

地震 ジャーナル

70

2020年12月

エッセイ 地震のリスクと共存する新しい生活様式とは？ ●佐竹健治

スロー地震多発領域が東北地震の破壊を止めた ●西川友章—— 1

余震はいつまで続くか ●遠田晋次——11

「地震月報」100年 ●岡田義光——25

南アフリカ大深度金鉱山の地震リスク低減

—2010～2015年度 SATREPS 研究成果の概要— ●小笠原宏——32

新型コロナウイルス感染と地震活動解析 ●津村建四朗/石川有三——44

1920年海原地震について ●司 宏俊/陳 文凱——48

迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい ●横山裕道——55

●書評——61

●訂正——64

●新刊紹介——65

●既刊総目録 [61号～70号] ——66

●ADEP情報——68

囲み記事 南海トラフ海底地震津波観測網N-netの概要 青井 真——20

ETASモデルと感染症 尾形良彦——42

地震記者の回想—2— 川端信正——59

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

地震のリスクと共存する新しい生活様式とは？

佐竹健治

2020年は新型コロナウイルス COVID-19によって世の中が大きく変化した。特に、4月～5月には政府によって緊急事態宣言が出され、戦後最悪ともされる社会・経済活動（大学では教育・研究活動）への打撃を与えた。先が見通せずに進行していくコロナ禍の中で、政府や地方自治体は専門家会議などを開いて意見を求めたが、感染症以外の専門家も交えて下した決断は、ワクチンの開発や集団免疫ができるまでは感染のリスクを抱えながら社会・経済活動を行うという、ウィズコロナの政策であった。

ウィズコロナ時代、さらには感染症が終息した後のポストコロナ時代の新しい生活様式（ニューノーマル）として、在宅勤務によるテレワークやオンラインでの講義や会議など、サイバー空間での活動が一気に加速した。大学では研究や教育活動、特に、学生の卒業や入学に影響が出ないように、講義に限らず大学院の入学試験や論文発表もオンラインで行っている。その結果、国内・国際学会や事務的な会議は、参加者との顔を突き合わせての議論や雑談はしにくいものの、オンラインでもほとんどの議事をこなせることがわかった。感染症が終息した後のポストコロナの時代でも、オンライン会議によって出張にかかる費用や時間を節約することが予想される。

コロナウイルスを地震に置き換え、地震学と社会の関係を振り返ってみよう。1995年阪神・淡路大震災、2011年東日本大震災などを経て、神戸における地震の発生、地震の短期的予知の可能性、M9クラスの超巨大地震の可能性や津波の長期評価など、その時点での地震学の知見や限界・不確実性が社会へきちんと伝わっていなかったことが議論されてきた。また、地震学は「科学に問うことはできるが、科学だけでは答えることができない」トランス・サイエンスであるという指摘もあった。2017年には、気象庁は東海地震に関する情報の発表を取りやめ、大規模地震対策特別措置法に基づく警戒宣言が発出されることはなくなった。これは、科学的には確度の高い地震の直前予測は不可能であることが世界中の地震学の常識となり、実際に警戒宣言が出された場合に社会や経済に与える損失についても指摘がなされていたことなどによる。コロナ禍での緊急事態宣言とその社会的影響をみると、この対応は賢明なものであったのだろう。

新型コロナウイルスについての知見が社会に示されるのと同様に、われわれは年々進歩する地震学の知見について、その限界や不確実性とともにつねに社会と共有し、政策に反映させる必要がある。地震や津波のリスクと共存する「新しい生活様式」として、われわれは何を社会に提案できるだろうか？



佐竹健治

[さたけ けんじ]

現職 東京大学地震研究所所長

略歴 北海道大学大学院理学系研究科修士課程修了、東京大学大学院理学研究科博士課程中退、理学博士。東京工業大学理学部、ミシガン大学地質科学科、工業技術院地質調査所、産業技術総合研究所活断層研究センターを経て、2008年から東京大学地震研究所教授。

