

2. 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 ヶ年の年次実施計画（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) 令和 2 年度業務目的

(2) 令和 2 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 河口域・河道域における津波挙動の分析
 - 2) 日本海沿岸域における津波被害特性
 - 3) 脆弱域の可視化
- (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) 8 ヶ年の成果

- (a) 業務の成果
- (b) 結論ならびに今後の課題
- (c) 引用文献

(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
	非常勤研究員	宮副祐子

(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ヵ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ヵ年の年次実施計画（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利特性を水利模型実験および数値流体モデルを用いて詳細に調べた。水利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

水槽実験に基づき河道に侵入する津波特性とその予測について分析した。平成 31 年度（令和元年度）業務に引き続き、日本海沿岸域の代表的な地域で想定される津波の浸水特性を分析した。日本海沿岸域の標高低地（脆弱域）および浸水経路を視覚化し、脆弱域として特定された港湾背後地や中小規模の河川・水路などにおける対策が浸水被害軽減に重要であることを示した。

(e) 令和 2 年度業務目的

水槽実験及び数値計算に基づき沿岸域における津波の伝播・氾濫特性を分析する。日本海沿岸域の標高低地（脆弱域）および浸水経路を視覚化する。これらの結果を踏まえ、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。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

海域から河道に侵入する津波の伝播特性を、水槽実験およびそれに対する再現計算に基づき分析した。水槽実験の結果から、海域と河道の接続域においては津波の反射波により水位が一時的に増大し、これにより津波水位は河道内に侵入後に平均的に上昇して伝播することがわかった。さらに、特定の条件下においては、河道内に侵入した津波は射流を形成して移動跳水を発生させることがわかった。そのような実験ケースに対しては、数値計算は十分に河道内津波水位を再現することができず、移動跳水の発生の有無により実海域および河道域における津波予測に不確実性が生じることがわかった。

国土交通省(2014)¹⁾が想定した断層シナリオに基づき、秋田県及び北海道の沿岸域を対

象に津波氾濫予測を行った。沿岸域に砂丘が発達している場合、その高さを津波が上回って後背域に氾濫するような氾濫形態は日本海沿岸域では発生しづらいことが、前年度までの東北日本や西日本沿岸域を対象とした津波氾濫予測の結果から明らかとなっている。秋田県・北海道においてもそれが確認されるとともに、主に砂丘前面地域や港湾域、河道沿いの浸水被害が懸念されることがわかった。また数メートルから数十メートル程度のスケールの沿岸微地形が浸水被害発生の有無に影響する可能性があることがわかった。

沿岸微地形を含み様々な空間スケールで点在する、津波水位に対する標高低地(脆弱域)を、数値標高データに簡易的なモデルを適用することで特定・視覚化した。上述したように、砂丘前面地域や港湾域、河道沿いが脆弱域として特定されるとともに、津波氾濫予測においては特定することが難しい微地形上の脆弱域が特定された。特に小規模の河川や水路が脆弱域として特定され、それらを介した津波浸水被害を抑制するためには、河川堤防や水門の整備が有効であることがわかった。

(b) 業務の成果

沿岸砂丘が発達している場合のその後背域では、想定される津波が砂丘を上回って越流することによる浸水被害の発生可能性は低いことが、前年度までの業務成果により明らかとなっている。したがって、砂丘の発達が抑制されている河口域および河道沿いの地域が浸水被害の発生が危惧される地域の一つとして上げられるため、それらの地域における津波予測が重要となる。この結果を踏まえながら以下の項目について分析を行った。

- (1) 海域から河口域に津波が来襲し、河道内に侵入して津波が伝播する一連の過程は、定量的な観測データの不足により十分には解明されていない。これを明らかにするためには、水槽実験に基づき一連の津波の挙動を観察し、その結果を定量的に分析することが必要である。これを踏まえ、河口域・河道域における津波挙動を水槽実験およびその再現計算に基づき分析した。
- (2) 定量的な知見の集約のもとに日本海沿岸域で想定される浸水特性を明らかにするため、前年度までに日本海沿岸域における代表的な地域において津波氾濫予測を実施してきた。得られた成果をさらに検証するため、本年度は北海道および秋田県を対象地域に加え、前年度の業務に引き続き日本海沿岸域における津波被害特性を分析した。
- (3) 前述のように日本海沿岸域では沿岸砂丘が発達している地域が少なくないため、津波に対して自然的に強靱な地域と脆弱な地域が混在していると考えられる。これを踏まえ、数値標高データに簡易的なモデルを適用することで、沿岸域における脆弱域の可視化を効率的に行った。この結果に基づき、脆弱域における津波浸水被害の発生過程を予測するとともに、浸水被害の抑制について検討した。

以上の3項目について、以下にそれぞれの成果を詳述する。

1) 河口域・河道域における津波挙動の分析

図 1 に水槽実験の模式図を示す。水槽内には昇降(開閉)式のゲートが設置されており、まずこれを閉じた状態でゲート沖側区間($x=0\sim 9.4$ m)の水位を上昇させ、ゲート前後の水位間で水位差を設ける。このゲートを急開(ダムブレイク)することで津波を想定した段波が発生し、それが岸側に向かって伝播する。水槽内のある地点から、アクリル板を設置して水路幅を狭窄させており、狭窄区間が水路内で 3 m 継続する。水槽内においては、この狭窄水路区間を河道と想定する。したがって、相対的に水路幅が広い領域(以下、海域と称す)と水路幅が狭い領域(以下、河道域と称す)が同一水槽内で接続されており、津波が河口域に来襲して河道内に侵入し、それが伝播する過程をシームレスに観察することが可能である。なお、主に河道地形が津波に与える影響を定量的に分析するため、水路底面に勾配は設けておらず、水路外への氾濫は発生しない。

ゲートを閉じた状態において、その前面静水深を h 、ゲート前後の水位差を Δh と定義する。 h および Δh の組み合わせを変えながら段波を発生させた。この組み合わせに応じて、段波の先端が分裂する波状段波、段波の先端が分裂しかつそれが碎波する波状段波、段波の先端が分裂せずに碎波する碎波段波のいずれかが形成される。図 1 に示すように、水路内には水位変化を計測するために 4 機の波高計(WG)を設置するとともに、面的な水位変化を観察するために水路側方から実験の様子をビデオカメラで撮影した。このような条件でそれぞれの実験ケースに対して 3 回の試行実験を行い、得られた計測データを用いて、河口域・河道域における津波の伝播特性を定量的に分析した。

図 2 に波高計で計測された水位変化の代表例を示す。なお、本報告書で示す実験結果のスケールは全て実験スケールに対応している。まず WG1 は海域に設置されており、水路内では静水深の変化がないことから、浅水変形による波高増幅が生じずに段波は伝播する。図では波状段波と碎波段波における計測例をそれぞれ Case 1 および Case 2 として示している。WG3 は河道域内に設置された波高計であるが、WG1 で計測された水位と比較して、WG3 で計測された波形では津波水位が平均的に上昇していることがわかる。波高計やビデオ画像などから、段波が狭窄位置(海域と河道域の境界)に達した時に狭窄地形により

