東北地方太平洋沖地震津波に関する
合同調査報告会

予稿集

2011 年 7 月 16 日　高槻市

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ

巻　頭　言

東日本大震災において被災された多くの皆様に心よりお見舞い申し上げます．被害にあわれた地域の復旧が一日も早く進むことを願っております．

2011 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分頃，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．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 500km，幅約 200km におよぶと考えられる．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来襲し，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．7 月 7 日現在で判明している被害は死者 15,865 人，行方不明者 7,016 人であり，そのほとんどが津波によるものと考えられる．

津波防災に関わってきた研究者の一人として，あまりに甚大な被害に驚愕すると同時に強い無力感に襲われた．どうすれば被災された方々のお役に立てるのか，これからの津波防災へどのように反映させていくべきなのかを現在もまだ模索している．もちろんこのような思いは私だけでなく，多くの研究者や津波防災に携わってこられた実務者も同じように抱いているはずである．我々が先ずなすべきことはこの津波災害をしっかりと調べて記録し，被災地の復興計画や今後の防災計画に少しでも貢献することであろう．また他の地域における津波防災の再検討に資することも重要であろう．このような考えのもとに，多くの研究者や実務者が北海道から沖縄県に至る広い範囲において，発災直後から津波に関する現地調査を行なってきた．

災害調査において最も重要となるのは被災地に入るタイミングである．調査開始が遅くなると津波の痕跡が消失するとともに目撃者の記憶も曖昧となる．しかし，早過ぎると救出・救援活動の妨げとなる危険性が高くなる．そのため，被災地において調査を開始する時期は，現地の状況を踏まえて総合的に判断しなくてはならない．今回の津波災害においては，被害が比較的小さかった北海道や西日本などでは地震の翌日から現地調査を開始したが，激甚な被災地となった岩手県や宮城県，福島県においては現地調査の自粛が必要であった．

一般的に，それぞれの研究者が独立して現地調査を実施すると，被害が甚大だった地域や被災形態に特徴がある地域に調査が集中してしまう傾向がある．また，津波災害の全体像を把握するためには，被害の大小に関わらずに広い範囲で外力の分布をつかむことが重要となる．そこで，被災地への負担を最小限にしながら，効果的に調査結果を得るため，合同調査グループを結成して調査地域や期間，人数などについて調整を行いながら現地調査を実施してきた．このような合同調査が可能であったのは多くの研究者や実務者にご賛

同いただき，またご協力いただいた結果である．合同調査に参加されたすべての方々に深く感謝したい．

合同調査グループには大学や研究機関，民間企業，行政などから約 50 組織，150 人にもおよぶメンバーが参加している．また，所属している学会も土木学会や地球惑星科学連合など多岐におよんでおり，様々な専門分野の協力のもとに現地調査が実施されてきた．得られたデータに関しては統一的な潮位補正を行い，合同調査グループの web サイト（http://www.coastal.jp/ttjt/）においてデータセットを一般公開している．そして，本報告会では現地調査結果をそれぞれの地域，それぞれの学会や機関の視点・アプローチからご報告いただいく．

我々が災害調査を行う目的はただデータを集めることではなく，それらのデータを活用して，被災地の復興や今後の防災に寄与することである．さらに，それ以外の地域の防災にフィードバックすることである．これらのことを念頭に置き，今後の防災研究の一助になることを期待して本報告会を開催する．被災地の復興計画や防災計画，その他の地域での津波防災の再検討に資することができれば幸いである．

2011 年 7 月

関西大学社会安全学部
高　橋　智　幸

目　　次

巻頭言　関西大学　高橋智幸

１．津波合同調査の全体概要とその解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
京都大学　森　信人

２．地域ごとの調査結果の報告

＜北海道・青森県＞

北海道および青森県における東北地方太平洋沖地震津波の実態に関する野外調査・・・・・・・・・・・7
北海道大学　中村有吾
北海道大学　西村裕一
北海道大学　伊尾木圭衣
北海道大学　プルナ スラスティア プトラ
北海道大学　ディティア グスマン

＜岩手県北部＞

岩手県北部の沿岸における津波被害の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
岩手大学　小笠原敏記
岩手大学　松林由里子
岩手大学　堺茂樹
岐阜大学　安田孝志

＜岩手県南部＞

岩手県南部を中心とした津波調査の報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
早稲田大学　柴山知也
早稲田大学　三上貴仁

＜宮城県北部＞

宮城県北部における津波痕跡調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
鹿児島大学　柿沼太郎
神戸市立工業高等専門学校　辻本剛三
京都大学防災研究所　安田誠宏
いであ株式会社　玉田　崇

＜宮城県南部＞

宮城県南部沿岸域における津波被害の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28
東北大学　今井健太郎
東北大学　今村文彦

東北大学　　越村俊一
東北大学　　菅原大助
東北大学　　サッパシー アナワット
東北大学　　佐藤翔輔

＜福島県＞
福島県沿岸域における津波の実態・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
大阪市立大学　　原口　強
鹿児島大学　　岩松　暉

＜東北地方＞
東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査
―津波来襲状況の解明と被害関数構築に向けて―・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・34
東北大学　　越村俊一

＜東北地方＞
津波の河川遡上・・38
東北大学　　田中　仁
東北大学　　真野　明
東北大学　　盧　敏

＜関東地方＞
関東沿岸における津波の実態と被害状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44
横浜国立大学　　佐々木淳

＜東海地方＞
東海地方における津波特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48
名古屋大学　　川崎浩司
名古屋大学　　鈴木一輝

３．各学会および各機関の視点・アプローチからの報告
構造物による津波防護機能とその限界・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50
東京大学　　佐藤愼司
仙台平野を中心とする津波被害実態と堆積物調査報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
千葉工業大学　　後藤和久
北海道大学　　西村裕一
東北大学　　菅原大助
名古屋大学　　阿部朋弥
北海道大学　　中村有吾
筑波大学　　藤野滋弘
大阪市立大学　　原口強

2011年東北地方太平洋沖地震の縮尺1:25,000広域津波被災マップ：
空中写真実体視判読による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63
日本地理学会災害対応本部
津波被災マップ作成チーム
津波波形からみた東北地方太平洋沖地震の津波波源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
東京大学　佐竹健治
東京大学　酒井慎一
東京大学　篠原雅尚
東京大学　金沢敏彦
建築研究所　藤井雄士郎
港湾における津波被害・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
港湾空港技術研究所　富田孝史
産総研による日本海溝沿いの津波痕跡調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
産業技術総合研究所　宍倉正展
産業技術総合研究所　澤井祐紀
産業技術総合研究所　行谷佑一
産業技術総合研究所　藤原　治
産業技術総合研究所　谷川晃一朗
産業技術総合研究所　楮原京子
産業技術総合研究所　木村治夫
産業技術総合研究所　岡村行信
産業技術総合研究所　宮下由香里
産業技術総合研究所　小松原純子
建築研究所　藤井雄士郎
建築研究所　奥田泰雄
電中研チームによる津波に関する調査報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・77
電力中央研究所　榊山　勉
電力中央研究所　吉井　匠
筑波大学　庄子　学
金沢大学　楳田真也
岩手県沿岸の海岸林と集落の津波被害状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・83
森林総合研究所　星野大介
現地調査から見た津波浸水高の分布の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・86
気象研究所　林　豊
気象庁　阿部正雄

気象庁　　飯野英樹
気象研究所　　前田憲二
気象研究所　　対馬弘晃
気象研究所　　岡田正實
気象研究所　　木村一洋
気象研究所　　岩切一宏
海岸堤防の被災状況と仙台平野における津波痕跡分布の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・92
国土技術政策総合研究所　　諏訪義雄
海上を進行中の津波の波頭等の計測・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
国土地理院　　神谷　泉
国土地理院　　乙井康成
国土地理院　　岡谷隆基
国土地理院　　小荒井衛

Contents

Preface Tomoyuki Takahashi

1. Overview of Tsunami Joint Survey and Preliminary Results of Analysis ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
Nobuhito Mori

2. The Regional Survey Reports

[Hokaido and Aomori Prefectures]

Field surveys on the 2011 Tohoku tsunami in Hokkaido and Aomori Prefectures ・・・・・・・・・・・・・ 7
Yugo Nakamura
Yuichi Nishimura
Kei Ioki
Purna Sulastya Putra
Aditya Gusman

[The Northern Part of Iwate Prefecture]

Characteristics on tsunami disaster of northern Iwate coast ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
Toshinori Ogasawara
Yuriko Matsubayashi
Shigeki Sakai
Takashi Yasuda

[The Southern Part of Iwate Prefecture]

A report on tsunami survey in south part of Iwate Prefecture ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16
Tomoya Shibayama
Takahito Mikami

[The Northern Part of Miyagi Prefecture]

Tsunami Trace Survey in the Northern Part of Miyagi Prefecture ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
Taro Kakinuma
Gozo Tsujimoto
Tomohiro Yasuda
Takashi Tamada

[The Southern Part of Iwate Prefecture]

Characteristics of Tsunami Damage on The 2011 off Tohoku Oki Earthquake Tsunami along the South Coast of Miyagi prefecture • 28

Kentaro Imai
Fumihiko Imamura
Shunichi Koshimura
Daisuke Sugawara
Anawat Suppasri
Shosuke Sato

[Fukushima Prefecture]

Tsunami disaster survey results on the coast of the Fukushima prefecture • • • • • • • • • • • • • • • • • • 30

Tsuyoshi Haraguchi
Akira Iwamatsu

[The Tohoku District]

Field Survey of the 2011 Tsunami Inundation in Tohoku District Towards comprehensive understanding of tsunami disaster • 34

Shunichi Koshimura

[The Tohoku District]

Tsunami Propagation into Rivers • 38

Hitoshi Tanaka
Akira Mano
Min Roh

[The Kanto District]

Tsunami Disaster Survey Results on the Coast of the Kanto Region • 44

Jun Sasaki

[The Tokai District]

Tsunami Characteristics on the Coast of Tokai Region • 48

Koji Kawasaki
Kazuki Suzuki

3. The Survey Reports from Societies and Institutes

Tsunami Characteristics on the Coast of Tokai Region • 50

Shinji Sato

Preliminary survey results of the tsunami damage and deposits at the Sendai Plain • • • • • • • • • • • • • • 57

Kazuhisa Goto
Yuichi Nishimura

Daisuke Sugawara
Tomoya Abe
Yugo Nakamura
Shigehiro Fujino
Tsuyoshi Haraguchi

1:25,000-scale tsunami-damage map on the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Japan, based on airphoto ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
Tsunami Damage Mapping Team, Association of Japanese Geographers

Tsunami Source of the 2011 Tohoku Earthquake from Tsunami Waveforms ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
Kenji Satake
Shin-ichi Sakai
Masanao Shinohara
Toshihiko Kanazawa
Yushiro Fujii

Tsunami Damage in Ports ・・ 69
Takashi Tomita

Pre- and post-tsunami survey along the Japan Trench by Geological Survey of Japan/AIST ・・ 74
Masanobu Shishikura
Yuki Sawai
Yuichi Namegaya
Osamu Fujiwara
Koichiro Tanigawa
Kyoko Kagohara
Haruo Kimura
Yukinobu Okamura
Yukari Miyashita
Junko Komatsubara
Yushiro Fujii
Yasuo Okuda

Report of tsunami damage investigation by CRIEP team ・・ 77
Tsutomu Sakakiyama
Takumi Yoshii
Gaku Shoji
Shinya Umeta

Coastal forest and town damage of the Tohoku Earthquake Tsunami
in Iwate prefecture, Japan · 83
Daisuke Hoshino
Characteristics of Distribution of Tsunami Inundation Height found by Field Surveys · · · · · · · · · · · · 86
Yutaka Hayashi
Masao Abe
Hideki Iino
Kenji Maeda
Hiroaki Tsushima
Masami Okada
Kazuhiro Kimura
Kazuhiro Iwakiri
Seawall Damages by 2011 Tsunami on the Pacific Coast of East Japan and
Decreasing of Tsunami Trace Height for Run up Direction in Sendai Plain · · · · · · · · · · · · · · 92
Yoshio Suwa
Measurement of the crest on ocean and other geometric characteristics of the tsunami
— the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake — · 99
Izumi Kamiya
Kosei Otoi
Takaki Okatani
Mamoru Koarai

津波合同調査の全体概要とその解析結果

Overview of Tsunami Joint Survey and Preliminary Results of Analysis

森　信人 [1,2]

Nobuhito Mori[1,2]

[1]京都大学　防災研究所，[2]津波合同調査グループ事務局

1. はじめに

3 月 11 日に起こった東北地方太平洋沖地震津波は，これまでにない巨大な津波被害を与え，その影響範囲は北海道から九州にまで及ぶ広範囲なものであった．本災害は，直接被害だけでも人命，港湾，住居，道路，鉄道，水産業の被災など多岐に渡り，現時点においても全容を把握することが出来ないほど甚大であった．被害の原因についても様々であるが，外洋から来襲した津波が引き押した被害がその大部分であったことが様々な観点から報告されている．

津波調査には色々な視点があるが，最も重要視されるのは，陸上に残る津波の痕跡（ウォーターマーク）の海面からの高さの計測であり，痕跡調査と呼ばれる．津波痕跡調査は，痕跡が存在するうちに出来る限り早期に調査を実施する必要があり，津波の高さは，沖合での津波の高さだけでなく，湾の水深変化および形状に大きく作用されるため，陸上付近の痕跡をできるだけ空間的に密に計測することが望ましい．今回のように被害が甚大かつ広範囲に広がる場合，これまで行われたことのない大規模な調査が必要である．このため，津波工学，海岸工学および地球物理関係研究者合が多数参加し，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（以下，津波合同調査グループ）として全国的に大規模な津波痕跡調査が実施された．

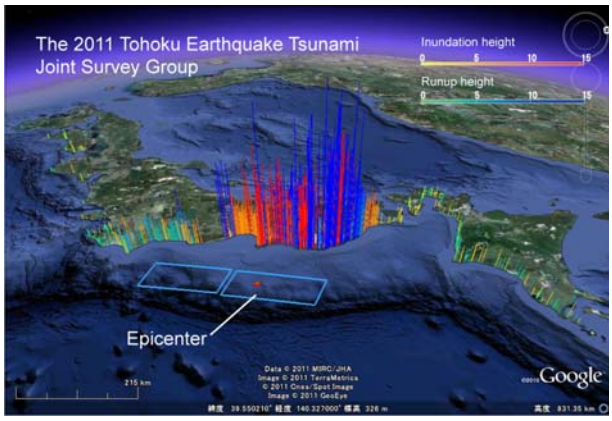


図-1 計測データの概要

（暖色：浸水高，寒色：遡上高）

以下では，津波合同調査の概略とようやく取りまとめが終わりつつある調査データの初期解析結果について概説する．

2. 合同調査グループによる観測と統一データセットの概要

3 月 11 日直後は，東北や関東の大学が地震や停電の影響を受けて研究活動が困難であったため，全国の津波調査のための事務局を関西大学と防災研究所の研究者で分担し，ML と Web を 3 月 13 日に立ち上げ情報共有を行った．主に ML を通じて全国的な調査のための方針等が議論され，三陸エリアの調査が困難であることは明確であったため，3 月末までは三陸地方を除く北海道から沖縄までの海岸線の調査を実施することとし，早期に消失し易い比較的微弱な

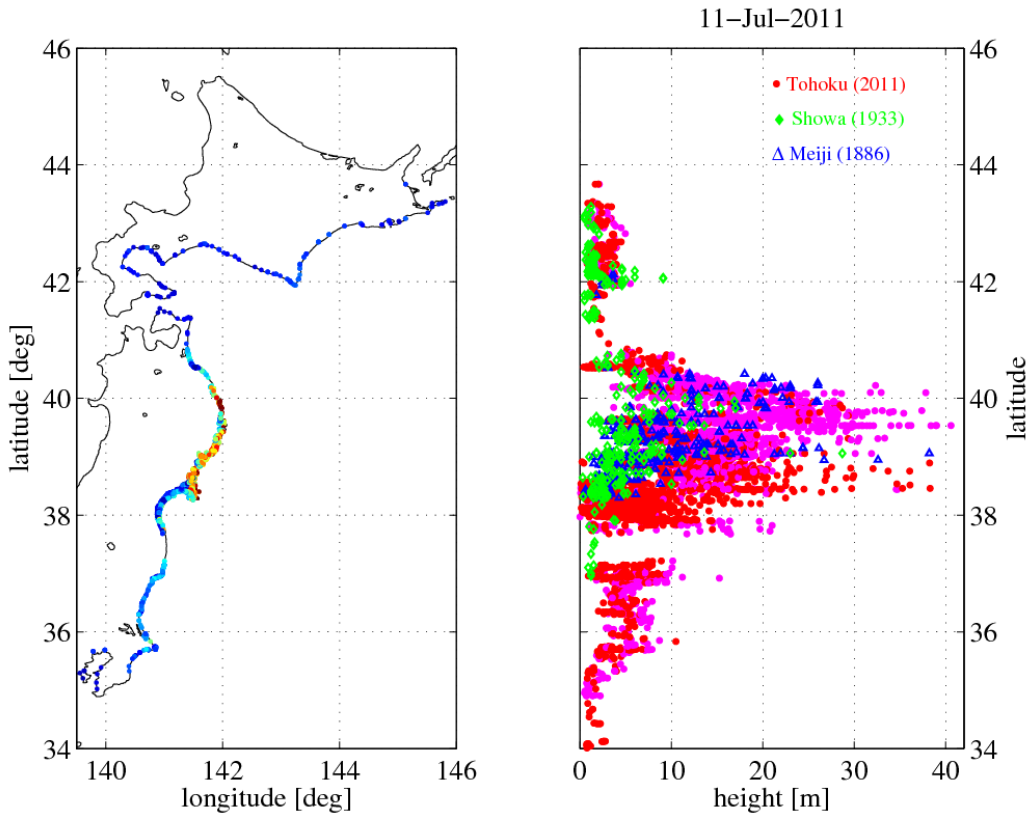


図-2 緯度方向に投影した津波高の分布

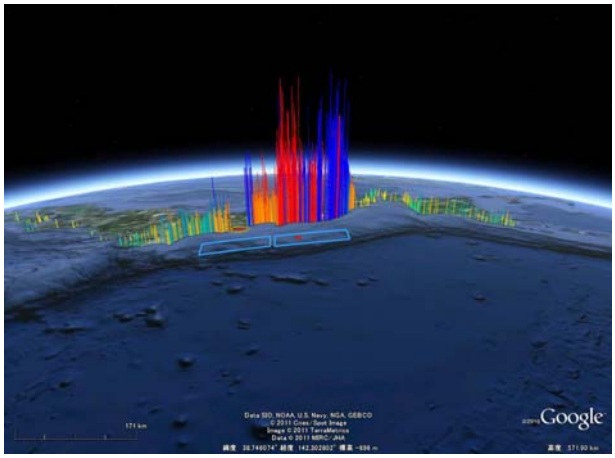
（●：浸水高，●：遡上高，◇：昭和三陸地震，△：昭和三陸地震）

痕跡について調査を進めた．これと並行して，東北地方の研究者と連絡を取りつつ東北地方の調査可能性について議論を進め，3 月 24 日より経験豊富な調査チームを少数班編成し，東北地方の局所的な調査を開始した．その後，被災地の状況や調査環境を考慮し，4 月中旬までは引き続き調査班の編成を行い，東北地方の調査範囲を慎重に広げ，その後調査範囲を広く展開した．

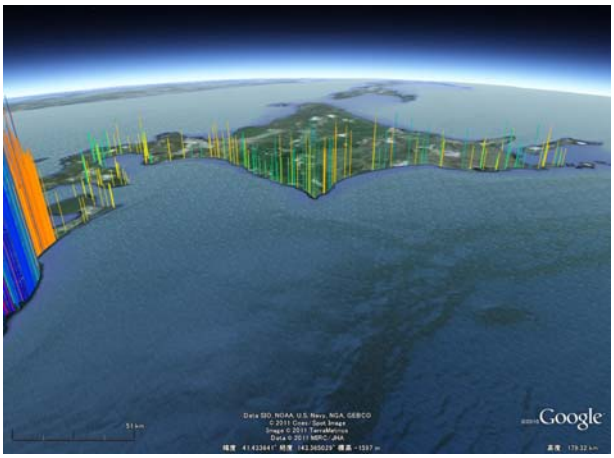
最終的には，合計 48 研究機関，計 148 名もの研究者が参加した大規模な津波調査となった．研究者による調査データに加えて，5 月以降には気象庁，国土交通省東北地方整備局，青森県・県土整備部，岩手県・県土整備部，宮城県・土木部，福島県・土木部より痕跡データの提供をいただき，日本における津波痕跡データをほぼ完全に把握することができた．

津波の痕跡には，浸水範囲端の最高到達点を示す遡上高とこれ以外の痕跡高さである浸水高を測量する（以下では，両者を合わせて痕跡高と明記する）．全国の調査で得られた痕跡高は，逐次事務局に集められ，Google Earth データとして即時にデータ配信を行った（図-１）．これをもとに，現地で調査中のチーム間で調査点が重複しないように各自調整を行うように調整を行った．

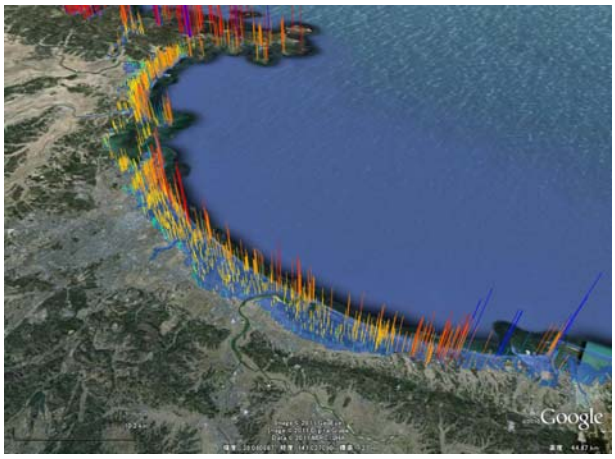
７月初旬までに測量されたデータは合計 5000 点を超え，世界的に見ても非常に大規模かつ空間的に密度な津波痕跡高データセットが得られた．各調査班のデータは，事務局でスクリーニングを掛け，測量方法に応じて潮位および標高等の補正を行い統一データセットの作成を行った．潮位補正においては，三陸付近の潮位観測データが不足していることに加えて，データ数が膨大であるため，数値シミュレーションを併用して，最大波到達時間の推定を行い，



(a) 太平洋側から見た東日本



(c) 北海道



(b) 仙台平野

(d) 関東地方

図-3 各地域毎の痕跡高の分布

国立天文台の天文潮位データベースを用いて補正を行なった．

統一データセットについては，順次更新を行いつつ事務局のウエッブサイト [1]で公開している．7 月に入ってもデータは増えつつあり，しばらくは更新が続く予定である．

3. 痕跡データの特徴

図-2 に示すのは，東日本における痕跡高（浸水高および遡上高）の分布を緯度方向に投影した結果である．三陸沖では痕跡高が 20m を超える地域が南北に約 290km 以上に渡り，30m を超える地域も約 198km と非常に大きな痕跡高が広範囲に記録されている．また，痕跡高が 10m を超える地域については約 425km と青森県から茨城県に渡る広域なエリアに広がっていることがわかった．局所的には，最高 40.4m の観測最大の遡上高がが記録されている．図-2 に示しているように，これらの緯度方向の空間的な分布幅および痕跡高共に，明治三陸津波，昭和三陸津波の規模を大きく上回るものであり，数値的に見ても今回の津波災害の 大きさが理解できる．

地域毎に見ると痕跡高の分布について大きく異なる様相が見ることが出来る．図-3 に示すのは，痕跡高の分布を各地域毎に拡大したものである．図は，

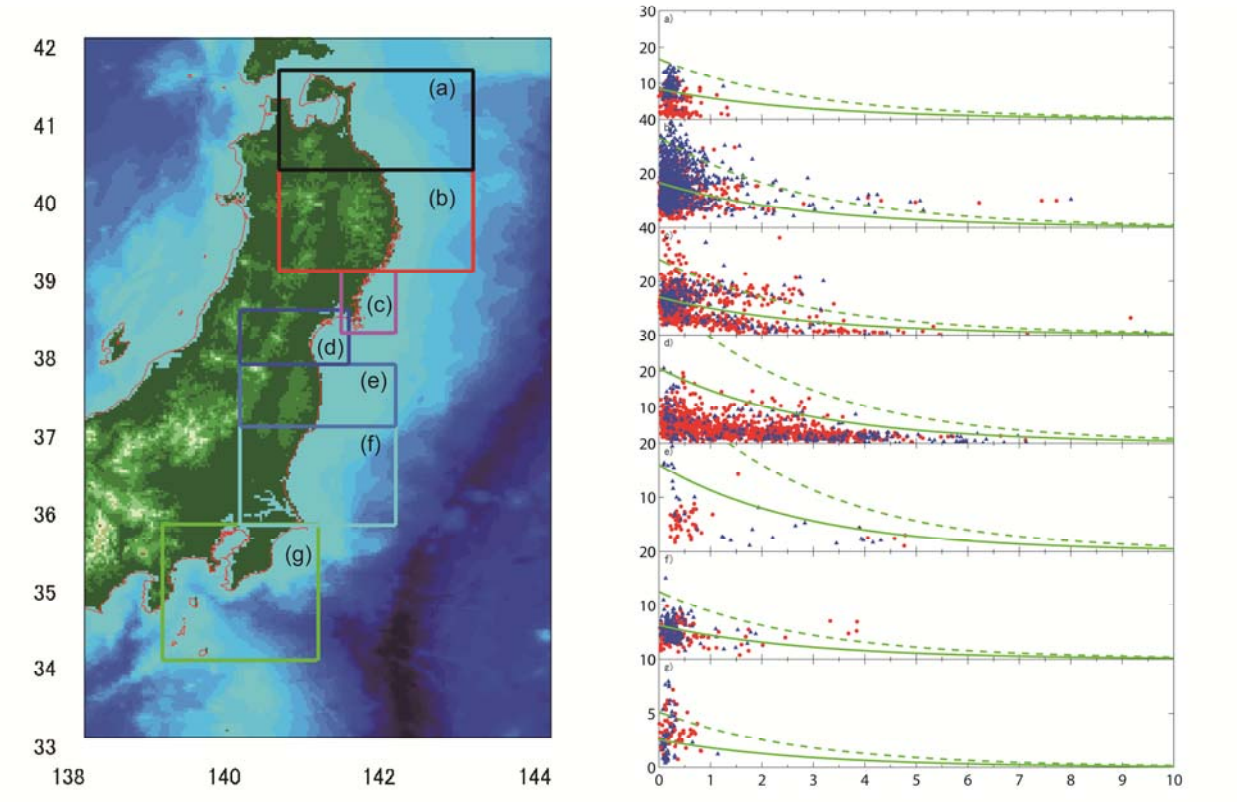
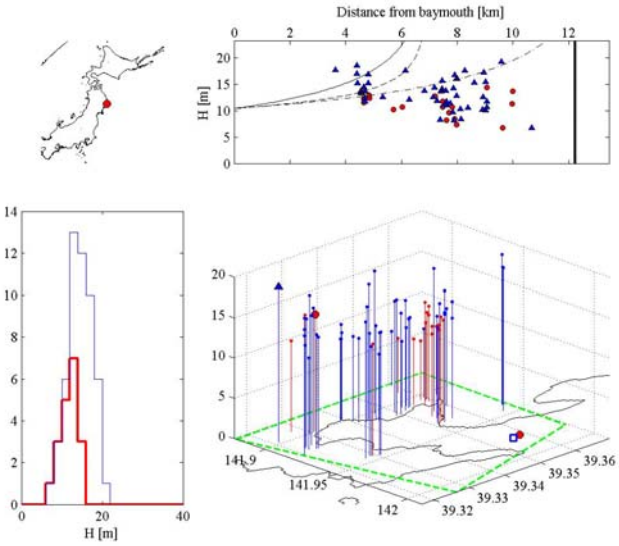


図-4 各地域ごとの遡上距離

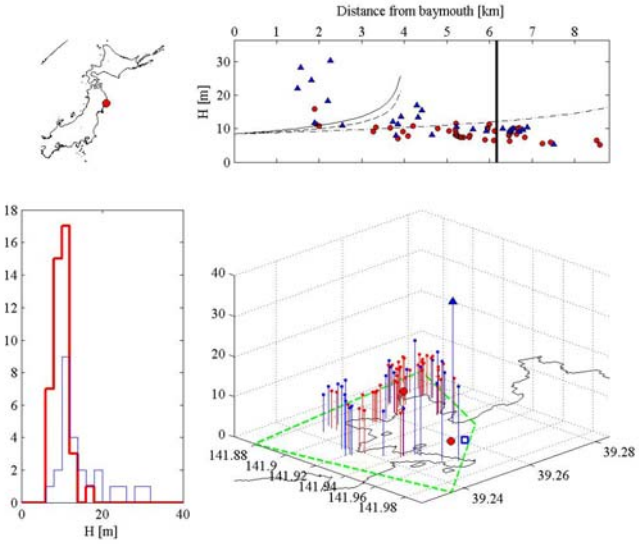
（左：領域区分，右：区分ごとの遡上距離，横軸遡上距離: km，縦軸痕跡高:m）

代表例として(a) 太平洋側から見た東北地方 ，(b) 仙台平野， (c) 北海道，(d)関東地方における痕跡高を示している．東北地方では，三陸地方に非常に高いピークがあり，震央から南北方向に指数関数的に減少していることがわかる．但し，震央から見ると，仙台平野で一度痕跡高が減少した後，福島県北部で一度上昇し，その後関東に向かって緩やかに減少している．図-3(b)に示す仙台平野では，沿岸部で 10m を超える痕跡高が観測されており，内陸部に向かって広範囲な氾濫域が見られる．全体的に仙台平野の中心部の方が南北端よりも陸域方向の浸水距離が長いように見られる．図-3(c)に示す北海道南岸においても 5m を超える痕跡高が広範囲で観測されている．北海道では襟裳岬付近で，最大の痕跡高が観測されており，これは岬付近の増幅効果ものと思われ，エッジ波による増幅効果と思われる特徴も見ることが出来る．図-3(c)に示す関東地方においても銚子を挟んだ南北領域で北海道南部と類似した岬やエッジ波の影響が見られる．また，東京湾内においても 3m を超える痕跡高が記録されているが，津波来襲時刻が平均潮位に近い時間であったため，大きな問題とならなかったようである．

三陸地方における 40m を超える遡上高に対して，仙台平野における内陸部への長距離の氾濫も大きな特徴の１つである．図-4 は，東日本を領域区分し，それぞれの区域における海岸線からの遡上距離を調べたものである．宮城県南部における被災状況であるが，平坦な平野部においても海岸部で高さ 10m を



(a) 大槌湾



(b) 釜石湾

図-5 湾スケールでの痕跡高の分布特性

超える津波が場所によっては 5km 以上も内陸に向かって遡上・氾濫していたことがわかる．三陸地方でも局所的には仙台平野と類似した傾向が見られるが，内陸への遡上は河川に沿ったものであり，リアス式海岸では長距離の遡上よりも痕跡高の増幅が顕著に見られた．

今回得られた津波痕跡データは，空間的に非常に密度が高いため，湾スケールの定量的な評価も可能としている．図-5 に示すのは，その一例であり，岩手県大槌湾および釜石湾における痕跡高の分布である．大槌湾では湾口で 20m を超える浸水高が記録されており，ほぼ同規模の浸水高・痕跡高が湾奥でも記録されいてる．一方，釜石港付近の被害も大きいが，湾口で記録されている 30m 前後の痕跡高は，湾

奥での浸水高・痕跡高は 10m 前後と大槌湾等隣接する類似の湾形状を持つ地域よりも 3～4 割は小さい．これは釜石湾口にある津波防潮堤の影響によるものと考えられる．このように，痕跡高を詳細に解析することにより，領域スケールの調査・分析では見えなてこなかった湾スケールの被災状況の原因把握を行うことが可能である．湾スケールの解析も様々な電子地理情報を組み合わせることにより，システマチックに実施可能としており，これらの結果については，別の機会に紹介したい．

4. おわりに

以上，津波合同調査グループの成り立ちとその取り組みについて概説を行った．津波合同調査グループとしての活動は，統一データセットの作成終了と共に終えるが，現在，並行して各機関で詳細に解析されつつある．これと共に，様々な数値モデルを用いた再現計算を実施し，現象の理解について把握とモデルの再現性の検証を行っている最中である．今回計測された津波痕跡高は，これらの基礎となる貴重なデータであり，今後長く有効的に使われていくことが期待される．

今回の津波がもたらした被害の実態解明は，今後の復興に直接役立つだけでなく，今後地震津波対策にもつながる．痕跡データと実際の被災状況を組み合わせることにより，津波防御施設および防御方法の有効性についての分析が可能であり，詳細については，今後の分析を待ちたい．

謝辞

合同調査グループに参加し，調査していただいた大学関係者，研究機関，行政機関の皆様に感謝すると共に，調査チーム派遣時ならびデータ取りまとめ時にボランティアとしてご協力頂いた数多くの皆様に深謝します．何より，今回の津波に関する津波痕跡調査が，分野および機関を超えて，被災地への影響を考慮して実施できたことに事務局として感謝致します．

参考文献

1) 津波合同調査グループ，http://www.coastal.jp/ttjt，2011.

北海道および青森県における東北地方太平洋沖地震津波の実態に関する野外調査

Field surveys on the 2011 Tohoku tsunami in Hokkaido and Aomori Prefectures

中村有吾[1]・西村裕一[1]・伊尾木圭衣[1]・プルナ スラスティア プトラ[1]・アディティア グスマン[1]

Yugo Nakamura[1], Yuichi Nishimura[1], Kei Ioki[1], Purna Sulastya Putra[1], Aditya Gusman[1],

[1]北海道大学大学院理学研究院　地震火山研究観測センター

1. はじめに

北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センターでは，北海道太平洋岸で津波注意報が解除された 3 月 13 日から津波の現地調査を実施した。調査は北海道太平洋岸全域，および青森県から福島県の太平洋岸の一部を対象とした。この調査は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの活動の一環でもある。4 月までに調査した地点は，北海道内 41 ヵ所，東北地方 58 ヵ所の計 99 ヵ所であった。それぞれの地点で，できる限り多くの痕跡を見いだし，各地での津波の挙動を把握することを目指した。本報告では，北海道および青森県における津波の実態について報告する。

2. 痕跡

港や集落では，ウォーターマークや建物の被害状況，目撃証言が津波の高さや浸水範囲，津波の陸上での挙動を示す根拠となる。自然海岸では，樹木の枝折れや幹に着いた傷，斜面や平坦面の表土の侵食状況，地表に残されたデブリや砂などの津波堆積物をできるだけ多く探し，浸水範囲や流向を推測した。特に，緩斜面や谷側の急斜面では，土壌の侵食跡や枯葉などからなるデブリが残されており，津波の遡上範囲，遡上限界の識別が可能であった。

3. 津波の高さ

複数の痕跡から推定した津波の高さ（図-1）は，北海道では太平洋岸の広い範囲で 3～4m であり，特に襟裳岬周辺では 5～6m と高かった。青森県三沢海岸の北部では津波の高さは 3～5m，南部では 6～10m と，南ほど高い傾向にある。さらに，岩手県では急激に高さを増し，20～30m を超えることがわかった。

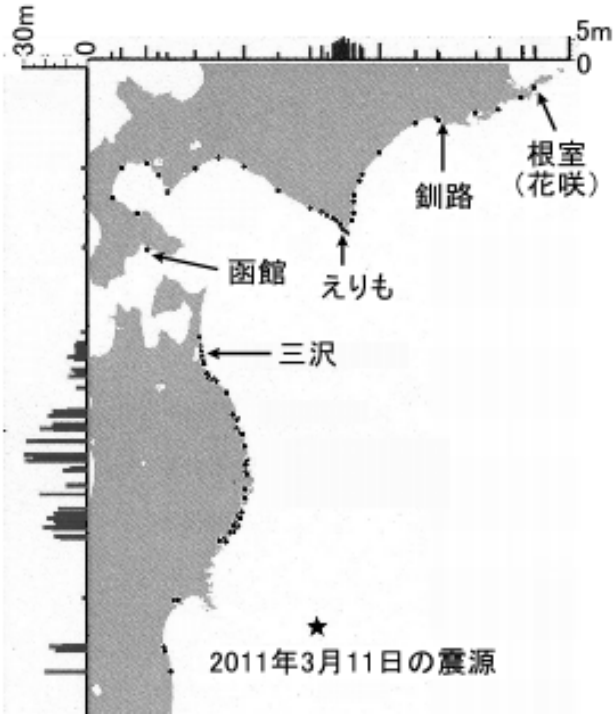


図-1　津波の高さの分布。地図上の点は測定地点。

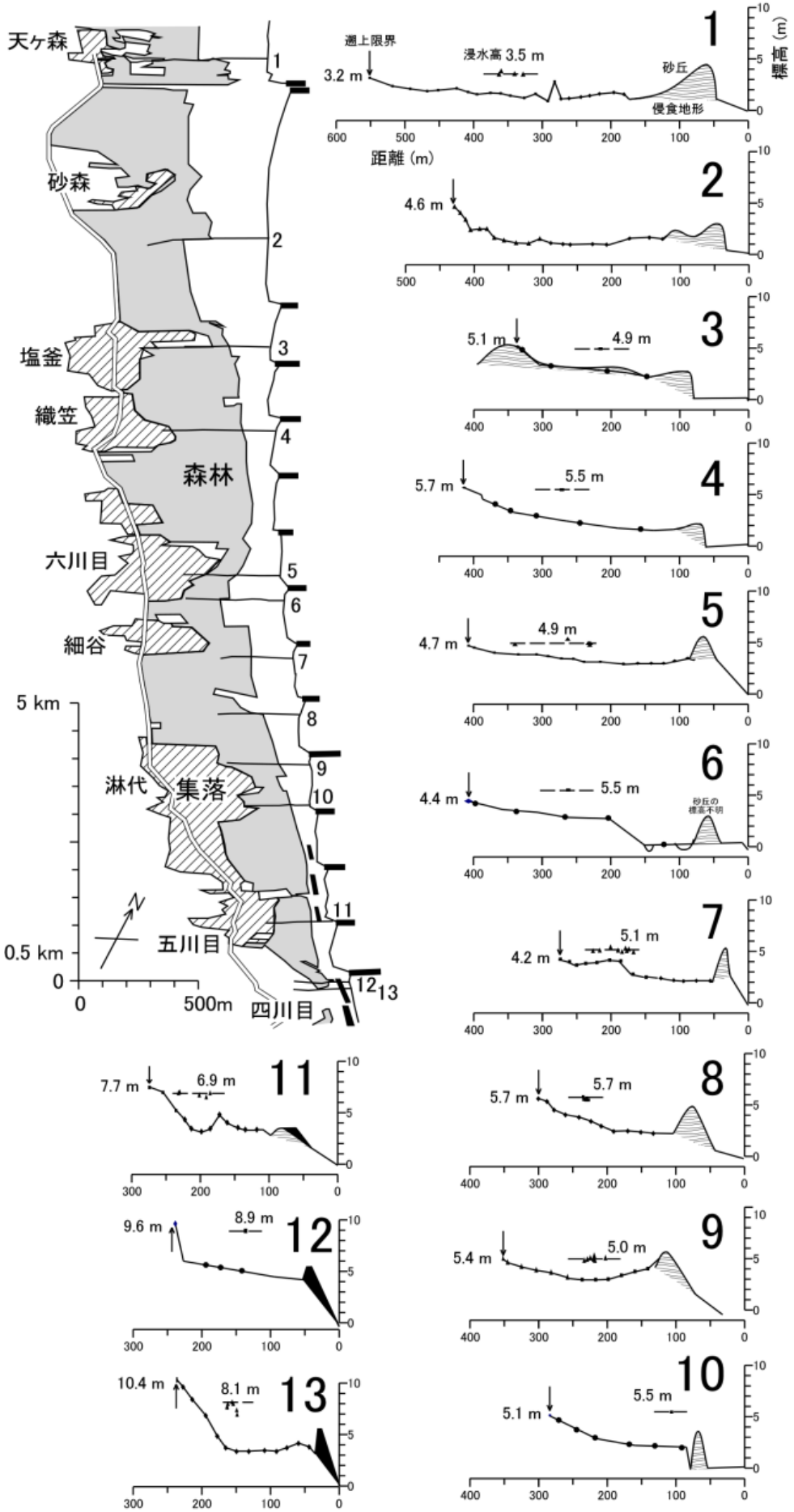


図-2　青森県三沢市における調査測線の位置と地形断面。地図に示した，海岸に直行する実線が調査測線。地図の縮尺は縦・横で異なることに注意。断面図に付記した水平の線と数値は津波の浸水高，矢印と数値はと遡上高を示す。

4. 微地形や構造物の影響

津波の波高や遡上距離は微地形や人工構造物の存在により影響を受ける。今回の調査結果を見ても，(1)砂丘列など海岸地形の違いにより波高や遡上距離に差があらわれたこと（図-2），(2)防波堤で守られた港内では，港外に比べて波高が 1/3 程度であること，(3)津波が谷に浸入した際，谷奥ほど遡上高が高くなる傾向があること，(4)津波が防潮堤を越えると波高が明らかに小さくなること，(5)海岸近くの急斜面で，津波が周囲に比べて局所的に高くなる例があること，が確認できた。津波の挙動が微地形や構造物に大きく影響されることは，今後，歴史・先史時代の津波波高や遡上距離と比較する際，また数値計算結果との比較をする際に注意が必要であることを示す。

