



Title	土砂災害を起因とした化学物質流出事故のリスク管理に向けたリスク評価手法の構築と対策効果の推定
Author(s)	森口, 暢人
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/95931
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

土砂災害を起因とした化学物質流出事故のリスク管理
に向けたリスク評価手法の構築と対策効果の推定

森 口 暢 人

2023 年 10 月

大阪大学大学院工学研究科
環境エネルギー工学専攻

論文目次

第 1 章	序論	1
1.1	Natural hazard-triggered technological accident (Natech)の定義とその特徴	1
1.2	降雨による土砂災害の発生状況と予測手法	1
1.3	過去に発生した Natech 事例の整理と得られた教訓	2
1.4	法的枠組みからみた海外における Natech のリスク管理の現状	6
1.5	法的枠組みからみた日本における Natech のリスク管理の現状と課題	6
1.6	Natech のリスク評価手法の整理と研究課題	10
1.6.1	特定の国を対象とした全国・地域規模におけるリスクの特定	10
1.6.2	具体的な事業所を対象とした定量的リスク分析・評価	12
1.6.3	リスク管理に向けた対策の評価	14
1.7	本研究の目的	16
1.8	本研究の枠組み	17
1.9	本論文の構成	18
	参考文献	20
第 2 章	土砂災害に被災する可能性のある事業所の特定と Natech リスクの抽出	29
2.1	緒言	29
2.2	研究の枠組み	30
2.3	土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所の特定	31
2.4	リスクの抽出に用いるデータの整備	31
2.4.1	ハザードに関するデータの整備	31
2.4.1.1	年間取扱量の整備	32
2.4.1.2	化学物質の性質に関するデータの整備	34
2.4.2	周辺地域の脆弱性に関するデータの整備	37
2.5	クラスター分析手法	39
2.6	SOM-Ward 法と K-means 法の比較	41
2.7	結果と考察	42
2.7.1	土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所の特定結果	42
2.7.2	ハザードに関するデータ整備の結果と事業所の分類結果	42
2.7.3	周辺地域の脆弱性に関するデータ整備の結果と分類結果	49
2.7.4	SOM-Ward 法と K-means 法の比較結果	53
2.7.5	SOM-Ward 法によって得られたハザードと脆弱性による分類結果の統合	54
2.7.6	Natech リスクの抽出結果のマップ化	56
2.8	結言	63
	参考文献	64
第 3 章	最悪のシナリオを想定した決定論的リスク評価手法の構築とケーススタディ	67
3.1	緒言	67

3.2	研究の枠組み	68
3.3	対象事業所の選定と事故シナリオの設定.....	68
3.4	化学物質の流出に伴うヒト健康影響の分析.....	71
3.4.1	流出ケースの設定	71
3.4.2	解析モデルと解析条件	72
3.4.3	急性毒性影響指標	73
3.4.4	被災者数の算出	73
3.5	感度解析	74
3.6	結果と考察	74
3.6.1	化学物質の大気中濃度の算出結果.....	74
3.6.2	被災者数の算出結果	77
3.6.3	感度解析の結果	78
3.7	結言	80
	参考文献.....	81
第4章	複数のシナリオを想定した確率論的リスク評価手法の構築とケーススタディ	85
4.1	緒言	85
4.2	研究の枠組み	87
4.3	事故シナリオの設定	87
4.4	Bayesian network モデルの構築によるヒト健康リスクの評価.....	88
4.4.1	Bayesian network の構造.....	88
4.4.2	Natech の発生確率	91
4.4.3	流出量の算出	94
4.4.4	揮発量と大気中濃度の算出	96
4.4.5	曝露人口の算出	98
4.5	社会的リスクの評価	99
4.6	診断的分析	100
4.7	感度解析	101
4.8	結果と考察	101
4.8.1	社会的リスクの算出結果	101
4.8.2	診断的分析の結果	103
4.8.3	感度解析の結果	106
4.9	結言	108
	参考文献.....	109
第5章	Natech のリスク管理に向けた対策のリスク削減効果の評価	113
5.1	緒言	113
5.2	研究の枠組み	115
5.3	規制・ガイドライン・対策事例集に基づく対策を考慮した事故シナリオの設定.....	115
5.4	対策を組み込んだ Bayesian network モデルの構築.....	118

5.4.1	Bayesian network の構造.....	118
5.4.2	Natech の発生確率.....	119
5.4.3	流出量の設定	119
5.4.4	揮発量と大気中濃度の算出	119
5.5	診断的分析と感度解析	120
5.6	結果と考察.....	121
5.6.1	各対策のリスク削減効果の比較	121
5.6.2	診断的分析の結果	123
5.6.3	感度解析の結果	124
5.7	結言	125
	参考文献.....	126
第 6 章	Natech のリスク管理に向けた土砂災害対策の費用便益分析	129
6.1	緒言	129
6.2	研究の枠組みと費用便益分析の全体像.....	130
6.3	対策の施工費用と維持管理費用の算出.....	131
6.4	対策による便益の算出	134
6.5	感度解析	137
6.6	結果と考察.....	138
6.6.1	費用便益分析結果	138
6.6.2	感度解析の結果	139
6.6.3	評価手法の不確実性	140
6.7	結言	142
	参考文献.....	143
第 7 章	結論.....	147
7.1	本研究の総括	147
7.1.1	リスクの特定	147
7.1.2	リスクの分析及び評価	148
7.1.3	リスクの管理	149
7.2	今後のリスク管理への提言と本研究の課題.....	149
7.2.1	リスクの特定	150
7.2.2	リスクの分析及び評価	151
7.2.3	リスクの管理	153
	参考文献.....	155
	謝辞.....	156
	本研究の基礎となる発表論文.....	158
Appendix		A-1
	補足資料 A-1 第 2 章の補足資料.....	A-1

補足資料 A-2 第 3 章の補足資料	A-7
補足資料 A-3 第 4 章及び第 5 章の補足資料	A-8

図表目次

図 1-1	日本における Natech のリスク管理に関連する法律・制度	9
図 1-2	本研究全体の枠組み	18
図 1-3	本論文の構成	19
図 2-1	Natech リスク抽出の枠組み	30
図 2-2	排出係数と年間取扱量の整備	33
図 2-3	対数変換後の合計年間取扱量のヒストグラム	43
図 2-4	ハザードによる事業所の分類結果と各変数の分布	46
図 2-5	ハザードの分類により得られた各クラスターの業種の内訳	47
図 2-6	脆弱性による事業所の分類結果と各変数の分布	51
図 2-7	脆弱性の分類により得られた各クラスターの業種の内訳	52
図 2-8	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（北海道）	58
図 2-9	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（東北地方）	58
図 2-10	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（関東・中部・近畿地方）	59
図 2-11	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（中国・四国・九州地方）	59
図 2-12	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（東京都・島嶼部）	60
図 2-13	土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（沖縄・奄美諸島）	60
図 3-1	決定論的リスク評価の枠組み	68
図 3-2	対象事業所の選定過程	69
図 3-3	対象事業所と周辺環境	69
図 3-4	本研究で想定した事故シナリオ	70
図 3-5	対象事業所と防油堤の設定	72
図 3-6	タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の濃度分布	75
図 3-7	タンク転倒ケースにおける防油堤が機能する場合の濃度分布	75
図 3-8	タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化	75
図 3-9	タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 250 m 地点における濃度変化	75
図 3-10	タンク転倒ケースにおける防油堤が機能する場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化	76
図 3-11	タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の濃度分布	76
図 3-12	タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能する場合の濃度分布	76
図 3-13	タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化	77
図 3-14	タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 250 m 地点における濃度変化	77
図 3-15	タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能する場合の流出地点から 50 m 地点にお	

ける濃度変化	77
図 3-16 曝露人数の感度解析結果	79
図 4-1 確率論的リスク評価の枠組み	87
図 4-2 本研究で想定する事故シナリオ	87
図 4-3 構築した BN モデルの全体像	89
図 4-4 土砂災害によるタンクの破損に関する模式図	94
図 4-5 本研究で想定する流出のイメージ図	95
図 4-6 曝露人数の設定	99
図 4-7 事業所の周辺人口の算出例	99
図 4-8 タンクの斜面からの距離ごとの社会的リスクの評価結果	102
図 4-9 診断的分析の結果を踏まえた社会的リスクの評価結果	106
図 4-10 感度解析の結果	106
図 5-1 対策を考慮した確率論的リスク評価の枠組み	115
図 5-2 本研究で想定する事故のシナリオ	115
図 5-3 対策を加えた BN モデルの全体像	118
図 5-4 各対策のリスク削減効果	121
図 5-5 各対策を最大限に実施した場合の社会的リスク	122
図 5-6 対策ノードを加えた感度解析の結果	124
図 6-1 費用便益分析の枠組み	130
図 6-2 設定した事故シナリオ	130
図 6-3 急傾斜地崩壊に関する対策施設のイメージ図 (広島県, 2016)	131
図 6-4 本研究で想定する現場打ちコンクリート枠工	132
図 6-5 対策の施工工程	132
図 6-6 請負工事費の算出項目 (国土交通省大臣官房技術調査課 (2020)より修正)	134
図 6-7 費用便益分析の感度解析結果	140
図 7-1 ALARP の原則に基づく安全目標の概念 (日本学術会議, 2017)	152

表 1-1	日本における土砂災害を起因とした Natech 事例のまとめ	5
表 1-2	Natech の定量的リスク評価に関する先行研究	14
表 2-1	GHS 分類区分のスコア付け	36
表 2-2	各 GHS 分類区分の定義 (GHS 関係省庁連絡会議, 2021)	37
表 2-3	周辺地域の脆弱性に関するデータ	38
表 2-4	SOM の解析条件	40
表 2-5	各区域区分及び現象区分に該当する PRTR 対象事業所数	42
表 2-6	ハザードに関するデータの整備の一例 (加算ケース)	43
表 2-7	ハザードの分類における各クラスターの PRTR 対象事業所数と取扱量及び化学物質の性質に関するスコアの平均値	48
表 2-8	周辺地域の脆弱性に関するデータ整備の一例	49
表 2-9	脆弱性の分類における各クラスターの PRTR 対象事業所数と各変数の平均値	52
表 2-10	ハザードの分類における SOM-Ward 法と K-means 法の比較	53
表 2-11	脆弱性の分類における SOM-Ward 法と K-means 法の比較	53
表 2-12	ハザードと脆弱性による分類の統合結果	54
表 2-13	都道府県ごとに整理した各リスクが懸念される事業所数	61
表 3-1	対象事業所が扱う物質 (環境省, 2022)	70
表 3-2	流出ケースの設定	71
表 3-3	ALOHA に入力する解析条件	73
表 3-4	感度解析の設定	74
表 3-5	屋外滞在割合の算出結果	78
表 3-6	被災者数の算出結果	78
表 4-1	親ノードの変数の設定	89
表 4-2	子ノードの変数の設定	90
表 4-3	土石等の移動と堆積による力を算出するためのパラメータ	93
表 4-4	タンクの座屈臨界圧力とタンク内部の抵抗圧力を算出するためのパラメータ	94
表 4-5	土石等の移動高さとタンクの破損位置の条件付確率表	95
表 4-6	プールの拡大における想定	97
表 4-7	各国・地域の F-N 基準線 (Jonkman et al., 2003)	100
表 4-8	各ケースにおける死者数の超過確率	103
表 4-9	1 人以上の死者が発生する条件における親ノードの RoV	104
表 5-1	予防策と緩和策の例	117
表 5-2	本研究で取り上げた対策と該当する項	118
表 5-3	対策ノードの設定	119
表 5-4	オイルフェンスの設置を考慮したプールの拡大における想定	120
表 5-5	1 人以上の死者が発生する条件における親ノードの RoV 上位 20 変数	123
表 6-1	労務費と材料費の根拠資料	132
表 6-2	各工程の想定及び根拠資料	133
表 6-3	事故による損失の算出項目	135

表 6-4	対策施工費用の算出結果	138
表 6-5	1 施設当たりの維持管理費用 (大阪府, 2011).....	138
表 6-6	事故による損失の算出と費用便益分析の結果	139

略語一覽

- AEGL: Acute Exposure Guideline Level
- ALARP: As low as reasonably practicable
- ALOHA: Areal Locations of Hazardous Atmosphere
- BN: Bayesian network
- CalARP: California Accidental Release Prevention
- CAMEO: Computer-Aided Management of Emergency Operations
- CPT: Conditional probability table
- CRED: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
- DAG: Directed acyclic graph
- EPA: Environmental Protection Agency
- ERPG: Emergency Response Planning Guidelines
- EU: European Union
- GHS: Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals
- GIS: Geographic Information System
- HC: Hazard Cluster
- HILP: High Impact Low Probability
- IDLH: Immediately Dangerous To Life or Health
- KHC: K-means Hazard Cluster
- KVC: K-means Vulnerability Cluster
- LSE: Limit state equation
- MAPP: Major-accident prevention policy
- Natech: Natural hazard-triggered technological accident
- NIST: National Institute of Standards and Technology
- NITE: National Institute of Technology and Evaluation
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
- NRA: National risk assessment
- PGA: Peak ground acceleration
- PRTR: Pollutant Release and Transfer Register
- PSA: Probabilistic safety assessment
- RMP: Risk Management Plan
- RoV: Ratio of Variance
- SOM: Self-Organizing Map
- TEQ: Toxic Equivalent Quantity
- TLV-STEL: Threshold Limit Value Short-Term Exposure Limit
- VC: Vulnerability Cluster
- VR: Variance reduction

第1章 序論

1.1 Natural hazard-triggered technological accident (Natech)の定義とその特徴

自然災害を起因とした産業事故は Natural hazard-triggered technological accident (Natech)と呼ばれ、1992年に Showalter と Myers によって初めて提唱された (Showalter and Myers, 1992)。“Natech”という用語はこれまでに複数の論文で用いられてきたが、その定義は各論文によって異なることが指摘されている (Nascimento and Alencar, 2016)。実際、Natech の定義としては、「技術的な緊急事態を引き起こす自然災害 (natural disasters that create technological emergencies)」(Showalter and Myers, 1994)や「自然災害を起因とした化学事故 (chemical accidents triggered by natural events)」(E. Krausmann et al., 2011)、自然災害を起因とする危険物の流出 (hazardous material releases caused by natural disasters)」(Cruz and Okada, 2008; Girgin and Krausmann, 2013; Santella et al., 2011)など、複数の定義が存在している。Kumasaki and King (2020)は、これらの定義の中核には自然災害によって引き起こされる複雑な二次災害を扱っているという点で共通点があると指摘している。

これまでに Natech として報告されている事例は、1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震によるアクリロニトリルの流出事故 (Girgin, 2011) や東日本大震災による石油コンビナートの火災・爆発 (Krausmann and Cruz, 2013)、ハリケーン・カトリーナによる海上プラットフォームからの油の流出等が挙げられ (Krausmann and Cruz, 2017)、多くの場合、自然災害に伴う「化学物質の流出事故」が取り上げられている。そこで、本研究では、Cruz and Okada (2008)や Girgin and Krausmann (2013)と同様に、Natech を「自然災害によって産業施設が被災し、それに伴って化学物質が流出する事故」として定義する。

Natech が通常の産業事故と異なる点として、岸本 (2014)は化学物質の流出に伴う複合的・連鎖的な影響を持つ点や自然災害を起因とすることから、リスク評価や管理を検討するには学際的なアプローチが必要となる点を挙げている。このような特徴から、Natech に対応する行政組織や法規制、研究機関、研究者が自然災害系と産業事故系に分断されていることを課題として指摘している (岸本, 2014)。よって、Natech のリスク管理を進めるためには、分野横断的な視点から、自然災害や化学物質のリスク、安全工学に関する既存の知見を組み合わせ、拡張することが必要であると考えられる。

1.2 降雨による土砂災害の発生状況と予測手法

地震や津波、洪水、落雷、豪雨などの自然災害の中で、土砂災害は降雨や地震、融雪などの誘因と地形、地質、植生などの素因が組み合わさることによって発生する土砂や土石等の移動現象を指す。世界各国で 2004 年から 2016 年までの間に、死者や負傷者を伴う大規模な土砂災害 (Fatal landslide)は 4,862 件発生しており、そのうち中国やインド、日本などのアジア地域で発生した土砂災害の割合は約 75%に達する (Froude and Petley, 2018)。また、災害疫学研究センター (The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters: CRED)のデータベース (Emergency Events Database)によると、1900 年から 2022 年までに発生した大規模な土砂災害の中で、日本の発生件数は 8 番目に位置しており (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023)、世界的に見ても日本は土砂災害が頻繁に発生する国といえる。

日本では 2002 年から 2021 年までの 20 年間で、毎年平均 1,300 件の土砂災害が発生しており、2021 年までの直近 10 年の人的被害と家屋被害はそれぞれ合計 714 人、4,974 戸発生している (国土交通省, 2022a)。特に近年では、土砂災害の発生件数は降雨とともに増加傾向にあることが指摘されており (国土交通省, 2020a)、1982 年から 1991 年までの 10 年間の平均発生件数と比べて、2012 年から 2021 年の平均発生件数は約 1.6 倍に増加している (国土交通省, 2022a)。また、2020 年に環境省が公開した気候変動

影響評価報告書によると (環境省, 2020), 気候変動に伴い降雨強度や総降雨量の大きい雨が降ることによって, 集中的な斜面の崩壊・がけ崩れ・土石流等の頻発が想定されると指摘している。さらに, 気候変動の影響評価のランク付けとして, 土砂災害等の山地災害は重大性, 緊急性, 確信度の全てが「高い」に位置づけられており, 土砂災害に伴う被害が発生する前に適切な対策を早急に推進する必要がある (環境省, 2020)。

土砂災害の発生予測について, 日本では土砂災害の発生場と土砂災害の発生時間帯の予測手法が確立されている。前者の発生場については, 土砂災害防止法に基づき, 各都道府県が地形, 地質, 土地利用の状況を踏まえた土砂災害警戒区域等を作成しており (国土交通省, 2021a), 2023 年 3 月末時点で 683,054 箇所が土砂災害警戒区域等として指定されている (国土交通省, 2023a)。土砂災害警戒区域等には, 建築物に被害が生じる恐れのある土砂災害特別警戒区域も含まれている (国土交通省, 2021a)。後者の発生時間帯については, 市町村長の避難指示の発令判断や住民の避難の判断を支援する法定情報として, 都道府県と気象庁が共同で土砂災害警戒情報を発表している (気象庁, 2022)。土砂災害警戒情報は, 短期降雨の指標となる 1 時間雨量と長期降雨の指標となる土壌雨量指数を用いて発表される (気象庁, 2022)。このように日本では, 素因に基づく土砂災害警戒区域と誘因となる降雨に基づく土砂災害警戒情報を組み合わせ, 土砂災害に対する警戒避難体制が社会実装されている。

土砂災害発生確率の予測モデルに関する研究として, 川越ら (2008)は 2004 年 7 月 12 日から 13 日に発生した新潟・福島豪雨による降水量を基に, 動水勾配と起伏量をパラメータとしたロジスティック回帰分析によって, 土砂災害発生確率モデルを構築し, 全国を対象とした土砂災害発生確率を算出している。この研究の課題として, ある特定の地域の災害履歴データを基に各パラメータの係数を求めていることが挙げられる。一方, 土砂災害の発生数は膨大であり, また対応に当たる人員体制の制約から, 発生予測に必要な土砂災害に関する一次情報の蓄積は不十分とされている (中谷・瀧口, 2022)。このような状況下で, 松田・中谷 (2020)は降雨等の誘因と比較して, 素因情報の活用が遅れていることを課題として, 過去 24 年間に発生した全国の降雨を起因とする土砂災害 16,218 件を素因情報によって整理し, 1 km メッシュを単位とした日本全国の土砂災害発生確率マップを作成している。このような全国規模での土砂災害発生確率マップは, 住民の避難対策の構築だけではなく, 土砂災害に被災する可能性のある事業所の特定や発生確率の推定, リスク分析に活用できると考えられる。

1.3 過去に発生した Natech 事例の整理と得られた教訓

Natech を引き起こす自然災害として, Ricci ら (2021)は CRED が示した自然災害の分類を適用し, 過去に発生した Natech の事例を分析している。具体的には, 地球物理的な災害 (例: 地震や土砂災害, 津波, 火山活動), 気象災害 (例: 風, 雨, 極端な気温, 台風等の熱帯性暴風雨, 落雷, 霧), 水文学的な災害 (例: 洪水, 波), 気候学的な災害 (山火事) の 4 種類に分類して, 1950 年から 2018 年までの約 70 年間に世界各国で報告された 9,100 件の Natech 事例を分析している。Ricci ら (2021)の分析結果から, 気象災害は全自然災害の約 36%しか発生していないにも関わらず, Natech 事例の約 86%を引き起こしていることが分かっている。水文学的な災害と地球物理学的な災害はそれぞれ Natech 事例の約 10%, 約 4%を引き起こしており, 気候学的な災害を起因とした Natech はほとんど発生していない。一方, 各災害を起因とした Natech の中で, 1 人以上の死者が生じた事例の割合が最も大きい自然災害は地震や土砂災害, 津波等の地球物理的な災害であり, 336 事例中 25 事例で死傷者が発生している。また, 地球物理的な災害を起因とした 336 事例中, 1000 万ユーロ (約 15 億円) 以上の経済的損失が発生した事例は 7 件発生しており, 他の自然災害よりも割合が大きくなっている。これらの結果から, 地震や土砂災害,

津波などを起因とする Natech が発生した場合、死傷者や大きな経済的損失が発生する可能性が他の自然災害よりも高いと考えられる。

地震を起因とした Natech 事例は、1950 年から 2018 年までの約 70 年間に世界各国で発生した Natech 事例 9,100 件中 166 件発生しており、約 1.8%を占めている (Ricci et al., 2021)。具体的な事故事例としてはトルコ・コジャエリ地震や中国・四川地震、東日本大震災による事例が挙げられる。トルコ・コジャエリ地震の事例では、貯蔵タンクが破損し、それに伴う火災によって、6 基のナフサタンクと 30,500 t の製品が全焼した (Girgin, 2011)。また、油による海洋の汚染も発生し、流出した油の清掃費用を含む復旧費用は 5,780 万ドル (約 80 億円) にも達したとされる (Girgin, 2011)。さらに、Aksa Acrylic Chemical Industry 社の貯蔵タンクのうち 3 つのタンクが破損し、流出した 6,500 t のアクリロニトリルが大气へ拡散することによって、周辺住民の健康被害やタンク周辺の半径 200 m 以内の動植物の死滅も報告されている (Girgin, 2011)。中国・四川地震の事例では、2 つの肥料工場が被災し、アンモニアや硫酸などの流出によって河川が汚染され、6 千人の住民が避難を余儀なくされた (Krausmann et al., 2010)。また、アンモニアの蒸気が谷を下り、住民の健康被害やその地域の植物に影響を与えた事例も報告されている (Krausmann et al., 2010)。東日本大震災による事例については、Krausmann and Cruz (2013) が石油コンビナートや大規模な化学プラント等、計 46 施設を対象とした分析結果を報告している。その報告によると、地震によって 28 件の施設の損傷と 3 件の火災が発生し、津波と地震の相互作用により、16 件の施設の被害と 1 件の火災が発生した (Krausmann and Cruz, 2013)。仙台製油所では、津波によるパイプラインの破損により、合計 8,300 m³ の重油が流出し、茨城県ではヒ素を含む鉍さい 40,000 m³ が流出した。また、千葉県のココンビナート施設では、地震によって LPG タンク 17 基が爆発・全焼し、それに伴い 1,142 人の住民が避難を余儀なくされた (Krausmann and Cruz, 2013)。このように Natech の発生に伴い、周辺住民の健康被害や自然環境の汚染が発生する可能性があり、化学物質の流出に伴う周辺地域への影響を踏まえたリスク管理が必要であると考えられる。

土砂災害を起因とした Natech 事例は、1950 年から 2018 年までの約 70 年間に世界各国で発生した Natech 事例 9,100 件中 164 件発生しており、約 1.8%を占めている (Ricci et al., 2021)。具体的な事故事例としては、2020 年にエクアドルで発生した土砂災害によるパイプラインの破損による油の流出事故 (MONGABAY, 2020) が挙げられ、European Union (EU) を中心に土砂災害によるパイプラインの破損による流出事例が複数報告されている (Girgin and Krausmann, 2015)。また、Gao ら (2022b) が分析対象とした中国における Natech 事例 288 件のうち、土砂災害を起因とした Natech は約 23%を占めている。日本における土砂災害を起因とした Natech 事例としては、表 1-1 に示す事例が挙げられる。なお、表 1-1 の事故事例は筆者が高圧ガス保安法の事故事例データベースや消防庁の資料、先行研究を基に、時系列ごとにまとめたものである。高圧ガス保安協会がまとめた事故事例のほとんどは、土砂災害によって液化天然ガスの容器が破裂または流失する事象であり、1972 年に発生した事例 (事例 1) では、流出したガスに引火し、重傷者が 1 名と軽症者が 6 名発生した (高圧ガス保安協会, 2023)。2018 年に広島県で発生した事例 (事例 15) では、火薬の保管庫が土砂災害によって破壊されたが、火薬等には引火しなかった (Kumasaki and King, 2020)。2020 年に鹿児島県と大分県で発生した事例 (事例 19, 20) では、土砂災害によって、それぞれ配管とタンク底板の溶接部が破損し、重油が流出、河川に到達した (消防庁, 2021, 2020a)。特に事例 19 では屋外貯蔵タンクの周囲に防油堤が設置されていたが、土砂や水によって機能せず、防油堤を超えて敷地外に重油が流出しており (消防庁, 2020a)、Natech のリスク管理の難しさを示す事例といえる。このような土砂災害を起因とした Natech は、近年土砂災害の発生件数が増加傾向にあることを踏まえると (1.2 節)、今後も発生する可能性が非常に高いと考えられる。2023 年においても、土

砂災害による Natech 事例は報告されており (European Comission Joint Research Center, 2023), 土砂災害を対象とした Natech のリスク管理は喫緊の課題であるといえる。

このような Natech が発生してきた原因として, Krausmann and Necci (2021)は想定される Natech のシナリオの複雑性や Natech のリスク評価手法の普及不足, ある発生確率以下のシナリオの排除, リスク管理の失敗によるコストの過小評価, 安全性よりも業績を追及する姿勢などを挙げている。これらの原因と Natech のリスクの不確実性を踏まえ, Krausmann and Necci (2021)は最悪のシナリオを想定するとともに, 事業所の移転を含む予防的アプローチを取ることが必要であると述べている。これは, 東日本大震災と津波による Natech 事例から得られる明確な教訓でもある (Krausmann and Cruz, 2013)。しかし, 土地利用の観点から, すでに立地している施設を移転させるには, 莫大な費用がかかり, 現実的に実行することは困難である (Cruz et al., 2017)。したがって, Natech の発生を防ぎ, リスクを削減するためには, 想定されるシナリオを特定し, 事前にリスク評価を実施したうえで, 予防策と緩和策を導入することが現実的な施策である (Cruz et al., 2017; Krausmann et al., 2011; Kumasaki and King, 2020; Ochiai et al., 2022)。過去に発生した Natech から得られる教訓としても, 自然災害を考慮した設計やリスクの緩和策を導入していた場合, 自然災害が発生しても被害を軽減できる可能性があることが示唆されている (Krausmann and Salzano, 2017; Kumasaki and King, 2020)。一方, 表 1-1 の事例 19 のように, Natech のシナリオ下では自然災害によって被害を受けることによって, 対策が機能しないシナリオも考えられ, これまでのリスク評価で取り上げた事故シナリオを拡張することが求められている (Misuri and Cozzani, 2021)。よって, リスク評価を実施する際には, 対策が機能しないという最悪のシナリオを考慮したリスク評価を実施するとともに, 複数の対策を組み合わせる実施することや様々なリスクの領域に適用できる汎用性のある対策を構築し, それらを実装することが重要であると考えられる。

表 1-1 日本における土砂災害を起因とした Natech 事例のまとめ

事例	発生日時	発生場所	業種	物質名	事象	出典
1	1972/7/10	広島県	充填所	液化石油ガス	配管の破損, LP ガスの爆発	①
2	1980/8/5	高知県	-	液化石油ガス	ボンベの破裂, ガスの漏洩	①
3	2004/10/11	神奈川県	窯業	酸素	配管の破損, 液体酸素の漏洩	①
4	2005/7/10	大分県	その他	液化石油ガス	ガス容器 4 本の流失	①
5	2005/9/6	岡山県	充填所	液化石油ガス	バルブが開くことによるガスの漏洩	①
6	2005/9/6	宮崎県	畜産	液化石油ガス	ガス容器 18 本の流失	①
7	2006/7/20	広島県	レジャー	フルオロカーボン 22	冷凍設備からの冷媒ガスの漏洩	①
8	2008/8/15	山形県	木材加工	アセチレン	ガス容器 1 本の流失	①
9	2009/7/27	佐賀県	畜産	液化石油ガス	ガス容器 4 本の流失	①
10	2010/6/30	宮崎県	畜産	液化石油ガス	配管の破損, LP ガスの漏洩	①
11	2011/5/30	福井県	販売店	液化石油ガス	容器の破損, LP ガスの漏洩	①
12	2012/3/6	京都府	販売店	液化石油ガス	容器の破損, LP ガスの漏洩	①
13	2018/7/6	広島県	工場	酸素, アルゴン, 炭酸ガス	ガス容器 2 本の流失	①
14	2018/7/6	広島県	武器製造業	火薬等	火薬保管庫の被災	②
15	2018/7/7	広島県	消費先の容器保管庫	液化石油ガス	ガス容器 2 本の流失	①
16	2018/9/30	鳥取県	食品	液化石油ガス	容器の破損, LP ガスの漏洩	①
17	2019/7/4	鹿児島県	養鶏場	その他 (プロパン)	容器 30 本の流失	①
18	2020/7/4	熊本県	高圧ガスの製造及び供給	プロパン	配管の破損, ガスの漏洩	①
19	2020/7/6	鹿児島県	養鰻場	重油	タンク底板の亀裂, 重油の流出	③
20	2020/7/7	大分県	燃料小売業	重油	送油配管の破損, 重油の流出	④

①：高圧ガス保安協会 (2023), ②：Kumasaki and King (2020), ③：消防庁 (2020a), ④：消防庁 (2021)

1.4 法的枠組みからみた海外における Natech のリスク管理の現状

世界各国で Natech のリスク管理に向けた法的枠組みが構築されつつあるが、その進捗はそれぞれの国によって異なる (Krausmann et al., 2017; Park and Cruz, 2022)。EU では、Seveso directive によって、ある特定の物質を一定量以上扱う事業者は、重大な事故を防止するための Major-accident prevention policy (MAPP) を作成するとともに、人の健康や環境への潜在的な影響に関する情報を含めた Safety report を一般に公開することが求められている (EUR-Lex, 2012)。この Seveso directive には、過去の Natech 事例を踏まえ、2012 年に洪水や地震等の自然災害を考慮した事故を含めることが明記された (EUR-Lex, 2012; Krausmann et al., 2017)。アメリカ合衆国では、ある特定の化学物質を一定量以上扱う事業所を対象に、Risk Management Plan (RMP) を策定することを義務付けている。この RMP には化学事故がもたらす潜在的な影響を特定し、事故を防止するための手段と事故が発生した場合の緊急対応計画を明記することが求められる (US EPA, 2022)。一方、この RMP には自然災害による事故については明示的には取り上げられていない (Krausmann et al., 2017; US EPA, 2022)。アメリカ国内において、地震が頻発するカリフォルニア州では、California Accidental Release Prevention (CalARP) program が存在し、地震による潜在的な化学物質の流出のリスク評価が求められている (CalEPA, 2023; Krausmann et al., 2017)。

1.5 法的枠組みからみた日本における Natech のリスク管理の現状と課題

日本では、Natech のリスク管理に向けた法律や制度が複数存在する。各法律や制度は、危険物を扱う事業所や自然災害が発生する可能性のある場を指定し、それらに対して設備の構造や土地利用、化学物質のリスク管理上の規制を設けることによって、直接的または間接的に Natech のリスク管理を実行している。

化学物質のリスク管理の観点からは、化学物質管理把握促進法に基づく Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) 制度によって、従業員数が 21 人以上であり、第一種指定化学物質を年間 1 t 以上 (特定第一種指定化学物質は 0.5 t 以上) 扱う事業者は化学物質の排出量と移動量を報告することが義務付けられている (経済産業省, 2023)。PRTR 制度自体は Natech のリスク管理を目的としたものではないが、2022 年 11 月には化学物質把握促進法第 3 条第 1 項の規定に基づく化学物質管理指針が改正され、各事業者は災害発生時における指定化学物質等の漏洩を未然に防止するための具体的な方策を平時から検討することが明記された (経済産業省, 2022a)。

化学物質に関連した産業事故の防止という観点からは、消防法や高圧ガス保安法、石油コンビナート等災害防止法などの法律が存在する。消防法は 1948 年に施行された法律であり、火災の予防を目的として、可燃性固体や引火性液体などの危険物を分類ごとに定められた指定数量以上扱う事業所を対象に、危険物の規制に関する政令において別途定められた管理方法や貯蔵タンク等の構造の基準等を義務付けている (総務省, 2022a)。この指定数量については、危険物の規制に関する政令の別表第三に明記されており、例えば第四類の第一石油類における非水溶性液体の場合は 200 L が指定数量として定められている (総務省, 2019)。危険物の規制に関する政令では、屋外貯蔵タンクの構造について、地震及び風圧に耐えることができる構造にすることなどが明記されている (総務省, 2019)。高圧ガス保安法は高圧ガスによる災害を防止することを目的として 1951 年に施行された法律であり、第 26 条第 1 項の規定により、ガス製造能力が 1 日当たり 100 m³ 以上の第一種製造者が危害予防規定を制定することが義務付けられている (経済産業省, 2022b)。この危害予防規定には、2018 年 11 月に大規模地震及び津波に係る防災及び減災対策を明記することが追加され、該当する事業者は地震や津波を対象としたリスク評価と対策が求められる (経済産業省, 2018)。石油コンビナート等災害防止法は、高度経済成長期

における石油コンビナートが取り扱う危険物の増加とそれに伴う事故を踏まえ、1975年に施行された。この法律は、指定数量以上の石油又は高压ガスが集積する特別防災区域を対象に、各都道府県が石油コンビナート等防災計画を作成することを義務付けている（総務省, 2022b）。指定数量については、石油コンビナート等災害防止法施行令によって別途定められており、特別防災区域は当該区域の石油の総貯蔵・取扱量の10万 kL に対する比と高压ガスの総処理量の2000万 m³に対する比の合計が1以上の場合に指定され、特定事業所は石油の貯蔵・取扱量の1万 kL に対する比と高压ガスの処理量の200万 m³に対する比の合計が1以上の場合に指定される（総務省, 2023）。石油コンビナート等防災計画には地震や津波などの自然災害を考慮することが明記されており（総務省, 2022b）、現在79地区、650事業所が規制を受けている（消防庁, 2023）。これらの既存の法律に加え、近年消防庁は危険物施設の風水害対策ガイドラインや500 kL 未満の小規模屋外貯蔵タンクの津波・水害対策工法に係るガイドラインを示すなど（消防庁, 2022, 2020b）、平時からの風水害や津波に対する備えや災害の危険性が高まってきた場合の応急対策等について、具体的な対策の実施を推進している。

化学物質の流出時の対応については、消防法、高压ガス保安法、石油コンビナート等災害防止法に加え、大気汚染防止法や水質汚濁防止法、ダイオキシン類対策特別措置法、毒物および劇物取締法において規定されている（環境省, 2022）。これらの法律が対象としている物質はそれぞれ異なるが、いずれの法律においても、直ちに応急措置を講じ、速やかに状況を都道府県または市町村に届け出ることを義務付けている。

自然災害に対する防災という観点からは、国土強靱化基本法に基づく、大規模災害からの被害の最小化に向けた国土強靱化基本計画が2018年に示された（内閣官房, 2018）。この計画では、災害発生時における有害物質の大規模拡散・流出等を防止するための資機材整備・訓練・研修を行うことが明記されており、具体的な施策として地震等により有害物質の流出が懸念される鉱山集積場における地震対策が進められている（内閣官房, 2018）。

自然災害の被害が生じる恐れのある区域に対する土地利用規制の観点から、災害危険区域、土砂災害特別警戒区域、津波災害特別警戒区域、浸水被害防止区域が指定されている（大塚, 2022）。災害危険区域は、1950年に施行された「建築基準法」第39条に基づき、急傾斜地、津波、高潮、出水等による危険の著しい区域として、地方公共団体により指定される（国土交通省, 2023b）。災害危険区域に指定された場合、住宅の用に供する建築物の建築が禁止され、災害防止上必要な場合はその他建築物の建築についても制限される（国土交通省, 2023b）。また、土砂災害特別警戒区域は「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（土砂災害防止法）」第9条に基づき各都道府県によって指定される区域であり（国土交通省, 2022b）、施行令第3条の基準に基づき、土石等の移動・堆積による力が建築物の耐力を超える場合に指定される。土砂災害防止法は、1999年6月に発生した広島土砂災害を踏まえ、警戒避難体制の構築や立地抑制策といったソフト対策を目的として、2001年に施行された（大塚, 2022）。土砂災害特別警戒区域内では、居室を有する建築物の建築や防災上の配慮を要する者が利用する施設の開発が制限される（国土交通省, 2022b）。津波災害特別警戒区域や浸水被害防止区域は、それぞれ「津波防災地域づくりに関する法律」第72条と「都市特定河川浸水被害対策法」第56条に基づき各都道府県によって指定され、自己居住用住宅の建築や防災上の配慮を要する者が利用する施設の開発が制限される（国土交通省, 2022c, 2022d）。一方、このような区域指定には、財産権との調整の難しさや住民の負担の発生、過疎化に拍車がかかる等の懸念から、地方公共団体が指定を躊躇する傾向にあることが指摘されている（大塚, 2022）。さらに、2020年には都市再生特別措置法等の一部を改正する法律により都市計画法の一部が改正され、2022年4月に施行された（国土交通省,

2020b)。これにより、自社ビル、オフィス、病院、旅館、ホテル、工場、倉庫などの自己の業務の用に供する施設について、一定規模以上の開発を行う場合は、土砂災害特別警戒区域や災害危険区域（レッドゾーン）を原則として含まないことが明記された（国土交通省, 2020b)。これによって、2022 年 4 月以降に、化学物質等の危険物を扱う一定規模以上の工場を開発する場合には、災害の危険性が特に高い上記の区域を除くことが求められる。

工場等の開発における土地利用規制の観点からは、都市計画法によって、都市計画区域における都市機能の維持や住居の環境の保護、商業や工業等の利便性の増進を目的とした用途地域が定められている（国土交通省, 2023c)。用途地域は現在 13 種類定められており、工業に関する地域については、準工業地域、工業地域、工業専用地域が定められている。準工業地域や工業地域は住宅等を建てることのできるが、工業専用地域は 1970 年に住環境の保護を目的に細分化された地域であり（国土交通省, 2009a), 住宅や飲食店、学校、病院、ホテルなどを建てることはできない。これらの地域内における用途制限は、主に業種や用途、建築物の床面積によって定められている。

地方自治体レベルにおける Natech のリスク管理としては、東京都や大阪府が東日本大震災における有害化学物質の流出事例を踏まえ、化学物質適正管理指針を作成している（大阪府, 2023a; 東京都, 2023a)。東京都では、近年増加する大型台風等に伴う水害等に対応することを目的に、2020 年に化学物質適正管理指針を改正し、化学物質を扱う事業者は浸水や土砂流入、強風等の水害対策を実施することが明記された。また、東京都は水害対策マニュアルを公開し、止水板や土嚢の設置、緊急計画の整備など具体的な事業者の水害対策を支援している（東京都, 2023b)。大阪府の指針は、南海トラフ巨大地震等に伴う地震や津波の規模を把握し、化学物質の漏洩に伴う環境リスクと低減のための対策の実施を事業者に求めている（大阪府, 2023a)。また、PRTR 制度の対象事業所の中で従業員数が 50 人以上の事業所は、大規模災害に備えた環境リスクの低減対策の方針を含めた化学物質管理計画書の届出が義務付けられている（大阪府, 2013)。さらに、大阪府では事業者の自主的な対策を促すために、大阪府内の事業所で実際に行われている対策を対策事例集としてまとめ、公開している（大阪府, 2023b)。

ここまでまとめた Natech のリスク管理に関連する各法律・制度の対象範囲を、Girgin ら (2019) が示した「リスクの特定（自然災害に被災する可能性のある事業所やシナリオの特定）」と「リスクの分析・評価（Natech が発生した場合に想定されるリスクの評価）」に「リスクの管理（リスクが懸念される場合における対策の実施）」という視点を加え、図 1-1 に整理する。

対象分野	法律・制度	対象施設・事業所	リスクの特定	リスクの分析・評価	リスクの管理
化学物質の管理	Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) 制度	有害な化学物質を一定量以上扱う事業所	排出・移動量、事業所の把握		災害時の流出対策の検討
産業事故の防止	消防法	危険物を指定数量以上扱う事業所	危険物の取扱量の把握		地震及び風圧に対する構造規制
	高圧ガス保安法	第一種製造者	主に地震と津波が対象、化学物質の流出による影響の評価		
	石油コンビナート等災害防止法	石油コンビナート施設	主に地震と津波が対象、化学物質の流出による影響の評価		
大規模自然災害	国土強靱化基本法	鉱山集積場	主に地震等の大規模自然災害が対象		
土地利用規制	建築基準法・土砂災害防止法等	主に住宅	土砂・津波・出水等の区域指定		指定区域の建築・開発制限
	都市計画法	工場等を含む産業施設			レッドゾーンにおける開発制限
地方自治体の化学物質管理	化学物質管理適正指針（大阪府）	PRTR制度の対象事業所	主に地震と津波が対象、化学物質の流出による環境リスク評価		
	化学物質管理適正指針（東京都）	化学物質を取り扱う事業者	ハザードマップとの照らし合わせ		浸水・流出防止対策の実施

図 1-1 日本における Natech のリスク管理に関連する法律・制度

これらの日本における法律や制度に基づく Natech のリスク管理における課題として、次の 5 点が挙げられる。

- 1) 事前のリスク評価が求められている事業所は石油コンビナート等の大規模な事業所や鉱山集積場、一部の PRTR 事業所に限定され、それ以外の事業所では Natech のリスク評価が実施されていないこと
- 2) リスク管理の対象となる災害のほとんどが地震と津波に限定され、洪水や土砂災害等の自然災害を考慮したリスク評価が実施されていないこと
- 3) 自然災害に被災する可能性のある区域の指定や工場等の開発規制は進んでいるものの、既存の土地利用規制の中で Natech の発生に伴う影響は考慮されていないこと
- 4) アメリカや EU と比べて、日本では事業所の周辺住民や周辺環境に対するリスクがほとんど考慮されていないこと
- 5) Natech に対する具体的な対策は示されているが、各対策のリスク削減効果などの有効性は定量的に示されていないこと

1)と 2)の課題については、特に 2022 年 11 月の化学物質管理指針の改正によって、今後災害対策が求められる PRTR 制度の対象事業所に当てはまる。PRTR 制度の対象事業所は、リスク評価に基づく防災計画の策定や対策が実施されている石油コンビナート施設や鉱山集積場と比べて小規模な事業所も含まれており、現時点では詳細なリスク評価は実施されていない。また、PRTR 制度の対象事業所は全国各地に約 3 万件以上が点在しており、上記の区域指定や土地利用規制が行われる前に立地していた既存の事業所を含めると、近年増加傾向にある土砂災害に被災することが十分に懸念される。しかし、消防法や高圧ガス保安法、石油コンビナート等災害防止法等の産業事故防止に関する法律や大阪府の化学物質管理適正指針の対象は主に地震や津波に限定されている。したがって、土砂災害を起因とし

た Natech のリスク管理を進めるためには、まず全国規模で土砂災害に被災する可能性のある事業所を特定し、リスク評価を実施した上で具体的な対策を実施することが必要であると考えられる。さらに、3)の土地利用規制における課題として、現在自然災害に被災する可能性のある区域における建築規制や開発制限は進んでいるが、現在の都市計画における用途規制等では、Natech の発生に伴う周辺地域に対する影響を考慮した土地利用規制が行われていない。化学物質を扱う事業所が土砂災害に被災した場合、化学物質が流出することによる健康影響や環境汚染が発生する可能性があるため、どのような影響が懸念されるのかを把握したうえで土地利用規制を行うことが求められる。4)の課題として、日本における産業事故防止のための法律や制度は主に事業所内における設備の構造や化学物質の管理方法に言及したものであり、化学物質の流出に伴う周辺住民や一般環境に対するリスクが明示的に考慮されていないことが指摘されている (Park and Cruz, 2022; 小野, 2021)。1.2 節で示したように、Natech が発生した場合には化学物質の流出に伴う周辺住民への被害も懸念されることから (Girgin, 2011; Krausmann and Cruz, 2013), 周辺地域への影響のシミュレーションを通じて、周辺住民の避難等の対策について検討することが必要であると考えられる。5)の課題について、消防庁や東京都、大阪府が対策ガイドラインや対策事例集などで Natech に対する具体的な対策を示しているものの、各対策の有効性や効果は定量的に示されておらず、事業者が対策を実施する際の根拠となる情報が限られる。そのため、具体的なリスク評価の事例とともに対策のリスク削減効果を定量的に示すことによって、対策の実施の意思決定を支援することが求められる。

1.6 Natech のリスク評価手法の整理と研究課題

1.5 節で示したように、日本の法律・制度における Natech のリスク管理では、土砂災害に被災する可能性のある事業所の特定、化学物質の流出に伴う周辺地域への影響を踏まえたリスク分析・評価、リスク管理に向けた対策効果の定量化という観点から課題があることが分かった。本節では、これらの課題を踏まえ、Natech を取り上げた既往研究を、ある特定の国を対象とした全国・地域規模におけるリスクの特定、具体的な事業所を対象とした定量的リスク分析・評価、リスク管理に向けた対策の評価ごとに整理し、これまでの研究の到達点及び研究課題について整理する。

1.6.1 特定の国を対象とした全国・地域規模におけるリスクの特定

国や地方自治体レベルでのリスク管理を実施するためには全国・地域規模におけるリスクの特定や分析が不可欠であるが、これまでに実施された Natech に関する研究は特定の事業所規模で実施されたリスク分析・評価の事例が多く、全国・地域規模の分析事例は限られる (Gao et al., 2022a; Girgin et al., 2019)。

全国規模で複数の事業所を対象とした分析として、Girgin ら (2019)は国家規模におけるリスク評価 (National risk assessment (NRA))の観点から、評価の枠組みを提案している。このリスク評価の枠組みは、リスクの特定、分析、評価という 3 つの手順で構成されている。リスクの特定では、自然災害に被災する可能性のある事業所とその事業所で想定されるシナリオを特定する。リスクの分析では、自然災害の発生確率やその影響、化学物質の流出等による影響の分析を通じて、想定されるシナリオによって生じるリスクの程度を把握する。リスクの評価では、リスクの分析によって把握したリスクを基準値等と比較することによってそのリスクが許容できるかどうかを評価する。このような NRA の観点からのリスク分析及び評価を通じて、国や地方自治体は Natech のリスク管理に必要な基礎情報を整理することが可能であると考えられる。この NRA の文脈から、Natech のリスクを分析した研究として、Török ら (2021)はルーマニアに存在する Seveso directive の規制対象の事業所を取り上げた定性的なリスク分析を実施し

ている。この研究は、地震と洪水を対象に、Geographic Information System (GIS)を用いた事業所の抽出とその事業所で想定される火災や有毒物質の大気拡散、爆発などの事故シナリオの特定を実施し、定性的な指標を用いたリスク分析によって事業所間の Natech リスクを比較した。また、ドイツに存在する Seveso directive の規制対象の事業所や原子力発電所を取り上げ、各施設の周辺地域の人口分布を分析した事例も存在する (Fekete and Neuner, 2023)。この研究は、Natech を対象としていないが、ドイツにおける地震のハザードマップと Seveso directive の対象事業所を重ね合わせたマップを作成している。さらに、国全体でのリスク評価とリスク管理を支援するために、過去の Natech 事例の収集、共有、管理、分析が可能なツール”Find-Natech”も開発されている (Luo et al., 2022)。このツールはアメリカで過去に発生した化学物質の流出事例を基に構築されており、Natech 事例の時間的・空間的な変化を把握することが可能である。

地域規模で複数の事業所を対象とした研究として、Cruz and Okada (2008)が都市部における Natech のリスクを定性的に分析する手法を構築している。この研究は地震を対象として、リスクを自然災害と化学物質の流出に伴う「ハザード」と周辺地域の「脆弱性」を掛け合わせたものと定義し、コジャエリ地震を対象とした検証を行っている。この研究で構築された手法はあくまでも定性的な分析手法であるため、絶対的な値は算出されず、事業所の立地の違いによるリスクの比較のみが可能である。同じく定性的なリスク分析として、Ancione and Milazzo (2021)が災害発生時のリスク管理を目的として、Bayesian network (BN)を活用したリスク分析ツールを開発している。この研究はケーススタディとして、イタリアのポー川流域の Seveso directive の事業所を対象として、洪水によるリスクを定性的に分析している。半定量的な評価手法として、Girgin and Krausmann (2013)は RAPID-N と呼ばれる Natech のリスク評価とその結果をマップ化するためのツールを開発した。このツールは地震を対象に、地震の規模や設備の種類、貯蔵されている物質等の条件を基に、半定量的にヒト健康リスクを評価することができる。また、Soto and Renard (2015)は GIS を活用し、技術的なハザードと周辺地域の脆弱性の指標を用いた半定量的な分析手法を構築した。この方法論はあらゆる地域やリスク、資産に適用可能であるとしており、Soto and Renard (2015) は洪水を対象として、フランスのリヨンを対象とした分析を実施している。GIS を活用した関連研究として、Ancione ら (2016)は地方自治体やリスク管理者の意思決定を支援することを目的に、火山灰による設備の脆弱性を評価し、それをマップ化するためのツールを開発した。さらに、定性的・半定量的なリスク評価事例として、中国の揚子江経済地域を対象とした研究が存在する (Gao et al., 2021, 2022a)。Gao ら (2021)は地震と洪水、台風を対象に、自然災害のハザードと周辺地域の脆弱性、企業が扱う化学物質のハザード、企業のリスク管理に関する指標をスコア化し、相対的にリスクが高い地域を特定することを試みた。また、Gao ら (2022a)はこの研究を拡張し、地震と洪水、台風を対象に、1 km メッシュ単位で Natech に伴う大気汚染と水環境汚染のリスクを分析し、Natech リスクの高いホットスポットを特定するためのリスクマップを作成している。

このようにフランスや中国、イタリア、ルーマニア、ドイツ、アメリカを対象とした全国・地域規模におけるリスク分析事例は存在し、自然災害に被災する可能性のある事業所の特定や定性的なリスクの把握が行われ、分析手法も構築されている。しかし、1.5 節で言及したように、日本の PRTR 事業所を対象とした具体的かつ網羅的な分析は行われていない。また、Girgin ら (2019)が提案した NRA の観点からのリスク評価では、自然災害に被災する可能性のある事業所やシナリオの特定、定性的なリスク分析までは行われているものの (Török et al., 2021)、特定した事業所における Natech のリスクの定量的な分析と評価、リスク管理に向けた対策の評価までは行われていない。

1.6.2 具体的な事業所を対象とした定量的リスク分析・評価

具体的な事業所を対象とした Natech のリスク分析・評価は、全国・地域規模におけるリスクの特定や分析と比べて進められており、事業所に関する詳細な情報を基にパラメータを設定することが可能であるため、定量的なリスク評価が進められている (Mesa-Gómez et al., 2020)。このような定量的なリスク評価の目的は、事故の発生頻度と最終的に発生する影響を推算することであり、具体的な評価手法としては Antonioni ら (2007) が地震を事例に構築しており、最新の研究では自然災害が安全対策にもたらす影響を考慮したリスク評価手法が提案されている (Misuri et al., 2023)。具体的な評価手法の流れとしては、まず参照とする自然災害とその規模を設定し、その自然災害によって影響を受ける可能性のある設備を特定した後、フラジリティ曲線等を用いて、設備の破損規模とその発生確率を算出する。ここで、参照とする自然災害の設定については、規制当局によって決定されることが多く、例えば再現期間 475 年の地震や 100 年に 1 度の洪水などが用いられる (Krausmann, 2017)。特に地震については測定値や過去の記録から比較的入手可能な表面最大加速度 (Peak ground acceleration: PGA)、洪水については政府等が作成したハザードマップから浸水深や速度等を把握することが多い (Krausmann, 2017)。次に、自然災害時における対策の機能を評価し、それを踏まえたシナリオの特定と頻度の評価を実施した後、そのシナリオが発生した場合の最終的な影響を分析する。参照とする他の自然災害がある場合にはこれらの手順を繰り返し、ない場合にはこれらのシナリオの組み合わせと頻度を分析した後、リスク指標の計算を行う。1.3 節で示したように、Natech が発生した場合には対策が機能しないケースも考えられるため、Misuri ら (2023) が提案した評価手法のように対策の機能を含めた上でリスクを分析する必要があると考えられる。

定量的なリスク評価手法の構築が進められている自然災害としては、地震と洪水、落雷が挙げられる (Mesa-Gómez et al., 2020)。これらの自然災害を対象とした研究では、主に設備の脆弱性評価と化学物質の流出確率の算出が取り組まれてきた (Fabbrocino et al., 2005; Landucci et al., 2012; Giovanni Lanzano et al., 2014; G. Lanzano et al., 2014; Lanzano et al., 2015, 2013; Panico et al., 2017; Salzano et al., 2009, 2003; Yang et al., 2018) (表 1-2)。地震によるタンクの破損確率の算出には、過去の事故事例から設定した表面最大加速度 (PGA) を変数とするフラジリティ曲線が用いられる (Fabbrocino et al., 2005; Salzano et al., 2003) (表 1-2)。洪水によるタンクの破損については、洪水がもたらす水の静圧と動圧の和がタンクの内圧と臨界圧の和を超えるかどうかを判断の基準とした評価が行われている (Antonioni et al., 2015; Khakzad and Van Gelder, 2018, 2017; Landucci et al., 2012) (表 1-2)。落雷に対するタンクの破損確率については、疑似的な落雷による金属の穿孔に関する実験データを基にモデルが構築されている (Necci et al., 2013) (表 1-2)。また、これらの設備の脆弱性に関する知見を活用し、自然災害による設備の破損、化学物質の流出・拡散に伴う曝露や火災・爆発による影響までを範囲としたリスク評価に関する研究も取り組まれてきた (Antonioni et al., 2015, 2009, 2007; Fabbrocino et al., 2005; Meng et al., 2015; Necci et al., 2016; Zeng et al., 2021) (表 1-2)。化学物質の曝露や火災・爆発による影響の具体的な評価としては、Yellow book (van den Bosch and Weterings, 1997) に記載されたモデル式に基づき、化学物質の拡散による大気中濃度や爆発による圧力、火災による放射熱を計算し、人の脆弱性を表す Probit model を用いた評価が行われている (Krausmann, 2017)。最終的な指標としては、ある 1 人の人間が事故によって死亡する確率を表す Individual risk (個人リスク) とある集団において被害を受ける人数と頻度の関係を表す Societal risk (社会的リスク) が用いられる (Krausmann, 2017)。さらに近年では、ドミノ効果と呼ばれるタンクの火災・爆発に伴って連鎖的に他のタンクが破損するシナリオを考慮したリスク評価手法も構築されている (Cozzani et al., 2014; Mesa-Gómez et al., 2021; Misuri et al., 2020a; Naderpour and Khakzad,

2018)。Misuri ら (2020a)は落雷を起因とした Natech を対象として、タンクの火災やプール火災による熱放射の値から、他の設備の破損確率を算出することによって、連鎖的に事故がエスカレーションするシナリオを考慮したリスク評価を実施している。このように地震や洪水、落雷を起因とする Natech のシナリオに対する定量的なリスク評価手法は既に確立されつつあり、ドミノ効果を考慮したリスク評価手法も既に構築されている。

ここまでに挙げた地震や洪水、落雷を対象としたリスク評価手法に対して、近年 Natech 事例が複数報告されている土砂災害を対象とした研究は少なく (Mesa-Gómez et al., 2020; Suarez-Paba et al., 2019), 定量的なリスク分析の事例に限られる (Alvarado-Franco et al., 2017; Hao et al., 2023; Kwag and Hahm, 2018; Lan et al., 2021; Liu et al., 2018) (表 1-2)。Alvarado-Franco ら (2017)は土砂災害によるパイプラインの破損確率を評価できるモデルを構築し、コロンビアを対象としたケーススタディを実施した。この研究はパイプラインの破損確率の評価のみに焦点が当てられており、化学物質の流出に伴う影響は着目されていない。Kwag and Hahm (2018)は韓国の原子力発電所を対象として、土砂災害に伴う影響を考慮した確率論的安全評価 (Probabilistic safety assessment: PSA)を実施し、土砂災害に伴う炉心損傷確率を評価している。また、化学物質等の危険物を扱う施設を直接対象としていないが、Liu ら (2018)は過去に発生した事故事例を用いて、土砂災害や洪水、土石流に対する中国の鉄道の脆弱性マップを作成している。化学物質の流出までをシナリオとして考慮した研究として、Lan ら (2021)はBNによる確率論的手法を採用したリスク評価を実施している。この研究では中国・寧波市に存在する貯蔵タンク施設を対象として、土砂が到達した場合にタンクが破損するという仮定の下で、降雨規模を考慮した土砂災害の発生確率と土砂の到達範囲をモデル化した。また、タンクの破損に伴う火災によるドミノ効果も考慮し、あるタンクが破損した場合の連鎖的な影響を含めたリスク評価を実施している。Hao ら (2023)は Lan ら (2021)の構築した手法を改良し、土砂災害に対するタンクの脆弱性を考慮したリスク評価を実施している。具体的には、洪水によるタンクの破損モデルと同様に、土砂災害の静圧と動圧がタンクの内圧と臨界圧の和を超えた場合にタンクが破損すると仮定し、化学物質の流出確率を算出している。Hao ら (2023)の研究の範囲は Lan ら (2021)とは異なり、土砂災害が発生した場合の影響に着目しており、専門家の判断を基に作成した条件付確率表を用いて、化学物質の流出に伴うプール火災が発生する確率を算出している。

このように定量的なリスク評価に関する研究は進んできたが、これらのリスク評価手法は主に事業所内の設備の脆弱性に焦点を当てており、事業所の周辺地域に対する影響を考慮したリスク評価事例に限られる (Mesa-Gómez et al., 2021)。特に土砂災害による Natech を対象とした定量的なリスク評価の研究は主に事業所内の設備の破損確率や火災の発生確率に焦点を当てており、化学物質の流出・拡散による周辺地域の影響を考慮した手法は構築されていない (表 1-2)。1.5 節で言及したように、化学物質の流出に伴う周辺住民や一般環境に対するリスクを考慮した上で対策を実施するためには、これまでに構築されてきたリスク評価の範囲を拡張し、事業所の周辺地域への影響を考慮することが必要であると考えられる。

さらに、これまでに構築されてきたリスク評価手法の技術的な課題として、リスク評価に用いられるパラメータが決定論的に設定されており、適用できる範囲が限定されることが指摘されている (Kabir et al., 2019)。この技術的な課題に対しては、BN を活用した確率論的なリスク評価が進められており、地震 (Kabir et al., 2019)や洪水 (Khakzad and Van Gelder, 2018, 2017; Tolo et al., 2017), 落雷 (Cheng and Luo, 2020), ハリケーン (Qin et al., 2020), 山火事 (Khakzad, 2019; Khakzad et al., 2018), 異常気温 (Naderpour and Khakzad, 2018)を取り上げたリスク評価が行われてきた。BN を活用することによって、

複雑な因果関係を有する Natech の要素間の関係を視覚的に捉えることができ、リスク評価で用いるパラメータの不確実性を考慮したリスク評価が可能である。また、Natech のような低頻度事象を確率論的に評価することが可能であり、最悪のシナリオを含め、複数のシナリオの網羅的な分析が期待されている。

表 1-2 Natech の定量的リスク評価に関する先行研究

	自然災害に対する設備の脆弱性評価・ あるシナリオの発生確率	化学物質の流出による影響の評価 (Societal risk/Individual risk の評価)
地震	Lanzano et al. (2013), (2015); G. Lanzano et al. (2014); Giovanni Lanzano et al. (2014); Panico et al. (2017); Salzano et al. (2003), (2009); Cozzani et al. (2014)	Fabbrocino et al. (2005); Antonioni et al. (2007), (2009); Meng et al. (2015)
洪水	Landucci et al. (2012); Khakzad and Van Gelder (2018), (2017)	Antonioni et al. (2015)
落雷	Necci et al. (2013); Yang et al. (2018); Misuri et al. (2020a)	Necci et al. (2016)
土砂災害	Alvarado-Franco et al. (2017); Hao et al. (2023); Kwag and Hahm (2018); Lan et al. (2021)	

1.6.3 リスク管理に向けた対策の評価

リスク管理に向けた対策の効果を考慮したリスク評価として、Pilone and Demichela (2018)は産業事故と洪水に対する対策を取り上げ、それぞれの対策の実施状況に応じてスコア付けを行うことによって、対策の効果を考慮した半定量的なリスク評価手法を提案している。Ancione and Milazzo (2021)は洪水を対象に、化学物質の流出を防ぐ対策、住民に影響範囲から避難させる対策、影響範囲に存在する学校やオフィス等に存在する非居住者を制限する対策を取り上げ、リスクマトリックスを用いた定性的な関係性に基つき、各対策の効果を分析している。この研究では、化学物質の流出を防ぐ対策が最もリスクの高い状況となる確率を減少させることが明らかとなっている。

定量的な対策の評価として、Necci ら (2016)は落雷を起因とする貯蔵タンクの火災を対象とした定量的リスク評価の中で、落雷に対する 3 種類の対策を評価している。具体的には、標準的な緩和策である消火用ガスのレベルの引き上げ、タンク貯蔵所の四方に 30 m の避雷針を設置すること、またタンク貯蔵所の中央部と四方に 30 m の避雷針の設置することを取り上げている。結果として、避雷針を設置する対策が効果的であり、本数を増やすことによって事故の発生確率を最大で 98.6%減らすことが可能であることが示された。また、Kabir ら (2019)は地震を起因とした貯蔵タンクの破損に伴う爆発による周辺地域の死傷者数を評価している。この研究では、貯蔵タンクの地震対策として、アンカーの設置を取り上げており、アンカーの有無が他のパラメータと比較して、最もリスクに寄与することを定量的に示した。Misuri ら (2020b)は Natech の発生時には通常的安全対策が機能しない可能性があることに着目し、洪水と地震によって、16 種類の対策が機能しなくなる確率を専門家に対するアンケート調査を基に算出している。この結果を基に、Misuri ら (2021a)は自然災害時において対策が機能する確率に変化することを考慮して、洪水と地震を起因とする Natech のリスク評価手法を構築した。この研究では、ドミノ効果までを考慮し、スプリンクラーと防火対策、圧力安全弁、散水設備、緊急救助隊の 5 つの対策をリスク評価に含めている。この研究をさらに拡張し、Misuri ら (2021b)は洪水を対象による

ドミノ効果までを考慮して、対策が機能する確率が変化するシナリオを考慮した確率論的リスク評価を実施している。この研究の結果として、対策が完全に機能するケースと比べて、対策が機能する確率が変化することを考慮した場合、リスクは1桁大きくなったが、完全に対策が機能しないと仮定したワーストケースよりもリスクは小さくなり、自然災害によって対策が影響を受けることを想定した場合でも対策は有効であることが示された。Lan ら (2021)は土砂災害を起因とした貯蔵タンクの破損によるドミノ効果を取り上げ、斜面の排水システムを導入することによるリスク削減効果を評価した。この研究では、斜面の排水システムを導入することによって、斜面の崩壊確率が約100分の1に減少することが示された。また、Hao ら (2023)も同様に土砂災害を対象として、タンクの破損と化学物質の流出に伴う火災を対象としたリスク評価を実施している。この研究では、緊急対応や圧力警報装置、流出範囲の制限などの6つの対策を取り上げ、それぞれの機能を専門家の判断によって設定している。この研究の結果として、安全柵と緊急避難が最も効率的な対策であると結論付けられている。さらに、Zeng ら (2023)は洪水を起因とするドミノ効果をシナリオとして取り上げ、貯蔵タンクの在庫量を指標としたレジリエンス評価を実施している。ここでは、散水装置と耐火被覆材を対策として取り上げており、散水装置は耐火被覆材と比べて、レジリエンス向上の効果が大きいことが明らかとなった。また、散水装置と耐火被覆材を組み合わせることが貯蔵タンクのレジリエンスをさらに向上させることが定量的に示された。Yang ら (2023)はNatechのリスクの緩和策として、事業所の立地場所や事業所内のレイアウト、貯蔵タンク等の設備の構造、社員の教育や定期検査等の生産管理、自然災害発生時の緊急対応などをまとめている。これらの研究成果に加え、大阪府では2012年に災害時における化学物質のリスク低減事業を実施しており、この中で緊急遮断弁が作用し、配管内の容量のみが漏洩することによるリスク削減効果を評価している(大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課, 2013)。また、中久保ら(2016)は地震によって化学物質が河川に流出するシナリオを対象に、緊急遮断弁によって流出率が1%になるという仮定の下で浄水場機能に対する影響を評価している。この研究では、緊急遮断弁を導入することによって、給水停止に至る可能性を大幅に軽減できることが定量的に示された。

上記に取り上げた対策の評価に関する研究では、対象となる対策の範囲が限定されるという課題が存在する。実際、Natechを含めた化学プロセス産業における事故の安全対策に関する研究のレビューによると、これまでの研究では主に火災によるドミノ効果の防止に焦点が当てられているため(Yuan et al., 2022)、他のハザードを対象とした研究が必要であることが指摘されている。また、対策の定量的な評価は依然として困難な課題であり、特に対策を考慮した事故による影響の定量的な評価が求められる(Yuan et al., 2022)。過去のNatech事例から得られる教訓として、複数の対策を組み合わせることで様々なリスクの領域に適用できる汎用性のある対策を構築することが重要であることから(1.3節)、危険物施設の風水害対策ガイドライン(消防庁, 2020b)や対策事例集等(大阪府, 2023b)で示されている貯蔵率の制限やオイルフェンスの設置などの各事業所に適用できる汎用性のある対策を取り上げ、それらの対策の効果を定量的に評価することが求められる。

さらに、このような対策の効率性を分析するための手法として、経済性を考慮した費用対効果分析や費用便益分析が用いられてきた。Gavious ら (2009)やChen and Reniers (2020)はプロセス産業の事故を取り上げ、対策の費用と事故に伴う損失の算出に必要な項目をまとめ、費用便益分析の手法を構築している。事故対策の費用便益分析に関する具体的な評価例として、Helle ら (2015)は海洋への油の流出事故を対象に、船舶航行管理による自動警報装置の導入や油流出事故の対応船の導入を取り上げた費用便益分析を実施している。また、Chen ら (2020)はテロ攻撃による意図的なドミノ効果を取り上

げ、フェンス上のセンサーやコンクリート壁の設置、対応時間の削減、耐火被覆材の設置などを対象とした費用便益分析の事例を示している。Tong and Gernay (2023)はドミノ効果を考慮したタンクの破損確率の評価と貯蔵量を指標としたレジリエンス評価を実施しており、この研究ではタンクの防火対策や緊急対応による破損確率の低減効果を指標として、対策費用との比較を実施している。Natech シナリオを含めた分析事例としては、山火事とハリケーンによる貯蔵タンクのリスク分析に関する研究が挙げられる (Khakzad et al., 2018; Qin et al., 2020)。Khakzad ら (2018)はドミノ効果を考慮した山火事を起因とするタンクの破損を対象に、タンクの防火対策を取り上げたリスク評価を実施している。ここでは、タンクの破損確率を基に、タンクが破損することによる損失の期待値と対策費用の合計を比較し、最も対策が効率的となるタンクを特定している。Qin ら (2020)はハリケーンに伴う洪水、風、降雨の3つのハザードを対象に、タンクの破損確率を評価している、ここでは、タンクに水を加えることによって、タンクの内圧を高める対策を取り上げ、あらかじめ設定した対策費用の予算に対する効率性と破損確率の削減効果の和を指標として、タンクの脆弱性を低減するために加えるべき最も効率的な水の量を特定している。これらの経済性を踏まえた対策の評価手法の課題として、対策の費用や事故に伴う損失の評価の範囲が限定的であり、算出の手法がそれぞれの研究によって異なることが挙げられる。一方、日本では、公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針が国土交通省によって示されており (国土交通省, 2009b), 砂防事業の費用便益分析マニュアル等で具体的な算出方法が既にまとめられている (国土交通省, 2021b)。このような統一された手法を Natech の対策の経済性評価に活用することによって、費用や損失の算出における恣意的な設定をできる限り排除した評価が期待できる。

