



Title	津波による石油タンク被災および石油流出・拡散の予測と対策立案に資する統合的数値解析手法の開発
Author(s)	堤, 雄大
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105471
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (堤 雄 大)

論文題名 津波による石油タンク被災および石油流出・拡散の予測と対策立案に資する統合的数値解析手法の開発

論文内容の要旨

南海トラフ地震により発生する津波がコンビナート施設に到達すると、二次災害を引き起こしうる。このような、自然ハザード起因の産業災害は「NATECH」と呼ばれる。

NATECHは「自然ハザード」、「産業施設の被災」、「産業災害」の各要素が時間的・空間的に強く結びついており、一つの事象の変化がその後の災害シナリオを大きく左右する可能性がある。多様な状況やシナリオを検討するためには、数値シミュレーションによる解析が不可欠であるが、従来の各要素を個別に扱う分断的な手法では十分に対応できない。そのため、複数の手法を時間軸上で統合した「統合型ハザードモデル」の構築が重要である。

本論文では、津波による石油貯蔵タンクの被災に関わる被害予測と対策立案に資する、2つの数値解析モデルの構築を行った。第一に、広域なコンビナート地区を対象とした「津波石油拡散モデル」を構築し、津波解析・石油タンクの被災推定・石油拡散解析を一体的に実施可能とした。第二に、三次元数値流体解析 (CFD) と物理エンジンを統合した「FSIモデル」を開発し、津波によるタンクの浮遊・衝突現象を解析できるようにした。これらのモデルは、従来の分断的な評価手法に比べて、より現実的で物理的整合性の高い被害予測を可能とするものである。本論文の構成は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。これまでの国内におけるNATECH対応事例や既往研究を整理し、その課題や研究のギャップを明らかにすることで、本研究の目的を明確化した。

第2章では、広域なコンビナート地区を対象として、津波解析・石油タンクの被災推定・石油拡散解析を一体的に行うため、津波数値解析モデル・流体力算定手法・石油粒子拡散モデルを統合し、津波石油拡散モデルを構築した。津波流体力算定手法は、数値実験から取得したデータをもとに構築され、非静水圧な圧力分布と流体力の時間変化を津波パラメータから計算可能である。この特性から限界重量を定義することも可能であり、これは石油の管理量や構造的対策の基準として役立つものである。また、石油粒子拡散モデルでは、石油の堤防や地形との衝突を厳密に考慮している。構築したモデルを用いて大阪北港地区を対象にケーススタディを行った。堤防による拡散挙動の変化は非常に大きなものであり、また、石油の流出タイミングによっても拡散範囲は大きく変化した。これらの結果から、避難計画を策定する際には、複数条件下での石油拡散分布を重ね合わせて評価することが有効であることが示された。これにより、安全側に立った被害予測が可能となり、これに基づく効果的な避難計画の立案にも活用できる。

第3章では、津波によって移動・衝突する石油タンクの流体-構造連成 (FSI) 問題を詳細に解析するために、CFDソフトウェアのOpenFOAMのソルバーであるoverInterDyMfoamと物理エンジンのBulletを統合し、FSIモデルを構築した。overInterDyMfoamで構造物の移動を計算するために採用されている重合格子法は、構造物衝突近傍の流体を取り扱いができるようにするために埋め込み境界法による改良を行った。また、Bulletは重心位置に偏りのある偏心物体や内部の流体であり質量分布が時々刻々変化する物体を扱えるように改良を行った。検証では、本モデルを用いてタンクの浮遊・滑動挙動の再現性を確認し、モデルの一定の妥当性が得られた。浮遊挙動の再現ではタンク内部の充填率ごとの浮遊挙動の違いを再現し、滑動挙動の再現ではタンク同士の衝突による滑動挙動の変化を再現した。本モデルは、津波によるタンクの浮上・滑動・衝突といった複雑な挙動を再現可能であり、これにより被災メカニズムの力学的解明に大きく寄与している。また、モデルの応用的活用として橋桁の流出解析も行った。Bulletにより複雑な形状同士の衝突挙動を計算し、OpenFOAMにより気液二相流体と構造物の相互作用を計算することができた。本モデルは、係留索モデルや物理エンジンのジョイント機能と統合することで、海岸・海洋工学分野における構造物の挙動再現および設計検討にも応用できる可能性がある。

第4章では、第2章・第3章それぞれの主要な成果と残された課題について述べ、これらを踏まえた統括的な将来展望を示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (堤 雄 大)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	荒木 進歩
	副 査	教授	入江 政安
	副 査	教授	佐藤 陽祐
	副 査	准教授	中谷 祐介

