

3. 1. 2 沿岸防災手法の工学的評価

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成 25 年度
 - 2) 平成 26 年度
 - 3) 平成 27 年度
 - 4) 平成 28 年度
 - 5) 平成 29 年度
 - 6) 平成 30 年度
 - 7) 平成 31 年度（令和元年度）
 - 8) 令和 2 年度
- (e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 河道に侵入する津波の氾濫リスクの評価
 - 2) 1833 年庄内沖地震津波の日本海西部域における増幅特性
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 令和 2 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

1.2 沿岸防災手法の工学的評価

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学大学院工学系研究科	准教授	下園武範
	教授	田島芳満
	助教	山中悠資

(c) 業務の目的

東北地方太平洋沖地震津波では東日本太平洋側を中心に壊滅的な被害が発生した。これを受けて、今後の津波対策としては、二段階の津波レベルを設定して、防災・減災の具体的な対策を進めることとなっている。すなわち、頻度の高い津波（レベル1津波）と最大クラスの津波（レベル2津波）を設定し、頻度の高い津波に対しては、海岸堤防などで陸地への浸水を防ぐことにより人命と資産を防護し、最大クラスの津波に対しては、避難手段の確保などにより人命を守るというものである。太平洋側沿岸では、プレートの動きにより百年程度の周期で繰り返し発生する地震による津波と、複数の地震の連動などにより発生する巨大津波が、プレート境界付近を中心に発生するため、二段階の津波レベルによる対策は津波の発生メカニズムと整合しており、社会的な認知も得やすい。しかしながら、日本海側沿岸では、地震の発生機構が異なるうえ、砂浜・砂丘によって特徴づけられる緩勾配海岸において、季節的に繰り返される高波の来襲や慢性的に海岸侵食の問題が深刻化しているという特徴を有しているため、これらの特徴を踏まえて最適な防災手法を検討する必要がある。

本サブテーマでは、日本海における地形・海象・津波の特徴に鑑み、地域の沿岸防災力と防災リテラシーの向上に資するため、工学的な観点から津波防災手法を評価することを目的とする。具体的には以下の4つの課題を8カ年にわたって実施する。

- ・日本海側沿岸における海象特性と沿岸防災手法の調査
- ・津波による海岸堤防の性能と限界の調査
- ・沿岸低地における津波の氾濫予測
- ・日本海沿岸に適した津波防災手法の提案

(d) 8カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成25年度：日本海側沿岸における海象特性と沿岸防災手法の調査

日本海側の海岸の特徴を海岸防災の観点から整理し、単調な砂浜海岸が多く、太平洋側に比較して、堤防・護岸の整備率はやや低いことを明らかにした。堤防の高さは、高波の

打ち上げ高さで設計されており、日本海側では、津波より冬季季節風による高波に対する防護が構造物設計の基準となっていることが確かめられた。さらに、海岸堤防の津波被害軽減性能に関する予備実験を実施し、堤防の壊れにくさと越流する津波のエネルギー減殺がトレードオフの関係にあることを明らかにした。

2) 平成 26 年度：津波による海岸堤防の性能と限界の調査

津波の堤防越流に伴う後背地のリスク評価を可能にするため、平成 26 年度に引き続いて越流時における堤防周辺の流体運動に関する水理模型実験を実施した。実験は、堤防法肩や法尻で局所的に発生する鉛直加速度による非静水圧が越流量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施した。実験および数値モデルによる検討の結果、津波高さが堤防高に対して相対的に大きい場合には、従来の方法では後背地への氾濫を危険側に評価することが示唆された。また、この効果は、堤防法面勾配が $1/3$ を越えると急激に大きくなることが示され、一般的な堤防の法面勾配の範囲 ($1/2$ - $1/3$) では無視できないことが示された。

3) 平成 27 年度：津波による海岸堤防の性能と限界の調査、沿岸低地における津波の氾濫予測

堤防によって防護された沿岸地域への津波氾濫予測の高精度化を目的として、津波が堤防を越流する際の水理特性を水理模型実験および数値流体モデルを用いて詳細に調べた。水理模型実験では勾配の異なる 6 通りの堤防模型に津波に見立てた段波を作用させて、各点での水位変動や越流量の計測を実施した。さらに、堤防周辺の詳細な流れ場の構造を明らかにするために、Navier-Stokes 方程式に基づく数値計算モデルにより実験結果の再現を行った。得られた結果をもとに堤防の表法面および裏法面の勾配がどのように越流特性に影響するかを整理した上で、氾濫モデルにおいて広く使われている越流公式の改良を行った。新たな越流公式は堤防形状の効果が反映されるため、従来のものに比べて高精度な越流量評価が可能であることが実験結果との比較によって示された。

4) 平成 28 年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（北海道～東北日本）

これまでの堤防越流に関する基礎実験から得られた知見および既存の氾濫モデルをもとに、堤防を含む複雑な平面地形を伝播・遡上する津波を再現するモデルを構築し、平面造波水槽実験によりモデルの検証を行った。さらに、北海道～東北日本を対象に代表地域を選定して、波源の不確実性を考慮した上で氾濫計算を実施した。海岸構造物が破壊されない場合と破壊される場合の浸水範囲や浸水量を比較することにより、構造物の効能を定量的に評価した。

5) 平成 29 年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（北海道～東北日本）

平成 28 年度の業務に引き続き、対象地域を拡げて日本海沿岸域（北海道～東北日本）の津波伝播・氾濫計算による被災特性の分析を行った。また、氾濫モデルによる既存構造物の実用的な津波耐性評価を可能にするため、平面水槽内に構築した段波生成装置を用いた実験を行い防波堤各部に作用する津波波力の特性を明らかにした。実験結果をもとに津波

氾濫モデルによる水理量から防波堤各部に作用する波力の評価を可能にする評価手法を構築してその性能を検証した。

6) 平成 30 年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（東北日本～西日本）

前年度の業務に引き続き、津波の伝播・氾濫計算による被災特性の分析を行った。東日本域及び西日本域における代表的な沿岸都市を複数対象とし、対象都市における個々の被害特性を推定するとともにそれらを各都市間で比較することで、津波被災特性における地域性を明らかにした。

7) 平成 31 年度（令和元年度）：沿岸低地における津波の氾濫予測、日本海沿岸に適した津波防災手法の提案

前年度の業務に引き続き、日本海沿岸域で想定される津波の浸水特性を分析した。本年度は特に河川津波の氾濫に着目し、そのリスクを定量的に評価した。また日本海西部海岸における浸水特性を評価するため、同海岸に浸水をもたらした 1833 年庄内沖地震津波の伝播・増幅特性を分析した。

8) 令和 2 年度：日本海沿岸に適した津波防災手法の提案

これまでの検討結果を踏まえて日本海側の津波防災に最適な工学的防災手法の枠組みを提案する。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

日本海に接続する河川を対象として、河道に侵入した津波の氾濫リスクと構造物によるその低減効果を分析する。また、前年度に得られた成果である津波の後続波増幅による浸水被害拡大について、既往津波を対象とした分析を行う。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

