

北陸沿岸域港湾の津波振動特性解析

長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学分野 田澤拓実

長岡技術科学大学環境社会基盤系 犬飼直之

1. はじめに

港湾では、船舶の安全な係留や荷役のために静穏な水域の確保が求められる。津波の周期が港湾の「固有周期」と一致すると、外洋での波高が低くても共振によって港内の波高が著しく増幅される。そのため、波高だけでなく、襲来する津波の周期特性を把握して共振リスクを評価することが防災上重要である。

津波側では、2024 年能登半島地震の震源域周辺の断層帯(NT2, NT3)には割れ残り¹⁾が指摘され(図-1)、今後も大規模な津波の発生が懸念されるが、従来の直線距離による伝播評価は地形的障壁を考慮できず、実際の到達時間と乖離する課題があった²⁾。港湾側でも、固有周期の把握が必要である。能登半島地震時の記録から新潟県内の主要港湾の固有周期を把握した例³⁾があるが、観測記録による方法は、記録が得られた地震と港湾に限られる。震源の予測が難しい日本海の津波に備えるには、特定の地震に依存せず、固有周期を評価できる方法が必要である。

そこで本研究では、まず GIS コスト距離解析により北陸沿岸域に襲来する津波の周期特性明らかにする。次に数値シミュレーションにより北陸主要港湾の固有周期を算出し、卓越周期帯と照合して共振リスクを評価する。さらに、数値シミュレーションの負担を減らすため、簡易推定手法の適用性を検証する。具体的には以下の3点を目的とする。

- (1)GIS コスト距離解析による北陸沿岸域への襲来津波の卓越周期帯の解明
- (2)数値シミュレーションによる北陸主要港湾の固有周期算出と共振リスク評価
- (3)メリアンの式による固有周期の簡易推定

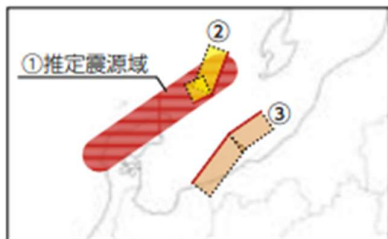


図-1 能登半島地震の断層帯の割れ残り

2. 解析方法と条件

2.1 コスト距離解析

本研究では、津波が震源から各港湾まで伝播する最短経路および到達時間を算出するため、オープンソース GIS ソフト「QGIS」および「GRASS GIS」を用いたコスト距離解析を実施した。津波の伝播速度 v は、水深 H と重力加速度 g を用いて $v = \sqrt{gH}$ で近似される。本解析では、日本近海の水深データ(JODC)をもとに、各メッシュの通過に要する時間を「摩擦コスト」として定義したコストマップを作成した。このマップに対し、累積コスト計算アルゴリズム(r. cost)を適用することで、地形的制約(障害物等)を物理的に考慮した「海上最短伝播距離」および「理論到達時間」を算出した。

2.2 対象とした地震と解析条件

日本海側で発生し、北陸沿岸域各港湾にて津波が観測された既往地震³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を解析対象とし、表-1 に計算条件と対象地震を示す。各地震の震源位置から、北陸沿岸域各港湾までの海上最短伝播距離と到達時間を算出し、襲来津波の周期特性との関係性を分析した。

項目	設定内容	備考
使用ソフトウェア	QGIS 3.40.14 / GRASS GIS 7.8 (r.cost)	
使用水深データ	JODC_500mメッシュ水深データ	J-DOSS mesh500
座標参照系 (CRS)	JGD2011 / 平面直角座標系 第9系 (EPSG:6677)	メートル単位での距離・速度計算のため
解析解像度	1,000m × 1,000m (1kmメッシュ)	計算負荷と広域解析のバランスを考慮
コスト値の設定	海域:水深に基づく $(1/\sqrt{gH})$ 陸域: Null (通行不可)	水深 h と重力加速度 g より伝播速度を算出
観測点の処理	近傍接合(スナップ)処理	陸域に重なる港湾点を隣接海域セルへ補正
震源データ	気象庁公表値および既往研究資料 (新潟の港で観測された日本海側の地震をピックアップ) ・男鹿半島沖地震(1964) ・新潟地震(1964) ・日本海中部地震(1983) ・北海道南西沖地震(1993) ・中越沖地震(2007) ・山形県沖地震(2019) ・能登半島地震(2024)	

