

地震 ジャーナル

68

2019年12月

エッセイ 伝えることは難しい

●橋本 学

南海トラフ沿いの異常な現象への防災対応 ●福和伸夫—— 1

理論地震記録を教師データとした機械学習による震源決定 ●坪井誠司/杉山大祐——14

トルコマルマラ海域の地震・津波災害軽減とトルコの防災・教育

—2013～2017年度 SATREPS 研究成果の概要— ●金田義行——25

深海魚と地震 ●織原義明——40

茨城県の地震の特異性 ●松村正三——44

●書評——51

●新刊紹介——54

●ADEP情報

囲み記事 2019年6月18日山形県沖の地震 (M6.7)

蛇籠を用いた簡易補強工法の検証実験

いにしへのジャーナル記事

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

伝えることは難しい

橋本 学

地元の自治体の防災担当の方に、「先生、津波はいいとして、地震の揺れのハザードマップは、どう使ったらいいんでしょう？」と訊ねられ、答えに窮したことがある。自分たちの住むところで「最大震度6強の揺れが起きる」と言われても対応しようがないと言われた。「耐震補強するとか、家具を固定するとか、できることを進めてください」と返すのが関の山だった。ちょっと考えてみるとわかることだが、津波や洪水の浸水ハザードマップは、事が起きてから時間的猶予があるので、避難に活用できる（可能性がある）。ところが、強い揺れが予想される場所にいたら、地震が起きてからでは逃げようがないのだ。こんなことに気づかなかったのか、と恥じ入るしだいであった。

一昨年から、大学の公共政策学を専門とする同僚と、小さなワークショップを何度か開催している。南海トラフ地震の発生シナリオを準備して、その進展にそって仮想の臨時情報を発表し、そのつど参加者にいろいろ考えてもらう、というものである。いろんな反応があって面白いのだが、「情報そのものが難しい」という感想が必ずある。私の説明もよくないのだろうが、根本的にまずいことがあるに違いないと感じる。もちろん南海トラフ地震の発生メカニズムや臨時情報が出されるようになった経緯などを、自分なりに平易な言葉で紹介しているつもりだ。だが、それらは聴衆の主たる関心ではないようだ。

おそらく多くの地震研究者が同様の経験をお持ちだと思う。地震研究者は、最先端の研究成果に基づいた最高水準の情報を提供することが、防災への最大の貢献と考えているだろう。得てして研究者は自分たちの成果を語りたくなくて、そちらに力を込めて話してしまう。しかし、生活者の立場で考えると、自分たちが暮らしていくための安全（あるいは危険）情報がほしい。どんなことが起きて、どう対処するのがよいのか知りたい。多くの人は「地震研究者ならしっかり答えてくれる」と期待している。ここに大きな齟齬がある。

かつて日本の家電メーカーはTVに特別な機能など高付加価値を付けて世界で競争したが、見事に敗北した。基本的な機能のみの他国の製品に価格競争で勝てなかった、といわれている。うり二つではないか？どちらもサブライ・サイドの一方的な考えで推し進められてきたのだ。地震防災における地震の科学も同じ轍を踏むのではないか、と老“爺”心ながら思う。



橋本 学

〔はしもと まなぶ〕

現職 京都大学防災研究所所長

略歴 京都大学大学院理学研究科博士課程修了、建設省国土地理院地殻調査部観測解析課長、京都大学防災研究所地震予知研究センター助教授、教授を経て現職

研究分野 地殻変動論、宇宙測地（特にSAR）

著書 「防災学ハンドブック」（共著、朝倉書店）

南海トラフ沿いの異常な現象への防災対応

福和伸夫

1. はじめに

平成が終わり令和の時代になった。私は、昭和を32年間、平成を30年間過ごし、令和を迎えた。昭和の時代に育ててもらい、平成とともに大学に異動し、建築耐震工学や地震工学の教育・研究に携わった。

中学生のときにプレートテクトニクスを知り、大学2年のときに東海地震説で社会が騒ぐ様子を見た。警戒宣言の訓練で地震学者がパトカーで運ばれる映像を見て不思議に感じたのを覚えている。この時期は、南海トラフ地震の話は私にとっては縁遠い問題だった。

建築構造を専攻した私は、1968年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震の建物被害を学びつつ、固体力学や弾性波動論に基づく卒論・修論をまとめ、1981年新耐震設計法導入とともに社会人になった。建設会社で、構造物と地盤との動的相互作用に関する研究を中心に原子力発電施設の耐震研究や、免震・制振技術、宇宙構造物、知識工学、微振動対策など、課題解決型の研究に精力的に取り組んだ。

平成元年に学位を取得して、1991年に大学に異動し、建築耐震工学や地震工学に関わる教育・研究に携わった。原子力発電施設や高層建築、免震・制振建築などの先端建築に携わっていた私は、耐震研究は十分に成熟し、大きな課題は残っていないと勘違いしていた。そんな私にとって、1995年阪神・淡路大震災での甚大な被害は衝撃的で、強震動や一般建築物、住宅の耐震化の重要性を実感し、地盤震動や耐震化推進の問題に取り組むことになった。

21世紀になり、想定東海地震の震源域の見直しによって、名古屋市も地震防災対策強化地域に

参入された。中央防災会議の東海地震対策専門調査会に参加したこともあり、その後、南海トラフ地震に深く関わるようになった。とくに、耐震化推進や災害被害を軽減する国民運動作り、被害予測や防災施策立案に力を注ぎ、その過程で、災害情報や防災教育に取り組むことになった。

2011年東北地方太平洋沖地震では、想定を超える被害を見て、切迫する南海トラフ地震に対し危機感を覚えた。その後、東海地域を中心に地震対策にいっそう真剣に取り組むことになった。当初は、突発災害を前提にした被害予測や防災対応、長周期地震動問題、製造業の産業防災などに取り組んだ。しかし、一昨年に「確度の高い地震発生の子測は困難」との見解が示されたため、南海トラフ地震臨時情報の問題に直面することになった。

私は、課題解決型の研究を志向する工学者ゆえ、それぞれの時代の社会が抱える課題を解決することを旨とし、研究課題は社会の要請に応じて変容してきた。近年は、防災・減災施策作りや社会の仕組み作りなど、社会科学的な研究の必要性を感じている。社会との関わりが増すに従い、科学と社会とのギャップの中で苦悶することが多くなった。社会に関する理解が不十分な中で、実力を超えて社会的発言をしがちな科学と、科学の実力を理解せずに過度な期待をしがちな社会が存在するため、さまざまな葛藤が生じていると感じる。

元来、地震研究は、科学的研究と被害軽減研究とを併せ持つものだった。1880年に設立された日本地震学会の総会で、ミルンは、「地震と火山に結びついたあらゆる事実を集めて組織化するのが、この会の主な目的」と語り、日本地震学会報告第一冊に、これからの日本の地震学はたんなる「地動ノ記載」に止まることなく、「地震ノ原因」と「其ノ万物ニ及ボス影響」を広く論究する必要

がある、と述べている。

1891年濃尾地震を受けて設立された震災予防調査会は、その報告第1号に、調査会は地震の災害を予防することを目指し、「一面に於ては地震を予知する方法があるのか否か」、また「一面に於ては地震が起こった際にその災害を最少にする計画を作る」とし、「調査事業の一部分はもっぱら理学に関し、一部分は主として工学に係るが、両者の間には緊密な関係があり、分離すべきではない」と記している。

また、地震研究所にある寺田寅彦による銘板には、「本所永遠の使命とする所は地震に関する諸現象の科学的研究と直接又は間接に地震に起因する災害の予防並に軽減方策の探究とである。」と記されている。

まさに、国難とも言える事態が予想される南海トラフ地震は、科学と社会が協力し、あらゆる力を結集して全力で課題解決に当たるべき問題である。直前予知の難しさが分かった一方で、観測網の整備により異常な現象が検知されやすくなった現状を考えると、異常現象の検知時には、さまざまな学説が提示されそうである。臨時情報という不確実な情報をいかに受け止め、被害軽減に活用するか、社会の知恵が問われている。

耐震工学の始祖・佐野利器は、関東地震の後、建築雑誌の1926年10月号に「耐震構造上の諸説」と題する論文を著し、「諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するの実技である、建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない。」と述べた。

科学と社会をつなぐ役割を担ってきた工学研究者や官僚、メディアは、近年、余裕をなくし目利き力を減退させている。専門分化や縦割り化とともに、大局観や俯瞰的な見方を持って、大きな課題に取り組んだり、社会的な合意形成をすることが不得手になってきた。今こそ、社会の力を回復し、理科に過度に頼っていた南海トラフ地震の問題を社会科の問題と捉え、科学と社会が一致協力して、よりよい答えを探求していく必要がある。

2. 気になる現代社会の状況

昨年2018年は「災」の年だった。年初から噴火、豪雪、地震、豪雨、猛暑、台風と続いた。

島根県西部地震(M6.1, 最大震度5強, 住家被害651棟, うち全壊17棟)、大阪府北部の地震(M6.1, 最大震度6弱, 住家被害61,770棟, うち全壊21棟)、北海道胆振東部地震(M6.7, 最大震度7, 住家被害15,978棟, うち全壊469棟)の被害を比べると、人口集中が被害を激増させることが分かる。

1995年兵庫県南部地震(M7.3)では、大阪府の最大震度は4、揺れによる大阪府内の住家被害は96,665棟、うち全壊は895棟だった。大阪府北部の地震では、最大震度が大きいのに家屋被害が減り、耐震化の成果のように見える。しかし、24年前の大阪府内の震度観測点は大阪管区気象台のある大手前の1点のみ、現在は88点もある。大手前の揺れを比較すると、大阪府北部の地震の揺れは24年前の揺れに比べ1/3程度である。自治体震度計の整備の結果、兵庫県南部地震の前夜で最大震度に大きな差があることには注意を要する。一昔前であれば最大震度4以下の揺れでこれだけの被害を出したことは問題がある。

大阪府北部の地震では6万3千基ものエレベーターが緊急停止した。府内の保守対象エレベーター数は7万6千基程度であり、半数以上が緊急停止したことになる。なかには閉じ込めも発生した。直下の地震でP-S時間が短いため、地震管制運転装置が役立たなかった。東京都には16万基を超えるエレベーターが存在する。首都直下地震での予想閉じ込め人数は1万7千人に及ぶとされ、現状の消防力では早期の救出は困難であり、餓死者発生も懸念される。いまだ、緊急停止機能が付いていないエレベーターが多数残っており、南海トラフ地震の臨時情報発令時に、エレベーターの使用を躊躇すれば、大都市は社会機能を大きく損なう怖れがある。

大阪府北部の地震での地震保険支払額は阪神・淡路大震災を超えた。地震保険加入率は3割程度

だったが、支払件数は15万件弱、支払額は1,033億円にも上った。行政が把握する住家被害数とはオーダーの異なる被害数である。また、昨年の風水害による損害保険金支払額は1兆円を超えた。現状の地震保険積立金は1兆8千億円程度しかなく、支払限度額も11兆7千億円である。損害保険会社の総資産が25兆円程度であることを考えれば、数百兆円にも及ぶ経済被害が予想される南海トラフ地震では、保険への過度な依存は危うい。

北海道の地震では、火山堆積物が覆う厚真の山々が大規模に崩落した。過去の地震でも、2016年熊本地震での阿蘇大橋周辺の土砂崩れ、2008年岩手・宮城内陸地震での栗駒山周辺の土砂崩れ、1984年長野県西部地震での御嶽山の山体崩壊など、同様の被害を繰り返し受けてきた。1923年大正関東地震で、神奈川県秦野市に震生湖ができたことは忘れておきたい。

北海道での全道停電も気掛かりな問題である。停電で社会のあらゆる機能が停止した。北海道では、電力自由化による経営上の厳しさもあり、新鋭の苫東厚真火力発電所に過度に依存していたため、発電所停止で需給バランスが崩れ、全道停電に陥った。また、北本連系線も、直流送電だったため、停電時には機能ができなかった。

南北に長い日本の電力システムは、串団子状の連系線構造になっているため、面的に広がる欧米と比べ脆弱である。東西で周波数が異なり、周波数変換能力に限りがあるため、南海トラフ地震のような大規模震災時には、電力融通には限りがある。また、一連の台風災害では、広域での被害発生で、要員不足により送配電設備の復旧に時間を要した。内陸に位置する県は、沿岸府県の発電所に頼っている。復電は発電所に近い沿岸部から順に行われる。南海トラフ地震では、西日本の多くの火力発電所がいったん停止するため、被害が少ない内陸部の復電に相当な時間を要すると思われる。

そもそも、電気と工業用水と燃料は相互依存関係にある。揺れや津波による直接的な被害だけでなく、工業用水が途絶したり、航路啓開が遅れLNG船が長期間入港できなければ発電はできな

い。

西日本豪雨での東西の物流途絶による全国の産業への影響や土砂災害による呉市の孤立、大阪府北部の地震での交通マヒによる出勤・帰宅困難、台風21号での連絡橋損壊による関西空港の孤立など、昨年の災害から学ぶことは多い。これらの事態がすべて現れるのが、南海トラフ地震である。

3. 過去の南海トラフ地震

南海トラフ地震の発生履歴は、図1のようにまとめられているが、近年、慶長地震の発生場所や、安政地震と昭和地震の震源域の住み分け、2種類の地震発生パターンの考え方など、多様な議論があるようだ。そもそも、地震発生の長期評価は、過去の地震発生履歴に基づいているので、結果を利用する側の社会は、幅をもった理解が必要だと感じる。

過去の地震をみると、南海トラフ地震は、駿河湾エリアを除けば、ほぼ同時期に震源域全体が破壊している。素人目にも、震源域の約半分で地震が起きれば、数年以内には残りの震源域で地震が起きそうだと考えるのが自然だと感じる。また、慶長地震を含めれば100年程度、慶長地震を含めずに安政地震と昭和地震を1つと考えると200年程度の間隔で活動しているようにも見える。

すでに昭和地震から75年、安政地震から165年が経過しているため、令和の時代に南海トラフ地震が起きる可能性は高そうである。南海トラフ地震発生の30~40年前から、西日本で地震活動が活発になると言われているが、たしかに平成の30年間は西日本で地震が多かったと感じる。

過去の南海トラフ地震と歴史との関係のみをみると、その影響の大きさが分かる。今年、改元の年だが、かつて災異改元が行われていた時代には、京都周辺の地震、関東に幕府があったときの関東地震、南海トラフ地震が発生したときに、改元していた。最近で言えば、1596年慶長伏見地震の後の文禄から慶長、1703年元禄関東地震の後の元禄から宝永、1854年安政東海地震・安政南海地震の後の嘉永から安政への改元に当たる。

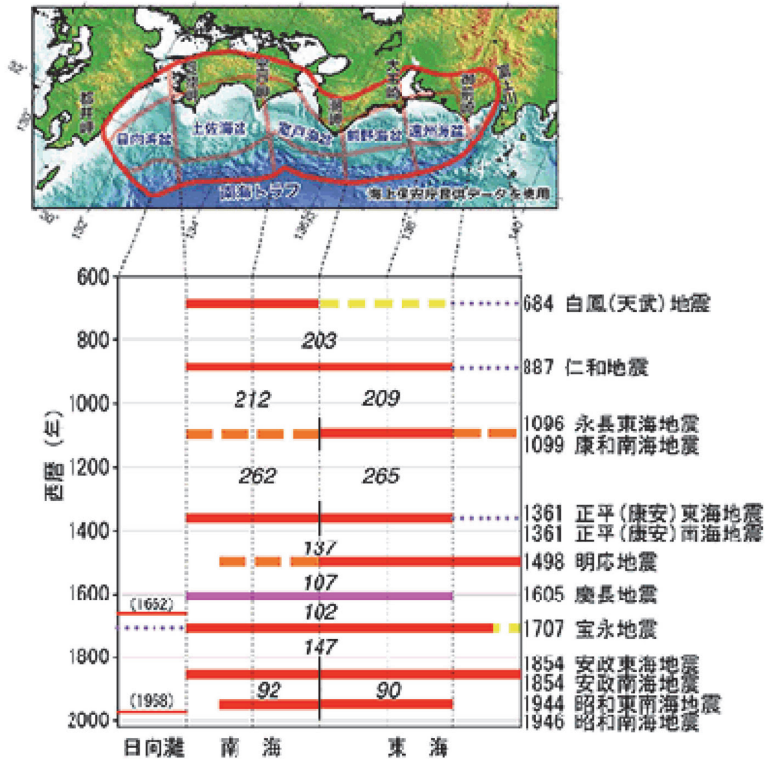


図 1 過去の南海トラフ地震 (内閣府 HP より)

いずれも、安土・桃山から江戸、元禄文化の終焉、江戸から明治と、歴史の転換期に一致する。これらは、1605年慶長地震、1707年宝永地震、1854年安政地震前後の地震の活動期とも重なる。

現在は、代始改元しかないが、災異改元が残っていたら、1923年関東地震、1944・46年昭和東南海・南海地震、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震では改元もあり得ただろう。

南海トラフ地震を原因とする改元には、安政地震の他に、1097年永長地震による嘉保から永長、1185年康和地震による元暦から文治、1362年承平・康安地震による康安から貞治への改元がある。南海トラフ地震が起きれば、改元せざるを得ないような社会状況に陥るのであろう。

1959年伊勢湾台風以降の昭和後半の30年間と平成の30年間を比較すると、平成の地震災害の多さが分かる。死者200人以上の平成の地震は、兵庫県南部地震、東日本大震災、1993年北海道

南西沖地震、2016年熊本地震と4つあるが、昭和後半は1983年日本海中部地震の104人が最大である。

日本近海での気象庁Mが8以上の地震は、昭和後半には1963年択捉島付近の地震だけだが、平成には東北地方太平洋沖地震、1994年北海道東方沖地震、2003年十勝沖地震と3つある。

西日本内陸での地震も、昭和後半は1968年えびの地震や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、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震、新潟県中越沖地震、2011年長野・新潟県境の地震、2014年長野県北部の地震、2016年熊本地震、2018年大阪府北部の地震などがある。

1948年福井地震後に設けられた震度階7は、昭和には記録されなかったが、平成には兵庫県南部地震、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震の前震・本震、北海道胆振東部地震と6

度も経験した。震度計の増加もあるが、平成は、南海トラフ地震発生の準備過程の30年間だったと言えるかもしれない。

4. 地震予知と大規模地震対策特別措置法

わが国の災害対策は、5,000人あまりの犠牲者を出した1959年伊勢湾台風での被害を受けて、1961年に公布された災害対策基本法に遡る。

同じ1961年に、坪井忠二、和達清夫、萩原尊禮の三氏が代表をつとめた地震予知計画研究グループが発足し、1962年に「地震予知一現状とその推進計画」（通称・ブループリント）をまとめた。地震予知実現のための具体的な道筋を示すとともに、巻末に「地震予知がいつ実用化できるか、すなわち、いつ業務として地震警報が出されるようになるか、については現在では答えられない。しかし、本計画のすべてが今日スタートすれば、10年後にはこの間に十分な信頼性をもって答えることができるであろう。」と記している。

これを受けて、1963年に文部省の測地学審議会に地震予知部会が設置され、日本学術会議も「地震予知研究の推進について」の勧告を発表した。さらに、1964年に測地学審議会が建議「地震予知研究計画の実施について」をまとめた。地震予知計画は、建議を第1次計画として1998年の第7次計画まで継続された。その間、1969年に、地震活動を学術的に議論する機関として地震予知連絡会（予知連）が設置され、1970年に観測強化地域や特定観測地域が指定された。さらに、1974年に科学技術庁が政策や予算の省庁調整を行う地震予知研究推進連絡会議を設置した。

この時期は、プレートテクトニクス理論が確立されたときに重なる。1962年に、ヘストとディーツが海洋底拡大説について、マシューズとヴァインが地磁気異常の縞模様について発表し、その後、1968年にウィルソンがウィルソンサイクルを発表して、理論が体系化されていった。また、1964年の汎用コンピュータIBM System/360の出現、東海道新幹線の開通、東京五輪、1969年のアポロ11号月面着陸、1970年の大阪万博など、

科学が急進展した時期にも一致する。

地震も活発だった。1964年新潟地震、1965年松代群発地震、1968年十勝沖地震、1974年伊豆半島沖地震が発生した。また、1975年に中国で起きた海城地震で、地震予知に成功したと喧伝された。

まさに、こういったタイミングの1976年5月24日に、石橋克彦氏が駿河湾地震説（東海地震説）の資料を地震予知連絡会に提出した。氏は地震学会秋季大会の予稿の中で、「確実な直前予知のためにまず何よりも必要なのは、各種観測計器が高密度に展開されかつそれらの信号が1ヶ所で集中記録され24時間監視されていることであろう。しかも集中記録される場所は、信号に対して絶えず的確な判断を下し、いざとなれば警報を出すことが出来る能力と権限を備えた機関でなければならない。さらにその機関は、自然科学的な観測・分析とその結果の無邪気な発表だけではなく、自らの流す情報の政治・経済・社会的影響をわきまえ、かつ絶えずそれを追跡調査してその結果を次の情報創出にフィードバックしてゆけるような能力と機能も備えていなければならない。また平常時にも駿河湾地震の予知と防災に関わる自然・社会・人文科学上のあらゆる研究のセンター的役割を演じ、一方絶えず地方自治体・地元住民を指導・啓蒙して最終的な警報が最も効果的に機能するよう努力を払っている必要がある。」と述べ、東海地区地震予知防災センターの設立を呼び掛けた。今、読んでも示唆に富んだ提言である。

東海地震説が発表された直後の8月18日に伊豆半島で河津地震が発生し、1976年10月には、地震予知研究推進連絡会議が地震予知推進本部に改組され、体制が強化された。さらに、1977年に、地震予知連絡会に東海地域判定会が設置された。

こういったなか、1978年1月14日に伊豆大島近海地震が発生し、静岡県民の動揺は大きかった。このため、静岡県知事の山本敬三郎氏や衆議院議員の原田昇左右氏の働きかけで、同年に大規模地震対策特別措置法（大震法）が制定された。

このように、東海地震説、静岡県での地震の続発と、地震予知に対する機運の高まりの結果、直

前予知を前提とした大震法が制定された。

大震法の成立後、予知連の東海地域判定会は気象庁の地震防災対策強化地域判定会に引き継がれた。しかし、1995年兵庫県南部地震の発生後、地震防災対策に重点を置いた地震防災対策特別措置法が成立し、同法に基づいて同年7月に地震調査研究推進本部が設置され、地震予知推進本部は解消された。

5. 阪神・淡路大震災以降の南海トラフ地震対応

兵庫県南部地震以降の南海トラフ地震対応は、2001年に中央防災会議が内閣府に移管された後に本格化した。

2001年の中央省庁再編に伴い、中央防災会議が国土庁から内閣府に移管され、東海地震に関する

専門調査会が設置された。この専門調査会で、最新の知見に基づいて東海地震の震源域の見直しが行われ、揺れの強い地域が西に広がった。専門調査会は、地震防災対策強化地域の見直し、東南海・南海地震の検討の必要性などを提言し、これを受けて、2002年に東海地震対策専門調査会と東南海・南海地震等に関する専門調査会が設置された。

2002年には、地震防災対策強化地域が拡大され、さらに、専門調査会で地震被害予測や対策方針が検討された。これを受けて地震防災戦略や地震対策大綱、応急対策活動要領が策定された。また、政令市・名古屋市が強化地域に含まれたため、交通機関停止による帰宅困難の問題が大きな課題となり、予知情報に加え注意情報が新設された。

表 1 南海トラフ地震に関わる戦後の年表

1946年	南海地震	1976年	駿河湾地震説
1948年	福井地震		河津地震
1950年	建築基準法		地震予知研究推進連絡会議が地震予知推進本部に改組
1959年	伊勢湾台風	1977年	地震予知連絡会東海地域判定会
1961年	災害対策基本法、地震予知計画研究グループ	1978年	伊豆大島近海地震 大規模地震対策特別措置法
1962年	地震予知一現状とその推進計画（ブループリント） 海洋底拡大説、地磁気異常の縞模様	1980年	地震財特法
1963年	文部省測地学審議会地震予知部会 日本学術会議勧告「地震予知研究の推進について」	1981年	新耐震基準の導入
1964年	測地学審議会建議「地震予知研究計画の実施について」 汎用コンピュータ IBM System/360 新潟地震、東海道新幹線開通	1995年	阪神・淡路大震災 地震防災対策特別措置法、耐震改修促進法 地震予知推進本部から地震調査研究推進本部へ
1965年	松代群発地震	2002年	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
1966年	地震保険に関する法律	2003年	東海地震対策大綱、東南海・南海地震対策大綱
1968年	ウィルソン「ウィルソンサイクル」 十勝沖地震	2007年	緊急地震速報の導入
1969年	地震予知連絡会 アポロ11号月面着陸	2011年	東日本大震災 津波対策の推進に関する法律、津波防災地域づくりに関する法律
1970年	観測強化地域や特定観測地域の指定 大阪万博	2013年	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
1974年	伊豆半島沖地震 科学技術庁・地震予知研究推進連絡会議	2014年	大規模地震防災・減災対策大綱
1975年	海城地震（中国）	2017年	南海トラフ地震に関連する情報
		2019年	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