河口から河道に侵入した津波の氾濫リスクを定量的に評価した。多くの場合は洪水対策のために整備された河川堤防の効果により津波の堤内地への氾濫は発生しない一方、港湾背後の低平地を流れる河川や河口近くの河道沿いでは津波の越流に伴う氾濫が発生する可能性があることがわかった。さらに、複数の河口から津波が侵入し、それらが河道内で重合して局所的な水位増大を引き起こすリスクがあることがわかった。一方で、港湾構造物により河川津波の氾濫リスクを低減させることができることがわかった。

日本海西部沿岸域においては、後続波の増幅が浸水被害を拡大させる可能性があることが前年度の業務成果により得られたため、実事例の分析として 1833 年に発生した庄内沖地震津波の同沿岸域における増幅特性を推定した。歴史史料及び痕跡高の精査からは、後続波の増幅によって境港市で津波浸水が発生した可能性が示唆された。さらにその津波の数値解析を実施し、境港市周辺海域においては後続波の増幅により最大水位が形成されていたことが確認され、津波浸水予測における後続波推定の重要性が確認された。

(b) 業務の成果

平成 28-30 年度での業務では、日本海海域に面する代表沿岸都市を対象に、様々な津波波源を想定しながら津波浸水のケーススタディを実施した。それらの成果から、津波が最大化するまでの時間は地域間でズレがあり、日本海東部沿岸域においては地震発生後から 1 時間以内に津波による水位上昇が最大になる場合が多いが、日本海西部沿岸域においては津波の第一波が到達してから数時間程度経過後にそれが最大になる場合があることがわかった。一方で、想定規模の津波に対しては海岸砂丘がその背後域への津波浸水を防ぐことができること、砂丘の切れ目となる河口や港湾及びその後背地が津波浸水に対して脆弱であることがわかった。さらに、河口導流堤や港湾防波堤といった海岸構造物によって、津波による浸水被害を有意に低減させることができることを明らかにした。したがって、脆弱域に襲撃する津波の特性及び津波氾濫リスクを定量的に把握し、脆弱域に侵入する津波外力を低減させることが日本海沿岸域の防災力の向上に繋がると考えられる。また平成 30 年度の業務では、日本海西部沿岸域において日本海東縁部で発生した津波の後続波が有意に増幅し、浸水が拡大する可能性があることを明らかにした。これを検証するためには、日本海東縁部で発生した既往津波の同沿岸域における増幅・浸水特性を分析することが重要であると考えられる。そこで本年度の研究項目を、1) 河道に侵入する津波の氾濫リスクの評価、2) 1833 年庄内沖地震津波の日本海西部域における増幅特性、のように分類し、以下に各研究項目の成果を詳述する。

1) 河道に侵入する津波の氾濫リスクの評価

津波が河口域に襲撃した際にはその一部が河道に侵入し、河川を遡上しながら氾濫することがある。2011 年に発生した東北津波においては河川堤防を越流した津波による大規模な氾濫被害が発生した¹⁾。日本海に接続する河川においても過去に津波が遡上したことがあり、1993 年に発生した北海道南西沖地震津波の河川遡上などがその代表例として知られている^{2) 3)}。平成 28-30 年度の業務においては、日本海沿岸域における代表都市を対象に様々な津波波源を仮定しながらケーススタディを実施した。その成果から、河道に侵入する津波の氾濫が日本海沿岸域で想定される津波氾濫特性の一つであることが明らかになっている。そこで本年度は、河道に侵入する津波の氾濫リスクを定量的に評価した。

河道に侵入する津波を高精度に推定するためには、一般的には河道を十分に解像した高解像度地形に平面二次元の数値モデルを適用する必要がある。しかしながらそれによって、海域地形を過剰に解像することになり莫大な計算負荷が生じることから、様々なシナリオを網羅的に分析することが難しくなる。そこで、計算負荷を低減させた数値モデルに基づき分析を行うことを念頭に置き、新潟県新潟市沿岸に接続する阿賀野川を対象とした数値実験を行った。まず国土交通省(2014)⁴⁾が想定した断層シナリオの中から阿賀野川に影響が大きいと考えられる F34 断層による津波に着目し、それが阿賀野川に侵入・伝播する過程を、平面二次元の非線形長波モデルに基づき空間解像度 20 m の地形を用いて推定した(図 1)。この際、阿賀野川の河床高は一定の標高とし、河川流量及び摩擦損失は考慮していない。次に、以下に略述する計算負荷を低減させた数値モデルに基づき、F34 津波が阿賀野川に侵入・伝播する過程を推定した。まず海域地形を空間解像度 700 m にスケールアッ

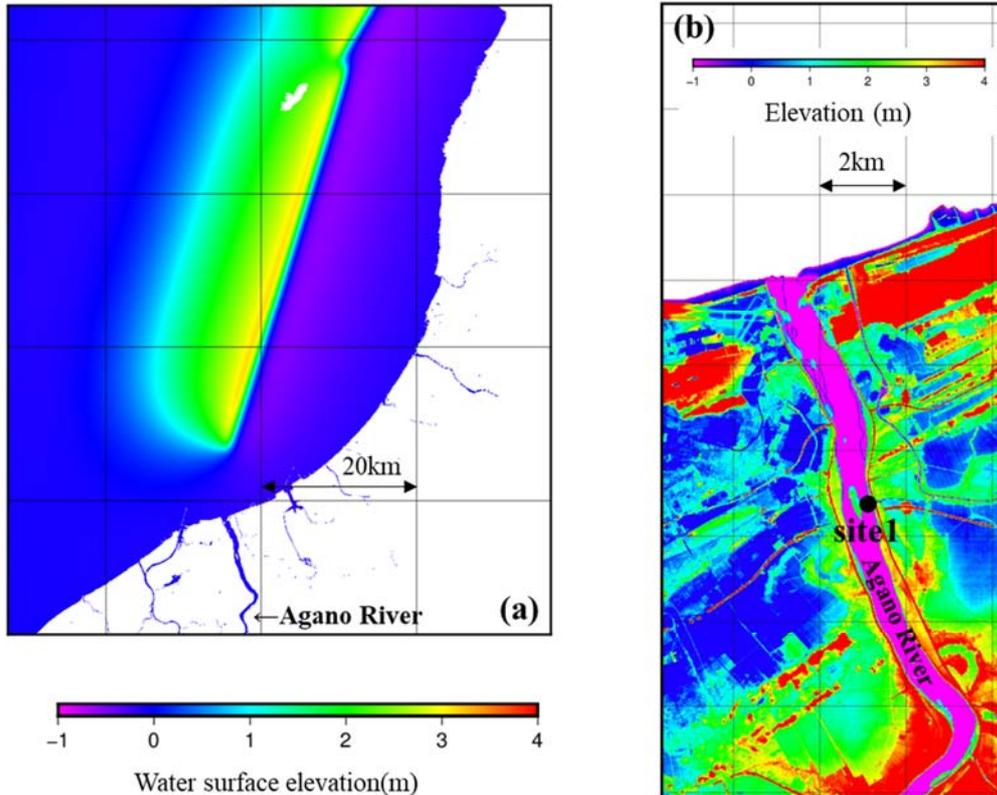


図 1 (a) F34 断層(国土交通省, 2014)⁴⁾ による初期津波波源と周辺地形; (b) 阿賀野川及びその周辺地形。陸上地形は国土地理院基盤地図情報数値標高モデルに基づく。