表-1 計算条件と対象地震

2.3 固有周期算出のための数値シミュレーション条件
北陸沿岸域主要港湾(岩船港, 柏崎港, 直江津港, 姫川港, 両津港, 新湊港)を対象に、地形データを用いた津波伝播シミュレーション⁸⁾を実施した。計算モデルには、連続式および運動方程式を陽的差分法により解く水位伝播計算モデルを採用し、各港について 10m 格子

の直交座標系地形データを構築した。計算条件は、6 港共通とし、代表例として姫川港(450×208 格子)の条件を表-2、図-2 に示す。入力条件として、計算領域沖側の外境界付近より、港に対して垂直方向に振幅 1m の正弦波を入力した。入力周期は 10min から 60min まで 5min 刻みで変化させ、各周期について波発生後 3 周期分の時間発展計算を行った。ピーク検出後はその前後 2min を 1min 刻みで追加計算した。本研究では、港内の 4 点程度の水位変動を算出し、水位変動量が最大となる周期を共振が最も強く表れる周期とみなして、各港の固有周期と仮定した。

◎使用地形データ:10m格子,450×208格子,直交座標系
◎計算モデル:(水位伝播計算モデル)運動方程式と連続性を陽的に差分
◎入力条件:振幅1mの正弦波を領域上方の外境界付近で入力
時間発展で水位変化
◎条件の変化:周期10min~60minまで5min刻みで変化させ、発生後周期3周
まで計算,港内4点ほど(検潮所等)の水位変動を把握
※ピーク検出まで範囲を拡大し,検出後はその前後2分を1分刻みで
追加計算し,水位変動量が最大となる周期を"固有周期"とした

表-2 姫川港における数値シミュレーション条件

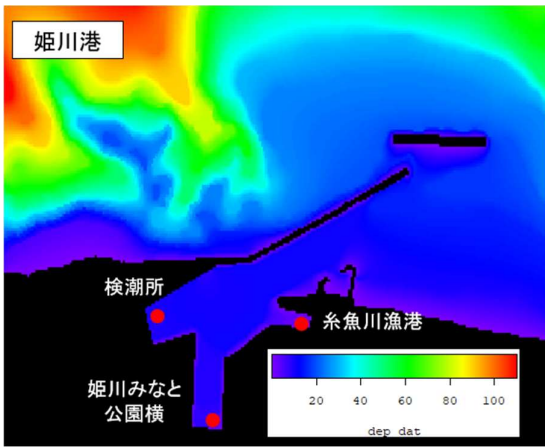


図-2 地形データ(例: 姫川港)

2.4 メリアンの式を用いた水深モデル化の検討

数値シミュレーションに要する地形データ構築等の負担を減らす方法として、矩形湾を仮定したメリアンの式

$$T = \alpha \frac{4L}{\sqrt{gH}} \quad (1)$$

による簡易推定を検討した。ここで、 T : 固有周期, L : 湾長, H : 平均水深, g : 重力加速度, α : 港湾補正係数⁹⁾である。複雑な海底地形を 1 次元の水深で表すため、QGIS 上に港湾計画図を読み込み、湾長 L と湾幅 B を固定したうえで、水深 H の与え方を次の 3 パターンとした。

A(距離重み付け平均水深): 湾口から湾奥への主航路軸に沿った各水深区間の距離による重み付け平均

B(面積重み付け平均水深): 港内の各水深区画の面積による重み付け平均。2 次元的な広がりを考慮する。

C(連続積分水深モデル): 主航路軸に沿った水深の連続的な変化 h_x を考慮し、次式で算出する。

$$T = 4\alpha \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{gh_x}} \quad (2)$$

3. 結果と考察

3.1 コスト距離解析の到達時間計算の精度検証

算出された理論到達時間と実測値を比較した結果、決定係数は $R^2 \approx 0.7$ となり、概ね良好な相関がみられた(図-3)。ただし、遠地地震や複雑な地形の港湾では、計算値が実測値よりも小さくなる(早く到達する)傾向があり、1km メッシュでは、港湾周辺の微細な地形や防波堤の影響が表現できないことが一因と考えられる。

