



Title	自然災害起因の産業事故を想定した水道事業継続に対するリスク評価枠組みの構築-淀川水系を対象とする ケーススタディ-
Author(s)	濱本, 翔吾
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101477
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

自然災害起因の産業事故を想定した
水道事業継続に対するリスク評価枠組みの構築
-淀川水系を対象とするケーススタディ-

濱 本 翔 吾

2024年11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 地震時の水道事業継続における課題の整理	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	5
参考文献	6
第2章 上水基幹管路の耐震化更新計画の評価枠組みの構築 -柴島浄水場基幹管路を対象としたケーススタディ -	9
2.1 緒言	9
2.2 浄水施設の耐震化の現状	9
2.2.1 水道施設の耐震化に関する行政の取り組み	9
2.2.2 管路の更新に関する先行研究の整理	11
2.2.3 本章の目的と枠組み	12
2.3 リスク評価の方法	14
2.3.1 基幹管路ネットワークモデル	14
2.3.1.1 管路ネットワーク行列の構築	14
2.3.1.2 管路データの定義	15
2.3.1.3 水量データの定義	15
2.3.2 地震被害推定モデル	17
2.3.2.1 地震データの定義	17
2.3.2.2 地震動の発生確率の設定	18
2.3.2.3 管路の破断率の推定	18
2.3.2.4 断水発生確率・断水人口の推定	20
2.3.2.5 応急給水能力と断水時水需要の推算	21
2.3.2.6 更新費用の推算	23
2.3.3 更新優先度評価	24
2.4 更新の優先度決定方法のケーススタディ	25
2.4.1 ケーススタディの条件	25
2.4.1.1 基幹管路ネットワークモデルの設定	25
2.4.1.2 地震被害推定モデルにおける地震データの設定	28
2.4.2 Base シナリオにおける断水発生確率と断水人口の算出結果	29
2.4.3 破断率シナリオ：破断率順での管路の更新	30
2.4.4 配水量シナリオ：配水量順での管路の更新	32
2.4.5 Risk score シナリオ：Risk score 順での管路の更新	33
2.4.6 更新費用の推算結果	34
2.4.7 更新シナリオの比較	36
2.4.7.1 断水人口・断水発生確率の比較結果	36

2.4.7.2	応急給水能力の推算結果	40
2.5	結言	41
	参考文献.....	42
第3章	大規模地震による化学物質の河川への流出に対する対策オプションの有効性の分析 -淀川水系を対象としたケーススタディ -	47
3.1	緒言	47
3.2	化学物質の河川への流出事象の現状.....	47
3.2.1	化学物質の流出事故による被害.....	47
3.2.2	行政の取り組み	48
3.2.3	本研究の目的と評価の枠組み	48
3.3	評価モデルの詳細	50
3.3.1	流出事象・対策オプションの想定	50
3.3.2	拡大シナリオ（イベントツリー）の展開.....	51
3.3.3	危険度の推定	53
3.3.3.1	地震動の発生確率の設定	53
3.3.3.2	初期事象の発生確率の推定	54
3.3.4	事象分岐確率の設定	55
3.3.4.1	緊急遮断弁	55
3.3.4.2	防油堤.....	55
3.3.4.3	従業員による流出防止措置	55
3.3.5	シナリオ発生確率の推定	56
3.3.6	影響度の推算	56
3.3.6.1	初期事象での流出量の設定	56
3.3.6.2	事象分岐による流出比率の設定.....	56
3.3.7	シナリオ別の事業所外流出量の推定.....	57
3.3.8	シナリオ別の取水口到達濃度の推定.....	58
3.4	ケーススタディ	60
3.4.1	対象地域における各パラメータの設定	60
3.4.2	対象事業所の設定	61
3.4.3	対策オプション導入の基準	62
3.4.3.1	ハザード比と目標貯蔵量の算出.....	62
3.4.3.2	Risk state 1 ($HQc < 1$ のとき).....	63
3.4.3.3	Risk state 2 ($1 \leq HQc < 10$ のとき).....	63
3.4.3.4	Risk state 3 ($10 \leq HQc < 100$ のとき)	64
3.4.3.5	Risk state 4 ($100 \leq HQc$ のとき)	64
3.4.4	感度解析の条件とその結果	64
3.4.5	取水口での最大濃度の推定結果	66
3.4.5.1	結果の概要	66

3.4.5.2	対策オプション導入数 $mi=1$ (Case2,3,4)の場合	66	
3.4.5.3	対策オプション導入数 $mi=2$ (Case5,6,7)の場合	66	
3.4.5.4	対策オプション導入数 $mi=3$ (Case8)の場合	67	
3.4.5.5	大規模災害に対する発生確率の評価	67	
3.4.5.6	ケーススタディ対象事業所への対策オプションの導入基準の適用	68	
3.5	結言	69	
	参考文献	70	
第4章 化学物質の河川流出と津波遡上による拡散が浄水処理システムへ及ぼす潜在的リスクの評価 -淀川水系を対象としたケーススタディ -			73
4.1	緒言	73	
4.2	津波遡上と化学物質流出の併発事故における現状の課題	73	
4.2.1	津波リスク評価の現状	73	
4.2.2	本研究の目的と評価の枠組み	74	
4.3	評価モデルの詳細	75	
4.3.1	流出地域の選定	75	
4.3.2	排出量推定モデル	76	
4.3.2.1	届出外貯蔵量・メッシュ別貯蔵量の推計	76	
4.3.2.2	河川への流出量の推計	77	
4.3.3	津波モデル	78	
4.3.4	河川水生生物に対するリスクの推定	80	
4.3.5	塩素処理過程での化学物質の生成量の推定	80	
4.4	ケーススタディ	81	
4.4.1	ケーススタディの条件	81	
4.4.1.1	対象地と対象物質の性質	81	
4.4.1.2	ヘキサメチレンテトラミンの届出外貯蔵量推計における設定	82	
4.4.1.3	淀川における津波モデルの適用	83	
4.4.1.4	リスク評価における設定	83	
4.4.2	評価ケースの設定	83	
4.4.3	ヘキサメチレンテトラミンの貯蔵量の推計結果	84	
4.4.4	ケース1の解析結果	86	
4.4.4.1	ヘキサメチレンテトラミンの挙動と濃度分布	86	
4.4.4.2	河川の水生生物とヒト健康に対するヘキサメチレンテトラミンのリスク評価	89	
4.4.5	ケース2の解析結果	89	
4.4.5.1	ヘキサメチレンテトラミンの挙動と濃度分布	89	
4.4.5.2	河川水生生物とヒトに対するヘキサメチレンテトラミンのリスク評価	93	
4.4.6	淀川水系における化学物質の津波遡上の対策検討	93	
4.4.7	上水取水口への影響が懸念されるヘキサメチレンテトラミン排出量の推定	94	
4.5	結言	96	

参考文献.....	98
第5章 結論	101
5.1 本研究の総括	101
5.1.1 本研究により得られた成果とその意義.....	101
5.1.2 大規模地震時の上水システムの業務継続に対するリスク評価結果の整理	102
5.2 今後の課題.....	103
5.2.1 本研究の枠組みにおける今後の課題.....	103
5.2.2 今後の水道事業に対するリスク評価における課題.....	104
参考文献.....	106
謝辞	107
本研究の基礎となる発表論文	108

図表目次

図 1-1 本研究の構成	5
図 2-1 全国の水道施設の耐震化率及び耐震適合率の推移	11
図 2-2 管路更新計画評価モデルの枠組み	13
図 2-3 配水量の計算例	16
図 2-4 モンテカルロ法によるノードの断水人口算出アルゴリズム	20
図 2-5 大阪市柴島浄水場のネットワーク図	25
図 2-6 浄水場からノードまでの距離と 断水発生確率の関係	29
図 2-7 浄水場からノードまでの距離と 断水人口の関係	29
図 2-8 管路の破断率と長さの関係	30
図 2-9 管路の破断率と直径の関係	30
図 2-10 基幹管路の更新費用の推定結果	34
図 2-11 断水人口と管路の更新費用の関係	36
図 2-12 基幹管路の総延長に対する更新比率と断水人口の関係	37
図 2-13 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 5%以上の断水が発生する確率の関係性	38
図 2-14 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 30%以上の断水が発生する確率の関係性	39
図 2-15 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 50%以上の断水が発生する確率の関係性	39
図 2-16 更新ケースごとのハザード比の推定結果	40
図 3-1 地震時の事業所からの化学物質流出対策オプションの評価の枠組み	49
図 3-2 Case2 における Event Tree の展開図	52
図 3-3 Case8 における Event Tree の展開図	52
図 3-4 河川断面のイメージ図	58
図 3-5 震度超過確率の感度解析の結果	65
図 3-6 化学物質貯蔵の感度解析の結果	65
図 3-7 河川流量の感度解析の結果	65
図 3-8 浄水場までの距離の感度解析の結果	65
図 3-9 対象事業所における化学物質の貯蔵量とハザード比の関係	68
図 4-1 津波による化学物質の河川遡上事象の評価の枠組み	74
図 4-2 1km メッシュマップの作製イメージ	75
図 4-3 淀川大堰周辺の航空写真	81
図 4-4 大阪府における全産業の従業者数メッシュマップ	82
図 4-5 対象地域と河川への排出地点	84
図 4-6 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 300 秒) (ケース 1)	86
図 4-7 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 8,700 秒) (ケース 1)	87

図 4-8 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 11,100 秒) (ケース 1)	87
図 4-9 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 18,000 秒) (ケース 1)	88
図 4-10 柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化 (ケース 1)	88
図 4-11 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 300 秒) (ケース 2)	90
図 4-12 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 8,700 秒) (ケース 2)	90
図 4-13 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 11,100 秒) (ケース 2)	91
図 4-14 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 18,000 秒) (ケース 2)	91
図 4-15 地震発生直後の柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化 (ケー ース 2)	92
図 4-16 津波到達時の柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化 (ケー ース 2)	92
図 4-17 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水取水口周辺流出条件での上水取水口周辺 濃度変化(地震発生直後).....	95
図 4-18 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水取水口周辺流出条件での上水取水口周辺 濃度変化(低濃度の拡大図)	95
図 5-1 本研究で評価を行った事象の整理	103

表 1-1 本研究で取り上げた上水の供給停止を引き起こす事象に対する現状の対応状況	4
表 2-1 近年の主な水道施設の耐震化に係る水道事業方針についての報告書及び法改正	10
表 2-2 震度階級と計測震度の対応(気象庁 (1996))	17
表 2-3 管路の破断率の補正係数(磯山ら(1998)).....	19
表 2-4 基幹管路の管路データ及び配水量データ	26
表 2-5 ノードの給水量データ	26
表 2-6 応急給水の作業時間の設定	27
表 2-7 大阪市水道局の応急給水車保有量	27
表 2-8 柴島浄水場排水区域における震度の超過確率と発生頻度.....	28
表 2-9 基幹管路の破断率と破断率シナリオにおける更新順序	31
表 2-10 基幹管路の配水量と配水量シナリオにおける更新順序	32
表 2-11 基幹管路の Risk score と Risk score シナリオにおける更新順序	33
表 2-12 単位長さ当たりの基幹管路更新費用の算出結果	35
表 3-1 対策ケースの設定.....	50
表 3-2 震度階級と計測震度の対応	53
表 3-3 平均値と標準偏差.....	54
表 3-4 対策オプション分岐確率.....	56
表 3-5 対策オプションの動作成功時と失敗時の流出比率.....	57
表 3-6 対象事業所の貯蔵物質及び立地の情報.....	61
表 3-7 ハザード比と事業所で最低限導入すべき対策オプションの目安.....	63
表 3-8 下流の浄水場取水口周辺の物質濃度に対する感度解析の条件	64
表 3-9 対策ケースの比較結果	66
表 4-1 届出外事業所におけるヘキサメチレンテトラミン貯蔵量の推計.....	82
表 4-2 流出地域の届出外事業所メッシュの貯蔵量.....	85
表 4-3 事業所から河川への化学物質流出ケースの設定	85
表 4-4 淀川水系におけるヘキサメチレンテトラミン流出時の津波遡上による 取水影響のケース スタディ結果	93
表 4-5 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の解析条件	94
表 4-6 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水口取水口周辺の最大濃度及び 給水中のホ ルムアルデヒド最大濃度	96
表 5-1 各章でのリスク評価実施事象と対策.....	103

第1章 序論

1.1 地震時の水道事業継続における課題の整理

近年水道事業は安全に飲用できる水を通常時に安定して使用できるという本来のあり方のみならず、一層のサービス水準、安定性の向上が求められるようになってきた。水道ビジョン(2004)においては、突発的な水質事故や自然災害といった緊急時にも安全安心な水を安定して供給することを求めていた。この課題は現在まで継続しており、2024年1月1日に石川県能登地方で発生した令和6年能登半島地震では同年の5月31日まで石川県内的一部地域で断水が発生し、多くの住民が不便な生活を強いられた(内閣府(2024))。水道事業者が平時から地震時に上水システムに影響を及ぼす事象について把握し、対策を検討する指針として、国土交通省(2020)は危機管理対策マニュアル策定指針を作成した。本指針の中で、上水システムの早期復旧と復旧までの応急措置等の方法をまとめた計画を作成しておくことを求められた(国土交通省(2020))。同マニュアルの策定指針は水道事業に対する突発的なリスクを引き起こす項目として、地震、風水害、水質汚染事故、施設事故・停電、管路事故・給水装置凍結事故対策、テロ、渴水からなり、それぞれに対して事業継続対応のための検討項目などがまとめられている(国土交通省(2020))。特に、地震は南海トラフ巨大地震等今後も大規模な地震が発生する可能性が高く、水道事業者等は被災時に的確に対応をすることが求められている(国土交通省(2020))。地震対策マニュアル策定指針では、主として施設・管路の被災と早期復旧、その間の応急対策に焦点が充てられており、事前対策は施設の耐震化が中心となっている(国土交通省(2020))。水道施設の耐震化は以前より課題として取り上げられており、2004年の水道ビジョンでは既に既存の水道施設の老朽化にともない水道施設の更新及び耐震化の必要性が指摘されている(厚生労働省健康局(2004))。多くの水道施設は高度経済成長期に敷設されたものであるため、2004年時点で施設の耐用年数を迎えており、同年発生した新潟県中越地震では約13万戸に亘って断水が発生する事態となった(国土交通省健康局水道課(2004))。この頃から、施設の耐震化更新を促進するための法令が整備され(厚生労働省(2007), 厚生労働省健康局水道課(2008)), 2009年度以降、現在まで水道の基幹となる施設(基幹管路、浄水施設、配水池)の耐震化の状況が調査公表されている(厚生労働省健康局水道課(2010, 2011, 2012, 2013, 2014), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課(2015, 2016a), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課(2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), 厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課(2024))。このような取組に加え、厚生労働省健康局水道課(2015)は水道事業者に対して水道施設の耐震化計画の策定方針を水道の耐震化計画等策定指針により提示した。更に、令和2年には防災・減災、国土強靭化のための5か年加速化対策が閣議決定され、基幹管路と浄水場・配水場において耐震化率を引き上げることを目的として、対策が推進されている。特に、管路については内閣官房(2023)において上水道の基幹管路の耐震適合率が重要業績評価指標の一つに定められており、継続的な更新が進められている。このような取り組みにより、水道施設の耐震化が進められてきたが、2022年度末時点では基本的な水道管のうち耐震性のある管路の割合が42.3%, 浄水施設の耐震化率が43.4%, 配水池の耐震化率が63.5%と十分に耐震化がなされているとは言えないのが現状である(厚生労働省 健康・生活衛生局水道課(2024))。特に、基幹管路の更新は他の二つの施設と比べて遅く、毎年1%程度のペースでしか更新が進んでいない(厚生労働省健康局水道課(2010, 2011, 2012, 2013, 2014), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課(2015, 2016a), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課(2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), 厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課(2024))。

局生活衛生局水道課(2024))。日本社会は人口減少の傾向にあることから水道事業も収入の減少により施設の更新が遅れる可能性も指摘されているため(厚生労働省健康局水道課(2008)), このような状況下において, 大規模地震発生時のリスクを最小化するためには, 耐震化による効果が高い管路から優先的に更新を行うような計画の策定が必要である。

一方で, 国土交通省(2020)では水質汚染事故に対しても危機管理対策マニュアル策定指針を作成しており, 緊急措置や応急給水, 応急復旧等を迅速に行うための体制作りの目安等が記載されている(国土交通省(2020))。水質汚染事故対策マニュアル策定指針では, 故意または過失による汚染物質の不法投棄, 事業所・工場等の処理施設の管理不備による汚染物質の流出等を主に想定しており, 地震時に化学物質取扱事業所から突発的に大量の化学物質が流出するようなケースは想定されていない。このような, 地震に起因する水質汚染リスクの評価としては, 下水処理施設の被災により, 未処理水の放流による河川水質汚染の影響を評価した例(厚生労働省健康局水道課(2006), 藤木ら(2009)), 化学物質の偶発的な流出を想定した浄水場取水への影響評価事例がある(中久保ら(2016))。このような化学物質の突発的な流出事象に対し, これまで水道事業者は主に二つの対策をとってきた。一つはセンサ開発等により水質悪化の検出精度を高め, 突発の水質汚染をすぐさま検知できるような技術の開発である(福田・田中(1998), 大戸(2001))。もう一つは突発的な水質悪化にも耐えうるような浄水処理能力を確保することであり, 追加の高度浄水処理プロセスを行うことによる原因物質の除去を図ってきた。後者については, 一般に高度浄水処理と呼ばれる, 通常の浄水処理(凝集沈殿+急速ろ過, 緩速ろ過, 膜ろ過等, 濁質の除去を目的とする浄水処理)に粉末活性炭, 粒状活性炭, オゾン, 生物処理といった処理プロセスを追加した浄水処理フローである。このような設備を持つ浄水処理場は 2006 年時点で浄水処理方式別・水源種類別の組合せ件数 6,052 のうち全体の 5.9%程度(財団法人水道技術研究センター(2009))であり, 突発的な化学物質の流出に対してもある程度の対応が可能となった。また, 北本ら(2022)はこのような化学物質の突発流出の水質事故を想定し, 水道水への影響を低減する追加の対策として粉末活性炭(GAC)処理において更新周期の短縮が有効であることを示し, 水質事故に対する浄水処理事業者の対応能力を明らかにした。

このような水質事故に対する取り組みがなされてきているものの, 2012 年に利根川流域で発生した未処理のヘキサメチレンテトラミンの排出事故では, 一部の浄水場で水質基準値を上回るホルムアルデヒドが検出された。これにより, いくつかの浄水場は取水停止の措置をとることとなり, 千葉県の 5 市(36 万戸, 87 万人)では断水に至った(水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会(2013))。金見(2013)は利根川の水質事故の分析結果から, 水質事故検知手法の開発, 事故対応時の簡易分析法の開発, 情報伝達体制の構築, 給水停止による社会的影響と健康リスクのバランスの評価, 化学物質排出源の管理把握といった当時の水質事故に対する課題を提言した。これらの課題の一部は危機管理対策マニュアル策定指針においても重要視されている内容である(国土交通省(2020))。また, 給水停止による社会的影響と健康リスクのバランスという課題に対しは, 水質事故等により, 浄水中の有害物質の濃度が一時的に基準値を一定程度超過する水質異常が生じた場合においても, 水道事業者等の判断により, 利用者に対して水道水の摂取を控えるよう広報しつつ, 給水を継続(摂取制限を伴う給水継続)することが可能とする通知がなされ, 水道事業者は水質事故時でもより社会の影響の小さい対応を判断する必要がある(厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課長通知(2016b))。このように, 平常時の水質事故に対し, 対策が検討されてきたが浄水処理側のみの対策では限界があるため, 化学物質取扱事業者が水系への流出防止措置を導入するなど, 管理対策の強化も必要である。

地震時の化学物質汚染として、津波によるものが多く報告されており、東日本大震災での津波による地下水の海水汚染事例(開発(2019))やヒ素、鉛などの重金属を含んだ津波堆積物の拡散(川辺ら(2012))が挙げられる。このように、地震時に津波が併発した場合、津波流により通常存在しないような物質が水系に拡散される可能性がある。また、津波は河道内を遡上することで浄水場の取水口に塩水が混入することにより取水障害が発生する可能性を指摘されており、大阪府淀川水系を対象とした事例では南海トラフ地震発生時に、河口から約30kmまで津波が遡上し、浄水場取水口の塩分濃度が上昇することが予測された(松宮ら(2009)、永島・米山(2017))。同様の事例が化学物質について起こったケースについても検討がなされており、浄水場の上流に立地する事業所からの流出のみならず、津波遡上により下流の事業所から排出された化学物質が取水口に到達する可能性も示唆されている(田窪ら(2021))。このように、地震と津波遡上の複合事象により、低頻度ではあるが浄水場下流の事業所からも有害物質が取水口周辺に流入する可能性がある。化学物質の流出と津波遡上の複合事象については可能性とその危険性が示唆されているものの、リスク評価は実施されていない。したがって、このような事象についてはリスク評価の枠組みを構築し、ワーストケースを想定した場合に、浄水場側で対策の検討の有無を判断すべきである。

本項では地震時の水道事業継続に対しリスクとなる事象とその課題について示した。水道施設の破損による断水事象に対しては、基幹管路の耐震化更新が他の水道施設と比べて十分でなく(厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課(2024))、今後も人口減少による収入の減少から更新の遅れが継続することが予想されている(厚生労働省健康局水道課(2008))。また、地震対策マニュアル策定指針(国土交通省(2020))で想定されていない事象として、地震時の化学物質取扱事業所からの化学物質の流出に起因する水質汚染による浄水場取水への影響について示した。このようなリスクに対しては、水道事業者だけでなく化学物質取扱事業所でも流出防止措置を導入し、リスクの低減を図る必要がある。

1.2 本研究の目的

表1-1に本研究で取り上げた上水システムの業務継続に影響を及ぼす事象に対する現状の対応状況を示す。国土強靭化計画における自然災害に対するリスクマネジメントの基本的な考え方は、まず主たるリスクを特定し、原因となる脆弱性についての分析、対応方策の検討と重点化・優先順位付けにより、効率的に対策を推進することである(内閣官房(2023))。この考え方に基づき、本研究で取り上げた地震時の水道事業の継続に対するリスクについて、行政の対応状況を示した。水道管の破壊に対しては、対策として管路の耐震化が進められている(厚生労働省健康局水道課(2015)、内閣官房(2023))。しかしながら、耐震化が完了している管路は2024年の現在においても50%以下であり、十分とはいえないのが現状である(厚生労働省健康・生活衛生局水道課(2024))。また、昨今の大規模地震においても長期的な断水が発生しており、更新計画の見直しが必要である。実際に、耐震化による断水率や断水人口の低減効果を比較することで更新指標を検討した事例はある(國實ら(2017))が、断水率の低減と管路の更新費用の両方を考慮した検討事例はなく、費用と更新効果の面で最適な更新計画の策定手段が必要である。

化学物質の突発流出に対しては、対策として特定の化学物質を取扱う事業者について災害による化学物質の漏洩を未然に防止するための方策を検討し、必要な措置をとることが義務付けられた。しかしながら、具体的な対策オプションについては特定の事業所を除いて規定されておらず、多くは事業者の自主的な判断により対策がされている。そのため、化学物質の大量流出というリスクに対しては漏洩防止策の対策効果の評価により、優先順位付けを実施することが必要である。また、事業所からの化学物質の

大量流出については上流の事業所から化学物質が流出し、河川流下により下流の浄水場取水口に達するシナリオと下流の事業所から化学物質が流出し、津波の河川遡上により上流の浄水場取水口にまで達するシナリオが考えられる。後者のシナリオについてはリスク評価の枠組みが構築されておらず、最悪の事態が発生した場合にどの程度の被害があるかが明らかとなっていないため、事故発生時の被害を定量化するモデルの構築及びワーストケースを想定した被害想定が求められる。

表 1-1 本研究で取り上げた上水の供給停止を引き起こす事象に対する現状の対応状況

給水停止の原因となる事象	リスクの特定	脆弱性分析	行政の対応方策	対応方策の優先順位付け
飲料水輸送システムの喪失・機能の低下	水道管の破損	全国の水道管の耐震適合率は50%未満である	水道管の耐震適合化	更新後の断水率(人口)の比率による更新シナリオの検討事例
原水の水質悪化による取水停止	事業所からの化学物質の大量流出	大量流出により高濃度の化学物質が下流の浄水場取水口に到達	特定の物質を扱う事業所に対し災害時の漏洩防止策の検討を義務化	-
		大量流出と津波の河川遡上で上流の浄水場取水口に高濃度の化学物質が到達	上に同じ	-

(筆者が作成)

このような背景から、本研究では上水の供給停止の要因となるリスクに対して、個別の課題に対応するため、以下の3つの評価の枠組みを構築する。

水道管の破壊というリスクに対しては、費用と更新効果を考慮した優先順位の評価が課題である。したがって、更新費用と更新後の断水人口の低減効果と水道事業者の応急給水能力を評価することで、最適な管路の更新計画を決定する評価の枠組みを構築する。

事業所から河川への化学物質の大量流出というリスクに対する一つ目の課題は、対策オプションの優先度評価がされていないことである。したがって、対策オプションの対策効果を比較し、事業者がどのような対策オプションを導入すべきかを決定するような評価の枠組みを構築する。

事業所から河川への化学物質の大量流出というリスクに対して、もう一つの課題は、津波の河川遡上により下流の事業所から出した化学物質が、上流の浄水場取水口にまで達するというシナリオを想定したリスク評価の枠組みが構築されていないことである。この課題に対して、評価モデルの構築とワーストケースを想定した被害想定を行うことで、対策の必要性について検討を行う。

さらに、それぞれの評価の枠組みを適用したケーススタディを行うことで、その実用性と課題についての検証を行う。ケーススタディの対象地は大阪市の柴島浄水場の配水区域および柴島浄水場が取水を行っている淀川水系とした。柴島浄水場は、水道管の破壊による被害が大きく、淀川水系は複数の都市部に跨っており、周辺に多くの化学物質取扱事業所が立地していることから、地震時の化学物質流出事故のリスクが高い地域といえる。このような背景から、これら三つの評価の枠組みのケーススタディの対象地として最適であると考えた。

1.3 本論文の構成

図 1-1 に本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究で対象とした上水の供給停止を引き起こす事象に対して、これまで行われてきた対策や法規制、先行研究について述べた後、現状の課題について整理を行った。課題に対して必要な評価の枠組みについて述べ、本研究で行った 3 つの評価の枠組みについて概要を示した。

第 2 章では、基幹管路の耐震化更新計画に対して、更新費用と耐震化効果の両方を想定した更新優先度の評価枠組みの構築を行い、柴島浄水場の配水本管ネットワークを対象としたケーススタディを行った。

第 3 章では、上流の化学物質取扱事業所から河川に化学物質が流出し、下流の浄水場の取水口での水質悪化が発生する事象を取り上げ、事業所側の対策オプションの導入が、リスクの低減にどれだけ効果があるかを流出事故の発生確率と下流の取水口への到達濃度により定量的な評価が可能となる枠組みを構築した。淀川水系を対象としたケーススタディにより、評価枠組みの実用性と淀川水系における事業所の対策オプションの導入基準について検討を行った。

第 4 章では、下流の化学物質取扱事業所から河川に化学物質が流出し、上流の浄水場取水口で水質悪化が発生する事象を取り上げ、事故シナリオのモデル化とリスク評価の枠組みを構築した。ケーススタディでは、ワーストケースの想定のため、津波の河川遡上が想定される南海トラフ地震を対象とし柴島浄水場の取水口の付近に大量の化学物質が流出したと仮定した。

第 5 章では、本研究で得られた知見と課題について整理し、結論について述べる。

課題① 基幹管路の効率的な耐震化更新計画の策定手法の構築

課題② 河川への化学物質流出を想定した流出防護策の導入効果分析手法の構築

課題③ 津波による化学物質の河道内拡散を想定したリスク評価手法の構築

第 1 章 序論 地震時の水道事業継続における課題の整理

水道事業継続に対するリスクの評価枠組みの構築、事前対策の考察

第2章 課題①

- 上水基幹管路の耐震化更新計画の評価枠組みの構築
- 耐震化更新シナリオの比較

第3章 課題②

- 河川への化学物質の流出、対策オプションによる流出防護策のモデル構築
- 対策オプションの導入シナリオの比較

第4章 課題③

- 津波の河川遡上による化学物質拡散のモデル化
- 浄水処理過程での生成物による潜在的なリスクを考慮したリスク評価手法の構築

第5章 結論 本研究により得られた知見及び今後の課題

図 1-1 本研究の構成

参考文献

- 大戸時喜雄. 2001. 突発河川水質事故管理システム. 計測と制御. Vol. 40, No.4, p. 315-319.
- 開發一郎. 2019. 三陸沿岸における東北地方太平洋沖地震の津波による水道水源地下水の汚染と回復. 地下水学会誌. Vol. 61, No.1, p. 37-45.
- 金見拓. 2013. 利根川水系ホルムアルデヒド水質事故の概要と提起された課題. 日本リスク研究学会誌. Vol. 23, No. 2, p. 57-64.
- 川辺能成, 原淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張銘, 駒井武. 2012. 東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク. 土木学会論文集 G(環境). Vol. 68, No. 3, p. 195-202.
- 環境省 水・大気環境局 土壌環境課 地下水・地盤環境室. 2010. 地下水汚染の未然防止のための構造と点検・管理に関するマニュアル (第 1.1 版).
<<https://www.env.go.jp/water/chikasui/brief2012/manual.html>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 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.
<<https://www.env.go.jp/content/900518774.pdf>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 北本靖子, 伊藤理彩, 東海明宏. 2022. 水道水源における化学物質流出事故に対する高度浄水処理及び対策オプションの評価. 環境科学会誌. Vol. 35, No. 3, p. 121-136.
- 國實眞治, 稲員とよの, 小泉明, 荒井康裕, 佐藤清和, 藤川和久, 長谷川進, 深瀬閑太郎. 2017. 震災時の断水影響を考慮した配水管網の耐震化更新計画に関する研究. 土木学会論文集 G (環境). Vol. 73, No. 7, III_515-III_524.
- 厚生労働省健康局水道課. 2006. 平成 17 年度流域水質の総合的な保全・改善のための連携方策（緊急時の水質リスクに対応した連携方策）検討調査報告書.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/topics_bukyoku_kenkou_suido_ryuiki_index.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省. 2007. 管路の耐震化に関する検討会報告書.
<<https://www.mlit.go.jp/common/830002448.pdf>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康局. 2008. 水道ビジョン. <<https://www.mlit.go.jp/common/830001162.pdf>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康局水道課. 2010. 水道事業における耐震化の状況（平成 21 年度） | 報道発表資料.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000000ynl2.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康局水道課. 2011. 水道事業における耐震化の状況（平成 22 年度） | 報道発表資料.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000001xwed.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康局水道課. 2012. 水道事業における耐震化の状況（平成 23 年度） | 報道発表資料.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000002qpnp.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康局水道課. 2013. 水道事業における耐震化の状況（平成 24 年度） | 報道発表資料.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000031812.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).

- 厚生労働省健康局水道課. 2014. 水道事業における耐震化の状況（平成 25 年度） | 報道発表資料. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000069235.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課. 2015. 水道事業における耐震化の状況（平成 26 年度） | 報道発表資料. <<https://www.mlit.go.jp/common/830003310.pdf>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課. 2016a. 水道事業における耐震化の状況（平成 27 年度） | 報道発表資料. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000146767.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課長通知. 2016b. 水質異常時における摂取制限を伴う給水継続の考え方について. <<https://www.env.go.jp/content/900546547.pdf>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2017. 水道事業における耐震化の状況（平成 28 年度） | 報道発表資料. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2019. 水道事業における耐震化の状況（平成 29 年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2020. 水道事業における耐震化の状況（平成 30 年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2021. 水道事業における耐震化の状況（令和元年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2022. 水道事業における耐震化の状況（令和 2 年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2023. 水道事業における耐震化の状況（令和 3 年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_newpage_31439.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課. 2024. 水道事業における耐震化の状況（令和 4 年度）. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/newpage_38800.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 国土交通省健康局水道課. 2004. 「新潟県中越地震水道被害調査報告書」について. <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/topics_bukyoku_kenkou_suido_topics_niigata_index.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 国土交通省. 2020. 危機管理対策マニュアル策定指針.

- <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_seisakunitsuite_bunya_topics_bukyoku_kenko_u_suido_kikikanri_sisin.html> (2024年11月7日閲覧).
- 財団法人水道技術研究センター. 2009. 水道事業における高度浄水処理の導入実態及び 導入検討等に関する技術資料.
- <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/topics_bukyoku_kenkou_suido_jousui_01.html> (2024年11月7日閲覧).
- 水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会. 2013. 水道水源における消毒副生成物前駆物質 汚染対応方策について とりまとめ.
- <<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kentoukai/dl/shoudoku02.pdf>> (2024年11月7日閲覧).
- 内閣官房. 2023. 国土強靭化基本計画.
- <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html> (2024年11月7日閲覧).
- 内閣府. 2024. 令和6年能登半島地震に係る被害状況等について(令和6年6月25日14:00現在).
- <https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_46.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- 田窪亮介, 米山望, 東海明宏, 伊藤理彩. 2022. 河川水塩分を考慮した南海トラフ地震津波来襲時の淀川における化学物質拡散予測. 海洋開発論文集. Vol. 38, 78巻2号, p. I_823- I_828.
- 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巻3号, p. 131-140.
- 永島弘士, 米山望. 2017. 津波来襲時の河道内塩水遡上に関する数値解析手法の提案. 土木学会論文集B2(海岸工学). Vol. 73, No. 1, p. 19-32.
- 福田政克, 田中良春. 1998. 突発性水質事故とセンサ技術. 富士時報. Vol. 71, No. 6, p. 347-351.
- 藤木修, 中山義一, 中井博貴. 2009. 地震による河川水質汚染の影響評価について. EICA. Vol. 14, 第2・3合併号, p. 28-36.
- 松宮弘信, 米山望, 田中尚, 鮫島竜一, 佐藤広章. 2009. 河川遡上津波発生時の淀川大堰上流部における塩水挙動解析. 自然災害科学. Vol. 28, No. 2, p. 573-574.

