

地震津波に対する減災評価法の提案

The proposal of the evaluation method for reducing tsunami damage

安野浩一朗¹・片山裕之²・間瀬 肇³・森 信人⁴

Kouichirou ANNO, Hiroyuki KATAYAMA, Hajime MASE and Nobuhito MORI

A lot of properties and lives were lost by the 2011 Tohoku Earthquake. Against the huge earthquake which is exceeding assumption, importance is attached to the issue of the disaster reduction instead of disaster prevention. In this paper, we developed analysis models to evaluate the tsunami damage (tsunami inundation, flooding bodies, human damage, and collapse of breakwater), and by using those analysis codes synthetically had evaluated the disaster reduction for Kesennuma-city. we had show that it becomes possible to perform disaster reduction which is meaningful by evaluating the effect by the prediction and the measure against damage concretely.

1. はじめに

東日本大震災による被災の甚大さをきっかけに津波防災に対するアプローチの方法について考え直すべき時期がきている。これまでの研究は「防ぐ」が主体で、「防ぐためのものが限界を越えたらどうなるか、想定を超えた外力に対する対応（減災）」に関する研究の蓄積は極めて少ない。従来の対策方法の列挙による計画・対策に留まらず、総合的な減災システムを展開していくには、図-1に示すようなプロセスで「減災」マネジメントを具体的に推進することが有効であり、それには3つの関係（「やるべきこと」（対策）＝「あるべき姿」（理想状態）－「ありのままの姿」（現状））を明らかにすることが重要である。

具体的には、(1)「減災」の「あるべき姿」を実現す

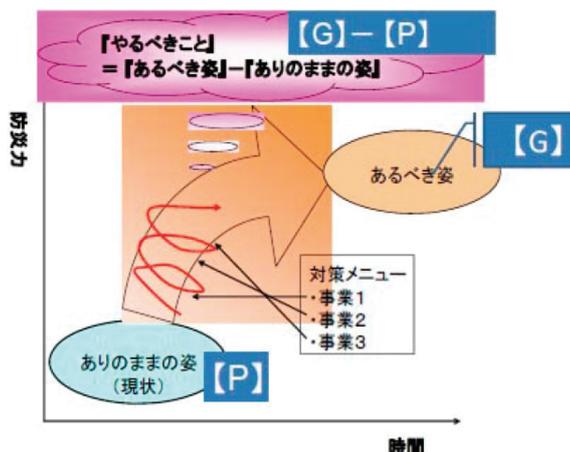


図-1 減災マネジメントシステムの展開(土木学会, 2012)

るための目標とする対策【G: Goal】を明確に描き、また「ありのままの姿（現在の取組み状況）」【P: Present】を評価する。(2)「あるべき姿」と「ありのままの姿（現状の姿）」の差分＝【G】－【P】が、これから「実施すべき対策」の内容となる。(3) (2)で抽出された「実施すべき対策」に必要な予算・時間・効果を評価し、事業計画化していき、これらのプロセスを複数年度の計画で実践することにより、PDCAのマネジメント・サイクルを実行し、合理的な進捗管理を行うことが有効である（土木学会, 2012）。

本研究では、多岐にわたる被害発生が特徴的な津波被害に対して、津波浸水被害、船舶の漂流被害、人的被害、津波防波堤の倒壊被害の4つの被害の評価に着目し、それを用いた効果的で現実に即した「減災」を果たすための活用方法を、宮城県気仙沼市大川北部地点を対象にした検討を通じて提案する。図-2に気仙沼地点における減災達成に向けた検証フローを示す。