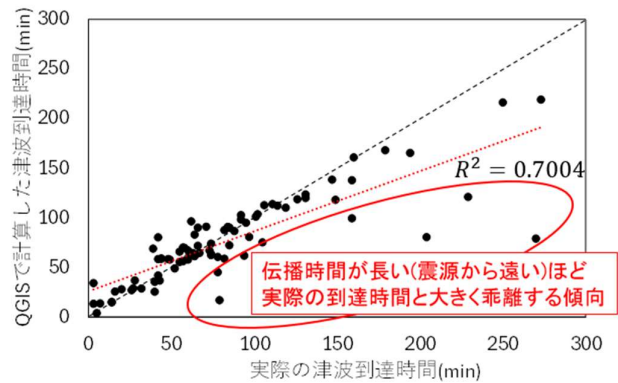


図-3 コスト距離解析の精度検証

3.2 周期特性の分析

算出された海上最短伝播距離・到達時間と観測された津波周期の関係(図-4、図-5)を分析した結果、以下のことが明らかになった。北陸沿岸域の卓越周期帯として、震源から各港までの到達時間と海上最短伝播距離の長短に関わらず、津波周期の大部分が 10min~30min の範囲に集中しており、これが北陸沿岸域における主要な津波特性であることが確認できた。

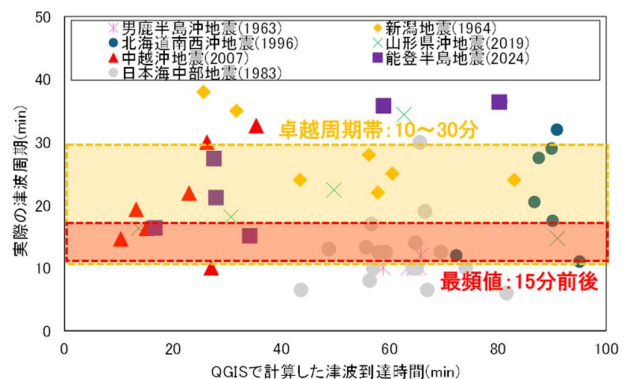


図-4 震源からの到達時間と津波周期の関係図

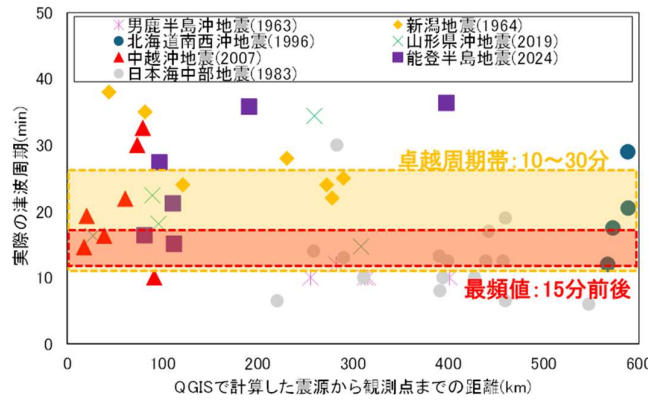


図-5 震源からの伝播距離と津波周期の関係図

3.3 各港湾の固有周期と共振リスクの評価結果

北陸沿岸域主要港湾(岩船港, 柏崎港, 直江津港, 姫川港, 両津港, 新湊港)の6港を対象に実施した数値シミュレーション結果より, 各港における固有周期(水位変動量が最大となる周期)を算出した。算出結果は, 岩船港: 30min, 柏崎港: 25min, 直江津港: 29min, 姫川港: 15min, 両津港: 15min, 新湊港: 50min となった。

3.2 で特定した北陸沿岸域への来襲津波卓越周期帯(10min~30min)と照合した結果, 新湊港を除く主要6港中5港(岩船・柏崎・直江津・姫川・両津)の固有周期が卓越周期帯と重複していることが判明した(図-6)。

