

水工学シリーズ 14-B-6

国内外における沿岸域災害調査

東京大学 教授

田島芳満

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

国内外における沿岸域災害調査

Post-Disaster Survey along Foreign or Domestic Coasts

田島芳満

Yoshimitsu TAJIMA

1. はじめに

「海岸・港湾に関する調査・観測の技術」をテーマとした水工学に関する夏期研修会(Bコース)の開催にあたり、国内外の沿岸域における災害調査に関するテーマで話題提供をさせていただくこととなった。私自身は、土木学会、海岸工学委員会からの派遣調査団の一員として参加した Hurricane Katrina や Cyclone Sidr, 台風 Haiyan に伴う高潮災害調査や、海岸工学委員会を事務局として運営した東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの一員として参加した津波災害調査、また、西湘海岸における高波に伴うバイパス道路の崩落災害の調査や、スリランカにおけるインド洋津波による津波堆積物の調査など、国内外における種々の沿岸域災害調査を経験させていただく機会を得てきた。

いずれの調査においても、調査時の環境や被害の実態、それに対応した調査計画や内容など、それぞれに異なる特徴があり、現場において臨機応変に調査計画や内容を修正していくことが重要であると感じたが、その一方で、それぞれの調査で共通する部分も多くあり、過去の災害調査事例を参照しながら事前に調査計画を立て、十分な準備をすることは、効率的で漏れの少ない災害調査を遂行する上で重要であると考えた。また、過去の災害事例との比較をする上でも、同様の基準に基づき調査を実施することはきわめて重要であると言える。このような観点から、特に津波に対する調査については、調査内容に関するマニュアルも整備されている（たとえば Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 1998, 今村, 1998, 首藤ら, 2007）。本稿では、これらのマニュアルの内容も参照しつつ、自身が経験した調査を中心とした具体例も交え、沿岸域災害調査を行う際の留意点や、情報の活用方法について整理する。また、特に最近の災害調査で非常に有用な知見を与えている被災時の画像データの分析に関する調査事例についても紹介したい。

2. 調査に向けた準備

2. 1 調査チームの編成

調査チームの編成は、国内、海外の違い、災害の特徴、調査の目的等を勘案しながら決める必要がある。まず第一に、被災地における救助、救援、復旧活動の妨げにならないこと、調査隊員の安全を最優先にすることを念頭に置く必要がある。たとえば東日本大震災時における調査(The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011)では、まず被害が大きかった岩手県、宮城県、福島県の3県には少人数の先遣隊が入り、緊急性の高い痕跡調査などの実施時期や規模などを検討するための広域的な情報収集を実施した。これと並行して、浸水被害の規模や程度が比較的小さく、痕跡が早期に消失してしまう可能性が高い3県以外の地域については、オンラインで調査地点や調査結果を共有しながら、各地における調査を順次実施した。次に被害の大きかった3県については、まず、痕跡の消失が早い浸水高や打ち上げ高、氾濫域を把握することを目的とし、領域別に分けた6チームを編成した。この6チームの調査目的は津波による氾濫特性の定量的な把握が主であったため、海岸工学を専門として過去の災害調査の経験がある研究者を中心にチームが編成された。土木学会では、発災直後に「東日本大震災特別委員会」が設置され、上記の津波痕跡調査を含む専門調査に加え、様々な分野の専門家による連携が必要な総合調査も第一次、第二次、第三次と目的を変えながら実施している。

海外における調査においては、調査の頻度が限られ作業効率がより重視される。また、調査地点へのアクセス、

現地における諸々の情報収集、治安や被災地住民へのヒアリングなど、現地の研究者や技術者による協力が必要不可欠になる。たとえば Hurricane Katrina や Sandy による北米での災害調査では、現地研究者や技術者による詳細な実態調査が既に実施されていたため、日本からの調査団の目的は、たとえば大学やアメリカ工兵隊、FEMA などの関係機関を訪問してヒアリング調査を実施することや、特徴的な氾濫被害状況に着目して、わが国における現状の防災対策との違いを検証することなどであった。このため、Katrina の災害調査(柴山ら, 2006)では海岸工学、水工学を中心としたメンバー、Sandy による災害調査(国土交通省・防災関連学会合同調査団, 2013)では、専門の異なるメンバーと国土交通省の職員が合同で調査を実施し、異なる視点にたった情報収集を行った。

一方、Cyclone Sidr に伴うバングラデシュにおける災害調査(柴山ら, 2008)や、台風 Haiyan に伴うフィリピンにおける高潮・高波災害調査(Tajima ら, 2014)では、高潮や高波の実態把握も十分ではなかったことから、バングラデシュではバングラデシュ工科大学(BUET)の研究者との、フィリピンではフィリピン土木学会 (PICE: Philippine Institute of Civil Engineers)との合同調査という形を取り、現地研究者や技術者とともに氾濫の実態を定量的に捉えることを第一目的とした調査を実施した。バングラデシュ、フィリピンともに、被災地での宿泊場所や移動手段、食糧が限られていたこと、また現地のメンバーとともに行動することで必然的にチームの人数が大きくなることから、日本側からの参加メンバーはいずれも 6 名と人数を限定する必要があった。また調査内容もまずは緊急性の高い痕跡調査に主眼が置かれたため、海岸工学を専門とする災害調査の経験者でチームを編成した。ただし、同行した PICE の専門家は、海岸工学に加えて風工学、構造物、環境など異なる分野のメンバーがチームに加わった。専門分野の異なるメンバーでヒアリングを交えながら被災当時の状況を議論し、定量的な計測とデータの整理・分析は経験豊富な日本側の専門家が行うという形となり、効率的な役割分担ができていた。また、大学をはじめとする研究機関からの専門家だけでなく、フィリピン全国の治水や災害復旧を実施する公共事業道路省(DPWH: Department of Public Works and Highways)の技術者が同行してくれたため、現地における主要な機関への立ち入りやヒアリングなど、非常にスムーズに調査を実施することができた。

2. 2 事前の情報収集

国内外を問わず、被災地では移動手段や宿泊場所、食糧、水など、通常時とは大きく環境が異なるため、事前の情報収集とそれに応じた準備が重要である。特に、先に現地に入った調査隊からの情報は貴重であり、様々なネットワークを通じて、宿泊場所、移動手段、食糧、水などの状況に加え、電力の利用可否、気候、治安、衛生状況、連絡手段などの情報を可能な限り事前に得ておくことが重要である。また海外での調査においては、ビザ取得や安全などに関する渡航情報や GPS などの計測機器の持ち込みに関する制限、税関をスムーズに通過するために公的文書の準備などを含め、相手国カウンターパートによるサポートも必要不可欠になる。ただし、被災国のカウンターパートは様々な対応に追われていることから、書類準備を含めたこれらのサポートを依頼する際には、依頼ルートを一本化するなどして、できるだけ効率よく最低限の依頼で済ませる様に配慮する必要がある。

また、特に痕跡高さなどの調査を実施する際には、特に海外では調査時の海面水位から痕跡高を計測することが多いため、調査期間中の潮位や海岸線へのアクセスなどの情報が得られると効率的である。バングラデシュでは、海岸線まで自動車で到達することができず、バイクと運転手を雇って移動したこともあった。

また高潮や津波における沿岸災害では、外力場を俯瞰するために被害の大きかったところだけでなく、浸水被害のなかった地点を含めて氾濫状況の全容を把握することも重要となる。このため、可能な範囲で事前に高潮・高波の数値解析を実施し、その特性を把握したうえで調査を実施すると効率的である。一方で、特に限られた情報の基で実施した数値解析では、現地における実際の氾濫浸水特性とは異なる場合も想定されるため、偏った先入観が調査内容、結果に影響を及ぼすことがないように、十分に留意する必要がある。

その他の情報として、現地で携帯 GPS を用いることにより、場所の記録は可能であるが、調査をしながら地形や条件と痕跡高との位置関係を俯瞰的に把握することが非常に重要となるため、GPS には可能な限り情報量の多い電子地図をインストールしておくこと、また、予定している調査地点の衛星画像や航空写真、地図を事前に入手

しておく必要もある。

2. 3 その他

上記の情報収集に加え、特に海外の災害調査に持参すべき物品について、挙げておきたい。

①携帯 GPS：乾電池で駆動する携帯 GPS を調査員全員がそれぞれ携帯し、軌跡ログ機能を使って等距離間隔あるいは等時間間隔で緯度経度情報を記録する。記録された緯度経度情報は、調査時の移動経路を記録するだけでなく、後述するデジタルカメラ画像やビデオ、ボイスレコーダーによる記録データに位置情報を付加する際に重要となる。また数日間にわたって調査を実施する際には、調査地点を空間的にバランスよく配置させるためにも、軌跡ログの参照は役に立つ。

②デジタルカメラ：被災地における撮影画像には、撮影日時に加えて撮影地点における緯度経度情報、さらに、撮影方角を合わせて記録すると良い。GPS 搭載型のデジタルカメラも有用であるが、カメラの起動から十分な精度の見込める緯度経度を推定できるようになるまで時間を要することもあるため、通常のデジタルカメラも併用し、携帯 GPS で記録した軌跡ログに基づき、調査後に緯度経度情報を画像に書き込める様に準備をしておくが良い。様々な痕跡を撮影する際には、スケールを添えた痕跡の写真だけではなく、特に海岸までの距離や状況、氾濫時における周辺の状況が分かるような写真を合わせて複数枚撮影すると良い。

③ボイスレコーダー：現地スタッフに通訳してもらいながらヒアリングを実施するが、通訳を介してのコミュニケーションとなり、十分な情報を得られないことがある。ボイスレコーダーやビデオにヒアリング内容を記録しておくことにより、調査後にそれを全訳することによってより詳細な情報が得られることも多い。記録時間と GPS 情報を連動しておくと、場所の特定もしやすい。現地での風による録音ノイズの対策や、録音開始時の場所や時間を音声として記録しておくことも調査後にデータを整理する際に重要となる。