論文審査の結果の要旨

南海トラフ等で発生する巨大地震により津波が生じ、沿岸域のコンビナート施設に到達すると、二次災害の発生が懸念される。このような自然ハザード起因の産業災害は「NATECH」と呼ばれる。NATECHは「自然ハザード」、「産業施設の被災」、「産業災害」の各要素が時間的・空間的に強く結びついているため、一つの事象の変化がその後の災害シナリオを大きく左右する可能性がある。多様な状況やシナリオを想定する際には、数値シミュレーションによる検討が重要となるものの、災害を構成する各要素を別個に解析する従来の手法では十分に対応できない。そのため、複数の手法を時間軸上で統合した「統合型ハザードモデル」の構築が重要である。

本論文では、津波による石油貯蔵タンクの被災に関わる被害予測と対策立案に資する、2種類の数値解析モデルの構築を行っている。第1の数値解析モデルにおいては、広域なコンビナート地区を対象とした「津波石油拡散モデル」を構築し、津波解析・石油タンクの被災推定・石油拡散解析を一体的に実施可能としている。第2の数値解析モデルにおいては、三次元数値流体解析(CFD)と物理エンジンを統合した「FSIモデル」を開発し、津波によるタンクの浮遊・衝突現象を解析可能としている。これらのモデルでは、各要素を別個に解析する従来の評価手法と比較して、より現実的で物理的整合性の高い被害予測が可能である。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べている。これまでの国内におけるNATECH対応事例や既往研究を整理し、その問題点や課題を明らかにすることにより、本研究の目的を明確にしている。

第2章では、広域なコンビナート地区を対象として、津波解析、石油タンクの被災推定、および石油タンクから漏出した石油の拡散解析を一体的に行うため、津波数値解析モデル・津波流体力算定手法・石油粒子拡散モデルを統合し、津波石油拡散モデルを構築している。このうち、石油タンクに作用する津波流体力算定手法は、数値実験から取得したデータをもとに構築しており、非静水圧な圧力分布および流体力の時間変化を算定可能である。これより石油タンクが浮遊および滑動を開始する限界重量を計算することも可能であり、石油の管理量や構造的対策の基準となることが期待される。石油粒子拡散モデルでは、石油粒子が堤防や地形と衝突する際のモデル化を極力排除し、物理的に表現している。ここで構築したモデルを用いて大阪北港地区を対象にケーススタディを行った結果、堤防による拡散挙動の変化は非常に大きく、石油の流出タイミングによっても拡散範囲は大きく変化することを示している。また、避難計画を策定する際には、複数条件下での石油拡散分布を重ね合わせて評価する必要性も提起している。これにより、安全側の被害予測が可能となり、効果的な避難計画の立案にも活用可能である。

第3章では、CFDソフトウェアのOpenFOAMのソルバーであるoverInterDyMFoamと物理エンジンのBulletを統合したFSIモデルを構築している。このFSIモデルは、津波により浮遊・滑動・漂流し、他の物体と衝突する石油タンクの流体-構造連成(FSI)問題を詳細に解析することを目的としている。overInterDyMFoamで構造物の移動を計算するために採用されている重合格子法は、構造物衝突近傍の流体を取り扱うため、埋め込み境界法を用いて改良している。Bulletは、重心位置に偏りのある偏心物体や、内部流体の質量分布が時々刻々変化する物体を扱えるよう改良している。実験結果との再現性検証では、本モデルによるタンクの浮遊・滑動挙動と比較し、浮遊についてはタンク内部の充填率ごとの浮遊挙動の違いを再現できること、および滑動についてはタンク同士の衝突による滑動挙動の変化を再

現できることを確認している。モデルの応用的活用として橋桁の流出解析も行っている。このように、Bulletにより複雑な形状同士の衝突挙動を計算し、OpenFOAMにより気液二相流体と構造物の相互作用を計算可能であることを示している。

第4章では、前章までに得られた主要な成果と残された課題を整理するとともに、これらを踏まえた統括的な将来展望を示している。

以上のように、本論文は沿岸域のコンビナート施設への津波来襲により懸念される石油タンクの被災、漏出した石油の拡散、石油タンクの浮遊・滑動・漂流・衝突等の複雑な挙動を解析可能な数値解析手法を構築し、妥当な解析結果を得ていることから、石油貯蔵施設および周辺地域で発生する被害の解明に大きく寄与しており、工学的な有用性が高い。また、構築された数値解析手法は係留索モデル等の機能と統合することにより、種々の海岸・海洋工学構造物の挙動を再現し、設計に生かせる可能性がある点においても有用性が高い。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。