

博士論文概要

論文題目

湾湖でのスロッシング現象に関する研究
A Study on Sloshing Phenomena
in Bays and Lakes

申請者

大平	幸一郎
Koichiro	OHIRA

建設工学専攻 海岸工学研究

2017年10月

2011年東北地方太平洋沖地震の直後、震源から遠く離れた山梨県の西湖やノルウェーのソグネ・フィヨルドなど複数の場所で津波のような異常な水位変動が目撃された。人的被害はなかったものの、係留船の陸への押し流しや小規模な陸上氾濫が確認された。同事象は、海域とは連続しない内陸部の湖で発生したことや、地震の発生直後に生じていることなどを踏まえると震源断層に伴う津波でないことは自明である。同様の異常な水面変動（以降、「本現象」という）について、過去100年以上の国内外の事例を調べた結果、他にも巨大地震の直後に稀に報告された事例があることがわかった。

2011年東北地方太平洋沖地震の津波による甚大な被害を受けて、沿岸地域の一般防災や港湾部に立地する原子力発電施設などの津波対策の考え方が見直され、沿岸部の耐津波機能は強化されてきた。しかしながら、海洋とは接続していない内陸部の湖や、海洋からの津波が侵入しにくいとされる湾奥部、防潮堤の内側の堤内地における運河など、これまで津波や高潮による被害とは無関係と考えられてきた水域の沿岸部では、津波や高潮対策などの水害対策は行われていない。そのため、対策が講じられていない地域における想定外の水位変動は、津波のように大きな波が発生しなくとも、陸上氾濫やそれに伴う漂流物の衝突などが容易に発生し、甚大な被害に繋がるリスクが見込まれる。

しかしながら、本現象について、具体的な波の発生メカニズムに関する知見はほとんどなく、評価手法も確立されていない。それどころか、本現象が報告された事例は稀有であり、取り纏めや整理された文献がないため、本現象に係る認知度は研究者の間でさえも低い。そのため、本現象に着目して情報の収集・整理を行い、地震直後の異常な水位変動という未知の水害リスクについて事前に把握し、予防策に繋げることは防災上意義がある。

以上の背景を踏まえて本研究では、地震直後に震源から離れた湾や湖などで発生する異常な水面変動という現象とその水害リスクに関する研究の先駆けとなることを目指し、既往の報告事例の情報収集・整理から発生要因の推定、評価手法の考案、将来予測、本現象の抑制方法の提案までを目的とした。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめ、これまでに報告された本現象に係る海外および国内の事例を収集・整理した。古くは1755年リスボン地震（ $M_w 8.6$ ）において、震源から数千 km 離れたイギリスやノルウェーのダムや湖で本現象が観測されており、それを含めて現在までに国内外あわせて十数件と、わずかながら報告事例がある。それら既往の本現象を励起した地震はマグニチュード6以上の巨大地震であった。観測機器などにより正確に波高や水位時系列が得られた例は稀有であるが、その中での最大波高は1m未満と津波の事例と比べて小さく、人的被害も報告されていないことがわかった。

