日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.32

Oct.2017

特　集：地震観測と構造物のヘルスモニタリング

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 32 号 2017 年 10 月）

Bulletin of JAEE（No.32 Oct.2017）

INDEX

巻頭言：

特集「地震観測と構造ヘルスモニタリング」と新編集委員会のめざすもの／平田　京子 …… 1

特集：地震観測と構造物のヘルスモニタリング

地震災害軽減のための強震観測の役割と期待／藤原　広行 …… 2
地震観測システムの小型化・軽量化・低コスト化／飯尾　能久 …… 8
最新の微動探査観測技術とシステムの構築について／先名　重樹 …… 13
建物の地震観測と構造ヘルスモニタリングについて／楠　　浩一 …… 17
橋梁の地震時挙動モニタリング／藤野　陽三 …… 21
超高密度リアルタイム地震防災システム“SUPREME”を活用した東京ガスの地震対応
／山端　悠介…… 25

シリーズ：温故知新 〜未来への回顧録〜

私の研究・教育人生／岩楯　敞広 …… 29

学会ニュース：

SMiRT24　参加報告／美原　義徳 …… 33
ESG Workshop 2017　開催報告／松島　信一 …… 34

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確認のお願い
／お知らせ／ご寄附のお願い／問い合わせ …… 36

編集後記

巻頭言

特集「地震観測と構造ヘルスモニタリング」と新編集委員会のめざすもの

平田　京子
●日本女子大学 教授

１．はじめに

2017年4月より本会会誌編集長を拝命した平田京子です。本会会誌をこれまで盛り立ててこられた先輩諸氏の活動に敬意を表しつつ、これらの活動を引き継ぐ新しいメンバーとディスカッションを始めたところです。2016年の熊本地震から、2017年は豪雨やメキシコでの地震が続いたため、災害への関心は引き続き高いものの、大地震について市民に関心を持ち続けてもらうことが少しむずかしくなっているように感じます。

特集を組むにあたって、どんなことを今の社会が求めるのかをディスカッションしたり、最先端の研究を取り上げたりするなど、技術をわかりやすく解説するための議論を開始したばかりです。まだ様子がつかめず手探り状態のメンバーですが、前委員会では会誌の編集業務にがっちり取り組めるように２名の幹事体制が整備されており、その体制を引き継ぎ、さらなる編集体制の強化を図っています。委員のハンドメイドな作業によって編まれる会誌は、どのように効率的に発展していけるのか、今、問われているように思います。

２．委員の紹介とミッション

委員は、以下の構成です。() は所属、敬称略。

高橋郁夫（防災科学技術研究所），入江さやか（日本放送協会放送文化研究所），佐藤 健（東北大学災害科学国際研究所），大渕正博（竹中工務店），桜井朋樹（ＩＨＩ），平井 敬（名古屋大学），徳永 英（エーオンベンフィールドジャパン），高橋典之（東北大学），山田真澄（京都大学防災研究所），肥田剛典（東京大学），鈴木比呂子（千葉工業大学），西村隆義（ジェイアール総研エンジニアリング），向井洋一（神戸大学），沼田宗純（東京大学生産技術研究所），古川洋子（日本女子大学）

私達はフラットでエネルギッシュな議論をしたいと思っています。多様な分野から構成される幅広い会員を擁する日本地震工学会がめざす「リンク」、「分野を越えた積極的交流」のほか、本会が社会にどのように貢献していけるのか、研究・開発と社会との接点をも特集で取り上げたいと考えています。本会を構成する会員の専門分野は広範で、それぞれ独自に発展しているためになかなか全容を把握しづらいのですが、それらをキーワードで束ねてみる、そして社会との接点をさぐる、ということに挑戦したいと考えている若手集団です。どうぞ応援、ご批評などお願いいたします。

３．特集解題

東日本大震災や熊本地震以降、理学的には可能性が指摘されつつも、工学的な設計においては「想定外」とされてきた大地震に対し、建築物や土木構造物、さらに機械設備などがどの程度の健全性を確保できるのか、という大きな課題に対する研究が精力的に進められています。そこで今号においては、地震計・地震観測から建物、橋梁、ライフラインに至るまで分野横断的な観点から、地震被害を軽減するための技術に着目し、「地震観測と構造ヘルスモニタリング」と題した特集を組むことにしました。私の所属する日本女子大学にも日本で初期の頃に構造物ヘルスモニタリングのためにセンサーが導入され、光ファイバーを用いたデータ収録が行われています。東日本大震災において東京都内で多くの帰宅困難者が発生したことの反省から、建物の継続使用性を測るために構造ヘルスモニタリングの実施物件数も増えてきました。このように構造ヘルスモニタリングは期待が大きい技術でありますが、過去の事例では建物オーナーのデータ提供に関する理解、情報共有のあり方などが課題になっており、データ活用のしかたはどうすればよいのか、など模索すべき点が多々あります。今回は構造ヘルスモニタリングという新技術が、どのような新しい地平を切り開くのか、複数の角度から執筆をお願いし、それぞれの分野で考えてみたいと思います。

平田 京子（ひらた きょうこ）

1990年　日本女子大学大学院修了、日本女子大学家政学部住居学科教授、博士（学術）、専門分野は市民防災、避難所運営、被災者の生活復興、リスクコミュニケーション

地震災害軽減のための強震観測の役割と期待

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部門長

1．はじめに

地震の揺れによる被害を防ぐためには、その揺れの特性を事前に予測し、適切な対策を施しておくことが重要である。地震による地面の揺れはどのくらいの強さで、どのような特性があるのかを解明するために開発された地震計を強震計と呼び、強震計によって構築された観測網を強震観測網と呼ぶ。1995年兵庫県南部地震以後に、日本全国を覆う強震観測網が整備され、内陸活断層タイプの地震、海溝型地震双方に対してデータの蓄積が進んでおり、事前の対策の検討のためのデータベースはかなり充実したものとなりつつある。さらに、地震時の災害対応にも強震計のデータを活用する研究開発が進んでおり、強震観測網を活用したリアルタイム地震被害推定システムや、建物ごとに設置された強震計による個別建物の被害推定システムの開発などが行われている。以下では、こうした取り組みの現状を概観すると共に、今後に向けての課題などについても考察したい。

2．強震観測網の整備とデータの蓄積

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[1)]、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。全国的な強震観測網が構築され20年以上が経過する中で、機器の更新に伴う強震観測技術の高度化が進められ、観測機器の安定性の向上や広ダイナミックレンジ・広帯域の観測が実現すると共に、最近では、特に観測データのリアルタイム処理技術が著しく向上している。

こうした観測網により得られたデータの蓄積は毎年着実に進んでおり、事前対策の検討に資するデータベースの構築が進められている。図1にK-NET、KiK-net、震度情報ネットワークのデータに基づき、防災科研で推定した過去20年間の面的震度分布を重ね合わせより得られた最大推定震度分布図を示す。図2には、K-NETで得られた過去20年間の記録による各観測点で観測された震度階の回数を示す。

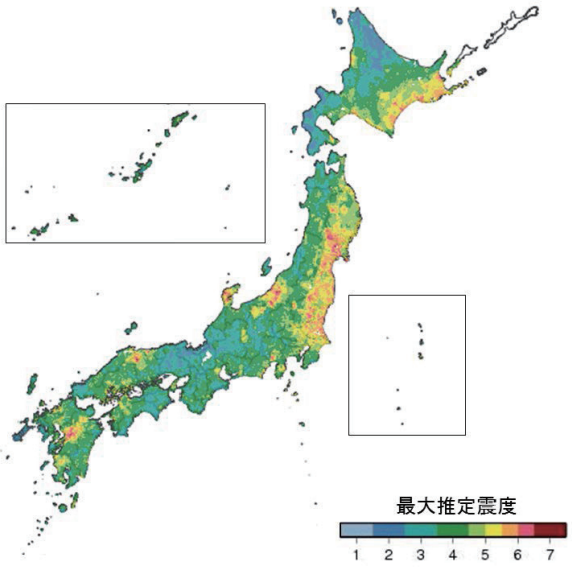


図１　過去20年間の最大推定震度分布図

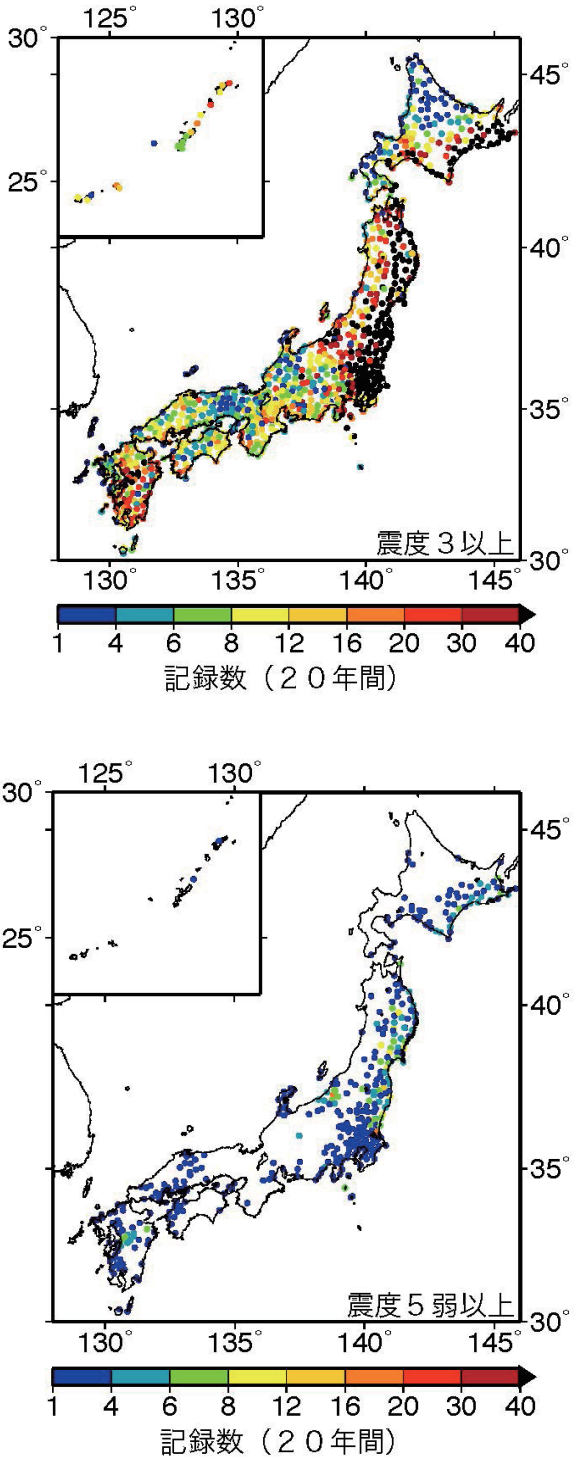


図２　K-NETで得られた過去20年間の記録による各観測点で観測された震度階の回数。震度3以上の回数（上図）、震度5弱以上の回数（下図）。

こうして蓄積された強震データに基づき、強震動予測手法の研究も進んでいる。地震動予測式と呼ばれる経験的な地震動予測手法の研究に加えて、主要な断層帯で発生する地震など、震源断層があらかじめ特定できる地震については、ある地震シナリオを想定し、物理モデルに基づき断層面上での破壊過程をモデル化し、不均質な地殻・地盤中での地震波伝播の数値シミュレーションを用いた詳細な地震動評価を行うことにより、強震動を予測する手法が開発されている。代表的な例に、詳細な地震動評価手法としてハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法がある。ハイブリッド法は、1秒程度よりも長周期側を差分法などにより計算し、短周期側を統計的グリーン関数法などの半経験的手法を用いて計算した後、それらを合成することにより広帯域の地震動を計算する手法である。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われ、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）」が、地震調査委員会により作成されている[2)]。

３．リアルタイム地震被害推定システムの開発

強震観測網の活用の１つとして、事前の強震動予測・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）[3)]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。

防災科学技術研究所では、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として、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を可能とするリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの研究開発を実施している（以下、J-RISQと呼ぶ）。J-RISQは、K-NETやKiK-net観測点で得られる強震データ、地方公共団体や気象庁の震度観測点で得られる震度情報を用い、微地形区分や広域地盤モデルによる揺れやすさを考慮した面的な地震動分布を推定し、それを入力とした震度曝露人口の推定や、建物種別や建築年代を属性として持つ建物モデルに複数の被害関数を適用することで建物被害推定を行うシステムである。

こうして得られるリアルタイム推定情報の一部（推定震度分布や震度曝露人口等）は、「J-RISQ地震速報」として、概ね震度3以上を観測した地震に対して、地震発生直後より既にWEB公開を行っている（http://www.j-risq.bosai.go.jp/）。以下では、現在開発中の建物被害推定システムに関して、最大震度7を観測した2016年熊本地震の4月14日のM6.5の地震（以下、M6.5

地震と呼ぶ）及び、4月16日に発生したM7.3の地震（以下、M7.3地震と呼ぶ）における被害の推定状況、及びそれら経験を踏まえたシステム開発の現状について報告する。

J-RISQシステムでは、K-NET及びKiK-netの強震動指標データ（計測震度、リアルタイム震度、加速度等）の他に、気象庁より提供される地方自治体や気象庁の計測震度データを受信している。K-NET及びKiK-netの観測データは地震が発生した後に同時に送られてくるものではなく、地震動が広がるにつれて順次それぞれの観測点から時間的にばらばらに送信される。本システムでは、受信した計測震度2.5以上の観測点数が閾値を超過した場合に被害推定を開始する。地震発生後可能な限り早期に被害推定情報を提供することを目的としており、その時点で入手したデータを用いて推定を行い、逐次的に「報」を重ね、情報を更新していくことで情報の迅速性を確保している。第1報は初めに震度データを受信してから1分程度で発表し、10分程度の間に数報被害推定処理を実施し、被害推定情報を更新する。十数分後には最終版として、最終報を発表する。

具体的な推定情報についてシステムでは、工学的基盤からの地盤増幅率を考慮した250mメッシュ強震動指標を求め、震度曝露人口、同時に複数の手法による建物被害および人的被害を推定する。建物被害推定では、建物構造・建築年代を考慮した中央防災会議[4]、堀江[5]、村尾･山崎[6]、翠川ほか[7]のほか、建物構造・建築年代・階数を考慮した佐伯ほか[8]、建物構造特性を考慮した清水ほか[9]等の手法を用いて推定している。人的被害では、平日・休日、月毎に1時間毎の滞留人口モデルを構築し、中央防災会議[4]および佐伯ほか[10]の手法を用いて、死者、重傷者、負傷者等を推定している。

最大震度7を観測した2016年4月14日のM6.5地震およびM7.3地震におけるリアルタイム被害推定の以下のような状況であった。M6.5地震においては地震発生から約29秒後にJ-RISQは第1報を発信し、約10分間で7報を発信した。最終的には、1091観測点の震度データを用い、震度6弱以上の曝露人口が約62万人、震度6強以上の曝露人口が約29万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約6千～ 1万4千棟程度、半壊棟数は約7千～ 3万3千棟程度であった。建物被害の分布としては、江津湖の東側から益城町宮園地区にかけて長さ7km、幅1km程度の細長い領域に被害が集中する結果であった。

M6.5地震から約28時間後に発生したM7.3地震では、地震発生から約29秒後に第1報を発信し、約11分間で8報を発信した。最終的には、2389観測点のデータを用い、震度6弱以上の曝露人口が約113万人、震度6強以上の曝露人口が約66万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約1万2千～ 3万1千棟程度、半壊棟数は約1万6千～ 7万9千棟程度であった。（後に入手した益城町宮園及び西原村小森の震度データを加味して再推定を行ったところ、全壊棟数が約1万6千～ 3万8千棟程度、半壊棟数は約1万8千～ 8万8千棟程度）。被害の分布としては、M6.5地震と同様の領域に加え、熊本市の東区や中央区等の広い領域で建物被害が多い地域が推定された。これらの推定結果を、自治体の被害報告や空中写真を用いた建物判読等の実被害と比較すると定性的な空間分布は概ね整合する一方で、被害の量は実被害を過大に評価している傾向が見られた。J-RISQによる被害推定による全壊棟数分布と実際の全壊棟数分布の比較を図3に示す。熊本地震による実被害データを用いた被害推定手法の改良について現在検討中である。

現状では、推定被害結果は、インターネットからユーザ認証によりアクセス可能なWEB APIによる数値情報を提供するとともに、SIPに参加している研究者向けに推定被害結果を確認するための地図と表で表示

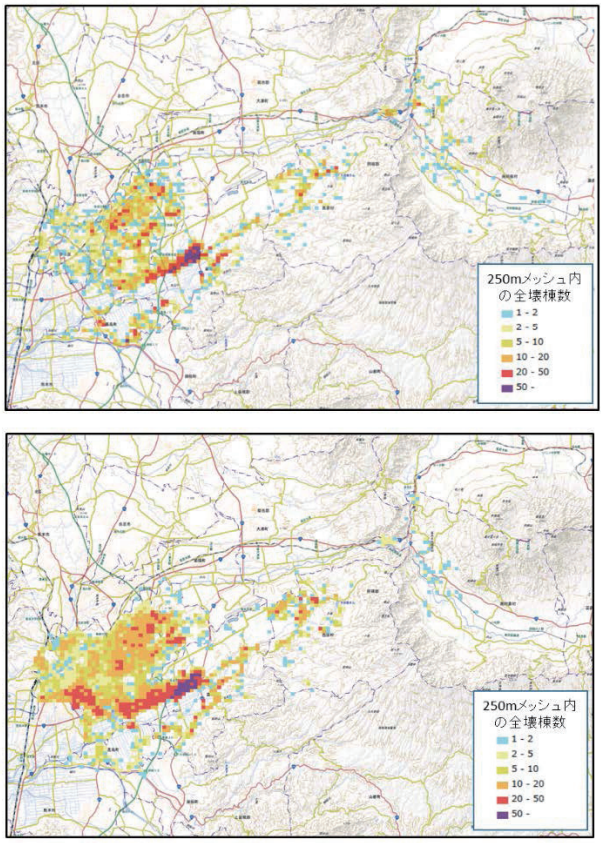


図３　実際の全壊棟数分布（上図）と熊本地震のJ-RISQによる被害推定による全壊棟数分布（下図）

した限定公開WEBページおよびWMSを提供している。WEB APIによる情報提供は2016年1月から実験的にSIP共同研究機関への情報提供を開始しており、推定した被害推定情報は地震発生後に数値データをダウンロード可能となっている。また、WEB APIを通して、SIPで開発が進められている府省庁連携防災情報共有システム（SIP4D）と連携し、他機関への迅速な情報提供を行っている。

さらに、リアルタイム被害推定情報を広く活用し、この情報を社会に実装するための企画を進めている。具体的には、本企画に参加して防災情報を活用したいと考えている自治体、民間企業、研究機関等で実験コンソーシアムを組織し、リアルタイム地震被害推定情報（震度情報、建物被害情報、人的被害情報等）を、テストフィールドを提供する場を実験的に構築する。その場を介して実際にデータを受信し活用して頂き、それぞれの立場におけるアイデアによって、BCP・BCMへの活用、商品への付加価値の生成、新たな情報提供サービスなどへの活用など検討を進める予定である。

