

津波推計・減災検討委員会報告書

平成24年6月

公益社団法人 土木学会

序

2011年3月11日（金）14時46分、三陸沖近海でマグニチュード9.0というわが国の歴史上最大の地震が発生し、それによって大規模な津波が東北地方から関東地方を襲った。強くかつ継続時間の長い揺れは、直接的には地盤の液状化や斜面崩壊等を広範囲にもたらしたが、人命の喪失という点では、津波によるものが圧倒的で、亡くなられた方は1万5856名、行方不明の方は3070名と報じられている。津波の高さや溯上高さは、2万6360人の犠牲者を出した明治三陸地震（1896年）による津波の規模を上回った地域が多い。

これまでの津波被害と大きく異なった点は、福島第一原子力発電所が非常用電源を喪失し、冷却機能を失って多量の放射性物質を放出したことである。幸い、放射能による人的被害はまだ報告されていないが、30万人以上の住民が1年後の今もまだ避難生活を続けており、生鮮食料品に放射能汚染による出荷停止も生じていて、社会的には甚大な影響を残している。

発電所を襲った津波は高さ10mの防波堤を乗り越えていて、東京電力が想定し対策していた津波高さを超えるものであった。想定津波高さは、2002年に土木学会から刊行された「原子力発電所の津波評価技術」によっており、この報告書作成に電力関係者が多数加わっているという理由で、報告書の第三者性が疑わしいとの批判が報道やインターネット上に見られた。

直ちに、学会長は報告書の内容および土木学会の役割に関する声明を発し、一応の収まりを見せたが、土木学会から積極的に情報発信することの必要性を強く感じた。想定する震源の規模により得られる想定津波高さは異なるものの、報告書に示されている津波評価技術は一般性があり、その普及を図る必要がある。さらに、今回の被災を教訓として、設計時の想定を超えた場合について明確で合理的な対策を検討しておく必要がある。そのために、津波推計・減災検討委員会を設置することとし、調査研究委員会の中で関係する19の委員会に参加を呼びかけた。順不同であるが、研究企画委員会、コンクリート委員会、水工学委員会、構造工学委員会、鋼構造委員会、海岸工学委員会、地震工学委員会、原子力土木委員会、海洋開発委員会、情報利用技術委員会、エネルギー委員会、建設技術研究委員会、地盤工学委員会、都市計画学研究委員会、土木史研究委員会、コンサルタント委員会、安全問題研究委員会、地球環境委員会、複合構造委員会の全ての委員会から参加いただき、昨年8月末に第1回委員会を開催した。

本年3月末までの7カ月程度で委員会のミッションを果たすために、主として幹事会で検討方針、資料収集等を積極的に行い、途中経過を全委員にメールで配信した。間瀬 肇副委員長（京都大学教授）、小長井一男幹事長（東京大学教授）、当麻委員兼幹事（電力中央研究所）をはじめとする幹事会のメンバーの献身的な努力により、短期間で議論の方向が定まり、報告書作成にたどり着いた。第2回委員会は1月上旬に開催して報告書の具体的内容の審議をし、3月下旬に第3回委員会で最終的なとりまとめの議論を行い、委員会の当初の目的をほぼ達成することができた。

本年3月5、6日には、土木学会震災特別委員会によるシンポジウムが開催された。その中のパレルセッションの一つとして、本委員会も津波水位推計技術に関する基調講演、6名のパネリストによるパネルディカッションを行い、成果の一部を報告した。

本委員会の議論を通じて、新たに「耐災」という概念を創出できたことに、委員長として役目が果たせたという思いがあり、委員および幹事の皆様に深く感謝いたします。

平成24年6月

津波推計・減災検討委員会委員長 丸山久一

津波推計・減災検討委員会 構成

委員長	丸山 久一	長岡技術科学大学
副委員長	間瀬 肇	京都大学 防災研究所
幹事長	小長井一男	東京大学
委員	家田 仁	東京大学
委員	今村 文彦	東北大学
委員	小川 篤生	西日本高速道路エンジニアリング関西 (株)
委員	菊池 喜昭	東京理科大学
委員	佐伯 光昭	(株)エイト日本技術開発
委員	坂本 俊一	清水建設(株)
委員	篠原 修	GS デザイン会議事務局
委員	柴山 知也	早稲田大学
委員	杉浦 邦征	京都大学
委員	高島 賢二	(独)原子力安全基盤機構
委員	高橋 清	北見工業大学
委員	寶 馨	京都大学 防災研究所
委員	中山 隆弘	広島工業大学
委員	二羽淳一郎	東京工業大学
委員	睦好 宏史	埼玉大学
委員	矢吹 信喜	大阪大学
委員	山田 正	中央大学
委員兼幹事	当麻 純一	(一財)電力中央研究所
幹事	有川 太郎	(独)港湾空港技術研究所
幹事	大友 敬三	(一財)電力中央研究所
幹事	谷村 幸裕	(公財)鉄道総合技術研究所
幹事	松山 昌史	(一財)電力中央研究所
オブザーバー	大西 博文	(公社)土木学会
オブザーバー	古木 守靖	(公社)土木学会
委員会顧問	首藤 伸夫	東北大学

津波推計・減災検討委員会報告書執筆者

章・節	執筆者
第1章 巨大津波被害の実態と教訓	有川 太郎
第2章 地震津波による水位推計手法	松山 昌史
第3章 津波に対する耐災の考え方	—
3.1 概説	丸山 久一
3.2 外的事象	
3.2.1 津波レベル	
3.2.2 耐災レベル2の外的事象で津波以外に考慮すべき条件	—
a. 津波と高潮の同時生起および極端高潮の推定法	間瀬 肇
b. 地殻変動による沈下，液状化・そのほかの要因による沈下	小長井一男
3.3 各種施設，システムにおける機能・安全確保	—
3.3.1 防波堤・防潮堤・堤防	有川 太郎
3.3.2 発電所	当麻 純一
3.3.3 橋梁構造物	丸山 久一
3.3.4 交通システム	—
a. 高速道路	青木 圭一
b. 鉄道	谷村 幸裕
3.3.5 ライフライン施設の津波対策のあり方	能島 暢呂
第4章 津波の減災方策に関する中・長期的戦略の構築への課題	—
4.1 概説	佐伯 光昭
4.2 「災害」と「減災」	
4.3 「減災」達成へのアプローチ	
4.4 地域BCP	—
4.4.1 BCPの全体像—東日本大震災の教訓を踏まえ—	指田 朝久
4.4.2 地域BCP実装，実践にあたっての手順	古木 守靖
4.4.3 地域BCPに対する土木学会の取組み	井上 晋一
4.5 監視・情報提供体制	—
4.5.1 津波時の情報伝達の課題と解決策	山田 晴利
4.5.2 津波警報の改善に向けての気象庁の取組み	尾崎 友亮
4.6 学会の貢献	小長井一男

目 次

序	i
津波推計・減災検討委員会 構成	iii
津波推計・減災検討委員会報告書執筆者	iv
第1章 巨大津波被害の実態と教訓 1	
1.1 被害の概要	1
1.1.1 今回の津波とその災禍の特徴	1
1.1.2 沿岸防護施設の被害	4
a. 被害の全体状況	4
b. 海岸堤防	4
c. 防波堤	7
1.1.3 背後地域の建物被害	8
a. 概 要	8
b. コンクリート建物の被害	9
1.2 想定と実際の乖離	11
1.3 避難行動	13
1.4 事後対応	14
1.4.1 復興に向けて配慮すべき事項	14
a. 地域の津波防災計画で対象とする津波減災レベルの設定法について	14
b. 地域の津波対策：多重的な津波防護機能	14
c. 防災計画の策定	15
1.4.2 各市町村の具体的な動き	15
1.5 まとめと教訓	16
第2章 地震津波による水位推計手法 19	
2.1 推計手順	19
2.2 津波の設定方法（入力条件）	20
2.3 数値計算手法	21
2.3.1 基本事項	21
2.3.2 数値計算モデルの選択	22
a. 基礎方程式	22
(i) 線形長波理論	22
(ii) 非線形長波理論（浅水理論）	22

(iii) 分散波理論	22
b. 近海伝播を対象とした基礎方程式と計算スキーム	2
c. 遠方海域からの伝播を対象とした基礎方程式と計算スキーム	22
2.3.3 入力条件	23
a. 海底面の鉛直変位分布	23
b. 変位の継続時間	23
c. 入力条件の設定	23
2.3.4 境界条件	23
a. 沖側境界条件	23
(i) 計算領域内から領域外へ向かう波が存在する場合の境界条件	23
(ii) 近海での沖側境界から波を入射する方法	24
b. 陸側境界条件	24
(i) 完全反射条件	24
(ii) 陸上遡上境界条件	24
c. 越流境界条件	24
(i) 防波堤等を格子の地盤高で表現する場合	24
(ii) 防波堤等を格子間の境界で表現する場合	25
2.3.5 計算領域および空間格子間隔	25
a. 空間格子間隔	25
(i) 波源域	26
(ii) 伝播過程における海域	26
(iii) 評価地点周辺の海域	26
(iv) 遡上域	26
b. 空間格子間隔の異なる部分領域の結合	26
2.3.6 時間格子間隔の設定	26
2.3.7 地形データ	27
a. 水深データ	27
b. 遡上域地形データ	27
c. 過去の地形データ	27
2.3.8 諸係数等	27
a. 摩擦項に関する係数	27
b. 渦動粘性係数	27
c. 津波先端に関する水深	28
2.3.9 再現時間	28
2.3.10 断層モデルの適合度の評価	28
a. 相田による幾何平均 K , 幾何標準偏差 κ	28
b. 適合度の目安	29
c. 留意事項	29
2.4 数値解析事例	30

第3章 津波に対する耐災の考え方 35

3.1 概 説	35
3.2 外的事象	37
3.2.1 津波レベル	37
a. レベル1（防護レベル）津波	37
b. レベル2（避難レベル）津波	37
3.2.2 耐災レベル2の外的事象で津波以外に考慮すべき条件	38
a. 津波と高潮の同時生起および極端高潮の推定法	38
(i) 津波・高潮の同時生起シナリオ	38
(ii) 同時生起確率の目安	39
(iii) 東北太平洋沖地震津波後の高潮の影響（時間差が大きい同時発生）	39
(iv) 計画潮位の設定法	39
(v) 地球温暖化も考慮した極端高潮の推定法	40
b. 地殻変動による沈下，液状化・そのほかの要因による沈下	43
(i) 地殻変動による沈下	43
(ii) 液状化による沈下	44
(iii) 長期に進行する沈下	46
3.3 各種施設，システムにおける機能・安全確保	48
3.3.1 防波堤・防潮堤・堤防	48
a. 東日本大震災における防波堤・防潮堤等の変形・破壊メカニズム	48
b. 津波に対する粘り強さに対する基本的な考え方	49
c. 粘り強い構造の一例	49
d. 今後の課題	50
3.3.2 発 電 所	50
a. 火力発電所の津波安全	50
(i) 津波被害の概要	50
(ii) 今後の津波対策のあり方	51
b. 原子力発電所の津波安全	52
(i) 津波被害の概要	52
(ii) 今後の津波対策のあり方	54
(iii) 土木学会「原子力発電所の津波評価技術」の改訂動向	55
3.3.3 橋梁構造物	56
a. 耐 震 性 能	56
b. 耐津波性能	57
3.3.4 交通システム	58
a. 高 速 道 路	58
(i) 高速道路における津波被災とその現状	58
(ii) 高速道路の対災のあり方	59
(iii) 高速道路の対災目標	59

b. 鉄道	60
(i) 鉄道における津波被災	60
(ii) 鉄道における津波対策のあり方	61
3.3.5 ライフライン施設の津波対策のあり方	62
a. ライフライン施設の津波対策の必要性	62
b. 多様な津波作用に対する対策の必要性	63
c. ライフライン施設の津波対策の具体的方策	63
(i) 移設等の津波回避の措置による被害の防止軽減策	64
(ii) 波力・浮力・漂流物による被害の防止軽減策	64
(iii) 浸水・水没・洗掘による被害の防止軽減策	64
(iv) バックアップによる機能維持対策	64
(v) 事業・業務継続支援の観点に基づく早期復旧対策	64
第4章 津波の減災方策に関する中・長期的戦略の構築への課題	67
4.1 概説	67
4.2 「災害」と「減災」	67
4.2.1 「災害」の定義と「減災」の意義について	67
4.2.2 「減災論」の系譜	69
4.3 「減災」達成へのアプローチ	71
4.3.1 総合的な減災マネジメント・システムの構築と展開方策	71
4.3.2 行政の施策・事業への反映—「地域防災計画」への導入	75
4.3.3 「減災」の概念と“未曾有”や“想定外”への対応の考え方	76
4.4 地域BCP	79
4.4.1 BCPの全体像—東日本大震災の教訓を踏まえ—	79
a. 被害想定のあるあり方	79
b. 想定内と想定外	80
c. BCPとは	81
(i) 被害を前提とする	82
(ii) 重要業務を絞り込む	82
(iii) 目標復旧時間を設定する	82
(iv) 早期復旧戦略と代替戦略の双方を持つ	83
d. BCP的発想による地域の継続	84
(i) 地域として備えるべき災害を決定する	84
(ii) 地域として優先順位をつける	84
(iii) 自治体業務のBCPを構築する	84
4.4.2 地域BCP実装, 実践にあたっての手順	85
a. 地域BCPの特質と必要性	85
b. 地域BCPの特質と必要性	86
c. マニュアル作成の実務(研究の提案)	87

(i) BCP 作成事例及び必要最小限の機能に関する聞き取り調査	88
(ii) モデル地域での検証	88
4.4.3 地域 BCP に対する土木学会の取組み	88
a. 土木学会安全問題研究委員会の活動状況	88
(i) 当委員会で主催する「安全討論会」を毎年 11 月頃に土木学会で開催	88
(ii) 安全工学シンポジウムへの参加	89
(iii) 労働災害防止のための安全教育活動の実施	89
(iv) 委員会・小委員会の運営	89
b. BCP 小委員会の設置	89
c. 安全問題研究委員会としての BCP への取組み	89
(i) 安全工学シンポジウムにおけるオーガナイズドセッションの運営	89
(ii) 土木学会全国大会における研究討論会の実施	89
(iii) 安全問題討論会の開催	89
(iv) BCP 小委員会の体制強化	90
d. 今後の課題	90
4.5 監視・情報提供体制	90
4.5.1 津波時の情報伝達の課題と解決策	90
4.5.2 津波警報の改善に向けての気象庁の取組み	92
a. はじめに	92
b. 東北地方太平洋沖地震での津波警報の課題	93
c. 津波警報等の改善策	93
(i) 改善の基本方針	93
(ii) 技術的な改善策	94
(iii) 津波警報の情報文等の改善	94
d. 今後の取組み	97
4.6 学会の貢献	97

第1章 巨大津波被害の実態と教訓

1.1 被害の概要

1.1.1 今回の津波とその災禍の特徴

2011年3月11日午後2時46分頃（日本時間）、三陸沖130km付近において、マグニチュード9.0の巨大地震が発生した。気象庁による震源とすべり量の分布を**図 1.1**に示す。震源の位置は北緯38.1度、東経142.9度、深さは24kmであり、震源域は長さ約450km、幅約200km、すべり量は20～30m程度におよんでいる¹⁾。この地震により引き起こされた津波は我が国の太平洋沿岸の広い範囲に襲来し、特に岩手県や宮城県、福島県を中心とした東日本において甚大な被害を発生させた。2012年5月16日現在で判明している被害者数は死者1万5858人、行方不明者3021人²⁾である。死亡原因別では、岩手県、宮城県、福島県の1万3135体の遺体を対象とした検死結果から1万2143人（92.4%）が溺死であり、圧死等は、578人（4.4%）であった³⁾。これは、8割程度が家屋倒壊等の圧死と判定された阪神・淡路大震災との大きな差であり、津波による死者がいかに多かったかを示すものである。

被災地における復興計画や将来的な防災計画の策定、また他地域での津波防災の再検討を行うためには、津波とその被害の実態を詳細に調べることが必要である。今回は大学や研究機関、行政、民間企業の研究者・技術者によって合同調査グループが編成され⁴⁾⁵⁾、その調査結果は土木学会の情報共有サイトで公開されている⁶⁾。この、合同調査グループの調査結果を基に今回の津波とそのもたらした災禍の特徴を検討した。

図 1.2に地震調査研究推進本部が日本海溝沿いで発生すると想定していた地震の震源域分布を示す⁷⁾。過去に発生した地震を参考に、プレート境界は8個のセグメントに分割されており、このうち宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りのセグメント以外はそれぞれが独立して地震を起こすと考えられていた。しかし、実際には**図 1.1**に示された範囲に断層破壊が進展し、結果として**図 1.2**の三陸沖中部、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖、三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの一部を含めた6個のセグメントが連動して破壊した。このように断層の連動破壊の可能性を過小評価していたため、それを初期条件として考えられていた津波もまた過小評価となっていた。

合同調査グループによる現地調査で判明している各地の津波の高さを**図 1.3**に示す。震源域に近い東北地方では特に高い津波が来襲しており、岩手県宮古市姉吉で最大の38.669m（T.P.基準）が測定されている。東北地方から離れるにしたがい津波は低くなる傾向を示すが、それでも北海道で5m強、関東地方で10m近くに達している。さらに遠方の四国地方でも3m、九州地方では1mを超える津波が来襲しており、今回の津波の影響範囲が極めて広域におよんでいることがわかる。**図 1.4**には、比較のため明治三陸地震津波（1896）、昭和三陸地震津波（1933）の津波痕跡高を示す。これを見ると、宮城県北部・岩手県では、明治三陸地震津波と同程度か少し大きく、その他の場所では、比較にならないくらい大きいことがわかる。

図 1.3では津波の高さを遡上高と浸水高に分けて示している。遡上高とは津波が最高地点に達して止まっ

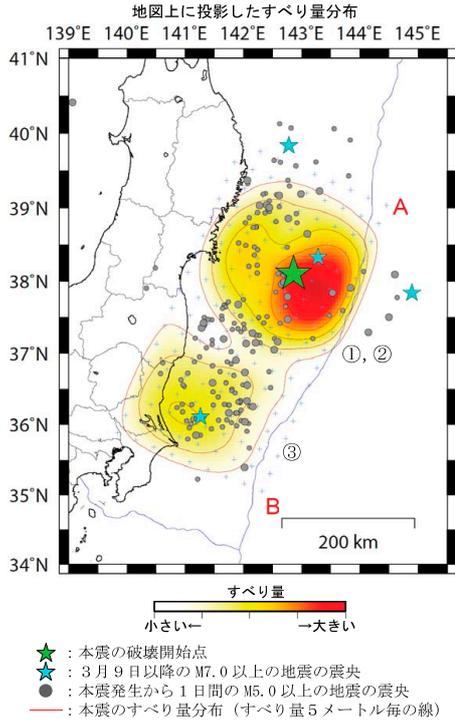


図 1.1 震源とすべり量の分布¹⁾



図 1.2 地震調査研究推進本部が日本海溝沿いで発生すると想定していた地震の分布⁷⁾

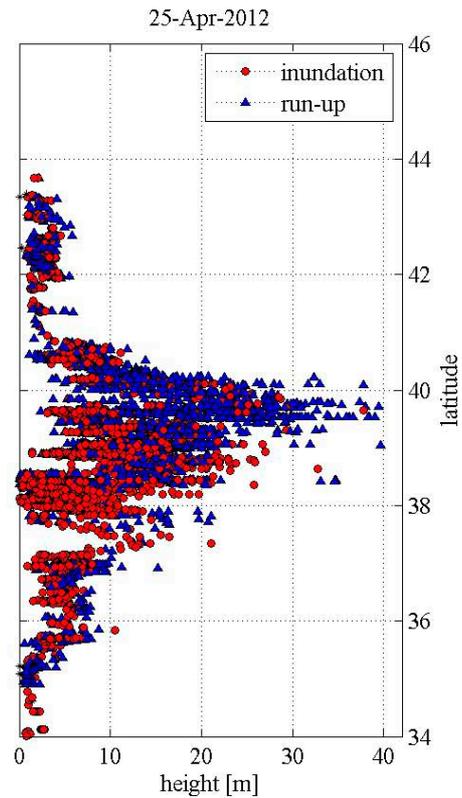
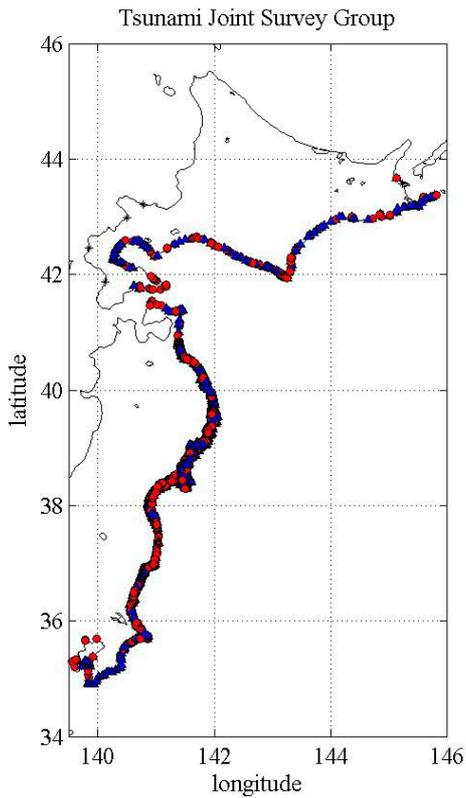


図 1.3 今回の津波^{4),5)}による遡上高 (run-up) と浸水高 (inundation) の比較

た時の高さ、浸水高とは津波が遡上している途中の高さである。遡上高は位置エネルギーのみになった状態であり、浸水高は位置エネルギーと運動エネルギーが混在した状態であるため、一般的には遡上高のほうが

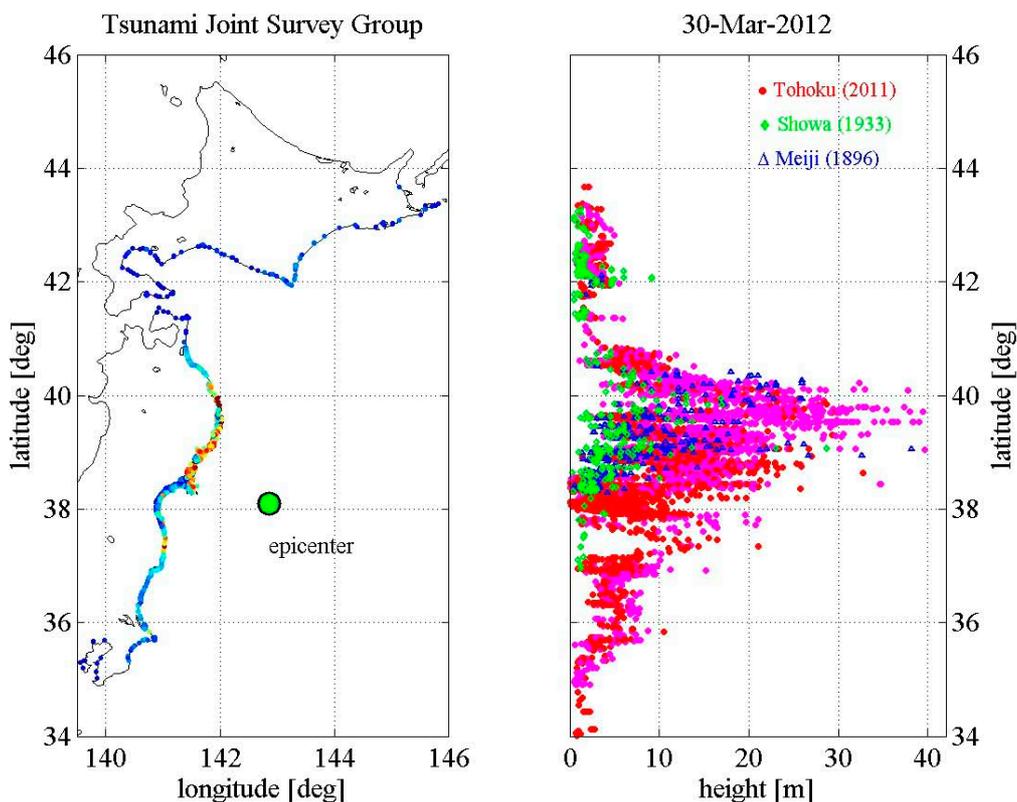


図 1.4 今回の津波^{4),5)}と明治三陸地震津波・昭和三陸地震津波の比較⁸⁾

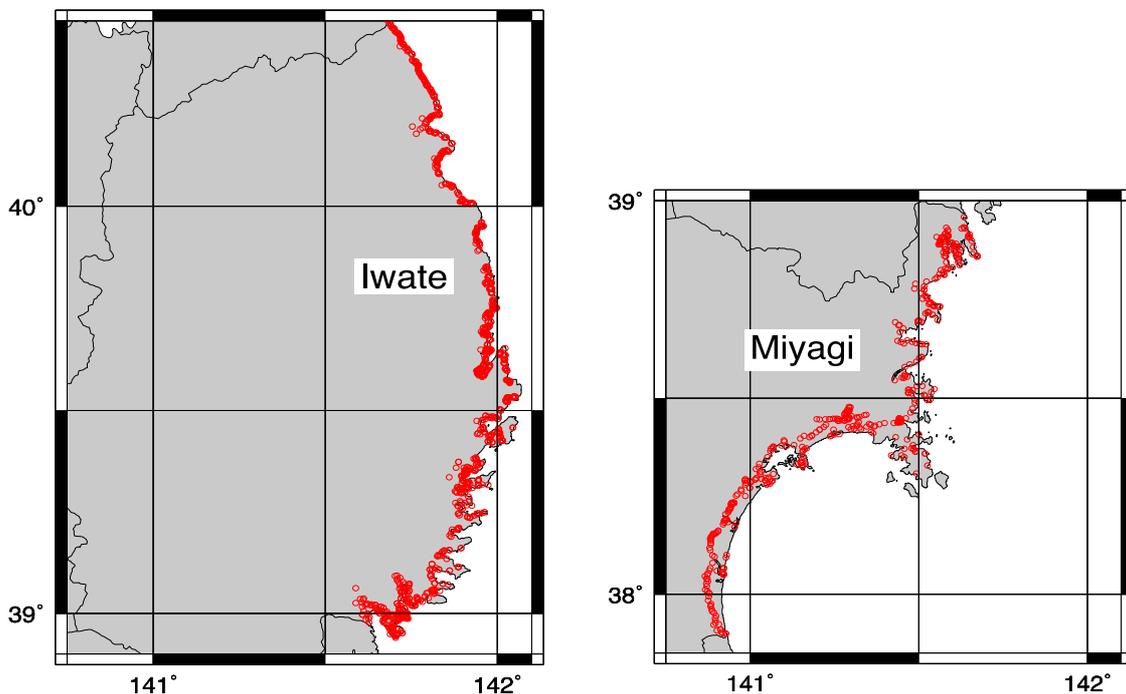


図 1.5 今回の津波^{4),5)}の遡上地点の分布

高くなる。今回の調査結果でも全体的にはそのような傾向を示しているが、地域によっては遡上高のほうが浸水高より低くなっている場合がある。これは遡上距離が長い場合に途中で地面の摩擦等によりエネルギーが逸散した結果であり、平野部でよく見られる。図 1.5 に岩手県と宮城県における遡上地点の分布を示す。岩手県や宮城県の北部ではリアス式海岸が発達しており、すぐ背後に山地がそびえている地域が多いため、

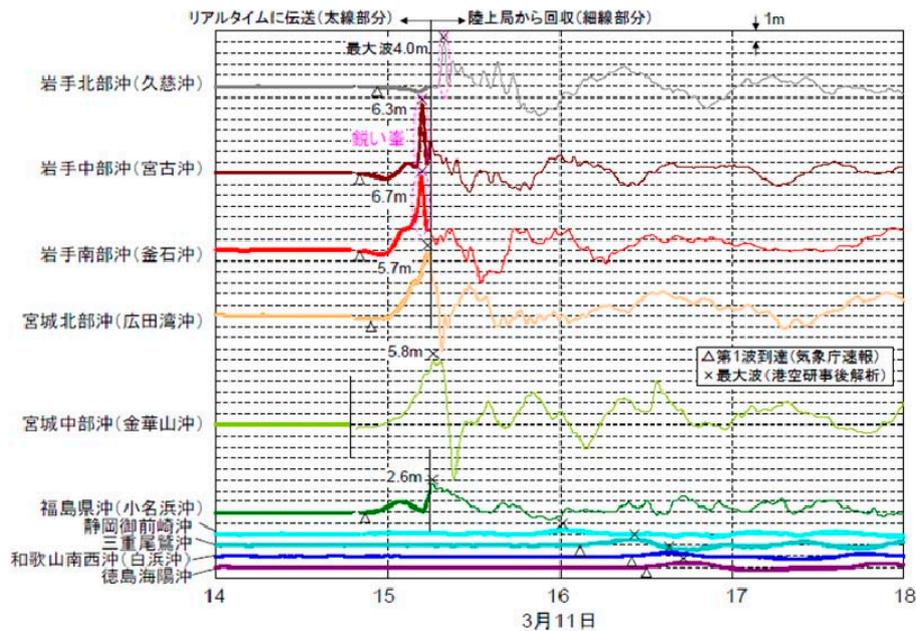


図 1.6 沖側に設置された GPS 波浪計により計測された津波波形

遡上地点は海岸付近に集中している。一方、宮城県南部では平野が発達しているため、遡上地点は海岸から数 km 内陸まで分布しており、広い範囲が浸水したことが分かる。

図 1.6 は、各地の沖側で設置された GPS 波浪計による津波の波形である⁹⁾。これを見ると、釜石付近で最も時刻的に早く津波が到達し、かつ津波も高いことがわかる。福島最大の波も他の場所と同じ程度であることから、地震の発生範囲が非常に広がったことがわかる。

1.1.2 沿岸防護施設の被害

a. 被害の全体状況

沿岸部には、防波堤・防潮堤・海岸堤防・護岸・胸壁等様々な防護施設があり、高潮や高波を防ぐために設計されている。陸域に浸水させないための施設では、高潮や津波に応じた高さで、施設の高さや強さを決めることとなる。そのようななか、設計外力を上回った津波が来襲した場所では、防護施設の多くが倒壊・破壊されていた^{10),11),12)}。被災メカニズムについては定量的にはいまだに不明瞭な点が多いが、共通の課題としては、防護施設を越流した場合の構造物の安定性が十分に検討されていなかったことであろう。したがって、越流時の施設の機能がどのように失われていくかということについて早急に検討することが、今後の防災・減災を考えるうえで急務である。ここでは特に海岸堤防と防波堤について、被災例とメカニズムについて記載する。

b. 海岸堤防

海岸堤防には、様々な構造がある。図 1.7 は、その一例を示しており、主に、中詰め砂等を前面、天端面、背面の 3 方で囲むタイプの傾斜型堤防と、自重により支えられた直立型のタイプにわけられる。

写真 1.1 は、岩手県宮古市田老の堤防の被害の様子を示したものである。田老の堤防は傾斜型堤防であり、前面の堤体の多くが海側に倒れていた^{14),15)}。堤防の天端高さは海面から約 10 m であり、来襲した津波の高さは堤防の前で 15 m から 20 m であった^{11),13)} (図 1.8 参照)。

津波の来襲の様子は上空からも撮影されていたが、堤防を越えて堤内地に浸水し、多くの背後構造物を破

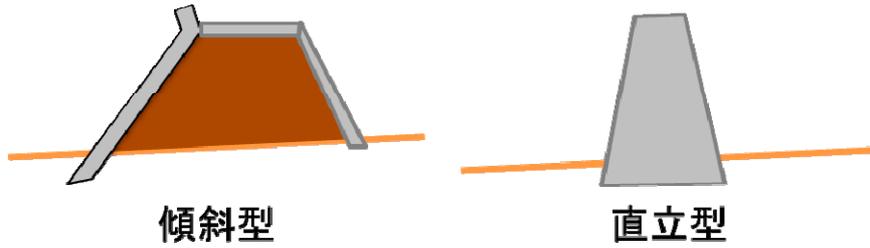


図 1.7 海岸堤防の種類例



写真 1.1 田老の防潮堤（右海側，4月15日撮影）

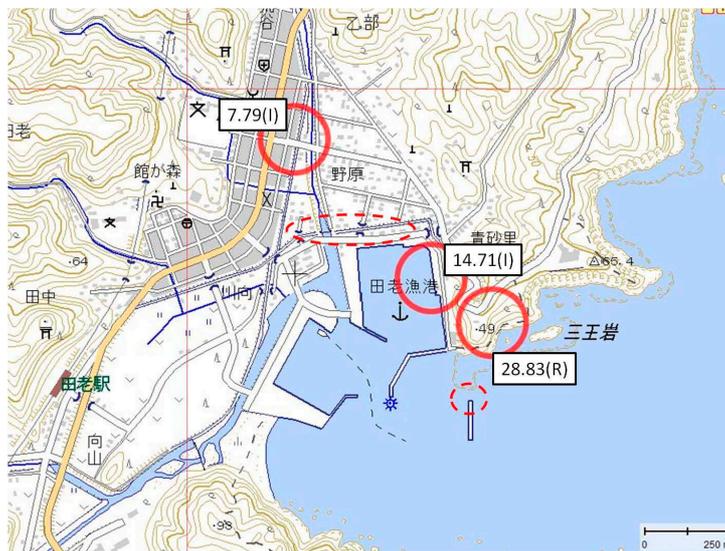


図 1.8 田老町における津波高さ

壊した。越流時の速い流れによりコンクリート版が流されたと考えられるが、長年の土の圧密などの沈下により空洞ができていれば、流れによる土砂の吸い出しやコンクリート版の不陸が発生し、背後のコンクリート版の流出を助長し、被害を大きくしたことが推測される¹⁶⁾。

この時点で前面の壁体だけを残した堤防も、田老町のように背後にすぐ山があるような場所では、背後の陸地への津波の遡上高が大きく、結果として大きくなった引波時の水位差によって、倒壊したのではと推測

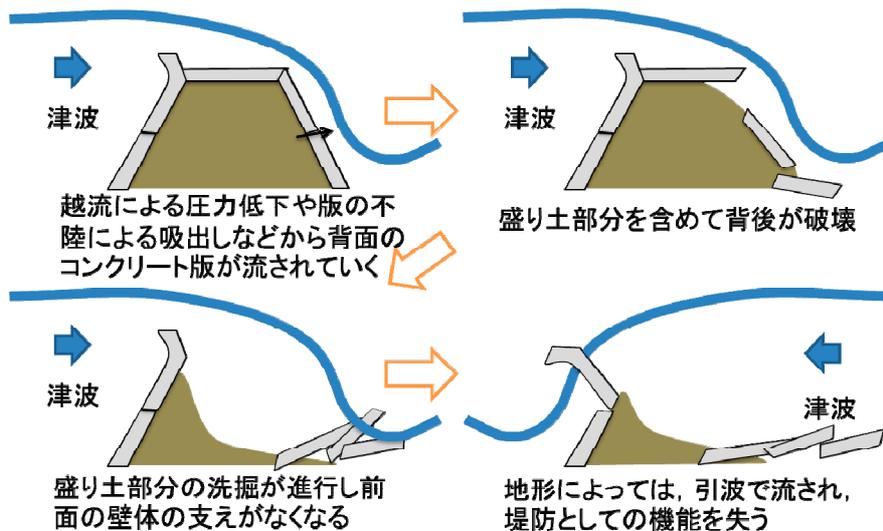


図 1.9 傾斜型堤防の被災メカニズムの一例



写真 1.2 大槌町の堤防被害（左海側，4月8日撮影）

される。図 1.9 に、海岸堤防の津波による被災メカニズムの一例を示す。背後の盛土があるために、一気に破壊されることはないが、津波が越流することにより背後部がまず被災し、やがて引き波によって前面の壁面まで破壊され、完全に堤防としての機能を失うというシナリオである。

写真 1.2 は、岩手県大槌町の直立型海岸堤防の被害である。図 1.10 は、直立型海岸堤防の考えられる被災パターンを示したものである。パターン 1、パターン 2 は押波時に生じるもので、パターン 3 は引波時に生じるものである。パターン 1 は、越流によって陸側の地盤が洗掘され、安定性を失い倒れていくものである。大槌町では、パターン 1 と 2 を組み合わせたような被害になっており、これは、押波時に倒れたと推測される。傾斜型堤防と違って、堤体が転倒すると、堤防としての機能をほぼ消失すると同時に、破堤した場

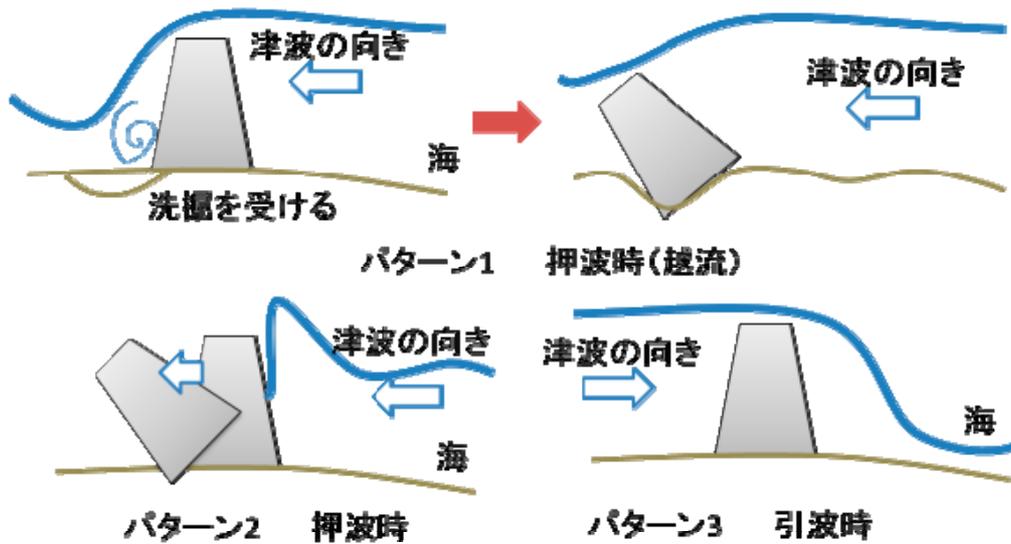


図 1.10 直立型海岸堤防の被災パターン



写真 1.3 釜石湾口防波堤が津波により破壊された様子 (2011年6月20日撮影)

合、ダムの決壊のように堰き止められた水が、勢いを持って背後を襲うことになる。

c. 防波堤

防波堤もかなり破壊された。一般的に津波防波堤は沖側に設置され、湾の中に入ってくる津波の流入を防ぐ効果がある。

写真 1.3 は、釜石にある津波防波堤が、津波により破壊された様子である。もっとも深い場所で水深 63 m もあり、倒れている防波堤は数万トンの重さにもなる。この釜石では防波堤の半分が、津波によってマウンドの下まで流され、残り半分は写真のようにマウンドの上で傾いた状態となった。図 1.11 は、ナローマルチビームを用いた防波堤開口部周辺での深淺測量の結果である。開口部における潜堤や北堤ケーソンがところどころ歯抜けになって落ちている状況が確認できる。

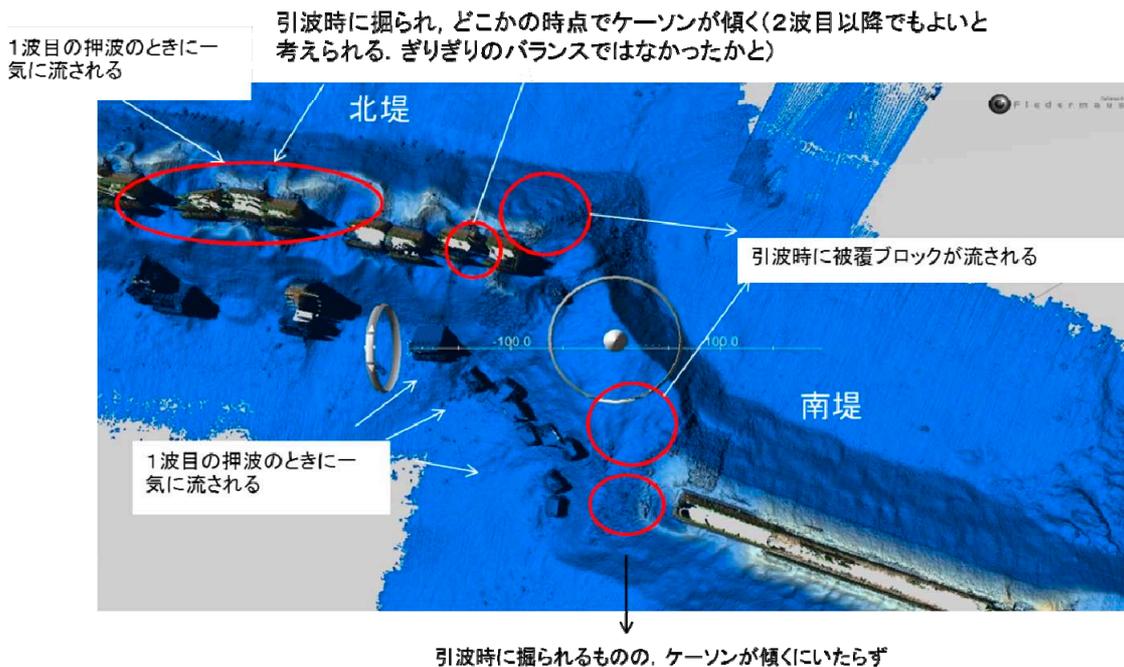


図 1.11 釜石湾口防波堤の開口部周辺における深浅測量結果

マウンドの下まで滑落した防波堤は、津波が防波堤を超え越流が始まったときに防波堤前面と背面の水位差が生じ、そのまま流されたと考えられ、一方、傾いたものは、石積マウンドが津波の流速によって洗掘されたことが原因と考えられる¹⁷⁾。今後は、越流が生じて倒れにくくなるような粘り強い防護施設の技術開発が課題である。

1.1.3 背後地域の建物被害

a. 概要

家屋の被害はもちろんのこと、コンクリートの構造物に対する被害も数多く生じた。

表 1.1 は、首藤 (1992)¹⁸⁾ によって提案された津波の高さと被害の経験的な関係を示したものである。これによると、木造家屋は 2 m 程度から被害が多くなる。

表 1.1 津波による被害形態 (首藤, 1992¹⁸⁾)

津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
津波形態 緩斜面	岸で盛上がる	沖でも水の壁 第二波砕波	形態は、左に ほぼ同じだが、 先端の砕波が 増える	どのような場所であっても、潮汐 に似たような上下動を示すことなく、 第一波巻き波砕波		
急斜面	速い潮汐	速い潮汐				
木造家屋	部分破壊	全面破壊(2m~)				
石造家屋	持ちこたえる		全面破壊(7m~)			
鉄・コン・ビル	持ちこたえる(~5m)			全面破壊		
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
防潮林	被害軽減	漂流物阻止	部分的被害	全面的被害		
	津波被害軽減		漂流物阻止	無効果		
養殖筏	被害発生					
沿岸集落		被害発生	被害率50%	被害率100%		



写真 1.4 冷凍工場でコンクリート壁が抜けた様子 (2011年6月21日撮影)



写真 1.5 コンクリート壁の被害 (2011年4月9日撮影)

一方、コンクリート構造物は、5m から 16m までの間が空白になっている。これは、東日本大震災に至るまでに、この空白を埋める事例が存在しなかったことを示している。今回の津波被災エリア全体での建物調査では、浸水深が 2m を超える地区で、全壊（流出含む）の建物の割合が大きくなったことがわかった。この調査では、木造やコンクリート造、鉄骨造といった区別はなされていないが、参考になる。

b. コンクリート建物の被害

浸水深が 8m 程度を越えた場所では、沿岸部における箱状のコンクリート建物、たとえば、冷凍庫であったり、浄化場であったり、の壁が抜けていた。津波によるコンクリート構造物の被害については、建築研究所資料¹⁹⁾に詳しくまとめられている。ここでは、特徴的な被害について示す。

写真 1.4 は、釜石港岸壁背後の冷凍製氷工場の壁面が抜けている様子である。この地域の浸水深は 8m 程度であり、岸壁を越えた津波がこの冷凍倉庫に到達したと思われるあたりで水しぶきが上がっていた状況がビデオ撮影されている。このような開口部の少ない建物では、建物内部に津波が入りにくいことに加え、2



写真 1.6 3階建ておよび2階建て鉄筋コンクリート建物の被害 (2011年3月27日撮影)



図 1.12 女川漁港付近の3階以上の建物の被害

階スラブもないため、その壁面が水圧によって破壊されたと考えられる。

写真 1.5 は、岸壁から数百 m とのところにあった女川町の貯蔵庫で、15 cm の鉄筋コンクリートの壁が破壊されている。女川町では浸水深が最大で 18 m 程度にも達したために、海岸から数百 m 離れていても壁体を破壊するほどの水圧があったことがうかがえる。