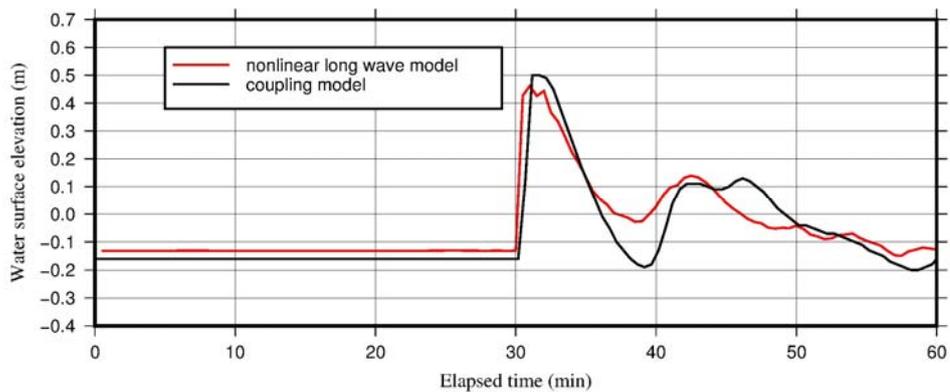


図 2 高解像度地形において非線形長波モデルで推定した波形(赤線)とカップリングモデルで推定した波形(黒線)の比較(Site 1)。

プさせ、海域における津波伝播を平面二次元の線形長波モデルに基づき推定した。それによる河口地点の推定水位を Yasuda(2010)⁵⁾ の一次元モデルに下流側境界条件として接続し、河道内の津波を効率的に推定した(以下、カップリングモデルと称す)。なお、高解像度地形において非線形長波モデルに基づき推定した波形と比較するために、一次元モデルでは分散項及び摩擦損失項を考慮していない。図 2 に非線形長波モデルとカップリングモデルによって推定された F34 津波による河道内(Site 1)の水位変動を示しており、非線形長波モデルによって推定される波形をカップリングモデルによって概ね再現できていること

がわかる。したがって、このようなカップリングモデルを用いることによって、河道内に侵入する津波の氾濫リスクを効率的かつ網羅的に推定することが可能である。

上述のカップリングモデルを用いて、子吉川・最上川・阿賀野川(図 3)における津波の氾濫リスクを定量的に評価した。まず各河川に影響が大きい想定断層シナリオを前年度までの業務で開発した高速津波計算システム⁶⁾により特定してピックアップした。想定の不確実性を考慮するために断層モデルのすべり量は 3σ レベルまで増大させ、断層の位置・深さ・走行・傾斜・すべり角にばらつきを与えることで、一つの断層に対して様々な仮想シナリオを設定した。次に、海域の津波伝播は前述の高速津波計算システムを用いて推定し、それに基づく河口位置の推定波形を一次元モデルに接続することで設定シナリオを網羅的に分析した。各河川管理事務所提供の断面データに基づく地形を一次元モデルの地形条件として用い、マニングの粗度係数は $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を仮定した。また河川の上流側境界ではおおよそ年平均流量に相当する河川流量を境界条件として与えた。なお、河道内に侵入した津波の氾濫や、前述の数値実験と同様に一次元モデルの分散項は考慮しない。このような条件の下で、各設定シナリオに基づく津波の第一波目来襲時の河道内最大水位に着目して数値計算を実施した。図 4 に各シナリオにおける河道内に侵入した津波の第一波目の最大水位と河川堤防高の比較を示す。図中では断面データのピーク標高を堤防高として示している。まず子吉川に影響が大きい断層としては F26・F30・F31 断層がピックアップされ、断層の不確実性を考慮してそれぞれに対して 729 のシナリオを設定して分析を実施した。

津波による河道内水位の上昇は河口から数キロ~十数キロメートル程度上流側まで見られたものの、いずれのシナリオにおいても堤防高までは達しなかった(図 4a)。次に最上川に影響が大きい断層として F28・F30・F34 断層が、阿賀野川に影響が大きい断層として F34・F35・F38 断層がそれぞれピックアップされ、同様のシナリオ数を分析した(図 4b,c)。最上川においては、一部のシナリオに基づく津波の最大水位が河口近くで堤防高と同等、あるいはわずかに上回っており、河道を介して軽微な浸水が発生する可能性があることがわかる。一方、その他の地点においては津波による最大水位は堤防高よりも有意に低くなっている(図 4b)、また阿賀野川では、全地点において津波による最大水位が堤防高よりも有意に低いことがわ

