

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か年の年次実施計画（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
 - 8) 平成32年度
- (e) 平成28年度業務目的

(2) 平成28年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 津波高速計算システムの開発
 - 2) 波源の不確実性を考慮した沿岸被災評価
- (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) 平成29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	教授	佐藤慎司
	教授	田島芳満
	准教授	下園武範

(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深刻化していく海岸侵食の問題が深刻化しているという海岸の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 ヶ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 か年の年次実施計画（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、日本海側の典型的な海岸地形条件における津波の平面氾濫実験を実施し、実験結果に基づいて津波氾濫モデルの検証および改良を行う。また、北海道～東北日本においてさらに対象地域を増やして氾濫計算を実施し、検討を継続する。

6) 平成30年度：沿岸低地における津波の氾濫予測（北陸～西日本）

北陸～西日本を対象にいくつかの代表地域を選定して、氾濫計算を実施し、検討を継続する。

7) 平成31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

日本海側に特徴的な海岸地形を選定し、大河川周辺の砂丘低平地を対象とした計算を分析する。

8) 平成32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28年度業務目的

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および改良を行う。日本海沿岸の各地において、波源の不確実性を考慮して波源シナリオを設定するための効率的な手法を構築する。さらに、北海道から東北の代表地域を対象として波源シナリオを設定して詳細な浸水計算を実施し、堤防の効果等も踏まえて津波によるハザードを定量的に評価することで、津波による被災特性を明らかにする。

(2) 平成28年度の成果

(a) 業務の要約

日本海沿岸地域の防災手法を検討するにあたって、各地において想定される最大クラスの津波による被災特性を把握することが重要である。しかしながら、日本海側の断層型地震による想定波源には不確実性が大きく、各地域の被災評価を行うにあたっては十分な幅をもって断層パラメータを設定する必要がある。このような検討には波源から沿岸地域の沖合伝播計算を繰り返し実施しなければならないため、日本海地域において波源シナリオ設定を支援するための高速津波計算システムを構築し、Web ベースのシステムとして DIAS を利用して一般公開した。さらに、日本海沿岸地域北部の河口に位置する港湾都市（山形県酒田市）を対象として波源の不確実性を考慮した氾濫計算を行った。砂丘に代表される日本海側の典型的な海岸地形を有する対象地において、津波による地域特有の被災特性や港湾防波堤の減災効果を明らかにした。

(b) 業務の成果

北海道から東北の日本海沿岸地域では、1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震、1993 年北海道南西沖地震等に代表される地震津波によって過去に甚大な被害が報告されている。しかしながら、太平洋側に比べて日本海側での地震津波対策は遅れており、津波による被害想定や被害対策を早急に検討する必要がある。政府による「日本海における大規模地震

に関する調査検討会」は日本海地域において 60 の津波を発生しうる活断層を特定し、これらの波源によって沿岸に來襲しうる津波高さを示している。また、各沿岸自治体においてはこれらの想定波源に基づいたハザードマップの整備が進められている。しかしながら、日本海側での断層型地震については不確実性が大きく、被害想定にあたっては各種の断層パラメータの偏差を考慮に入れる必要がある。このような検討には各波源について断層パラメータを変化させた多数の沖合伝播計算を行う必要があるが、対象地域ごとにこのような検討をするには膨大な時間がかかる。以上のような背景を踏まえて、平成 28 年度は、沿岸地域の被災評価を行うにあたって、各波源による沿岸來襲波やその不確実性による影響を効率的に検討することを可能にする津波高速計算システムの開発を行った。さらに、開発したシステムをもとに、山形県酒田市を対象として海岸での詳細な津波氾濫計算により被災特性の分析を行った。以下では各項目ごとに研究成果を詳述する。