女川町では、これらの倉庫の他にも多くの鉄骨やコンクリートの建物が被害を受けた。写真 1.6 は、もともと岸壁近くにあつてここまで流されたと思われる 3 階建てのアパートと、その右隣で横倒しになった 2 階建ての交番である。図 1.12 は、女川漁港周辺で被災した 3 階建て以上の建物の被害の分布である。黒矢印が流されたと考えられる建物となる。これらの建物が流された理由は、木造家屋と同様、浮力がその要因のひとつと考えられ、水没後に流されたと考えられる。しかし同様の浸水深程度の他地域において、これほど流された事例は少ない。

この原因のひとつとして地震後の地盤状態を考えなければならないであろう。地盤反力が小さくなれば、杭周辺の摩擦力も小さくなり、浮力による上向き作用力で容易に引き抜けやすい状態になった可能性が考えられる。

今後より徹底した現地調査を踏まえ、被災メカニズムについて検討することが課題である。

1.2 想定と実際の乖離

図 1.13 および図 1.14 は、震災前のハザードマップと今回の津波の浸水範囲との比較を示す²⁰⁾。これを見ると宮古市田老では、ハザードマップと浸水範囲がほぼ一致しているのがわかる。これは、背後の山が迫っており、陸地範囲が狭くなっているためである。その一方で、大船渡市、仙台市、石巻市ではハザードマップでの浸水範囲を大きく超えての浸水があったことが明瞭である。津波の予測には大きな不確かさがあり、それをハザードマップに明示すべきことは震災前から指摘されていたことであるが対応が十分とはいえなかった。図 1.15 は、津波高と死亡率の河田(1997)²¹⁾の調査結果に、今回の津波による死亡者・行方不明者と浸水範囲内人口²⁰⁾の割合とその地域の平均的な浸水高の関係を加筆したものである。石巻市は範囲が広く、津波高を平均することが難しかったため除外しているが、総じて、宮城県より岩手県のほうが津波高が大きい割に死亡率が小さい傾向にある。岩手県のなかでは陸前高田市が比較的死亡確率が高い。川への遡上、住民の経験などの差が関係していると考えられる。これより、想定との乖離が、死亡確率に大きく影響することが考えられ、考え得る最悪のシナリオを可能な限り検討することが減災につながる事がわかる。

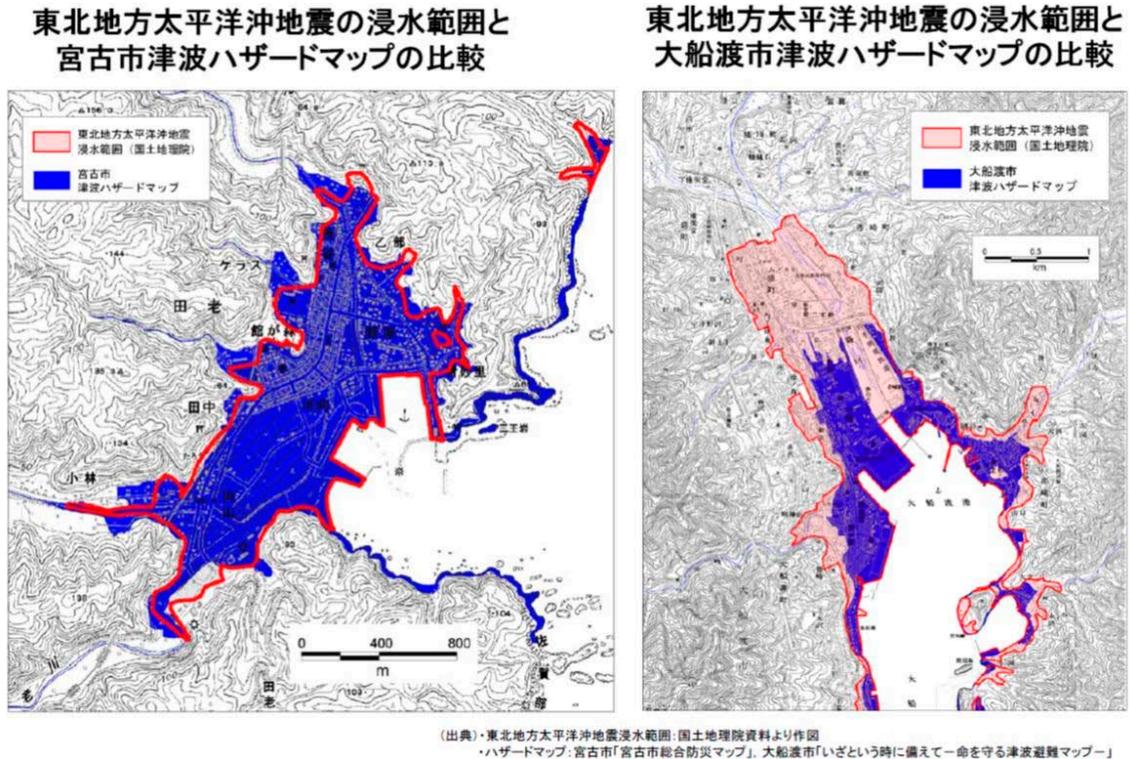
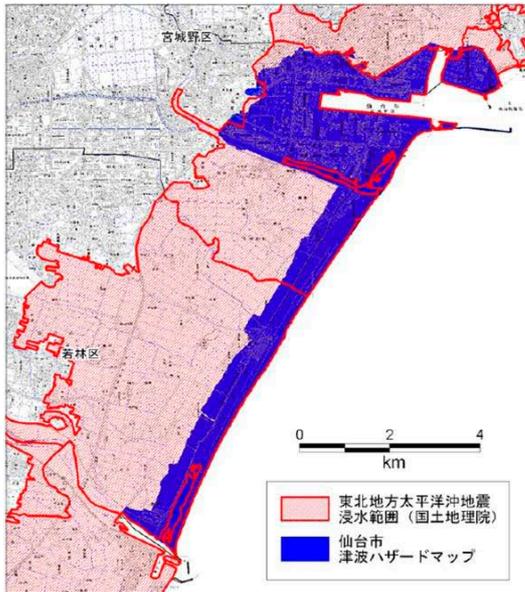
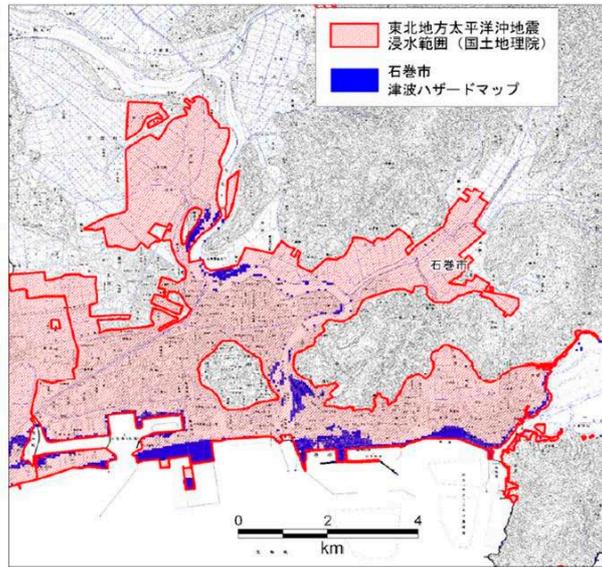


図 1.13 宮古市と大船渡市の震災前のハザードマップと浸水エリアの比較

東北地方太平洋沖地震の浸水範囲と
仙台市津波ハザードマップの比較



東北地方太平洋沖地震の浸水範囲と
石巻市津波ハザードマップの比較



(出典)・東北地方太平洋沖地震浸水範囲:国土地理院資料より作図
・ハザードマップ:仙台市「仙台市津波ハザードマップ」、石巻市「石巻市津波ハザードマップ」

図 1.14 仙台市と石巻市の震災前のハザードマップと浸水エリアの比較

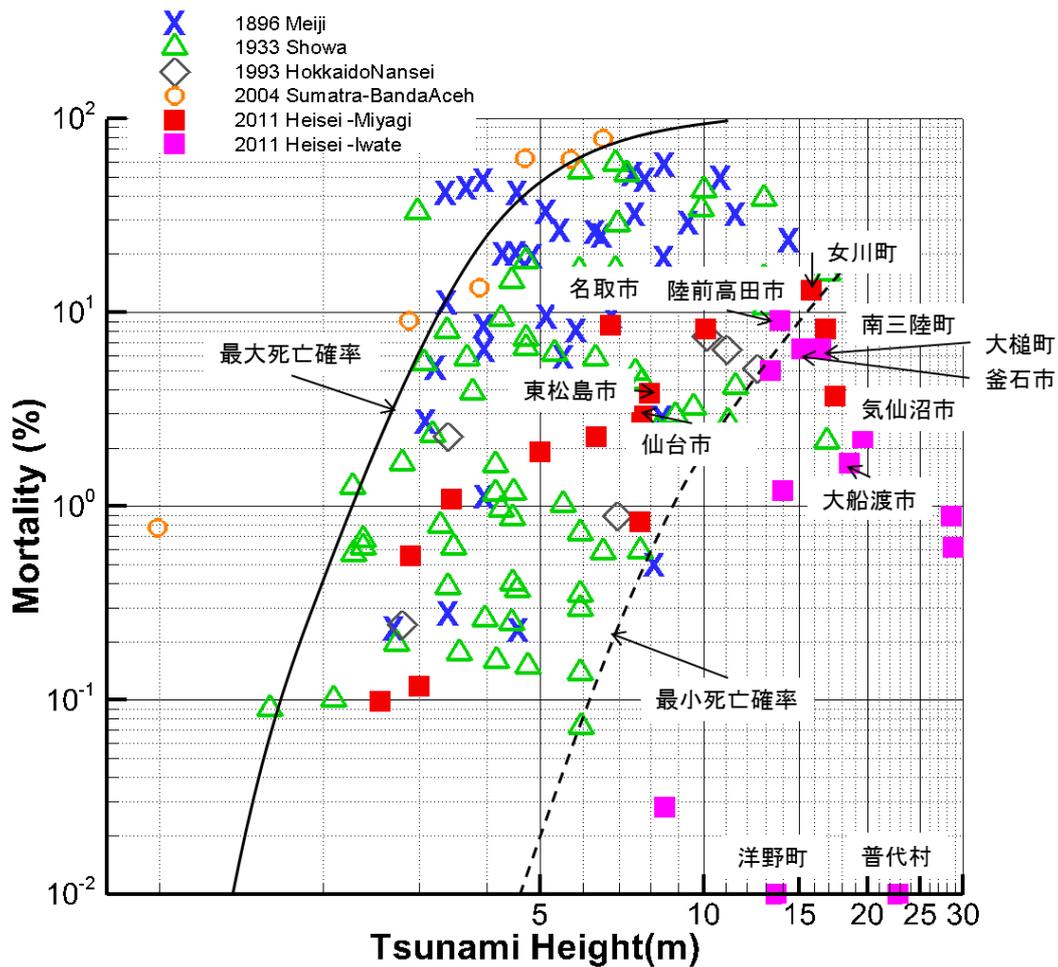


図 1.15 津波高と死亡確率 (河田(1997)²¹) の結果をもとに加筆修正)

1.3 避難行動

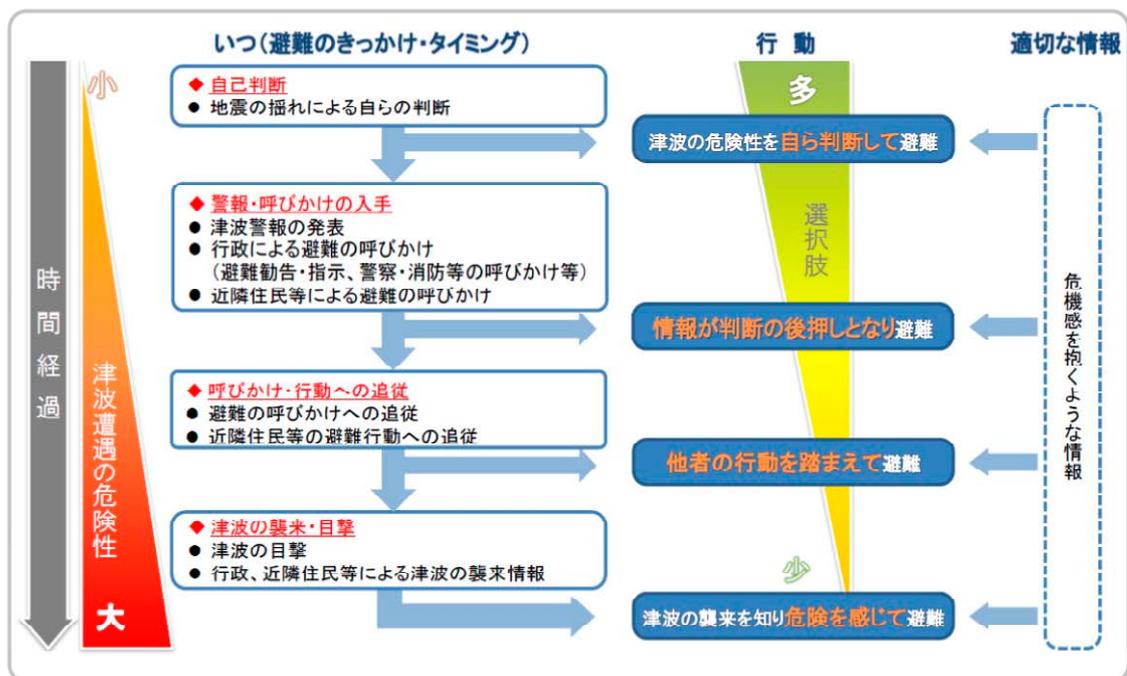
中央防災会議の「災害時の避難に関する専門調査会津波防災に関するワーキンググループ」では、

- ・ 情報と避難行動の関係, ・ 情報伝達手段とそのあり方,
- ・ 避難支援者の行動のあり方, ・ 自動車で安全かつ確実に避難できる方策,
- ・ 津波からできるだけ短時間で円滑に避難ができる方策, ・ 防災意識の向上,

など、東日本大震災における津波からの避難行動等に関する実態調査結果をまとめることを目的としている。2012年度は10回程度の開催を予定し、その中でその活動成果をとりまとめるとされている。この第1回資料に2011年度に行われた主なアンケート調査の一覧が掲載されていて、そこには42団体が何らかのアンケートもしくはヒアリングをしていると紹介されている。

そのなかのひとつの国土交通省都市局のアンケートでは、その速報として、東日本大震災の津波被災現況調査の第3次報告がなされている²³⁾。青森県から千葉県までの6県62市町村の津波の浸水被害者を対象に、12月末の速報の時点で約5000のサンプル数をもとに、津波からの避難実態調査について、現時点までの調査結果(速報)をとりまとめている。(1)ヒアリング対象者のうち、約80%の人が30分以内に避難を開始していたこと、(2)しかし家族・親戚等の探索等の行動も多かったこと、(3)避難の際の交通手段は徒歩と車がほぼ半々であったこと、(4)車の方が徒歩より平均移動距離は長いものの、車による避難者の約18%は、500m以内の短距離の利用であったこと、さらに、(5)避難路の問題点として、「信号が点灯していなかった」「渋滞して車が動けない状態だった」との回答を挙げる方が多い状況であったこと、などが示されている。

地震が発生してから津波がくる前に避難行動を開始した人は全体の約63%であったようであるが、一方で残り37%のうち26.8%の人々(1183人)が、最大波が到達後も避難行動をとらなかったと回答している。



主な「情報(避難の判断材料)」と避難行動の関係 概念図

図 1.16 津波避難の段階的分類 (概念図)²⁴⁾

図 1.16 は上述のワーキングの第 6 回会合における資料³²⁵⁾のなかに示された、津波避難の段階的分類（概念図）である。これによれば、最後の情報伝達ステージは、津波の目撃である。上述の「最大波が到達したあとも避難行動をとらなかった 26.8% の人たち」がすべて津波を目撃したと考えると、津波が来襲前に避難行動を開始しなかった 37% の人の 72% 程度が津波目撃後ですら、避難行動を起こさなかったことになる。

復興庁のまとめによると²⁶⁾、宮城県、岩手県の避難者の数は 17 万人である。その方々のほとんどが津波で家屋を失ったと仮定すると、上述のアンケートの確率から 17 万人のうちの 37% にあたる 6.3 万人が津波を目撃するまで何らの行動を起こさず、そして 26.8% の 4.5 万人が津波目撃後も避難しなかったことになる。

報告された死者数の約 9 割が溺死であるから、1.7 万人が津波に巻き込まれたとすれば、これは津波目撃まで何ら行動を起こさなかった 6.3 万人の 27% にも達する試算となり、津波目撃後の行動のリスクがきわめて大きいことを物語っている。

1.4 事後対応

1.4.1 復興に向けて配慮すべき事項

a. 地域の津波防災計画で対象とする津波減災レベルの設定法について

津波減災レベルの設定においては、数百年から千年に一度の発生確率、または起こり得る最大の地震を想定し、その地震規模に対応する地盤変動（注：不確実性があり、ひとつに決まらない）で生起される津波のうち、当該地域に最も大きな被害を与える津波を数値シミュレーションなどの手法を用いて評価するべきである。また津波減災レベルは避難計画や土地利用計画に反映されるものなので、単に高さだけでなく、津波到達時間や来襲方向、流速なども含めたシナリオとして捉えるべきである。

しかし、現時点では東北地方太平洋沖地震の断層モデルについて様々な研究・提案がされている状況であり、津波減災レベルを精度良く確定することは現時点の科学・技術では限界がある。

そのため、当面の措置として、歴史津波や東北地方太平洋沖地震津波の痕跡を整理し、その分布の包絡線として津波高さを設定する方法が考えられる。東北地方太平洋沖地震津波が過去最大となる地域が多いことから、この設定法では、ほとんどの被災地で東北地方太平洋沖地震の高さ・浸水域などをもとに防災計画・土地利用計画を策定することになる。農林水産省および国土交通省では、海岸堤防の計画・設計に必要な「設計津波の水位の設定方法等を平成 23 年 7 月 11 日に関係部局に対して通達している。その考えをもとに、岩手、宮城、福島県では、自治体および国土交通省や国の関係機関と連携し、発生頻度の高い津波と最大クラスの津波を対象として沿岸部の海岸堤防高さを決めている^{27),28),29)}。

ただし、この設定法には不確実性があるため、最新の地球科学等からの知見を踏まえつつ、津波数値計算による予測を併用して、精度向上を図るとともに随時見直すことが必要である。

b. 地域の津波対策：多重的な津波防護機能

東北地方太平洋沖地震津波では一部の海岸保全施設が破壊され、海岸保全施設が破壊されたか否かにより被害の度合いが異なる事例や、また海岸保全施設が破壊されてもなお一定の効果をあげたとみられる事例があり、海岸保全施設の重要性が再認識された。しかし、それに加え、海岸保全施設以外のものが効果をあげたと見られる事例もあった。

例えば、仙台市では盛土構造である仙台東部道路を境界として津波被害の度合いがはっきりと異なっており、道路盛土が第 2 線堤の役割を果たしたと考えられている。また大船渡市吉浜では過去の津波被害から、

低地にあった道路を山腹に作り直し、もともと固まって位置していた集落を道路に沿って分散して配置していたため、防潮堤が破堤したにも関わらず、家屋については深刻な被害に至らなかった。

このように地域の津波対策では、海岸保全施設に加え、盛土構造の活用、地域計画、土地利用規制等による多重的な防護機能を兼ね備えるべきである。津波の来襲時に、まずは人命を守ることを目指して、避難計画を含めた被害軽減を図り、復旧・復興を行いやすい津波に強いまちづくりを目指して、対策を進めることが重要である。

ただし、それらの対策が有効かどうかは十分に精査する必要がある、その限界を明らかにしておくことも重要である。経験的には、浸水深が2mを越えると木造家屋の被害が急増すると言われており、東日本大震災でもその傾向が認められるので、防護効果を見るには浸水深が2m以上の地域をどれだけ減少させられるかが簡易な指標として使用できると考えられる。なお、実際の被害は流速や漂流物の有無によって大きく変わるため、浸水深だけでなく地域特性が大きく関係してくるものである。地域ごとの被害特性を分析し、地域によって指標を変えることも検討すべきである。

土地利用規制に関しては、今回の浸水域の一部を災害危険区域に指定することや、建築物の被害軽減のため建築制限を設けることも検討すべきだが、建築を許可するためのスペックや、災害危険区域から除外される浸水深・流速等の検討を行う必要がある。

c. 防災計画の策定

被災地の復興にあたり、低平地（今回の津波の浸水域）を活用しないということはある程度あり得ない。しかし、標高が津波減災レベルの津波高さ以下の地域は、津波により再び浸水する危険性がある地域である。津波のリスクを認識した上で防災計画・土地利用計画を策定する必要がある。

住民の命を守るための避難計画や津波情報の伝達システム等の対策は、東日本大震災の教訓を生かし、津波減災レベルを基本として再構築する必要がある。また、地域のハザードマップ（防災地図）等には津波減災レベルを具体的に反映させることが重要で、そのためには地域に根ざした津波防災専門家の養成が必要である。

なお、東日本大震災では広範囲の停電によって津波情報の取得・伝達が計画通りにいかなかった事例や、避難誘導担当者が被災してしまった事例があった。非常用電源の導入なども重要だが、情報伝達や避難誘導がうまく機能しなかったとしても被害が少なくなるような土地利用計画・防災計画も重要である。災害の教訓を伝承するための手段としてモニュメントの建設、出版、防災教育などがあるが、奥尻島・青苗やハワイ島・ヒロにあるようなメモリアル公園は災害教訓の伝承だけでなく、津波来襲時に被害を軽減する施設としても有効だと思われる。

1.4.2 各市町村の具体的な動き

復興庁は、「一刻も早い復興を成し遂げられるよう、被災地に寄り添いながら、前例にとらわれず、果敢に復興事業を実施するための組織として、内閣に設置された組織であり、(1)復興に関する国の施策の企画、調整及び実施、(2)地方公共団体への一元的な窓口と支援等を担う」とあり³⁰⁾、2011年12月9日に設置された。それによれば、**図 1.17**のように41地区が復興計画の策定を年度内に行っている。

土木学会の東日本大震災特別委員会の地域基盤再構築特定テーマ委員会では、復興方策について生活再建、生業再建、安全再建の視点から総合的に調査分析し、地域基盤再構築の方向性や具体的方策について迅速に提案することを目的として活動を行っており、その報告のなかで、地域の復興の様子が記載されている³¹⁾。

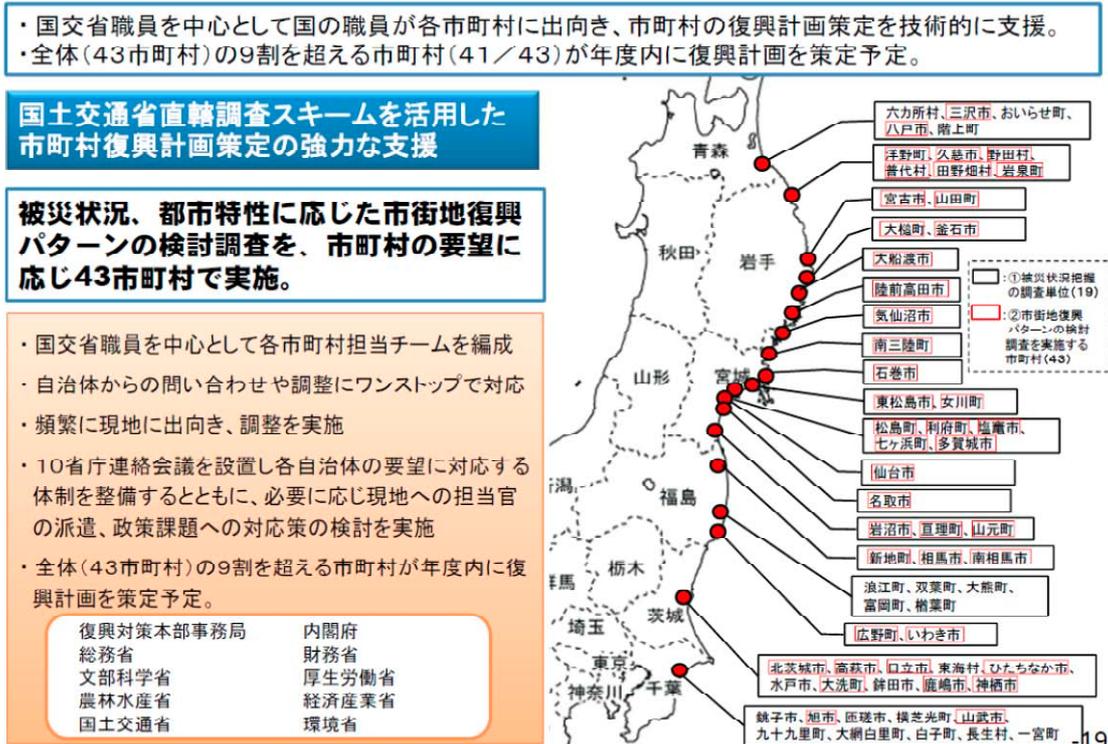


図 1.17 各地域の復興計画策定状況 (2012年5月21日現在)³⁰⁾

そのなかで陸前高田市を例にとると、市のホームページ³²⁾のなかで、被災から復興までの道筋がわかる。そこから抜粋すると、

- 2011年5月1日 震災復興本部及び復興対策局を設置
- 5月16日 震災復興計画策定方針を決定
- 8月8日 第1回震災復興計画検討委員会(委員55名)開催
- 12月2日 震災復興計画策定
- 12月21日 震災復興計画議決

となっており、ほぼ9ヶ月復興計画の策定に時間が必要だったことがわかる。

そのなかで、2011年から2013年までを復興基盤整備期、2014年から2018年までを復興展開期として位置づけている。復興期間中も人々の生活は続くことを考えると、早期の復旧、復興という観点は非常に大切であるということがわかる。

1.5 まとめと教訓

今次津波は、岩手県では明治三陸と同程度かそれより少し大きく、宮城県、福島県では、それよりも遙かに大きく、貞観地震津波と同程度であることがわかった。そのようななか、設計を上回る外力によって多くの堤防・防波堤が破堤し、内陸に大きな被害をもたらした。また、死亡率は、従来の想定と同程度の場合と、それを大きく上回る場合とで、大きく異なることがわかった。想定の設定が重要であることは言うまでもないが、今後は津波減災レベルを超える場合の対応を十分に検討しておくことが大きな教訓である。避難行動においても、津波目撃後に行動を起こした場合の死亡率はかなり大きく、素早い避難が極めて大事であることがわかる。

今回の想定を上回る津波による災害からの復旧・復興計画を立てる中で、計画立案自体でも1年程度を有している。計画立案段階においても早期に必要な措置を講じなければ、該当地域にとっては死活問題となる可能性がある。ハードを効率よく活用し、ソフトで人命を守る、ハードとソフトが一体となる防災・減災対策を平時から検討し練り上げていく努力が大切である。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について，第28報，21p.，2011.
- 2) 警察庁：<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>
- 3) 平成23年版警察白書：<http://www.npa.go.jp/hakusyo/h23/honbun/index.html>
- 4) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 1, pp.63-66, 2011.
- 5) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査の報告，津波工学研究報告，印刷中，2011.
- 6) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，東北地方太平洋沖地震津波情報共有サイト，<http://www.coastal.jp/ttjt/>，参照2011-9-23.
- 7) 地震調査研究推進本部：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（一部改訂），40p.，2009.
- 8) 東北大学・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/>，参照2011-9-23.
- 9) 河合弘泰・佐藤真・川口浩二・関克己：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震津波の特性，港湾空港技術研究所報告，Vol. 50, No. 4, pp. 3-64, 2011.
- 10) 高橋重雄ら：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231, 2011.
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料，第646号，2011.
- 12) 熊谷兼太郎ほか：2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害調査，国総研資料，第658号，2011.
- 13) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 1, pp.63-66, 2011.
- 14) 都司嘉宣ら：2011年東北地方太平洋沖地震の津波高調査，東京大学地震研究所彙報，第86号，2012.
- 15) Arikawa, T. et al.: Collapse Mechanism of Protective Structure (Seawall) by Huge Tsunami, International Journal of Protective Structures, 投稿中
- 16) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部：国総研技術速報No.1：粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第1報），2012. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/sokuhou/file/120514.pdf>
- 17) 有川太郎ら：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討－水理特性を中心とした第一報－，港湾空港技術研究所資料，No.1251, 2012.
- 18) 首藤伸夫：津波強度と被害，津波工学研究報告，第9号，東北大学工学部，1992.
- 19) 建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）調査研究（速報），<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html>
- 20) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会，第1回会合，資料3-2
- 21) 河田恵昭：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, 1997.
- 22) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 1, pp.63-66, 2011.
- 23) 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループホームページ，http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_tsunami/index.html
- 24) http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi09_hh_000004.html

- 25) 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ 資料 3, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_tsunami/6/3.pdf
- 26) 復興庁ホームページ, <http://www.reconstruction.go.jp/topics/120521genjototorikumi.pdf>, 復興の現状と取組, 2012年5月21日
- 27) 宮城県沿岸現地連絡調整会議(国土交通省 東北地方整備局): 宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について(案): <http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyouokijishinn/kaigann/kaigann2.pdf>, 2011年9月9日
- 28) 福島県沿岸における海岸堤防高さの設定について, <http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/teiboutakasanosettei.pdf>, 2011年10月
- 29) 岩手県津波防災技術専門委員会ホームページ, http://www.pref.iwate.jp/~hp0212/fukkou_net/tsunamibousai.html
- 30) 復興庁ホームページ
- 31) 土木学会誌, Vol. 97, No. 4, April 2012.
- 32) 陸前高田市役所ホームページ, <http://www.city.rikuzentakata.iwate.jp/index.html>

第2章 地震津波による水位推計手法

2.1 推計手順

地震津波の発生原因は、地震時の海底面の変形である。地震の発生原因は断層運動であるが、断層運動は同時に地殻変動も発生させる。この地殻変動により海底面が変形したときに、海水に擾乱が発生し、津波となる。発生した津波は、四方に広がり、その一部が沿岸に到達すると浸水等の災害となる。したがって、津波の推計方法は図 2.1 に示すように「地震による津波の発生」と「津波の海域伝播」の2つから構成される流れとなる。入力条件は地震の情報、海域伝播には推計対象地点と地震との位置関係や海底地形の情報が必要である。

津波の水位推計の目的は、① 構造物の耐津波設計や地域防災計画策定のための基本条件、② 緊急対策や避難実施のための予警報、に大別できる。本章では①の目的に適した水位推計手順を述べる。津波の推計を実施する手法の代表的なものが数値計算である。数値計算以外では、日本周辺の地震津波について、津波マグニチュード M_t と津波の検潮儀記録による津波の振幅または痕跡高との関係を示した簡易式が提案されている^{1),2)}。これらの研究では、 M_t は験潮記録上の最大振幅（全振幅）もしくは痕跡高 H (m) とその観測点と津波波源からの距離 R (km) で規定されている。また、 M_t はモーメントマグニチュード M_w と関連付けられており、逆に利用すれば M_w と地震発生位置と推計対象地点の距離から痕跡高を算出することができる。ただし、この手法では海底地形の影響が直接的に取り入れられていないこと、また、最近は数値計算の技術とコンピューターの発展により、数値計算のコストが金額面でも時間面でも小さくなったことから、簡易式の利用は限定的である。例えば、多くの地震断層から推計対象地点に影響のある津波を起こすものを選択する場合のスクリーニングに用いられる。

津波の海域伝播において、海底地形は大きな影響を与える。海底には山、谷、島等があり、津波の挙動も複雑になるため、実際の地形を再現することが必要となる。一般的に模型実験は水に関わる現象の再現に有効であるが、津波の活動範囲は一般的に 1000 km 四方を越える。それに対して水深は数 km 程度、最も深いマリアナ海溝でも 10 km 程度であり、水平規模に対して垂直規模が 1/100 以下である。したがって、1000 km 四方を実際の地形を無ひずみで再現できる実験設備は、現在の世界には存在しない。(独)港湾空港技術研究所、電力中央研究所、オレゴン大学等の大きな水路で実施された例はあるが、いずれも、沿岸から深海のごく一部分を細長く切り取って再現したものである。このようなことから、津波の海域伝播には数値計算が用いられる。沿岸のみならず陸上遡上も含めて数値計算による津波挙動を推計することが可能である。

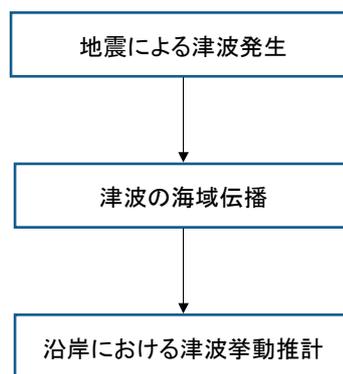


図 2.1 津波推計手順

2.2 津波の設定方法（入力条件）

ここでは、近年から東日本大震災前の津波災害の想定に関わる歴史と津波の設定方法について述べる。1980年前後、東海地震の発生が懸念されるようになり、付随する津波の危険性が認識され、国が中心となり、「津波常襲地域総合防災対策指針」（1983）³⁾が整備された。防潮堤に代表される防災施設のみでは巨大津波が防ぎきれないこと、地域防災計画・防災体制も必要であることが初めて盛り込まれた。次に1993年北海道南西沖地震津波の発生を契機に七省庁による津波対策が検討され、「地域防災計画における津波対策強化の手引き」⁴⁾がまとめられた。その後、中央防災会議（内閣府）により、日本沿岸の津波危険度が各海域別に検討され、ある一定の危険度を越える地域はハザードマップ⁵⁾を作成し、地域防災計画を策定するように勧告した。これを受けて、高知県・徳島県・静岡県をはじめ各県では、ハザードマップの整備が進められており、一部は既に公開されている。東日本大震災前までのハザードマップにおける津波の設定は、既往の代表的な津波災害を再現した数値計算結果による浸水マップが用いられることが多かった。しかし、東日本大震災後には既往最大にとらわれずに、地震を想定することが試みられている⁶⁾。

原子力施設を対象とした場合については、1990年代以前は個別地点ごとに、既往最大の歴史津波および活断層から想定される最も影響の大きい津波を数値計算等により求めて設計津波水位を設定し、これをもとに設計が行われてきた。上記の「地域防災計画における津波対策強化の手引き」において、既往最大の津波のみならず“想定しうる最大規模の地震津波”を考慮に入れる必要が指摘された。また、原子力発電所の津波の評価方法に関して標準的な手法がまとめられていなかった。以上のような観点から、1998年10月より電力共通研究が開始され、その成果を審議するために、翌年に土木学会原子力土木委員会の中に津波評価部会が設けられた。ここで、津波の波源や数値計算に関して培ってきた知見や技術進歩の成果を集大成して、原子力施設の設計津波の設定方法を取りまとめた。そして、この成果を「原子力発電所の津波評価技術」⁷⁾（以下津波評価技術2002）として刊行した。この成果は、(社)日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針に記載された「津波評価技術指針」の基盤となった。また、IAEA（国際原子力機関）や米国のNRC（原子力規制委員会）の災害ガイドに参照・引用されており^{8),9)}、国際的に世界の最先端の成果であることが認められている。なお、津波評価部会は、その後も津波水位の確率論的評価や津波による地形変化等を課題として継続されている。

津波評価技術2002の考え方について述べる。設計津波水位の決定において、津波を評価する過程で生じる不確定性や誤差をどう考慮するかが課題である。津波を評価するには、津波波源となる断層パラメータを決定し、それを基に海底の地盤変動を計算する。それを入力条件として津波計算を行い、対象地点の津波による水位変化を得ることができる。この中で、1)断層パラメータ（図2.2）を評価する上での不確定性、また2)数値計算モデルや3)使用する

地形データの誤差、これらは必ず存在する。この課題を念頭に検討を重ねた結果、津波評価技術2002ではこの3つの中から断層モデルの不確定性について、その変動幅を設定してパラメータスタディを行い、対象サイトに最も影響の大きいものを想定津波と決定する手法を提案した。

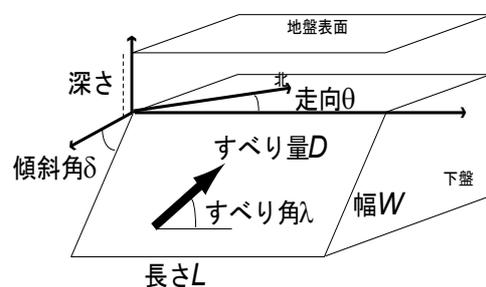


図 2.2 地震断層を規定する断層パラメータ

詳細は文献に譲るが、パラメータスタディの概要をここでは示す。まず、基準断層モデルを、各海域の地震の発生位置や発生様式を踏まえて設定する。例えばプレート境界で発生する地震については、ある発生域について基準断層モデルを設定する。この時に、不確定性の存在する因子については地震学知見に基づきその変動範囲を規定する。また、波源位置や最大モーメントマグニチュードは地震地帯構造図等の地震学的知見を基に決定する。

基準断層モデルを基に、不確定性の存在する因子については、それらを変動させて数値計算を実行し、各断層パラメータの津波高さを評価する。これらの結果を想定津波群とする。パラメータスタディの手順は以下の通りである。不確定性の存在する因子群の中で、サイトの津波高さに最も支配的である因子についてパラメータスタディを行い、最も影響の大きい断層モデルを決定し、次にその他の因子に関するパラメータスタディを行う。この手順を繰り返して各因子をすべて固定し、最終的に想定津波を決定する。図 2.3 に示した概要図では、断層位置、走向、傾斜角の順に、最も影響の大きい値を決定していく様子を示した。最後に朔望平均満潮位と朔望平均干潮位を勘案して、設計津波水位を決定する。

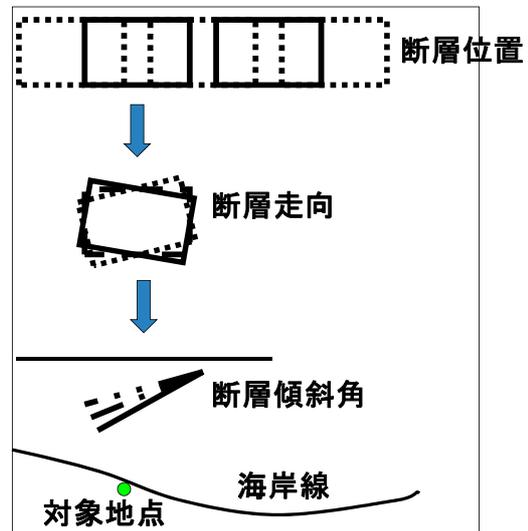


図 2.3 パラメータスタディの概要

このように、原子力施設においては、歴史上の津波を発生させた地震などを基にして基準断層モデルを設定し、その断層パラメータによって推計対象地点に影響を与える断層モデルを設定する。したがって、この手法により、歴史上の津波を起こした津波波源よりも影響の大きいものが推計できる。

以上のように、1990年代に想定しうる最大の津波を考慮するという方針が示され、歴史上において最大の地震が一定の領域内のどこでも種々の形式で発生すると仮定し、対象地点に最も影響のある津波を想定する手法が2002年に提案された。しかし、東北地方太平洋沖地震津波は、歴史上の最大地震（M8クラス）を大きく上回る巨大地震（M9.0）であり、少なくとも三陸沿岸より南の沿岸において、地域防災計画や原子力発電所設計での津波水位を大きく上回る巨大津波が到達した。今後は、日本に津波の影響を与える海洋性地震について、このような未認識の巨大地震を、現状の研究成果を基に、沿岸の住民や重要施設の防災・減災の観点から、どのように想定するかが大きな課題である。

2.3 数値計算手法

2.3.1 基本事項

2.1 に示したように津波の推計には数値計算が用いられ、津波発生原因である地震時の地殻変動解析とそれにより発生した津波の伝播計算により、津波の発生、海洋伝播、沿岸への到達が再現される。数値計算を実施する場合、評価対象となる津波による現象に応じて、適切な数値計算手法を用いる必要がある。数値計算手法は、基礎方程式と数値計算スキームからなる数値計算モデル、入力条件、境界条件、地形データなどから構成され、これらは適切に選択もしくは作成される必要がある。

2.3.2 数値計算モデルの選択

数値計算においては、再現すべき現象に関する計算精度と計算に要する時間などを考慮して適切な基礎方程式と計算スキームを選択する必要がある。

a. 基礎方程式

津波の伝播現象は、水深に比べて波長が長いことから、長波として記述される。3次元の基礎方程式を鉛直方向に積分した平面2次元場を基本とする。長波の理論には以下の各理論があり、再現すべき現象に応じて適切に使い分ける。

(i) 線形長波理論

波高と水深の比が小さい（非線形性が無視できる）場合に適用する。運動方程式は非定常項と圧力項（静水圧分布）からなる。海底摩擦が無視できない場合は摩擦項を考慮する。

(ii) 非線形長波理論（浅水理論）

波高と水深の比が小さくない（非線形性が無視できない）場合に適用する。運動方程式は非定常項、圧力項（静水圧分布）および移流項からなり、浅海域における波の前傾化が考慮できる。通常、海底摩擦も無視できないため、摩擦項も同時に考慮する。水平渦動粘性項を導入することもある。

(iii) 分散波理論

伝播に伴い津波波形の曲率が大きくなり水粒子の鉛直方向加速度が無視できず、波の分散性が現れる場合に適用する。(i)に分散項を加えたものを線形分散波理論、(ii)に分散項を加えたものを非線形分散波理論といい、遠地津波の外洋伝播計算には線形分散波理論を適用する。また、遠浅海岸の津波伝播時に発生するソリトン分裂による波状段波を再現する場合は、非線形分散波理論が有効である。

ソリトン分裂とは、津波の先端の波峰が複数の波峰に分裂する現象で、長周期波の先端に短周期波が重なった波状段波の波形となり、浅海域で短周期波の波高が増幅して、砕波することにより波力が大きいことが知られている。

なお、津波発生から海洋伝播を3次元の基礎方程式を直接数値計算することも可能である¹⁰⁾。また、評価地点が北海道南西沖地震津波の最高遡上高記録地点（奥尻島藻内）のような急勾配かつ曲率の大きい谷状地形等特殊な海岸地形条件を有する場合には、領域を限って3次元場で定式化された基礎方程式を用いることが望ましい場合もある¹¹⁾。

b. 近海伝播を対象とした基礎方程式と計算スキーム

近海伝播を対象とする場合、水深200m以浅の海域を目安¹²⁾に浅水理論を適用した基礎方程式を選定する。その場合の計算スキームとしては、スタッガード格子を用いた陽的差分法が採用されることが一般的である。その理由は差分化の際の計算誤差を評価する方法がほぼ確立しているからである。

遠浅海岸におけるソリトン分裂現象等を対象にした場合に非線形分散波理論を用いた数値計算が選定される。この場合は、運動方程式に陰的差分法を用いる必要がある。砕波による運動量拡散項を導入して、分裂と砕波を考慮した津波の平面2次元数値計算法が提案された¹³⁾。その後精度と数値計算効率を考慮した多段階混合差分法が提案された^{14),15)}。さらに、ソリトン分裂波の砕波波高を精度よく推計するための数値計算モデルが提案された^{16),17)}。これらの手法により、ソリトン分裂現象とその砕波現象の計算を行うことが可能である。

c. 遠方海域からの伝播を対象とした基礎方程式と計算スキーム

遠方海域から伝播する遠地津波に対しては、波高が水深に比べて小さいため線形理論が適用できる。ただし、初期波形が様々な周期成分を含んでいる場合、水深の深いところでは周波数ごとに波速が少しずつ異なる

るため、長時間伝播すると次第に短周期成分程遅れが生じてくることから、この効果を再現するためには分散項を含む運動方程式の適用が必要となる。さらに、遠地津波に対しては運動方程式中にコリオリ力を考慮する必要があることに加え、地球が球形である効果を見逃さないため球座標系を採用する必要がある。計算スキームとしては、スタッガード格子で、かつ連続の式には陽的差分法、運動方程式には陰的差分法が採用されることが一般的である。