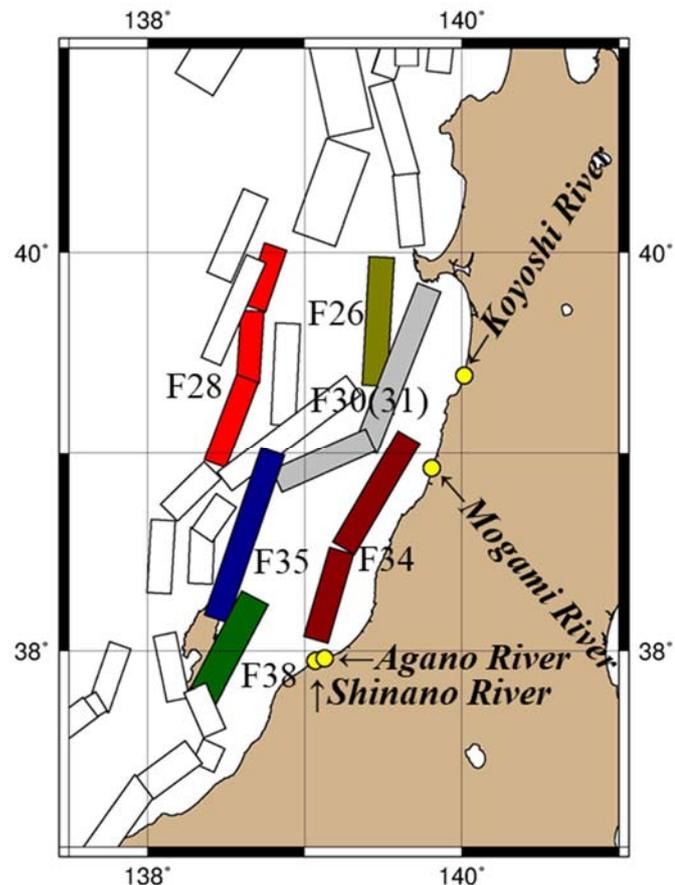


図 3 国土交通省(2014)⁴⁾に基づく断層分布と対象河川河口位置。

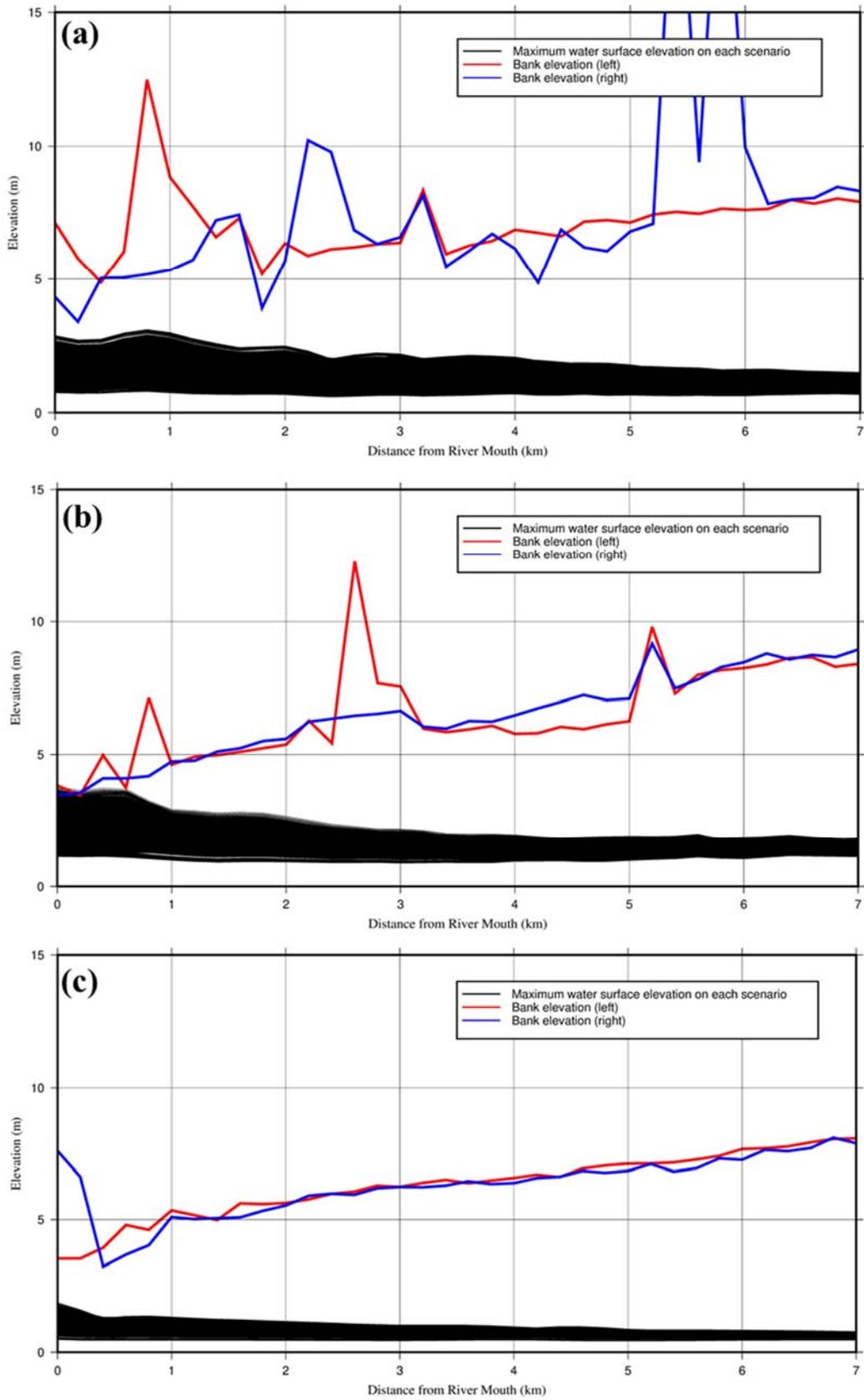


図4 河道内における津波の第一波目最大水位(黒線)と堤防高(赤線：左岸堤防高、青線：右岸堤防高)の比較。(a) 子吉川；(b) 最上川；(c) 阿賀野川。

かる(図 4c)。これらの 3 河川はいずれも一級河川であり、洪水・治水対策のための河川堤防が整備されている。我が国においては古くから河川の治水事業が展開されており、多くの河川において洪水リスクを抑制するために河川堤防が整備されてきた。したがって、河川堤防が整備されている河川においては、それによって河道に侵入した津波の氾濫リスクも同時に抑制されていると考えられる。さらに、日本海側では融雪出水によって河川流量が大きく増大し、河道内水位が高水位となる場合があるが、図 4 に示すように多くの地点で津波の最大水位は堤防高を大きく下回るため、河川流が津波氾濫に及ぼす影響は小さく、かつ極めて限定的であると考えられる。

前述の 3 河川に加え、信濃川を対象とした分析を実施した(図 3)。信濃川下流域では関屋分水路によって河川流が分流されており、異なる二つの河口を有しているため、これを考慮した数値計算を実施した。また、信濃川河口は新潟西港内に位置しており、構造物の影響が河道に侵入する津波の特性に大きく影響することが予想されるため、線形理論に基づく高速津波計算システムを用いた河口水位の推定では不確実性が大きくなると考えられる。そこで、双方向ネスティンググリッドシステムに基づき河口周辺地形は 1.11" (約 30 m)で解像し、それに非線形長波モデルを適用することによって河口水位を推定した。それを Yasuda(2010)⁵⁾ の一次元モデルに接続することで、河道内に侵入する津波への構造物の影響を考慮することができる。まず前述の手順と同様に、高速津波計算システムを用いて信濃川に影響が大きい断層(F34・F35・F38 断層)を特定し、すべり量の不確実性のみ考慮したシナリオ(3 σ レベル)に基づく分析を実施した。図 5 に各シナリオに基づく津波の第一波目の信濃川河道内における最大水位と河川堤防高の比較を示す。信濃川河口から侵入した津波は、いずれのシナリオにおいても信濃川河口から 2-3 km 地点において最大水位が堤防高と同等か上回っていることがわかる(図 5a)。また関屋分水路から侵入した津波においては、F38 津波による最大水位が堤防高を大きく上回っていることがわかる(図 5b)。信濃川においても河川堤防が整備されているものの、関屋分水路による河川流量調整機能の存在により、河口から分流地点までの区間においては比較的堤防の天端高が低く抑えられている。これが、津波氾濫が他の河川よりも発生しやすくなっている一因であると考えられる。また堤防を越流する津波の流量は、河川流量に応じた河道内水位によって大きく変化することが予想される。したがって、堤防高を大きく上回る最大水位が推定された地点においては、その越流による浸水範囲はその時点における河川流による水位によって変化すると考えられる。したがって、融雪出水などの影響により浸水範囲が大きく変化する可能性が考えられ、浸水予測量に季節性があることがわかった。次に、図 6 に信濃川河口から分流地点までの区間における F38 津波の伝播過程を示す。信濃川河口から津波が侵入・伝播する一方で、関屋分水路から侵入した津波が分流地点から信濃川河口に向かって流入していることがわかる。それらの津波は河道内で重合しており、このような重合による局所的な水位増大が津波氾濫をもたらす可能性がある。さらに、信濃川河口域にある新潟西港の防波堤の天端高を静水面下まで低下させた場合の、河道内に侵入する津波の氾濫リスクの変化を分析した(図 7)。図 7 より、防波堤の天端高を低下させると、F35・F38 断層による津波においては河道内の津波の最大水位は増加する傾向が見られた。したがって、それらの津波に対しては防波堤の存在が河道からの津波氾濫リスクを低下させていると見なすことができる。一方、F34 断層による津波に対しては天端高を低下させるとその最大