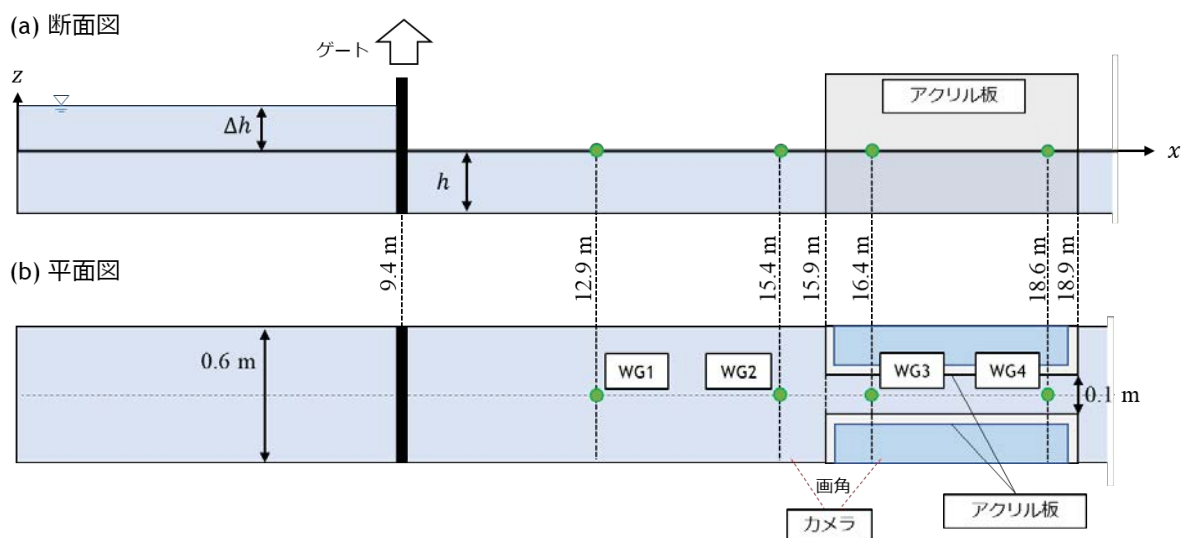


図 1 水槽実験の模式図(断面図及び平面図)

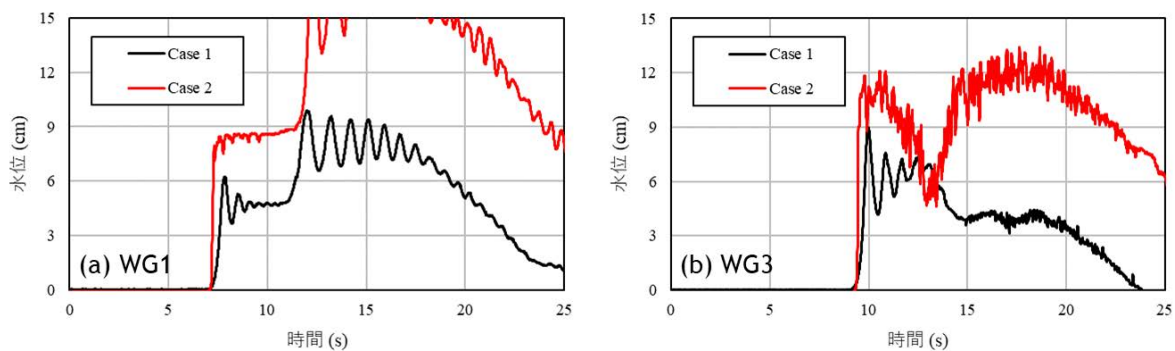


図2 WG1 および WG3 における代表的な計測水位例



図3 撮影動画のスナップショット (図2 Case 2 に対応)

反射波が生じ、海域水位はその影響で一時的に大きく増大することが確認された。河道が有する波および流れに対する遡上特性に加え、海域と河道域の水位差が一時的に大きくなったことによる河道内への津波の流入量の増大が、平均的な水位の上昇に寄与したことが推察される。なお、図 2(a)の 10 秒以降に計測されている水位上昇は、入射段波と沖合に向かう反射波が重合することによって発生した水位上昇である。一方、図 2(b)より、Case 2 では段波が到達時に水位が上昇するが、その後水位は低下し始め、それを経て再び上昇に転じていることがわかる。対応するビデオ画像を確認すると、その実験ケースにおいては河道域内で段波が射流を形成するとともに移動跳水が発生しており、それが前述のような特徴的な計測波形をもたらしたことがわかった(図 3)。ただし、図 2(および図 3)で示したケース以外で、波状段波が入射する実験ケースでも河道内でそのような現象が発生していることが確認された。このことから、入射段波の波高や周期、河道特性に応じて射流および跳水発生の有無が決定されると推察される。

図 4 に WG3 と WG1 で計測された水位の最大値の比(以下、波高比と称す)と WG1 で計測された水位の最大値と静水深 h の比(以下、相対波高と称す)の関係を示す。前述したように、水路内では浅水変形による波高増幅は発生しないことから、図 4 は入射段波の大きさに対して水路内でどの程度その水位が増大するかを表す。図 4(a)より、波状段波が入射する場合においては、砕波・非砕波に関わらず相対波高が大きくなるほど波高比は減少する傾向にあることがわかる。一方、砕波段波の場合においては実験条件によってそれらの関係が大きくばらついていることがわかる。そこで、砕波段波に対する結果を詳細に分析するため、図 4(b)に静水深別に再整理した結果を示している。図 4(b)より、ばらつきは大きいものの、その他の段波条件における結果と同様に、相対波高が大きくなるほど波高比は減少する傾向にあることがわかる。これらの結果から、河口域に来襲した津波は相対波高に応じてその水位を上昇させて河道内に侵入することがわかった。

次に、数値計算に基づき水槽実験で得られた結果の再現を試みた。数値計算には平面二次元非線形分散波方程式を用い、運動方程式に底面摩擦項及び拡散項を付与した形式を採用した。砕波モデルには佐藤(1995)²⁾を参考にして流速波速比に基づき砕波の発生を判定し、砕波の発生が判定された場合には適切な拡散係数を運動方程式に与えて波の波高減衰過程をモデル化した。なお、弱非線形・弱分散特性を有する非線形分散波方程式は非線形性が卓越する砕波段波の再現には適していないことを踏まえ、砕波段波の再現においては運動方程式内の分散項を無視することで得られる非線形長波方程式に基づき数値計算を行った。図 5 に WG3 における実験結果と数値計算結果の比較を示す。Case 1 の場合は、数

