日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.27

Feb.2016

特　集：東北地方太平洋沖地震5周年
「震災復興と地震・津波対策技術（その1）」

JAEE

http://www.jaee.gr.jp/

公益社団法人 日本地震工学会

Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014東京都港区芝5-26-20建築会館

Tel:03-5730-2831　Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌（第 27 号 2016 年 2 月）

Bulletin of JAEE（No.27 February.2016）

INDEX

巻頭言：

特集「東北地方太平洋沖地震５周年」について／高橋　郁夫 …… 1

特集：東北地方太平洋沖地震5周年「震災復興と地震・津波対策技術（その１）

5年目の住宅復興 ―東日本大震災の仮設住宅・災害公営住宅・防災集団移転―／佃　　悠 …… 2
2011年津波による海浜変形・回復・復興／有働　恵子 …… 8
東日本大震災からの産業復興と企業防災／丸谷　浩明 …… 13
2011年東北地方太平洋沖地震の地震動／川辺　秀憲 …… 19
東日本大震災の教訓を踏まえた地震ハザード研究／藤原　広行 …… 25
非線形分散波理論による2011年東北地方太平洋沖地震津波の計算／馬場　俊孝 …… 32
津波とピロティ構造／田中　礼治、澁谷　　陽 …… 36

シリーズ：温故知新 ～未来への回顧録～

地震工学の今昔／柴田　明徳 …… 42

学会ニュース：

日本地震工学会第11回年次大会(2015)開催報告／日本地震工学会大会実行委員会 …… 47
セミナー「実務で使う地盤の地震応答解析」開催報告／中村友紀子 …… 51

学会の動き：

本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い
／登録メールアドレスご確認のお願い／問い合わせ先 …… 52

編集後記

巻頭言

特集「東北地方太平洋沖地震５周年」について

高橋　郁夫
●会誌編集委員会 委員長／国立研究開発法人 防災科学技術研究所 主幹研究員

１．はじめに

一瞬にして大きな津波が多くの町を呑み込んでしまったあの日からもうすぐ５年。テレビに映し出された、今までに見たこともない衝撃的な映像を今でも思い出します。この地震は、津波災害だけでなく、地盤の液状化、長周期地震動、建物の２次部材の脱落、原子力発電所の炉心溶融と放射能汚染など様々な問題を引き起こし、地震工学に大きな課題を突き付けました。

この５年間、家を流され、家族や友人を失った被災地の方々にとっては辛くて長く感じられたい歳月であったのではないかとお察しいたします。５年たった今でも、被災地の復興は道半ばであり、１日も早い復興を望まずにはいられません。

２．特集：東北地方太平洋沖地震５周年

東北地方太平洋沖地震発生から５周年を迎えるに当たり、本会誌では、本号と次号の２回に亘ってこの地震災害の特集を組むことになりました。そのテーマは「震災復興と地震・津波対策技術」です。現在、復旧・復興の状況はどうなっているのか、防災・減災に向けた取組みはどこまで進んでいるのか、そして、今後どのような課題が残されているのかなどの問題について、地震・津波の調査・分析、震災の復旧・復興などの対応に携わってこられた専門家や関係者の方々にこれらの問題について解説して頂きます。

本号の特集の前半は、主として復旧・復興に関連したテーマについて解説して頂きました。佃悠氏には、この地震における住宅被害、地震から５年経った現在の住宅事情や問題点について、また、有働恵子氏には、津波による広域的な海浜の変形とその影響、回復状況に関して解説して頂きました。丸谷浩明氏には、被災地の企業の復興状況、企業防災・BCPの取組み等について概説して頂きました。

本号の特集の後半は、この地震による地震動や津波の分析、今後の地震・津波への防災対策に関連したテーマです。川辺秀憲氏には、観測された強震記録の検証と震源モデルについて、藤原広行氏には、強震観測網や長周期地震動を含めた全国の強震動予測など、今後に向けた地震動の研究や地震防災・減災の取組みについて解説して頂きました。馬場俊孝氏には、津波計算コードを用いた本地震における津波の再現計算について紹介して頂きました。最後に、田中礼治氏・澁谷陽氏には、津波とピロティ構造の関係についての検討結果についてして解説して頂きました。

３．新連載：温故知新

本号より「温故知新」と題した新しい連載が始まります。皆様よくご存じの通り、「ふるきをたずねてあたらしきをしる」ということわざで、「故（ふるき）」は「古いもの」という意味でなく、先人の智慧という意味を表しています。この言葉の如く、本連載では、これまで多くの研究開発や実務に携わってこられた大先輩に、ご自身の研究や業務の経験を踏まえて、今後の地震工学を担う研究者や実務者の方々、特に前途有望な若手の方々にご自身の思いを語り、またアドバイスをして頂くという企画です。もちろん、中堅、ベテランの方々にとってもきっと役立つ、あるいは耳の痛い話が聞けるのではないかと思います。本連載の執筆は、主として日本地震工学会のスペシャルアドバイザーの方々を中心にお願いしようと考えています。大先輩のお話の中に、読者それぞれにとって、これからの研究や実務における新しい発想や方法のヒントが見つかるものと期待しています。その初回は、耐震工学の第一人者として現在もご活用中の柴田明徳氏に寄稿して頂きました。

４．おわりに

会誌25号の巻頭言にも書きましたが、本会誌では、発生した地震や津波に関する情報をできるだけ早くまた詳細に会員の皆様に発信していくと共に、その後の被害からの復旧・復興、その災害を教訓にした防災・減災対策の実施状況などについても機会を捉えてフォローしていくことが重要な役割の一つであると考えています。今後とも、会員の皆様の弛まぬ研究活動の成果や、実務における災害対策や体験を会誌に寄せて頂けたら幸いです。

高橋　郁夫（たかはし いくお）
1981年東北大学工学部建築学科卒業。1983年同大学院修了後、清水建設㈱入社。大崎研究室、和泉研究室、技術研究所において耐震工学・地震防災等の研究開発に従事。2015年4月より現職。博士（工学）。

5年目の住宅復興
―東日本大震災の仮設住宅・災害公営住宅・防災集団移転―

佃　　悠
●東北大学大学院工学研究科 助教

１．はじめに

2016年3月11日で東日本大震災の発生から5年目を迎える。阪神・淡路大震災時には約5年で、中越地震の際には約3年で仮設住宅からの完全退去が宣言されたのに対し、東日本大震災被災地では災害公営住宅の建設は2015年度にピークを迎えたが、防災集団移転や土地区画整理事業等土地の造成から必要な事業にはもうしばらく時間が必要である。筆者は、2012年より現職に着任し、複数の被災自治体で災害公営住宅等の計画支援を行ってきた。とかく、５年という歳月だけをみて、復興の進捗が遅いと評価されがちだが、実際何が住まいの復興を阻害しているのか。はたまた、早い・遅いという議論を超えた問うべき問題が存在するのか、復興の事業主体に比較的近い立場から５年目の住宅復興を概観してみたい。

２．住宅復興の背景

２．１．東日本大震災による住宅被害

2011年3月11日に発生した地震とその後来襲した津波は、青森県から茨城県北部にかけての約500kmの太平洋沿岸地域を中心に大きな被害をもたらした。住宅の被害は、全壊が124,690棟、半壊が275,118棟と報告されている（2015年9月9日現在）。特に、岩手・宮城・福島の3県の被害は大きく、全半壊住宅の棟数は26,165棟、238,126棟、93,649棟と、合計すると全体の約9割を占める。1995年に発生した阪神・淡路大震災の住宅の全半壊棟数249,180棟（2006年5月19日確定値）と比べても被害の大きさが分かる。

２．２．津波被災地としての東日本大震災の特性

阪神・淡路大震災（以下、阪神）では、地震とその後の火災による住宅被害が多かったのに対し、東日本大震災（以下、東日本）での被害の多くは津波によるものであった。応急仮設住宅を建設するにしても、住宅の復興に向けても、まずは安全な敷地を確保するということが必要とされた。応急仮設住宅は、高台や内陸の公共用地を中心に建設されたが、岩手県ではその後の公営住宅等復興用地への活用を見越して敷地を選定しており、すでにこの時点から復興を見据えた動きが見られている。

実際、恒久的な住宅の再建に取り組むにあたり、居住可能地域をどのように設定するか検討が行われた。国の防災会議では、想定津波を100数十年に一回のL1津波と500年から1000数百年に一回のL2津波に分け、シミュレーションを行った上で、防潮堤ではL1を防ぎ、L2については2m以上の浸水が想定される場所を原則として居住が禁止される「災害危険区域」とする、いわゆる2-2ルールが適用されることとなった。「災害危険区域」は基礎自治体ごとに設定され、この区域に居住していた被災者は、新しい土地を取得・再建か、災害公営住宅への入居か、または高台移転を選択することになり、住まいの再建方法を大きく規定している。

２．３．住宅復興の「時間」に影響するもの

東日本での住まいの復興を考える際には、この「大量の住宅需要」と「限定的な土地活用」という前提が大きな影響を与えていることを理解する必要がある。「大量の住宅需要」に対応するため各自治体で計画策定が進められたが、工事着工は必然的に同時期に始まることになり、材料と職人の取り合いとなった。ちょうど、基本設計が終わり、工事の入札が本格化した2013年は2020年の東京オリンピックの開催が決定したこともあり、建設業者の入札価格が高騰し、多くの不落が発生した。特に、大都市圏から距離があり、材料の流通や周辺地域からの人材確保が不利な岩手県の沿岸部などでは、工事費の高騰が著しく、一般の設計施工分離の入札では建設がおぼつかないことから、デザインビルドのプロポーザルや買い取り方式、設計段階から施工者が関与するECI等を活用して、復興事業が進められることになり、設計から見直す事態になる場合も少なくなかった。

また、「限定的な土地利用」により、まず災害危険区域を設定した上で、安全な場所で敷地を設定し、民地であれば土地を買い取り、さらに高台では土地の造成、低平地では嵩上げを行った上で、土地の引き渡し、住宅の着工となるため、長期の事業となるのである。

３．単線型復興と複線型復興

災害により住まいを失くした多くの被災者に対して、行政はまずは一時的な住まいの提供、続いて恒久的住宅取得への支援を行う。前者は、避難所とその後の仮

設住宅、後者は災害公営住宅や住宅再建支援金等である。避難所、仮設住宅、災害公営住宅は震災後の公共が行う住宅支援に関する直接施策であるが、阪神での施策はこの３つが主であったことから「単線型復興」と言われている。一方で、東日本の住宅復興は「複線型復興」もしくは「混線型復興」であると言われている。これは、プレハブ住宅が主であった阪神の仮設住宅に対し、東日本ではプレハブに加え、木造仮設住宅やみなし仮設住宅が提供されていること、恒久住宅の確保では、災害公営住宅だけでなく、自力再建に対する支援金や集団移転などの施策が実施されていることを指している。住宅需要に対して、全てをプレハブの仮設住宅や災害公営住宅だけで供給することが困難であるという行政側の事情と、住まいの選択肢が広がったという被災者側の利点の両方の意味があると言える。

住まいの復興を考える上では、建物としての「住宅」だけでなく、その中で営まれる「生活」の継続や集合して居住することによって生まれる「コミュニティ」の形成が重要である。東日本での住宅復興の計画では、これらの視点が初期から重視されてきた。選択肢の多様化はこの生活の維持を支える一助にもなっている。

４．仮の住まい－応急仮設住宅とみなし仮設住宅

４．１．応急仮設住宅

避難所と応急仮設住宅の供与は、1947年に制定された災害救助法に規定されている。「救護」が目的となることから、「建築」としてよりは「支援物資」と同等の扱いとして、厚生労働省が所管していたが、東日本では大量の供給が必要とされたことから、内閣府が担当に変更されている。

（１）多様な構法

阪神では自力仮設住宅も見られたが、プレハブ協会の協力により建設されたプレハブ住宅が大半を占めた。その後、1996年には全都道府県でプレハブ協会と協定を結び、原則として災害時には協会の支援のもと、プレハブの仮設住宅が建設されることなった。東日本の被災地でも県主導により多くの仮設住宅がプレハブで供給されているが、プレハブだけでは対応が難しいことから、コンテナを用いたもの（女川町）や、木造によるもの（福島県、住田町他）も建設された。特に住田町では発災直前、木造仮設住宅のモデルプランを作成しており、それを用いて、近隣市町村被災者向けの仮設住宅をいち早く建設している。また、原子力発電所被害で長期的な避難生活が余儀なくされている福島県では当初より中期以上の避難生活を想定し、かつ将来的に恒久住宅への転用が可能な木造仮設住宅が建設されている。

一方で、建設された応急仮設住宅が寒冷地仕様となっていないため、建設後に数度の改修が必要となり、結果戸当たり単価が上昇するという事態が発生している。避難所での生活改善の取り組みも充実してきたことから、必ずしも「スピード」を重視するのではなく、福島で取り組まれたような復興住宅へ移行も視野に入れた中長期的な視点での住宅建設の必要性も指摘されている。

（２）コミュニティへの配慮と地域型仮設住宅

阪神では入居期間の長期化に対応するため、災害救助法上では義務づけられていなかった集会所にあたる「ふれあいセンター」を復興基金事業として実施し、中越地震（以下、中越）では生活に不安を抱える高齢者等を支援するためのサポートセンターと入居者への見守り訪問活動を行う生活支援員が設置された。東日本でもこれを受け継ぎ、集会所は各仮設住宅で設置されるとともに、遠野市や釜石市でコミュニティケア型仮設住宅（生活支援が必要となる高齢者等のために、二つの住棟を向かい合わせとし、その間にデッキと屋根が設けられた上に、併設するサポートセンターを渡り廊下で連結し、コミュニティ形成と生活支援の利便性に配慮している）が建設されている。

また、阪神では、グループホーム型の地域型仮設住宅が建設され、その後グループハウス尼崎として公営住宅に展開した。今回も石巻市等複数の自治体で福祉仮設住宅の建設は見られるが、公営住宅への展開は現在のところ想定されていない。

４．２．みなし仮設住宅

みなし仮設住宅とは、民間賃貸住宅を借り上げて応急仮設住宅とみなして扱うもので、東日本ではじめて大規模に活用された。すでに入居済の住宅も遡及的に対象とされたため、その数は最大69,000戸にのぼる。新たに応急仮設住宅を建設するのに比べ、既存住宅の有効活用ができるという点、応急仮設住宅では十分な広さが確保できない人数の多い家族の居住で利点があり、今後の災害時には基本としてみなし仮設住宅によって仮設住宅が提供されるということが申し合わされている。一方で、筆者らの調査では、一度町外で居住すると住宅再建時に世帯分離を選択する様子がみられており、既存の住宅ストックが十分ではない自治体では、自治体から転出してみなし仮設に入居することで、将来的に従前の自治体に戻る可能性が低下すると考えられる。大都市圏での災害においては、みなし仮設住宅が有効に機能するのに対して、地方自治体においては、人口流出に拍車をかけるきっかけともなりう

るため、場合によって、みなし仮設住宅と合わせ、応急仮設住宅の適切な提供も引き続き考慮する必要があると考えられる。

４．３．仮設住宅居住期間の長期化と集約・撤廃

応急仮設住宅の耐久年数は２年と設定されているが、東日本では、2年目以降、1年ごとに延長が行われており、6年目まで一律で延長が決定している市町村は岩手・宮城の2県で14市町村にのぼる。特に、被害の大きい自治体では、受け皿となる災害公営住宅等の建設にも時間を要するため、仮設居住期間が長期になる一方、自力再建が可能な被災者はいち早く仮設住宅から転出しており、なおかつそのような住民が仮設住宅自治会の役員を担っている場合もあることから、コミュニティの維持が難しくなってきている。また、仮設住宅では家賃が不要であるために、明確な再建意志がないと転出のインセンティブが働かないのもネックである。応急仮設住宅の耐用年数、また敷地の将来的な利活用を考慮すると早期の転出と撤去が望ましいが、仮設住宅居住者の中には、災害公営住宅の入居基準を満たさない人もいることから、適切な受け皿への移行を支援しながら、多数分散している仮設団地を集約しつつ、撤去を行うことが課題となっている。

５．災害公営住宅事業と防災集団移転促進事業

東日本で行われた住宅復興施策のうち、行政が主体となり建設が行われた事業に災害公営住宅事業と防災集団移転促進事業がある。この２つについてみていく。

５．１．事業の対象者

（１）災害公営住宅事業

通常の公営住宅の入居者には、所得の制限があるが、「東日本大震災復興特別区域法」により東日本の災害公営住宅では入居収入基準を充たすことは不要とされた。そのため、全壊や大規模半壊等で罹災証明のある被災者は所得に関わらず入居が可能となった。ただし、家賃は所得により段階的に設定され、低所得者については特例的に低減される。

（２）防災集団移転促進事業

今回初めて大々的に実施された「防災集団移転促進事業」は、「防災のための集団移転促進事業に係る国の財政上の特別措置等に関する法律」に基づき、住居の集団的移転を行うための事業であり、災害危険区域等で移転促進区域に設定された地域に住宅や土地を所有していた被災者を対象とし、集団的な高台や内陸への移転に用いられている。過去に数十戸単位の適用は見られたが、「東日本大震災復興特別区域法」により5戸以上（従来は10戸以上）でも移転が可能になったことが大規模な活用につながった。防災集団移転住宅地を含めた面整備事業（他に土地区画整理事業、漁業集落防災機能強化事業）による宅地は2015年9月現在で20,338戸分（岩手・宮城・福島県）が造成予定である。

５．２．必要戸数の確定

災害公営住宅、防災集団移転住宅地のいずれも、実際の計画を進めるためには、まず始めに必要な戸数を把握する必要がある。国では、居住意向調査によって、

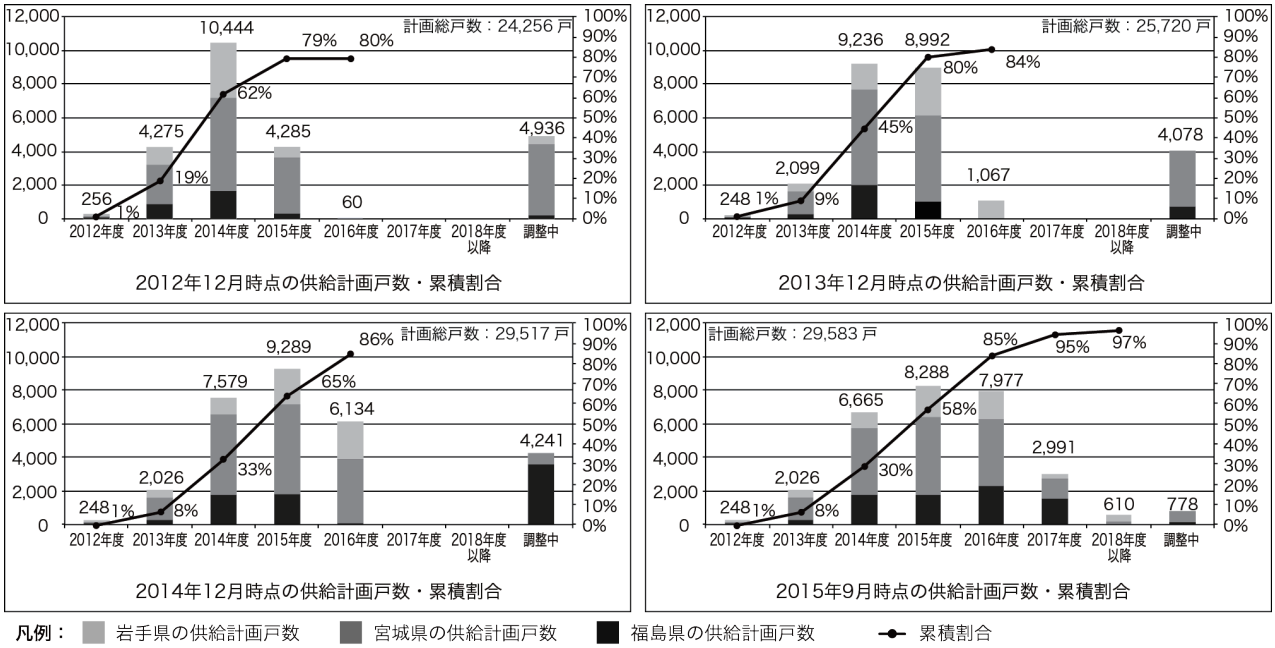


図１　災害公営住宅供給計画戸数の推移　データ参照：復興庁　住まいの復興工程表, 2013.3, 2014.3, 2015.2, 2015.11

住民の意向を把握した上で住宅再建事業手法の検討をすることとしており、各市町村では、複数回の「居住意向調査」を実施し、必要戸数を把握している。しかし、居住意向は実施の時期によって変動することが少なくなく、早い段階で如何に確定的な戸数把握を行うことができるかが、過小供給による住宅不足と過剰供給による将来的なデッドストック防止の双方から重要である。特に被災直後は、冷静な判断を行うことが困難であることから、正確な情報提供と丁寧な説明を通じて、戸数把握に務める必要がある。図１は、岩手・宮城・福島の3県での災害公営住宅計画戸数の変遷を示している。2012年段階と比べて、福島県の計画戸数の増加により全体戸数は増加しているが、岩手・宮城県では一旦増加した後、むしろ減少している。加えて、前述した入札不調等の影響で、当初2014年度に供給のピークを迎えるはずが、2016年度頃までピークが続く状況となっている。丁寧な戸数把握の一例として、宮城県七ヶ浜町では、独自のエクセルシートにより、第２回調査以降は世帯ごとに適切な住宅再建の方法についての個別面談を実施しており、早い段階で必要戸数の絞り込みを行っている（図２）。一方で、個別面談が難しく、希望戸数の振れ幅が大きい大規模都市圏では、統計的なシミュレーションに基づいた戸数確定手法と、震災に関係なく事前に長期的・具体的なまちづくりのビジョンを策定しておき、適切な戸数の指針とすることが有効であると思われる。

５．３．災害公営住宅の計画

東日本被災地は、震災前から人口減・高齢化が進む地域が多く、災害公営住宅入居者は特に高齢者の割合が高くなることが想定されたため、当初から「孤立化・孤独死」を防ぐことが重視されていた。また、「浜」と呼ばれるリアス式海岸の入り江に存する集落は、代々続く密接なコミュニティが形成されており、その復興も重要である。「地域コミュニティの再生」と「孤立化・孤独死の防止」、また「福祉との連携」という視点から、災害公営住宅の計画をみていく。

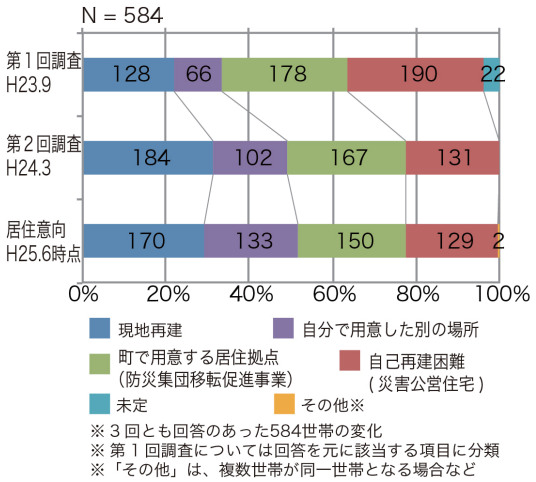


図２　居住意向の変化（宮城県七ヶ浜町）
出典：七ヶ浜町震災復興計画前期基本計画［2011-2015］更新版

（１）地域コミュニティの再生

阪神では、高齢者・障がい者に優先的入居が認められた結果、場合によっては、従前居住地から離れた住宅に入居し孤立する事例も見られた。中越では、山間の小規模集落が被害にあったことから、それまでの生活スタイルに根ざした住環境のあり方が模索され、長岡市山古志地域等で中山間地型復興公営住宅が建設された。東日本でも、従前の居住地に配慮して建設・入居が試みられている。例えば、浜等の小規模な集落については、元々の住民を対象として集落内に建設が行われている。また、約4,500戸の災害公営住宅を建設する石巻市では住戸の希望申込に対し、抽選で入居が決められるが、その際に震災以前の地域での当選確率が高くなるように配慮されている。

また、災害危険区域でなくとも、津波被害を受けた地域では多くの建物が失われており、市街地の再生を如何に図るかも課題である。しかし、阪神の長田区の

写真１　リビングアクセスとメゾネットを組み合わせた事例（石巻市新立野復興公営住宅）

写真２　中庭に面してリビングと住戸のアクセスを設けた事例（七ヶ浜町菖蒲田浜町営住宅）

例では再開発事業を用いて復興が図られたが、未だに商業施設が多くの空室を抱える状況が続いていることからも、事業選択は慎重に行う必要があることが分かる。釜石市では、津波の被害を受けた市の中心部である東部地区の数カ所に、１階には住戸を設けず安全を確保した災害公営住宅の建設を進めている。それらが新しい町の骨格を形成し、まちににぎわいを呼び戻すよう企図されている。

（２）孤立化・孤独死を防ぐ

孤独死に関するメカニズムについては、田中らにより阪神の被災者を対象とした調査から、社会的参加の機会（無職）、親族形成（未婚）、心身の健康面（ALC依存）のリスクが孤立化につながっており、必ずしも高齢者のみの問題ではないことが分かっている。さらにこのような人たちは元々人とのつながりが薄いことから、積極的な活動に向いている集会所等の有無と相関しないことも指摘されている。そこで、東日本の被災地では、日常的なアウェアネスを促し、自然な見守りを実現するような建築の工夫が行われている。

自然な見守りを促すための工夫の一つが、「リビングアクセス型住戸」である。「リビングアクセス型住戸」は1983年に住宅・都市整備公団により葛西クリーンタウン清新北ハイツで初めて取り組まれたが、プライバシーの確保とコミュニティへ開くことの両立が必要であるため、標準的な設計を行うことが難しく、必ずしも一般化していなかった。しかし、日常の大半を過ごすリビングをコミュニティの場となる共用空間に近づけた住戸は、漁村集落の「縁側」のある従前の住宅との親和性も高いと考えられ、七ヶ浜町や石巻市、釜石市等で取り入れられている。

また、共用空間の作り方の工夫として、公営住宅内に重層的なコミュニティ単位を設定する手法がみられる。岩沼市玉浦西地区では、６カ所の集落が内陸移転した防災集団移転住宅地の２つの集落の接点となる３カ所を災害公営住宅の敷地とし、コミュニティへの帰属と住宅管理に配慮するとともに、数戸単位で共有するテラスを設けるといった工夫がされている。さらに前述の七ヶ浜町の菖蒲田浜町営住宅では、100戸を約30戸ごと5棟に分け、さらに中庭を囲むように南北に分棟し、コミュニティの単位としている。

（３）福祉との連携

阪神では、グループハウス尼崎のような福祉仮設住宅を発展させた災害公営住宅がみられたが、介護保険法（2000年施工）等により法整備が進み、福祉的支援が明確に位置づけられたため、住まいは住まいとして確保することが重視され、福祉的災害公営住宅の取り組みは多くはない。そのような中、相馬市では、グループハウス型の「井戸端長屋」と呼ばれる住宅が4カ所5棟建設された。入居者同士で支え合って生活することに重点がおかれ、食堂やランドリー（井戸端）を設置した広い共用部と各住戸から成る住宅で、従前からの顔見知りが多い地区では、当初の想定通り、入居者同士が支え合って生活をしている様子もみられている。もう一つは、南三陸町での取り組みで、宮城県、国交省の直轄調査、日本建築学会等の支援のもと、町で最も建設戸数が多い志津川東地区でモデル事業として住まいと福祉の連携が検討された。災害公営住宅の隣地に福祉モールを建設し、災害公営住宅と福祉施設がそれぞれ独立しながらも、一体的な活用によって高齢者等支援を必要とする住民が安心して生活できるというものである。

５．４．防災集団移転住宅地の計画

東日本では、防災集団移転促進事業が初めて大規模に活用されたが、規模の大きい団地が多いのも特徴である。そのため、高台移転の際には、大規模な造成工事が必要になる。一般的な造成工事を行うと、工事面積が広く、工期も長く、費用もかかることから、アーキエイドの支援を受けた石巻市鮎川地区等、建築と土木を一体的に検討することで、地形を活かした計画を行った事例もみられる。また、防災集団移転住宅地ではまちづくり協議会が設置されているが、気仙沼市小泉地区等では、住民自身が計画の主体となりまちづくりを進める事例も見られる。いち早く住宅復興が完了した前述の岩沼市では、住民の要請から、沿岸の６集落が内陸の一つの防災集団移転住宅地へ移転した。約30回にもおよぶ住民ワークショップを通して、自分たちでまちの計画を検討していった。そのため、早い段階での住民の合意形成が可能となった。質を担保しながら、早い復興を遂げる好例であり、計画段階から計画側と実際に居住する人とが上手くコラボレーションすることの重要性が分かる。

５．５．入居のミスマッチとスムーズな移行への支援

災害公営住宅、防災集団移転住宅地のいずれも今年度が建設・造成のピークであり、実際の計画がどれくらい居住者の「生活」の質の向上に貢献しているか、また、まちや集落の再生に効力を発揮したかは今後の評価を待つしかないが、現在明らかになってきている課題として、入居のミスマッチがあげられる。せっかく完成した災害公営住宅でも人気の集中するものとそうでないものがあり、空き室が発生してなかなか埋まらないという住宅が発生しているのだ。大量の住宅が供

給されるために、時期を分けて住宅が完成するので、入居予定者もより条件のよい物件を選んで選択している。「早い」ことだけを優先して、建設することの危険性が明らかになってきている。