1.7 本研究の目的

以上のように、土砂災害の発生件数は近年増加傾向にあり、気候変動による降雨の頻発化・激甚化によって、今後も増加することが予想される (1.2 節)。そのような中、土砂災害を起因とした Natech は国内外含めて複数報告されており (1.3 節)、将来的に発生件数が増加することが懸念される。このような Natech の発生を防ぎ、発生した際の影響を緩和するためには、土砂災害の警戒避難体制と同様に、Natech が「いつ」、「どこで」発生する可能性があり、また発生した際に「どのような影響が懸念されるのか」を事前に把握し、具体的な予防策と緩和策を導入することが重要である。「いつ」については、土砂災害警戒情報等の既存の情報を活用することができるが、これまでの日本の法的枠組みにおける Natech のリスク管理においては、Natech が「どこで」発生するのか、また発生した際に「どのような影響が懸念されるのか」については十分な分析が行われていない。具体的には、Natech のリスク管理の対象となる主な自然災害と事業所はそれぞれ地震や津波、石油コンビナートや鉱山集積場等の大規模な事業所に限定されており、土砂災害や自然災害時を想定した対策が求められる PRTR 制度の事業所を対象とした網羅的なリスク分析は行われていない (1.5 節)。また、消防法や高圧ガス保安法などの産業事故の防止を目的とした法律や都市計画法で定められている土地利用規制においては、Natech の発生に伴う周辺住民や一般環境に対する影響が考慮されておらず、既存の対策ガイドライン等では対策導入の根拠となる Natech を考慮した対策のリスク削減効果は定量的に評価されていない (1.5 節)。このような土砂災害を起因とした Natech のリスク管理を進めるためには、土砂災害に関する知見に加え、安全工学や化学物質のリスク管理に関する知見を組み合わせることが求められる (1.1 節)。しかし、既往研究の中で、PRTR 事業所を取り上げた全国規模におけるリスクの特定は実施されていない (1.6 節)。また、土砂災害を起因とした Natech の定量的リスク評価は主に設備の破損確率や事故の発生確率を評価したものに限られ、

化学物質の流出に伴う周辺地域に対する影響は考慮されていない (1.6 節)。さらに、これまでの研究において定量的な評価が実施されている対策は限定され、対策事例集やガイドライン等で示されている汎用性のある対策については現状評価されていない (1.6 節)。

そこで、本研究では、土砂災害を起因とした Natech のリスク管理に向けた評価の枠組みの構築と今後のリスク管理への提言を目的として、日本に存在する土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所を特定し、土砂災害を起因とする化学物質流出事故のリスク評価手法の構築と実装を通じて、事故に伴うリスクと対策のリスク削減効果を定量的に評価した。

1.8 本研究の枠組み

1.7 節に示した目的を達成するための本研究全体の枠組みを図 1-2 に示す。本研究の枠組みは、Girgin ら (2019) が提案した NRA の観点からのリスク分析・評価の枠組みに「リスクの管理」を追加することによって構築した。

リスクの特定では、Natech がどこで発生する可能性があるのかを把握するために、現在日本でリスク評価の対象となっていない PRTR 事業所を対象として、土砂災害に被災する可能性のある事業所を特定した。そして、それらの事業所が有する化学物質のハザードと周辺地域の脆弱性を指標として、土砂災害によって化学物質が流出したと仮定した場合に想定されるリスクを定性的に抽出した。PRTR 制度では、事業所の設備や化学物質の取扱量等の情報が収集されておらず、詳細かつ定量的に Natech のリスクを分析することは困難であると考えられるため、決定論的な観点から分析を実施した (第 2 章)。

リスクの分析・評価では、Natech が発生した際にどのような影響が懸念されるのかを把握するために、特定した事業所を対象としたケーススタディを通じて、土砂災害を起因とする化学物質流出事故に伴うヒト健康リスクの評価手法を構築・実装した。ここでは、まず最悪のシナリオを想定した決定論的な観点からリスク分析手法を構築した (第 3 章)。次に、構築した決定論的リスク分析手法を拡張し、複数のシナリオを想定した確率論的な観点から、これまでのリスク評価手法の課題であった事業所の周辺地域への影響を踏まえたヒト健康リスクを分析する手法を構築した。最後に、得られたリスク分析結果を各国で定められたリスク許容値と比較し、リスク評価を実施した (第 4 章)。

リスクの管理では、対策の効果と経済的な効率性を把握するために、構築したリスク評価手法を用いて、具体的な対策を取り上げたリスク削減効果の定量的な評価と費用便益分析を実施した。具体的な対策については、既存の法律やガイドラインに基づく対策を取り上げ、確率論的な観点からのリスク評価に適用することによって、各対策のリスク削減効果を定量的に比較した (第 5 章)。対策の費用便益分析については、対策の施工費用や事故による損失を評価するために必要な情報が限られるため、分析の一例を示すという観点から、最悪のシナリオを想定した決定論的リスク評価の結果に基づき、土砂災害対策の経済性を評価した (第 6 章)。

	情報量 少 ← 多 →	
評価のステップ	決定論的	確率論的
リスクの特定 - 土砂災害に被災する可能性のあるPRTR事業所の特定 - 事業所が有するハザードと周辺地域の脆弱性指標を用いたNatechリスクの定性的な抽出	第2章	
リスクの分析・評価 - 自然災害に対する設備の脆弱性評価 - 化学物質の流出・拡散による周辺地域に対するヒト健康リスクの定量的な分析 - 各国で定められたリスク許容値との比較	第3章	第4章
リスクの管理 - 対策によるリスク削減効果の定量的な評価と比較 - 土砂災害対策の費用便益分析	第6章	第5章

図 1-2 本研究全体の枠組み

1.9 本論文の構成

本論文の構成を図 1-3 に示す。本論文は次の 7 章から構成されている。

第 1 章では、Natech の定義と土砂災害の発生状況、Natech のリスク管理の現状、Natech のリスク評価手法と研究課題を整理し、それらを背景として本研究の目的、枠組みを構築した。

第 2 章では、土砂災害に被災する可能性のある PRTR 制度の対象事業所を特定し、ハザードと脆弱性指標を用いた事業所の分類によって、各事業所で懸念される Natech のリスクを抽出した。

第 3 章では、第 2 章で特定した事業所の中から、ケーススタディの対象とする事業所を抽出し、最悪のシナリオを想定した決定論的な観点からヒト健康影響を分析した。

第 4 章では、第 3 章と同様の事業所を対象として、複数のシナリオを想定した確率論的な観点からヒト健康リスクを評価した。ここでは、Bayesian network モデルを構築し、複数のシナリオを対象とした網羅的なリスク評価を実施した。

第 5 章では、規制やガイドライン、対策事例集に基づいた複数の対策を取り上げ、第 4 章で構築した Bayesian network モデルを拡張することで、各対策のリスク削減効果を定量的に評価、比較した。

第 6 章では、第 3 章の結果に基づき、土砂災害対策の費用便益分析を実施し、経済的な観点から対策の効率性を考察した。

第 7 章では、本研究によって得られた成果と今後の土砂災害を起因とした Natech のリスク管理、本研究の課題についてまとめた。

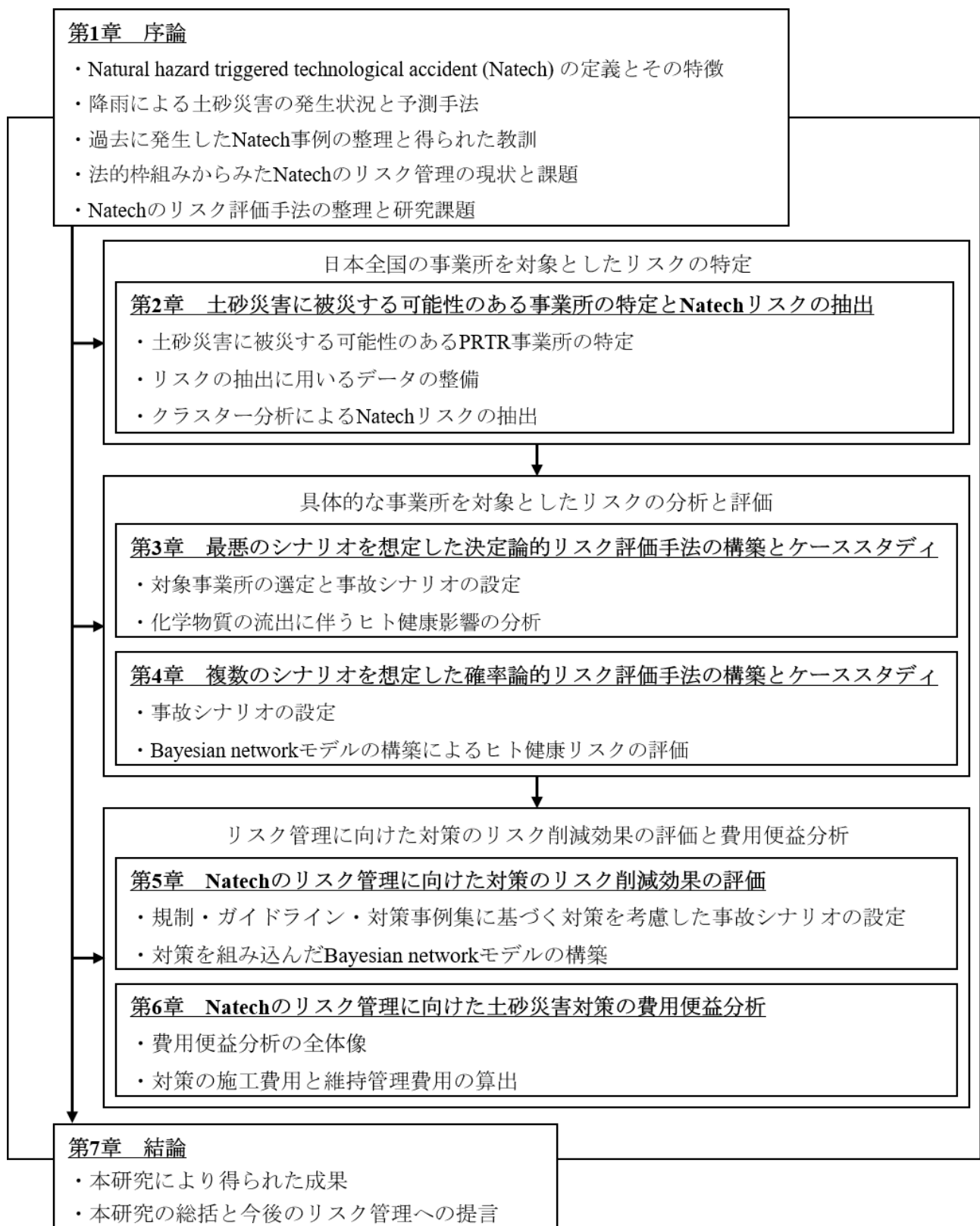


図 1-3 本論文の構成

参考文献

- Alvarado-Franco, J.P., Castro, D., Estrada, N., Caicedo, B., Sánchez-Silva, M., Camacho, L.A., Muñoz, F., 2017. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides. *Engineering Geology*. 222, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.005>
- Ancione, G., Milazzo, M.F., 2021. The Management of Na-tech Risk Using Bayesian Network. *Water* (Switzerland). 13. <https://doi.org/10.3390/w13141966>
- Ancione, G., Salzano, E., Maschio, G., Milazzo, M.F., 2016. A GIS-based tool for the management of industrial accidents triggered by volcanic ash fallouts. *Journal of Risk Research*. 19, 212–232. <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.961515>
- Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., Cozzani, V., 2009. Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events. *Reliability Engineering and System Safety*. 94, 1442–1450. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.02.026>
- Antonioni, G., Landucci, G., Necci, A., Gheorghiu, D., Cozzani, V., 2015. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering and System Safety*. 142, 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020>
- Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V., 2007. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. *Journal of Hazardous Materials*. 147, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.043>
- CalEPA, 2023. California Accidental Release Prevention. <https://calepa.ca.gov/california-accidental-release-prevention/> (accessed 23 May 2023).
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023. Emergency Events Database (EM-DAT). <https://www.emdat.be/> (accessed 4 June 2023).
- Chen, C., Reniers, G., 2020. Economic approaches for making prevention and safety investment decisions in the process industry, in: *Methods in Chemical Process Safety*. pp. 355–378. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2020.03.003>
- Chen, C., Reniers, G., Khakzad, N., 2020. Cost-benefit management of intentional domino effects in chemical industrial areas. *Process Safety and Environmental Protection*. 134, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.007>
- Cheng, Y., Luo, Y., 2020. Analysis of Natech risk induced by lightning strikes in floating roof tanks based on the Bayesian network model. *Process Safety Progress*. 40. <https://doi.org/10.1002/prs.12164>
- Cozzani, V., Antonioni, G., Landucci, G., Tugnoli, A., Bonvicini, S., Spadoni, G., 2014. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 28, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.009>
- Cruz, A.M., Krausmann, E., Kato, N., Girgin, S., 2017. Natech risk management and assessment Chapter 13 *Reducing Natech Risk: Structural Measures*. Elsevier, Netherlands.
- Cruz, A.M., Okada, N., 2008. Methodology for preliminary assessment of Natech risk in urban areas. *Natural Hazards*. 46, 199–220. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9207-1>
- EUR-Lex, 2012. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing

- Council Directive 96/82/EC Text with EEA relevance. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0018> (accessed 23 May 2023).
- European Commission Joint Research Center, 2023. eNatech - eNatech Database. <https://enatech.jrc.ec.europa.eu/> (accessed 18 May 2023).
- Fabbrocino, G., Iervolino, I., Orlando, F., Salzano, E., 2005. Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. *Journal of Hazardous Materials*. 123, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.015>
- Fekete, A., Neuner, S., 2023. Spatial Industrial Accident Exposure and Social Vulnerability Assessment of Hazardous Material Sites, Chemical Parks, and Nuclear Power Plants in Germany. *International Journal of Disaster Risk Science*. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00486-x>
- Froude, M.J., Petley, D.N., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Gao, Y., Cao, G., Hu, L., Bi, J., Ma, Z., 2022a. Spatially resolved risk assessment of Natech in the Yangtze River Economic Belt, China. *Process Safety and Environmental Protection*. 159, 1039–1052. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.050>
- Gao, Y., Cao, G., Ni, P., Tang, Y., Liu, Y., Bi, J., Ma, Z., 2021. Natural hazard triggered technological risks in the Yangtze River Economic Belt, China. *Scientific Reports*. 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93353-y>
- Gao, Y., Hu, L., Xie, Y., Bi, J., Ma, Z., 2022b. Understanding the Patterns and Characteristics of Natech Events in China. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4044355>
- Gavious, A., Mizrahi, S., Shani, Y., Minchuk, Y., 2009. The costs of industrial accidents for the organization: Developing methods and tools for evaluation and cost-benefit analysis of investment in safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 22, 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.008>
- Girgin, S., 2011. The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Science*. 11, 1129–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- Girgin, S., Krausmann, E., 2015. Lessons learned from oil pipeline natech accidents and recommendations for natech scenario development: Final report. Publications Office.
- Girgin, S., Krausmann, E., 2013. RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 26, 949–960. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.10.004>
- Girgin, S., Necci, A., Krausmann, E., 2019. Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 35. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101072>
- Hao, J., Liu, L., Long, Z., Chu, Y., Zhang, D., Chen, X., Huang, C., 2023. Scenario deduction of Natech accident based on dynamic Bayesian network: A case study of landslide accident in a liquor storage tank area in Guizhou Province, China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 83. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105067>
- Helle, I., Ahtiainen, H., Luoma, E., Hänninen, M., Kuikka, S., 2015. A probabilistic approach for a cost-benefit analysis of oil spill management under uncertainty: A Bayesian network model for the Gulf of Finland. *Journal of Environmental Management*. 158, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.042>
- Kabir, G., Suda, H., Cruz, A.M., Giraldo, F.M., Tesfamariam, S., 2019. Earthquake-related Natech risk assessment using a Bayesian belief network model. *Structure and Infrastructure Engineering*. 15, 725–739. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1569070>

- Khakzad, N., 2019. Modeling wildfire spread in wildland-industrial interfaces using dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*. 189, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.006>
- Khakzad, N., Dadashzadeh, M., Reniers, G., 2018. Quantitative assessment of wildfire risk in oil facilities. *Journal of Environmental Management*. 223, 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.062>
- Khakzad, N., Van Gelder, P., 2018. Vulnerability of industrial plants to flood-induced natechs: A Bayesian network approach. *Reliability Engineering and System Safety*. 169, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.016>
- Khakzad, N., Van Gelder, P., 2017. Fragility assessment of chemical storage tanks subject to floods. *Process Safety and Environmental Protection*. 111, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.012>
- Krausmann, E., 2017. *Natech Risk Management and Assessment Chapter 7 Natech Risk and Its Assessment*. Elsevier, Netherlands.
- Krausmann, E., Cozzani, V., Salzano, E., Renni, E., 2011. Industrial accidents triggered by natural hazards: An emerging risk issue. *Natural Hazards and Earth System Science*. 11, 921–929. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-921-2011>
- Krausmann, E., Cruz, A.M., 2017. *Natech Risk Management and Assessment Chapter 2 Past Natech Events*, Elsevier. Elsevier, Netherlands.
- Krausmann, E., Cruz, A.M., 2013. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. *Natural Hazards*. 67, 811–828. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0607-0>
- Krausmann, E., Cruz, A.M., Affeltranger, B., 2010. The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 23, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.10.004>
- Krausmann, E., Fendler, R., Averous-Monnery, S., Cruz, A.M., Kato, N., 2017. *Natech Risk Management and Assessment Chapter 4 Status of Natech Risk Management*.
- Krausmann, E., Necci, A., 2021. Thinking the unthinkable: A perspective on Natech risks and Black Swans. *Safety Science*. 139, 105255. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105255>
- Krausmann, Elisabeth, Renni, E., Campedel, M., Cozzani, V., 2011. Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards*. 59, 285–300. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9754-3>
- Krausmann, E., Salzano, E., 2017. *Natech Risk Management and Assessment Chapter 3 Lessons Learned From Natech Events*. Elsevier, Netherlands.
- Kumasaki, M., King, M., 2020. Three cases in Japan occurred by natural hazards and lessons for Natech disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 51. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101855>
- Kwag, S., Hahm, D., 2018. Development of an earthquake-induced landslide risk assessment approach for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 50, 1372–1386. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.07.016>
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., Cozzani, V., 2012. Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*. 106, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.05.010>
- Lan, M., Zhu, J., Lo, S., 2021. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment method for modeling risk for industrial facilities subjected to landslides. *Reliability Engineering and System Safety*. 215. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107851>

- Lanzano, Giovanni, De Magistris, F.S., Salzano, E., Fabbrocino, G., 2014. Vulnerability of industrial components to soil liquefaction. *Chemical Engineering Transactions*. 36, 421–426. <https://doi.org/10.3303/CET1436071>
- Lanzano, G., Salzano, E., De Magistris, F.S., Fabbrocino, G., 2013. Seismic vulnerability of natural gas pipelines. *Reliability Engineering and System Safety*. 117, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.03.019>
- Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., 2014. Seismic vulnerability of gas and liquid buried pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 28, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.010>
- Lanzano, G., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., Salzano, E., 2015. Seismic damage to pipelines in the framework of Na-Tech risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 33, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.12.006>
- Liu, K., Wang, M., Cao, Y., Zhu, W., Yang, G., 2018. Susceptibility of existing and planned Chinese railway system subjected to rainfall-induced multi-hazards. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 117, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.030>
- Luo, X., Tzioutzios, D., Tong, Z., Cruz, A.M., 2022. Find-Natech: A GIS-based spatial management system for Natech events. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 76. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103028>
- Meng, Y., Lu, C., Yan, Y., Shi, L., Liu, J., 2015. Method to analyze the regional life loss risk by airborne chemicals released after devastating earthquakes: A simulation approach. *Process Safety and Environmental Protection*. 94, 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.09.001>
- Mesa-Gómez, A., Casal, J., Muñoz, F., 2020. Risk analysis in Natech events: State of the art. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 64. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104071>
- Mesa-Gómez, A., Casal, J., Sánchez-Silva, M., Muñoz, F., 2021. Advances and gaps in natech quantitative risk analysis. *Processes*. 9, 1–14. <https://doi.org/10.3390/pr9010040>
- Misuri, A., Antonioni, G., Cozzani, V., 2020a. Quantitative risk assessment of domino effect in Natech scenarios triggered by lightning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 64. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104095>
- Misuri, A., Cozzani, V., 2021. A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities. *Process Safety and Environmental Protection*. 152, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.018>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2021a. Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events. *Reliability Engineering and System Safety*. 205. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107278>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2021b. Assessment of risk modification due to safety barrier performance degradation in Natech events. *Reliability Engineering and System Safety*. 212. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107634>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2020b. Assessment of safety barrier performance in Natech scenarios. *Reliability Engineering and System Safety*. 193. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106597>
- Misuri, A., Ricci, F., Sorichetti, R., Cozzani, V., 2023. The Effect of Safety Barrier Degradation on the Severity of Primary Natech Scenarios. *Reliability Engineering and System Safety*. 235. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109272>

- MONGABAY, 2020. Massive erosion likely due to hydropower dam causes oil spill on Ecuador's Coca River. <https://news.mongabay.com/2020/05/massive-erosion-likely-due-to-hydropower-dam-causes-oil-spill-on-ecuadors-coca-river/> (accessed 23 May 2023).
- Naderpour, M., Khakzad, N., 2018. Texas LPG Fire: Domino Effects Triggered by Natural Hazards. *Process Safety and Environmental Protection*. 116, 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.008>
- Nascimento, K.R.D.S., Alencar, M.H., 2016. Management of risks in natural disasters: A systematic review of the literature on NATECH events. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.10.003>
- Necci, A., Antonioni, G., Bonvicini, S., Cozzani, V., 2016. Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning. *Reliability Engineering and System Safety*. 154, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.05.009>
- Necci, A., Antonioni, G., Cozzani, V., Krausmann, E., Borghetti, A., Alberto Nucci, C., 2013. A model for process equipment damage probability assessment due to lightning. *Reliability Engineering and System Safety*. 115, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.018>
- Ochiai, N., Nakayama, J., Izato, Y. ichiro, Miyake, A., 2022. Lessons learned from the 2011 Great East Japan Earthquake: A case study of tsunami risk assessment in a Japanese chemical corporation. *Process Safety Progress*. 41, 283–292. <https://doi.org/10.1002/prs.12315>
- Panico, A., Basco, A., Lanzano, G., Pirozzi, F., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., Salzano, E., 2017. Evaluating the structural priorities for the seismic vulnerability of civilian and industrial wastewater treatment plants. *Safety Science*. 97, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.030>
- Park, H., Cruz, A.M., 2022. Insights on Chemical and Natech Risk Management in Japan and South Korea: A Review of Current Practices. *International Journal of Disaster Risk Science*. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00409-2>
- Pilone, E., Demichela, M., 2018. A semi-quantitative methodology to evaluate the main local territorial risks and their interactions. *Land Use Policy*. 77, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.027>
- Qin, R., Zhu, J., Khakzad, N., 2020. Multi-hazard failure assessment of atmospheric storage tanks during hurricanes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104325>
- Ricci, F., Moreno, V.C., Cozzani, V., 2021. A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*. 147, 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.031>
- Salzano, E., Garcia Agreda, A., Di Carluccio, A., Fabbrocino, G., 2009. Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones. *Reliability Engineering and System Safety*. 94, 1577–1584. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.02.023>
- Salzano, E., Iervolino, I., Fabbrocino, G., 2003. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 16, 403–409. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00052-4)
- Santella, N., Steinberg, L.J., Aguirra, G.A., 2011. Empirical Estimation of the Conditional Probability of Natech Events Within the United States. *Risk Analysis*. 31, 951–968. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01561.x>

- Showalter, P.S., Myers, M.F., 1994. Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations. *Risk Analysis*. 14, 169–182. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00042.x>
- Showalter, P.S., Myers, M.F., 1992. Natural Disasters as the Cause of Technological Emergencies A Review of the Decade 1980-1989. Colorado.
- Soto, D., Renard, F., 2015. New prospects for the spatialisation of technological risks by combining hazard and the vulnerability of assets. *Natural Hazards*. 79, 1531–1548. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1912-6>
- Suarez-Paba, M.C., Perreux, M., Munoz, F., Cruz, A.M., 2019. Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades. *Safety Science*. 116, 58–77. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.033>
- Tolo, S., Patelli, E., Beer, M., 2017. Risk Assessment of Spent Nuclear Fuel Facilities Considering Climate Change. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A Civil Engineering*. 3, 10–44. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000874>
- Tong, Q., Gernay, T., 2023. Resilience assessment of process industry facilities using dynamic Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 169, 547–563. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.048>
- Török, Z., Ozunu, A., Radovici, A., Maloş, C., Calapod, A., Senzaconi, F., 2021. Natech hazard identification at national level for seveso sites affected by floods and earthquakes. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*. 66, 255–264. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2021.2.22>
- US EPA, 2022. Risk Management Program (RMP) Rule Overview. <https://www.epa.gov/rmp/risk-management-program-rmp-rule-overview> (accessed 23 May 2023).
- van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M., 1997. Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow Book). Committee for the Prevention of Disasters, Netherlands.
- Yang, Y., Chen, G., Chen, P., 2018. The probability prediction method of domino effect triggered by lightning in chemical tank farm. *Process Safety and Environmental Protection*. 116, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.019>
- Yang, Y., Chen, G., Zhao, Y., 2023. A Quantitative Framework for Propagation Paths of Natech Domino Effects in Chemical Industrial Parks: Part II—Risk Assessment and Mitigation System. *Sustainability*. 15, 8306. <https://doi.org/10.3390/su15108306>
- Yuan, S., Yang, M., Reniers, G., Chen, C., Wu, J., 2022. Safety barriers in the chemical process industries: A state-of-the-art review on their classification, assessment, and management. *Safety Science*. 148. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105647>
- Zeng, T., Chen, G., Reniers, G., Hu, K., 2023. Resilience assessment of chemical industrial areas during Natech-related cascading multi-hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 81. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104967>
- Zeng, T., Chen, G., Reniers, G., Yang, Y., 2021. Methodology for quantitative risk analysis of domino effects triggered by flood. *Process Safety and Environmental Protection*. 147, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.042>
- 大阪府, 2013. 大阪府化学物質管理適正管理指針. <https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4460/00027077/shishin.pdf> (accessed 24 May 2023).

- 大阪府, 2023a. 大規模災害に備えた化学物質による環境リスクの低減対策について.
<https://www.pref.osaka.lg.jp/kankyohozen/shidou/saigai.html> (accessed 24 May 2023).
- 大阪府, 2023b. 事例集「化学物質を取り扱う事業所で今日からできる対策事例—明日起きるかもしれない大規模災害に備えて—」. <https://www.pref.osaka.lg.jp/kankyohozen/shidou/jireishu.html> (accessed 25 September 2023).
- 大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課, 2013. 平成24年度災害時における化学物質のリスク低減事業. <https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4460/00138828/houkokusho.pdf> (accessed 6 June 2023).
- 大塚路子, 2022. 災害と土地利用. 調査と情報—ISSUE BRIEF—, 国会国立図書館.
- 小野恭子, 2021. 災害・事故事象に対応する化学物質拡散予測と評価に関する現状と課題. 安全工学. 60, 168–174.
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2008. 数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築. 自然災害科学. 27, 69–83.
- 環境省, 2020. 気候変動影響評価報告書（詳細）. <https://www.env.go.jp/content/900516664.pdf> (accessed 4 June 2023).
- 環境省, 2022. 地方公共団体環境部局における化学物質に係る災害・事故対応マニュアル策定の手引き.
- 岸本充生, 2014. Natech（自然災害起因の産業事故）リスクの評価と管理. 安全工学. 53, 214–219.
- 気象庁, 2022. 土砂災害警戒情報・土砂キキクル（大雨警報（土砂災害）の危険度分布）.
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/doshakeikai.html> (accessed 8 June 2023).
- 経済産業省, 2018. 高圧ガス設備等に求められる耐震設計基準の性能規定化や水素燃料電池自動車の更なる普及に向けた規制の見直し等の改正について.
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2018/11/201811141000.html (accessed 24 May 2023).
- 経済産業省, 2022a. 指定化学物質等取扱事業者が講ずべき第一種指定化学物質等及び第二種指定化学物質等の管理に係る措置に関する指針の一部を改正する告示について（令和4年11月4日 公布）. https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/8_6.html (accessed 18 May 2023).
- 経済産業省, 2022b. 高圧ガス保安法. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=326AC0000000204> (accessed 24 May 2023).
- 経済産業省, 2023. PRTR制度. https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/index.html (accessed 23 May 2023).
- 高圧ガス保安協会, 2023. 事故事例データベース(令和3年版).
https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/incident_db.html (accessed 22 May 2023).
- 国土交通省, 2009a. 第1回都市計画制度小委員会・配布資料5 都市計画制度の概要.
<https://www.mlit.go.jp/common/000046608.pdf> (accessed 4 July 2023).
- 国土交通省, 2009b. 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編).
- 国土交通省, 2020a. 気候変動を踏まえた砂防技術検討会 - 資料2 近年の土砂災害実績を踏まえた課題.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/02shiryo.pdf (accessed 18 May 2023).
- 国土交通省, 2020b. 「安全なまちづくり」・「魅力的なまちづくり」の推進のための都市再生特別措置法等の改正について. https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/content/001406990.pdf (accessed 24 June 2023).

国土交通省, 2021a. 土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について.
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf> (accessed 8 June 2023).

国土交通省, 2021b. 砂防事業の費用便益分析マニュアル(案).

国土交通省, 2022a. 令和3年の土砂災害. <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshasaigai.pdf>
 (accessed 24 May 2023).

国土交通省, 2022b. 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=412AC0000000057> (accessed 2 July 2023).

国土交通省, 2022c. 津波防災地域づくりに関する法律. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=423AC0000000123> (accessed 2 July 2023).

国土交通省, 2022d. 都市特定河川浸水被害対策法. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=415AC0000000077> (accessed 2 July 2023).

国土交通省, 2023a. 全国における土砂災害警戒区域等の指定状況 (R5.3.31時点) .

国土交通省, 2023b. 建築基準法. https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000201_20230616_505AC0000000063 (accessed 2 July 2023).

国土交通省, 2023c. 都市計画制度の概要 土地利用計画制度.
https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/toshi_city_plan_tk_000043.html (accessed 4 July 2023).

消防庁, 2020a. 危険物施設の風水害対策のあり方に関する検討会 資料1-5-3 令和2年7月豪雨における風水害被害と危険物の臨時的な取扱い例. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-62/01/shiryuu1-5-3.pdf (accessed 14 March 2022).

消防庁, 2020b. 危険物施設の風水害対策ガイドライン (ver2) 本文.
<https://www.fdma.go.jp/mission/prevention/countermeasures/items/kiho1.pdf> (accessed 24 May 2023).

消防庁, 2021. 危険物に関わる事故事例_流出編 (令和2年).

消防庁, 2022. 小規模屋外貯蔵タンクの津波・水害対策工法に係るガイドライン.
https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-97/04/guideline1.pdf (accessed 2 June 2023).

消防庁, 2023. 令和4年版 消防白書 第1章 災害の現況と課題 第3節 石油コンビナート災害対策.
<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r4/65826.html> (accessed 23 May 2023).

総務省, 2019. 危険物の規制に関する政令. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306>
 (accessed 24 May 2023).

総務省, 2022a. 消防法. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=323AC1000000186> (accessed 24 May 2023).

総務省, 2022b. 石油コンビナート等災害防止法. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=350AC0000000084> (accessed 23 May 2023).

総務省, 2023. 石油コンビナート等災害防止法施行令. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=351CO0000000129> (accessed 14 July 2023).

東京都, 2023a. 化学物質を取り扱う事業者の災害対策について.
<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/chemical/chemical/disaster.html> (accessed 6 June 2023).

東京都, 2023b. 化学物質を取り扱う事業者のための水害対策マニュアル.

内閣官房, 2018. 国土強靱化基本計画 (平成30年12月14日閣議決定) .
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kk-honbun-h301214.pdf (accessed 18 May 2023).

中久保豊彦, 多田悠人, 東海明宏, 2016. 地震に伴うPRTR対象物質の流出による浄水場機能への影響評価とその対策効果分析. 日本リスク研究学会誌. 26, 131–140.

中谷洋明, 瀧口茂隆, 2022. 降雨による土砂災害に関する全国集計データ. 国土技術政策総合研究所資料, No.1231.

松田昌之, 中谷洋明, 2020. 地形・地質に関する主題図を用いた全国における土砂災害発生リスク推定法に関する考察. 国土技術政策総合研究所資料, No.1120.

第2章 土砂災害に被災する可能性のある事業所の特定と Natech リスクの抽出

2.1 緒言

Natech のリスク管理を進めるためには、まず Natech が発生する可能性のある事業所を特定するとともに、その事業所で懸念されるリスクを把握することが必要である。このステップは Girgin ら (2019) が示した NRA の枠組みにおいて、「リスクの特定」に位置づけられる。

Natech に着目した研究の中で、全国規模でリスクを特定した研究は事業所単位のリスク評価に関する研究と比べて少なく、数少ない先行研究の 1 つとして Török ら (2021) がルーマニアに存在する Seveso directive の規制対象の事業所を取り上げた定性的なリスク分析を実施している。この研究は、地震と洪水を対象に、GIS を用いた事業所の抽出とその事業所で想定される火災や有毒物質の大気拡散、爆発などの事故シナリオの特定を実施している。一方、1.6.1 項に示したように、本研究で対象としている土砂災害に着目した研究は見られない。

また、現在日本において、全国規模でリスクの特定や評価が実施されている事業所は石油コンビナート等災害防止法(総務省, 2022)に基づく、大規模な事業所に限定されており、化学物質管理指針の改正によって今後対策が求められる PRTR 制度の対象事業所の大部分は Natech のリスクの特定は行われていない。

そこで、本章では、土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所の特定と想定される Natech リスクの抽出を通じて、現在日本が置かれた状況を把握するとともに、リスクの特定に利用可能な情報を整理する。

本章の構成は次の通りである。2.2 節では、本章における研究の枠組みを示した。2.3 節では、土砂災害に被災する可能性のある事業所を特定する方法を示した。2.4 節では、リスクの抽出に必要なデータを示し、その整備方法をまとめた。2.5 節では、本研究で用いるクラスター分析手法を示した。2.6 節では、SOM-Ward 法と K-means 法を比較するための手法を示した。2.7 節では、事業所の特定とリスクの抽出結果を考察した。2.8 節では、本研究により得られた結論を示した。

2.2 研究の枠組み

研究の枠組みを図 2-1 に示す。

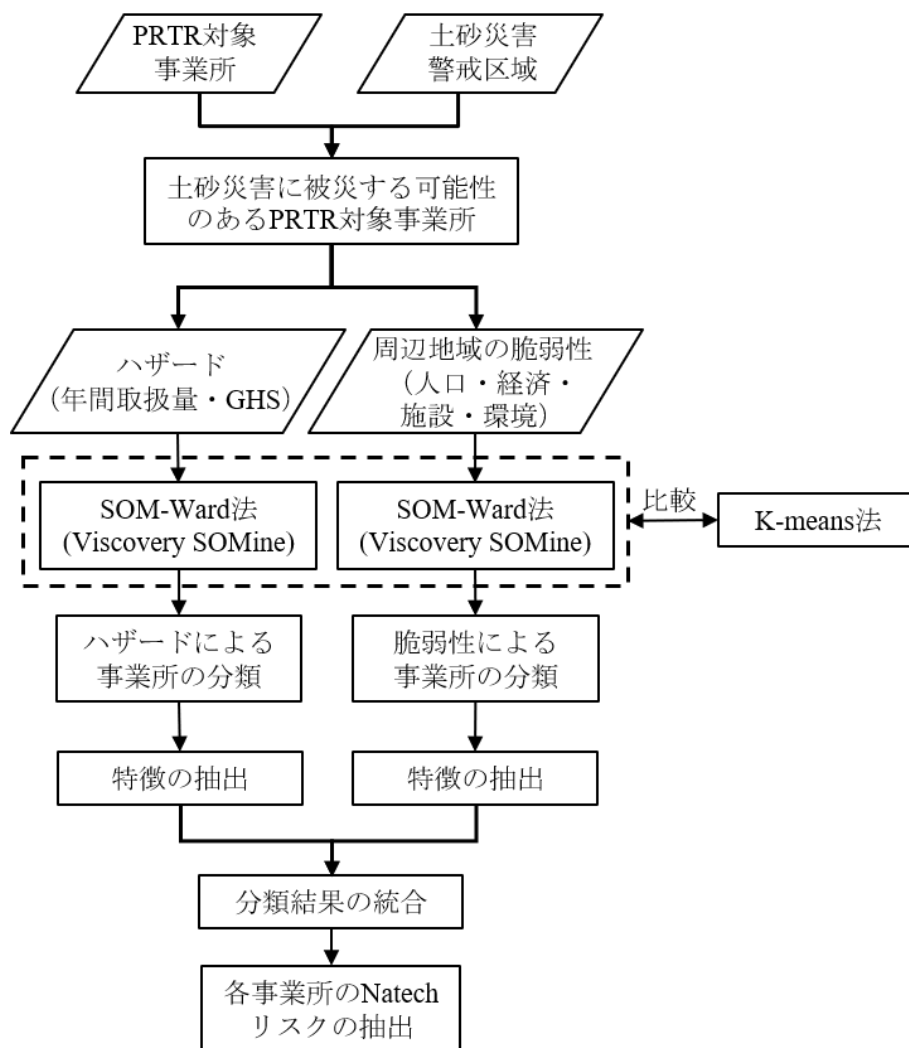


図 2-1 Natech リスク抽出の枠組み

本研究で取り上げる PRTR 制度の対象事業所は、扱われている化学物質の種類やその排出・移動量、事業所の位置情報、業種が一般に公開されており、人の健康や生態系に有害性のある化学物質を一定量以上扱っているため（経済産業省, 2023a）、突発的に化学物質が流出した際の周辺地域にもたらす影響が懸念される。2019 年度における PRTR 制度の対象事業所は全国各地に 33,318 件存在し（環境省, 2021a）、現状地震と津波によるリスク評価が求められている石油コンビナート等特別防災区域（全国 79 地区）と比べて（消防庁, 2023）、様々な土地利用環境に遍在していると考えられるため、本研究で取り上げる土砂災害にも被災する可能性がある。なお、PRTR 制度における集計が始まった 2001 年度における対象事業所数は 34,830 件であり（環境省, 2003a）、2019 年度の対象事業所は 2001 年度と比べて、1,512 件減少している。

土砂災害に関する情報として、日本では土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等(国土交通省, 2021)が作成されている。土砂災害警戒区域等は、土砂災害警戒区域と土砂災害特別警戒区域に分かれ、後者は前者よりも危険性が高い区域として、開発行為に対する制限や建築物の構造規制等が行われる(国土交通省, 2021)。本研究では、過去に土砂災害によって被災した危険物施設の位置と土砂災害警戒区

域が概ね一致していることを踏まえ (消防庁, 2020), 土砂災害の危険性がある場の情報として, 土砂災害警戒区域等を用いて, 土砂災害に被災する可能性のある PRTR 対象事業所を特定した。なお, 土砂災害警戒区域や土砂災害特別警戒区域の土砂災害の捕捉率はそれぞれ約 89%, 76%であり (松田・中谷, 2020), 十分に災害を補足できる指標であると考えられる。

さらに, 本研究では, Cruz and Okada (2008) が実施した複数の事業所を対象とした定性的なリスク分析手法に従い, Natech リスクを式(2-1)として定義し, 土砂災害に被災する可能性のある各事業所が有するハザード (Hazard)と周辺地域の脆弱性 (Vulnerability)という 2 つの指標を用いて, Natech リスクの抽出を実施した。

$$Risk = Hazard \times Vulnerability \quad (2-1)$$

式(2-1)に示したハザードについては, 事業所の業種や取り扱う化学物質の種類, 在庫量, 設備, 動作環境, 安全対策の有無などが挙げられ, 周辺地域の脆弱性については, 人口や経済指標, 施設 (浄水場, 排水処理場, 発電所, 病院, 避難所, 消防署など), 自然環境 (公園, 農地, 自然保護区域, 森林, 河川, 海洋, 湖沼など) などが挙げられる。一方, PRTR 制度では, 事業所の設備に関する情報は収集されていないため, 詳細かつ定量的に Natech リスクの抽出を実施することは困難であると考えられる。また, 全国各地に存在する各事業所のリスクを 1 つ 1 つ抽出することは時間的にも困難である。そこで, 本研究では事業所の分類を行うことで, 各事業所のハザードと周辺地域の脆弱性の特徴を抽出し, NRA の観点から, 各事業所において相対的に懸念される Natech リスクを定性的に抽出することを試みた。

事業所の分類では, クラスタ分析の 1 つである Self-Organizing Map (SOM) 法と Ward 法を組み合わせた SOM-Ward 法(Mindware Inc, 2022)を用いた。なお, クラスタ分析手法の違いによっては得られる分類結果が異なると考えられるため, 本研究では, 非階層的クラスタ分析手法として一般的に用いられる K-means 法との比較を行い, 分析手法の不確実性を考察した。

2.3 土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所の特定

PRTR 制度の対象事業所の情報は GIS データとして, 製品評価技術基盤機構 (National Institute of Technology and Evaluation : NITE) によって公開されている(独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022a)。また, 土砂災害警戒区域の指定状況は国土数値情報(国土交通省, 2022)において, GIS データとして公開されている。

本研究では, ArcMap Ver 10.8.1 (Esri 社) の空間検索機能を用い, 上記の PRTR 対象事業所と土砂災害警戒区域等の GIS データから, 土砂災害警戒区域等 (2020 年 8 月 1 日時点) に該当する PRTR 対象事業所 (2019 年度) を特定した。

2.4 リスクの抽出に用いるデータの整備

2.4.1 ハザードに関するデータの整備

事業所が有するハザードは, 土砂災害に対する設備の脆弱性 (化学物質の流出可能性) や化学物質の取扱量, 流出した物質の危険・有害性などが挙げられる。一方, 2.2 節で言及したように, PRTR 制度では事業所の設備に関する情報や化学物質の取扱量は収集されておらず, 設備の脆弱性等を具体的に分析することは困難である。よって, 現状 PRTR 制度で公開されている各事業所が扱う化学物質の排出・移動量と各化学物質の種類を基に, ハザードに関するデータを整備することが求められる。

Natech 発生時における潜在的なリスクを把握するためには、災害時における各事業所の取扱量に関する情報が必要であり、PRTR 制度で公開されている化学物質の排出・移動量を基に、化学物質の年間取扱量を算出する取り組みが既に行われている (田和ら, 2021)。具体的に、田和ら (2021)は各地方自治体が別途収集した年間取扱量のデータを基に、公開されている排出・移動量から年間取扱量を推定する方法を構築し、化学物質のおよそ半数を 0.1-10 倍の範囲で推計している。化学物質の危険・有害性の指標としては、各物質の物性値や環境基準値等が挙げられるが、特に PRTR 制度の対象物質について網羅的に整理された指標として、「環境管理参考濃度」が提案されている (エコケミストリー研究会・環境資源システム総合研究所, 2022; 高梨ら 2005)。また、この環境管理参考濃度を基に、排出量を重み付けした「毒性重み付け排出量」という指標も提案されており (Nakamura et al., 2008)、この考え方をを用いることによって、毒性を考慮した取扱量を算出できる可能性がある。しかし、現状提案されている環境管理参考濃度は長期毒性情報を基に選定されており (高梨ら 2005)、人の健康保護のための大気や水域管理参考濃度、水生生物保護のための水域管理参考濃度のみに指標が限定されている。Natech は火災や爆発、化学物質の曝露に伴う急性影響等も懸念されることから、これらの指標と比べて、より網羅的に各物質の物理的性質や有害性について整理された指標が適していると考えられる。その 1 つの指標として、Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS 分類)が存在する (United Nations, 2021)。GHS 分類は国際的に調和された化学物質の分類・表示方法であり、化学物質の取り扱いや輸送、使用における国際的に統一されたルールとして用いられている。現在、3,000 以上の化学物質を対象に、物理化学的危険性と健康に対する有害性、環境に対する有害性に関する計 35 項目について分類が行われている (独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022b)。

これらを踏まえ、本研究ではハザードに関するクラスター (Hazard Cluster; HC) 分析に用いる変数として、PRTR 制度で公開されている情報から整備可能な各事業所の化学物質の年間取扱量 (中村ら, 2019; 田和ら, 2021)と各事業所が扱う化学物質の GHS 分類を収集・整備した。

2.4.1.1 年間取扱量の整備

本研究では、この排出係数の考え方を活用し、以下の式(2-2)より、排出・移動量合計を排出係数で除すことによって、年間取扱量を算出した (田和ら, 2021)。

$$Ha = \frac{Re}{Er} \quad (2-2)$$

ここで、 Ha : 年間取扱量 (kg/year), Re : 排出・移動量合計 (kg/year), Er : 排出係数 (-) を表す。

本研究では、図 2-2 に示すフローチャートに従って、排出係数と年間取扱量のデータ整備を行った。

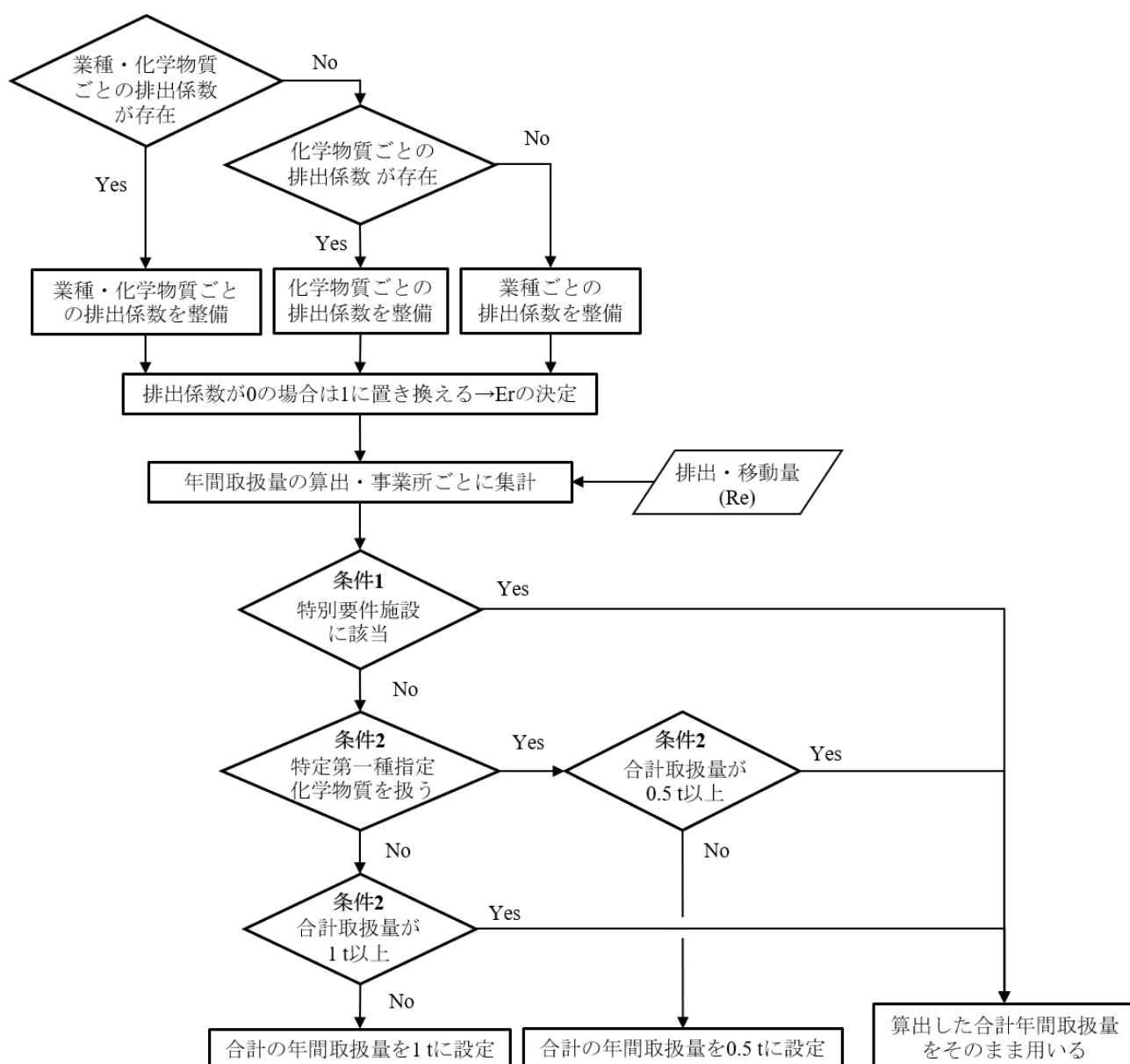


図 2-2 排出係数と年間取扱量の整備

排出係数については、取扱量が収集されている 12 自治体で算出された排出係数 (大阪府立環境農林水産総合研究所, 2022; 田和ら, 2021)の平均値を全国の事業所に適用した。本研究で用いた排出係数は、「業種かつ化学物質」、「業種」、「化学物質」ごとに整理されており (大阪府立環境農林水産総合研究所, 2022; 田和ら, 2021), これらの整理された排出係数の精度は、「業種かつ化学物質」、「化学物質」、「業種」ごとに整理された排出係数の順で高いと考えられる。そこで、本研究では、まず業種・化学物質ごとの排出係数を用いて、PRTR 制度において公表されている各事業所の業種及び扱っている物質と照合することによって、115 物質の排出係数の整備を行った。さらに、業種・化学物質ごとの排出係数が存在しない 84 物質に対しては、化学物質ごとの排出係数を整備し、物質ごとの排出係数が存在しない 1 物質に対しては、業種ごとの排出係数を整備した。排出係数が 0 の場合は事業所の年間排出・移動量は年間取扱量を超えることはないという考え方に基づき、排出係数の最大値である 1 を用いて、取扱量を算出した。なお、排出係数を 1 にするという仮定によって、取扱量を過小評価している可能性がある。ダイオキシン類については他の化学物質と異なり、集計の単位に Toxic Equivalent Quantity (TEQ) が用いられ

ており (環境省, 2003b), PRTR 制度では mg-TEQ を単位として集計されている (環境省, 2021b)。そこで、本研究ではダイオキシン類とそれ以外の年間取扱量を別途集計し、異なる変数として、クラスター分析に用いた。

一方、本研究で対象とした事業所は PRTR 制度の対象事業所であるにも関わらず、排出係数を用いた合計年間取扱量の算出では、設定された排出係数の誤差のため、PRTR 制度の対象事業所となる要件を満たさない事業所が存在した。そのため本研究では、最終的な取扱量を整備するにあたり、PRTR 制度の対象事業所となる 2 つの条件を考慮し、算出した合計年間取扱量の下限値を定めた。1 つ目の条件 (条件 1) は特別要件施設の所有の有無である。PRTR 制度では、特別要件施設を所有している事業所は、年間取扱量の要件とは別に、対象事業所となる (経済産業省, 2023b)。PRTR 制度における特別要件施設は、以下の 4 点を指している (経済産業省, 2023b)。

- ① 鉱山保安法により規定される特定施設 (金属鉱業、原油・天然ガス鉱業に属する事業を営む者が有するものに限る。)
- ② 下水道終末処理施設 (下水道業に属する事業を営む者が有するものに限る。)
- ③ 廃棄物の処理及び清掃に関する法律により規定される一般廃棄物処理施設及び産業廃棄物処理施設 (ごみ処分業及び産業廃棄物処分業に属する事業を営む者が有するものに限る。)
- ④ ダイオキシン類対策特別措置法により規定される特定施設

PRTR 制度によって公表されているデータでは、これらの特別要件施設に該当する施設のデータまでは入手することが出来ない。そのため、本研究では、金属鉱業、原油・天然ガス鉱業、下水道業、一般廃棄物処理業、産業廃棄物処理業を営む事業所とダイオキシン類を扱っている事業所を特別要件施設の条件に該当すると仮定した。これらの条件に該当する事業所については、下限値を設定せず、算出された合計年間取扱量をそのまま用いた。なお、PRTR 制度において、下水処理施設が届出を実施している化学物質の排出量は、実際の放流水中の化学物質濃度の測定値に放流量を乗じることで算出される (国土交通省, 2023a)。測定された値が定量下限値未満かつ検出下限値以上の場合は、定量下限値の 2 分の 1 を測定値として用いることから (国土交通省, 2023a)、排出量を基に算出した年間取扱量は実際よりも過大評価されている可能性がある。

2 つ目の条件 (条件 2) は年間取扱量の要件である。この制度では、第一種指定化学物質を 1 t 以上、特定第一種指定化学物質の場合は 0.5 t 以上扱っている事業所が対象となる (経済産業省, 2023b)。そのため本研究では、特定第一種指定化学物質を扱っている事業所は最低でも 0.5 t 以上、第一種指定化学物質のみを扱っている事業所では最低でも 1 t 以上取り扱っているとして、年間取扱量の下限値を定めた。

2.4.1.2 化学物質の性質に関するデータの整備

具体的なデータの整備手順としては、まず製品評価技術基盤機構 (NITE) がまとめている GHS の分類結果 (独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022b) を基に、対象事業所が扱っている化学物質の CAS 番号と GHS 分類区分における各化学物質の CAS 番号を照合することで、物質ごとに物理化学特性や毒性を整備した。しかし、PRTR 制度では、化合物 (例: 亜鉛の水溶性化合物、アンチモン及びその化合物、六価クロム化合物等) が対象物質となっている場合があるため、それらの物質については、CAS 番号を 1 つに定めることができない。そのため、本研究では、環境リスク評価書 (環境省, 2021c) や化学物質総合情報提供システム (NITE-CHIRIP) (独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2021) を用いて、対象事業所が扱う 26 個の化合物に当てはまる具体的な物質の CAS 番号を整備し (補足資料 A-1, 表 A-1-1)、その化合物は該当する物質が有する性質を全て有するとして、GHS 分類区分の整備を行った。

整備した結果、全体で 35 個存在する GHS 分類区分のうち、爆発物、エアゾール、酸化性ガス、自然発火性液体・固体、自己反応性化学品、水反応可燃性化学品、酸化性液体、有機過酸化物、鈍性化爆発物の 10 区分については、本研究で対象とした物質では該当しなかった。また、特定標的臓器毒性については、臓器ごとの影響を示しており、臓器ごとに変数を分割すると変数が非常に多くなり、結果の解釈が難しくなると考えられることから除いた。これらを踏まえ、本研究で用いた 23 個の GHS 分類区分を表 2-1 に、各分類区分の定義を表 2-2 に示す (GHS 関係省庁連絡会議, 2021)。なお、各物質を分類するための詳細な基準については、GHS 文書 (GHS 関係省庁連絡会議, 2021)を参照されたい。

次に、GHS の各分類区分における性質や毒性の大きさを考慮するため、各分類区分に対して、危険・有害性が小さい区分から順位付けを行い、その順位をスコアとした (表 2-1)。なお、表 2-1 に示したスコアは、本研究で対象とした物質が有する区分のみを用いたものであり、この区分以外（「分類できない」や「分類対象外」等）は全て 0 とした。また、CAS 番号が特定できなかった化合物については、その化合物に当てはまる具体的な物質の中で、表 2-1 に示した各 GHS 分類区分のスコアが最も大きい値を代表させた。

本研究では、事業所の分類を行うため、事業所が扱う各物質の危険・有害性に関する情報を事業所ごとに整理する必要がある。情報整理の方法としては、各物質の危険・有害性スコアの加算値を事業所ごとに整理する加算ケースと各事業所が扱う物質の中で最も危険・有害性スコアが大きい値を事業所のハザードとして代表させる最大値ケースが挙げられる。本研究では、前者の加算ケースを採用し、事業所ごとに各 GHS 分類区分の危険・有害性スコアを整理した。加算ケースを採用することによって、各事業所が取り扱う化学物質の数を反映することができ、危険・有害性だけではなく、化学物質の取扱数を考慮した特徴の抽出に繋がる。化学物質の取扱数は、同じ区分の物質を扱う事業所同士のハザードを比較する場合や事故時の潜在的なハザードを把握する場合に必要な要素であると考えられる。特に、化学物質の流出時には、複数の物質が同時に流出する場合が想定されるため、各事業所の潜在的なハザードを表す指標として、取扱数を考慮した指標が必要である。

上記の理由から、本研究では化学物質の取扱数をハザードとして考慮できる加算ケースを採用した事業所の分類を行った。なお、比較参照のために、最大値ケースを採用した場合の分類も実施した（補足資料 A-1 参照）。

表 2-1 GHS 分類区分のスコア付け

化学物質の性質	区分 1	区分 1A	区分 1B	区分 1C	区分 2	区分 2A	区分 2B	区分 3	区分 4	区分 5
可燃性ガス	2	-	2	-	1	-	-	-	-	-
引火性液体	4	-	-	-	3	-	-	2	1	-
可燃性固体	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-
酸化性固体	3	-	-	-	2	-	-	1	-	-
金属腐食性化学品	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
急性毒性 (5 分類区分)	5	-	-	-	4	-	-	3	2	1
皮膚腐食性／ 刺激性	3	3	3	3	2	-	-	1	-	-
眼に対する重篤な損 傷性／眼刺激性	3	-	-	-	2	2	1	-	-	-
呼吸器感作性	3	2	1	-	-	-	-	-	-	-
皮膚感作性	3	2	1	-	-	-	-	-	-	-
生殖細胞変異原性	-	-	2	-	1	-	-	-	-	-
発がん性	-	2	2	-	1	-	-	-	-	-
生殖毒性	-	2	2	-	1	-	-	-	-	-
誤えん有害性	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-
水生環境有害性 短 期（急性）	3	-	-	-	2	-	-	1	-	-
水生環境有害性 長 期（慢性）	4	-	-	-	3	-	-	2	1	-
オゾン層への 有害性	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
高圧ガス	圧縮ガス，液化ガス，高圧液化ガス，低圧液化ガス，溶解ガスを全て 1 とし て，それ以外の区分を 0 とする									
自己反応性化学品	タイプ C，タイプ D，タイプ G をそれぞれ 3,2,1 とし，それ以外の区分を 0 とする									

表 2-2 各 GHS 分類区分の定義 (GHS 関係省庁連絡会議, 2021)

化学物質の性質	定義
可燃性ガス	標準気圧 101.3 kPa で 20°Cにおいて、空気との混合気が燃焼範囲を有するガス
引火性液体	引火点が 93°C以下の液体
可燃性固体	易燃性を有する、または摩擦により発火あるいは発火を助長する恐れのある固体
酸化性固体	それ自体は必ずしも可燃性を有しないが、一般的には酸素の発生により、他の物質を燃焼させまたは助長するおそれのある固体
金属腐食性化学品	化学反応によって金属を著しく損傷し、または破壊する物質または混合物
急性毒性 (5 分類区分)	物質または混合物への単回または短時間の経口、経皮または吸入曝露後に生じる健康への重篤な有害影響（すなわち致死作用）
皮膚腐食性／ 刺激性	物質または混合物への曝露後に起こる、表皮を貫通して真皮に至る明らかに認められる壊死（腐食性）／皮膚に対する不可逆的な損傷（刺激性）
眼に対する重篤な 損傷性／眼刺激性	物質または混合物への曝露後に起こる、眼の組織損傷、すなわち視力の重篤な機能低下（損傷性）／目に変化を生じさせること（刺激性）
呼吸器感作性	物質または混合物の吸入後に起こる、気道の過敏症
皮膚感作性	物質または混合物に皮膚接触した後に起こる、アレルギー性反応
生殖細胞変異原性	物質または混合物への曝露後に起こる、生殖細胞における構造的および数的な染色体の異常を含む、遺伝性の遺伝子変異
発がん性	物質または混合物への曝露後に起こる、がんの誘発またはその発生率の増加
生殖毒性	物質または混合物への曝露後に起こる、雄雌の成体の性機能および生殖能に対する悪影響に加えて、子世代における発生毒性
誤えん有害性	液体または固体の化学品が口または鼻腔から直接、または嘔吐によって間接的に気管および下気道へ侵入することによる化学肺炎、肺損傷あるいは死のような重篤な急性毒性
水生環境有害性 短期（急性）	化学品への短期の水生曝露の間にその急性毒性によって生物に引き起こされる化学品の有害性
水生環境有害性 長期（慢性）	水生環境における化学品への長期間の曝露を受けた後にその慢性毒性によって引き起こされる化学品の有害性
オゾン層への 有害性	ハロカーボンによって見込まれる成層圏オゾンの破壊の程度
高圧ガス	20°C, 200 kPa（ゲージ圧）以上の圧力の下で容器に充填されているガスまたは液化、深冷液化されているガス
自己反応性化学品	熱的に不安定で、酸素（空気）がなくとも強い発熱分解を起こし易い液体または固体の物質あるいは混合物

2.4.2 周辺地域の脆弱性に関するデータの整備

本研究では、周辺地域の脆弱性に関するクラスター（Vulnerability Cluster; VC）分析に用いる変数として、複数の事業所を対象とした Natech の定性的・半定量的リスク分析 (Cruz and Okada, 2008; Soto and Renard, 2015)において用いられている周辺の人口、経済、施設、自然環境に関するデータを ArcMap Ver 10.8.1 (Esri 社)によって整理し、解析に用いた（表 2-3）。

表 2-3 周辺地域の脆弱性に関するデータ

指標	具体的な項目	クラスター分析において用いるデータ
人口	全年齢人口	PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュ内の全年齢人口, 14 歳以下, 65 歳以上人口
	14 歳以下人口	
	65 歳以上人口	
経済	事業所数 従業者数	PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュ内の全業種の事業所及び従業者数
	農家数 農業従事者数	PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュ内の総農家数及び農業従事者数
施設	避難施設数 消防署数 警察署数	PRTR 対象事業所の周囲 1 km 以内に存在する避難施設数, 消防署数, 警察署数
自然環境	1 級・2 級河川	PRTR 対象事業所から 100 m 以内に 1 級・2 級河川, その他の河川, 海洋, 湖沼が存在する場合は 1, 存在しない場合は 0
	その他河川	
	海洋	
	湖沼	
	農地	PRTR 対象事業所が農業地域上に存在する場合は 1, 存在しない場合は 0

周辺地域の人口については、国勢調査（2015 年）の GIS データ(e-Stat 政府統計の総合窓口, 2022)から、対象とする PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュにおける全年齢人口と化学物質の曝露に対する脆弱性が大きいと考えられる 14 歳以下, 65 歳以上人口 (Cruz and Okada, 2008)を収集した。国勢調査の人口データは 250 m メッシュ, 500 m メッシュの範囲におけるデータも存在するが、過去の Natech 事例から、Natech の発生に伴う影響は 500 m 以上に及ぶと考えられるため (北後, 2019), 本研究では 1 km メッシュを選択した。なお、各 1 km メッシュ内の PRTR 対象事業所の位置は、メッシュの中央に必ず存在するとは限らないため、人口を過小あるいは過大評価している可能性があることに注意が必要である。

経済指標については、経済センサスと農林業センサスの 2 つのデータを用いた。前者については、2016 年の経済センサスー活動調査の GIS データ(e-Stat 政府統計の総合窓口, 2022)から、PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュにおける全業種の事業所数と従業者数を収集した。後者については、2015 年の農林業センサスの GIS データ(e-Stat 政府統計の総合窓口, 2022)から、PRTR 対象事業所が位置する 1 km メッシュにおける農家数及び農業従事者数を収集した。

周辺施設については、浄水場や発電所などの社会インフラに関わる施設や人が多く集まる集客施設、教育施設、医療機関が挙げられるが(Cruz and Okada, 2008), これらの施設については経済センサスー活動調査に含まれている(総務省統計局, 2019)。また、上下水道や電力網, パイプライン等も脆弱性として挙げられるが、これらについては全国規模で入手することが困難である。そこで、本研究では災害時の対応施設のみを取り上げ、災害対策基本法に基づく避難施設に加え、Natech 発生時の消火活動等を含む初動対応や住民の避難誘導を実際に担うと考えられる消防署と警察署 (北後, 2019)を取り上げた (表 2-3)。これらのデータは、いずれも国土数値情報(国土交通省, 2012a, 2012b, 2012c)から入手した 2012 年度のデータであり、ポイントデータとして整理されているため、本研究では、PRTR 対象事業所の周囲 1 km のバッファーを作成し、以内に存在する避難施設数, 消防署数, 警察署数を収集した。

周辺の自然環境については、先行研究(Soto and Renard, 2015)において収集されている指標に加え、過去に発生している河川や海洋等への化学物質の流出 (Girgin, 2011; Krausmann and Salzano, 2017)を想定し、PRTR 対象事業所から 100 m 以内に該当する環境が存在する場合は 1、存在しない場合は 0 とした。河川については、国土数値情報(国土交通省, 2009)からラインデータ入手し、水源としての価値が高い 1 級・2 級河川とそれ以外の河川に分けてデータを整備した。海洋については、国土数値情報(国土交通省, 2006)から入手した海岸線のラインデータを用いて、100 m 以内に海洋が存在するかどうかの判断を行った。湖沼についても、国土数値情報 (国土交通省, 2005)から入手したポリゴンデータに基づき、100 m 以内に存在するかどうかの判断を行った。なお、自然保全地域に関するデータも国土数値情報(国土交通省, 2015a)から入手可能なため、河川や海洋と同様に整備を行ったが、事業所から 100 m 以内に存在しなかったため、今回の解析対象から除いた。また、農地については、国土数値情報(国土交通省, 2015b)から入手した農業地域（農用地として利用すべき土地があり、総合的に農地の振興を図る必要がある地域）のデータを用いたため、対象とする事業所が農業地域のポリゴン上に存在する可能性がある。そこで、本研究では農地に活用できる土地が Natech の発生により汚染される可能性を考慮し、農業地域のポリゴン上に事業所が存在する場合は 1、存在しない場合は 0 として、データを整備した。

2.5 クラスタ分析手法

本研究では、事業所の分類のためのクラスタ分析手法として、Self-Organizing Map (SOM) 法を適用した。SOM は Kohonen によって 1982 年に開発された脳の情報処理を模したモデルであり (Kohonen, 2013), 多次元のデータを低次元のマップ上に可視化できるという特徴から、クラスタ分析に用いられている。SOM の基本的なアルゴリズムは以下の通りである (藤野・吉田, 2006)。

前提条件として、入力データは k_i 個の変数を持ち、サンプル数は h_s とする。また、出力層として、 $m_l \times n_l$ 行列に配列されたノード（神経細胞）が存在し、それぞれのノードに参照ベクトルと呼ばれる、入力データと同じ次元を持つベクトルが存在すると仮定する。この条件の下で、入力データ x_d が与えられたとき、式(2-3)を用いて、入力データに最も一致する（ユークリッド距離が短い）出力層のノードが探索される。この時、入力データに最も一致する出力層のノードは「勝者ノード」と呼ばれる。次に、勝者ノードとその近傍にある参照ベクトルが、式(2-4)と式(2-5)を用いて、入力データの値に近づくように更新される。この計算手順を繰り返すことによって、出力層のノードは、入力データの値に近づき、多次元のデータが 2 次元上のマップに可視化される。

$$\|m_w - x_d\| = \min \|m_e - x_d\| \quad (2-3)$$

$$m_e := m_e + h_{ci}(x_d - m_e) \quad (2-4)$$

$$h_{ci} = \alpha_s \exp \left\{ -\frac{\|r_e - r_w\|^2}{2\sigma_c^2} \right\} \quad (2-5)$$

ここで、 m : ノードの参照ベクトル、 x_d : 入力ベクトル、 e : ノード番号、 w : 勝者ノード番号、 h_{ci} : 近傍関数、 α_s : 学習の強さ、 r_i : i 番目のノードの位置ベクトル、 σ_c : 近傍の広がりを決める定数、 $:=$ は更新を表す。

これらの SOM の特徴を踏まえ、本研究で SOM 法を用いた理由を以下に示す。

1. 本研究で解析対象とする PRTR 対象事業所は 1,000 件を超えているため、計算容量の観点から、階層的クラスター分析よりも非階層的クラスター分析を用いるのが望ましい(吉原・徳高, 2014; 高柳, 2014)。
2. 非階層的クラスター分析手法の 1 つである SOM 法は、分類結果と分類に用いた変数の分布を可視化することが可能であり、解析に用いたデータ及び各クラスターの特徴を視覚的に捉えることができる。
3. SOM 法はこれまでに林業地域の分類 (藤野・吉田, 2006)や地域分析 (李, 2009; 桐村, 2010)に用いられており、本研究と類似した研究として、自然災害のリスク評価に用いられている例 (Chen et al., 2019)も存在することから、本研究にも適用可能であると考えられる。

なお、本研究では、SOM 法のアルゴリズム(Kohonen, 2013)によって得られたマップに Ward 法を用いる独自のクラスタリング手法(Mindware Inc, 2022)を適用した (Viscovery SOMine Version 7.2 (Viscovery Software GmbH, 2018), マインドウェア総研)。本手法は、K-means 法の短所の 1 つであるクラスター数の決定を事前に行う必要がなく、初期値に依存しない、再現性のある結果が得られる (Kohonen, 2013)。また、Viscovery SOMine では分類や区別を意味する名義尺度の変数を扱うことができ、自動でクラスターの数を決定できる(Viscovery Software GmbH, 2018)。

表 2-4 に Viscovery SOMine Version 7.2 (Viscovery Software GmbH, 2018)を用いて解析を行う際に必要な設定事項と設定値を示す。

表 2-4 SOM の解析条件

設定事項	設定値
(1) ノード値	1000
(2) テンション	0.5
(3) 各パラメータの重要度	1
(4) スケーリング	分散
(5) トレーニングスケジュール	Accurate

(1) ノード数

ノード数は得られる SOM のアルゴリズムによって得られるマップの粒度（解像度）を表す。本研究ではデフォルト値である 1000 を用いた。

(2) テンション

テンションは SOM のアルゴリズム(Kohonen, 2013)における近傍の広がりを決める定数を表し、テンションが小さくなるほど、データの差異が大きく表現される。本研究ではデフォルト値である 0.5 を用いた。