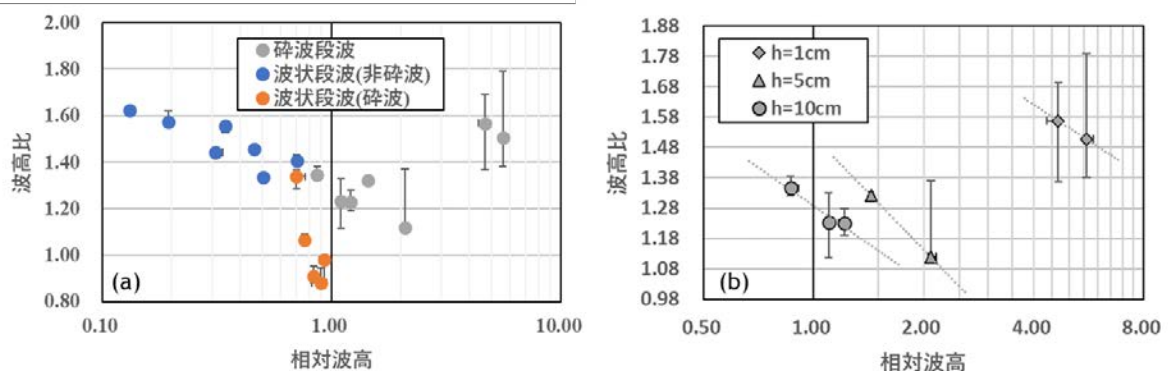


図 4 相対波高に対する河道内での波高上昇比(3 回の試行実験結果の中央値をプロット、最小値と最大値の範囲をエラーバーで示す); (a)全実験ケース; (b)砕波段波のケース。

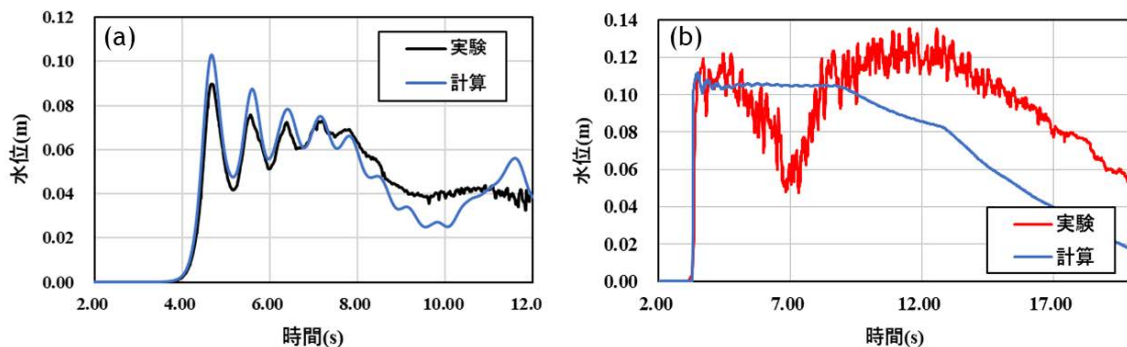


図 5 WG3 における実験結果と数値計算結果の比較; (a) Case 1; (b) Case 2。

値計算は良好に水槽実験の結果を再現できていることがわかる。一方、Case 2 に対しては、水位の立ち上がりは良好に再現できているにも関わらず、その後の水位変動過程が再現できていないことがわかる。前述したようにこの水位変動は射流および移動跳水の発生に起因するものであり、強い非定常乱流構造を有する移動跳水を含む時空間水位変動を非線形分散波方程式や非線形長波方程式のみで再現することは本質的に困難である。他方、実スケールにおける津波伝播及び氾濫予測においてはそのような方程式系が広く用いられている。これらのことから、射流や跳水発生の有無が河道内の津波予測に不確実性をもたらし、津波の流入量や水位の予測に影響し、水位到達時間などに影響する可能性が示唆された。

平成 31 年度(令和元年度)では、実波源を想定しながら河道内における津波予測を行った。対象河川の多くの区間では予測される津波水位よりも河川堤防高の方が大幅に高く、津波氾濫の危険性は小さかった。しかしながら、河口周辺域では一部のシナリオ下で河川堤防高を津波水位が上回る場合が確認されている。前年度の予測では、本年度の水槽実験で得られた河道内の津波水位が海域でのそれと比較して平均的に上昇すること、射流や跳水発生により予測に不確実性が含まれることが十分に考慮できていない。したがって前年度に予測された、津波水位が河川堤防高と同等程度以上となるシナリオには、氾濫予測に一定の不確実性が含まれている可能性があることがわかった。

2) 日本海沿岸域における津波被害特性

本研究課題では、日本海沿岸域の代表都市における津波浸水予測を継続して行っており、前年度までに酒田市・新潟市・金沢市・敦賀市・境港市・米子市を対象とした予測を行った。今年度はさらに石狩市・せたな町・秋田市を対象として津波被害予測を行った。平成 30 年度業務で行った浸水予測と同様に、ネスティング手法に基づき計算地形を高解像度化しながら非線形長波方程式に基づき氾濫予測を行った。石狩市、せたな町、秋田市それぞれに対して影響が大きい、国土交通省(2014)¹⁾が想定した F06、F14、F26 断層を適用し、想定の不確実性を考慮するために 3 σ レベルのすべり量を想定した。

図 6 に浸水被害推定結果を示す。いずれの地域においても比較的標高が高い沿岸砂丘が発達しているため、それを越流するような津波の氾濫は発生していない。浸水被害が発生しているのはいずれの地域においても、砂丘前面の沿岸域、港湾域およびその周辺であり、沿岸域内に浸水域が限定されている。この傾向は、前年度までの津波浸水予測の結果においても同様に得られている。このような砂丘前面の沿岸域においては浸水被害対策が必要であるが、平成 31 年度(令和元年度)成果報告書で詳述したように、港湾域においては防波堤により津波水位及び被害を有意に低減できる場合があるため、地震及び津波に対する防波堤の耐性強化が浸水被害軽減に有効である可能性がある。

石狩市および秋田市における浸水予測においては、両地域を流れる河川を考慮していないが、せたな町における浸水予測においては後志利別川の河道を考慮した予測を行った。後志利別川の河川堤防は 1993 年の北海道南西沖地震により被災した経験がある。数値計算地形上では河床標高を一定値とし、河川流量は考慮していない。図 7(a)に河道内の最大水位分布を示す。河道内の水位上昇量の推定は、河道地形や河川流量が正確に反映されていないことおよび、水槽実験に基づく分析結果を踏まえると不確実性は大きいものの、後志利別川の比較的上流域まで津波が影響する可能性があることがわかる。さらに、図 7(b)