また、計画段階と入居者が異なることによる計画上の難しさも明らかになってきている。事前に居住者が決まっている場合は、その要望を聞きながら検討を進めることが可能だが、市街地等の災害公営住宅では供給戸数も希望者も多いため、抽選で入居者を決めることになり、計画段階の参画者が必ずしも入居する訳ではなく、計画の意図が十分に理解されずに入居する事態も発生する。入居者選定の方式も含めた計画手法の検討が必要である。

さらに、せっかく再建しても、再建先に新しいコミュニティがまだ形成されておらず、移行期に孤立する様子もみられている。中には、仮設住宅の集会所を懐かしんで通う人もいるそうだ。仮設住宅と違って、災害公営住宅の集会所は水光熱費等管理費の負担が住民となることから、使用に二の足を踏んでいるということも聞かれる。移行期のコミュニティを形成する場や支援の仕組みも必要である。

7．最後に

５年目に差し掛かり、すでに工事と入居が完了している自治体では、新しいコミュニティの形成と既存コミュニティの再生に力を注ぎつつもポスト復興に動き出している。それに対し、被害が大きい市町村では、再建方法が未だ不確定な被災者の去就が仮設住宅の撤去や災害公営住宅の建設に影響を及ぼしている。明確な仮設住宅の撤去時期を明示することで、災害公営住宅の戸数と住宅復興のゴールを確定することでしか解決ができないようにも思われる。

「時間」の問題には、「大量の住宅供給」と「限定的な土地利用」という要因があった。特に防災集団移転住宅地は、高台の適地があっても民地である場合は土地の取得から行う必要があり、時間のかかる要因となっている。また、防災集団移転事業で自治体が被災者から取得した土地では、大規模嵩上げ事業や土地区画整理事業が行われているが、広大な低平地の具体的活用が見えていない自治体もある。2-2ルールは、津波の記憶が新しい被災直後の議論の中では、有効な解決方法だと思われたが、震災から時間が経過した現在では、その是非についての議論も始まっている。実際に、集落の歴史や地形の合理的活用からみてより良い方法はなかったのか、平時の議論を十分に積み重ねる必要があるだろう。

また、災害公営住宅でも防災集団移転住宅地でも震災から時間が経つにつれて、当初よりも希望者が減り、空きが発生しているものもみられる。空いていても維持管理は必要であることから、過大な供給はデッドストックとなり、将来の負債となる可能性がある。まちづくりにおいて住民の意向を反映することは必須であるが、意向の変動を見据え、人口減を前提とした計画論の構築と、強いまちのビジョンの事前の形成が、復興に限らず今後人口減が進む我が国での建築計画や都市計画における課題だと言えるだろう。専門家として、合理的で冷静な判断ができるためのエビデンスを東日本の経験から残しておくことも必要である。

さらに、コミュニティ指向の住宅等空間の質的な試みの評価は今後の課題であるが、住民同士のコミュニティが醸成されやすい住宅の多様な取り組みは、災害時だけではなく、今後の住まいのあり方に大きな示唆を与えるものになると考えている。

参考文献

1)消防庁災害対策本部：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について（第152報），2015. 9. 9

2)消防庁：阪神・淡路大震災について（確定報），2006. 5.19

3)塩崎賢明：復興〈災害〉–阪神・淡路大震災と東日本大震災，岩波新書，2014.12

4)田中正人・上野易弘：被災市街地の住宅セイフティネットにおける「孤独死」の発生実態とその背景，地域安全学会論文集 (14・15)，437-444，2011.11

5)大水敏弘：実証・仮設住宅—東日本大震災の現場から，学芸出版社，2013.8

6)日本建築学会：建築雑誌，No. 1655，2014.3

7) 横田小百合，佃悠，小野田泰明：仮設住宅の住まい方と近所付き合いにみる環境変化の影響に関する研究　S町を事例として，日本建築学会大会学術講演梗概集，2014（建築計画）pp.1067-10684，2014.9

8) 横山壮，佃悠，小野田泰明，佐々木翔李：防災集団移転促進事業の展開に見る大規模宅地形成の状況　東日本大震災における復興事業の展開に関する研究　その２，日本建築学会大会学術講演梗概集（都市計画），pp.257-258，2015.9

佃　悠（つくだ はるか）

2012年東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程修了、現職．博士（工学）．一級建築士．専門：建築計画

2011年津波による海浜変形・回復・復興

有働　恵子
●東北大学災害科学国際研究所 准教授

1．はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波により、岩手県から福島県の沿岸部は壊滅的な被害を受けた。汀線変化を含む陸域の地形変化については、比較的計測が容易で衛星画像等が利用できることから、その侵食や回復について多くの研究がなされている。海域の地形変化については、震災以前からの地形計測データが少ないため解析例が限られるものの、いくつかの結果が報告されている。これらの研究成果によれば、砂浜侵食被害については、海岸堤防の破堤個所や河口付近では被害が大きいものの、堤防が残存したところでは陸域の侵食被害が少ないなどの特徴がみられる[1)、2)、3)]。また、海域においても、海岸構造物に海岸侵食抑制効果や海域への流出土砂の捕捉効果があったことが報告されている[4)、5)、6)]。

被災後は、台風のように高頻度で生じる災害に対応するために堤防の仮復旧が行われることはあっても、復興計画が策定され堤防建設の準備が整うまで本復旧は行われていない。地形回復が認められた海岸の多くは、本復旧が行われるまでの1年程度の短期間の間に自然状態で回復した[7)]。

震災発生から5年が経ち、被災沿岸部では急ピッチで復興が進められている。自然状態で回復しなかった海岸の中には、大規模な埋め立てや堤防建設、養浜などの海岸整備事業を行っている自治体もある。

本稿では、2011年地震津波により生じた広域の海浜変形特性とその後の回復状況について概説し、回復が認められた宮城県仙台湾南部海岸と回復が認められなかった陸前高田市高田海岸を取り上げ、津波による海浜変形と回復、そしてその後の復興について述べる。

2．2011年津波による広域の海浜変形とその回復状況の概要[8)]

図１に、青森県から茨城県にかけての地殻変動、砂浜勾配と地盤沈下量、津波高さと堤防高さ、ならびに汀線後退量を示す。地盤沈下量は国土地理院[9)]のデータで、津波高さは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ[10)]のデータである。また、砂浜勾配と汀線後退量のデータとしては環境省生物多様性センター[11)]の解析結果を用いた。

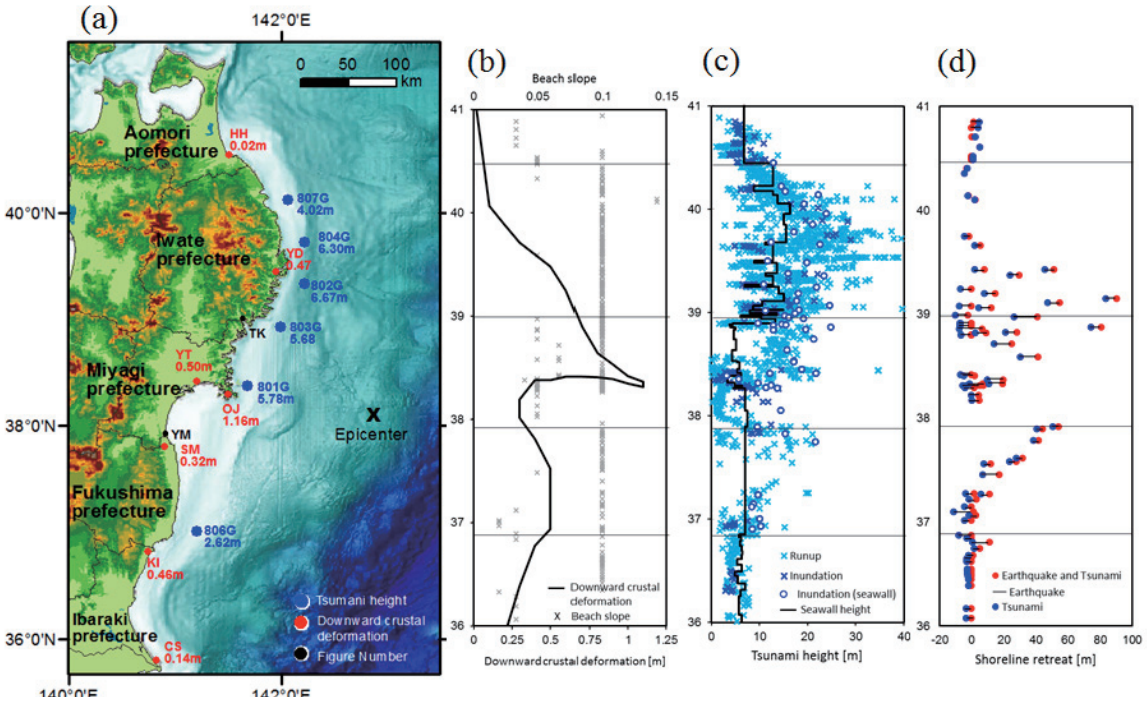


図１　青森県から茨城県にかけての (a) 地盤沈下量と津波高さ、(b) 砂浜勾配と地盤沈下量、(c) 津波高さと堤防高さ、ならびに (d) 汀線後退量。TK、NT、ならびにYMはそれぞれ高田海岸、名取川河口、ならびに山元海岸の位置を示す。

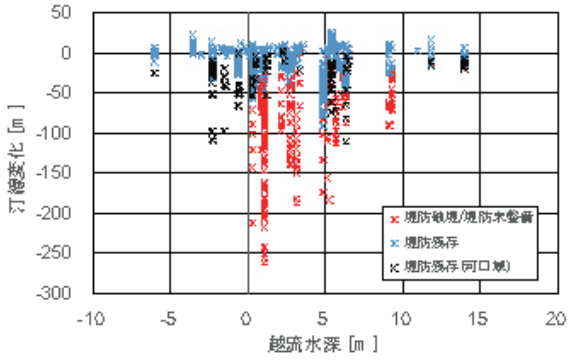


図２　越流水深と汀線変化との関係[8)]

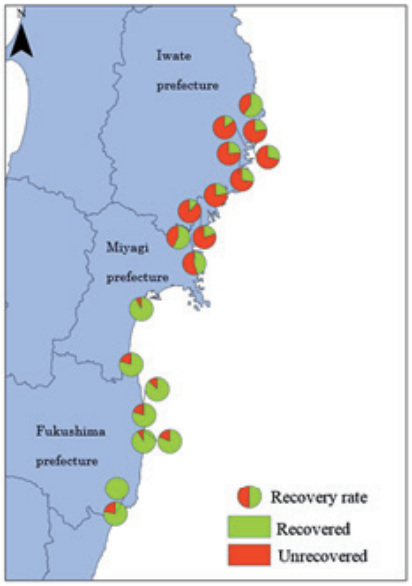


図３　海浜の回復割合[8)]

地盤沈下量は、青森県で5cm程度、千葉県で10cm程度であるが、震源に向かうにつれて大きくなり、牡鹿半島では1m以上であった。しかし、地盤沈下量（図1 (b)）と地盤沈下による汀線後退量（図1 (d)）の間に明確な関係性は認められない。これは、地盤沈下量が大きかったリアス海岸では比較的急勾配の砂浜が、沈下量が小さかった仙台平野などの平野部では緩勾配の砂浜が多く、結果として地盤沈下の影響が小さかったためである。また、地盤沈下による汀線後退と比して津波によるそれの方が顕著に大きかった（図1 (d)）。

次に、各海岸領域の越流水深と汀線変化との関係を図2に示す。2011年津波により堤防が決壊した場合あるいは海岸堤防が整備されていなかった場合、津波後も堤防が残存した場合、ならびに堤防が残存していても河口幅の拡大により汀線が後退した場合を分けて表示した。ここで、越流水深は、堤防付近の津波高さから堤防高さを差し引いたものとし、堤防天端を基準とした津波高さを示す。これが正の場合は越流が生じており、越流が生じると破堤のリスクが増大する。

図より、越流水深が負の場合（越流が生じない場合）には破堤は生じていないものの、正の場合には越流水深が1m以下であっても破堤が生じるケースがあった。また、破堤あるいは堤防未整備の区間において、汀線後退量が顕著に増大していた（図の×プロット参照）。越流水深が負で汀線後退量が大きいケースは、いずれも河口幅の拡大によるものであった（同△プロット参照）。一方、堤防が残存している場合、越流水深が大きくなっても汀線後退量は小さかった（同○プロット参照）。以上より、堤防の状況が海浜変形に多大な影響を及ぼし、堤防が破堤せず残存することによって、海浜の大規模侵食が抑制されることが明らかとなった。

被災から3年後の海浜の回復割合を図3に示す。顕著な回復が認められたのは被災から1年以内であり、それ以降は変化が小さい。回復状況には、牡鹿半島以北のリアス式海岸部とそれ以南で明らかな差異が認められ、リアス式海岸部では比較的回復割合が小さい。回復の程度は、侵食領域への周辺からの土砂供給量に依存する。リアス式海岸部では、周辺から供給可能な土砂量が小さいために回復割合が小さいと考えられる。

３．被災後回復した海浜の例：仙台湾南部海岸[5)、12)]

(1) 仙台湾南部海岸の概要

宮城県仙台湾南部海岸の1947 ～ 2014年の空中写真（国土地理院提供、2012年3月および2014年9月のみGoogle Earth衛星画像）を、図4に示す。この海岸では、海岸線から陸側数kmにわたり、標高2m未満の低平地が広がっている。仙台平野は、海水準が安定した約5000 年前以降、七北田川や名取川、阿武隈川からの土砂供給により0.4 ～ 1.2 m/yearの割合で発達したとされている[13)]。水深5 m以浅では、1/100 ～ 1/50程度の勾配の地形が、水深5 ～ 15 m程度では1/200 ～ 1/100程度の緩やかな地形が、それ以深では1/500 未満の平坦な地形が広がり、河口には砂州が伸びる（図4 (a)）。

仙台湾南部海岸では、土砂供給源である福島の崖海岸の侵食防止対策や相馬港の整備により、特に福島県との県境付近の山元海岸（図4 (b)）で1970 年代から激しい侵食が生じ、大規模な海岸侵食対策が進められていた[14)]。これに対し、仙台湾南部海岸の北部では南部からの土砂供給があることから、地形の変化は小さく安定していた（図4 (a)）。

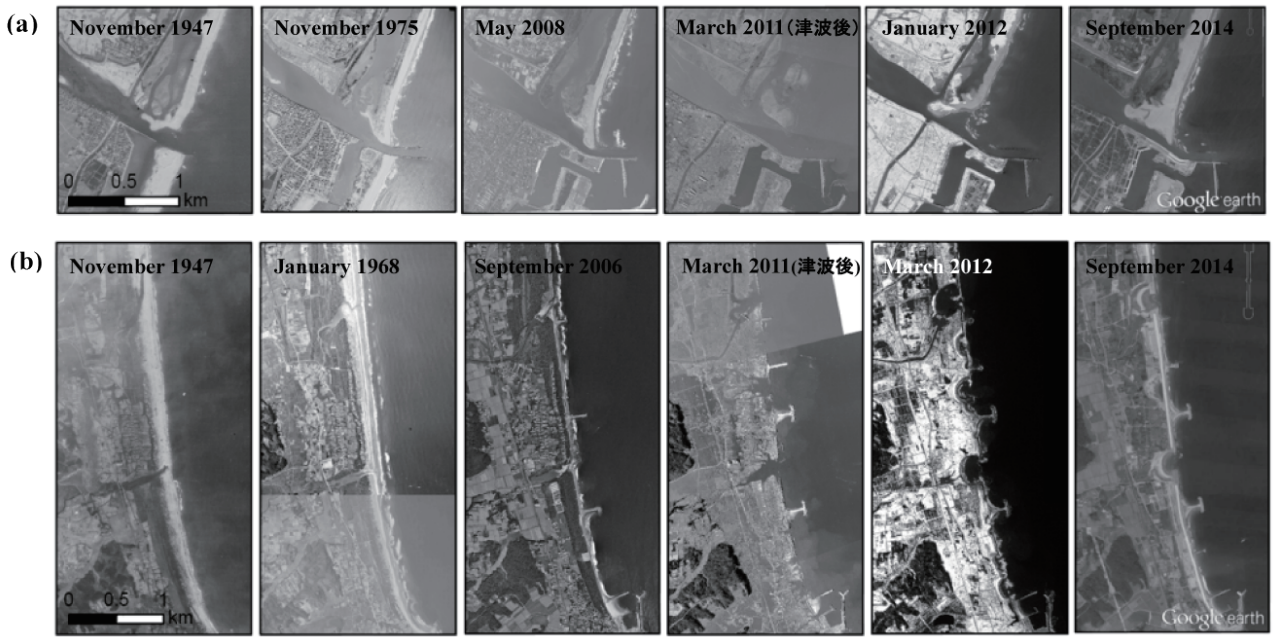


図４　仙台湾南部海岸の(a)名取川河口（図１のNT参照）および(b)山元海岸（同YM参照）の1947 ～ 2014年の衛星画像[5), 12)]

(2) 2011年津波による海浜侵食とその後の回復

仙台湾南部海岸における2011年津波時の最大浸水高および最大遡上高は、いずれも亘理郡山元町坂元において、13.5 mおよび9.6 mであった。被災前の堤防高さはT.P. + 6.2～7.2mであり、津波高さはこれをはるかに上回る規模であった。

津波による海岸地形変化には、3つの特徴が認められる。1つは、福島県との県境付近の海岸（特に山元海岸）における堤防破堤とこれに伴う大規模な侵食である（図４(b)）。この侵食は主に引き波時の戻り流れによるもので、最大で数百m内陸まで侵食が生じ、この侵食域海側の水深5 ～ 10mの海底には帯状の堆砂域が生じた。次に、河口砂州の侵食である。この侵食により、七北田川河口の蒲生干潟、名取川河口の井土浦では急激な環境変化が生じ、生態系にも多大な影響を及ぼした。もう1つは、堤防背後の侵食による海岸線方向の水路形成である。これは押し波時に津波が堤防を越流した際に形成されたもので、この水路のさらに陸側の海岸林領域に堆砂が生じた。

堤防破堤付近では津波による大規模侵食が生じたものの、その後は1年以内に急速な回復がみられた。大規模侵食が生じた山元海岸においては、被災直後の数か月で急速に回復し、1年程度はポケットビーチ状に砂浜が回復した。しかし、その後の変化は小さく、被災前より汀線が後退した状態で陸域に水域を残したまま堤防の建設が進められた（図４(b)）[7)]。河口砂州についても、1年程度は回復が認められ新たな砂州が形成されたものの、その位置や形状は被災前と異なる（図４(a)）。

有働ら[5)]によれば、海浜侵食メカニズムは以下のように考えられる。押し波時には、浅海域で侵食を生じさせながら土砂が陸側に輸送され、津波が堤防を越流したところではその背後の洗掘によりさらに多くの土砂が陸域に輸送された。また、戻り流れにより、堤防の破堤地点や河道、新たに形成された水路などに集水し、海浜や河口砂州を侵食して土砂が海域に輸送された。堤防が残存したところでは比較的侵食が抑制された。

(3) 現在の復興状況

仙台湾南部海岸では、被災前には堤防高T.P. + 6.2 ～ 7.2 mの堤防が整備されていたが、被災後T.P. + 7.2 mで復旧されることとなった。この復旧は7工区約29 kmの海岸で実施され、2015年度までに完了する計画である。なお、この海岸では被災前より海岸侵食対策としてヘッドランドや養浜による海岸整備が行われていた。山元海岸では、今後数十年にわたり以前から計画されていた海岸整備が行われる予定である。引き続き、海浜の地形変化や環境変化をモニタリングしつつ、適切な整備を進めていく必要がある。

４．被災後回復しなかった海浜の例：高田海岸[6)]

(1) 高田海岸の概要

図５に1947年から2015年までの高田海岸周辺の空中

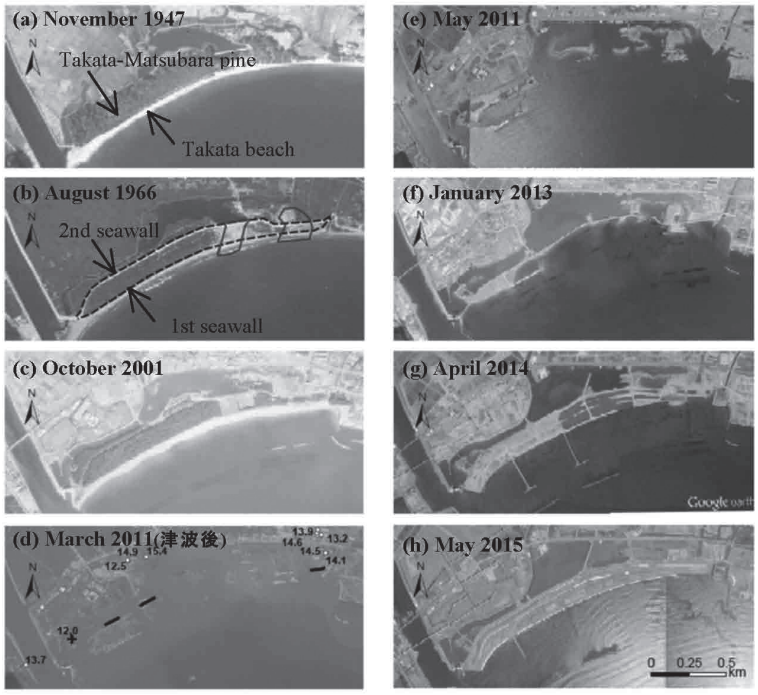


図５　高田海岸（図１のTK参照）の1947 ～ 2015年の衛星画像[6)]

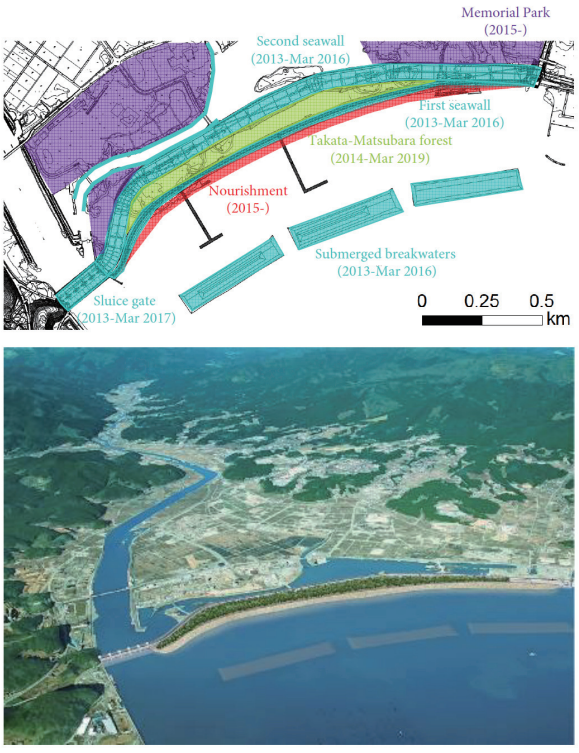


図６　高田海岸の復興計画[17)]

写真（国土地理院提供、2014年4月のみGoogle Earth衛星画像）を示す。三陸沿岸部は以前より度々津波被害を被ってきており、高田海岸もその例外ではない。高田海岸の津波の歴史について詳細に記された首藤[15)]の資料によれば、1960年のチリ地震津波の際には、海岸延長2 kmにわたって高さ3 ～ 4 mの水が押し寄せ、海と古川沼の間に設置されていた防波堤が決壊し、水田200 haが浸水した。引き潮によって高田松原は分断され松原中央部に最深部5 m、幅約240 mの侵食が生じた（図５(b)の実線枠内参照）。

被災後、前浜を防護し汀線維持を図る目的で第1線堤が施工されるなど、高田松原は海水浴場として復興した[15)]。高田海岸では1972年度より海岸侵食対策として突堤や離岸堤の整備が進められてきており、また、1988年4月に高田海岸の周辺区域はコースタル・コミュニティ・ゾーン整備計画区域に認定され、海岸事業や公園事業など各種所管の公共事業が連携して実施されている[16)]。1990年から2001年にかけて、天端高T.P.- 2.9 mの人工リーフの建設が進められた。2011年津波による被災前は、海岸地形の変化は小さく安定した状態にあった。

(2) 2011年津波による海浜侵食とその後の回復

高田海岸は、人工リーフ建設前から比較的安定した状態にあったが、2011年地震により0.7m程度[9)]の地盤沈下が生じるとともに、10 mをこえる大津波が来襲して砂浜の多くが消失し、人工リーフにおいても、ブロックの飛散が生じるなどの損壊を被った（図５(d)）。今回の砂浜消失箇所には、1960年のチリ地震津波で消失被害が大きかった防潮林幅が小さい箇所も含まれるが、高田海岸の砂浜消失面積は1960年津波のとき0.1

km^{2}程度であるのに対し、2011年津波では0.36 km^{2}で大きく異なる。一方、人工リーフ周辺の海底では顕著な堆積が認められた。なお、前節の仙台湾南部海岸の例とは対照的に、高田海岸では被災後の回復は認められなかった。

有働ら[6]によれば、人工リーフ周辺の津波前後の堆積量は24万m^{3}であり、砂浜領域の侵食土砂58万m^{3}の少なくとも半分程度は海域に輸送され、リーフにより捕捉されたと考えられる。

(3) 復興計画と現在の復興状況

高田海岸では、高田松原の再生に対する市民の強い意向を受け、ほぼ消失した高田松原を復旧することとなった（図６）。この復旧にあたり、高田松原の侵食防止のための第1線堤の堤防高はT.P. + 3.0 m、内陸の浸水を防ぐための第2線堤の堤防高はT.P. + 12.5 mとされ、第2線堤は旧堤防のT.P. + 5.5 mと比して7 mの嵩上げとなった。堤防の幅も60 m程度と旧堤防の4倍程度である。堤防建設は2013年から開始され、2015年度までに完了する予定である。

砂浜については、2015年11月に試験養浜が施工された。2016年12月まで1年程度の間、環境・地形モニタリングが行われ、その影響評価を行った後に養浜が施工される計画である。この養浜砂としては、粒径や色などを考慮し、宮城県大和町の砂が使用される予定である。なお、高田松原は、2019年頃にかけて整備が行われる。

５．おわりに

本稿では、2011年地震津波により生じた海浜変形特性とその後の回復状況について概説した。津波による大規模な侵食は、主に引き波時に破堤部分を含む無堤防区間に流れが集中することに起因するものであった。海岸堤防や人工リーフなどの海岸構造物は、津波の流況やこれによる土砂輸送に多大な影響を与えていた。被災後、大規模侵食部の回復が認められたのは被災から1年以内であり、それ以降は変化が小さかった。回復状況には、牡鹿半島以北のリアス式海岸部とそれ以南で明らかな差異が認められ、リアス式海岸部では回復割合が小さかった。

ここで示した知見は、被災前から様々な観測が行われていた我が国で発生した災害であったからこそ得られた、貴重なものである。今後も引き続き復興過程をモニタリングし、よりよい海岸環境に資する知見を蓄積していく必要がある。

参考文献

1) Tanaka, H., Nguyen, X. T., Hirao, R., Umeda, M., Pradjoko, E., Mano, A. and Udo, K.: Coastal and estuarine morphol-ogy changes induced by the 2011 Great East Japan Earth-quake Tsunami, Coastal Engineering Journal, 54, 1250010, 2012.
2) 永澤毅、田中仁：津波による大規模地形変化とそれに伴う構造物の被災要因の分析、土木学会論文集B2（海岸工学）、68、pp. I_1361-I_1365、2012.
3) Udo, K., Sugawara, D., Tanaka, H., Imai, K., and Mano, A.: Impact of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami on beach morphology along the Northern Sendai Coast, Coastal Engineering Journal, 54, 1250009, 2012.
4) 加藤史訓、野口賢二、諏訪義雄、坂上敏彦、佐藤祥昭：津波による地形変化に関する現地調査、土木学会論文集B3（海洋開発）、68、pp. I_174-I_179、2012.
5) 有働恵子、武田百合子、田中仁、真野明：東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性、土木学会論文集B2（海岸工学）、69、pp. I_1391-I_1395、2013.
6) 有働恵子、武田百合子、田中仁：津波による土砂輸送に及ぼす人工リーフの効果に関する研究、土木学会論文集B3（海洋開発）、71、pp. I_653-I_658、2015.
7) 高村まや、有働恵子、佐藤源之、高橋一徳、阿部朋弥：GPR（地中レーダ）を用いた津波後の堆積構造把握技術の開発、土木学会論文集B2（海岸工学）、71、pp. I_1711-I_1716、2015.
8) Tojo, K. and Udo, K.: Analysis of beach erosion because of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami and its recovery, Journal of Coastal Research, 75, 2016. (in press)
9) 国土地理院 (2011): GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動、http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html.
10) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012): 痕跡調査結果20121229版、http://www.coastal.jp/ttjt/index.php.
11) 環境省自然環境局生物多様性センター：平成24年度東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査等業務報告書, 2013.
12) Udo, K., Takamura, M., Takeda, Y., and Mano, A.: Serious erosion of the southern Sendai Coast due to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami and its recovery process, Post-Tsunami Hazard, Advances in Natural and Technological Hazards Research, pp 225-236, 2015.
13) 松本秀明、加藤温子、熊谷真樹：仙台平野の海浜における砂浜侵食、1978～2010年の実態と将来予測、人間情報学研究、16、103-110、2011.
14) 国土交通省東北地方整備局：平成21年度事業評価監視委員会（第３回）資料、海岸事業再評価 仙台湾南部海岸 海岸保全施設整備事業、2009.
15) 首藤伸夫：三陸地方の津波の歴史 その4 高田松原、http://www.coastal.jp/ttjt/index.php?%E9%81%8E%E5%8E%BB%E3%81%AE%E6%B4%A5%E6%B3%A2、2011.
16) 井上公人：海岸構造物周辺の底生生物群集に及ぼす物理環境の影響に関する研究、東北大学大学院博士学位論文、193p、2002.
17) 岩手県沿岸広域振興局大船渡土木センター：第3回高田地区海岸養浜技術検討委員会資料、2015.