④乾電池：現地では充電が十分に行えない可能性もあるため、電気を使わずに利用できるオートレベルや、乾電池で使うことのできる GPS、距離計などの計測機器、カメラ、レコーダー等の準備をすると良い。GPS はトラック機能を使って、調査時における移動先での緯度経度を等間隔あるいは等時間間隔で記録し続けておくと、カメラやボイスレコーダのデータとの組み合わせもできて便利である。

3. 調査内容

本節では、実際の現地調査時における調査項目やその留意点について整理する。上述した様に、調査では目的に応じて様々な調査項目、調査内容が考えられるが、ここでは特に氾濫時の状況を把握することを目的とした痕跡調査に主眼をおく。

3. 1 痕跡高調査

津波や高潮に伴う氾濫浸水被害の特徴を把握するには、まず氾濫域における浸水高や遡上高などの高さの分布の情報が必要不可欠となる。氾濫域における水位については、氾濫流の特性や地形、また氾濫時の潮位などによって大きく影響を受けるため、高さの測量に加え、氾濫流の流向や流速、水位がピークに到達するときの様子、水位ピークの継続時間など、付随する様々な情報をできる限り定量的に残すことが重要となる。また、他の災害事例との比較も容易にすることも勘案すると、最低限の計測すべき項目やその記載方法などを統一したフォーマットに基づき記録を残す方が良い。東日本大震災時における調査や、その後の台風 Haiyan に伴う氾濫災害調査では、統一したフォーマットを使用した。以下にフォーマットの中に記録するデータの一覧を示す。

1. 計測地点の地名
2. 座標（緯度経度）
3. 調査日時（基準時に注意する）
4. 測定高(計測時の水面からの高さ)
5. 計測した高さの種類
6. 計測地点の海岸線(汀線)からの距離
7. 測定対象：例えば「浸水家屋の内壁に残った浸水痕」，「海草など漂流物の漂着端」など
8. 根拠：例えば「目撃者の証言」，「明確な痕跡」など
9. 信頼度
10. 調査グループ
11. 備考
12. 測定時の潮位
13. 計測した高さが発生した日時（予想）
14. 上記発生時の潮位
15. 潮位推定の参照地点
16. 潮位補正後の高さ

ここで「5. 計測した高さの種類」は、R: 遡上高、I: 浸水高、P: 港内(津波)高（港湾において、岸壁は越えてはいないが明確に高さが分かる水位）、W: 微弱な津波（常時波浪との判別が不可能な微弱な津波）、V: 波浪による水位変動による影響を含む高さ(特に高潮・高波災害調査のとき)から該当するものを選ぶ。浸水高は氾濫域の中での水位で、海岸線や海岸近くの建物に残された水位の痕跡や付着した漂流物の痕跡などであるのに対し、遡上高は、陸上部の氾濫境界端での高さである。浸水高の計測場所ではまだ流速がある場合が多いのに対し、遡上高(遡上端)では流速がゼロとなる。氾濫域における流れに対する抵抗損失はあるものの、遡上橋では氾濫流の運動エネルギーも位置エネルギーへと変換されているため、遡上高の方が浸水高よりも高くなる場合が多い。図-1 に浸水高、浸水深、遡上高の定義を示す。図に示したように、これらの高さは氾濫当時における潮位を基準として推定する。

次に「9. 信頼度」については、以下の分類(首藤・卯花, 1984)から該当するものを選択する。

- A: 信頼度大なるもの。痕跡明瞭にして、測量誤差最も小なるもの。
- B: 信頼度中なるもの。痕跡不明につき、聞き込みにより、周囲の状況から信頼ある水位を知るもの。測量誤差小。
- C: 信頼度小なるもの。その他砂浜などで異常に波がはい上がったと思われるもの、あるいは測点が海辺より離

れ測量誤差が大なるもの。

D: 信頼度極小なるもの。高潮、台風などの影響で痕跡が重複し、不明瞭なもの、等。

特に、現地調査を実施している段階では、上記項目の1～11 および 13 の情報を得る。備考欄には、現地における地形の条件など、気づいたことを記す。特にこのフォーマットでは、遡上高や浸水高、計測地点標高などの情報は記録されるものの、海岸から該地点までの地形や、樹林帯や建物、海岸堤防、さらに流向や浸水継続時間など氾濫場の特性を表す重要な要素を全て網羅しているわけではないので、備考欄やその他のデータアーカイブや、論文や報告書等の手段を用いて情報を整理し記録しておくことも重要である。たとえば2011年東北地方太平洋沖地震津波合同調査チームによる、取得画像や痕跡高等のデータは GRENE-City 津波アーカイブとして DIAS(Data Integration Analysis System: データ統合・解析システム)に登録され、研究や学習を利用目的として申請したユーザに対して公開されている(<http://grene-city.csis.u-tokyo.ac.jp/>)。

(1) 痕跡の判別および痕跡高の計測方法

まず、浸水高や遡上高についてであるが、痕跡の事例、周辺にも同様の痕跡があること、建築物に残された水面の痕跡は、最高水位に達した後少し水位が低下した状態で長時間浸水が継続して痕跡が残ることも多く、必ずしもピークの浸水高を表していない可能性もあるため、周辺の状況を常に確認しながら痕跡の信頼度を評価する必要がある。目撃者がいた場合には、目撃証言を組み合わせることにより信頼度を高めることができるため、非常に有効である。ヒアリング実施時における留意点は後述する。遡上高についても同様で、海藻や貝殻など海から流されてきたものの漂着痕があると良いが、海岸における砂や倒壊した家屋や船の破片、流された木などが漂着している場合もある。いずれの場合も、周辺の標高が同程度の地点に同様の漂着物があるか否かが信頼度を評価する上で重要となる。発災から調査日まで大きな降雨がなかった場合などでは、土壌塩分濃度の計測も遡上端を判別するために有効な情報を与えることもあるが、この場合には、発災前の状況(高波による遡上や飛沫の影響等)を十分に検証する必要がある。また、海水の遡上に伴い、草木が枯死したり変色する場合も多く、周囲にも同様の境界が見られれば、発災後の草木の色などの状況から遡上端を推定することも可能である。

東日本大震災における痕跡高の調査では、特に三陸海岸や福島などで、海岸に面した急斜面上における遡上高(打ち上げ高)を計測することも多かった。漁具やゴミなどの漂着物の痕跡や、草木の損傷の状況などから遡上高を推定することができたが、場所によっては地震による斜面の崩壊等に伴い損傷をうけた樹木も多数みられた。また台風ハイアンによるフィリピンにおける災害調査においても、ココナツ林や建物は風によって大きな損傷を受けたため、必ずしもこれらの損傷状況のみから浸水高や遡上高を判定することができなかった。周辺の状況(同じ高さと同様の痕跡があること)やヒアリング情報などから総合的に痕跡を同定することが重要である。

また氾濫流の流速が大きい地点では、構造物海側ではせき上げにより痕跡が高くなっている場合が多いことにも留意が必要である(たとえば加藤ら, 2012)。また、建物の前面と背面における浸水高の違いから氾濫流の流速や、建物に作用する流体力の推定を試みる研究・調査事例もある(たとえば松富・首藤, 1984)。以上より、特に氾濫流速

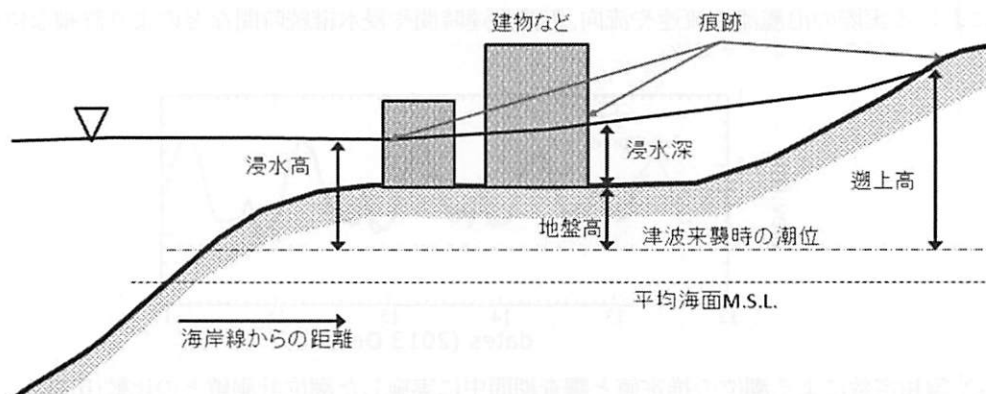


図-1 浸水高・遡上高などの定義

が大きかったことが想定される地点における浸水高を計測する際には、可能な範囲で周辺の複数の建物の内壁や、前面、背面における痕跡をそれぞれ確認し、流速やせき上げによる影響を評価する必要がある。同一あるいは近傍の建物周辺の痕跡で特に明確な高さの分布が見られる場合には、備考欄に状況を書き加えながら複数点における痕跡高を記録すると良い。