研究分野 地震学（巨大地震・巨大地震波）

著書 『巨大地震・巨大地震波』（共著、朝倉書店）、『東日本大震災の科学』（共編、東京大学出版会）

スロー地震多発領域が東北地震の破壊を止めた

西川友章

1. はじめに

スロー地震は通常の地震と比べて断層がきわめてゆっくりと間欠的に滑る（ずれ動く）現象である。これまでの研究から、世界各地のプレートとプレートの境界では多種多様なスロー地震が発生することが明らかになっている。

西南日本に位置し、巨大地震の発生が想定される南海トラフは、世界で最もスロー地震研究が進んだプレート沈み込み帯である。南海トラフでは、2002年に発見されたテクトニック微動（1 Hzから10 Hzの周波数帯で観測される数十秒から数百秒、あるいはそれ以上続く微弱な振動；以下、微動）をはじめ、超低周波地震（10秒から100秒の周期のゆったりとした揺れが卓越する地震）や、スロースリップイベント（数日から数年かけて断層がゆっくり滑る現象）などさまざまなスロー地震が、ユーラシアプレート下に沈み込むフィリピン海プレート上面で頻繁に観測されている（Obara and Kato, 2016）。これらのスロー地震はプレート境界面上の巨大地震発生領域を取り囲むように発生している。このことから、スロー地震と南海トラフ巨大地震の関係がさかんに研究されてきた。

南海トラフにおけるスロー地震研究の大きな進展とは対照的に、東日本太平洋沖に位置し、太平洋プレートがオホーツクプレート下に沈み込む日本海溝のスロー地震活動の全容は長らく謎に包まれてきた。日本海溝のスロー地震研究にはいくつかの先駆的な研究がある。たとえば、1992年7月、岩手県はるか沖合で、マグニチュードの大きな群発地震（7個の $6.0 \leq M_j \leq 6.9$ の地震）を伴う M_w 7.3~7.7の過渡的な非地震性滑り（「ウルトラスロー地震」）が伸縮計によって観測された

（Kawasaki *et al.*, 1995）。ここで、非地震性滑りとは短周期の地震波を放出しない低速な断層滑りのことである。また、日本海溝では2011年3月11日に日本観測史上最大の地震である M_w 9.0東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）が発生したが、東北地震の1カ月前にも同地震の滑り領域内部で M_w 7.0のスロースリップイベントが発生していたことが、海底水圧計観測により明らかとなった（Ito *et al.*, 2013）。これらの先駆的研究により、日本海溝においても南海トラフと同様にスロー地震が発生することは知られていた。しかし、スロー地震が発生する場所が陸から遠いはるか沖合であったため、陸域の観測網ではスロー地震の観測が難しく、また、これまでの海底観測は限られた領域でしか行われていなかったこともあって、日本海溝全域（南北約800 km）にわたる詳細なスロー地震分布や、スロー地震分布と東北地震の滑り領域の関係は明らかにされていなかった。

2016年、防災科学技術研究所が日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の運用を開始した。この大規模な海底観測網により、日本海溝全域にわたるスロー地震の詳細な分布を解明することがついに可能となった。本稿では、S-netや陸域の地震・測地観測網の観測データによって、近年明らかとなった日本海溝全域にわたるスロー地震の分布（Nishikawa *et al.*, 2019）を紹介し、日本海溝におけるスロー地震と巨大地震の関係や、日本海溝と南海トラフのスロー地震分布の違いについて議論する。