有働　恵子（うどう けいこ）

2003年筑波大学卒、独立行政法人港湾空港技術研究所研究官、東北大学助教を経て現職、博士（工学）、専門分野：海岸工学

東日本大震災からの産業復興と企業防災

丸谷　浩明
●東北大学災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

東日本大震災の避難者数は、復興庁資料[1)]によれば、発災後3日目に47万人に達したが、2015年10月現在、約19万人となっている。恒久住宅への移転が徐々に進み、仮設住宅等への避難者数は減少しているが、その数は依然として多い。

また、産業面をみると、被災地の鉱工業生産は被災1年後以降、概ね震災前の水準程度に回復し今日に至り、グループ補助金[i]の交付先企業の約４割が震災直前の売上水準以上まで回復していると答えている。しかし、沿岸部の復興は順調とは言えず、例えば、漁業の水揚げは約8割までの回復であり、水産加工施設は約8割で業務再開しているが、震災により失われた販路の確保等の問題もあり売上の回復が遅れている。

このような中で、被災地の企業の防災の取組みはあまり進んでいない。被災企業の多くは、事業の復興や当面の経営存続に精一杯で、企業防災や事業継続計画（BCP）への取組みに乗り出す余裕がないところが多い。しかし、これら企業や被災地の産業の復興過程は、来るべき大災害における教訓に満ちている。

本稿は、著者の被災企業ヒアリング調査の結果も踏まえつつ、被災地の企業がいかに復興し、企業防災やBCPに取り組みつつあるか、そして、これまでの取組みが将来の災害の復興にどう活かされ得るのかについて概説することとする。

2. 企業被害及び復興の実態

2.1 企業被害の状況

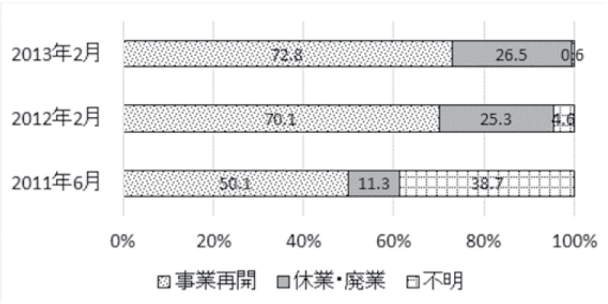
最初に、東日本大震災の被災3県の企業数の減少を確認しておく。表１は、被災3県の大震災前2009年と大震災後2012年の事業所数の変化である。この期間に全国的にも企業数は6.4％減少したが、被災三県では10.6％減少した。さらに、津波被害が大きかった沿岸市町村をみると、3県合計で18.3%減少し、中でも岩手県では24.5%も減少したのが目立つ。

また、大震災後の被害甚大地域（定義は図の補注を参照）における企業の事業再開と休業・廃業の数の推移を示したのが図2である。被災3ヶ月後の2011年6月の再開企業は半数で状況不明の企業が多い。その後、11ヶ月後の2012年2月には7割の企業が再開したが4分の1を上回る企業が廃業・休業であった。さらに、2013年2月の時点では、前年に比べ再開企業は2.7%ポイントしか増えなかった。

表１　被災地域の事業所数の推移

		2009年	2012年	増減率
全国		6,199,222	5,804,223	▲ 6.4
3県合計		278,755	249,118	▲ 10.6
	沿岸市町村	81,738	66,810	▲ 18.3
岩手県		66,009	59,984	▲ 9.1
	沿岸市町村	14,889	11,241	▲ 24.5
宮城県		111,343	99,052	▲ 11.0
	沿岸市町村	48,324	38,330	▲ 20.7
福島県		101,403	90,082	▲ 11.2
	沿岸市町村	18,525	17,239	▲ 6.9

出典：2013年中小企業白書[2)] [ii]
資料：総務省・経済産業省「平成24年経済センサス－活動調査」(速報)



出典：2013年中小企業白書[2)] [iii]
資料：㈱帝国データバンク「東北３県・沿岸部「被害甚大地域」5000社の再追跡調査」（調査対象企業数5,004社）

図１　東北３県の被害甚大地域の事業再開状況の推移

これらの数字から、東日本大震災が被災地の産業、企業に大きな負のインパクトを与えたことがわかる。

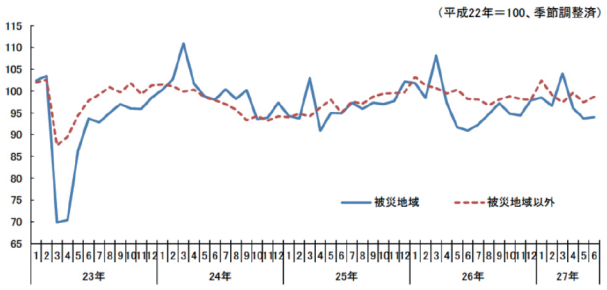
2.2 産業復興の現状

次に、このような被害を受けた企業、産業がこれまでどのように復旧、復興をしてきたかについてみる。

2.2.1 鉱工業全体の復興状況

東日本大震災の被災市町村（災害救助法適用市町村）の鉱工業生産は、およそ1年後に指数水準が震災前に戻り、その後110を超える水準に至り、その後は、被災市町村以外とほぼ同じ傾向で推移した。ただし、平成26

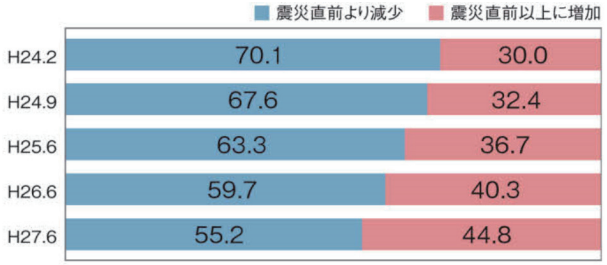
年度から、被災市町村以外をやや下回る傾向もみられる（図2）。ただし、これらの動きには復興需要による生産増も含まれており、被災前からの鉱工業の生産が復旧したとは限らない。



出典：経済産業省資料(2015)[3)]

図２　震災にかかる地域別鉱工業指数[iv]

次に、グループ補助金の交付を受けた企業へのアンケート調査における、売上げ水準の震災前との比較が図3である。平成27年（2015年）6月段階で、震災直前より増加した企業が44.8％、減少した企業は55.2%となっている。震災直前より売上が増加する企業が徐々に増えているが、まだ半数には届かない。ただし、グループ補助金を受けている企業は、被災企業の中でも復興を計画的に推進している企業が多いと考えられ、この点も考慮して解釈する必要があろう。



（グループ補助金交付先企業へのアンケート結果）
出典：復興庁(2015)[1)]
資料：東北経済産業局調べ

図３　震災直前の売上水準からの変化状況

2.2.2 水産加工業の復興状況

次に、津波被害が大きかった沿岸部の主要産業の一つの水産加工業の復興状況である。復興庁(2015)によれば、被災3県で再開を希望する水産加工施設（818施設）の復旧状況は、2015年6月段階で、84％となっているが、震災により失われた販路の確保等の問題もあり、水産加工業の売上の回復が遅れている。

一方、水産庁(2015)[4)]によれば[v]、青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県の5県の全体で、生産能力が8割以上回復した業者は50％、内訳は、青森県90％、岩手県53％、宮城県50％、福島県25％、茨城県66％（調査期間は2014年11月17日～2015年１月23日）である（図４）。前回調査（調査期間は2014年2月28日～3月12日）では、岩手県57％、宮城県49％、福島県24％で、生産能力の回復は横ばい傾向である（図2）。また、売上の回復状況については、5県全体で、売上が８割以上回復した業者は40％、内訳は、青森県90％、岩手県58％、宮城県40％、福島県21％、茨城県39％（図５）。前回調査では、岩手県44％、宮城県36％、福島県10％で、売上は回復傾向にあるものの、依然として生産能力の回復より遅れている。

水産加工業で復興が進んでいない要因としては、一般に、営業再開までに時間を要し、その間に取引先を一度完全に失い、事業再開ができても販売先の確保に苦慮していること[vi]と、従業員が十分確保できず、フル操業ができないことの2点が指摘されており、著者が被災地の行政機関や業界関係者から聞いた話でも、同様な声が多く聞かれた。なお、被災地の人手不足については後述する。

2.2.3 その他の産業の復興状況

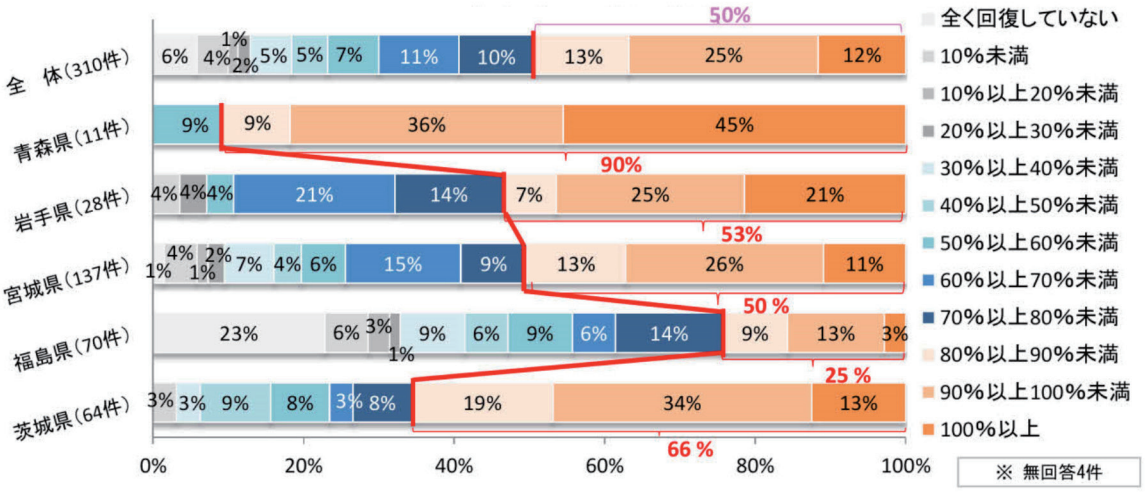
続いて、他の産業の復旧状況をみると、復興庁(2015)によれば、水産業については、被災3県の主要な魚市場の水揚げ[vii]は、2015年2月までに80％まで回復し、水揚金額については、同じく87％の697億円まで回復したにとどまっている。

農業については、津波被災農地のうち避難指示区域や農地転用される土地が全体の16％を占めるが、残りの84％のうち、2014年度までに津波被災農地の70％分が営農の再開が可能となっており、2015年度中にさらに4％分が営農再開可能となる見込みで、残りの10％分が今後、営農再開可能となる見込みである。

観光業については、3県の延べ宿泊者数を2010年と比較してみると、宿泊施設全体では、2011年は109.1％、2012年は107.2％、2013年は109.0％に続き、2014年は111.0％となっており、復興需要による高い水準が続いている。ただし、その中の観光客中心の宿泊施設についてみると、2014年は89.2％と徐々に回復してきているが、震災前の水準には1割以上下回った状況が続いている。

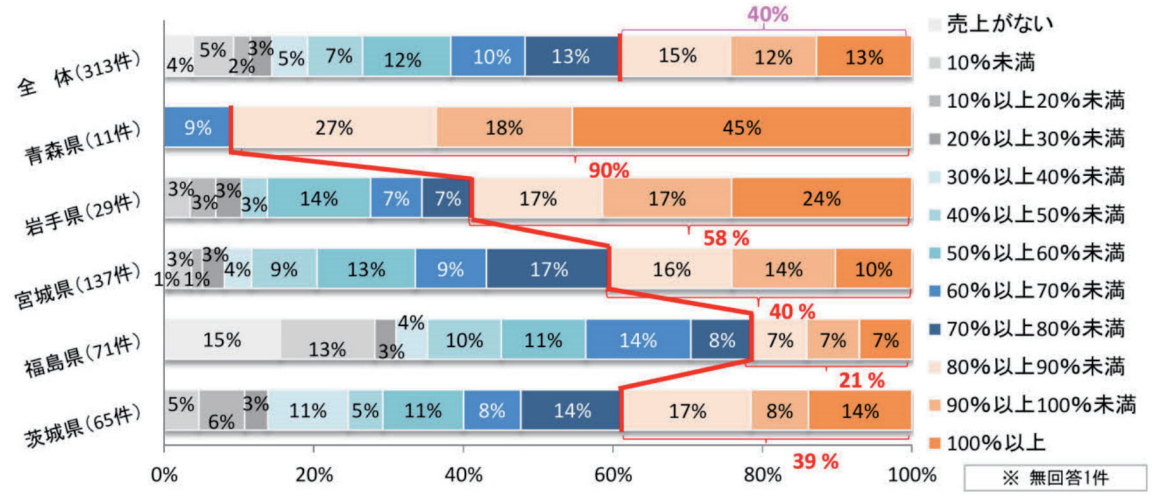
3. 東日本大震災からの企業・産業復興の課題

著者は、当研究室の寅屋敷助教とともに、東日本大震災で被害を受けた中小企業に対して個別の現地ヒアリング調査を実施した。調査対象企業は宮城県、岩手県、山形県、福島県、茨城県の5県の、被災後に事



出典：水産庁「水産加工業における東日本大震災からの復興状況アンケート（第２回）」[4)]

図４　生産能力の復旧状況



出典：水産庁「水産加工業における東日本大震災からの復興状況アンケート（第２回）」[4)]

図５　売り上げの回復状況

業継続・早期復旧を果たした企業13社である。実施期間は2014年8月から2015年8月までのほぼ1年間である。中小企業でBCPを被災当時に策定しており、早期復旧を果たした企業を探したがわずかしかおらず、BCPを策定していなくとも、事業継続・早期復旧を果たした中小企業も対象にした。なお、ここでの早期復旧とは、主要な取引先を喪失しないことを主な判断基準とした。

3.1 従業員の確保

現在の東日本大震災の被災地において、事業再開が果たせた企業にとって、人手不足が事業の主な支障要因の一つと広く言われている。従業員の募集をしても応募がほとんどないとの話をよく聞く。

人手不足の要因としては、復旧・復興事業自体の求人が多いうえに、復興に関わる人向けの商業・サービス業の求人が多いこと、さらに、その賃金単価が従来の地域の相場より相当高くなっていることが挙げられる。

なお、原発被災地における従業員の確保の困難さは、他の被災地より一段と厳しい状況である。

3.2　企業の事業再開に合ったインフラの復旧

大震災でインフラやライフラインが大きく損傷した地域では、企業事業の再開にはこれらの復旧が不可欠である。特に、沿岸部に広範な地盤沈下が生じたことから、企業が活動するには排水のために土地の嵩上げが必要となる。この工事が遅れる場合、沈下したままの地盤で復旧するには排水のポンプアップが自前で必要となり、嵩上げ工事を待てば、その間は企業活動を

休眠せざるを得ない。

また、道路も嵩上げが着工され、その基盤が整ってから道路に敷設する上下水道の整備も一体に行われる。そのため、企業の自己の敷地の嵩上げ工事が終わって建物再建を着工しても、地域の上下水道等のネットワークの完成までは操業できないので、企業の事業再開予定日に間に合わないといった問題も発生した。

3.3 住宅用地の嵩上げ時期と企業復興の時期

津波被災地域の復興まちづくりの計画で、住宅の再建が中心課題となるのは理解でき、防災集団移転促進事業等による高台への移転、土地区画整理事業等による土地の嵩上げ、安全な場所に建てられた災害公営住宅への入居などが進められる（図6のA及びA'エリア）。しかし、この事業進捗には住民意向把握や権利の調査や調整のために時間を要する。これに企業用地が混在し、嵩上げ工事に建物再建がペースを合わせるよう求められると、建築制限がかけられたまま数年もかかる嵩上げ工事の完成を待つことになり、経営上の支障が大きいとヒアリング調査で複数の企業から指摘があった。

企業は、就業者なら緊急避難は可能との前提で、事業用地に大幅な土地の嵩上げは不要と整理されれば、排水のため土地の沈下分を嵩上げしたらすぐに社屋の再建工事に入りたい（図6のCエリア）。そこで、図6の女川町のような計画と配慮が早急に行われるのが効果的だが、その実現には、早期にCエリアからの住宅の移転の合意などの地域の協力も必要になる。

また、一部の自治体では、企業が自らの費用で立て替えて嵩上げ工事を行い、事後に費用を精算するといった早期工事着手を重視した柔軟な対応がとられたところもあったが、広く行われたとはいえない。

3.4 地域主要産業サプライチェーンの一体復旧

地域の主要産業の復興には、サプライチェーンでつながった関係企業の一体的な復旧が不可欠である。例えば水産業関係でも、漁業が復旧しても、水産加工業をはじめ関連の事業者の復旧がセットでそろわない限り、産業として復旧ができない。すなわち、漁港のがれきの撤去を急ぎ、補助制度等を用いて漁船・関係設備を急いで復旧しても、卸売市場、荷さばき所、製氷・貯氷施設、冷蔵・冷凍倉庫、水産加工業、水産品の運輸業等が合わせて復旧しないと水揚げしても意味がない。また、それぞれに必須の電力、上下水道、通信等のライフラインの確保も前提となる。

この点について、気仙沼のように、被災地関係者の官民にわたる連携により、主力のカツオの水揚げが始まる6月下旬までに生魚の出荷体制だけは間に合わせた例がある一方で、一部の事業者の復旧が進まずに産業全体の復旧が思ったように進まなかった例もあった。

4. 被災・復興企業の防災への取組

続いて、東日本大震災後数年が経過した、現時点での被災地企業の防災への認識について述べる。

4.1　被災企業の防災への認識

著者らによる前述のヒアリング調査の対象企業は、事業継続・早期復旧を果たした企業であることもあり、総じて被災の経験を将来の企業防災に活かす必要性を認識していた。しかし、具体的な取組が既に行われているか否かは、状況が分かれた。

大震災の被災時にBCPを策定していた調査対象の中小企業は2社であったが、その後いずれもBCPの見直しを行っていた。また、大震災後に策定を進め調査時点でBCPが策定済であったのは別に2社あったが、更なる改善に取り組む必要性をコメントしていた。

一方で、BCP策定済みの企業以外については、防災対策の強化やBCPの策定にまだ手がついていないとの回答が多かった。その理由を聞くと、いまだ復興途上

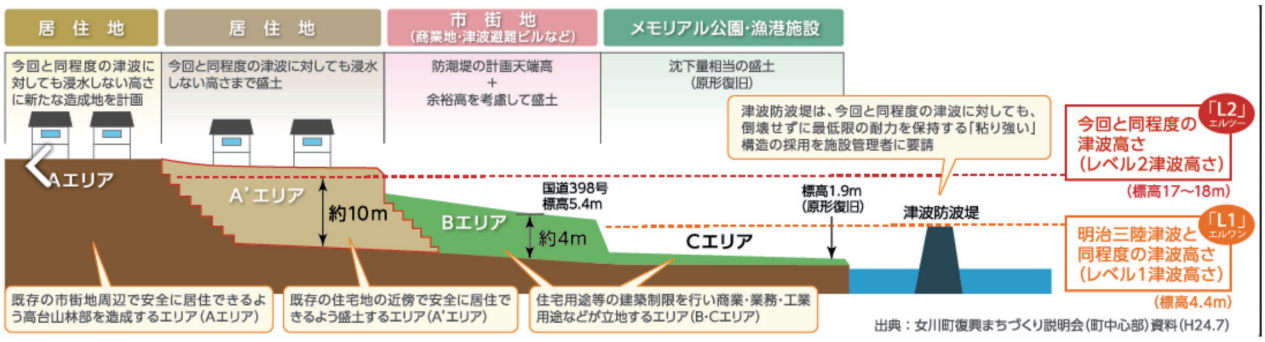


図６　女川町中心部の嵩上げ[5)]

で、人手の確保もままならず、手が回らないという理由を述べる企業がほとんどだった。

4.2 従業員の認識とＢＣＰの教育・訓練

調査対象のBCP策定済みの企業からは、被災時の従業員一人ひとりの意識が重要であり、例えば、従業員が自分の担当事業の復旧に必要なリソースを認識し、経営者の具体的な指示を待たずに考え、提案できることなどが重要だとの指摘もあった。

また、BCP文書の詳しさに対する意見では、分厚いBCP文書は避け、従業員に習得してもらいたい内容は、覚えられる文書量に絞るべきとの意見が多かった。

社内のBCPの訓練については、定期的に繰り返す必要性を指摘していた。また、訓練手法を学びたいとの意向を示す企業も複数あった。

5. 将来の大災害に備えた企業防災の教訓

本稿の最後に、以上で述べた東日本大震災における企業や産業の被災・復旧の経験から、南海トラフ巨大地震などの来るべき大災害に備えた教訓を提示したい。

5.1 企業の費用立て替えの復旧工事の許容

第3章でも述べたように、がれきの処理や土地の嵩上げは、地元の地方自治体が国の補助を受けて行う事業となるため、企業が急いで実施できるようにするには、費用を一時企業が立替え、後で公費により支弁を受ける仕組が認められなければ難しい。しかし、このような柔軟な対応が認められた地域は、東日本大震災の被災地では限られていた。この点の改善を行うべきであると考える。

5.2　インフラ復旧のタイミング

前述の気仙沼のカツオの生魚の水揚げに間に合うように地域の各主体が連携して復旧を実現した例も踏まえ、インフラ・ライフラインの供給主体である行政や公益企業が、地域経済に重要な複数の依存関係にある主体の事業継続を考慮することが必要と考える。

企業が発災前の重要な販売先を失わない事業継続の達成には、カツオのように季節的な業務は別として、製造業であれば、1週間から2ヶ月ぐらいの許容時間しかないというのが一般的イメージである。

なお、この時期を逃したら、その後はいつまで遅れても同じなのではない。取引先を何とか一部でも取り戻し、以前雇用していた熟練工にまた働いてもらうためにも、再建可能な時期が少しでも早い方がよい。

5.3　代替拠点の確保の重要性

東日本大震災では、企業の拠点が甚大な被害を受けた場合、代替拠点（自社製品・サービスの代替供給先からの供給を含む）の必要性が改めて強く認識された。BCPを策定し、代替拠点又は代替供給をしてくれる協定先企業を明確にすることが求められる。ただし、代替拠点を定めておかなくても、被災直後に探し始め早急に確保できた企業も早期復旧を果たしていたことにも留意が必要である。

早期の代替拠点の確保には、そこに自社に必要な設備があると有利である点、代替拠点の補修や整備のために地元業者へ早期発注が必要である点などから、被災企業と代替拠点の保有者との間につながりがあれば有利である。つまり、代替拠点の確保には平常時からの人的ネットワークが重要な可能性がある。

5.4　被災地外での代替操業への地元理解

内閣府の事業継続ガイドライン第三版（内閣府(2013)[6]）に「地元地域の側においては、企業・組織が地域貢献を行うことと、当該企業・組織が事業継続のために代替拠点へ移転することは切り離し、その経営判断に理解を進めることも望まれる。地元に拠点のある企業・組織が、BCP発動により別拠点でも生き残ってこそ、地域に戻ることも可能となり、また、それが地域の復興にもつながると考えられる。(p. 21)」と記述されている。著者もガイドラインの改定でこの記述追加の提案者の一人であった。代替拠点に移る決断をするに際して、地元の地方公共団体や経済界から「ここで再建をがんばって欲しい」、「被災地を見捨てないでほしい」といった声があがることが少なくない。しかし、中小企業が収入無しに給与を払い続けることができるのは2か月程度がメドであり、被災地外で営業を継続できなければ、従業員を解雇し、休眠状態で復旧を待つしかない。また、他地域であっても事業継続ができてこそ、現地に戻る体力も残ることを考慮し、地元行政や経済界が認識を新たにすべきと考える。

6. おわりに

本稿では、東日本大震災における産業復興が必ずしも順調に進んでいない実態を報告するとともに、被災地の企業の防災に対する取組状況を概説した。さらに、今後の大規模災害発生時の企業の早期復旧に向けての教訓を提示した。

これまでの復旧・復興制度は、産業や企業の復旧・復興に必要なスピードについて重視されておらず、被災者の住宅、コミュニティ形成等の面から復興スケ

ジュールが考えられてきた面がある。それには、被災者が避難所へ応急避難した後、仮設住宅に移り、その後、自宅再建や災害公営住宅への入居というプロセスと時間の流れが前提となっている。一方、企業にとっては、顧客・販売先を一度失えば、再開しても取り戻すことが困難という事業継続上の制約があり、もちろん、多くの産業を一律に扱うことはできないが、数週間から2か月ぐらいの間に復旧ができるかどうかがポイントとなり、許容される対応時間が短い。

したがって、例えば、事業用地と住宅用地の嵩上げの高さ、スケジュールに違いを設けるなど、有力地元産業の特性を踏まえた機動的な産業復興政策が今後は実施されることを期待する。

謝辞

調査にご協力頂いた各企業にこの場をお借りして改めて御礼を申し上げます。本研究はJSPS科研費26510002の助成を受けたものです。

i 東日本大震災の被災企業に対する「中小企業等グループ施設等復旧整備補助事業」により交付される補助金のこと。被災した中小企業などがグループを作り、共同して施設・設備の復旧・整備を行う場合に支援する。国と県が連携して補助を行う。

ii 中小企業白書（2013年版）[1)]の第1-1-30図「被災地域の事業所数･従業者数の推移」より。データは、総務省･経済産業省「平成24年経済センサス－活動調査」(速報)である。沿岸市町村とは、内閣府「平成23年版防災白書」p.94からp.96に上げられている市町村。ただし、仙台市は行政区ごとに集計。調査実施日の2012年2月1日時点で、市町村の一部又は全部が警戒区域又は計画的避難区域に該当した市町村は除く。

iii中小企業白書（2013版）[1)]の第1-1-31図「東北３県の被害甚大地域の事業再開状況の推移」より。データは、(株)帝国データバンク「東北3県・沿岸部「被害甚大地域」5000社の再追跡調査」である。東北3県とは、岩手県、宮城県、福島県。被害甚大地域とは、津波被害が特に大きかった地域と福島第一原発事故による計画区域・計画的避難区域をいう。

iv 本試算指数は、「東日本大震災（長野県北部地震を含む）」にて、災害救助法の適用を受けた9件の194市町村（東京都の帰宅困難者対応を除く）を被災地域として計算したもの。

v 青森県、岩手県、宮城県、福島県及び茨城県の水産加工業における東日本大震災からの復興状況を調査するため、前回（2014年11月~2015年1月）に引き続き平成26年11月17日から平成27年１月23日までに、当該5県の全国水産加工業協同組合連合会傘下組合所属等、937企業に対しアンケート調査を実施。回収率は、全体で34%（314企業）。また、売上が回復したと回答があった企業を対象にヒアリングを実施。

vi NHKスペシャル「震災4年被災者1万人の声」（2015年3月8日放映）は、水産加工業等の企業が、復興に時間がかかると販売先を失い、他の供給者が入り込み、容易に販売先を回復できないことを報じた。

vii久慈（岩手）、宮古（岩手）、釜石（岩手）、大船渡（岩手）、気仙沼（宮城）、女川（宮城）、石巻（宮城）、塩釜（宮城）、小名浜（福島）における１年間（3月 - 翌年2月）の水揚げの、被災前１年間（22年3月 - 23年2月）に対する比率を示したもの。

参考文献

1) 復興庁：東日本大震災からの復興の状況と最近の取組(平成27年11月版)、2015
http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat7/sub-cat7-2/201511_pamphlet.pdf (2016年1月12日閲覧)

2) 中小企業庁：「中小企業白書（2013 年版）」第１部、pp.28-29、2013
http://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H25/PDF/h25_pdf_mokuji.html (2016 年1 月12 日閲覧)

3) 経済産業省：「震災にかかる地域別鉱工業指数」及び「津波浸水地域に所在する鉱工業事業所の生産額」の試算値について（平成27年6月分確報）、2015
http://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/bunseki/pdf/h27/b2010_h4a1506et.pdf (2016年1月12日閲覧)

4) 水産庁：水産加工業における東日本大震災からの復興状況アンケート（第２回）、2015
http://www.jfa.maff.go.jp/j/pres (2016年1月12日閲覧)

5) 女川町：復興まちづくり情報交流WEB
http://www.onagawa-info.com/revive/index.html
(2016年1月12日閲覧)

6) 内閣府防災担当：事業継続ガイドライン第3版、2013、http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyou/keizoku/pdf/guideline03.pdf (2016年1月12日閲覧)

