

ETA を用いた津波避難のリスク評価 - 閉上における復興計画案を事例として -

近藤 晴香, 福田 匡史, 平山 健斗
アドバイザー教員 村尾 修

2011年9月30日

1 はじめに

2011年3月11日午後2時46分頃に発生した東日本大震災は、マグニチュード9.0、震源域は長さ約500km、幅約200kmにおよぶ我が国観測史上最大の地震であり、地震そのものによる被害とそのあとに続いた大津波によって甚大な被害をもたらした。特に津波は場所により波高10m以上、遡上高は40.5m[1]の規模に及び、津波によって破損した福島第一原子力発電所は今も停止状態での冷却作業などが続けられている。

このような津波被害を受けた被災地の復興支援活動は現在も行われているが、津波被害のあった土地を今後どのように復興していくかについては特に活発な議論が進められている。また今回の津波で被害を受けなかった沿岸地域に関しても、震災を機に津波による建物の被害や避難の方法などについての検討が進められており、津波避難リスクを正しく評価することの必要性というものは高まってきている。

そこで本報告では、調査対象地を今回の地震による津波で甚大な被害を受けた宮城県名取市閉上地区（図3）とし、ETA（Event tree Analysis）と呼ばれるイベントツリー解析の手法を用いて津波発生から避難行動成功までのプロセスを分析し、津波避難のリスク評価を行うことを提案する。

またこの地区は、名取市による復興計画案の中で市街地を残すという方向で検討が進められており、名取市震災復興計画（素案）[2]の中で複数の再建案が提案されている。この復興計画ではA、B、Cの3つの再建案が示されているが、このうちA案（図1）とC案（図2）については津波被害シミュレーションの結果も公表されている。このため、A案とC案のそれぞれの再建案についても同様に津波避難リスクの解析を行い、その安全性を評価する。

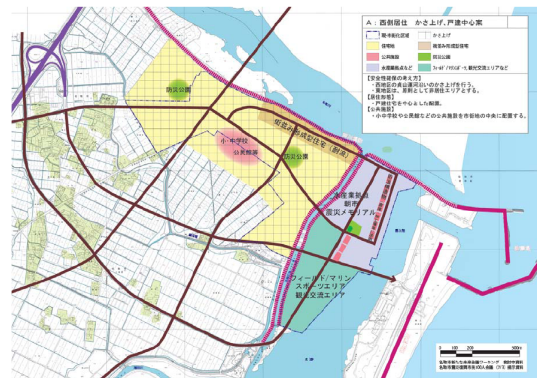


図1: 閉上地区再建案 A

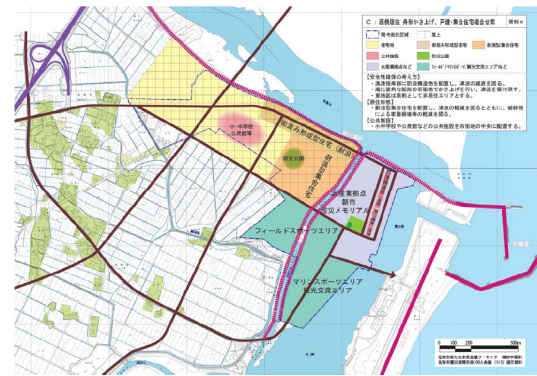


図2: 閉上地区再建案 C

2 閉上について

閉上は江戸時代から栄える閉上漁港の港町として位置づけられ、また日本一とも評価されるアカガイの産地でもある。仙台空港からの立地の良さと、貞山運河や広浦、ゆりあげ港朝市、ゆりあげビーチなどの観光、交流場所が多く存在することから、名取市民をはじめ隣接市町から多くの人々が閉上を訪れており、このため閉上地区は名取市の中でも重要な地区だと言える。