1) 津波高速計算システムの開発

開発したシステムは山中ら¹⁾による線形分散波理論に基づく高速伝播計算手法に基づくものである。この手法では、事前に対象海域内の各点において単位量だけ水位を上昇させた単位波源による伝播計算を行って沿岸に來襲する津波波形の計算を実施する。津波の沖合伝播は線形理論で表されることから、単位波源による網羅的な計算結果をデータベース化することによって、重ね合わせの原理により任意波源（初期水位上昇）による伝播計算結果を瞬時に求めることができる。山中ら¹⁾による手法は、津波が長距離を伝播する際に影響する分散効果を考慮しており、従来の線形長波理論に基づく手法に比べて現実に即した推定を行うことができる。矩形単位波源を用いた場合に分散効果により著大な数値振動が生じる問題に対し、滑らかなガウス単位波源を用いることによって、線形分散波理論に基づく高速計算を実現している。

この手法を用いて政府想定波源が含まれる日本海全域を網羅するように単位波源による伝播計算を実施した。日本海沿岸の水深 100 m の等深線に沿って波形取得地点を設定し、各地点での単位波源による計算波形をデータベース化した。このデータ量は膨大なものとなるため、データベースおよび後述するシステムの運用には DIAS（データ統合・解析システム）を利用している。このデータベースを利用して想定波源により沿岸地点に來襲する津波波形を高速に取得できる Web ベースのシステムを構築した（図 1）。このシステムでは、着目する沿岸地点および想定波源を指定することにより数秒程度で來襲波の時間波形を得ることができる。また、特定の地点に対して著大な津波をもたらす想定波源のランキング表示や、ワーストケースの波形を表示するといった機能を有している。さらには、対象海域内において任意の断層設定をして、各沿岸点での波形を求めるといったインターフェイスを導入にしている。このシステムを用いれば、沿岸地域での被災想定を行うにあたって、対象とする波源の特定やその不確実性による津波高さへの影響評価などを効率的に行うことが可能となる。システムは一般に公開しており、DIAS のユーザー登録をすることにより利用することができる。