5. 津波堆積物の特徴

青森県三沢海岸を中心に，この津波で形成した堆積物の分布，層相，堆積構造について詳細な野外調査をおこなった。津波が押しよせた海岸では，砂丘や段丘崖の侵食が顕著であった。津波堆積物は，侵食域の背後で厚く堆積しており（図-3），侵食域から離れると層厚は一気に薄くなるが，堆積物は浸水限界まで分布する。反対に，海岸付近に侵食されやすい地形がないと，津波堆積物は薄く，分布はパッチ状である。また，分布域に防潮堤，崖，密度の高い森林があると，層厚は減衰する。津波堆積物は主に砂で，海岸からの距離に応じて細粒化する。また，軽鉱物の割合が増加する。津波の波高と，堆積物の厚さ･粒径の間には,顕著な関係は見られなかった。

今後は，詳細な粒度分析に基づいて陸上での津波の挙動を考察するとともに，鉱物組成・微化石分析により津波堆積物の供給源を推定する。また，古津波（869 年貞観津波など）による堆積物との比較検討も必要である。

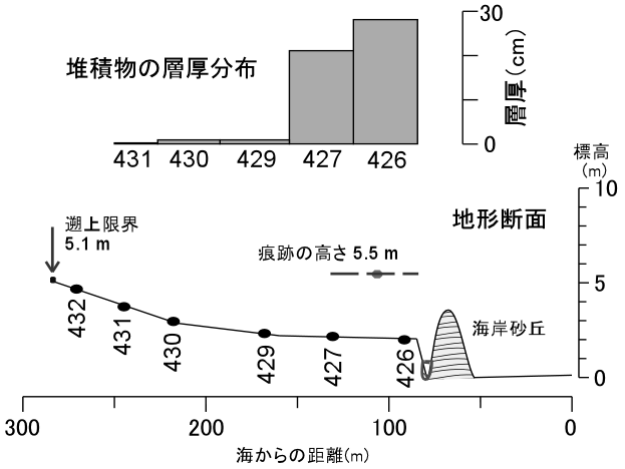


図-3　三沢市淋代における調査側線の地形断面（下）と津波堆積物の層厚分布（上）

謝辞

各自治体職員の皆様，漁業協同組合職員の皆様，漁業者をはじめ地元住民の皆様には調査に快くご協力いただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

岩手県北部の沿岸における津波被害の特徴

Characteristics on tsunami disaster of northern Iwate coast

小笠原敏記[1]・松林由里子[1]・堺茂樹[1]，安田孝志[2]

Toshinori Ogasawara[1], Yuriko Matsubayashi[1], Shigeki Sakai[1] and Takashi Yasuda

[1]岩手大学　工学部　社会環境工学科，[2]岐阜大学大学院　工学研究科　環境エネルギーシステム専攻

1. はじめに

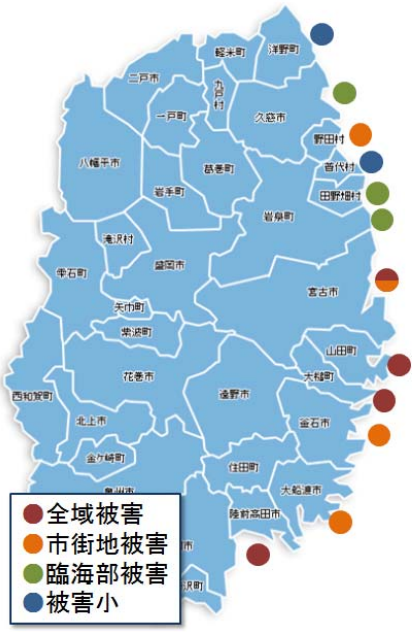
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分ごろに発生した東北地方太平洋沖地震では，岩手県の大船渡市を初め県内 7 市町村において震度 6 弱を記録した[1)]．今回の震災では，東北地方を中心に津波による多大な被害を受けた．岩手県においても 7 月 8 日現在，死者・行方不明者合わせて 6,859 人，家屋倒壊数 24,317 戸に及んでいることから[2)]，人的・物的被害が甚大であったことが言える．

本論では，岩手県沿岸全体の津波による被害状況の概要を初めに示し，更に宮古市より北部沿岸における津波被害の特徴を被害状況に応じて報告を行う．

2. 岩手県沿岸の被害状況

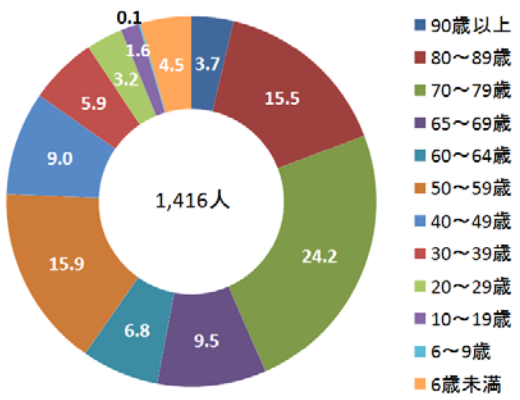
これまでの岩手県の津波対策は，1896 年明治三陸津波，1933 年昭和三陸津波，1960 年チリ津波による被害状況を踏まえ，各地域で計画津波高を設定して，防潮堤を初め防災施設の整備を進めて来た（平成 22 年度末時点の整備率は約 73%）．

今回の津波による沿岸 12 市町村の被害状況は，図－1 に示すように大別され，臨海部に市街地が集積した沿岸南部の陸前高田市，大槌町，山田町および宮古市田老では，計画津波高を上回る津波が防潮堤や水門などの防災施設を乗り越えたことにより，壊滅的な被害を受け，まちの機能をほとんど喪失した．臨海部の市街地を中心に被災し，その背後の市街地は残存した大船渡市および釜石市では，湾口防波堤



図－1　岩手県沿岸 12 市町村の被害状況

による津波の抑制効果が機能したものと推察される．ただし，釜石湾口防波堤の北堤（長さ 990m）は完全に崩落し，南堤（長さ 670m）も部分的に破壊されている．また，大船渡湾口防波堤は，北堤（長さ 243.7m）および南堤（長さ 291m）共に全壊しており，陸側から確認することが困難であった．宮古市中心部，大船渡市三陸町，更には沿岸北部に位置する野田村においても市街地が大きな被害を受けた．さらに，中心市街地は被害を受けていないが，臨海部の集落に被害を受けた地域として，久慈市，田野畑村および岩泉町小本といった沿岸北部の地域が見られる．一方，洋野町および普代村では，防災施設背後の建物



図－2　岩手県における震災 1 ヶ月後の死亡者数の年齢分布の割合

表－1　岩手県における漁港海岸の被害状況

全体漁港海岸	現有施設	被災施設	被災率
防潮堤整備箇所	55 箇所	52 箇所	95%
防潮堤延長	39,492m	25,341m	64%
水門	142 基	52 基	37%
門扉	331 基	137 基	41%
突堤	341m	143m	42%
離岸堤	1,554m	644m	41%

※平成 23 年 4 月 18 日現在

は，ほとんど被害を受けなかった．

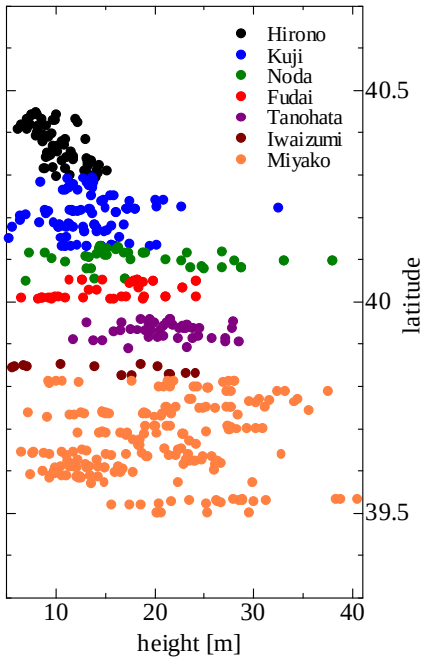
陸前高田市（人口 23,164 人）および大槌町（同 15,249 人）の死者・行方不明者数は，県対策本部によると 6 月 30 日現在，それぞれ 2,089 人および 1,610 人であり，人口に対する死者･行方不明者の割合は，9.0%および 10.6%で人口の 1 割程度を占めている．また，震災 1 ヶ月後の死亡者数の年齢分布を図-2 に示す．65 歳以上が全体の約 5 割を占めており，高齢者の多くが逃げ遅れて亡くなられたと考えられる．また，40 歳～60 歳の死亡者数が全体の約 3 割を占めていることがわかる．社会の中心的な役割を担う年齢層も多くの命を落としていることになるが，その原因の一つとして，消防団や防災関係者の強い責任感から，水門の管理あるいは避難の呼びかけを行っていたため，自分自身が逃げ遅れて津波に巻き込まれた可能性が十分に考えられる．

表－1 は，県内の漁港海岸の施設に関する被害状況を示す．防潮堤整備済 55 箇所中 52 箇所が被害を受け，被災率が 95%であり，損壊の規模に差はあるものの，ほとんどの漁港海岸で被害を受けている．また，防潮堤延長による被災率が 64%であり，更に水門，門扉等の防災施設も被災率が 4 割を上回っており，防災施設の機能が低下しているため，余震による津波が発生した場合，非常に危険な状態である．

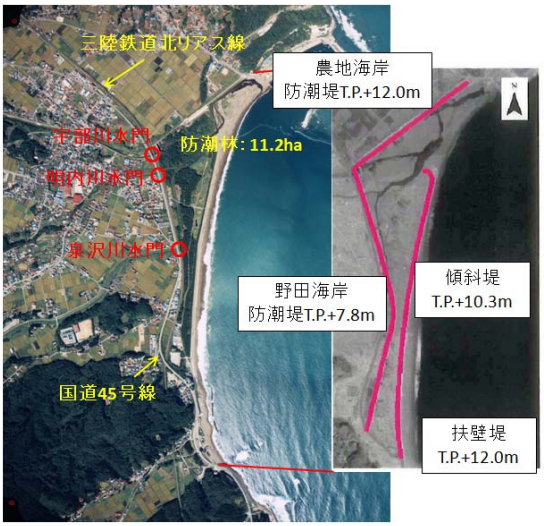
3. 岩手県北部沿岸における被害状況

(1) 岩手県北部沿岸の津波遡上高

図－3 は，岩手県北部の沿岸域で観測された津波



図－3　岩手県沿岸北部における遡上高



図－4　被災前の野田村の防災施設の状況

写真－1　野田海岸に最大波の津波が襲来した様子

遡上高を示す．なお，本データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによるものである．遡上高の全体の傾向は，岩手県沿岸中央に位置する宮古市から北部の洋野町にかけて減少しているが，野田村に限ると，30m を越える遡上高が観測されていることがわかる．

(2) 野田村の被害状況（市街地を中心に被害を受けた地域）

野田村は，市街地を中心に被害を受けた地域であるが，図－4 に被災前の防災施設の状況を示す．防災施設は，海岸防災林施設（傾斜堤：高さ T.P.+10.3m，扶壁堤：高さ T.P.+12.0m，防潮林：11.2ha）が整備され，その背後には，宇部川より北の農地海岸の防潮堤（高さ T.P.+12.0m）および南の野田海岸の防潮

(a) 破壊された防潮堤（T.P.+10.3m）

(b) 倒木・流木した防潮林（11.2ha）

(c) 上屋が流出した泉沢川水門

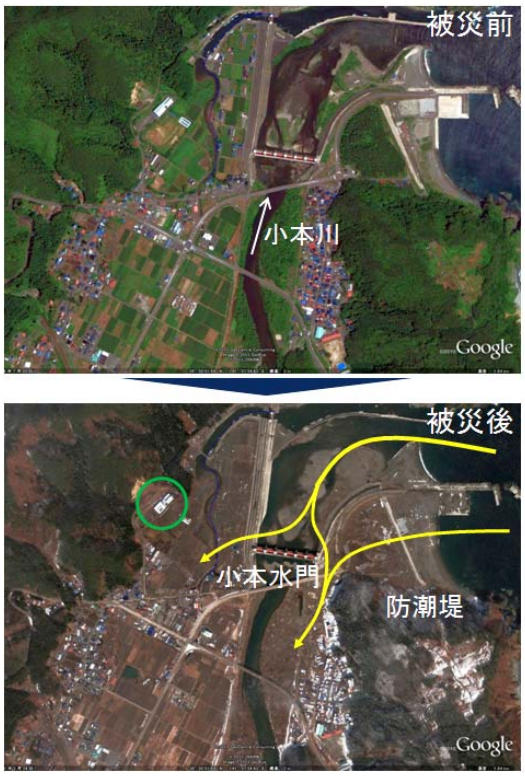
写真－2　野田村市街地の被災状況

堤（高さ T.P.+7.8m）が整備された二線堤となっている．また，図中の赤丸で示す水門 3 基が整備されている．さらに，防潮堤背後には，国道 45 号線および三陸鉄道（北リアス線）が防潮堤と平行するように建設されている．写真－1 は，野田海岸に最大波の津波が襲来したときの様子を示す．写真中に見える構造物は，海岸防災林施設の防潮堤である．津波は海岸に面した防潮堤（1 線堤）だけでなく，その背後の防潮堤（2 線堤）も越流して，海岸から約 1km に位置する野田村役場の 1 階部分（浸水高

T.P.+7.9m）も浸水し，村全体で 502 戸の家屋被害を受けた．また，T.P.+12.0m で整備された防潮堤では，裏法基礎部分で浸食されたが，前面の護岸は残存した．一方，T.P.+10.3m の防潮堤は，写真－2(a)に示すように，壊滅的な被害を受けた．その背後の防潮林も写真－2(b)に示すように，ほとんどが倒木・流木の被害を受け，更には流木した多くの松が漂流物となり，家屋に二次的被害を及ぼした．さらに，3 基の水門は何れも破損し，泉沢川水門では，浸水高が T.P.+13.1m であったことから，水門上屋に強い流体力が作用したため，写真－2(c)に示すように上屋が流出したものと推察される．

(2) 岩泉町の被害状況（臨海部の集落に被害を受けた地域）

岩泉町小本地区の防災施設は，防潮堤，水門および河川堤防（左岸：0.45km，右岸：0.35km）であり，何れも計画津波高 T.P.+13.3m で整備されている．図－5 は，被災前と被災後の小本地区の様子を示す．津波は水門（浸水高：T.P.+19.3m）および防潮堤を



図－5　岩泉町小本地区の被災前と被災後の様子

(a) 普代川水門上流側の破壊された管理橋

(b) 渓谷に造られたダムのような構造

写真－3　普代川水門

越流し，更には水門下流の両岸からも越流した．そのため，河口から左岸約 1.2km，右岸約 0.9km までの範囲が浸水し，小本中学校（図中緑の丸部分）で約 2m の浸水を記録した．家屋の被害は，全壊から一部損壊まで含めて 202 戸であった．

(3) 普代村の被害状況（ほとんど被害を受けなかった地域）

普代村の防災施設は，宇留部海岸河口から 300m に位置する普代水門（防潮堤含めて長さ 205m，高さ T.P.+15.5m，県営事業として 12 年間，総工費 35 億 6 千万円，1984 年に完成）および太田名部海岸の防潮堤（長さ 155m，高さ T.P.+15.5m，総工費約 6 千万円，1967 年に完成）がある．津波は，水門（浸水高：T.P.+24.0m）を越流し，写真－3(a)に示すように水門上流側の管理橋を破壊した．そして，約 300m 遡上したが，水門上流約 100m の左岸に位置する普代小学校や更に上流の市街地に被害を及ぼさなかった．この水門の両端は，写真－3(b)に示すように山裾まで

延び，峡谷に築かれたダムのようであり，地形的特徴を旨く利用した隙のない構造と言える．これに対して，前述した小本川水門の両端は，小本川の堤防までであり，その先は低平な住宅地となっている．このため，津波が水門を一旦越えてしまえば両岸からも津波が越流し，その下の住宅地に被害が直接及ぶことになる．結果的に小本川水門は，津波をせき止められなかっただけでなく，せき上げ効果によって水位を大きく上昇させて，両岸の堤防から溢れ出た津波によって被害を拡大させた．

これは，外力が想定を上回った場合，防災施設が逆に拡大要因となり，想定外の被害を発生させる可能性があることを示唆している．災害対策においては，あらゆる可能性を検討し，盲点を残してはならないことが必要と言える．

(4) 宮古市田老の被害状況（壊滅的な被害を受けた地域）

宮古市田老では，昭和三陸地震津波（1933 年）によって，全人口 1,798 名のうち 763 名の犠牲者を出した [3]．津波から村を守るために万里の長城と呼ばれる高さ 10m の防潮堤が築かれた．図－6 に示す防潮堤は，3 つの防潮堤を中央部で接続し，X 型を形成している．防潮堤①（図中黄色点線：長さ 1,350m）は昭和三陸津波を受けて，1934 年から 57 年度にかけて，津波を沢沿いに受け流し，避難する時間を稼ぐことを目的として建設された．防潮堤②（同赤色点線：長さ 582m）はチリ地震津波を受けて，1962 年から 65 年度にかけて建設された．防潮堤③（同緑色点線：長さ 501m）は 1973 年から 78 年度にかけて建設された．②・③の防潮堤は，津波に正面から立ち向かうように，湾口に対して平行に造られた．したがって，防潮堤①と②・③の設計思想は全く異なるものであった．今回の津波では，X 型防潮堤の海側の方が破堤し，写真－4 に見られるように，防潮堤②では，長さ 600m が全壊し，③では，長さ 300m で天端・裏法面が損壊した．一方，防潮堤①では，大きな損傷は見られなかった．これらは，今後の防災施設の役割を考える上で参考にすべき事実であり，津波（水の動き）をどのように制御するかを考えさせられるものである．

図－6　宮古市田老の市街地と X 型防潮堤

(a) 破壊された防潮堤②

(b) 天端・裏法面が損壊した防潮堤③

写真－4　被災した田老防潮堤

4. まとめ

壊れない堤防や粘り強い堤防というのは想定内の

外力に対しては絶対条件であるが，外力が想定を大きく上回る場合についての科学的検討が今後の課題である．また，外力の想定を誤らないためには，今回の経験および過去の被災事例をしっかりと踏まえた上で，容易なことではないが，来襲する可能性のある外力の上限とその確率を科学的に解明し，その結果を基に対策の前提となる想定を必要に応じて改めることが重要である．

これまで岩手県沿岸部では，防潮堤や水門などの防災施設の整備を進めて来ており，1960 年チリ地震津波以降，大きな被害を受けなかった．また仮に，月日の経過に伴い過去の津波災害を忘れ，防災施設の過渡の依存性によって，今回の悲劇を生んだとしたのならば，この経験を風化させないことが大切であり，災害文化の継承が我々の責務でもある．

謝辞

岩手県沿岸の現地調査において，震災当時の様々な経験を聞かせて頂いた被災地の皆様に心より深謝の意を表します．

参考文献

1）岩手県災害対策本部会議資料，参考資料 1.

2）いわて防災情報ポータル：
http://sv032.office.pref.iwate.jp/~bousai/

3）津波の辞典，首藤伸夫他，朝倉書店，p. 29.

岩手県南部を中心とした津波調査の報告

A report on tsunami survey in south part of Iwate Prefecture

柴山知也[1]・三上貴仁[2]

Tomoya Shibayama[1] and Takahito Mikami[2]

[1]早稲田大学理工学術院教授，[2]早稲田大学創造理工学研究科

1. はじめに

土木学会海洋開発委員会では，津波発生以来，早稲田大学を中心とする調査隊を四次にわたって派遣し，津波の浸水高さを調査した[1)]．そのうちの 4 月 15 日から 30 日まで実施した第三回は，アメリカ土木学会の第一次調査団との合同調査[2)]である．本稿では，これらの結果と東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの調査結果[3)]のまとめを合わせ用いて，主に岩手県南部を中心とした津波痕跡高の調査結果について解説する．

2. 土木学会海洋開発委員会･早稲田大学隊の調査結果

図１に調査結果を示す．岩手県から千葉県までの沿岸において現地調査を行い，岩手県，宮城県北部の湾奥で 10m 以上（場所によっては 15m 以上），仙台湾沿岸で 5～10m，千葉県および茨城県の沿岸で 5m 前後の浸水高を計測した．多くの地域で家屋の流出，海岸構造物の損壊，船の乗り上げ等の被害を確認した．

3. 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの調査結果[3)]を用いた調査結果の概要

本稿では主に岩手県南部について解説するため，図２に示すように田老地区から陸前高田市のデータについて述べることとする．用いたデータは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループのデータ集であり，その中には 2. の早稲田大学隊のデータも含んでいる．図で特に赤丸で示した田老，宮古，姉吉，大槌，釜石，大船渡に着目してそれぞれの地域について述べる．

(1) 田老

田老地区の北部の半島部では遡上高が 35m に達している．湾内の遡上高さ（浸水高さ）は漁港近傍で 15m を越えており，明治三陸津波での浸水高さを上回った．

(2) 宮古

宮古漁港の周辺では概ね 10m 程度の浸水高さとなっており，津波防潮堤を越流していた．湾外での遡上高さは 35m を越え，湾奥部の浸水高さは概ね 10m となった．

(3) 姉吉

姉吉地区は明治三陸津波，昭和三陸津波でも壊滅的被害を受けたが今回も漁港地区は概ね 40m の遡上高を記録し，漁港とキャンプ場は壊滅した．幸い集落は高地移転をしており，70m 程度の丘の上に集落があるため，人家の被災は免れている．集落に至る道路も途中まで津波が遡上しており，漁港からの道沿いには樹木がなぎ倒された荒涼たる風景が広がっている．

(4) 大槌

大槌町は街の中央を流れる大槌川を津波が遡上し，

各所で河川堤防を越えて津波が陸上に氾濫した．町内の浸水高さは 10m を越えている．湾内では浸水高さが 15m を越える場所もある．

(5) 釜石

釜石湾の湾口防波堤の外側では 30m を越える遡上高さがあるが，防波堤内では概ね 10m 程度の浸水高および遡上高となっている．

(6) 大船渡

大船渡市内では概ね 10m 程度の浸水高さとなっている．一方で市内を流れる盛川に沿って内陸部奥深くまで津波が侵入している．

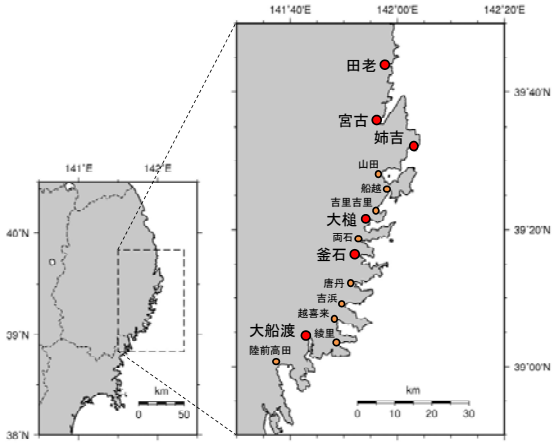


図２：岩手県南部沿岸での主な調査地点

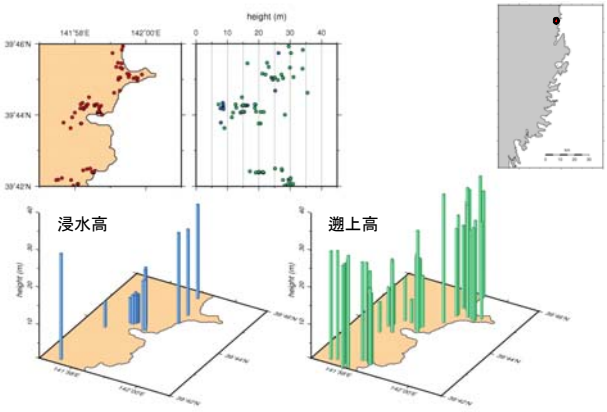


図３：田老での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

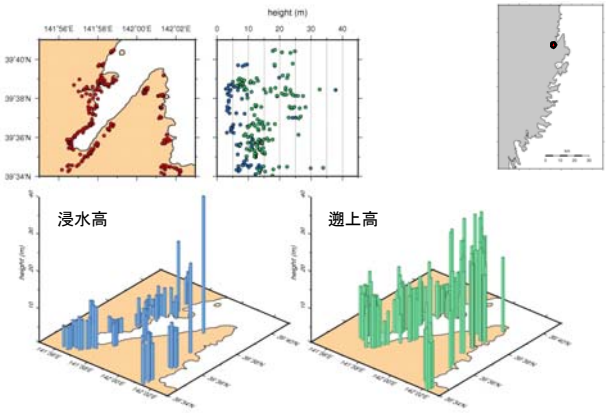


図４：宮古での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

参考文献

1) 柴山知也・松丸亮・高木泰士・Miguel ESTEBAN・三上貴仁：2011 年東北地方太平洋沖地震による津波災害の宮城県以南における現地調査，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67，2011（査読中）．

2) ASCE: ASCE-JSCE Tohoku Tsunami Reconnaissance Team Report, 2011.

3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:調査結果，http://www.coastal.jp/ttjt/.

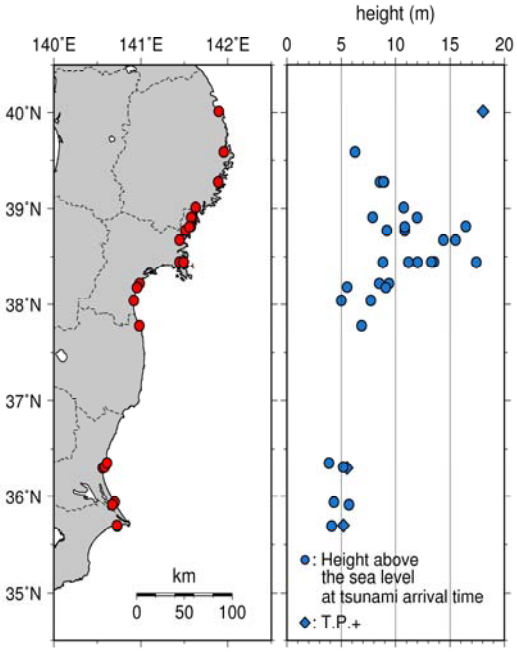


図１：土木学会海洋開発委員会派遣早稲田大学隊の浸水高さ計測結果

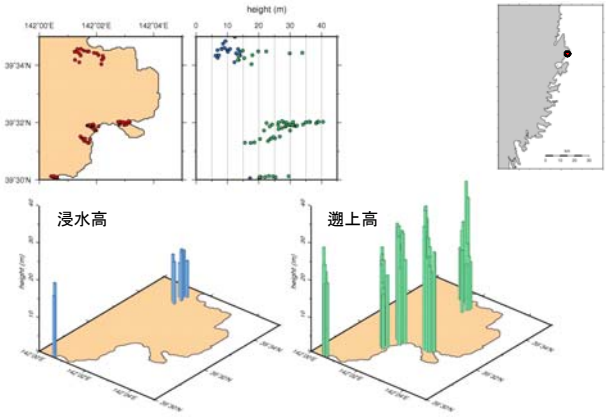


図５：姉吉での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

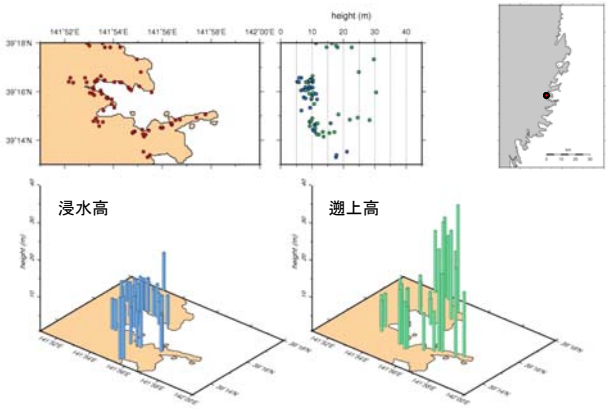


図７：釜石での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

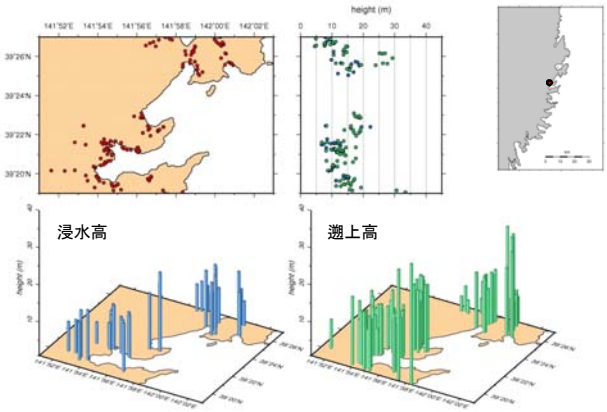


図６：大槌での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

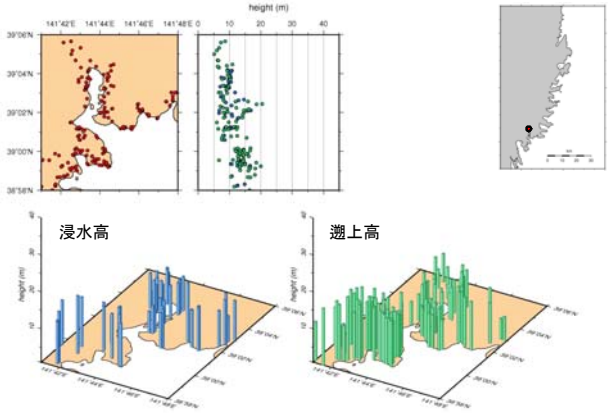


図８：大船渡での痕跡高分布（データは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）

宮城県北部における津波痕跡調査

Tsunami Trace Survey in the Northern Part of Miyagi Prefecture

柿沼太郎[1]・辻本剛三[2]・安田誠宏[3]・玉田　崇[4]

Taro Kakinuma[1], Gozo Tsujimoto[2], Tomohiro Yasuda[3] and Takashi Tamada[4]

[1]鹿児島大学大学院，[2]神戸市立工業高等専門学校，[3]京都大学防災研究所，[4]いであ株式会社

1. 序　　論

東北地方太平洋沖地震津波合同調査において，著者らは，津波痕跡調査第 2 期調査団の調査に参加し，2011 年 4 月 1 日～6 日に，岩手県及び宮城県の津波痕跡調査を行なった．その際，浸水高の測定には，レーザ距離計（Impulse 200）とプリズムを用いた．本稿では，このうち，宮城県北部に関する調査結果を示す．また，紙面の都合上，網羅できないが，合同調査グループの他班の調査結果[1)] も参照し，宮城県北部における浸水高及び津波被害の概要を述べる．

ところで，宮城県の海岸地形は，気仙沼市から石巻市東部にかけてと，石巻市西部から亘理郡にかけての二つの地区に大別されるであろう．前者は，起伏に富んだリアス式海岸を特色とし，他方，後者は，後背に平野が控える比較的なだらかな海岸線を有している．図-1 に，宮城県の行政界を示す．本稿では，これら二つの地区のうち，前者，すなわち，気仙沼市から，本吉郡南三陸町，石巻市東部，そして，牡鹿郡女川町に至る宮城県北部を対象とする．

宮城県沿岸部における浸水高の調査結果[1)] を図-2 に示す．宮城県北部の浸水高が南部よりも高い傾向にあることが見て取れる．この原因として，リアス式海岸に特徴的な，湾奥や岬先端での津波の集中が考えられるが，断層位置や，牡鹿半島による遮蔽効果等，様々な要因が挙げられ，原因解明には，数値解析等を併せた詳細な考察が必要である．

図-1　宮城県の行政界

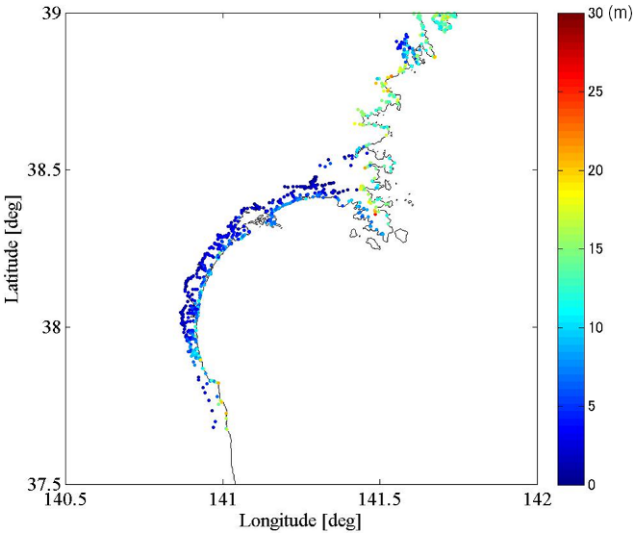


図-2　宮城県沿岸部における浸水高の分布[1)]

2. 気仙沼市

(1) 気仙沼市の浸水高の概要

気仙沼港において，4～7 m 程度と，比較的低い浸水高であったが，場所によっては，9 m 程度の高い地点もあった．ここで，本稿では，浸水高を平均海面からの高さで表わすこととする．写真-1 は，気仙沼港付近に残されていた，乗用車に重なり，家屋に衝突した船舶である．気仙沼港以外の地点では，6～20 m 程度の浸水高が見られ，局所的に，20 m を超える地点もあった．すなわち，本吉町赤牛で 23.0 m，また，本吉町中島で 21.0 m であった．これらの地点を除き，浸水高は，唐桑町で 11～15 m 程度であり，また，本吉町で概ね 9～19 m であった．

なお，神山川と天川に挟まれた市街に，500 m も続く 1 m 程度の浸水深の痕跡が認められたことは，河川の存在を考える上で，注意すべき事項である．

(2) 波路上向原（はじかみむかいばら）

御伊勢浜（おいせはま）海水浴場のある波路上向原では，図-3 の地点①に，家屋外壁の明瞭な痕跡線を認め，その浸水高は，16.0 m であった．

写真-2 の中央に示す家屋の 2 階部分は，約 50 m 離れた場所から流され，土台が数 m 高い所にあった左側の家屋に衝突して止まった．これらの家屋は，汀線より 400 m 前後内陸に入った地点にあった．ここで，本稿では，汀線からの距離として，海岸線からの地形図上での最短直線距離で表わすこととする．

(3) 本吉町三島

大谷（おおや）海岸に面する本吉町三島では，図-3 の地点②に，家屋外壁の明確な痕跡線を認めた．浸水高は，15.1 m であり，この地点は，汀線より約 240 m に位置する．同じ高さの地盤上に建つ周辺家屋に被害があったが，玄関先の地盤がこの痕跡より約 0.5 m 高い家屋には，浸水被害が見られなかった．

大谷海岸は，波路上向原よりも，1 m 程度であるが浸水高が低くなっている．これは，大谷海岸が舘

写真-1　気仙沼港付近の陸上に乗り上げた船舶（右方向に海がある．）

図-3　波路上向原と大谷海岸（①: 北緯 38 度 49 分 39.6 秒・東経 141 度 34 分 42.1 秒，②: 北緯 38 度 48 分 55.8 秒・東経 141 度 34 分 2.4 秒）

写真-2　波路上向原の流出家屋

鼻崎の遮蔽域にあったためであると考えられる．

御伊勢浜海水浴場，大谷海岸の両者とも，以前の地図と比較して，幅 50 m 程度の砂浜が消失したようである．

(4) 本吉町赤牛

本吉町赤牛では，図-4 の地点①において，愛宕神社の御堂内壁に明瞭な痕跡線があった．浸水高は，23.0 m と，比較的高かった．この地点は，汀線より約 180 m 内陸に位置する．

(5) 本吉町小金沢

図-4 の地点②において, JR 気仙沼線小金沢駅背後の家屋玄関ドアに明確な痕跡線があり，浸水高は，19.1 m であった．この地点は，汀線より約 100 m 内陸に位置する．

本吉町赤牛の愛宕神社と小金沢駅は，400 m も離れていないが，前者では，愛宕神社に向かって狭くなる地形となっており，更に，神社の崖を津波が駆け上がったか，あるいは，急勾配地形上の反射により, 後者よりも浸水高が大きくなったと考えられる．

赤牛では, JR 気仙沼線のコンクリート製の橋桁が落下していたが, これが流体力によったのか, また，揚圧力によったのか，今後，検討する必要がある．

(6) 本吉町歌生（うとう）

図-5 の地点①に，家屋外壁及び窓の明確な痕跡線を認めた．浸水高は，19.3 m と比較的高かった．この地点は，汀線より約 200 m に位置する．ここは，津波の進路上に，蔵内漁港の防波堤があったが，堤の高さが低く，その効果があまり現れなかった．

3. 本吉郡南三陸町

(1) 本吉郡南三陸町の浸水高の概要

本吉郡南三陸町では，12～20 m 程度の浸水高が測定された．特に，戸倉で，16～21 m 程度，歌津浪板の北側及び歌津名足で，18 m 程度と高かった．歌津のその他の地点では, 13～16 m 程度であった．また，

図-4 本吉町赤牛と本吉町小金沢（①: 北緯 38 度 47 分 55.6 秒・東経 141 度 32 分 12.1 秒, ②: 北緯 38 度 47 分 44.7 秒・東経 141 度 32 分 2.8 秒）

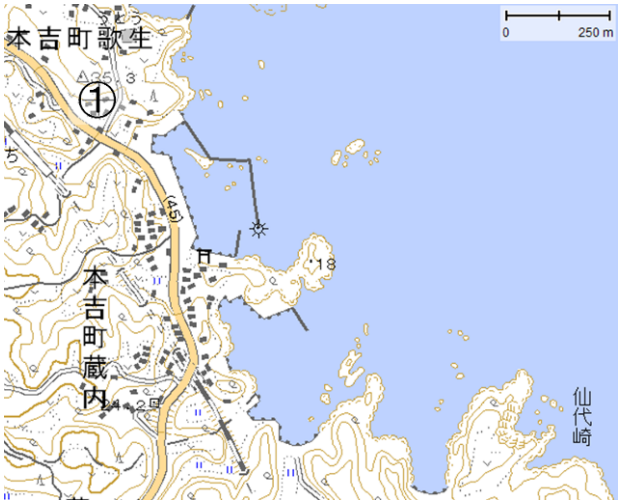


図-5 本吉町歌生（①: 北緯 38 度 45 分 18.3 秒・東経 141 度 31 分 34.2 秒）

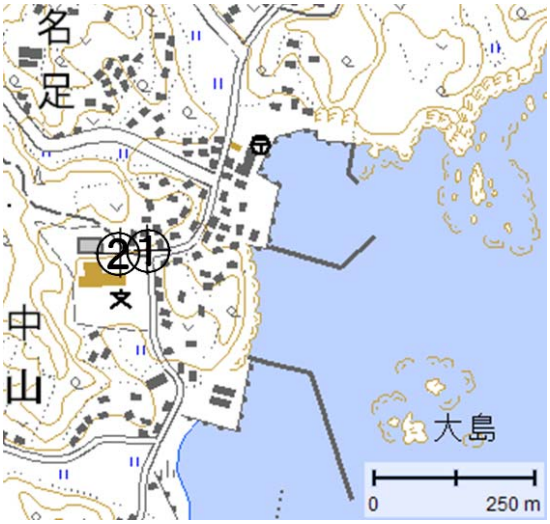


図-6 歌津名足（①: 北緯 38 度 43 分 20.6 秒・東経 141 度 33 分 22.3 秒, ②: 北緯 38 度 43 分 20.4 秒・東経 141 度 33 分 20.6 秒）

志津川では，12～16 m 程度であった．

(2) 歌津名足（なたり）

図-6 の地点①において，名足小学校東隣の民家の家屋フェンスに，住民によって，浸水高指示板が掲げられていた．この上辺より，浸水高は，17.7 m であった. この地点は, 汀線より約 170 m 内陸にある．

昭和三陸津波の際に，低地に住居のあった名足の住民は，浸水被害を受け，杉林であった高地を宅地として移転した．移転したこの名足小学校隣の民家は, 床上浸水に留まり, 家屋に損傷が殆どなかった．

また，図-6 の地点②において，名足小学校の飼育小屋ドアに明瞭な痕跡線を認め，浸水高は，17.8 m であった．この地点は，汀線より約 200 m 内陸に位置する．名足小学校運動場が避難場所に指定されており, この高さが校舎の地盤でもあったが, これは, 浸水高より約 6 m も低かったことになる．

(3) 歌津馬場

馬場漁港を有する歌津馬場において，図-7 の地点①で，崖の梅の木の上まで浸水したとの目撃証言を得た．同じ高さに，多数の漂着物があった．この浸水高は，15.7 m であり，この地点は，汀線より約 290 m 内陸に位置する．歌津馬場で家屋を流された住民は, 初期の津波警報の津波高さが 6 m であったため, 海抜 10 m 以上にある自宅に津波が来ると思わなかった．しかし，戸外で津波を観察し，予想より大きな津波が来襲すると判断して，家屋背後の高台に逃がれた．バリバリという破壊音と共に津波が押し寄せ，浸水高の水面が 20 分もの間，海まで繋がっていたとのことである．そして，住居から 100～200 m 程度南方に位置する大沼～小沼の方面で，更に 4 m 程も高く海面が上昇したように見えたそうである．これは，この半島の東西，すなわち，歌津馬場と歌津大磯の 2 方向から来た津波が大沼・小沼周辺で出くわしたからである．2 方向から伝播した津波が衝突して海面が跳ねたという証言は，歌津大磯の住民からも聴取した．