丸谷　浩明（まるや ひろあき）

1989年東京大学卒。建設省入省。京都大学経済研究所教授、内閣府（防災担当）参事官等を経て現職。経済学博士。専門分野：事業継続マネジメント、防災社会システム。

2011年東北地方太平洋沖地震の地震動

川辺　秀憲
●大阪大学 准教授

1．はじめに

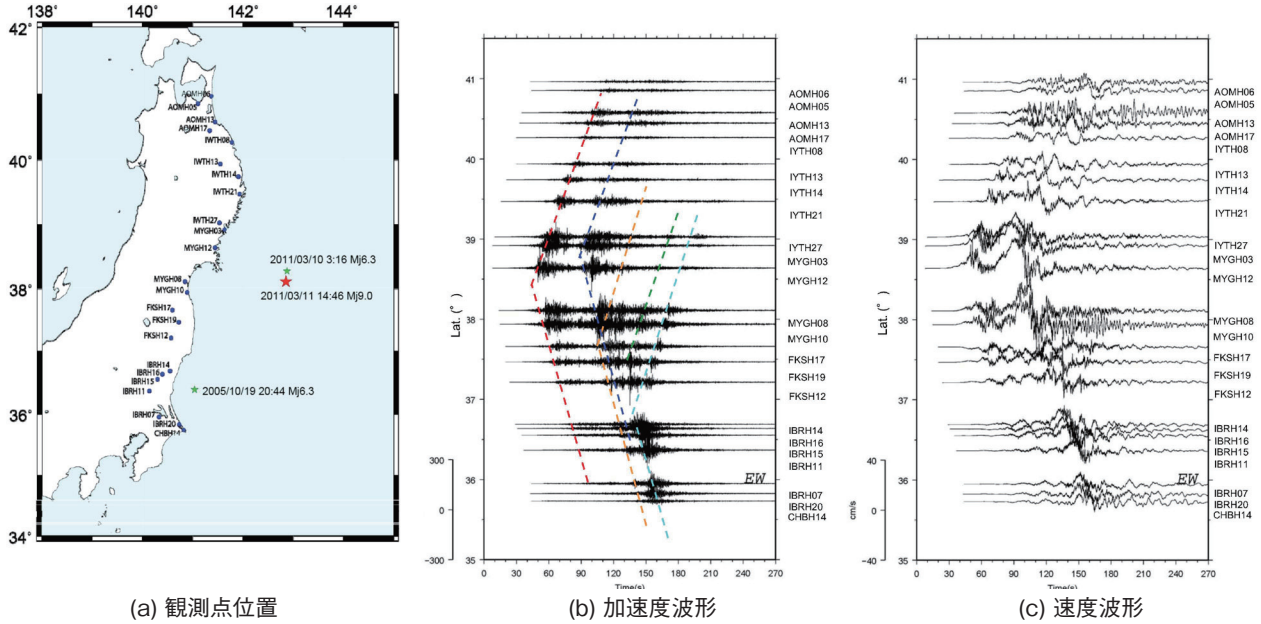
2011年3月11日14時46分に東北地方の宮城県沖でMw9.0の巨大な海溝型地震である2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方から関東地方の広い範囲で多くの被害が発生した。その被害の多くは巨大な津波によるものであったが、地震動（強震動）による被害も数多く発生した。この地震では、関東平野を中心に超高層ビルにおいて天井の落下、内装材、エレベータなどの被害が発生し[1), 2), 3)など]、震源から700km以上離れた大阪平野においても超高層ビルの応答が非常に大きくなり[4)]、巨大地震の長周期地震動に対する対策の問題点を浮き彫りにした。

本稿では、まず東北地方太平洋沖地震の強震観測記録を検証し、次に、強震動が主にどのような場所で発生したかを我々の研究[5)]を基に説明する。

2．観測記録

東北地方太平洋沖地震では（独）防災科学技術研究所（NIED）、気象庁をはじめとして多くの観測網で貴重な強震記録が得られている。図1にNIEDの強震観測網KiK-netで観測された加速度波形と、速度波形を示す。図中の破線は宮城県沖から福島県沖が発生源と推定される５つの波群の南北への伝播を表している。これらの強震記録の最も大きな特徴は、5分以上にも及ぶ長い継続時間である。また、観測地点により得られた記録の特徴が大きく異なっている。加速度波形を見ると、宮城県以北の太平洋側の記録では特徴的な2つの波群が観測されており、福島県ではその2つの波群に加えて異なった波群も複数観測され、その南の茨城県では特徴的な1つの波群が観測されている。これらの観測記録は、この地震の震源過程が非常に複雑であったことを示唆している。また、宮城県の速度波形を見ると2つの特徴的な波群は非常に長い周期の波が先に到達し、遅れて大振幅の周期の短い地震動（強震動）が到達していることが分かる。これは、非常に長い周期の地震動の震源域と強震動の震源域が異なった場所にあったことを示唆していると考えられる。

次に、図2にNIEDの強震観測網（K-NET、KiK-net）で観測された記録の最大加速度分布を示す。最大加速度は関東平野北部から宮城県の海岸沿いの広い範囲で大きくなっているが、火山フロントを境にその西側では東側と比べて最大加速度は急激に小さくなっている。これらの記録を最大加速度順に並べると表1のようになる[6)]。K-NET築館（MYG004）をはじめとして仙台平野から関東平野にかけて広範囲で非常に大きな加速度が観測されている。最大加速度2933galで震度7を観



(a) 観測点位置　(b) 加速度波形　(c) 速度波形

図１　KiK-netの観測点位置及び地中観測波形（EW成分）

測したK-NET築館周辺では震度と比べると被害が少なかったが、これは0.3秒以下の周期が卓越した地震動であり、建物への影響が小さかったためである[7]。なお、K-NET築館については崖地形による増幅の影響が指摘されている[8]。

次に、K-NET、KiK-netの観測記録の応答スペクトルの分布を図3に示す。周期0.25秒から1秒までの応答スペクトルは宮城県から関東平野北部にかけて大きくなっており、震源から離れると小さくなっている。また、周期が長くなるにつれ震源から遠い地域まで大きな値となり、長周期の地震動の減衰が短周期の地震動より小さいことを示している。また、関東平野では周期8秒から10秒、濃尾平野では2秒から4秒、大阪平野では4秒から6秒のスペクトルが大きくなっており、堆積盆地ごとに異なった周期の卓越が見られる。

3．震源モデル

この地震の震源断層は三陸沖から茨城県沖にかけてのプレート境界上に広がっており、その断層面の破壊過程（すべりの進展過程）は、長い周期（主に周期10秒以上）の地震波形記録や、GPSなどの地殻変動記録、津波波形記録などを用いたインバージョン解析によって求められている[例えば9), 10), 11)]。求められた震源モデルに共通する特徴として、最終すべり量分布について、宮城県沖の震源（破壊開始点）付近から海溝軸にかけての浅い領域に大きなすべりが集中していることが挙げられる。これらの震源モデルは主に周期10秒以上の周期帯の地震動から求められた震源像であり、一般構造物や長周期構造物に影響を及ぼす周期帯の地震動の生成をあらわす震源像とは異なっている。

一般構造物や長周期構造物に影響を及ぼす周期帯の地震動の記録（強震記録）から、経験的グリーン関数法を用いて複数の強震動生成領域（SMGA）から成る震源モデルが求められている[5), 12) ~ 14)など]。ここでは、我々が求めた震源モデル[5)]について、モデル化の概要と、求まった震源モデルの特徴を述べる。

震源のモデル化には太平洋沿岸部のKiK-netの地中観測記録を用い、0.1 ～ 10Hzのバンドパスフィルターを施した波形を対象として、経験的グリーン関数法[15), 16)]を用いたフォワードモデリングによって強震動生成領域（SMGA）を評価した。この地震の震源断層面は、沈み込む太平洋プレートの形状をもとに、気象庁の震源をとおる走行195度、傾斜角13度の面と仮定した。なお、震源モデルを設定する際には表層地盤での地震動の増幅の観測記録への影響をできるだけ避けるために、図4に示す固い地盤（S波速度の速い地層）に設置された観測点の記録を用いた。震源のモデル化の際には、図1に破線で示した波群の伝播を考慮して、各観測点への波群の到達時刻などからSMGAの位置や破壊開始時間などを推定した。図4、図5及び表2にSMGAの配置と震源パラメータを示す。宮城県沖、岩手県南部沖、福島県沖、茨城県沖に５カ所のSMGAを配置した震源モデルとなっている。求まったSMGAの特徴として、前述の震源インバージョンにより求められたすべり量分布とは異なり、SMGAは本震の震源より深い断層面上に位置していることが挙げられる。よって、周期10秒以上の地震動と、一般構造物や長周期構造物に影響を及ぼす周期帯の地震動の生成領域が異なっていると言える。2つ目の特徴として、SMGAの地震モーメントが断層全体の地震モーメントと比べて小さいことが挙げられる。気象庁CMT解によるによるこの地震の地震モーメントは4.22×10^{22}Nmである。

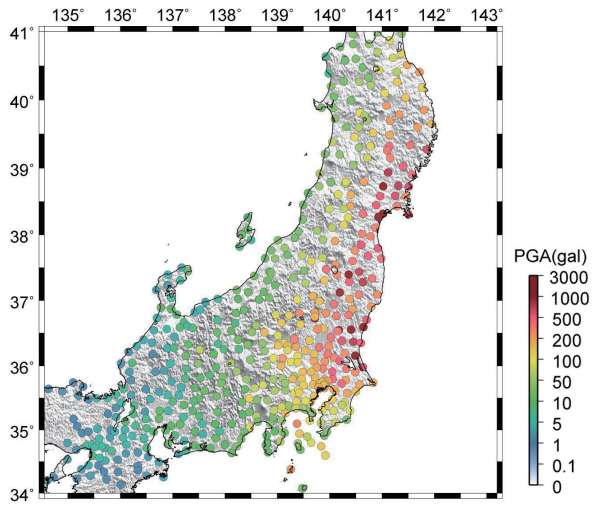


図２　最大加速度分布

表1　最大加速度上位10観測点[6)]

	観測点名	最大加速度(gal)	計測震度※
1	K-NET築館(MYG004)	2933	6.6
2	K-NET塩竈(MYG012)	2019	6.0
3	K-NET日立(IBR003)	1845	6.4
4	K-NET仙台(MYG013)	1808	6.3
5	K-NET鉾田(IBR013)	1762	6.4
6	KiK-net西郷(FKSH10)	1335	6.0
7	KiK-net芳賀(TCGH16)	1305	6.5
8	K-NET茂木(TCG014)	1291	6.3
9	KiK-net岩瀬(IBRH11)	1224	6.2
10	KiK-net山元(MYGH10)	1137	6.0

※気象庁告示に基づき計算

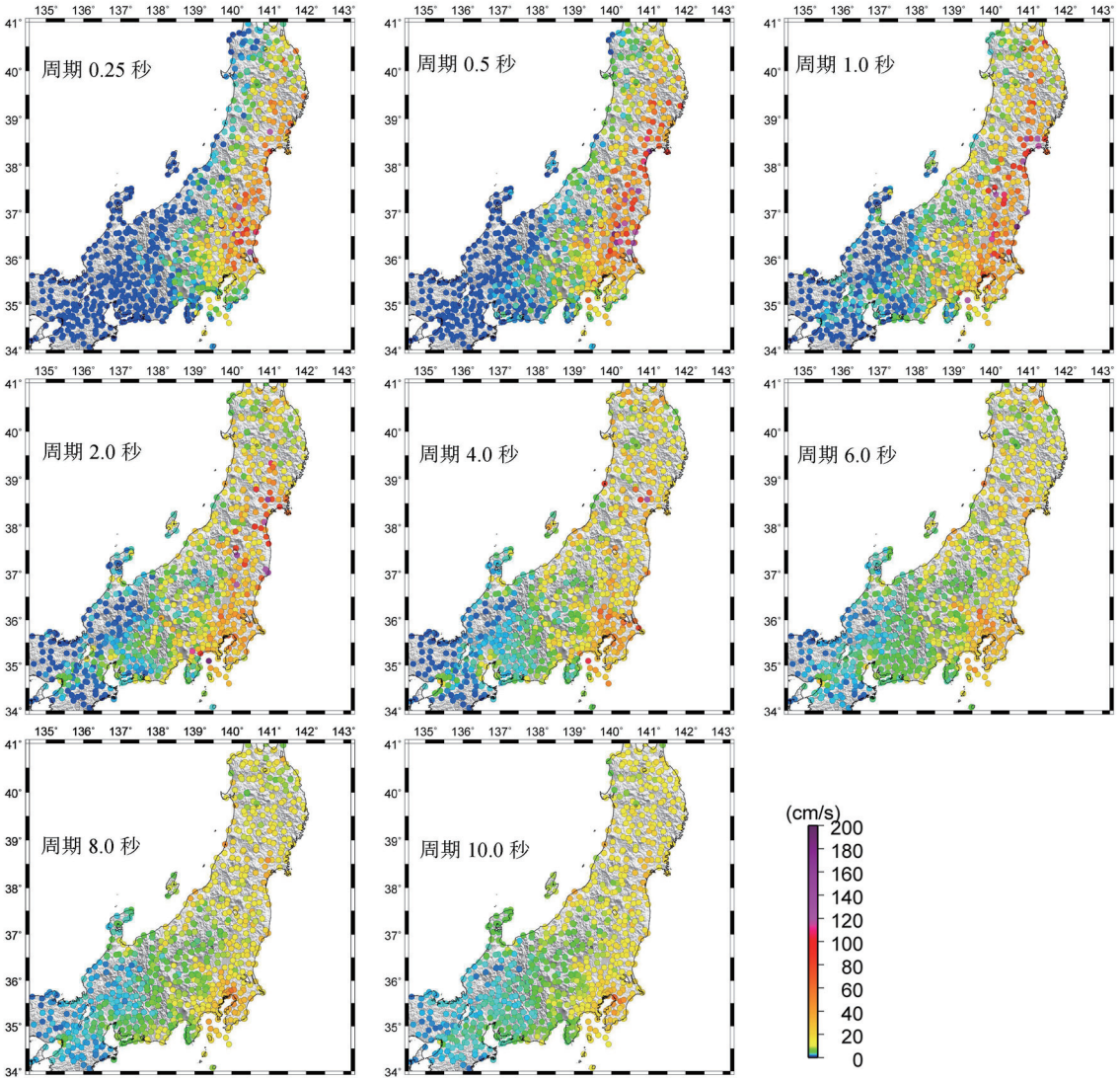


図３　擬似速度応答スペクトルの分布（減衰5%、EW成分）

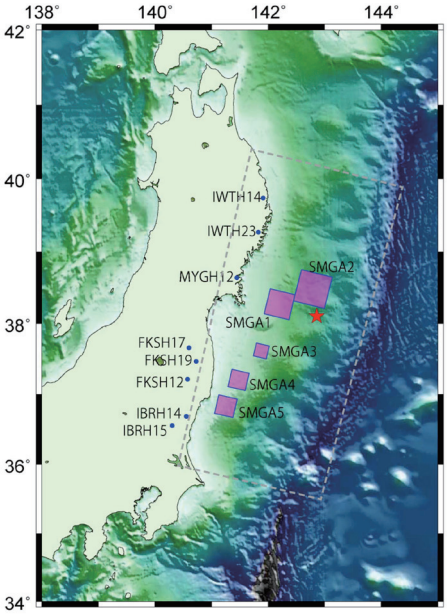


図４　強震動生成領域及び観測点位置

一方、表2に示した各SMGAの地震モーメントの和は2.03×10^{21}Nmであり、強震動の生成に寄与した地震モーメントは、地震全体の地震モーメントの5％程度であったと言える。なお、SMGAの地震モーメントの和から求まるモーメント・マグニチュードはMw8.2程度である。

次に、各SMGAが強震記録にどのように影響しているかを見るために、宮城県・福島県・茨城県の3つの観測点を例に観測波形と経験的グリーン関数法により合成した各SMGAからの波形の比較を図6に示す。この図から、5つのSMGAから5つの波群がそれぞれ伝播し各観測点に到達していることが分かる。具体的には、宮城県の観測点（MYGH12）では、観測波形の特徴である2つの波群はSMGA1およびSMGA2で生成された波である。福島県の観測点（FKSH17）では、非常に複雑な波形であるが、それぞれのSMGAからの波が観測波形のどの部分に対応しているかが分かる。茨城県の

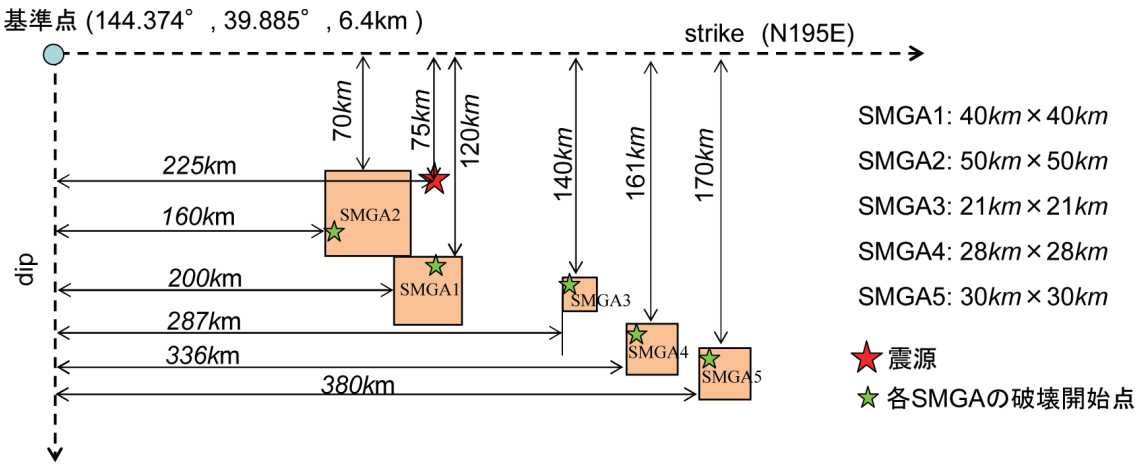


図５　東北地方太平洋沖地震の5つの強震動生成領域からなる震源モデル

表２　震源パラメータ及び波形合成時に使用した係数

		SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4	SMGA5
走行	(°)	195	195	195	195	195
傾斜角	(°)	13	13	13	13	13
面積	(km^2)	40×40	50×50	21×21	28×28	30×30
地震モーメント	(N・m)	5.02×10^{20}	1.10×10^{21}	6.43×10^{19}	1.02×10^{20}	2.58×10^{20}
応力降下量	(MPa)	20.4	21.6	15.7	10.5	23.1
ライズタイム	(s)	3.6	4.5	1.9	2.5	2.7
破壊開始時間	(s)	24.0	59.0	81.0	111.0	126.0
種地震		2005/12/17 3:32 M6.1	2011/03/10 3:16 M6.4	2010/06/13 12:33 M6.2	2010/06/13 12:33 M6.2	2005/10/19 20:44 M6.3
重ね合わせ数	n	4	5	3	4	3
本震と種地震の応力降下量の比	c	7.0	8.0	3.0	2.0	3.0

観測点（IBRH14）では、100秒前後の特徴的な波群はSMGA2、SMGA4、およびSMGA5で生成された波がほぼ同時に到達してできたものであることが分かる。

４．まとめ

本稿では、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動と震源モデルについてとりまとめた。それらの特徴及び知見を以下に抜粋する。

(1) 観測記録の最大加速度は、関東平野北部から宮城県の海岸沿いの広い範囲（火山フロントの東側）で大きくなった。

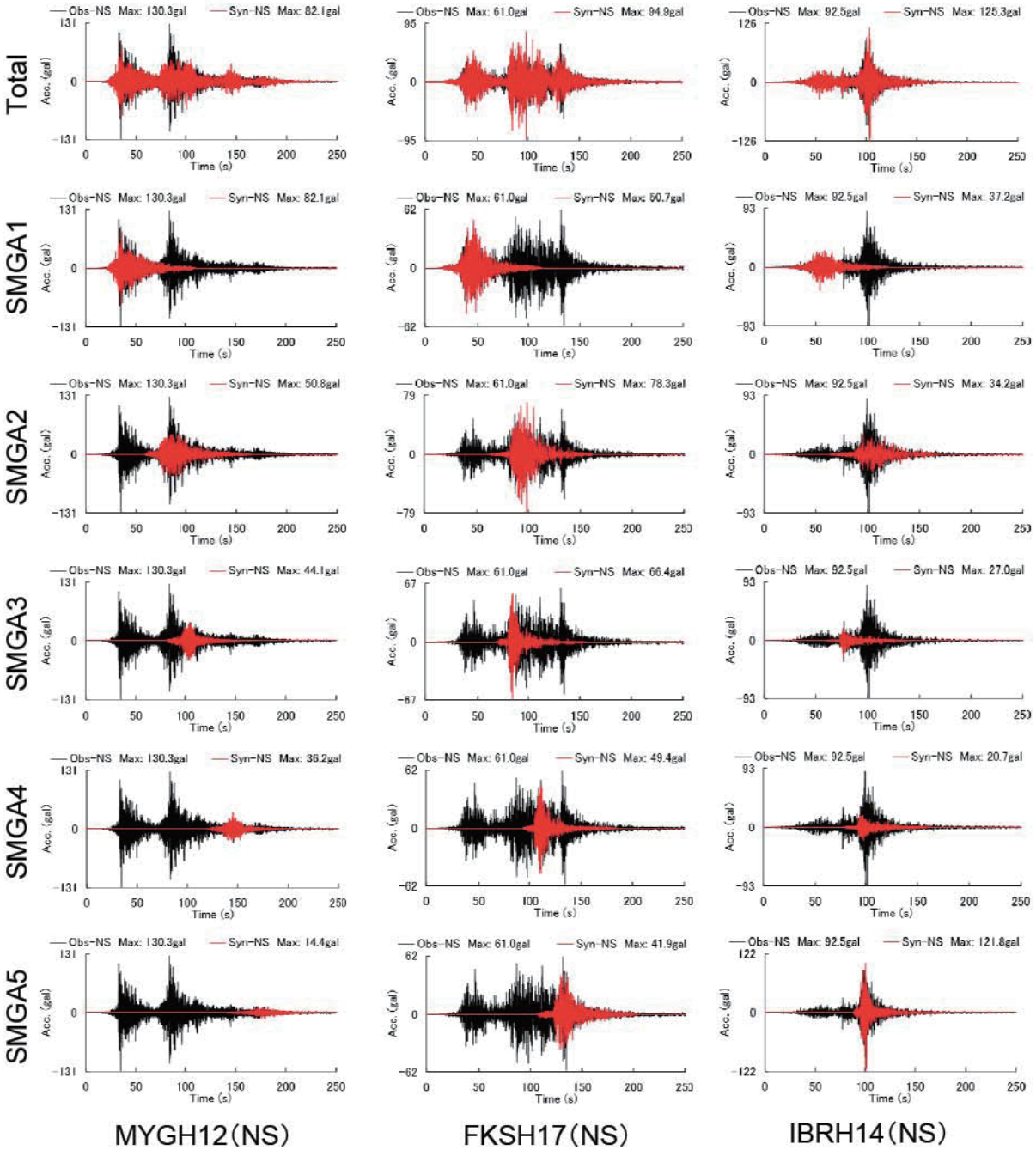
(2) K-NET築館（MYG004）をはじめとして仙台市と大崎市を中心に非常に大きな加速度が観測された。

(3) K-NET築館では最大加速度2933galで震度7を観測したが、0.3秒以下の周期が卓越した地震動であり、周辺では建物への影響が小さかった。

(4) 観測記録の応答スペクトルの分布を見ると、盆地ごとの卓越周期は、関東平野では8秒から10秒、濃尾平野では2秒から4秒、大阪平野では4秒から6秒であった。

(5) 宮城県沖、岩手県南部沖、福島県沖、茨城県沖に全体で5カ所のSMGAを配置した震源モデルを提案した。これらSMGAの位置は、地震調査研究推進本部の東北沖のプレート境界地震の想定震源域のうち、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖にそれぞれほぼ対応している。

(6) 推定したSMGAの位置は、主に周期10秒以上の地震動、地殻変動、津波などの記録を用いた震源インバージョンにより求まったすべり分布[9), 10), 11)など]とは大きく異なっており、海溝型プレート境界の超巨大地震の震源過程の複雑さとともに、すべり量が大きくなるところで必ずしも周期の短い地震動が生成されるとは限らないことを示唆している。今後このような超巨大地震の震源のモデル化では最終すべり量



——観測波形、——合成波形（Bandpass Filter: 0.1-10Hz）

図６　SMGAごとの合成波形と観測波形との比較

のみでなく、周期に応じた震源のモデル化の必要性が指摘される。

(7) 5つのSMGAの地震モーメントの総和は気象庁のCMT解による地震モーメントの約5%であり、残りの地震モーメントはSMGA以外の背景領域に加え、その大半が海溝軸付近の大すべり域によるものと考えられる。

今後は、これまで考慮しなかったSMGA内での不均質性のモデル化の必要性やその方法の検討、より周期の長い地震動、地殻変動や津波を含めた震源の全体像の解明などを進め、こうした超巨大地震時の地震動や津波などの予測のためのレシピの構築が必要である。

参考文献

1) 東京消防庁予防部：東京消防庁管内における東北地方太平洋沖地震時の対応状況等の調査結果、2011.8.
2) 大阪府総務部：咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、2011.5.
3) 久田嘉章：東日本大震災緊急報告 東京を襲った長周期地震―新宿西口超高層ビル街からの報告―、JABS・建築雑誌、2011.5.
4) 建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、2012.3.
5) 川辺秀憲・釜江克宏：2011年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化、日本地震工学会論文集、Vol.13、No.2 (特集号)、pp.75-87、2013.
6) 防災科学技術研究所：http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/PREV_HP/outreach/ul/EVENT/201103_NIED_0313.pdf.
7) 源栄正人：東日本大震災を経験して思う地盤震動研究の重要性、第39回地盤震動シンポジウム、pp.43-50、2011.
8) 山中浩明・他：2011年東北地方太平洋沖地震で震度７が記録された地域での余震及び微動観測、日本地震学会講演予稿集 2011年度秋季大会、P2-31.
9) Suzuki, W. et al.: Rupture Process of the 2011 Tohoku-Oki Mega-thrust Earthquake (M9.0) Inverted from Strong-motion Data, Geophysical Research Letters, Vol.38, No.7, L00G16, doi:10.1029/2011GL049136, 2011.
10) Yoshida, Y. et al.: Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, Earth, Planets and Space, 63, pp.565-569, 2011.
11) Fujii, Y. et al.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth, Planets and Space, 63, pp.815-820, 2011.
12) Asano, K. and T. Iwata: Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth, Planets and Space, Vol. 64, No.12, pp.1111-1123, 2012.
13) Kurahashi, S. and K. Irikura: Short-period source model of the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.103, No.2B, pp.1373-1393, 2013.
14) 佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル–プレート境界地震の短周期レベルに着目して–、日本建築学会構造系論文集、No.684、pp.289-298、2012.
15) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, 151-156, 1986.
16) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地域的な震源スケーリング則を用いた大地震（M7級）のための設計用地震動予測、日本建築学会構造系論文集、416、57-70、1990.