(2) 痕跡高の計測

痕跡高の計測については、レベル測量などにより調査時における海面からの標高を測量して記録する場合が多い。この場合、調査実施時における現地での潮位を推定する必要がある。事前の情報収集において、調査対象地点周辺に検潮所がある場合にはそのデータの入手可否、また検潮所自身の被災状況などを確認しておく必要がある。たとえば、台風ハイアンによる高潮災害調査を実施したレーテ島のタクロバンでは、タクロバン港にあった検潮所のデータに基づき、調和定数が得られていた。しかしながら、被災時には既に検潮所の潮位計が撤去されており実際のデータが得られなかったため、タクロバンにおける潮位の推定には調和定数に基づく潮位の推定値を用いた。ただし、調査期間中には圧力式波高計を用いて検潮所における潮位変動を計測し、推定値との整合性を確認した(図-2：田島ら, 2014)。バングラデシュにおいても、同様の調和定数に基づきベンガル湾奥周辺における潮位の推定値を用いたが、特に河道内における水位は局所的な地形による影響を強く受けるため、潮位の推定には注意が必要である。その他の手段としては、たとえばグローバル海洋潮汐モデル(松本, 1994)などを用いて地形による影響の少ない湾沖合における潮位変動を推定し、地形の影響を強く受ける湾奥部については、非線形長波モデルなどを用いて推定する方法などもあり、精度の良い地形を与えることにより実用上十分な潮位の推定精度が得られることも確認されている(田口ら, 2013)。計測時の海面高さについては、各地点近傍に検潮所がない場合には上述した様に過去のデータ等に基づき求めた調和定数に基づき推定するか、グローバル海洋潮汐モデルと沿岸部の微細な地形の影響を考慮した詳細な潮汐モデルとを組み合わせるなどして推定するしかない。このため、現地において水面高さを基準に痕跡高の計測を行う際には、風波の碎波に伴う setup や、流速が大きく抵抗が大きい河川流の上流側など、潮汐以外の影響ができるだけ無視できる地点を選定した方が良い。また、特に海面標高の推定誤差が懸念される場合には、後日必要に応じて標高の計測を行えるようなベンチマークとなる地点の標高も同時に計測しておくとも良い。

東日本大震災では、地震にともない沿岸部では沈降も生じ、発災後は満潮時に浸水被害を受ける沿岸地域も多く存在した。特に東日本大震災では、RTK-GPS 等を用いて効率的かつ高精度に標高計測を行うチームもあったが、基準となる基地局自身の変位による影響も考えられるため、時折海面高さや、被災地周辺における水準点の座標、標高を計測しておくなど、後日改めて計測が可能なベンチマークの測量を実施しておくことも重要である。

3. 2 氾濫特性の調査

上記の痕跡高の調査は、津波の波源位置や規模、また高潮を引き起こす台風の経路や風況を推定するための、広域的な氾濫外力場の推定をする際に非常に重要である。一方で、東日本大震災に見られたようにレベル1を超える津波による沿岸域における氾濫を前提とした減災対策を講じるためには、海岸線に襲撃する津波の特徴に加え、個々の地域における実際の氾濫流の流速や流向、氾濫到達時間や浸水継続時間などのより詳細な情報が必要となる。

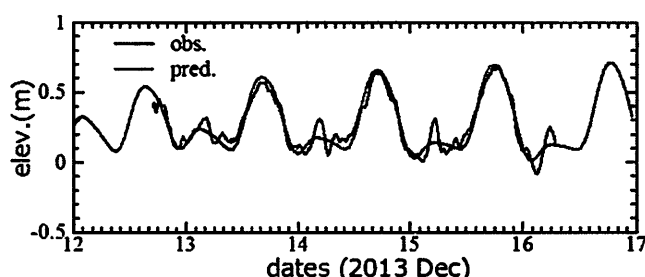


図-2 調和定数による潮位の推定値と調査期間中に実施した潮位計測値との比較(田島ら, 2014)

(1) ヒアリングに基づく流況の推定

特に現地における氾濫・浸水の痕跡が明確ではない場合、津波や高潮の規模が比較的小さい場合などは、現地におけるヒアリングによる状況把握が必要不可欠になる。特に海外における災害調査でヒアリングを行う際には、当該地の文化や被災者の感情、復旧・復興活動の妨げにならないように十分な配慮が必要であり、また言語の問題も勘案して現地スタッフにインタビューをお願いした方が良い。

ヒアリングの項目についても、各地点、各調査で共通した項目を準備し、現地の言語に訳した質問リストを準備すると良い。IOC(1988)に添付されているアンケートシートの主な質問事項は以下の通りである。

- ・ ヒアリング対象者の情報(氏名、住所、職業、年齢、性別など)
- ・ 地震に関する情報(地震の大きさ、夜間の地震の場合、何人が地震によって目覚めたか？何人が地震を感じたか？前震・余震を含む地震の発生時間、被災者数、地震に伴う主な被害、液状化、地割れなどの目撃情報、井戸水の変化、地震の予兆の有無など)
- ・ 津波に関する情報(津波来襲前の状況：気候、潮位、音など、津波来襲時間、時計やテレビなどによる現地時間、地震から津波来襲までの時間、津波来襲時の様子、来襲波の回数、来襲波の周期、来襲波の振幅、引き波時にどの程度水位が下がったか？個々の来襲波の高さの違い、波はどのように見えたか？川の様だったか？波の様だったか？砕けながら来襲したか？来襲時の音、氾濫域の地形の変化(侵食、洗堀、堆積)、津波石の有無、浸水範囲など)
- ・ 避難や意識に関する情報(津波のことを知っていたか？過去に津波の経験があるか？津波に対して避難方法などの事前の対策を考えていたか？実際の津波の来襲時に何をしたか？どのように避難したか？避難を困難にする状況、障害物はあったか？)
- ・ 津波来襲後の状況(発災前後で潮位は変化したか？岩やサンゴ礁が干出したなどの変化？発災後に沈下したところはあるか？)

同じ地点であっても、複数の目撃者から証言を得ること、目撃時の状況、たとえば、どこにいたか、何をしていたか、どのように目撃したか、時間をどのように知ったか(時計を見た？食事などの日常の習慣行動との関係など)を確認することにより、目撃情報の信頼度を検証することができる。また、氾濫時の状況や浸水高などについては、答えを誘導するような質問や、「はい」、「いいえ」で答えられる様な質問は避け、できる限り目撃者に自分の言葉で状況を説明してもらうようにすることも重要である。高潮に伴う氾濫状況のヒアリング調査では、雨、風の状況、雨による内水氾濫などの影響も勘案し、氾濫水の色や匂い、来襲方向などの状況も確認した。また例えば台風ハイアンによる高潮災害は早朝に発生したため、朝食時間や、起床時間などの習慣と避難時の状況を合わせて聞くことにより、氾濫開始時間や浸水継続時間の推定、確度の検証をした。

(2) 流向の調査

氾濫域における流向は、避難計画や土地利用計画を含めた氾濫域における減災対策を講じる上で重要な要素の一つとなる。ここでは、佐貫ら(2013)による調査方法および調査結果の活用法の一例を紹介する。以下に示す図-3～図-8は佐貫ら(2013a)による図である。

(a) 調査概要および調査方法

流跡調査は、岩手県陸前高田市、同大槌町および福島県楢葉町の3地域で実施した。図-3に調査地点を示す。調査地域は、それぞれ気仙川、大槌川(小槌川)、木戸川といった中河川の下流域に位置する低平地であり、周囲は堤防によって囲まれているものの、2011年東北津波により甚大な被害を受けた場所である。

流跡調査では、電柱等の柱状物の倒壊方向に着目し、それらが津波による流れの向きを示すものと考え、方位センサーとGPSを内蔵したデジタルカメラを用いて柱状物の傾倒方向に向かって写真を撮る、あるいは、コンパスとGPSによる緯度経度情報と傾倒した柱状物を一緒にデジタルカメラで撮影することにより、傾倒状況と併せて撮

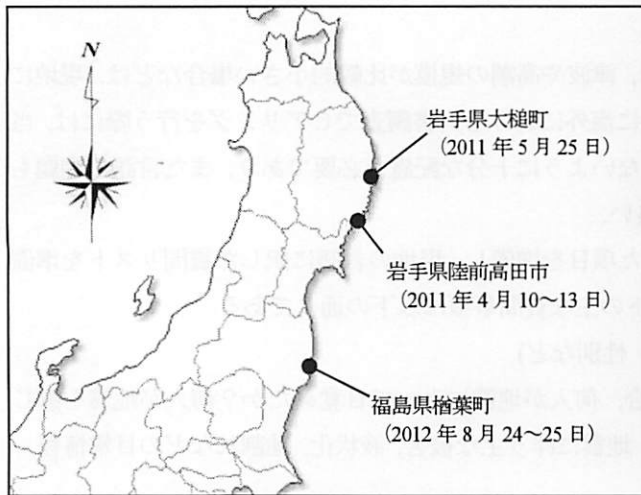


図-3 調査地点の位置および調査

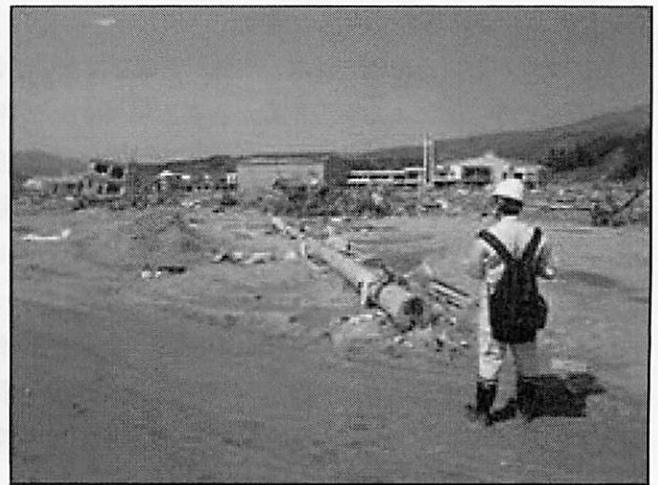


図-4 浸流跡調査 (2011年4月10日, 陸前高田市)