第3章では、本現象の発生要因の推定を行ったうえで、本現象を再現および予測できる数値解析手法の選定を行った。まず、発生要因を推定するために、本現象の発生前後において湖底地形等の調査結果が得られている山梨県西湖を代表例として、地形条件や気象条件など、水位変動を起こしうる各要因の蓋然性を検討した。その結果、発生当時、西湖において津波を励起する湖底の地すべりや活断層、波浪を発生させる強風などの地形・気象条件は認められず、地震動に伴うスロッシング現象によるものである可能性のみが残った。スロッシング現象とは、通常、外部からの強制振動により容器やタンク内の液面が揺動する現象であるが、この概念を拡張し、湖や湾などの実地形において地震動の加振により地盤が振動し、それに励起されて波が発生するスロッシング現象が起きたものと推定した。次に、本現象を再現するモデルを選定するために、参考となりうる既往の解析モデルとその課題について整理した。類似の現象を分析したものとして、セイシュ（副振動）の解析モデル、地震による水平方向の地殻の永久変位に伴う波の励起の解析モデル、地震による水平方向の地殻の動的変位に伴う波の励起の解析モデルが挙げられた。一方、これらの手法はいずれも本現象を再現するためには波の発生機構に関するモデル化に問題を抱えており、実現象を忠実かつ十分な精度で再現する手法は提案されていないことがわかった。そこで、推定した発生要因および既往の解析手法の課題を踏まえて、地震に伴う地盤の強制振動により、湾内や湖内の水が揺動するという実現象に即した波の発生メカニズムを再現できること、また、波の複雑な伝播状況を再現できることの2つの観点から、三次元スロッシング解析を選定した。三次元スロッシング解析は、これまで LNG タンクや水槽などの設備を対象に適用されてきた手法であるが、本研究では湾や湖、運河などの大規模地形に拡張して使用することとした。具体的には、三次元でモデル化した地形に地震の動的変位を与え、それに伴う水の挙動を再現する。解析ツールは OpenFOAM であり、動的メッシュソルバを適用することで、従来、スロッシング解析において水塊に地震動の加速度などを与えていたものが、地盤に加速度を入力できるようになり、地盤が振動することで水が受動的に揺動する現象を再現することを可能にした。

第4章では、大型振動台による水理実験結果との比較から第3章で選定した数値解析手法のモデルの妥当性を検証するとともに、本解析手法を用いて感度分析を行うことで本現象が生じやすい条件を確認した。まず、モデルの妥当性について、酒井ほか（2007）による矩形タンクを用いたスロッシングの実験結果と本解析手法の解析結果との比較検証を行った。その結果、計算値は水面形状、水位時系列、圧力時系列のいずれも、高い精度で実験結果を再現しており、本解析手法はスロッシング現象を定量的に評価できる手法であることを確認した。次に、感度分析として、矩形水槽の斜面勾配を5度以下の間隔で変化させ、斜面勾配と生

成される波高との関係について分析した。その結果、水平方向の振動に対しては、傾斜 20° 前後を境に生じる波高が有意に小さくなること、一方、鉛直方向の振動に対して、斜面勾配によらずほとんど波を発生しないことを確認した。したがって、スロッシングによる波の発生には地震動の水平成分が重要であり、波を大きくする条件は「大きな勾配を持つ斜面が広く分布すること」であることがわかった。

第 5 章では、本解析手法による実現現象の再現性の確認を目的として、これまでに報告された事例のうち、観測記録や証言などが得られており検証比較が可能な事例を対象に再現計算を行った。2011 年東北地方太平洋沖地震時に発生した西湖、河口湖、芦ノ湖、フィヨルドでの本現象を対象に再現計算を実施した結果、いずれのケースも計算値が観測値や目撃証言などと概ね一致した。したがって、スロッシング現象の概念を拡張した本解析手法に実現現象の再現性があり、本現象はスロッシング現象で説明できることを確認した。また、再現された波高と各水域における湖（海）底の斜面勾配の分布を比較した結果、第 4 章の感度分析の結果である、「波を大きくする条件は大きな勾配の斜面が広く分布すること」についても確認できた。したがって、三次元のスロッシング現象手法を用いた解析により、これまで再現できなかった湾や湖などの大規模を対象にした異常な水位変動を定量的に評価する解析手法を提案することができた。

