

# 日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

**No.38**

Oct.2019

特 集：平成の地震工学を振り返る



<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38号 2019年10月)

Bulletin of JAEE (No.38 Oct.2019)

## INDEX

### 巻頭言：

---

特集「平成の地震工学を振り返る」にあたって／永野 正行 .....	1
-----------------------------------	---

### 特集：平成の地震工学を振り返る

---

平成の地震災害の概要／入江 さやか .....	3
強震動研究の進展／入倉 孝次郎 .....	7
平成における橋梁の耐震技術の進化と課題／運上 茂樹 .....	11
平成のHICを振り返る／鳥井 信吾 .....	15
緊急地震速報の実用化の経緯／横田 崇 .....	19
リアルタイム津波予測の発展／越村 俊一 .....	23
平成の液状化被害と対策／若松 加寿江 .....	27
今後10年 将来に向けた課題／福和 伸夫 .....	32

### 特別寄稿：

---

金井 清先生が遺された書籍と紙袋(資料)／工藤 一嘉 .....	36
----------------------------------	----

### 学会ニュース：

---

「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会」成果報告会 開催報告／高田 毅士 .....	40
第17回世界地震工学会議(17WCCE)の準備状況／17WCCE学術プログラム委員会 .....	42

### お知らせ：

---

お知らせ .....	44
------------	----

本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／登録メールアドレスご確認のお願い  
／JAEE Newsletter 第8巻 第3号(通算第25号)が2019年12月末に発刊されます／ご寄附のお願い／問い合わせ先

### 編集後記

# 特集「平成の地震工学を振り返る」にあたって

永野 正行

●会誌編集委員長／東京理科大学

前委員長の日本女子大学・平田京子先生を引継ぎ、本号より会誌編集委員会の委員長を仰せつかりました。本誌は年3回発行され送付されるものであり、日本地震工学会と会員の皆様の橋渡しをする唯一の紙媒体であります。2020年9月には世界地震工学会議が開催されます。また、2021年1月には日本地震工学会20周年の節目を迎えるなど、重要なイベントが控えています。日本地震工学会を盛り上げるためにも、本誌をより一層充実した内容とする所存ですので、どうぞよろしくお願いたします。

2019年4月末をもって、30年にわたる平成時代が終わりました。平成は、「災害の時代」と言われるほど多くの自然災害に見舞われた時代でした。図1は、平成時代に国内で発生した主要な被害地震の規模と発生位置を示したものです。この時代に如何に多くの被害地震が国内の様々な場所で発生したかが分かります。特に図1に示す1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震などでは多数の犠牲者と構造物・地盤等の被害が見られました。さら

に平成時代以前には設計上想定していなかった大振幅レベルの強震記録が多数得られました。一方、これらの地震を通じ、耐震設計基準の改定や、耐震技術の向上、免制震や緊急地震速報といった新たな地震対策が登場するなど、地震工学が大きな進歩を遂げた時代でもありました。2001年には地震工学の分野横断的調査・研究の推進等を目的として、青山博之先生を初代会長として日本地震工学会が創立されました。

平成元年は私が大学院修了後、ゼネコンの研究室に入社してちょうど1年目と重なっております。平成時代に発生した地震災害の中で、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)は、やはりインパクトの大きい出来事でした。当時は入社7年目でした。朝、会社に出勤してテレビで映される光景は、衝撃的なものばかりでした。高速道路の高架橋倒壊、神戸の街の壊滅的な被害、オフィスビルのパンケーキ状の崩壊、長田区の火災・・・地震発生3カ月後に現地を調査する機会を得ました。初めての地震災害の現地調査です。今もそうですが、現地の状況は、実際

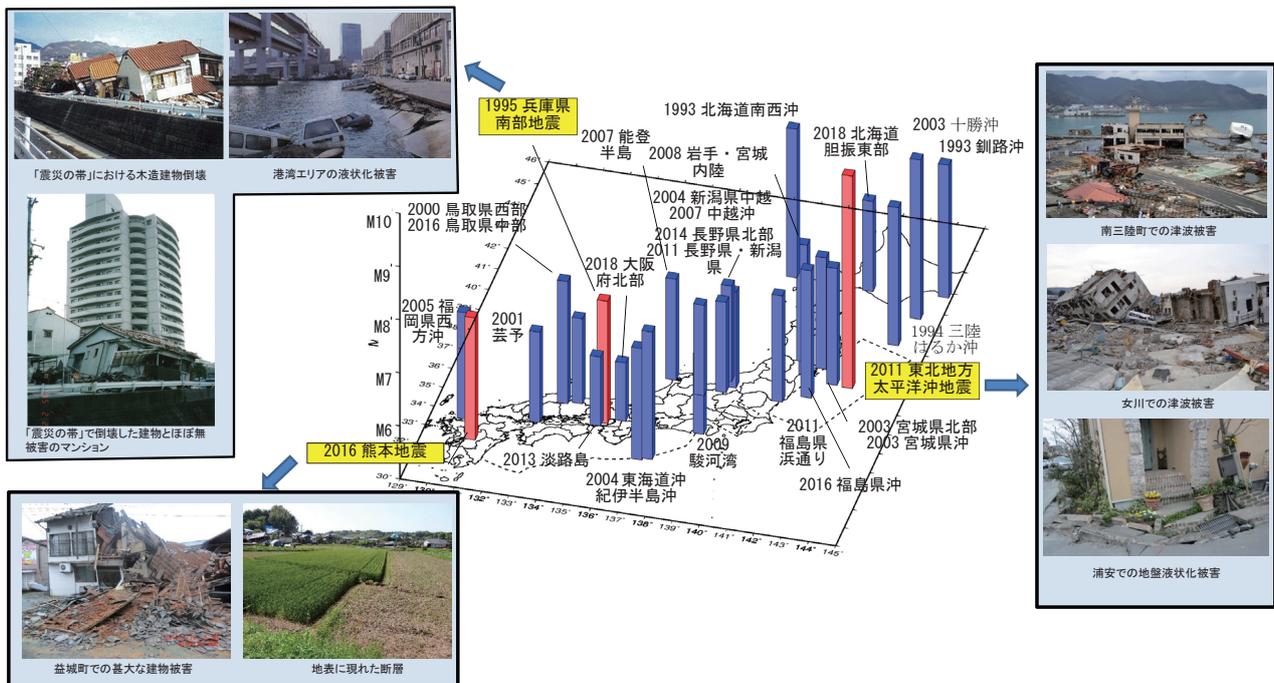


図1 平成時代に国内で発生した主要な被害地震

に見てみないと分からない部分も多いかと思えます。神戸中心部を山側から海側まで歩いた場合、被害の状況が場所によって大きく異なっていました。いわゆる『震災の帯』です。事前に速報等で聞いておりましたが、改めて実際に見てみると、高々100m離れた地点で被害の様子が大きく異なっている状況はやはり驚きでありました。これが、建物被害と地盤構造との関係を強く意識するきっかけとなりました。『震災の帯』では倒壊した建物が多数存在していたのですが、外見上ほとんど被害のない建物が混在している点も驚きでした。この本を手にとっていただいている会員の皆様も多くも、平成時代に発生した地震災害には何らかの形で関わっていることと思えます。

本号の特集は「平成の地震工学を振り返る」とし、平成時代に発生した地震災害、および平成時代の地震防災の概要を総括いたします。各災害の教訓から地震工学がどのように発展し、また、今後どのように発展し得るかに焦点を当て、平成時代及び今後の地震工学を多様な視点から俯瞰いたします。

トップバッターとして、NHK放送文化研究所・入江さやか氏に平成時代に発生した地震被害と地震防災の動きを年表で整理していただきます。強震動研究の第一線で活躍されてきた愛知工業大学・入倉孝次郎先生には、平成時代に発生した強震動や強震動研究の発展、課題を振り返っていただきます。土木の耐震基準に長年関わってこられた東北大学・運上茂樹先生には、1995年兵庫県南部地震以降の橋梁の耐震設計や耐震補強等の技術、今後の課題をまとめていただきます。平成時代には、国内に建つ超高層建物の数が飛躍的に増大するとともに、その耐震性についても大きく変化し

ました。日建設計・鳥井信吾氏には、平成の超高層建物、免震・制振建物の変遷をわかりやすいイラストで解説していただくとともに、首都機能分散への思いを語っていただきます。2007年気象業務法の改正・施行により導入された緊急地震速報を推進された愛知工業大学・横田崇先生には、実用化までの経緯を振り返っていただきます。2011年東北地方太平洋沖地震では東北地方の太平洋沿岸部における甚大な津波被害のほか、浦安のような東京湾沿岸部での液状化被害が社会問題となりました。東北大学・越村俊一先生にはリアルタイム津波予測の発展を、関東学院大学・若松加寿江先生には平成の液状化被害と戸建て住宅の液状化対策の課題を解説していただきます。最後に日本地震工学会の前会長である名古屋大学・福和伸夫先生より、今後10年を見据えた将来に向けた地震工学の課題を紹介していただきます。

いずれの執筆者も、平成時代に発生したすべての地震災害を経験し、地震工学で重要な役割を担ってきた方々です。その文章には各人の熱い思いが綴られており、大変充実した特集になっています。執筆していただいた先生方には、編集委員を代表して心より御礼申し上げます。



### 永野 正行 (ながの まさゆき)

東京理科大学理工学部建築学科 教授、1988年早稲田大学大学院修了、同年鹿島建設小堀研究室、2008年より現職、日本地震工学会理事(会誌)、博士(工学)、専門分野は地震工学、建築振動学。

本稿編集中の2019年10月に令和元年台風第19号が発生し、関東から東北を直撃しました。水害、強風等により多くの方々が亡くなり、広い範囲で構造物、インフラへの甚大な被害も現れました。同じ自然災害を扱う私たちにとっても、防災に関わる新たな共通の課題が浮き彫りになったと思われれます。亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々にお見舞い申し上げます。

## 平成の地震災害の概要

入江 さやか

●NHK放送文化研究所 メディア研究部 上級研究員

### 1. はじめに

多くの自然災害に見舞われた「平成」の時代は2019年4月30日に幕を下ろした。元号が変わること自体に科学的な意味はないが、約30年間の地震災害を振り返り、地震防災の「これまで」と「これから」を考えるよい機会ではないだろうか。そこで、平成の主な地震災害と地震防災対策を、時系列に沿って年表形式でおおまかに整理してみた。本稿はいわば本号の特集の「前座」のようなものである。各分野の専門家の方々が、平成時代における地震工学・地震防災の変遷について執筆されているので、必要に応じて次ページからの年表を参照していただければ幸いである。

### 2. 平成時代の地震の発生状況

気象庁の震度データベースによると、平成時代（1989年1月8日～2019年4月30日）に観測された震度5弱以上の地震は353回あった。内訳は表1の通りである。なお、同データベースでは、気象庁震度階級が見直された1996年9月以前の「震度5」「震度6」は、それぞれ「震度5弱」「震度6弱」として扱われている。

表1 平成時代に発生した最大震度5弱以上の地震の回数

震度	5弱	5強	6弱	6強	7	合計
回数	218	77	39	13	6	353

### 3. 平成時代の地震による人的被害

平成時代に発生した地震による死者・行方不明者は「災害関連死」を含めると約29,300人にのぼる（資料により数値に異同があるため、概数とした）。

このうち、平成23年の「東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）」は、2019年3月現在で22,153人（うち災害関連死3,723人）であった。平成7年の「阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）」では6,437人（同919人）、「平成28年熊本地震」で273人（同223人）、「平成5年北海道南西沖地震」で230人となっている。

### 4. 地震防災対策をめぐる動き

30年間の地震防災対策についてここで詳しく記述する紙幅はないが、年表に示す通り、阪神・淡路大震災、東日本大震災などの被害地震を契機に、防災対策の推

進や被災者支援などに関する多くの法律や制度が整備された。また、「首都直下地震」「南海トラフ巨大地震」などの大規模地震災害の被害想定が公表され、政府だけでなく地方自治体や企業なども参画して事前の防災対策が検討・実施されている。

阪神・淡路大震災が起きた平成7年には「地震防災対策特別措置法」が施行された。これにともない総理府（当時）「地震調査研究推進本部」が設置され、調査研究を国として一元的に推進する体制が整備された。さらに平成13年には国の省庁再編にともない、防災行政が国土庁から内閣府に移行した。

阪神・淡路大震災を受けて地震観測網も大幅に拡充された。平成8年以降、防災科学技術研究所のK-NET（全国強震観測網）、Hi-net（高感度地震観測網）、KiK-net（基盤強震観測網）の運用が始まった。一方、気象庁は平成9年から従来の震度情報に地方自治体の震度計データを含めて発表を開始。それまで全国で約600ヶ所だった観測点は、防災科学技術研究所の観測点も含めて現在約4200ヶ所となっている。また、実大三次元震動破壊実験施設「E-ディフェンス」、スーパーコンピューター「地球シミュレータ」などの研究施設の整備も進んだ。

防災情報に関しては、「緊急地震速報」「長周期地震動に関する観測情報」など新たな地震防災情報の提供が始まったほか、北海道南西沖地震や東日本大震災などをを受けて、津波警報・注意報の高度化・迅速化が図られた。

平成時代には、ソフト・ハードの両面から、地震災害の軽減のために多くの研究や施策が進められてきた。しかし、平成30年北海道胆振東部地震の大規模停電のように、思いがけない被害や影響が生じる。首都直下地震や南海トラフ地震への対策にも課題が多い。

一方、わが国の高齢化率は2025年には30%を超えると予測されている。総人口はすでに減少局面に入っている。高度成長期に整備された道路・橋などの社会資本の老朽化対策も大きな課題となっている。スタートしたばかりの「令和」の時代ではあるが、平成よりも一層厳しい社会的環境にあると言わざるを得ない。その中で、地震災害に強い社会をどのように構築していくかが改めて問われているといえよう。

表2 平成の主な地震災害と地震防災対策

年	主な地震災害	政府の地震防災をめぐる動き
平成元年 (1989)		
平成2年 (1990)		■南関東地域地震被害想定を公表(国土庁)
平成3年 (1991)		
平成4年 (1992)		■「南関東地域直下の地震対策に関する大綱」策定(国土庁)
平成5年 (1993)	<b>1月15日 平成5年釧路沖地震(M7.5/最大震度6)</b> 死者2人。釧路地方気象台で最大加速度919galを記録。釧路市緑ヶ丘の盛土造成宅地で地すべり、マンホールの浮き上がりによる上下水道被害などが発生した。  <b>7月12日 平成5年北海道南西沖地震(M7.8/最大震度6)</b> 死者202人、行方不明者28人。地震発生後数分で大津波に襲われた奥尻島での被害が甚大。島南端の青苗地区では大規模な火災も発生し、壊滅状態となった。	
平成6年 (1994)	<b>10月4日 平成6年北海道東方沖地震(M8.2/最大震度6)</b> 根室市花咲港で津波を観測。釧路市などで住宅全壊61棟。  <b>12月28日 平成6年三陸はるか沖地震(M7.6/最大震度6)</b> 死者3人、住宅全壊72棟。	■COSMOS-G2(地殻連続歪監視施設/GRAPES(全国GPS連続観測網))運用開始(国土地理院)
平成7年 (1995)	<b>1月17日 阪神・淡路大震災:平成7年兵庫県南部地震(M7.3/最大震度7)</b> 死者6,434人、行方不明者3人、負傷者43,792人、住宅全壊104,906棟、全・半焼7,132棟。 都市直下の活断層による地震。気象庁震度階で初めての震度7を記録(計測震度ではなく現地調査による)。神戸海洋気象台で最大加速度818galを記録。新耐震設計法導入以前の木造住宅や10階程度の建築物に大きな被害。神戸市から西宮市にかけて建築物の被害が集中した地域は「震災の帯」と呼ばれた。六甲アイランドやポートアイランドなどを含む沿岸地域で大規模な液状化現象が発生。淀川などの河川堤防や護岸にも被害が出た。	■「地震防災対策特別措置法」施行 地震による災害から国民の生命・財産を保護し、地震に関する調査研究を推進するための体制を整備する目的で設けられた。地震防災緊急事業5か年計画の作成および財政特別措置、地震に関する調査研究体制の整備を主な内容とする。 ■「地震調査研究推進本部」設置(総理府→現在は文部科学省) 地震に関する調査・研究の成果を政府として一元的に推進 ■「建築物の耐震改修の促進に関する法律」施行 ■「災害対策基本法」一部改正 ボランティアや自主防災組織の活動の環境整備などが図られる。
平成8年 (1996)		■「特定非常災害の被害者の権利利益の保全等を図るための特別措置に関する法律」施行 ■K-NET(全国強震観測網)運用開始(防災科学技術研究所) ■GEONET(GPS連続観測網)運用開始
平成9年 (1997)		■「密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律」施行 ■気象庁における地震観測データの一元処理開始/計測震度計による震度観測運用開始/震度階級の改訂(8階級を10階級に/震度情報に地方公共団体の震度データを含めて発表開始(気象庁)) ■KIK-net(基盤強震観測網)運用開始(防災科学技術研究所)
平成10年 (1998)		■「被災者生活再建支援法」施行 ■余震確率の発表を開始(気象庁・地震調査委員会)
平成11年 (1999)		■量的津波予報の運用開始、津波予報区の細分化(気象庁) ■「南関東地域直下の地震対策に関する大綱」修正(内閣府)
平成12年 (2000)	<b>10月6日 平成12年鳥取県西部地震(M7.3/最大震度6強)</b> 負傷者182人、住宅全壊435棟。M7クラスの地殻内部の地震だが、事前に活断層の存在は指摘されており、明確な地表地震断層も現れなかった。	■Hi-net(高感度地震観測網)本格運用開始(防災科学技術研究所)
平成13年 (2001)	<b>3月24日 平成13年芸予地震(M6.7/最大震度6弱)</b> 死者2人、住宅全壊70棟。広島県呉市などで土砂災害による被害が顕著。	■省庁再編ともない、防災行政を国土庁から内閣府に移管 ■東海地震の想定震源域の見直し(内閣府) ■「日本地震工学会」設立
平成14年 (2002)		■東海地震の「地震防災対策特別強化地域」を拡大(内閣府) ■「地球シミュレータ」運用開始(海洋研究開発機構)
平成15年 (2003)	<b>9月26日 平成15年十勝沖地震(M8.0/最大震度6弱)</b> 死者1人、行方不明1人、住宅全壊116棟。北海道・本州太平洋岸に最大4m程度の津波。長周期地震動によって発生した石油タンクの液面揺動(スロッシング)で、苫小牧市のナフサタンク2基で火災が発生、鎮火まで44時間を要した。	■「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」施行 「東南海・南海地震対策大綱」策定 東南海・南海地震の被害想定を公表、「防災対策推進地域を指定」(内閣府) ■「東海地震対策大綱」策定(内閣府)
平成16年 (2004)	<b>10月23日 平成16年新潟県中越地震(M6.8/最大震度7)</b> 死者68人、負傷者4,805人、住宅全壊3,175棟、避難者は1歳最大で10万人超。1997年の計測震度導入後、初めて震度7を観測。川口町で最大加速度1675.8galを記録した。 各地で土砂災害が多発。山古志村(現・長岡市)は、交通・通信が途絶し孤立したため、全村民が自衛隊のヘリコプターで村外に避難した。土砂災害による河道閉塞も発生、住宅が水没などの被害が出た。JR東日本の上越新幹線が、長岡駅付近で脱線。新幹線の脱線は1964年の開業以来初めてだが、人的被害はなかった。	■「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」施行 ■「東南海・南海地震防災対策推進基本計画」決定(内閣府) ■東海地震に関する情報体系を見直し、「観測情報」「注意情報」「予知情報」の3段階に(気象庁)

年	主な地震災害	政府の地震防災をめぐる動き
平成17年 (2005)	<b>3月20日 福岡県西方沖を震源とする地震 (M7.0/最大震度6弱)</b> 死者1人、負傷者1,204人、住宅全壊144棟。福岡市西区の玄界島では住宅100棟以上が全壊し、多数の住民が島外に避難した。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「地震防災戦略」策定 (内閣府)</li> <li>■「首都直下地震対策大綱」策定 (内閣府)</li> <li>■防災基本計画に企業のBCP策定・運用努力を明記。BCP策定の指針となる「事業継続ガイドライン」を公表 (内閣府)</li> <li>■東海地震予知業務に係る情報発表体系を2段階から3段階に変更 (気象庁)</li> <li>■「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」一部改正 土砂災害ハザードマップ等による周知徹底へ</li> <li>■「建築物の耐震改修の促進に関する法律」一部改正 (国土交通省)</li> <li>■「全国を概観する地震動予測地図」公表 (文部科学省)</li> <li>■「E-ディフェンス」竣工 (防災科学技術研究所)</li> </ul>
平成18年 (2006)		<ul style="list-style-type: none"> <li>■「宅地造成等規制法」一部改正</li> <li>■「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震対策大綱」策定 (内閣府)</li> <li>■緊急地震速報の先行的な提供開始 (気象庁)</li> </ul>
平成19年 (2007)	<b>3月25日 平成19年能登半島地震 (M6.9/最大震度6強)</b> 死者1人、負傷者356人、住宅全壊686棟。能登有料道路で大規模崩壊11ヶ所を含む大きな被害が出た。  <b>7月16日 平成19年新潟県中越沖地震 (M6.8/最大震度6強)</b> 死者15人、負傷者2,346人、住宅全壊1,991棟。 東京電力柏崎刈羽原子力発電所では運転中の原子炉は自動的に停止したが、3号機の変圧器からの火災発生など不適合な事象が発生した。また、各号機の原子炉建屋基礎版上で観測された最大加速度が、設計で考慮した地震動による最大応答加速度を上回った。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「緊急地震速報」の一般向け提供開始 (気象庁)</li> <li>■緊急地震速報を利用した津波警報・注意報の迅速化 最速2分以内に (気象庁)</li> <li>■「被災者生活再建支援法」一部改正</li> <li>■「全国瞬時警報システム (Jアラート)」運用開始 (総務省)</li> <li>■衛星通信により、弾道ミサイル攻撃に関する情報だけでなく、緊急地震速報や津波警報・注意報などを瞬時に全国に伝達する。</li> <li>■中部圏・近畿圏の内地地震の被害想定を公表 (内閣府)</li> </ul>
平成20年 (2008)	<b>6月14日 平成20年岩手・宮城内陸地震 (M7.2/最大震度6強)</b> 死者17人、行方不明者6人、負傷者426人、住宅全壊30棟。岩手県一関西のKIK-net観測点で、上下の最大加速度が4Gに近い値が記録された。栗駒山周辺や栗原市の荒砥沢ダム周辺で大規模な地すべりが発生。一関市では、国道342号線の祭時 (まつるべ) 大橋が落橋した。	
平成21年 (2009)	<b>8月11日 駿河湾を震源とする地震 (M6.5/最大震度6強)</b> 死者1人、負傷者319人。東名高速道路の静岡県牧之原SA付近で盛土法面が崩壊、通行止めとなった。気象庁が初めて「東海地震観測情報」を発表したが、東海地震には結びつかないと判定された。	■「中部圏・近畿圏直下地震対策大綱」策定 (内閣府)
平成22年 (2010)		
平成23年 (2011)	<b>3月11日 東日本大震災：平成23年東北地方太平洋沖地震 (M9.0/最大震度7)</b> 死者・行方不明者22,153人、負傷者6,230人、住宅全壊121,781棟、避難者は最大時約47万人。わが国の観測史上最大の地震。全世界でも1900年以降で4番目の規模 (米国地質調査所による)。東北から関東にかけての太平洋沿岸に大津波が押し寄せ、甚大な被害。東京電力福島第一発電所は、運転中であった1～3号機が、停止後の炉心の冷却に失敗し、炉心を損傷する事故 (過酷事故) に至った。東京湾岸などを中心に広域で液状化現象が発生した。  <b>3月12日 長野・新潟県境を震源とする地震 (M6.7/最大震度6強)</b> 負傷者57人、住宅全壊73棟。 <b>3月15日 静岡県東部を震源とする地震 (M6.4/最大震度6強)</b> 負傷者75人 <b>4月7日 宮城県沖を震源とする地震 (M7.2/最大震度6強)</b> 死者4人、負傷者296人、住宅全壊36棟以上 <b>4月11日 福島県浜通りを震源とする地震 (M7.0/最大震度6弱)</b> 死者4人。地殻内の正断層型地震で、福島県いわき市では井戸沢断層の近傍で地表に地震断層が現れた。 <b>6月30日 長野県中部を震源とする地震 (M5.4/最大震度5強)</b> 死者1人。地殻内の横ずれ断層型地震で、牛伏寺断層付近で発生。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「津波対策の推進に関する法律」施行</li> <li>■「津波防災地域づくりに関する法律」施行</li> <li>■東日本大震災復興構想会議「復興への提言」を公表 (内閣府)</li> <li>■「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」報告を公表 (内閣府)</li> <li>■「津波警報の改善の方向性の最終取りまとめ」を公表 (気象庁)</li> <li>■「防災対策推進会議」発足</li> <li>■「南海トラフの巨大地震モデル検討会」発足 (内閣府)</li> <li>■DONET 1 (地震・津波観測監視システム) 本格運用開始 (海洋研究開発機構)</li> </ul>
平成24年 (2012)	<b>3月14日 千葉県東方沖を震源とする地震 (M6.1/最大震度5強)</b> 死者1人。  <b>12月7日 三陸沖を震源とする地震 (M7.3/最大震度5弱)</b> 死者1人。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「災害対策基本法」一部改正</li> <li>■「原子力規制委員会設置法」施行</li> <li>■「津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する提言」を公表 (気象庁)</li> <li>■「南海トラフ巨大地震」の津波高・浸水域・被害想定を公表 (内閣府)</li> <li>■「首都直下地震対策検討ワーキンググループ」発足 (内閣府)</li> <li>■スーパーコンピューター「京」運用開始 (理化学研究所)</li> </ul>

