

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.30

Feb.2017

緊急報告：17WCEEの開催地が仙台市に決定

特集：ここまで来た数値シミュレーション



<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30号 2017年2月)

Bulletin of JAEE (No.30 February.2017)

INDEX

緊急報告：

16WCEEの総会で17WCEEの開催地が仙台市に決定／目黒 公郎 1

特集：ここまで来た数値シミュレーション

特集「ここまで来た数値シミュレーション」について／高橋 郁夫 4
統合地震シミュレーションの現状と将来／堀 宗朗 5
沈み込み帯巨大地震発生シナリオの数値シミュレーション／堀 高峰 9
津波災害研究における数値シミュレーション／越村 俊一 13
免震構造の極限挙動シミュレーション／菊地 優 17
3次元地震応答シミュレーション技術を活用した
原子力施設の地震リスク評価手法の高度化への取り組み／西田 明美 21
複合災害避難シミュレーションによる大都市避難の問題点
一火災避難と帰宅困難現象を事例として一／廣井 悠 25

シリーズ：温故知新 ～未来への回顧録～

地震防災工学から気の向くままに歩んで防災に至る／北浦 勝 29

学会ニュース：

東日本大震災合同調査報告総集編 刊行記念シンポジウム開催報告／本田 利器 33
5th IASPEI / IAEE International Symposium:
Effects of Surface Geology on Seismic Motionへの出展および参加、次回日本開催の報告／
津野 靖士、松島 信一、東 貞成 35
第16回世界地震工学会議(16WCEE)報告／鹿嶋 俊英 37

追悼文：

Vitelmo V. Bertero先生のご逝去を悼む(1923年5月9日～2016年10月24日)／和田 章 39

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／お知らせ／問い合わせ 41

編集後記

16WCEEの総会で17WCEEの開催地が仙台市に決定

目黒 公郎

●日本地震工学会 (JAEE) 会長 17WCEE日本招致委員会委員長

この度、南米チリのサンチャゴ市で開催された第16回世界地震工学会(16WCEE、写真1)の総会(2017年1月12日午後)にて、次回、第17回世界地震工学会(17WCEE)の開催地を決めるプレゼンテーションと投票がありました。総会はWCEEの主催母体であるIAEE(国際地震工学会)加盟国の代表者をメンバーとするIAEE最高決議機関です。17WCEEの開催国として立候補した国は、当初は8か国(インド、インドネシア、イラン、日本、メキシコ、ニュージーランド、トルコ、米国)でしたが、ビッドペーパーの提出前に、イラン、トルコ、米国が辞退し、さらに直前になってインドも辞退したので、最終的な立候補国は4か国(インドネシア、日本、メキシコ、ニュージーランド)になりました。

総会において各候補国は、インドネシアはバリ、日本は仙台、メキシコはカンクン、ニュージーランドはオークランドをそれぞれ会場とした17WCEEの企画を発表しました。全てのプレゼンテーションの後に投票が行われ、日本は投票の一巡目に、総会参加メンバー国(40か国)の過半数(21票、他はニュージーランド10票、インドネシア5票、メキシコ4票)の票を得て、次回の開催地に選ばれました。次回の開催地が、投票の一巡目で決定されることは大変珍しく、日本の提案が高く評価されたことを大変うれしく思います。

日本は前回に引き続いての立候補でした。前は惜し

くも採択されませんでした。その際の教訓を踏まえ、開催候補地を横浜市から仙台市に変更した上で、様々な事前の対策を練り、活動を行いました。今回、仙台市を選定した理由は、東日本大震災の被災地であること、同市の「防災・環境都市」としての様々な活動と第3回国連世界防災会議をはじめとする大規模会議の開催実績、利用可能な会議場の規模と価格、同市と会場へのアクセスビリティの良さ、宿泊施設の数と価格帯、周辺地域を含む観光資源の豊富さなどです。

今回、実施した主な事前の対策と活動を列挙すると、招致活動のための予算の確保(MICE*誘致アンバサダー**への申請と採択、仙台市からの招致助成金の獲得等)、オールジャパンの連携体制の整備(関連他学会の連携、総理大臣から学術・災害・観光関連省庁の全大臣、開催自治体首長などからの支援の取り付け)とその見える化、2020年9月に仙台市で開催することの有効性と合理性のロジックづくりなどです。

我が国では、開催決定後の会議運営支援プログラムに比べて、会議の招致活動を支援するプログラムが非常に少ないので、今回のWCEE招致のロビー活動を行う上では、MICE誘致アンバサダーに採択されたことや仙台市から招致助成金を得たことの意味はとて大きかったといえます。またビッドペーパー(写真2)を用意する上



写真1 16WCEEの開会式の様子



*MICE：企業等の会議(Meeting)、企業等の行う報奨・研修旅行(インセンティブ旅行)(Incentive Travel)、国際機関・団体、学会等が行う国際会議(Convention)、展示会・見本市、イベント(Exhibition/Event)の頭文字。

**MICE誘致アンバサダー：日本政府観光局が認定し、国際会議をはじめMICEを日本に誘致・開催するため、日本の顔として海外へのPRや国内への普及活動をする有識者。



写真2 日本が用意したBid Paper (その一部)

で、内閣官房からの強力な支援を頂いて、総理大臣からの招待レターを頂戴できたこと、地元仙台市と企画の早い段階から内容の検討と活動を一緒に展開できたことも重要でした。これらの環境を得ることで初めて、総会の前日に在チリ日本大使の公邸を使わせていただき、各国代表を招待したJapan Nightパーティ(写真3)を実施し、WCEE招致に向けた我が国の決意や準備状況、さらに開催地の日本や仙台市の魅力を十分伝えることができました。

さらにスポンサー展示スペースの最も目立つ特等席に、日本関連の3つのブースを連続して確保し、16WCEEの開催期間中ずっと17WCEEの招致活動を会議参加者の皆さんに伝えることができたことも、全体の雰囲気づくりの上でとても効果的であったと思われます(写真4)。会議の後半には、投票前にもかかわらず、16WCEEの多くの参加者が次回2020年の17WCEEは日本の仙台市で開催されることが当然のような雰囲気になっていました。

繰り返しになりますが、今回、上記のような様々な活

動を展開する上では、前回の招致活動の経験がとても役に立ちました。前回の招致委員会の皆さま、特にその中心として活動を進められた川島一彦先生と笠井和彦先生に敬意を表するとともに、様々なご心配とご助言をいただきましたことに、心からお礼申し上げます。

今回の招致の成功は日本チーム全体の努力と協力の賜物です。JAEE会員と事務局の皆さま、17WCEE日本招致委員会、日本政府観光局(JNTO)、仙台市、仙台観光国際協会、日本コンベンションサービスの皆様に深く感謝いたします。ビッドペーパー準備のために、何度も深夜までお付き合いいただいた皆さま、忙しい日程調整の中、国内外からSKYPEで議論に参加いただいた方々、2泊6日の弾丸出張でサンチアゴに駆けつけ、Japan Nightで仙台の魅力を熱く語ってくださった伊藤敬幹仙台副市長をはじめとする仙台市の皆さん、大使公邸の利用を許可していただいた二階尚人在チリ日本全権大使と準備にご協力いただいた多くの関係者の皆さま、本当にどうもありがとうございました。そして何よりも、一連の招致活



写真3 総会前日に在チリ日本大使公邸で開催されたJapan Nightパーティの様子

動をずっと一緒に進めてきた中塾良昭先生(JAEE副会長、17WCEE日本招致委員会副委員長)に深く感謝する次第です。今回の招致活動では、厳しい時間的な制約の中で目黒・中塾で基本方針を決め、他の委員の皆さんのご意見を伺いながら活動を進めてきましたが、活動の全体像が見えにくかった方々の中には、二人が独断専行しているように感じた人もおられるかもしれません。配慮が行き届かなかった点に関しては、深くお詫び申し上げます。一方で、様々な制約の中で、今回の招致活動が何とか成功裏に実施できた最大のポイントは、同じ大学、同じ研究所に2人がいて、これまでの信頼関係に基づいて、様々なことがらを即断して対応に当たることができたからです。17WCEEの招致は、私の会長就任時の約束の一つ

でもあったので、これを達成できたことで少しホッとしました。

チリでの16WCEEの閉会式にて、WCEEのシンボルである木製の彫像をチリ地震工学会会長より私が受け(写真5)、これを日本まで持ち帰りましたJAEEの事務所に飾ってありますので、今度、ぜひご覧いただきたく思います。

ところで、言うまでもないことですが、招致が決定したとはいえ、17WCEEの本番はこれからです。また16WCEEの開催時期が遅かったので、次回までの時間は3年8か月弱しかありません。今後は、2020年9月中旬の開催時期から逆算して、様々な活動を展開していくことになりますが、これまでと変わらぬご支援とご協力をよろしくお願いいたします。



写真4 JAEEによる17WCEE招致のブースの様子



写真5 チリの地震工学会会長Patricio Bonelli Canabes氏よりJAEE会長の著者がWCEEのシンボルを受け取っている様子

特集「ここまで来た数値シミュレーション」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

近年の地震工学におけるシミュレーション技術の発展には目を見張るものがあります。地震動や津波、構造物の応答、災害対応に関係する人や車などの移動、火災の延焼など、多くの分野において数値シミュレーションは高度化・高精度化し、従来に比べて、より詳細な視点での考察、より広域的な領域を対象とした考察が可能になってきています。その背景にあるのは、何と云っても(スーパー)コンピュータの発展であると思います。図1¹⁾には、近年のコンピュータのCPUとストレージの変化を示しましたが、これを見ると如何にコンピュータが飛躍的な進化を遂げてきたかを知ることができます。この進化によって、従来は不可能と思われた大規模かつ高精度なシミュレーションが実現可能になり、さらにこのことが様々な解析手法の開発の可能性の後押しをしていると考えられます。かつては、演算を可能にするために記憶領域を極力少なくするための複雑なプログラミングに四苦八苦した時代がありました。時代は変わり、現在はコンピュータの並列計算を如何に効率的に行うかがプログラミングの重要な視点の一つになっていると思います。

また、最近では地震観測データ、モニタリングシステムによる実挙動のデータ、実験データ、災害対応記録などが多く蓄積されるようになり、数値シミュレーション結果の検証ができるようになったことも数値シミュレーション技術の発展の大きな要因になっているのではないかと考えられます。

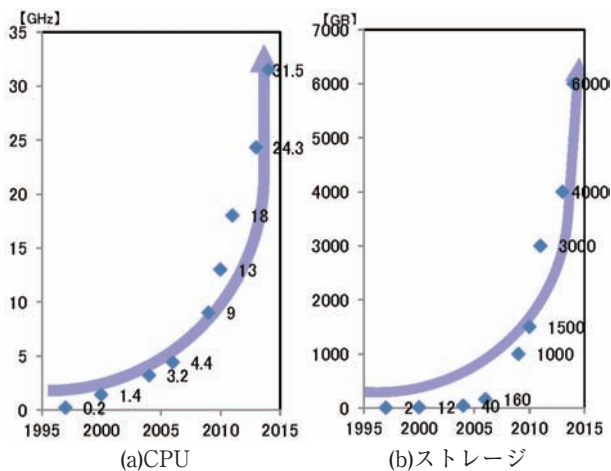


図1 コンピュータのCPUとストレージの飛躍的な進化¹⁾に加筆

本誌では、地震工学の様々な分野で活躍されている専門家に、その分野の先進的な数値シミュレーションの取組みを紹介して頂きました。

2. 様々な分野で研究が進む数値シミュレーション

特集では、まず、多岐多様な数値解析手法を連成させて都市全体を対象とした統合地震シミュレーションについて堀宗朗氏に、地震発生のモデルとそれに基づいたシミュレーションにより地震発生シナリオを検討するためのアプローチについて堀高峰氏に、それぞれの現状と今後の展望を紹介して頂きました。また、津波災害の予測シミュレーションと防災対策における活用上の展望に関して越村氏に解説して頂きました。構造の分野では、積層ゴムや免震建物全体の極限挙動を予測する解析手法とその数値シミュレーション事例について菊地氏に、原子力施設の地震応答シミュレーションのための3次元仮想振動台システムと、その技術を活用した評価手法の高度化への取組みについて西田氏に紹介して頂きました。さらに、廣井氏には、大都市を対象とした複合災害からの避難行動を扱った数値シミュレーションによって、大都市における避難の困難性を可視化して示して頂きました。

3. おわりに

本誌で紹介したいずれの特集記事においても、現在のコンピュータの能力を駆使した先進的な数値シミュレーションがわかりやすく解説されており、読者にとっては自身の専門でない分野における取組みについても知ることができ、非常に有益な内容となっていると思います。本誌の内容が地震工学に携わる多くの方々の今後の活動の参考になり、また、今後、数値シミュレーションがより多くの場面で活用されて防災対策が進むことを願っています。

参考文献

1)総務省：通信自由化以降の通信政策の評価とICT社会の未来像等に関する調査研究、2015年3月
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h27_01_houkoku.pdf (2017.01.27閲覧)



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年同大修了後、清水建設(株)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)。

統合地震シミュレーションの現状と将来

堀 宗朗

●東京大学地震研究所 教授

1. はじめに

地震工学には、経験工学の側面と、先端技術の側面があると考えている。地震の観測データが少ない20世紀にも、原子力発電所や大規模橋梁の超重要構造物の耐震性設計が行われてきた。こと数値解析に絞って考えても、往時の計算機を使って耐震設計ができたことは驚愕とも評すべきことである。

20世紀後半から地震工学は構造物の耐震から都市の地震防災も対象とするようになった。さらに、近年では、地震被害からのより迅速な都市の復旧（レジリエンス）も対象となっている。各所で発生する多様な被害を防ぎ、被災した場合には迅速復旧を図る、という網羅的な地震被害対応が求められている。

都市の地震防災の高度化には、高速化・大規模化が進む計算機と整備された都市デジタル情報の利用が必要である。この二つは「都市の丸ごと地震シミュレーション」を実現する。計算機や都市情報の限界で余儀なくされた簡略な数値解析を超え、信頼度の高い地震シミュレーションを行うのである。

「都市の丸ごと地震シミュレーション」の具体像とである統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES¹⁾) に関し、本稿は現状と将来を概説する (図1参照)。IESの研究開発には多くの方々のご尽力をいただいていた。冒頭であるが、何よりもまず、厚く御礼を申し上げたい。

2. IES

IESは、地盤の地震動、構造物の地震応答、社会の被害対応に関する多岐多様な数値解析手法を連成させて、地震の災害・被害・対応過程を計算する。シミュレーションには、第三者が開発した数値解析手法を使う。より多くの数値解析手法をIESのシステムに実装することで、より網羅的な都市の地震シミュレーションが実現する。

数値解析手法のシステム実装は単純である。各数値解析手法が必要とする入力データを提供し、出力データを取り込む、という二つの作業である。勿論、都市全体の地盤・構造物に対して、数値解析手法に提供する入力データを構築することは容易ではない。テラバイトを超える出力データを取り込むことも容易ではな

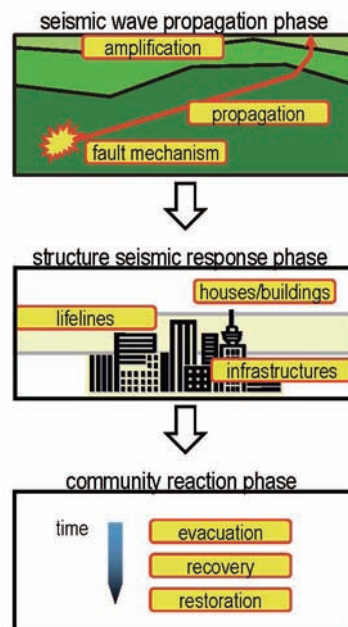
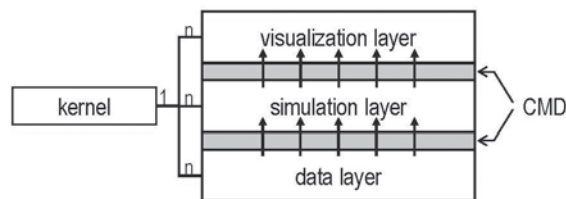


図1 IESの概要：地震動、構造物応答、災害対応の一連過程をシミュレーション

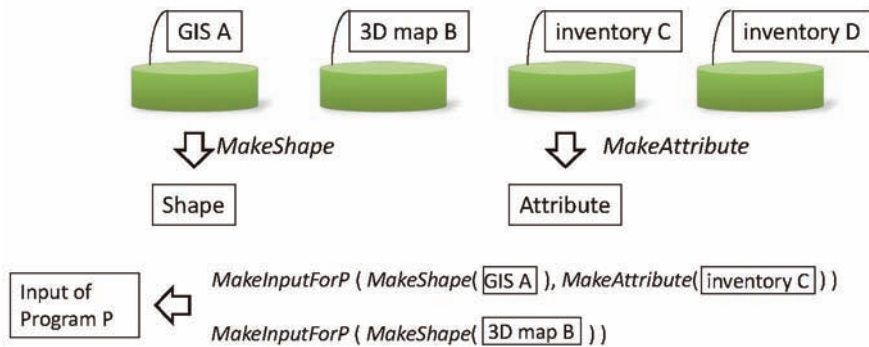
い。しかし実装は単純である。

IESのプログラムでは、データレイヤ・解析レイヤ・可視化レイヤの3層から構成されるレイヤ構造を採用している (図2参照)。数値解析手法は解析レイヤの要素とし、データ・可視化レイヤと入力・出力データのやり取りを行う。レイヤの間のやり取りには専用のデータを開発している。多様な事項に対応できる汎用性と、多様な書式に変換できる柔軟性を備えたデータ (CMD, Common Modeling Data) である。



kernel handles IES component(s) in each layer using CMD

図2 IESのプログラム構造。データ、計算、可視化レイヤから構成され、レイヤ間のやり取りには専用のデータであるCMDが利用される。



GIS A、3D map B、データ C、データ Dが都市デジタル情報のリソースとして利用可能。構造物の形状モデルはMakeShapeを、構造物の特性はMakeAttributeを使って構築。数値解析毎にMakeShapeとMakeAttributeのコードが作成されるが、使用の際には共通の関数を利用。

図3 複数リソースを利用するAMCの概念図

都市を対象とするため、IESは高性能計算 (High Performance Computing, HPC) の利用が大前提となる。HPCとは、大型並列計算機のハードウェアとソフトウェアを利用した大規模・高速の計算である。HPCを利用することで、1兆自由度を超える地盤解析モデルの非線形地震動解析を半日で完了する。

3. 有限要素法とモデル自動構築手法

IESを支える基幹技術は有限要素法 (Finite Element Method, FEM) とモデル自動構築手法 (Automated Model Construction, AMC) である。

3.1 FEM

複雑な形状を持つ物体の解析に長けたFEMは基盤的数値解析手法である。一方、格子モデルを使わないFEMはHPCに馴染まず、板材の線形弾性解析が中心の構造物にはHPCは無用である。

地盤・岩盤やコンクリートを扱う建設産業では、逆にFEMの大規模化は魅力である。動的解析ではFEMの高速化も魅力となる。したがって、HPCのFEM利用は地震工学では重要課題と考えられる。

HPCのFEM利用の根幹は、FEMのマトリクス方程式を高速で解くという「ソルバ」である。「ソルバ」開発は計算・計算機科学の課題であり、先端技術である。手前味噌であるが、著者のグループは、スーパーコンピュータ「京」を使ったFEM²⁾を開発した。このFEMは地震動の数値解析では圧倒的性能を誇り、計算・計算機科学の分野でも高く評価されている。

3.2 AMC

地理情報システムに蓄積される都市デジタル情報は量・質とも増加している。この情報を使って、地盤や構造物の解析モデルを自動構築することがAMCの目的である。デジタル情報を解析モデルに変える、

という意味でAMCの根幹はデータ変換である。

都市デジタル情報は、市販の電子地図や行政データ等、複数のリソースに分散している。各々のリソースには固有の情報が入っている。異種リソースの情報を集約するため、AMCでは多様なリソースに適用できる高度なデータ変換のプログラムを開発している。

データ変換の汎用性と拡張性を高めるため、AMCはアルゴリズムの抽象化を重視している。異なるリソースの異なる情報を使って様々な解析モデルを構築する際、見かけは同じ手続きでデータ変換ができる、という抽象化である。