津波計算システム

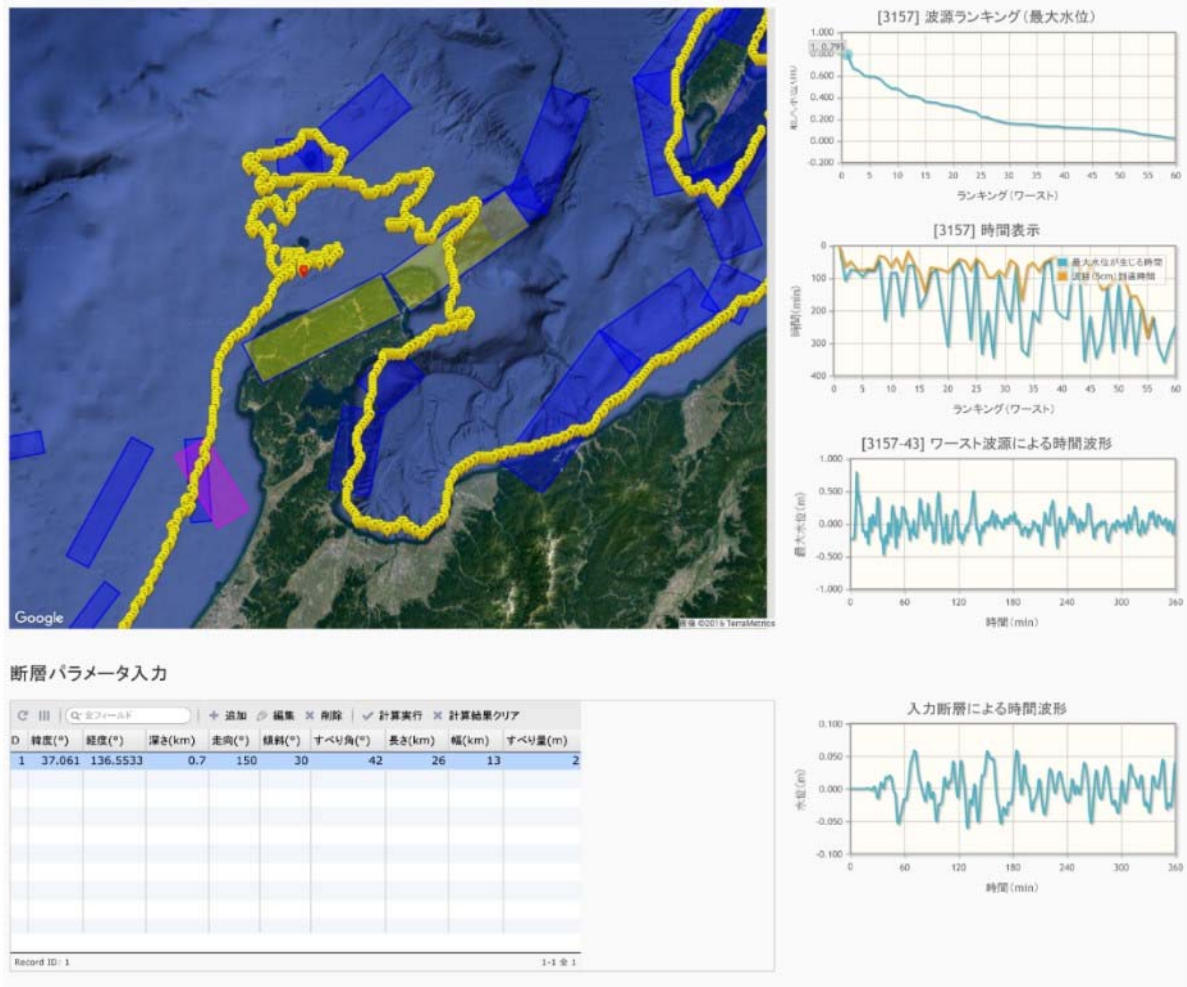


図 1 津波高速計算システムの表示画面の例

2) 波源の不確実性を考慮した沿岸被災評価

上記で開発した高速津波計算システムを基に、波源の不確実性を考慮した沿岸地域の被災評価についてケーススタディを実施した。まず、対象地域の選定にあたって、システムにより政府想定波源による沿岸来襲波の評価を行った。その結果、津波波高が比較的大きく、人口の集中する港湾都市が点在する地域として東北地方の日本海沿岸地域に着目した。これまでの検討により、日本海沿岸では沿岸砂丘が発達していることから特に大河川の河口に位置する都市が津波に対して脆弱であると考えられ、このような典型的特徴を有する地域として山形県酒田市（図 2）を対象とした。酒田市は、山形県沿岸北部の最上川の最下流に位置する、人口約 106,000 人（平成 27 年現在）の都市である。重要港湾である酒田港の背後および最上川沿いに市街地が広がっており、海岸部には標高 10 m を越える沿岸砂丘が発達する日本海沿岸地域特有の地形条件を有している（図 3）。