第2章 上水基幹管路の耐震化更新計画の評価枠組みの構築

-柴島浄水場基幹管路を対象としたケーススタディ-

2.1 緒言

本章では、巨大地震が管路破断に及ぼす影響をシナリオ解析により検討する。解析を通じて、管路更新計画の進捗を評価するための実用的な手法を提案し、提案手法を実際に適用した場合の実現可能性を検証する。ここでは、地震時の柴島浄水場の基幹管路の更新計画に焦点を当て、対象地域の今後数十年間の震度の超過確率から算出した断水発生確率と断水発生時の断水人口の減少という観点から、異なる更新計画の比較を行い、今後の更新計画を評価・改善するための適切な指標について検討する。また、推定した断水人口から応急給水車により供給する必要がある水量を算出し、これを現状の大都市の応急給水能力と比較することで、断水時の飲料水供給途絶のリスクを評価する。

本章の構成は次の通りである。2.2節では、浄水施設の更新についての既往研究及び行政等の取組を整理し、本研究の位置付けを明確にし、本研究で設定した目的と評価の枠組みを示す。2.3節では評価モデルの詳細について示す。2.4節では柴島浄水場を対象としたケーススタディの条件とその結果をまとめるとともに、2.5節で本章の結論について述べる。

2.2 浄水施設の耐震化の現状

2.2.1 水道施設の耐震化に関する行政の取り組み

表2-1に近年の主な水道施設の耐震化に関する法令及び取り組みを示す。2004年に厚生労働省健康局より公表された水道ビジョンでは、21世紀において、日本の水道事業が変革期にあるとし今後の方針や課題が示された(厚生労働省健康局(2004))。この時点において日本の水道普及率は96.8%に達しており(厚生労働省健康局(2004)),通常時に安全に飲用できる水を安定して供給するという水道事業が本来満たすべき目的はほぼ達成できていると言ってよい状況であった。しかしながら、今後の課題として地震等の災害時における水の安定供給や、持続可能な水道システムを支える基盤の強化といった将来を見据えた課題も掲げられるようになった(厚生労働省健康局(2004))。特に、多くの水道施設が高度経済成長期に布設されたことから、この時期には耐用年数を迎えており、施設の耐震化更新を促進するために種々の検討や法令の改正がなされた(厚生労働省(2007), 厚生労働省健康局水道課(2008))。実際に、2008年の水道ビジョンの改訂においては新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震のような大規模な地震による、断水の頻発を受け、施設の老朽化による水道施設の脆弱性の高まりが指摘された(厚生労働省健康局(2008))。その後、2011年に発生した東日本大震災での甚大な被害をうけ、水道事業に対しても強靭化に対する考え方方が大きく見直された。2013年に公表された新水道ビジョンでは、老朽化した水道施設の更なる耐震化を目指し、これまで掲げていた安全と持続に、自然災害等による被災を最小限にとどめることを目的とした強靭の理念を新たに加え、将来の水道の理想像として示した(厚生労働省健康局(2013))。また、東日本大震災以降の被害分析により水道施設の耐震化及び更新計画の策定方法を改訂し、より具体的な対策推進を進めてきた(平成25年度管路の耐震化に関する検討会(2014), 厚生労働省健康局水道課(2015))。このような取り組みにより、水道施設の耐震化が推進されており、その実施状況が、浄水施設と基幹管路、配水池の耐震化状況が水道事業における耐震化の状況調査において2009年度以

降、毎年調査公表されている(厚生労働省健康局水道課(2010, 2011a, 2012, 2013, 2014), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課(2015, 2016), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課(2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), 厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課(2024))。また、基幹管路の更新については、病院や避難所等の重要給水施設へ配水する基幹管路を優先して耐震化を進める方針も提示されており、重要性から耐震化更新に優先度を付けて推進がなされている(厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課(2017))。2018年の水道法の一部改正では、多くの水道施設が更新時期を迎えており、水道施設の点検や維持・修繕、台帳整備が義務化され、施設の計画的な更新が推進されている(国土交通省(2018))。また、令和6年1月1日に発生した能登半島地震での被害をうけ、2024年3月に上下水道地震対策検討委員会が設置され、災害に強い持続可能な水道を目指して今後の地震対策の在り方についての検討がなされている最中である(国土交通省(2024))。

表 2-1 近年の主な水道施設の耐震化に係る水道事業方針についての報告書及び法改正

公表年等	法改正又は報告書名	概説
2004	水道ビジョン	今後の水道事業の課題として、徹底した衛生管理、非常時の安定性、人口減少等の社会変革のなかで持続可能なシステムの基盤を強化することが強調された。
2007	管路の耐震化に関する検討会報告書	高度成長期時代に布設された管路が更新時期を迎えることを踏まえ、更新時に耐震性の高い管路の採用基準やその性能について提示した。
2008	水道施設の技術的基準を定める省令改正	施設の新設及び更新時の耐震化促進のため、水道施設の耐震性能基準が明確にされた。
2008	水道の耐震化計画等策定指針	水道事業者が効率的な施設更新を進められるような支援ツールを提供。
2008	水道ビジョン(改訂)	施設の老朽化による水道施設の脆弱性が高まっているとし、水道施設の耐震化更新推進の重要性が高まっていることを指摘。
2013	新水道ビジョン	東日本大震災での被害を受け、老朽化した水道施設の耐震化の更なる促進が求められる。一方で、今後の人口減少による収入減により、施設の更新が遅れる可能性も指摘。
2014	管路の耐震化に関する検討会報告書	東日本大震災での被害状況を分析し、今後の課題として被害の大きかった設備の耐震化やループ配管等の管路システムの強化、老朽化による腐食の調査等の対応方針がまとめられた。
2015	水道の耐震化計画等策定指針	東日本大震災等における被害状況を踏まえて、水道施設の被害想定方法や地震対策等の内容を充実させた改訂が加えられた。
2017	重要給水施設管路の耐震化計画策定の手引き	災害時に重要な拠点となる病院、診療所、介護や援助が必要な災害時要援護者の避難拠点などを給水優先度が高い施設とし、配水する管路について優先的に耐震化を進める方針が提示された。
2018	水道法改正	水道事業者等への点検を含む施設の維持・修繕を行うこと、台帳の整備を行うことが義務付けられ、水道施設の計画的な更新に努めなければならないこととし、水道施設の更新を見据えた長期的な維持管理計画が求められるようになった。
2024	上下水道地震対策検討委員会	令和6年1月1日に発生した能登半島地震での水道施設の被害をうけ、今後の地震対策のあり方について検討がなされている。

(筆者作成)

図 2-1 に全国の水道施設の耐震適合率の推移を示す。ここで、基幹管路は導水管、送水管、配水管本管といった主要な管路のことを指す。浄水施設、配水池が毎年 2~5% 程度継続して耐震化率が向上し続けているのに対し、基幹管路は平均して 1% 程度しか耐震適合率が上昇していない。日本社会は人口減少の傾向にあることから水道事業も収入の減少により施設の更新が遅れる可能性も指摘されているため(厚生労働省健康局水道課(2008)), 今後も同様の更新ペースを維持すると仮定すると基幹管路の耐震適合が 100% 完了するのは 50 年以上先となる。このようなタイムスケールとなると、当初作成した計画の推進中にも地震に見舞われる可能性が高く、100% 耐震化更新を行うことを想定した更新計画でなく、許容できるリスクを見極めながら、更新途中に被災した場合にも被害を最小化できるような更新計画の策定が必要となる。

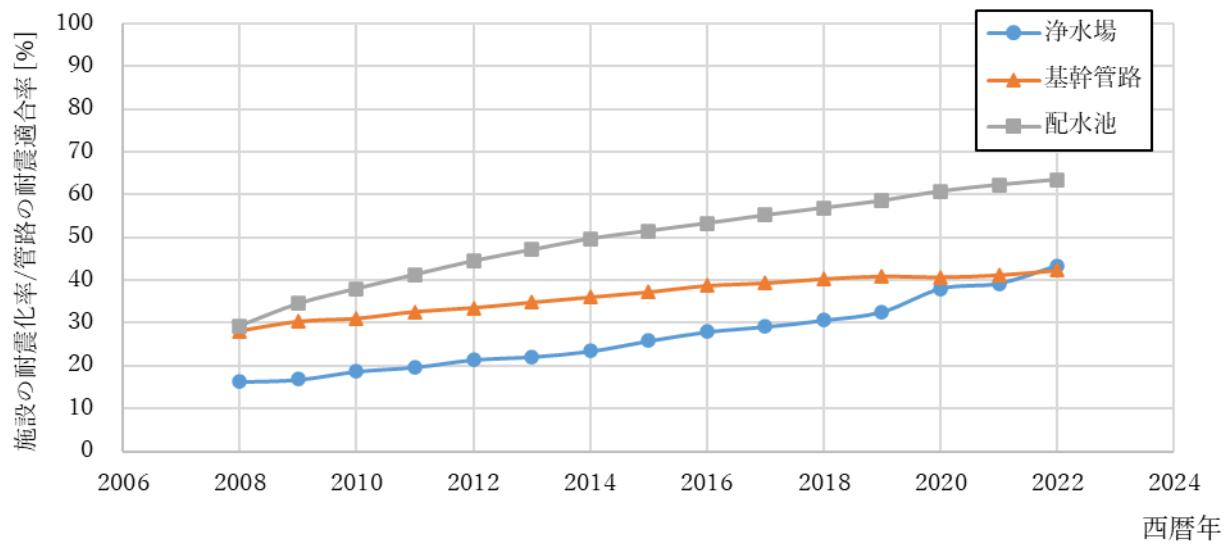


図 2-1 全国の水道施設の耐震化率及び耐震適合率の推移

(厚生労働省健康局水道課(2010, 2011a, 2012, 2013, 2014), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課(2015, 2016), 厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課(2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), 厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課(2024)から筆者が作成。)

2.2.2 管路の更新に関する先行研究の整理

管路の更新計画の評価は既往の地震による被害分析に基づく管路の被害予測研究が基礎となっている。管路の被害予測研究としては、兵庫県南部地震の上水道管路被害を分析したものが基本となっており、管種、管径、微地形、液状化の程度等の諸条件を補正係数で表すことで地震動強さの指標から被害推定式を提案した(磯山ら(1998))。この結果は、(社)日本水道協会によって被害予測手法(日本水道協会(1998))としてとりまとめられており、多くの地震被害想定の調査に用いられている。その後、2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震による管路の被害データを加えた推定式が提案されるなど(丸山・山崎(2009)), 推定式の更新がなされてきた他、予測結果と被害実績の比較検討による精度検証が行われた(永田ら(2015))。東日本大震災での管路の被害についても平成 25 年度管路の耐震化に関する検討会(2014)において分析がなされており、この分析と財団法人水道技術研究センターによる管路被害予測式の研究における成果は、水道の耐震化計画等策定指針での被害の予測手法に反映されて

いる(平成 25 年度管路の耐震化に関する検討会(2014), 財団法人水道技術研究センター(2013), 厚生労働省健康局水道課(2015))。

管路ネットワークの更新計画の評価については, 老朽化を想定した更新効果の分析による更新計画の検討手法の開発(森ら(2009), 國實ら(2015))がなされている他, 更新と維持管理及び漏水事故による損失コストを考慮したライフサイクルコスト評価手法による管路の更新時期の提案がなされている(高橋ら(2017), 賀須井ら(2018))。地震時の脆弱性に着目したものとしては, 國實ら(2016)が配水小管ネットワークを対象として, 地震による断水量の推定, 耐震化による断水量の削減効果を検証した。また, 國實ら(2017)により, 配水小管ネットワークの形状と, 水需要分布という配水区域の地域特性を考慮した更新優先度の順位付けが提案されている。長谷川ら(2019)は, 地震リスクを考慮したライフサイクルコスト評価指標による更新時期の検討を行っており, 地震被害と損失コストを考慮した更新計画の立案に役立てることができる。

これらの研究で検討されている更新計画では, 望ましい管路の更新順序や時期を提案することが可能であるが, 実際の更新の進捗状況による影響は考慮されていない。現状の基幹管路の耐震適合の進捗のように, 計画の完了に数十年を要する場合, 更新の優先度を定めるだけでなく, 更新の推進の速さについても検討する必要がある。すなわち, 現状の基幹管路ネットワークにおいて, 許容できない脆弱性を持つ管路が存在する場合は, リソースを集中させ早急に更新を完了し, その後, 事故確率が低く更新の重要性が高くなき管路を隨時更新していくというような計画が求められる。このような検討を行うためには, 管路の更新による被害の低減効果として, 断水の発生確率と影響度の両方を考慮し, 発生確率が極めて低い断水事象についてはある程度許容して更新の優先度を下げるような対応が必要である。

2.2.3 本章の目的と枠組み

本項では, これまでの背景を踏まえ, 本研究での目的について示す。本研究では, 現状の水道施設の基幹管路の耐震化の進捗状況を踏まえて, 今後数十年間における基幹管路の耐震化更新計画の策定手法を開発する。大阪市の柴島浄水場の基幹管路の更新を対象とし, 構築した手法を用いたケースステディにより, 構築手法の妥当性について検証した。

図 2-2 に, 水道管路更新計画を決定するためのモデルの枠組みを示す。本モデルは大きく三つの手順で構成される。一つ目の基幹管路ネットワークモデルでは, 対象とする基幹管路ネットワークを行列によりモデル化する。行列では管路の接続をノードとエッジにより表現した。基幹管路ネットワークモデルでは管路の破断率の算出に必要な管路データについても整理する。管路データは管路の組成を表す管種と管径, 距離, 埋設されている地形の状態からなる。水量データでは各管路の配水量と世帯への給水量を定義する。管路データの管径が得られない場合は配水量から推定する手法についても示している。次に, 地震被害推定モデルにより地震発生時の断水発生確率と断水人口を算出した。ここでは, 震度ごとの発生確率と液状化危険度からなる地震データを定義し, 基幹管路ネットワークモデルで定義した管路データを用いて, 基幹管路それぞれの破断率を算出した。断水量の算出はモンテカルロ法を用いて行った。管路の破断率をもとに, 想定する地震強度において基幹管路ネットワークモデルの各管路が破断するか否かを判定し, 断水量を算出した。この操作を繰り返し, 断水の発生確率と断水人口を算出した。最後に更新優先度評価により, 本研究で設定した更新シナリオにより, 管路の耐震化を行った場合に断水発生確率と断水人口がどのような推移で低減するかを算出した。更新優先度評価では更新後の管路の破断率

と更新費用を定義し、更新シナリオで定めた順序で基幹管路の更新を行った。地震被害推定モデルにおいて更新した管路の破断率を更新後の値に変更し、同様の手順で断水発生確率と断水人口を算出した。これを全ての基幹管路が更新されるまで繰り返し、断水発生確率と断水人口、また応急給水需要量がどのように変化するかが更新シナリオ別に比較することにより、更新優先度の評価指標の優位性について考察した。

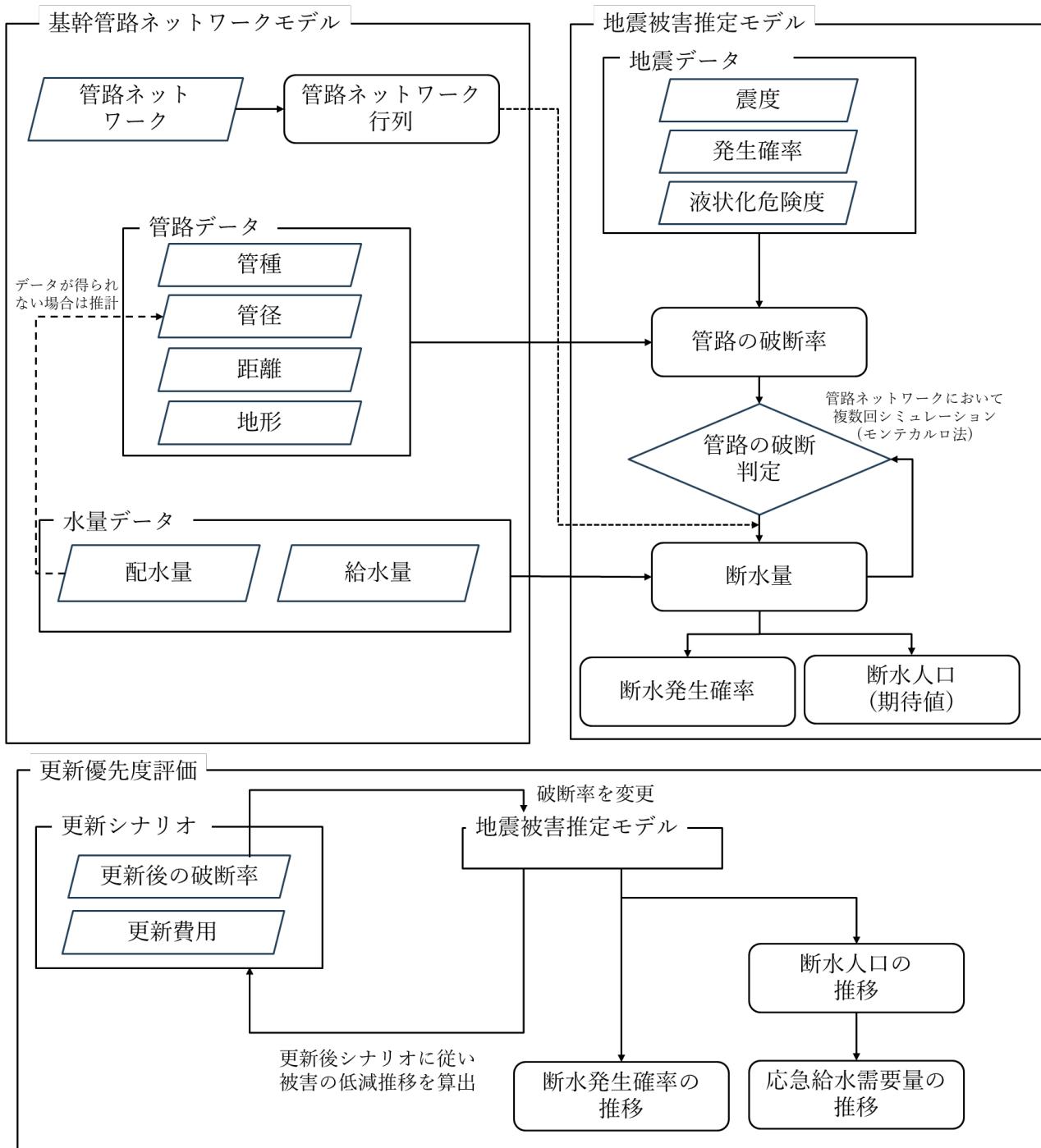


図 2-2 管路更新計画評価モデルの枠組み

2.3 リスク評価の方法

2.3.1 基幹管路ネットワークモデル

2.3.1.1 管路ネットワーク行列の構築

配水本管の管路ネットワークにおいて、地域ごとに断水人口を算出するために、管路ネットワークを N_{node} 個のノードによりモデル化し、ノード間の管路による接続を式(2.1)のような $N_{node} \times N_{node}$ の正方行列で表した。ここで $a_{i,j}$ はノード i から j への接続の仕方を表し、水がノード i からノード j に流れる場合、 $a_{i,j}$ を 1 とし、そうでなければ $a_{i,j}$ は 0 となる（式(2.2)）。

$$A = (a_{i,j}) = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,N_{node}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_{node},1} & \cdots & a_{N_{node},N_{node}} \end{pmatrix} \quad \text{式(2.1)}$$

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1; \text{ノード } i \text{ からノード } j \text{ への流れがある場合} \\ 0; \text{ノード } i \text{ からノード } j \text{ への流れがない場合} \end{cases} \quad \text{式(2.2)}$$

変数	意味
A	管路ネットワークの接続行列
$a_{i,j}$	ノード i からノード j への接続を表す係数
N_{node}	管路ネットワークのノード数

2.3.1.2 管路データの定義

本項では管路データの定義方法を示す。管種はダクトイル鉄管、鉄管、硬質塩化ビニル管、鋼管、石綿セメントからなり、基幹管路で用いられている素材に基づいて設定した。また、地形は磯山ら(1998)が管路の被害件数の推定式作成時用いた区分を使用し、改変山地、段丘、谷・旧水部、沖積平野、その他の5種類とした。管径と管路の距離は実際の調査結果または統計等により設定するが、ここでは、管径がデータから得られない場合の推定方法について示す。日本水道協会(2012)は、配水本管の管径を決定する際に時間あたりの最大配水量(計画時間最大配水量)を想定し、配水本管の最小動水圧としては0.15～0.20MPaの範囲を標準として設計を行っている。これらの条件を満たすように管径を決定した(日本水道協会(2012))。最小動水圧はHazen-Williamsの式(式(2.3))により算出した摩擦損失水頭から計算した。各管路について最小の管径を50mmとして、50mm間隔で直径を大きくした際に、最小動水圧を満たすような管径を設定した。 H を圧力に換算して動水圧とみなし、水の密度を1.00 g/cm³として100mあたり1MPaと計算した。

$$H = 10.666 \cdot C^{-1.85} \cdot D^{-4.87} \cdot Q^{1.85} \cdot L \quad \text{式(2.3)}$$

変数	意味
H	摩擦損失水頭 [m]
C	流速係数
D	管径 [m]
Q	流量 [m ³ /s]
L	管路長 [m]

2.3.1.3 水量データの定義

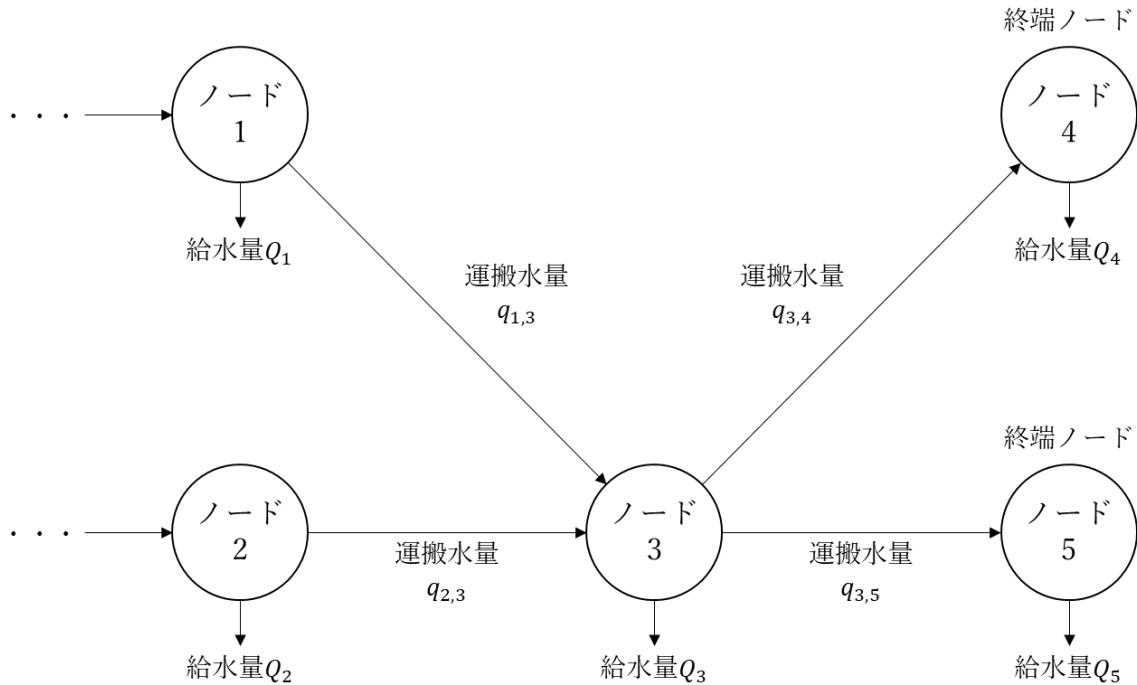
各ノードに分布する人口は、50mの人口メッシュマップ(政府統計の総合窓口(e-Stat)(2017))を参考に設定した。メッシュ内にノードが存在する場合はそのノードから配水され、存在しない場合は最も近いノードから配水されると仮定し、メッシュマップをノードに振り分け、メッシュの合計の人口をそのノードにおける給水人口と定義した。

給水量の算出には1人あたり1日に供給しなければならない水の最大量を意味する、1時間当たりの計画最大給水量(計画時間最大配水量)の統計データを使用した(日本水道協会(2012))。式(2.4)では、管路 i,j を流れる運搬水量 $q_{i,j}$ [L/day]の算出方法を表しており、ノード j に接続している下流の管路の運搬水量とノード j が配水小管及び家庭に供給している給水量 Q_j [L/day]の合計により算出される。ノード j の下流に基幹管路が接続していない場合(終端ノード)は、運搬水量 $q_{i,j}$ は給水量 Q_j [L/day]と等しくなる。ただし、ノード j に複数の管路から配水がされている場合は、それらの管路で同じ水量が運搬されていると仮定し、運搬水量 $q_{i,j}$ [L/day]を求めた。式(2.5)ではノード j の給水量 Q_j [L/day]を算出しており、計画一人一日最大給水量 Q_a [L/day]にノード j の給水する計画人口 Pop_j を乗じることにより求めた。図2-3にはノード3に二つのノード1と2から配水しており、ノード3から二つのノード5と6に配水している場合の各管路での運搬水量の算出例を示す。

$$q_{i,j} = \frac{\sum_k^{N_{node}} a_{j,k} q_{j,k} + Q_j}{\sum_k^{N_{node}} a_{kj}} \quad \text{式(2.4)}$$

$$Q_j = Q_a \times Pop_j \quad \text{式(2.5)}$$

変数	意味
$q_{i,j}$	管路 <i>i,j</i> を流れる運搬水量 [L/day]
N_{node}	管路ネットワークのノード数
Q_j	ノード <i>j</i> が配水小管及び家庭に供給している給水量 [L/day]
Q_a	計画一人一日最大給水量 [L/day]
Pop_j	ノード <i>j</i> の給水する計画人口
N_{node}	ノード数



この図において、 $q_{1,3} = q_{2,3} = \frac{1}{2}(q_{2,5} + q_{3,4} + Q_3)$, $q_{3,4} = Q_4$, $q_{3,5} = Q_5$ となる

図 2-3 配水量の計算例

式(2.6)と式(2.7)により管路*i,j*を流れる配水量の最大値(計画時間最大配水量)を計算した。日本水道協会(2012)が示す既往の実績に従い、 K_{time} は配水のピーク時間を表す補正係数であり、2008年の夏期の全国46都市411箇所の配水区域の結果を回帰分析することで導き出されており(日本水道協会(2012))、式(2.7)のように計画一日最大給水量から計算される。

$$u_{i,j} = K_{time} \times \frac{q_{i,j}}{24 \times 1000} \quad \text{式(2.6)}$$

$$K_{time} = 1.8489 \left(\frac{q_{i,j}}{24 \times 1000} \right)^{-0.0145} \quad \text{式(2.7)}$$

変数	意味
$u_{i,j}$	管路 <i>i,j</i> の計画時間最大配水量 [L]
K_{time}	配水量ピーク時間の補正係数

2.3.2 地震被害推定モデル

2.3.2.1 地震データの定義

本研究では、管路の破断率を算出する際の地震強度指標として、最大地表速度(PGV)を用いた。式(2.8)により計測震度から最大地表速度(PGV)を算出した。式(2.8)は過去に発生した地震の強震記録をもとに推定された(磯山ら(1998))。ここで I_l は計測震度、 PGV は最大地表速度 [cm/s]を示しており、本研究では震度5弱から7の5つの区分を設け、各震度区分*l*における計測震度 I_l の値を表2-2に示す。 I_l には気象庁(1996)が定める震度の範囲の中央値を用いた。

$$I_l = 2.002 + 2.603 \times \log(PGV) - 0.213 \times \{\log(PGV)\}^2 \pm 0.344 \quad (I_l \geq 4) \quad \text{式(2.8)}$$

変数	意味
l	震度区分
I_l	計測震度
PGV	最大地表速度 [cm/s]

表2-2 本研究で想定する震度区分と計測震度の対応(気象庁(1996))

震度区分(l)	震度階級	震度の範囲	計測震度(I_l)
1	5弱	4.5以上5.0未満	4.75
2	5強	5.0以上5.5未満	5.25
3	6弱	5.5以上6.0未満	5.75
4	6強	6.0以上6.5未満	6.25
5	7	6.5以上	7

液状化危険度の指標には、地層の液状化の可能性を表す指標である PL 値を用い、対象とする水道事業者の立地する地方自治体が公表している液状化危険度の被害想定を用いた。

2.3.2.2 地震動の発生確率の設定

本研究では、気象庁の定める震度階級に基づいて、震度 5 弱以上の地震動を対象としてその発生確率を設定した。地震ハザードステーションにおいて、日本全国の 250m メッシュにおける 2020 年から 30 年間での震度 5 弱、震度 5 強、震度 6 弱、震度 6 強以上の揺れに見舞われる確率(超過確率)が公表されている。これをもとに本研究では 4 つの震度階級の地震動の発生確率を推定した。式(2.9)のようにこれらの計測震度を超過する地震動が発生する確率を設定した(国立研究開発法人防災科学技術研究所(2024))。

$$\begin{aligned} F_l &= \frac{f_l - f_{l+1}}{30} \quad (1 \leq l < 7) \\ &= \frac{f_l}{30} \quad (l = 7) \end{aligned} \quad \text{式(2.9)}$$

変数	意味
F_l	対象地で計測震度 l の地震が発生する確率 [/year]
f_l	対象地で計測震度 l 以上の地震が今後 30 年の間に発生する確率 [-]
l	震度区分

2.3.2.3 管路の破断率の推定

管路の被害件数は、磯山ら(1998)が提案した被害推定式(式(2.10), 式(2.11))を用いて算出した。特に、使用数の多いダクタイル鉄管の場合、標準被害率が式(2.11)のように表されている(磯山ら(1998))。

$$E_{i,j} = C_d \times C_l \times C_g \times C_p \times L \times R(PGV) \quad \text{式(2.10)}$$

$$C_p \times R(PGV) = 2.03 \times 10^{-5} \times (PGV - 15)^{2.19} \quad \text{式(2.11)}$$

変数	意味
$E_{i,j}$	管路 i,j の被害件数
C_d	管径に係る補正係数
C_l	液状化に係る補正係数
C_g	地形に係る補正係数
C_p	管種に係る補正係数
$R(PGV)$	標準被害率関数

本研究で用いた補正係数を表 2-3 に示す(磯山ら(1998))。直径 500mm 以上のパイプライン、鋼管、石綿セメント管については被害数が少ないため、補正係数を暫定的に参考値として設定されている値を用いた(磯山ら(1998))。また、液状化の補正係数については、都道府県等の被害想定が公表している液状化危険度(PL 値)を評価指標として、液状化の可能性が高いとされる 15 より大きい場合を全体的、5 より大きく 15 以下の場合を部分的な液状化であるとし、補正係数を決定した(岩崎ら(1980))。

表 2-3 管路の破断率の補正係数(磯山ら(1998))

地形	補正係数	管径 [mm]	補正係数
改変山地	1.1	~75	1.6
段丘	1.5	100~150	1.0
谷・旧水部	3.2	200~450	0.8
沖積平野	1.0	500~	0.5
その他	0.4		
管種	補正係数	液状化	補正係数
ダクタイル鉄管	0.3	なし	1.0
鉄管	1.0	部分的	2.0
硬質塩化ビニル管	1.0	全体的	2.4
鋼管	0.3		
石綿セメント管	0.3		

管路で一か所の破断が発生する確率は、式(2.12)を用いて、破断の発生個所数からポアソン確率を用いて計算した。管路に少なくとも 1 つの破断があると送水できなくなると仮定し、式(2.13)のように指数分布により、 $P_{f_{i,j}}$ を管路*i,j*の破断率として定義した。

$$P_{i,j}(X = k_{breaks}) = \exp(-E_{i,j}) \times \frac{(E_{i,j})^{k_{breaks}}}{k_{breaks}!} \quad \text{式(2.12)}$$

$$P_{f_{i,j}} = 1 - P_{i,j}(X = 0) = 1 - \exp(-E_{i,j}) \quad \text{式(2.13)}$$

変数	意味
$P_{i,j}(X)$	管路 <i>i,j</i> で <i>X</i> 箇所の破断が発生する確率
k_{breaks}	管路の破断個所数
$P_{f_{i,j}}$	管路 <i>ij</i> の破断率

2.3.2.4 断水発生確率・断水人口の推定

断水率は、各ノードに水が供給されない頻度を計算するモンテカルロ法で算出した。図 2-4 にノード別の断水人口を算出するためのモンテカルロ法のアルゴリズムを示す。地震の発生回数を 1,000 回として、地震発生時に管路ネットワークの全ての管路に対して破断率に従い破断の有無を判定した。判定された管路ネットワークの状態を、今回の地震発生後の管路ネットワーク状態と規定し、断水量を算出した。この試行を地震の発生回数で繰り返し、特定の断水量を超過する回数を合計の断水量を地震発生回数で割ることで断水量を算出した。本研究では、給水量の 1%を超える断水が起こった場合を断水と判定して、断水発生回数のカウントを行った。

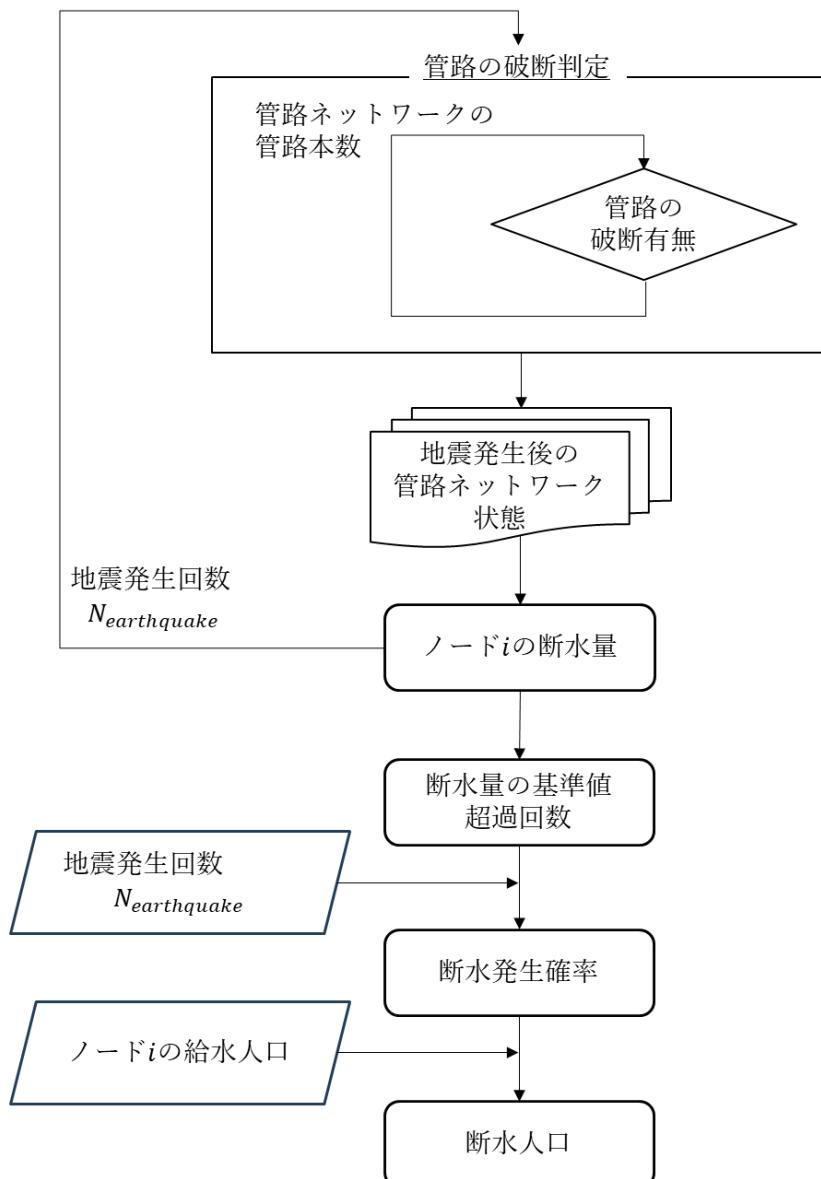


図 2-4 モンテカルロ法によるノードの断水人口算出アルゴリズム

ノードに水が供給されない場合をそのノードの断水とみなし、式(2.14)のように断水発生確率として計算した。モンテカルロ法において、ある事象の発生確率 P_D は(式(2.15))に示すように試行回数 $N_{earthquake}$ のうち特定の事象が起きた回数 N_D の比により表せられる。これにより基幹管路ネットワーク全体で給水量のうち 5%未満が断水する確率と 30%未満が断水する確率と 50%未満が断水する確率を算出した。破断したパイプラインには水が流れないと仮定し、配水量 $b_{i,j}$ は、式(2.16)のように破断が起こっていない場合のパイプラインの 1 日の最大給水量[L/day]によって決定される。

$$P_{D_i} = \frac{N_{D_i}}{N_{earthquake}} \quad \text{式(2.14)}$$

$$P_D = \frac{N_D}{N_{earthquake}} \quad \text{式(2.15)}$$

$$b_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\sum_k^{N_{node}} q_{i,k} + Q_i} \quad \text{式(2.16)}$$

変数	意味
P_{D_i}	ノード <i>i</i> における断水発生確率
N_{D_i}	ノード <i>i</i> での断水の発生回数
$N_{earthquake}$	想定する地震の発生回数(モンテカルロ法における試行回数)
P_D	モンテカルロ法における事象の発生確率
N_D	モンテカルロ法における事象の発生回数
$b_{i,j}$	ノード <i>i</i> からノード <i>j</i> への配水量 [L/day]
Q_i	ノード <i>i</i> が配水小管及び家庭に供給している給水量 [L/day]

断水人口 Pop_{D_i} は、破断率を用いた各地域の断水発生確率 P_{D_i} に、ノードごとに分布する人口 Pop_i を乗じて算出した(式(2.17))。

$$Pop_{D_i} = P_{D_i} \times Pop_i \quad \text{式(2.17)}$$

変数	意味
Pop_{D_i}	ノード <i>i</i> での断水人口
P_{D_i}	ノード <i>i</i> における断水発生確率
Pop_i	ノード <i>i</i> での給水人口

2.3.2.5 応急給水能力と断水時水需要の推算

水道管の破断による断水発生時、水道事業者は応急給水を実施する。本研究では、断水が発生した地域の広域避難所等に仮設水槽を設置し、周辺住民が各家庭用に上水を補充することを想定した。仮設水槽への注水にはタンク車等の応急給水車を用いる。応急給水車は浄水場や配水場等の補給場所で上水の補給後、広域避難所の仮設水槽への注水を行いながら移動し、タンクの容量が空になった後に再び補給場所で補給を行うことを繰り返すものとした。大都市水道局大規模災害対策検討会(2024)では、応急給水

車による一日あたり給水可能な量を式(2.18)のように試算している。本研究では、本式により算出されるEWSを断水発生時に浄水施設が給水可能な量、すなわち浄水施設の一日あたりの応急給水能力と定義した。

$$EWS = \sum_k^{N_{emergency}} \left(\frac{T_{work}}{T_{fill} + T_{move} + T_{supply} + T_{return}} \times V_{emergency_k} \right) \quad \text{式(2.18)}$$

変数	意味
EWS	1日あたりの応急給水能力 [m ³ /day]
$N_{emergency}$	断水発生時に利用可能な応急給水車の台数
T_{work}	応急給水の一日あたりの作業時間 [min]
T_{fill}	給水車への注水時間の平均値 [min]
T_{move}	給水車の給水基地から応急給水の対象とする施設までの移動時間の平均値 [min]
T_{supply}	応急給水の作業時間の平均値 [min]
T_{return}	応急給水の対象とする施設から給水車の給水基地までの移動時間の平均値 [min]
$V_{emergency_k}$	応急給水車 k の給水容量 [m ³]

断水発生時に必要な応急給水量は式(2.19)のように断水人口と地震発生時の一人一日あたりに必要な目標水量から水需要量を算出した。

$$EWD = \sum_i^{N_{node}} (Q_{demand} \times Pop_{D_i}) \quad \text{式(2.19)}$$

変数	意味
EWD	1日あたりの目標給水能力 [m ³ /day]
Q_{demand}	断水発生時の一人一日あたりの目標水量 [m ³ /day・人]

式(2.20)に示すように、浄水施設の応急給水能力と一日あたりの目標給水能力の比率からハザード比を算出した。ハザード比が1より大きい場合、地震時の水道管の断水により必要となる応急給水量は浄水施設が保有する給水能力を上回っているため、配水区域の住民への供給水が不足するリスクが高いと判断できる。一方で、ハザード比が1より小さい場合は、浄水施設の保有する応急給水能力により十分な水量の供給が維持できる可能性が高いと判断できる。

$$HQ_E = \frac{EWD}{EWS} \quad \text{式(2.20)}$$

変数	意味
HQ_E	断水時の応急給水におけるハザード比

2.3.2.6 更新費用の推算

一般的な開削工法でパイプラインを耐震化する場合の工事費は、式(2.21)用いて算出した。更新対象は車道に埋設されるダクタイル鉄管路の耐震継手化で昼間施行を想定した(厚生労働省健康局水道課(2011b))。管路が河川を横断している場合は、埋設管路の建設用の式ではなく、パイプビーム形式の水道橋の昼間施行に対し設定された更新費用の算出式(式(2.22))を適用した(厚生労働省健康局水道課(2011b))。

$$CS_{buried} = 51.4912 \times \exp(0.0026 \times D) \quad \text{式(2.21)}$$

$$CS_{bridge} = 2.0676 \times D + 313.4953 \quad \text{式(2.22)}$$

変数	意味
CS_{buried}	埋設管路の長さ [m]あたりの建設費 [千円] (税込み)
CS_{bridge}	水道橋の長さ [m]あたりの建設費 [千円] (税込み)
D	管径 [mm]

2.3.3 更新優先度評価

表 2-4 に更新優先度評価で設定した更新シナリオを示す。更新シナリオはシナリオ毎の断水発生確率と断水人口を管路の耐震化が行わないシナリオ(Base シナリオ)と比較することで、シナリオの優位性を評価した。破断率シナリオでは、断水事故の発生確率を低減させることを意図し、地震における機能喪失の確率が高いものから順に更新することを想定した。配水量シナリオでは、断水時の事故の影響度を低減させることを意図し、機能喪失時に被害が大きくなるものから順に更新することを想定した。Risk score シナリオでは、破断率と配水量の両立を意図したシナリオである。國實ら(2017)は、管路の破断率と給水量を両立する指標として、Risk score ($F_{i,j}$) を用いて、管路の更新順序を決定した。この指標は、ブロック内の破断したパイプラインの推定数に単位面積当たりの平均給水量とブロックの非耐震化率を乗じることにより、以下の式(2.23)のように算出される(國實ら(2017))。

$$F_v(k_{block}i) = P_d(k_{block}i) \times K_q(k_{block}) \times (100 - S_a(k_{block})) \quad \text{式(2.23)}$$

変数	意味
$F_v(k_{block}i)$	管路 <i>i</i> の Risk score
$P_d(k_{block}i)$	k_{block} における管路 <i>i</i> の推定破断点数
$K_q(k_{block})$	k_{block} の単位面積当たりの給水量
$S_a(k_{block})$	単位面積当たりの給水量

この考え方を基幹管路の場合に適用し、管路の運搬水量を水需要の指標とし、管路ごとに式(2.24)のように管路*i,j*の Risk score $F_{i,j}$ を算出した。

$$F_{i,j} = P_{f_{i,j}} \times q_{i,j} \quad \text{式(2.24)}$$

変数	意味
$F_{i,j}$	管路の Risk score
$P_{f_{i,j}}$	管路 <i>ij</i> の破断率
$q_{i,j}$	管路 <i>ij</i> の運搬水量

表 2-4 管路の更新シナリオと更新順序の指標

シナリオ名	更新順序の指標
Baseシナリオ	-
破断率シナリオ	破断率 ($P_{f_{i,j}}$)
配水量シナリオ	配水量 ($b_{i,j}$)
Risk scoreシナリオ	Risk score ($F_{i,j}$)

2.4 更新の優先度決定方法のケーススタディ

2.4.1 ケーススタディの条件

2.4.1.1 基幹管路ネットワークモデルの設定

本研究では、大阪府大阪市の北部に配水を行っている柴島浄水場の給水区域の基幹管路ネットワークを対象に解析を行った。図 2-5 は、大阪市水道局 100 年史に基づいて作成した柴島浄水場の配水本管の構成である(大阪市水道局(1996))。ノード 1 とノード 2 は柴島浄水場を表しており人口が集中する大阪市北部へ複数のルートで配水している。水は番号の小さいノードから大きいノードへ配水しており、図中の矢印は配水の方向を示す。