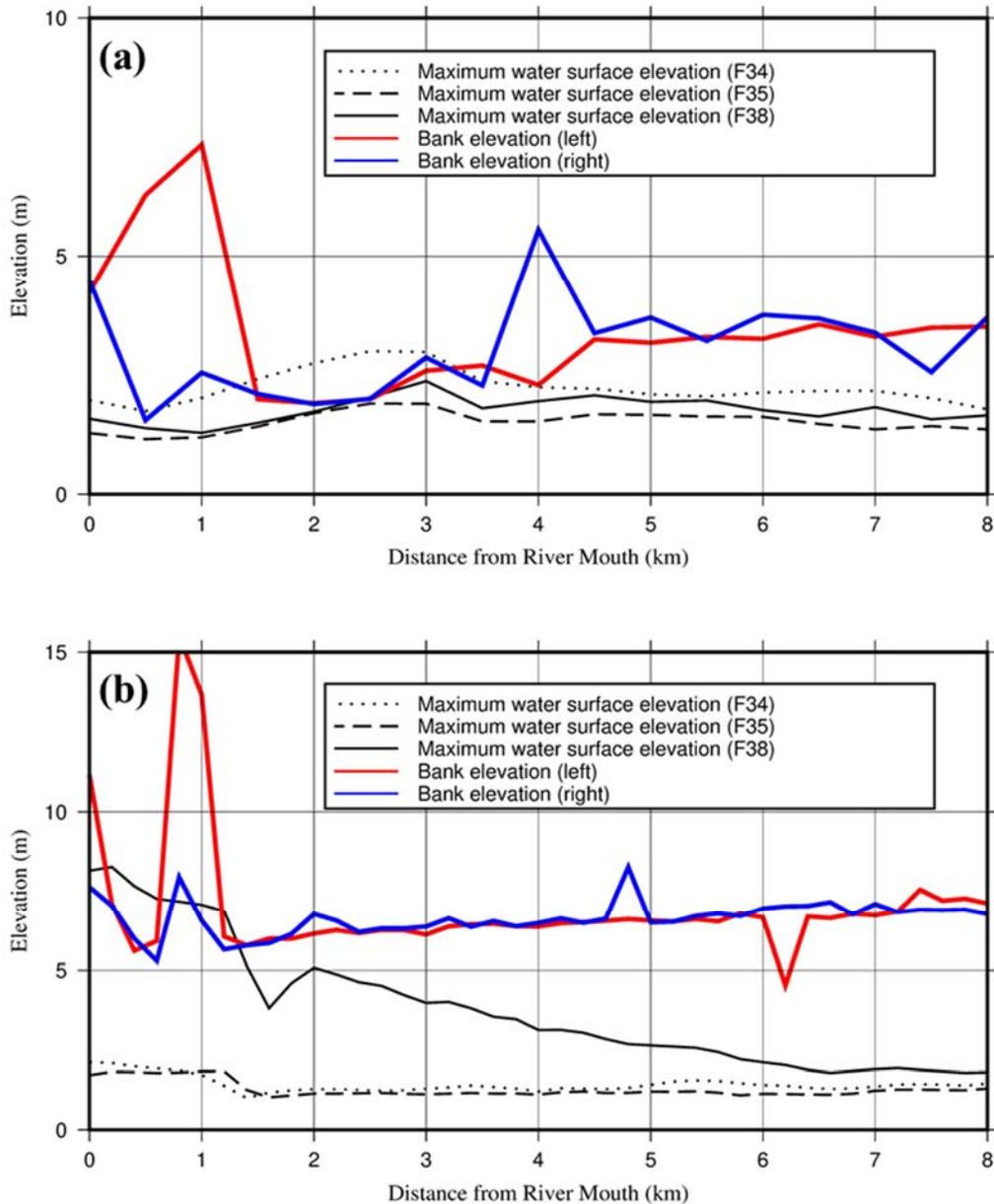


図 5 信濃川河道内における津波の第一波目最大水位(黒線)と堤防高(赤線：左岸堤防高、青線：右岸堤防高)の比較。(a) 信濃川河口 - 分流地点間; (b) 関谷分水路区間とその上流区間。点線・破線・実線はそれぞれ F34・F35・F38 津波を表す。

水位は低下する傾向が見られた。新潟西港の防波堤はおおよそ北北東の方向に延伸しており、F34 津波はその方向から信濃川河口に向かって来襲する(図 3)。このことから、同方向から来襲する津波は防波堤に沿って伝播し、河口域に集中する特性があると考えられる。このようなことを踏まえると、防波堤などの海岸構造物は河道内の津波氾濫リスクを抑制する効果がある一方で、特定の津波に対してはそのリスクを増大させていると考えられる。

2) 1833 年庄内沖地震津波の日本海西部域における増幅特性

本項で述べる内容は論文として取りまとめ、土木学会論文集 B2(海岸工学)に投稿中であり、それを引用しながら述べる。1833 年に発生した庄内沖地震は日本海東縁部(山形県沖)