謝辞

本研究では（独）防災科学技術研究所のKiK-net、K-NETの観測記録を使用させて頂きました。また、震源情報は、気象庁及び（独）防災科学技術研究所のF-netのデータを使用させて頂きました。ここに記して感謝致します。

川辺 秀憲（かわべ ひでのり）

2002年神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程システム機能科学専攻修了、京都大学原子炉実験所助手を経て現職。博士（工学）。専門分野：地震工学（特に震源のモデル化および強震動予測）。

東日本大震災の教訓を踏まえた地震ハザード研究

藤原　広行
●国立研究開発法人防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域長

1．はじめに

我が国は世界的に見ても有数の地震国であり、震災を経験する度にその教訓を踏まえ地震災害対策を積み上げてきた。5年前に発生した東北地方太平洋沖地震は、M9.0という日本周辺で発生した地震としては有史以来最大規模のものであり、津波、地震動、液状化などによりもたらされた被害は、死者1万6千人以上、建物の全半壊36万棟以上と甚大なものとなり、東京電力福島第一原子力発電所の事故も含めて、広域的な複合災害を引き起こし、東日本大震災と命名された。震災から5年が経過する今なお、復興は継続しており、震災を踏まえた研究もその途上にある。

以下では、東日本大震災の前後での比較という短期的視点ではなく、時計を25年ほど前に戻し、この四半世紀における地震動研究、特に私自身が主体的に関わってきた強震観測網の整備と地震ハザード評価に関する歩みを振り返りながら、東日本大震災がもたらした教訓とそれを踏まえた今後の研究の方向性などについて考察する。特に、21年前に発生した阪神・淡路大震災は、我が国の地震研究において大きな転換点となるものであり、その後、全国的な地震観測網の整備、実大三次元震動破壊実験施設の整備、全国を概観した地震動予測地図の作成、地球シミュレータ、京コンピュータなどのスパコンの開発などの国家プロジェクトが推進され、それらの結果として地震ハザードについての多くの知見が得られつつある中で、東日本大震災は発生した。阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ進められたこれらプロジェクトの成果が、東日本大震災時にどのように機能したか、あるいはどのような教訓が得られ、その後の取り組みに引き継がれているのかという視点から分析を進めたいと思う。

2．強震観測網の整備

日本全国における強震計の設置台数は、日本の強震観測の推進を目的として設置された強震観測事業推進連絡会議に登録された強震計の数だけでも、1980年代半ばには1,500台を超えていた。しかしながら、1995年兵庫県南部地震が発生する以前には、気象庁が実施している震度観測を除けば、日本全国を一律にカバーする強震観測網は存在しなかった。

兵庫県南部地震により引き起こされた阪神・淡路大震災は、それまでの強震観測のスタイルを変える転換点となった。日本における強震観測体制に対する反省がなされ、日本のどこで地震が発生したとしても必ず被害地域での記録が取得でき、しかも必要としている全ての人々が、それらの強震記録を自由に利用できる強震観測・データ流通システムを構築する必要性が認識され、防災科学技術研究所により、全国規模の強震観測網の整備が開始された。この結果構築されたのが、全国強震ネットワーク（K-NET）である。これは、全国を約25kmメッシュで覆う約1,000 カ所の強震観測網であり、1995 年度補正予算により整備が認められ、1996 年6月より運用を開始した。

また、1995年7月には地震防災対策特別措置法が成立し、当時の総理府に地震調査研究推進本部が設置され、基盤的地震観測網と呼ばれる総合的な地震観測網の整備が開始された。その一環として基盤強震観測網（KiK-net）と呼ばれる地表及び地中での強震観測網の整備が行われた。K-NET及びKiK-netのデータは、すべてインターネットを介して公開されている。総務省消防庁がとりまとめている震度情報ネットワークでは、各自治体が設置した震度計、気象庁の震度計、防災科学技術研究所のK-NETの一部が利用されており、全国で4,200点を超える震度情報ネットワークが構築されている。このように、1995年阪神・淡路大震災が転換点となり、日本における地震観測網、特に、強震観測網は大きく変化し、世界でも希な高精度・高密度強震観測網が構築されることとなった。

3．東北地方太平洋沖地震の地震動記録

阪神・淡路大震災の教訓を踏まえた地震観測網の整備など地震災害への備えが進む中で、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震は発生した。東北地方太平洋沖地震は、M9.0という日本周辺で発生した地震としては有史以来最大規模のものであった。東北地方太平洋沖地震は、海域の断層直上では強震計による観測はなされていなかったものの、全国的に整備された稠密な観測網により強震記録の得られた初めてのＭ９クラスの地震となった。北海道から九州にいたる1200点以上のK-NET及びKiK-net観測点で地震動が記録され

（図１）、特に岩手県から千葉県にかけての20観測点で1Gを超える加速度が記録された。観測された最大の加速度はK-NET築館 (MYG004) における2933 gal（3成分合成）であり震度７であった。また、余震や誘発された地震も数多く起こっており、それらの中には震源が本震に比べて陸域に近い地殻やスラブ内で発生したM7クラス地震もあり、震度6強ないし6弱の揺れにより死者が出るなど大きな被害を生じている。

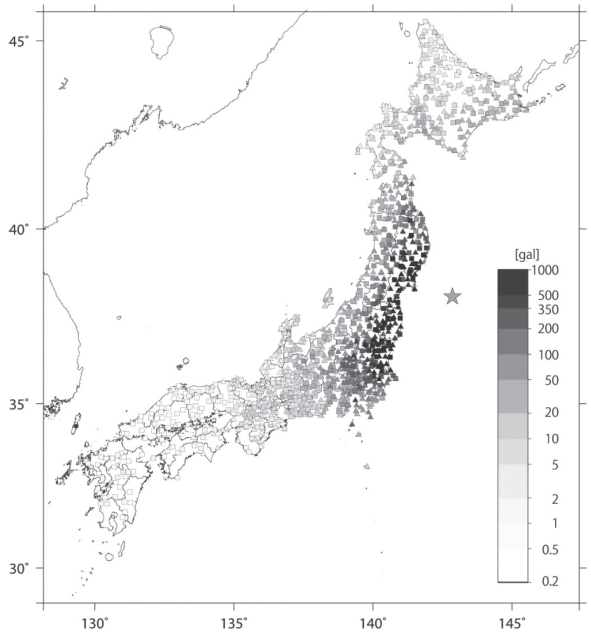


図１　K-NET及びKiK-netで観測された最大加速度

図２に観測された波形を示す。観測波形は地図上に▲で示したK-NET及びKiK-netの観測点のデータを用いて緯度毎に並べ、太灰色で顕著な３つの波群を示している。K-NET築館を含め、東北地方の多くの観測点の記録には明瞭な波群が２つ認められ、両者の時間間隔は地点によらず概ね40秒程度であることから、大きなすべりが断層面上の比較的近い場所で２度起きたことが示唆される。ただし、多くの観測点において、２つの波群の振幅は加速度波形（短周期）では同程度であるのに対し、速度波形（長周期）では２つ目の波群の振幅が数倍大きいなど、性質が異なる点もある。また、震源域南部に位置する観測点では、福島沖を震源とする３つ目の波群が認められ、断層破壊の複雑さがわかる。岩手県から千葉県のK-NET・KiK-netの36観測点の強震波形を用いてマルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法により断層破壊過程を推定した結果では、宮城県の沖合海溝寄りに大きなすべりがあったことが報告されている。これら、東北地方太平洋沖地震の強震動の特徴に関しては、青井･他[1]により、また震源過程に関しては八木[2]により、総合報告がとりまとめられている。それらは、M9クラスの海溝型巨大地震の震源過程やそれにより励起される地震動の複雑さを示しており、単純化された従来の予測モデルだけでは、M9クラスの地震による地震動の特徴全体を説明することが困難であることがわかる。このため、M9クラスの地震に対応した広帯域の地震動予測手法

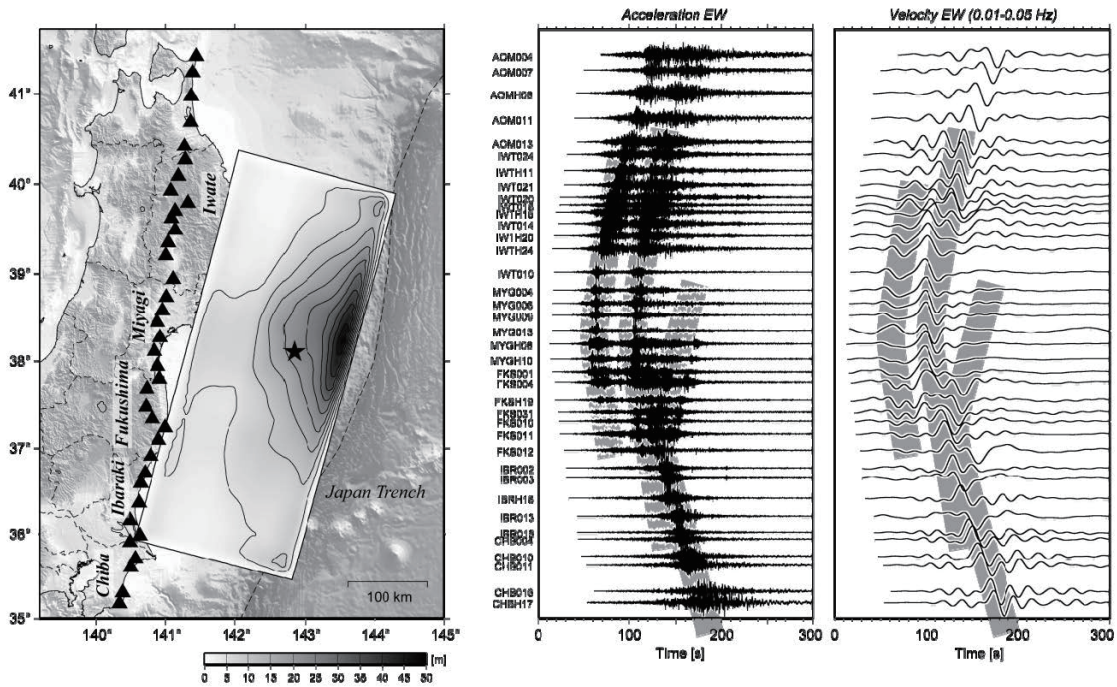


図２　断層モデル及び、加速度と速度の観測波形

が必要となり研究が続けられている。

阪神・淡路大震災の教訓を踏まえて整備された全国的な強震観測網は、世界でも初となるM9クラスの地震に対する稠密な強震観測データを記録し、巨大海溝型地震の強震動特性の研究のために必要な基礎データを全世界に発信することに貢献した。

４．全国を概観した地震動予測地図

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、神戸地域において「震災の帯」と呼ばれる震度７の揺れに見舞われた帯状の地域が出現した。この地震により引き起こされた阪神・淡路大震災の犠牲者の死因の大半が、地震の揺れによる建物の倒壊や家具の転倒によるものであった。このため、兵庫県南部地震を契機として発足した国の地震調査研究推進本部では、活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成を目標の１つとして掲げ、全国を概観した地震動予測地図を作成することとなった。2005年3月には、最初の予測地図が完成し、「全国を概観した地震動予測地図」[3]として公表された。その後、毎年度、新たな評価結果を取り込むことにより「全国を概観した地震動予測地図」の更新が行われてきた。2009年7月には、それまでの10年間の検討のとりまとめとして、各種データの追加や作成手法の高度化により、それまで約1kmメッシュで表現された地図が、約250mメッシュに細分化された表現になる等、大幅な改良が加えられると同時に名称も変更され、「全国地震動予測地図」[4]として公表された。

「全国地震動予測地図」は、地震災害の軽減に資するため、将来日本で発生するおそれのある地震による強い揺れを予測し、その結果を地図として表したものである。「全国地震動予測地図」は、地震発生の長期的な確率評価と強震動の評価を組み合わせ、確率論的地震ハザード解析の手法を用いて作成した「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されている。

「全国地震動予測地図」は、地震調査研究推進本部地震調査委員会による長期評価及び強震動評価に関する活動の成果の集大成として位置づけられるものであり、地図の作成に必要なデータまで含めると膨大な量の情報を含んでいる。これら地震ハザードに関する情報は、防災科学技術研究所が運用している地震ハザードステーションJ-SHIS（http://www.j-shis.bosai.go.jp/）から公開されている。

５．東日本大震災の教訓を踏まえた改良

東北地方太平洋沖地震は、地震調査研究推進本部により作成されてきた「全国地震動予測地図」において考慮されていなかった。このため、観測された地震動と予測地図を比較すると、福島県から茨城県北部地域では、予測されていた地震動レベルは過小評価であった。この原因は、一義的には、地震活動モデル作成の根拠となっている長期評価において、M9.0の巨大地震の発生が評価されていなかったことによる。東日本大震災の最も大きな教訓は、地震ハザード評価の基本となる地震活動モデルそのものの設定に不備があったことを示した点にある。

地震調査研究推進本部においては、東日本大震災の教訓を踏まえ、海溝型地震に対する長期評価の改訂が進められている。これまでの長期評価では、観測記録、歴史記録や地形・地質学的調査の成果に基づき、同じ領域で同等の規模の地震が繰り返し発生するという考え方で評価してきたものを、新たな長期評価においては、各領域について過去に発生した地震のデータから想定した最も起こりうる地震のみならず、史料や観測記録で発生が確認されていない地震についても、科学的根拠に基づいて想定できるよう、評価手法の改善を図るとしている。

こうした方針に基づき、南海トラフで発生する地震及び相模トラフで発生する地震に対する長期評価が改訂され公表された。

東北地方太平洋沖地震の教訓の一つは、内陸地殻内と比較して地震活動が活発なプレート境界においても、過去数百年程度の歴史資料ではそこで発生する稀な地震が十分に捉えられていないこと、毎回同じような地震がほぼ一定間隔で繰り返す固有地震モデルに限定せず、さらに多様な地震発生を考えなければならないことである。低頻度でありながら発生すると影響が甚大な地震については、現状では十分な知見が無く、日本およびその周辺地域で発生する最大級の地震像が現状では必ずしも明らかになっているわけではない。このような状況下で地震調査委員会が公表した「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）」[5]と「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）」[6]は、長期評価手法の検討途上での評価ではあるものの、評価対象領域で発生する可能性のある最大クラスの地震を提示していること、ほぼ同じ規模の地震の繰り返しを前提としたモデルではなく、発生する地震についての多様性を示していること、不確実な情報に関しても参照していることなどの点において、従来の評価から大きく変わっている。

確率論的地震ハザード評価では、将来起こりうる全ての地震をモデル化する必要がある。一方で、長期評価がなされた地震は、将来発生する可能性のある地震の一部に過ぎない。このため、その隙間を埋める必要があり、地震動予測地図作成のための地震活動モデルにおいては、「震源断層を特定しにくい地震」を統計的手法により考慮する方法論が採用されてきた。狭義の地震学的知見にのみ基づいていては評価できず、地震像を明確化したモデル化が困難な地震に対して、それらを如何にモデル化するかということが、確率論的地震ハザード評価において重要でかつ本質的に難しい課題となっている。

「全国を概観した地震動予測地図」が2005年に公表された後、日本海側の各地で内陸地殻内の地震が相次いで発生し地震被害をもたらした。こうした地震は、予め長期評価では評価されていなかったが、確率論的地震動予測地図においては、「震源断層を特定しにくい地震」として地震活動モデルの中でモデル化されていた。地震学的な知見を補完する地震ハザード評価の枠組みが機能していたといえる。

しかし、東北地方太平洋沖地震は、長期評価において評価されていなかっただけでなく、地震学的知見の不足を補うために準備されている地震ハザード評価における不確定性を評価するための確率論的なモデルにおいてもとらえることができていなかった。

防災科学技術研究所の地震ハザード評価チームにおいては、東日本大震災の教訓を将来の地震に対するハザード評価の改良に活かすため、以下のような課題を掲げ、それらを解決するための検討を行ってきた[7),8)]。

①低頻度の地震まで抜け落ちのない地震活動モデルの構築

認識論的な不確定性を十分に考慮し、過去に発生した地震のデータから想定した最も起こりうる地震のみならず、史料や観測記録で発生が確認されていない地震についても科学的根拠に基づき想定することにより、海溝型の地震及び活断層の地震の双方に対して、数千年から数万年に１度程度の事象までを考慮することができる地震活動のモデル化を目指す必要がある。

②低頻度の地震まで考慮した地震動のハザード評価

低頻度の地震によるハザードを認識するため、地震の切迫性を確率値を用いて強調する従来型の情報発信に加え、長期間の平均的な地震ハザード評価を行い、再現期間1万年程度あるいはそれ以上の期間に対する地震動評価を行うことも必要である。

上記に加えて、強震動評価及び情報発信の高度化の観点からは下記のような課題も残っている。

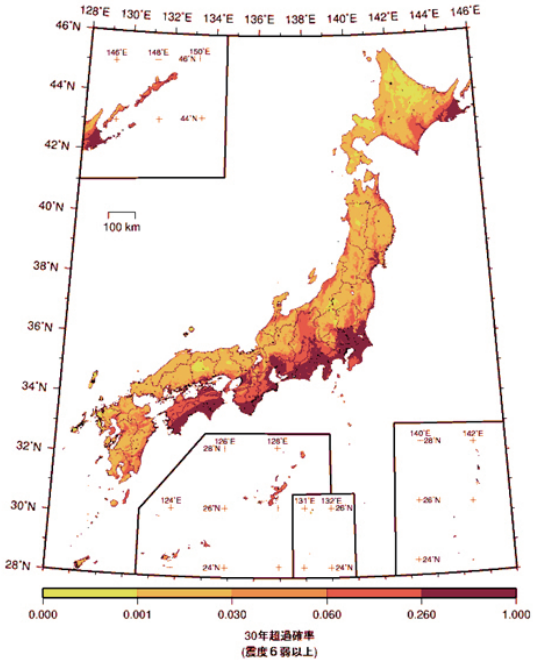


図３　2014年版の確率論的地震動予測地図

③確率論的な地震活動モデルから適切なシナリオ地震を選定する手法の確立

④巨大地震に対する強震動予測手法の高度化

⑤低頻度巨大地震に関するハザード情報の適切な伝達手法の開発

地震調査研究推進本部では、３年半にわたり東日本大震災の教訓を踏まえたハザード評価の改良に向けた検討が続けられた[9),10)]。2014年12月に、地震調査研究推進本部より「全国地震動予測地図2014年版～全国の地震動ハザードを概観して～」[11)]が公表され（図３）、その後も改良に向けた検討が続けられている。

一方で、まだ多くの課題が残されており検討が続けられている。将来の予測における不確実性の扱い、その中でも特に、「認識論的不確定性」の扱いは今後の重要な検討課題である。

６．長周期地震動の評価

長周期地震動とは、超高層ビルや長大構造物等に被害を生じさせる可能性のある長い周期の地震動である。その周期に関して明確な定義はないが、一般的には、周期数秒程度以上の地震動を示すことが多い。長周期地震動は、地震規模が大きく震源が比較的浅い地震により発生することが知られている。さらに、長周期地震動は、大規模な平野部のように厚い堆積層が存在する地盤で増幅され、長時間にわたって揺れが継続する特徴を有している。

長周期地震動の予測においては、3次元不均質地盤内での地震波伝播シミュレーション手法が用いられる。最新のスパコンなど強力な計算機を用いることにより、断層震源の破壊過程から地震波の伝播まで物理モデルで表現し、その方程式系を差分法や有限要素法などにより解くことによって予測が可能となる。地震動予測において、物理モデルに基づく理論的な予測手法が取り入れられている分野でもある。過去20年間で進められたスパコン開発のプロジェクトにより、今では、日本列島を丸ごと計算機の中でモデル化し、長周期地震動の予測計算を行うことが可能となりつつある。その予測手法においては地下構造の物性値に関するモデル化が重要となる。このためには，弾性波速度構造、特にS波速度構造を知ることが重要である。地下構造に関する情報の種類や多寡を反映して、地震動評価の観点からは、地下構造を大きく３つの領域、上部マントルから地震基盤（S波速度3km/s相当層）までの地殻構造、地震基盤から工学的基盤（S波速度300m/s～700m/s相当層）までの深部地盤構造、工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けてモデル化することが、近年試みられている。この中でも特に深部地盤構造のモデル化が長周期地震動の定量評価においては必須である。このため、長周期地震動予測精度の向上を目的とした深部地盤の全国モデルが検討され、全国１次深部地盤モデルが地震調査研究推進本部から公表されている。地盤モデルの精度向上に向けた取り組みは継続的に実施され、関東地域など一部地域においては、より広帯域の地震動予測を目指した浅部・深部統合地盤モデルの構築も進められている。

東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえて評価が見直された南海トラフ及び相模トラフで発生する海溝型巨大地震による長周期地震動についても検討が進められ、内閣府より南海トラフで発生する地震に対する長周期地震動の評価結果が公表されている[12)]。

新たに見直された長期評価によれば、これまで知られていたよりも大きな規模の地震まで考慮する必要が生じている。特に、巨大地震発生の切迫性が指摘されている南海トラフの地震や人口が集中する首都圏に大きな影響を及ぼす相模トラフの地震については、過去の地震に基づく少数かつ特定の「シナリオ」を対象とした従来の長周期地震動予測にとどまらず、過去に例のない巨大地震により生じる長周期地震動をも考慮した長周期地震動ハザード評価が検討されている。多数の数値シミュレーションを用いた検討においては、設定されたモデルパラメータによっては、極めて大きな地震動が予測される場合なども含まれている。こうした不確実性が大きな事象についての長周期地震動予測をどのように実施し、予測結果を活用するかについては課題も多く、議論が続いている。

７．リアルタイム地震被害推定・状況把握システム

事前の地震ハザード評価だけでなく、リアルタイムの観測情報を地震災害の軽減に活かすためのシステム開発が東日本大震災の教訓を踏まえ進められている。

国の総合科学技術・イノベーション会議が推進する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において開発が行われているリアルタイム地震被害推定・状況把握システムについて紹介する（図４）。

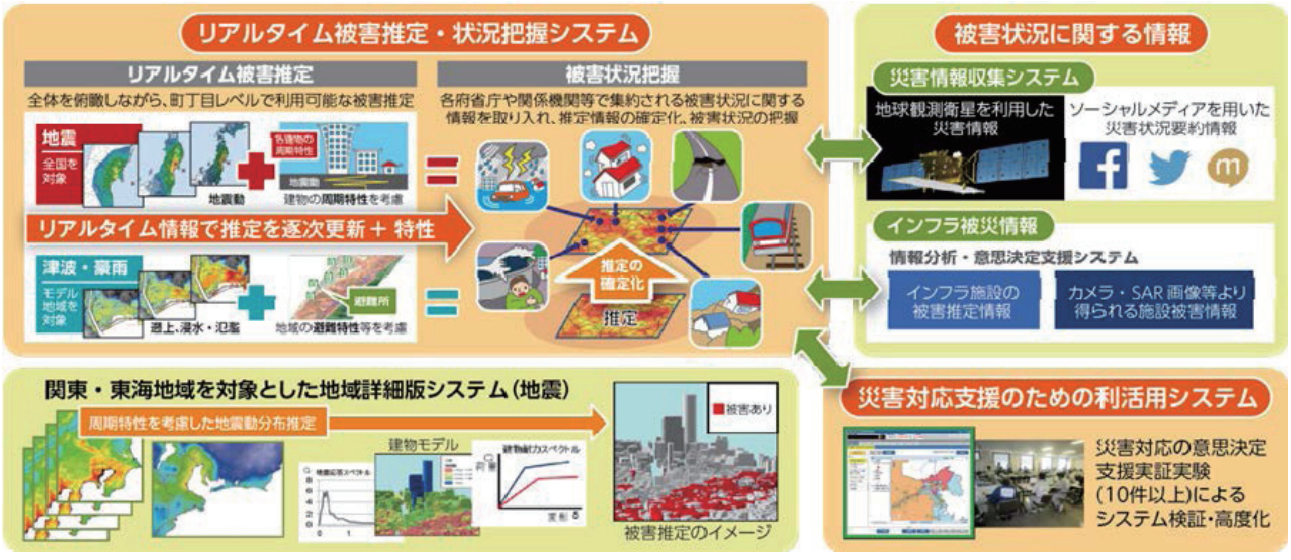


図４　リアルタイム地震被害推定・状況把握システムの概要

災害が発生した場合に、迅速に被害状況を把握し適切な初動体制の確立や災害対応につなげていくことは極めて重要である。1995年阪神・淡路大震災における応急対策活動の遅れや、2011年東日本大震災での広域被害状況の俯瞰的把握の困難性に対する反省から、被災状況を迅速かつ俯瞰的・面的に把握するとともに、事前対応、応急対策及び復旧・復興対策の各段階における情報を統合化し、総合的な意思決定を迅速に行うことの重要性が指摘されてきた。これに対して、国、地方公共団体、企業等の様々なレベルで被害推定システムが構築されているものの、推定精度の不足や、災害全体の俯瞰的・面的把握の困難性がこれまでにも指摘されている。そこで、災害発生直後の初動対応の意思決定支援等に資することを目的に、大地震のような広域にわたる災害が発生した場合でも被害全体をリアルタイムに推定、状況を把握することで概観でき、かつ詳細な推定により町丁目単位、個別建物レベルでも利用可能な、リアルタイム被害推定・状況把握システムの開発が進められている。また、共同研究開発機関等との連携のもと、衛星データやソーシャルメディアの分析情報や道路等のインフラの被災情報等の活用が検討されている。

システム開発にあたっては、これまで防災科学技術研究所が培ってきた各種技術、特に地震に関しては全国を対象とした地震ハザード評価技術や地震観測網データを用いた即時解析技術、地下構造、建物・人口分布モデル、被害状況に関する情報を取り込み、地震検知後1分程度から情報発信する高精度なリアルタイム被害推定システムを開発し、実証実験等を通してシステム改良を進める計画である（図５）。全国を対象とした地震被害推定に係わる情報の一部については、地図や表を用いて総合的に分かりやすくコンパクトにまとめたJ-RISQ地震速報を地域指定等が可能となるように高機能化し、2015年6月より公開を開始した（URL: http://www.j-risq.bosai.go.jp/report/）。

また、将来的には、被害を推定するだけではなく、衛星データやソーシャルメディアの分析結果や、インフラの被災情報、SIPの他の研究項目と連携し、時々刻々得られる実被害に関する情報を継続的に収集・分析し、被害に関する情報を確定化あるいは推定情報と

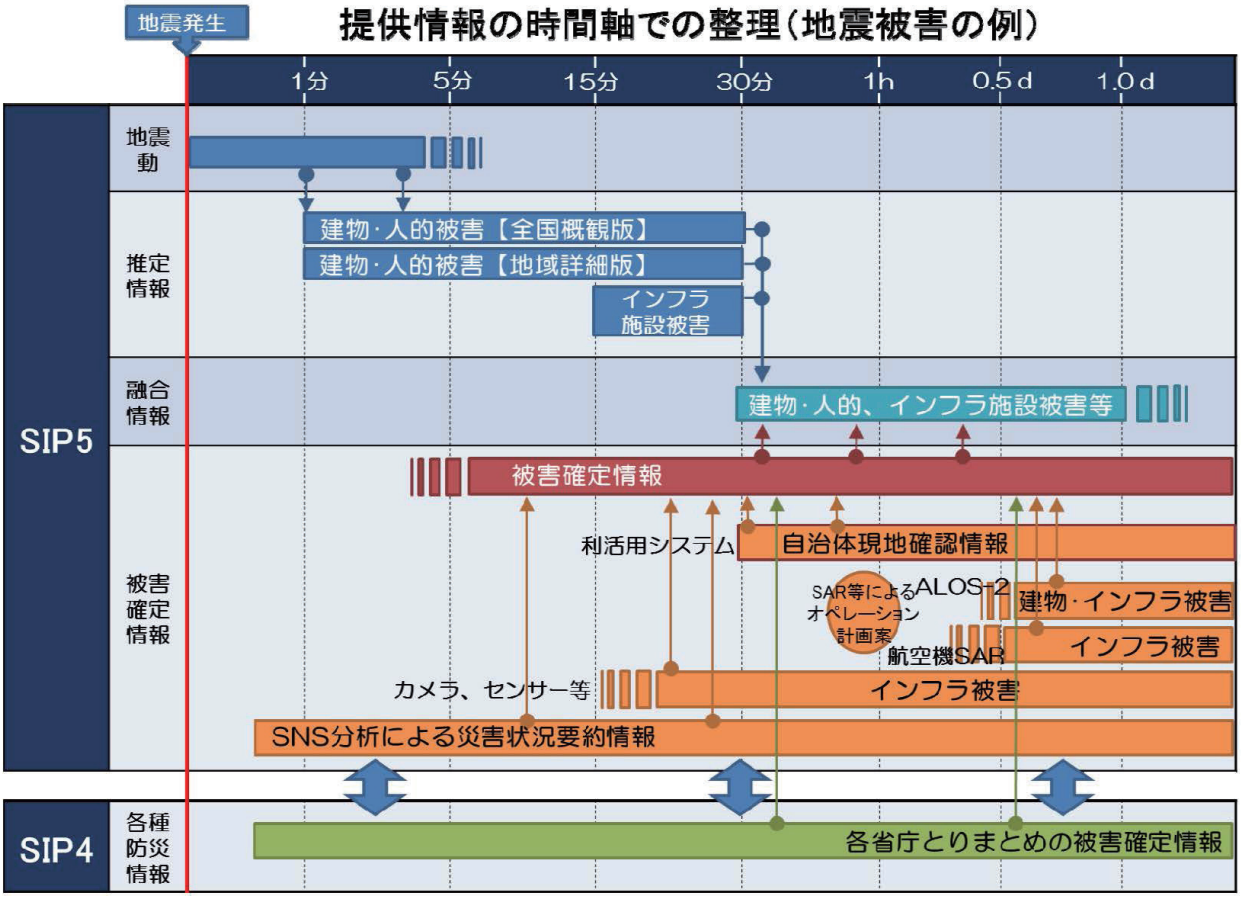


図５　リアルタイムでの提供情報の時間軸での整理

実被害情報を融合することで、信頼性を向上させ、情報共有できるシステムの開発を目標としている。このような手法開発、データ連携、システム化を通して、広域災害が発生した場合であっても被害全体を即時に推定、状況を把握することで被害を概観でき、かつ250mメッシュ程度の詳細な推定により町丁目単位程度でも利用可能とする迅速な対応を支援する情報提供の実現を目指している。

また、地震被害に関しては、上記のように全国を対象とした開発を進めると同時に、関東及び東海地域を対象に長周期から建物等の被害に直結する主要な周期帯域までの特性を説明できる250mメッシュの広域地下構造モデルを構築し、地震動予測の精度向上を図る。さらに関係機関が保有するボーリングデータや物理探査データ等も活用した50mメッシュ程度の詳細な地盤モデルを一部地域で構築し、強震連続観測データや個別建物モデルと合わせ、建物耐力スペクトルや物理過程のシミュレーションを用いた構造物解析による被害推定の高解像度化を図る計画である。

8．おわりに

阪神・淡路大震災以後の5年と比較して、東日本大震災以後の5年の地震防災における取り組みは、その歩みが遅い部分が感じられる。これは、現在の我が国の国内事情によるところもあるのかもしれない。東日本大震災の教訓は、長期的な視点から捉える必要がある。阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ整備が進んだ強震観測網は、貴重なデータを記録することができたが、ハザード評価においては、我々の知識は未だ不十分であることを改めて認識させられた。短期的には解決が難しい課題も多く突きつけられている。一方で、ICT技術の進歩により阪神・淡路大震災当時には構想はあっても実現できなかったシステムが、現在では実現可能になりつつある。近年、効率化や即効性のある成果が求められる場面が多いが、地味な取り組みであってもあきらめることなく、一歩ずつ着実に前進することも地震防災においては重要であろう。

参考文献

1) 青井真、功刀卓、鈴木亘、森川信之、中村洋光、先名重樹、藤原広行：2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、地震2、64、pp.169-182、2012.
2) 八木勇治：2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程、地震2、64、pp.143-153、2012.
3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書，2005.
4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国地震動予測地図」，2009.
5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）、2013.
6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）、2014.
7) 藤原広行、河合伸一、青井真、森川信之、先名重樹、東宏樹、大井昌弘、はお憲生、長谷川信介、前田宜浩、岩城麻子、若松加寿江、井元政二郎、奥村俊彦、松山尚典、成田章：「東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討」、防災科学技術研究所研究資料、379、2012.
8) 藤原広行、森川信之、河合伸一、青井真、先名重樹、前田宜浩、東宏樹、はお憲生、岩城麻子、若松加寿江、井元政二郎、長谷川信介、奥村俊彦、早川俊彦、高橋真理：「東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良」、防災科学技術研究所研究資料、399、2015.
9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「今後の地震動ハザード評価に関する検討～ 2011年・2012年における検討結果～」、2012.
10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「今後の地震動ハザード評価に関する検討～ 2013年における検討結果～」、2013.
11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国地震動予測地図2014年版～全国の地震動ハザードを概観して～」、2014.
12) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会・首都直下地震モデル検討会：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告、2015.