2.3.3 入力条件

数値計算における津波を発生させるための入力条件として、断層モデルによって計算される海底面の鉛直変位分布を与える方法を用いる。

a. 海底面の鉛直変位分布

数値計算の初期条件設定に必要な海底面の鉛直変位分布については、地震発生地盤が等方で均質な弾性体であるとの仮定のもとで地震断層運動に伴う変位分布を計算する Mansinha and Smylie¹⁸⁾ の方法が一般的に採用されている。なお、この解析結果は、地盤のポアソン比 ν が 0.25 (Lame の定数 μ と λ が互いに等しい) の条件下で得られることに注意する必要がある。 $\nu \neq 0.25$ の条件および割れ目噴火に対応する開口断層にも適用できるさらに汎用性の高い地殻変位解析方法としては、岡田の方法¹⁹⁾ がある。

b. 変位の継続時間

大規模津波を発生させる場合の断層の破壊時間は数 10~120 秒程度とされるが、この程度の海底変位継続時間では瞬時に海底が変化した場合と比べて津波計算結果はほとんど差がないとされている^{20),21)}。したがって、現実的な変位継続時間を考慮しても変位が瞬時に生じると仮定してもいずれでも良い。なお、瞬時に海底変位が生じるとして計算した場合には海面に短周期振動が現れることがあるが、時間をかけて海底変位を与えたときにこの振動が生じないのであれば、津波本体とは関係がないので無視して良い。

c. 入力条件の設定

a. で述べた海底面の鉛直変位分布をその直上の海面に与え、これを津波計算の初期水位条件とするのが一般的であり、これを基本とする。海底地盤変動の時間変化を(基礎方程式中等において)考慮する場合には、静水面を初期水位条件とする。なお、上記いずれの場合も、津波による初期流速はゼロと設定する。

近年では、地震の直接シミュレーションが行われており(例えば、文献 10), 22)), 地震時の海底面の変位分布について、時間変化も計算することができる。このように時間的に変化する海底面の変位分布を入力条件とすることも可能である。

2.3.4 境界条件

数値計算にあたっては、計算領域、海底・海岸地形、構造物等を考慮して、境界条件を適切に設定するものとする。境界条件には、a. 沖側境界条件、b. 陸側境界条件、c. 越流境界条件の3つが代表的である。

a. 沖側境界条件

計算領域は有限の範囲を選択せざるを得ないため、人為的に沖側・側方に開境界を設け、津波が境界がない場合と同じ挙動を示すよう適切な条件を与える必要がある。なお、本体系化原案では沖側境界と側方境界を含めて沖側境界と称する。

(i) 計算領域内から領域外へ向かう波が存在する場合の境界条件

従来は、進行波の条件^{20),21),23),24)}を用いて線流量を表現する方法が用いられてきたが、この条件が成立しない場合の対処方法として、特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件²⁵⁾が考案されている。

その他の自由透過の条件としては、境界に仮想的な完全反射の壁面を設定し、そこで発生する重複波の半分が透過波成分と等しいという原理を利用²⁶⁾して、与えることができる。この時、壁面の位置を工夫して設置すると高い精度の結果が得られる²⁷⁾。

なお、特性曲線法と仮想的完全反射条件については、領域外から計算領域内へ向かう波が共存する場合にも適用できる。ただし、後者については、沖合境界に対する入射角が直角に近い条件で適用可能である。

(ii) 近海での沖側境界から波を入射する方法

遠地津波の計算にあたって、外国沿岸に設定した断層モデルから得られた初期条件のもと、球座標系で定式化された線形分散波理論に基づき日本沿岸における津波波形を計算した場合は、その波形の入射波成分を沿岸計算用の計算格子（近地津波と同様の格子）の沖側境界に与えることができる。また、検潮記録から逆算した時系列波形を上記同様に沖側境界に与える方法もある。

b. 陸側境界条件

海域と陸域の境界条件については、次に示す各条件を参照して適切に設定するものとする。

(i) 完全反射条件

陸上部への遡上を考慮しない場合は、汀線を鉛直無限壁と考えて汀線に直角な方向の線流量をゼロとする。つまり、完全反射の条件を採用する。ただし、この条件を用いる場合は、汀線に隣接する海側格子の海底が引き波の際に露出しないように十分な水深が存在する必要がある。この水深が小さい場合は、引き波時に海底面の露出を考慮し、次の押し波時に次項で述べる陸上遡上境界条件を用いることができる。

(ii) 陸上遡上境界条件

陸上斜面への遡上を考慮する場合や浅い海域の引き波の際等は、津波先端部での地形を格子間隔幅の階段状に近似し、計算過程で時刻ステップごとに階段上に水があるか否かを判別する。実務では、岩崎・真野²⁸⁾の方法が広く用いられている。この方法の要点は次のとおりである。

- ・ 津波の先端は、水位と格子境界（4 辺）での最大静水深の和が正の格子とゼロまたは負の格子の境界にある。
- ・ 線流量を計算するための格子境界での全水深は、両側の格子の高い方の水位と格子境界での静水深の和として求める。
- ・ 水のない格子中点とその背後格子の水位を結ぶ直線が水面勾配の一次近似であるとして線流量を計算する。全水深がゼロまたは負の場合には線流量をゼロとする。
- ・ 全水深がゼロに近づいた場合には移流項を省略する。

最近では、遡上計算で線流量を求める際の全水深や移流項の扱いに関して岩崎・真野の方法を見直した先端条件を提案している例もある²⁹⁾。

c. 越流境界条件

防波堤、海岸堤防・護岸等の構造物を越流する際の境界条件については、次に示す各条件を参照して適切に設定するものとする。

(i) 防波堤等を格子の地盤高で表現する場合

防波堤等を格子地盤高で表現できる場合には、防波堤等を越流する際の境界条件として、前節で述べた陸上遡上境界条件を適用することができる。

(ii) 防波堤等を格子間の境界で表現する場合

①本間公式³⁰⁾ (図 2.4)

計算領域内に防波堤・防潮堤が存在し、水位がその天端高を越えた場合、天端高を基準とした堤前後の水深を、 h_1, h_2 ($h_1 > h_2$) とすると、越流状態に応じて堤単位長さ当たり越流量 q を以下のように求めることができる^{25),31)}。

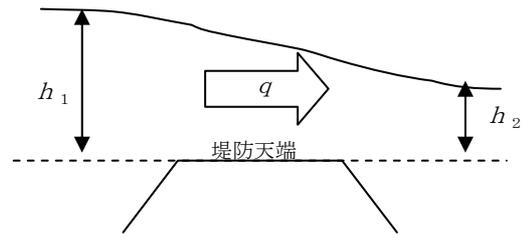


図 2.4 本間公式の説明図

$$\text{(完全および不完全越流)} \quad q = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad h_2 \leq \frac{2}{3}h_1$$

$$\text{(潜り越流)} \quad q = \mu' h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad h_2 > \frac{2}{3}h_1$$

ここに、 $\mu = 0.35, \mu' = 2.6\mu$, 重力加速度 g

なお、越流しない防波堤・防潮堤では、それを鉛直無限壁とする完全反射条件を与え、堤に直角方向の線流量をゼロとする。

②相田公式³²⁾ (図 2.5)

汀線に護岸が存在する場合には、潜堤の場合のように流量係数を用い、護岸内側への堤単位長さ当たり越流量を以下のように求めることができる。

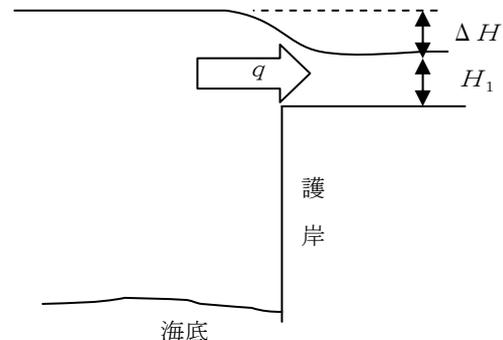


図 2.5 相田公式の説明図

$$q = C_1 H_1 \sqrt{g\Delta H}$$

ここに、 H_1 : 護岸上面からの水位

Δ : 不連続箇所での水位差

$$C_1 = 0.6$$

2.3.5 計算領域および空間格子間隔

津波の計算領域については、その中に波源域を含み、評価地点での最大水位上昇量および最大水位下降量に影響を及ぼす屈折（レンズ効果を含む）、反射（多重反射を含む）、回折、セイシュ、捕捉効果、遡上等が精度よく再現できるような領域を設定する必要がある。

津波計算においては、このような観点から、津波の空間波形および地形の状況に応じて異なる格子間隔の領域を接続して同時に計算する方法が用いられる。すなわち、外洋では津波空間波形の1波長は数10km～数100kmのオーダーであるが、水深が小さくなるにつれて波長が短くなるため、これに合わせて順次細かいものを用いる必要がある。また、海岸付近については、地形が入り組んでいる場合が多いため、津波の空間波形に加えて、対象とする海岸の特徴的な地形または人工構造物のスケールに応じて空間格子間隔を適切に設定する必要がある。

計算領域と空間格子間隔の設定および接続にあたっては以下の点に留意する

a. 空間格子間隔

各部分領域において精度良い計算結果が得られるよう以下のように空間格子間隔を設定する。ただし、以下に示すのは、最も一般的なスタッガード格子・リーブフロッグ差分法を基本とした数値計算モデルを適用した場合の目安値であり、有限要素法等の他の数値計算モデルを適用する場合の要素寸法や格子間隔については、それらと計算誤差の関係を十分検討してから適切な値を設定する必要がある。

(i) 波源域

波源域においては、波源域の大きさおよび津波の空間波形に着目して格子間隔を設定する。

津波の空間波形に基づき格子間隔を設定する際の目安として、長谷川ら³³⁾が提案した方法、すなわち、津波空間波形の1波長の1/20以下を格子間隔として設定する方法を採用してよい。

(ii) 伝播過程における海域

伝播過程における海域においては、津波の空間波形に加え、海底地形の影響で生じる屈折現象に着目して格子間隔を設定する。

海底地形が単純である場合には、格子間隔を設定する際の目安は**(i)**と同じであるが、屈折現象の影響が大きいと判断される領域については、1波長の1/100以下の格子間隔が必要となる場合もある。

(iii) 評価地点周辺の海域

評価地点周辺の海域においては、津波の空間波形、海底勾配、海底・海岸地形、防波堤等の構造物の規模・形状等に着目して格子間隔を設定する。

海岸地形が複雑ではなく、構造物の影響がほとんどない条件下において、水深50m以下から汀線までについて格子間隔を100m程度から25m程度まで徐々に小さくすることを目安とする。

港湾等が存在する場合については、その港口部付近では港口幅の1/5程度以下の計算格子を用いれば港内水位を精度良く計算できることがわかっている。

また、評価地点付近がV字状の湾になっている場合については、湾内平均波長 L_0 と湾奥行き l の比 L_0/l に応じて格子間隔を設定する必要がある。この場合、 $L_0/l < 6$ では湾奥部で津波あるいは誘発されたセイシュの1波長の1/100以下の格子間隔が必要となる場合もある。

(iv) 遡上域

地形が複雑でない条件下における遡上域の格子間隔 Δx の設定にあたっては、斜面勾配 α 、周期 T 、重力加速度 g を用いた次式によって設定してもよい。

$$\frac{\Delta x}{\alpha g T^2} \leq 7 \times 10^{-4} \quad (\text{マンニングの粗度係数 } n = 0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s の場合})$$

$$\frac{\Delta x}{\alpha g T^2} \leq 4 \times 10^{-4} \quad (\text{摩擦項を考慮しない場合})^{34)}$$

b. 空間格子間隔の異なる部分領域の結合

接続計算では、空間格子間隔の選定に注意が必要である。あまり格子間隔の違いのある領域を接続させると、小さな格子間隔の領域（小領域）で誤差が蓄積する場合がある。これは、各領域で再現できる限界波長が格子間隔の2倍となるために、小領域で発生した短い波長成分が大領域へ接続できずに内部に残されてしまうためである。格子間隔の選定としては、1/3あるいは1/2等の割合で減少させることが必要である。

なお、各計算領域を接続する際に、側方接続境界が陸岸と鋭角で交わる場合は、陸岸からの反射波がすぐ側方境界に達し、地形が粗いまま得られた外側の格子領域での計算結果との差が大きく不安定となる場合もある。

2.3.6 時間格子間隔の設定

前節で述べた考え方に従って適切に設定された空間格子間隔に対して、計算の安定性等を考慮して次に示すCFL条件（波動数値計算における一般的な安定条件であり、以下には平面2次元数値計算の場合の条件を示す）を満たすように時間格子間隔を設定する。

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{\max}}}$$

ここに、 Δx ：空間格子間隔

Δt ：時間格子間隔

h_{\max} ：最大水深

g ：重力加速度

通常、複数の大きさの格子を接続して時間格子間隔一定で一度に数値計算を行うことから、まず Δx が同じである領域ごとに CFL 条件を満たすように Δt を求め、最終的には最小の Δt 以下を時間格子間隔として採用することになる。

ただし、実際に計算を行う場合は、数値誤差や現象の非線形性が介在するため、 Δt は $\Delta x / \sqrt{2gh_{\max}}$ に比べて余裕をもって小さく設定する必要がある。特に、津波の引き波時に高速流が現れる場合の計算を行う際には、津波伝播速度 $\sqrt{gh_{\max}}$ よりも流速値の方が大きくなり計算の発散につながることもある。

2.3.7 地形データ

a. 水深データ

近年の広範囲を対象とする音響測深技術の発達や衛星通信による位置測定技術により、水深分布の測定技術は飛躍的に向上している。そのため、既往津波の再現計算および想定津波の計算においては、精度向上の観点から、用いる水深データは、最新の測定結果をもとに作成することを基本とする。

海底地形データとしては、海上保安庁水路部の海図や海の基本図、財団法人日本水路協会の日本周辺 500m メッシュ海底地形デジタルデータや海底地形デジタルデータ (M7000 シリーズ) 等が活用できる。さらに、評価地点周辺で深浅測量が既に実施されていれば、その測量データを用いることができる。遠地津波等海洋の広範囲を対象とする場合は Gebco による 30 秒メッシュの地形データ等が活用できる。

b. 遡上域地形データ

遡上域の計算に用いる陸域地形データも最新の地形図をもとに作成することを基本とする。陸域地形データとしては、国土地理院の基盤地図情報サイトにおいて 10m 格子幅 (日本全国) や 5m 格子幅 (主要都市など) の標高データを活用することができる。

c. 過去の地形データ

既往津波来襲時に存在しなかった人工改変 (構造物等) が最新地形データに反映されている場合には、評価地点での想定津波水位を痕跡高と比較する際、ならびに既往津波水位の再現計算の際、改変部分のみ改変前の地形が記載されている地形データを用いることとする。

2.3.8 諸係数等

a. 摩擦項に関する係数

摩擦項に与える係数は表 2.1 を参考に設定する。

ただし、摩擦係数を水深によって変化させる場合、不連続に変化させるとその場所で流速場の計算結果が不自然な状況になることもあるため、滑らかに変化するように設定するのが望ましい。

b. 渦動粘性係数

渦動粘性係数が $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ($10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) 以下であれば、ゼロの場合に比べて水位低下率が 5% 程度以下であるので、水位変化を評価対象とする場合には、最大値として $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ($10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) を目安とすることができる。

表 2.1 摩擦項に与える係数

係数の名称	文献で示されている値
マニングの粗度係数 n ($\text{m}^{-1/3} \text{s}$)	岩崎・真野 ²⁸⁾ : 海域 0.03
	後藤・佐藤 ³⁵⁾ : 海域 0.025
	小谷ら ²⁹⁾ : 遡上域 (次のとおり)
	高密度居住区 0.08
	中密度居住区 0.06
	低密度居住区 0.04
摩擦係数 k_b	森林域 0.03
	田畑域 0.02
	田中 ³⁶⁾ : 深海域 0.0026
	浅海域 0.005~0.01
	遡上域 0.01~0.5

c. 津波先端に関係する水深

理論上は、津波先端部の水深がゼロとなったときに新たにそこを露出域と判定するわけであるが、実際には、数値計算誤差により微小水深が残ってしまい意味のない計算を継続することもある。また、遡上した津波の先端部は水深がごく小さいため、摩擦項および移流項の分母が小さくなり、数値計算が発散しやすくなる。そこで、①先端の水深をゼロとみなして計算を実行しないように「打ち切り水深」を設定したり、さらに、②摩擦項および移流項に代入する水深をある水深より小さくならないように「仮想水深」を設定する方法が用いられる。今津ら³⁷⁾は打ち切り水深および仮想水深に関する研究を行っており、設定にあたって参考とすることができる。

2.3.9 再現時間

津波は第一波で最大水位上昇量または最大水位下降量が発生するとは限らず、波源での水位変化時系列および対象地点やその周辺・周囲の地形条件等によって、それらが生ずる時刻は変わってくる。例えば、湾内固有振動が励起される場合や、対岸からの第一波の反射波と後続の津波が重なり合うような場合には、数波目以降に最大水位上昇量や最大水位下降量を生じることもあり、これらを捉えることのできる十分な再現時間を選択することが重要である。

2.3.10 断層モデルの適合度の評価

a. 相田による幾何平均 K 、幾何標準偏差 κ

津波痕跡高と計算値の空間的な適合度を表す指標として、従来相田³²⁾による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ が適用されてきた。 K および κ の定義式は次のとおりである。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n (\log K)^2 \right\} \right]^{1/2}$$

n : 地点数

$K_i = R_i / H_i$

R_i : i 番目の地点での痕跡高

H_i : i 番目の地点での計算値

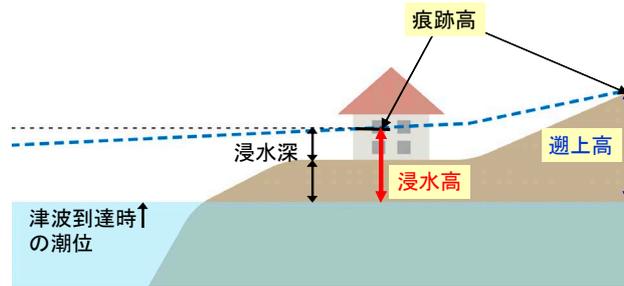


図 2.6 津波の痕跡高の種類と定義

なお、 κ の推定誤差は標本の数に依存するため、 K 、 κ の算出にあたっては、参考として標本の数を明記するべきである。

なお、津波の痕跡高には、図 2.6 に示すように遡上高と痕跡高の 2 つがあるが、いずれも陸上における津波の痕跡高である。計算結果も、陸上遡上計算を実施して、同じか近い場所の計算結果と実測結果と比較すべきであるが、計算格子幅が 50 m 以上と大きい場合には、陸上遡上計算を省略する場合がある。

b. 適合度の目安

既往津波の断層モデルを設定する際には、沿岸における津波の痕跡高をよく説明できるように、すなわち、相田による幾何平均 K がほぼ 1 となるように、かつ、相田による幾何標準偏差 κ が可能な限り小さくなるように断層パラメータを設定する。

広域の K 、 κ については、次の条件を目安とする。

$$0.95 < K < 1.05$$

$$\kappa < 1.45$$

広域にわたる痕跡高分布の全体的傾向を説明できるようにすることが重要であるとともに、評価地点周辺で十分な再現性を持つようにも留意すべきである。

評価地点周辺に着目して再現性を評価するための痕跡高を選定する場合には、評価地点からの距離が近いことに加えて、評価地点周辺の海岸・海底地形が類似していること、また、 K 、 κ を算出するに必要な痕跡高の数を確保できること等を考慮する。

また、検潮記録を参考にできる場合には、津波の波長や位相等を表現できるように断層パラメータを設定する。

なお、津波の記録に加えて地震の記録が豊富に残されている最近の津波については、津波をもたらした地震の諸特性（余震分布、発震機構解、地震前後の地殻変動量等）を参考にすることができる。

c. 留意事項

痕跡高の信頼性が疑わしいものについては、出典等に立ち戻り痕跡高記録の精度の再検討を実施し、信頼度が低い場合には適合度の評価において除外することができる。

なお、津波の周期と検潮儀の応答特性等によっては、検潮記録は痕跡高よりも小さくなることがあるため、痕跡高のかわりに検潮記録の最大値に対して断層モデルの適合度を評価する場合には、検潮記録と痕跡高の系統的な違いについて十分留意する必要がある。

2.4 数値解析事例

ここでは、東北地方太平洋沖地震津波の数値解析事例を示す。図 2.7 は国土地理院が GPS によって測量された地殻変動等を基に設定した断層モデルである。これを基に、2.3.3 a. に示した方法で海底変動を解析して得られた鉛直変位分布を津波発生の入力条件とする。

図 2.8 に津波のシミュレーションによる津波の伝播過程を示す。ここでは、非線形長波理論に基づく数値計算モデルを用いた。図 2.8 (a) は地震発生直後の水位分布で、海底面の鉛直変位分布を示す。発生した津波は、約 30 分後に本州最東の岩手県東部に到達し (図 2.8 (b))、南北に方向に順次到達、被害地域を拡大し

東北地方太平洋沖地震 (2011年3月11日) の震源断層モデル
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011: Fault Model

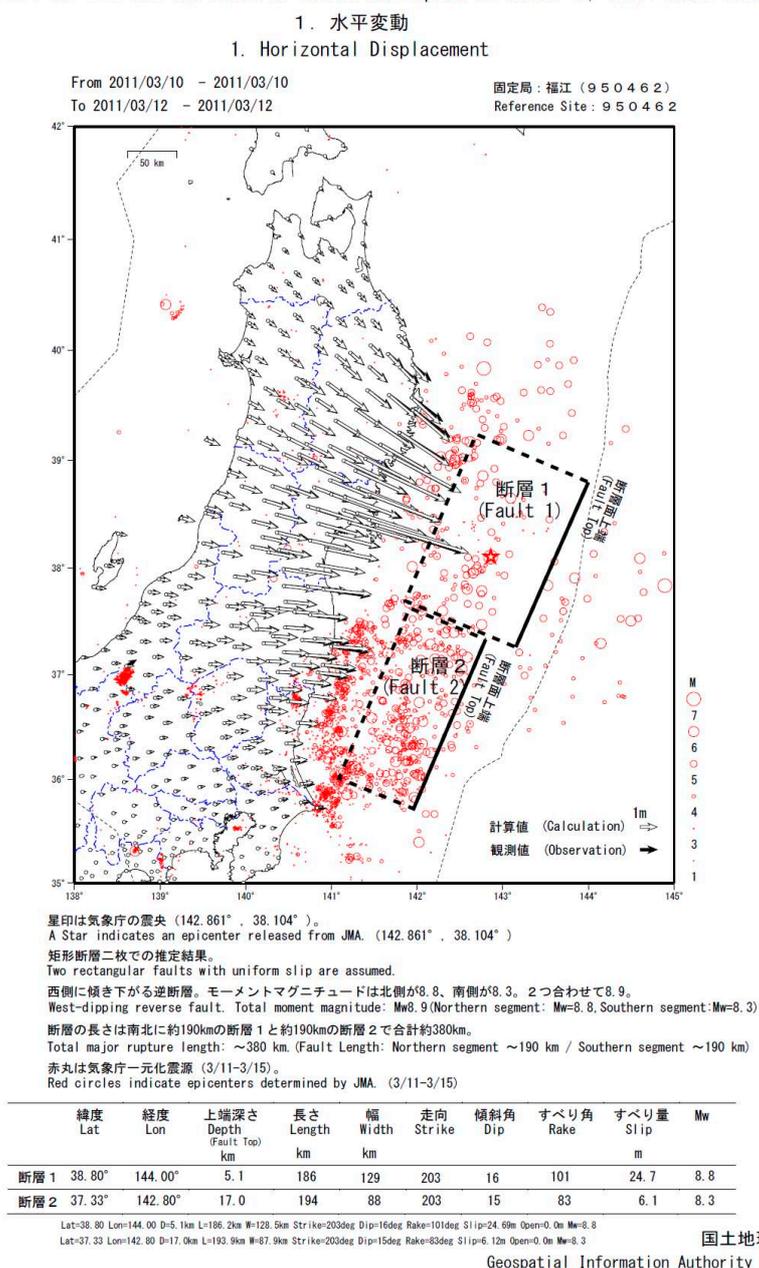


図 2.7 東北地方太平洋沖地震の断層モデルの一例 (国土地理院)

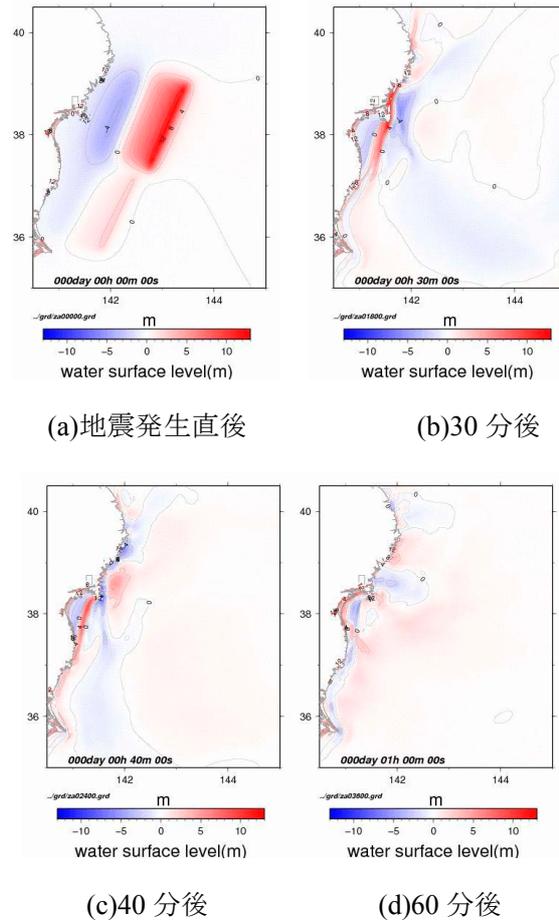


図 2.8 数値シミュレーションによる津波挙動。赤が水位上昇、青が水位下降を示す。

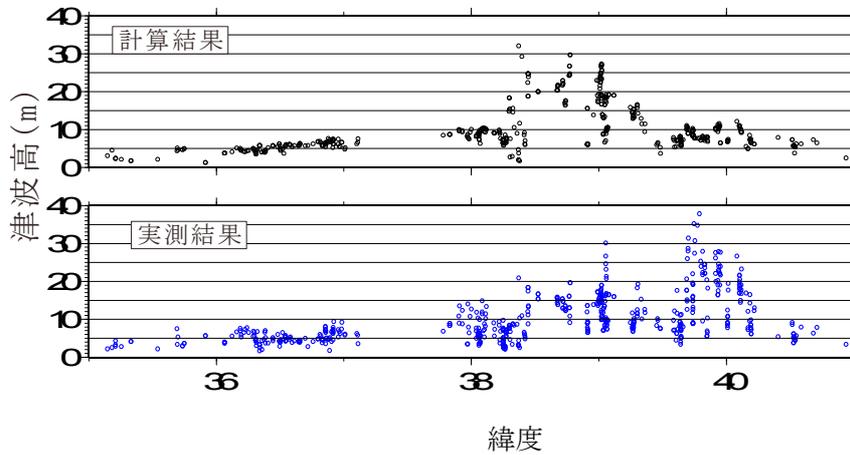


図 2.9 津波痕跡高の実測結果と数値計算結果の比較（東北地方太平洋沖地震津波）

た。また、仙台平野より南では、約 40 分後に、福島沿岸に到達した（図 2.8 (c)）。海岸線形状が凹で遠浅海岸である仙台平野には、約 60 分後に津波が到達した（図 2.8 (d)）。以上のような数値解析で得られた到達時刻は実際に観測された津波到達時間と調和的である。

また、図 2.9 に、津波の実測結果と計算結果の比較を示す。ここでの本断層モデルでは、北緯 40 度付近の 35 m 以上の実測結果は計算では再現されていないが、そこを除けば比較的良好に再現されている。このケースにおいて 2.3.10 で示した相田による適合度評価を行ったところ、幾何平均 K は 0.98 および幾何標準

偏差 κ は 1.64 であり、 κ は適合度の目安より大きい。よって、津波の再現モデルという観点からは、修正の余地があり、断層のセグメント構成や各すべり量を見直すことが必要である。

参考文献

- 1) Abe, K. : Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern pacific, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.27, pp.194-205, 1981.
- 2) 阿部勝征：地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測，*東京大学地震研究所彙報*，Vol.64, pp.51-69, 1989.
- 3) 建設省河川局・水産庁：津波常襲地域総合防災対策指針，16p., 1983.
- 4) 国土庁・農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁：地域防災計画における津波対策強化の手引き，99p, 1998.
- 5) 内閣府：東南海・南海地震等に関する専門調査会（第16回）資料，中央防災会議のページ，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/>，2003.
- 6) 神奈川県：神奈川県津波浸水予測図，<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/sabo/kouwan/shinsui/shinsui.html>，2012年2月.
- 7) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，321p, 2002.
- 8) IAEA : Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Draft Safety Guide, DS417, 2011, <http://www.ansn.org/Common/Topics/OpenTopic.aspx?ID=9065>, 2011.
- 9) NRC : Tsunami Hazard Assessment at Nuclear Power Plant Sites in the United States of America – Final Report (NUREG/CR-6966), 2009.
- 10) Furumura, T. and Saito, T. : An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, *Journal of Disaster Research*, Vol.4, No.2, pp.118-126, 2009.
- 11) 米山望・松山昌史：1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上現象の数値解析，*電力中央研究所報告*，U01002, 17p., 2001.
- 12) 首藤伸夫：津波と防災，*土木学会論文集*，No.369/II-5, pp.1-11, 1986.
- 13) 佐藤慎司：波の分裂と碎波を考慮した津波の数値計算，*海岸工学論文集*，第42巻，pp.376-380, 1995.
- 14) 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明：非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル，*土木学会論文集*，No.600/II-44, pp.119-124, 1998.
- 15) 原信彦・岩瀬浩之・後藤智明：非線形分散波理論式に関する多段階混合差分スキームの提案，*海岸工学論文集*，第45巻(1), pp.26-30, 1998.
- 16) 岩瀬浩之・深沢雅人・後藤智明：ソリトン分裂波の碎波変形に関する水理実験と数値計算，*海岸工学論文集*，第48巻，pp.306-310, 2001.
- 17) 松山昌史・池野正明・榊山勉・武田智吉：大陸棚上における津波のソリトン分裂と碎波に関する研究，*電力中央研究所報告*，N05045, 21p., 2006.
- 18) Mansinha, L. and Smylie, D. E. : The displacement field of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 19) Okada, Y. : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 20) Aida, I. : Numerical Experiments for the Tsunami Propagation - the 1964 Niigata Tsunami and the 1968 Tokachi-oki Tsunami, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Vol.47, pp.673-700, 1969.
- 21) 岩崎敏夫・楊沢民：三陸大津波の数値実験，第21回海岸工学講演会論文集，pp.83-89, 1974.
- 22) 青井真・早川俊彦・藤原広行：地震動シミュレータ：GMS，*物理探査*，Vol. 57, pp. 651-666, 2004.
- 23) 相田勇：1923年関東地震津波の数値実験，*東京大学地震研究所彙報*，Vol.48, pp.73-86, 1970.
- 24) 相田勇：地震の断層モデルによる津波の数値実験，*地震第2輯*，第27巻，pp.141-154, 1974.
- 25) 後藤智明・小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，*東北大学工学部土木工学科資料*，52p., 1982.
- 26) 日野幹雄・仲座栄三：数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面2次元問題への適用，第35回海

- 岸工学講演会論文集, pp.262-266, 1988.
- 27) 今村文彦：石垣島における 1771 年明和大津波と津波石移動の数値解析, 津波工学研究報告, 第 18 号, pp.61-72, 2001.
 - 28) 岩崎敏夫・真野明：オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp.70-74, 1979.
 - 29) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 第 45 回海岸工学講演会論文集, pp.356-360, 1998.
 - 30) 本間仁：低溢流堰堤の流量係数, 土木学会誌, 第 26 巻, 第 6 号, pp.635-645, 第 9 号, pp.849-862, 1940.
 - 31) 岩崎敏夫・真野明・荒井唯：綾里湊における津波の数値計算, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.79-83, 1981.
 - 32) 相田勇：陸上に溢れる津波の数値実験－高知県須崎および宇佐の場合－, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.441-460, 1977.
 - 33) 長谷川賢一・鈴木孝夫・稲垣和男・首藤伸夫：津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究, 土木学会論文集, No.381/II-7, pp.111-120, 1987.
 - 34) Goto, C. and Shuto, N. : Numerical simulation of tsunami propagation and run-up, Tsunamis—Their Science and Engineering, pp.439-451, 1983.
 - 35) 後藤智明・佐藤一央：三陸海岸を対象とした津波計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 2 号, pp.3-44, 1993.
 - 36) 田中寛好：沿岸部における津波予測モデルの開発, 電力中央研究所報告, U385017, 46p., 1985.
 - 37) 今津雄吾・今村文彦・首藤伸夫：氾濫計算を安定に行うための先端条件の検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集 第 2 部, pp.242-243, 1996.

第3章 津波に対する耐災の考え方

3.1 概説

わが国のこの100年程度を振り返ると、地震および津波で甚大な被害を幾度も受けてきたが、科学技術面での対応という観点では、構造物の耐震設計により多くの力が注がれてきた。特に、1995年の阪神大震災では、多くのコンクリート構造物が破壊し、倒壊した状況を目の当たりにして、構造技術者は大きな衝撃を受けるとともに、それを防ぐための研究、技術開発を精力的に行った。その結果、構造物の耐震性能に関する知見が飛躍的に進み、構造物の非線形性を適確に反映した耐震設計法が導入されていった。

設計で考慮する地震動の大きさを2段階で考えるという方針は、この時に新たに導入された。それまでは、設計地震動は1つであった。大きな地震が発生するたびに、設計地震動の大きさを見直し、また、構造物の被災の状態を見て、大変形時の構造物の非線形性を適宜考慮するという手法を展開していた。この手法は簡便ではあるが、要求性能に対する適用性が十分ではなかった。構造物の設計において、新たに2段階の地震動を導入することにより、中規模の地震（構造物の供用期間中に数回発生）に対しては、構造物の応答を弾性範囲に留め、大規模な地震（既往最大かそれ以上）に対しては、塑性変形はするが耐荷力を保持し、地震後には、補強しなくても補修により再使用ができるという要求性能が明示でき、それを満たす設計法や既設構造物の補強方法の開発が進んだ。特に、構造物の破壊に対する研究が進み、破壊安全度に関する信頼性が増した。

東日本大震災における津波の浸水高および被災の甚大さを見て、多くの技術者は阪神大震災の時と類似の大きな衝撃を受けた。巨大な湾口防波堤が崩され、防潮堤の高さを越える津波が来襲した地域では、たとえ10mほどの高さであったとしても、被害を完全に防ぐことができず、多くの人命および資産を失うことになり、被災後1年経過してもなお避難生活を強いられている人々も多い。

一方で、津波から人命を守ることは、可能な限り海岸線から離れた高台に避難するというで物理的に可能となることが、東日本大震災の避難の実態調査などからも明らかになっている。これは地震による建物の倒壊とは被害の性質の異なるものであり、避難を行うことで、どのような津波であっても人命を可能な限り守ることができる可能性を示すものである。そのようななか、きわめて高い防潮堤や防波堤は、経済性、利便性、ならびに景観など日常生活に支障を来す恐れが多いことが指摘されていた。そこで、津波の規模について、数十年～百数十年に1度程度の頻度の高い津波規模と、数百年～千年に1度程度と考えられる最大クラスの津波規模の、2段階で考えようという案が津波特定テーマ委員会から提示され、中央防災会議でも提唱された。これは、構造物の設計は、原則は発生頻度の高い津波規模で考え、一方で、避難計画は、最大クラスの津波規模で考えることにより、たとえ、頻度の高い津波規模を越える津波が来襲し、防護施設を破壊したとしても、人命だけは守るようにするとする考えであり、ハード対策とソフト対策をあわせて津波による被害を最小限にするというアイデアである。

表 3.1 耐災レベル

耐災レベル	外的事象	被災状況
レベル 1	レベル 1 津波，高潮（台風），豪雨による洪水の影響を適切に組み合わせて用いる	防災（人命，財産を完璧に守る）
レベル 2	レベル 2 津波，高潮（台風），豪雨による洪水，地盤沈下等全ての影響を組み合わせて用いる。	減災（人命は守る）
超レベル 2		減災

このように、完全に防護できなくても被害を最小化するために備える考え方を減災といい、被害を完全に防護するために備える考え方である防災（狭義）と分けられている。そこで、本委員会では、防災、減災を含めたより広い意味で“耐災”という概念を導入することとした。耐災のレベルを表 3.1 に示すように、レベル 1、レベル 2 および超レベル 2 の 3 段階に区分けし、各々のレベルで考慮すべき外的事象および被災状況を表 3.1 のように定義した。

耐災レベルと被災状況を対応させることとし、耐災レベル 1 では、表 3.1 内で示す外的事象に対して、構造物で人命、財産を完璧に守る“防災”とする。例として、防潮堤を考えると、設計者として、どの程度の外的事象に対して防災を達成するための防潮堤の高さ、耐力を定めるかという問題になる。レベル 1 津波、台風時の高潮、豪雨による洪水等の発生確率を考慮し、それらの組合せを適切に考えて外的事象の大きさを決める。その大きさを例えば 10m と想定した場合、10m の水位上昇に対しては、堤体内は 100% 守られることになる。しかし、10m を超えた水位に対しては、どのような被害が生じるかは不明である。

そこで、耐災レベル 2 について検討することとする。耐災レベル 2 の外的事象は、考えられる最悪の組合せとする。すなわち、レベル 2 津波、台風時の高潮、豪雨による洪水、さらには、地震による地盤沈下等、全てを組み合わせたものとする。このレベルの水位は、一般には、既往最大よりも大きくなる。この水位は、主として、当該地域がどの程度のダメージを受けるかのシミュレーション用の水位であり、また避難棟等の特殊な施設の設計条件となると考えてよい。ここでは、防潮堤などの構造物を乗り越えて流水が襲ってくる。したがって、防波堤、防潮堤、堤防等の構造物以外の手段により、いかに災害を減じるかを考えなければならない。一般には、避難をいかに早く行うかである。早期の水位上昇の予知、情報の伝達、避難場所の指定、確保、避難方法の訓練、普段の教育などが考えられる。情報の伝達に関しては、4 章の 4.5 「監視・情報提供体制」でも詳述してあるので、参照していただくことよい。復興に際しては、さらに、道路の線形、位置や居住地域制限等の都市計画も関わってくる。

耐災レベル 1、2 のイメージを図 3.1 に示す。この図には、実現象と目的とする内容とが同居している。例えば、①の曲線は人命を守る手だてに望まれるもので、レベル 2 の外的事象が生じた際にも、このような曲線となるには何が必要となるかを検討し、達成することを期待するものである。一方、③、④は、浸水予想域の住宅の被害状況を表すと言える。高層の鉄筋コンクリート建物にすると、③の曲線が②に近づくことが予想される。この図は、一種の目標を示すものでもあり、種々の手段の有効性を図る尺度にもなり得るのである。

超レベル 2 の概念は、自然の外力には人間の想像力を超えた事象の発現も否定はできないことを、設計者、計画者に想定するように期待するとともに、土木の専門家グループが、多くの人命にかかわる巨大なシステムの一部を構成する時などに、他のサブシステムとの的確なインターフェースを通じて、他のサブシ

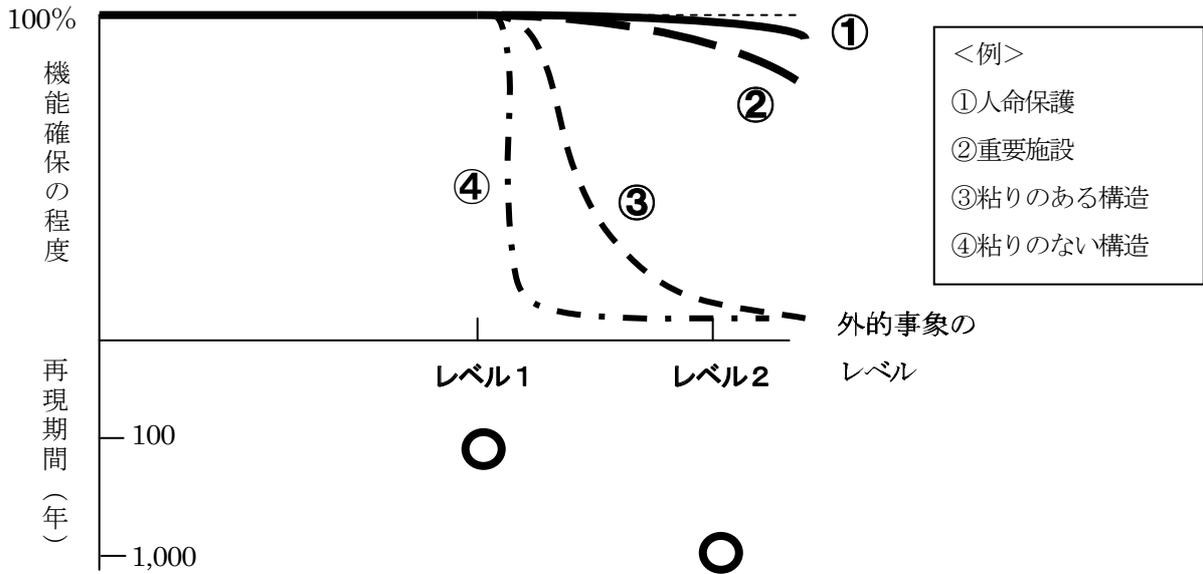


図 3.1 耐災のイメージ

テムに万が一の備えなど必要な対策を行うように奨励することを期待して導入したものである。

なお、海岸線に防潮堤を設置するのが困難なビーチリゾート地域や港湾施設などの場合には、外的事象がレベル1あるいはそれ以下でも被災することがあると考えられる。

3.2 外的事象

3.2.1 津波レベル

a. レベル1 (防護レベル) 津波

発生頻度が高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波であって、概ね数十年から百数十年に1回程度の割合で発生する津波である。この津波に対しては、人命保護に加えて住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保等といった、主に施設整備により被害を防ぐことを目指す。防潮堤や海岸堤防といった海岸防御施設で津波による浸水を防止するものである。

背後地の条件（例えば、家屋が少ない、家屋が密集、商業・工業施設、原子力施設）によって、海岸防御施設の重要度が異なるが、津波レベル1では、施設の重要度に応じて浸水を防止・最小化する。

b. レベル2 (避難レベル) 津波

発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波であって、数百年～千年に1回程度の割合で発生する津波である。この津波に対しては、住民の避難に重点をおき、とりうるすべての手段を用いて、人命を守り、経済損失の軽減を目指す。防潮堤や海岸堤防等、海岸防護施設を越えて浸水することを想定し、それに対して土地利用や避難対策等を含めた総合的な対策により被災を減じるものである。

背後地の条件にかかわらず、レベル2の津波が来襲すると、越流、あるいは、海岸防御施設の破壊により越流・遡上が生じる。レベル2の津波に対して海岸防御施設が粘り強く機能すれば（全崩壊しなければ）、被害を軽減することができる。しかし、現在この粘り強さが評価できないために、どのような最悪の浸水範囲になるかが予測できない。そのため、レベル2の津波の来襲時には、海岸構造物の機能が消失するというシナリオが最悪シナリオとなる。そもそもレベル2の津波そのものを決めることが難しいという問題があ

る。この点は、4.2.1「災害の定義と減災の意義について」でも若干触れているが、地震学および歴史地震学からの知見が重要となる。

3.2.2 耐災レベル2の外的事象で津波以外に考慮すべき条件

レベル2の津波を想定し減災のための対策を策定するに当たり、居住・生活空間に対する津波の高さが、その来襲時の海面の高さに依存することは言うまでもない。加えて、津波に先行する強い揺れによって地盤の液状化やゆすり込みによる沈下、また地殻変動による地表レベルの変動があること、そして高潮が同時、あるいは津波と前後して生起する可能性についても考慮しておかなければならない。本項は津波以外に考慮すべき条件について取りまとめる。

a. 津波と高潮の同時生起および極端高潮の推定法

(i) 津波・高潮の同時生起シナリオ

津波は、1つのピークの継続時間は数十分で、発生から終息まで約1日であるが、来襲規模や発生時刻はわからない。高潮は継続時間が数時間であり、気象情報によってその来襲規模や時刻がおおよそ推定できる。津波と高潮の同時生起による被害は、両者の規模、時間差（ピークがずれる、発生日がずれる）によって異なる。また、人的被害と物的被害はそれぞれ、両者の規模や時間差によって異なる。図3.2は、津波と高潮の時間差、および規模の差を模式的に描いたものである。

同時生起における発生時間差および規模の影響は、以下のようである。

(1) 津波、高潮の両者とも単独で被害を与える規模の場合（図3.2(a)）

1) 津波と高潮が重なる：

高潮が生じることは前もってわかっているので、避難準備や避難はできる。高潮ピーク時に、突然津波が来襲することになるが、前もって住民が避難していれば、人的被害は少し減る。ただし、避難所が津波の浸水域外の場合に限る。各種施設・建物、交通・ライフライン等には超甚大な被害が発生する。

2) 津波の後に高潮が来襲する：

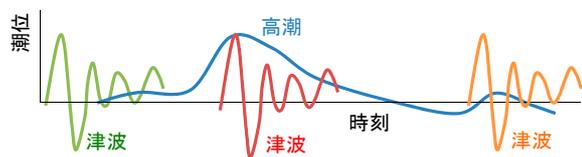
津波による甚大な人的・物的被害が生じ、その後の高潮来襲によってさらに甚大な物的被害と、加えての人的被害が生じる。地震による地盤の沈降や津波による洗掘の影響で、高潮が引いた後も長期間湛水することが考えられる。