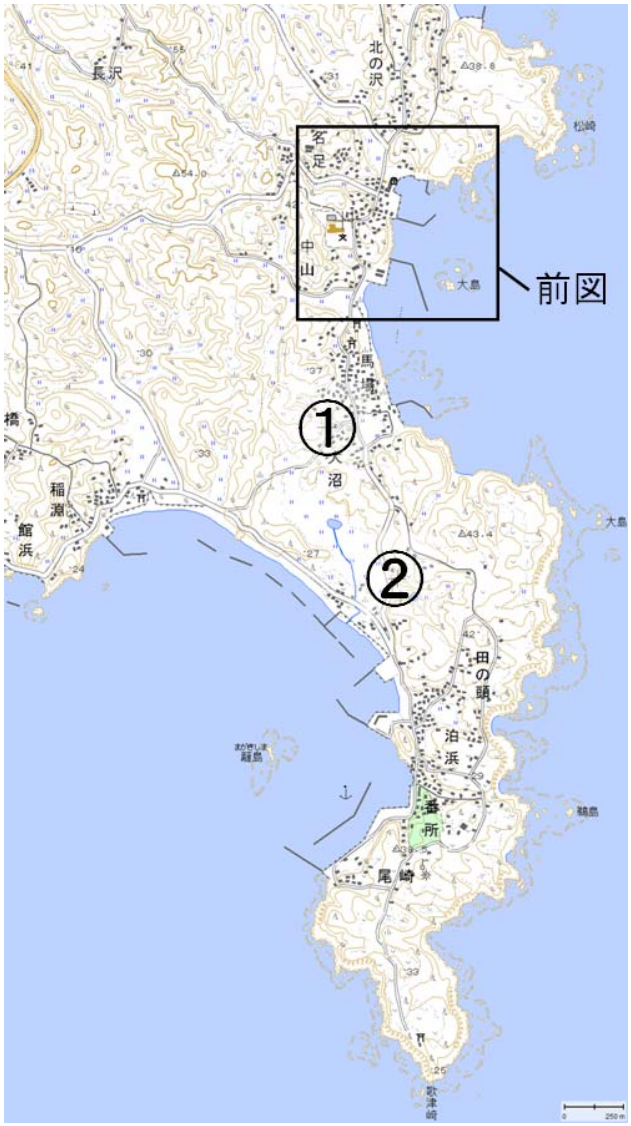


図-7 歌津馬場と歌津大磯（①: 北緯 38 度 42 分 52.4 秒・東経 141 度 33 分 17.8 秒, ②: 北緯 38 度 42 分 31.8 秒・東経 141 度 33 分 30.1 秒）

なお，歌津馬場の地点①の目撃証言をいただいた住民は，先祖が明治三陸津波の後，高地移転をした場所に居住していたが，家屋を流されてしまった．被災者に対するヒアリングは，慎重に行なったつもりであるが, 礼儀を欠くことがあったかも知れない．しかしながら，どなたも気さくにお話しいただき，特に，歌津馬場の御夫妻は，明るいバイタリティを示された．この御夫妻と別れてからの車中で色々と想い, 悲しさがこみ上げてきたことが忘れられない．

(4) 歌津大磯

長須賀海水浴場のある歌津大磯において，図-7 の地点②で，家屋前庭の浸水限界に関する住民の目撃証言を得た．周辺の同じ高さの位置に，漂着物があった．この浸水高は，13.3 m であり，この地点は，汀線より約 270 m 内陸に位置する．

(5) 志津川小森

志津川の街も，志津川病院等の幾つかのビルを残して廃墟と化した．浸水限界は，丘陵が始まる場所まで，容赦なく広がっていた．図-8 の地点①は，国道 398 号線の, 海に向かって右側の崖沿いであるが, 漂着物が多数散在していた．この地点は，汀線より約 2.5 km の地点であり，GPS 計の示す標高は，約 18 m であった．

(6) 志津川小田

写真-3 は，JR 気仙沼線清水浜（しずはま）駅の駅舎であり，駅舎外壁に，明瞭な痕跡線があった．痕跡線の位置を写真上に赤色線で示している．この地点は，図-9 の地点①であり，浸水高は，12.1 m で，汀線より約 260 m 内陸に位置する．津波は，JR 気仙沼線の線路のレベルを超え，JR 気仙沼線は，壊滅的な被害を受けた．陸前戸倉～大谷海岸を見た限り，駅及び線路共に被害を受けており, 場所によっては, 上述のように落橋もあった．簡単に切断されない線路は，写真-4 のように道路に曲がり落ち，こうした線路上に土砂が盛られ，即席の道路とされた場所もあった．線路や駅舎といった鉄道関連の瓦礫は，各鉄道会社の所有物であるが，地方自治体及び個人の所有物と区分けして処分することが難しく，所有者の区別なく処理する何らかの手立てが必要である．

また，清水浜駅の屋根には，写真-3 に見られるように漂流物の衝突痕が残されていた．津波以前になかったと証言されたこの衝突痕は，上述した浸水高より約 2 m 上方にある．比較的大きな物体が津波により漂流し, こうした衝突痕を付したと推測される．

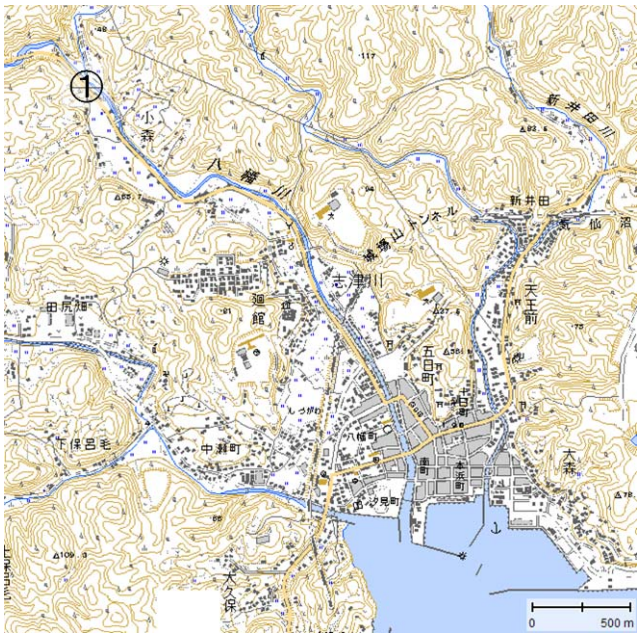


図-8　志津川（①: 北緯 38 度 41 分 34.2 秒・東経 141 度 25 分 45.3 秒）

写真-3　JR 清水浜駅の駅舎と津波の痕跡

図-9　志津川小田・志津川平磯・志津川大森（①: 北緯 38 度 41 分 26.2 秒・東経 141 度 29 分 14.9 秒, ②: 北緯 38 度 40 分 47.7 秒・東経 141 度 28 分 24.8 秒, ③: 北緯 38 度 40 分 16.4 秒・東経 141 度 27 分 39.0 秒）

(7) 志津川平磯

平磯漁港に近い図-9 の地点②において，家屋 2 階の窓及びサッシに明確な痕跡線を認めた．この浸水高は，13.3 m であり，この地点は，汀線より約 50 m の位置にある．

(8) 志津川大森

図-9 に示す地点③の大森崎において，木に掛かった白い戸等，同じ高さに多数の漂着物があった．この浸水高は，12.1 m であり，この地点は，汀線より約 120 m 内陸の位置にある．

(9) 本吉郡南三陸町（旧志津川町）戸倉（とぐら）

図-10 の地点①において，家屋窓に明確な痕跡線を認めた．この浸水高は，20.5 m と比較的大きく，この地点は，汀線より約 450 m 内陸の高台にある．

なお，戸倉で 300 m も流されて助かった男性によると，そのように流されて助かった人が大勢いるそうである．眼前を流れている屋根にとっさに乗って海に流され，2011 年 3 月 11 日の夜に，知人の漁船に救助された住民もいたとのことである．

また，図-10 の地点②の戸倉中学校において，校舎 1 階の窓に明確な痕跡線を認めた. この浸水高は，20.0 m であり，この地点は，汀線より約 70 m の位置である．

モアイ像が 2 体配置された戸倉中学校は，校舎が海抜 10 m 以上の高台にあり，浸水深は，1 階の約 1.7 m であった．しかしながら，戸倉小学校（図-10 の③）は, 低平地にあり, 写真-5 に見られるように，3 階建ての屋上に牡蠣殻等が漂着していた．このように，学校は，高台に建てられていたり，また，低地に建てられていたりと様々であり，こうした違いがどのような理由によるのか，そして，どうすべきであるのか，今後，調査する必要がある．学校立地のための指針に関して，文部科学省大臣官房文教施設企画部に非公式の電話で尋ねたところ，津波に対する立地の規則がないとのことであった．

写真-4　JR 気仙沼線の曲がり落ちた線路

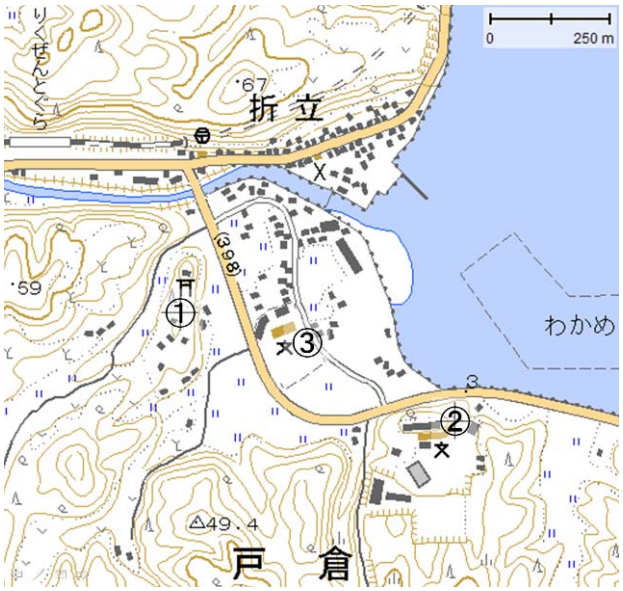


図-10　戸倉（①: 北緯 38 度 38 分 41.1 秒・東経 141 度 26 分 12.1 秒, ②: 北緯 38 度 38 分 33.9 秒・141 度 26 分 35.6 秒）

写真-5　戸倉小学校

戸倉小学校付近では，複数個の海岸護岸パラペットの流出があり，約 100 m 流されたものもあった．

神割崎に近い図-11 の地点①において，道路横の斜面上に，横一列に並んだゴミや，土の色の変化を認めた．この浸水高は，15.5 m であり，この地点は，汀線より約 60 m の位置にある．

4. 石巻市東部

(1) 石巻市東部の浸水高の概要

雄勝字味噌作において 21.4 m の浸水高が測定され，雄勝の他の地点で，15 m 程度であった．また，谷川浜でも 20 m 以上の浸水高が見られ，谷川浜川原で，25.8 m であった．その他の沿岸付近では，低くて 3 m 程度の地点もあれば，高くて 17 m 程度の場所もあった．牡鹿半島では，西部より東部の浸水高が大きい傾向があった．こうした様々な浸水高が現れたことが，石巻市東部の特徴と言える．今後，各地点の浸水高に関する詳細な検討が必要である．

(2) 北上町十三浜大指（おおさし）

図-11 の地点②において，崖の多数の漂着物より，浸水高は，17.2 m であった．この地点は，汀線より約 220 m 内陸に位置する．写真-6 に示す水産加工場の建物があるこの地盤上に，住宅も建てられていたが，ここは，昭和三陸津波によって浸水を経験した高さであった．この大指漁港では，放送によって，全住民が内陸にある高台に避難できた．

5. 牡鹿郡女川町

(1) 牡鹿郡女川町の浸水高の概要

女川町の沿岸部は，総じて浸水高が大きかった．比較的低かった竹浦でも 9～12 m 程度であり，その他の計測地点では，ほぼ 10 m を超えた．ただし，20 m を超える津波は，現れなかったようであり，得られた浸水高の最大値は，桜ヶ丘の 19.9 m であった．海抜約 16 m の高台にある女川町立病院の 1 階に津波が達し，約 2 m の浸水深があった．また，女川港

図-11 神割崎～大指漁港（①: 北緯 38 度 37 分 48.8 秒・141 度 31 分 35.4 秒，②: 北緯 38 度 36 分 40.1 秒・141 度 31 分 8.0 秒）

の浸水高が 16～19 m と高いことは，特筆に値する．

(2) 牡鹿郡女川町の鉄筋コンクリート建造物の倒壊

女川町における被災の特徴の一つに，幾つもの鉄筋コンクリート建造物の倒壊が挙げられる．この一例として，写真-7 の建物 A は，基礎ごと横転している．写真-8 に，その基礎の裏側を示す．引き抜かれた杭も見られる．ところが，隣の建物 B には，大きな被害が確認できない．これは，建物 B が，建物 C（観光物産施設のマリンパル女川）の背後に建っており，遮蔽効果が現れたためと考えられる．こうした遮蔽効果を示す頑強な建造物は，津波防波堤としての機能を期待できる．ただし，頑強な建造物の間隙を津波が通過する際，大きな流速が発生する可能性がある．これに起因すると考えられる局所洗掘例を写真-9 に示す．写真-10 上に示すように，マリンパル女川の 2 棟間に，比較的大きな局所流が発生したため，こうした局所洗掘が起きたと考えられる．

その他の，女川町における鉄筋コンクリート建造物の転倒例を写真-11 に示す．なお，前述したマリンパル女川は，避難ビルに指定されていたが，その南側の棟の屋上を津波が越えてしまった．鉄筋コンクリート建造物は，避難ビルに指定されることもある．こうした転倒等の被害に関して，今後，老朽化対策も含め，浮力や液状化といった様々な要因を対象として調査を進める必要がある．

6. 結　　論

津波の進行方向と岬の位置の関係によって，遮蔽効果が現れたり，また，陸上にある丘が内陸に行くに従い平地を狭めて津波を高くするといった局所的な地形の影響が大きいと言える．河川を含む各地形における津波の挙動の特徴をシミュレーションにより把握することが重要である．また，何波も到来する津波の流れに伴う，構造物，特に，シェルタや防波堤の機能を求められる鉄筋コンクリート建造物の，転倒・流動に関して，地盤の土砂の運動も考慮して知識を深める必要がある．津波と被害の実体を総合的に理解すると共に，地域毎の特徴を分析することが肝要であり，そうしてこそ，コミュニティの防災に対して，教訓を形成することが可能となる．

写真-6　大指漁港

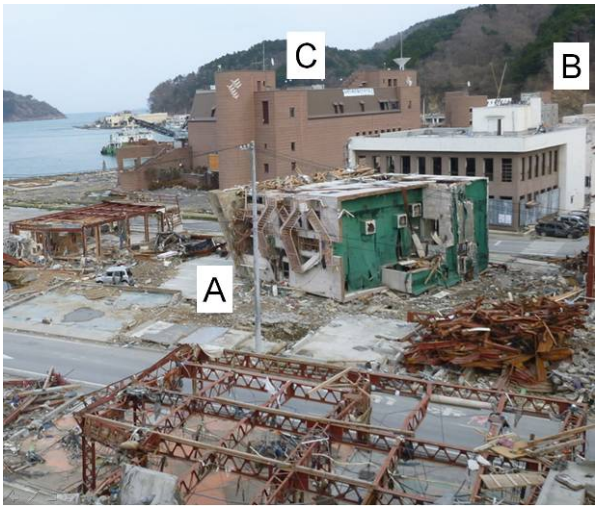


写真-7　牡鹿郡女川町における鉄筋コンクリート建造物の倒壊（C は，マリンパル女川である．）

写真-8　写真-7 の転倒した建物 A の基礎裏

写真-9　マリンパル女川の 2 棟間の局所洗掘

写真-10　マリンパル女川の流れに対する影響

写真-11　牡鹿郡女川町における鉄筋コンクリート建造物の転倒例

謝　　辞

本調査にあたり，長岡技術科学大学の細山田得三教授に器材準備等の後方支援をしていただいた．また，調査中，被災者の方々に，大変貴重な証言をいただいた．ここに，感謝の意を表する次第である．

参考文献

1) 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調査結果の速報値, http://www.coastal.jp/ttjt, 2011.

宮城県南部沿岸域における津波被害の特徴

Characteristics of Tsunami Damage on The 2011 off Tohoku Oki Earthquake Tsunami along the South Coast of Miyagi prefecture

今井健太郎 [1]・今村文彦 [1]・越村俊一 [1]・菅原大助 [1]・サッパシー アナワット [1]・佐藤翔輔 [1]
Kentaro Imai[1], Fumihiko Imamura[1], Shunichi Koshimura[1], Daisuke Sugawara[1], Anawat Suppasri [1], and Shosuke Sato[1]
[1] 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に東北太平洋沖で発生した M9 の地震による津波は，青森県から千葉県に至る太平洋沿岸で激甚津波被害をもたらした．

当該沿岸域である石巻平野～仙台平野は，浜堤列が発達するタイプの沖積低地であり，砂丘から浜堤，堤間湿地，その背後はほぼ平坦な地形という特徴を有している．また，記録に残されている過去の津波氾濫の経験も極端に少なく，堆積物調査により明らかにされた古地震津波の履歴は，有史以降では 869 年貞観地震津波と 1611 年慶長地震津波の 2 回である [1)]．2011 年 3 月に発生した巨大地震による津波は当該沿岸域で死者・行方不明者数合わせて 10242 名，全壊・半壊・一部損壊を含む家屋被害棟数 15 万棟 [2)]，自動車被害は宮城県全域で約 14 万 6 千台，（岩手県約 4 万台，福島県約 5 万台の被害台数）[3)]，陸上に打ち上げられた船舶数は 1758 隻（七ヶ浜町・多賀城市・仙台市東部・名取市を除く）[4)]となる甚大な被害をもたらした．

2. 宮城県南部沿岸域における津波被害の特徴

当該沿岸域における津波の特徴としては，6 m 以上の高さを有する津波が高度に土地利用展開された近代都市の沿岸域に来襲したことであり，津波力による直接的な被害はもちろんのこと，自動車，船舶，コンテナ，抜根・折損樹木，そして破壊された建物瓦礫による漂流物による被害，そして公共交通機関被害が目立った．また，本地震による巨大津波と当該沿岸域の地形的特徴により，浸水範囲も広大となり，沿岸からおおよそ 3～4 km 内陸に位置する三陸自動車道や仙台東部自動車道へ津波は到達，あるいはそれ以上の浸水被害となった（図-1）．

：浸水範囲

3. 各市町沿岸における津波被害と特徴

(1) 石巻市南部・東松島市

石巻市南部の中心市街は川湊として発展してきた歴史を有し，江戸期以降，津波被害の経験が少なかったことから，旧北上川沿いや沿岸部には水産関連施設や宅地など，多彩な土地利用が行われていた．このような経緯により，沿岸部や河川沿いから市街地へ溢れた津波は甚大な被害をもたらし，河口部右岸の南浜・門脇地区では津波氾濫に加えて火災による甚大な被害が発生した．ここでは 4000 名以上の

尊い命が失われた．また，地震発生から 3 時間以降には，地盤沈下の影響を受けた中心市街地へ陸上に溢れた津波が集積し，潮位の影響も相まって数日間冠水した．公共交通機関も甚大な被害を受け，JR 仙石線沿線では車両の脱線・漂流や軌道被害が発生し，現在一部区間は運休状況にある（2011/7/10 時点）．

沿岸部においては，海岸構造物の一部崩壊や海岸林の倒伏・折損被害が確認された．一方で，石巻市渡波地区では，海岸林によりその背後の建物流出を低減していたことが確認された．また，街路樹により船舶や車などの漂流物捕捉も随所に観られた．

ここでの浸水深は沿岸部で 7 m 程度，市街地では 4 m 程度であり，浸水距離は沿岸からおおよそ 4 km 程度であった．

(2) 松島市

松島湾の湾口部に点在する小島により，津波の流入を抑制したためか，宮城県南部沿岸において津波による人的・家屋被害が最も少なかった地域である．一方で，牡蠣養殖関連の水産施設は壊滅的な被害を受けた．ここでの浸水深は 1 m 程度であった．

(3) 塩竈市・七ヶ浜町・多賀城市

東北地域の物流を担う港湾施設を擁するこの地域では，市街地や港湾施設に大きな津波被害が発生した．仙台港区では津波による直接被害に加えて，船舶，自動車やコンテナ流出が顕著であり，市街地にはそれらが津波とともに漂流し，被害を拡大させた．また，石油コンビナートから大火災が発生し，施設の機能が停止した．このために，東北地方では深刻なガソリン供給不足に陥った．津波の浸水深は沿岸部では 7 m 程度，市街地では 4 m 程度であり，浸水距離は沿岸からおおよそ 4 km 程度であった．

(4) 仙台市・名取市・岩沼市

仙台市の中心市街地から沿岸域まで，高度な土地利用が展開されている仙台市宮城野区・若林区，そして仙台空港を擁する名取市・岩沼市の沿岸部において，人的・家屋流出被害は甚大であった．防潮堤の一部崩壊，人工砂丘の消失や海岸林破壊など，海岸施設の甚大な被害を受け，さらに，１ヶ月近くに及ぶ仙台空港施設の機能停止や農地浸水による塩害など，多くの経済的損失をもたらした．ここでの津波浸水深は沿岸部で 4～6 m，浸水距離は内陸 5 km にまで及び，震災直後は津波が運んだ泥質土砂が至るところの道路を埋め尽くした．海浜砂と液状化により噴出した砂に加えて海岸付近にある農地の耕作土も剥ぎ取られ，内陸側に堆積したとみられる．

一方で，仙台東部自動車道の盛土により，漂流物捕捉や浸水抑制が確認された．平野部における津波対策を行う上で，多重堤による防御の有効性が示された事例といえる．

(5) 亘理郡亘理町・山元町

沿岸部では，人的・家屋流出被害に加えて，防潮堤の崩壊や海岸林被害が顕著であった．公共交通機関も甚大な被害を受け，JR 常磐線沿線では車両の脱線・漂流や軌道被害が発生し，現在（2011/7/10 時点）も一部区間は運休状況にある．

阿武隈川河口部においては，津波により内陸部へ大量の土砂が移動しており，汽水湖（鳥の海）が土砂で埋まるなど自然環境へも大きな影響を与えた．ここでの津波浸水深は沿岸部で 6～12 m，浸水距離は内陸 4 km にまでおよんだ．

4. おわりに

本地震津波は近代都市に来襲した最大級のものである．本津波による被害の全容把握には未だ十分ではないが，今後の津波対策の高度化に関わる重要な示唆を多く含んでいる．今後も，継続的に被害の詳細把握を行う必要がある．

謝辞：津波浸水深データの一部は仙台河川国道事務所から提供を受けました．浸水域データは株式会社パスコから提供を受けました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治（2011）：地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について．自然災害科学，29-4，501-516，2011.
2) 宮城県（オンライン）：地震被害等状況及び避難状況，http://www.pref.miyagi.jp/kikitaisaku/higasinihondaisinsai/higaizyoukyou.htm，参照 7-10-2011.
3) 河北新報（オンライン）：東北 3 県、津波被害車 23 万台超　保管場所に苦慮，http://www.kahoku.co.jp/news/2011/05/2011050601000624.htm，参照 7-10-2011.
4) 河北新報（オンライン）：陸上に船舶 3156 隻　宮城県が中間報告，http://www.kahoku.co.jp/spe/spe_sys1062/2-0110503_18.htm，参照 7-10-2011.

福島県沿岸域における津波の実態

Tsunami disaster survey results on the coast of the Fukushima prefecture

原口　強[1]・岩松　暉[2]

Tsuyoshi Haraguchi[1]，Akira Iwamatsu[2]

[1] 大阪市立大学大学院理学研究科，[2] 鹿児島大学名誉教授

1. はじめに

福島県沿岸域は，2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以下, 2011 年津波とする）によって，海岸沿いの広い範囲で津波による浸水被害を受けた．さらに福島第一原子力発電所事故に伴い，海岸線の約 4 割が警戒区域とされた（図-1）．

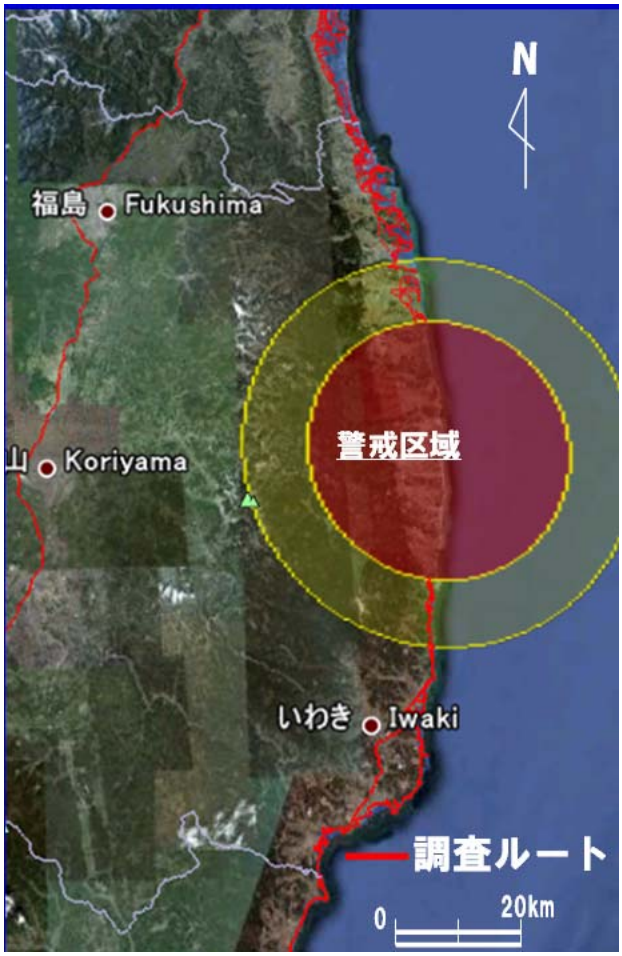


図-1　本研究で対象とした調査範囲.

2011 年 6 月 19 日 15 時の福島県災害対策本部のデータによると，死者数 1636，行方不明者数 334，避難者数 21610，住宅，建物被害（全壊＋半壊）41557 である．

筆者は青森県下北半島尻屋崎から千葉県館山市布良までの現地調査を行なった．そのうち，ここでは福島第一原子力発電所事故に伴う警戒区域を除く福島県沿岸域における津波の実態について，2011 年 5 月 27～29 日, 6 月 9～11 日に実施した現地調査結果をもとに概要を報告する．

2. 調査方法とデータの公開

調査は津波による浸水範囲を特定することを主眼として実施し，あわせて津波による被害状況を確認した．現地調査は原口が担当し，漂流物や流水痕跡などから浸水・遡上限界地点を確認・認定し，その位置をパソコン上の詳細地形図上でプロットしながら浸水位置をマッピングした．被災地の多くの地点で瓦礫撤去作業や災害復旧工事が行われて立入りが時間制限されたため，こうした地区の調査は早朝に行なった．

現地の調査結果（電子データ）は毎日インターネット経由で岩松に送り，海岸線データを組みわせて浸水範囲のポリゴンを作成した．それらのデータは電子国土，google earth，google map などで閲覧可能なファイルに変換されたのち，情報地質学会の以下のサイトから情報発信を行なった．

http://www.jsgi-map.org/tsunami/

3．津波による浸水・遡上範囲

行政区ごとの浸水範囲を図-2～図-6 に示す.

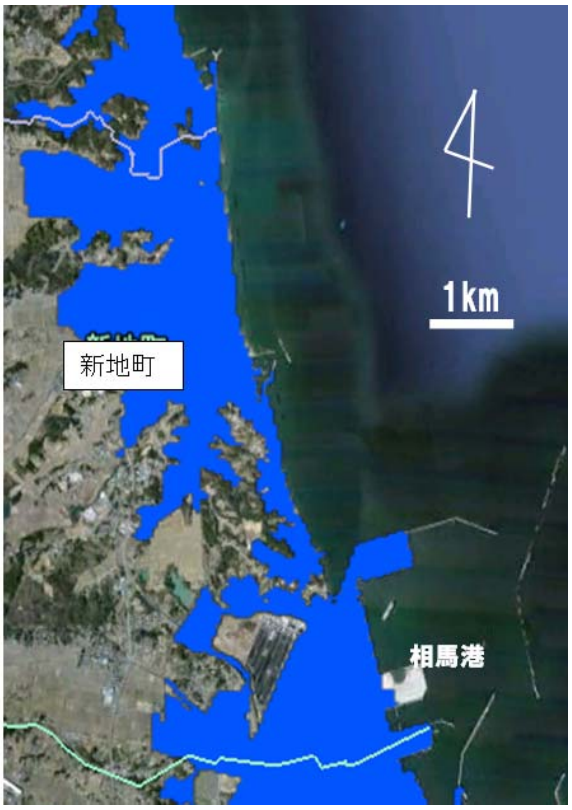


図-2　新地町の浸水範囲.

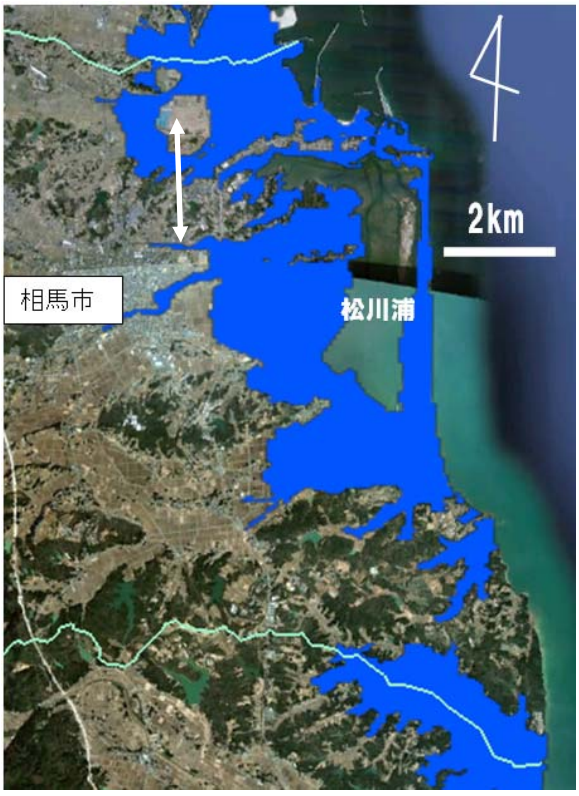


図-3　相馬市の浸水範囲.

図-4　南相馬市の浸水範囲.

図-5　広野町の浸水範囲.

図-6　いわき市の浸水範囲.

浸水範囲を見ると，新地町北部で 2km 前後，相馬港付近で約 3.1km 内陸側への遡上している．松川浦では海岸線からは 4km，松川浦の汀線からは最大 2.5km 遡上している．南相馬では海岸線から平均的には 2～2.5km，河川沿いに見ると最大 4.5km の遡上が確認されている．

広野町では海岸から 500m 程度，いわき市では鮫川沿いで最大約 2.2km，北側で 500～600m，南部に向かうほどその範囲は狭くなる傾向が認められる．

4. 浸水域との津波高さ

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ [1)]のデータを参照して，それぞれの地域で計測された代表的な津波高さを浸水域調査マップ上に記載した．

新地町～相馬市付近の津波高さ（図-7）を見ると，新地町の海岸沿いで 7-14m，相馬市の海岸沿いで 15-16m，相馬市の松川浦では 1.5-2.5m の津波高さが観測されている．

広野町～いわき市付近の津波高さ（図-8）を見ると，いわき市の海岸沿いでみると北部で 3-5m，中部で 6-10m, 南部で 4-6m の津波高さが観測されている．

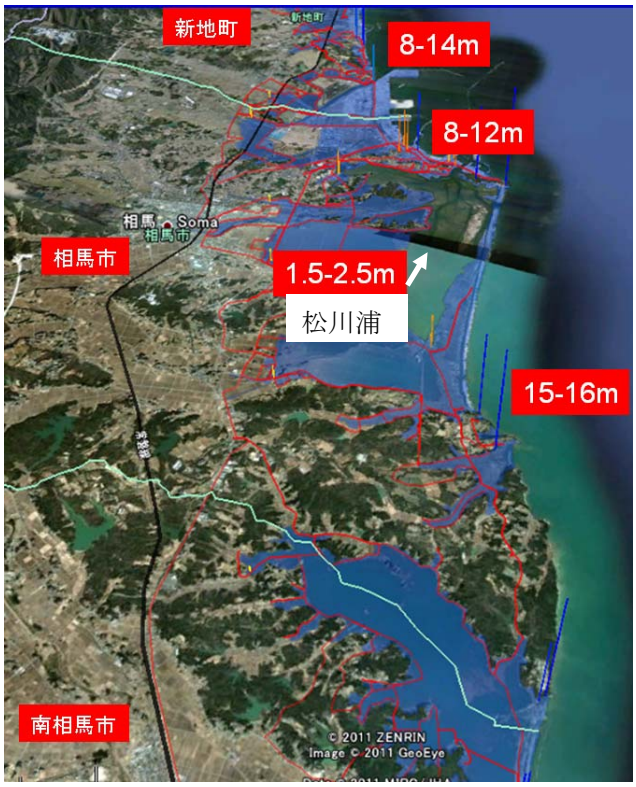


図-7　新地町～相馬市付近の津波高さ.

図-8　広野町～いわき市付近の津波高さ

松川浦では 2m 程度の津波高であるが，東側の太平洋沿岸部では 8-12m の津波が海岸線を襲い，その一部は松川浦と限る稜線沿いの低い峠を乗り越えて道路沿いに松川浦まで達している（図-9）.

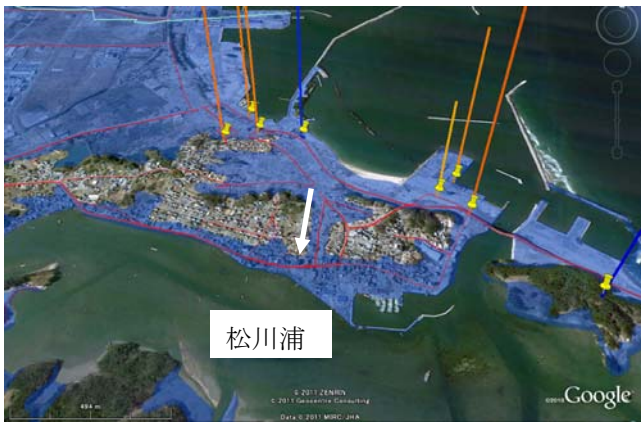


図-9　松川浦付近で見られる東側から峠を超えてきた津波（矢印）.

5．過去の津波との対比

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ [1)]でまとめられた福島県データ（図-10）でみると，これまで知られていた過去の津波高さを大きく上回る津波が沿岸域を襲ったことが確認される.

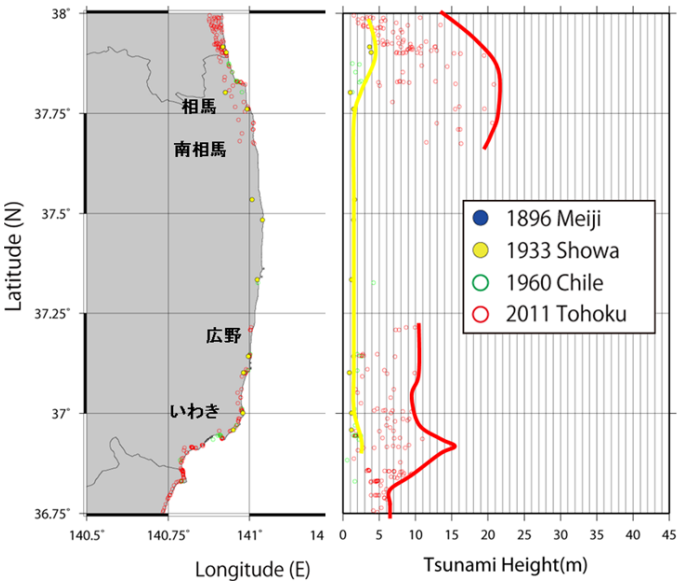


図-10　福島県内の過去の津波と 2011 年津波.

すなわち，これまで観測されていた津波はいずれも最大 5m 以下，殆ど 3m 程度であった．今回観測されたものは 10-15m に達し，北部ほど高いことが読み取れる.

6．あとがき

本文では福島第一原子力発電所事故に伴う警戒区域を除く福島県沿岸域における津波の実態について，2011 年 5 月 27～29 日，6 月 9 ～11 日に実施した現地調査結果をもとに概要を報告した.

今後，被災直後に撮影された空中写真や衛星写真を判読し，立入が困難な警戒区域部分の津波浸水状況の推定作業を行う予定である.

謝辞

本研究は，東北大学運営交付金（特別）－東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査―（代表：今村文彦）を受けて行なった．ここに記して謝意を表する.

参考文献

1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，http://www.coastal.jp/ttjt/.

東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査
―津波来襲状況の解明と被害関数構築に向けて―

Field Survey of the 2011 Tsunami Inundation in Tohoku District
Towards comprehensive understanding of tsunami disaster

越村俊一 [1]

Shunichi Koshimura[1]

[1] 東北大学大学院工学研究科　災害制御研究センター

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（M9.0）に伴い発生した津波は，福島県，宮城県，岩手県の沿岸域の人口密集地域を消滅させるほどの激甚な被害を及ぼした. 仙台平野から三陸沿岸地域にかけて，歴史・地質学的記録上の地震・津波をはるかに上回る，超巨大地震・津波であった.

宮城県の仙台平野では，海岸線から 5 km 以上内陸まで津波が浸水し，一般家屋だけでなく，仙台空港などの重要なインフラ設備にも甚大な被害をもたらした．また，宮城・岩手両県の内湾部では，既往最大外力を計画高とした高さ 10m 以上の防波堤・防潮堤をはるかに上回る規模の津波が来襲し，背後の集落が壊滅的な被害を受けた.

津波の被災地では，今後の復旧・復興計画に加え新たな津波対策の検討を行うことになる．さらに，本津波災害の事例の基づき，我が国全体の津波対策を再構築する必要も生じてくる．その際の基礎となる資料が本津波の浸水域，遡上高，および被害実態であり，我が国全体の津波対策を再構築する上で極めて重要な情報である.

本稿では，上記問題意識に基づき，東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査を実施し，特に浸水域内の被害状況と津波来襲状況の関連を明らかにするための調査結果の概要を報告する．さらに，本研究で得られた知見を統合し，我が国の新しい津波被害評価式「津波被害関数」として整備するための展望を述べる.

なお，本研究について，浸水範囲の現地調査については，東北大学，千葉工業大学，防衛大学校，関西大学, 大阪市立大学等からの計 20 名の研究者による研究グループにより実施された．その結果については，研究グループの調査結果公開ページを参照されたい [1)].

2. 津波浸水範囲の把握

本研究グループでは，津波浸水範囲の把握を第一義の目的として現地調査を実施した．津波被災地において，漂流物の漂着地点を把握，または現地における聞き取り調査により，津波の浸水限界点の緯度・経度・標高値の高精度 GPS 測位を実施した．調査は 3 月 26 日から開始し，7 月初旬の時点で岩手県・宮城県において計 1,000 地点における浸水限界点の測定を行った．GPS 測位は，まず調査地域内に私設基準点を設置し，スタティック測位後に遠方の電子基準点を用いて基線解析を実施し，私設基準点の正確な座標を得た．その後調査者が移動局を持って浸水限界点のスタティック測位を行い，私設基準

点のデータを利用して解析・補正した．ただし，現時点では日本国内のほぼ全ての電子基準点において改測を必要としており，ここでは測位を Fix した地点のみを暫定的な結果として図-1 に示す．改測終了後、座標を変更して解析することで絶対精度を確保する．結果は随時本研究グループの情報共有プラットフォーム[1)]で公開する予定である．

3. ビデオ映像の解析による津波来襲状況の解明

東北地方太平洋沖地震津波では，沿岸部の数多くの潮位観測施設が津波により破壊され，津波来襲状況の全貌は未だに分かっていない．ここでは，宮城県女川町におけるビデオ映像の解析から明らかになった津波の来襲状況について報告する．

利用した映像は，女川町民が女川町営の観光物産私設の屋上で撮影したものである（読売新聞社提供）．映像中にある津波の水位や目安となる建物の寸法，高さを現地調査により測定し（たとえば図-2），時系列としたものが図-3 である．津波が岸壁を越えたのは 15:21 頃（目撃証言）であり，およそ 15 分で第 1 波のピークに達したことがビデオの解析から明らかになった．また，映像には建物が流失する瞬間も捉えられており，その時間における浸水深・流速を計測すると，浸水深約 5m，流速 6.3m/s であったことが分かった．女川町では，特に鉄筋コンクリートおよび鉄骨造のビルの転倒・流失の事例が多く，建物に実際に作用した津波力の評価，数値シミュレーションの再現性の評価だけでなく，避難ビルの耐津波性能の要件を再考するための資料として活用できることを確認した．

4. 家屋被害地図の作成と被害関数構築に向けて

津波波浸水域内の家屋の流失状況を俯瞰して見ることはきわめて重要である．建物被害状況と，防波堤・防潮堤等の海岸施設の被害状況と関連づけることで，海岸施設がどの程度被害軽減に寄与したかなど，これまでの津波防災対策の検証を行う必要がある．また，海岸の地形，標高や土地利用などの様々な地理的条件や現地調査・シミュレーションによって得られる津波の流体力学的な諸量（浸水深や流速等）と関連づけて考えることで，地域がもつ津波に対する脆弱性が分かる．さらに，復興計画の策定にあたっては，津波被害の実態や地域の脆弱性をきちんと理解し，それらを教訓としてまちづくりに反映させていく必要がある．このような目的のもと，我々は国土地理院が公開している航空写真を用いて家屋の流失状況の判読を行った[2)]．図-4 にその一例を示す．現在，宮城県・岩手県で被害判読作業を終了し，今後は，浸水深の調査結果や数値シミュレーション結果との統合により，津波被害関数を作成する予定である．津波被害関数とは，津波による家屋被害や人的被害の程度を被害率(または死亡率)として確率的に表現し，津波浸水深，流速，波力といった流体力学的な諸量の関数として記述するものである[3), 4)]．

東北地方太平洋沖地震津波災害による被害の実態として津波被害関数をまとめ，復興計画におけるゾーニングおよびリスク評価に用いるとともに，今後の東海・東南海・南海地震津波対策に資する，我が国の津波被害予測式を構築することが今後の課題である．

謝辞

本研究は，東北大学運営交付金(特別) 東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査(代表：今村文彦)，NEDO 産業技術研究助成事業(08E52010a，代表：越村俊一)および科学研究費補助金(22681025，代表：越村俊一)の補助を受けて実施した．また，建物被害の判読には国土地理院撮影の航空写真を利用させて頂いた．住宅地図は，東京大学・空間情報科学研究センターとの共同研究の一環で，株式会社ゼンリン

から提供いただいた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 東北地方太平洋沖地震津波情報共有プラットフォーム（オンライン）：<www.tohoku-tsunami.jp>, 2011.