2. S-netが明らかにした日本海溝のスロー地震分布

S-netは海底ケーブルによって接続された150の観測点（地震計と海底水圧計が一体となった観

測装置) からなり、千葉県房総半島沖から北海道根室半島沖までの南北約1,000kmにわたって東日本太平洋沖に設置されている(図1)。これは、日本海溝全域と千島海溝南端部にあたる。S-netはこれらの広大な領域においてスロー地震(とくに微動)を観測することを可能にした。図2にS-netによって観測された微動の波形の1例を示した。これは、茨城県北部のはるか沖合(北緯36.7°、東経142.5°付近)に設置された観測点で記録された波形である。この波形は、P波・S波の到着が不明瞭で、数十秒から数百秒にわたり微弱な振動が続くという典型的な微動の特徴を示している。

2016年8月15日から2018年8月14日までに、S-netが記録した地震波形データから検出された日本海溝沿いの6,759個の微動の震央を図3に示した。微動は、主に千葉県から茨城県のはるか沖合(北緯35°~37°; 1,877個)と、岩手県から北海道十勝(北緯39°~42°; 4,807個)のはるか沖合において、オホーツクプレート下に沈み込む太平洋プレート上面の10~20kmの等深線に沿って頻繁に発生していた。その一方、東北地震の滑り領域が位置する福島県から宮城県(北緯37°~39°)の沖合では、微動の発生頻度が千葉県・茨城県や岩手県・北海道十勝の沖合と比べて

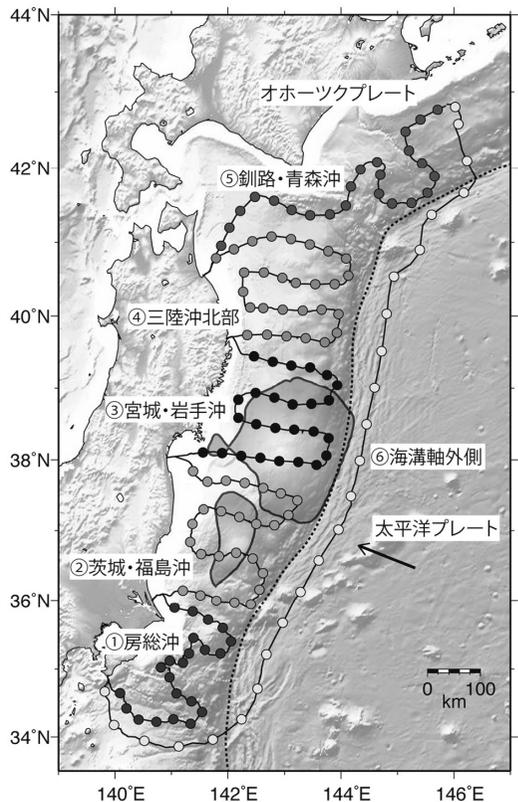


図1 日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の観測点分布。丸はS-netの観測点、黒い線は海底ケーブル。6つの海域に150点設置されている。黒い閉曲線は東北地震の滑り領域(滑り量10mのコンター)(Iinuma *et al.*, 2012)。黒い破線は日本海溝の海溝軸、黒い矢印はオホーツクプレートに対する太平洋プレートの運動方向