(3) 各パラメータの重要度

重要度はマップの生成における各変数の影響度合いを表す。本研究では全ての変数について、同じ重要度を持つとし、1 を設定した。

(4) スケーリング

スケーリングとは単位の異なるデータを比較するために行う処理を表す。本研究では、各入力変数について平均を 0, 分散を 1 とする処理である「分散」を用いた。なお、自然環境に関するダミー変数についても他の変数と同様にスケーリングを実施した。

(5) トレーニングスケジュール

トレーニングスケジュールは、マップを作成する際のパラメータの選択に影響する設定項目であり、Viscovery SOMine Version 7.2 (Viscovery Software GmbH, 2018)では、Fast, Normal, Accurate の3つを選択することができる。本研究では、より詳細かつ精度の高いマップを得るために、Accurate を用いて解析を行った。

また、変数の設定として、事業所周辺の自然環境に関するデータ（表 2-3）は「存在する」、「存在しない」の区別を表しているため、名義尺度として扱った。さらに、データの中に外れ値が存在する場合は、SOM 法によって得られるマップが上手く形成されない可能性があるため（古川, 2017）、データの分布に関して前処理を行った。具体的には、本研究で算出した年間取扱量は平均が 1.4×10^8 、標準偏差が 5.0×10^9 、最大値と最小値の差が 1.8×10^{11} となり、分布が 0 付近に大きく偏ったため、データの分布を均等化させるために、Viscovery SOMine Version 7.2 上で以下の式(2-6)、(2-7)を用いた対数変換(Viscovery Software GmbH, 2018)を行った。

$$x_{som}' = \ln(x_{som} - offset) \quad (2-6)$$

$$offset = x_{min} - \frac{\bar{x} - x_{min}}{10^{s/\bar{x} - x_{min}}} \quad (2-7)$$

ここで、 x_{som}' ：対数変換後の値、 x_{som} ：対数変換前の値、 x_{min} ：データの最小値、 $\bar{x}$ ：データの平均値、 s ：データの標準偏差を表す。なお、式(2-6)において、 $offset$ は負の値の対数変換を可能にすることを目的として、対数変換前 (x_{som})の値から引かれる。また、式(2-7)中の $10^{s/\bar{x} - x_{min}}$ は数値的安定性を確保するために、 10^7 が最大値として設定される。

この対数変換は、ヒストグラムの小さな値に「解像度」を与えることを意味しており、本研究においては年間取扱量が比較的小さな事業所群における取扱量を踏まえた分類が可能になる。また、ダイオキシン類の年間取扱量についても同様の処理を行った。

2.6 SOM-Ward 法と K-means 法の比較

本研究では、SOM-Ward 法による分類を行ったが、クラスター分析の手法によっては、分類の結果が異なる可能性がある。そのため、本研究では、SOM 法と同じ非階層的クラスター分析の1つとして、一般的に用いられる K-means 法(李, 2009; 高柳, 2014)との比較を通じて、クラスター分析手法における不確実性を考察した。解析に用いたデータは 2.4.1 項と 2.4.2 項に示したハザードと脆弱性に関するデータである。また、データの前処理として、2.5 節に示した対数変換及び各入力変数の平均を 0、分散を 1 とする標準化を行った。

本研究では、IBM SPSS Statistics Version 28.0.1.0 (IBM Japan, Ltd.) を用いて、K-means 法によるクラスター分析を行った。なお、K-means 法によるクラスター分析では、事前にクラスターの数を決定する必要がある。本研究では、SOM-Ward 法と K-means 法の比較を行うため、SOM-Ward 法によって自動的に設定されたクラスターの数と同一の値を設定した。また、K-means 法では、扱うことが可能な変数が連続値に限定されているため (IBM Documentation, 2021)、自然環境に関する変数については、「存在する」を 1、「存在しない」を 0 とし、ダミー変数とした。

ここで、K-means 法によって得られたハザードと脆弱性に関するクラスターは、それぞれ K-means Hazard Cluster (KHC) 及び K-means Vulnerability Cluster (KVC) とした。

2.7 結果と考察

2.7.1 土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所の特定結果

2019 年度における全 PRTR 対象事業所 33,318 件中 (環境省, 2021a), 土砂災害警戒区域等に該当する PRTR 対象事業所は 1,306 件となった。そのうち, 建築物等の損壊が生じる可能性のある特別警戒区域に該当する事業所は 68 件となった (表 2-5)。現象区分では, 広範囲に影響を及ぼす土石流の警戒区域のみに該当する事業所が 729 件となり, 土砂災害警戒区域に該当する事業所の半数以上を占める結果となった (表 2-5)。また, 急傾斜地の崩壊かつ土石流などの複数の現象区分に該当する事業所も存在することから (表 2-5), これらの事業所では, 各現象区分に応じた複数の対策が求められると考えられる。なお, この結果は PRTR 対象事業所のポイントデータと土砂災害警戒区域等のポリゴンデータが重なるところを抽出した結果であるため, 事業所の敷地の一部分が土砂災害警戒区域等に該当するような場合はカウントできていない。よって, 実際には, 土砂災害に被災する可能性のある事業所は本研究の抽出結果よりも多く存在する可能性がある。加えて, 土砂災害警戒区域等の指定は年々更新されていくため, 現時点では土砂災害警戒区域等に該当しない事業所が将来的に警戒区域に該当する可能性があることにも留意されたい。

表 2-5 各区域区分及び現象区分に該当する PRTR 対象事業所数

		該当する事業所数
区域区分	土砂災害警戒区域のみ	1,238
	土砂災害警戒区域かつ特別警戒区域	68
現象区分	急傾斜地の崩壊	387
	土石流	729
	地滑り	63
	急傾斜地の崩壊かつ土石流	109
	土石流かつ地滑り	11
	急傾斜地の崩壊かつ地滑り	6
	全ての現象区分	1

2.7.2 ハザードに関するデータ整備の結果と事業所の分類結果

式(2-6)及び(2-7)による対数変換後の合計年間取扱量を図 2-3 に示す。

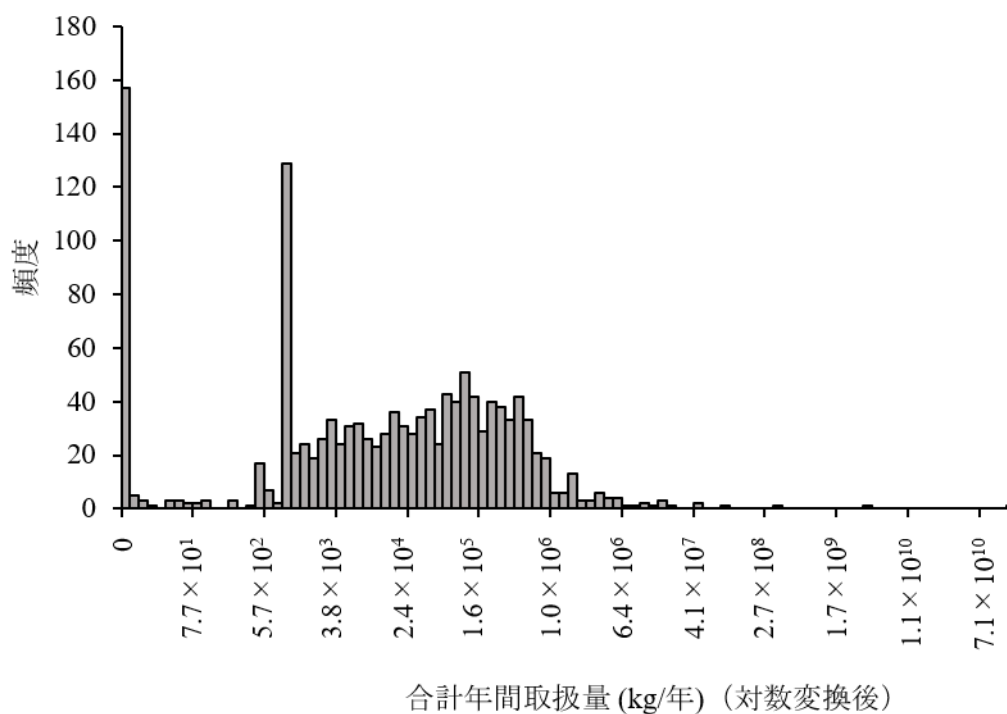


図 2-3 対数変換後の合計年間取扱量のヒストグラム

図 2-3 のヒストグラムにおいて、合計年間取扱量が 0 kg/年に近い事業所が約 160 事業所存在するが、これは特別要件施設に該当した事業所が含まれ、これらの施設に該当した事業所は算出した合計年間取扱量をそのまま用いたことが算出結果に反映されていると考えられる (図 2-2)。また、570 kg/年から 3,800 kg/年の間にも約 130 事業所が該当する区間が存在するが、これは図 2-2 の条件 2 に該当する事業所であり、合計年間取扱量の下限値を 1 t に設定したことが反映されている。

表 2-6 に、加算ケースにおけるハザードに関するデータの整備例を示す。

表 2-6 ハザードに関するデータの整備の一例 (加算ケース)

事業所整理番号	合計年間取扱量 (kg/年)	ダイオキシン類 取扱量 (mg-TEQ/年)	引火性液体 (-)	急性毒性 (経口) (-)	水生環境有害性 短期 (急性) (-)
E2001000-00125-00	5,500	0	1	2	2
E2001000-00128-00	110,000	0	18	2	15
E2001000-00230-00	3,200	0.7	22	67	77
E2001000-00276-00	2,900	0	1	2	2
E2001000-00294-00	520,000	0	22	60	73
E2001000-00434-00	920,000	0	22	60	73

表 2-6 に示すように、本研究では合計年間取扱量とダイオキシン類の取扱量を分けて整理している。また、引火性や急性毒性、水生環境有害性等の GHS 分類を用いたスコアは各事業所が扱っている化学物質の数と各化学物質の危険・有害性 (表 2-1) を反映している (2.4.1 項)。最大値ケースにおけるデータの整備例は補足資料 A-1 の表 A-1-2 に示す。

このように整備したデータを用いた事業所の分類の結果、1,306 事業所は 6 個のクラスターに分類された（図 2-4）。なお、図 2-4 の「HC」はそれぞれのクラスター名を示し、「HC」の後に続く数字は各クラスターを区別するために自動で設定される。暖色系の色は、各入力変数の値が大きいノードを表し、寒色系の色は各入力変数の値が小さいノードを表す。(a)の年間取扱量はダイオキシン類の年間取扱量を除いたものである。表 2-7 中の平均年間取扱量(a), (b)及び化学物質の性質に関するスコア(c)~(y)は全て対数変換前の値を示している。

HC1 に該当する PRTR 対象事業所数は最も多く、1 事業所当たりの平均年間取扱量は 9.3×10^6 kg/年であった（表 2-7）。HC1 の特徴は化学物質の性質に関するスコアが他のクラスターや全事業所の平均と比べて小さいことが挙げられ（図 2-4 (c)-(y), 表 2-7）、1 事業所当たりの平均年間取扱量は 2 番目に大きいことから（表 2-7）、扱っている物質が少ない事業所群であると考えられる。また、業種という観点からみると、HC1 に該当する PRTR 対象事業所は燃料小売業が 107 件で最も大きく、次いで石油製品・石炭製品製造業（44 件）、プラスチック製品製造業（37 件）、電気機械器具製造業（32 件）、金属製品製造業（30 件）、化学工業（29 件）などの製造業が主に該当した（図 2-5）。製造業は、各事業者が製造している製品によって、取り扱う化学物質が限定されることが分類結果に反映されたと考えられる。

HC2 の特徴は、可燃性ガスや引火性液体、急性毒性、発がん性、生殖毒性、水生環境有害性などの化学物質の性質に関するスコアが他のクラスターや全事業所の平均と比べて大きいことが挙げられる（図 2-4(c)-(i), (k)-(p), (r)-(u), (w)-(y), 表 2-7）。また、1 事業所当たりの平均年間取扱量は最も大きく、一部の事業所はダイオキシン類を取り扱っている（図 2-4(b), 表 2-7）。HC2 に該当する PRTR 対象事業所は、下水道業や一般廃棄物処理業、産業廃棄物処分業の事業所が合わせて 257 件となり、HC2 の事業所の大部分を占めた（図 2-5）。これらの業種に該当する PRTR 対象事業所の大部分は、特別要件施設に該当すると考えられ、これらの事業所は下水道法や廃棄物処理法、大気汚染防止法の測定対象となっている 30 物質とダイオキシン類の届出が求められている（経済産業省, 2023c）。したがって、HC1 に該当した製造業等と比べて、多くの化学物質の排出量の届出が行われているため、他のクラスターと比べて、化学物質の性質に関するスコアが特に大きくなったと考えられる。

HC3 の特徴は引火性液体と誤えん有毒性のスコアが他のクラスターや全事業所の平均と比べて相対的に大きいことが挙げられる（図 2-4 (i), (v), 表 2-7）。HC3 に該当する PRTR 対象事業所は、燃料小売業や石油卸売業が合わせて 432 件となり、HC3 に該当する全事業所の約 99%を占めた（図 2-5）。

HC4 に該当する PRTR 対象事業所の特徴はダイオキシン類の平均年間取扱量が他のクラスターや全事業所の平均と比べて大きいことが挙げられ（図 2-4 (b), 表 2-7）、一部の事業所はダイオキシン類のみを扱っていることが分かった（図 2-4 (a), (b)）。HC4 に該当する PRTR 対象事業所は一般廃棄物処理業（83 件）や産業廃棄物処理業（20 件）が約 80%を占め（図 2-5）、廃棄物の処理の過程でダイオキシン類が排出される事業所が該当したと考えられる。また、HC4 には自然科学研究所（6 件）や木材・木製品製造業（3 件）、パルプ・紙・紙加工品製造業（3 件）などが該当した。

HC5 の特徴は可燃性固体のスコアが他のクラスターや全事業所の平均と比べて大きかったため（図 2-4 (j), 表 2-7）、HC5 に含まれる PRTR 対象事業所は、可燃性固体を扱う窯業・土石製品製造業（5 件）や電気機械器具製造業（2 件）、武器製造業（1 件）などが該当した。

HC6 に該当する PRTR 対象事業所は 2 事業所のみであり、金属腐食性化学品を扱う事業所が該当し（図 2-4 (q), 表 2-7）、業種は化学工業のみであった。

これらのハザードによる分類結果から、各事業所の業種に依存する形で、扱う物質の種類や数の違い

を主な特徴量とした分類が行われたと考えられる。特に、HC1 に該当する製造業等のサプライチェーンの上流に位置する事業所や HC2, HC4 に該当する下水道業、一般廃棄物処理業等の下流に位置する事業所、HC3 に該当する燃料小売業などは、マップ上に扱うまたは処理している化学物質の物性ごとの違いが顕著に表れた（図 2-4）。一方、年間取扱量については、HC1 や HC2, HC3, HC5, HC6 に該当するマップ全体に分布しており、HC4 や HC1 に該当するマップの上部に年間取扱量が 0 の事業所が分布する傾向が見られる（図 2-4）。この結果から、年間取扱量を算出する際に考慮した特別要件施設の条件や年間取扱量の下限值の設定は少なからずマップの形成及び分類に影響を与えたと考えられる。

図 2-4 から、業種ごとに扱っている化学物質の種類が大きく異なることが確認されたが、業種によっては化学物質の取扱方法や事業所内の設備も大きく異なると考えられる。PRTR 制度で公開されている情報では、事業所の設備を考慮した分析は難しいが、業種による化学物質の取扱方法を整理することによって Natech の発生可能性までを考慮することが可能であると考えられる。

さらに、最大値ケースを採用した場合の分類結果との比較から、HC2 や HC3, HC4, HC5, HC6 に該当した事業所の大部分は、最大値ケースにおいてもそれぞれ HCmax 3, HCmax 2, HCmax 5, HCmax 8, HCmax 9 に該当する結果となり（補足資料 A-1 表 A-1-4）、それぞれのクラスターで抽出される特徴も一致する傾向が見られた（補足資料 A-1 表 A-1-3）。一方、最大値ケースでは、スコアに化学物質の取扱数が反映されないため、加算ケースで HC1 に該当した取扱数が少ない特徴を持つ事業所群は抽出できなかった。

なお、本研究は定性的な評価であるため、スコアの基準値等は存在せず、各クラスターどうしの比較のみが可能となる。一方、全てのクラスターにおいて、引火性液体や経口、経皮、蒸気の吸入曝露によるヒトへの急性毒性、また急性及び慢性の水生環境有害性のスコアが 0.33 以上であることから

（表 2-7）、少なくとも各クラスターに属する 1 事業所以上はこれらの性質を持つ物質を扱っていると解釈できる。よって、いずれのクラスターに属する事業所においても、化学物質が流出した場合、有毒物質の拡散や火災・爆発に伴うヒト健康、水生生物に対する影響が生じる可能性がある。

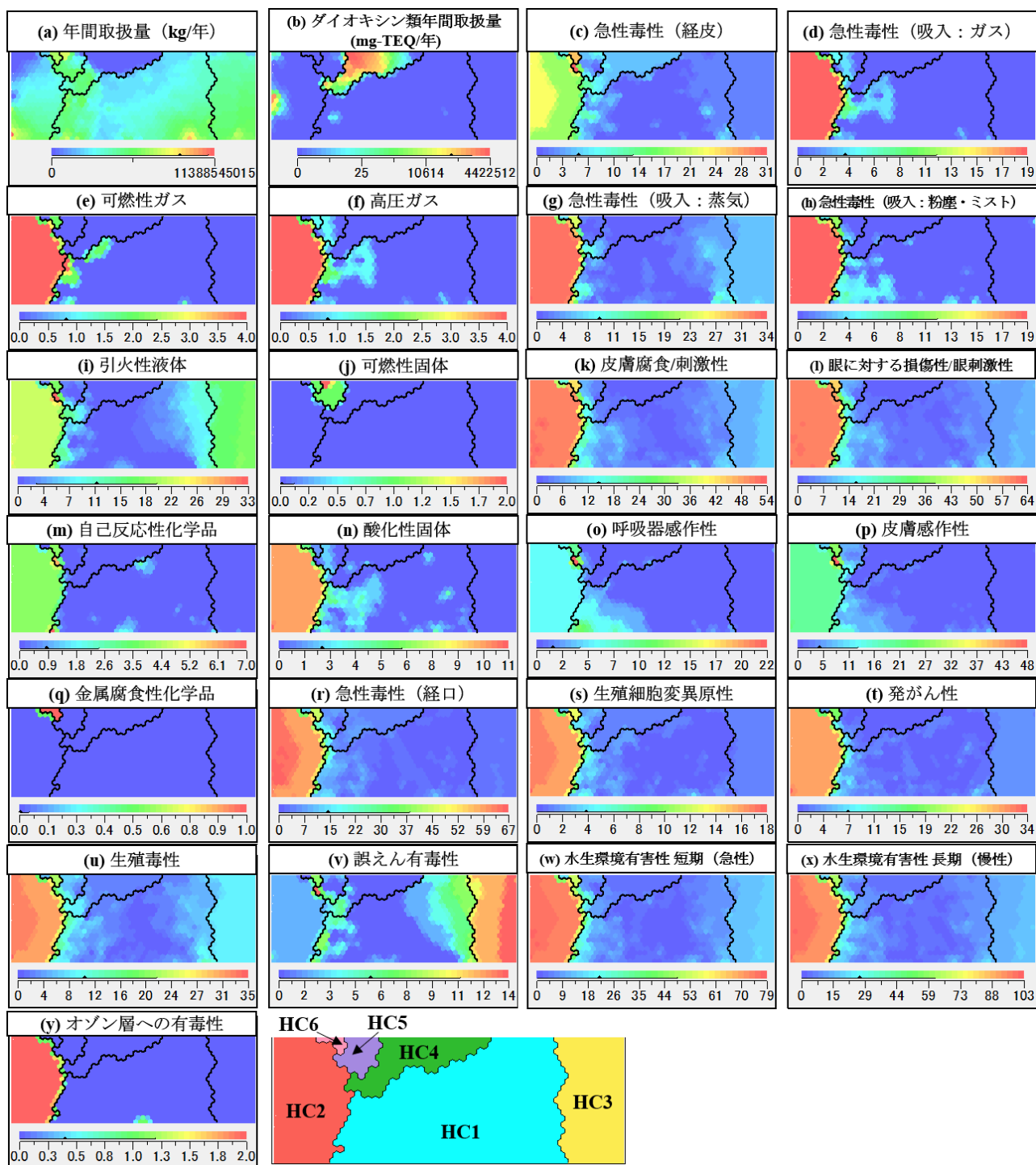


図 2-4 ハザードによる事業所の分類結果と各変数の分布

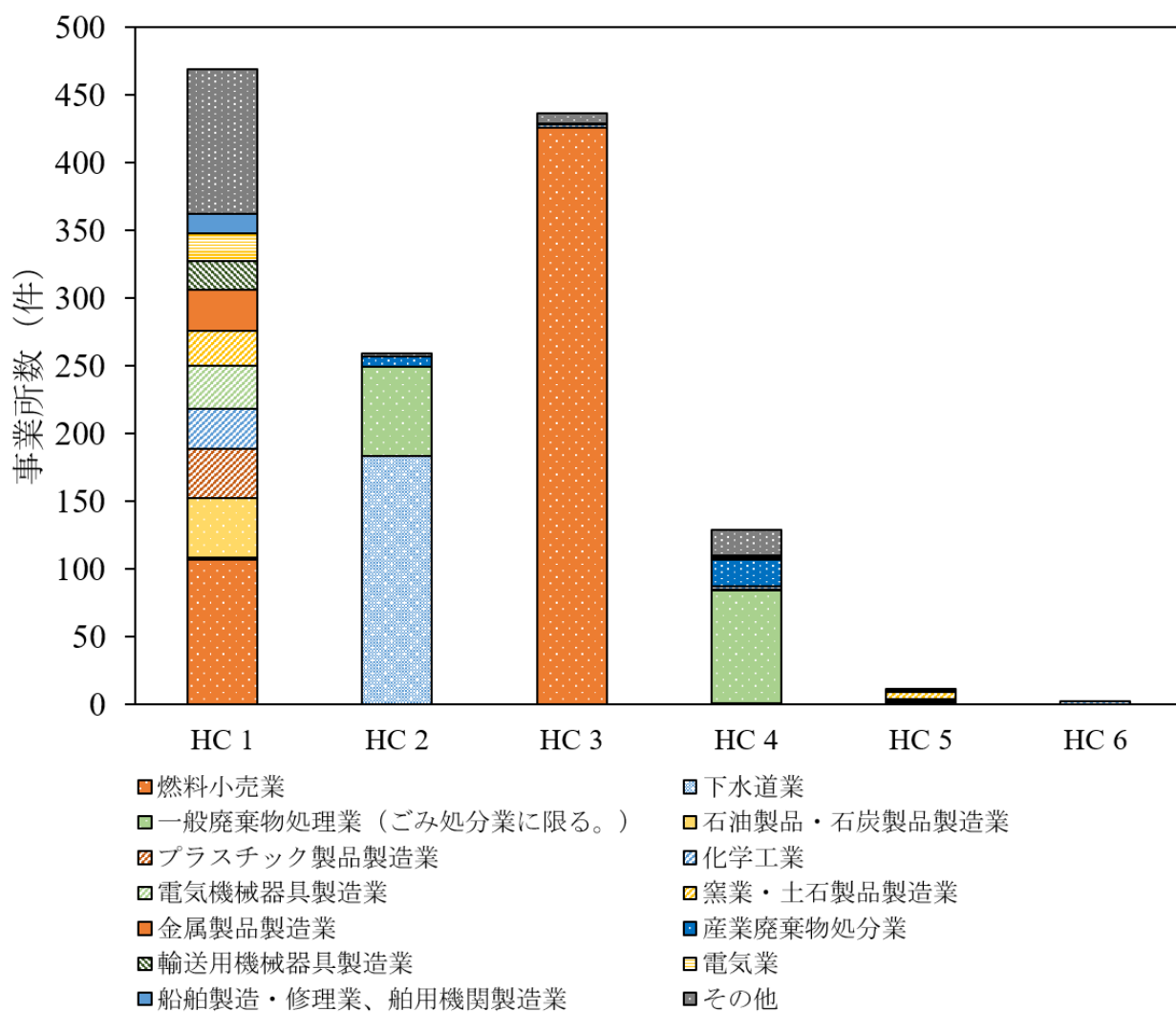


図 2-5 ハザードの分類により得られた各クラスターの業種の内訳

表 2-7 ハザードの分類における各クラスターの PRTR 対象事業所数と
取扱量及び化学物質の性質に関するスコアの平均値

() 内は単位を示す	全事業所	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5	HC6
PRTR 対象事業所数 (件)	1,306	469	259	436	129	11	2
(a) 平均年間取扱量 (10 ⁶ kg/年)	140	9.3	700	0.31	0.10	2.0	2.2
(b) ダイオキシン類平均 年間取扱量 (kg-TEQ/年)	0.11	0	0.046	0	1.0	0.0019	0
(c) 急性毒性 (経皮) (-)	5.6	1.2	20	2.0	5.2	7.0	17
(d) 急性毒性 (吸入：ガス) (-)	3.9	0.32	19	0	0.0	1.5	2.5
(e) 可燃性ガス (-)	0.82	0.077	4.0	0	0	0	1.0
(f) 高圧ガス (-)	0.83	0.085	4.0	0	0.0080	0.36	0.50
(g) 急性毒性 (吸入：蒸気) (-)	9.3	1.9	33	6.0	0.33	3.6	16
(h) 急性毒性 (吸入：粉塵、ミ スト) (-)	4.0	0.52	19	0	0.0	2.1	8.0
(i) 引火性液体 (-)	11	3.2	22	17	0.47	4.8	10
(j) 可燃性固体 (-)	0.010	0	0	0	0	1.1	0.50
(k) 皮膚腐食性／刺激性 (-)	14	3.2	51	8.9	0.43	9.7	30
(l) 眼に対する重篤な損傷性／ 眼刺激性 (-)	16	3.6	60	8.5	0.50	12	34
(m) 自己反応性化学品 (-)	0.83	0.081	4.0	0.0020	0.0080	0.64	2.0
(n) 酸化性固体 (-)	2.1	0.40	10	0	0.050	0.73	3.0
(o) 呼吸器感作性 (-)	1.5	0.71	6.0	0.0	0.070	2.5	7.5
(p) 皮膚感作性 (-)	4.5	1.1	20	0.0	0.14	9.6	18
(q) 金属腐食性化学品 (-)	0.0015	0	0	0	0	0	1.0
(r) 急性毒性 (経口) (-)	14	1.7	62	2.1	5.3	7.7	29
(s) 生殖細胞変異原性 (-)	3.9	0.46	16	1.0	1.1	2.1	8.0
(t) 発がん性 (-)	7.3	0.87	30	3.0	0.15	1.9	11
(u) 生殖毒性 (-)	10	2.6	32	7.9	2.3	6.6	14
(v) 誤えん有害性 (-)	5.6	2.3	2.0	13	0.23	2.6	4.0
(w) 水生環境有害性 短期 (急性) (-)	21	4.6	74	14	3.5	12	34
(x) 水生環境有害性 長期 (慢性) (-)	27	5.8	95	15	4.7	15	42
(y) オゾン層への有害性 (-)	0.40	0	2.0	0	0	0	0

2.7.3 周辺地域の脆弱性に関するデータ整備の結果と分類結果

周辺地域の脆弱性に関するデータの整備例を表 2-8 に示す。

表 2-8 周辺地域の脆弱性に関するデータ整備の一例

事業所整理番号	人口 (人)	従業員数 (人)	農業従事者数 (人)	避難施設数 (箇所)	1 級・2 級 河川 (-)	農地 (-)
E2001000-00125-00	894	233	0	2	0	1
E2001000-00128-00	2404	1083	0	26	0	0
E2001000-00230-00	1	0	0	0	0	1
E2001000-00276-00	0	23	0	2	0	0
E2001000-00294-00	9	3	0	1	0	1
E2002000-00033-00	1506	658	23	5	0	1

表 2-8 に示す通り，人口や従業員数，農業従事者数，避難施設数等は数値として整備し，1 級・2 級河川や農地については「存在する」を 1，「存在しない」を 0 としたダミー変数として整備した。

このように整備したデータを用いた事業所の分類の結果，1,306 事業所は 7 個のクラスターに分類された (図 2-6)。なお，図 2-6 の「VC」はそれぞれのクラスター名を示し，「VC」の後に続く数字はそれぞれのクラスターを区別するために自動で設定される。暖色系の色は，各入力変数の値が大きいノードを表し，寒色系の色は各入力変数の値が小さいノードを表す。自然環境を表す変数 (g)-(k) については，名義尺度において 1 (存在する) と設定した変数マップのみを示している。

VC1 に該当する PRTR 対象事業所数は最も多く，農地が周辺に存在するという特徴が読み取れる (図 2-6, 表 2-9)。また，VC1 は全年齢人口や従業者数が他のクラスターと比べて 2 番目に小さいが，総農家数や農業従事者数が最も大きいことから (表 2-9)，地方の農村部に立地する PRTR 対象事業所が該当していると考えられる。PRTR 対象事業所の業種は，燃料小売業が 176 件と最も多く，次いで一般廃棄物処理業 (74 件) や下水道業 (50 件)，石油製品・石炭製品製造業 (22 件)，プラスチック製品製造業 (19 件) など，様々な業種が該当した (図 2-7)。

VC2 の特徴は河川や海洋，湖沼が周辺に存在しないことが挙げられる (図 2-6 (g), (h), (j), (k), 表 2-9)。一方，全年齢人口や従業者数は全クラスターの中で 2 番目に大きい (表 2-9)。VC2 に該当する PRTR 対象事業所の業種は，燃料小売業が 81 件と最も多く，次いで一般廃棄物処理業 (34 件) や下水道業 (13 件)，化学工業 (11 件)，電気機械器具製造業 (11 件) など，VC1 と同様に様々な業種が該当した (図 2-7)。

VC3 の特徴は周辺に 1 級・2 級河川が存在し，全年齢人口が最も小さいことが挙げられる (図 2-6 (g), 表 2-9)。また，VC3 に該当する半数以上の事業所では，周辺に農地も存在し (図 2-6 (i))，総農家数や農業従事者数は全クラスターの中で 2 番目に大きい (表 2-9)。VC3 に該当する PRTR 対象事業所は，燃料小売業が 123 件と約 40% を占め，次いで下水道業 (78 件) や一般廃棄物処理業 (16 件) などが該当する結果となった (図 2-7)。

VC4 の特徴は周辺に 1 級・2 級河川以外の小規模な河川が存在することが挙げられる (図 2-6 (h), 表 2-9)。また，半数以上の事業所では周辺に農地が存在している (図 2-6 (i))。VC4 に該当する PRTR 対象事業所は，燃料小売業が 46 件と最も多く，次いで下水道業 (18 件) や一般廃棄物処理業 (15 件)，石油製品・石炭製品製造業 (6 件)，プラスチック製品製造業 (6 件) など，様々な業種が該当した (図 2-7)。

VC5 の特徴は周辺に海洋が存在することが挙げられる (図 2-6 (j), 表 2-9)。VC5 に該当する PRTR 対象事業所は、燃料小売業が 36 件、下水道業が 24 件と合わせて約 60%を占めるが、船舶製造・修理業、船用機関製造業 (12 件) などの臨海部に立地すると考えられる業種も該当した (図 2-7)。

VC6 の特徴は周辺の全年齢人口や事業所数、従業者数が全クラスターの中で最も大きいことが挙げられる (図 2-6 (a)-(c), (l), (m), 表 2-9)。また、避難施設数や警察署数はマップ全体にばらついているものの (図 2-6 (d), (f)), VC6 では最も大きく (表 2-9), 他のクラスターと比べて、人口が密集している市街地に立地する PRTR 対象事業所が該当したと考えられる。VC6 に該当する PRTR 対象事業所は、燃料小売業が 66 件となり、約 80%を占める結果となった (図 2-7)。

VC7 の特徴は周辺に湖沼が存在することが挙げられる (図 2-6 (k), 表 2-9)。VC7 に該当する PRTR 対象事業所は全て燃料小売業の事業所であった (図 2-7)。

以上の脆弱性による分類の結果、全てのクラスターにおいて、燃料小売業や下水道業、廃棄物処理業などの割合が大きくなった。燃料小売業はガソリンスタンド等の燃料を供給する事業所が大半を占めると考えられ、どのような地域においても、燃料を供給する施設は存在することから、全てのクラスターにおいて、燃料小売業の割合が大きくなったと考えられる。一方、VC5 に該当する PRTR 対象事業所のうち、船舶製造・修理業に属する事業所は 12 件該当したことから、周辺地域の環境と業種との関連性も少なからず確認された。本研究では、解析対象の事業所として、土砂災害に被災する可能性のある事業所に限定したため、上記のような分類結果が得られたと考えられるが、災害を限定せずに本研究のような分類を行うことで、地域的な特徴と業種との関連性をより詳細に分析することが可能である。

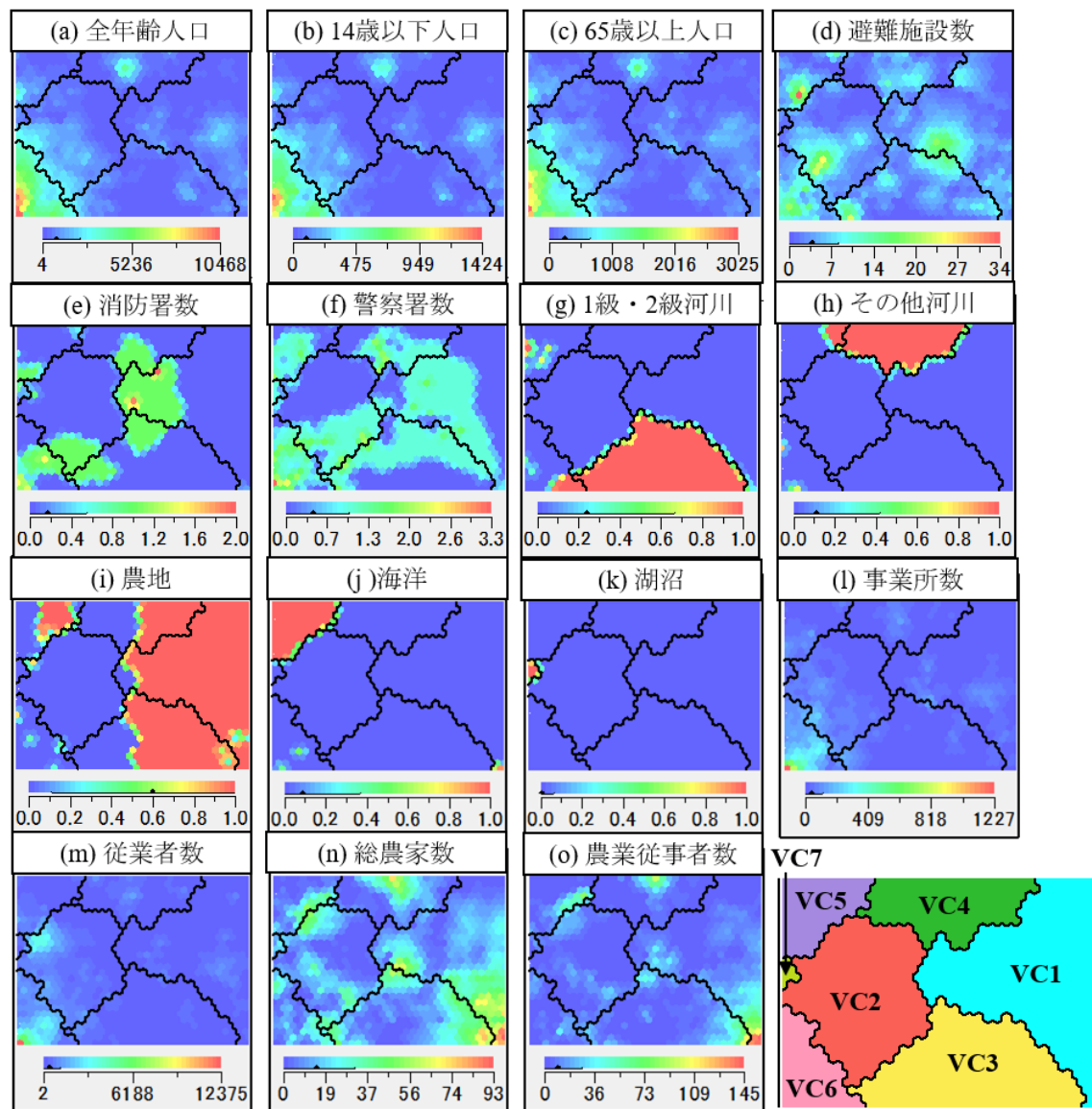


図 2-6 脆弱性による事業所の分類結果と各変数の分布

表 2-9 脆弱性の分類における各クラスターの PRTR 対象事業所数と各変数の平均値

() 内は単位を示す	VC 1	VC 2	VC 3	VC 4	VC 5	VC 6	VC 7
PRTR 対象事業所数 (件)	462	237	282	129	107	84	5
(a) 全年齢人口 (人)	383	850	370	538	508	5051	826
(b) 14 歳以下人口 (人)	46	104	40	66	54	650	100
(c) 65 歳以上人口 (人)	129	255	131	163	183	1418	247
(d) 避難施設数 (箇所)	3.0	3.9	3.5	2.9	4.2	7.5	2.2
(e) 消防署数 (箇所)	0.14	0.14	0.15	0.16	0.10	0.48	0.60
(f) 警察署数 (箇所)	0.35	0.39	0.42	0.38	0.49	1.0	0.80
(g) 1 級・2 級河川 (-)	0.0020	0	1	0	0.093	0.21	0
(h) その他河川 (-)	0	0	0	1	0.084	0.048	0
(i) 農地 (-)	0.98	0.0040	0.76	0.54	0.35	0.060	0
(j) 海洋 (-)	0.0090	0	0	0	1	0.024	0
(k) 湖沼 (-)	0	0	0	0	0	0	1
(l) 事業所数 (事業所)	21	43	22	23	31	214	53
(m) 従業者数 (人)	197	586	166	246	287	1940	463
(n) 総農家数 (戸)	18	9.5	17	13	6.9	13	13
(o) 農業従事者数 (人)	12.8	4.4	10.5	8	5.6	5.9	5.2

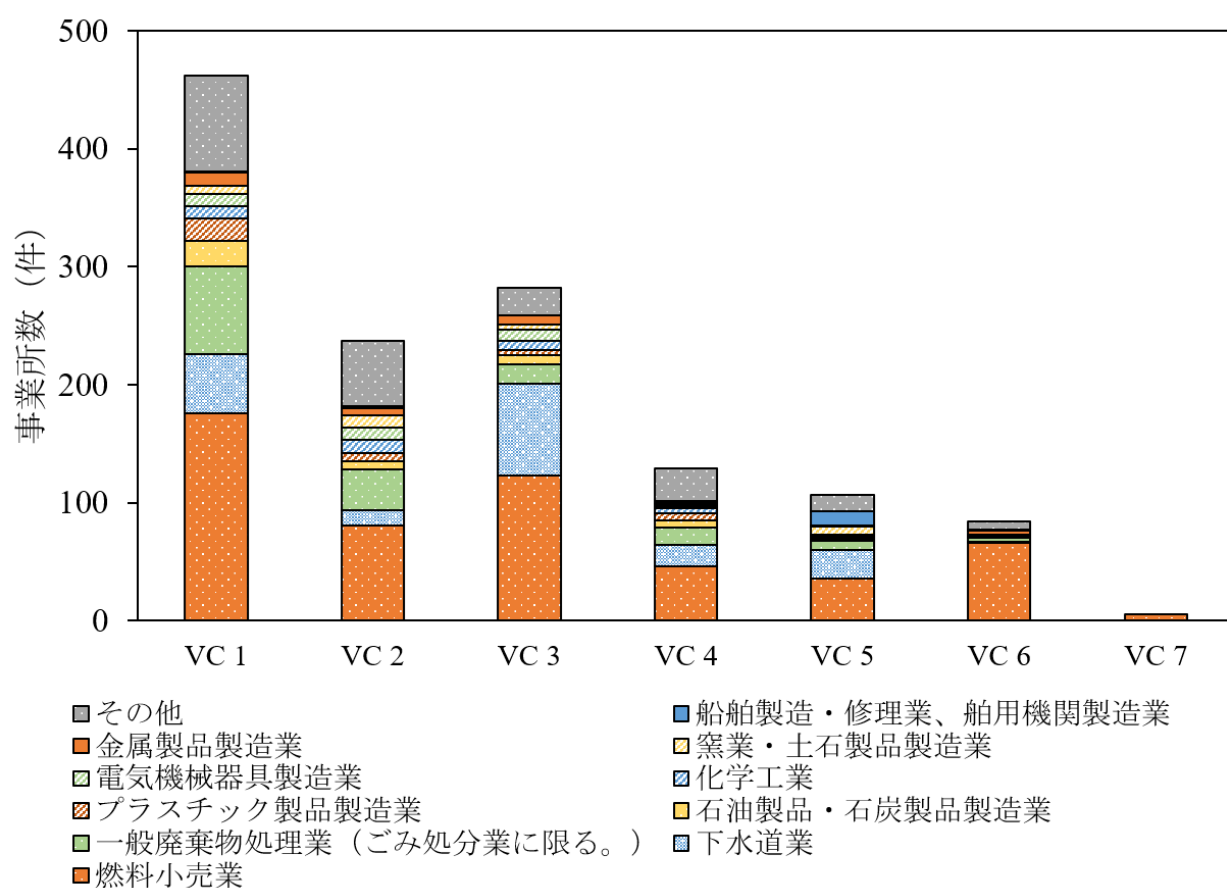


図 2-7 脆弱性の分類により得られた各クラスターの業種の内訳

2.7.4 SOM-Ward 法と K-means 法の比較結果

SOM-Ward 法および K-means 法によって得られたハザードと脆弱性による分類結果の比較表を表 2-10 と表 2-11 に示す。

表 2-10 ハザードの分類における SOM-Ward 法と K-means 法の比較

		K-means 法						合計
		KHC1	KHC2	KHC3	KHC4	KHC5	KHC6	
SOM-Ward 法	HC1	0	0	0	0	0	469	469
	HC2	0	0	0	0	259	0	259
	HC3	0	0	0	0	0	436	436
	HC4	0	0	0	0	0	129	129
	HC5	10	0	0	1	0	0	11
	HC6	0	1	1	0	0	0	2
	合計	10	1	1	1	259	1034	1306

SOM-Ward 法により、HC2 に分類された事業所は、K-means 法においては全て KHC5 に該当した（表 2-10）。これは化学物質の性質に関するスコアが特に大きいという特徴がどちらの手法によっても抽出されたことを意味している。一方、SOM-Ward 法による分類によって、HC1、HC3、HC4 に該当した事業所は、K-means 法による分類では全て KHC6 に該当していた（表 2-10）。この結果から、K-means 法ではダイオキシン類の平均年間取扱量が大きいという特徴や誤えん有毒性のスコアが大きいという特徴は抽出されなかったと考えられる。対照的に、SOM-Ward 法によって、HC5 や HC6 に該当した事業所は、K-means 法では KHC1、KHC2、KHC3、KHC4 に分類された（表 2-10）。ここには、SOM-Ward 法では分類されなかった金属腐食性化学品かつ可燃性固体を扱う事業所が含まれており、K-means 法による分類では分析に用いたデータの中でも特に特徴的な要素を持つ事業所が抽出されたと考えられる。

表 2-11 脆弱性の分類における SOM-Ward 法と K-means 法の比較

		K-means 法							合計
		KVC1	KVC2	KVC3	KVC4	KVC5	KVC6	KVC7	
SOM-Ward 法	VC1	65	0	0	73	0	324	0	462
	VC2	90	0	0	8	0	134	5	237
	VC3	62	0	0	50	0	168	2	282
	VC4	19	0	0	12	0	93	5	129
	VC5	37	0	0	6	0	62	2	107
	VC6	3	1	14	0	0	0	66	84
	VC7	0	0	0	0	5	0	0	5
	合計	276	1	14	149	5	781	80	1306

周辺地域の脆弱性による分類の場合は、SOM-Ward 法において VC7 に該当した事業所が、K-means 法では KVC5 に分類された（表 2-11）。一方、SOM-Ward 法の分類において、VC7 以外のクラスターに該当した事業所は、K-means 法による分類では複数のクラスターに分類された（表 2-11）。この結果は、

自然環境に関する変数がダミー変数として扱われたことが 1 つの要因であると考えられる。また、K-means 法による分類では、KVC2 に 1 事業所のみが該当するなど（表 2-11）、ハザードによる分類結果と同様に、他の事業所にはない特徴的な要素を基に、事業所の分類が行われた。

このように、K-means 法と SOM-Ward 法による分類結果は大きく異なることが分かった。また、K-means 法は SOM-Ward 法と比べて、より特徴的な要素が抽出されやすく、1 つのクラスターに 1 事業所のみが該当し、大部分の事業所が同じクラスターに分類されるといった特徴が見られた。この結果は、SOM-Ward 法と K-means 法の比較を行った調査区の分類に関する先行研究の結果(李, 2009)とも整合的である。

Natech のリスクを把握するうえで、各事業所の特徴的な要素を考慮することは重要であると考えられるが、全国規模で事業所の分類を行う場合は、個々の事業所の特徴的な要素に着目しすぎると、全体的な事業所の特徴の把握が困難になる可能性がある。その点、SOM-Ward 法によって得られた分類結果は K-means 法と比べて、クラスター内のケース数が等個数となるようなクラスターを作る傾向がある Ward 法の特徴(高柳, 2014)が反映されている。加えて、SOM-Ward 法を用いることで、各クラスターの特徴を視覚的に捉えることが可能であるという点を考慮すると、本研究のような事業所の特徴から Natech リスクを把握する場合においては、SOM-Ward 法はより有用な手段であると考えられる。一方、K-means 法はより特徴的な事業所を抽出することが可能であるため、SOM-Ward 法と組み合わせることによって、同じような特徴を持つ事業所の中で、より特徴的な事業所を見つけることが可能になる。

2.7.5 SOM-Ward 法によって得られたハザードと脆弱性による分類結果の統合

表 2-12 に、SOM-Ward 法によって得られたハザードと脆弱性による分類結果のマトリックスを示す。

表 2-12 ハザードと脆弱性による分類の統合結果

	HC1 : 燃料小売業 ・製造業	HC2 : 下水・廃棄 物処理業	HC3 : 燃料 小売業	HC4 : 廃棄物 処理業	HC5 : 窯業・土石製 品製造業	HC6 : 化学工業	合計
VC1 : 農地	168 (9)	87 (5)	137 (10)	66 (2)	4 (0)	0 (0)	462 (26)
VC2 : 自然環境 が存在しない	108 (3)	25 (0)	70 (0)	31 (1)	3 (0)	0 (0)	237 (4)
VC3 : 1 級・2 級河川	84 (6)	85 (4)	97 (5)	13 (1)	1 (0)	2 (0)	282 (16)
VC4 : その他河川	50 (4)	30 (2)	39 (1)	10 (2)	0 (0)	0 (0)	129 (9)
VC5 : 海洋	40 (2)	30 (2)	29 (3)	5 (3)	3 (0)	0 (0)	107 (10)
VC6 : 人口・ 従業者が多い	17 (1)	2 (0)	61 (1)	4 (0)	0 (0)	0 (0)	84 (2)
VC7 : 湖沼	2 (0)	0 (0)	3 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (1)
合計	469 (25)	259 (13)	436 (21)	129 (9)	11 (0)	2 (0)	1306 (68)

*各クラスター名の後に、クラスター分析によって得られた代表的な業種、周辺環境の特徴を示している (2.7.2, 2.7.3 項参照)。また、()内の数値は土砂災害特別警戒区域に該当する事業所を表す。

ハザードと脆弱性の組み合わせが存在しない場合を除くと、1,306 事業所は 31 グループに分類されることが分かった（表 2-12）。また、該当する PRTR 対象事業所が最も多くなった組み合わせは HC1 と VC1 の組み合わせであった（表 2-12）。HC1 は扱っている物質数は少ないものの（2.7.2 項）、燃料小売業や各種製造業が該当したクラスターであり、VC1 は周辺に農地が存在するクラスターである。よって、この組み合わせに該当する PRTR 対象事業所において、化学物質が流出した場合、火災・爆発に伴う農作物に対する被害や農業地域の汚染の発生が懸念される。加えて、VC1 は他のクラスターと比べて、農家数や農業従事者数が大きいため、農地の汚染等による経済的損失の発生も懸念される。

VC2 は周辺に河川や海洋などの自然環境がほとんど存在しないため、HC1, HC2, HC3, HC4, HC5 との組み合わせに該当する PRTR 対象事業所では、化学物質の流出や火災・爆発による周辺の施設に対する物理的な被害やそれに伴う人的被害の発生が特に懸念されると考えられる。

VC3 は全てのハザードによる分類結果との組み合わせが生じる結果となった（表 2-12）。表 2-7 から、HC1 から HC6 の全てのクラスターにおいて、水生環境有害性のスコアは 3.5 以上であり、かつ VC3 は周辺に 1 級・2 級河川が存在するため、これらの組み合わせにおける PRTR 対象事業所では、河川に化学物質が流出することによる生態系リスクが特に懸念されると考えられる。さらに、VC3 は周辺に農地が存在する PRTR 対象事業所も該当しているため（図 2-6）、河川への化学物質の流出と農地の汚染という複合的なシナリオの発生も懸念される。

同様に、VC4 においても河川に化学物質が流出することによる生態系リスクが懸念されるが、VC3 との違いとして、HC5 や HC6 との組み合わせが生じず、HC1 との組み合わせに該当する事業所が最も大きくなった（表 2-12）。

VC5 との組み合わせの結果、HC1 から HC5 までの組み合わせが生じ、特に HC1, HC2, HC3 との組み合わせに該当する PRTR 対象事業所が大きくなった（表 2-12）。HC1 から HC3 は引火性液体のスコアが 3.2 以上であるため、化学物質が海洋に流出した場合、海上火災の発生が懸念される。また、VC3 や VC4 と同様に、化学物質が流出した場合の生態系リスクも懸念される。

VC6 は周辺の人口や事業所数、従業者数が他のクラスターと比べて最も大きく（表 2-9）、ハザードによる分類結果と組み合わせると、HC3 に該当する PRTR 対象事業所数が最も多くなった（表 2-12）。HC3 と VC6 の組み合わせに該当する PRTR 対象事業所は全て燃料小売業の事業所であり、HC3 は引火性液体のスコアが特に大きいことから、該当する事業所は燃料用のガソリンや灯油等を販売するガソリンスタンドが主に該当したと考えられる。よって、ガソリンスタンドの設備に加え、給油中の車から化学物質が流出する可能性があり、それに伴う火災や爆発が懸念される。また、VC6 は周辺の人口が特に大きいため、他のクラスターと比べて、火災・爆発による被害が特に大きくなると考えられる。さらに、VC6 は経済的な指標である事業所数や従業者数が最も多く、火災・爆発の発生による生産停滞等に伴う経済に対する影響も懸念される。

VC7 に該当した PRTR 対象事業所は全て燃料小売業の事業所であった。VC7 は周辺に湖沼が存在する PRTR 対象事業所が該当しており、湖沼の周辺には宿泊施設が見受けられるところもあるため、火災・爆発に伴う周辺住民に対する被害に加えて、避難経路などの土地勘の少ない観光客に対する被害も懸念される。また、VC3 や VC4 と同様に、湖沼へ化学物質が流出することによる生態系リスクも同時に懸念される。

表 2-12 に示した土砂災害特別警戒区域に該当する事業所についても、全体の事業所と同様に、VC1 に該当する事業所が最も多く、VC1 と HC3, HC1 の組み合わせに該当する事業所数が特に多くなった。土砂災害特別警戒区域に該当する建築物は構造規制等の対策が実施されていると考えられるが（国土交

通省, 2021), 警戒区域よりも土砂災害の危険性が高いため, まずはこのような区域に該当する事業所から, 各グループにおいて特に懸念されるリスクの評価及び対策の構築, 点検等を実施する必要があると考えられる。このように分類によって得られたハザードと周辺地域の脆弱性の特徴を組み合わせることによって, 各事業所で懸念される Natech リスクを抽出することが可能であると考えられる。

2.7.6 Natech リスクの抽出結果のマップ化

2.7.5 項で示した分類結果の統合による Natech リスクの抽出結果を基に, 土砂災害警戒区域等に該当する事業所の位置を懸念されるリスク及び該当する警戒区域ごとに, 全国規模で地図上に表示することが可能となる (図 2-8 - 図 2-13)。地図上に事業所を表示するに当たって, VC3, VC4, VC5, VC7 に該当する 523 事業所は周辺に河川や海洋などの水域が存在するという共通点があるため, これらのクラスターに該当する PRTR 対象事業所は総じて生態系リスクが懸念されると判断した。また, VC1 に該当する 462 事業所は周辺に農地が存在するため, 農地の汚染等のリスク, VC2 は周辺に河川や海洋等の自然環境が存在せず, VC6 は周辺の人口が特に大きいため, VC2 と VC6 に該当する 321 事業所はヒト健康リスクが懸念されると判断した。これらのリスクの抽出結果を踏まえ, 都道府県ごとに各リスクが懸念される事業所数を表 2-13 に示す。

北海道における土砂災害特別警戒区域に該当する事業所数は 31 件であり (表 2-13), 各事業所は北海道西側の沿岸部に集中していることが分かった (図 2-8)。特に, ヒト健康リスクが懸念される事業所は, 県庁所在地である札幌市付近に集中していた。また, 土砂災害特別警戒区域に該当する事業所の中で, ヒト健康リスクが懸念される事業所は 1 件, 生態系リスクが懸念される事業所は 2 件存在していた。

東北地方は 1 都道府県当たりの土砂災害警戒区域に該当する事業所が他の地域と比べて最も少なく (表 2-13), 北海道とは対照的に内陸部に複数の事業所が存在していることが分かった (図 2-9)。ヒト健康リスクが懸念される事業所は合計 21 件であるのに対して, 農地の汚染等のリスクや生態系リスクが懸念される事業所はそれぞれ合計 36, 31 件存在していた (表 2-13)。また, ヒト健康リスクが懸念される事業所は仙台市や山形市付近に分布していることが分かった (図 2-9)。

関東地方の中で, 神奈川県は土砂災害警戒区域に該当する事業所数が最も多くなっており, ヒト健康リスクが懸念される事業所数は 6 割を占めた (表 2-13)。図 2-10 から, 特に三浦半島付近でヒト健康リスクが懸念される事業所が集中していることが分かる。また, 東京都は関東地方の中で, 土砂災害警戒区域に該当する事業所が 2 番目に大きく, ヒト健康リスクが懸念される事業所はおよそ 6 割を占めていた (表 2-13)。対照的に, 群馬県は関東地方の中で, 3 番目に土砂災害警戒区域に該当する事業所が多いものの, ヒト健康リスクが懸念される事業所は 1 事業所のみであり, 大半が農地の汚染等のリスクが懸念される事業所であった (表 2-13)。

中部地方は 1 都道府県当たりの土砂災害警戒区域に該当する事業所数が 2 番目に多く, 特に長野県は全国で最多の 118 事業所が該当した (表 2-13)。これは長野県の土砂災害警戒区域の指定数が全国で 4 番目に大きいことが起因していると考えられる (国土交通省, 2023b)。また, 長野県に該当する事業所は, 北から南に線上に分布しており (図 2-10), 山脈に囲まれた盆地に多くの事業所が立地していると考えられる。岐阜県は全国で 3 番目に土砂災害警戒区域に該当する事業所数が多く, 84 件の事業所が該当した (表 2-13)。岐阜県に該当する事業所は広い範囲に散らばっており (図 2-10), ヒト健康リスクが懸念される事業所数は全国で最も多い 26 件が該当した (表 2-13)。静岡県に該当する事業所は, 沿岸部沿い, 愛知県に該当する事業所は山地沿いに広く分布していた (図 2-10)。

近畿地方では, 兵庫県の土砂災害警戒区域に該当する事業所が最も多く, 70 事業所が特定された (表

2-13)。兵庫県に該当する事業所は内陸，沿岸部ともに広く分布していた (図 2-10)。一方，大阪府に該当する事業所は，和歌山県や奈良県の県境，北部に分布しており (図 2-10)，ヒト健康リスクが懸念される事業所が 6 割を占めた (表 2-13)。京都府に該当する事業所は日本海側の沿岸部，三重県と和歌山県に該当する事業所は太平洋側の沿岸部に集中して分布していた (図 2-10)。

中国地方で特に土砂災害警戒区域に該当する事業所数が多い県は広島県であり，全国で 2 番目に多い 90 事業所が該当した (表 2-13)。広島県は全国で最も土砂災害警戒区域の指定が進んでいることがこの結果に反映されていると考えられる (国土交通省, 2023b)。また，広島県は土砂災害特別警戒区域に該当する事業所が 6 件存在し，全国で最多となったことから (表 2-13)，優先的な調査が必要であると考えられる。広島県におけるヒト健康リスクが懸念される事業所は特に広島市周辺に分布していた (図 2-11)。一方，島根県では，ヒト健康リスクが懸念される事業所は 0 件となり，農地の汚染や生態系リスクが懸念される事業所のみが存在していた (表 2-13)。

四国地方で最も土砂災害警戒区域に該当する事業所が大きい県は愛媛県であり，48 事業所が該当した (表 2-13)。愛媛県では生態系リスクが懸念される事業所が約 67%を占め (表 2-13)，特に沿岸部に集中して分布していた (図 2-11)。高知県は農地の汚染リスクが懸念される事業所がおよそ 7 割を占め (表 2-13)，県全体に広く分布していた (図 2-11)。

九州地方では，長崎県の土砂災害警戒区域に該当する事業所が最も大きく，49 事業所が該当し，そのうち 19 事業所でヒト健康リスクが懸念されることが分かった (表 2-13)。福岡県では，ヒト健康リスクが懸念される事業所が約 6 割を占め (表 2-13)，特に福岡市や北九州市周辺に分布していた (図 2-11)。

さらに，他の地域と比べて該当する事業所が少ないものの，図 2-12 や図 2-13 のように，東京都や沖縄県の島嶼部においても土砂災害警戒区域に該当する事業所が存在することが分かった。また，東京都の島嶼部や沖縄県ではそれぞれヒト健康リスク，農地の汚染等のリスクが特に懸念される事業所が該当していた (図 2-12, 図 2-13)。

総じて，ヒト健康リスクが懸念される事業所は各都道府県の県庁所在地等の人口が大きい市町村に分布していると考えられる。また，土砂災害警戒区域に該当する事業所が多い都道府県は，他の都道府県と比べて，土砂災害警戒区域の指定が進んでいる傾向がみられた。これは土砂災害警戒区域上に存在する事業所数が少ないからといって，土砂災害に被災する可能性のある事業所が少ないとは限らないことを示唆している。実際，土砂災害警戒区域は年々更新されていくため，現在は土砂災害警戒区域に該当しない事業所も将来的には警戒区域に該当する可能性がある。また，土砂災害警戒区域は基本的に人が住む地域を対象として指定されるため，土砂災害に被災する可能性のある事業所は本研究で特定した事業所以外にも存在する可能性がある。本研究は定性的なリスクの抽出にとどまっているため，定量的なリスクの比較はできないが，このようなマップを作成することによって，各都道府県において優先的な調査が必要なエリアや事業所の把握に繋がると考えられる。

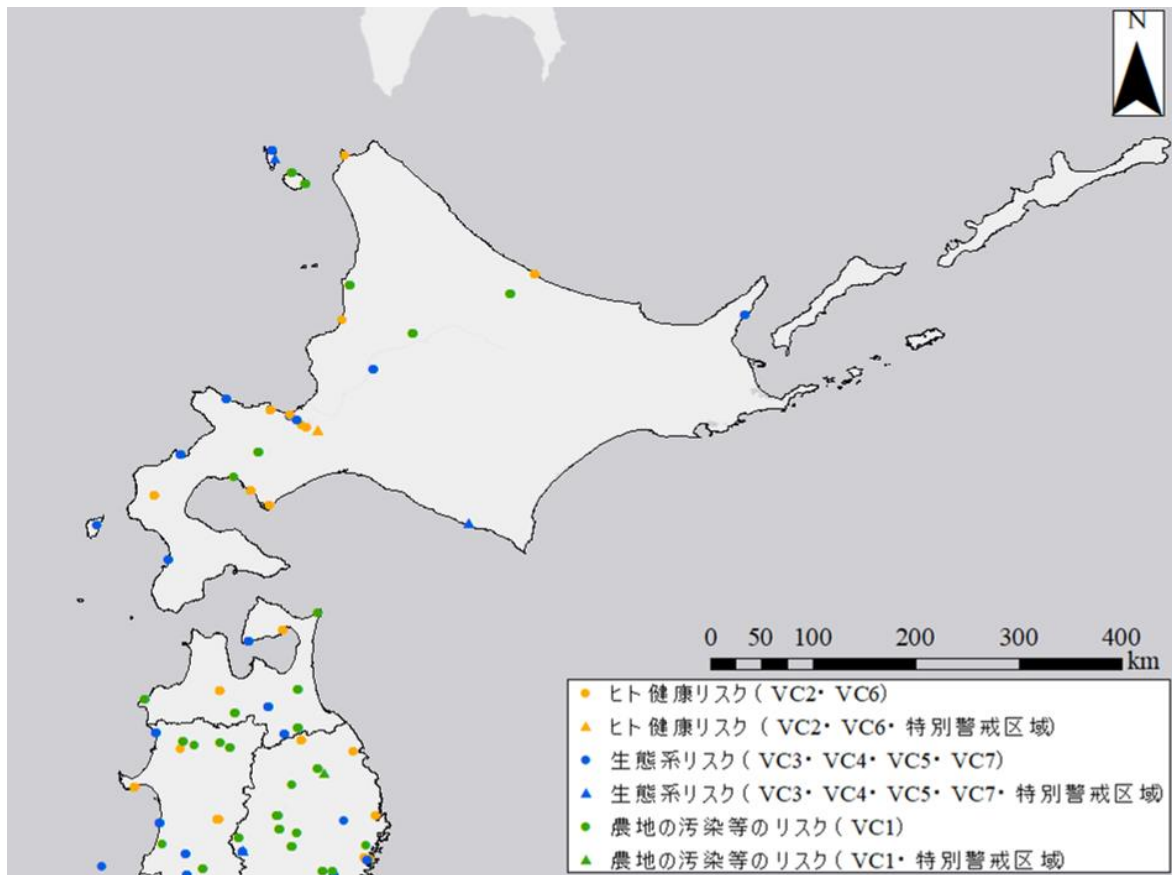


図 2-8 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（北海道）

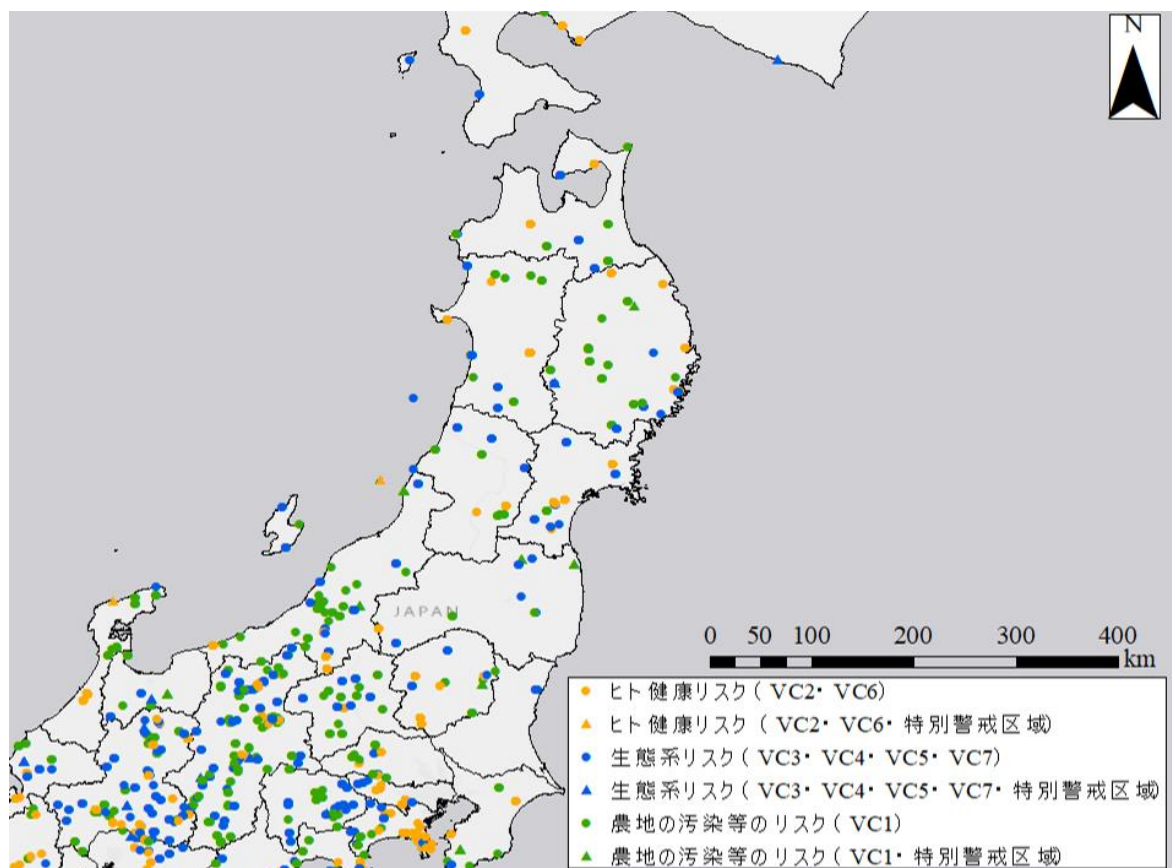


図 2-9 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（東北地方）

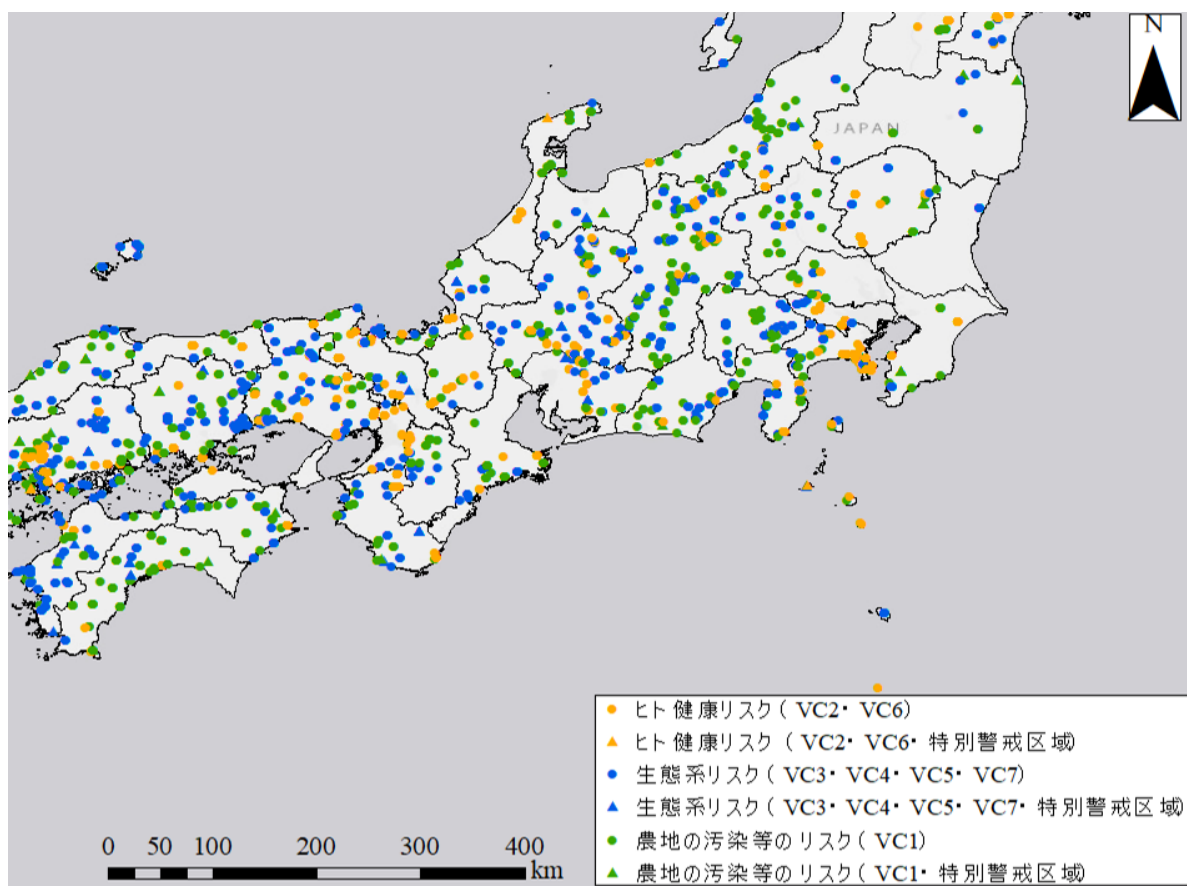


図 2-10 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（関東・中部・近畿地方）

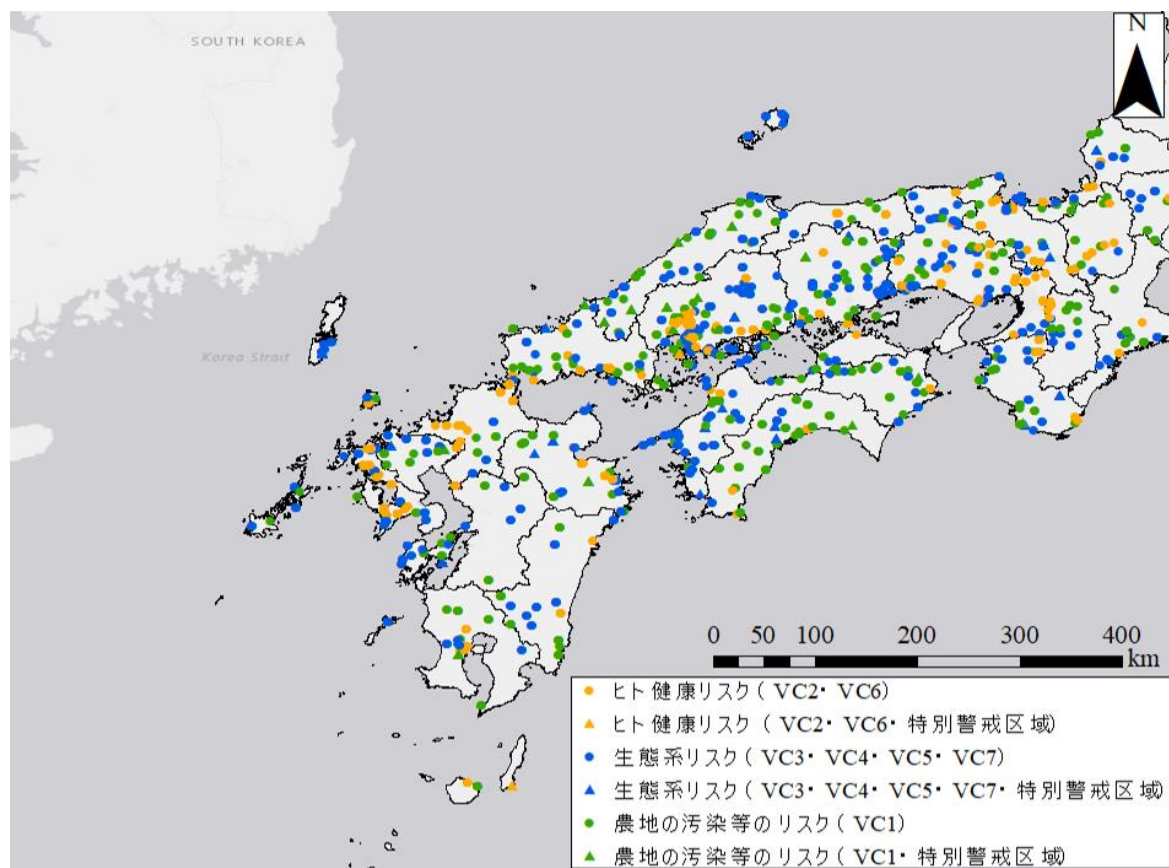


図 2-11 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ（中国・四国・九州地方）

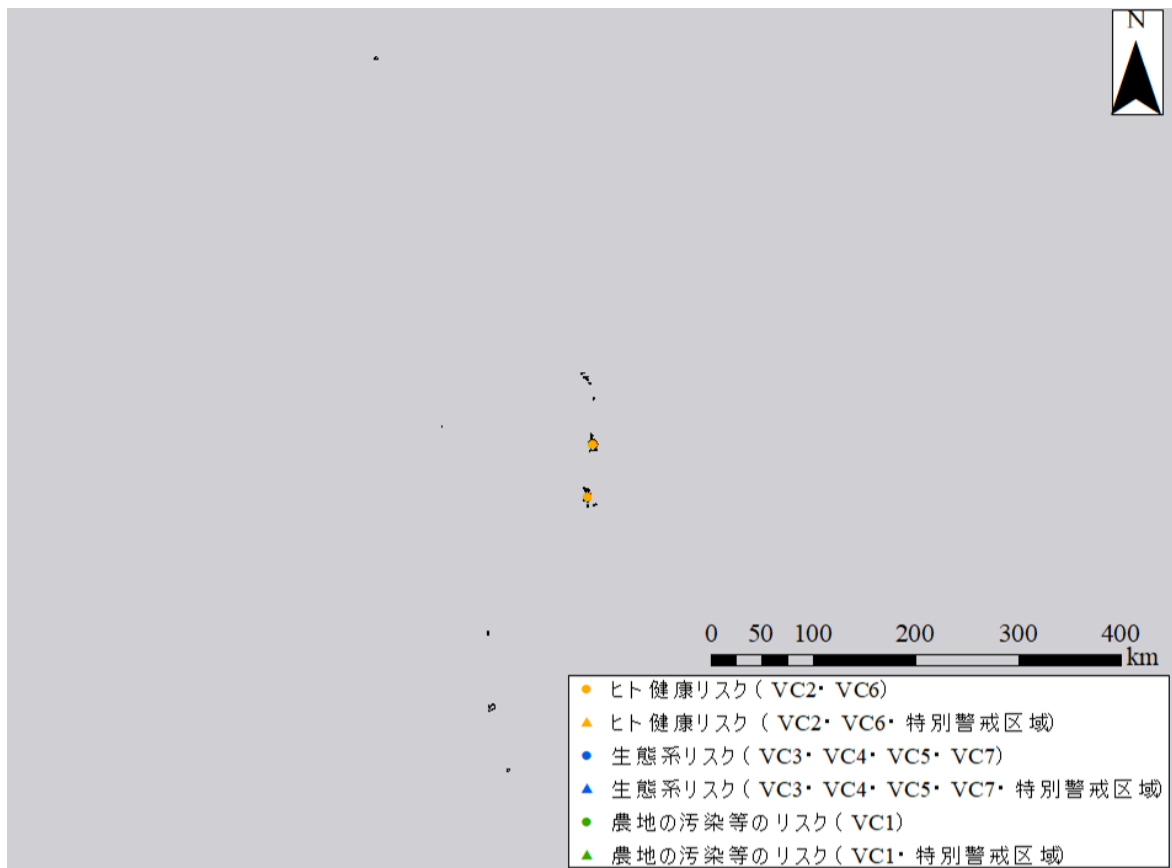


図 2-12 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ (東京都・島嶼部)