2) 越村俊一, 郷右近英臣, 柴山明寛, 今村文彦, 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による建物被害地図（オンライン）：<www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/tohoku2011/mapping_damage.html>,2011.

3) 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明 ：津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320--331, 2009.

4) 越村俊一, 萱場真太郎, ：1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考 --津波被害関数の構築に向けて-, 地震工学論文集, 第 10 巻, 第 3 号, pp.88-101, 2010.

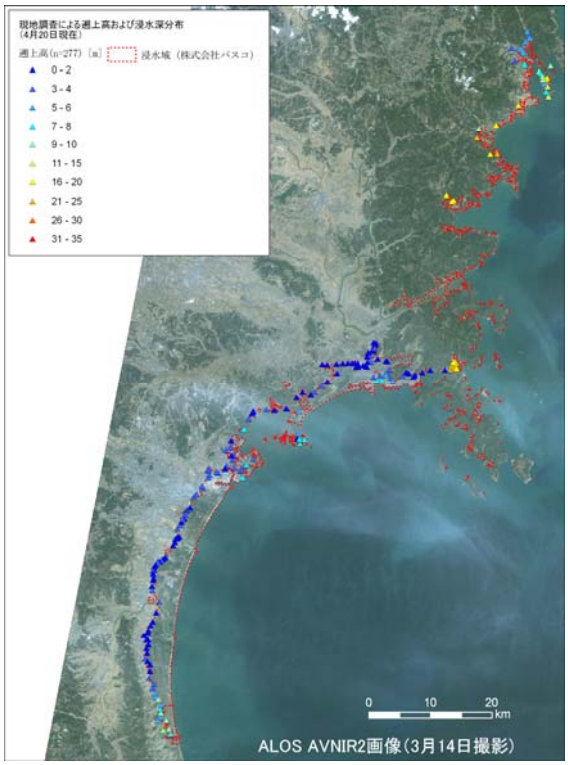


図-1 津波浸水限界および遡上高の測定結果

図-2 津波来襲時のビデオを用いた水位の計測例

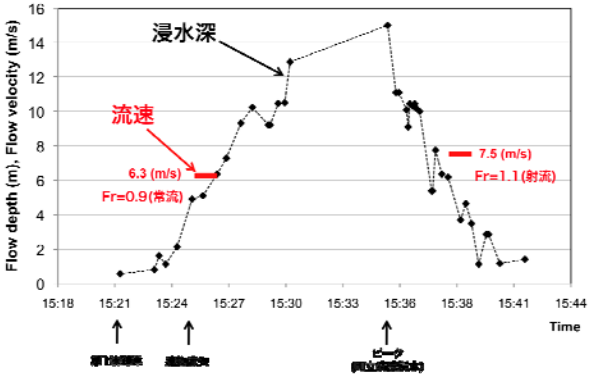


図-3 映像解析により得られた女川町の津波流況

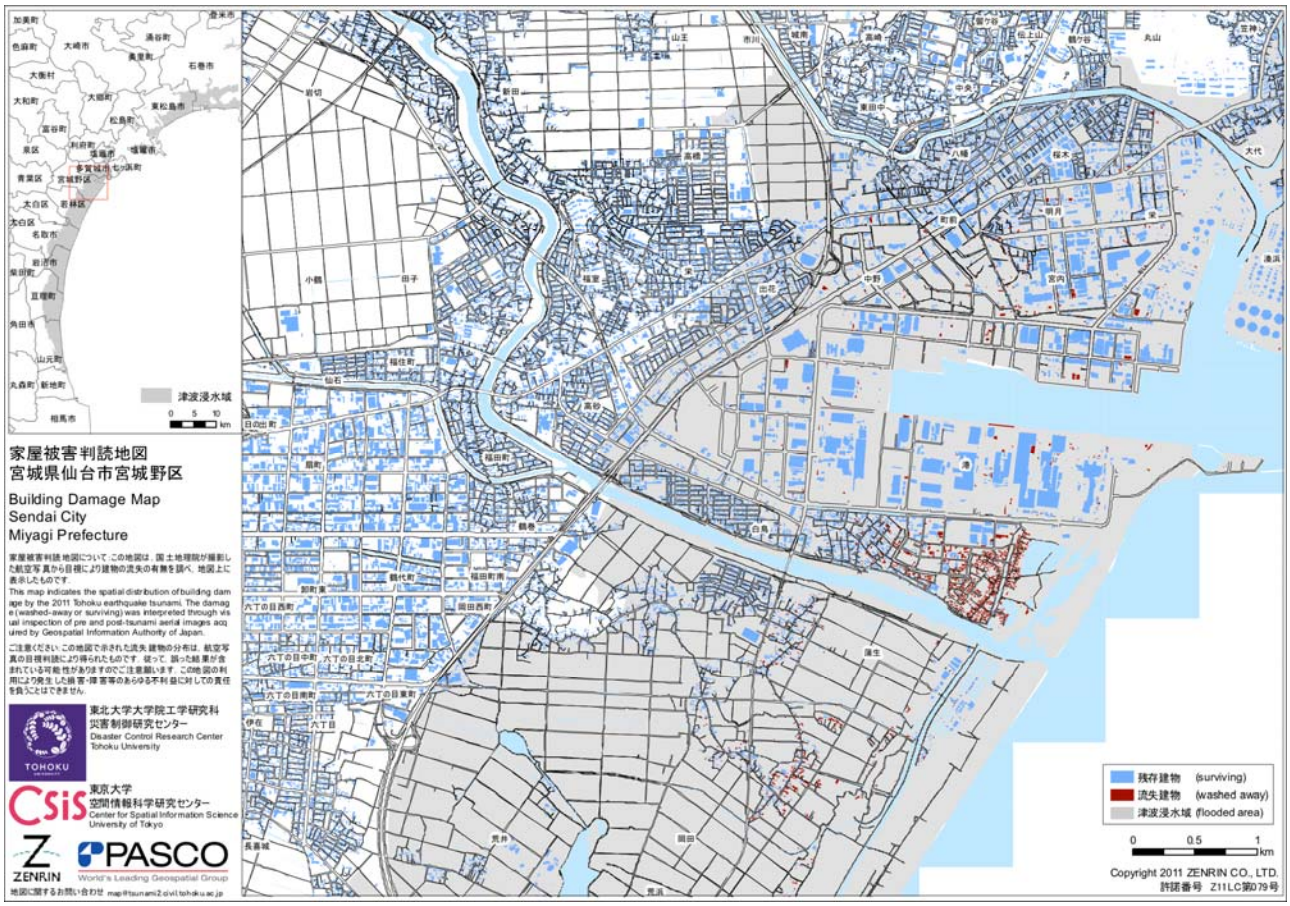


図-3　航空写真の目視判読により得られた建物被害地図 [2)]

津波の河川遡上

Tsunami Propagation into Rivers

田中　仁[1]・真野　明[1]・盧　敏[1]

Hitoshi Tanaka[1], Akira Mano[1] and Min Roh[1]

[1]東北大学大学院工学研究科

1. はじめに

東日本大震災津波の発生直後，土木学会水工学委員会では河川に関わる被災事象の調査を目的として調査団を結成し，青森県から千葉県にわたる河川を対象に調査を実施した[1)]．以下では，この調査のうち宮城県内における調査結果を中心に報告を行う．なお，これ以外の河川については，土木学会水工学委員会の HP http://committees.jsce.or.jp/hydraulic/ に公開される．

また，津波来襲時には各種機関により貴重な津波の映像が撮影されている．そこで，これらのビデオ画像をもとに河川を遡上する津波の波速を評価し，堤内地を遡上する津波との相違を明らかにした．

2. 現地調査結果

(1) 北上川

図-1　調査地点

北上川河口部には通常右岸砂州の発達が見られていたが，洪水時の流れにより砂州が完全にフラッシュされている．

図-1 地点 2 の月浜第二水門は支川大沢川からの排水，および北上川からの塩水遡上防止を目的とする水門である．現地踏査時には応急復旧がなされた後であった（図-2）．大型土嚢が見える取り付け部分が津波の流れにより侵食された．水門のうち，写真に示したメインゲート，サイドゲートについては，仮設の発電機により使用は可能である．バランスゲートについては操作が出来ず，水位差による動作がなされているのみである．

図-2　月浜第二水門の被災状況

多くの生徒の命が失われた石巻市立大川小学校に近い新北上大橋付近（図-1 地点 4）の状況を図-3 に示す．左は本川、右は支川富士川が見える．北上川側の川面の土堤部が大きく侵食され，川裏の被覆ブロックのみを残している．

図-4 は同じ場所から上流部の針岡地区を見ており，この箇所で破堤している．写真左の県道 30 号河北桃生線は富士川に架かり，その直下流で破堤が生じた．

図-3　新北上大橋の下流部

図-4　新北上大橋の上流部

また，新北上大橋の左岸側２スパンが津波に流され，約 500m 上流の河道内に残されている（図-5）．

津波は図-1 地点 9 に位置する北上大堰（図-6）を越流して，さらに上流まで伝搬している．管理事務所からの情報によれば，メッセンジャーワイヤーの切断，津波来襲に伴うゲートの浮き上がり，ゲート下流部での漏水などの被害が発生した．

図-5　新北上大橋の被災状況

図-6　北上大堰

北上大堰の設計時には津波に伴う外力は設計に考慮されていない．その後，宮城県沖地震の発生確率が高まるにつれて，津波波力の影響に関する検討がなされている．このような堰や水門についても，今後，津波に対する検討が求められる．その際，今回の被災事例は検討のための資料として貴重なデータとして位置づけられる．

北上川下流河川事務所より提供を受けた水位データから得た津波高さ分布を図-7 に示す．津波は北上大堰を越波した後に急激に波高を減じ，49km の大泉地点まで伝搬している．一方，2010 年に来襲したチリ地震津波の際には北上大堰で越波は生じず，河口側に反射しており [2)]，今回の津波と比べ規模が大きく異なっていることが確認される．

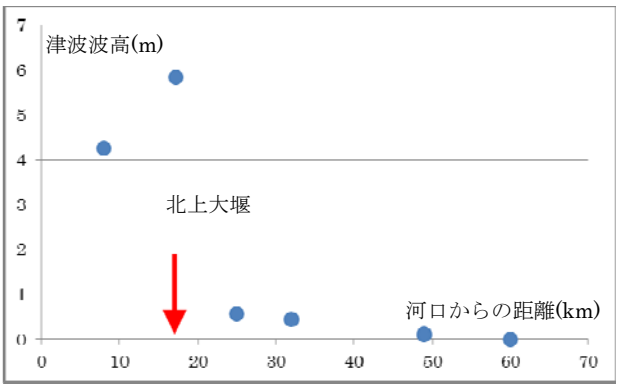


図-7　北上川沿いの津波波高変化

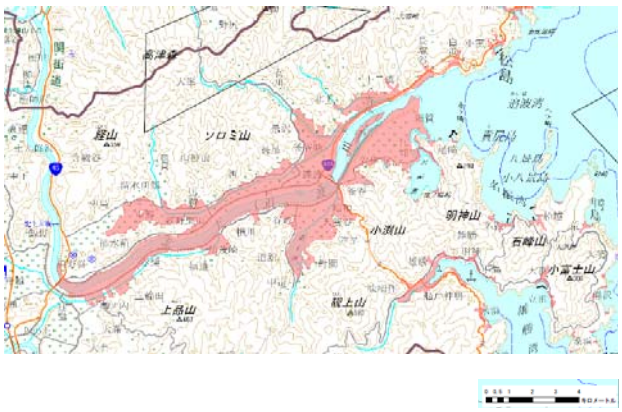


図-8　北上川沿いの浸水域 [3)]

図-8 は国土地理院の空中写真より得られた北上川周辺の浸水域である [3)]. これによれば, 河口から堤内地浸水域の最上流端までの距離は約 12km であり, 河川内においてはるかに長い距離を遡上していることが分かる.

(2) 増田川

図-9　増田川の調査地点

図-10　増田西大橋周辺の漂着物

増田川は名取川を流れる二級河川である．地点 3（河口から約 7.3km）増田西大橋の直上流部の状況を図-10 に示す．周辺の堤内地には津波が遡上していないものの，河道内には乗用車などが漂着しており，堤内地・堤外地で明らかな対照を示している．ここから約 90m 上流が津波の遡上端と判断された．

以上の調査から明らかになった津波の遡上端を，他の河川（名取川，七北田川，砂押川）とあわせて図-11 に示す．なお,「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による堤内地での浸水域も示している．いずれの河川においても，堤内地に比べ河道内の遡上距離は二倍にも及んでいる．特に，増田川においては乗用車を流すほどの津波が名取市中心市街地に及んでいることは注目に値する．また，砂押川については多賀城市内で破堤が生じ，河川からの氾濫流が被害を拡大している．今次津波の浸水域について，仙台東部自動車道の存在が被害を低減したとの報告がある．しかし，河川遡上津波に関してはこのような陸上構造物の効果はあり得ず，今後の津波防災計画の立案に際して特に検討を要する．

図-11　河川の最大遡上位置と周辺堤内地の浸水域

3. 河口砂州や潟湖の消滅 [4)]

図-12 には，河口砂州が消失した宮城県鳴瀬川を示す．中導流堤が海域に孤立し，その機能を果たしていない．鳴瀬川河口部においては図中で左から右に向かう沿岸漂砂が卓越する．しかし，写真で明らかなように河口近傍の漂砂上手側にヘッドランドが構築され，河口に向かう沿岸漂砂の供給は期待できないことから，以前のような河口砂州の回復は困難であると考えられる．このように，砂州の発達を前提とした中導流堤による河口維持が危機的な状況に陥っている．

図-13 は仙台市七北田川河口部を示している．河口左岸には蒲生干潟があったが，ラグーンと海を隔たる砂浜が完全に決壊し，以前の干潟内に砂が持ち込まれている．

阿武隈川，名取川，北上川，おいても同様な河口砂州の消失が見られた．名取川では，図-13 の蒲生干潟と同様に河口左岸の河口潟湖である井戸浦が消滅した．

これらの汽水環境は仙台湾の沿岸漁業と密接に関わっていることが知られている [5)]．例えば，仙台湾水域における有用漁業資源の一種であるイシガレイの稚魚は１月から３月のこれらの内湾・河口域に移動し，体長が 50mm から 60mm となる夏季から秋季に外海に出て行く [6)]．上記の河口潟湖が受けたダメージは，このような水産面での有用な水域が失われたことを意味する．

田中ら [2)]は 2010 年のチリ地震津波の河川遡上について報告を行っている．これによれば，顕著な遡上が東北地方の多くの河川で観測されたが，河口地形には変化が無く，開口部の地形特性に応じた遡上が見られている．一方，今回の津波は各河川の河口地形を大きく変容させており，また，遡上距離もはるかに長い．これらの点からも，2010 年のチリ地震津波と比べて大規模なものであったことが分かる．

(a) 被災前(2006 年 10 月 31 日，国土地理院)

(b) 被災後(2011 年 3 月 12 日，国土地理院)

図-12　鳴瀬川河口

4. 河道内津波伝搬速度の評価

今回の津波発生時には多くの貴重なビデオ映像が取得されている．ここでは，これらのうち仙台平野を伝搬する津波のフロント部を撮影したものを収集し，波速の評価を行った．

(a) 被災前(2011 年 3 月 6 日)

(b) 被災後(2011 年 3 月 12 日，国土地理院)

図-13 七北田川河口周辺海浜

図-14 津波波速の分布

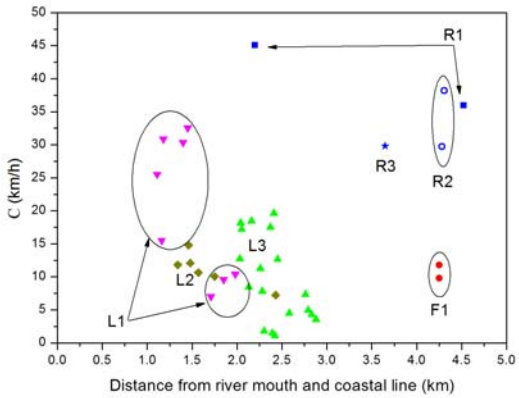


図-15 津波の波速と汀線からの距離との関係

結果を図-14，図-15 に示す．河道内（R），高水敷（F），および堤内地（L）の三つに分けて示している．これより，河道内の波速 C は 30km/h から 45km/h であり，これに対して堤内地での波速はその半分以下の値であることが分かる．ただ，例外的に名取川左岸 L1 の 1.0km から 1.5km 付近では 30km/h 程度の速度を有している．1.5km 付近には，図-14 に示すとおり県道塩釜亘理線が通っている．この道路により津波の早さが極端に低減していることがわかる．このように，仙台東部自動車道のみならず，他の盛土道路も津波被害の低減に効果を有することが確認された．

なお，河道内であっても，高水敷に上がった津波は堤内地と同程度の伝搬速度であり，低水路と異なる特性を示す．

5. おわりに

東北地方太平洋沖地震津波により生じた河川遡上について，河川構造物の被害，河川遡上特性，河口地形の大規模変化，河口処理の問題点などを報告した．これらの知見は，今後の防災計画立案や河川施設の復旧に当たって考慮すべき項目である．

また，2004 年のインド洋大津波に発生時のスリランカにおける調査によれば，大河川よりもむしろ中小河川において被害が大きく，その機構について考察が行われている[7), 8)]．今次の津波においても，大規模な破堤被害が二級河川において多く見られる．今後，このような視点での調査・研究も求められる．

謝辞

現地調査の実施に当たっては，国土交通省東北地方整備局，宮城県の支援を頂いた．また，東北地方整備局，自衛隊東北方面隊から貴重なビデオの提供を頂いた．さらに，「東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会」の補助，河川財団河川整備基金助成，京都大学防災研究所特別緊急共同研究助成を受けた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 土木学会水工学委員会:東日本大震災調査団報告, http://committees.jsce.or.jp/hydraulic/ , 2011.

2) 田中　仁・Nguyen Xuan Tinh・盧　敏・Nguyen Xuan Dao: 2010 年チリ地震津波の東北地方河川への遡上-河口地形と遡上特性との関連-, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S1627-S1632, 2011.

3) 国土交通省国土地理院：浸水範囲概況図, http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html, 2011.

4) 田中　仁・真野　明・有働恵子: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による海浜地形変化, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol. B2-68, 2012.（印刷中）

5) 田中　仁: 河口周辺における地形変化と生態系への影響, 月刊「海洋」総特集－流域・河口海岸系における物質輸送と環境・防災－, 第 36 巻, 第 3 号, pp.236-241, 2004.

6) 大森迪夫・鬣田義成: 河口域の魚. 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー」(栗原　康編), 東海大学出版会, pp.108-118, 1988.

7) 田中　仁・中川　一・石野和男・矢野真一郎・Bandara Nawarathna・安田浩保・渡邊康玄・長谷川和義: スマトラ沖地震津波によるスリランカでの被害に関する現地調査-河川被害を中心として-, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.577-582, 2006.

8) 石野和男・Bandara Nawarathna・矢野慎一郎・中川　一・田中　仁: スマトラ地震津波によるスリランカ南西部の橋梁被害調査解析と津波対策の今後の課題, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1457-1462, 2007.

関東沿岸における津波の実態と被害状況

Tsunami Disaster Survey Results on the Coast of the Kanto Region

佐々木 淳[1]

Jun Sasaki[1]

[1]横浜国立大学　大学院都市イノベーション研究院

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した M9.0 の東北地方太平洋沖地震および同 15 時 15 分に茨城県東方沖で発生した M7.7 の余震等による津波は茨城から神奈川にかけての関東沿岸にも来襲し，特に茨城から千葉の太平洋沿岸ではいくつかの地域で大きな被害が引き起こされた．また，津波は東京湾内にも伝播し，一部の漁港で浸水したり，ノリヒビが破壊されるといった被害がみられた．

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループでは津波の全体像を把握するため非常に多くの現地調査が実施されたが，本稿では本グループによる関東沿岸での調査結果速報値[1)]，信岡ら（2011）[2)]による茨城県北部における調査解析結果，および下園ら（2011）[3)]による茨城県鹿島灘海岸，千葉県九十九里海岸における調査解析結果を参考に，茨城県および千葉県の太平洋沿岸における津波の実態と被害状況を報告する．また，横浜国立大学および大成建設（株）により実施された東京湾内での調査結果の概要を紹介する．

2. 茨城県沿岸における津波について

(1) 津波の概況

遡上高と痕跡高を合わせた痕跡高調査結果[1)]を図-1 に示す．茨城県内の最大痕跡高は茨城県神栖市日川浜における浸水高 9.9 m であったが，これは特異的に高い値であり，他の浸水高は大きいもので 7m 強であった．一方，最大遡上高は北茨城市平潟町の 9.4m であり，他にも 8 m から 9 m を超えるものが 6 測点存在している．津波の痕跡高を南北にみると南に行くほど小さくなるといった傾向は読み取れず，北茨城市，日立市南部から鉾田市，および神栖市において高くなる傾向が見られると同時に，近接し測点でも痕跡高に大きな差がみられる等，複雑な分布となっていた．

茨城県沿岸における過去の大きな津波災害としては 1677 年 11 月 4 日の延宝房総沖地震津波が挙げられる．竹内ら（2007）[4)]によれば，この津波の推定浸水高は那珂港で 4.5～5.5 m，磯浜村で 5.0～6.0 m 以上となっている．茨城県は延宝地震津波や 1896 年の明治三陸地震津波を参考に検討し，2007 年に津波浸水高想定区域図を作製しているが，信岡ら（2011）[2)]によれば今回の津波の痕跡高の多くは想定の範囲内に収まっていたと考えられる．

(2) 被害規模の要因について

茨城県の東日本大震災による茨城県内の死者数は 2011 年 6 月 1 日現在で 24 名となっているが，多くの住民は迅速な避難により難を逃れた．県内最大の犠牲者 5 名を出した北茨城市では平潟町で 9.5 m の遡上高を記録しているが，平潟漁港の背後では 3.6 m とかなり小さな値に抑えられていた．同様の傾向は大津漁港でも見られ，漁港の沖防波堤の存在が津波

高さの低減に有効であったことを示唆している．また，北茨城市南部の下桜井海岸の高潮対策護岸，足洗海岸や小野矢指海岸の人工砂丘，保安林や海岸林等が有効に機能し，これらの海岸のほとんどの範囲は防護されていた．一方，河川や水路を遡上した津波による浸水もみられた．

下園ら（2011）[3]によると，大洗では浜幅の広い砂浜が形成されているが，このため海岸護岸等の天端が通常波浪に対する設計から低く設定されており，このような場所で浸水被害が大きくなったことが報告されている．

3. 千葉県太平洋沿岸における津波について

千葉県の太平洋沿岸における津波痕跡高の調査結果[1]を図-1 および図-2 に示す．九十九里海岸北端に位置する旭市において 7.9 m の最大遡上高が記録されており，九十九里海岸を南へ向かうに従い痕跡高が小さくなる傾向がみられ，勝浦以南の痕跡高は 2 m 未満であった．また，九十九里海岸の中央部で痕跡高が小さくなる傾向が認められる．

7 月 6 日現在で死者 13 名（千葉県全体の死者は 20 名）を出し，最も人的被害の大きかった旭市では，飯岡海岸で 6～8 m の痕跡高が記録され，海岸道路に面した市街地では家屋が流出する等，甚大な被害が発生した．浜幅の広い飯岡海岸には砂丘や保安林が存在せず，天端高 4.5 m の海岸堤防があるのみであり，津波は容易に堤防を乗り越え，市街地に越流した．飯岡海岸は沖合に向かって舌状に浅い地形となっており，屈折により津波のエネルギーが集中しやすく，九十九里海岸でも特に被害の大きくなることが知られている[5]．

九十九里海岸では旭市を除く広範囲に後浜砂丘が形成されており，また，保安林の海側には護岸や土堤が設置されているところもあり，これらの砂丘や土堤の高さが十分にある大部分の海岸では津波による浸水被害は軽微であった[3]．一方，九十九里海岸には中小河川が多く存在し，これらの河道から進入した津波による堤防や橋の損傷と浸水がみられた．特に山武市の木戸川河口（写真-1）では広範囲に堤防が被災しており，浸水面積が九十九里海岸で最大となった[3]．

写真-1：木戸川河口部の被災した堤防（6 月 21 日撮影）

写真-2:船橋漁港内における津波による倉庫壁面の浸水跡（3 月 20 日撮影）

千葉県では九十九里海岸に対し 1703 年 12 月 31 日の推定 M8.1 の元禄地震津波による被害想定を行っていた．佐竹ら（2008）[6]の数値シミュレーションによれば，元禄地震津波による九十九里海岸での津波高は 5 m 程度と推定され，今回の津波と同程度であったと推察される．九十九里海岸における現況の海岸堤防は高波・高潮を計画外力として設置され

たものであり，それらの天端高は概ね 4.0 m であった．既述のように一部地域では大きな被害が発現したものの，大部分の海岸における浸水被害は軽微であった．一方，九十九里海岸以南，特に勝浦以南では今回の津波による痕跡高は 2 m 以下であったが，元禄地震津波では 8～10 m を超えるような津波高が推定されている [6]．

写真-3:木更津漁港における津波よって岸壁に打ち上げられた泥と浸水により破損したアサリ加工場（3 月 20 日撮影）

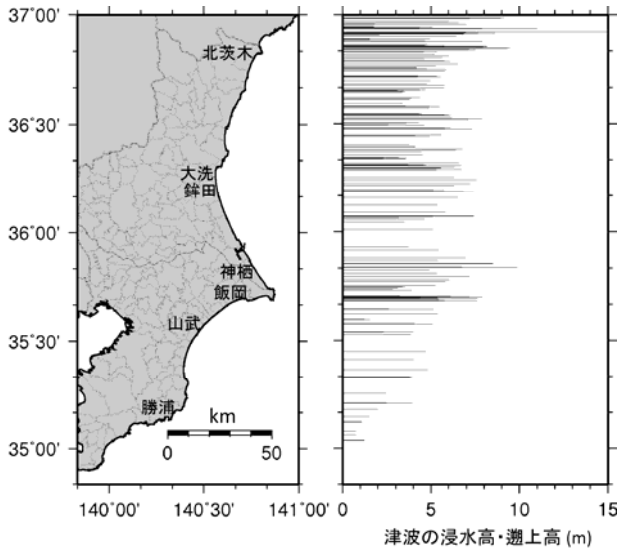


図-1：茨城県および千葉県太平洋沿岸における津波浸水高・遡上高の調査結果 [1]

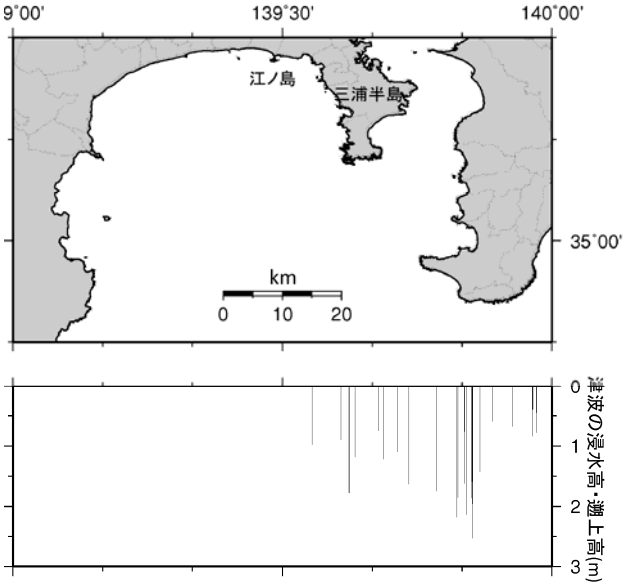


図-1：千葉県南部および神奈川県沿岸における津波浸水高・遡上高の調査結果 [1]

4. 東京湾沿岸における津波について

津波は東京湾にも伝播し，17 時 40 分頃に横浜港で約 1.6 m，東京港晴海で 1.5 m の津波高が観測された．東京湾における過去の津波高の推定では 1703 年の元禄地震津波が最大級のものと考えられ，横浜で 3～4 m，両国で 1.5 m，浦安および船橋で 2.0 m といった値が推定されている [7]．横浜国立大学と大成建設（株）の研究チームが 3 月 20 日実施した痕跡高調査では，船橋漁港で 2.8 m の浸水高，木更津漁港では 2.5 m の浸水高を記録（共に潮位補正済み）する等，場所によっては元禄地震津波の推定値を上回る値となっていた．その結果，船橋漁港では岸壁上で浸水したが（写真-2），陸閘を閉めたこともあって周辺住宅への浸水は免れた．一方，木更津漁港の一部でも岸壁上に浸水し，アサリの加工場に被害が出た（写真-3）．木更津港においても若干の浸水がみられたが，これは護岸の越流によるものではなく，側溝からの内水氾濫であった．

東京湾内のいくつかの漁港で浸水による被害があったが，これに加え，船舶の横転やノリヒビの破損といった被害が広範囲にみられた．特にノリヒビに

ついては三番瀬,木更津,富津等で被害が確認され，特に三番瀬と富津の被害が大きかった．被害の発生場所には一つのノリ漁場の中でも偏在がみられ，津波による大きな流速が非一様に発現することと関係しているものと推察される．

5. 神奈川県沿岸における津波について

図-2 に神奈川県の三浦半島周辺における，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる津波痕跡高（浸水高および遡上高）の調査結果[1)]を示す．なお，神奈川県内では江ノ島（図-2 には示されていないが，江ノ島ヨットハーバーによる津波高の計測結果が存在する）以西のデータは，データ参照時点では存在しなかった．津波の高さはいずれも 2 m未満であり，漁港内の船舶やノリヒビを除いてほとんど被害は発生しなかったものと思われる．

6. まとめ

関東沿岸では茨城県および千葉県旭市で津波による大きな被害がみられ，遡上高は最大で 10 m 近くに達していた.また,中小河川を遡上した津波により，河口の堤防が破壊されたり，周辺市街地が浸水したケースが多々見られた.これらの地域では 1677 年の延宝房総沖地震津波や 1703 年の元禄地震津波が最大級の津波と考えられるが，今回の津波はこれらと同程度か下回るものであった．一方，東京湾では船橋漁港や木更津漁港等で浸水被害が発生しており，元禄地震津波による推定値を上回るような痕跡高が記録された場所もあった．神奈川沿岸では全体像をとらえたデータは収集できなかったが，三浦半島でも 2 m以下であり，ほとんど被害は発生しなかったものと推察される．

謝辞

茨城県および千葉県における津波について，東京大学の佐藤愼司教授および茨城大学の信岡尚道准教授にご教示いただいた．記して謝意を表する．

参考文献

1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:調査結果速報値，http://www.coastal.jp/ttjt/，参照 2011-07-10.
2) 信岡尚道，鵜崎賢一，松浦健郎，鍋谷泰紀:2011 年東北地方太平洋沖地震による茨城県北部の津波，土木学会論文集 B2，Vol. 67，No. 1，2011.（投稿中）
3) 下園武範，高川智博，田島芳満，岡安章夫， 佐藤愼司， 劉 海江 ：2011 年東北地方太平洋沖地震津波による茨城県･千葉県沿岸域における被害，土木学会論文集 B2，Vol. 67，No. 1， 2011.（投稿中）
4) 竹内仁，藤良太郎，三村信男，今村文彦，佐竹健治，都司嘉宣，宝地兼次，松浦健郎:延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸～福島県沿岸での痕跡高調査，歴史地震，No. 22，pp. 53-59，2007.
5) 都司嘉宣：千年震災，ダイヤモンド社，276pp.，2011.
6) 佐竹健治，宍倉正展，行谷佑一，藤良太郎，竹内仁:元禄関東地震の断層モデルと外房における津波，歴史地震，No. 23，pp. 81-90，2008.
7) 羽鳥徳太郎：東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東（1703），安政東海（1854）津波とその他の津波の遡上状況，歴史地震，No. 21，pp. 37-45，2006.

東海地方における津波特性

Tsunami Characteristics on the Coast of Tokai Region

川崎浩司[1]・鈴木一輝[1]

Koji Kawasaki[1] and Kazuki Suzuki[1]

[1]名古屋大学　大学院工学研究科　社会基盤工学専攻

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震によって巨大な津波が発生し，東北地方沿岸部では甚大な災害が引き起こされた. さらに, 全国各地の沿岸部に津波が襲来し，様々な被害が発生した.

東海地方では，**表-1** に示すように地震発生直後に津波注意報が発令され，15 時 30 分には津波警報へ引き上げられた．15 時 41 分には，下田港で津波の第 1 波が観測され，その後，東海地方各地に津波が襲来した．東海地方では，津波による人的被害は皆無であったが，三重県沿岸部において津波による物的被害が報告された.

本稿では，東海地方の沿岸域における津波特性および津波被害を議論する.

表-1　東海地方における津波警報等の経過 [1)]

		静岡県	愛知県外海	伊勢・三河湾	三重県南部
11日	14:49	津波注意報	津波注意報		津波注意報
	15:14			津波注意報	
	15:30	津波警報	津波警報	津波警報	津波警報
	16:08	大津波警報			
	18:47				
	21:35				
	22:53				
12日	3:20				
	13:50	津波注意報	津波注意報	津波注意報	
	20:20			解除	津波注意報
13日	7:30	解除	解除		
	17:58				解除

2. 東海地方沿岸域の地形特性

津波被害が甚大であった三陸海岸と同様，三重県太平洋沿岸部から伊勢湾湾口部にかけては，複雑な海岸線をもつリアス式海岸が形成されており，従来から甚大な津波被害を被ってきた.

また，東海地方には，伊勢湾，三河湾や駿河湾といった広大な湾が存在している．伊勢湾は，国内最大級の内湾であり，平均水深は 20m と浅い．また，隣接する三河湾も平均水深は 9m と伊勢湾と同様に浅い内湾である．一方，駿河湾は日本で最も深い湾であり，最大水深が 2500m である.

3. 東海地方における津波特性

図-1 に示す検潮所で観測された第 1 波と最大波の地震発生から到達時までの経過時間および津波高さを**図-2** にそれぞれ示す.

東海地方では発生から 55 分後に下田港で津波の第一波が最初に観測された．その後，愛知県太平洋

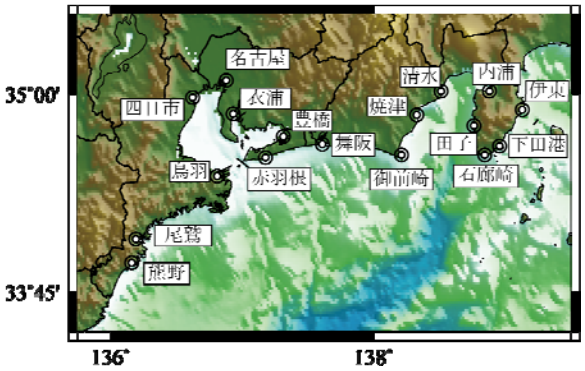


図-1　東海地方における津波観測所

沿岸，三重県南部の順に津波が襲来しており，第 1 波の到達時間は震源からの距離が近いほど早くなっている．ただし，伊勢・三河湾では湾奥部に到達するまでに，湾口部での津波到達から 1 時間程度経過している．これは，伊勢湾・三河湾の水深が比較的浅いためである．また，下田港を除き，静岡県沿岸部では，第 1 波から最大波到達までの間隔が短い．一方，伊勢湾・三河湾および三重県南部では間隔が 1 時間以上あり，特に三河湾の湾奥部に位置する衣浦では地震発生から 4 時間以上経過した後に最大波が観測された．

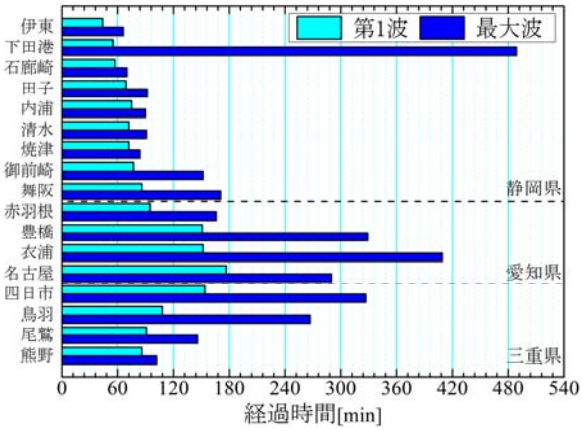
図-2(b)に示す津波高さをみると，駿河湾では第 1 波と最大波の津波高の差がわずかである．一方，伊勢湾・三河湾湾内やリアス式海岸を有する鳥羽や尾鷲では，第 1 波と最大波の差が大きいことがわかる．特に，鳥羽では東海地方最大の 1.7m の津波が観測されている．これは，リアス式海岸によって津波が増大したためであると考えられる．また，伊勢湾湾奥部に位置する名古屋においても 1.0m と東海地方において比較的高い津波が観測された．

4. 東海地方における津波被害

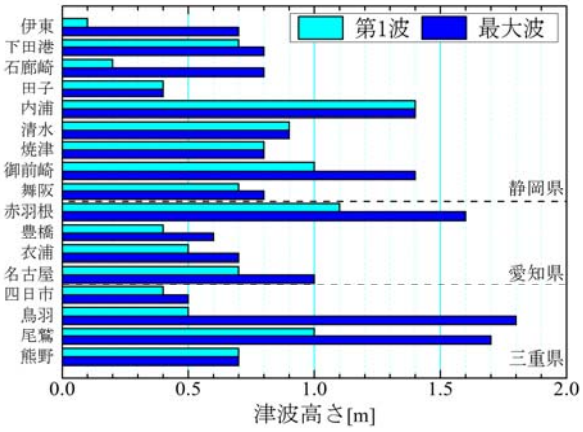
東海地方沿岸域においては，甚大な津波被害はほとんどなかった．しかしながら，三重県では津波による人的被害はなかったものの，**表-2** に示すように物的被害が発生した．家屋被害は軽微であったが，船舶が沈没，流出するといった被害が生じた．また，多数の筏や網，漁業施設が破壊・流出したといった被害が報告されている．

5. おわりに

本稿では，東海地方における津波の特性と被害について議論した．今後は，東北地方太平洋沖地震による津波の数値解析を行い，より精緻に津波の伝播特性について検討する予定である．



(a) 地震発生から到達までの経過時間



(b) 津波高さ

図-2 東海地方における津波観測値 [2)]

表-2 三重県における津波被害 [3)]

住家	床上浸水［件］	1
	床下浸水［件］	0
非住家	床上浸水［件］	1
	床下浸水［件］	9
船舶	沈没　［隻］	17
	流出　［隻］	4
田	冠水　［ha］	2.7

参考文献

1）気象庁：平成 23 年 3 月の地震活動及び火山活動について，[online]http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/08a/1103jishin.html，2011.

2）気象庁：津波情報：津波観測に関する情報，[online]http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/observation_04_20110313180559.html，2011.

3）三重県：県内の被害状況一覧，[online]http://www.pref.mie.lg.jp/KOHO/HP/tohoku/higai/1103131800higaishukei.pdf，2011.