藤原 広行（ふじわら ひろゆき）

1989年京都大学大学院理学研究科中退。博士（理学）。科学技術庁国立防災科学技術センター（現：防災科学技術研究所）入所。強震観測網の整備、地震動予測地図の作成、統合化地下構造データベースの開発、災害リスク情報プラットフォームの開発等に従事。

非線形分散波理論による2011年東北地方太平洋沖地震津波の計算

馬場　俊孝
●徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授

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（以下、2011年東北津波）は岩手県、宮城県を中心に甚大な被害を発生させた。この津波の伝搬、遡上の再現計算や南海トラフなどでの将来発生するとされる津波の想定には、非線形長波理論が用いられている。また、計算に必要な津波の初期水位分布は、断層運動による地盤の鉛直変位と同じ形として扱われることが普通である。しかし、2011年東北津波においては、通常用いられるこれらの方法では再現できない現象がいくつか確認された。

我々は、これらの現象の予測を可能にすることを目的として、平面二次元の津波計算コードの高度化を共同で行っている。このコードは開発に参画している機関の頭文字を並べて「JAGURS」と呼ばれる。JAGURSには様々な機能があるが、本稿では、非線形分散波式の適用と津波の初期波形のモデル化を中心にして、2011年東北津波の再現計算を紹介する。

2．非線形分散波モデル

津波が浅海域に達すると徐々に非線形効果が大きくなり、波が切り立ってくる。遠浅の海岸のように海岸線へ到達するまでに十分な時間があると非線形効果と分散効果により、津波の波峰が複数の波に分かれることがあり、これを津波のソリトン分裂という。2011年東北津波の時には仙台平野沖で自衛隊のヘリコプターによりソリトン分裂波が撮影された。ビデオ記録の分析[1]によれば、分裂波の波長は百ｍから数百ｍ程度、波高は数ｍ程度であると推定された。

ソリトン分裂が発生すると、波高が高くなり、その後急激に砕波するために、波力が大きくなると考えられる。また、2011年東北津波の際に注目された津波堆積物の原因となる海底土砂の巻き上げが大きくなると予想される。津波のソリトン分裂を再現するには、非線形分散波理論を利用する必要がある。非線形分散波理論は、1983年日本海中部地震をきっかけとして、1990年代に発達したモデルであるが、数値計算的には分散項を陰的に解くため計算負荷が高く、その適用例は必ずしも多くない。

一方、計算機の発展は目覚ましく、約10年で1000倍のペースで性能向上が続いている。近年では数百から数千プロセッサーを使った大規模並列計算も珍しくなく、計算負荷の高い非線形分散波式も、広域に高分解能で数値的に解けるようになってきた。

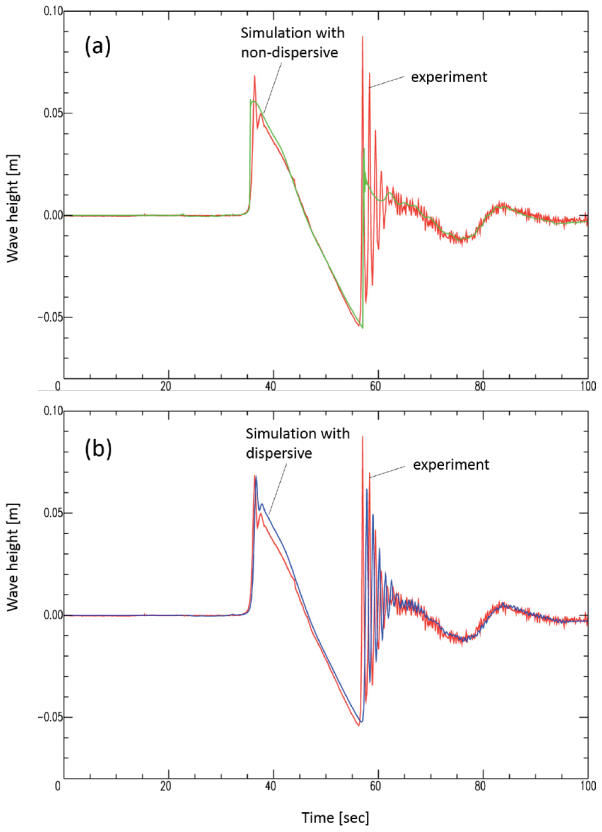


図１　大規模造波実験の再現シミュレーション (a)非線形長波モデル、(b) 非線形分散波モデル

JAGURSは非線形分散波式をスタッガード格子のリープフロッグ陰解法形式の差分法で解いている（詳細はBaba et al., 2015[2] を参照）。ここでは、OpenMPのスレッド並列によるループ分割、MPIによるプロセス並列、それらのハイブリッド並列による処理が可能である。プロセス並列には領域分割法を採用し、あるプロセッサーが担当する領域の端の水位、流速の更新処理の際に、別のプロセッサーが保持する隣接領域の水位、流速の情報が必要となるが、その場合はMPI通信により、必要な情報を取得している。また、JAGURSでは地形ネスティングが可能である。ネスティンググ

リッド間の通信も同様に、更新の際に情報が足らない場合は、それを保持する別のプロセッサーからMPI通信で取得するという方法を採用している。京コンピュータをはじめとするスパコンや中規模クラスタ計算機、ＰＣでも実行が可能である。

３．非線形分散波モデルによる大規模水路実験の再現

まず、JAGURSの計算結果と水理実験を比較する。Matsuyama et al. (2007) [3]は、長さ約200mの大規模造波水路を用いた水理実験によりソリトン分裂現象を再現した。大規模造波水路には大陸棚を模擬した1/150の地形が設置され、地形勾配と造波周期と振幅をさまざまに変えて繰り返し実験を行った。

本稿では、この実験のうち明瞭なソリトン分裂が発生した地形勾配1/200、造波周期20秒、片振幅0.03mのケースを対象とした時系列水位波形とJAGURSを用いて計算した結果を比較した。非線形長波モデル（図1a）では実験で記録された分裂波を全く再現できていないのにとして、非線形分散波モデル（図1b）では、分裂波の振幅、周期共にほぼ再現できていることがわかる。

４．非線形分散波モデルによる2011年東北津波の再現

次にJAGURSを用いて2011年東北地震の再現計算を実施する。研究対象領域は自衛隊ヘリからソリトン分裂現象が確認された仙台平野沖とし、図2に示す領域で津波を計算した。そこでは、四角で示されように5層のネスティンググリットを設定し、研究対象領域に向かって、地形分解能を向上させた。ビデオ分析[1]よって分裂波の波長は百ｍから数百ｍ程度と読み取られており、これを再現するために最も内側のネスティンググリッドの地形分解能は2/9秒格子（約6m）と設定した。

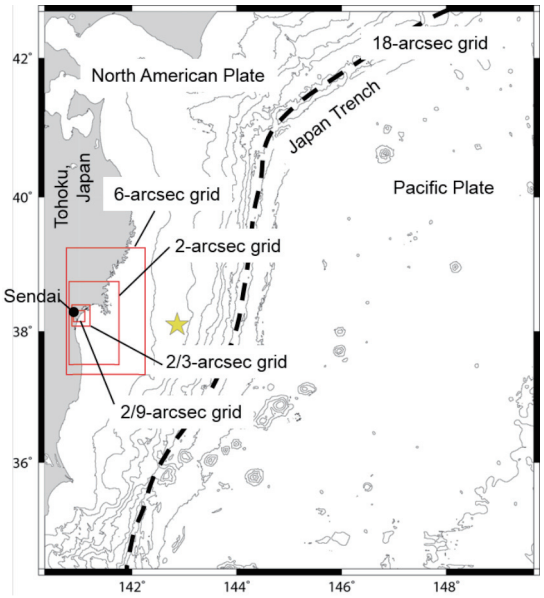


図２　2011東北津波の計算領域。沿岸付近の四角はネスティンググリッド領域を示す。

2011年東北津波の初期水位分布としてSaito et al. (2011)[4]の提案モデルを利用した。津波の伝搬計算には非線形分散波理論を用い、海底摩擦のマニングの粗度係数は一律に0.025 s/m$^{1/3}$とした。陸上への遡上も考慮した。差分計算の安定条件を満たすため、時間ステップ幅を0.1秒に設定し、3時間分の津波伝搬を計算した。計算には理化学研究所の京コンピュータ192ノード（1,536コア）を利用した。計算を終えるまでに必要

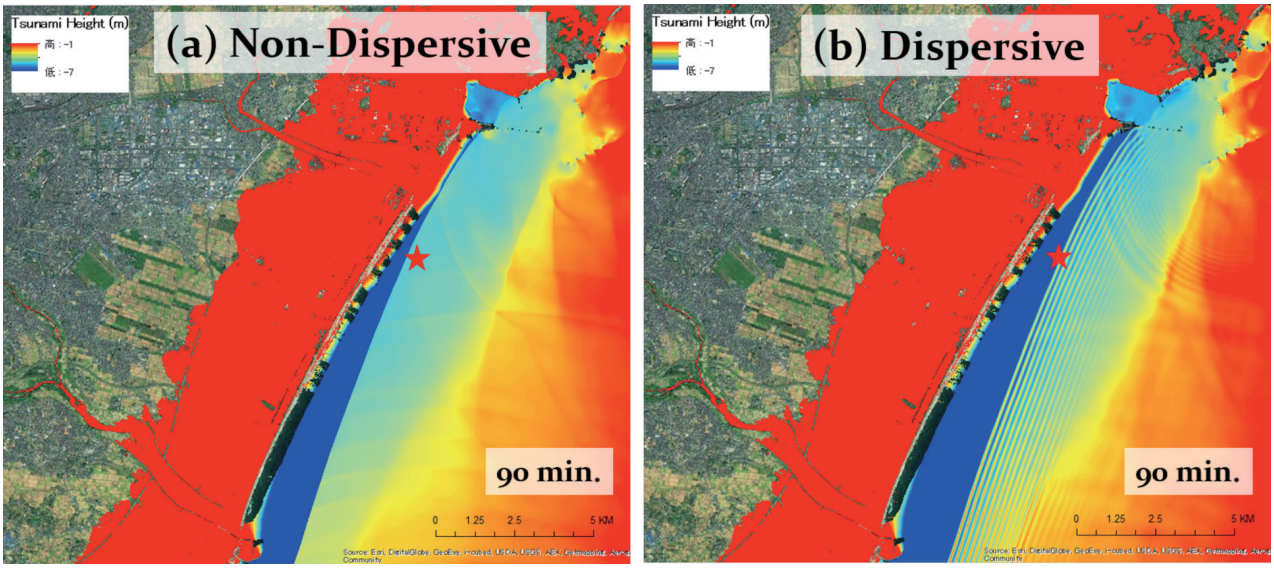


図３　非線形長波モデル（左）と非線形分散波モデル（右）によって得られた2011年東北地方太平洋沖地震発生後90分の仙台平野周辺での水位分布。

だった時間は約9.5時間であった。比較のため非線形長波モデルでの計算も行った。

自衛隊ヘリが撮影した頃（地震発生90分後）の仙台平野沖の計算結果を図3に示す。また、図3中星印で示した位置での水位の時系列を図4に示す。非線形分散波モデルの計算結果では少なくとも13個の分裂波が確認できる。分裂波の波長は約200m、波高は最大3mであり、自衛隊ヘリから撮影された分裂波の特徴をほぼ再現した。また、計算で得られた分裂波の周期は約13秒であった。

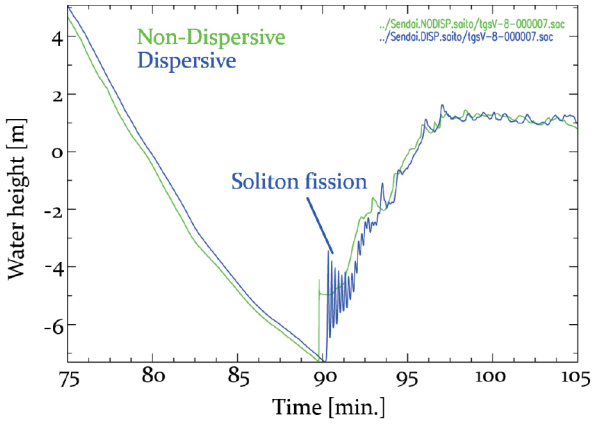


図４　図３中星印の位置の時系列水位波形 分散波モデルではソリトン分裂（Soliton fission）が確認できる。

５．津波の初期水位分布のモデル化

最後に、津波発生過程モデル化についての考察を行う。津波は断層運動などによる海底の地殻変動によって、海水が持ち上げられることによって発生する。津波の計算に必要な初期波形は、断層運動による地盤の鉛直変位と同じ形を入力するのが一般的である。しかし、海底斜面が水平移動すると、見かけのうえでは水深が変化し、これによって津波が発生することがある[5]。特に2011年東北地方太平洋沖地震では、断層運動より海底が約50mも水平変位したと報告されている[6]。さらに、この場合、合算した海底の変位に短波長成分が含まれるが、短波長成分は海面には現れないため、ローパスフィルタが必要となることが理論的に示されている[7)-8)]。

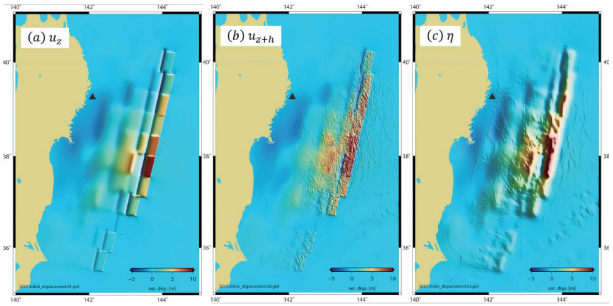


図５　モデル化の違いによる初期水位分布の違い。(a)海底地殻変動の鉛直成分と同じ。(b)海底斜面の水平移動の効果[5]を考慮したもの。(c)さらにローパスフィルタ[7)-8)]をかけたもの。

JAGURSは津波の伝搬・遡上だけでなく、初期水位分布も断層パラメタに基づいて内部で計算できる。そこでは、半無限均質弾性体を仮定した海底地殻変動[9]、斜面の水平移動の効果[5]、ローパスフィルタ[7)-8)]を扱える。Satake et al. (2013) [10]が提案した断層モデルに基づいてJAGURSより計算した津波の初期水位分布を図5で比較する。図5aは海底地殻変動の鉛直成分のみを海面に入力した場合の初期水位分布、図5bは図5aに海底斜面の水平移動による見かけ上の隆起を加えたもの、図5cはさらにローパスフィルタを施したものである。図5では断層破壊の時間発展は考慮されていないが、巨大地震の場合、すべての断層が破壊し終わるまでに5分以上かかることもある。Sakake et al. (2013)[10]が示した断層破壊の時間発展も考慮した場合の入力海水位を図6に示す。

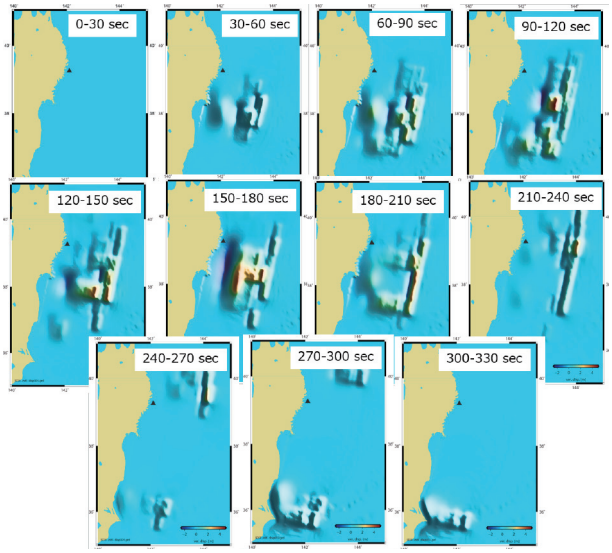


図６　図5cに加えて断層の破壊伝搬の効果を考慮したもの初期水位変動。30秒毎の入力水位を示す。

各初期水位モデルから計算されたGPS波浪計（図5中三角位置）での時系列津波波形を図7に示す。断層運動に起因する海底の鉛直変位成分のみを考慮した場合（U_z）、斜面の水平移動の効果も加味した場合（U_{z+h}）、それに短波長成分をカットするフィルタを施した場合（η）、断層破壊の時間発展も考慮した場合（$\eta_{\text{time-dependent}}$）を示している。また、観測された津波波形を点線（obs）で示した。斜面の水平移動の効果を考慮すると津波高が大きくなり、ローパスフィルタをかけるとやや小さ

くなる。さらに断層の時間発展を考慮すると、波形の位相が遅れるとともに津波高がさらに小さくなる。このように初期水位モデルの扱いによって、得られる津波波形が明らかに異なることがわかる。つまり、2011年東北津波の初期水位分布のモデル化には、従来の海底地殻変動の鉛直成分のみならず、海底斜面の水平移動の効果やローパスフィルタが必要であること言える。

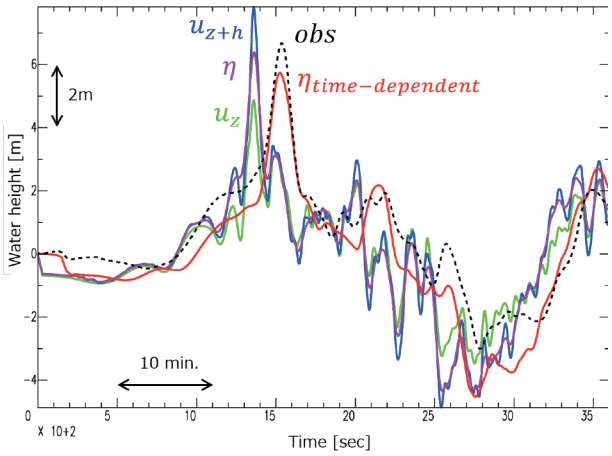


図７　初期水位のモデル化の違いに由来するGPS波浪計位置（図5中三角印）での津波波形の違い。

６．まとめ

本稿では、非線形分散波理論の適用と初期水位分布のモデル化の違いの影響について、2011年東北津波の観測データと数値計算結果を比較しつつ議論した。そして、これらの影響を考慮する／しないによって、津波波形が大きく違うことを示した。2011年東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0という超巨大地震であるため、これらの効果が顕著であったのかもしれないが、その他の超巨大津波の再現シミュレーションや、南海トラフの超巨大地震による津波の想定においても、同様にこのような効果を考慮しなければならないケースがあると考えられる。

参考文献

1) 村嶋陽一他：非線形分散波理論モデルによる東北地方太平洋沖地震津波のソリトン分裂の再現、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 68、pp. I_206-I_210, 2012.

2) Baba, T. et al. : Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami, Pure Appl. Geophys., Vol. 172, pp. 3455-3472, 2015.

3) Matsuyama, M. et al. : A study of tsunami wave fission in an undistorted experiment, Pure Appl. Geophys., Vol. 164, pp.617–631, 2007.

4) Saito, T. et al. : Tsunami source of the 2011 Tohoku - Oki earthquake, Japan: Inversion analysis based on dispersive tsunami simulations, Geophys. Res. Lett., Vol. 38, L00G19, doi:10.1029/2011GL049089, 2011.

5) Tanioka, Y. et al. : Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., Vol. 23, pp. 861-864, 1996.

6) Fujiwara, T. et al. : The 2011 Tohoku-oki earthquake: displacement reaching the trench axis, Science, Vol. 334, p. 1240, 2011.

7) Kajiura, K. : The leading wave of a tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 41, pp. 535-571, 1963.

8) Tanioka Y. et al. : Sediment effect on tsunami generation of the 1896 Sanriku tsunami earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol. 28, pp. 3389-3392, 2001.

9) Okada, Y. : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, pp. 1435-1154, 1985.

10) Satake, K. et al. : Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform Data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 103, pp. 1473-1492, doi: 10.1785/0120120122, 2013.

馬場　俊孝（ばば としたか）

1998年金沢大学卒、独）海洋研究開発機構研究員経て現職、博士（理学）、専門分野：津波

津波とピロティ構造

田中　礼治　　／澁谷　　陽
●東北工業大学名誉教授　　●東北工業大学工学部建築学科客員研究員

1．はじめに

2011年3月11日の東日本大震災から早や5年が経過しようとしている。いまだ、多くの方々が仮住まいをしいられており、住まいに苦しめられている。災害復旧の遅れは、災害の大きさと関係するのが一般的である。東日本大震災がいかに大きな災害であったかが分かる。

東日本大震災の被害の大半は津波による被害であると言っても過言ではない。現在でも住まいに苦しめられている状態から見ると、いかに津波と建築が密接な関係にあるかが分かる。日本では何故か、津波は土木分野の課題として処理されてきたように思う。別に、土木が処理しようが、建築がやろうが問題はないのだが、東日本大震災後の住宅事情を見るとこれからは建築の方々も津波問題についてこれまで以上に力を注いで努力する必要があるのではないかと考えている。

そのようなことから筆者等は津波と建築の関係は今後どうすべきかを考えるために2014年10月に「東日本大震災の教訓を後世に残すことを考える勉強会」（会長　和田章　元日本建築学会会長）を一般社団法人日本津波建築協会に設置し活動を行っている。本報告はその勉強会での成果の一部であると同時に、これから来ると予想される東海、東南海、南海の地震で発生するかも知れない津波の減災対策に活用していただければと思い執筆したものである。

比較的津波に効果的だと考えられているピロティ構造について、これまであまり検討されてこなかったように思われる。そこで本報では津波とピロティ構造の関係について多少検討したので報告する。ピロティ構造は津波避難ビル等にも使用されており、これからの津波減災対策に欠かせない建築物だと考えられる。御一読してもらい、参考にしていただければ幸いである。

2．近代建築は十分津波に抵抗できる

写真1および写真2はいずれも岩手県田老町での津波の被害状況である。

写真1と写真2は、ほぼ同じ場所から同じ方向を撮ったものである。写真1は昭和三陸大津波（1933年、昭和8年）の被害状況であり、写真2は東日本大震災（2011年、平成23年）でのそれである。

写真1と写真2を比べてみると両者には大きな違いがあることが分かる。何が違うかというと昭和三陸大津波の写真1では津波でほとんど全ての建物が流失しているのに対して、東日本大震災の写真2では多くの建物が流失せずに残存している。即ち、昭和三陸大津波の時代には建物の抵抗力が弱く津波に抵抗できなかったものが、東日本大震災では建築技術の進歩により建物の抵抗力が大きくなり、津波に抵抗していることが分かる。これまで、日本人の多くは津波の力はもの凄く大きくて津波に抵抗できるような建物は造れないのではないかという根拠のない恐怖感が先走っていたように思う。しかし、写真2から分かるように現在の建築技術をもってすれば十分に津波に抵抗できる建物を

写真1　昭和三陸大津波では全ての建物が流失している（1933年）

写真２　東日本大震災では津波後でも多くの建物が残存している（2011年）

造ることが出来たことが分かる。

「羹に懲りて膾を吹く」というようなことをする必要がない時代が到来したということである。これからは建築を用いて津波と堂々と渡り合って津波と闘っていける時代がやってきたことを東日本大震災が証明してくれたと考えている。そういう意味では東日本大震災の津波は、画期的な出来事であったと思う。しかしながら、この新しい時代の幕開けのために2万人近い方々が犠牲になったということは、残念でならない。

3．津波避難ビルから見える津波と建築の相関

津波の避難には水平避難と鉛直避難の2種が存在する。鉛直避難は建物の高さ方向を活用する方法である。鉛直避難を可能にするには津波に十分抵抗し得る建物が必要である。津波避難ビルに関しては、2005年（平成17年6月）に「津波避難ビル等に係るガイドライン」[1]が発行されている。2012年（平成24年2月）には「津波避難ビル等の構造上の要件の解説」[2]が発行されている。

写真３　津波避難タワーの1例（仙台市）

いずれにしても、津波避難ビルは建物が津波に対して十分抵抗し得ることが前提であるから、避難ビルの基本的な考え方は現代建築は津波に抵抗し得るという概念がベースになっている。写真3は東日本大震災後仙台市内に建設された津波避難タワーの1例である。鉄骨造で、最上階には避難所と食料、水などの非常時備品などの保管所が設置されている。

4．ピロティ構造の津波での有効性を検証した東日本大震災

見付け面積の小さいピロティ構造は津波に効果的である。東日本大震災において、このピロティの有効性を活用した住宅の事例が岩手県、宮城県で見られた。1例を写真4に示しておく。いずれのピロティ式住宅、ピロティ式マンションでも津波の翌日から日常生活が送れたと言っており、ピロティ効果の有効性が認められた。

ピロティ構造は図1に示すように柱と梁だけから造られている。柱と梁しかないので、津波は建物の中を自由に行き来できる。それ故、津波の力を受けにくい。津波に強い建物を造るのに適している。

写真４　宮城県気仙沼市大谷海岸近くの1階ピロティ構造住宅。無被害。

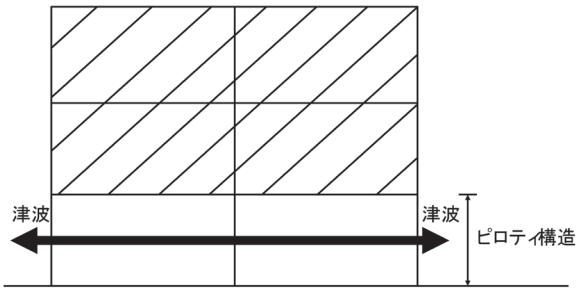


図１　ピロティ構造では津波が自由に行き来できるので津波に強い建物を造れる

5．漂流物による津波被害

東日本大震災での漂流物被害の状況の1例を示す。写真5は海岸線から直線距離で約1.9㎞の地点である。浸水痕が写真の店舗の外壁に残されており、車道の路面から約1.8mの浸水深が確認された。この地点では残存漂流物として車が数多く確認でき、この車により建物の1階部分が破壊されていた。写真は車が店舗の1階部分に衝突して入り込んだ様子を示している。このように窓やドアなどの開口部と壁の一部が破壊されていた。

写真6は海岸線から直線距離で約1.6㎞の地点である。写真には無いが浸水痕が残存した住宅の外壁に残されており、車道の路面から約2.3mの浸水深が確認された。この地点の建物は倒壊したものが多く、倒壊をまぬが

写真５　漂流物が店舗内に流入している

れた建物でも1階部分は被害を受けていた。漂流物としては小型の船舶、車、建物の瓦礫が目立った。写真の船舶は、約長さ7.5m×幅2.5m×高さ1.5mの大きさである。このように、漂流物によって建物が被害を受けている事例は東日本大震災では無数に見られた。

写真６　大きな船も漂流物となる

６．津波に対する建築物の構造設計

津波に対する建築物の構造設計方法として、津波避難ビル・津波避難タワー等の避難建築物についての構造設計指針が、2012年2月に国土交通省住宅局及、国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所により、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」[2)]（以下、暫定指針）がとりまとめられた。

この暫定指針は、津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等について検討したものであり、東北地方太平洋沖地震の被害状況調査を踏まえ、2005年に発表されたガイドラインに示されていた下式の津波波圧算定式の水深係数を、津波の勢いが軽減されることが見込まれる場合には低減できると見直しを行なったものである。詳しくは文献2)を参照してもらいたい。

$$qz=\rho g(ah-z)$$

ここに、qz：構造設計用の進行方向の津波波圧（kN/m^2）、ϱ：水の単位体積質量（t/m^3）、g：重力加速度（m/s^2）、h：設計用浸水深（m）、z：当該部分の地盤面からの高さ（0≤z≤ah、m）、a：水深係数（状況に応じ、1.5～3.0）、暫定指針では、津波避難ビル等を設計する際の外力として、津波波圧を想定し算定式を示している（図2参照）。また、津波被害調査から、建築物に被害を与える外力には津波波圧意外にも漂流物による衝突力があることがわかり、漂流物の衝突力についても記述はあるが、衝突力については現在研究中であり、オーソライズされていないと示されている。

暫定指針中には多くの設計例が示されているが、衝突力については図3に示すように、衝突力により柱などの鉛直部材が(A)が破壊した場合には、応力の再分配により柱(B)が負担するとして建物の安全性を確保するとしている。しかし、図4に示すような小規模な

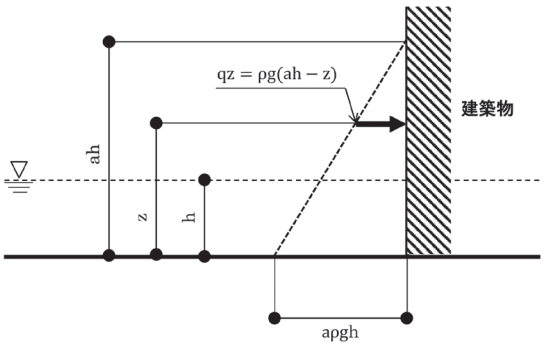


図２　津波波圧式

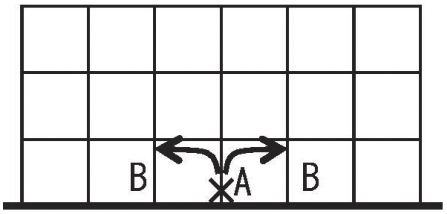
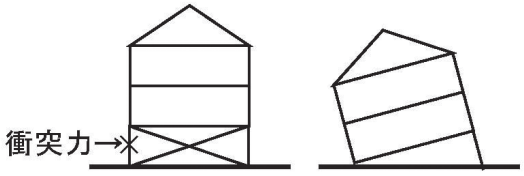