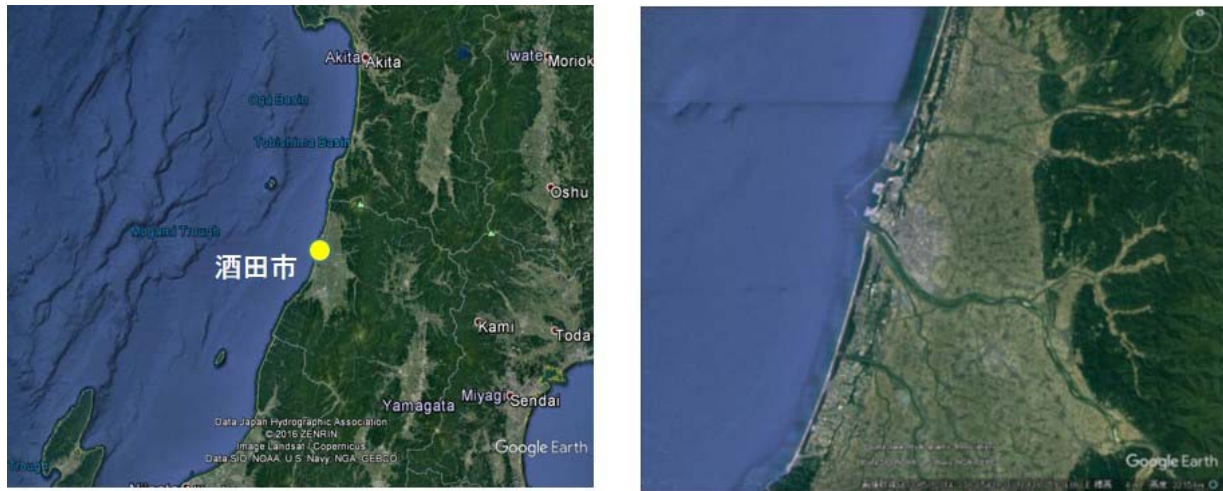


図2 ケーススタディ対象エリアの衛星写真（山形県酒田市）



図3 酒田市宮野浦海岸の砂丘（平成28年12月15日撮影）

表1 酒田市のハザード評価のために設定した波源シナリオ

シナリオNo.	考慮した断層パラメータ	検討会モデルとの違い	すべり量	マグニチュード M_w
1	--	検討会試算モデル	6.0 m	7.79
2	すべり量	すべり量を 1σ 増大	7.5 m	7.98
3		すべり量を 2σ 増大	9.0 m	8.09
4		すべり量を 3σ 増大	10.5 m	8.18
5	傾斜角	傾斜角を60度とする	6.0 m	7.79
6	傾斜角/すべり量	シナリオ4,5の複合	10.5 m	8.18

高速計算システムによる検討の結果、政府検討会が想定する 60 断層のうち、F30 断層が酒田市沿岸に最大の津波をもたらすと推定された。沿岸津波高さについて、各種断層パラメータに対する感度分析を行った。すべり量やすべり角、傾斜角等の断層パラメータを変化させ、0.015 度のメッシュサイズで広範囲での津波伝播計算を行い、山形県沿岸での最大水位上昇量を比較することで、その断層パラメータのうち主要因子を同定した。図 4 には一例として政府想定 F30 断層パラメータからすべり量を増やした場合の山形県沿岸での最大津波高さの変化を示している。このような検討を基に政府想定波源よりも危険側になると考えられる波源シナリオをすべり量および傾斜角を変化させて表 1 のように複数設定した。なお、表中のすべり量の偏差は検討会資料に基づき $\sigma = 1.5 \text{ m}$ としている。