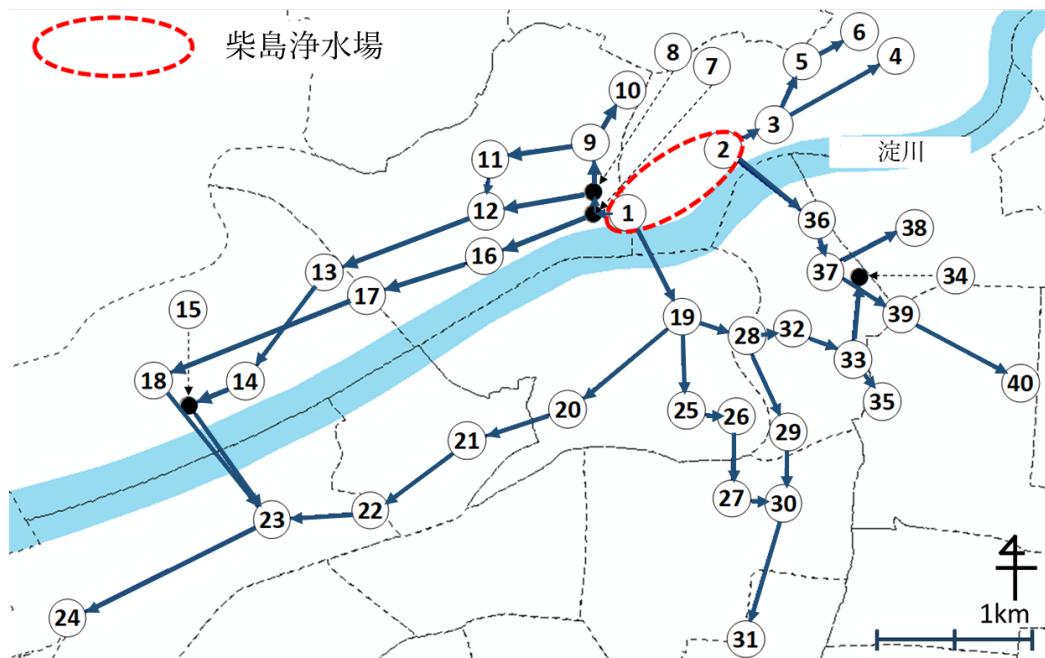


図 2-5 大阪市柴島浄水場のネットワーク図

表 2-5 に管路性状と配水量の推定結果を、表 2-6 に各ノードの給水量の推定結果を示す。管路 No. は上流側のノード、下流側のノードを示す。管路の長さは柴島浄水場のネットワーク図から算出し、給水量及び配水量は大阪府の 1 人 1 日あたりの最大給水量をもとに算出した。ノード 32 の給水量は、周囲のノードと近接しており、給水量が少量となるため、今回の解析では 0 として扱った。

表 2-5 基幹管路の管路データ及び配水量データ

管路No.	管径[m]	距離[m]	配水量[L/day]	管路No.	管径[m]	距離[m]	配水量[L/day]
1-7	0.9	4.4×10^2	2.1×10^8	19-20	0.95	2.0×10^3	1.1×10^8
1-19	1.35	1.7×10^3	2.9×10^8	19-25	0.7	1.5×10^3	5.7×10^7
2-3	0.75	7.7×10^2	9.5×10^7	19-28	0.8	8.4×10^2	1.1×10^8
2-36	1	1.6×10^3	1.3×10^8	20-21	0.85	1.4×10^3	9.5×10^7
3-4	0.65	1.9×10^3	4.1×10^7	21-22	0.7	1.6×10^3	5.1×10^7
3-5	0.6	1.0×10^3	4.7×10^7	22-23	0.4	1.3×10^3	1.6×10^7
5-6	0.45	8.5×10^2	2.8×10^2	23-24	0.3	3.0×10^3	5.4×10^6
7-8	0.75	3.4×10^2	1.6×10^8	25-26	0.55	6.3×10^2	4.7×10^7
7-16	0.7	1.7×10^3	5.8×10^7	26-27	0.45	1.2×10^3	3.9×10^7
8-9	0.75	7.4×10^2	1.1×10^8	27-30	0.4	6.9×10^2	1.9×10^7
8-12	0.6	1.4×10^3	4.1×10^7	28-29	0.5	1.6×10^3	2.5×10^7
9-10	0.5	9.1×10^2	3.1×10^7	29-30	0.35	1.1×10^3	1.9×10^7
9-11	0.7	1.3×10^3	6.1×10^7	30-31	0.5	2.2×10^3	1.9×10^7
11-12	0.55	8.5×10^2	4.2×10^7	28-32	0.6	6.0×10^2	6.2×10^7
12-13	0.85	2.2×10^3	7.3×10^7	32-33	0.65	8.6×10^2	6.2×10^7
13-14	0.6	2.0×10^3	3.2×10^7	33-34	0.4	1.2×10^3	1.5×10^7
14-15	0.45	7.7×10^2	2.5×10^7	33-35	0.5	7.7×10^2	3.4×10^7
15-23	0.45	2.0×10^3	1.6×10^7	36-37	0.8	7.3×10^2	1.2×10^8
16-17	0.65	1.5×10^3	4.8×10^7	37-38	0.6	1.3×10^3	4.1×10^7
17-18	0.6	2.9×10^3	2.8×10^7	37-39	0.7	1.1×10^3	6.5×10^7
18-23	0.5	2.6×10^3	1.6×10^7	39-40	0.7	1.9×10^3	5.3×10^7

表 2-6 ノードの給水量データ

ノード番号	給水量[L/day]	ノード番号	給水量[L/day]	ノード番号	給水量[L/day]	ノード番号	給水量[L/day]
1	7.7×10^6	11	2.0×10^7	21	4.4×10^7	31	1.9×10^7
2	1.1×10^7	12	9.9×10^6	22	3.5×10^7	32	0
3	6.2×10^6	13	4.0×10^7	23	4.3×10^7	33	1.3×10^7
4	4.1×10^7	14	7.6×10^6	24	5.4×10^6	34	1.5×10^7
5	1.9×10^7	15	8.8×10^6	25	1.0×10^7	35	3.4×10^7
6	2.8×10^7	16	9.6×10^6	26	7.5×10^6	36	1.2×10^7
7	4.5×10^6	17	2.0×10^7	27	2.0×10^7	37	1.3×10^7
8	8.7×10^6	18	1.3×10^7	28	2.3×10^7	38	4.1×10^7
9	1.3×10^7	19	2.1×10^7	29	6.1×10^6	39	1.1×10^7
10	3.1×10^7	20	1.1×10^7	30	1.9×10^7	40	5.3×10^7

給水量及び配水量は本研究の解析対象地である大阪市では、上水道管路の総延長のうち、ダクタイル鋳鉄管が最も多く使われており、全体のおよそ 77 %を占めている。一方で、耐震化率は 27.6%に留まっている(大阪市水道局(2023))ことから管種は全て耐震化されていないダクタイル鋳鉄管と仮定した。耐震化はダクタイル鋳鉄管を耐震化継手付きのものに更新することを想定した。大阪市では、上町台地のある一部の地域を除き、地盤高さの変動は 5m 以下である。したがって、基幹管路ネットワーク全体が沖積平野にあると設定し、地盤高による圧力変動は無視できると仮定した。流速係数は、管路の内面の粗さおよび管路の曲がりと分岐の数によって変化するが、屈曲部損失などを含んだ管路全体の値として用いられる $C=110$ を用い、式(2.3)に適用した(日本水道協会(2012))。

応急給水の作業時間は大都市水道局大規模災害対策検討会(2024)での設定例を参考し、表 2-7 のように設定した。また、応急給水車の容量と保有台数については、大阪市水道局(2023)が公開している 2021 年時点の応急給水車のデータを用い、表 2-8 のように設定した。断水発生時の一人一日あたりの目標水量は、厚生労働省健康局水道課(2015)が地震発生～3 日までの目標水量として設定している 3L/人・day の値を用いた。

表 2-7 応急給水の作業時間の設定

応急給水の一日あたりの作業時間 [min]	720
給水車への注水時間の平均値 [min]	15
給水車の給水基地から応急給水の対象とする施設までの移動時間の平均値 [min]	20
応急給水の作業時間の平均値 [min]	15
応急給水の対象とする給水車の給水基地までの移動時間の平均値 [min]	20

表 2-8 大阪市水道局の応急給水車保有量

形状	容量 [m ³]	台数
加圧ポンプ	3.85	1
	3.8	1
	3.5	3
	3.3	3
	2	7
	1.8	1

2.4.1.2 地震被害推定モデルにおける地震データの設定

表 2-9 に対象地域の各震度階級の超過確率と発生頻度[/year]を示す(国立研究開発法人防災科学技術研究所(2024))。本研究では過去の地震において管路の破断が報告されている震度 5 弱以上を想定し、発生頻度を算出した。本来震度の超過確率はメッシュ単位で地域ごとに算出されているため、管路ごとに震度の発生頻度を算出することができるが、計算負荷の都合上基幹管路ネットワーク全ての管路で同じ値とし、柴島浄水場が立地している大阪市東淀川区での推計結果を参照した(国立研究開発法人防災科学技術研究所(2024))。

表 2-9 柴島浄水場排水区域における震度の超過確率と発生頻度

	超過確率 [%]	発生頻度 [/year]
震度5弱	89.3	5.6×10^{-3}
震度5強	72.5	1.4×10^{-2}
震度6弱	29.2	8.1×10^{-3}
震度6強	5	1.7×10^{-3}

また、液状化危険度についても基幹管路ネットワーク全体で一定の値とし、柴島浄水場の給水エリアでは、配水区域のほぼ全域で高い液状化危険度が想定されている(大阪府(2017))ことから、PL 値を 20 とし、 C_l は 2.4 と仮定した。

2.4.2 Base シナリオにおける断水発生確率と断水人口の算出結果

図 2-6 は、Base シナリオにおける各ノードの断水発生確率と浄水場からの距離の関係を示す。各ノードまでの距離は、浄水場からノードへの配水に使用される管路の総延長を表す。ノードまでの経路が複数ある場合は、各経路の距離の平均をとり、この値を柴島浄水場からの距離とみなした。ノード 7 は、断水発生確率が最も小さく、浄水場からの管路の総延長が短い。対照的に、ノード 22 は単一の経路で配水されているノードのうち、浄水場から最も遠くに位置しており、断水発生確率が最も高い。ノード 14, 15, 23, 24, 31 は浄水場からの距離はノード 22 よりも遠いが、複数の経路により配水されているため、断水発生確率は低くなった。

図 2-7 は、予想断水人口と柴島浄水場からの距離の関係を示している。原点は柴島浄水場に直結しているノード 1 とノード 2 である。断水人口は、式(2.17)に示すように、断水率と人口の積から計算される。したがって、ノード 40, 21, 22 のような断水率と人口が大きいノードで、断水人口が大きく推定された。断水率は柴島浄水場からの距離に比例して増加したが、断水人口は浄水場からの距離と明確な相関は見られなかった。浄水場に近いノードでは断水人口が減少する傾向が見られた。断水率が 0~0.3 の場合、断水人口は 8,000~10,000 人程度の差があり、断水人口への影響は大きい。浄水場から遠いノードでは、断水人口が高いノードと低いノードの差が大きかった。

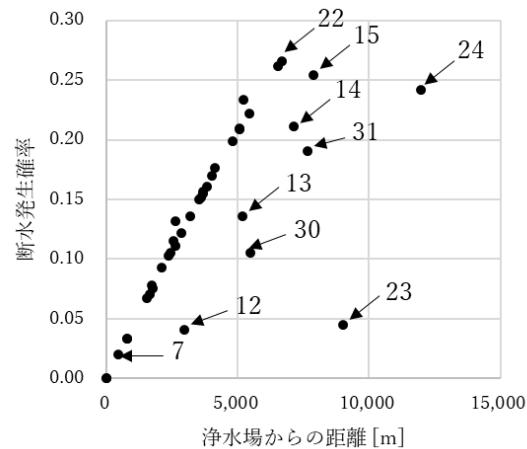


図 2-6 浄水場からノードまでの距離と
断水発生確率の関係

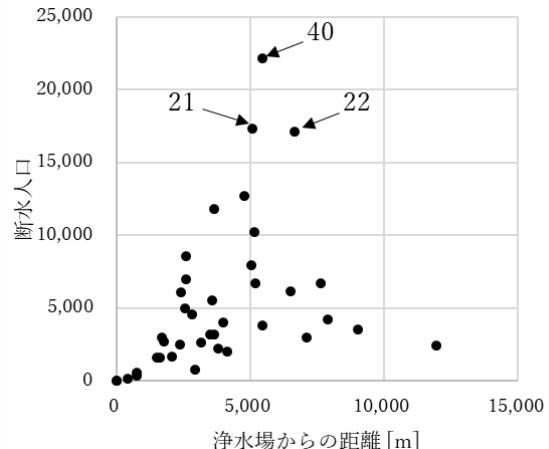


図 2-7 浄水場からノードまでの距離と
断水人口の関係

2.4.3 破断率シナリオ：破断率順での管路の更新

図 2-8 に、管路の長さと破断率の関係を、図 2-9 は、管路の直径と破断率の関係を示している。破断率は震度により変化するが、各管路の破断率の大小関係は変わらないため、ここでは代表として震度 6 弱における結果のみを示す。図 2-8 より、管路長さに対する破断率の関係性は 2通りに分かれ、管路 5-6, 14-15, 15-23, 22-23, 23-24, 26-27, 27-30, 29-30, 33-34 は、他の長さの等しい管路と比較して破断率が大きくなっている。また、管路 12-13, 17-18, 18-23, 30-31 は長さが大きいが管径も大きく、補正係数が小さくなるため、破断率は小さく推定された。図 2-9 より、柴島浄水場の基幹管路は配水量が大きく、ほとんどの管路で管径が 500mm を超えているため、管径の補正係数は 0.5 となる。図 2-8において、破断率が高くなつた管路は 450mm 以下 200mm 以上であったため管径の補正係数は 0.8 となり、破断率が大きくなっている。

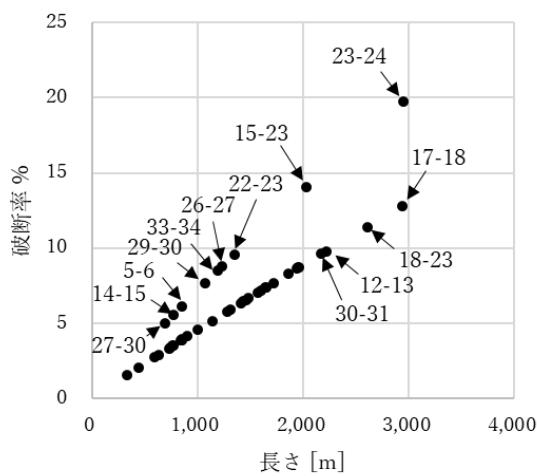


図 2-8 管路の破断率と長さの関係

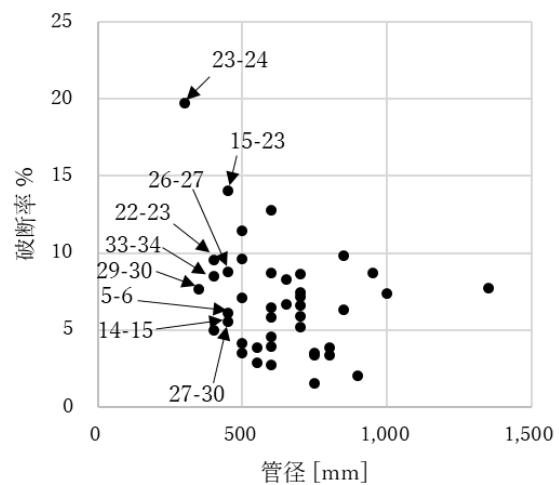


図 2-9 管路の破断率と直径の関係

震度 6 弱における破断率シナリオにおける管路の破断率と更新順序を表 2-10 に示す。更新の優先順位が最も高い管路 23-24 は、管路ネットワークの末端にあった。この管路は配水量も口径も小さく、長さも長いため、破断率が大きい管路となった。管路 15-23 の直径は 450mm 以下 ($C_d=0.8$) であるため、破断率が特に大きかった。管路 25-26, 28-32, 1-7, 7-8 は短く、破断率は 3%未満と小さい。

表 2-10 基幹管路の破断率と破断率シナリオにおける更新順序

更新順序	管路No.	破断率[%]	更新順序	管路No.	破断率[%]
1	23-24	19.73	22	20-21	6.34
2	15-23	14.05	23	5-6	6.13
3	17-18	12.78	24	9-11	5.92
4	18-23	11.42	25	37-38	5.80
5	12-13	9.80	26	26-27	5.58
6	30-31	9.60	27	14-15	5.57
7	22-23	9.56	28	37-39	5.17
8	13-14	8.71	29	27-30	5.00
9	19-20	8.70	30	3-5	4.55
10	39-40	8.62	31	9-10	4.13
11	33-34	8.48	32	32-33	3.91
12	3-4	8.29	33	11-12	3.89
13	1-19	7.69	34	19-28	3.85
14	29-30	7.66	35	33-35	3.53
15	7-16	7.42	36	2-3	3.50
16	2-36	7.36	37	8-9	3.38
17	21-22	7.18	38	36-37	3.34
18	28-29	7.06	39	25-26	2.91
19	16-17	6.67	40	28-32	2.74
20	19-25	6.56	41	1-7	2.04
21	8-12	6.45	42	7-8	1.55

2.4.4 配水量シナリオ：配水量順での管路の更新

表 2-11 に配水量と配水量シナリオにおける更新順序を示す。管路 1-19, 1-7, 7-8, 2-36 は、柴島浄水場に近い管路で水量が最も多い。管路 23-24 はネットワークの末端に位置しており、配水量が最小の管路であり、優先順位は低くなつた。

表 2-11 基幹管路の配水量と配水量シナリオにおける更新順序

更新順序	管路No.	配水量[kL/日]	更新順序	管路No.	配水量[kL/日]
1	1-19	2.94×10^5	22	25-26	4.7×10^4
2	1-7	2.18×10^5	23	3-4	4.13×10^4
3	7-8	1.55×10^5	24	8-12	4.12×10^4
4	2-36	1.31×10^5	25	11-12	4.12×10^4
5	36-37	1.19×10^5	26	37-38	4.08×10^4
6	19-28	1.11×10^5	27	26-27	3.95×10^4
7	19-20	1.06×10^5	28	33-35	3.42×10^4
8	8-9	1.05×10^5	29	13-14	3.24×10^4
9	2-3	9.49×10^4	30	9-10	3.11×10^4
10	20-21	9.46×10^4	31	17-18	2.85×10^4
11	12-13	7.25×10^4	32	5-6	2.83×10^4
12	37-39	6.48×10^4	33	28-29	2.52×10^4
13	28-32	6.23×10^4	34	14-15	2.48×10^4
14	32-33	6.23×10^4	35	27-30	1.92×10^4
15	9-11	6.14×10^4	36	29-30	1.92×10^4
16	7-16	5.77×10^4	37	30-31	1.89×10^4
17	19-25	5.75×10^4	38	15-23	1.60×10^4
18	39-40	5.35×10^4	39	18-23	1.60×10^4
19	21-22	5.05×10^4	40	22-23	1.60×10^4
20	16-17	4.80×10^4	41	33-34	1.54×10^4
21	3-5	4.74×10^4	42	23-24	5.36×10^3

2.4.5 Risk score シナリオ：Risk score 順での管路の更新

表 2-12 に Risk score と Risk score シナリオにおける更新順序を示す。配水量が最も多く、調査対象管路の中で最も長い管路 1-19 の Risk score が最も高かった。ネットワークの末端に近い管路 27-30 は短く、配水量も破断率も小さい。したがって、管路 27-30 の Risk score は低く算出された。

表 2-12 基幹管路の Risk score と Risk score シナリオにおける更新順序

更新順序	管路No.	リスクスコア	更新順序	管路No.	リスクスコア
1	1-19	2.26×10^4	22	32-33	2.44×10^3
2	2-36	9.63×10^3	23	7-8	2.41×10^3
3	19-20	9.19×10^3	24	37-38	2.37×10^3
4	12-13	7.11×10^3	25	15-23	2.24×10^3
5	20-21	6.00×10^3	26	26-27	2.21×10^3
6	39-40	4.61×10^3	27	3-5	2.16×10^3
7	1-7	4.43×10^3	28	18-23	1.82×10^3
8	7-16	4.28×10^3	29	30-31	1.81×10^3
9	19-28	4.26×10^3	30	28-29	1.78×10^3
10	36-37	3.96×10^3	31	5-6	1.73×10^3
11	19-25	3.77×10^3	32	28-32	1.70×10^3
12	17-18	3.64×10^3	33	11-12	1.60×10^3
13	9-11	3.64×10^3	34	22-23	1.53×10^3
14	21-22	3.63×10^3	35	29-30	1.47×10^3
15	8-9	3.57×10^3	36	14-15	1.38×10^3
16	3-4	3.42×10^3	37	25-26	1.37×10^3
17	37-39	3.35×10^3	38	33-34	1.30×10^3
18	2-3	3.33×10^3	39	9-10	1.28×10^3
19	16-17	3.21×10^3	40	33-35	1.20×10^3
20	13-14	2.82×10^3	41	23-24	1.06×10^3
21	8-12	2.66×10^3	42	27-30	9.58×10^2

2.4.6 更新費用の推算結果

図 2-10 と表 2-13 に、単位長さあたりの基幹管路の更新費用を示す。式(2.21)により、埋設管路の更新費用を算出した。また、淀川を横断する管路 1-19, 2-36, 15-23, 18-23 の更新コストは式(2.22)を用いて計算した。淀川を横断する水道橋に位置する管路は、単位長さあたりの更新費用が高いため、管路ネットワークの中で特に更新費用が大きくなつた。埋設管路の中では、管路 1-7, 19-20 が管路ネットワークの上流に位置しており、配水量が高く管径が大きいため、更新費用が高い。

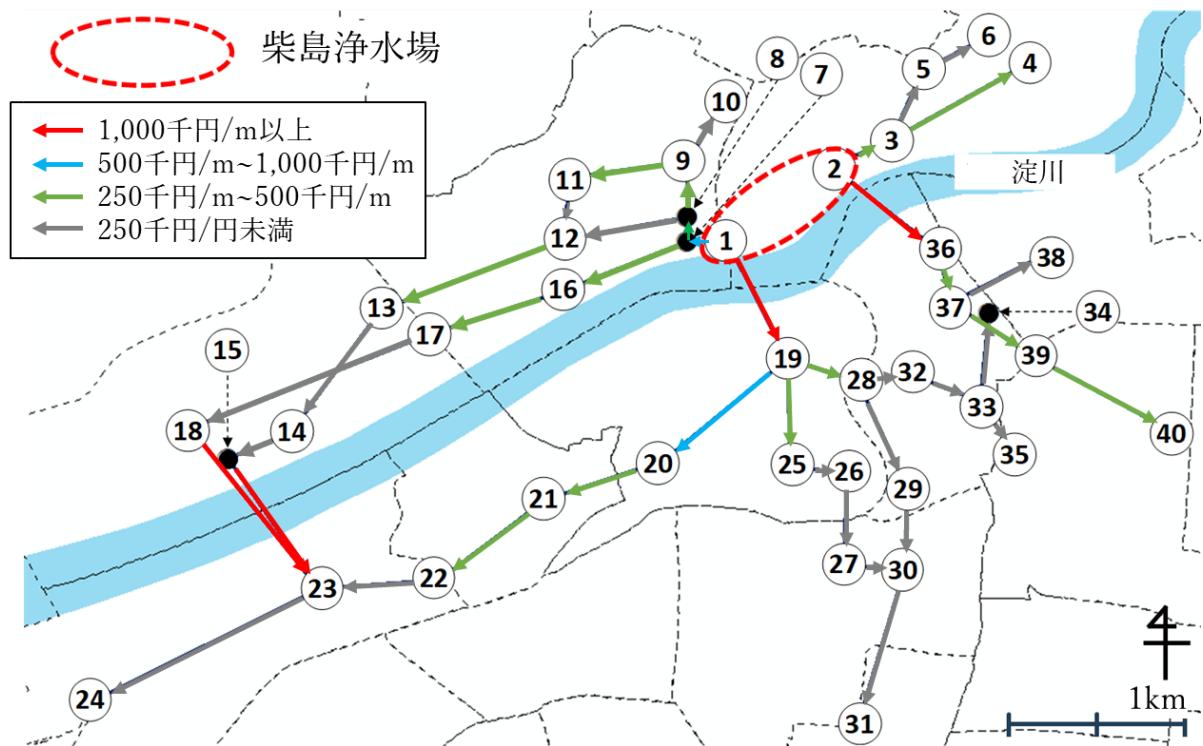


図 2-10 基幹管路の更新費用の推定結果

表 2-13 単位長さ当たりの基幹管路更新費用の算出結果

管路No.	更新費用 [千円/m]	管路No.	更新費用 [千円/m]
1-7	535	19-20	609
1-19	3,105	19-25	318
2-3	362	19-28	412
2-36	2,381	20-21	469
3-4	279	21-22	318
3-5	245	22-23	146
5-6	166	23-24	112
7-8	362	25-26	215
7-16	318	26-27	166
8-9	362	27-30	146
8-12	245	28-29	189
9-10	189	29-30	128
9-11	318	30-31	189
11-12	215	28-32	245
12-13	469	32-33	245
13-14	245	33-34	146
14-15	166	33-35	189
15-23	1,244	36-37	412
16-17	279	37-38	245
17-18	245	37-39	318
18-23	1,347	39-40	318

2.4.7 更新シナリオの比較

2.4.7.1 断水人口・断水発生確率の比較結果

図 2-11 は、シナリオ別の更新コストと断水人口の変化を示している。3つのシナリオとも、すべての管路の更新率が 100%になると断水人口の推定値は 0 になる。比較したシナリオの中では、配水量シナリオが最も更新コストに対する断水人口が小さく、費用対効果が高いことが分かる。したがって、配水量の多い管路から優先的に更新することで、将来の地震による断水人口を低コストで減らすことができ、耐震化による断水人口の低減効果を低コストで得られる。

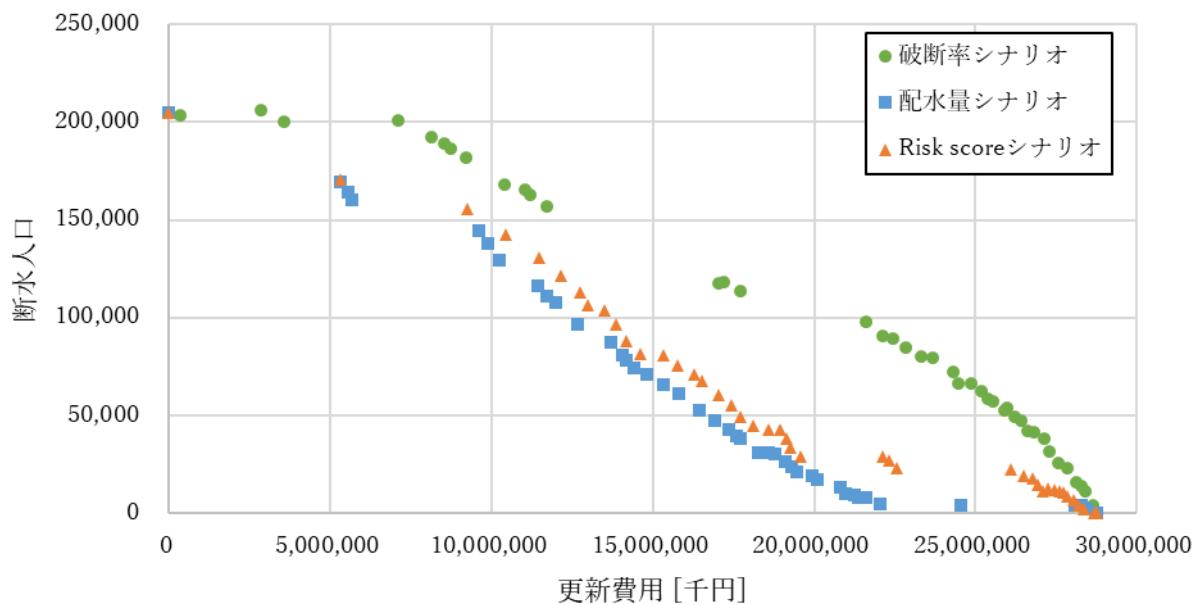


図 2-11 断水人口と管路の更新費用の関係

図 2-12 にシナリオごとの基幹管路の更新比率に対する断水人口の推移を示す。傾向は図 2-12 同様で、配水量シナリオが最も更新による断水人口の低減効果が大きく、破断率シナリオが更新比率に対して断水人口の低減量が小さい。大阪市水道局(2023)における、現状の基幹管路の耐震管率(33.8%)と、耐震適合管の比率(66.5%)を示す。耐震管は耐震継手のダクタイル鉄管と鋼管で構成されており、耐震適合管は耐震管以外でも、周辺地盤の性状などから耐震性があると評価できる管路で構成される。これを本研究で比較した 3 つの更新シナリオと比較すると、破断率シナリオは 33.8% の更新が終わった時点での断水人口が約 170,000 人であるのに対し、配水量シナリオと Risk score シナリオはほぼ同等で 6~70,000 人程度と破断率シナリオと更新の進捗度は同等であるのに対し、断水人口には 2~3 倍程度開きがある。同様に、耐震適合管が耐震継手付きのダクタイル鉄管と同等の耐久性を持っていると仮定した場合、破断率シナリオでの断水人口はおよそ 80,000 人、配水量シナリオと Risk score シナリオがおよそ 20,000 人程度である。したがって、基幹管路において、管路単体の脆弱性をもとに更新順序を決定すると、水需要量を考慮した配水量シナリオと Risk score シナリオのような更新計画と比べて対策の効果が表れるまでに時間がかかる可能性がある。

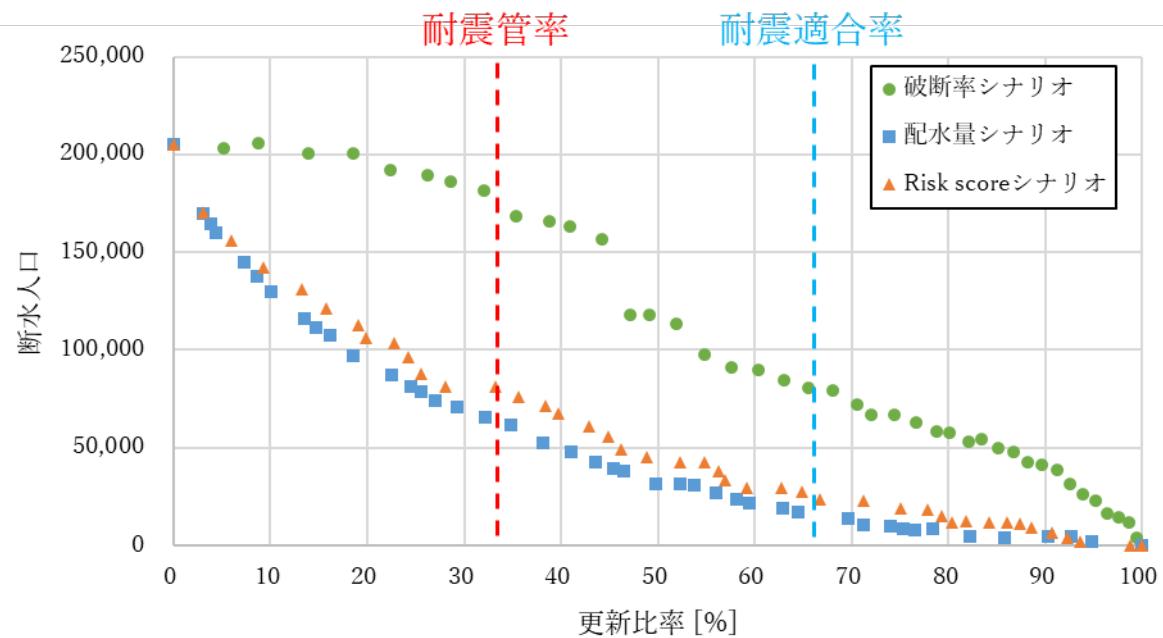


図 2-12 基幹管路の総延長に対する更新比率と断水人口の関係

図 2-13, 図 2-14, 図 2-15 に総延長に対する更新比率と断水の発生確率の関係性を示す。基幹管路の破断により配水区域内の一部地域に上水を供給することができなくなり、断水が生じたことを表す。断水の発生確率は浄水場が配水場から給水した水量に対し、ある閾値以上の量の水量が断水により供給されなくなる確率を示した。今回は断水量の閾値として 5% と 30% と 50% で比較を行った。更新比率が 33.8% の場合、断水の発生確率は 5%, 30% 程度までの断水であれば 0.03/year であるが、50% では一部の更新シナリオでは発生確率を低減している。また、更新比率が 66.5% の場合は 50% 以上が断水する大規模な断水リスクは 10^{-3} /year 程度まで下がるが、30% ではシナリオ間でばらつきがあり、配水量シナリオでは更新前の 10 分の 1 程度まで発生確率を低下させているが、Risk score シナリオでは 50% 程度にとどまっており、破断率シナリオでは対策前とほとんど変化していない。

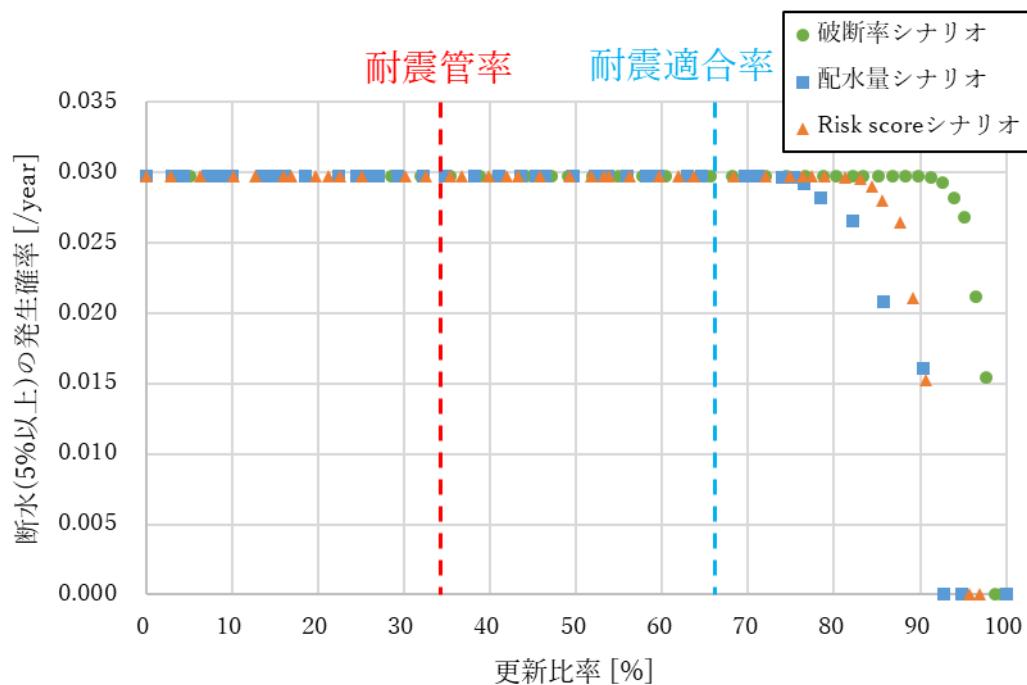


図 2-13 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 5% 以上の断水が発生する確率の関係性

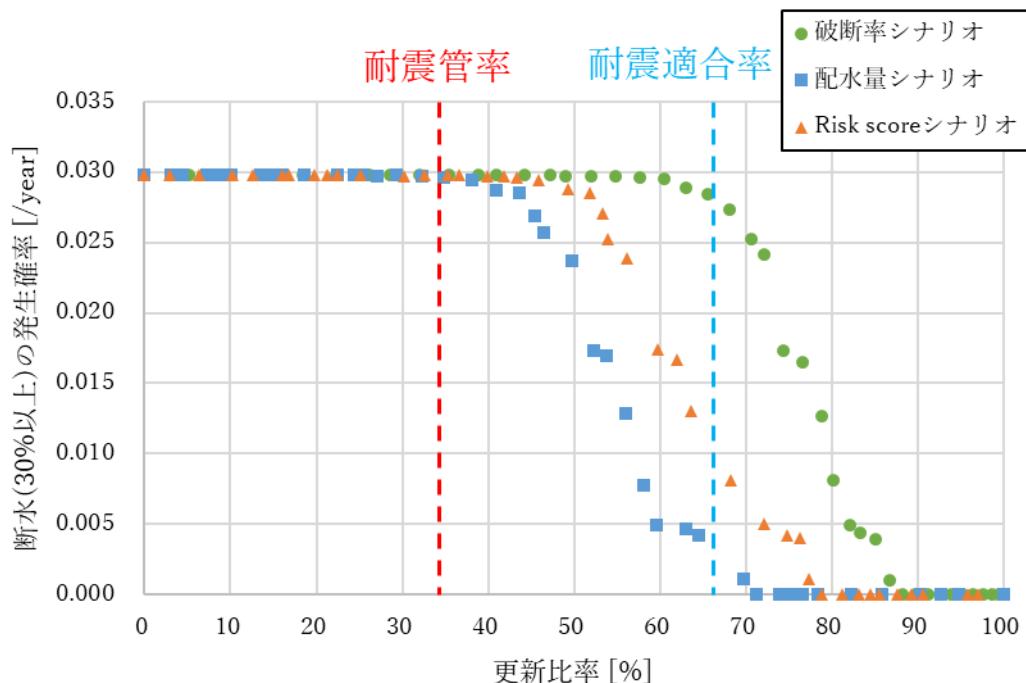


図 2-14 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 30%以上の断水が発生する確率の関係性

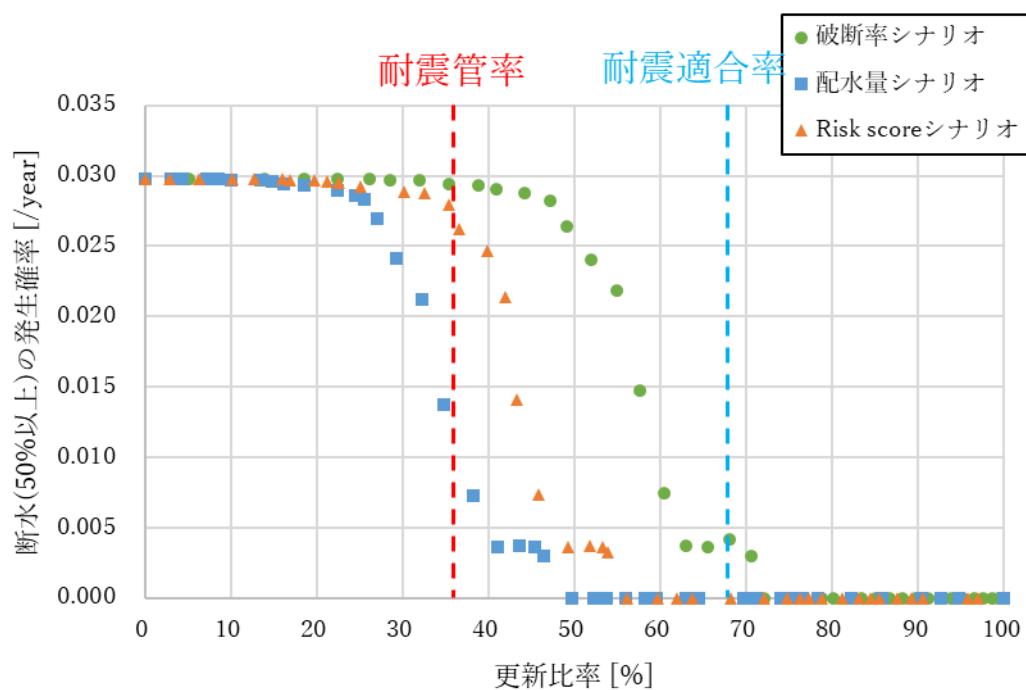


図 2-15 総延長に対する更新比率と浄水場供給量に対して 50%以上の断水が発生する確率の関係性

上記のような分析により、水道事業者は許容できない断水率を設定したときの、優先して更新すべき管路の比率を把握することができる。すなわち、配水区域内の非常用水などの備蓄量などから、供給水量