4. 例題

4.1 東京の統合地震シミュレーション

東京を対象としたIESの例を示す。スーパーコンピュータ「京」を使った地震動計算と、構造物の地震応答の計算である。図4に小規模の都市モデルを示す。

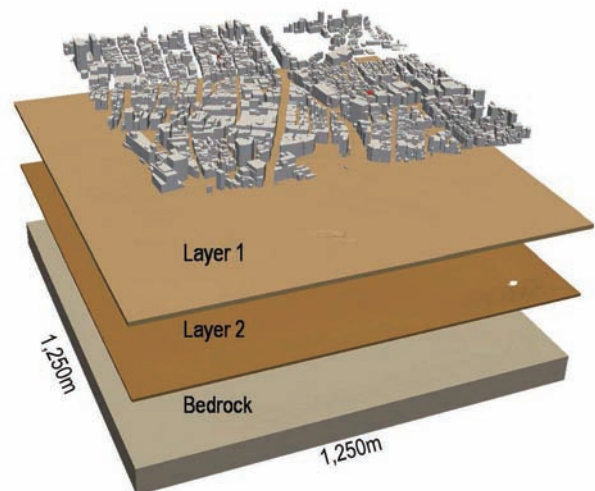


図4 東京の小規模都市モデル。地盤と構造と構造物の解析モデルが自動構築される。

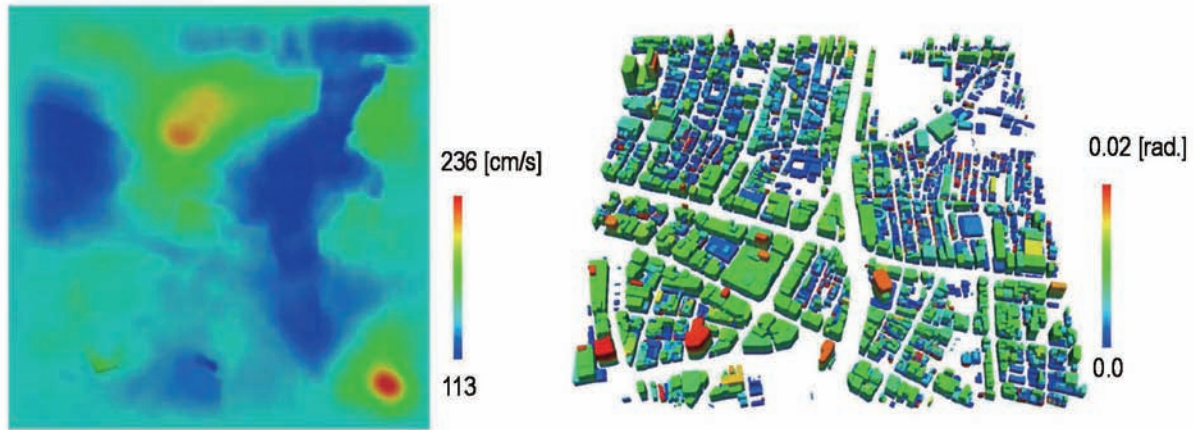


図5 IESで出力される地盤のSI値と建物の層間変形各の分布

地震動計算は、工学基盤と表層2層の非線形ソリッド要素解析モデルを使っている。構造物は非線形多自由度系モデルである。

HPCを利用したIESにより、都市丸ごとの地震シミュレーションが可能であることを示している(図5参照)。都市モデルの構築に使うデータが優良なものになると、より信頼度の高いシミュレーション結果が得られる。

4.2 神戸の統合地震シミュレーション

神戸市を対象としたIESを示す。行政の協力により、都市デジタル情報の異種リソースを使い、AMCによって建築構造物やライフラインの解析モデルが自動構築されている(図6参照)。

神戸市のIESでは、地盤の液状化解析も試行されている。10万個のボーリングデータを基に地盤モデルを自動構築し、固液連成の地盤解析が可能であることを示している(図7参照)。

5. 今後の展開

5.1 社会科学シミュレーション

前章で示したように、IESは、災害・被害は相応の数値解析手法が実装されている。対応の数値解析手法の実装を進めることが課題である。現在のIESには、津波群集避難の数値解析手法が実装されている。

実装中の数値解析手法は、地震発生後の都市交通と被災地や地域の経済状況の数値解析手法である。前者は交通需要の予測も含めた交通シミュレーションであり、後者は復旧対応の効果を考慮した経済シミュレーションである。HPCの利用を想定しているため、入力・出力データの取り扱いの他に、数値解析手法自体の高度化も進められている。

対応の数値解析は、計算の直接の対象となる数値問題の妥当性を検証することが難しい。このため、「都市のBig Data」と称される都市の先端データの利用を進め、数値解析の妥当性の検証を進めている。勿論、先端データは都市モデルの構築にも利用される。

5.2 地震動シミュレーション

IESの基幹の一つはHPC-FEMであるが、これは、想定された地震シナリオから導かれる広域地震動分布の評価に利用することもできる。我が国では主流となっ

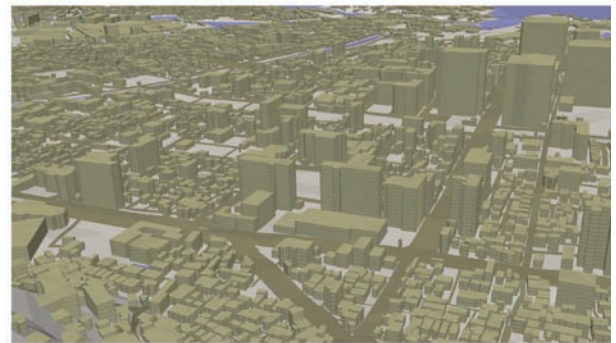


図6 神戸市の都市モデル。異種リソースを使って、建物群(上図)とライフライン(下図)の都市モデルが自動構築される

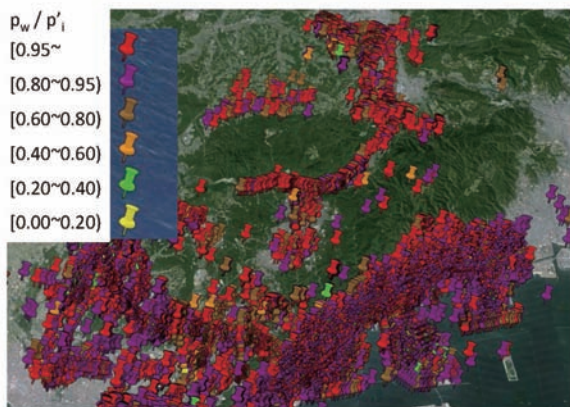


図7 IESを使った液状化シミュレーション。10万のポーリングデータから地盤モデルを自動構築し、固液連成解析を実行する。

ている差分法に比べ、FEMは複雑な形状を持つ地殻・地質構造の地震動計算には適している。事実、地震動分布の非一様性を正確に再現するためには、FEMの利用は欧米で進められている。

広域の都市での高分解能の地震シミュレーションにはHPCの利用が必須である。IESのHPC-FEMは世界最高性能を誇る。研究開発を進めつつ、内閣府等の協力で、HPC-FEMの実用を図ることも進められている。特に、複数地震シナリオに対応する地震動分布の評価にはHPC-FEMの実用が重要である。

5.3 自然災害シミュレーション

IESは地震シミュレーションに開発されたが、他の自然災害への転用も可能である。特に、風水害と地震の「総合防災」を進める際、共通の都市情データを活かした風水害と地震のシミュレーションは、ほぼ同質の災害情報を提供すると思われる。

内閣府総合科学技術・イノベーション会議では、2016年にSociety 5.0(超スマート社会)³⁾を提案している。都市データから構築された都市モデルを使う自然災害シミュレーションは、「超スマートな防災・減災」となる可能性がある。少なくとも、災害予測に関してより合理的な予測を実現することは十分期待される。

5.4 メタモデリング理論

IESが重視しているHPCは、数値解析の大規模化・高速化を果たす。その一方で、何でもかんでもHPCの数値解析、という考え方も愚かである。要求に応じた適切な品質が保証されれば十分だからである。

特に構造物に対し、要求に応じた低品質から高品質のモデル化を行い、それを数値解析することが望まれる。著者のグループはこれを「メタモデリング」⁴⁾と呼

び、理論構築を行っている。質点系モデルから超大規模解析モデルまで、数値解析の選択肢を広げることを実現する。

6. おわりに

文部科学省は、2020年以降にスーパーコンピュータを新規開発する計画を立てている。計算・計算機科学の工学利用は各国がしのぎを削っている。地震工学の分野でも、計算・計算機科学の利用が望まれる。

我が国の優れた耐震設計の技術は世界に多大な影響を与えた。個々の数値解析技術のみならずその統合化の技術を世界に発信することは重要な挑戦と考えている。「和を以って貴し」となす我が国固有の統合化は大事に育成したい。

謝辞

本稿の作成にあたって、東京大学地震研究所市村強准教授と理化学研究所計算科学研究機構大谷英之・陳健・藤田航平研究員から図を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Hori, M.: Introduction to computational earthquake engineering, 2nd ed., Imperial College Press, 2011.
- 2) Ichimura, T. et al.: Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15, 2015.
- 3) 内閣府：第5期科学技術基本計画の概要、<http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5gaiyo.pdf>, 2016.
- 4) M. Hori, et al.: Meta-Modeling for Constructing Model Consistent with Continuum Mechanics, Journal of Japan Society of Civil Engineers, A2, 71, 1, 2015.



堀 宗朗 (ほり むねお)

1984年東京大学土木工学科卒業。
1987年カリフォルニア大学サンディエゴ校Ph.D.課程修了。
地震工学・応用力学・計算科学の研究開発に従事。
2001年より現職。2012年より理化学研究所計算科学研究機構ユニットリーダー兼務。

沈み込み帯巨大地震発生シナリオの数値シミュレーション

堀 高峰

●海洋研究開発機構 主任研究員・グループリーダー

1. はじめに

東日本大震災をもたらしたマグニチュード (M) 9の東北地方太平洋沖地震や、東海から九州沖で100~200年に一度発生してきた南海トラフ沿いの巨大地震 (M8~9クラス) は、日本列島の載ったプレートとその下に沈み込むプレートの境界面での断層すべりとして発生する。これらは繰り返し発生してきたことが歴史資料に残る被害の記述や、津波の痕跡 (堆積物等) からわかっているが、その震源域の広がりや1回の地震の際の断層すべりの量は毎回変化しており、再来間隔も倍半分で変化してきたと考えられる。図1は南海トラフの場合について、震源域の広がりや再来間隔の変化についての知見を模式的に示したものである。

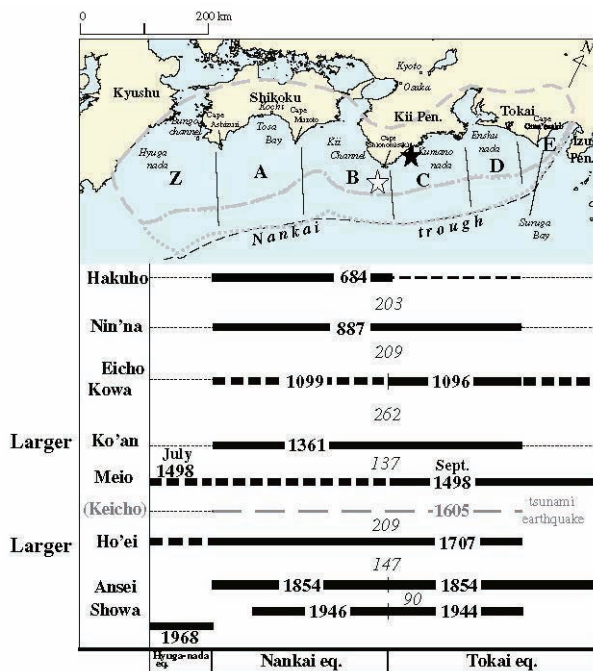


図1 南海トラフ沿いの巨大地震の履歴¹⁾。楷書数字は発生年、イタリック数字は再来間隔。1605年は津波地震の可能性。実線は確からしい、破線は可能性が高い、点線は可能性があることをそれぞれ示す。Largerは隆起量や津波がより大きい地質学的証拠があることを示す²⁾。

限られた歴史資料や地質学的な痕跡の情報にもとづいており、現在でも議論がわかれることも多々あるが、大きな変化が見られることは確かである。これに加えて、東日本大震災の後には内閣府が南海トラフの巨大

地震の最大級の想定を出し、地震性すべりが起こり得る領域すべてで地震を起こした場合を提示している。こうした限られた過去の地震の起こり方の情報や最大級の地震・津波のシナリオから、来るべき次の南海トラフの巨大地震のシナリオを描くことは容易なことではない。我々はこれまで、過去の南海トラフでの巨大地震の起こり方の変化のメカニズムを、地震発生の繰り返しの数値シミュレーションにもとづいて研究してきた³⁾。ここでは、地震発生の繰り返しを表すモデルと、そのモデルにもとづいたシミュレーションを用いて、科学的に合理的に地震発生シナリオを検討するためのアプローチの現状と今後の展望について紹介する。

2. 地震発生の繰り返しのモデル

日本列島の下には複数のプレートが沈み込んでいる。地質学的な時間スケールでは、プレート同士の相対運動をまかなうように、沈み込む海側のプレートと陸を載せたプレートとの境界ですべりが生じる。もし境界面のどこでも摩擦無しですべりが進行すれば、境界面を震源断層とする地震は生じない。しかし、境界面に働く摩擦によって、海側のプレートが陸側のプレートの一部を引きずりながら沈み込むことで、周囲よりもすべり遅れる領域が生じると考えられる。実際、すべり遅れに起因する変形で生じた地表面の変位がGEONETで観測されており、これをデータとして、すべり遅れ率の分布も推定されている (図2)⁴⁾。このすべり遅れが蓄積することで、境界面に働く応力が増加し、応力がその時点での面の摩擦強度に達すると、すべり遅れを解消するようなすべりが生じる。そのすべりが十分高速であれば、周囲に弾性波が伝播することになる。この高速なすべりが地震であり、伝播する弾性波が地震波である。

このような描像が妥当であることは、すべり遅れ率の分布と地震時の断層すべりの分布が対応していることから確かめられている。図3に示したように、普段周囲よりもすべり遅れていた場所が、過去に起きた津波の波源と重なるとともに、東北地方太平洋沖地震のすべり分布とも重なることがわかる⁵⁾。つまり、現在すべり遅れている場所が、過去に繰り返し地震を発生させてきた訳だが、震源域の広がりはその都度異なる

ということであり、将来起こる地震の予測の難しさを端的に示している。しかし、観測データから、地震の原因となる状態を知ることがある程度可能であることは、科学的に合理的な地震発生シナリオを検討する上で不可欠なポイントである。

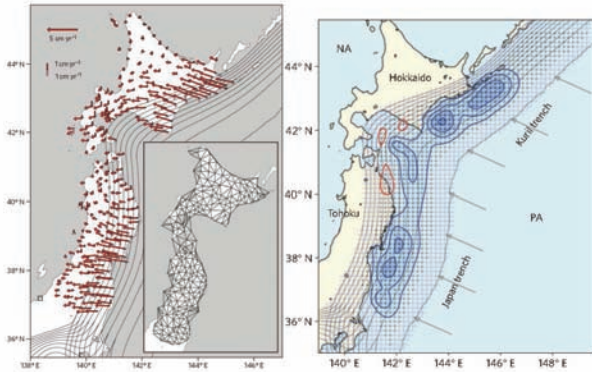


図2 左はGEONETで測定された地表変位速度⁴⁾。右は変位速度を左下の三角網の辺長変化率に変換し、その分布と整合するように推定されたすべり遅れ率の分布。コンタの間隔は3cm/年。

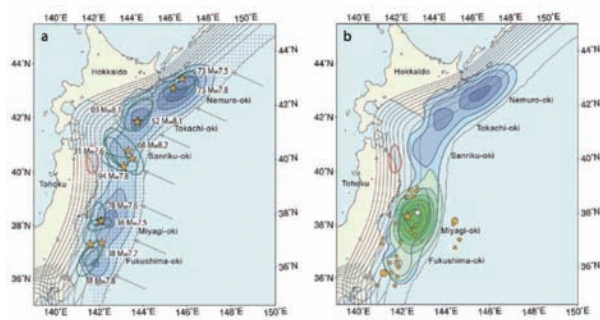


図3 左はすべり遅れ率の分布と過去の津波波源域の分布を比較したもの。右は同じすべり遅れ率の分布と東北地方太平洋沖地震のすべりを比較したもの。

沈み込むプレートと陸側のプレートの境界面でのすべり遅れの蓄積と解消は、プレート境界面でのすべり速度の時空間変化であり、それによって生じる地震の繰り返し発生は、与えられたプレート間の相対速度のもとで、(1)すべり遅れやその解消による剪断応力の増減、(2)応力と強度とすべりの関係(構成関係)、(3)強度の変化(強度発展則)を規定した連立方程式で記述される³⁾。

プレート境界面上のすべりの時空間変化によって生じる面上での応力(すべりの向きの剪断応力)の変化は、次のように書ける。

$$\frac{d\tau_i}{dt} = \sum_j K_{ij}(V_j - V_{pl}) + \frac{G}{2\beta} \frac{dV_i}{dt} \quad (1)$$

ただし、面上で一様なすべり速度をもつ小断層でプレート境界面を離散化しており、媒質が半無限均質弾性体で、かつ動的な応力変化をすべり応答関数には含めず、定常すべりによる応力変化を無視した近似をしている。 τ_i と V_i は小断層 i にかかる剪断応力とすべり速度、 K_{ij} は小断層 j での単位すべりによる小断層 i での静的な応力変化を与えるすべり応答関数、 V_{pl} 、 G 、 β はプレート間相対速度、剛性率、S波速度を表す。ここでは岩石実験にもとづいて導入された摩擦則である、すべり速度・状態依存摩擦則⁶⁾を用いる。

$$V = V_* \exp\left[\frac{\tau - (\tau_{s*} + \Delta\tau_s)}{A}\right] \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta\tau_s}{dt} = \frac{B}{L/V_*} \left[\exp\left(-\frac{\Delta\tau_s}{B}\right) \exp\left(-\frac{V}{V_c}\right) - \frac{V}{V_*} \left\{ \frac{\Delta\tau_s}{B} + \ln\left(\frac{V}{V_*}\right) \right\} \right] \quad (3)$$

V はすべり速度、 $\tau_s = \tau_{s*} + \Delta\tau_s$ は面の強度を表し、 V_* は任意の基準速度(ここではプレート間相対速度)とする。(2)式で表される応力と強度とすべり速度の関係は、図4(a)に模式的に示したように、ある時点の強度に比べて、応力が低ければすべり速度が非常に小さく(すべり遅れが生じ)、強度を少しでも超えると一気に大きなすべり速度になることを表わしている⁷⁾。一方(3)式で、 V_c は第1項と第2項の切り替わりを決めるパラメータであり、以下では 10^{-8} m/sとする⁶⁾。ここで、第1項は時間の対数に比例した強度の回復を表し、第2項はすべりに伴う強度の低下(すべり弱化)を表す(図4b,c)⁷⁾。そして A 、 B 、 L が強度変化の特性を決めるパラメータである。これに、プレート境界面の形状と相対速度、モデルを規定するパラメータを与えれば、与えられた初期条件のもとでの地震発生の繰り返しの数値シミュレーションを行うことができる。

3. 南海トラフの巨大地震のシミュレーション

前述のモデルを南海トラフに適用した数値シミュレーションの例を紹介する¹⁾。与えたプレート間相対速度の分布を図5(a)に示す。プレート間相対速度として与えているのは、GEONETデータから推定されたすべり遅れ率の分布を単純化したもの³⁾である。紀伊半島から東側で相対速度が減少しているのは、伊豆半島を載せた海側のプレートが陸側のプレートに衝突し、そこでは境界面のすべりによるプレート間相対運動の解消が生じていないことの影響を示している。

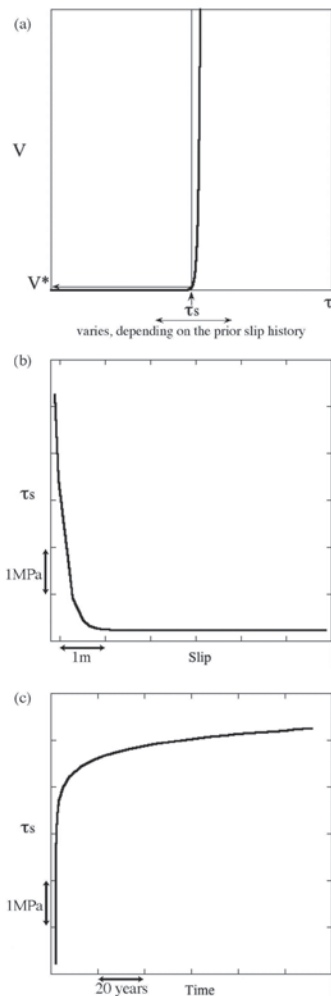


図4 (a) すべり速度・応力・強度の関係。(b)強度のすべり依存性。(c)強度回復の時間依存性。

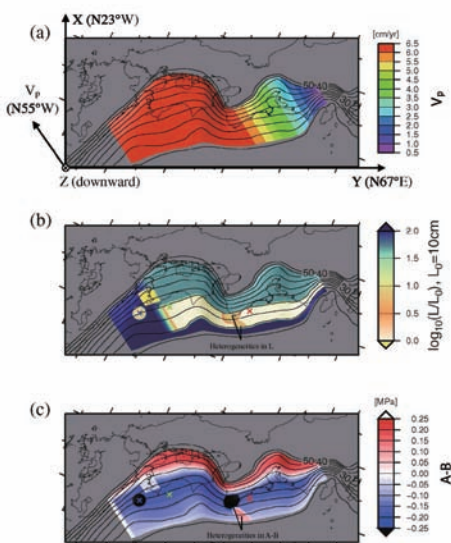


図5 (a)プレート相対速度分布。(b)パラメータLの分布。(c)パラメータA-Bの分布。

また、図5(b,c)には、摩擦強度変化の特性を決めるパラメタの分布を示した。強度の深さ依存性や構造の不均質等を考慮し、試行錯誤で設定している。これらを用いてシミュレーションを行った結果得られた地震時のすべりの分布と規模、再来間隔の変化等を図6に示す¹⁾。これらの結果は、過去の地震の起こり方そのままを再現したものではなく、再来間隔や規模の変化の特徴を再現したものとなっている。具体的には、紀伊半島を境に東西に別れて発生する場合と全体が1つの地震として発生する場合がある、規模がM8前半~後半である、再来間隔が100~200年と変化する、東西に別れて発生する場合の間隔が数日以内のときもあれば、年オーダーのときもある、といったことである。このように、過去の地震の起こり方の特徴をとらえたモデルにもとづいて、観測データと整合する範囲内で、どのような地震が起こり得るかを検討するというのが、科学的に合理的なシナリオ検討のアプローチである。