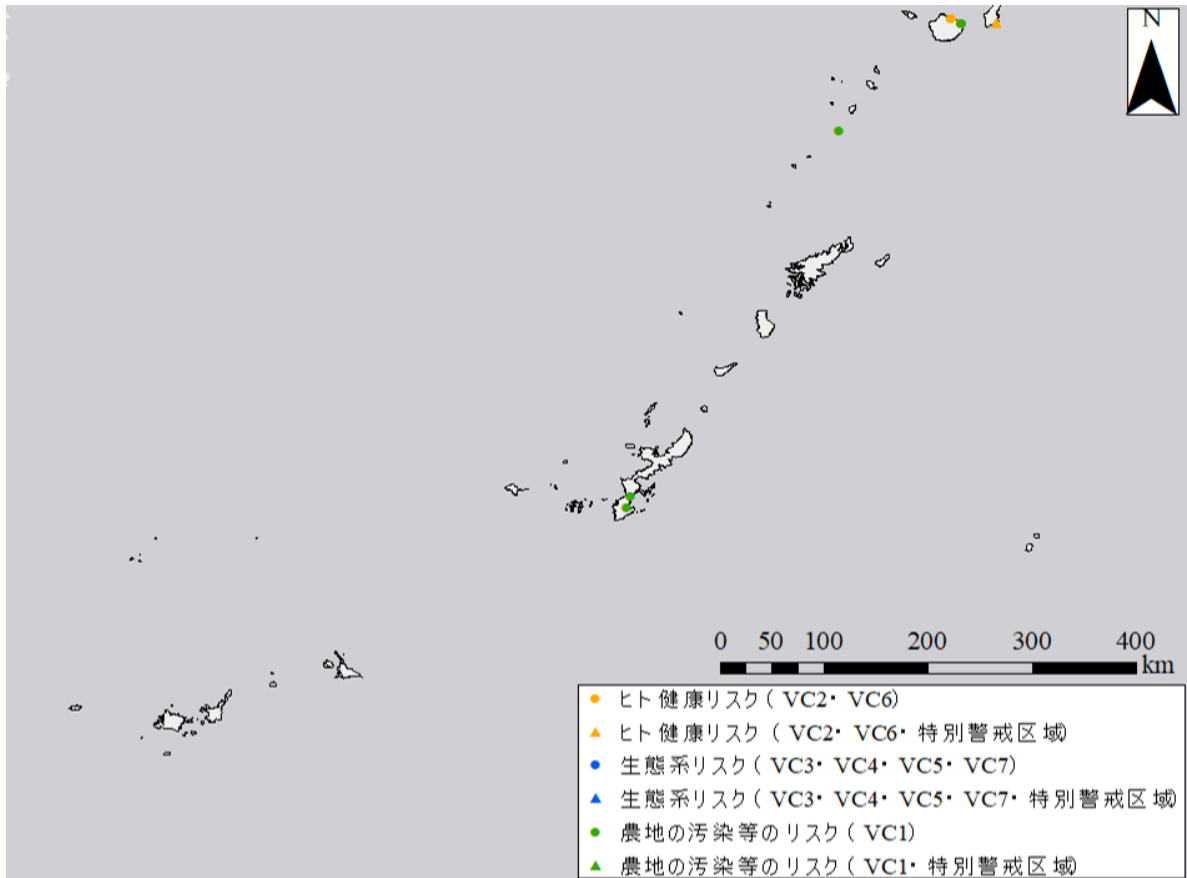


図 2-13 土砂災害警戒区域に該当する PRTR 対象事業所の分類マップ (沖縄・奄美諸島)

表 2-13 都道府県ごとに整理した各リスクが懸念される事業所数

都道府県	土砂災害警戒 区域上の PRTR 事業所数	土砂災害警戒区域に該当			土砂災害特別警戒区域に該当		
		ヒト健康 リスク	生態系 リスク	農地の汚染 リスク	ヒト健康 リスク	生態系 リスク	農地の汚染 リスク
北海道	31	10	10	8	1	2	0
青森県	11	2	4	5	0	0	0
岩手県	27	6	6	13	0	1	1
宮城県	13	6	6	1	0	0	0
秋田県	15	4	4	7	0	0	0
山形県	13	3	5	5	0	0	0
福島県	9	0	5	2	0	0	2
茨城県	6	0	5	1	0	0	0
栃木県	13	6	3	3	0	0	1
群馬県	17	1	6	10	0	0	0
埼玉県	11	3	2	6	0	0	0
千葉県	8	2	1	4	0	0	1
東京都	21	12	5	2	1	1	0
神奈川県	35	21	9	5	0	0	0
新潟県	42	5	12	22	1	0	2
富山県	7	0	2	3	0	1	1
石川県	12	3	1	7	1	0	0
福井県	18	4	6	7	0	1	0
山梨県	26	1	12	12	0	1	0
長野県	118	18	41	57	0	2	0
岐阜県	84	26	40	16	0	2	0
静岡県	49	8	21	18	0	0	2
愛知県	19	6	6	5	0	2	0
三重県	15	3	6	6	0	0	0
滋賀県	15	8	2	5	0	0	0
京都府	27	11	8	5	0	3	0
大阪府	10	6	4	0	0	0	0
兵庫県	70	23	32	15	0	0	0
奈良県	19	6	6	7	0	0	0
和歌山県	29	6	10	10	0	2	1
鳥取県	10	3	4	3	0	0	0
島根県	43	0	21	18	0	0	4
岡山県	51	7	27	15	0	1	1
広島県	90	24	37	23	1	2	3
山口県	41	12	9	18	0	1	1

表 2-13 都道府県ごとに整理した各リスクが懸念される事業所数（つづき）

都道府県	土砂災害警戒 区域上の PRTR 事業所数	土砂災害警戒区域に該当			土砂災害特別警戒区域に該当		
		ヒト健康 リスク	生態系 リスク	農地の汚染 リスク	ヒト健康 リスク	生態系 リスク	農地の汚染 リスク
徳島県	24	2	8	13	0	0	1
香川県	7	1	3	3	0	0	0
愛媛県	48	2	29	14	0	3	0
高知県	28	3	3	18	0	2	2
福岡県	22	14	5	3	0	0	0
佐賀県	15	2	5	6	0	1	1
長崎県	49	19	23	5	0	2	0
熊本県	19	0	10	7	0	2	0
大分県	27	6	9	8	0	3	1
宮崎県	15	2	7	6	0	0	0
鹿児島県	25	8	7	7	1	1	1
沖縄県	2	0	0	2	0	0	0
合計	1306	315	487	436	6	36	26

*右から 2 列目の値は、各都道府県の土砂災害警戒区域上に存在する PRTR 事業所数を表し、右から 3 列目以降の数値の合計値となっている。

2.8 結言

本章では、土砂災害に被災する可能性のある PRTR 対象事業所を特定するとともに、ハザードと周辺地域の脆弱性を指標とした事業所の分類によって、各事業所において相対的に懸念される Natech リスクの把握を試みた。

土砂災害警戒区域等に該当する事業所は 1,306 件となり、そのうち 68 件が土砂災害特別警戒区域に該当することが確認された。また、広範囲に影響を及ぼす土石流の危険性がある区域に半数以上を占める 729 件の事業所が該当することが分かった。これまでの土地利用規制には、財産権との調整の難しさ等から一定の限界が存在すると考えられるため、既に土砂災害の危険性のある区域に立地する事業所においては、事故の発生を防ぐための予防策や事故が発生した場合の影響を低減するための緩和策を導入することが重要である。

年間取扱量と GHS を用いたハザードによる分類の結果、業種ごとに扱っている化学物質の数や種類が大きく異なることが確認され、特に燃料小売業や下水道業・廃棄物処理業などは、扱っている化学物質の物性ごとの違いが顕著に表れた。また、ハザードによる分類によって得られた 6 クラスター全てにおいて、化学物質が流出した場合、有毒物質の拡散や火災・爆発によるヒト健康、水生生物に対する影響が懸念されることが分かった。周辺地域の脆弱性による分類では、周辺の人口・事業所数や農地、河川、海洋、湖沼などの自然環境に関する変数が主な特徴量となり、7 個のクラスターが得られた。その内、周辺に農地が存在するという特徴を持ったクラスター（VC1）に該当する PRTR 対象事業所が最も多くなり、1,306 件中 462 件が該当した。

これらのハザードと周辺地域の脆弱性による分類結果を組み合わせることによって、全国の土砂災害に被災する可能性のある 1,306 事業所は 31 個のグループに分類された。また、組み合わせの結果から、最も該当する事業所が多いグループは、周辺に農地が存在する燃料小売業や製造業であり、168 事業所が該当した（HC1 と VC1 の組み合わせ）。また、人口が特に大きいグループに該当する事業所は、ほとんどがガソリンスタンド等の燃料小売業の事業所であった（HC3 と VC6 の組み合わせ）。これらの分類結果を用いることで、各事業所において懸念される Natech リスクを定性的に把握することができた。特に河川や海洋、湖沼などが周辺に存在するクラスター（VC3・VC4・VC5・VC7）に該当する 523 事業所では生態系リスク、農地が周辺に存在するクラスター（VC1）に該当する 462 事業所では農地の汚染等のリスクが懸念される。加えて、周辺に河川や海洋等の自然環境が存在しないクラスター（VC2）や周辺人口が大きいクラスター（VC6）に該当する 321 事業所では、特にヒト健康リスクが懸念される。さらに、これらの定性的な判断を基に Natech が発生する可能性のある事業所を懸念されるリスク及び警戒区域ごとに、地図上に表示することが可能となった。土砂災害警戒区域に該当する事業所数は長野県や広島県など、土砂災害警戒区域の指定が進んでいる県で特に多いことが分かった。また、ヒト健康リスクが懸念される事業所は各都道府県の県庁所在地等の人口が大きい市町村に分布していた。このマップを用いることで、各都道府県にどのようなリスクが懸念される事業所が存在するのかを網羅的に把握することが可能になるとともに、優先的に調査すべき事業所の特定にも繋がると考えられる。

参考文献

- Chen, N., Chen, L., Ma, Y., Chen, A., 2019. Regional disaster risk assessment of china based on self-organizing map: Clustering, visualization and ranking. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 33, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.005>
- Cruz, A.M., Okada, N., 2008. Methodology for preliminary assessment of Natech risk in urban areas. *Natural Hazards*. 46, 199–220. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9207-1>
- Girgin, S., 2011. The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Science*. 11, 1129–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- Girgin, S., Necci, A., Krausmann, E., 2019. Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 35. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101072>
- IBM Documentation, 2021. Choosing a Procedure for Clustering. https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=SSLVMB_28.0.0/spss/base/cluster_choosing.html (accessed 16 June 2023).
- Kohonen, T., 2013. Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*. 37, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.018>
- Krausmann, E., Salzano, E., 2017. Natech Risk Management and Assessment Chapter 3 Lessons Learned From Natech Events. Elsevier, Netherlands.
- Nakamura, J., Azuma, N., Kameya, T., Kobayashi, T., Urano, K., 2008. Analysis of the toxicity-weighted release amount ranking of PRTR chemicals in Japan. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 43, 452–459. <https://doi.org/10.1080/10934520701796226>
- Soto, D., Renard, F., 2015. New prospects for the spatialisation of technological risks by combining hazard and the vulnerability of assets. *Natural Hazards*. 79, 1531–1548. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1912-6>
- Török, Z., Ozunu, A., Radovici, A., Maloş, C., Calapod, A., Senzaconi, F., 2021. Natech hazard identification at national level for seveso sites affected by floods and earthquakes. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*. 66, 255–264. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2021.2.22>
- United Nations, 2021. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) Ninth revised edition.
- Viscovery Software GmbH, 2018. Viscovery® SOMine User's Manual.
- e-Stat 政府統計の総合窓口, 2022. 統計 GIS データダウンロード. <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?type=1> (accessed 8 March 2022).
- GHS 関係省庁連絡会議, 2021. GHS 文書 改訂第 9 版 (2021 年) の仮訳 本編. https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/int/files/ghs/ghs_text_9th/GHS_rev9_jp_document.pdf (accessed 22 July 2023).
- Mindware Inc, 2022. SOM-Ward クラスタリング. <http://www.mindware-jp.com/basic/clustering3.html> (accessed 4 January 2022).
- エコケミストリー研究会, 環境資源システム総合研究所, 2022. 環境管理参考濃度と毒性重み付け係数総括表. <http://www.ecochemi.jp/PRTR2020/area/00000-000-006.pdf> (accessed 23 July 2023).
- 大阪府立環境農林水産総合研究所, 2022. 地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所. <http://www.kannousuiken-osaka.or.jp/> (accessed 26 March 2022).

環境省, 2003a. 平成 13 年度の集計結果の概要.

https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo_H13/kekagaiyou.pdf (accessed 14 July 2023).

環境省, 2003b. ダイオキシン類 (関係省庁共通パンフレット) .

<http://www.env.go.jp/air/dioxin/2003pamph.pdf> (accessed 10 January 2022).

環境省, 2021a. 令和元年度排出量・移動量の集計結果の概要.

https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo_R01/2_summary.pdf (accessed 15 June 2023).

環境省, 2021b. 令和元年度 PRTR データの概要 ～化学物質の排出量・移動量の集計結果～集計表 1. 全国の届出排出量・移動量. https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo_R01/5_shukeihyo_1.pdf (accessed 10 January 2022).

環境省, 2021c. 化学物質の環境リスク初期評価関連. <http://www.env.go.jp/chemi/risk/> (accessed 13 January 2022).

桐村喬, 2010. 自己組織化マップ (SOM) を利用した神戸市既成市街地における阪神・淡路大震災前後の居住者特性の変化に関する研究—時空間データの類型化と可視化—. 地理学評論, 83, 151–175.

経済産業省, 2023a. PRTR 制度. https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/index.html (accessed 23 May 2023).

経済産業省, 2023b. PRTR 制度 対象事業者.

https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/3.html (accessed 15 June 2023).

経済産業省, 2023c. PRTR 排出量等算出マニュアル (PDF 版) (令和 5 年 3 月版) 第III部資料編 2.Q&A. https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/pdf/r5_haishutsu_sanshutsu_manual/3-2.pdf (accessed 4 September 2023).

国土交通省, 2005. 国土数値情報 | 湖沼データ. https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W09-v2_2.html (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2006. 国土数値情報 | 海岸線データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-C23.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2009. 国土数値情報 | 河川データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2012a. 国土数値情報 | 警察署データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P18.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2012b. 国土数値情報 | 避難施設データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P20.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2012c. 国土数値情報 | 消防署データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P17.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2015a. 国土数値情報 | 自然保全地域データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A11.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2015b. 国土数値情報 | 農業地域データ. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A12.html> (accessed 20 May 2022).

国土交通省, 2021. 土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について.

<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf> (accessed 8 June 2023).

国土交通省, 2022. 国土数値情報 | 土砂災害警戒区域データ.

https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1_4.html (accessed 18 May 2022).

- 国土交通省, 2023a. 下水道における化学物質排出量の把握と化学物質管理計画の策定等に関するガイドライン（案）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001602734.pdf> (accessed 4 September 2023).
- 国土交通省, 2023b. 全国における土砂災害警戒区域等の指定状況（R5.3.31 時点）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/content/001612299.pdf> (accessed 16 July 2022).
- 消防庁, 2020. 資料 3-2 危険物施設の風水害対策のあり方に関する検討報告書（令和元年度・中間まとめ）（概要）. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-44/03/shiryoku3-2.pdf (accessed 28 June 2023).
- 消防庁, 2023. 令和 4 年版 消防白書 第 1 章 災害の現況と課題 第 3 節 石油コンビナート災害対策. <https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r4/65826.html> (accessed 23 May 2023).
- 総務省, 2022. 石油コンビナート等災害防止法. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=350AC0000000084> (accessed 23 May 2023).
- 総務省統計局, 2019. 平成 28 年経済センサス-活動調査 産業分類一覧. <https://www.stat.go.jp/data/e-census/2016/kekka/bunrui.html> (accessed 8 March 2022).
- 高梨ルミ, 亀屋隆志, 小林剛, 糸山景子, 浦野紘平, 2005. 人の健康保護を考えた自主管理のための環境管理参考濃度の提案とPRTR対象物質への適用. 環境科学会誌. 18, 71–83.
- 高柳良太, 2014. SAS Enterprise Guide 多変量解析編. SAS Institute Japan.
- 田和佑脩, 矢吹芳教, 野呂和嗣, 田澤慧, 水谷聡, 杉浦隆介, 中村智, 2021. PRTR データを活用した化学物質取扱量の推計. リスク学研究. 30, 177–185.
- 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2021. NITE-CHRIP（化学物質総合情報提供システム）. https://www.nite.go.jp/chem/chrp/chrp_search/systemTop (accessed 13 January 2022).
- 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022a. PRTR マップデータのダウンロード. https://www.nite.go.jp/chem/prtr/map_data/PRTRmapdata.html (accessed 15 June 2023).
- 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022b. NITE 統合版 GHS 分類結果. https://www.nite.go.jp/chem/ghs/ghs_nite_download.html (accessed 3 January 2022).
- 中村智, 田和佑脩, 矢吹芳教, 2019. 緊急の災害・事故に備えた大阪府の化学物質対策への取り組み. 環境化学. 29, 119–128.
- 藤野正也, 吉田昌之, 2006. 自己組織化マップアルゴリズムに主成分分析とクラスター分析を併用した林業地域分類方法とその検証. 日本森林学会誌. 88, 221–230.
- 古川徹生, 2017. 自己組織化マップ入門.
- 北後明彦, 2019. 浸水を背景とするアルミ工場の爆発・火災による周辺地域の被害と避難状況. 消防防災の科学. 136, 42–48.
- 松田昌之, 中谷洋明, 2020. 地形・地質に関する主題図を用いた全国における土砂災害発生リスク推定法に関する考察. 国土技術政策総合研究所資料, No.1120.
- 李燕, 2009. 空間分析におけるクラスター分析と自己組織化マップ手法の比較. 土木計画学研究. 26, 77–84.
- 吉原一紘, 徳高平蔵, 2014. クラスター分析の概要. Journal of Surface Analysis. 21, 10–17.

第3章 最悪のシナリオを想定した決定論的リスク評価手法の構築とケーススタディ

3.1 緒言

第2章では、現在の日本において、土砂災害を起因とした Natech が発生する可能性のある事業所を特定し、各事業所で懸念されるリスクを抽出した。リスクを特定した次のステップでは、具体的な分析と評価を通じて、そのリスクがどの程度であるかを把握することが求められる。

1.6.2 項に示したように、土砂災害を起因とした Natech の定量的なリスク評価に関する研究は少なく (Mesa-Gómez et al., 2020; Suarez-Paba et al., 2019), これまでに実施された研究は、主に土砂災害によるパイプラインの破損確率や化学物質の流出に伴うドミノ効果、プール火災の発生確率に着目している (Alvarado-Franco et al., 2017; Hao et al., 2023; Lan et al., 2021)。土砂災害によって化学物質が流出した場合には、周辺地域の住民や自然環境にも影響をもたらす可能性があるため、設備の破損確率やシナリオの発生確率だけではなく、化学物質が流出した場合にどの程度の影響があるのかを分析することが求められる。

そこで、本章では、具体的な事業所を対象としたケーススタディを通じて、土砂災害を起因とした化学物質流出事故に伴うヒト健康リスクの評価手法を構築することを目的とする。なお、本章では、最悪のシナリオを想定した決定論的な観点からリスク評価を実施した。

本章の構成は次の通りである。3.2 節では、本章における研究の枠組みを示した。3.3 節では、対象とする事業所の抽出結果を示し、その事業所において想定される事故シナリオを設定した。3.4 節では、土砂災害を起因とした化学物質の流出に伴うヒト健康影響の分析手法を示した。3.5 節では、設定した各変数の不確実性を考慮するための感度解析手法を示した。3.6 節では、リスク評価と感度解析の結果を示し、事故に伴う被災者数について考察した。3.7 節では、本研究により得られた結論を示した。

3.2 研究の枠組み

決定論的リスク評価の枠組みを図 3-1 に示す。

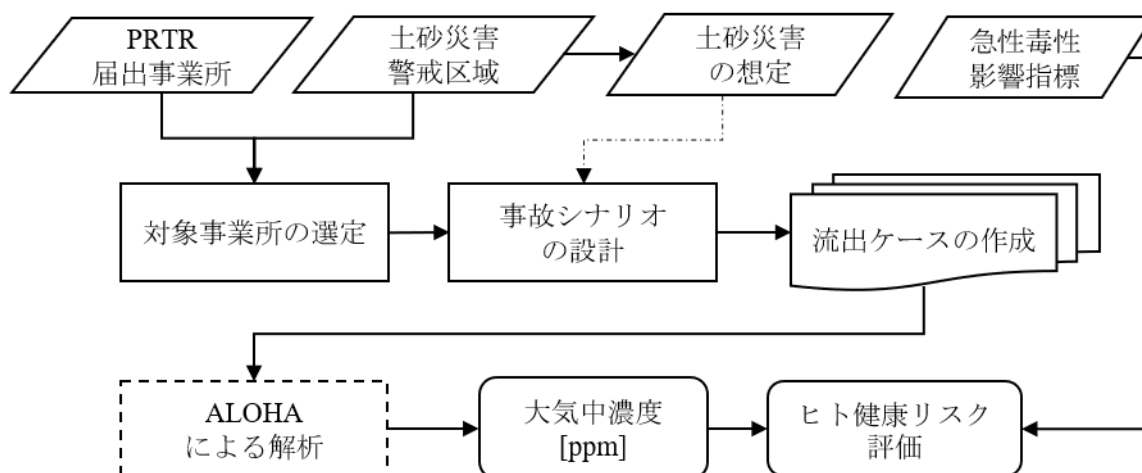


図 3-1 決定論的リスク評価の枠組み

まず具体的な事例に基づいたリスク評価を行うため、第 2 章で抽出した土砂災害に被災する可能性のある事業所から、対象事業所を選定した。次に選定した事業所において、想定される事故シナリオを設定し、Areal Locations of Hazardous Atmosphere (ALOHA) Version 5.4.7 (US EPA, 2022) を用いて、化学物質の流出、拡散に伴う大気中濃度を算出した。最後に、算出した大気中濃度を基に急性毒性影響指標を用いて、化学物質流出によるヒト健康リスクを評価した。

3.3 対象事業所の選定と事故シナリオの設定

本研究でリスク評価の対象とする事業所は、第 2 章で特定した土砂災害に被災する可能性のある 1,306 事業所の中から選定した (図 3-2)。具体的な選定方法としては、i) まず業種による化学物質の取扱方法の違いを考慮した (図 3-2)。これまでに Natech が多く発生してきた業種は、化学物質を製品の製造のために貯蔵している製造業や化学工業などが該当する。そこで、本研究では、製造業等と化学物質の取扱方法が異なり、流入した化学物質を処理している下水道業と一般廃棄物処理業（ごみ処分量に限る。）、産業廃棄物処分量を除いた。また、貯蔵タンクが地下に存在するガソリンスタンドが主に該当する燃料小売業は、土砂災害に被災してもタンク等の設備が被災する可能性は低いと考え、対象から除いた。次に、これらの業種を除いた 411 事業所から、ii) 2007～2016 年の土砂災害平均発生件数上位 8 都道府県（鹿児島県、新潟県、神奈川県、山口県、島根県、静岡県、熊本県、広島県）(国土交通省, 2018a)に存在する事業所を抽出した (図 3-2)。ここまでで 1,306 件の事業所は 100 件まで絞り込まれた。さらに第 2 章で算出した結果を基に、iii) リスクの指標となる合計年間取扱量が上位の事業所から、Google Map を用いて、事業所内の設備・施設が屋外にあることが特定され、それらが土砂災害警戒区域内に存在し、事業所の周囲 100 m 以内に住宅が存在する事業所を目視で絞り込んだ (図 3-2)。なお、設備や施設が屋内にある事業所も土砂災害に被災した場合には、設備の破損が発生する可能性はあるが、屋内に存在する設備の情報を入手することは難しいため、本研究では屋外に設備が存在する事業所を選定することとした。選定の結果、100 事業所の中で 6 番目に合計年間取扱量が多い新潟県柏崎市に存在する原油・天然ガス鉱業の事業所が選定された (図 3-3)。図 3-3 から、対象事業所内にある屋外貯蔵タンクの 1 つが土砂災害警戒区域に該当していることがわかる。また、事業所から北へ約 100 m の位置に住宅地が存

在し，化学物質が流出した場合，周辺住民への健康被害が発生する可能性が考えられる。

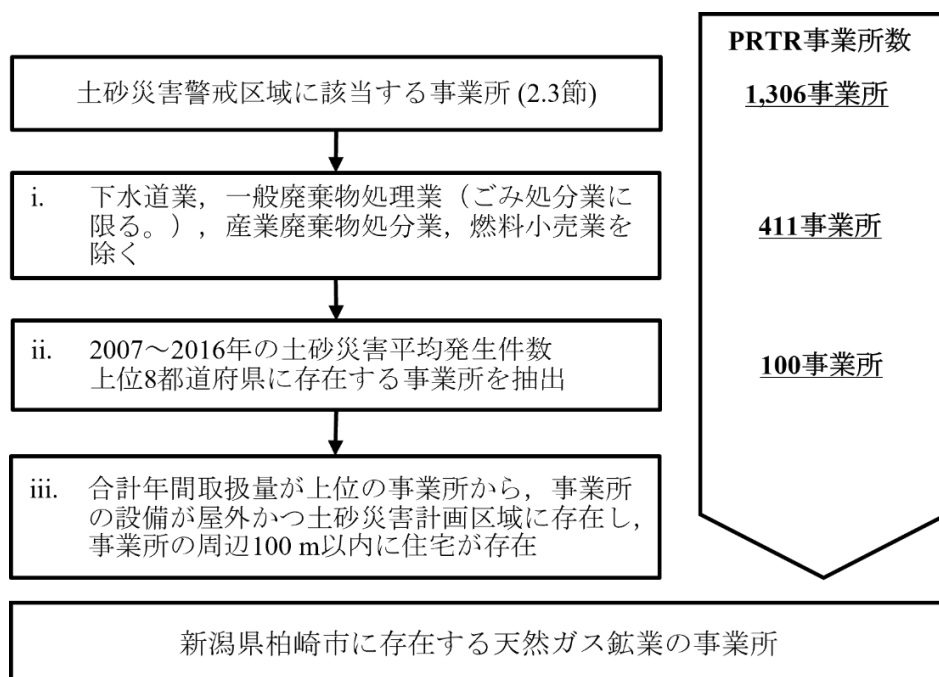


図 3-2 対象事業所の選定過程

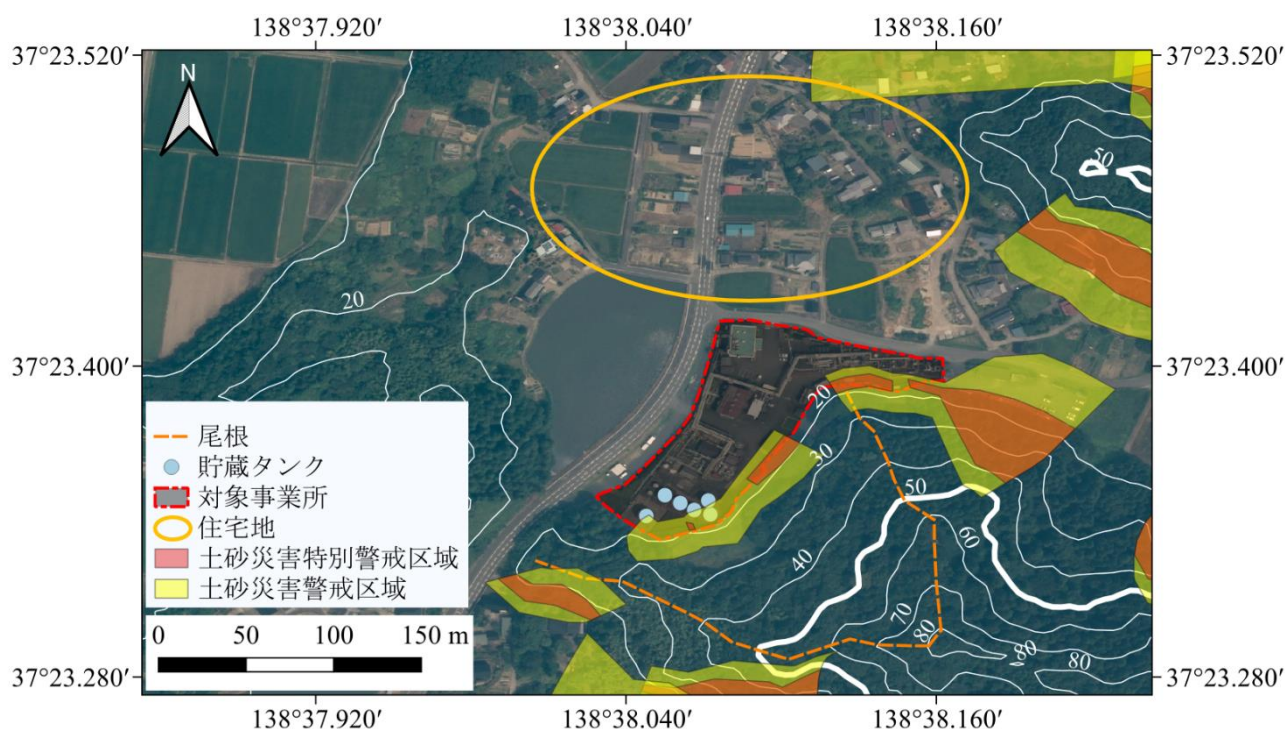


図 3-3 対象事業所と周辺環境

2.4.1 項で示した年間取扱量の算出方法から，この事業所が取り扱っている各化学物質の年間取扱量（2019年度データ）を算出した（表 3-1）。これらの物質の大気分布割合は全て 90.0%以上であり（表 3-1），大気へ排出されている。そこで，本研究では，周辺地域の広い範囲に影響を与えることが予想され，過去にも複数報告されている化学物質の大気拡散（Girgin, 2011; Krausmann et al., 2010）を事故シナリオとし

表 3-1 対象事業所が扱う物質 (環境省, 2022)

物質名	総排出・移動量 (kg/year)	年間取扱量 (kg/year)	大気分布割合 (%)	水溶性 (mg/L)
キシレン	68	1,200	99.0	146 (25°C)
トルエン	380	13,100	99.8	515 (20°C)
ノルマルヘキサン	4,000	32,000	90.0	9.47
ベンゼン	2,000	1,303,000	99.9	1790 (25°C)

て設定した。第 2 章で整理した GHS 分類を参照すると、これらの物質は全て引火性と水生環境有害性を有しており、過去の Natech 事例の分析結果から (Ricci et al., 2021), このような物質が流出した場合に「火災や爆発」、「複合事象」が生じた事例は 6.3%(4,353 件中 274 件)のみであり、残りの 93.7%には「河川や海洋に流出することによる環境汚染」や「流出したが急性影響が表れなかった事例」が含まれている。これらの物質は揮発性有機化合物に該当するため (神奈川県, 2020), 火災や爆発が生じなかった場合、気象条件や流出量によっては大気へ拡散すると想定され、本研究で想定した事故シナリオが発生する可能性は過去の事例を踏まえても十分にあると考えられる。なお、化学物質が土壌に流出することによって、土壌汚染や地下水汚染等が発生する可能性もあるが、事業所内はコンクリートで覆われていることから、本研究ではそのケースを考慮しなかった。

一方、最も年間取扱量の大きいベンゼンは水溶性が最も大きく、次いでトルエン、キシレンが大きくなっている (表 3-1)。本研究では、降雨を起因とする土砂災害を想定するため、水溶性が大きい物質は降雨による影響を受ける可能性がある。しかし、降雨の影響を考慮した化学物質の挙動を分析することは非常に難しい。そこで、本研究では対象事業所が取り扱う物質の中で水溶性が最も小さく、降雨による影響を受けにくいと考えられるノルマルヘキサンを取り上げ、リスク評価手法を構築した。

事故シナリオの全体像を図 3-4 に示す。事故シナリオとして、屋外貯蔵タンクが土砂災害によって破損し、タンク内の化学物質が流出するシナリオを想定した。降雨による土砂災害の発生前には、降雨の状況によって事前に大雨警報や土砂災害警戒情報に基づいた避難勧告が発令される場合がある (気象庁, 2022)。実際、平成 30 年 7 月豪雨における土砂災害の実態では、避難勧告が避難の理由になっていることが示されている(国土交通省, 2018b)。そこで本研究では、避難勧告によって住民や従業員が事前に避難する場合を想定し、避難した場合は人的被害が発生せず、施設被害のみが発生するとした。化学物質の流出シナリオとしては、過去に防油堤が機能しなかったケースも確認されていることから (消防庁, 2020), 消防法で導入が義務付けられている事業所内の防油堤が機能する

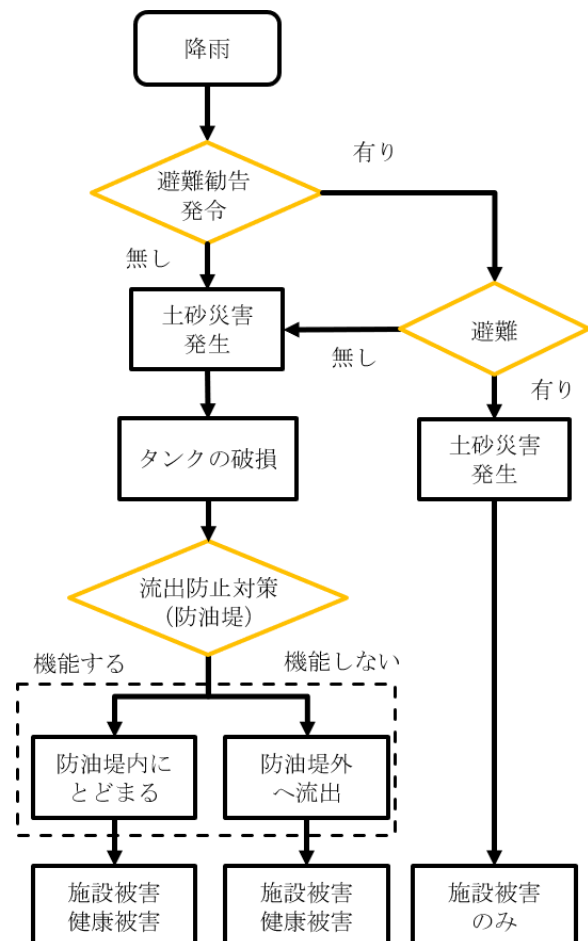


図 3-4 本研究で想定した事故シナリオ

(土砂災害によって防油堤が壊れない) 場合と機能しない (土砂災害によって防油堤が壊れる) 場合に分け、前者では化学物質が防油堤内にとどまり、後者では防油堤外に流出すると仮定した。また、どちらのシナリオにおいても従業員や周辺住民への健康被害が考えられるため、本研究では事業所が稼働しており、従業員に対する被害が最も大きくなる可能性のある平日の日中に事故が発生すると想定した。

3.4 化学物質の流出に伴うヒト健康影響の分析

3.4.1 流出ケースの設定

対象事業所に設置されているタンクは、土砂災害警戒区域図から (新潟県, 2023), 直径が約 5 m, Google map から高さが約 6 m と推定されるため、容量はおよそ 120 kL であると考えられる。一方、タンクは物理的に入れることができない容量が存在するため、大阪ガス株式会社 (2018) の資料から、およそ 8 割が貯蔵されていると想定した。したがって、本研究では、ノルマルヘキサンが 100 kL 貯蔵され、同量が流出すると仮定した。また、ノルマルヘキサンは常温で液体であるため、液体の状態で貯蔵されていると仮定した。

本研究では土砂災害によるタンクの破損ケースとして表 3-2 に示す 2 ケースを想定し、防油堤の機能の有無を考慮して計 4 つの流出ケースを設定した。タンクの転倒ケースは、タンクが転倒することで化学物質が速やかに流出する最悪のケースを考え、化学物質が広がった状態 (プール状態) からの揮発を想定した。また、プールの大きさは、防油堤が機能する場合は防油堤の面積からタンク等の構造物の面積を除いた面積 (約 1,100 m²) に等しいと設定し、防油堤が機能しない場合は事業所全体まで広がるとして、事業所全体の面積から構造物の面積を除いた面積 (約 11,000 m²) を設定した。これらの面積は、対象事業所付近の土砂災害警戒区域図(新潟県, 2023)と Google map をもとに算出した (図 3-5)。タンク付属配管の破損ケースは流出孔の直径を 0.2 m, 高さを 0 m として設定した。流出孔の直径は Google map から、タンクに付属している配管の直径を見積もり、その配管が破断するとして設定した。最大プール面積は、付属配管破損ケースの設定のもとで、ALOHA(3.4.2 項参照)により算出された値 (約 11,100 m²) (表 3-2) を本研究のシナリオに適用した。

表 3-2 流出ケースの設定

ケース	防油堤が機能しない	防油堤が機能する
タンクの転倒	プールからの揮発を想定	プールからの揮発を想定
	プール面積 : 11,000 m ² (事業所面積)	プール面積 : 1,100 m ² (防油堤面積)
タンク付属配管の破損	付属配管の直径 0.2 m, 高さ 0 m	付属配管の直径 0.2 m, 高さ 0 m
	最大プール面積 : 11,100 m ²	最大プール面積 : 1,100 m ² (防油堤面積)

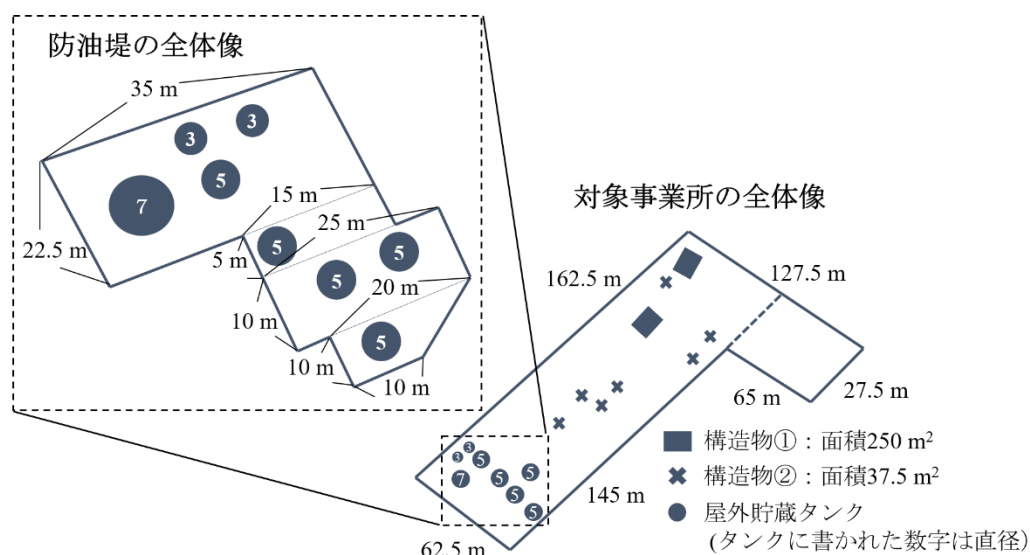


図 3-5 対象事業所と防油堤の設定

3.4.2 解析モデルと解析条件

本研究で使用した ALOHA は Computer-Aided Management of Emergency Operations (CAMEO) ソフトウェアツールの 1 つであり、化学事故の緊急対応計画の作成や緊急事態に対応することを目的として開発されているため (US EPA, 2022)、本研究で想定した事故シナリオにも適用可能であると考えられる。ALOHA は主に可燃物質や有害物質などの漏洩による影響を評価することができ、リスク評価のツールとして ALOHA が用いられた例は複数存在する (Pilone and Demichela, 2018; Tahmid et al., 2020)。一方、解析対象時間が最大で 60 分であることや周辺の建物等の影響が考慮できないことが短所として挙げられる。

ALOHA において用いられる大気拡散モデルは正規型プルームモデルとスラブモデルの 1 つである DEGADIS モデルの改良型である (US NOAA and EPA, 2013)。本研究で対象とするノルマルヘキサンは空気よりも重い物質であるため、計算過程において DEGADIS モデルが選択されたことを確認した。また、ALOHA では屋外濃度だけではなく、室内濃度を算出することができる。室内濃度は建物の全ての窓が閉められており、屋外濃度と室内濃度が均一で、環境条件が変わらないという仮定の下で算出される。また、ALOHA は Direct (直接流出)、Puddle (プール状態からの揮発)、Tank (タンクからの流出)、Pipeline (パイプラインからの流出) の 4 種類の流出モデルを設定することができる (US NOAA and EPA, 2013)。本研究では、流出モデルとしてタンク転倒ケースでは Puddle、タンク付属配管破損ケースでは Tank を用いた。

ALOHA の解析条件を表 3-3 に示す。風速と気温については、対象事業所がある新潟県柏崎市の過去 30 年間の 6 月から 10 月までの観測データの月ごとの平年値を平均した値を用いた (気象庁, 2021a)。当該期間を選択した理由として、2017 年から 2019 年における 6 月から 10 月までの 1 月当たりの土砂災害平均発生件数は約 432 件であり、1 年全体での 1 月当たりの平均発生件数約 194 件を大きく上回るためである (国土交通省, 2020, 2019, 2018c)。また、6 月から 10 月は梅雨前線や台風によってもたらされる降雨を起因とした土砂災害が多く発生する期間である。風向は最悪のシナリオとして、周辺住民が化学物質に曝露することを想定し、事業所から住宅方面に風が吹くことを想定した。また、土砂災害が発生する状況下では雨が降っている可能性が高いと考えられるが、ALOHA は雨天の想定がされていない。本研究で選択したノルマルヘキサンは水溶性が低いとされているため (環境省, 2002)、雨の影響を大きく

受けないと考えられるが、できる限り雨が降っている状態に近い設定の下で、化学物質の拡散を計算するために、湿度は設定できる最大の値である 99%を用い、天候は曇りとした。大気安定度は気温、風速、天候の条件から、中立と設定された。地表面粗度については事業所周辺に建物が密集しておらず、また事業所から住宅方面には農地が広がっているため、化学物質が拡散しやすい「Open Country」とした (US EPA and NOAA, 1999)。流出する地表面は化学物質の揮発量に影響を及ぼす。本研究では、事業所内での流出を想定しているため、流出地点の地表面をコンクリートと設定した。室内濃度を算出する際に必要となる建物の種類は民家と事業所を想定し、双方とも 2 階建てとした。以上の条件を反映した結果、空気交換率 (屋内と屋外の空気が完全に入れ替わる 1 時間当たりの回数) は ALOHA において 0.17 が選択された。

表 3-3 ALOHA に入力する解析条件

項目	数値・条件
風速 (m/s)	1.6
風向	南
天候	曇り
地表面粗度	開いた土地
大気安定度	中立
逆転層の高さ	なし
気温 (°C)	21.2
湿度 (%)	99
風速測定高度 (m)	10
流出する地表面	コンクリート
建物の種類	2 階建て
建物の周囲の環境	囲まれていない
空気交換率 (1/hr)	0.17

3.4.3 急性毒性影響指標

急性曝露の影響を評価するための代表的な指標としては Emergency Response Planning Guidelines (ERPG)や AEGL, Threshold Limit Value Short-Term Exposure Limit (TLV-STEL), Immediately Dangerous To Life or Health (IDLH) などが挙げられる (宮田, 2005)。AEGL と ERPG は毒性に関する一次情報を用いて、厳密な調査を経て設定されているのに対し、TEEL は AEGL と ERPG が設定されるまでの一時的な値として設定されている。本研究では事業所内の従業員だけではなく、周辺住民に対する吸入曝露による急性影響を評価するために、感受性が高い人を含めた一般的な公衆を対象とした指標である AEGL を用いた (US EPA, 2023a)。具体的に、AEGL は気体あるいは揮発性物質を主体とした急性毒性物質を対象に、5 つの曝露時間 (10 分, 30 分, 1 時間, 4 時間, 8 時間) のそれぞれに対し想定される健康被害を 3 段階のレベルに分類し、空気中濃度で表している (US EPA, 2023a)。AEGL 1 は「不快なレベル」で公衆に対し不快感を与える濃度、AEGL 2 は「障害レベル」で公衆に対し避難能力の欠如や重篤な影響を与える濃度、AEGL 3 は「致死レベル」で公衆の生命が脅かされる健康影響を与える濃度とされる (国立医薬品食品衛生研究所, 2020)。ノルマルヘキサンの AEGL 1 は十分なデータが揃っていないため、定義されていない (US EPA, 2023b)。一方、AEGL 2, AEGL 3 の 60 分値はそれぞれ 2,900 ppm, 8,600 ppm と設定されている (US EPA, 2023b)。本研究では、ALOHA のデフォルト値として設定されている AEGL の 60 分値を用いてヒト健康リスクを評価した。

3.4.4 被災者数の算出

ヒト健康リスクは AEGL 2, AEGL 3 の濃度に曝露すると考えられる被災者の数を算出することによって評価した。

被害を受ける集団として、事業所の従業員と周辺住民を想定し、避難勧告によって避難した場合は両方の集団とも AEGL 2, AEGL 3 の濃度に曝露しないとした。一方、避難勧告が出されていない状況において、土砂災害が発生した場合、従業員は避難や状況確認のために屋外に出ると考えられるため、本研究では最悪と考えられるシナリオを想定し、従業員全員が屋外の濃度に曝露するとした。

また、避難勧告が出されていない状況において、周辺住民は日常的な生活を送っていると想定し、平日の日中に屋外にいる人の割合を求めることで、予想被災者数を算出した。平日の日中の時間帯の定義として、平日の在宅行為者率が40%以下となる9時から16時の間 (NHK 放送文化研究所, 2016a) と設定した。この時間帯における屋外滞在割合は、NHK 国民生活時間調査から得られた各行動の平均行為者率 (NHK 放送文化研究所, 2016b) と廣瀬・藤元 (2016) が推定した値を用いて算出した。NHK 国民生活時間調査は「ながら」の行動を含んでいるため、各行動の平均行為者率の合計は100%を超える。よって、本研究では各行動の平均行為者率の合計が100%となるように、各行動の平均行為者率に100/(平均行為者率の合計) を乗じ、それらの値に廣瀬・藤元 (2016) が推定した各行動の屋外滞在率を乗じることで屋外滞在割合を求めた。周辺住民の数はAEGL 2, AEGL 3 の超過範囲に該当する住宅数から、1住宅に1世帯が住んでいると仮定して算出した。1世帯当たりの人数は柏崎市の人口と世帯数 (柏崎市, 2020) から求めた。最後に、求めた住民数に屋外滞在割合を乗じることで被災者数を算出した。

3.5 感度解析

本研究では、化学物質流出リスクに対する感度解析を実施し、最終結果の不確実性に影響を与える要因を分析した。感度解析はタンク付属配管破損における防油堤が機能しないケースを基準として、貯蔵量と流出孔の高さ、気象条件の変化がヒト健康リスクの不確実性に与える影響を分析した (表 3-4)。表 3-4 の上方、下方は各変数の値がそれぞれ最大、最小に振れる場合を表している。ただし、大気安定度については上方が安定、下方が不安定な側に振れるとした。

表 3-4 感度解析の設定

	上方	下方
貯蔵量 (%)	80	20
流出孔の高さ (m)	1.0	0
大気安定度	安定	不安定
風速 (m/s)	14.2	1.0
気温の高さ (°C)	37.4	3.3

貯蔵量は最大量を80%、最低量を20%として評価を行った。タンクの貯蔵量80%は物理的に入れることができるおおよその上限値であり、タンクの貯蔵量20%はポンプによって引くことができる容量のおおよその下限値である (大阪ガス株式会社, 2018)。流出孔の高さは急傾斜地崩壊に伴う土石等の移動の高さを上限とした。土石等の移動の高さは土砂災害警戒区域を指定する際に用いられ、埼玉県的基础調査マニュアル (埼玉県, 2019) ではこれまでの災害履歴から1.0 mとされている。本研究ではこれに従い、流出孔の最大高さを1.0 mとした。気象条件の不確実性については大気安定度と風速、気温を取り上げた。大気安定度の範囲は不安定 (A) と安定 (F) として取り上げた。風速の下限値はALOHAの解析条件の下限値である1.0 m/sと、上限値は柏崎市の2011年から2020年までの観測データにおいて、6月から10月までの最大風速の中の最大値である14.2 m/sを用いた (気象庁, 2021b)。気温については、柏崎市の2011年から2020年までの観測データから、6月から10月までの最高気温の最大値 (37.4°C) と最低気温の最小値 (3.3°C) を用いた (気象庁, 2021b)。

3.6 結果と考察

3.6.1 化学物質の大気中濃度の算出結果

タンク転倒ケースにおける濃度分布を図 3-6 と図 3-7 に示す。ALOHAにおけるAEGL超過範囲は、ground-levelにおける濃度がAEGLの値を超える範囲を表す (US NOAA and EPA, 2013)。

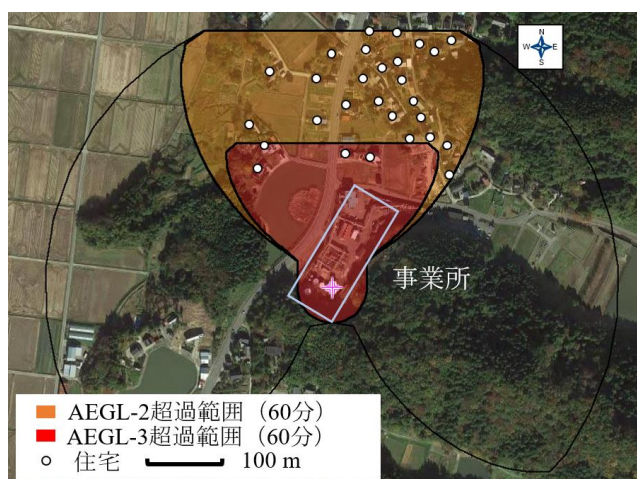


図 3-6 タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の濃度分布

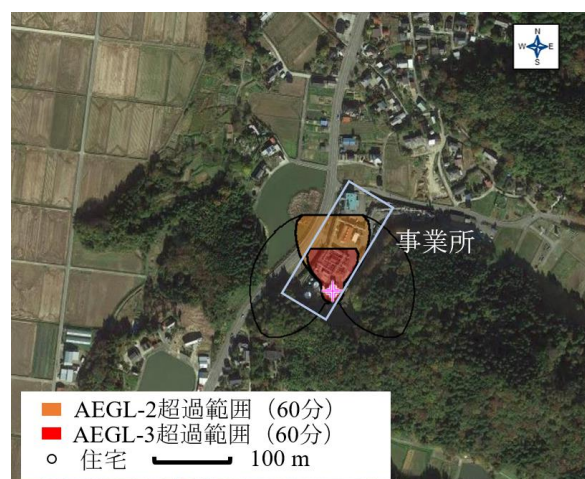


図 3-7 タンク転倒ケースにおける防油堤が機能する場合の濃度分布

防油堤が機能しないケース(図 3-6)では事業所と住宅 4 軒が AEGL 3 の超過範囲に該当し、周辺の住宅 24 軒が AEGL 2 の超過範囲に含まれるという結果となった。一方、防油堤が機能するケースでは事業所のみが AEGL 2, AEGL 3 の超過範囲に該当する結果となった (図 3-7)。この結果から、防油堤によってノルマルヘキサンの広がる面積が制限され、揮発量が減少することで、AEGL を超過する範囲が縮小することが示された。

タンク転倒ケースにおける濃度の時間変化について、防油堤が機能しないケースでは、事業所付近の屋外濃度は流出から 5 分以内に AEGL 3 を超えることがわかった (図 3-8)。また、屋内濃度は流出から 20 分以内に AEGL 2 を超える結果となった (図 3-8)。さらに、住宅地付近の屋外濃度は 5 分以内に AEGL 2 を超過するが、屋内濃度は流出から 1 時間後においても AEGL 2 未満であった (図 3-9)。これらの結果から、屋外にいる従業員は AEGL 3 の濃度に曝露する可能性が高く、屋内に避難したとしても AEGL 2 の濃度に曝露する可能性が高い。また、屋外にいる周辺住民も AEGL 2 の濃度に曝露する可能性が高いが、屋内に避難することで AEGL 2 の濃度の曝露を回避することが可能であると考えられる。

防油堤が機能する場合においても、事業所付近の屋外濃度は AEGL 3 を超過するため、屋外にいる従業員は AEGL 3 の濃度に曝露する可能性が高い (図 3-10)。これらの結果から、最悪のシナリオを想定した場合には、従業員は AEGL 2 以上の濃度に曝露する可能性が高く、事故が発生する前に避難行動を取ること、また平時から避難行動を含めた緊急時の計画を策定することが重要であると考えられる。

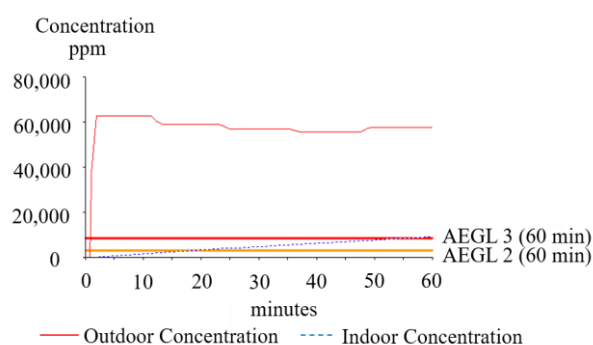


図 3-8 タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化

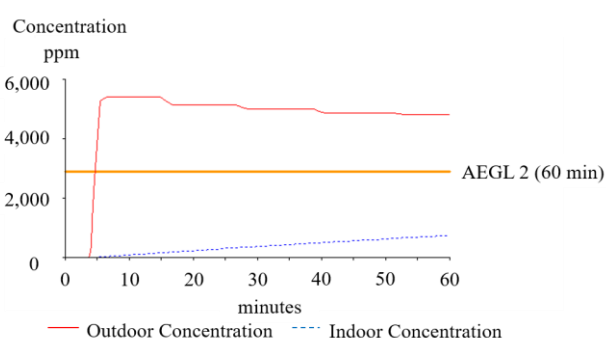


図 3-9 タンク転倒ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 250 m 地点における濃度変化

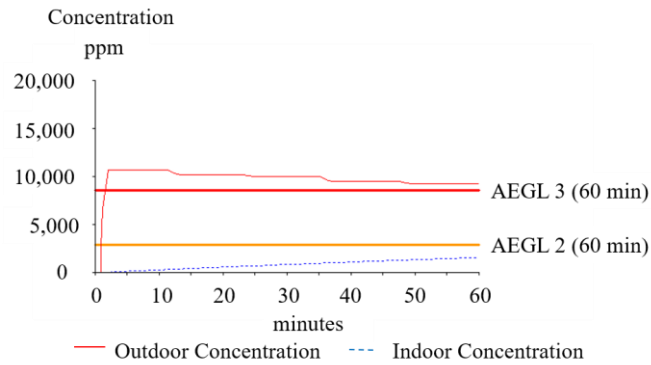


図 3-10 タンク転倒ケースにおける防油堤が機能する場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化

続いて、タンク付属配管破損ケースにおける濃度分布を図 3-11 と図 3-12 に示す。

タンク付属配管破損ケースにおいて、防油堤が機能しない場合は AEGL 3 の超過範囲に事業所と住宅 3 軒が該当し、AEGL 2 の超過範囲には住宅 21 軒が含まれるという結果となった (図 3-11)。これはタンク転倒ケースでは、プールが 11,000 m² に広がった状態からの揮発を想定したのに対し、タンク付属配管破損ケースではプールが徐々に広がることを想定したため、後者は前者のケースよりも総揮発量が小さいことが反映されていると考えられる。一方、防油堤が機能する場合は事業所のみが AEGL 2, AEGL 3 の超過範囲に該当した (図 3-12)。

タンク付属配管破損ケースにおける濃度の時間変化を図 3-13、図 3-14、図 3-15 に示す。タンク転倒ケースと同様に、防油堤が機能しない場合は事業所付近の屋外濃度は 5 分以内に AEGL 3 を超過しており、屋外にいる従業員は AEGL 3 を超える濃度に曝露する可能性が高いことが分かった (図 3-13)。また、住宅地付近の屋外濃度は流出地点から約 30 分後に AEGL 2 の濃度を超過した (図 3-14)。したがって、30 分以内に流出地点から 330 m 以上離れる、もしくは屋内に避難することで AEGL 2 の濃度における曝露を防ぐことが人的被害を回避する上で有用な手段となることが示された。

さらに、防油堤が機能する場合においても事業所内の屋外濃度は 5 分以内に AEGL 3 の濃度を超過した (図 3-15)。したがって、タンク転倒ケースと同様に、屋外にいる従業員は防油堤が機能する場合においても、AEGL 3 の濃度に曝露する可能性が高く、事故の発生を防ぐための事前対策や避難行動が求められる。

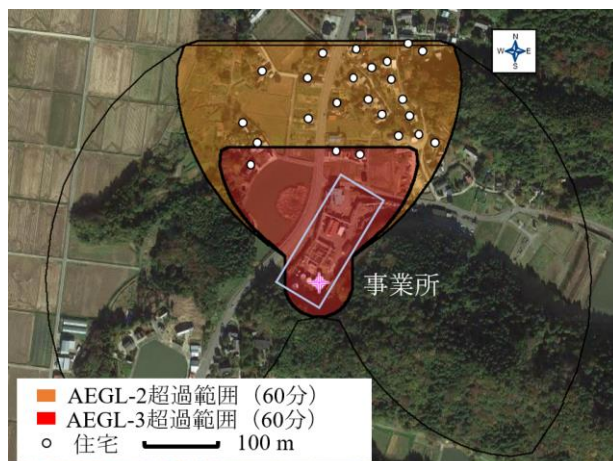


図 3-11 タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の濃度分布

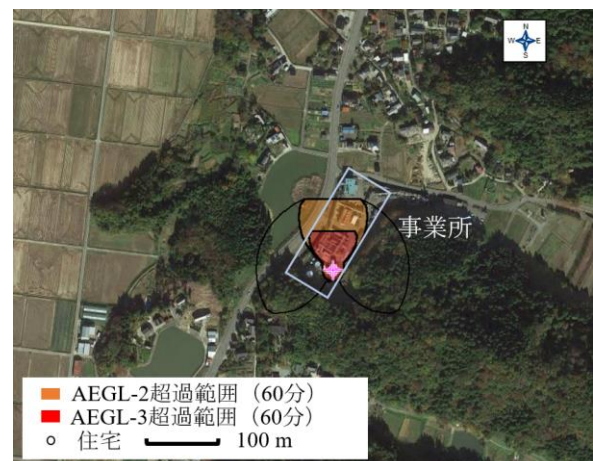


図 3-12 タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能する場合の濃度分布

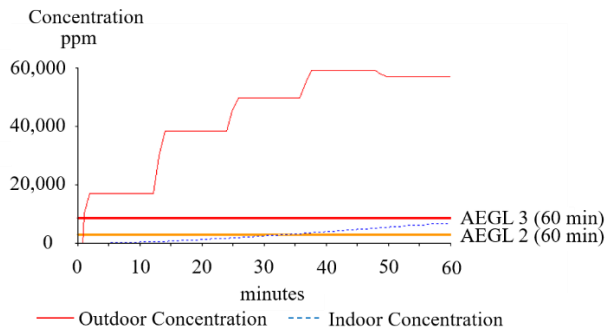


図 3-13 タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化

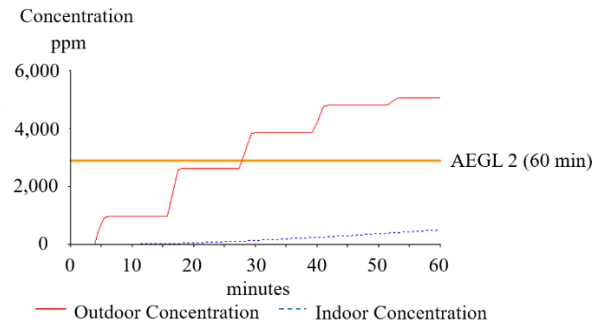


図 3-14 タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能しない場合の流出地点から 250 m 地点における濃度変化

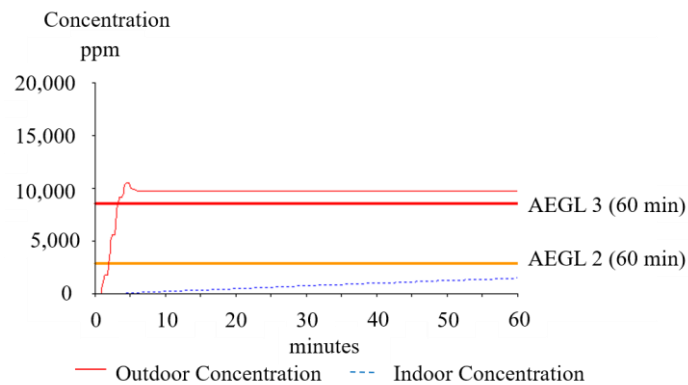


図 3-15 タンク付属配管破損ケースにおける防油堤が機能する場合の流出地点から 50 m 地点における濃度変化

3.6.2 被災者数の算出結果

周辺住民について、平日の日中（9時から16時まで）に屋外にいる人の割合を求めた結果、約24%となる結果が得られた（表 3-5）。周辺住民の数は、柏崎市の人口と世帯数（柏崎市, 2020）より、人口が81,836人、世帯数が34,883世帯であるため、1世帯当たりの人口は約2.3人となった。

ここまでの結果から、被災者数を流出ケース、曝露濃度ごとに表 3-6 に示す。タンク転倒ケースでは、流出地点から半径約344 m以内に住んでいる住民13人がAEGL 2の濃度に曝露すると考えられる。タンク付属配管破損ケースでは、流出地点から約333 m以内に住んでいる住民12人がAEGL 2の濃度に曝露すると考えられる。一方、AEGL 3の濃度に曝露すると考えられるのは、両ケースともに従業員22人と周辺住民2人と推定される。防油堤が機能する場合は、タンク転倒、付属配管破損の両ケースともに従業員のみがAEGL 3の濃度に曝露すると考えられる。この結果から、防油堤が機能することで、被災者の数がおおよそ4割減少することが示された。防油堤は消防法によって、屋外貯蔵タンクの周囲に設置することが義務付けられており（総務省, 2019）、本研究で示した結果から、この法律の有効性を示すことができたといえる。

表 3-5 屋外滞在割合の算出結果

行動項目	屋外滞在割合(%)
睡眠	0.0
食事	0.0
身のまわりの用事	0.14
療養・静養	0.0
仕事関連	
仕事	11
仕事のつきあい	0.14
学業	
授業・学内の活動	1.7
学校外の学習	0.087
家事	
炊事・掃除・洗濯	0.41
買い物	1.7
子どもの世話	0.0
家庭雑事	0.34
通勤	1.3
通学	0.60

表 3-5 屋外滞在割合の算出結果（続き）

行動項目	屋外滞在割合(%)
家事	
社会参加	0.40
会話・交際	0.81
レジャー活動	
スポーツ	0.88
行楽・散策	2.1
趣味・娯楽・教養のネット	0.0
趣味・娯楽・教養	1.3
マスメディア接触	
テレビ	0.0
ラジオ	0.0
新聞	0.0
雑誌・マンガ・本	0.0
CD・テープ	0.0
ビデオ	0.0
休息	0.33
その他・不明	1.2

表 3-6 被災者数の算出結果

ケース	AEGL 2 濃度曝露人数 (人)	AEGL 3 濃度曝露人数 (人)
タンクの転倒 (防油堤が機能しない)	13	24
付属配管の破損 (防油堤が機能しない)	12	24
防油堤が機能する	0	22

3.6.3 感度解析の結果

図 3-16 に化学物質の拡散による AEGL 2, AEGL 3 の濃度の曝露人数を対象とした感度解析結果を示す。図 3-16 はタンク付属配管が破損した場合における防油堤が機能しないケースの合計曝露人数 36 人を基準として、各変数を上方と下方に変化させた場合の曝露人数と変化の幅を示している。なお、各変数値を表 3-4 のように設定した場合の濃度分布図は補足資料 A-2 の図 A-2-1 から図 A-2-7 に示す。

風速の不確実性が結果に最も影響を及ぼす要因であり、風速を 1.0 m/s とした場合は、曝露人数が 46 人となり、基準ケースと比べて 10 人増加した。一方、風速を 14.2 m/s とした場合は曝露人数が 0 人となり、基準ケースと比べて 36 人減少することが分かった。風速は化学物質の拡散に大きな影響を与える要因であり、風速が小さい場合は化学物質が拡散しにくく、化学物質の大気中濃度が高くなることによって、曝露人数が増加したと考えられる。また、大気安定度の不確実性による曝露人数の変化の幅は最大で 22 人となり、大気安定度が安定であればあるほど、化学物質が拡散しにくく、高リスクと

なることが示された。気温については、基準ケースと比べて 37.4℃に設定した場合は曝露人数が 8 人増加し、曝露人数の変化の幅は最大で 18 人となることが分かった。気温が高くなることによって、揮発量が増加することが結果に寄与していると考えられる。以上の結果から、曝露人数が最も多くなる最悪の気象条件は風速が小さく、大気が安定かつ気温が高い気象条件であると考えられる。さらに、貯蔵量の不確実性も曝露人数に影響を与え、貯蔵量を 80%から 20%に変化させると曝露人数が最大で 14 人減少することが示された。この結果から、事故発生時における従業員の数など、事業所の操業状況が曝露人数に不確実性をもたらすと考えられる。一方、流出孔の高さの変化による曝露人数の変化は 3 人とどまり、推定曝露人数の結果に与える影響は小さいことが示された。これらの感度解析を通じて、限られた範囲ではあるが、結果の不確実性を評価できたと考えられる。

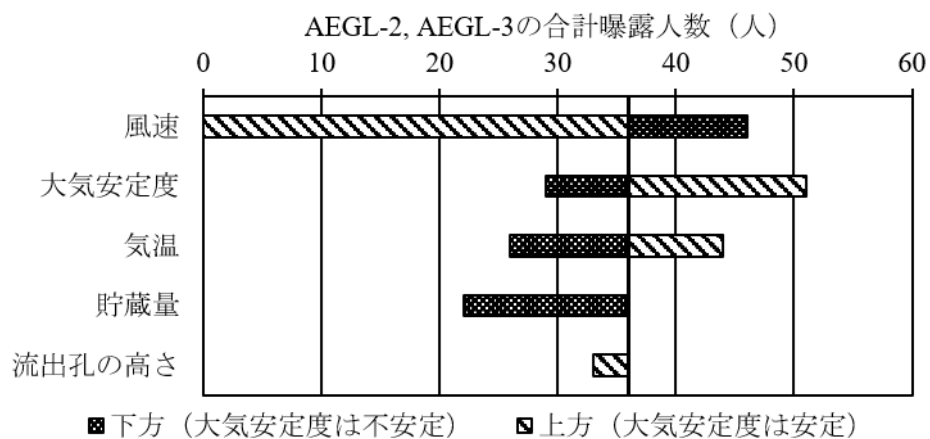


図 3-16 曝露人数の感度解析結果

3.7 結言

本章では、これまでに構築された土砂災害を起因としたリスク評価手法の範囲を拡張し、土砂災害を起因として化学物質が流出、大気へ拡散することを想定したヒト健康リスクの評価手法を構築した。また、本研究では、最悪と考えられるシナリオを想定した決定論的アプローチから、リスク評価ツール ALOHA を用いたリスク評価の具体例を示した。

リスク評価の結果、化学物質の流出時に防油堤が機能し、プール面積が制限された場合には、揮発量が減少することによって、周辺住民の AEGL 2 の濃度に対する曝露を防ぐことができ、被災者数を最大で約 41% 減少させることが可能であることが示された。この結果から、防油堤は一定のリスク削減効果があると考えられる。一方、防油堤が機能した場合においても従業員は AEGL 2 以上の濃度に曝露する可能性があるため、従業員の避難等を含め、平時から土砂災害が差し迫った場合の対応計画を立てることが重要であると考えられる。また、ALOHA を用いた分析によってある地点の大気中濃度の時間変化を得ることが可能であり、この出力結果を用いることで、周辺住民の避難行動の指針を作成することが可能である。本研究では、タンク付属配管破損ケースにおいて、防油堤が機能しなかった場合では、30 分以内に流出地点から 330 m 以上離れる、もしくは屋内に避難することで AEGL 2 の濃度における曝露を防ぐことが可能であることが示された。総じて、本研究で想定したシナリオの下では、周辺住民は屋内に避難することによって、AEGL 2 の濃度に対する曝露を回避できる可能性があることが示された。また、感度解析の結果からは、風速がリスク評価の結果に最も不確実性をもたらす要因であり、風速が 1.0 m/s の場合には被災者数が約 28% 増加し、風速が 14.2 m/s の場合には被災者数が 0 人となった。感度解析を通じて、化学物質が拡散しにくく、大気中濃度が最も高くなる最悪の気象条件は風速が小さく、大気が安定かつ気温が高い気象条件であることが特定された。また、貯蔵率が 20% の場合は、被災者数が約 39% 減少し、事業所の操業状況が曝露人数に不確実性をもたらすと考えられる。

参考文献

- Alvarado-Franco, J.P., Castro, D., Estrada, N., Caicedo, B., Sánchez-Silva, M., Camacho, L.A., Muñoz, F., 2017. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides. *Engineering Geology*. 222, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.005>
- Girgin, S., 2011. The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Science*. 11, 1129–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- Hao, J., Liu, L., Long, Z., Chu, Y., Zhang, D., Chen, X., Huang, C., 2023. Scenario deduction of Natech accident based on dynamic Bayesian network: A case study of landslide accident in a liquor storage tank area in Guizhou Province, China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 83. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105067>
- Krausmann, E., Cruz, A.M., Affeltranger, B., 2010. The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 23, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.10.004>
- Lan, M., Zhu, J., Lo, S., 2021. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment method for modeling risk for industrial facilities subjected to landslides. *Reliability Engineering and System Safety*. 215. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107851>
- Mesa-Gómez, A., Casal, J., Muñoz, F., 2020. Risk analysis in Natech events: State of the art. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 64. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104071>
- Pilone, E., Demichela, M., 2018. A semi-quantitative methodology to evaluate the main local territorial risks and their interactions. *Land Use Policy*. 77, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.027>
- Ricci, F., Moreno, V.C., Cozzani, V., 2021. A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*. 147, 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.031>
- Suarez-Paba, M.C., Perreux, M., Munoz, F., Cruz, A.M., 2019. Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades. *Safety Science*. 116, 58–77. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.033>
- Tahmid, M., Dey, S., Syeda, S.R., 2020. Mapping human vulnerability and risk due to chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104289>
- US EPA, 2023a. About Acute Exposure Guideline Levels (AEGs). <https://www.epa.gov/aegl/about-acute-exposure-guideline-levels-aegls> (accessed 18 June 2023).
- US EPA, 2023b. Hexane Results - AEGL Program. <https://www.epa.gov/aegl/hexane-results-aegl-program> (accessed 18 June 2023).
- US EPA, 2022. ALOHA Software. <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (accessed 16 June 2023).
- US EPA, NOAA, 1999. ALOHA User's Manual. <http://www.disaster-info.net/lideres/english/jamaica/bibliography/ChemicalAccidents/CameoPkg/alohaManual.pdf> (accessed 18 June 2023).
- US NOAA, EPA, 2013. ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4 Technical Documentation. United States.
- NHK放送文化研究所, 2016a. 時刻別行為者率2015年国民全体. <https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/> (accessed 18 June 2023).