の30%程度までの断水は許容できるとした場合に、30%以上の断水が起こる確率を $1.0 \times 10^{-3} / \text{year}$ 未満にするには配水量の多い順に更新を行った場合、およそ70%更新すれば目標を達成できる。このように、本研究で構築した方法論をもとに、発生確率と断水規模から水道事業者が優先して更新を完了すべき管路を把握することができる。

2.4.7.2 応急給水能力の推算結果

図2-16に応急給水に対するハザード比の推定結果を示す。実線は更新シナリオ毎の管路の更新に伴うハザード比低減の推移を示す。ハザード比は応急給水能力と目標給水能力により算出されるが、本研究では応急給水能力はシナリオ毎で変わらない。また、目標給水能力は断水人口から算出されるため、シナリオ毎の応急給水に対するハザード比は断水人口の推定結果と同様の傾向となった。大阪市水道局(2023)による現状の基幹管路の耐震管率である33.8%では、いずれのシナリオにおいてもハザード比は1.0を超過しており、断水人口に対して大阪市水道局が所有する応急給水車のみでは十分な上水の供給を維持できない可能性がある。リスク低減の施策としては、耐震化更新比率を高め、断水人口を低減すること、もしくは応急給水能力を高めることが挙げられる。耐震化更新比率を高める場合、配水量シナリオでは60%程度まで上げればRisk scoreは1.0を下回り、現状の応急給水能力で断水量を補うことが可能と考えられる。応急給水能力を高める場合、応急給水車を増やし、給水能力を2倍程度まで高める必要がある。

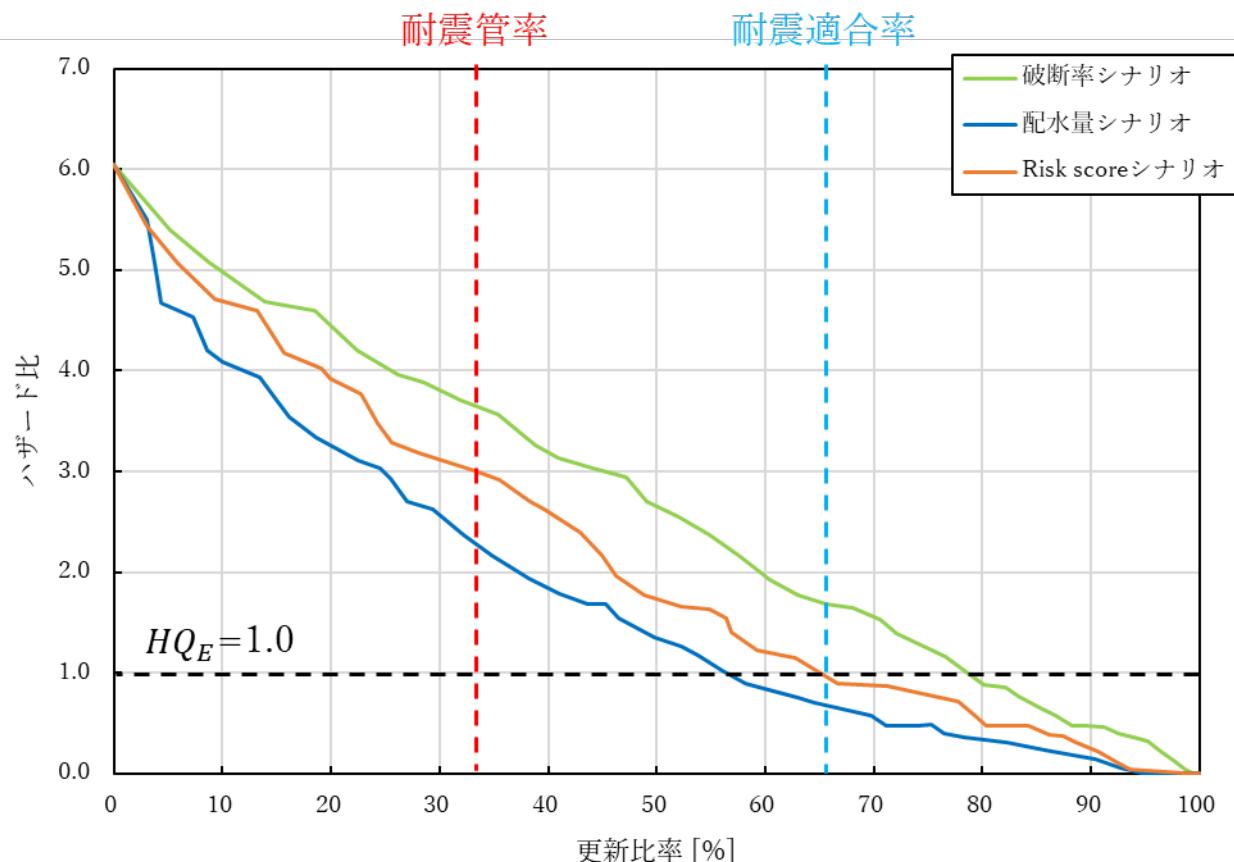


図 2-16 更新ケースごとのハザード比の推定結果

2.5 結言

本研究では、大規模地震による水道管路の破断の脆弱性を評価し、その脆弱性に基づく耐震対策の優先順位を決定した。都市部の例として柴島浄水場の給水区域に着目し、耐震管路更新の適切な優先順位を決定した。具体的には、破断率、配水量、Risk score に着目した。本研究で得られた結論については以下に示す。

管路の更新計画の進捗を評価する実用的な手法を提案した。3つの更新シナリオを比較し、シナリオアプローチによる費用便益分析を行った。その結果、浄水場から離れた人口密集地では、予想される断水人口が非常に大きいことがわかった。配水量の大きい管路が破断した場合、その地域の住民に与える被害は大きくなるため、配水量に応じて管路を更新することは、地震後の断水人口を減らすうえで最も効果的な指標であった。

また、断水の発生確率と管路の更新比率を比較することで、基幹管路の耐震化にしきい値を設けることができた。従来の更新計画では断水人口や断水発生確率をできるだけ効率よく低減させることを目的としていたが、本研究では断水の発生確率を導入することで、更新計画中の被災に対して断水の発生確率をどこまで許容できるかを検討することができるようになった。すなわち、水道事業者は断水の規模と発生確率が許容できないレベルであった場合に、どの程度まで耐震化の更新を完了させれば、最低限のリスクが回避できるか、推定することができる。これにより、水道事業者は基幹管路の更新という長期的な計画において、適切な更新の推進度合の配分ができるようになった。

大阪市水道局の現状の応急給水能力を、断水人口から算出したハザード比に評価した結果、現状の耐震化率では応急給水能力に対して2倍程度の水量が必要となる断水人口が生じ、地震時に最低限必要な給水を維持できなくなる可能性があることが分かった。この対策として、大阪市水道局は早急な耐震化または応急給水能力の強化が必要である。

本研究では、管路のみを対象としており、浄水場や配水場などの施設の被害については考慮していない。しかし、断水率を詳細に評価する際には、これらの施設が被災した場合を考慮する必要がある。今後は、管路の老朽化を考慮した、より現実的な更新計画の構築も求められる。

また、本研究でのアプローチは柴島浄水場の給水区域以外の地域にも適用ができ、管路の更新計画の検討に役立てられると考える。

参考文献

- 政府統計の総合窓口(e-Stat). 2017. 人口基本集計に関する事項(公開日 2017-06-27).
<<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&aggregateUnit=H&surveyId=H002005112015&statsId=T000847&prefCode=27>> (2024年11月7日閲覧).
- 磯山龍二, 石田栄介, 湯根清二, 白水暢. 1998. 水道管路の被害予測に関する研究. 水道協会雑誌. Vol. 67, No. 2, p. 25-40.
- 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田 進. 1980. 地震時地盤液状化の程度の予測について. 土と基礎. Vol. 28, No. 4, p. 23-29.
- 大阪市水道局. 2023. 災害対策, 水道管の耐震化の取り組みについて.
<www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000091835.html> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪市水道局. 1996. 大阪市水道百年史. 大阪市水道局.
- 大阪市水道局. 2023. 災害時はここで水を配ります.
<<https://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000474498.html>> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪府. 2017. 地域防災計画・被害想定, 南海トラフ地震対策, 震度分布・液状化可能性.
<www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/keikaku_higaisoutei/sindobunpu_etc.html> (2024年11月7日閲覧).
- 賀須井直規, 中谷隼, 春日郁朗, 古米弘明. 2018. 数理最適化を用いた広域化水道システムの長期運用・更新計画立案の手法開発. 土木学会論文集G(環境). Vol. 74, No. 7, p. III_111-III_122.
- 気象庁. 1996. 計測震度の算出方法.
<www.data.jma.go.jp/svd/equiv/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm> (2024年11月7日閲覧).
- 國實薦治, 稲員とよの, 荒井康裕, 小泉明, 橋本英樹, 吉澤健太郎. 2015. 配水本管ネットワーク構造による事故影響を考慮した管路更新優先度評価. 土木学会論文集G(環境). Vol. 71, No. 6(環境システム研究論文集 第43巻), p. II_451-II_458.
- 國實薦治, 稲員とよの, 小泉明, 荒井康裕, 佐藤清和, 柿沼誠, 長谷川進, 柳井茂, 深瀬閑太郎. 2016. モンテカルロシミュレーションによる配水小管ネットワークの震災被害影響の分析. 土木学会論文集G(環境). Vol. 72, No. 7, p. III_457-III_465.
- 國實薦治, 稲員とよの, 小泉明, 荒井康裕, 佐藤清和, 藤川和久, 長谷川進, 深瀬閑太郎. 2017. 震災時の断水影響を考慮した配水管網の耐震化更新計画に関する研究. 土木学会論文集G(環境). Vol. 73, No. 7, p. III_515-III_524.
- 財団法人 水道技術研究センター. 2013. 地震による管路被害予測の確立に向けた研究報告書【概要版】. 水道技術研究センター.
<<https://www.jwrc-net.or.jp/docs/publication-outreach/2012-03gaiyou.pdf>>.
- 厚生労働省健康局. 2004. 水道ビジョン.
<<https://www.mlit.go.jp/common/830001244.pdf>> (2024年11月7日閲覧).
- 厚生労働省. 2007. 管路の耐震化に関する検討会報告書.
<<https://www.mlit.go.jp/common/830002448.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局. 2008. 水道ビジョン.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830001162.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局. 2013. 新水道ビジョン.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830004445.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2008. 水道の耐震化計画等策定指針.

<<https://www.env.go.jp/content/900546646.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2010. 水道事業における耐震化の状況（平成21年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000000ynl2.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2011a. 水道事業における耐震化の状況（平成22年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000001xwed.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2011b. 水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830005401.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2012. 水道事業における耐震化の状況（平成23年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_2r9852000002qpnp.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2013. 水道事業における耐震化の状況（平成24年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000031812.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2014. 水道事業における耐震化の状況（平成25年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000069235.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康局水道課. 2015. 水道の耐震化計画等策定指針.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830004177.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課. 2015. 水道事業における耐震化の状況（平成26年度） | 報道発表資料.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830003310.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課. 2016. 水道事業における耐震化の状況（平成27年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000146767.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生・食品安全部水道課. 2017. 重要給水施設管路の耐震化計画策定の手引き.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830003986.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2017. 水道事業における耐震化の状況（平成28年度） | 報道発表資料.

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2019. 水道事業における耐震化の状況（平成29年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2020. 水道事業における耐震化の状況（平成30年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2021. 水道事業における耐震化の状況（令和元年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2022. 水道事業における耐震化の状況（令和2年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_houdou_0000189572_00004.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省医薬・生活衛生局生活衛生局水道課. 2023. 水道事業における耐震化の状況（令和3年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_newpage_31439.html> (2024年11月7日閲覧).

厚生労働省健康・生活衛生局生活衛生局水道課. 2024. 水道事業における耐震化の状況（令和4年度). <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/newpage_38800.html> (2024年11月7日閲覧).

国土交通省. 2018. 水道法の改正について

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/stf_seisakunitsuite_bunya_topics_bukyoku_kenu_suido_suishitsu_index_00001.html> (2024年11月7日閲覧).

国土交通省. 2024. 上下水道地震対策検討委員会

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000874.html> (2024年11月7日閲覧).

国立研究開発法人 防災科学技術研究. 2024. 地震ハザードステーション.

<<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>> (2024年11月7日閲覧).

大都市水道局大規模災害対策検討会. 2024. 南海トラフ巨大地震対策《全国の水道事業体に向けた提言》～給水車の大量不足と迅速に救援体制を構築するための対策と事例～
<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/files/items/27779/File/teigen_06_01.pdf> (2024年11月7日閲覧).

高橋信補, 武本剛, 足立進吾. 2017. ライフサイクルコスト評価に基づく水道管路の最適更新時期決定手法. 土木学会論文集G(環境). Vol. 73, No. 1, p. 1-10.

永田茂, 丸山喜久, 庄司学. 2015. 既往の上水道配水管の地震被害予測式の予測精度に関する検討. 土木学会論文集A1(構造・地震工学). Vol. 71, No. 4 (地震工学論文集第34巻), p. I_50-I_61.

日本水道協会. 1998. 地震による水道管路の被害予測. 日本水道協会.

日本水道協会. 2012. 水道施設設計指針. 日本水道協会.

長谷川高平, 荒井康裕, 小泉明. 2019. 地震リスクを考慮した送水管路更新計画のLCC最適化 一マルチイベントモデルによる評価法の提案一. 土木学会論文集G(環境). Vol. 75, No. 7, p. III_73-III_84.

平成25年度管路の耐震化に関する検討会. 2014. 管路の耐震化に関する検討報告書.

<<https://www.mlit.go.jp/common/830003341.pdf>> (2024年11月7日閲覧).

丸山喜久, 山崎文雄. 2009. 近年の地震データを考慮したマクロな配水管被害予測式. 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集.

森正幸, 稲員とよの, 小泉明, 渡辺晴彦, 沼田篤男. 2009. モンテカルロ法を用いた水道管路更新計画の評価. 環境システム研究論文集. Vol. 37, p. 1-8.

第3章 大規模地震による化学物質の河川への流出に対する対策オプションの有効性の分析

-淀川水系を対象としたケーススタディ-

3.1 緒言

本章では、上流の化学物質取扱事業所から河川に化学物質が流出し、下流の浄水場の取水口での水質悪化が発生する事象を取り上げ、事業所側の対策オプションの導入が、リスクの低減にどれだけ効果があるかを流出事故の発生確率と下流の取水口への到達濃度により定量的な評価が可能となる枠組みを構築する。淀川水系を対象としたケーススタディにより、評価枠組みの実用性と淀川水系における事業所の対策オプションの導入基準について検討を行う。

本章の構成は次の通りである。3.2節では事業所からの化学物質の流出事象における課題とこれまでの行政等の取組について示し、本章の目的と評価モデルの枠組みを示す。3.3節では評価モデルの詳細を示し、対策オプションの導入ケースの設定、事故シナリオの発生確率及び流出量の推定方法、ケースの評価方法について示す。3.4節では柴島浄水場を対象としたケーススタディの結果と考察を示す。最後に、3.5節で本章の結論について述べる。

3.2 化学物質の河川への流出事象の現状

3.2.1 化学物質の流出事故による被害

大規模地震が発生した際、地震動による物的な被害だけでなく、産業施設が被災により化学物質が流出し、周辺環境に放出されるような二次的被害に発展する危険性がある。このような自然災害起因の産業事故は natural-hazard triggered technological accidents (Natech) と呼ばれ、低頻度であるが甚大な被害をもたらす場合がある。実際に、1995年の阪神淡路大震災では、尼崎市でタンク本体近傍に取り付けられていたバルブが破断したため、C重油40kLが防油堤内に流出、防油堤のき裂から約600Lが防油堤外に流出した(尼崎市・あまがさき未来協会(1998))。また、2003年の十勝沖地震において、石油タンクのスロッシングにより、タンクの浮き屋根の損傷、流出した石油による火災に派生し、大きな被害を伴った。このような災害時の化学物質の流出事故を想定し、事故発生頻度と被害影響の推算方法が提案してきた(Fabbrocino et al.(2005), Antonioni et al.(2007), Meng et al.(2014))。

これらの研究では流出した化学物質の火災あるいは吸入暴露を想定しており、事業所とその周辺住民への影響評価にとどまっている。しかしながら、事業所から河川に化学物質が流出した場合、飲料水の供給を通して被害が広範囲に及ぶ可能性がある。2014年ウェストバージニア州カナワ郡のエルク川沿いの工場から4-メチルシクロヘキサンメタノールが流出する事故が発生した。この事故により600人近くが流出事故に関連した症状で病院を訪れ、13人が入院する事態となった(Manuel(2014))。また、日本においても、2012年に利根川流域で未処理のヘキサメチレンテトラミンが排出されたことで、一部の浄水場で水質基準値を上回るホルムアルデヒドが検出された事例があった。これにより、いくつかの浄水場は取水停止の措置をとることとなり、千葉県の5市36万戸、87万人)では断水に至った(水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会(2013))。このように水系への有害化学物質の流出はヒト健康、社会的に重大な被害を及ぼす可能性があり、災害時の突発流出についても考慮したリスク評価を実施する必要がある。水系への化学物質の流出を想定したリスク評価としては緊急遮断弁

を対象とした導入による浄水場取水口での物質濃度の低減効果の分析を行った例など一部の研究に限られる(中久保ら(2016))。

3.2.2 行政の取り組み

日本においては 2010 年、水質汚濁防止法の一部改正により同法で定める有害物質による地下水の汚染を未然に防止するため、有害物質を使用・貯蔵する施設の設置者に対し、地下浸透防止のための構造、設備及び仕様の方法に関する基準の遵守、定期点検及びその結果の記録・保存を義務付けられる規定等が新たに設けられ、有害物質の流出防止策の整備が進んでいる(環境省(2010))。さらに 2022 年、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改正により、災害による指定化学物質の漏洩を未然に防止するための方策を検討し、必要な措置をとることが定められた。また、経済産業省(2024)では、具体的な方策検討の一助となるよう、化学物質の漏洩による被害の防止に向けた地方公共団体との連携や平時からの取組の事例等について整理している。災害発生時の企業の事業継続という観点では、財団法人 企業活力研究所(2013)が企業側の取り組みの状況の調査・整理を行っており、参考にすることができる。しかしながら、事業者が取扱う化学物質や貯蔵量は多岐にわたり、災害の発生状況や立地等により必要な対策は異なるため、事業者は独自に化学物質の流出対策を検討しなければならない。消防法においては危険物の貯蔵施設の形態ごとに詳細な基準が設けられている。屋外タンク事業所においては防油堤の設置が、一定の貯蔵量を超えた屋外タンクについては緊急遮断弁の導入が義務付けられている。同様に、指定化学物質等取扱事業者に対しても、事業所ごとの規模や取扱う物質に基づいて対策オプションの導入基準を定めることが必要である。

このような化学物質取扱い事業所の状況に対し、行政側の対応としては環境省(2022)が、化学物質災害・事故発生時の地方公共団体の対応についてマニュアル策定の手引きを作成している。この手引きでは化学物質を取扱う施設等から化学物質の漏洩・流出が起こったことを対象として、地方公共団体の環境部局が平時からどのような体制整備をしておく必要があるか、また事故発生時及び事故発生後にどのような対応をすべきかが記載されている。このように、災害発生時の化学物質の流出事象に対しては地方公共団体と化学物質取扱事業者の両方が平時から体制を整備しておく必要があるが、化学物質取扱事業所の状態は事業所毎に多岐にわたるため、明確な規制を設けることが困難となっている。

3.2.3 本研究の目的と評価の枠組み

本研究では化学物質を取扱う事業所において地震時に貯蔵タンク又は配管が破断し、河川へと化学物質が大量に流出することを想定し、リスク評価を通じた対策オプションの組合せを検討する。化学物質の貯蔵形態としては屋外に設置されているタンク(屋外タンク貯蔵所)を想定した。屋外タンク貯蔵所は消防法における貯蔵所の分類の一つであり、貯蔵量の制限が無く、大量貯蔵に適した貯蔵形態であると考えられる。また、河川への排出を想定しているため、常温の液体で貯蔵される化学物質を考える。したがって貯蔵タンクも液体の貯蔵で多く用いられる円筒形タンクを想定した。

図 3-1 に本研究での対策オプションの評価のフローチャートを示す。フローチャートは石油コンビナートの防災アセスメント指針(2013)におけるリスク評価の概念をもとに、具体的な対策オプションの組合せを評価するために、筆者らが追加を行った。まず、対策オプションの有無の組合せにより、対策ケー

スを作成する。本研究では化学物質取扱事業所の対策オプションの導入優先度を評価するために、対策オプションとしては事業所が管理可能な敷地内で実行可能なもののみを想定した。流出事象としては、化学物質取扱事業所の被災により、貯蔵タンク又は配管から化学物質が漏洩する事象を対象とした。想定する対策オプションの組合せに対して、対策オプションが機能した場合と機能しなかった場合で事象分岐を設定した。対策オプションの導入効果を比較するために、事業所外に流出した化学物質については、事業者が管理できないものであるとし、流出した物質の全量が事業所に最も近い河道内に瞬時に排出されるものとした。このとき、事業所から河道までは仮想的な水路を想定した。事業所と浄水場取水口の距離から流下距離を求め、移流拡散方程式を用いて下流の浄水場取水口近辺における化学物質の濃度を推定した。このとき、流下中の物質の揮発及び分解は起こらないものとし、取水口において化学物質がとりうる濃度の最大値を算出した。発生危険度は災害の発生確率を、影響度は取水口での化学物質濃度の最大値を用いる。災害の発生確率はある規模の地震動が発生する確率と流出事故、対策オプションによる事業所外への流出事故の発生確率を積算することで算出する。事業所外への流出量についても、物質の貯蔵量から貯蔵施設からの流出量及び対策オプションによる流出量低減を踏まえ、最終的な事業所外への流出量を算出した。最後に、発生危険度と影響度をもとに総合的な災害の危険性(リスク)を評価し、許容されるリスクレベルとなる対策オプションの組合せについて検討する。

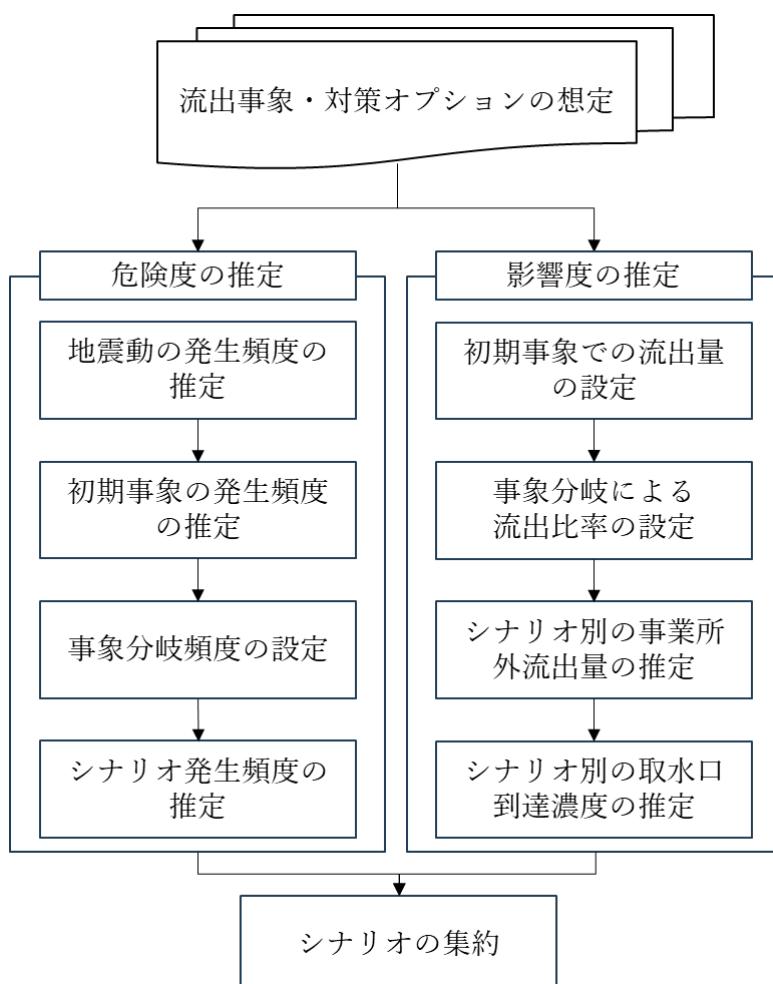


図 3-1 地震時の事業所からの化学物質流出対策オプションの評価の枠組み

3.3 評価モデルの詳細

3.3.1 流出事象・対策オプションの想定

想定する対策オプションの導入有無で表 3.1 のような対策ケースの作成を行った。表 3-1 で None は対策オプションを導入していないことを表している。また、対策オプション数は対策ケースごとの対策オプションの導入数(m_i)を表している。本研究では、化学物質取扱事業所が管理可能な事業所の敷地内で実行可能であり、液体の流出防止に有効な対策オプションのうち、消防法、水質汚濁防止法、各都道府県条例において特定の条件を満たす化学物質取扱事業所において導入が義務付けられている対策オプションである、防油堤、緊急遮断弁、従業員による流出防止措置を評価対象とした。防油堤には防液堤やためます、側溝など化学物質貯蔵タンクの周囲に設置された漏洩物を一時貯留する物理的な構造を含む。緊急遮断弁はタンクと配管のつなぎ目に設置されており、配管の破断時に遠隔操作により弁を閉止することでタンク本体からの流出を防ぐ。水質汚濁防止法、消防法においては流出事故発生時の速やかな漏洩物の回収が義務付けられている。したがって、事業所は流出事故を確認した場合、安全の範囲内で漏洩物の回収及び拡散防止を展開すると想定し、従業員による流出防止措置を対策オプションとして設定した。従業員による流出防止措置では、事業所の従業員が流出した化学物質を土嚢や吸着剤で囲って回収する、事業所外部につながる排水溝を閉止するなどの対応により、事業所外部への化学物質の流出を防ぐ措置を想定している。

表 3-1 対策ケースの設定

Case <i>i</i>	対策オプション			対策オプション数 m_i
	防油堤等	緊急遮断弁	従業員による 流出防止措置	
1	None	None	None	0
2	Yes	None	None	1
3	None	Yes	None	1
4	None	None	Yes	1
5	Yes	Yes	None	2
6	None	Yes	Yes	2
7	Yes	None	Yes	2
8	Yes	Yes	Yes	3

3.3.2 拡大シナリオ（イベントツリー）の展開

石油コンビナートの防災アセスメント指針(2013)の手法に従い、①初期事象の設定、②事象分岐の設定、③拡大シナリオ（イベントツリー;ET）の展開の手順で ET を作成した(総務省消防庁特殊災害室(2013))。

① 初期事象の設定

本研究では化学物質流出の初期事象としてタンクもしくは配管の大破の 2 通りを想定した。過去の地震での、屋外貯蔵タンクの損傷パターンは座屈、浮上がり、スロッシングによる浮き屋根または天板の損傷に大別される(Hamdan(2000), 菅付ら(2014))。中でも座屈と浮上がりはタンク下部の損傷を引き起こし内容物の全量流出といった被害に繋がりやすい。実際に 1995 年の兵庫県南部地震では、神戸市内の 2 か所の事業所で合計 3 基の水タンクで座屈が発生し、座屈発生位置が側板最下段であったことから破口部から貯水がすべて流出した例があった(山田・亀井(1995))。一方でスロッシングによる化学物質の流出は底板・側板下部の損傷と比べて流出量が限定的である。今回の研究では、水系への化学物質の流出を対象としており、流出量が少量であるスロッシングによる溢流については扱わないものとした。以上のような背景から、初期事象は化学物質貯蔵タンクの大破と配管の大破を想定し、タンク内の全量が 10 分以内の短時間で流出すると仮定した(Haag(1999))。また、タンク及び配管の大破は互いに独立に発生するものとし、タンク本体と配管の大破が同時に発生する事象については極めて発生確率が低いため考えないものとした。

② 事象分岐の設定

地震により化学物質取り扱い事業所で流出事故(初期事象)が発生した後、ケース毎に対策オプションによる事象分岐を考える。対策オプションは緊急遮断弁、防油堤、従業員による流出防止措置の順に実施されるものとした。

③ イベントツリーの展開

対策オプションの導入有無に従い、事象分岐による ET の展開を行った。タンクの大破と配管の大破それぞれの ET において事象分岐は Number of countermeasures (m_i) により定められるため、ケース i で想定されるシナリオの数 v_i は式(3.1)のように表される。図 3-2, 図 3-3 に ET の展開図の一例を示す。Case2 の場合、対策オプション導入数 $m_1=1$ であるためシナリオ数 $v_2=4$ となり、Case8 の場合、対策オプション導入数 $m_8=3$ であるためシナリオ数 $v_8=16$ となる。

$$v_i = 2^{m_i+1} \quad \text{式(3.1)}$$

変数	意味
v_i	ケース i で発生しうるシナリオ数
m_i	ケース i で導入している対策オプションの数

ケース2で想定するシナリオ ($m_2=1, v_2=4$)
対策オプション；緊急遮断弁

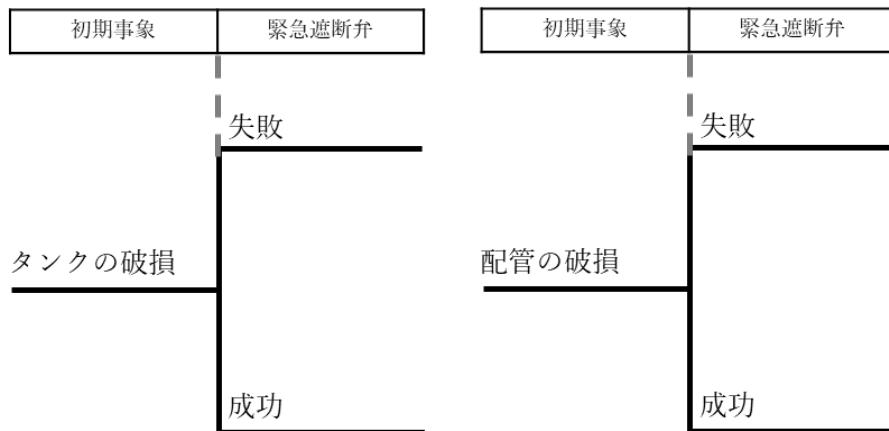


図 3-2 Case2 における Event Tree の展開図

ケース8で想定するシナリオ ($m_8=3$, $v_8=16$)
対策オプション；緊急遮断弁, 防油堤等, 従業員による流出防止措置

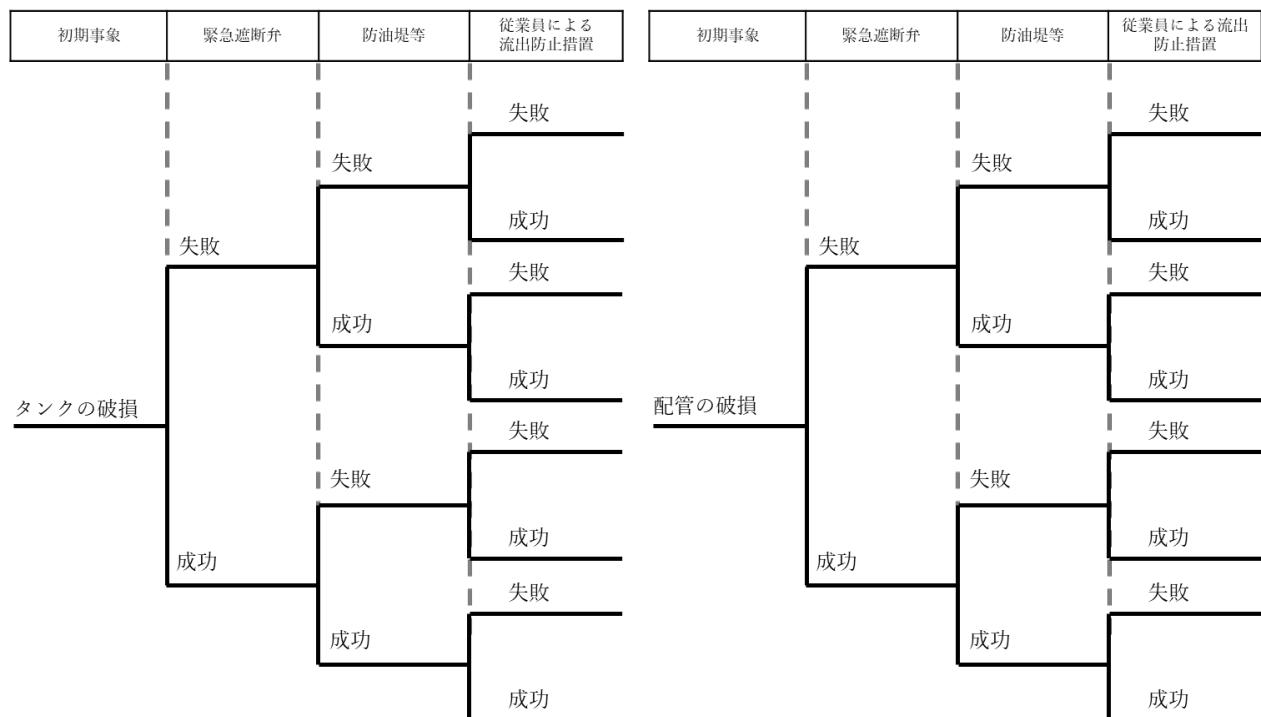


図 3-3 Case8 における Event Tree の展開図

3.3.3 危険度の推定

3.3.3.1 地震動の発生確率の設定

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所(2024)が推定した地震度の発生確率から各階級の震度の地震が発生する確率を算出した。式(3.2)と式(3.3)に震度の発生確率を示す。ここで I_l は計測震度, PGA は最大地表加速度 [cm/s^2]を示しており、本研究では震度 5 弱から 7 の 5 つの区分を設けた。各震度区分 l における計測震度 I_l の値を表 3-2 に示す。 I_l には気象庁(1996)が定める震度の範囲の中央値を用いた。

$$F_l = \frac{f_l - f_{l+1}}{30} \quad (1 \leq l < 5) \quad \text{式(3.2)}$$

$$= \frac{f_l}{30} \quad (l = 5)$$

$$PGA_l = 10^{-0.23 + 0.51 \cdot I_l} \quad \text{式(3.3)}$$

変数	意味
F_l	対象地で震度区分 l の地震が発生する確率 [/ year]
f_l	対象地で震度区分 l 以上の地震が今後 30 年の間に発生する確率 [-]
PGA_l	震度区分 l での最大地表加速度 [cm/s^2]
I_l	震度区分 l における計測震度

表 3-2 本研究で想定する震度区分と計測震度の対応(気象庁(1996))

震度区分(l)	震度階級	震度の範囲	計測震度(I_l)
1	5弱	4.5以上5.0未満	4.75
2	5強	5.0以上5.5未満	5.25
3	6弱	5.5以上6.0未満	5.75
4	6強	6.0以上6.5未満	6.25
5	7	6.5以上	7

3.3.3.2 初期事象の発生確率の推定

タンク、配管の損傷確率は peak ground acceleration(PGA)を強度指標とする fragility curve により算出した(Salzano et al.(2003))。式(3.4)において用いた fragility curve の平均値と標準偏差の値を表 3-3 に示す。タンクは、充填率が上限に近く、アンカーボルトにより固定されているタンクを想定した。パイプの fragility curve については Federal Emergency Management Agency(FEMA)(2022)が G&E Engineering Systems (G&E)(1994)の調査をもとに石油パイプラインシステムのコンポーネントごとに設定された高架管の fragility curve の平均値と標準偏差の値を用いた。

$$p_{ie_l} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{PGA_l} \exp\left(-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dz \quad \text{式(3.4)}$$

変数	意味
p_{ie_l}	震度区分 l での初期事象の発生確率
μ	平均値
σ	標準偏差

表 3-3 平均値と標準偏差

	μ	σ
充填率が上限に近い固定タンク (FEMA (2020))	1.6	0.6
高架管 (FEMA (2020))	1	0.6

3.3.4 事象分岐確率の設定

3.3.4.1 緊急遮断弁

東日本大震災における調査結果から緊急遮断弁を有していたにもかかわらず配管からの内容物の流出があったものは、常用電源と非常用電源の両方が喪失したことによるとされている(総務省消防庁予防課危険物保安室 (2014))。したがって、本研究では緊急遮断弁の失敗確率を停電発生確率と非常用電源の不始動確率の積と定義した。式(3.5)に能島ら(2003)が提案した計測震度 I_l の地域での停電の p_{outage} 発生確率を示す。また、一般社団法人日本内燃力発電設備協会(2012)は東日本大震災において震度 6 強以上の地域に設置された防災用自家発電機 4811 台について被災時の稼働状況を調査しており、84 台が不始動又は異常停止等により正常に稼働できなかったことを報告している。この結果をもとに停電確率に非常用電源喪失確率 1.75% を乗じることで緊急遮断弁の作動が失敗する確率を算出した。

$$p_{outage_l} = \frac{\exp(-19.72 + 3.75 \cdot I_l)}{1 + \exp(-19.72 + 3.75 \cdot I_l)} \quad \text{式(3.5)}$$

変数	意味
p_{outage_l}	震度区分 l における停電の発生確率
I_l	震度区分 l における計測震度

3.3.4.2 防油堤

流出拡大防止に失敗する確率は宮城県石油コンビナート等防災アセスメント調査(2014)から、流出事故が発生しても流出油が防油堤外に流れ出る可能性は低いとして設定された値を用いた(1.0×10^{-3})。消防法での屋外タンク貯蔵所の規定では、防油堤の容量は防油堤内の貯蔵物質の容量の 110%以上である必要がある。また、水質汚濁防止法においても有害物質使用特定施設又は有害物質貯蔵施設の周囲に防油堤を設けることが義務付けられている。水質汚濁防止法においては防油堤の容量については記載がないものの、「想定される流出量分の有害物質を含む水の流出を防止できる容量を確保すること」と記載されている。このような記載から有害化学物質を貯蔵するタンクの周囲の防油堤等はタンク内の容量を十分に貯留できると考えられる。したがって、本研究では防液堤等はタンク容量の全量が流出した場合でも一時的な貯留が可能であり、破壊しない限りは外部への流出は起こらないものと仮定した。