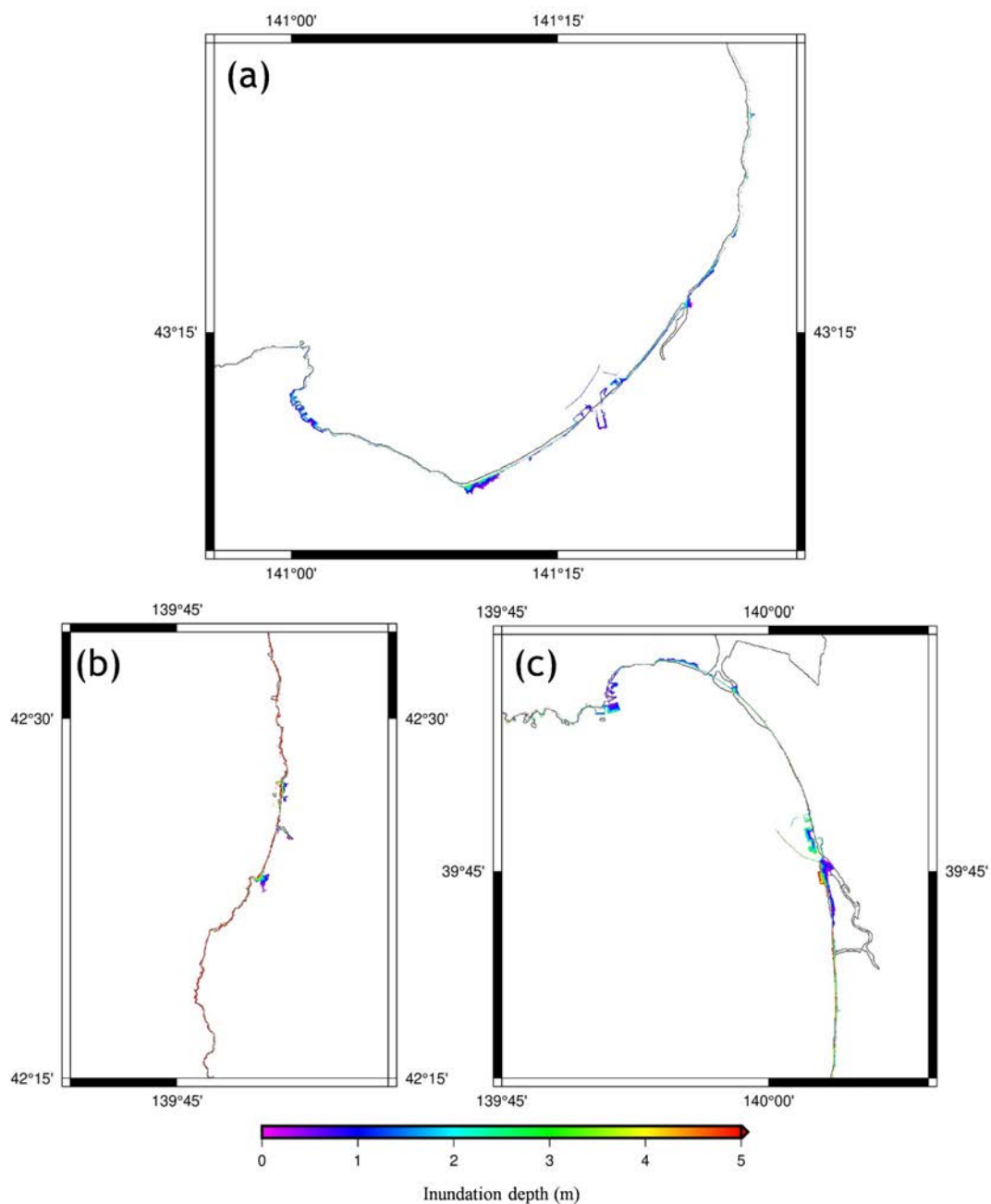


図6 浸水被害推定結果; (a) 石狩市; (b) せたな町; (c) 秋田市

に国土地理院基盤地図情報数値標高モデル³⁾に基づく標高分布を示す。後志利別川の河川堤防高は上流域から河口域まで比較的高く、津波の堤内地への氾濫を抑制する機能も同様に有していると推察される。一方、後志利別川下流域から河口域にかけて、数メートルから数十メートル程度の幅を有する小水路・小河川がいくつか接続している。後志利別川の堤防を津波が越流する可能性は低いと考えられるが、これらは津波の影響域内で接続しているためこのような水路・河川を介した津波の内陸での氾濫が危惧される。小規模の水路および河道の影響を津波予測に反映させるためには、それらを数メートル程度、あるいはそれ以上の細かさで十分に解像する必要があるが、河道内における津波予測が不確実なことに加え、そのような大幅な高解像度化は非現実的な計算負荷をもたらす。さらに、例え

ば図 7(b)に示す水路は堤防下を通り後志利別川に接続しており、その接続地点では樋門となっている。自由水面を持つ領域内でのみ氾濫予測が可能な非線形長波モデルでは、樋門を介した氾濫を予測することは難しい場合がある。これらのことから、砂丘前面に位置する沿岸域や砂丘の切れ目、港湾域や河口域に加え、数値計算では捉えづらい小規模水路・河川(微地形)を有する地域が津波に対して脆弱である可能性があり、それらをあらかじめ特定することが重要であると考えられる。