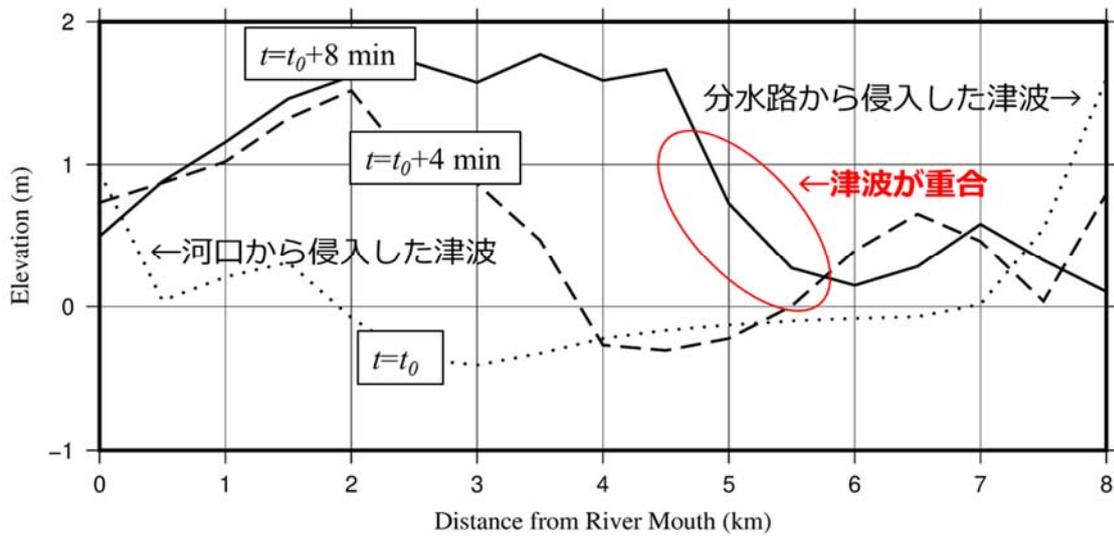


図 6 二つの河口から侵入した F38 津波の河道内での重合(信濃川河口一分流地点間)。

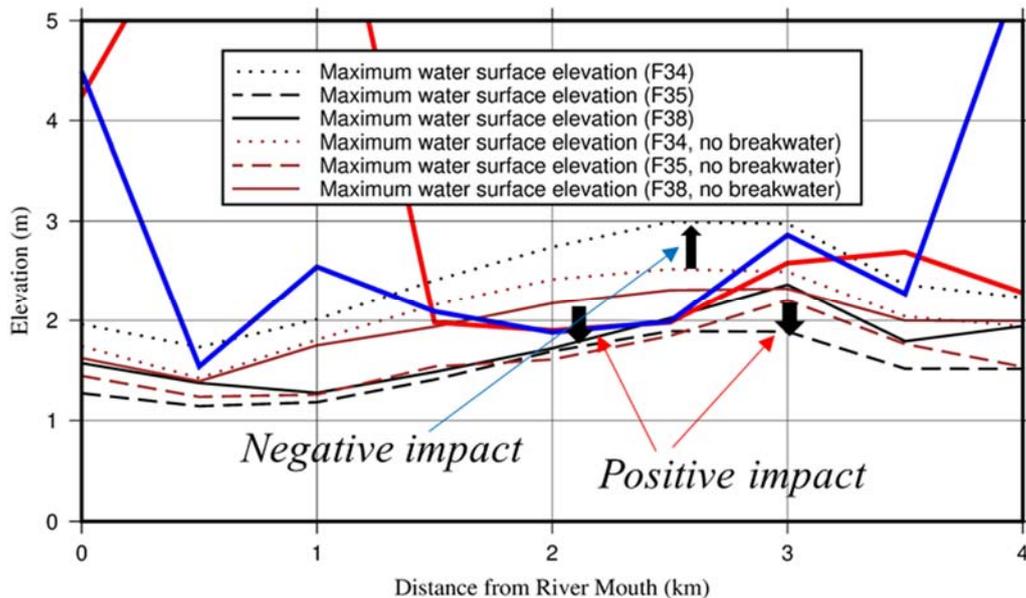


図 7 防波堤有無による信濃川河道内(信濃川河口一分流地点間)の最大水位の変化。

点線・破線・実線はそれぞれ F34・F35・F38 津波を表し、線色の違いにより防波堤の有無による違いを表す。

で発生した地震であり、それによる津波(以下、1833 年津波)が日本海西部沿岸域まで伝播して浸水被害を発生させた(図 8)。美保湾内に位置する米子市においては、同津波により内陸に輸送されたと見られる海岸砂が発見されている⁷⁾。また隣接する境港市においては、同津波による浸水が発生したことが歴史史料により記されている⁸⁾。1833 年津波に関する定量的な観測記録は乏しいため、その全容を理解するためにまず残されている定性的な記録を整理した。羽鳥(1990)⁹⁾によれば、庄内沖地震の発震日時は 12 月 7 日 14 時ごろであり、既往研究によれば山形沖で発生した津波は 120-150 分程度で日本海西部沿岸域に到達するため¹⁰⁾、美保湾沿岸域には 16 時半ごろまでに津波の第一波がピークになると推測さ

れる。一方、都司ら(2017)⁸⁾は歴史史料に基づき、境港市においては同日の夜に0.5 mの浸水が発生したと結論付けている。年や位置によって多少のばらつきがあるものの、12月上旬の境港市の日没時刻は17時前であると推測されるため¹¹⁾、1833年津波は沿岸部固有振動などによる後続波の増幅によって同市を浸水させた可能性が示唆される。前年度の業務成果では、日本海東縁部で発生した津波は美保湾の固有振動の励起によって増幅することがあることが明らかになっており¹⁰⁾、1833年津波も同様のメカニズムにより増幅して浸水被害をもたらした可能性が考えられる。これを踏まえ、美保湾の固有周期を特定するため、2019年12月18日15時から12月20日17時までの期間、境港市境港に容量式波高計を設置し(図8)、港内の水深の時間変化をサンプリング周期15 sで計測した(図9a)。計測データからは37分や23分などがピーク周期として推定され(図9b)、それらの時間スケールに鑑みると湾スケールの固有振動が励起されていたことが推察される。次に、日本海西部海域を含む計算領域において、沖合格子点(Site 1,2)(図8)から周期波を造波し、球面座標系線形長波方程式を用いて同海域の水位変動特性を分析した。図10では境港位置に対応する格子点(Site S)における周期 T と最大水位 η_{\max} の関係を示しており、前述のピーク周期と整合する周期帯において η_{\max} が極大化していることが確認できる。また、造波