年	主な地震災害	政府の地震防災をめぐる動き
平成25年 (2013)	<b>4月15日 淡路島付近を震源とする地震 (M6.3/最大震度6弱)</b> 負傷者35人、住宅全壊8棟。地殻内の逆断層型の地震で、兵庫県南部地震(平成7年)の震源に隣接。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「大規模災害からの復興に関する法律」施行</li> <li>■「大規模な災害の被災地における借地借家に関する特別措置法」施行</li> <li>■「首都直下地震対策特別措置法」施行</li> <li>■「南海トラフ地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」 ([「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」を一部改正])</li> <li>■「災害対策基本法」一部改正</li> <li>■「建築物の耐震改修の促進に関する法律」一部改正</li> <li>■南海トラフ巨大地震対策検討WGが最終報告を公表(内閣府)</li> <li>■首都直下地震対策検討WGが被害想定と対策を公表(内閣府)</li> <li>■新しい大津波警報・津波警報・沖合津波観測情報の運用開始(気象庁)</li> <li>■「長周期地震動に関する観測情報(試行)」の公表開始(気象庁)</li> </ul>
平成26年 (2014)	<b>11月22日 長野県北部を震源とする地震 (M6.7/最大震度6弱)</b> 負傷者35人、住宅全壊77棟。糸魚川-静岡構造線断層帯の北部で発生したと考えられる。長野県は独自に「長野県神城断層地震」と命名。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■「災害対策基本法」一部改正</li> <li>■「国土強靱化基本計画」を閣議決定</li> <li>■「大規模地震防災・減災対策大綱」策定 従来の5つの地震防災対策大綱を統合</li> <li>■日本海における大規模地震に関する調査検討会が津波浸水想定を公表(国土交通省・内閣府・文部科学省)</li> </ul>
平成27年 (2015)		<ul style="list-style-type: none"> <li>■南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告(内閣府)</li> <li>■DONET1(地震・津波観測監視システム)本格運用開始(海洋研究開発機構)</li> </ul>
平成28年 (2016)	<b>4月11日・16日 平成28年熊本地震 (14日 M6.5/最大震度7、16日M7.3/最大震度7)</b> 死者273人(うち災害関連死223人)、負傷者2807人、住宅全壊8668棟。熊本県の布田川断層帯・日奈久断層帯で発生した地殻内の横断層型地震で、30kmにわたり地表地震断層が出現。熊本県益城町では、史上初めて震度7を2回観測した。2回目の地震では西原村小森では2m超の変位を記録。1回目の地震では、気象庁の長周期地震動階級4が初めて観測された。震源近傍の益城町、西原村などで木造住宅が多数被災したほか、熊本市や宇土市、益城町などでは官公庁や病院などの公共施設も被災し、機能不全に陥った。電力・ガス・水道などのライフラインにも大きな被害が出た。土砂災害も多発し、大規模な斜面崩壊で阿蘇大橋が落橋するなど、橋梁、道路、鉄道など交通インフラも大きな被害を受けた。これらのインフラの復旧には、「大規模災害からの復興に関する法律」が初めて適用された。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■熊本地震を踏まえた応急対策・生活支援策検討WG(フッシュ型物資支援や避難所運営など)応急対策・生活支援策を検証</li> <li>■「超高層建築物等における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について」を地方自治体等に通知(国土交通省)</li> <li>■S-net(日本海溝海底地震津波観測網)運用開始(防災科学技術研究所)</li> </ul>
平成29年 (2017)		<ul style="list-style-type: none"> <li>■「南海トラフ地震に関連する情報」の運用開始/「東海地震に関連する情報」運用停止</li> <li>■「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」設置(気象庁)</li> <li>■MOWLAS(陸海統合地震津波火山観測網)運用開始(防災科学技術研究所)</li> </ul>
平成30年 (2018)	<b>6月18日 大阪府北部を震源とする地震 (M6.1/最大震度6弱)</b> 死者6、負傷者462人、住宅全壊12棟。小学校のブロック塀が倒壊し、通学中の小学生が死亡。エレベーターでの閉じ込め事案が多数発生。関西地方の多くの鉄道が運転を見合わせて、出勤困難者・帰宅困難者多数。  <b>9月6日 平成30年北海道胆振東部地震 (M6.7/最大震度7)</b> 厚真町で発生した大規模な地すべりで多数の人的被害。札幌市の住宅造成地で広域にわたり陥没などの地盤災害が発生。地震の影響で道内全域(島嶼部を除く)の電力供給が停止し最大で約295万世帯が停電した。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■電力レジリエンスWG中間とりまとめ(経済産業省)</li> <li>■北海道胆振東部地震を受けた今後の対策を検討</li> </ul>
平成31年 (2019)		<ul style="list-style-type: none"> <li>■「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン」公表(内閣府)</li> <li>■「長周期地震動に関する観測情報」が本運用に移行(気象庁)</li> <li>■SIP4D(基盤的防災情報流通ネットワーク)運用開始(防災科学技術研究所)</li> </ul>

参考文献

- ・国立天文台編「理科年表2019」(2018年11月)
- ・内閣府「日本の災害対策」(2015年3月)
- ・地震調査研究推進本部「地震調査研究推進本部 10年の資料集」(2006年3月)
- ・同「地震調査研究推進本部 20年の資料集」(2015年3月)
- ・東京電力「柏崎刈羽原子力発電所 6号炉・7号炉基準地震動の策定について」(2015年4月)
- ・同「福島第一原子力発電所事故の経過と教訓」 <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/> (2019年8月27日閲覧)
- ・福和伸夫・飛田潤・平井敬「耐震工学 教養から基礎・応用へ」(2019年3月)
- ・福和伸夫「建築物の地震対策と社会の防災意識」(建築保全センター機関誌『Re』203号,2019年7月)
- ・気象庁・内閣府・総務省消防庁・復興庁・国土交通省・

厚生労働省・文部科学省・防災科学技術研究所・海洋研究開発機構 各ウェブサイト



入江 さやか (いりえ さやか)

1987年一橋大学社会学部卒。読売新聞社、スタンフォード大学地震工学センター、(株)日本総合研究所を経て、2000年にNHK入局。報道局社会部、災害・気象センターなどを経て2014年から現職。日本地震工学会理事(広報)、日本災害情報学会企画委員、防災士。専門分野は、災害報道・災害情報。

# 強震動研究の進展

入倉 孝次郎

●愛知工業大学 客員教授

## 1. はじめに

平成時代はタイプの異なる2つの大震災に襲われ、自然の力に対してまだまだ我々の防災力(resilience)の弱さを思い知らされた31年間であった。この間、科学技術の急速な進展で、強震動研究自体大きく変化した。振り返るべき課題として、高密度強震動観測網の構築、地下構造のモデル化、震源の波形インバージョンと特性化震源モデル、強震動予測レシピの4つをあげたい。これらの4つの課題はそれぞれ密接に関連しているもので、強震動研究のためには同時に進展させることが不可欠であった。

## 2. 高密度強震動観測網の構築

平成の31年間で強震動研究にとって特筆すべきことの1つは、日本で高密度強震動観測網が構築されたことである。日本における強震観測の発展の歴史は工藤(1994)<sup>1)</sup>による「強震観測—歴史と展望—」にまとめられている。1978年にIAEA, UNESCO等の主催で強震アレイ観測に関する国際ワークショップが開催され、望ましい観測体制として、絶対時刻、ダイナミック・レンジや周波数レンジの拡大、プレイベント・メモリーなどの機能を持つ計器を推奨する意見が出され、必然的にデジタル地震計の開発・利用が提言された。米国では、ワークショップ以前にUSGSが中心となりカルフォルニアの活断層や地震常襲地域に強震観測網の設置を開始し、1979年インベリアルバレー地震(M6.9)で活断層の周辺に展開された強震観測網でアレイ状の記録が得られた。これらの強震動記録は公開され、耐震設計のための工学的研究だけでなく、波形インバージョンによる断層面内のすべり分布を求めるなど理学的研究にも使われるようになった。日本では、ワークショップの議を受け、高密度強震観測の必要性に関して日本学術会議の勧告が出され、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所(以下、防災科研と記す)、建設省土木研究所・建築研究所などで小規模の高密度強震観測が行われるようになったが、数値データに関しては、一般には公開されなかった。気象庁は1987年に機械式の強震計をデジタル型強震計(87型)に入れ替え、データ公開を始めたが、全国で80台程度に過ぎず、高密度とは言えないものであった。

強震観測の推進とデータの収集と公開を目的として、1967年に強震観測事業推進連絡会議(以下、強震連絡会と記す)が防災科研に設けられ、1988年に日本全国に高密度強震動観測網の具体的提案がなされていた。しかしながら、この計画は、1995年兵庫県南部地震以前には全く予算化されなかった。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は阪神・淡路地域に揺れによる大きな被害をもたらした。震度7に相当する被害の集中した「震災の帯」やその周辺では、公的機関による強震動データはわずか数点でしか得られなかった。この地震の発生時に、被災地の震度情報の収集に時間がかかり、政府の初動対応が遅れたなどの社会的問題が生じた。この大震災を契機として、総合的な地震防災対策を推進するため、地震防災対策特別措置法が制定され(1996年)、同法に基づいて地震調査研究推進本部が設置され(当初は総理府、その後文部科学省に移管)、その下で高感度地震観測網Hi-net、地殻変動連続観測網など基盤的調査観測が推進された。強震動に関してもHi-netに併設して、地表と地中の2箇所にセンサーをもつKiK-netが構築された。地中地震計は一般的には深さ100mに置かれているが、場所によっては2000m以上、最も深いのはさいたま市岩槻の深層観測施設で深さ3510mに設置され、きわめて興味深いデータを国際的に提供している。強震連絡会の計画は防災科研により全国を約20km間隔で均質に覆う1000個以上の観測点のK-NETとして実現された(功刀他、2009)。

気象庁は、1996年より95型震度計の運用開始、2004年より多機能型地震観測装置による観測を開始し、2007年からは緊急地震速報システムの運用を行っている。そのほか、自治省消防庁の補助で各都道府県の各市町村に最低1地点の震度観測点、全国に3000点以上観測点が設置されるようになった。港湾空港技術研究所(以下、港湾技研と記す)は港湾地域を対象として、国土技術政策総合研究所は全国の河川施設・道路施設で高密度観測を行っている<sup>2)</sup>。

## 3. 地下構造のモデル化

強震動を予測するには、地震がどこで発生し、地球内部をどのように伝わり、表面近くの軟らかい地盤で

どのように増幅されるかを定量的に評価する必要がある。地震本部による地震ハザード評価では、工学的基盤以深の3次元地下構造、深部構造モデル、と浅部構造モデルが仮定されている。深部構造は、Koketsu et al. (2008)<sup>3)</sup>の提案に従って、防災科研が中心となって、屈折法、反射法地震探査、重力探査、表層地質、ボーリング、微動探査等種々のデータを収集し、さらに地震動の観測記録とシミュレーション結果を比較することにより調整し、構築されたものである。浅部構造については、評価地点直下の3次元地下構造を切り出し、水平成層を仮定し、高密度の微動観測による表層地盤構造を加えて構築されている(先名, 2017)<sup>4)</sup>。地震動予測地図は、長周期地震動について不連続格子を用いた3次元有限差分法(Aoi and Fujiwara, 1999)<sup>5)</sup>、短周期地震動について水平成層構造の重複反射理論、により、ハイブリッド合成で評価される。地盤構造と地震動増幅に関する新しい方法論は川瀬(2018)<sup>6)</sup>にまとめられている。

#### 4. 震源の波形インバージョンと特性化震源モデル

高密度強震動観測網で得られた強震動記録を用いて、1980年代から震源断層のすべり分布の推定の研究が行われるようになった。震源断層から生成される地震動は、表現定理に基づけば、断層面上のすべり時間関数と震源と観測点間のグリーン関数の畳み込み積分で表現される。震源断層を取り巻く観測点の地震記録と震源と観測点間の地下構造が与えられれば、断層面上の不均質なすべり分布が積分方程式を解くことにより評価される。この方法は震源インバージョンとして多くの研究がなされている。Hartzell and Heaton (1983)<sup>7)</sup>は、断層面を小領域の断層に分割し、それぞれの小断層において時間差を持つ複数の基底関数を設定し、インバージョンの解として得られた基底関数の線形結合ですべり速度の時間関数が評価できる方法(Multi-time window linear-waveform-inversion)を提案した。その他にも不均質な断層破壊過程を評価する種々の方法が開発されている。これらの方法で、大きな地震が発生すると断層近傍の波形記録を用いて断層すべり分布が推定されようになった。

インバージョン結果の信頼性は、グリーン関数の精度、すなわち地下構造のモデル化の精度に依存する。地下構造決定の困難さと数値計算上の容易さから、地下構造として平行成層構造を仮定する場合が多い。平行層の仮定でも長周期(1秒以上)に関してはある程度信頼できる結果が得られるが、それよりも短周期側では精度が保証されない場合が多く、インバージョンで

得られた震源像は一般的には長周期に対応すると考えられる。インバージョン結果の信頼性を高めるために最も重要なことは理論的グリーン関数の誤差を少なくすることである。そのために各観測点で得られた小地震記録を用いて地下構造モデルに基づくシミュレーションと観測記録の誤差が最小になるようにする地下構造のチューニングがなされる。地下構造に関する知識が集積された地域では、3次元地下構造の観測記録への影響評価がなされ、3次元地下構造を考慮したインバージョンが試みられている(藤原・他, 2013)。

震源インバージョンによって推定されるような断層面上の不均質なすべり分布が事前に与えられれば、将来の大地震に対する強震動の予測が可能になる。しかし、事前の情報で不均質なすべり分布をどのように推定できるか、別途検討が必要とされる。問題解決の方法の1つが震源断層モデルの特性化である。1995年兵庫県南部地震の後、米国と日本の強震動研究者が共同で米国カリフォルニアと日本の内陸地殻内地震の震源インバージョンの結果を収集して、断層すべりの不均質性について統計的解析を行った。当時は、カリフォルニアではすでに高密度強震動観測網が作られ、Mw 6以上の中規模地震が起こると、震源インバージョン解析がなされていた。一方、日本には高密度観測網がなかったため、強震動記録を用いた震源インバージョンの系統的な研究は行われてなかったが、1995年兵庫県南部地震については、気象庁、港湾技研、JR、関西地震観測研究協議会などの公的機関のみならず民間会社の記録も収集して震源インバージョン解析がなされた(例えば、Sekiguchi et al., 2000)<sup>9)</sup>。

この共同研究の成果の1つとして、内陸地殻内地震のすべりモデルの特性化という考えがまとめられた(Somerville et al., 1999)<sup>8)</sup>。彼らは、主として強震記録を用いたすべり分布から、一定の規範を用いて、アスペリティと背景領域に分け、アスペリティ面積の地震モーメント(Mwに対応)依存性を分析した。彼らは断層面全体の平均すべり量を求め、平均すべり量の0.3倍以上のすべりを持つ領域を破壊域と定義し、地震モーメントと破壊域のスケーリング則を導いた。さらに、平均すべり量の1.5倍のすべりをもつ領域をアスペリティと定義して、アスペリティ面積のスケーリング則を導いた。複数のアスペリティが存在する場合、個々のアスペリティ面積の和を複合アスペリティ面積(combined asperity area)と定義し、地震モーメントと複合アスペリティ面積のスケーリング則を求めると地震モーメントと破壊域のスケーリング則と相似の関係にあることが分かった。

一方、強震動震源モデルは、経験的グリーン関数法 (Irikura, 1986)<sup>11)</sup>を用いて、フォワード・モデリングで検討されてきた。例えば、1995年兵庫県南部地震の強震動震源モデルは、Kamae and Irikura (1998)<sup>12)</sup>により、インバージョンからのすべり分布を参考にして、3つのアスペリティの位置に長方形のパッチ (強震動生成域) を配置し、パッチ内に一様の応力パラメータを仮定し、経験的グリーン関数法によって断層近傍域の観測点の強震動が再現できることを確かめた。彼らのシミュレーション結果は、速度記録にみられるパルス波や加速度記録にみられる包絡形状がよく再現できている。

Miyake et al.(2003)<sup>13)</sup>は日本周辺の内陸地殻内地震について、インバージョンによるすべり分布の大きい領域に長方形の強震動生成域を配置し、経験的グリーン関数法を用いて計算されたシミュレーション波形が観測記録に一致するように強震動生成域の面積と応力パラメータを推定した。彼女等が求めた強震動生成域の幾何学的位置と大きさは、Somerville et al. (1999)<sup>10)</sup>のアスペリティの位置と大きさにほぼ一致する。

## 5. 強震動予測レシピの提案

日本の内陸地殻内地震に関して震源インバージョン解析や経験的グリーン関数法による強震動生成域モデルなどの知識の集積から、分かってきた震源像に基づいて、強震動予測レシピという考えが提案された(例えば、入倉・三宅, 2001<sup>14)</sup>; Irikura and Miyake, 2011<sup>15)</sup>)。

強震動予測レシピは活断層に発生する地震や海溝域に発生する地震による強震動予測を目的として、地形・地質調査データ、歴史地震、地球物理学的調査に基づき震源断層を想定したとき断層パラメータを推定する手続きを系統的にまとめたものである。この「レシピ」は同一の情報があれば誰がやっても同じ答えが得られる強震動予測の標準的な方法論を目指したものである。現状ではいまだ開発途上であり今後の地震関連データの蓄積と動力学的断層破壊過程に関する理論および実験的研究の発展により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。

強震動予測レシピの考えに基づいて、広帯域地震動評価の実装および利活用にあたっては、地震調査研究推進本部の関連委員会や防災科研の研究者による種々の問題点の検討に負うところが大きい。地震調査研究推進本部から公表されている全国地震動予測地図のうち、震源断層を特定した地震動予測地図で使用された強震動予測レシピの詳細は、地震調査委員会の強震動評価手法分科会、強震動評価部会、地震調査委員会の

討議を経て定められたものである。また、内閣府防災担当の関連委員会においても、様々な検討が行われてきた。

2016年熊本地震 (Mw 7.0) は、既存の活断層沿いに地表破壊を生じ、断層の極近傍の観測点で永久変位とフリリング・ステップに伴う長周期パルスをもつ強震動が観測された。このような断層極近傍における永久変位や長周期パルスを有する強震動はこれまでの特性化震源モデルでは再現できないが、地震発生層の上部にある表層 (2-3 kmの厚さ) に長周期地震動生成域 (LMGA) を設定することで、再現可能なことが示されている (Irikura et al., 2019)<sup>16)</sup>。

強震動予測レシピの開発の着想となった地震の震源モデルは、国内および海外の被害地震の震源近傍の強震記録を用いた震源インバージョンのすべり分布と強震動生成域の推定に基づいている。震源インバージョンによるアスペリティとフォワード・シミュレーションで推定される強震動生成域がほぼ一致するというのは、日本周辺に発生する地殻内地震には有効であるが、必ずしも一般化できない。2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の破壊域は、岩手沖から茨城県沖にかけて南北に約500km、東西に約200kmの広大な領域であった。アスペリティと定義される大すべり域はより東側の南北に広がる領域にあるのに対し、強震動生成域は破壊域の西端に近いダウンディップに位置し、異なる場所に推定された (Kurahashi and Irikura, 2013)<sup>17)</sup>。ただし、この地震の強震動は局地的に大きな応力降下を生じた小さなアスペリティ、すなわち強震動生成域から生成されるという考えは支持された。

プレート境界地震については、観測データがあるM7~8クラスについては、個別の検討がなされてきた。地震モーメントと破壊域の関係や破壊域と強震動生成域の関係、などのスケージングは限られたデータしかないため一般化が困難である。M9クラスの超巨大地震について、強震観測記録が得られているのは、2010年チリ・マウレ地震と2011年東北地方太平洋沖地震のみである。震源モデルの一般化は難しく、当面は事例反映に留まると思われる。アスペリティ (大すべり域) と強震動生成域の不一致に加え、破壊形態やすべり速度時間関数の多様性に鑑み、断層走向方向および断層傾斜方向について、丁寧な震源モデル化が必要である。また、観測地震動のマグニチュードの飽和が説明可能な震源モデルの構築が望まれる。

## 6. 強震動研究の課題と今後の展望

強震動の信頼性ある予測を行うには、これまでの

強震動研究の枠を広げて検討する必要がある。想定する地震の震源像を明らかにするとともに、震源の破壊過程および地震動生成の物理モデルの構築、震源と対象地域を包含する地下構造・地盤構造の精緻化が必要とされる。強震動予測レシピは、上のような地震動の物理モデルを現時点で入手できる知識と情報を用いて、地震動評価のためのパラメータ評価のシステム化をめざしたものである。

方法論の信頼性を高めるには、今後さらなる国際的な評価や批判を受ける必要がある。米国南カリフォルニア地震センター SCECに構築されている広帯域地震動プラットフォームは、ユーザー自身が Verification と Validation (手法検証と結果の妥当性確認) が行えるシステムづくりを目指している。現在プラットフォームには8つの代替計算手法(alternative computational methods)が実装され、カリフォルニア、東北アメリカ、日本における過去の地震やシナリオ地震に対して0 - 20 Hz地震波形を生成することができる。強震動予測レシピもプラットフォームの検証対象に選ばれており、他の手法との比較検討でさらなる高度化が期待される。

図1で、Mw6.7の地震を想定して、米国で開発されたGP法(Graves and Pitarka, 2010)<sup>18)</sup>と日本のレシピの異なる震源モデル化によるシミュレーション結果が比較される。GP法は、すべり分布がk-2の形状を有するランダム震源モデルで、破壊速度やライズタイムも一定のバラツキをもつ方法である。この結果では、2つの方法は、震源モデルは大きく異なるが、シミュレーション結果のgoodness of fit (ln data/model)は1σの範囲内でよく一致している (Pitarka et al., 2018)<sup>19)</sup>。SCEC BBPにおける強震動予測レシピの課題は三宅・他(2019)<sup>20)</sup>で議論されており、今後の展開が期待される。

## 参考文献

- 1) 工藤一嘉：地震2, 47, pp.225-237, 1994.
- 2) 功刀卓・他：地震2, 61, pp.S19-S34, 2009.
- 3) Koketsu K. et al.: 14WCEE, No. S10-038, 2008.
- 4) Aoi S. and Fujiwara, H.: BSSA, 89, pp.918-930, 1999.
- 5) 先名重樹：日本地震工学会誌, 32, pp.13-16, 2017.
- 6) 川瀬 博：第46回地盤震動シンポ, pp.63-76, 2018.
- 7) Hartzell, S. H. & Heaton, T.: BSSA, 73, pp. 1553-1583, 1983.
- 8) 藤原 了・他：物理探査学会, 第128回講演会論文集,

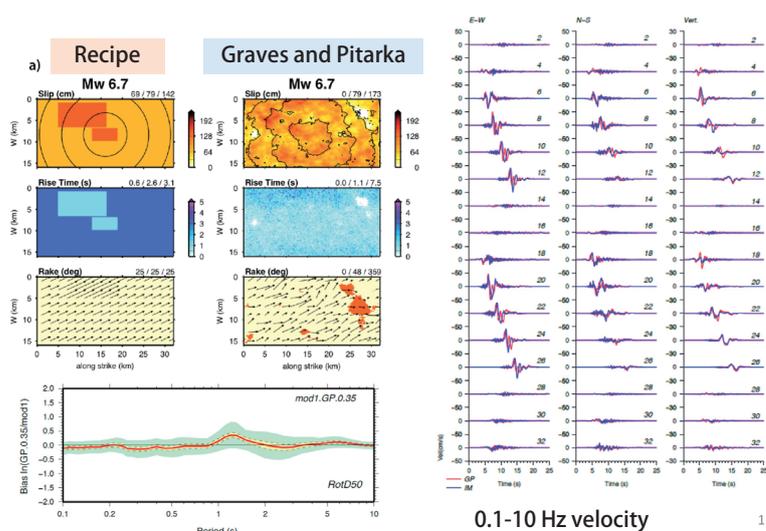


図1 強震動予測レシピとGP法との比較 (Pitarka et al., 2018)<sup>19)</sup>。左：両方法のパラメータ比較 (上からslip, rise time, rake angle) 左bottomは両方法のGoodness of fitの比較。右：両方法のシミュレーション波形比較。

P-7, 2013.