図３　衝突力により柱が破壊した場合の設計方法



a.　衝突力で柱破壊　　b.　住宅全体崩壊

図４　ピロティ住宅の柱が衝突力で破壊した場合の住宅全体の崩壊

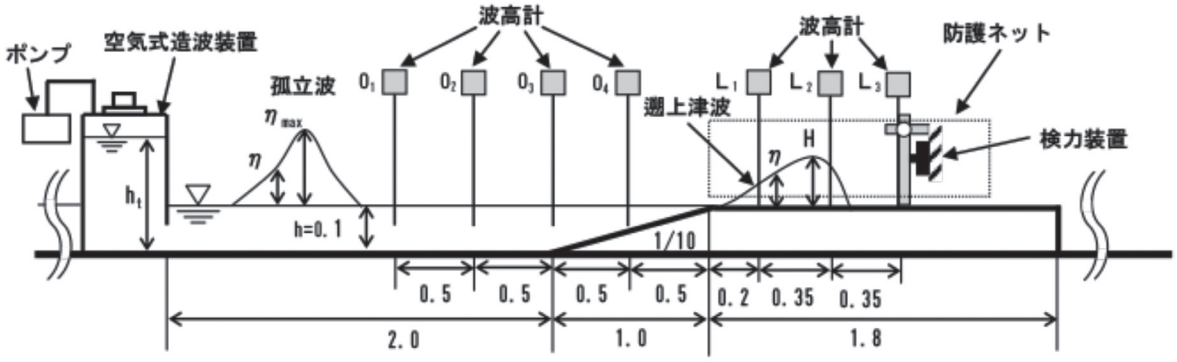


図５　実験状況図（単位：m）

住宅などでは、1本の柱が衝突力で破壊した場合に応力の再分配が不可能なこともあり、建物全体の崩壊を招くこともある。そのようなことが起こらないようにするには衝突力を求め、柱が衝突力で破壊しないように設計する必要がある。そこで衝突力について検討するために、以下に示すような実験を行った。

７．遡上津波による漂流物の衝突実験

７．１　実験目的

漂流物の衝突力については松冨[3]や池谷ほか[4]などによる先駆的な研究がなされているが、その研究のほとんどが、漂流物が壁面に働く力を調べており、ピロティ構造の柱のように津波から見て細い柱に働く力は改めて調べる必要がある。漂流物の衝突力を把握するためには、漂流物の衝突速度と付加質量について調べる必要がある。衝突力については、その時系列のピーク値が調べられることが多いが、住宅等構造物の場合は柱の材料が木材、鋼、コンクリートなど色々あり、また、その構造上の弾性も色々とあり得る。そこで本報では漂流物の運動量に着目することとした。すなわち、漂流物が衝突するときに速度が急変して運動量が変化する。その量は、漂流物の形状により定まる付加質量に大きく依存し、物体の材料や柱の構造にあまり左右されないと考えられる。そして、その付加質量が把握できれば、津波による衝突時の速度を推定し、運動量の変化、すなわち衝突力の力積を与え、これを衝突時の構造強度計算の入力とすれば、構造物の耐力の検討が可能になると考えられる。

付加質量を調べるため、衝突後の漂流物が停止すると仮定し、漂流物自身の質量mと流体の付加質量m_a、衝突速度をvとすると、力積と運動量変化の関係より(1)式が得られる。よって，この式により付加質量m_aが求められる。

$$F \cdot dt = (m + m_a)v \quad \cdots (1)$$

本報告では、不明な点の多いピロティ構造の柱に対する漂流物の衝突力について調べるため、実験を行い、構造物の耐力を検討するために、必要となる漂流物の付加質量と衝突速度について報告する。

７．２　実験方法

実験状況を図5に示す。実験の縮尺は1/100である。開水路内に仙台湾の海底部分を模した傾斜部(1/10)と平野部を設置した。遡上津波を発生させるため、空気式造波装置内の吸引高さを40cm、70cm（以下、h_t40、h_t70と略称）とし2種類の津波を発生させる。h_t40の波は海岸線(傾斜部と平野部の境界線)で最大浸水深が約6.0cmであり、h_t70では約9.0cmである。衝突力を計測するために図6に示した検力装置でロードセル（LMA-A型小型圧縮型）により衝突力を計測した。検力装置の設置位置は、海岸線付近を仮定したL=50cm(L：海岸線から平野部側への距離)の位置と、海岸線から約1km以上後方の内陸部を仮定したL=450cmの2箇所である。漂流物として図7に示した厚板型を使用した。漂流物を衝突させる場合は、漂流物の初期位置と検力棒の距離を変えて遡上津波を発生させる。遡上津波の水粒子速度を計測するために、漂流

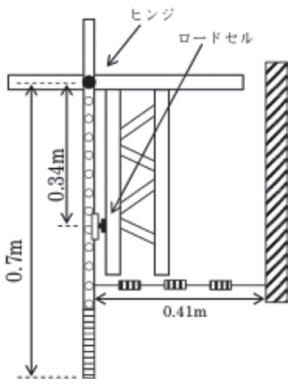


図６　検力装置図

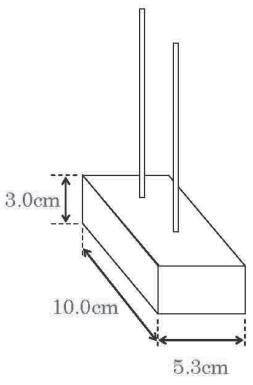


図７　漂流物模型
(質量91 g)

物の無い状態で、PIVシステムを用いて計測した。図7には実験に使用した漂流物模型を示す。漂流物の衝突速度は漂流物に細い棒（直径:0.2cm、長さ:17cm）を立て、PTVシステムを使用して計測した。

7．3　実験結果

遡上津波の水粒子速度と漂流物衝突時の直前の0.02秒間の衝突速度を図8と図9に示す。

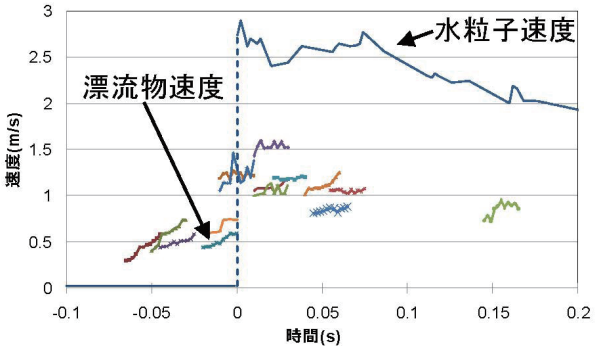


図８　水粒子速度と漂流物速度の時系列
(L_3、h_t70 、front)

漂流物の衝突速度は一連の0.02秒間の最後の値となる。波の波前面で水粒子速度が検知される前から漂流物の速度が計測されているが、これは遡上津波がL_3の場所に到達する前に漂流物が押され始めて衝突することを示している。波前面での衝突は衝突時刻が後ろになるほど加速時間が長くなり速度が大きくなる。一方、波後面での衝突は、ほぼ水粒子速度と同じになり、詳細に見るとわずかに減速傾向にある。

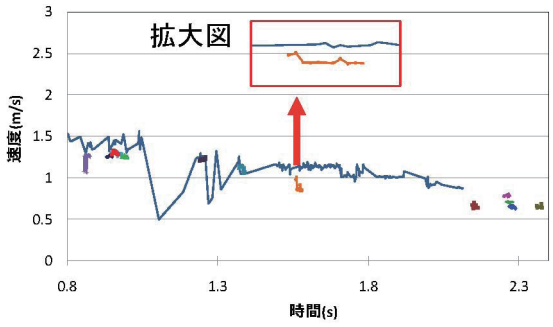


図９　水粒子速度と漂流物速度の時系列
(L_3、h_t70 、back)

以下の実験結果には、今回の遡上津波(L=50cm、L=450cm)の他に、以前に行なった孤立波[5] (η3、η5、η8)と遡上津波[6] (L=15cm、L=85cm)の結果を追加している。図10には力積と衝突速度の関係、図11には付加質量と衝突速度の関係を示す。力積は$W\cdot\sqrt{(g\eta_{max})}/L_m$で無次元化している。ここに、漂流物の重量:W、漂流物長さ:L_m、最大浸水深:η_{max}による$\sqrt{(g\eta_{max})}$である。そして衝突速度は$\sqrt{(g\eta_{max})}$で無次元化している。また、付加質量は漂流物の質量で無次元化した付加質量係数:$C_m = m_a/m$で表わしている。

図10より、全ての計測位置で衝突速度が大きくなるにつれ衝突力の力積も大きくなる。各計測位置での衝突速度の最大値は$\sqrt{(g\eta_{max})}$の2 ～ 2.4倍の速度であり、このときに力積も最大値となる。ただし、L=15cmの計測位置では、漂流物の初期位置と検力棒の距離を十分にとることができず、漂流物が十分に加速できなかったため、最大衝突速度が小さくなったと考えられる。

次に図11より、孤立波の場合は漂流物速度が速くなるにつれ付加質量係数は1.0に近づいていくが、遡上津波では計測位置がL=15cmおよびL=50cm、L=85cmの場合に付加質量係数は全ての漂流物模型で1.0以下にばらつくことがわかる。一方、L=450cmの場所では付加質量係数は0.5以下にばらつくことがわかる。

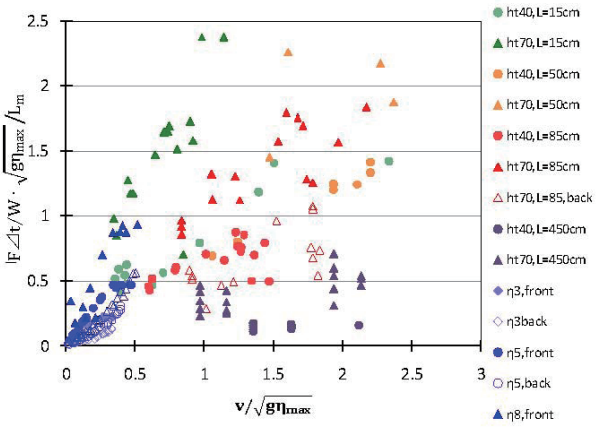


図 10　衝突力の力積と衝突速度

図10　衝突力の力積と衝突速度

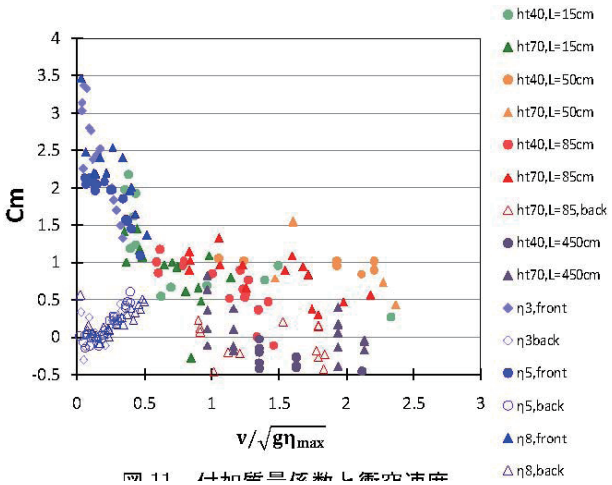


図11　付加質量係数と衝突速度

７．４　実験の結論

遡上津波の場合、漂流物による衝突力の力積は漂流物の衝突速度におおむね比例する。その漂流物の衝突速度の最大値は、海岸線付近でも内陸部でも$\sqrt{(g\eta_{max})}$の2.4倍程度の速度となる。それ故、その速度のときに力積が最大となり、そのとき海岸線付近で付加質量係数は1.0程度となる。一方、内陸部では0.5程度となり、海岸線付近での値の半分となる。実際の漂流物の衝突により発生する衝突力を求めることができる。

８．まとめ

ピロティ構造は津波に対して有効な構造である。しかし、ピロティ構造の柱に対する漂流物の衝突力の大きさに関しては、まだ不明な点が多い。そのようなことから、文献2)の設計例においても衝突力は不明のまま、応力の再分配という考え方で処理している。

不明のまま設計することは、決して良いことではない。そこで本報では柱に対する衝突力について実験により検討した。その結果、本報の実験方法を用いることによって衝突力を解明し得ることが分かった。そこで、今後本報の実験方法を用いて種々の衝突力について検討し、衝突力を設計に取り決めるよう努力する所存である。

参考文献

1)津波避難ビル等に係るガイドライン検討会,内閣府政策統括官（防災担当）:津波避難ビル等に関するガイドライン,2005年6月

2)国土交通省国土技術政策総合研究所,一般社団法人建築性能基準推進協会,協力独立行政法人建築研究所:東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針,2014年2月

3)松冨英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性,土木学会論文集，No. 621/II - 47，pp. 111 - 127，1999

4)池谷毅，稲垣聡，朝倉良介，福山貴子，藤井直樹，大森政則，武田智吉，柳沢賢：津波による漂流物の衝突力の実験と評価法の提案，海岸工学論文集，第53巻，pp. 276 - 280，2006

5)澁谷陽,新井信一,高橋敏彦,相原昭洋:孤立波による漂流物の衝突力と付加質量,土木学会論文集B3Vol.67No.2,pp.565-570,2011

6)澁谷陽,相原昭洋,新井信一 ,高橋敏彦:平野部に遡上した津波による漂流物の衝突力,土木学会論文集B3Vol.67No. 2,pp.210-215,2012

7)松冨英夫:流木衝突力の実用的な評価式と変化特性,土木学会論文集,No.621/II-47,pp.111-127,1999

8)S,Arai.A,Sibuya.A,Aihara.T,Takahasi:Inundation and Damage by Run-up Tsunami of 2011 in the Sendai Plain,Japan,ISOP-2012,2012

田中　礼治（たなか れいじ）

1940年秋田生まれ、東北工業大学名誉教授、工学博士、現在　宮城県既存建築物等地震対策推進協議会　会長、宮城県建築住宅センター建築物耐震診断・耐震改修判定委員会　委員長、岩手県建築住宅センター建築物耐震診断・耐震改修判定委員会　委員長､その他多数委員会委員長など

澁谷　　陽（しぶや あきら）

2013年東北工業大学卒、東北工業大学工学部都市マネジメント学科客員研究員を経て現職、工学博士、専門分野：津波による漂流物の衝突力

地震工学の今昔

柴田　明徳
●東北大学名誉教授

1．はじめに

歳をとると誰でも昔への関心が高まる。私の場合、地震研究の歴史に興味を持ち始めたきっかけは、明治初期に来日したジョン・ミルンとの出会いである。宇佐美龍夫先生の訳書[1]を通じて、ミルンの地震研究への幅広い貢献と、彼の魅力的な人柄を知った。それ以来、折に触れて関連の歴史資料を捜して読むようになった。

地震に関する科学的な研究分野に、地震学と地震工学がある。地震学は主として地球内部に発生する地震現象を対象とするのに対し、地震工学の対象とするところは、大地震が地球表面上に作られた諸構造物及びそこでの人間生活に及ぼす様々な影響と、それによって起こる災害の防止・軽減である。ロバート・ライサーマンは、「地震工学（Earthquake Engineering）」という用語は1940年代から50年代に使われ始めた、と述べている[2]。それ以前は、地震工学に相当する用語として、日本では「耐震構造」、海外では「Engineering Seismology」という言葉が多く用いられた。

地震工学の進歩は、大地震の被害経験と切り離して考えることはできない。ここでは、主に黎明期の地震工学の発展の過程におけるいくつかの事柄と、大地震との関わりを辿ってみたい。

2．ロバート・マレットと「観察地震学」

西欧における最も有名な地震は1755年の**リスボン大地震**であろう。この地震では、死者6万2千人、大津波、火災も起こり、リスボンの市街は壊滅し、ヨーロッパ中に大きな衝撃を与えた。リスボン地震は西欧で啓蒙思想と科学的思考の発展するきっかけの一つになったと言われる。イヌマエル・カント[3]はこの地震に大変興味を抱き、いくつか論文を書いたが、今から見れば、見当違いの所もある。

リスボン地震から約100年後、1857年**ナポリ大地震（バシリカ地震）**が起こり、死者1万人の大きな被害が生じた。

アイルランドの工学者**ロバート・マレット**（1810～1881）は、この地震被害を2か月に亘って調査し、詳細な報告書を書いた。その題名は

「Great Neapolitan earthquake of 1857
The First Principles of Observational Seismology」

である[4]。この本は、調査と観察に基づく近代地震学及び地震工学の出発点と言えるであろう。

写真１　R. マレット[7]

マレットはダブリンに生まれ、トリニティカレッジを卒業して、父親の鍛造工場を継いだ。工業上の様々な発明で成功を収め、英国科学振興協会に多くの論文を発表した。

彼は地震に非常な興味を抱き、ナポリ地震以前の1846年に論文「地震の動力学について」を発表している[5]。これは、複雑な地震を科学の目で解明しようと試みた最初の取り組みであろう。Seismologyもギリシャ語のseismos (揺れ)からの彼の造語である。

彼は地震波速度の測定が地球の内部構造の研究に結びつくことを見通していた。地震計の設計も行ったが、実現はしなかった。しばらく後に、イタリアのルイジ・パルミエリが同様の地震計を開発し、1855年からヴェスビアスで地震観測を始めている。

また、マレットは古今の膨大な地震資料を収集して地震カタログの作成を行い、これを基づいて1858年に世界の地震地図を出版した（図1）[6]。地震帯が色の濃淡で示されている。この長期に亘る困難な作業には、父と同じトリニティカレッジを卒業した長男の協力があった[7]。

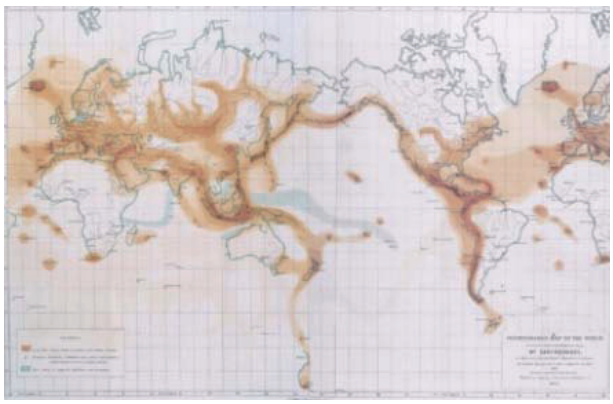


図１　世界地震図（マレット、1858年）

このような背景があってこそ、ナポリ地震の優れた調査報告があると言ってよい。初めて地震被害を見たであろう彼は、報告の中で「調査者が地震で破壊された町に入ると、彼の頭は全くの混乱状態に陥る。」と記した。激しく破壊された78の村々を回り、彼は物体の倒れた方向と、建物の亀裂の方位を調べている[4]。

3．ジョン・ミルンと「地震科学」

幕末の日本は、安政の東海・南海地震（1854年、死者3千人）、江戸地震（1855年、死者4千人）と大地震が相次ぎ、ペリーの黒船来航（1853～54年）もあって、内外共に動乱の時代だった。

1868年明治維新の後、政府は、西欧の学問・技術を導入するため、多くの「お雇い外国人」を招いた。その数は3000 ～ 4000人と言われ、英国人が最も多くて半数近く、また米国、フランス、ドイツ、オランダ等からも招いた。日本の様々な制度や学問・技術の発展に対する若い彼らの貢献は、極めて大きかった。

ジョン・ミルン(1850－1913)は、アイルランドのリバプールに生まれ、工部大学校（後に工科大学）の鉱山学のお雇い外国人教師として、26歳の時ロンドンからイルクーツクを経てモンゴルを横断し、汽車、船、馬車、駱駝などによる半年の大陸旅行の末、1876年の春、東京にやってきた[8]。

写真２　J. ミルン[9]

1880年横浜地震を経験して大きな衝撃を受けたミルンは、世界で最初の地震学会である「日本地震学会」を設立し、精力的に地震の研究を始める。会長には服部一三を立て、自分は副会長として会の実質的な運営を行った。また、工部大学校の同僚のトマス・グレイ（電信工学、5年間在日）と共に地震計の開発に取り組み、同じく地震計開発を行っていた東京大学のジェームス・ユーイング（機械工学・物理学、24歳で赴任、5年間在日）と競い合った。当時、多くの学者が地震に関心を持ち、政府側も地震研究が重要と考えていた。

ミルンは1880年から1892年まで「日本地震学会報告」（第1 ～ 16巻）、1893年から帰国する1895年まで「日本地震学会誌」を英文で刊行した[10]。その大部分は彼個人の熱意と努力によるものである。第1巻の巻頭に載せられたミルンの論文「Earthquake Science in Japan」では、19世紀に大きく進展したマレット以来の西欧地震学の現況や地震・火山研究の課題について巾広く述べると共に、耐震建築の重要性を指摘している。

ミルンは、1884年に6m×2.8mの実験家屋を作り、杭頭と建物の間に鋼球を入れ、建物の内外で地震観測を行い、その効果を検討した[11]。

1891年（明治24年）に**濃尾地震**が起こる。死者は7000人余、住家や土木建築構造物にも大きな被害が出た。ミルンは、同僚のウィリアム・バートン（衛生工学）、写真師の小川一真とともに被害の調査に赴き、写真集「The Great Earthquake of Japan 1891」を出版した[12]。この貴重な写真集は、「東京大学地震研究所図書室特別資料データベース」で一般に公開されている[13]。

ミルンは函館の願乗寺の娘トネと結婚して19年を日本で過した後、1895年にトネを伴って英国へ戻り、ワイト島ニューポートのシャイドを拠点として、世界各地に地震計を配置し、地球規模での地震観測を行った。これは、地球構造研究の原点と言えよう[14]。

英国の地震・工業動力学学会（SECED）では、1987年からマレット－ミルンの記念講義（Mallet-Milne Lecture）を隔年開催で続けている。第1回の講演はインペリアル・カレッジのN. アンブレジー、その題名は「Engineering Seismology」である[15]。

なお、ジョン・ミルンの生涯を辿ったドキュメンタリー「The man who mapped the shaking earth」（2013年）が、日本語字幕付きで、日本地震工学会ホームページ（地震工学資料）に公開されている[16]。

4．大森房吉と「震災予防調査会報告」

濃尾地震の翌年1892年に、震災予防調査会が菊池大麓らにより文部省内に設置され、地震学や耐震構造学の研究が精力的に行われた。委員として物理学の田中館愛橘、長岡半太郎、地震学の関谷清景、土木の古市公威、建築の辰野金吾などが参加した。なお、ミルンが殆ど独力で推進した日本地震学会はこれに伴って解散となる。

震災予防調査会において多大の成果を挙げたのが、早世した関谷の後を継いだ**大森房吉**(1868 ～ 1923)である。濃尾地震の時、大森はミルンの調査に随行している。大森は、地震学の多くの研究と共に、常時微動測定や構造模型の振動台実験など、耐震構造の研究も行った[18]。

写真３　大森房吉[17]

「震災予防調査会報告」[19]は、濃尾地震の後、第1号（1893）から第101号（1927）まで刊行され、関東地震

までの約30年間、わが国の地震学及び耐震構造学を支えたが、大森はその最も精力的な推進者であった。

５．佐野利器と「家屋耐震構造論」

1906年に米国で**サンフランシスコ地震**が起こる。死者3000人、多くの建物被害が生じた。鉄骨の高層建物が大破し、大火災も発生した。

スタンフォード大学はこの地震で大変な被害を受けた。地震の100周年に作られたホームページ「Stanford University and the 1906 Earthquake」は、大学の被災と復興の様子が詳しく出ており、好個の資料である[20]。

佐野利器（1880 ～ 1956）は、東京帝大の建築学科を出て3年目の26才で、震災予防調査会から派遣され、大森房吉、中村達太郎と共にサンフランシスコ地震の調査に赴いた。同年の建築雑誌「加州震災談」に被害の状況を報告し、鉄筋コンクリート造の耐震性を強く主張した[22]。

写真４　佐野利器[21]

その後、佐野は1910年に欧米を視察、1911 ～ 1914年ドイツに留学する。1916年には「家屋耐震構造論」（震災予防調査会報告第83号甲、乙）を著し、佐野震度を提唱して、日本の耐震構造学を牽引する[23]。この報告の中には、サンフランシスコ地震の建物被害例が多数引用されている。

1908年にイタリアで**メッシーナ地震**が起こる。死者は8万2千人、近代ヨーロッパ史上最悪の地震被害だった。脆弱な煉瓦造の建物は地震に耐えられず、メッシーナとレッジョの町は地震と津波で壊滅した。津波は最大12mに達したとされる。大森房吉は、この地震を調査し、震災予防調査会報告の英文版に載せている（1909年）[24]。また、丁度滞欧中であった東北大学の日下部四郎太（地震学）は震災地を視察している[25]。この地震では、当時開発が進んでいたウィーヘルト地震計等により、各地で多数の地震記録が得られた。

地震後に、イタリア政府は9人の技術者と5人の教授からなる委員会を作って調査と検討を命じた。その報告書では、建物は1層の重量の1/12、2層以上の重量の1/8の水平力に耐えるべき、とした。これは世界最初の静的水平震度による耐震設計法の提案であった[26]。

６．末広恭二と「工学地震学」、

1923年（大正12年）**関東大震災**は、死者10万の大災害をもたらした。後藤新平は、帝都復興院の総裁として、区画整理と公園・道路の整備による東京の大復興計画を策定し、今の東京の骨格を作った。佐野利器は、後藤新平の依頼を受けて復興院及び東京市の建築局長として活躍し、市街地建築物法（1919年制定）の中に、1924年初めての法的な耐震規定である震度0.1を定めた。なお、米国では、1927年のUniform Building Codeにおいて、0.075 ～ 0.1の設計震度が定められた。

関東大震災の2年後の1925年に東大地震研究所が設立され、**末広恭二**（1877 ～ 1932、造船学）が初代所長事務取扱になる。物理学の寺田寅彦も地震研究所を兼務する。末広の地震波分解器（図2、1926年）は、地震工学で最も重要な応答スペクトルについての、実地震動による先駆的な実験研究であった[27]。

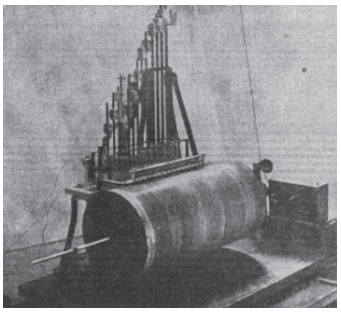


図２　地震波分解器（末広）

写真５　末広恭二[28]

末広は1931年にアメリカの諸大学で講演を行い、関東地震の被害の分析を述べると共に、当時まだ得られていない強震記録の重要性を強く訴え、大きな感銘を与えた。翌1932年に彼は死去するが、彼の講演内容を収めた1932年のASCE論文「Engineering Seismology Notes on American Lectures」の冒頭にある土木学会会長**ジョン・フリーマン**（1855 ～ 1932）の弔辞は末広への敬意に溢れている[29]。

フリーマンは、関東大震災の後に日本を訪れ、末広らとの交流から強震計の必要性を痛感し、その開発を米国で強力に推進した。彼は1932年に著した大著「Earthquake Damage and Earthquake Insurance」で耐震設計と地震保険の必要性を力説し、その年に死去する[31]。

写真６　J.フリーマン[30]

そして、1933年米国のロングビーチ地震ではじめての強震記録が得られた[32]、[33]、[34]。その時得られたVernon記録は、NS 0.13G、EW 0.15Gである。また、7年後の1940年のインペリアルバレー地震で有名なエルセントロ記録（NS 0.32G）が得られている。日本では、終戦後

の1952年から強震計SMACによる強震観測が始まる。

地震工学の基本となる応答スペクトルの概念は、モーリス・ビオー（1905 ～ 1985）により、彼の1932年のカリフォルニア工科大学における博士論文で提示された[35)、36)]。

7．ジョージ・ハウスナーと「地震工学」

1945年に太平洋戦争が終り、日本の戦後復興が始まる。終戦の前後に1944年東南海地震（死者1223人、大津波）と1946年南海地震（死者1330人、大津波）が発生、1948年に福井地震（死者3769人、断層約25km）が起こる。1950年に建築基準法が制定され、静的震度0.2、長期・短期許容応力度による耐震規定が定められた。戦後の日本では地震と共に甚大な水災害も多く発生し、1953年には京都大学に防災研究所が設立された。

一方米国では、強震記録に基づく動的応答の研究が進展する。戦後の地震工学におけるリーダーはカリフォルニア工科大学の**ジョージ・ハウスナー**（1910 ～ 2008）であろう。彼は応答スペクトル、地震動特性、弾塑性地震応答等の広い分野で先駆的な研究を行った[37)]。

写真７　J. ハウスナー[37)]

1956年に**第1回世界地震工学会議**（World Conference on Earthquake Engineering, **WCEE**）が米国バークレイで開催された。地震に関する諸問題を工学の視点から考える地震工学の学問分野が次第に確立されてゆく。

第2回**WCEE**は1960年に東京と京都で開かれた。この時代には、強震記録に基づく弾塑性地震応答解析が、コンピューターの発達により急速に進んだ。1963年に世界地震工学会（**IAEE**）が誕生し、初代会長には日本から**武藤清**（1903 ～ 1989）が選出された。

日本は戦後の経済復興が進み、1963年には建築物の高さ制限（100尺）が撤廃され、1968年に最初の超高層である霞が関ビル（36階）が完成した。

写真８　武藤　清[38)]

また、1968年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震での被害経験を経て建築基準法が改正され、1981年には建物の動力学的特性と弾塑性応答特性を考慮した新耐震基準が施行された。