影位置および傾倒方向を記録した(図-4)。調査対象とした柱状物は、電柱のほか、鉄骨、標識ポール、家屋基礎台のアンカーボルトおよび孤立した立木等とし(図-5(1)~(4))、倒壊方向に構造体特有の方向特性が現れやすいフェンスやガードレール等(図-5(5)および(6))については、流向の判断が難しいため対象外とした。

(b) 流跡調査結果

上記の流跡調査により、陸前高田では225点、大槌町では362点、檜葉町においては269点の流向データを取得した。また、併せて実施した浸水高と流向の調査結果をGoogle Earth上にプロットして図-6に示す。図より、いずれの地点においてもベクトルの大半は陸側を指しており、津波押し波時の衝撃的な波力の作用が柱状物の傾倒に卓越的に作用していたことが分かる。一方で、川や海へ向かうベクトルは引き波によるものと推察される。またそれら以外にも単純に解釈できないベクトルが少なからず混在している。特に陸前高田地点においてそのようなベクトルが多数認められ、津波によって複雑な流況場が形成されていることが推察される。

(c) 数値氾濫解析結果との比較

当該地点における津波氾濫の特徴をさらに分析するため、数値モデルによる氾濫解析の結果と現地調査による流向を比較した。佐貫ら(2013)は、各地点における氾濫流の流向は時々刻々変化することに着目し、柱状物の傾倒方向と、時々刻々変化する流向を比較し、両者が最もよく一致する時間の抽出を試みた。

まず、流向の実測値と計算値のなす角度を $\Delta\theta$ とし、 $\cos \Delta\theta$ がピークをとる時間 t_d を求めた。このとき t_d は、各測点において津波第1波目の到達時を $t=0$ と定義し、 $\cos \Delta\theta$ が最大となる時の時間として定義した。これに倣い、全ての測点に対する t_d を求め、その度数分布を調べた(図-7)。その結果、陸前高田では第一波および第二波の2つ



図-5 流跡調査対象とした柱状物の例(1)~(4)、および流向の判断が難しい柱状物の例(5)、(6)

の時間帯に t_d の度数が分布し、それぞれ津波の第1波目および第2波目に対応することが推察された。また明瞭ではないが、その中間に引き波時のデータが存在することも分かる。これらの異なる t_d の時間帯が、氾濫域におけるどの地点に出現するのかを調べるため、各地点における t_d について、第一波押し波時、第一波引き波時、第二波押し波時のフェーズに分類し、フェーズ毎に色の異なるベクトルに表してその分布を図示した(図-8)。これらの分布と数値解析に基づく氾濫域の流れ場を比較し、佐貫ら(2013)は以下の様な結論を導いている。

(1) 流跡調査データは大半が陸側を指しており、特に海岸線付近など津波押し波時の波力による破壊が支配的な場においてその傾向が顕著に見られた。(2) 大槌・檜葉地点では、津波到達時の流向計算値を比較することで観測値と良好に対応した。(3) 陸前高田地点では、傾向はかなり良く一致し、特に第2波目の複雑な流況場は、第1波目の戻り流れと第2波目の山側からの反射波によるものであることが分かり、特に斜面近傍や気仙川付近において、第二波による影響が顕著になることが分かった。

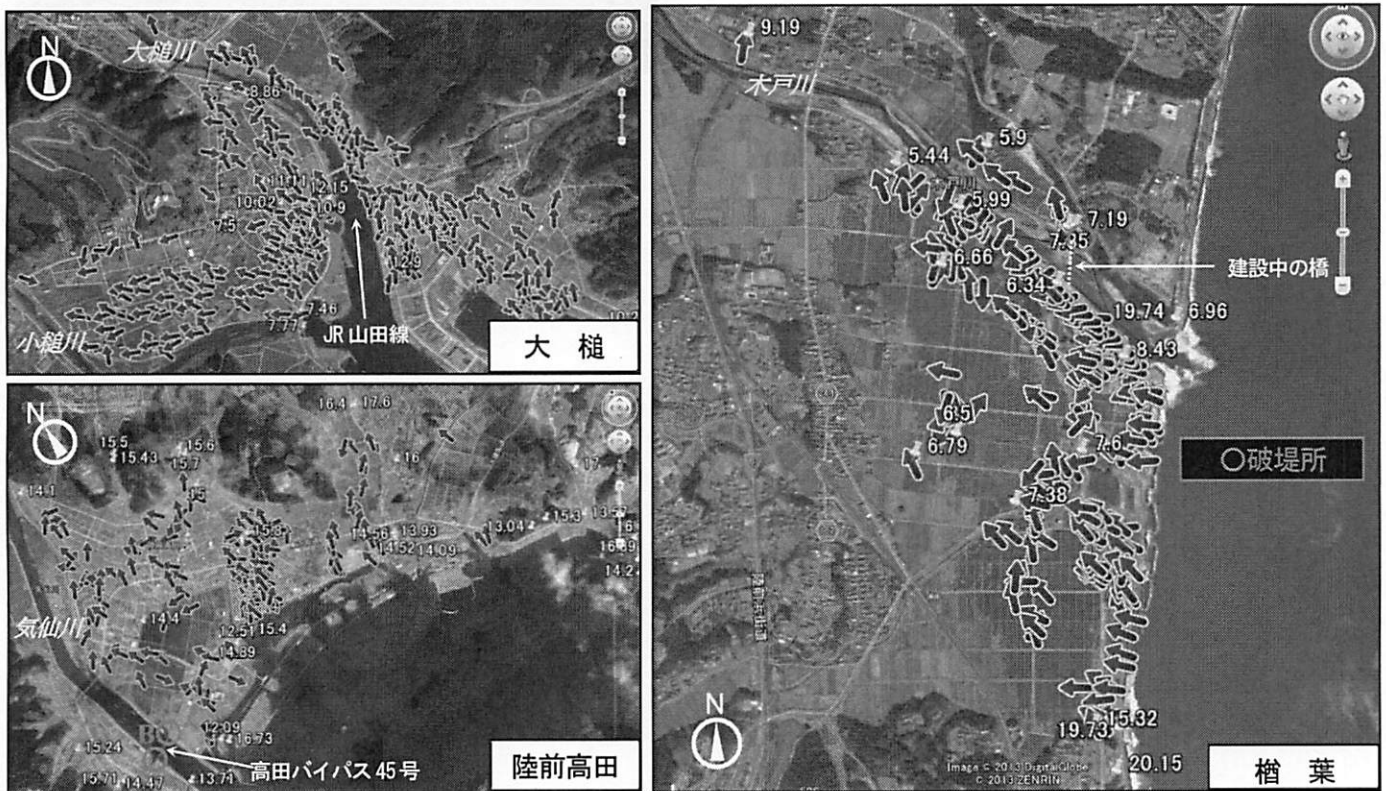


図-6 流向および浸水高の計測結果(大槌、陸前高田および檜葉)

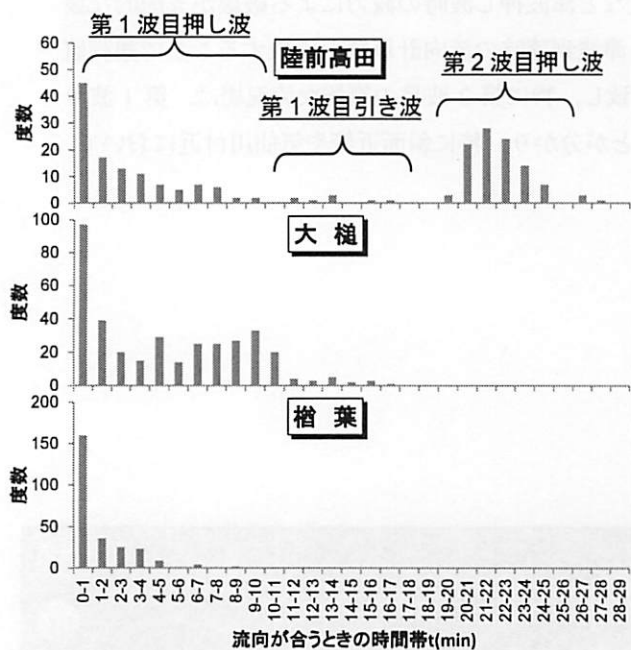


図-7 流向の観測値と計算値が合う時の t_a (min) ($t=0$ は各測点に津波が到達したときの時間)



図-8 フェーズ毎に色分けした流向の実測値

4 映像解析による津波特性把握のための現地調査

4. 1 映像解析事例

東日本大震災では、津波来襲時や被災直後における空撮映像や地域住民の撮影による動画や静止画が数多く得られている。これらの映像の解析により、従来の津波被災後の現地調査では得ることのできない津波の動態に関する様々な定量的データの抽出が進められている。

航空写真などの比較的広域を捉えた静止画像から東日本大震災における津波氾濫直後の被害状況を定量的に俯瞰した分析事例として、越村・郷右近(2011, 2012)は宮城県を対象に航空写真や斜め視空中写真に基づき建物被害の判読を行っている。田島ら(2006)は、メキシコ湾岸の Biloxi 地区を対象に、Hurricane Katrina による高潮災害の前後の航空写真を用いて、家屋の流失率の空間分布を推定し、数値モデルに基づく高潮・高波混合場における水理条件と比較し、家屋損失率は浸水深よりも流体力との方が高い相関関係を示すことを明らかにしている。また中山ら(2012)は、航空写真から瓦礫、水没、泥などの空間分布を推定する手法を構築し、その妥当性を検証している。さらに菅ら(2012)は気仙沼湾における大型船舶の漂流、座礁の位置や状況を把握し、数値モデルとの比較を行っている。また被災前後の海浜地形の大規模な変形を分析している研究例も多い(たとえば平尾ら, 2011)。