４．簡易センサーを用いた建物における観測

国や公的機関が整備し運用している強震観測網に加えて、最近では簡易センサーによる高密度観測を展開する試みが加速している。

国や公的機関が整備した強震観測網は、日本全国をおおよそ20km程度の間隔で覆っており、自然現象としての地震を大局的にとらえるという意味では、十分な密度で全国をカバーしている。一方で、地震が人間社会に及ぼす影響を計測するという観点からは、観測密度が十分であるとは言えない。強震動の分布は地盤の状況により大きく変化し、また、建物の状況は1棟ごとに異なっている。このため、強い地震動による建物の被害状況を把握するためには、究極的には、建物1棟ごとの揺れを直接的に計測することが必要になると予想される。しかし、従来型の強震観測施設は設置費・運用費が高く、観測点数を現状以上に飛躍的に増やすことは現実的ではない。このため、人間社会の側、例えば、建物の揺れを個別に計測することができるような高密度のセンサー・ネットワークを構築するためには、従来とは異なった発想でのシステム構築が必須となる。

携帯端末に内蔵されたMEMSセンサーを利用して、携帯端末を強震計として利用しようという発想は、こうした課題の解決に向けた1つの試みである。急速に普及が進んでいる携帯端末にアプリケーションをインストールすることにより、地震計の機能を付与することができ、それらによる観測データをクラウド側のサーバで管理することにより、センサークラウドを構築することができる。これにより、従来型では困難と考えられていた大規模なセンサー・ネットワーク構築の可能性がでてくる。

藤原ほか[11]は、携帯端末を使用した強震観測の先駆けとして、iPhoneを利用したシステム、「i地震」を開発し、実証的な研究を実施してきた。「i地震」は、2010年8月にリリースされ、その後逐次改良が加えられている。2011年1月末からはつくば、東京地域を中心に実験運用が開始された。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震でも記録が得られ、建物の地震応答解析に十分耐えられる品質の記録が得られることが実証されている。藤沢市では地域NPOらの協力により、地盤や建物種別・建築年代等の条件が極力ばらつくよう抽出した21棟の建物の上階と下階 計37箇所（棟数と設置箇所数が一致しないのは集合住宅等で上下階の同時設置が困難な場所もあるため）に設置され、観測が行われその成果が報告されている。「i地震」センサー自体の性能についてはK-NET型強震計との並行観測試験が行われており、震度３以上の地震動であれば計測震度相当値で±0.1の誤差範囲で一致するが、震度２以下の地震動であればノイズの影響で過大な値となることが確認されている[12]。また、E-Defenseにおける実大三次元振動実験に参加し、鉄骨造30階建相当の高層建物内において適切に固定されていれば、入力波形やフロア高さに応じた周期特性や、強震時の非線形応答を加速度記録から確認できることが示されている。

こうしたクラウド型観測技術の開発において、質の高いハザード・リスク情報を提供するためには、超稠密なセンサー・ネットワークの構築に加え、その情報共有化が鍵となる。このため、多様なデータを集め、格納・検索し、利用者のニーズに合わせて表現・利活用するための技術開発を実施することが重要となると考えられる。

５．断層極近傍での強震動

平成28年（2016年）熊本地震は、主要活断層帯として地震調査委員会による長期評価がなされていた布田川断層帯・日奈久断層帯の一部の活動により発生した。このうち、4月14日21時26分頃のM6.5の地震は日奈久断層帯の高野－白旗区間、4月16日1時25分頃のM7.3の地震は布田川断層帯の布田川区間が主に活動した地震と評価されている。

本断層帯で発生する地震に関しては、熊本地震が発生する前に強震動評価が実施されており[13]、これまで

培ってきた強震動予測手法の検証が実施されている。

熊本地震は、主要断層帯の全域が破壊するという意味では、地震調査研究推進本部の活動が始まって以来最初の主要断層帯で発生した固有規模地震と位置づけられ、地表地震断層も明瞭に観測された。これまでに整備されていた強震観測網により、多数の強震観測データも取得された。西原村が設置していた震度計では、地表地震断層のごく近傍域での波形として、3秒程度の長周期のパルス状の速度波形記録が得られるなど、活断層のごく近傍域での揺れの特徴を示すデータが得られている。

建物被害との関係からは、地表地震断層のごく近傍域で大きな建物被害が発生していることが調査結果より判明しており、活断層のごく近傍での強震動の特性の解明が課題の1つとなっている。

SIPによるリアルタイム地震被害推定システムの開発の一環として行われた熊本地震の建物被害調査により、広域での建物被害分布データがまとめられている。それら調査では、熊本地震により生じた建物被害に関して、熊本市他11市町村を対象とした航空写真判読により作成した建物被害分布データを基に、地表地震断層と建物被害分布の関係を分析するとともに、建物被害が多かった益城町を対象に、地表地震断層の北側と南側の倒壊率を算出し、断層の位置と建物被害の関係を検討しており、興味深い結果が得られている。

熊本市他11市町村の約42万棟の建物を対象に目視による航空写真判読を行い作成された建物被害分布図を図4に示す。ここで建物の被害状況は、被害大、中、小、なしの4区分とし、被害大は罹災証明の全壊に、中は半壊、小は一部損壊に概ね相当する区分としている。布田川断層帯の地表地震断層と建物被害の関係を見ると、地表地震断層に沿って被害大の建物の多くが分布し、その数は断層の北側で多く、地表地震断層の近傍ほど、被害が大きい。図5には、益城町中心部における地表地震断層と建物被害分布を示しており、断層近傍の被害大が顕著に多く、特に断層の北側に多く分布することがわかる。

こうした建物被害分布の特徴を説明するためには、建物の地震強度に関する情報、地盤の揺れやすさに関する詳細なデータに加えて、詳細な断層形状と断層面上でのすべり速度の時間履歴など詳細な断層破壊に関するパラメータを推定することが必要になる。断層ごく近傍域での地震動の特性解明は、これからの強震動研究の重要な課題であろう。現状の全国的に整備された強震観測網のデータだけでは、まだデータが不足している。断層ごく近傍域での強震動特性を解明するための強震観測網の整備が必要である。

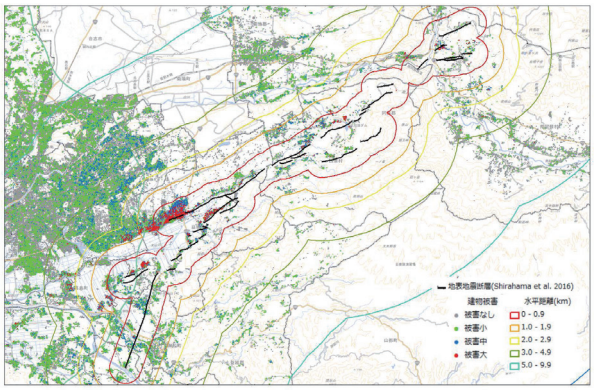


図４　地表地震断層と建物被害分布の全体図

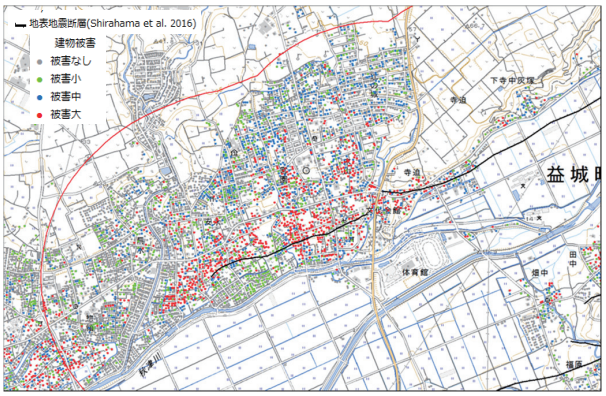


図５　益城町中心部の地表地震断層と建物被害分布

６．おわりに

全国的な強震観測網が整備されて20年以上が経過し、その間に発生した地震のデータが蓄積され、強震動の特性に関する理解は大きく進展した。事前の備えのための強震動予測手法や地震ハザード評価手法の研究も進展し、国や地方公共団体が作成する地震ハザードマップの質も向上してきた。また、リアルタイムでの観測データの処理技術の進展に加え、地下構造データベースの整備、建物や人口等のデータベースの整備も進み、地震直後に被害の概要を推定できるシステムも現実のものとなりつつある。こうした成果は、過去20年以上にわたって各分野で培われてきた技術が融合することによってやっと可能となったものである。一方で、まだ解決すべき課題も多く残されている。断層のごく近傍域での強震データは、まだ不足している。活断層のごく近傍域での強震観測の強化などは今後の重要な課題である。強震動研究のさらなる進展に期待したい。

参考文献

1) 藤原広行、功刀卓、安達繁樹、青井真、森川信之：新型K-NET：強震動データリアルタイムシステムの構築、日本地震工学会論文集、第7巻、第2号（特集号）、pp.2-16、2007.
2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）、2016.
3) 総合科学技術・イノベーション会議：戦略的イノベーション創造プログラム課題「レジリエントな防災・減災機能の強化」、http://www.jst.go.jp/sip/k08.html（2017年9月6日参照）
4) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、2012、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20120829_gaiyou.pdf （2017年9月6日参照）
5) 堀江啓：阪神・淡路大震災における木造建物の層破壊被害、地震ジャーナル、第38号、pp.30-40、2004.
6) 村尾修、山崎文雄：震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数、日本建築学会構造系論文集、第555号、pp.185-192、2002.
7) 翠川三郎、伊東佑記、三浦弘之：兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討、日本地震工学会論文集、第11巻、第4号、pp.34-47、 2011
8) 佐伯琢磨、高橋郁夫、藤原広行、國松要介：建物の周期特性を考慮した木造建物の被害率曲線の構築、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2分冊、pp.19-20、2016
9) 清水智、藤原広行、中村洋光、森川信之、佐伯琢磨、小丸安史、若浦雅嗣、時実良典、早川譲：罹災証明の被害の定義に基づいた広域的な被害予測のための応答スペクトルの建物被害関数の検討、地域安全学会梗概集、No.39、pp.57-60、2016.
10) 佐伯琢磨、中村雅紀、渡辺敬之、翠川三郎：地震による死傷者数および負傷に対する治療費用の評価方法、地域安全学会論文集、No.3、pp.133-140、2001.
11) 藤原広行、東宏樹、内藤昌平、先名重樹、中村洋光、はお憲生、吉田稔、結城昇、平山義治：センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム、日本地震工学会論文集、第13巻、第5号、pp.44-61、2013.
12) Naito, S., H.Azuma, S.Senna, M.Yoshizawa, H.Nakamura, K.X.Hao, H.Fujiwara, Y.Hirayama, N.Yuki, M.Yoshida, Development and testing of a mobile application for recording and analyzing seismic data, Journal of Disaster Research, Vol.8, 990-1000, 2013.
13) 藤原広行、河合伸一、青井真、功刀卓、石井透、早川譲、森川信之、本多亮、小林京子、大井昌弘、先名重樹、八十島裕、奥村直子：布田川・日奈久断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第256号、2004.

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、リアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発等に従事。

地震観測システムの小型化・軽量化・低コスト化

飯尾　能久
●京都大学防災研究所 教授

1. はじめに

近年の科学の進歩により、様々な自然現象について、その発生の仕組みや原因が解明され、災害の軽減のための取り組みが精力的に行われている。大昔であれば、不動であるはずの地面が突然割れて大きくずれることは、心底恐ろしいことであったに違いない。現在では、これは地震の断層運動によることが知られており、得体の知れないものとして徒に恐れることはなくなった。

しかしながら、地震や断層運動がどのようなものかはよく分かってきたが、その原因については、残念ながらまだよく分かってはいない[1)]。断層に加わるせん断応力が、断層の強度に達するとすべりが発生すると考えられるが、実際の断層の強度がどの程度の大きさなのか、それに加わるせん断応力の大きさはどの程度であるかということは、現在のところはまだ不明である。力学において、力は最も基本的なパラメータであるが、地震の起こる地下深くでは、その大きさがよく分かっていないのである。さらに、内陸の断層に加わるせん断応力がどのように増加して行くか、ひずみエネルギーがどのようにたまって行くかという問題も解明されておらず、現時点は、有力な仮説が提案されているという段階である[1)]。

そのため、内陸大地震の発生予測においては、活断層の活動履歴等に基づく統計的な手法がとられているが[2)]、色々な問題が指摘されている。断層に加わる応力と強度の兼ね合いなど、内陸地震の発生の仕組みの理解に基づいた予測手法の開発が待たれている。

このような背景の下、内陸地震のことを明らかにすることを当初の目的として、「満点地震計」を開発し、「満点計画」と呼ばれる次世代型の稠密地震観測計画を開始した。例えば、地下深くの応力状態を精度良く推定するためには、既存の観測網からのデータだけでは足りないことがよく分かっていた。そこで、野外において、大量の質の高い地震データを長期間にわたって記録する試みを開始した訳である。本稿では、この開発の経緯やその成果の概要を報告する。より詳しくは別紙を参照されたい[3)4)5)]。

2. 開発の背景 - 断層に加わる応力の推定のために

2.1 地震メカニズム解とは？

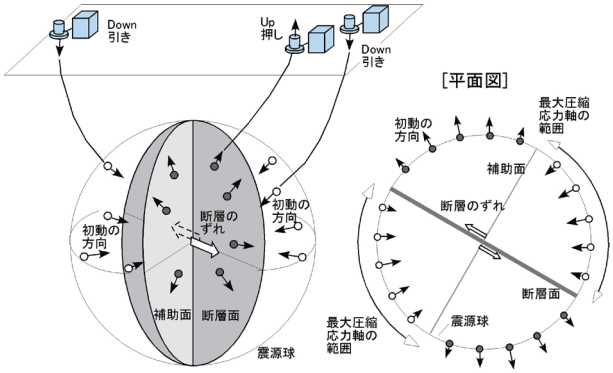


図１　地震メカニズム解の模式図（鉛直な横ずれ断層）

地震の起こる地下深くの応力を推定できる手法は、地震メカニズム解を用いた応力逆解析である。地震メカニズム解とは、図1に模式的に示すように、震源球(断層を囲む仮想的な球)上において、地震波の初動(地震波の最初の動き)の方向の空間分布を示したものである。右図のように水平面に投影するとよく分かるが、初動の方向が、震源に向かうものと震源から離れるものの4象限型となり、その境界(節面)のひとつが断層面に相当する。この初動の2種類の方向は、各観測点でのＰ波初動が上向き(押し)か下向き(引き)かに対応している。断層に加わる最大圧縮応力の方向は、震源球上の引きの領域内にあるはずであり、多数のメカニズム解が得られると応力場を推定することが可能となる。その方法の概要は拙著[1)]を参照いただきたい。

2.2 応力の大きさの推定

上記の応力逆解析により推定可能なのは、主応力の方位と相対的な応力の大きさの比のみであり、地震発生に一番関係する差応力(最大主応力と最小主応力の差)の大きさそのものは分からない。地震メカニズム解は断層面上のすべりの方向を示すものであり、すべり方向は、主応力の方位には関係する場合が多いが、差応力の大きさ自体には関係しないからである。そのため、差応力の大きさを求めるためには工夫が必要となり、大地震後の応力場の空間変化を「物差し」として用いる方法がある。地震のすべり分布は地震学において推定可能な量であり、それによる応力変化も計算出来る。図2に、長さ15kmの横ずれ断層の周辺の地震

後の最大主圧縮応力軸の方位分布を黒線で示した。地震前の応力場は空間的に均質であり、最大主圧縮応力の方向が矢印で示されている。左図のように地震前の差応力が地震時の応力変化に比べて十分大きい場合は、応力変化は効かないのに対して、右図のように小さい場合は、断層両端で応力場が乱れる。それが非常に小さい場合は、地震後の応力場は、応力変化の空間分布に近いものとなるだろう。

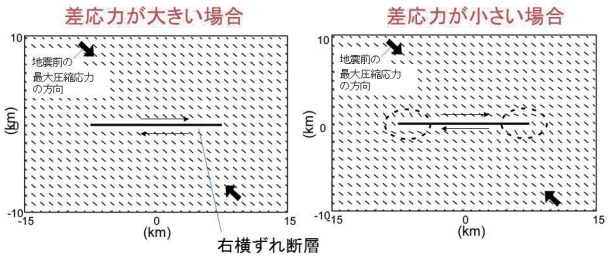


図２　大地震後の応力場（平面図）

2.3 応力の大きさの推定のために必要なこと

図2に示されているように、内陸地震について、応力場の空間変化を捉えるためには、空間分解能をkmオーダーに上げる必要がある。そのためには、小さな領域内で多数の精度の良い地震メカニズム解を得なければならない。数を増やすには、長期間にわたって小さな地震まで記録することが必要である。長期間データを得るためには、通年で安定して記録をとることが必要である。小さな地震まで記録するためには、震源にできるだけ近づいて、ノイズの小さい場所で高感度の観測をしなければならない。また、精度の良い地震メカニズム解を得るためには、多数の観測点が必要となる。

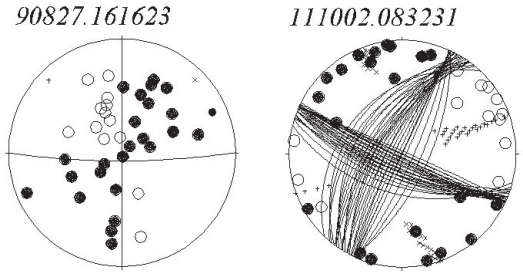


図３　地震メカニズム解の例

図3に地震メカニズム解の例を示した(図1の右側と同様に水平面に投影したもの、円の中心が震源の直上にあたる)。右図のように観測点が少ないと、メカニズム解は精度良く決定出来ない。特に重要なのは、震源の直上付近に観測点が多いことである。図1に、震源から観測点への地震波の経路を示しているが、地表近くほど地震波速度が小さいため、地震波は曲がっている。そのため、震源球の中心付近でデータが少なくなり、メカニズム解が精度良く決まらないケースが多い。日本の内陸では、微小地震の深さは5-15km程度が多く、左図のようなメカニズム解を得るためには、震源の直上で1km間隔くらいの観測点の空間密度が必要となる。また、このような稠密地震観測は、地下構造を詳しく調べるためにも非常に役に立つのである。

3. 従来の装置の問題点

内陸において、1km間隔で通年の地震観測を行うことは、満点計画の開始前は、ほとんど不可能だった。人口密集地では通常は高感度の地震観測は不可能なため、人家の少ない山間部をフィールドとすることが多い。しかしながら、山間部では道路が1kmおきにあることは稀であり、AC電源も、通常は人家のある道路沿いでしか得られない。

