

津波浸水域の簡易評価式

Simplified Evaluation Formula for Inundation Area by Tsunami

○清水 智¹, 若浦雅嗣²
Satoshi SHIMIZU¹ and Masatsugu WAKAURA²

¹ 応用アール・エム・エス株式会社 災害リスク事業部
Catastroph Risk Division, OYO RMS Corporation

² 応用アール・エム・エス株式会社 災害リスク事業部
Catastroph Risk Division, OYO RMS Corporation

We tried to construct an empirical formula for evaluating inundation area by tsunami. The formula is derived from the surveyed inundation data of tsunami caused by the 2011 Tohoku Earthquake. It uses three explanatory variables which are tsunami height at coastline, ground level and distance from coastline of the objective site. We compared inundation area by the formula with actual inundation area by the 2011 Tohoku Earthquake and the 1960 Chile Earthquake. Additionally, we showed that this formula enables us to make comparative review easily against the case beyond the scope of the assumption.

Keywords : tsunami, inundation area, simple evaluation formula

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、想定を超えた大きな津波が押し寄せ、多くの犠牲者が発生した。

東北地方太平洋沖地震以前から国や自治体では、津波の被害想定を行われてきたが¹⁾、それらは特定のシナリオ地震が発生した場合の津波高・浸水範囲・浸水深を数値シミュレーションで求めるものが中心であった。数値シミュレーションによる浸水予測は、精緻な予測が可能な反面、シミュレーションを行うための地形・海岸構造物のモデル作成や膨大なメッシュ数の逐次計算など、一般に多大な作業量と作業時間を要する。また様々なシナリオを検討するための再解析もそれほど容易ではない。

本研究は、東北地方太平洋沖地震で実際に起きたことを簡易評価式の形で経験則として整理し、今後の防災に生かせないかという観点で行なっている。簡易評価式は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが行った現地調査結果²⁾をもとに回帰分析を行い、海岸線での津波高、対象地点の海岸線からの距離、標高の3つの変数で浸水域を評価するものである。得られた簡易評価式については、東北地方太平洋沖地震の実際の浸水域との比較により再現性を検討するとともに、1960年チリ地震の浸水域との比較により他の地震への適用性を検討した。

東北地方太平洋沖地震では、想定外の津波により、多くの犠牲者が発生し社会に多大な影響を与えた。津波対策を検討する場合も、単に想定シナリオに対して安全かどうかという視点だけではなく、想定外の津波が来た場合の状況を予測しておくことが今後は必要になると考えられる。本簡易評価式は、簡便ではあるが、海岸線での津波高が変化した場合の浸水範囲を容易に評価ができる。想定外の様々な状況を可視化することで地域の防災力を高めるツールとして活用されることが期待される。

2. 簡易評価式の構成

既往研究における数値シミュレーション以外の津波の

浸水・遡上予測式のうち、津波の時刻歴波形や周期を用いずに津波の浸水高（または浸水範囲）を求める場合、海岸線での津波高、標高、海岸線からの距離、粗度係数等を説明変数とするものが多い(例えば³⁾⁴⁾。

簡易評価式の構築するにあたっては、海岸線に襲った津波のエネルギーが摩擦や空気抵抗によって失われるとともに位置エネルギーに変換されると仮定する。即ち、位置エネルギーを標高、損失エネルギーを海岸線からの距離の関数と考え、簡易評価式を式(1)の形式とした。

$$z = H + \alpha h + \beta L \quad (1)$$

ここで、 z : 遡上高（または浸水高）(m)

H : 海岸線での津波高 (m)

h : 標高 (m)

L : 海岸線からの距離 (m)

α, β : 回帰係数

浸水域は式(1)の $z - h \geq 0$ の範囲となり、海岸線 ($L = 0$ かつ $h = 0$) では $z = H$ が成り立つ。以下、式(1)を原点回帰して回帰係数を求め、簡易評価式を構築した。

3. 使用したデータ

式(1)から回帰分析に必要なデータは、海岸線での津波高、標高、海岸線からの距離、遡上高である。これらのデータは、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ²⁾のデータを用いた。

(1) 遡上高・海岸線からの距離

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ²⁾は、東北地方太平洋沖地震による津波の遡上浸水状況を調査したもので、調査地点の位置情報、浸水高または遡上高(図1参照)、海岸線からの距離、信頼度などが整理されている。このうち、信頼度が A または B で、青森県六ヶ所村～千葉県大網白里町の太平洋沿岸の調査地点(i)の遡上高(式(1)の z_i)と海岸線からの距離(L_i)を用いた。ただし、海岸線からの距離は計測されていない地