閉上地区の津波による被害は甚大で、閉上の全域が

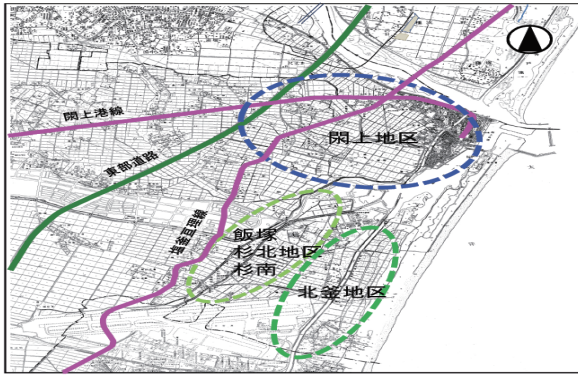


図 3: 名取市における閉上の位置関係

浸水し、域内の家屋はほとんど流失・損壊した。死者・行方不明者数はおよそ 600 人にのぼり、これは 2 月末時点での閉上地区の人口の 1 割以上にあたる。名取市全体の死者・行方不明者数がおおよそ 1000 人であることと比較すると、閉上地区は名取市の中で最も大きな被害を受けていることがわかる。また破壊跡から推定される浸水深は最大 8.5m[3]であったという報告からも、閉上地区に來襲した津波がどれほど大きかったかを推し量ることが出来るだろう。

閉上地区のある名取市内には、下増田地区沿岸部のように防災集団移転促進事業による移転が検討されている地域も存在する。しかし閉上という土地の歴史や地域特性から、この地区に関しては地区住民の早期の再建や財産の保全を前提に、現在の位置での被災市街地復興土地画整理事業による再建を基本として検討が進められている。

3 先行研究

3.1 マルチエージェントシステムを用いた津波避難シミュレーションモデルの開発

渡辺らはマルチエージェントシステムを用いてエージェントの属性設定から行動の把握まで行える津波避難予測モデルを開発した[4]。エージェントとは避難者の事を指し、属性とは避難に関わる要因のことを指す。具体的には、避難開始時間や歩行速度、避難警報発令の有無、避難地までの避難経路等が挙げられる。

この研究において、地震発生から避難完了までの避難行動についてモデル化を行っている(図4)。津波による人的被害を評価する上で、重要となる人的要因や避難者の津波避難行動に関わる要因の詳細化という点で本報告にとって有用であると考えられる。

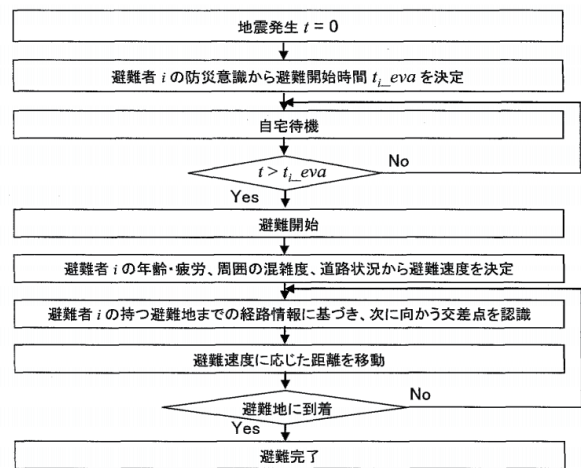


図 4: 避難行動の流れ

3.2 津波による人的及び建物被害評価手法

越村らは津波被害想定指標としての津波被害関数の概念とその構築手法を提案した[5]。津波被害関数とは、津波による建物被害や人的被害の程度の被害率(または死亡率)として確率的に表現し、津波浸水深、流速、波力など津波の流体力学的なパラメータを関数として記述するものである。浸水深別建物被害関数を図5に、浸水深別人的被害関数を図6に示す。図5における P_D は建物被害率を表す。