そのため、バッテリーなどのDC電源で装置を駆動することが必要となるが、開発に着手した2006年頃においては、地震観測用の記録装置の最も優れたものでも、消費電力は0.5W程度であった。一般的なカーバッテリー (重量11.5kg)は、5時間容量が36Ah程度であるので、バッテリー１個では、１ヶ月程度稼働するに過ぎない(バッテリーは一般的には消費電流が小さいほど容量が大きくなるが、非常に小さい場合には自己放電との兼ね合いが出てくるため、そう大きくはならない)。日本海側など冬季には積雪のためアクセスできないところで、半年以上メンテナンスなしで稼働させるためには、このバッテリーが6個程度必要となる。観測点が少数なら可能かもしれないが、仮に10カ所行うとすると、半年毎のバッテリー交換のときに60個運搬する必要がある。道路のないところでは事実上は不可能であり、車を用いたとしても限界に近く、これ以上の多点観測は極めて困難である。

ソーラーを併用すればバッテリーの個数を少なくできるが、日当たりの良い場所を確保出来るとは限らないし、この程度の消費電力をまかなうだけのソーラーパネルを道路のない山中へ運搬することは厳しい。

このように、1km間隔の地震観測においてはDC電源を用いる必要があるが、AC電源が無いところでは専用回線やインターネットなど有線によるデータ伝送も不可能である。無線や携帯電話を用いると、消費電力が増えるため、バッテリーをさらに増やさなければならない。そのため、データは伝送せず、現地収録方式(オフライン)を取る必要がある。オンラインによる集中記録方式ではなく、現地収録方式の採用は、自然地震観測に限らず、石油資源等の大規模な探査において

も近年始まりつつあるが、GPS衛星からの高精度時刻信号を利用できるようになったことが大きい。ところで、半年間データを記録するため大容量の記憶媒体を装備する必要があるが、2006年頃は大容量の地震データを記録できる装置は存在しなかった。現地収録方式でかつ通年で観測することが想定されていなかったのである。

写真１　満点地震計と低消費電力記録装置

4. 満点地震観測システムの開発

4.1 必要とされること

そこで、京都大学防災研究所が中心となって、満点地震観測システム(満点システム)を開発した。想定される使い方は、例えば、M7クラスの大地震の余震域とその周辺に1kmおきに設置し、半年以上連続で地震波を記録するというものである。やや広めの100km×100kmの領域では１万点の観測網となり、これは百点満点の微小地震観測なので、「満点計画」と名付けられた。これを実現するためには、道路のない山中にも短時間に大量の観測点を設置することが必要となる。そのため、装置は小型軽量でかつ設置が容易であることが必要不可欠である。一人の人間が５セット程度を背負って、山道沿いにサクサクと田植えをするように設置出来ることが望ましい。半年間以上連続観測するためには、低消費電力で動作し、大容量の記憶媒体を備えることが必要となる。加えて、当然ながら、地震波を精度良く、高い時刻精度で記録しなければならない。また、台数が多くなるので、できるだけ低価格であることが必須である。

4.2 低消費電力記録装置の開発

最初に、(株)近計システム社と共同で、低消費電力記録装置(EDR-X7000)を開発した(写真1右)。

小さな地震まで観測対象となり、波形は高周波となるため、サンプリング周波数は高い方が望ましい。従来の地震観測では、伝送容量の問題から、100Hz程度のサンプリングで行われることが多かった。しかし、震源付近における地震波形は、M5で1Hz、M3で10Hz、M1なら100Hz程度となると予想される。非弾性減衰により波長が延びるため観測点ではより低周波となるが、通常はM0くらいまで十分観測可能であるので、サンプリング周波数は250Hzを基本とし、切り替えにより1kHzも可能とした。

2006年当時は、この周波数帯域で高精度かつ低消費電力であるσΔ型ADC(ADコンバーター)は無かったため、18bit分解能の逐次比較型ADCを工夫して用いた。高感度短周期地震計の記録可能な最大振幅と地動のノイズレベルの検討から、24bitADCが必要となる場合は、極めて限られることが分かったからである。これにより、低消費電力化にも貢献した。

サンプリング周波数が高くなると、データ量が増える。すると、サンプリングとデータ書き込みに関する短時間あたりの仕事量が増えるので、消費電力も増えることとなる。カーバッテリーは背中に５個も背負えないので、乾電池駆動できるように、限界まで低消費電力化を行った。例えば、CPUをスリープさせることが良く行われるが、それではまだ甘く、難しい仕事以外はPLD(Programmable Logic Device)に任せて、普段はCPUを止めている。

低消費電力化と時刻精度の両立が大きな課題であった。このような低消費電力下でも時刻精度を保つため、水晶発振子の発振周波数を印加電圧で制御し、さらに制御に用いるパラメータの値を自己学習させることで、1msの時刻精度を実現した。これにより、GPS衛星の信号を受ける間隔を、1-2時間に１回で押さえることが可能となり、低消費電力化に貢献した。自己学習の機能は装置の組み立てにおいても重要な役割を果たした。水晶の発振周波数やその制御パラメータは個体毎に異なっており、特性を揃えることは大変な作業であるが、自己学習機能により、面倒な調整が不要となり、製作時間の短縮や低コスト化に役立っている。本機能は特許を取得している。

250Hzサンプリングで半年間連続記録するため、4GBのCFカード(2006年当時の最大容量)を6枚装備することとした。これは、装置としては、あまり美しくないものであるが、機能的には必要不可欠であった。

設置を容易にするために、パラメータ設定は、1枚目のCFカードに書き込んでおくこととした。従来の装置は現地でパソコンを接続するものが多かったが、これにより作業の手間や時間を著しく軽減できた。地震計を含めて、動作チェックはランプ点滅によるセルフチェックを基本としている。また、液晶の表示機能や各種ボタンや通信コネクタを省くことにより、低消費電力化と装置の簡単化にも貢献している。ちなみに、記録された波形の確認は、保守用のCFカードを用いることによりパソコンで可能である。

安定して動作させるために、装置は防水としている。装置のサイズは、230(W)×181(H)×68(D) mm、重量は1.2kg以下と小型軽量を達成した。

消費電力は0.08W以下であり、開発から10年近く経った現在でも、EDR-X7000以外の最も優れた地震観測用の記録装置と比べても、半分程度の消費電力となっている。地動ノイズの小さな観測点であれば、アルカリ単一乾電池24本で半年以上動作可能である。重量は3kg程度であり、バッテリーを用いる場合の1/3程度となる。

写真２　設置中と設置後の満点地震観測システム

4.3 小型軽量地震計の開発

地震観測システムは、センサー (地震計)と記録装置から成るが、実は当初は、地震計は既存のものを用いるつもりだった。しかし、小型軽量の記録装置が出来上がると、既存の地震計の重さや使い勝手の悪さがだんだんと気になってきた。短周期高感度の地震計は仕組みが単純で既に完成されたものと見られているためか、改善は遅れている。高性能で安定して動作するため今でもよく用いられているL-22D(Mark Products社製)は、30年以上前に開発されたものである。磁石や金属の切り出し加工で製作され、重くて大きい上に、加工の手間がかかるためか価格も高かった。今回開発した小型軽量地震計(近計システム社製KVS-300、写真1左)は3成分一体型の地震計で小型軽量化を実現しつつ（106(W)×104(H)×140(D) mm、約1.5kg)、L-22Dと同等の性能を持っている。

小型軽量が達成されたのは、磁性体の粉末焼結の技術を活用して、小型高性能の磁石とコイルのシステムを構築できたことによる。磁石は、超小型のハードディスク用のモーターに用いられる磁石などを作る技術によるもので、極めて高精度である。磁石とコイルのすき間をぎりぎりまで小さくして、磁力線の強度を上げることが出来たため、高感度化と小型軽量化の両方を達成出来た。この磁石とコイルのシステムも特許を取得している。

可能な限り軽量化するために、筐体には樹脂を採用した。設置時間の短縮のために下記のような工夫をした。露岩上に直接設置できるように、水平レベル調整用ネジのストロークを長く、狭い場所でも設置可能なように水平調節ネジを上側から調整可能とした。ちなみに、L-22Dは水平調整用の仕組みを持っていない。地震計も当然ながら防水であり、両端に防水コネクタを持った専用ケーブルで直接記録装置に接続することとした。コネクタやケーブルも、可能な限り軽量化して、1 万点観測が可能なように配慮した。

5. 運用状況と今後の課題

2017年現在、京大防災研が中心となっているものだけでも国内外の 4 カ所に大きな観測網を構築し、合計約300点で、地震データを順調に記録し続けている。本章では、観測における問題点と今後の展望を述べる。

5.1 仕様策定における問題 - 限界を追求しすぎ？

1万点規模の観測を可能とするために、装置の仕様を検討した。例えば、小型軽量化や低消費電力化を、可能な限り徹底的に行った。その結果として、地震計では、樹脂性の筐体の採用やケーブルとコネクタの軽量化を計った。樹脂性の筐体は耐衝撃性等においては金属製に比べておとるため、どれだけ長期間にわたって安定して使用できるかどうかは今後の問題となる。最近のロットでは、対ノイズ性を確保するため筐体に金属のコーティングが行われているが、同時に防水性能も向上している。

軽量化のため、ケーブルの素材は軽く内部のモールドも当初はなかったが、動物にかまれたときなどの耐久性に問題があり、重量はあるがより固いものに順次取り換えている。現在は数百点程度の観測に留まっており、実は徒歩でないとアクセス出来ない点は、そうは多くはない。最も頻繁に使われる状況に合わせた設計が必要であったかも知れない。

低価格化については、当初は、１セット10万円以下を目指していた。当時の標準的な装置に比べて1/10以下の価格であり、出来るだけ機能を限定して低価格にしようとしていた。GPSユニットが当時は高価であったため、ラジオの信号を用いるなどの安価な方法を検討したが、生命線である時刻精度が危ういと、観測自体の意味が失われる恐れもあるため、確実な方法をとった。筐体の防水化もコストアップとなったが、写真2左に見られるプラスチックケースが破損したり、ふたが開いたりした場合にも、装置が故障することを少

なくできた。工業用のCFカードの採用も数倍以上のコストアップとなるが、低消費電力化に寄与している。

結果として、従来の装置の半分程度の低価格化は達成したが、目標としていたものからはやや遠かった。開発した満点システムは、結果的には汎用性のあるものとなり、自然地震観測以外にも活用されているが、より低価格化するためには、機能を絞り込んで、用途を特化することも考慮する必要があると考えられる。

5.2「0.1満点計画」

2017年春から、鳥取県西部地域において、千点の観測点による、0.1満点地震観測が始まった[6]。用いられているのは、九州大学が中心となって新たに開発した簡易型のシステムであり、満点システムの技術をベースにしている。安価なものにするために、３成分観測ではなく上下動１成分観測とし、筐体も防水ではない。一方、データは現地収録だけではなく、携帯電話により準リアルタイムで伝送される。現地収録方式だと、データ解析を行うのがどうしても半年以上遅れるため、短期の研究プロジェクトでは厳しいからである。その点を考慮して、成分数を減らし、サンプリング周波数を100Hzと低く押さえて、伝送と集中記録を可能とした。非常に小さな地震の波形の解析や、S波の検知には問題はある可能性はあるが、メカニズム解を決めるためには十分である。小型･軽量･低価格化においては、今後の重要な方向の一つであると考えられる。

謝辞

満点システムの開発において、平成18年度京都大学総長裁量経費と平成19年度防災研究所特別事業費等のサポートを得た。満点システムは、京都大学防災研究所と㈱近計システムが中心となり、各大学関係者や中小企業各社により共同開発された。㈱近計システム、㈱サイスモテック、㈱日本科学冶金、㈱エス・ジー・ケイ、㈱京都電測の関係の皆様に深く感謝する。本研究は文部科学省の科学研究費補助金26109005、および「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けた。

参考文献

1) 飯尾能久：内陸地震はなぜ起こるのか？、近未来社、174p、2009.
2) 地震調査委員会：活断層の長期評価手法(暫定版)報告書について、http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/katsu_hyokashuho/honpen.pdf、2010.
3) 三浦 勉他：近畿地方中北部における臨時地震観測、京都大学防災研究所年報、Vol 53B、pp. 203-212、2010.
4) 飯尾能久：次世代型地震観測システムの開発と運用：満点(万点)を目指して、京都大学防災研究所年報、Vol 54(A)、pp. 17-24、2011.
5) 飯尾能久：満点計画ー次世代型稠密地震観測システムの開発ー、物理探査学会ニュースレター、Vol 14、pp.2-3、2012.
6) 松本 聡他：内陸地震発生域における 0.1 満点地震観測へ向けて、日本地震学会2016年度秋季大会講演予稿集、S02-P07、2016.

飯尾 能久 (いいお よしひさ)

1980年京都大学卒、京都大学理学部助手、防災科学技術研究所主任研究官等を経て現職、京都大学理学博士、専門分野：内陸地震の発生過程と発生予測についての研究

最新の微動探査観測技術とシステムの構築について

先名　重樹
●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

平成28年熊本地震においては、益城町において4/14の前震(M_{jma}6.5)と4/16の本震(M_{jma}7.3)の2度にわたって震度7を観測した。強震動や液状化による被害も甚大であり、特に、断層近傍の住宅等に大きな被害を及ぼした。住宅等建物被害の分布においては、おおよそ本地震の地表地震断層近傍に被害が集中している傾向が確認されたが、断層直上であっても被害が少ない場所や、断層から離れていても被害が比較的大きな場所も確認されている。これらの現象は、地質地盤の違いにより被害が異なった可能性が高いと推察される。

地盤の善し悪しを知るには、ボーリング調査を行うのが一般的だが、調査コストがかかる他、地震動の増幅および周期特性を知る上で重要なS波速度を直接的に得られない。S波速度は、地震による揺れやすさを知るための重要な情報となり、防災にも役立てられる。S波速度を得ることの出来るPS検層や表面波探査については、コストがかかる上に観測者の能力や解析結果の解釈も難しく、多くの観測は望めない。

S波速度を明らかにするための一つの方法として、常時微動と呼ばれる地面の微小な揺れをデータとして用いる方法がある。微動アレイ探査法は、通常、数mから数kmの範囲で地表面に複数の地震計を配置し、数時間にわたり常時微動を観測することで地下数mから数kmまでのS波速度構造を推定する方法である。観測の手軽さにより、特に2000年代に入ってから、各大学・研究期間で非常に多くの観測・研究がなされるようになったが、一般的な地質・地盤調査業務に高頻度に使われている状況にはない。

防災科学技術研究所（以下、防災科研）では、強震動予測のための広域地盤モデルを構築するため、この微動アレイ探査法を特に工学的基盤よりも浅い地盤（浅部地盤）に特化して、後述する「極小アレイ・不規則アレイ」の観測および解析を徹底的に簡易化し、大量観測を可能にする微動探査システムを構築している。本報告では、微動探査観測の技術とシステムに関しての研究・開発概要と参考までに、その結果を活用した地盤モデルの構築状況を紹介する。

2.　開発方針（一般ユーザーの利用の検討）

我々が対象とする浅部地盤構造は、家屋の立地や町の防災等から一般市民にも関心が高いと考えられる。この程度の深さの地盤構造は局所的に変化する。平成28年熊本地震においては、益城町等で、家1 ～ 2軒程度（数十m）離れていたために地盤災害による被災を免れたというケースも報告されている。そのため、場合によっては10 ～ 20m程度ピッチでデータをとる必要がある。しかし、このような高分解能は、国や自治体の地震災害軽減プロジェクト等の広域調査では実現は困難である。そこで、地方の大学等、地域に興味を持つ一般ユーザーを対象に、自分でデータを取得し、解析や結果の閲覧までできるような微動観測システムの構築を検討した。このアプローチを実現するためには、アレイ配置が簡単で、操作や管理が簡単な観測機材を開発する必要がある。データ処理の自動化や客観的な品質管理をする必要もある。また、データの散逸を防ぎ、継続的に蓄積するために、データベース周りもセットで開発する必要がある。次章以降にその開発内容について報告する。

3.　微動観測および解析手法

3.1　極小アレイおよび3点不規則アレイでの観測

我々が提案する観測方法は、主に、円の中心に1台、円周上に均等に配置した3台（合計4台）の地震計で構成される半径0.6 mのアレイ（極小アレイ）と、このアレ

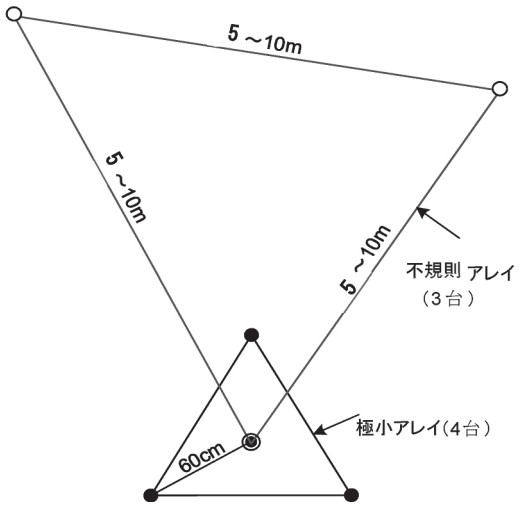


図1　極小・不規則アレイ展開概念図

写真１　極小・不規則アレイ観測状況

イから各々５～10m程度離れた位置に、三角形に近い形で2点設置（不規則アレイ）する。極小・不規則アレイの展開概念図を図１に、観測状況を写真１にそれぞれ示す。

上記のアレイ形状で、15分間程度微動を観測することで、深さ数mから百m前後程度までの浅部地盤S波速度構造を推定することが可能となっている[1),2)]。

3.2　位相速度の読み取りと地盤構造の推定

最終的に得たい情報は、地盤のS波速度構造である。そのためには、近くの検層データや広域的な地質構造を初期モデルとして、アレイ観測で得られた位相速度に合わせて修正する逆解析が実施されることが多い。しかし、初期モデルの作成には専門家の知見が必要となり、自動処理と解析結果の即時配信が難しい。そこでここでは、周波数―位相速度で表される分散曲線を波長―位相速度の関係に変換し、適当なスケーリングにより深さ―S波速度の関係とみなす簡易変換を採用することとした[3)]。分散曲線から波長40 mに対応する位相速度を深さ30 mまでの平均S波速度とみなす方法[4)]も併用する。最後に、H/Vスペクトルと分散曲線の同時インバージョン[5)]等も半自動で行った上で、研究と実証によってある程度説明性の高い結果が得られていることを確認した（図2）。

3.3　データ解析の自動化と品質管理

一般ユーザーの利用という観点から、解析区間の選択、位相速度の読み取りを含むすべての処理を自動化した[6),7)]。これは、読み取りにおける客観性の確保、時間短縮、ヒューマンエラー対策を兼ねている。後で目視により自動処理の結果を確認し、読み直しも可能となる半自動の仕組みとした。データ欠損や、劣悪な設置環境等のため生データに問題がある場合、準リアルタイム的にその事実を提示することで、その場で再観測をする等判断が可能となる。解析結果の品質が低い場合は3点不規則アレイ等の追加観測を実施するという判断も可能となる。解析結果の過剰解釈を防ぐためにも、品質管理を徹底する必要がある。品質管理のための指標は、波形の最大振幅やスペクトル密度、SN比等の量を組み合わせて評価している。