3) 津波の前に高潮が来襲する：

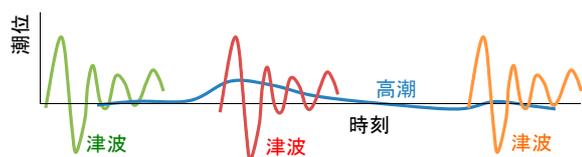
高潮で甚大な海岸防護構造物の被害が生じた後に巨大津波が来襲するので、より甚大な人的・物的被害が生じる。

(2) 津波、高潮のいずれかが単独で被害を与える規模の場合（ここでは津波が大きい場合とし、また時間差は1日以内とする、図3.2(b)）

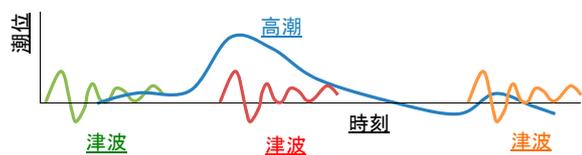
1) 津波と高潮が重なる：



(a) 津波と高潮の規模が同程度の場合



(b) 津波が大きい場合



(c) 津波が小さい場合

図3.2 津波と高潮の同時発生シナリオ

高潮が生じることは前もってわかっているが、予測される規模が小さいので避難準備をしていないところへ巨大津波が来襲し、潮位が高い状態に津波が重畳して（津波高が増加して）、超甚大な人的・物的被害が発生する。

2) 津波の後に高潮が来襲する：

津波による甚大な人的・物的被害が生じ、その後の高潮来襲によって物的被害が増加する（時間差が数日・数週間以上でも同じ）。

3) 津波が発生する前に高潮が来襲している：

高潮は小さいが巨大津波の最大海面水位を増加させ、甚大な人的・物的被害が生じる（時間差が数日・数週間以上では高潮の影響はない）。

(3) 津波、高潮のどちらも単独では被害を与えない規模の場合（時間差は1日以内とする）

1) 津波と高潮が重なる：

高潮と津波が重なって海岸施設の天端高を超えると、人的・物的被害が生じる。

2) 津波の後に高潮が来襲する：

ピーク値が重ならないので、人的・物的被害は生じない。

3) 津波の前に高潮が来襲する：

ピーク値が重ならないので、人的・物的被害は生じない。

(ii) 同時生起確率の目安

津波を起こす規模の地震は、日本で10年に1度、特定の地域（三陸、東海、南海等）では50～100年に1度、東北太平洋沖地震津波クラス（M9クラス）は1000年に1度程度である。これより、年発生確率をそれぞれ、1/100および1/1000とする。高潮については、日本に上陸する台風は年に2、3個、特定の地域で大きな高潮が起こるのは数10年～50年に1度程度である。ここで、年生起確率は1/100とする。

津波と高潮が発生する原因は地震と台風と異なるため、それぞれの発生事象は独立と考えられるので、津波と高潮がある年に同時に発生する確率は、1/10000および1/100000となる。また、両者が同時に生起するのは1年のうちの台風シーズンで、1日のうちでも満潮と干潮があり、それぞれに対して最大潮位が異なる。すなわち、最悪のシナリオは最大高潮が満潮時刻に生じて、その時に津波が来襲する場合である。

なお、地球温暖化により極端高潮の再現期間は短くなることが予想される¹⁾。

(iii) 東北太平洋沖地震津波後の高潮の影響（時間差が大きい同時発生）

気象庁は、平成23年7月22日、「東北地方太平洋沖地震に伴う高潮警報・注意報の暫定的な基準による運用について」を発表した。東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により甚大な被害を受けた太平洋沿岸の地域では、地盤が大きく沈下するとともに、海岸堤防や排水施設等が被害を受けており、浸水や冠水が起りやすくなっているからである。気象庁では、これらの地域に対して、大潮の時期にあわせて「大潮による高い潮位に関する潮位情報」を発表するとともに、特に潮位の高くなる期間や地域等に、適宜基準「高潮注意報」を発表し、海岸や河口付近の低地での浸水や冠水のおそれについて注意を呼びかけた。

幸いにも同時に高潮は生じなかったが、台風15号は9月21日午後2時過ぎに静岡県浜松市付近に上陸し、徐々に勢力を弱めたが速度を上げ、東海・関東・東北地方を縦断した。震災被災地では居住地での浸水被害はあったものの、低地に建築規制がかけられていた地区も多かったことから被害は軽減された。

(iv) 計画潮位の設定法

潮位の変動は、天文潮、気象潮（高潮、異常潮位）、副振動、静振、海流、海水温度、季節的気圧変動、河川水位、波浪等の変動が重なったものである。このうち、天文潮と気象潮が計画潮位を決める上で重要な外

力要因である。

(1) 高潮を主とした計画潮位の設定法

計画潮位は、天文潮および気象潮や津波による異常潮の実測値または推算値に基づいて定める。高潮と津波はまれにしか起こらない事象で、かつ、発生原因が異なるので通常は同時には起こらないと考える。建設後の修復が難しい重要構造物の設計に当たっては、海面上昇の予測量を考慮して計画潮位を定める。高潮の記録はできるだけ長期間の観測データに基づいて検討するのが望ましいが、長期間にわたるデータは少ない。計画潮位を定める方法には、以下の4つの方法がある。

- 1) 既往最高潮位に余裕高を加える
- 2) 朔望平均満潮位に既往の最大潮位偏差、あるいは、モデル高潮の潮位偏差を加える
- 3) 既往の異常高潮位の生起確率から、ある再現期間の潮位を求める
- 4) 異常潮位の生起確率と各潮位に対する背後地の被害額等を勘案して、潮位を決める

現在広く使われているのは、1)と2)である。いずれを採用するかは、それぞれの数値を比較し、実測期間、生起頻度、施設・背後地の重要性や経済性を考慮して決める。東京湾沿岸部においては、大正6年の台風12号と昭和24年のキティ台風の進路に伊勢湾台風級の台風が襲来した場合を想定し、その際の気象、海象条件による高潮位に対処しうる高さが採用されている。

(2) 最悪シナリオによる設定法

最悪シナリオ災害に伴う被害予測（例えば、東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会：危機管理行動計画（第二版）、158p、2009）における台風の条件は、以下のようである。

- 1) 将来の地球温暖化による台風の巨大化を考慮し、「現在中部地方で考えられうる天変地異として既存計画の想定を超える現実的な自然現象」という考えに基づく。
- 2) 上陸時の台風の中心気圧は、既往最大の中心気圧が911.6hPa（室戸台風：室戸岬付近）であることから910hPaと設定する。
- 3) 伊勢湾台風の進行速度、上陸時刻、中心気圧の時間変化はともに、伊勢湾台風と同じにする
- 4) 台風の経路は、伊勢湾奥の潮位偏差が高くなり、最も危険な台風経路であるコースとする。
- 5) 潮位は海面上昇の影響は考慮せず、朔望平均満潮位を用いる。

(v) 地球温暖化も考慮した極端高潮の推定法

IPCC 第5次報告書 (IPCC AR5) に向けて、全球気候モデル (GCM) による地球温暖化に関する気候変動予測実験が精力的に行われており、自然災害への影響評価に必要なデータが提供されつつある。安田らは、北西太平洋における台風の将来変化を調べるため、IPCC AR4 のために実施された大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) の MRI-GCM データを用いて解析を行ったが、GCM による熱帯低気圧の再現精度が低いため、発生数・強度ともに観測値に比べて無視できない大きなバイアスがあるという結果を得た²⁾。

気候変動が海岸災害へ及ぼす影響評価研究としては、確率台風モデルを用いた評価^{3),4),5),6),7)} や、極端化シナリオに基づくワーストケースの検討⁸⁾、最悪台風経路による可能最大高潮の評価^{9),10)} 等が主なアプローチ方法であった。

以下には、従来の研究を参考にして、極端化高潮を推定する3つの解析方法を整理し、利点と欠点をまとめる。3つ方法とは、(1) 気候変動予測モデル出力を用いる方法、(2) 確率台風モデルを用いる方法、(3) 最悪シナリオ探査を用いる方法、である。

(1) 気候変動予測モデル出力を用いる方法

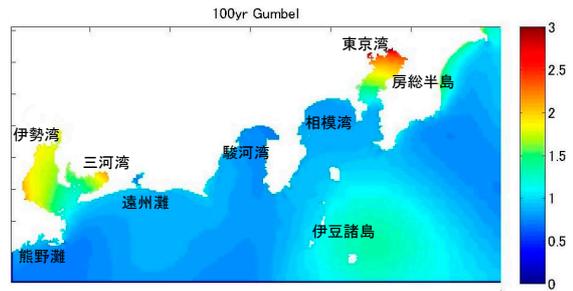
(a) 気候変動予測モデルとして、台風特性の再現性がよい気象庁気象研究所の水平解像度約 20 km (TL959) の超高解像度全球大気モデル (MRI-AGCM 3.2S) によるシミュレーション結果を用いる。(b) AGCM データの気象場 (海面更正気圧および海上 10 m 風速) を直接に駆動力として与えて、高潮シミュレーションを行う。(c) 計算対象の台風数は、現在気候で 190、将来気候で 127 である。台風ごとの最大高潮偏差の計算結果を極大値資料とし、極値統計解析を行う。

この手法によって、再現期間 100 年の高潮偏差を調べたところ、周防灘での将来気候の再現確率値が現在気候に比べて大きく増大すること、燧灘や播磨灘では将来の偏差は現在気候よりも小さくなったが、逆に、安芸灘および斎灘では大きくなること、**図 3.3** に示すように、東京湾における将来変化よりも、伊勢湾、三河湾での増大傾向が顕著で、変化量は東京湾より大きくなること、将来気候における高潮偏差の増大特性には、エリア依存性があることがわかった¹¹⁾。

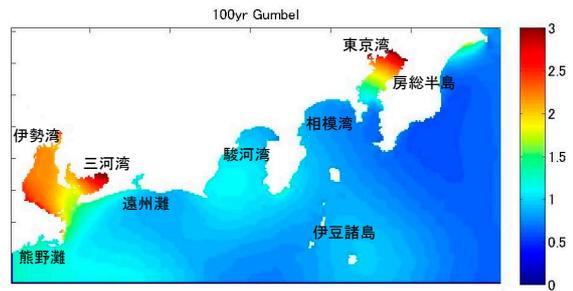
この方法の利点は、気候変化物理量 (たとえば風速と気圧) を用いて、また物理・数理モデルを通して直接推定値 (高潮) を求めることができる。欠点として、GCM の能力 (特に解像度) および精度に依存すること、計算期間やサンプル数 (台風) が少ないため、長い再現期間に対する設計値 (高潮) を求めることができないことが挙げられる。

(2) 確率台風モデルを用いるによる方法

(a) 20 km 格子の超高解像度全球大気モデル (MRI/JMA AGCM) による最新の温暖化予測実験結果を用い、現在気候実験結果と温暖化後の将来気候実験結果から得られる台風について、その変化特性を調べる。対象範囲は、東経 100 度~200 度、北緯 0 度~70 度、台風情報として、台風の中心位置 (台風経路)、発生個数、台風出現位置および消滅位置とする。(b) 気候予測実験結果に基づく現在と将来の台風の変化特性を考慮して、仮想将来台風に対する確率台風モデルを作成する。(c) 確率台風モデルによって得られる台風に基づいて、高潮シミュ



(a) 現在気候



(b) 将来気候

図 3.3 高潮偏差 100 年再現確率値 (unit: m)

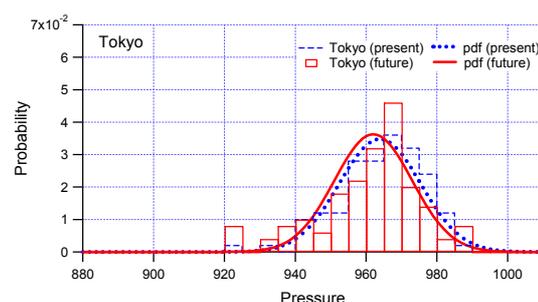
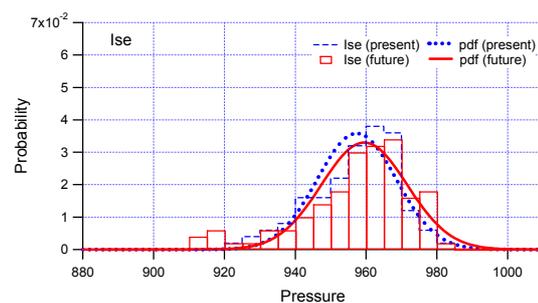
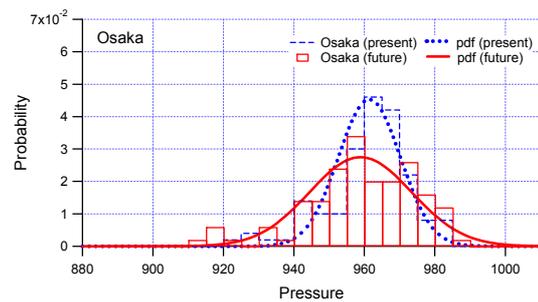


図 3.4 三大湾来襲台風の最低中心気圧

レーションを行う。

この手法により、(a) 将来台風の発生個数は現在に比べて減少すること、(b) 台風の発生位置・消滅位置については、分布が北東に移動すること、(c) 温暖化の影響を考慮した確率台風モデルにより、総個数が現在より減少すると同様に、大阪湾、伊勢湾および東京湾のいずれの地域でも来襲する台風数は減少すること、(d) 三大湾を通過する台風の最低中心気圧については、将来気候での平均値は現在気候に比べてほとんど変わらないか、若干小さくなるが、将来気候下では中心気圧が低い 920 hPa 以下の台風の頻度が増加し、台風強度の極端化が予測された (図 3.4) ⁶⁾。

利点は、十分なサンプル数が得られ、長い再現期間（発生確率）の設計値（高潮）を得ることができる。欠点は、GCM から得られる現在気候と将来気候の状態量から推定される変化予測の仮定に依存することである。そのため、各種の GCM による変化予測結果を包含する仮定を用いるのが良い。

(3) 最悪シナリオ探索を用いる方法

(a) MRI-AGCM の結果から、ある地域に対する将来極端台風を抽出する。気候モデルで計算されるこうした極端台風が異なる経路をたどった場合を考えるために、力学的に矛盾のないように台風の経路を操作し、台風経路・規模についてのアンサンブル実験を行う。(b) まず極端台風から渦位を取り出し、その渦位の位置・強度操作を行い、渦位逆変換法を用いて任意の初期位置を持つ台風場を用意する。得られた初期場をもとに、メソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いた台風の物理的ダウンスケールを行い、異なる経路を辿る極端台風のアンサンブル計算を実施する。(c) (b) で得られた台風経路について、高潮計算を行う。

図 3.5 および図 3.6 に示すように、東京湾に対してこの方法を適用した結果 ¹²⁾、過去に東京湾において大きな被害をもたらしたキティ台風と同程度の偏差が得られた。また、東京湾内の各地点においても最大の高潮は、最低気圧・最大風速よりも経路に依存していた。このように、気候変動モデルにより予測された極端台風に対し、経路を任意に変化させた極端台風についての力学的ダウンスケールと高潮シミュレーションを実施すれば、将来高潮予測における不確実性を評価できる。

利点は、GCM による可能最大事象（ワースト台風）を取り出し、そこから物理・数理モデルを通してワースト高潮を推定することが可能である。

欠点は、GCM の能力および精度に依存すること、ワースト高潮の再現期間（発生確率）が不明なこと

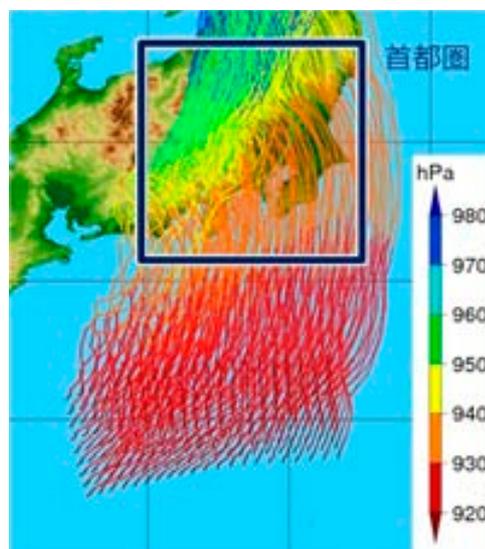


図 3.5 初期値操作を行った極端台風経路（線は中心位置の経路、色は中心気圧）

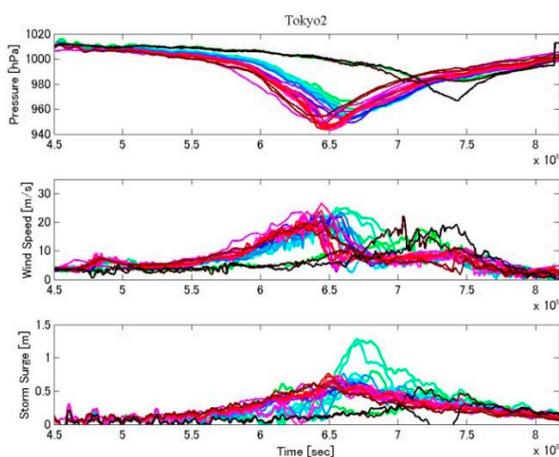


図 3.6 東京湾における計算結果（上から気圧、風速、高潮偏差の時間変化）

ある。

再現期間の推定方法としては、確率台風モデルを援用し、ワースト台風とほぼ同じコースを通る台風を探してその再現期間を求めることが考えられる。

b. 地殻変動による沈下、液状化・そのほかの要因による沈下

(i) 地殻変動による沈下

津波を生起する海溝型地震の発生に伴い地殻変動による顕著な地盤の沈降が起こることは過去にも報告されてきた。1946年（昭和21年）12月21日の昭和南海地震（M8.0）では室戸・紀伊半島が南上がりの傾動を示し、潮岬で0.7m、室戸岬で1.27m、足摺岬で0.6mの上昇がみられた一方、須崎・甲浦で約1mの沈降があり、高知付近では 9.3 km^2 、須崎および宿毛でそれぞれ 3.0 km^2 が海面下に没し、水が引くまで半月程度かかったとされる（海上保安庁水路局, 1948 他）¹³⁾。地震観測が始まって以降最大規模とされる1960年5月22日チリ地震（Mw9.5）ではアラウコ（Arauco）半島からチロエ（Chiloe）島のケション（Quellon）にかけての海岸部で1.5mほどの沈降が報告され、プエルトモント（Puerto Montt）など多くの都市が浸水した（**図 3.7**, National Geophysical Data Center, NOAA）¹⁴⁾。海岸沿いの山脈が2.7m沈下したとの観測もある。このチリ地震はチリのみならずアメリカ、日本など太平洋諸国に到達し、日本では142名の死者を出している（USGS）。



図 3.7 チロエ島（Isla Chiloe）東海岸のケション（Quellon）の海岸通（写真：Pierre St. Amand, National Geophysical Data Center, NOAA）¹⁴⁾：写真にある半ば取り壊された建物は市役所庁舎である。チロエ島のこの付近は2mほど沈降したとされる。

2011年3月11日の東日本太平洋沖地震では全国に20km間隔で配置されたGPS電子基準点の連続観測から陸上部で水平方向に約5.3m、上下方向に約1.2mという極めて大きな地殻変動が記録された¹⁵⁾。この結果仙台湾岸に沿って**図 3.8**（右）に示すように浸水域が現れた¹⁶⁾。

その結果、地震前は、既往最高潮位以下の面積 83 km^2 のうち、平均海面以下の面積が 3 km^2 であったものが、地震後にはそれぞれ 111 km^2 、 16 km^2 に変化した¹⁷⁾。これらの沈降は完全というわけにはいかないが徐々に回復していくと予測されている。それでも沈降は長期に留まり復興の大きな妨げになり、また少なくとも津波襲来時には津波堤や護岸の高さを減ずる要因として考慮されなければならない。

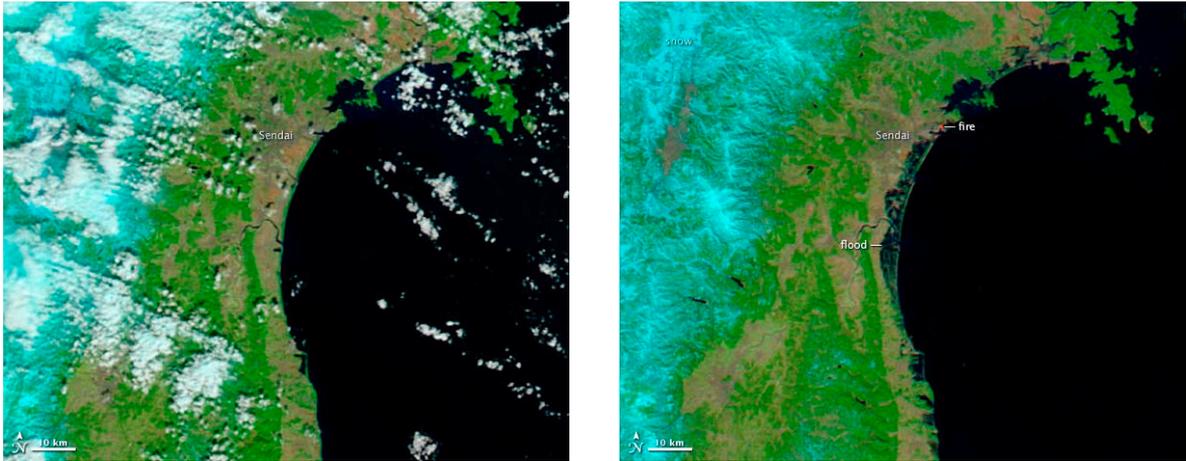


図 3.8 アメリカ航空宇宙局 (NASA) の衛星 Terra に搭載された中解像度可視・赤外線放射計 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) によって撮影された仙台平野：左は地震前 2011 年 2 月 26 日、右は地震後の 3 月 13 日の状況で、仙台湾岸に浸水域が現れている状況が明瞭に確認できる (Atkinson, N. 2011, 衛星写真：MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC) ¹⁶⁾。

(ii) 液状化による沈下

地殻変動の他にも物理的に津波堤や護岸の高さを減ずる現象は少なくない。その一つが液状化である。液状化による地盤の沈下も数 m に及ぶ可能性がある。近年の地震の事例として 1990 年のルソン (Luzon) 地震 (フィリピン, Ms7.8) が挙げられる。この地震ではルソン島中央平野の西端からリングイエン (Lingayen) 湾に沿った低地で液状化が多発している。ルソン島中央平野の北端、リングイエン湾に面したダグパン (Dagupan) ではアグノ (Agno) 川の支流であるパンタル (Pantal) 川の蛇行域に沿ってその中心部が発達している。液状化による地盤沈下は市中心部 (16.043, 120.338 付近) で 1 m 程度であり、地震直後は干潮時でも浸水している箇所が見られた。寸断された排水路に砂が入り込み排水不良で衛生面でも深刻な状況にあった ¹⁸⁾。ダグパン市の北、リングイエン湾に面した小都市アリングアイ (Aringay) のアラスカ地区 (Alaska, 16.384, 120.329 付近) では地盤が 1~3 m ほど沈下し、満潮時には家の軒先までが浸水するようになった。サントマス (Santo Tomas) 近郊のナルバカン (Narvacan, 16.259, 120.367 近辺) はリングイエン湾に突き出した砂嘴の先端近くにあったが、集落全域が海面下に没した。最大沈下量は 3 m にも達したとされる ¹⁹⁾。現在でもこれらの地域の状況は衛星写真で確認できる (図 3.9)。

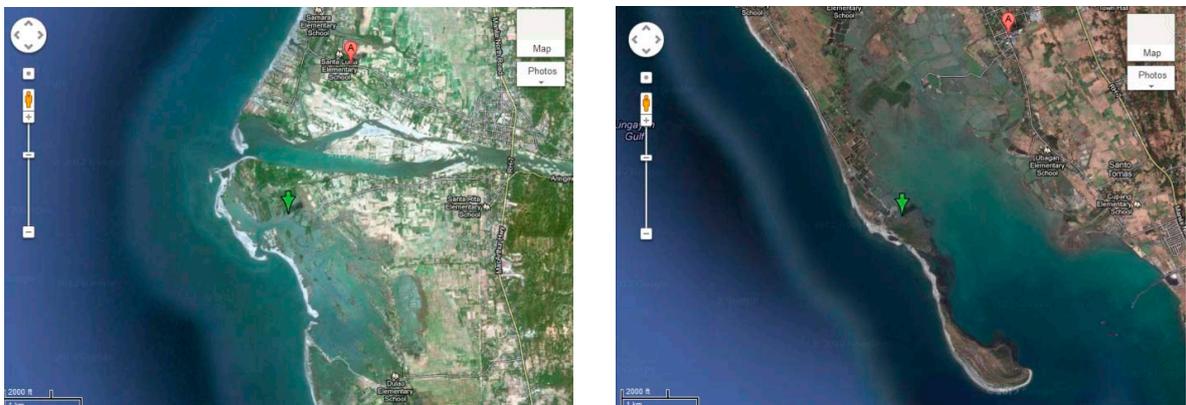


図 3.9 1990 年フィリピン・ルソン地震で液状化により大きく沈降した地域：左の緑の矢印はアラスカ地区 (Alaska, 16.384, 120.329 付近)、右はナルバカン (Narvacan, 16.259, 120.367 近辺)。衛星写真は Google Map

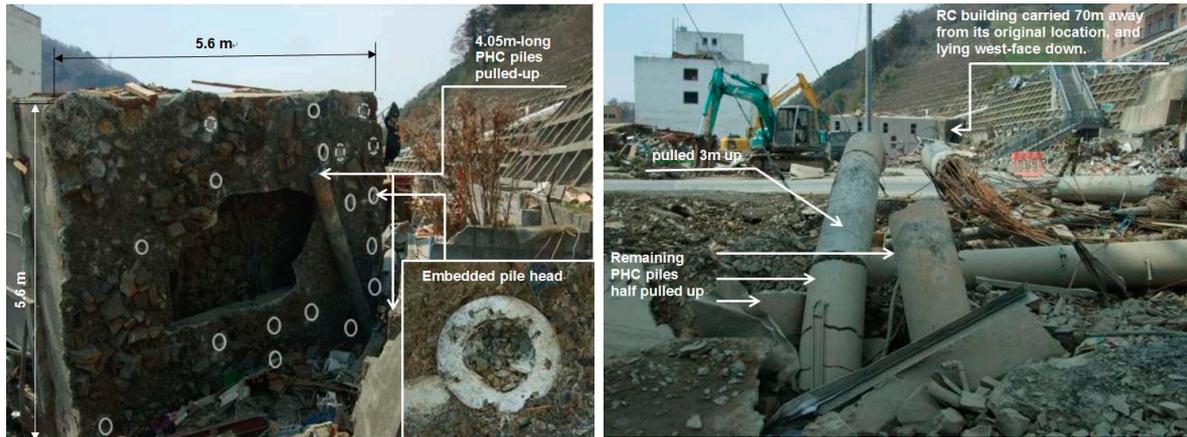


図 3.10 女川町で流された RC 建物 (左: 38.442489, 141.444946) と引き抜けた PC 杭 (右: 38.44246, 141.445697) ²²⁾

1964 年の新潟地震でも液状化による沈下は深刻であった。新潟駅北にある明石通は昭和 29 年より土地区画整理事業により湿地地帯を埋め立て、市街、街路を造成した所で、元禄時代は河川であったと推定されている。被害はおよそ 640 m にわたり、沿道のビル、人家などが陥没あるいは傾斜し、地下水・土砂の噴出により地震直後は 60 cm の深さで浸水した ²⁰⁾。通船川の周辺では津波の浸水が 1 カ月以上も続いた場所があったとされる ²¹⁾。

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災の津波被災地では仮に液状化の痕跡があったとしても大半が津波で流されていて液状化が津波堤や護岸に与えた影響の評価は極めて困難である。女川では杭支持の RC 建物が複数流され、中には引き抜けた PC 杭を引きずりながら流された建物もある (図 3.10) ²²⁾。このあたりをビデオカメラで撮影した画像には岸壁背面から泥水が流れ出ている光景もあって、PC 杭周辺地盤が液状化したのではないかなどの推測がなされているが確たることは不明であり、今後様々な調査を俟たなければならないであろう。

震源から大きく離れた関東平野でも多数の液状化被害が報告されている。東京湾岸で液状化の報告された埋立地は合せて 42 km² にも及ぶとされる ²⁴⁾。このあたりの洪積層内部での加速度記録が新木場で得られていてその最大加速度は合成値で 51.05 cm/s² 程度、地表でも 126.8 cm/s² で 0.1 G をわずかに超えたに過ぎない ²⁵⁾。それでもその継続時間の長さが液状化に大きくつながったとの見解があり幅約 200 km、長さ約 500 km の広範囲に亘った震源域を持つ海溝型巨大地震の課題を改めて浮き彫りにした形になった。

図 3.11 は浦安市の上空から航空レーザー計測を行い得られたデジタル地表モデル (Digital Surface Model, 以下 DSM) を地震前の DSM と比較し、標高の差を抽出したものである ^{22),23),26)}。この比較にあたっては東日本の広域で基準点がずれてしまったことがあり、液状化による浅層地盤のみの沈下を抽出するため杭支持の RC 建物の屋上標高をテンプレートとして 2 つの DSM を重ねている。図 3.11 右上の 1946 年に米軍によって撮影された航空写真と比較すると、現在の市域の広範な部分が埋立地の上に広がっていること、そしてその埋立事業が戦後に進められたことがわかる。青色の濃い沈下の大きな箇所はおおむね東西方向に幅 1 km ほどの帯として広がっていて、大きな沈下は 0.5 m を超えている。現在、実務的には液状化層厚に 0.05 を乗ずることで地盤の沈下量の推定が行われているが、今回の地震ではそれほど強くないが長時間継続する地震動についてはたして同じような経験則が通用するのか確認する意味でも貴重なデータとなろう。そしてこのようなデータの整備が沿岸地域や河川の周辺で進むことは、今後の地震・津波防災を講ずる上でいうまでもなく重要である。それは液状化が同じ場所で繰り返し起こることが過去の地震を振り返ることで指

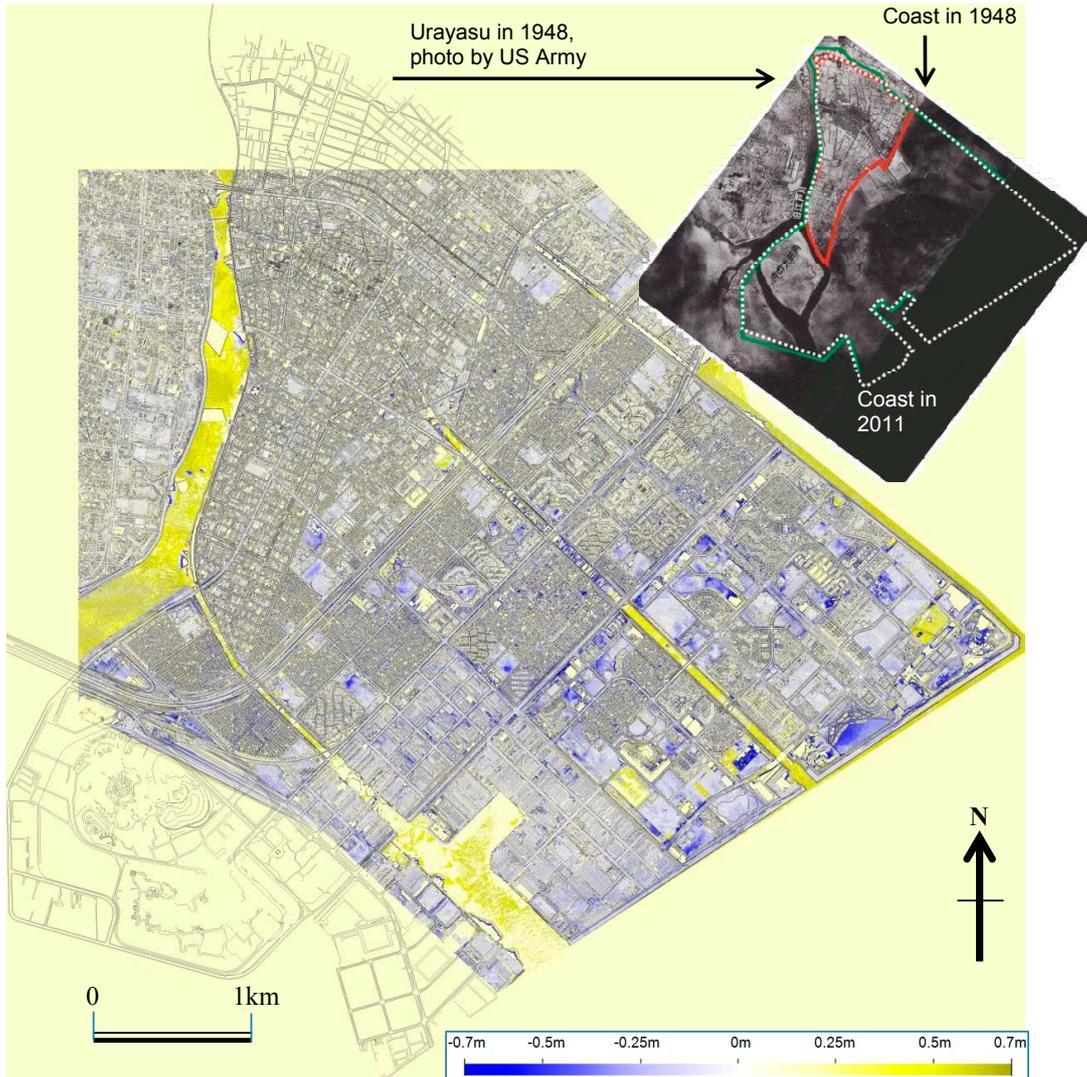


図 3.11 浦安市の液状化による沈下マップ²³⁾：図右上の 1946 年に米軍によって撮影された航空写真と比較すると、現在の市域の広範な部分が埋立地の上に広がっていること、そしてその埋立事業が戦後に進められたことがわかる。青色の濃い沈下の大きな箇所はおおむね東西方向に幅 1 km ほどの帯として広がっていて、大きな沈下は 0.5 m を超えている。

摘されるようになったからでもある。若松は 1987 年の千葉県東方沖地震で液状化の発生があった場所で、今回の地震で再び液状化が発生した市町村数が 147 に及ぶことを指摘している²⁷⁾。護岸、津波堤の今後の整備を進めるうえでも今後詳細な情報の共有と開示が必要であろう。

沿岸部の液状化ばかりではなく河川堤防が液状化で沈下することにも留意する必要がある。津波が河川を遡上する事例は過去に少なからず報告されているからであり、また東北太平洋沖地震でも津波の河川遡上と被害が多数確認されているからである。河川の多くは長い歴史の中で洪水対応として人工的にその流路が改修されてきた。しかしながら地震が起こると、かつての川筋があぶりだされるように液状化痕跡として浮き上がってくる（図 3.12）。加えて直線的な流路に改修されたことでさらに内陸奥まで津波が遡上する可能性が高くなっている。過去にさかのぼって地形地質情報を確認し、津波の遡上に備える必要がある。

(iii) 長期に進行する沈下

2012 年 1 月の後半になって各報道機関がマグニチュード 7 クラスの首都直下型地震が発生する確率は 4 年以内で 70% とする東京大学地震研究所の研究結果を報道している²⁹⁾。地震調査研究推進本部は同程度の



図 3.13 総武線中川放水路橋付近の左岸から荒川河口方面（写真撮影：小長井，2011年10月，35.711349, 139.855736）

3.3 各種施設，システムにおける機能・安全確保

3.3.1 防波堤・防潮堤・堤防

a. 東日本大震災における防波堤・防潮堤等の変形・破壊メカニズム

東日本大震災においては，防波堤・防潮堤等がかなり多く破壊された。そのようななか，今回の津波においては被災の様子を撮影したビデオが多くあり，そこから被災原因が推測されている。その結果は，委員会などで整理されつつあるが，総じて津波が構造物を乗り越えた際や引波時に被災したケースが多かった。

特に釜石の防波堤の被災メカニズムを検討するため，水理模型実験および数値計算がなされ，越流により背面の圧力が減圧すること，洗掘により基礎マウンドの滑動抵抗力が減少することが明らかとなった。図 3.14 は，その概要を示している。特に，越流などによる洗掘の影響は，防波堤・防潮堤の安定性に大きく寄与していると考えられる。図 3.15 は八戸港の事例であるが，背後が大きく洗掘されており，それにより防波堤がマウンドから滑落したと思われる場所も多かった。今後，このような洗掘の影響を定量化することは



図 3.14 津波に対する防波堤の安定性に関する概念図

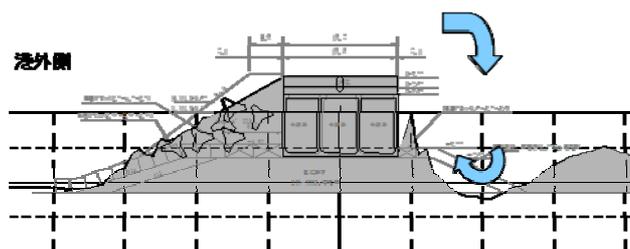


図 3.15 越流洗掘型の事例（八戸港八太郎防波堤（中央部））（東北地方整備局提供）

急務である。

b. 津波に対する粘り強さに対する基本的な考え方

今回の津波では結果として、防護施設が破壊され、被害を完全に防ぐことができず、多くの人命および資産を失うことになり、被災後1年経過してもなお避難生活を強いられている人々も多い。一方で、津波から人命を守るためには、避難が有効であることも様々な場所で報告されている。そのようななか、津波の規模について、100年～150年に1度程度の頻度の高い津波規模と、数百年～千年に1度程度と考えられる最大クラスの津波規模の、2段階で考えるという案が土木学会津波特定テーマ委員会で提唱されている。これは、構造物の設計は、原則として頻度の高い津波規模で考え、一方で、避難計画は、最大クラスの津波規模で考えることにより、たとえ、頻度の高い津波規模を越える津波が来襲し、防護施設を破壊したとしても、人命だけは守るようとする減災の概念であり、ハード対策とソフト対策をあわせて津波による被害を最小限にするという考え方である。

防波堤や防潮堤が設計外力以上の外力で一気に破壊されてしまうことは、背後地域に対し急激に被害の度合いを大きくすることにつながるため、設計外力以上の津波が作用した場合においても、変形は大きくなるが急激な破壊を生じないようにし、構造物の機能低下を極力小さくしたり、構造物が完全に破壊するまでの時間を稼いだりすることが重要である。

図3.16は、その概念を示すものであり、津波の高さが設計の高さを超えたとしても損傷のレベルを抑えることで、防護機能のレベルを保持させるものである。この図では構造物単体の粘りの概念を示すものであるが、特定地区の防護施設全体を考え、ある場所が破壊されても、全体としての防護機能の低下をできるだけ抑えるとした考え方もある。つまり、鋼のように、ある程度の力を加えても塑性変形は許すものの一気に破断には至らない、そういう構造を「粘り強い」構造としている。

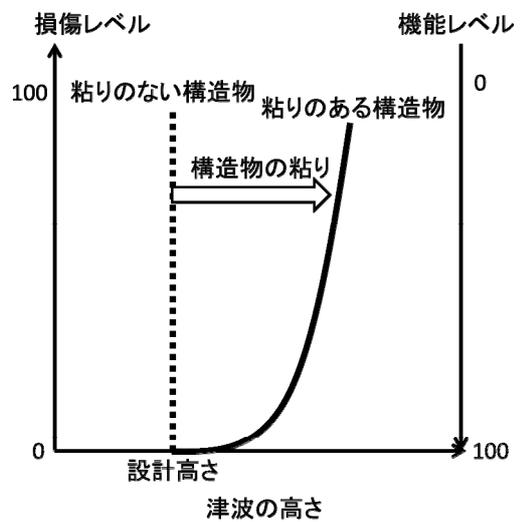


図 3.16 津波に対する「粘り」の概念図

c. 粘り強い構造の一例

構造物単体としての「粘り」の構造は、未だ研究途上にあるが、防波堤の粘り強さの概念は、図3.17に示すようなものであると考えられる。この図では、防波堤背後に捨石等で腹付けすることにより、基礎マウン

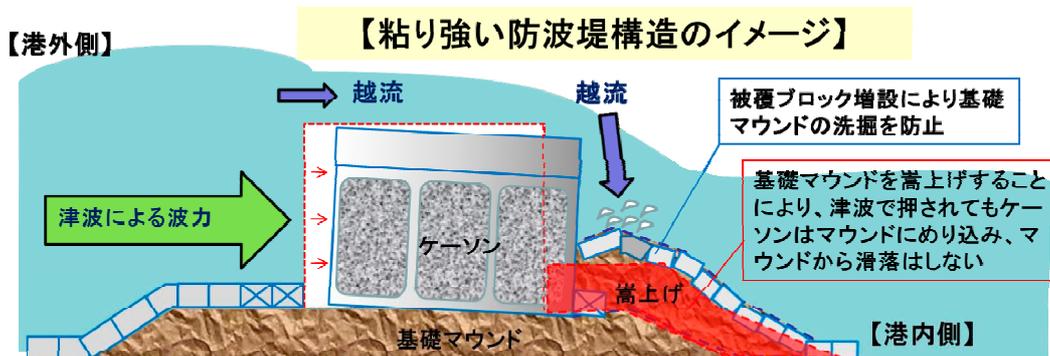


図 3.17 粘り強い防波堤構造のイメージ

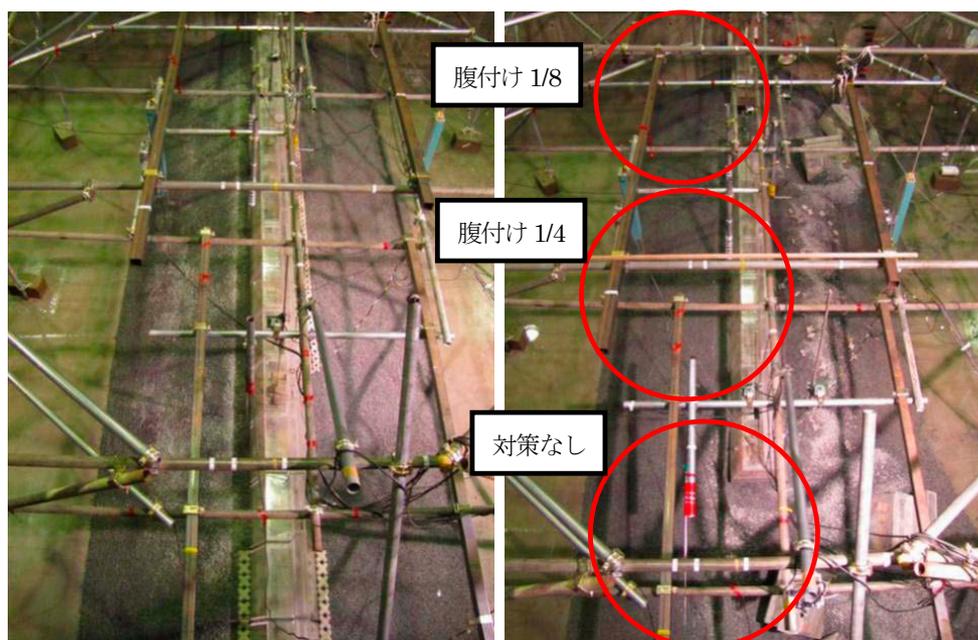


図 3.18 腹付け工の津波に対する粘り強さの実験（左：実験前，右：実験後）

ドにおける洗掘を防止し、かつ、津波の外力が設計高さを越えても、簡単に基礎マウンドから滑落しない構造となっている。

図 3.18 は、腹付け工の津波に対する粘り強さに関する実験の結果を示すものであり、対策なし、ケーソンの高さの 1/8 まで腹付けしたもの、ケーソンの高さの 1/4 まで腹付けしたものをそれぞれならべ、同時に津波の外力を作用させた結果となる。これを見ると、腹付け 1/4 のみケーソンが流されていないことがわかる。これは、腹付け 1/8 では越流による洗掘によりその効果がほとんど見受けられず、一方で、1/4 程度の高さであれば、実験の作用時間程度では洗掘されきれず、津波力に耐えられたことが示されている³¹⁾。