東南海・南海地震についても同様な検討が行われ、2002年に東南海・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が制定され、地震防災対策推進地域の指定や、地震防災対策推進計画の策定が定められた。さらに、地震防災戦略や地震対策大綱、応急対策活動要領も策定された。

一方、気象庁は、2002年にナウキャスト地震情報検討委員会、2003年にはナウキャスト地震情報の実用化に関する検討委員会を設置し、2004年から緊急地震速報の試験運用を始めた。さらに、2005年に設置した緊急地震速報の本運用開始に係る検討会での検討を受けて、2007年から緊急地震速報の本運用を始めた。離れた震源の地震では強い揺れ到達までの猶予時間を確保することができるため、震源域が海域にある地震では、きわめて有用な情報となる。直前予知に頼った東海地震対策から脱皮する1つのきっかけにもなったと言える。

そして、2011年に東日本大震災が発生した。明快な前兆現象を捉えられなかったことや、想定を超えるM9.0の地震だったことなど、地震学にとっては大きな試練となった。震災後、中央防災会議に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が設置され、震災の教訓を踏まえた地震対策が検討された。この検討結果を受けて、2011年に津波対策の推進に関する法律や津波防災地域づくりに関する法律が制定され、都道府県知事が津波災害警戒区域や津波災害特別警戒区域を指定できることになった。

南海トラフ地震に関しては、内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会で、最大クラスの南海トラフ地震の震源モデルの検討が行われ、さらに、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループで被害予測を実施し、地震対策の基本方針が検討された。その予想被害量は、最悪、死者32万3千人、全壊家屋240万棟、経済被害220兆円と、甚大なものであった。

検討結果に基づき、2013年に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が制定され、南海トラフ地震防災対策推進基本計画の策定や、南海トラフ地震防災対策推進地域と南

海トラフ地震津波避難対策特別強化地域の指定が行われた。また、関係機関は具体的な応急対策活動に関する計画を策定することになった。計画策定に当たっては、最大規模の地震・津波が突発的に発生することを前提とし、ハード対策とソフト対策を組み合わせる被害軽減を図ることを基本にした。推進地域は、震度6弱以上になる地域や津波高3m以上で海岸堤防が低い地域が、特別強化地域は、30cm以上の浸水が地震発生後30分以内に生じる地域が指定された。

南海トラフの巨大地震モデル検討会は、長周期地震動に対する検討もを行い、2015年に「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」を公表した。これを受けて、国土交通省は2016年に「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」をまとめ、超高層建物の長周期地震動対策を強化した。

東日本大震災後、南海トラフ地震対策が進んだものの、直前予知に基づく警戒宣言発令を前提とする東海地震対策と、事前防災を基本とする南海トラフ地震対策が併存する状況が続いた。このため、2016年に南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループが設置され、大規模地震の予測可能性、地震観測やその評価体制、地震防災対応のあり方などについて検討を行い、2017年に「南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応のあり方について（報告）」をまとめた。報告では、大震法の前提になっていた直前予知について、「警戒宣言が前提とする確度の高い予測は困難」との見解が示された。あわせて、特別な対応をすべき異常な現象として、「半割れ」「一部割れ」「ゆっくりすべり」の3ケースが取り上げられた。「半割れ」は安政地震や昭和地震に対応し最も警戒するケース、「一部割れ」は東北地方太平洋沖地震の前震に相当する状況、「ゆっくりすべり」は想定東海地震に対する従来の考え方を踏襲したものと位置づけられる。

この報告を受け、同年11月より、気象庁が「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」（評価

検討会)を設置し、「南海トラフ地震に関連する情報」を發表することになった。情報には、「臨時」と「定例」があり、臨時情報は南海トラフ沿いで異常な現象が観測された場合などに發表される。これに伴い、警戒宣言発令は事実上凍結された。

しかし、この段階では、臨時情報發表時の社会の対応のあり方は示されなかった。臨時情報は、地震の発生可能性が高まったことを示すのに留まり、地震発生の時期、場所、規模などの情報は示されない。一方で、観測網の整備により異常な現象は検知しやすくなっている。このため、この不確実な情報を災害被害軽減にどう活かすかが問われた。こういった課題は、十分な時間をかけて議論を尽くすべきであるが、今後30年間の地震発生確率が70~80%という切迫性を考えると、速やかな方向付けも必要だった。

そこで、静岡県、高知県、中部経済界での約半年間のモデル検討を踏まえて、2018年に南海トラフ沿いの異常な現象への防災対応検討ワーキンググループが設置された。検討内容は、防災対応をとるべき南海トラフ沿いで異常な現象、その防災対応のあり方、防災対応を実行するに当たっての仕組み等であり、昨年末に「南海トラフ沿いの異常な現象への防災対応のあり方について(報告)」がまとめられた。

ここでは、地震発生の確実な予測ができないことを前提に、平常時より地震発生の可能性が相対的に高まった旨の情報に基づいて、減災に活用する方策を検討した。地震発生の可能性、社会の状況、受忍の限度等を踏まえ、最も警戒すべき防災対応の期間は1週間とし、地震発生の可能性の程度から、「半割れ」と、「一部割れ」「ゆっくりすべり」とでは異なる対応レベルにした。

住民、地域、企業等は、個々の状況に応じて、自ら可能な防災対応をあらかじめ検討・実施することを基本とした。最も警戒すべき「半割れ」時には、明らかに津波からの避難が完了できない地域の住民のみに1週間の避難を求めた。それ以外の地域の住民や企業などには、日頃からの地震への備えを再確認するなど警戒レベルを上げつつ、

可能な限り社会機能を維持することを求めた。

この報告を受けて、本年3月に内閣府から「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(第1版)」が示された。第1版と明記されているように、今後、検討・実施状況を踏まえ、内容を改訂することを前提にしている。ガイドライン公表に合わせて、気象庁からは「南海トラフ地震に関連する情報の名称について」が示され、気象庁から發表される情報も整理された。

6. 南海トラフ地震に関連する情報

気象庁が發表する南海トラフ地震に関連する情報は「南海トラフ地震臨時情報」と「南海トラフ地震関連解説情報」の2種類であり、南海トラフ地震臨時情報は、南海トラフ沿いで異常な現象が観測され、大規模地震と関連するかどうか調査を開始した場合、調査を継続している場合、調査結果を發表する場合に示される。また、南海トラフ地震関連解説情報は、調査結果を發表した後に状況等を發表する場合と評価検討会の定例会合の調査結果を發表する場合に示される。

南海トラフ地震臨時情報は、キーワードを情報名に付記することになり、「臨時情報(調査中)」、「臨時情報(巨大地震警戒)」、「臨時情報(巨大地震注意)」、「臨時情報(調査終了)」の4種類が定められた。調査中は調査を開始した場合または調査を継続している場合、巨大地震警戒は「半割れ」に相当すると評価した場合、巨大地震注意は「一部割れ」か「ゆっくりすべり」に相当すると評価した場合、調査終了は巨大地震警戒、巨大地震注意のいずれにも当てはまらないと評価した場合に發表される。

気象庁は、南海トラフの想定震源域およびその周辺でM6.8程度以上の地震が発生した場合と、プレート境界面で通常とは異なるゆっくりすべり等を観測した場合に、臨時情報(調査中)を發表し、評価検討会を開催する。Mはモーメントマグニチュードで定義される。

「半割れ」は、想定される南海トラフ震源域の

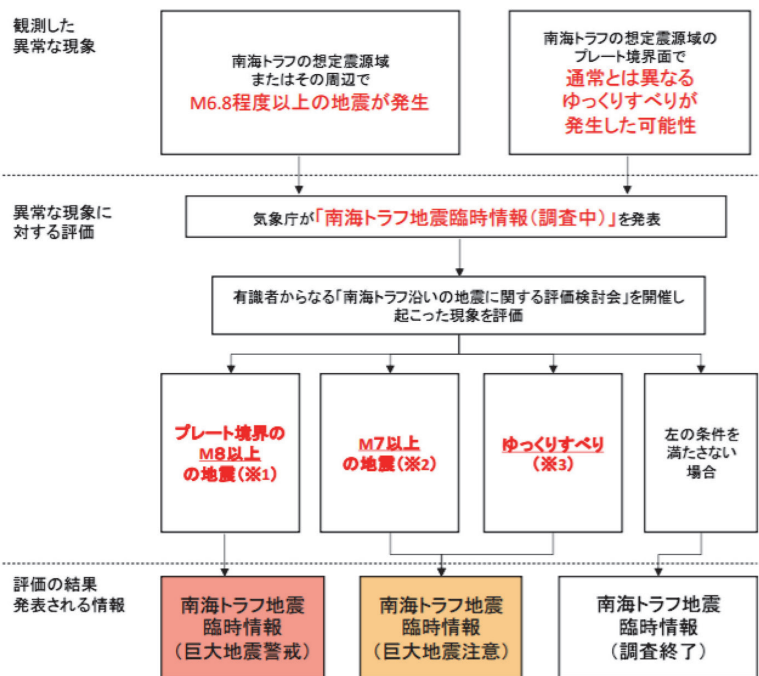


図 2 南海トラフ地震臨時情報（内閣府 HP より）

プレート境界で M8.0 以上の地震が発生した場合とされ、「一部割れ」は、想定震源域のプレート境界で M7.0 以上、M8.0 未満の地震が発生した場合と、想定震源域のプレート境界以外や海溝軸外側 50km 程度までの範囲で M7.0 以上の地震が発生した場合、「ゆっくりすべり」は、短い期間にプレート境界の固着状態が明らかに変化しているようなゆっくりすべりを観測した場合とされた(図2)。

ちなみに、規模が小さかった 1944 年東南海地震は M8.2 とされている。また、震源域の 7 割以上が破壊したら震源域全体が破壊したとみなすとされた。モーメントマグニチュードや震源位置を即時に精度高く評価できるかが課題といえる。

一方、南海トラフ地震関連解説情報は、臨時情報の発表後に、地震活動や地殻変動の状況等を発表するための情報である。事態の推移を解説するもので、とくに、「ゆっくりすべり」時には多くの関心を集めるとされる。多様な解釈があり得るので、気象庁の発表の仕方や、報道の伝え方などが課題となる。

「半割れ」の地震発生時には、気象庁から、緊急地震速報、震度速報、津波警報が発せられた後、地震発生後 5~30 分程度で、「南海トラフ地震臨時情報（調査中）」が発表され、大規模地震の発生可能性についての調査が始まる。その後、評価検討会での検討を踏まえ、最短 2 時間後程度で「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）」を發し、大規模地震の発生可能性が相対的に高まっている旨などを発表する。さらに、随時「南海トラフ地震関連解説情報」を発表し、事態の推移を解説することになる(図3)。

なお、南海トラフ沿いで M8 クラスの地震が起きた場合には、気象庁は、最大クラスの地震が発生したと考え、いったん、被災予想地域全域に大津波警報などを發し、震源域が明らかになるとともに、津波警報や津波注意報に変更することになる。

7. 防災対応検討ガイドライン

防災対応検討ガイドラインには、南海トラフ地

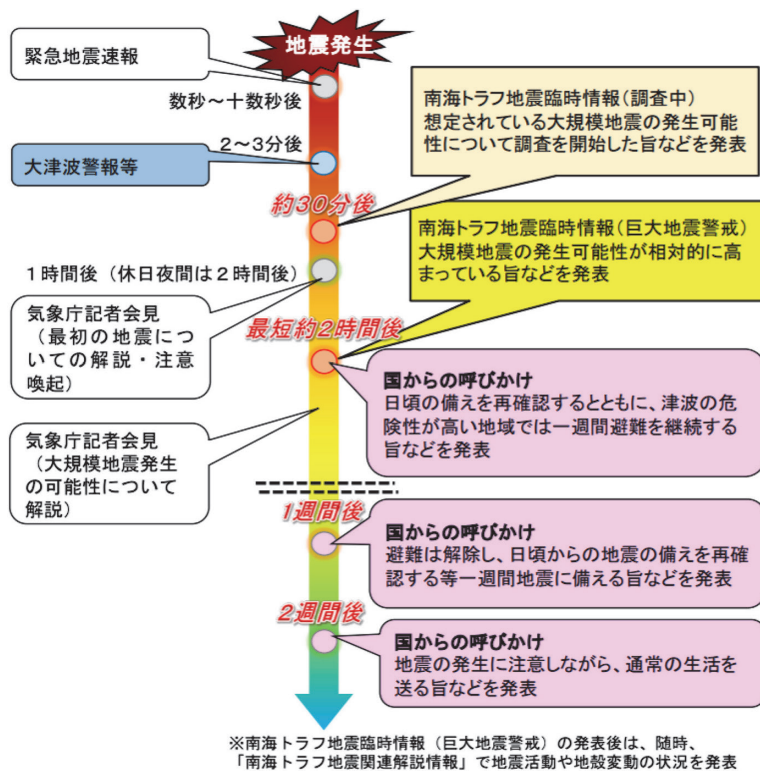


図 3 巨大地震警戒時の情報 (内閣府 HP より)

震関連臨時情報が発表された場合に、南海トラフ地震防災対策推進地域にある地方公共団体、指定公共機関、特定企業等が、防災対応の検討の際に参考とすべき事項がまとめられている。本来、地震対策の基本は、突発的な地震発生に備えることにあるが、不確かな情報ではあるものの、臨時情報が発表されたときに、通常より警戒レベルを高めることなどで、少しでも被害を減らすことを目的としてガイドラインが策定された。自治体や企業はガイドラインを参考に各組織の防災計画の見直しを行い、2020年度のしかるべき時期から運用を開始することになる。

ガイドラインは3編で構成されており、第1編共通編には、臨時情報の位置づけや情報発表時の基本的な対応の考え方や国が発表する情報の流れが、第2編住民編には、地方公共団体が住民の避難対応などについて検討する手順等が、第3編企業編には、指定公共機関、特定企業等の検討手順等が記述されている。企業編については、一般の

企業等でも活用されることが望まれる。

ガイドラインでは、津波からの避難が間に合わない地域を抱える沿岸自治体に、「事前避難対象地域」の設定を求めている(図4参照)。津波によって30cm以上の浸水が地震後30分以内に生じる地域の中で、地震発生後の避難では全住民が明らかに避難を完了できない地域を「住民事前避難対象地域」、高齢者などの要配慮者の避難が間に合わない地域を「高齢者等事前避難対象地域」としている。

事前避難対象地域を抱える自治体は、避難の勧告や避難所の確保といった対応をあらかじめ定める必要がある。避難先は、知人・親類宅等を原則とするが、避難先の確保が困難な住民のために自治体は避難所開設等の準備が必要となる。

「半割れ」に相当する臨時情報(巨大地震警戒)と、「一部割れ」や「ゆっくり滑り」に相当する臨時情報(巨大地震注意)とで、防災対応のレベルは異なる。M8クラスの地震である「半割れ」

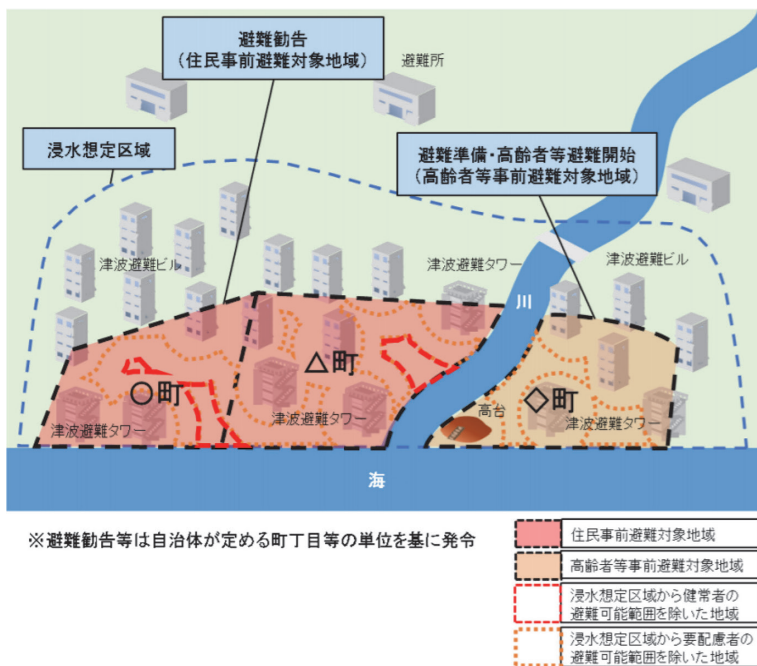


図 4 事前避難対象地域（内閣府 HP より）

の場合には、最大クラスの南海トラフ地震の被災地域全域に大津波警報が発せられるので、沿岸住民はいったん、指定緊急避難場所に避難する。被災地では甚大な被害が発生し、政府は緊急災害対策本部などを設置し、被災地では切迫した応急活動が始まる。

一方、被災地以外に対しては、臨時情報（巨大地震警戒）が発せられ、国から日頃の備えを再確認すること、津波の危険性の高い事前避難対象地域では1週間避難を継続することなどが呼びかけられる。大津波警報が津波注意報に切り替えられるとともに、沿岸住民は指定緊急避難場所から指定避難所や自宅などに移動する。ライフラインや交通機関の被害は軽微なことから、商店の営業も再開される。

自治体の判断に委ねられているが、住民事前避難対象地域には避難勧告などが、高齢者等事前避難対象地域には避難準備情報が発せられると想像される。避難者は、津波注意報に切り替わった後、自宅に戻らず緊急指定避難場所から親戚・知人宅や避難所に移動することになる。避難期間は、地

震発生後1週間である。1週間経過後は、「一部割れ」と同等の対応をさらに1週間続ける。

なお、避難先周辺では、ライフラインや商業施設は通常どおりと考えられるので、避難に必要なものは自ら確保し、避難所運営も住民が行うことを原則にしている。対象地域外の住民は、個々の状況に応じて後発地震の発生に注意した防災行動を取りつつ、通常どおりの生活を行う。また、土砂災害の恐れのある地域や、自宅の耐震性が不十分な住民などは、個人の判断での自主避難を原則にしている。

企業や病院などは可能な限り事業を継続することとし、従業員の安全確保や施設・設備の点検、輸送ルートの変更、在庫の積み増し、重要データのバックアップや金型の退避など、事業継続に必要な措置をとることを事業者に求めている。

一方、臨時情報（巨大地震注意）に対応する「一部割れ」と「ゆっくりすべり」に対しては、過去に「一部割れ」に相当する地震の直後に大規模地震が発生した事例が南海トラフ沿いでは知られていないこと、ゆっくりすべり後の大規模地震発生

についても観測経験がないことから、日頃からの地震への備えを再確認するなどの防災対応をとることとし、その期間は「一部割れ」では1週間、「ゆっくりすべり」では、すべりの変化が収まってから、変化していた期間と同程度の期間とした。

8. 段階的社会合意と理科から社会への転換

不確実な情報を災害被害軽減に生かすには、論理的な理科の答えではなく、曖昧かつ多様な社会科の答えが必要である。異常が観測されても地震はいつ起きるか分からないなか、命を守ることを最優先しつつ、社会機能を維持する必要がある。震源域の半分で地震が起きた場合には、被災地では甚大な被害のなかにある。残りの地域は被災地支援に全力をあげつつ、日本社会を支え続け後発地震に備えなければいけない。

命と生業、理科と社会、支援と準備、公と私、統一性と多様性など、さまざまな葛藤の中で対策のあり方を社会合意する必要がある。今後、ガイドラインを介して、国から県、市町村、企業・住民へとボールが投げかけられる。個々が当事者意識を持ってこの問題を考えると、突発災害への備えと自助が基本だと分かる。そして、自助では困難なことは共助で、共助で無理なことは公助で、企業・住民から市町村、県、国へとボールを投げ返せばよい。おのおのが自助のレベルを上げ、共助、市町村連携、隣接県連携などを進めつつ、解決困難な課題を国に上げる。社会からの要請があれば、国は一步踏み込んだ施策が可能となり、ガイドラインの改訂に繋がる。このキャッチボールを続けることで、社会合意が民主的かつ段階的に進み、地震対策が進化すれば、日本社会のあり様も変わっていく。

残された課題は多いが、空振り覚悟で見逃しを回避する態度で、対策を進めたい。臨時情報の発表や報道、国際社会への情報提供、為替や株価、地震保険、海外からの大型船舶対応、津波避難用の出船係留、危険作業やエレベーターの緊急地震

速報活用、土砂災害・津波災害警戒地域の安全確保、社会インフラの安全性の情報開示、防災拠点や医療・福祉・教育機関の機能維持、など残された課題は多いが、1つずつ対策を進めたい。

南海トラフ地震は、広域が同時に被災する超巨大災害であり、誘発地震や風水害などが加われば複合災害となる。被害規模は甚大である。公の力には限界があり、抜本的被害軽減のため個人が努力をするしかない。今一度、自然への畏怖の念を取り戻し、社会や個人のあり様を見直したい。孫子の格言「彼を知り己を知れば百戦殆うからず」のように、地震の怖さを学び、「君子危うきに近寄らず」と危険を避け（土地利用）、地震の対策を点検し「転ばぬ先の杖」と備え（耐震補強）、「備えあれば憂い無し」と災害を乗り越えたい。自律・分散・協調型の共助社会を実現すれば、「災い転じて福となす」ことができる。上杉鷹山の「為せば成る、為さねば成らぬ何事も、成らぬは人の為さぬなりけり」や、鷹山の師匠・細井平洲の「勇なるかな勇なるかな、勇にあらざして何をもって行なわんや」の言葉を胸に、次世代のために、勇気をもって着眼大局・着手小局で、南海トラフ地震対策に取り組んでいきたい。

福和伸夫

〔ふくわ のぶお〕

現職 名古屋大学減災連携研究センター教授・センター長、あいち・なごや強靱化共創センター長

略歴 1981年名古屋大学大学院工学研究科修了、1981年清水建設、1991年名古屋大学工学部助教授、1997年同大学先端技術共同研究センター教授、2001年同大学環境学研究科教授、2009年同・副研究科長、2012年より現職

研究分野 建築耐震工学・地震工学・地震防災

著書 次の震災について本当のことを話してみよう。（時事通信）、必ずくる震災で日本を終わらせないために。（時事通信）、耐震工学～教養から基礎・応用へ～。（講談社）



2019年6月18日山形県沖の地震 (M6.7)

2019年6月18日22時22分、山形県沖の深さ14kmでM6.7の地震が発生し、新潟県村上市で震度6強、山形県鶴岡市で震度6弱の揺れが記録された(図1)。この地震に伴って、鶴岡市鼠ヶ関で11cm、秋田・新潟・輪島港で8cmなどの津波が観測された。

余震活動は北東-南西方向の長さ約20kmの領域に集中し、その南端付近でM4.2の最大余震が本震の2.5時間後に発生した。6月18~26日の余震について波形相関DD法により精密再決定された震源分布の断面図では、余震が東傾斜する面に並んでいることが分かる(図2)。

この地震の発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であり、震源に近いGNSS観測点では北西方向に約5cmの水平変動が観測された。国土地理院からは地殻変動データに基づいた断層モデルが提出されており、東に傾斜する断層面を仮定した場合、その諸元は以下のように推定されている。

長さ19.7km、幅6.2km、上端深さ7.6km
 走向N40°E、傾斜角28°
 すべり角99°、すべり量1.2m

今回の地震活動は、1964年新潟地震(M7.5)の震源域北端に隣接する場所で発生した。図3は、草野・浜田(1991)により再決定された新潟地震の本震(赤丸印)と1964年6月16~30日の余震分布(黒丸印)に、今回の地震の震源域(青楕円)を重ねて示したものである。

広域で見ると、北海道西方沖から新潟県沖にかけての日本海東縁部では、1940年積丹半島沖地震(M7.5)、1993年北海道南西沖地震(M7.8)、1980年日本海中部地震(M7.7)、1964年新潟地震(M7.5)など、これまでに大地震がたびたび発生している。地質学的にも、この海域では南北方向に延びる帯状の活断層・活褶曲帯が何条も存在し、「新潟-神戸ひずみ集中帯」へと連なっていることが知られている。

参考文献

草野富士雄・浜田信生. 1991. 1964年新潟地震の余震分布再調査結果について. 地震, 44, 305-313.
 (岡田義光: 地震予知総合研究振興会)

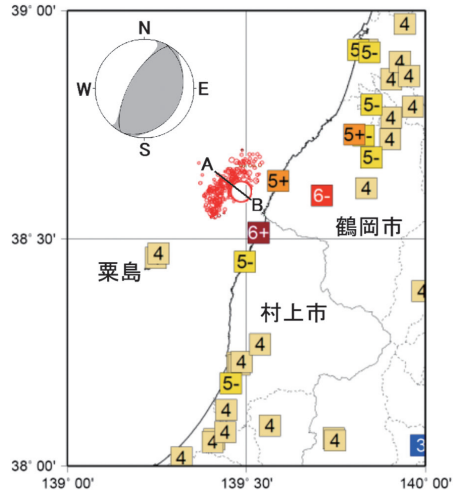


図1 2019/6/18山形県沖の地震の震度分布と震源分布(6/18~25), および本震の発震機構解(気象庁資料)