一方で、歴史的には知られていない発生パターンもこの結果には含まれている。すなわち、図6(f)で震源域の西端でM7クラスの地震が発生し、その後西側で先にM8クラスの地震が起き、1年後に東側が続くというものである。歴史的には東側が先に起こる場合が知られているだけであるが、限られた情報に縛られず、西側から先に起こるシナリオも考慮することは、事前の防災・減災対策の上で非常に重要である。

4. 今後の展望

今回紹介したような、数値シミュレーションにもとづくシナリオの検討のアプローチはようやく始まったばかりである。これを将来の地震の想定や防災・減災対策に活用していくためには、当然色々な課題がある。まずは観測データへの整合性を高めることが必要で、GEONET以外にも観測の進展として、震源域の真上である海底での地殻変動観測が進んできており⁸⁾、こうしたデータの取り込みも進めつつある。また、観測データを過去に遡るには明治時代からの測量データがあり、前回の地震前後を含む100年以上にわたる地殻変動データが存在する。こうしたデータと整合させるには、モデルに媒質の粘弾性応答を取り入れる必要がある。そのため、3次元有限要素法を使ったシミュレーションに移行する準備も進めている。これは最近になって、超大規模有限要素法での高速計算が実現したために、可能となってきたものである^{9,10)}。さらには、データやモデルの誤差(物性や構造の曖昧さ等)を考慮することで、起こり得るシナリオのばらつきを定量的に把握できるようにすることも重要な課題である。

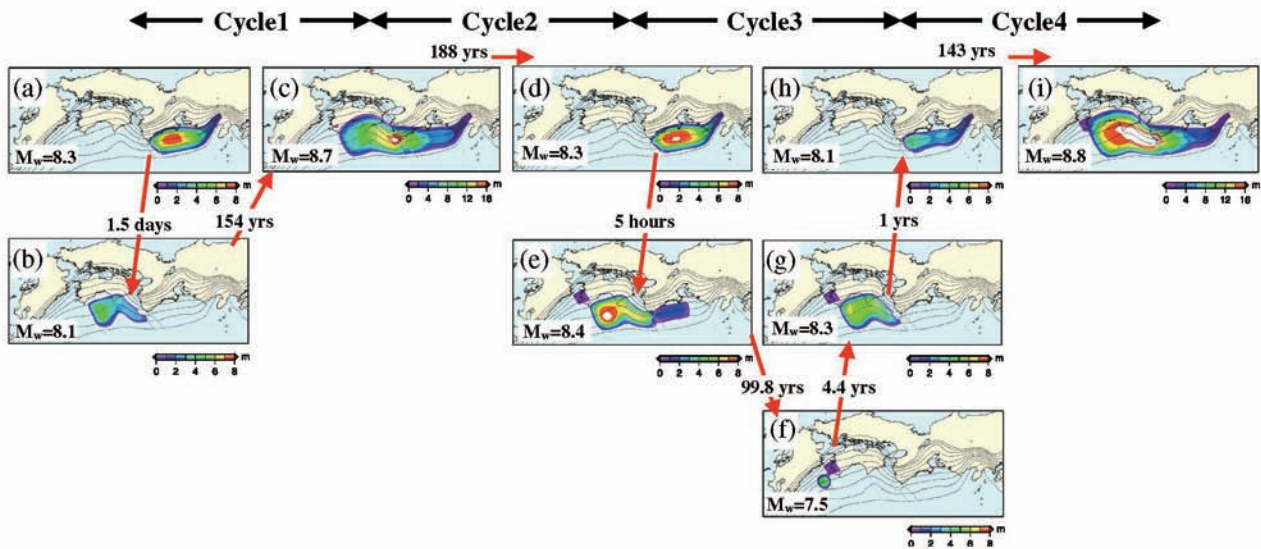


図6 南海トラフ巨大地震シミュレーションの例¹⁾。

このように様々な課題はあるが、各時点での知見を活かせるところから防災・減災対策に取り入れるとともに、何が必要かのフィードバックをして、より有効な対策に役立てていきたいと考えている。

謝辞

計算には理研AICSの京コンピュータを用いた(課題番号hp150215)。本誌への投稿の機会を与えて頂いたことに感謝致します。

参考文献

- 1) Hyodo, M., Hori, T., Kaneda, Y.: A possible scenario for earlier occurrence of the next Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan, *Earth Planets Space*, Vol.68, DOI 10.1186/s40623-016-0384-6, 2016.
- 2) Shishikura, M., Maemoku, H., Echigo, T., Namegaya, Y., Nagai, A.: History of multi segment earthquake along the Nankai Trough, deduced from tsunami boulders and emerged sessile assemblage, *Japan Geoscience Union Meeting 2011*, May 2011.
- 3) 堀 高峰: プレート境界地震の規模と発生間隔変化のメカニズム, *地震*, Vol. 61, pp. S391-S402, 2009.
- 4) Hashimoto, C., Noda, A., Sagiya, T. Matsu'ura, M.: Interplate seismogenic zones along the Kuril- Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, Vol.2, pp.141-144, 2009.
- 5) Hashimoto, C., A. Noda, and M. Matsu'ura: The MW 9.0 northeast Japan earthquake: Total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, Vol. 189, pp. 1-5, 2012.
- 6) Kato, N., T.E. Tullis: A composite rate- and state-dependent law for rock friction, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp. 1103-1106, 2001.
- 7) Nakatani, M.: Conceptual and physical clarification of rate and state friction: frictional sliding as a thermally activated rheology, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, pp.13347-13380, 2001.
- 8) Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T., Asada, A: Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, Vol. 534, pp. 374-377, 2016.
- 9) Ichimura, T., Agata, R., Hori, T., Hirahara, K., Hashimoto, C., Hori, M. Fukahata, Y.: An Elastic/Viscoelastic Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, *Geophys. J. Int.*, Vol. 206, No. 1, pp. 114-129, 2016.
- 10) Fujita, K., Ichimura, T., Koyama, K., Horikoshi, M., Inoue, H., Meadows, L., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Hori, T.: A Fast Implicit Solver with Low Memory Footprint and High Scalability for Comprehensive Earthquake Simulation System, 99, *Research Poster*, SC16.



堀 高峰 (ほり たかね)

1998年京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て、1999年より海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)研究員、2015年より現職。博士(理学)。

津波災害研究における数値シミュレーション

越村 俊一

●東北大学災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

近年、津波災害研究や津波災害対策の実務において、あらゆる局面で数値シミュレーションが活用されている。たとえば、気象庁の津波予報技術とは、全国66の予報区毎に津波高や到達時刻等を予測するものであり、事前の10万通り以上もの地震断層シナリオから計算した津波高予測データベースを基盤としている（データベース駆動型予報システム）。最も大きな利点は、即時的に得られた地震情報（震源位置、マグニチュード）を用いて、地震発生から3分以内の予報が可能なことである。また、津波被害想定などの災害対策は言うまでもなく、災害復興計画の立案にも、数値シミュレーションは活用されている。2011年東日本大震災後の復興計画策定においては、沿岸部の海岸保全施設の高さ・配置、これからの都市計画および土地利用計画がどのように津波に強いまちとして機能しうるかを評価するために、数値シミュレーションが活用された。

数値シミュレーションと一口に言っても、津波の発生機構や、伝播・遡上の流体力学的な振る舞いを予測するもの、津波の建物への作用や構造物の耐力・破壊を予測するものなど力学法則に基づいた数値モデルや、人間の避難行動・意志決定過程などを社会科学的にモデル化して構築される数値モデルなど多岐に渡る。

本稿では、主に津波災害の予測という観点での数値シミュレーションについて、その現状と防災対策における活用上の展望を論ずる。

2. 津波の数値シミュレーション技術

津波の発生・伝播という現象を数値的に解くという試みは1960年代から始まった。その技術は、地震・津波の観測網の充実、測地・測量技術の向上、計算機性能の向上と足並みをそろえるように発展し、シミュレーションの空間分解能の高精細化、高次の物理現象の再現、シミュレーションの高速化など多様な方向性で研究が進められている。

津波の伝播・遡上の予測には、その領域（沖合・沿岸および浅海域の伝播、陸上での遡上）と分解能（空間・時間）に応じて方程式系を使い分ける必要がある。いずれにせよ、支配方程式を差分法等により離散化する方法が一般的である。たとえば、水深50m以上の沖合

においては、津波伝播・波高増幅の非線形性はほぼ無視できるから、運動方程式については線形長波理論が支配方程式になる。あるいは、長距離を伝播する津波を再現するには波数分散性が無視できなくなるので、分散波理論を用いる。津波が浅海域に達し、陸上での遡上を再現する場合には、非線形長波の運動方程式（浅水理論）に底面摩擦項や分散項、碎波モデルを付加したものをを用いるのが一般的である。正確な津波の予測・再現には、方程式系の適切な選択、津波初期水位分布（断層運動による海底地盤変動）、詳細な海底・陸上地形の情報と計算の分解能、土地利用状況等による陸上の津波抵抗則の適切なモデル化等が重要な要件となる（詳細は首藤ら¹⁾を参照のこと）。2011年東北地方太平洋沖地震津波の場合、日本近海の津波の全体像の再現には直交座標系による非線形長波理論式または非線形分散波理論式が、太平洋全体への外洋伝播を含めた津波を再現する場合には球面座標系による分散波理論式および線形長波理論式が必要である。

いまや多くのシミュレーションコードが専門的な知識が無くとも利用できるようになってきているが、数値解析手法における支配方程式、格子間隔（空間分解能）の選択、精度の検証(Verification & Validation; V&V)、結果の解釈と適用限界を踏まえて適切に活用する必要がある。多くのシミュレーションモデルの適用性を検証するためのベンチマークの設定やV & Vは米国の研究グループにより盛んに行われており、国の津波浸水予測や被害想定、津波対策に用いるシミュレーションモデルの要件を明確に指定している²⁾。我が国でも、近年土木学会海岸工学委員会において議論が進められており、厳密解や水理実験、現地調査結果など様々な検証データを用いたベンチマークが確立されつつある³⁾。

3. 東日本大震災被災地の復興計画策定におけるシミュレーションの活用

ここでは、東日本大震災後の復興計画策定に活用された数値シミュレーションの事例を紹介する。

平野部での広範囲にわたる浸水や地盤沈下により、沿岸部は壊滅的な状況となった。安全であるということに加えて、安心して住み続けることができるまちをどのようにしてつくるかということが、復興まちづく

りの課題となった。特に、再来周期が数百年から千年規模の津波に対しては、海岸の防潮堤や防波堤だけで防ぐということは不可能であり、土木構造物の寿命や維持管理の問題を考えると、百数十年確率規模の津波を基準として施設高を考えるのが現実的であるとの考え方が示された⁴⁾。

あらゆる規模の津波から命や住まいを津波から守るために、海岸での防潮堤・防波堤だけでなく、その背後の緑地や防災林、さらに幹線道路や鉄道などの交通施設を盛土構造として堤防機能を付与し、居住エリアなどのまちの配置も考え直すことで「多重」の防御を図り、被害を最少化する減災を指向したまちづくりの考え方が取り入れられた。そのために、津波防護施設の計画や新しいまちづくり案(土地利用案)による地形モデルを作成し、数値シミュレーションによって、それらの効果を検証する必要がある。

以下では、筆者らが仙台市と共同で取り組んだ復興計画における数値シミュレーションの活用事例を述べる。

まず、非線形長波式に基づくシミュレーションモデルにより2011年東北地方太平洋沖地震津波を再現し、モデルの妥当性を評価した⁵⁾。図1に示すのは、仙台市における津波浸水計算(2011年津波の再現)の結果であり、震災後の地盤沈下を考慮して構築した10m分解能の地形データを利用して計算し、浸水深の空間分布を示したものである。現地調査で得られた浸水深・浸水深分布、また国土地理院による浸水範囲の調査結果やビデオ映像を用いた検証を行った⁶⁾。

図2は、仙台市の復興計画における沿岸部の防潮堤整備(7.2m)、県道塩釜・亘理線の嵩上げ(6m)を想定して実施した今次津波を想定したシミュレーションの結果(最大浸水深)である³⁾。防潮堤・防波堤の整備や道路の嵩上げにより、今次津波に対して、特に県道から西側で浸水範囲の減少、浸水深の減勢効果が期待できるが、県道の東側は津波が反射することで浸水深が増加することが分かる。この結果に基づき、県道東側の土地利用方策と、さらにその地域で活動する人々の生存空間や避難経路を確保するための方策が検討されることとなった。多重防御による被害軽減効果を明らかにし、その被害軽減効果やメンテナンスも含めた費用対効果についての社会的合意を得た上で、現在県道の嵩上げ工事が進められている。

4. 津波のリアルタイム予測

津波観測網の整備を背景とし、様々なアプローチで、津波を早期に予測する研究が進められている。た

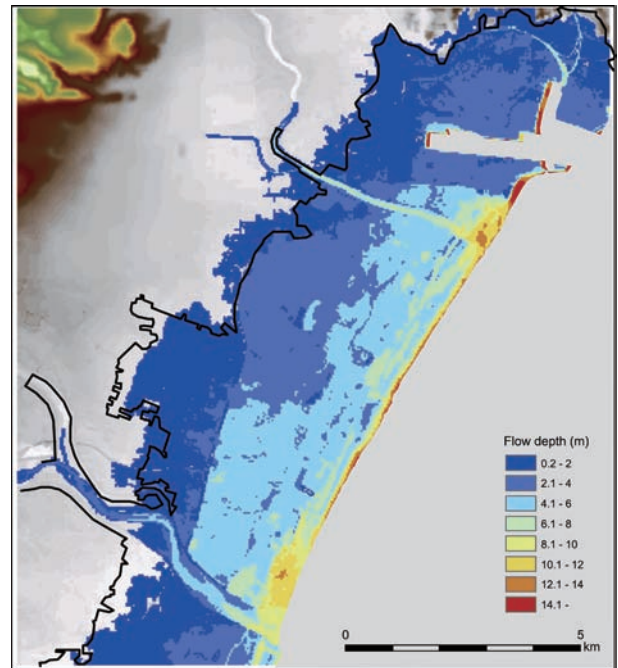


図1 仙台市における2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現結果⁵⁾。実線は国土地理院により確認された津波浸水域。

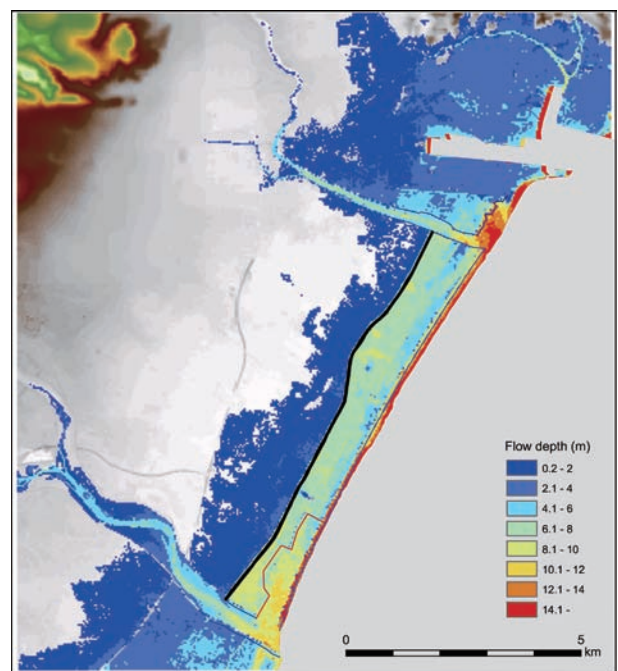


図2 仙台市震災復興計画に基づく、最大クラスの津波に対する津波浸水予測の結果⁵⁾。実線は嵩上げ予定の県道を示す。

たとえば、我が国の太平洋岸では観測点150点にもおよぶS-NetやDONETを代表とする高密度な沖合津波観測網^{7),8)}が整備されつつあり、津波発生時の海面変動の直接的な観測や津波波源の高精度推定⁹⁾への期待が高まっている。リアルタイムで高密度な津波の沖合観測の実現を前提

に、沖合観測データを参照した津波浸水予測データベース¹⁰⁾や、観測データの同化による津波予測手法^{11),12)}の開発が進められており、津波予測の高度化に向けて国家的な取り組みが進行中である。

一方、筆者らは、独自に津波の伝播・浸水予測、建物被害予測、被害のマッピングという3つの要素技術を統合して、リアルタイム津波浸水・被害予測の枠組みを構築している。東日本大震災でも明らかになったように、巨大津波からの避難や早期被害予測のためには、津波の陸上での振る舞いを高度かつ迅速に予測する必要がある。我々が目指すのは、詳細な浸水域と被害の早期予測であり、「津波の高さ」だけでなく、「浸水域」を予測してそれを発信することで、災害初期の対応を支援できると考えた。津波の陸上遡上の予測は、津波波源モデル（初期条件）の推定精度が確保できれば、土地利用や建造物の有無を適切に表現することで、浸水域の予測が精度良く行えることを確認している。また、浸水域内の人口や建物棟数、流失棟数など、より具体的な被害の情報を量的に予測することで、より迅速・効果的な救援活動に貢献できる。ここでは、リアルタイム津波浸水・被害予測情報配信の実現に向けた課題への取り組みについて述べる。

津波数値計算の初期条件には、断層破壊の具体的なメカニズムに関連した断層モデルが必要で、特に地震学・測地学の研究者との連携が必要になる。近年、GEONETをはじめとする衛星測位（GNSS）技術の発展を背景とした新しい地震・地殻変動観測が普及しており、津波発生モデルの精度向上に期待が持てる¹³⁾。

津波の浸水予測に関しては、従来のワークステーションでは浸水予測の実行には数時間以上の時間が必要であり、リアルタイムでの予測は技術的に困難であったが、High Performance Computing Infrastructure（HPCI）の普及がその課題解決の追い風になっている。筆者の研究グループは、津波の予測計算の高速化を、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータSX-ACEの独自運用により実現している。ここでは、10分以内に津波波源モデルを予測、10mメッシュという高分解能の浸水計算を、10分以内に完了することを具体的な目標とした。我々はこれを10-10-10（トリプル・テン）チャレンジと名付けて実証に取り組み、目標を達成することができた¹⁴⁾。

関連技術との比較の観点では、京コンピュータによる計算パフォーマンス¹⁵⁾との比較を行った。本研究で使用している津波解析プログラムのパフォーマンスは、コア数が同じであればSX-ACEの方が圧倒的な性能を有するよう、シミュレーションコードの最適化に成功

した。結果として、気象庁の1予報区（だいたい1県に対応）の3時間分の高精度浸水予測を行う場合、256コアを使用すれば3分以内で予測を完了できるようになった（図3）。この結果は、スーパーコンピューティングに関する研究の最高峰の国際会議であるSC15の発表に採択され、高い評価を得た¹⁴⁾。筆者らによるリアルタイム津波シミュレーション技術は、2年にわたる実証を経て、現在高知県で試験運用を行っている¹⁶⁾。

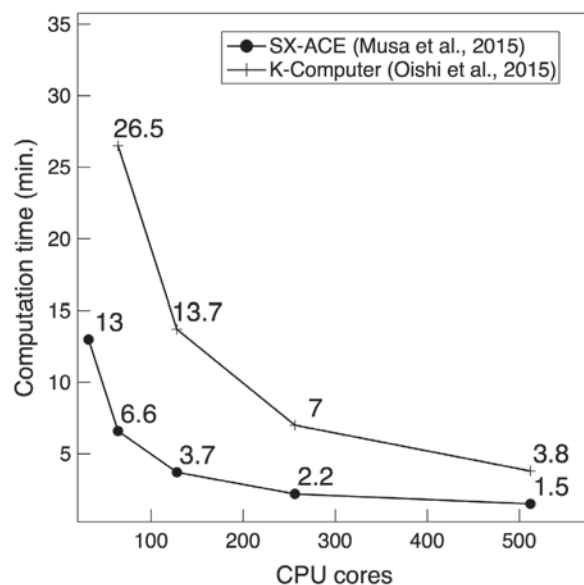


図3 スーパーコンピュータSX-ACEの利用による津波浸水計算の性能（縦軸は3時間分の浸水予測に要する時間、横軸はCPUのコア数）¹⁴⁾。比較しているのは、京コンピュータによる津波浸水予測計算のパフォーマンス¹⁵⁾。

5. 災害シナリオの提示と数値シミュレーション統合にむけて

2011年東日本大震災の被害の実態・教訓を踏まえた、将来の巨大災害の減災にむけた課題は、如何に起こりうる災害事象を予測し、先手を打って被害拡大の防止や被害の軽減に向けて具体的な対策を講じていくかである。この社会的要請に応えることこそシミュレーションの究極の目標である。そのために筆者らは、地震の揺れ、津波浸水、建物被害、火災というハザードと、社会の脆弱性や人間の対応行動との関連で複合・連鎖的に進行していく事象を災害シナリオとして社会に開示し、社会が災害を乗り越えて行くための対応を先導する研究を、JST CREST事業「大規模・高分解能数値シミュレーションの連携とデータ同化による革新的地震・津波減災ビッグデータ解析基盤の創出」の補助を得て推進している。本研究プロジェクトの報告は、Journal of Disaster ResearchのSpecial Issue¹⁷⁾に掲載しているので、興味のある読者は是非ご覧いただきたい。