点も多数ある。この場合は、津波で浸水した海岸線からの最短距離を GIS ソフトで計測し海岸線からの距離を求めた。津波で浸水した海岸線は、文献 5) をデジタル化して特定した。

(2) 標高

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ²⁾では調査地点の標高は調査項目にない。記事として標高や地盤高の記載がある地点もあるが全体に占める割合はごく僅かである。ここでは、遡上高と標高は等しいと仮定して調査地点(*i*)の標高値(h_i)を設定した。

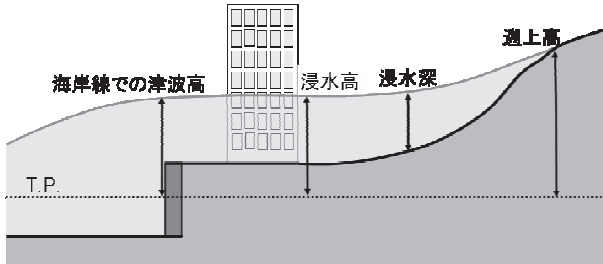


図 1 浸水高と遡上高の定義

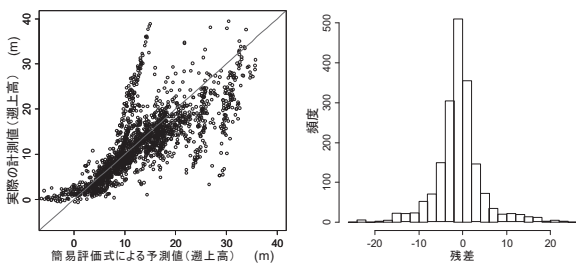
(3) 海岸線での津波高

海岸線での津波高は、海岸線からの距離が 50m 以内にある浸水高計測地点の浸水高が海岸線での津波高を近似的に表すと仮定し、これを線形補間することで、連続的に海岸線での津波高を設定した。調査地点(*i*)に対応する海岸線での津波高(H_i)は、調査地点から最短距離の地点の津波高を適用した。

4. 回帰分析

3. で設定したデータ(z_i, H_i, h_i, L_i ; 単位は m)を用いて回帰分析を行った。得られた回帰式を以下に示す。また、図 2・3 には回帰分析の結果と回帰式の形状を、表 1 には残差(e_i)の標準偏差と四分位点を示した。

$$z_i = H_i + 0.2359h_i - 0.001604L_i + e_i \quad (2)$$

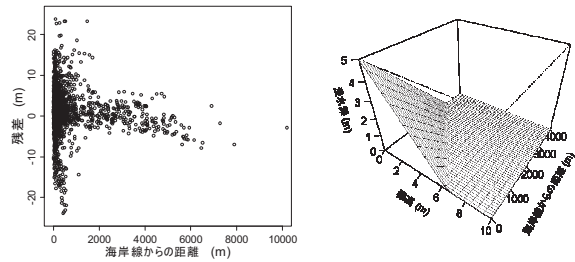


実測値と回帰式の比較 残差のヒストグラム
図 2 回帰分析の結果 (1)

表 1 残差の標準偏差と四分位点 (単位 m)

標準偏差	第 1 四分位点	中央値	第 3 四分位点
5.3924	-2.9619	-0.8136	1.1407

回帰式の残差の標準偏差は 5.39m で、海岸線に近い地点では残差のばらつきが大きい傾向があるものの、海岸線からの距離が離れる程ではばらつきは小さくなる結果となった。



残差と海岸線からの距離 回帰式の形状
図 3 回帰分析の結果 (2)

5. 実際の浸水域との比較

簡易評価式で算出される浸水域の妥当性を確認するため、2011 年東北地方太平洋沖地震、1960 年チリ地震津波の実際の浸水域と比較を行った。

(1) 2011 年東北地方太平洋沖地震

文献 5) で実際の浸水域が確認できる青森県六ヶ所村から千葉県大網白里町の太平洋沿岸地域を対象に比較を行った。簡易評価式による評価は 10m メッシュ単位で行い、式(1)の $z-h \geq 0$ の範囲を浸水域とした。浸水域を計算するにあたって、標高 h は国土地理院が整備している基盤地図情報⁶⁾の 10m メッシュ標高を用いた。海岸線での津波高 H は文献 2) のデータで海岸線からの距離が 50m 以内にある浸水高計測地点の浸水高を計測地点付近の海岸線での津波高と仮定し、これを線形補間することで、海岸線での津波高を連続的に設定した。海岸線からの距離 L は、安全側を考慮 z が最も大きくなる海岸線からの距離を適用した。