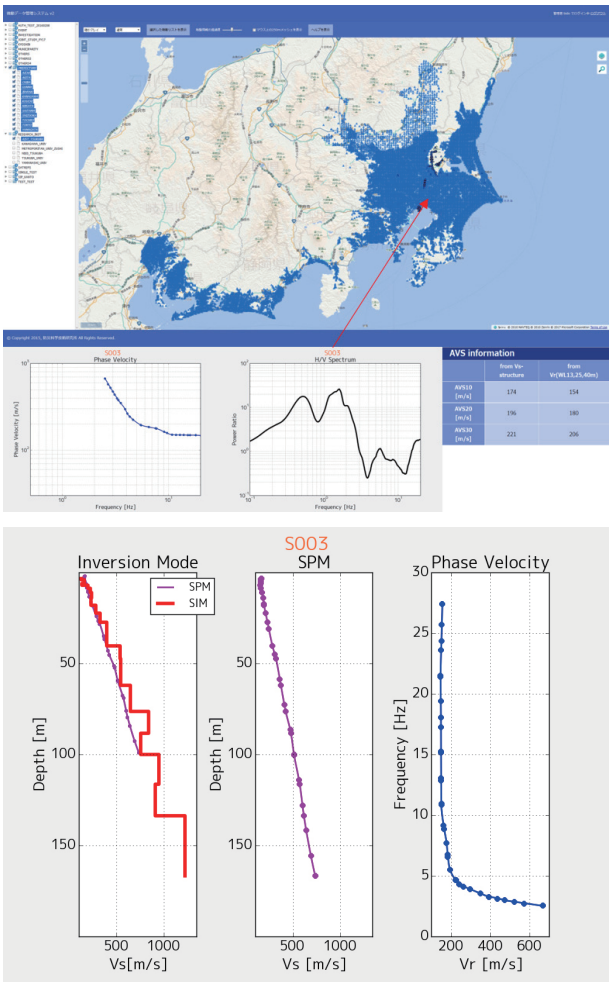


図２　微動観測による自動解析・解釈結果表示例
（上：関東地域の微動DB画面と位相速度・H/Vスペクトル比をそれぞれ示す。下：S波速度解析図等）

4.　微動観測システムの開発

4.1　地震計の開発

微動アレイ探査に用いる地震計は、応答特性の個体差が小さく、特に位相特性が揃っていなければならず、自己ノイズが低いことも重要となる。また、H/Vスペクトルの単点観測に用いる可能性を考えると、上下方向だけでなく水平方向の地面の動きを感知するためのセンサーが必要となる。これらの条件をみたしつつ、機動性を確保するために、小型軽量で内容物が一つの筐体に収められていること、現場での配線等の手

作業が不要なこと、1日の観測中で電源が持続すること、電源オンから短時間で安定に記録を開始できること、車両運搬の耐振動性、防塵・防滴性にも対応できること等を条件とした。これらの要件を満たすために、2005年頃から、高感度で広ダイナミックレンジ、低ノイズでバイアス温度安定性の高い地震計を開発・開発協力をしてきている[8),9)]。この機材は極小アレイの適用にも耐える性能を有することが実証されている。

4.2 「i微動」とクラウド解析システムの開発

微動アレイ観測を大量に実施し、その解析結果までを円滑に管理するためには、観測データの取得から解析、結果の評価に至るまでの工程が少なくかつ簡単であることが必要である。特に観測によるデータ取得と解析までの間には、解析のためのデータチェック・データフォーマット変換・写真整理等の整理作業に多くの時間が割かれる。しかし、現場で簡単にこれらのデータを編集することなくデータベースに納めることが可能となれば、沢山の観測データを楽に管理できるため、前述の簡単な観測機器と合わせ大量の観測管理が可能となる。これらの目的を達成するため、現場でのデータ整理から解析等（位置情報・写真情報・観測データ・時刻歴情報・解析結果等のデータ登録）の一連の工程が簡単に行え、ヒューマンエラーが少なくなる仕組みを開発した。具体的には、地震計からPCやタブレット等の端末にデータを欠損なく送受信でき、後述するデータベースへ転送する「i微動」[10)]を構築した（図3）。

図３　i微動 システム（タブレットでの表示例）
（左：観測中のリアルタイム波形表示・
右：H/Vスペクトル比）

データベースに登録されたデータは、自動的に品質管理・解析され、解析結果からS波速度構造（地盤モデル）をWEBGIS等にて地図情報とともにリアルタイムに近い形で配信・確認できる必要がある。これらを実現するために、高速に微動データを解析・品質管理する「クラウド解析システム」を構築した。システム構成と概念図を図4に示す。

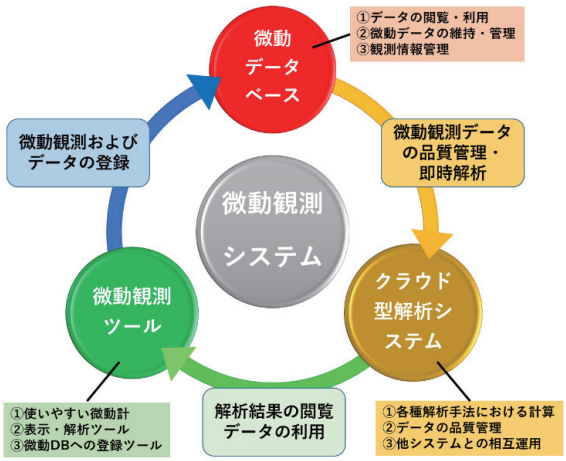


図４　微動クラウド解析システムの概念図

スマートフォン用アプリケーションについては、波形やスペクトルのチェック、簡易的な微動のSN比管理等のデータの品質管理を行えるようにしている。また、クラウド解析では、入力されたデータについて詳細解析およびデータの品質管理を行う[11)]。本クラウドシステムを使えば、使わない場合に比べて、観測から解析結果に至るまでの工程が5 ～ 10倍程度高速化している。なお、微動の生データ・解析データを効率的に閲覧・活用可能とするためのデータベースの形式も検討した。具体的には、微動観測データについてはXML形式の書式を定義し、観測生データおよび解析結果データについては、汎用性の高い数種類のフォーマット形式で収めている。

5.　浅部・深部統合地盤構造モデルの構築

前章までに紹介した微動システムを使用して、関東地域の浅部・深部統合地盤構造モデルの構築を行っている。モデル化においては、まず、関東地域全域において自治体や民間等からボーリングデータ(約28万本)を収集し、地表から工学的基盤までの浅部地盤構造モデル（地質モデル）を作成した。次に、既往の深部地盤構造モデル(J-SHIS深部モデル)を結合し、初期モデルを作成した。最後に、この初期モデルを基に、K-NET、KiK-net、気象庁および自治体等の地震観測点における地震記録と、前節までに紹介した極小・不規則微動アレイ観測を関東地域全域にて約1 ～ 2km間隔、11,000カ所以上実施して、地震動の計算に最も重要な地盤の硬軟を表すS波速度や層厚の設定等を行った。これらの計算結果に基づいて、約250mメッシュ

単位の地盤構造モデル及びモデルから計算される各種増幅指標（最大速度増幅率、震度増分、周期毎の応答増幅倍率等）のマップを作成した（図5参照）。現在もモデルの精度向上の検討を続けており、徐々に関東地域の詳細な地盤の揺れやすさの詳細が明らかになってきている[12)]。

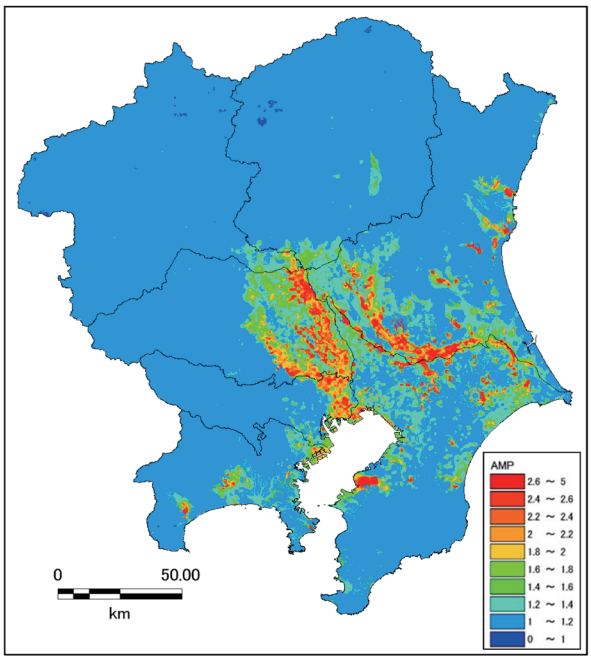


図５　関東地域全域で作成した「浅部・深部統合地盤モデル」に基づく工学的基盤 (Vs400(m/s))からの周期１秒の応答増幅倍率（ 一次元重複反射法による増分 ）

6.　まとめ

我々の目標は、地震防災をはじめとする地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の情報を取得し、地質調査の精度を高め、地盤モデルの高精度化を計ることにある。そのためには膨大な量の微動データを取得・解析・蓄積する必要があり、本システムを構築した。極小アレイの観測は非常に簡易で、小人数で多数の観測を行うことが可能で、容易にS波速度構造の空間変化をイメージングでき、地震災害軽減のための地震ゾーニングの高精度化に寄与できる。現状では分解能の観点から微地形区分等から推定せざるを得ない表層地盤の揺れやすさを、S波速度構造や地盤振動特性の実データから評価できるようになるため、地震の揺れに関する予測精度が飛躍的に向上する。また、液状化等の地盤災害の評価や、建築・土木構造物の立地条件の検討にも寄与できる。このようにこの研究の成果には幅広い社会的な価値と波及効果が期待されるものと考える。

＜謝辞＞

産業総合技術研究所の長郁夫氏（本システム構築に関わる共同研究者）には執筆に関してご協力いただいた。記して感謝いたします。

＜参考文献＞

1) I. Cho, S. Senna and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, Geophysics, 78 (1), KS13-KS23, 10.1190/GEO2012-0248.1 (2013).
2) 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 常時微動を用いた浅部構造探査の高度化について, 日本建築学会大会[近畿]梗概集2014, 355-356 (2014).
3) 長郁夫: SPAC法の一般化とCCA法の開発について, 地球惑星科学連合, SSS35-01 (2014).
4) 紺野克明, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No. 647/I-51, 415-423 (2000).
5) H. Arai and K. Tokimatsu: S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., 95 (5), 1766-1778, doi:10.1785/0120040243 (2005).
6) 長郁夫, 先名重樹, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査法の高度化(その1): 自動読み取りアルゴリズムの開発, 地球惑星科学連合 , SSS35-P01(2014).
7) 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行: 微動を用いた浅部構造探査の高度化(その2)–自動読み取りアルゴリズムの適用–, 地球惑星科学連合, SSS35-P02(2014).
8) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第115回物理探査学会学術講演会論文集, 227-229 (2006).
9) JU410微動観測装置：白山工業ホームページ, http://www.hakusan.co.jp/information/log/2017/04/ju410.shtml
10) 先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行: 微動探査観測システム「i 微動」等の開発, 物理探査学会第124回学術講演会論文集, 346-348 (2011).
11) 先名重樹: 微動クラウドシステムの構築, 地球惑星科学連合, SSS26-P20(2015).
12) 先名重樹,松山尚典,神薫,若井淳,前田宜浩,藤原広行: 関東地域における微動観測に基づくS波速度構造の推定と地盤モデルの構築, 物理探査学会第133回学術講演会論文集, 58-61 (2015).

先名 重樹（せんな しげき）

1994年金沢大学大学院理学研究科修了、2008年東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻博士課程修了、博士（工学）、国立研究開発法人防災科学技術研究所主幹研究員、専門分野：地震地盤工学

強震動予測のための地盤構造モデルの構築および地盤調査・解析手法の研究開発を行っている。

建物の地震観測と構造ヘルスモニタリングについて

楠　　浩一
●東京大学地震研究所 准教授

1．はじめに

モニタリング（Monitoring）とは、「監視すること、観察して記録すること」などの意味がある。建物のモニタリングを考えると、地震時の建物の揺れを観測して記録する強震観測はもちろんのこと、平常時の常時振動観測、あるいは温度や風向・風速の観測、さらには電力消費量の観測など、多岐にわたる。構造モニタリングに特化しても、その測定対象は、微振動（通常は速度）、強振動（通常は加速度）だけではなく、層間変形や傾斜、衛星を用いた残留変位計測などもある。ここでは、その中で地震時の強震観測とヘルスモニタリングに絞って、その目的と意義、現在の技術動向について紹介する。

2．強震観測

日本は地震国であり、構造物の水平方向の設計荷重の中では、一部の超高層建物や津波避難ビルなどを除いて、地震荷重が一番大きくなるのが一般的である。地震荷重を設定するためには、①建物の脚元での地震の大きさ、②建物の階ごとの振動性状、の２つの情報が必要となる。①に関しては、近年、地中の「工学的基盤」での地震の大きさと、それより浅い部分の表層地盤での地震動の増幅係数に関する情報が必要であることが分かってきている。①に関しては、K-NETをはじめ、自由地盤での強震観測網は格段に整備が進んできた。しかし、地盤と建物の相互作用により、建物基部での地震動は自由地盤でのそれと異なる可能性があることが広く知られており、より合理的かつ精度よく地震荷重を設定するためには、建物の強震時の挙動を把握する必要があり、建物の強震観測の推進が望まれる。しかし、自由地盤での地震観測とは異なり、建物の強震観測では建物所有者および利用者の理解と協力がなければ進められない。その為、建物所有者や利用者にも強震観測による直接的なメリットが望まれている。強震観測を用いた建物のヘルスモニタリングはその一つと言えるであろう。

3．構造ヘルスモニタリング

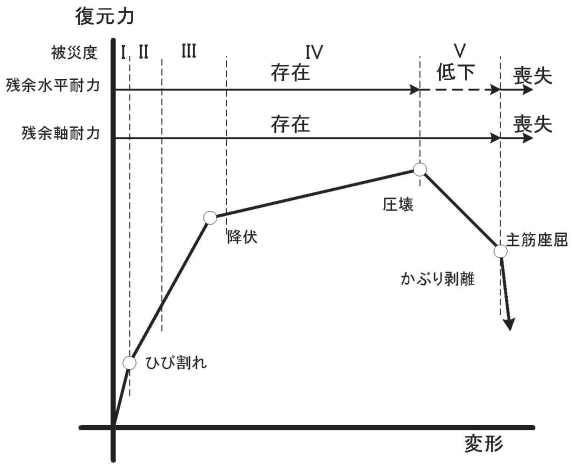
3.1 構造ヘルスモニタリングとは

「構造ヘルスモニタリング」とは強震観測などの「モニタリング」とは異なり、「観測」だけではなくその観測データを用いて何らかを「判断」し、その判断結果を「表示」する機能を有するものと定義することができる。構造物のヘルスモニタリングの対象としては、強震動時（巨大地震時）の建物の安全性評価だけではなく、常時振動などを用いた建物劣化状況の把握、メンテナンスなどの修繕時期の判断などが考えられる。強震観測と対をなして推進が望まれるものとしては、強振動時の構造ヘルスモニタリングが挙げられる。ここでは、この強振動時の構造ヘルスモニタリングに着目する。

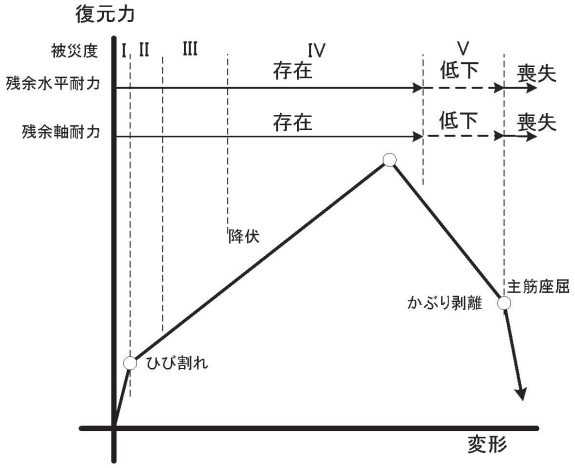
3.2 応急危険度判定と被災度区分判定

現行においても、既に日本には「応急危険度判定」と「被災度区分判定」[1]という判定制度がある。文献１）では、「応急危険度判定」の目的として、「余震等に対する建築物の倒壊危険性やその付帯物の落下・転倒の危険性を地震直後の段階で判定」することとしている。また、「被災度区分判定」としては、応急危険度判定の「次の段階として、被災建築物の主として構造躯体に関する被災度を把握し、これに基づき継続的に使用するための復旧の要否を判定」することとしている。建物の被災度は一般的には被災度I ～Ⅴに分類される。その被災度は、例えば鉄筋コンクリート構造だと「靭性破壊型」および「脆性破壊型」にわけて、図１のように部材や建物の復元力と変形の関係に従って分類される。

応急危険度判定や被災度区分判定は基本的には目視により構造部材の被災度を１つずつ確認することを原則としているため、その実施には非常に時間がかかる。例えば平成７年兵庫県南部地震の際には、被災地域に建物が39万５千棟[2]であったのに対して、判定を行った技術者は延べ6,000人で、46,000棟を判定するのに３週間が必要であった[3]。平成23年東北地方太平洋沖地震では、例えば宮城県内の仙台市他11市・18町では、2,955人の技術者により50,721棟を判定するのは8週間以上が必要であった[4]。必要とした期間も長く、その間に評価できた建物数も充分とはいえない。また、目視に依るが故に技術者のレベルによって判定が大きくばらつくことが問題としてこれまでも指摘されている。更に技術者による詳細な調査が必要となる「要注



(a) 靭性破壊型



(b) 脆性破壊型

図１　復元力―変形関係と被災度の関係

意」という灰色の判定が多く出され、この詳細調査には時間がかかり、その結果、住民の不安を早急に取り除くことができず、避難者数を増やすこととなる。

つまり本震後の被災建物の耐震性能評価方法として、①本震直後に判定結果が表示できる、②判定結果のばらつきが少ない、③「安全」か「危険」かの２値で判断ができる、ことが望まれており、構造ヘルスモニタリングがそれを実現可能と考えられる。特に③では、本震直後の建物の安全性のみならず、想定される最大の余震に対する安全性の評価も重要となる。その為には余震に対する被災建物の応答予測も当然必要となる。