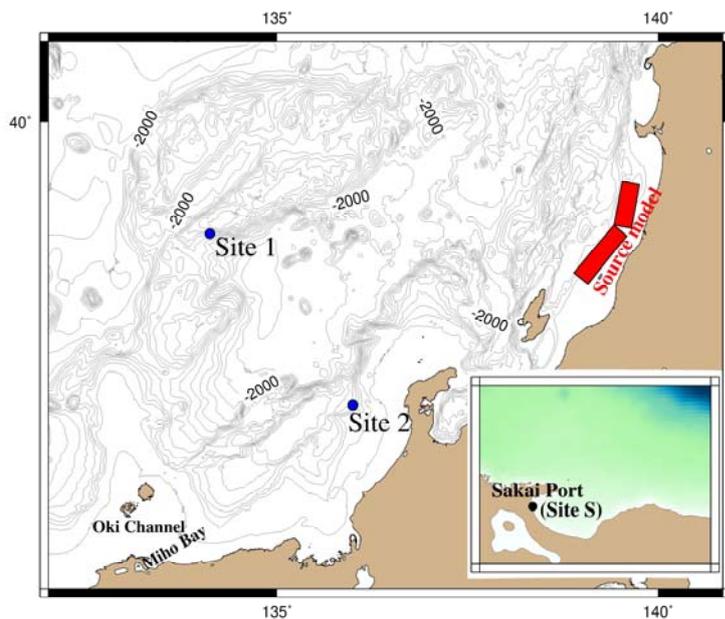


図8 相田(1989)¹¹⁾の断層モデルに基づく波源位置(赤色)と日本海西部域の位置関係及び波高計設置地点と造波格子位置(青色)。

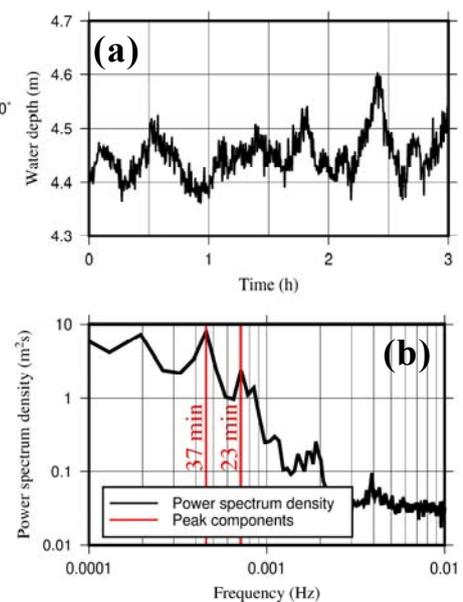


図9 (a)計測水深データ及び(b)計測水深データのパワースペクトル(黒線)。

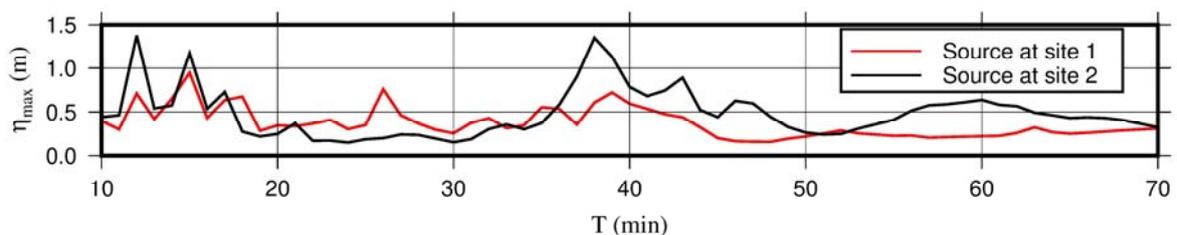


図10 Site Sにおける最大水位の入射波周期及び入射方向依存性。赤線はSite 1から造波した場合の結果、黒線はSite 2から造波した場合の結果。

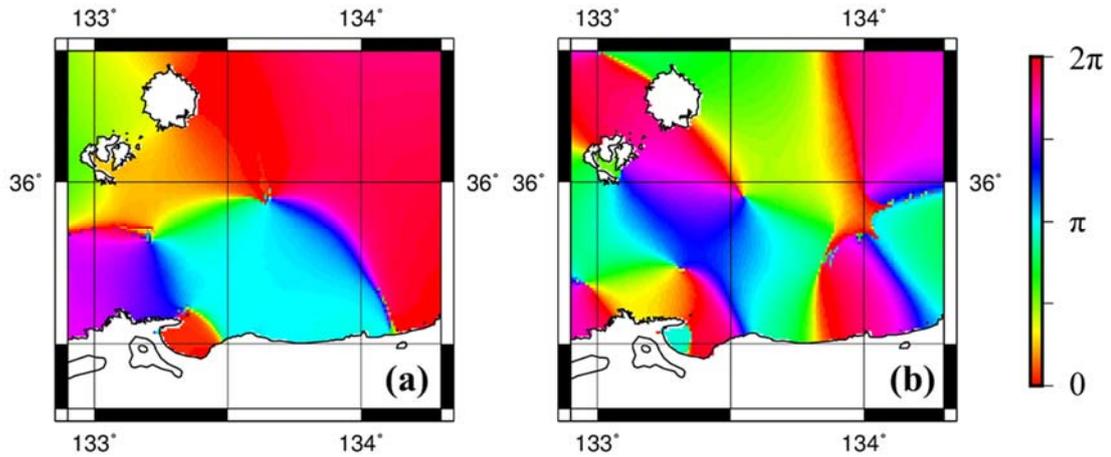


図 11 Site 2 からの造波による水位変動の位相特性(ϕ)。(a) $T=60$ min; (b) $T=38$ min.

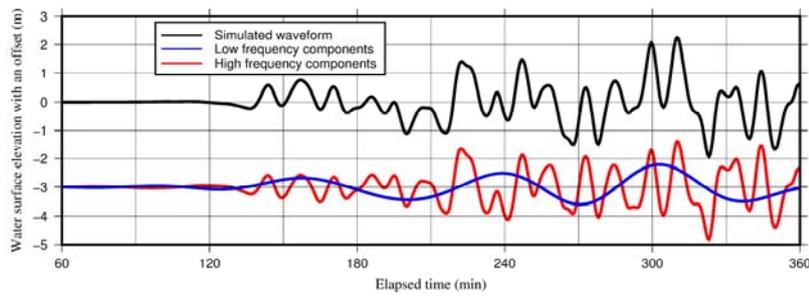


図 12 Site S における 1833 年津波の推定水位(黒線)及びその周波数成分(長周期成分：青色、短周期成分：赤色)。

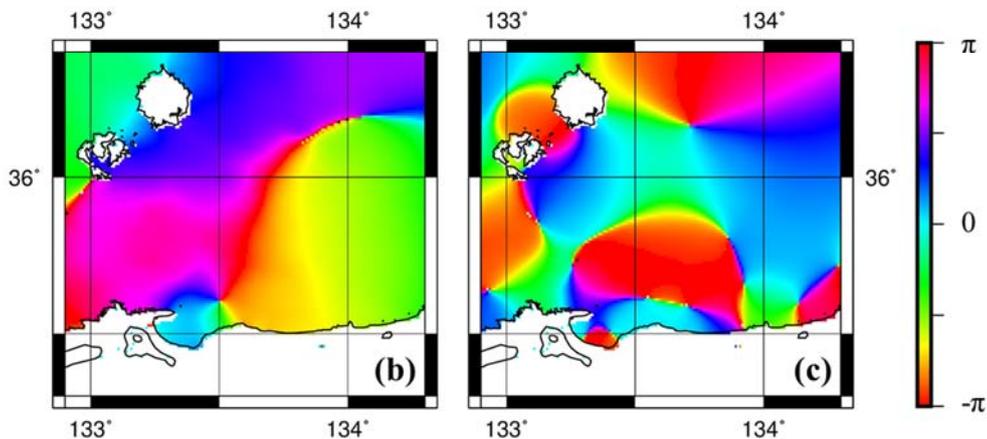
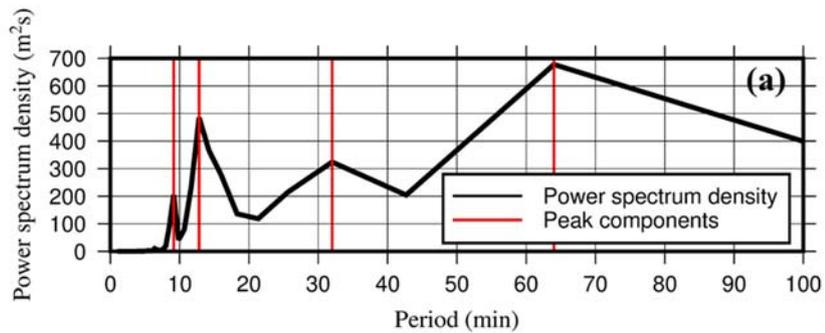


図 13 (a) Site S における 1833 年津波のパワースペクトル(黒線); クロススペクトルに基づく Site S に対する (b) 64 min と (c) 32 min の位相分布。