構造物による津波防護機能とその限界

Performance and Limitation of Tsunami Defense by Structures

佐藤愼司

Shinji Sato

東京大学大学院　工学系研究科　社会基盤学専攻

1. はじめに

津波対策は構造物によるハード対策と警報・避難などによるいわゆるソフト対策を組み合わせて総合的に進められてきた．今回の津波の規模は，場所によっては構造物の設計条件をはるかに上回るものであったため，全壊・流出した施設も多く，構造物による防護の限界を指摘する声も多い．今後の復旧に向けて，今回の津波において施設が果たした役割については，土木学会津波特定テーマ委員会で詳細調査を実施中であるが，本稿では主として筆者らが実施した調査に基づいて，構造物防護の効用と限界について議論することとする．

2. 構造物の機能と接続部における被災

千葉県九十九里浜から福島県いわき市にかけての 200km を超える延長の海岸では，来襲した津波の海岸線での高さと，主として高波を対象に設計された海岸堤防の高さがほぼ同程度であったため，多くの海岸で浸水被害を軽減することができた．**図−1** は，千葉県九十九里浜において，後浜に設置された土堤の頂部（天端高さ T.P.+6.2m）をわずかに乗り越えた津波痕跡を示したものである．津波は右側海浜境界に設置されている T.P.+4m の堤防を乗り越えて，一部が土堤を乗り越え，左側（陸側）の松林の柵が一部倒れているが，被害は軽微であった．海岸堤防と二重の防御となっている，高さが十分な土堤が海水の侵入を軽減した例と考えられる．

図−1 土堤頂部をわずかに乗り越えた津波（千葉県九十九里浜野栄付近，3 月 18 日撮影）

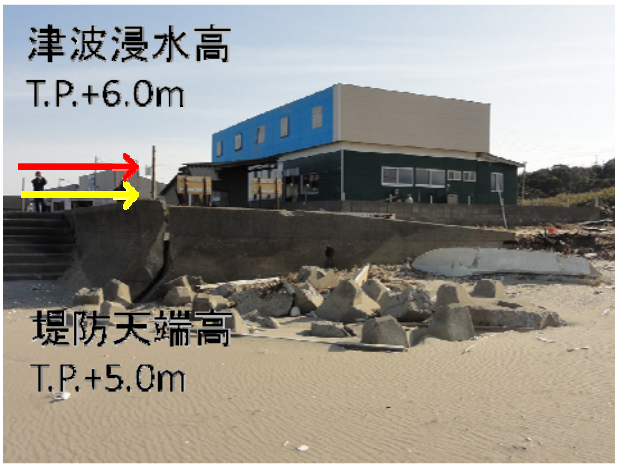
後浜砂丘の津波防護効果は，九十九里浜から波崎海岸に至る広い範囲で確認された．一方で，後浜が切れている河口や海浜への進入路付近では津波の集中的な侵入が見られた．九十九里浜の木戸川河口周辺の浸水被害は，河口から津波が侵入した典型的な例の一つである（下園ら，2011）．木戸川河口部は沼地が点在する低湿地帯であり，河道と沼地を分離する形で河川堤防が築かれている．この後背低地は 5m を越える砂丘によって浜から隔てられているが，河道によってほぼ直角に砂丘が寸断されている．

河道から侵入した津波は，河川堤防を破壊しながら両側に広がる低地に氾濫するとともに（**図−2**），河川堤防を越流する形で，海岸に平行に走る道路に沿って氾濫し，道路沿いの民家等を中心に床上浸水被害をもたらした．河口部に到達した津波の高さは海岸での計測結果から 5〜6m と推定される．したがって，河道以外にも砂丘が津波高さより低いところが見られ，そのような個所からも津波は砂丘を越流する形で後背地に侵入したものと考えられる．

図−2　木戸川河口部で破堤した河川右岸堤防（3 月 18 日撮影）

これに対し，九十九里浜の新堀川河口部には，水門が設置されているため，浸水被害が小さく抑えられた．河口部の水門は，内水氾濫を防ぐ目的で設置された排水機場の一部である．河口部に来襲した津波の高さは海岸部での痕跡から 5〜6m であり，木戸川の場合とほぼ同規模であった．水門の天端は，最大津波痕跡高よりも 1m 程度低かったため津波はゲートを越流したが，河道周辺の浸水深は小さく，近隣家屋の被害の多くは床下浸水にとどまった．九十九里浜におけるこれらの事例は，後浜に形成される十分な高さの自然地形が海岸堤防と合わせて防護機能を果たすこと，および，中小河川の河口部では，相対的に弱い強度の河川堤防が破壊され，浸水被害が拡大すること，さらに，河口部の水門が越流を許容する場合でも浸水被害の軽減に効果があることなどを示す貴重な事例である．

図−3 は，茨城県鉾田市京知釜海岸において，一部損傷した海岸堤防（天端高さ T.P.+5.0m）周辺を示したものである．周辺の津波痕跡から堤防付近の浸水高は T.P.+6m 程度であるが，写真手前の揚船場で海岸堤防の線形が屈曲しており，この部分では背後に浸水被害が生じている．これに対し，堤防背後では，地盤から 1m 程度の浸水は生じているが，建物の流出などの被害は見られず，堤防が越流水の流勢を弱めるのに効果的であったものと推察される．

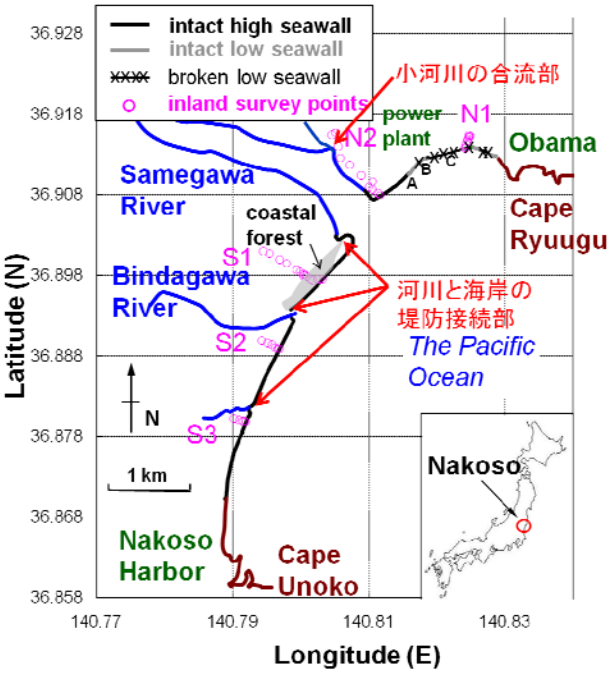


図−3　一部損傷した海岸堤防による浸水防御（茨城県鉾田市京知釜海岸，3 月 19 日撮影）

茨城県北部から福島県いわき市にかけては，設計波が高くなるため，海岸堤防の天端高さも T.P.+5m〜+6m 程度と高く設定されている．今回の津波の堤防付近における浸水高は 5m〜9m 程度であり，堤防を越流している区間が多く見られた．福島県いわき市の勿来海岸では，河口部や堤防天端不連続部などで被災の程度に明瞭な差異が見られたため，佐藤ら(2011)を参照しながらその特徴について議論する．勿来海岸は**図−4** に示すように全長約 7km のポケットビーチであり，来襲した津波の高さは T.P.基準でほぼ 7m 程度であると考えられるが，堤防の線形や天端高さに不連続な部分があり，これらによって被災の程度に明確な差が見られた．

図−5 は鮫川河口左岸の海岸堤防背後の状況であ

る．地盤高は T.P.基準で約 2m であり，天端高 T.P.+6m の海岸堤防が整備されている．堤防位置での津波の浸水高は T.P.+7m 程度であるので，約 1m の深さで越流していることになる．海岸堤防裏法に繁茂していた蔓植生が剥落していることから，越流した津波の流れの強さを確認できるが，背後の民家は玄関までしか浸水しておらず，玄関脇に駐車していた自動車も浸水を免れている．堤防の効果により，浸水量が大幅に軽減されたうえに，海岸部の標高が高いいわゆる逆勾配地形であるために，越流水が陸地奥の標高の低い部分に急速に流れていったためであると考えられる．



図−4 福島県いわき市勿来海岸と海岸堤防

図−5 鮫川河口部左岸の海岸堤防（勿来海岸，4 月 1 日撮影）

勿来海岸では，河川堤防と海岸堤防の接続部などで被害が集中した．**図−6** は，鮫川河口右岸で，海岸堤防（T.P.+5.5m）が水門を介して河川堤防（T.P.+5m 程度）に接続している箇所の状況である．河川堤防は表法だけがコンクリート被覆されており，水門取り付け部は天端高さが海岸堤防に比べて約 1m 低い．津波は水門ゲートを越流するとともに土堤天端から裏法を洗掘し，海岸背後の低地の広域を浸水させた．

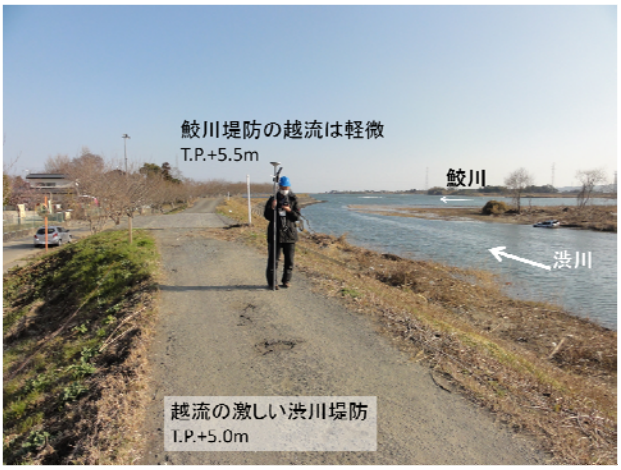
図−6 鮫川河口部右岸における河川堤防の洗掘と津波の氾濫（勿来海岸，4 月 1 日撮影）

図−7 蛭田川河口部左岸における河川堤防の破堤（勿来海岸，国土地理院 3 月 12 日撮影画像に加筆）

図−8 関田北地区における小河川河口部における海岸堤防の破壊と浸水被害（勿来海岸，3 月 25 日撮影）

河川堤防の破壊は**図−7** に示すように蛭田川でも見られた．周辺の海岸堤防は，天端通路から裏法部が破壊しているものは部分的に見られたが，堤防躯体に損傷は見られない．一方，蛭田川河口部では，海岸堤防の線形が凹む形となっているが，これが津波を集中させることになり，左岸側で土堤の河川堤防（天端高さ T.P.+4.5m）の破堤を招いたものと推察される．

図−8 はさらに南側の関田北地区の小河川の河口部である．同所では，海岸堤防の線形が凹んでおり，河口には水門が設置されている．津波は堤防凹部に集中し，堤防天端通路を破壊するとともに一部の民家を破壊した．



図−9 渋川が鮫川に合流する地点（福島県いわき市，4 月 2 日撮影）

河川堤防からの津波の越流は，河川合流部でも見られた．**図−9** は，渋川が鮫川と合流する地点における左岸堤防天端の状況である．写真手前の渋川では堤防天端高さが T.P.+5m であり，鮫川の堤防天端高より約 50cm 低い．渋川両岸の浸水被害が大きかったことから，河川を遡上した津波は，天端高の低い渋川区間で越流量が大きくなったものと推察された．

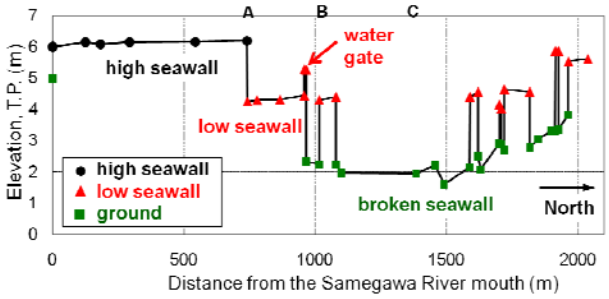
以上の様に福島県いわき市勿来海岸の南部地域では，堤防を 1m 程度越流する規模の津波に対して，海岸堤防と河川堤防の接続箇所や小河川との合流部，さらには海岸堤防の線形が凹んでいる箇所などで集中的な浸水被害が生じた．俯瞰的な視点で構造的な弱点を補強する総合的な対策が重要であると思われる．

3. 海岸堤防の損傷と倒壊

鮫川河口から北部の海岸では，堤防の損傷と倒壊が多く見られた．**図−10** は鮫川河口部から北側約

2km の区間の海岸堤防の天端高さと倒壊状況を示したものである．河口から約 700m の A 地点までは天端高 T.P.+6m の高い堤防が整備されているが，それより北部では天端高さが低くなり，T.P.+4.2m～5m 程度となる．高さが低い区間の堤防は，ほとんどの区間で倒壊しており，津波の浸水高が T.P.+7m 程度であることを考慮すると，越流水深が 3m 近くなると転倒する堤防が多くなるものと考えられる．

筆者らが岩手県で実施した調査ではさらに越流水



図−10 勿来海岸北部における海岸堤防天端高さと堤防の破壊状況

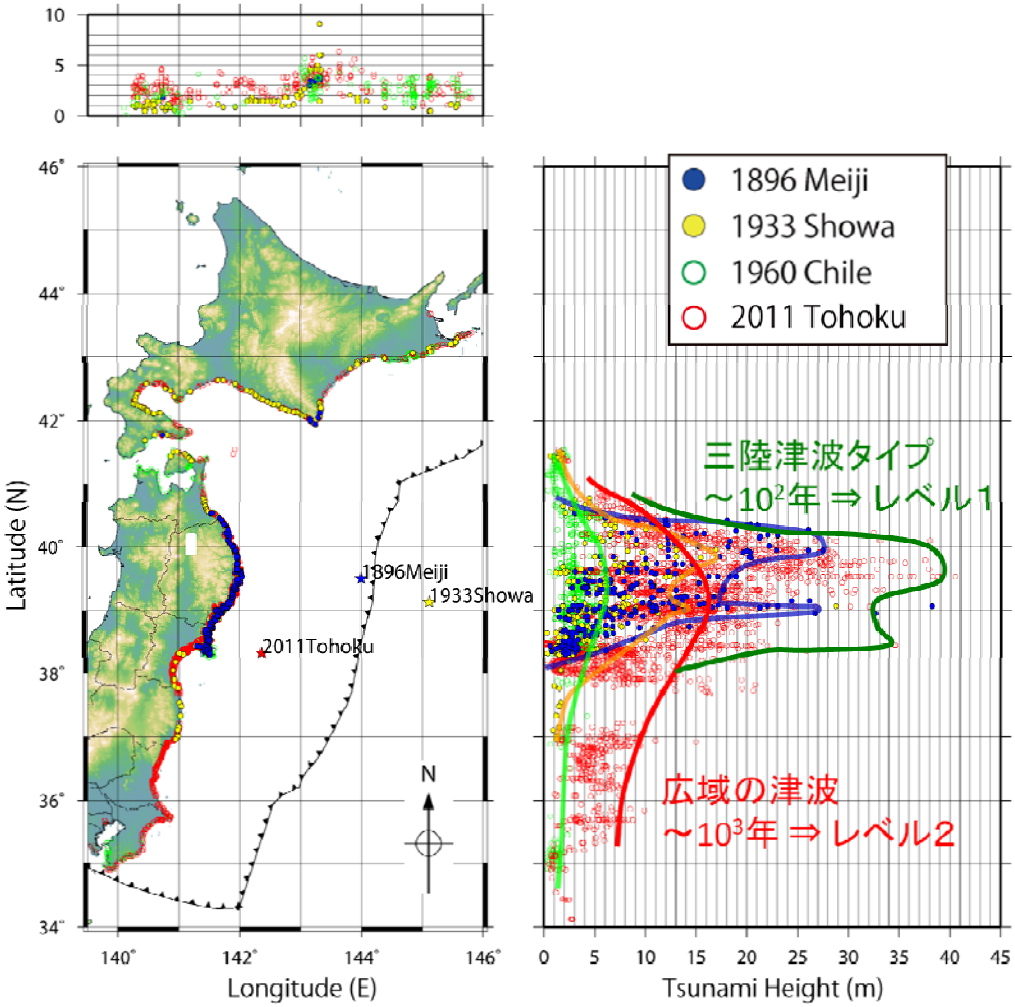
図−11 勿来海岸北部岩間地区で倒壊した海岸堤防（4 月 1 日撮影）

深が大きくなる事例が見られ，大規模な倒壊に至っている事例が多く見られた．千葉県から福島県までの調査において，堤防が倒壊を免れた場合には，越流量を軽減する効果が確認されたため，今後はある程度越流した場合にも倒壊までには至らない粘り強い堤防構造の具体化を検討する必要がある．そのためには，詳細かつ網羅的な事例分析を通じて，堤防の破壊形態を類型化するとともに破壊率を定量化する必要がある．

4. 今後の施設設計のあり方

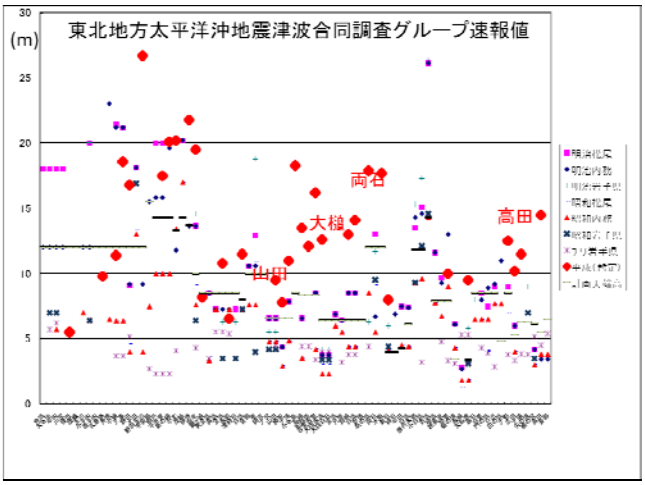
図−12 は合同調査グループによる痕跡高速報値を過去の津波と比較したものである．痕跡高は，チリ地震津波，昭和三陸津波，明治三陸津波の順に高くなり，今回の津波痕跡が最大値となっている所が多いことがわかる．また，明治，昭和の三陸津波の痕跡は岩手県から宮城県北部に集中しているのに対し，チリ地震津波は広い範囲に影響していることも確認できる．佐竹ら(2011)は，今回の津波の特性は，明治三陸タイプと貞観タイプの地震が同時に起きたことにより説明できることを示している．痕跡高の分布を大まかに二つに分けて，広域タイプの波源による津波（赤実線）と三陸タイプの波源による津波（緑実線）に分けるとすると，チリ地震津波の分布に相似な広域分布と三陸津波の特徴を示す狭い領域の分布に分かれる．貞観地震クラスの津波の再現期間は千年程度であるため，耐用年数が 50 年程度である現在の構造物でこれに対応するのは非現実であり，構造物の耐用年数が飛躍的に伸びない限り，百年程度の再現期間を設計外力の基準（レベル１，「防護津波レベル」の概念）とするのが合理的である．再現期間がはるかに長い外力は海岸堤防などの海岸保全施設の設計には直接用いないが，レベル２，「減災レベル」として具体的に設定し，地域の防災計画や，特に重要な防災施設等の設計に活用するのが望ましい．

図−13 は岩手県の海岸堤防に関して，天端高さ設定の根拠となっている痕跡高を，計画天端高，および今回の津波の堤防位置付近での痕跡高速報値と合わせて示したものである．図の左側の北部では，今



図−12 津波の痕跡高の分布と津波規模の設定（土木学会津波特定テーマ委員会の作業で，鴫原氏＠防衛大が作成した図に加筆，今回の津波の痕跡高データは，東北地方太平洋沖地震津波合同調査チームによる速報値）

回の津波痕跡高は明治三陸津波の痕跡高と同程度かそれ以上である．これに対し，中部および南部では，今回の津波痕跡高が既往のものよりはるかに高く，これらを津波設計外力の設定にどのように反映すべきかが，問題となる．これらの痕跡高分布が，再現期間の長い貞観タイプの波源に特徴的なものなのか，あるいは，再現期間が百年程度の三陸津波タイプの波源でも再現されるものなのか，今後，数値計算などで分析を進めていく必要がある．



図−13 岩手県における海岸堤防位置付近の津波浸水高と堤防天端高さの沿岸分布（今回の津波の痕跡高データは，東北地方太平洋沖地震津波合同調査チームによる速報値から筆者が選択）

参考文献

1) 下園武範・高川智博・田島芳満・岡安章夫・佐藤愼司・劉 海江：2011 年東北地方太平洋沖地震津波による茨城県・千葉県沿岸域における被害，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 67，No. 3, 2011.
2) 佐藤愼司・武若 聡・劉 海江・信岡尚道：2011 年東北地方太平洋沖地震津波による福島県勿来海岸における被害，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 67，No. 3, 2011.
3) 佐竹健治・酒井慎一・藤井雄士郎・篠原雅尚・金沢敏彦: 東北地方太平洋沖地震の津波波源，科学，Vol. 81, No. 5, pp. 407-410，岩波書店，2011 年 5 月.

仙台平野を中心とする津波被害実態と堆積物調査報告

Preliminary survey results of the tsunami damage and deposits at the Sendai Plain

後藤和久 [1,2]・西村裕一 [3]・菅原大助 [2]・阿部朋弥 [4]・中村有吾 [3]，藤野滋弘 [5]・原口強 [6]

Kazuhisa Goto[1,2], Yuichi Nishimura[3], Daisuke Sugawara[2], Tomoya Abe[4]

Yugo Nakamura[3], Shigehiro Fujino[5] Tsuyoshi Haraguchi[6]

[1] 千葉工業大学惑星探査研究センター，[2] 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター，

[3] 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター，[4] 名古屋大学大学院環境学研究科，

[5] 筑波大学大学院生命環境科学研究科，[6] 大阪市立大学大学院理学研究科

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以下, 2011 年津波とする）の一つの特徴は，過去に同地域を巨大津波が襲った事実が，あらかじめわかっていたという点にある．古文書記録である『日本三代実録』には，貞観 11 年 5 月 26 日（西暦 869 年 7 月 13 日）に発生した地震と津波（以下，貞観津波）についての記述が残されている [1), 2)]．それによれば，現在の仙台平野において，地震による被害だけでなく津波が広範囲に浸水した様子が記録されている．さらに，貞観津波に関する伝説や伝承も宮城県気仙沼市から茨城県大洗町にかけて残されており，特に仙台平野から福島北部で大津波を示唆するものが多い [3)]．

また，貞観津波やそれ以前の巨大津波の地質学的証拠が数多く報告されていた点も特筆すべきである．特に，2 章でレビューするように，おもに砂からなる津波堆積物（津波によりもたらされた土砂が堆積したもの）の詳細な調査が 1990 年代前半から行なわれ，こうした調査結果に基づいて，波源モデルの推定も行なわれてきた．

2011年津波によりもたらされた堆積物の特徴や分布は，貞観津波の規模や波源，再来周期を再評価するために重要であると同時に，今後津波堆積物を用いた日本全国の津波リスク評価を行なう際の基礎情報になると考えられる．こうした観点から，我々が4－6月の間に仙台平野を中心とする広域で行なった現地調査結果を報告する．

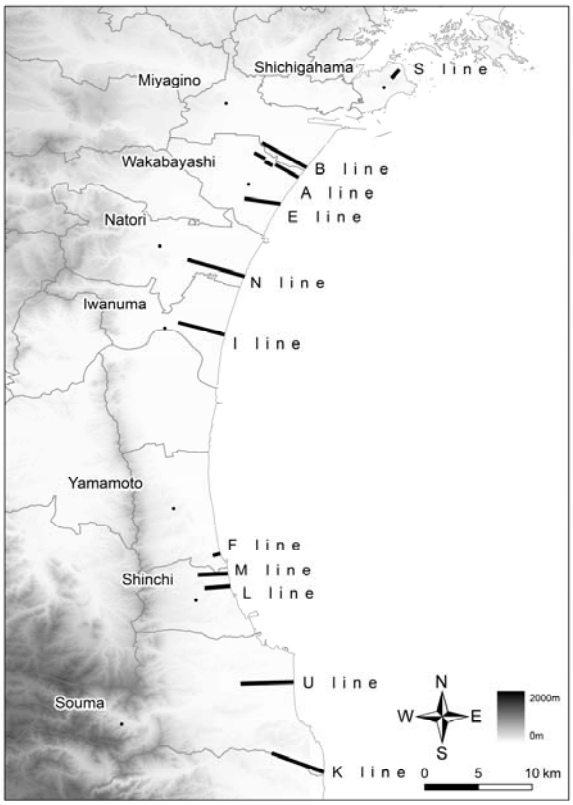


図-1　本研究で対象とした調査測線の位置.

2．貞観津波堆積物の研究史

貞観津波の堆積物を初めて報告したのは，箕浦[4]，阿部ら[5]，Minoura and Nakaya[6]である．箕浦[4]とMinoura and Nakaya[6]は，仙台平野での掘削コアから貞観津波やそれ以前の津波堆積物を見出し，およそ800年の間隔で巨大津波が襲来していることを指摘した．阿部ら[5]は，仙台市における貞観津波堆積物を報告し，貞観津波の痕跡高として2.5～3.0 mを報告し，海岸の津波高としてこれを数 m上回る値を推定した．その後，Minoura et al. [7]や菅原ら[8]は，仙台市や福島県相馬市で貞観津波やそれ以前の津波堆積物を見出し，貞観津波の地震マグニチュードを8.3，津波による浸水範囲を2.5-3 kmと推定し，さらに津波再来周期を約800-1100年間隔と見積もっている．また，河野ら[9] は，数値計算に基づき，地震マグニチュードを8.5と推定している．

その後，澤井ら[10, 11, 12]や宍倉ら[13]，Sawai et al. [14]では，仙台平野や石巻平野の広範囲をカバーするように複数地域で調査を行い，従来調査された以外の場所でも浸水範囲が数kmに及ぶこと，津波の再来間隔が500-1000年程度と見積もられることを明らかにしている．さらに，今泉ら[15]やSuzuki et al. [16]は，福島県浪江町において，鳥居ら[17]は岩手県大槌町において，それぞれ貞観津波堆積物を報告している．また，地形学的研究にもとづき，澤井ら[12]や菅原ら[18]は，仙台市における浸水域を，当時の海岸線（現在より約1 km内陸側）から少なくとも1.0～3.0 kmと推定している．

こうした津波堆積物の情報を元に精緻な数値計算が行なわれ，佐竹ら[19]や行谷ら[20]は貞観地震のマグニチュードを8.3～8.4，菅原ら[18, 21]では底面掃流力も評価材料に用いて，マグニチュード8.35と見積もっている．

3．調査方法

本研究では，図-1 に示す 11 測線で現地調査を行なった．このうち，測線 A は後藤，原口，菅原，藤野，阿部が 4 月上旬に，測線 N は後藤，西村，菅原，藤野が 5 月上旬に，測線 U，K は西村，中村，阿部が 6 月中旬に，それ以外の測線は，阿部，菅原，後藤が 6 月上旬に，それぞれ海外の研究者や学生諸氏の協力をえながら調査を行なった．測線上で，約 50－400 m の間隔で地表に堆積した土砂の層厚や堆積学的特徴，構成物の特徴，粒度特性などを調べた．

4．2011 年津波堆積物の特徴

各測線ごとの特徴や津波堆積物の詳細な記載は別稿で行なうが，ここでは 2011 年津波堆積物の全体的な特徴についてまとめる．第一に，沿岸部で浸水高にして 10 m に達する津波が来襲したにもかかわらず，海岸や砂丘の侵食がさほど顕著ではなく，大規模な土砂移動が起きた形跡がないことが特徴として挙げられる（図-2）．津波堆積物の層厚は，海岸に近い沿岸林内などで厚く，層厚 5～30 cm 程度（図-3）であり，内陸に向かって層厚は変動しながらも全体としては薄層化する傾向にある．粒径は主に細粒～中粒砂が主体である．各測線では，遡上限界付近においても，層厚数 cm から砂粒子一つ分ほどの厚さ（1 mm 以下）の極めて薄い砂層が観察される．この薄い砂層は連続性が悪く，パッチ状に分布する場合もある．また，田園地帯においては，津波によりもたらされた砂層の上に厚さ～数 cm の泥層が堆積している場合が多く見受けられる（図-4）．泥層の層厚は，内陸に進むにつれ増加する傾向が認められた．

従来は，砂質津波堆積物の供給源として，沖合いや砂浜，砂丘などに堆積している砂が大部分を占めると考えられてきた．ところが，図-5 に示すように，仙台平野の田園地帯においては，液状化に伴う噴砂の跡がいたるところで確認され，噴砂痕を中心として厚く砂が堆積している様子も観察された．噴砂に

図-2　測線 A（仙台市荒浜付近）の海岸の様子．離岸堤の大規模損壊や砂浜消失は見受けられない．

図-3　測線 A の沿岸林内に堆積した津波堆積物．

図-4　測線 A の海岸から 3.2 km 内陸の地点での津波堆積物．約 1 mm 層厚の砂層（矢印）の上に，約 2 cm の泥層が堆積している．

図-5　測線 A の水田地帯で観察される噴砂痕．

より局所的に地表にもたらされたと考えられる砂が津波により移動し再堆積している形跡も見られたことから，噴砂も津波堆積物を構成する砂の供給源の一つだと言える．一方，泥層の供給源は，ラグーン（福島県相馬市）や河川，人工的に作られた水路などの底に溜まっていた水底堆積物や，津波により侵食された耕作地の表土が主体だと考えられる．

5．浸水域と土砂分布域の関係

津波堆積物を用いて過去の津波の浸水限界を推定する場合，従来は土砂の分布範囲を津波の最低浸水域としてきた．しかし，土砂の分布域を越えて津波が内陸まで浸水している可能性は否定できず，実際に 2004 年インド洋大津波などの近年の津波直後の調査では，必ずしも土砂の分布域と津波の浸水域があわないことが指摘されている [22]．

図-6 に，2011 年津波により運搬された砂と浸水域の関係のプロットを示す（堆積環境が異なる測線 U，K は除く）．すべての地点でほぼ浸水限界付近でも津波により運搬された砂が堆積していたため，津波により運搬された砂が存在するか否かという点で言えば，津波の浸水域と砂の分布範囲はほぼ一致している．ただし，浸水距離が 3～4.5 km と非常に長い測線では，浸水限界付近の砂の層厚は 1 mm 以下の厚さしかない．古津波を対象とした場合，このようなごく薄い砂層や泥のみからなる層を地層中から認識することは極めて困難である．実際に，菅原ら [18] では，貞観津波の堆積物と認識できる砂層の厚さを 0.5 cm 以上として調査を行なっている．

そこで，津波堆積物として地層中でも認識でき，かつ菅原ら [18] の結果と比較が可能な層厚 0.5 cm の砂層の分布限界もプロットした（図-6）．その結果，浸水距離が約 2 km 以下の地点では，層厚 0.5 cm の津波堆積物は浸水限界でも観察できるのに対し，浸水距離が約 2 km を超える場所では浸水距離と砂の到

達距離に乖離が認められ，砂層の分布は最大でも 3 km 程度が限界で，浸水距離の 62-76%でしかないことがわかった．

このような土砂分布は，陸上を遡上する過程での津波の物質運搬力の低下だけでなく，地形や粒子サイズ，砂の供給量にも関係していると考えられるため，現時点では解釈が難しく，今後さらに研究を行なう必要がある．一方，菅原ら[18]は仙台平野において 0.5 cm 以上の層厚の貞観津波堆積物の分布範囲を，当時の海岸線から約 2.7 km と推定していて，今回の推定値（~3 km）と近い値を示すことは興味深い特徴であり，津波堆積物を用いて貞観津波の浸水域や波源を再評価する上での重要な知見になると考えられる．

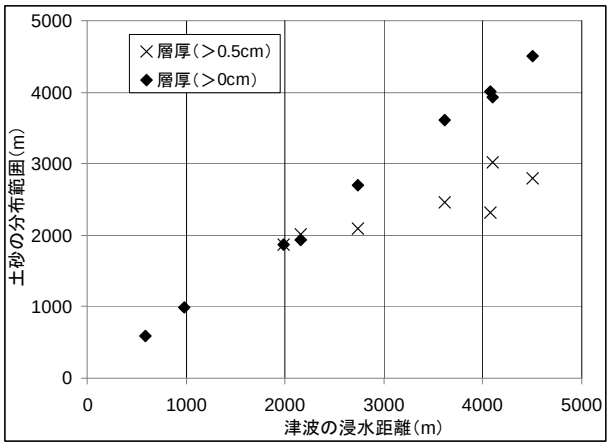


図-6　仙台平野における津波の浸水距離と砂層の分布範囲（層厚＞0 cm と＞0.5 cm の場合）．

6．津波堆積物を用いたリスク評価について

津波堆積物研究の重要性は 2004 年インド洋津波以降に再認識され[22), 23), 24), 25)]，2011 年津波以降はこれがさらに高まった．中央防災会議の「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」でも，津波堆積物の重要性が再認識されている．津波の再来間隔や過去の津波の規模を推定しリスク評価を行なう上で，津波堆積物が有用であることは確かであるが，津波堆積物の認定については，高い専門性が要求されることに加え，解決されていない問題が多々ある点にも留意が必要である．

まず，津波堆積物の認定については，ストーム（台風などの暴浪）堆積物や浜堤の砂層などと明瞭に区別できることを示さなくてはならならず，したがって堆積学的な深い洞察が必要となる[26), 27)]．また，津波堆積物を用いて津波再来間隔を推定しリスク評価を行う際には，供給源としての砂が沖合いまたは海浜部に過去に定常的に存在していたことが前提条件となる．供給源となる砂が存在しない岩礁部などでは，津波が通過しても堆積物としての痕跡は残らないから，対象地域で一時期でも砂浜や浅海底に砂が存在しない時期があり，その時期に津波が来襲していたとすれば記録が残らないことになり，正確な津波再来間隔は推定できないことになる．また，津波堆積物の有無や層厚は場所により大きく変化するため，コアリング調査では津波堆積物がたまたま保存されていない場所を掘削してしまうこともある．そのため，古津波の調査地点数は十分多くする必要がある．そして，数千年前の古津波規模（浸水域など）を議論する場合，海岸線の位置や地形などが現在とは異なっている場合がある．そのため，地形学的手法により過去の地形復元を同時に行なわなくてはならない．こうした条件が満たされていることを確認しなければ，津波堆積物を用いて再来間隔や古津波の規模を正しく議論することはできない．

今後，日本各地で津波堆積物調査を行い，低頻度巨大津波のリスク評価を行う必要がある．しかし，日本において津波堆積物を専門とする研究者はごく限られており，関連する諸分野の研究者，技術者の協力が不可欠である．また，津波堆積物が持つ過去の津波の発生履歴や規模などの情報を正しく理解してリスク評価を行い，適切な手順で行政や一般社会に結果を還元するためにも，津波堆積物研究を専門

とする地質，地形学に精通した研究者および技術者の育成が急務である．

謝辞

本研究の一部は，東北大学運営交付金（特別）－東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査―（代表：今村文彦）を受けて行なった．また，現地調査では，Catherine Chagué-Goff, James Goff, Bruce Jaffe, Bruce Richmond, Witold Szczuciński, David R. Tappin, Rob Witter, Eko Yulianto らの協力を得た．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 吉田東伍：貞観十一年陸奥府城の震動洪溢，Vol. 8，pp. 1033-1040，1906.

2) 渡邊偉夫：日本被害津波総覧．第二版，東京大学出版会，238pp., 1998.

3) 渡邊偉夫：伝承から地震・津波の実態をどこまで解明できるか―貞観十一年（869 年）の地震・津波を例として―，歴史地震，Vol. 17，pp.130-146，2001.

4) 箕浦幸治：東北日本における巨大津波の発生と周期，歴史地震，Vol. 6, pp. 61-76, 1990.

5) 阿部壽，菅野喜貞，千釜章：仙台平野における貞観 11 年(869 年)三陸津波の痕跡高の推定，地震（第 2 輯），Vol. 43，pp. 513-525, 1990.

6) Minoura, K. and Nakaya, S. : Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeast Japan, Journal of Geology, Vol. 99, No. 2, pp. 265-287, 1991.

7) Minoura, K., Imamura, F. Sugawara, D. Kono, Y. and Iwashita, T. : The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 23, pp. 83-88, 2001.

8) 菅原大助，箕浦幸治，今村文彦：西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元，津波工学研究報告，Vol. 18，pp. 1-10，2001.

9) 河野幸夫・村上　弘・今村文彦・箕浦幸治：貞観津波と海底潜水調査，東北地域災害科学研究，Vol. 36，pp.115-122，2000.

10) 澤井祐紀，岡村行信，宍倉正展，小松原純子，松浦旅人，Than Tin Aung，藤井雄士郎：仙台平野の堆積物に記録された歴史時代の巨大津波－1611 年慶長津波と 869 年貞観津波の浸水域－，地質ニュース，Vol. 624，pp. 36－41, 2006.

11) 澤井祐紀，宍倉正展，岡村行信，高田圭太，松浦旅人，Than Tin Aung，小松原純子，藤井雄士郎，藤原治，佐竹健治，鎌滝孝信，佐藤伸枝：ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）における古津波痕跡調査，活断層・古地震研究報告，Vol. 7，pp. 47-80，2007.

12) 澤井祐紀，宍倉正典，小松原純子：ハンドコアラーを用いた宮城県仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）における古津波痕跡調査，活断層・古地震研究報告，Vol. 8，pp. 17-70，2008.

13) 宍倉正展，澤井祐紀，岡村行信，小松原純子，Than Tin Aung，石山達也，藤原治，藤野滋弘：石巻平野における津波堆積物の分布と年代，活断層・古地震研究報告，Vol. 7，pp. 31-46，2007.

14) Sawai, Y., Fujii, Y., Fujiwara, O., Kamataki, T., Komatsubara, J., Okamura, Y., Satake, K., Shishikura, M. : Marine incursions of the past 1500 years and evidence of tsunamis at Suijin-numa, a coastal lake facing the Japan Trench, The Holocene, Vol. 18, pp. 517-528, 2008.

15) 今泉俊文，石山達也，原口強，宮内崇裕，後藤秀昭，島崎邦彦：東北地方太平洋沿岸域における

地質調査，宮城県沖地震における重点的調査観測（平成 19 年度）成果報告書，pp. 107-132，2008.

16) Suzuki, H., Imaizumi, T., Ishiyama, T., Miyauchi, T., Kagohara, K., Haraguchi, T., Murashima, N., Omachi, T. : Holocene tsunami deposits associated with earthquakes along Pacific coast, northeast Japan. EOS Transactions, AGU Fall Meet. Suppl., 90(52), T33B-1884, 2009.

17) 鳥居和樹，原口強，今泉俊文，宮内崇裕，島崎邦彦:東北地方三陸海岸における津波堆積物調査，日本応用地質学会研究発表会講演論文集，pp. 23，2007.

18) 菅原大助，今村文彦，松本秀明，後藤和久，箕浦幸治：過去の津波像の定量的復元—貞観津波の痕跡調査と古地形の推定について，津波工学研究報告，Vol. 27，pp. 103-132，2010.

19) 佐竹健治，行谷佑一，山木滋：石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション，活断層・古地震研究報告，Vol. 8，pp. 71-89，2008.

20) 行谷佑一，佐竹健治，山本滋：宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869 年貞観津波の数値シミュレーション，活断層・古地震研究報告，Vol. 10，pp. 1－21，2010.

21) 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治，地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について，自然災害科学，Vol. 29-4，pp. 501-516，2011.

22) 後藤和久，藤野滋弘：2004 年インド洋大津波後の津波堆積物研究の課題と展望，地質学雑誌，Vol. 114，pp.599-617，2008.

23) 今村文彦，後藤和久：過去の災害を復元し将来を予測するためのアプローチ－津波研究を事例に－，第四紀研究，Vol. 46, 491-498, 2007.

24) 藤原治，後藤和久，平川一臣，池原研，今村文彦：古地震・津波情報の地震・津波防災への応用，第四紀研究，Vol. 46, pp. 445-450, 2007.

25) 西村裕一，津波堆積物の時空間分布に基づく古津波の調査研究. 地震, 第 61 巻特集号, s497-s508, 2009.

26) 七山太，重野聖之：遡上津波堆積物概論－沿岸低地の津波堆積物に関する研究レビューから得られた堆積学的認定基準－，地質学論集，Vol. 58，pp. 19－33，2004.

27) 藤原治：津波堆積物の堆積学的・古生物学的特徴，地質学論集，Vol. 58，pp. 35－44，2004.