本報告において、越村らの被害関数を用いて建物被害及び人的被害について評価を行った。

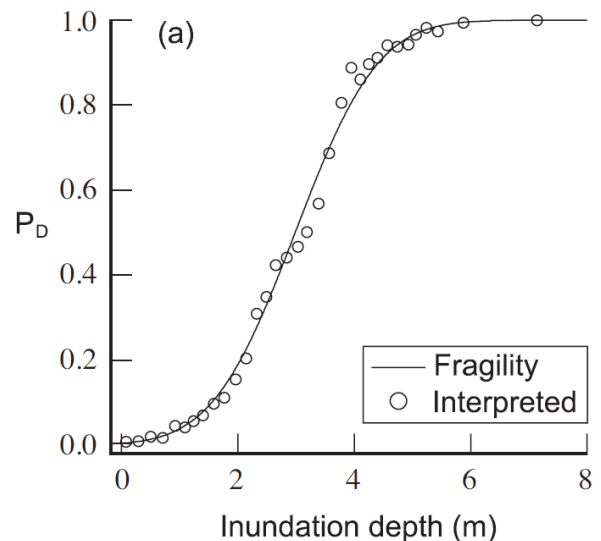


図 5: 浸水深別建物被害関数

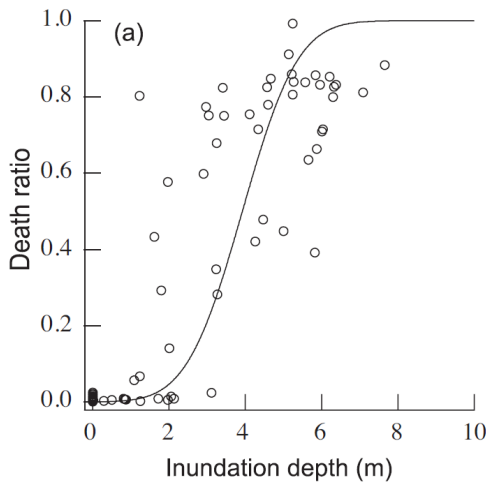


図 6: 浸水深別人的被害関数

4 津波による被害評価

4.1 被害関数による建物及び人的被害評価

建物被害関数及び人的被害関数 [5] を用いて、津波による建物被害及び人的被害について評価を行った。閉上地区を対象とし、東日本大震災津波襲来前、復興案 A、復興案 C について襲来する津波のレベルに応じて評価を行った。津波レベルとして 2 つのレベルを設定した。1 つは数十年から百数十年に 1 度の津波を対象とし、人命及び資産を守るレベル（以下、津波防護レベル）、もう一つは津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル（以下、津波減災レベル）である [6]。2011 年 3 月に発生した東日本大震災津波は津波減災レベルに相当する。本報告における被害評価のための詳細なパラメータ設定や条件については 5 章で述べる。

4.2 ETA による人的被害評価

ETA（イベントツリー解析）とは安全性解析やリスクアセスメントで用いられる手法である。ある故障や事故（原因）の発生（初期事象）を想定し、引き続き発生すると予想される事象（対策など）の確率を割り当てることで、その故障や事故の結果（中間事象・最終事象）に至る過程と発生確率を明らかにするものである。

本報告では津波発生から避難行動成功の可否までのプロセスをイベントツリーで構築し、東日本大震災津波の条件の元、人的被害評価を行った。

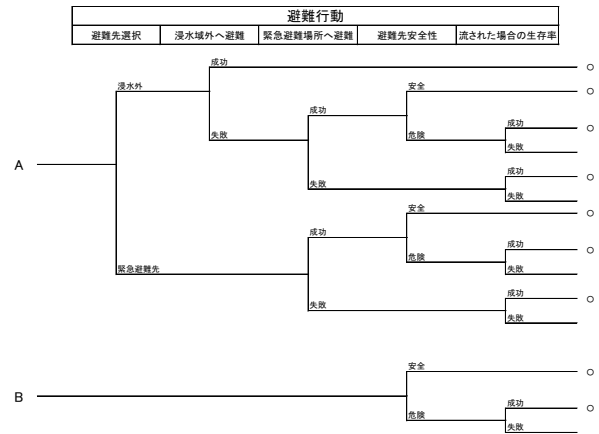
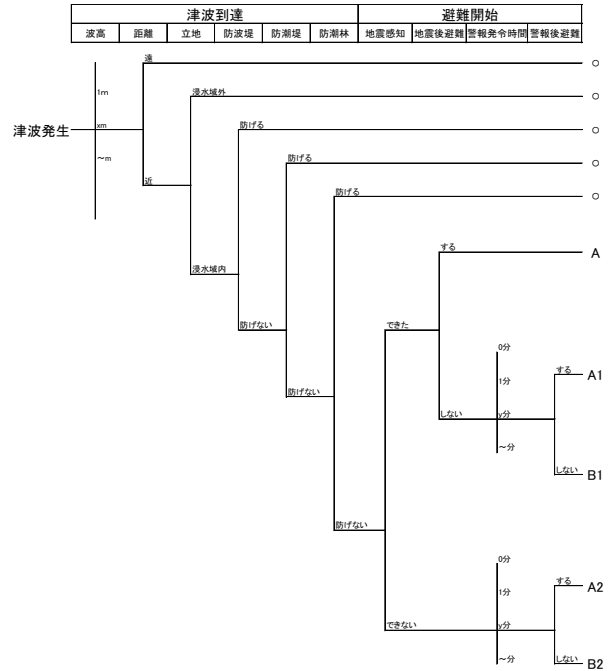