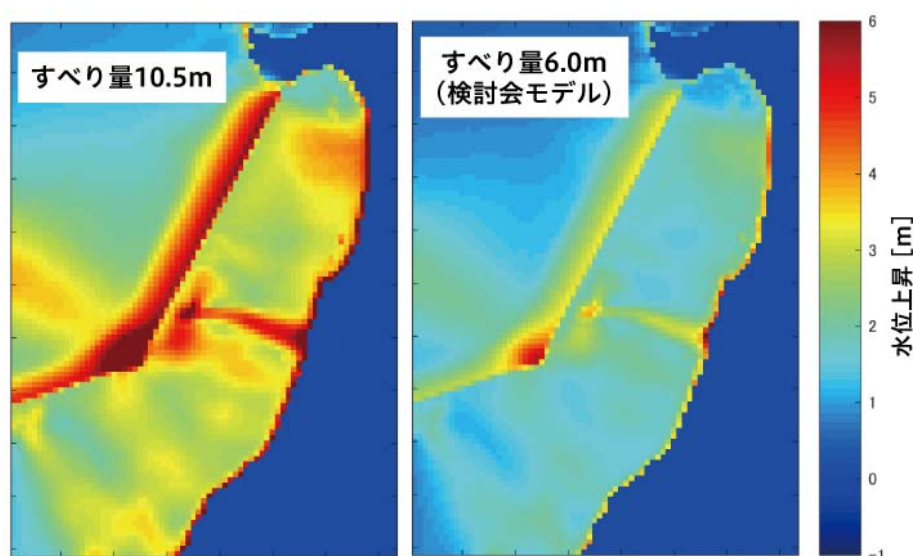


図 4 すべり量増大による最大水位上昇量の変化（F30 断層）

これら 6 つの波源シナリオに基づいて、酒田市周辺での浸水計算を行った。計算にあたっては、国土地理院による「基盤地図情報数値標高モデル」のうち酒田市を含む範囲の 5 m メッシュの標高データを基に陸域地形データを作成した。海域については日本水路協会発行の海底地形デジタルデータ（M7000 シリーズ）を用いて陸域データと統合した。浸水計算は Shimozono ら²⁾による非線形長波理論に基づく氾濫モデルを用いて、先述の広域計算の結果を境界条件として 10 m の計算格子上で実施した。いずれのシナリオについても地震後 20 分程度で津波は海岸へと到達するが、すべり量を大きくした場合でも沿岸砂丘を越えた後背地への浸水や最上川の堤防を越える氾濫は確認されなかった。

図 5(b) にはすべり量を変化させた場合の浸水範囲を色分けして表示している。漁港設備や物流施設が整備されている港湾埠頭・泊地やその後背地において陸地への浸水が見られた。また、比較的小規模な河川に沿って住宅が密集している地域等が弱点となることが確認された。すべり量の増大に応じて浸水域は広がるものの、急激な浸水域の拡大は見られなかった。上記の計算では港湾の沖防波堤を地形として考慮しているが、これらは津波に対して設計されたものではないため、防波堤損壊を考慮した場合の浸水計算を実施し

た。図 5(c) は、すべり量を大きくした波源シナリオ 4 について防波堤の破堤状況ごとの浸水範囲を示したものである。堤防部分破堤は第二北防波堤のみが破堤、堤防全壊は南北すべての防波堤が破堤した場合を想定している。この結果から、港湾防波堤の破堤によって浸水範囲が大きく拡大することが分かり、この規模の津波に対しては防波堤は一定の浸水被害の軽減効果を有していることが示唆された。