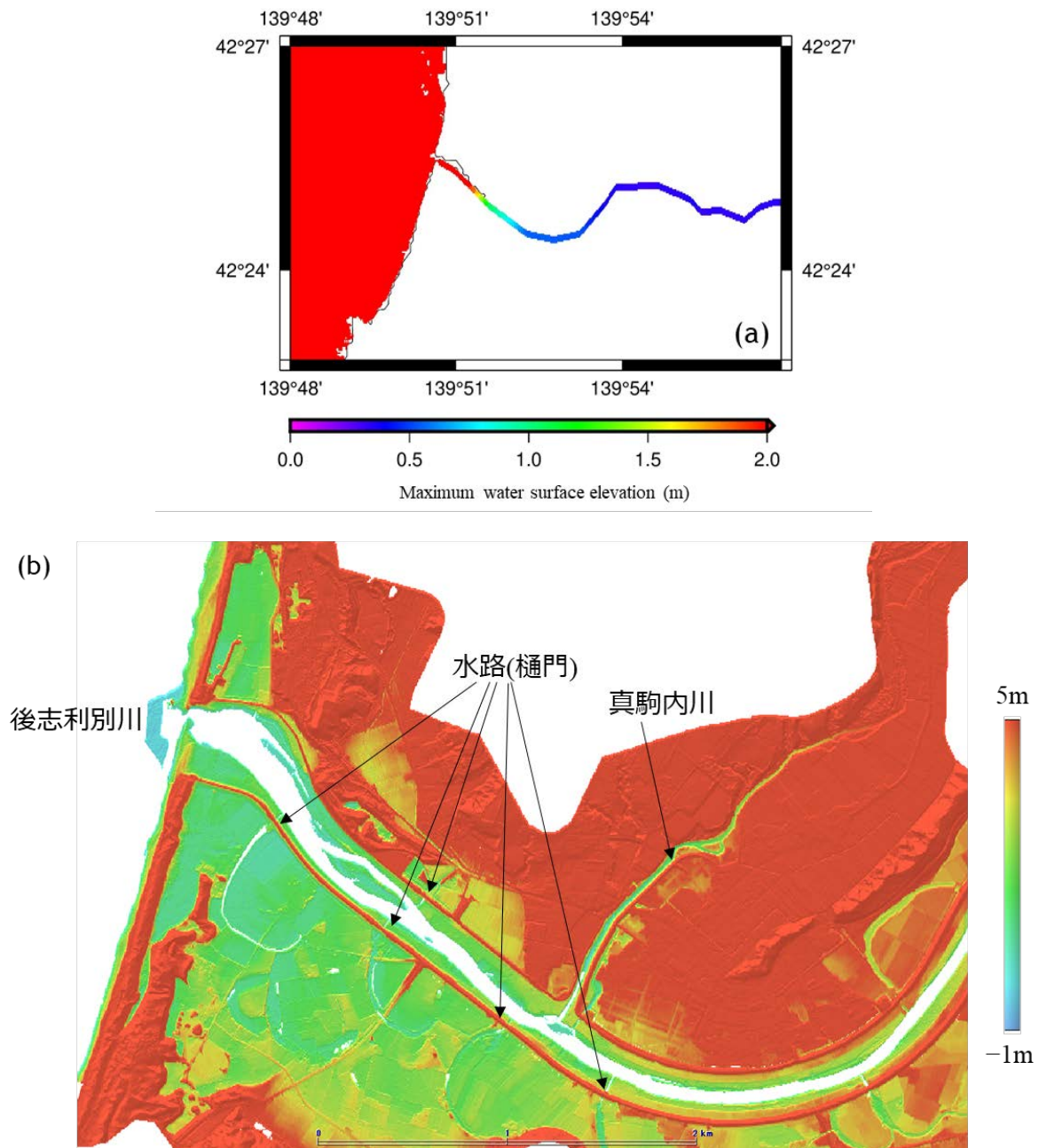


図 7 (a) 後志利別川河道内の最大水位上昇量; (b) 後志利別川下流域から河口域周辺の標高分布(国土地理院³⁾)。

3) 脆弱域の可視化

図 8 に対象地域の区分図を示す。対象沿岸域は日本本土の日本海側全沿岸域であり、それぞれの地域を小領域に分割して脆弱域を抽出する。まず、国土地理院基盤地図情報数値標高モデル(10 m)³⁾ をダウンロードした。これを用いて、各地域の数値標高モデル(DEM)を 0.5 arc-sec(10~15 m)の解像度で再構築した。次に、構築した DEM において汀線位置に相当する格子点を抽出し、それらの格子点における津波水位を仮定した。このような条件のもと、それぞれの汀線格子から四方に向かって津波水位よりも標高が低い格子を探索し(図 9)、浸水が発生する可能性があるかどうか(想定津波水位よりも標高が低いかどうか)を判定した。標高が津波水位よりも低いと判定された格子点から、さらに四方に同様の探索を行うことで、汀線格子から連続的に続く津波水位よりも低い格子群が効率的に抽出される(図 9)。このように抽出された格子群を、想定する津波水位に対して脆弱な地域と定義する。様々な津波水位を想定してその領域を抽出し、その領域情報を kml ファイルとして保存することで脆弱域を視覚化した。