第 6 章では、将来発生が予想される地震に対して、選定した本解析手法を用いて本現象の予測を行い、被害のリスクを把握するとともに、対策方法についても検討した。まず、内閣府(2013)により報告されている都心南部直下地震(Mw 7.3)を入力地震動とし、東京湾湾奥に位置する北品川地区の京浜運河を対象に計算を行った。同地域のような堤内地は津波・高潮に対するハード対策があまり講じられていないが、津波や高潮の発生時には水門ゲートが閉められ運河が閉鎖水域になることで、本現象により生じる波が複雑に反射し、本現象による波高が大きくなることが予想される。予測計算の結果、発生する波は大きくとも 0.5 m 程度に留まるため、陸上氾濫のリスクは小さいと考えられるものの、入力される地震動によっては地震波形の周期と地形の固有振動周期が一致するため、共振による増幅が生じ、さらに大きな波が発生するリスクが考えられる。次に、本現象の対策について検討するため、代表的なハード対策を例に、数値計算によるケーススタディを行い、波の抑制効果の比較を行った。その結果、抑制効果を期待できるハード対策として、消波ブロックや水平バツフルの設置が挙げられ、対策の施工や運用・管理面を鑑みた場合、消波ブロックが最適策と推定した。ただし、詳細な様式や形状、配置については多種多様であるため、実務においてはケースごとに最適策を検討することが必要となる。

第 7 章は結論であり、本研究で得られた主要な成果を総括した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 大平 幸一郎 印