3.3.4.3 従業員による流出防止措置

従業員による流出防止措置は、当直の従業員が流出事故発生時にバルブや排水溝を手動で閉止、吸着剤で回収することで敷地外への流出を防ぐことを想定した。宮城県石油コンビナート等防災アセスメント調査(2014)において、小破漏洩時の流出油の拡散防止・回収の一時的な措置に対し、失敗確率 1.0×10^{-1} が設定されている。本研究でも同様の措置を想定し、従業員による流出防止措置の失敗確率は 1.0×10^{-1} と設定した。

3.3.5 シナリオ発生確率の推定

イベントツリーに従い、Antonioni et al.(2007)の方法をもとに各シナリオの発生確率(Return period)を式(3.6)のように算出した。ケース*i*におけるシナリオ*j*の発生確率 $p_{s_{i,j}}$ は震度区分*l*に相当する地震動の発生確率 F_l と震度区分*l*における初期事象の発生確率 p_{iel} と対策オプションの事象分岐確率 p_{ck} の積をPGAの分割数*n*で合計した値により表される。 p_{ck} は表 3-4 に示すように各対策オプションの失敗確率により、成功時と失敗時の分岐確率が定められる。

$$p_{s_{i,j}} = \sum_l^n (F_l \cdot p_{iel} \cdot \prod_k p_{ck}) \quad \text{式(3.6)}$$

変数	意味
$p_{s_{i,j}}$	ケース <i>i</i> におけるシナリオ <i>j</i> の発生確率 [/year]
<i>n</i>	PGA _{<i>l</i>} の分割数(<i>n</i> =5)
p_{iel}	震度区分 <i>l</i> での初期事象の発生確率
p_{ck}	対策オプション <i>k</i> の分岐確率

表 3-4 対策オプション分岐確率

対策オプション	対策オプションの分岐確率	
	成功	失敗
緊急遮断弁	$1 - p_{outage}_l \times 1.75 \times 10^{-2}$	$p_{outage}_l \times 1.75 \times 10^{-2}$
防油堤等	$1 - 1.0 \times 10^{-3}$	1.0×10^{-3}
従業員による流出防止措置	$1 - 1.0 \times 10^{-1}$	1.0×10^{-1}

3.3.6 影響度の推算

3.3.6.1 初期事象での流出量の設定

タンク及び配管の被害形態は大破による全量流出を想定した。したがって、初期事象であるタンクもしくは配管の大破による流出量は貯蔵量に等しい値とした。

3.3.6.2 事象分岐による流出比率の設定

流出比率は成功時と失敗時の 2 通りを設定しており、成功時は対策オプションが正常に機能した場合の流出比率を、失敗時は機能が一部喪失した場合の流出比率を用いる。緊急遮断弁は作動により、タンク本体からの内容物の流出を防ぎ、配管内部のみからの流出に抑えるものとし、中久保ら(2016)が大阪府(2013)の試算をもとに設定した流出比率として採用した 0.01 を成功時の流出比率に設定した。防液堤等はタンク容量に対し十分な容量を備えていることから、成功時の流出比率は 0 とした。また、従業員による流出防止、回収についても成功時の流出比率を 0 に設定した。失敗時の流出比率は 1978 年の宮城沖地

震での重油流出事例を参考に設定した。当該の事故では、仙台地区にある 2 基の重油タンク (31,500kL) 及び 1 基の減圧軽油タンク (23,700kL) の側板と底板の接合部付近が破断し、約 70,000kL の重油が流出した(宮城県石油コンビナート等防災本部 2014)。陸上での拡大は、流出油等防止堤で防止できたが、一方では排水溝を通ってガードベースン (容量 6,000kL) に流出し、直ちに港湾に通ずる排水口の緊急遮断ゲートの閉鎖を行ったが、ヘドロが堆積していたため完全に閉鎖できず、土のうやダンプトラックによる土砂の搬入等により封鎖を完了するまでに数千 kL が海上に流出した(宮城県石油コンビナート等防災本部 2014)。この事例から、タンクからの流出量 70,000kL に対し、防液堤等で防げなかった量を 6,000kL、排水溝の閉止で防げなかった量を 1,000kL と仮定し、防液堤等と従業員による流出防止、回収の失敗時の流出比率をそれぞれ 0.1 と設定した。

3.3.7 シナリオ別の事業所外流出量の推定

影響度を推算するために流出事故発生時の河川への化学物質排出量を推定する。シナリオごとの事業所外部への化学物質の流出量は式(3.7)のように算出した。 RR_k は流出率を表し、各シナリオにおいて対策オプション k への化学物質の流入量のうち次の対策オプションもしくは事業所外に流出する割合を示している。 RR_k の値を表 3-5 に示す。河川に排出し得る化学物質の最大量を想定するために、事業所から流出した物質は全量が事業所に最も近い河道内に瞬時に排出されるものとした。

$$M_{i,j} = \rho \times S \times \prod_k RR_k \quad \text{式(3.7)}$$

変数	意味
$M_{i,j}$	ケース i , シナリオ j における事業所外への流出量 [kg]
ρ	化学物質の密度 [kg/L]
S	化学物質の貯蔵量 [L]
RR_k	対策オプション k での流出比率

表 3-5 対策オプションの動作成功時と失敗時の流出比率

対策オプション	流出比率	
	成功	失敗
緊急遮断弁	0.01	1
防油堤等	0	0.1
従業員による流出防止措置	0	0.1

3.3.8 シナリオ別の取水口到達濃度の推定

河川に排出された化学物質が浄水場取水口に到達するまでの挙動は移流拡散方程式を用い、一次元の河川モデルを仮定して推算した(式(3.8))。河川流速、河川断面積が一定であるとして、下流での化学物質濃度の最大値を式(3.9)により推算した。事業所外へ流出した後は、仮想水路により全量が一度に河川へと排出されるものと仮定した。また、河川の断面積は式(3.10)のように河川の平均流量と流速から算出した。

拡散係数は式(3.11)のように Elder の縦分散係数の式 (Elder (1956)) により算出し、摩擦速度は式(3.12)により求めた。河川の断面は図 3-4 に示すような三角形の形状であると仮定し、断面積と水深から径深を算出した。動水勾配は事業所から浄水場までの流下距離と標高差から算出した。式(3.13)に示すように、水深は河川流量から H-Q 式を用いて算出し、補正係数は対象地の水深と流量のデータから推定した。本研究では、化学物質の揮発や分解については考慮せず、河川に排出された化学物質が下流の浄水場取水口において確認される最大濃度を推算した。

$$\frac{\partial C_{i,j}}{\partial t} + u \frac{\partial C_{i,j}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_{i,j}}{\partial x^2} \quad \text{式(3.8)}$$

$$C_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{A_r \sqrt{4\pi D(L/u)}} \quad \text{式(3.9)}$$

$$A_r = \frac{Q_r}{u} \quad \text{式(3.10)}$$

$$D = 5.93 H u^* \quad \text{式(3.11)}$$

$$u^* = \sqrt{g R I_e} \quad \text{式(3.12)}$$

$$H = a Q_r - b Q_r^2 \quad \text{式(3.13)}$$

変数	意味
$C_{i,j}$	ケース <i>i</i> , シナリオ <i>j</i> におけるL m 下流での化学物質濃度の最大値[g/L]
D	拡散係数 [m ² /s]
A_r	河川断面積 [m ²]
u	河川流速 [m/s]
L	河川排出地点から浄水場取水口までの河川流下距離 [m]
H	平均水深 [m]
u^*	摩擦速度 [m/s]
g	重力加速度 [m/s ²] (9.8 m/s ²)
R	径深 [m]
I_e	動水勾配 [m]

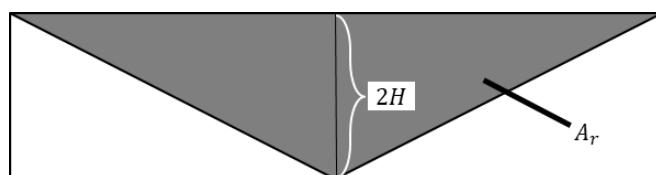


図 3-4 河川断面のイメージ図

3.3.8 シナリオの集約

ケース*i*における浄水場取水口での化学物質濃度の最大値が基準値*Ca*を超過する確率をシナリオの発生確率を合計することにより求めた(式(3.14))。

$$P_i(Ca) = \sum_j^{v_i} p_{s_{i,j}}(C_{i,j} > Ca) \quad \text{式(3.14)}$$

変数	意味
$P_i(Ca)$	ケース <i>i</i> で浄水場取水口での化学物質濃度が基準値 <i>Ca</i> を超過する確率
$p_{s_{i,j}}$	ケース <i>i</i> におけるシナリオ <i>j</i> の発生確率 [/year]
Ca	化学物質濃度の基準値 [g/L]
v_i	ケース <i>i</i> で発生しうるシナリオ数

基準値*Ca*には対象とした化学物質の水質基準値と亜急性参照値を用いた。亜急性参照値は水質異常時に摂取制限をしながら給水を継続する場合に参考とする指標として国立医薬品食品衛生研究所(2020)が提案した考え方である。式(3.15)に亜急性参照値、式(3.16)に亜急性参考用量の算出方法を示す(国立医薬品食品衛生研究所(2020))。式(3.15)における 10^{-3} は $\mu\text{g}/\text{L}$ から mg/L への単位変換定数を表す。

$$C_{sa} = saRfD \times \frac{BW}{DI} \times 10^{-3} \quad \text{式(3.15)}$$

$$saRfD = \frac{POD}{UFS} \quad \text{式(3.16)}$$

変数	意味
C_{sa}	亜急性参照値 [mg/L]
$saRfD$	亜急性参考用量 [$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$]
BW	体重 [kg]
DI	1日当たりの飲料水摂取量 [L/day]
POD	Point of Departure Level [$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$]
UFS	不確実性係数の積 [-]

亜急性参照値はPOD(Point of Departure)に NOAEL を用いて算出した(国立医薬品食品衛生研究所(2020))。NOAEL 及び体重と 1 日当たりの飲料水の摂取量は国立医薬品食品衛生研究所(2020)の方法をもとに設定した。国立医薬品食品衛生研究所(2020)では成人と小児に対してそれぞれ亜急性参照値が算出されているが、本研究では成人の場合で比較を行い、 $BW=50\text{ kg}$ 、 $DI=2\text{ L/day}$ とした。

3.4 ケーススタディ

3.4.1 対象地域における各パラメータの設定

ケーススタディとして淀川流域に立地する化学物質取扱い事業所を対象として流出事故発生確率と流出量の推定を行った。淀川は流路延長 75 km, 流域面積 8,240 km²に及び、取水地点の上流に人口約 150 万人の大規模な都市があることから、日本の他の大都市と比較して人間活動の影響を受けやすく、水道水源の潜在的な汚染リスクが他の主要河川よりも高い状況にある(国土交通省淀川河川事務所)。濃度のリスク評価の対象とする浄水場取水口については、淀川の河口からおよそ 10 km に位置しており、大阪府内の上水を供給している柴島上水取水口を対象とした。

国土交通省の水質水門データベースの枚方観測所における 1970 年から 2021 年の流量データのうち、データの得られるものの平均値をとり、河川流量に 293.7 m³/s を用いた。河川流速は流れの遅い平野部を仮定し 1 m/s であるとして断面積を求めた。年間のデータが得られた 2002 年の枚方観測所における水深と流量から H-Q 式の補正係数を算出し式(3.13)において、 $a=3.8 \times 10^{-3}$, $b=1.8 \times 10^{-6}$ とした。

3.4.2 対象事業所の設定

本研究でケーススタディの対象とする事業所の情報を表 3-6 に示す。事業所の化学物質貯蔵量は Hamamoto et al. (2021) の方法により 2021 年度の Pollutant Release and Transfer Register(PRTR 制度)において届け出られている排出量・移動量を用いて推定した。当該事業所は京都府京都市右京区においてテトラクロロエチレンを取扱う事業所である。テトラクロロエチレンはフロンガスの製造や金属の洗浄剤として使用されているが、高い毒性を持つ物質とされており、実験動物に対しては発がん性が認められている。また、水質汚濁防止法においては有害物質に指定されており、排水基準が設けられている他、水道水質基準値が指定されている物質もある。また、化学物質濃度の評価は対象事業所からおよそ 40km 下流に位置する柴島浄水場の上水取水口を対象とした。動水勾配は国土交通省の地理院地図より得た、取水口と事業所の標高差から算出した。

テトラクロロエチレンは水道水質基準項目が設けられている物質であり、0.01 mg/L が基準値として定められている。POD は Buben and O'Flanerty (1985) の 6 週のマウスの経口、Hayes ら (1986) の 90 日のラットの飲水 NOAEL 14 mg/kg/day を用い、UFs は 1000(種差および個体差について 100、発がん性について 10)を適用した。これらの値から亜急性参考値として 0.35 mg/L を得た。

表 3-6 対象事業所の貯蔵物質及び立地の情報

対象物質	テトラクロロエチレン	
推定貯蔵量 [kg]		5.7×10^6
浄水場取水口までの流下距離 [km]		40
動水勾配		4.0×10^{-4}
水質基準値 [mg/L]		0.01
亜急性参考値 [mg/L]		0.35
	5弱	86.4
今後30年間の震度*の超過確率 [%]	5強	61.5
(国立研究開発法人防災科学技術研究所 (2024))	6弱	17.5
	6強	1.9

*震度は気象庁が定める計測震度を示す。

3.4.3 対策オプション導入の基準

3.4.3.1 ハザード比と目標貯蔵量の算出

事業所で貯蔵しうる化学物質貯蔵量の最大値 S_{max} [kg]と対象河川の渇水時の流量 Q_{min} [m³/s]を用いて、下流の浄水場取水口での潜在的到達濃度の C_p [mg/L]を式(3.17)～式(3.20)のように求めた。

$$C_p = \frac{S_{max}}{A_s \sqrt{4\pi D_s (L/u)}} \quad \text{式(3.17)}$$

$$A_s = \frac{Q_s}{u} \quad \text{式(3.18)}$$

$$D_s = 5.93 H_s u_s^* \quad \text{式(3.19)}$$

$$u_s^* = \sqrt{g R_s I_e} \quad \text{式(3.20)}$$

変数	意味
C_p	取水口での化学物質の潜在到達濃度 [mg/L]
S_{max}	事業所の貯蔵量の最大値 [kg]
A_s	渇水時の最小流量における河川の平均断面積 [m ²]
D_s	渇水時の最小流量における拡散係数 [m ² /s]
Q_s	渇水時の河川の平均流量 [m ³ /s]
H_s	渇水時の最小流量における河川の平均水深 [m]
u_s^*	渇水時摩擦速度 [m/s]
R_s	渇水時の最小流量における河川の径深 [m]

評価対象とする化学物質の亜急性参考値もしくは水質基準値などの基準濃度を C_{st} [mg/L]として、式(3.17)で得た C_p [mg/L]とともに、式(3.21)のようにハザード比を算出した。

$$HQ_c = \frac{C_p}{C_{st}} \quad \text{式(3.21)}$$

変数	意味
HQ_c	取水口での化学物質の濃度のハザード比 [-]
C_{st}	化学物質濃度の基準値 [mg/L]

HQ_c の値から、浄水場取水口への影響のみを考えた場合、事業所側で導入すべき対策は表 3-7 のように場合分けすることができる。

表 3-7 ハザード比と事業所で最低限導入すべき対策オプションの目安

Risk state	ハザード比の範囲	対策オプションの導入目安
1	$HQ_c < 1$	不要
2	$1 \leq HQ_c < 10$	防油堤又は従業員による流出防止措置に準ずる対策
3	$10 \leq HQ_c < 100$	防油堤と従業員による流出防止措置またはそれらに準ずる対策
4	$100 \leq HQ_c$	全ての対策オプションに加え、貯蔵量の制限が必要

また、貯蔵量の低減と組み合わせる場合、貯蔵量の目標値は式(3.22)のよう算出する。 RR_{max} は事業所が導入している対策オプションが全て失敗した場合の流出率を表し、 $S_{target} [\text{kg}]$ は化学物質貯蔵量の目標値を表す。すなわち、式(3.7)から全ての対策オプションが失敗した場合の化学物質の流出量を算出することができ、 HQ_c を用いてワーストケースにおいても下流の浄水場取水口への影響が起こらないために、維持すべき化学物質の貯蔵量を算出することができる。

$$\frac{S_{target}}{S_{max}} = \frac{1}{HQ_c} \times \frac{1}{RR_{max}} \quad \text{式(3.22)}$$

変数	意味
S_{target}	化学物質貯蔵量の目標値 [kg]
S_{max}	化学物質貯蔵量の最大値 [kg]
RR_{max}	事業所が導入している対策オプションが全て失敗した場合の流出率 [-]

3.4.3.2 Risk state 1 ($HQ_c < 1$ のとき)

Worst 条件においても事業所から流出した化学物質により下流の取水口での化学物質濃度が基準値を超えるリスクは小さいと推定されるため、対策オプション導入の優先度は低いと判断する。

3.4.3.3 Risk state 2 ($1 \leq HQ_c < 10$ のとき)

未対策の場合、Worst 条件においても事業所から流出した化学物質により下流の取水口での化学物質濃度が基準値を超える可能性がある。事業所からの流出量が 10 分の 1 未満になれば、取水口での化学物質濃度は基準値を下回ると推定されるため、少なくとも防油堤 1 つ以上またはこれに相当する対策オプションの導入が必要である。

平常時の化学物質貯蔵量を HQ_c が 1 未満になるような値で維持することで、流出時の下流取水口での化学物質濃度超過のリスクを低減することも可能である。

3.4.3.4 Risk state 3 ($10 \leq HQ_c < 100$ のとき)

未対策の場合、Worst 条件においても事業所から流出した化学物質により下流の取水口での化学物質濃度が基準値を超える可能性がある。事業所からの流出量が 100 分の 1 未満になれば、取水口での化学物質濃度は基準値を下回ると推定されるため、少なくとも防油堤と従業員による流出防止措置の組合せもしくはこれに相当する対策オプションの導入が必要である。

または、平常時の化学物質貯蔵量を HQ_c が 1 未満になるような値で維持することで、流出時の下流取水口での化学物質濃度超過のリスクを低減する。

3.4.3.5 Risk state 4 ($100 \leq HQ_c$ のとき)

本研究で想定している全ての対策オプションを採用しても、Worst 条件で下流取水口での化学物質濃度が基準値を超過する可能性がある。防油堤を複数採用するなどの対策オプションの追加と平常時の化学物質貯蔵量の低減する必要がある。

3.4.4 感度解析の条件とその結果

対策オプション導入の基準について方法の有用性を検証するために感度解析を行った。表 3-8 に感度解析の条件を示す。感度解析の変数には、30 年以内の震度の超過確率、化学物質の貯蔵量、河川の平均流量、浄水場取水口までの距離を設定し、浄水場取水口での濃度を算出した。感度解析には Low, Base, High の値を設定した。Base は表 3.5 に示すケーススタディ対象事業所で設定した値である。震度の超過確率の Low には Base の 1/2 の値を、High には震度 6 強を 50% として、震度 5 弱～震度 6 強の地震の発生確率が均等になるように設定した。化学物質の貯蔵量はケーススタディでの値を Base とし、貯蔵量の 10 分の 1 を Low、10 倍を High とした。平均の河川流量は国土交通省の水質水門データベースの枚方観測所における 1970 年から 2021 年の流量データのうち、データの得られるものの最小値である $62.8 \text{ m}^3/\text{s}$ を Low とし、平均流量の 2 倍を High とした。また、河川流量 Low の際の平均水深は 1m、High は 3m としている。浄水場取水口までの距離は Base の 40km をもとに、最も近い場合として 1km を Low、遠い場合として 80km を High に設定した。

表 3-8 下流の浄水場取水口周辺の物質濃度に対する感度解析の条件

変数	感度解析条件			
	Low	Base	High	
今後30年間の震度*の超過確率 [%] (国立研究開発法人 防災科学技術研究所 (2024))	5弱	43.2	86.4	99.9
	5強	30.8	61.5	63.3
	6弱	8.75	17.5	66.6
	6強	0.95	1.9	50
化学物質貯蔵量 [kg]		5.7×10^5	5.7×10^6	5.7×10^7
河川流量 [m^3/s]		62.8	293.7	587.4
浄水場までの距離 [km]		1	40	80

図 3-5 から図 3-8 に Case1 での取水口に到達する化学物質濃度、つまり取水口に到達しうる最大濃度に対する、震度の超過確率、化学物質の貯蔵量、河川流量、浄水場取水口までの距離のそれぞれの感度解析結果を示す。図 3-6 に示すように、化学物質濃度は物質の貯蔵量に比例するため、他の変数に比べて感度が高い。次に図 3-7 に示す河川流量の感度が高く、渇水時は平常時に対して、流出量が同じでも取水口に到達する濃度が 10 倍程度になることが分かる。図 3-5 に示すように、地震の発生頻度は事故の発生確率に影響するため、変動しても濃度の超過確率は変化するが、取水口に到達する最大濃度は変わらない。図 3-8 に示すように、取水口までの距離が最も近い場合は遠い場合と比べて、3 倍程度の濃度となるが、貯蔵量、河川流量と比較すると変動は少ないことが分かる。

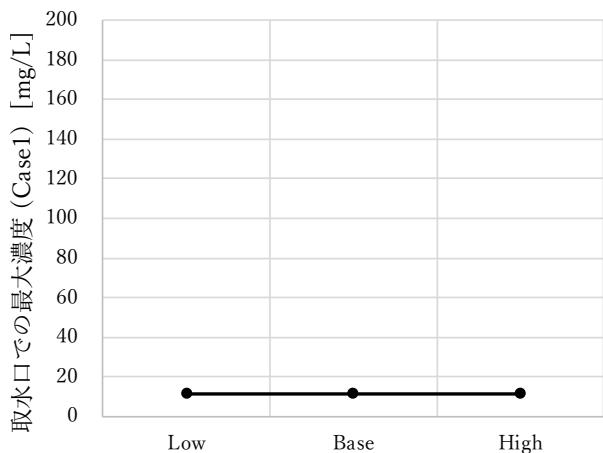


図 3-5 震度超過確率の感度解析の結果

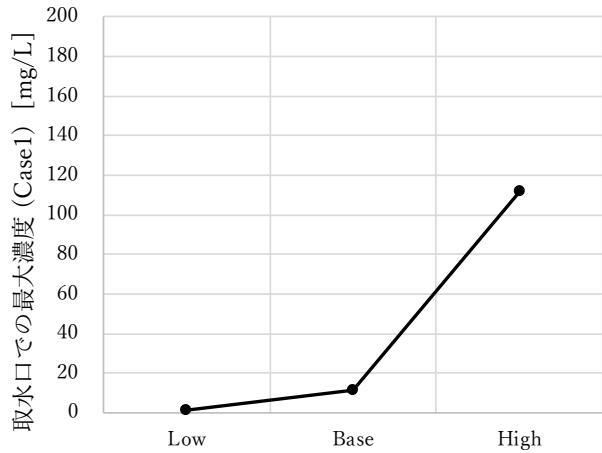


図 3-6 化学物質貯蔵の感度解析の結果

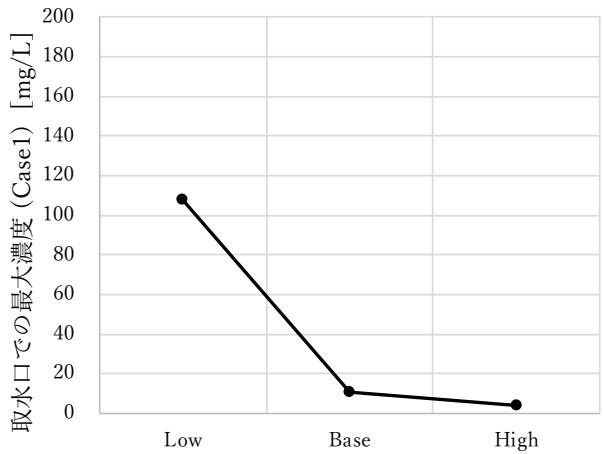


図 3-7 河川流量の感度解析の結果

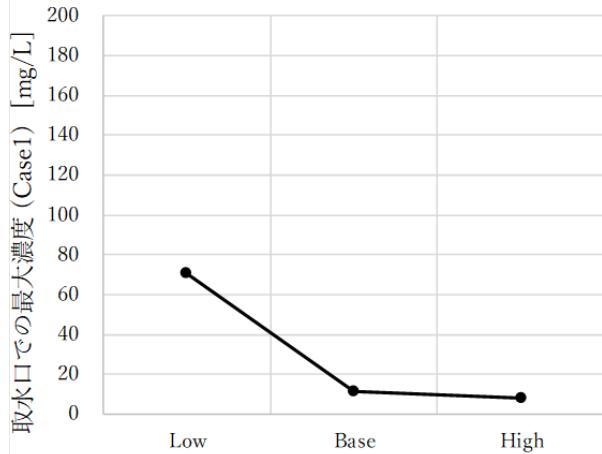


図 3-8 浄水場までの距離の感度解析の結果

3.4.5 取水口での最大濃度の推定結果

3.4.5.1 結果の概要

表 3-9 に対策ケースごとの比較結果を示す。取水口での最大濃度は各ケースのうち、事業所外への流出量が最も大きくなるシナリオで取水口に到達する最大の化学物質濃度を表す。Case1 は、対策オプションがない場合を示しており、取水口での最大濃度と超過確率が最大である。Case2～4 は、それぞれ防油堤、緊急遮断弁、従業員による流出防止措置のそれぞれ 1 つの対策オプションしかないケースである。緊急遮断弁は機能喪失時に全量を放出すると仮定しているため、Case3 の取水口での最大濃度は Case1 と同様に全ケース中最大であった。Case2, Case3, Case4 の超過確率の違いは、各対策オプションの失敗確率に依存しており、失敗確率が最も低い防油堤を導入している Case2 が超過確率が最も低くなっている。Case5～Case7 は、2 つの対策オプションを導入したケースであり、Case5 は防油堤と緊急遮断弁、Case6 は緊急遮断弁と従業員による流出防止措置、Case7 は防油堤と従業員による流出防止措置である。3 つのケース ($m_i=2$) の中で、Case7 の取水口の最大濃度が最も小さく、亜急性参照値を下回っている。超過確率は、失敗確率の小さい対策オプションの組み合わせの順に小さくなる。Case8 は、3 つの対策オプションをすべて導入したケースであり、取水口の最大濃度および超過確率が最も小さい。対策オプション導入数 m_i を増やしていくと取水口での最大濃度と超過確率はだいに小さくなっていく。

表 3-9 対策ケースの比較結果

Case	m_i	取水口での 最大濃度 [mg/L]	超過確率 [/year]	
			水質基準値	亜急性参照値
1	0	11	1.6×10^{-3}	1.6×10^{-3}
2	1	1.1	1.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}
3	1	11	1.6×10^{-3}	2.2×10^{-5}
4	1	1.1	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}
5	2	1.1	1.6×10^{-6}	2.2×10^{-8}
6	2	1.1	1.6×10^{-4}	2.2×10^{-6}
7	2	1.1×10^{-1}	1.6×10^{-7}	0
8	3	1.1×10^{-1}	2.2×10^{-9}	0

3.4.5.2 対策オプション導入数 $m_i=1$ (Case2,3,4) の場合

Case2,4 がともに取水口での最大濃度が対策なしの Case1 の 10 分の 1 となった。一方で緊急遮断弁は動作しなかった場合に貯蔵量の全量が流出してしまうため、Case3 では取水口での最大濃度は変化しなかった。超過確率は失敗確率が最も小さい防油堤(Case2)が最も小さく、次いで従業員による流出防止措置(Case4)、緊急遮断弁(Case3)の順となった。

3.4.5.3 対策オプション導入数 $m_i=2$ (Case5,6,7) の場合

防油堤と従業員による流出防止措置を導入した Case7 では最も流出量が多いシナリオでも取水口での最大濃度は亜急性参照値より小さくなるため、超過確率は 0 となった。対策オプション導入数が 1 つの

場合と同様、対策オプションに防油堤を含む Case5 と Case7 で超過確率が低い。防油堤以外の二つの対策を導入している Case6 は防油堤のみを導入している Case2 よりも超過確率が大きい。このことから防油堤は他の二つの対策オプションよりも優先して導入すべきであるといえる。

井上(1980)は社会的に許容される安全水準として発生頻度 $10^{-6}/\text{year}$ という値を提案し、この値未満の事象は発生する可能性が相当に小さいことを示した。本ケーススタディの場合、Case7 では全ての濃度の基準値に対する超過確率が $10^{-6}/\text{year}$ を下回っている。したがって本ケーススタディの事業所の場合、防油堤と従業員による流出防止措置を最低限導入していれば、地震時に河川に貯蔵物質が流出する事象の発生確率は社会的に許容できるレベルにまで低減することができると言える。

3.4.5.4 対策オプション導入数 $m_i=3$ (Case8) の場合

超過確率は対策を導入していない Case1 の 10^{-5} 以下となり、取水口での最大濃度は 100 分の 1 となった。水質基準値の超過確率は $2.2 \times 10^{-9}/\text{year}$ と最も小さい値となった。Case7 と同様 Case8 も濃度の超過確率が $10^{-6}/\text{year}$ を下回っており、発生確率は社会的に許容できるレベルであると言える。

3.4.5.5 大規模災害に対する発生確率の評価

災害の発生確率に対して $10^{-6}/\text{year}$ という基準値が提案されている一方で、石油コンビナートの防災アセスメント指針(2013)では、発生頻度が $10^{-6}/\text{year}$ 未満の災害についても影響度の特に高いもののみ発生確率を考慮しない「大規模災害のシナリオ」として検討することとしている。同指針では災害の影響度指標として距離を用い、事業所から 200m 以上離れた場所にまで影響が及ぶ可能性がある場合を大規模災害として検討するとしている。本研究のように河川への流出では、高濃度の化学物質が浄水場で処理しきれず上水として給水され場合、給水地域の多くの人々に影響を及ぼす可能性がある。したがって、河川への化学物質の流出は影響度が大きい事象として扱うべきであり、取水口での化学物質濃度の基準値超過の確率が非常に低い Case7 と 8 のように場合でも、発生確率によらずの流出事故リスクの低減を検討すべきである。

さらなる流出量の低減をするためには防油堤を複数採用することが有効である。実際に石油コンビナート等における特定防災施設等及び防災組織等に関する省令では、消防法で対象とする可燃性液体を 10,000kL 以上貯蔵する屋外貯蔵タンクを持つ事業所に対し、敷地内の屋外タンク貯蔵所の個別の防油堤の全てを囲む防油堤を設置し、二重の流出防護策を設けることを義務付けている。

また、ケーススタディの結果から緊急遮断弁の対策効果を高めるために、自家発電機の不始動しないよう事前に対策しておくことも有効である。式(3.5)より停電の発生確率は震度 6 強では 98%、5 弱でも 13% と高いため、緊急遮断弁の失敗確率も高くなっている。したがって事業所側で緊急遮断弁の失敗確率を低減するためには自家発電機の始動が失敗する確率を小さくすることが必要であり、定期的なメンテナンスなど常時の備えが重要である。

3.4.5.6 ケーススタディ対象事業所への対策オプションの導入基準の適用

ケーススタディ対象事業所での HQ_c を求め、対策オプションの導入基準を評価した。最大貯蔵量 S_{max} はケーススタディで式(3.22)により算出した 5.7×10^6 kg、渴水時流量 Q_s と平均水深 H_s は、感度解析で用いた値を使用し、それぞれ $62.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、1 mとした。

テトラクロロエチレンの水質基準値 0.01 mg/L を化学物質濃度の基準値とした場合、 $HQ_c = 1.6 \times 10^4$ となり、Risk state 4 で対策オプションの導入と貯蔵量の削減を組み合わせたリスク低減対策が必要なレベルとなる図 3-9 に HQ_c と貯蔵量の関係を示す。グラフの最大値は S_{max} における HQ_c を表し、 HQ_c の値によって各貯蔵量におけるリスク状態を判断することができる。図 5 から、Risk state 3 に低減するためには、貯蔵量を 3.7×10^4 kg 以下、Risk state 2 は 3.7×10^3 kg 以下、Risk state 1 は 3.7×10^2 kg 以下に低減する必要があることがわかる。このように、事業所における化学物質の保管量に応じてリスク状態を判定し、推奨される対策方法の組み合わせを把握することができる。

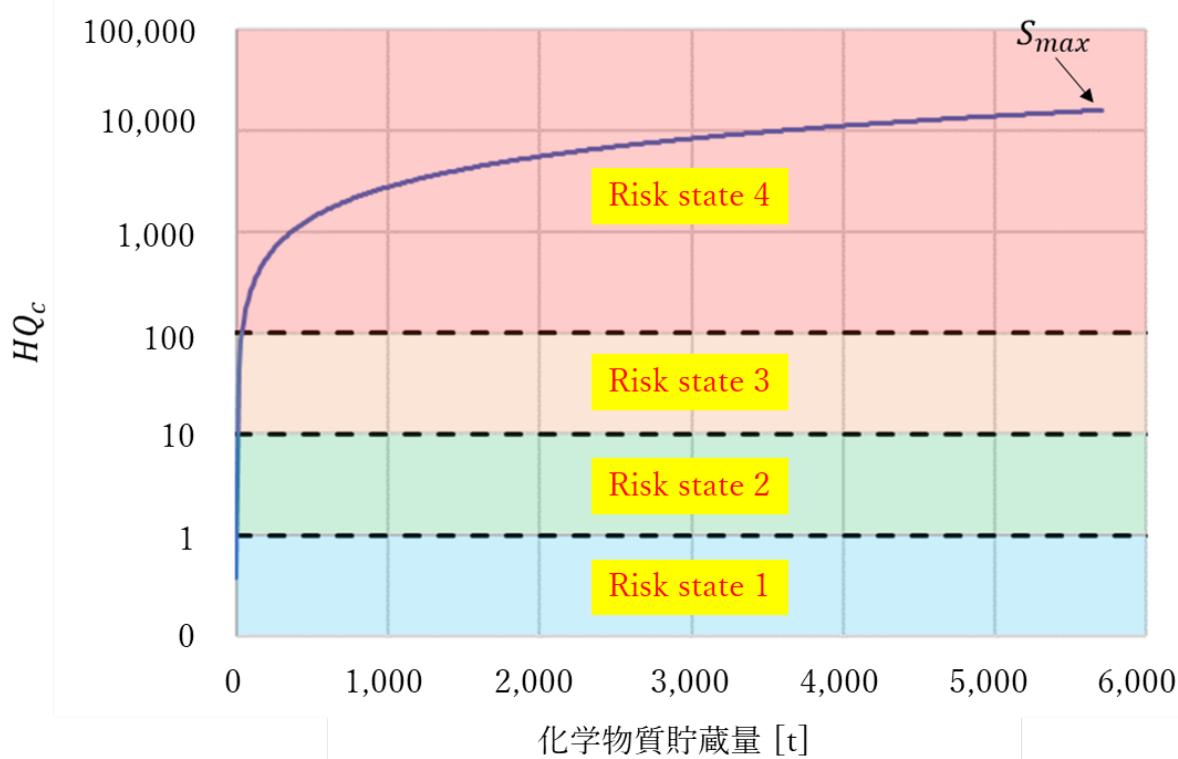


図 3-9 対象事業所における化学物質の貯蔵量とハザード比の関係

3.5 結言

本研究では、大規模地震発生時の化学物質の河川流出事象について、下流の浄水場取水口への取水影響を評価対象として、事業所が導入すべき対策オプションについて検討した。具体的には、事業所側の流出事故防止策の対策オプションとして、緊急遮断弁と防油堤、従業員による流出防止措置を想定し、これらの組合せによる対策オプションのケース設定を行った。ケース毎にタンク本体と配管からの流出を想定し、導入している対策オプションの成功・失敗により事故シナリオを作成した。これらのシナリオに対してそれぞれ発生確率と事業所外への流出量を求めて対策ケースの有効性の比較を行った。シナリオの発生確率は、貯蔵容器からの流出事故発生確率と導入している対策オプションの成功・失敗確率を用いて推算した。また、事業所外への流出量は化学物質の貯蔵量から対策オプションによる流出量の低減比率を用いて推算した。流出量の推定値から河川の移流拡散方程式により浄水場取水口での化学物質濃度を推算し、取水口での化学物質濃度が基準値を超過する確率を算出することで事故の発生確率と影響度の両方を考慮した対策オプションの組合せの評価検討を行った。

淀川水系でのケーススタディの結果、3つの対策オプションのうち、防油堤が事故の発生確率と流出量の両方を低減できる、最も有用な対策オプションであることが分かり、防油堤に次いで従業員による流出防止措置、緊急遮断弁の順に事故リスクの低減効果が高いことが分かった。また、さらなる事故リスクの低減のためには、防油堤等の多重化、自家発電機の定期的なメンテナンスなどを対策オプションとして提案した。

淀川水系でのケーススタディについて取水口での化学物質濃度に対し、地震の発生確率と化学物質の貯蔵量、河川流量と事業所から浄水場取水口までの距離を変数として感度解析を行った。その結果、貯蔵量と河川流量が取水口での濃度に対する感度が大きいことが分かった。この結果から、河川流量が最も小さく、かつ事業所で化学物質の貯蔵量が最も多くなるような状況をワーストケースとして解析を行い、ハザード比の値で対策オプションの導入基準を定めることを提案した。また、ハザード比と導入している対策オプション失敗時の流出比率を用いて、取水口での化学物質濃度が基準値を超えないための貯蔵量の目標値の算出方法について定義した。これらの方法論を用いることで、化学物質取扱事業者は河川への化学物質の流出事象に対して対策オプション及び化学物質貯蔵量の目安を把握することができ、適切な流出防護策の導入に役立てることができると考える。

本研究では、化学物質の河川への流出事象という、大量流出時に周辺住民への影響が考えられる事象を取扱ったため、リスク評価の中ではワーストケースとなるよういくつかの仮定をおいて解析を行った。化学物質貯蔵容器からの流出については、貯蔵形態は考慮せず、円筒型の屋外タンク貯蔵所の大破事象のみを対象とし、事業所外への流出量の全量が一度に河川へと排出されることを想定しているため、流出事故が発生した後の時間経過は考慮できておらず、今後の課題として残した。

参考文献

- Antonioni, G., Spadoni, G. and Cozzani, V. 2007. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 147, p. 48-59.
- Buben, J.A. and O'Flaherty, E.J. 1985. Delineation of the role of metabolism in the hepatotoxicity of trichloroethylene and perchloroethylene: a dose-effect study. *Toxicology and Applied Pharmacology*. Vol. 78, No. 1, p. 105-122.
- Elder, J. W. 1956. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, p. 544-560.
- Fabbrocino, G., Iervolino, I., Orlando, F. and Salzano, E. 2005. Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 123, p. 61-69.
- Federal Emergency Management Agency. 2022. Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 5.1. <https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_hazus-earthquake-model-technical-manual-5-1.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- Fire and Disaster Management Agency. 2013. Disaster Prevention Assessment Guidelines for Petroleum Complexes. <https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento100_44 Houkokusho_assessment.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- G&E Engineering Systems, Inc. (G&E). 1994. NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES EARTHQUAKE LOSS ESTIMATION METHODS TECHNICAL MANUAL, Fuel Line Systems, Communication Systems, Waste Water Systems.
- Haag, P.A.M., U. and Ale, B.J.M. 1999. Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book), Committee for the Prevention of Disasters. Directorate-General for Social Affairs and Employment.
- Hamamoto Shogo, Ito Lisa, Yoneyama Nozomu and Tokai Akihiro. 2021. Case Study for the Predictive Environmental Risk Assessment of Hexamethylenetetramine Release to the Yodo River during a Massive Tsunami Attack. *water*. Vol. 13, No.4, p. 549.
- Hamdan, F.H. 2000. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 53, No. 3, p. 307-333.
- Hayes, J.R., Conder, L.W. Jr. and Borzelleca, J.F. 1986. The subchronic toxicity of tetrachloroethylene (perchloroethylene) administered in the drinking water of rats. *Fundam Appl Toxicol* Vol. 7 No. 1, p. 119-125.
- Meng, Y., Lu, C., Yan, Y., Shi, L. and 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*. Vol. 94, p. 366-379.
- Manuel, J. 2014. Crisis and Emergency Risk Communication: Lessons from the Elk River Spill. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 122, No. 8, p. A214-A219.
- Salzano, E., Iervolino, I., and Fabbrocino, G. 2003. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 16 p. 403-409.