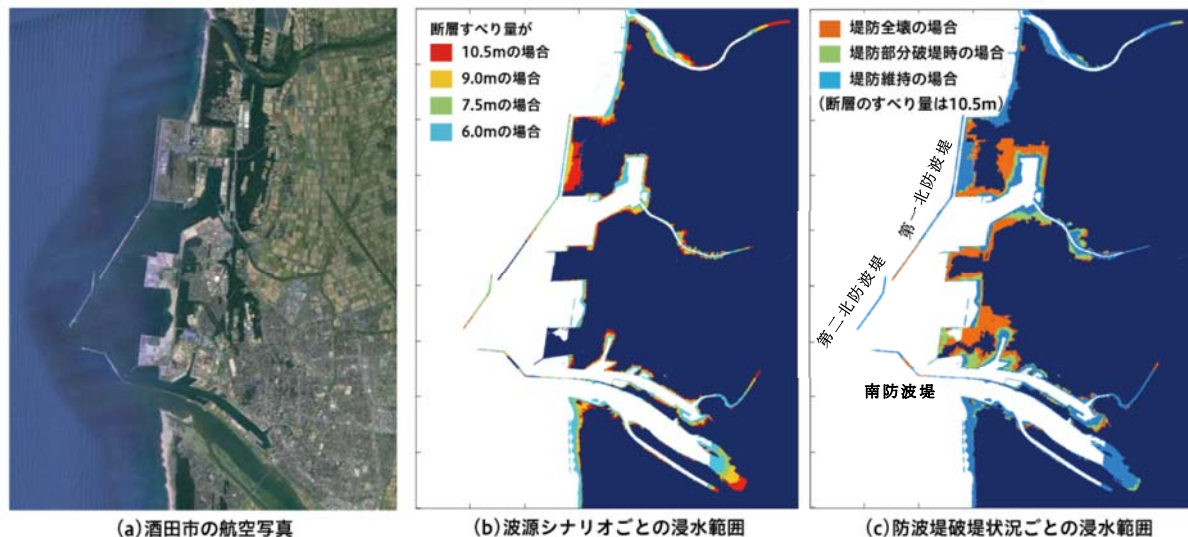


図 5 酒田市のシナリオ別浸水計算結果

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では波源の不確実性を考慮した上で日本海沿岸地域での津波被災評価法について検討を行った。沿岸地域の被災評価にあたって波源シナリオの設定を行うため、日本海を対象とした高速津波計算システムを構築し、DIAS を用いて一般公開した。このシステムを利用すれば、各地域において影響の大きい想定波源の同定や各種の断層パラメータによる感度分析を効率的に行うことができ、日本海沿岸地域の津波対策に資するものと期待される。

山形県酒田市を対象としたケーススタディを通して、津波に対して脆弱と考えられる河口周辺に位置する港湾都市について、浸水計算により特にハード面での防災上の課題を抽出した。波源の不確実性を考慮した津波氾濫解析から沿岸砂丘が津波防災上重要な役割を果たすこと明らかとなり、砂丘の維持・管理や小規模河川への対策が被害を軽減する上で重要であることが示された。また、既存の港湾防波堤の耐性強化により津波被害の低減が可能であることが示唆された。特に陸域においては、以上の検討では未だ考慮されていない様々な影響要素が存在するため、より広範な検討を行う必要がある。また、日本海沿岸地域の津波防災のあり方を議論する上で、より多くの地域でこのようなケーススタディを実施することが求められる。

(d) 引用文献

- 1) 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), Vol. 70(2), pp. 206-210, 2014
- 2) Shimozono, T., Sato, S., Okayasu, A., Tajima, Y., Fritz, H. M., Liu, H. and Takagawa, T.: Propagation and inundation characteristics of the 2011 Tohoku tsunami on the central Sanriku coast, Coastal Engineering Journal, Vol. 54(01), 1250004, 2012

(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
Takenori Shimozono	Long wave propagation and run-up in converging bays (論文発表)	Journal of Fluid Mechanics	平成 28 年 6 月
Shinji Sato and Shohei Ohkuma	Formation of breaking bores in Fukushima Prefecture due to the 2011 Tohoku Tsunami (論文発表)	Proc. Intl. Conf. on Coastal Engineering	平成 29 年 4 月
K M Ahtesham Hossain Raju and Shinji Sato	An experimental study on sand dune sediment transport due to tsunami overwash (論文発表)	Proc. Intl. Conf. on Coastal Engineering	平成 29 年 4 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

名称	機能
日本海を対象とした高速津波計算システム	日本海沿岸の各地点において政府想定波源あるいは任意波源による来襲津波の波形を高速に求めることができる Web ベースのシステムである。 http://apps.diasjp.net/tsunami

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 29 年度業務計画案

平成 28 年度の業務に引き続き、日本海側の典型的な海岸地形条件における津波の平面氾濫実験を実施し、実験結果に基づいて津波氾濫モデルのさらなる検証・改良を行う。また、これまでの検討から港湾都市において防波堤が津波に対して一定の減災効果を有することが示された。モデルによって得られた防波堤による浸水低減効果の妥当性を検証するため、防波堤模型を設置した条件でも実験を実施する。また、実験および数値計算を通して津波によって防波堤に作用する流体力の評価を行い、既存防波堤の津波耐性強化の可能性を検討する。

さらに、日本海沿岸地域（北海道～東北日本）において、さらに対象地域を拡大して津波氾濫計算による被災特性分析を行う。これまでの検討に加えて河川流や河川堤防の破堤の影響など、より広範な影響要素を考慮した定量的被災評価を実施する。これら検討を通して日本海沿岸北部地域における防災上の課題を抽出・整理する。