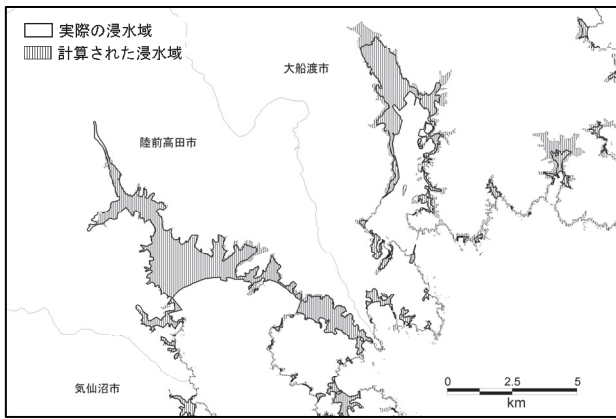
表 2 に、簡易評価式で計算された市区町村別浸水面積と航空写真から算定された実際の浸水面積⁵⁾を示す。図 4 には、簡易評価式と実際の浸水域を図示した。

簡易評価式による浸水域は、青森県～岩手県および茨城県南部～千葉県で、実際の浸水域よりも過大に評価する結果となったが、岩手県南部～茨城県北部にかけての地域では概ね実際の浸水域を再現できることが確認できた。特に、陸前高田市や仙台平野付近で非常によく一致している。一方、浸水域が波源域と正面で相対していない地域(宮古市・大船渡市・気仙沼市・旭市他)や津波で被害を受けた地域の端部(青森県など)では、簡易評

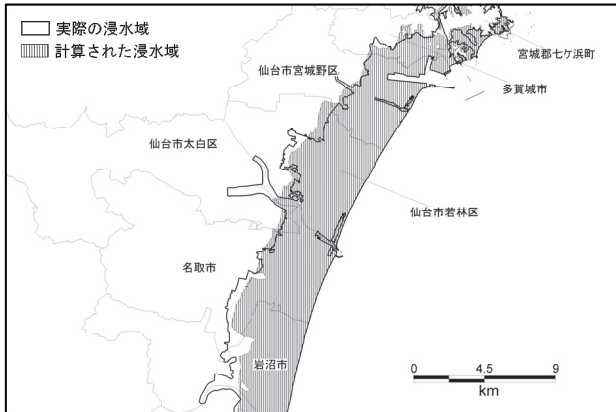
表 2 市町村別の浸水面積の比較

	航空写真	簡易評価式	比率		航空写真	簡易評価式	比率		
青森県	上北郡六ヶ所村	5	18	3.60	福島県	相馬郡新地町	11	10	0.91
	上北郡おいらせ町	3	4	1.33		相馬市	29	28	0.97
	三沢市	6	20	3.33		南相馬市	39	35	0.90
	八戸市	9	15	1.67		双葉郡浪江町	6	10	1.67
岩手県	三戸郡陸上町	0.5	0.5	1.00	双葉郡双葉町	3	7	2.33	
	九戸郡洋野町	1	2	2.00	双葉郡大熊町	2	5	2.50	
	久慈市	4	8	2.00	双葉郡富岡町	1	5	5.00	
	九戸郡野田村	2	5	2.50	双葉郡柳井町	3	5	1.67	
	下閉伊郡菅代村	1	3	3.00	双葉郡広野町	2	3	1.50	
	下閉伊郡野畑村	1	3	3.00	いわき市	15	32	2.13	
	下閉伊郡岩泉町	1	7	7.00	茨城県	北茨城市	3	5	1.67
	宮古市	10	27	2.70		高萩市	1	2	2.00
	下閉伊郡山田町	5	8	1.60		日立市	4	3	0.75
	上閉伊郡大槌町	4	7	1.75		那珂郡東海村	3	4	1.33
宮城県	釜石市	7	13	1.86	ひたちなか市	3	2	0.67	
	大船渡市	8	16	2.00	東茨城郡大洗町	2	2	1.00	
	陸前高田市	13	15	1.15	銚子市	2	2	1.00	
	気仙沼市	18	32	1.78	鹿嶋市	3	8	2.67	
	本吉郡南三陸町	10	14	1.40	神栖町	3	18	6.00	
	牡鹿郡女川町	3	5	1.67	銚子市	1	2	2.00	
	石巻市	73	50	0.68	旭市	3	9	3.00	
	東松島市	37	36	0.97	千葉市	1	11	11.00	
	宮城県松島町	2	1	0.50	山武郡横芝光町	1	5	5.00	
	宮城県利根町	0.5	0.5	1.00	山武市	6	12	2.00	
宮城県	塩釜市	6	3	0.50	山武郡九十九里町	2	9	4.50	
	宮城県七ヶ浜町	5	6	1.20	山武郡大網白里町	0.5	5	10.00	
	多賀城市	6	6	1.00	長生郡白子町	1	8	8.00	
	仙台市宮城野区	20	22	1.10					
	仙台市若林区	29	30	1.03					
	仙台市太白区	2	3	1.50					
	名取市	27	25	0.93					
	岩沼市	29	26	0.90					
	亶理郡亶理町	35	28	0.80					
	亶理郡山元町	24	23	0.96					