NHK放送文化研究所, 2016b. 2015年国民生活時間調査報告書.

https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20160217_1.pdf (accessed 18 June 2023).

大阪ガス株式会社, 2018. LNGタンクに関するリスク容量のご説明.

https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/029_03_02.pdf (accessed 18 June 2023).

柏崎市, 2020. 柏崎市の人口と世帯数 (行政区) (令和2年11月末).

<https://www.city.kashiwazaki.lg.jp/material/files/group/5/R211gyouseiku.pdf> (accessed 30 March 2021).

神奈川県, 2020. 環境省が示す主なVOC100種. <https://www.pref.kanagawa.jp/documents/3497/767803.pdf> (accessed 18 June 2023).

環境省, 2002. [33] n-ヘキサン. 物質に関する基本的事項. <https://www.env.go.jp/chemi/report/h14-05/chap01/03/33.pdf> (accessed 15 August 2022).

環境省, 2022. 化学物質の環境リスク初期評価 評価書一覧 (第21巻まで).

https://www.env.go.jp/chemi/risk/chemi_list/index.html (accessed 18 June 2023).

気象庁, 2021a. 柏崎市 平年値 (年・月ごとの値).

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_ym.php?prec_no=54&block_no=0532&year=&month=&day=&view= (accessed 18 June 2023).

気象庁, 2021b. 過去の気象データ・ダウンロード. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (accessed 18 June 2023).

気象庁, 2022. 土砂災害警戒情報・土砂キキクル (大雨警報 (土砂災害) の危険度分布).

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/doshakeikai.html> (accessed 8 June 2023).

国土交通省, 2018a. 平成29年 全国の土砂災害発生状況. <https://kensanpress.com/ksp/wp-content/uploads/2018/03/6620f9b024a1ab5f90cf431ccae09b98.pdf> (accessed 18 June 2023).

国土交通省, 2018b. 平成30年7月豪雨における土砂災害の被害実態 (追加説明資料).

https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_jikkousei/181031/02shiryo2.pdf (accessed 18 June 2023).

国土交通省, 2018c. 平成29年の土砂災害. <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29dosyasaigai.pdf> (accessed 18 June 2023).

国土交通省, 2019. 平成三十年の土砂災害. <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/h30doshasai.pdf> (accessed 18 June 2023).

国土交通省, 2020. 令和元年の土砂災害.

<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r1dosha/r1doshasagainogaiyou.pdf> (accessed 18 June 2023).

国立医薬品食品衛生研究所, 2020. AEGLとは. <http://www.nihs.go.jp/hse/chem-info/aegl/agnote.pdf> (accessed 18 June 2023).

埼玉県, 2019. 土砂災害警戒区域指定のための基礎調査マニュアル (平成30年4月埼玉県)第二編 急傾斜地の崩壊編. <https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/127756/kisocyouysam-kyukeisya.pdf> (accessed 18 June 2023).

消防庁, 2020. 危険物施設の風水害対策のあり方に関する検討会 資料1-5-3 令和2年7月豪雨における風水害被害と危険物の臨時的な取扱い例. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-62/01/shiryou1-5-3.pdf (accessed 14 March 2022).

総務省, 2019. 危険物の規制に関する政令. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306> (accessed 24 May 2023).

- 新潟県, 2023. 新潟県土砂災害警戒区域等の指定状況及び基礎調査結果の公表状況. <http://www.sabou-niigata.jp/dosyahou/index.php> (accessed 18 June 2023).
- 廣瀬勝己, 藤元憲三, 2016. 被ばく線量評価に用いられる居住係数の再評価. 環境放射能除染学会誌. 4, 97–104.
- 宮田栄三郎, 2005. 影響評価ツールを活用した安全対策の検討例. 安全工学. 44, 183–189.

第4章 複数のシナリオを想定した確率論的リスク評価手法の構築とケーススタディ

4.1 緒言

第3章では、決定論的なアプローチから、土砂災害を起因とした化学物質流出事故のリスク評価手法を構築した。決定論的なアプローチからのリスク評価では、ある特定のシナリオに基づき、被災者数等の具体的な結果を算出することが可能であるが、その一方で設定した各変数の変動による結果の不確実性を網羅的に評価することはできない。また、変数を決定論的に設定するため、評価可能なシナリオが限定され、適用できる範囲が制限されてしまう (Kabir et al., 2019)。

このような決定論的なアプローチの課題に対して、近年 Bayesian network (BN)を活用した確率論的リスク評価に関する研究が進められている (Ancione and Milazzo, 2021; Cheng and Luo, 2020; Hao et al., 2023; Kabir et al., 2019; Khakzad, 2019; Khakzad et al., 2018; Khakzad and Van Gelder, 2018; Lan et al., 2021; Naderpour and Khakzad, 2018; Qin et al., 2020; Tolo et al., 2017; Wang et al., 2022)。BN は、確率的なグラフィカルモデルであり、複雑なシステムを有する生態系のモデリング (Uusitalo, 2007)やプロセス産業のリスク評価 (George and Renjith, 2021)において用いられてきた。Natech も自然災害による産業施設の被災、それに伴う化学物質の流出や拡散、生態系やヒト健康影響の発生という複雑な事象であり、BN のようにグラフィカルに表現することが可能なモデルは Natech 事象を扱う上で適していると考えられる。また、BN の基礎となるベイズの定理の特色は、事前確率に個人の主観に基づく主観確率を用いることが容認されている点である (松原, 2008)。これによって、Natech のような通常の産業事故と比べて低頻度であり、リスク評価に必要なデータが少ない状況であっても、専門家の知識も含めた様々な情報源からのデータを組み合わせることが可能となる (Uusitalo, 2007)。もう1つのベイズの定理の特色は、結果に対する原因の確率を計算する式を与えるという点である (松原, 2008)。これによって、原因から結果を推測する従来のリスク評価だけでなく、結果から原因を推測することによって、結果に寄与する要因や高リスクとなる状況の把握が可能となる (Kabir et al., 2019)。

BN を用いた Natech の定量的リスク評価としては、洪水やハリケーンによる貯蔵タンクの脆弱性評価 (Khakzad and Van Gelder, 2018, 2017; Qin et al., 2020)、ドミノ効果を考慮した設備の脆弱性評価 (Khakzad, 2019; Khakzad et al., 2018; Lan et al., 2021; Naderpour and Khakzad, 2018)、気候変動の影響を考慮した使用済み核燃料施設のリスク評価 (Tolo et al., 2017)が挙げられるが、これらの研究は化学物質の流出に伴う周辺地域に対する影響を評価していない。一方、化学物質の流出による周辺地域への影響を踏まえたリスク評価として、Ancione and Milazzo (2021)は洪水を対象に、半定量的なリスク指標を用いたリスク管理ツールを構築した。また、Wang ら (2022)は、データの不足に伴う認識論的不確実性を考慮するために OR/AND gate を BN に用い、経済損失と環境影響、死傷者数の3つの指標を半定量的に評価する手法を構築した。さらに、Kabir ら (2019)と Cheng and Luo (2020)はそれぞれ地震を起因とした爆発事故に伴う爆風圧と落雷を起因としたプール火災や爆発事故を対象として、事故に伴う周辺地域の致死確率を評価した。しかし、これらの半定量的、定量的リスク評価に関する研究は、土砂災害や過去に発生した化学物質の大気拡散による健康影響 (Girgin, 2011; Ricci et al., 2021)を対象としておらず、周辺地域の人口分布などの特徴を考慮した詳細かつ定量的なリスク評価は行われていない。BN を用いて事故により発生した大気汚染のリスク評価を実施した研究として、Zhang ら (2022)は周辺地域の人口密度や病院へのアクセシビリティなどの脆弱性を考慮してリスク評価を行っているが、この研究は自然災害を起因とした事故を対象としておらず、気象条件が決定論的に設定されているため、想定されるシナリオが限定されるという課題が残されている。

BN を活用することで、Natech のような高影響低頻度事象 (High Impact Low Probability: HILP) 事象を扱うことができ (Tolo et al., 2017), 様々な情報源を用いることによって生じる不確実性を確率分布として表すことが可能となる。また, BN を用いることで, 従来のリスク評価 (予測的分析: Predictive analysis) に加え, 原因から結果を推定する診断的分析 (Diagnostic analysis)によって, 結果に寄与する要因の特定が可能となる。さらに, BN は複数の確率変数を一度に扱うことが可能であるため, タンクの位置や貯蔵率, 気象条件に対して, 複数のパラメータを設定することによって, 決定論的なアプローチと比べて, より幅広く, 複数の場面・シナリオに適用できるリスク評価手法を構築できる可能性がある (Kabir et al., 2019)。

そこで, 本章では, 第 3 章で構築した決定論的アプローチからのリスク評価手法を拡張し, BN を活用した確率論的リスク評価手法を実施することによって, Natech のリスク評価における BN の適用可能性について考察した。また, 構築した BN を基に, 診断的分析と感度解析を通じて, 結果に寄与する原因を特定し, 今後の土砂災害を起因とする Natech のリスク管理に繋がる知見を整備した。

本章の構成は次の通りである。4.2 節では, 本章における研究の枠組みを示した。4.3 節では, 本研究で想定する事故のシナリオを設定した。4.4 節では, 設定した事故のシナリオに基づき, BN の構造と具体的な設定を示した。4.5 節では, ある結果が生じた場合に最も原因となる可能性が高い要因を特定するための診断的分析の方法を示した。4.6 節では, BN を用いた感度解析の方法を示した。4.7 節では, BN を用いたリスク評価の結果と診断的分析, 感度解析を通じて特定した結果に寄与する要因を示した。4.8 節では, 本研究により得られた結論を示した。

4.2 研究の枠組み

本研究の枠組みを図 4-1 に示す。

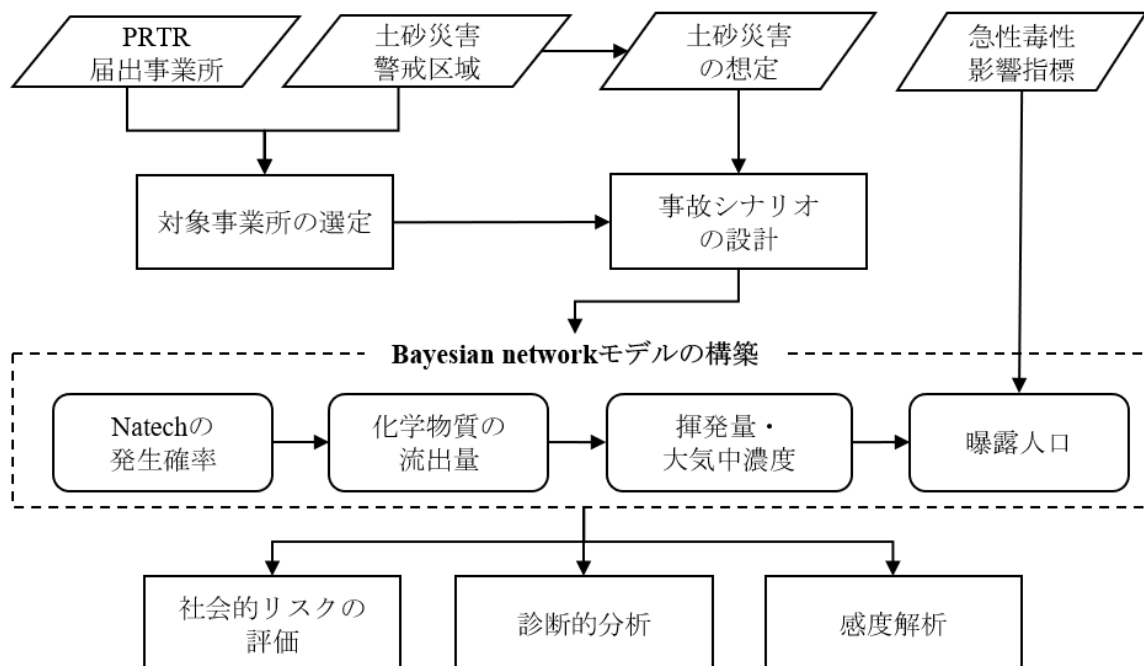


図 4-1 確率論的リスク評価の枠組み

本研究では、第 3 章で対象とした事業所を取り上げ、その事業所で想定される事故シナリオを設計する。次に設定した事故シナリオに基づき、リスク評価のための Bayesian network (BN)モデルを構築する。本研究では、土砂災害の発生、土砂災害に伴うタンクの破損、化学物質の流出、大気中濃度、曝露人口までを扱うことが可能な BN モデルを構築する。最後に、構築した BN モデルを用いて、周辺地域の人口を考慮した社会的リスクを評価し、診断的分析と感度解析を通じて、リスク評価の結果に寄与する変数を特定する。

4.3 事故シナリオの設定

図 3-3 に示すように、対象事業所内には 6 つの貯蔵タンクが存在し、それぞれ斜面から 5-30 m の範囲に存在している。タンクの後ろにある斜面の最大高さは約 65 m、傾斜は約 20 度である。本研究では第 3 章と同様に、ノルマルヘキサンがタンクに貯蔵されており、土砂災害によって流出すると仮定してリスク評価手法を構築した。

本研究で想定した事故シナリオとそれに伴う被害、具体的な BN モデルの構築において該当する項を図

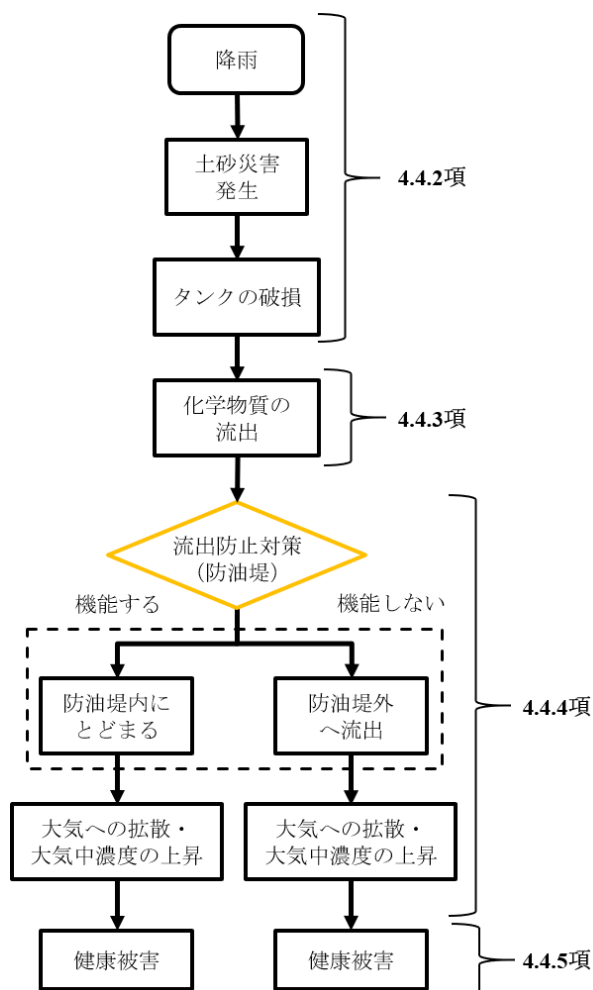


図 4-2 本研究で想定する事故シナリオ

4-2 に示す。3.3 項で想定した事故シナリオと比べて、本研究では避難勧告の発令による周辺住民の避難を明示しなかったが (図 4-2), BN モデルによって得られた結果から周辺地域の住民の避難について考察した。明示しない理由として、本研究において、化学物質の拡散を評価した範囲に避難所が存在しなかったことが挙げられる。

4.4 Bayesian network モデルの構築によるヒト健康リスクの評価

4.4.1 Bayesian network の構造

BN は、変数を表すノードとノード間の関係を表すアークによって構成される有向非循環グラフ (Directed acyclic graph: DAG) である。ノード間の関係は条件付確率表 (Conditional probability table: CPT) によって定義される。仮に X_j から X_n の向きにアークが存在する場合は、 X_j が親ノード、 X_n が子ノードという関係になる。各ノードには複数の確率変数が設定でき、確率分布や条件付確率によって定義される。なお、本研究では、親となるノードを持たないノードを BN 全体の親ノードとして定義する。

また、BN における同時確率分布 (Joint probability distribution) は以下の式(4-1)のように定義される。

$$P(X_1, X_2 \cdots X_n) = \prod_i P(X_i | \text{parents}(X_i)) \quad (4-1)$$

ここで、 $X_1, X_2 \cdots X_n$ は BN におけるノード、 $\text{parents}(X_i)$ はノード X_i の親ノード、 $P(X_i | \text{parents}(X_i))$ は CPT を表す。

さらに、BN はベイズの定理 (式(4-2)) を基に、Evidence E が与えられた時に、事前確率 (Prior probability) を更新し、事後確率 (Posterior probability) を算出することができる (Khakzad et al., 2013, 2011)。これにより、結果から原因を推測する診断的分析 (Diagnostic analysis) が可能となる。

$$P(X|E) = \frac{P(X, E)}{P(E)} = \frac{P(X, E)}{\sum_x P(X, E)} \quad (4-2)$$

本研究では、Norsys 社の Netica software (Norsys Software Corp, 2022) を用いて、BN の構築を行った。なお、定義式 (補足資料 A-3) によって定義される条件付確率については、それぞれ 1,000 回の繰り返し計算によって、条件付確率表を設定した。また、親ノードの各変数の確率値を設定する際に十分なデータが存在しない場合には、Kabir ら (2019) や Cockburn and Tesfamariam (2012) と同様に、親ノードの各変数を等確率として設定した。

本研究で構築した BN と各ノードに対応する項を図 4-3 に、設定した各親ノードと子ノードの変数を表 4-1 と表 4-2 に示す。本研究で構築した BN のノード数は 36 (うち親ノード 13)、リンク数は 64、条件付確率の合計数は 79,998,048 となった。なお、本研究で構築した BN における各ノード間の因果関係や各変数の区切り方は、過去の事故事例や統計データ、筆者の主観を基に設定しており、構築した BN は実際の事象の因果関係を特定するものではないことに注意が必要である。

表 4-2 子ノードの変数の設定

ノード名 (子ノード)	変数	変数の数	単位
Landslide_impact (土砂がタンクに到達)	Yes, No	2	-
Tank_collapse (タンクの破損)	Yes, No	2	-
Dispersion_air (化学物質が大気に拡散)	Yes, No	2	-
Collapsed_soil_volume (崩壊土量)	40, 80, 100, 150, 210, 240, 370, 500	7	m ³
Release_rate (流出率)	0, 0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3, 0.3-0.4, 0.4-0.5, 0.5-0.6, 0.6-0.7, 0.7-0.8, 0.8-0.9, 0.9-1	11	-
Tank_height (タンクの高さ)	0, 0-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9	7	m
Tank_diameter (タンクの直径)	0, 0-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9	6	m
Tank_collapse_height (タンクの破損高さ)	0-0.25, 0.25-0.5, 0.5-0.75, 0.75-1, 1-1.25, 1.25-1.5, 1.5-1.75, 1.75-2, 2-2.25, ≥2.25	10	m
Release_amount (流出量)	0, 0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-250, 250-300, 300-350, 350-400, 400-450, 450-500	11	m ³
Storage_amount (最大貯蔵量)	0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-600	6	m ³
Puddle_depth (プールの深さ)	0, 0-0.01, 0.01-0.05, 0.05-0.1, ≥0.1	5	m
Evaporation (揮発量)	0, 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, ≥50	7	kg/s
Outdoor_concentration (大気中濃度)	0, 0-2900, 2900-8600, ≥8600	4	ppm
Temperature (気温)	(-10)-(-5), (-5)-0, 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40	10	°C
Wind_speed (風速)	0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, ≥7	8	m/s
Solar_insolation (日射量)	Strong, Moderate, Slight, No	4	-
Cloudiness (雲量)	0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10	10	-
Atmospheric_stability_level (大気安定度)	Class A, Class B, Class C, Class D, Class E, Class F	6	-
Wind_direction (風向)	N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW	16	-
Population (周辺人口)	0, 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50, 50-55, 55-60, 60-65, 65-70, 70-75, 75-80, 80-85, 85-90, 90-95, 95-100	21	人
Above_AEGL3 (AEGL 3 超過確率)	AEGL3, No effect	2	-
AEGL3_exposure_population (AEGL 3 の曝露人数)	0, 0-1, 1-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50, 50-55, 55-60, 60-65, 65-70, 70-75, 75-80, 80-85, 85-90, 90-95, 95-100	22	人
AEGL3_exposure_population_one (1 人以上の AEGL 3 の曝露人数)	0, 0-1, ≥1	3	人

4.4.2 Natech の発生確率

本研究で想定した Natech のシナリオが発生する確率 (P_{Natech})は以下の式(4-3)で定義した。

$$P_{Natech} = P(L) \times P(I|L) \times P(R_l|I) \times P(D|R_l) \quad (4-3)$$

ここで、 $P(L)$ ：土砂災害の発生確率、 $P(I|L)$ ：土砂災害が発生した場合に、土砂がタンクに到達する確率、 $P(R_l|I)$ ：土砂がタンクに到達した場合にタンクが破損し、化学物質が流出する確率、 $P(D|R_l)$ ：化学物質が大気に拡散する確率を表す。

$P(L)$ (Landslide_occurrence)については、土砂災害発生確率の算出モデルが複数存在し (川越ら, 2008; 杉原ら, 2011; 松田・中谷, 2020), モデルによって発生確率を算出するための変数が異なる。本研究は、土砂災害警戒区域に立地している事業所を対象としているため、構築した手法を特定した事業所へ適用することを考えた場合、土砂災害警戒区域を変数とした発生確率モデルを用いることが適していると考えられる。そこで、本研究では、過去 24 年間 (1996～2019 年) の降雨による土砂災害履歴から算出された 1 年当たりの降雨を起因とする土砂災害発生確率を用いた (松田・中谷, 2020)。1996～2019 年までの 24 年間の土砂災害履歴は災害位置が特定され、降雨による土砂災害としてデジタル形式で整理されている期間となる。この発生確率は、土砂災害警戒区域に基づいて整理されており、土砂災害警戒区域及び土砂災害特別警戒区域ごとに算出されている。本研究で対象とする事業所は特別警戒区域が含まれるメッシュに該当しているため、土砂災害警戒特別区域における発生確率を設定した。

$P(I|L)$ (Landslide_impact)については、Lan ら (2021)が示した過去の土砂災害事例から得られた式(4-4), (4-5), (4-6)を用いて、土砂災害が発生した場合に土砂がタンクに到達する確率を算出した (図 4-4)。

$$P(I|L) = P(M(X_d, \theta_u) < 0|L) \quad (4-4)$$

$$M(X_d, \theta_u) = X_d - \left(\frac{H_s}{H_s/td} - \frac{H_s}{\tan \theta_u} \right) \quad (4-5)$$

$$H_s/td = 0.87 \tan \theta_u + 0.025 \quad (4-6)$$

ここで、 td ：土砂の移動距離 (m)、 H_s ：斜面の崩壊高さ (m)、 θ_u ：崩壊箇所の傾斜 (度)、 X_d ：タンクと斜面の距離 (m)を表す (図 4-4)。

式(4-5), (4-6)に示すように、土砂の移動距離を求めるためには、斜面の勾配 (Slope_angle; θ_u)と斜面の崩壊高さ (Slope_collapse_height; H_s)が必要となる。斜面の勾配については、タンクの設置されている標高と最大標高との差 (約 65 m)とタンクと最大標高の水平距離 (約 190 m) (図 3-3) から、平均 20 度として設定し、Lan ら (2021)の設定に基づき、標準偏差 1 度の正規分布に従うとした。一方、斜面の崩壊高さを特定することは困難であるため、本研究では不確実性を考慮し、0-65 m を 5 m 間隔で等確率として崩壊位置を設定した。最大崩壊位置の 65 m はタンクの設置されている標高と最大標高との差から設定した (図 3-3)。また、タンクと斜面の距離 (Safe_distance; X_d)については、斜面の下端からのタンクの設置位置を地図上で測定し (図 3-3)、不確実性を考慮して、5-30 m を 5 m 間隔で等確率として設定した。

$P(R_l|I)$ (Tank_collapse)については、Hao ら (2023)の考え方を採用し、土砂がタンクに到達した場合のタンクの破損確率を設定した (図 4-4)。Hao ら (2023)は洪水によるタンクの脆弱性の評価などに用いられている Limit state equation (LSE) (Antonioni et al., 2015; Landucci et al., 2012)によって、土砂災害に対する

タンクの破損確率を評価している (式(4-7))。

$$LSE = P_{sm} + P_{sa} - (P_{cr} + P_l) \quad (4-7)$$

ここで、 P_{sm} ：土石等の移動による力、 P_{sa} ：土石等の堆積による力、 P_{cr} ：タンクの座屈臨界圧力、 P_l ：タンク内の液体の抵抗圧力を表す (図 4-4)。 $LSE > 0$ の場合、タンクが座屈することによる破損、化学物質の流出が生じることが想定される。

本研究では、土砂災害防止法に基づく土砂災害特別警戒区域を設定するために用いられる以下の式(4-8)~(4-15)を使って、土石等の移動による力 (P_{sm})と土石等の堆積による力 (P_{sa})を算出した (国土交通省, 2001; 埼玉県, 2019)。

$$P_{sm} = \rho_m g h_{sm} \left[\left\{ \frac{b_u}{a} (1 - \exp(-2aH_s/h_{sm} \sin \theta_u)) \cos^2(\theta_u - \theta_d) \right\} \exp(-2aX_d/h_{sm}) + \frac{b_d}{a} (1 - \exp(-2aX_d/h_{sm})) \right] \quad (4-8)$$

$$b_u = \cos \theta_u \left(\tan \theta_u - \frac{(\sigma - 1)c}{(\sigma - 1)c + 1} \tan \phi \right) \quad (4-9)$$

$$a = \frac{2}{(\sigma - 1)c + 1} f_b \quad (4-10)$$

$$b_d = \cos \theta_d \left(\tan \theta_d - \frac{(\sigma - 1)c}{(\sigma - 1)c + 1} \tan \phi \right) \quad (4-11)$$

$$P_{sa} = \frac{\gamma h_{sa} \cos^2 \phi}{\cos \delta \left\{ 1 + \sqrt{\sin(\phi + \delta) \sin \phi / \cos \delta} \right\}^2} \quad (4-12)$$

$$h_{sa} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{W^2 \tan^2 \phi + 4W h_{sa1} \tan \phi} - W \tan \phi \right) \quad (4-13)$$

$$W = 3.94 V_o^{0.366} \quad (4-14)$$

$$h_{sa1} = \frac{-X_d + \sqrt{X_d^2 + 2S \tan(90 - \theta_u)}}{\tan(90 - \theta_u)} \quad (4-15)$$

各パラメータの設定を表 4-3 に示す。ここで、土石等の移動高さ (Height_movement_sediment; h_{sm})は土砂災害警戒区域を策定するための手法の中で、斜面の崩壊深の 2 分の 1 として設定されている (埼玉県, 2019)。そこで、本研究では過去の事例から得られた斜面の崩壊深の統計データ(中谷ら, 2020)を基に、設定されている崩壊深の区分の 2 分の 1 を土石等の移動の高さの区分として再設定し、事前確率を設定した。また、崩壊土量 (Collapsed_soil_volume; V_o)については、埼玉県 (2019)に基づき、斜面の崩壊高さ (H_s)に基づく形で設定した。

表 4-3 土石等の移動と堆積による力を算出するためのパラメータ

項目	パラメータ	単位	設定
P_{sm} (kN/m ² =kPa)	g	m/s ²	重力加速度
	ρ_m	t/m ³	土石等の密度：1.8 (埼玉県, 2019)
	h_{sm}	m	土石等の移動の高さ (Height_movement_sediment)
	H_s	m	急傾斜地の高さ (Slope_collapse_height)
	θ_u	度	急傾斜地の傾斜 (Slope_angle)
	θ_d	度	急傾斜地の下端から隣接する急傾斜地以外の土地の傾斜：0
	X_d	m	タンクと斜面の距離 (Safe_distance)
	σ	-	土石等の比重：2.6 (埼玉県, 2019)
	c	-	土石等の容積濃度：0.5 (埼玉県, 2019)
	ϕ	度	土石等の内部摩擦角：30 (砂質土) (埼玉県, 2019)
	f_b	-	土石等の流体抵抗係数：0.025 (埼玉県, 2019)
P_{sa} (kN/m ² =kPa)	γ	t/m ³	土石等の単位体積重量：17 (砂質土) (埼玉県, 2019)
	h_{sa}	m	土石等の堆積高さ (式(4-13))
	ϕ	度	土石等の内部摩擦角：30 (砂質土) (埼玉県, 2019)
	δ	度	建築物の壁面摩擦角：内部摩擦角 $\phi \times 2/3$ (埼玉県, 2019)
	W	m	斜面の最大崩壊幅 (式(4-14))
	V_o	m ³	崩壊土量 (Collapsed_soil_volume)
	h_{sa1}	m	水平に土石等が堆積するときの堆積高 (式(4-15))
	X_d	m	タンクと斜面の距離 (Safe_distance)
	S	m ²	土石等の断面積：崩壊土量(V_o)/最大崩壊幅(W) (埼玉県, 2019)
	θ_u	度	急傾斜地の傾斜 (Slope_angle)

タンク内の液体の抵抗圧力 (P_l)とタンクの座屈臨界圧力 (P_{cr})はそれぞれ式(4-16), (4-17)から求めた (Hao et al., 2023; Qin et al., 2020) (図 4-4)。

$$P_l = \rho_l g h_l \quad (4-16)$$

$$P_{cr} = \frac{2.59 E_y t_{cr}^2}{Th \times Td \sqrt{\frac{Td}{t_{cr}}}} \quad (4-17)$$

各パラメータの設定を表 4-4 に示す。ここで、貯蔵率は最大量の 80%が貯蔵されていると仮定し、タンクの厚みは危険物の規制に関する政令 (総務省, 2019)で定められている屋外貯蔵タンクの最小の厚みである 0.0032 m とした。タンクの高さ (Tank_height)とタンクの直径 (Tank_diameter)の設定は 4.4.3 項で詳しく説明する。

表 4-4 タンクの座屈臨界圧力とタンク内部の抵抗圧力を算出するためのパラメータ

項目	パラメータ	単位	設定
P_l (Pa)	g	m/s ²	重力加速度
	ρ_l	kg/m ³	ノルマルヘキサンの密度：660 (環境省, 2002)
	h_l	m	液体の高さ：貯蔵率(Sr ：80%)×タンクの高さ (Tank_height)
P_{cr} (Pa)	E_y	Pa	ヤング率：日本産業規格(JIS) G3101「一般構造用圧延鋼材 SS400」, 206×10^9 (株式会社カブク, 2023)
	t_{cr}	m	タンクの厚み：0.0032 (総務省, 2019)
	Th	m	タンクの高さ (Tank_height)
	Td	m	タンクの直径 (Tank_diameter)

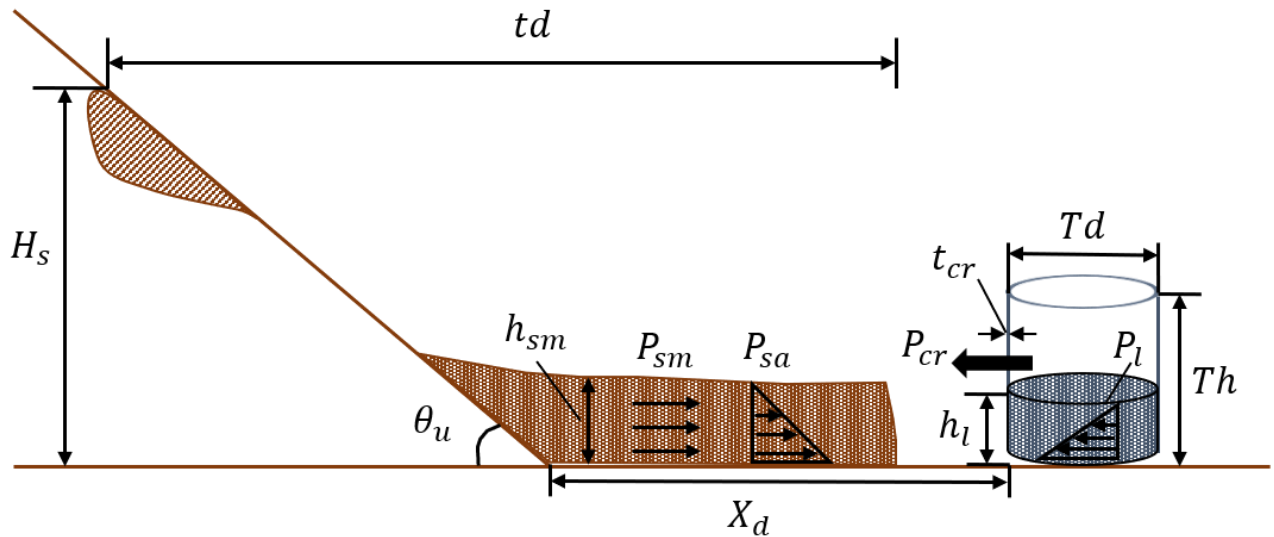


図 4-4 土砂災害によるタンクの破損に関する模式図

$P(D|R_l)$ (Dispersion_air)については、Ricci ら (2021)が実施した過去 9,100 件の Natech の事例分析を基に設定した。Ricci ら (2021)は流出した物質の Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)分類ごとに最終的に発生したシナリオ (火災、爆発、有毒ガスの拡散、環境汚染、流出したが急性影響が生じなかった事象、複数シナリオ) を整理している。本研究で対象としたノルマルヘキサンは、GHS 分類において可燃性及び水生環境有害性を有しており(独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022)、Ricci ら (2021)の分析によると、このような GHS 分類を有する化学物質が流出した場合、有毒ガスの拡散は発生していない。しかし、火災や爆発などの事象が発生しなかった場合には、揮発性を有するノルマルヘキサン (神奈川県, 2020)は大気へ拡散すると考えられ、本研究で構築した BN は、事故が発生したが、気象条件や流出量によって急性影響が生じなかった事象もシナリオとして含む。そこで、本研究では、Ricci ら (2021)の分析結果から、火災と爆発が生じなかった事例を化学物質が大気へ拡散する可能性がある事例 (全 4,553 件中 4,245 件) としてみなし、 $P(D|R_l)$ を設定した。

4.4.3 流出量の算出

まずタンクと斜面の距離に基づき、タンクの直径(Tank_diameter; Td)とタンクの高さ(Tank_height; Th)

を設定した。タンクの直径(Td)については、ArcMap ver 10.8.1 (Esri 社) を用いて計測したが、計測した数値にも不確実性が生じると考えられるため、5~9 m を 1 m ずつ連続値として設定した。タンクの高さ(Th)については、Google map と新潟県の資料から貯蔵量が特定できる 2 つのタンクについて、測定した直径を基に算出した。貯蔵量が分からないタンクについては、不確実性を考慮し、算出可能な貯蔵タンクの高さの範囲内 (4~9 m) で、1 m ずつ等確率でタンクの高さを設定した。これらの設定を基に、以下の式(4-18)より、各タンクの最大貯蔵量(Storage_amount; Sa) (m^3)を算出した。

$$Sa = \pi \times \left(\frac{Td}{2}\right)^2 \times Th \quad (4-18)$$

流出率(Release_rate; Rr) (-)については、土石等の移動高さ (h_{sm})に基づき、タンクが座屈し、亀裂が生じた破損位置(Tank_collapse_height; Tc) (m)よりも上部に存在する量が突発的に流出することを想定した (図 4-5)。タンクの破損位置(Tc)については、各区分における土石等の移動高さ (h_{sm})以下で発生すると考えられることを考慮し、土石等の移動高さに基づく形で、タンクの破損位置(Tc)の各区分の発生確率を設定した (表 4-5)。

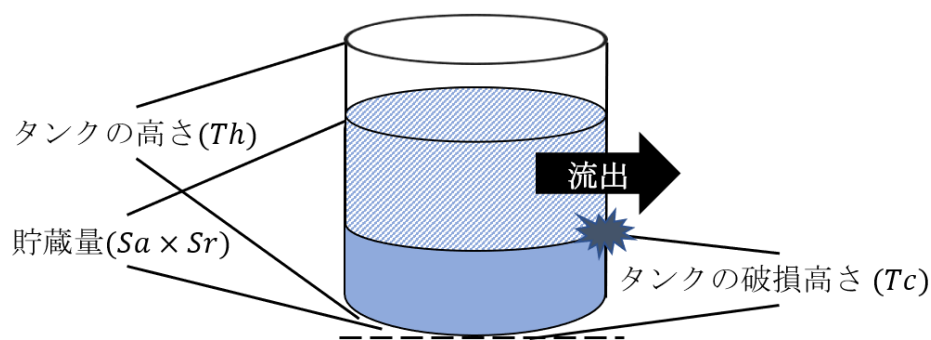


図 4-5 本研究で想定する流出のイメージ図

表 4-5 土石等の移動高さとタンクの破損位置の条件付確率表

Tc h_{sm}	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-
0-0.5	50.0	50.0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5-1.0	25.0	25.0	25	25	0	0	0	0	0	0
1.0-1.5	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	0	0	0	0
1.5-2.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	0	0
2.0-	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

*表内の数値は確率(%)を示している。

また、タンクの貯蔵率(Sr) (-)は 80%として設定し、以下の式(4-19)を用いて流出率(Rr)を設定した。

$$Rr = 1 - \frac{Tc}{Th \times Sr} \quad (4-19)$$

流出量(Release_amount; Ra) (m^3)は、最大貯蔵量 (Sa) (m^3)と貯蔵率(Sr) (-), 流出率 (Rr) (-)から以下の式(4-20)により算出した。

$$Ra = Sa \times Sr \times Rr \quad (4-20)$$

4.4.4 揮発量と大気中濃度の算出

流出した化学物質のプールの拡大については、Briscoe and Shaw (1980)のモデルを基に、円形プールが拡大すると仮定して、プール半径(r_a) (m)を算出した (式(4-21))。また、BN は有向非循環グラフであり、ループを作ることができないため、揮発によるプールの体積の減少を表現することができず、無限にプールから揮発することになる。そこで、本研究ではプールの最大面積を設定し、最大面積下における揮発量が継続した場合の総揮発量が流出量を超えた時間でプールが消滅すると仮定した。なお、この仮定によって、揮発の継続時間が過小評価されている可能性があることに注意が必要である。ここで、揮発のタイムステップ (Time_step; t) (s)は 1 秒間隔で最大 3,600 秒とした。また、第 3 章で用いたリスク評価ツール ALOHA (US NOAA and EPA, 2013)の設定を基に、プールの深さ(Puddle_depth; Pd) (m)は最小で 0.005 m まで広がると仮定した。これらの想定と対象事業所内に既に設置されている防油堤 (Catch_basin) (面積 : 1,100 m^2)を考慮し、以下の表 4-6 のようにプールの拡大を想定した。なお、Natech の発生時に防油堤が機能するかどうかは、Misuri ら (2020) がアンケート調査によって分析しているものの、地震と洪水のみが対象となっている。そこで、本研究では、機能する確率と機能しない確率をそれぞれ 50%と仮定した。

$$r_a = \left\{ r_0^2 + \left(\frac{8g\Delta Ra}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} t \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4-21)$$

ここで、 r_a : プール半径 (m), r_0 : 初期のプール半径 (m), g : 重力加速度 (m/s^2), Δ : 係数 (地表面の場合は 1), Ra : 流出量 (m^3), t : タイムステップ (s)を表す。

表 4-6 プールの拡大における想定

条件	想定
防油堤が機能しない場合 (Catch_basin="Not functioned")	$\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \leq 0.005 \text{ m であれば,}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{Ra}{\pi \cdot 0.005}} \quad Pd(t) = 0.005 \text{ m}$ 最大プール面積は $\frac{Ra}{0.005}$
防油堤が機能する場合 (Catch_basin="Functioned")	$\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \leq 0.005 \text{ m であれば,}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{Ra}{\pi \cdot 0.005}} \quad Pd(t) = 0.005 \text{ m}$ 最大プール面積は $\frac{Ra}{0.005}$ $\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \geq 1,100 \text{ m}^2 \text{ であれば,}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{1,100}{\pi}} \quad Pd(t) = \frac{Ra}{1,100 \text{ m}^2}$ 最大プール面積は $1,100 \text{ m}^2$

揮発量(Evaporation; Q) (kg/s)や大気中濃度(Outdoor_concentration; C) (ppm)を算出する際に必要となる気象条件については、日時に依存する形で設定した (図 4-3)。日付(Month)については、1 月 1 日を 1, 12 月 31 日を 365 として月ごとに連続値として表し、各月の日数に応じて事前確率を定めた。時間帯(Time_zone)については、本研究で用いた雲量の観測値の制約から、3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 時の 7 個の変数を取り上げ、それぞれ等確率として設定した。気温(Temperature; T_{ce})、風速(Wind_speed; u_{10})、風向(Wind_direction)については、対象事業所が存在する新潟県柏崎市、雲量(Cloudiness)については新潟県新潟市のデータを 2017~2021 年の 5 年分ダウンロードし(気象庁, 2022a)、日時に依存する形で別途作成した条件付確率表を BN に取り込んだ。なお、柏崎市の風速測定高度は 10 m となっているため(気象庁, 2022b)、ここでの風速は高度 10 m 地点における風速 (u_{10}) である。気温は-10℃~40℃を 5℃間隔、風速は0~7 m/s 以上を 1 m/s 間隔、風向は16方位、雲量は0~10を1間隔で設定した。日射量(Solar_insolation)と大気安定度(Atmospheric_stability_level)については、対象事業所のポイントデータの緯度・経度と ALOHA の Technical guidance(US NOAA and EPA, 2013)を基に設定し、日射量は Strong, Moderate, Slight, None の 4 変数、大気安定度は A, B, C, D, E, F の 6 変数を設定した。

揮発量(Q)については、本研究で用いた柏崎市の風速測定高度が 10 m となっているため(気象庁, 2022b), Mackay and Matusgu (1973)のモデル(式(4-22), (4-23))を用いて設定した(Heymes et al., 2013)。また、モデル式のパラメータとして、Yellow book (van den Bosch and Weterings, 1997)で示されている値を用い、気温(T_{ps})と風速(u_{10})に依存する形で揮発量を算出した。

$$Q(t) = k_m(u_{10}, r_a(t)) \times \frac{P_v(T_{ps}) \times \mu_l}{R \times T_{ps}} \times \pi(r_a(t))^2 \quad (4-22)$$

$$k_m(u_{10}, r_a(t)) = 0.004786 \times u_{10}^{0.78} \times (2 \times r_a(t))^{-0.11} \times 0.8^{-0.67} \quad (4-23)$$

ここで、 $P_v(T_{ps})$: 温度 T_{ps} 時の蒸気圧 (N/m²)、 μ_l : 対象物質の分子量 (kg/mol)、 R : 気体定数 (J/(mol ·

K)), T_{ps} : 気温 (K), u_{10} : 高度 10 m 地点における風速 (m/s), $r_a(t)$: プール半径 (m)を表す。

また、対象としたノルマルヘキサンの蒸気圧 $P_v(T_{ps})$ はアントワン式(式(4-24))に基づき設定し、パラメータ(a_p , b_p , c_p)は National Institute of Standards and Technology (NIST) の Chemistry WebBook から引用した(National Institute of Standards and Technology, 2021)。なお、NIST が示しているパラメータは約 13°C以上 69°C未満と約-96°C以上-8°C未満の 2 つの条件下で適用可能であるが、本研究の対象地域では-8°C未満になることはほとんどないため、約 13°C以上で適用可能なパラメータを用いて外挿することで、蒸気圧を算出した。

$$\log_{10}P_v(T_{ps}) = a_p - \left(\frac{b_p}{(T_{ps} + c_p)} \right) \quad (4-24)$$

ここで、 a_p : 4.00266, b_p : 1171.53, c_p : -48.784 である (National Institute of Standards and Technology, 2021)。

大気中濃度(C)については、Gaussian plume model (式(4-25)~(4-27))を用いて設定した。

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)u_{pd}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-Pd)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+Pd)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) \right\} \quad (4-25)$$

$$\sigma_y(x) = S_y x (1 + 0.0001x)^{-1/2} \quad (4-26)$$

$$\sigma_z(x) = S_{z1} x (1 + S_{z2} x)^{S_{z3}} \quad (4-27)$$

ここで、風下方向の距離($x_distance$; x)と風向に垂直な方向の距離($y_distance$; y)、濃度の測定高度(z_height ; z)はそれぞれ最大 1,000 m, 500 m, 2 m とした。風下方向の距離(x)と風向に垂直な方向の距離(y)は、それぞれ 250 m 間隔で連続値として設定し、事前確率は等確率とした。また、濃度の測定高度(z)は 0.5 m 間隔で連続値として設定し、事前確率は等確率とした。拡散係数 $\sigma_y(x)$ と $\sigma_z(x)$ のパラメータ S_y , S_{z1} , S_{z2} , S_{z3} については、ALOHA の Technical guidance (US NOAA and EPA, 2013)に基づき、大気安定度と周辺環境(Surrounding_environment)に依存する形で設定した。周辺環境については、ALOHA において地表面粗度が 20 cm 未満で選択される Rural と 20 cm 以上で設定される Urban をそれぞれ等確率として設定した (US NOAA and EPA, 2013)。プールの液面上(揮発面)における風速(u_{pd})は、ALOHA の Technical guidance (US NOAA and EPA, 2013)に基づき、式(4-28)より算出した。ここで、 α は経験的に得られたパラメータであり、大気安定度に依存する (Havens and Spicer, 1985)。

$$u_{pd} = u_{10} \left(\frac{Pd}{10} \right)^\alpha \quad (4-28)$$

4.4.5 曝露人口の算出

本研究では、急性毒性指標として、第 3 章と同様に Acute Exposure Guideline Level (AEGL) (国立医薬品食品衛生研究所, 2020)を用いて、ヒト健康影響を評価した。AEGL を超過する濃度に曝露する可能性のある人数は、大気中濃度 (C)と 16 方位の風向、風下方向の距離(x)、風に垂直な方向の距離(y)に基づき設定した。評価対象範囲については、Gaussian plume model が風下方向の x 軸に関して、左右対称であ

ることを考慮し、流出地点から 1 km×1 km の範囲における曝露人数を算出した (図 4-6)。具体的には、風向と風下方向の距離(x)、風向に垂直な方向の距離(y)に基づく各 250 m メッシュの周辺人口(Population; P)を算出し、そのメッシュにおける AEGL 超過確率(Ep)を求めることで、AEGL を超過する濃度に曝露する可能性のある人数が生じる確率を算出した (図 4-6)。本研究では、解析対象時間を 3,600 s に設定しているため、大気中濃度(C)に基づき、ノルマルヘキサンの AEGL の 60 分値 (AEGL 3: 8,600 ppm) (US EPA, 2023)を用いて、AEGL 3 超過確率(Above_AEGL3)を設定した。最終的には、超過確率を基に、AEGL3 を超過する濃度に曝露する人数が発生する確率(AEGL3_exposure_population)と AEGL 3 に曝露する可能性がある人数が 1 人以上発生する確率 (AEGL3_exposure_population_one)を算出した。

風向に基づく各 250 m メッシュの周辺人口(P)は、国勢調査から得られた 250 m メッシュ人口データ (政府統計の総合窓口(e-Stat), 2022)を基に算出した。具体的には、各 16 方位の方角に作成した 1 km メッシュを 16 個の 250 m メッシュに分割し、各 250 m メッシュが重なった範囲における国勢調査の人口データを面積按分することによって算出した (図 4-7)。なお、本研究では、ArcGIS Pro ver 2.6.2 (Esri 社)の Union 機能を用いて、人口を面積比率で按分した。加えて、従業員の曝露を考慮するために、各 16 方位の 250 m メッシュの中で、最も流出地点に近い 250 m メッシュには従業員数 (20 人)を追加した。

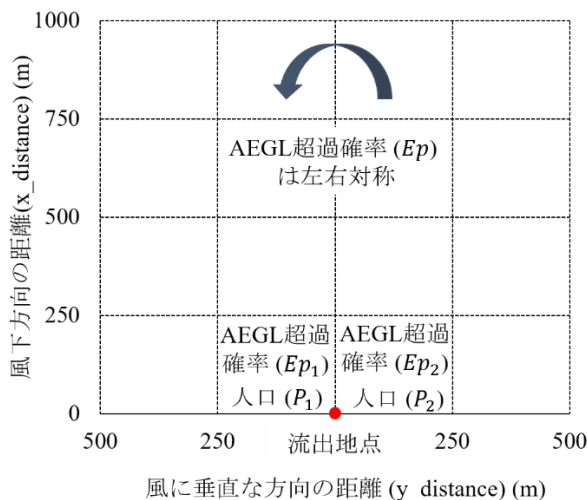


図 4-6 曝露人数の設定

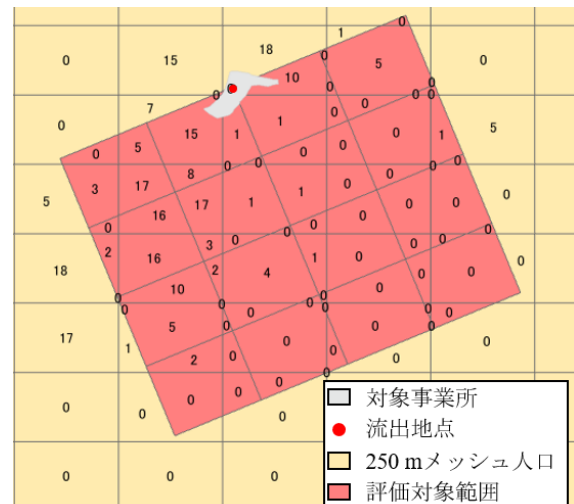


図 4-7 事業所の周辺人口の算出例

*風向が北西ケースの場合を示しており、図中の数字は面積按分後の人口を表す。

4.5 社会的リスクの評価

本研究のような定量的な Natech のリスク評価においては、一般的に Individual risk (個人リスク)と Societal risk (社会的リスク)の 2 種類の評価指標が用いられる (Krausmann, 2017)。前者の個人リスクは、事業所周辺のある特定の位置において、個人が悪影響 (死亡や負傷など) を受ける確率を表す。個人リスクは周辺の人口密度や分布に依存しない指標であるのに対し、社会的リスクはある地域で発生した事故によって影響を受ける可能性のある「人数」と「確率」の関係を表し (Health and Safety Executive, 2010; Jonkman et al., 2003; Krausmann, 2017)、周辺地域の人口分布や密度に依存した指標である。4.4.5 項に示したように、本研究で構築した BN によって、AEGL を超過する濃度に曝露する人数とその発生確率が得られるため、本研究では、事業所の周辺地域の人口分布などを考慮した社会的リスクが評価指標として適していると考えられる。社会的リスクには複数の表現手法が存在するが (Jonkman et al., 2003)、本研

究では、複数の Natech 研究(Antonioni et al., 2009; Krausmann, 2017; Ricci et al., 2021)において用いられており、社会的リスクを表現する際に一般的に用いられる F-N curve (Jonkman et al., 2003)を用いて評価を行った。F-N curve は 1 年当りの死者数 N が γ_f 以上となる発生確率と死者数の関係をグラフにプロットしたもので、横軸、縦軸ともに対数目盛で表される (式(4-29) (Jonkman et al., 2003))。

$$1 - F_N(\gamma_f) = P(N > \gamma_f) = \int_{\gamma_f}^{\infty} f_N(\gamma_f) \quad (4-29)$$

ここで、 $f_N(\gamma_f)$: 1 年間当りの死者数の確率密度関数、 $F_N(\gamma_f)$: 1 年間当りの死者数の累積分布関数を表し、1 年間当りの死者数(γ_f)は AEGL 3 以上の濃度に曝露する人数とした。

また、得られた F-N curve を用いてリスクを評価するに当たって、本研究では F-N 基準線 (式(4-30))との比較を実施した。この基準線はイギリス、オランダ、チェコ、フランス、デンマーク、香港など複数の国・地域で定められており、リスクを伴う危険な活動の制限に用いられている (Jonkman et al., 2003; Trbojevic, 2005)。一方、それぞれの国・地域で用いられている基準線の値は異なるため (Jonkman et al., 2003; Trbojevic, 2005)、任意の 1 つに決めることは難しい。そこで、本研究では、Natech のリスク分析に関する先行研究 (Ricci et al., 2021)で用いられているイギリスとオランダの基準値に、それらの基準値の中間に位置する香港とデンマークにおいて設定された基準値を目安として加え (表 4-7)、比較を行った。

$$1 - F_N(\gamma_f) = Co / \gamma_f^\beta \quad (4-30)$$

ここで、 Co : F-N criterion line の位置を決定する定数、 β : F-N criterion line の傾き (リスク回避度)を表す。なお、傾き β は重大な事故により重みを付けることが反映されており、 $\beta = 1$ はリスク中立、 $\beta = 2$ はリスク回避と呼ばれている (Vrijling and Van Gelder, 1997)。なお、香港の F-N 基準線における γ は最大で 1,000 人である (Jonkman et al., 2003)。

表 4-7 各国・地域の F-N 基準線 (Jonkman et al., 2003)

国	β	Co
イギリス	1	1×10^{-2}
香港	1	1×10^{-3}
オランダ	2	1×10^{-3}
デンマーク	2	1×10^{-2}

4.6 診断的分析

本研究では、結果に寄与する原因を特定するために、ベイズの定理 (式(4-2))を基に、診断的分析を実施した。具体的には、ベイズの定理を基に、あるノード中の変数(v_a)の事後確率($Po(v_a)$)が事前確率($Pr(v_a)$)からどれだけ変動したかを表す Ratio of Variance (RoV) (George and Renjith, 2021; Qin et al., 2020; Zarei et al., 2017)を算出した (式(4-31))。RoV が正である変数は事前確率に比べて事後確率が増加しているため、ある結果が生じるとした場合に発生した可能性が高い変数であると解釈できる。また、RoV が大きければ大きいほど、事後確率の事前確率に対する増加率が大きいため、結果に大きく影響を与える

変数となる。これによって、ノード中の変数間の結果に対する寄与度を比較することが可能となる。

$$RoV = \frac{Po(v_a) - Pr(v_a)}{Pr(v_a)} \quad (4-31)$$

本研究では、Time_step を除く各親ノードにおける変数 (表 4-1) を取り上げ、1 人以上の死者 (AEGL 3 の濃度に曝露した人) が発生する条件における RoV を算出した。

4.7 感度解析

診断的分析はあるノード中の変数間の寄与度を比較するための手法であるが、ノード間の比較はできない。そこで、本研究では、Netica 上の Sensitivity to Findings 機能 (Norsys Software Corp, 2020) を用いて感度解析を実施した。Sensitivity to Findings 機能では、あるノードに New finding (F) が与えられた時の対象ノード(Z)の分散 ($V(Z)$)の減少量 (Variance reduction; VR) を算出する (式(4-32))。得られた対象ノードの分散の減少量 (VR) が大きいノード、つまり対象ノードの分散を大きく減少させるノードが結果を左右する要因であると解釈でき、これによってノード間の比較が可能となる。

$$VR = V(Z) - V(Z|F) \quad (4-32)$$

本研究では、診断的分析と同様に Time_step を除く親ノード (表 4-1) を取り上げ、AEGL3 の濃度に曝露する可能性のある人数を対象として、感度解析を実施した。

4.8 結果と考察

4.8.1 社会的リスクの算出結果

タンクの斜面下端からの距離ごとの社会的リスクを図 4-8、各ケースにおける超過確率値を表 4-8 に示す。本研究ではタンクの厚みを最小の 0.0032 m、貯蔵率を最大の 80%、防油堤が機能する確率と機能しない確率はそれぞれ 50% として設定しており、斜面から 5-10 m の位置にあるタンクを Base ケースとしている (図 4-8)。なお、グラフの形は各日付、時間帯における風向によって、評価の対象領域が変わり、それに伴い人口分布が変化することに依存している。また、本研究で設定した各 16 方位における 250 m メッシュの人口は 100 人未満となった。

図 4-8 より、斜面から 5-10 m に位置するタンク (Base ケース) の社会的リスクは、取り上げた 4 カ国の中で最も安全側に立ったオランダの基準は超過しなかった。Ale (2005) によると、オランダでは法律によって明示的に禁止されていないものは全て許可されるため、この基準はリスク管理に関する議論の終着点として設定されている。一方、イギリスの基準は As low as reasonably practicable (ALARP) の原則の実現を目的とした議論の出発点として設定されている。このような基準の違いは各国の法律や歴史に依存しており、単純に比較することは困難である。しかし、気象条件や崩壊位置などの不確実性を考慮したリスク分析の結果、少なくともこの 4 つの基準の中で最も安全側に位置し、LPG 施設のリスク研究や大規模な事故に対する人々の嫌悪感などを考慮して定められたオランダの基準 (Ale, 2005) 未満となることが確認された。また、斜面からの距離が 10-15 m の位置にあるタンクの社会的リスクは、5-10 m の位置と比べて小さく (図 4-8)、1 人以上の死者が生じる確率は約 100 分の 1 になった (表 4-8)。これは斜面からの距離が延びることによって、斜面の崩壊高さによっては土砂が到達しなくなるからであり、

土砂が到達する確率が小さくなることに起因している。斜面からの距離が 15 m 以上の場合は土砂が到達しないことによって、社会的リスクが 0 となった (表 4-8)。この結果から、本研究で対象とした事業所において、事故を回避するためには、少なくともタンクと斜面の距離を 15 m 以上離すことが必要であると考えられる。

防油堤の機能の有無を考慮した結果、防油堤が機能せず、防油堤外へ化学物質が流出した場合は社会的リスクが増加し (図 4-8)、1 人以上の死者が生じる確率は防油堤が機能するケースと比較して、約 2.5 倍に増加した (表 4-8)。この結果から、第 3 章の結果と同様に、防油堤によってプールの面積を抑制することによって、ヒト健康リスクを減少させることが可能である。

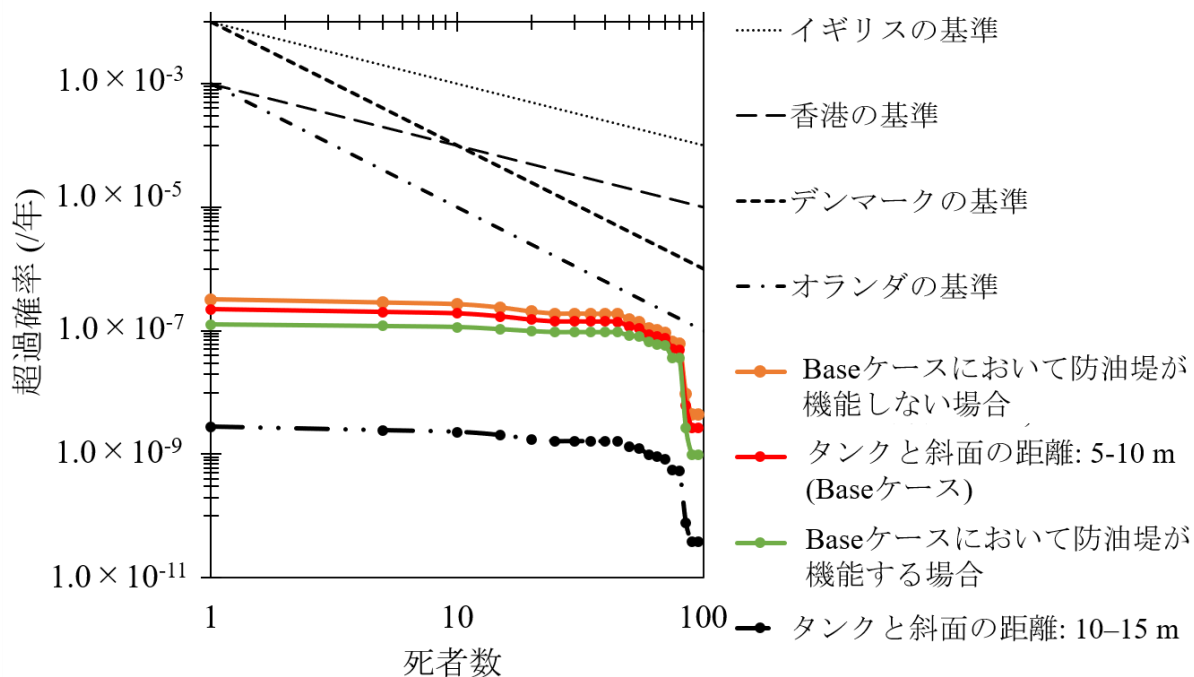


図 4-8 タンクの斜面からの距離ごとの社会的リスクの評価結果

表 4-8 各ケースにおける死者数の超過確率

死者数	Base ケースにおいて 防油堤が機能しない 場合	タンクと斜面 の距離: 5-10 m (Base ケース)	Base ケースにおいて 防油堤が機能する 場合	タンクと斜面の 距離: 10-15 m	タンクと斜面の 距離: 15-20 m
1	3.21×10^{-7}	2.24×10^{-7}	1.26×10^{-7}	2.77×10^{-9}	0
5	2.85×10^{-7}	2.02×10^{-7}	1.19×10^{-7}	2.42×10^{-9}	0
10	2.67×10^{-7}	1.91×10^{-7}	1.15×10^{-7}	2.28×10^{-9}	0
15	2.36×10^{-7}	1.71×10^{-7}	1.06×10^{-7}	2.02×10^{-9}	0
20	2.03×10^{-7}	1.51×10^{-7}	9.85×10^{-8}	1.75×10^{-9}	0
25	1.88×10^{-7}	1.42×10^{-7}	9.49×10^{-8}	1.62×10^{-9}	0
30	1.88×10^{-7}	1.42×10^{-7}	9.49×10^{-8}	1.62×10^{-9}	0
35	1.87×10^{-7}	1.41×10^{-7}	9.46×10^{-8}	1.61×10^{-9}	0
40	1.87×10^{-7}	1.41×10^{-7}	9.46×10^{-8}	1.61×10^{-9}	0
45	1.86×10^{-7}	1.40×10^{-7}	9.38×10^{-8}	1.60×10^{-9}	0
50	1.51×10^{-7}	1.17×10^{-7}	8.30×10^{-8}	1.32×10^{-9}	0
55	1.40×10^{-7}	1.10×10^{-7}	7.95×10^{-8}	1.23×10^{-9}	0
60	1.10×10^{-7}	8.77×10^{-8}	6.52×10^{-8}	9.73×10^{-10}	0
65	1.03×10^{-7}	8.16×10^{-8}	6.02×10^{-8}	9.09×10^{-10}	0
70	9.33×10^{-8}	7.57×10^{-8}	5.81×10^{-8}	8.19×10^{-10}	0
75	6.53×10^{-8}	5.10×10^{-8}	3.68×10^{-8}	5.64×10^{-10}	0
80	6.19×10^{-8}	4.89×10^{-8}	3.60×10^{-8}	5.32×10^{-10}	0
85	9.65×10^{-9}	6.15×10^{-9}	2.64×10^{-9}	7.82×10^{-11}	0
90	4.43×10^{-9}	2.71×10^{-9}	9.83×10^{-10}	3.79×10^{-11}	0
95	4.43×10^{-9}	2.71×10^{-9}	9.83×10^{-10}	3.79×10^{-11}	0