- 尼崎市・あまがさき未来協会. 1998. 尼崎市の記録:阪神・淡路大震災. <<https://da.lib.kobe-u.ac.jp/da/eqb/0100055388/>> (2024年11月7日閲覧).
- 井上威恭. 1980. 社会的に許容される安全水準. 高圧ガス. Vol. 17, No. 5, p. 2-8.
- 一般社団法人日本内燃力発電設備協会. 2012. 東日本大震災における自家発電設備調査報告書. <https://nega.or.jp/publication/press/2012/pdf/2012_03_15.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪府. 2013. 災害時における化学物質のリスク 低減検討業務報告書. <<https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4460/00138828/houkokusho.pdf>> (2024年11月7日閲覧).
- 環境省 水・大気環境局 土壌環境課 地下水・地盤環境室. 2010. 地下水汚染の未然防止のための構造と点検・管理に関するマニュアル (第1.1版). <<https://www.env.go.jp/water/chikasui/brief2012/manual.html>> (2024年11月7日閲覧).
- 経済産業省製造産業局化学物質管理課化学物質評価室 環境省大臣官房環境保健部環境安全課. 2024. 化学物質管理指針：災害による化学物質等による被害の未然防止に向けた好事例集. <https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/information/pdf/shishin_jireishuu.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- 国土交通省. 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/> (2024年11月7日閲覧).
- 国土交通省淀川河川事務所. 琵琶湖・淀川水系の取排水のしくみ. <<https://www.kkr.mlit.go.jp/yodogawa/know/summary/problem/problem-shikumi.html>> (2024年11月7日閲覧).
- 国土交通省国土地理院. 地理院地図 (電子国土 Web). <<https://maps.gsi.go.jp/#5/36.102376/140.097656/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>> (2024年11月7日閲覧).
- 国立医薬品食品衛生研究所. 2021. 令和2年度 第1回水質基準逐次改正検討会 資料2 亜急性参照値について. <<https://www.mhlw.go.jp/content/10901000/000730285.pdf>> (2024年11月7日閲覧).
- 国立研究開発法人 防災科学技術研究. 2024. 地震ハザードステーション. <<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>> (2024年11月7日閲覧).
- 財団法人 企業活力研究所. 2013. 東日本大震災を踏まえた企業の事業継続の実効性向上に関する調査研究報告書-グローバルな競争環境下におけるリスク対応力の向上とともにづくりの競争力の確保を目指して-. <https://www.bousai.go.jp/kyouiku/keizoku/keizoku12/kentoukai12_08.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- 水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会. 2013. 水道水源における消毒副生成物前駆物質 汚染対応方策について とりまとめ. <www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kentoukai/dl/shoudoku02.pdf> (2024年11月7日閲覧).
- 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也. 2014. 貯蔵タンクに対する地震・津波被害の判定方法事故シナリオ. 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 70, No. 2, p. I_822-I_827.
- 総務省消防庁予防課危険物保安室. 2014. 危険物施設の震災等対策ガイドライン【屋外タンク貯蔵所編】. <https://www.fdma.go.jp/publication/guideline/items/guideline_3.pdf> (2024年11月7日閲覧).

- 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. <<https://www.env.go.jp/content/900518774.pdf>> (2024年11月7日閲覧).
- 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. Vol. 26, No. 3, p. 131-140.
- 能島暢呂, 杉戸真太, 鈴木康夫, 石川裕, 奥村俊彦. 2003. 震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル. 土木学会論文集. No. 724 Vol. I -62, p. 225-238.
- 童華南, 山崎文雄. 1996. 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係. 生産研究. Vol. 48, No. 11, p. 547-550.
- 宮城県石油コンビナート等防災本部. 2014. 宮城県石油コンビナート等防災アセスメント調査. <<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/syoubou/miyagi-bousaikeikaku.html>> (2024年11月7日閲覧).
- 山田實, 亀井浅道. 1995. 阪神・淡路大震災における屋外タンク貯蔵所の被害状況. 安全工学. Vol. 34, No. 6, p. 459-465.

第4章 化学物質の河川流出と津波遡上による拡散が浄水処理システムへ及ぼす潜在的リスクの評価 -淀川水系を対象としたケーススタディ-

4.1 緒言

本章では、化学物質取扱事業所から河川への化学物質流出と、津波遡上の複合事象を取り上げ、事故シナリオのモデル化とリスク評価の枠組みを構築し、ワーストケースにおける当該事象によるリスクの有無と対策検討の必要性について考察する。

本章の構成は次の通りである。4.2節では津波に起因する化学物質の河川遡上による浄水場取水口への化学物質拡散事象について、課題とこれまでの行政等の取組について示し、本章の目的と評価モデルの枠組みを示す。本研究では、津波による化学物質の河川遡上による浄水場取水口への化学物質拡散事象について、リスクの有無を評価するために、ワーストケースを想定した解析を行うことを目的としてモデルの構築を行う。本研究では、化学物質の流出はPRTR法において排出量・移動量の届出が義務付けられていない複数の小規模事業所(届出外事業所)を対象とし、これらの事業所からの同時流出を想定した。4.3節では評価モデルの詳細について示す。本研究では、届出外事業所の化学物質貯蔵量を推計し、流出対象とした地域内立地する複数の小規模事業所が貯蔵している評価対象の化学物質の全量が河川へ流出すると仮定し、リスク評価を行う。また、津波モデルから河川中の化学物質の挙動をシミュレーションし、浄水場取水口における化学物質の濃度の時間変化及び、浄水処理過程における物質変化も考慮したリスク評価を実施する。4.4節では、ケーススタディとして柴島浄水場においてヘキサメチレンテトラミンの流出事故を想定したリスク評価を行い、結果と考察について示す。最後に、4.5節で本章の結論について述べる。

4.2 津波遡上と化学物質流出の併発事故における現状の課題

4.2.1 津波リスク評価の現状

2011年の東日本大震災での被災以降、多くの津波に対する被害想定やリスク評価研究がなされており、施設などの直接被害の評価(福谷ら(2015), 福谷ら(2021))だけでなく、津波による火災の延焼リスク評価研究(今津ら(2016), 大江・富田(2022)), 災害時の廃棄物量に着目した研究(青木ら(2022))など津波流による二次被害に着目した研究も多く実施してきた。中でも化学物質リスクに着目したものとして、川辺ら(2012)は東日本大震災において津波によるヒ素や鉛などの重金属を含んだ津波堆積物の拡散状況の調査を行い、土屋ら(2012)は、津波堆積物に含まれるヒ素のリスク評価手法を構築し、溶出によるリスクを明らかにした。このように、津波リスクとは津波による直接被害のみならず、化学物質の運搬等を伴う二次的な被害を想定したリスク評価が必要である。特に、東日本大震災では津波が河川を伝播することで浸水域が拡大した(Tanaka et al. (2020))。このような津波の河川遡上に着目し、永島・米山(2017)は淀川を対象として、波源から河川までの平面二次元と浄水場取水口周辺の三次元解析を組合せた津波モデルにより、塩水の混入による取水障害の可能性を評価した。このように東日本大震災では、津波による化学物質の拡散事例があり、河川遡上時には内陸部にまで影響を及ぼす可能性があるが、事業所から流出した化学物質が河川を遡上するような事象を想定したリスク評価は行われておらず、このような事象に対しての被害の有無は明らかとなっていない。

4.2.2 本研究の目的と評価の枠組み

上記のような背景から、本研究では、津波による化学物質の河川遡上を対象とした浄水場取水口の取水障害のリスク評価の方法論を構築し、リスクの有無を明らかにし、水道事業者及び化学物質取扱事業者が対策導入の要否を検討できるような枠組みを開発することを目的とした。リスクの有無を明らかにするために、評価に際してはワーストケースとなるような想定を行い、化学物質の河川遡上に対して、リスクの低減対策が必要であるかを判定できるような評価枠組みとした。

図 4-1 に評価の枠組みを示す。災害シナリオでは、震災により地盤が液状化し、施設に貯蔵されていた化学物質が河川に流出することを仮定した。その際、液状化のリスク指標として、地盤の液状化のしやすさの指標である PL 値を用いた。排出量推定モデルでは、PRTR データに基づく排出係数を用いて化学物質の取扱量を推計した。2022 年度における PRTR 対象物質の排出量の合計は、全国の届出事業所で 122kt、届出外事業所で 187kt であった(環境省(2024a), 環境省(2024b))。したがって、小規模事業所が多数密集しているような地域では、届出事業所よりも多くの有害化学物質が貯蔵されている可能性がある。したがって、本研究では、ワーストケースとして特定の地域に立地する複数の届出外事業所から化学物質が流出することを想定した。評価を行う化学物質に対し、各メッシュにおける貯蔵量を推定し、貯蔵量が多く、かつ地震時の被害の可能性が高いと予想されるメッシュ群を選定し、メッシュ内の貯留量の合計が河川へ流出するものとした。事業所から流出した化学物質は、メッシュ内に設定した仮想水路に流入し、河川に流出すると仮定した(石川・東海(2006))。この河川への流出量を津波モデル(永島・米山(2017))に適用し、化学物質の濃度分布の時間変化を推定した。最終的に浄水場に到達する化学物質の濃度、浄水処理の過程で除去または生成される物質濃度を推定し、水道水質基準と比較した。これらの分析手順により、地震後に河川に流出した化学物質がヒト健康、水生生物に与える潜在的な影響を評価した。

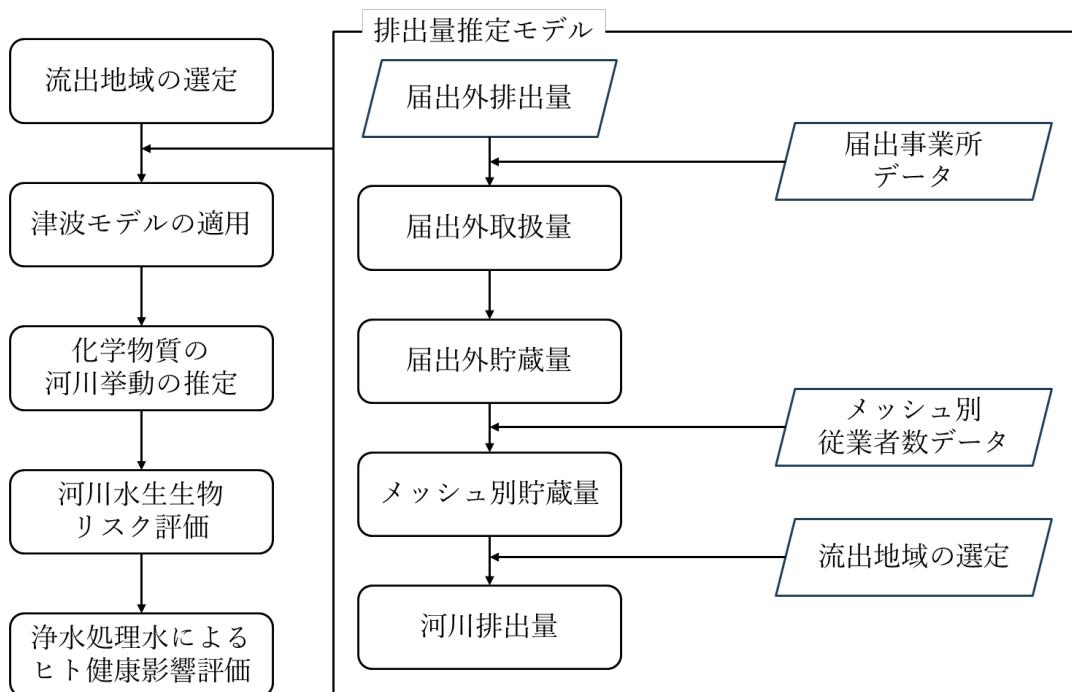


図 4-1 津波による化学物質の河川遡上事象の評価の枠組み

4.3 評価モデルの詳細

4.3.1 流出地域の選定

対象地域において、化学物質の貯蔵量と地震リスクを流出地域の選定基準とした。地震リスクには、各都道府県等が公表している被害想定から震度分布と液状化危険度を参考に流出地域の選定を行った。液状化危険度は、地層全体の液状化の可能性を表すPL値を評価指標とした。最もPL値が高い区分である25以上のメッシュのPL値は一律で27.5とした。図4-2のように、被害想定がPL値の階級別に色分けされている場合、階級の中央値をその区分におけるPL値とし、1kmメッシュ単位で平均をとりPL値を算出した。

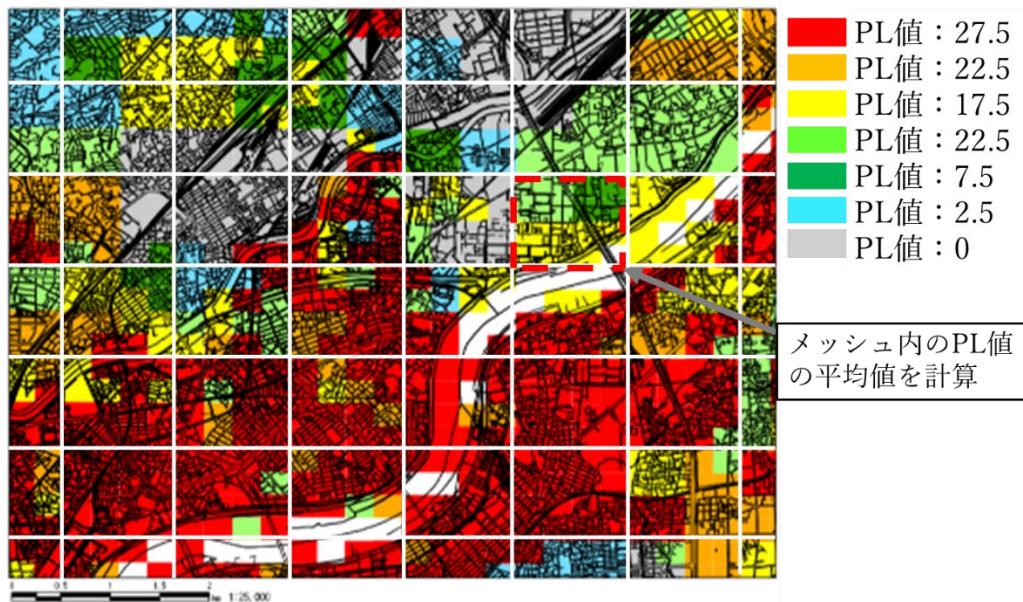


図4-2 1kmメッシュマップの作製イメージ

4.3.2 排出量推定モデル

4.3.2.1 届出外貯蔵量・メッシュ別貯蔵量の推計

排出量推定モデルでは、届出外事業所における化学物質のメッシュ別貯蔵量を環境省(2021)、経済産業省(2021)及び中久保ら(2016)の方法に基づいて推定した。以下で、届出排出量 E [kg/年]、届出外排出量 nE [kg/年]とする。排出量は大気、公共水域、土壤、埋立地への排出量の合計を表す。届出移動量 $Trans$ [kg/年]は届出事業所から事業所外へ移動する化学物質の量を表し、 $nTrans$ [kg/年]は届出事業所から事業所外へ移動する化学物質の量を表す。 $nTrans$ [kg/年]は式(4.1)により、届出事業所の排出量と移動量の比から推定した(環境省(2021))。化学物質の貯蔵量は工場での取扱量に依存するが、排出量と移動量には製品として出荷される分の化学物質は含まれない。したがって、式(4.2)のように排出係数を用いて排出量と移動量から取扱量を算出した(環境省(2021))。届出外事業所における化学物質取扱量 nHA [kg/年]は式(4.3)のように、排出係数が届出事業所における排出係数 EF と等しいと仮定して算出した(中久保ら(2016))。藤木ら(2009)は、京都市上下水道局が実施したヒアリング調査の中央値である 2 週間を貯蔵量換算係数として採用している。ただし、実際の調査では 3 年分を保管している事業所もあったため、より安全に推計するために 1 年分の取扱量を採用した(式(4.4))。全産業の従業員数 W を振り分け指標とし、メッシュ別の化学物質の貯蔵量[kg/日]を算出した。従業員数のメッシュデータは e-Stat の人口基本集計より引用した(政府統計の総合窓口(e-Stat) (2017))。メッシュ別の届出外事業所の貯蔵量 S_m [kg/日]は届出外事業所の貯蔵量 S [kg/日]を算出した(式(4.5))。

$$nTrans = nE \times \frac{Trans}{E} \quad \text{式(4.1)}$$

$$EF = \frac{E + Trans}{HA} \quad \text{式(4.2)}$$

$$nHA = \frac{nE + nTrans}{EF} \quad \text{式(4.3)}$$

$$S = nHA \quad \text{式(4.4)}$$

$$S_m = \frac{W_m}{W} \times S \quad \text{式(4.5)}$$

変数	意味
$nTrans$	届出外事業所からの移動量 [kg/年]
nE	届出外事業所からの排出量 [kg/年]
$Trans$	届出事業所からの移動量 [kg/年]
E	届出事業所からの排出量 [kg/年]
HA	届出事業所での取扱量 [kg/年]
EF	排出係数 [-]
nHA	届出外事業所での取扱量 [kg/年]
S	届出外事業所での貯蔵量 [kg/日]
S_m	届出外事業所でのメッシュ m 貯蔵量 [kg/日]
W	都道府県全産業の従業員数
W_m	全産業のメッシュ m における従業員数

4.3.2.2 河川への流出量の推計

化学物質の河川への流出については、短時間に多量の化学物質が河川に流れ込むと、少量が長期間にわたって河川に流れ込むよりも環境中の濃度が高くなり、被害が大きくなる。そこで、本研究ではタンクの倒壊や転倒により、貯蔵量の全量が短時間に流出すると仮定した(式(4.6))。

$$q = \frac{V_{tot}}{T_{release}} \quad \text{式(4.6)}$$

ただし、 $t > T_{release}$, $q = 0$ 。

変数	意味
q	流出速度 [m/s]
V_{tot}	化学物質の総量 [m^3]
$T_{release}$	時刻 0 [s]から化学物質の流出が終了するまでの時刻 [s]

したがって dV [m^3]は式(4.7)のように表すことができる。

$$dV = q \times \Delta t \quad \text{式(4.7)}$$

変数	意味
dV	時刻 t におけるタンクから漏出する化学物質の量 [m^3]
Δt	計算時間の増分

河川への化学物質の排出による河川中の濃度の変化は式(4.8)~式(4.10)のように表した(田窪ら(2022))。

$$\tilde{V}_t = V_t + dV \quad \text{式(4.8)}$$

$$\tilde{C}_t = \frac{C_t \times 10^3}{\tilde{V}_t} \times 10^{-3} \quad \text{式(4.9)}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_t &= \frac{\rho_t V_t + \rho_c dV}{\tilde{V}_t} \\ &= \rho_0 + \tilde{C}_t \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) \times 10^3 \end{aligned} \quad \text{式(4.10)}$$

変数	意味
V_t	流出セルの時刻 t ($\leq T_{release}$) におけるセルの体積 [m^3]
C_t	流出セルの時刻 t ($\leq T_{release}$) における化学物質の濃度 [mg/L]
ρ_t	流出セルの時刻 t ($\leq T_{release}$) におけるセルの密度 [kg/m^3]
\tilde{V}_t	流出後のセルの体積 [m^3]
\tilde{C}_t	流出後の化学物質の濃度 [mg/L]
$\tilde{\rho}_t$	流出後のセルの密度 [kg/m^3]
ρ_0	水の密度 [kg/m^3]
ρ_c	化学物質の密度 [kg/m^3]

化学物質流出の際に、 \tilde{V}_t が化学物質流出セルのセル体積を超える場合には鉛直方向に 1 つ上のセルに超過分の体積が加わるとする。なお、そのセルにおいても化学物質濃度は \tilde{C}_t 、密度は $\tilde{\rho}_t$ と設定する(田窪ら(2022))。

4.3.3 津波モデル

流体密度が変化する非定常流れの基礎方程式は以下のとおりである(永島・米山(2017))。なお、 j に総和の規約を適用することとする。

流体速度の基礎方程式

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{式(4.11)}$$

流体の運動方程式 ($i=1,2,3$)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad \text{式(4.12)}$$

乱流評価式 (標準 $k-\epsilon$ モデル)

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \bar{\rho} \epsilon \quad \text{式(4.13)}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{式(4.14)}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{式(4.15)}$$

$$P_k = \frac{1}{2} \bar{\rho} \nu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad \text{式(4.16)}$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_{\epsilon 1} = 1.45, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09 \quad \text{式(4.17)}$$

化学物質の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\bar{C} \cdot \bar{u}_j + \left(\alpha + \frac{\nu_t}{S_{c_t}} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right\} \quad \text{式(4.18)}$$

$$S_{c_t} = 1.0 / 1.2 \quad \text{式(4.19)}$$

化学物質濃度と流体密度の関係式

$$\bar{\rho} = \rho_0 + C \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c} \right) \times 10^3 \quad \text{式 (4.20)}$$

ρ_0 については、以下の推定式を用いる(George S. 1975)。

$$\begin{aligned}\rho_0 = & (999.83952 + 16.945176T - 7.987041 \times 10^{-3}T^2 \\ & - 46.170461 \times 10^{-6}T^3 + 105.56302 \times 10^{-9}T^4 \\ & - 280.54253 \times 10^{-12}T^5)/(1 + 16.879850 \times 10^{-3}T)\end{aligned}\quad \text{式(4.21)}$$

\tilde{u}_i と \bar{u}_i の関係式 ($i=1,2,3$)

$$\tilde{u}_i = \bar{u}_i - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\nu_t}{S_{ct}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} \quad \text{式(4.22)}$$

変数	意味
u_i	流速の各方向成分 [m/s]
ρ	流体の密度 [kg/m ³]
G_i	単位質量あたりの外力の各方向成分 [N/kg]
p	圧力 [N/m ²]
ν	動粘性係数 (=1.0 × 10 ⁻⁶) [m ² /s]
k	乱流エネルギー ($\equiv \bar{\rho} u_j'' u_j'' / 2\bar{\rho}$) [m ² /s ²]
ϵ	乱流エネルギー散逸率 ($\equiv \nu \bar{\rho} u_{i,j}'' u_{i,j}'' / \bar{\rho}$) [m ² /s ³]
ν_t	渦動粘性係数 [m ² /s]
P_k	乱流エネルギーの生成項
C	化学物質濃度 [mg/L]
α	分子拡散率 [m ² /s]
S_{ct}	乱流シュミット数=1.0/1.2 (細田(1990))
ρ_0	水の密度 [kg/m ³]
ρ_c	化学物質の密度 [kg/m ³]
T	流体の温度 [°C]
$-$	レイノルズ平均量
\sim	ファーブル平均量
$'$	レイノルズ平均量からの変動量

4.3.4 河川水生生物に対するリスクの推定

式(4.23)のように定義し、河川水生生物が化学物質に短期間暴露される生態リスクを評価した。濃度と継続時間の積は、時間幅を加算して算出した。 Δt から時間 t_1 から t_2 を加算して濃度と継続時間の積を算出した。*Risk score*が 1 より大きい場合、河川水生生物への影響がある。1 未満の場合は河川水生生物への影響はない。河川水生生物に対するリスク評価は濃度が上昇し、再度下降するまでのピークにおいて算出した。濃度上昇のピークの開始時刻 t_1 は、最大濃度の 10 分の 1 を超える時刻とし、終了時刻 t_2 は最大濃度の 10 分の 1 を下回る時刻とした。

$$Risk\ score = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} C_t \Delta t}{C_{acute} \times T_{acute}} \quad \text{式(4.23)}$$

変数	意味
C_t	濃度測定点における時間 t での物質濃度 [mg/L]
C_{acute}	化学物質の毒性試験結果の急性毒性値 [mg/L]
T_{acute}	毒性試験における持続時間 [s]
t_1	濃度上昇のピークの開始時刻
t_2	濃度上昇のピークの終了時刻

4.3.5 塩素処理過程での化学物質の生成量の推定

化学物質を含む河川水が浄水場に取水され、浄水処理により浄化または、塩素処理等により副生成物が生成されることを想定し、給水中の化学物質濃度を推定した。 t_1 から t_2 [s]を原水中の化学物質のピークの継続時間とし、式(4.24)のように処理後の給水中の化学物質濃度を推定した。ワーストケースを想定するため、塩素処理により毒性の高い副生成物が生成するような化学物質を対象とする際は、式(4.25)のように、塩素処理による副生成物の生成率 $K_{productin}$ を仮定し、給水中の物質濃度を推定した。このような物質を想定する際は、浄水場における潜在的な生成量を算出するため、オゾン処理機能などの水処理機能は震災の被害により失われており、塩素処理により生成する物質濃度のみを想定する仮定を行った。給水中の化学物質濃度 C_A [mg/L]は、完全混合条件下での推定濃度である。ヒト健康リスク評価においても、評価は濃度上昇のピークにおいて算出した。

$$C_A = \frac{K_{purification} \times \sum_{t=t_1}^{t_2} C_t \Delta t \times Q_{intake}}{Q_{supply} \times (t_2 - t_1)} \quad \text{式(4.24)}$$

$$C_A = \frac{K_{productin} \times \sum_{t=t_1}^{t_2} C_t \Delta t \times Q_{intake}}{Q_{supply} \times (t_2 - t_1)} \quad \text{式(4.25)}$$

変数	意味
C_A	給水中の化学物質濃度の推定値 [mg/L]
$K_{purification}$	浄水処理による化学物質の浄化率
$K_{productin}$	浄水処理によって生成される単位質量あたりの最大の有害化学物質量
Q_{intake}	単位時間あたりに取水口の取水量 [L/s]
Q_{supply}	単位時間あたりの給水量 [L/s]

4.4 ケーススタディ

4.4.1 ケーススタディの条件

4.4.1.1 対象地と対象物質の性質

大阪府淀川中流域の淀川大堰周辺を対象とし、南海トラフ地震を想定してケーススタディを行った。本研究では、津波遡上による化学物質の遡上においてワーストケースの評価を行うために、淀川河口付近に到達する津波高が最も高いモデルを用いて解析を行った(内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会(2012))。大阪府の南海トラフ地震の液状化危険度の被害想定をもとに、筆者が1km メッシュマップを作成し、PL値を算出した(大阪府(2020))。1km メッシュのPL値は、各 250m メッシュマップのPL値の中央値の平均値を採用し、PL 値 25 以上のメッシュの PL 値は一律 27.5 とした。

図 4-3 に淀川大堰周辺の航空写真を示す。図 4.3 では対象地域である大阪市周辺の航空写真と、淀川とその支流である大川の分岐点に位置する淀川大堰周辺の拡大図を示しており、柴島浄水場の工業・上水取水口を示している。淀川大堰は、淀川河口から 9.8km の地点にあり、中央 4 門の制水ゲート(幅 55 m)と両サイドの 1 門ずつの流量調整ゲート(幅 40 m)から構成され、塩水の遡上の防止などの機能を持つ(淀川大堰工事誌編集委員会(1983))。淀川大堰の下流は朔望平均満潮位+0.9m とした(永島・米山(2017))。

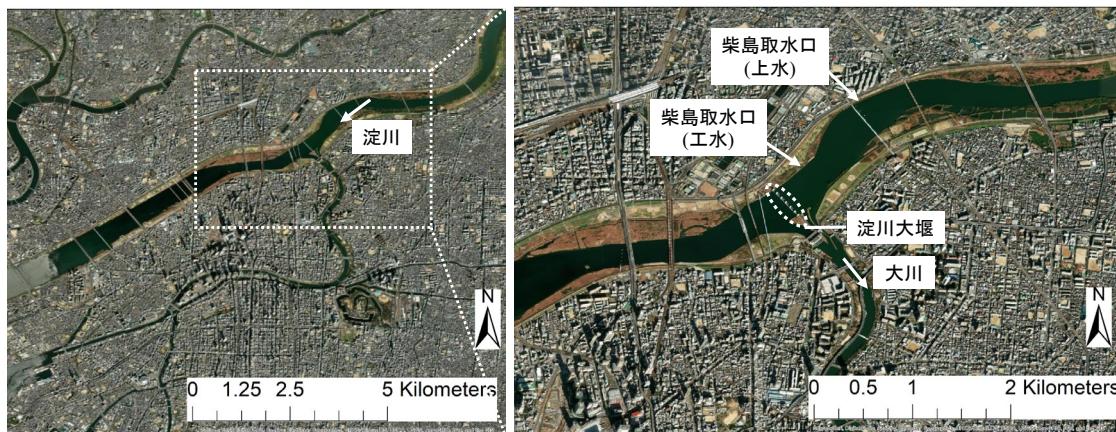


図 4-3 淀川大堰周辺の航空写真

本研究で対象化学物質としてヘキサメチレンテトラミンを取り上げた。ヘキサメチレンテトラミンは PRTR 制度において第一種指定化学物質に分類されている他、塩素処理過程でホルムアルデヒドを生成するため、浄水処理を考慮した本研究の枠組みにおいて、有害性のポテンシャルが最も高いと判断した。

4.4.1.2 ヘキサメチレンテトラミンの届出外貯蔵量推計における設定

表 4-1 に、流出地域における届出外事業所のヘキサメチレンテトラミン貯蔵量を推定するために使用したデータを示す。届出事業所は平成 30 年度の PRTR けんさくくんの大坂府のデータから(厚生労働省(2024)), 届出外事業所における排出量は環境省(2024b)の推計値を用いた。全産業の従業者数は 2017 年のメッシュデータから引用した (政府統計の総合窓口(e-Stat)(2017))。

表 4-1 大阪府におけるヘキサメチレンテトラミン貯蔵量推計のための基礎データ

大阪府の届出事業所における排出量の合計 [kg/年]	5
大阪府の届出事業所における移動量の合計 [kg/年]	4.8×10^3
大阪府の届出事業所における取扱量の合計 [kg/年]	2.3×10^5
大阪府の届出外事業所における排出量の推計値 [kg/年]	95
大阪府における全産業の従業者数	9.2×10^6

図 4-4 は、大阪府の全産業の従業者数をもとに作成したメッシュマップである。メッシュの濃淡は全産業の従業員数を示している。大阪市の中心部に位置し、色が濃い北区と中央区のメッシュは、地域の従業員数が多い。

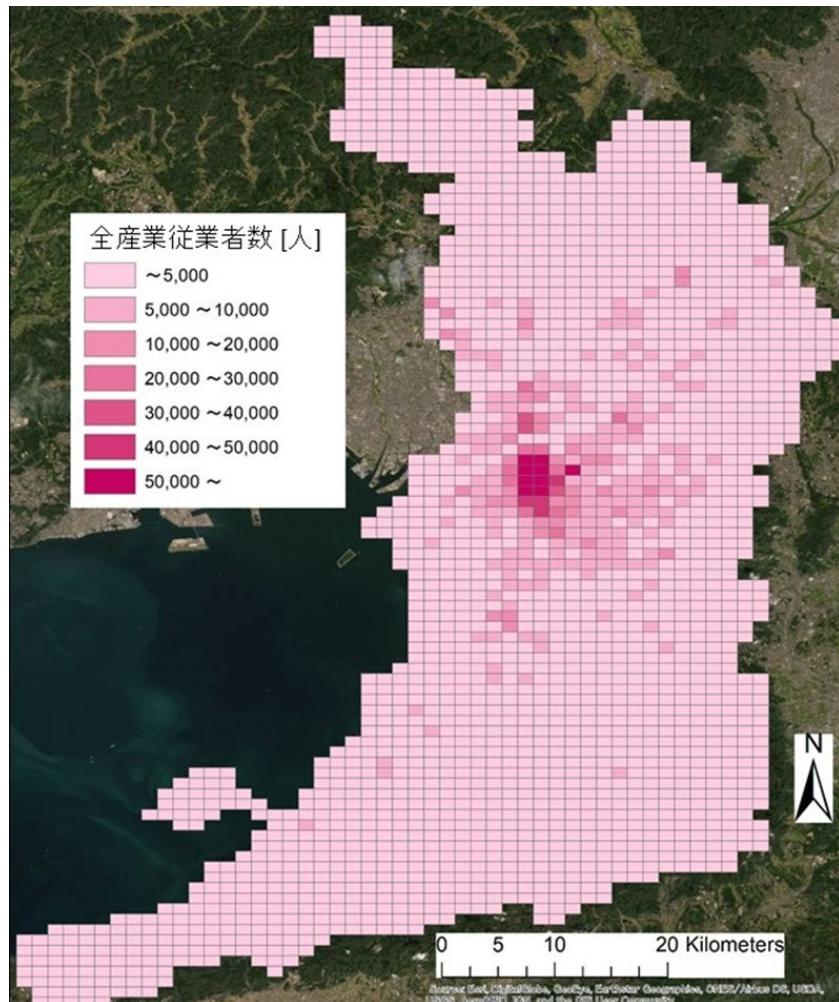


図 4-4 大阪府における全産業の従業者数メッシュマップ

4.4.1.3 淀川における津波モデルの適用

淀川の流量は津波がより上流まで影響を及ぼすと想定される渴水時の最小流量である $62 \text{ m}^3/\text{s}$ を想定した(永島・米山(2017))。このとき、河川水は淀川大堰を越えず、全流量が支流の大川に流入する(永島・米山(2017))。河川水は、淀川大堰の上流側、下流側ともに塩分濃度 0mg/L の淡水とした。水温は、水中での化学分解や水面から大気への揮発が起こりにくい低水温期を想定して 15°C とした(田窪ら(2022))。ヘキサメチレンテトラミンの分子拡散率は $2.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ とし((永島・米山(2017))), 水中での分解・反応、大気中への揮発、水中浮遊物質への吸着は考慮していない。したがって、本研究での解析は、短時間に出現する最大濃度の推定に相当する。計算の設定において、ヘキサメチレンテトラミンの環境中の濃度の推計値 ($3.0 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$) (独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))は加えず、流出による濃度上昇分のみを加えた。

4.4.1.4 リスク評価における設定

大阪市水道局(2019)によると、低水温期で取水量が最も少なくなる1月の平均取水量は、工業用水で $64,041 \text{ m}^3/\text{日}$ である。また、上水は柴島取水口と一津屋取水口から取水しており、ポンプの取水能力の比率は 88:12 であることから、この能力比で上水の平均取水量を割り、柴島浄水場取水口の取水量を算出した(大阪市水道局(2019))。同年の柴島浄水場の1月の平均取水量が $581,132 \text{ m}^3/\text{日}$ であったことから、柴島取水口の取水量 Q_{intake} を $5.9 \times 10^3 \text{ L/s}$ とし、平均給水量 $461,881 \text{ m}^3/\text{日}$ から、 Q_{supply} を $5.3 \times 10^3 \text{ L/s}$ とした。

ヘキサメチレンテトラミンの塩素化によるホルムアルデヒドの生成量を評価した研究によると、単位質量あたりのヘキサメチレンテトラミンから生成されるホルムアルデヒドの質量は約 $0.6\sim1.1\text{g}$ である(益崎ら(2013), 鶴田ら(2014),(2015),(2017))。安全側を推定するため、最も生成量の多いケースを想定し、 $K_{production}$ を 1.1 とした。水道水中のホルムアルデヒド濃度 C_A をホルムアルデヒド水質基準 (0.08mg/L) (厚生労働省(2024))と比較し、リスク評価を行った。

通常時の河川水中のヘキサメチレンテトラミン濃度は $3.0 \times 10^{-3}\text{mg/L}$ と推定される(独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))。有効数字を考慮し、平常時の河川水中濃度の有効数字の1桁目が変化する濃度、すなわち河川水中のヘキサメチレンテトラミン濃度が流出により $5.0 \times 10^{-5}\text{mg/L}$ 以上増加した場合にリスク評価を行い、増加量がこの値より小さい場合、四捨五入すると通常のヘキサメチレンテトラミン濃度と等しくなるため、リスク評価は行わなかった。水生生物に対するヘキサメチレンテトラミンの毒性データの最小値は、甲殻類のミジンコに対する遊泳阻害指標である 48 時間 EC₅₀ の 104 mg/L である(化学物質評価研究機構(2004))ことから C_{acute} とした。 T_{acute} をそれぞれ 104 mg/L および 172,800 秒(48 時間)とした。また、柴島浄水場では、工業用水の取水口では塩素処理が行われていないため、浄水処理後の給水中のホルムアルデヒドのリスク評価については上水の取水口のみを対象とした。

4.4.2 評価ケースの設定

評価ケースとして以下の2つを想定し、これらの比較を行うことで、流出位置に対する浄水場取水口への影響を評価した。いずれの場合も流出時間は 60 秒とし、地震発生から 18,000 秒(5 時間)後まで解析を行った。

ケース 1

このケースでは、淀川大堰下流の右岸で、ヘキサメチレンテトラミンが排出された場合を想定した。淀川大堰が完全に閉じている渴水時には、大堰を流下する河川流量はゼロになる。したがって、ヘキサメチレンテトラミンが大堰の下流に排出され、津波遡上により大堰を越流した場合、川の流れによって希釈されることなく、高濃度のヘキサメチレンテトラミンは津波が到達するまで大堰の直下に留まることが予想される。

ケース2

このケースでは、柴島浄水場の上水取水口の周辺にヘキサメチレンテトラミンが排出された場合を想定し、ワーストケースとなる排出地点での評価を行った。

4.4.3 ヘキサメチレンテトラミンの貯蔵量の推計結果

大阪府におけるヘキサメチレンテトラミンの届出外移動量は、式(4.1)より $9.2 \times 10^4 \text{ kg}$ と推定され、大阪府におけるヘキサメチレンテトラミンの届出移動量の約 19 倍である。排出係数は式(4.2)から 0.021 となる。式(4.3)から算出される届出外事業所での取扱量は $4.3 \times 10^6 \text{ kg}$ である。これらの値から各メッシュ内の届出外事業所におけるヘキサメチレンテトラミン貯蔵量の推計値を求め、柴島浄水場取水口に近く、貯蔵量の多い地域として、図 4-5 に示す 2km × 2km の 4 メッシュを対象地域とした。メッシュの網掛けはヘキサメチレンテトラミンの届出外貯蔵量を示し、濃い赤のメッシュほど推定貯蔵量が多いことを示す。淀川大堰の南西側で貯蔵量が多く、1 メッシュあたり 30 トン以上と推定されている。これらの地域は人口が多く、従業員数も多いことから貯蔵量も多く推定された。柴島浄水場の取水口は、いずれも淀川の右岸に位置していることから、右岸メッシュから淀川に流出した場合、大量のヘキサメチレンテトラミンが右岸取水口に流入することが予想される。そこで、ヘキサメチレンテトラミンの排出地点には淀川の右岸を想定した。表 4-2 に対象地域の届出外事業所のヘキサメチレンテトラミン貯蔵量を示す。図 4-5 の白い点線で囲まれた 4 メッシュのヘキサメチレンテトラミンの届出外貯蔵量の合計であり、 $4.9 \times 10^4 \text{ kg}$ となる。PL 値はすべてのメッシュで 15 を超えており、液状化ポテンシャルが大きく地震時の流出リスクが高い地域であることが分かる。