図 7: イベントツリー作成モデル

イベントツリー作成手順を以下に示す。また実際に作成したイベントツリーを図 7 に示す。

・イベントツリー作成手順

(1) 対象範囲の定義

閉上地区を対象とし東日本大震災津波における人的被害を対象範囲とする。

(2) 初期事象の定義

津波の発生を初期事象とする。

(3) 対応（防護機能・行動）の定義

防護機能として防波堤，防潮堤，防潮林を想定する。また、避難行動を以下のように定義している。地震感知や津波警報に従い、津波到達前に浸水エリア外や高台等に避難することを前提とし、それが困難な場合は緊急避難場所に避難するものとする。

(4) 事故のシナリオの定義

事故のシナリオの定義とは、初期事象から最終事象

までに発生する過程の事象を，事故の流れに沿って明確化することである．本報告におけるシナリオの定義を表 1 に示す．

表 1: 事故シナリオの定義

(I) 津波到達	(II) 避難開始	(III) 避難行動
波高	地震感知	避難先選択
距離	地震後避難	浸水域外避難
立地	警報発令時間	緊急避難
防波堤	警報後避難	避難先安全性
防潮堤		生存率
防潮林		

5 津波被害評価のための条件設定とその評価

5.1 被害関数による被害評価手法

本報告では，被害関数を用いて津波被害を評価するために以下のように条件を設定した．

家屋，人口分布については津波被害前の場合は丁目別の人口，世帯数，家屋が，各丁目内に平均的に分布すると仮定した．また，復興案 A，復興案 C の場合は，津波被害前の人口，世帯数，家屋を保つと仮定し，A 案においては対象地域全体に平均的に分布するとした．C 案においては，対象地域内に戸建住宅と集合住宅が存在するが，戸建を想定する区画では A 案と同じ人口密度，世帯密度とし，残りはすべて集合住宅に居住すると仮定した．

本報告では津波減災レベルの津波で 3 つ全ての都市設計の場合，津波防護レベルで C 案の場合の被害評価を行った．名取市新たな未来会議により想定された浸水深を図 8 に示す [7]．分析に使用する浸水深を図 8 のシミュレーションより読み取った．

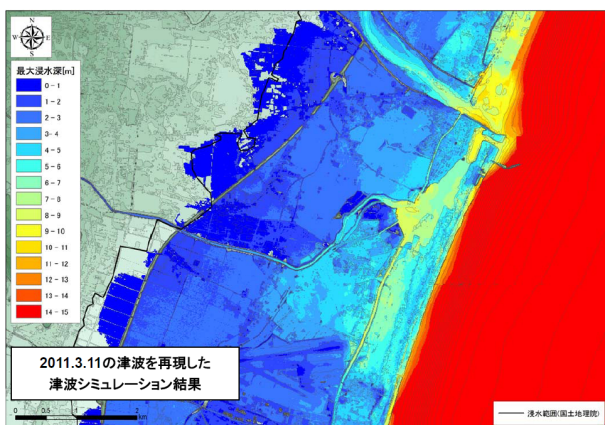


図 8: 2011.3.11 の津波を再現したシミュレーション

5.2 ETA による被害評価手法

今回作成した津波の人的被害を求めるイベントツリーの各要素において成功，失敗を振り分ける値の設定を行った．まず，津波到達のブロックでは，今回はシミュレーションによる予測より，津波が到達するであろうことが明らかであるので，すべて失敗とした．次に避難開始までのブロックでは，地震感知率は名取市が震度 6 強を観測したことから 100%とした．地震後避難および警報後避難の割合は仙台市若林区におけるアンケートより設定を行った [8]．設定値を表 2 に示す．津波警報にかかる時間は気象庁の目標値より 3 分とした．