2011 年東北地方太平洋沖地震の縮尺 1:25,000 広域津波被災マップ：空中写真実体視判読による検討

1:25,000-scale tsunami-damage map on the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Japan, based on airphoto interpretation

日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム

Tsunami Damage Mapping Team, Association of Japanese Geographers

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震により，広域的な津波被害が生じたことを受け，日本地理学会災害対応本部は津波被害を検討する作業チームを立ち上げ，航空写真判読に基づいて縮尺２万５千分の１の津波被害分布図を作成し，3 月 29 日にインターネットを通じて発表した（ http://www.ajg.or.jp/disaster/201103_Tohoku-eq.html ；英語ページもあり）（7 月 10 日時点で 108 図幅）．

被災マップ作成の目的は，被災範囲をできるだけ迅速に把握し，救援活動や復興計画の策定に資するデータを提供すること，および津波遡上の全体像を明らかにして現地調査のベースマップを提供するとともに，被害分布の地域性を明らかにして，被害の原因解明調査に資するデータを提供することである．

2. 手法

空中写真の実体視判読により，□津波の遡上範囲，□家屋の多くが流される被害を受けた範囲を判読した．判読には主に，国土地理院が地震後（3 月 12 日，13 日，19 日，4 月 1 日，5 日）に撮影した約 3,000 枚の航空写真を用いた．作業にあたっては，複数の判読者が判読結果をクロスチェックして最終案を確定した．なお，航空写真が撮影されていない福島県の一部地域は GoogleEarth 上の高解像度の衛星画像（単画像）を用いた．津波被災マップは，迅速な公開を図るために，手書き作業図のスキャン画像であったが，GIS による様々な分析に用いることができるようにデータ化し，4 月 8 日，国土地理院「電子国土 Web システム」ならびに防災科学技術研究所「e コミマップ」上で公開した．

電子国土 Web システム は国土地理院が運営するシステムで，津波被災マップを比較的容易に２万５千分の１相当の地形図上に示すことができる．e コミマップは防災科学技術研究所が運営しており，地震前後の航空写真との重ね合わせが容易でビジュアル機能に優れている．また，閲覧者が自由にその他の情報と重ね合わせることができる利用者参加型システムでもある．データの公開者は，GIS データそのものを提供しなくても良い方式を取っているためデータの管理がしやすい利点がある．ただし，閲覧の際に２万５千分の１よりも大縮尺の地図も表示できるため，津波被災マップの精度を超えて表示される危険性がある．このため拡大表示に制限を設け，２万５千分の１よりも大縮尺の表示をすると，津波被災マップのデータが表示されないように工夫した．

津波被災マップに含まれる誤差には，写真判読基準の違いや，判読結果を２万５千分の１の地形図に転記する際に発生する誤差などがある．判読限界に関しても注意書きを明示する必要があり，津波被災マップを公開している Web ページには，「現地調査で確認したものではないため，今後の精査によって

改訂されることがある．とくに，平野部や市街地など，空中写真のみでは判断が困難な場合がある」旨を記した．

津波の遡上高の高度分布については，電子化した遡上範囲の限界線（輪郭）の内側にバッファをかけて 10 m DEM （基盤地図情報）の標高データを用いた．線の内側のみの標高データを用いた理由は，限界線のすぐ外側の浸水していない崖の標高を誤って採用しないようにするためである．また，ノイズ除去のために 30 地点（約 300 m）の移動平均により平滑化した．遡上高分布図の作成予定範囲は，青森県六ヶ所村付近から千葉県一宮町付近にかけてである．

現地調査は二班に分かれて実施し，北部班は岩手県宮古市田老から山田町周辺（北部，2011 年 4 月 2 日から 6 日に実施），南部班は宮城県女川町から亘理町（南部，同 4 月 22 日から 24 日に実施）において調査を行った．北部班は写真判読によって津波の遡上高が高いと認定した地点で遡上範囲と浸水高の関係に着目して，南部班は被害の大きい地域で地形と浸水高の関係に着目して調査を実施した．北部班における津波の遡上範囲の認定は，集落では津波をみていた住民への聞き取りを行い，集落がないところでは，津波により運ばれたとみられる浮きや発泡スチロール等の漂着物や林床の落葉の剥離を指標に行った．測量はレーザー距離計（インパルス）を用いて行った．基準となる標高は海面からの高さとし，干満に伴う潮位変化の補正をおこなった．南部班では津波被災マップに示された遡上範囲を北部と同様に現地での観察や聞き取りにより確認した．また，海岸線に直交する方向に測線を設け，津波の痕跡を確認して，レーザー距離計を用いて浸水深を計測し浸水高を求めた．建物等に残っている津波の痕跡を測る際は，津波が強くぶつかったと想像される壁面等は避け，建物の裏側など安定した水位の痕跡を測るように努めた．地盤高は地震前の測量に基づく DEM を利用した．一部は GPS 計測によって直接求めた．石巻平野では旧北上川右岸の河口付近に位置する日和山の南側でとくに被害が大きかったため，この山の周囲に沿って集中調査をおこなった．

3. マッピングの結果

三陸海岸では宮古より北のリアス海岸でない地域でも大規模な浸水を受けており，隣り合う谷でも浸水高が大きく異なることがある．また，この地域の特徴として，津波の遡上範囲と家屋の多くが流される被害を受けた範囲がほぼ一致する例が多くみられた．

北上川河口付近は北上川沿いを津波が遡上し甚大な被害を受けたが，地形や堤防が津波の進行を妨げたために被害が少なかったと推定される地域もあった．また，石巻平野では日和山という浸水を免れた段丘が存在し，その海側の低地が他の地域と比較して極端に甚大な被害を受けている．一方，湾内に多くの島がある松島地域では比較的被害が少ない．これらの例は地形が被害の大小を左右する要因になっているようである．

仙台平野では七北田川や名取川，阿武隈川沿いに自然堤防が分布し，さらに海岸線に沿うように浜堤列が発達する．平野の幅が小さくなる阿武隈川以南では，浜堤間の間隔も狭い．津波は海岸線から数 km 程度遡上しており，最も内陸に位置する浜堤列あるいはその直前にまで達した．とくに最も海側に位置する浜堤に立地していた集落は壊滅的な被害を受けた．遡上限界付近では，水田上に分布していた稲わらなどが水田の角にはき寄せられていることが多い．また，阿武隈川右岸では，集落が堤防に守られていたために浸水しなかったケースとともに，微高地（自然堤防）に立地していたことで浸水を免れている例もあった．

浜通りの海岸には，阿武隈山地から太平洋に流入

する河川に沿うように，丘陵や河成段丘，沖積低地が東西方向に分布し，海成段丘もみられる．この地域では，丘陵や段丘を開析して形成された沖積低地や谷底低地が，津波による大規模な浸水を受けている．茨城県沿岸は，仙台平野や浜通りの海岸に比べると浸水範囲が狭い．

遡上高の高度分布をみると，仙台平野から原町にかけては三陸海岸に比べて低い傾向にある．また，幅数 km の海岸平野が広がる仙台平野では 5 m 以下と低いのに対し，丘陵・段丘を開析した沖積低地や谷底低地が分布する浜通りの海岸では，10 m 以上に達した地点も目立ち，リアス海岸だけではなく外洋に面した海食崖の連なる地域でも場所によっては遡上高が高いことがわかった．今後，地形の特徴と遡上高との関係などを詳細に明らかにしていく必要があるだろう．

4. 現地調査結果

(1) 三陸海岸北部　田老～山田

宮古市旧田老町松月は，東に開口した入り江で，海岸線付近の谷幅は約 240 m であるのに対し，湾から 300 m 内陸では約 120 m となり谷幅が急激に狭まるとともに，谷の平面形状も湾曲している．津波の高さは海岸付近で 22 m 超，谷幅が狭まる地点で高さ 30 m 以上となり急に高くなった．そこから 20 数 m まで高度を下げ，上流側へ徐々に痕跡高が高くなっていた．海岸から約 1.23 km の地点での遡上高は約 30 m に達した．

田老の北にある漁港では，津波の遡上高が軒並み 30 m を超えた．乙部野では 34.7 m，重津部では 27.5 m，小堀内では 37.3 m であった．その北の水沢の漁港では 24 m 程度であった．

北向きに山田湾に面する山田町大浦では津波の遡上高は 10 m 程度であった．しかし，大浦の南にある外海に開いた湾に面した小谷鳥では約 27 m に達し，集落の被害も甚大であった．大浦の東，白崎北の谷では，海岸から約 450 m 内陸まで津波が遡上した．ここでは，海岸部の津波の高さは約 23 m であったが，痕跡高はすぐに 30 m 以上にまで上昇し，谷の奥までほぼ同じ高度を保った．

以上のように，津波の遡上高は，近接している湾であっても湾ごとに異なることが明らかになった．さらに，津波遡上の縦断面形からは，津波遡上の様式に差異があることも明らかになった．松月では，痕跡高が局所的に高くなる地点は，湾から続く陸上部の谷が急に狭まる地点に一致し，さらに内陸側に向かっても痕跡高が増す傾向が認められた．逆に，白崎北の谷など小さな谷の場合には，内陸側へ痕跡高は増しておらず，ほぼ同じ高さで谷の最奥部に到達した．さらに，小堀内漁港のように海岸部の谷が蛇行する形状の場合は，津波の到達範囲が狭く，局所的に大きくなった可能性がある．

(2) 三陸海岸南部～仙台平野　女川～亘理

仙台平野の荒浜周辺は，海岸線から約 4 km 内陸まで浸水した．現地で確認した溯上限界は津波被災マップのそれと比較的よく合っていた．荒浜から仙台東部道路にかけての浸水高をみると，海岸線付近で 10 m 前後，その背後で 5-6 m 程度であった．浸水高はその内陸側で 4 m 程度に減少し一定となり，遡上限界手前の仙台東部道路付近での浸水深は 1 m 以下になっていた．

石巻平野の石巻港西側では，海岸線から 3 km 程度内陸を走る仙石線付近まで浸水した．海岸線近くにおける浸水高は 7 m 程度であり，その背後には 3 m 前後の浸水高となった地域が広がる．日和山周辺においては，とくに被害の大きかった日和山南方で 7 m を超える浸水高もみられた．その一方で，内陸に向かうにつれて浸水高が減少していく傾向が認められた．特筆すべき点は，日和山東部の堤防の陸側で浸水深が 3 m を超える地域でも家屋が流亡を免れ

ていることである．木造家屋の流亡には浸水深の大きさだけでなく，流速や密度，津波とともに流れてくる瓦礫等の存在も大きく寄与することが示唆された．

女川は東側が海に面しており，3 つの谷底平野に広がる集落の大部分が，今回の津波により壊滅的な被害を受けた．津波被災マップによれば，遡上範囲と家屋の多くが流される被害を受けた範囲がほぼ一致している．現地調査によれば，津波の高さは海岸線付近で 15 m を超えており．ここから内陸に広がる谷底平野，さらに谷の最奥部にいたるまで，15-18 m 程度の浸水高を維持していたため，一部では高台であっても浸水を受けた．

5. まとめ

空中写真の実体視判読・クロスチェックにより，青森県六ケ所村付近から千葉県一宮町付近までの全域（福島県の一部は高解像度の衛星画像を使用）の津波の遡上範囲と家屋の多くが流される被害を受けた範囲を示した．また現地調査を通じ，ある程度大きな規模の湾では遡上高と浸水高に大きな差が認められないことや，小さな規模の湾では遡上高が地形の影響を受けることがわかった．ただし，いずれも津波が遡上限界付近で這い上がるような事象は認められなかった．木造家屋の流出・流亡は，浸水高のみでは説明できず，流速や密度，津波に巻き込まれた瓦礫などの存在が大きく寄与すると考えられた．

6. 今後の予定

現在進めている千葉県の空中写真判読をもって，予定されていた全域の記載が終了する．今後は全域の再検討を実施し，8 月末をめどに最終版を公表する予定である．

謝辞

航空写真の整理や電子化等の作業においては名古屋大学・奈良大学・広島大学の学生にご協力いただきました．深く感謝いたします．

注

津波被災マップ作成チームのメンバーを以下に記す：鈴木康弘（名古屋大・代表）・石黒聡士（名古屋大）・碓井照子（奈良大）・宇根　寛（国土地理院）・海津正倫（奈良大）・熊原康博（群馬大）・後藤秀昭（広島大）・小岩直人（弘前大）・坂上寛之（ファルコン）・杉戸信彦（名古屋大）・田村賢哉（奈良大）・中田 高（広島大）・廣内大助（信州大）・堀 和明（名古屋大）・松多信尚（名古屋大）・宮城豊彦（東北学院大）・渡辺満久（東洋大）．

津波波形からみた東北地方太平洋沖地震の津波波源

Tsunami Source of the 2011 Tohoku Earthquake from Tsunami Waveforms

佐竹健治[1]・酒井慎一[1]・篠原雅尚[1]・金沢敏彦[1]・藤井雄士郎[2]

Kenji Satake[1], Shin-ichi Sakai[1], Masanao Shinohara[1], Toshihiko Kanazawa[1] and Yushiro Fujii[2]

[1]東京大学　地震研究所，[2]建築研究所　国際地震工学センター

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の津波は，日本沿岸の検潮所，GPS 波浪計や沖合の海底水圧計などで記録された．釜石沖で観測された津波波形と，これらの津波波形のインバージョンによる津波波源モデル[1),2)]を紹介する．講演では，東京大学地震研究所で行った津波調査のまとめ[3),4)]や津波波源モデルとの比較も紹介する予定である．

2. 観測された津波波形

釜石沖には東大地震研で設置した TM1(海岸から約 70　km，水深 1600 m)と TM2(約 40 km，水深 1000 m)の海底水圧計が設置されている．TM1 では 14 時 46 分の地震発生直後から地震波形に引き続いて徐々に毎面が約 2m上昇し，約 11 分後からさらに約 3 m 急激に上昇した（図 - 1）．TM2 では，同様な 2 段階の津波が約 4 分遅れて記録されている．国土交通省によって設置された岩手県南部沖 GPS 波浪計でも，地震後 12 分頃から同様な水面変化が記録された[1),2)]．

三陸沿岸の検潮所（宮古，釜石，大船渡，鮎川）では，地震後約 30 分位までは水位変化が記録されているが，その後の記録は得られていない．これらに加え，北海道から四国までの沿岸の波浪計・海底水圧計，さらに太平洋西部の DART に記録された津波波形のインバージョンにより波源域内でのすべり量分布を求めた[2)]（図 - 2）．

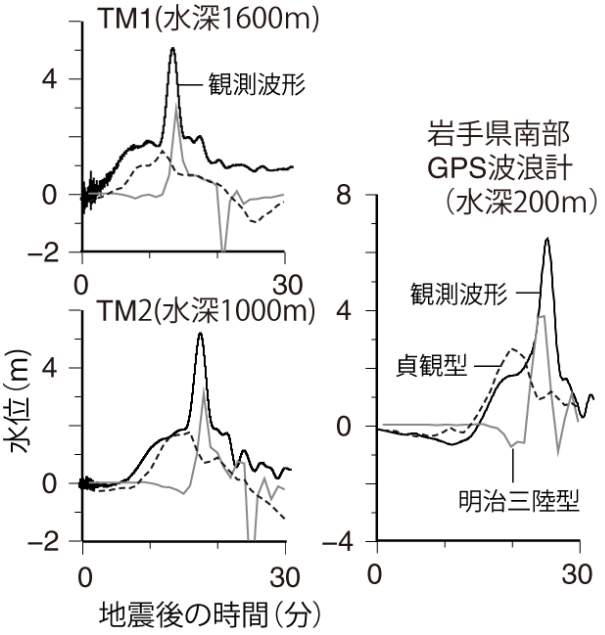


図 - 1　釜石沖海底水圧計と GPS 波浪計で記録された津波波形と，明治三陸型・貞観型断層モデルから計算した波形．

3. すべり分布

震源域を 50 km 四方の小断層 40 枚に細分化し，それぞれのすべり量を求めたところ，すべり量が 2 m 以上である断層の長さは合計 350 km となり，岩手県沖から宮城県沖・福島県沖まで伸びていることがわかった（図 - 2）．最大 40 m 以上という大きなすべりの領域が日本海溝付近に推定された[2)]．このような海溝付近の大きなすべりは，1896 年の明治三陸沖地震の断層モデル（海溝付近，幅 50　km）とよく似て

いる[5]．一方で明治三陸津波とは異なり，三陸南部沖・宮城県沖のプレート深部（深さ 10～50 km）でも10～30 m程度の大きなすべりが得られた．さらに，福島県沖でも約 10 m の，茨城沖でも最大 3 m のすべりが推定されている，これらのプレート境界のすべりは，869 年貞観地震のモデルとよく似ている[6),7)]．

海溝付近のすべり（明治三陸型）とプレート境界深部のすべり（貞観型）とに分けて津波波形を計算したところ，釜石沖の海底水圧計や GPS 波浪計で観測された最初の水位上昇は貞観型の，やや遅れた急激な水位上昇は明治三陸型の波源で発生したことがわかった（図 - 1）．

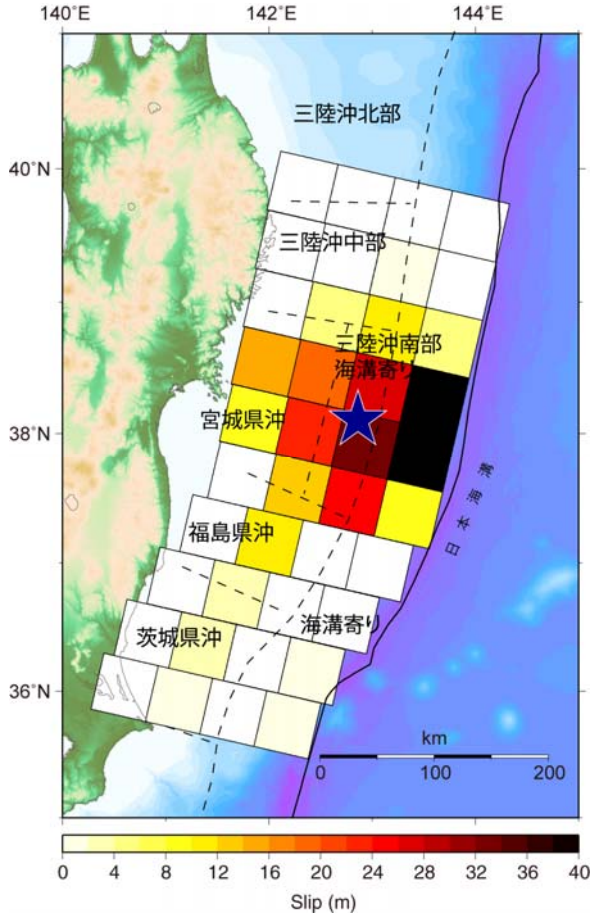


図 - 2　東北地方太平洋沖地震の断層面上のすべり量分布[2]．地域分けは地震調査委員会による長期評価に基づく．

謝辞

本調査研究は平成 22 年度及び 23 年度科学研究費補助金（2011 年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査，研究代表者　篠原雅尚）による援助を受けた．

参考文献

1）佐竹健治，酒井慎一，藤井雄士郎，篠原雅尚，金沢敏彦：東北地方太平洋沖地震の津波波源，科学 5 月号，pp. 407-410，岩波書店，2011.

2）Fujii，Y.，Satake，K.，Sakai，S. Shinohara，M. and Kanazawa，T.，Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku，Japan earthquake，Earth，Planets，Space，in press，2011（published online）.

3）都司嘉宣，佐竹健治，石辺岳男，杉本めぐみ，大木聖子，西山昭仁，室谷智子，泊次郎，上野俊洋，平成 23 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の津波について（速報），地震ジャーナル，51，pp. 11-21，2011.

4）都司嘉宣，　千年震災　繰り返す地震と津波の歴史に学ぶ，ダイヤモンド社，276 pp.，2011.

5）Tanioka，Y. and Satake，K.，Fault parameters of the 1896 Sanriku tsunami earthquake estimated from numerical modeling，Geophys. Res. Lett.，23，pp. 1549-1552，1996.

6）佐竹健治・行谷佑一・山木滋，石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション，活断層・古地震研究報告，８，pp. 71-89，2008.

7）行谷佑一・佐竹健治・山木滋，宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869 年貞観津波の数値シミュレーション，活断層・古地震研究報告，10，pp. 1-21，2010.

港湾における津波被害

Tsunami Damage in Ports

富田孝史

Takashi Tomita

独立行政法人港湾空港技術研究所　アジア・太平洋沿岸防災研究センター

1. はじめに

独立行政法人港湾空港技術研究所および国土交通省国土技術政策総合研究所は，3 月 14 日から茨城港で行った現地調査を始めとして，東北および関東地方の 13 港湾（八戸港，久慈港，宮古港，釜石港，大船渡港，気仙沼港，女川港，石巻港，仙台塩釜港，相馬港，小名浜港，茨城港，鹿島港）およびその周辺，さらに仙台空港の地震および津波に関する現地調査を実施した．さらに，日本沿岸沖に設置された GPS 波浪計や港湾に設置された地震計の解析を行った．これらの調査に携わった両研究所の人数は 34 名である．本資料は，上記の調査結果を取りまとめた報告書[1]に基づくとともに，その後に得られた知見について報告を行うものである．

2. GPS 波浪計で観測された津波波形

日本の海岸から約 10～20km 離れた水深 100～200m の沖合では，GPS を搭載したブイ（GPS 波浪計）より波浪や津波の観測が 2008 年より実施されている．東北～四国地方太平洋沿岸の沖合に設置された GPS 波浪計のうち 9 基が東北地方太平洋沖地震による津波を観測した（**図-1**）．

岩手県から福島県沖合の GPS 波浪計には，地震発生から間もない 14 時 50 分台に第 1 波が到達し，岩手県沖では明瞭な引き波初動が観測された．また，釜石南部沖（釜石沖）では，引き波の後の 15 時 01 分頃に第 1 波の押し波が始まり，その後 5 分程度で 2m 程度にまで上昇しそれが約 20 分間程度継続している．さらにその 2m の水位の上に 5 分間程度で 5m 近くの水位上昇が加わって，15 時 12 分頃に約 6.7m の津波高が観測された．

GPS 波浪計の観測データは気象庁にも直接配信されており，沖合でどんどん高くなる波形を見た気象庁は，地震情報と量的津波予報システムにより地震後 3 分に発表した津波警報などの第 1 報から 25 分後の 15 時 14 分に津波警報等のレベルアップを行って発表している．

3. 津波痕跡高

現地調査から得た津波の浸水高や遡上高を**図-2** に示す．遡上高は岩手県が他県に比べて高くなっている．これには，岩手県に来襲した津波が高かったことに加え，リアス式海岸による津波増幅効果が現れていると考えられる．一方，そもそも高い津波の

本資料は，高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山﨑浩之・長尾毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川　康之・野津厚・岡本修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎誠・泉山拓也・関克己・廉慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邉祐二による 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 年 4 月発行）に基づき，その後の知見を加えたものである．

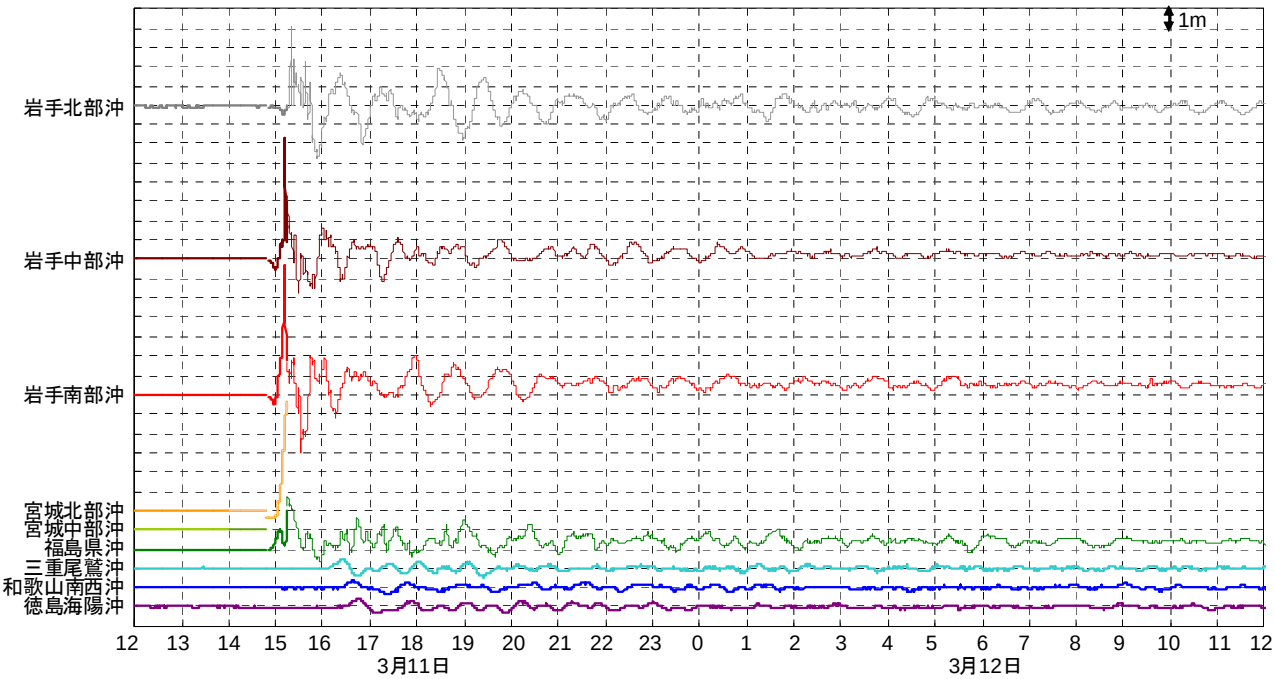


図-1 GSP 波浪計で観測された津波波形 [1)]

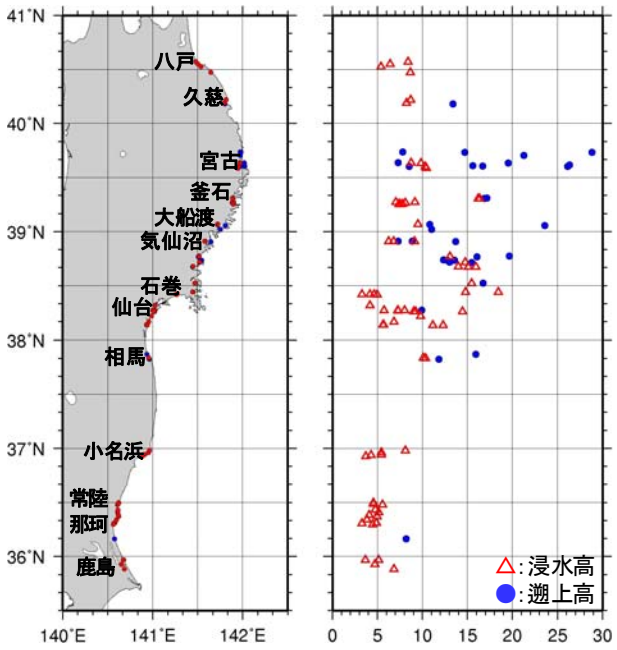


図-2 津波痕跡高 [1)]

ため，浸水高は岩手県だけでなく宮城県でも 10 m を超えている．

4. 津波被害の実態

港湾域では，防波堤や岸壁など港湾の施設が被災した．**写真-1** に示す釜石港の湾口防波堤は，設計では高波浪と当時の既往最大であった明治三陸地震津波との比較から耐波安定性上厳しい条件であった高波浪が設計条件に採用されており，明治三陸地震津波にも対応した防波堤であった．ただし，防波堤開口部から津波は侵入するので，海岸線にある胸壁とともに津波による浸水被害を軽減する考え方であった．しかし，今回の津波はその想定よりも高く，防波堤前後の津波に水位差に起因する水平力の作用などにより防波堤マウンド上のケーソンが港内側に移動・水没した．下迫の解析では [1)]，南堤深部の釜石湾口防波堤の大きなケーソンの場合では，ケーソンが水没したことによる浮力増大がケーソンの耐波安定性に大きく影響したことから，ケーソンが没水した状態で防波堤前後に作用する静水圧から滑動限界となる前後の水位差を算出した．その結果は 9.6 m であった．同様な解析から，北堤浅部では水位差は 7.5 m となった．

また，大船渡港では，チリ地震津波対応で整備された湾口防波堤が今回の津波により被災し，マウン

ド上のケーソンが全て海面下に没した．湾口防波堤だけでなく港を静穏にするための一般の防波堤も，相馬港，八戸港などで被害を受けた．

写真-1 釜石湾口防波堤の北堤の被害

しかし，港湾の背後地域では，防波堤等の存在により，その周囲に比べて津波被害は若干軽減されたようである．例えば八戸港では，防波堤背後にあった埠頭上では 5～6 m の浸水高であったのに対し，防波堤の外側の地域では 8～9 m であった（**図-3**）．

図-3 八戸港およびその周辺の津波痕跡高 [1)]

釜石沖の GPS 波浪計による津波観測波形に合うように津波波源を調整して行った津波伝播・遡上計算によると，釜石湾口防波堤の有無により，釜石港の須賀地区にある検潮所の位置では津波高を 13.7m（防波堤なし）から 8.7m（防波堤あり）に減少させ，さらに須賀地区の胸壁を津波が越流し始める時刻を 6 分程度遅延させた．

浸水により，木造家屋の流失等の建物被害（**写真-2** および 3）が発生した．とくに，防護ラインの外側の低平地にある港湾では，作業者等の安全のために避難計画や緊急避難場所の設置などの避難対策を検討しておくことが大切である．釜石港の平田地区では港内に盛られた泥炭の山に登って助かった人もいる．

写真-2 相馬港における上屋の被害（浸水高 10.1m）

写真-3 相馬港の北，釣師浜与港背後（遡上高 15.9m）

建物被害に加えて，船舶，コンテナや自動車等の漂流物被害（**写真-4**）も発生した．40ft コンテナの場合，空のときの重量は 3～4t であるが，それが浮力によって浮くときの浸水深は 0.10～0.13 m（喫水

深）である．一方，コンテナが満載で最大総重量の 30.48t になれば，喫水深は 1.05m になる．したがって，**写真-4** に示した高砂埠頭では 3.7m の浸水深であったことから，満載コンテナの 3 段積みであったとしても流出することになる．

写真-4 仙台塩釜港（仙台港区）高砂埠頭のコンテナ流出被害（浸水高 7.3m）

さらに，クレーンやオイルタンクの転倒も認められた．漂流したフローティングドック等が岸壁に衝突したこと，津波の引き波による流れが収れんしたことによって被災した岸壁もあった．

港内の海底では，津波の速い流れにより，防波堤開口部や埠頭の隅角部において洗掘が発生した箇所がある．八戸港では，埋立地の隅角部を形成するケーソンが転倒したのは，その前面の海底の洗掘によると考えられる．また，震災直後は問題なく見えた白銀北防波堤の堤頭部分が 6 月 1 日に消失しているのが確認された．原因究明に向けた詳細な調査はまだ行われていないが，この被災には台風 2 号から変わった温帯低気圧に伴う高波の作用が直接の要因である一方，津波の洗掘により基礎部分の安定性が低下していたことが主な原因と推察される．

5. おわりに

設計の対象にした津波よりも高い津波の作用により防波堤や胸壁等の防護施設が被災した．特に，防波堤の場合には，津波が大きく越流したことが特徴である．しかし，被災した防波堤であっても，背後地域における津波被害を一定程度であるが低減する効果が認められた．その一方で，「防波堤や防潮堤を越えるような津波は来ないと思った」など防波堤等の効果を過大に評価して避難が遅れた人が少なくないことが指摘されている．今後，レベル２の津波（その地域で考え得る最大クラスの津波）を考えることは，防波堤や防潮堤を越流して浸水を引き起こす津波が存在することにつながるので，津波に強いまちづくりや避難計画・対策を進めるとともに，防波堤等を乗り越えてやってくる津波があることを住民等に周知する努力がこれまで以上に重要になる．住民等への説明においては，そのような津波により引き起こされる津波被害をイメージできるように分かりやすく示すことが大切である．

さらに，日本では，被災後に台風等による高潮および高波が作用することも考えられる．これらによる被害に対応できるように，レベル１の津波（発生頻度が高く，防護施設で地域を守ることを目指すレベルの津波）よりも高い津波が作用したとしても，粘り強い構造により大きく損傷しないあるいは早期復旧が可能な程度の損傷に留めることのできる防護施設を目指すことが重要である．

今回の津波災害では船舶，コンテナ等の漂流物の流出や打上げも一つの特徴であった．漂流物対策についてさらに検討を進める必要がある．

また，今回の地震では港湾施設に大きな被害を与える 0.3～1Hz 程度の周波数帯における地震動のエネルギーは，青森県や岩手県では小さかったので施設被害はほとんどなかったが，宮城県以南では地震による施設被害が認められた [1)]．特に，液状化により被災した施設に津波の作用が加わって複合災害が発生している箇所が少なからずあり，このような被

災形態について明らかにして対策を検討する必要がある．

広域災害において港湾は地域の救援や早期復旧活動に重要な役割を果たすことが今回の震災で明らかになった．さらに，震災後に地域の産業活動を停滞させないあるいは早期に復旧できるように，震災による港湾機能の低下を極力小さくすることが大切である．このためには，津波に強いまちづくりと合わせて港湾 BCP を検討する必要がある．

謝辞

現地調査は，国土交通省の要請のもとに，港湾空港技術研究所，国土技術政策総合研究所，東北地方整備局および関東地方整備局の協力により実施された．実施に際して，多くの関係者の支援および協力を受けており，ここに深甚なる謝意を表する．

参考文献

1）高橋重雄・・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山﨑浩之・長尾毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川　康之・野津厚・岡本修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎誠・泉山拓也・関克己・廉慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邉祐二：2011 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.

産総研による日本海溝沿いの津波痕跡調査

Pre- and post-tsunami survey along the Japan Trench by Geological Survey of Japan/AIST

宍倉正展[1]・澤井祐紀[1]・行谷佑一[1]・藤原　治[1]・谷川晃一朗[1]・楮原京子[1]・木村治夫[1]・岡村行信[1]・宮下由香里[1]・小松原純子[2]・藤井雄士郎[3]・奥田泰雄[3]

Masanobu Shishikura[1], Yuki Sawai[1], Yuichi Namegaya[1], Osamu Fujiwara[1], Koichiro Tanigawa[1], Kyoko Kagohara[1], Haruo Kimura[1], Yukinobu Okamura[1], Yukari Miyashita[1], Junko Komatsubara[2], Yushiro Fujii[3] and Yasuo Okuda[3]

[1]産業技術総合研究所　活断層・地震研究センター，[2]産業技術総合研究所　地質情報研究部門，[3]建築研究所

1. はじめに

産業技術総合研究所（以下，産総研）では，2011 年東北地方太平洋沖地震との類似性が指摘されている 869 年貞観地震について，これまで仙台・石巻平野と福島県沿岸について調査を行ってきた．また，今回の地震後には，まず千葉県および茨城県沿岸での津波の高さと浸水域の調査および津波堆積物の調査を行い，その後，仙台平野と石巻平野において津波堆積物の調査を行った．

2. 869 年貞観地震の調査

産総研では，これまでおもに文部科学省の「宮城県沖地震における重点的調査観測」において，過去の津波に関する調査,研究を行ってきた.この調査,研究では,おもに津波堆積物の分布に基づいて,869 年貞観地震の津波浸水域を復元し，さらに珪藻分析などに基づいた地殻変動の情報も取り入れて，貞観地震の震源断層を推定している．その結果，仙台・石巻平野では，当時の海岸線から 3～4 km も内陸まで津波が浸水していたこと，その浸水域を説明する断層モデルは，宮城県沖から福島県沖にかけてのプレート境界で，長さは少なくとも 200ｋｍ，推定されるマグニチュードは 8.4 以上という結果が得られた．また同様の津波は，津波堆積物の証拠から，450～800 年間隔でくり返し生じていることも明らかになった．これらの詳しい内容は，以下で易しく解説している．

宍倉ほか（2010）平安の人々が見た巨大津波を再現する－西暦 869 年貞観津波－.AFERC ニュース,No.16, 1-10.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/katsudo/aferc_news/no.16.pdf

また，津波堆積物の調査結果および断層モデルの推定については以下の報告書を参照されたい．

宍倉ほか（2007）石巻平野における津波堆積物の分布と年代.活断層・古地震研究報告,No.7(2007 年), 31-46.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h18seika/pdf/shishikura.pdf

澤井ほか（2007）ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）における古津波痕跡調査．活断層・古地震研究報告，No.7（2007 年），47-80.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h18se

ika/pdf/sawai.pdf
澤井ほか（2008）ハンドコアラーを用いた宮城県仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）における古津波痕跡調査.活断層･古地震研究報告，No.8（2008 年），17-70.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h19seika/pdf/02.sawai.pdf
佐竹ほか（2008）石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション．活断層・古地震研究報告，No.8（2008 年），71-89.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h19seika/pdf/03.satake.pdf
行谷ほか（2010）宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869 年貞観津波の数値シミュレーション．活断層・古地震研究報告，No.10（2010 年），1-21.
http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/seika/h21seika/pdf/namegaya.pdf

3. 2011 年東北地方太平洋沖地震における茨城県・千葉県沿岸での調査.

産総研では，3 月 12～4 月 6 日にかけて，のべ 6 日間,および 6 月 20～21 日に茨城県～千葉県の沿岸の津波調査を行った.特に 3 月 14 日の調査では建築研究所との合同調査隊を組んだ．調査項目は，津波の高さを測ること，津波の浸水範囲（波先の位置）を明らかにすること,津波堆積物の観察などである.

まず津波高さに関しては，海面からの高さ（痕跡高）にして 4 m 弱の痕跡が多く認められた．地面からの高さ（浸水深）にして 2 m 弱の痕跡が多かったが，4 m 程度に達するものもあった．茨城県神栖市の波崎海岸では，信頼性が低いものの標高約 7.5 m の砂丘を越流した痕跡も見られた．九十九里浜中部の千葉県山武市蓮沼海岸においても，砂丘を越えた津波の痕跡が見つかった（写真 1）が，九十九里浜南部に行くと砂丘を超える津波はほとんどなかったように見える.

浸水範囲の調査は九十九里浜沿岸において行い，どの程度内陸まで津波が浸水したか（浸水限界）を調べた．主には津波で運ばれて集積した浮遊物と住民からのヒアリングにより波先の位置情報を把握した（写真 2）．おおむね海岸から数百 m 内陸まで浸水していたが，津波が水路を伝って遡上した場所などでは 2 km 程度内陸まで浸水した所もあった．人工構造物の影響も大きいが，九十九里浜全体で見ると南部の方が浸水域が狭くなっている.

このほか蓮沼海岸で津波堆積物の調査を行い，3 測線で層厚と浸水高との関係を調査している.

写真 1　九十九里浜中部蓮沼海岸の砂丘．津波はこの砂丘を覆い，植物をなぎ倒した．電柱が陸側へ折れ曲がっている様子も見える.

写真 2　九十九里浜中部（山武市蓮沼）において確認された波先限界．歩道手前に津波で運ばれた泥質堆積物と植物片，ボラが観察できる.

4. 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台平野・石巻平野での調査.

産総研では，前述の通り，仙台平野および石巻平野において 869 年貞観地震やそれ以前の津波堆積物について詳しい調査を行ってきた.

今回の地震においても津波は仙台・石巻平野で 3～4 km 以上内陸まで浸水しており，津波堆積物を広く残している．今回の津波堆積物の分布状況やその層相などの情報は，過去の津波堆積物の理解において非常に重要であり，また堆積物の特徴と浸水限界や浸水深などとの関係を明らかにすることで，将来の津波規模の予測に資するデータになることから，これまでのべ 14 日間の調査を行った.

今回の津波堆積物は，海岸に近い場所では主に海浜から運ばれた中粒～粗粒砂からなり，場所により層厚 70 cm に及ぶが（写真 3），内陸部では砂層とそれを覆う泥層からなる（写真 4）．砂層部分の層厚は内陸へ徐々に薄くなっていく傾向にあり，代わって泥層が相対的に厚くなる．たとえば仙台市若林区では海岸から内陸2.8 km 地点における砂層の層厚は1 cm で，それを層厚 2 cm の泥層が覆う様子が観察された（写真 5）．また砂層は単純な一枚の層ではなく，海岸付近から内陸にかけて，層厚に関係なく侵食面や粒径の変化で区別される 3～4 層のサブユニットから構成されていることも確認した.

写真 3　宮城県山元町の海岸近くで観察された今回の地震による津波堆積物.

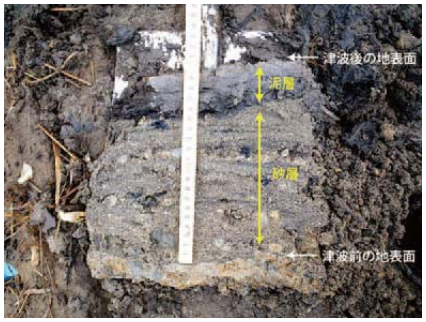


写真 4　宮城県山元町で観察された今回の地震による津波堆積物（海岸から約 1 km 内陸）.

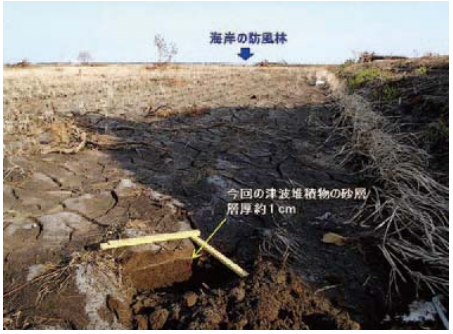


写真 5　仙台市若林区で観察された今回の地震による津波堆積物（海岸から約 2.8 km 内陸）.

津波堆積物の分布について，その内陸への到達限界位置を調べたところ，砂層は海岸線から 2～3.5 km 内陸まで確認できた．また泥層は砂層よりもさらに 0.5～1 km 内陸奥まで分布しており，津波の水自体はそこからさらに 0.5～1 km 内陸まで及んでいる．通常，地層として確認できる過去の津波の痕跡は主に砂質堆積物であることを考えると，これらの調査結果は，過去の津波の浸水域が津波堆積物から推定した位置よりもさらに内陸奥まで及んでいた可能性を示唆する.

砂質堆積物について，貞観津波と今回の津波とで，それぞれの時代における海岸線から内陸への到達限界距離を見ると，おおよそ似たような値を持つ．これは両者の津波の規模が，大まかに見て同程度だったことを示している．ただし人工構造物の有無が津波の浸水にも大きく影響していることから，同じ条件での厳密な比較は難しい状況である.