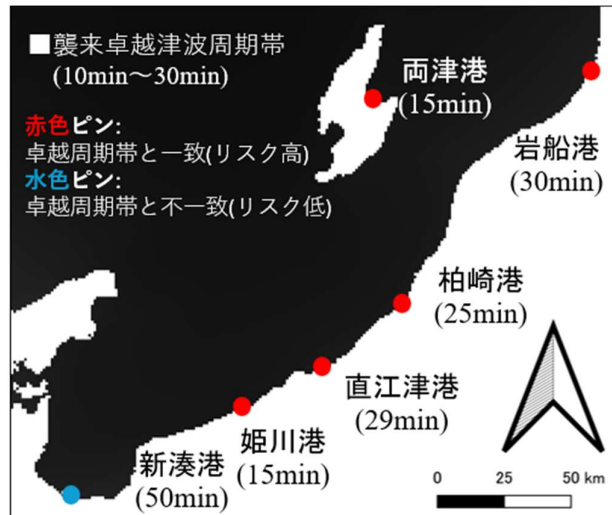


図-6 北陸沿岸域主要港湾の共振リスク

このことから, 日本海側で発生する津波がこれらの港湾に入射した場合, 港内での共振による増幅が発生して静穏度が著しく低下し, 係留船舶の被害や荷役障害を引き起こすリスクが高い可能性が示唆された。したがって, これらの港湾においては防波堤の延長や港内形状の変更など, 津波エネルギー低減案の検討の必要性が示唆される。

3.4 メリアンの式による簡易推定の精度検証

前述の数値シミュレーションは精度が高い一方, 地形データの作成と計算に多大な時間とコストを要する。そこで, 多数の港湾や将来の改修案を対象とした簡易推定法として, 矩形湾を仮定したメリアンの式の適用性を検証した。岩船港, 直江津港, 柏崎港, 姫川港の4港について, 3パターン(A: 距離重み付け, B: 面積重み付け, C: 連続積分)の水深モデルによる算定値を, 数値シミュレーション(基準値)と比較した(表-3)。

表-3 各メリアンの式と基準値の固有周期の比較

	①距離重み付け	②面積重み付け	③連続積分	数値シミュレーション
岩船港	14.9min	15.2min	15.3min	30min
直江津港	29.2min	29.1min	29.4min	29min
柏崎港	21.1min	19.7min	20.4min	25min
姫川港	14.5min	14.5min	13.1min	15min

直江津港ではメリアンの式が基準値をほぼ再現し, 柏崎港・姫川港でも差は1~2割程度であった。一方, 岩船港ではメリアンの式による固有周期が15minと, 基準値30minの約半分になった。水深モデルA~C間の周期差は1.4min程度にとどまり, 最も高精度と想定したモデルCもA, Bと同程度であった。A~Cはいずれも一定幅の矩形湾を前提としており, 水深の扱いを変えても精度は改善しなかったことから, 精度は水深の算定方法よりも港湾の平面形状に左右されと考えられる。

岩船港のように主航路の側方に大きな泊地を持つ港湾(図-7)では, 泊地への水の回り込みにより実効的な周期が長くなり, 1次元の式では過小評価になったと考えられる。一方, 直江津港や姫川港のように, 湾口から湾奥まで波が主航路軸に沿って直線的に伝播する港湾では, メリアンの式は有効に機能した(図-1, 図-8)。

岩船港の15minと30minはいずれも卓越周期帯(10min~30min)内にあり, 判定は変わらなかった。しかし, 同程度の過小評価が帯の下端に近い港で生じれば, 帯外と誤判定され, 共振リスクを見逃す恐れがある。また, 形状によって誤差が変わる以上, メリアンの式のみでは対策の可否を判断することは難しい。したがって, メリアンの式を簡易推定に用いるには, 適用できる形状の範囲を明らかにするとともに, 側方泊地をもつ港湾に対する補正方法を検討することが今後の課題である。