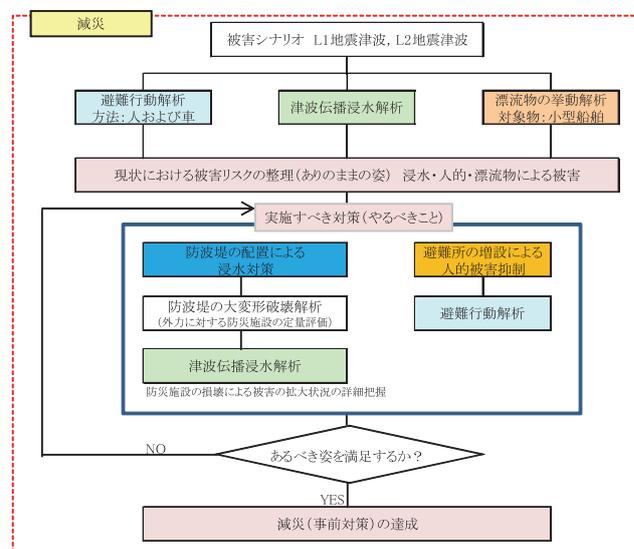


図-2 減災達成に向けた検証フロー

- | | | | | |
|-------|------|-----------|-------------|----|
| 1 正会員 | 博(工) | 五洋建設(株) | 土木技術開発部 | 係長 |
| 2 正会員 | 博(工) | 五洋建設(株) | 土木技術開発部 | 部長 |
| 3 正会員 | 工博 | 京都大学防災研究所 | 気象・水象災害研究部門 | |
| 4 正会員 | 博(工) | 京都大学防災研究所 | 気象・水象災害研究部門 | |

2. 被害評価手法の概要および気仙沼地点の被害評価

(1) 津波浸水被害評価

気仙沼市大川北部地点における複数の被害シナリオとして、L1地震津波（宮城県沖想定運動型地震津波）、L2地震津波（東北地方太平洋沖地震津波、東北大学地震断層モデルVer1.1）を想定した。線形長波方程式および非線形長波式の差分モデルにより津波の伝播を数値計算した。地震津波の波源は、Mansinha and Smylie (1971)の方法で初期水位を決定した。津波の伝播は、線形および非線形長波方程式をリープフロッグ法で差分化し、検討域に近づく程、格子解像度を上げて領域接続して解析する。検討範囲の陸上遡上は小谷ら（1998）の方法で計算を行い、土地利用に応じた粗度分布を与える手法とした。計算条件の詳細は、西畑ら（2012）と同様である。図-3に気仙沼大川北部地点のありのままの姿（陸上標高等の地形条件は東北地方太平洋沖地震津波の発生前）における最大浸水高の比較を示す。

図-3より、どちらの地震津波に対しても、多大な浸水被害が生じることとなり、地震津波の違いによる浸水エリアの相違は大きく、L2地震津波による浸水エリアはL1地震津波に比べて約1.5～1.7倍、最大浸水高では約2.0～2.5倍もの差が生じていることがわかる。なお、図には示していないが、1波目（水位変動が発生）の来襲時間については地震津波の違いによる明確な差は見られず、L1地震津波、L2地震津波ともに地震発生から約40分後であり、第1波目の津波高が最も大きい傾向を示していた。

(2) 津波による船舶漂流被害の評価

津波による船舶漂流被害の評価は、あらかじめ浸水

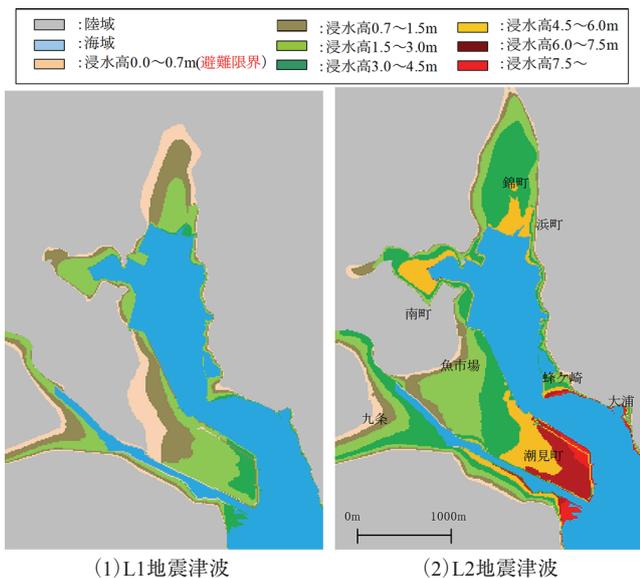


図-3 最大浸水高の比較(ありのままの姿)