電中研チームによる津波被害調査報告

Report of tsunami damage investigation by CRIEP team

榊山　勉[1]・吉井　匠[2]・庄子　学[3]・楳田真也[4]

Tsutomu Sakakaiyama[1], Takumi Yoshii[2], Gaku Shoji[3] and Shinya Umeta[4]

[1]電力中央研究所　地球工学研究所，[2]電力中央研究所　環境科学研究所，[3]筑波大学大学院，[4]金沢大学

1. はじめに

当チームは，第 2 期調査 6 チームのうちの 1 チームとして 2011 年 3 月 31 日から 4 月 5 日に渡り，宮城県岩沼市から牡鹿半島南部の範囲の痕跡高さの測定と被害調査を行った．既に痕跡データが得られている地点間を補完するように地点を選び測定を行った．測定結果を図-1 に示す．図中の表記は，例えば (D-4) 8.80 I は，括弧内が地点番号，数字は計測値（単位 m），アルファベットは R：遡上高，I：浸水高を示す．当チームが測定したなかでの最大遡上高さは，牡鹿半島の鮫浦地区の谷川小学校近くの道路脇斜面での 20.9m であった．

本報告会では，宮城県南部の調査結果は別途報告があるので，被害調査結果から当チームが関心をもった結果について報告する．また，公開されている電力施設の調査結果について，合同チーム調査結果との比較を示す．

図-1　調査範囲と浸水高，遡上高の調査結果

2. コンテナの漂流・漂着

図-2 に示す仙台塩釜港の南側に位置する高砂埠頭は，被災直後立ち入りが禁止されていたが，津波調査ということで許可が得られ調査を行うことができた．図-3 に示すように，この埠頭ではコンテナが津波により流され 3 段重ねの山積みになっていた．図-2 の D-6 は隣接する JFE 条鋼仙台製造所での浸水高さ 6.8m を得た地点を示す．ここでの浸水深は 2.6m であった．40 フィートのコンテナが 3 段積みの高さ

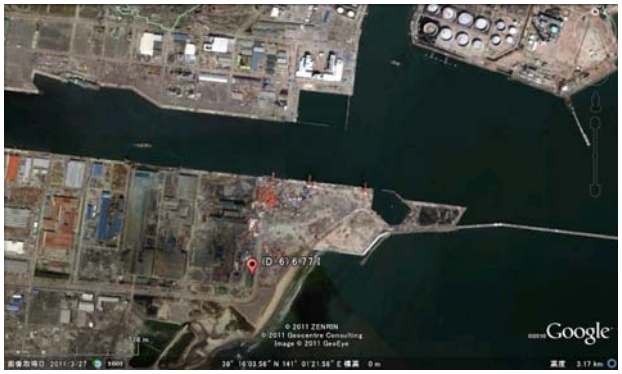


図-2　仙台塩釜港

図-3　高砂埠頭のコンテナ

図-4　天端高さ 11m の海岸堤防を越流

図-5　コンテナの漂着先：七ヶ浜町菖蒲田海水浴場南西の傾斜護岸

図-6　コンテナの漂流元と漂着先

は 7.5m を超える．したがって，この数 100m 間で浸水深にこの程度の変化があったことになる．

埠頭の南東側は図-4 に示す海岸堤防に護られていたが，津波は天端高さ 11m のこの海岸堤防を越流したことを確認した．堤防の一部は破堤していた．図-4 にみられるように堤外の砂浜にコンテナが流

図-7　仙台空港東南部海岸堤防

図-8　海岸堤防背面の局所洗掘

出していた．図-5 に示すように，仙台塩釜港の北に位置する七ヶ浜町の菖蒲田海水浴場近傍にもコンテナが多数漂着していた．周辺にはコンテナ埠頭はないので，高砂埠頭から漂流したものと思われる．図-6 に示すように，高砂埠頭と菖蒲田海水浴場間は約 5km の距離にある．津波が繰り返し作用したことにより流出したコンテナが輸送されたことを示すものと思われる．

3. 海岸堤防の被災形態の比較

宮城県南部の沿岸の調査に加えて，帰路の途中で福島県相馬市内の海岸線を視察した．仙台空港近傍の海岸堤防と相馬港北部の福島県相馬市高瀬地区の海岸堤防では，両者の被災形態は著しく異なった．図-7 に示す仙台空港から東に行った地区での海岸堤防は，図-8 に示すように堤防本体が天端まで残っている範囲の背後で堤防に沿って洗掘されていた．その背後の松林も残っている．ここでは，津波が海

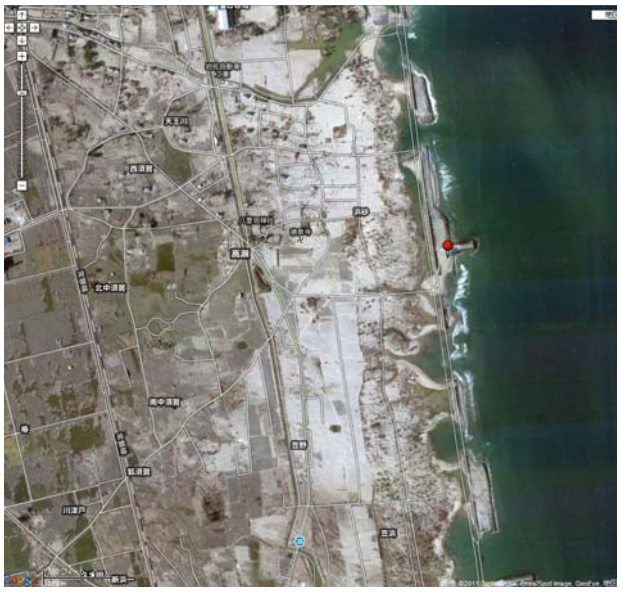


図-9　相馬市高瀬地区近傍の海岸堤防

岸堤防を越流し，背後が洗掘されたことを示す．

これと比較する相馬港北部の高瀬地区近傍の海岸堤防の位置を図-9 に示す．ここでは，特に図-9(b)に示す撮影場所から南側にみられるように，海岸堤防の本体そのものが数カ所にわたり崩壊し，歯抜け状態になっていた．堤防背後では図-8 とは異なり局所的に洗掘された様子はなく広い範囲で平坦になっていた．

このような海岸堤防の破壊の状況の違いは，津波の作用の違いが考えられる．相馬市沖では海上保安庁のまつかぜがソリトン分裂波を乗り越えたビデオが公開されている．また，避難時に撮影されたビデオでは海岸堤防に作用した津波が数 10m 打ち上げられた様子が映されていた．このようにこの地区では，仙台空港東の海岸とは異なりソリトン分裂波の作用による被災があるかもしれない．

4. 原子力発電所の痕跡高さとの比較

2011 年 7 月 8 日に，東北電力，東京電力，日本原子力発電 3 社が津波の調査結果をプレスリリースした．先の 4 月 9 日のプレスリリースに加えて計算結果と追加の検討結果が示されている．今回，対象地点に近い福島第一原子力発電所と女川原子力発電所

(a) 図-9 の撮影場所から北側の海岸堤防の背面

(b) 図-9 の撮影場所から南側の海岸堤防の前面

図-10　高瀬地区近傍の海岸堤防の被災

について合同チームの調査結果と比較する．ただし，福島原子力発電所の周辺は立ち入り禁止のため合同チームの調査結果では空白の領域となっているので，その周辺のデータとの比較になる．図-11 に女川原子力発電所から福島第一原子力発電所の位置関係を示す．同図には GPS 波浪計のうち，宮城中部沖と福島沖の GPS 波浪計の位置も示した．前者の宮城中部

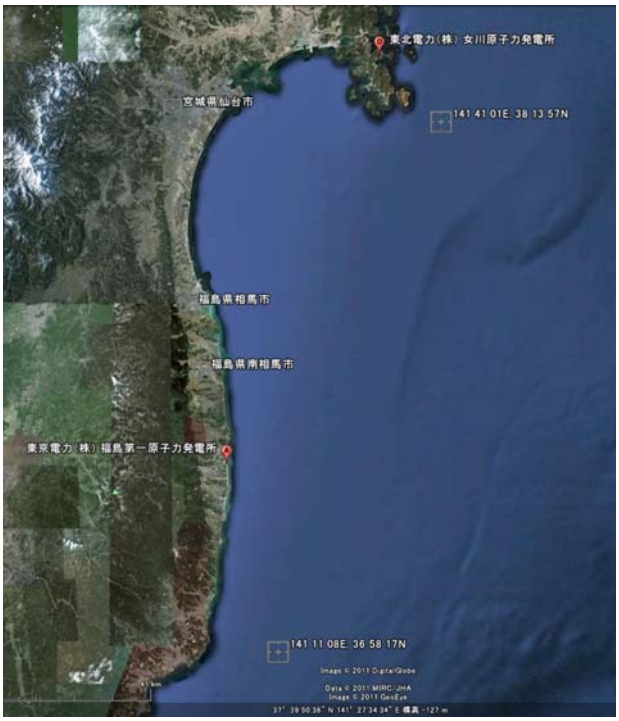


図-11　女川原子力発電所，福島第一原子力発所，GPS 波浪計の位置関係

沖の GPS 波浪計は牡鹿半島の東部に設置されており比較的女川原子力発電所に近い．後者の福島沖の GPS 波浪計は小名浜港沖に設置され，福島第一原子力発電所はどちらの GPS 波浪計からも離れた位置にある．これらの水位データは，参考図として末尾に示した．

(1) 福島第一原子力発電所の痕跡高さ [1)]

図-12 に福島第一原子力発電所を示す.図-13 に示すプレスリリースによると福島第一原子力発電所敷地内の最大遡上高は，南西部の建屋背後の法面上で 0.P.+約 17m から 18m である．また，最大浸水高は，同じく南西部の建屋における 0.P.+約 16m から 17m である.ここに,0.P.は小名浜港工事基準面を示し，東京平均海面 T.P.-727m である.示された値は 0.P.+約 17mから 18m のような表示となっており,1m 単位であり，合同チームのデータとは精度が異なる．図-14 では，発電所の敷地に浸水したと推定される領域が表示されており，タービン建屋，原子炉建屋など主要建屋設置されているエリアほぼ全域が浸水域となったと報告されている．

図-14 は，衛星写真から確認した福島第一原子力発電所の港湾施設の被災例である．図-14(a)は消波ブロック 1 個が傾斜堤の天端にのり上がっていたことを確認したものである．図-14 (b)では副防波堤の堤頭部のケーソンの滑動が認められる．

以上のように，主防波堤と副防波堤の機能に及ぼす著しい被災は認められない．

痕跡高さの比較は，女川原子力発電所の結果と一緒に後述する．

(2) 女川原子力発電所の痕跡高さ [2)]

図-15 に女川原子力発電所を示す.図-16 に示すプレスリリースによる女川原子力発電所の津波の遡上高さの調査結果を示す．津波の痕跡が認められた位置が図-16 中に線で示されている．最大遡上高は 0.P+13.8m であった．ここでの 0.P.は，福島原子力発電所の基準面と同じ表記となっているが，女川の工事用基準面高さを示し，東京湾基準面 T.P-0.74m である．

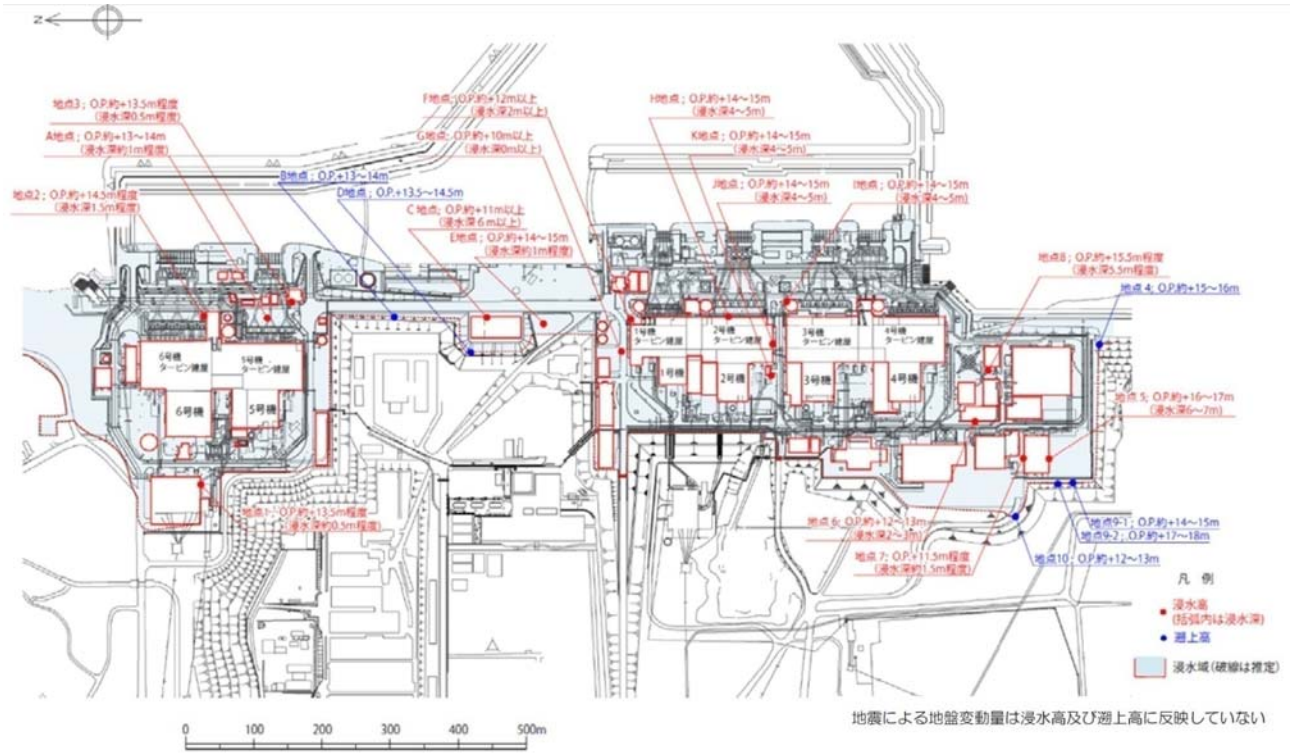


図-13　福島第一原子力発電所の津波痕跡高さの調査結果 [1)]

(a)　消波ブロックの天端への移動

(b) 堤頭部のケーソンの滑動

図-14　港湾構造物の被災

(3) 痕跡高さの比較

図-17 に福島第一原子力発電所と女川原子力発電所の調査結果を合同チーム調査結果と比較した結果を示す．福島第一原子力発電所の最大浸水高と最大遡上高は N37 度から N38 度の調査結果の 15m から 20m の包絡線に含まれるようである．福島第一原子力発電所の周囲は絶壁であること，発電所の敷地の地形は山を削った小さな窪地のような地形であることから，波長の長い津波にとっては直立壁に近いものと考えられる．背後地形が平らな仙台平野や緩やかな斜面を遡上する津波に比べると，遡上した津波の反射波の影響を受けやすい地形になっているものと考えられる．

図-15　女川原子力発電所

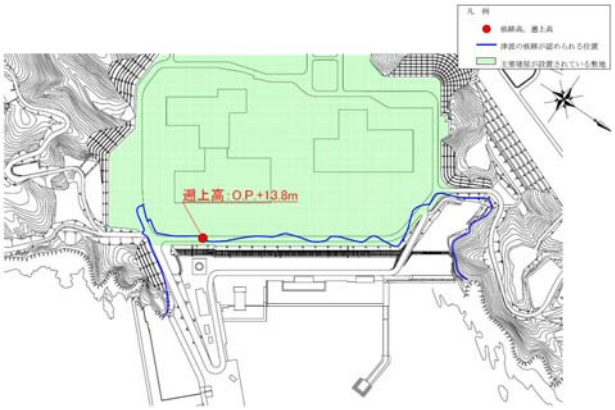


図-16　女川原子力発電所の調査結果 [2)]

一方，女川原子力発電所の測定結果は，高橋ら [4)] による女川港の痕跡高さ 14.8m から遡上高さ 18.4m より若干低い値となっている．

4. さいごに

本報告では，コンテナの漂着から津波による輸送距離を示す結果，海岸堤防の被災形態の違いと津波の特性との関係など調査内容から単に各地点で得られて内容を紹介するのではなく，複数の地点の上方から関連する内容をとりまとめた．さらに，計測データの空白領域である福島第一原子力発電所の痕跡高さと合同チームの測定結果との比較から，最大値の包絡線として矛盾しないことを示した．

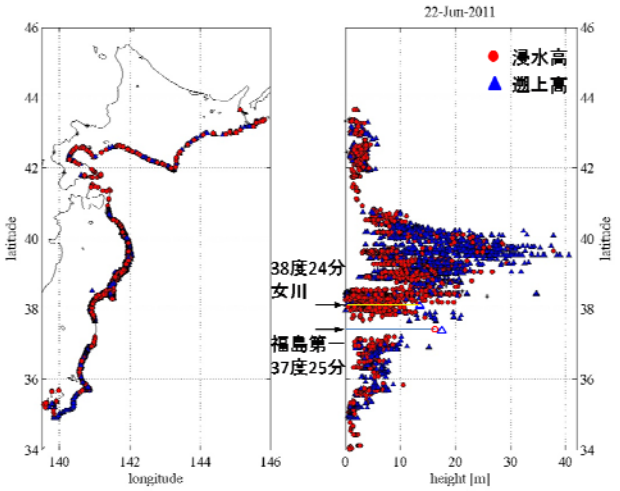
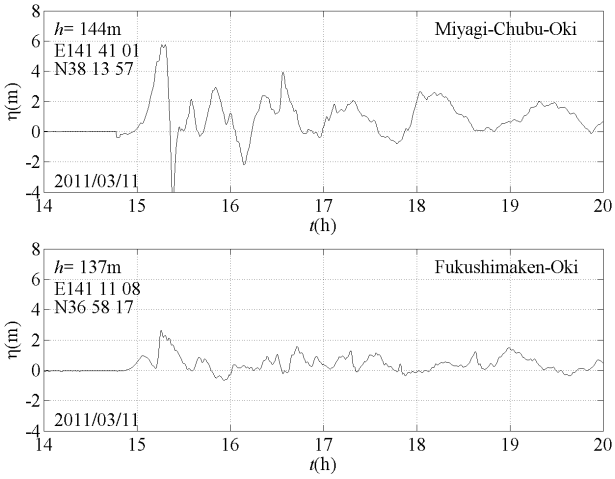
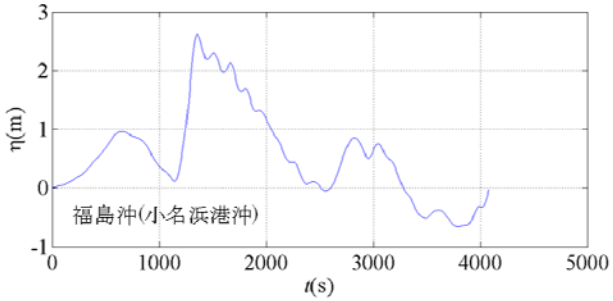


図-17　合同チーム調査結果との比較



参考図-1 GPS 波浪計の水位データ



参考図-2 GPS 波浪計福島沖水位データの拡大図

参考図-3 女川原子力発電所の水位データ

謝辞

本稿で用いた GPS 波浪計データは，国土交通省港湾局によって観測され，港湾空港技術研究所で処理されたものである．貴重なデータを公開していただいたことに，謝意を表します．

z

参考文献

1) 東京電力 http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110708b.pdf，2011 年 7 月 8 日参照．

2) http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afieldfile/2011/07/08/11070801_b1.pdf，2011 年 7 月 8 日参照．

3) 海岸工学委員東北地方太平洋沖地震津波情報，土木学会，http://www.coastal.jp/ttjt/，2011 年 7 月 8 日参照．

4) 高橋重雄他，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.1231，200p.

岩手県沿岸の海岸林と集落の津波被害状況

Coastal forest and town damage of the Tohoku Earthquake Tsunami in Iwate prefecture, Japan

星野大介 [1]

Daisuke Hoshino[1]

[1]森林総合研究所東北支所

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日，東北地方太平洋沖地震によって発生した巨大な津波が東北地方の沿岸に襲来し，多くの人命を奪い，家屋や諸施設に甚大な被害を与えた．沿岸の市町村には，津波被害を軽減および回避させるための防災施設が，つまり人工物施設である防潮堤や防波堤，自然物施設である海岸林などが配備されていたが，多くが今回の津波で破壊され，保護されるべき人命，家屋に被害が出てしまった．

被災現場の状況が時間と共に変化していることから，筆者は速やかな調査の必要性を強く感じ，津波被災約1ヶ月後に海岸林14ヶ所の航空画像判読と現地踏査を行った．本論文の目的は岩手県沿岸の市町村の海岸林と集落がどのように配置され，どのような津波被害を受けたか，被害軽微な箇所があればその特徴とはなにかを記載することである．

2. 調査地と方法

国土地理院や Google 社がウェブ上で公開している東北地方太平洋沖地震の前後の航空画像や衛星画像を用いて，岩手県沿岸の海岸林を探索した．国土地理院の２万５千分１地形図を用いて海岸林の全長，林帯幅の最大最小値を 10m 括約で記録した．調査地 1 箇所につき 1～3 集落を次のように探索した．2 万 5 千分 1 地形図で海岸林の中央付近から平野部の最深部方向へ直線を引き，最接近する集落を前方集落として記録した．また前方集落の後方に集落が存在する場合,被害甚大,被害軽微の 2 集落を記録した．地形図を用いて海岸線－集落間の水平距離を 10m 括約で記録した．また集落のおおまかな海抜を地形図の10m括約の等高線から按分して1m括約で記録した．海岸線から前方集落までの防災施設やオープンスペースの配置を記録した．防災施設については陸上物に限定し，防潮堤，海岸林のほか，防潮機能が期待できる公園林や屋敷林，凸地である盛り土された道路や線路，凹地である河川や湖沼を対象とした．また，無施設・無立木地である田畑や園地などオープンスペースの配置と，奥行き(m)を記録した．東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値（2011 年 6 月 22 日参照）から，海岸線付近の津波の高さを引用した．優先的に浸水高（痕跡高）を引用したが，遡上高のデータしか無い場合はこれを用いた．岩手県海岸保全施設等天端一覧表 [1)]から，防潮堤の高さ(T.P.)を引用した．

2011 年 4 月上旬，探索した海岸林付近で現地踏査を行った．海岸林の林冠層の構成樹種を記録した．海岸林，防潮堤，集落の被害状況を災害時における一戸建ての全壊・半壊の定義 [2)]を参考に記録した．防潮堤の集落側直下に越流した津波の洗掘痕が認められればその形態を記録した．

3. 結果

(1) 防災施設の構造と土地利用デザイン

岩手県沿岸 9 市町村から，東北地方太平洋沖地震津波の発生以前に海岸林が存在する 14 箇所を調査地として抽出した.

岩手県沿岸の海岸林 14 箇所の主要な構成樹種はマツであり，クロマツとアカマツが認められ，一部林分では広葉樹が混交していた．海岸林の全長は 210m～2000m，林帯幅は 10～700m の範囲にあった．概観して林帯幅 50m 前後の林帯が狭い海岸林が多い傾向にあった．防潮堤の天端高は過去 3 回の津波の浸水高を目標にしており，4.5～15.5m の範囲にあった [1].

海岸線―前方集落間距離は,3 箇所で 1080～1250m の範囲にあり，海岸線と前方集落との間には広い土地空間が存在した．前方集落 2 箇所も海岸線から 600m 前後の広い土地空間が存在した．ほかの前方集落 9 箇所は海岸線から 500m 以内の近距離に位置していた．多くの前方集落は海抜 10m 以下の低地に存在し，2 箇所の前方集落だけが海抜 18m 以上の高地に存在していた.

海岸線から前方集落までの防災施設とオープンスペースの配置は，海岸線の後ろに防潮堤・海岸林があり,次に他の防災施設やオープンスペースがあり，あるいはなく，前方集落に至っていた．多くの海岸林は防潮堤の後ろに位置したが，3 箇所では防潮堤の前に配置されていた．とくに海岸線―前方集落間距離が長かった前方集落 2 箇所の前には，広い土地空間に水平距離にして奥行き約 900～500m の田畑や園地が存在していた．2 箇所では，防潮堤，海側海岸林，河川，公園林，屋敷林が，あるいは海側海岸林，防潮堤水門，集落側海岸林が連続的に配置されていた.

(2) 津波高と海岸林，防潮堤，集落の被害

本調査地における東北地方太平洋沖地震津波は高さ 8～23m に及ぶ巨大な津波であった(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2011)．宮古より北の隆起海岸地域の津波高は 20-23m であり,宮古以南のリアス式沈降海岸地域の津波高は 8-19m より高かった.

全ての調査地の海岸林が，津波によって全壊あるいは半壊していた.防潮堤は 8 箇所で全半壊したが，6 箇所でほぼ被害がなかった．しかし，全ての防潮堤の直下に洗掘跡が見いだされ，津波は全ての防潮堤を越流していた.

前方集落 14 箇所の被害状況は全壊 8 箇所，半壊 2 箇所，被害軽微 4 箇所であった．さらに前方集落の後方には，全壊した後方集落 5 箇所と被害軽微の後方集落 4 箇所が認められた.これら集落 23 箇所について，海岸線における津波高と集落の海抜，海岸線－集落間距離，海岸林の林帯幅（最小・最大値の平均値）の関係をプロットしたところ，海抜 20m 前後以上で海岸線から 500m 前後以上離れていた高地集落の被害が軽微であった．海抜 15m 以下の低地集落の被害状況と海岸線からの距離の関係は不明瞭であった．防潮堤の高さが 15.5m 以上，あるいは林帯幅 1000m 前後の海岸林があるとき，低地集落の被害は軽微であった.

4. 考察

海岸林の持つ公益的機能は，防風，飛砂防止，防潮,防霧,飛塩防止といった防災機能のほか,風致,生物保護，水産資源保全機能などと非常に多岐にわたり，この多面性こそが長所であり，沿岸市町村の生活環境において海岸林が重要な所以である [3]．しかし，海岸林の防災機能，とりわけ防潮機能は津波や高潮を海岸林単体で完全に防止できる訳ではなく，あくまでも軽減，あわよくば回避を期待できる程度である [4]．この点，津波，高潮に対する防災施設と

して特化した防潮堤や防波堤もまた同様である[5]．首藤[4]は三陸大津波，南海地震津波，チリ地震津波，日本海中部地震津波が襲来した 43 箇所で，津波の浸水深に対する防潮林の林帯幅の効果を評価したところ，浸水深 3m までは林帯幅 20～30m の防潮林が，浸水深 3～5m までは 30m 以上の林帯幅が津波の流勢緩和に有効であったと指摘した．今回の東北地方太平洋沖地震津波の高さは，本調査地において最低でも 8m，最高で 23m まで及んでおり，首藤が検証した事例以上の規模であった．

本調査の結果から，集落の津波被害回避には，まずもって高地への集落移転が効果的であることがわかった．また高地に集落を置くだけでなく，集落の前にはある程度の広い土地空間が配置してあり，オープンスペースとして活用されていた．この土地空間は津波が侵入した際，緩衝地帯として働いたものと推定した．

低地集落の津波被害に対する海岸林－集落間距離の軽減効果は明瞭ではなく，防潮堤が高かったり，海岸林の林帯幅が 1000m を超えたりした 2 箇所でのみ回避，軽減効果が認められた．この 2 箇所は，海岸線から集落の間に林帯幅の厚い海岸林の存在を可能とする広い土地空間があり，その中には天端高の高い防潮堤水門や，津波を遡上させた河川が存在していた．つまり，今回の規模の津波から低地にある集落を，海岸林や防潮堤単体で守ることは難しく，集落前の広い土地空間にそれら複数の防災施設が複合的に配置されていることで，低地集落の津波被害が軽減，回避されたものと結論づけた．

謝辞

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループには津波高のデータを，岩手県土木部には防潮堤天端高のデータを引用させて頂いた．国土地理院や Google 社には公開している航空写真や衛星画像を本研究に活用させて頂いた．御礼を申し上げる．山本幸一氏，坂本知己氏には，様々なご助言を頂いた．岩手県農林水産部，沿岸広域振興局岩泉土木センター，岩手県下閉伊郡田野畑村役場の関係各位には被害地調査に便宜を図って頂いた．心から感謝を申し上げる．

参考文献

1）岩手県:岩手県海岸保全施設等天端一覧表,2011.

2）昭和 43 年 6 月 14 日総審第 115 号内閣総理大臣官房審議室長通達 ，災害の被害認定基準の統一について，1968.

3）村井宏，石川政幸，遠藤治郎，只木良也：日本の海岸林―多面的な環境機能とその活用―，pp.247-373，ソフトサイエンス社，1992.

4）津波研究小委員会:津波から生き残る－その時までに知ってほしいこと－,pp.122-123,土木学会，2011.

5）首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界，第 32 回海岸工学講演会論文集，465～469，1985.

現地調査から見た津波浸水高の分布の特徴

Characteristics of Distribution of Tsunami Inundation Height found by Field Surveys

林　豊[1]・阿部正雄[2]・飯野英樹[2]・前田憲二[1]・対馬弘晃[1]・岡田正實[1]・木村一洋[1]・岩切一宏[1]

Yutaka Hayashi[1], Masao Abe[2], Hideki Iino[2], Kenji Maeda[1], Hiroaki Tsushima[1], Masami Okada[1], Kazuhiro Kimura[1], and Kazuhiro Iwakiri[1]

[1]気象研究所　地震火山研究部，[2]気象庁　地震火山部

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分にモーメントマグニチュード（Mw）9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した．気象庁は，この地震に伴い，東北地方太平洋岸などに大津波の津波警報を発表するなど，全国 66 の津波予報区全てに対して津波注意報または津波警報を発表した[1)]．

気象庁では，海岸における「津波の高さ」を基準として，津波警報，津波注意報および津波予報（以下，予警報）を発表している．ここで，津波の高さとは津波によって生じた潮位異常，すなわち，津波がなかったと仮定した場合の潮位を基準とした潮位の変化量のことである（図 1）．

気象庁では津波予警報を発表した場合には，検潮所における潮位観測値等を分析して，予警報の発表内容が適切であったか否かを検証し，その結果を業務の参考として活用している．検潮施設の数には限りがあることから，顕著な津波があった場合には，現地調査を通じて，検潮施設のない海岸も含めて詳細な津波の高さの分布を把握することができれば，予警報の検証のために有効となる．2011 年東北地方太平洋沖地震による津波では，東北地方太平洋沿岸の検潮所の多くで，強い地震動あるいは高い津波のために障害を生じ，最大の津波の高さの観測値が得られていない場合もある．このため，現地調査により津波の高さの分布を解明することは，とりわけ重要性が高い．

気象庁（気象研究所と各地の気象台を含む；表 1）は，主として「津波の高さ」に近い性質を持つと考えられる海岸近傍での津波浸水高（痕跡高とも；図 1）に着眼した現地調査を実施し，その速報解析の結果を，「地震・火山月報（防災編）」[2)]で公表した．

本稿では，津波浸水高の速報解析の結果[2)]の概略を報告する．また，気象研究所では同時に，局所的な津波の挙動に関する観測値を収集することを目的とした調査も併せて実施しているので，その結果の概略も報告する．

なお，気象庁（気象研究所と各地の気象台を含む）が実施した現地調査結果は，全て東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループに報告している．

2. 手法と目的

気象庁地震火山部は，全国の気象台が統一した方法で地震動や津波の現地調査を実施できるように，2011 年 3 月に現地調査のためのマニュアル[3)]を改定した．2011 年東北地方太平洋沖地震による津波現地調査は，このマニュアルに沿って実施されたが，実質的には，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの現地調査マニュアルに示された方法と同一である．

(1) 津波浸水高分布の調査

津波の痕跡等の位置と海水面の高さの差をレベル測量した値を計測値とし，計測時の潮位と津波最大波の推定到達時刻における平常潮位との差を補正して，津波浸水高（痕跡高）とした．対象範囲は太平洋側で，調査の実施官署は気象庁本庁，気象研究所および各地の気象台である（表 1)．

痕跡等は，建造物に残された浸水痕，樹木に絡まった漂流物，目撃者の証言に基づく浸水箇所の上限などを，津波浸水高（痕跡高）を測定可能な箇所を海岸から近い場所で探した．計測には，レーザー距離計，トータルステーション等を用いた．津波最大波の推定到達時刻は，測定値が得られる最寄りの検潮所での最大波の出現時（あるいはその推定時刻）を用いた．計測時の潮位と津波最大波の推定到達時刻における平常潮位は，潮位表が得られる最寄りの検潮所での天文潮位の差で代用した．

測定値は，気象庁本庁と気象研究所に集約して，品質管理と測定値の補正処理が行われた．

(2) 詳細な津波分布の調査

調査対象地区は，茨城県北茨城市の平潟地区，茨城県ひたちなか市大津漁港付近，千葉県旭市の海岸の 3 箇所とし，各地区内に多数の測定点を設けて，詳細な津波分布の調査を調べた．

津波浸水高（痕跡高）に限らず，遡上高も測定対象としたこと，計測はトータルステーションを用いたこと，調査と解析の実施官署が気象研究所のみであることを除けば，2.(1)と同じ方法である．

3. 調査結果（速報）

(1) 津波浸水高分布の調査

本調査の解析結果（速報）は,「地震・火山月報（防災編)」[2)]で公表している．概要は図 2 に示すとおりであるが，これらは，津波の高さに相当する測定値だと考えることができる．岩手県沿岸では 10m を超えたことが判明したほか,北海道から四国にいたる太平洋沿岸各地で数 m の津波の痕跡が確認された．

(2) 詳細な津波分布の調査

a) 茨城県北茨城市の平潟地区

本地区では，防波堤の背後にあたる漁港内と，それに隣接する住宅地で海岸から近い場所での津波浸水高の違いに着目した調査を実施した．平潟地区での津波に伴う水位上昇は，防波堤の背後になる漁港内では 3.5m 程度，数百 m 離れた漁港外では 7m 程度と，大きく異なっていた（図 3a)．

なお，浸水したのが 1 階までであっても，大きな漂流物が衝突して 2 階外壁が損傷を受けた建物がある（図 3b)．このことは，津波予測や避難計画において，浸水高や津波の高さだけで津波のハザードを議論すべきではないことを明確に示している．

b) 茨城県ひたちなか市大津漁港付近

本地区では，海岸から高台へと通じる一つの通りを選んで，浸水方向に沿った浸水高の分布のサンプルを得ることを目的とした調査を実施した．得られた分布は図 4 のとおり．ここでは，津波がかけ上がる際に，浸水高がなめらかに変化してはおらず，階段状に浸水高が高くなる様子が認められる．

c) 千葉県旭市の海岸

本地区は九十九里浜の最東端にあたる．最寄りの検潮所（銚子）では，津波到達から 2 時間以上経過した 17 時 22 分に最大波を記録していることから，聞き取り調査を多く取り入れて，後続波の挙動を知ることを目的とした調査を実施した．得られた分布は図 5 のとおり．聞き取り調査の結果，飯岡地区など長さ 1km 程度の海岸では第三波と思われる 17 時頃に最大波があり,それ以外の海岸では 15 時台の第一波が最大波だったことも分かった．旭市での津波の死者が集中している地区とこの範囲が一致してい

るが，この範囲での津波は，周囲に比べて際立って高いわけではないことも分かった．

飯岡地区では，第一波で自宅が浸水したために避難し，暗くなる前に家の後片付けをしようと，混雑した避難所から自宅に帰ったところ，津波が来て亡くなった方がいるという話も聞いた．このような行動が旭市での被害を拡大させる要因になった可能性がある．

4. 今後の課題

本稿で報告した速報解析値では，計測時の潮位と津波最大波の推定到達時刻における平常潮位として，天文潮位と実際の潮位との差を考慮していない簡易な補正を行っている．また，計測時と津波到達時の潮位基準面の違いも考慮していない．

実測潮位は，天文潮位のモデルと実際との差，海流，海上風，気圧の影響などで，多くの場合は天文潮位と数 cm～数十 cm の違いがある．また，余効変動あるいは余震に伴う海岸付近での地殻変動量は，一般には，本震に伴う地殻変動よりも小さいが，東北地方の太平洋沿岸の検潮所の潮位基準面は本震後数十 cm 変化しているため，これらの地域では，計測時と津波到達時の潮位基準面の違いは数 cm 以上に達すると考えられる．

以上のことから，今後はより正確な補正をして，最終的な解析値をまとめる計画である．ただし，その際，速報解析値と比べて，結果の違いは数十 cm 以内だと考えられる．最終的な解析値は，2011 年東北地方太平洋沖地震津波の発生機構の研究などに活用していきたい．

謝辞

被災地で多くの方々から親切に情報を提供していただき，現地調査を実施することができました．
高橋智幸先生，森信人先生，都司嘉宣先生はじめ，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの各位には，調査計画の立案や調査結果の解析に際して，ご教示いただきました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）Ozaki, T.: Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0) - Tsunami warnings/ advisories and observations -, *Earth Planets Space*, in press, 2011.

2）気象庁：特集 1.「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」，地震・火山月報（防災編），平成 23 年 3 月号, 気象庁, pp.57-148，2011.

3）気象庁地震火山部: 附録．地震津波現地調査マニュアル,地震津波災害調査指針，気象庁地震火山部, pp.1-58, 2011.

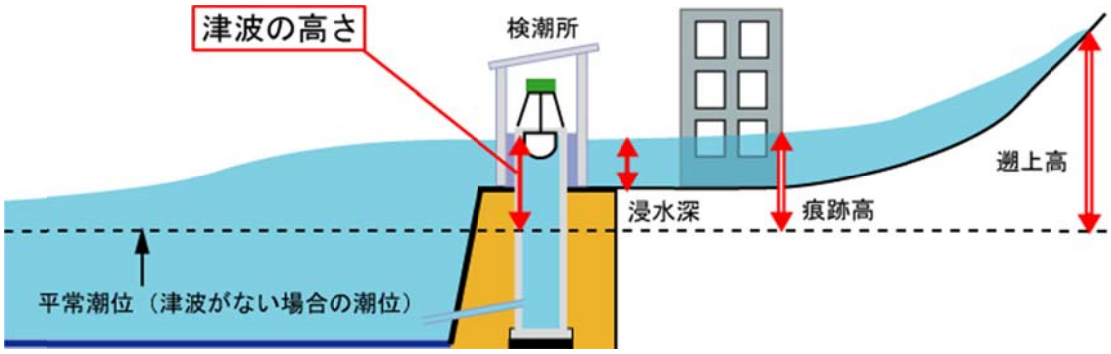


図 1　津波の高さ，津波浸水高（痕跡高），遡上高の定義 .「地震・火山月報（防災編）」[2)]より .

表 1　津波現地調査実施日及び実施官署.

	実施官署調査実施日	調査実施日実施官署	調査対象市町村
札幌管内	札幌管区気象台	3 月 14～16 日	浦幌町、豊頃町、大樹町、広尾町、日高町、新冠町、新ひだか町、浦河町、様似町、えりも町
	函館海洋気象台	3 月 14～16 日	函館市、八雲町、長万部町、森町、鹿部町
	室蘭地方気象台	3 月 14～15 日	豊浦町、洞爺湖町、伊達市、室蘭市、登別市、白老町、苫小牧市、厚真町、むかわ町、日高町
	釧路地方気象台	3 月 14～16 日	釧路市、釧路町、白糖町、厚岸町、浜中町、根室市、標津町
仙台管内	青森地方気象台	3 月 29～30 日	八戸市、むつ市、六ヶ所村
	盛岡地方気象台	3 月 28～30 日	久慈市、宮古市、釜石市
	気象庁	3 月 29～30 日	大船渡市
	仙台管区気象台	3 月 28 日 4 月 1～2 日	石巻市、仙台市、東松島市、塩釜市、松島町、利府町、七ヶ浜町、相馬市
	気象庁	4 月 2～3 日	相馬市、いわき市
東京管内	気象研究所	3 月 26 日	北茨城市、日立市
	気象研究所 水戸地方気象台	3 月 25 日	ひたちなか市、大洗町
	気象庁 銚子地方気象台	3 月 25 日	銚子市
	気象庁	3 月 26 日	鉾田市、神栖市
	銚子地方気象台	3 月 29 日	銚子市
	気象研究所	4 月 12 日～13 日	旭市
大阪管内	津地方気象台	3 月 14 日、3 月 25 日 3 月 28 日	鳥羽市、伊勢市、紀北町
	和歌山地方気象台	3 月 14～15 日	海南市、由良町、白浜町、田辺市、串本町、那智勝浦町、太地町
	徳島地方気象台	3 月 13 日、3 月 16 日 4 月 15 日	阿南市、小松島市、美波町、牟岐町、海陽町
	高知地方気象台	3 月 14 日、3 月 25 日 3 月 29～30 日 4 月 8 日、4 月 12 日	須崎市、土佐市、中土佐町、土佐清水市、大月町、宿毛市、四万十市、黒潮町、室戸市、田野町、安田町、安芸市、香南市

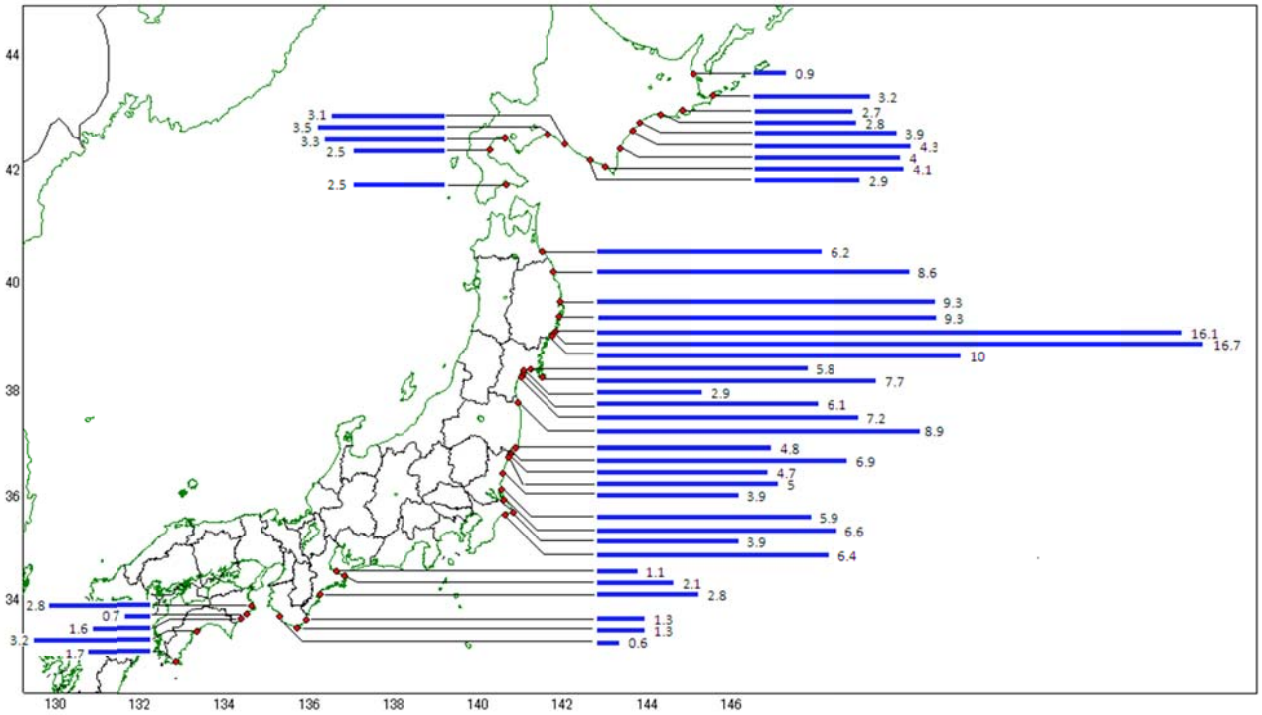
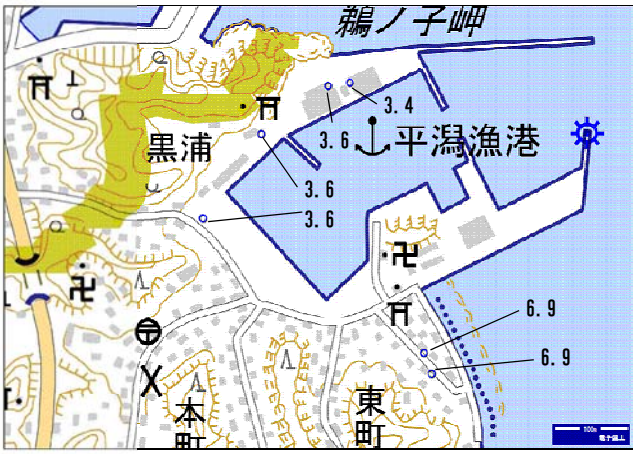


図 2　主な調査地点における津波の痕跡から推定した津波の高さ．

単位は m.「地震・火山月報（防災編）」[2)]より．

(a)



(b)

図 3　茨城県北茨城市平潟漁港付近の津波高の分布（基図には電子国土の地形図を利用）．

(a)浸水高，単位は m．(b)浸水と漂流物の被害を受けた住宅の例．

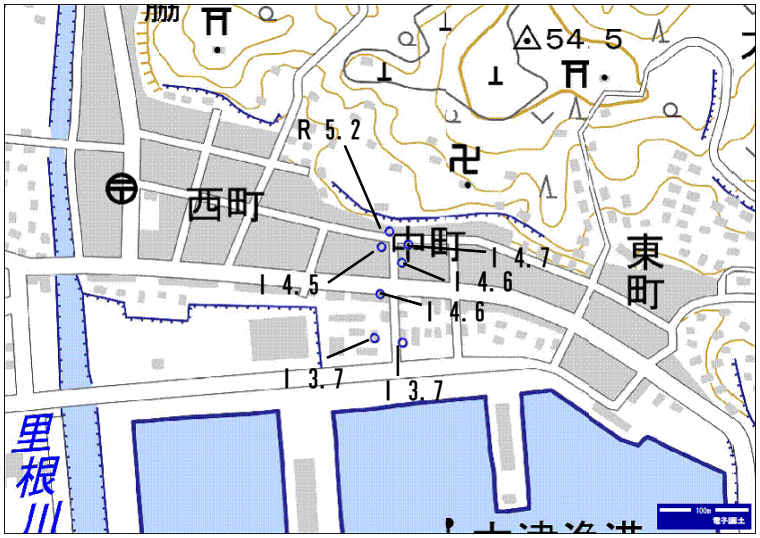


図 4　茨城県ひたちなか市大津漁港付近の津波高の分布（基図には電子国土の地形図を利用）

I は浸水高，R は遡上高を示す．単位は m.