4.8.2 診断的分析の結果

1人以上の死者が発生する条件における親ノードにおける各変数の RoV（事前確率からの事後確率の増加率）を表 4-9 に示す。なお、表 4-9 は事後確率が事前確率よりも増加した変数のみを示しており、これらの変数は1人以上の死者が発生するという事象を生じさせる可能性が高い変数であると解釈できる。

最も RoV が大きくなった変数は土砂災害の発生に関するノード (Landslide_occurrence)が”Yes”の状態であり (表 4-9)、これは土砂災害が発生することを示している。死者が発生する条件においては、土砂災害が発生し、タンクから化学物質が流出しているはずであり、この結果はそれを意味している。次いで、RoV が大きくなったノードは土石等の移動の高さ (Height_movement_sediment)となり (表 4-9)、死者が発生する条件においては、土石等の移動の高さが 2 m 以上、1.5-2 m、1-1.5 m である事後確率はそれぞれ 50.0%、29.0%、20.1%となった。土石等の移動の高さは特にタンクの破損確率に影響をもたらす、4.8.1 項の Base ケースと比較して、土石等の移動の高さが 2 m 以上であった場合はタンクの破損確率は約 22 倍大きくなり、1人以上の死者が発生する確率は約 21 倍となった。また、土石等の移動の高さが 2 m 以上の場合の社会的リスクはオランダの基準を超過することが分かった (図 4-9)。この結果から、土石等の移動の高さは特にリスク評価の結果に影響をもたらす要因であることが特定された。さらに、

表 4-9 より、斜面からの距離 (Safe_distance) が 5-10 m の位置にあるタンクが破損した可能性が高いことを示された。この結果から、4.8.1 項で示した結果と同様に、タンクと斜面の距離は事故を防ぐために特に重要な要素であると考えられる。斜面の傾斜 (Slope_angle) と斜面の崩壊高さ (Slope_collapse_height)については、傾斜や高さが大きくなればなるほど、RoVが大きくなっている。これは、傾斜や崩壊高さが大きくなればなるほど、土砂災害の発生に伴う土石等の到達範囲が広くなり、その分、事故の発生確率が大きくなることに起因している。化学物質の拡散に関連する変数としては、風向に垂直な方向の距離 (y_distance)が風下方向の距離 (x_distance)よりも結果に寄与しており、特に風向に垂直な方向 0-250 m の地点は特に高リスクとなりやすいと考えられる (表 4-9)。また、風下方向の距離が 0-250 m, 250-500 m の距離も RoV が正となっていることから (表 4-9), 高リスクになりやすいことが示唆されている。図 4-9 から、Base ケースにおいて、風に垂直な方向 0-250 m 地点と風下方向 0-250 m 地点におけるリスクは、各地点を等確率として設定したケースよりも社会的リスクが大きくなった。1 人以上の死者が生じる確率は、風に垂直な方向 0-250 m と風下方向 0-250 m 地点において、それぞれ約 100.0%, 44.6%大きくなった。この結果から、本研究で対象とした事業所の周辺地域の住民は、風に垂直な方向、風下方向ともに 500 m 以上に避難することがリスクを回避するために必要であると考えられる。さらに、化学物質の拡散に関わる変数としては、時間帯 (Time_zone)が結果に比較的寄与しており、21 時、3 時、6 時、18 時などの夜間から明け方にかけての時間帯で特に高リスクとなることが分かった (表 4-9)。その時間帯に

高リスクとなるのは、大気が安定しやすく、揮発した物質が拡散しにくくなることで (Cieslik, 1991), 日中よりも大気中濃度が高くなる可能性が高いことに起因する。このような高リスクとなる可能性のある

表 4-9 1 人以上の死者が発生する条件における親ノードの RoV

ノード名	変数	RoV (%)
土砂災害の発生 (-)	Yes	29311.8
土石等の移動高さ (m)	≥2.0	2066.7
土石等の移動高さ (m)	1.5-2	1009.7
タンクと斜面の距離 (m)	5-10	393.9
斜面の傾斜 (度)	27-29	381.5
斜面の傾斜 (度)	25-27	317.4
斜面の傾斜 (度)	23-25	216.0
斜面の崩壊高さ (m)	60-65	200.9
斜面の崩壊高さ (m)	55-60	190.3
斜面の崩壊高さ (m)	50-55	153.9
斜面の傾斜 (度)	21-23	105.0
風向に垂直な方向の距離 (m)	0-250	100.0
斜面の崩壊高さ (m)	45-50	94.1
土石等の移動高さ (m)	1-1.5	86.9
時間帯 (時)	21	56.4
時間帯 (時)	3	54.6
風下方向の距離 (m)	0-250	44.8
防油堤の機能 (-)	Not functioned	43.6
時間帯 (時)	6	42.4
斜面の崩壊高さ (m)	40-45	39.8
風下方向の距離 (m)	250-500	35.0
周辺環境 (-)	Rural	34.4
時間帯 (時)	18	26.8
日付 (日)	273-304	11.7
日付 (日)	304-334	9.7
日付 (日)	151-181	6.3
日付 (日)	120-151	4.2
日付 (日)	181-212	4.1
日付 (日)	243-273	2.8
日付 (日)	90-120	1.1
濃度の測定高度 (m)	0-5	0.8
濃度の測定高度 (m)	1-1.5	0.7
日付 (日)	59-90	0.3
濃度の測定高度 (m)	0.5-1	0.0

夜間から未明に事故が発生した場合には、吸着剤の使用やオイルフェンスの設置などの緩和策の実施が困難になる可能性が高いと考えられる。そのため、夜間から未明に土砂災害が差し迫った状況には、事故の発生を防ぐための予防策を事前に実施すべきである。また、18 時の RoV が他の時間帯と比べて小さいのは (表 4-9)、対象地域では夏季の場合、日が出ている可能性があり、3 時、6 時、21 時と比べて揮発した物質が拡散しやすいことが原因として考えられる。4.8.1 項でも示したように、防油堤が機能しない場合はリスクが増加する可能性があり、表 4-9 で示した通り、1 人以上の死者が発生する条件においては、防油堤が機能しなかった確率（事後確率）は増加した。この結果から、土砂災害発生時においても防油堤が機能するために、防油堤の構造の強化や防油堤をより深くすることによって、水や土砂が溜まっても流出した物質を保持できるようにするなど、防油堤の機能を維持するための物理的な対策やオペレーションを検討する必要がある。表 4-9 に示した変数の中では比較的 RoV が小さいものの、周辺環境 (Surrounding_environment) が "Rural" の場合や発生する日付 (Month) が 10 月 ("273-304"), 11 月 ("304-334"), 6 月 ("151-181"), 5 月 ("120-151"), 7 月 ("181-212"), 9 月 ("243-273"), 4 月 ("90-120") などが高リスクとなる可能性があることが分かった。周辺環境について、Gaussian plume model の拡散係数に関するパラメータは、地表面粗度に基づく "Rural" と "Urban" の各設定に依存しており、"Urban" エリアでは建築物上に発生する乱流や熱の損失によって発生する対流により、"Rural" エリアよりも化学物質が拡散しやすい (Briggs, 1973) ことが反映されていると考えられる。発生する月は地域ごとの気象条件の特徴を表しており、上記に挙げた月では風速の期待値の平均が 2.3 m/s であるのに対し、それ以外の月における期待値の平均は 3.0 m/s であり、RoV が大きくなった月では揮発した化学物質が拡散しにくいことによって大気中濃度が高くなり、その結果として高リスクな状態になりやすいことが結果に反映されたと考えられる。なお、月ごとの気象条件の変化は地域によって大きく変わることが想定され、他の事業所に本研究の手法を適用した場合、高リスクとなる可能性のある月は本研究と異なると考えられる。一方、濃度の測定高度 (z_height) については、これらの変数と比べて、結果に大きく寄与しないことが分かった。

Lan ら (2021) も本研究と同様に、タンクが破損した場合の事後確率と事前確率の変化を分析することで、タンクと斜面の距離が特に結果に影響を与える要因であることを明らかにした。一方、本研究は化学物質の大気拡散をシナリオとして考慮することによって、Lan ら (2021) の研究では実施されていない化学物質の大気拡散に関する変数との比較を可能にするとともに、土石等の移動・堆積に伴うタンクの破損確率を考慮することによって、土石等の移動の高さが結果に大きく寄与する要因であることを明らかにした。

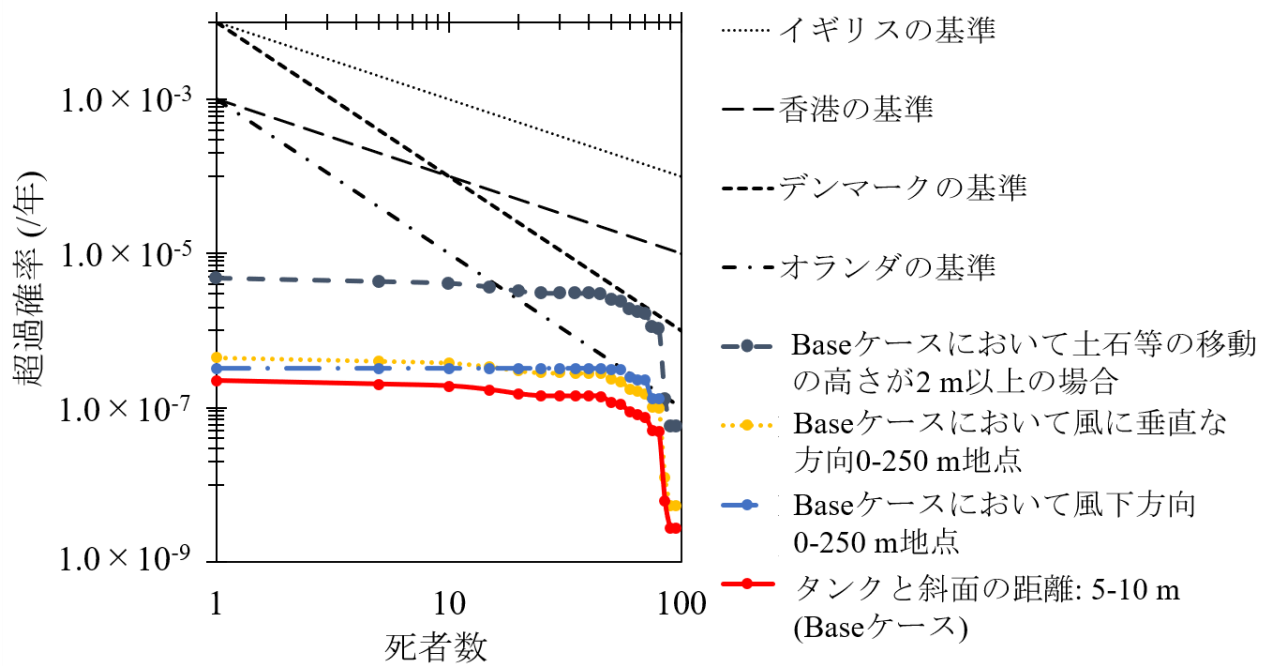


図 4-9 診断的分析の結果を踏まえた社会的リスクの評価結果

4.8.3 感度解析の結果

AEGL3 の濃度に曝露する可能性のある人数 (死者数) に対する感度解析の結果を図 4-10 に示す。ここでは、各親ノード間の VR の比較を示している。

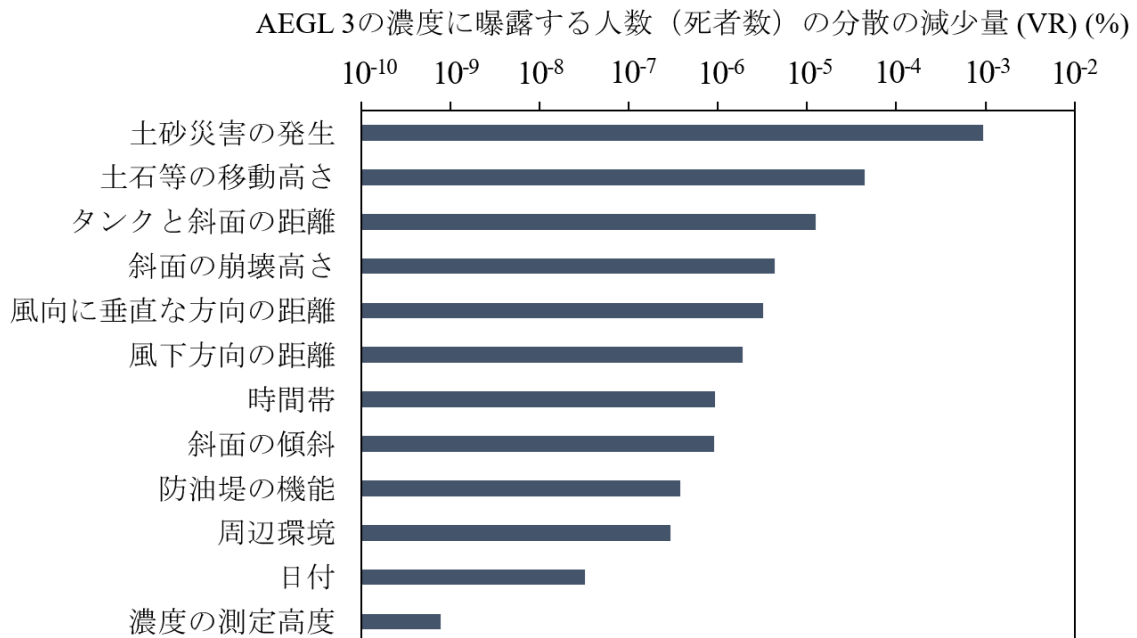


図 4-10 感度解析の結果

各親ノードにおける変数が確定した場合でも、総曝露人数の分散は最大で約 0.001% (土砂災害の発生に関するノード (Landslide_occurrence) が確定した場合) しか減少しないことが分かった (図 4-10)。この結果は、図 4-10 に示した各親ノードにおける変数が確定した場合でも、親ノードに基づく子ノード

は大きな分散を有しており、それが伝播することによって、最終的な結果の分散は大きく軽減されないことを示している。これは Natech 特有の因果関係の複雑性とそれに基づく不確実性を表していると考えられる。

親ノードの VR の比較を行うと、土砂災害の発生 (Landslide_occurrence) が最も AEGL 3 の濃度の曝露人数に寄与し、結果を左右する要因であることが分かった。この結果は、4.8.2 項と同様の結果であった。また、土石等の移動の高さ (Height_movement_sediment) やタンクと斜面の距離 (Safe_distance)、斜面の崩壊高さ (Slope_collapse_height) も結果に寄与しており、これらの土砂災害に伴う化学物質の流出に関わるノードが特に不確実性をもたらす要因であると考えられる。

化学物質の流出・拡散に関わるノードについては、風向に垂直な方向の距離 (y_distance) が風下方向の距離 (x_distance) よりも VR が大きくなっている (図 4-10)。風向に垂直な方向は風下方向と比べて、風による影響を受けないため、高濃度な状態となりやすいことから、風向に垂直な方向の位置によって大気中濃度が大きく変動したと考えられる。また、事故の日付 (Month) と時間帯 (Time zone) を比較すると、後者の方がより結果に寄与していることが分かった (図 4-10)。この結果から、対象事業所が位置する地域においては、月別変化よりも 1 日の時間変化が大気中濃度とそれに基づく曝露人数を変動させており、事故が発生する時間帯がリスクを評価する上で特に重要な変数であると考えられる。今後詳細に化学物質の大気拡散をシミュレーションし、リスク評価を実施する際には、時間帯の設定によって大きくリスク評価の結果が変わることを考慮し、複数の時間帯で評価を実施することが必要である。周辺環境 (Surrounding_environment) については、図 4-10 のノードの中では比較的 VR が小さいが、化学物質の大気拡散の評価において Gaussian plume model を用いる場合、地表面粗度の設定は大気中濃度の算出結果にある一定の影響を与えると考えられる。さらに、防油堤の機能 (Catch_basin) については、周辺環境や月よりも結果に変動をもたらしており、これは最大プール面積の設定によって、結果が大きく変わる可能性があることを示唆している。

4.9 結言

本研究は、周辺環境への影響を踏まえた Natech のリスク評価手法 (Cheng and Luo, 2020; Kabir et al., 2019) と土砂災害を起因とした Natech のリスク評価手法 (Hao et al., 2023; Lan et al., 2021) を組み合わせ、土砂災害を起因としてタンクからノルマルヘキサンが流出し、大気へ拡散した場合のヒト健康リスクを評価可能な手法を構築した。本研究で構築した BN は 1,747,200 通りのシナリオを対象に、風下方向 1 km×風に垂直な方向 1 km×高度 2 m の範囲で、流出から 1 時間まで 1 秒間隔でヒト健康リスクを評価することを可能にした。パラメータを決定論的に決める手法と比べて多くのシナリオを一度に評価できたため、ケーススタディではあるものの、あらゆる可能性を含めた一般性の高い結果が得られた。

本研究で構築した BN によって、対象事業所内に設置されている各タンクの社会的リスク (Jonkman et al., 2003) を斜面からのタンクの距離ごとに評価できた。タンクの厚みを最小の 0.0032 m、貯蔵率を最大の 80%、防油堤が機能する確率と機能しない確率はそれぞれ 50% として設定した場合の斜面から 5-10 m の地点にあるタンクの社会的リスクは、4 カ国の基準の中で最も安全側に位置するオランダの基準未満となった。一方、15 m 以上の距離にタンクがある場合は、土砂が到達せず、リスクは生じなかった。本研究によって得られた結果は、リスクを低減するために必要な事業所のレイアウト等の検討につながると考えられる。また、防油堤によってプールの面積を制限することにより、1 人以上の死者が生じる確率は約 43% 減少することが確認され、これは第 3 章の結果と同様に防油堤が機能することがリスク削減に繋がることが示唆された。

BN の特徴である診断的分析の結果から、1 人以上の死者が発生する条件においては、土石等の移動の高さが 2 m 以上である事後確率は 50.0% となり、RoV は土砂災害の発生に関する変数を除き、最も大きくなった。リスク評価の結果からは、土石等の移動の高さが 2 m 以上の場合、死者が生じる確率は約 21 倍大きくなることが示された。また、斜面の崩壊高さや傾斜は大きければ大きいほど、リスクが大きくなることが分かった。化学物質の拡散に関して、特に高リスクとなる条件としては、風に垂直な方向 0-250 m の地点や夜間から未明の時間帯 (3, 6, 18, 21 時) であることが分かった。風に垂直な方向 0-250 m の住民は優先的な避難が必要であり、夜間から未明にかけて、土砂災害が予測される場合には、事故の発生を防ぐための予防策を実施することが必要であると考えられる。

感度解析の結果からは、土石等の移動の高さやタンクと斜面の距離、斜面の崩壊高さなどの事故の発生確率を左右する要因が評価結果に大きな変動を与えていることが分かった。また、Gaussian plume model を用いた大気拡散シミュレーションに関わる風下方向の距離や風向に垂直な方向の距離、時間帯、周辺環境、プールの最大面積などのパラメータも結果に対して比較的大きな影響をもたらしていた。

本研究で構築した BN モデルの有効性は、設定したノード間の因果関係 (ネットワーク構造) と条件付確率、各変数の区切り方に依存している。本研究では、土砂災害の発生確率やタンクの破損確率、破損位置、流出量、揮発量、大気中濃度の算出過程で仮定を置き、複数のモデルを組み合わせることによって、土砂災害の発生から化学物質の流出・拡散、ヒト健康リスクの評価を可能にした。感度解析の結果からは、事故の発生確率に関わるノードが結果に大きな影響をもたらしていることが示され、特に土砂災害の発生位置を等確率とした設定などに課題があると考えられる。今後は、土砂災害の発生位置の特定や事例収集による土砂災害の規模に応じたタンクの破損規模の評価 (Fragility 曲線の算出等) について、さらなる研究が必要である。

BN を用いた分析は、Natech に対する確率論的リスク評価や結果に寄与する原因の特定を通じて、Natech という複雑な因果関係を有する事象を理解するための 1 つの手段になり得る。

参考文献

- Ale, B.J.M., 2005. Tolerable or acceptable: A comparison of risk regulation in the United Kingdom and in the Netherlands. *Risk Analysis*. 25, 231–241. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00585.x>
- Ancione, G., Milazzo, M.F., 2021. The Management of Na-tech Risk Using Bayesian Network. *Water* (Switzerland). 13. <https://doi.org/10.3390/w13141966>
- Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., Cozzani, V., 2009. Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events. *Reliability Engineering and System Safety*. 94, 1442–1450. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.02.026>
- Antonioni, G., Landucci, G., Necci, A., Gheorghiu, D., Cozzani, V., 2015. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering and System Safety*. 142, 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020>
- Briggs, G.A., 1973. Diffusion estimation for small emissions. Preliminary report. U.S. Department of Energy. <https://doi.org/10.2172/5118833>
- Briscoe, F., Shaw, P., 1980. SPREAD AND EVAPORATION OF LIQUID. *Prog. Energy Comb. Sci.* 6, 127–140. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(80)90002-7)
- Cheng, Y., Luo, Y., 2020. Analysis of Natech risk induced by lightning strikes in floating roof tanks based on the Bayesian network model. *Process Safety Progress*. 40. <https://doi.org/10.1002/prs.12164>
- Cieslik, S., 1991. Dispersion and Transport of Atmospheric Pollutants, in: Velzen Daniel (Ed.), *Sulphur Dioxide and Nitrogen Oxides in Industrial Waste Gases*. Springer, pp. 47–71. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3624-2_4
- Cockburn, G., Tesfamariam, S., 2012. Earthquake disaster risk index for Canadian cities using Bayesian belief networks. *Georisk*. 6, 128–140. <https://doi.org/10.1080/17499518.2011.650147>
- George, P.G., Renjith, V.R., 2021. Evolution of Safety and Security Risk Assessment methodologies towards the use of Bayesian Networks in Process Industries. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.031>
- Girgin, S., 2011. The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: Aftermath and lessons learned. *Natural Hazards and Earth System Science*. 11, 1129–1140. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>
- Hao, J., Liu, L., Long, Z., Chu, Y., Zhang, D., Chen, X., Huang, C., 2023. Scenario deduction of Natech accident based on dynamic Bayesian network: A case study of landslide accident in a liquor storage tank area in Guizhou Province, China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 83. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105067>
- Havens, J.A., Spicer, T.O., 1985. Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-Than-Air Gas Mixtures. Volume 1. United States.
- Health and Safety Executive, 2010. Societal risk and the consideration of technical and policy issues.
- Heymes, F., Aprin, L., Bony, A., Forestier, S., Cirocchi, S., Dusserre, G., 2013. An experimental investigation of evaporation rates for different volatile organic compounds. *Process Safety Progress*. 32, 193–198. <https://doi.org/10.1002/prs.11566>
- Jonkman, S.N., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K., 2003. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*. 99, 1–30. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00283-2)

- Kabir, G., Suda, H., Cruz, A.M., Giraldo, F.M., Tesfamariam, S., 2019. Earthquake-related Natech risk assessment using a Bayesian belief network model. *Structure and Infrastructure Engineering*. 15, 725–739. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1569070>
- Khakzad, N., 2019. Modeling wildfire spread in wildland-industrial interfaces using dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*. 189, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.006>
- Khakzad, N., Dadashzadeh, M., Reniers, G., 2018. Quantitative assessment of wildfire risk in oil facilities. *Journal of Environmental Management*. 223, 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.062>
- Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2013. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 91, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.01.005>
- Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2011. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering and System Safety*. 96, 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012>
- Khakzad, N., Van Gelder, P., 2018. Vulnerability of industrial plants to flood-induced natechs: A Bayesian network approach. *Reliability Engineering and System Safety*. 169, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.016>
- Khakzad, N., Van Gelder, P., 2017. Fragility assessment of chemical storage tanks subject to floods. *Process Safety and Environmental Protection*. 111, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.012>
- Krausmann, E., 2017. Natech Risk Management and Assessment Chapter 7 Natech Risk and Its Assessment. Elsevier, Netherlands.
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., Cozzani, V., 2012. Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*. 106, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.05.010>
- Lan, M., Zhu, J., Lo, S., 2021. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment method for modeling risk for industrial facilities subjected to landslides. *Reliability Engineering and System Safety*. 215. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107851>
- Mackay, D., Matusgu, R.S., 1973. Evaporation Rates of Liquid Hydrocarbon Spills On Land and Water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 51, 434–439. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450510407>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2020. Assessment of safety barrier performance in Natech scenarios. *Reliability Engineering and System Safety*. 193. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106597>
- Naderpour, M., Khakzad, N., 2018. Texas LPG Fire: Domino Effects Triggered by Natural Hazards. *Process Safety and Environmental Protection*. 116, 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.008>
- National Institute of Standards and Technology, 2021. NIST Chemistry WebBook n-Hexane. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C110543&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on> (accessed 20 November 2022).
- Norsys Software Corp, 2022. Norsys - Netica Application. <https://www.norsys.com/netica.html> (accessed 22 June 2023).
- Norsys Software Corp, 2020. Sensitivity to Findings. https://www.norsys.com/WebHelp/NETICA/X_Sensitivity_to_Findings.htm (accessed 24 November 2022).

- Qin, R., Zhu, J., Khakzad, N., 2020. Multi-hazard failure assessment of atmospheric storage tanks during hurricanes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104325>
- Ricci, F., Moreno, V.C., Cozzani, V., 2021. A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*. 147, 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.031>
- Tolo, S., Patelli, E., Beer, M., 2017. Risk Assessment of Spent Nuclear Fuel Facilities Considering Climate Change. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A Civil Engineering*. 3, 10–44. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000874>
- Trbojevic, V.M., 2005. Risk criteria in EU, in: In: Proc. ESREL 2005. Tri-City.
- US EPA, 2023. Hexane Results - AEGL Program. <https://www.epa.gov/aegl/hexane-results-aegl-program> (accessed 18 June 2023).
- US NOAA, EPA, 2013. ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4 Technical Documentation. United States.
- Uusitalo, L., 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecological Modelling*. 203, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.11.033>
- van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M., 1997. Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow Book). Committee for the Prevention of Disasters, Netherlands.
- Vrijling, J.K., Van Gelder, P.H.A.J.M., 1997. SOCIETAL RISK AND THE CONCEPT OF RISK AVERSION. *Advances in Safety and Reliability*. 1, 45–52. <https://doi.org/10.1016/B978-008042835-2/50005-9>
- Wang, Q., Cai, M., Wei, G., 2022. A scenario analysis under epistemic uncertainty in Natech accidents: Imprecise probability reasoning in Bayesian Network. *Environmental Research Communications*. 4. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac47d4>
- Zarei, E., Azadeh, A., Khakzad, N., Aliabadi, M.M., Mohammadfam, I., 2017. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of Hazardous Materials*. 321, 830–840. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.074>
- Zhang, H., Liu, R., Liu, J., Zhang, Z., 2022. Formal probabilistic risk analysis of accidental air pollution in a development zone using Bayesian networks. *Journal of Cleaner Production*. 372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133774>
- 神奈川県, 2020. 環境省が示す主なVOC100種. <https://www.pref.kanagawa.jp/documents/3497/767803.pdf> (accessed 18 June 2023).
- 株式会社カブク, 2023. SS400（一般構造用圧延鋼材）. <https://www.kabuku.io/guide/metal/steel/ss400/> (accessed 22 June 2023).
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2008. 数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築. *自然災害科学*. 27, 69–83.
- 環境省, 2002. [33] n-ヘキサン . 物質に関する基本的事項. <https://www.env.go.jp/chemi/report/h14-05/chap01/03/33.pdf> (accessed 15 August 2022).
- 気象庁, 2022a. 気象庁|過去の気象データ・ダウンロード. <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php#> (accessed 15 August 2022).
- 気象庁, 2022b. 地域気象観測所一覧. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf (accessed 23 June 2023).

国土交通省, 2001. 国土交通省告示第三百三十二号.

https://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosha_hourei_pdf/dosya_kokuji.pdf (accessed 22 June 2023).

国立医薬品食品衛生研究所, 2020. AEGLとは. <http://www.nihs.go.jp/hse/chem-info/aegl/agnote.pdf> (accessed 18 June 2023).

埼玉県, 2019. 土砂災害警戒区域指定のための基礎調査マニュアル (平成30年4月埼玉県)第二編 急傾斜地の崩壊編. <https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/127756/kisocyousam-kyukeisya.pdf> (accessed 18 June 2023).

杉原成満, 篠崎嗣浩, 大石博之, 荒木義則, 古川浩平, 2011. ロジスティック回帰分析を用いた土砂災害警戒情報の解除基準の設定に関する一考察. 土木学会論文集F6 (安全問題) . 67, 41–51.

政府統計の総合窓口(e-Stat), 2022. 国勢調査2020年 5次メッシュ 人口及び世帯. <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2020&aggregateUnit=Q&serveId=Q002005112020&statsId=T001102> (accessed 23 June 2023).

総務省, 2019. 危険物の規制に関する政令. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306> (accessed 24 May 2023).

独立行政法人製品評価技術基盤機構, 2022. NITE統合版 GHS分類結果.

https://www.nite.go.jp/chem/ghs/ghs_nite_download.html (accessed 3 January 2022).

中谷洋明, 瀧口茂隆, 金澤瑛, 2020. がけ崩れ災害の実態. 国土技術政策総合研究所資料, No.1122.

松田昌之, 中谷洋明, 2020. 地形・地質に関する主題図を用いた全国における土砂災害発生リスク推定法に関する考察. 国土技術政策総合研究所資料, No.1120.

松原望, 2008. 入門ベイズ統計 [意思決定の理論と発展]. 東京図書株式会社.

第5章 Natech のリスク管理に向けた対策のリスク削減効果の評価

5.1 緒言

第3章と第4章では、想定されるシナリオに基づき、ヒト健康リスクを分析し、許容値と比較することによってそのリスクを評価した。リスク評価の結果が許容値を超過する場合には、リスク管理として何かしらの対策を実行し、リスクを削減することが求められる (Cruz et al., 2017)。実際、対策が導入されていた場合には、事故の発生を防ぐ、また発生した際の影響を緩和することができた事例が報告されている (Krausmann and Salzano, 2017; Kumasaki and King, 2020)。

Natech のリスクを削減するための対策としては、予防策 (Prevention measures)と緩和策 (Mitigation measures)の大きく2つの対策に分類される (Cruz et al., 2017)。前者は設備の損傷や化学物質の流出を防ぐための対策、後者は化学物質の流出などが発生した場合に影響を緩和するための対策を指す。予防策としては、自然災害の外力に対する設備の構造における対策が挙げられ、地震に対する貯蔵タンクの強化としてはアンカーの設置等が挙げられる (Cruz et al., 2017; Kabir et al., 2019)。また、パイプラインについては、フレキシブル管の導入が対策として挙げられる。洪水に対する貯蔵タンクの対策としては、設備のかさ上げ、擁壁の設置、アンカーやタンク内に水を加えることによる浮き上がりの防止等が存在する (Cruz et al., 2017; Qin et al., 2020)。一方、緩和策としては、揮発面積を減らすための防油堤や流出量を減らすための緊急遮断弁の導入、有毒ガスの拡散を防ぐための散水システム、消火やタンクの温度を下げるためのスプリンクラー設備、住民への影響を減らすための防火壁などが対策として挙げられる (Cruz et al., 2017)。これらの対策に加え、近年日本においても、ガイドラインや対策事例集等で Natech に対する具体的な対策事例が示され、リスク管理に向けた事業者の対策の実施を推進している。具体的に、消防庁では危険物施設の風水害対策ガイドラインを2020年に公開した (消防庁, 2020)。また、東京都では化学物質を取り扱う事業者向けの水害対策マニュアル、大阪府では地震・津波に対する対策事例集を示している (大阪府, 2023; 東京都, 2023)。これらのガイドラインや対策事例集では、計画的な操業の停止や規模の縮小、保管量の適正化による流出量の低減、容器・棚等の固定による流出防止、土のうや止水板の設置、配管やマンホールの閉鎖、オイルフェンスや吸着剤の使用による拡散の防止といった各事業所に適用可能なより一般的な対策が挙げられている (大阪府, 2023; 東京都, 2023; 消防庁, 2020)。

このような対策の実施を進めるためには、上記のガイドライン等で具体的な対策の周知を図るとともに、各対策を実施することでどの程度リスクが削減されるのかを定量的に示すことも必要である。実際、Natech を対象として、予防策や緩和策によるリスク削減効果を定量的に評価した研究は複数存在する (Hao et al., 2023; Kabir et al., 2019; Khakzad et al., 2018; Lan et al., 2021; Misuri et al., 2021a, 2021b, 2020; Necci et al., 2016; Qin et al., 2020; Zeng et al., 2023)。しかし、これらの研究では、地震に対する貯蔵タンクのアンカーの設置 (Kabir et al., 2019)や落雷に対する避雷針の設置 (Necci et al., 2016)、洪水に対してタンクに水を加える対策 (Qin et al., 2020)、土砂災害に対する斜面の排水対策 (Lan et al., 2021)、ドミノ効果を対象とした防火対策 (Khakzad et al., 2018; Misuri et al., 2021b, 2021a; Zeng et al., 2023)などを対象としており、想定されるシナリオと対策の範囲が限定されている。なお、Hao ら (2023)は、緊急対応や圧力警報装置、流出範囲の制限、安全柵、緊急避難などの6つの対策を取り上げているが、これらの機能は専門家の判断を基に設定しており、完全に定量的な評価とはなっていない。また、このような対策は自然災害時には機能しない場合があり、近年では対策が機能しないシナリオを考慮した対策の評価も求められている (Misuri and Cozzani, 2021)。さらに、Natech のような複雑なシナリオのリスク管理を進めるためには、様々なリスクの領域に対して適用できる汎用性のあるリスク管理体制の構築も求められる

(Krausmann and Necci, 2021)。

そこで、本章では、第4章で実施した確率論的リスク評価を基に、土砂災害による化学物質の大気拡散のシナリオを対象として、既存のガイドラインや対策事例集で示されている対策を複数取り上げ、各対策のリスク削減効果を定量的に評価、比較することを目的とした。

本章の構成は次の通りである。5.2節では、本章における研究の枠組みを示した。5.3節では、規制、ガイドライン、対策事例集を基に対策を取り上げ、4.3節に示した事故のシナリオを拡張した。5.4節では、設定した事故のシナリオに基づき、第4章で構築したBNモデルを拡張し、その構造と具体的な設定を示した。5.5節では、第4章と同様に診断的分析と感度解析の方法を示した。5.6節では、各対策によるリスク削減効果を示すとともに、診断的分析、感度解析を通じて結果に寄与する要因を示した。5.7節では、本研究により得られた結論を示した。

5.2 研究の枠組み

図 5-1 に本研究の枠組みを示す。

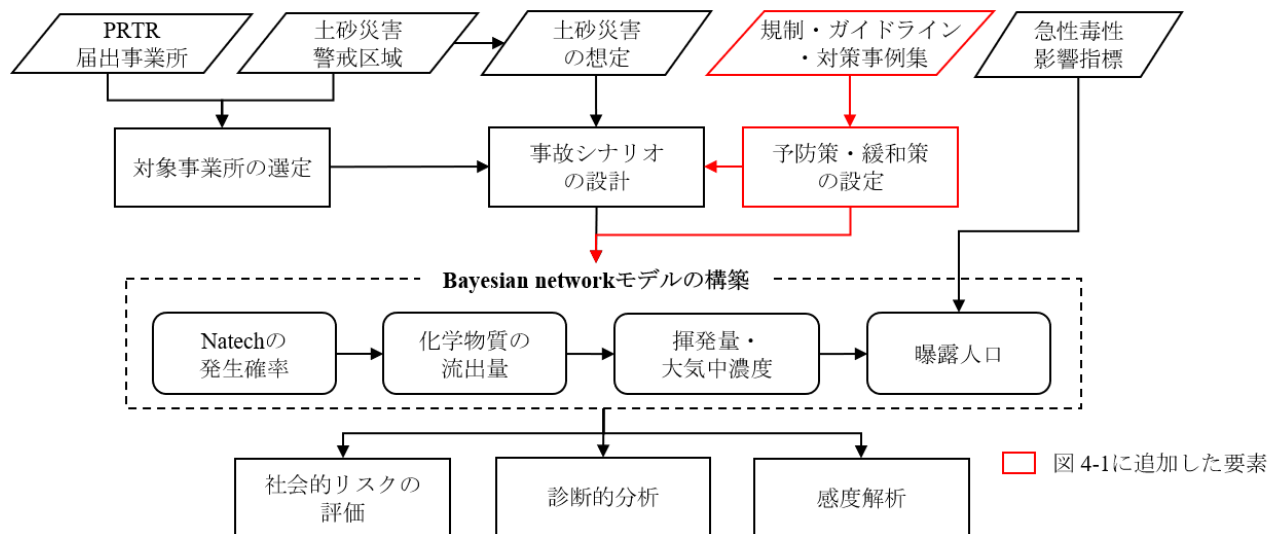


図 5-1 対策を考慮した確率論的リスク評価の枠組み

本研究では、第 4 章で構築した BN モデルに対策を追加することによって、対策のリスク削減効果を評価した。具体的な対策については、規制やガイドライン、対策事例集に加え、第 4 章で構築した BN モデルの設定を考慮して設定した。設定した対策は第 4 章で構築した BN モデルにノードとして追加し、各対策を実施した場合のヒト健康リスクの変化から対策のリスク削減効果を定量的に評価した。最後に、診断的分析と感度解析を通じて、対策を含めて、リスク評価の結果に寄与する変数を特定した。なお、曝露人数の算出、社会的リスクの評価についてはそれぞれ 4.4.5 項と 4.5 節を参照されたい。

5.3 規制・ガイドライン・対策事例集に基づく対策を考慮した事故シナリオの設定

4つの文献から (Cruz et al., 2017; 大阪府, 2023; 東京都, 2023; 消防庁, 2020), 自然災害や想定される影響、予防策と緩和策ごとに対策を表 5-1 にまとめ、本研究で取り上げる対策と設定を表 5-2 に示した。また、本研究で想定する事故のシナリオを図 5-2 に示した。

本研究で対象とする土砂災害に対する予防策としては、土のうや止水板の設置、配管の弁やマンホールの開鎖による浸水や土砂流入の防止・低減が挙げられる (表 5-1) (消防庁, 2020)。一方、土砂災害は土砂の移動現象に

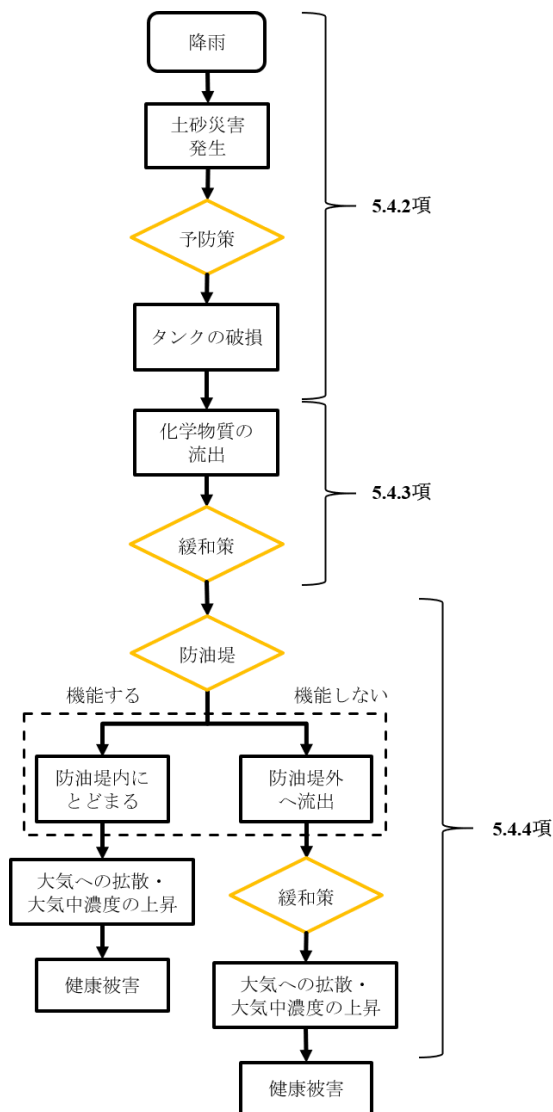


図 5-2 本研究で想定する事故のシナリオ

よって、設備が破損するという特徴を有することから、洪水や津波対策として挙げられるアンカー等による設備の強化やタンクに水を加えることによるタンク内部の圧力を増加させることなども対策の1つとして考えられる。予防策の中で、各自然災害に共通した対策としては、計画的な操業の停止や規模の縮小、電力等のライフラインの確保、流出の可能性を減らすための保管量の適正化や廃液・廃棄物の処理などが挙げられる (表 5-1)。

緩和策の種類としては、化学物質の流出や拡散の防止、火災の影響の緩和、避難等に分けられる (表 5-1)。化学物質の流出が確認された場合の緩和策としては、吸着剤、バキュームカーやポンプによる化学物質の回収などが挙げられる。また、流出した化学物質の拡散防止のために、防油堤の設置、床のコーティング、土のうやオイルフェンスの設置、発泡システムや散水システムの導入なども挙げられる。火災が発生した場合には、消火やタンクのクーリングのためのスプリンクラー設備や居住地等を保護するための防火壁などが対策として挙げられる。化学物質の曝露や火災の影響を緩和するために避難が必要な場合には、避難経路の設定や通信手段の確保、周辺住民等への周知などが対策として挙げられる。

これらの対策例と第4章で構築したBNモデル内の変数、対象とするシナリオを踏まえ、定量的に評価可能な対策として、本研究では表 5-2 に示す対策を取り上げた。まず土砂災害に対する設備の強化として、タンクの改修によるタンクの厚みの変更を取り上げた。タンクの厚み (Tank_thickness; t_{cr}) については、危険物の規制に関する政令において、屋外貯蔵タンクの最小の厚みが 0.0032 m と定められているため (総務省, 2019), 本研究では最小を 0.0032 m, 最大を 0.015 m と仮定して、タンクをより厚くした場合のリスクの変化を分析した。また、もう1つの予防策として、土砂災害警戒情報等の発令により、土砂災害の危険性が高まった場合にタンク内の貯蔵率を制限する対策を取り上げた。本研究では、貯蔵率 (Storage_rate; Sr) を最低 20%, 最大 80% として想定した (大阪ガス株式会社, 2018)。緩和策としては、吸着剤の使用とオイルフェンスの設置を取り上げた。前者は化学物質が流出した場合に、吸着剤の使用量 (Oil_absorbent; Oa) だけ、流出した危険物の体積が減少すると想定し、高性能吸着剤 (1 箱 100 枚当たり 0.125 m³ 吸着可能) (ユニセル株式会社, 2021) を最大で 100 箱使うことを想定した。後者については、防油堤が機能しなかった場合に、オイルフェンスを設置することによって、最大プール面積 (Maximum_puddle_area) が制限されると想定した (図 5-2)。本研究では、事業所外への流出を防ぐという観点から、プールの最大面積が事業所の面積 (11,000 m²) に制限されるケースとその2分の1の面積 (5,500 m²) に制限されるケースの2ケースを想定し、リスク削減効果の評価を行った。

これらの対策を考慮した事故シナリオは図 5-2 のようになる。第4章と同様に、防油堤が機能する場合と機能しない場合に分けて、各対策を考慮した。なお、図 5-2 は各予防策と緩和策を実施した場合と実施しない場合で、シナリオが変わると考えられるが、どのシナリオにおいても最終的に健康被害が生じる可能性があるため、図 5-2 のようにシナリオごとに分けずに示した。

本研究では、4.8.1 項で示した Base ケース (タンクの厚みが最小の 0.0032 m, 貯蔵率が最大の 80%, 防油堤が機能する確率と機能しない確率が 50%) を基に、各対策のリスク削減効果を評価した。

表 5-1 予防策と緩和策の例

種類	自然災害・影響	対策
予防策	地震	貯蔵タンク等のアンカーによる固定 ワイヤー・チェーンによる容器・棚等の固定，容器の落下対策 配管支持金具の補強，フレキシブル配管の導入 地震動軽減のためのスライドの設置
	液状化	地下配管の地上配管化，地下水の定期的なくみ上げ 基礎杭の設置，地盤改良の実施
	津波	止水板の設置，かさ上げ，設備の移転，配管の弁の閉止 アンカーによる固定，フレキシブル配管の導入，防潮堤の設置
	落雷	設備の接地，避雷針，サージ保護装置の導入
	洪水	土のうや止水板の設置による浸水や土砂流入の防止・低減 配管の弁やマンホールの閉鎖，容器・棚等の固定 禁水性の物質等を水密性のある区画や高所での保管 設備の防水，かさ上げ，アンカーによる固定 タンクに水を加えることによる浮き上がりの防止 排水用ポンプの準備
	土砂災害	土のうや止水板の設置による浸水や土砂流入の防止・低減 配管の弁やマンホールの閉鎖によるタンクや配管内への流入防止
	共通	計画的な操業の停止，規模の縮小の判断基準や実施要領の策定 予備電力の確保（小型発電機等の導入） 保管量の適正化，廃液・廃棄物の処理
緩和策	化学物質の流出	流出・漏洩の監視，緊急遮断弁の導入，吸着剤による回収 回収容器の準備とバキュームカー，ポンプによる回収
	化学物質の拡散	防油堤の設置，床のコーティング，排水溝の閉鎖， 化学物質の混合防止，土のう，オイルフェンスの設置 ガス吸収装置の導入，中和剤の導入 揮発を防ぐための発泡システム，拡散防止のための散水システム
	火災	消火やタンクのクーリングのためのスプリンクラー設備 居住地や管理室を保護するための防火壁，消火栓の導入
	避難等	避難経路の設定，通信手段の確保（衛星電話，防災無線） 関係機関への通報・周辺住民等への情報の発信

表 5-2 本研究で取り上げた対策と該当する項

種類	対策	具体的な内容	該当する項
予防策	タンクの厚みの変更	タンクを強化することを目的に、既存のタンクを改修し、タンクの厚みを変更する。	5.4.2 項
	貯蔵率の制限	土砂災害の危険性が高まった場合に、タンク内のノルマルヘキサンの貯蔵率を制限する。	5.4.2, 5.4.3 項
緩和策	吸着剤の使用	化学物質が流出した場合に、吸着剤を用いて、流出した物質を回収する。	5.4.3 項
	オイルフェンスの設置	化学物質が流出した場合に、オイルフェンスを設置し、プールの広がりを制限する。	5.4.4 項

5.4 対策を組み込んだ Bayesian network モデルの構築

5.4.1 Bayesian network の構造

本研究で構築した BN モデルと各ノードに対応する項を図 5-3 に、第 4 章で構築した BN に対策として追加したノードを表 5-3 に示す。本研究で構築した BN のノード数は 39（うち親ノード 16）、リンク数は 69、条件付確率の合計数は 323,842,191 となった。

ここで、第 4 章で構築した BN モデルでは、防油堤 (Catch_basin) をノードとして加えていたが、本研究では防油堤の代わりに最大プール面積 (Maximum_puddle_area) をノードとして加え、防油堤の機能の有無を考慮した。Maximum_puddle_area が”Not functioned”の状態は、防油堤が機能しないことを意味しており、”1100”の状態は防油堤が機能した場合の最大プール面積となっている (表 5-3)。

なお、対策ノードを加えた各ノードの条件付確率表を設定するための定義式は補足資料 A-3 に示している。

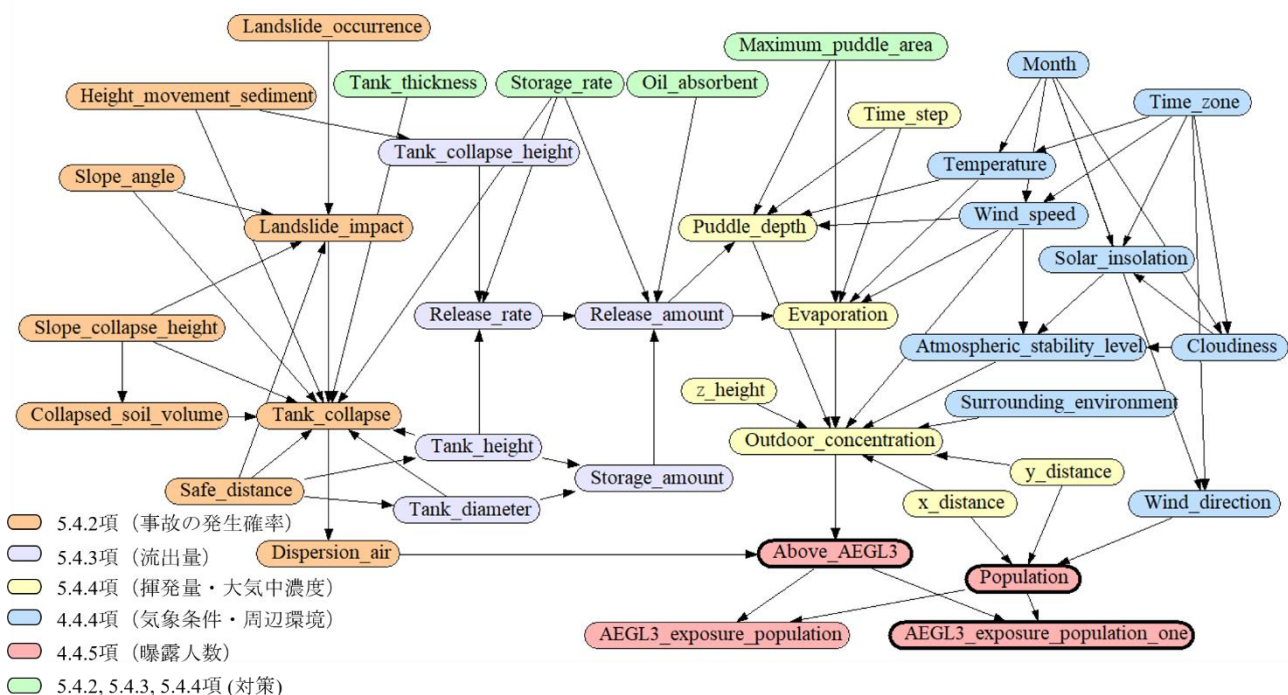


図 5-3 対策を加えた BN モデルの全体像

表 5-3 対策ノードの設定

対策ノード名	変数	変数の数	単位
Tank_thickness (タンクの厚み)	0.0032, 0.0032-0.0045, 0.0045-0.006, 0.006-0.0075, 0.0075-0.009, 0.009-0.012, 0.012-0.015	7	m
Storage_rate (貯蔵率)	20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80	7	%
Oil_absorbent (吸着剤の使用)	0, 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100	11	箱
Maximum_puddle_area (最大プール面積)	Not functioned, 1100, 5500, 11000	4	m ²

5.4.2 Natech の発生確率

4.4.2 項で用いた式(4-3)から式(4-17)より、Natech の発生確率を設定した。本研究では、タンクの厚みの変更を考慮するため、表 5-3 に示した区分ごとにタンクの座屈臨界圧力を算出することによって (式(4-17)), タンクの厚みの変更に伴うタンクの破損確率の変化を分析した。また、本研究では貯蔵率 (Storage_rate; Sr) の制限に伴う貯蔵率の変化を考慮するため、式(5-1)を用い、表 5-3 に示した貯蔵率の区分ごとに液体の高さを設定することによって、式(4-16)からタンクの内部圧力を算出した。

$$h_l = Sr \times Th \quad (5-1)$$

ここで、 h_l : タンク内の液体の高さ (m), Sr : 貯蔵率 (%), Th : タンクの高さ (m)を表す。

なお、タンクの厚み (Tank_thickness)と貯蔵率 (Storage_rate)については、各変数を等確率として設定した。

5.4.3 流出量の設定

4.4.3 項に示した流出量の算出方法との違いとして、本研究では貯蔵率の制限と吸着剤の使用を考慮していることが挙げられる。貯蔵率の制限については、式(4-19)を用いて、各貯蔵率 (Storage_rate; Sr) における流出率 (Release_rate)を算出した。また、貯蔵率の制限とともに、吸着剤の使用 (Oil_absorbent; Oa) を考慮することによって、式(5-2)より流出量 (Release_amount; Ra)を算出した。

$$Ra = Sa \times Sr \times Rr - (Oa \times 0.125) \quad (5-2)$$

ここで、 Ra : 流出量 (m³), Sa : 最大貯蔵量 (m³), Sr : 貯蔵率 (%), Rr : 流出率 (-), Oa : 吸着剤の使用量 (箱)を表す。なお、右辺が 0 以下になった場合、 Ra は 0 となる。

なお、吸着剤の使用 (Oil_absorbent)については、各変数を等確率として設定した。

5.4.4 揮発量と大気中濃度の算出

4.4.4 項と同様の手法を用いて、揮発量と大気中濃度を算出した。本研究では、オイルフェンスの設置を考慮するため、最大プール面積 (Maximum_puddle_area)ごとに表 5-4 の想定の下で、揮発量 (Evaporation)とプールの深さ (Puddle_depth)の算出を行った。

表 5-4 オイルフェンスの設置を考慮したプールの拡大における想定

条件	想定
防油堤が機能せず，オイルフェンス を設置していない場合 (Maximum_puddle_area="Not functioned")	$\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \leq 0.005 \text{ m}$ であれば， $r_a(t) = \sqrt{\frac{Ra}{\pi \cdot 0.005}} \quad Pd(t) = 0.005 \text{ m}$ 最大プール面積は $\frac{Ra}{0.005}$
防油堤が機能せず， オイルフェンスを設置 する場合 (Maximum_puddle_area =5,500 m ² or 11,000 m ²)	$\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \leq 0.005 \text{ m}$ であれば， $\frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}} < 0.005 \text{ m}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{Ra}{\pi \cdot 0.005}} \quad Pd(t) = 0.005 \text{ m}$ 最大プール面積は $\frac{Ra}{0.005}$ $\pi(r_a(t))^2 \geq \text{Maximum_puddle_area}$ であれば， $\frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}} \geq 0.005 \text{ m}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{\text{Maximum_puddle_area}}{\pi}}$ $Pd(t) = \frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}}$ 最大プール面積はMaximum_puddle_area
防油堤が機能する場合 (Maximum_puddle_area =1,100 m ²)	$\frac{Ra}{\pi(r_a(t))^2} \leq 0.005 \text{ m}$ であれば， $\frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}} < 0.005 \text{ m}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{Ra}{\pi \cdot 0.005}} \quad Pd(t) = 0.005 \text{ m}$ 最大プール面積は $\frac{Ra}{0.005}$ $\pi(r_a(t))^2 \geq \text{Maximum_puddle_area}$ であれば， $\frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}} \geq 0.005 \text{ m}$ $r_a(t) = \sqrt{\frac{\text{Maximum_puddle_area}}{\pi}}$ $Pd(t) = \frac{Ra}{\text{Maximum_puddle_area}}$ 最大プール面積はMaximum_puddle_area

5.5 診断的分析と感度解析

本研究では，4.6 節と 4.7 節に示した方法を用いて，診断的分析と感度解析を実施した。診断的分析については，表 4-1 に示した Time_step を除く親ノードに加え，対策に関するノード(Tank_thickness, Storage_rate, Oil_absorbent, Maximum_puddle_area)を取り上げ (表 5-3)，1 人以上の死者が発生する条件における RoV を算出した (式(4-31))。また，感度解析についても，4.7 節に示した方法を用いて，対策に関するノード (表 5-3)を加えた親ノードを対象として，式(4-32)から AEGL3 の濃度に曝露する可能性のある人数 (死者数)に対する感度解析を実施した。

5.6 結果と考察

5.6.1 各対策のリスク削減効果の比較

各対策によるリスク削減効果を図 5-4 に示す。なお、本研究では、4.8.1 項で示した Base ケース (斜面から 5-10 m の位置にあるタンクにおいて、タンクの厚みが 0.0032 m、貯蔵率が 80%、防油堤が機能する確率が 50%) を基に、対策のリスク削減効果を評価した。なお、ここではリスクとして、1 人以上の死者が生じる確率を取り上げ、オイルフェンスの設置については、Base ケースにおいて防油堤が機能しなかった場合におけるリスク削減効果を評価した。

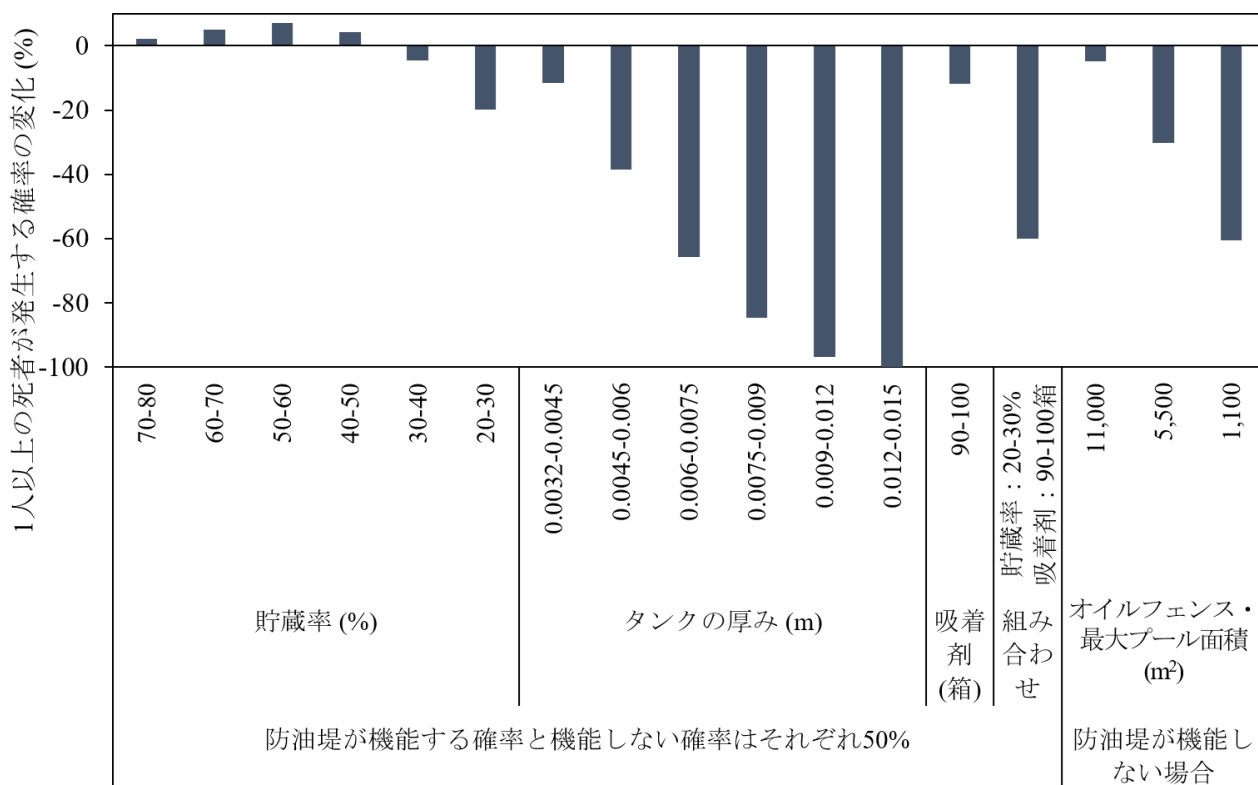


図 5-4 各対策のリスク削減効果

本研究で取り上げた 4 つの対策を比較すると、最もリスク削減効果が大きい対策はタンクの厚みを変更する対策であり、現状政令で定められている最小の 0.0032 m からタンクの厚みを 0.0088-0.0118 m 増やことによって、1 人以上の死者が生じる確率は約 99.9% 減少した (図 5-4)。これは、タンクの測板をより厚くすることによって、座屈臨界圧力が大きくなり、タンクの破損確率が減少することに起因する。本研究で対象とした事業所において想定される土石等の移動・堆積による力に対しては、タンクの厚みを 0.012-0.015 m にすることによって、タンクの破損を完全に防ぐことはできないものの、事故の発生に伴うヒト健康リスクを大幅に減らすことが出来ることが本研究によって示された。また、予防策の 1 つである貯蔵率の制限については、80% の状態から 70-80%、60-70%、50-60%、40-50% に減らした場合はかえってリスクが増加することが示され、50-60% の場合は死者が生じる確率が最大で約 7.1% 増加した (図 5-4)。これは、貯蔵率を減らすことによって、タンク内の液体の圧力 (内圧) が減少し、タンクの破損確率が増加したことに起因する。一方、貯蔵率を 30-40%、20-30% に制限した場合には、死者が生じる確率はそれぞれ約 4.5%、19.8% 減少することが確認された (図 5-4)。これは、タンクの内圧の減少に伴う破損確率の増加分よりも、事故が発生した際の流出量の減少に伴う AEGL 3 の超過確率の減少分が大きくな

ったためである。この結果から、土砂災害による貯蔵タンクの破損が想定される事業所において、貯蔵率の制限を対策として実施する場合には、タンクの破損確率が増加することも考慮に入れる必要があり、各対策オプションがもたらす相互作用を考慮した対策の分析や実施が求められる。

緩和策として、本研究で想定した吸着剤を使用し、流出した物質を回収できた場合には、最大で死者が生じる確率を約 11.9%減少させることが可能であることが分かった (図 5-4)。この結果から、吸着剤の使用は予防策である貯蔵率の制限やタンクの厚みの変更よりもリスク削減効果は劣るものの、化学物質が流出した影響を緩和するためには有効な対策であると考えられる。本研究では最大で 90-100 箱使用することを想定したが、さらに多くの吸着剤による回収を行うことができれば、よりリスクを低減させることが可能である。さらに、防油堤外へ化学物質が流出した際に、オイルフェンスによってプールの最大面積を 11,000 m², 5,500 m²に抑制できた場合には、それぞれ死者が生じる確率は約 4.7%, 30.2%減少した。これは、プールの最大面積が抑制されることによって、単位時間当たりの揮発量が減少し、大気中濃度の上昇が抑制されたことに起因する。また、防油堤が機能しなかった場合と機能した場合を比較し、プールの最大面積を事業所面積の 10 分の 1 (1,100 m²)に抑制できた場合、死者が生じる確率は約 60.6%減少した。これらの結果から、緩和策として、プールの最大面積を柔軟に変えることが可能なオイルフェンスを設置し、できる限り早急にプール面積を小さく制限することによって、大気中濃度の上昇が抑制され、AEGL3 を超える濃度に曝露する人数を減少させることが可能であると考えられる。

これらの結果に加え、本研究では複数の対策を組み合わせるという観点から、タンクの厚みの変更よりも比較的实施しやすいと考えられる貯蔵率の制限と吸着剤の使用を実施した場合のリスク削減効果を検討した。図 5-4 から、貯蔵率を事前に 20-30%に制限し、吸着剤を 90-100 箱使用することで、流出した物質を回収できた場合、死者が生じる確率は約 60.1%減少することが分かった。これは各対策によって、流出量が減少し、大気中濃度が AEGL 3 を超えるような高濃度な状態になる可能性が低くなったためである。この結果から、タンクの厚みを政令で定められている最小の 0.0032 m から約 2-2.5 倍に厚くする対策とほぼ同程度のリスク削減効果が得られることが分かった。

各対策を最大限実施した場合の社会的リスクの変化を図 5-5 に示す。

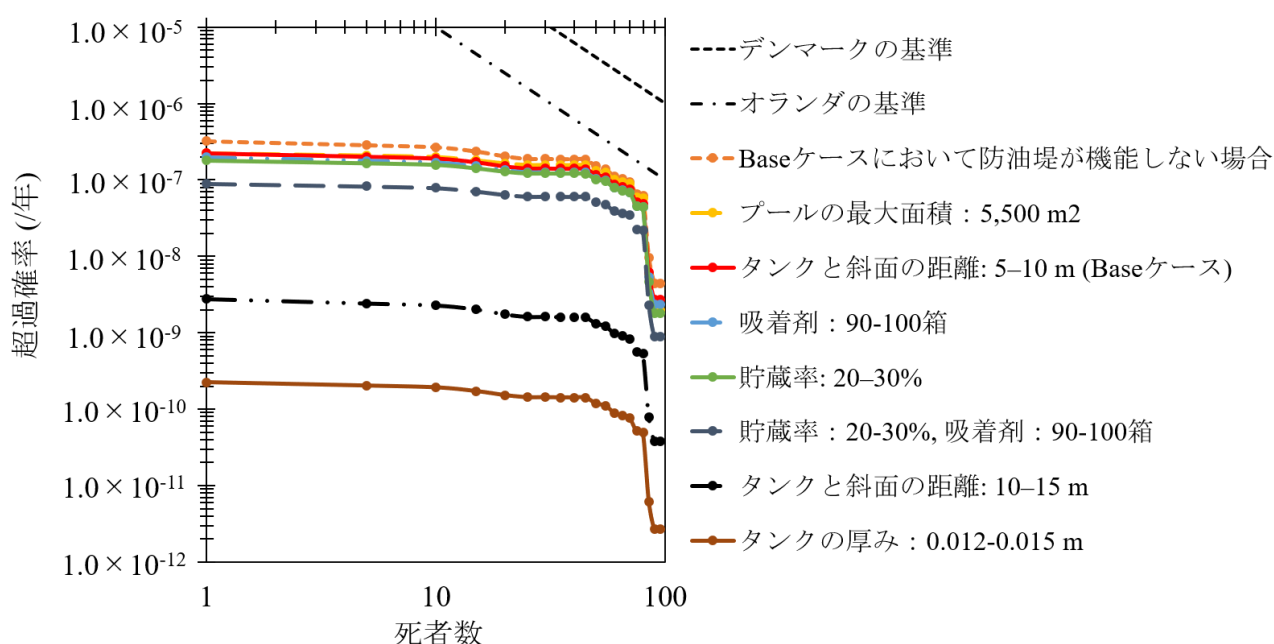


図 5-5 各対策を最大限に実施した場合の社会的リスク

Base ケースと比べて、タンクの厚みを 0.012-0.015 m に増やすと、各死者数の区分における超過確率は約 1000 分の 1 に減少することが示され、タンクと斜面の距離が 10-15 m の位置にあるタンクよりも社会的リスクが減少した (図 5-5)。これとは対照的に、貯蔵率を 20-30%に制限した場合や吸着剤を 90-100 箱使用した場合は、Base ケースと比べて社会的リスクは減少しているものの、ほとんど変化していない (図 5-5)。同様に、防油堤が機能しなかった場合と比べて、オイルフェンスの設置によって、プールの最大面積を 5,500 m² に制限できた場合は社会的リスクが減少しているものの、ほとんど変化が見られない (図 5-5)。貯蔵率の制限と吸着剤の使用を組み合わせた場合には、各死者数の区分における超過確率は約 5 分の 2 に減少していた (図 5-5)。これらの結果から、本研究の想定の下で、対策のリスク削減効果のみを比較した場合には、タンクの厚みの変更、貯蔵率の制限と吸着剤の使用の組み合わせ、貯蔵率の制限、吸着剤の使用の順でリスク削減効果が大きいと考えられる。また、オイルフェンスの設置については、プールの面積をどれくらい早く抑えることが出来るかによってリスク削減効果が変わり、少なくともプール面積を 5,500 m² 未満に抑えることができれば、防油堤が機能しなかった場合においても、Base ケースより社会的リスクを減少させることが可能であると考えられる (図 5-5)。

5.6.2 診断的分析の結果

1 人以上の死者が発生する条件における各変数の RoV (事前確率からの事後確率の増加率) 上位 20 変数を表 5-5 に示す。なお、表 5-5 は事後確率が事前確率よりも増加した変数のみを示しており、これらの変数は 1 人以上の死者が発生するという事象を生じさせる可能性が高い変数であると解釈できる。