3.3 構造モニタリング技術

構造モニタリングの最も簡便な方法は、建物基部だけにセンサーを設置し、設計時に用いた地盤面での設計荷重に相当するものを強震時に観測し、観測値が設計値を越えたかどうかを判断するものである[例えば5)]。設計方法によっては、加速度、速度、あるいはエネルギー換算値を用いる場合がある。この構造モニタリングは最も簡便な方法であることから、建物の構造特性や応答値にモニタリング技術は用いておらず、設計時の計算値を用いることとなる。また、設計値を越えた場合の損傷程度の評価は、設計時の計算値を正として推定することとなる。想定される余震に対する損傷も、設計時に構築したモデルに本震に相当する地震動を２度入力するなどして解析的に評価することになるであろう。その為、実構造物と設計時の計算モデルとの差異を考慮することは出来ない。

建物が損傷を受けると、復元力―変形関係では図２に示すように、接線剛性が低下し、非線形挙動を示すこととなる。この復元力―変形関係上の任意の点（例えば図中の（A））と原点を結んだ傾きは(A)点での等価剛性（K_e）と呼ばれる。(A)点を最大応答点として定常応答を生じると、建物の見かけの等価周期T_eは建物の質量mを用いて、式(1)のように表せる。

$$T_e = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K_e}} \tag{1}$$

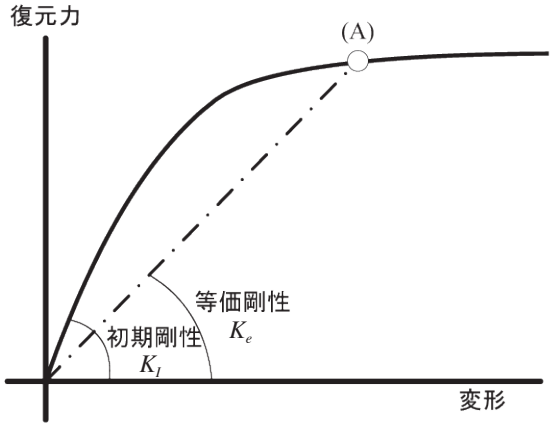


図２　損傷と等価剛性K_e

つまり、周期の変化を検出することにより、建物の損傷の有無を把握する建物モニタリング手法が可能となる。しかし、周期の変化と図１で示したような被災度を結びつけることが困難なこと、式(1)に示すように、剛性（K_e）の変化に比べてT_eの変化は感度が悪いこと、および文献6)でも示されているように周期の変化が必ずしも損傷に拠らないこと、などの問題点がある。また、想定される余震に対する損傷を予測することも困難である。

他には、地震時に観測された加速度を２階積分して各階の変位を算出し、各階の層間変形角の最大値を求

め、別途設定する閾値と比較することにより損傷の有無を判断する方法が特に高層建物を中心に用いられている。閾値としては設計で用いられる一般的な値（およそ1/150～1/100）を採用することが多い。しかしこの手法では、設定した閾値の精度や閾値を越えた場合の被災度の評価などに問題があり、また想定される余震に対する損傷を予測することも困難となる。

一方、文献7)では、層間変形角を用いる手法と同様に各階で計測された加速度を２階積分することにより各階の変形を算出するとともに、各階の質量比も用いて等価線形化法を援用し、実観測記録から建物の等価一自由度系での性能曲線を算出して被災度を判定する方法を提案している。図3に判定方法の概念図を示す。建物は(A)点で降伏し剛性が低下するため、要求曲線は(B)点から履歴減衰の影響で５％減衰での要求曲線（図中　Curve 1）に比べて低下する（図中　Curve 2）。このCurve 2と性能曲線との交点（図中(C)点）が本震での最大応答点と理論上はなる。ここで要求曲線は建物基部で計測された加速度を用いて計算できる。実際には、減衰の推定方法、特に塑性率の計算方法等の影響で誤差があることは充分考えられる。

一方、余震では建物の損傷が更に進展し、建物の変形が進むことがある。これは、図３からも分かるとおり、見かけ上は減衰が低下するのと同じこととなる。一方、最大の余震が本震と同じレベルであり、かつ余震の発生機構が本震と同じであると仮定すると、余震は本震と一致することとなる。弾性解析では、同じ波を２度入力しても解析結果は等しくなるため、最大余震に対する５％減衰での要求曲線は本震時と同じとなる。その為、性能曲線と余震での減衰を考慮した要求曲線（図中　Curve 3）との交点（図中(D)点）が余震での最大応答点と予測できる。(C)点から見て、安全限界点（図中(E)点）が(D)点よりも遠ければ建物は余震に対して安全、逆に近ければ危険と判断できる。このように、この手法を用いると、想定される最大余震に対する応答とその損傷度を陽に予測することができる。

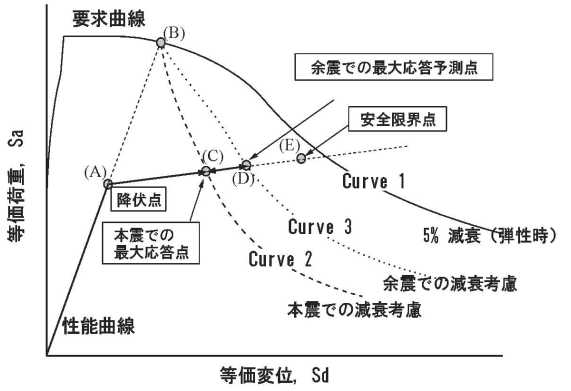
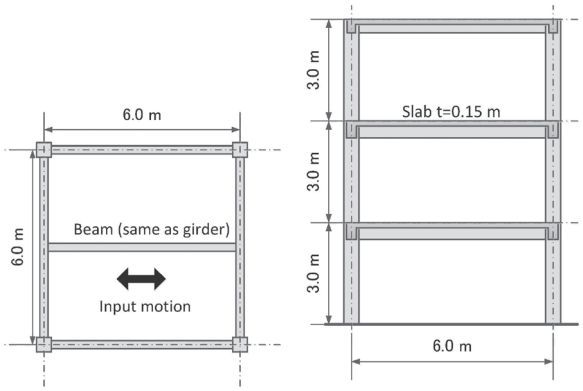


図３　判定方法の概要

図４に示す実大３層鉄筋コンクリート造試験体の振動台実験結果[8)]に対して、性能曲線を算出した結果を図5に示す。図中には、算出された結果を文献7)に従って３折れ線に近似したモデルも併せて示している。建物の各層の安全限界変位を安全限界変形角などによりあらかじめ定義することにより、性能曲線上での安全限界点を別途定義することができる。本震および余震での最大応答点とこの安全限界点を用いて、図６に示すように損傷度の判定が可能となる。



(a)　伏図　　(b)　軸組図

図４　実大3層試験体

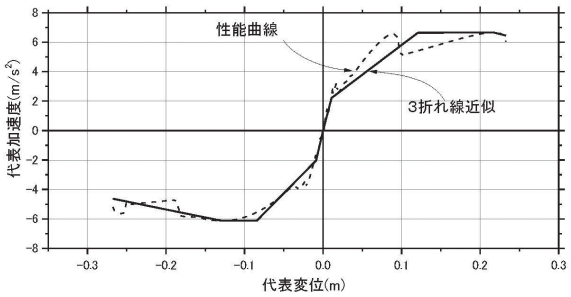


図５　算出された性能曲線と３折れ線近似

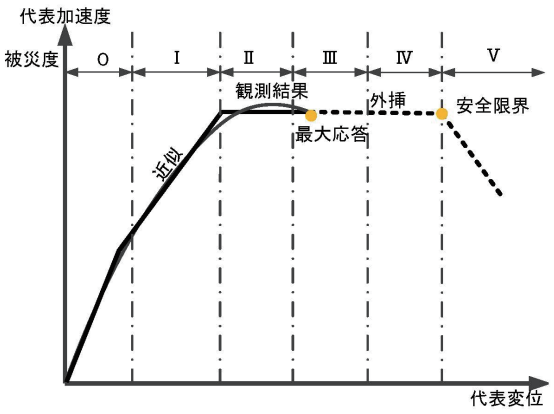


図６　性能曲線と被災度の関係

４．今後の建物ヘルスモニタリング

性能曲線を用いた構造ヘルスモニタリング技術は、東京大学地震研究所を中心として、既に日本全国40棟以上の建物に加えて、ペルー共和国やトルコ共和国でも採用されており、24時間観測が行われている。今後の技術開発としては特に、センサーの設置容易性の改善と観測の冗長性の向上のため、センサーの無線化・無電源化が強く望まれる。

構造ヘルスモニタリングに使用するセンサーに要求される精度や性能は、適用するヘルスモニタリング技術によってそれぞれ異なる。しかし、現状では精度や性能を評価する試験方法が統一されていない。また、いろいろな会社の製造したセンサーが接続できるようにするためには、通信やデータフォーマットなどの規格化も必要となるであろう。

建物ヘルスモニタリングによって得られた本震による被災度および最大余震で推定される被災度の情報は、建物所有者や利用者にとって重要であるだけでなく､その情報を防災拠点に集約することにより､ほぼリアルタイムで実被害の分布情報を把握することが可能となり、地域災害対策上も極めて有効となるであろう。例えば、避難所の利用可能状況の把握、救急車・消防車の配置計画の立案などに利用できると考えられる。

平成23年東北地方太平洋沖地震や平成28年熊本地震の経験から、構造被害のみならず、天井や間仕切り壁、方立壁などの非構造壁、外装材やガラスサッシといった非構造部材の被害状況が建物の継続使用性を判断する上で重要であることが分かってきた。言い換えれば構造的に無被害であるとしても、継続利用できるかどうかはまた別の要因で決まる可能性があるという事となる。そこで今後は、建物ヘルスモニタリングの対象としては、非構造部材へと拡張していくことが必要であろう。しかし、システム天井の天井ボードの落下などでは、ボード全てにセンサーを貼付することは現時点では非現実的である。そのため、例えば画像システムを利用するなど、新しいモニタリング技術の開発も今後必要となるであろう。

現在、IoT技術が産業界で広く開発・推進されている。そこでは、家電製品や空調設備、防犯システムなど、建物ヘルスモニタリングと同様にインターネット回線を通して接続しているセンサーや機器が沢山ある。建物ヘルスモニタリングも、その技術単体での利用のみならず、IoT技術をはじめとした大きなシステムの一部としてどのような活用方法・情報提供ができるのかを考えるべきときが来ている。

参考文献

1)国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所　監修、一般財団法人日本建築防災協会　発行:再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針　2015年改訂版、2016

2)日本建築センター：“平成７年阪神･淡路大震災建築震災調査委員会報告書　－集大成－”、1996

3)(財)日本建築防災協会：“建築防災７月号”、1995

4)既存建築物耐震診断・改修等推進全国ネットワーク委員会　平成29年度総会資料、2017

5)伊藤陽祐、小川勤、奥谷哲也、片山誠弥、川里健、平間敏彦、森重信、和田芳宏：エネルギーに基づく原子炉建屋の迅速な耐震裕度評価に関する研究　その１　研究概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、2012

6)Ligang Li、Akihiro NAKAMURA、Toshihide KASHIMA and Masaomi TESHIGAWARA：”Earthquake Damage Evaluation of an 8-story Steel-Reinforced Concrete Building using Sa-Sd Curves”, 日本建築学会構造系論文集、Vol79、No.702、pp.1107-1115, 2014

7)楠浩一、日向大樹、服部勇樹、田才晃：加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研究　多質点系構造物の場合、日本建築学会構造系論文集、第79巻 第699号、pp.613-620、2014

8)阿満重幸、北嶋圭二、細矢 博、江戸宏彰：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2 構造IV, pp.713-714, 1995

楠　浩一（くすのき こういち）

1992年東京大学工学部建築学科卒業。1997年同大学院博士修了後、東京大学生産技術研究所第一部助手。2000年より建設省建築研究所（当時）、2006年より横浜国立大学准教授を経て、2014年４月より現職。博士（工学）

橋梁の地震時挙動モニタリング

藤野　陽三
●横浜国立大学　先端科学高等研究院　上席特別教授

１．はじめに

地震時挙動を知る目的で、これまでにも橋梁において様々な地震応答観測が行われてきた[1)]。矢部・塚本により、建物も含めての地震応答観測の広汎な例がまとめられており大いに参考になる[2)]。米国での事例・レヴューについては建物が主であるが文献[3)]がある。

地震観測の目的は、基本的には、設計に用いた、剛性、質量、減衰、境界条件、相互作用などのモデル化が妥当かどうかを確認することにある。橋梁は一つ一つを設計し、施工・製作され、異なる地盤などの条件のもとに置かれ、形状、規模も様々であり、単品性が極めて高い。また、橋梁にはヒンジや支承など不連続な箇所があり、挙動が明確でないところも多々ある。減衰などは測ってみないとわからない部分が多い。観測の結果は蓄積されて設計基準やモデル化に反映されることになる。例えば、川島ら[4)]はPC斜張橋の地震応答の分析から、構造減衰は加振機による値に比べ、かなり大きいことを示した。これは観測無くしてはあり得ない重要な知見である。他の観測事例からも同じような知見が得られ、その根拠が明確になれば、設計基準に反映されることになろう。

観測した当該橋梁に構造変更などの形で観測結果が直接、フィードバックされることは稀である。ここが観測と監視すなわちモニタリングとの違いである。今回の特集の題目にはモニタリングに加え、さらにヘルスがついた「ヘルスモニタリング」という言葉が使われている。ヘルスモニタリングとは地震応答の文脈で言えば、地震応答の記録から橋梁における損傷の有無、程度を明らかにし、その情報をフィードバックし、当該橋梁を地震後供用してよいのか否か、補修が必要か否かの判断のサポートに使えることを意味している。いわゆる観測がレベルI、何らかの検証を目的とした観測はモニタリングの意味が高くレベルII、その上を行くヘルスモニタリングはレベルIIIといえるのではないであろうか？

本稿では、ヘルスモニタリングに向けての筆者の研究を中心に述べさせていただくことにする。様々な研究が活発に行われていることは承知しているが、限られた紙面の関係で、他の方々の研究にあまり言及できないことをお許しいただきたい。

２．免震橋における強震観測モニタリング

我が国では免震橋が1990年以降、多く建設されたが、これは免震支承による動特性を利用したものであり、その効果の確認には強震観測が不可欠であり、いくつかの橋梁において実施されている[5-7)]。これは先ほどの分類から言えばレベルIIの地震応答モニタリングと言えるべきものであろう。

橋の強震観測は地盤と橋脚に地震計を設置するのが普通である。その2つの記録から地震入力と構造出力が議論され、設計モデルの妥当性が検討される。免震橋では、加えて桁の振動も観測し、免震効果を確認する。筆者らは 1995年の兵庫県南部地震における阪神高速・松ノ浜免震高架橋の観測地震応答から、設計で想定した免震効果が確認することができた[8)]。

果たしてすべての免震橋において免震効果が発揮しているのであろうかと思い、地震応答観測が行われている免震橋の国内記録を収集した。その一つが北海道初の免震橋である温根沼大橋（根室）の記録である。1994年北海道東方沖地震による桁の橋軸方向の記録を図１に示す。桁の動きと橋脚の動きがほぼ同じで一体化して動いていること、すなわち免震支承の役割を果たしていないことが示唆された[9)]。現場に赴き、免震積層ゴム支承を調べるとサイドブロックにより橋軸方向の桁の動きが拘束されていることを確認した（写真1）。積層ゴムが桁の自重で圧縮され、サイドブロックに桁が接触し、桁の橋軸方向の動きが拘束されたのであろう。この結果は橋の管理者に知らせ、免震支承の補修が行われた。観測結果が生き、構造補修につながったという意味で、ここでの観測はヘルスモニタリングに近いと言えるものになったと考えている。

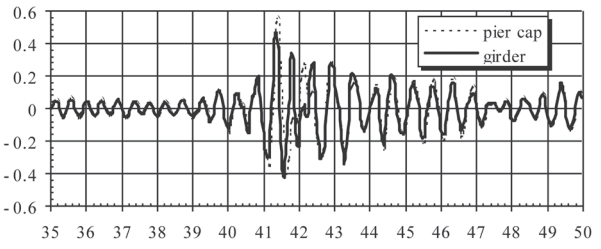


図１　温根沼大橋（免震橋）での橋脚天端と桁の地震応答（相対的な動きがないことが分かる）

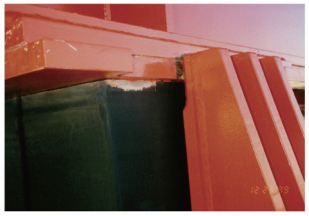


写真１　サイドストッパーと支承プレートが噛んだ状態

集められた免震橋での地震観測記録を丁寧に解析することでRC橋脚の非弾性応答や地盤との相互作用の検証など、逆問題を楽しむことを経験した[10-12]。数値シミュレーションでは味わえない、実データの持つ意味の深さを私自身が実感したのである。建物にではあるが自ら地震応答観測システムを構築して観測データを収集するにまで至った[13]。

３．横浜ベイブリッジの地震応答モニタリング

1989年に完成した横浜ベイブリッジ（中央スパン460m）は代表的な長大斜張橋の一つである。極めて軟弱な地盤に対し特殊な基礎形式を採用したこともあって、地震時の橋全体の挙動を知る目的で、図2に示すように高密度地震応答計測システムが導入された。具体的には、地中やタワー、橋脚、桁などに30を越える加速度計が設置され、80成分を越える地盤の揺れや応答を計測してきた。30年近く経過した今でも計測密度の点からは世界一といえる。1989年以来、中小地震を中心に地震記録が得られ、その記録から固有周期、減衰、モード形が十数次のモードまで同定することができた[14]。

1995年兵庫県南部地震では東神戸大橋（1994年完成）の端橋脚のウインドシューが橋軸直角方向の大きな揺れで破損し、その結果、端リンクと桁との結合部が外れるという想定外の被害が発生した[15]。側径間には中間橋脚があったので、中央スパンが下に垂れるという事態はならずに済んだのは幸いであった。横浜ベイブリッジも同様に桁は端橋脚においてリンク構造により結合しているが、中間脚はないため上揚力による端リンクの破損は橋全体の崩壊につながりうる。そこで端リンクの橋軸方向の動きを過去の地震応答記録から調べたところ、設計で想定している、端リンクが桁に対してヒンジではなく、剛結、即ち固着して動く場合が多いことが明らかになった[14]。このことは端橋脚には設計では考慮していない大きな曲げモーメントが橋軸方向に発生することにつながり極めて危険な現象と判断された。

2006年以降、同橋の耐震補強検討が行われ、そこでは、モニタリングから判明した固有振動特性から検討モデルの妥当性が検証された[16]。また、エンドリンクと桁端部との剛結による端橋脚の損傷を危惧し、端橋脚の基部と桁端をPCケーブルでつなぎ、fail-safeな構造とする補強策が採用された。

地震観測結果の分析により、設計では想定していない、すなわち想定外の動きが確認され、それが耐震補強につながった。このように、設計時には知り得なかった新たな挙動の発見は、設計の考え方を見直し、設計法の向上につながる。これもモニタリングの効用の一つを示すものといえる。