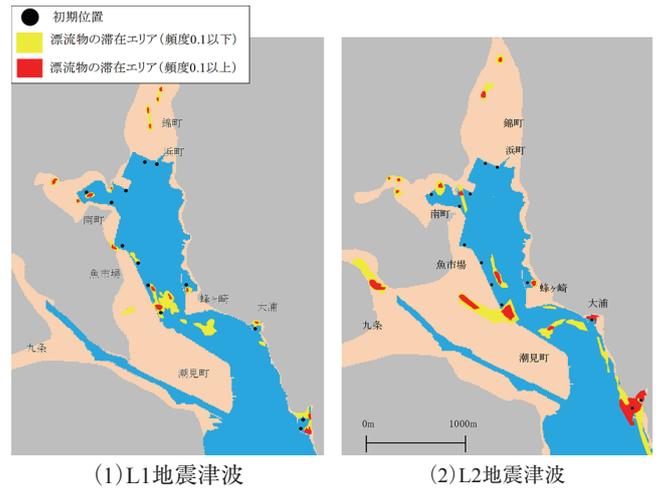


図-4 係留船舶の滞在エリアの比較(ありのままの姿)

析により評価した水位・流速を外力条件とし、障害物との接触は個別要素法に基づき、船舶などの漂流物は複数の球要素からなる複合体としてモデル化を行う手法とした。さらに、正規分布関数に基づく拡散項を導入した津波流体力の不確定性を確率的に評価することとした

なお、解析手法の詳細については、安野ら（2007, 2011）を参照されたい。図-4に乱数を変化させた50回解析における船舶の滞在エリアの比較結果を示す。エリアの定義は、主要な津波来襲が終了する前10分の間に滞在した履歴地点として整理している。

図-4より、どちらの地震津波に対しても、船舶の漂流被害が生じることとなり、定性的にはL1地震津波に対しては引波による流出被害の発生傾向がやや強く出ており、一方でL2地震津波では流入被害が顕著であるように見受けられる。

(3) 人的被害の評価

人的被害は、津波に対する避難行動解析により避難所への避難成功率を算出することで行った（図-5）。解析手法は、GISデータから落とししたリンク・ノードを有する経路において、各リンクのハザードポテンシャル値に基づいて避難行動を行うモデルとし、船舶漂流被害の評価と同様に、津波浸水解析で得られた結果を用いることとした。避難手段としては、徒歩および渋滞を考慮した自動車による避難を想定し、自動車避難の場合は、最適速度モデルを元に津波災害時に拡張したモデルを用いた。

なお、解析手法の詳細については、西畑ら（2012）を参照されたい。表-1に避難行動解析の設定一覧を示す。

図-6に避難行動解析結果の例を示す。なお、徒歩の場合は、最も避難困難となりやすい60歳以上の結果のみをプロットした。L1地震津波のケースでは、避難開始が20分後の付近から避難困難となる比率が目立ち始めている。L2地震津波においては、徒歩の場合で地震開始直後に避難を開始したとしても成功率が100%に達していな

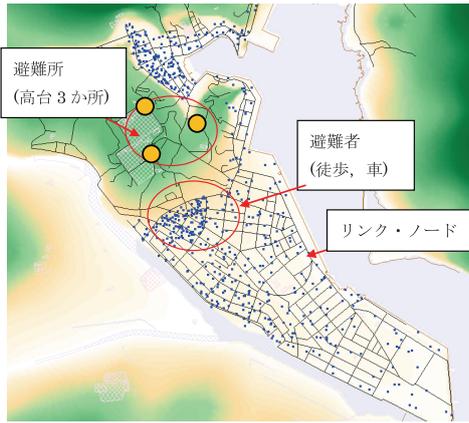


図-5 避難モデルの概要(ありのままの姿)