一方、ビデオ画像等に基づき氾濫する津波の動態を分析した研究事例として、越村(2011)は女川沿岸部におけるビデオ画像に基づき、最大約 15m (T.P.) に達した 20 分間の水位変動を定量化している。また越村ら(2012)は仙台市名取川周辺における空撮映像に基づき、津波遡上端の時空間分布や漂流物の定量的な追跡を行っている。さらに横山ら(2012)は気仙沼舞根湾において地域住民によるビデオ撮影画像に基づき、漂流物から流速を、水面標高の変化から水位の低下速度を、それぞれ 2.3~3.8m/s, 2.4cm/s と推定している。また Fritz et al. (2012) も気仙沼湾奥において合同庁舎周辺を捉えたビデオ映像に基づき、ピーク水位は 9m(TP) に到達し、水位低下時には流速が 2 分間で 3m/s から 11m/s へと急激に加速したことを示している。また佐貫ら(2013b)は、福島県木戸川周辺におけるビデオ映像に基づき、河川遡上する津波の伝搬速度は堤内地低地よりも速く、最大約 13m/s に達したことを示し、さらに山中ら(2012)は岩手県綾里湾奥の白浜海岸で水位がピークに達した後、周期 8 秒程度の水面変動が卓越的に生じていたことなどを示している。

これらの画像に基づく被災状況の分析は、比較的広域をほぼ同じ条件(スケール、推定誤差など)で比較・検証することができ、現象の把握や理解するうえで極めて有効であるが、現地における調査を合わせて、実際に起きている現象と画像との関係を明らかにしておくことが必要不可欠であり、また、画像に捉えられた地点の座標を求めて画像変換等を行うことにより、変動を含む氾濫流の水位や振幅、流速など、様々な情報を定量的に抽出することも可能である。

ここでは、被災地の住民がハンディビデオカメラを用いて撮影した動画画像を活用し、津波氾濫時の挙動を定量的に捉えることを試みた山中ら(2012)の研究を例に、これらの定量データを抽出するための現地調査方法を考える。以下の図-9~図-13 は、山中ら(2012)の成果から引用している。

(a) 綾里湾奥白浜海岸における津波挙動の分析

岩手県大船渡市三陸町に位置する綾里湾では、来襲した津波が局所集中する傾向が見られた。特に湾奥の白浜海岸においては、漁港背後域である南側斜面周辺で集中的に高い津波痕跡高が計測された。また、漁港施設や消波構造物の倒壊・損壊も同地点において集中的に見られた。この白浜海岸においても津波来襲時の様子がビデオ画像で捉えられており、山中ら(2012)はこの白浜海岸において撮影されたビデオ画像(図-9)に焦点をあてて津波の挙動を可能な限り定量的に抽出した。

(b) ビデオ画像の処理

デジタルビデオカメラによって記録された映像から津波の定量的な情報を抽出するため、まず映像から 1/30 秒間隔で連続する静止画像群を取り出した。定点観測カメラによる画角が固定された連続静止画像に基づく沿岸域で

の定量的なデータの抽出は既にいくつかの研究事例があるが（例えば田島ら，2008），本研究で対象としたビデオ画像は津波来襲時に避難しながら撮影されたもので，カメラ自体の動きが著しく，そのままでは定量データの抽出が困難であった．そこで，本研究では以下の手順で連続静止画像内の同一対象物に対応する画素座標を統一補正した．まず取り出した連続静止画像をそれぞれ輝度値の平面分布に変換し，これらの画像群の中から統一補正のための基準静止画像 1 枚を選定した．次に連続静止画像間のマッチングに適する固定物体を含む領域（テンプレート）を決定し，補正する画像を平行移動・回転させながら，テンプレート内の輝度値分布が基準画像のそれと最も良く適合する位置を正規化相互相関法により求めた．なお，テンプレートには図-9 に示した南側斜面の一部を指定した．これにより求めた移動量及び回転量に基づき，各画像における画素座標を変換し，連続した補正画像群を作成した．

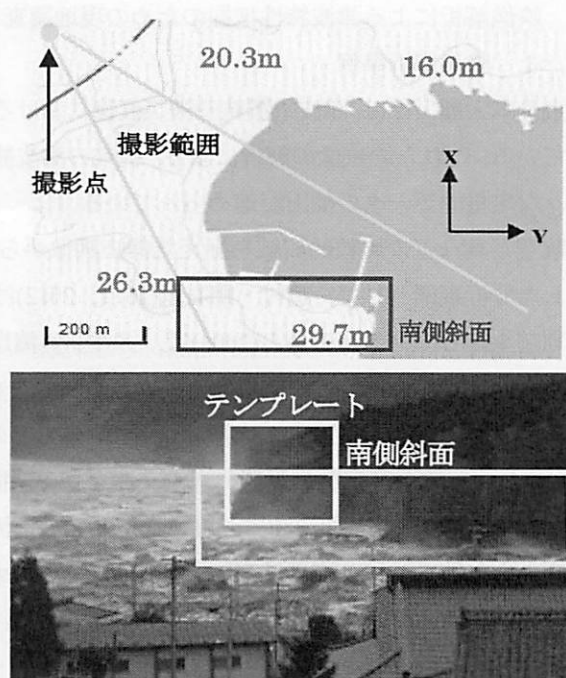


図-9 綾里湾白浜海岸における痕跡高，ビデオ撮影位置および撮影画像の例

(c) 二段階座標変換による実座標系の推定

次に補正後の連続静止画像群に対して幾何的な座標変換を施すことにより，画素座標に基づく実座標推定を試みた．津波来襲時のビデオ画像からは座標変換に必要な実座標情報が既知である点を見出すことが困難であったため，本研究ではビデオ画像が撮影された地点と同じ地点から静止画像 A（図-10）を改めて撮影し，この画像を介した以下の二段階の座標変換を行い実座標を推定した．

まず基準画像において，静止画像 A と共通する 20 の基準参照点を選定した．これらの参照点の選定には，画像内にバランス良く分布することや，静止画像 A 取得時と津波来襲時で位置が変化していないことなどを条件とした．

次に選定したそれぞれの基準点に対応する画素座標を静止画像 A の中から抽出し，両画像で対応する画素情報に基づき，田島ら(2008)と同様の手法を用いて両画像の位置関係を表すための座標変換パラメタを推定した．これにより，ビデオ画像内の任意の画素座標と対応する静止画像 A の画素座標が得られる．次に，静止画像 A の中から現地測量に基づき実座標が既知である 9 点を選定した．

座標変換に必要なパラメタは，カメラの位置や画角，焦点距離，レンズの歪みなどであり，実際の撮影条件が分かれば推定できる値であるが，ここでは，これらのパラメタを未知変数であるとして，画像に写った参照点の位置座標をもっともよく再現するパラメタを最小二乗法に基づき推定している．未知変数にするパラメタの数により，最小二乗法によるパラメタ推定に必要な参照点の個数は変化するが，通常は最低 4 地点以上の参照点が必要となる．また，単一のカメラから捉えられた画像であるため，座標変換は平面から平面への変換のみが可能であることに注意が必要である．すなわち，上記の方法によりパラメタを推定した後，画像に写っている任意の点(画素座標)に対応する実際の位置座標を推定するには， x, y, z の 3 つの直交座標のうち，ひとつの座標の値を指定する必要がある．たとえば，海面上を移動する漂流物の位置などを推定する際には，標高 z を海面高さで指定することにより，指定した z 座標，画素座標，変換パラメタに基づき，対象点の x, y 座標を推定することができる．

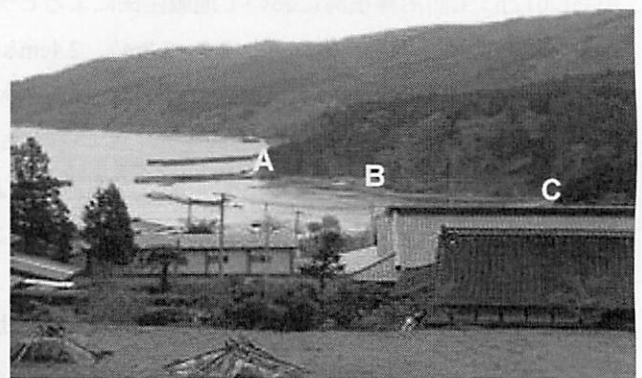


図-10 静止画像 A

山中ら(2012)はこのようにしてえられたビデオ画像に基づく実座標情報の推定誤差について分析し、個々の実座標の推定精度に比べ、速度の推定に重要な任意の2点間の距離の推定誤差は数%程度であるとしている。以下、画像から抽出した定量データの例を示す。

(d) 水位の時空間変化の抽出

以上の操作により、ビデオ画像に捉えられた任意の地点および対応した実際の位置座標(x, y, z)のうちのひとつの座標を指定されれば、残りの2つの位置座標を推定することが可能となった。山中ら(2012)はまず、得られた座標変換パラメタに基づき、水面変動の時空間分布の抽出を試みた。水面位置を抽出するのは図-10のA, B, Cに示した斜面上とし、斜面上の座標を指定することにより、水面境界位置の標高を推定しようとするものである。

まず輝度値の空間勾配を指標として水面位置の画素座標を抽出した。次に画素座標から実標高を推定するには、対応する水平座標を与条件として与える必要がある。本研究では静止画像A内の南側斜面に沿ってGPSで測量した水平座標群を用い、これらの座標の各点から鉛直上向きに測線を延ばし、この線と抽出した水面の境界線との交点における z 座標を水面高さとして求めた。ここで、水面境界は斜面上に位置しているため、実際にはGPSで計測した水平位置とはズレがある。画像とほぼ正対する斜面の勾配を 30° とし、計測地点と水面との標高差を勘案すると水平座標のズレは15m程度と推定され、このときの z 座標の推定誤差は1m程度過大となる。また湾口と湾奥では撮影地点からの距離が異なるため、斜面上の水平座標推定誤差による水位の誤差は、湾奥の方が湾口よりも数十cm程度高くなる可能性があることにも留意する必要がある。