(2017年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 論文	
○a-1	大平幸一郎・高島知行・三上貴仁・柴山知也（2017）：湾湖でのスロッシング現象と影響評価，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 73, No.1（通常号），p. 56-66.
a-2	上原洋史・田中良仁・大平幸一郎（2017）：遠州灘における VHF 帯海洋レーダを用いた海流観測，電力土木，2017年01月号，p. 117-121.
a-3	森勇人・上原洋史・大平幸一郎（2015）：浜岡原子力発電所の津波早期検知・予測の取り組み，電力土木，2015年01月号，p. 69-73.
a-4	Tasnim, K. M., Shibayama, T., Esteban, M., Takagi, H., Ohira, K. & Nakamura, R. (2015) : Field observation and numerical simulation of past and future storm surges in the Bay of Bengal: case study of cyclone Nargis, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Vol. 75, Issue.2, pp. 1619- 1647.
a-5	Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Ohira, K., Sasaki, J, Suzuki, T. Achiari, H., Widodo, T. (2014) : Tsunami vulnerability evaluation in the Mentawai islands based on the field survey of the 2010 tsunami, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Vol.71, Issue.1, pp.851-870.
a-6	Esteban, M., Jayaratne, R., Mikami, T., Morikubo, I., Shibayama, T., Thao, N.D., Ohira, K., Ohtani, A., Mizuno, Y., Kinoshita, M & Matsuba, S. (2014) : Stability of Breakwater Armour Units against Tsunami Attack, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.140. Issue.2, pp.188-198.
a-7	Shibayama, T., Esteban, M., Nistor, I., Takagi, H., Thao, N. D., Matsumaru, R., Mikami, T., Aranguiz, R., Jayaratne, R. & Ohira, K. (2013) : Classification of Tsunami and Evacuation Areas, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Vol.67, Issue.2, pp.365- 386.
a-8	大平幸一郎・柴山知也・Miguel Esteban (2012) : 気候変動の影響を受けた台風による波浪・高潮被害の変化予測—気象・波浪・高潮・潮汐統合モデルの開発と長期予測—，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp. I_55-I_59.
○a-9	大平幸一郎・柴山知也（2012）：長周期地震動による震源遠隔地での波の発生，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 68, No.2, pp. I_55-I_59.
a-10	三上貴仁・柴山知也・武若聡・Miguel Esteban・大平幸一郎・Rafael Aranguiz・Mauricio Villagran・Alvaro Ayala（2011）：2010年チリ沖地震津波災害の現地調査，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 67, No.2, pp. I_529-I_534.
a-11	柴山知也・大平幸一郎（2010）：首都直下地震による東京湾内津波の挙動と災害危険度の評価，海洋開発論文集，Vol. 26, pp. 219-223.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(国際学会 発表論文)	
a-12	Tasnim, K. M., <u>Ohira, K.</u> , Shibayama, T., Esteban, M. (2014) : Numerical Simulation of cyclonic storm surges over the Bay of Bengal using a meteorology-wave-surge-tide coupled model, 34rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), pp.1-15, South Korea.
a-13	Tasnim, K. M., <u>Ohira, K.</u> & Shibayama, T. (2013) : Numerical Simulation of Tropical Cyclone Nargis By Using OSIS Model: Hing Casting of Historical Cyclone as well as Prediction of Future, Proceedings of International Sessions in Conference of Coastal Engineering, JSCE, Vol.4, pp.11-15.
a-14	Shibayama, T., <u>Ohira, K.</u> & Takabatake, T. (2013) : Present and future tsunami and storm surge protections in Tokyo and Sagami bays, Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), pp.24-26, Bali, Indonesia.
a-15	Esteban, M., Rafael A. M., Morikubo, I., Mikami, T., Thao, N. D., <u>Ohira, K.</u> & Shibayama, T. (2012) : Rebuilding Composite Breakwaters Following the 2011 Tohoku Tsunami: Lessons Learnt and Does It Make Sense to Reinforce? Proceedings of International Sessions in Conference of Coastal Engineering, JSCE, Vol.3, pp.81-85.
a-16	Tasnim, K. M., <u>Ohira, K.</u> & Shibayama, T. (2012) : Numerical Simulation of Cyclone SIDR Using a WRF-SWAN-Surge-Tide Coupled Model , Proceedings of International Sessions in Conference of Coastal Engineering, JSCE, , Vol.3, pp.1-5.
a-17	<u>Ohira, K.</u> , Shibayama, T., Esteban, M., Mikami, T., Takabatake, T. & Kokado, M. (2012), Comprehensive numerical simulation of waves caused by typhoon using a meteorology-wave-storm surge-tide coupled model, 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), pp.1-12, Santander, Spain,
a-18	Esteban, M., Rafael A. M., Morikubo, I., Mikami, T., Thao, N. D., <u>Ohira, K.</u> , Ohtani, A. & Shibayama, T. (2012) : Stability of rubble mound breakwaters against solitary waves, Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering (ICCE), pp.1-13, Santander, Spain.
○a-19	<u>Ohira, K.</u> & Shibayama, T. (2011) : Wave behavior in Tokyo Bay caused by a tsunami or long-period ground motions, Proceedings of 6th International Conference on Coastal Structures, pp. 1313-1324, Yokohama, Japan.
b. 総説	なし
c. 講演	
c-1	<u>大平幸一郎</u> (2015) : 海岸工学と電力土木, 2015年度早稲田大学技術士稲門会講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス.
c-2	森勇人・ <u>大平幸一郎</u> (2014) : 浜岡原子力発電所の津波対策に係る津波波力に関する実験的研究, 中部電力株式会社平成26年度技術開発賞選考発表会, 中部電力株式会社本店.
c-3	中村亮太・ <u>大平幸一郎</u> ・柴山知也・大山剛弘 (2013) : 気象-高潮-波浪-潮汐統合モデルを用いた地球温暖化後の東京湾と駿河湾の高潮の評価, 平成25年度日本沿岸域学会, 大阪市立大学.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c-4	大平幸一郎（2013）：水圧鉄管等の肉厚測定値のばらつきに関する一考察，中部電力株式会社岐阜支店工務部門業務研究発表会。
c-5	大平幸一郎（2013）：水圧鉄管等の肉厚測定値のばらつきに関する一考察，中部電力株式会社土木建築部門保守技術発表会。
c-6	東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2011）：2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査の報告，東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会，関西大学。
d. 著書	なし。
e. その他 (技術報告)	
e-1	大平幸一郎（2017）：浜岡原子発電所敷地周辺の津波堆積物調査，中部電力株式会社技術開発ニュース，No. 157，pp. 29-30。
e-2	土木学会原子力土木委員会津波小委員会（2016）：原子力発電所の津波評価技術 2016，公益社団法人土木学会，（津波評価小委員会構成員の一員として）。
e-3	大平幸一郎（2010）：現場レポートーチリ地震津波の現地調査を終えてー，早稲田ウィークリー，1217号，（2010年5月27日号掲載）。