参考文献

- 1) 首藤伸夫、今村文彦、越村俊一、佐竹健治、松富英夫(編)：津波の事典、350p.、2007.
- 2) Horrillo, J., S. T. Grilli, D. Nicolsky, V. Roeber, J. Zhang : Performance Benchmarking Tsunami Models for NTHMP's Inundation Mapping Activities, Pure and Applied Geophysics, Volume 172, Issue 3, pp.869-884, 2015. doi:10.1007/s00024-014-0891-y
- 3) 土木学会海岸工学委員会：津波作用に関する研究レビューおよび活用研究小委員会(小委員長：高橋智幸) <www.coastal.jp/ja/index.php?津波作用に関する研究レビューおよび活用研究小委員会>
- 4) 国土交通省：防波堤の耐津波設計ガイドライン、40p.、2013
- 5) Koshimura, S. and N. Shuto : Response to the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami disaster, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2015. doi:10.1098/rsta.2014.0373
- 6) Koshimura, S., S. Hayashi, H. Gokon : The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction, Soils and Foundations, Vol.54, 4, pp.560-572, 2014. doi:10.1016/j.sandf.2014.06.002
- 7) 防災科学技術研究所：日本海溝海底地震津波観測網(S-net) 整備事業<www.bosai.go.jp/inline/>
- 8) 海洋研究開発機構：地震・津波観測監視システム DONET <www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>
- 9) Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, H. Nakamura : Multi-index method using o shore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, Earth, Planets and Space, 68:128, 2016. doi:10.1186/s40623-016-0500-7
- 10) Yamamoto, N., K. Hirata, S. Aoi, W. Suzuki, H. Nakamura, T. Kunugi : Rapid estimation of tsunami source centroid location using a dense offshore observation network, Geophysical Research Letters, Volume 43, Issue 9, pp.4263-4269, 2016.
- 11) Maeda, T., K. Obara, M. Shinohara, T. Kanazawa, K. Unehira : Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: A data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting, Geophysical Research Letters, Volume 42, Issue 19, pp.7923-7932, 2015.
- 12) Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, T. Maeda : Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake, Geophysical Research Letters, Volume 43, Issue 9, pp.4189-4196, 2016.
- 13) Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Inuma, K. Tachibana, T. Demahi, T. Sato, M. Ohzono, N. Umino : Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), Journal of Geophysical Research, Volume 117, Issue B2, 2012. doi:10.1029/2011JB008750
- 14) Musa, A., H. Matsuoka, O. Watanabe, Y. Murashima, S. Koshimura, R. Hino, Y. Ohta, H. Kobayashi, A Real-Time Tsunami Inundation Forecast System for Tsunami Disaster Prevention and Mitigation, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Strage and Analysis (SC15), Austin, Texas, Nov. 2015. <http://sc15.supercomputing.org/sites/all/themes/SC15images/tech_poster/tech_poster_pages/post142.html>
- 15) Oishi, Y., F. Imamura, D. Sugawara : Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions, Geophys. Res. Lett., 42, 1083-1091, 2015. doi:10.1002/2014GL062577.
- 16) 総務省：G空間シティ構築事業 <www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/top/local_support/02ryutsu06_03000054.html>
- 17) たとえばKoshimura, S. : Establishing the Advanced Disaster Reduction Management System by Fusion of Real-Time Disaster Simulation and Big Data Assimilation, Journal of Disaster Research, Vol.11 No.2, pp.164-174, 2016. doi: 10.20965/jdr.2016.p0164



越村 俊一(こしむら しゅんいち)

2000年東北大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。人と防災未来センター専任研究員、東北大学准教授を経て現職。専門分野：津波工学、数値シミュレーション

免震構造の極限挙動シミュレーション

菊地 優

●北海道大学大学院工学研究院 教授

1.はじめに

2011年東日本大震災では、免震構造の防災拠点建物が、震動による被災を免れ機能を維持したことにより、被災者の救援活動に大活躍した。免震構造は期待どおりの性能を発揮したというのが定評となり、防災拠点の免震化が一層加速されることとなった。一方で、同震災以降、建築構造は過大な地震入力に対する明確な設計思想が求められるようになった。免震構造といえども例外なく、想定外の極限事象に対して安全性を確保する対策を講じることが必要となっている。

想定外に備えるには、それらの事象を知ることから始まる。知ったからといって解決にはならないものの、知らなければ対策を講じることができない。理想的には実物による実験で極限事象を再現して理解したいところであるが、現実的には困難である。このとき、数値シミュレーションは強力なツールとなる。本稿では、特集の主旨に従い、免震構造を対象に、その極限挙動を数値解析で再現する方法、数値シミュレーション事例について紹介する。

2. 免震構造における数値シミュレーションの必要性

構造物の数値シミュレーションでは、連続体である構造要素を、ある仮定を導入することによって離散化し単純化する。構造物の振動解析で長年多用されてきた質点系モデルは、力学的挙動の本質を損なわない程度に簡略化が施されてきた結果の産物である。その中でも免震構造は質点系モデルとの親和性が非常に良く、図1のように上部構造建物を剛体とする1質点系を用いても現実との乖離は少ない。また、積層ゴムやダンパーなどの免震部材と、ばねやダッシュポットといった力学モデルとの対応も直感的に理解できる。ただし、そう言えるのは、免震構造が1980年代初頭に出現してからおよそ10年程度であろう。免震構造は1995年阪神淡路大震災を契機に本格的に普及し、2000年以降に頻発した内陸地震においても効果を発揮し実績を蓄積してきた。免震構造の普及に伴って建物の形態や免震部材が多様化・複雑化したことで、単純な力学モデルでは対処が困難となってきた。さらに、2003年十勝沖地震が免震構造に与えた影響は大きく、長時間・長周期地震動に対する免震建物の極限挙動への対応も必須

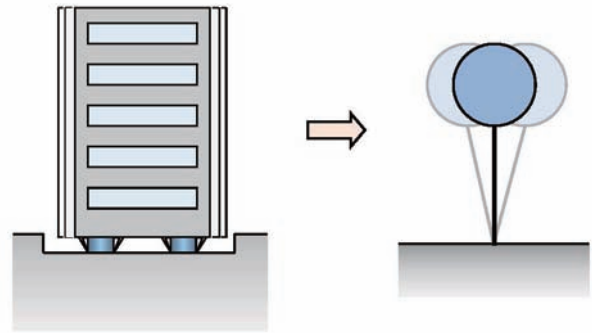


図1 免震構造物の振動モデル

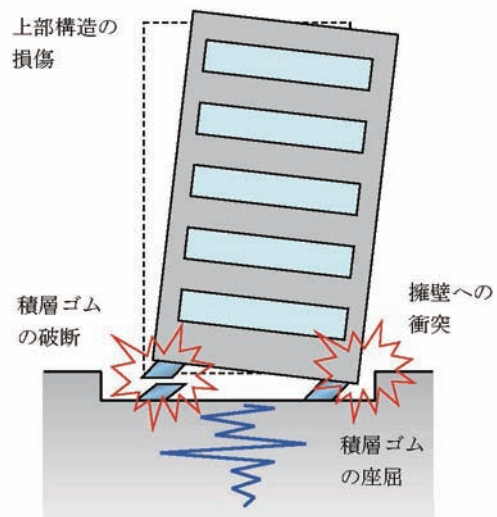


図2 免震建物の極限挙動

となって来る。

上述のような状況下で、筆者も図2に示す免震構造の様々な極限挙動を数値シミュレーションで再現すべく、解析手法の研究開発を行ってきた。免震構造では変形のひとつが免震層に集中することから、免震部材のモデル化の良否が建物全体の挙動の再現性に大きく影響する。また、極限挙動の多くは免震部材の過大な変形や過酷な応力状態に関わるものであり、その先には擁壁への衝突や上部構造建物の損傷という好ましくない事象が待ち受けている。本稿では初めに免震部材の極限挙動を再現するための各種力学モデルについて解説し、続いてそれらの解析手法を用いた免震建物の地震時挙動の数値シミュレーション事例を紹介する。

3. 免震積層ゴムの力学挙動シミュレーション

3.1 大変形挙動

積層ゴムはせん断ひずみ300%を超えるとハードニング特性を示す。鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）や高減衰積層ゴム（以下、HDR）のように支承・減衰一体型の積層ゴムでは履歴減衰特性が加わり、挙動が一層複雑になる。既往のBi-linear Modelでは大変形挙動を再現できないことから、曲線系の復元力モデル（Kikuchi-Aiken Model）が提案されている¹⁾。

図3は高減衰積層ゴムに対してせん断ひずみ400%までの変形を与えた場合の数値シミュレーション結果である。ハードニング特性を含め、実験と解析の対応は非常に良い。文献1)のモデルは、高減衰積層ゴムの他、鉛プラグ入り積層ゴム、免震U型ダンパーにも拡張されており、長周期地震動に対する検討が要求される中、ニーズは非常に高い。

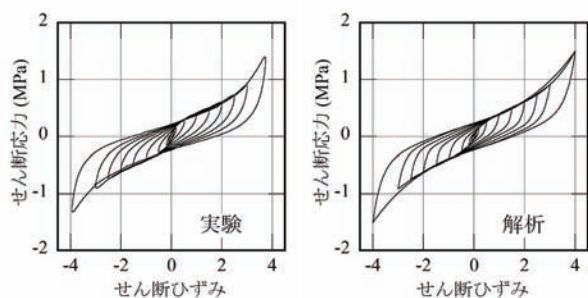


図3 HDRの大変形シミュレーション (X0.4S、面圧1 MPa)

3.2 多軸連成挙動

積層ゴムは、図4のように大変形下では作用軸力の大小によって終局状態が大きく異なるというせん断変形と軸力の多軸連成挙動を示す。従来は低軸力下でのゴムの破断ひずみを限界変形と関連づけていたが、免震構造の長周期化に伴う支持荷重や変形の増大により、高軸力下での座屈挙動が無視できない状況にある。

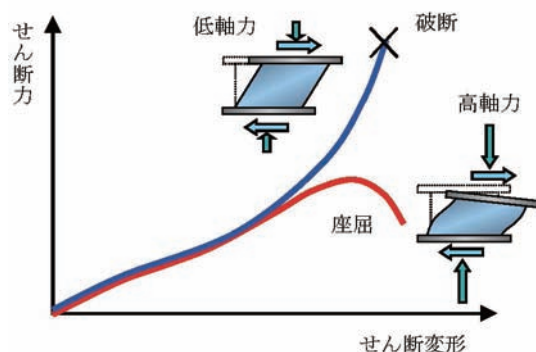


図4 積層ゴムの連成挙動

せん断力がせん断変形のみで決まる通常の復元力モデルではせん断変形と軸力の多軸連成挙動を表現することはできず、連成モデルが必要となる。図5は著者が提案している力学モデル（並列軸ばねモデル）である^{2),3)}。このモデルは上下端部の多数の非線形軸ばね群と中間部のMSSモデルおよびそれらをつなぐリジッドリンクで構成され、P-Δ効果と幾何学的非線形性を表現する。図6は並列軸ばねモデルを用いたφ1000mm LRBの多軸載荷試験の数値シミュレーション結果である³⁾。試験では米国UCSDのSRMD試験機を用いて高面圧(17MPa)下にて水平1方向に動的加力しており、過大な軸力とせん断変形下で生じる負勾配が解析でも表現されている。

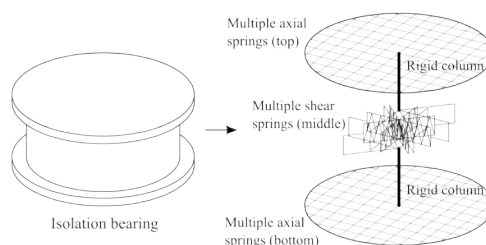


図5 積層ゴムの多軸連成力学モデル

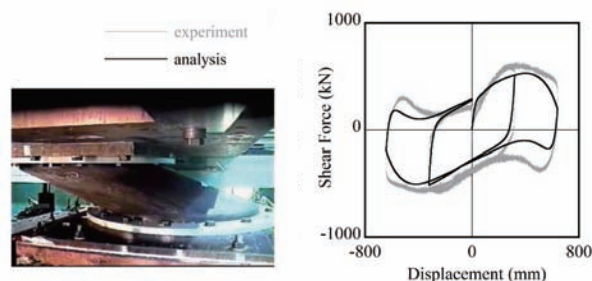


図6 LRBの多軸連成シミュレーション (高面圧17.3MPa下での水平1方向動的加力試験)

並列軸ばねモデルには汎用性があり、積層ゴムの種類に応じてモデル中間部のMSSモデルを他の多軸連成モデルに換装できる。HDRでは水平2方向加力時に積層ゴム内部にねじれひずみが蓄積されることにより水平2方向の復元力が大きく連成するために、それを表現するYamamoto Model⁴⁾やKato Model⁵⁾などの力学モデルが提案されている。図7はHDRの水平2方向加力試験の数値シミュレーション結果である。並列軸ばねモデルの中間部にはYamamoto Modelを適用した。積層ゴムは図3と同じゴム材料 (X0.4S) であるが、面圧および水平2方向加力の影響を受けて図3の履歴ループ形状から大きく変化している様子が良好に再現されている。

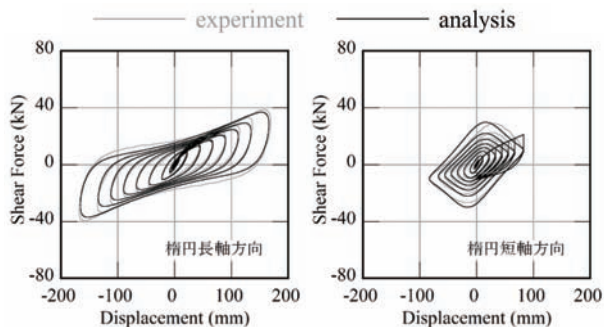


図7 HDR (X0.4S) の多軸連成シミュレーション (面圧13MPaにおける水平2方向楕円加力)

3.3 熱・力学連成挙動

支承・減衰一体型の積層ゴムでは履歴吸収されたエネルギーが熱エネルギーに変換され、発生熱により積層ゴム内部の温度が上昇する。大振幅の長時間地震動では、温度上昇が積層ゴムの力学特性に影響を及ぼす懸念がある。国土交通省は、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策として、免震建築物には長時間の繰返しの累積変形の影響を考慮して安全性の検証を行うことを要求している。文献⁶⁾ではLRBを対象として、熱伝導解析と地震応答解析を交互に実施しながら熱による力学特性の変化を時々刻々、建物応答に反映させる熱・力学連成解析手法が開発された。筆者もこれに倣い同様の熱・力学連成解析システムを開発している。図8はLRBの多数回繰返し载荷試験のシミュレーション解析結果である。履歴ループ形状が最初の数サイクルに比べて、それ以降の加力サイ

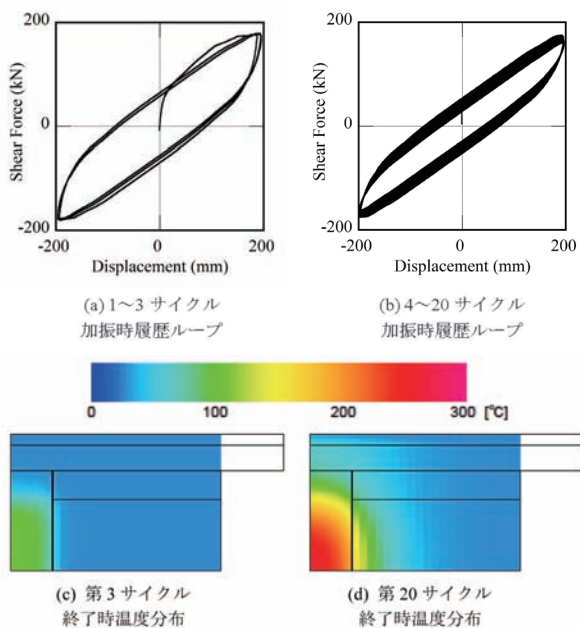


図8 熱・力学連成挙動のシミュレーション解析

クルで徐々に細くなり、鉛プラグ中心位置での温度が約300°C近くに達する結果となった。現在、この解析システムを用いて、高耐久LRBの開発を行っている。

4. 免震建物の地震時挙動シミュレーション

4.1 復元力モデルによる地震応答特性

免震建物の地震応答解析では、最大応答値のみならず床応答スペクトルのような周期特性の再現性が問われることもある。図9は15階建て免震建物を設定し、高減衰積層ゴムに直線系のBi-linear Modelと曲線系のKikuchi-Aiken Model¹⁾の2種類の復元力モデルを適用した場合の応答値の比較である。Bi-linear Modelでは全体的に最大応答加速度は大きい。また、床応答スペクトルでは二次モードに相当する周期0.4～0.5秒付近でBi-linear Modelの応答値が大きく上回る。この差は、直線系であるBi-linear Modelの折れ点通過時の剛性急変が、免震建物全体の高次モードを大きく励起することが原因である。この事例は、免震部材の復元力モデルが地震応答解析結果に大きく影響し、適切なモデルの選択が必要であることを示唆している。

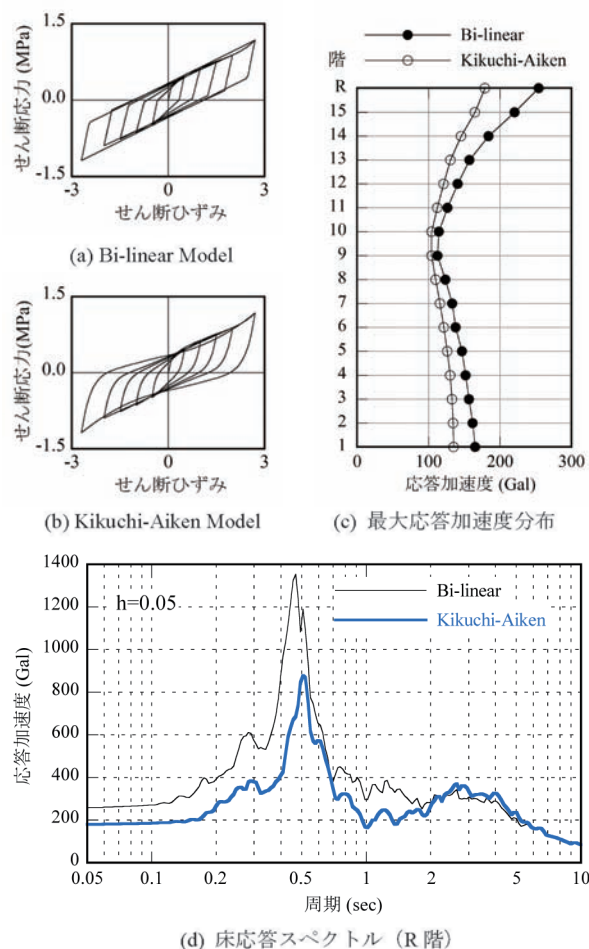


図9 復元力モデルによる地震応答値の比較

4.2 免震建物の非線形挙動

図10は上部構造建物の非線形挙動を再現した3次元地震応答解析結果である。加速度の大きさに応じて地盤や質点の色を変えて描画することで、建物の変形と応答加速度を同時に可視化している。

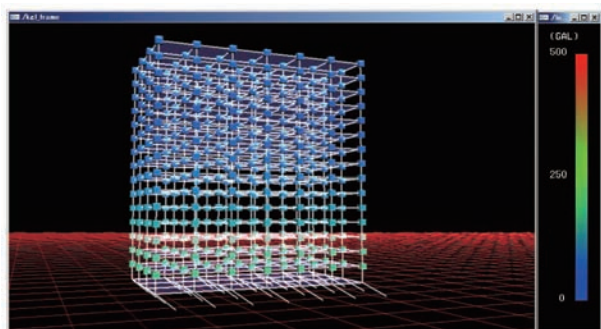


図10 免震建物の地震時挙動の可視化

図10の建物モデルに対して入力地震動を10Gal刻みで大きくして地震応答解析を行ったときの、入力地震動レベルと建物1階の層間変形の関係を図11に示す。建物モデルには、基礎固定と免震2種類(天然ゴム系積層ゴム(NR)+鋼材ダンパー(S-damper)あるいは高減衰積層ゴム(HDR))の計3種類を設定した。入力レベルが増大するといずれの建物モデルでも層間変形は増大するが、免震では400Gal付近で変形が急増し600Gal付近で基礎固定を上回る。免震における層間変形の急増時期は、上部建物の柱梁の塑性化開始点に対応しており、免震構造の脆弱性を示す現象として留意すべき極限事象である⁷⁾。

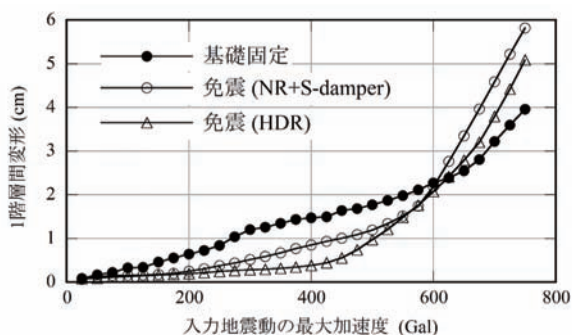


図11 免震建物の非線形挙動の検討事例

5. おわりに

本稿では、免震構造を対象として、積層ゴムおよび免震建物全体の極限挙動を予測する解析手法と、数値シミュレーション事例を紹介した。免震構造は本来、単純なモデル化が可能であり、質点系モデルとの親和性が非常に高かった。しかし、免震構造の多様化・複雑化および要求性能の高まりによって、それが困難な

状況となった。免震構造が巨大地震への有効な備えとなるためには、免震構造自体の高性能化はもちろんのこと、極限挙動を予測するための数値シミュレーション技術の一層の高度化も必要となるであろう。

参考文献

- 1) Masaru Kikuchi, Ian D. Aiken, 'An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings', EESD, Vol. 26, 215–231, 1997.
- 2) Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken: 'Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads', EESD, Vol. 39, pp.1513–1531, 2010.
- 3) M. Kikuchi, I. D. Aiken, A. Kasalanati, 'Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings', Proc. of 15WCCE, Lisbon, Portugal, 2012.
- 4) Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki, Harumi Yoneda and Masahiko Higashino: 'Nonlinear behavior of high-damping rubber bearings under horizontal bidirectional loading: full-scale tests and analytical modeling', EESD, Vol. 41, pp.1845–1860, 2012.
- 5) Hideaki Kato, Takahiro Mori, Nobuo Murota, Masaru Kikuchi: 'Analytical Model for Elastoplastic and Creep-Like Behavior of High-Damping Rubber Bearings, Journal of Structural Engineering', Vol. 141, No. 9, pp.04014213-1–10, ASCE, 2015.
- 6) 本間友規, 近藤明洋, 竹中康雄ほか: 大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その9～11), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.397–402, 2008.9.
- 7) Masaru Kikuchi, Cameron J. Black, Ian D. Aiken: 'On the response of yielding seismically isolated structures', EESD, Vol. 37, pp.659–679, 2008.