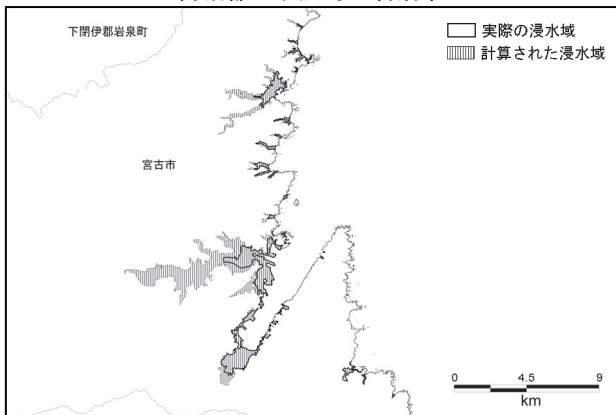
単位はkm²
浸水面積1km未満の市区町村は0.5km²とした。



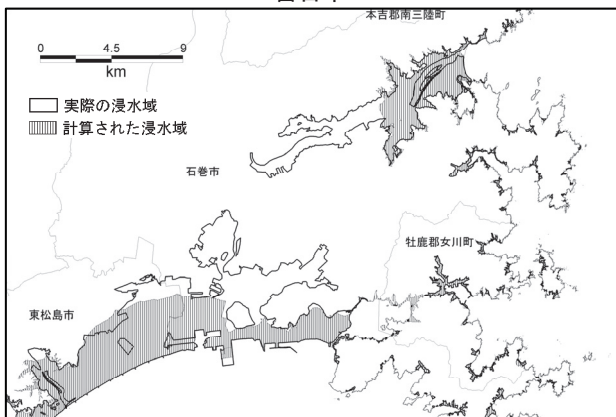
陸前高田市・大船渡市



宮城郡七ヶ浜町～岩沼市



宮古市



石巻市・牡鹿郡女川町

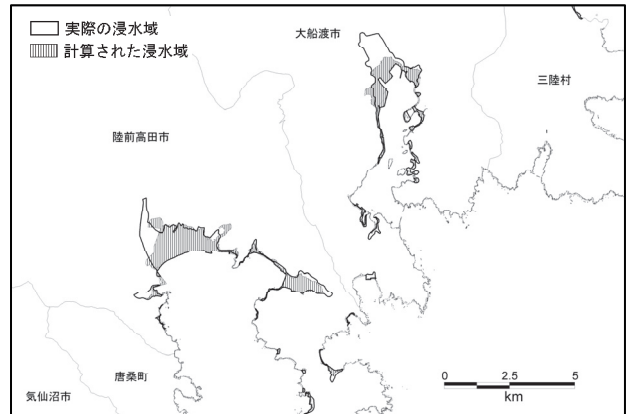
図4 簡易評価式の算定結果と実際の浸水域

簡易評価式による評価は過大となった。また、石巻市では過少評価となったが、これは 10m メッシュ標高データの精度の問題と考えられる。

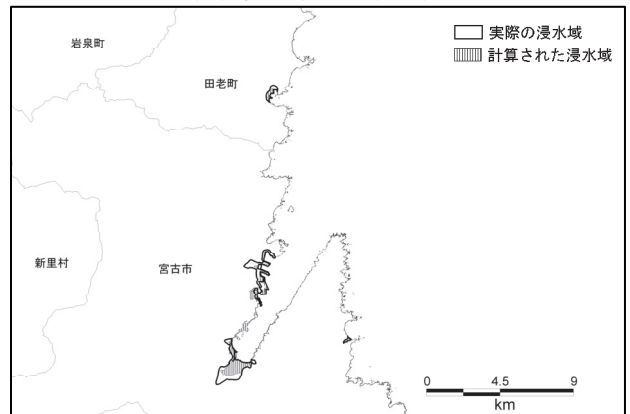
(2)1960年チリ地震津波

文献 7)で実際の浸水域が確認できる市町村のうち、大船渡市、陸前高田市、宮古市、田老町を対象に簡易評価式で浸水域を評価し実際の浸水域と比較した。標高は基盤地図情報⁶⁾の 10m メッシュ標高を用いた。海岸線での津波高 H は文献 8)の 1960 年チリ地震津波の津波痕跡データで海岸線からの距離が 50m 以内にある浸水高計測地点の浸水高を計測地点付近の海岸線での津波高と仮定し、これを線形補間することで、連続的に海岸線での津波高を設定した。海岸線からの距離 L は、(1)項と同様に安全側を考え z が最も大きくなる海岸線からの距離を適用した。

表 3 に、簡易評価式で計算された 3 市 1 町の市町別浸水面積と文献 7)から算定された浸水面積を示す。図 5 には、簡易評価式と実際の浸水域を示した。



陸前高田市・大船渡市



宮古市

図5 簡易評価式の算定結果と実際の浸水域

表 3 市町別の浸水面積の比較 (単位は km^2)

		実際	簡易評価式	比率