- 9) Sekiguchi, H. et al.: BSSA, 90, pp. 117-133, 2000.
- 10) Somerville, A. et al.: SRL, 70, pp.59-80, 1999.
- 11) Irikura, K.: Proc. 7JEES Tokyo, pp.151-156, 1986.
- 12) Kamae, K. and Irikura, K.: BSSA, 88, pp.400-412, 1998.
- 13) Miyake, H. et al.: BSSA, 93, pp.2531-2545, 2003.
- 14) 入倉孝次郎・三宅弘恵：地学雑誌, 110, pp. 849-875, 2001.
- 15) Irikura, K. and Miyake, H.: PAGEOPH, 168, pp. 85-104, 2011.
- 16) Irikura, K. et al.: PAGEOPH, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02283-4>, 2019.
- 17) Kurahashi, S. and Irikura, K.: BSSA, 103, pp.1373-1393, 2013.
- 18) Graves, R. and Pitarka, A.: BSSA, 100, pp. 2095-2123, 2010.
- 19) Pitarka, A. et al.: IAEA-TECDOC, CD-1833, 2018.
- 20) 三宅弘恵・他：日本地震学会2019年予稿集, pp. S15-10, 2019



入倉孝次郎 (いりくら こうじろう)

1968年京都大学大学院博士中退、京都大学防災研究所教授を経て現職(愛知工業大学客員教授)、理学博士、専門分野：強震動地震学

# 平成における橋梁の耐震技術の進化と課題

運上 茂樹

●東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授

## 1. はじめに

改めて、平成の時代は、まさに「大地動乱の時代」<sup>1)</sup> だったのではないかと。

表1は、平成時代30年4カ月の間に国内外で発生し、橋梁の耐震設計に影響を与えた代表的な被害地震とその特徴を示したものである。地震発生たびに従来経験したことがなかったような、あるいは、従来の経験を大きく超えるような事象が次々と発生し、そこから教訓が得られていることがわかる。特に、平成時代においては、平成7年(1995年)阪神・淡路大震災、平成23年(2011年)東日本大震災が発生し、「大震災」と呼称がつく過去3度しかない地震のうちの2度が発生し、我が国の社会・経済に対し重大なインパクトを与えた。従来観測されたことがなかったような強烈な地震動の発生、極めて大きな地表地震断層の出現、巨大津波の襲来、大規模斜面崩壊等の地盤変状の発生、そしてこれらの事象が同時あるいは連続して複合的に発生している。地震の発生サイクルに比較して非常に短い約31年間という期間でもこのような多くの新しい知見が得られており、人間社会における実際の経験に基づく知識は非常に限られたものであることが認識される。過去の歴史や経験に学ぶとともに、新たな災害事象の出現に対しても想像力と洞察力の感度を高めて備えることが不可欠となってきている。

本文では、「平成における橋梁の耐震技術の進化と課題」と題し、震災時には避難路・緊急輸送路として必要不可欠なライフラインとなる道路を構成する構造物の1つである橋梁に着目し、平成時代の地震による

表1 平成時代に橋梁構造物の耐震設計に影響を与えた代表的な被害地震とその特徴

被害地震	特徴：新たな事象や教訓
6(1994)年 米国ノースリッジ地震 7(1995)年 兵庫県南部地震	過去に記録されていないような強い地震動
11(1999)年 トルコ・コジャエリ地震 11(1999)年 台湾・集集地震	10m規模の極めて大きな地表断層
15(2003)年 十勝沖地震 16(2004)年 新潟県中越地震	長周期地震動の影響 既設構造物の耐震補強の促進
16(2004)年 スマトラ島沖地震	30m規模の大津波
20(2008)年 岩手宮城内陸地震	極めて大規模な斜面崩壊
20(2008)年 中国・四川地震 22(2010)年 チリ・マウレ地震	M8級直下～M9級の大規模地震(広域多発災害)
23(2011)年 東北地方太平洋沖地震	M9級の大規模地震と想定を超える大津波(地震、津波、原子力災害の複合災害)
28(2016)年 熊本地震	強震動(2回の連続地震)、大規模地盤災害

被害経験とともに進化してきた耐震設計や耐震補強等の耐震技術と今後の課題を整理したい。

## 2. 耐震設計技術

平成時代において橋梁の耐震技術はどう進化したのか。表2は、大正12年(1923年)関東地震以降の被害地震とその教訓をもとに開発され、進化してきた橋梁の耐震技術の変遷を示したものである<sup>2)~6)</sup>。

橋梁の設計において地震の影響を具体的に考慮するようになったのは、2,000橋近い橋が被害を受けた関東地震が契機となっている。橋台・橋脚等の設計に地震力に相当する静的な慣性力を作用させ、弾性解析に基づく「震度法と許容応力度法」が導入された。地震の影響を設計に考慮することによって、その後の地震被害数は劇的に減少していく。

昭和39年(1964年)新潟地震では、砂質地盤の液状化に伴う昭和の大橋の落橋被害が生じた。この被害経験から「液状化に対する設計法(液状化判定法と基礎の設計法)」が開発され、さらに支承破壊後の上部構造の大変位による落下をできるだけ防ぐための「フェイルセーフ設計法(落橋防止構造)」が導入された。

昭和58年(1978年)宮城県沖地震では、鉄筋コンクリート橋脚や支承部などに被害が集中するようになった。これは、基礎や下部構造が強化されてきた結果、次の弱点部となる部位に損傷が移行したものである。こうした被害経験を踏まえ、鉄筋コンクリート橋脚のねばりを確保するための「じん性設計法」として、せん断力に対する設計法、軸方向鉄筋の段落し部の設計法、配筋細目などが充実してきた。

部材の破壊特性や変形性能の評価に関する一連の実験研究によって、損傷が生じることを意識しない弾性設計法から踏み出し、大規模地震時には損傷が進展するが、その損傷を許容範囲内に収めるといった本格的なじん性設計法が開発された<sup>5)</sup>。これは、「地震時保有水平耐力法」として平成2年(1990)の道路橋示方書に規定された。ここには、L1地震、L2地震という2段階の設計地震動を考慮した「2段階耐震設計法」の考え方とともに、こうした設計地震動に対して、それぞれ、「健全性の確保」あるいは「崩壊防止」といった耐震設計において達成すべき目標性能を明示した設計法が導入さ

表2 橋梁の地震被害と耐震技術の進化(参考文献<sup>5)</sup>に基づき作成)

主な被害地震	地震作用	耐震要求性能	耐震設計法・性能照査	耐震構造・構造コンセプト
1923年関東地震	関東地震の地震動	仕様のな設計	震度法+許容応力度法 (弾性設計, 静的設計)	
1964年新潟地震	2段階地震動 L1: 中規模, L2: プレート境界 L2: 内陸M7級	目標性能を明示した設計 L1: 健全性, L2: 崩壊防止 耐震性能1, 2, 3 (安全性, 供用性, 修復性)	震度法 地震時保有耐力法 (RC橋脚の塑性設計) 地震時保有耐力法拡大 (全主要部材) 動的設計: 非線形 キャパシティデザイン 変位ベース設計法	液状化判定・基礎設計 フェイルセーフ設計: 落下防止 RC部材の設計: せん断・段落 し・配筋細目 本格的なじん性設計: RC橋脚
1978年宮城県沖地震 1982年浦河沖地震				
1995年兵庫県南部地震	断層変位・断層近傍地震動 長周期地震動	仕様規定から性能規定へ	限界状態設計・信頼性設計 対津波設計: 波力・浮力 地上・半地下・地下構造・ 地盤を含む統一耐震設計 地盤変状(断層, 斜面崩壊)	免震設計 各種構造部材のじん性構造細目 液状化に伴う流動化設計 高性能構造: 高強度材料 制震設計・減震設計・耐震補強 インテリジェント耐震構造 センサーモニタリング ロバスト・リダンダント構造 ABC(急速施工構造) 対津波構造 リスクベース設計 劣化損傷を考慮した構造リスク
1999年トルコ・台湾地震 2003年十勝沖地震	津波の影響 内陸直下M8級			
2004年スマトラ島沖地震 2008年中国四川地震	巨大地震・広域災害 巨大津波・長時間地震動・ 複合災害 前震・本震・余震・断層			
2010年チリ地震 2011年東日本大震災				
2016年熊本地震				

れ、「性能設計法」の先駆けとなった。

大正12年(1923年)関東大震災以来最大の被害を引き起こしたのは、平成7年(1995年)に兵庫県南部の大都市圏を襲った兵庫県南部地震であった<sup>7)</sup>。強震観測が開始されてから我が国のみならず世界的にみても経験したことの無い大きな影響を及ぼす地震動で、従来の耐震設計で考慮されていた地震動レベルの2倍を超えるような強震動が広範囲で観測された。兵庫県南部地震による甚大な被害は、地震動に対する構造物の耐震設計法に重大な影響を及ぼし、これを大きく見直す契機となった<sup>8)</sup>。

落橋等の甚大な被害の多くは、強烈な地震動を受けた「鉄筋コンクリート橋脚の主鉄筋段落し部における曲げせん断破壊」によるものであった。このような被害経験を踏まえ、兵庫県南部地震のような「内陸直下で起こるM7級の地震」による地震動が耐震設計において考慮すべき地震動として位置付けられた。橋全体系としてねばり強く地震に耐える構造を目指し、橋脚、基礎、支承等の各構造部材に対して「地震時保有水平耐力法」が適用されることになった。強地震に対して構造物の損傷の進展を追跡するための「動的解析法」、長周期化やエネルギー吸収性能の向上によって構造物の地震応答を低減して耐震性の向上を図る「免震設計法・制震設計法」、液状化に伴う地盤の側方移動に対する「液状化に伴う流動化設計法」も導入された。また、地震による損傷を意図した適切な構造部位に誘導し、そこでエネルギー吸収を確実に図ることにより、橋全体としての安全性を確保するという「キャパシティ・デザイン(損傷制御設計法)」の考え方も具体化した。さらに、後述するように相対的に耐震性の低い既設構造物の耐震性の向上を図るために、橋脚、支承、基礎の各部材、あるいは、橋梁全体系としての「耐震補強法・アップグレード技術」も開発、実用化

された。

その後、平成11年(1999年)トルコ・コジャエリ地震や台湾集集地震において多くの落橋被害を生じさせた「断層変位の影響」、平成15年(2003年)十勝沖地震において石油タンクの火災を引き起こした「長周期地震動」、平成16年(2004年)スマトラ沖地震、そして平成23年(2011年)東日本大震災

における「巨大津波」による多くの橋梁の流失被害、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震や平成26年(2016年)熊本地震における「斜面崩壊等の地盤変状」による落橋被害等、従来には見られなかった新たな甚大な被害も続発した。平成22年(2010年)チリ地震、東日本大震災では、延長約500kmに渡る巨大断層に沿った広範囲の地域で被害が多発し、震後の迅速な救援・復旧対応が困難になるような「広域多発災害」、地震と津波あるいは原子力災害等が同時、連続、複合して発生する「複合災害」が大きな影響を及ぼした。

東日本大震災は、M9.0という海溝型巨大地震であり、太平洋側の広範囲の地域に継続時間の長い強震動を生じさせるとともに、その後に襲った巨大津波により死者・行方不明者約2万人という激甚な被害を発生させた<sup>9)</sup>。複数の震源域が連動して破壊した巨大断層、原子力災害を含めた複合的な災害に対して、「想定外」という言い訳が非常に厳しい批判を受けるとともに、「設計レベルを超えるような外的作用」に対する備えやバックアップシステムの重要性が認識された。

平成26年(2016年)熊本地震では、2日間という短い時間内に隣接する異なる断層において、M6.5とM7.3の「2つの地震が連続して発生」し、非常に強い揺れ(震度7)がいずれも夜間に同じ地域を襲った<sup>10)</sup>。「斜面崩壊」に起因して発生したと推定される大規模橋梁の崩落、強震動と断層変位が同時作用した地盤変状の影響と推定される被害の発生等の教訓も得られた。

「津波、斜面崩壊及び断層変位の影響」に対しては、それらのハザードの推定精度に限界のある事象であり、現時点ではこれらを直接的に設計に取り込む方法の確立までには至っていない。現状ではそれらの影響を受けないように架橋位置又は橋の形式の選定を行うこと、被災時の機能回復の方策とそれに必要な資機材の整備、道路網の多重化による被災時の補完性を確保できる路

線計画など地域の防災計画等とも整合するために必要な対策を講じるなどハード・ソフトの両面からの対策が求められている。

### 3. 耐震補強技術

前述のように、地震被害の経験をもとに耐震技術が進化し、時代とともに耐震性が向上した構造物が構築、蓄積されてきている。したがって、古い時代の構造物の中には、現在の目から見ると相対的に耐震性が低い構造物が存在し、このような構造物に対して重大な被害を防止、軽減するための耐震補強対策が行われる。古い時代に建設された構造物資産は膨大な量であり、これら全てに対して短期間で最新の基準を全て満足させるように補強対策を行うことは困難である。また、古い時代の橋でも地震時に振動しにくく、被災しにくい構造特性を有するものなどもあり、古い時代の橋梁全てが地震に対して脆弱ということではない。このため、その橋梁の保有する耐震性能レベルや架橋地点における大地震の発生切迫度、さらには被災時の地域への影響などの路線の重要度等に基づく優先度が考慮され、耐震対策が進められてきている。

表3は、道路橋に対して実施されてきた「耐震点検」の経緯を示したものである<sup>3)</sup>。最初の耐震点検は、昭和46年(1971年)の米国サンフェルナンド地震が契機となって始められている。その後被害地震の発生を踏まえ約5カ年間の継続プログラムとして順次対象橋や点検項目を拡大して進められてきている。支承破壊に伴う落橋を防ぐ落橋防止装置の設置やパイルベント橋脚など被災事例のある古い構造を有する橋梁の対策が実施されている。

表3 橋梁の耐震点検の変遷(参考文献<sup>3)</sup>、<sup>12)</sup>に基づき作成)

耐震点検	耐震点検の着目点	経緯
昭和46(1971)年	主に昭和31年以前の橋梁で、変状とパイルベント橋脚の縁端距離に着目した点検	昭和46(1971)年に米国で発生したサンフェルナンド地震が契機
昭和51(1976)年	主に昭和31年以前の橋梁で、変状と縁端距離、落橋防止装置に着目した点検	
昭和54(1979)年	主に昭和31年以前の橋梁で、落橋防止構造と地盤の液状化に着目した点検	昭和53(1978)年伊豆大島近海地震、同年宮城県沖地震が契機
昭和61(1986)年	主に昭和46年以前の橋梁で、液状化判定、橋脚の強度判定、杭基礎の支持力判定、RC橋脚の段落し部の耐震性判定などに着目した点検	昭和57(1982)年浦河沖地震、昭和58(1983)年日本海中部地震、昭和59(1984)年長野県西部地震が契機
平成3(1991)年	昭和61年点検に、RC橋脚およびラーメン橋脚の段落し部の耐震性判定が追加された点検	橋梁の耐震性の一層の向上を目的
平成8(1996)年	橋長15m以上の橋梁を対象とし、主にRC橋脚、鋼製橋脚、落橋防止構造、支承構造、液状化、流動化などに着目した点検	平成7(1995)年兵庫県南部地震が契機
平成17(2005)～19(2007)年	橋梁耐震補強3カ年プログラムによる耐震補強対策の加速化。RC橋脚、鋼製橋脚、支承部や落橋防止構造に着目した点検	平成16(2004)年新潟県中越地震、平成17(2005)年福岡県西方沖地震が契機。東海・東南海・南海地震等の大規模地震の逼迫性
上記以降	緊急輸送道路の耐震補強の加速化継続中。大規模地震の発生確率等を踏まえ、落橋・倒壊の防止対策、路面に大きな段差が生じないように支承の補強や交換等	緊急輸送道路上の15m以上の橋梁の対策進捗率79% (2019.3時点)

耐震補強対策に対しても、多くの落橋被害を発生させた平成7年(1995年)兵庫県南部地震が大きなインパクトを与えた<sup>8)</sup>。被害分析によると、昭和55年(1980年)の道路橋示方書を境にして被害率やその程度が大きく相違しており、この基準より古い橋梁において倒壊等の被害を受けた橋梁が集中していた。橋脚の被害が大きく相違した理由としては、「軸方向鉄筋の段落し位置の設計法」の相違によることが明らかにされ、こうした適用基準や構造条件等に対する被害分析に基づき、鉄筋コンクリート橋脚、鋼製橋脚、基礎、支承部、落橋防止構造等に対する耐震対策が進められた。

鉄筋コンクリート橋脚に対する補強工法としては、「鋼板・鉄筋コンクリート・繊維材巻立て工法」が採用されている。既設構造部材の外周を鋼板や鉄筋コンクリート、繊維材等によって巻立て、既設構造と一体化することによって、部材の曲げ耐力、せん断耐力、じん性、あるいはこれらを組み合わせた耐震性能の向上を図る最も一般的な工法である。巻立て部をフーチングにアンカー定着することにより部材の曲げ耐力の向上を図ることも可能であり、基礎の安定性に影響しない範囲で定着するアンカー量を適度に調整することによって、じん性のみならず、耐力とじん性のバランスに配慮した補強が可能になる。

平成16年(2004年)新潟県中越地震等による被害を踏まえ、平成17～19(2005～2007)年度には、緊急輸送道路機能を確保するために3箇年で重点的に耐震補強を促進する「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」が実施された<sup>3)</sup>。落橋等致命的な被害に結びつく可能性のある部材のぜい性的な被害を防止することを目的として、鉄筋コンクリート橋脚、鋼製橋

脚、支承部や落橋防止構造等に対する対策が中心として実施された。さらに、本州四国連絡橋をはじめとする長大橋、アーチ橋や斜張橋などの特殊な構造を有する橋も対象とし、詳細な解析を行うことによって、性能評価、必要な耐震対策の検討が実施された。

耐震補強工法には、前述のような各部材の強度やじん性を向上させる方法の他に、水中部などの部材補強が困難な橋に対

して、部材補強なしに橋全体としての耐震性を向上させる工法も適用された。「①免震工法(既設支承を免震支承に交換して免震構造とする工法)」、「②慣性力分散工法(地震時に負担する慣性力を他の下部構造に分散させることにより、橋全体として地震力に対して抵抗する工法)」、「③変位拘束工法(地震時に上部構造に生じる変位を拘束する工法)」などが一例である<sup>11)</sup>。

こうした耐震補強が実施された橋梁がその後の地震を経験するようになってきたが、確実に耐震補強が耐震性能の向上に寄与していることが東日本大震災等の実際の地震でも確認、検証されつつある。

平成31年3月現在、緊急輸送道路上の橋梁の耐震補強の進捗率は全体で79%とされている。今後も耐震補強の加速化が継続されており、2021年度までに地震発生確率が26%以上の地域で、また、2026年度までに全国で耐震補強の完了を目指すこととされている<sup>12)</sup>。

#### 4. 今後の耐震技術

現在、我が国では、南海トラフ巨大地震、首都直下地震、千島海溝地震等が高い確率で近い将来発生する可能性のあることが指摘されている。東京圏、名古屋圏、大阪圏といった高度に人口が集中し都市機能が集積した地域、情報化が発達し、交通・電力等ライフラインに極度に依存した都市構造、一方で高齢化・人口減少が進む地方が併存する現代社会の中で、可能な限りの被害の最小化と災害発生時の迅速な事後対応への備えが求められている<sup>13)、14)</sup>。

上記のように、耐震技術は、地震被害の経験から得られた教訓を1つ1つ克服しながら、より耐震性に優れた橋梁構造やその設計法が開発され、技術基準等を通じて社会実装されてきた。地震が発生した際には、引き続き、なぜ被害が発生したのか、あるいは、発生しなかったのかについて、地震動強度や構造特性面からの検証とその蓄積が重要と考える。さらに、津波、斜面崩壊、断層変位などの超過外力に対する具体的な影響評価法や構造設計法の開発、設計地震動の地域係数等全国の地震リスク評価の合理化・精緻化、様々な災害要因に対応可能な「オールハザードアプローチ設計」、地震時の構造物の望ましい挙動を確実に実現するための「損傷制御の信頼性向上」、そして今後の構造コンセプトとして、地震被害を受けない・受けにくい構造「ダメージフリー構造」、地震被害を自己検知・自己診断する構造「インテリジェント構造」、地震被害を受けても早期に復旧可能な構造「ABC構造」の開発等に継続的に取り組んでいく必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) 石橋克彦：大地動乱の時代－地震学者は警告する、岩波新書、1984.
- 2) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990、1996、2002、2012.
- 3) (公社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編)、2006.
- 4) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編に関する参考資料、2015.
- 5) 川島一彦：耐震工学、鹿島出版会、2019.
- 6) 運上茂樹：激甚化する地震災害と社会インフラの機能維持、第3回切迫する大規模地震と耐震技術開発、橋梁と基礎、Vol.52、No.11、pp.42-45、2018.
- 7) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1996.
- 8) (社)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国総研資料第646号、土研資料第4202号、2011.
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、土研資料第4359号、2017.
- 11) (財)海洋架橋橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集、2005.
- 12) 国土交通省：道路における震災対策、2019. <http://www.mlit.go.jp/road/bosai/measures/index1.html>. (参照2019-08-31)
- 13) 吉田敏春、斎藤清志、運上茂樹：道路における地震対策と技術開発、土木学会誌、Vol.100、No.7、pp.20-23、2015.
- 14) 運上茂樹：国土強靱化のための耐震技術開発：インフラ施設へのレジリエンス設計の視点(最新技術戦略)、土木施工、56(1)、pp.22-25、2015.



運上 茂樹(うんじょう しげき)

1983年北海道大学卒、1985年同大学院修了、建設省(現国土交通省)土木研究所耐震研究室研究員、同室長、国立研究開発法人土木研究所耐震総括研究監を経て現職、博士(工学)、技術士(建設部門)、専門分野：橋梁の耐震設計

# 平成のHICを振り返る

(High-rise, Isolation, Control)

鳥井 信吾

●日建設計構造グループ プリンシパル

## 1. はじめに

昭和64年1月7日(土)、その年初めての休日出勤に早朝から出かけた。とある超高層建物の骨組みスケッチを書きながら聞いていたラジオから、突然にまた神妙に「天皇陛下が崩御されました」という音声聞こえてきたことを鮮明に覚えている。入社約4年後で、それなりに油がのってきた頃であった。土曜の朝の事務所には誰もおらず、話し相手もないので少し戸惑いつつも、翌週へ向けての資料作りの手を止めることはなかった。もちろん一人の日本人として昭和天皇の死を悼んだが、ここで記したいのは...この平成の始まりの頃に一人の若輩構造設計者(筆者)が社会資本(主として建物)を世に創り出すにあたって何を考えていたか、そして当該構造設計者が約30年という年月を経て「平成の超高層、制振、免震を地震工学の側面から振り返る」というお題を頂き、同様な視点で<今>の自分は何を考えているか...である。最近、経営的な話をする事も多いなかで、純粋な技術者として、この機に建物と自らを振り返ることは、実は非常に感慨深く、本稿で書き残したことの一端がこれからの令和という時代に少しでも役立ってくれればと思うと、気持ちが高ぶってくるのであった。この高揚感は赤本と黄本<sup>1),2)</sup>を読んだ時に感じたものと同じで、執筆開始の大きなきっかけとなっている。

名付けて平成のHIC物語の始まりである。HICとは、High-rise・Isolation・Controlの頭文字をとって、超高層と免制振建物の略称とさせて頂いた。散文ゆえに、時間の無い方は「おわりに」の節に飛んで頂くのもありである。中身は、これまで筆者がシンポジウム<sup>3),4)</sup>等で語ってきたことの集大成として、また、おりしも来年還暦を迎える身として、HICの過去と未来に思いを馳せ、自らやるべき業も含めて述べたものである。なお、実建物の引用が困難となってしまった故に、各所の挿絵にて前向きに想像を膨らませて頂ければ幸いである。

## 2. 昭和終盤を振り返る(デザイン意識の萌芽)

〇〇副都心というカッコよい言葉があって、中高含めた学生時代に自らの将来を思い描きながらその街をさまよった記憶がある。どうして、あるいはどのような方法で、こんな高い建物が建てられるのだろうかとい

う極々単純な思いで頭の中が一杯だった。

この時代は、<整形>とか<対象>がキーワード、ダブルコア配置でそのコアを耐震要素としているなどの流行もあった。単純な矩形平面以外にも三角形や丸形平面、流線形状に上層に行くにしたがって適度に細くなる立面形状や内部に吹抜けを有するタイプがあり、自分だったらこんなスタイルを実現させたいというようなデザイン意識が芽生えた頃といえる(図1)。

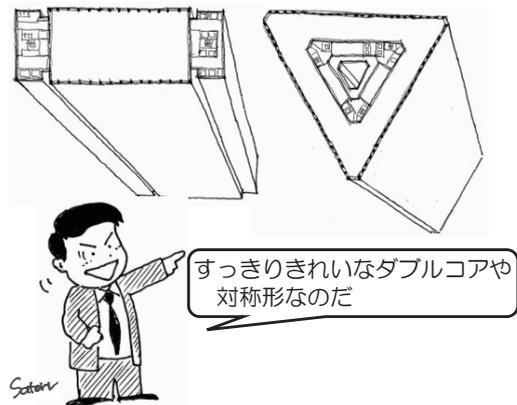


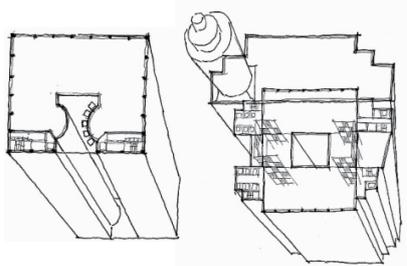
図1 昭和終盤

## 3. 平成前期(H1～15年)

### 3.1. HICの目覚ましい発展

冒頭に書いた入社数年目～10年選手になろうとしている頃である。超高層ビルの形に変化が見られてきて、曲線状の外見やコの字型平面が現れ、セットバックという言葉では表しきれない立面的傾きをもつ建物が生まれ、吹抜の形状も特殊なものが増えた。建物によってはドラマのロケで何度も使われ、テレビに出た時は「あれだ!」と、自分の家族がテレビに映ったのと同じ感覚に陥った。〇〇制振壁といったものが何種類か出始め、効き具合を考慮して軸組上で千鳥配置をしたりする工夫も行った(図2)。

当時(自分が設計者として少しモノがわかってきた頃?、いや今考えると実はまだまだ未熟だった頃)の、お客様への構造設計主旨説明を良く思い出す。恥ずかしげもなく記すが、「ガタガタ揺れる地震に対して、超高層建物はヤナギの木のようにしなって地震の揺れから身を守る」といった内容で、これは物理現象を説



特徴ある形状の超高層ビル出現!!  
この吹抜はTVで見たことあるね、  
千鳥の制振壁は現場で苦労したけど  
仕上げで隠れてしまって残念...