南側斜面における推定した水位の時間変化図を図-11に示す。図-11の横軸は斜面に沿った水平方向距離、縦軸は時間経過を、色が推定水位を表している。図中のA, B, Cは図-10に示した南側斜面上の位置で、B点は撮影点から南側斜面を見たときの画面手前の斜面と画面奥の斜面の境界位置である。A-B間は画面奥の斜面上の水位、B-C間は画面手前の斜面上の水位を表すため、A-B間とB-C間の境界は不連続である。ここで、時間はビデオ撮影開始からの時間を表す。図-11では、水位がピークに達した30秒付近以後で周期8秒程度の水面変動が見られた。また、この変動はA-B間でほぼ同位相で変化しており、斜面と直行する方向、すなわち沿岸方向に波が伝播していることがわかった。一方、B-C間では50秒から70秒にかけて右斜め下に向かって水位のピークが岸向きに移動している様子も見られた。これらのことから、湾口での水位変動は津波の侵入方向と南側斜面に正対する方向の最低二つのモードを有していたと推察される。また湾奥では津波による周期の長い水面変動が卓越し、重複波を形成していたようであるが、A-B間で見られたような短周期の水面変動も見られた。

(e) 水表面流速

次にビデオ映像で多数確認された漁船ブイなどの漂流物を0.5秒間隔で追跡することによって、白浜海岸内での波や流れ場の推定を試みた。漂流物平面座標を推定するには、与条件として漂流物の画素座標と水面標高を与える必要がある。標高は前節で求めたC地点における水位の時系列(図-12)を平滑化して与えた。

推定した漂流物の位置、移動方向、移動速度を図-13に示す。漂流物の初期位置は赤色で示し、同一漂流物の平面座標は直線で結んでいる。また、図-12の水位がピークとなる時間($t=35s$)を境界としてピーク来襲前後の二つの時間帯に分割し、それぞれの時間帯における漂流物の追

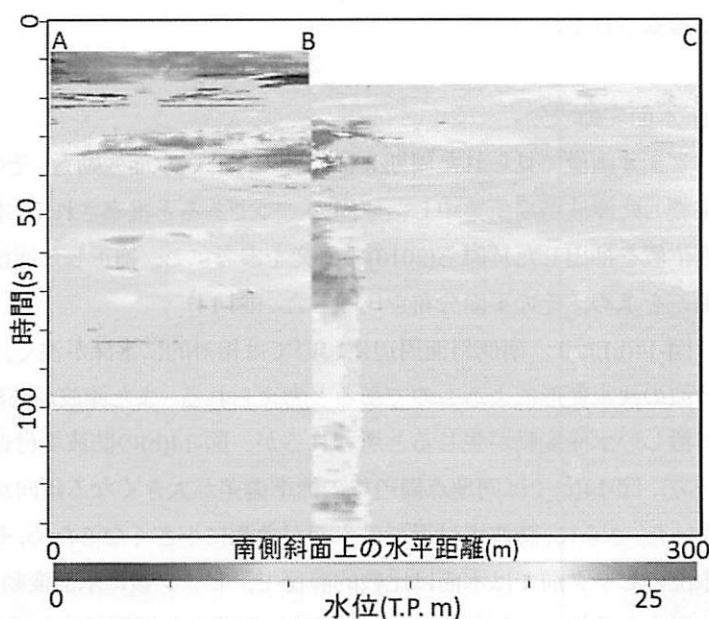


図-11 浸画像から抽出した南側斜面上の水位の時空間分

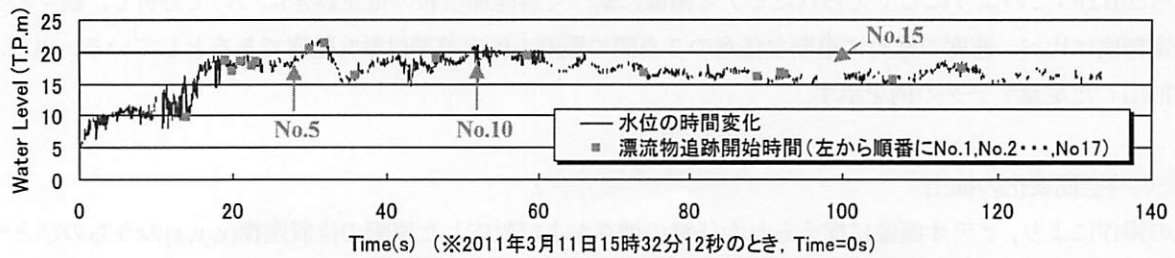


図-12 湾奥(C点付近)地点における水位の時間変化

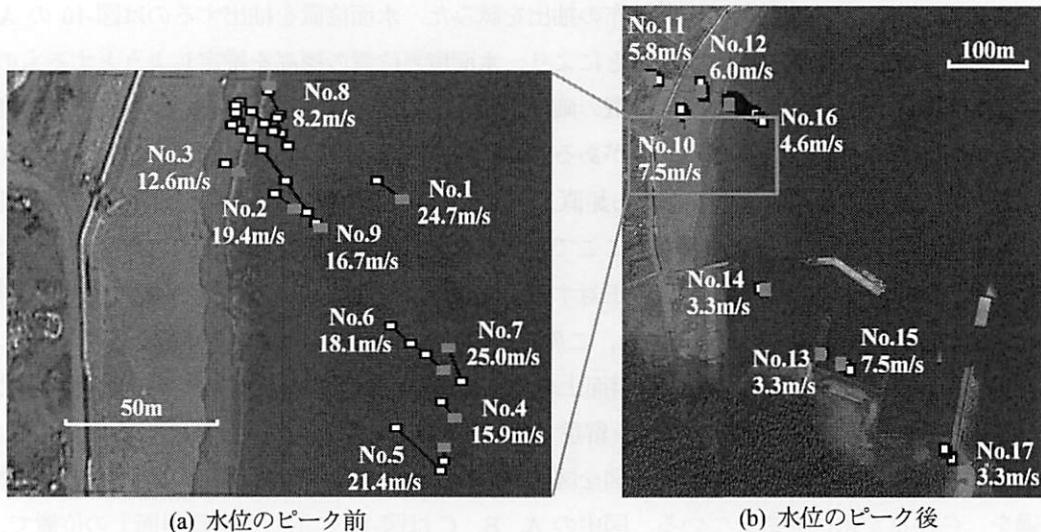


図-13 漂流物の位置・移動方向・移動速度

跡結果を表示した。図-13より、ピーク前の漂流物は、そのほとんどが津波の侵入方向と一致した方向に移動しているが、明らかに北から南に向けて移動している漂流物(No.5, 7, 8)も見られた。またそのような移動方向を示した漂流物は水位がピークに達する時間帯に集中していることから、水位のピーク近傍の時間帯で湾内の津波が既に重複波を形成していたことや、周期の短い水面変動が漂流物の移動特性に影響を及ぼしていたことなどが推察される。さらに、ピーク前の漂流物の平均移動速度はほとんどが10m/s以上であった。ピーク後には漂流物の移動方向は場所によって異なっており、ピーク直後に卓越して見られた周期8秒の水面変動により、移動形態が大きく変化したと考えられる。海岸構造物や湾内急勾配斜面からの多重反射波による複雑な波・流れ重合場が形成されていたことが推察される。

(f) 水面変動成分

ビデオ画像で見られた周期8秒程度の激しい水面変動も、その大きさは場所や時間により異なっており、これが来襲した津波が局所集中した原因の一つであると推察される。本研究では画像内の輝度値の変化に着目してその水面位置を抽出した竹原ら(2010)の研究を参考にし、補正した連続静止画像における同一画素座標上の輝度値の標準偏差を求め、その平面分布を比較した(図-14)。

図-14(b)より、南側斜面周辺においては相対的に水深が浅く、標準偏差が大きくなる傾向が見られた。砕波を伴う波の浅水変形によるものであると考えられる。また津波が防波堤を越流するとき、防波堤の裏側は剥離渦によって激しい水面変動が生じると考えられるが、図-14(b)の防波堤付近では輝度値の標準偏差が相対的に小さくなった。一方、図-14(c)では同地点周辺での標準偏差が大きくなる傾向が見られ、ピークの前後でその平面分布が大きく異なった。さらに、防波堤付近では水深が急激に小さくなるため、その周辺の水面変動は激しくなると予想されたが、水位のピーク前では水面は比較的静穏で、ピーク後に水面変動が激しくなった。