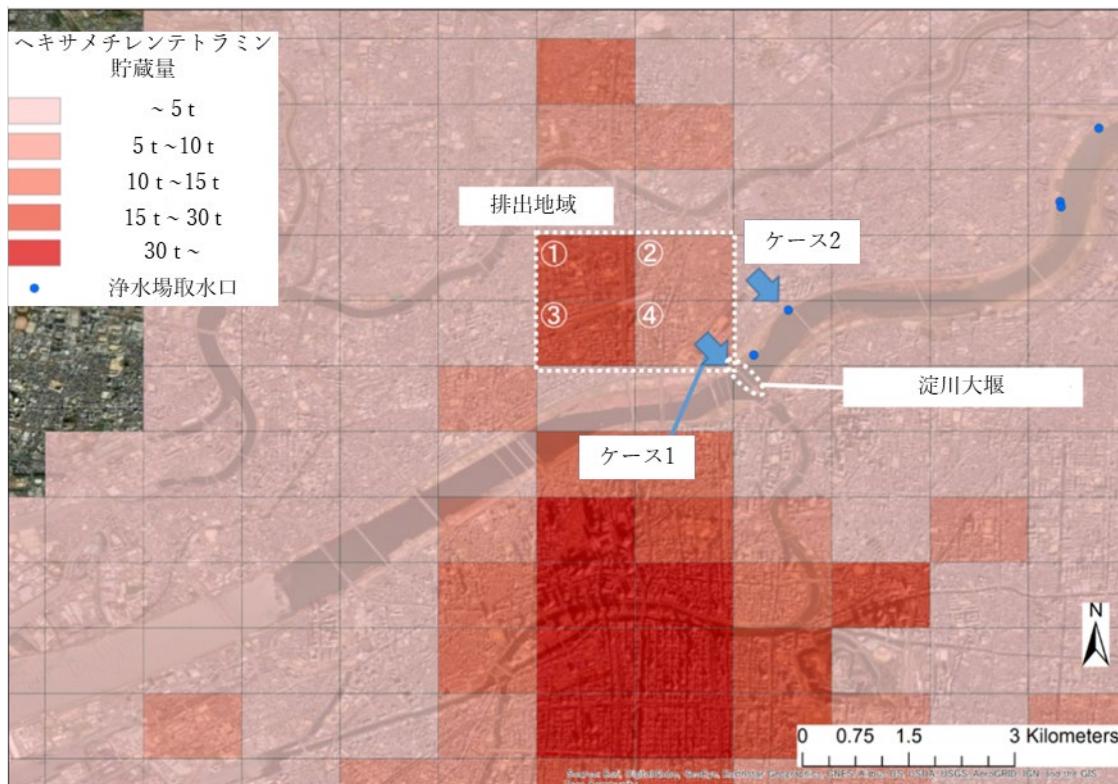


図 4-5 対象地域と河川への排出地点

表 4-2 流出地域の届出外事業所メッシュの貯蔵量

メッシュ番号	従業者数 (政府統計の総合窓口(e-Stat) (2017))	届出外貯蔵量 [kg]	PL値
1		3.9×10^4	26.9
2		1.2×10^4	25.9
3		3.9×10^4	25.9
4		1.4×10^4	23.3

表 4-3 に評価ケースの詳細を示す。ケース 1 では、淀川大堰下流の右岸からヘキサメチレンテトラミンが流出すると仮定した。渴水時に堰を越えて水が流れないことから、この地点でヘキサメチレンテトラミンが流出した場合、河川流下により希釈されず、津波が来るまで高濃度のヘキサメチレンテトラミンが残ることが予想され、津波遡上による濃度の上昇が最も確認できるポイントである。ケース 2 では、上水の取水口付近を流出地点と想定して設定し、ワーストケースでのリスク評価を実施した

。

表 4-3 事業所から河川への化学物質流出ケースの設定

	流出地域	流出地点*	流出地点から取水口までの距離
ケース1	淀川沿岸の貯蔵量、液状化危険度とともに高い2km×2kmメッシュ	淀川大堰の右岸	300m (工水)
			1,000m (上水)
ケース2	上に同じ	柴島浄水場の上水取水口	750m (工水)
		直上の水面	0m (上水)

*詳細は図 4-5 に示す。

4.4.4 ケース 1 の解析結果

4.4.4.1 ヘキサメチレンテトラミンの挙動と濃度分布

図 4-6, 図 4-7, 図 4-8, 図 4-9 は、淀川水路におけるヘキサメチレンテトラミンの濃度分布を示す。図右のカラーバーはヘキサメチレンテトラミンの濃度を示し、 0mg/L から $1.0 \times 10^{-3}\text{ mg/L}$ の範囲である。図中の秒数は地震発生後の経過時間を示し、それぞれ流出直後(300 秒), 津波到達前(8,700 秒), 津波拡散後(11,100 秒), 通常流に戻った後(18,000 秒)の濃度分布図を表している。濃度分布図においては、通常時の河川水中のヘキサメチレンテトラミン濃度の推定値 $3.0 \times 10^{-3}\text{ mg/L}$ (独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))は考慮せず、事業所からの排出量から推定される濃度のみを示している。

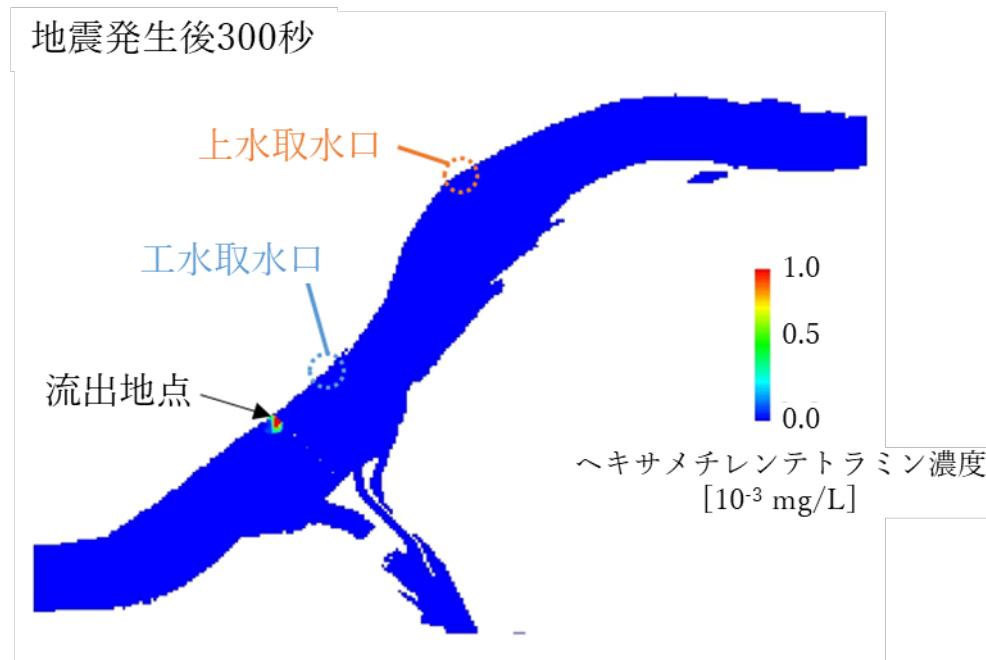


図 4-6 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 300 秒) (ケース 1)

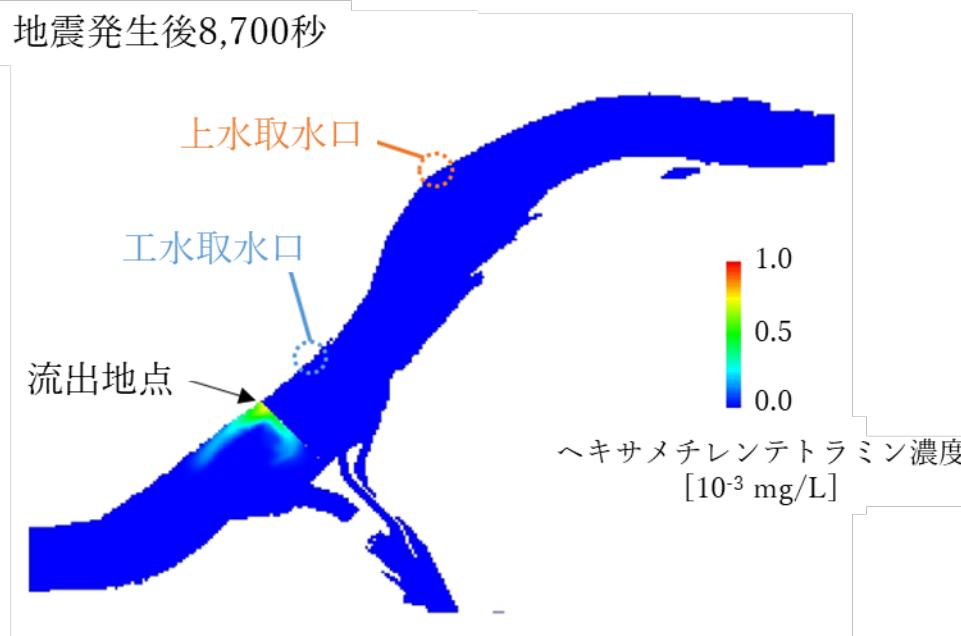


図 4-7 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 8,700 秒) (ケース 1)

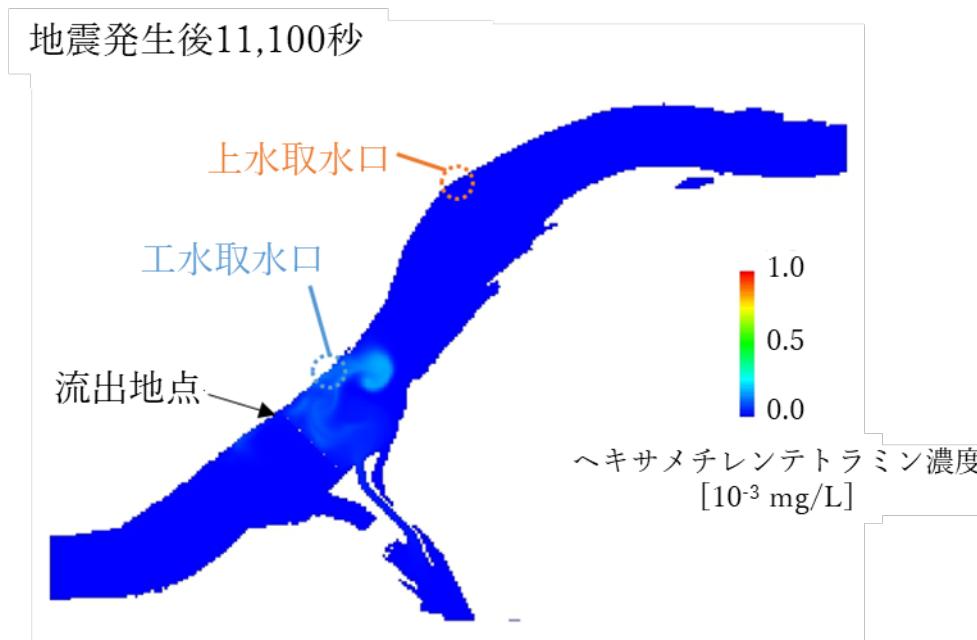


図 4-8 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 11,100 秒) (ケース 1)

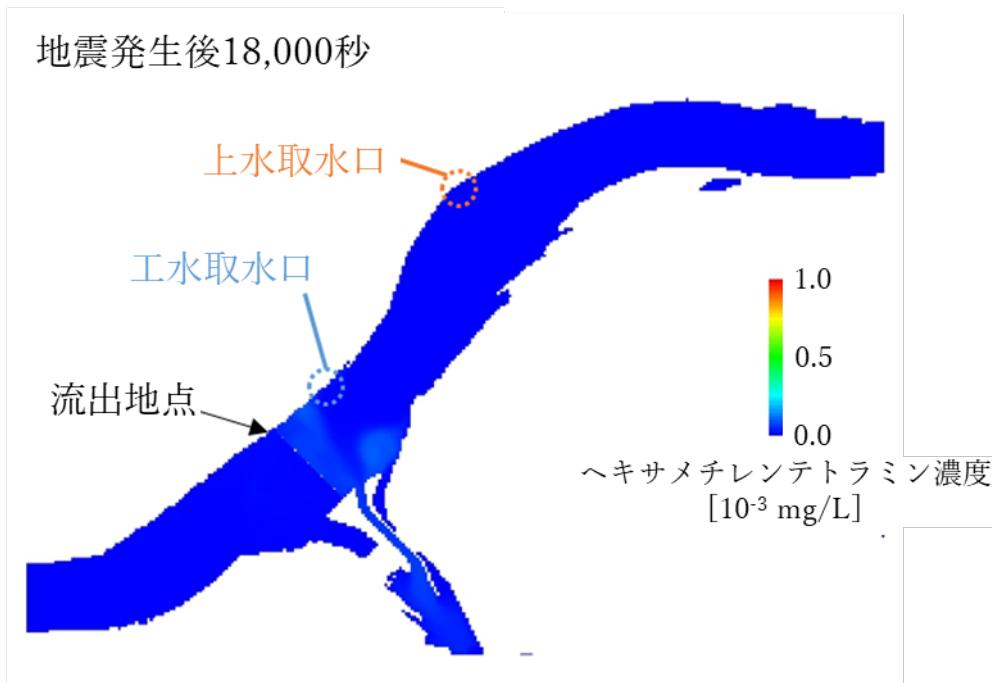


図 4-9 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 18,000 秒) (ケース 1)

流出直後の流出地点付近が最もヘキサメチレンテトラミン濃度が高いことがわかる。図 4-7 は津波到達直前の図であり、津波の引き波によって 350m ほど下流に拡散している図 4-8 は津波によってヘキサメチレンテトラミンが最も上流に押し上げられたときの図であり、淀川大堰から上流約 400m まで濃度約 2.0×10^{-4} mg/L の水塊が到達している。図 4-9 では、河川水中のほぼ全域でヘキサメチレンテトラミンの濃度が 1.0×10^{-4} mg/L 以下でとなっており、津波時のヘキサメチレンテトラミン濃度は津波流によって希釈され、通常の河川流の場合よりも小さくなる。

図 4-10 は、ケース 1 における柴島浄水場の工業用取水口と上水用取水口のヘキサメチレンテトラミン濃度の変化を示している。図 4-10 で、地震発生から 18,000 秒までの工水取水口と上水取水口の濃度の時間変化を示す。

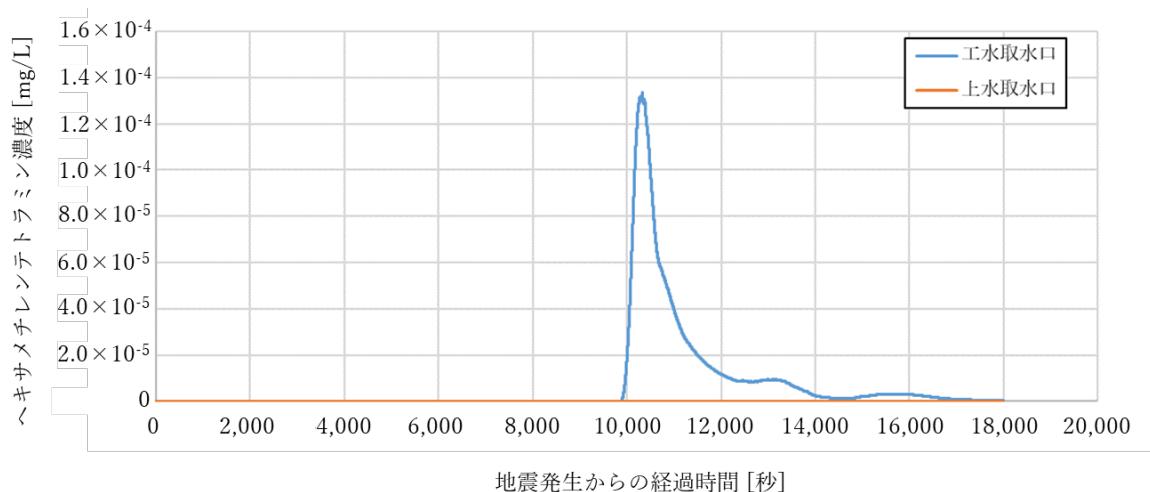


図 4-10 柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化 (ケース 1)

ケース1では、地震発生から約2時間30分後に津波が淀川大堰に到達し、柴島浄水場の工水取水口で一時的にヘキサメチレンテトラミン濃度が上昇した。工業用取水口の最大ヘキサメチレンテトラミン濃度は 1.3×10^{-4} mg/Lであり、平常時の推定濃度を加算すると 3.1×10^{-3} mg/Lとなった。工業用取水口のヘキサメチレンテトラミン濃度が上昇し始めた後、 1.0×10^{-5} mg/Lを約 2.2×10^3 秒間超過した。上水取水口の濃度は、平常時の河川水中の推定濃度(3.0×10^{-3} mg/L)よりも低いままであった(独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))。

4.4.4.2 河川の水生生物とヒト健康に対するヘキサメチレンテトラミンのリスク評価

工水取水口周辺の水生生物に対するRiskscoreは、ヘキサメチレンテトラミン最大濃度の10分の1(1.3×10^{-5} mg/L)の濃度が継続時間で計算を行い、継続時間は9,986秒から11,874秒の1,889秒であった。平常時環境中のヘキサメチレンテトラミン濃度の推定値(3.0×10^{-3} mg/L)を加えてRiskscoreを算出したところ、 3.2×10^{-7} であり、最高濃度と推定された工業用取水口付近でも水生生物へのリスクの懸念がないことがわかった。

大阪市は工業用水の水質についてヘキサメチレンテトラミンやホルムアルデヒドの濃度を指定しておらず、ヘキサメチレンテトラミンを動物に経皮投与した場合の毒性試験結果は現在得られていない。しかし、ヘキサメチレンテトラミンに暴露された作業者に対するパッチテストの結果では、陽性反応が認められている他、紅斑、丘疹、そう痒、蕁麻疹、浮腫などのアレルギー性接触皮膚炎、喘息、アレルギー性鼻炎、アレルギー性結膜炎などが報告されており、ヘキサメチレンテトラミンがヒトに対して感作性を示す物質であることが示唆されている(独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))。本研究の結果によると、工水取水口における河川水中のヘキサメチレンテトラミンの最大濃度は、通常時の河川水中の推定濃度(3.0×10^{-3} mg/L)(独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))よりも小さい。したがって、工業用水を取り扱うことによるリスクは懸念されないと考える。上水取水口のヘキサメチレンテトラミン濃度は 5.0×10^{-5} mg/L以下であったため、ヘキサメチレンテトラミンによって生成されるホルムアルデヒドのリスクについては閾値未満であり、評価を行わなかった。

4.4.5 ケース2の解析結果

4.4.5.1 ヘキサメチレンテトラミンの挙動と濃度分布

図4-11、図4-12、図4-13、図4-14に、淀川水路におけるヘキサメチレンテトラミンの濃度分布を示す。図中の秒数は地震発生後の経過時間を示し、それぞれ流出直後(300秒)、津波到達前(8,700秒)、津波拡散後(11,100秒)、通常流に戻った後(18,000秒)の濃度分布図を表している。濃度分布図においては、通常時の河川水中のヘキサメチレンテトラミン濃度の推定値 3.0×10^{-3} mg/L(独立行政法人 製品評価技術基盤機構他(2008))は考慮せず、事業所からの排出量から推定される濃度のみを示している。

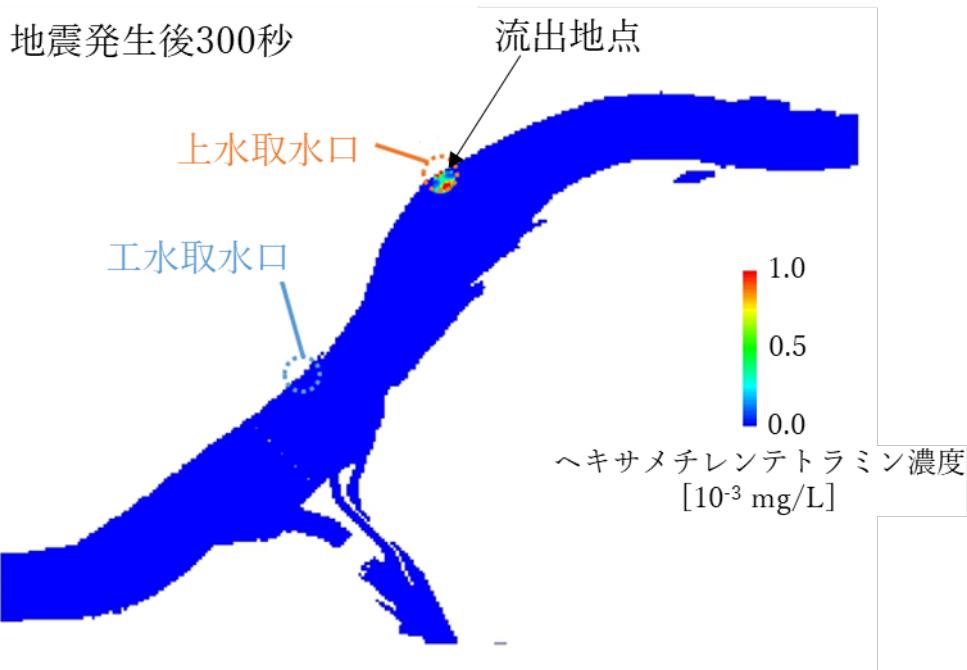


図 4-11 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 300 秒) (ケース 2)

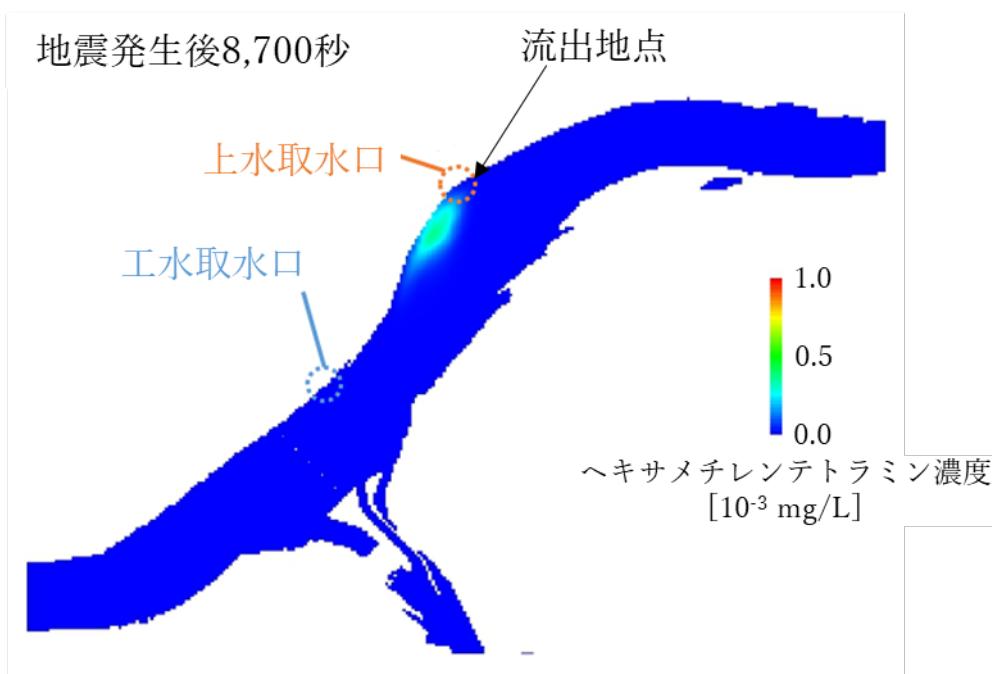


図 4-12 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 8,700 秒) (ケース 2)

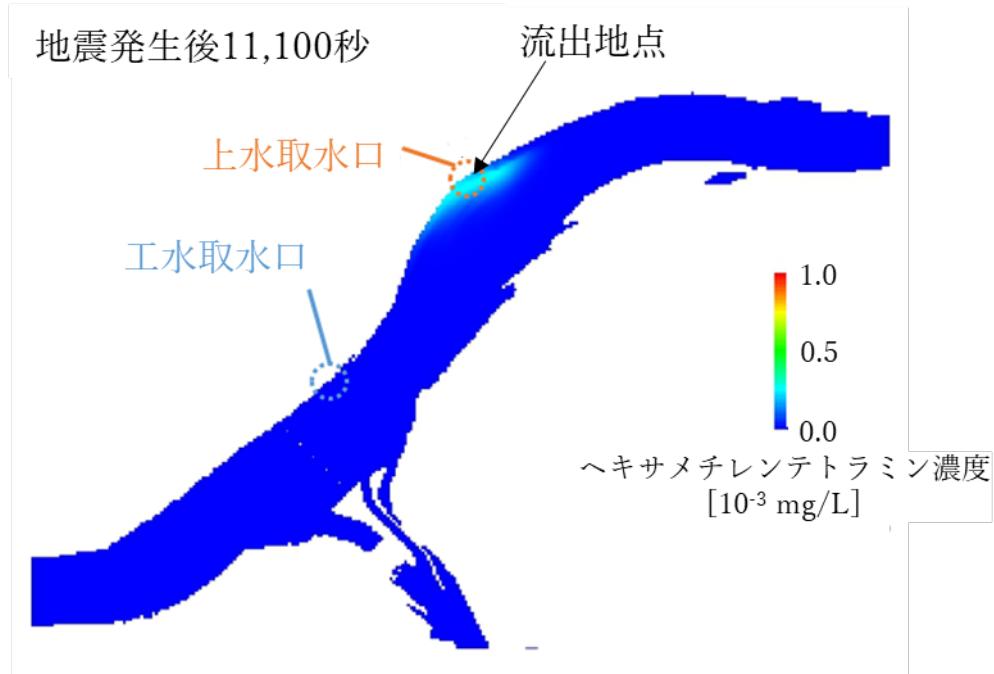


図 4-13 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 11,100 秒) (ケース 2)

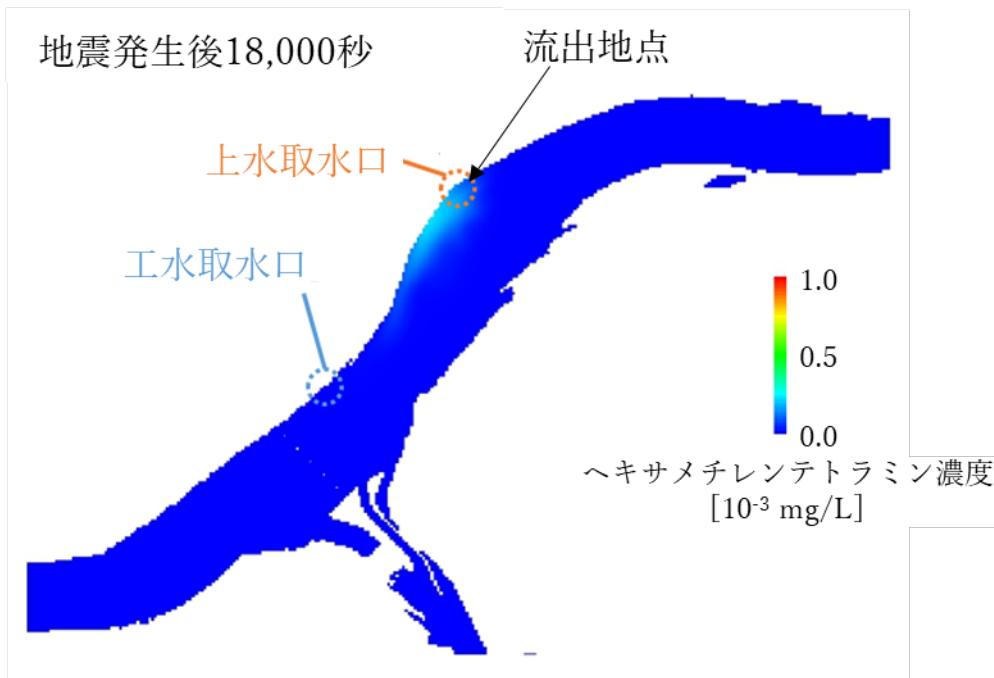


図 4-14 ヘキサメチレンテトラミンの濃度分布(地震発生後 18,000 秒) (ケース 2)

流出直後の流出地点付近のヘキサメチレンテトラミン濃度が最も高く、最大で $2.5 \times 10^{-1} \text{ mg/L}$ であった。また、図 4-12 は津波到達直前の図であり、下流方向 400m に約 10^{-4} mg/L オーダーのヘキサメチレンテトラミン濃度の水塊が流下している。図 4-13 は津波によってヘキサメチレンテトラミンが最も上流に押し上げられたときの図であり、流出地点から上流 100m まで約 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$ の濃度となっている。図 4-14 では、

ヘキサメチレンテトラミンは再び川を下っており、ヘキサメチレンテトラミン濃度は 2.0×10^{-4} mg/L 以下である。津波が河川を遡上したときのヘキサメチレンテトラミン濃度は流出直後の約 1/1000 であった。

図 4-15, 図 4-16 は、それぞれケース 2 における柴島浄水場の工水取水口と上水取水口のヘキサメチレンテトラミン濃度の変化を示している。工水取水口と上水取水口の濃度の時間変化を示し、図 4-15 は 0 秒から 300 秒までの濃度変化、図 4-16 は、8,000 秒から 18,000 秒までの濃度変化を示す。ケース 2 では、流出直後から高濃度のヘキサメチレンテトラミンが下流に流れしており、上水取水口でも高濃度のヘキサメチレンテトラミンが確認できる。上水取水口でのヘキサメチレンテトラミン濃度の最大値は 8.5×10^{-2} mg/L で、平常時の推定濃度を加えると 8.8×10^{-2} mg/L となった。流出直後に複数のピークが見られるのは、ヘキサメチレンテトラミンの流出が 60 秒間継続し、流出速度も同じであったため、定常状態に達するまでは値の変動が軽微であったためである。しかし、津波が到達すると濃度は再び上昇し、津波遡上時に観測されたヘキサメチレンテトラミンの最大濃度は約 2.4×10^{-4} mg/L で、流出直後の濃度の 100 分の 1 以下であった。工水取水口では 5.0×10^{-5} mg/L 以下であった。

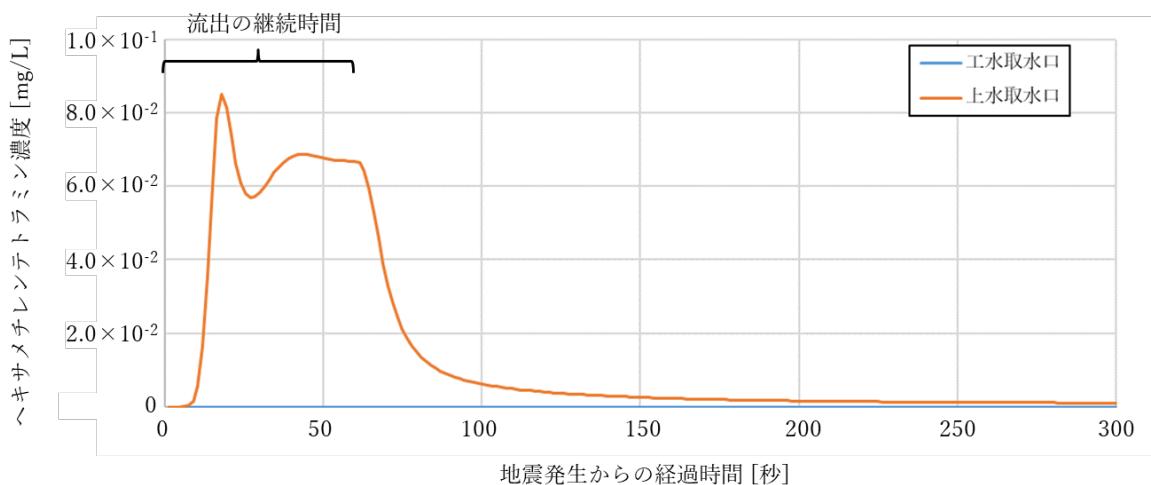


図 4-15 地震発生直後の柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化（ケース 2）

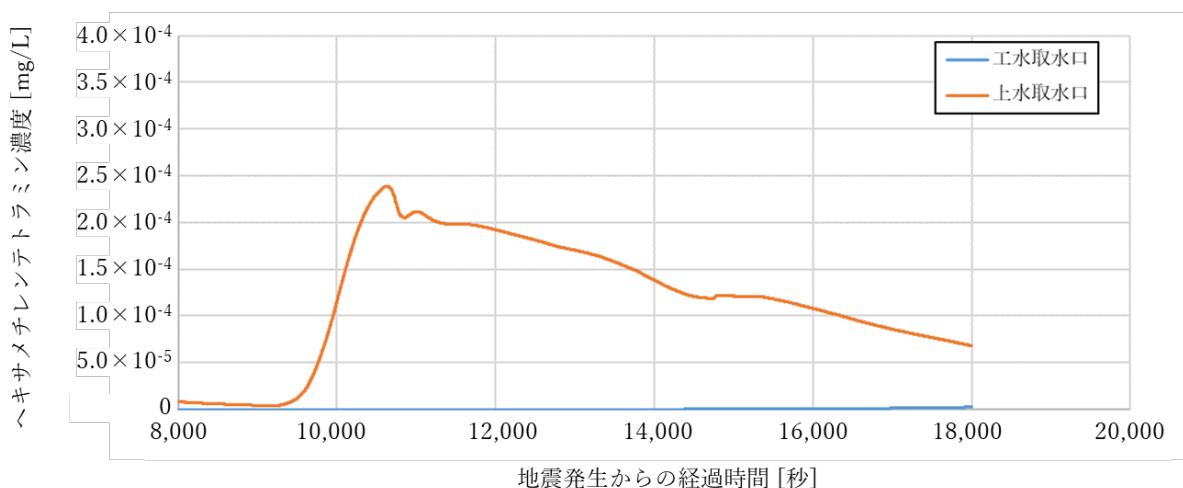


図 4-16 津波到達時の柴島浄水場の取水口付近のヘキサメチレンテトラミン濃度の時間変化（ケース 2）

4.4.5.2 河川水生生物とヒトに対するヘキサメチレンテトラミンのリスク評価

地震発生から 18,000 秒後まで、柴島浄水場の工水取水口のヘキサメチレンテトラミン濃度は $5.0 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$ 以下であった。したがって、工水取水口におけるリスクは懸念されないと判断した。上水取水口付近の水生生物に対する *Riskscore* をピーク濃度の継続時間から算出した。ヘキサメチレンテトラミン最高濃度の 10 分の 1 である $8.5 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ 以上の濃度で、12 秒から 90 秒までの 78 秒間がピークであった。通常時の推定ヘキサメチレンテトラミン濃度 ($3.0 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$) を加算して *Riskscore* を計算しても、 2.4×10^{-7} となり、水生生物に対するリスクは懸念レベルになかった。

ピークの継続時間において、上水取水口から取水されたヘキサメチレンテトラミンの量は、平常時に環境中に存在すると推定されているヘキサメチレンテトラミンを含めて $2.5 \times 10^4 \text{ mg}$ であった。これに基づき C_{FA} は $5.2 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ と推定された。この濃度は、ホルムアルデヒドの水質基準値 $8.0 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ 未満であり、リスクは懸念レベルにない。水質基準値がラットの慢性毒性値(Woutersen et al.(1989))に基づくものであるのに對し、本試験のホルムアルデヒド濃度が同オーダーで継続する時間は 78 s しかないため、リスクの懸念は非常に低いと判断できる。この結果から、ヘキサメチレンテトラミン濃度が最大となる、流出地点の近辺で流出直後においても河川水生生物に対するリスクの懸念がないことから、ヘキサメチレンテトラミンはワーストケースの想定においても河川流出により河川水生生物に大きな被害を与える可能性は極めて低いといえる。

4.4.6 淀川水系における化学物質の津波遡上の対策検討

ケーススタディにおけるヘキサメチレンテトラミンの取水影響の検討結果を表 4-4 に整理する。ケース 1 は津波遡上により淀川大堰上流に位置する工水取水口でのリスクが高くなる条件として、淀川大堰直下から流出したケースを示し、ケース 2 は上水取水口に対するリスクが最も高くなる条件として、上水取水口周辺に流出したケースを示す。ホルムアルデヒドは浄水処理過程における塩素処理により生成するため、給水中のホルムアルデヒド濃度の水系は上水に対してのみ実施した。また、ケース 1 における上水取水口近辺のヘキサメチレンテトラミン濃度は通常時の河川水中の推定濃度 ($3.0 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$) に比べて濃度が 1000 分の 1 以下と極めて低かった。この結果から、上水に対するワーストケースを想定したケース 2 においても、給水中のホルムアルデヒド濃度の最大値は水質基準値を超過しないため、ヘキサメチレンテトラミンの流出に対しては低減策の実施の優先順位は低い。しかしながら、給水中のホルムアルデヒド濃度最大値は水質基準値の $8.0 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ の約 66% にまで達するため、安全を鑑みてヘキサメチレンテトラミンを取扱う届出外事業所は流出防止措置を検討することが望ましい。第 3 章の表 3-5 で仮定したように、本研究で対象とした流出地域の全事業所が防液堤等の対策を導入した場合、破断により機能を喪失した場合においても流出量を 10% の $4.9 \times 10^3 \text{ kg}$ にまで低減することができるため、給水中のホルムアルデヒドによる水質基準値の超過リスクを更に低減することができる。水質汚濁防止法において同法で定める有害物質を貯蔵する施設に対して、防液堤またはそれに準ずる対策を導入することが義務付けられている。ヘキサメチレンテトラミンは同法において対象物質とされていないが、本研究で明らかとなった取水に対するリスクを考慮し、同様の対策を検討すべきである。

表 4-4 淀川水系におけるヘキサメチレンテトラミン流出時の津波遡上による

取水影響のケーススタディ結果

ヘキサメチレンテトラミン 排出量 [kg]	取水口周辺の原水中のヘキサメチレンテトラミン 濃度の最大値 [mg/L]		給水中のホルムアルデヒド 濃度の最大値 [mg/L]	
	上水	工水	上水	上水
ケース1	4.9×10^4	極めて低い	3.1×10^{-3}	極めて低い
ケース2	4.9×10^4	8.8×10^{-2}	3.0×10^{-3}	5.2×10^{-2}