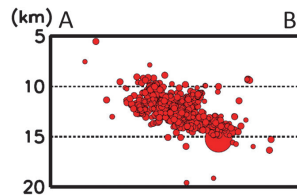


図2 図1のAB方向の震源分布断面図(気象庁資料)

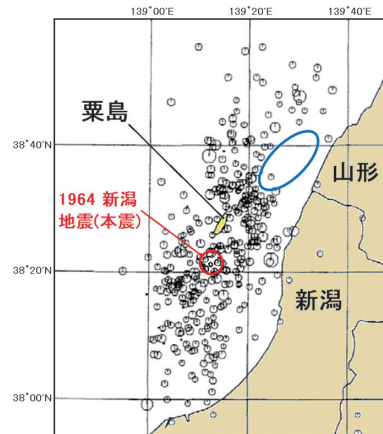


図3 再決定された1964年新潟地震の震源分布と、今回の地震の震源域(気象庁資料)

理論地震記録を教師データとした 機械学習による震源決定

坪井誠司・杉山大祐

1. はじめに

地震の震源情報は地震カタログ等に用いられる地震学の基本的情報である。震源は地震波到着時の読み取り値から最小自乗法により決定する手法が20世紀半ばに開発され、グローバルな観測網による震源決定から、地域的な観測網によるものまで広く使われてきた。本稿では、最近の計算機科学の進展に伴い現れてきた新技術である機械学習を震源決定に用いる試みについて解説する。

2. 機械学習とは

従来のニューラルネットワークを多層化させたディープニューラルネットワーク（深層学習）を始めとする人工知能（AI）技術は、ここ数年で基盤となる技術がほぼ確立され、産業分野において多数のイノベーションを起こしている。この深層学習の登場は、特に画像、動画、音声、文章のような「多次元」かつ「大量」で「多様」なデータであっても、高精度な学習を可能にした。画像解析の事例だけに絞っても、医療画像からのがん細胞の検知、工場生産過程での異常検知、防犯カメラでの自動監視など、実利用化の例は枚挙に暇がない。ここ数年はこのような産業分野だけでなく、地球科学分野においても応用例が現れ始めている。観測装置の高性能化と普及、IoT（Internet of Things）機器の低コスト化など、機械学習の対象になり得る観測ビッグデータの蓄積も進んでいる。蓄積されたデータからは新たな現象の理解や、予測の高度化に繋がる未知の定数などが潜在することも期待され、機械学習を含む多角的な

分析が急務である。

2.1 ニューラルネットワークの仕組み

まず、近年話題となっている深層学習やニューラルネットワークとは何かについて解説する。ニューラルネットワークとは、脳の神経細胞間を繋ぐネットワーク形成の仕組みを計算モデル化（図1）した機械学習である。このニューラルネットワークの歴史は古く、1960年代にはすでに多層パーセプトロン（図2）と呼ばれる基本的な学習モデルが提案されていた。このモデルは、ある入力データを図1のような計算を行うユニットを数層重ねて接続し、出力値を計算する。入力 x_i にそれぞれ対応する重み w_i を掛けた重み付き出力の総和に定数のバイアス項 b を足し、その結果を脳の神経細胞の発火を模した関数に入力して結果を算出し、出力 y とする。脳の神経細胞は多数の他の細胞からの入力（膜電位の変化）の総和により発火の成否が決定されるが、これを模したものである。これを図2のようにネットワーク接続し、出力 y を次の隠れ層と呼ばれる中間の各ユニットへの入力値として用い同様に計算し、同様に出力層への入力値として用いる。このように各層、各ユニットの計算と次の各ユニットへの出力を繰り返すことで、最終的な出力層、つまり結果データを算出する。このうち、重み w_i は、次の神経細胞への繋がり具合の太さ、神経細胞間の情報伝達経路を形成する役割を担っている。重み w_i は初期値としてランダム値を設定するため、もちろん、まったく学習をしていない初回計算は正解データとはかけ離れた値が出力される。重み w_i を学習するプロセスはさまざまな手法があるが、基本的な流れとしては次のようになる。まず、学習のためにはある入力値と、それと対となる正解

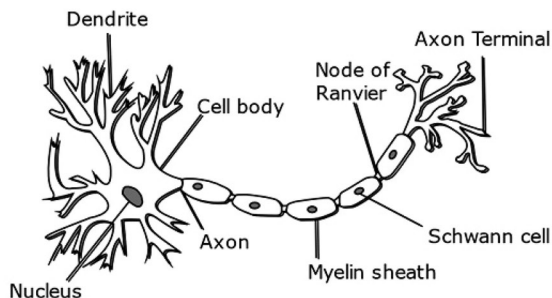
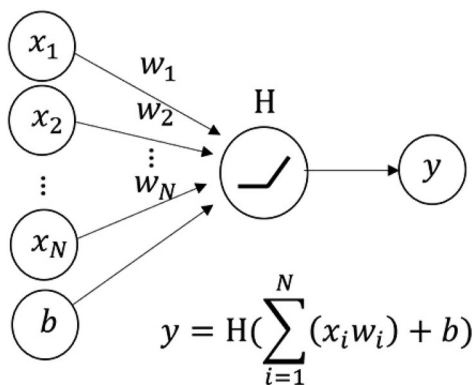


図 1 神経細胞とニューラルネットワーク. x_i は入力, y は出力, w_i は重み, b はバイアス項, H は神経細胞の発火を模した任意の関数

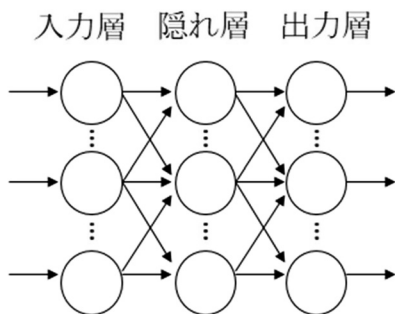


図 2 多層パーセプトロン. 図1のユニットを複数層用い, それぞれ次の層のユニットへすべて接続したもの. 全結合層とも呼ばれる

値を付与した学習用のデータ群が必要である. これを教師データという. この入力値からニューラルネットワークで出力値を計算し, その出力値と, 正解値との誤差 (たとえば二乗誤差など) を算出し, その誤差が小さくなる重み w_i の勾配方向を偏微分を用いて算出し, 重み w_i を更新する. 中間の隠れ層についても, 出力層での各誤差と, 現在の重み w_i を用いて逆算出する (誤差逆伝播という) ことで隠れ層が持つ誤差もそれぞれ計算でき, 同様の勾配計算から重み w_i を更新できる. これをさまざまな入力データ+正解データのパターンで計算して重み更新を繰り返すことで, 入力データに対応する正解データを算出する最適な重み w_i を得ることができる. これが基本的なニューラルネットワークの学習の仕組みである.

もちろん, これは最も基本となる学習モデルで

あり, その後も神経科学の知見を取り入れつつ, さまざまな学習モデルが提案され, 改良されてきた. 基本的なニューラルネットワークでは隠れ層がせいぜい1, 2層程度で, それを超える層の学習は困難だったが, 近年では, 層を深くしても学習が可能なモデルも提案され, また計算機の性能向上によって高速に学習できるようになり, 結果, より深く複雑な層構成での学習が可能となった. このような機械学習は広義で深層学習と呼ばれている. 深層学習モデルを用いた画像や動画の学習, 認識においては, 畳込みニューラルネットワーク¹⁾ が特に多く用いられる. この畳込みニューラルネットワークは脳の視覚野にヒントを得たモデルであり, 最新の深層学習モデルでもバリエーションを交え, 広く使われている.

2.2 畳込みニューラルネットワークとは

それでは, この畳込みニューラルネットワークの内部では何が行われているのだろうか? 代表的な畳込みニューラルネットワークについて図3-aに示す. 先程説明した基本的なニューラルネットワークは, 1ユニットの結果をすべての次の層の各ユニットへ接続する. これは現在では全結合層と呼ばれているが, 畳込みニューラルネットワークでは, この全結合層に加えて, 畳込み層とプーリング層が用いられる.

畳込み層では, 入力画像に対して, 畳込みフィルタを用いた画像処理が行われる. この畳込みフィルタはたとえばエッジの抽出など, 一般的に

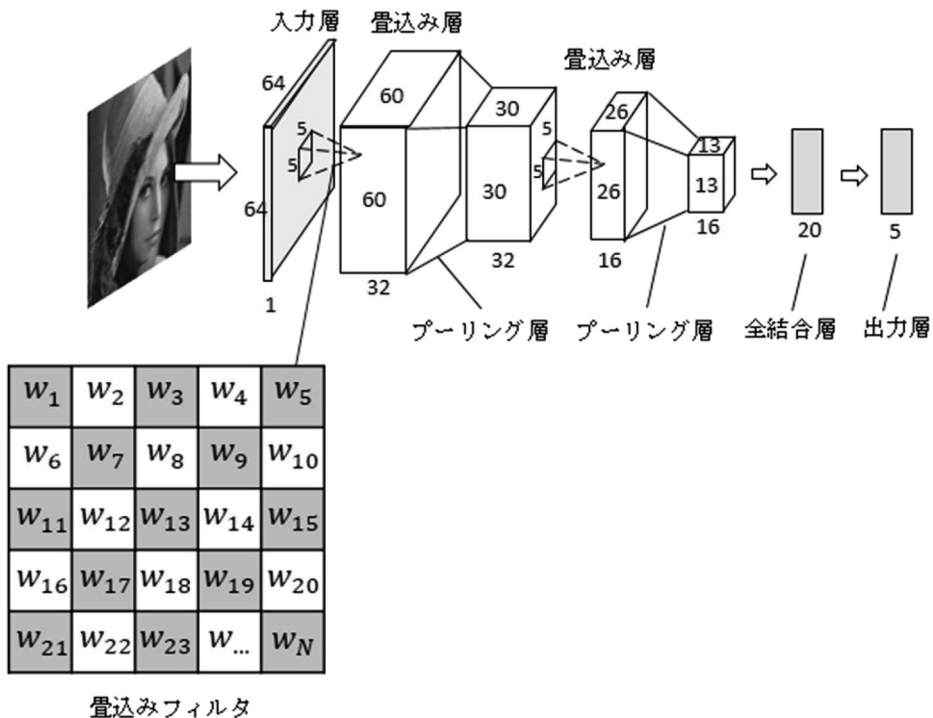


図 3-a 入力画像 $64 \times 64 \times 1$ ，畳込み層+プーリング層が2層，全結合層が1層からなる，畳込みニューラルネットワークの1例

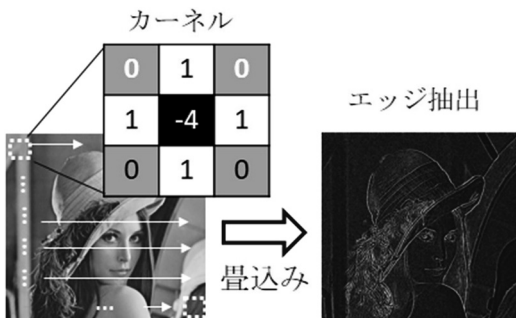


図 3-b 畳込み処理によるエッジ抽出の例

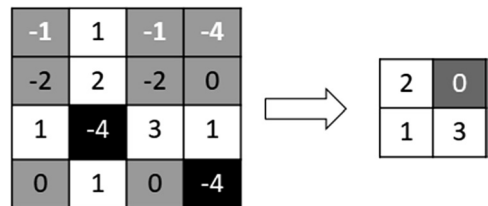


図 3-c プーリング層の処理例，図は最大値プーリングを示す

使われている画像処理のアルゴリズムである。畳込みフィルタでは図 3-b のようなカーネルと呼ばれる行列を画素に乗算することを繰り返すことで画像処理を行うアルゴリズムであるが、畳込み層ではこのカーネル行列自体が学習対象、つまりニューラルネットワークの重み w_i なのである。この畳込みフィルタを複数パターン用いて入力画像に対してそれぞれ計算し、畳込みフィルタの種

類によって線の形や明暗パターンなど、さまざまな特徴を抽出する。

入力画像は畳込み層を通して複数の特徴抽出がなされた画像として次の層へ出力される。出力値は、プーリング層（図 3-c）と呼ばれる層に接続される。プーリング層は、画像をある範囲内の最大値を保ったまま縮小するなど各所の特徴を残しつつ、特徴が出現する位置のズレなどある程度許容し、かつ情報を次元圧縮することを目的とした層である。この畳込み層とプーリング層を何回

か繰り返す、最後に全結合層へ接続するのが一般的な畳込みニューラルネットワークである。全結合層では、得られたさまざまな特徴のパターンを入力値として、出力すべきデータへの計算方法を学習によって獲得する。この畳込みニューラルネットワークの流れは、脳の視覚野で言うと、受容野から単純細胞層、複雑細胞層への情報伝達の仕組みに相当している。

以上が畳込みニューラルネットワークの概要だが、畳込みニューラルネットワークを用いた深層学習による画像解析が一般的になるまで、従来の解析手法では画像分析に必要な特徴量、たとえば線の形や明暗のパターンをどのように抽出するかを、問題に応じてすべて人間が設計していた。しかし、畳込みニューラルネットワークを用いた深層学習では、畳込みフィルタのカーネル行列が学習対象、つまり特徴の捉え方自体をデータの中から学習で獲得することが可能になった。これは画像認識分野での大きなブレイクスルーとなり、たとえば、画像に写っているものを認識し自動で分類する一般物体認識タスクの例では、訓練された人間の目に匹敵、または、それ以上の精度が達成され、大きな話題となった。さらにこれは、2次元の画像データだけではなく、映像や音声、文章など各分野の多次元データの認識においても、同様に特徴抽出の自動獲得は有効であり、画像認識の分野を越えさまざまな分野での応用が広がり、ブレイクスルーを起こしている。

深層学習を含むニューラルネットワークの技術は、まだ人間のような汎用的な知性を持つ汎用人工知能の実現までには至っていないものの、訓練された人間の「目」や「手」など、一部の高度なタスクを代替することは十分現実的になってきた。地球科学分野においても、解くべき問題に合わせた学習モデルを設計し、ビッグデータを学習することで、専門家に相当するような分析や重要パラメータ推定の自動化が期待できる。次に、われわれの地震分野における深層学習の応用事例を紹介したい。

3. 人工知能による地震動と低周波微動シグナルの自動判別

地震・地殻活動観測網と解析技術の発達により、プレート境界周辺において、通常地震動と比べてゆっくりとした断層運動などの特徴を持つゆっくり地震（低周波微動、超低周波地震、スロースリップなど）が発生していることが明らかになってきた。この低周波微動などの地震をモニタリングし発生メカニズムを解明することで、巨大地震発生の準備過程について理解が深まることが期待される。しかし、低周波微動や地震動の波形は震源と観測点の距離や位置関係によってさまざまに変化するため、画一的基準での自動判別は困難であり、これまでは人間の目と手によって判別、カタログ化の作業が行われてきた。

本研究では、南海トラフ付近の海底に展開された地震・津波観測監視システム「DONET」での地震動と低周波微動シグナルとそれ以外（ノイズなど）を自動判別するため、深層学習を用いた新しい手法 SRSpec-CNN²⁾ (図4)を開発した。学習に使用する地震計記録データは通常地震波(3成分)の情報で、そのデータに過去のカatalogデータより、低周波微動か、通常地震動か、何もないノイズかを対応付け、20,344個の学習用のデータを作成した。なお、深層学習では、先に述べた畳込みニューラルネットワークの利用等により、多次元データの学習に優れているため、通常地震波データを人間が目で見えて判断できるような画像データに変換することで高精度化が期待できる。そこで SRSpec-CNN では、入力となる通常地震計記録データを、図5のように周波数成分と継続時間の情報を明示的に表すランニングスペクトルの2次元データに変換を行った。

上記の学習モデルと教師データを用い、GPU(グラフィックスプロセッサ)を用いた深層学習を行ってシグナルの判別精度評価を行った。ここで、学習モデルが、未来に発生する地震でも判別できるよう、学習するデータを85%、学習に使用しない検証用データ15%と同じ地震が混在し

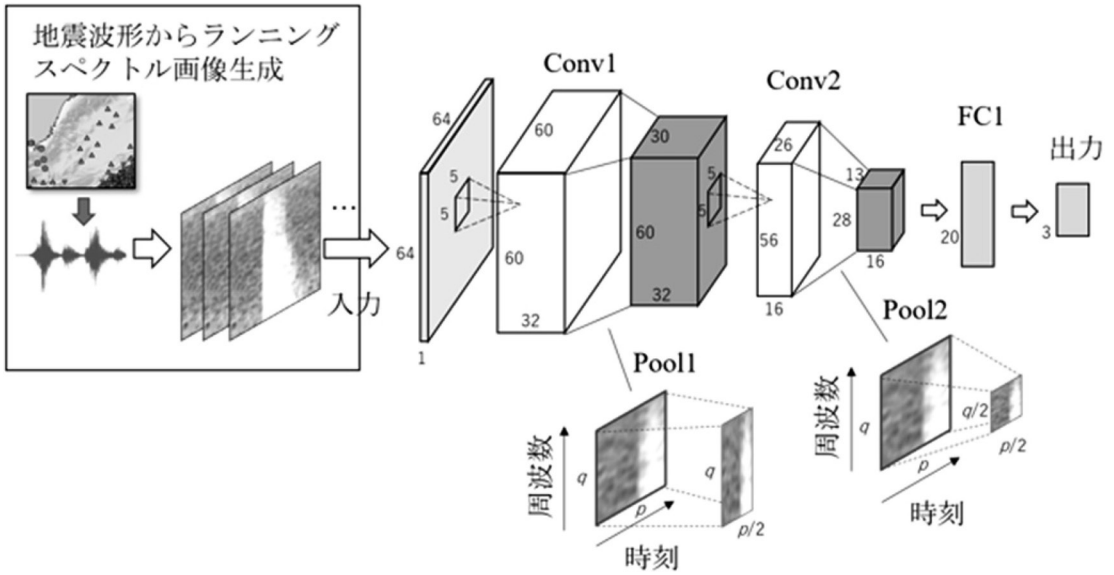


図 4 シグナル判別に用いた SRSpec-CNN の構成. 入力した地震動からランニングスペクトル画像を作成し, 最終的にシグナルが低周波微動, 通常の地震動, ノイズそれぞれの確率が出力される. 非対称な構造のプーリング層 (Pool 1) は本研究で新たに考案し, 導入したものの

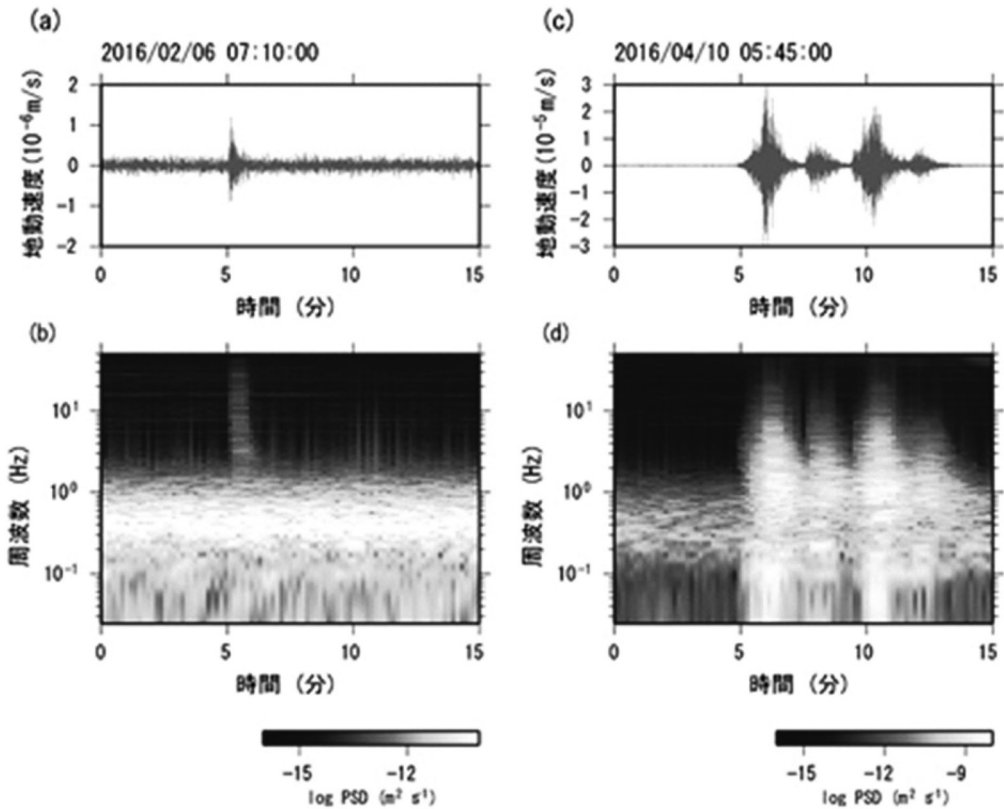


図 5 通常の地震動 (a), (b) と低周波微動 (c), (d) のシグナル. DONET の KMD13 観測点での観測波形 (a), (c) とランニングスペクトル (b), (d)

ないよう分割する。さらに、観測網に新しく観測点が追加された場合を想定し、全観測点のうち2つの観測点のデータも学習しない検証用データとした。また、ノイズ成分が大きすぎるデータは全体から除外している。SRSpec-CNNを用いて教師データを学習後、学習に使用しなかった検証用データをシグナル判別させて判別の正解率を測定したところ、正解率99.5%という高精度の判別性能が得られた。また、除外した二つの観測点のデータでも正解率は99.2%と、やはり高い判別性能を示した。これは、観測網を展開している領域での各シグナルの一般的な特徴を学習しているため、観測網に新しい観測点を追加しても自動判別が可能であることを示している。この結果から本研究では、SRSpec-CNNを用いてランニングスペクトルとして学習することで、地震動と低周波微動シグナルの高精度の判別が可能であることを明らかにしている。

4. 理論地震波形記録を用いた機械学習による震源決定手法

深層学習を用いる場合、前提条件として、一般に、教師データとなるビッグデータを保有しているか、または機械的に大量生成できるかという点が、ブレイクスルーとなるような精度実現に必要となることがよく知られている。一方、地球科学分野への深層学習の応用においては、観測データを収集して訓練データを作る場合に、極端現象のデータ量が不足することが課題となる。たとえば先にあげた事例のように頻繁に発生する低周波微動であれば観測データから学習することも可能であるが、巨大地震のように稀な現象の学習は困難である。そこでわれわれは理論地震波形記録を基に教師データを作成することを考えた。図6は、埼玉県で起きた地震に対して計算した理論地震波形記録から、ある時刻における地表の変位分布を表したものである。経験を積んだ地震学研究者ならば、この図を見て、波動の広がりの様子からおおよその震源の位置を、また広がりや山谷の間隔から地震波の見かけ速度により震源の深さを推測

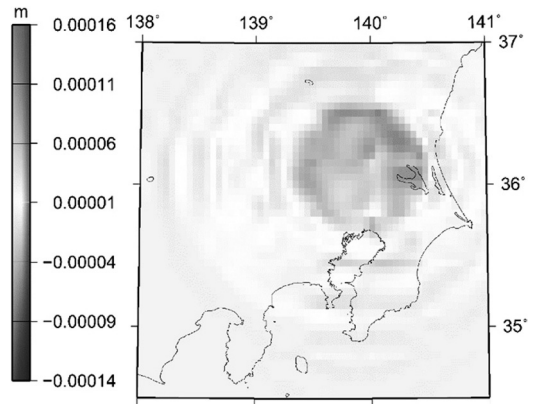


図6 2008年4月4日に発生した埼玉県の地震 (M_{JMA} 5.0) について計算した垂直成分の理論地震波形に基づく地震波伝播画像。画像は地震発生時刻の20秒後に対応

することができると思われる。ここでは、このような画像を基にして震源パラメータを推定するニューラルネットワーク（人工知能と言い替えることもできる）を構築することを試みた。

機械学習によりニューラルネットワークを構築するためには、前述のように大量の教師データが必要となる。活発な地震活動と稠密な地震観測網が存在する日本列島のような地域では、多くの地震波伝播の画像を地震波の観測データから構築することができる。しかしながら、その場合でも地震の起きる場所とそのメカニズムはほぼ決まっているので、地震数を増やしても教師データとして適切な多様性が得られるわけではない。一方、理論地震波形記録は、任意の震源位置およびマグニチュードの地震に対して計算することができるので、大量の理論地震波形記録を計算し、教師データとして用いた機械学習を行うことで機械学習の精度を容易に向上させることが可能となる。また、地震活動が活発でない地域で起きる地震や、大地震のように観測記録が少ない地震に対しても教師データを用意することができるなどが長所となると考えられる。

理論地震波形記録を数値的に計算するための手法には、差分法や有限要素法などさまざまなものが存在する。これまで、地殻やマントルの不均質性を考慮に入れて数値的に計算する場合、膨大