以上の特性は、津波ピークの来襲時に発達した短周期波と周期の長い津波による流れとの干渉や、白浜海岸にお

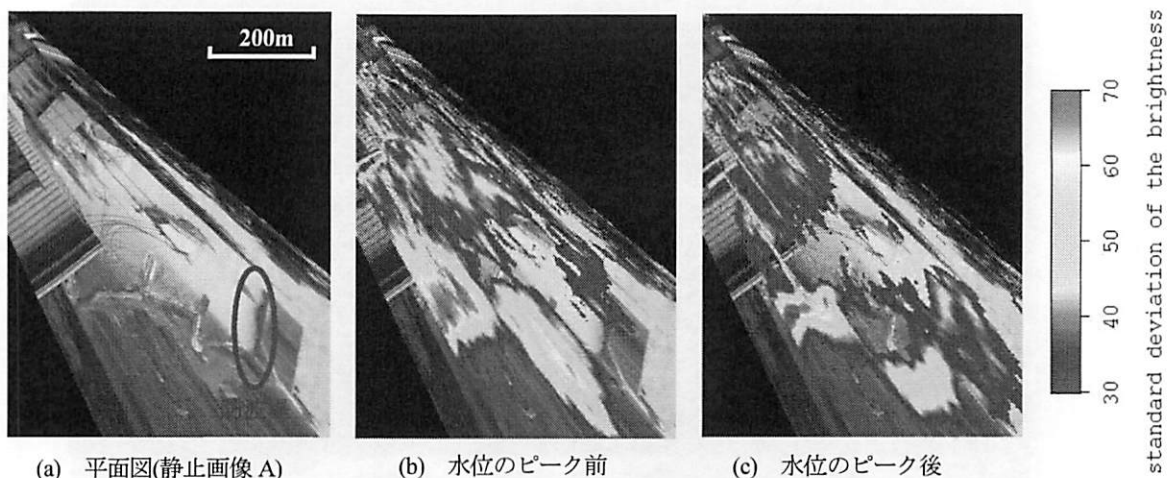


図-14 水面において時間変化する輝度値の標準偏差の平面分布(座標変換により描画)

ける重複波の重量など様々な要因が考えられる。周期波と短周期波が関係する非常に複雑な波・流れ場が形成されたために、従来の長波理論では説明できない挙動が湾内で生じたものと思われる。この短周期波が卓越することによって生じていた津波の挙動は、防波堤を破壊・損壊させた力を増幅させた可能性がある。

以上、津波来襲時におけるビデオ画像から抽出可能な定量データの例として、山中ら(2012)の研究を紹介した。津波来襲時に撮影されたビデオ画像に基づく発災時の画像には、位置座標の分かる参照点の数が限られており、発災時の画像のみでは座標推定精度に限界がある。ここで示した二段階の座標推定手法は、発災時の貴重な画像情報から定量的なデータを抽出する際に非常に効果的である。同様の調査事例として、西湘海岸に高波浪が来襲した際の遡上帯における長周期波動の特性を抽出した田島ら(2013)の研究、木戸川河口部における津波の遡上特性を分析した佐貫ら(2013b)の研究などがあるので参考にされたい。

5. その他の災害調査

5. 1 衛星データ活用のための調査

衛星データは、現地の状況を広域的に俯瞰することができるため、大まかな調査計画や、救援、復旧活動計画を立てる際に非常に効果的である。また衛星データから沿岸域災害に関する特性を定量的に抽出しようとする研究も多く試みられている。沿岸部における災害においては、とくに氾濫浸水域の推定(たとえば国土地理院、<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>)や、氾濫域における家屋の被害程度や被害戸数を推定(たとえば堺ら、2013)、高波による地形変化を推定したもの(たとえば濱田ら、2012)などがある。台風ハイアンによる高潮・高波災害においても、衛星データを用いてマングローブの被災状況の推定を試みたもの(Gunasekara ら、2014、図-15)や、太平洋に面した海岸における侵食と侵食された砂の打ちあがり距離を推定してその沿岸方向分布や、海岸線前面に発達した珊瑚礁リーフの幅との関係を推定しようとしたものなどがある(Gunasekara ら、2014、図-16)。いずれの場合においても、衛星データで得られている各地点における値の分布と実際の諸量との関連づけをする必要があり、これらの参照データを取得するための現地調査は必要不可欠である。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、「自然または人為的災害時における宇宙設備の調和された利用を達成するための協力に関する憲章」(国際災害チャータ)に平成 17 年より加入した。これは、大規模災害時には他国の加盟宇宙機関と衛星データを共有し、災害の全容把握に役立てることを目的とした国際協力の枠組みであり、発災時における任意の対象地点における被災状況の把握に大いに貢献する。また 2014 年 5 月に打ちあがった ALOS-2(だいち 2 号)では、昼夜や雲による影響を受けない L バンド合成開口レーダ(SAR)による監視技術が強化され、従来の解像度 10m から 1~3m まで向上するなど、より詳細なデータを抽出することが可能になると期待される。

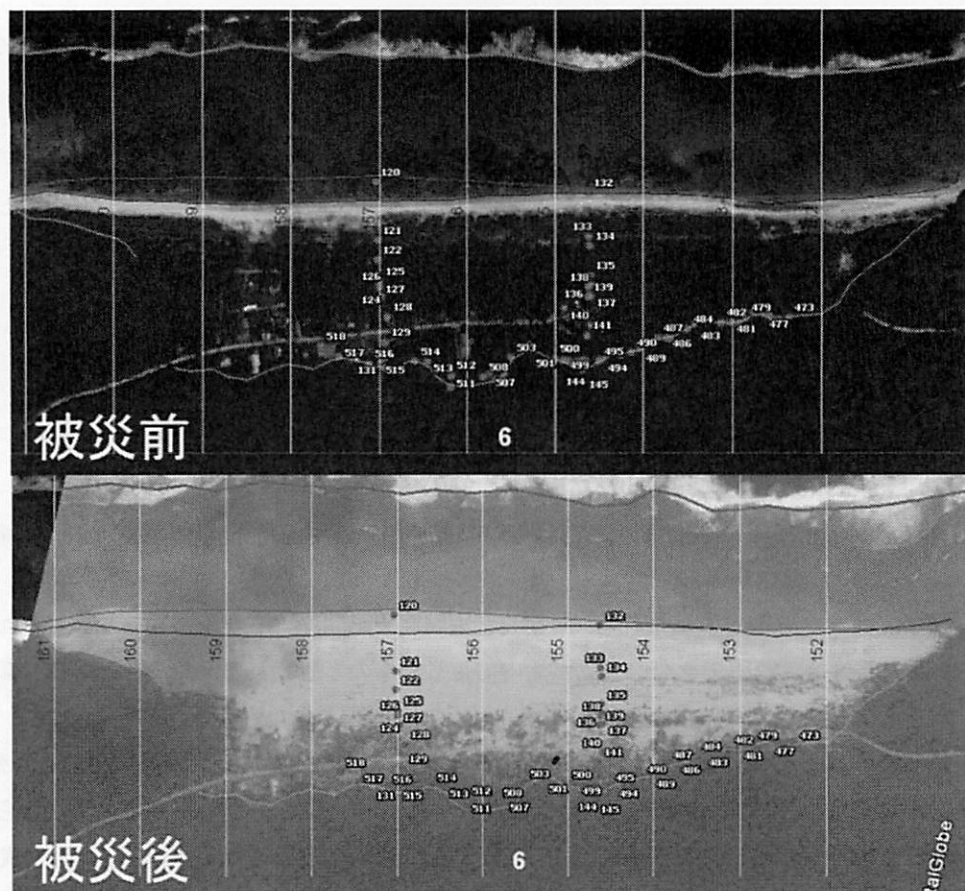


図-15 海岸線(フィリピン東サマル東海岸)における砂の打ちあがりの推定(黄色線)と実測値(桃色点)の比較.
被災前後における比較.

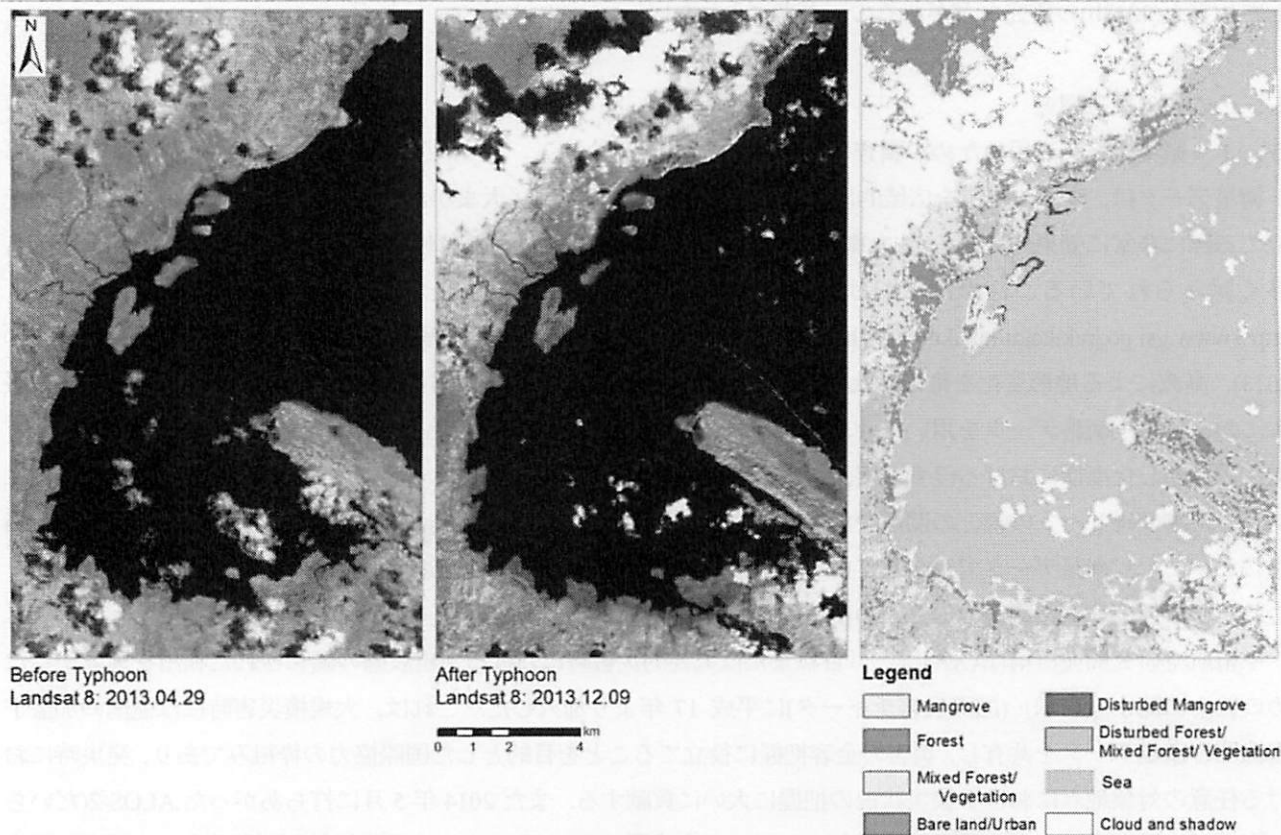


図-16 海岸線(フィリピン東サマル東海岸)におけるマングローブ被災程度の空間分布

5. 2 津波堆積物の調査

津波堆積物の調査は、これまでの事例と異なり、津波により運ばれた海浜砂や海由来の物質の堆積構造を分析することにより、歴史津波の概要を明らかにしようとするものである(たとえば、菅原ら, 2002, 原口ら, 2009). 堆積物に含まれる貝殻などの物質の年代計測には放射性炭素年代測定などの手法が用いられるが、七山ら(2009)や西口ら(2013)は、砂粒子のルミネッセンス特性を計測することにより、堆積構造の年代推定を試み、その有効性を確認している。また田島ら(2007)は、津波堆積層厚の分布から氾濫流の特性(流速や流向の時間変化)の推定を試みている。