表 2: 避難開始状況

	地震発生後	警報発令後	避難しない
避難率	22.2%	50.6%	27.2%

次に，避難行動のブロックに移る．避難先選択では，避難時に浸水域外と緊急避難先のどちらへ向かうかの割合を設定する．今回は先行研究 [9] を参考に浸水域外を目指す割合が 73.4%，避難所として指定された緊急避難先を目指す割合が 26.6%とした．浸水域外，緊急避難先への避難行動の成否は，想定される避難経路距離，避難速度，避難可能時間の関係より設定を行った．浸水域外は図 8 のシミュレーションから，緊急避難では名取市の津波ハザードマップ [10] から避難目標地点の設定を行い，各丁目からの避難経路距離の設定を行った．避難速度は各調査で設定に幅があったが，今回は個人情報や道路状況に関わらず徒歩で移動し 50m/分と設定した．避難可能時間は津波到達時間 [11] から警報発令時間と避難準備時間 (15 分) を避難のタイミングごとに差し引いた時間とした．これらの値より，避難行動の成否を以下の関係式の値の正負より求めた．

$$(\text{避難経路距離}) - (\text{避難速度}) \times (\text{避難可能時間})$$

値が正の場合：避難失敗

値が負の場合：避難成功

緊急避難先の安全性は先行研究 [12] より，避難しなかった場合の建物の被害率及び被害率はそれぞれの被害関数 [5] より浸水深別に設定を行った．

設定した各値をイベントツリーに導入し，津波被害前の都市設計，津波減災レベルの津波の場合において丁目別に計算を行った．実際の被害率との相関図を図 9 に示す．また，死者数の比較を図 10 に示す．

浸水深の読み取りは図 8 より行ったが，1m あたりの色彩の変化が小さく読み取りに誤差が生じた可能性

がある。また、内陸部では、試算した被害率は実際より低い傾向が見られた。これは、避難率を対象地全体で一様と設定したが、実際には内陸部の方が海岸地域より避難率が低くなるためと考えられる。閉上地域全体の被害は実際には死者 590 名、被害率 11.6%、今回の試算では死者 578 名、被害率 11.4%と非常に近い値が得られた。しかし、これは個々の結果の誤差が結果的に打ち消されたことによるものであるため、必ずしも今回の試算が正確であることを示さない。

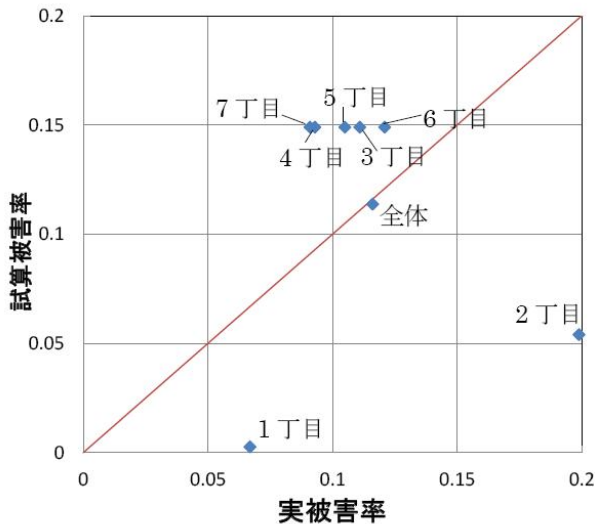


図 9: 被害率相関

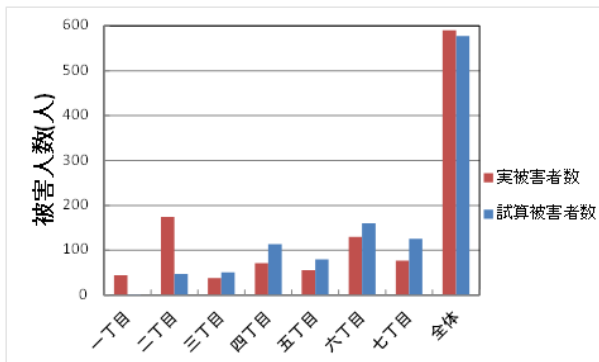


図 10: 丁目別死者数

5.3 津波被害評価～都市設計別比較～

復興案 A と復興案 C において、津波減災レベルの津波の場合の建物被害及び人的被害の評価を行った。

各復興計画において町の区画が変わるため、対象地域全体において被害を評価した。

浸水深別に被害関数による被害率 [5] を求め、想定される浸水面積と住宅密度から被害建物数を算出した。結果を表 3 に示す。

また、浸水深別に ETA による被害率を求め、想定される浸水面積と人口密度から死者数を算出した。結果を表 4 に示す。

表 3: 建物被害評価結果

	建物被害数 (戸)	被害率 (%)
実被害	1518	83.133
津波被害前	1258	68.894
A 案	93	5.093
C 案	19	1.040

表 4: 人的被害評価結果

	死者数 (人)	被害率 (%)
実被害	590	11.619
津波被害前	578	11.382
A 案	2.66	0.053
C 案	2.12	0.042

A 案、C 案ともに被害が大きく減少する結果となった。これは、居住区域の浸水深が A 案、C 案とも 2m 以下に抑えられたためと考えられる。浸水深 2m 以下においては図 5 に示される建物被害関数、および人的被害関数の値は小さく、被害率は小さくなった。しかし、図 5 より、浸水深が 2m 程度となった場合でも高い被害率となった場合も存在するため、実際に津波が襲った場合、被害率は高くなる可能性がある。