腹付けにより粘り強い構造となる可能性が示されたが、越流による背後の洗掘防止は必須であり、上部工の形状の工夫や被覆ブロックの重さの選定も重要となる。

d. 今後の課題

今回の津波による防護施設の被災状況やそれに伴う背後地域の被災状況から、津波に対する防災の考え方は、ソフトとハードの対策による減災の考え方にシフトしている。そのようななか、設計外力以上の津波が作用した場合においても、一気に破壊しない「粘り」の構造の解決は急務である。一例として腹付け工を示したが、単に腹付けを行うだけでは、津波のように作用時間が長くなれば、越流洗掘によりその効果がゼロとなり、施設の防護機能をゼロとなってしまう。そのため、越流洗掘を防止する構造を考え出すことは必須となる。また、防波堤や防潮堤等の変形まで定量的に予測可能な手法を開発することが、今後の大きな課題であると考えられる。

3.3.2 発電所

a. 火力発電所の津波安全

(i) 津波被害の概要

津波対策に関して、法令などにより設計方法を規定したものはないが、各火力発電所においては既往津波や低気圧等による高潮時の潮位を考慮し、整地地盤高さや発電所本館床面高さなどを決めてきている。東日

本大震災では、こうした想定された水位を大きく上回り、東北電力株式会社、東京電力株式会社、常磐共同火力株式会社、株式会社クリーンコールパワー研究所などの火力発電所に甚大な設備被害が生じた。ただし、いずれも人命への重大な影響や、火災、爆発、危険物の大量流出はなかった。

東北電力株式会社の設備においては、仙台火力発電所、新仙台火力発電所、原町火力発電所が広い範囲の津波被害を受けた。原町火力発電所において2基の重油タンク（各9800kl）うち1基が倒壊した（**図 3.19**）。その他の設備では、揚炭機の倒壊（**図 3.20**）、発電所建屋への浸水、ポンプ、電動機類の冠水、大型通風機、電気集じん機、変圧器などの冠水や破損があった。また、地震動の影響か津波の影響か推定困難とされるが、補機基礎の傾きや荷役岸壁の変位があった。このように大被害を受けた原町火力発電所では、復旧に長期間を要し、運転再開は2013年夏までと見込まれている。



図 3.19 津波による重油タンクの損壊³²⁾

図 3.20 津波による揚炭機の倒壊³²⁾

東京電力株式会社の設備においては、広野火力発電所、常陸那珂火力発電所、鹿島火力発電所で広い範囲の津波被害があった。危険度の高い油タンク、LNG タンクの本体に被害はなかったが、付属設備には水流による破損があった。その他の設備では、発電所建屋への浸水、ポンプ、電動機類の浸水、揚炭、コンベアの破損などがあった。揚炭、コンベアの破損は船の衝突によるものである。

(ii) 今後の津波対策のあり方

電力系統の設備形成において、複数の発電所が複数の送電線を介して一体的な運用のネットワークを形成していることから、東日本大震災においても電力の融通により広域・長時間の供給支障を回避することができた。しかし、計画停電の実施や、その後の節電要請などを踏まえると、原子力発電所がベース電源としての供給力を失った状態では、火力発電所からの安定供給力は現代社会システムの維持においてクリティカルであり、社会安全の観点から津波対策の強化が求められる。

東日本大震災を踏まえ、地域防災計画等に向けて土木学会等では2段階の津波レベル、すなわちレベル1津波（防護レベル）とレベル2津波（避難レベル）を提案しており、これらは地域の津波発生シナリオを設定する際の上位概念とされている。一般の海岸保全施設は、人命及び資産を守るためにレベル1津波に対して設計される。この場合、津波高さは数十年から百数十年に1度発生する頻度が対象となる。これに対して、レベル2津波はレベル1津波をはるかに上回る規模の大津波であり、再現期間は数百年から千年の津波が対象となる。人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベルである。レベル2津波に対して海岸保全施設で対処することは現実的でなく、津波防災計画においては海岸保全施設の機能に期待をかけない避難対策がなされる。

震災後のこの新しい津波防災の考え方に照らして、火力発電所においても2段階の津波対策を提案する。すなわち、レベル1津波に対しては、発電所に関わる人命や資産を守る。そのために、防波堤や防潮堤などにより施設への浸水を防ぐ。これをドライサイト対策と名付ける。レベル2津波に対してのドライサイト対策は現実的でないため、①人命に重大な影響を与えないことを主目的とした燃料タンク等危険物の破損防止対策、②長期的な発電支障を生じさせないことを主目的としたその他設備の復旧難易度に応じた対策、に区分した取り組みが求められる。

なお、東日本大震災での地震動による火力発電所の被害は津波被害と比べて比較的小さく、兵庫県南部地震を踏まえた国の防災基本計画（平成7年7月）の「耐震性確保の基本的考え方」に基づく耐震対策（図3.21）が有効であったことが報告されている。なお、震動や液状化によって個々に生じた設備被害が火力発電所システムの復旧に及ぼした影響を踏まえるとともに、地震の特性（卓越周期、プレート境界型や内陸直下型等）を考慮して、引き続き耐震対策の充実を図るべきである。

<p>耐震性区分Ⅰ：一旦機能喪失した場合に人命に重大な影響を与える可能性のある設備(ダム、LNGタンク（地上式、地下式）、油タンク)</p> <p>確保すべき耐震性；</p> <p>A.一般的な地震動に際し個々の設備毎に機能に重大な支障が生じないこと</p> <p>B.高レベルな地震動に際しても人命に重大な影響を与えないこと</p>
<p>耐震性区分Ⅱ：耐震性区分Ⅰ以外の電気設備（水路等、水タンク、発電所建屋・煙突、ボイラー及び付属設備、護岸、取放水設備、変電設備、架空送電設備、地中送電設備、架空配電設備、地中配電設備、給電所、電力保安通信設備）</p> <p>確保すべき耐震性；</p> <p>A.一般的な地震動に際し個々の設備毎に機能に重大な支障が生じないこと</p> <p>C.高レベル地震動に際しても著しい（長期的かつ広範囲）供給支障が生じないよう、代替性の確保、多重化等により総合的にシステムの機能が確保されること</p>

図 3.21 電力設備（原子力を除く）の耐震対策の基本³²⁾

b. 原子力発電所の津波安全

(i) 津波被害の概要

津波の影響を受けた原子力発電所は、東京電力株式会社の福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、東北電力株式会社の女川原子力発電所、日本原子力発電株式会社の東海第二原子力発電所である。「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本政府の報告書（平成23年6月原子力災害対策本部）」、東京電力「福島原子力発電所調査報告書（中間報告）平成23年12月」³³⁾等によれば、津波が非常用電源に及ぼした影響として以下が知られている。

最初に、地震動により外部電源系における変電機器や送電鉄塔が損傷し、全号機への外部電源は失われていた。その後、福島第一原子力発電所（全6号機）では、防波堤（10m）を越流した津波が敷地前面海域から来襲し、主要建屋設置位置のほぼ全域が冠水した（図3.22）。敷地高さは、1～4号機が10m（小名浜港工事基準面からの高さ）、5および6号機が13mである。この発電所の設置許可申請書における設計津波水位は3.1mとされている。全号機の補機冷却用海水ポンプ施設が冠水した。1号機から5号機までは常用系、非常用系の高圧電源盤がすべて被水しており、仮に外部電源や非常用ディーゼル発電機が機能していたとしても電力を必要とする機器に供給することができない状況であった。

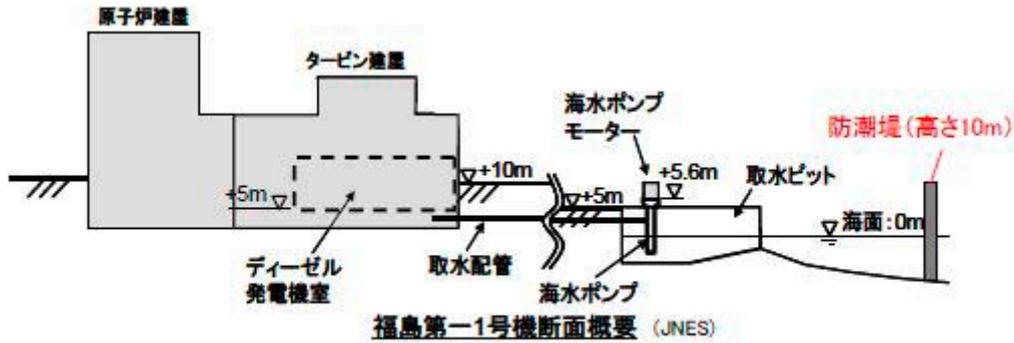


図 3.22 福島第一原子力発電所の防波堤を越流する津波の状況³⁵⁾

福島第二原子力発電所（全4号機）では、海側エリアから O.P.+12m の主要建屋敷地エリアへ斜面を超えて遡上した痕跡は認められなかった。一方、主要建屋エリア南側から免震重要棟へ向かう道路に沿って集中的な遡上が認められた。海側エリアの浸水高さは痕跡調査結果により約 7m と報告されている。この発電所の設置許可申請書では設計津波水位は 3.1m～3.7m（号機によって異なる）とされている。補機冷却用海水ポンプ施設のうち、残留熱を除去するために必要な海水系は全 8 系統のうち 3 号機の 1 系統を除いて機能を喪失した。非常用ディーゼル発電機は、地上開口部から原子炉建屋（付属棟）に浸水した 1 号機では、3 台ある非常用ディーゼル発電機のすべてが被水して使用できなくなった。また、非常用ディーゼル発電機の海水系（4 基で全 12 系統）は 3 号機の 2 系統、4 号機の 1 系統を除きすべての機能が喪失しており、この結果として海水系を喪失した非常用ディーゼル発電機 9 台が機能喪失した。なお、地震動により外部電源の故障による送電停止があったが、複数系統のうち 1 系統が送電可能であった。

女川原子力発電所（全 3 号機）では、海側の敷地で海水の浸入した跡が認められたが、敷地高さ 14.8m（女川原子力発電所工事基準面からの高さ）にある主要な建屋には到達しなかった（図 3.23）。設置許可申請所では、設計津波水位は 9.1m とされている。港内静穏域に設置されていた潮位計の記録によれば観測最大水位は約 13m である。すなわち、設置許可申請での設計津波水位を超える津波が襲来したが、敷地高さにおいて余裕をみた津波対策により非常用冷却系の機能を確保できた。海水ポンプ室への直接の冠水はなかったが、地下取水ピットの水位上昇によって海水が溢れ、2 号機の補機冷却系ポンプが浸水し、非常用ディーゼル発電機の冷却機能が失われ、同発電機 3 台のうち 2 台が停止した。なお、外部電源系においては、発電所敷地内の受電設備が故障し受電不可となったが、3 月 12 日に復旧し、通常の電源系統に復帰した。

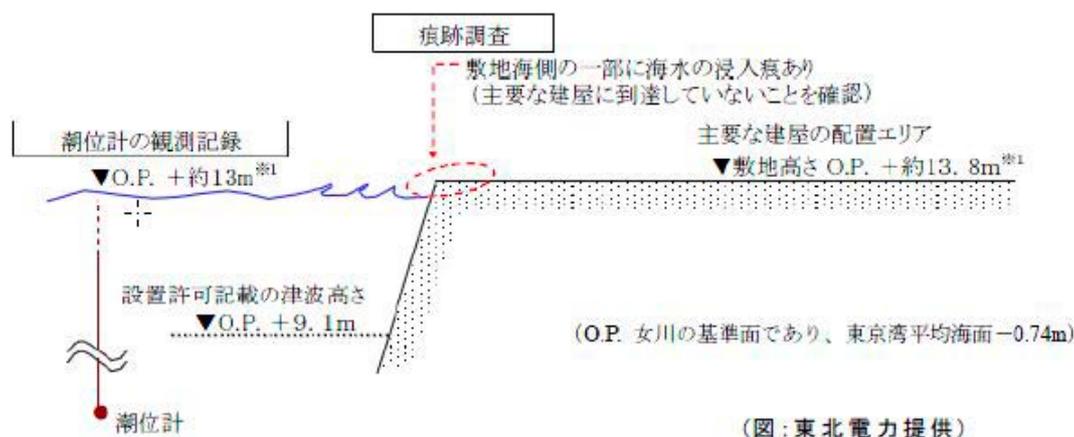


図 3.23 女川原子力発電所に襲来した津波の状況³⁵⁾

なお、各発電所とも、設置後の耐震バックチェックとして津波に対する検討がなされてきており、それには土木学会「原子力発電所の津波評価技術」³⁴⁾が標準手法として適用され、設置許可申請時の津波高さを上回る水位が推計されていた。この内容について、震災を踏まえての検証が今後必要と考える。

(ii) 今後の津波対策のあり方

原子力発電所では、発電所の設置許可申請時に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（2006.9.9 原子力安全委員会）」により「施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生すると可能性がある」と想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。」が国の安全審査において個々に確認されることになっている。安全審査は、これまで1次審査（原子力安全・保安院）と2次審査（原子力安全委員会）によるダブルチェック体制で行われてきた。審査では、地点ごとに設定する設計津波最高水位に対する安全性（敷地に侵入しないこと）と、設計津波最低津波に対する安全性（非常用取水を確保すること）が要求されている。

震災を踏まえ、耐震設計審査指針の改訂案（原子力安全委員会 地震・津波関連指針等検討小委員会 2011.12.26）がとりまとめられた。そこでは、上記の「適切な津波」の設定において安全審査上規定すべき事項が新たに設けられている。基本的考え方は、現行指針の「施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生すると可能性がある」と想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。」が踏襲されており、サイトごとに定められるこのような津波（基準津波という）に対して「施設を浸水させないこと（ドライサイト対策）」と「水位低下に対しても取水を確保すること」を基本要件としている。

原子力発電所で考慮される基準津波やその要件は、一般施設での津波とは異なるので、一般施設におけるレベル1津波（防護レベル）、津波レベル2津波（避難レベル）と、原子力発電所における基準津波とを直接対比させることはできない。敢えて対応づけるとすれば、原子力発電所での基準津波は、一般施設での津波レベル2に不確かさを考慮して十分安全側の設定する大きさに相当すると考えられる。

以下には、耐震設計審査指針の津波に関する改訂案の論点を記す。

1) 基準津波の設定

津波の発生要因として以下を考慮した波源モデルに基づいた津波（検討用津波）を複数作成したうえで、安全側に基準津波を設定する。

- ・ プレート間地震

- ・ 海洋プレート内地震
- ・ 海域の活断層による地殻内地震
- ・ 火山現象
- ・ 地すべり, 斜面崩壊
- ・ 上記の組み合わせ

基準津波は, 人工物の影響を受けない敷地沿岸域に入射する時刻歴波形として設定するとされているが, その具体的方法については明らかでない。東北地方太平洋沖地震を含めた世界の既往の大津波に関する記録の反映, 想定すべき津波波源に関する自然科学の最新知見の反映などが求められる。

2) 基準津波に対する安全性評価

基準津波によって施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないことは, 主に以下によって確認する。

- ・ 水位上昇については, 施設設置位置や津波に対する防御施設の措置等による施設を浸水させないこと。また, 開口部等から施設に津波が浸入しないこと。
- ・ 水位低下については, 必要な時間, 取水が確保できること。
- ・ 砂移動については, 取水口の閉塞等によって取水の妨げにならないこと。

津波に対する防御施設等に関しては, その構造に応じ, 浸食や洗掘に対する抵抗性, すべりや転倒に対する安定性を評価し, それらの破損, 変形に起因して浸水防御機能が損なわれることがないこと等を確認する。

3) 浸水に対する考慮

基準津波の大きさをいかにどのように定めようとも, 津波現象に対する人知が及ばないところがあるので, 仮に浸水すると想定しての考慮が必要というのが今般の震災の教訓である。現時点では, まだ, 耐震設計審査指針への記載が明らかではないが, 東日本大震災における原子力発電所への浸水を踏まえて, 津波高さが施設設置位置を上回る可能性に対しての, 設備・機器類の重要度に応じた水密性・防水性等の構造的対処が必要である。これらは, 既設の各サイトにおいては震災後の緊急安全対策としてすでに実施されていることであるが, 安全審査における体系的な規定としてはまだ整備されていない。

今後, 基準津波を超える事象に対しては, 緊急安全対策の効果, ストレステストの結果, 確率論的リスク評価(津波 PRA)などに基づいて, 安全余裕や炉心損傷リスクを明らかにしていく必要がある。津波 PRA については, 最近, 津波を起因とした確率論的リスク評価の実施基準が日本原子力学会の場で, 多分野の専門家の意見や公衆審査を経てとりまとめられている。これには, 土木学会での研究成果「確率論的津波ハザード解析の方法」³⁶⁾が反映されているが, 今後実務者の協力を得て具体的な適用事例について知見を集積する必要がある。

(iii) 土木学会「原子力発電所の津波評価技術」の改訂動向

2002年に土木学会による津波評価技術がまとめられて以降, 設計津波水位の設定のための標準的なマニュアルとして関係者に利用されてきた。しかし, 基本条件として考慮すべき震源の設定において, 東北地方太平洋沖地震の震源を想定しておらず, 適用可能な範囲に限度があることが明らかになった。今後は, このように再現期間の長い巨大津波を基準津波の設定に反映する必要がある。日本海溝沿いに関しては東北地方太平洋沖地震を既往最大津波として扱う場合の課題を追究するとともに, 他の地域に関しては既往地震や想定地震に関する地震学の進展を適切に取り入れて改訂する必要がある。その際のキーテクノロジーとして, 主に以下の課題が挙げられる。

- ・ 津波堆積物などによる古津波の研究成果の反映

- ・ 再現期間の長い地震や連動性の地震など、これまで十分考慮されていない震源に対応した波源モデルの開発
- ・ 海岸保全施設の破損や越流をよく表現できるモデルの開発
- ・ 浸水域内での氾濫の状態を精度よく表現できるモデルの開発
- ・ 氾濫に伴う漂流物や陸上の土砂移動を精度よく表現できるモデルの開発
- ・ 地震による海底地形変動を直接の原因としない津波の予測（火山，地すべりなど）

3.3.3 橋梁構造物

a. 耐震性能

地震動による被害調査結果から判断すると、鉄筋コンクリート橋梁構造物の耐震設計および耐震補強技術の有効性は十分発揮されたと言える。特に、阪神大震災以降の耐震設計法で建造された鉄道や道路の橋梁構造物にはほとんど被害が認められていない。耐震補強を施した橋梁構造物にも被害が認められていない。道路橋では、杵に被害が認められるものがあり、ゴム製の杵では切断されているものもあったが、落橋には至っておらず、被害としては、想定内とすることができる。



図 3.24 コンクリート橋脚のせん断破壊 (by K. Maruyama)

橋梁構造物の耐震設計は、要約すると2点にまとめられる。第1の点は、橋脚（通常は鉄筋コンクリート橋脚）は、図 3.24 に示すようなせん断破壊を防ぐこと、第2の点は、桁が橋脚から落ちないことである。第1の点を達成するためには、せん断耐力を増すことで、①帯鉄筋量を増やす、②圧縮側コンクリートを十分に拘束する、等の手法があり、具体的な計算方法や施工技術も開発されている。せん断耐力を増すことで、図 3.25 のように、大変形時にも耐荷力を失わない粘りのある鉄筋コンクリート橋脚が得られる。

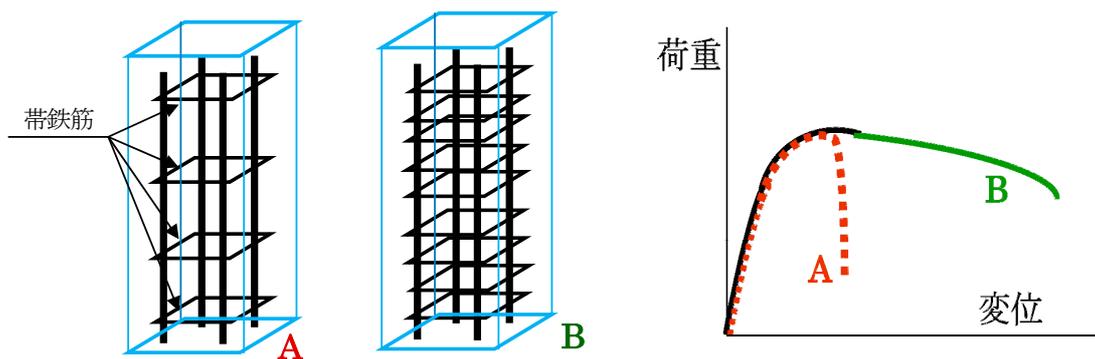


図 3.25 帯鉄筋の効果

第2の点は、落橋防止装置と呼ばれて、種々の工法が開発されている。鉄筋コンクリート桁では、スパンがそれほど長くないことから、主として、橋脚頭部の横桁の幅を広くし、そこに、主桁の横移動を防止する装置を取り付ける。鋼橋の場合は、スパンが長くなるため、桁の移動を防止するというより、桁の自重を支えることのできる鋼棒あるいは鋼ロープにより桁を橋脚頭部に取り付けていて、まさに、桁が落ちることだけを防いでいる。

b. 耐津波性能

インターネットの Google earth および現地調査の結果、青森県から千葉県までの太平洋沿岸にある橋梁で、津波で流失したものの数は、鉄道橋 28, 国道および県道 40, 市町村道 154 で、合計 222 橋となっている。海岸線から 5 km までの内陸部に存在した橋梁の数は 3 090 であるが、浸水域の橋梁数はこれより少なく、浸水しても流失を免れた橋梁は 1 703 橋である。どのようにしたら、津波にも抵抗できる橋梁になるかは、目下のところ研究中で、まだ、十分な解答が得られていない。図 3.26 のような鋼桁に取り付けられた落橋防止装置、および図 3.27 のような PC 桁用の落橋防止装置では、津波による桁の流失を防ぐことは全くできなかった。一方、図 3.28, 図 3.29 を見ると、桁を橋脚頭部に十分固定して流失を防ぐ工夫をすると、津波によって桁側面に作用した力が橋脚に伝わり、場合によっては橋脚を破壊させたり、基礎に力が伝わって、橋脚を傾かせたりして、最終的には桁の落橋に至っている。



図 3.26 鋼桁の落橋防止装置



図 3.27 PC 桁の落橋防止装置



図 3.28 橋脚頭部の破壊

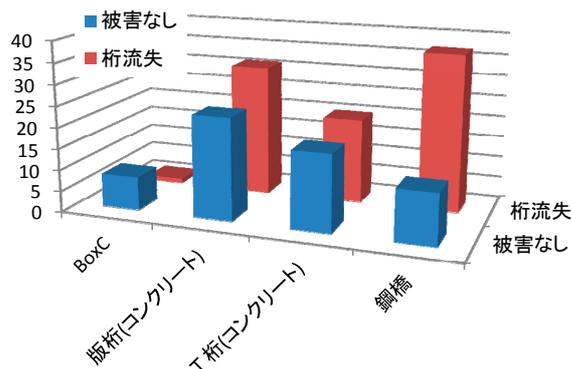
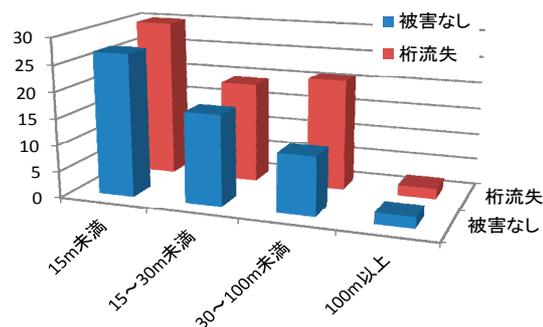


図 3.29 橋脚の傾倒

一方、図 3.30 (仙台空港) のように、津波高さは 5~6m であったと予想される地域で、ほとんどの橋脚は流失していない。津波高さや流速を橋梁位置で推定する作業はまだできていないので、橋梁の種別や桁の長さ (スパン長) で分類してみたのが図 3.31, 図 3.32 である。これらの作業は、コンクリート委員会の中に設置された略称「橋梁津波委員会」のメンバーである田中泰司氏 (長岡技術科学大学助教) によるものである。



図 3.30 仙台空港近辺の橋梁の様子

図 3.31 桁の種類の影響³⁷⁾図 3.32 桁の長さの影響³⁷⁾

「被害なし」とした橋梁は、流失した橋梁の近傍にある橋梁で、ほぼ同様な津波の力を受けたと想定されるものを数えている。図からは、流失した橋梁の数と流失を免れた橋梁の数が同じような印象を与えているが、前述したように、浸水域で流失していない橋梁数はかなりの数に上っている。

この結果からは、まだ、結論を導き出すまでには至っていないが、各橋梁位置での津波の高さ、速度等の詳細なデータ（津波解析から得られるデータ）を基に、より具体的な検討が必要であることを示唆している。

3.3.4 交通システム

a. 高速道路

(i) 高速道路における津波被災とその現状

平成 23 年の東北地方太平洋沖地震において、NEXCO（東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)）が管理する高速道路では、津波により東名高速道路、西湘バイパス、新湘南バイパス、仙台東部道路が通行止めを実施している³⁸⁾。

東名高速道路の富士 IC から清水 IC 間、西湘バイパス、新湘南バイパスで津波警報の発令により、高速道路を利用する車両の安全性を考慮し通行止めを実施したものであり、津波により実際に被害を受け、使用不可の判断により通行止めを余儀なくされた道路施設としては、仙台東部道路の仙台港北 IC、名取 IC、仙台若林 JCT のみである。

東名高速道路の通行止めは、富士 IC から清水 IC までの上下線で、3 月 11 日（金）14 時 46 分から翌 12 日（土）14 時 45 分までの 24 時間通行止めが実施され、西湘バイパスは 3 月 11 日 14 時 46 分から翌 12 日（土）15 時 30 分まで、新湘南バイパスは 3 月 11 日 14 時 46 分から 18 時 35 分まで通行止めが実施されている。

仙台東部道路では仙台港北 IC、名取 IC、仙台若林 JCT が図 3.33～図 3.35 に示すとおり津波の襲来を受け、他に仙台東部道路の道路施設の地震動による安全性確認・復旧作業も含めて、3 月 24 日 6 時まで通行止めが実施されている。

高速道路のような高規格幹線道路は、いうまでもなく災害発生時の自衛隊や消防、警察等の救援車両等の利用、復旧物資等の輸送のための利用の大動脈となるものであり、今回の災害においても東北自動車道を中心に緊急交通路に指定され、緊急車両の走行だけでなく、サービスエリアやパーキングエリアが被災地を往来する緊急車両の中継基地・補給基地として活用されている。

また、東北での津波被災を受け、各地の高速道路では、地元自治体と協定を締結し、高速道路自体が交差道路を跨ぐ盛土等により周辺地盤より高い位置に路面があるため、津波避難地域として活用される等の動き



図 3.33 仙台港北 IC 周辺被災状況



図 3.34 名取 IC 被災状況



図 3.35 仙台若林 JCT 被災状況

も見せている。

(ii) 高速道路の対災のあり方

高速道路は、高速走行における安全性および有料道路制度のため、その流出入が限られる構造である。このため、津波が襲来した場合、あるいは襲来が予想される場合に、高速道路を外れての避難は不可能である。それゆえ、津波が襲来すると想定される場合は、高速道路の通行止め、つまり閉鎖をすることが車両および人命を守るために必要となる。

また、高速道路のような高規格幹線道路は、常時においては走行の定時性が求められ、緊急時においては上述のように緊急車両の走行が求められている。その通行が不可となった場合の影響は、当然甚大となり、避難あるいは救援、復旧・復興にも影響が及ぶこととなる。

以上から、高速道路は、津波の影響を受けない地域に計画、あるいは津波の影響を受けない高さで計画されることが望ましい。しかし、国土が狭く、地価も高価な我が国において、全ての高速道路において津波の影響を受けないように計画することは困難である。

このため、必然的に津波の影響を受ける地域、あるいは受けることを前提に計画せざるを得なく、現実的に既に津波の影響を受ける地域に高速道路が建設されており、この対応については未だ今後の議論となるところである。

(iii) 高速道路の対災目標

津波レベル 1 に対しては、津波襲来においても被災せず、当然、供用可能な状態を確保することが望ましい。例えば、北陸自動車道の親不知高架橋（図 3.36）のように路面高さを高くし、走行車両へ津波が影響しないことが理想であろう。しかし、これが不可能な場合（例えば工事費や取付道路等の関係から）は、物流・救援等のルートのリダンダンシーの観点から、例えば東名高速道路に対する新東名高速道路のように、代替ルートの確保が必要となる³⁹⁾。



図 3.36 北陸自動車道 親不知高架橋

津波レベル 2 に対しては、影響を受けないとするには、経済合理性から困難な場合が多い。したがって、津波襲来が予想される場合には、走行車両の安全性のために通行止めを実施し、まず、人命の安全確保を最優先に考えるべきである。一方、道路構造物に対しては、被災を受けるものの、その後の救援・物流の確保のために、速やかに緊急車両の走行が可能となるよう、大きな損傷は生じないようにすべきである。

津波レベル2を超えるものに対しては、津波レベル2と同様に、通行止めは行うものの、道路構造物に対しても速やかに緊急車両が走行できるようにすることが理想ではあるものの、想定を超える津波に対しての損傷を限定的に留められるかは、現時点の科学的な根拠は不明である。このため、このような事態に至っても、国内の物流が完全に止まらないように、まさにリダンダンシーとして代替路線を想定しておくことが重要である。阪神淡路大震災において、名神高速道路・中国自動車道が通行止めとなった際には北陸自動車道と国道27号が東西を結ぶ代替ルートとなり、支援物資や救援車両を被災地へ送り届ける大動脈となった事例もある⁴⁰⁾。

以上、津波レベルに応じた高速道路の機能確保レベルをまとめると表3.2のとおりである。今後、高速道路等の高規格幹線の津波に対する機能確保について、国レベルで議論され、災害に強い国土形成がなされることが望まれる。

表3.2 津波レベルと高速道路の機能確保

津波レベル	高速道路の走行	高速道路の構造物
津波レベル1	走行可能	損傷なし
津波レベル2	津波襲来時は通行止め、速やかに復旧し走行可能	損傷は限定的で、速やかに緊急車両の通行を可能とする
津波レベル2を超える	通行止め	損傷は限定的、あるいは代替ルートにより物流を確保

b. 鉄道

(i) 鉄道における津波被災

東北地方太平洋沖地震において、岩手県、宮城県、福島県に跨る多数の鉄道路線が津波の被害を受け、太平洋沿岸部のJR東日本、三陸鉄道、仙台空港鉄道の各路線のほか、貨物専用線も被害を受けた。

JR東日本では、八戸線、山田線、大船渡線、気仙沼線、石巻線、仙石線、常磐線で津波の被害を受けた。主な被害は、津波による駅舎流失23駅、線路の流出・埋没65箇所(延長約60km)、橋桁流出・埋没101箇所、道床碎石流出約80箇所、盛土・切取等土工設備の変状約50箇所、電柱の折損・傾斜・ひび割れ約950箇所、軌道変位約210箇所などであり、合計約1680箇所被害を受けた。三陸鉄道では、北リアス線、南リアス線の両線区で津波の被害を受け、北リアス線で駅舎流失1駅、線路の流出2箇所、橋梁・高架橋の損傷15箇所など合計122箇所が被災、南リアス線では流失した駅舎はなかったものの、駅舎損壊4駅、線路の流出2箇所、橋梁・高架橋の損傷20箇所など合計423箇所が被災した。また、仙台空港線でも、駅舎損壊2駅、橋梁・高架橋・トンネルの損壊3箇所を含む10箇所津波被害を受けた。一方、貨物専用線においては、JR貨物グループの5路線で、津波により駅舎や線路、橋梁・高架橋の損傷、列車の脱線などの被害を受けた。図3.37に東北地方において津波による鉄道の被災路線を



図3.37 津波による鉄道の被災路線

示す。

東北地方太平洋沖地震における沿岸部の鉄道の被害の特徴としては、地震の規模がかなり大きかったにもかかわらず、地震動による揺れの被害はそれほど多く報告されていないが、津波による被害は甚大であり、津波の影響の有無によって、構造物の損傷状況が大きく異なる状況が各地で見られた。以下に、線路、橋梁、盛土の被害状況について述べる。

まず、線路は津波により流失する被害を受け、山田線磯鶏～津軽石間や大船渡線陸前矢作～竹駒間などJR東日本の7線区と三陸鉄道の2線区で合計71箇所の線路流失被害を受けた。過去の被害において、木製の枕木が用いられている場合は、津波により大きな浮力が働き、線路が大移動することが知られている。今回も、線路流出箇所の近傍などでは、線路の大移動が多数確認された(図3.38～図3.39)。

次に、橋梁の被害であるが、JR東日本の7線区で101箇所の橋桁が流失・埋没したほか、橋脚の傾斜や折損、橋台背面盛土の崩壊・流失など、多数の被害が報告されている。鋼桁は比較的軽量であるため流失し易いが、比較的重いコンクリート桁も移動や転倒などが相次いだ。これらの橋梁は設計年代が古いため、多くの支承構造は旧式の鋼製支承であり、移動制限装置や落橋防止装置が設置されていなかった。このため、津波により桁に水平方向あるいは上方の力が働くと、橋脚より容易に脱落したものと考えられる。また、折損した橋脚も設計年代が古く、水平力に対して脆弱な構造であるため、被害が大きくなる一因となったと考えられる(図3.40～図3.42)。

盛土の被害は、のり面崩壊などの被害が生じており、JR東日本の7線区と三陸鉄道の2線区で、盛土・切り取りなど土工設備の被害箇所は157箇所にのぼった。一方、鉄道盛土が堤内の津波遡上を抑える役割を果たしていたと推察される事例も報告されている。



図 3.38 駅舎の流失 (山田線大槌駅)



図 3.41 PC 桁の流失 (気仙沼線津谷川橋梁)



図 3.40 鋼桁の流失
(山田線大槌川橋梁)



図 3.39 (南リアス線)



図 3.42 無筋コンクリート橋脚の流失
(気仙沼線赤牛川橋梁)

(ii) 鉄道における津波対策のあり方

東北地方太平洋沖地震において、津波による鉄道施設の被害は甚大であり、このような津波を受けても安全性や機能が確保されるようにすることは容易ではない。津波被害を避けるためには、まずは路線計画時において、津波の影響を受けない場所に鉄道を敷設することが基本になると考えられる。特に国土の幹線を構成する路線は、津波の影響を受ける可能性がある箇所を避けて路線計画することが基本になる。

しかし、平野部や、住民の生活路線であって、生活圏が沿岸部にある場合などは、津波の影響が想定される箇所にも鉄道路線を計画せざるを得ない。また、既設の鉄道路線においては、海岸に沿って建設されている路線も存在する。このような場合は、鉄道施設の整備において津波の影響を考慮する必要があるが、あらゆる津波に耐えられるように整備するのは現実的ではない。基本的には、津波レベル1に対しては、鉄道施設への損傷を抑制し、機能や安全性への影響を少なくするが、津波レベル2に対しては、鉄道施設に被害が生じることを前提として、乗客や乗務員等の人命の安全確保を図る方策を講じていくことになる。

津波レベル1に対しては、鉄道施設の損傷を小さくするように設計をすることとなるが、設計に用いる作用が明確になれば、対応を検討することは可能であると考えられる。今回の地震で被害を受けた構造物は、建設年代が古く、旧耐震基準で設計されたものが多かったが、このような構造物に対しては併せて耐震補強等の対策を実施して、地震の揺れと、その後に来襲する津波の両方に対応できるようにしておく必要がある。

津波レベル2に対しては、主にソフト面での対応となると考えられるが、地震発生時に列車が安全に停止できる場所や、乗客等が安全に避難できる場所とそれに至る誘導路の整備を検討していく必要がある。地震発生時の列車停止場所が津波の影響を受ける恐れがある場合は、津波の情報を乗務員に伝達し、安全な場所まで移動する対応が必要となると考えられ、そのためには乗務員への情報伝達手段や安全な移動方法の確保が必要となる。また、今回の地震で駅舎が流失する被害が多数発生したが、駅から安全な場所に避難できる方策の確保を図るか、駅舎等を津波に強い構造にしておく必要がある。

3.3.5 ライフライン施設の津波対策のあり方

a. ライフライン施設の津波対策の必要性

本報告書では、津波からの防護施設の整備を検討あるいは実施する主体（専門家、国、地方自治体）において、その基本方針として、津波レベルを次の三段階に分けることが述べられている⁴¹⁾。

- 1) 堤防機能により越流を抑止し、人命財産の損失防止を目指す「防護レベル（レベル1）」
- 2) 越流を許容しつつも、避難や備えなどの社会対応により被害軽減を目指す「減災・避難レベル（レベル2）」
- 3) 超レベル2

ライフライン施設もこうした設計思想のもとで整備された津波防護施設に守られることが期待されるが、実社会に普及するには長期間を要する。またライフライン施設に関する下記のような特殊事情や社会的使命を鑑みると、「防護⇄避難」という対策軸を超えて、多様な観点から津波対策を検討しておく必要がある。

- ・ 施設の立地条件（臨海部や河川沿岸部）によっては津波防護施設によって防護されない施設が存在すること
- ・ 津波防護施設の越流を許容する高レベルの津波に対しても、（避難以外の）対策を整備する必要があること
- ・ 市民生活、社会経済活動、都市機能を根底から支える施設であること
- ・ 災害対応、復旧・復興、企業・行政の事業・業務継続のため機能保持や早期回復が強く求められること
- ・ 津波被災時には危険物の漏洩や汚水滞留など、公衆の安全・衛生に危害を及ぼす二次災害要因があること

このため、ライフライン施設の関連協会においては、それぞれ独自に、東日本大震災の教訓を踏まえて津波対策に関して性能規定型設計法を導入する方針がとりまとめられつつある^{42)~46)}。

b. 多様な津波作用に対する対策の必要性

ライフライン施設は大別すると、(a) 拠点施設（発電所、取水・浄水場、下水処理場、ガス製造所、通信ビル、タンク、ガスホルダー等）、(b) ライン施設（送・配電ケーブル、管路、管渠、通信ケーブル等）、および、(c) それらの中継施設（送電鉄塔、電柱、ポンプ場、人孔、整圧ガバナー、中継局等）、の3要素で構成されている。これらの施設は全体として面的に広がったネットワーク・システムを形成しており、施設の立地条件は、沿岸部、平野部、高台など様々である。施設の設置形態も様々であり、地上構造物（建屋、屋内設備、屋外設備、架空設備）、地下埋設物（地下埋設管、地下埋設ケーブル、共同溝など）、部分的に地表に現れる添架物（橋梁添架管、橋梁添架ケーブルなど）などがある。

これらの施設のうち津波対策を要するのは、主として臨海部から平野部にかけて立地する地上構造物である。レベル1相当の津波に対しては海岸保全施設による防護が見込めるが、越流を許容するレベル2相当の津波に対しては、施設の重要度、保持すべき機能、想定される津波作用の種類に応じて何らかの対策が必要となる。津波作用としてまず考慮すべきは、持続的に作用する重複波圧に伴う波力である。その計算方法として、国土交通省住宅局により津波避難ビル等の構造設計を念頭に示された「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」⁴⁷⁾を用いると、構造設計用の津波進行方向の津波波圧は、浸水深から求められる静水圧に水深係数を乗じて設定される。ライフライン施設の各構造形式および設置条件（構造物周辺の境界条件や粗度、海岸線からの距離や勾配等）に適合した津波波圧の算定式を構築し、耐津波設計に反映させることが今後必要である。

浸水深については、「津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針」⁴⁸⁾において示されたように、当該地点における「最大クラス」の津波をシナリオベースで考慮した上で設定する方法が考えられる。一方、土木学会原子力土木委員会では、津波ハザードの確率論的評価を実施し、その成果を「確率論的津波ハザード解析の方法」⁴⁹⁾として取りまとめており、低頻度重大事象の影響も考慮した津波リスク評価を行う上では有効な方法が示されている。決定論的なアプローチと確率論的なアプローチを設計体系の中でどのように位置づけ、具体的に運用するかについては、各ライフラインの施設の特性や業態に応じた検討が必要であり、ライフライン津波工学としての課題である。

実際の津波被害は、持続的に作用する重複波圧に加えて、津波先端部の衝撃的な段波波圧に伴う波力、漂流物の衝突による衝撃力、浮力などが複合的に作用して発生したものと考えられる。これらに関しては現象理解という観点から1990年代から豊富な研究知見が得られている。種々の津波作用の組み合わせを考慮してライフライン施設のための津波荷重評価手法を構築することが急務である。

また上記のような被害以外にも、津波による地盤洗掘によって露出した地下埋設物が波力あるいは漂流物によって破損・流出したケースや、橋梁添架という形で一部地表に現れた管・ケーブル類が河川を遡上した津波によって損傷・流出したケースなども多数報告されていることから、津波荷重を考慮してライフライン施設の埋設・添架方法の改善を図ることが必要である。屋内外の電気設備・通信設備等が津波による冠水・水没によって全損する被害が多数報告されているほか、長時間停電による機能停止、非常用蓄電池の枯渇、非常用発電機の燃料不足など、ライフライン相互連関も問題となった。圧力差（水頭差）によって地中埋設管路を介したサイフォン効果により浸水被害が引き起こされる可能性も指摘されている。こうした様々な被害態様を考慮した津波対策の技術的検討と対策の普及推進が急務である。

c. ライフライン施設の津波対策の具体的方策

以下では、ライフライン施設における津波対策^{42)~46)}について、共通課題と言える事項についてまとめることとする。

(i) 移設等の津波回避的措置による被害の防止軽減策

LNG 受け入れ基地や下水処理場など、やむを得ない場合を除いて、可能な限り津波を回避できる高台などに施設を立地させることが望ましい。高台が無理な場合でも、津波波力の減衰効果を期待して、臨海部および津波遡上可能性のある河川沿岸からの距離を十分に確保する方法が考えられる。電気設備や非常用設備については、施設内での高所への移設、建物の上層階への移設、盛土による嵩上げなどにより、浸水高以上の設置となるよう改善することが望ましい。ただし既設施設ではこうしたリスク回避方策は困難な場合が多く、以下のリスク低減方策が主体となろう。

(ii) 波力・浮力・漂流物による被害の防止軽減策

重要施設で既存の海岸保全施設による防護が見込めない場合は、独自の津波防護施設を整備し、越流防止・浸水までの時間遅延を図ることが必要である。水門や陸閘の操作を当てる職員の安全確保のため、遠隔制御化などの方法も必要である。また越流時に備えて、施設の構造躯体の強化や設備の基礎への堅固な固定により波力・衝撃力・浮力への抵抗力を増強させる対策や、防護柵・防護壁による漂流物からの防護対策などが求められる。津波の進行方向と平行した施設設置による波力の緩和も効果的と考えられる。

(iii) 浸水・水没・洗掘による被害の防止軽減策

ネットワークの末端施設に抜本的な津波対策を施すことは困難であるが、架空電線・ケーブル類などの地上構造物の地下埋設化（ケーブルボックス、共同溝）や橋梁添架管の伏せ越し化、堅固な舗装による地盤の洗掘防止によって被害軽減を図ることができる。重要な電気設備・通信設備等については、防水扉設置や開口部閉塞などによって施設への津波侵入を防止したり、設備自体を防水構造化するなど、「浸水即機能停止」とならないような対策が必要である。

(iv) バックアップによる機能維持対策

拠点施設が津波被害を受けると、その影響が長期化する傾向にあることから、供給源の多重化・多様化（水源、ガス供給源、発電所）や処理施設の相互連絡（浄水場、下水処理場）、バイパスルートの設置などにより、一部のネットワーク上の被害を全体でカバー可能なシステムとすることが望ましい。周波数変換所の容量不足により電力融通が制約されている状況を鑑みると、様々な機能的バックアップ対策のボトルネックを排除する必要がある。

ライフラインの相互連関の面では、長時間停電を想定した対策が重要であり、十分は余裕時間を持つバックアップ電源や自立的エネルギーの確保などの多重防護策が必要である。

(v) 事業・業務継続支援の観点に基づく早期復旧対策

津波被害が甚大な地域では、道路啓開、浸水の排水、がれきの撤去、津波堆積物の除去、水没設備の洗浄など、復旧着手までに要する先行作業が多くなる。また地殻変動に伴う地盤沈下や津波の長期湛水などにより、被災地復興計画と社会インフラ復旧は表裏一体の関係になることが予想される。全国的な支援団体からの受援体制に加えて、被災地全体の災害対応・復旧計画との連携を重視した体制づくりが必要である。復旧にあたっては、BCP の観点から施設の機能的な重要度や需要家の社会的な重要度に応じて目標復旧期間を定め、必要に応じて段階的機能復旧を進めることによって社会全体での影響の最小化を図るという視点が必要である。設備面では、被災時に交換が容易な汎用的ユニットを採用するなどの工夫が望ましい。サービス継続あるいは復旧にあたっては水質保全（水源の津波水没により混入した塩分除去、下水の安定排除・消毒）やガス・電気保安（危険物漏洩、塩害による漏電事故）に十分な配慮が必要である。