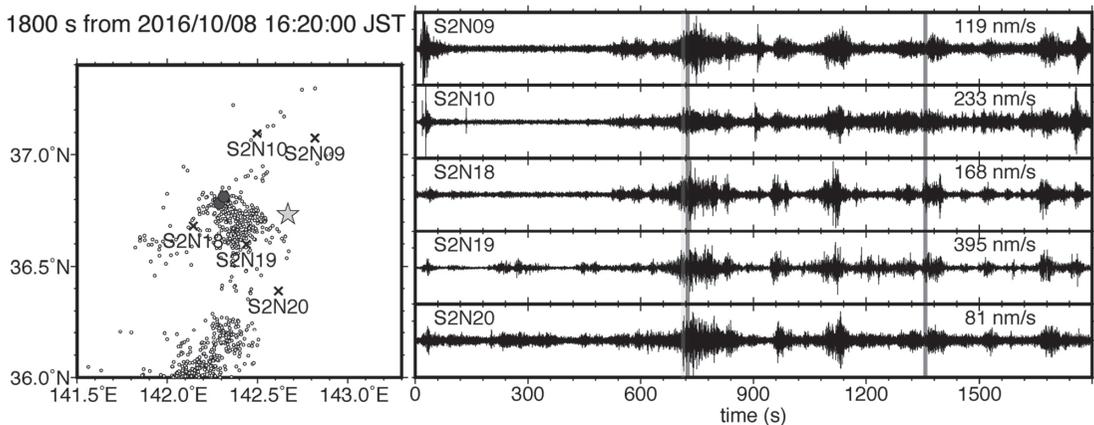


図2 S-netにより観測された茨城県北部のはるか沖合の微動の震央分布(左)と波形(右)。左図で、2つの濃いグレーの丸は検出された微動の震央を、星はF-net広帯域地震観測網によって観測された超低周波地震の震央を示す。小さい丸は、2016年8月15日から2018年8月14日までに検出された他の微動の震央。斜め十字はS-netの観測点の位置を示す。右図で、2つの濃いグレーの縦線は検出された微動の発生時刻を、薄いグレーの縦線(1つ目の濃いグレーの縦線の直前)は超低周波地震の発生時刻を示す

きわめて低く、2016年8月15日から2018年8月14日までに32個しか検出されなかった。これは検出された全微動(6,759個)の0.5%にすぎない。

日本海溝の微動活動は、南海トラフにおいて沈み込むフィリピン海プレート上面深部(30~40kmの等深線沿い)で発生する微動(深部微動)の活動と類似した特徴を示した。たとえば、十勝沖では1日に20km程度の速さで、太平洋プレートの等深線にそって微動の震央が南西方向に移動する現象が観測された(図3C)。同程度の速さのプレート等深線に沿った震央移動現象が南海トラフの深部微動でもしばしば観測されている。また、日本海溝の微動は、陸域のF-net広帯域地震観測網により観測された M_w 3.4~3.6の超低周波

地震(図3A, Bの北緯36.7°付近の黄色の星)や、GEONET(Global Navigation Satellite System(GNSS)連続観測システム)により2017年5月から6月に千葉県東方はるか沖で観測された M_w 6.4のスロースリップイベント(図3A, Eの北緯35.4°付近の緑の四角形)と同時に発生していた。このような、複数の種類のスロー地震が同時に発生する現象も、南海トラフ深部においてしばしば観測されている。

その一方、日本海溝の微動活動は南海トラフの深部微動活動と異なる特徴も示した。たとえば、2016年8月岩手県はるか沖合(図3Aの北緯39.0°~40.4°, 東経143.7°付近)で、微動活動と大きなプレート境界地震(M_j 6.4と M_j 6.2; 図3Dの赤い星)が空間的に近接(数十km程度)