また、都市設計 C 案、津波防護レベルの津波の場合の想定を行った。このとき、津波は居住区域まで浸水しなかったため、被害は出なかった。

5.4 既存手法との比較

津波による人的被害の評価手法は複数提案されている。中央防災会議による手法 [13] では、被災可能性のある地域の人口、シミュレーションによって求められた避難未完了率、浸水深別死者率の積によって死者数の評価を行っている。津波減災レベルの津波を想定し、この手法を用いて評価を行った場合、避難未完了率 100%としても被害率は 6.6%程度と予想される。これは、用いている浸水深別死者率 (1993 年北海道南西沖地震の被害率より設定) の値が小さいためと考えられる。

6 おわりに

本報告では、宮城県名取市閉上地区における津波避難のリスク評価を行った。まず ETA の手法を用いてイベントツリーを作成し、そして津波被害関数とイベントツリーの 2 つの手法を用いて東日本大震災の被害

についての解析を行った。次に、名取市が提案している閑上地区の復興案についての津波避難リスクを上記2つの手法を用いて解析した。

東日本大震災の被害については、誤差は考えられるものの閑上地域全体の実際の被害率が11.6%、今回の試算での被害率11.4%と非常に近い値が得られた。

復興案における津波被害リスクは、A案、C案ともに実際の被害、津波被害前の地区構成における被害予想と比べて、大きく減少する結果となった。

本報告では閑上地区の津波被害リスクについてのみ解析を行ったが、今後は今回作成したイベントツリーを用いての他地域についての解析も行いたい。

参考文献

- [1] 日本気象協会，平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震津波の概要（第3報），2011。
<http://www.jwa.or.jp/static/topics/20110422/tsunamigaiyou3.pdf>
- [2] 名取市，名取市震災復興計画（素案），2011。
http://www.city.natori.miyagi.jp/fukukoukeikaku/node_13257/node_13656
- [3] 名取市未来会議，第1回名取市新たな未来会議資料，2011。
<http://www.city.natori.miyagi.jp/content/download/10235/65355/file/H23.5.22siryou.pdf>
- [4] 渡辺公次郎，近藤光男：津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シュミレーションモデルの開発，日本建築学会計画系論文集，vol74，pp.627-634，2009。
- [5] 越村俊一，行谷祐一，柳澤英明：津波被害関数の構築，土木学会論文集B，vol65，No4，pp320-331。
- [6] 津波特定テーマ委員会「津波特定テーマ委員会第2回報告会（2011.6.13）資料」，土木学会，2011。
http://committees.jsce.or.jp/2011quake/system/files/110613_tsunami.pdf
- [7] 名取市新たな未来会議「第五回名取市新たな未来会議 資料」，名取市，2011。
<http://www.city.natori.miyagi.jp/content/download/10895/69264/file/shiryou5.pdf>
- [8] 早川哲史，今村文彦「地震・津波災害時における住民の避難行動と危険認識に関する研究」，土木学会第57回年次学術講演会 IV-30，2002。
- [9] 仙台市消防局防災安全課「チリ大地震による津波避難アンケート報告書」，仙台市，2010。
http://www.city.sendai.jp/kurashi/shobo/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2011/02/01/report.pdf
- [10] 宮城県防災砂防課「名取市津波浸水予測マップ」，宮城県，2005。
<http://www.pref.miyagi.jp/sabomizusi/bousai/bou-ht2.html>
- [11] 宮城県危機対策課「宮城県第三次地震被害想定調査報告書」，宮城県，2011。
http://www.pref.miyagi.jp/kikitaisaku/jishin_chishiki/3higaishin/sanzihigaitop.htm
- [12] US Army Corps of Engineers, *Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System*, Draft Final report of the Interagency Performance Evaluation Task Force, 2006。
- [13] 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る被害想定手法について」，中央防災会議，2006。
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/17/siryou1.pdf>