図2 平成前期

明するイメージとしてとても腑に落ちたし、一般的な表現として分かりやすかったのも事実である。

解析にかかわるソフトやハードの進歩も著しく、立体効果を詳細に確認できる環境が整ってきて、計算上でも明快な答えを得て、相応の根拠を作成できたが、それは検討用地震動が正しいことが前提である。というわけで短周期地震の観測波を対象として、HICの耐震性は高いと言われていた。(やや)長周期地震という言葉も机上の勉強はしていたが、実感をもって受け入れていなかった。低層建物は振動解析すると非常に大きな応答がでて現実的な設計ができないと悩んだり、今や耳を疑うが「関西には大地震は来ないんだよ、だから...」というようなことがまことしやかに話されていたこともある。

### 3.2. H7年兵庫県南部地震を経て

そんな時に起こったのが兵庫県南部地震で、近代日本の都市や建物にとっての試練であった。外国の震災を例に日本ではこのようなことはないと考えていたにもかかわらず甚大な被害が生じ、とある建築構造の著名な教授が、テレビで日本の耐震基準についての反省の弁を率直に述べていたのがとても印象深かった。

ただし、1981年施行の新耐震設計法採用以前の建物に被害が多かった一方で、同じ場所にあったHICは凜として見えた。特に数少ない免震構造においてもその効果がしっかりと分かり、まさに免震ブームが訪れたのである。しかし残念ながら、喉元過ぎればというが如く、その後数年でブームは去っている。しかも地震動に対する想定は、まだ不十分であったともいえよう。

### 3.3. 設計用入力地震動(人工地震動)の採用

そのような中で、HIC検討に用いた新たな地震動の応答スペクトルの一例を図3に示す<sup>5)</sup>。今の告示スペクトルの25%増のもので、評定委員会等では一定の評価

を得たものの、お客様に使用許可を得るには難しい場面があった。理由はご想像の通り躯体コストが上昇するからであり、経済原理と減災防災の相関関係を身に染みて感じた。それでも、本検討により先般公開された南海トラフ地震対策のスクリーニングで問題ないとされた建物も多く、名誉挽回もでき、これをHICの検討に使い始めた先輩諸氏を心から尊敬している。

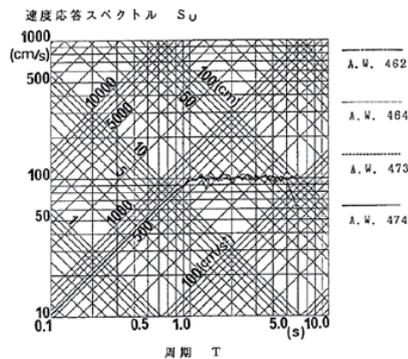
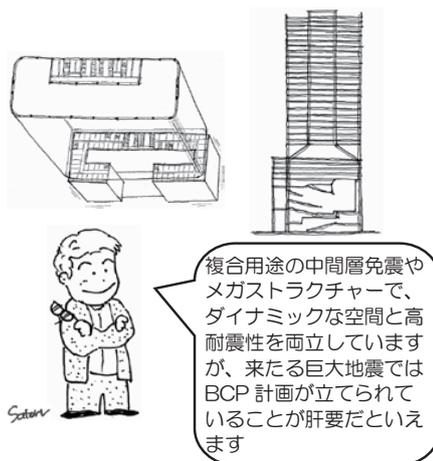


図3 人工地震動の応答スペクトル

## 4. 平成後期 (H16 ~ 31年)

### 4.1. 複合建築とHIC

都市の建物に、さらに特殊な形態やグレードを志向する時代への変革期を迎えた。再開発において、同一敷地や同一基礎躯体の上に制振超高層や中高層、免震建物が立ち並ぶといった様相で、相互作用の検討に真摯に取り組んだ。加えて容積率緩和の特例で、ホール等も含む複数用途が縦に積層されるような形式の複合建築が必要となったが、その用途切替階を免震層にするという案が型にはまった建物が出現した(図4)。



複合用途の中間層免震やメガストラクチャーで、ダイナミックな空間と高耐震性を両立していますが、来たる巨大地震ではBCP計画が立てられていることが肝要だと思います

図4 平成後期

これらの建物のおかげで元にあった旧耐震の建物や古い民家等が新しく生まれ変わり、それなりに安全で素敵な街になった。少し皮肉っぽく「それなりに」と

書いているのは、ここでも来たる地震が想定通りの地震であったらという前提がつくからである。設計技術や地震工学が進化した時間は、地球誕生からの自然史の中では、一瞬のできごとでなかなか想定通りにいかないとよく言われるのはご存知の通りである。

## 4.2. 天災と人災

天の与えたる次の試練は東北地方太平洋沖地震(通称3.11)である。筆者も設計や現場で多少の経験を積んだ立場になっており、社内の地震対策本部(本部長は社長)で実際の現場対応にあたった。その対応に明け暮れた後に、少し落ち着いてから思ったことは...

- (1) 損傷した建物にもトリアージが必要である。応急危険度判定とは少し異なるイメージで、即日の調査や復旧を求められる緊張感ある場面かつ全建物が個々の企業や人の大事な資産という前提の中で、今何を優先すべきかを対策本部内で共有しつつ、会社と構造グループの理念に照らし合わせて自らの決断と責任のもとに動いた記憶がある。
- (2) 建物に対して、性能設計の志向を強める。ヤナギのようにしなっていて地震に耐えても大きな揺れは怖いと認識し、これを予め説明すると共に、倒れないだけでなく極力揺れを減らす設計も必要である。
- (3) 都市の過密化回避を本気で行う。想定外巨大地震が大都市圏の直近で起きた場合の一番の対策である。→この(2)(3)の話は次節の未来話として詳述する。

次に人災とは耐震偽装、材料性能偽装問題等々の社会的事件を指すことはいままでもない。信じられない、悲しい...その他、各種の背景を語った書物は沢山あり、特に構造設計者はこれを自分事として考えるべしといわれている。それは十二分に認識した上で、外因である法律をどうすべきかの私見も次節で述べる。

ともあれ平成後期には、大災害や事件の経験とそれに伴う法律(技術的助言を含む)改正により、特別な検討がHICに求められるようになった。初期のHICのなかには補強改修される建物や、部材交換を余儀なくされた免震建物が生じた。平成前期の自分には完全に想定外の話が多く、本来は技術の発展が明るい未来に繋がるのであるが、そのことに疑問をもってしまうような時代になってしまったともいえそうである。

## 4.3. モノづくりの気持ちを伝えたい

時代が変わっても早々変わらないものがある。それはモノづくりの気持ちであり、これを伝承するための尊いお客様の言葉をあげてみたい。平時においては「(新しいだけでなく)このデザインがあってこそ新鋭のテナントさんが集まってくれたと思う。」といった話があったり、3.11後には「(値段は)高いと思ったが、

あなたの提案を採用してよかった」と言われ、思わず涙した記憶がある。

どの時代でも自ら設計した建物が社会の役に立ちつつ世に生まれていると実感することによるモチベーションアップは測り知れない。これが分かると建築工学に携わることの人気は衰えないはずと信じる。働き方改革といった言葉のない時代であり、少しやんちゃもしたが、これからはITやAIを駆使して、時間は1/3でも同じ気持ちが変わるようになる時代が来ると信じている。今はその過渡期にいるだけだ。

## 5. 令和を迎えて

### 5.1. 性能設計本格導入と建築基準体系整理

既出4.2(2)を受けての話である。性能設計を社会に真に理解して頂くには設計者に時間と費用が必要である、また高グレード建物を建設するお客様にも当然ながら時間と費用がかかる。「性能設計を説明する時間などなく、法律を自他共に理解するだけで手一杯!」という超真面目な構造設計者の叫びも実際に聞いたことがあり辛かった。それでも、できる設計者とその理解者の数を早く増やしたい。話が飛躍して恐縮ながら、そのための理想は、現法律の大部分を技術的助言とし、言葉上で法律違反と言われたいために使う多くの時間と費用を性能設計の理解と周知にかけることである。

なにより今の基準法や施行令細則に見られる、既往の条項との整合性に配慮した妙な表現で、書いた人しかわからないような内容は見直したい。補強は改修する機会に実施すればよい運用と共に前向きでわかりやすい新法が公布されてほしい。とにかく...法律改正は無理と言われても、自ら声をあげてまずは性能設計を周知するという一人称主体で対応する覚悟である。

### 5.2. 首都機能分散

既出4.2(3)を受けての話で、既に色々なご意見があるが、言い方を間違えると経済界から総スカンを食らってしまう。その中で本格的機能分散を誰がいつやるか...ここから少し独善的な話になるが、私案は国の大臣クラスが代々引き継いで100~200年単位で実行するものだと思っている。地球の歴史から考えると、それでも間に合う可能性が十分あると思う。

具体的には図5→6→7のように都市が変化していくことを想像している。今の再開発は、元が旧民家であろうと初期の超高層建物であろうと現地建替えを主としているが、この提案では解体後の土地は緑にして、新築は首都圏近郊の土地を国や自治体が斡旋するのである。経済原理からはマイナス成長、補助費用も多大であるが、震災復興予算をたてるつもりになれば、

意外に簡単であろう。また、これからの交通網やIT化（テレワーク）の発展を考えると現実味もあるといえる。しかし、こればかりは一介の構造設計者ではできない話で、三人称主体の提言で恐縮であるが、大災害における建物や都市の被害体験や各種思想の変遷の流れからは、今すぐにも国や自治体が決断すべき時だと思っている。

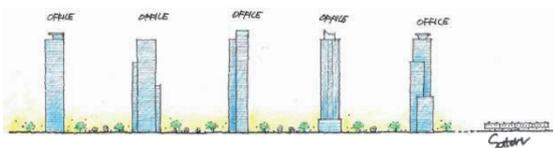


図5 今までの都市



図6 理想の都市



図7 職住接近の都市

この機能分散と、上項5.1で述べた法律体系改革が合わさってテレビのニュースになる夢をよくみる。【建替による首都機能分散決定！】といった見出しが翌日の新聞に載っているのではとほっと目が覚めるのである。「(都心以外の)地方は儲からない(から仕事にならない)」...これは近い身近の都市計画・経済学識者から聞いた言葉である。皆様の給与水準が上がることは良いことだが、この原理のみで動いてよいかと真剣に考えるべきである。既述の性能設計と法改正がすぐにはできなくとも、現行の耐震性能を有する建物でよいから徐々に機能分散=建物分散配置をすることが防災減災に一番役立つ気がする。逆に、いくら良い性能を持つ建物を量産しても今の密集を避ける処方がないと真の強い国や都市づくりにならないと考える。大変僥倖であるが、「強靱な…」を考えようとしている国交省白書<sup>6)</sup>や都庁発行の都民向け資料<sup>7),8)</sup>にも、この意味での機能分散を述べているものはないようだ。この機に、地震工学と社会工学を結び付けて日本における次世代HICのあり方の再検討をしていかないといけないと心から思う。

## 6. おわりに

平成が終わって令和を生きる今の中堅若手の技術者、そして実は政治家の方々等に是非伝えたいことを記した。最後に改めてその概要をまとめておく。

☆平成時代はHICの絶頂期である。整形なラーメンやチューブ構造が主体であった超高層ビルに、特殊な形態が多く現れ制振構造が珍しくなくなり、加えて制振かつ免震という大規模複合建築が出現した。それらHICは相応の社会的役割を果たしている。

☆一方で、HICとその設計者は兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震、さらには各種の偽装事件を受けて、色々な経験をした。長周期地震動検討により、第一世代の超高層は補強も経験した。それでも首都圏HICは本当の意味の大地震の洗礼を受けていないことを忘れてはならない。

☆令和におけるHICとその設計者は、真の性能設計を普及させつつ、都市機能分散や法律改定に思いを馳せていきたい。

JAEEの大先生を通じて大臣にも親書を渡してみたいといった野望もある。とにかく、頭がしっかりしているうちは明るい未来を諦めないでいたいと思う。

以上、平成時代の筆者を叱咤激励してくださった方々を思い出しながら書いており、末筆で恐縮ながらこの場を借りて心より感謝致します。本当に有難うございました、そして令和もよろしくお祈りします。

## 参考文献

- 1) 福和伸夫：次の震災について本当のことを話してみよう。、時事通信社、2017。
- 2) 福和伸夫：必ずくる震災で日本を終わらせないために。、時事通信社、2019。
- 3) 日本建築学会構造委員会 振動運営委員会：シンポジウム 阪神・淡路大震災を振り返り、来る大地震に備える - 建築振動研究に課せられたもの -、2011。
- 4) 日本建築学会構造委員会 振動運営委員会：シンポジウム 東日本大震災から5年 - 建築振動工学の到達点と残された課題 -、2016。
- 5) 北村春幸、山根尚志、村上勝英、寺本隆幸：観測地震動の位相特性を用いた設計用人工地震動について：その1、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B、構造I、pp. 287-288、1990.9
- 6) 国土交通省：国土交通白書 令和元年版、2019。
- 7) 東京都政策企画局計画部計画課：東京都長期ビジョン(概要版)、2015。
- 8) 東京都都市整備局都市づくり政策部広域調整課：東京の都市づくりの歩み、2019。



鳥井 信吾 (とりい しんご)

1985年北海道大学大学院修了、同年日建設計構造部配属、現在同社執行役員 エンジニアリング部門構造設計グループプリンシパル

# 緊急地震速報の実用化の経緯

横田 崇

●愛知工業大学地域防災研究センター センター長・教授

## 1. はじめに

気象庁は、2007年12月に気象業務法が改正・施行されたことを受け、地震動の予報・警報として緊急地震速報を発表・提供している。これに先立ち、2006年8月から特定利用者への情報提供を行い、利用者の混乱防止と利用の推進について検討を進め、2007年10月からは一般への情報提供を開始し、冒頭で述べた気象業務法の改正を迎えた。

緊急地震速報は、震源域近傍の観測点の地震波から、直ちに、震源、規模、各地の震度等を推定し、被害をもたらす主要動が始まる前に速報し、被害の大幅な軽減のための対策に資することを目的とした情報である。

このようなアイデアは、有線通信が開発された19世紀には、地震波と電気信号の速度差を利用した活用事例として語られ、わが国でも、1960年代には、海底地震計で揺れを検知し都市に地震波が到達する前に大地震の発生情報を知らせる「10秒前大地震警報システム」<sup>1)</sup>として示されていた。しかし、地震波の観測、処理、通信等の技術開発等を要したため、実用的なシステムの開発に至るのは1990年代を待つこととなる。

当時の特筆すべきシステムとして、メキシコの地震警報システム<sup>2)</sup>がある。これは、太平洋岸で発生する巨大地震から約400km離れたメキシコシティを守るためのもので、太平洋岸に地震観測点を列状に整備し、複数の地震観測点で地震波を検出するとメキシコシティ等に揺れを予告するシステムで、「10秒前大地震警報システム」を広域版として実現したものである。

一方、地震の初期微動(P波)と主要動(S波)の速度差を利用したシステムとして、1970年代には、P波を検知しS波が始まる前に情報を発する地震警報システムが開発され、1980年代には、エレベータや列車の制御等に実装されるようになり、その後の地震被害を契機に一層の研究開発が進んだ。特に、鉄道総合技術研究所が開発された「ユレダス」<sup>3)</sup>は、単独の地震観測点の地震波を処理して、地震のマグニチュード、震源方向と距離を推定し、当該地点の揺れを予測する画期的なシステムであった。

気象庁でも、期を同じくして、地震波の自動処理、緊急地震速報の開発等を行ってきた。ここでは、気象庁における緊急地震速報の開発の動機や経緯等につい

て、著者の前職での経験をもとに、緊急地震速報の実用化の経緯等について、観測システムの整備及び情報の高度化への取り組みの観点から紹介する。

## 2. 緊急地震速報開発への第一歩：EPOSの整備

気象庁における緊急地震速報等の開発の第一歩は、初代の「地震活動等総合監視システム (EPOS : Earthquake Phenomena Observation System)」に始まる。

初代EPOSは、東海地域の地震活動・地殻変動のデータ処理を目的として準備が進められていたが、1983年日本海中部地震を契機に、東海地域の監視に加え、津波警報の発表を従来の15分から7分に迅速化するために急遽整備することとなった。整備は、1985年度に始まり、1987年3月から試用し、同年8月から運用に供された<sup>4)</sup>。



写真1 初代EPOSの大型監視盤・操作卓の外観(気象庁)

津波警報の迅速な発表のため初代EPOSは、地震の検知とP波、S波、最大波の時刻・振幅・周期、地震波の到来方向、継続時間等の検出処理等を自動化し<sup>5)</sup>、気象庁本庁の地震火山現業室にいる職員に、地震発生と津波の有無を音と光で知らせ、震源・マグニチュード及び発表する津波警報を、大型監視盤、操作卓、及びディスプレイに表示した。

大型監視盤には、地震が検知された観測点のランプが時間順に点滅し、大きな地震が発生すると、点滅する観測点が震央から広がっていく様子が即座に認識できるようになっていた。また、処理結果の表示画面には、P波マグニチュードも併せて表示し、そして、震源とマグニチュードの計算結果に誤りがあるか否かが視覚的に評価できる表示としていた(図1参照)。

初代EPOSで処理した観測データは、気象庁の観測点(地震計32点、潮位計17点、歪計36点、火山地震計

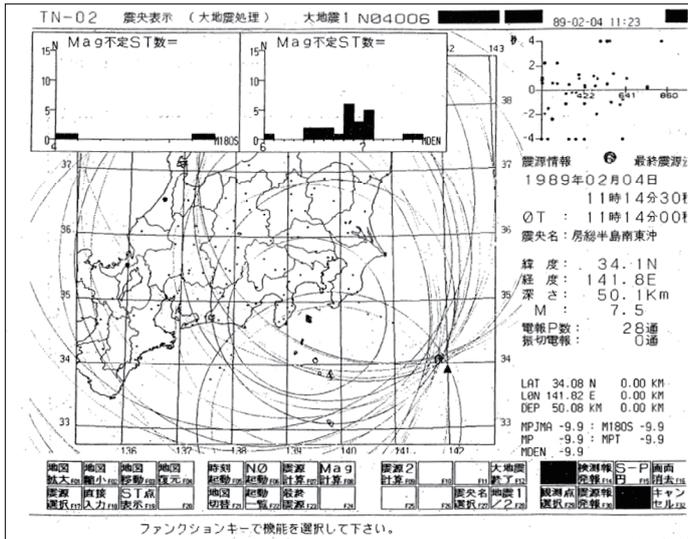


図1 初代EPOSの震源計算結果の表示画面(気象庁)

16点)以外に、関係機関の協力を得て、国土地理院(傾斜計等6点)、工業技術院地質調査所(傾斜計等11点)、東京大学地震研究所(地震計17点、火山地震計11点)、名古屋大学(地震計8点)、防災科学技術研究所(地震計11点)の観測データを集約し、当時としては多岐にわたる大量のデータを処理するシステムであった。

これら初代EPOSの観測データの殆どは、東海地域監視のためのもので、当時、気象官署に設置されていた地震計は、各気象官署の職員が記象紙からP波の到達時刻、S波の到達時刻、最大振幅を読み取り、気象庁本庁及び管区气象台に電文で連絡してくる仕組みで、当時、気象庁本庁には地震波形はテレメータされていなかった。津波予報のために地震波形が気象庁本庁にテレメータされていた地震観測点の分布図を図2に示す。津波予報等の緊急処理を行う観測網としては、観測点の密度も低く、脆弱なものであった。



図2 初代EPOSの津波予報のための地震観測点図外に、八丈島と父島の2観測点がある(気象庁)

初代EPOSには、当時の最新の処理手法が導入されており、自動処理の手法を含め、その後の緊急地震速

報の処理にも用いられているものも少なくない。

例えば、緊急地震速報でテリトリ法と呼ばれる処理は、震源計算の初期値を決定する手法として、初代EPOSに導入していた。これは、ボロノイ分割と呼ばれる領域分割の処理を利用したもので、二つの観測点の地震の到着時刻差から、他方よりも早い観測点が多く存在する領域を求め、その領域の観測点の直下10kmを第一次震源とする手法である。但し、その区間が開区間の場合には、その区間の観測点直下10kmにおいた場合と、観測点から开区間の方向100kmの直下10kmにおいた場合の二つを初期値として、最終震源を評価した。

地震が多発した際、同一場所での地震の続発には、最大マグニチュードをモニターすることで済むが、異なる場所で同時に発生した場合を想定し、予め領域を幾つかに分割し、それぞれの領域ごとに処理した地震が同一か否かを評価する手法を導入している。

初代EPOSは、地震から約7分で津波警報を発表できるよう設計したシステムである。このため、より早く地震のマグニチュードが評価できるよう、最大振幅を待たずP波のみによりマグニチュードを評価できる経験式も導入した。この方式は、緊急地震速報で活用される方式と考え方は同じものである。

また、当時、東海沖と房総沖で巨大地震の発生が想定されていたことから、図2に示すとおり、それぞれの領域には、海底地震計が設置されていた。これは、正に「10秒前大地震警報システム」を具現化するために、先輩たちが整備した地震観測網とも言える。東海沖、或は房総沖で地震が発生した際には、気象庁本庁が大きく揺れる前に地震発生を知ることができる。当然、現業職員においても、いち早く津波警報等の情報を発表する心構えであったと聞いていた。

初代EPOSは、現業室にいる職員に、地震発生と震源・マグニチュードをより早く知らせ、迅速に津波警報等が発表できるシステムとして設計している。これは、現業室の中で緊急地震速報を試行していることに相当する。初代EPOSの整備を、緊急地震速報開発の第一歩と呼ぶ所以であり、ここでの成果を社会に発信できる情報とすることは、システム整備に係わった者の夢でもあった。

### 3. 防災情報としての地震情報のあり方の検討の始まり

初代EPOSでは、中枢における処理システムの整備により一定の業務の改善を図ったが、更なる業務の改善には、観測網の強化が必要であった。

1991年4月に地震火山部の技術担当調査官に命ぜられ、観測網の高密度化とテレメータ化を立案した。また、将来の夢のような社会を実現するための計画を生活関連枠の予算として検討するよう企画・予算部局から指示があり、日本列島を海底ケーブルで囲む総額2千億円の観測網を計画した。しかし、いずれの計画も整備への財政当局の理解を得るのは難しく、逆に、津波予報・警報以外の業務は観測成果を発表しているだけの業務であり、これら予報業務でない業務は廃止すべきではないかと企画・予算部局から指摘された。

このため、地震火山部が発表している津波警報以外の情報についても、防災情報として不可欠なものであり、将来の地震動の予測に繋がる重要な情報であることを示すことが必要となった。緊急地震速報への第二の扉は、ここから始まる。

当時、プロジェクトの実施にあたり民間活力の導入が謳われていたことから、まずは、民間企業等の理解と協力を得ることが重要であり、民間企業の協力を得て検討することを企画部局から勧められた。このため、初代EPOSの整備に参加していた三菱総合研究所の協力を得て、民間企業から資金を調達し、検討を開始した。