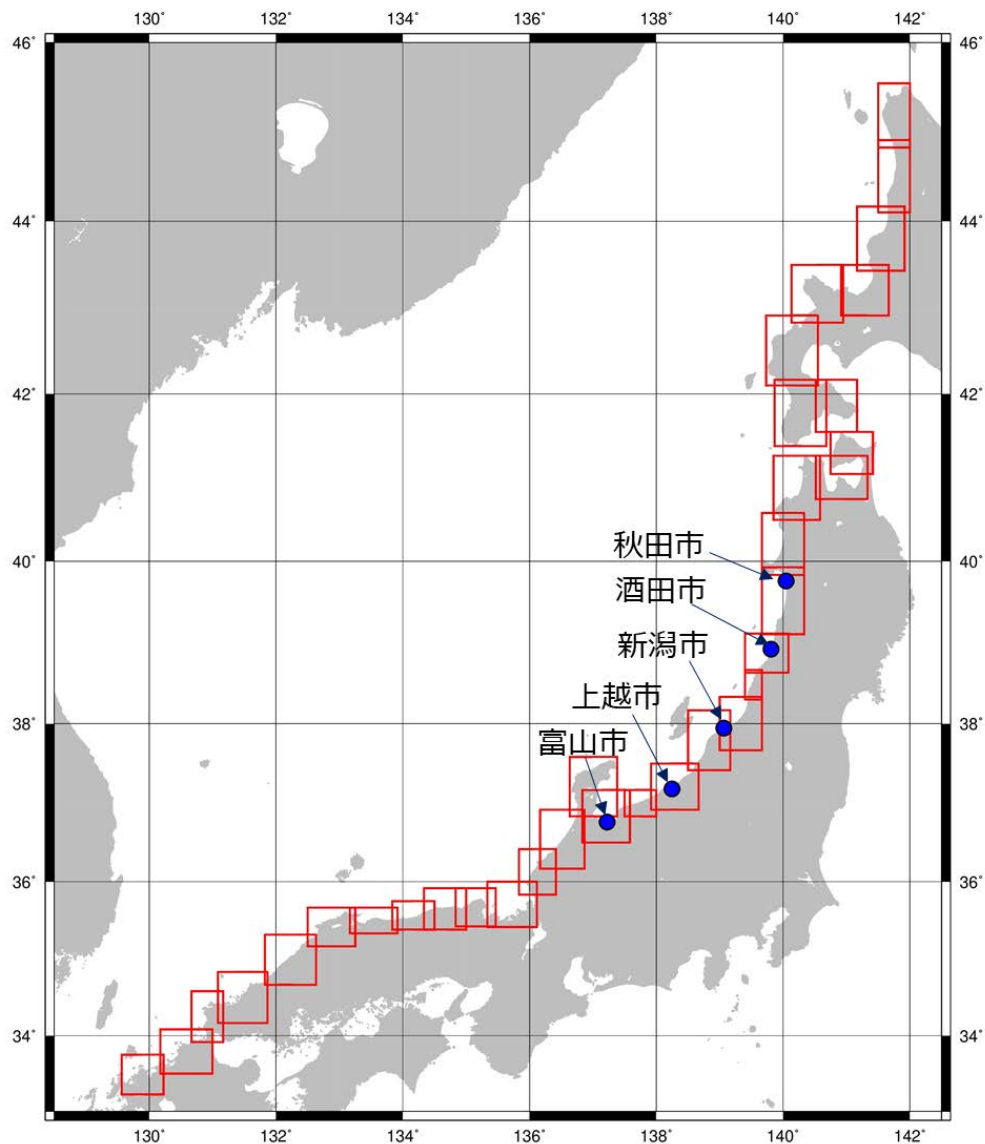


図 8 地域区分図(矩形領域; 34 地域)と詳細分析対象地域

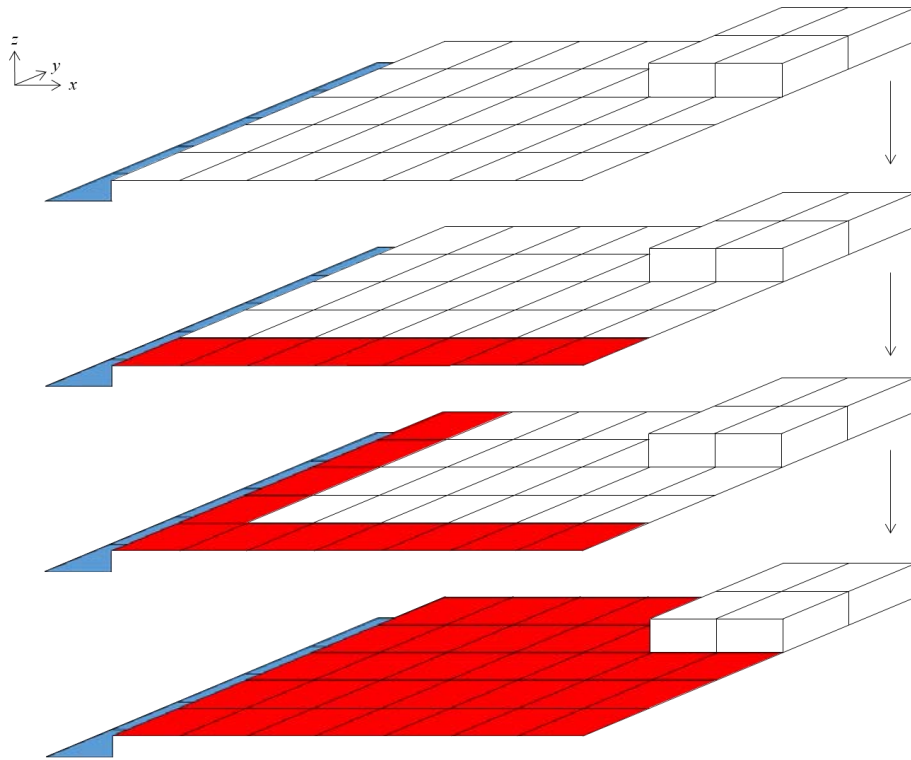


図9 脆弱域抽出過程の模式図。青色格子と赤色格子はそれぞれ汀線格子と想定水位よりも標高が低い格子を表す。

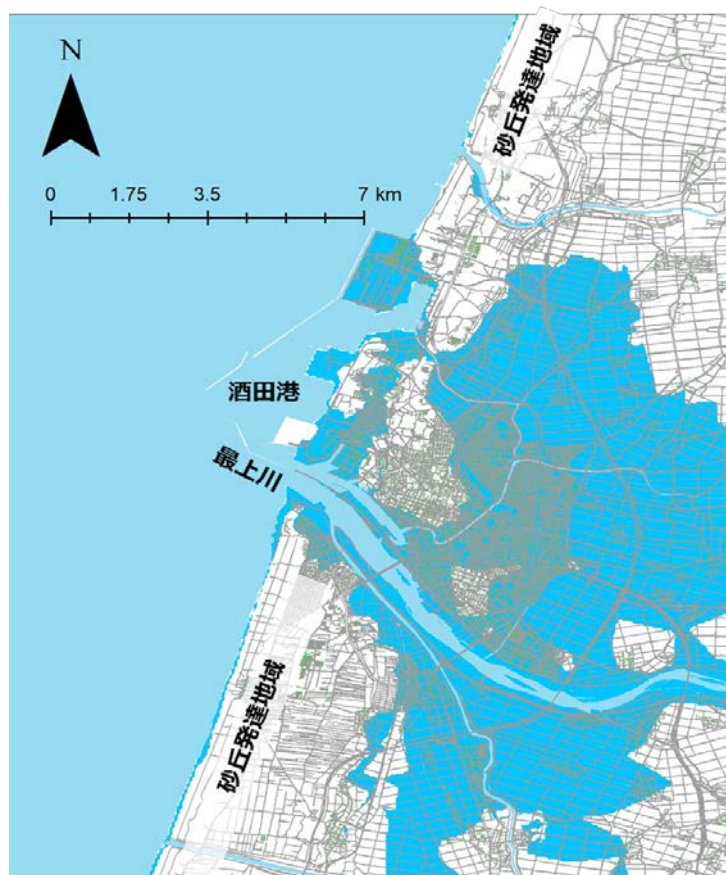


図10 津波水位6mを想定した場合における酒田市の脆弱域(青色)(国土地理院⁴⁾)。

例として山形県酒田市における脆弱域を図 10 に示す。前述したように、沿岸域に発達した砂丘が存在する場合にはそれを津波が乗り越えるような氾濫形態は発生しづらい。図 10 は内陸に想定津波水位よりも標高が低い地域が存在することを示しているものの、沿岸砂丘上は脆弱域として抽出されておらず、その切れ目から内陸に浸水が拡大する可能性があることを示している。酒田市の場合では酒田港や最上川河口域がその切れ目に位置しており、それらを介して津波の浸水が内陸に及ぶ可能性がある。

前項で述べたように、小規模水路・河川を有する地域は津波の氾濫リスクを抱えている可能性がある。これを踏まえ、DEMを高解像度化し、代表的な沿岸地域においてさらに詳細な分析を行った。対象地域は日本海東縁地域に面し、人口が比較的多い秋田市、酒田市、新潟市、上越市、富山市である(ただしその周辺市町村も含む)(図 8)。これらの地域における DEM を 0.25 arc-sec(6~8 m)で国土地理院基盤地図情報数値標高モデル(5 m)³⁾を用いて構築した。この高解像度化により、河川堤防高や中小規模の河川および水路形状も良好に DEM に反映されることが期待できる。高解像度化した DEM を用いて、前述の手順と同様に脆弱域を抽出した。

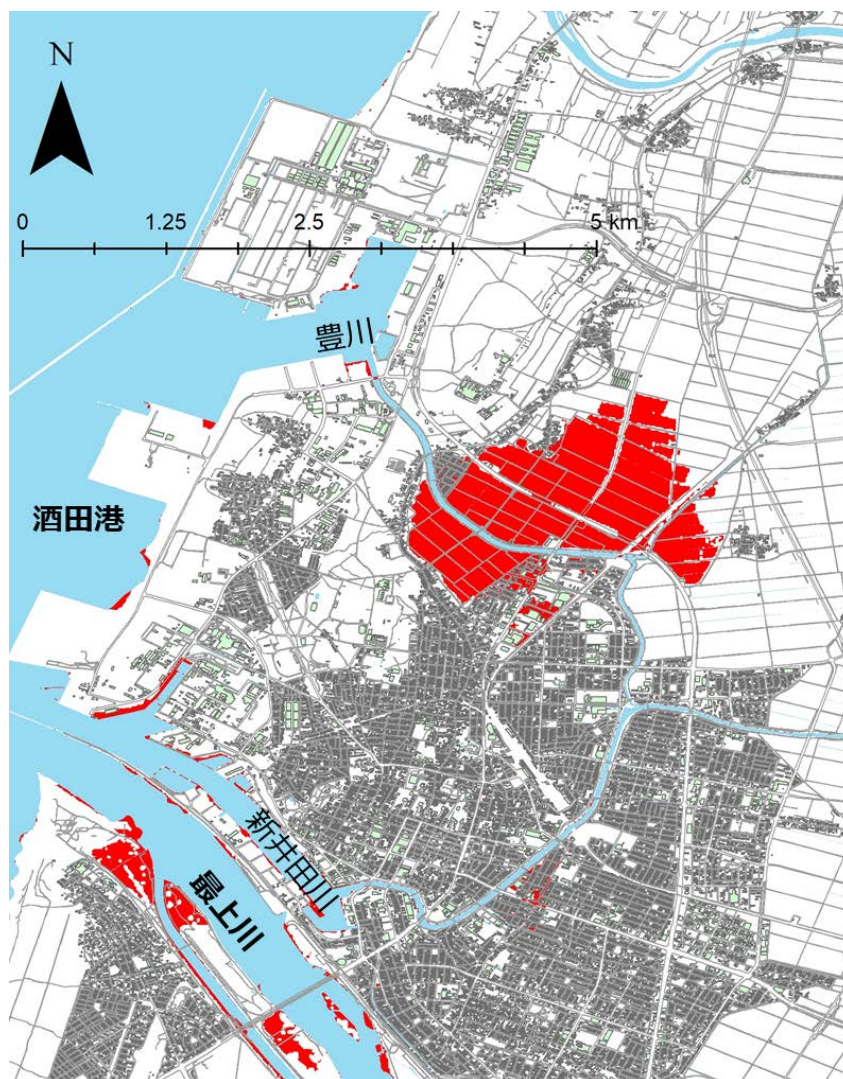


図 11 津波水位 2 m を想定した場合における酒田市の脆弱域 (赤色; 高解像度地形に基づく)(国土地理院⁴⁾)