4.8.2 項に示した結果と同様に、1 人以上の死者が発生する条件においては、土砂災害が発生しており、土石等の移動の高さや傾斜、斜面の崩壊高さが高いことが示された (表 5-5)。4.8.2 項の結果との違いとしては、タンクの厚みが 0.0032 m, 0.0032-0.0045 m, 0.0045-0.006 m の場合に高リスクとなる可能性が高いことが挙げられる (表 5-5)。この結果から、タンクの破損確率に関わる変数の中で、タンクの厚みは土石等の移動の高さや傾斜よりも結果に寄与する度合いは小さいものの、風に垂直な方向の距離と時間帯などの化学物質の拡散に関わる変数よりも結果に寄与していることが分かった。なお、各変数の区切り方によって、診断的分析の結果は変化する可能性がある。

表 5-5 1 人以上の死者が発生する条件における親ノードの RoV 上位 20 変数

ノード名	変数	RoV (%)
土砂災害の発生 (-)	Yes	29311.8
土石等の移動高さ (m)	≥2.0	2095.1
土石等の移動高さ (m)	1.5-2	895.5
斜面の傾斜 (度)	27-29	471.8
タンクと斜面の距離 (m)	5-10	390.6
斜面の傾斜 (度)	25-27	377.9
斜面の傾斜 (度)	23-25	253.3
斜面の崩壊高さ (m)	60-65	212.1
斜面の崩壊高さ (m)	55-60	193.0
斜面の崩壊高さ (m)	50-55	152.5
タンクの厚み (m)	0.0032	136.3
斜面の傾斜 (度)	21-23	114.7
タンクの厚み (m)	0.0032-0.0045	106.2
土石等の移動高さ (m)	1-1.5	106.1
風向に垂直な方向の距離 (m)	0-250	100.0
斜面の崩壊高さ (m)	40-45	89.6
時間帯 (時)	21	57.3
時間帯 (時)	3	56.3
風下方向の距離 (m)	0-250	55.2
時間帯 (時)	6	43.6

5.6.3 感度解析の結果

AEGL3 の濃度に曝露する可能性のある人数 (死者数)に対する感度解析の結果を図 5-6 に示す。ここでは、対策ノードを加えた各親ノード間の VR の比較を示している。

4.8.3 項と同様に、土砂災害の発生 (Landslide_occurence) や土石等の移動の高さ (Height_movement_height), タンクと斜面の距離 (Safe_distance), 斜面の崩壊高さ (Slope_collapse_hgiht) が VR の上位を占めている結果となった (図 5-6)。これらの変数の中で、本研究で取り上げた 4 つの対策については、タンクの厚み (Tank_thickness), 貯蔵率 (Storage_rate), オイルフェンスや防油堤の設置による最大プール面積 (Maximum_puddle_area), 吸着剤の使用 (Oil_absorbent)の順で結果に寄与していることが分かった (図 5-6)。この結果は本研究における対策の設定に依存するが、少なくとも設定の範囲内ではタンクの厚みの変更, 貯蔵率の制限, オイルフェンスの設置等によるプールの最大面積の制限, 吸着剤の使用の順で対策が有効であると考えられる。これらの対策に関するノードに加え、人の手によって操作可能な変数としては、タンクと斜面の距離 (Safe_distance)が挙げられ、これは取り上げた 4 つの対策よりも結果に寄与していた。これらの結果から、本研究で想定したシナリオにおいては、土砂が到達しない場所への危険物施設の移転, タンクの厚みを増やすことによる貯蔵タンクの強化, 土砂災害が差し迫った場合における事前の貯蔵率の制限, オイルフェンスの設置によるプールの最大面積の抑制や吸着剤の使用による流出物質の回収の順でリスク削減効果が大きいといえる。

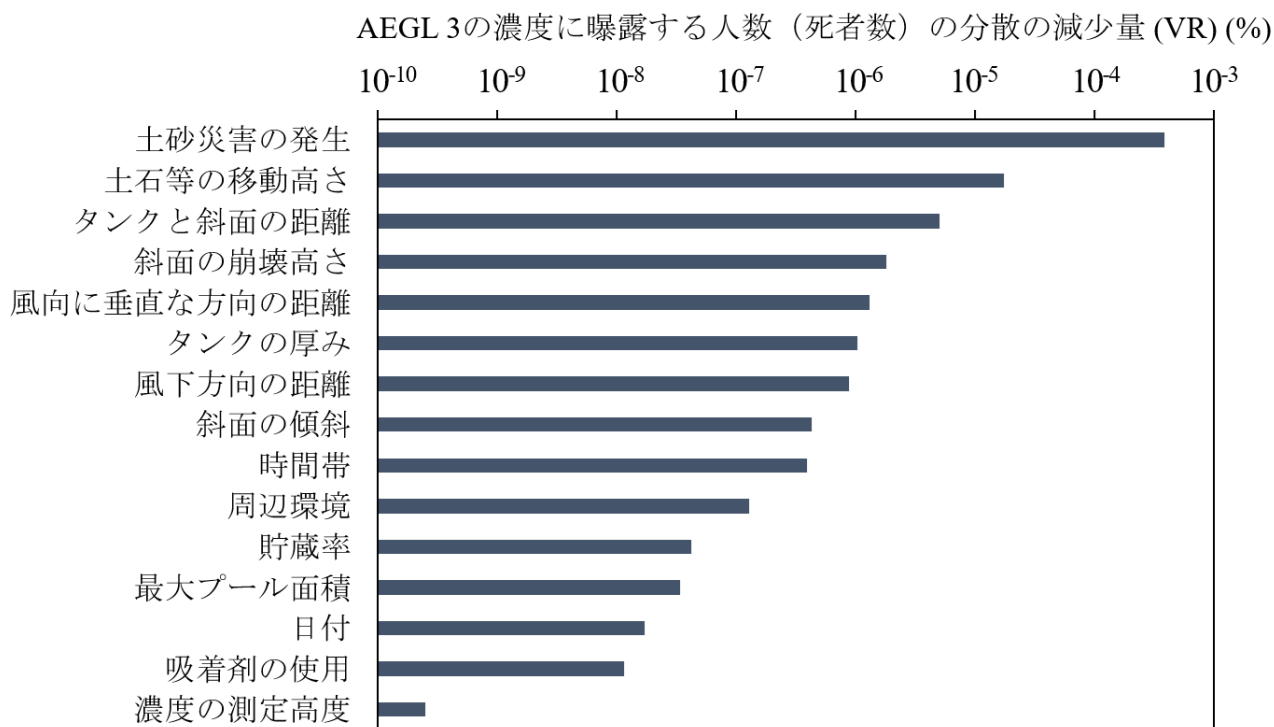


図 5-6 対策ノードを加えた感度解析の結果

5.7 結言

本研究は、第4章で構築したBNモデルに対策に関する変数を加えることによって、各対策のリスク削減効果を評価した。対策としては、規制やガイドライン、対策事例集に基づき、タンクの厚みの変更による設備の強化、土砂災害の危険性が高まった場合における貯蔵率の制限、吸着剤の使用による流出した化学物質の回収、オイルフェンスの設置によるプールの最大面積の抑制の4つを取り上げた。

各対策の中で最もリスク削減効果が大きかった対策は、タンクの厚みの変更であり、政令で定められている最小の0.0032 mから0.012-0.015 mにすることによって、1人以上の死者が生じる確率は約99.9%減少し、社会的リスクは約1000分の1となった。貯蔵率の制限によって、貯蔵率が80%の状態から、50-60%に制限すると、死者が発生する確率は約7.1%増加した。一方、貯蔵率が20-30%の状態では、死者が発生する確率は約19.8%減少した。この結果から、貯蔵率の制限はタンク内の液体の圧力を減少させることにより、かえってリスクを増加させる可能性があり、このような対策のリスク削減効果を評価するに当たっては、BNのようなモデルを用いて、各対策の相互作用を考慮した分析が必要であると考えられる。緩和策の1つである吸着剤について、90-100箱の吸着剤を用いて流出した化学物質を回収できた場合には、死者が発生する確率は約11.9%減少した。防油堤外へ化学物質が流出した場合に、オイルフェンスの設置によって、プールの最大面積を5,500 m², 1,100 m² (事業所面積の50%, 10%)に抑制できた場合には、それぞれ死者が生じる確率は約30.2%, 60.6%減少した。この結果から、いかに早くオイルフェンスを設置し、プールの最大面積を抑制できるかが、化学物質が流出した場合の緩和策として重要であることが示された。さらに、貯蔵率の制限と吸着剤の使用を組み合わせた結果、死者が生じる確率は約60.1%減少し、タンクの厚みを最小から約2-2.5倍に厚くした場合とほぼ同程度のリスク削減効果が得られたことが分かった。

感度解析の結果から、本研究で想定したシナリオ・想定の下で、各対策を比較した結果、土砂が到達しない場所への危険物施設の移転、タンクの厚みを増やすことによる貯蔵タンクの強化、土砂災害が差し迫った場合における貯蔵率の制限、オイルフェンスの設置によるプールの最大面積の抑制、吸着剤の使用による流出物質の回収の順でリスク削減効果が大きいと結論付けられた。

本研究では主に物理的な対策を取り上げ、各対策を実施できた場合のリスク削減効果を定量的に評価したが、貯蔵率の制限や事故が発生した場合の緩和策を実施するためには緊急計画の策定などの組織的な対応 (Krausmann et al., 2017)も必要となる。また、危険物施設の移転や貯蔵タンクの強化などの危険物施設の改修などは、実施に時間がかかり、費用も高額になる可能性がある。したがって、本研究で示されたように、比較的実行可能な対策として、貯蔵率の制限や吸着剤の使用を組み合わせるなど、時間・費用面から実施しやすい対策からまずは実施すべきであると考えられる。

参考文献

- Cruz, A.M., Krausmann, E., Kato, N., Girgin, S., 2017. Natech risk management and assessment Chapter 13 Reducing Natech Risk: Structural Measures. Elsevier, Netherlands.
- Hao, J., Liu, L., Long, Z., Chu, Y., Zhang, D., Chen, X., Huang, C., 2023. Scenario deduction of Natech accident based on dynamic Bayesian network: A case study of landslide accident in a liquor storage tank area in Guizhou Province, China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 83. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105067>
- Kabir, G., Suda, H., Cruz, A.M., Giraldo, F.M., Tesfamariam, S., 2019. Earthquake-related Natech risk assessment using a Bayesian belief network model. *Structure and Infrastructure Engineering*. 15, 725–739. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1569070>
- Khakzad, N., Dadashzadeh, M., Reniers, G., 2018. Quantitative assessment of wildfire risk in oil facilities. *Journal of Environmental Management*. 223, 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.062>
- Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E., 2017. Natech risk management and assessment Chapter 14 Reducing Natech Risk: Organizational Measures. Elsevier, Netherlands.
- Krausmann, E., Necci, A., 2021. Thinking the unthinkable: A perspective on Natech risks and Black Swans. *Safety Science*. 139, 105255. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105255>
- Krausmann, E., Salzano, E., 2017. Natech Risk Management and Assessment Chapter 3 Lessons Learned From Natech Events. Elsevier, Netherlands.
- Kumasaki, M., King, M., 2020. Three cases in Japan occurred by natural hazards and lessons for Natech disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 51. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101855>
- Lan, M., Zhu, J., Lo, S., 2021. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment method for modeling risk for industrial facilities subjected to landslides. *Reliability Engineering and System Safety*. 215. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107851>
- Misuri, A., Cozzani, V., 2021. A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities. *Process Safety and Environmental Protection*. 152, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.018>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2021a. Assessment of risk modification due to safety barrier performance degradation in Natech events. *Reliability Engineering and System Safety*. 212. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107634>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2021b. Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events. *Reliability Engineering and System Safety*. 205. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107278>
- Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V., 2020. Assessing the impact of natural hazards on safety barriers on the basis of expert elicitation. *Chemical Engineering Transactions*. 82, 109–114. <https://doi.org/10.3303/CET2082019>
- Necci, A., Antonioni, G., Bonvicini, S., Cozzani, V., 2016. Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning. *Reliability Engineering and System Safety*. 154, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.05.009>
- Qin, R., Zhu, J., Khakzad, N., 2020. Multi-hazard failure assessment of atmospheric storage tanks during hurricanes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104325>
- Zeng, T., Chen, G., Reniers, G., Hu, K., 2023. Resilience assessment of chemical industrial areas during Natech-

related cascading multi-hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 81.

<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104967>

大阪ガス株式会社, 2018. LNGタンクに関するリスク容量のご説明.

https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/029_03_02.pdf (accessed 18 June 2023).

大阪府, 2023. 事例集「化学物質を取り扱う事業所で今日からできる対策事例ー明日起きるかもしれない大規模災害に備えてー」. <https://www.pref.osaka.lg.jp/kankyohozen/shidou/jireishu.html> (accessed 25 September 2023).

消防庁, 2020. 危険物施設の風水害対策ガイドライン (ver2) 本文.

<https://www.fdma.go.jp/mission/prevention/countermeasures/items/kiho1.pdf> (accessed 24 May 2023).

総務省, 2019. 危険物の規制に関する政令. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306> (accessed 24 May 2023).

東京都, 2023. 化学物質を取り扱う事業者のための水害対策マニュアル.

ユニセル株式会社, 2021. オルソープ. <https://www.unisel.co.jp/product/functionality/olsorb/> (accessed 4 July 2023).

第6章 Natech のリスク管理に向けた土砂災害対策の費用便益分析

6.1 緒言

第5章では、タンクの厚みの変更による設備の強化や貯蔵率の制限といった予防策、吸着剤の使用やオイルフェンスの設置による緩和策を取り上げ、各対策のリスク削減効果を定量的に評価した。一方、このよう対策を実際に導入するためには、資機材の準備や設備の改修が必要であり、これには多くの費用が生じる場合がある。一方、事業者や行政が対策に用いることが可能な予算には限りがあるため、対策を導入する際には対策の経済性を踏まえた意思決定が求められる。このような意思決定を支えるための手法の1つとして、費用便益分析が存在する。

費用便益分析とは、社会的目的を達成するためのいくつかの代替案（プロジェクト）の取捨、優劣の順序付けを国、地域全体から考えた経済的視点から行うための手法の1つである（土木学会, 1996）。

日本では公共事業の費用便益分析の指針として、「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」が示されている（国土交通省, 2009）。これは各事業分野において、費用便益分析の実施に係る計測手法や考え方について定めたものである。また、これをもとに「急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル（案）」が出されており（国土交通省, 2021）、急傾斜地崩壊対策を対象として、具体的な便益の計算手法などがまとめられている。

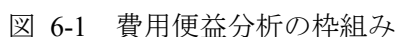
「費用便益分析」という用語は公共事業等の評価に用いられるのが一般的ではあるが、事業者が実施する安全対策の意思決定においても、費用便益分析という考え方が適用可能であるとされている（牧野, 2014）。実際に海外の文献では、産業事故防止のための安全対策の評価に関して、「費用便益分析（Cost-benefit analysis）」という用語を用いている研究例が複数存在している（Chen et al., 2020; Chen and Reniers, 2020; Gavius et al., 2009; Helle et al., 2015; Reniers and Brijs, 2014; Tong and Gernay, 2023）。そこで、本研究では「費用便益分析」を事業者の安全対策を含めて、ある事業の便益と費用を比較することによって、意思決定を行うための分析を指す用語として用いる。

本研究で対象とする Natech は自然災害を起因として発生する産業事故であるため、その対策を評価するためには、安全工学の観点から対策を評価するための枠組みが必要である。一方、Natech は東日本大震災による原発事故のように、その影響が事業所内にとどまらず、周辺環境や社会、経済に広く波及する可能性があり、対策の評価として、社会全体の便益や費用を考慮する必要があると考えられる。

そこで、本章では、牧野（2014）や Chen and Reniers（2020）などがまとめた安全対策の評価項目に対し、公共事業を評価するための既存の便益計測手法を用いることによって、Natech に対する土砂災害対策の費用便益分析の一例を示し、分析に必要な情報と算出される便益の目安を提示することを目的とした。なお、公共事業の評価手法を用いることができない項目については社会的な便益として評価できると考えられる計測手法を用いた。

本章の構成は次の通りである。6.2 節では、本章における研究の枠組みと費用便益分析の全体像を示した。6.3 節では、本研究で想定する対策の設定とその施工費用、維持管理費用の算出方法を示した。6.4 節では、対策による便益を算出するために事故の発生に伴う損失の算出方法を示した。6.5 節では、設定した各変数の不確実性を考慮するための感度解析手法を示した。6.6 節では、費用便益分析と感度解析の結果を示し、想定した対策の経済性について考察した。6.7 節では、本研究により得られた結論を示した。

本研究の枠組みを図 6-1 に示す。



費用便益分析における評価指標である費用便益比の計算式を式(6-1)に示す(国土交通省, 2009)。

(6-1)

ここで n : 評価期間, B_v : ある年次の便益 (円), C_v :



ある年次の費用 (円), dr : 社会的割引率である。便益は安全対策を導入した場合と導入しなかった場合の損失の差を表している。

評価期間は、コンクリートの悪条件下における寿命が 50 年程度とされていることから (国土交通省, 2014), 50 年間とした。また, 割引率は国土交通省所管公共事業の費用便益分析で適用されている値を適用し, 4%とした (国土交通省, 2009)。費用便益分析における費用は最初の年に施工費用が発生し, 次の年から維持管理費用が 50 年間発生するとした。また, 便益については対策を施工した次の年から 50 年間発生するとした。

6.3 対策の施工費用と維持管理費用の算出

本研究で対象とする事業所は急傾斜地崩壊の危険性がある場所に立地しているため, 急傾斜地崩壊対策が求められる (図 6-3)。急傾斜地崩壊対策は(1)「のり切」, (2)「急傾斜地の崩壊を防止するための施設」, (3)「急傾斜地の崩壊が発生した場合に生じた土石等を堆積するための施設」の 3 種類が挙げられる (国土交通省, 2017)。(1)は不安定土塊や急傾斜地そのものを除去する工法であり, 土砂災害を防ぐうえで最も確実性が高いが, 施工の想定が難しい。(3)は主に待ち受け式の擁壁や盛土が挙げられ (図 6-3), 斜面と建築物との間にスペースが必要となるが, 対象事業所の屋外貯蔵タンクは斜面との距離が近いいため, 土石等を堆積するための施設は適していないと考えられる。よって, 本研究では(2)を土砂災害対策として採用した。



図 6-3 急傾斜地崩壊に関する対策施設のイメージ図 (広島県, 2016)

(2)「急傾斜地の崩壊を防止するための施設」に該当する具体的な施設としては, 土留, 法面を保護する施設, 排水施設の 3 つの施設が挙げられる (図 6-3) (広島県, 2016)。土留は法面の崩壊を防止するた

めの施設であり，主に擁壁工とアンカー工に分かれるが，擁壁工は斜面と構造物の間にスペースが必要であるため，施工環境に適していないと考えられる。アンカー工は現場打ちコンクリート枠工やコンクリート張工と併用される施設であり，安定性を高め，岩盤の崩壊を防止する役割を持つ。法面を保護する施設としては，コンクリート張工とコンクリート枠工の大きく 2 つの種類に分けられる。その中でも，本研究では法面を保護する施設として，現場打ちコンクリート枠工を採用し（国土交通省北海道開発局，2021；広島県，2016），安定性を高めるためにアンカーを設置する対策を想定した。

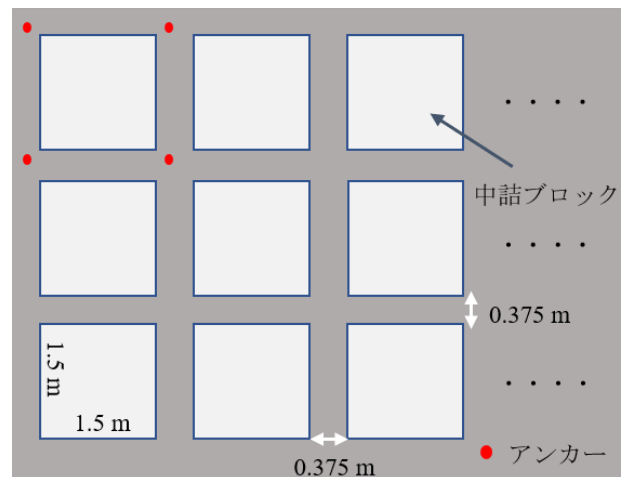


図 6-4 本研究で想定する現場打ちコンクリート枠工

本研究で想定した現場打ちコンクリート枠工を図 6-4 に示し，施工工程を図 6-5 に示す。この対策の施工費用を算出するため，本研究では土木工事積算基準等（国土交通省大臣官房技術調査課，2020）によって算出可能な施工工程に限定し，図 6-5 の実線部分に該当する足場工，アンカー工，型枠工，コンクリート工，中詰工の 5 つの工程を取り上げ，積算を行った。この施工工程に基づき，表 6-1 に積算に必要な労務費と材料費の根拠資料を，表 6-2 に積算に必要な各工程の想定と根拠資料を示す。

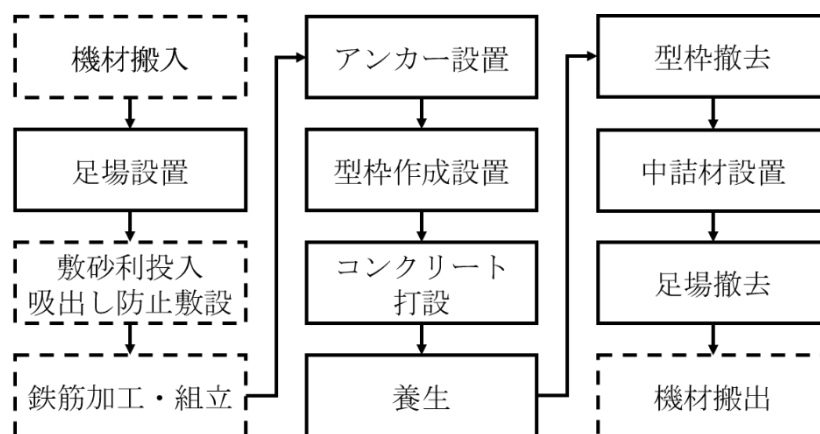


図 6-5 対策の施工工程

表 6-1 労務費と材料費の根拠資料

項目	各積算の根拠資料
作業員	公共工事設計労務単価表（国土交通省，2020a）・新潟県の値
ラフテレーンクレーン運転	建設物価（2020 年 10 月）（建設物価調査会，2020）・北陸の値
コンクリートポンプ車運転	公共工事設計労務単価表（国土交通省，2020a） 土木工事積算基準 1 章①建設機械運転労務（国土交通省大臣官房技術調査課，2020），人件費のみを取り上げる。
コンクリート	建設物価（2020 年 10 月）（建設物価調査会，2020） レディミクストコンクリート（40-12-25）
張りブロック	建設物価（2020 年 10 月）（建設物価調査会，2020） 厚さ 10 cm，富山の値

表 6-2 各工程の想定及び根拠資料

工程	項目	想定	設定と各積算の根拠資料
足場工	足場面積 (m ²)	81	土木工事積算基準 6 章仮設工⑤足場工 (国土交通省大臣官房技術調査課, 2020) 単管傾斜足場, 安全ネットあり, 諸雑費 30% コンクリート枠工全体の大きさとした。
アンカー工	アンカー数 (本)	32	施工パッケージ型積算方式標準単価表 (国土交通省, 2020b) 削孔: 足場工なし, 二重管方式, 呼び径 115 mm, 粘性土・砂質土 アンカー鋼材加工・組立・挿入・緊張・定着・頭部処理: 二重防食, PC 鋼線より線, 設計荷重 400 以上 1300 kN 以下, 頭部処理あり
	アンカー長さ (m)	1.0	これに加え, グラウト注入, ボーリングマシン移設の費用を計上。 アンカーは枠の四方に 1 本ずつ配置。長さは 1 m と想定。グラウト使用量は土木工事積算基準 3 章共通工⑦アンカー工 (国土交通省大臣官房技術調査課, 2020)に記載されている式(6-2)を用いて算出した。
	グラウト注入量 (m ³)	0.033	$V_i = \frac{D_p^2 \times \pi}{4 \times 10^6} \times H_d \times (1 + K_c) \quad (6-2)$ ここで, V_i: 注入量 (m³), D_p: ドリルパイプの外径 (m), H_d: 削孔長 (m), K_c: 補正係数 (2.2)である。
型枠工	枠面積 (m ²)	100.5	土木工事積算基準 3 章共通工①-5 コンクリート法枠工 (現場打法枠工) (国土交通省大臣官房技術調査課, 2020) 施工パッケージ型積算方式標準単価表 (国土交通省, 2020b) 一般型枠の小型構造物, ラフテレーンクレーン運転の費用を計上。厚さは 0.5 m と想定。
コンクリート工	コンクリート打設量 (m ³)	16.9	土木工事積算基準 3 章共通工①-5 コンクリート法枠工 (現場打法枠工) (国土交通省大臣官房技術調査課, 2020) コンクリートポンプ車打設, 諸雑費 2% 厚さは 0.5 m と想定。ロス率を考慮して, 土木工事積算基準 3 章①-5 コンクリート法枠工に記載されている式(6-3)を用いて算出した。 使用数量 (m ³)=設計数量 (m ³)×(1+S _l) (6-3) ここで S _l : ロス率 (0.15) である。
中詰工	枠内面積 (m ²)	47.3	土木工事積算基準 3 章共通工①-4 コンクリート法枠工 (プレキャスト法枠工) (国土交通省大臣官房技術調査課, 2020) 中詰ブロック, 諸雑費 10%

工事全体の費用を算出するためには、工事目的物の施工に直接必要な費用である直接工事費に加え、間接工事費や一般管理費等、消費税相当額を計上する必要がある（図 6-6）（国土交通省大臣官房技術調査課，2020）。本研究では、土木工事積算基準第 1 編土木工事積算基準等通知資料からそれぞれの経費率を得た。共通仮設費率と現場管理費率は工種を砂防・地すべり等工事として、一般管理費率は算出の基準の前払金支出割合（35%を超え、かつ 40%以下）とした。消費税は 10%として、消費税相当額を計上した。

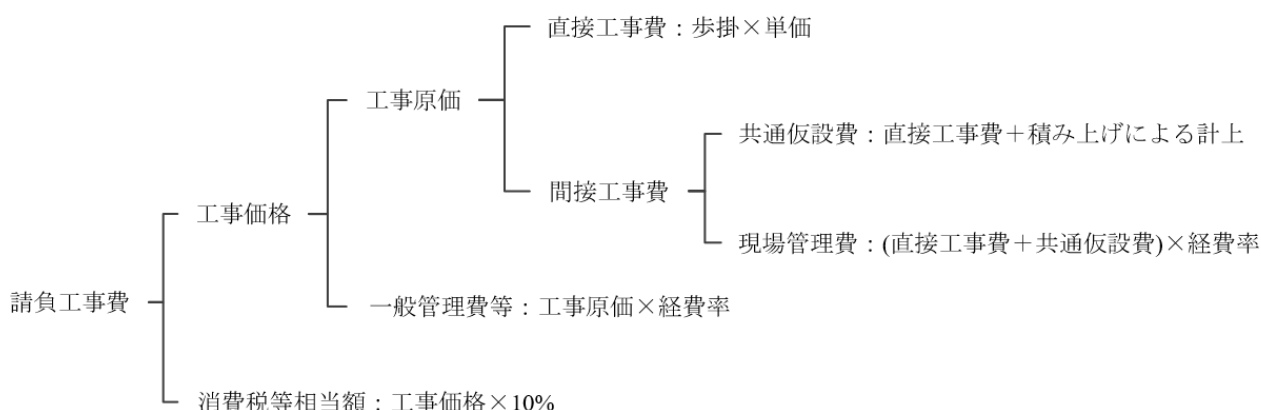


図 6-6 請負工事費の算出項目（国土交通省大臣官房技術調査課（2020）より修正）

土砂災害対策の維持管理費用は大阪府の施設補修・日常維持費の 2010 年度予算（大阪府，2011）を参考に算出した。全体の予算から日常維持費と各対策の補修費の割合を乗じてそれぞれの予算を算出し、対象施設（箇所）数で除すことで 1 箇所当たりの補修・維持費を算出した。日常維持の該当施設数は、施設補修費の対象となっている箇所（急傾斜，砂防堰堤，地すべり）の合計とした。本研究では、日常維持費と各施設補修費の合計額を維持管理費用として用いた。

6.4 対策による便益の算出

本研究では 6.2 節にも述べたとおり，土砂災害対策を実施することで土砂災害が発生せず，その結果として事故が回避できると仮定した。ここで便益は土砂災害対策を導入した場合と導入しなかった場合の損失の差を表しており，本研究では以下の式(6-4)を用いて便益の期待値を算出した。

$$Benefit = Loss \times (P_{前} - P_{後}) \quad (6-4)$$

ここで，**Benefit**：便益の期待値，**Loss**：事故による損失， $P_{前}$ ：対策導入前の発生確率， $P_{後}$ ：対策導入後の発生確率である。

事故による損失額の評価項目として，表 6-3 に参照とすべき 13 項目（①～⑬）を取り上げた（Gavious et al., 2009; Jallon et al., 2011; Reniers and Brijs, 2014; みずほ情報総研株式会社（経済産業省委託事業），2018; 牧野，2014）。本研究では定量的に評価できると考えられる項目として，①～④と⑧～⑩の項目を取りあげ，3.4 節に示した流出ケースごとに事故による損失額を算出した。したがって，現時点で情報が得られていない⑤～⑦，⑪～⑬の項目を評価に含めると，算出した損失額よりも大きくなると考えられる。本不確実性については，6.6.3 項に詳しく述べる。

表 6-3 事故による損失の算出項目

項目	概要
①建物や設備等の損失	建物や装置・設備、現場に保管されていた原材料、製品などの資産が滅失することによる損害
②救護・医療費	事故現場での応急処置や病院への搬送など医療として緊急に生じる費用
③給与支払い	労働者災害補償保険からは給付されない休業 1～3 日目の休業補償
④被災者への補償	葬祭料、弔慰金、障害手当金、遺族補償費、退職金割増額
⑤訴訟費用	示談費用、弁護士費用、訴訟スタッフの費用
⑥既存従業員への割増賃金	新規従業員を雇用せず生産規模を維持する場合に支払う賃金
⑦新規従業員補填に係る費用	生産規模を維持するために新規従業員を雇用する場合の費用
⑧生産停滞	生産ロス等
⑨事故調査費用	事故調査のための人件費や報告書作成費用、事故調査委員への謝金
⑩罰金、課徴金、過料	行政罰により支払う罰金
⑪保険料率の上昇	保険金を支払った後の保険料上昇分
⑫組織トップの対応費用	記者会見等を含む組織トップによる様々な事故対応に必要な費用
⑬その他計測が困難なもの	事故により発生する離職率増加、企業イメージの悪化、従業員のモチベーションの低下等

①は急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル (案) (国土交通省, 2021)を参考に算出した。対象事業所付近の土砂災害警戒区域図より、土砂災害によって被災すると考えられる施設はタンク等の償却資産のみであると考えられる。該当業種の償却資産評価額は、対象事業所の従業員数と従業員 1 人当たりの償却資産評価額 (16,503 千円)(国土交通省, 2020c)、被害率を乗じることで求められる。被害率については、堆積土砂厚 50 cm 未満、50 cm 以上 100 cm 未満、100cm 以上における、それぞれの被害率から平均をとった値 (0.473) (国土交通省, 2021) を設定した。算出された費用は全ての流出ケースにおいて一律に生じるとした。

②については救急費用と入院費用を算出した。救急費用は、消防白書 (消防庁, 2020)から得られた職員数と消防費を用いて、救急に係る費用を算出した (佐藤, 2013)。さらに、救急に係る予算を 1 年間の救急出動件数 6,608,341 件 (2018 年度) (消防庁, 2020)で除すことで、救急 1 件当たりの費用を算出した。ここで、救急件数は障害レベル (AEGL 2) と致死レベル (AEGL 3) の濃度に曝露する人数とした。

入院費用は、入院日数を損傷、中毒及びその他の外因の影響における 35 歳から 64 歳の平均在院日数 20.1 日と仮定した (厚生労働省, 2019)。入院にかかる費用は、令和元年度の入院 1 日当たりの医療費 (37,890 円) (厚生労働省, 2020)から算出した。入院数は障害レベル (AEGL 2) の濃度に曝露する人数とした。

③は対象事業所の有価証券報告書 (2020 年 3 月期) から得られた平均年間給与から平均日額給与を算出した。この日額給与の 6 割が従業員 22 人に 3 日間支給されるとして給与支払いの費用を算出した (牧野, 2014)。この費用は全ての流出ケースにおいて一律に生じるとした。

④に関しては、公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編) (国土交通省, 2009)に従って、人的損失額として評価した。技術指針 (国土交通省, 2009) では、人的損失額は財産的損害額と精神的損害額の和として定義され、また財産的損害額は逸失利益と医療費の和として定義されている。本研究では②において、医療費を算出しているため、精神的損害額と財産的損害額を評価した。精神的損害額は

1人当たり2.26億円が適用されているため、この値を用いて、致死レベル(AEGL3)の濃度に曝露する人数を乗じることで算出した。逸失利益については以下の式(6-5)(国土交通省,2009)から、従業員と住民に分けて算出した。

$$Lb = ai \times \{1 - (1 + r)^{-b}\} / ar \quad (6-5)$$

ここで、 Lb : 逸失利益 (円), ai : 各期間ごとに発生する収入額 (年間収入-生活費)(円), b : 労働可能期間満了時 (b 年後), ar : 年利率 (法定利率 5%) である。

ai に関して、従業員の年間収入は該当企業の2020年度の有価証券報告書より値を得た。生活費については、2019年度の家計調査(総務省,2021)から、実収入に対する消費支出(総世帯のうち勤労者世帯)の割合(約55%)を用いて算出した。住民の収入と生活費は「にいがた県統計ボックスの令和元年家計調査年報」(新潟県,2020)から、2人以上の世帯のうち勤労者世帯の実収入の平均652,636円/1世帯/1ヶ月を収入として用い、同様に消費支出の平均314,427円/1世帯/1ヶ月を生活費として用いた。年間収入、年間生活費に換算する際は実収入、消費支出ともに12倍した。 b に関しては、従業員、住民ともに平均年齢から定年までの期間とした。従業員の平均年齢は有価証券報告書より値を得た。住民の平均年齢は柏崎市の年齢別統計人口(柏崎市,2020)から値を得た。定年は令和3年4月から施行されている改正高齢者雇用安定法より、雇用確保が義務化される65歳(厚生労働省,2021)とした。

⑧は、営業停止損失(式(6-6))(国土交通省,2021)として評価した。

$$A_i = M_i \times \left(n_0 + \frac{n_1}{2} \right) \times p_i \quad (6-6)$$

ここで A_i : 営業停止損失 (円), i : 産業大分類, M_i : 従業者数 (人), p_i : 付加価値額 (円/人/日), n_0 : 営業停止日数 (日), n_1 : 営業停滞日数 (日) である。

鉱業における付加価値額は、「治水経済調査マニュアル(案)各種資産評価単価及びデフレーター」(国土交通省,2020c)より、令和元年度の値で72,240円/人/日となる。停止日数、停滞日数は、崩土の堆積厚50cm未満、50cm以上100cm未満、100cm以上における、それぞれの停止、停滞日数の平均をとった値(停止日数:8.3日、停滞日数:17.9日)(国土交通省,2021)を用いた。営業停止損失は全ての流出ケースで一律に生じるとした。

⑨に関する情報は一般に公開されておらず、得ることが困難である。本研究では大まかな費用を算出するため、航空、鉄道および船舶の事故における事故調査費用を用いた。これらの事故等調査報告書1件当たりの費用は令和元年度の値で約154,000円である(国土交通省,2020d)。これを事故調査費用として、全てのケースに一律に生じるとした。

⑩については、事故の「予見可能性」が罪に問われるかどうかの1つの判断基準となる。土砂災害の予見可能性については、対象事業所は土砂災害警戒区域に該当しているため、事業者は土砂災害の発生を予見することができると考えられる。一方、土砂災害によるタンクの破損、化学物質流出、ヒトへの曝露が予見できたかどうか論点になる。本研究では最悪のシナリオを想定することの重要性を鑑み、想定した事故シナリオが予見可能であるとした。また、急傾斜地崩壊対策は基本的に土地の所有者もしくは急傾斜地の崩壊によって被害を受けるおそれのある者が施工することとなっている(国土交通省,2022)。したがって、事業者は事故の発生を予見できたのにも関わらず、事故の発生を防ぐための適切な

対策を行わなかったことで、業務上過失致死傷罪に問われる可能性がある (法務省, 2023)。本研究では該当する刑法 (法務省, 2023) に従い、罰金 100 万円が課されるとした。一方、避難ありのケースなど被災者数が 0 の場合は罰金が課されないとした。

最後に式(6-4)で示した通り、算出された損失額の合計に対策導入前の発生確率と対策導入後の発生確率の差を乗じることで便益の期待値を算出した。本研究は費用便益分析の一例を示すことが目的であるため、簡便のために 1 年当たりの土砂災害発生確率を事故の発生確率として設定し、便益の期待値を算出した。土砂災害発生確率に関する既往研究は複数存在するが (川越ら, 2008; 杉原ら, 2011), 本研究では第 4 章の確率論的リスク評価で用いた土砂災害発生確率を設定した (松田・中谷, 2020)。本研究で対象とする事業所は土砂災害特別警戒区域が含まれるメッシュに該当しており、1996 年から 2019 年までの約 24 年間に 1 回以上の土砂災害が発生する確率は 7.94% となったことが報告されている (松田・中谷, 2020)。当該区域に該当するメッシュにおける 1 年当たりの土砂災害発生確率は式(6-7)を用いて算出した (松田・中谷, 2020)。

$$P_T = 1 - (1 - P_{24})^{\frac{T}{24}} \quad (6-7)$$

ここで、 P_T : T 年間で 1 回以上土砂災害が発生する確率である。

本研究では、土砂災害対策を導入した場合は事故が発生しないと仮定しているため、対策導入後の発生確率を 0 として、便益の算出を行った。

6.5 感度解析

不確実性下での費用便益分析に関する評価手法は複数存在する。防災の経済分析 (多々納・高木, 2005) によると、1) 損失予測の不確実性を考慮し、安全側を評価する必要がある場合にはベータ確率分布における 90 パーセンタイル損失値を用いる方法が一般的であると述べられている。また、不確実性下での便益評価手法は 2) システムの状態の違いに対する支払意思額の期待値を用いる方法と 3) プロジェクトの実施に対する支払意思額を用いる方法があるとされている (多々納・高木, 2005)。安全工学の分野では、4) 不確実性のもとで費用便益分析を行う際に **disproportion factor** という値を導入し、費用/便益 < **disproportion factor** の場合、つまり費用と便益の比がある値を超えない場合、安全対策が合理的に実施可能であるとみなす考え方も存在する (Goose, 2006; Reniers and Brijs, 2014; Talarico and Reniers, 2016)。これは便益に **disproportion factor** という係数を乗じることで、便益を大きく見積もり、事業者が対策を行うための動機を持たせる意図が含まれていると解釈できる。さらに、国土交通省の技術指針では、5) 不確実性を考慮した事業評価を行う際に、感度解析を行うことが示されている (国土交通省, 2009)。事業者が意思決定を行う際には、安全側の評価を行うだけでなく、不確実性を考慮し、費用便益比がどれくらい幅をとるか検討する必要があると考えられる。

本研究では、6.4 節で示す通り、国土交通省の技術指針 (国土交通省, 2009) の評価手法をもとに費用便益分析を行っているため、その一貫性を考慮し、不確実性がもたらす影響を評価するために、費用便益分析に対する感度解析を採用した。具体的には 3.6.3 項で示したタンク付属配管の破損における防油堤が機能しないケースの感度解析の結果をもとに、結果に大きな影響を与えると考えられる被災者数の変動による費用便益比の変動を評価した。また、現在一般的に用いられている割引率 4% に関しても複数の議論が存在することから (国土交通政策研究所, 1999; 国土交通省, 2020e), 3.6.3 項で示した感度解析の項目に、割引率を加えて感度解析を行った。割引率は本研究で用いた 4% のケースに加え、2%, 6% の

ケース (国土交通政策研究所, 1999)で評価を行った。

6.6 結果と考察

6.6.1 費用便益分析結果

対策施工費用の算出結果を表 6-4 に示す。全体の工事費用である請負工事費は 9,579,000 円となった。また、本研究は急傾斜地の崩壊対策を対象としているため、表 6-5 より、維持管理費用は 1 年当たり 148,900 円となった。

続いて、便益の算出結果を流出ケースごとに表 6-6 に示す。便益の期待値は式(6-7)によって算出された 1 年間の土砂災害発生確率 0.344%を乗じて算出された。防油堤が機能する場合は、タンク転倒ケース、付属配管破損ケースともに被災者数が同じとなるため、事故による損失額は同額となった。損失額の評価項目の中で最も金額が大きくなった項目は被災者への補償であり、本研究で行った試算では被災者の数が損失額の合計に大きな影響を与えるという結果となった (表 6-6)。また、防油堤が機能する場合は防油堤が機能しない場合と比べて、損失額が約 5 億円減少している。これは防油堤によって、化学物質の影響範囲が縮小し、被災者数が減少したことが反映された結果である。避難が行われ、被災者数が生じなかった場合には、防油堤が機能しない場合と比べて、損失額が約 62 億円減少していた。また、費用便益分析の結果から、避難あり(被災者が 0)のケースを含め、全てのケースにおいて、便益が費用を上回ることが分かった (表 6-6)。したがって、法律で定められている防油堤の設置に加え、導入費用は高額となるが、土砂災害そのものを防ぐ事前対策も、土砂災害発生確率のみを考慮した場合においては経済的に合理的な対策であると考えられる。

また、本研究では対策の効果を際立たせるために対策導入後の発生確率を 0 としたが、対策により発災のリスクを完全に 0 にすることは難しいため、想定した対策により、どの程度まで土砂災害発生確率を低減できれば費用便益比の観点から有用であるかを検討した。具体的には式(6-4)から、対策導入後の発生確率を変数として、費用便益比がおおよそ 1 となる確率を求めることで、対策に求められる効果を検討した。その結果、現状の土砂災害発生確率を避難ありのケースでは約 0.0551%以下 (約 84.0%以上)、避難なしのケースでは約 0.335%以下 (約 2.62%以上)まで低減させることができれば、費用便益比の観点から本対策は合理的な対策であるといえることがわかった。

表 6-4 対策施工費用の算出結果

項目	費用 (千円)
足場工	264
アンカー工	2,385
型枠工	813
コンクリート工	469
中詰工	325
直接工事費	4,256
共通仮設費	646
現場管理費	2,243
一般管理費	1,563
消費税相当額	871
請負工事費	9,579

表 6-5 1 施設当たりの維持管理費用 (大阪府, 2011)

	割合	日常維持費・修繕費 (円)	施設数	1 施設当たり費用 (円)
日常維持 (除草等)	37%	24,285,320	520	46,700
施設補修 (急傾斜)	26%	17,065,360	167	102,200
施設補修 (地すべり)	18%	11,814,480	13	908,800
施設補修 (砂防堰堤)	19%	12,470,840	340	36,700

表 6-6 事故による損失の算出と費用便益分析の結果

(単位：千円)	避難あり	防油堤が機能する	タンクの転倒 (防油堤が機能しない)	タンク付属配管の破損 (防油堤が機能しない)
①建物や設備等の損失	171,730	171,730	171,730	171,730
②救護・医療費	0	2,543	14,178	13,301
③給与支払い	924	924	924	924
④被災者への補償	0	6,214,369	6,750,620	6,750,620
⑧生産停滞	27,415	27,415	27,415	27,415
⑨事故調査費用	154	154	154	154
⑩罰金、課徴金、過料	0	1,000	1,000	1,000
損失額の合計	200,223	6,418,135	6,966,021	6,965,144
便益の期待値	689	22,078	23,963	23,960
費用便益分析結果				
50 年間の総便益	15,393	493,255	535,369	535,302
50 年間の総費用	12,906	12,906	12,906	12,906
費用便益比	1.20	38.2	41.5	41.5

6.6.2 感度解析の結果

図 6-7 に費用便益比の感度解析結果を示す。図 6-7 はタンク付属配管の破損における防油堤が機能しないケースの費用便益比 41.5 (表 6-6)を基準として、各変数を上方と下方に変化させた場合の費用便益比とその変動の幅を示している。風速や大気安定度などの気象条件が変動することに伴う被災者数の不確実性により、費用便益比が最小で 1.20, 最大で 65.4 まで変化するという結果となった。この結果から、3.6.3 項で示した化学物質流出影響の感度解析結果と同様に、風速や大気安定度、気温といった気象条件による被災者数の不確実性が感度解析結果にも大きな影響を与える要因であることが分かった。さらに、風速が想定される最大の値をとり、被災者数が 0 の場合においても (3.6.3 項参照)、費用便益比は 1.20 であり、便益が費用を上回ることが分かった。割引率については、6%と2%のケースで費用便益比はそれぞれ 33.2, 53.5 となった。本研究の設定では、割引率が 4%のケースと比べて、割引率を大きくすることによって便益が割り引かれ、費用便益比が小さくなることが示された。また、気温よりも割引率が費用便益分析の結果に不確実性をもたらすことがわかった。この結果から、現状の 4%に加え、複数の割引率で費用便益比を算出することは対策導入の意思決定を行う際に必要であると考えられる。

Natech のような大きな不確実性が伴う事象に対する事前対策の費用便益分析を行う際には、事故のシナリオやリスク評価に用いるモデルの不確実性などを考慮し、感度解析を行うことで、意思決定に対する信頼性を高めることが重要である。

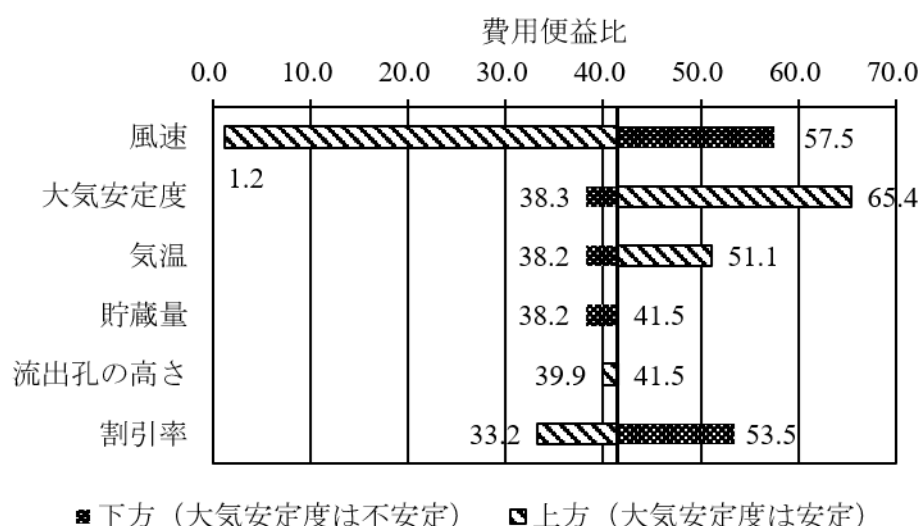


図 6-7 費用便益分析の感度解析結果

6.6.3 評価手法の不確実性

本研究で設定したパラメータによる評価結果の不確実性を評価するために、6.6.2 項で気象条件やシナリオの不確実性による被災者数の変動とそれに伴う費用便益比の変動を示した。一方、本研究では 6.4 節でも述べたように、事故による損失の評価項目として、企業イメージの悪化や訴訟費用など、定量的な評価が困難な項目が含まれておらず、そこに不確実性が生じ得る。また、本研究では土砂災害に伴う被害だけではなく、化学物質の流出・拡散に伴う被災者数を考慮した損失の評価を行った。しかし、流出した化学物質の回収作業などを考慮した場合、事故に伴う営業停止日数は土砂災害単体が発生した際の営業停止日数よりも大きくなる可能性があり、Natech を考慮する場合には化学物質の流出に伴う被害を詳細に評価することが求められる。実際にこれらの費用が加算された場合には、事故による損失額はより大きくなると考えられる。

また、本研究では費用便益分析に必要な情報と分析の一例を示すことができたが、簡便のために土砂災害の発生確率のみを用いた評価を行い、タンクの破損確率や気象条件の発生確率などを考慮することができていない。本研究で想定したような約 60~70 億円の損害が生じる、石油コンビナート等の化学プラントにおける事故の年間発生確率は、主に人的要因や設備・システムを要因として、 10^{-5} 以上 10^{-2} 未満を取ると推定されている (中村, 2016)。このことから、本研究で算出した 1 年当たりの便益の期待値は石油コンビナート等の化学プラントで推定されている、自然災害を除く年間あたりの事故発生確率の最大値付近を乗じたことに相当する。しかし、屋外貯蔵タンクの破損確率や設定した風速、風向などの気象条件の発生確率、土砂災害時に防油堤が機能する確率などを考慮すると、実際の事故の発生確率は本研究での推定結果より小さくなる可能性が高い。その場合、便益の期待値が本研究の推定値の 100 分の 1、1000 分の 1 になる可能性も十分に考えられる。そのため、第 4 章で示した確率論的リスク評価を基に、本研究のような費用便益分析を実施することによって、より詳細に各パラメータの不確実性を踏まえた費用便益分析が可能であると考えられる。実際、Helle ら (2015) は Natech を対象とはしていないが、Bayesian network を活用した確率論的リスク評価を基に対策の費用便益分析を実施している。このような手法は本研究で実施した費用便益分析と比べて、より複雑な分析過程を必要とするが、低頻度かつ不確実性が大きい事象である Natech の対策を評価する上では有効であると考えられる。

さらに、対策の効果についても定量的な評価ができておらず、本研究では対策の効果を明確にさせる

ために土砂災害対策を導入した場合は発生確率を 0 としている。6.6.1 項で示したように、費用便益分析の観点から、合理的な対策であるといえる発生確率はケースによって変わるため、対策による効果を定量的に評価することも今後検討すべき課題であるといえる。

6.7 結言

本章では、対策の経済性分析の一例として、土砂災害対策を取り上げた費用便益分析を実施し、今後の Natech に対する予防策や緩和策の分析に必要な情報と算出される便益の目安、検討すべき課題を提示した。特に本研究では、これまでの安全工学の観点から設定された便益評価項目に対し、現在日本で用いられている公共事業を評価するための便益計測手法を適用することによって、恣意的な設定をできる限り排除する形で評価を実施した。

土砂災害対策については、既存の法律施行令で定められた対策の中から、対象事業所で実施可能な対策を選定し、土木工事積算基準等を用いて施工費用を算出した。事故による損失については、既存の研究から算出項目を設定し、急傾斜地崩壊対策事業所の費用便益分析マニュアルに従う形で算出を行った。便益については、土砂災害対策を実施することで事故の発生確率が 0 になると仮定し、土砂災害の発生確率を基に便益の期待値を算出した。

費用便益分析の結果、全てのケースにおいて費用便益比が 1 を超えたため、対策による便益が費用を上回ることが示された。また、対策による効果として、現在の土砂災害発生確率 0.344% から、避難ありのケースでは約 0.0551% 以下、避難なしのケースは約 0.335% 以下まで低減させることができれば、費用便益比の観点から本対策は合理的な対策であることが示された。

感度解析の結果からは、風速が最大であり、被災者数が 0 の場合でも費用便益比は 1.20 となり、最大で費用便益比は 65.4 まで変化することが分かった。また、感度解析を実施した変数以外に、費用便益分析の結果に大きな影響を与える要因として、事故の発生確率が挙げられる。特に本分析では、土砂災害によるタンクの破損確率や気象条件の発生確率などを考慮できていないため、便益の期待値を過大評価している可能性がある。本手法に対し、詳細な発生確率の算出結果を組み合わせることによって、不確実性を踏まえた分析が可能であると考えられる。

参考文献

- Chen, C., Reniers, G., 2020. Economic approaches for making prevention and safety investment decisions in the process industry, in: *Methods in Chemical Process Safety*. pp. 355–378.
<https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2020.03.003>
- Chen, C., Reniers, G., Khakzad, N., 2020. Cost-benefit management of intentional domino effects in chemical industrial areas. *Process Safety and Environmental Protection*. 134, 392–405.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.007>
- Gavious, A., Mizrahi, S., Shani, Y., Minchuk, Y., 2009. The costs of industrial accidents for the organization: Developing methods and tools for evaluation and cost-benefit analysis of investment in safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 22, 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.008>
- Goose, M.H., 2006. Gross Disproportion, Step by Step - A Possible Approach to Evaluating Additional Measures at COMAH Sites. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. 1–11.
- Helle, I., Ahtiainen, H., Luoma, E., Hänninen, M., Kuikka, S., 2015. A probabilistic approach for a cost-benefit analysis of oil spill management under uncertainty: A Bayesian network model for the Gulf of Finland. *Journal of Environmental Management*. 158, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.042>
- Jallon, R., Imbeau, D., De Marcellis-Warin, N., 2011. Development of an indirect-cost calculation model suitable for workplace use. *Journal of Safety Research*. 42, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2011.05.006>
- Reniers, G., Brijs, T., 2014. Major accident management in the process industry: An expert tool called CESMA for intelligent allocation of prevention investments. *Process Safety and Environmental Protection*. 92, 779–788.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.003>
- Talarico, L., Reniers, G., 2016. Risk-informed decision making of safety investments by using the disproportion factor. *Process Safety and Environmental Protection*. 100, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.003>
- Tong, Q., Gernay, T., 2023. Resilience assessment of process industry facilities using dynamic Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 169, 547–563. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.048>
- 大阪府, 2011. 土砂災害対策事業のあり方について. <http://219.122.60.86/attach/6892/00089300/2siryou1.pdf> (accessed 19 June 2023).
- 柏崎市, 2020. 柏崎市の年齢別統計人口 (令和2年11月末).
<https://www.city.kashiwazaki.lg.jp/material/files/group/5/R211nennrei.pdf> (accessed 30 March 2021).
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹, 2008. 数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築. *自然災害科学*. 27, 69–83.
- 建設物価調査会, 2020. 建設物価 令和2年10月1日 No.1249.
- 厚生労働省, 2019. 退院患者の平均在院日数等. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/17/dl/03.pdf> (accessed 19 June 2023).
- 厚生労働省, 2020. 令和元年度 医療費の動向.
https://www.mhlw.go.jp/topics/medias/year/19/dl/iryohi_data.pdf (accessed 19 June 2023).
- 厚生労働省, 2021. 高齢者雇用安定法改正の概要. <https://www.mhlw.go.jp/content/11600000/000694689.pdf> (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省, 2009. 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編).
- 国土交通省, 2014. 国土交通白書2014 第I部 第1章 第3節 コラム コンクリートの寿命について.
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/index.html> (accessed 19 June 2023).

- 国土交通省, 2017. 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律施行令.
https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=413CO0000000084_20170401_429CO0000000063 (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省, 2020a. 令和2年3月から適用する公共工事設計労務単価について.
- 国土交通省, 2020b. 令和2年度 施工パッケージ型積算方式標準単価表.
- 国土交通省, 2020c. 治水経済調査マニュアル (案)各種資産評価単価及びデフレーター 令和2年4月改定.
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/shisan_r2.pdf (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省, 2020d. 令和元年度の事業に係る行政事業レビューシート 174公共交通等安全対策に必要な経費. https://www.mlit.go.jp/page/kanbo05_hy_002096.html (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省, 2020e. 令和2年度 第1回 公共事業評価手法研究委員会 議事概要.
<https://www.mlit.go.jp/common/001353956.pdf> (accessed 20 June 2023).
- 国土交通省, 2021. 急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル (案) 令和3年1月.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/zigyo_hyokasyuho/manualkyukeisha.pdf (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省, 2022. 急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=344AC0000000057> (accessed 19 June 2023).
- 国土交通省大臣官房技術調査課, 2020. 令和2年度版国土交通省土木工事積算基準.
- 国土交通省北海道開発局, 2021. 令和3年度北海道開発局道路設計要領第4章法面保護工.
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g700000011y2-att/splaat0000003v77.pdf (accessed 19 June 2023).
- 国土交通政策研究所, 1999. 費用便益分析に係る経済学的基本問題 第3章 費用便益分析における割引率. https://www.mlit.go.jp/pri/houkoku/gaiyou/pdf/H11_1_3.pdf (accessed 20 June 2023).
- 佐藤雅代, 2013. 救急の現況と制度としての持続可能性. 第201回産業セミナー. 41–55.
- 消防庁, 2020. 令和元年 消防白書 第2章 消防防災の組織と活動.
https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r1/items/r1_all.pdf (accessed 19 June 2023).
- 杉原成満, 篠崎嗣浩, 大石博之, 荒木義則, 古川浩平, 2011. ロジスティック回帰分析を用いた土砂災害警戒情報の解除基準の設定に関する一考察. 土木学会論文集F6 (安全問題). 67, 41–51.
- 総務省, 2021. 家計調査報告 2021年2月. https://www.stat.go.jp/data/kakei/sokuhou/tsuki/pdf/fies_mry.pdf#page=15 (accessed 23 July 2021).
- 多々納裕一, 高木朗義, 2005. 防災の経済分析 リスクマネジメントの施策と評価.
- 土木学会, 1996. 第四版土木工学ハンドブックII. 技報堂出版.
- 中村昌允, 2016. 化学プラントの安全目標. 学術の動向. 21, 32–38.
- 新潟県, 2020. 令和元年家計調査年報. <https://www.pref.niigata.lg.jp/site/tokei/kakeinennpou03.html> (accessed 23 July 2021).
- 広島県, 2016. 特定開発行為許可制度の手引 (急傾斜地崩壊技術基準案編).
https://chotatsu.pref.hiroshima.lg.jp/standard/file/sd_tokuteikaihatsu_k20170327.pdf (accessed 19 June 2023).
- 法務省, 2023. 刑法第二百十一条業務上過失致死傷等. https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=140AC0000000045_20200401_430AC0000000072&keyword=%E9%81%8E%E5%A4%B1%E8%87%B4%E6%AD%BB%E5%82%B7 (accessed 19 June 2023).
- 牧野良次, 2014. 安全対策の費用便益分析に関する最近の研究と課題. 安全工学. 53, 160–166.

松田昌之, 中谷洋明, 2020. 地形・地質に関する主題図を用いた全国における土砂災害発生リスク推定法に関する考察. 国土技術政策総合研究所資料, No.1120.

みずほ情報総研株式会社 (経済産業省委託事業), 2018. 平成29年度製造基盤技術実態等調査事業 (製造業における安全対策の評価及びその促進等に関する調査).

第7章 結論

7.1 本研究の総括

本研究は、土砂災害を起因とした Natech のリスク管理に向けた評価の枠組みの構築を目的として、Girgin ら (2019) が示した「リスクの特定」、「リスクの分析・評価」の枠組みを「リスクの管理」まで拡張し、全国規模における事業所の特定とリスクの抽出、具体的な事業所を対象としたリスク評価手法の構築と適用、リスク管理に向けた対策のリスク削減効果の評価と費用便益分析を実施した。

第1章では、本研究における Natech の定義を示し、降雨を起因とする土砂災害の発生状況と過去に発生した Natech 事例をまとめた。また、海外や日本における Natech のリスク管理に関わる法制度と先行研究を「リスクの特定」、「リスクの分析・評価」、「リスクの管理」の視点からまとめ、課題を整理し、本研究の目的を示した。第2章では、全国の土砂災害に被災する可能性のある PRTR 事業所を特定し、事業所が有するハザードと周辺地域の脆弱性を指標とした分類によって、定性的にリスクを抽出した。第3章では、具体的な事業所を取り上げ、最悪のシナリオを想定した決定論的な観点から、土砂災害を起因した化学物質流出事故に伴うヒト健康リスクを分析した。第4章では、決定論的な観点からのリスク分析手法を拡張し、Bayesian network モデルを用いた確率論的な観点から、ヒト健康リスクの評価を実施した。第5章では、リスク管理に向けて、規制やガイドライン、対策事例集を基に、具体的な対策を取り上げ、各対策のリスク削減効果を定量的に評価した。第6章では、公共事業の費用便益分析マニュアルを適用し、Natech を考慮した土砂災害対策の経済性分析の一例を示した。

本研究で提示したリスクの特定、分析・評価、管理の枠組みを適用することによって、Natech に対する全国規模から事業所規模までの横断的なリスク管理が期待できる。

本研究で示した枠組みに沿って、得られた成果を以下に整理する。

7.1.1 リスクの特定

本研究は、これまでに網羅的なリスク分析が実施されていない PRTR 制度の事業所を対象として、土砂災害に被災する可能性のある事業所を特定し、各事業所の Natech リスクを定性的に分析した。

2019 年度に報告された PRTR 制度の対象事業所 33,318 件のうち、土砂災害警戒区域等に該当する事業所は 1,306 件であり、その中でも建築物等の損傷の可能性のある特別警戒区域に該当する事業所は 68 件存在することが分かった。また、広範囲に影響をもたらす土石流の危険区域に 729 件の事業所が該当し、急傾斜地の崩壊（がけ崩れ）の危険区域には 387 件の事業所が該当した。さらに、複数の現象区分（例：土石流と急傾斜地崩壊）に該当する事業所も存在することから、これらの事業所では各現象区分に応じた複数の対策が求められる。また、これまでの土地利用規制には、財産権との調整の難しさ等から一定の限界が存在すると考えられるため、既に土砂災害の危険性のある区域に立地する事業所においては、事故の発生を防ぐための予防策や事故が発生した場合の影響を低減するための緩和策を導入することが重要である。

各事業所が有する化学物質のハザードによる分類の結果、業種によって排出されている化学物質の種類と数が大きく異なり、それを特徴量として事業所が分類されていることが分かった。特に、製造業は排出されている物質数が少ないが取扱量は比較的大きく、下水道業や廃棄物処理業などの業種は報告対象となる物質数が非常に多いことが特徴量として分類されていた。一方、いずれのクラスターに該当した事業所も引火性液体や人への急性毒性、水生環境有害性のスコアが 0.33 以上であったことから、少なくとも各クラスターに該当する事業所はこれらの性質を有する物質を排出し、扱っていると考えられる。

したがって、各クラスターに該当する事業所において、土砂災害によって化学物質が流出した場合、火災や爆発、ヒト健康、水生生物への影響が懸念される。

周辺地域の脆弱性による分類の結果、周辺に河川や海洋、農地、湖沼などの各自然環境が存在する事業所や人口の多い地域に立地する事業所などがクラスターを形成した。該当した事業所数が最も多いクラスターは周辺に農地が存在するという特徴量を基に形成されており、1,306 件中 462 件の事業所が該当した。また、各クラスターに該当した業種の中で最も割合が大きい業種は燃料小売業であり、本研究で対象とした事業所では地域的な特徴と業種との間の関係性は見られなかった。

ハザードと脆弱性による分類結果を組み合わせることによって、全国の土砂災害に被災する可能性のある事業所 1,306 件は 31 グループに分類された。周辺地域の脆弱性を基に相対的に懸念されるリスクを定性的に抽出した結果、農地の汚染等が懸念される事業所は 462 件、ヒト健康リスクが懸念される事業所は 321 件、生態系に対するリスクが懸念される事業所は 523 件存在することが分かった。これらの結果は、地図上に表示することが可能であり、各都道府県にどのようなリスクが懸念される事業所が存在するのかを網羅的に把握することによって、優先的に調査すべき事業所の特定にも繋がると考えられる。

7.1.2 リスクの分析及び評価

新潟県に存在する原油・天然ガス鉱業の事業所を対象に、貯蔵タンクからノルマルヘキサンが流出した場合のケーススタディを通じて、周辺地域の住民に対する健康被害を含めた土砂災害を起因とする化学物質流出事故のリスク評価手法を構築した。

最悪のシナリオを想定した決定論的リスク評価の結果、防油堤が機能せず、タンクが転倒するケースで致死レベルの濃度（AEGL3）に曝露する人数は 24 人、障害レベルの濃度（AEGL2）に曝露する人数は 13 人発生する可能性があることが分かった。一方、事故のシナリオにも依存するが、周辺住民については、屋内に避難する対策オプションが障害レベルの濃度に曝露する可能性を減らすための有効な手段であることが分かった。また、防油堤が機能することによって、曝露する可能性のある人数を約 4 割減らすことが可能であることが示された。感度解析の結果からは、風速の設定が結果に最も寄与しており、リスクが最も大きくなる最悪の気象条件は風速が小さく、大気が安定かつ気温が高い条件であることが分かった。

また、本研究では決定論的リスク評価の手法を拡張し、Bayesian network モデルによる複数のシナリオを考慮した確率論的リスク評価手法を構築した。確率論的リスク評価から、斜面の下端から 5-10 m の位置にあるタンクにおいて、貯蔵率が 80%、タンクの厚みが 0.0032 m、防油堤がする確率が 50%と仮定した場合の 1 人以上の死者が生じる確率は $2.24 \times 10^{-7}/\text{year}$ であり、死者数と発生確率の関係を表す社会的リスクはオランダの基準未満となった。一方、防油堤が機能しない場合は 1 人以上の死者が生じる確率は $3.21 \times 10^{-7}/\text{year}$ となり、社会的リスクが大きくなった。最も斜面に近い 5-10 m の位置にあるタンクと比べて、斜面との距離が 10-15 m の位置にあるタンクは、1 人以上の死者が生じる確率は約 100 分の 1 となり、15 m 以上では土砂が到達しない結果となった。また、診断的分析から、1 人以上の死者が発生する条件においては、土石等の移動の高さが 2 m 以上あるいは 1.5-2 m である可能性が高いことが示された。リスク評価の結果からも、土石等の移動の高さが 2 m 以上の場合には、上記のシナリオにおける社会的リスクはオランダの基準を超過することが示された。この結果から、土砂災害が発生した場合には、タンクの破損確率を決定する土石等の移動の高さが特に重要な変数であることが特定された。さらに、診断的分析の結果からは、大気が安定となる夜間から未明にかけての時間帯や平均的な風速が小さくなる月において、事故が発生した場合に高リスクとなることが示され、特に風に垂直な方向は風下方

向と比べてリスクが大きくなることが示された。感度解析の結果からは、親ノードの中でリスク評価の結果に不確実性をもたらす上位 4 変数として、土砂災害の発生、土石等の移動高さ、タンクと斜面の距離、斜面の崩壊高さが特定され、この結果は診断的分析の結果と同様に、土砂災害が発生した場合に土砂がタンクに到達するか、また到達した場合にタンクが破損するかという事故の発生を左右する要因が特に結果に寄与していた。これらの結果から、土砂災害の規模に応じた設備の破損確率の算出など、事故の発生確率の詳細な分析が必要であると考えられる。

7.1.3 リスクの管理

これまでに定量的な評価が行われた対策はアンカーや避雷針の設置、防火対策等に限定されているため、本研究では規制や対策事例集に基づき、タンクの厚みの変更、貯蔵率の制限、吸着剤の使用、オイルフェンスの設置を取り上げ、各対策のリスク削減効果を定量的に評価した。リスク削減効果の評価結果から、政令で定められている最小の厚みである 0.0032 m から 0.012-0.015 m に変更することで 1 人以上の死者が生じる確率は約 99.9%減少することが示された。また、貯蔵率の制限については、80%貯蔵されている状態から、50-60%に制限すると死者が生じる確率は約 7.1%増加するが、20-30%に下げると約 19.8%減少することが分かった。この結果は流出量を減らすための対策が、逆にタンクの内圧を低下させ、破損確率を増加させることによって、全体的なリスクが増加することを示している。緩和策の 1 つである吸着剤について、90-100 箱の吸着剤を用いて流出した化学物質を回収できた場合には、1 人以上の死者が発生する確率は約 11.9%減少した。また、防油堤が機能しなかった場合に、オイルフェンスを設置することは有効であり、事業所の面積の 50% (5,500 m²)、10% (1,100 m²) に制限することによって、死者が生じる確率はそれぞれ約 30.2%、60.6%減少することが分かった。この結果から、できる限り早くオイルフェンスを設置し、プールの面積の拡大を抑えることが緩和策として重要であることが示唆された。比較的容易に実施可能であると考えられる貯蔵率の制限と吸着剤の使用を組み合わせる実施した場合は、死者が生じる確率が約 60.1%減少し、タンクの厚みを最小から 2-2.5 倍に厚くする対策とほぼ同程度のリスク削減効果が得られることが分かった。一方、感度解析の結果から、タンクと斜面の距離が上記に挙げた対策よりも結果に寄与しており、これまでの Natech 事例から得られた教訓と同様に、事故の発生を防ぐための予防策として、土砂が到達しない場所への危険物施設の移転を検討することも重要な対策として挙げられる。

さらに、本研究では経済性を踏まえた対策の効率性を評価するために、公共事業の費用便益分析マニュアルを Natech のシナリオに適用することによって、土砂災害対策の費用便益分析の一例を示し、費用便益分析に必要な情報を整理した。費用便益分析の結果、事故の損失項目の中で最も金額が大きくなった項目は被災者への補償であり、事故に伴う損失を減らすためには被災者の数を減らすことが求められる。また、本研究で取り上げた土砂災害対策の費用便益比は 1 を超えたため、経済的に効率的な対策であることが分かった。一方、本研究で定量的に評価した事故による損失の項目は限定されており、感度解析によって不確実性の幅を示したものの、想定したシナリオやその発生確率の設定に課題が残されている。

7.2 今後のリスク管理への提言と本研究の課題

本研究で得られた成果を踏まえ、土砂災害を起因とした Natech のリスク管理に向けた提言とそれを実現するために残された課題を構築した枠組みに沿って、下記にまとめる。