6. おわりに

国内外における沿岸域災害調査において、自身の経験に基づき、事前に準備すべきこと、調査時に特に気を付けるべきこと、また特に最近の災害事例では多くのデータが得られるようになった災害時の画像データの分析のための調査方法、抽出データの活用事例などについて整理した。現地で調査を実施する際には、ある程度外力場の特性を想像しながら必要な計測点のデータを収集することと、一方で、先入観による偏ったデータの収集を避けるために、ある程度機械的・網羅的に計測を行うことのバランスが必要であると考え、今後の災害調査を計画・実施する際の参考になれば幸いである。

参考文献

- 今村文彦(1998): 津波被害調査のマニュアル, 東北大学災害制御研究センター津波研究報告, 15, pp.107-117.
- 加藤史訓・諏訪義雄・藤田光一・岸田弘之・五十嵐宗博・岡村次郎・林雄一郎 (2012): 建築物等による津波のせき上げの評価方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.68, No.2, pp.331-I_335.
- 菅裕介, 越村俊一, 小林英一: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾における大潟船舶の漂流・座礁の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.68, pp.251-I_255, 2012.
- 越村俊一: 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 -, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会資料, 2011.
- 越村俊一, 香月恒介, 茂渡悠介: GPU コンピューティングによる津波解析の高速化とリアルタイム浸水予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学論文集, 第 57 巻), Vol. 66, No.1, pp.191-195, 2010.
- 越村俊一, 郷右近英臣: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.68, pp.336-I_340, 2012.
- 越村俊一, 郷右近英臣, 福岡巧巳, 林里美: リモートセンシングによる 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の広域被害把握, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 6 号(特集号), 2012.
- 郷右近英臣, 越村俊一: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の被災地における斜め視空中写真判別による建物被害のマッピング, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.68, pp.1421-I_1425, 2012.
- 国土交通省・防災関連学会合同調査団(2013): 米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書, 107p.
- 境友里・越村俊一・松岡昌志 (2013): TerraSAR-X 強度画像の変化に着目した津波被災地の建物被害程度の把握, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.1456-I_1460.
- 佐賀宏・高川智博・田島芳満・佐藤慎司 (2013a): 流向に着目した 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の挙動解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.201-I_205.
- 佐賀宏・竹森涼・田島芳満・佐藤慎司 (2013b): ビデオ画像と数値シミュレーションに基づく河川津波の氾濫解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.196-I_200.
- 柴山知也・田島芳満・柿沼太郎・信岡尚道ほか (2008): サイクロン Sidr によるバングラデシュ海岸・河川高潮災害の現地調査, 海岸工学論文集, 55, 1396-1400.
- 柴山知也・安田孝志・小島治幸・田島芳満・加藤史訓・信岡尚道・安田誠宏・多摩川勝巳(2006): Hurricane Katrina による高潮被害の調査, 海岸工学論文集, 53, pp.401-405.
- 首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫 (2007): 津波の事典, 朝倉書店, ISBN 978-4-254-16050-5 C 3544, 350p.
- 首藤伸夫・卯花政孝 (1984): 1983 年日本海中部地震津波の痕跡高, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 1, pp.88-267.
- 菅原大助・箕浦幸治・今村文彦(2002): 西暦 869 年貞観津波による堆積物に関する現地調査, 月刊海洋(号外), 28, pp.110-117.
- 田口裕介・田島芳満・Mohammad Asad Hussain (2013): 衛星監視に基づくメグナ川河口周辺地形の大規模変形特性の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.636-I_640.
- 田島芳満・川崎浩司・浅野雄司・Noel M. Ortigas (2014): 台風 Haiyan に伴うレイテ島およびサマル島における高潮・高波特性の分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.70(印刷中).
- 田島芳満・佐藤慎司・工藤寛之・Thisara Welhena・Chandana Siriwardana・Saman Smarawickrama (2007): 津波堆積物の分析に基づく津波氾濫流の時空間構造の推定, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.526-530.
- 田島芳満・佐藤慎司・藤原弘和 (2006): Hurricane Katrina による Biloxi 周辺の高潮被害分布とその外力特性の検証, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.406-410.
- 田島芳満・高川智博・浅野泰史・佐藤慎司・武若聡 (2008): 特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.646-650.

- 田島芳満・丹治雄一・三宅健一・加藤広之・中山哲殿：連続静止画像に基づく島田川河口部における地形変動特性の分析，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.67，pp.I_1045-I_1060，2011.
- 田島芳満・三上生真・長谷川貴哉 (2013)：沿岸遡上帯における長周期波伝播特性の画像分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.69，No.2，pp.I_146-I_150.
- 田中仁，Mohammad B. Adityawan，真野明：東北地方太平洋沖地震津波後の七北田川河口閉塞とその後の地形変化，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.68，pp.I_1_601-I_605，2012.
- 中山哲殿，磯崎由行，駒口友章，三島豊秋，佐々木崇之：画像解析による津波被害状況の把握と現地踏査結果との比較，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.68，pp.I_1421-I_1420，2012.
- 七山太・長友恒人・下岡順直・須崎憲一・古川竜太・重野聖之・石井正之・猪熊樹人・北沢俊幸・中川充(2009)：ルミネッセンス法を用いた津波堆積物の年代測定の試み：北海道東部，根室沿岸低地の試料を例として，地質学雑誌，第 115 巻，第 6 号，pp.249-260.
- 西口幹人・劉海江・佐藤慎司・田島芳満・山中悠資 (2013)：津波堆積砂の光励起ルミネッセンス分析に基づく歴史津波の分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.69，No.2，pp.I_291-I_295.
- 濱田佳大・田島芳満・Wickramarachchi Bandula (2012)：南西モンスーンが卓越するスリランカ西海岸における砂州の大規模変形と長期土砂収支の解明，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.68，No.2，pp.I_606-I_610.
- 林 里美，越村俊一：映像解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68，No.2，I_366-I-370，2012.
- 原口強・石辺岳男(2009)：津波堆積物・隆起イベント層から推定される三陸沖中部の巨大地震モデル，月刊地球，Vol.31，No.4，pp.223-230.
- 東日本大震災合同調査報告書編集委員会 (2014)：東日本大震災合同調査報告 共通編 2 津波の特性と被害，271p，ISBN978-4-8106-0860-1.
- 松富英夫・首藤伸夫 (1994)：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，41，pp.246-25.
- 松本晃治 (2004)：海洋潮汐モデル NAO.99b の構築と普及，測地学会誌，第 50 巻，第 3 号，pp.187-200.
- 山中悠資，田島芳満，佐藤慎司：ビデオ画像解析に基づく綾里湾白浜海岸に集中した津波外力場の分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.68，pp.I_341-I_345，2012.
- 横山勝英，新谷哲也，鈴鴨若菜：気仙沼市舞根地区における津波被害状況とがれきの輸送特性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，vol.68，pp.I_1391-I_1395，2012.
- Gunasekara, Kavinda. Tajima, Y., and S. Shimoazono (2014): Variation of Impact along the East Coast of Eastern Samar Due to Typhoon Haiyan in the Philippines, Journal of JSCE, B2 (Coast. Eng.), vol.70, No.2, (printing)
- Hermann M. Fritz, David A. Phillips, Akio Okayasu, Takenori Shimoazono, Haijiang Liu, Fahad Mohammed, Vassilis Skanavis, Costas E. Synolakis, and Tomoyuki Takahashi : The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma Bay using LiDAR, Geophysical Research Letters, vol.39, L00G23, doi:10.1029/2011GL050686, 2012.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (1998) : Post-Tsunami survey field guide, Manuals and guides 30, 43p.
- Sanuki, H., Tajima, Y., Yeh, H., and S. Sato : Dynamics of the Tsunami flooding to the river basin, Proc. Int. Conf. on Coast. Dynamics, 2013 (accepted).Tajima, Y., Yasuda, T., Pacheco, B.M., Cruz, E. C., Kawasaki, K., Nobuoka, H., Miyamoto, M., Asano, Y., Arikawa, T., Ortigas, N.M., Aquino, R., Mata, W., Valdez, J. and F. Briones (2014): Initial report of JSCE-PICE Joint Survey on the storm surge disaster caused by Typhoon Haiyan, Coastal Eng. Journal, World Scientific, DOI: 10.1142/S0578563414500065.
- The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011) : Nationwide field survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Journal of JSCE, B, vol.67, No.1, pp.63-66.