図 11 に高解像度化した DEM に基づく山形県酒田市の脆弱域の抽出結果を示す。図 11 には汀線位置で 2 m の津波水位を想定した際に抽出される脆弱域を示しているが、新井田川および豊川の下流域が脆弱であると判定されている。汀線位置(海域)における津波水位と河道内の津波水位は必ずしも対応しないものの、これらの地域は比較的津波に対して脆弱であると考えられる。一方、前項までに得られた結果と、これらの河道幅は数十メートル程度であることを踏まえると、数値計算に基づく新井田川および豊川を氾濫する津波の予測には比較的大きな不確実性が伴うことが予察される。酒田市では令和 3 年 3 月に津波ハザードマップが更新・公開されており⁵⁾、本業務で得られた結果と同様に、新井田川沿いの地域が浸水する可能性がある地域として示されている。このような津波氾濫予測に不確実性が高いと考えられる小規模水路・河川を介した浸水被害を抑制・軽減するためには、河川堤防の整備が効果的であるが、総延長が長くなることもある河川や水路の全区間でそのような整備を実施することは現実的ではない。これらのことから、津波を河川および水路に可能な限り流入させないことが浸水被害抑制に最も重要であり、これを実現するためには下流・河口域および海域との接続域において、津波の侵入を防ぐ水門の整備を行うことが効果的であると考えられる。

ここで、本研究業務における脆弱域の可視化は日本海沿岸域に点在する標高低地を俯瞰することに主眼を置いたものである。脆弱域の抽出過程は想定した津波水位と陸域標高の比較のみに終始し、簡易的に標高低地を抽出した結果が脆弱域として示され、図 11 で特定された小規模の河川もその結果の一つにすぎない。つまり本研究業務における可視化とは、津波の氾濫過程を考慮せずに対象領域内で相対的に標高が低い地域を抽出することに本質があり、可視化された領域と各地方自治体などにより示されている津波浸水ハザードマップは異なるものであることに留意する必要がある。

最後に、秋田市、酒田市、新潟市、上越市、富山市の津波に対する脆弱性を比較した。まず、それぞれの地域において汀線位置における津波水位を想定し、その水位レベルにお

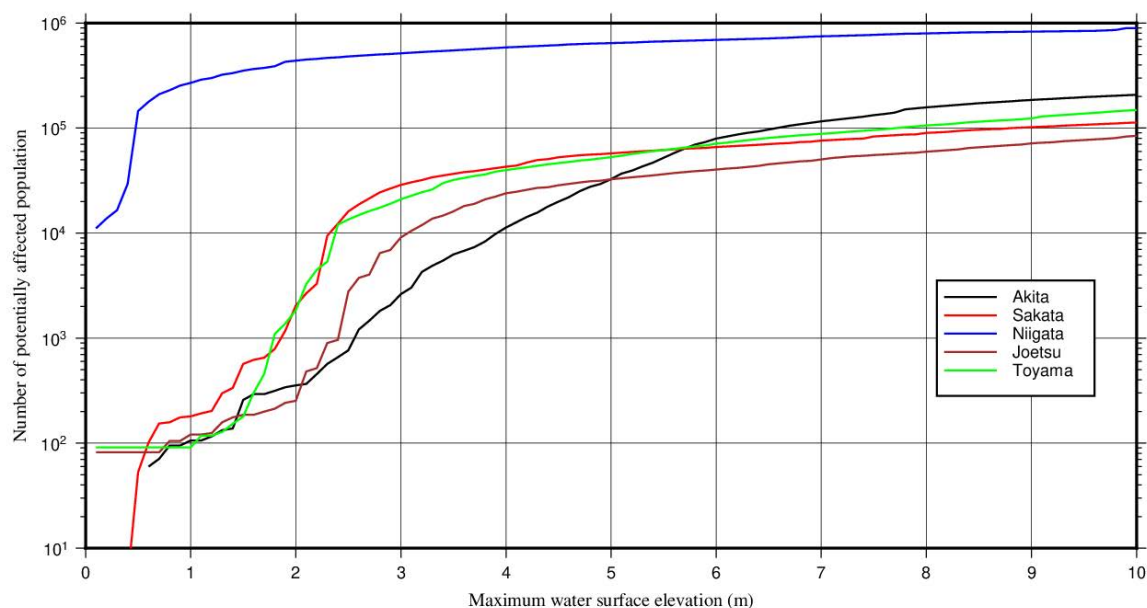


図 12 想定津波水位レベルと影響人口数の関係

ける脆弱域を同様の手法で抽出した。次に、抽出された領域内に分布する人口総数をマイクロベース(2017)人口データ(50 m メッシュ)⁶⁾に基づき集計した。これにより、想定津波水位に対してどの程度の人口が影響を受ける可能性があるのかを分析することができる。想定する津波水位と、その津波水位に基づき抽出された脆弱域内に分布する人口総数の関係を図 12 に示す。図 12 より、新潟市はその他の地域と比較して津波に対する脆弱性が高いことがわかる。この結果は、新潟市では海拔ゼロメートル地帯が広がっており、その地域に人口が多く分布していることに起因している。また新潟市に対する結果では、津波水位が 0.1 m の段階で多くの人口が影響を受ける結果となっているが、これは海域および河川に接続している小水路が高解像度地形においても十分に解像できておらず、その地域を介して内陸に浸水が広がると判定されたためであることがわかった。酒田市を含むその他の地域では、想定水位が 1 m を超え始めると影響人口数が大幅に増加し始めることがわかる。酒田市では、図 11 に示すように想定水位が 2 m 程度になると小河川を介して内陸に浸水が拡大する可能性が危惧され、上述の影響人口数の増加はその結果に起因している。また、上越市や富山市においても、小水路・小河川を介して脆弱域が拡大している様子が見られた。これらのことから、前述したように小水路・小河川などの微地形を有する地域での対策が、日本海沿岸域における有効な津波対策として機能すると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