また、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震での応答記録からは、同橋の主塔のウインドシューと主桁の橋軸直角方向の動きで衝突が発生していることが判明した[17]。横浜での地震動は道路橋示方書耐震設計編のレベルI程度相当であった。レベルIIでの地震の際、衝突が塔などにどのような損傷を与えるかの検討も行われている[18]。これも応答観測があったからこそ、行わ

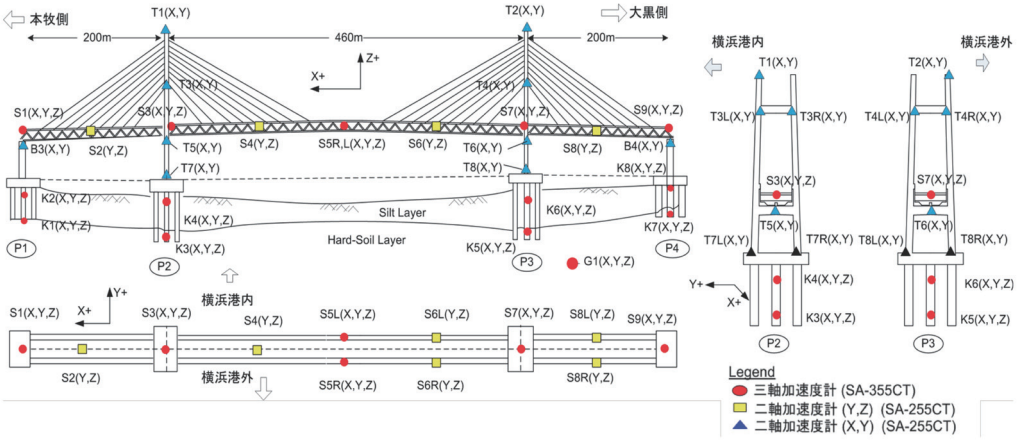
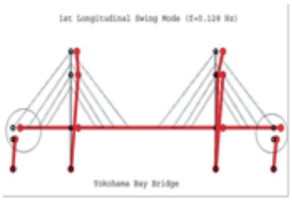


図２　横浜ベイブリッジにおける高密度地震モニタリング

れることになったと言える。

国内では東神戸大橋など主要な長大橋において、海外でもVincent Thomas橋などで地震応答観測が行われ、有用な知見を提供している。地震時の非線形応答[19]や地盤と上部構造との相互作用[20]、構造連結部の性能[21]、動的解析モデルによる地震応答の再現性[22]などに関する理解を深めることに大きく貢献している。ただ、1995年兵庫県南部地震において東神戸大橋の桁や塔の上での計器が極めて残念なことに作動しなかった。

a)設計で想定しているモード（端橋脚と主桁がヒンジで連結）



b)設計で想定していないモード（端橋脚と主桁が剛結で連結）

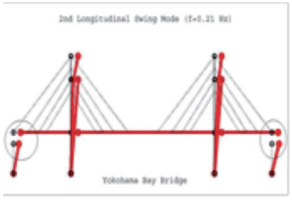


図３　中小地震の記録から同定された橋軸方向振動モード

４．ヘルスモニタリング（レベルIII）に向けて

地震を受けた橋梁が、点検に行く必要があるか、通行可能と判断してよいのかなどは大きな問題である。特に、横浜ベイブリッジのような大型橋梁では緊急点検に時間もかかり、ヘルスモニタリングによる損傷検知技術への期待も大きい。リアルタイムに損傷を検知する技術の開発も欠かせない（例えば文献23）。実用化を目指した研究開発も行われるようになってきている（例えば文献24）。

局部的な損傷を検知するには配置する振動センサーの数も必然的に多くなる。センサーのコストが下がっている中で、給電と通信のためのワイヤリングのコストの占める割合が高くなっている。

ワイヤレス通信については、最近活発な研究が行われ、長山ら（東大）は大量の応答データを送るマルチホップ通信方式を提案し[25]、また、同時送信型フラディングにより安定的な通信が可能になってきた[26]。筆者は、長山、鈴木らの協力を得て、ある中型斜張橋にテンポラリーではあるが高密度ワイヤレス地震応答モニタリングシステムを構築し、実用性の見地からシステム改善を行っているところである。

もう一つの課題は給電である。上述のモニタリングシステムでも乾電池を用いており、現在では数か月に一度のバッテリー交換が必要となる。システムの改善により、これを5年程度に伸ばすことは可能と聞いている。太陽光などを使ったシステムも開発されている。電気自動車(EV)の分野で検討されている、電磁誘導やマイクロ波によるワイヤレス給電技術のこの分野への展開に期待しているが、どうなのであろうか？

通信がワイヤレスになり、給電の問題が解決したとき、ヘルスモニタリングの姿が根本的に変わってくるであろう。その時期はそう遠くないと私はみている。

５．終わりに

長期観測モニタリングは、地震や強風による橋梁の応答特性を調べるには不可欠である。計測器の設置コストの問題もあるが、長年にわたって計測を行うため管理の負担も大きく、また地味なところが多々ある。機器の更新が行われずに観測が中止された例もある。

いくつかの例を本稿でも記述したが、観測モニタリングは実橋の実荷重による実応答を知るという意味では極めて重要な情報を提供しうるものである。計算機が発達し極めて高度な解析やシミュレーションが可能になっているだけに、観測モニタリングの価値も高まっている。長期観測モニタリングはモデルの検証の有力な方法であることを我々は認識すべきである。

また、ワイヤレスに代表されるヘルスモニタリングの技術革新はすぐそこに来ているように思われる。そのときに重要となる技術開発を見据えて、今から準備すべきことは多々あるように思う。

橋梁などは管理者が公的機関であり、それ故、観測データはあるルールのもとで我々研究者が入手可能な場合が多い。幸い、筆者自身、観測データを使わせていただいたおかげで興味深い研究を行わせていただき、感謝に耐えない。いろいろな立場から分析することで観測データの価値が増すわけで、このオープンなしきたりが今後とも継続するように努力することも重要であることを最後に指摘しておきたい。

参考文献

1) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室：土木構造物に対する強震観測、土木研究所資料、土研資料第1734号、ISSN 0386-5878、pp.1-33、昭和57年8月
2) 矢部正明、塚本英子：構造物の地震応答の観測に関する調査、第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム 講演論文集、pp.297-304, 2017.
3) Celebi, M.: Seismic Monitoring of Structures and New Devolopments, *Earthquakes and Health Monitoring of*

Civil Structures(edited by Garevski, M.) Springer, pp.37-83, 2013
4) 川島一彦、荻本英典、渡邊学歩、西弘明：強震記録に基づくPC斜張橋の減衰特性、土木学会論文集A、Vol.65、No.2、pp.426-439,2009.
5) 道路橋の免震構造研究委員会　わが国の免震橋事例集、財団法人土木研究センター、平成23年12月.
6) 川島一彦、増本秀二、長島博之、原広司：強震記録からみた宮川橋(免震橋)の振動特性、橋梁と基礎、pp.34-36,1992.11.
7) 建設省土木研究所　地震防災部耐震研究室：実測記録に基づく免震橋の地震時振動特定に関する研究、土木研究所資料、平成7年11月.
8) 吉田純司、阿部雅人、藤野陽三：兵庫県南部地震における阪神高速湾岸線松の浜免震橋の地震時挙動、土木学会論文集、No.626、pp.37-50, 1999.
9)Chaudhary, M.T.A., Abe, M. and Fujino, Y.: Investigation of atypical seismic response of a base-isolated bridge ", *Engineering Structures*, Vol.24, No.7, pp.945-953, 2002.
10) Chaudhary, M.T.A., Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J.: System Identification of Two Base-Isolated Bridges Using Seismic Records, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.126, No.10, pp.1187-1196, 2000.
11) Chaudhary, M.T.A., Abe, M. and Fujino, Y., Identification of soil-structure interaction effect in base-isolated bridges from earthquake records, Soil *Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.21(8), pp713-725, 2001.
12) Chaudhary, M.T.A., Abe, M. and Fujino, Y.: Performance evaluation of base-isolated Yama-age bridge with high damping rubber bearings using recorded seismic data, *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 8, pp. 902-910, 2001.
13) Siringoringo, D.M. and Y Fujino: Seismic response analyses of an asymmetric base - isolated building during the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.22(1), pp.71–90, 2015.
14) Siringoringo, D.M. and Yozo Fujino, Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, Journal of Structural Control and Health Monitoring, 13 (1), 226-244, Jan-Feb 2006.
15) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告-土木構造物の被害-橋梁、1.5.1東神戸大橋、pp.313-324, 1998年.
16) 山本泰幹、藤野陽三、矢部正明：地震観測された長大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性、土木学会論文集A、Vol.65、No.3、pp.738-757, 2009.
17) 藤野陽三, シリゴリンゴ　ディオンシウス, 並川賢治, 矢部正明 : 2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.2, pp.372-391, 2013.
18) 武田智信、水谷司、長山智則、藤野陽三：マルチスケールモデルによる長大橋主塔主桁間の衝突の再現と局部損傷の評価、第36回地震工学研究発表会、pp.1-12, 2016.
19) Smyth A.W, Jin-Song P., Masri S.F.：System identification of the Vincent Thomas Suspension bridge using earthquake records, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32 (3), pp.39-367, 2003.
20) Ganev T., Yamazaki F., Ishizaki H., Kitazawa M.： Response analysis of the Higashi-Kobe Bridge and surrounding soil in the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27, pp.557-576, 1998.
21) Siringoringo D.M., and Fujino Y.：Dynamic characteristics of a curved cable-stayed bridge identified from strong motion records, *Engineering Structures*, 29 (8), pp. 2001-2017, 2007.
22) Siringoringo D.M., and Fujino Y.：System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37, pp. 361-386, 2008.
23) 肥田隆宏、水谷司、高橋良和、藤野陽三：RC柱の非線形地震応答波形からのウェーブレット変換を用いた簡易な損傷検知手法の検討、土木学会論文集A2（応用力学）、Vol.70、No.2、pp.I_937-I_945、2015.
24) 石間ほか：鉄道における状態監視システムの事例について、日本鋼構造協会誌、No. 30, pp.38-41, 2017.
25) 長山智則、Spencer, Jr., B. F.、藤野陽三：スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発、土木学会論文集、65(2) pp.523-535,2009.
26) 鈴木誠、長山智則、大原壮太郎、森川博之：同時送信型フラディングを利用した構造モニタリング、電子情報通信学会論文誌、2017年12月号（掲載予定）.

藤野 陽三（ふじの ようぞう）

1972年東大土木卒、1974年同修士 1976年Waterloo大学博士　Ph.D. 東大地震研、筑波大学構造工学系を経て、1982年から東大工学部に勤務。2014年からは現職。橋梁の振動、制御、モニタリング、マネジメントの研究に従事。東京大学名誉教授。

超高密度リアルタイム地震防災システム“SUPREME”を活用した東京ガスの地震対応

山端　悠介
●東京ガス（株）　防災・供給部　防災グループ 副課長

1．はじめに

東京ガスでは大規模地震への備えとして、事業継続計画の観点に基づいて規則類を整備する等、地震防災のPDCAサイクルを構築すると共に予防対策、緊急対策、復旧対策の3本柱を軸とした地震防災対策を推進している。

中でも地震時の二次災害防止のための緊急対策として、超高密度に設置したSIセンサー（地震計）により高精度な被害把握・被害推定を実現する超高密度リアルタイム地震防災システム“SUPREME”を導入しており、東日本大震災においても確実に稼動し、発災直後の地震観測情報の収集とガス導管の被害推定により速やかな初動措置に寄与した。

本報告においては、東京ガスの地震防災の取り組み、そして東日本大震災におけるSUPREMEを軸とした初動措置ならびにガス供給停止地区の復旧作業について以下に述べる。

2．東京ガスの地震防災の取り組み

2．1 予防対策

当社の製造・供給設備の中でも都市ガス供給の根幹を支える製造設備、ガスホルダー、高圧・中圧ガス導管については予防対策（設備対策）を講じ、地震時の被害を最小限にすることを基本方針としている（図１）。

製造設備、高圧ガス導管については日本ガス協会の耐震設計指針、社内基準に基づき、設計・建設を行っており、レベル2地震動に対して、漏洩を発生させず機能維持することを目標耐震性能としている（表１）。既存設備に対しても、阪神・淡路大震災を踏まえた改訂後の設計指針によって耐震性能を確認しており、必要に応じた耐震対策も実施済みである。

中圧ガス導管は高圧ガス導管と同様、強度や柔軟性に優れ、大きな地盤変動にも耐える溶接接合鋼管を使用した設計・建設を行っている。

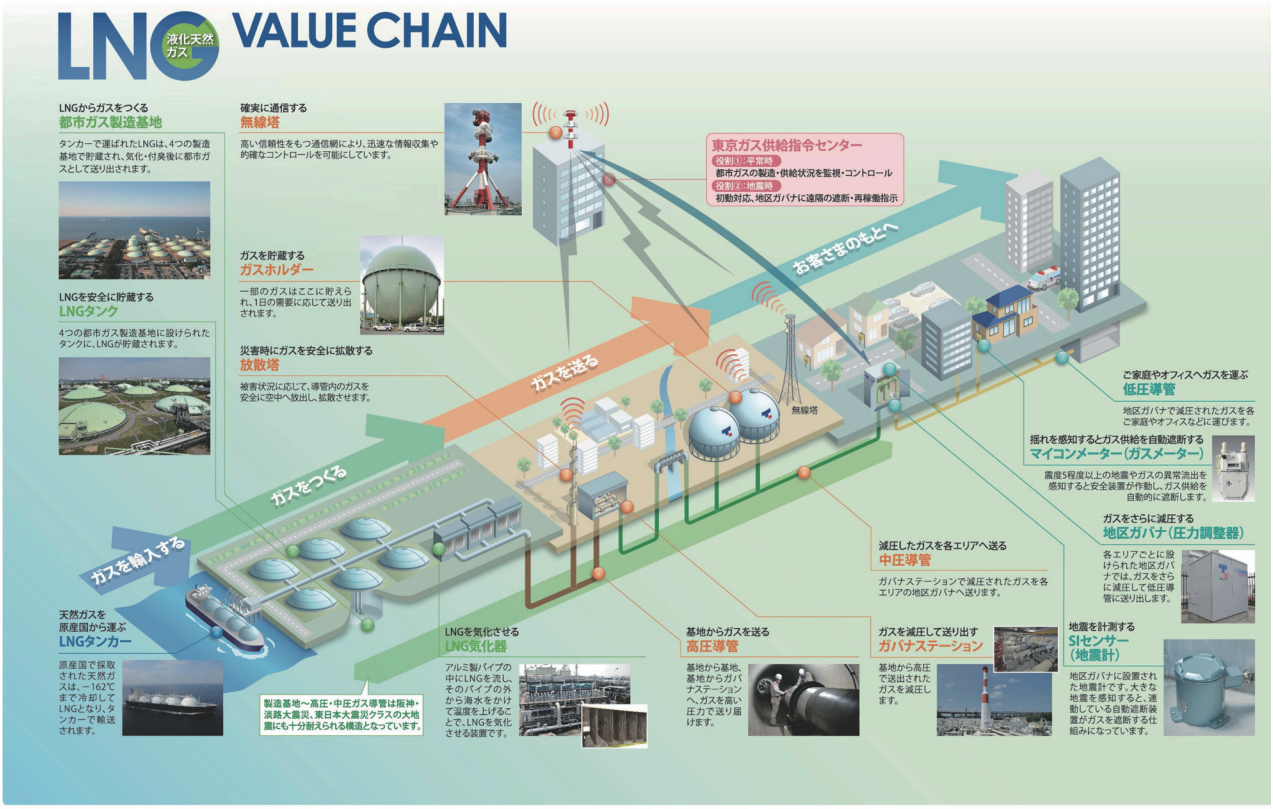


図１　都市ガス供給の流れと地震防災対策の概要

表１　重要設備の目標耐震性能

対象地震	目標耐震性能
レベル1 （供用期間中1 ～ 2回発生）	部材が塑性変形せず、かつガスの気密性が保持され修理することなく運転に支障を来たさないこと
レベル2 （供用期間中発生可能性は低いが、非常に強い地震）	一部塑性変形など生じるが、ガスの気密性は保持し機能を維持すること

２．２ 緊急対策

中圧以上の製造・供給設備についてはレベル2地震動に対しても機能を維持するように建設しているが、一部の耐震性の低い低圧ガス導管については大規模地震発生の際に被害を受けることが想定される。そのため、二次災害を防止するために、被害が大きな地域に対して迅速かつ的確に都市ガスの供給停止を行う必要があり、以下のような緊急対策を講じている。

1) マイコンメーターの設置

最も需要家側に位置する二次災害防止のための設備として、マイコンメーターを全戸に設置している。マイコンメーターは、ガスメーターに感震器を搭載したもので、震度5程度を超える揺れを感知した場合、ガスを自動遮断する機構を有している。

2) 低圧ブロックの形成

当社の供給エリア内には約50,000kmの低圧ガス導管が網の目のように張り巡らされているが、その導管網は261個の地域（ブロック）に分割されている。

ブロックは、隣接するブロックと物理的に分離されているため、地震による被害が大きい地域だけを分離

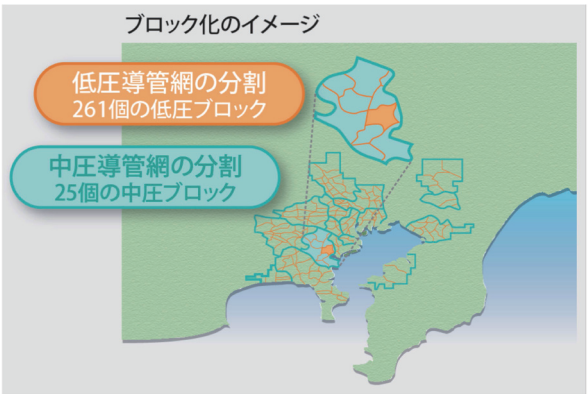


図２　導管網のブロック化

してガスの供給を停止し、被害が小さい地域においてはガスの供給を継続することが出来る。また、低圧ブロック内には中圧から低圧にガス圧力を下げる地区ガバナが複数あり、低圧ガス導管を通じて相互に接続し、ブロック内にガスの供給をしている。

3) SUPREMEによる確実な供給停止

当社では地区ガバナ約4,000基全てにSIセンサーを設置し、地震の揺れの大きさを約1㎢に１基という高密度で計測している。このSIセンサーには、建物被害との相関が高い周期の速度応答スペクトル平均値をSI値として演算する機能や、波形による液状化判定、３軸の波形データ保存等の機能が備わっている。

地区ガバナで大きな揺れ（震度6弱相当）を感知した場合、地区ガバナは自動遮断し、当該地区ガバナからブロック内へのガス供給を停止する。ただ、当該ブロック内でも地盤条件等により揺れが小さく自動遮断されない地区ガバナが残る場合がある。この場合は、ブロック内の低圧ガス導管は相互に接続されているため、都市ガス供給は継続されている。