菊地 優(きくちまさる)

1986年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了、清水建設株式会社大崎研究室などを経て2009年に現職、博士(工学)、専門分野: 構造工学、耐震工学、免震・制震

3次元地震応答シミュレーション技術を活用した原子力施設の地震リスク評価手法の高度化への取り組み

西田 明美

●日本原子力研究開発機構 研究主幹

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震からまもなく6年。福島第一原子力発電所の事故を受け、原子力施設の地震に対する安全性の評価は従来にも増して重要な課題であると位置づけられ、原子力分野にかかわる研究者・技術者には地震安全に対するこれまで以上の真摯な取り組みが求められている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）システム計算科学センターでは、原子力施設の建屋や機器の地震時挙動を精度よく評価可能な技術の研究開発に取り組んでいる¹⁾²⁾。3次元仮想振動台システムとよんでいるその技術は、複雑かつ巨大な構造物である原子力施設を部品単位で認識し、必要な解析のためのデータを組み上げる組立構造解析アプローチを核とする。これまでに、原子力機構大洗研究開発センターにある高温工学試験研究炉³⁾の建屋や機器のデータを用いた数値実験を行い、原子力施設全体での大規模地震応答シミュレーションが可能であることを実証している。

本稿では、3次元仮想振動台システムのフレームワーク、システムの核となる組立構造解析アプローチ、および、3次元仮想振動台システムの適用研究として近年開始した原子力施設の地震リスク評価手法の高度化への取り組みについて紹介する。

2. 3次元仮想振動台システムの概要

2.1 3次元仮想振動台システムのフレームワーク

図1に3次元仮想振動台システムの概要を示す。本システムは、ネットワークによる計算機結合環境において、複数のプログラムやデータの関係図を描画できるTME (Task Mapping Editor) 機能等を利用し、部品ごとのデータの集積や解析を実行するフレームワークからなる。本フレームワークを用いて、これまでに、原子力機構内の4つのスーパーコンピュータをネットワーク結合した計算機環境で合計約2億自由度規模の大規模地震応答シミュレーションを実現し、提案するフレームワークの有効性を実証している⁴⁾⁵⁾。解析結果の例を図2に示す。

2.2 組立構造解析アプローチ

3次元仮想振動台システムでは、CADデータやメッシュデータは部品単位で構成され、解析の目的に応じ

て必要な部品を組み合わせることが可能である。前述の数値実験では、組立構造解析アプローチにより部品データを各計算機に配置し、ネットワーク経由で連携させる解析を行っている。

組立構造解析アプローチでは、多くの部品を組み上げていくため、部品間の結合処理が不可欠となる。部品間の結合面におけるメッシュは一般的に不整合となり、それらの接続には現実の結合面の物理状態に応じた接続方法を選ぶ必要がある。これまでに、パネル法、多点拘束法、マルチスプリング等が実装されている⁶⁾⁷⁾。複数の接続方法を実装することで、システムの利用者は物理状態に応じた接続方法を選ぶことが可能となる。

組立構造解析アプローチは、文部科学省HPCI (High Performance Computing Infrastructure) 戦略プログラム／分野4「次世代ものづくり」／課題5「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」（課題責任者：原子力機構システム計算科学センター 中島憲宏）(H21-26年度)⁸⁾における「実験では不可能な詳細かつ一体的な耐震シミュレーション技術（あるがままシミュレーション技術）」の研究開発においても適用されている⁹⁻¹²⁾。

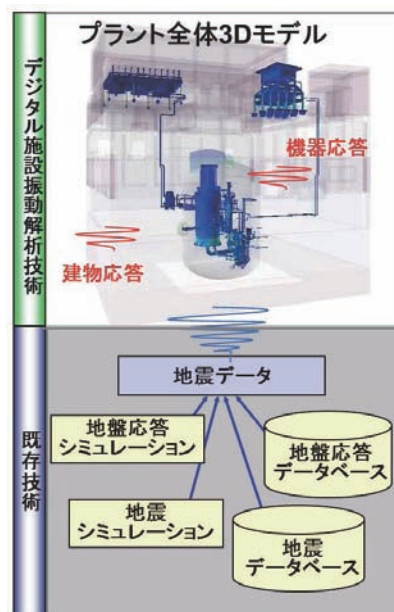


図1 3次元仮想振動台システムの概要¹⁾

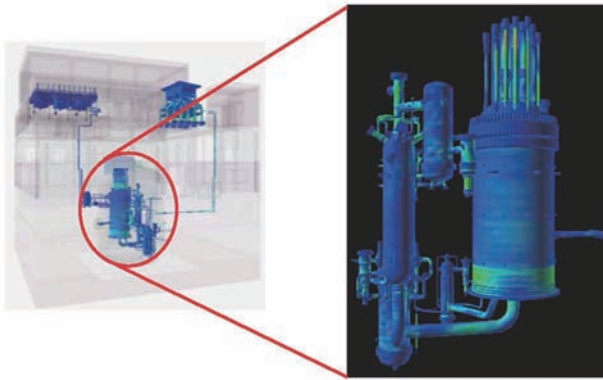


図2 3次元仮想振動台システムを用いたシミュレーション結果の例

3. 原子力施設の地震リスク評価手法の高度化への取り組み

3. 1 モンテカルロシミュレーションを用いた次世代地震リスク評価手法の構築

(1) 概要

東北地方太平洋沖地震以降、原子力施設の地震リスク評価の重要性がクローズアップされ、各所で議論されるようになってきた。原子力施設の地震リスク評価は、設計想定を超える地震動の発生可能性を考慮して安全を一層確実にするための強化策として有力な手段であることが期待されている。そこで、これまでに開発してきた3次元仮想振動台システムを活用した地震リスク評価手法の高度化の試みとして、モンテカルロシミュレーション(MCS)を用いた地震リスク評価手法の提案を目的とし、研究開発に着手した。従来の地震リスク評価では、地震動(ハザード)評価と建屋・機器の損傷(フラジリティ)評価において、分離した手法を用いることが一般的である。すなわち、地震動の特性を地動加速度(PGA)といったスカラー量で表現し、また、建屋・機器の耐力も地動加速度の大きさに表現することを基本としており、地震動の複雑な特性や建屋・機器の多様な損傷特性を十分表現できていないことが問題であった。本来、分離手法を用いずに一貫して個々の地震動に対するシミュレーションにより建屋や機器の損傷を評価することが適切であり、本検討ではその構築を目標としている。本手法のメリットは、対象とする機器が損傷しやすい地震動の震源特性の同定、また、機器間の損傷の相関などを直接評価できること等にある。なお、本研究の一部は、東京大学、東京都市大学、CSAJ、大成建設との共同研究として実施しているものである。

(2) 入力地震動の生成¹³⁾

はじめに、入力となる地震動の生成法の検討に着手

した。従来の地震リスク評価における地震動評価法は、距離減衰式による地震ハザード等に基づく経験的手法と断層モデルによる物理的手法の大きく二つに分けることができる。前者では地震動の震源特性を十分に反映できないという課題があり、後者では地震動の発生頻度を考慮できないという課題があった。そこで、これらの課題を解決するために、両者を組み合わせた手法を考案した。すなわち、対象敷地の距離減衰式による地震ハザードに調和し、かつ断層モデルを考慮した多数の時刻歴波形の集合(地震波群)を作成する手法を提案した。対象敷地の地震ハザードと地震波作成範囲を図3に示す。作成した地震波群は、地震ハザードとの関係が明確であり、更に地震波群の各地震波は互いに異なる震源特性を有しているため、地震波の時刻歴波形と震源特性を結びつけることができるという点で地震リスク評価の精度向上に資することが期待される。

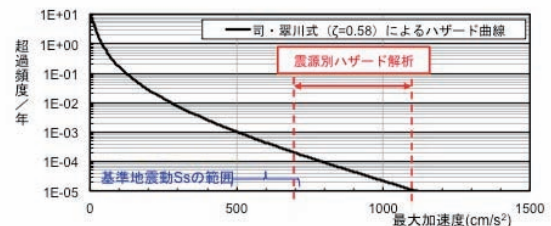


図3 距離減衰式に基づく地震ハザード曲線の例

これまでに、原子力機構の大洗地区周辺で起こり得る地震動をMCSで発生させ、発生頻度に応じた地震動を抽出する試みを行った¹⁴⁾。抽出した地震動の例を図4に示す。このように、ハザード曲線上で同程度の最大加速度領域においても、その条件を満足する地震動は多様な波形から構成されることが分かる。

不確かさを考慮した震源特性を表1に示す。その結果、図5に示すように震源特性のうち平均応力降下量や高振動数遮断フィルタは地震動の最大加速度への影響が大きいという知見が得られている。

表1 不確かさを考慮した震源特性¹³⁾

平均応力降下量	$\Delta\sigma$
ライズタイム比	α_{rr}
高振動数遮断フィルタ	f_{max}
媒質のQ値	C_{Qc}, C_{Qp}
アスペリティ面積比	$C_{S\sigma}$
アスペリティ位置	$aspX, aspY$
破壊開始点位置	$startX$

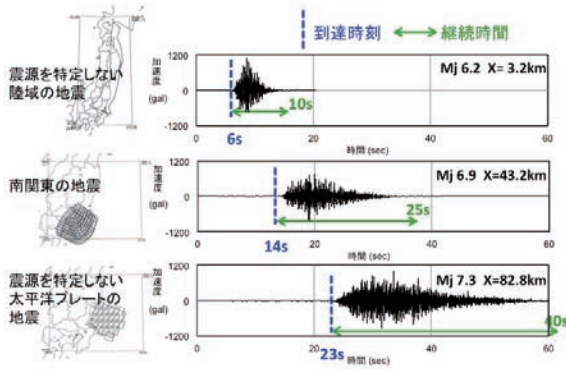


図4 作成した地震波の時刻歴波形の例¹³⁾

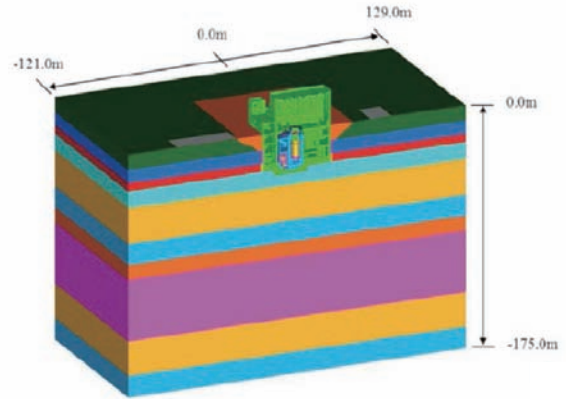


図6 原子力施設(建屋)の3次元有限要素モデルの例¹⁵⁾

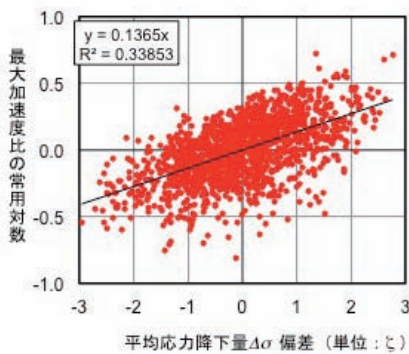


図5 震源特性と最大加速度比の関係の例
(最大加速度比は中央値に対する比)

(3) 地震応答シミュレーションの例

(2)で生成した地震動群を入力とする原子力施設の地震応答シミュレーションを実施し、得られた建屋や機器の応答を耐力と比較することで、建屋や機器の損傷を評価する。これまでに、同サイトに立地する原子力施設(建屋)の3次元有限要素モデルによる地震応答シミュレーションに着手している¹⁵⁾。シミュレーションに用いている原子力施設(建屋)の3次元有限要素モデルの例を図6に示す。(2)で生成した200種類の地震動を用いて地震応答シミュレーションを実施し、建屋耐震壁の同一階における応答の相関や、最大応答のばらつきの分析等を行っている。多様な地震動を入力して得られる結果を分析することで、建屋や機器の応答のばらつきや、応答と入力した地震動の震源特性との相関など、詳細な分析を行うことが可能となる。

3. 2 地震リスク評価の信頼度向上への取り組み

原子力施設の地震リスク評価にかかわり、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の信頼度向上に関する研究」(代表:東京都市大学村松健教授)(H24-26年度)が採択された¹⁶⁾。本研究では、地震起

因事象の確率論的リスク評価(地震PRA)の手法について、炉心損傷頻度評価に伴う不確かさをより適切に取り扱うための新たな数学的枠組みと、専門家の知識(専門知)を活用した地震時損傷評価(フラジリティ評価)の手法を検討・提案するとともに、その適用に必要な地震時システム信頼性解析用計算コードを開発することにより、地震PRAの信頼度を向上させ活用促進に資することを目的としている。原子力機構は、原子力施設機器のフラジリティ評価手法の検討にかかわり、機器の地震時入力となる建屋応答の感度解析を担当し、3次元有限要素モデルを用いた多数の地震応答シミュレーションと分析を実施した¹⁷⁾。特に、リスク評価における不確かさを自然界に存在する偶然的な不確かさと知識不足に起因する認識論的不確かさに分類し、低減可能な不確かさである認識論的不確かさの定量化を試みている。本研究は、研究期間終了後も前述の東京大学等との共同研究の一部として継続的に実施している。

4. おわりに

原子力機構において開発している原子力施設の地震応答シミュレーションのための3次元仮想振動台システムと、その技術を活用した原子力施設の地震リスク評価手法の高度化への取り組みについて紹介した。計算機の発達とともに、計算処理の大規模化等に起因する課題は徐々に克服され、実形状を模した3次元有限要素モデルなどを用いた大規模解析を多数同時に行うようなシミュレーション技術が実用化される時期はそう遠くないことが予想される。一方で、近年はシミュレーション結果の検証と妥当性評価の重要性がV&V(Verification and Validation)というキーワードで認知され、各学会はその実施のためのガイドラインを策定している¹⁸⁻²⁰⁾。出力される膨大な計算結果を検証し、適切に分析して活用するための技術の重要性は、原子力

分野にかかわる地震安全に対する評価の信頼性向上のためにも、今後ますます高まっていくものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省HPCI戦略プログラム、および、文部科学省国家課題対応型研究開発事業原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブとして実施したものである。

参考文献

- 1) 西田明美、他 8 名：原子力プラントのための 3 次元仮想振動台の構築—組立構造解析法による巨大施設解析システムの提案、日本原子力学会和文論文誌、Vol.6、No.3、pp.376-382、2007.
- 2) 西田明美、他 8 名：原子力施設のための 3 次元仮想振動台システムの研究開発への取り組み、RIST ニュース、No.54、pp.33-37、2013.
- 3) https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/_top/top.htm
- 4) Yamada, T., et al.: Proposal of vibration table in an extended world by grid computing technology for assembled structures, Theor. Appl. Japan, Vol.57, pp.81-87, 2008.
- 5) Kim, G., et al.: Full-scale 3D vibration simulator for an entire nuclear power plant on the simple orchestration application framework, Progress in Nuclear Science and Technology (PNST), Vol.2, pp.634 – 638, 2010.
- 6) Nakajima, N., et al.: Assembly Structural Analysis System, Transactions of the 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT22), 2015.
- 7) Nakajima, N., et al.: Structural Analysis for Assembly by Integrating Parts, Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22), 2014.
- 8) <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/project/earthquake/index.html>
- 9) 中島憲宏、他 6 名：大型プラントの次世代耐震シミュレーション、ターボ機械、p.44-50、2014.
- 10) 中島憲宏、他 6 名：「京」利用による次世代耐震シミュレーションの例証、計算工学、Vol.20、No.4、pp.20-22、2015.
- 11) Nishida, A., et al.: Seismic response simulation of HTTR building against 2011 Tohoku Earthquake, the 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE23), 2015.
- 12) Nakajima, N., et al.: Time Domain Response Analysis

for Assembly by Integrating Components, Transactions of SMiRT23), 2015.

- 13) 原子力施設の地震リスク評価手法の高度化に向けて—断層モデルと発生頻度予測を組み合わせた地震動生成法の提案—、原子力機構の研究開発成果2014、p.123、2014.
- 14) Nishida, A., et al.: Hazard-Consistent Ground Motions Generated with a Stochastic Fault-Rupture Model, Nuclear Engineering and Design, Vol.295, pp.875–886, 2015.
- 15) 西田明美、他4名：原子力施設の地震リスク評価手法の高度化のための原子力施設建屋・機器の地震応答解析、JCOSSAR 2015 論文集、2015.
- 16) http://www.jst.go.jp/nuclear/result/h26/pdf/ini_p04.pdf
- 17) Nishida, A., et al: Reliability Enhancement of Seismic Risk Assessment of NPP as Risk Management Fundamentals, Part III: Sensitivity Analysis for the Quantification of Epistemic Uncertainty on Fragility Assessment, SMiRT23, 2015.
- 18) 工学シミュレーションの品質マネジメント（第2版）、日本計算工学会、2014.
- 19) 工学シミュレーションの標準手順（第2版）、日本計算工学会、2015.
- 20) シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015、日本原子力学会、2016.



西田 明美 (にしだ あけみ)

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、東京大学生産技術研究所、(旧)日本原子力研究所を経て現職。博士(工学)。専門分野：計算工学、構造工学、衝撃工学。

複合災害避難シミュレーションによる大都市避難の問題点 —火災避難と帰宅困難現象を事例として—

廣井 悠

●東京大学大学院 准教授

1. はじめに

2016年末に糸魚川市で発生した大規模火災、いわゆる糸魚川大火は、延焼面積約4万平米という甚大な被害に至ったものの、幸いにも死者は発生していない。筆者らのヒアリングによれば、糸魚川市では出火から約2時間後、本町及び大町2丁目に避難勧告が出されており、防災行政無線や個別受信機でこれを伝えると共に、職員が戸別訪問しながらまわることによって避難を促したという。強風下で都市大火が発生しながらも人的被害が僅かであった原因は、延焼速度が過去の大火に比べてそれほど速くなかったという理由のほか、このような市や消防の迅速な避難に関する判断が一因であったと考えられる。ところで上記のような平常時の火災とは異なり、地震時における市街地火災からの避難はより困難と考えられる。なぜなら地震時は、細街路の閉塞や情報伝達の障害、同時多発火災による避難経路の不足など、避難行動を阻害する様々な要因が更に加わるからである。この地震火災からの避難については、避難シミュレーションを含め、過去より様々な検討が進められてきた^{例え(1), (2), (3)など}。しかしながら、わが国の東京・大阪・名古屋などを代表とする大都市域は特に、多量の帰宅困難者による過密空間の発生や津波と火災の同時多発などが大規模災害時に想定され、よりいっそう市街地火災からの避難は困難なものになると想定される。

このような状況を踏まえ、本稿では著者らが開発をすすめている大都市を対象とした複合災害からの避難行動を扱ったシミュレーションを用い、このような困難性を可視化してみよう。このシミュレーションは、大都市災害で発生しうる複合的な災害事象を取り扱う点が特徴であり、ここでは首都圏を対象として、帰宅困難現象と市街地火災という2種類の現象を事例としたい。さて、帰宅困難現象により移動する人々は場合によっては都道府県境界をこえるなどやや広域的な移動を行う一方で、地震火災からの避難は最寄りの広域避難場所まで移動することが一般に求められており、やや狭い単位での避難行動となる。このため本研究では計算量の関係から、首都圏スケールの広域シミュレーションと地域単位の狭域シミュレーションを別個に構築し、両者を入れ子構造的に関連付けることで複

合災害からの避難行動の評価を可能とした。

2. 広域の避難シミュレーション (帰宅困難)