検討開始当初は、参加した企業の方から、観測網の整備についても資金を提供しても良いとの感触が得られていたが、検討を進めるうちに経済状況が変化してきたことから、「観測網の整備は、国として整備すべし」と民間企業の検討参加者から異論が唱えられるようになった。一方、震源や震度等の情報は、防災対策のトリガーとして重要な情報であり、更に、主要動による揺れが始まる前の情報発表は、それが実現すればエレベータの停止等、一層有効な情報となるとの意見を得た。

これらを踏まえ、①震度等の観測成果の防災情報への活用、②主要動到達前の即時的な地震情報の実現、そして③必要となる観測網の整備の3つの観点からの検討を進めることとした。②は、現在、緊急地震速報とよばれており、①の情報の予報と位置付けられる。

以下、以降の検討等について紹介する。

#### 4. 地震情報の防災対応への活用と観測網の整備

当時、全国に展開されていた気象庁の観測点は、職員のいる気象官署に設置し維持されていた。しかし、震源やマグニチュードの決定を自動化し、地震情報や津波警報を迅速に発表するには、地震時等にも機能が維持できるものである必要があり、全国に等間隔で高密度に展開され、且つ複数ルートでのデータ収集機能

を持つ観測網が必要であった。また、巨大な地震が発生する海域への地震観測網の整備も強く望まれていた。

このような状況のなか、1993年7月、北海道南西沖地震により、地震発生から約3分で高さ20mを超える津波が奥尻島を襲い、強い地震動による被害は広い範囲に及び、気象庁の地震観測網にも重大な障害が発生した。このため、同年の補正予算により、全国150カ所に、津波地震観測装置が整備された(図3参照)。

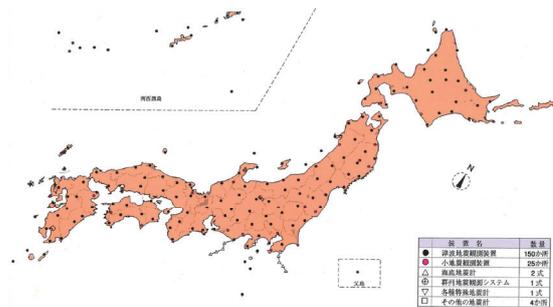


図3 津波地震観測施設整備による地震観測点(気象庁)

津波地震観測施設には、高感度地震計、強震計、震度計が整備され、約3分で津波警報が発表できるようにするとともに、地震発生から約2分で震度を速報し、震度4以上の大きな揺れを観測した場合には、テレビやラジオ等の放送機関からも、海岸からの速やかな避難が呼びかけられることとなった。

これら準備を整えている最中、1995年1月の兵庫県南部地震により、死者・行方不明者6千人を超える大きな被害が発生した。この地震により、阪神地域や淡路島で震度7の揺れによる被害が発生していたが、その状況の把握に数日を要した。このため、都市部における被害の状況が即座に把握できるよう、消防庁と共同し、補正予算により震度計が整備された。

国の危機管理体制も強化され、気象庁が発表する震度により、関係省庁の局長クラスが緊急参集チームとして即座に参集する体制が構築された(図4参照)。

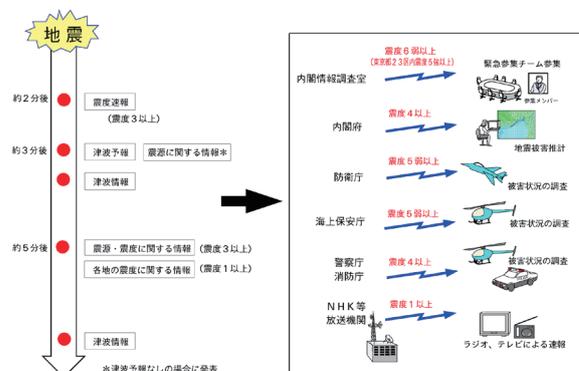


図4 気象庁から発表される情報と防災対応(気象庁)

また、この地震を契機に、地震調査研究推進本部が発足し、調査研究のため地震観測網が強化され、観測データは気象庁に集約され、処理することとなった。

### 5. 緊急地震速報の運用に向けての検討

1991年の民間資金による検討を踏まえ、1992年から日本財団、国土庁の助成による検討を重ね、地震津波観測施設の全国的な観測網の整備を背景に、1994年、気象審議会から、気象庁として緊急地震速報の実用化に向けた検討を進めることの答申を得る。その後、防災科学技術研究所及び鉄道総合技術研究所との共同研究により、技術的な開発を進めた。これらの経緯等については、他<sup>6)</sup>を参考頂くとし、ここでは、運用に向けた気象庁の動きを紹介する。

1999年度から、気象庁の業務として、緊急地震速報の実用化を見据えた技術的な検討会を開催した。そして、2002年度に多機能型の地震観測網の整備に着手できたことから、2003年3月には、実証実験による情報の提供開始と、実用化に向けた準備を進めるため、「ナウキャスト地震情報の実用化に関する検討委員会」が設置された。図5に、当時のナウキャスト地震情報の概念図を示す。

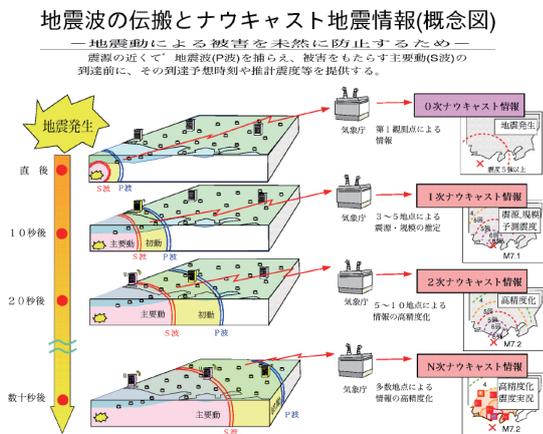


図5 ナウキャスト地震情報の概念図(気象庁)

この検討会が設置されるまでの間、気象庁では「ナウキャスト地震情報検討委員会」を開催し、予算事情に配慮しながら検討を重ねてきたが、進展が遅いと内閣府から指摘されることもあった。2003年3月以降、運用に向けての課題について、実証実験を行いながら、放送機関や民間等で利用に向けての具体的な検討についても、比較的速やかに進められたと思っている。

これらの検討の中で、気象業務法の改正も視野に検討すべきであるとの意見もあり、情報名称についても、カタカナ名の「ナウキャスト地震情報」から「緊急地震速報」に改められた。

### 6. おわりに

気象庁業務における観測網や処理システムの整備の観点から、緊急地震速報の実用化に向けた検討の経緯等について紹介した。

緊急地震速報は、非常に短い時間で処理・伝達・対処され、初めて有効な情報として機能する。AIなどの新しいテクノロジーや、急速に進化している通信・処理技術を駆使し、組織体制の垣根を超えた社会全体としての取り組みにより、今後、一層有効な緊急地震速報システムが構築されることを願ってやまないものである。

### 謝辞

緊急地震速報の実用化は、地震動の予報・警報の業務化の実現でもある。2007年12月に気象業務法が改正され、緊急地震速報は、地震動予報、地震動警報と位置付けられた。この改正においては、火山の噴火予報、噴火警報の実施についても気象業務法で定められた。個人的には、強く記憶に残る年である。

これらのことは、関係機関等の協力により観測データの共有化が図られてきたことによる。また、速報・伝達される内容等についても、放送機関や通信事業者の多大な協力により、具体化検討が行われ実装されてきた。整備に携わった者として、ここに改めて感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 伯野元彦、高橋博：10秒前大地震警報システム、自然、pp.74-79、1972。
- 2) Espinosa-Aranda, J. et al. : Mexico City seismic alert system, Seismological Research letters, 66, pp.42-53、1995。
- 3) 中村豊：地震総合防災システムの研究、土木学会論文集、681、pp.1-33、1996。
- 4) 横田崇、山本雅博：地震活動等総合監視システム、(その1 概要について)、験震時報第52号、pp.89-99、1989。
- 5) 横田崇：自動検出手法の研究、気象研究所技術報告第16号、pp.56-100、1985。
- 6) 東田進也：緊急地震速報の過去・現在・未来、地震調査研究推進本部20年の資料集、pp.114-120、2015。



横田 崇 (よこた たかし)

1982年東京大学大学院理学研究科博士課程修了、同年気象庁入庁、地震火山部のシステム整備、気象庁全体の防災企画調整等を担当し、東京管区気象台長を経て2015年から現職、理学博士。内閣府本部政策参与(非常勤)を兼務。

# リアルタイム津波予測の発展

越村 俊一

●東北大学災害科学国際研究所 教授

## 1. はじめに

米国National Geophysical Data Centerの津波イベントデータベース<sup>1)</sup>によると、平成時代(1989年から2019年の31年間)には世界で津波が362回発生し、死者は25万人以上を数える。1イベントあたりの平均にしても700人以上の死者数ということになる。当然、この統計には2004年のインド洋大津波、2011年の東北地方太平洋沖地震津波が卓越して寄与しているが、巨大津波災害とは、その発生は低頻度であるが、一度発生するとその被害は極めて甚大になるということがいえる。また、巨大津波は大洋を横断して波及するため、国際的な枠組みでの観測・対策が必要であることも特徴的である。1968年に発足したPacific Tsunami Warning Centerから、現在ではIndian Ocean(2005年)、Caribbean(2006年)、North East Atlantic & Mediterranean(2012年)と、世界で4つの津波警報システムが運用されている。我が国では、1952年に気象庁の津波警報業務が開始され、1999年にデータベースに基づく量的津波警報システムに移行した。その後、2011年東北地方太平洋沖地震津波の教訓から、地震の観測、警報発表の流れ、警報の情報文を改善するなど、現在に至っている。

1990年代以降の津波予測技術の発展は、観測・通信技術の発展、観測網の拡充、計算機性能の向上に支えられてきた。2016年以降の我が国の津波情報において、津波の観測値を発表する津波観測点は385地点もある。特に太平洋側には、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)や地震・津波観測監視システム(DONET)をはじめとして、世界でも類をみない高密度な津波観測網が整備されている。また、計算機性能の向上を背景に、広域の津波浸水予測も高速かつ低コストで実施できるようになってきた。すなわち、これまで不可能であった津波予測のリアルタイム化が可能になったのである。

本稿では、今後の発展が期待できる「リアルタイム津波予測技術」に焦点を絞り、その展望について論ずる。

## 2. 津波の数値シミュレーション

津波の伝播・陸上遡上の予測には、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)に応じて数値モデル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により離散化する方法が一般的である。長波理論の差分法に基づく津波数値計算の場合、座標系と支配方程式を、再現する津波の対象(遠地/近地、外洋伝播/遡上)に応じて適切に選択する必要がある。2011年東北地方太平洋沖地震津波の場合、日本近海の津波の再現には直角座標系による非線形長波理論式を、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。いずれにせよ、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。

## 3. リアルタイム津波浸水予測技術

津波浸水予測をリアルタイムで行うには、大別すると3つのアプローチがある。表1に主要な研究を分類して示す。

1つ目は、無数の津波発生シナリオに基づき計算しておいたデータベースから、沖合観測結果に近い結果を抽出する「データベース型」<sup>2), 3), 4)</sup>である。津波の観測・計算波形全体のマッチングで検索する方法と、観測波のピーク値から浸水シナリオを抽出する方法などがある。我が国太平洋側には、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)や地震・津波観測監視システム(DONET)など、非常に高密度な津波観測網が整備されており、データベース型の予測手法がポピュラーであるが、沖合観測の可否に依存すること、海岸施設、土地利用など陸上条件が変化した場合に膨大な浸水予測データベースの更新が必要になるなど、データベース保守上の課題がある。

2つめは、数値シミュレーションによる予測結果を稠密な観測網の津波波形と同化する「データ同化型」である<sup>5), 6)</sup>。波源モデル等の推定プロセスが不要であり、観測データから直接的に波動場を予測可能であるが、リアルタイムでの高度なデータ同化の実現や観測地点の粗密によって予測精度が変化する問題を克服する必要がある。

3つめが、初期条件からオーソドックスに解く「フォ

表1 リアルタイム津波予測技術の分類

アプローチ	手法	津波観測/地震観測データ	出典
DB	マルチインデックス法 (データベースサーチ)	S-net	Yamamoto et al. (2016), EPS
DB	ガウスプロセス回帰	DONET	Igarashi et al. (2016), MGR
DB	Near-TIF (データベースサーチ)	-	Gusman et al. (2014), JGR
DA	データ同化	S-net, DONET	Maeda et al. (2015), GRL Wang et al. (2018), EPS
FW	リアルタイム・フォワード計算	GEONET	Koshimura et al. (2017), OCEANS Musa et al. (2018), J.SC Ohta et al. (2018), JDR

DB：データベース型、DA：データ同化型、FW：フォワード型

ワード型]である。以下では、筆者らが開発した「フォワード型」の手法である「リアルタイム津波浸水被害予測システム」<sup>7), 8), 9), 10)</sup>について概説する。

フォワード計算による津波のリアルタイム予測の課題は3つある。

1点目は、津波の発生予測である。津波数値計算の初期条件には、断層破壊の具合的なメカニズムに関連した断層モデルや津波発生時の初期水位分布の情報が必要である。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。

筆者らのシステムでは、地震情報として、気象庁の緊急地震速報とGEONETの地殻変動観測情報を用いたリアルタイム断層モデル推定法RAPiD<sup>11)</sup>および国土地理院のREGARD<sup>12)</sup>による解を即時に取得し、津波波源モデルの計算過程を自動化した。

2点目は、津波の浸水予測である。一般的な非線形長波理論に基づく数値モデルでは、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) の普及が課題解決の追い風になっている。一方、ほとんどのスーパーコンピュータの運用体制では災害時の即時的な予測を行うための運用を行うことは難しい。筆者らは、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 (ディザスターモード：地震発生時に所要の計算リソースを即座にアサインする) により実現し、いつ地震が発生してもリアルタイム予測ができるよう、スパコンの計算リソースを確保している。図1のように、10分以内に津波の発生 (断層モデル) を予測、10mメッシュという高分解能の浸水計算を10分以内に完了するという目標を達成している<sup>7), 8), 10)</sup>。

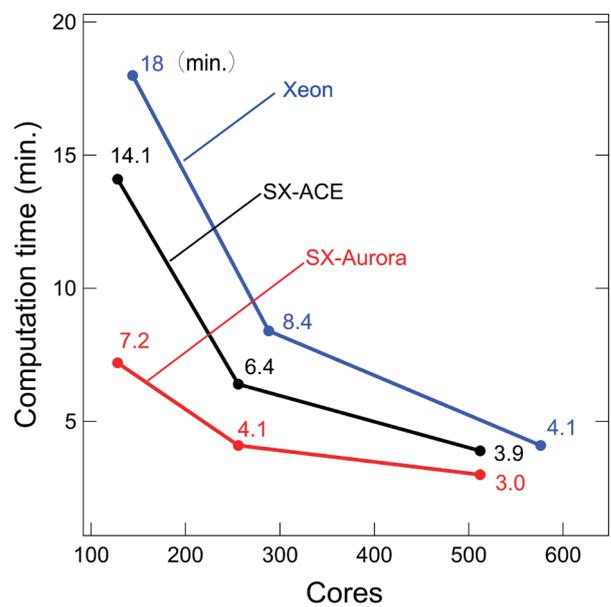


図1 各種プラットフォームにおける6時間分の浸水予測計算 (10mメッシュ) のパフォーマンス (高知市で実施)<sup>10)</sup>。

また、東北大学の津波解析プログラムは、SX-ACEの高いメモリバンド幅およびベクトル化効率の恩恵により、計算効率が非常に高いことも特徴である。さらに、ベクトル型スパコンの次世代機 (SX-Aurora) やクラウドシステムで利用される汎用機 (Intel Xeon) での最適化も進んでおり、複数のプラットフォームでリアルタイム予測が可能となっている<sup>10)</sup>。

3点目は、量的な被害の予測である。津波の浸水域は、湾の構造や建物の密度などによって左右される。量的な被害予測手法の整備と、結果の集計・地図化が必要となる。これには、津波被害関数<sup>13)</sup>を構築したことで、地域特性や建物種別に対応した被害の量的予測が可能になった (図2)。

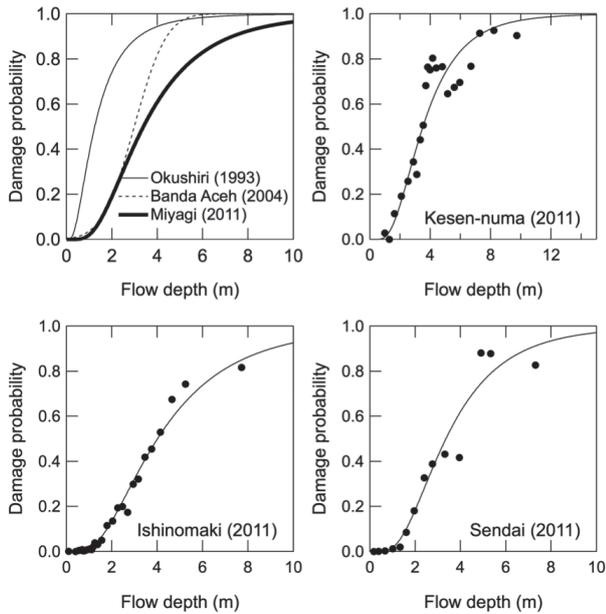


図2 2011年東北地方太平洋沖地震津波における建物被害データから得られた津波被害関数の例<sup>13)</sup>。

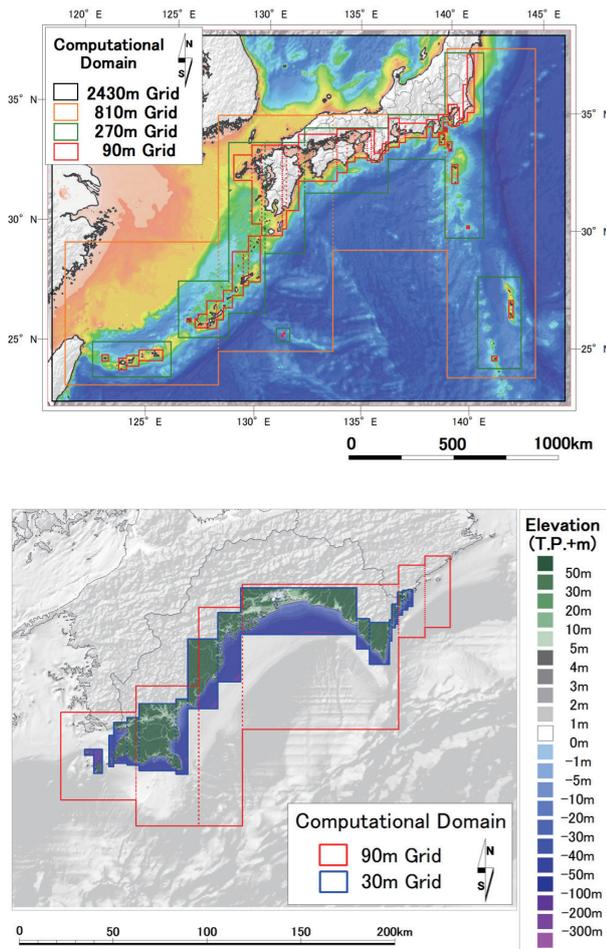


図3 リアルタイム津波浸水被害予測システムの対象領域。(上：領域構成(90mメッシュまで表示)、下：浸水予測を行う30mメッシュの構成(高知県の例)。

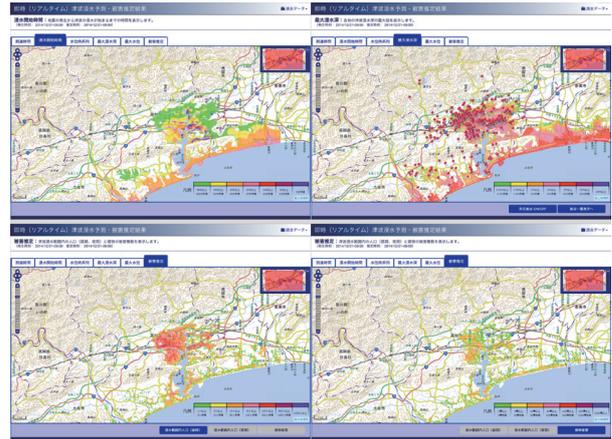


図4 リアルタイム津波浸水被害予測システムの出力結果例(左上：津波の浸水開始時間、右上：浸水深分布、左下：浸水域内人口分布、右下：建物被害(流失)棟数分布)

上記の成果を踏まえ、本システムにより、南海トラフ地震の発生を想定して、鹿児島県から静岡県までの6,000kmの海岸線を予測対象領域として(図3)、内閣府の津波浸水被害予測システムの構築・運用を2018年から開始した。計算領域が広大であることから、内閣府システムとしては津波被害の概略を迅速に把握することを最優先事項として、沿岸部30mメッシュの分解能で運用を行っている。なお、シミュレーションは東北大学と大阪大学のスーパーコンピュータを同時に利用して行うこととなっており、冗長性も確保されている。

図4に高知県で実証した津波浸水被害予測結果(南海トラフ想定地震Mw8.7の例)を示す。国勢調査が綿密に行われている日本では、人口分布および建物の位置と場所を正確に把握できるため、これらの情報を組み込むことで10m区画まで細分化した浸水予測結果から建物被害地図の作成が可能になった。建物の位置と場所を正確に把握し、津波被害関数から得られる流失率を求めることで、細分化した浸水予測結果から建物被害の量的な予測が可能になった。

#### 4. おわりに

東日本大震災の教訓を踏まえ、観測技術の発展、観測網の拡充、計算機性能の向上を背景に、津波の浸水をリアルタイムで予測できるようになった。本稿では、現在我が国で研究開発・社会実装が進められているリアルタイム津波予測手法のレビューを踏まえ、筆者らが開発したスーパーコンピュータによるフォワード型リアルタイム津波浸水被害予測システムについて概説した。

スーパーコンピュータの災害時利用を可能にし、地震情報自動取得と津波の発生予測（10分以内）、津波伝播・浸水・被害予測（10分以内）、結果の図化・配信を10mメッシュで行うという目標を達成し、現在では、さらに改良を進め、地震発生から3時間分の津波浸水予測を5分程度で行うことが可能になり、ベクトル型スーパーコンピュータで30分以内の全国津波浸水予測が可能となった。この成果により、2018年に内閣府津波浸水被害推計システムとして採用され、運用が開始されることとなった。今後は、日本全体を対象とした予測領域の拡大や、様々な主体・ユーザのニーズに対応した予測情報・活用技術の研究を進めていく必要がある。特にリアルタイムシミュレーションでは、陸上での津波の浸水状況の時間的変化も出力が可能であり、被害の予測だけでなく、「命を守る情報」としての高度化が期待できる。

気象庁も、津波予報業務において今後10年で取り組む予測技術として、津波第1波・最大波・減衰までの予測の高度化（津波の時間的推移、警報・注意報解除の見通し、天文潮の考慮など）を目指しており、リアルタイムシミュレーションの活用の検討を始めている。将来は、リアルタイム予測技術の活用により、さらにきめ細かな津波予報の実現が可能になるだろう。

## 謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターと大阪大学サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータSX-ACEを利用することで実現できた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益な指導と協力をいただいた。基礎研究に際しては、JSTのCREST（グラントナンバー JPMJCR1411）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) National Geophysical Data Center, <www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\_db.shtml> (参照2019-09-11)
- 2) Yamamoto et al., Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth, Planets and Space*, 68:128, 2016. doi: 10.1186/s40623-016-0500-7
- 3) Igarashi et al., Maximum tsunami height prediction using pressure gauge data by a Gaussian process at Owase in the Kii Peninsula, Japan, *Mar Geophys Res*, 37:361–370, 2016. doi:10.1007/s11001-016-9286-z
- 4) Gusman et al., A methodology for near-field tsunami inundation forecasting: Application to the 2011 Tohoku

- tsunami, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 8186–8206, 2014. doi:10.1002/2014JB010958
- 5) Maeda et al., Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: A data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 7923–7932, 2015. doi:10.1002/2015GL065588
- 6) Wang et al., Data assimilation with dispersive tsunami model: a test for the Nankai Trough, *Earth, Planets and Space*, 70:131., 2018. doi:10.1186/s40623-018-0905-6
- 7) Koshimura et al., Advances of tsunami inundation forecasting and its future perspectives, *IEEE Oceans*, 2017. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084753
- 8) Musa et al., Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *J Supercomput*, 74: 3093, 2018. doi:10.1007/s11227-018-2363-0
- 9) Ohta et al., Role of Real-Time GNSS in Near-Field Tsunami Forecasting, *Journal of Disaster Research Vol.13 No.3*, 2018. doi: 10.20965/jdr.2018.p0453
- 10) Musa et al., Performance Evaluation of Tsunami Inundation Simulation on SX-Aurora TSUBASA. In: Rodrigues J. et al. (eds) *Computational Science – ICCS 2019*. doi:10.1007/978-3-030-22741-8\_26
- 11) Ohta et al., 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), *J. Geophys. Res.*, 117, B02311, 2012. doi:10.1029/2011JB008750
- 12) Kawamoto et al., REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res.*, 2017. doi:10.1002/2016JB013485
- 13) 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