参考文献

- 1) 文部科学省研究開発局：21世紀気候変動予測確信プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成22年度研究成果報告書，2011.
- 2) 安田誠宏・高田理絵・金 洙列・間瀬 肇：地球温暖化予測データに基づく台風極端化特性の評価と高潮シミュレーション，海岸工学論文集，第55巻，pp.1331-1335, 2008.
- 3) 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明：地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入，海岸工学論文集，第52巻，pp.1221-1225, 2005.
- 4) 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明：確率台風モデルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定，海岸工学論文集，第53巻，pp.1271-1275, 2006.
- 5) 河合弘泰・橋本典明・山城 賢・安田誠宏：確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.1256-1260, 2009.
- 6) 安田誠宏・安藤 圭・森 信人・間瀬 肇：地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング，海岸工学論文集，第56巻，pp.1281-1285, 2009.
- 7) 安田誠宏・林 祐太・森 信人・間瀬 肇：地球温暖化による高潮，高波推算に対応可能な確率台風モデル，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66, No.1, pp.1241-1245, 2010.
- 8) 桐 博英・丹治 肇・中矢哲郎：地球温暖化後の台風に伴う高潮潮位偏差の変化，海岸工学論文集，第51巻，pp.241-245, 2004.
- 9) 吉野 純・村上智一・小林孝輔・安田孝志：台風気象場初期値化アプリケーションによる可能最大高潮評価手法の検討，海岸工学論文集，第54巻，pp.316-320, 2007.
- 10) 吉野 純・小林孝輔・児島弘展・安田孝志：大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.396-400, 2009.
- 11) 安田誠宏・中條壯大・金 洙列・森 信人・間瀬 肇・Kevin Horsburgh：気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.L1171-L1175, 2011.
- 12) 林 祐太・安田誠宏・森 信人・中條壯大・間瀬 肇・奥 勇一郎：気候変動に伴う将来高潮予測の不確実性—東京湾をケーススタディーとして—，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.L1181-L1185, 2011.
- 13) 海上保安庁水路局：昭和21年南海大地震調査報告，書誌201号，水路要報増刊号，1948.<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/siryouko/suiro-youhou/suiro-youhou.html>
- 14) National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA): Great Chile Earthquake of May 22, 1960 - Anniversary Edition, Natural Hazards Data, Images and Education, http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?eq_1=45&t=101634&s=0&d=4&d=44
- 15) 国土地理院：GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動，<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>, 2011.
- 16) Nancy Atkinson : Satellite Photos Before and After of Japan's Earthquake, Tsunami, Universe Today on March 14, 2011. <http://www.universetoday.com/84042/satellite-photos-before-and-after-of-japans-earthquake-tsunami/>
- 17) 国土交通省河川局・国土地理院：仙台平野における地震に伴う地盤沈下について，4月28日報道発表資料，<http://www.mlit.go.jp/common/000143299.pdf>, 2011.
- 18) 柳沢栄司・井合 進・若松加寿江・山崎 淳・山崎文雄：ダグパン地域の被害，1990年フィリピン・ルソン地震被害調査報告書，震害調査シリーズ1，pp.101-124, 1993a.
- 19) 柳沢栄司・井合 進・若松加寿江・山崎 淳・山崎文雄：構造物の被害・液状化，1990年フィリピン・ルソン地震被害調査報告書，震害調査シリーズ1，pp.163-178, 1993b.
- 20) 国土交通省北陸地方整備局：新潟市の地盤災害の特徴について，<http://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/hokurikunobosai/jisin/jisin1.htm>
- 21) 新潟地域振興局地域整備部：たずねてみよう山の下閘門排水機場，http://www.pref.niigata.lg.jp/niigata_seibi/1201107656973.html, 2007.
- 22) Konagai, K., Kiyota, T. and Kyokawa, H. : Piles for RC/Steel-frame buildings pulled up by tsunami at Onagawa Town, in the March 11th 2011 East Japan Earthquake, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center,

- IIS, University of Tokyo, No. 44, pp.49-58, 2011a.
- 23) Konagai, K., Shibuya, K., Eto, C. and Kiyota, T. : Map of soil subsidence in Urayasu, caused by the March 11th 2011 East Japan Earthquake, <http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/east-japan-eq/index.html>, 2011b.
 - 24) 安田 進・原田健二：東京湾岸における液状化被害，地盤工学会誌，Vol.59, No.7, pp.38-40, 2011.
 - 25) 池田隆明，小長井一男，片桐俊彦：2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の鉛直アレー地震観測記録，第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，I-192, 2011.
 - 26) Konagai, K., Asakura, T., Suyama, S., Kyokawa, H., Kiyota, T., Eto, C. and Shibuya, K. : Soil subsidence map of the Tokyo Bay Area liquefied in the March 11th Great East Japan Earthquake, International Symposium on Engineering Lessons from the Great East Japan Earthquake, Paper No. 115, 2012.
 - 27) 若松加寿江：地盤被害，第11回地震災害マネジメントセミナー「地震防災の在るべき姿－東日本大震災の教訓－」，土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会第11回地震災害マネジメントセミナー講演資料，2011.
 - 28) 坂東和郎・齋藤浩之・浦山智晴：見附市街地における建物の被害と地盤の関係，新潟県連続災害の検証と復興への視点，災害復興科学センター，pp.106-115, 2004.
 - 29) 東京大学地震研究所，2012年1月23日の読売新聞朝刊の報道について，http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/shutoseis/, 2012.
 - 30) 長谷川時雨：日本橋旧聞-木魚の配偶-，岡倉書房（底本），1935あるいは岩波文庫第6刷，岩波書店，青空文庫 <http://www.aozora.gr.jp/cards/000726/card4536.html>, 2000.
 - 31) 有川太郎，佐藤昌治，下迫健一郎，富田孝史，辰巳大介，廉慶善，高橋研也：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討－水理特性を中心とした第一報－，港湾空港技術研究所資料，No.1251，2012.
 - 32) 原子力安全・保安院 総合エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会 電気設備地震対策 WG，2011年8月8日，9月28日配布資料
 - 33) 東京電力：福島原子力発電所調査報告書（中間報告），2011年12月
 - 34) 原子力発電所の津波評価技術，土木学会原子力土木委員会津波評価部会，2002年2月
 - 35) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－，平成23年原子力災害対策本部，2011年6月
 - 36) 確率論的津波ハザード解析の方法，土木学会原子力土木委員会津波評価部会，2011年9月
 - 37) 白石卓也，丸山久一，田中泰司，山口貴幸：Google Earthを用いた津波被害を受けた橋梁の調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，投稿中
 - 38) 木水隆夫・広瀬剛・大塚行輝：東北地方太平洋沖地震による高速道路橋の被害報告，橋梁と基礎，第45巻，第6号，2011.6
 - 39) 廣瀬輝：新東名高速道路（御殿場JCT～三ヶ日JCT）の路線概要，橋梁と基礎，第45巻，8号，2011.8
 - 40) 大震災に学ぶ－阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書－，（社）土木学会 関西支部，1998.6
 - 41) 土木学会 東日本大震災対応特別委員会 津波推計・減災検討委員会：津波推計・減災検討委員会報告書，2012.
 - 42) 厚生労働省健康局水道課・（社）日本水道協会：平成23年（2011年）東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書，2011.9.
 - 43) 国土交通省 下水道地震・津波対策技術検討委員会：第4次提言 耐津波対策を考慮した下水道施設設計の考え方，2012.3.
 - 44) 経済産業省原子力安全・保安部会：電気安全小委員会電気設備地震対策ワーキンググループ，電気設備地震対策ワーキンググループ報告書2012.3.
 - 45) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会 災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書，2012.3.
 - 46) 総務省 総合通信基盤局：大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方に関する検討会報告書，2011.12.
 - 47) 国土交通省住宅局：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，2011.11.
 - 49) 国土交通省：津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針，2011.12.
 - 49) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法，2011.9.

第4章 津波の減災方策に関する中・長期的戦略の構築への課題

4.1 概説

巨大海溝型地震である東北太平洋沖地震が引き起こした津波のように、深刻な被害をもたらす自然災害の再現周期がきわめて長いのであれば、被災の正確な実態と教訓を次に来るべき巨大災害への備えとするために、第3章で述べた復興過程での新たな耐災の考えと併せ、きわめて長期にわたる合理的な減災達成の戦略を整理し検討しておく必要がある。本章では当委員会のテーマである極低頻度の巨大地震がもたらす津波の災禍を将来にわたってどのように軽減していくか、つまり津波減災達成に必要な施策や対策とその展開のプロセスについて、前章までに記述された内容と関連付けて論究する。

以下、4.2では、「災害」と「減災」を取り上げ、あらためて「災害」の構造と「減災」の意義について整理、確認を行うとともに「減災」論の系譜を明らかにしている。次いで、4.3では「減災」達成のアプローチの方法論として総合的な「減災」マネジメント・システムの骨格と取組の展開の方法を概説するとともに、行政の施策や事業への反映方策として、災害対策基本法の下で地方公共団体が定めることを義務付けられている「地域防災計画」にこのシステムを導入すべきこと、そして、“未曾有”や“想定外”の事象の発生への対処の基本的な考え方を明らかにしている。なお、この4.3に記述する内容の多くは当学会東日本大震災特別委員会に設けられた「地域防災計画特定テーマ委員会」が平成23年12月に公表した「中間とりまとめ(案)」¹⁾に基づいている。4.4では震後対応として「減災」実現のための広域連携を意図した“地域BCP(Business Continuity Planning)”の導入の課題と実現方策を取りまとめている。

以上は、長期にわたる「減災」マネジメント・システムについてまとめているが、発災時の情報把握と伝達がどのように進むかも、上記の減災達成の方法論に大きく関わる場所である。そこで4.5では、津波監視と避難情報を含む提供体制について、高度なICT(Information and Communication Technology)を活用する課題や方策、今回の震災・津波被害を受けての気象庁の取組みについて紹介する。また例えば昭和三陸津波直後に、恐らく今私たちが知恵を絞って展開していると同様の検討がなされていたことに鑑みると、当時の復興計画の意図が忘れ去られ、あるいは時の事情が優先されてきた事実に行き当たる。知恵や教訓を長期に風化させないために学会の役割はどこにあるのかについて4.6で述べる。

4.2 「災害」と「減災」

4.2.1 「災害」の定義と「減災」の意義について

「災害」とは、広辞苑によれば、「異常な自然現象や人為的原因によって、人間の社会生活や人命に受ける被害」と定義されているように「自然災害」と「人為災害」の二つに大別される。法律上は、災害対策基本法の第2条第1項において、「暴風、豪雨、豪雪、洪水、高潮、地震、津波、その他の異常な自然現象又は大規模な火事若しくは爆発その他その及ぼす被害の程度において、これに類する“政令で定める原因”により

生ずる被害をいう」と規定されている。ここでいうその他の異常な自然現象には、冷害、干害、雹害、霜害、旋風、地すべり、山崩れ、崖崩れ、土地の隆起、土地の沈降などが挙げられている。また、「政令で定める原因」として、同法施行令第1条には、「放射性物質の大量の放出」、多数の者の遭難を伴う船舶の沈没その他の大規模な事故」と定められている。

地球上に起こる自然現象には、地球内部や表面で急激かつ巨大なエネルギーを放出する地震や火山噴火、台風などがあるが、これらが人間の社会が存在しないところで発生した場合には、災害にはならず単に自然の猛威としての現象が発生しただけのことになる。このように自然現象による災害の規模はその現象の猛威と地域社会の健全性、そのうらはらの脆弱性の程度によって大きく左右されるものである。それらの災害もたらす損害は、人命の喪失や負傷などの人的被害、そして個人の資産や社会インフラの被害による直接損害に加え、地域社会の経済活動の低下による間接的な損害の総和として表される。

これまで「災害」の構造については、これまで多くの概念が提案されてきている。ここではそれらを基本に「災害」の規模と程度を規定する構成要因の相互関連と「減災」達成までのプロセスを図4.1²⁾に示す。

「災害」は地域社会の基盤となる地形や地質など自然環境に関する「素因」と地域社会に災害を引き起こす原因となる自然現象の作用の強さで定まる「誘因」、そしてその地域社会の土地利用状況、建物や各種インフラの脆弱性の程度や道路・公園などの公共空間の狭小性に係わる「被害拡大要因」、さらに、これらの地域社会の持つ欠陥を事前に施策や対策の実行によって耐災性を高める効果を表す「被害抑制要因」の四つの因子から、その規模や程度が定まることになる。また、同図に示したように、「減災」の概念は「災害」の規模や程度の軽減を意味するものであり、「被害拡大要因」と「被害抑制要因」との力関係によってその程度や効果が規定されることになる。

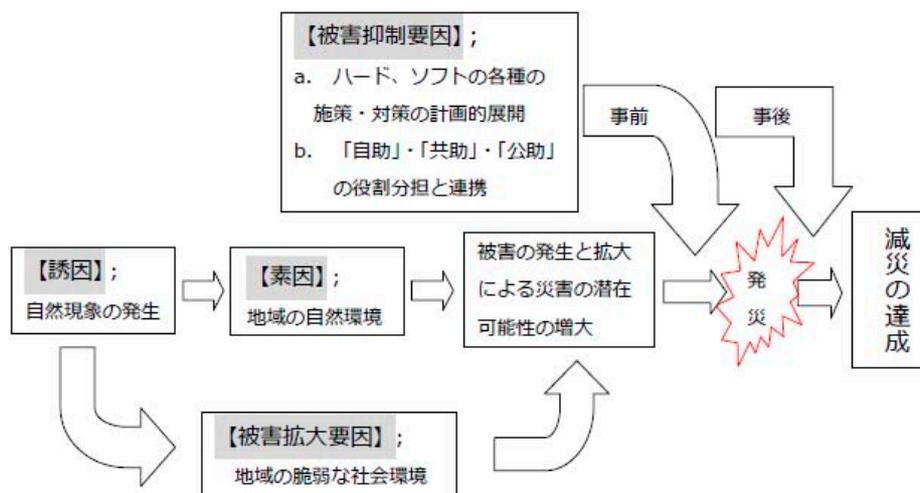


図4.1 「災害」の構造と「減災」のプロセス²⁾

ここで、一般的な概念として用いられる「災害リスク」について考えてみる。国連開発計画 (United Nations Development Program, UNDP) では、自然もしくは人間による「ハザード」と「脆弱な状態」によって引き起こされる被害発生確率、またはその結果、生じる損失 (人命、財産、生計、経済活動の崩壊、環境破壊) と定義されている。この災害リスク R_d は次のように定式化される。

$$R_d = H \times V$$

ここに、 H : ハザードであり、次式で表される。

$$H = F \times p$$

ここに、 F ：作用外力の強さと広がり、

p ：生起確率^{注1)}

V ：その地域内での脆弱な状態にあるもの（地盤、建物、社会インフラなど）の量

よって、

$$R_d = F \times p \times V = (F \times V) \times p$$

で表される。この最右辺のかっこ内の $F \times V$ は、地震や洪水などの自然の猛威が発生した際の被害の総計を表すことになるため、上式は自然の猛威が襲った場合の被害総計にその自然の猛威の生起確率を乗じたものが災害リスクになることを意味することがわかる。

この生起確率 p は発生頻度と同義でなく、その時点以前で起こったイベントに独立ではないことに留意する必要がある。仮に発生頻度が1回/1000年だとしても、長期にわたり静穏な状況が続いているのであれば生起確率が上がっている可能性を疑うべきである。地震学の最近の知見にもとづいて、国の中央防災会議や地震調査推進本部で南海トラフ沿いの連動型巨大地震や首都圏直下地震が近い将来発生する可能性が高いものと公表されているが、このような大地震に対しては、 $p = 1$ 、つまり確定的に発生することも前提に、それによる被害想定の結果をどのように被害軽減～「減災」を達成していくかという課題に対処しなければならないのである。

1995年の阪神・淡路大震災以降、地域社会の活動の基盤となる建物や社会インフラ諸施設の耐震性能については、一般的な耐用年数の間に1～2回程度生じる地震動の強さ（レベル1地震動）に対しては、地震後の健全性の確保を、また耐用年数に比べてはるかに長い再現期間を有する低頻度の大地震の際の地震動強さ（レベル2地震動）に対しては、それらを使用する者の生命の確保を目標にはするものの、地震後に再び使用することができる健全性を確保することは必ずしも保証しないことが定着して来ている。一方で、阪神・淡路大震災以前の建物や社会インフラ施設、中でも津波に備える防潮堤などの海岸保全施設には、このような耐震性能の確保目標を満たしていない、いわゆる“既存不適格”なものが全国的にもまだ多く存在している。

このような実態を考えれば、上記の南海トラフ沿いの巨大地震や首都圏直下地震など p がほぼ1に近いとされるシナリオに対する備えを進める際に、レベル1及び2の二段階地震動の目標耐震性能を確保するような事前の補強対策を現在供用している建物や社会インフラ施設全般に一律に行うことは、そのコスト面での負担の大きさから到底現実的に不可能であることは自明であろう。これは、津波対策を防潮堤のみで完全に防御しようとする対処方策についても同様なことが言える。

あらためて、このような制約の下で、どのように災害規模の軽減、すなわち「減災」を達成していくかという命題に対して、被害抑制要因として、施設に対する事前のハードな耐震補強ばかりでなく、ソフトとしての都市計画やまちづくりのための制度、計画手法の見直し、被災地の自治体相互の広域的協働・連携行動の計画なども組み合わせた最適な「減災」戦略の策定が喫緊の課題となる。

4.2.2 「減災論」の系譜

この「減災」の概念は、いつごろから、そしてどのような災害がきっかけとなって打ち出されてきたもの

注1) この生起確率は、サイコロの目が出る確率のような前のイベントに左右されない独立の事象の確率ではない。地震を起因とする津波の場合、地震により地殻に累積していたひずみが解放されるのであるが、その後次第にひずみは累積していく。したがって静穏な時期が長く続いた後の確率は大きくなっていく可能性があると思われるべきである。

であろうか。永松は減災に係る政策論を表した著書³⁾の中で、

- (1) 1973年の第1次オイルショック以後1980年代の初頭の時期に、それまで1960年代の初めから10年余りも続いた高度経済成長期が終焉をむかえ公共部門の財政が悪化する中で、国土保全の考え方もダムや堤防や遊水地などハードな治山・治水施設を強化しても水害を完全になくすことはできないとする、いわば“水害をなくす”ということから“被害を軽減する”という発想への転換の必要性が認識され始めたこと、つまり、一定の被害発生は認めた上で災害の程度を軽減しようとする「減災」の概念が打ち出されたこと、
- (2) 住民の生命・財産を守るための第一義的な対策は住民自らや地域によって行われるべきで、それを越えた時に初めて行政が支援するという、いわば「公助」・「共助」・「自助」の概念が確立されたものと考えられること、

などの興味深い指摘をしている。ちなみに、上記(1)については1960年代半ばから10年余りの間に、河川の洪水による浸水災害に対する地域住民からの損害賠償請求の訴訟、たとえば大阪府での大東水害訴訟や新潟県の加治川水害訴訟などの事案などのいわゆる災害裁判が多く発生⁴⁾したことが背景にあるものと思われる。

この「減災」と「自助」・「共助」・「公助」の意義については、阪神・淡路大震災で再現期間が千年を超える極めてまれなM7.3の直下型地震による未曾有の強烈な地震動の作用によって生じた建物や橋梁などの土木構造物の被害、そして地震発生直後の人命救助や消火活動の実態からもあらためて重要なことが確かめられた。

河田⁵⁾は、この「減災」について、もともと「防災」という意味を被害が完全に生じない特殊な状態を指すのに対し、被害を極力減らすことを意味するものと認識していて、1990年から国連主導で始まったIDNDR: International Decade for Natural Disaster Reductionが「国際防災の10年」と訳されたことに、なぜ「国際自然災害軽減の10年」のようにReductionを軽減と訳出されなかったのかという疑問を呈していた。そして、阪神・淡路大震災での悲惨な被災体験が被害を完全に防ごうとする「防災」の考え方の限界を感じ、その非現実的な理念から被害をできるだけ少なくするにはどうしたらよいかという「減災」の考え方への転換が自然に進んだことや、この「減災」の基本は「自助」・「共助」・「公助」にあることを記述している。この河田の「減災」に対する思いは、東日本大震災発生のおぼ3か月前に刊行された彼の著作「津波災害—減災社会を築く」⁶⁾の中でも、持続可能な津波減災社会の実現に向けて、津波で命を失う危険性の高い人たを、何とか失わないようにすることの重要性とそれを実現するために(1)災害文化、(2)ユニバーサル・デザインが大切なことを指摘していることから窺い知ることができる。

このような阪神・淡路大震災の以前から低頻度の巨大災害への備えとして「減災」の理念やその実現方策としての「自助」・「共助」・「公助」の重要性については専門家の間では共有されていたが、遺憾ながら社会的には必ずしも十分理解されてはいなかった。2011年(平成23年)3月11日、わが国の観測史上最大規模となるMw9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、引き続いて巨大な津波が広域的に襲いかかり、多くの人命の喪失を含む甚大な被害を生じせしめた。この悲惨な状況が明らかになるにつれ、再現期間千年を超す極めて低頻度の自然現象としての激甚な地震と津波に対して、ハードな防潮堤や堤防を強化するのみで被害を完全に防ぐことが不合理であるとする土木学会の提言や国の中央防災会議での関連委員会での検討の成果の内容が社会的にも理解された。ここに人命の確保を最優先し災害の規模をできるだけ減らすという「減災」と「自助」・「共助」・「公助」の重要性が広く国民レベルで認識され、共有されることとなったのである。

4.3 「減災」達成へのアプローチ

4.3.1 総合的な減災マネジメント・システムの構築と展開方策¹⁾

このような地震や火山噴火、台風などの豪雨災害などの自然災害の「減災」の達成には、**図 4.1** に示した災害の構造に係る要因のうち、【被害抑制要因】を地域の【素因】や【被害拡大要因】の状況を適切に勘案して、効果的な施策や対策となるようにその展開を PDCA (Plan-Do-Check-Act) ループに乗せて計画的にマネジメントしていくことが必要となる。このいわば、総合的な“「減災」マネジメント・システム”の展開には、

- (1) 発災前後の時間の経過と関連づけた被害抑制要因となる必要な施策・対策の項目とそれらの内容の具体化
- (2) 上記(1)の施策・対策の実行状況のマネジメント手法の確立
- (3) 行政システムの受け皿となる「地域防災計画」の内容の見直し

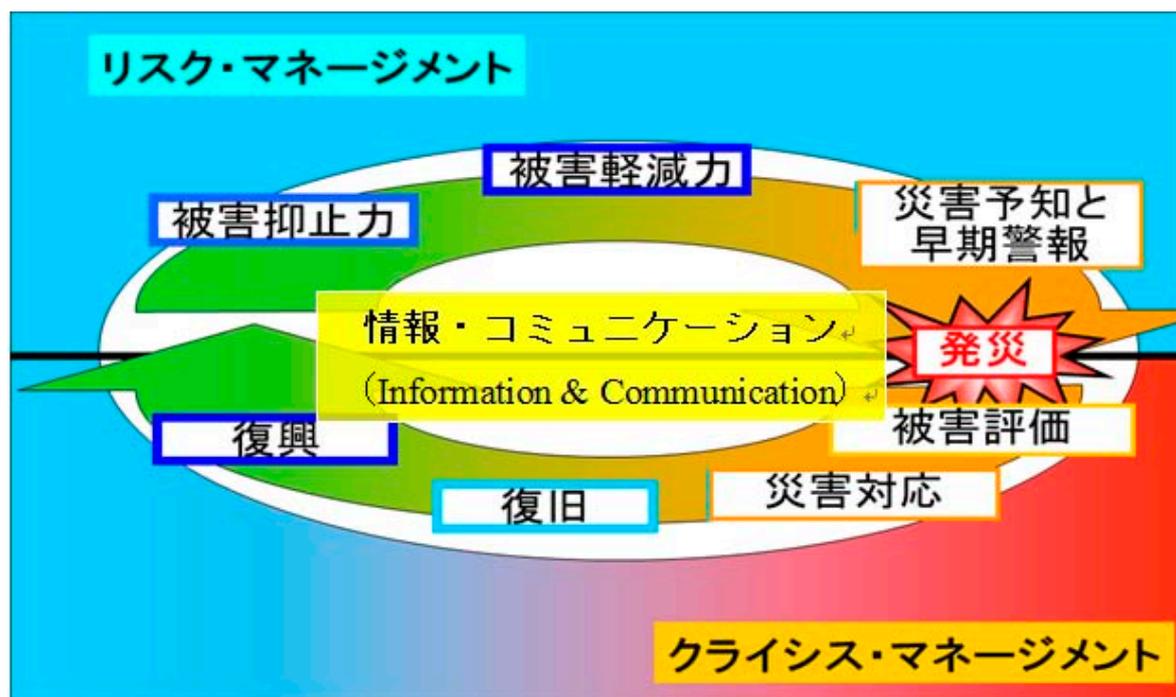
などの課題を解決しなければならない。

上記の【被害抑制要因】を構成する施策・対策内容は発災の事前と事後に分けられる。事前の施策・対策は、(1)被害抑止、(2)被害軽減、(3)災害予知と早期警報、の3つに、事後のものについては、(1)被害評価、(2)災害対応、(3)復旧、(4)復興の4つにそれぞれ大別、分類される。これらの実行状況については、事前の施策・対策についてはリスク・マネジメント、事後のものについてはクライシス・マネジメントによって進捗管理や実施内容の評価などが行われる。リスク・マネジメントは未だ起きていない事象に対して、それが生じた際の被害を予防し軽減するために、最も合理的な諸対策を選択し、それらの実行状況を管理するための手段であるのに対し、クライシス・マネジメントは起きてしまった被害に対して、時々刻々の状況や制約条件が変わっていく中で被害の拡大を防ぐとともにそれらを最小限に留め、迅速かつ確かな復旧・復興を推進させるための管理・運営の手段である。また、この二つのマネジメントの円滑な実行には情報共有とコミュニケーションが関係者間での確かつ迅速に行われることが不可欠である。これらが当学会東日本大震災特別委員会の地域防災計画特定テーマ委員会「中間とりまとめ(案)」(以下「中間とりまとめ(案)」と略記)で示された総合的な減災マネジメント・システムの骨格であり、**図 4.2**¹⁾にその全体的な概念を示す。以下、「中間とりまとめ(案)」で提案した概要をまとめる。

上記の事前3つ、事後4つに大別される対応策の中で、「減災」に最も重要なものは事前対策の(2)被害軽減であり、被害が発生してもその連鎖を断ち切ることが被害拡大の抑制～「減災」に極めて重要である。

表 4.1には、地震災害を対象にした場合の上記の事前・事後の施策・対策の具体的な事例の案¹⁾に加筆を参考までに示す。同表の内容は主に「公助」としての行政機関や公益企業者の執るべき施策や対策となっている。

「自助」・「共助」・「公助」のそれぞれの対策の内容を考える際には、次の点に留意すべきである。すなわち、これら三者の担う対策は相互補完関係になっている項目が多く、**図 4.3**¹⁾に示すようにこのバランスが重要である。全てを公で行うならば、莫大な費用がかかるのに対し、住民それぞれが努力し助け合えば、少ない費用で大きな効果を産み出すことも可能となる。備蓄物資を例にとれば、備蓄して消費期限が近づいた食品を個人・企業であれば何かの際に利用することは容易であるが、自治体で大量の備蓄を抱えているとその有効利用を兼ねた処理は容易でない。「公助」は、「自助」や「共助」にインセンティブが働く方向に行うべきであり、いたずらに公への依存心を高めるべきではない。そのためには、災害リスク等の情報開示が当然のことながら重要となる。**図 4.2**に示した輪の中心に「情報・コミュニケーション」とあるのは、そのような情報開示に始まって、関係機関との連携、住民とのリスクコミュニケーションが、「減災」対策の『ある



効果的な減災対策の実行には、対象とする災害と地域の特性を踏まえて、与えられた時間と予算の中で、7つの対策を適切に組み合わせて実施することで成り立つ

図 4.2 総合的な「減災」マネジメント・システムの概念図¹⁾

表 4.1 地震災害を対象にした事前及び事後対策の代表事例（参考文献 1）に加筆）

施策・対策の各ステージ分類		対策の内容	
事前	被害抑止	ハード	建物や各種構造物の粘り強い構造への耐震補強および液状化対策
		ソフト	防災まちづくり計画（津波に対する高地移転含む）の推進
	被害軽減	ハード	津波避難ビル等の避難施設、停電に対するバックアップシステムの整備、応急復旧を容易ならしめる道路橋の落橋防止構造等各種社会インフラの機能確保のためのフェイルセーフ的設備の整備
		ソフト	避難計画&避難マニュアル整備と住民への啓発教育 被害予測シナリオに基づく応急復旧計画の策定
予知&早期警報	ハード	緊急地震速報等の情報伝達手段の確保や二重化	
	ソフト	上記情報等の活用マニュアル整備と住民への啓発教育	
事後	被害評価	ハード	地震動データに基づく津波推計システムや即時被害推定システムや衛星・航空等のリモートセンシングなど各種モニタリングシステム整備と、被害額の早期推計システム整備
		ソフト	早期被害状況の評価技術及び応急復旧工法の選定方法の確立やマニュアルの整備、実際の被害状況を踏まえた応急復旧計画の評価・見直し手法の検討・策定
	災害対応	ハード	災害対策本部立ち上げ、被害状況の把握、津波避難誘導、人命救助、消火活動、二次災害の抑止などの初動対応、避難生活の支援、緊急物資の調達等の応急活動など、物流産業・宅配業者等による生活・産業向けサービスの対応
		ソフト	地域住民や法人企業、NPO などへの情報伝達計画の作成 他の行政機関や NPO からの受援計画（復旧段階含む）の作成 地域建設業者等との復旧支援協定内容、BCP（行政機関、法人企業や諸団体）の策定
	復旧	ハード	社会インフラ施設やライフラインの早期復旧 仮設住宅への入居支援、がれき処理など
		ソフト	避難住民への生活援助や精神的支援計画の策定
	復興	ハード	都市環境の回復・改善、財源確保、心のケアなど
		ソフト	復興方針及び地域の再生計画（※ 1）及び復興まちづくり計画策定

※ 1 特に復興段階においては、人口減少下の今日のわが国の状況を踏まえ、地域集落や都市基盤施設の統廃合も視野に入れた、将来の都市・地域活性化へとつなげる取組みが求められる。

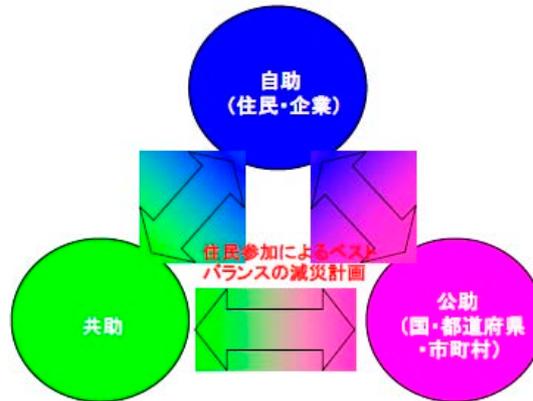


図 4.3 「自助」・「共助」・「公助」の関係¹⁾

表 4.2 減災対策マトリックス¹⁾

	発災↓					
	被害抑止	被害軽減	予知・早期警報	被害評価	災害対応	復旧・復興
市町村	H					
	S					
都道府県	H					
	S					
国	H					
	S					

表 4.3 行政機関別 減災対策マトリックス¹⁾

	発災↓					
	被害抑止	被害軽減	予知・早期警報	被害評価	災害対応	復旧・復興
自助 (市民+法人)	H					
	S					
共助	H					
	S					
公助	H					
	S					

【注】上記の2つの表でHはハード、Sはソフトを意味する。

べき姿』に到達するために不可欠であることを示している。

このため、表 4.2 に示す「減災」対策マトリックスの様式でそれらの内容を定めていくことによって合理的な減災対策の目標とするメニュー、すなわち『あるべき姿』を明らかにすることができる。

東日本大震災で改めて認識させられたことは、この「自助」・「共助」に企業が係ることの重要性である。発災時に社員・家族の安全を守るのみならず、地域住民と連携して救助・消火等の防災行動に大きな力を発揮することが可能であり、企業が存続できなければ多くの人が職を失い地域経済が停滞し、復旧・復興が遅れるという負の連鎖を招く。

地方公共団体では、まず、表 4.2 の「減災」対策マトリックスを当該地域の自然災害の環境を踏まえて、対象とする災害に対して有効な対策の内容を埋めて行く作業に着手すべきである。

表 4.3 は、さらに公助を市町村、都道府県、国が果たすべきことを示す概念を表している。この表の中身をそれぞれの機関が埋めていくことによって、これら行政の階層間での役割分担の確認と再調整とが容易になるものと考えられる。とくに従来は、市町村や都道府県が地域防災計画立案の基礎として行う被害想定においては、自分たちの対応能力をはるかに超える規模の災害を想定することは困難であった。その大きな理由は、表 4.3 のように上位の行政機関までを含めての対応策を前提にした検討がなされていなかったためである。東日本大震災のような規模の極めて大きい災害までを対象に総合的な防災対策を講じていくには、市町村や都道府県は同表の「減災」対策マトリックスを用いて、前提とすべき適切な規模の災害を想定していくべきである。

それでは、これらの総合的な「減災」マネジメント・システムの展開はどのようにすべきであろうか。減災に関する諸対策を計画的かつ効率的に実施して行くためには、対象とする災害と地域の特性を踏まえて、

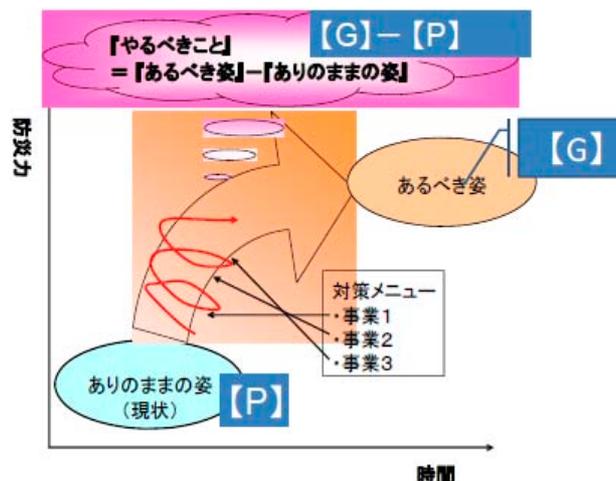


図 4.4 「減災」マネジメント・システムの展開プロセス¹⁾

与えられた時間と予算の中で、各ステージの対策を適切に組み合わせて、それらを確実に実行することが重要である。その際、単に既存の計画の列挙で終わらないための方法論が必要となることは自明である。

プロジェクト・マネジメントとしてビジネス分野では広く認識されている手法が、防災計画にも応用できる。すなわち、図 4.4 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、実践すべきである。すなわち、

- (1) 減災の「あるべき姿」を実現す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】の実態を表 4.2 の減災マトリクスの形式で表現する、
- (2) 図 4.5 に示す「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、事業計画化していく、
- (4) 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・サイクルを実行でき、合理的な進捗管理を行うことができる。

当然ながら、上記の【G】、つまり地域の減災の「あるべき姿」を形成して行くプロセスにおいては、地域の住民や NPO、企業の関係者を巻き込んだ議論が必要になり、彼らの参画・協働の内容が「共助」や「自助」の対策項目として明らかになる。

また、このような地域の「減災」の「あるべき姿」【G】を議論するプロセスを表 4.3 を用いて都道府県と市町村それぞれで取り組むことにより、両者間で取り組むべき対策の重複や遺漏が明確となるはずであり、これらの突き合わせを通して都道府県と市町村との間での対策の役割分担～実行主体を合理的に定めることができるものと考えられる。

このマネジメントでは行政の担当者ばかりでなく地域の住民や NPO が達成度や対策の進捗状況を具体的に確認できることが重要であると考えている。そのためには、地域の「減災」の将来ビジョンを描くとともに、これまで、内閣府主導で進められている地域の地震防災戦略に基づくアクションプランのように、5年後、10年後の目標に対して事業計画を立案し、定期的に進捗度をチェック可能にすることが不可欠である。

このような、都道府県とそれに含まれる市町村との間の調整を通して、広域的な自然災害に対する「減災」を達成して行くために、国の災害対策基本法に基づいて地方公共団体が定めなければならない地域防災計画に求められる本来的な使命と役割分担が明確になるものと思われる。また、それと同時にこの地域防災

あるべき姿マトリクス【G】

		発災↓					
		被害抑止	被害軽減	予知・早期警報	被害評価	災害対応	復旧・復興
自助	H						
	(市民+法人) S						
共助	H						
	S						
公助	H						
	S						

ありのままの姿(現在の取り組み状況)マトリクス【P】

		発災↓					
		被害抑止	被害軽減	予知・早期警報	被害評価	災害対応	復旧・復興
自助	H						
	(市民+法人) S						
共助	H						
	S						
公助	H						
	S						

実施すべき対策のマトリクス

		発災↓					
		被害抑止	被害軽減	予知・早期警報	被害評価	災害対応	復旧・復興
自助	H						
	(市民+法人) S						
共助	H						
	S						
公助	H						
	S						

(要する時間、費用、効果)

図 4.5 「減災」対策として実施すべき対策のマトリクス¹⁾

計画を規定する「災害対策基本法」の矛盾点や問題点が浮き彫りになるのは確実であり、早急に上記の「減災」対策マトリクスのあるべき姿と現状の差を明らかにする作業を「減災」対策として優先して地方公共団体で取り組むべきである。

もう一つの重要な点は、この行政組織間の調整で決まった内容に対して、経年的な対策の実施状況を踏まえ、あるべき姿～達成目標に対するPDCAのマネジメントの実行が容易になり、地域住民や企業関係者に対策事業の展開状況をわかりやすく説明することができることである。このような計画の達成プロセスを明示することにより、「自助」・「共助」・「公助」の対策の内容の進捗状況が改めて関係者全員に確認されることは有意義と考えられる。

この他のメリットとして地域防災計画に織り込むべき減災対策の概要が明確になり、目次構成や内容が地域の住民や企業関係者にとってもわかりやすいものになるものと思われる。

4.3.2 行政の施策・事業への反映—「地域防災計画」への導入

東日本大震災の重大な教訓を踏まえて、迫り来る低頻度巨大地震災害に備えるためには、「自助」・「共助」・「公助」の精神に基づいて、社会全体で「減災」を達成する方策を国家経営の重要な戦略目標に掲げ、計画的に迅速に進めていくことが求められている。

このため、わが国の地震、津波や洪水、火山噴火などの自然災害の対応をつかさどる「災害対策基本法」に基づき、地方公共団体で定めなければならない「地域防災計画」が東日本大震災で果たしてその機能を果たしたのかという観点から、その内容を客観的に評価し見直すべき課題と改善の方向性を整理することが重要である。上記の「中間とりまとめ(案)¹⁾」では東日本大震災の際には、津波による激甚な被害を受けた地方公共団体のほとんどで現行の「地域防災計画」の内容では発災後の緊急対応や復旧活動に有効に機能し

なかったものと評価された。また、低頻度巨大地震による広域災害の「減災」を達成していくために、「地域防災計画」に求められるあるべき姿を次のように提言¹⁾した。

地域防災計画は地方公共団体における災害対策全般に係わる最上位計画であり、都市や地域の将来のあるべき姿を踏まえながら、あらゆる災害の軽減、すなわち「減災」について真に実効ある計画でなければならない。そのためには、各種の災害対策を単に列挙したものではなく、都市計画等、まちづくりに関わるすべての計画に影響を与える、「減災」のための対策に関する総合的な全体計画として位置づけられるべきである。

また、その内容については、地域住民の生命・財産および企業・産業を災害から守るために、達成目標とそのためマネジメント計画を明示した災害予防計画と、想定を上回るような低頻度超巨大災害に対しても、最低限の機能は維持可能な災害対応計画のそれぞれについて、関係機関や住民との合意に基づいた内容を明確に示した計画であるべきである。

これらの内容を具体的に実現し、津波減災を中長期的に可能ならしめるためには、地域の【素因】つまり図 4.1 に示した地域の地形や地質などの状況を踏まえ、津波の影響を受けにくい「減災」効果をベースに据えた土地利用を含むまちづくり計画を「地域防災計画」に明確に規定することが重要である。そして津波に対する避難計画についても地域の【素因】を適切に評価し、避難ビル等のハードな施設整備の他、高齢者対策も含めたきめの細かいソフトな対策などを網羅した内容とするよう「地域防災計画」に反映することも必要である。それに加えて、上記の総合的な「減災」マネジメント・システムの考え方と手法についても「地域防災計画」の中に導入し、実際に必要な施策・対策を事業化し計画的に展開していかなければならない。

この他、上記「中間とりまとめ(案)¹⁾」では、広域的な災害規模の軽減を図るために地方公共団体相互も広域的な協働・連携関係を締結して、地域を統合した総合的な減災対策を共同で検討し、予防計画や対応計画の作成に当たることや、発災後の対応の共通ルールと広域連携の組織・体制を構築していくことが必要であることも指摘している。この実行プロセスは発災後の対応計画を行政の広域連携により定めることになるので、後出 4.4 の“地域 BCP (Business Continuity Plan)”の概念およびこれを具現化する手順についてさらに詳細に触れる。

4.3.3 「減災」の概念と“未曾有”や“想定外”への対応の考え方

東日本大震災では、わが国でそれまで生じたことも考えてもみなかった、いわば“未曾有”で“想定外”の巨大地震の発生と、最大で 20m を超える高さの大津波の襲来により津波防潮堤や防波堤などの海岸保全施設が壊滅的な被害を受けた。そして、三陸～房総半島の太平洋沿岸に甚大な人的・物的被害を生じたばかりでなく、世界で初めての地震と津波が原因の東京電力福島第一原子力発電所の事故が諸外国のエネルギー政策に深刻な影響を与えることとなった。

これらの海岸保全施設や原子力発電所の津波により生じた被害の原因に関して、上記の“未曾有”とか“想定外”という概念を援用して、予見不可能な不可抗力の事象であって免責されるものではないかという工学や技術の専門家が少なからず意識の底流にあったように思われる。このような状況に対し、地震発生の 11 日後、土木学会、地盤工学会及び日本都市計画学会の各会長が「関係する分野の専門家たるものは“想定外”という言葉を使うときは少なくとも言い訳や弁解であってはならず、このような巨大地震に対しては、先人がなされたように、自然の脅威に畏れの念を持ち、ハード（防災施設）のみならずソフトも組み合わせた対応が重要であることを、あらためて確認すべきである。」と共同緊急声明を公表した。

この“想定外”の概念について、畑村⁷⁾は“想定”とは、何か企画を考え、計画するといった「考えを作る」ときに自分の考えの範囲を決めるが、そのときの境界を設定し、考えの枠を決めることだと述べている。この境界とか枠については、考えるに必要な時間とかどのくらいのお金をかけてよいかという費用などの制約条件が想定の外～境界を決める要因であることも指摘した。さらに、彼は原子力発電所の安全性の確保と関連して「最悪時」を前提に設計という行為そのものを見直すべきと主張⁸⁾した。

西川⁹⁾は“想定外”の持つ意味について分析し、次の4つに大別できるものとした。

- (1) 想像できなかった“想定外”：想像力の欠如，予測能力の不足
- (2) 考慮しなかった“想定外”：思考停止
- (3) あきらめの“想定外”：“思考～考えること”の放棄
- (4) 見過ごしの“想定外”：状況変化の見落とし，忘却など，怠慢，先送り

このうち、社会インフラ施設の計画や設計、マネジメントに従事する技術者にとっては(2)の思考停止が重大な要因のように考えられる。つまり、基準を満たしているからとかマニュアル等を書いてないから対応しなくていいのではといった理由、また、採算性の観点からそもそも対応の現実性に欠けるという論理で不作為になるからである。土木分野での耐震設計に関する“想定外”に対する問題は、供用期間の間に稀にしか生じないとされる「レベル2地震動」を超える強い地震動が作用した場合に、どのような被災の状態になるのかを官民の技術者の多くが具体的にイメージしようとしていないのではないかというおそれである。つまり、設計基準で定めている「レベル2地震動」を超える可能性が存在するという地震動の予測の不確定性を技術者の多くがあまり顧みずに“想定外”に関する上記分類(2)の思考停止に相当する状況になってしまっているのではないかという危惧である。

また、行政機関や法人企業などでは、あらかじめ最悪の事態を想定して発災後の業務や生産の継続を行うことができるようあらかじめBCPを策定する必要があるにもかかわらず、その多くの組織で“想定外”に関する上記分類(3)、(4)に相当する状況に陥り、十分な対処ができていない状況にあることも「減災」社会の実現にとって重たい課題であると言える。