な計算資源が必要となるために現実的な地球モデルに対する計算はあまり行われてこなかった。しかしながら、21世紀に入ってから、いわゆるスーパーコンピュータと呼ばれる高速大容量計算機の進展に伴い、現実的な地球モデルに対する計算が行われるようになった。ここでは、大規模並列計算機に適した手法の1つであるスペクトル要素法³⁾を用いて、地球内部地震波速度3次元構造を考慮した理論地震波形記録を教師データとして用いることを考えた。理論地震波形は、スペクトル要素法のSPECFEM3D_GLOBEを用いた。SPECFEM3D_GLOBEは全球を伝播する地震波形を計算するためのプログラムであるが、地球を6個のブロックに分けてモデル化するので、その1つのブロックを使うことで地域的な理論地震波形記録を計算することができる。このようなプログラムを使うことで、地域的な理論地震波形記録計算においても、地球の曲率を考慮に入れた正確な計算を実行することが可能である。震源決定手法を開発するための領域としては図6に示した関東地方を対象とし、震源決定を行うニューラルネットワークを理論地震波形記録を教師データとした機械学習により構築することを試みた。教師データとして用いる理論地震波形記録は、海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用するスーパーコンピュータシステムの256個のCPUコアを使って計算した。計算に用いた3次元地球モデルはS20RTS⁴⁾、理論地震波形記録の精度は周期17秒である。S20RTSモデルは全球のS波速度3次元モデルであり、日本列島付近は長波長のなめらかな不均質構造として表されている。ここでは、周期17秒という長周期の実体波を用いて推定を行うので、3次元モデルとしてはこのような長波長モデルで十分と考えられる。より短周期の実体波を用いる場合は、日本列島下に沈み込む太平洋プレートの構造を取り込んだモデルを使用することが必要であろう。

教師データの生成には、震源を図6の領域に緯度方向、経度方向にそれぞれ0.2°間隔で、深さ方向は80kmから30kmまで5km間隔で約600個配置し、それぞれの地震に対して0.2秒間隔で2

分間の理論地震波形を、地表に0.2°おきに配置した仮想的な観測点に対して計算し、0.2秒ごとの約6万枚の地表における地震波伝播画像を生成した。生成した画像を基に、震源パラメータを推定するニューラルネットワークの構築を試みた。ニューラルネットワークは深層学習でよく使われるConvolutional Neural Network (CNN)で、convolutionは3層とし、各パラメータを推定するネットワークを機械学習により生成した。ニューラルネットワークのフレームワークはTensorFlow (<https://github.com/tensorflow>)を用いた。機械学習は約6万枚の画像の4/5を用い、学習のパラメータ設定を海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用する大型計算機システム「Data Analyzer」を使用して行った。学習により構築したニューラルネットワークに対して残り1/5の画像を用いて検証を行った。検証に当たっては、地震波学習に用いたものが含まれないように注意深く地震を選んだ。検証結果はほぼ満足のいくもので、入力した画像から震源パラメータを推定するニューラルネットワークを構築することが可能であることが分かった。

5. 観測データを用いた震源決定の試み

次に、構築したニューラルネットワークを実際の観測データに適用し、震源決定が可能であるかを検証した。図6に示した領域で2008~2018年の間に起きたM5クラスの地震9個を選び、それらの地震に対するK-NET観測網の観測記録を用いた。それぞれの地震に対するK-NET観測網による加速度波形を積分して速度に変換し、5Hzサンプリングのデータにダウンサンプリングした。それぞれの時刻における速度振幅を空間で内挿し、教師データで用いた画像と同じサイズのデータを作成した。各時刻ごとの画像をニューラルネットワークの入力として用い、震源パラメータの推定を行った。図7には用いた地震の震央とK-NET観測点の分布を示した。観測データから得られた画像をニューラルネットワークに入力し、震源の推定を行った結果を図8に示した。比

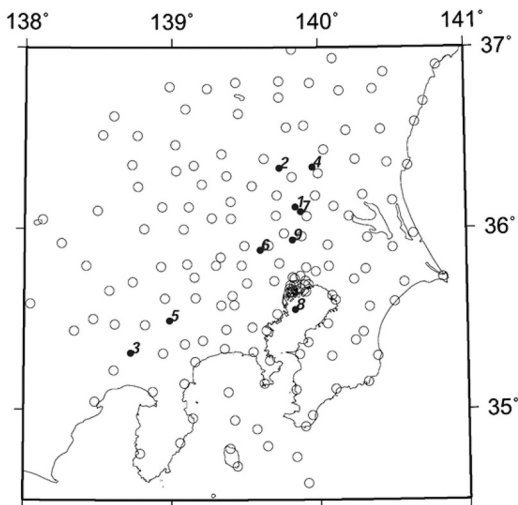


図 7 K-NET 加速度計観測網の観測点分布。白丸は K-NET 観測点を示し、黒丸は本研究で検討した地震の震源を示す。地震に隣接する番号は、図 8 の地震番号に対応

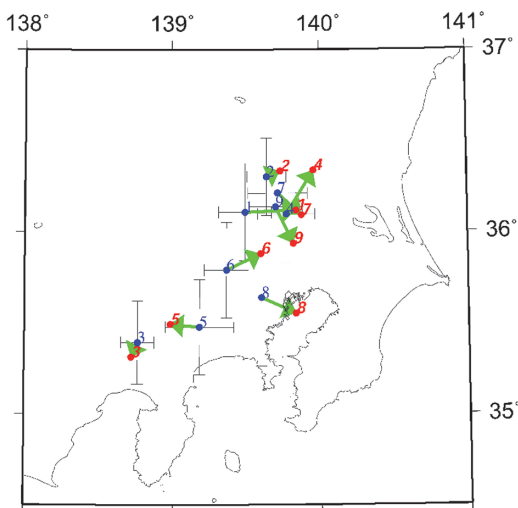


図 8 実際のデータの震源推定の結果。赤丸は、気象庁による震源地を示し、青丸は、提案されたニューラルネットワークの結果を示す。緑の矢印は、両方の震源地の位置の違いを示す。エラーバーは、K-NET データを使用して作成された 20 秒間の表面伝搬画像に基づく推定を使用して計算された、経度と緯度の両方の標準偏差を示す。地震に隣接する番号は、図 7 の地震番号に対応

較のために、気象庁地震カタログによる震央の値も示した。推定した震源は約 6 秒間の各時刻の画

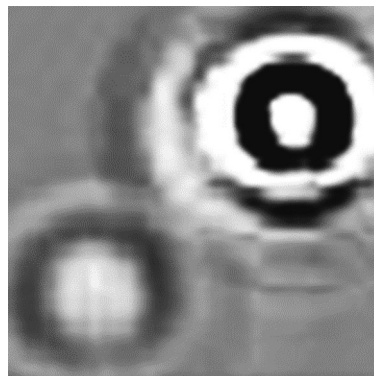


図 9 図 7 に示す領域に対して作成された理論地震波伝播画像。発震時が 6 秒離れたマグニチュード 4 と 5 の 2 つの地震を考慮している

像による推定値を平均し、誤差はその標準偏差としている。図 8 からは、構築したニューラルネットワークにより、観測データを用いても、ほぼ気象庁地震カタログによる震源に一致する震央が得られることが分かる。震源決定精度の向上には、より多くの教師データの利用、日本列島下の地震波速度構造データの利用などが考えられる。

6. 考 察

前述のように、地球科学分野への深層学習の応用においては、観測データを収集して教師データを作る場合に、たとえば巨大地震などのような極端現象のデータ量が不足することが問題になる。理論地震波形記録を教師データとする場合は、このように観測が少ない例についても教師データを作成することが可能となる。観測例が少ない場合としては、地震の震源が図 9 に示すような同時に別の場所で発生した場合も考えられる。このような例についても、理論地震記録を用いれば教師データとすることができる。したがって、これまでの震源決定法では対応が困難であった、同時に発生する複数の地震の決定にも対応できる可能性がある。ここでは、教師データ数は数 1,000 件と少ないが、理論地震波形記録から図 9 のような同時に地震が発生する事例を作成して、これを複数の地震として認識するニューラルネットワークを

構築することを試みた。その結果、99%以上の精度で複数地震として認識することが可能なニューラルネットワークを構築することができた。今後は、実際の地震観測網において、このような理論地震波形記録を教師データとした機械学習による震源決定手法が適用可能かを検討する予定である。

謝辞

震源決定には防災科学技術研究所のK-NET観測網のデータを使用しました。理論地震波形記録の計算にはSPECFEM3D_GLOBEを、また機械学習にはTensorFlowを、海洋研究開発機構地球情報基盤センターが運用するスーパーコンピュータシステム上で用いました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) LeCun, Y., Haffner, P., Bottou, L. *et al.* 1999. Object recognition with gradient-based learning. In: Shape, Contour and Grouping in Computer Vision. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1681, Springer, Berlin, Heidelberg.
- 2) Nakano, M., Sugiyama, D., Hori, T., Kuwatani, T. and Tsuboi, S. 2019. Discrimination of seismic signals from earthquakes and tectonic tremor by applying a convolutional neural network to running spectral images. *Seismol. Res. Lett.*, **90**, 10.1785/0220180279.

- 3) Komatitsch, D., Tsuboi, S. and Tromp, J. 2005. The spectral-element in seismology. In: Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms, Geophys. Monograph. Vol. 157, AGU, pp. 205-227.
- 4) Ritsema, J., van Heijst, H. J. and Woodhouse, J. H. 1999. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, **286**, 1925-1928.

坪井誠司

[つばい せいじ]

現職 国立研究開発法人海洋研究開発機構情報技術担当役. 理学博士

略歴 1986年東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程修了, 東京大学地震研究所助手, 防衛大学校助教授, 横浜市立大学助教授, 海洋科学技術センタープログラムディレクター, 海洋研究開発機構部長等を経て, 2018年より現職

研究分野 地震学, グローバル地震学



杉山大祐

[すぎやま だいすけ]

現職 国立研究開発法人海洋研究開発機構技術主任. 修士(情報工学)

略歴 2009年湘南工科大学大学院電気情報工学専攻修了, 海洋研究開発機構地球シミュレータセンター技術主事等を経て, 2019年より現職

研究分野 情報工学・機械学習



蛇籠を用いた簡易補強工法の検証実験

開発途上国では、伝統的な石積等の脆弱な建物が多く、地震時の崩壊による人的被害が多発する傾向にある。2015年のネパール地震では、8,000人弱の人命が失われたが、人的被害の多くは山間部に建てられた石積の伝統的な住宅であった。これらの住宅被害のうち、8割は地域の職人あるいは住民自身によって建設された“ノンエンジニアド”の石積み組積造（既存不適合住宅）によるものであったが、山間部ゆえに道路事情が悪く建設資材の搬入が困難であり、復興が進んでいないのが現状である。このような状況の下、現在、耐震工法（ネパールの耐震新基準NBC105を満たす構造）の普及が進められているが、山間部でのアクセスの悪さが妨げとなり、庶民住宅は国の基準法があっても、経済的な理由で同じ材料を用い、同じ構造によって建設されることが多く、同様な被害が繰り返されることとなる。したがって、人的被害軽減のためには、現地道路事情等の諸条件を鑑み、まずは現地の住民の費用負担を極力軽減し、自ら実施し得る補強方法を身につける必要があると考える。

本実験研究で扱った簡易補強工法は、蛇籠を用いたジャケッティング工法であり、庶民住宅を金網で巻くことによって、住民自らが実施し得る耐震補強技術である。もともと、蛇籠は紀元前の中国で生まれた伝統的な土木技術で、金網籠に石を詰めただけの単純構造であるが、運搬が容易、かつ高い技術力を要さず低コストでの施工が可能である特徴を持つ。ネパール現地調査において、道路擁壁を始め、いたるところに使われ、地震時に変形するが崩壊には至らない粘り強い構造であることを確認している。

検証実験は、平成31年2月26日に防災科学技術研究所の大型耐震実験施設を利用して行われた。ネパールの成型石材を模したセメントレンガ（幅100mm×奥行200mm×厚さ60mm）

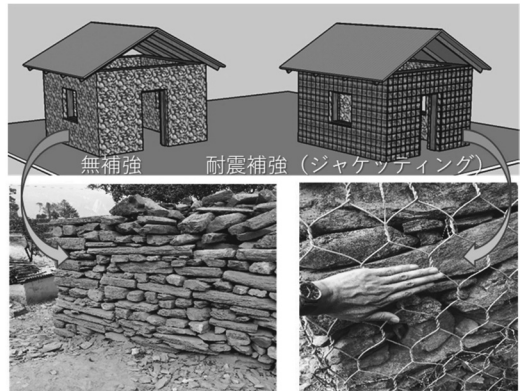


図1 試験体の概要（左：無補強，右：ジャケッティング補強）

約6,500個を準備し、ミキサー練りによる目地材（土質材料）の圧縮しろを考慮し、厚さは50mm（最終的に30mm程度に圧縮）として手積み作業を行った。試験体は、補強の有無を比較するため2棟準備した（図1）。個々の試験体のサイズは、組積の壁を幅0.2m、長さ3mおよび高さ2mとし、平面3m×3mとした。2棟のうち、簡易補強をする1棟を対象に、目地に針金を差し込み、壁の内外に巻き付けたワイヤメッシュを引っ張り固定することで壁体の補強を行った。

検証実験における加振条件は、1995年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸波（NS成分）を用い、加速度振幅を10%から70%まで調整した波を加えて、無補強試験体が倒壊するまでを条件とした。実験では、30%調整加振で無補強試験体の壁に損傷が入り、ついで50%調整加振で背面の壁が倒壊した。最終的に実施した70%調整加振では、無補強試験体は全壊相当、一方、ジャケッティング補強試験体は壁に大きなクラックが入り、試験体全体が変形したが倒壊しないことが確認された（図2）。

本実験研究は、千葉大学をはじめとする大



図2 実験後における試験体の様子。(a)は加振前、(b)は最終加振後。

学・民間企業との共同研究として実施されたが、実験費用の一部は、クラウドファンディングによる寄付金が使われた(図3)。クラウドファンディング自体は防災科研で初めて実施したものであったが、実験費用を工面すること以外に、この取り組みを広く知ってもらい、技術を普及・促進させるために企画されたものであった。震災後のネパールを対象として、現地の事情より「住民自らが実施できるローコスト

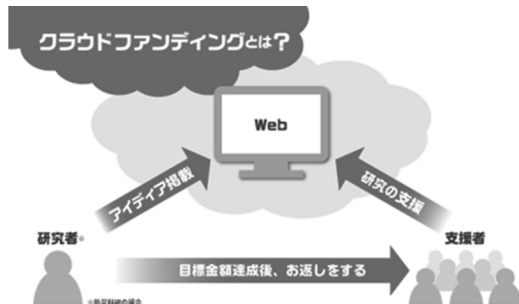


図3 クラウドファンディングのしくみ

耐震補強工法の開発」が喫緊の課題と考え、蛇籠技術を用いたジャケッティング工法の効果検証を行った。その結果、変形は許容するが倒壊は防げることを確認し、少なくとも人命は守れる技術としての確立が可能であることを確認することができた。

最後に、蛇籠の技術は簡便で応用性と耐震性が高いことからさまざまな構造物への対応が可能であり、「Low-Techを科学し、Low-Costを追求し、そしてLocalで活かす」3L技術として、さまざまな国や現場における「命を守る減災技術」としての構築を目指している。

(中澤博志：防災科学技術研究所
地震減災実験研究部門)

トルコマルマラ海域の地震・津波災害軽減と トルコの防災・教育 —2013～2017 年度 SATREPS 研究成果の概要—

金田義行

1. SATREPS トルコプロジェクト

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) は国際協力機構 (JICA) と科学技術推進機構 (JST) の連携で実施されている国際共同研究事業である。本研究プロジェクトは研究領域「開発途上国のニーズを踏まえた防災に関する研究」の課題として平成 24 年度に採択された研究期間 5 カ年の防災研究プロジェクトである。

国際共同研究として、日本側は当時、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) に在職していた筆者 (金田) を研究代表者として、トルコ側はボアジチ大学カンデリ地震観測研究所 (KOERI) 所長 (開始当時 Mustafa Erdik 教授、その後 Haluk Ozer 教授に交代) を研究代表者として開始された。研究対象はトルコマルマラ海である。マルマラ海は黒海とエーゲ海に挟まれた内海であり、黒海とはボスポラス海峡で繋がれ、両岸にはトルコ最大の都市イスタンブール (人口約 1,450 万人で東京都の人口約 1,000 万人よりも多い) が広がる。このマルマラ海にはトルコを東西に貫く長大な北アナトリア断層 (約 1,000km 規模) が存在し、このマルマラ海の断層による地震が発生するとイスタンブールをはじめ沿岸地域は甚大な被害が想定される。このマルマラ海沿岸域の地震津波被害軽減と防災教育の推進を目的として SATREPS トルコプロジェクトが開始された。ここでは、プロジェクトの概要と研究成果を紹介する。

2. プロジェクトの背景

近年 2004 年インドネシスマトラ大津波地震、2011 年東日本大震災など甚大な地震津波被害が多発している。一方、1999 年には台湾で集集地震、そしてトルコではイズミット地震が発生している。地震災害における建物の倒壊に関しては、既存建築物の耐震不適格が世界共通の問題となっており、トルコも当問題を抱えている。トルコで 1999 年 8 月 17 日に発生したイズミット地震では 1 万 7,000 人余りが死亡した。そのうちイスタンブールでは、震央から 70km も離れているにもかかわらず約 1,000 名の死者が出た。しかしその後も耐震不適格問題を含む地震対策はほとんど進展していなかった。その結果、2011 年 10 月 23 日にトルコ東部でヴァン地震 (マグニチュード 7.2) が発生し、確認されただけでも死者が 600 名を超える甚大な被害が発生した。津波被害についても、マルマラ海下にある北アナトリア断層の一部で 1509 年、1766 年に地震が発生し、大都市イスタンブールを含めた沿岸各地で被害を受けた。2 度の津波を発生させた海底断層は、1999 年イズミット地震震源域 (陸域) の西側に隣接しているため、マルマラ海で海底地震が発生することによる津波災害のリスクが高まっているが、津波被害の大きい地震は数百年に一度しか起きていないため、津波に関する理解や防災対策が進んでいないのが現状である。

そこで本プロジェクトでは、地震・津波に関する災害国であり、マルマラ海地震リスクがあるトルコを対象国として、理学・工学の面から融合さ

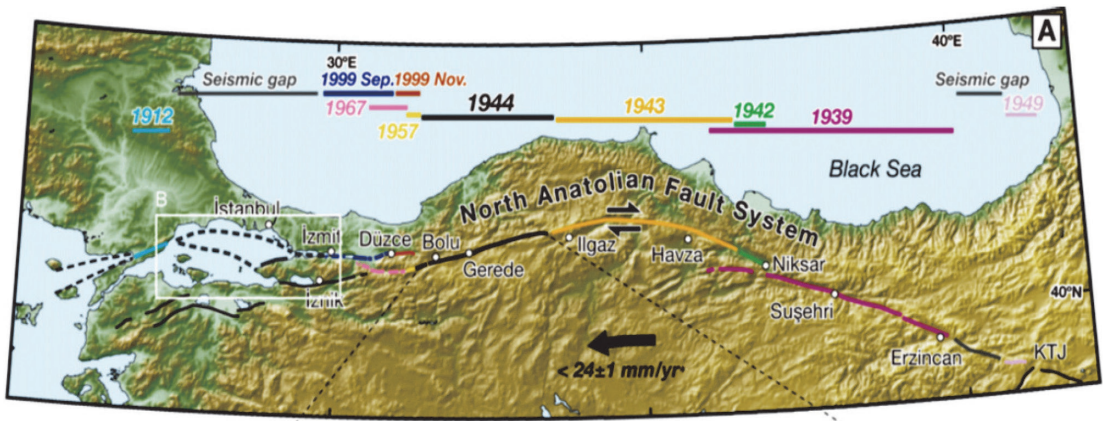


図 1 北アナトリア断層の位置図. B のエリアがマルマラ海

せた研究結果に基づく災害リスク評価を定量的に行い、その内容を社会科学の専門家によって防災教育・災害対応として情報発信し、国民一人一人の防災意識を向上させるとともに、災害対策の推進を図ることとした。

トルコでは2009年に災害対応を目的とした政府組織が首相府災害管理組織 (Disaster and Emergency Management Presidency; AFAD) として再構築され、災害前後を一貫して対応する体制となっている。

一方で組織体制問題の他に、トルコ政府は1999年のイズミット地震後から、既存不適格構造物の削減も行ってきた。しかし、上述のヴァン地震では公共の建物も含む約2,200棟の建物が倒壊し、約11,000棟の建物が被害を受けたが、破壊した建物は、耐震設計されていない構造物と構造部材が強度不足の構造物が大半であった。

本研究プロジェクトの対象地域となるマルマラ海沿岸域は、トルコで最も工業化および開発された地域であり、この地域の地震災害リスクを低減させることはトルコの社会経済を支える上で重要である。トルコの北アナトリア断層沿いではこれまで多くの被害地震が発生しているが、その発生パターンはおおむね震源が東から西に移動している。1999年イズミット地震はマルマラ海の東部陸域で発生していることから、マルマラ海下の北アナトリア断層は、まさに地震の空白域となっ

ている (図1)。したがって将来の北アナトリア断層沿いの地震を考えるとマルマラ海で地震が発生する可能性が多く地震学者から指摘されている。そのため、地震発生リスク評価の高度化のためには、はじめに海底観測によりマルマラ海の想定震源域を詳細にイメージし、震源モデルを構築することが必要である。トルコのマルマラ海で海底観測体制を構築することは、地震研究者が地震空白域の固着状況を把握し、振動・建物倒壊などの定量的予測を高度化することにつながり、他の地震空白域の特徴を推定する上で役立つ情報が得られると期待される。想定マルマラ地震がイスタンブール近傍のマルマラ海で発生した場合、津波を伴う大都市災害問題が懸念される。

また、1766年に発生したマルマラ地震は、約3カ月の時間遅れを伴う連動型地震となった。これらを理解することは、日本でも近い将来発生する可能性があるとして指摘されている、房総半島沖地震・関東地震をはじめとする首都圏直下型地震や、東海・東南海・南海地震が連動する巨大地震の発生メカニズムの理解の推進や海底観測を展開する上で役立つと考えられる。さらに先進シミュレーションによる地震発生や津波発生シナリオ研究等の予測研究、表層地盤調査に基づく具体的な地域のDEM (数値標高モデル) 情報や構造物情報を用いた地震応答解析などの地震工学研究、各研究成果に基づく防災教育推進研究など本研究プ

プロジェクトの研究成果は日本、トルコ両国の地震防災研究にも大きな貢献が期待される。

3. プロジェクトの概要

比較的規模の小さい地震でも犠牲者の多いトルコにおいて、震災に強い国づくりのため、理学・工学・社会科学を融合した共同研究を実施した(図2)。本研究プロジェクトは4つの研究グループ(G1~G4)で構成されている。震源モデルの構築(観測研究に基づきマルマラ地震像を明らかにする)G1, 近い将来発生する可能性の高い巨大地震発生シナリオと津波シミュレーションを研究するG2, 先進シミュレーション・解析・表層地盤情報を用いて詳細な構造物の地震応答解析や数値・模擬実験を研究するG3, 災害リスクを数値シミュレーションに基づくアニメーションやリスク評価のマッピングなどを用いて多角的なイメージングの映像や副読本などを通じて市民の意

識向上を図り、政府や地方が立案した震災対策が着実に実行できる環境構築に貢献するG4の4研究グループである(図3)。

日本側は筆者(金田)を研究代表、高橋成実氏(元海洋研究開発機構、現防災科学技術研究所副センター長)を研究副代表、セチキン・チタク氏(元海洋研究開発機構)をリエゾンとして、G1研究リーダーは金田、G2研究リーダーは堀 高峰氏(現海洋研究開発機構センター長)、G3研究リーダーは堀 宗朗氏(元東京大学地震研究所教授、現海洋研究開発機構領域長)、G4研究リーダーは隈本邦彦氏(江戸川大学教授)と坂本真由美氏(元名古屋大学、現兵庫県立大学准教授)、トルコ側は研究代表機関とG1リーダー機関をKOERI、G2リーダー機関は中東工科大学、G3リーダー機関は首相府災害緊急事態対策庁AFAD、G4リーダー機関はKOERIとAFADの体制で実施した。