本研究で構築するシミュレーションのひとつめは、都市圏スケールを対象とした避難シミュレーションである。これは既存研究の成果⁴⁾を用いたもので、自動車と徒歩の移動双方を考慮しており、おおむね1都3県かつ東京駅から40km圏内を対象範囲としている。このもとで、既存研究⁵⁾によって得られた帰宅意思モデルに基づき帰宅困難者が自宅へ様々な交通手段で移動すると仮定して、その再現を試みた(対象人口約600万人)。この結果、歩行者空間で6人/m²を超えるような過剰な密集状態がいつどこで発生するか、また災害対応が著しく遅れる重度の交通渋滞がどのような条件で発生するかを検証することができ、帰宅困難者対策の政策評価を可能とすることができた。用いた道路はDRMデータ(平成26年)の一般都道府県道以上及び道路交通センサス(平成22年)対象道路(ただし高速道路は除外)であり、歩道幅は道路交通センサスの歩道幅データを使用、道路交通センサス対象外の歩道幅については片側1m×両側としている。このもとで自動車と徒歩移動者が移動を行うマルチエージェント型シミュレーションを構築している。移動速度は中央防災会議⁶⁾を参考に、徒歩移動の場合は混雑度が1.5人/m²以下で時速4km/h、混雑度が1.5人/m²以上6人/m²未満では時速4km/hから時速0.4km/hまで直線的に低減し、混雑度6人/m²以上は0(つまりそれ以上入らない)ものとした。他方で自動車の移動速度は道路交通センサスの非混雑時旅行速度を基本としたが、帰宅車両による混雑状況に応じた速度制限を与えた。混雑状況による速度制限は道路交通からの推計値により、車両密度の最大値を150台/kmとしたうえで、100台/km以上の車両密度では、速度を1km/hに制限し、車両密度(台/km)、移動速度(km/h)において(1)式が成り立つよう設定した(ただし歩道の混雑度が0.5人/m²以上の場合は歩行者による車両交通への影響を考え、車両密度に(2)式を適用。この数値は実データと適合するよう推定した値であり、この場合の決定係数R²=0.48であった)。なお、車両密度には帰宅車両の通行台数に道路交通センサスの14時台の交通量を加えた。

$$\rho_{car} = 1000V_{car}^{-1.0} \quad (1)$$

$$\rho'_{car} = 750V_{car}^{-1.3} \quad (2)$$

上記のシミュレーションで用いている移動者データは廣井ら⁵⁾の分析結果を用いた。ここでは、帰宅意思の決定にランダム効用理論 (Multinomial Logit Model) を仮定し、東日本大震災時に得られたアンケート調査のトリップデータをあてはめ、係数とそのHessian行列を求めることで係数

の有意確率及びモデル全体の自由度調整済尤度比を求めている。このもとで、表1に示すケーススタディを設定し、様々な政策評価を検証する。

ケース(1)は東日本大震災を再現した結果である。東日本大震災時は平日の就業時間中に発生した震度5強程度の災害であったため、帰宅開始時間もばらつき、かつ滞留できる施設も多く、一斉帰宅状態とはなっていない。このため混雑の発生条件としてはやや緩い条件となる。ここでは帰宅開始時間分布を東日本大震災時と同様 (ただし、高層建物内の滞留者が屋外に出てくるまでの時間などは考慮していない) とし、徒歩帰宅、車で迎えに来る選択も東日本大震災時と同様の割合としてシミュレーションを行った。

これ以降のケースは首都直下地震など強い揺れを想定したものである。ケース(2)は東日本大震災時と異なり、就業者などの「通勤・通学・勤務」目的の人や、買い物客など「私用・その他」の人がいずれも災害直後に一斉の徒歩帰宅を試みると仮に想定した場合の結果である (ただし車での送迎を選択する人の数は上記の帰宅意思モデルに基づくものとする)。つまり東日本大震災時と徒歩帰宅者の数及びその出発時間分布が大きく異なり、結果としてたいへんな混雑が考えられる想定である (東日本大震災時の滞留者が、仮に全員徒歩帰宅してしまったらという想定)。ケース(3)はケース(2)をベースとしつつ、就業者など「通勤・通学・勤務」目的の人が半分は徒歩帰宅ではなく滞留を選択したとする場合の想定である。つまり徒歩帰宅者の帰宅開始時間分布は一斉でありながら、就業者の一斉帰宅数を半分抑制できた場合の政策効果とみてよい。ケース(4)もケース(2)をベースとしつつ、買い物客などの「私用・その他」の人が半分徒歩帰宅ではなく滞留を選択する場合のシミュレーションである。一時滞在施設の確保をはじめとした、私用外出者の帰宅抑制効果を検証す

表1 広域シミュレーションケースの特徴と結果

	ケース(1)	ケース(2)	ケース(3)	ケース(4)	ケース(5)
帰宅開始時間	東日本大震災時と同様	一斉	一斉	一斉	一斉
従業員の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	半分が滞留	全員帰宅	全員帰宅
私用外出者の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	全員帰宅	半分が滞留	全員帰宅
車両による帰宅	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車
車両による送迎	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	無し
6人/m ² 以上の平均道路延長(歩道,km)	0.04	5.10	1.43	4.24	5.10
3km/h未満となる道路延長(歩道,km)	1307	1529	1527	1537	576

るケースとなる。ケース(5)はケース(2)をベースとして、車で迎えに来る人をゼロとしたケースである。このとき、車で迎えに来てもらうことを選択する人はみな滞留するものとし、自分の自動車で帰宅する人は他ケースと同じくそのまま一斉に帰宅を試みる。

なお、ここで構築したシミュレーションは東日本大震災時の帰宅データおよび東日本大震災発生時の携帯端末による経路探索サイト (株式会社ナビタイムジャパン)⁷⁾ 利用者のプローブデータ (東京23区内、トリップ移動距離1km以上、震災直後から6時間後までの移動で抽出: サンプル数81区間) による検証を行っている。その結果は、図1、図2のように示され、おおむねシミュレーション結果は東日本大震災の実態を表しているものと解釈できる。

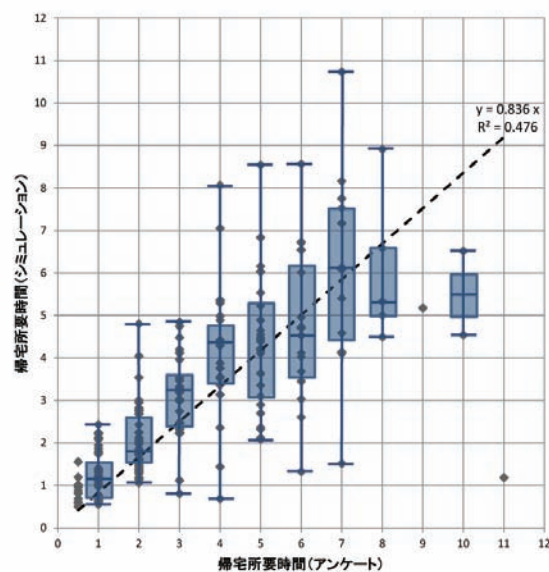


図1 実データとシミュレーション (ケース1) で計算した帰宅所要時間の比較 (N=444)

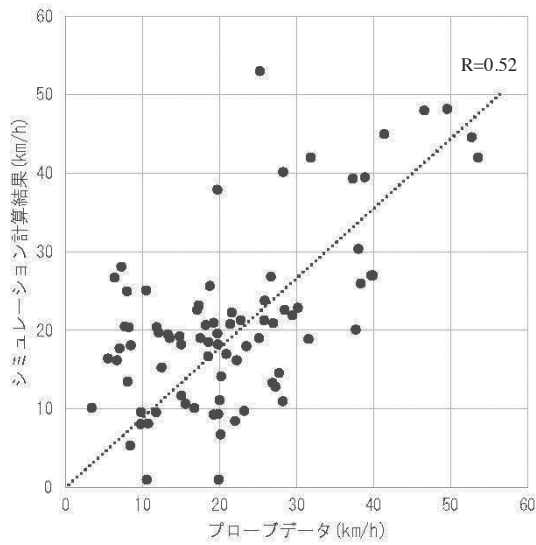


図2 プローブデータとシミュレーションケース1の区間別移動速度の関係 (N=81)

3. 狭域の避難シミュレーション (市街地火災)

続いて、市街地火災からの避難シミュレーションを構築する。本来であれば市街地火災からの避難シミュレーションも広域を対象として行うのが望ましいが、計算量の制約から、市街地火災からの避難は避難圏域を守り、各々が指定された避難場所に向かうものと仮定し、東京都墨田区を対象としている。

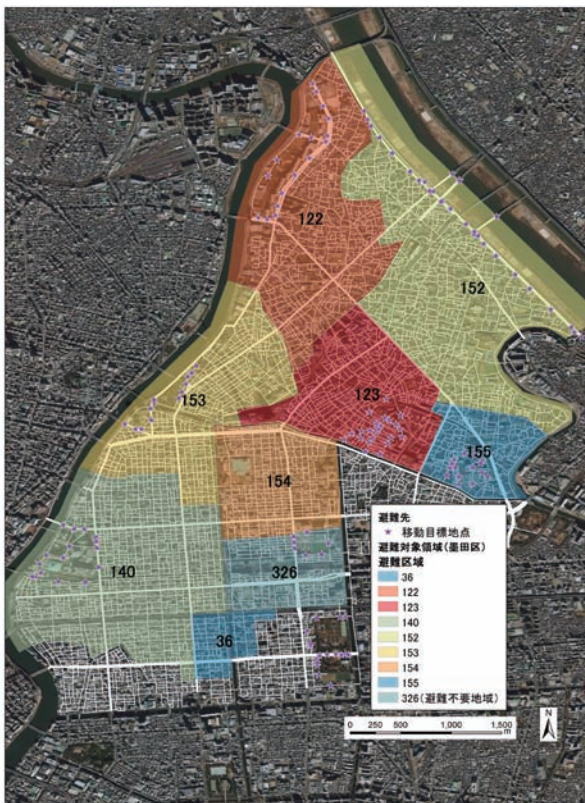


図3 避難区域と避難移動目標地点 (墨田区全域)

ここで市街地火災からの避難については滞在者のみとした (外出者および帰宅後のエージェントは市街地火災からの避難を行わない)。結果としてこの狭域避難シミュレーションでは、延焼危険性の高い東京都墨田区全域を対象に、対象地域内の平日昼間での滞在者 (PT調査により算出し、総計約22万人) が各建物から指定広域避難場所へ移動するようシミュレーションを設定し、広域シミュレーションで対象とした幹線道路のみならず、細街路 (歩行者通行幅は4mとし、車は通行しないものとする) も避難行動に用いることとした。対象地域を示したものが、図3である。

4. 入れ子シミュレーションの結果と今後の課題

広域と狭域の入れ子シミュレーションとして、広域の避難シミュレーション (約600万人) のケース (2) を前提 (帰宅困難者が一斉帰宅するものと仮に想定) とした上で、狭域の避難シミュレーション (約22万人) と同時に計算する。なおここでは、道路閉塞の確率を細街路に限り1リンクあたり5%と仮に設定し、様々なケースの下で避難完了時間分布を計算している。この結果が図4である。Case 0は混雑の影響がなく、かつ道路が閉塞しない場合である。このケースは平常時に避難場所へ任意の住民が建物から移動することを想定したもので、この状況下では98.4%が30分以内に避難を完了することができる。Case Aは混雑を考慮しないが道路閉塞があるパターンを示したものである。ここでは、Case Aと比べてやや避難完了時間が遅くなるが、それでも97.7%が1時間以内での避難を可能とする。つまり対象とした市街地に関する限り、リンクが5%の確率で閉塞しても代替の避難路は存在することになる。ここまでは、狭域シミュレーションのみで計算した結果であり、帰宅困難者の存在は考慮していない。

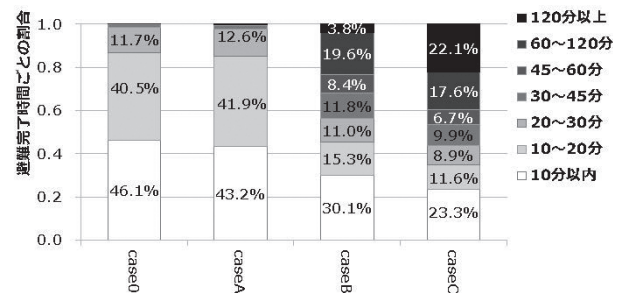


図4 それぞれのケースにおける避難完了時間比較

他方でCase BとCase Cは、帰宅困難者の存在を考慮して入れ子シミュレーションの計算結果をまとめたものである。はじめにCase Bでは、道路閉塞を考慮したうえで、地震発生直後に墨田区の住民全員が避難を開

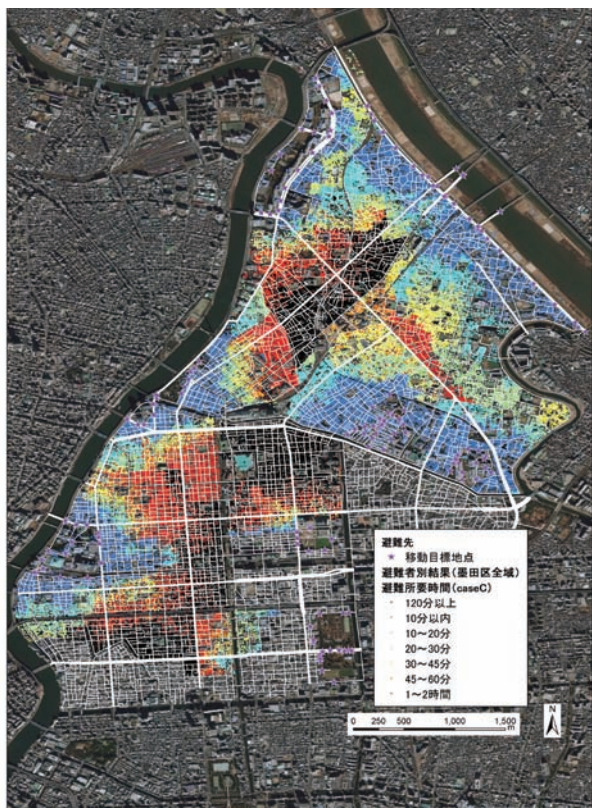


図5 ケースCの避難完了時間

始した。この状況下では、30分以内に避難を完了できる人が56.4%であり、1時間以内は76.6%しか指定された広域避難場所まで到達できない。ここでは全体の3.8%(8,334人)が2時間以内に避難場所に到達できないことになるが、墨田区の住民は地震直後に一斉避難をしているため、帰宅困難者による混雑の影響はそれほど受けてはいない。次にCase Cである。このケースは道路閉塞したうえで、地震発生から2時間後に墨田区住民全員が避難を一斉に開始するものである。地震が発生してから2時間後のため、墨田区内には多数の帰宅困難者が滞在している。つまりこのケースは、帰宅困難者の移動と市街地火災からの避難者が錯綜して大混雑を起こした場合を検証するものである。結果として、このケースにおいては30分以内に避難を完了できる人は43.8%、1時間以内でも60.3%しか指定された避難場所に到達できないことがわかった。さらに、2時間以内に指定された広域避難場所にたどり着けない人は全体の22.1%(48,471人)である。つまりこれは帰宅困難者の一斉帰宅かつ地震から2時間後の避難行動という条件下では、帰宅困難者による市街地火災避難の阻害がシミュレーション上で可視化された(図5)ということになる。特に地震直後と地震から2時間後では、2時間経っても指定された広域避難場所にたどり着けない数の住民が約6倍に増えてしまう点は、対策の必要

性を示唆するものであろう。

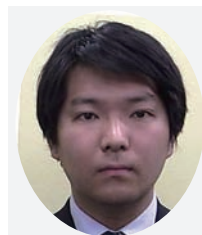
本研究は首都圏を対象としているため市街地火災からの避難を念頭に置いたものであるが、津波避難においてもこの傾向は同様であると考えられる。いずれにせよ大都市内で迅速な避難を実現するためには、帰宅困難者による混雑発生も踏まえた避難開始時間の設定や、避難計画からみた一斉帰宅抑制の効果検証など、大都市特有の避難計画の策定技術が必要とされるであろう。

謝 辞

本稿で紹介したシミュレーションは科学研究費補助金若手研究(A)：複合災害を考慮した大都市における避難行動の再現とその計画・支援に関する研究(研究代表者：廣井悠, H25-H28)の助成を受けました。

参考文献

- 1)熊谷良雄、岸栄吉：火災時における避難行動の分析 -酒田大火と関東地震・東京を例にして-、日本都市計画学会、日本都市計画学会学術研究発表会論文集、No.18、pp.169-174、1983.
- 2)塚越功：酒田市大火の避難行動の解析、建設省建築研究所、昭和52年度秋期講演会梗概集、pp.79-103、1977.
- 3)梶秀樹、熊谷良雄、増山格、野堀勝明：広域避難計画における地区別避難危険度の算定、日本都市計画学会、日本都市計画学会学術研究発表会論文集、No.17、pp.559-564、1984.
- 4)廣井悠、大森高樹、新海仁：大都市避難シミュレーションの構築と混雑危険度の提案、日本地震工学会論文集第16巻第5号、pp.111-126、2016.
- 5)廣井悠、関谷直也、中島良太、藁谷俊太郎、花原英徳：東日本大震災における首都圏の帰宅困難者に関する社会調査、地域安全学会論文集、No.15、2011年、pp.343-353.
- 6)中央防災会議：首都直下地震避難対策等専門調査会報告、2008年。
- 7)ナビタイムジャパン：<http://corporate.navitime.co.jp/>



廣井 悠(ひろいゆう)

東京大学准教授。1978年10月東京都文京区生まれ。東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻・博士課程を中退、同・特任助教、名古屋大学減災連携研究センター准教授を経て2016

年4月より現職。

博士(工学)、専門は都市防災、都市計画、防災学、行動科学。平成28年度東京大学卓越研究員。JSTさきがけ研究員(兼任)。

地震防災工学から気の向くままに歩んで防災に至る

北浦 勝

●(公益社団法人)金沢職人大学校 理事長・学校長

1. はじめに

大学4年生で研究室選びのとき、仲の良かった友とは別の研究室を選んだ。わたしにはどうしても友に頼ってしまう性格があるから、卒研は自力でしたいと思った。しかし研究室に入ったら、優秀な同級生と一緒に、親切な先輩がいたので、またそういう人たちに頼りそうになりかけた。それぞれの才能や力量を持ち寄ってする共同研究は良いが、共同研究者に全面依存のような研究への関わり方はするまいと思った。

1960年代当時は強震記録が少なかったので、地盤の動特性を反映できる地震波を電算機上で作成する研究を指導教官の下で始めた。大学でも使えるようになったFORTRAN言語で動く電算機を使い、指導教官によって作られたプログラムを使いこなすうちに、ほかの研究に使うプログラムを作る自信が少しはついた。修士論文では構造物基礎—地盤系の復元力を求める実験を実施した。一人ではできない実験的研究であったので、指導教官と一緒に行ったが、できるだけ共同研究となるように、教官に頼り切らないように心がけた。こうして、実験をするノウハウを身につけた。博士論文では、(1)複雑な地震波が作用するときの系の復元力特性を実験で求め、(2)電算機上で復元力特性を制御するプログラムを作成し(図1)、(3)地震波を入力としたときの系の応答を求めた。

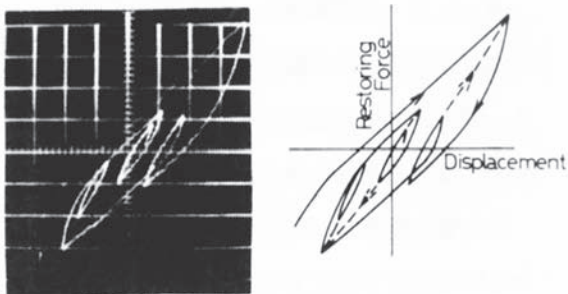


図1 構造物基礎—地盤系の復元力特性とその制御法

2. 独り立ちへのスタート

雪国にある金沢大学へ赴任し、act locallyを実践しようと、積雪時の構造物の地震応答に注目した。最も簡単な線形1自由度系の場合で考え、減衰定数はあまり変わらないとすると、雪による質量の増加は系の周期を増加させ、地震時には免震のような効果を生み出し、



写真1 豪雪による家の破壊調査

系にかかる地震力を小さくする。しかし系の変形量が増えて限界値を超え、壊れてしまう危険性がある。もし積雪量が多いと、地震がなくても雪の重さだけで壊れてしまう(写真1)。ということは、積雪時の木造家屋は地震に不利であるから、屋根雪は早い目に下ろすのがよいとの、当然の結論を得た。しかし会社等に勤めている人は週末にしか屋根雪下ろしをできない。そこでギリギリまで屋根雪下ろしをしない場合、今後の雪予報を考慮すると、予めどれくらいの積雪量で雪下ろしをするのがよいか等の研究もした。敷地が広いと屋根雪を下ろしっぱなしで良いが、狭いとそれをどこかへ捨てに行かねばならない。屋根雪下ろしをした後に道路の除排雪をすると、除排雪は一度で済むが、人間は疲れるから、話は簡単ではない。屋根雪下ろしを業者に依頼したいほど積もるときは、依頼が殺到するから、なかなか来てもらえない。家がつぶれないかとヒヤヒヤする。近年は暖冬で、金沢辺りでは屋根雪下ろしをする必要はほとんどなくなった。最近では、建築費が少し高くつくが積雪2mでも屋根雪下ろし不要の家があるし、バス通りには道路のほぼ中心線に沿って消融雪装置が設けられ、小さい穴からなま温かい井戸水が放水される。しかしおしゃれかどうか知らないが、長靴を履かなくなった人や高齢者や身体の不自由な人は道路に少しでも雪があると、歩きにくいし、地震時にも逃げにくい。雪問題は山ほどあり、その解決が期待されているが、キーワードは近所パワー、共助、ボランティア精神であると思う。

この辺りから研究対象が地震防災工学から少し離れた。

3. ライフライン地震防災と実験

ライフラインという言葉が注目されたとき、軟弱地盤では特に問題であると思い、1980年代に、液状化地盤中の埋設管の応答と震害防止について、先ず実験で確かめようと思った。幸い教育機関としては比較的大型の振動台を設置できたので、長さ1mほどの管模型をゆる詰め湿潤砂層中に埋設した。地盤が液状化するまでの途中で管のひずみが大きくなることが分かった。また液状化に伴う地盤流動が応答に大きく効くので、延びる継ぎ手、延びる管体だと管の破断は免れる等の結果を得た。企業との共同実験もした。