前出の「中間とりまとめ(案)¹⁾」では、地域の被害想定や社会インフラの設計基準で想定している作用外力を超えた場合にどのような被災状況となるかを推定するための手立てとして、**図4.6**に示す作用外力と被害率の関係を示した。この図に示した●印が被害想定もしくは設計基準での外力の大きさとその際の被害状況(率)の関係である。たとえば、外力として地震動を考えると図中の●印の強さの地震動を受けた場合、被害率は3本の曲線(異なる3つの地域や3種類の施設や建物に相当)とも同じである。しかし外力が●印を超えて少し大きくなる、つまり被害想定もしくは設計基準で定められた地震動を超えると、この3つ地域

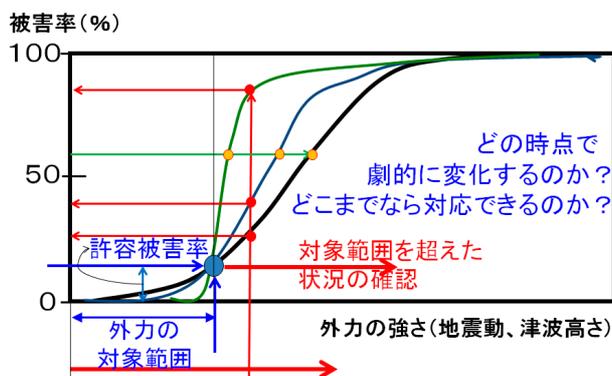


図4.6 想定外の外力作用の影響の考え方¹⁾

もしくは3種の施設や建物では、地域全体もしくは構造の耐震性能に応じて被害状況には大きな差が現れることを意味している。自分たちの地域や施設を管理する組織では、外力が想定を超えてどのレベルに達したときに被害が著しく増大するのか、どのレベルを超えると対応不能になるのか、などを確認しておくことが重要である。この分析的な検討の概念が原子力発電所の安全審査で導入された“ストレス・テスト”に相当するものである。この確認をしないで、被害想定もしくは設計基準で定められた作用外力を意味する●印以下の範囲の外力時の被害しか想定していないと、●印を超える外力が作用した場合の状況に対するイメージがなくなり、適切な対応ができないことになるのである。いわば、西川の上記の“想定外”の分類の(1)と(2)に想定する状況となるのである。

東日本大震災の教訓の一つとして、建物や社会インフラ施設の耐震性能の評価にこのような地震動の不確定性を考慮した、被害想定や設計基準を超える地震動が作用した場合の被災状況を上記のストレス・テストの概念で物理的、力学的手法により定量的に把握しておくことを指摘したい。これらの基準類の改定作業の際には、できるだけリアリティのある解析を行って設計体系が保持する構造特性に応じた耐震性能の限界を明らかにすることは極めて有意義と考えられるからである。

なお、図4.6は外力の種類の違いによる被害の発生差として見ることもできる。家屋流出などの津波災害は、図中の緑色の線で示したように、外力である津波の高さがあるレベルを超えると劇的に増加する。東日本大震災の状況は、まさにこのような特性が現れたものとも見なすことができる。本報告書「第3章 津波に対する対災の考え方」に示されている図3.1の縦軸の機能確保の程度が図4.6の縦軸の被害率の逆数の関係に相当している。図4.6の作用外力～被害率関係の曲線の勾配が緩くなるように必要な対策を講じることによって、地震や津波などに対して粘り強い地域特性や施設構造にしていくというのが、「減災」達成へのプロセスであることも容易に理解されよう。ちなみに、亀田¹⁰⁾は「耐津波工学」を提唱する中で、図4.6と同様な概念で、原子力発電所の非常用ディーゼル発電機や補機冷却用海水ポンプなどの重要な安全機器の津波の浸水高さに対する機能喪失確率の関係を表すフラジリティ曲線の概念を図4.7に示した。彼は福島第一原子力発電所の津波被害の状況は上記の安全機器の機能が同図(a)に示すような浸水すなわち機能停止というステップ関数状の形で説明され、その形状から「クリフエッジ」効果と呼ばれると指摘している。そして、この「クリフエッジ」の状態では設計津波を超える領域における残余のリスクは極めて大きくなっていくわけで、これを防ぐために同図(b)に示すなめらかな緩い勾配の曲線、すなわち「スムーズ・フラジリティ」と呼ばれる状況に変えるか、あるいは同図(c)に示すような「クリフエッジ」を十分な安全域に引き上げることが津波に対する残余のリスク低減策の要となるという重要な概念を提起していることに注目すべきである。

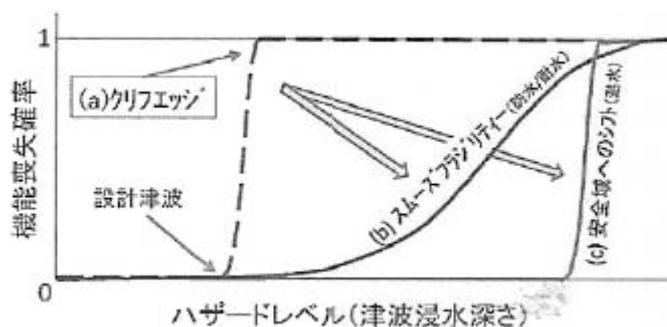


図4.7 クリフエッジ解消の方策¹⁰⁾

4.4 地域BCP

東日本大震災では津波の被害が顕著であった。そして国をはじめ多くの自治体や企業そして市民が適切に対応をとることが出来なかったことに対し「想定外」という言葉が度々使われた。この津波が本当の意味で「想定外」であったかについては諸説あるが、少なくとも我々は同じ失敗を繰り返すことだけは避けなければならない。ここでは地域の対応を検討するが、参考となるひとつの思想が事業継続計画（BCP: Business Continuity Plan）である。BCPの思想では自らの施設や要員など経営資源が被災することを前提に自らの主たる業務の継続策を検討する。従来は堤防などが災害を防いでくれるとの前提に立って地域の防災計画を策定することが多かったが、今後は地域の継続性の観点から何らかの災害で地域が被災したときにどのように対応すればよいのかも併せて検討していくことが必要であり有効である。国も自治体も企業もそして市民も、堤防などのハード対策に頼る防災には限界があり被災する可能性があるという認識のもと、災害に負けない粘り強い地域社会の構築が望まれている。本節では4.4.1で東日本大震災の教訓を踏まえ望ましい地域BCPの全体像、4.4.2でその実装、実践にあたっての手順、そして4.4.3で当学会がこれまで進めてきた、またこれから進めようとする課題について記述する。

4.4.1 BCPの全体像－東日本大震災の教訓を踏まえ－

a. 被害想定のある方

国や自治体は地域の防災計画を検討する際には何らかの被害想定を策定し、それに基づいて具体的な防災施策を検討・実施してきた。何らかの対応策を実施するためには資金が必要であり、その財源は市民の税金であることから、限られた財源をいかに有効活用するかの視点に立ち、科学的根拠を拠りどころに海岸堤防や河川堤防の高さを決定したり、避難所の整備などを行ったりしている。この被害想定について、政府や自治体およびそれを利用する企業や市民が知らず知らずのうちに誤った認識を持ってしまったことが、東日本大震災での対応の失敗のひとつである。それは、政府や自治体の設定した被害想定やハザードマップなどがその地域における最大被害であると思いきってしまったことだ。考えてみれば、被害想定やハザードマップは、何らかの想定に基づいた仮定にすぎないのであり、その被害想定どおりに災害が起きるはずがないことは、指摘されればすぐにわかるものであるが、平常時においてこの事実を認識していた人は少なかった。つまり、被害想定やハザードマップを超える災害が発生する可能性が在るということを認識していなければいけなかったのである。内閣府が中心となり2004年3月に策定された「津波ハザードマップマニュアル」には「ハザード情報はあくまで予測であり、条件によってはそれを越えることがあり得ること」を太書するよりの指示が記されている¹¹⁾。しかし、現実において被害想定を利用する企業や市民、被害想定を策定した国や自治体までもが、この被害想定を前提に対応しようとし、それを越えることが在るという認識を明確に持たぬまま東日本大震災を迎えたのである^{注2)}。

一方、被害想定は当時の科学的根拠に基づいて検討されるものということになっているが、時代をおって被害想定が大きくなる傾向がある。これは想定シナリオ作成者側が新事実などを踏まえてより安全側という考えが働くこともあるが¹²⁾、既往最大値をターゲットとすることが予算獲得や計画策定において多くの関係者に受け入れられやすいことも要因となっていると思われる。一方で、災害対応能力を超えた被害想定

注2) 本報告書第1章1.2「想定と実際の乖離」および中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会中間とりまとめ」¹²⁾ 参照

を公開したとすると、自治体に対して対応の達成を要求する圧力が強くなり対処に困るため、自治体の対処能力の範囲内に想定被害を設定してしまうというバイアスも働く¹³⁾。これらは自治体の無謬性の追求や自治体が何でも守ってくれるという公助への依存が強くなりすぎること起因しているともいえる。自分の対処能力の範囲内に被害想定を小さく設定するというバイアスは、企業が災害対応を検討するにあたって被害想定を行う際にもよくみられる。また、危険性を情報公開することに対して「地価が下がる」などといったクレームが発生する懸念もあり¹⁴⁾、それが市民が正しく地域の危険を知ることを妨げ、危険認識の欠如と自助力の停滞という問題が起きてしまうのである¹⁵⁾。

我々は東日本大震災に遭遇し、自然の破壊力の凄さと人間の科学力の未熟さを思い知らされたが、我々人間に対する「自然の前にもっと謙虚であれ」という警鐘とも思われ、自治体等が先端科学技術を駆使してもあらゆる自然災害を押さえ込むことは出来ないという認識を、市民に求めたものともいえる。つまり、今後場合によっては堤防を越える津波が発生し、市民の財産を奪い、生命を脅かすことがあるという認識を持つ必要がある。

b. 想定内と想定外

市民や企業そして自治体も、どの程度の災害に備えるかを定めるための手がかりが必要である。そのため、一般に政府や自治体が発表する想定地震や想定水害・想定津波などの被害想定や浸水深などを表したハザードマップなどに準拠して計画を作ることは有効である。そして、このときに注意しなければならないことが、先にも述べたように、災害は決して被害想定通りに起こらないということである。今までも災害の度に何らかの想定外（予想以上の被害）に見舞われてきたことを念頭に置き、計画の範囲内の被害が発生する場合と、予想外の被害が発生する場合の両面に備える必要がある。この考えを1枚の図に表現したのが図4.8である¹⁵⁾。

この図の縦軸は企業や自治体など組織の業務内容である。基礎に人命安全の確保があり、その上にビジネスつまり組織としての製品やサービスの提供業務がある。横軸は災害の規模の大きさを表すものであり、右にいけばいくほど組織にとってより大きな災害規模を表す。この横軸の途中に縦線があるが、これが組織として計画を構築するにあたって用いる被害想定の大さを表す。企業や自治体の想定被害は、多くの場合政

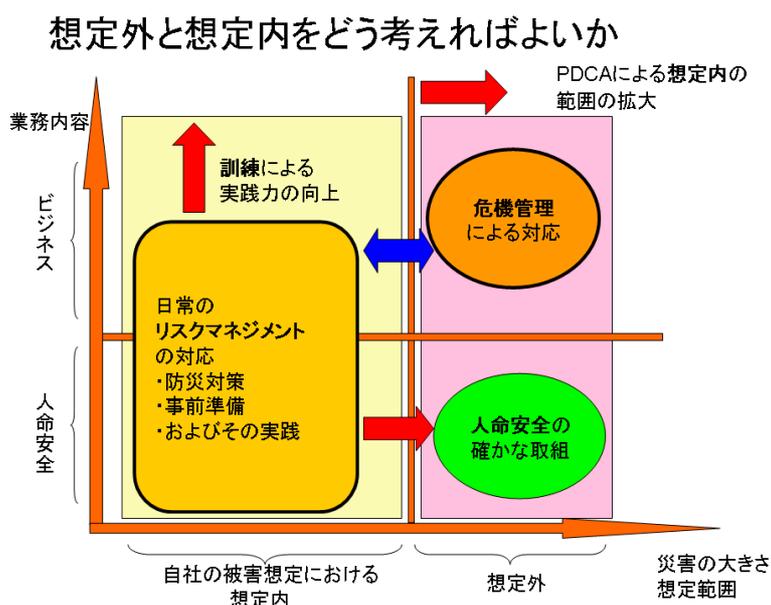


図 4.8 想定内と想定外にどのように対処するか¹⁵⁾

府や自治体が公表する被害想定やハザードマップに準拠する。さらにこれらの想定地震や想定津波高など公表された被害想定などから、企業や自治体は自分の組織の被害状況を想定して対応する。

このとき、実際に発生した災害がこの縦線の被害想定より左側、つまり被害想定より小さな規模であれば、あらかじめ検討した計画を履行し対処するよう求められる。そのため、日常のリス・クマネジメント活動や防災活動において防災対策を充実させ、被災後の対応策の事前準備を行いながら対応力を向上させる実践的な取り組みを行っていく。人命安全は完璧に対応して当然であり、さらに製品やサービスの供給ができるようにする。これらを確実にできるようにするために訓練を繰り返し、実践力を向上させていく。

一方、この想定被害よりも大きな災害が発生した場合の対処も事前に考えておかなければならない。これは東日本大震災の教訓でもある。いわゆる「想定外」の災害が発生した場合でも、企業や自治体などの組織は人命安全を実現するための最大限の対応をすることが求められる。特にこの場合は自組織の防災計画が破られることを前提としなければならないため、人命安全の確保においても自組織以外の施設への避難や自治体では管轄地域外への避難も考える必要がある。そしてビジネスであるが、この場合は既存の防災対策や復旧計画などでは対処できないため、考えにくいことであるが被災後の残った役員・従業員のノウハウや人脈、資金、機材などを把握し、その場で経営者などが智恵をしぼり組織の存亡を懸けた臨機応変な危機管理を実施する。

津波で例えれば、レベル1の津波であれば堤防で人命および財産の両方を守りきる。この場合、企業や市民は津波に対してはほぼ無傷で地震動の被害や停電対応などの災害対応を行うことができる。レベル2の津波であれば堤防の越流が発生するが津波の到達時刻が遅くなる。避難計画が機能すれば人命は救うことができるが、残念ながら経済においては大きな被害が発生し、被害発生を前提としたBCPの発動が必須となる。このレベル1、レベル2までの津波は被害想定の対象として捉えて、企業や自治体は対応を検討し実践しなければならない。そしてこれらの想定を超えた「超レベル2」の津波もあることを忘れてはならない。なお、企業によってはBCPを策定しておらず、自社の対応能力がレベル1しかないという場合もある。この場合はレベル2の津波に対しては危機管理として行動することを余儀なくされる。そのためまずBCPを策定しそして、企業の発展に伴いPDCA（Plan-Do-Check-Act）の継続的改善を実施することにより、対処する想定被害の大きさを拡大していくことが必要である。

c. BCPとは

従来の防災では人命安全を中心とした取り組みであったが、世界第二位の経済大国にあっては人命安全に加えて経済の安全も同時に達成することが求められている。そこで従来の人命安全や施設保全などの対応策を実施することに加えて求められたものが事業継続計画（BCP）である。地域を考える場合であっても人命安全だけでは地域が立ち行かないことはもはや明確であり、地域経済を如何に継続し復旧するかにつき地域として事前に検討することが必要である。

BCPは今述べたように人命安全に加えて経済活動も検討するものであるが、そこには特徴的ないくつかの考え方がある。ひとつは製品やサービスの供給責任を主眼においた思想であること、そして何らかの理由で自組織の経営資源が被災したことを前提に計画を立てることである。被災を前提に対応計画を考えることは特に従来の行政の防災計画に欠けていた視点である。

ここでBCPの定義を図4.9により説明する。

事業継続計画とは、災害時に特定された重要業務が中断しないこと、また万一事業活動が中断した場合には目標復旧時間内に重要な機能を再開させ、事業中断に伴う顧客取引の競合他社への流出、マーケットシェアの低下、企業評価の低下などから企業を守るための経営戦略である。この図で横軸は時間軸で左から右に

事業継続の概念図

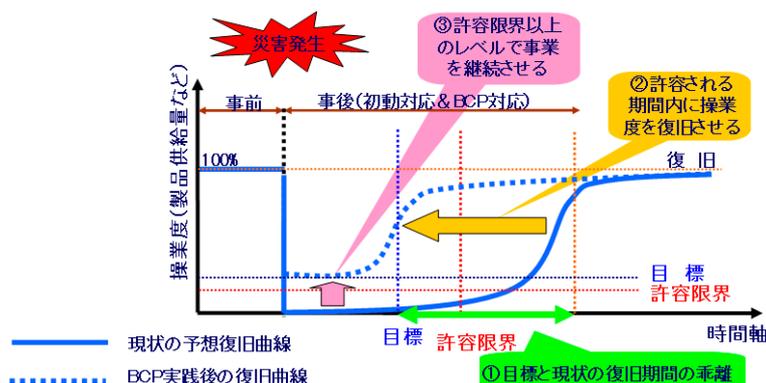


図 4.9 事業継続の概念図¹⁶⁾

時間が流れていく。縦軸は操業度である。もし何も対応していなかった場合にはこの図の実線のように災害発生において何らかの被害が発生し、操業度がゼロになり、長い時間かけて復旧を行いようやく元の操業度に戻れることを示している。一方事前に BCP を構築できていれば、災害発生においても操業度は許容限界以上の水準に落ち込み度合いを留めることができ、復旧時間も許容限界より以前の早期に目標を置き、最低限の重要業務を再開させることにより、全体的に復旧曲線を左上の方向に持ち上げることを示している。

この BCP を検討するうえでいくつか重要な検討項目がある。

(i) 被害を前提とする

BCP は何らかの事件や事故および災害が発生し、組織の経営資源である要員、設備、資金、システムなどに何らかの被害が発生したことを前提に対処策を事前に準備する。一般には経営を担う重要な機能が停止したところから対応策を検討する。その原因の地震や水害、火災、テロ、インフルエンザなどの防災対策も重要であるが、どのような原因で機能が停止するかを 100% 完全に把握することは困難であるため、原因であるリスクは問わず機能が停止したところから検討する。具体的には主要な施設である本社や工場が壊滅し使用出来ない場合どうするか、従業員が 10% しか出社出来ない場合どうするかなど、機能の停止を想定する。日本の企業や自治体の防災対策で多く見られる、工場も本社事務所も被害が軽微であり全員無事という想定では、BCP の対応ができないことは自明であろう。

(ii) 重要業務を絞り込む

何らかの経営資源が被災している前提であるため、当然ながら自社の製品やサービスを 100% 提供することができない。そのため限られた残された能力をどの製品やサービスに集中させればよいかを決める必要がある。つまり、どの製品やサービスをどのお客様にいつまでに提供するかを決めるのである。この決定には災害後の取引環境に大きな影響を与えるため、経営者が決定する必要がある。具体的にどの製品やサービスを選択するかは様々な価値観があり、ひとつおりに決めることが出来ないが、売上高、利益、シェア、重要な顧客からの要請、社会的責任および製品の特殊性、代替生産の容易性、などから決める。社会的責任および製品の特殊性というとわかりにくいですが、例えばある医薬品製造業の BCP では、薬のシェアが高くその製品が手に入らなければ多くの患者さんが亡くなってしまうことがあるため、売上げや利益は高くないものの製薬メーカーの社会的責任から特定疾病の薬を第一優先順位に決定した事例がある。

(iii) 目標復旧時間を設定する

従来の防災との比較において BCP の特徴といえるのがこの目標復旧時間の決定である。お客様との約束

(サービスレベルアグリーメント) が守れない、在庫払底、生産停止が長引くなどによるお客様離れが始まる時期、生産停止による賠償金額、生産が停止し続けた場合の資金繰りの限度、地震や火災などの災害による予想復旧期間などを検討し、最終的に経営者が決定する。目標復旧時間が短時間であればあるほど対応策にコストがかかるが、遅くすればするほど顧客離れや倒産の可能性が高くなる。答えはひとつとおりでなくまさに経営者の専権事項である。目標復旧時間は事業や業種によって異なる。銀行などでは数時間程度であることが求められ、ATM などにおいてはさらに短時間であることも求められる。また半導体産業などでは操業が2週間も止まると顧客離れが始まるとされている。東日本大震災では操業停止期間がわずか2日程度でサプライチェーンの切り替えが行われており、従来以上に復旧速度にシビアな経営環境となってきたことが判明した^{15),17)}。

(iv) 早期復旧戦略と代替戦略の双方を持つ

目標復旧時間を達成するためにBCPでは大きく分けて早期復旧戦略と代替戦略の2つがある。これらを組み合わせることが必要である。早期復旧戦略は従来の防災の考え方に馴染むもので、耐震補強や機械の転倒防止などを実施し、まずは被害にあわないようにする。そして万が一被災した場合には現場で素早い修復を行う。このためにあらかじめ復旧専門業者や工務店などと協定を結んだり、修理部品の予備を保管したりするなどの対応を行う。

もうひとつの代替戦略はBCPの特徴的な戦略で、被災地域の外に拠点を移動しそこで機能を継続する考え方である。本社が被災したら支店に本社機能を移転することを事前に計画し、本社機構に必要な什器備品を準備する、あるいは第二工場をあらかじめ確保する、短時間で他工場に生産ラインを移転する、被災したサプライチェーンを切り替える、バックアップシステムを構築するなど様々な対応を実施する。BCPといえばまさに代替戦略といっても過言ではない。しかしながら中小企業では拠点がひとつしかないという所も多く、その場合この代替戦略はどのように考えればよいだろうか。中小企業の代替戦略の基本は、同業他社との双方向の災害時代替生産協定である。東日本大震災でも商圏の重ならない隣接県の同業者と事前に「お互い様協定」を結んでいた中小企業が、BCPを実践させて成功している。また大企業であっても世界的な競争の中で拠点の集約を進めた結果、ひとつの製品はひとつの工場でしか生産出来ないところも多くなってきており、これらの大企業でも同業他社との協定が有効に機能した事例は少なくない。

ここで、日本の企業や自治体の共通した課題がある。それは防災から発展したBCPのため目標復旧時間が不鮮明であること、および代替戦略が検討されていないことである。目標復旧時間が停電回復後1週間という定めのある企業があったが、その企業は早期復旧戦略しかもっていなかった。非被災地のユーザーはライフラインの被災や復旧とは関係ない別の時間で動いている。従って目標復旧時間は非被災地の視点で定める必要があり、ユーザーの求める復旧時間までに早期復旧できないのであれば、代替戦略を持つことが必須なのである。しかも東日本大震災では早期復旧戦略そのものが機能しない場合があることが明確になった。それは津波被災地域で水面下に沈下した土地に立地していた企業、津波被災地域で長期建築停止地域に立地していた企業、原子力発電所事故で立入禁止地域に立地していた企業などではその場所で早期復旧が出来なかった。つまり何らかの被災を前提に検討するBCPにおいては代替戦略が必須なのである。

被災を前提とすること、重要業務に絞ること、目標復旧時間を設定すること、早期復旧戦略だけでなく代替戦略をもつこと、これがBCPの特徴であることを理解する必要がある。また、対策を実施することはコストがかかるという誤解があるが、代替戦略のひとつである同業他社との提携にはコストがかからない。BCPはコスト負担が可能な大企業でなければ対応できないという誤解を解き、中小企業こそBCPを実施していかなければならない。

d. BCP 的発想による地域の継続

BCP の思想は主に企業を中心に開発されてきたが、自治体もサービス業にとらえれば同様に BCP を構築できるし、また構築しなければならない。さらに最近では地域そのものをひとつの組織としてなぞらえ、地域の継続を考える地域継続計画 DCP (District Continuity Plan) の概念もでてきている¹⁸⁾。地域も住民の命が助かるだけでは継続出来ず、経済基盤の復旧や継続が必要であることは明らかである。また企業の経済を考えた場合には、大企業の工場などが地域経済の中心となっている地域や西陣織、銀食器、鞆、眼鏡など地場産業のネットワークが地域の主要産業となっている所もある。このような特徴を持つそれぞれの地域が自然災害に遭遇してどのように継続していくかは、自治体のみならずその地域の企業や市民の共通の課題として捉える必要がある。DCP はまだ概念が成熟していないが、地域住民の人命安全に自治体の BCP と地域産業の BCP を加えた、地域全体の経済活動も含めた事前準備であると理解すればよい。

(i) 地域として備えるべき災害を決定する

地域として備えるべき災害を決定する。津波でいえばレベル 1、レベル 2 の津波を決定するということがある。何度も繰り返すようであるが、人命の安全と経済の安全を達成するべき津波高が従来の唯一の想定でレベル 1 であったとすれば、レベル 2 は BCP の概念である被災を前提とする津波である。レベル 2 の津波では堤防を越流しても到達時間を遅らせることにより人命の安全を図ることはできるが、産業施設は被害を免れることはできない。DCP の重要な要素である地域の経済活動の早期復旧や代替生産にあたっては、このレベル 2 を想定して企業の主要拠点や設備が被災することを前提に検討する。

(ii) 地域として優先順位をつける

地域としてどの産業を優先的に復興することが地域全体の最適なのかについて、事前に市民の合意を取り付ける必要がある。意見が食い違い一つにまとめることは困難と思われるが、被害が発生した場合には避けては通れない問題であり、そうであれば事前に論議をオープンに実施しておくことが重要である。また BCP は企業ごとに策定するのが現実であるが、実際にはそれらが競合し、部分最適が全体最適にならないこともある。そのため地域で自治体と企業そして市民などがどのように地域として復旧していくかのシナリオを共有することも大切である。

(iii) 自治体業務の BCP を構築する

レベル 2 の場合には市庁舎など自治体の拠点も被災することを前提に自治体業務の継続計画、特に代替計画を構築し実践する。場合によっては自治体の枠を越えて隣接自治体の中に代替拠点や避難先などを設定する広域避難の考え方を適用する必要もある。

そして最後に超レベル 2 の津波を忘れてはならない。レベル 2 の被害想定によりハザードマップで津波浸水域などが示されることになるが、自治体は災害によってはそれを越えることもあることを市民に理解させることが必要である。その場合は自治体の対応能力をも超えるため、市民は自らの命を救う行動をとる（自助）ことを認識しなければならない。自治体が全て守ってくれるという幻想は捨て去らなければならない。市民に自治体の限界があることを適切に理解してもらうこと、また公助に過剰な期待をすることを防ぎ、自助と共助の精神を身につけてもらうことは、東日本大震災の大きな教訓でもある。このように考えるととても日本には暮らせないなどと思う人もいるだろうが、世界的にみれば火災やテロや竜巻、洪水・疫病など地域それぞれに環境に応じたリスクが存在するのであり、「絶対安全」は決してないことも理解しなければならない。自然は時に災害をもたらすがそれ以上に大きな恵みをもたらしてくれる。自然との共存が災害列島とも呼ばれる日本の宿命なのである。

被害想定を超える災害が発生することがあること、被害を前提として対処する BCP の考え方が有効であ

ること、早期復旧戦略に加えて代替戦略を持つこと、地域全体で人命安全に加えて地場企業などの経済活動を含めた DCP を構築することなど、東日本大震災の教訓を活かしてよりよい地域社会を構築していただくことが今切実に求められている。

4.4.2 地域 BCP 実装、実践にあたっての手順

a. 地域 BCP の特質と必要性

地域 BCP は、事前に策定された個々の主体の事業継続計画（BCP）の関係調整、欠落機能の補完等を行って、大災害の被災後も地域の必要とする優先順位の高い機能を最大限維持・確保し、また迅速な応急復旧を行って、安全な住民避難や早期に地域の復旧・復興を実現するための計画であると言える。この地域 BCP を DCP（District Continuity Plan）と呼ぶ場合がある。地域 BCP はあくまで実施されて意味のあるものであるが、現在のところ試行錯誤によるアプローチが続いている段階であり、ここではそれらを踏まえていくつもの試案を、具体的な作業事例を加えて提示し、実務の参考に供することを狙いとしてまとめている。

地域 BCP も BCP である以上一般的な BCP の特質は有すると考えられる。まずその目的は事前の防災対策を実施しても発生する災害に対して、被害を前提としつつも被る人命・資産の被害を小さくし、復旧・復興の早期実現を図る狙いを有する。地域の安全は、防災計画に基づく災害対策の充実によるアプローチのみならず、万が一既存の防災対策にもかかわらず被災した時の対応も考えておくべきである。企業レベルの対応として出発した BCP は現在公共機関の BCP（行政では業務継続計画と呼ばれる）としても実施されつつある¹⁹⁾。

次に巨大外力に対しても手立てを講じて、残すべき優先的機能をあらかじめ決め、あるいはバックアップ施設活用など代替手段を決め、さらに一定の被災いは許すものの、一定の期間内に回復すべき機能をあらかじめ決めておくという特色を有する。しかし地域 BCP は地域の全体を考えるがゆえに一般の BCP と異なり以下の特徴を有する。

- (1) 一組織や一定の機能だけでなく地域としての被災の軽減、早期復旧・復興が目的であること、
- (2) 対策の実施主体が複数にわたること、
- (3) 従って意思決定には協議会等の新たな組織の設置が有効であること。

BCP は現在企業あるいは行政団体レベルで策定が進んでいる。しかし例えば地域の被災後の復旧・復興を考えた時絶対に喪失してはならない、あるいは優先的に健全性を確保しておくべき機能として、例えば避難路、地域にとって外部と通じる重要橋梁、救急医療、児童・学童の安全、非常用通信、さらには地域の基幹的産業等の存在が考えられるが、これは個々の BCP のみでは完全には解決できない地域の課題である。

ここで地域 BCP の必要性を改めて整理しておく。

まず最初の必要性は、個々の事業主体がそれぞれ BCP を作るよう奨励しても、実行出来ない団体、あるいは地域として不足する機能が存在する可能性、及びバランスを欠く可能性があることである。地域として残すべき機能、目標を定めて復旧すべき機能を決定し、地域システムとしての持続計画の確立することは、避難や応急復旧など住民の命と財産の保護の上からも、また早期の復旧・復興の上からも好ましく、ここに地域 BCP の必要性が存在する。

図 4.10 は地域 BCP の必要性の概念を示すものである。すなわちある地域で考えると、従来 BCP のなかった官庁 A の公的機能、企業 C の機能を地域にとって重要であればその整備が促され、またこれらの BCP でカバーされない、取り残されている必要な機能（例えば、避難階段の建設、避難棟の建設など）を追加することを検討し、地域全体で被災時の対応を行う必要があることが表わされている。

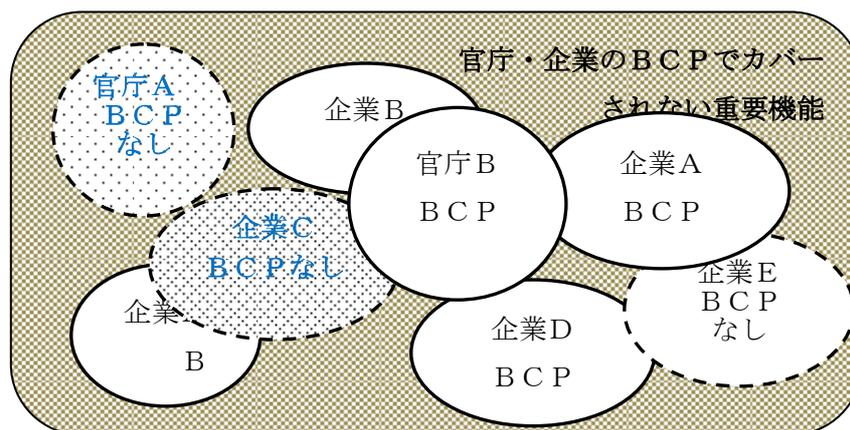


図 4.10 地域 BCP が必要な理由

b. 地域 BCP の特質と必要性

ここで具体的に地域 BCP の作成手順を考えてみると図 4.11 のようになりう。

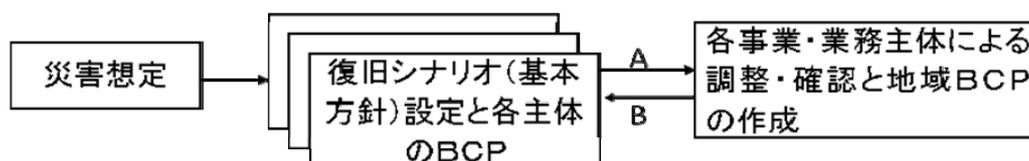


図 4.11 地域 BCP の作成手順

手順 1. 被災想定

まず作業のための前提として、被害想定を決定する必要がある。

最初の手順は (1) 災害原因の想定 (原因, 規模, 発生時刻と気象等の条件) であり, 合わせて (2) 被害想定 (被害の内容, 場所, 時間的経過) を決定する。この際, 従来の楽観的想定に基づくシナリオではなく, 被災を前提とする想定を行う。さらに分析の方法として, 地域の施設・資産ごとに, その管理者, 想定被害, 災害対策 (個別 BCP) を確認する。それを一覧表にすると表 4.4 のようになる。

手順 2. 復旧シナリオの設定

手順 1 はいわば被災直後の状況を想定したものであるが, その復旧についてもシナリオを決定する必要がある。復旧の実態を踏まえて 3 段階に分けて考えてみる。

- (1) 緊急対応期 (3 日まで) は緊急避難, 人命救助 (人が何も食べずに生きられる最大期間), 道路啓開の期間, 自衛隊受け入れなどを行う時期である。
- (2) 応急対応期 (7~10 日まで) は地域内ストックで生活・生産する期間であり, ライフライン応急復旧, ボランティア受け入れ, 復興・普及体制確立, 仮設住宅の準備手配などを行う時期である。
- (3) 応急復旧期 (1 か月まで) は他地域からの支援, 域外ネット復活による生活・生産開始, 復旧工事の開始と本格復旧準備, 仮設住宅の建設等を考慮する時期である。

次にそれぞれの期間に必要な最小限の機能を決定することとする。以下事例を示す。

- (1) 急対応期では, 緊急医療 (地域内), 児童・学童の安全, 避難場所 (水, 暖房, 食糧, 排泄), 基本インフラ機能^{注3)} (基幹通信, 重要橋梁, 重要施設の電気・水・ガス), ガソリン確保などが考えられる。

注3) 被災した首長・行政幹部が最も強調することである (岩沼市長, 宮城県土木部次長, 岩手県土木整備部長インタビュー)。

表 4.4 地域の施設・資産ごとの管理者, 想定被害, 災害対策

地域施設・資産		管理者	想定被害状況		災害対策（個別 BCP）
			外力レベル 1	外力レベル 2	
津波防護施設	津波防波堤				
	防潮堤				
	河口堰				
	河川堤防				
主要施設	道路				
	情報・通信施設				
	病院				
	官公庁				
	警察・消防署				
	学校				
主要産業施設					
住宅					
農地					
山林					

(2) 応急対応期では、応急医療、役所の機能^{注4)}、避難場所（水・暖房・食糧・排泄）、応急瓦礫 1 次撤去などが考えられる。

(3) 応急復旧期には、応急医療、避難場所＋協定避難場所、復旧準備にかかる行政、学校教育の復旧などが考えられる。

手順 3. 各事業・業務主体による確認と地域 BCP の作成

次に地域の継続性から必要な機能、早期の回復が望まれる機能、従来の BCP ではカバーされていない機能などについて検討し、変更や追加の BCP を取りまとめる。

まず地域の事業関係者が集まり（行政・医療・公営企業・地域の企業代表等からなる地域 BCP 協議会を活用する）、以上のシナリオに対してどのようなことができ、どのような点が抜け落ちているか検討する。次に抜け落ちている点、バランスを欠いた事柄に関する対策を提案し、対応主体を確認し、各主体で必要な修正を実施する。必要に応じて追加の予算確保を行う。例えば以下のような議論がありうる。確実な通信手段（対市民、対外部（県庁・国の機関））が不足していないか、戸籍データのバックアップが不十分ではないか、隣接地域との交通確保の点で古い橋梁の強度は十分か、安全な医療施設が確保されていないのではないか、病院への道路の安全が確保されていないのではないか、学校、役所、病院が津波の襲来可能な地点にあるのではないか、学校、家庭での防災教育の変革の必要性があるのではないか等々である。表 4.5 は、以上のような調整を経て地域の必要度に応じて調整された、外力レベルに対応する各施設の安全レベルの具体例である。

c. マニュアル作成の実務（研究の提案）

以上の分析はいわば観念的な BCP の作業手順であるので、実用化のためには実態を把握し、重要な事項を東日本大震災の事例から探り、他の地域での適用を試みる必要がある。そこで実態調査とモデル地域での

注4) 被災し、行政機能がマヒし復旧もままならない市、町があった。復興にあたり市庁舎の現位置再建を市民は反対した例もある²⁰⁾。

表 4.5 外的事象（外力）、安全レベルと維持すべき機能の具体例

		外力（外的事象）レベル		
		外力レベル1 （レベル1 津波、高潮、高波、洪水の影響を適切に組み合わせる）	外力レベル2 （津波、高潮、高波、洪水、地盤沈下等全ての影響を組み合わせる。）	外力超レベル2
安全レベル （要求性能）	安全レベル1 健全性維持	堤防他通常施設、人命、避難棟、学校、病院、発電所、道路・通信・電気その他ライフライン等すべて	人命、原発、避難棟、学校、病院、非常用通信、優先道路、市役所、警察、消防等優先機能	同左
	安全レベル2 軽微な損傷・障害、（早期復旧可）	一部の沿岸部日常生産施設、港湾、ビーチリゾート、（早期復旧）	優先道路、発電・送電、石油プラント、上下水道、（堤防）等（早期復旧）	同左
	安全レベル3 大損傷・障害		港湾、ビーチリゾート	同左

検証を提案する。

(i) BCP 作成事例及び必要最小限の機能に関する聞き取り調査

BCP はすでに複数の企業、国の機関、県などの自治体で作成している。また今回の被災地ではどのような被災や機能喪失が地域の避難、復旧、復興活動にとって致命的かを認識している。従って以下の調査を計画・実施する。

- (1) BCP の事例収集と分析、
- (2) 被災の実態と、地域住民の避難行動・救命活動、早期の復旧・復興に不可欠な優先的機能・施設に関する聞き取り調査。

(ii) モデル地域での検証

積極的な自治体をモデルに、BCP 協議会またはこれに準ずる幹事会を編成し、実際の用に供する BCP 作成マニュアルと地域 BCP 素案を作成する、といった検討が必要である。

4.4.3 地域 BCP に対する土木学会の取組み

a. 土木学会安全問題研究委員会の活動状況

土木学会ではこれまでも様々な BCP に関する調査研究活動を展開してきた。例えば地震工学委員会では地震災害に特化する形で 2008 年から「地震リスク・マネジメントと事業継続性小委員会（略称：SRM-BCP 小委員会）」が活動しその成果を集約しているが、より長期に広範な形で「安全・安心問題」についての課題についての議論を進めてきた委員会として 1990 年 9 月からほぼ現在の形での活動開始した土木学会安全問題研究委員会がある。一口に「安全・安心問題」といっても幅広いテーマがあり、切口によって扱う課題も異なっている。具体的には自然災害の軽減に向けた取組み、土木構造物の安全性という観点からのメンテナンスの問題、建設業従事者の労働安全災害に関する問題、土木と危機管理に関する問題、安全教育や防災教育などの人材育成に関する問題などがある。現在の土木学会安全問題研究委員会（以下当委員会）の主な活動は次のとおりである。

(i) 当委員会で主催する「安全討論会」を毎年 11 月頃に土木学会で開催

安全討論会では、毎年テーマを決め、テーマに沿う内容の論文を広く募集し、査読をしたうえで採択され

た論文については当日内容を発表してもらい、討論をする。また、採択された論文については「土木学会論文集 F6 (安全問題)」に編集される。

(ii) 安全工学シンポジウムへの参加

安全工学シンポジウムは、日本学術会議の主催、安全工学会など 35 学協会の共催という体制で運営されており、土木のみならず幅広い技術分野に関するテーマに関する研究発表や、安全に関する問題提起を行うことによって、安全工学や各分野の発展に資する目的で毎年 7 月に開催されている。土木学会も共催学会として参加し、また幹事学会として 7 年に 1 回シンポジウムの運営を担っている。

(iii) 労働災害防止のための安全教育活動の実施

労働災害防止のため、建設関連職場の安全集会等への訪問や講演会の開催による労働安全問題に関する啓蒙活動や、土木系大学生に対する現場見学を通じた安全への取組み事例の紹介など土木界の労働安全に対する意識の醸成と知識の向上に取り組んでいる。

(iv) 委員会・小委員会の運営

上記の活動を円滑に進めるために、適宜安全問題研究委員会を開催するとともに、主要なテーマに取り組むための小委員会を設置し、活動している。現在設置されている小委員会は、「土木学会論文集編集小委員会」、「労働災害小委員会」、そして本稿の本題に関わる「BCP 小委員会」である。

b. BCP 小委員会の設置

「BCP」というワードが今次震災を機に大きく注目されているが、当委員会では震災前から来るべき巨大地震（どちらかという首都圏直下や東海、南海、東南海を意識していたが）に対する事業継続の重要性に鑑み、土木学会における取組みということもあって、特に災害時に建設業を営む会社が事業を継続していくためには何をどのように準備すべきかという観点から研究テーマとして取り上げるべく、2009 年度に「BCP 小委員会」を設置したところである。とはいえ、委員会としても「そもそも BCP とは何か?」というところからのスタートであったので、2010 年度は、実際に BCP を策定している建設会社や四国地方整備局の取組みなどの事例を分析研究するところから始めることとなった。小委員長には、BCP を策定している建設会社の委員を充て、情報収集を含む委員会活動の充実と委員会運営の円滑化を目指すこととした。ところが、2011 年度の活動をどのようにしていくかを議論している矢先震災が発生したため、そのような活動計画を全面的に見直し、BCP についての土木学会としての検討を早急に深化することが必要となった。

c. 安全問題研究委員会としての BCP への取組み

2011 年度は、以下の取組みを実施した。

(i) 安全工学シンポジウムにおけるオーガナイズドセッションの運営

「BCP (事業継続計画) を巡る課題と動向～安全・安心・安定な社会作りへのアプローチ」と題し、5 つのテーマ発表をし、議論を行った。

(ii) 土木学会全国大会における研究討論会の実施

安全工学シンポジウムと同じテーマで 6 つのテーマ発表をし、議論を行った。2011 年度の全国大会の会場が愛媛大学であることから、四国地方整備局の取組みについての発表事例の紹介を組み入れた。

(iii) 安全問題討論会の開催

「大規模地震災害と事業継続計画」を総合テーマとし、31 篇の論文の発表をし、討論を行った。この中で、事業継続計画 (BCP) および地域継続計画 (DCP) の策定のあり方、さらに組織間連携のあり方について議論を深めることに取り組んだ。また、東京海上日動リスクコンサルティング (株) 指田朝久氏 (本項 a の執筆担当) より「事業継続計画 (BCP) の成果と改善点～東日本大震災を振り返る～」と題した講演をいただ

いた。

(iv) BCP 小委員会の体制強化

東日本大震災の発生を機に、土木学会としても BCP に対する取組みの重要性と必要性を認識し、BCP に対する検討を強化する方針が打ち出されている。具体的な成果として、土木学会として BCP の作成に関するマニュアルを整備し、大震災においても機能する計画の策定を広く求めていくことを目的とした取組みを進めていくこととなった。

このような取組みの実施母体として、従前の BCP 小委員会が上記の目的を達成するためのタスクフォースとして機能するよう、現小委員会メンバーに加え外部の有識者なども新たに委員として参画を要請し、体制を強化することとした。この小委員会（名称：BCP 拡大小委員会）は、2 年程度の活動期間で成果を出す予定であり、そのため、当面、小委員会内に以下に述べる 2 つの WG を設置し、活動を進めることとしている。WG その 1 は、「事例調査に関する WG」とし、震災によって組織の中核機能が喪失するなど BCP の前提が崩れたことにより事業継続が困難になった事例を、被災した市民の目線で調査し、どこにどのような問題があったのかについて把握することとした。WG その 2 は、「BCP のあり方検討に関する WG」とし、東日本大震災の津波被害等のモデルケースに対し、BCP においてどのような前提に立ってどのような事項を定めておくことが必要なのか、あるいは個々の組織の BCP のみならず地域が継続していくための体系化、更には地域継続計画（DCP）をどのように定めていく必要があるのかを具体的に検討することとした。

d. 今後の課題

土木学会としての BCP の取組みは、まだ緒についたばかりである。前述した取組みを通じて、「想定外の災害であっても使える BCP」の策定を目指さなければならない。大切なことは、学会としてのマニュアルあるいはガイドラインの整備を図ったうえで、社会に対する啓蒙やその普及を促進するための諸活動を計画的かつ継続的に進めていくことが不可欠と考える。当委員会では、当面の BCP 拡大小委員会の活動に加え、中長期的な観点での BCP に関する諸課題について引き続き取り組んでいく予定である。