越村 俊一 (こしむら しゅんいち)

東北大学災害科学国際研究所・教授  
2000年東北大学大学院博士後期課程修了、博士(工学)。学術振興会特別研究員(米国NOAA)、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、リモートセンシング

# 平成の液状化被害と対策

若松 加寿江

●関東学院大学工学総合研究所 研究員

## 1. 平成の液状化被害

平成時代には、1993年（平成5年）釧路沖地震を皮切りに、大規模地震災害が次々と発生した。液状化もその例に漏れず、被害が発生した地震（以下、液状化地震と記す）は、表1に示す通りである。平成5年から30年の25年間に25回、毎年1回のペースでわが国のどこかで液状化被害が発生していたことになる。本稿では、平成の液状化について被害の観点から振り返り、被害軽減にむけた課題について述べる。

表1 平成の液状化地震

発生年	地震名(震源地)	発生年	地震名(震源地)
平成5 (1993)	釧路沖地震	平成16 (2004)	新潟県中越地震
平成5 (1993)	能登半島沖地震	平成16 (2004)	釧路沖地震
平成5 (1993)	北海道南西沖地震	平成17 (2005)	福岡県西方沖地震
平成6 (1994)	北海道東方沖地震	平成17 (2005)	宮城県沖
平成6 (1994)	三陸はるか沖地震	平成19 (2007)	能登半島沖地震
平成7 (1995)	兵庫県南部地震	平成19 (2007)	新潟県中越沖地震
平成9 (1997)	鹿児島県北西部	平成20 (2008)	岩手・宮城内陸地震
平成11 (1999)	秋田県沖	平成21 (2009)	駿河湾
平成12 (2000)	鳥取県西部地震	平成23 (2011)	東北地方太平洋沖地震
平成13 (2001)	芸予地震	平成25 (2013)	淡路島
平成15 (2003)	宮城県沖	平成28 (2016)	熊本地震
平成15 (2003)	宮城県北部	平成30 (2018)	北海道胆振東部地震
平成15 (2003)	十勝沖地震		

## 2. 主な液状化地震の被害の特徴

### 2.1 平成5年（1993年）釧路沖地震

この地震は1月15日、厳寒の北海道を襲った地震である。1983年の日本海中部地震以来の大地震ということで、積雪もいとわず釧路に駆けつけて度肝を抜かれた。歩道に設置されたマンホールが軒並み突出していたのである（写真1）。今では珍しくないマンホールの浮き上がりだが、それまでの地震では見られなかった



写真1 釧路沖地震で約1.3m浮き上がったマンホール（釧路町）

光景だった。しかも被害箇所は液状化が起きそうもない粘性土地盤である。その後の調査でマンホール設置の際に掘削して周囲を埋め戻した砂が液状化して浮き上がったことがわかった。原地盤が透水性の悪い粘性土の方が、埋戻し砂の過剰間隙水圧が上がりやすかったのである。

他にもこの地震による液状化のトピックスは多数あるが、もう一つだけ紹介したい。釧路段丘の谷埋め盛土造成地の釧路市緑ヶ岡5丁目で住宅の液状化被害があった。盛土は火山灰質土で、後で述べる2018年北海道胆振東部地震による札幌市清田区の被害地と同様な土地条件である。住民によれば、緑ヶ岡5丁目では、1973年の根室半島沖地震でも液状化被害があったとのことである。1993年以降も、1994年北海道東方沖地震、2003年十勝沖地震で被災しており、30年間に4回液状化被害を受けたことになる。

### 2.2 平成5年（1993年）北海道南西沖地震

この地震では、北海道駒ヶ岳の麓の森町で岩屑なだれ堆積物が液状化したことが注目された。木造住宅や宿泊施設などが被害を受けた。液状化した堆積物は重量の80%が礫で構成されており、所々直径1mにも及ぶ岩塊も含まれていた。その後、凍結試料を用いた液

状化試験で、礫と礫の間に充填されていた砂は非常にゆるい堆積構造で液状化抵抗が小さいことが明らかになった<sup>1)</sup>。森町では1983年の日本海中部地震でも液状化が起きていたことも判明した。

### 2.3 平成7年(1995年)兵庫県南部地震

この地震による液状化は、四国東部から琵琶湖の南岸までの広い範囲に発生した。液状化したのは、家屋の倒壊が集中した震度7の帯ではなく、それより海側の地域だった。特に神戸市、芦屋市、西宮市の大阪湾岸の埋立地では高密度に発生し、埋立地の面積の20～30%が噴砂で覆われた。埋立地で液状化した土の大部分は、「マサ土」と言われる風化花崗岩の山砂だった。この地震以前には、川砂や海砂の液状化は多数起きていたが、山砂の大規模な液状化は初めての経験で、山砂は液状化しにくいというそれまでの通説をくつがえした。

液状化が激しかったポートアイランドや六甲アイランドの居住エリアでは、軟弱粘土層の圧密促進や支持力増加のために地盤改良が行われており、杭基礎の高層建築物の液状化被害は極めて軽微だった。

埋立地の護岸に近い地区では、液状化により側方流動が発生し、神戸港に壊滅的な被害を与えた。ケーソン式護岸が慣性力により海側に前傾・移動したために、背後の液状化地盤が海に向かって流れ出し、移動量は最大5m以上にも達した。側方流動により地盤が海中に流出したことで、背後地盤は最大2m以上も大きく沈下した(写真2)。護岸近くの多くの建物や橋梁の基礎杭が、水平方向の地盤変位に耐えられず折損した。

戸建て住宅の液状化被害は、芦屋市の芦屋浜地区(埋立地)に特に集中した。この地区は1980年から分譲が開始された地震当時は新しい住宅地だった。大量の噴砂があり、戸建て住宅998棟中939棟が被害を受け、6割以上が傾斜角1/100以上傾いた<sup>2)</sup>。住宅が液状化によって、歪まずに剛体的に傾斜する被害が多数見られた初めての地震だった。芦屋浜以外では、大阪市の淀川下流部の地域で住宅の液状化被害が多く見られた。

この地震による液状化でもう一つ特筆すべきは、淀川の西島堤防(大阪市此花区)の被害である。液状化により、堤防が長さ1.8kmにわたって崩壊した。盛土が最大3mも沈下し、天端は低潮位から3.5mの高さになってしまった<sup>3)</sup>。幸い地震当時は川の水位が低かったために水害は免れた。

この地震を契機に設計指針類が大改定された。道路橋示方書<sup>4)</sup>は、液状化判定法そのものが更新されただけでなく、臨海部の水際線から100m以内にある橋に



写真2 兵庫県南部地震における護岸移動に伴う背後地盤の沈下と側方流動。左手の倉庫は杭が損傷(神戸市ポートアイランド北部)

については地盤流動の影響を検討することが義務づけられた。建築基礎構造設計指針は2001年の改定<sup>5)</sup>で、護岸付近や緩斜面で側方流動が生じた場合の地盤変位の予測法が示された。

### 2.4 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震

この地震で液状化が確認された地域は、北は青森県から南は神奈川県まで南北約650kmの範囲で、東北地方と関東地方の全13都県の193市区町村に及んだ(図



図1 東北地方太平洋沖地震により13都県193市区町村で液状化が確認された地点<sup>6)</sup>

1)。液状化の発生は、東北地方に少なく関東地方に多かった。これは、日本最大の平野である関東平野の堆積物が液状化しやすかったこと、人工的に改変した土地が多いこと、本震の約30分後に茨城県沖でマグニチュード7.6の最大余震が発生したことが一因と考えられる。

この地震による液状化被害を特徴付けるのは、戸建て住宅の液状化被害である(写真3)。国土交通省都市局の調べ(2011年9月27日の集計)によると、液状化による宅地の被害は9都県80市区町村の26,914件に上った。都県別に見ると千葉県が最も多く18,674件と約7割を占めた。市町村別では浦安市が8,700件と最も多く、全国の被害件数の3分の1の数になった。



写真3 東北地方太平洋沖地震で液状化によって最大76cm沈下した築4年の住宅(茨城県稲敷市、新里進氏提供)

液状化被害を受けた宅地は、浦安市で代表される埋立地の他、利根川などの大きな川の旧河道、砂礫や砂鉄の採掘跡地の埋戻し地盤など特殊な土地履歴を持つ地盤が多かった。また、千葉県、茨城県、宮城県では丘陵や台地の谷埋め盛土造成地の被害も多く、その数は2000件以上に上った<sup>7)</sup>。

この地震による甚大な宅地の液状化被害を受けて、2011年11月に国土交通省により「市街地液状化対策推進事業」が創設された。これは、東日本大震災により液状化で被災した自治体の液状化対策事業を財政支援するための事業で、災害の再発生を抑制し土地の資産価値を回復するための対策工事を、道路等の公共施設と隣接宅地と一体的に行うものである。東日本大震災では、茨城県、千葉県、埼玉県の12市がこの事業の補助を受け、地盤調査や液状化対策工法などの検討を行った。このうち6市の一部の地区では、対策工事が

実施された。その他の地区では、対策実施に必要な対象地区の住民の2/3の以上の同意が得られない、技術的に実施困難などで対策工事を断念した。

被害宅地の約半数の4103世帯が対策事業の候補地区となった浦安市でも、工事实施に必要な住民の合意が得られたのは当初の予定の1%にも満たない1地区33世帯のみで、残りの地区は工事には至らなかった<sup>8)</sup>。住民の自己負担額が約200万円と高額で、震災から7年以上経過しても終わらぬ事業に住民が嫌気がさすなどして、浦安市が目指す「原則として、地区の100%の合意」には至らなかったとのことである。

## 2.5 平成28年(2016年)熊本地震

この地震では前震と本震で震度7が2回観測された。液状化の発生も、前震、本震と両方で確認されており、その広がりには熊本県下の18市町村に及んだ(図2)。兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震での経験から、液状化は埋立地など人工造成地盤で起きる災害というイメージがそれまで広く浸透していたが、この地震による液状化の大部分は白川や緑川などの川の氾濫堆積物で覆われている地域で発生した。白川水系の堆積物は、地元でヨナと呼ばれている火山灰の二次堆積物(川が運搬して再堆積した土)であった。埋立地でも噴砂はあったが、熊本県にはそもそも海岸の埋立地はほとんどなく、熊本港や八代港のごく一部に存在するだけだった。

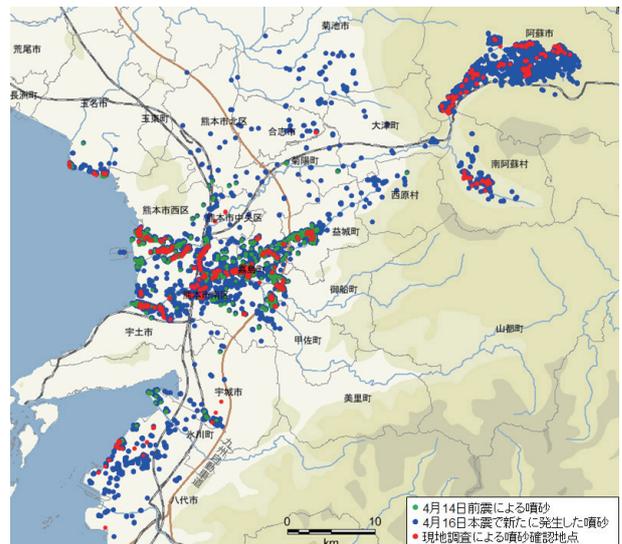


図2 熊本地震により熊本県下の18市町村で液状化が確認された地点<sup>9)</sup>

この地震でも戸建て住宅の液状化被害が多く、熊本市によれば被害棟数は2900戸とのことである<sup>10)</sup>。そのうち約1300戸は熊本市南区近見から川尻にかけての帯

状の地域に集中していた。

標高500mの阿蘇山のカルデラ内でも本震で農地などに多数の噴砂が確認された。この地域の液状化は白川の支流の黒川の氾濫原と阿蘇火山麓の扇状地に集中していた。

熊本地震の液状化被害地のうち、前述の熊本市南区近見から川尻にかけて地区とその他の2地区では、国の補助事業である「宅地液状化防止事業」が適用され、現在、再液状化防止に向けた対策工事を実施中である。

## 2.6 平成30年(2018年)北海道胆振東部地震

この地震では、震央に近いむかわ町・苫小牧市から北は石狩平野の広い範囲で噴砂が見られた。被害が最も甚大だったのは、札幌市清田区の造成地である。清田区は、支筋カルデラの火山山麓地の緩斜面で、一般には月寒台地と呼ばれている。かつては原野だった地域で1960年頃から宅地造成が行われてきた。谷を火山灰質土(支筋火砕流堆積物)で埋めた里塚、美しが丘、清田地区などで宅地の液状化被害が発生した。このうち里塚では、谷沿いの地盤が最大約3m沈下し、地盤に引きずられるような形で住宅が大きく傾斜した(写真4)。直接基礎の建物の典型的な液状化被害である基礎のめり込み沈下は認められなかった。



写真4 北海道胆振東部地震による地盤の陥没に伴う住宅の沈下(札幌市清田区里塚)

里塚の被害地は、谷筋にあたる帯状の地区で上流部と下流部では高低差が10mある傾斜地である。連続して分布する盛土層が液状化して地中を流れ、液状化層上部の非液状化層が薄い下流側の路面を押し破って噴出した。土砂が抜け出た上流部では陥没、土砂噴出箇所より下流部には土砂が流下して堆積した<sup>1)</sup>。これに対して、旧谷筋に敷設された暗渠管に沿って地震前から空洞ができており、盛土の液状化と相まって過大な

沈下が発生したのではないかという説もある。

現在、里塚地区では、再発防止に向けた宅地液状化防止事業が検討されている。市道の直下は深層混合処理、宅地は薬液注入が採用される見込みである。

## 3. 進まない戸建て住宅の液状化対策

平成の30年間、大きな地震が起きる度に筆者は現地に駆けつけ液状化の調査を行ってきた。目を疑うような被害にも遭遇した。マンホールの浮き上がりにしろ流動の影響を受ける護岸構造物の杭基礎にしろ、被害の教訓を得て構造物の液状化対策は進歩してきている。しかし、1964年新潟地震から半世紀余り、液状化に対して未だ無防備に近いのが戸建て住宅である。

戸建て住宅などの小規模建築物(建築基準法6条1項四号に該当する建築物)は、建築基準法で構造計算が義務づけられていない。基礎構造に関しては仕様規定(施行令38条1項)で「建築物の基礎は、建築物に作用する荷重及び外力を安全に地盤に伝え、かつ地盤の沈下又は変形に対して構造耐力上安全なものとしなければならない」と規定されている。しかし、特例として提出図書の省略が認められている小規模建築物では、液状化の可能性の判断は設計者に委ねられている(四号特例と言われている)。

以上のように法整備が進んでいないのが、戸建て住宅の液状化対策が進まない理由の一つである。しかし、建築基準法は生命・財産を保護するための最低限の基準を定めたものであることから、この法律で液状化対策の義務付けはきわめて困難である。

一方、ハウスメーカーの提案や建築主の要望で自主的に対策を講じている住宅もある。事実、2018年の北海道胆振東部地震で被災した札幌市清田区美しが丘や清田地区では、15年前の2003年十勝沖地震で液状化被害を受けた後、杭基礎で新築した家は傾斜せず対策が功を奏した。無対策のまま沈下修正工事だけをした家は、2018年の地震で悉く再被害を受けた。

狭隘な宅地地盤向けの対策工法は、2011年東北地方太平洋沖地震の後、関連団体の努力により飛躍的に進歩し低価格化が図られている。しかし、地盤改良には一般的には300万円～1000万円の費用が見込まれる。建築費全体に占める割合は大きく、設計者から勧められてもたやすく採用できる値段ではない。浦安市における市街地液状化対策事業でも紹介したように、国や自治体の補助を受けて1世帯当たり200万円の破格の費用で宅地と公共部分(主に生活道路)の一体的な地盤対策ができるという好条件で、しかも液状化被害の厳しさは経験済みの住民でさえ首を立てに振らなかつ

た(住民投票で反対した)という現実がある。

液状化の被災経験がない一般の方々に危機感を持ってもらい対策や備えを促すにはどうしたら良いか?国土交通省は、液状化被害への気づきやリスクコミュニケーションツールとして、全国液状化しやすい区分図(全国を250mメッシュ単位の微地形区分によって液状化しやすいさを色分けした図)と都道府県液状化危険度分布図(都道府県の地震被害想定調査における想定地震による液状化危険度の分布図)を令和元年度末に公表する予定である。

また、平成30年～令和2年の3年間に総合技術開発プロジェクトで「リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ」作成マニュアルの開発を進めている<sup>12)</sup>。各自治体に住民が分かり易い詳細なハザードマップを作成してもらい、対策や備えに繋げようというものである。

戸建て住宅の被害軽減の推進を阻む最大の要因は、そもそも一般の方々の宅地の安全性への関心・意識が低いことにあると考える。今では多くの人々が品質表示を確認した上で食品を購入するように、土地の安全性を確認して購入するのが当たり前の中になって欲しい。前述のハザードマップに期待される役割も大きいですが、土地の履歴(改変履歴、液状化履歴など)を気軽にチェックできる仕組みが必要である。それには我々専門家が先頭に立って努力する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 電力中央研究所：1993年北海道南西沖地震における礫地盤液状化の原因解明(その1)、電力中央研究所報告U94007、1994.
- 2) 芦屋市家屋被害判定検討委員会：芦屋市家屋被害判定検討委員会報告書、1995.
- 3) 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、土木構造物の被害第3章、土木学会、1997.

- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996.
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001.
- 6) 若松加寿江、先名重樹、小澤京子：2011年東北地方太平洋沖地震による液状化発生の特徴、日本地震工学会論文集 第17巻、第1号、pp.43-62、2017.
- 7) 若松加寿江、古関潤一：関東地方のミニ開発造成地における宅地の液状化被害の実態と課題、第50回地盤工学研究発表会発表論文集、pp.1723-1724、2015.
- 8) 東畑郁生：2011年東日本大震災における千葉県浦安市の宅地の液状化被害と復興、建築士、Vol.68、No.803、pp.24-27、2019.
- 9) 若松加寿江、先名重樹、小澤京子：平成28年(2016年)熊本地震による液状化発生の特徴、日本地震工学会論文集 第17巻、第4号、pp.81-100、2017.
- 10) 熊本日日新聞社：熊本日日新聞2016年12月14日朝刊第1面.
- 11) 札幌市：清田区里塚地区の市街地復旧に向けた地元説明会第3回資料、2018. <https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/stn/satozuka.html> (参照2019-01-29)
- 12) 石井崇：これからの液状化ハザードマップ、建築士Vol.68、No.803、pp.28-31、2019.



若松 加寿江(わかまつ かずえ)

早稲田大学理工学研究科修士課程修了、国立研究開発法人防災科学技術研究所研究員、関東学院大学工学部教授などを経て現職、博士(工学)、主な著書に『日本の液状化履歴マップ 745-2008』、『そこで液状化が起きる理由(わけ)—被害の実態と土地条件から探る』(共に、東京大学出版会)。

# 今後10年 将来に向けた課題

福和 伸夫

●名古屋大学減災連携研究センター センター長・教授

## 1. はじめに

会誌編集委員会から本特集号「平成の地震工学を振り返る」に今後10年を視野に将来への課題を記すよう依頼された。振り返る平成の30年と展望する令和の10年という期間のバランスの違いをどう考えるべきか悩みつつも、比較的近い将来の課題を述べよとの意図と考え、10年後を想像しつつ課題を考えてみたい。ただし、浅学非才ゆえ、その視点には偏りがある。民間で若干実務を経験し、地元・名古屋の大学で30年弱を過ごし、定年を間近に控える中、南海トラフ地震に直面する地震工学研究者としての小文と捉えて頂きたい。

## 2. 30年前、10年前と10年後の社会

### 2.1 1989年の社会と平成の30年

平成が始まった1989年は、天安門事件、ベルリンの壁崩壊、冷戦終結など、世界が激動した年である。日本では、消費税が導入され、年末には日経平均株価が史上最高値となるなど、バブルの絶頂期であった。インターネットや携帯電話はまだ普及していなかった。その後の30年間、日本は多くの被害地震を経験した。

災害対策基本法制定の契機となった1959年伊勢湾台風以降の昭和後半30年間と平成の30年間を比較すると、平成の被害地震の多さに気づく。

昭和後半には、震度7の地震は1つも無いが、平成には、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の前震と本震、2018年北海道胆振東部地震と6度も経験した。

昭和後半に起きた地震の最大死者は日本海中部地震の104人だが、平成には東北地方太平洋沖地震や兵庫県南部地震など、死者200人以上の地震が4つもある。

また、昭和後半の西日本の内陸直下の地震は1961年北米濃地震、1968年えびの地震、1984年長野県西部地震くらいだが、平成には、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、04年新潟県中越地震、05年福岡県西方沖地震、07年能登半島地震、07年新潟県中越沖地震、16年熊本地震、18年大阪府北部の地震など、10個以上起きている。

### 2.2 2009年の社会と日伊で起きた2つの地震

2009年の新語・流行語大賞は「政権交代」、今年の漢字は「新」だった。前年の2008年9月に起きたリーマン

ショックで経済が混乱し、衆議院選で民主党が圧勝して、政権交代が行われた。新型インフルエンザが流行した年でもある。インターネットと携帯電話が普及し、緊急地震速報も2007年から本運用が始まった。

2009年8月11日には、駿河湾の深さ23kmでM6.5の地震が発生し、最大震度6弱を観測した。東海地震の震源域近傍で起きたため、初めて東海地震観測情報が出された。「地震防災対策強化地域判定会」の臨時の委員打合せ会が招集され、「想定される東海地震に結びつくものではない」との見解が発表された。当時は、2011年東北地方太平洋沖地震の前でもあり、地震予知を前提にした大規模地震対策特別措置法（大震法）による東海地震対策の一環だった。

一方、イタリアでは、2009年4月6日にラクイラでM6.3の地震が発生し、309人が犠牲になった。この地震の前には多数の群発地震が発生し、住民の不安が高まって社会問題となっていた。その中、国家市民保護局が大災害委員会を招集し、「安全宣言」を出していた。このため、地震後、委員会メンバー7人が過失致死で起訴された。第1審では全員に実刑判決が出たが、最終的には科学者6名は無罪、行政官1名が執行猶予付き禁固2年で判決が確定した。

これから10年経って、日本では地震の直前予知を断念し、本年5月31日の中央防災会議で南海トラフ地震防災対策推進計画が改訂され、大震法が事実上凍結された。3日以内の地震発生を前提とした警戒宣言発令から、いつ地震が起きるか分からない南海トラフ地震臨時情報の発表に変わったことは、隔世の感がある。

この10年に起きた地震には、震度7を記録した地震だけでも4つある。震度観測点の増加もあるが、1990年代、2000年代と比較して多いと感じる。

### 2.3 2030年問題と10年後の社会

「2030年問題」という言葉をよく聞く<sup>1)</sup>。2030年の日本で生じると予想される社会的問題の総称である。国民の1/3が高齢者となり、人口が現在よりも1千万人減少して、様々な社会的変化が起こるといわれる。労働力不足、高齢者の貧困、過疎地域の増加といった問題が生じ、国内総生産も低下する。働き手不足により、介護、観光、医療、IT、航空などの業界は深刻な事態になると予想されている。空き家率が3割を越し、

社会インフラの老朽化が進行し、債務も膨らんでいると予想される。日本が縮む一方で、世界の人口は85億人まで増加し、水や食料、エネルギーの不足が懸念される。エネルギー自給率8%、食料自給38%しかない日本の現状を考えると将来が危ぶまれる。未来の年表<sup>2)</sup>などの未来予測は悲観的であり、将来を見据えた検討の必要性が指摘されている<sup>3)</sup>、一方で、2027年にはリニア中央新幹線が開通予定であり、三大都市圏が一体化したスーパーメガリージョンが形成され、現在とは異なる国土構造になっていると思われる。

こういった中、今後10年間に南海トラフ地震や首都直下地震が発生すれば、日本社会は大きな困難に直面することになる。最大クラスの南海トラフ地震が発生すると、最悪、20年間で1,410兆円の経済被害となり、日本は世界の最貧国になる恐れがあると土木学会が指摘している<sup>4)</sup>。一方、地震が起きていなければ、発生確率は益々高まる。ちなみに、本年1月時点での地震発生確率は、今後10年が30%、30年が70～80%であり、地震後経過率は0.83、次の地震までの標準的期間は15.2年とされている。過去の例からすると、今後10年の間に西日本を中心に活断層による地殻内地震が複数発生し、場合によっては、南海トラフ地震の震源域周辺で比較的規模の大きな地震やゆっくり滑りが起きる。その場合には、南海トラフ地震臨時情報(巨大地震注意)が発表され、社会的な混乱が予想される。社会が狼狽えれば、日本の信頼度が低下し、地震発生前に経済的な困難に陥る可能性がある。