そこで、集めた地震情報から被害が大きいと推定されたブロックで未遮断のガバナがある場合、当社が定める供給停止判断基準に基づきSUPREMEによる遠隔遮断を行い、地震発生から約10分でブロック全体のガス供給を停止し安全を確保する。

4) SUPREMEによる低圧ガス導管の被害推定

当社では、阪神・淡路大震災等、過去の地震における低圧ガス導管の被害実績を基に作成した被害推定式をSUPREMEに実装している。被害推定式は、被害実績を統計的に処理した結果を表現する近似式で、揺れ（SI値）が大きくなれば被害が多くなるという関係を表したものであり、ある程度の大きさをもったエリア内でマクロに被害箇所を推定するのに適している。

SUPREMEでは、発災後に観測された約4,000個所のSI値と事前に整備された地盤データに基づき、50mメッシュ毎の推定SI値を算出し、管種や延長等を考慮し、メッシュ毎の推定被害箇所数を算出する。

最終的にはブロック毎の被害箇所数を推定し、追加供給停止判断や復旧戦略の策定等に活用する（図３）。

２．３ 復旧対策

迅速な復旧を行うため、ガスの供給を停止したブロック毎に被害状況を的確に把握し、最適な復旧方法を選定する。まずSUPREMEで得られた情報を基に、速やかに１次判定を実施し、その後の現場確認により

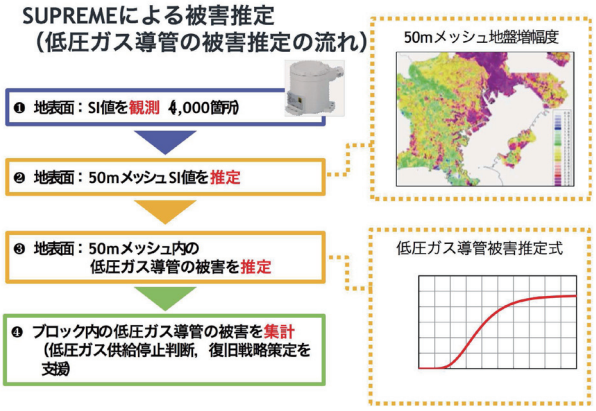


図３　SUPREMEによる低圧ガス導管の被害推定

最終的な復旧方法を決定する。復旧作業はITシステムを最大限活用し、効率的に作業を進める（図４）。全国の都市ガス事業者は、一般社団法人日本ガス協会を通じ、地震災害復旧に対する要員や資機材を相互に協力する体制を構築している。

図４　復旧作業の流れとITシステムの活用

また、「地区ガバナ遠隔再稼働システム」を開発し、地震発生後の導管網の圧力監視によりガスの漏えいがないと判断される場合には、遠隔操作にて地区ガバナを再稼働できる仕組みをSUPREMEに実装し、2014年度より運用開始した。これにより、渋滞が見込まれる地震発災直後においても、被害がない地域の当日中の復旧が可能となった。

３．東日本大震災の対応

３．１ SUPREMEを軸とした初動措置

2011年3月11日14時46分、当社供給区域内の茨城県日立市では震度6強を、また都心部を中心とした供給区域内の広い範囲にわたり震度5弱～5強が観測された。地震発生と同時に各家庭のマイコンメーターの感震遮断機構が作動し、約1,000万件の需要家のうち推定約300万件のマイコンメーターが自動遮断、まずは需要家の安全を確保した。

時を同じくして本社にあるSUPREMEが稼動し、約4,000基の地区ガバナに設置されているSIセンサーからの地震情報を約5分で収集、画面上に供給停止の判定結果が明示され、ガスの供給停止の意思決定をサポートした（図５）。

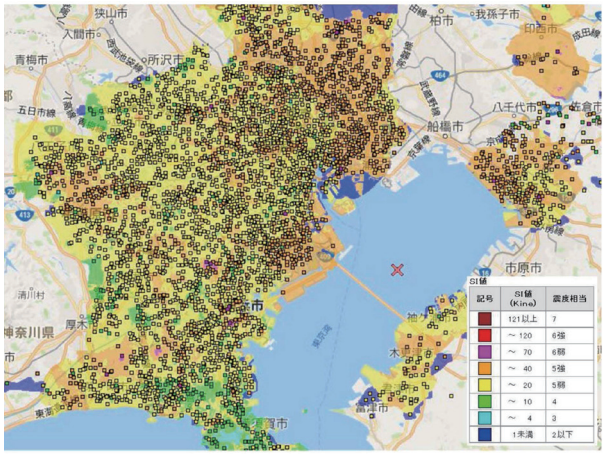


図５　SUPREMEの稼働状況
（実情報収集、被害推定の状況）

また、日立市においては、当社が定める供給停止判断基準に基づきブロック供給停止を行った。

供給停止戸数は日立市全域で30,008戸、その他の3地域で588戸、合計30,596戸を数えた。しかし、SUPREMEを軸とした迅速な対応により需要家の安全を確保し、二次災害を引き起こすことは無かった。

SUPREMEでは、地震情報に加えてガス供給圧力情報、停電情報など、地域毎にきめ細かく被害情報（実測値）を収集すると共に、ガス導管の被害推定、液状化危険度推定などを実施し、初動措置の対応方針を策定するにあたって十分な情報を短時間で集約した。

約4,000基の地区ガバナのうち14基はSIセンサーと連動した遮断装置により、安全のため低圧ガスの送出を停止した。その内11基については、周囲の地区ガバナとガス導管による接続があり、隣接した地区ガバナからのバックアップにより供給を継続したが、ガス導管の接続が無く独立した地区ガバナが供給する3地域については供給を停止した（横浜市1地域、茨城県2地域）。

３．２ 速やかに非常事態対策本部を設置

社内規則に基づき、地震発生と同時に社長を本部長とする非常事態対策本部が本社に設置され、30分後には本部長以下のメンバーが集まり第１回本部会議を開催した。地震発生後、僅か30分で第１回本部会議を開催出来たのは、SUPREMEが確実に供給区域全体の被害状況を把握、推定出来ていたからであり、企業における災害対応の初動措置、また事業継続性の確保に際する情報収集・集約の即時性の重要さが改めて確認された。

３．３ 製造・供給設備の被害状況について

今回の地震において、重要設備である製造設備、ガスホルダー、高圧・中圧ガス導管の被害は無かった。これら重要設備に対しては前述した予防対策を実施してきたが、今回の地震においてもその有効性が十分に確認されたものと言える。

一部で残存する耐震性の低い低圧ガス導管については地震による被害を受けたが、SUPREMEによる被害推定では被害件数のオーダーで良い一致を示し、マクロな被害把握を目的とする被害推定式の有効性が確認された。

３．４ 日立市全域約3万戸を1週間で復旧

単独ガバナの感震自動遮断に伴う供給停止地域となった横浜市の1地域、茨城県の2地域については、ガス導管に被害が無いことを地震発生後のガス供給圧力の状況から判断し、3月11日当日に復旧を完了した。

また、供給を停止した日立市全域約3万戸については、東京ガス社員をはじめ、協力企業等、東京ガスグループのメンバーが復旧にあたり、およそ1週間後には全ての需要家へのガス供給再開を実現した。

これまでの復旧マニュアルは、大規模地震を想定し、ガス導管の被害甚大地域に対応したものしか無かったが、過去の経験に基づき、様々な被害程度に対応するよう当該地震の前に復旧マニュアルの見直しを行っていた。約3万戸の供給停止地域の復旧を僅か１週間で完了できたのは、この新しい復旧マニュアルを適用し、またその運用が適切に実施された結果である。

写真１　日立市の復旧作業

４．地震防災対策のさらなる充実・強化に向けて

東日本大震災の対応において、これまでの予防対策、緊急対策、復旧対策の3本柱に基づく地震防災対策の有効性が確認され、特にSUPREMEを軸とした初動措置は十分に機能したと言える。その一方、幾つかの課題も確認されたため、優先度に基づき対策をさらに充実・強化させている。

さらに、2016年4月に発生した熊本地震で得られた知見を踏まえ、都市ガス業界全体として供給停止判断基準の見直しを検討している。今後、東京ガスとしてもSUPREMEの拡充改善により、供給停止判断基準見直しや被害推定式高度化などを実現していきたい。

より切迫性が高まっている首都直下地震などの大地震に備え、これまで以上に強固に地震防災対策に取り組んでいくことで、防災力を高め続け、東京ガスに対する信頼の維持向上に努めていく。

山端 悠介（やまはな ゆうすけ）

2007年東京ガス入社、供給設備の遠隔監視制御システムや電気設備の設計・建設を担当、2013年より全社防災施策の企画立案業務を担当

シリーズ：温故知新 ～未来への回顧録～

私の研究・教育人生

岩楯　敞広
●首都大学東京 名誉教授・オープンユニバーシティ 特任教授／上海交通大学 客員教授

１．はじめに

私は、東京オリンピックが開催された1964年の4月に、東京都立大学工学部土木工学科に入学、1970年3月に同大学院工学研究科修士課程を卒業、同年4月（財）電力中央研究所（電中研）に入所し、研究生活をスタートしました。1994年3月、我孫子研究所耐震部長を最後に退職するまで24年間研究生活を送りました。その後、1994年4月に、母校東京都立大学の土木工学科に教授として戻り、2009年3月退職するまで15年間、さらに、名誉教授として現在に至るまで、地震工学・耐震工学を専門として、学生の教育・研究に邁進して来ました。この間、上海交通大学の客員教授となり、中国の学生の研究・教育の指導も続けております。2014年1月からは、首都大学東京のオープンユニバーシティ（OU）の特任教授に就任し、社会人の教育の仕事にも携わっております。以下に大学時代から現在に至るまでの50年余の研究･教育人生を四つの段階に分けて紹介致します。

２．第一ステージ（東京都立大学山本研究室時代）

私は、昭和42年度（1967年度）の卒論生として山本稔教授の研究室（土木応用力学講座）に入り、学部の1年間と修士課程の2年間合計3年間指導を受け、光弾性実験と数値解析法（差分法と有限要素法）をベースに卒業研究を行いました。

①**卒論論文**：卒論のテーマとして、「差分を利用した構造解析とその実証」が与えられ、光弾性実験により求めた等色線縞次数（主応力差）とラプラス方程式（主応力和）を差分近似して得られた多元（45元）の連立1次方程式の解を組み合わせ、内部主応力を算定・評価しました。当時、都立大学には、大型計算機は無く、タイガー手回し計算機により、サブストラクチャ法を適用し解析を試みましたが、一向に解が収斂せず苦労しました。幸い、早稲田大学の大型計算機（トスバック）を使用して計算し、無事卒業研究を完成することができました。

②**修士論文**：修士課程1年時には、当時、土木分野でも普及し始めた有限要素法（FEM）を、山本研究室でも研究に取り入れることになり､ゼミの教材として､チンキビッチとクラーフ共著の「Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics」（McGRAW HiLL）を選び、博士課程の先輩を中心に輪読し、FEMの基礎（変分法、変分原理）を学習するとともに、解析プログラムの開発に取り組みました。また、土木学会の岩盤力学委員会のFEMの研究会にも出席する機会がありました。研究会では、電中研のダムの解析事例などの発表があり、土木分野におけるFEMの最新の研究成果を学習することができ修士論文のための有益な準備期間となりました。修士課程2年時には、直ちに、修士論文（「構造物の近似解法」）に取り掛かり、有限要素法を平板の曲げ問題に適用し、Theory of Plates and Shells（McGraw-Hill）（S. Timochenko & Woinoinowsky-Krieger）を参考に、理論の展開を行い、FEM解析プログラムを作成し、厳密解や種々の近似解（級数解）と比較解析を行い、有限要素法の有効性を検証しました。そして、卒業論文と修士論文を取りまとめ、卒業後、昭和45年度（1970年度）土木学会第25回全国大会（大阪）で「平板の曲げ問題に対する有限要素法と差分法の組合せについて」を発表し、土木学会にデビューを果たしました。村田二郎教授の推薦により、電中研に就職（都立大土木工学科で初めて）が決まりました。

東京都立大学山本研究室での3年間の卒論・修論を通して、研究の両輪である実験（光弾性実験）と数値解析法（差分法と有限要素法）を体験・習得できた事は、卒業後の電中研での研究の基礎となり、その後の研究に大いに役立ちました。

３．第二ステージ（電力中央研究所時代）

電中研では、1970年4月に入所してから1994年3月に退職するまでの24年間の研究生活を送りました。構造部材料研究室に配属され、2年後、地盤耐震部耐震第一研究室に移り、本格的に耐震工学・地震工学に関連する研究を進めることになりました。**「研究の原点は、現場にある事」**をモットーに、電力各社の水力・火力・原子力発電所の現場で発生した地盤・構造物の耐震安全性に関する諸問題に対し、地震観測・現場実験・振動台模型実験・解析を駆使して取り組みました。また、土木学会、電事連、電気協会等の各種委員会に委員として参画し、岩盤立地・新立地技術の開発、電力土木構造物の耐震設計技術指針の策定等に当たりました。

以下に、代表的な研究について、紹介致します。

① パイプビームシェル構造物を対象とした有限要素法解析プログラムの開発と応用

入所後、直ちに、パイプビームシェル構造物を対象とした有限要素法解析プログラムを作成し、水力発電所のペンストックや火力・原子力発電所の取水立坑や埋設管路、LNG地下タンク等の軸対称構造物の応力解析を行い、最初の研究報告書を作成しました。

② 起振機による原子炉格納施設の振動試験

当時、電力会社は、原子力発電所の設置許可条件として、耐震安全性について、完成時、設計通りに建造されているかを起振機による振動試験（起振実験）により確認し、通産省に報告することが義務づけられておりました（使用前検査）。このため、電中研では、電力会社の要請を受けて、原子炉建屋の安全性を確認するため、第三者的な立場から官庁立会いの下で、建設中の原子炉建屋に起振機を設置し、電力会社と共同で振動試験を実施（原子炉格納施設を揺する）し、その応答特性（固有振動数、減衰定数、振動モード）を調べ、耐震安全性の検討･評価を行ってきました。私は、PWR型の九州電力玄海原子力発電所2号機、同川内原子力発電所１号機、四国電力伊方原子力発電所1、2号機の起振実験を担当・実施し、その応答特性を把握し耐震性安全性評価を行いました（写真１）。この研究成果を､アメリカ・シカゴで開催された第7回世界原子炉構造会議（7th SMiRT）に発表しました。

写真1　伊方原子力発電所の起振実験
（1979年：33歳）

③ せん断土槽の開発と軟弱地盤の非線形振動特性に関する模型振動実験と解析

耐震第一研究室の1年先輩の国生剛治先生（中央大学名誉教授）と電中研で開発した強震時の実地盤の非線形挙動を模型実験で再現できるせん断土槽（写真2）を用いて、振動台模型実験を実施し、軟弱地盤の非線形振動特性の検討・評価を行いました。国生先生は、この研究成果を土木学会論文集（共著）に投稿し、土木学会論文奨励賞を受賞されました[1)]。

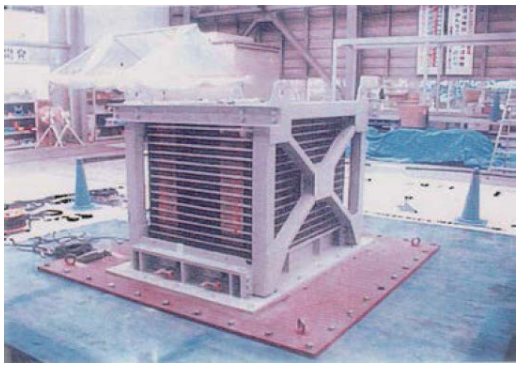


写真2　せん断土槽

④ 地中構造物の耐震性に関する研究（博士論文）

LNG地下タンク、取水立坑、取水ピット等の軟弱地盤に建設される地中構造物の強震時および液状化過程の挙動、地下構造物に作用する動土圧に関し、せん断土槽を用いた模型振動実験や現場実験等により実験的に、かつ開発した地盤―構造物の連成系軸対称FEM複素応答解析手法（CRAS）を用いて、解析的に検討し、解明に当たりました。そして、これらの研究成果を東京都立大学博士論文「地中構造物の耐震性に関する研究」として、取りまとめました[2)]。

⑤ 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性の研究

1987年4月に、土木学会原子力委員会「限界状態設計部会：主査岡村甫東京大学教授（当時）」の委員および「設計用地震荷重WG」の運営担当として限界状態を考慮した屋外重要構造物の耐震設計の標準化に関する研究に着手しました。限界状態の設定、設計用地震荷重に関する検討、鉄筋コンクリート設計方法の検討、試設計及び実験により安全照査方法の検証を目途とし、4年半鋭意検討を進め、その成果を取りまとめ、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」（土木学会原子力員会:1992年9月）として、刊行することが出来ました[3)]。

⑥ 原子力発電所第四紀地盤立地技術に関する研究

原子力発電所の新立地方式の一つとして、第四紀地盤立地技術の研究に精力的に取り組みました。第四紀地盤立地を実現させるため、埋設建屋を対象とした合理的な地震応答評価法の開発を進めるとともに第四紀地盤に建設された実規模構造物（東海原子力研究所動力試験炉（JPDR）：全高38.1mの内ほぼ1/3が地下コンクリート内に埋め込まれている）の地震観測、起振実験を実施し、埋設建屋の動的応答特性、埋設効果を検討・評価し、高い耐震性を有していること検証しました[4)]。これらの結果は､その後、土木学会原子力委員会

の審議を経て、「原子力発電所の立地多様化技術」(1996年)および「同(追補版)」(1999年)に、掲載されました。また、第四紀地盤立地技術の研究の一環として、アメリカ合衆国カルフォルニア州パラアルトのEPRI(Electric Power Research Institute:アメリカ電力研究所)に、1985年4月から1986年9月まで、1.5年間海外出張し、EPRIの最新の研究成果の調査・分析や第四紀地盤に建設された原子力発電所の視察を行いました。EPRIにおける1.5年の研究生活は、貴重な経験となり、帰国後、電中研、東京電力、台湾電力、EPRIが台湾花蓮地点において共同で実施した第四紀地盤立地の実証研究を進める上で大きな財産となりました。

4．第三ステージ(東京都立大学・首都大学東京時代)

1994年4月に、母校東京都立大学に工学研究科土木工学専攻の教授として着任しました。

大学における教育･研究人生は、阪神・淡路大震災(1995年1月)に始まり、中国四川大地震(2008年5月)に至る15年間でした。私の15年間の教育・研究人生を、5年毎に3つの段階(① Hop:自己と大学人としての基盤を築く段階、② Step:研究・教育に没頭する段階、③ Jump:教育･研究を集大成し、社会に還元する段階)に分け、3つの研究の柱を打ち立て、教育・研究生活をスタートしました。