具体的な内容は、マルマラ海地震の震源モデル

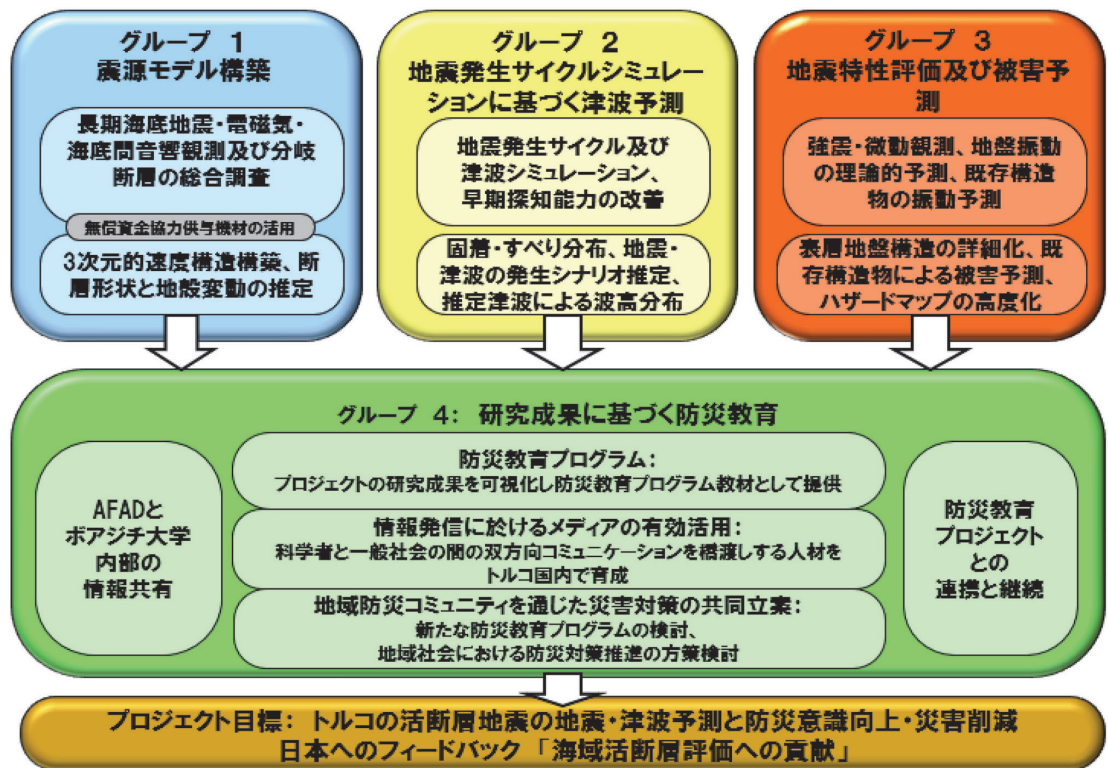


図2 本プロジェクトのマスタープラン

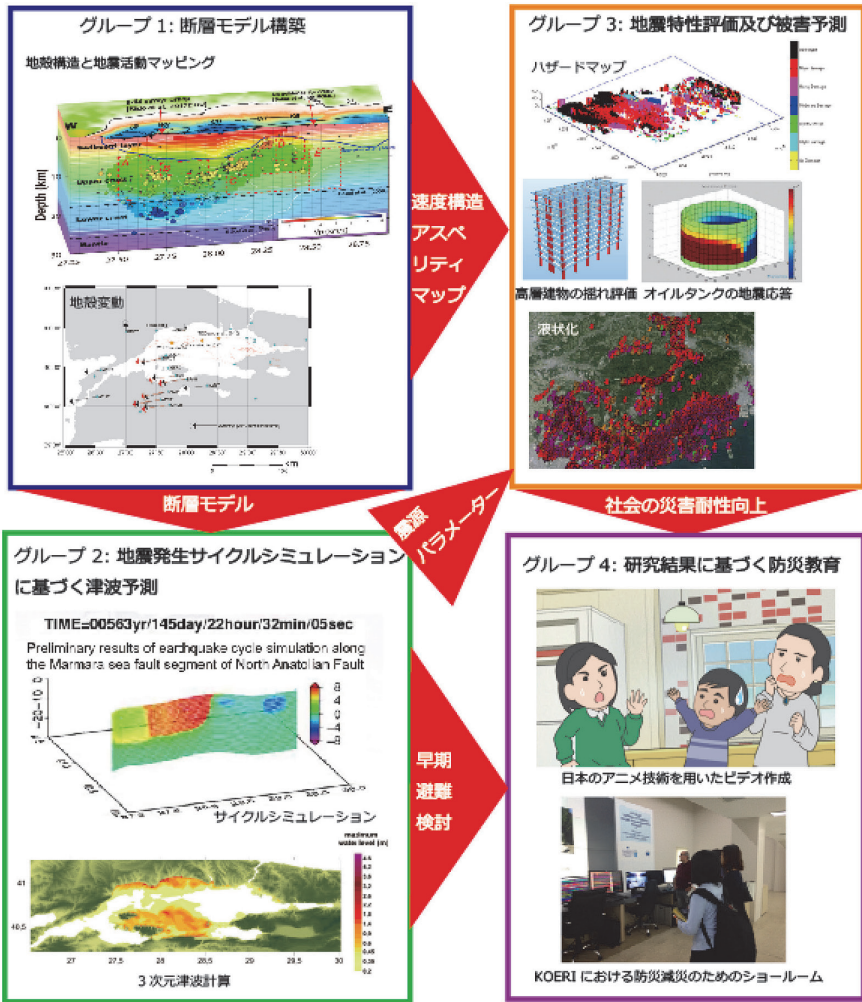


図 3 グループ間の成果と連携関係

構築をはじめ、災害リスクを数値シミュレーションに基づくアニメーションやリスク評価のマッピングなどを用いて多角的なイメージング（可視化）を行い、地震災害に対する意識をトルコ国民一人一人に着実に根付かせること、そのイメージングされた内容について、マスメディアを用いて効果的に配信するとともに、マルマラ海沿岸の地方自治体およびライフライン事業者が研究機関と共同で防災対策を検討する「地域防災コミュニティ」や、市民との対話による「災害対策シンポジウム」の場で有効に活用し、災害対策の提言・実行をトルコ市民の手で自ら行う環境を構築することである。

4. プロジェクトの実施内容

4.1 プロジェクト全体

G1 は長期地震観測、電磁気観測、GPS 音響による海底地殻変動観測を行い、その結果からアスペリティを含めた断層モデルを構築し、トルコ側によるトレンチ調査と整合的な結果を得た。過去の巨大地震の発生パターンが示すセグメント化が震源分布からも明確に把握でき、その震源分布はトモグラフィ研究から求めた地殻構造や電磁気学構造から推定される流体分布と整合する。繰り返し地震観測や海底間測距観測、陸上の GPS 観測

からは、断層のダイナミックな動きが捉えられ、自然地震観測から明らかになったメカニズム解析や異方性解析の結果と整合する。G1から得られた震源モデルはG2やG3に活用され、各シミュレーション研究へと展開された。なお、計12台のOBS（海底地震計）や海底間測距装置をトルコに譲渡し、運用技術を移転するとともに、トルコ国内に海域の観測基盤と組織を構築した。

G2では、地震像イメージング研究により得られた成果を用いて地震発生サイクルシミュレーション、津波シミュレーションを行った。トルコに地震発生シナリオや津波計算の環境を整備し、G1による成果を取り込んだ計算を実施した。まず、イズミットセグメントでの過去の地震発生パターンを地震発生サイクル計算から実現した。次に、G1から得た断層モデルに基づき、サイクル計算を実施した。G1が求めた断層モデルとダイナミックな断層の動きは横ずれ成分を持つ断層運動を表現したものであるが、それだけでは過去の津波履歴を説明できないことから、海底の柔らかい堆積物の崩壊（海底地すべり）による津波被害も考慮した。トルコでは3次元の津波計算も実現した。

G3では、強震動シミュレーションと構造物地震応答解析結果に基づいてトルコで初めて詳細な定量的アプローチでのハザードマップの作成を行った。各地の地盤調査も進み、G1の観測結果に従った強震動計算、実大構造物耐震性評価やハザードマップ作成が進んだ。この地盤調査、表層地盤だけでなく、建物の応答も視野に入れて調査観測を実施した。建物の動きを構造からシミュレーションし、実際の実大構造物耐震性評価を得た。トルコ国内の建物を実大で評価をしたことは、過去に例がないことである。ハザードマップ作成では、地理情報システムと各種シミュレーションを組み合わせた次世代型ハザードマップ作成の日本独自の技術をトルコ国内に普及させた。これらの成果はG4での啓発活動を通じて防災教育に活かされつつあり、メディアとの相互理解が得られた。

G4では、各Gの研究結果について、マスメ

ディアを用いて効果的に配信するとともに、地方自治体およびライフライン事業者が研究機関と共同で防災対策を検討する「地域防災コミュニティ」や、市民との対話による「災害対策シンポジウム」の場で有効に活用し、災害対策の提言・実行をトルコ市民の手で自ら行う環境を構築した。トルコでは、1999年のマルマラ地震以降、学校教育に地震防災が導入されているが、津波に関する防災教育の教材は作成されていなかったため、本プロジェクトの結果に基づき、新たに津波防災教育教本・ビデオを作成、KOERIの地震教育園で毎週防災教育プログラムを実践した。地域で防災事業を推進させるための基盤作りとして、AFAD、地方政府、大学と連携した地域セミナーをヤロワ市、テキルダー市、チャナッカレ市、イスタンブール市で開催した。特に、チャナッカレでのセミナーでは、活発な質疑応答が行われ、現地メディアにより大きく報道された。

4.2 研究題目 G1「震源モデル構築」

マルマラ海周辺において海底地震の長期観測、海底下の電磁気観測、海底間音響測距観測を含めた測地観測の実施およびトレンチ調査の成果を収集し、マルマラ海を横断する活断層の地震像を明らかにし、震源モデルを構築した。

G1は下記のサブ課題で構成され、これらの成果に基づき震源モデルを構築した。

G11：海底地震の長期観測

G12：海底下の電磁気観測

G13：海底間音響測距観測

G14：トレンチ調査

以下にG11ならびにG13の観測結果を示す。

4.2.1 G11：海底地震の長期観測

海底地震観測に関しては、OBSを用いた連続観測により北アナトリア断層に沿って、マルマラ海西部を中心に震源分布と速度構造を明らかにした（図4）。震源分布の浅部上限は音響基盤深度に沿って分布する。震源分布の下限は、地域によって大きな違いがある。図4の西側では震源分布の下限は下部地殻内の深さ15~20km周辺にある。Central Basinから東側では、下限は上部地殻内にあり、約13kmとなる。さらに、Kumburgaz

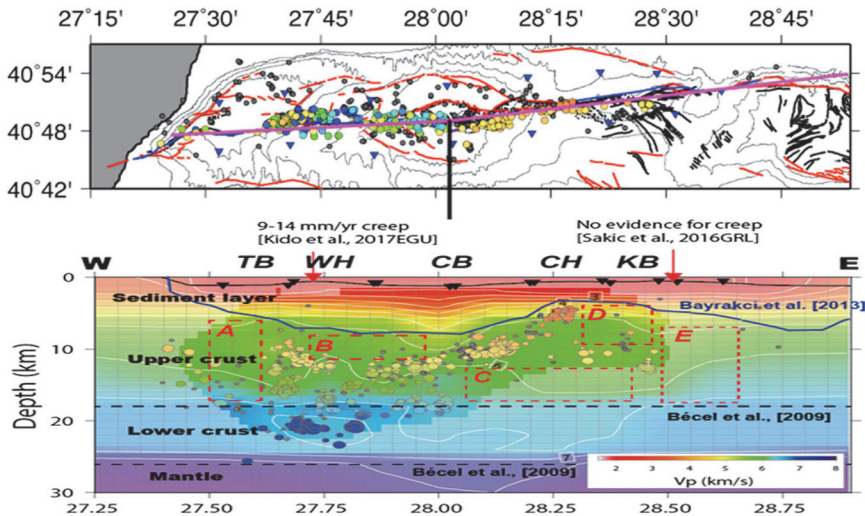


図4 グループ1が構築した断層モデル (Yamamoto *et al.*, 2017). (上) 北アナトリア断層周辺の震源分布. 赤線は活断層分布, カラーは震源分布を示す. (下) 断層モデル. 赤点線はアスペリテイの位置を示す. TB, WH, CB, CH, KB はそれぞれ Tekirdag Basin, Western High, Central Basin, Central High, Kumburgaz Basin

Basin 東側では地震活動が極端に低調であることもわかった. これらの地震活動の違いは, 断層面の傾斜にも表れている. なお, 地震発生帯内では, 均質に震源が分布するのではなく, 一部に地震が発生しないエリアを初めて明らかにした. 断層モデル上の震源分布の不均質性は, 毎年の繰り返し観測から共通であることを確認し, 上記の地震が発生しないエリアをアスペリテイとした (図4). トルコ側を中心に, 陸上観測点のデータと統合して震源メカニズムの解析を進めた結果, 正断層や横ずれ断層のメカニズムを持つ震源が多数決められ, おおむね地形や断層の方向と整合した結果が得られた. また, 異方性解析が示す応力場は北西～南東方向でメカニズム解の結果ともよく整合した.

4.2.2 G13: 海底間音響測距観測

海底地殻変動観測については, Western High の近傍において, これまで3.5年分のデータを取得した. 北アナトリア断層を挟んで5台の測距装置 (ME 1-5) を海底にW字型のアレイを組んで設置し, 測距データを12時間おきに取得している. 同時に姿勢データと温度データを取得しており, これらのデータで補正して, 最終的な測距データを得た. 3.5年分のデータの蓄積からME2-

ME5, ME1-ME2, ME1-ME3, ME3-ME4 の間でそれぞれ 11.4 ± 2.3 mm/year, 9.4 ± 1.5 mm/year, 17.9 ± 2.9 mm/year, 8.2 ± 3.2 mm/year の変位速度を得た. 信頼区間を考慮して, おおむね8～18 mm/year の断層に沿った横ずれ変位の速度を検出した (図5). 広域のGPSデータからは, マルマラ海より南側の観測点において, 北側に対して2.5 cm/year の変位速度が得られている. これらのデータを統合すると, 海底の断層沿いには8 mm/year 程度のクリープがあり, 一部は固着していると考えられる. このように海底の活断層の変位をこの精度で求めることができたことは, 世界で初めてのことである.

4.3 研究題目 G2「地震発生サイクルシミュレーションに基づく津波予測」

G2は下記のサブ課題で構成され, これらの成果に基づき地震発生サイクルシミュレーションと津波予測研究を実施した.

G21: 地震発生サイクルシミュレーション

G22: 津波シミュレーション

G23: マルマラ海の津波シナリオデータベース

G24: 早期探知能力の改善

以下に G21 と G22 の成果を示す.

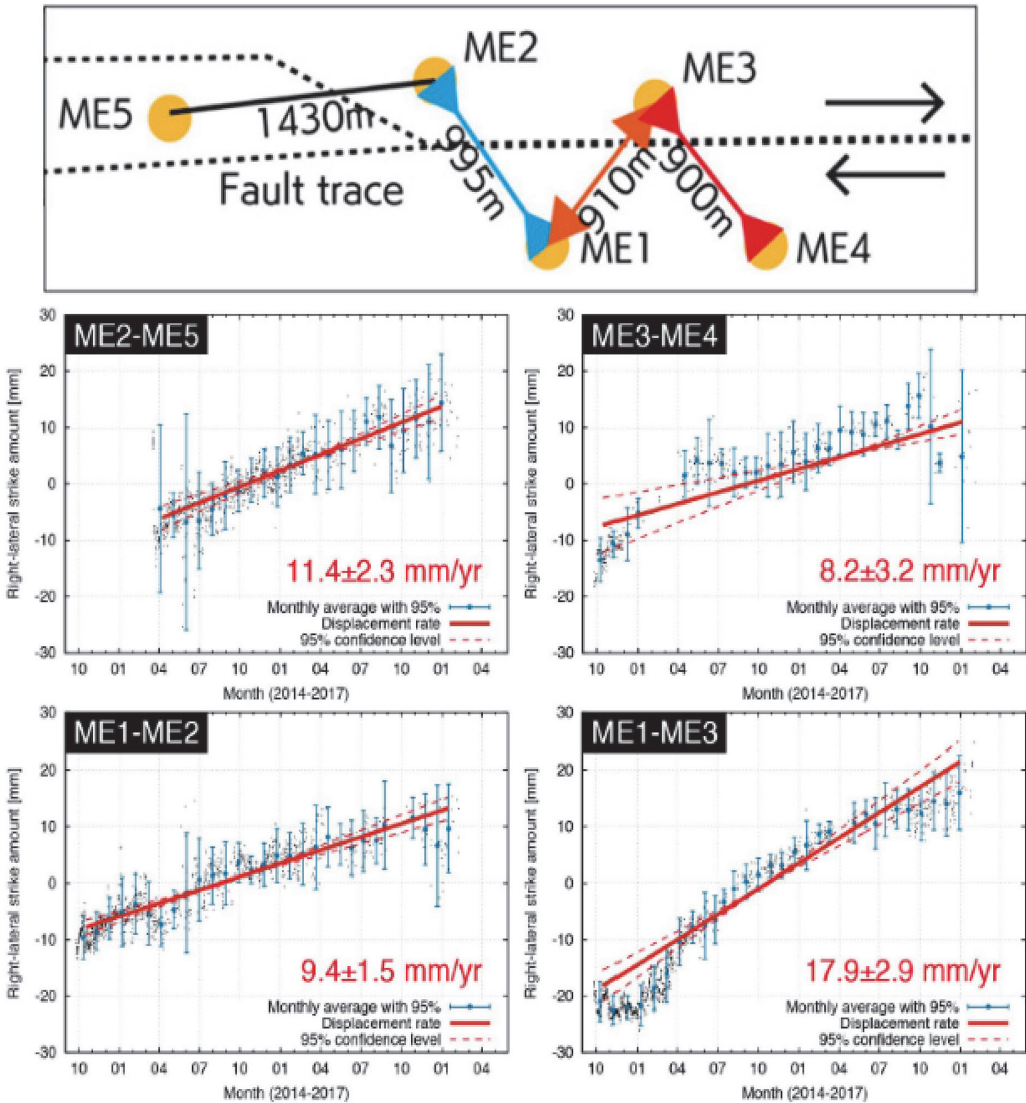


図5 海底間測距観測の結果 (Yamamoto *et al.*, 2019). (上) 海底間測距装置の北アナトリア断層との位置関係. (下) 各海底間測距装置間の測距結果

4.3.1 G21: 地震発生サイクルシミュレーション

地震発生サイクル・破壊伝播計算では初年度からコードのチューニングを進め、京コンピュータや大学の大型計算機センターのスパコンで実用的な時間で実スケールの計算ができるようにした。さらに、北アナトリア断層を対象とした断層モデルのデジタルデータを入手し、地震発生サイクル計算を行った。断層ジオメトリを導入した暫定シミュレーションにより、イズミットセグメントとそれ以西との分割を再現した。現在、G1の震源

分布等から求めた断層ジオメトリ (イスタンブール沖以西) に、従来の破壊伝播シミュレーションで用いられていた断層ジオメトリを組み合わせた断層モデルを構築した (図6)。破壊伝播計算については、破壊の進展・停止に重要となる断層周辺の応力場の空間分布の解析を進めた。その結果、破壊伝播シミュレーションで考慮すべきマルマラ断層帯沿いの応力場が東西で回転していることを応力場インバージョン解析によって示した。地表ならびに断層形状 (実形状よりもスムーズな

場合)を考慮したFEM(有限要素法)での破壊伝播計算が実施できるようになった(図7)。

4.3.2 G22:津波シミュレーション

津波シミュレーションで、イスタンブールの

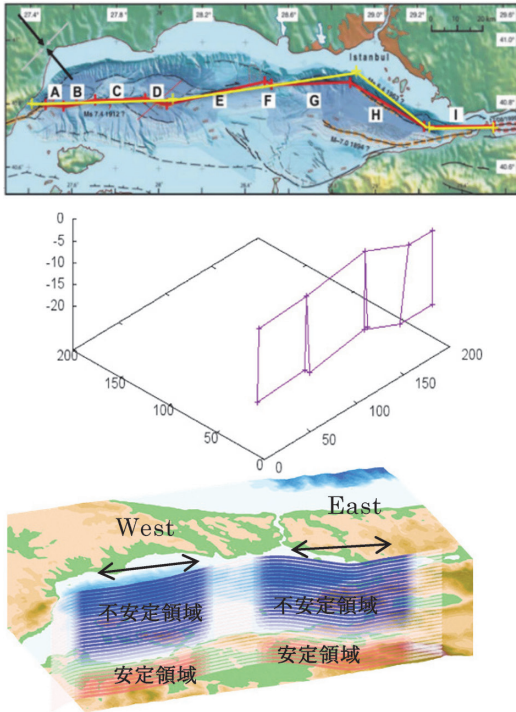


図6 グループ1による断層形状に基づいた地震発生シナリオのためのグループ2による北アナトリア断層モデル。(上)平面図,(中)断層形状,(下)地震発生シナリオ用断層モデル

Haydarpaşa Portを対象とした津波遡上計算を実施した。トルコ側の津波シミュレーション担当であるMETUが高解像度(最小5mグリッド)の地形データに加えて、道路や建物のデータ(1m解像度)を津波計算用に整備し、津波伝播・遡上の2次元計算を実施した。これにより、2つの防潮堤の強化の必要性を示した。また、Yenikapiを対象とした津波遡上計算を同様な高解像度データにもとづいて行うとともに、都市の対津波脆弱性の評価を、シミュレーション結果とその土地の特性を組み合わせる手法を提案した(図8)。

4.4 研究題目G3「地震特性評価および被害予測」

G3は下記のサブ課題で構成され、これらの成果に基づき地震特性評価および被害予測研究を実施した。

G31:地盤構造のモデリングと解析、および強震動推定

G32:大規模実験および先端数値解析を使った構造物耐震性評価

G33:ハザードマップ作成

以下に各グループの研究成果を示す。

4.4.1 G31:地盤構造のモデリングと解析、および強震動推定

マルマラ海周辺において微動観測を行い、その結果を基に地震動特性評価の検討を進めた。微動観測は、図9のようにマルマラ海の主要都市中心部および強震観測点において微動の上下成分のA

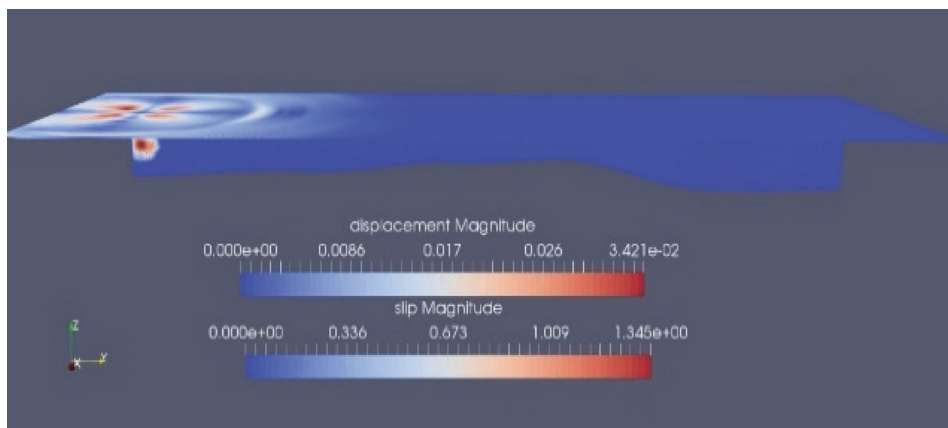


図7 地表ならびにスムーズな断層形状を考慮した破壊伝播計算

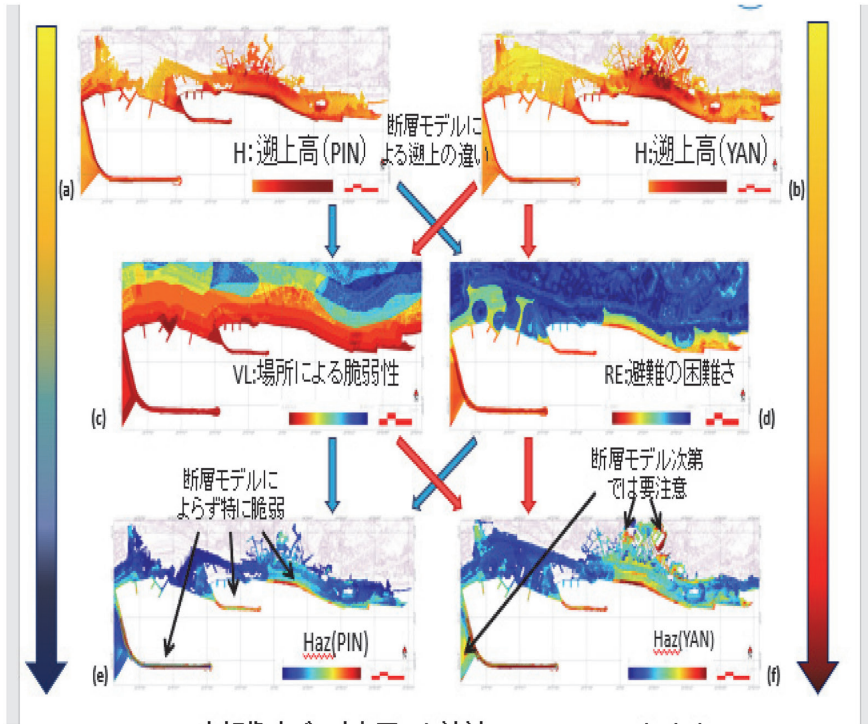


図 8 高解像度データを用いた津波シミュレーションによる対津波脆弱性の評価例

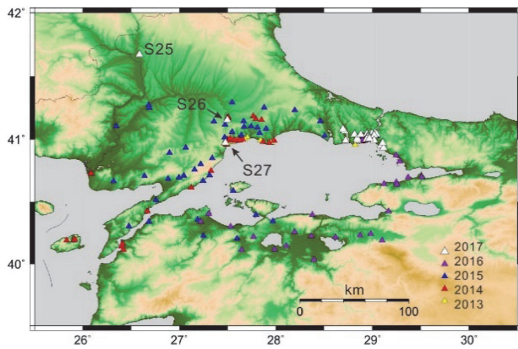


図 9 微動アレイ観測の位置

レイ観測を行い、周波数1Hz以上のレイリー波の位相速度を推定し、その逆解析によって表層地盤のS波速度構造モデルを構築した。とくに、マルマラ海西部のTekirdag地域では密な微動観測を実施し、表層30mの平均S波速度(AVS30)と平均地表勾配の相関関係を求め、これを基にTekirdag周辺のAvs30マップを作成した。