岩手県	下閉伊郡田老町	0.3	0.2	0.67
	宮古市	3.4	1.8	0.53
	大船渡市	3.0	2.0	0.67
	陸前高田市	5.4	4.3	0.80

実際の浸水域と簡易評価式による浸水域の比較を行ったところ、全体的にはやや過小評価になる傾向があるが、田老町や陸前高田市では実際の浸水域を概ね再現できている。一方、宮古市や大船渡市では実際との乖離がやや大きい。宮古市や大船渡市の浸水域は湾の奥深くや側面に位置しており、このような地域で簡易評価式を適用する場合は、注意が必要である。

6. 想定外を考慮した防災施設の立地選定

構築した簡易評価式は、想定以外の津波の浸水予測を簡単に行うことが可能である。日本のある地域（以降「A 地域」と称す。A 地域は仮想の地域である。）における想定外の津波を考慮した避難施設の設置箇所の検討例を示す。

A 地域では避難施設の新設を検討しており、その候補地が 5 箇所存在する。新設箇所の選定にあたっては、想定外の津波も考慮し、適切な場所を選定する。

A 地域で過去最大の津波高は 6m であり、被害想定として海岸線に 6m の津波高が来襲するケースが想定されていると仮定する。これを基準ケース（Case3）とし、表 4 のように津波高を変化させ、各ケースの浸水域を簡易評価式で算定し、各候補地の浸水危険度の順位付けを行った。図 6・7 には Case1~6 の浸水域と設置候補地の位置関係を示す。また、表 5 には津波高が変化した場合の各候補地の浸水状況を示す。

表 4 設定した海岸線での津波高

	津波高 (m)	備考
Case1	3.0	基準の0.5倍の津波高
Case2	4.8	基準の0.8倍の津波高
Case3	6.0	基準の津波高
Case4	7.2	基準の1.2倍の津波高
Case5	9.0	基準の1.5倍の津波高
Case6	12.0	基準の2.0倍の津波高