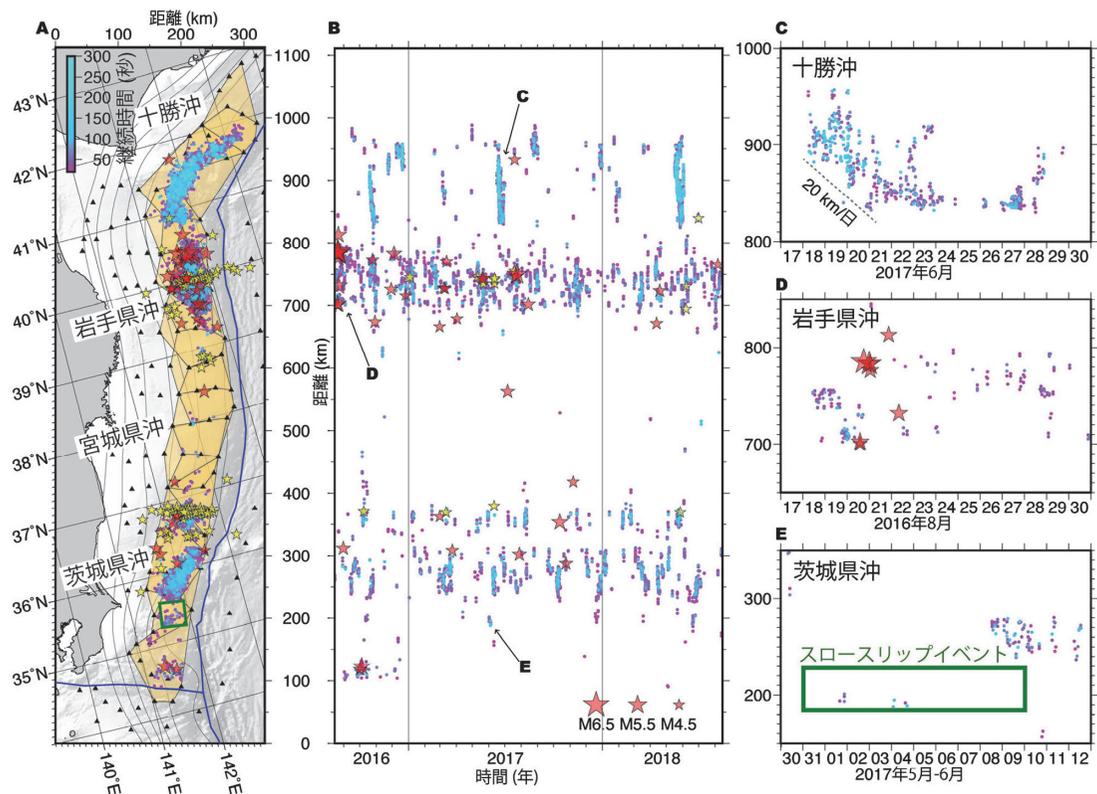


図3 (A) 2016年8月15日から2018年8月14日までに日本海溝沿いで検出された微動の震央分布。紫色から水色の点は微動を示す。色はそれぞれの微動の継続時間を示す。微動の検出はオレンジ色の領域内で行われた。黄色の星は超低周波地震を、赤い星は気象庁一元化震源による通常の地震を示す。緑色の正方形は2017年5月から6月にGEONET(GNSS連続観測システム)によって観測されたスロースリップイベントの断層モデル。黒い三角はS-netの観測点。黒い実線は太平洋プレートの10km間隔の等深線。(B) 検出された微動の時空間分布。(C-E) (B) で示した微動の時空間分布の拡大図

して同時に発生した。この微動活動はプレート境界地震に2日程度先行して活動を開始していた(図3D)。このような微動活動と大きなプレート境界地震の同時発生現象は、南海トラフ深部では観測された例がない。また、前節で紹介したように、この地域では1992年7月にもマグニチュードの大きな群発地震(7個の $6.0 \leq M_j \leq 6.9$ の地震)と M_w 7.3~7.7の非地震性滑り(「ウルトラスロー地震」)が同時に発生する現象が観測されている。これらの観測事実から、岩手県のはるか沖合のプレート境界は、通常地震とスロー地震が空間的に近接して同時に発生するという、南海トラフではみられない特徴をもつと考えられる。

3. 日本海溝のスロー地震分布と東北地震の滑り領域の空間的關係

図4には、スロー地震関連現象の空間分布と日本海溝のプレート境界面上で発生した M_j 7以上の大地震の滑り領域を示した。ここで、スロー地震関連現象には、微動や、超低周波地震、スロースリップイベントに加えて、「繰り返し地震を含む群発地震活動」も含まれている。繰り返し地震は、プレート境界面上の同一の小さな固着域(断層が滑らずにくっついている領域)が繰り返し破壊される現象であり、発生するたびにまったく同じ地震波形が観測されるという特徴をもつ。繰り返し地震は固着域周辺の非地震性滑り(定常滑りやスロースリップイベントなど)によって駆動されると考えられている。また、群発地震は、明確な本震のない小さな地震の群れであり、しばしば非地震性現象に誘発される。とくに沈み込み帯では、スロースリップイベントに伴って発生することがある。たとえば、フィリピン海プレートがオホーツクプレート下に沈み込む相模トラフでは、プレート境界面上でスロースリップが発生するたびに、スロースリップの滑り領域周辺で繰り返し地震を含む群発地震活動が誘発される。また、東北地震の1カ月前に同地震の滑り領域内部で発生したスロースリップイベントも、繰り返し地震を含む M_j 5程度の群発地震活動を伴った(Kato *et al.*, 2012)。これらの観測事実をふまえ、図4で