### 3. 地震工学の周辺の状況

近年、人新世、SDGs、Society5.0、第4次産業革命、CASEなどのキーワードをよく聞く。一見、地震工学とは関りが無さそうに見えるが、社会の変化により災害像は変化するので、無縁ではない。10年後を見据え、周辺の社会動向を概観してみる。

人新世とは、人類が農業や産業革命を通じて地球規模の環境変化をもたらした時代と定義されている。人間の営みによって地球環境が受ける影響が無視できなくなり、完新世に続く新たな地質年代として人新世が提唱された。二酸化炭素やメタンガスの大気中濃度、成層圏のオゾン濃度、地球の表面温度や海洋の酸性化、海の資源や熱帯林の減少など、気象や土壌に影響が現れている。

災害は、hazard(ハザード)、vulnerability(脆弱性)、exposure(曝露)によって生じる。地殻変動である地震現象への影響は認められないが、災害危険度の高い沿岸低地への都市域の拡大は、揺れ・液状化・津波・浸水・

土砂災害などのハザードを増大させた。また、都市への人口集中は暴露量を増大させ、高齢化・人口減少・貧困化・限界集落などは社会を脆弱化させた。

SDGs(Sustainable Development Goals)は、2016年から2030年までに達成すべき国際目標の略称で、貧困や飢餓、エネルギー、気候変動、平和的社会など、持続可能な開発をめざしている。2015年9月の国連持続可能な開発サミットで合意され、ミレニアム開発目標(MDGs)の後継として採択された。10年後に達成する目標で、下記の17項目からなる。

①貧困をなくそう、②飢餓をゼロに、③すべての人に健康と福祉を、④質の高い教育をみんなに、⑤ジェンダー平等を実現しよう、⑥安全な水とトイレを世界中に、⑦エネルギーをみんなにそしてクリーンに、⑧働きがいも経済成長も、⑨産業と技術革新の基盤をつくろう、⑩人や国の不平等をなくそう、⑪住み続けられるまちづくりを、⑫つくる責任つかう責任、⑬気候変動に具体的な対策を、⑭海の豊かさを守ろう、⑮陸の豊かさを守ろう、⑯平和と公正をすべての人に、⑰パートナーシップで目標を達成しよう。

地震対策でも重要なことばかりである。災害は社会の抱える問題を露呈させる。地震での被害を減じ、災害後に社会を早期に回復するには、SDGsの17つの目標は防災面でも重要な事柄である。

Society5.0は、サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を融合させることで、経済発展と社会的課題の解決を両立するもので、人間中心の社会を目指した概念である。狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く新たな社会と位置付けられている。IoTであらゆる人とモノをつなげ、様々な知識や情報を共有し新たな価値を生み出す。そして、AIにより必要な情報を必要な時に提供し、ロボットや自動走行車などで、少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などの課題を克服するものである。少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差は2030年問題そのものである。災害被害の拡大要因でもあり、Society 5.0で実現される社会は、地震災害が減じられる社会でもある。

第4次産業革命とは、蒸気機関などを用いた機械化による18世紀末の第1次産業革命、電力を用いた大量生産による20世紀初頭の第2次産業革命、電子工学や情報技術を用いた自動化による1980年代の第3次産業革命に続くもので、IoT、ビッグデータ、AI、ロボットを活用した技術革新である。経済産業活動に加え、人間や社会のあり方にも影響を与えられられている。

ちなみに、第1次産業は農業・林業・水産業、第2次産業は鉱工業・製造業・建設業など。第3次産業はサー

ビス・通信・小売り・金融・保険などと定義されてきたが、第4次産業としては情報通信・医療・教育サービスなどの知識集約産業が提案されている。

Society5.0や第4次産業革命でのコアとなるIoT、ビッグデータ、AI、ロボットは、地震災害でも活用が大いに期待される。とくに、災害後の初動対応に有用である。IoTやビッグデータは早期の被害状況と対応資源の把握に、AIはSNSやビッグデータなどで得られる膨大な情報に基づく判断に、ロボットは危険な環境における救命救出に力を発揮する。

こういった流れの上にあるのが、CASEである。CASEとは、Connected(コネクテッド)、Autonomous(自動運転)、Shared & Services(カーシェアリングとサービス)、Electric(電気自動車)からとった造語である。Mobilityを中心に、様々なセンサーが張り巡らされ、モノやデータの共有化が進み、Society5.0の基盤が構築されていく。ただし、電気と通信の確実な確保が前提になるため、災害時への対応は残された課題となっている。地震による地殻変動も位置精度を減じる心配がある。

ビッグデータを用いた深層学習によるAIは、解の探索がブラックボックス化し、現象の抽象化やモデル化・構造化が行われにくい。このため、物事の本質や現象のメカニズムを理解することや、対策手段を考えることには向かない。また、情報化が進んだとしても、地震災害軽減の基本は、耐震化などの事前防災にあることは変わらない。

#### 4. 今後の地震工学研究のキーワード

今後を考える上でのキーワードを10個挙げてみる。

##### 4.1 見たくないものを見る

インターネットやSNSを通して膨大な情報が溢れているが、新聞やテレビを通じたプッシュ型情報からSNSなどのプル型情報への変化の結果、多くの人は限られた領域の情報のみと接するようになり、視野の狭量化が起きているようだ。社会の縦割りが進み相互依存度が高まる中、部分最適化と人任せになった体質を改め、俯瞰的視点で「見たくないものを見る」態度と全体最適化の視点が重要である。

##### 4.2 相互依存社会

高機能化した社会は、機能が分化し、相互の依存度の高い複雑なネットワークを形成する。製造業のサプライチェーン、交通網、物流、ライフライン、通信など、その実態を知ることは難しい。一方で、日本の産業を担う自動車産業は3万点の部品を3万社で製造し、物流やライフラインに大きく依存する。社会を支える

水道や港湾などの社会インフラは、複数の官庁、国・都道府県・市町村・民間企業が関り、その実態が見えない。縦割・横割の中、情報開示が遅れ、社会のボトルネックが見えなくなっている。不都合なことの情報の開示を進め、影響度の高い致命的な災害病巣を早期に切除・治癒する態度が必要である。

##### 4.3 縮退と持続発展

人口減少や経済の縮退、債務の増大により、地震工学を支える研究者や研究資金の減少は不可避である。大規模地震が切迫する中、災害被害軽減に寄与する地震工学研究の持続・発展は欠かせない。基礎学理を継承し人材を継続的に育成すると共に、真に重要な研究課題を創成する必要がある。そのためには、選択と集中、継承と創成のバランスが鍵を握る。建築物や社会インフラなどの既存ストックを全て改築することは困難であり、長寿命化や耐震改修技術の開発、既存ストック改修の優先順位などを定める必要がある。

##### 4.4 自律・分散・協調

首都圏への一極集中は、首都直下地震の暴露人口を増加させ、地方の首都圏への依存度の高さは、他地域への被害波及を拡大する。かつての日本社会のように、各地に人口が分散し自律力を持つことが、地震被害の波及を抑制する。効率性重視の首都への一極集中を改め、地方都市の自律力を向上させるため、地方創成の推進は地震工学の立場でも重要である。国土交通省が進めるコンパクト×ネットワーク<sup>3)</sup>は一つの方向性であり、2027年に予定されるリニア中央新幹線の開通やテレワークの普及にも期待したい。

##### 4.5 総力の結集

大規模な災害被害と向き合うにはあらゆる力を結集するしかない。近年、研究分野の細分化が進み、俯瞰的視点や研究者のコーディネート力・問題解決力が減退しているように感じられる。災害の被害軽減には、①事前対策・最中対策・事後対策の3つの時間断面の研究、②Hazard・Vulnerability・Countermeasureの研究、③Prediction(予測)・Prevention(予防)・Response(対応)のバランス良い研究推進のための地球科学・社会工学・人文社会科学・情報科学の研究連携、④研究を施策化し実装へと結びつける研究・行政・社会の連携、⑤自助・共助・公助の連携、⑥時・空間の遠くと近くとの連携など、あらゆる力を集める必要がある。学会や、各地の行政機関や基幹大学などがコーディネータ役を担うことが期待される。

##### 4.6 HVEの改善

災害被害軽減には、Hazard、Vulnerability、ExposureのHVEの解消が必要となる。Hazard低減には長期的

には土地利用(国土・都市計画)の見直しによる危険回避が、短期的には堤防などの社会インフラ強化が、Vulnerability低減には、都市インフラの強靱化や建築物の耐震化、海外と結ぶ港湾や空港の強化による孤立回避などが、Exposure改善には、人口の地方分散などの国土利用の見直しなどが必要となる。何れも短期に実現できることではないが、2030年問題解決のためにも、この10年でのロードマップを作り、実践を始める必要がある。

#### 4.7 新技術の活用

地震工学の外側で進むSociety5.0、CASE、IoT、ビッグデータ、AI、ロボット、スーパーコンピューター「富岳」などで実現される新技術を、地震工学研究に積極的に取り込み、災害軽減に役立てる必要がある<sup>9)</sup>。12年前に本運用が始まった緊急地震速報は、その先駆けでもある。大都市に集中する高層ビル向けに、長周期地震動を対象にした緊急地震速報を早期に実現したい。

#### 4.8 不確実な情報の活用

南海トラフ地震臨時情報のような不確実な事前情報を社会の実情に応じて被害軽減にどのように活かすか、大きな課題である。臨時情報発表後、いつ起きるか分からない地震を前に、人命を守るための津波被災地等の事前避難、ライフライン・物流・行政・医療・福祉などの社会機能維持、高層ビル・石油タンクの長周期地震動対策、エレベータの閉じ込め対策、海外への安心情報発信など課題は多い。また、デマ情報もあるSNSから得られるビッグデータ活用も今後の課題である。

#### 4.9 合意形成

巨大地震の発生確率が益々高まっていく中、便利さと安全、集中と分散、首都と地方、分析と合成、効率性と冗長性、専門分化と総合性、生命と生業、統一性と多様性、先端と普及など相反する価値観の中で、社会の合意形成を図っていく必要がある。また、日本国憲法は、国民の最低限の生存権と財産権を共に保障しているため、建築基準法で規定される耐震基準は最低基準でしかない。耐震規定に定められる外力を上回ることが予想される南海トラフ巨大地震を前に、技術者による安全性の説明責任と合意形成の重要性を再認識し、耐震安全性のあり方について議論を深めたい。

#### 4.10 価値観

国民の行政依存体質を改め、かつてのように、災害を我がことと考え自らの命は自ら守るといった価値観の醸成が必要である。「彼を知り己を知れば百戦殆うからず」とか、「災い転じて福となす」、「温故知新」など、先人が築いた防災文化を再び根付かせる必要がある。そして、本音で語り、本質を見抜き、本気で行動

を始めたい。そのためには、国や地域を皆で守るといふ価値観の共有が必要であり、呉越同舟で力を合わせる必要がある。高頻度に発生する中小災害にビクビクする華奢な社会から、多少鈍感でも大災害にもへこたれない骨太な社会へと変えていきたい。

#### 5. おわりに

中央防災会議防災対策実行会議防災関連調査研究の戦略的推進ワーキンググループが「防災関連調査研究における現状の課題と今後の対応の在り方について」をまとめ、学術連携等による総合的な視点からの防災・減災研究の推進の必要性を指摘している<sup>7)</sup>。各研究機関や防災行政機関の役割を調整し、防災関連調査研究の体系化とその社会実装化を進めることができる組織・体制を構築し、防災研究を一気通貫で進められるような仕組みが必要だと指摘している。日本地震工学会もその一翼を担っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 経済財政諮問会議：2030年展望と改革タスクフォース報告書、2017.
- 2) 河合雅司：未来の年表、講談社、2017.
- 3) 西條辰義：フューチャー・デザイン、勁草書房、2015.
- 4) 土木学会平成29年度会長特別委員会レジリエンス確保に関する技術検討委員会：「国難」をもたらす巨大災害対策についての技術検討報告書、2018.
- 5) 国土交通省：国土のグランドデザイン2050～対流促進型国土の形成～、2014.
- 6) 社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会：「国土交通技術行政の基本政策懇談会」中間とりまとめ、2018.
- 7) 中央防災会議防災対策実行会議防災関連調査研究の戦略的推進ワーキンググループ：防災関連調査研究における現状の課題と今後の対応のあり方について(報告)、2017.



福和 伸夫(ふくわ のぶお)

1981年名古屋大学大学院修了後、清水建設で勤務の後、名古屋大学に異動。建築耐震工学・地震工学に関わる教育・研究に携わる傍ら、防災・減災活動を実践。現在は南海トラフ地震対策に注力。

## 金井 清先生が遺された書籍と紙袋 (資料)

工藤 一嘉

●名誉会員

### 1. はじめに

金井 清先生は2008年4月13日満100歳で逝去され、今年で没後11年になる。金井先生の紹介は不要と考えるが、地震工学 (Engineering Seismology) を学として体系化された、わが国が世界に誇る研究・教育の第一人者である。金井先生が東京大学地震研究所 (1931～1968年の37年間、以降東大地震研と略) と日本大学生産工学部 (1968～1987年の19年間、以降日大生産工学部と略) で研究や教育に使用された書籍類 (単行本と学術誌) と紙袋やファイルに収納された資料類は、特別のご指示がないまま、ご自宅に残された。筆者は金井先生と同じ職場に恵まれたが、残念ながらどちらもご一緒した時期はなかった。ただ、先生の晩年に親しくお目にかかる機会が多く、上記の資料整理の任にあずかった。資料等の内容調査まではたどり着いてはいないものの、一応の整理が着き、保存方法も決まったので、その報告をさせていただく。

### 2. 経緯

金井先生が逝去されて一年後に「金井清先生追悼シンポジウム」(2009、震災予防協会) が開催された。その少し後だったと記憶するが、奥様の金井トシ子様からご自宅にある書籍類は日大生産工学部へ寄贈したいとのご希望が寄せられた。日大生産工学部の建築工学科の先生方にご相談いただき、当時日大生産工学部図書館長の職に就かれていた川村政史教授 (現名誉教授) が中心となられて書籍類 (ジャーナル類を含む) の受け入れ体制をご検討いただいた。東大地震研集報は全号 (ただし、第1号のみ複写で、近年の号を除く) 揃っており貴重と考え、寄贈先は生産工学部図書館に、それ以外の書籍およびジャーナル類は生産工学部建築工学科セミナー室の書棚に保管していただくことになった。後に書籍類は建築工学科の資料室に移され、現在は廣田直行教授の指導・管理の下に、歴史的に貴重と考えられる書籍類と一般書とに分けて書架に保管されている。この資料室には、他にも退職された先生方からの寄贈書籍も収納され、共に広く利用されると伺っている。

紙袋に代表される未製本・未整理の資料は、ご自宅の書庫に手つかずに保管されていた。しかし、2016年

3月に奥様も逝去され、奥様の妹様ご夫妻の大橋 紘・悦子様から、金井先生が残された資料 (紙袋など) を可能な限り利用して欲しい旨の相談を受けた。とにかく中身を拝見するため、建築工学科の師橋憲貴教授室の一角を使わせていただき、見せていただくこととした。サイズ12の段ボールで8箱に及んだ。多くは地震研究所のB5版用の封筒に収納され、表にタイトルが記されていた。当時、筆者が非常勤講師を務めていて、週1回の講義の後に拝見することとしたため、随分時間がかかってしまったが、分かる範囲で分類を試みた。保存先に関しては、東大地震研が創立100年を迎えるための資料収集を続けており、その一環で多くを寄贈・受領していただき、また詳細は後述するが、原爆被害調査資料は広島平和記念資料館に寄贈受理 (2018年11月) されている。

### 3. 書籍類・ジャーナルなどの内容

#### 3.1 書籍類

基本的には科学関連の学術書・啓蒙書に限って寄贈いただいたが、単行本は280冊余りで、大学・研究室発行の小冊子なども含まれる。因みに、歴史的な原書の例 (1930年以前) では、表1ようになる。妹澤克惟先生からの書籍も含まれているようである。

表1 1930年頃までに出版された原書類

著者	題名	出版社	発行年
C. G. KNOTT	The Physics of Earthquake Phenomena	Oxford, Clarendon	1908
A.E.H. LOVE	Some Problems of Geodynamics	Cambridge Univ. Press	1911
H. LAMB	Hydrodynamics	Cambridge Univ. Press	1916
E.T.WHITTAKER	A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies	Cambridge Univ. Press	1917
A.E.H. LOVE	A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity	Cambridge Univ. Press	1920
J. PRESOTT	Applied Elasticity	Longmans	1924
J. W. S. Baron RAYLEIGH	The Theory of Sound Vol 1. Second ed. Revised and Enlarged	Macmillan	1926
J. W. S. Baron RAYLEIGH	The Theory of Sound Vol 2. Second ed. Revised and Enlarged	Macmillan	1926
A.E.KENNELLY	Tables of Complex Hyperbolic and Circular Functions	Harvard Univ. Press	1927
H. JEFFREYS	The Earth, Its Origin, History and Physical Constitution	Cambridge Univ. Press	1929
L.M. MILNE-THOMSON	Standard Table of Square Roots	G. Bell Sons Ltd.	1929

### 3.2 Proceedings類

世界地震工学会議の第1回（1956年、バークレイ）から第9回（1988年、東京-京都）までのProceedingsが揃っている。今では、全てpdfファイルで見ることが出来るが、原本なので貴重な資料と言えるのではないだろうか。因みに、金井先生は第10回マドリッド、第11回アカプルコの会議にも参加されているが、第10回のProceedingsが蔵書には含まれていない。第11回のProceedingsはCD-ROMであった。

同様に、日本（国内）地震工学シンポジウム講演集（後に論文集）も第1回（1962年）から第9回（1994年）まで揃っている。その他、日本建築学会地盤震動シンポジウム、歴史地震研究会、ESGシンポジウム（1992、1998）などの講演集、Proceedingsも数多く残されている。なお、古いものでは、World Engineering Congress（1929）のAbstract集がある。年代からして、妹澤先生がお持ちだったと推定される。日大生産工学部建築工学科の資料室では金井先生の蔵書の書棚が設けられているが、特にProceedingsや古い書籍類は、貴重品として写真1のように保存されている。



写真1 日大生産工学部建築工学科資料室におけるProceedingsやジャーナルの本棚

### 3.3 ジャーナル・報告書類

地震研彙報は前述のように、日本大学図書館生産工学部分館（現在の名称）に収納されている。75号以降の彙報や出版物は建築工学科の資料室に収められている。日本地震学会誌「地震」第1輯はほぼ全号、第2輯は第1巻から55巻まで揃っている。

報告書関係では、関東地震の被害調査報告である、震災予防調査会編「震災予防調査会報告第百号（甲）、（丙）上、（丙）下、（丁）、（戊）、（岩波書店）」が計5冊

であるが、残念ながら乙は含まれていない。やや古い資料に限るが、他には1948年福井地震の調査報告書では、昭和23年6月28日福井地震調査概報（1949、験震時報、第十四巻別冊、中央气象台）や、昭和23年福井地震調査研究速報（1949、日本學術會議）などがある。また、纏まったものとして、日本損害保険協会による地震保険に関連する報告書類も1966年以降2003年までの全38冊収納されている。

### 3.4 地震資料

1941年から1943年にかけて文部省震災豫防評議會が編纂した「増訂 大日本地震史料」第1巻から第3巻までの3冊、および宇佐美龍夫東大名誉教授が中心となって編纂された「新収 日本地震史料 第一巻」（1981年）から「第五巻 別巻六ノ二」（1988年）まで計17冊、「新収 日本地震史料 拾遺」の別巻を含む7冊などがあり、さらに関連の資料が5冊ほど存在する。

### 4. 紙袋に収納された未製本資料等

書籍類をお引き取りする前に、2009年の時点で、金井先生宅の書庫の各棚をそのまま撮影してあるが、未製本資料（いわゆる紙袋）の例を写真2に示す。写真でも分かるように、特に終戦直後の資料の紙質は悪く、注意していても触るとボロボロと紙屑が落ちてしまい、取り扱いに苦労した。教授室のごみを増やし、師橋教授には大変ご迷惑をおかけした。



写真2 金井先生宅の本棚の一例（2008年当時）

金井先生は「紙袋の効用」（1957年1月11日、学会余滴、朝日新聞）というコラム記事を残されている。未解決の問題を紙袋にしまい、後に取り出して新たな発見（M<sub>2</sub>波や微動）に繋がった思い出を記事にされたものである。金井先生には宝の山であろうが、我々には残念ながら猫に小判と恐れつつも、整理を進めさせていただいた。

昨年の暮れころまでに資料の中身はおおよそ把握でき、大まかな分類が出来た。内訳を表2に示す。な

お、表には記していないが、金井先生が研究対象とされていたテーマ毎のファイル（例えば、地震動の距離減衰、五重の塔など）は多くが別刷り等であったこと、また学生のレポート（段ボール箱にほぼ半分の量）は個人情報逸散につながる恐れがあること、講義ノートは、共立出版の「地震工学」の原稿に近い内容であることから、建築工学科の先生方のご意見を伺いながらも、筆者の責任で焼却処分とさせていただいた。以下、簡単に資料の内容について紹介したい。

表2 紙袋等未製本を主とした資料群の分類と寄贈先

タイトルなど	内容	寄贈先等
東南海地震資料	5袋、報告書と調査資料 詳細は表3	地震研究所に寄贈
南海地震資料	5袋 報告書と調査資料 詳細は表4	地震研究所に寄贈
福井地震資料	被害写真(1枚)、地図等メモ、ほかバラ資料、新聞切り抜きなど。微動関係の作業資料	地震研究所に寄贈
妹澤先生関連資料	学士院授賞審査要旨、ご葬儀参列者名簿、葬儀写真6枚、石本巳四男著 地震とその研究、所員会議事録等	地震研究所に寄贈
Kyouji Suyehiro	Engineering Seismology Notes on American Lecture. Proc. American Soc. Civil Engineers Vol. 58, No.4.	地震研究所に寄贈
原爆資料と印刷物	5袋、写真、手書きの未公表原稿など	広島平和記念資料館に寄贈
金井研備忘録	A4ノート2冊(前田敏雄氏、小林庄司氏)	広島平和記念資料館に寄贈

#### 4.1 地震資料

1944年東南海地震の資料は全く無いものと思っていたので、この資料の存在にいささか驚いた。というのは、萩原尊禮先生の著書「地震予知と災害」<sup>1)</sup>の東南海・三河地震の記述の中に、「金井清さんが二つの地震を大変詳しく調べられた。ところが(・中略)金井さんの調査記録は命令に忠実に従っていた女子職員の手によりすべて焼却されてしまったのです。」と記されていることを、記憶力の乏しい筆者がたまたま覚えていたためである。ご自宅に「疎開」してあった分だけは残されていたことになる。前にも記したが、この時期の紙質は極めて悪く、内容を詳しくは調査していない。一旦コピーをとってから利用することが肝要と考えるが、それも大変な作業かもしれない。タイトルのみを表3に示すが、これらはクリアファイルブックに収納してある。

同様に1946年南海地震の資料を表4に示す。A1サイズほどのトレース用紙に地図や各地の詳細な震度を書き込んだ図などが含まれる。

1948年の福井地震の資料は、製本された資料に関しては日大生産工学部へ、その他は東大地震研へと別れてしまったが、製本されたものは全て元々地震研図書室に存在するため、このような処置とした。

#### 4.2 妹澤克惟先生関連の資料

妹澤先生は金井先生の恩師で地震研究所創設期から

地震研究所の発展に尽くされ、金井先生との共著も多い。恩師の貴重な資料を保存されていたようで、地震研創立時の所員会（現在の教授会に相当）の議事録や、石本巳四男先生が妹澤先生に謹呈された署名入りの著書、妹澤先生のご葬儀の写真などが含まれる。

表3 1944年東南海地震被害関連資料

ファイル	項目	形式	内容	備考
1	地震研究速報第4号	ガリ版印刷	マル秘の印、著者：水上武、宮村拱三、表俊一郎、金井清（この分だけ別とじ） +手書きの原稿と元資料か(?)	手書き原稿：B5原稿用紙、裏表4枚
2	中央気象台	ガリ版印刷	遠州灘地震概報	3頁
	軍需課	ガリ版印刷	重要軍需工場震災被害調査	軍事秘の印
3	調査資料	ガリ版印刷	工場震災被害(復旧)詳報(9日正午現在)、および(10日現在、追報)、12日正午現在 追報第2、愛知県労政課	B5(B4を2つ折り)
	調査資料	ガリ版印刷	電気被害状況 愛知県労政課	B5、3頁
	調査資料	ガリ版印刷	瓦斯被害状況 愛知県労政課	B5、4頁
	調査資料	ガリ版印刷	地震被害状況 庵原部、小笠部	
4	調査資料	手書きメモ	各地の被害数(統計)など	A4 計8枚
5	調査資料	手書きメモ	詳細不明	
6	調査資料	手書きメモ	詳細不明	
	地図		名古屋市全図 名古屋市復興局 昭和22年11月	B2版
	地図		名古屋市全図並都市計画図 アルプス出版社 昭和24年5月24日・他	B2版書き込みあり
	地図	トレース	東海、名古屋周辺(1/350,000、1/240,000)	各1枚
ファイル2	公共建物の震害調査表		名古屋市の公立小学校の被害調査表 構造種別、被害程度を統一形式で記載(各学校へのアンケート結果か?)	全5袋：おそろしく数10枚分、紙質が悪いので、取り扱い注意
冊子			極秘 東南海大地震調査概報	中央気象台
冊子			東海道および南海道両地震調査報告	日本建築学会、S40年2月