令和 2 年度の業務では、数値計算に基づき沿岸域における津波氾濫予測を実施するとともに、水槽実験に基づきながら津波予測の不確実性を明らかにした。前年度までに行った津波氾濫予測結果を併せ、沿岸砂丘が発達していることで大規模な浸水被害が発生しづらいうことが確認されるとともに、港湾域や河川に接続している小水路・小河川に津波が侵入することで、内陸人口居住域で浸水被害が発生する可能性があることがわかった。また、国土地理院基盤地図情報数値標高モデル³⁾を用いて、想定津波水位よりも標高が低い、津波に対して脆弱である可能性がある地域を簡易的な手法に基づき抽出して可視化した。その結果、前述の結果と同様に、小水路・小河川周辺地域が津波に対して脆弱である可能性があることがわかった。津波の空間スケールに対して小水路・小河川の空間スケールは微小であり、またそれらに流入する津波の予測には比較的大きな計算負荷と不確実性が伴う。これらのことから、そのような領域に津波を侵入させないことが最も効果的な津波被害軽減策であると考えられ、水門の整備などがそれを実現する選択肢の一つとして考えられる。

日本海沿岸域において津波の被害が危惧される地域では、その被害軽減に向けて対策が着実に進行している。本業務で得られた成果を踏まえ、津波の影響が比較的大きい地域内で小水路・小河川が存在する場合には、水門を整備することにより不確実性が低減され、さらに堅牢な津波減災対策となる可能性がある。そのような対策を行った場合において、詳細な津波氾濫予測を実施し、浸水被害やその予測の不確実性がどの程度低減するのかを定量的に評価することが今後の課題として上げられる。

(d) 引用文献

- 1) 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/ (2021年3月2日参

照)

- 2) 佐藤慎司：波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算，海岸工学論文集，42，376-380，1995.
- 3) 国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル，<https://www.gsi.go.jp/kiban/>（2021年3月2日参照）.
- 4) 国土地理院：基盤地図情報基本項目，<https://www.gsi.go.jp/kiban/>（2021年3月2日参照）.
- 5) 山形県酒田市：津波ハザードマップ，
<http://www.city.sakata.lg.jp/bousai/bousai/tsunami/tsunami-hazardmap.html>（2021年3月1日参照）.
- 6) マイクロベース：マイクロメッシュデータ 2010，<https://www.microgeo.biz/>，2010（2020年10月13日参照）.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
日本海西部域における1833年庄内沖地震津波の広域沿岸挙動に関する研究（口頭発表）	山中悠資, 島津希来, 下園武範, 檜垣敬真	第67回海岸工学講演会	令和2年11月12日	国内(オンライン開催)
沿岸防災手法の工学的評価（口頭発表）	下園武範	日本海地震・津波プロジェクト 成果報告会	令和3年2月8日	国内(オンライン開催)

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
日本海西部域における1833年庄内沖地震津波の広域沿岸挙動に関する研究	山中悠資, 島津希来, 下園武範, 檜垣敬真	土木学会論文集B2(海岸工学)	令和2年11月4日	国内

(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) 8ヵ年の成果

(a) 業務の成果

本業務は、太平洋側とは異なる日本海側の海象・地形条件および地震・津波想定状況を整理し、津波に対する防災手法の工学的な分析を実施して日本海沿岸域に最適な防災手法とその普及方法を検討することを目的として実施したものである。これらを念頭に置き、本業務では水槽実験や数値計算を用いながら、沿岸構造物の津波による破壊形態と津波被害低減効果の関係や、津波伝播・氾濫予測の妥当性および不確実性を評価した。

日本海沿岸域では砂浜・砂丘海岸の割合が高いが、海岸侵食が生じている砂浜も多く、津波防災上の保全が必要な海岸も多い。堤防・護岸の整備率は太平洋側と比較してやや低いものの、激しい冬期風浪により海岸背後に発達した沿岸砂丘が、そのさらに背後への津波の氾濫を抑制しており、堤防と同等の効果を有していることがわかった。また日本海沿岸域における複数の地域において、国土交通省(2014)¹⁾が想定した日本海海域における最大クラスの津波波源に基づき津波氾濫予測を行った結果、津波が砂丘を越流してその背後に浸水被害をもたらす可能性は低いことが確認された。一方、沿岸砂丘前面に位置する沿岸域に加え、砂丘の発達が阻害され比較的標高が低い港湾周辺域および河口周辺域においては浸水被害が生じる可能性が高いことがわかった。港湾では、波浪によるその内側領域の水面変動を静穏にするための防波堤がその外郭として維持されているが、防波堤が港湾域内の津波被害を抑制できる可能性があることがわかった。河口周辺域では、比較的標高が低い海域との接続領域付近では浸水被害の発生が懸念されるのに対し、津波が大規模河川の河道に侵入して河川を遡上する場合には、大部分の河道区間において河川堤防の天端高が津波水位を大きく上回り、津波が河川を氾濫する可能性は低いことがわかった。さらに、河川堤防が整備されていない中小河川および水路に津波が侵入・遡上し、それらを介して海岸から離れた内陸で津波が氾濫する可能性があることがわかった。また、そのような津波氾濫の予測には大きな不確実性が伴うことが明らかとなった。

(b) 結論ならびに今後の課題

本業務の成果により、日本海沿岸域では発達した砂丘の存在により津波に対して自然的に強靱な地域と脆弱な地域が混在していることがわかった。したがって、日本海側の長大な海岸線の中に点在する、津波に対して脆弱な地域に集中的に防災投資を行うことが望ましいと考えられる。脆弱域として、港湾域や河口域および河道・水路周辺域など、人工的に地形が抜本的に改変(あるいは一部改変)されている地域が特定された。港湾防波堤は津波被害を低減させる可能性があることが示されたが、防波堤は波浪を設計外力として設計されているため、地震および津波に対する耐性を付与することで安定した津波被害低減効果が期待できると考えられる。また河口域に来襲した津波は、河道に侵入して遡上し、上流域で氾濫被害をもたらす場合があるが、大規模河川においてはこれまでの治水事業により河川堤防が十分な高さで整備されており、その発生可能性は極めて低い。一方、中小規模の河川および水路では、侵入した津波が氾濫する可能性がある。前述したように、このような津波氾濫予測には比較的大きな不確実性が伴うため、中小規模の河川・水路への津波の侵入を可能な限り抑制することが最も合理的な津波対策であると考えられ、海域との

接続域において水門を建設することが具体的な対策の一つとして上げられる。さらに、想定津波に対して脆弱であると考えられる地域を可視化した。この可視化により、脆弱域の特定と同地域における具体的な対策手法を普及することが可能である。

以上のように、日本海側における海象・地形条件を整理するとともに、想定される津波波源を用いて氾濫予測を行い、津波に対して脆弱な地域を特定した。また、人工的かつ工学的に改変されている地形特性を踏まえながら、脆弱域において津波被害を軽減するための具体的な対策手法を示した。これらのことから、本業務の目的を達成できたと結論付ける。現在各地域で進められている防災対策に本業務で提案した対策を付与することで、津波被害および津波予測の不確実性の低減が実現され、さらに堅牢な津波防災対策となることが期待される。今後の課題として、提案した対策を行った場合において詳細な津波氾濫予測を実施し、浸水被害やその予測の不確実性がどの程度低減するのかを定量的に評価することが上げられる。

(c) 引用文献

- 1) 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/ (2021年3月2日参照)