ハウスナーは、1984年サンフランシスコの第8回WCEEで「地震工学の史的考察」と題する講演を行い、それまでの工学面での地震工学の発展を振り返ると共に、社会・経済など非工学面からの研究の必要性を述べ、新しい特殊大型構造物の耐震、都市生活の地震安全、地震リスクに関する教育の必要性など、今後の地震工学における重要課題の指摘を行っている[26)]。現在の我々に大きな示唆を与える論考である。

WCEEは4年ごとに開催され、論文数は、1956年第1回が40編、1984年第8回が844編、最近の2012年第15回リスボンでは3041編に上り、世界の地震国が挙って地震防災に取り組む時代となっている[39)、40)]。

しかし、様々な面での地震工学の発達にもかかわらず、地震災害の防止・軽減は困難な課題であったし、また今後もあり続けるだろう。20世紀後半から21世紀初めに起こった地震・津波災害の数々－1976年唐山地震、1985年メキシコ地震、1995年阪神・淡路大震災、2004年スマトラ地震津波、そして2011年東日本大震災－を改めて思い起こしたい。

東日本大震災の翌年、2012年に東北大学災害科学国際研究所が設立された。文系から理工系までを総合した実践的な災害科学の推進が目的である。

8．おわりに

地震工学の歴史を振り返る時、地震災害の克服に対する先人の弛まぬ熱意と努力に深い感動を覚える。

情報技術の進歩により、本稿で取り上げた歴史資料の殆どはインターネットで見ることが出来る。地震工学を学ぶ若い人達は、是非実際の原資料に触れて、そこから未知への挑戦の姿勢を学んで欲しいと思う。

参考文献

1) レスリー・ハーバート＝ガスタ、パトリック・ノット（宇佐美龍夫監訳）、「明治日本を支えた英国人 地震学者ミルン伝」、日本放送出版協会、1982年
原著：Leslie Herbert - Gustar and Patrick Nott, “John Milne The Father of Modern Seismology”, Paul Norbury Publications Ltd. Kent, England, 1980
2) Reitherman, R., Earthquakes and engineers, ASCE Press, 2012
3)カント、地震の原因　他五編、田中豊助・原田紀子・大原睦子訳、内田老鶴園
4) Mallet, R., Great Neapolitan earthquake of 1857, The First Principles of Observational Seismology, Chapman and Hall, 1862
5) Mallet, R., On the dynamics of earthquakes, Transactions of the Royal Irish Academy, 1848
6) Mallet, R., Fourth report upon the facts and theory of earthquake phenomena, Report of 28th Meeting of British Association for the Advancement of Science (John Murray,

London), 1-136 (plate XI), 1858
7) Wood, R., Robert Mallet and John Milne – Earthquakes incorporated in Victorian Britain, Earthquake Engineering & Structural Dynamics., 17, 1, Special issue, 1988
8) 柴田明徳、ジョン・ミルン没後100年、日本地震工学会誌　No.18、2013年（平成25）1月号
9) Courtesy of Carisbrooke Castle Museum, Newport, Isle of Wight, England
10) Transactions of the Seismological Society of Japan, 1880-1892, Vol.1-16：Seismological Journal of Japan, 1893-1895
（東京大学OPAC→国内リポジトリ→transactions of the seismological society of japan（検索）で140件が表示）
11) Milne, J., On construction in earthquake countries, Minutes of the Proceedings of the Institute of Civil Engineers, session 1885~86, part 1, paper 2108, London, Volume 83, 1886 :Also in the Transactions of the Seismological Society of Japan, 1887
12) Milne, J., W. K. Burton, Plates by K. Ogawa, The great earthquake of Japan 1891, Lane, Crawford & Company, Yokohama, Japan
13) 東京大学地震研究所図書室特別資料データベース
http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/dl/meta_pub/G0000002erilib
The Great Earthquake of Japan, 1891,
http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/dl/meta_pub/G0000002erilib_L000958
14) Celebrating the life and work of the Seismologist Professor John Milne 1850 – 1913
http://www.isleofwightsociety.org.uk/jmilne.aspx:
15) Ambraseys N., Engineering seismology, Earthquake Engineering & Structural Dynamics., 17, 1, Special issue, 1988 (Mallet-Milne Lecture by the Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics (SECED))
16) 日本地震工学会、ジョン・ミルンドキュメンタリー「The Man Who Mapped the Shaking Earth（日本語字幕版）」
http://www.jaee.gr.jp/jp/stack/archive/john_milne/
17) 福井県郷土歴史博物館　大森房吉先生資料館
http://namaz.ge.fukui-nct.ac.jp/omori/omori.html
18) 大森房吉、構造物振動験測調査報告 前編、震災予防調査会報告第97号（甲）、1921年
19) 震災予防調査会報告、第1号（1893）～第101号（1927）
：東京大学　UTokyo Repository→資料タイプ別／研究科部局別→地震研究所→震災予防調査会報告→巻号一覧（1 ～ 101号）
：国立国会図書館デジタルコレクション→震災予防調査会報告
20) Stanford University and the 1909 Earthquake
http://quake06.stanford.edu/centennial/
21) 佐野博士追想録、昭和32年11月、編集人兼発行人　森井健介（建築会館内）
22) 佐野利器、「米国加州震災談(一)」、建築雑誌238号、1906年、「同（二）」239号1906年、「同（三）」241号1907年
23) 佐野利器、「家屋耐震構造論」、震災予防調査会報告第83号、（甲）1916年、（乙）1917年
24) Omori, F., Preliminary Report on the Messina-Reggio Earthquake of Dec. 28, 1908, Bulletin of the Imperial Earthquake Observation Committee, V3, N2, 1909 (震災予防調査会報告英文版)
25) 津金仙太郎、日下部四郎太－信仰物理学者、1973年、中央書院
26) Housner J., Historical view of earthquake engineering, Proc. 8th WCEE, 1984
27) 末広恭二、「地震波分解器及其記録」、Bulletin of the Earthquake Research Institute, I, 1926
28) Scientific and Technical Papers by Kyoji Suehiro, Compiled and Published by the Suehiro Memorial Committee, Tokyo 1934、昭和9年1月、発行所　末広恭二博士記念事業会（代表今岡純一郎、東京帝国大学工学部船舶工学科教室内）
29) Kyoji Suehiro, “Engineering Seismology Notes on American Lectures”, Proc. ASCE, LVIII, No.4, 1932
30) National Academy of Sciences of the United States of America, Biographical Memoirs, Volume XVII, Eighth Memoir, Biographical Memoir of John Ripley Freeman 1855-1932, by Vannevar Bush, 1935
http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/freeman-john.pdf
31) John R. Freeman, “Earthquake Damage and Earthquake Insurance”, McGraw Hill, 1932
32) H. O. Wood, “Preliminary report on the Long Beach earthquake”, BSSA, April 1933
33) F. P. Ulrich, “The Strong Motion Program of the United States Coast and Geodetic Survey”, BSSA , 1935（冒頭に、Freemanの強震計設置への強い希望についての記述がある。）
34) 斉田時太郎、「ロングビーチ震災による地震工学の収穫」、地震第1輯、6. 6、1934年、318－325
35) M. A. Biot, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, BSSA, Vol.31, No.2, 1941
36) Trifunac. M. et al., Origin of the response spectrum method, 14th WCEE, China, 2008
37) Selected Earthquake Engineering Papers of George W. Housner, Civil Engineering Classics, American Society of Civil Engineers, 1990
38) 武藤 清教授最終講義、耐震構造の発達－超高層ビルへの道－、1963年（昭和38）5月、発行人　武藤清先生還暦祝賀記念会（代表　太田博太郎）
39) Otani, S., The dawn of structural earthquake engineering in Japan, 14th WCEE, 2008
40) Gulkan P. and Reitherman R., The IAEE at fifty: A brief history of the International Association for Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering Center Office, Tokyo, 2012

柴田　明徳（しばた あけのり）

1960年　東京大学工学部建築学科卒
1981年　東北大学教授
1999年　東北大学名誉教授

学会ニュース

日本地震工学会第11回年次大会(2015)開催報告

日本地震工学会大会実行委員会

１．はじめに

第11回を迎えた今年度の年次大会は、2015年11月19、20日の両日に渡り中埜良昭副会長（東京大学生産技術研究所）を大会実行委員長として、紅葉で彩り豊かな同駒場キャンパス内An棟において開催された。今回の大会は、日本地震工学会の学会としての最大の特徴である分野横断的な会員構成を活かし、従来の年次大会とは開催形式を大きく変えて一つのホールを主会場として参加者が一堂に会して情報交換を行う形式で実施した。表１に示すように、大会１日目は、土木・地盤・機械・地震・建築の各分野の代表者5名による基調講演､および､２つの国際セッションから構成した。２日目は、学会会員の多くの方が関係している耐震設計関連セッション、現在進行中の国内最大の分野横断型研究の一つである防災・減災に関するSIPセッション、および、本会会長特別研究委員会のセッションの３つのセッションを実施した。また、一般発表を主会場に隣接するホワイエを活用したポスターセッション形式で構成することで直接意見交換が行える形式とした。参加者は、生憎、天候が悪く、出足が鈍いかと思われたが、2日間を通じて305名（会員185名、非会員34名、学生会員40名、学生非会員46名）であった。また、今回の大会は、初日午後からのInternational Sessionに関連して、多くの海外からの参加者があり、ポスターセッションや交流会を含め英語が飛び交う大会となった。［松岡・古屋］

表１　年次大会2015構成

11月19日（木）	
基調講演 司会： 中埜良昭（東大）	会長挨拶 目黒公郎（東大）
	土木分野 高橋良和（京大）
	地盤分野 安田　進（東電大）
	機械分野 藤田　聡（東電大）
	地震分野 堀　宗朗（東大）
	建築分野 福和伸夫（名大）
ポスターセッション(1)	
横断セッション(A) 免震・制振 コーディネータ： 岡崎太一郎（北大）	James Ricles（Lehigh Univ.） 西谷章（早大） Ian Buckle（Univ. of Nevada） 源栄正人（東北大）
ポスターセッション(2)	
横断セッション(B) 国際研究発表会 司会： 党紀（埼玉大）	Hari Ram PARAJULI （Kyoto Univ.） Anatoly PETUKHIN （Geo-Research Institute） Bhuddarak CHARATPANGOON （Kyoto Univ.） Sunggook CHO （Innose Tech Co. Ltd.） Shigeru IHARA （首都高速道路株式会社） Erick MAS（Tohoku Univ.）
交流会	
11月20日（金）	
横断セッション(C) 各分野の耐震設計 コーディネータ： 五十田博（京大）	建築分野 福山　洋（建研） 土木分野 長尾　毅（神戸大） 機械分野 尾西重信（中電） 地盤分野 新井　洋（国総研） 地震分野 加藤研一（小堀研）
ポスターセッション(3)	
横断セッション(D) SIPセッション コーディネータ： 藤原広行 （防災科研）	中島正愛（京大） 青井　真（防災科研） 藤原広行（防災科研） 熊谷　博（NICT） 金田義行（名大） 臼田裕一郎（防災科研）
横断セッション(E) 会長特別研究委員会 コーディネータ： 久田嘉章 （工学院大）	久田嘉章（工学院大） 加藤孝明（東大） 大原美保（土研） 猪股　渉（東京ガス） 藤田　聡（東電大）

２．基調講演・横断セッション

(1) 基調講演

基調講演は、１日目午前中を使用して、目黒公郎会長（東京大学生産技術研究所）による学会のあるべき姿を含めた挨拶から開始し、その後、学会を構成する主な５つの研究分野の代表者から各分野での研究の流れ、現状のトピックス、および、今後の課題や提案について熱のこもった講演がなされた。いずれの講演も各研究分野の現状とともにいくつかの課題が明確に示されることで異なる研究分野の参加者にも大変有意義な情報が得られる機会になった。また、より積極的な横断的研究の実施の必要性についても強く認識できる講演であった。［古屋］

写真１　目黒会長の挨拶

(2) 横断セッション(C)「各分野の耐震設計」

本特別セッションは2日目の午前9時～10時50分の予定で100名ほどの参加をいただき開催された。日本地震工学会が分野横断的な特徴を有する学会であることを、ここで改めて説明するまでもないが、本特別セッションではその特徴を活かし企画されたものである。内容は各分野の耐震設計における地震動、構造物側の限界値、さらに地震動と限界値の組み合わせなどをそれぞれ報告いただき、比較するとともに、今後予想される地震動の大きさや設計の方向性について議論するというものである。建築、土木、機械系でそれぞれ違う地震動や限界値で設計されており、今後それらの考え方の統一に向けた整理や想定外の外力に対する備えについて共通認識の構築に向けた第一歩として、極めて意義深い会となった。［五十田］

写真２　横断セッション(C)の様子

(3) 横断セッション(D)「SIPセッション」

日本地震工学会が進めようとしている分野間連携の強化に資する議論を行うことを目的として、様々な分野の連携により研究が進められている国のプロジェクトの一例としてSIPでの研究の取り組みが紹介された。SIPとは、総合科学技術・イノベーション会議の指導の下で進められている戦略的イノベーション創造プログラムの略称であり、その課題の１つである、「レジリエントな防災・減災機能の強化」において実施中の研究の中で、特にリアルタイムでの地震時の災害状況の把握、情報の共有化・利活用に関するシステム開発の状況が報告された。分野間での連携について、その重要性や克服すべき課題などに関してパネル形式での議論が行われた。［藤原］

写真３　横断セッション(D)の様子

(4) 横断セッション(E)「巨大都市で想定される様々な災害（オールハザード）の現状と対策を考える」

本セッションは、会長特別研究委員会「首都圏における地震・水害等による複合災害への対応に関する委員会」の主催により、現代の巨大都市で対応が必要な震災や火災、津波・水害、大群集によるパニックなど様々な複合災害（オールハザード）の現状と課題を理解し、今後の方向性を検討するために企画された。建築・都市・土木・機械の各分野における最先端の研究成果や、事業者による実践的なＢＣＰなどの対策事例が報告され、活発な質疑が行われた。その結果、最大級地震等による過酷災害だけでなく、可能性の高い中小災害など様々な被災レベルを考慮し、施設・地域内への待機から広域避難まで柔軟な対応を可能とする事前の行動計画や対応ルールを準備しておく必要性等を確認した。［久田］

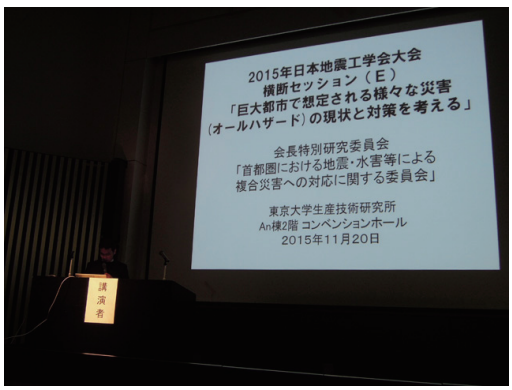


写真４　横断セッション(E)の様子

３．インターナショナルセッション

(1) 横断セッション(A)「免震・制震」

Seismic Protective Systems（広義の免・制震システム）を主題にした横断セッション(A)には、米国の研究者20名を含めて、100名以上の参加をいただいた。2011年東日本大震災の教訓や、免・制震構造と地震早期警報システムに関する最新の研究事例を紹介いただいたあと、会場全体で討論を実施した。免・制震構造をより高度化・実践化するために必要な技術開発は何か、という問いかけに対して、地震早期警報システムの積極的な活用と、電子制御に極力頼らないアクティブ制振が挙げられた。米国側からは、設計規準も設計現場も免・制震技術に対応できておらず、なかなか研究成果が設計に反映されない現状が指摘された。［岡崎］

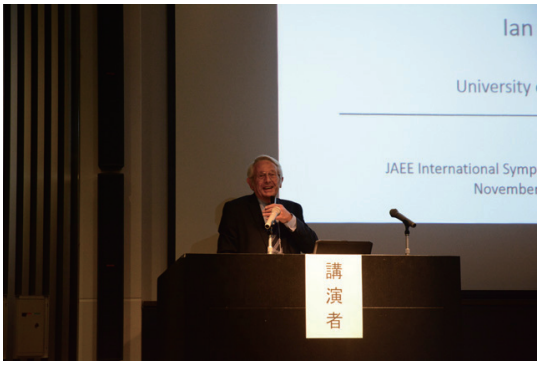


写真５　Ian Buckle氏の講演

(2) 横断セッション(B)「国際研究発表会」

日本の最先端の研究を世界に発信すること、国内外の学生、研究者、実務者に英語での発表・討論の機会を提供することを目的に、2012年より国際シンポジウムを大会と同時開催している。2015年度は大会の横断セッションの一つとして開催された（担当理事：澤田純男）。11月19日午後3時よりポスターセッションを行い、幅広い分野から13件の発表があった。続くオーラルセッションでは口頭発表に選ばれた6名のうち5名の発表があり、党紀博士（埼玉大学）の司会のもと、活発な質疑が行われた。［小檜山］

写真６　国際研究発表会の様子

４．ポスターセッション

本年度の大会では新たな試みとして、例会のパラレルセッションによる口頭発表を基本とした発表形式から、ホール会場で一堂に会するポスターセッション形式に変更して、研究分野間のより積極的な意見交流の場を企画した。投稿された約160編の論文発表（表２）を4つのセッションに分けて、各セッション40編ほどのポスターが並び、研究分野を越えた交流だけでなく、社会人・学生の垣根を越えた交流、また海外からの参加された研究者との意見交換も活発に行われ、様々な意味で横断的な学会発表の場が形成された。［千葉］

写真７　ポスターセッションの様子

５．交流会

1日目のセッション終了後の18時過ぎから同学キャンパス内An棟の1階にあるイタリア料理「カポ・ペリカーノ」にて交流会が行われた。国際セッション22名を含む50余名が参加した。始めに目黒会長から開会の言葉があり、中埜良昭副会長による乾杯を経て、歓談となった。盛り上がったところで国際セッション参加者に対する表彰式が開かれた。各受賞者に目黒公郎会長から表彰状が手渡された（優秀発表者の一覧：表３）。また、Buckle先生ならびに当麻純一元副会長からも貴重なメッセージを頂いた。最後に、次回高知での開催について甲斐芳郎理事から案内があり、閉会となった。約半数の参加者が海外からという状況になり、急遽、司会の小檜山理事を含め英語で進行することとなったが大変活気ある盛況な交流会となった。［松岡］

写真８　交流会の様子

6．技術フェア

本大会の技術フェアは、勝島製作所、白山工業、配水用ポリエチレンシステム協会、アーク情報システム、不動テトラ、昭和電線デバイステクノロジー、近計システム、ミツトヨ、サンエス、大林組の10社のご協力により開催された。学会の特徴同様に多岐にわたる出展内容となり参加者には大変興味深い展示内容になった。また、今年度は、ポスターセッションと同じ場所に設置することで多くの意見交換ができ大変有意義であったと出展側からの感想をいただいた。［古屋］

写真９　技術フェアの様子

7．おわりに

本大会は、従来の大会形式を大きく変更し、一堂に会して意見交換を行う開催形式とした。結果として、図1に示すように参加者数と論文数は前回と比較してやや減少したものの、普段あまり得る機会のない他分野の研究状況や課題などの新たな知見が得られたことや分野横断的研究の重要性が明確になるなど大変好評であった。また、ホールと隣接ホワイエによりオーラルセッションとポスターセッションを行うことで非常にコンパクトかつ密度の高いセッション構成が可能となった。今後も隔年、もしくは、4年に一度など定期的に今年度の開催形式で大会を実施することで学会の重要性が高まると考えられる。

最後に、大会参加者と技術フェア出展企業に深く感謝申し上げる。次回は、2016年9月26日、27日で高知にて開催予定である。［古屋・松岡］

【第11回年次大会実行委員会】

中埜良昭（実行委員長、東大生研）、澤田純男（副委員長、京大防災研）、甲斐芳郎（副委員長、高知工科大）、古屋治（幹事、都市大）、五十田博（京大）、岡崎太一郎（国際、北大）、藤原広行（防災科研）、久田嘉章（工学院大）、宮本慎宏（工学院大）、原忠（高知大）、池田雄一（高知高専）、小檜山雅之（国際、慶大）、千葉一樹（論文編集、東急建設）、中川貴文（交流会、国総研）、中村いずみ（WEB、防災科研）、松岡太一（総務、明大）、皆川佳祐（論文編集、埼玉工大）

表２　各分野の発表者数

分野		件数	
自然現象	震源特性	6	31
	地盤震動	18	
	地盤の液状化・斜面崩壊	1	
	津波・歴史地震	6	
構造物	免震・制振・ヘルスモニタリング	13	59
	地中構造物およびダム	3	
	杭および基礎構造	1	
	建築構造物	34	
	地盤と構造物の相互作用	3	
	土木構造物	2	
	機械設備系	1	
	耐震補強	2	
社会問題	ライフライン	3	30
	緊急速報・災害情報	4	
	防災計画・リスクマネジメントおよび社会・経済問題	15	
	その他	8	
被害	東日本大震災調査	2	3
	最近の地震被害調査	1	
国際	免震・制振	16	31
	国際研究発表会	15	

表３　優秀発表者の表彰結果

番号	氏名 (所属)	題目
P1-23	天藤潤一 (東京理科大学)	2011 年東北地方太平洋沖地震時の濃尾平野における観測記録の再現解析と地盤増幅特性の評価
P1-28	Tat FU (University of New Hampshire)	Structural Control Using a Double Skin Facade Damper System
P1-29	Georgios TSAMPRAS (Lehigh University)	Deformable Connection for Earthquake-Resistant Building Systems
P2-4	浅井竜也 (東京大学)	建築物に作用する津波漂流物衝突時の衝撃外力
P2-35	Ashish SHRESTHA (Saitama University)	Feasibility of Smart Devices in Structural Vibration Measurement
P3-8	山本航輔 (千葉大学)	杭基礎が被災した集合住宅における上部構造から杭に作用する地震力の考察
P3-27	中原悠智 (慶應義塾大学)	震源断層位置の不確定性を考慮した断層近傍の木造建物の地震リスク
P4-1	小島紘太郎 (京都大学)	地盤との動的相互作用を考慮した弾塑性構造物の断層近傍地震動に対する極限応答の閉形表現
P4-11	原　昌弘 (筑波大学)	東北地方太平洋沖地震で被災した下水道管路網・敷設下の工学的基盤相当に作用した地震波に関する一考察

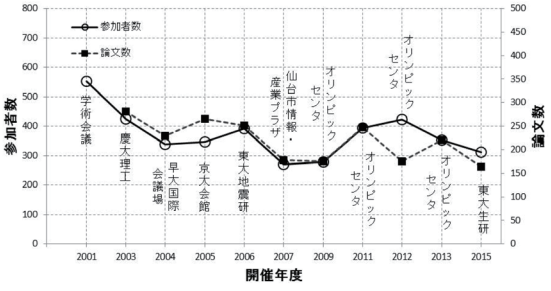


図１　大会の参加者数と論文数の推移

セミナー「実務で使う地盤の地震応答解析」開催報告

中村友紀子
●千葉大学大学院工学研究科 准教授

1．はじめに

事業企画委員会では、2015年11月27日10:00~18:00東京大学地震研究所第一会議室においてセミナー「実務で使う地盤の地震応答解析」を開催した。

東北学院大学の吉田望先生に講師をお願いする本セミナーは、過去に地震工学会で2008年、2009年の2回開催されて大変好評であったものの、その後は開催されておらず6年ぶりの開催となった。今回の講習会は、前回から期間が空いたこともあってか、申し込み締め切りより前に定員120名一杯の申し込みがあり、以降、参加希望の方にはお断りせざるを得ないほどの盛況ぶりであった。

本報告はこのセミナーの概要について紹介する。

2．講演内容

セミナーは、司会の片岡事業企画副委員長の挨拶、講師紹介が行われたのち、以下に示すプログラムに沿って行われた。

(1)　地震応答解析の基本条件と影響要因
・波動伝播経路、・地震動増幅のメカニズム
・地震動の減衰と上限、・地震応答解析の流れ
(2)　地震応答解析に必要な地盤調査と土質試験
・力学特性と計測方法、・室内試験とその整理
・地震応答解析に用いる力学特性の求め方
・力学特性の設定、・複素剛性
(3)　空間のモデル化
(4)　地震応答解析手法
・波動方程式と運動方程式、・逐次積分法
・変数分離法、・等価線形法の短所とその改良
(5)　減衰の設定
・減衰の種類、・Rayleigh減衰、・散乱の減衰
(6)　計算例
・地震応答解析の精度
・定数設定の誤差が応答に与える影響
・解析例（小ひずみ、中ひずみ、大ひずみ）
・難しい問題、・数値計算事例から見た各種要因
（Rayleigh減衰のもう一つの効果、等価線形化法と非線形法、等価線形解析の適用性、基盤が深いときの減衰、減衰が大きいと応答は小さくなるか）
(7)　総まとめ

写真１　講師の吉田望先生(東北学院大学)

写真２　満席の会場

写真３　司会進行の片岡氏による感想とお礼

3．おわりに

内容はタイトル通り初歩から多岐にわたって説明をして頂き、参加者にとっては有意義な一日となったと思う。一方、参加者は、本学会員より非会員の方が多く、初の試みとして土木学会・建築技術教育普及センター・建設コンサルタンツ協会によるCPD認定プログラムとしたが、申請は6名と非常に少なかったのは意外であった。また、比較的若い方の参加が目立っていた。

300枚を超えるスライドの資料を用意され、長時間の講演をお引き受け頂いた講師の吉田望先生にはこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

本学会に関する詳細はWeb上で

日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員（正会員、学生会員、法人会員）を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。
日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧下さい。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご活用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員ページ」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ　http://www.jaee.gr.jp/
会員ページ　http://www.jaee.gr.jp/members.html

会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容（原則として年3回の発行であるため）」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認頂けます。

日本地震工学会ホームページ　投稿・応募ページ　http://www.jaee.gr.jp/contribution.html

登録メールアドレスご確認のお願い

当学会では、会員の皆様のお役に立つ会員限定のニュースやセミナー情報をメールにて配信させていただいておりますが、メールが届かず戻ってきてしまうケースが散見されます。メールアドレスを変更された方、あるいは、このところ弊学会から1通もメールが届いていないという会員の方は、以下の方法で会員登録情報をご変更いただくか、事務局までご連絡いただきますようお願い申し上げます。

【会員登録情報のご変更方法】

日本地震工学会のWEBサイト（http://www.jaee.gr.jp/jp/）の「会員ログイン」より、
会員番号とパスワードを入力してログインし、「登録情報の変更」を選択して登録情報をご変更ください。尚、会員番号またはパスワードがご不明な方は事務局までお問い合わせください。

問い合わせ先

不明な点は、氏名・連絡先を明記の上、下記までお問い合わせ下さい。

日本地震工学会　事務局　〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館
TEL : 03-5730-2831　FAX : 03-5730-2830　電子メールアドレス: office@general.jaee.gr.jp

編集後記：

2016年最初の日本地震工学会会誌が無事発刊できることとなりました。本誌に原稿をご寄稿頂いた著者の方々、および関係各位に心よりお礼申し上げます。

本誌では、特集記事として「東北地方太平洋沖地震5周年」を企画しました。企画の意図は巻頭言に書かれている通りで、特集記事の情報が会員皆様のお役に立つことを願っております。また、新連載「温故知新 ～未来への回顧録～」では連載のトップバッターとして柴田先生から地震工学の進歩を辿った分かり易い記事をご寄稿いただきました。この記事を読んで私自身も、地震工学自体がまだまだ新しい学問であって、今現在も発展している最中であることを強く感じました。

これまで、一読者として本誌を読んでいた時と違って、編集側として本誌に携わりますと、タイトル一つとっても色々議論されていることや、原稿を隅々まで確認していることなどを知りましたし、また、第一線で活躍される研究者や先生方とじかにやり取りさせていただいて勉強にもなりました。本号をもって、会誌編集委員の半数は新委員へとバトンタッチいたしますが、会誌編集にご興味持たれた方は、是非、お近くにいる（近くにいないかもしれませんが）会誌編集委員にお声かけください。もしかしたら、次の委員候補を探しているかもしれません。

最後に一点、心残りがございまして、著者から頂く原稿は主にカラー図面となっております。会誌上では白黒印刷となるため、すべての情報を表現しきれず、もったいなく感じております。日本地震工学会会誌では冊子版とWeb版を用意しており、Web版では図面の多くはカラー図面で提供されていますので、よりクリアな図面を見たいという方は是非とも学会Webサイトの方にもお立ち寄りください。

なお次号では、特集「東北地方太平洋沖地震5周年（その2）」を企画しております。本号では記事にされなかった防災教育や観測システムなどについても記事執筆を依頼予定です。どうぞご期待ください。

井上　修作（竹中工務店）

会誌編集委員会

委員長	高橋　郁夫	防災科学技術研究所	委　員	桜井　朋樹	ＩＨＩ
副委員長	小檜山雅之	慶應義塾大学	委　員	佐藤　　健	東北大学
幹　事	井上　修作	竹中工務店	委　員	佐藤　大樹	東京工業大学
幹　事	岩城　麻子	防災科学技術研究所	委　員	関口　　徹	千葉大学
幹　事	西田　明美	日本原子力研究開発機構	委　員	田中　浩平	鉄道総合技術研究所
			委　員	平井　　敬	名古屋大学
			委　員	丸山　喜久	千葉大学
			委　員	山口　　亮	損害保険料率算出機構

日本地震工学会誌　第27号　Bulletin of JAEE　No.27

2016年2月29日発行（年３回発行）
編集・発行　公益社団法人 日本地震工学会
〒108－0014　東京都港区芝５－２６－２０　建築会館
TEL　03－5730－2831　FAX　03－5730－2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2016
本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。
Printed in Japan