表4 1946年南海地震被害関連資料

ファイル	項目	形式	内容	備考
1	紙袋	ガリ版印刷	岡山県・岐阜県・高知県・香川県など震災被害状況調査(内務省にあてた各県の被害報告(中間報告も含む))	紙質が悪いので取り扱い注意
2	地図等メモ	紙片	四国と周辺の被害率を大きなトレース地図への記入、その他踏査メモ、地図類	
3	地図等メモ	紙片	中村町を中心とした詳細地図やメモ	
4	公文書・領収書など	紙片	高知県の防災対策計画の立案、県からの研究費に対する、領収書類が多く含まれる。	
5			米軍からの火薬運搬の許可・指示書	A4 1枚タイプ
6	地図等メモ	紙片	大社市における異常震域の検討と地図類	
冊子			南海道大地震調査概報、中央気象台	

以上、地震被害調査資料と妹澤先生関連の資料および、末広恭二先生の“Engineering Seismology”の原本など表2の中で5項目の資料は全て地震研究所への寄贈が受理され、図書室で保管されている。一部ではあろうが、中には未知の資料が含まれている可能性がある。地震研究所では、いずれ閲覧できるようにしていただけるものと期待している。

#### 4.3 原爆関係資料

金井先生は原爆被害を調査された唯一の地震工学者で(調査に同行された助手の方はおられるが)、「米寿者の追懐」<sup>2)</sup>の中で広島に原爆が投下された直後に派遣されたことや、「1945年に被爆者の範ちうに入り、生命の限界を覚えるようになり」(後略、原文のまま)

と記されており、人生観を大きく変えられたことが推測される。原爆投下後の1か月ほど後に学術研究会議（日本学術会議の前身）による調査研究に参加され、広島・長崎を現地調査された。この時に撮影された写真や調査資料が、写真3のように5袋に収納されていた。

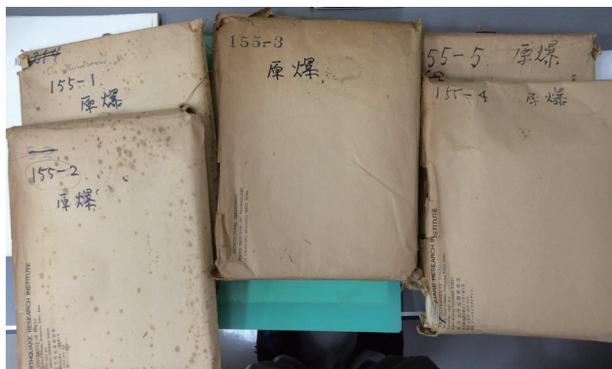


写真3 原爆被害調査資料の外観

この資料に限らないが、金井先生は大変几帳面に多くの資料を残されている。誌面の都合上詳細を記せないが、この5袋の内容を大別すると、①写真類：広島市内各地を撮影したと考えられるプリント（キャビネ版）64枚、長崎市内が55枚、その元となるフィルム計38枚、電柱の振動実験の写真が11枚とパノラマ写真（繋ぎ合わせ）が数枚、②手書きの原稿4件（後述）、③出張証明書類、④学術研究会議関連の報告書類（多くはガリ版刷り）、⑤金井研究室備忘録（日誌、B5判ノート2冊）、⑥地図類、メモなどである。金井研究室備忘録（前田敏雄氏記入）によれば、金井先生は熱線跡や爆風の調査にあたり、写真は調査に同行した前田助手が主として撮影したことが記されており、撮影場所・方角なども丁寧に記されている。他の記事からは、当時の研究室のあり方が垣間見られるような感がある。写真類は箱に収納し、紙片類は項目に分けて、クリアファイル2冊に収納し、全てを広島平和記念資料館に寄贈を申請し、受理された（2018年11月）。その後、資料館学芸課の落葉裕信氏の下で写真を含め全ての資料が画像電子化され、そのコピー（DVDと整理表）は、ご厚意により本年8月に東大地震研と筆者に送って頂いた。

手書きの原稿4件について、触れておきたい。一つは日本学術会議報告集<sup>3)</sup>への原稿で、2つ目は爆風を対象とした調査報告で未公表・未完のものである。その他に、地震研究所銘入りの400字詰め原稿用紙に、署名はないが「原子爆弾空襲の体験」と「原子爆弾による広島市の損害に就て」と題する、2編の手書きの原稿が見つかった。内容と筆跡は明らかに金井先生ではない。紙面の都合上詳細は披露できないが、この原

稿は、金井先生の広島一中時代の同級生で、東大医学部付属病院長を務められた心臓外科の本本誠二先生が、1945年8月6日広島に帰郷されていて原爆被害に遭われ、その体験を記述された直筆の未発表原稿であることが判明した。この2編の原稿も金井先生の資料と共に、広島平和記念資料館に寄贈された。執筆者が明確になったことから、ご息女の松田雅子様から寄贈していただいた。当時の地震研究所は東大病院と近接しており、中学時代からのご学友でもあり、特に原爆の被害に関しては密接なご連絡を取り合われたと想像するに難くない。しかし、なぜ執筆されてから70年ほど金井先生の紙袋の中で眠り続けていたのか、残念ながら最早知る由もない。

### 謝辞

金井先生の学術関係の全ての資料をご提供いただいた大橋様ご夫妻に心より御礼申し上げます。日大生産工学部建築工学科の諸先生、中でも川村名誉教授、廣田教授のご尽力により、書籍類の纏まった保存が可能となり、師橋教授からは本稿に貴重な教示をいただきました。木本先生の貴重な原稿であることが確認できたのは、ご息女の松田雅子様、甥にあたられる山内久明東大名誉教授、心臓血管外科医療でご後輩の高本眞一東大名誉教授のご理解とご尽力の賜物です。広島平和記念資料館の落葉様には十分な整理が行き届いていない資料を快く受理していただき、資料のデジタル化とその複製を寄贈していただきました。地震研究所での資料保存にあり、創立100周年のための資料収集に尽力されている桑原史治氏、小原一成教授（当時所長）、三宅弘恵准教授に大変お世話になりました。また、太田裕元東大地震研教授（本会名誉会員）には、当初からご相談に預かりました。お世話になった方々に深甚から御礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 萩原尊禮：地震予知と災害、丸善、1997、pp.56.
- 2) 金井清：米寿者の追懐、文献社、1995、pp.39.
- 3) 金井清：広島における原子爆弾の爆心地、原子爆弾災害調査報告集 第一分冊、日本学術振興会刊、1953、pp.92-98.



工藤 一嘉（くどう かずよし）

1968年 東北大学大学院理学研究科修了、東京大学地震研究所助教授を経て日本大学生産工学部教授（研究所）、同非常勤講師、理学博士、現在は全て退職、専門は強震動地震学

# 「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会」 成果報告会 開催報告

高田 毅士

●東京大学大学院工学系研究科 教授

## 1. はじめに

我が国においては、地震は避けることのできない自然ハザードであり、原子力発電所の地震安全確保は最重要課題である。原子力発電所の持続的安全性確保のためには、福島事故の経験等や新たな知見を踏まえ、様々な安全性向上活動をトータルに扱って相互に整合性のとれるような体系を目指した、リスクと深層防護の概念を根幹に置いた新しい安全性確保の基本原則が必要である。

日本地震工学会は、「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる研究委員会」を2016年5月に設立し、地震安全に関わる広範な分野の密接な連携の下、多様で深い議論を通して、地震安全に関わる基本原則を明らかにし、それを共有化した上で原子力発電所の安全確保の実践的研究を行ってきた。

このたび、上記の活動成果を取り纏め、「『地震安全の原則』の提案と具体化に向けて」と題した成果報告会を2019年7月12日に専売ホール（東京都港区）にて開催した。主催は日本地震工学会、協賛は日本原子力学会および土木学会原子力土木委員会で、参加者は95名であった(写真1)。



写真1 成果報告会の様子

## 2. 開催概要

報告会のプログラムは表1に示す通りである。

最初に、中笠良昭日本地震工学会会長からの挨拶、そして本委員会の顧問でもある日本原子力学会標準委員会原子力安全検討会宮野廣主査からの挨拶があった。

次に、高田毅士委員長から「『地震安全の原則』の提案と具体化に向けて」と題して、趣旨説明が行われた。

続いて、高田孝編集WG主査から「地震安全の原則とその基本的考え方」について、糸井達哉幹事および藤本滋活用WG主査から「地震安全の原則の対地震ハザード設計への適用」について、報告があった。

その後、外部専門家である山口彰氏（東京大学）、小長井一男氏（東京大学名誉教授）、藤田聡氏（東京電機大学）を迎えてパネルディスカッションを行い、参加者からも様々な意見をいただいた(写真2)。



写真2 パネルディスカッションの様子

## 2.1 報告内容

「地震安全の原則とその基本的考え方」では、リスクと深層防護の概念を根幹とした基本理念ならびに、基本理念を実際の設計や運用の観点で具体化し共有することを目的とし、地震安全原則を策定したことが報告された。

「性能確保のための設計体系に対応する地震ハザード評価の体系」では、「耐震設計（揺れに対する設計）」から「対地震ハザード設計（地震がもたらす多様な効果に対する設計）」への考え方の変化や設計用地震ハザードの設定の考え方について、報告された。

「対地震ハザード設計体系」では、地震安全の原則に基づき、これまでの知見と整合性が取れる原子力発電所の土木構築物、建築物や発電設備システムなどの耐震設計体系を提案し、深層防護とリスクの概念を取り込んだ性能設計体系を構築したことが報告された。

表1 成果報告会プログラム

司会：成宮祥介（委員会副委員長、JANSI）

日本地震工学会会長挨拶	中埜良昭（本会会長、東京大学）
日本原子力学会標準委員会原子力安全検討会主査挨拶	宮野廣（委員会顧問、法政大学）
趣旨説明	高田毅士（委員会委員長、東京大学）
地震安全の原則とその基本的考え方	高田孝（委員会編集WG主査、JAEA）
性能確保のための対地震ハザード設計への適用 (1) 性能確保のための設計体系に対応する地震ハザード評価の体系	糸井達哉（委員会幹事、東京大学）
性能確保のための対地震ハザード設計への適用 (2) 対地震ハザード設計体系	藤本滋 (委員会活用WG主査、神奈川大学)
パネルディスカッション 「原則の意義と今後の活用」	司会：高田毅士（前掲） パネリスト： 山口彰（東京大学） 小長井一男（東京大学名誉教授） 藤田聡（東京電機大学）
パネルディスカッション総括	成宮祥介（前掲）

## 2.2 パネルディスカッション

パネルディスカッションでは、委員会で掲げた論点を中心に、活発な議論が行われ、パネリストから重要な意見をいただいた。

- ・地震安全の原則は特別と考えられるが、なぜ必要か踏み込み切れていない。
- ・原則と実装に向けた検討内容に対しては、目的から要求への繋がりの議論がまだ足りない。
- ・①不確定性、②広域性、③共通原因故障、④随伴性といった地震の特殊性を考慮した原則であるべき。といった本質的な意見もあれば、
- ・リスクも便益も踏まえた原則になっていれば海外への技術展開への拠り所になり、原子力分野以外にも大いに活用できると思う。
- ・想定地震の設定やモバイル設備の評価に役に立ち、「何でも基準地震動で評価」という状況から脱却できるのでは。
- ・学協会では原則の使い方について今後議論する場を設けていきたい。

といった建設的な意見もあった。

参加者からも様々な意見をいただき、地震安全の原則の必要性は認識していただいたと感じているが、実機への適用にはより踏み込んだ検討が必要であることも一層明確になったと考えられる。

## 3. おわりに

成果報告会では、委員会における3年間の研究成果を示すとともに、活発な議論がパネルディスカッションで行われ、パネリストのみならず会場からも様々な意見をいただいた。委員会活動は2019年7月で終了となったが、成果報告会で配布した報告書は最終版ではなく、現在、報告会の意見も踏まえて最終報告書の取り纏めを進めている段階である。

今後は、学協会における規格基準策定において、委員会成果を展開していく予定である。

なお、成果報告会で使用された資料は委員会のWebページ (<https://www.jaee.gr.jp/jp/research/research12/>) にて公開しているので参照されたい。

# 第17回世界地震工学会議(17WCEE)の準備状況

## 17WCEE学術プログラム委員会

### 1. はじめに

2020年9月に予定されている第17回世界地震工学会議(17WCEE)の準備状況が、2019年9月20日に開催された日本地震工学会大会の横断セッション「第17回世界地震工学会議(17WCEE)の成功を目指して—新しい企画と準備状況の説明—」で紹介された。本稿では、そのときに報告された「17WCEE 全体プログラムと準備状況」(東京大学・目黒公郎)、「17WCEE 学術プログラムの全体」(東京大学・高田毅士)、「若手Brainstorming Session について」(慶應義塾大学・小檜山雅之)に基づき、学術プログラムを中心に17WCEEの準備状況等を紹介する。

### 2. 学術プログラムの概観

17WCEE ではTowards Disaster Resilient Society (災害に強い社会を目指して)をメインテーマとして、以下の主要な研究テーマが掲げられている。

- ・他分野連携と国際連携による震災軽減
- ・原子力発電所と地震・津波問題
- ・大規模数値シミュレーションによる地震防災技術の展開
- ・長周期地震動と構造物応答
- ・スマートシティと都市防災

17WCEE のプログラム構成は以下の通りである。

- 1) 基調講演 (IAEE推薦4名+学術プログラム委員会選定7名)
  - 2) 招待講演 (学術プログラム委員会推薦10名)
  - 3) IAEE企画 (マスターズセッション)
  - 4) 地震工学の進むべき道を議論するセッション
  - 5) 新しい形態のOSの企画
  - 6) 新しい発表方法の試み
  - 7) ブラインドテストセッションの企画
  - 8) スポンサー・セッション
  - 9) Grant-in-Aid, Early Career and Student Awards
- 3)～6)については4. 以降で概要を紹介する。

### 3. アブストラクト投稿状況

2019年9月15日にアブストラクトの電子投稿が締め切られた。この時点における国別の応募状況を図1に、分野別の応募状況を図2に示す。

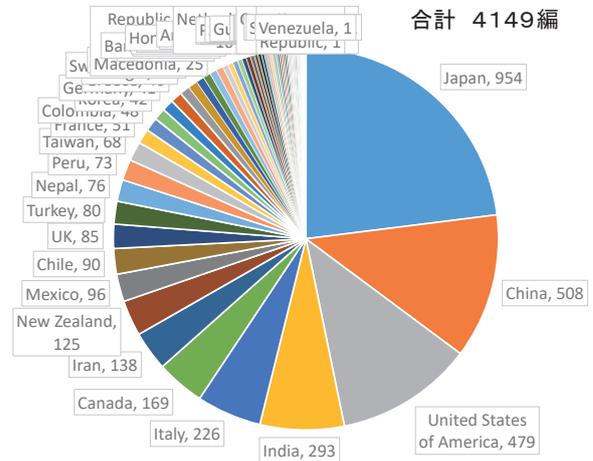


図1 国別のアブストラクト投稿状況

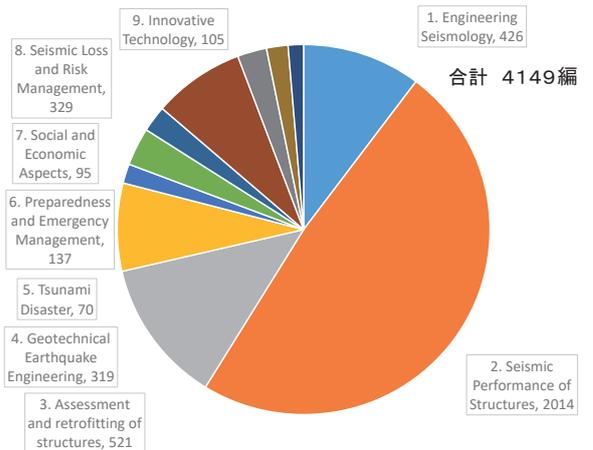


図2 分野別のアブストラクト投稿状況

全応募数は4149編であり、2週間延期したアブストラクト締め切り直前で投稿件数が大幅に増加した。ホスト国である日本からの投稿が954編で最大であり、次いで中国の508編、米国の479編と、この3つで全体の約半分を占める。以下、インド293編、イタリア226編、カナダ169編、イラン138編、ニュージーランド125編、メキシコ96編、チリ90編、英国85編、トルコ80編、ネパール76編、ペルー73編、台湾68編、フランス51編、コロンビア48編、韓国42編、ドイツ41編、ギリシャ40編、等となっている。

アブストラクト募集時の投稿分野は以下のとおりである。

- 1) Engineering Seismology (工学的地震学)
- 2) Seismic Performance of Structures (構造物の耐震性能)
- 3) Assessment and retrofitting of structures (構造物の評価と改修)
- 4) Geotechnical Earthquake Engineering (地盤耐震工学)
- 5) Tsunami Disaster (津波被害)
- 6) Preparedness and Emergency Management (対策と緊急時管理)
- 7) Social and Economic Aspects (社会経済的影響)
- 8) Seismic Loss and Risk Management (地震損害とリスクマネジメント)
- 9) Innovative Technology (革新的技術)
- 10) Lessons Learnt from Earthquakes (地震の教訓)

分野別では、Seismic Performance of Structuresが2014編でほぼ半数を占める。次いで、Assessment and retrofitting of structuresが521編、Engineering Seismologyが426編となっている。

#### 4. 国際地震工学会(IAEE)の企画

国際地震工学会(IAEE)では、著名かつ引退された先生を招へいするマスターズセッションとして、以下の企画を計画している。

- 1) Read the Masters : 150頁程度の専門書モノグラフ
- 2) Greet the Masters : 記念講演会
- 3) Meet the Masters : 若手少人数との昼食または軽食会  
招へい予定の先生は片山恒雄(日本)、Luis Esteva Maraboto(メキシコ)、Theodosios P. Tassios(ギリシャ)、James O. Jirsa(米国)の4名である。

#### 5. 地震工学の進むべき道を議論するセッション

17WCEEのビッドペーパー(会議立候補時の提案書)で、次世代(若手)研究者によるFuture Directions of Earthquake Engineering(地震工学の将来展望)を議論するセッションが提示された。これを受け、以下に示す合計4テーマ(WCEE運営委員会から2テーマ、IAEEから2テーマ)について、Brainstorming Sessionが企画されている。

- 1) Emerging vulnerability
- 2) Super advanced exploration, simulation, and monitoring
- 3) Towards "Earthquake-Proof" Structures
- 4) Societal Resilience to Earthquakes and Tsunamis

会議2～5日目の午前中に2時間程度、1テーマずつ実施される。WCEE運営委員会のセッション1)、2)では、コーディネーターによる主旨説明、シニアパネリストによる基調講演、若手パネリストによるブレイクアウトミーティング/ディスカッション、マスターズによる講

評、まとめから構成される。事前に数回のミーティングを実施し、ディスカッションの方針、シナリオを準備し、これらの議論のresolutionを会議最終日(閉会式)に発表する予定である。

#### 6. 新しい形態のOSの企画

オーガナイズドセッション(OS)は、以下の4つの形態で募集された。いずれも1～2時間のコマで予定されており、締切時に112件のOSが提案されている。

##### 1) Mini-symposia (MS)

MSは地震工学の学際的かつ横断的分野で特定の課題について、招待発表ならびにパネル討論を実施する。3～8件の招待発表や特定課題に関するパネル討論からなる。

##### 2) Invited Talk Sessions (ITS)

ITSは地震工学の特定課題をフォーカスして最新知見に関する専門家や研究者からなる。口頭発表として扱われ、通常の技術セッションと考えられる。4～8件の技術発表からなる。

##### 3) Special Sessions (SS)

SSはパネル討論や非技術的発表(研究資金、起業、技術移転など)や、異なる課題に共通要因などに関する討論など。

上記、1)～3)については、いずれも発表者は1頁の発表梗概を作成し、それを17WCEEのウェブサイトより閲覧できるようにする。

##### 4) Concurrent Sessions (CS)

CSは講義形式で対話型のセッションで、通常の技術発表セッションである。テーマは会議のトピック分類による。通常、4～8件の発表があり、それぞれ異なる視点の発表となる。フルペーパーを投稿する口頭発表として扱われ、通常の技術セッションと同じである。

#### 7. 新しい発表方法の試み

17WCEEの発表形式は、以下の3通りである。

- 1) Oral (口頭発表、質疑を入れて12分予定)
- 2) Poster Presentation (PP、ポスター発表)
- 3) Short Oral Presentation (SOP、ショート口頭発表)

このうちSOPは、17WCEEで導入予定の新しい発表方法である。ショート口頭発表とポスター発表を組み合わせる形式で、口頭発表の機会を増やすことを目的とする。ポスター会場の一角に多数のSOPブースを配置し、ポスターコアタイムの最初に3分×5編程度のショート口頭発表を行う。SOPはポスター掲示とPPTもしくはPDFの提出を必須とする。

## お知らせ

### ■ 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 <https://www.jaee.gr.jp/>

会員ページ <https://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 <https://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っ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 (<https://www.jaee.gr.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。

## ■ JAEE Newsletter 第8巻 第3号 (通算第25号) が2019年12月下旬に発刊されます。

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、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。

JAEE Newsletterについては以下のサイトで掲載しております。

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

最新号(第8巻 第2号)では、論文賞、功績賞、功労賞、論文奨励賞を受賞された皆様からの声を掲載しております。また、第17回世界地震工学会議(17WCEE)のお知らせも掲載しておりますので、ぜひご覧ください。

## ■ 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。是非とも皆様方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」(<https://www.jaee.gr.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](mailto: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](mailto:office@general.jaee.gr.jp)

## 編集後記：

本号の特集では、「平成の地震工学を振り返る」をテーマに、平成の30年余りにおいて発生した地震被害や、それらを通じて進化・発展してきた地震対策について取り上げました。

平成は災害の時代、とよく言われますが、本誌の編集を進めていく中で、改めて平成において発生した地震被害の凄まじさ、その多様さに驚きました。また同時に、多くの研究者、技術者の方々が地震工学に関する研究開発に着実に取り組まれ、平成を通じて、地震対策技術が目覚ましく進歩したことも再認識しました。平成を通じて蓄積されたこれらの技術や知見が、令和やその先の時代で待ち構えている、南海トラフ地震、首都直下地震への重要な対抗策となることは間違いありません。そういった意味で、平成の地震工学の歴史と進歩をまとめた本誌は、地震工学に携わる会員の皆様にとっても、とても有意義なものになるのではないかと感じています。

末筆ではございますが、ご多忙の中本誌の記事をご執筆いただいた著者の皆様に、心より御礼を申し上げます。また、編集及び校正作業にご尽力いただきました編集委員の皆様、関係各位にも深く御礼申し上げます。

塩見 謙介 (IHI)

「平成の地震工学を振り返る」と題した本号の特集では、平成時代に発生した被害地震の概要から、強震動、耐震・免震・制震設計、緊急地震速報、津波対策、液化化対策等、実に多様な観点から、地震工学の最近30年程の発展と、今後の展望をご執筆いただきました。平成時代に、地震工学の発展に多大な貢献をされた方々の原稿を読んでいますと、苦心されながらも地震防災・減災のために一步一步、研究・開発を進めてこられた事実や背景が分かり、本号の編集幹事としても万感の思いがしました。また、それらを踏まえた今後の展望からは、令和時代における地震工学研究の発展が垣間見えます。

当然ですが、自然災害には時代という境目がなく、今後も容赦なく我々を襲ってくるはずですが、そのような災害に同様に対峙していく令和時代における地震工学研究の歩みに、本特集号の内容が何らかの形で役立てば幸いに存じます。

最後に、ご多忙の中にも関わらずご執筆いただきました著者の皆様方、そして、原稿編集にご協力いただいた本誌編集委員の皆様方に深く御礼申し上げます。

福谷 陽 (関東学院大学)

## 会誌編集委員会

委員長 永野 正行 東京理科大学

幹事 塩見 謙介 I H I

幹事 福谷 陽 関東学院大学

委員 浅野 公之 京都大学防災研究所

委員 入江さやか NHK放送文化研究所

委員 岩田 直泰 鉄道総合技術研究所

委員 小穴 温子 清水建設

委員 王 欣 東京理科大学

委員 大西 直毅 東京大学

委員 大野 卓志 高圧ガス保安協会

委員 寺島 芳洋 竹中工務店

委員 肥田 剛典 東京大学

委員 平井 敬 名古屋大学

委員 成田 修英 戸田建設

日本地震工学会誌 第38号 Bulletin of JAEE No.38

2019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 2019

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