表-1 避難行動解析の設定一覧

項目	徒歩避難	車両避難
避難者数	1000人	300台, 600台, 1000台
避難所数	3箇所 (高台)	
緊急時	高い場所へ避難する	
避難速度	【一定速度】 30歳代 5.29km/h 40歳代 3.71km/h 60歳~ 2.08km/h	【最高速度】 道路幅 ~1.5m : 通行なし 道路幅 1.5~3.0m : 30km/h 道路幅 3.0~5.5m : 40km/h 道路幅 5.5~ : 60km/h

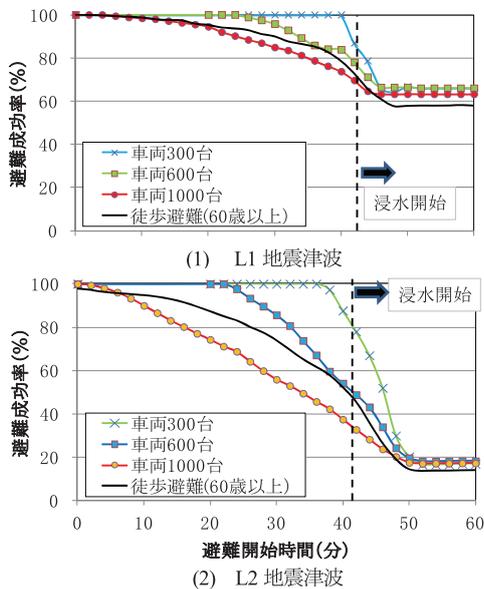


図-6 避難開始時間と避難成功率(ありのままの姿)

い。また、車両1,000台のケースでは、60歳以上の徒歩避難成功率よりも寧ろ危険性が高くなるなどの傾向を示している。

(4) 津波防波堤の倒壊被害の評価

津波防波堤の倒壊被害の評価については、楕円モデルに基づくDEM法を用いた。検討手順は、あらかじめL1地震津波を対象に静的設計を行い、次にDEM法によりL1地

表-2 静的計算結果

安全率	L1 地震津波	L2 地震津波
滑動	1.25	0.40
転倒	1.34	0.63

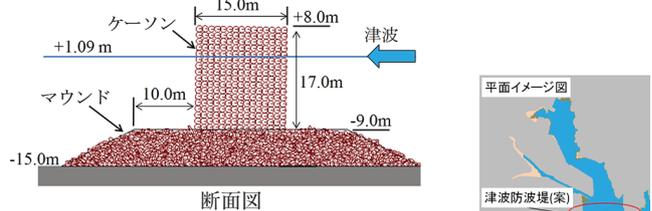
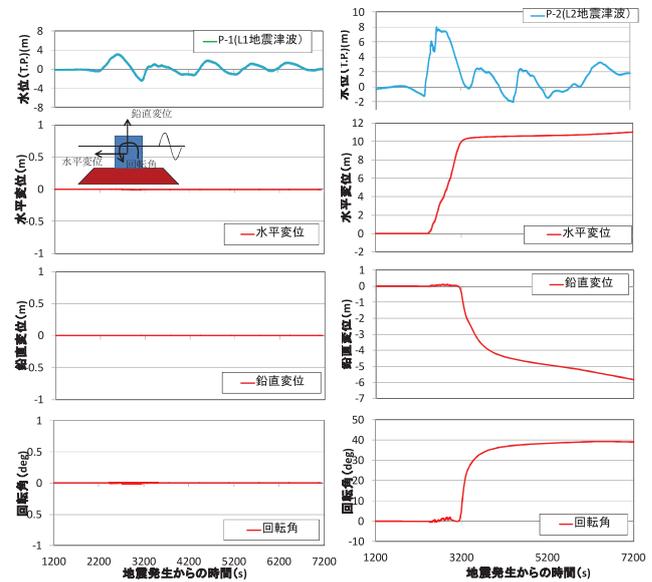