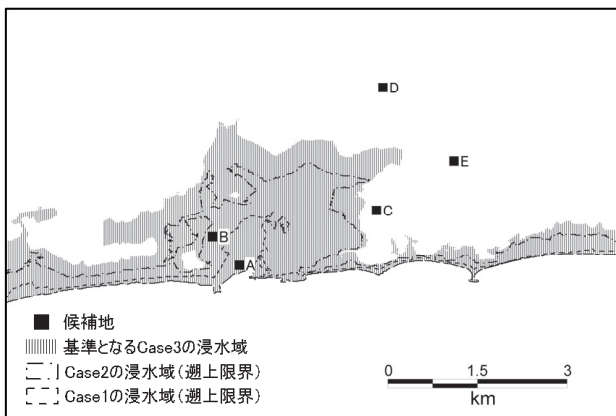


図 6 基準となる Case3 および想定以下の Case1・2 の浸水域と設置候補地

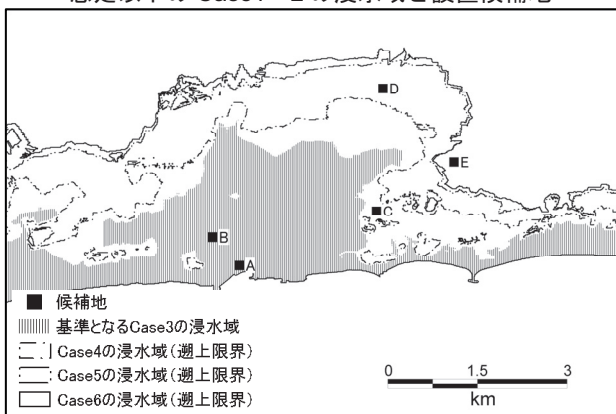


図 7 想定を超える Case4~6 の津波が来襲した場合の浸水域と設置候補地

表 5 より、想定通りの Case3 の場合では、候補地 C、D、E の 3 箇所が浸水する危険性のない地域とされるが、海岸に来襲する津波高が高くなるにつれて、浸水しない候補地は減少し、想定の上の津波が来襲した場合、候

補地 E のみが浸水しないことがわかる。浸水に対する候補地の安全性は E、D、C、B、A の順になることが分かるだけでなく、想定の上の何程度程度の津波高で危険に晒されるか判断することが可能になる。

表 5 津波高が変化した場合の各候補地の浸水状況

候補地	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	立地場所 の安全性
津波高	3.0m	4.8m	6.0m	7.2m	9.0m	12.0m	
A		x	x	x	x	x	危険 ↑ ↓ 安全
B			x	x	x	x	
C				x	x	x	
D					x	x	
E						x	

x印は浸水した候補地

7. おわりに

本論文では 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡調査の結果を元に簡易評価式を構築した。さらに、構築した簡易評価式を用い、2011 年東北地方太平洋沖地震、1960 年チリ地震津波の実際の浸水域と比較を行った。その結果、特殊な地形では実際の浸水域との乖離があるものの、波源域から直線的に津波が来襲する地域では概ね実際の浸水域を再現できていることが確認できた。

さらに、簡易評価式を用いることで、津波高が変化に伴う浸水域の変化を簡便に表現できることを示し、シナリオに過度に依存せず、想定外の津波を考慮に入れた避難施設の立地選定などの防災対策に適用可能なことを示した。

また、本評価式は海岸線での津波高を変化させた場合の浸水域を簡単に求めることが可能であり、海岸線に来襲する津波高が確率的に与えられた場合に、浸水の危険性を確率的に評価することが可能となる。

今回、2011 年東北地方太平洋沖地震、1960 年チリ地震津波で実際の浸水域と比較を行ったが、これらの地震はマグニチュードが大きく津波の周期も長いと考えられるため、周期が短い津波への適用性などの点から、その他の過去の被害地震や数値シミュレーションによる浸水域との比較のほか、浸水深の評価については今後の課題である。

謝辞

本論文の作成にあたっては、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループおよび津波痕跡データベースのデータを使用させていただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 損害保険料率算出機構：津波浸水予測シミュレーションに関する研究，地震保険研究 16，pp.9-12，2008.9
- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ
<http://www.coastal.jp/tjt/>の速報値（2012年3月1日参照）
- 3) McSaveney,M.,Rattenbury,M：Tsunami impact in Hawke's Bay, Institute of Geological and Nuclear Sciences Client Report 2000/77, 2000
- 4) Camfield,F.E.：Tsunami Engineering. Special Report No.6, CoastEngineering Research Centre, Corps of Engineers, U.S.Army, 1980
- 5) 国土地理院：25,000 分の 1 浸水範囲概況図，
<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html>
- 6) 国土地理院：基盤地図情報，<http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 7) 国土交通省東北地方整備局：まちづくりサポートマップ，
<http://www.thr.mlit.go.jp/>
- 8) 東北大学工学研究科、原子力安全基盤機構：津波痕跡データベース：<http://tsunami3.civil.tohoku.ac.jp/tsunami/mainframe.php>