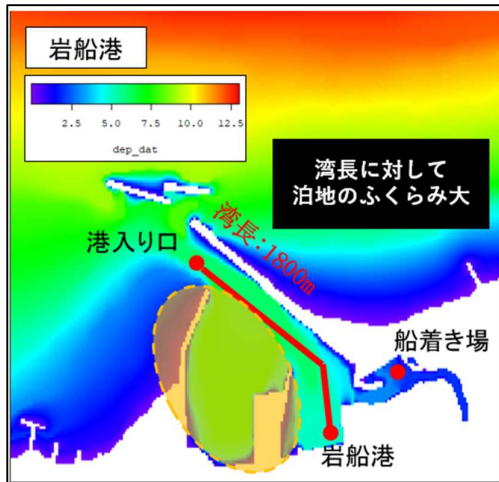


図-7 姫川港の湾長と泊地のふくらみの比較

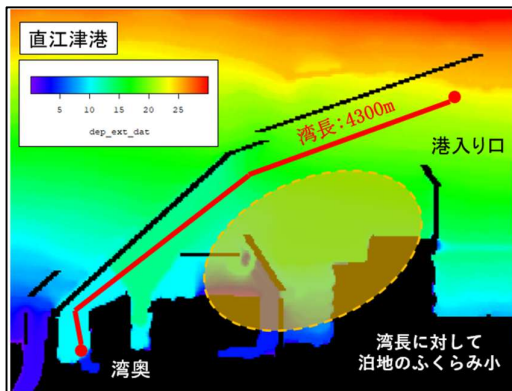


図-8 直江津港の湾長と泊地のふくらみの比較

4. おわりに

本研究では、北陸沿岸域における主要港湾での津波防災対策の評価手法の確立を目指し、GIS コスト距離解析による来襲津波の周期特性の解明、数値シミュレーションによる主要 6 港の固有周期の算出と共振リスク評価、ならびにメリアンの式を用いた簡易推定手法の適用性検証を行った。得られた主要な知見は以下の通りである。

1. コスト距離解析により海上最短伝播距離と到達時間を分析した結果、北陸沿岸域に襲来する津波の卓越周期帯は、伝播距離や到達時間の長短に関わらず 10min~30min に集中する特性が明らかになった。
2. 数値シミュレーションの結果、主要 6 港のうち 5 港(岩船、柏崎、直江津、姫川、両津)の固有周期が卓越周期帯と重複した。これらの港では、津波入射時に共振による災害リスクを有する可能性がある。
3. メリアンの式による簡易推定は、一軸方向に波が伝播する直線的な港湾では良好な精度で固有周期を再現できた。一方、側方に大きな泊地を持つ岩船港では基準値の約半分に過小評価した。水深の与え方より港

湾の平面形状に精度が左右されることが示唆された。今後は、側方泊地の張り出し割合に対するメリアンの式の適用限界の定量化と湾幅の広狭変化を考慮した連続積分モデルの拡張を進める。また、本研究のシミュレーションは港口に対する垂直入射を想定しているため、震源位置に応じた斜め方向からの津波入射による港内振動特性の変化についても検討を深める。さらに、これらの結果に基づき共振リスクが高いと判定された港湾を対象に、防波堤配置の変更や港内形状の最適化による静穏度向上・津波低減対策案の検討を行う。

5. 参考文献

- 1)上越市,危機管理課,正しく恐れ,正しく備えましょう,
<https://www.city.joetsu.niigata.jp/uploaded/attachment/250205.pdf>
- 2) 犬飼直之, 永原優衣, "能登半島地震時の新潟県沿岸域の港湾における津波の湾水振動特性の把握", 土木学会論文集, 81 巻, 17 号, 25-17006, 2025
- 3)新潟県地方気象台,新潟地震,
https://www.data.jma.go.jp/niigata/menu/2024project/niigata_files/tsunami_obs_result.png
- 4)運輸省港湾技術研究所,1993 年北海道南西沖地震の特性と被害,p17-19
- 5)運輸省港湾技術研究所,1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察,p25~30
- 6)気象庁,災害時地震・津波速報 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震,
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200703.pdf
- 7)気象庁,災害時地震・津波報告 令和 6 年能登半島地震 ,https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2024/saigaiji_202403.pdf
- 8) 犬飼直之,永沢薫:数値計算による東北地方太平洋沖地震津波による岩手県北部での構造物被災状況の把握,土木学会論文集 B2(海洋工学),Vol.68,No.2,I_306-I_310,2012
- 9) 本多・寺田ら (K. Honda. T. Terada, Y. Yoshida & D. Ishitani: Secondary undulations of oceanic tides, Journal of College of Science, Imperial University 24 (1903)