図-7 津波防波堤の規格(案)



(1) L1 地震津波 (2) L2 地震津波

図-8 津波防波堤の変位・回転角

震津波およびL2地震津波に対する津波防波堤に生じる被害の定量的評価を行った。津波外力は、浸水解析結果の最高水位(進行波)と谷本ら(1983)の設計波力方法を元に津波波力の時系列データを用意した。なお、解析手法の詳細および手法の妥当性検証については、安野・森屋ら(2013)を参照されたい。図-7に仮想的に提案した津波防波堤の諸元を示す。

図-8に提案した津波防波堤(ケーン)の倒壊被害を評価した結果を示す。L1地震津波に対しては、ケーンは殆ど変位・回転が生じない結果を示している。一方で、L2地震津波では、第一波目の来襲とともに、まず水平変位が卓越し、その後沈下を含めた大規模な回転が発生し、40°程度傾斜した状態でほぼケーンの移動が停止する傾向を示している。

3. 地震津波に対する減災評価（気仙沼を対象にして）

(1) 3つの関係性（あるべき姿-ありのままの姿-やるべきこと）

減災評価においては第1章で述べた3つの関係性を整理することが重要となる。まず、第2章での解析結果から得られる「ありのままの姿」を整理した。表-3に整理結果を示す。

次に、「あるべき姿」を過去の研究事例等を参考に仮想的に提案した。表-4に提案内容を示す。L2地震津波における「あるべき姿」に、30分以内に避難を開始するという設定を行った根拠については、村上ら（2013）の避難開始時間の実態調査を参考にした。表-3と表-4を見比べると、現状の当該地点は目標を満足していないことが具体的にわかる。なお、本研究では具体的な目標に船舶の漂流被害に関する内容は設定していない。

(2) やるべきことの提案および効果検証

表-3と表-4から明らかになった理想像と現状の乖離から、やるべきことの必要性が明確になることがわかる。第2章での結果を踏まえて表-5に示す方策をやるべきこととして提案し、効果検証を行う。

図-9に沖合への津波防波堤を設置したことによる浸水

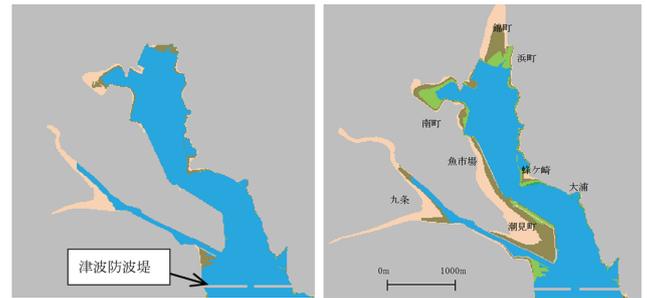
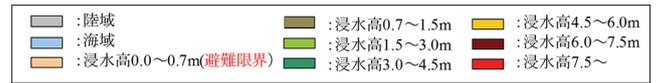


図-9 最大浸水高の比較(津波防波堤有)

領域最大高さの低減効果を検討した結果を示す。なお、津波防波堤の諸元は図-7に示す通りとし、解析における津波防波堤は、図-8に示す鉛直変位の時刻歴を反映させる方法で、津波に対する防波堤の健全性を考慮した浸水被害の評価を行っている。図-9から沖合に防波堤を設置することで、L1地震津波に対しては、一部の局所的な0.7m以内（避難限界の浸水高）の浸水領域が見られるが、概ね完全に防ぐことが可能となることがわかる。なお、図には示していないが、避難行動解析結果からもL1地震津波に対しては、あるべき姿を満足する結果を得ている。