一方で、実際に津波の河川遡上が発生した場合、海水による取水への塩水の混入や、底質の巻き上げから濁度が生じる可能性がある。大阪市(2021)は淀川に対して南海トラフ巨大地震の被害想定(内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会(2012))をもとに、浄水場の取水影響について検討を行った。その結果、淀川の河川流量の少ない渴水時のケースで柴島浄水場の上水取水口周辺では、地震発生後約2時間半後から32時間までの約30時間塩化物イオン濃度が水質基準値の200mg/Lを超過すると推定した(大阪市(2021))。塩化物イオンは通常の浄水処理では除去することができないため、大阪市水道局は基準値を超過する取水口では取水停止の対策をとるとしている(大阪市(2021))。底質の巻き上げによる濁度については一部取水口で基準値を超過する予測をしているが、通常の浄水処理で除去可能であり、水道水への影響はないとしている(大阪市(2021))。本研究で想定したヘキサメチレンテトラミンの流出事例では、上水取水口へのリスクが最も高くなる流出地点で、かつ高度浄水処理が機能しない場合においても塩素処理過程で生じる給水中のホルムアルデヒド濃度が水質基準値を超過する期間はごく僅かであり、塩化物イオンと比較すると水道水への影響は非常に小さいことが分かった。

大阪市水道局では塩水による取水停止時に給水を継続させるための対策として、津波到達前の約2時間半の間に大阪市水道局の全浄水場の浄水処理量のアップ、配水池等の備蓄水の活用、海水影響を受けない上流の浄水場の処理量アップによる配水運用を掲げている(大阪市(2021))。これらの対策により取水停止後も十数時間は市内全域で給水継続が可能であることが見込まれている(大阪市(2021))。したがって本研究での解析結果から、ヘキサメチレンテトラミンの流出により取水停止の措置をとった場合においても、大阪市水道局は給水を継続することが可能であると予想される。

4.4.7 上水取水口への影響が懸念されるヘキサメチレンテトラミン排出量の推定

本研究の解析から、ワーストケースを想定した際、淀川大堰の下流にヘキサメチレンテトラミンが流出した場合、津波の遡上によりヘキサメチレンテトラミンを含む水塊は上水取水口にまで到達せず、リスクの懸念がないことが分かった。一方で、上水取水口の周辺に流出した場合は短期間であるが、水質基準値と同オーダーのホルムアルデヒドが生成しうる濃度が継続することが分かった。そこで、上水取水口周辺に流出するケースにおいて、表4-5のように流出量を5倍、10倍、100倍として評価を行うことで、上水取水口に影響が懸念されるような排出量の推定を行った。

表 4-5 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の解析条件

条件	流出地点	ヘキサメチレンテトラミンの排出量 [kg]
ケース2	取水口_Base	4.9×10^4
ケース2-A	取水口_排出量×5 柴島浄水場の	2.5×10^5
ケース2-B	取水口_排出量×10 上水取水口直上の水面	4.9×10^5
ケース2-C	取水口_排出量×100	4.9×10^6

図4-17にケース2-A、2-B、2-Cにおける地震発生後河川へのヘキサメチレンテトラミン流出開始直後の上水取水口周辺における300秒間の濃度の変化を、図4-18に18,000秒間の結果を示す。排出量を5倍、10倍、100倍となっている一方で、流出直後60秒間のヘキサメチレンテトラミン濃度はおよそ2倍、3倍、7倍程度に留まっている。本研究では、化学物質の排出量に対して、全量が60秒間一定の速度で排出されると

仮定した。排出後の化学物質は計算セル内に瞬時に拡散されるため、ワーストケースの100倍のような過大な流出が生じたケースにおいても最大濃度は数倍程度に留まったと考えられる。地震発生後、およそ1,000秒以降はいずれのケースにおいても上水取水口周辺でのヘキサメチレンテトラミン濃度は 5.0×10^{-3} mg/Lを下回り、流出直後の100分の1程度の値にまで希釈されている。

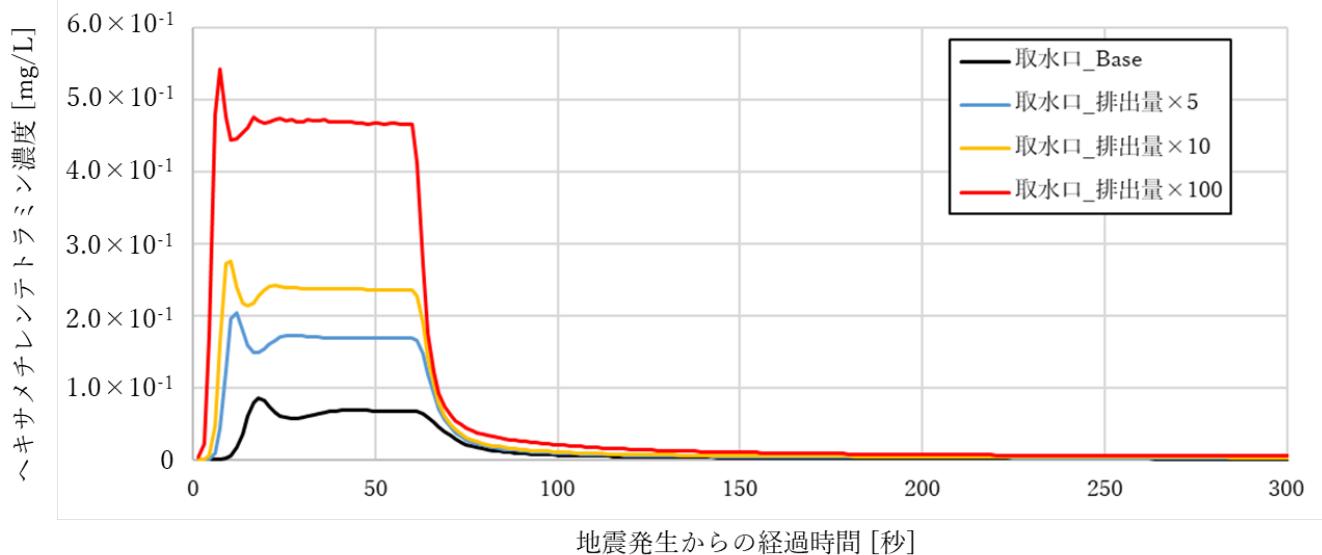


図 4-17 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水取水口周辺流出条件での上水取水口周辺濃度変化(地震発生直後)

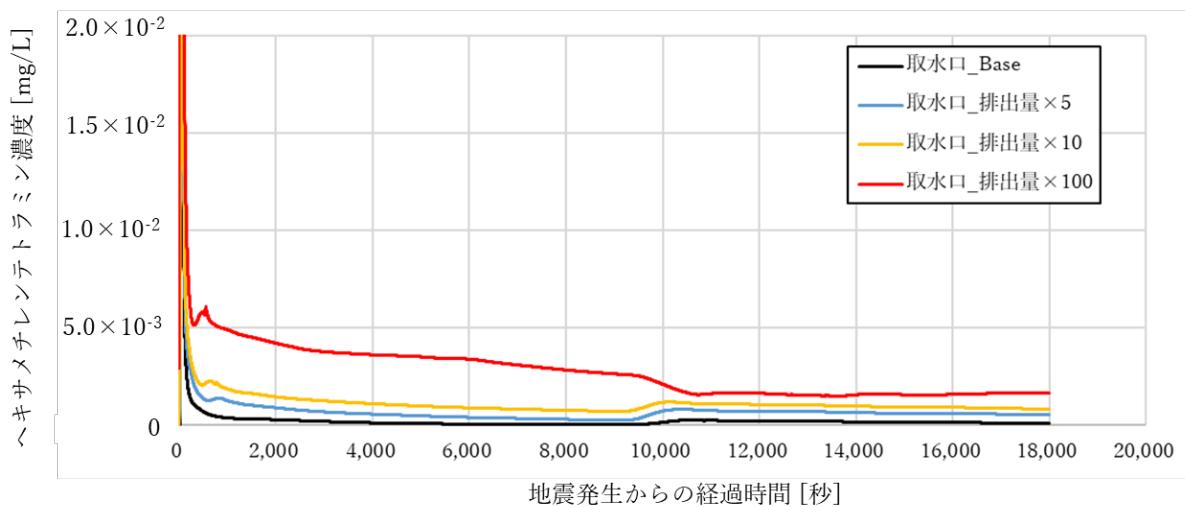


図 4-18 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水取水口周辺流出条件での上水取水口周辺濃度変化(低濃度の拡大図)

表4-6に排出量増加時の上水取水口周辺の最大濃度及び給水中のホルムアルデヒド最大濃度の推定結果を示す。いずれのケースにおいても最大濃度は流出直後に十数秒で到達しており、給水中のホルムアルデヒド濃度は、排出量増加ケースにおいてホルムアルデヒドの水質基準値である 8.0×10^{-2} mg/Lを超過した。本解析条件では、化学物質の排出量が 10^5 kgを超えるワーストケースの5倍の排出量のケースでホルムアルデヒド水質基準値の超過したため、60秒間の瞬時の流出ではなく、長時間にわたりヘキサメチレンテトラミンが河

川に排出され続ける条件の方が水質基準値を超過する期間が長くなると考えられる。本研究では、流出は瞬時を想定し 60 秒と設定したため、ケース 2-A における毎秒のヘキサメチレンテトラミン排出量は $4.2 \times 10^3 \text{ kg/s}$ となる。したがって、少なくとも数トンオーダーのヘキサメチレンテトラミンが毎秒河川に排出され続けていない限りは給水中のホルムアルデヒド濃度は水質基準値を超過しないと推定した。

表 4-6 ヘキサメチレンテトラミン排出量増加時の上水口取水口周辺の最大濃度及び
給水中のホルムアルデヒド最大濃度

条件	取水口周辺の原水中の ヘキサメチレンテトラミン 濃度の最大値 [mg/L]	給水中のホルムアルデヒド 濃度の最大値 [mg/L]
ケース2 取水口_Base	8.8×10^{-2}	5.2×10^{-2}
ケース2-A 取水口_排出量×5	0.21	0.15
ケース2-B 取水口_排出量×10	0.28	0.21
ケース2-C 取水口_排出量×100	0.55	0.44

4.5 結言

本章では、津波による化学物質の河川遡上に対する、対策の方針を決定するため、当該事象による浄水場取水口への取水障害のリスク評価の方法論を構築することを目的とした。実際に構築した方法論を淀川から取水している大阪市水道局柴島浄水場でのヘキサメチレンテトラミン流出事象に対してワーストケースを想定したケーススタディを行うことで、当該事象による取水障害のリスクを定量的に示し、以下のような知見を得た。

取水口の下流で排出された場合（ケース 1）と、取水口付近で津波遡上前に取水口に到達した場合（ケース 2）でケーススタディを行い、リスク懸念の有無を確認した。ヘキサメチレンテトラミン濃度が最も高いと推定されたケース 1 では、ピーク時の *Riskscore* は 3.2×10^{-7} であり、水生生物に対するリスクの懸念は低いと考えられる。上水取水口での、ヘキサメチレンテトラミン濃度の上昇は $5.0 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$ 以下であった。したがって、水生生物に対するリスク懸念は同様に低く、取り込まれたヘキサメチレンテトラミンによって浄水場で生成される可能性のあるホルムアルデヒドのリスクについても懸念レベルにないと判断した。ケース 2 において工水取水口では、ヘキサメチレンテトラミンの流出後、濃度の上昇は $5.0 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$ 以下であった。したがって、こちらも取水によるリスクは懸念レベルになかった。また、上水取水口におけるピークの継続時間に対する *Riskscore* は、 2.3×10^{-7} であり、ヘキサメチレンテトラミン濃度が最も高くなると予想される流出地点近傍においても、水生生物に対するリスクはないことが示唆された。さらに、上水取水後の浄水場で塩素処理により生成可能なホルムアルデヒド濃度は $5.3 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$ であり、水質基準値 ($8.0 \times 10^{-2} \text{ mg/L}$) を超えていない。濃度の計算過程では、投入するヘキサメチレンテトラミンの体積と河川の水量との差が過小評価の原因となるため、さらなる検討が必要である。地震時にヘキサメチレンテトラミンの全量が上水取水口の真上の水面に排出されるケース 2 は、取水口でヘキサメチレンテトラミンの最大濃度をとることを前提としているが、流出直後の初期濃度は投入時の希釈水量に依存するため、評価方法にはさらに検討の余地がある。この場合、水質基準を超えるホルムアルデヒドが発生するリスクは懸念されるレベルではないことがわかった。

本章で構築した方法論は津波による河川遡上のモデル構築により、対象地域と対象物質を変更して適用することが可能であり、水道事業者はこのような化学物質の河川遡上に対するリスクレベルを把握することができる。また、本研究ではワーストケースの想定を行うために、化学物質の排出源を PRTR 法において排出量の届出が義務付けられていない小規模事業所とし、1km メッシュ単位での対象物質の貯蔵量を推定する方法論を

示した。これにより、行政が把握・管理できていない潜在的な化学物質リスクを把握することができる。また、本研究での方法論は浄水場での処理過程を考慮している。特に、今回ケーススタディで対象としたヘキサメチレンテトラミンのような浄水処理過程で有害性の高い物質を生成する化学物質は浄水機能の一部喪失等により、浄水処理後の給水中において高いリスクが発現する可能性がある。本研究では、このような非定常なシナリオも想定したうえで、リスク評価を行う枠組みを構築した。

参考文献

- George S. Kell. 1975. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg.. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. *Journal of Chemical and Engineering Data*. Vol. 20, No. 1, p. 97-105.
- Tanaka Hitoshi, Nguyen Xuan Tinh, Nguyen Trong Hiep, Kayane Kosuke, Min Roh, Umeda Makoto, Sasaki Mikio, Kawagoe Seiki and Tsuchiya Mitsukuni. 2020. Intrusion Distance and Flow Discharge in Rivers during the 2011 Tohoku Tsunami. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 8, No. 11, p. 882.
- Til, H.P., Woutersen, R.A., Feron, V.J., Hollanders, V.H.M., Falke, H.E. and Clary, J.J. 1989. Two-year drinking-water study of formaldehyde in rats. *Food Chem Toxicol.*, Vol. 27 p. 77-87.
- 青木康貴, 秋山充良, 石橋寛樹, 小島貴之, 越村俊一. 2022. RBF ネットワークと準モンテカルロ法を用いた確率論的津波ハザード解析および南海トラフ地震による災害廃棄物量のリスク評価への適用. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学). Vol. 78, No. 1, p. 1-16.
- 今津雄吾, 野竹宏彰, 関澤愛, 山本治貴. 2016. 東北地方太平洋沖地震時の津波瓦礫分布調査に基づく局所的津波火災リスク判定手法. 土木学会論文集 B2(海岸工学) . Vol. 72, No. 2, p. I_1615-I_1620.
- 政府統計の総合窓口(e-Stat). 2017. 人口基本集計に関する事項(公開日 2017-06-27).
<<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&aggregateUnit=H&surveyId=H002005112015&statsId=T000847&prefCode=27>> (2024年11月7日閲覧).
- 石川百合子, 東海明宏. 2006. 河川流域における化学物質リスク評価のための産総研－水系暴露解析モデルの開発. *水環境学会誌*. Vol. 29, No. 12, p. 797-807.
- 大江崇, 富田孝史. 2022. 津波火災の延焼発生リスクを評価するロジスティック回帰モデルの構築. 土木学会論文集 B2(海岸工学). Vol. 78, No. 2, p. I_337-I_342.
- 大阪市. 2020. 工業用水道事業について. <<https://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000015747.html#5>> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪市. 2021. 「南海トラフ巨大地震の津波による浄水場の取水影響に関する検討結果」および「大阪市水道局における影響と対策」について. <<https://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000272968.html>> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪市水道局. 2019. 平成30年度水道局事業年報 30.4.1~31.3.31.
<www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000496406.html> (2024年11月7日閲覧).
- 大阪府. 2020. 震度分布・液状化可能性.
<http://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/keikaku_higaisoutei/sindobunpu_etc.html> (2024年11月7日閲覧).
- 化学物質評価研究機構 (2004) 調査資料 (未公表). 環境省. 2003b. ヘキサメチレンテトラミンのオオミジンコ (*Daphnia magna*) に対する急性遊泳阻害試験 (三菱化学安全科学研究所, 試験番号: A020367-2, 2003年5月30日).
- 川辺能成, 原淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張銘, 駒井武. 2012. 東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク. 土木学会論文集 G(環境) . Vol. 68, No. 3, p. 195-202.
- 環境省. 2007. PRTR インフォメーション広場 平成19年度届出外排出量推計方法の詳細, 1.対象業種を営むすそ切り以下事業所からの排出量.
<www.env.go.jp/chemi/prtr/result/todokedegaiH19/syosai.html> (2024年11月7日閲覧) .

- 環境省. 2021. PRTR インフォメーション広場.
<www.env.go.jp/chemi/prtr/risk0.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 経済産業省, 環境省. 2021. PRTR 排出量等算出マニュアル 第 4.2 版 平成 31 年 3 月 作成 第 I 部 基本編 2. 基本的な PRTR の実施手順 (2) 排出量・移動量の基本的な算出手順.
<www.env.go.jp/chemi/prtr/notification/sansyutsu/1_2_2.pdf> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 環境省. 2024a. 令和 4 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～.
<<https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo.html>> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 環境省. 2024b. 令和 4 年度 PRTR 届出外排出量の推計方法.
<https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/todokedegai_siryo.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省. 2024. PRTR けんさくん平成 30 年度.
<www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/6a.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 厚生労働省. 2024. 水質基準項目と基準値 (51 項目).
<www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 田窪亮介, 米山望, 東海明宏, 伊藤理彩. 2022. 河川水塩分を考慮した南海トラフ地震津波来襲時の淀川における化学物質拡散予測. 海洋開発論文集. Vol. 38, 78 卷 2 号, p. I_823- I_828.
- 土屋範芳, 井上千弘, 山田亮一, 山崎慎一, 平野伸夫, 岡本敦, 小川泰正, 渡邊隆広, 奈良郁子, 渡邊則昭, 東北地方津波堆積物研究グループ. 2012. 東北地方太平洋沖地震による岩手, 宮城, 福島県沿岸域の津波堆積物のヒ素に関するリスク評価. 地質学雑誌. Vol. 7, p. 419-430.
- 鶴田朋子, 田中航也, 平林達也. 2014. ホルムアルデヒド前駆物質の分析法及びオゾン処理性, 大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績. Vol. 65, p. 19-31.
- 鶴田朋子, 森寛佳二, 平林達也. 2015. ホルムアルデヒド前駆物質の浄水処理性, 大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績. Vol. 66, p. 19-23.
- 鶴田朋子, 北本靖子, 森寛佳二, 平林達也. 2017. 浄水処理対応困難物質 (ホルムアルデヒド前駆物質) の分析法の確立と処理性. 水道協会雑誌. Vol. 86, No. 7, p. 2-13.
- 独立行政法人 製品評価技術基盤機構他. 2008. 化学物質の初期リスク評価書 ver.1.0 No.107 ヘキサメチレンテトラミン.
<www.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_02_001/risk/pdf_hyoukasyo/198riskdoc.pdf> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 永島弘士, 米山望. 2017. 津波来襲の河道内塩水遡上に関する数値解析手法の提案. 土木学会論文集 B2 (海岸工学). Vol. 73, No.1, p. 19-32.
- 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. Vol. 26, No. 3, p. 131-140.
- 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会. 2012. 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 津波断層モデル編.
<https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report01.pdf> (2024 年 11 月 7 日閲覧).
- 日本化学会. 2004. 化学便覧基礎編 2 改定 5 版丸善. p. II-66.
- 福谷陽, 徳永英, 佐藤一郎, 今村文彦. 2015. エネルギー保存則による浸水評価を用いた広域に亘る施設群の津波リスク評価. 土木学会論文集 B2(海岸工学). Vol. 71, No. 2, p. I_1549- I_1554.

- 福谷陽, 北野利一, 安田誠宏, 有川太郎, 山中亮一. 2021. 確率論的津波ハザード評価手法 (coRaL 法) の構築とそれによる津波浸水評価. 土木学会論文集 B2(海岸工学). Vol. 77, No. 2, p. I_175- I_180.
- 藤木修, 中山義一, 中井博貴. 2009. 地震による河川水質汚染の影響評価について. EICA. Vol. 14, 第 2・3 合併号, p. 28-36.
- 細田尚. 1990. 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究. 学位論文. 京都大学.
- 益崎大輔, 田中航也, 平林達也. 2013. ヘキサメチレンテトラミンの測定方法及び高度浄水処理における処理性. 大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績. Vol. 64, p. 33-39.
- 淀川大堰工事誌編集委員会. 1983. 淀川大堰誌. 建設省近畿地方整備局淀川工事事務所. p. 37 232.

第5章 結論

5.1 本研究の総括

5.1.1 本研究により得られた成果とその意義

本研究は、大規模地震発生時に上水システムの業務継続に影響を及ぼす可能性のある事象に対し、それらの課題を分析し、評価の枠組みを構築することにより対策検討を行うことを目的とした。

第1章は、大規模地震発生時の上水システムの事業継続における課題をこれまでの行政の取組と先行研究を整理することにより明らかにした。大規模地震発生時の上水システムの事業継続に対して、行政はこれまで水道施設の破損または機能低下を主な課題とし、水道施設の耐震化を推進してきたことを示した。しかしながら、現状の水道施設、特に基幹管路の耐震化状況は十分ではなく、適切な更新優先度の評価手法を作成し、効率的な管路の更新計画の策定手段の構築が求められていることを示した。また、二つ目の課題として、大規模地震発生時の水質汚染事故に対する対策検討が進んでいないことを挙げた。水質汚染事故に対して、水道事業者は浄水処理機能や水質の管理の強化などの対策を実施しているが、有害化学物質が水系に大量に流出した場合、浄水処理による対応が困難となる可能性がある。大規模地震発生時は化学物質取り扱い事業所の被災により大量の化学物質の流出が懸念されるため、このような突発的な有害化学物質の水系への流出を想定した評価枠組みとその対策の検討が必要である。三つ目の課題として、地震により津波が発生と化学物質流出の複合事象を挙げた。津波が河川を遡上した場合、本来上水システムに流入しない下流に位置する事業所からの排出物質が、取水に影響を及ぼす可能性がある。このような事象に対するリスク評価はほとんど行われておらず、リスクの評価枠組みの構築が必要である。本研究ではこれらの課題を解決する評価枠組みの構築を行うことを目的とした。

第2章では、上水基幹管路の更新優先度の評価枠組みの構築を行った。これまでの更新優先度評価の課題として、管路更新の推進速さを考慮できていないことを挙げ、断水の発生確率と断水の影響度を算出することで、現状の更新の進捗度合いを評価できるような評価方法を構築した。評価モデルは基幹管路ネットワークのモデル化を行うことであらゆる水道事業者の基幹管路ネットワークについて適用可能な評価枠組みとした。大阪市水道局の柴島浄水場の基幹管路に対してケースステディを行い、断水量の規模に従い、リスク低減に必要な管路の更新比率を明らかにした。その結果、従来見過ごされていた、管路の更新順序の違いにより、更新の過程で地震が起きた際の断水事故の発生確率に差異が生じることを明らかにした。また、現状の大阪市の応急給水能力を大阪市が保有するポンプ車の台数から算出し、断水により生じる災害時の応急給水需要量と比較することで、応急給水能力の評価を行った。その結果、現状の耐震化率では応急給水能力を上回る水需要が発生する可能性があり、早急な管路の耐震化と応急給水能力の向上が必要であることが分かった。

第3章では、地震による化学物質の河川への流出に対する対策オプションの対策効果分析の評価枠組みの構築を行った。化学物質取り扱い事業所は規模も物質も多岐にわたるため、適切な対策導入の基準が定まっていない。したがって、本研究では、化学物質の河川への流出に対する対策オプションの対策効果の評価枠組みを構築した。これにより化学物質取扱事業所は取扱い物質や貯蔵量、立地条件から対策オプションの導入基準を判断することが可能になる。評価の枠組みを淀川水系に適用し、事業所からの化学物質の流出による取水障害へのリスクを定量的に示し、対策オプションの導入によるリスクの低減幅を示した。本研究で構築したモデルは、従来緊急遮断弁導入時の対策効果のみに留まっていた評価(中

久保ら(2016))に発生確率の概念を導入したもので、複数の対策オプションの対策効果の比較検討を行うことを可能にした。

第4章では、化学物質の河川流出と津波遡上による浄水処理システムへの影響評価枠組みを構築した。事業所から流出した化学物質が河川を遡上するような事象を想定したリスク評価は行われていないため、本研究では評価枠組みの構築とワーストケースを想定したケーススタディを行うことで、本事象が対策導入によるリスク低減の必要性があるかを検討した。淀川水系でのケーススタディの結果、ヘキサメチレンテトラミンを対象とした場合、浄水場で生成される潜在的なホルムアルデヒドの濃度は水質基準値よりも低く、対策の優先順位は低いことが分かった。このことは、従来の知見を化学物質の流出と浄水処理過程での物質変化の視点からより明確化できたことに相当する。

5.1.2 大規模地震時の上水システムの業務継続に対するリスク評価結果の整理

表5-1、図5-1に本研究の各章で評価を行った事象について、対策前後の発生確率と影響度のレベルを整理した。図5-1では各章が示しているのは本研究で実施したリスク評価により得られた事象の発生頻度と影響度を示しており、破線で囲まれた箇所は対策を行わなかった場合のリスクを示しており、図中の矢印は対策の導入により発生頻度と影響度がどの程度まで低減できるかを示している。第2章で取り扱った上水基幹管路の破断による断水事象は、大阪市水道局の柴島浄水場の場合、耐震管への更新、すなわち耐震化継手付きのダクタイル鉄管への更新を一切行っていない場合は $10^{-2}/\text{year}$ 程度の発生確率と推定された。全ての基幹管路の耐震が完了すると、断水の発生確率は極めて低いレベルとなる。現状耐震化継手付きのダクタイル鉄管の地震による破断事例は得られていないため、破断率は極めて低いと考えられる。今後の調査や管路の経年劣化を考慮により、耐震化継手付きのダクタイル鉄管の脆弱性を正しく算出することが求められる。また、耐震管への更新を行っていない場合においても、断水時の応急給水体制を整備し、断水発生時に必要最低限の給水ができる応急給水能力を確保しておくことで、ハザード比を低減することができる。ポンプ車の台数を増やす、応急給水にかかる作業時間の低減のために平時から訓練を行う等の活動が有効であると考えられる。また、大都市水道局大規模災害対策検討会(2024)が検討しているような被災地外からの応援体制の構築も重要である。第3章の河川への化学物質の流出については、対策を一切行っていない場合、 10^{-3} 程度の頻度で取水に影響を及ぼす可能性があることが分かった。防液堤、緊急遮断弁、従業員による流出防止措置の導入により流出による取水口での取水リスクと発生確率の両方を提言させることができるとなり、対策オプションを複数導入すると図上の原点に向かうようにリスクを低減させることができる。化学物質流出については防液堤等の多重化等により、河川への流出リスクは極めて小さい値にまで低減することができるため、事業所ごとに適切なレベルの対策導入の判断が必要である。第4章の津波遡上による化学物質の拡散については、ワーストケースを想定するために、小規模事業所(届出外事業所)の複数の事業所からの流出を仮定しており、かつ津波が河川に流入するタイミングで河川に排出することを仮定している。したがって、本研究で想定したような事象が発生する確率は極めて低いと考えられる。また、ワーストケースにおいても浄水場取水口及び給水中の化学物質リスクは懸念レベルにないことが分かった。このような図の左下部分にあたる、影響度と発生頻度の両方がリスク判定の閾値よりも小さい場合は、低リスクの事象と判断することができ、対策の優先順位は低い。反対に、第2章で扱った基幹管路の更新によるに発生頻度が高く、影響度も大きいいため、最も対策の優先順位は高い。このような事象は対策オプション導入により、発生確率と影響度

が懸念レベルになくなるまでリスク低減を図る必要がある。

表 5-1 各章でのリスク評価実施事象と対策

評価対象		対策オプション
2章	上水基幹管路の破損による断水	耐震管への更新、応急給水能力の向上
3章	河川への化学物質の流出	流出防止措置の導入
4章	河川に流出した化学物質の津波遡上による拡散	流出防止措置の導入

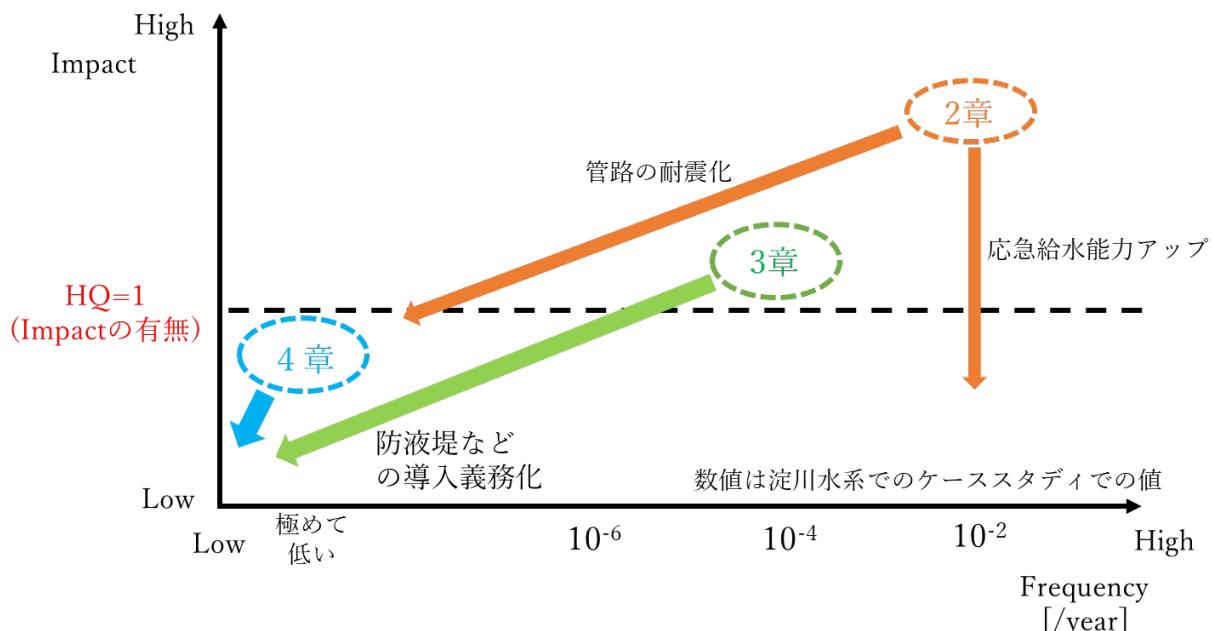


図 5-1 本研究で評価を行った事象の整理

5.2 今後の課題

5.2.1 本研究の枠組みにおける今後の課題

本研究で構築した評価の枠組みについての今後の課題について示す。

上水基幹管路の更新の優先度評価については、更新完了までにかかる時間を考慮できていないことが主な課題である。現状の基幹管路の更新スピードでは全ての管路の耐震化が完了するまでに数十年かかる。したがって、更新計画の最中に管路の劣化が進行し、経年劣化により破断リスクが高まる可能性がある。今回耐震管として考えた耐震化継手付きのダクタイル鋳鉄管は現状、経年劣化、地震による破断事例がないため、劣化および地震による破断の過程をモデル化することができない。今後の知見のアップデート、もしくは劣化の傾向をモデル化することができれば、更新計画推進中の管路の経年劣化を考慮することができ、より実用的な更新優先順位の作成手段を検討することができるようになる。

化学物質の水系への流出事象及び対策オプションの導入効果分析のモデルについては、浄水場取水口の周辺での最大の化学物質の到達濃度を表し、リスク評価を行ったため、浄水場での浄水処理過程による化学物質の浄化を考慮できていない。浄水処理により除去可能な化学物質は浄水処理方式や高度浄水処理の有無等によって変わるため、浄水場側の処理能力も参考に対策導入を検討すべきである。また、

水系への流出過程では実際には、事業所から河川に排出されるまで空間的時間的隔たりがあるはずであるが、本研究では事業所外への排出量がそのまま河川に排出されるものとして評価を行った。事業所の敷地外に流出した後も事業者の回収作業が継続されるはずであるので、このような事業者の取組を反映させて対策検討を行うことが望ましい。

本研究では、各事象の影響度をハザード比として比較評価を行ったが、ハザード比ではリスク懸念の有無は判断できるが、値を比較することはできない。今後の課題として、断水事象と化学物質による曝露のリスクを統一の指標で表し、管路の更新と水系への化学物質の流出防止措置の対策効果を比較可能にすることで、異なる事象に対する対策の優先度を評価できるようにすることが挙げられる。断水については上水の不足によるヒトへの健康影響と社会的影響に着目し、金銭価値化を行い、化学物質の取水リスクについてはヒト健康影響を評価し、同様に金銭価値化することで同じ指標での評価が可能になると見える。

5.2.2 今後の水道事業に対するリスク評価における課題

本研究では、自然災害起因の産業事故を想定し、水道事業継続に対するリスク評価の枠組みを構築することを目的とし、基幹管路の更新計画、化学物質の流出による水質汚染、津波遡上による化学物質の浄水場取水口への取水障害について評価モデルを構築し、淀川水系を対象とするケーススタディにより、リスクの定量化を行った。浅見(2016)は政策評価について科学的リスク評価の実施とリスク管理における実現可能性の検討が重要であるとしたように(浅見(2016)), 実際の政策決定では、このようなリスク評価に基づいて、実際に対策を実行する際に起こりうる影響など定性的な側面も含めた意思決定がなされる。また、浅見(2016)は特に社会基盤事業等を実施する場合には、広い住民の意見を聞き、健康に関する評価を組み込む必要があるとしており(浅見(2016)), 水道事業のような社会基盤事業において対策等を実施する場合は各ステークホルダーに対する影響に配慮する必要がある。朝日・萩原(1999)は水質リスクを対象として、環境リスク評価モデルをアンケート調査結果との比較により、リスク認知の観点から解釈した。その結果、水道水のリスク認知の情報量が少ない確信度の低い段階である可能性を考慮しておく必要があることが示された(朝日・萩原(1999))。このように、水道事業に対する意思決定においては、個人の主観的なリスク認知や情報環境が選択性に影響を与えるため、十分な情報伝達が必要であると言える。本研究では自然災害時の水道事業に対するリスクについて定量的な評価を行ったが、実際には、実現可能性や関係者のリスク認知を考慮した意思決定が必要であり、対策の推進に際しては注意が必要である。例えば、化学物質取扱施設の流出防止措置導入の必要性について述べたが、同時に施設の作業者への健康影響への配慮も必要であり、作業者へのリスク認知と政策との間に乖離がある場合はそれを是正するような活動が必要である。

また、高橋(2002)は絶対的安全は存在せず、受け入れ可能なリスクのレベルを設け、許容することが必要であるとし、受け入れ可能なリスクに対してはそのリスクの大きさに応じて合理的に実現可能な限り低くなるよう改善努力することを宣言し実行すること、努力目標としての「安全目標」も、明示可能な企業理念の一つとして重要な位置づけをもつことになると主張した。本研究で示したように、水道管の更新は早急に推進すべき課題であるが、推進が困難であるという現実もある。したがって、本研究で示したような、管路更新の進捗から現状の地震に対する脆弱性を評価し、できる限りリスクが低くなるよう更新計画の改善が必要である。また、事業所からの化学物質流出の対策の推進においても、本研究で示した

通り、対策オプションを多く導入するほど、リスクを低減することができるが、その分更新費用の増加や現場の作業者に与える負担の増加などは大きくなる。したがって、化学物質の流出事故の管理に対しては、厳重な対策が必要な事業所の条件等を把握し、許容可能なレベルである事業所に対しては努力目標とするなど、段階的な目標値の設定が有効であると考える。本研究で構築したリスク評価の枠組みは、事業所の性質を反映したうえで、下流の浄水場取水口に対して影響を推算することができるため、このような意思決定に活用することができると考える。また、地震時の化学物質の流出や津波遡上といった低頻度で発生しうる事故に対する規制の目標値設定については引き続き議論が必要な課題である。

参考文献

- 朝日ちさと, 萩原清子. 1999. 水道水におけるリスク評価に関する一考察. 地域学研究. Vol. 30, No. 1, p. 167-181.
- 浅見真理. 2016. 水道及び環境分野におけるリスク評価・管理と行政的枠組み. 日本リスク研究学会誌. Vol. 26, No. 2, p. 83-89.
- 大都市水道局大規模災害対策検討会. 2024. 南海トラフ巨大地震対策《全国の水道事業体に向けた提言》～給水車の大量不足と迅速に救援体制を構築するための対策と事例～
https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/files/items/27779/File/teigen_06_01.pdf (2024年11月7日閲覧).
- 高橋英明. 2002. 技術社会における安全の目標. 安全工学. Vol. 41, No. 6, p. 364-370.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、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。東海教授には学部4年から博士後期課程まで6年半の長きにわたり研究ゼミや論文の執筆、学会発表において多大なるご指導をいただきました。研究課題の設定方法や解決手法等のご指導を通じて、社会課題の捉え方について根幹となる考え方をご教示いただきました。これは、筆者が現在企業での業務を行う中での思考の基礎となっております。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。池先生からは、地震発生時の水道事業者の応急給水の対応など、本研究をより実用的な成果とするうえで重要なご指摘を多数いただきました。ここに御礼を申し上げます。

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。中久保先生からは、原水中の化学物質濃度に対するリスク評価の考え方についてご指導いただいた他、日々の東海研究室でのゼミのなかでも評価モデルの作成、解析ケースの検討の面で多くご指導をいただきました。ここに御礼を申し上げます。

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、今後の研究活動及び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小島直也助教、伊藤理彩特任研究員（その後、助教、特任講師）には学部4年次から研究の進め方や論文の執筆方法など研究活動の基礎となる内容から、研究のまとめ方まで多岐に渡る内容について、熱心にご指導賜りました。深く御礼申し上げます。

本研究では津波モデルへの化学物質流出事象の適用にあたり、京都大学防災研究所の米山望准教授にはモデルの作成及び解析方法について多大なるご協力をいただいた他、条件設定と結果の考察の面で多くのご指導をいただきました。深く御礼申し上げます。

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、研究活動において様々な面でご支援・ご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

同研究室の先輩、後輩、同僚には、ゼミ内外での議論をはじめ、公私にわたり様々な面で刺激をいただき、研究活動を進めるうえでのモチベーションとなっていました。記して謝意を表します。

最後に、学部4年次から博士後期課程まで長きにわたり筆者の研究活動を温かく見守ってくれた家族に深く感謝いたします。

2024年11月

濱本 翔吾

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	Hamamoto, S., Ito, L., Tokai, A. 2021. Assessment of Renewal Priority of Water Pipeline Network against Earthquake Risk. <i>water</i> , Vol. 13, No. 4, p. 572. doi: 10.3390/w13040572	第2章
2	Hamamoto, S., Ito, L., Yoneyama, N., Tokai, A. 2021. Case Study for the Predictive Environmental Risk Assessment of Hexamethylenetetramine Release to the Yodo River during a Massive Tsunami Attack. <i>water</i> , Vol. 13, No. 4, p. 549. doi: 10.3390/w13040549	第4章
3	Hamamoto, S., Tokai, A., Nakakubo, T., Ito, L. 2024. Effectiveness of countermeasure options for chemical facilities against the discharge of chemical substances into rivers caused by a large earthquake: case study of the Yodo river system in Osaka prefecture, Japan. <i>Environment Systems and Decisions</i> , Vol. 44, p. 906-921. doi: 10.1007/s10669-024-09982-x	第3章