格子位置の違いにより境港で生じる最大水位分布が異なることがわかり、湾内の水位変動特性は波の入射方向によって大きく異なることを示している。さらに、各海域格子点において、基準時間(t_s)経過後からの水位のゼロアップクロス時間 t_0 を抽出し、水位変動の位相のずれ $\varphi=2\pi(t_0-t_s)/T$ を推定した(図 11)。 $T=60$ min の位相は美保湾内で概ね同位相となっており、湾軸方向の一次固有振動モードが励起されていることがわかる。一方、比較的水深が浅い隠岐海峡における位相分布は概ね同位相となっており、それが湾内の位相分布に対して逆位相となっていることから、海峡スケールで生じる固有振動が湾スケールの固有振動に影響を及ぼす可能性があることがわかった。また、 $T=38$ min の位相分布は湾外では連続的に変化しているのに対し、弓ヶ浜半島と島根半島に挟まれた海域では概ね同位相であることから、特定の周期の波に対して局所的な固有振動が励起される海域が湾内に存在することがわかった。最後に、相田(1989)¹¹⁾ の断層モデルに基づき 1833 年津波による水位変動を前述の線形長波方程式を用いて推定した。Site S における最大水位は痕跡高と整合する 2.3 m となり、またそれが得られた地震発生後約 5 時間は 19 時半頃に対応することから(図 12)、歴史史料と比較して妥当な推定結果が得られていることが確認できる。図 12 に示す推定水位の時間変化からは複数の周期的な水位変動成分が見られたため、まずその水位変動のパワースペクトルを推定した(図 13a)。次に Site S の水位変動に対する他の海域格子のそのクロススペクトルを推定し、パワースペクトルで得られたピーク周期に対応する周期の位相を推定した。図 13(b,c) に示す位相分布から、1833 年津波来襲時には湾内領域で複数の空間スケールの固有振動が励起されていたことがわかり、これらの重合による局所的な水位増大が境港の浸水を拡大させた可能性が示唆された。

前述したように前年度の業務成果においては、日本海東縁部で発生した地震津波が日本海西部沿岸域の沿岸部固有振動によって増幅して同沿岸域に浸水被害を発生させる可能性があることが明らかとなっており、既往津波においても同様の増幅メカニズムで津波が増幅していたことが確認された。したがって、日本海西部沿岸域においては沿岸部の固有振動特性の推定が重要であることや、後続波を含めた津波挙動の推定が重要であることが確認された。

(c) 結論ならびに今後の課題

令和元年度(平成 31 年度)の業務では、日本海沿岸域に接続する代表河川において、河道から津波が氾濫するリスクを定量的に評価した。多くの場合では、洪水・治水対策のために整備された河川堤防の効果により河道からの津波氾濫は抑制されているが、河口周辺域などでは限定的に津波の最大水位が堤防高を上回ることがわかった。そのような地域においては、融雪出水などの河川流量の影響を受け、津波の堤防越流量が大きく変化する可能性がある。防波堤などの海岸構造物の存在により河道に侵入する津波の氾濫リスクが抑制されていることが明らかとなった一方、特定の津波に対してはそれが増大していることがわかった。防波堤強化に基づき河道内に侵入する津波の氾濫リスクを低下させることができると考えられるが、特定の津波に対してはさらなる対策が必要であることを示唆している。さらに、日本海西部海域における 1833 年庄内沖地震津波の挙動を分析し、美保湾内に位置する米子市や境港市においては固有振動の励起による後続波の増幅によって津波浸水が発生した可能性があることがわかった。

本年度の業務成果及び前年度までの業務成果によって、津波来襲時の浸水拡大は第一波目来襲時、後続波来襲時に大別できること、そのいずれにおいても浸水が想定されるのは港湾や河口周辺域の低平地であること、防波堤などの海岸構造物により氾濫被害を抑制できることが示された。今後の課題として、日本海域に点在する様々な断層による津波に対する各沿岸域の脆弱性を視覚化し、それらの地域に対する効果的な津波防災対策を検討することが挙げられる。

(d) 引用文献

- 1) 木村雄貴, 下園武範, 佐藤慎司: 高解像度津波氾濫モデルに基づく海岸堤防の越流・破堤による後背地の影響評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), I_289-I_294, 2015.
- 2) 宮崎知与, 史亜傑: 1993年北海道南西億地震津波の河川遡上痕跡調査とその水位再現検討, 自然災害科学, 16(3), 179-189, 1997.
- 3) 川上源太郎, 加瀬善洋, 卜部厚志, 清水康博, 仁科健二: 日本海東縁の津波とイベント堆積物, 地質学雑誌, 123(10), 857-877, 2017.
- 4) 国土交通省: 日本海における大規模地震に関する調査検討会, 2014. http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- 5) Yasuda, H.: One-Dimensional Study on Propagation of Tsunami Wave in River Channels, Journal of Hydraulic Engineering, 136(2), 93-105, 2010.
- 6) 山中悠資, 佐藤慎司, 田島芳満, 下園武範, 佐貫宏: 線形ブシネスク理論に基づく高速津波計算システムの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), I_206-I_210, 2014.
- 7) 西口幹人, 佐藤慎司, 山中悠資, 竹森涼: 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), I_291-I_295, 2014.
- 8) 都司嘉宣, 今井健太郎, 岩瀬浩之, 森谷拓実, 松岡祐也, 佐藤雅美, 芳賀弥生, 今村文彦: 天保四年(1833)出羽沖地震津波の隠岐諸島, および島根半島での津波高, 津波工学研究報告, 33, 333-356, 2017.
- 9) 羽鳥徳太郎: 天保4年(1833)山形沖地震とその津波規模, 地震, 43(2), 227-232, 1990.
- 10) Yamanaka, Y., S. Sato, T. Shimozono, and Y. Tajima: A numerical study on nearshore behavior of Japan Sea tsunamis using Green's functions for Gaussian sources based on linear Boussinesq theory, Coastal Engineering Journal, 61(2), 187-198, 2019.
- 11) 相田勇: 天保四年の庄内地震による津波に関する数値実験, 続古地震・実像と虚像-, 萩原尊禮・藤田和夫・山本武夫・松田時彦・大長昭雄 著, 204-213, 東京大学出版会, 1989.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Y. Yamanaka, S. Sato, T. Shimozono, and Y. Tajima	Simulation of tsunami inundation at a remote coast induced by coastal resonance of Japan Sea tsunami (口頭発表)	The 27th IUGG General Assembly (モントリオール)	令和元年 7月
山中悠資	河道を伝播する津波の高速推定手法の構築 (口頭発表)	第9回巨大津波災害に関する合同研修会(大阪)	令和元年 12月

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和2年度業務計画案

令和元年（平成31年）度までの成果により、日本海海域で発生する津波の伝播・氾濫特性と津波に対して強靱性/脆弱性を有する沿岸地域の特徴が明らかになった。令和2年度ではそれらの成果を集約し、日本海沿岸域に点在する脆弱域の視覚化を図り、脆弱域における効果的な津波防災対策を検討することを業務目標とする。また、他のサブテーマの令和元年（平成31年）度の業務成果として、これまでに提案されている断層モデルに加え、さらに新たな断層モデルが提案されており、それによる沿岸域の津波の浸水特性についても分析する。