L2地震津波に対しても、浸水領域の低減に効果を果たしている傾向が伺える。最大浸水高も津波防波堤がない場合よりも5割以下まで低下している。その要因としては、第1波目が最大津波であることと、図-7より津波防波堤が大きく傾斜し始めるのが第1波目のピークを過ぎる前後であったために、津波防波堤は大きく傾斜するものの高い津波抑制効果を果たしたものと思われる。

続いて、津波防波堤がある場合における避難行動解析を実施した。図-10に解析結果を示す。

なお、図には津波防波堤を設置していないケース（ありのままの姿）の検討結果も合わせてプロットしている。

図-10より、防波堤のない場合よりも全体的な避難成功率は飛躍的に向上する傾向を示しているものの、徒歩避難の場合は、60歳以上のケースで12分後以降、車両避難

表-3 ありのままの姿(現状)(2章にて検討)

地震津波	浸水被害	人的被害	
		歩行避難 (60歳以上)	車両避難 (1000台)
L1 地震津波	被害発生 最大浸水高 3m程度	避難困難 (避難開始2分以降)	避難困難 (避難開始4分以降)
L2 地震津波	被害発生 最大浸水高 8m程度	地震直後に避難を開始しても避難困難	

表-4 あるべき姿(理想像)

地震津波	あるべき姿	具体的な予測目標
L1 地震津波	防災 浸水・人命を守る	浸水が生じない、もしくは浸水領域がほぼ0に近い（避難困難者も生じないと想定）。
L2 地震津波	減災 人命は守る	浸水が生じても、徒歩・車両によるどちらの避難手法を用いても30分以内に避難を開始すれば避難成功。

表-5 やるべきこと(本研究にて提案)

提案	目的	やるべきこと (本研究での提案)	検証方法
方策1	津波浸水の低減・防止	津波防波堤の配置	津波浸水解析
方策2	避難時間の短縮化	避難所の増設	避難行動解析

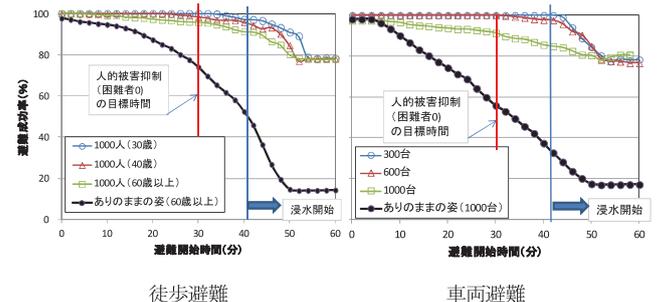


図-10 避難行動解析結果(津波防波堤有, L2地震津波)

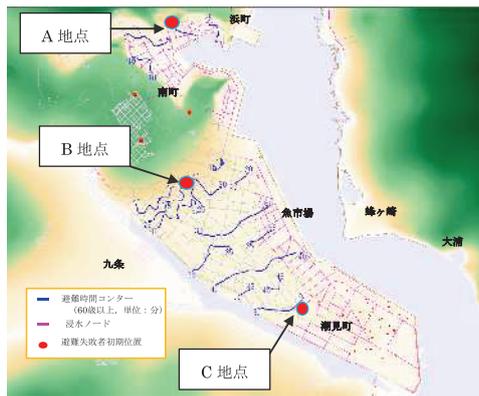


図-11 避難所の増設箇所(案)

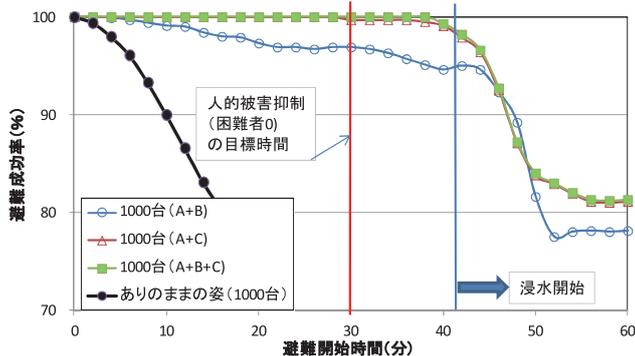


図-12 避難行動解析結果(車両避難)
(津波防波堤有 + 避難所増設, L2地震津波)