強震観測は、図10に示すようにTekirdag地域を中心に実施した。微動観測や強震観測の結果

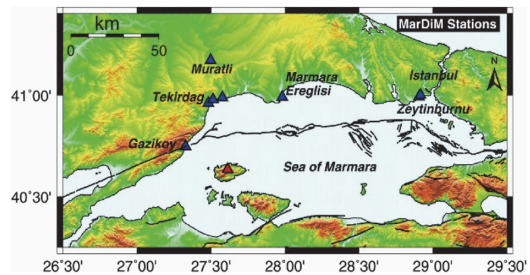


図 10 本プロジェクトで実施している地震観測点の位置

に基づく1次元S波速度構造モデルを用いて、2014年5月24日にエーゲ海で発生したGokceada地震によるマルマラ海での強震動のシミュレーションを波数積分法に基づいて行った。

図11に示すように、S波部分からなる主要動をよく再現することができ、地盤モデルが妥当なものであることを確認した。そのほか、同様の手法と地盤モデルを用いて1912年のMurefte地震による強震動の評価も試みた。次にG1およびG2グループの研究成果である想定される地震の

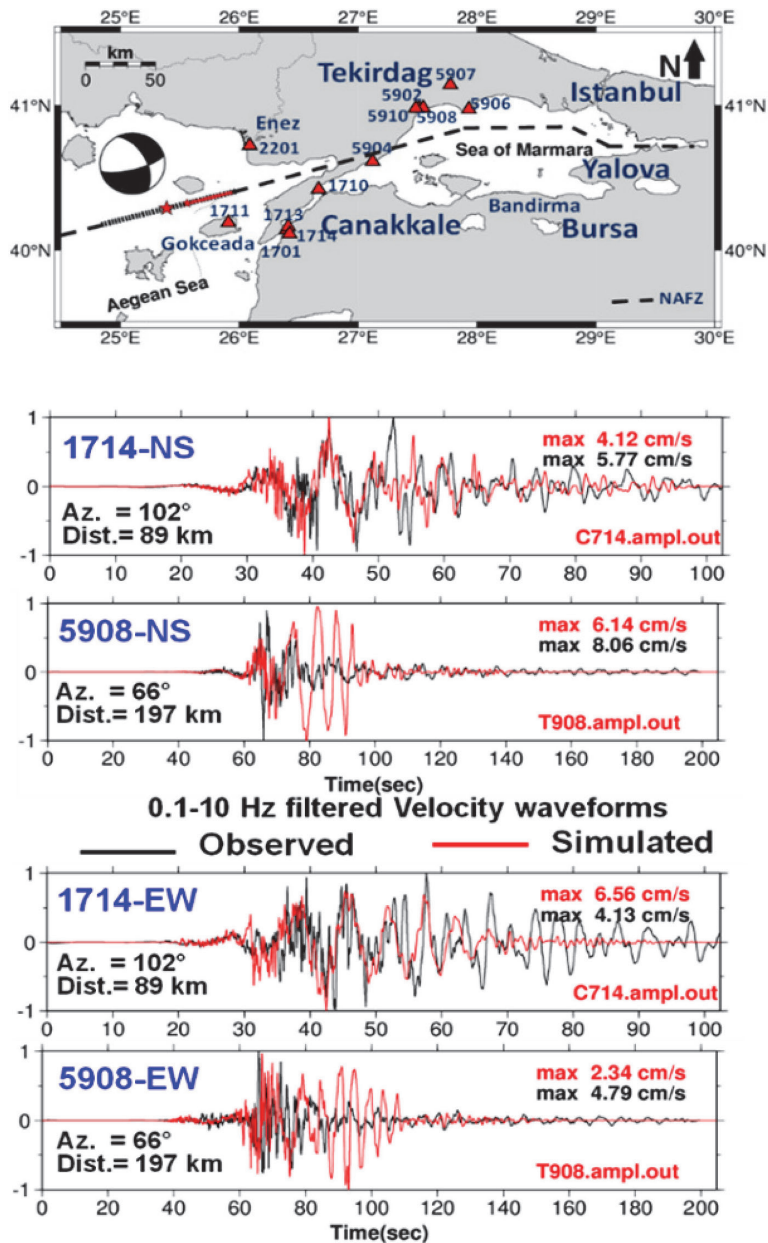


図 11 2014年5月24日のGokceada地震 (Mw=6.9) の震央と観測点の位置の地図 (上), および観測点1714と観測点5908における強震動のシミュレーション結果 (地動速度) の比較の例 (下)

震源モデルを用いて、強震動の評価を行った。図12に示すように、想定地震 (Mw 7.5) の震源モデルは2つのセグメントからなり、それぞれに2つのアスペリティがあるモデルである。強震動計算には、上述の方法と地盤モデルを用いた。

図12には Zeytinburnu (Z02) と Tekirdag (5908)

で計算された地表の速度が示されている。Z02ではアスペリティに近いので、振幅が大きな結果になっている。なお、表層地盤の増幅特性の評価は線形増幅を仮定しているため、強震動が過大評価になっている観測点もあると考えられる。

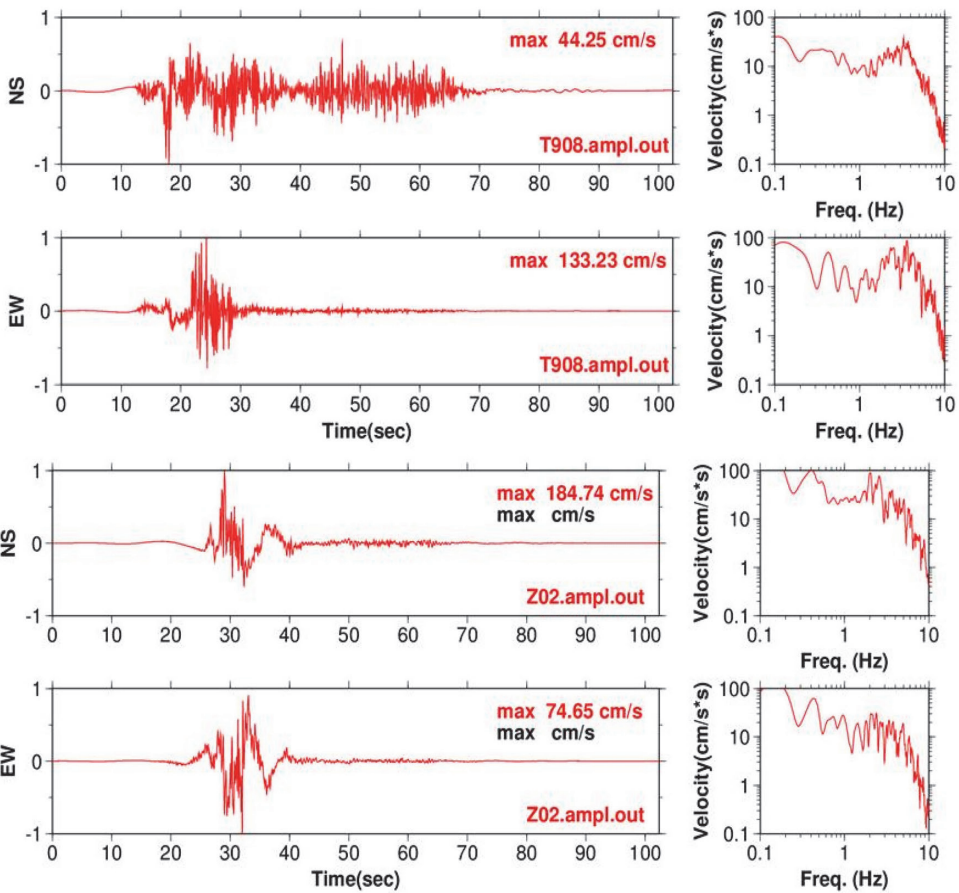


図 12 想定地震のモデル (上) と強震動評価結果 (中: 観測点 5908, 下: 観測点 Z02)

4.4.2 G32: 大規模実験および先端数値解析を使った構造物耐震性評価

耐震性評価を行う具体的な構造物として、10 層鉄筋コンクリート造建築物を計画し、解析モデ

ルを構築した。高性能計算を用いる詳細な解析モデルとなるため、細部の詳細なモデル化が重要である。くり返す地震動を受けて複雑な強度低下性状を伴いつつ終局状態に至る地震応答挙動の数値

解析的評価は、国際的継続課題として位置づけられており、トルコの典型的建物との整合も視野に比較・参照ができるよう、解析モデルの数値解析を実行した。耐震性評価のための大規模実験と先

端解析に関して日本は世界最先端の技術を開発している。この実験技術と解析技術をトルコ側カウンターパートナーに技術移転した。

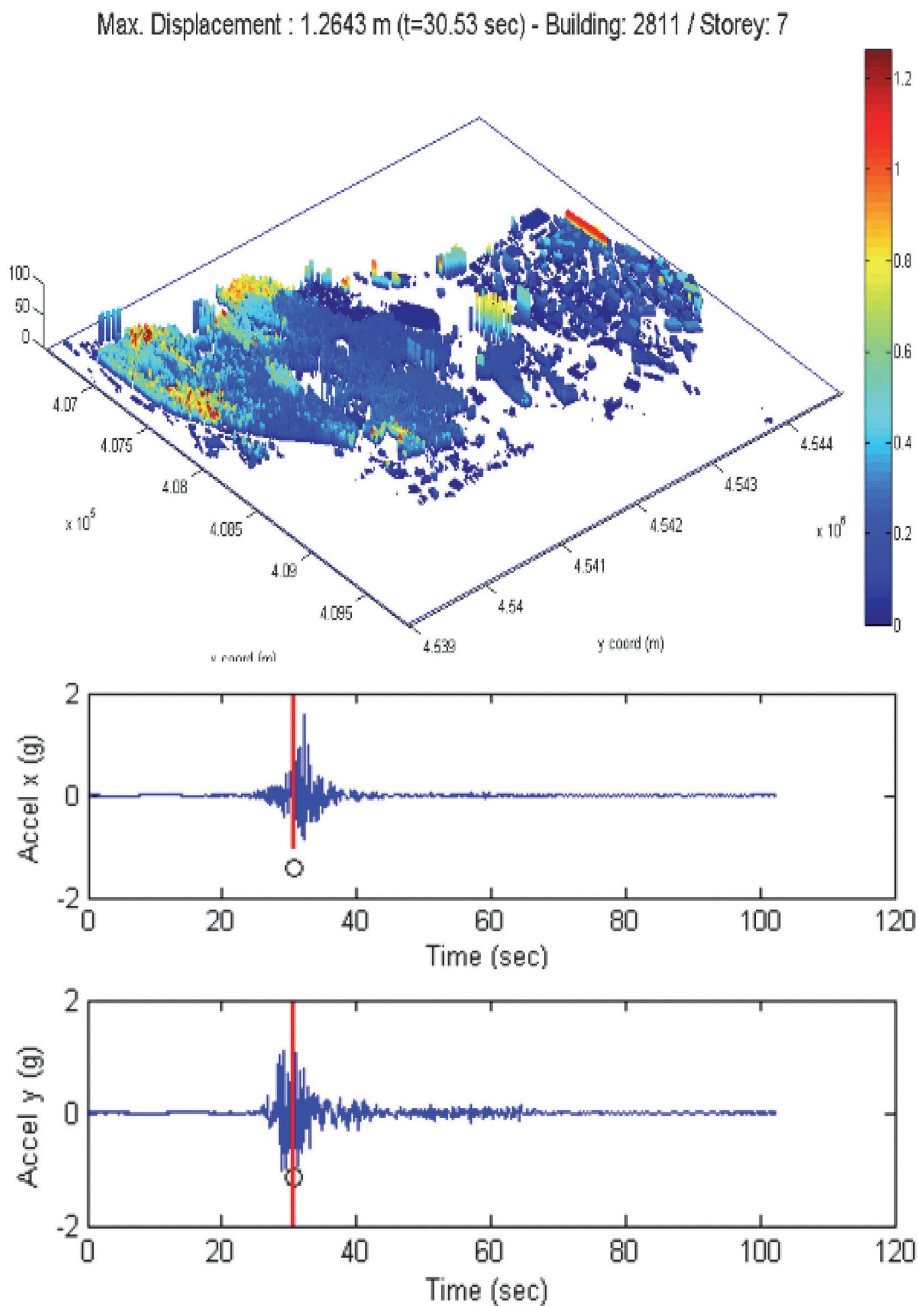


図 13 都市モデルを利用したシミュレーションに基づくハザードマップ (上)。基盤から入力された地震動が地盤で増幅される過程と、地盤の地震動が引き起こす構造物の地震応答の過程を計算した結果も示す (中: X 成分, 下: Y 成分)

4.4.3 G33：ハザードマップ作成

イスタンブール近郊の詳細地理情報システムを利用した都市モデルを構築した。この都市モデルを利用し、シミュレーションベースのハザードマップを作成した(図13)。ハザードマップ作成には、日本で開発されたLinuxベースのプログラムや、H27年度にトルコ・日本の研究者が共同で開発したMatlabベースのプログラムが利用されている。前者は並列計算も実行可能であるが、後者はPCで稼働することを目的としている。地理情報システムと各種シミュレーションを組み合わせた次世代型ハザードマップ作成の技術はわが国独自のものである。トルコ側カウンターパートナーに技術移転を行った。ソフトウェアの技術移転に留まらず、大規模数値解析を実行する高性能計算に必要なハードウェアの選定の技術も移転された。

4.5 研究題目 G4「研究結果に基づく防災教育」

G4は下記のサブ課題で構成されている。

G41：研究結果に基づく視聴覚教材の開発

G42：研究成果を活用した防災教育の検討と地域社会における防災対策の推進検討

以下に各研究成果を示す。

4.5.1 G41：研究結果に基づく視聴覚教材の開発

視聴覚教材「津波に関する知識」や津波ブックレット(図14)、「防災教育アニメ作品」などの制作、さらに研究全体を紹介する「研究紹介DVD」の制作によって、よりわかりやすく研究成果と、地震への備えの重要性をトルコ国民に伝えることができた。

また、メディアセミナーやメディアサイエンスカフェのたびに多くのトルコメディアで放映、記事化してもらえたことは、多くのトルコ国民に本プロジェクトのねらいや進行状況、研究成果を知ってもらうことに役立ったと考えられる。

4.5.2 G42：研究成果を活用した防災教育の検討と地域社会における防災対策の推進検討

本プロジェクトを通して、トルコの歴史津波や津波ハザードリスクに関する研究を行い、それに

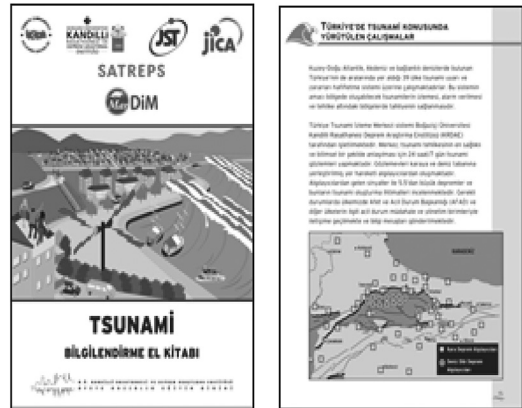


図14 新たに作成された津波教本

基づき新たに津波防災教育教本・ビデオが作成された。また、カウンターパートであるカンデリ地震観測所の地震教育園(Earthquake Education Park)において、毎週水曜日にそれを活用した防災教育プログラムが実践されている。あわせて市民向けの啓発資料として、活用した教本を京都造形芸術大学と連携したほか、トルコの木造家屋の構造と防災対策について学習するための教材開発も行われ、それを活用した防災教育が推進された(写真1)。地域で防災事業を推進させるための基盤作りとして、AFAD、地方政府、大学と連携した地域セミナーをマルマラ海沿岸地域で開催した。開催地は、ヤロワ市(2015年4月)、テキルダール市(2015年9月)、チャナッカレ市(2017年2月)、イスタンブール市(2017年9月)であった(図15)。地域セミナーでは、開催地域のハザード・リスクとの整合性をとる形で最新のプロジェクト成果の紹介が行われた(図16)。

5. まとめ

本研究プロジェクトの成果として、①マルマラ海地震の震源モデルや地震発生シナリオといった理学的研究成果、②津波シミュレーションによる津波脆弱性評価、表層地盤、詳細なDEMならびに構造物データに基づく先進的なシミュレーションによる次世代型ハザードマップの提案といった工学的研究成果、ならびに③防災教育、

しかし重要な点は、研究成果の社会への実装であり、海域観測研究やシミュレーション研究の継続と進展である。そのためには、SATREPS 終了後の継続的な研究連携が不可欠である。今後は日本の防災減災へのフィードバックを視野に入れた連携研究の推進を図りたいと考える。

謝辞

本研究プロジェクトの実施にあたり、プロジェクトメンバーはじめ JICA 本部、JST、JICA アンカラ事務所ならびに在アンカラ日本大使館など、多くの皆様のご支援を受けたことに深謝します。

参考文献

- Guler, H. G., Baykal, C., Arikawa, T. and Yalciner, A. C. 2018. Numerical assessment of tsunami attack on a rubble mound breakwater using OpenFOAM®. *Appl. Ocean Res.*, **72**, 76-91.
- Hori, T., Pinar, A., Necmioglu, O., Hori, M. and Nishizawa, A. 2017. Special issue, The next Marmara earthquake: disaster mitigation, recovery, and early warning. *Earth Planets Space*, **69**: 65.
- Jayasinghe, J.A.S.C., Hori, M., Riaz, M. R., Tamechica, N., Wijerathne, M.L.L. and Ichimura, T. 2016. Application of meta-modeling for quality assurance of automated high fidelity bridge structure models. *J. Jpn. Soc. Civil Eng.*, **72**, 98-109.
- Karagoz, O., Chimoto, K., Yamanaka, H., Ozel, O. and Citak, S. 2018. Broadband ground-motion simulation of the 24 May 2014 Gokceada (North Aegean Sea) earthquake (Mw 6.9) in NW Turkey considering local soil effects. *Bull. Earthq. Eng.*, **16**, 23-43.
- Sahin, A., Sisman, R., Askan, A. and Hori, M. 2016. Development of integrated earthquake simulation system for Istanbul. *Earth Planets Space*, **68**, 115.
- Yamamoto, R., Kido, M., Ohta, Y., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Pinar, A., Kalafat, D., Ozener, H. and Kaneda, Y. 2019. Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 1268-1275.
- Yamamoto, Y., Takahashi, N., Pinar, A., Kalafat, D., Citak, S., Comoglu, M., Polat, R. and Kaneda, Y. 2017. Geometry and segmentation of the North Anatolian Fault beneath the Marmara Sea, Turkey, deduced from long-term ocean bottom seismographic observations. *J. Geophys. Res., Solid Earth*, **122**, 2069-2084.

金田義行

[かねだ よしゆき]

現職 国立大学法人香川大学四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構特任教授/副機構長/地域強靱化研究センター長/学長特別補佐



略歴 1979年東京大学理学系研究科大学院地球物理学専攻修士課程修了。1997年海洋科学技術センター（現：国立研究開発法人海洋研究開発機構）入所，2009年地震津波・防災研究プロジェクト/プロジェクトリーダー，2014年名古屋大学減災連携研究センター特任教授を経て，2016年より現職。理学博士

研究分野 地震学（南海トラフ巨大地震研究，地下構造研究，シミュレーション研究，リアルタイムモニタリング研究），減災科学研究

受賞歴 平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰（科学技術賞），平成30年防災功労者内閣総理大臣表彰，2018年度濱口梧陵国際賞受賞，第12回海洋立国推進功労者表彰（内閣総理大臣賞）

著書（共著含む）「地球と生きる～災害と向き合う知恵～」，「先端巨大科学で探る地球」，「サイエンスカフェによろこそ」など

深海魚と地震

織原義明

日本には「深海魚が出現すると地震が起こる」といった言い伝えがある。この言い伝えはどこからきたのであろうか？ 文献を調べると、1743年（寛保3年）に出版された菊岡沾涼（キクオカセンリョウ）著の『諸国里人談（ショコクリジندان）』にたどりつく。この書物には、若狭国（今の福井県南部）の海岸に人魚が現れ、その人魚を殺してしまったら、30日後に大地震が起きたという話が載っている。この人魚の姿が深海魚リュウグウノツカイを連想させることから、深海魚と地震とを結びつけた物語と考えられている。

今日では、「深海魚出現は地震の前触れ」とする話は、週刊誌やインターネット上でしばしば目にする。はたして、この言い伝えは本当なのか？ かりに本当であるなら、地震災害軽減に役立つ情報になるかもしれない。そのような思いから両者の関連を調べてみた。

深海魚出現カタログの作成

深海魚出現と地震との関連を議論するには、両者がいつ・どこで・どの程度の規模のものが発生したのかを明らかにする必要がある。地震の震源データは気象庁一元化震源カタログを使用し、1923年まで遡ることができた。一方、深海魚については漂着や捕獲などを記録した文献は複数存在するが、地域や期間が限定されている。残念ながら、震源データのように日本全国を長期間にわたって網羅したカタログはない。しかし、深海魚出現は珍しい出来事であることから、特に地方においては新聞記事になることがある。そこで、学術文献に加え、地方紙を中心とした新聞記事、さ

らに水族館等の公開情報から深海魚出現カタログを作成した。そして、リュウグウノツカイやサケガシラなど地震前兆の深海魚と言われている8魚種について地震との関連を調べた。震源データがある1923年以降で最も古い深海魚出現報告は、1928年11月26日の高知県土佐奈半利海岸に屍体で漂着したリュウグウノツカイ1匹である。この日からマグニチュード(M) 9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した2011年3月11日までに、出現日と場所が特定できた深海魚の出現報告数は336件となった。なお、ほとんどの報告は1件につき1匹である。図1は年ごとの報告件数を示している。これを見ると2010年が52件と突出している。これは1~4月に43件あり、この影響が大きい。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の発生日により近い9~12月は2件だけだった。また、1930~1950年代は文献等の情報がそもそも少ないため報告件数も少なくなっている。

深海魚出現と地震との比較

次に、この336件の深海魚出現をどのような地震と比較すべきかが問題になる。地震はマグニチュードが1小さくなると、その数が大幅に増える。たとえば、マグニチュード6の地震は日本周辺で年間15個程度だが、マグニチュード5の地震は年間に約120個と桁違いに多く発生している（気象庁一元化震源カタログの2001~2010年の統計から）。また、日本の歴史地震における地震前の動物異常を調べると、マグニチュードが6を超えると異常出現率が高くなるとされている。さらに、震源からおよそ100kmを超えるとその率が

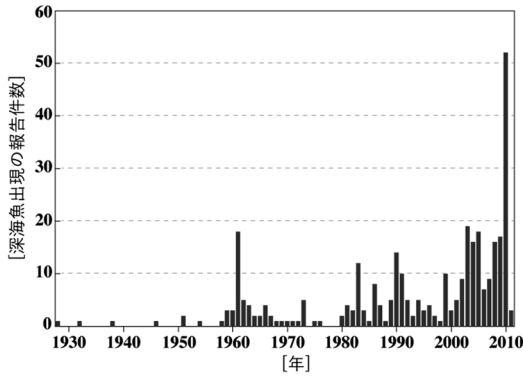


図 1 1928年11月26日から2011年3月11日までの年ごとの深海魚出現の報告件数

低くなり、地震発生の1日前ごろに出現のピークがあるとされている。これらのことから、対象とする地震は深海魚出現場所から半径100km以内に発生したマグニチュード6.0以上(100km以浅)の地震とした。異常の有効期間については、地震発生の1日前では短すぎる。かといって半年や1年では長い。そこで、深海魚出現から30日後までとした。(前述した『諸国里人談』でも30日後だった。)

対象となる地震は、余震を除いたところ221個となった。図2に示すグレーの大きな円が深海魚出現場所からそれぞれ半径100kmの範囲を示すアラート領域になる。小さな黒色のひし形がアラート領域内で発生した221個の地震で、領域外