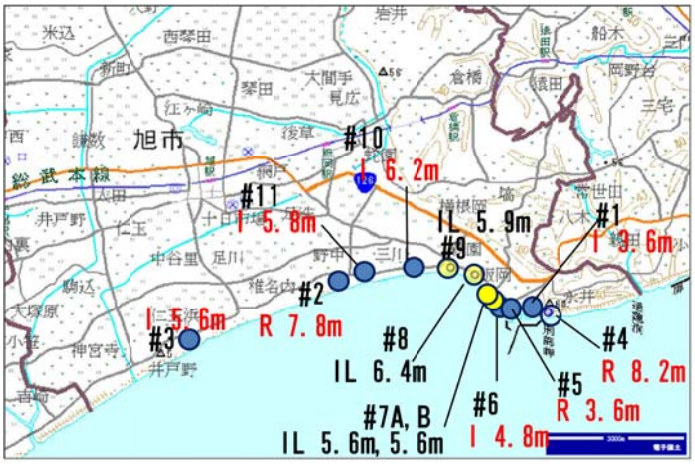


図 5　千葉県旭市の津波高の分布（基図には電子国土の地形図を利用）

I は浸水高，R は遡上高，L は後続波が最大波であることを示す．#はサンプル番号.

海岸堤防の被災状況と仙台平野における津波痕跡分布の特徴

Seawall Damages by 2011 Tsunami on the Pacific Coast of East Japan and Decreasing of Tsunami Trace Height for Run up Direction in Sendai Plain

諏訪義雄 [1]

Yoshio Suwa[1]

[1]国土技術政策総合研究所　河川研究部　海岸研究室

1. はじめに

東北太平洋沖地震津波を受けて，国土技術政策総合研究所及び国土交通省水管理国土保全局・東北地方整備局では,沿岸各県の協力を得ながら痕跡調査,海岸堤防の被災状況等の調査を行っている．これまでに得られた調査結果等について報告する．

2. 海岸堤防・護岸の被災状況

(1) 堤防天端高と痕跡浸水高

図-1 は,合同調査グループの速報結果[1)]をもとに、特に被害が大きかった岩手・宮城・福島の３県の主な海岸の堤防天端高と海岸近くの痕跡浸水高を比較したものである．釜石から相馬まで痕跡浸水高が堤防の天端高を 5m 以上上回っている海岸が多いことがわかる．以下，青森県,茨城県，千葉県も含めて海岸堤防・護岸の被災の特徴を述べる．推定越流水深の大きさに応じて被害の程度が大きくなる傾向が見られた．

(2) 青森県

青森県沿岸の堤防天端高と痕跡浸水高を比較すると越流水深は数十 cm～2.5m の間と推定された.三沢から八戸にかけての沿岸で，写真-1 のように裏法被覆工が越流水によって流され，裏法尻・天端保護工・堤体が洗掘を受けている被災が多かった．表法被覆工や波返し工には被害は見られないものが多い．また，小河川河口等において引き波時の流れが集中して拡大した流路跡が残されている事例も見られた．

写真-1 裏法被覆工・天端の被災（一川目海岸）

写真-2 拡大した流路跡（六川目海岸）

(3) 岩手県

深刻な被災例は，写真-3～4 の陸前高田の事例に示すような堤防が破堤・全壊したうえに海岸線が大

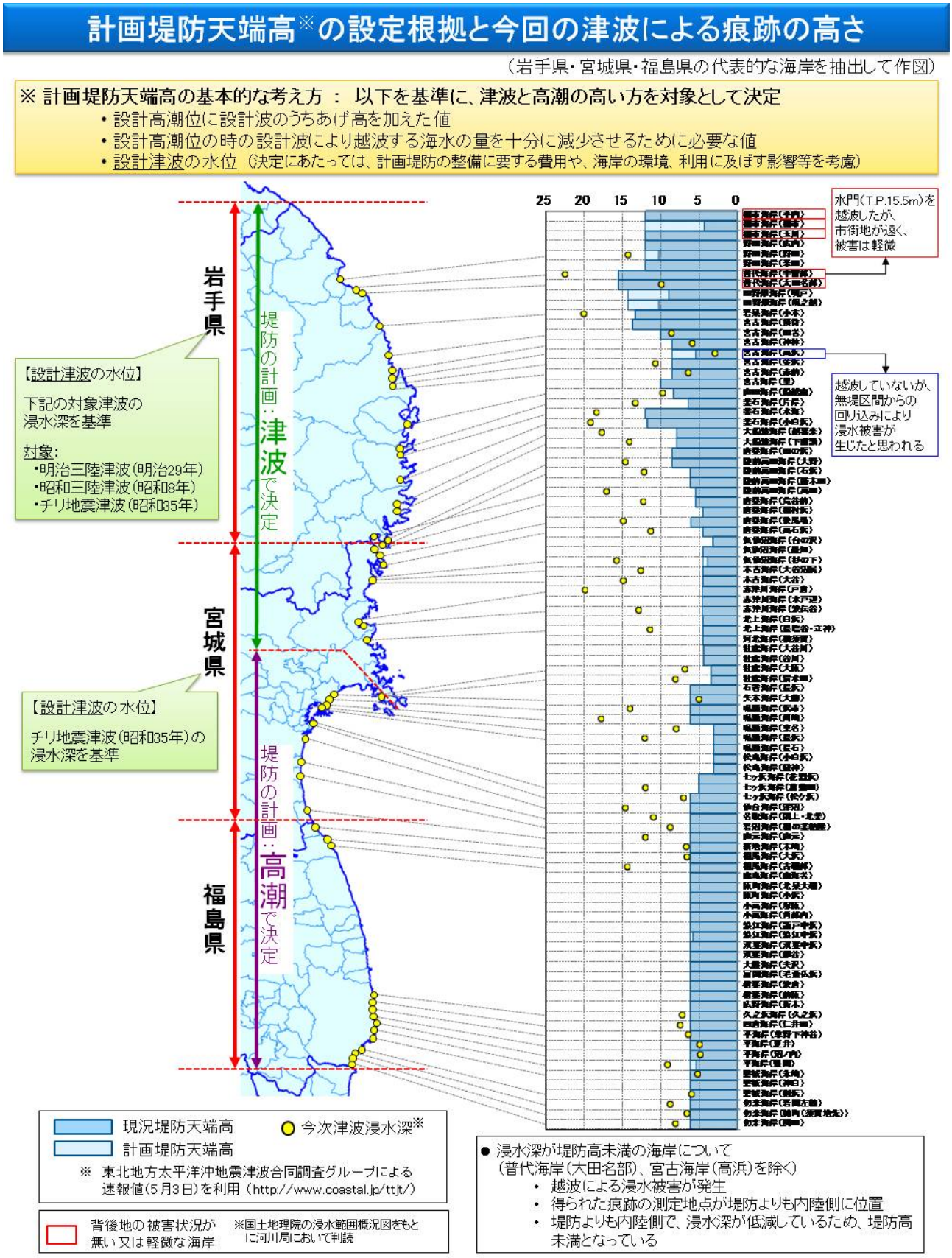


図-1 岩手県～福島県の堤防天端高と痕跡浸水高

写真-3 津波来襲前の陸前高田海岸（緑線：海側堤防（天端高 T.P3m）、茶色線：陸側堤防（天端高 T.P5.5m））

写真-4　津波来襲後の陸前高田海岸（緑線：海側堤防（天端高 T.P3m）、茶色線：陸側堤防（天端高 T.P5.5m））

写真-5 表法被覆工の海側への倒壊（下甫嶺海岸）

きく後退するものである．このような被災は他にも船越南，片岸，越喜来等の海岸でも発生していた．

宮古以北の野田，明戸，田老海岸でも堤防が全壊に近い被災を受けていたが，海岸線の後退までは生じていない．金浜海岸，大槌漁港海岸では歯抜け状の破堤が発生していた．部分破壊事例では写真-5 のような引き波による表法被覆工の倒壊が見られることも特徴である．

(4) 宮城県

岩手県中南部沿岸と同様，最も深刻な被災である堤防の破堤・全壊と海岸線後退が三陸沿岸では志津川漁港海岸・横須賀海岸等で，平野部では山元海岸で発生している．平野部では歯抜け状の破堤や引き波時に拡大した流路跡も多く見られた．

破堤に至らない被災では，裏法尻の洗掘と裏法被覆工・天端保護工・堤体が被災し，写真-6 のように表法被覆工のみが全部あるいは下部のみ残っている事例が目立った．

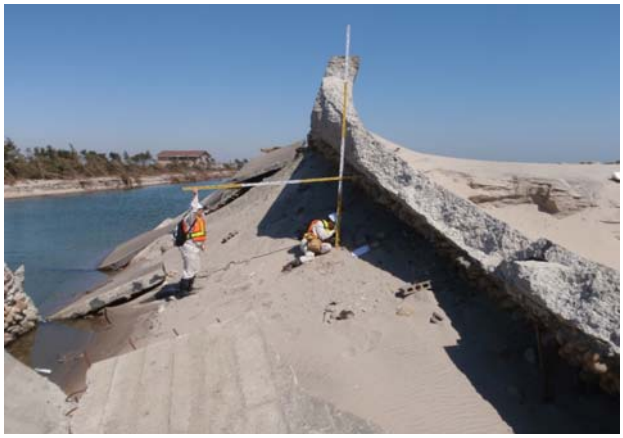


写真-6 表法被覆工のみ残存（吉田浜）

破堤・全壊した場所と破堤に至らない場所では背後の被害が大きく異なる．破堤箇所では写真-7 のように地面の洗掘が 100m 以上に及び写真-8 のようなブロックのうちこみ等が見られる場合がある一方，破堤していない箇所では写真-9 のように洗掘も法尻の 20m 程度で済んでいる．

写真-7 海岸線の大幅後退（山元海岸）

写真-8 破堤箇所背後ブロックうちこみ（山元海岸）

写真-9 部分破壊箇所背後の被害（蒲崎海岸）

(5) 福島県

福島県沿岸は北部と南部で被災の程度も大きく異なる．図-1 に示したとおり，北部は越流水深が 4～8m と大きかったと推定される一方，南部は 2m 以下と推定される．被災状況も北部では，写真-10 のような破堤・全壊と海岸線後退が発生している．

写真-10 破堤・全壊と海岸線後退（古磯部海岸）

南部の最も深刻な被災は写真-11 のような波返し工の倒壊である．写真-11 の事例では海側・陸側両方に倒壊しているので押し波と引き波の両方で被災していると推定される．

写真-11 波返し工の倒壊（豊間地区海岸）

写真-12 天端保護工・法肩の被災（須賀海岸）

そのほか南部の典型的な被災事例は写真-12 のような波返し工裏の天端保護工や法肩の被災である．

(6) 茨城県

茨城県では堤防天端を越えている場所と越えていない場所が混在している．越流水深は 0～2m と推定される．典型的な被災は，写真-13 のような天端保護工の陥没が生じているものである．地震動による沈下・すべりの影響も複合されていると思われる．

写真-13 天端保護工の陥没（鉾田海岸）

(7) 千葉県

九十九里海岸沿岸の特に北部で被災が見られる．越流水深は 0～2m である．典型的な被災は，写真-14 のような砂浜が消失している護岸の天端・表法の陥没と写真-15 の裏法尻の側溝の移動である．

写真-14 砂浜消失海岸の天端陥没（野手海岸）

写真-15 裏法の排水溝移動（木戸海岸）

3. 仙台平野における痕跡分布の特徴

今回の津波災害では，仙台平野等の平地を津波が遡上し，家屋・自動車等を漂流物に変えていった．津波氾濫流の遡上方向の特徴を調べるため，仙台平野では，図-2 の測線で痕跡標高の遡上方向分布を測定した．代表的な測線における測定結果を図-3 に示す．図から，仙台平野では痕跡標高が遡上方向に減衰していく特徴があることがわかる．ただし，丘陵地が海岸線に近づく南部の坂元川測線では減衰傾向が鈍くなる．平野部における痕跡標高の減衰傾向は，石巻平野でも確認できた．

図-2 仙台平野痕跡標高測定測線

次に，痕跡標高の減衰が一般的なものなのか確認するため，比較として三陸地域の陸前高田と田老において，合同調査グループの測定結果 [1)]を使わせていただき，痕跡標高の遡上方向分布を整理してみた．陸前高田の結果について，図-4 に測線を図-5 に結果を示す．

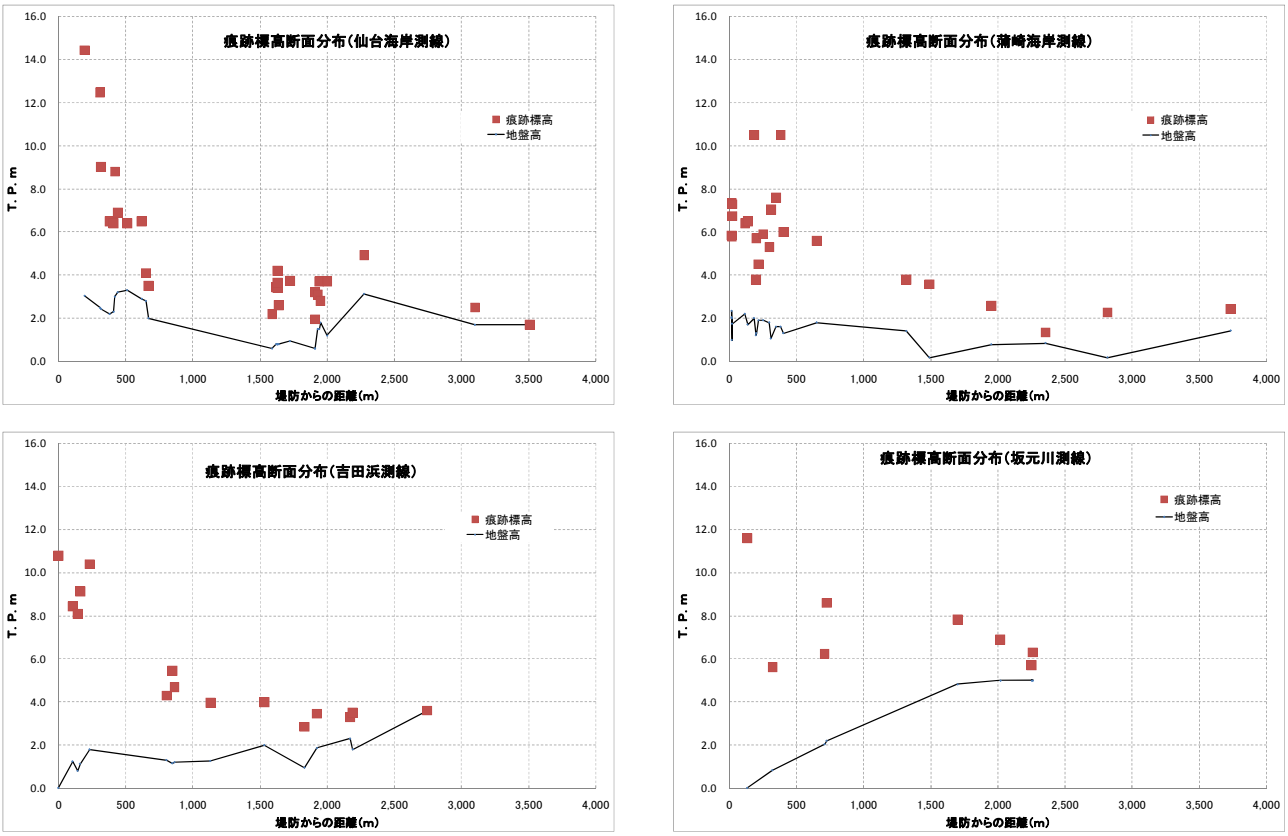


図-3 痕跡標高の遡上方向分布（仙台平野）

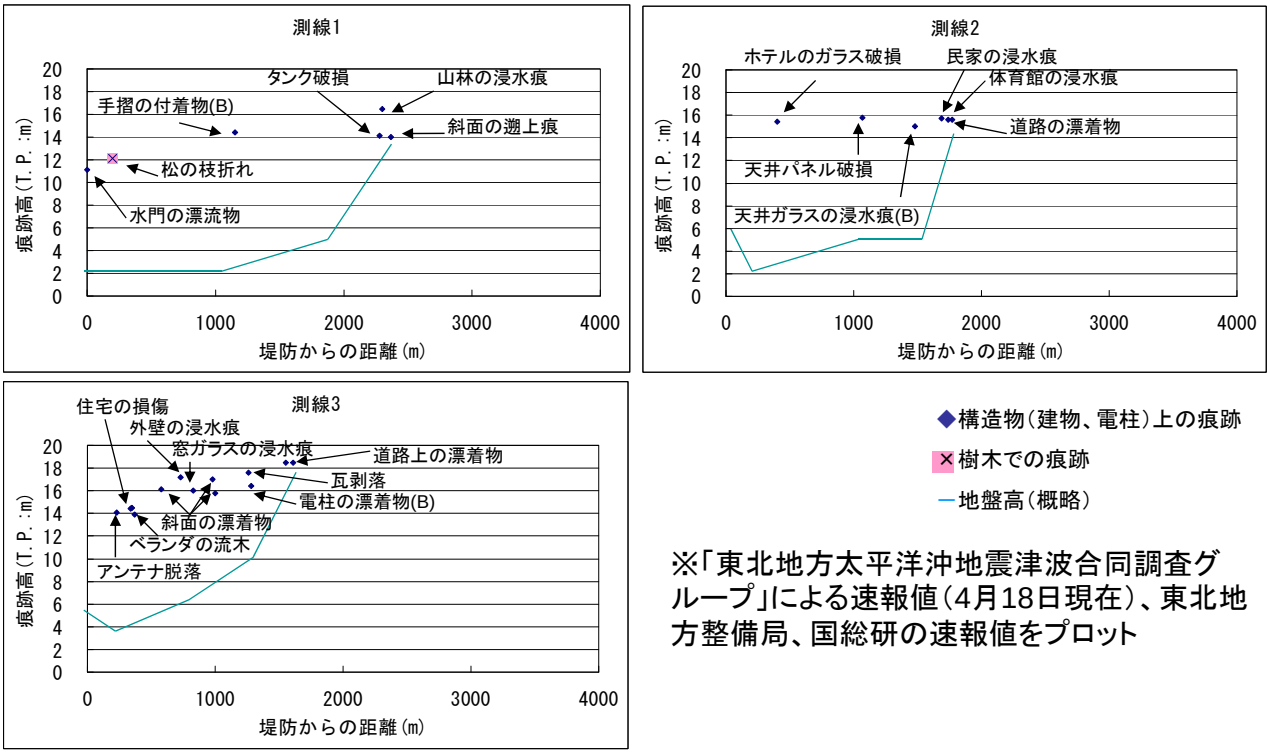


図-5 痕跡標高の遡上方向分布（陸前高田）

図から，陸前高田では，痕跡標高が遡上方向に減衰せず，むしろ遡上方向に上昇する特徴があることがわかる．田老でも堤防が大破した区間では同様の特徴が見られた．

これらから，今次津波の痕跡の遡上方向分布の特徴が平野部と三陸地域で異なり，平野部では減衰し，三陸地域や奥行きの狭い平野では減衰せず，場合によっては上昇する傾向があることがわかった．これらの地形的な特徴は，津波につよいまちづくりを考える際に考慮すべき要素の１つであると考えられる．

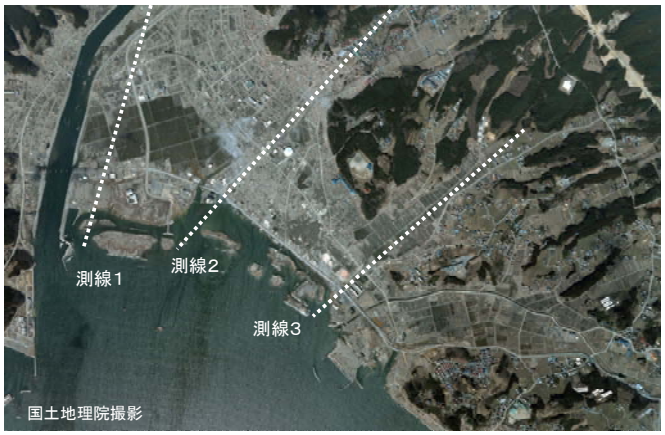


図-4 痕跡標高整理測線（陸前高田）

4. まとめ

以上まとめると次のとおりである．

(1) 青森から千葉までの太平洋沿岸の堤防・護岸の被災の特徴は以下のとおりである．

・推定越流水深が大きくなるほど被災の程度も深刻になる傾向がある．

・最も深刻な被災は堤防・護岸が破堤・全壊し，海岸線が後退するものである．次いで破堤・全壊するが海岸線後退までは生じないもの，歯抜け状に破堤するものである．

・部分破壊では，裏法・天端の被災，波返し工の陸側への倒壊等押し波による被災と表法被覆工の海側への倒壊等引き波によるものが見られる．

・茨城，千葉では地震動による影響も複合したと思われる被災も見られる．

(2)仙台平野等において痕跡標高の遡上方向分布を調べた．その結果，平野部の奥行きの大きい場所では痕跡標高が遡上方向に減衰していることがわかった．比較のため，合同調査グループの調査結果をもとに陸前高田でも痕跡標高の遡上方向分布を調べたところ，減衰は見られずむしろ上昇している傾向が見られた．津波痕跡標高の遡上方向分布は地形によって異なる．

謝辞

東北地方整備局には，痕跡調査や被災状況調査等で多大な協力をいただきました．青森，岩手，宮城，福島，茨城，千葉各県には被災情報の提供や現地調査等で多大な支援をいただきました．この場を借りて感謝申し上げます．

参考文献

1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，http://www.coastal.jp/ttjt/

海上を進行中の津波の波頭等の計測

Measurement of the crest on ocean and other geometric characteristics of the tsunami — the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake —

神谷泉[1]・乙井康成[1]・岡谷隆基[1]・小荒井衛[1]

Izumi Kamiya[1], Kosei Otoi[1], Takaki Okatani[1], and Mamoru Koarai[1]

[1]国土地理院 地理地殻活動研究センター

1. はじめに

国土地理院は，平成 23 年 （2011 年） 東北地方太平洋沖地震の津波の浸水範囲を調査し，公表したが，その後，本津波に関していくつかの幾何学的な計測を試みたので，その結果を報告する．なお，これらの結果を含め，本地震に関する国土地理院のとりくみについては，下記 URL を参照ください．

http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html

2. MMS を用いた浸水高の計測

(1) 方法

MMS（Mobile Mapping System ; モービルマッピングシステムあるいはモバイルマッピングシステム ; 図–1）は，自動車を用いた計測用の画像取得システムである．国土地理院は，6 個の CCD カメラと GPS/IMU（車両等の位置と姿勢を継続的に計測するシステム）を含むトプコン社製 IP-S2 Lite を用いて，本地震の津波被害を，位置を再現できるかたちで記録した．

我々は，その記録の中で，図–2 に示す経路のデータ（4 月 14 日取得）を用い，津波浸水高を計測した．ここで，浸水高は，浸水深（地上から津波の痕跡があったところまでの高さ）＋標高である．計測の様子を図–3 に示す．画面上で地物に合わせて点をクリックすると，システムが，異なる位置から撮影された写真上の当該点に対応する点を検索し，2 枚（あるいはそれ以上）の写真の光線が交わる点の 3 次元座標を求める．画面上で 2 点をクリックすると，図に示すとおり，2 点を頂点とする座標軸に平行な直方体を画面に表示し，2 点間の相対位置を表示する．

図–1 MMS の例（http://www.topcon.co.jp /news/20091001-518.html を一部改変）

図–2 浸水高の計測に使用した MMS の計測経路

図–3 MMS データを使用した計測の様子

このようにして，浸水深を計測した後，地震後の航空レーザ測量データによる標高を加えることで，浸水高を求めた．

地震発生から 1 ヶ月経過した写真から，画像上の水平線が津波の痕跡であるか否かを判定することは，必ずしも容易ではない．そこで，本計測では，計測者とは異なる点検者をおいた．

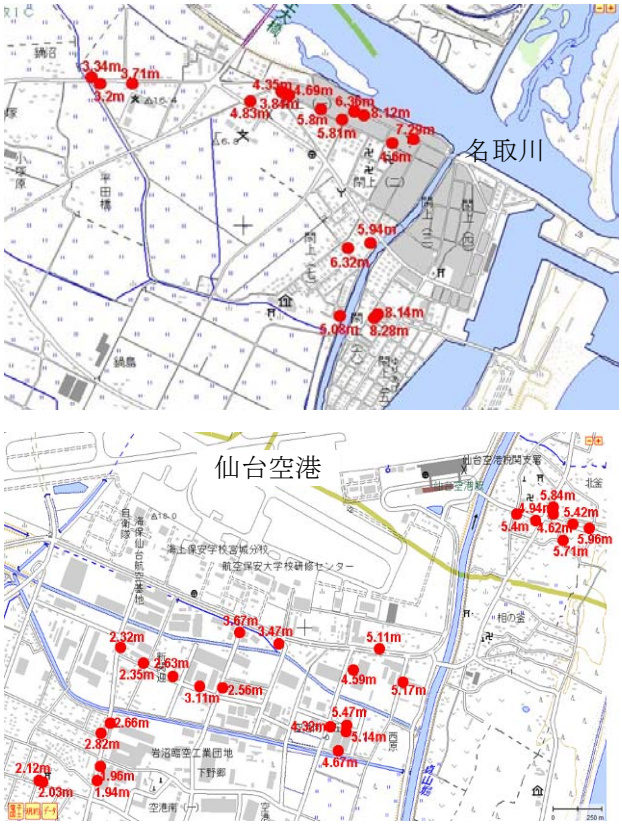
(2) 結果

本計測の計測箇所と計測された浸水高を図–4 に示す．また，本計測の結果と，東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが取りまとめた計測値との比較を図–5 に示す．

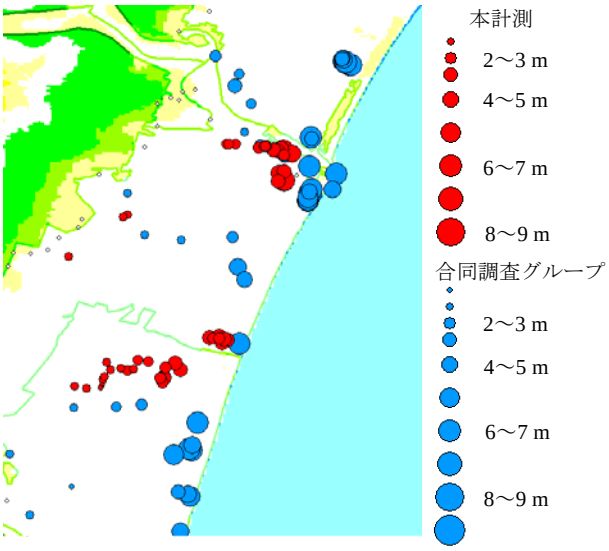
(3) 考察

図–5 を見ると，本計測の結果と，合同調査グループが取りまとめた計測値は，概ね一致している．図–5 の凡例がメートル単位であることを考慮すると，本計測結果は，少なくともメートル単位の精度を有していると考えられる．

現地において痕跡を認定する場合は，必要に応じ視認位置を変更する（近づく，異なる方向から観察する），あるいは直接対象物に触ることにより，ハレーション，電線の影，建物本来の色の違い等の影響を回避することができる．一方，本手法では，固定位置から固定の露出で撮影された静止画あるいは動画を用いるため，これらの問題点を回避しにくい．更に，本システムでは，電柱，樹木等の柱状物における痕跡の認定もできない．従って，単に津波の浸水高を計測する方法としては，通常の現地調査の方が適切である．一方，位置を特定可能な災害の記録として MMS データは有効であると考えられ，その一つの応用として浸水高が計測できる点に，本手法の意義があると判断される．特に，通常の現地調査



図–4 津波痕跡計測箇所と浸水高



図–5 合同調査グループの計測値との比較

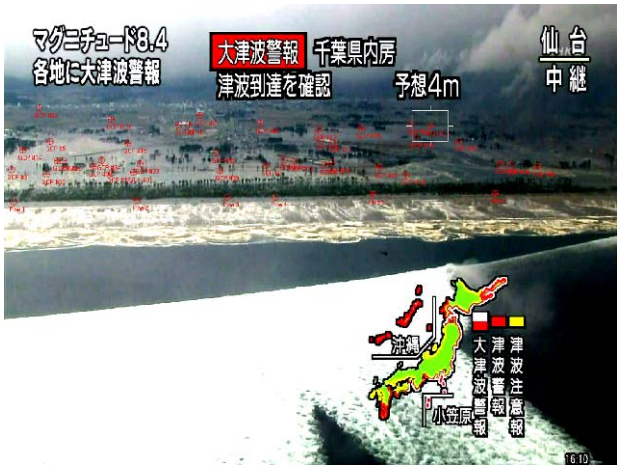
が困難な災害直後に車両が進入できる場合，MMS による画像の記録と浸水高の計測は有効であると考えられる．また，MMS は，計測のトレーサビィティーの確保のためにも有用である．

3. 海上を進行中の津波の波頭の位置の計測

(1) 計測方法

海上を進行中の津波（最高波の次の波）の波頭を NHK が中継していた. 国土地理院北海道地方測量部による録画を用いて，この波頭の位置を計測した．

まず, 動画から, 20 秒間隔で 4 枚の静止画（図–6）を抽出した．次に，この静止画と，地震後の空中写真の正射画像（オルソ画像；http://portal.cyberjapan.jp/denshi/index3_tohoku.html）を比較し，両者においてともに確認できる対応点を GCP（地上基準点）として取得した．この GCP を使用して，射影変換[1] を用いて幾何補正を行ない，静止画のオルソ画像を作成した．射影変換は，平坦地の空中写真を正射画像化する方法である．従って，地表面の起伏，レンズの歪み等は考慮されていない．一方，画面の縦横比は自動的に調整されるため，結果には影響しない．一旦正射画像が作成されると，対応点の発見が容易となり，より多数の GCP が取得できる．GCP の配点の例を図–6 に示す．この例では，43 点の GCP を取得している．



図–6 静止画の例（赤は，GCP のマークと名前）

本研究では，陸上に分布する GCP を使用して，海上の位置を外挿により求めるため，特に，沿岸部の GCP が重要となる．海岸の松林と砂浜の境界は明瞭に確認できるが，境界線上の位置を特定することは困難である. そこで, この境界線上に GCP を設定し, 境界上の GCP の残差が 1 画素以内になるよう, 境界線上で GCP の位置を適宜移動させた．

最後に，静止画の正射画像上で，波頭の位置を図化した．

(2) 時刻あわせ

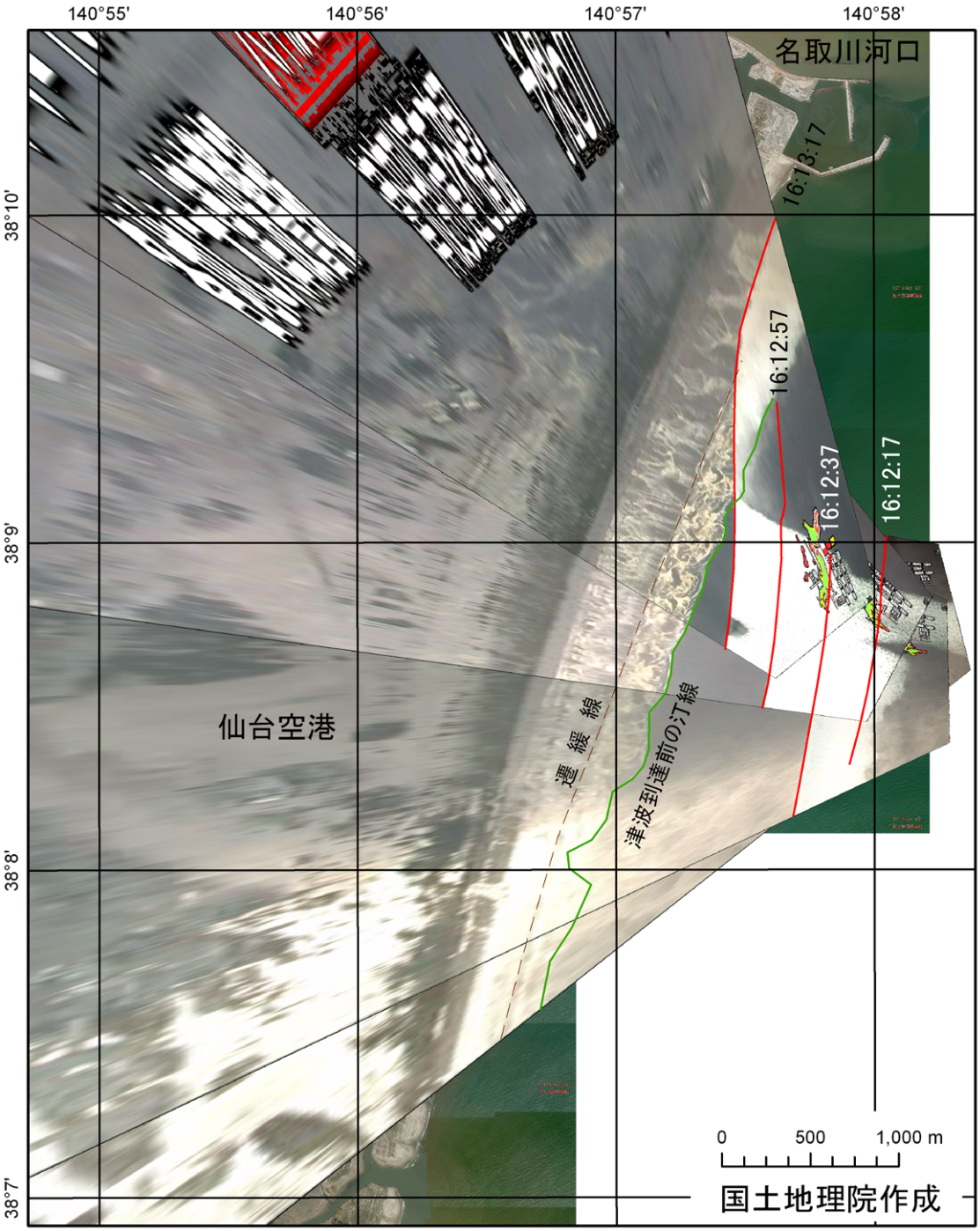
本計測では，当該箇所の映像に「中継」と表示されているため，放映に伴う時刻のずれを考慮する必要はない．しかし，NHK の録画には，時報等，時刻を直接特定できる事象が記録されていなかった．そのため，同じ時間に放映された STV（札幌テレビ）の録画を使用した．STV の録画には，分単位の時刻が表示されていた．そこで，この表示の変化をキーとして，STV の録画の時刻を同定した．

次に，午後 6 時半ごろに行われた気象庁の会見を NHK と STV がともに中継していたため，会見中の事象をキーとして，NHK と STV を同期し，NHK の録画の時刻を同定した．

また，これとは独立な時刻の情報であるアナウンサーの発言（現在時刻は 4 時になったところです，現在時刻は間もなく 5 時になるところです), 震度速報のテロップの表示時刻を使用し，先の時刻同定と矛盾しないこと確認した．

(3) 結果

本計測の結果を図–7 に示す．動画を見ると，松林と，その時点の汀線の間に，明瞭な遷緩線（線より陸側で傾斜が急で，海側で傾斜が緩やかとなる線）があった．そのため，汀線と遷緩線も図化した．津波の速度は約 50 km/s（14 m/s）であった．この速度に相当する水深と波高の和（d+H）は, 20 m である．



図–7 海上を進行中の津波の波頭の位置

(4) 考察

地上ディジタル放送では，2 秒程度の遅延が生じる．本計測では，放送を録画した時刻を使用していないため，遅延による時刻同定の誤差は生じない．しかし，画面に表示される時計が遅延を考慮して調整されている可能性がある．この調整がなされると，中継を映した時刻と画面に表示される時刻が異なることになり，時刻同定に誤差を生じる．また，NHK の録画の時刻同定には，これとは別に，2 回の時刻同期の操作を行っている．以上，時刻の同定には数秒の誤差がある可能性がある．ただし，時刻の相対値は正しいので，速度の計測には影響しない．

本計測の方法は，これまでの津波の計測とは異なる．本計測は，以下の点において，意味があると考

える．

- 被災のため検潮記録が得られていない最大波以後の波の到達状況を把握することができる．
- 最大波の引き波による汀線の前進を定量的に把握することができる．

4. 陸上を進行中の津波の先頭の位置の計測

(1) 方法

NHK は，名取市閖上地区ほかにおける津波の進行状況も中継していた．この録画を用いて，津波の先頭の位置を計測した．なお，この計測の際には，前章で用いた北海道地方測量部による録画を入手していなかったため，Youtube にアップされていた録画（http://www.youtube.com/watch?v=LA6woyPZLp4）を用いた．時刻合わせの方法は前章と同じである．

動画から，計測に適したコマを選択し，これと地震前の空中写真の正射画像（http://portal.cyberjapan.jp/denshi/index3_ortho.html）を比較し，その時点の津波の到達範囲を同定し，正射画像上で描画した．描画には，上記 URL で利用できる電子国土の描画機能を使用した．

(2) 結果

計測結果を図-8 に示す．

(3) 今後の方針

今回の計測結果は予備的なものであり，今後，NHK および他の空撮画像を使用して，より広範囲の津波の先頭の位置の計測を行う予定である．また，陸上で撮影されたビデオ映像も使用することを検討している．その際，本会等で，津波の各分野の専門家の意見をお聞きし，どのようなデータが求められているかを把握し，計測方法及び計測対象を選定する予定である．

5. まとめ

位置を再現できる災害記録手段として MMS は有効と考えられ，その一つの応用として少なくともメートル精度の津波の浸水高の計測ができた．

図–8 陸上を進行中の津波の先頭の位置

仙台空港付近の海上を進行中の津波（最高波の次の波）の波頭の位置を計測できた．

名取市の陸上を進行中の津波の先頭の位置を計測できた．陸上の津波の計測については，専門家の意見を踏まえ，計測対象及び計測方法を見なおし，計測を継続する予定である．

謝辞

（社）日本測量機器工業会からは，MMS を貸与いただくとともに，その使用方法を教えていただいた．MMS の計測は，国土地理院応用地理部が行った．国土地理院北海道地方測量部からは NHK 及び STV の録画を提供していただいた．ハンドル名 tsunami201103 氏が Youtube にアップした映像を使用させていただいた．この場を借りて，お礼いたします．

参考文献

1) 高木幹夫，下田陽久：新編画像解析ハンドブック，pp.1304-1308，東京大学出版会，2004.