7.2.1 リスクの特定

本研究により、土砂災害警戒区域に該当する PRTR 事業所は、全事業所の約 4%であり、各事業所が扱っている化学物質が土砂災害によって流出した場合には、火災や爆発、水生生物に対する影響、農地の汚染等の発生が懸念されることが分かった。このような状況は、1.5 節にも言及したように、これまでの用途地域における規制において、Natech は考慮されておらず、2020 年の都市計画法の改正までは、事業所や工場等の開発における自然災害を踏まえた土地利用規制の範囲が限定的であったことが 1 つの要因として考えられる。また、本研究で用いた土砂災害警戒区域は基本的に人が住んでいる地域を対象として設定されているため、土砂災害の危険性があっても土砂災害警戒区域に指定されていない場所に事業所が立地している可能性がある。したがって、日本には土砂災害に被災する可能性のある事業所が本研究で特定した以上に存在すると考えられる。今後土砂災害を起因とした Natech のリスク管理を進めるためには、土砂災害に被災する可能性のある区域の指定を進めるとともに、そのような区域に事業所を立地させないことが重要である。加えて、本研究で実施したように、土砂災害に被災する可能性のある区域に既に立地している事業所の特定も必要となる。

特定した既存の事業所については、各事業所で想定されるシナリオや懸念されるリスクを把握するために、GHS 分類などの化学物質の性質に関する情報を整理し、Natech 特有のシナリオとして発生が懸念される化学物質の反応に伴う火災などを含めた間接的な事故シナリオ (Misuri and Cozzani, 2021) の特定を事前に行っておくことが必要である。なお、2022 年に環境省から示された「地方公共団体環境部局における化学物質に係る災害・事故対応マニュアル策定の手引き」(以下、災害・事故対応の手引き) にも本研究で用いた情報を整理することが明記されており (環境省, 2022), 本研究は災害・事故対応の手引きによって環境部局が整理したハザードマップや事業所, GHS 分類などの情報を活用した分析の一例を示したといえる。

加えて、本研究では実施できていないが、対策の実施や調査の優先順位を付けるためには、特にリスクが懸念される事業所のスクリーニングが求められる。BN を活用したリスク評価の結果からは、土石等の移動高さや斜面の傾斜、崩壊高さが大きければ大きいほどリスクが大きくなることが示唆された。この結果から、標高や傾斜が特に大きい斜面や土砂災害が発生した場合に土石等の移動高さが特に大きくなる可能性がある斜面の近くに立地する事業所は特にリスクが高い傾向にあると考えられる。また、土砂災害に対しては、屋外に危険物施設が存在する場合、設備が破損し、化学物質が流出する確率が高いと考えられるが、本研究で実施した「リスクの特定」では事業所の設備の脆弱性を考慮することができていない。さらに、化学物質の在庫量が大きい事業所は相対的に懸念されるリスクが大きいと考えられるが、本研究では年間取扱量のみを考慮した分析にとどまっている。なお、本研究の分析で用いた年間取扱量も推定値にとどまり、算出結果には不確実性が伴う。これらは PRTR 制度において収集されている情報が限定的であり、化学物質の貯蔵量や貯蔵設備、危険物施設に関する具体的な情報を入手できないことに起因する。よって、これらの情報を届けることが義務付けられている消防法等によって収集された情報を活用するなど、PRTR 制度以外で得られる危険物施設の情報を活用した全国規模でのリスクの特定が今後の課題として挙げられる。一方、PRTR 届出排出・移動量から在庫量を算出する研究も現在進められていることから (中村ら, 2021), このような知見を活用することで、各 PRTR 事業所が扱う物質の在庫量を考慮したリスクの特定が今後期待される。さらに、毒性を考慮した指標として、本研究では比較的整備しやすい GHS 分類を変数とした分析を実施したが、より詳細に想定されるシナリオやリスクの大きな事業所を特定するためには、各化学物質の物性値や化学物質の危険・有害性を反映した毒性重み付け在庫量等を用いた分析も 1 つの方法として考えられる。

7.2.2 リスクの分析及び評価

リスクが特に懸念される事業所が特定された場合、それらの事業所を対象とした定量的なリスクの分析と評価が必要である。ここで、前述の通り、土砂災害警戒区域は基本的に人が住んでいる地域を対象として設定されているため、土砂災害警戒区域に指定されていない場所でも土砂災害が発生する可能性がある。そのため、斜面の近くに立地している事業所は、本研究で実施したように斜面の高さと傾斜、斜面からの設備の位置を基に、土砂災害が発生した場合に土砂が設備に到達するかどうかを判断することが求められる。また、到達することが確認された場合には、土砂災害が発生した場合に設備が破損するかどうかの分析が必要である。これらの一連の分析は、既存施設の改修や新規施設の開発に対する規制を適用する際にも検討すべき項目でもある。

設備が破損し、化学物質が流出することが懸念される場合は、想定されるシナリオに基づき、化学物質の流出に伴うリスクの分析を実施する必要がある。現在の法整備では、化学物質の流出に伴う一般環境への影響が考慮されていないことが課題として挙げられ (小野, 2021), 本研究では化学物質が大気へ拡散することによる周辺住民のヒト健康リスクを評価対象として取り上げた。しかし、実際には土壌の汚染や河川等への化学物質の流出も懸念されることから、事業所の周辺地域の特徴を踏まえたシナリオの特定とリスクの分析が求められる。ここでは、本研究で用いた ALOHA 以外のツールを活用することが必要であり、化学物質が大気へ拡散するシナリオ以外を取り上げた評価は本研究で残された課題である。また、ALOHA を用いたシミュレーションにおいても、物理現象全てを完全に表現することは難しく、本研究では降雨による影響を考慮できていないという課題が存在する。なお、大阪府の災害時における化学物質のリスク低減事業の報告書には、本研究で用いた ALOHA 以外のツールとして、産業技術総合研究所の AIST-SHANEL や GERAS-3 などのツールなどがまとめられており (大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課, 2013), このようなツールを活用することは災害や事故を起因とする化学物質の流出に伴う影響を分析する足掛かりになると考えられる。さらに、本研究ではケーススタディとして、ノルマルヘキサンのみを取り上げて分析を実施した。しかし、本研究で対象とした事業所はキシレンやトルエン、ベンゼンを取り扱っており、実際に事故が発生した場合には、ノルマルヘキサン単体ではなく、これらの複数の物質が同時に流出する事象も発生する可能性がある。したがって、複数の物質が同時に流出するシナリオを想定してリスク評価を実施することが今後の課題として挙げられる。その際には、複数物質の挙動を評価できるようなツールが必要になるとともに、複数の物質が同時に流出した場合のリスク評価手法を構築することが求められる。

最終的には、これらのツールを活用したリスク分析の結果を設定された基準値と比較することによって、そのリスクが許容されるかどうかを判断することが求められる。本研究では、ある地域で発生した事故によって影響を受ける可能性のある「人数」と「確率」の関係を表す社会的リスクを指標として、4 つの国・地域の基準値と比較することによってリスク評価を行った。これらの基準値は、各国・地域によって異なり、それぞれの国の背景情報が考慮されているため、単純な比較は困難である。Natech のリスクを「評価」するためには、どの程度のリスクであれば許容されるのかを追加的に議論することが必要であると考えられる。このような基準については、近年経済産業省の産業保安に関する小委員会においても社会共通の安全目標を持つことが重要であると指摘されている (経済産業省, 2021)。また、具体的な安全目標としては、日本学術会議がプラント系工学システムを対象に、死者が発生するような重大事故の防止を目的とした安全目標を 2017 年に提案している (日本学術会議, 2017)。具体的な基準案として、As low as reasonably practicable (ALARP) の原則に従い (図 7-1), 設計起因や機器故障、テロ、自然

災害等のあらゆる原因事象に対して、事故発生の可能性が明らかな重大事故の発生確率を 10^{-6} /年以下とすることが、許容可能なリスクの基準値 (図 7-1 の B 基準) として提案されている (日本学術会議, 2017)。この提案を踏まえると、現状日本において Natech のリスクを評価するための基準案としては 10^{-6} /年が挙げられる。本研究で対象とした事業所において、1 人以上の死者が発生する確率は 10^{-7} /年オーダー

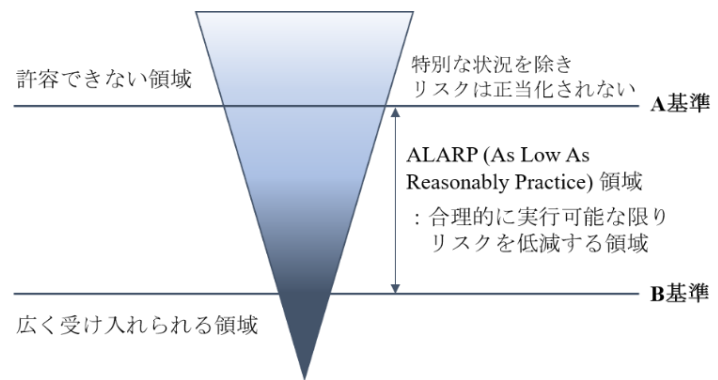


図 7-1 ALARP の原則に基づく安全目標の概念
(日本学術会議, 2017)

であるため (表 4-8), 10^{-6} /年を基準値とした場合には、対象事業所における土砂災害を起因とした Natech のリスクは許容されると考えられる。一方、これはあくまでも 1 つの基準案であるため、現状の日本における Natech のリスクを踏まえた追加的な議論は引き続き必要であると考えられる。

これら一連のリスク分析・評価でとった本研究のアプローチは、決定論的な手法と確率論的な手法に分かれる。決定論的な観点からは、土砂が到達した場合にタンクが破損するなど、一定の仮定を置いており、確率論的リスク評価と比べて用いた情報量が少なく、情報の整理に必要な時間は少ないが、評価可能なシナリオが限定される。一方、確率論的リスク評価は、決定論的リスク評価と比べて多くの情報を用いており、評価モデルの構築には複雑で多くの過程が必要となるが、評価可能なシナリオの数は格段に多く、不確実性を確率分布として表現することができる。また、単純な比較は困難であるが、確率論的観点からの分析によって、決定論的観点からの分析で算出された人数を上回る死者数が発生する可能性があることが示唆された。これは決定論的観点からの分析で想定した最悪のシナリオが必ずしも「最悪」であるとは限らないことを示している。このように確率論的観点からの分析は各変数の組み合わせを網羅的に考慮することが可能であり、Bayesian network を活用した診断的分析は最悪のシナリオの特定にも繋がると考えられる。一方、確率論的観点からの分析では、非常に発生確率が小さく、稀な事象も結果として算出可能である。そのため、最終的にリスクを評価する際には、「期待値」の概念を導入することも必要であると考えられる。このような決定論的手法と確率論的手法の選択は、評価に用いることが可能な情報量や時間、コストに依存すると考えられ、これらの両方のアプローチを組み合わせたリスク評価が推奨されている (Kirchsteiger, 1999)。具体的には、まず定性的なリスクの特定を実施し、事故の発生が懸念されることが分かった場合には、決定論的な観点からリスク分析を行う (Kirchsteiger, 1999)。決定論的な観点からのリスク分析の結果、事故によって、重大な影響が周辺環境等へもたらされる可能性があることが判明した場合、確率論的な観点から、より詳細な分析を実施する (Kirchsteiger, 1999)。このような一連の分析によって、時間やコスト面からもより効率的なリスク評価を実施できる可能性がある。

加えて、本研究では主に土砂災害の発生する場、つまり空間的な情報を用いて、Natech のリスクを分析したが、将来的には気候変動による降雨の変化に伴い、土砂災害の発生規模や発生確率が変化することも想定される。また、本研究では、リスク分析の範囲として、事故の発生直後を切り取った急性影響を取り上げたが、シナリオによっては慢性影響や経済影響などの長期にわたる影響も懸念される。今後のリスク評価手法の構築では、これらの時間的な情報を含め、評価範囲を拡張することが必要である。

最終的に本研究で構築した手法を拡張し、全国の事業所のリスクを定量的に評価することができれば、日本が有する Natech リスクの包括的な管理を実現することが可能であると考えられる。

7.2.3 リスクの管理

リスクが定められた基準値を超過した場合には、本研究で用いた対策事例集等を参考に、各事業所はそれぞれの立地状況や設備の状況を踏まえたリスク削減のための対策を実施することが求められる。本研究の成果として、危険物施設の移転、貯蔵タンクや防油堤などの設備の強化、貯蔵率の制限、吸着剤の使用やオイルフェンスの設置等の緊急時のオペレーションの順でリスク削減効果が大きいことが定量的に示された。事業所の建設段階や施設の改修段階では、危険物施設を土砂の到達範囲外へ設置することや貯蔵タンク等の設備を強化する対策を検討すべきであると考えられる。一方、すでに事業所が稼働しており、現存施設の移転や改修が難しい場合には、貯蔵率の制限や吸着剤の使用、オイルフェンスの設置などが実行可能な対策として挙げられる。また、本研究によって、貯蔵率の制限と吸着剤の使用を組み合わせた場合、タンクの厚みを増やす対策と同程度のリスク削減効果が得られることが明らかになった。この結果から、リスクが懸念される事業所では実施可能な対策を組み合わせる実施することが重要である。一方、本研究によって、貯蔵率の制限はかえってタンクの脆弱性を高めてしまう可能性があることが示唆された。この結果から、本研究で取り上げなかった対策を検討する際には、それぞれの対策がもたらす相互作用を考慮した対策の分析が必要であると考えられる。また、貯蔵率の制限や吸着剤の使用、オイルフェンスの設置などのオペレーションを実施するためには、平時からの資機材の準備や訓練に加え、土砂災害の危険性が高まった際の対応計画を作成することが求められる。

一方、事業者が対策の実施に割くことのできる予算には限りがあり、既存の危険物施設の移転や設備の強化は多くの費用が必要となる可能性がある。よって、これらの対策を実施するためには、本研究で実施した費用便益分析の手法等を用いて、経済的な効率性を考慮した意思決定が求められる。なお、費用便益分析の結果は、事故による損失として取り上げる項目の範囲や算出方法に大きく依存することに注意が必要であり、費用便益分析結果は意思決定のための参考情報として位置づけることが適当であると考えられる。実際に対策の意思決定を行う場合には、費用便益分析の結果に加え、想定される死傷者数などの情報を含めた総合的な判断が求められる。今後の研究の方向性としては、リスク評価の不確実性を詳細に評価可能な確率論的リスク評価と費用便益分析を組み合わせることによって、各変数の変動を考慮した対策の経済性分析が可能であると考えられる。

さらに、本研究で得られた結果として、化学物質が大気へ拡散するシナリオが発生した場合には、周辺住民の健康影響が懸念され、最悪と考えられるシナリオを想定した場合には 24 人の死者、13 人の負傷者が発生する可能性があることが分かった。周辺住民に対する影響を考慮したリスク管理を実施するためには、上記に挙げた事業所内の対策に加え、周辺住民の避難などのソフト対策もリスク管理として求められる。このようなリスク管理を実施するためには、平時からの事業者と住民のリスクコミュニケーションが重要である。環境省の災害・事故対応の手引きの中では、避難経路や避難先、拡散シミュレーションなどの結果に基づき想定される事故の状況や事故の際の住民の対応等に関する情報に関して理解を深めておくことが望ましいとされている (環境省, 2022)。本研究で示した懸念されるリスクごとに各事業所を整理したマップは、このようなリスクコミュニケーションを推進する際の参照情報になると考えられる。また、2023 年 3 月には災害時への対応に向けた平時からの取り組みに活用することを目的に、PRTR データ地図上表示システムにハザードマップが追加された (環境省, 2023)。このようなマップを拡張し、アメリカの Risk Management Plan における Vulnerable Zone Indicator System (US EPA, 2022) のような形で、Natech や事故起因の化学物質の流出によって影響を受ける範囲を示したハザードマップを作成することで、想定される事故の状況や避難先の目安等を住民が把握することに繋がると考えられ

る。このようなハザードマップの作成には、複数の事業所を対象とするリスク分析手法の構築が必要であり、本研究で構築した Bayesian network モデルの拡張や分析結果を地図上に図示できる ALOHA や RAPID-N (Girgin and Krausmann, 2013)などのツールを用いたリスク分析手法を構築することが求められる。

参考文献

- Girgin, S., Krausmann, E., 2013. RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 26, 949–960. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.10.004>
- Girgin, S., Necci, A., Krausmann, E., 2019. Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 35. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101072>
- Kirchsteiger, C., 1999. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- Misuri, A., Cozzani, V., 2021. A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities. *Process Safety and Environmental Protection*. 152, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.018>
- US EPA, 2022. Vulnerable Zone Indicator System. <https://www.epa.gov/rmp/forms/vulnerable-zone-indicator-system> (accessed 13 June 2023).
- 大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課, 2013. 平成24年度災害時における化学物質のリスク低減事業. <https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4460/00138828/houkokusho.pdf> (accessed 6 June 2023).
- 小野恭子, 2021. 災害・事故事象に対応する化学物質拡散予測と評価に関する現状と課題. *安全工学*. 60, 168–174.
- 環境省, 2022. 地方公共団体環境部局における化学物質に係る災害・事故対応マニュアル策定の手引き.
- 環境省, 2023. PRTRデータ地図上表示システム. <https://www2.env.go.jp/chemi/prtr/prtrmap/> (accessed 13 June 2023).
- 経済産業省, 2021. 第4回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 産業保安基本制度小委員会 資料1 産業保安における共通的・横断的な視点について. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/sangyo_hoan_kihon/pdf/004_01_00.pdf (accessed 5 September 2023).
- 中村智, 田和佑脩, 野呂和嗣, 矢吹芳教, 2021. 災害・事故に備えた化学物質の在庫量の推計. *環境化学*. 31, 98–105.
- 日本学術会議, 2017. 工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用. <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170920-2.pdf> (accessed 5 September 2023).

謝辞

本論文は大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻、博士後期課程における研究成果を学位請求論文として取りまとめたものであります。

本論文を作成するに当たり、ご指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻の東海明宏教授に甚大なる謝意を表します。指導教官である東海教授には、学部4年次、博士前期課程、博士後期課程の4年間の研究生活の中で、研究ゼミや論文投稿、日々のディスカッションにおいて、筆者のために多くの時間を割いていただきました。その過程では、社会が抱える課題の捉え方や課題に対するアプローチ方法などの具体的な研究の進め方に加え、将来の進路などを含めた様々な内容についてご指導いただきました。筆者のこれまでの成果は東海先生のご指導の賜物であると考えております。深く御礼申し上げます。

本論文を査読いただきました大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻の池道彦教授に謝意を表します。池教授からは、事故シナリオの設定や下水道施設におけるリスク、全国の事業所を対象としたリスク評価手法の拡張など、本研究で得られた結果の妥当性や本研究の意義について、今後の本研究の発展に資する多大なる示唆をいただきました。記して謝意を表します。

同じく本論文を査読いただきました大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻の紀伊雅敦教授に謝意を表します。紀伊教授からは、対策の費用便益分析に関する項目や設定についてご指導いただき、研究の実用及び展開に関して多大なる示唆をいただきました。記して謝意を表します。

同じく本論文を査読いただきました大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻・連携大学院・統合環境学連携分野(国立環境研究所環境リスク・健康領域、主幹研究員)の今泉圭隆招へい教授に謝意を表します。今泉招へい教授からは、構築したリスク評価モデルにおける設定や得られた結果の妥当性、一般化に向けた課題についてご指導いただき、モデルによって得られた結果をどのようにリスク管理に活かしていくのかという観点から多大なる示唆をいただきました。記して謝意を表します。

同じく本論文を査読いただきました大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻の中久保豊彦准教授に謝意を表します。中久保准教授からは、リスク管理の対象やリスクを評価する際の基準の設定等についてご指導いただき、複合的リスクの管理に向けた重要な示唆をいただきました。記して謝意を表します。

筆者の力量不足により、副査を務めていただいた先生方のご助言をすべて反映するには至りませんでしたが、今後の研究活動や業務にぜひ生かさせていただきたいと考えております。

大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻の伊藤理彩特任助教(令和5年度)(助教, 令和2~4年度)には、学部4年次、博士前期課程、博士後期課程の4年間の中で、論文の執筆や研究の具体的な進め方など、公私にわたり多くの熱心なご指導をいただきました。深く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻・連携大学院・統合環境学連携分野(国立環境研究所資源循環領域、主幹研究員)の小口正弘招へい教授には、研究ゼミ等を通じて、資源循環システムの視点から様々なアドバイスをいただきました。ここに謝意を表します。

本研究の一部は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費及び(公社)環境科学会の博士後期課程学生研究奨励賞により、多くの関係者の方々のご支援を受けて実施されました。特に、大阪府環境農林水産総合研究所の中村智参事には、本研究を進めるために必要なデータの提供をいただきました。ここに謝意を表します。

本論文を作成するうえで、東海研究室の事務補佐員である藤原裕美子様には、研究活動をはじめ、公私にわたり様々な面でご協力・ご支援をいただきました。ここに謝意を表します。

同研究室の先輩，同輩，後輩には，ゼミをはじめとする活発な議論を通じて多くの刺激をいただきました。記して謝意を表します。

最後に，博士後期課程進学という筆者の挑戦を応援し，温かく見守り心身を気遣ってくれた家族に深く感謝いたします。振り返ってみると，博士後期課程への挑戦は，「悩むのならやってみたらいい」という父の言葉に背中を押されたのだと思います。これからは，学部 4 年次から博士後期課程に至るまで，一貫して取り組んできた複合的なリスクの評価という知見を活かし，持続可能な社会の実現に向けて，実務を通じて貢献していきたいと考えております。

2024 年 1 月

森口 暢人

本研究の基礎となる発表論文

No.	著者名・論文題目・発表誌名	本研究との対応
1	森口暢人, 伊藤理彩, 東海明宏, 2022. 土砂災害を起因とした化学物質流出事故のリスク評価と対策の費用便益分析. リスク学研究, 31(3), 195-218. doi: 10.11353/sesj.35.355, licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)	第 3 章 第 6 章
2	森口暢人, 伊藤理彩, 東海明宏, 2022. 土砂災害警戒区域内に立地する PRTR 対象事業所における Natech リスクの抽出. 環境科学会誌, 35(6), 355-376.	第 2 章
3	Moriguchi, N., Ito, L., Tokai, A. 2023. Risk assessment of chemical release accident triggered by landslide using Bayesian network. <i>Science of The Total Environment</i> , Vol. 890, 164321.	第 4 章 第 5 章

Appendix

補足資料A-1 第2章の補足資料

表 A-1-1 化合物と整理した CAS 番号

PRTR 番号	名称	主な物質	CAS 番号
1	亜鉛の水溶性化合物	塩化亜鉛	7646-85-7
		硫酸亜鉛	7733-02-0
		硝酸亜鉛	7779-88-6
4	アクリル酸及びその水溶性塩	アクリル酸	79-10-7
30	直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩（アルキル基の炭素数が10から14までのもの及びその混合物に限る。）	デシルベンゼンスルホン酸	31093-47-7
		デシルベンゼンスルホン酸ナトリウム	1322-98-1
		ウンデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム	27636-75-5
		ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム	25155-30-0
		トリデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム	26248-24-8
		テトラデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム	28348-61-0
31	アンチモン及びその化合物	三酸化二アンチモン	1309-64-4
		三塩化アンチモン	10025-91-9
		ヘキサヒドロキソアンチモン酸カリウム	12208-13-8
75	カドミウム及びその化合物	カドミウム	7440-43-9
		シアン化カドミウム	542-83-6
		ステアリン酸カドミウム	2223-93-0
		ラウリン酸カドミウム	2605-44-9
		塩化カドミウム	10108-64-2
		塩化カドミウム(II)・5/2 水和物	7790-78-5
		水酸化カドミウム	21041-95-2
		炭酸カドミウム	513-78-0
		硝酸カドミウム	10325-94-7
		硝酸カドミウム四水和物	10022-68-1
		硫セレン化カドミウム	12214-12-9
硫化カドミウム	1306-23-6		
硫酸カドミウム	10124-36-4		

1	硫酸カドミウム水和物	7790-84-3
		臭化カドミウム 7789-42-6
		酢酸カドミウム 543-90-8
		酸化カドミウム(II) 1306-19-0
82	銀及びその水溶性化合物	銀 7440-22-4
		臭化銀 (I) 7785-23-1
		硝酸銀 (I) 7761-88-8
		ヨウ化銀 (I) 7783-96-2
87	クロム及び三価クロム化合物	クロム 7440-47-3
		水酸化クロム 1308-14-1
		酸化クロム 1308-38-9
		三塩化クロム 10025-73-7
88	六価クロム化合物	硫酸クロム 10101-53-8
		クロム酸 1333-82-0
		ニクロム酸ナトリウム 10588-01-9
		二クロム酸カリウム 7778-50-9
		クロム酸ナトリウム 7775-11-3
		クロム酸カリウム 7789-00-6
		クロム酸鉛 7758-97-6
		クロム酸亜鉛 13530-65-9
		クロム酸ストロンチウム 7789-06-2
		クロム酸カルシウム 13765-19-0
132	コバルト及びその化合物	ニクロム酸アンモニウム 7789-09-5
		コバルト 7440-48-4
		酢酸コバルト (II) 71-48-7
		酸化コバルト (II) 1307-96-6
		塩化コバルト (II) 7646-79-9
		硝酸コバルト (II) 10141-05-6
		硫酸コバルト (II) 10124-43-3
144	無機シアン化合物（錯塩及びシアン酸塩を除く。）	ギ酸コバルト (II) 544-18-3
		シアン化水素 74-90-8
		シアン化ナトリウム 143-33-9
		シアン化カルウム 151-50-8
		シアン化銀 506-64-9
235	臭素酸の水溶性塩	塩化シアン 506-77-4
		臭素酸カリウム 7758-01-2
		臭素酸ナトリウム 7789-38-0
237	水銀及びその化合物	水銀 7439-97-6
		塩化水銀 (II) 7487-94-7

		水銀蒸気	7439-97-6
		ジブチルスズジ脂肪族モノカルボン酸 (C ₂ - C ₁₁)塩(ジブチルスズ=ジラ ウレート)	77-58-7
239	有機スズ化合物	トリブチルスズオキシド	56-35-9
		二塩化ジブチルスズ	683-18-1
		テトラブチルスズ	1461-25-2
		シクロヘキサスズ	13121-70-5
		亜セレン酸 (IV)	7783-00-8
		亜セレン酸ナトリウム (IV)	10102-18-8
		亜セレン酸バリウム (IV)	13718-59-7
242	セレン及びその化合物	セレン化水素 (II)	7783-07-5
		セレン酸ナトリウム (VI)	13410-01-0
		二酸化セレン (IV)	7446-08-4
		六フッ化セレン (VI)	7783-79-1
		硫酸銅・5水和物	7758-99-8
272	銅水溶性塩 (錯塩を除く。)	硫酸銅 (無水)	7758-98-7
		塩化銅	7447-39-4
		酸化鉛	1317-36-8
		塩化鉛	7758-95-4
305	鉛化合物	硫化鉛	1314-87-0
		硝酸鉛	10099-74-8
		硫酸鉛	7446-14-2
		酢酸鉛	301-04-2
		酸化ニッケル	1313-99-1
		二硫化三ニッケル	12035-72-2
309	ニッケル化合物	塩化ニッケル	7718-54-9
		硝酸ニッケル	13138-45-9
		硫酸ニッケル	7786-81-4
		五酸化バナジウム (V)	1314-62-1
		メタバナジン酸アンモニウム (V)	7803-55-6
		オキシ三塩化バナジウム (V)	7727-18-6
321	バナジウム化合物	メタバナジン酸ナトリウム (V)	13718-26-8
		四塩化バナジウム (IV)	7632-51-1
		三塩化バナジウム (III)	7718-98-1
		酸化バナジウム (III)	1314-34-7
		砒素	7440-38-2
332	砒素及びその無機化合物	三酸化砒素	1327-53-3
		酸化砒素 (V)	1303-28-2

		砒酸水素鉛	7784-40-9
		アルシン	7784-42-1
348	フェニレンジアミン	o-フェニレンジアミン	95-54-5
		p-フェニレンジアミン	106-50-3
		m-フェニレンジアミン	108-45-2
374	ふっ化水素及びその水溶性塩	ふっ化水素	7664-39-3
		ふっ化ナトリウム	7681-49-4
		ふっ化カリウム	7789-23-3
		ふっ化アンモニウム	12125-01-8
395	ペルオキシ二硫酸の水溶性塩	ペルオキシ二硫酸アンモニウム	7727-54-0
		ペルオキシ二硫酸カリウム	7727-21-1
405	ほう素化合物	ほう酸	10043-35-3
		四ほう酸ナトリウム	1330-43-4
		過ほう酸ナトリウム	7632-04-4
		三酸化二ほう素	1303-86-2
		三ふっ化ほう素	7637-07-2
412	マンガン及びその化合物	過マンガン酸カリウム	7722-64-7
		塩化マンガン (II)	7773-01-5
		硫酸マンガン (II)	7785-87-7
		硝酸マンガン (II)	10377-66-9
		二酸化マンガン	1313-13-9
438	メチルナフタレン	1-メチルナフタレン	90-12-0
		2-メチルナフタレン	91-57-6
453	モリブデン及びその化合物	三酸化モリブデン(VI)	1313-27-5
		モリブデン酸ナトリウム(VI)	7631-95-0
		七モリブデン酸六アンモニウム (VI)	12027-67-7
		リンモリブデン酸(VI)	12026-57-2
		二硫化モリブデン(IV)	1317-33-5

表 A-1-2 ハザードに関するデータの整備の一例（最大値ケース）

事業所整理番号	合計年間取扱量 (kg/年)	ダイオキシン類 取扱量 (mg-TEQ/年)	引火性液体 (-)	急性毒性 (経口) (-)	水生環境有害性 短期 (急性) (-)
E2001000-00125-00	5,500	0	1	2	2
E2001000-00128-00	110,000	0	3	2	3
E2001000-00230-00	3,200	0.7	4	5	3
E2001000-00276-00	2,900	0	1	2	2
E2001000-00294-00	520,000	0	4	5	3
E2001000-00434-00	920,000	0	4	5	3

表 A-1-3 最大値ケースにおけるハザードの分類結果

() 内は単位を示す	HC max 1	HC max 2	HC max 3	HC max 4	HC max 5	HC max 6	HC max 7	HC max 8	HC max 9
PRTR 対象事業所数 (件)	103	482	262	180	117	59	90	11	2
(a) 平均年間取扱量 (10%kg/年)	38	0.30	690	0.020	0	7.2	0.012	2.0	2.2
(b) ダイオキシン類 平均年間取扱量 (kg-TEQ/年)	0.055	0.0013	0.046	0	1.1	0	0	0.0019	0
(c) 急性毒性 (経皮) (-)	1.2	2.0	5.0	1.7	5.0	0.12	0	3.1	3.5
(d) 急性毒性 (吸入：ガス) (-)	0.63	0.033	5.0	0	0	0.81	0	1.5	2.5
(e) 可燃性ガス (-)	0.16	0	2.0	0	0	0.27	0	0	1.0
(f) 高圧ガス (-)	0.16	0.0080	1.0	0	0	0.25	0	0.36	0.50
(g) 急性毒性 (吸入：蒸気) (-)	0.72	2.0	5.0	2.0	0	0.88	0	1.4	4.5
(h) 急性毒性 (吸入： 粉塵，ミスト) (-)	2.0	0.0040	5.0	0.033	0	0.20	0	0.82	5.0
(i) 引火性液体 (-)	0.52	3.0	4.0	2.6	0	0.22	1.1	1.3	2.5
(j) 可燃性固体 (-)	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.50
(k) 皮膚腐食性／ 刺激性 (-)	2.4	2.0	3.0	2.0	0	1.9	0	2.5	3.0
(l) 眼に対する重篤な損 傷性／眼刺激性 (-)	2.6	2.0	3.0	1.9	0.017	1.9	1.9	2.5	3.0
(m) 自己反応性化学品 (-)	0.029	0.033	1.0	0	0	0.14	0	0.18	0.50
(n) 酸化性固体 (-)	1.1	0.050	2.0	0	0	0.20	0	0.73	1.5
(o) 呼吸器感作性 (-)	1.6	0.062	3.0	0.017	0.026	0.31	0	0.73	3.0
(p) 皮膚感作性 (-)	1.9	0.087	3.0	0.067	0.026	0.86	0	3.0	3.0
(q) 金属腐食性化学品 (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
(r) 急性毒性 (経口) (-)	2.4	2.0	5.0	0.12	5.0	1.0	1.9	2.8	4.0
(s) 生殖細胞変異原性 (-)	0.90	0.99	2.0	0	1.0	0.41	0.011	1.4	2.0
(t) 発がん性 (-)	1.1	2.0	2.0	0.17	0	1.2	0.022	1.0	2.0
(u) 生殖毒性 (-)	1.7	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0	1.8	2.0
(v) 誤えん有害性 (-)	0.29	2.0	2.0	2.0	0	0	0.13	0.91	1.0
(w) 水生環境有害性 短期 (急性) (-)	3.0	2.9	3.0	2.2	3.0	0.95	2.0	2.5	3.0
(x) 水生環境有害性 長期 (慢性) (-)	3.8	3.0	4.0	2.8	4.0	1.2	3.0	3.3	4.0
(y) オゾン層への 有害性 (-)	0.010	0	0.99	0	0	0.034	0	0	0

*表 A-1-3 中の HCmax は最大値ケースにおける分類によって得られたクラスターを示している。

表 A-1-4 最大値ケースと加算ケースにおけるハザードの分類結果の比較

	HC max 1	HC max 2	HC max 3	HC max 4	HC max 5	HC max 6	HC max 7	HC max 8	HC max 9
HC1	97	42	2	179	0	59	90	0	0
HC2	0	0	259	0	0	0	0	0	0
HC3	1	434	0	1	0	0	0	0	0
HC4	5	6	1	0	117	0	0	0	0
HC5	0	0	0	0	0	0	0	11	0
HC6	0	0	0	0	0	0	0	0	2

*表 A-1-4 中の HCmax, HC はそれぞれ最大値ケース, 加算ケースにおける分類によって得られたクラスターを示している。

*表 A-1-4 から, 加算ケースで HC2~6 に該当した事業所の大部分は, 最大値ケースにおいても, それぞれが同じクラスターに該当していることが分かる。一方, HC1 に該当した事業所は, 最大値ケースでは HCmax 1~4, 6, 7 に分散している。

補足資料A-2 第3章の補足資料

感度解析結果を以下の図 A-2-1 から図 A-2-7 に示す。

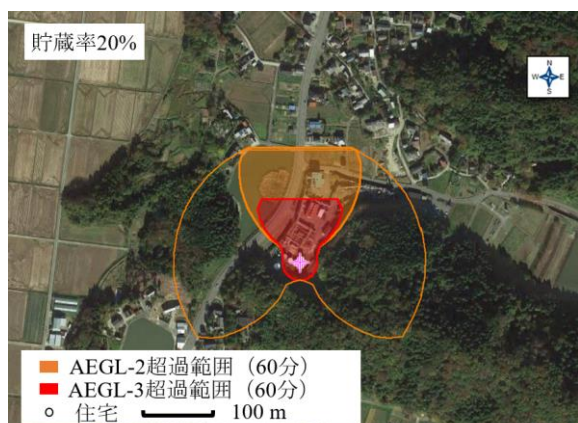


図 A-2-1 貯蔵率が 20%の場合の濃度分布

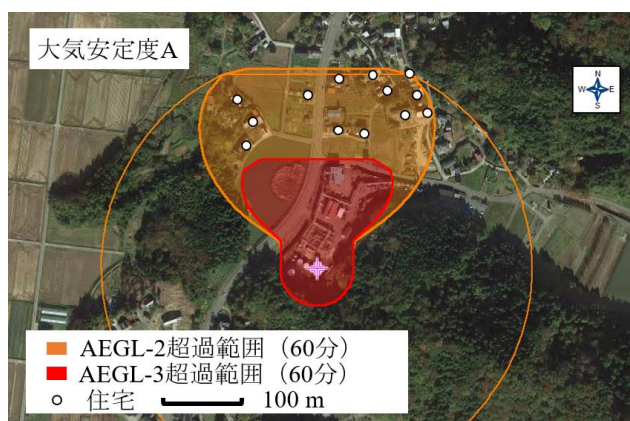


図 A-2-2 大気安定度が不安定の場合の濃度分布

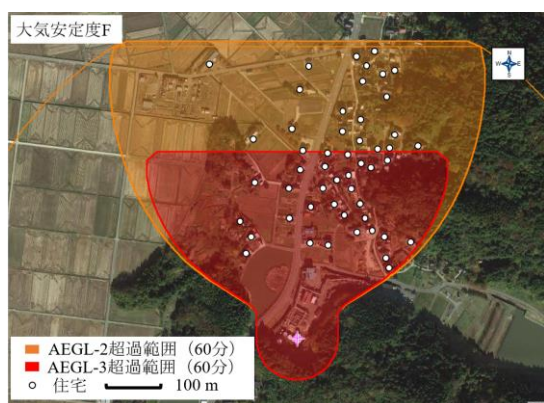


図 A-2-3 大気安定度が安定の場合の濃度分布

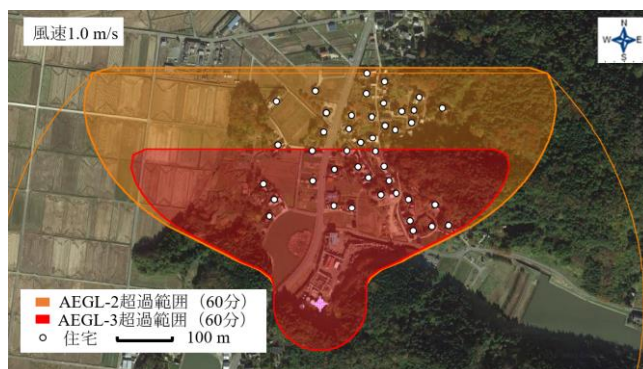


図 A-2-4 風速が 1.0 m/s の場合の濃度分布

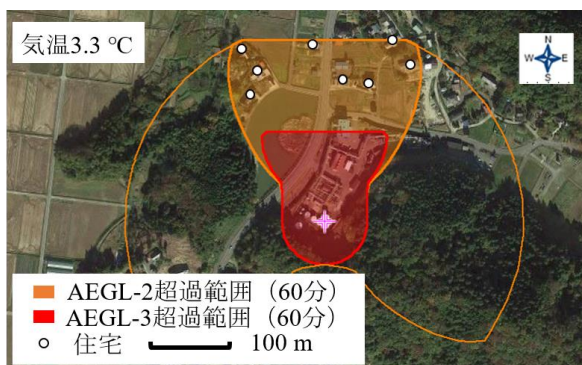


図 A-2-5 気温が 3.3 °C の場合の濃度分布

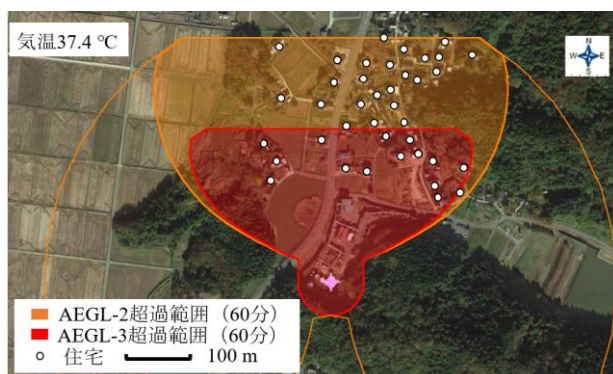


図 A-2-6 気温が 37.4 °C の場合の濃度分布

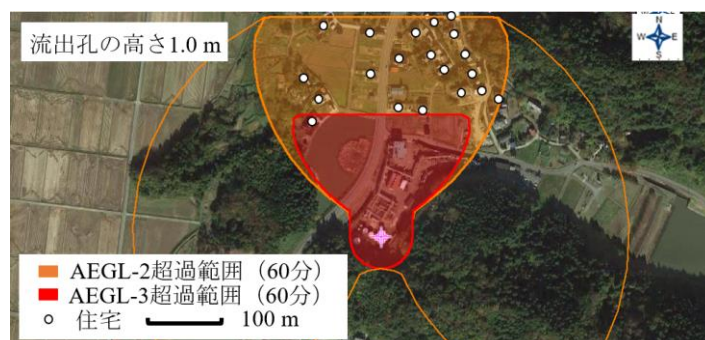


図 A-2-7 流出孔 1.0 m の場合の濃度分布

以下に対策に関するノードを加えた各ノードの関係を表す定義式を示す。なお、以下の定義式は Netica software 上で機能する。

• **Slope_angle** の条件付確率表

$p(\text{Slope_angle}) =$
 $\text{NormalDist}(\text{Slope_angle}, 20, 1)$

• **Landslide_impact** の条件付確率表

$p(\text{Landslide_impact} \mid \text{Landslide_occurrence}, \text{Safe_distance}, \text{Slope_angle}, \text{Slope_collapse_height}) =$

$(\text{Landslide_occurrence} == \text{Yes} ?$
 $(\text{Safe_distance} - ((\text{Slope_collapse_height} / (0.87 * \tan(\text{Slope_angle} * \text{deg}) + 0.025)) - (\text{Slope_collapse_height} / \tan(\text{Slope_angle} * \text{deg}))) < 0 ?$
 $(\text{Landslide_impact} == \text{Yes} ?$
 $100 : 0):$
 $\text{Landslide_impact} == \text{No} ?$
 $100 : 0):$
 $\text{Landslide_occurrence} == \text{No} ?$
 $(\text{Landslide_impact} == \text{No} ? 100 : 0) : 0)$

• **Tank_collapse** の条件付確率表

$p(\text{Tank_collapse} \mid \text{Tank_thickness}, \text{Landslide_impact}, \text{Storage_rate}, \text{Tank_diameter}, \text{Tank_height}, \text{Height_movement_sediment}, \text{Slope_collapse_height}, \text{Slope_angle}, \text{Safe_distance}, \text{Collapsed_soil_volume}) =$

$\text{Landslide_impact} == \text{Yes} ?$

$\text{Tank_diameter} != 0 ?$

$\text{Tank_height} != 0 ?$

$\text{Height_movement_sediment} != 0 ?$

$\text{Slope_collapse_height} != 0 ?$

$($
 $1.8 * 9.80665 * \text{Height_movement_sediment} *$
 $($
 $\cos(\text{Slope_angle} * \text{deg}) * (\tan(\text{Slope_angle} * \text{deg}) - \tan(30 * \text{deg}) * ((2.6 - 1) * 0.5 / ((2.6 - 1) * 0.5 + 1))) / (2 / ((2.6 - 1) * 0.5 + 1) * 0.025) * (1 - \exp(-2 * (2 / ((2.6 - 1) * 0.5 + 1) * 0.025) * \text{Slope_collapse_height} / \text{Height_movement_sediment} / \sin(\text{Slope_angle} * \text{deg}))) * \cos((\text{Slope_angle} - 0) * \text{deg})^2 * \exp(-2 * (2 / ((2.6 - 1) * 0.5 + 1) * 0.025) * \text{Safe_distance} / \text{Height_movement_sediment})$
 $+$

$$\begin{aligned}
& \cos(0^\circ) * (\tan(0^\circ) - \tan(30^\circ) * ((2.6-1)^{0.5} / ((2.6-1)^{0.5} + 1))) / (2 / ((2.6-1)^{0.5} + 1)^{0.025}) * (1 - \exp(- \\
& 2 * (2 / ((2.6-1)^{0.5} + 1)^{0.025}) * \text{Safe_distance} / \text{Height_movement_sediment})) \\
&) \\
& + \\
& 17 * \cos(30^\circ)^2 \\
& * (\sqrt{(3.94 * \text{Collapsed_soil_volume}^{0.366})^2 * \tan(30^\circ)^2 + 4 * (3.94 * \text{Collapsed_soil_volume}^{0.366})} \\
& * (- \\
& \text{Safe_distance} + \sqrt{\text{Safe_distance}^2 + 2 * \text{Collapsed_soil_volume} / (3.94 * \text{Collapsed_soil_volume}^{0.366}) * \tan((90 - \\
& \text{Slope_angle}) * \text{deg})}) / \tan((90 - \text{Slope_angle}) * \text{deg}) * \tan(30^\circ) * \text{deg})) \\
& - (3.94 * \text{Collapsed_soil_volume}^{0.366}) * \tan(30^\circ) * \text{deg}) / 2 \\
& / (\cos(30^{2/3} * \text{deg}) * (1 + \sqrt{(\sin((30 + 30^{2/3}) * \text{deg}) * \sin(30^\circ) / \cos(30^{2/3} * \text{deg})))^2}) \\
&) * 10^3 \\
& - \\
& (2.59 * 2.06 * 10^{11} * (\text{Tank_thickness})^2 / (\text{Tank_height} * \text{Tank_diameter} * \sqrt{\text{Tank_diameter} / \text{Tank_thickness}})) + \\
& 660 * 9.80665 * \text{Tank_height} * \text{Storage_rate} / 100) \\
& > 0?
\end{aligned}$$

(Tank_collapse == Yes?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No ?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No ?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No ?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No ?

100 : 0) :

(Tank_collapse == No ?

100 : 0)

• Release_rate の条件付確率表

Release_rate (Tank_height, Tank_collapse_height, Storage_rate) =

Tank_height == 0 ?

0 :

Tank_height != 0 ?

$1 - \text{Tank_collapse_height} / (\text{Tank_height} * \text{Storage_rate} / 100) \leq 0 ?$

0 :

$1 - \text{Tank_collapse_height} / (\text{Tank_height} * \text{Storage_rate} / 100) : 0$

• **Storage_amount** の条件付確率表

$\text{Storage_amount}(\text{Tank_height}, \text{Tank_diameter}) =$

$\pi * (\text{Tank_diameter} / 2)^2 * \text{Tank_height}$

• **Release_amount** の条件付確率表

$\text{Release_amount}(\text{Release_rate}, \text{Storage_amount}, \text{Storage_rate}, \text{Oil_absorbent}) =$

$\text{Storage_amount} * \text{Storage_rate} / 100 * \text{Release_rate} - (\text{Oil_absorbent} * 0.125) \leq 0 ?$

0 :

$\text{Storage_amount} * \text{Storage_rate} / 100 * \text{Release_rate} - (\text{Oil_absorbent} * 0.125) > 0 ?$

$\text{Storage_amount} * \text{Storage_rate} / 100 * \text{Release_rate} - (\text{Oil_absorbent} * 0.125)$

: 0

• **Solar_insolation** の条件付確率表

$p(\text{Solar_insolation} \mid \text{Month}, \text{Time_zone}, \text{Cloudiness}) =$

$\sin(37.3947079525149 * \text{deg}) * \sin(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80)))$

$+ \cos(37.3947079525149 * \text{deg}) * \cos(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80))) * \cos(\text{deg} * (15 * (12 - (\text{Time_zone} - 138.6350999 * \text{deg} / 15)))) > 0.1 ?$

$1111 * (1 - 0.0071 * \text{Cloudiness}^2) * (\sin(37.3947079525149 * \text{deg}) * \sin(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80)))$

$+ \cos(37.3947079525149 * \text{deg}) * \cos(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80))) * \cos(\text{deg} * (15 * (12 - (\text{Time_zone} - 138.6350999 * \text{deg} / 15)))))$

$- 0.1) > 851 ?$

$\text{Solar_insolation} == \text{Strong} ?$

100 : 0 :

$\text{and}(1111 * (1 - 0.0071 * \text{Cloudiness}^2) * (\sin(37.3947079525149 * \text{deg}) * \sin(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80)))$
 $+ \cos(37.3947079525149 * \text{deg}) * \cos(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80))) * \cos(\text{deg} * (15 * (12 - (\text{Time_zone} - 138.6350999 * \text{deg} / 15))))) - 0.1) > 526,$

$1111 * (1 - 0.0071 * \text{Cloudiness}^2) * (\sin(37.3947079525149 * \text{deg}) * \sin(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80)))$
 $+ \cos(37.3947079525149 * \text{deg}) * \cos(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} - 80))) * \cos(\text{deg} * (15 * (12 - (\text{Time_zone} - 138.6350999 * \text{deg} / 15))))) - 0.1) \leq 851) ?$

$\text{Solar_insolation} == \text{Moderate} ?$

100 : 0 :

$\text{and}(1111 * (1 - 0.0071 * \text{Cloudiness}^2) * (\sin(37.3947079525149 * \text{deg}) * \sin(23.45 * \text{deg} * \sin(\text{deg} * 0.986 * (\text{Month} -$

80))) +cos(37.3947079525149*deg)*cos(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))*cos(deg*(15*(12-(Time_zone-138.6350999*deg/15)))))-0.1) > 176,

1111*(1-0.0071*Cloudiness^2)*((sin(37.3947079525149*deg)*sin(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))+cos(37.3947079525149*deg)*cos(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))*cos(deg*(15*(12-(Time_zone-138.6350999*deg/15)))))-0.1) <= 526) ?

Solar_insolation == Slight ?

100 : 0 :

1111*(1-0.0071*Cloudiness^2) *((sin(37.3947079525149*deg)*sin(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))+cos(37.3947079525149*deg)*cos(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))*cos(deg*(15*(12-(Time_zone-138.6350999*deg/15)))))-0.1) <= 176 ?

Solar_insolation == No ?

100 : 0 : 0

:

sin(37.3947079525149*deg)*sin(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))+cos(37.3947079525149*deg)*cos(23.45*deg*sin(deg*0.986*(Month-80)))*cos(deg*(15*(12-(Time_zone-138.6350999*deg/15)))) <=0.1 ?

Solar_insolation == No ?

100 : 0

: 0

• Atmospheric_stability_level の条件付確率表

p (Atmospheric_stability_level | Solar_insolation, Wind_speed, Cloudiness) =

Wind_speed <2.0 ?

Solar_insolation == Strong ?

Atmospheric_stability_level == Class_A ?

100 : 0 :

Solar_insolation == Moderate ?

Atmospheric_stability_level == Class_A ?

50 :

Atmospheric_stability_level == Class_B ?

50 : 0 :

Solar_insolation == Slight ?

Atmospheric_stability_level == Class_B ?

100 : 0 :

Solar_insolation == No?

Cloudiness <5 ?

Atmospheric_stability_level == Class_F ?

```

100 : 0 :
Cloudiness == 5?
Atmospheric_stability_level == Class_E ?
50 :
Atmospheric_stability_level == Class_F ?
50 : 0 :
Cloudiness >5 ?
Atmospheric_stability_level == Class_E ?
100 : 0 : 0 : 0:

and (Wind_speed >2.0 , Wind_speed <3.0) ?
Solar_insolation == Strong ?
Atmospheric_stability_level == Class_A ?
50 :
Atmospheric_stability_level == Class_B ?
50 : 0 :
Solar_insolation == Moderate ?
Atmospheric_stability_level == Class_B ?
100 : 0 :
Solar_insolation == Slight ?
Atmospheric_stability_level == Class_C ?
100 : 0 :
Solar_insolation == No?
Cloudiness <5 ?
Atmospheric_stability_level == Class_F ?
100 : 0 :
Cloudiness == 5?
Atmospheric_stability_level == Class_E ?
50 :
Atmospheric_stability_level == Class_F ?
50 : 0 :
Cloudiness >5 ?
Atmospheric_stability_level == Class_E ?
100 : 0 : 0 : 0
:

and (Wind_speed >3.0 , Wind_speed <5.0) ?
Solar_insolation == Strong ?
Atmospheric_stability_level == Class_B ?
100 : 0 :

```

Solar_insolation == Moderate ?
 Atmospheric_stability_level == Class_B ?
 50 :
 Atmospheric_stability_level == Class_C ?
 50 : 0 :
 Solar_insolation == Slight ?
 Atmospheric_stability_level == Class_C ?
 100 : 0 :
 Solar_insolation == No?
 Cloudiness <5 ?
 Atmospheric_stability_level == Class_E ?
 100 : 0 :
 Cloudiness == 5?
 Atmospheric_stability_level == Class_D ?
 50 :
 Atmospheric_stability_level == Class_E ?
 50 : 0 :
 Cloudiness >5 ?
 Atmospheric_stability_level == Class_D ?
 100 : 0 : 0 : 0
 :

 and (Wind_speed >5.0 , Wind_speed <6.0) ?
 Solar_insolation == Strong ?
 Atmospheric_stability_level == Class_C ?
 100 : 0 :
 Solar_insolation == Moderate ?
 Atmospheric_stability_level == Class_C ?
 50 :
 Atmospheric_stability_level == Class_D ?
 50 : 0 :
 Solar_insolation == Slight ?
 Atmospheric_stability_level == Class_D ?
 100 : 0 :
 Solar_insolation == No?
 Atmospheric_stability_level == Class_D ?
 100 : 0 : 0
 :

 Wind_speed >6.0 ?

```

Solar_insolation == Strong ?
Atmospheric_stability_level == Class_C ?
100 : 0 :
Solar_insolation == Moderate ?
Atmospheric_stability_level == Class_D ?
100 : 0 :
Solar_insolation == Slight ?
Atmospheric_stability_level == Class_D ?
100 : 0 :
Solar_insolation == No?
Atmospheric_stability_level == Class_D ?
100 : 0 : 0
: 0

```

• **Evaporation** の条件付確率表

```

Evaporation (Wind_speed, Release_amount, Time_step, Temperature, Maximum_puddle_area) =
Maximum_puddle_area != 0 ? #便宜上 0 を防油堤が機能しない=Not functioned と置いている。
(Time_step != 0 ?
(Release_amount != 0?
(Wind_speed != 0 ?
(Release_amount/Maximum_puddle_area < 0.005 ?
(
0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *( (2*sqrt(Release_amount/0.005/pi))^(-0.11)) * (0.8^(-0.67)) * ( 10^(4.00266
- (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)) ) ) *100000*0.0862) / (8.3144*(Temperature+273) ) *
(Release_amount/0.005) / (660) * Time_step < Release_amount ?

(Release_amount/(pi*sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi)*Time_step ) <=0.005 ?

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *( (2*sqrt(Release_amount/0.005/pi))^(-0.11)) * (0.8^(-0.67)) * ( 10^(4.00266
- (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)) ) ) *100000*0.0862) / (8.3144*(Temperature+273) ) *
(Release_amount/0.005) :

Release_amount/(pi*sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi)*Time_step ) > 0.005 ?

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *( (2* sqrt( sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi) * Time_step ) )^(-0.11)) *
(0.8^(-0.67)) * ( 10^(4.00266 - (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)) ) ) *100000*0.0862) /
(8.3144*(Temperature+273) ) * (pi* sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi) * Time_step)
: 0
):

```

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * (2 * \sqrt{\text{Release_amount}/0.005/\pi})^{(-0.11)} * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Release_amount}/0.005) / (660) * \text{Time_step} \geq \text{Release_amount} ?$

0 : 0
):

$\text{Release_amount}/\text{Maximum_puddle_area} \geq 0.005 ?$

(
 $0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * (2 * \sqrt{\text{Maximum_puddle_area}/\pi})^{(-0.11)} * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Maximum_puddle_area}) / (660) * \text{Time_step} < \text{Release_amount} ?$

(
 $\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step} \geq \text{Maximum_puddle_area} ?$

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * (2 * \sqrt{\text{Maximum_puddle_area}/\pi})^{(-0.11)} * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Maximum_puddle_area}) :$

$\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step} < \text{Maximum_puddle_area} ?$

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * (2 * \sqrt{(\sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step})}^{(-0.11)}) * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step})$
 : 0
):

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * (2 * \sqrt{\text{Maximum_puddle_area}/\pi})^{(-0.11)} * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Maximum_puddle_area}) / (660) * \text{Time_step} \geq \text{Release_amount} ?$

0 : 0
): 0
):

$\text{Wind_speed} == 0 ?$

0 : 0):

$\text{Release_amount} == 0 ?$

0 : 0):

Time_step == 0 ?

0 : 0) :

Maximum_puddle_area == 0 ? #便宜上 0 を防油堤が機能しない=Not functioned と置いている。

(Time_step != 0 ?

(Release_amount != 0 ?

(Wind_speed != 0 ?

(

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *((2*sqrt(Release_amount/0.005/pi))^(-0.11)) * (0.8^(-0.67)) * (10^(4.00266
- (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)))) *100000*0.0862) / (8.3144*(Temperature+273)) *
(Release_amount/0.005) / (660) * Time_step < Release_amount ?

(Release_amount/(pi*sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi)*Time_step)) <=0.005 ?

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *((2*sqrt(Release_amount/0.005/pi))^(-0.11)) * (0.8^(-0.67)) * (10^(4.00266
- (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)))) *100000*0.0862) / (8.3144*(Temperature+273)) *
(Release_amount/0.005) :

Release_amount/(pi*sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi)*Time_step) > 0.005 ?

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *((2* sqrt(sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi) * Time_step))^(-0.11)) *
(0.8^(-0.67)) * (10^(4.00266 - (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)))) *100000*0.0862) /
(8.3144*(Temperature+273)) * (pi* sqrt(8*9.80665*Release_amount/pi) * Time_step)
: 0
) :

0.004786 *(Wind_speed^(0.78)) *((2*sqrt(Release_amount/0.005/pi))^(-0.11)) * (0.8^(-0.67)) * (10^(4.00266
- (1171.53/ (Temperature+273+(-48.784)))) *100000*0.0862) / (8.3144*(Temperature+273)) *
(Release_amount/0.005) / (660) * Time_step >= Release_amount ?

0 : 0

) :

Wind_speed == 0?

0 : 0) :

Release_amount == 0?

0 : 0) :

Time_step == 0 ?

0 : 0)

: 0

• Puddle_depth の条件付確率表

Puddle_depth (Time_step, Wind_speed, Release_amount, Temperature, Maximum_puddle_area) =

Maximum_puddle_area != 0 ? #便宜上 0 を防油堤が機能しない=Not functioned と置いている。

(Time_step != 0 ?

(Release_amount != 0 ?

(Wind_speed != 0 ?

(Release_amount/Maximum_puddle_area < 0.005 ?

(

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * ((2 * \sqrt{\text{Release_amount}/0.005/\pi})^{(-0.11)}) * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Release_amount}/0.005) / (660) * \text{Time_step} < \text{Release_amount} ?$

(

$\text{Release_amount}/(\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step}) \leq 0.005 ?$

0.005 :

$\text{Release_amount}/(\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step}) > 0.005 ?$

$\text{Release_amount} / (\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step})$

: 0) :

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * ((2 * \sqrt{\text{Release_amount}/0.005/\pi})^{(-0.11)}) * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Release_amount}/0.005) / (660) * \text{Time_step} \geq \text{Release_amount} ?$

0 : 0) :

$\text{Release_amount}/\text{Maximum_puddle_area} \geq 0.005 ?$

(

$0.004786 * (\text{Wind_speed}^{(0.78)}) * ((2 * \sqrt{\text{Maximum_puddle_area}/\pi})^{(-0.11)}) * (0.8^{(-0.67)}) * (10^{(4.00266 - (1171.53/(\text{Temperature}+273+(-48.784)))}) * 100000 * 0.0862) / (8.3144 * (\text{Temperature}+273)) * (\text{Maximum_puddle_area}) / (660) * \text{Time_step} < \text{Release_amount} ?$

(

$\pi * \sqrt{8 * 9.80665 * \text{Release_amount}/\pi} * \text{Time_step} \geq \text{Maximum_puddle_area} ?$

$\text{Release_amount} / \text{Maximum_puddle_area} :$

$\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 9.80665 \cdot \text{Release_amount} / \pi} \cdot \text{Time_step} < \text{Maximum_puddle_area} ?$

$\text{Release_amount} / (\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 9.80665 \cdot \text{Release_amount} / \pi} \cdot \text{Time_step})$

: 0):

$0.004786 \cdot (\text{Wind_speed}^{0.78}) \cdot (2 \cdot \sqrt{\text{Maximum_puddle_area} / \pi})^{-0.11} \cdot (0.8^{-0.67}) \cdot (10^{4.00266} - (1171.53 / (\text{Temperature} + 273 + (-48.784))) \cdot 100000 \cdot 0.0862) / (8.3144 \cdot (\text{Temperature} + 273)) \cdot (\text{Maximum_puddle_area} / (660) \cdot \text{Time_step} \geq \text{Release_amount} ?$

0: 0

): 0):

$\text{Wind_speed} == 0 ?$

0: 0):

$\text{Release_amount} == 0 ?$

0: 0):

$\text{Time_step} == 0 ?$

0: 0):

$\text{Maximum_puddle_area} == 0 ?$ #便宜上 0 を防油堤が機能しない=Not functioned と置いている。

$(\text{Time_step} != 0 ?$

$(\text{Release_amount} != 0 ?$

$(\text{Wind_speed} != 0 ?$

(

$0.004786 \cdot (\text{Wind_speed}^{0.78}) \cdot (2 \cdot \sqrt{\text{Release_amount} / 0.005 / \pi})^{-0.11} \cdot (0.8^{-0.67}) \cdot (10^{4.00266} - (1171.53 / (\text{Temperature} + 273 + (-48.784))) \cdot 100000 \cdot 0.0862) / (8.3144 \cdot (\text{Temperature} + 273)) \cdot (\text{Release_amount} / 0.005) / (660) \cdot \text{Time_step} < \text{Release_amount} ?$

$(\text{Release_amount} / (\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 9.80665 \cdot \text{Release_amount} / \pi} \cdot \text{Time_step}) \leq 0.005 ?$

0.005 :

$\text{Release_amount} / (\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 9.80665 \cdot \text{Release_amount} / \pi} \cdot \text{Time_step}) > 0.005 ?$

$\text{Release_amount} / (\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 9.80665 \cdot \text{Release_amount} / \pi} \cdot \text{Time_step})$

: 0):

$0.004786 \cdot (\text{Wind_speed}^{0.78}) \cdot (2 \cdot \sqrt{\text{Release_amount} / 0.005 / \pi})^{-0.11} \cdot (0.8^{-0.67}) \cdot (10^{4.00266} - (1171.53 / (\text{Temperature} + 273 + (-48.784))) \cdot 100000 \cdot 0.0862) / (8.3144 \cdot (\text{Temperature} + 273)) \cdot$

$(\text{Release_amount}/0.005) / (660) * \text{Time_step} \geq \text{Release_amount} ?$

0 : 0) :

$\text{Wind_speed} == 0 ?$

0 : 0) :

$\text{Release_amount} == 0 ?$

0 : 0) :

$\text{Time_step} == 0 ?$

0 : 0)

: 0

• **Outdoor_concentration** の条件付確率表

$\text{Outdoor_concentration}(\text{Surrounding_environment}, \text{x_distance}, \text{y_distance}, \text{Evaporation}, \text{Atmospheric_stability_level}, \text{Wind_speed}, \text{z_height}, \text{Puddle_depth}) =$

$\text{Puddle_depth} == 0 ?$

0 :

$\text{Puddle_depth} != 0 ?$

$(\text{Surrounding_environment} == \text{Rural} ?$

(

$\text{Atmospheric_stability_level} == \text{Class_A} ?$

$(\text{Evaporation} / (2 * \pi * (0.22 * \text{x_distance} * (1 + 0.0001 * \text{x_distance})^{(-1/2)}) * (0.20 * \text{x_distance}) * (\text{Wind_speed} * (\text{Puddle_depth}/10)^{0.109}) * \exp(-((\text{y_distance})^2) / (2 * (0.22 * \text{x_distance} * (1 + 0.0001 * \text{x_distance})^{(-1/2)})^2)) * (\exp(-(z_height - \text{Puddle_depth})^2) / (2 * (0.20 * \text{x_distance})^2)) + (\exp(-(z_height + \text{Puddle_depth})^2) / (2 * (0.20 * \text{x_distance})^2)))) * 10^6 * 0.27889821$
):

$\text{Atmospheric_stability_level} == \text{Class_B} ?$

$(\text{Evaporation} / (2 * \pi * (0.16 * \text{x_distance} * (1 + 0.0001 * \text{x_distance})^{(-1/2)}) * (0.12 * \text{x_distance}) * (\text{Wind_speed} * (\text{Puddle_depth}/10)^{0.112}) * \exp(-((\text{y_distance})^2) / (2 * (0.16 * \text{x_distance} * (1 + 0.0001 * \text{x_distance})^{(-1/2)})^2)) * (\exp(-(z_height - \text{Puddle_depth})^2) / (2 * (0.12 * \text{x_distance})^2)) + (\exp(-(z_height + \text{Puddle_depth})^2) / (2 * (0.12 * \text{x_distance})^2)))) * 10^6 * 0.27889821$
):

$\text{Atmospheric_stability_level} == \text{Class_C} ?$

$(\text{Evaporation} / (2 * \pi * (0.11 * \text{x_distance} * (1 + 0.0001 * \text{x_distance})^{(-1/2)}) * (0.08 * \text{x_distance} * (1 + 0.0002 * \text{x_distance})^{(-1/2)}) * (\text{Wind_speed} * (\text{Puddle_depth}/10)^{0.120}) * \exp(-$

```
((y_distance)^2) / ( 2* ( 0.11*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) )^2 ) )*( ( exp( - ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.08*x_distance*(1+0.0002*x_distance)^(-1/2) )^2 ) ) ) + ( exp( - ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.08*x_distance*(1+0.0002*x_distance)^(-1/2) )^2 ) ) ) ) *10^6 * 0.27889821
):
```

```
Atmospheric_stability_level == Class_D ?
```

```
( Evaporation/( 2 * pi * ( 0.08*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) ) ) *
( 0.06*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2) ) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.142) ) * exp( -
((y_distance)^2) / ( 2* (0.08*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2 ) )*( ( exp( - ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.06*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2) )^2 ) ) ) + ( exp( - ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.06*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2) )^2 ) ) ) ) *10^6 * 0.27889821
):
```

```
Atmospheric_stability_level == Class_E ?
```

```
(Evaporation/( 2 * pi * ( 0.06*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) ) ) *
( 0.03*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) ) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.203) ) * exp( -
((y_distance)^2) / ( 2* (0.06*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2 ) )*( ( exp( - ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.03*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) )^2 ) ) ) + ( exp( - ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.03*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) )^2 ) ) ) ) *10^6 * 0.27889821
):
```

```
Atmospheric_stability_level == Class_F ?
```

```
(Evaporation/( 2 * pi * ( 0.04*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) ) ) *
( 0.016*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) ) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.253) ) * exp( -
((y_distance)^2) / ( 2* (0.04*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2 ) )*( ( exp( - ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.016*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) )^2 ) ) ) + ( exp( - ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.016*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1) )^2 ) ) ) ) *10^6 * 0.27889821
):0
):
```

```
Surrounding_environment == Urban ?
```

```
(
```

```
Atmospheric_stability_level == Class_A ?
```

```
( Evaporation/( 2 * pi * ( 0.22*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) ) ) *
( 0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2) ) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.109) ) * exp( -
((y_distance)^2) / ( 2* (0.22*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2) )^2 ) )*( ( exp( - ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2) )^2 ) ) ) + ( exp( - ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* ( 0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2) )^2 ) ) ) ) *10^6 * 0.27889821
):
```

Atmospheric_stability_level == Class_B ?

(Evaporation/(2 * pi * (0.16*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2)) *
(0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2)) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.112))
* exp(- ((y_distance)^2) / (2* (0.16*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2))*((exp(- ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* (0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2))^2))) + (exp(- ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* (0.24*x_distance*(1+0.001*x_distance)^(1/2))^2)))) *10^6 * 0.27889821
):

Atmospheric_stability_level == Class_C ?

(Evaporation / (2 * pi * (0.11*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2)) * (0.20 * x_distance) * (Wind_speed
* (Puddle_depth/10)^0.120)) * exp(- ((y_distance)^2) / (2* (0.11 * x_distance * (1+0.0001*x_distance)^(-
1/2))^2))*((exp(- ((z_height - Puddle_depth)^2) / (2* (0.20*x_distance)^2))) + (exp(- ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* (0.20*x_distance)^2)))) *10^6 * 0.27889821
):

Atmospheric_stability_level == Class_D ?

(Evaporation/(2 * pi * (0.08*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2)) *
(0.14*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1/2)) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.142)) * exp(-
((y_distance)^2) / (2* (0.08*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2))*((exp(- ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* (0.14*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1/2))^2))) + (exp(- ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* (0.14*x_distance*(1+0.0003*x_distance)^(-1/2))^2)))) *10^6 * 0.27889821
):

Atmospheric_stability_level == Class_E ?

(Evaporation/(2 * pi * (0.06*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2)) *
(0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2)) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.203)) * exp(-
((y_distance)^2) / (2* (0.06*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2))*((exp(- ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* (0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2))^2))) + (exp(- ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* (0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2))^2)))) *10^6 * 0.27889821
):

Atmospheric_stability_level == Class_F ?

(Evaporation/(2 * pi * (0.04*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2)) *
(0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2)) * (Wind_speed * (Puddle_depth/10)^0.253)) * exp(-
((y_distance)^2) / (2* (0.04*x_distance*(1+0.0001*x_distance)^(-1/2))^2))*((exp(- ((z_height -
Puddle_depth)^2) / (2* (0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2))^2))) + (exp(- ((z_height +
Puddle_depth)^2) / (2* (0.08*x_distance*(1+0.0015*x_distance)^(-1/2))^2)))) *10^6 * 0.27889821
);0
);0
);0

• **AEGL3_exposure_population** の条件付確率表

AEGL3_exposure_population (Above_AEGL3, Population) =

Above_AEGL3 == AEGL3?

Population * Above_AEGL3

:0

• **AEGL3_exposure_population_one** の条件付確率表

AEGL3_exposure_population_one (Population, Above_AEGL3) =

Above_AEGL3 == AEGL3?

Population * Above_AEGL3

:0