地盤の良し悪しはライフラインのみでなく、一般の構造物の応答にも大きく影響するから、常時微動を活用した地盤の動特性評価に挑戦した。人間活動による振動や雑振動の少ない夜間にする事の大切さなど、いろんなノウハウがあることから、他大学の先達に教を請いに行った。石川県内はもとより、富山、福井でも地盤の常時微動を測定し、福井では1948(昭和23)年の福井地震の被害の大きかった地盤との関連を捉えることができた。また他の研究者が発表されていた重力異常の地図を利用し、重力異常地域との対応も指摘できた。地震災害調査においても常時微動を測定し、その成果を用いて、実地震記録が得られていない地盤の地震記録を推定する研究も実施した。

構造物を対象にした常時微動測定では、特別名勝兼六園内にある日本武尊(やまと たけるのみこと)の像やそれを支える石積みで実施した(写真2)。



写真2 兼六園内の日本武尊の銅像(改修後)

兼六園は金沢観光の目玉中の目玉であるから、慎重に実施した。西南の役に出征した2,000人の兵士のうち400人が戦死したことから、その御霊を兼六園内に祀るために、九州で熊襲退治をした日本武尊の故事を重ね合わせて、この銅像が担ぎ出された(諸説あり)。しかし完成後、百数十年が経ち、像を載せている台座石にひびが入っていることから、万一にも地震や台風で像が落下したり、石垣が壊れて観光客や地元民に迷惑が掛かっては大変であるとの考えから、石積みを積み直

すことになった。このような話を関係者から聞き、調査に協力するように依頼されたが、それまで授業で習ったことも、教えたこともなかったので、お断りしようと思った。しかし「長いこと金沢でお世話になっているのに、少しは恩返しをしようと思わんがか」(金沢弁では「か」の前に「が」が入る)と諭され、一から石積みの勉強をすることになった。調査では、反力を取れるように、ゼネコンに先ず銅像をしっかりと鉄骨で覆ってもらった。銅像や石積みの微動を計測するとともに、石積みを東西南北の水平方向から押したり引っ張ったりした。予想していた通り、石積みが若干緩んでいた。ここからは石積みに興味を持っておられる石工さんの出番で、ゼネコンと協力しながら、先ず銅像を取り外し、昔のように、樽とジャッキを使って台座石から下の方へと、石を一つ一つ外した。それを元に戻すに当たっては、割れている石は似たような新しい別の石に取り替え、裏込め石と間詰石をうまく配置しながら胴長の石を表面に置き、積み上げて行く。これでまた百年以上はもつであろうと期待できる出来映えであった。

最近の常時微動実験で最も印象に残っているのは完成(2001(平成13)年)したばかりの金沢城の五十間長屋や菱櫓及び橋爪門続櫓(つづきやぐら)を測定(写真3)し、それから14年後の2015(平成27)年にも測定したことである。



写真3 金沢城五十軒長屋の全景と常時微動測定

元いた研究室の後輩が実施したものだが、測定結果はほとんど変わっていない。劣化しているところかかえて強くなっている個所があり、柱と梁がよりがっしりと噛み合っている剛性が増していることが分かった。今は昼間に調査した常時微動結果から、雑微動を除去して本来の信号をうまく取り出せる方法が考え出されている。

わたしの研究室で勉強し、母国に戻った留学生はたくさんいるが、そのうちの数名とわたしの後輩が地震

防災の共同研究をしている。彼らも常時微動の計測を行っている。

4. 震害調査

震害調査には何回も行ったが、ついつい大きな被害に目をとられがちである。被害の甚大さを調査するだけならマスコミの方がはるかに早い。われわれは被害の小さい所も調査して、何がどのような原因で壊れ、一方何がどのような原因で壊れなかったかをともに知らねばならない。国内での死者の伴う地震はほぼすべてを調査した。外国へも調査にでかけた。ほぼよその土地の地震ばかりを調べたが、2007(平成19)年の地元の能登半島地震のときは忙しかった。実はこの地震の前にも1985(昭和60)年能登半島沖地震や1993(平成5)年能登半島沖地震が発生し、その度に震害調査を行い、地元民にアンケートをとった。地元の防災に貢献しようとマスコミにも調査結果を取り上げてもらった。しかしほとんど誰も見向いてくれなかったし、他の誰も復旧や復興の研究をしなかった。地元では唯一わたしの研究室だけが忙しく調査し、結果を発表したように思う。しかし今回は違った。不幸中の幸いであったが、死者は一人であった。地震の発生したその日に現地調べ、翌日は輪島市役所へ聞き取り調査に行ったところ、「復旧、復興に備えて金沢大学も協力してほしい。ついては委員会を設けるから委員を出してほしい」と言われた。直ぐに副学長に連絡を取り、最適な委員を選び推薦した。そのおかげもあってか、復旧復興はほぼ順調に進んだ。学長は「調査団を組織し、総合大学である長所を生かしてあらゆる観点から地震災害を解析し記録として残し、復興に役立てるとともに、今後の震災にも役立つ調査をするように」と指示した。副学長が団長となり、定年退職が間近いわたしと文系のもう一人が副団長となった。日頃地震や地震調査とは無縁と思われて



写真4 2007年能登半島沖地震調査報告書(金沢大学)

いた学問領域の研究者達が我も我もと手を上げ、研究に名乗りを上げたのにはびっくりした。近年よく言われる大学の地域貢献を考えたからか、今回は学長が研究費を出すと言ったからか、あるいは人が亡くなったからか、文理系合わせて100人以上の研究者が調査に参加した。地震防災はわたしの研究室の専売特許であると思っていたが、地震時にはすべての人やモノが揺すられるから、すべての分野が地震や地震防災と関わっていることをあらためて感じた(写真4)。

5. 美術品用の小型免震装置の開発

阪神・淡路大震災のあった1995(平成7)年の4月1日の新潟県北部地震で、豊浦町の市島(いちじま)邸の湖月閣の一階が倒壊した。しかし直ぐ近くにある茶室は被害を免れた。茶室はちょうどそれがすっぽり入るくらいの凹型の底の浅い半円球のパラボラアンテナのような地面上に置かれていた。茶室の底面もパラボラアンテナにはまるように凸に膨らんでおり、地震のときに茶室が底面で滑ったと推察され、ほんの少しずれていた。免震効果で被害を免れたと考えられる。2004(平成16)年新潟県中越地震では、十日町市博物館に展示されていた火焰土器が免震台の上に置かれていたにもかかわらず、転倒し破損した。上下動が強かったからであるという。これらのことを覚えていたので、直径50cmほどの底の浅いお椀のような入れ物に、タカアシガニ(高脚蟹)のように足の長い、上下の振動を吸収できるバネと減衰器を持つ四輪車を入れ、その上に美術品を載せるという小型免震装置を開発した。形は不格好であるが、水平動はもとより上下動にも対応できる。大学では「特許を取るように」と盛んに奨励するので取ったが、どこの企業も使ってくれなかった。水平動にしか対応できない市販の免震台は、堅い表紙の本のような形で、持ち運びも至って簡単であることから、もっと手軽に扱えるモノでないと、なかなか誰も使ってくれないと知った。

6. 土木史や歴史建築物関連の技のこと

土木史研究については、思わぬことから始まった。当時80歳の方が来られて、これまでに査読付きの論文をいくつか書いたので、まとめて博士論文にしたいとのこと。わたしはこれまで土木史に興味がなく、どう書けば論文としての体裁になるのかが分からなかった。古文書や文献に載っていることを写すだけではダメで、資料を加工し、考察を加えるのだらうとは思ったが、矢張り良く分からず、そこで土木史の分野で既に活躍されていた数人の先生にお願いして、手ほどきを受けた。80歳のこの方の研究の一部は辰巳用水の変遷を調査するた

めに、1804(文化6)年絵巻と1839(天保5)年絵巻を比較し、用水末端部の兼六園への入り口部分の移設時期などを検討していた。同氏は両絵図のコピーを博士論文の付録につけたいと希望した。ところが研究で用いた絵巻のうち、文化6年絵巻は個人の持ち物であった(写真5)。



写真5 文化6年絵巻(一部)

そこで持ち主に承諾を取ってほしいと言われ、電話をしたところ、ご先祖は加賀藩の高級武士であったが、江戸に向かうとき、その絵図を持って行ったとのこと。その家では「代々絵巻を家宝としていて、加賀藩の『か』と言う声が聞こえても緊張し鳥肌が立ったが、子どもや孫は何とも感じていない。当時の知事が『譲ってほしい』と言われたが、『これはいくらお金を積まれても譲ることはできない』と啖呵を切った。しかしこのままでは家宝が失われてしまう。どうしたら良いかを考えていた。ちょうどよい機会であったので、親族会議を開いて寄贈すると決めたい」とのこと。後日原物は石川県立博物館に寄付されることになった。同氏の博士論文には希望通り絵図が付録として挟み込まれている。

辰巳用水は、今何かをしなければ、管理人が歳をとり、用水組合員も減っているのです、このままではいずれ立ち行かなくなるところにまで来ている。金沢は幸いにも戦災や大きな自然災害を受けていないことから、歴史的な建造物が比較的良く残っている。用水は現代のまちに潤いと賑わいを与えるほかに、道の狭いまち中の住宅街で、万一の火災時や場合によっては地震火災時にも人やモノを火災から守るのに役立つと期待される。そこでわたしは今、同氏の跡を追いかけるように、用水の土木学的価値と用水管理のコツと継続方法を調査する会と、文化遺産を自然災害から守る会に所属し、研究や活動をしている。

このような活動をしていたからか、大学を定年退職後、昔ながらの伝統的な匠の技を伝承する金沢職人大学校から声をかけていただき、お世話になっている。大学校には住に関係する職人のうち、石工、瓦、左官、造園、大工、畳、建具、板金及び表具の各業種を対象とする学科がある。昼間は現代工法で仕事をし、夜間

や休日に石川県内で考えられる最高の技能を持った職人を先生として、訓練生は技の獲得に励んでいる。場合によっては京都や東京など他県などからも教えに来ていただいている。授業料は無料で、伝統の心を学ぶために茶道や小謡も学んでいる。昔の工法にも地震や災害に対する巧みな技が組み込まれていることを勉強しつつある。

7. おわりに

研究における give and take には先輩から教えてもらって、後輩に伝えることも含まれると思う。何事にもノウハウがあるから、本を読んでも分からないこと、教科書にもなかなか載っていないが、その分野ではごく当たり前の常識は、恥を忍んでその道の専門家に教えを乞うこと。実験ではそのようなことが多いように感じる。そうすることで、その分野の研究レベルが全体として上がるかもしれない。

東日本大震災では津波から命からがら助かった方の話を聞く研究グループに交えていただき、正しい防災情報の獲得と、地域の防災コミュニティ力の大切さを知った。阪神・淡路大震災でも学んだ。わたしは3,200世帯、9,300人ほどから成る町会連合会の防災防犯担当の係を仰せつかっており、コミュニティの醸成に力を入れている。県庁所在地の活断層としては発生確率の大きい森本・富樫断層がわたしの町付近を横切っている。65歳以上の高齢化率は25%、金沢市全体の平均値より少し大きい。防災防犯担当委員のうち意識の高い方は熱心に取り組んでいるが、そうでない人にも取り組んでもらえるように、最新の知見を取り入れた、難しい内容を噛み砕いた、できるだけ短い文章と、分かり易い絵や漫画、写真から成る数ページの冊子や映像を作ることが大切であると感じている。

わたしの研究は地震防災工学から歴史や建築の面白いがする方向に移って行ったが、今はより広く防災という立場で勉強し、実践しているところである。

以上、いかにもわたし一人で研究などを実施したように書いたが、実際は恩師、先輩や研究室の同僚、学生、仲間の成果がほとんどであり、この機会にあらためて厚く感謝申し上げたい。



北浦 勝(きたうら まさる)

1967(昭和42)年京都大学工学部土木工学科卒。同大学院博士課程、助手を経て1977(昭和52)年金沢大学工学部助教授、教授、2009(平成21)年名誉教授。2012(平成24)年から現職。

東日本大震災合同調査報告総集編 刊行記念シンポジウム開催報告

本田 利器

●東京大学大学院 新領域創成科学研究科

1. はじめに

東日本大震災の経験の記録を残すため、日本地震工学会、日本建築学会、土木学会、日本地震学会、日本都市計画学会、日本機械学会、地盤工学会、日本原子力学会の8学会が、分野の枠を越えて取り組み、全28編からなる「東日本大震災合同調査報告」を出版している¹⁾。これまでに、復興などの今後の研究が必要な編を除くほとんどの出版が完了したこと、また、震災から5年が経ったことを踏まえ、その締めくくりとして、全体像をコンパクトにまとめた総集編が出版された。

その出版を記念したシンポジウムが、2016年12月19日(月)に、建築会館ホール(東京都港区)で行われた。シンポジウムでは、本合同調査報告刊行に携わっている8学会のそれぞれより専門家を迎え、多様な立場から、東日本大震災の知見及びその後の研究が、近年の熊本地震などの大災害や、将来に予想されている南海・東南海地震等の大災害に対してどのように活かされているかを紹介・議論していただいた。

当日は満席(登録参加者145名)であっただけでなく、参加者が非常に熱心な姿勢で話を聴く雰囲気であったことが印象的であった。以下に簡単に報告させていただく。

2. シンポジウムの内容

シンポジウムでは、まず、東日本大震災合同調査報告書編集委員会委員長をつとめる和田章先生(東京工業大学名誉教授)から開会挨拶をいただいた。その後は、以下に紹介する三部から構成された。

第一部では、『「東日本大震災合同調査報告総集編」について』というタイトルで、総集編の編集委員長をつとめられた腰原幹雄先生(東京大学生産技術研究所教授)から、総集編の概要の紹介や、DVDに内容を収録しつつも紙媒体で出版することの意図、膨大な被害調査の結果を残すことの意義についての解説がなされた。

第二部は、『「過去」に学ぶ～東日本大震災から熊本地震まで～』というタイトルのもと、4学会から推薦

された4名のパネリストから講演があった。以下に簡単に紹介する。(敬称略)

(1) 日本地震学会：「地震学にとっての東日本大震災」／山岡耕春(名古屋大学教授、日本地震学会会長)

東北地方太平洋沖地震のメカニズムや、その知見を踏まえた最近の知見として、地震の長期予測やその南海トラフへの適用、大地震の発生機構の複雑系としての性質等が紹介された。

(2) 日本建築学会：「東日本大震災の教訓を踏まえた建築・まちづくり」／小檜山雅之(慶應義塾大学教授)

総集編執筆担当者からのメッセージとして、各種建築構造物や設計・計画、まちづくりに関する知見の要点が紹介された。また、都市のレジリエンスを高めるためには設計の「社会化」が必要との指摘があり、建物の機能維持のための制震等の研究例が紹介された。

(3) 地盤工学会：「顕在化した地震地盤災害リスクとその軽減」／風間基樹(東北大学教授)

地盤工学会の委員会活動やその成果、出版物等が紹介された。また、東日本大震災により顕在化した地盤リスクとして、液状化、津波被害、放射性物質による汚染等が事例とともに解説された。

(4) 日本地震工学会：「東日本大震災からの学び～インフラの“危機耐性”」／本田利器(東京大学教授)

東日本大震災での地震観測から得られる教訓として、各種構造物での強震観測網の整備や、社会のレジリエンスに資する「危機耐性」という耐震性能を考えることの重要性が紹介された。

(5) パネルディスカッション

上記4つの話題提供の後、腰原幹雄先生の司会のもと、それぞれの分野が他分野に求めることや、東日本大震災の被災にあたって、阪神淡路大震災の経験はどう活かされていたのか、また、この地震の経験の何を将来に残すべきであるかという議論がなされた。

第三部では、『「将来」へ備える～南海・東南海地震

等の巨大災害を見据えて〜』というタイトルで、4つの学会から推薦されたパネリストからの講演がなされた。それぞれの内容を簡単に紹介する。(敬称略)

(1) 土木学会：「二段階ハザード設定による減災」／佐藤慎司(東京大学教授)

土木学会が担当・関与する11編の各編の内容が紹介された。対象は、土木構造物、ライフライン、といったハードウェアから、緊急対応や社会経済的影響というソフトウェアまで幅広い。それらを踏まえた知見として、「防災から減災へ」「超過外力への対応」等の考え方が提示された。

(2) 日本機械学会：「産業施設及び機械構造物の耐震設計の現状と効果に関する一考察」／藤田聡(東京電機大学 統括副学長/教授)

機械学会における調査分科会での活動や、機械構造物の被災事例や設計基準の改定等の対応が紹介された。都市機能の維持に於いて機械構造物の役割は大きいことや、対策の検討のために分野横断的な体制が不可欠であること等が紹介された。

(3) 日本都市計画学会：「自然災害と都市のレジリエンス」／横張真(東京大学教授、日本都市計画学会会長)

都市のレジリエンスの例として、食料確保の必要性とその取り組みが紹介された。解決策として、諸外国の事例等も参考に、都市農業という考え方が、実現可能性等も含めて紹介された。

(4) 日本原子力学会：「福島事故の教訓と課題～リスク論と深層防護による地震安全確保～」／高田毅士(東京大学教授)

福島原発事故を踏まえた教訓として、リスク概念の重要性を提示するとともに、対応策としてのリスクマネジメント、特に、深層防護の考え方やその実装についての取り組みが紹介された。

(5) パネルディスカッション

上記4つの話題提供の後、本田の司会でパネルディスカッションがなされた。第二部でも言及されていた分野横断的な研究や検討についての議論が中心となった。実践されている事例や過去の経験などに基づき、人的交流の重要性や個々の研究者や技術者が他分野に取り組むことの有用性や必要性、それらを実施していくための要件等が議論された。

最後は、東日本大震災合同調査報告書編集委員会副委員長をつとめられた川島一彦先生(東京工業大学名誉教授)より、閉会の挨拶をいただいた。阪神淡路大震災の報告書の経験を踏まえ、東日本大震災合同報告の出版にむけた活動をされてきた経緯や出版の現状等をご紹介いただいた。

3. おわりに

東日本大震災から5年が経ちつつも、まだまだ課題は山積しており、本企画を準備する過程に於いても東日本大震災に関するニュース等は耳に入ってきた。社会的関心の高さは、本イベントに多くの出席者があったことや出席者が真剣に聞き入る姿からも感じられた。また、提供された話題やパネルディスカッションが、時間的にはかなり制約の大きいものであったにもかかわらず、内容的に非常に充実していたことから、この地震を契機に多くの課題が認識され、様々な研究が生み出されたことを実感した。これは、それらを取りまとめた報告書およびその総集編の刊行に意義があることをあらためて示していたと考える。

今回のシンポジウムには販売促進という意味もあった(当日は、総集編の割引価格による展示即売も行われていた)が、話題提供者の方々にはそのようなレベルをはるかに超えた講演、議論をしていただけた。このような出版記念のイベントが、形式的なものにとどまらず、質の高い実質的な議論の機会となったことは、企画の一端を担った者としては嬉しい限りである。

参考文献

- 1) 東日本大震災合同調査報告：
http://www.jaee.gr.jp/jp/stack/report_geje/



写真 会場の様子。当日は、熱心な姿勢の参加者で満席であった。

5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motionへの出展および参加、次回日本開催の報告

津野 靖士

●鉄道総合技術研究所 副主任研究員

／松島 信一

●京都大学防災研究所 教授

／東 貞成

●電力中央研究所 副研究参事

1.はじめに

2016年8月15 - 17日に台湾台北市の国際コンベンションセンターにおいて、National Center for Research on Earthquake Engineering, National Applied Research Laboratories (NCREE) の主催、IASPEI、IAEE、国立台湾大学、国立中央大学、京都大学防災研究所、中華民国科学技術部の共催のもと、表層地質が地震動に及ぼす影響 (Effect of Surface Geology on seismic motion) に関する第5回IASPEI/IAEE国際シンポジウムが開催され、28ヶ国から191名の参加があった。

本学会の「強震動評価のための表層地盤モデル化手法研究委員会」(以下、ESG研究委員会)は2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震の強震動特性の解明に関する最新の成果を発信することを目的としてブースを出展し、本委員会所属の東貞成委員長、岩田知孝委員、植竹富一委員、川瀬博委員、津野靖士委員、早川崇委員、松島信一委員の計7委員が参加した。また、本委員会では、第1回、第2回以来となる第6回IASPEI/IAEE国際シンポジウムの日本開催を企画し、東委員長が、IASPEI/IAEE合同ESG国際ワーキンググループのビジネスミーティングにて日本招致のプレゼンを実施した。

2.シンポジウムのセッション

シンポジウムは、NCREE所長のProf. Kuo-Chun Chang

の開催の趣旨説明で始まり、IASPEI/IAEE合同ESG国際ワーキンググループのIASPEI側の委員長である川瀬博教授(京都大学)の開会挨拶(写真1)の後、各講演者の発表となった。

本シンポジウムは3日間にわたり口頭セッションとポスターセッションがあったが、口頭セッションはKeynote speaker(表1)とInvited speakerのみであった(写真2)。29の口頭発表の内10が、101のポスター発表の内43が日本からの参加者による発表であり、ESG研究に対して日本の関心が高いことが伺える。本シンポジウムは7つのセッションから構成され、Ground motion simulationとShallow velocity structures and depth parameters、Soil dynamics and nonlinearity、Applications of microtremor survey、Downhole array observation and analysis、Near fault ground motions、Seismic hazards and loss assessmentsがあった。本シンポジウムのHP(<http://esg5.ncree.org.tw/>)では口頭セッションで発表されたパワーポイントがダウンロード可能であり、興味がある方には是非ご覧いただきたい。