【研究の3つの柱】

(1) 研究の柱―1:トンネル・地下構造物の耐震性に関する研究

大学奉職直後に発生した1995年1月の阪神・淡路大震災による耐震神話の崩壊は、地震・地盤工学の一端を担う私にとって、本地震が突き付けた大きな試練となり、原点に立ち戻って、地震・耐震研究を再始動する絶好の機会となりました。

阪神・淡路大震災直後に「トンネル・地下構造物の耐震性に関する研究」に着手しました。地震被害調査を行い、電中研で開発したせん断土槽による模型振動実験と軸対称地震応答解析プログラム(CRAS)等用いて、地下鉄構造物(大開駅舎等)の地震被害原因の究明に取り組みました。並行して、土木学会地震工学委員会「トンネル地下構造物の地震被害調査小委員会(1995 ～ 1997)」および「地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会(2003 ～ 2005)」の委員長として産学公の研究者･技術者、実務担当者を結集し、本地震が我々に突き付けたトンネル・地下構造物の耐震性に関する諸問題の解決に当たりました。その成果を学生の卒業論文や土木学会「阪神・淡路大震災調査報告(土木構造物の被害第2章)(1998年6月)」および「地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会の報告／シンポジューム発表論文集(2006年6月)」に取りまとめました。

(2) 研究の柱―2:逗子地域の不整形地盤の地震応答特性に関する研究

耐震・地震研究の先輩である(故)国井隆弘教授の遺産(地震計8台)を引き継ぎ、1994年6月から、逗子地域の表層地盤5カ所、さらに、1998年に、地中 - 30mに地震計を設置し、地震観測を開始しました。今までに、200以上の貴重な地震データを得ております。特に、2011年3月の東日本大震災時には、過去最大の加速度記録(表層地盤で:NS=124.45gal)を取得し、これらを用いて、独自に開発し解析手法により地盤構造を同定し、地盤構造の検討・評価を行いました。さらに、同定した地盤構造をベースに3次元FEM地盤構造モデルを作成し、地中での観測波を入力波として解析を行い、大地震時の逗子地域の不整形地盤の非線形応答特性を明らかにし、逗子市の地震防災に寄与する事ができました[5](写真3)。

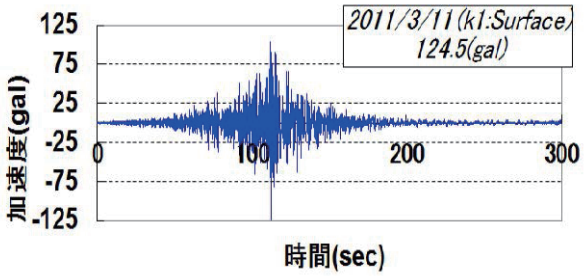


写真3　逗子の表層地盤の観測波形(NS成分)
(東北地方太平洋沖地震)

(3) 研究の柱―3:中国との国際共同研究

中国(6人)、フィリピン(1人)、シリア(1人)等の多くの留学生(博士、修士、研修生)の教育・研究指導を行う機会を得て、中国西安交通大学・上海交通大学との国際共同研究「中国の都市の地震防災と歴史的構造物の耐震性に関する研究」に着手し、①西安市の地盤・文化遺産(城壁や鐘楼,鼓楼等)の常時微動観測、地震応答解析②中国最古の木造建築構造物である山西省応県の釈迦塔(応県木塔)を対象に地震観測、常時微動観測を日本・中国と共同で実施し、応答特性・耐震性評価を行いました(写真4)。

さらに、③2008年5月に発生した中国四川大地震の地震被害調査を共同で実施し、被害原因の究明を図りました[6](写真5)。これらの研究・教育活動を通し、車 愛蘭先生(現在上海交通大学教授)を含め7名の博士(中国人2名)、24名の修士および50名以上の学士を岩楯研究室から誕生させる事が出来ました。

応研木塔：中国最古の木造建築 高さ65.86m

写真4　応研木塔の常時微動観測（2005年：59歳）

映委鎮の最大落石現場：中国地震調査団と

写真5　四川大地震の調査（2008年：62歳）

その他、国内で発生した地震だけでなく、国外の地震（1999年の台湾集集地震、2001年のインドKatch地震、2006年のインドネシア・ジャワ島中部地震など）の被害調査を行い、学生の研究・教育に反映しました。

5．第四ステージ（首都大学東京退職後から現在に至るまで）

退職後、首都大学東京名誉教授、上海交通大学客員教授に就任し、首都大学東京と中国上海交通大学の学生の教育・研究指導を続けております。特に、上海交通大学では、車先生が現在実施中の多くの研究（振動台模型実験や常時微動観測など）に、研究顧問的な立場で協力しております。さらに、2014年1月に、首都大学東京オープンユニバーシティ（OU）の特任教授に就任し、社会人を対象とした教育活動（都市の地震防災）を続けております。私が、今まで培った経験や知識を少しでも多く、社会に還元し、次世代を担う後進に伝え継承することが、私の**使命（Mission）**と考えております。今後とも、新たな目標に挑戦し進化したい。

6．終わりに

最後に、私の教育･研究を支えてくれた大学の恩師･先輩・後輩、電中研の上司・先輩・後輩及び研究室の学生諸君に、この機会に厚く感謝申し上げます。これからの地震工学を担う後輩諸氏には、常に高い目標と独立意識、新しい領域に踏み出す勇気と追求する姿勢を持ち活躍することを期待致します。

押忍

参考文献

1) 国生剛治・岩楯敞広：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析、土木学会論文報告集、第285号、1979.5.

2)「地中構造物の耐震性に関する研究」、東京都立大学博士論文、1985.3.

3) 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル、土木学会原子力委員会、1992.9.

4) 岩楯他：原子力発電所の第四紀地盤立地に関する研究―その2 埋設建屋・地盤の地震応答評価法―、電力中央研究所総合報告：U20、1991.2.

5) 岩楯敞広・内藤伸幸・安藤幸治・小田義也：東北地方太平沖地震による逗子地域の表層地盤の地震応答特性、土木学会論文集、Vol.70、No.4、pp.1-8、2014.

6) A.L. Che, J.H. Qi, X.P. Wu, T. Iwatate, M. Yoshimine, Y. Oda, Q.W. Ma, F. Zhang & Z.J. Wu : Application of micro tremor observation on investigation of geological hazard induced by the great Wenchuan earthquake in Sichuan province, Proceedings of the International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (IS-TOKYO 2009), 15-18 June 2009, pp.331-336, 2009.6.

岩楯 敞広（いわたて たかひろ）

1970年東京都立大学修士課程卒、同年(財)電力中央研究所入所、1994年退職、同年東京都立大学教授、2005年首都大学東京教授、2009年名誉教授、上海交通大学客員教授、2014年首都大学東京OU特任教授

学会ニュース

SMiRT24　参加報告

美原　義徳
●鹿島建設株式会社 原子力部 副部長

１．はじめに

原子力構造工学の分野に重点を置いた、2017年8月21日～25日に韓国釜山で開催された国際会議SMiRT24（24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology）及び、地震工学会が後援している2017年8月28日、29日に東京大学本郷キャンパスで開催されたPost-SMiRT24 Seminarに参加したので、その趣旨・内容等を報告する。

２．SMiRT24の概要

IASMiRT（International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology）が主催する国際会議SMiRTは、原子力工学と耐震/計算部門を合わせた点に特色のある国際会議で、Nuclear Engineering Design誌と連携している。第1回が1971年にベルリンで開催された後、2年ごとに米国、欧州、アジア地域で順次開かれており、第24回は韓国釜山で開催された。また、次回SMiRT25は、2019年に米国ノースカロライナ州シャーロットにて開催される予定である。

国際会議SMiRT24の一般講演は、様々な工学的な専門範囲（原子力、建築・土木、機械）を横断した、原子力構造工学に係る10個の技術セッション（Division 1：材料、Division 2：構造健全性、Division 3：計算科学、Division 4：荷重、Division 5：試験・解析、Division 6：設計・建設、Division 7：リスク評価、Division 8：保全・運転、Division 9：廃棄物・燃料サイクル・廃炉、Division 10：新型炉）に分類されて、発表・討論される。

さらに、これ以外に、最新知見に係る技術セッション及び、国際的に重要なテーマに関する特別セッションで構成される。

SMiRT24に投稿された合計478論文を技術セッション毎に分類すると、Division 5が90論文、Division 2が79論文、Division 6が73論文、Division 7で48論文であり、特に2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて、外的ハザードに対する設計、解析及びリスク評価に関する論文発表が相対的に多い傾向が見られる。

また、多くの基調講演のうち、東京大学高田毅士教授からは「日本の原子力発電所における耐震安全の現状と課題」と題した基調講演が行われ、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故以来の日本における耐震設計、解析及びリスク評価の現状と今後の展望に関して、海外の方からの活発な意見交換がなされた。

３．Post-SMiRT24 Seminarの概要

SMiRT24開催後の2017年8月28日、29日には、設計を超える状況を焦点に置いた外部事象（地震・津波等）に対する原子力安全の高度化をテーマにしたPost-SMiRT24 Seminarが東京大学本郷キャンパスで開催された（写真）。2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故を鑑み、原子力発電所の設計拡張状態及び、地震・津波等設計を超える外部事象による過酷事故での原子力安全の高度化の国際的な動向に加えて、実際の適用・実施方法に関しても、SMiRT24での議論を参照しながら国内外の著名な専門家134名が参加し、国際的な議論を行った。

写真　Post-SMiRT24 Seminar会場の状況

４．おわりに

原子力構造工学の分野に重点を置いた、国際会議SMiRT24及びPost-SMiRT24 Seminarに参加したが、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて、設計を超える外的ハザードによる過酷事故の防止・緩和のための現実的な対処手法が国際的に重要なテーマとなっていることが再認識できた。

ESG Workshop 2017　開催報告

松島　信一
●「強震動評価のための深部地盤モデル化手法の検証に関わる研究委員会」委員長／京都大学防災研究所 教授

１．はじめに

2017年8月5日(土)の午後に、神戸市中央区の神戸国際会館（802・803室）において、「ESG Workshop 2017」を開催した。このワークショップは、日本地震工学会の強震動評価のための深部地盤モデル化手法の検証に関わる研究委員会（以下、ESG研究会）が企画し、IASPEI/IAEE Joint Working Group on Effect of Surface Geology on Seismic Motion（以下、ESG国際委員会）と合同で開催したものである。

ワークショップでは、地盤増幅特性に関する最新の研究、最新ESG研究の動向、被害地震の震源近傍強震動、などについての講演および活発な議論が行われた。参加者数は講演者を含め42名であった。

ワークショップの冒頭で、ESG研究会の委員長である松島（京大防災研）から開会の挨拶とワークショップの主旨説明が行われた。

２．講演と議論の概要

第１部では、Fäh（スイス連邦工科大学チューリッヒ校）は、地震ハザード・リスク評価を行う際に地盤増幅特性を考慮する方法について、現在一般的に行われている方法では不十分であることを具体例により指摘し、今後の地震ハザード・リスク評価に信頼性のある定量化された地盤増幅特性を導入するための方法として、スイスの強震動ネットワークのデータを用いた手法を紹介した。次に、川瀬（京大防災研）は、拡散波動場理論を応用することにより、微動観測記録と地震観測記録の経験的関係と地震観測記録の上下動の増幅特性を考慮して、地震観測記録がない場合でも地盤増幅特性を推定する方法を提案した。また、両者はともに、地表から深さ30mまでの平均S波速度（Vs30）は、地盤増幅特性の指標として多く用いることは不適切であり、より定量的な地盤増幅特性を用いることが必要であると指摘した。続いて、Steidl（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）は、米国における地盤の非線形応答までを含めた観測および研究動向について紹介し、ボアホール観測点を複数配置した地点では降雨による地盤特性の変化を把握できることや強震時のひずみを観測できることを示した。山中（東工大環境・社会理工学院）は、ESG研究会をはじめとする日本地震工学会のESG研究関連のこれまでの活動と、最近行った足柄平野および立川断層近傍における合同地震・微動観測と観測により得られた成果について紹介した。

第２部では、Lin（台湾国立地震工学研究センター）は、台湾の強震観測網の観測点の包括的地盤情報データベースについて紹介した。すべての強震観測点において、表層30mの平均S波速度（Vs30）、S波速度1.0km/sの層の深さ（Z1.0）、高振動数遮断振動数（κ）などが求められ、それぞれの経験的関係が求められていることを示した。次に、岩田（京大防災研）は、2016年熊本地震の本震（2016.04.16　M_{JMA}7.3、Mw7.0）の際に震源近傍で観測された強震記録の特性および周辺の強震観測記録から推定された震源破壊過程について示した。引き続き、青地（フランス地質調査所）は中央イタリアで発生した2016年Amatrice地震（2016.08.24 M_L6.0）をはじめとする一連の地震による震源近傍強震動および震源破壊過程について紹介した。中央イタリアでの一連の地震が正断層であったことから、正断層による地震動や断層周辺の応力分布について動力学的断層破壊シミュレーションに基づいて検討した成果が示された。

第３部では、津野（鉄道総合技術研究所）は、2011年東北地方太平洋沖地震の際に特徴的な強震記録の紹介およびそれらの観測点周辺における地震動・微動を用いた地下構造調査結果を示し、観測された強震動と地下構造の特徴について報告した。最後に、Sánchez-Sesma（メキシコ国立自治大学工学研究所）は、メキシコ盆地を例に、盆地内の地震応答を理解するための地震動記録に基づく周波数-波数（f-$\mathbf{k}$）領域における解析手法の提案およびその有用性について示した。

全ての講演終了後のディスカッションでは、Fähが問題提起したように地盤特性の指標として近年よく用いられているVs30では地盤特性が十分に反映できないため、フーリエスペクトルに基づく定量的な指標が必要であることが議論された。

３．おわりに

最後に、次期ESG国際シンポジウムの実行委員長となる東（電力中央研究所）より閉会の挨拶があり、次回のESG国際シンポジウムは2021年春に日本（京都近

傍）で開催する予定であることが報告された。

講演タイトルおよび講演者

Opening remarks
　Shinichi Matsushima (Kyoto University, Japan)
“Site characterization as basic step for reliable quantification of site-effects in seismic hazard and risk assessment”
　Donat Fäh (ETH Zürich, Switzerland)
“Application of diffuse field concept to earthquake and microtremor HVRs: Direct evaluation of 1-D S-wave amplification factors without earthquake observation”
　Hiroshi Kawase (Kyoto University, Japan)
“Recent ESG activities in the USA”
　Jamison Steidl (University of California Santa Barbara, USA)
“Recent activities of ESG research group in Japan Association for Earthquake Engineering”
　Hiroaki Yamanaka (Tokyo Institute of Technology, Japan)
“Comprehensive site database of TSMIP network in Taiwan”
　Che-Min Lin (National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan)
“Near-source strong motions and source process of the 2016 Kumamoto earthquake”
　Tomotaka Iwata (Kyoto University, Japan)
“On the near-field ground motion during the 2016 Central Italy earthquakes”
　Hideo Aochi (BRGM, France)
“Site specific issues arising from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake”
　Seiji Tsuno (Railway Technical Research Institute, Japan)
“Understanding the seismic response of alluvial basins by means of analysis in the frequency-wavenumber (f-k) domain”
　Francisco J. Sánchez-Sesma (National Autonomous University of Mexico, Mexico)
Discussions
Closing remarks
　Sadanori Higashi (Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan)

写真１　会場風景

写真２　発表・質疑応答風景1

写真３　発表・質疑応答風景2

写真４　発表・質疑応答風景3

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。

お知らせ

JAEE Newsletter 第6巻 第3号（通算第19号）が2017年12月末に発刊されます。

JAEE 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。

過去のJAEE 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/jp/stack/1925-2/

ご寄附のお願い

日本地震工学会は、地震工学及び地震防災に関する学術・技術・教育の進歩発展をはかり、地震災害の軽減に貢献することを目的に、全ての事業を公益活動として推進しております。

2013年5月に「公益社団法人」格を取得し本会が「公益社団法人」として認められたことから、皆様方からの学会への御寄附に対して税制上の優遇措置が認められることとなりました。

本会が公益活動をさらに強化し、社会貢献活動を行っていくためには、財政強化が不可欠であり多くの方々のご寄附が必要です。是非とも皆様からのご支援をお願い申し上げます。

ご寄附をいただける方は、WEBサイト「公益社団法人 日本地震工学会 寄附のお願い」（http://www.jaee.gr.jp/jp/donation/）をご参照のうえ、お申込みいただきますようお願いいたします。

（連絡先）
公益社団法人　日本地震工学会事務局
TEL：03-5730-2831　E-MAIL：office@general.jaee.gr.jp

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：

本号では地震計から地震観測、そして構造物までという幅広い範囲を取上げさせて頂きました。分野は異なれども、どの執筆者も災害による被害を軽減するために最大限の努力をされておりました。日本地震工学会会誌の執筆は、ボランティアで依頼をさせて頂いており、皆様の熱意によって支えられていることを、幹事を務めて再確認することができました。

また、日本地震工学会の存在意義を多くの人々に伝えるために、報道機関への会誌の配布を行っております。今後は、日本地震工学会の精神である、「日本地震工学に関する各分野の研究を横断的にとらえること」が、会誌を通して会員の皆様、そして多くの人々に伝わっていくようになればと考えています。最後になりましたが、ご多忙の中にも関わらずご執筆いただきました著者の方々、そして会誌編集時にご協力いただいた多くの方々に深く感謝申しあげます。

大渕　正博（株式会社竹中工務店）

本号の特集では「地震観測と構造ヘルスモニタリング」をテーマに、いろいろな内容に関してご執筆をいただきました。地震工学に関する多様な分野から構成されている本学会の特色が活きる内容であると思います。

最近は、医工連携など従来の分野を跨ぐような研究開発が実施され、その成果も多く見られるようになってきています。本学会でも、その構成各分野間での連携等が為され、有効な研究、技術開発の実施、新たな防災対策などに結びつけば良いと考えております。そこに、学会誌での記事が発端にでもなってくれると、編集する立場としてはうれしいのですが。

桜井　朋樹（株式会社ＩＨＩ）

会誌編集委員会

委員長	平田　京子	日本女子大学
幹　事	大渕　正博	竹中工務店
幹　事	桜井　朋樹	ＩＨＩ
委　員	入江さやか	日本放送協会放送文化研究所
委　員	佐藤　　健	東北大学災害科学国際研究所
委　員	鈴木比呂子	千葉工業大学
委　員	高橋　郁夫	防災科学技術研究所
委　員	高橋　典之	東北大学
委　員	徳永　　英	エーオンベンフィールドジャパン
委　員	西村　隆義	ジェイアール総研エンジニアリング
委　員	沼田　宗純	東京大学生産技術研究所
委　員	平井　　敬	名古屋大学
委　員	肥田　剛典	東京大学
委　員	古川　洋子	日本女子大学
委　員	向井　洋一	神戸大学
委　員	山田　真澄	京都大学防災研究所

日本地震工学会誌　第32号　Bulletin of JAEE　No.32

2017年10月31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