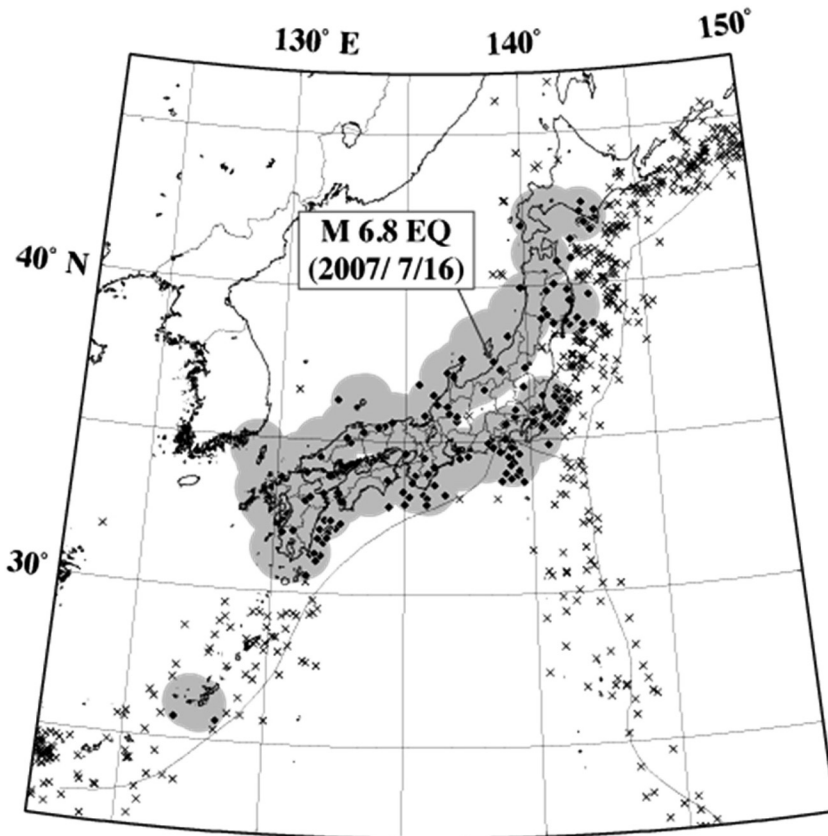


図 2 アラート領域と $M \geq 6.0$ の地震。グレーのエリアが深海魚出現場所から半径100kmのアラート領域で、◆印がアラート領域に含まれる221個の地震、×印が領域外の地震(期間:1928/11/26~2011/3/11)

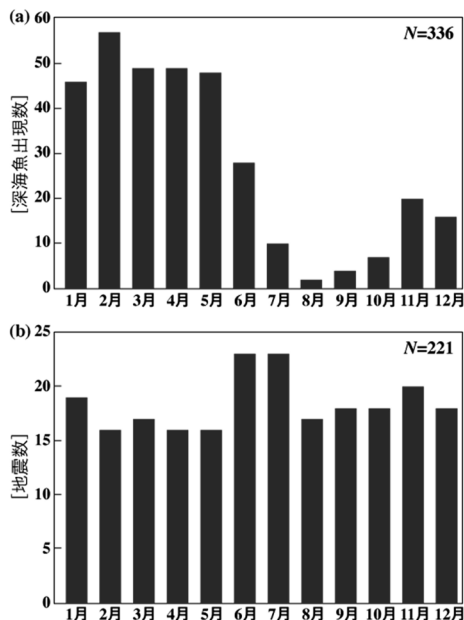


図3 深海魚出現報告と地震の月別の発生頻度。図2に示した、(a) 深海魚出現報告336件の月別発生頻度、(b) 地震221個の月別発生頻度

の地震は×印で示されている。そして、この地震221個と深海魚の出現報告336件との関連を調べたところ、深海魚出現日から30日後までに出現場所から半径100km以内で地震があったケースは、2007年6月19日新潟県柏崎市米山海岸沖でサケガシラ1匹が混獲され、27日後(7月16日)にその場所から北東約30kmで発生した新潟県中越沖地震(M6.8)のみであった。

このようにして調べた深海魚と地震について、時空間的に関連がありそうなものはたった1組しかなかった。期間中もっとも大きな地震だった2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)でもなかった。さらに、M6.0よりもマグニチュードが小さい地震を対象にしたり、対象範囲を広げたり、対象期間を長くしたりすれば、対応する深海魚と地震の数は増えるであろう。また、今後新たな情報が見出され、深海魚出現カタログが更新されれば、対応する両者が増えることも考えられる。したがって、今回の結果から地震の先行現象を捉え

ていた深海魚がいないとまでは言えない。しかし、深海魚の出現報告は災害軽減に有用な情報ではなかったと言うことはできるであろう。言い換えるなら、深海魚出現を地震前兆とした言い伝えは“迷信”だったということである。

深海魚出現の原因は何か？

では、深海魚出現の原因は何か？ 専門家のあいだでもはっきりしたことはまだわかっていない。図3は図2に示した深海魚の出現報告336件と地震221個を発生月別で示したものである。地震は年間を通してだいたい平均して発生しているが、深海魚は冬から春にかけて多く、夏場が極端に少ない。月別の頻度に関して両者は対応していない。また、深海魚の出現報告場所は日本海側が圧倒的に多い。一方、日本周辺の地震はそもそも日本海側よりは太平洋側が多い。特に千島海溝沿いから日本海溝沿いで多く発生している。こうした時空間的な違いから考えてみても、深海魚出現の主たる原因は地震ではなく、別の原因、たとえば海流や海水温の季節的な変化などから探ったほうが良いのではないと思われる。深海魚出現の主な原因は地震ではなかったとなると、「深海魚出現は地震の前兆」とする言い伝えは、やはり“迷信”だったということになる。

実は、日本全国に残る災害に関連する言い伝えのなかに、深海魚と地震とを結びつけるものは意外と少ない。はっきりしたものは、愛知県足助町(当時)が1979年に刊行した「言い伝え」集『あすけのことわざ』にある「海底の魚が、浮き上がるは、地震の前兆。」くらいである。普段は深海に棲息する深海魚が海面近くに現れるのは、海底で何らかの異常があったからに違いない、それは地震に先行する異常現象に違いない、そうした思い込みが深海魚と地震を結びつけていたのかもしれない。

謝辞

本研究は東京大学地震研究所共同利用（2019-Y-地震（中短期予測）2）の援助をうけました。

参考文献

- Orihara, Y., Kamogawa, M., Noda, Y. and Nagao, T. 2019. Is Japanese folklore concerning deep-sea fish appearance a real precursor of earthquakes?. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, <https://doi.org/10.1785/0120190014>
- 大後美保. 1985. 災害予知ことわざ辞典. 東京堂出版, pp. 13-21.
- 総務省消防庁. 2019. 防災に関わる「言い伝え」. https://www.fdma.go.jp/publication/database/item/database009_02_02.pdf (2019年9月26日閲覧)

織原義明

[おりはら よしあき]

現職 東海大学海洋研究所 地震予知・火山津波研究部門 特任准教授. 博士（理学）

略歴 山形大学理学部地球科学科卒業. 理化学研究所テクニカルスタッフ, 同研究所研究員, 足利市議会議員, 独立行政法人防災科学技術研究所契約研究員, 東京学芸大学教育学部物理科学分野専門研究員を経て現職

研究分野 地震先行現象, 地震予知・予測情報のリテラシー, 地域防災

書籍 地震前兆現象を科学する（共著：祥伝社新書）



茨城県の地震の特異性

松村正三

1. 地震数と地震被害

茨城県つくば市に移り住み、時折の講演でこの地に起きる地震の特徴を解説するうちに、筆者は、茨城県、特にその中南部に起きる地震の発生の仕方がきわめて特異であると意識するようになった。その特異性は図1に明瞭に示される。同図は、全国47都道府県別に、有感地震回数(1970～1994年の25年間、各管区・地方気象台で計数された震度1以上の合計、気象庁「震度データベース」より)に対して地震・津波による死者・行方不明者数(1867～2019年3月の約150年間の合計(対数軸)、地震調査研究推進本部「都道府県ごとの地震活動」より)をプロットした結果である。破線楕円で囲んだように全体として右上がりの正相関が見られるなか、茨城県はこの傾向から大きく逸脱し、有感地震の多さの割に地震を原因とする死者数の有意に少ないことがみてとれる。ただし、都道府県当たりの死者数は地震発生当時の人口または人口密度に依存するであろうゆえに、この統計は必ずしも公平とは言えないが、試みに現代の人口や人口密度で較正してみても全体の傾向は変わらない。通常、日常的に起きる中・小・微小地震だけでは、その地に蓄積された歪エネルギーの全部は解消しきれない。したがって、「普段の地震活動が活発だからといって大地震発生の危険性が緩和されるわけではなく、むしろ危険性を暗示する」ということが地震学の常識となっているが、どうやら茨城県ではこの常識が当てはまらなさそうに思われる。図1では、隣県の栃木県も類似の傾向を示しており、こうした傾向

が関東平野中部に広くいきわたるテクトニックな性向に関連していることが強く示唆される。

以下では、茨城県とその周辺に起きる地震の特徴を解説するとともに、上記の特異性を生み出している当地のテクトニクス的背景について考察する。

2. 茨城県下の地震活動

図2は、関東地方東部の地震活動を3とおりの深さ、A(浅部):30km以浅、B(中深部):30～60km、C(深部):60～90km、に分けて描いたものである。Aは浅い地殻内地震であるが、東京湾を囲む関東地震の想定震源域とその周縁部を別にして、また中深部からのしみ出しを除くと関東中部には明瞭な浅発地震活動が見当たらない。2011年東北地方太平洋沖地震後、北部の茨城・福島県境近傍において浅い正断層による活動が活発化した。本稿の議論の対象からは外れている。

一転してBの中深部では、茨城・千葉の県境に沿って活発な地震クラスタが西北西～東南東に並び(破線楕円)、さらにCの深部では、両県の西部に地震クラスタがほぼ南北に並ぶ(実線楕円)。前者は、フィリピン海プレートと上盤の陸側プレートとの接面、ないしは接面近傍のフィリピン海プレート内部での活動であり、後者は、太平洋プレートとフィリピン海プレートとの接面、ないしは接面近傍の太平洋プレート内部での活動である。これらは、茨城県下で重なり合う3枚のプレート間の相互運動に伴う力学的干渉によって生じたものと考えられ、県下の活発な地震活動の主たる要因となっている。

3. 茨城県下のサイスマテクトニクス

まず地殻内浅発地震（図2A）の不活発性についてであるが、図3を見ていただきたい。同図は、国土地理院の三角および三辺測量から導出された約100年間にわたる日本列島の歪速度分布図である（Sagiya *et al.*, 2000の図より転載）。この図から、茨城県を含む関東平野中部は全国でももっと

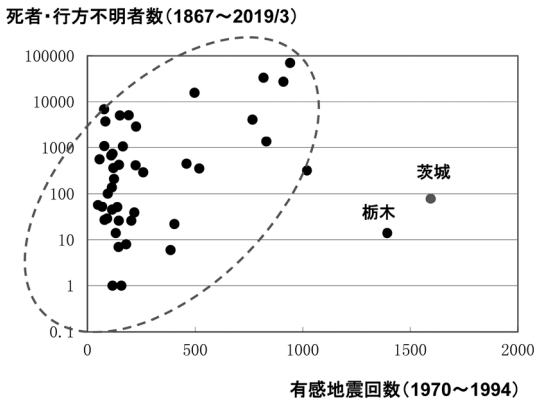


図1 都道府県別の死者・行方不明者数対有感地震回数。有感地震は1970～1994年の震度1以上、死者・行方不明者数は1867～2019年3月の合計（対数軸）

も歪速度の小さい領域に相当することが分かる。筆者は、この原因を県下におけるフィリピン海プレートと太平洋プレートの固着沈み込みのせいではないかと推察した。同図右側の添付円内の押し引き矢印の組み合わせは、両プレートの固着沈み込みモデルから導いたフィリピン海プレートに起因する地表歪パターン（点線矢印）、および、太平洋プレートによる歪パターン（実線矢印）を模式的に描いたものである。量的な妥当性を別にすれば、少なくとも定性的には両プレートの固着沈み込みによる剪断歪が打ち消し合うセンスであり、この地域に活断層が認定されていない状況と相俟って、浅発地震が不活発な事情が説明される。

次に、中深部（図2B）および深部（同C）の活発な地震活動についてである。木村尚紀（Kimura *et al.*, 2006）は、BおよびCの地震クラスタに対してM5級の代表的地震波形の解析を行い、それらが繰り返し地震であって、これによる地震時滑りの平均的な速度が、Bではフィリピン海プレートと上盤プレートとの相対運動速度、Cでは太平洋プレートとフィリピン海プレートとの相対運動速度とそれぞれマッチしていることを明らかにした。すなわち、BおよびCに見られる活発な地

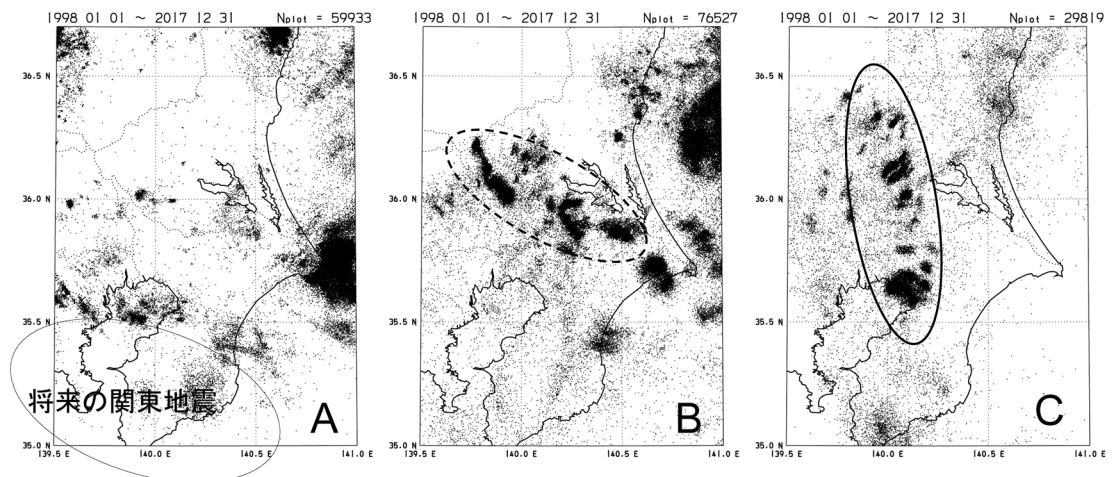


図2 関東平野東部における微小地震の深さ別震央分布（気象庁地震カタログより）。A：浅部（30 km以浅）、B：中深部（30～60 km）、C：深部（60～90 km）

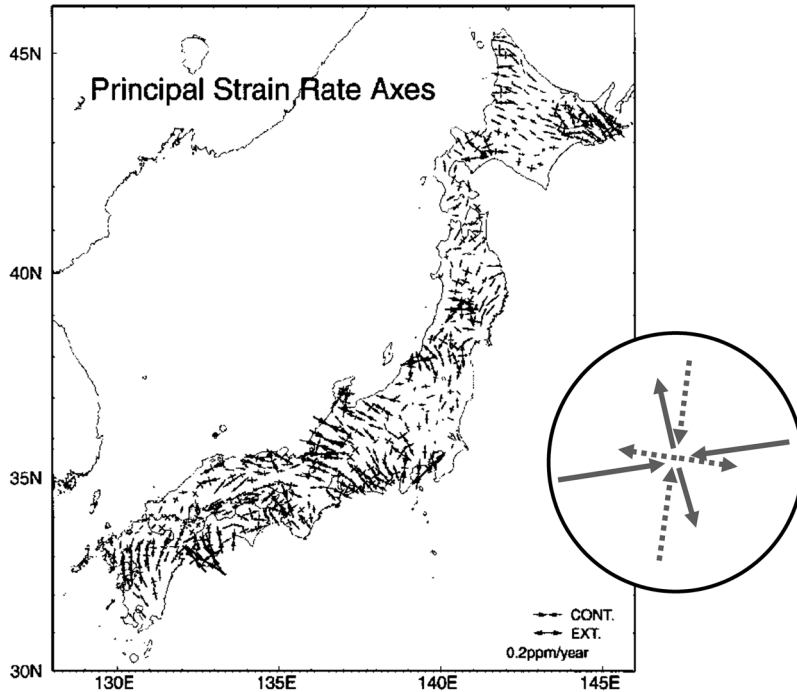


図 3 国土地理院の三角・三辺測量に基づいた約 100 年間の歪速度分布. 右円内の添付図は、太平洋プレート（実線矢印）とフィリピン海プレート（点線矢印）の固着沈み込みによって関東平野中部にもたらされる歪分布を模式的に描いたもの

震クラスタは、沈み込んだ両プレートによる引きずり込みを短期間のうちにそのつど、解消しており、結果的にこの領域に大地震を発生させるだけの歪エネルギーを蓄積し得ない状況の出現を強く示唆している。被害地震を顧みれば、この領域では 1895 年霞ヶ浦の地震（M7.2）および 1921 年龍ヶ崎の地震（M7.0）の 2 つがあげられる。前者は太平洋プレート、後者はフィリピン海プレートのともにスラブ内に起きた地震と推定されており、それぞれが図 2 の C および B のクラスタに関わったものとする、クラスタのサイズから勘案して、これらがそれぞれの領域における最大地震に相当するとみなすことができそうである。前者の地震では当時の茨城県で 6 人の死者が出ているが、震源の深さから見て地表の揺れはおおむね震度 6 弱以下であり、現代の建物であれば深刻な影響を受けるほどのものとは考えにくい。

さらに考察を敷衍する。図 4 は、Nakajima・Hasegawa（2010）が描いた沈み込むフィリピン海プレートと太平洋プレートの等深度線であり、同時に彼らは、両プレートの接触域を描き出した。ここでは、同図に図 2 の B および C の地震クラスタ分布をそれぞれ破線と実線の楕円で加筆している。2 個の楕円は、鉛直方向に一定の間隔を保ちながら平面的にはある角度をもってクロスしており、このことは、フィリピン海プレートと太平洋プレートとがこの付近において振れた姿勢でもって強く相互作用し、その結果、相互にクロスする応力集中域がそれぞれの内部に生み出されたことを想像させる。2 個の楕円の位置は、等深度線の湾曲、すなわちプレートが屈曲する位置とも重なって見え、茨城県下において太平洋プレートがフィリピン海プレートにのしかかれて背斜のごとく屈曲し、フィリピン海プレートがその反

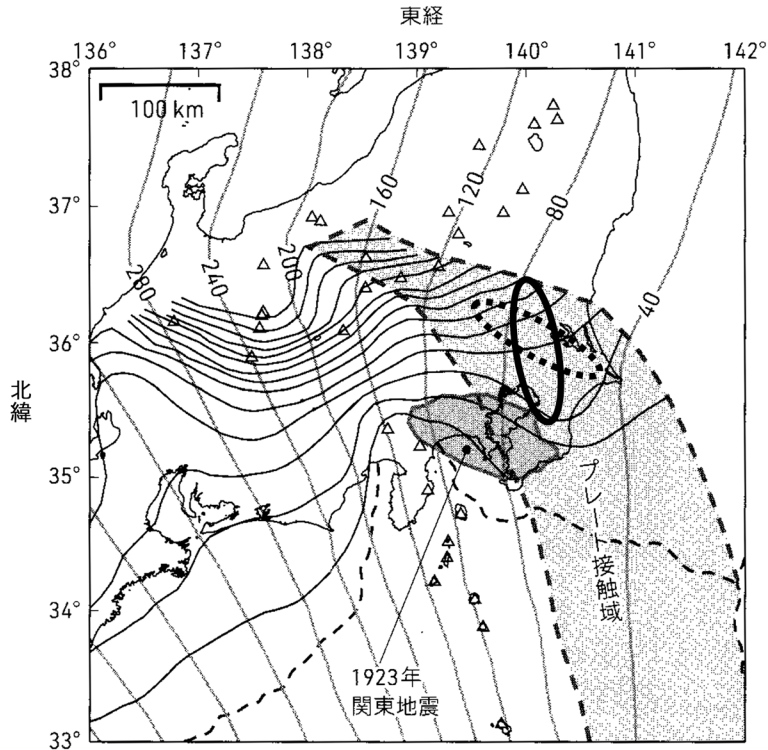


図 4 フィリピン海プレートおよび太平洋プレートの等深度線分布図 (Nakajima・Hasegawa, 2010 の図に加筆). 2 個の楕円は図 2 の B: 中深部 (破線) および C: 深部 (実線) の地震クラスタ領域を示す

作用によって向斜のごとく屈曲することになり、こうしたプレート間の物理的干渉の反映が B と C の地震活動の成因であるだろうと思いついたのである。

4. 茨城県沖の海溝型地震

図 5 は、茨城県沖で繰り返し発生する約 M7.0 の固有地震の震源域とその他の地震の震央分布を示す (地震調査研究推進本部「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価」より)。この地震の平均発生間隔は約 20 年と比較的短く、地震の規模と太平洋プレートの相対運動速度は釣り合っている。また、M7.5 前後の地震が発生する福島県沖や宮城県沖に比べてその地震規模は有意に小さく、太平洋プレートの沈み込みに伴うカッ

プリングが茨城県沖ではそれ以北よりも弱いことを窺わせる。2011 年東北地方太平洋沖地震の本震直後、茨城県沖には M7.6 の余震が発生し、これが最大余震となった。この地震は、本震震源域の南端付近に位置し、震源域における急速な応力再配分による過渡的な歪蓄積が結果したものと考えられる。2011 年の巨大地震の震源域は、その南限が茨城県沖に画定されており、また、強震動生成域の分布範囲も茨城県沖までには達していない。このことは、太平洋プレートと陸側プレートとのカップリングが、茨城県沖付近でフィリピン海プレートに干渉され、その南方ではフィリピン海プレートとのカップリングに置き換わっていくことと無関係ではないだろう。カップリングが完全にフィリピン海プレートとの間に置き換わった伊豆・小笠原からマリアナ海溝にかけては、もは

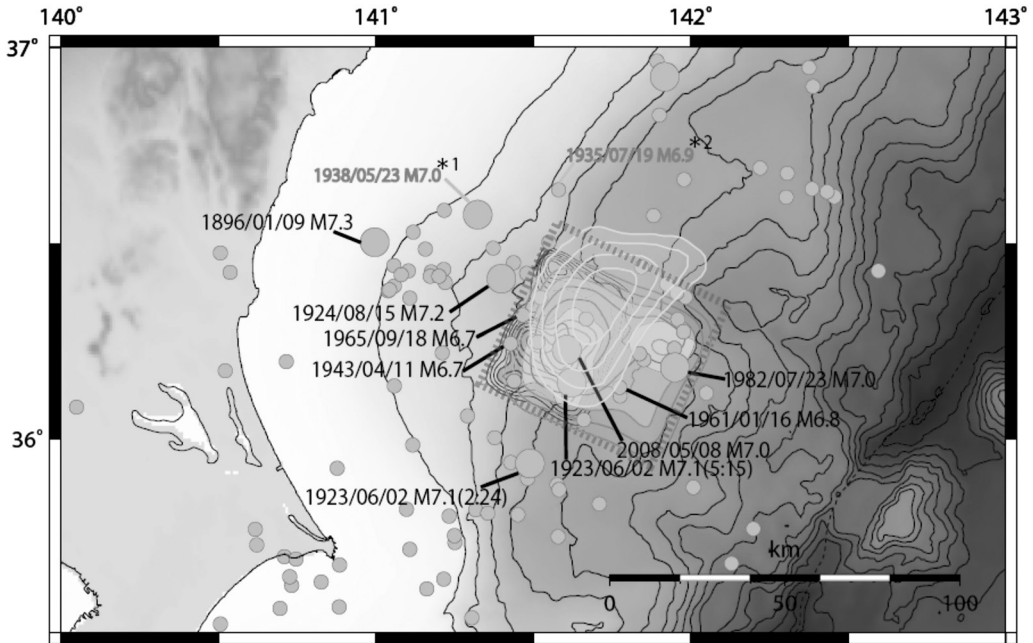


図 5 茨城県沖における M7 級固有地震の震源域および主な地震の震央分布（地震調査研究推進本部のホームページより）

や強固なカップリングが存在しないとされている。地震調査委員会は、2011 年地震の割れ残りとして茨城県沖から房総沖にかけて M8.4 地震の発生を想定しているが、以上の事情を考慮した場合、この地震が津波地震となる可能性を別として、著しい強震動を発生させることは想像しがたい。当面のタイムスケールで地震動を考慮する場合は M7.0 程度の固有地震が実際的な対象とみなされ、結果的に活動度と地震被害の関連から見た茨城県の地震の特異性は、海溝型地震に対しても成立することになる。

5. まとめと考察

以上のとおり、茨城県の直下および太平洋沖に発生する地震に対しては他の都道府県と異なるテクトニクス事情による地震規模の限界が存在するとし、それが初節で紹介した茨城県下の地震活動の特異性を形作っているものと解釈した。特異な

テクトニクス事情とは、県下に 3 枚のプレートが集まり、それらが複雑な形状と運動をもって物理的に干渉しあっているということである。このようなテクトニクスの複雑さが、活発な地震活動を生み出すと同時に、まさにその複雑さが地震の規模に一定の制約をもたらしているのであろう。

2011 年東北地方太平洋沖地震（M9.0）発生の翌年、2012 年 1 月に新聞各紙によって「M7 級首都直下地震が 4 年以内に 70%」という衝撃的な報道がなされ、世上に物議を醸すという事件が発生した。事の発端は、東京大学地震研究所のグループが行った地震活動の統計的分析による予測の告知であった。彼らは、巨大地震後の地震活動の一時的な活性化を背景に、余震活動の減衰を示す大森公式と M 別頻度分布を示す GR（ゲーテンベルク・リヒター）式だけに基づいて南関東における M7 級地震の発生確率を算出した。その分析手法に特別な過誤はなかった。それにもかかわらず、報道から 8 年近くを経過した今も M7 地震

は発生しておらず、予測はほぼ外れたと言っても過言ではないだろう。ではなぜ、予測どおりに事が運ばなかったのだろうか。筆者は、ここで解釈した茨城県を含む関東平野中部を支配する地震の発生事情の特異性がこの問題に絡んでいると推測する。彼らが扱った地震活動の主要部分には茨城県下の地震が大きく寄与していた。そして、ここでの地震活動には、GR 式を M7 級まで外挿し得ない要素が含まれていたということになる。GR 式の適用限界には、それぞれの地域に固有のテクトニクス事情が反映されるはずであるが、茨城県の地震活動に見られる特異性は、ベテランの研究者にとって常識的な GR 式の運用を見誤らせるまでに圧倒的なものであったと言えそうである。

謝辞

本稿の執筆にあたって、岡田義光氏および鷺谷威氏にはたいへんお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

地震調査研究推進本部。都道府県ごとの地震活動。
https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/ (2019 年 4 月 8 日閲覧)
地震調査研究推進本部。三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版) について, 平成 23 年 11 月 25 日。 <https://www.jishin.go.jp/main/chousa/>

kaikou_pdf/sanriku_boso_4.pdf (2019 年 4 月 10 日閲覧)

- Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T. and Hirata, N. 2006. Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea Plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips. *Tectonophysics*, **417**, 101-118.
- 気象庁。震度データベース検索。 <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php> (2019 年 4 月 6 日閲覧)
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. 2010. Cause of $M\sim 7$ intraslab earthquakes beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Possible evidence for a vertical tear at the easternmost portion of the Philippine Sea slab. *J. Geophys. Res.*, **115**, B04301.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.