3.日本地震工学会ESG研究委員会の展示ブース

本シンポジウムの団体展示では15の機関および企業の参加があった。本学会ESG研究委員会の展示ブースでは、学会紹介のポスター2枚、本委員会活動状況のポスター3枚、本委員会委員が実施した2016年熊本地

表1 各セッションとKeynote speakerのタイトル

Session	Speaker	Title
Ground Motion Simulation	Kojiro Irikura (Kyoto Univ., Japan)	Methodology of simulating ground motions from crustal earthquake and mega-thrust subduction earthquakes: application to the 2016 Kumamoto earthquake (crustal) and the 2011 Tohoku earthquake (mega-thrust)
	Pierre-Yves Bard (Université Joseph Fourier, France)	Using ambient vibration measurements for risk assessment at an urban scale : from numerical proof of concept to a case study in Beirut (Lebanon)
Shallow Velocity Structures and Depth Parameters	Hiroshi Kawase (Kyoto Univ., Japan)	Studies on the deep basin site effects based on the observed strong ground motions and microtremors
Soil Dynamics and Nonlinearity	Jonathan P. Stewart (University of California, Los Angeles, USA)	Non-ergodic site response in seismic hazard analysis
Applications of Microtremor Survey	Francisco Sánchez-Sesma (Mexico National Autonomous Univ., Mexico)	Modeling and inversion of the microtremor H/V spectral ratio: physical basis behind the diffuse-field approach
Downhole Array Observation and Analysis	Kazuyoshi Kudo (Nihon Univ., Japan)	Advantages of borehole array data for better understanding of strong ground motion in sedimentary basins
Near Fault Ground Motions	Dr. Brian Chiou (California Department of Transportation, USA)	Hanging-wall and directivity effects on the near-fault ground motion
Seismic Hazards and Loss Assessments	Chin-Hsiung Loh (National Taiwan Univ., Taiwan)	Selection of ground-motion prediction equations for probabilistic seismic hazard analysis: case study of Taiwan

震に関する観測報告のポスター1枚、計6枚のポスターを展示した(写真3)。

また、配布物として、学会入会パンフレット英語版、17WCEE日本招致パンフレット、2013年IASPEI/IAEE合同ESG国際ワークショップ(東京開催)のプロシーディングスを展示し、学会入会パンフレット英語版を50部ほど配布した。

4.IASPEI/IAEE 合同ESG国際ワーキンググループ

本シンポジウム2日目の昼休みに、IASPEI/IAEE合同ESG国際ワーキンググループのビジネスミーティングがProf. Kuo-Liang Wenの司会で行われた(写真4)。International Science Committeeのメンバーより、各国のESG研究の現状やメンバー交代が報告された。ESG国際ワーキンググループは、本シンポジウムを含めてこれまで5回の国際シンポジウムを実施しており(1992年日本、1998年日本、2006年フランス、2011年アメリカ、2016年台湾)、日本地震工学会ESG研究委員会の



写真3 日本地震工学会展示ブース(東委員長)



写真1 IASPEI/IAEE合同ESG国際ワーキンググループ委員長(IASPEI)川瀬教授の開会挨拶



写真4 IASPEI/IAEE合同ESG国際ワーキンググループのビジネスミーティング

東貞成委員長が日本招致のプレゼンを実施した結果、次回の第6回ESG国際シンポジウム(ESG6)は日本(京都)で実施されることが決定した。

5.おわりに

本ESG研究委員会の活動期間は2017年3月までとなり、来年度以降は、国際的なESG研究への参画と国内研究の高度化を目指し、新たなESG研究委員会の立ち上げを企画している。今年度は最終年度であり、3年間の研究成果をとりまとめて講習会などを実施し、本委員会の成果を広く学会員に還元していく予定である。2017年7月30日-8月4日開催のIAG-IASPEI神戸の前後に、ESG国際ワークショップを開催し、今後の国際的なESG研究の方向性や次回国際シンポジウムで実施するブラインド・プレディクションのイベントなどについて、国内外のESG研究者と議論する予定である。最後に、日本地震工学会の吹野美絵氏には多大なご支援をいただきましたこと、お礼申し上げます。



写真2 口頭発表会場の様子

第16回世界地震工学会議(16WCEE)報告

鹿嶋 俊英

●国立研究開発法人建築研究所 主任研究員

1. はじめに

世界地震工学会議(World Conference on Earthquake Engineering: WCEE)は、1956年に第1回が米国で開催されて以来、ほぼ4年ごとに世界各地で開催されてきた地震工学分野最大のイベントである。本稿では、2017年1月9日より13日までの間、チリのサンティアゴで開催された第16回世界地震工学会議(16WCEE)について報告する。

2. 開催概要

第16回世界地震工学会議(16WCEE)は、2017年1月9日より13日までの5日間にわたり、チリの首都サンティアゴ市の北西部、サンティアゴ市を東西に横切るMapocho川岸に立地するCasa Piedra会議場で開催された。チリは、1960年に発生した観測史上最大のモーメントマグニチュード(Mw)9.5のチリ地震をはじめ、度々巨大な地震に襲われている。最近では2010年のMaule地震(Mw8.8)で大きな被害が発生し、2014年Iquique (Mw.8.2)、2015年Illapel (Mw.8.2)と地震が頻発している。

IAEE事務局の速報値によれば、会議の参加者は73か国2,500人近くに上り、そのうち2割ほどが日本からの参加者であったとのことである。これは国別の集計では最多である。ちなみに2位がアメリカ、3位が中国で、開催地のチリは4位であった。

発表論文数は2,000を超え、そのうち7割ほどが口頭発表、残りがポスター発表となっていた。全体のプログラムは午前と午後の最初に大会議場を用いた1時間の全体セッションが設けられ、5つの基調講演と2つの討論、4人の招待講演が企画された。口頭発表は15の会議室を用いた並行セッションとして行われ、ひとつのセッションに2時間(一部1.5時間)が割り当てられ、1日に2ないし3つのセッションが開催された。1題の発表に割り当てられた時間は15分であり、セッション辺り8題の発表が行われることになる。セッションの総数(コマ数)は200近くに達する。またポスターセッションは、会議場2階の広大なホワイエで最終日を除く4日間に渡って行われ、午前と午後30分ずつのコーヒーブレイクがコアタイムに設定されていた。



写真1 Casa Piedra会議場

3. 会議のテーマ

会議のスローガンは”Resilience, the new challenge in earthquake engineering”、和訳すれば「レジリエンス、地震工学の新たな挑戦」、レジリエンスは構造物から社会まで含めた復元力、あるいは強靱性を表すが、訳し難いのであえてカタカナで表記する。基調講演の題目を見れば、会議の主題が見えてくるであろうと考え、以下に基調講演の一覧を示す。

- Stephen Mahin - "Resilience by Design: A Structural Engineering Perspective"
- René Lagos - "The quest for resilience in seismic design of RC buildings: The Chilean practice"
- Steve Kramer - "Effects of Long-Duration Motions on Soil Liquefaction Hazards"
- Raul Madariaga - "Earthquakes in subduction zones and the scaling of their seismic spectra"
- Carlos Ventura - "Real Time Damage Assessment"

5人のスピーカーのうち2人が地元チリからである。基調講演の中からキーワードを拾えば、レジリエンス、液状化、海溝型地震、損傷評価と言ったところである。海溝型巨大地震に対峙するチリと日本の課題の共通点が見えてくようである。

4. 口頭発表

口頭発表は、スペシャルセッションを中心に編成されており、スペシャルセッションのテーマの数は78に及んだ。ひとつのテーマで複数のセッションを用いる

場合もあり、スペシャルセッションの総数(コマ数)は100を超える。対して、スペシャルではない一般のセッションの数は80強であった。

このように、取り扱う分野は幅広く、膨大な数の発表が並行して行われているため、全体を把握するのは不可能である。ここでは筆者の関連分野(強震観測、建物地震応答、地震被害など)について若干触れる。

昨年発生した、日本の熊本地震(4月)、エクアドル Muisne地震(4月)、及び、イタリアAmatrice地震(8月)についてはスペシャルセッションが設けられ、話題提供が行われた。他にも2011年東北地方太平洋沖地震や2015年ネパールGorkha地震を題材にしたスペシャルセッションが行われた。

一般のセッションで目を引いたのは、Isolation and Energy Dissipation Devices (免震・制振)である。6つのセッションが設けられ、一部は別の部屋での同時開催になっていた。このトピックの論文数は130を超え、90以上に分類されたトピックの中で最多であった。スペシャルセッションでもPassive control systems: analysis methods and designing procedures(2コマ)があり、また、日本免震構造協会主導のスペシャルセッションJapan's Protective Systems after the 2011 Tohoku Earthquake : JSSI Special Session(2コマ)もあり、関連するセッション数は10に及ぶ。チリでも近年免震建物が普及してきており、免震・制振構造の普及は世界的なものになって来たと感じさせた。

5. ポスター発表

ポスター発表は、600編以上の論文が4日間に分けて行われた。1日当たり160編弱のポスター発表が行われたことになる。ポスターの配置は論文番号順になっており、研究分野でソートされていたわけではない。このため関連する分野の発表をまとめて見るのは難しいが、様々な研究分野の動向を目にできるという利点があった。

ポスター発表の会場は細長い平面形状をしており、その長手方向に沿って掲示用のパネルがセットされていたため、ポスターを見るには細長い通路を行くことになる。奥まったところにはなかなか人に来てもらえないというもどかしさがあったようにも感じた。

6. 会場運営など

会場の運営は概して素晴らしいものであった。初日は、レジストレーションや昼食会場で長蛇の列ができるなど少々混乱もあったようだが、2日目には解消されていた。また、会議のプログラムなどが確認できる

アプリ(iOS及びAndroid対応)が各ストアを通じて配布された。配信は会議開催直前になってしまったが、このアプリはなかなか便利であった。

会議場はサンティアゴ市内の地下鉄路線から離れた場所にあったので、参加された方々は交通手段に少々苦労されたようである。シャトルバスはあるのだが本数が限られていた。公共バス路線はスペイン語が話せない者には敷居が高い。タクシーは吹っ掛けられることがある。筆者は使わなかったが、実はUberが普及しており、聞いた話ではこの使い勝手が良かったようである。

このような国際会議では、初日にWelcome Cocktailが振る舞われ、期間中にGala Dinnerが開催されることが慣わしである。Welcome Cocktailは会議場の屋外で開催され、開放的なものであった。またGala Dinnerはサンティアゴ旧市街の由緒ある競馬場、Club Hípico de Santiagoで催され、とても雰囲気の良いものであった。他にも南米一の高さを誇るCostanera Towerや、サンティアゴ地下鉄、歴史的な建造物等種々のツアーが企画されていたが、参加できなかったのが残念である。



写真2 Club Hípico de Santiago競馬場

7. 終わりに

2020年、第17回世界地震工学会議の開催場所が仙台市に決まった。日本地震工学会の招致委員会をはじめ、招致活動に携わった方々に祝意を表したい。世界地震工学会議は最新の研究開発の情報を得るだけでなく、開催地の人や文化に触れる良い機会である。仙台で世界の技術者や研究者に再開できることを楽しみにしている。

Vitelmo V. Bertero先生のご逝去を悼む (1923年5月9日～2016年10月24日)

和田 章

●東京工業大学名誉教授

California大学Berkeley校の耐震工学研究の黄金期を率いた名誉教授Vitelmo V. Bertero先生は、哲学者の風格をお持ちで、研究成果、研究活動だけでなく、育てられた卒業生の輪は世界に広がっており、現在の地震工学の礎を築かれた偉大な先生です。

1947年に母国アルゼンチンのLitoral大学の土木工学科を卒業して米国に移り、Massachusetts工科大学の土木工学の修士及び博士の学位を取得されています。その後、California大学Berkeley校の土木工学科に招聘され、1958年から1991年にかけて土木環境工学科に務められました。1988年から1990年まで、EERC (Earthquake Engineering Research Center) の所長を務められています。

土木構造物及び建築構造物の地震時挙動、耐震設計、地震工学に関する数多くの総合的な解析的および実験的研究を進められました。鋼構造、鉄筋コンクリート造骨組、耐震壁、および組積造を対象に、耐震設計の包括的な方法を開発し、地震時の非弾性応答に関する多くの先駆的な研究を推進しました。地震時の損傷評価におけるエネルギーを尺度とした理論に関する革新的な研究を進め、地震を受ける構造物の性能設計のための概念的枠組、特に地震動の大きさと設計目的を示したマトリックスを提案しています。このマトリックスは多くの研究者が今でも活用しています。

1964年のアラスカ地震を始めとして、世界で起こるほとんどの大きな地震災害の調査を行い、1995年の兵庫県南部地震の調査にも来られ、日本の研究者と同行しています。調査は構造物だけでなく非構造部材にも及び、これらの経験は大学の講義を通して学生に伝えられました。ご自宅に保存されていた無数の地震被害調査のスライドはPEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) のYousef Bozorgnia教授によって整理されており、ホームページに公開される予定です。

地震工学のさまざまな問題に関する350以上の論文と報告書を発表し、これら独自の研究と活動について多くの国内外の賞を受賞し、重要な委員会活動を率いました。California大学ではEgor Popov先生などの世界的な教授陣と共同研究を進めました。最後に、代表的な受賞歴と務められた要職について英文で紹介させていただきます。

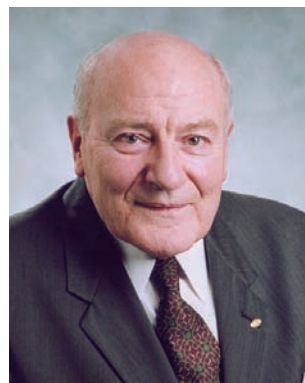
1984年にサンフランシスコの丘の上のフェアモン

トホテルで第8回世界地震工学会議が開かれました。この頃、Bertero先生は61歳で、California大学のRichmondにある振動台を使って実験をしていました。お忙しそうにしている中、簡単なお話しかできませんでしたが、握手して頑張りなさいと言われました。今では大教授のStephen Mahin先生が、試験体の上に乗って仮動的実験を説明していたのも懐かしい思い出です。Popov先生の元で博士課程にいた笠井和彦先生は偏心K型筋違付き骨組の実験を説明していました。

この頃、建築研究所を中心とした日米協力の研究が盛んになり、特にCalifornia大学の先生との関係が深まって行きました。1994年にノースリッジ地震があり、1年後に兵庫県南部地震があり、土木構造、建築構造の耐震性確保の重要性が叫ばれていた時代です。日米の研究交流も盛んだったと思います。

1999年頃イタリアのシシリー島のCatania大学のGiuseppe Oliveto教授からメールを受け、小さなシンポジウムに出かけました。Bertero先生の家系はアルゼンチンの前にはイタリアにおられたとのことで、イタリアでは本当にリラックスしておられていたように思います。Oliveto教授のアパートの屋上で一緒に食事をしました。話の流れはよく覚えていませんが、真冬のボストンは雪も積もりとても寒いのですが、MITで研究をしている時に、Popov先生が訪ねてきて、カリフォルニアはもっと暖かくて住みやすいよ、と言われ決心したのだと言われていました。

それから、なんどもシシリーに行きましたし、Bertero先生やMahin先生に呼ばれ、California大学で講義をする機会もいただきました。後で知ったことですが、面識のないシシリー島の先生に紹介してくれたのはBertero先生だったとのこと、ありがたいお話だと思っています。Bozorgnia先生とBertero先生がEarthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering, (CRC Press, 2004)を発行



しましたが、一つの章を一緒に書かせていただきました。とても光栄なことと思っています。

1906年サンフランシスコ地震の100年のシンポジウムがサンフランシスコ市内で開かれました。このとき大きなディナーがあり、The Applied Technology CouncilとEngineering News Record から“Top 10 Seismic Engineers of the 20th Century” (2006)が授与されました。このとき、そばにいた卒業生のお話では、Bertero先生は、世界のどの国で震災が起きても悲しんで涙を流し、「もっと丈夫な建築を世界に広めなければならない」と言われるそうです。

この追悼文の記述には、PEERのwebsite上に掲載された追悼文¹⁾を参考にしましたが、その最後に書かれていて、Bertero先生の生涯を表す素晴らしい記述がありますので、英文のまま転記させていただきます。

During his nearly 50-year career at Berkeley and with international activities, Professor Bertero taught, advised, and mentored generations of students, postdoctoral fellows, research associates, as well as practicing engineers, many of whom are now well-known experts and leaders in earthquake engineering. Professor Bertero said “nothing is more rewarding than witnessing the success of former students and research associates.”

Vitelmo V. Bertero先生の御業績と御要職

The Academy of Science of Argentina (1971);

The Jai Krishna Award from the India Society of Earthquake Technology (1974);

The Extraordinary Chair of Javier Barrios Siera at the National University of Mexico (1986);

The Advisory Committee to the United States Congress regarding the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) (1988-1992);

ACI Arthur Anderson Award (1989);

Academy of Engineers of Argentina (1989);

First International Gold Medal Eduardo Torroja from the CSIC, Spain (1989);

Awarded the Berkeley Citation, UC’s highest honor (1990);

AISC T. R. Higgins Lectureship Award (1990);

The “Construction Man of the Year” for “advancing the science of earthquake engineering” by Engineering News Record (1990);

The U.S. National Academy of Engineering as Foreign Associate (1990);

Received the ASCE Nathan Newmark Award (1991);

Director, the United States, of the International Association of Earthquake Engineering (IAEE) (1992-2000);

Honorary Doctoral degrees including “Doctorado Honoris Causa en Ingeniería” from the University of Los Andes, Mérida, Venezuela (1993);

EERI Housner Medal (1995);

“Top 10 Seismic Engineers of the 20th Century” by the Applied Technology Council and Engineering News Record (2006);

The Rose School Prize for his “long and distinguished career, during which he emphasized the need to understand structural performance under seismic attack, and to learn lessons from structural damage and failure in earthquakes. He led a whole new field of research emphasizing the importance of energy demand and capacity in seismic performance.” (2010);

Honorary Professor in seven universities in South American countries;

Honorary Member of the American Concrete Institute (ACI);

Fellow of the American Society of Civil Engineers (ASCE);

Honorary Member of the Structural Engineers Association of Northern California;

参考文献

1) <http://peer.berkeley.edu/news/2016/10/vitelmo-v-bertero-october-24-2016/> (2017年2月4日閲覧)



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「JAE 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ください。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>



お知らせ

JAE Newsletter 第6巻 第1号 (通算第17号) を2017年4月末に発刊します。

2016年に発生した熊本地震、鳥取地震では、住宅等だけではなく文化財にも被害が生じました。そこで、次号のJAE Newsletterでは、「文化財の地震防災」の特集を組み、文化財の地震被害や修復保存活動、被災された当事者の声などをお届けする予定です。

そのほか、17WCEE招致に関してのお話、チリで開催された16WCEEの参加報告、毎回ご好評をいただいている武村先生の連載「鯰おやじのおせっかい」、学会からのお知らせなどについて掲載予定です。

過去のJAE Newsletterについては以下のサイトに掲載していますので、ぜひご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/stack/1925-2/>

JAE Newsletter は、日本地震工学会誌を補完し、タイムリーに情報発信する目的で2012年9月に創刊されました。2015年より、会誌と連携した情報発信を行うため、会誌と交互となる4月、8月、および12月に学会のWebサイト上で発行しています。

地震工学に興味を持つ一般の読者も意識したわかりやすい記事を通じて、地震工学と地震防災の一層の普及・発展を目指しています。



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：

本号では、「ここまで来た数値シミュレーション」と題して、地震工学に関連する分野の著名な研究者の方々に数値シミュレーションを用いた研究事例についてご執筆頂きました。お忙しい時期にもかかわらず、ご執筆いただきましたこと本当に感謝申し上げます。また、好評の連載「温故知新」では、北浦勝先生にご執筆いただきました。拝読いたしました。先生の地震防災に対する今も変わらぬ情熱を感じることができました。そのほか、学会ニュースなどにも多くの記事をご寄稿頂きました。

学会誌は封筒から取り出すことも極めて稀で、ほとんど読んだことがない、という平均的な一会員だった私が、会誌編集委員会を務め、前号では特集記事の一つを執筆する機会を頂き、今号では編集幹事になりました。執筆者の皆様と会誌編集委員会の方々のボランティア精神でこの学会誌が支えられていることを強く実感しました。今号が大過なく（自分が気づいていないだけで、実際は何かやらかしているかもしれませんが・・・）発刊に至ったことをとてもうれしく思います。ありがとうございました。

私は、今号の幹事を以て会誌編集委員会を無事に退任となります。委員会のメンバーはそれぞれ本業が忙しいのだから、平等に仕事を負担するべきと考えていました。今号の幹事を務めたことで、少しは活動に貢献できたかと思っております。2月号は卒業論文、修士論文の締め切り時期と重なることはわかっており、「この時期は忙しいから」と幹事を辞退することも何度も頭の中によぎりました。しかし、今では非礼なことをせずに良かったと思っております。

今後は再び一会員に戻りますが、まずは会誌を封筒から取り出すことから始めたいと思います。

丸山 喜久 (千葉大学大学院工学研究科)

会誌編集委員会

委員長 高橋 郁夫 防災科学技術研究所
幹事 丸山 喜久 千葉大学

委員 岩城 麻子 防災科学技術研究所
委員 大淵 正博 竹中工務店
委員 桜井 朋樹 I H I
委員 佐藤 健 東北大学
委員 佐藤 大樹 東京工業大学
委員 関口 徹 千葉大学
委員 田中 浩平 鉄道総合技術研究所
委員 徳永 英 エーオンベンフィールドジャパン
委員 西田 明美 日本原子力研究開発機構
委員 平井 敬 名古屋大学

日本地震工学会誌 第30号 Bulletin of JAEE No.30

2017年2月28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 2017

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