1000台のケースでは、依然として地震発生直後に避難を開始しても避難成功率が目標に到達しない結果を示している。防波堤の配置のみでは、30分以内に避難を開始すれば人的被害を抑制できるというあるべき姿を満足するには至っていないことが明確にわかる。

津波防波堤だけでは、あるべき姿を満足できていないことが得られたため、方策2として避難所の増設による効果を検証した。避難所の増設においては、避難に要する時間のコンターを参考にして、津波防波堤を設置した場合に浸水領域から外れた3地点を提案した。

図-12にさらに避難所を増設した場合の避難行動解析結果を示す。避難所AとBへ設置した場合は、効果的な改善には至らず、C地点への設置による効果が大きい傾向を示している。その傾向は徒歩避難の場合においても同様であった。結果的に3か所への増設により、目標時間30分以内に避難を開始すれば人的被害を防ぐことが可能となる結果を示している。表-6にあるべき姿を満足するためにやるべきことを整理した結果を示す。

以上から、4つの解析手法を総合的に活用することにより、津波災害に対する減災達成のための具体的なプロセスを示すことが可能であることを示した。

表-6 やるべきこと(検討結果)

地震津波	あるべき姿	やるべきこと
L1 地震津波	防災 浸水・人命を守る	津波防波堤の配置により達成
L2 地震津波	減災 人命は守る	津波防波堤 + 避難所の増設(3箇所)により達成

4. まとめ

(1) 4つの解析手法を用いて、気仙沼市大川北部地点の「あるべき姿」(理想状態)を仮想的に設定し、「ありのままの姿」(現状)との乖離を解消するための「やるべきこと」(必要な対策)に関する評価を行った。その結果、「やるべきこと」(必要な対策)として、津波浸水高抑制と来襲時間遅延のための沖合防波堤の設置、および避難困難地解消のための3箇所の避難場所の増設により、「あるべき姿」(理想状態)を満足することが可能である結果を得た。

(2) 多岐にわたる被害が想定される津波災害に対し、気仙沼地点を例にした本研究での検討方法、手順を実施することにより、「減災」を果たすための有力な手法となることを示した。

参考文献

安野浩一朗・西畑 剛・森屋陽一 (2007) : 浮体特性を考慮した漂流シミュレーションの適用性に関する研究, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 87-92.

安野浩一朗・森屋陽一・西畑 剛 (2011) : 漂流被害の確率的評価方法の提案, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_583-I_588.

安野浩一朗・森屋陽一・間瀬 肇・森 信人 (2013) : 低頻度偶発波浪を想定した混成堤の大規模変形量解析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 69, pp. I_485-I_490.

河田恵昭 (1997) : 大規模地震災害による人的被害の予測, 自然災害科学, Vol.16, No.1, pp.3-13.

小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998) : GISを利用した津波遡上計算と被害予測, 海工論文集, 第45巻, pp. 356-360.

谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田 繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野 晋, 平石哲也 (1983) : 1983年日本海中部地震津波の実態と二, 三の考察, 港湾技術研究所資料No. 470, pp. 299.

土木学会 (2012) : 津波推計・減災検討委員会報告書, 115p., 永松伸吾 (2008) : 減災政策論入門【巨大災害リスクと市場経済】, シリーズ災害と社会④, 弘文堂, 218p., 西畑 剛・森屋陽一・安野浩一朗・今村文彦 (2012) : 津波からの避難車両のモデル化と渋滞等の評価, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第59巻, pp. 731-735.

人と防災未来センター, <http://www.dri.ne.jp/center/gensai.html>

村上ひとみ・柳原純夫・三上卓 (2013) : 石巻市の津波避難における車利用のパターンと危険性, 5p., Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971) : The displacement field of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol. 61, pp. 1433-1440.