松村正三

[まつむら しょうぞう]

略歴 東京大学理学部物理学科卒業, 同大学院地球物理学博士課程中退, 独立行政法人防災科学技術研究所固体地球研究部門長などを経て退職。科学技術庁長官賞を受賞。瑞宝小綬章を受章。理学博士

研究分野 地震学



いにしえのジャーナル記事

地震ジャーナルの内容は最近お堅くなった、むずかしくなったとの声をお聞きする。

たしかに、当振興会を創設され20年前に逝去された萩原尊禮先生や、ジャーナルの初代編集長であり15年前に亡くなられた力武常次先生が仕切っておられた頃は、ソフトでユニークな記事が数多く含まれ、執筆者にも著名人・文化人など多彩な顔ぶれが並んでいた。

以下にその一端を紹介するが、昔の記事は振興会のホームページですべて閲覧できるので、興味のある方はぜひ訪れてみていただきたい。

エッセイ

- 柳田邦男（評論家）情報の内実を知る，5
小松左京（作家）「地震観測衛星」について，7
原田昇左右（建設大臣）私と地震との関係，8
秦野 章（元警視総監）地震対策は抜群の政治だ，9
野坂昭如（作家）“焼跡派”の地震観，11
近衛忠輝（日本赤十字社社長）地震と赤十字の救援活動，15
海老名香葉子（エッセイスト）地震に備えて，17
秋篠宮文仁（皇族）河の神様，18
味岡健二（元東京消防庁消防総監）東京の震災対策事始め，19
高秀秀信（横浜市長）都市の地震防災，21
佐々淳行（初代内閣安全保障室長）災害は忘れないうちにやってくる，23
石原信雄（元内閣官房副長官）行政とボランティア活動，25
有馬朗人（文部大臣）平田森三先生のこと，26

対 談

- 萩原尊禮・力武常次，地震予知計画発足のころ，1，11-25
和達清夫・末廣重二，深発地震の発見，4，1-10

聞 き 書

- 林家こぶ平（落語家）父三平の地震ざらい，9，51-53
三浦布美子（女優）芝居と地震，15，34-37

一般記事

- 仁尾一三（週刊新潮記者）週刊誌に読む地震の歴史，3，45-47
清水幾太郎（思想家）ある思想家の地震体験，4，11-14
牧野正久（東京理科大）地震と切手，6，32-35
井崎脩五郎（競馬評論家）馬と地震，7，46-48
飯島吉晴（民俗学）地震と鯰絵 地震のコスモロジー，11，32-39
萩原尊禮 歌舞伎と地震 地震加藤，12，16-21
ハギギ志雅子（作家・画家）1990年イラン地震に想う，12，30-34
森 哲郎（画家）「なまず裁判」を上演して，12，35-38
朝倉喬司（ルポライター）キジ・ナマズ・船頭小唄，13，60-63
志方俊之（元陸自北部方面総監）自衛隊の地震防災対策 何時でも何処でも，18，26-32
岡井 隆（歌人・医学博士）地震と短歌，22，54-60
近藤信行（作家）天災と人災と，23，44-49
種村季弘（独文学）災害解釈の精神史 クライストの地震小説について，24，66-73
時実新子（川柳作家）地震と川柳 阪神大震災の被災体験，24，74-80
大林太良（文化人類学）要石と大地の柱，26，44-50

囲み記事

- 萩原尊禮 茂吉と地震，4，39
広井 脩（新聞研）天意下る 北原白秋，3，35
本蔵義守（東工大）地震数え唄，33，40
力武常次 地震いろは歌留多，33，41

地震ジャーナルは学術誌ではなく、どこかしらゆとりを持った、地震に関する「読み物」をめざしている。そのためには、上にリストアップしたような趣きある記事を増やしたいところであるが、現在の編集人には、そのような才覚も人脈も備わっていない。せめて、掲載する記事の内容についてはなるべく分かりやすいものにする努力を続けてゆきたい。

（岡田義光：地震予知総合研究振興会）

■ 書 評 ■

● シームレスな地球科学の展開

中島淳一 著

日本列島の下では何が起こっているのか

評者 小林洋二

この本は、日本列島下で起こっている地震・火山および地殻変動などを理解するための解説書である。著者は若き地震学者であるが、火山学、岩石学、地球化学および地質学などの幅広い分野を網羅し、それらの研究成果を統一的に結びつけて理解しようと試みている。50年ほど前に島津康男は「地球科学は地球物理学、地球化学および地質学等個々の分野に分けられるものではなく、“シームレスサイエンス”である」と主張した。全10章からなる本書は、まさに“シームレスサイエンス”の現代版であろう。面白く読ませてもらった。ただし、書評には字数制限があるため、私の興味のある箇所についてのみまとめた。

最初にプレートテクトニクスの基礎を解説している。まず地球が地震波速度の深さ方向の変化から判断して層構造をしていること、ついで地震波トモグラフィーの解析結果から沈み込み帯におけるスラブの形状やマントルウェッジ内の低速度層の存在について述べている。

ついで現在の日本列島が形成された歴史を地質学や古地磁気学の成果を基にして論じている。1,500万年前まで日本海やフィリピン海が拡大し、日本列島は現在の位置付近まで移動した。300万年前頃からフィリピン海プレートの運動方向が南北から北西に変化した結果、本州は東西圧縮場となり、特に東北日本では逆断層運動や奥羽山脈の形成が始まったとしている。このような地史観については諸論があると思われるが、それに加えて著者は、近年GNSSで得られたデータなどによって、現在の太平洋プレート、フィリピン海プレート、オホーツク海プレートおよびアムールプレートが存在するとしている。

最後に沈み込み帯で起こる地震や火山活動の原因が水の存在とその移動にあることを力説している。その機序として、海溝の海側で発生したアウトターライズ地震で生

じた断層が通り道となって水はスラブ内部深くまで運ばれ、マントル内物質と反応して含水鉱物（蛇紋岩）となる。一方、地殻物質（堆積岩や火山岩）と反応した場合は含水鉱物を含む高圧変成岩となると説明している。著者はその詳細については述べていないが、私は変成分帯と、プレート境界で発生する特徴的な逆断層型地震（浅部から深部に向かって超低周波地震、普通地震、そして低周波地震およびスロースリップ、さらに50~70km付近で発生する普通地震）の深さ分布との間に何らかの因果関係があるかもしれないと考えている。なぜなら、各変成相の弾性的・塑性的性質の強弱によって破壊の仕方に違いが生じることが推測されるからである。その関係を示すと理解が深まるのではないだろうか。変成岩岩石学から明らかにされている相図を以下に例として示す。プレートの沈み込み付近で形成されたと考えられている低温高圧変成帯（たとえば三波川変成帯）では、

- (1) 深さ10kmまで(250℃以下)：沸石相、パンペリ石・アクチノ閃石相：変成度が弱く、非変成性の堆積岩と変わらず塑性的性質が強い。
- (2) 深さ15~30km(250~350℃)：緑簾石・藍閃石相：変成度が高くなり、弾性的性質が強くなる。
- (3) 深さ30~50km(350~500℃)：ヒスイ輝石を含んだローソン石・藍閃石相：地殻物質はこの温度帯では塑性的性質が強まる。加えて、周囲のマントル物質が水と反応して蛇紋岩の形成が始まり、いっそう塑性的性質が強まる。
- (4) 深さ50km以上の深部(500℃以上)：オンファース輝石・ざくろ石からなるエクロジャイト相：地殻物質はエクロジャイトとなり、マントル物質と同程度の弾性的性質を持つ。蛇紋岩の脱水化も始まる。

一方、島弧の下部地殻内(深さ15~30km、温度350~600℃)では火成岩および緑色片岩相・角閃岩相の安定な中圧型変成帯(たとえば領家変成帯)となる。現在の日本列島では、火山地帯のみならず非火山地帯(たとえば大阪・奈良境界付近および兵庫・京都境界付近)でも、この深さと温度の地殻内で低周波地震が発生している。この低周波地震の発生は地殻の塑性的性質の強まりと関連しているように思われる。

本書を読んで結論的に述べれば、本書は日本列島周辺でみられる地学現象をできるだけ結びつけて理解できる

よう、プレートの沈み込みによって起こる現象の原因（プレートの含水化）から結論（火山の形成や内陸地震の発生）までを、その途中経過（プレート境界地震やスラブ内地震の発生）を含めて紹介しており、たいへん魅力的であり、かつ説得力があると思われた。

「追記」この書評を書き終えたころ、京都大等の研究チームによる東北日本弧に発生しているプレート境界付近の普通地震およびスロー地震の発生場所の分布に関する研究成果が新聞報道された（朝日新聞 8月29日）。「サイエンス」に原著論文が発表されている。

<講談社ブルーバックス、2018年10月、新書判、304頁、1,100円+税>
[こばやし ようじ 元筑波大学助教授]

● 脚注まで面白い

纈纈一起 著 地震動の物理学

評者 竹中博士

今年の2月頃だったと思う。ある日私の勤務する岡山大学の生協の書店の新刊コーナーの中央にこの本が6冊くらい平積みしてあるのを見かけた。私の大学は、地震を専門とする研究者や学生が多数いる大学ではないので、正直この専門書をどのくらいの人が購入されるのか、まったく想像できなかった。ところが、数日後にその書店に寄ったときには、残っていたのは1冊きりだった。もしかしたら私の研究室の学生に訊いてみたところ、平積みのほとんどを購入したのは彼らであった。本書が出版されて日が浅く、私はまだ学生達に本書を紹介したり薦めたりはしていなかった。そこで、学生に本書を購入した理由を尋ねると、「コスパが良いから」、言い換えると、内容が盛り沢山なのに（他書に比べて）値段が安いからという返事が返ってきた。これにはたいへん感心した。ここでは以下、本書の内容について紹介し、この検証を試みる。

本書は、そのタイトルからわかるように地震動の専門書である。地震動を「地震の震源から近い場所の揺れ」と定義し、その解析や計算に用いられる「数式や手法を単に提示するだけでなく、それらを読者自身が導き出せるように解説」することを目標に書かれている。本書は4つの章と1つの付録から構成されている。第1章（「地震と地震動」）では、地震波動論を学ぶ上で必要な弾性理論と波動論の基礎についてコンパクトにまとめられている。第2章（「震源の効果」）は、前半では主に無限均質媒質中の断層震源（点震源）の解析解とその円筒波展

開について、後半では震源インバージョンを含む震源解析について解説している。第3章（「伝播の効果」）では、地震波が地下構造を伝播する影響を評価する計算手法についてメインに書かれている。特に水平成層構造を扱う準解析的な手法について詳しく記述されている。本章では差分法や有限要素法といった3次元不均質構造が扱える数値的な手法についても紹介されているが、類書ではあまり見られない波線理論やレイトレーシングについても多くの式や図を用いて説明している。さらに微動や地震波干渉法に係る理論についても説明されている。第4章（「地震動の観測と処理」）には、地震計の原理、波形のデジタル処理、経験的のべイズ推定まで含む最小二乗法について解説されている。最後の付録Aでは、「物理学」とは外れるが、地震動にとって重要なマグニチュードと震度についてコンパクトかつわかりやすい説明がされている。

本書の特徴は、各章末にある充実した参考文献リストとともに「数式や手法を単に提示するだけでなく、それらを読者自身が導き出せるように」するために非常に役立つと思われる欄外の脚注である。この脚注はほとんどのページにあり、初学者はもちろん専門家にとってもありがたい。この脚注を読むだけで、著者がたいへんな勉強家であることがわかる。自身で定式化や式を導出して、さらにそれらを計算するためにコードに実装されてきた著者だからこそできる読者への配慮と感心させられるものが多く、脚注だけ読んでいても楽しい。

最後に、地震学の代表的な教科書である Aki and Richards (1st ed. 1980; 2nd ed. 2002) の表記に慣れた若い読者に一言助言したい。本書に掲載の式には、虚数部の符号などが Aki and Richards と微妙に異なるものが多々あることに気づかれると思う。それらの多くは、時間についてのフーリエ変換の定義が本書と Aki and Richards で異なることからくる。本書の複素フーリエ「逆」変換の核関数（複素指数関数）は $\exp(+i\omega t)$ である。これだけの違いで、たとえば複素周波数の虚数部の符号や、上昇波と下降波の式が逆になったり、外向波に対応するハンケル関数が（第1種ではなく）第2種になったりとその影響は大きい。単に虚数部の符号の違いといえども、波形計算の結果が発散したり、ベンチマークの結果と波形は似ていても振幅が微妙に合わないといったことが起こる。ただ、心配することなかれ。Aki and Richards 流の式と異なる箇所には上述の親切な脚注が付いている。このフーリエ変換の定義の違いがもたらす影響は、読者に本質的な気づきをもたらしてくれるかもしれない。ちなみに、私も授業では本書と同じフーリエ変換の定義を採用している。そしてその影響につい

て学生に注意を促している。研究では、最近ではできるだけ Aki and Richards 流を採用するようにしているが、

<近代科学社, 2018年12月, A5判, 363頁, 4,500円+税>
[たけなか ひろし 岡山大学教授]

● 新鮮な感覚で見直す活断層

岡田篤正・八木浩司 著

図説日本の活断層—空撮写真で見える主要活断層帯 36—

評者 白濱吉起

本書は航空機から撮影した斜め空中写真を中心に、地形の3Dイメージ、イラストを使用し、詳細な解説を付けて日本の主要活断層を紹介している。地形を鳥瞰する写真はカラーかつ高精細で、地形と活断層の関係がわかりやすく把握できるものである。また、多くの活断層研究者は、直上から撮影した空中写真には見慣れているが、斜めから撮影した写真にはなじみが薄いため、見慣れた地形であっても新鮮な感覚で見直すことができるだろう。

掲載されたほとんどの写真は、筆者らが大きな地形変化が行われる前の1960年代から航空機を使用して撮影してきたものである。航空機での撮影には、天候や飛行コースといった好条件を整える必要があり、かつ写真撮影にも熟練した技術が必要であったろう。そうした事情を鑑みると、変動地形がよく分かるよう撮影方向に工夫が凝らされ、鮮やかに撮影された数々の写真には、筆者らの費やした労力の大きさが感じられ、心服せざるを得ない。

内容は大きく2つの章に別れている。最初の第0章は活断層の教科書的内容についての総説である。この部分を入念に読み込むことで、本書の内容が理解できるような構成となっている。その後の章は地域ごとの活断層について、分布・形状・断層の特徴・活断層の認定理由・活断層の活動履歴などを根拠となる資料と図を基に簡潔にまとめている。取り上げた断層帯は北海道・東北地域が7断層、北陸・関東地域が3断層、中部・東海地方が11断層、近畿地方が8断層、四国地方が3断層、九州

地方が4断層と全国の活断層をまとめるとともに、逆断層、横ずれ断層、正断層といった各種の断層についても網羅している。なかでも中央構造線を構成する断層帯を多く掲載していることは、筆者らの主要な研究対象であったことに起因するものだろう。

活断層の説明は、一冊に主要36断層をまとめている都合上、一断層帯に付き2~4ページと紙面が限られているため、最低限の内容にとどめている。しかし、内容を薄めることもなく、カラーの地図や図を多用し、必要十分な記載がなされている。各断層の記載には根拠となる資料が明記されているため、活断層研究者が、全国の主要活断層を網羅的に把握することを目的に、カタログとして用いることも可能である。ただ、紙面の制約上仕方のないことではあるが、専門用語が多用されているため、一般の方がいきなり各断層帯の説明を読むと理解が難しいかもしれない。まずは、最初の総説から読み始める必要があるだろう。また、掲載された斜め空中写真には写真中に文字や記号がほとんど記載されていない。これによりいくつかの写真については、ぱっと見たときの断層の位置や地形の変状の把握がやや難しい。しかし、一般の方でも文章と地図をよく読めば、十分把握できるように書かれているため、1つの勉強として練習してみるとよいかもしれない。

本書の他のシリーズは、日本の風土の理解を目的に、日本の「島」、「湖」、「植生」といったわれわれの周囲にありふれた地物の紹介を主眼としている。その1つとして「活断層」を選択したところは慧眼と言わざるを得ない。間違いなく現在の日本の地形の形成に寄与している地物は活断層である。一連のシリーズを並べたとき、日本国内では活断層がありふれた存在であることが感じられる。全国の活断層をまとめた書籍としては「新編日本の活断層(東京大学出版会)」や「第四紀逆断層アトラス(東京大学出版会)」などがあげられる。それらと比べると、サイズ、価格ともに手頃であり、手に取りやすい一冊といえる。地震災害への対策として自分の住んでいる地域にどのような活断層があるかを知っておくことは重要であり、本書はその一助となることだろう。

<朝倉書店, 2019年2月20日, B5判, 216頁, 4,800円+税,

ISBN978-4-254-16073-4 C3044>

[しらはま よしき 産業技術総合研究所研究員]

●新刊紹介

東日本大震災合同調査報告書編集委員会 編
**東日本大震災合同調査報告 土木編 (7) 社会
経済的影響の分析**
土木学会, 2019年4月, B5判, 68頁, 6,000円+税

東日本大震災合同調査報告書編集委員会 編
**東日本大震災合同調査報告 建築編 (11) 建築
法制/都市計画**
日本建築学会, 2019年5月, B5判, 279頁, 8,500円
+税

山崎晴雄 著
**富士山はどうしてそこにあるのか 地形から見
る日本列島史**
NHK出版, 2019年5月, 新書判, 238頁, 850円+税

鎌田浩毅 著
富士山噴火と南海トラフ
講談社, 2019年5月, 新書判, 272頁, 1,000円+税

佐野弘好 著
基礎地質学ノート
古今書院, 2019年5月, B5判, 188頁, 3,200円+税

荒井正行 著
基礎から学ぶ弾性力学
森北出版, 2019年5月, 菊判, 192頁, 2,800円+税

気象庁 編
**気象業務はいま<2019>守ります人と自然とこ
の地球**
研精堂印刷, 2019年6月, A4判, 183頁, 2,700円+税

貝塚爽平・太田陽子ほか 編, 久保純子・鈴木毅彦 著
写真と図で見る地形学 増補新装版
東京大学出版会, 2019年6月, AB判, 261頁, 5,300円
+税

歴史学研究会 編
**歴史を未来につなぐ:「3・11からの歴史学」の
射程**
東京大学出版会, 2019年6月, A5判, 332頁, 3,500円
+税

福島叔彦 著
**首都直下地震—被害・損失とリスクマネジメ
ント**
早稲田大学出版部, 2019年6月, A5判, 128頁, 1,500
円+税

盛川 仁・山中浩明 著
地盤と地盤振動 観測から数値解析まで
朝倉書店, 2019年6月, B5判, 144頁, 4,500円+税

鎌田浩毅 監
**日本列島のしくみ 見るだけノート 重ね図で
わかる!**
宝島社, 2019年6月, A5判, 199頁, 1,480円+税

大谷栄治・長谷川昭・花輪公雄・佐々木晶ほか 著
太陽・惑星系と地球
共立出版, 2019年6月, A5判, 400頁, 4,800円+税

今村文彦 監, 鈴木親彦 編
**災害記録を未来に活かす (デジタルアーカイ
ブ・ベーシック)**
勉誠出版, 2019年6月, A5判, 208頁, 2,500円+税

ジョン・ファーンドン 著; ティム・ハッチンソン 絵,
久田健一郎 訳
知っておきたい! 地球のしくみ
東京書籍, 2019年7月, A4変判, 80頁, 1,800円+税

横山裕道 著
さまよえる地震予知 追いつけた記者の証言
紫峰出版, 2019年8月, A5判, 211頁, 1,800円+税

西村祐二郎 編著, 鈴木盛久・今岡照喜・高木秀雄ほか 著
基礎地球学 (第3版)
朝倉書店, 2019年8月, A5判, 212頁, 2,800円+税

濱田政則・若竹 亮ほか 編著
**都市臨海部地域の強靱化—増大する自然災害へ
の防災対応**
早稲田大学出版部, 2019年8月, A5判, 168頁, 1,500
円+税

大巴潤三・加納靖之・橋本 学 監
京都の災害をめぐる
小さ子社, 2019年9月, A5判, 128頁, 1,600円+税

ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

退職

吉田 敏雄 地震調査研究センター 副所長 19. 6.30

採用

當麻 純一 地震調査研究センター 所長
兼 本部 地震防災調査研究部 副首席主任研究員 19. 7. 1

渡邊 秀雄 本部 地震防災調査研究部 参事 19.10. 1

編集後記

当振興会の創設者である萩原尊禮先生が1999年11月に亡くなられてから20年、また、本誌の初代編集長であった力武常次先生が2004年8月に亡くなられてから15年が経つ。

両先生を偲び、古い地震ジャーナルの記事の中からユニークなものをピックアップして、囲み記事にまとめてみた。興味ある読者はぜひ振興会のホームページを訪れてほしい。

さて、本号冒頭のエッセイは、京都大学防災研究所の所長に就任された橋本先生に執筆をお願いした。研究者の立場と生活者の立場との間で、これまでに経験されたギャップについての感想が率直に語られている。

次に、本文最初の論説では、来たるべき南海トラフ地震に先がけて何らかの異常な現象が生じた際、どのような防災対応をとるべきかという難しい問題を取り上げた。この難題に関して、内閣府ではどのような検討がなされたのかについて、その検討委員会の主査を務められた名古屋大学の福和先生に内容を解説していただいた。

半割れ、一部割れ、ゆっくりすべりのそれぞれの事象に対して、どのような情報が出され、どのような防

災対応が想定されているのかについて、詳しい説明をお聞きすることができた。

ところで、最近の情報技術の進歩には目を張るものがあり、AI(人工知能)に関するニュースを頻繁に見聞きするようになった。地震学の分野にもその技術革新の波は押し寄せてきており、今号では、理論地震記録を教師データとした機械学習により地震の震源決定を行う試みについて、海洋研究開発機構の坪井、杉山両先生より紹介していただいた。

一方、シリーズ化している国際プロジェクトSATREPSの個別紹介については、今回、トルコプロジェクトを取り上げ、そのプロジェクトリーダーを務められた愛媛大学の金田先生に解説をお願いした。

このほか、寄書としては、古来言われてきた深海魚の出現と地震発生との関連性について統計的な検証を行った結果を、東海大の織原先生より報告していただいた。両者に相関関係は見られず、言い伝えは迷信であるとの結論であった。

もうひとつの寄書として、有感地震の発生数が飛び抜けて大きい割に地震被害の少ない茨城県について、その特異性に関するひとつの解釈を、元防災科研の松村先生より披露していただいた。

また、囲み記事としては、本年6月に山形県沖で発生したM6.7の地震に関する速報を掲載したほか、開発途上国において適用が期待される蛇籠を用いた耐震補強について、防災科研の中澤先生より解説をいただいた。このプロジェクトでは、大型振動台を用いた実験がクラウドファンディングによる寄附金で行われたということも話題となった。

今号もバラエティー豊かな内容となったが、読者諸氏の忌憚ないご意見やご批評をお願いしたい。

(Y.O.)

地震ジャーナル 第68号

令和元年12月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区神田猿樂町1-5-18
公益財団法人

地震予知総合研究振興会

http://www.adep.or.jp
TEL: 03-3295-1966
FAX: 03-3295-3136

発行人 金沢敏彦

編集人 岡田義光

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/一般財団法人学会誌刊行センター

☆ 本誌は、地震予知総合研究振興会のホームページにおいて閲覧およびPDFのダウンロードができます。
☆ 「地震ジャーナル」冊子の新規配布、配送先変更、配送停止については当振興会までご連絡ください。