4.5 監視・情報提供体制

4.1 から 4.4 までは、長期にわたり検討を重ねていかなければならない減災マネジメントシステムについてまとめているが、発災時の情報把握と伝達がどのように進むかも、上記の減災達成の方法論に大きく関わるところである。本節では観測史上最大規模の東北太平洋沖地震によってもたらされた、それまでの想定を大きく超えた津波の災禍の中で浮き上がってきた監視・情報提供の問題を集約し、今後進めていかなければならない取組みについて述べる。

4.5.1 津波時の情報伝達の課題と解決策

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、牡鹿半島の東南東約 130 km の三陸沖の海底下約 24 km を震源として、わが国の地震観測史上最大規模（M9.0）の「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」が発生した。この地震に対し、気象庁は地震発生後 3 分で津波警報を発表したが、死者・行方不明者約 1 万 9 000 人という甚大な人的被害が発生し（警察庁、2012）、そのほとんどは津波による犠牲であった。この震災・津波で、津波に関わる避難情報の伝達、避難において以下のような問題が生じた。

(1) 地震発生 3 分後に出された津波警報第 1 報では、予想される津波の高さが 3 m とされていた（岩手

県、福島県に対して)。その後沖合に設置されていた GPS 波浪計によって高さ 2.6m~6.7m の峰が観測された (15 時 12 分~15 時 19 分頃)²¹⁾ ため、この観測結果を用いて津波高の予報値が上方に修正された。この結果が通報されたのは、津波が到達するおおよそ 10 分前であり、避難に十分な余裕があったとはいえない。

- (2) GPS 波浪計は、地震、津波の被害を受けることなく観測を続けデータを陸上局に送っていた。データは陸上局、港湾事務所を経由して独立行政法人港湾空港技術研究所へ伝送され、気象庁にも提供された。しかし、陸上側の施設が津波によって被災したため、3 月 11 日の 15 時 15 分頃から伝送ができなくなった²²⁾。
- (3) 津波に対する避難情報は主に防災行政無線と広報車によって住民に伝達された。地震発生後の停電、通信施設の損壊により、これ以外の伝達手段 (固定電話、携帯電話など) は十分に機能しなかった。しかし、防災行政無線による情報の伝達は一方通行であり、正確に伝わったのか、また避難したのかを確認することができないという問題がある。津波の場合には二次災害のおそれがあるため、避難したかどうか確認しに行くことが難しいのである。また音声以外に文字や画像を伝えたい場合もあるが、防災行政無線では対応できない。
- (4) 三陸自動車道路は津波を考慮した設計がなされており、道路に避難した車両は津波を免れた。また、仙台東部道路でも平野部の盛土区間に周辺住民が避難して助かっている。仙台東部道路のインターチェンジから道路に入った車両もあったが、地震発生後にインターチェンジは閉鎖されていたため、強行突破したのである。災害時の避難は徒歩によることが原則とされていること、仙台東部道路は緊急輸送にも使われることを考えあわせると、インターチェンジの閉鎖はやむを得なかった面もあるが、盛土で造られた道路での一時的な避難民受け入れも選択肢の一つとして検討されて良いのではないだろうか。
- (5) 徒歩ではなく車で避難した人もいるが、渋滞に巻き込まれているところを津波に襲われ、犠牲になった方がいる²³⁾。車に津波の接近を知らせる手段がなかったこと、交通渋滞の情報を伝える手段がなかったこと、地震後の停電や信号機の損壊によって交通信号が滅灯し、信号交差点で渋滞が発生したこと、車から降りて徒歩で避難するという決断ができなかったことなどが原因であったと推察できる。

こうした問題点に対して検討が行われ、解決策が提案されている。中にはすぐに実現可能な解決策もあり、早急に対策を講じることが望まれる。

まず、GPS 波浪計についてである。東日本大震災において貴重な情報を提供した GPS 波浪計では RTK-GPS 方式による測位が行われており、この測位方式の技術的制約からこれまで沖合 20 km 以遠に設置することは難しかった。しかし、精密な単独測位方式 (PPP-AR) を利用した新しい GPS 波浪計が開発されており、より沖合への設置が可能となっている²⁴⁾。東日本大震災では陸上の通信施設が被害を受けたため、GPS 波浪計で観測された情報が伝達できなくなったが、地上側の施設を災害に対して頑健なものとするとともに、非常用電源と燃料を確保し、通信網を多重化することによって確実な情報伝達を実現することが望まれる^{注5)}。

避難情報の伝達では、被災する可能性のある人々に確実に避難情報を伝達し、行動を促す必要がある。情報が確実に伝わったのかどうか、実際に避難行動を取ったのかどうか、さらには発災時に各人のいる場所ま

注5) 謝辞：GPS 波浪計に関わる資料を提供していただいた日立造船株式会社に感謝する。

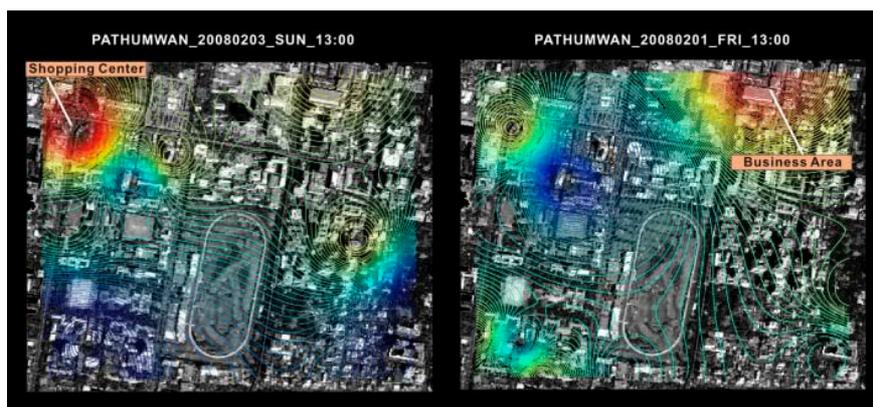


図 4.12 携帯電話の基地局データを用いて、タイ中心部における人の分布を推定した事例²⁷⁾
(赤い部分の人口密度が高い。左：日曜日，右：金曜日)

で知ることができれば、よりきめ細かな対応（逃げ遅れた被災者の搜索など）や地域の特性に応じた避難情報の伝達が可能となるが、現時点ではそこまでの対応は難しい。2007年から第三世代の携帯電話に対してGPS機能を付与することが原則として義務化されたので、携帯電話を使って被災者の位置を把握し、被災者の位置に応じたサービスを提供することが原理的には可能となっている（図 4.12）。こうしたサービスを実現する上で障壁となっているのは、個人情報保護の課題である。解決策としては、事前に本人から承諾をとっておく方法、匿名化・集計化を通じて個人が識別できないようにする方法がある²⁵⁾。

また、高齢者にとって携帯電話は必ずしも使いやすい機器ではない。東日本大震災ではタブレット型の端末が利用された事例がある。いずれにしても、高齢者、視覚等に障がいのある人々への情報伝達方法についてはさらなる検討を行う必要がある。

車に乗っている人に避難情報を伝達するには、路測のセンサー（光ビーコン、電波ビーコン等）を使って情報を収集するとともに、路車間・車車間通信を利用して情報提供を行う仕組みを導入することを検討する必要がある。高速道路の法面を避難場所にすることについては、すでに一体整備が始まっており²⁶⁾、仙台東部道路では法面に避難用階段が設けられている。こうした動きがさらに広がることが期待される。

4.5.2 津波警報の改善に向けての気象庁の取組み

a. はじめに

気象庁では今回の被害の甚大さに鑑み、津波警報をどのように改善すべきかについて検討するため、有識者や関係防災機関等よりなる「東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報改善に向けた勉強会」を3回開催（6～9月）し、勉強会における意見、一般への意見募集、同時期に開催されていた中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」における議論等を踏まえ、昨年9月、「東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について」（以下、「津波警報改善の方向性」）をとりまとめ、公表した（気象庁，2011b²⁸⁾）。

「津波警報改善の方向性」で示した津波警報の改善策のうち、情報の伝え方、発表のありかたなどに係る一部の事項については別途検討するとしており、これらについて結論を得るため、有識者や関係防災機関等よりなる「津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する検討会」を別途開催し、1月末までに3回の会合を経て、2月、「津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する提言」（以下、「提言」）をとりまとめた（気象庁，2011c²⁹⁾）。

本稿では、「津波警報改善の方向性」及び「提言」で示された具体的な改善策、今後の予定等について述べる。

b. 東北地方太平洋沖地震での津波警報の課題

既に 4.1.1 で概略触れたところではあるが、ここに今回の震災・津波で浮き上がった課題を整理してみる。気象庁は当初地震の規模を M7.9 と推定し、地震発生 3 分後の 14 時 49 分、津波警報の第 1 報として、岩手県、宮城県、福島県へ津波警報（大津波）を発表、予想される津波の高さをそれぞれ 3m, 6m, 3m と発表した。その後、沖合の GPS 波浪計や沿岸の検潮所における観測データを基に、津波警報や注意報の対象地域を拡大するとともに予想される津波の高さを引き上げた。しかしながら、その後の解析で得られた東北地方太平洋沖地震の規模は M9.0、沿岸での津波の高さは 10m 以上にも及び、第 1 報での地震の規模の推定や津波高さの予測は実際のもを大きく下回るものであった（気象庁, 2011a³⁰）。

こうした状況を踏まえ、「津波警報改善の方向性」では、津波警報の発表に係る課題を以下のとおり整理した。

- (1) 地震発生 3 分後に発表した津波警報第 1 報で推定した地震規模 (M7.9) が過小評価だった。また、評価が過小である可能性を認識できなかった。気象庁マグニチュード (Mj) (勝間田, 2004³¹) が 8 を超える地震について、迅速にその規模を推定する手法を導入し第 1 報に活用する方策を検討する必要がある。
- (2) 地震規模推定が過小な中で発表した「予想される津波の高さ 3m」が避難の遅れにつながった例があったと考えられる。(1) とともに、津波警報第 1 報における津波の高さの発表のあり方についても検討する必要がある。
- (3) 地震発生約 15 分後に計算されるべきモーメントマグニチュード (Mw) が、地震波が国内の広帯域地震計の測定範囲を超えたため計算できず、津波警報の続報が迅速に発表できなかった。また、GPS 波浪計よりも沖合にあるケーブル式沖合水圧計のデータを反映させた津波警報更新手段が不十分であった。津波警報の続報において、Mw をより確実に求められるよう、振幅の大きい地震波まで測定できる広帯域地震計の活用を進めるとともに、沖合津波観測の強化とその利用技術の開発を進める必要がある。
- (4) 今回発表した津波観測情報において、初期段階で観測された小さい津波の情報「第 1 波 0.2m」等が、避難の遅れ、中断につながった例があったと考えられる。津波観測情報の伝え方、情報文のあり方等について検討する必要がある。

c. 津波警報等の改善策

(i) 改善の基本方針

b. に示した課題に係る改善策の基本方針について、「津波警報改善の方向性」では、以下のとおり整理した。

(1) 早期警戒

地震発生後 3 分程度以内の迅速な発表を目指す従来の方針は堅持し、その後得られるデータ・解析結果に基づき、より確度の高い警報に更新する。

(2) 安全サイド

津波波源の推定に不確実性が残っている間は、不確実性の中で安全サイドに立った警報発表を行う。

また、「強い揺れを感じたら自らの判断で避難する」ことが基本であることを周知徹底したうえで、警報を効果的に機能させる。

(ii) 技術的な改善策

津波警報第1報発表の迅速性を確保するため、地震規模の推定は3分程度で計算可能な気象庁マグニチュード (M_j) を用いることを基本とするが、マグニチュード8を超えるような巨大地震や津波地震の場合には、その規模を3分程度で正確に算出することは技術的に困難である。このため、推定した気象庁マグニチュード (M_j) の過小評価の可能性を速やかに認識できる監視・判定手法を導入し、地震が発生した海域で想定される最大マグニチュードを適用、ないしは同手法で得られるマグニチュードの概算値を用いて、安全サイドに立った津波警報の第1報を発表することとする。その後、最新の地震・津波の観測データが明らかになり次第、より確度の高い津波警報に更新する。具体的には、津波警報の迅速かつ適切な更新に必要なモーメントマグニチュード (M_w) を15分程度で迅速かつ安定的に求めるため、強震動まで測定できる広帯域強震計を新たに整備し活用することとする。

また、気象庁では、平成23年10月現在、全国で15台のGPS波浪計（国土交通省港湾局）と12台のケーブル式海底水圧計（気象庁、（独）海洋研究開発機構、東京大学地震研究所）を津波監視に活用しており、GPS波浪計については、東北地方太平洋沖地震において津波警報の更新に重要な役割を果たした。一方のケーブル式海底水圧計については、GPS波浪計よりも沖合にあり、ケーブル式海底水圧計により津波が観測されたときにどの沿岸でどれだけの津波となるかを見積もる手法が確立されておらず、津波警報の更新に活用するには至っていない。今後、これらを津波警報の更新に活用できるよう、技術開発を進める。これらの点を踏まえた津波警報改善策による警報発表の流れを図4.13に示す。

(iii) 津波警報の情報文等の改善

(1) 津波警報等の発表基準と津波の高さ予想の区分

東北地方太平洋沖地震及び2010年のチリ中部沿岸の地震による津波の高さと被害との関係の調査結果に基づき、津波警報等の発表基準及び津波の高さ予想の区分を表4.6のとおりとする。津波の高さ予想の区分は、津波予測の誤差やとりうる防災対応の段階等を踏まえて、現状の8段階（0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m 以上）から5段階（1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 10 m 超）とし、情報で発表する津波の高さの予想値は、予想される幅を単一の数値で表現したものとする。危機感を喚起するため、高さ予想の区分の幅の高いほうの値で発表する。

表4.6 津波警報・注意報の分類と津波の高さ予想の区分等

警報・注意報の分類	発表基準及び 津波の高さ予想の区分	予想される津波の高さ	
		数値での発表	定性的表現での発表
津波警報（大津波）	10 m～	10 m 超	巨大
	5 m～10 m	10 m	
	3 m～5 m	5 m	
津波警報（津波）	1 m～3 m	3 m	高い
津波注意報	0.2 m～1 m	1 m	なし（表記しない）

また、地震規模の過小評価の可能性を検知し、当該海域で想定される最大のマグニチュードを適用するなどして津波警報の第1報を発表する場合は、地震規模推定の不確定性が大きいと考えられることから、予想される津波の高さを、数値ではなく「巨大」など定性的表現で発表し、通常地震とは異なる非常事態であることを伝える。津波の高さを定性的に表現した情報文の例を図4.14に示す。

なお、地震発生約15分後には、モーメントマグニチュード (M_w) による確度の高い津波の予測や津波の観測結果に基づいて津波警報の更新を行うが、この場合の予想される津波の高さは数値で発表する。

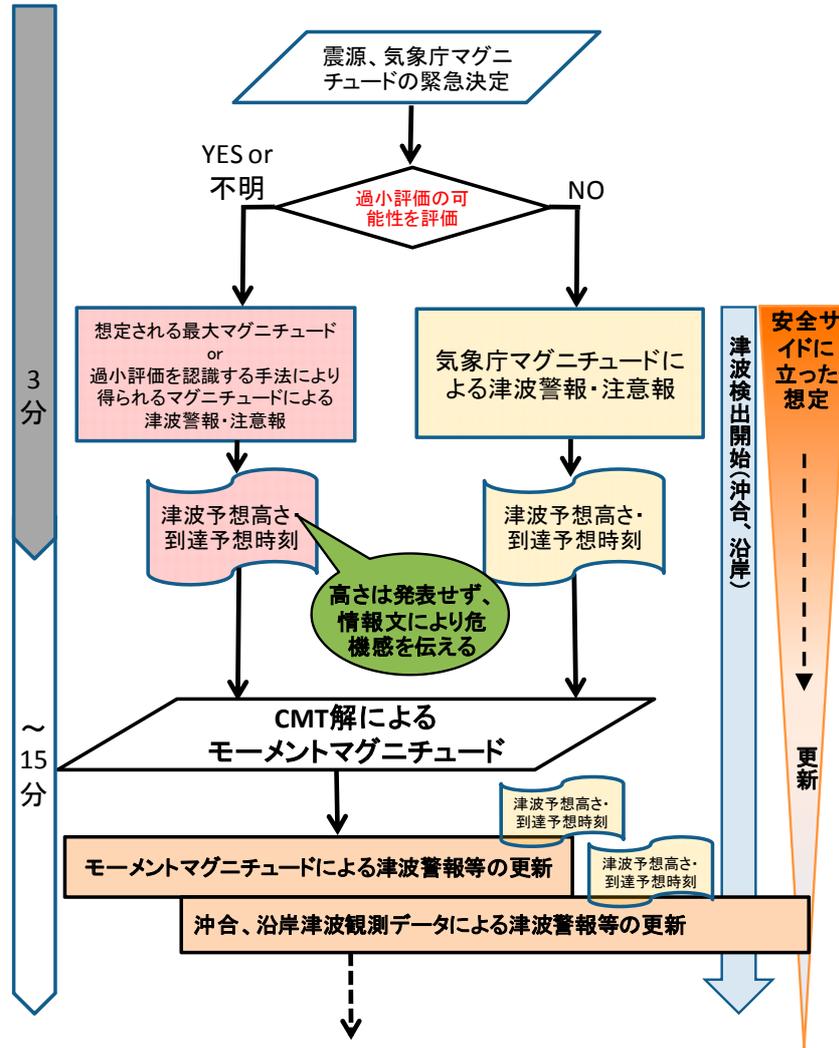


図 4.13 津波警報改善策による警報発表の流れ

(2) 津波観測データの発表

津波は何度も繰り返し来襲するが、第1波が最大になるとは限らず、第2波、第3波など後続波がより大きくなることが多く、津波の第1波の観測値が小さい場合、今回の津波は小さいものとの誤解を与えるおそれがある。一方、津波が観測されたという事実を伝えることも重要と考えられることから、津波の第1波については、到達した時刻と押し・引きのみ発表し、最大波については、観測された津波の高さが、予想されている津波の高さ区分よりも十分小さい場合は、「観測中」と定性的表現で発表することとする。なお、観測した津波の高さを数値で発表する基準は表 4.7 のとおりで、既に最大波が観測されたと誤解を与えないよう「これまでの最大波」と表現することとする。

表 4.7 観測された津波の高さを数値で発表する基準

発表中の警報等	数値で発表する基準
津波警報 (大津波)	観測値 > 1 m (基準に達しない場合は「観測中」)
津波警報 (津波)	観測値 \geq 0.2 m (基準に達しない場合は「観測中」)
津波注意報	すべて数値で発表 (ごく小さい場合は「微弱」)

【現行】		
津波情報（津波到達予想時刻・予想される津波の高さに関する情報）		
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 50 分 気象庁発表		
[津波到達予想時刻・予想される津波の高さ]		
予報区名	到達予想時刻	予想される津波の高さ
〈大津波〉		
岩手県	既に津波到達と推測	3 m
宮城県	11 日 15 時 00 分	6 m
福島県	11 日 15 時 10 分	3 m
〈津波〉		
北海道太平洋沿岸中部	11 日 15 時 30 分	1 m
青森県太平洋沿岸	11 日 15 時 30 分	1 m
茨城県	11 日 15 時 30 分	2 m
千葉県九十九里・外房	11 日 15 時 20 分	2 m
伊豆諸島	11 日 15 時 20 分	1 m
〈津波注意〉		
北海道太平洋沿岸東部	11 日 15 時 30 分	
...
<p>なお、場所によっては津波の高さが「予想される津波の高さ」より高くなる可能性があります これ以外の沿岸でも、若干の海面変動があるかもしれませんが、被害の心配はありません 詳しくは津波予報（若干の海面変動）を参照ください</p>		
[震源、規模]		
きょう 11 日 14 時 46 分頃地震がありました		
震源地は、三陸沖（北緯 38.0 度、東経 142.9 度、牡鹿半島の東南東 130 km 付近）で、震源の深さは約 10 km、マグニチュードは 7.9 と推定されます		
【改善案】		
津波情報（津波到達予想時刻・予想される津波の高さに関する情報）		
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 50 分 気象庁発表		
[津波到達予想時刻・予想される津波の高さ]		
予報区名	第 1 波の到達予想時刻	予想される津波の最大波の高さ
〈大津波〉		
岩手県	津波到達中と推測	巨大
宮城県	11 日 15 時 00 分	巨大
福島県	11 日 15 時 10 分	巨大
〈津波〉		
北海道太平洋沿岸中部	11 日 15 時 30 分	高い
青森県太平洋沿岸	11 日 15 時 30 分	高い
茨城県	11 日 15 時 30 分	高い
千葉県九十九里・外房	11 日 15 時 20 分	高い
伊豆諸島	11 日 15 時 20 分	高い
〈津波注意〉		
北海道太平洋沿岸東部	11 日 15 時 30 分	
...
<p>津波警報が発表された沿岸部や川沿いにいる人はただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難してください 到達予想時刻は、予報区のなかで最も早く津波が到達する時刻です。場所によっては、この時刻よりもかなり遅れて津波が襲ってくる場合があります 到達予想時刻から津波が最も高くなるまでに数時間以上かかることがありますので、観測された津波が小さくても、津波警報が解除されるまで安全な場所から離れないでください これ以外の沿岸でも、若干の海面変動があるかもしれませんが、被害の心配はありません 詳しくは津波予報（若干の海面変動）を参照ください</p>		
[震源、規模]		
きょう 11 日 14 時 46 分頃地震がありました		
震源地は、三陸沖（北緯 38.0 度、東経 142.9 度、牡鹿半島の東南東 130 km 付近）で、震源の深さは約 10 km、マグニチュードは 8 を超える巨大地震と推定されます		

図 4.14 津波の高さを定性的に表現した情報文の例

(3) 沖合の津波観測データの発表

東北地方太平洋沖地震では、津波警報更新における沖合津波観測の有効性が実証された。沖合津波観測データは、現在、沿岸での観測データと合わせて発表しているが、これまでの観測情報とは別に新設することとする。また、GPS 波浪計より更に沖合に設置している海底水圧計の観測データも活用することとする。

表 4.8 沖合の観測値及び沿岸で推定される津波の高さを数値で発表する基準

発表中の 警報等	沿岸で推定される津波の高さを数値で発表する基準	基準を超えた場合	基準に達しない場合
津波警報 (大津波)	推定値 > 3 m	沖合の観測値, 沿岸で推定される津波の高さも数値で発表	沖合の観測値は「観測中」, 沿岸で推定される津波の高さは「推定中」で発表
津波警報 (津波)	推定値 > 1 m	沖合の観測値, 沿岸で推定される津波の高さも数値で発表	
津波注意報	すべて数値で発表	沖合の観測値, 沿岸で推定される津波の高さも数値で発表	

一般に津波は沖合では沿岸より低く、その値のみを発表した場合、来襲している津波は小さいものとの誤解を与えるおそれがあるため、沖合での観測値とともに、沿岸に到達した場合の高さの推定値もあわせて発表する。また、沿岸で推定される津波の高さが、予想されている津波の高さ区分よりも十分小さい値の場合も、(2)の考え方と同様、避難行動を妨げることがないように、表 4.8 のとおり発表基準を設け、基準に達しない場合、沿岸で推定される津波の高さは「推定中」と定性的表現で発表する。

d. 今後の取組み

上記の津波警報等の改善については、気象庁や津波警報を伝達・利用する防災関係機関等におけるシステム改修状況等を踏まえ、平成 25 年 3 月に運用を開始する予定である。

また、津波避難においては、津波警報と避難指示等の防災対応、避難行動との関係を整理するとともに、情報伝達手段、ハザードマップや防災教育等の津波防災対策との連携が重要である。津波防災対策については、中央防災会議「災害時の避難に関する専門調査会・津波防災に関するワーキンググループ」において検討が進められており、気象庁はこの議論を十分に踏まえつつ、より一層の津波警報の改善に取り組むこととしている。

4.6 学会の貢献

土木学会は今回の震災に対して様々な緊急対応を打ち出してきたが、長期にわたり今回の教訓を風化させず社会に積極的に貢献し続けることもその使命として求められている。震災後の 3 月 23 日、土木学会、地盤工学会、日本都市計画学会の 3 学会会長による緊急声明³²⁾が出された。その一節を引用すると、「まずは、震災の調査分析および今までに積み重ねてきた対策の再評価である。それはより信頼性の高い基準や指針の構築につながるものである。次に、急がれる緊急復旧への実行性のある提言及びどのようにして安心して住めるまちと国土経営の体系を築いたらいいのかという恒久復興への提言、さらには国土の危機管理を念頭に置いた社会システムの再編等である。それらは、やがてわが国を襲うことが予想されている、東海、東南海、南海地震をはじめとする巨大地震への備えとなるべきものである。」と行動の指針となるべき考えが盛り込まれている。そして「われわれが想定外という言葉を使うとき、専門家としての言い訳や弁解であってはならない。」と専門分野の垣根を踏み越えた取組みが必要であることを述べている。この行動指針を受ける形で震災特別委員会が組織され、そのもとに分野横断の特定テーマ委員会が 1 年程度の期間目標を設け政策提言につなげるべく活動を進めている。津波推計・減災委員会もそうした特別活動の一環である。そしてそれらの成果は 3 月 5 日 6 日に開催される国際シンポジウム「東日本大震災 あれから 1 年そしてこれから ～巨大災害と社会の安全～」などで提示された。

一方、国土交通省と地方自治体は、被害を受けた海岸堤防を再整備するにあたって今回の 3 月 11 日の津

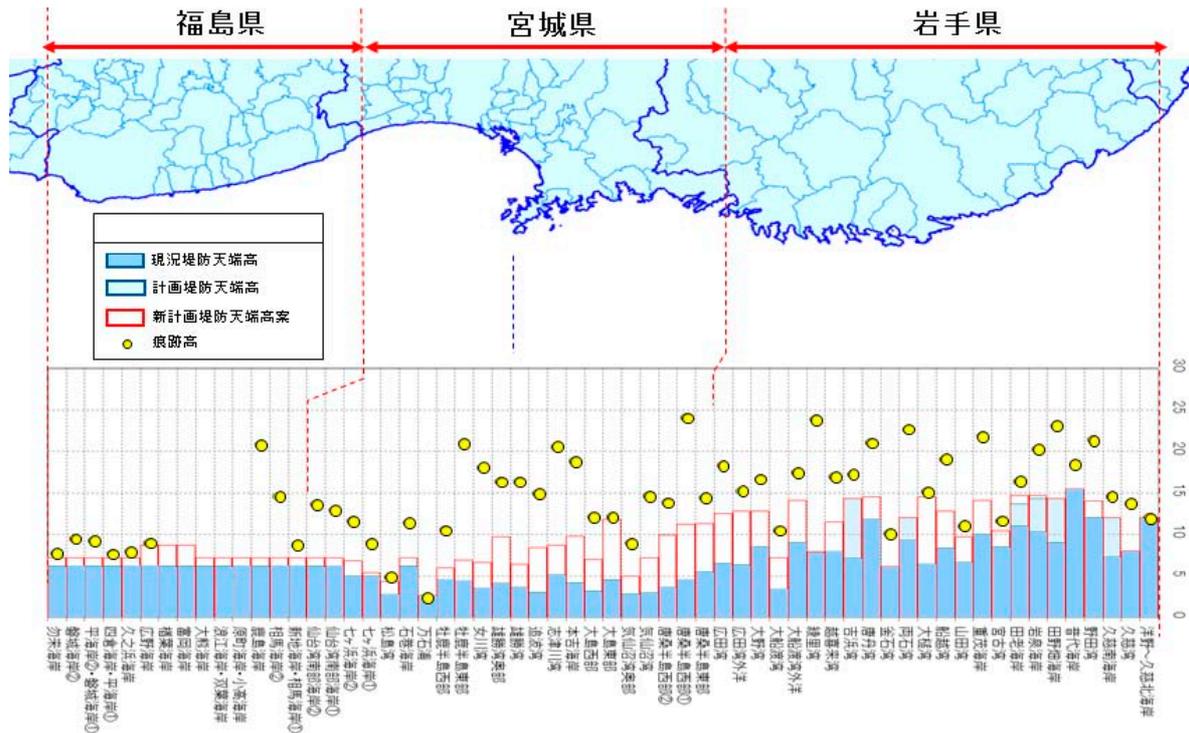


図 4.15 各地域海岸の堤防高（現況・計画・新計画）（国交省東北地整作成³³⁾）

分類	回避型	分散型	抑制型
ねらい (巨大津波 に対して)	生命と財産を守る	生命を守り、財産の多く を保全する	生命を守り、財産の壊滅 的被害を防ぐ
イメージ	<p>宅地造成</p> <p>高所移転</p> <p>被災集落</p> <p>津波エネルギー</p>	<p>嵩上げ・高所移転</p> <p>再生市街地</p> <p>分散</p> <p>被災市街地</p> <p>防災施設</p> <p>津波エネルギー</p>	<p>嵩上げ・高所移転</p> <p>道路</p> <p>再生市街地</p> <p>抑制</p> <p>被災市街地</p> <p>防災施設</p> <p>津波エネルギー</p>

図 4.16 津波防災プランの分類³⁴⁾

波を過去最大級の津波ととらえ、数十年～百数十年の頻度で発生している津波をもって設計対象津波群とすることを基本方針に定め、協議によって概ねすべての沿岸地域での堤防高案を提示している（図 4.15, 国交省東北地整作成³³⁾）。また岩手県は 2011 年 6 月に、宮城県は 2011 年 9 月にそれぞれの復興計画を公表している。例えば岩手県はこの復興計画の中で津波の被害を受けた市町村の復興構想として (1) 回避型, (2)

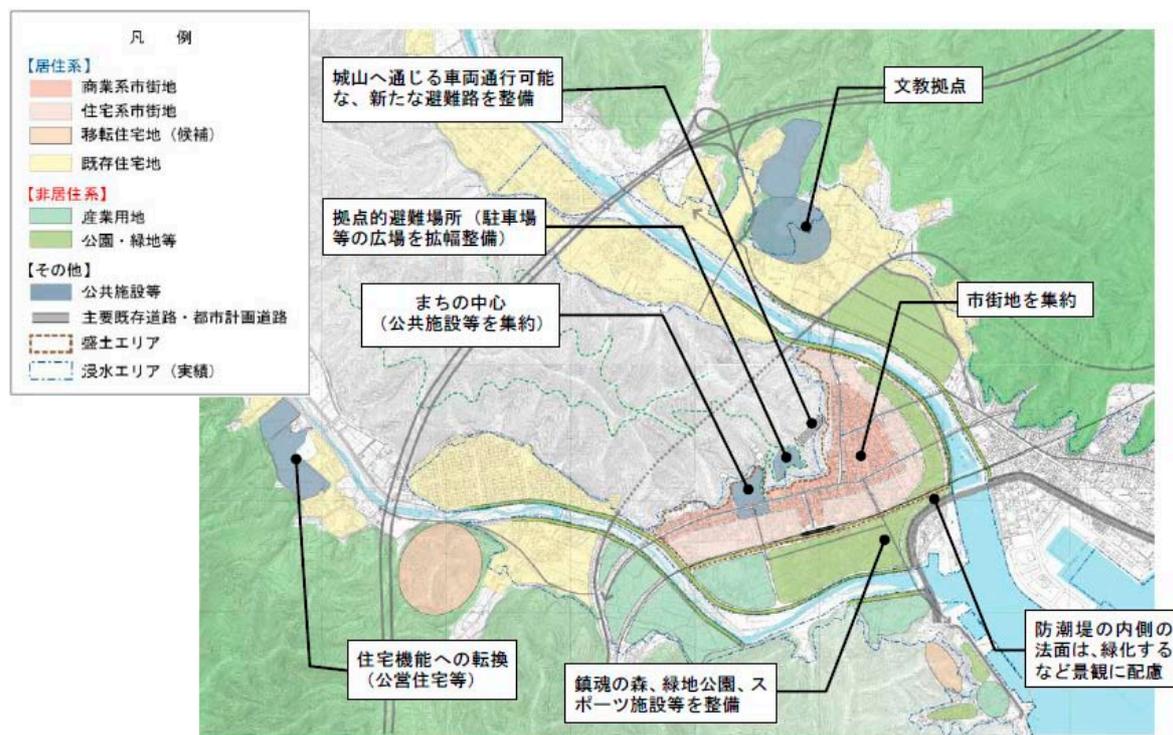


図 4.18 大槌町災害復興計画案³⁶⁾

「大槌を襲ひたる昭和 8 年津浪高は満潮面上 2.3 m，家屋の流出倒壊戸数 222 戸，浸水 135 戸を出せるも，本地方における一の経済中枢をなせる本市街地は現地復興の外なく，幸に津浪の勢力土木工作物に依りて防ぎ得る程度のものであるを以て，十分の予防法を講ずれば，被害を極度に減少し得べし。即ち大槌川右岸を整理し之より小釜川左岸に至る防浪堤を設くるを得ば，本市街地を挟む両河川は緩衝地帯となりて，津浪の災害を軽減するを得可し。街路復旧事業として路線数 11，延長合計 1367 m，幅員 5 m 乃至 11 m を施行す」。また，さらに続けて「岩手県大槌町安渡：集団移転戸数 20 戸，造成敷地は部落北方山手にて明治二十九年津浪浸水位（満潮面上 3.00 m）より尚 8 m 以上の高さにある安全地帯にして，その面積 939 坪である」とあり大槌町安渡が安全な高台であることにも触れている。

国土地理院の国土変遷アーカイブスに収蔵の 1946 年米軍撮影の航空写真では，浸水を許容する緩衝地帯として計画された大槌川と小釜川に挟まれた地域はそのまに空地として写っているが，その後急速に開発が進み当初の構想が戦後の様々な事情を反映して大きく変貌してしまった。2011 年 12 月に大槌町が町再生創造会議で取りまとめた復興計画案³⁶⁾（図 4.18）は，この地区を公園緑地とし，その背後に商業系市街地，住宅系市街地を配するもので，また一部住宅を高台に移転させるなどその骨子は昭和三陸津波直後の内務大臣官房都市計画課の計画に盛り込まれた思想をそのまま踏襲したかに思われる。

昭和三陸津波以降，2011 年 3 月 11 日に津波に至るまでの大槌の変遷は，既に 3.1.3 でも触れた荒川放水路掘削時に遊水地として計画された放水路左岸側（東京都江戸川区）の現状にも共通し，長い時の経過の中で当初の防災構想が忘れ去られ，あるいは切迫する時の事情が優先されてきたことによるものであろう。これらの事例はいかなる激甚な災禍の教訓も世代を超えてこれを伝承することが極めて難しいことを物語っている。

この観点からも学会の責務は大きい。本節の最初にも紹介した地震直後からの学会の矢継ぎ早の対応は，この大震災の教訓をまだその記憶が生々しく残る中で，提言や今後の研究課題の発掘に繋がっていく活動と

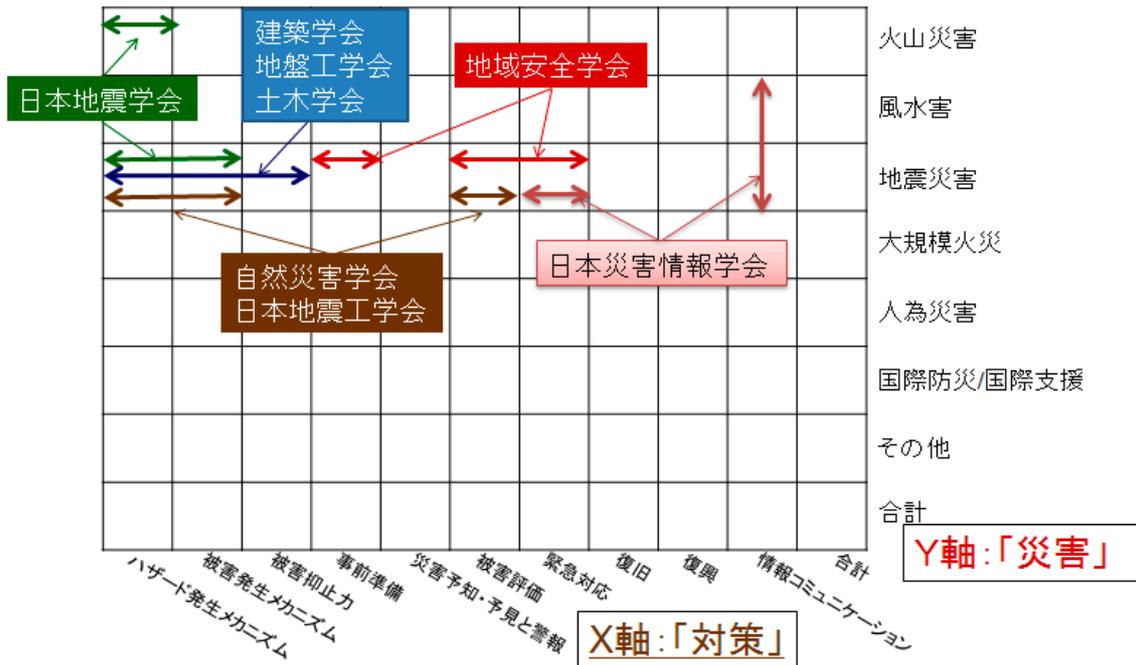


図 4.19 学会論文集における的中率が高い研究分野：上位3分野を示す。的中率の平均値より低い分野は除外³⁷⁾

理解できる。しかし一方で本当に難しい課題はこれから長期にわたりその教訓を風化させないように不断の努力を積み上げていくことにある。目黒は、防災に関わる学会に発表された多くの論文のキーワードを集約し、防災に関わる諸課題の中で発表される研究成果がどの分野に集中し、あるいはどの分野がカバーされていないかを整理している(図 4.19)³⁷⁾。この図は、土木学会、地盤工学会、地震工学会などの研究のスペクトルが多かれ少なかれ類似している反面、本当に防災上必要であっても学術としての成熟が十分でなくカバーされていない課題も多い現状を示している。

成功した事例が、悲惨な災害の報道の陰に隠れて見えにくくなっている点も、また将来の防災戦略構築上、決してプラスには働かない。今回の津波で岩手県釜石市の小中学校の生存者率が 99.8% であった陰には釜石市で片田が進めてきたような地道な防災教育の成果があった³⁸⁾。成功事例として少なからず報道はされたものの比率からいえば悲惨な事例の報道がやはり圧倒的である。東日本大震災の起こる少し前、2011年2月のニュージーランド・カンタベリー地震ではクライストチャーチで語学学校の入るビルが倒壊し多くの日本人が犠牲になったことが連日のように報道された。しかしニュージーランドではこれまで小中学校校舎の耐震化に重点が置かれ、小中学校での生徒の死者がゼロであったことはあまり知られていない。それ以前の2008年四川地震、そして2005年のパキスタン・カシミール地震で多くの児童が犠牲になったことを思うと、これは誇るべき成果のはずだが、やはり成功した事例ほど報道では目立たない。

津波推計・減災委員会報告書の3.1にもりこまれた提案の骨子はレベル2、超レベル2の対応に考えられるあらゆるシナリオを検討しなければならないことを強調するものである。そして社会がこの悲惨な教訓を忘却させないためには、災禍の実態と原因を科学的に知り得た立場の者が、正確な記録と解析を積み上げ説得力のあるメッセージを発し続けることが求められているのである。

参考文献

- 1) 公益法人土木学会東日本大震災特別委員会地域防災計画特定テーマ委員会：中間とりまとめ（案），2011年12月。
- 2) 佐伯光昭：東日本大震災の教訓と迫り来る巨大地震への「減災」の備え（ppt原稿），平成24年度（通算第14回）インフラストラクチャ研究会幹部セミナー 講演資料，一般社団法人建設コンサルタント協会主催，2012年5月18日。
- 3) 永松伸吾：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，2008年11月。
- 4) 法律時報 臨時増刊 現代と災害，日本評論社，1977年3月。
- 5) 河田恵昭：これからの防災・減災がわかる本，岩波ジュニア新書603，2008年8月。
- 6) 河田恵昭：津波災害—減災社会を築く，岩波新書1286，2010年12月。
- 7) 畑村洋太郎：未曾有と想定外 東日本大震災に学ぶ，講談社現代新書2117，2011年7月
- 8) 畑村洋太郎：『最悪時』前提に設計見直し，科学技術の役割—原発事故に学ぶ上，経済教室，日本経済新聞，2011年5月30日
- 9) 西川和廣：〈新春座談会〉東日本大震災に学ぶ，月間建設12-01，2012年1月号
- 10) 亀田弘行：原子力発電所の安全に対する地震工学の課題，日本地震工学会誌，No.15，2011年10月。
- 11) 内閣府，農林水産省農村振興局，水産庁，国土交通省 河川局・港湾局：津波・高潮ハザードマップマニュアル，2004年3月。
- 12) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会中間とりまとめ，2011年6月
- 13) 大規模地震は想定外だったのか，日本経済新聞社説，2012年5月24日
- 14) 鎌ヶ谷市洪水ハザードマップ Q&A：Q13 ハザードマップで浸水想定地域とされた土地の価格（家屋の価値）が下がってしまうのでは？ <http://www.city.kamagaya.chiba.jp/guidemap/shitsugi.pdf>
- 15) 指田朝久：事業継続計画（BCP）は機能したか—東日本大震災を振り返る—，土木学会・第11回地震災害マネジメントセミナー，土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会，2011年11月。
- 16) 内閣府：内閣府事業継続ガイドライン第二版，2009年。
- 17) 東日本大震災と事業継続計画（BCP），タリスマン2011年12月号，東京海上日動火災保険，2011。
- 18) 座談会・大規模地震に備える・地域継続力向上を目指して，Civil Engineering，土木学会誌，2011年10月号，2011。
- 19) 内閣府：地震発災時における地方公共団体の業務継続の手引きとその解説，2010年4月。http://www.bousai.go.jp/jishin/gyomukeizoku_chihou/index.html
- 20) 戸羽太：被災地の本当の話をしよう，ワニブクス新書，pp.70-71，2011年8月。
- 21) 高橋重雄，戸田和彦，菊池喜昭他：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，独立行政法人港湾空港技術研究所，2011年4月。
- 22) 独立行政法人港湾空港技術研究所のサイトに掲載された記事による。<http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328pari.html>
- 23) 朝日新聞記事：「渋滞 津波被害を拡大—避難を促しても車降りる人少数」，2011年4月1日夕刊。
- 24) 読売新聞記事：「GPS 津波計 より沖に」，2012年1月21日。
- 25) 土木学会・電気学会：ICTを活用した耐災施策に関する総合調査団（第三次総合調査団）緊急提言—ICTを活用した耐災（防災・減災）施策—，2011年7月13日，土木学会のサイト（<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/93>）に掲載。
- 26) 朝日新聞記事：「高速道路を避難場所に 国交省，一体整備容認へ」，2012年1月29日。
- 27) Horanont, T. and Shibasaki, R. : An implementation of mobile sensing for large-scale urban monitoring, International workshop on urban, community, and social applications of networked sensing systems UrbanSense 08, November, 2008.
- 28) 気象庁（2011b）：東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について，http://www.jma.go.jp/jma/press/1109/12a/tsunami_kaizen_matome.html（参照，2011-9-29）
- 29) 気象庁（2011c）：津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する提言，http://www.jma.go.jp/jma/press/1202/07a/tsunami_keihou_teigen.html（参照，2012-2-7）

- 30) 気象庁 (2011a) : 地震・火山月報 (防災編), pp.57-75, 2011年3月
- 31) 勝間田明男 : 気象庁変位マグニチュードの改訂, 駿震時報, Vol.67, pp.1-10, 2004.
- 32) 土木学会, 地盤工学会, 日本都市計画学会 : 土木学会長・地盤工学会長・日本都市計画学会長 共同緊急声明, 東日本大震災特別委員会情報共有サイト, <http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/29>, 2011.
- 33) 川嶋直樹 : 東日本大震災の対応についてー復旧・復興に向けてー, 第11回地震災害マネジメントセミナー, 地震防災の在るべき姿ー東日本大震災の教訓ー, 講演 No. 5, 土木学会地震工学委員会の地震防災技術普及小委員会, 2011.
- 34) 岩手県 : 岩手県東日本大震災津波復興計画 復興基本計画・復興実施計画 (第1期), http://www.pref.iwate.jp/~hp0212/fukkou_net/fukkoukeikaku.html#3, 2011.
- 35) 内務大臣官房都市計画課 : 三陸津浪に因る被害町村の復興計画報告書, 1934.
- 36) 大槌町災害復興室 : 大槌町災害復興計画 (基本計画) 第6章 地域別復興まちづくりの方向性, http://otsuchi.web.fc2.com/new/main/page_saigai_fukkousitu.html#label004., 2011.
- 37) 目黒公郎 : 防災関連学会の会員特性と研究分野の動向分析結果, 第30回日本自然災害学会学術講演, 2011年11月.
- 38) [語り手] 片田敏孝, [聞き手] 坂井康人, 岩波 綾 : インタビュー 釜石市内における津波防災教育, 土木学会誌, Vol.96, No.8, 2011年8月 (巻末添付).