は繰り返し地震を含む群発地震活動を、スロースリップイベントの発生を示唆する現象としてスロー地震関連現象に含んでいる。これらの群発地震活動は、気象庁一元化震源の M_j 3以上の地震から検出された。また、繰り返し地震は、北海道大学、弘前大学、東北大学、および東京大学の微小地震観測網により観測された。図4において、微動は2016年8月から2018年8月までの期間に、超低周波地震は2005年1月から2018年8月までの期間に、スロースリップイベントは2017年5月から6月に、繰り返し地震を含む群発地震は1991年1月から2010年12月までの期間に検出されたものである。

スロー地震関連現象は、岩手県沖と茨城県沖でとくに多数観測された(図4)。岩手県沖(北緯 $39^\circ \sim 41^\circ$)では、微動(継続時間80秒以上)が300個、超低周波地震が41個、繰り返し地震を含む群発地震が92イベント(8系列)検出された(図4B)。茨城県沖(北緯 $35^\circ \sim 37^\circ$)では、微動(継続時間80秒以上)が268個、超低周波地震が83個、繰り返し地震を含む群発地震が188イベント(26系列)検出された(図4C)。また、同地域では2017年5月から6月に M_w 6.4のスロースリップイベントが検出された(図4Aの緑の四角形)。一方、東北地震の滑り領域が位置する宮城県沖(北緯 $37^\circ \sim 39^\circ$)では、微動(9個)や、超低周波地震(6個)、繰り返し地震を含む群発地震(35イベント、6系列)が岩手県沖や茨城県沖と比べて少なく、東北地震の滑り領域とスロー地震関連現象(とくに微動)の分布は空間的に相補的である(図4A)。また、東北地震にかぎらず、1930年以降に日本海溝のプレート境界で発生した M_j 7以上の大地震の滑り領域は、スロー地震関連現象が比較的少ない地域に分布している。スロー地震関連現象がとくに多数観測された岩手県のはるか沖合(北緯 $39.0^\circ \sim 40.4^\circ$ 、東経 143.7° 付近)と茨城県のはるか沖合(北緯 $35.7^\circ \sim 37.0^\circ$ 、東経 142.3° 付近)は、東北地震も含め、どの大地震(図4B、Cのオレンジの領域)でも大きく滑ってはいない。その一方で、岩手県のはるか沖合では、1992年7月にマグニチュードの

大きな群発地震（7個の $6.0 \leq M_j \leq 6.9$ の地震）を伴う M_w 7.3~7.7 の非地震性滑り（「ウルTRASロー地震」）が観測されている（図4Bの緑の領域）。また、同地域では、東北地震後にアフタースリップ（大地震後のプレート境界面上の過渡的な非地震性滑り）が発生したことが、繰り返し地震の解析から明らかになっている（Uchida and Matsuzawa, 2013）。茨城県のはるか沖合でも、

GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測（GNSS-A観測）によって、東北地震後に大規模なアフタースリップが発生したことが明らかにされている（図4Cの黒い破線）（Inuma *et al.*, 2016）。これらの観測事実から、岩手県と茨城県のはるか沖合のプレート境界は、大地震の発生時には大きく滑らず、大地震間あるいは大地震後に発生するスロー地震やアフタースリップなどの非

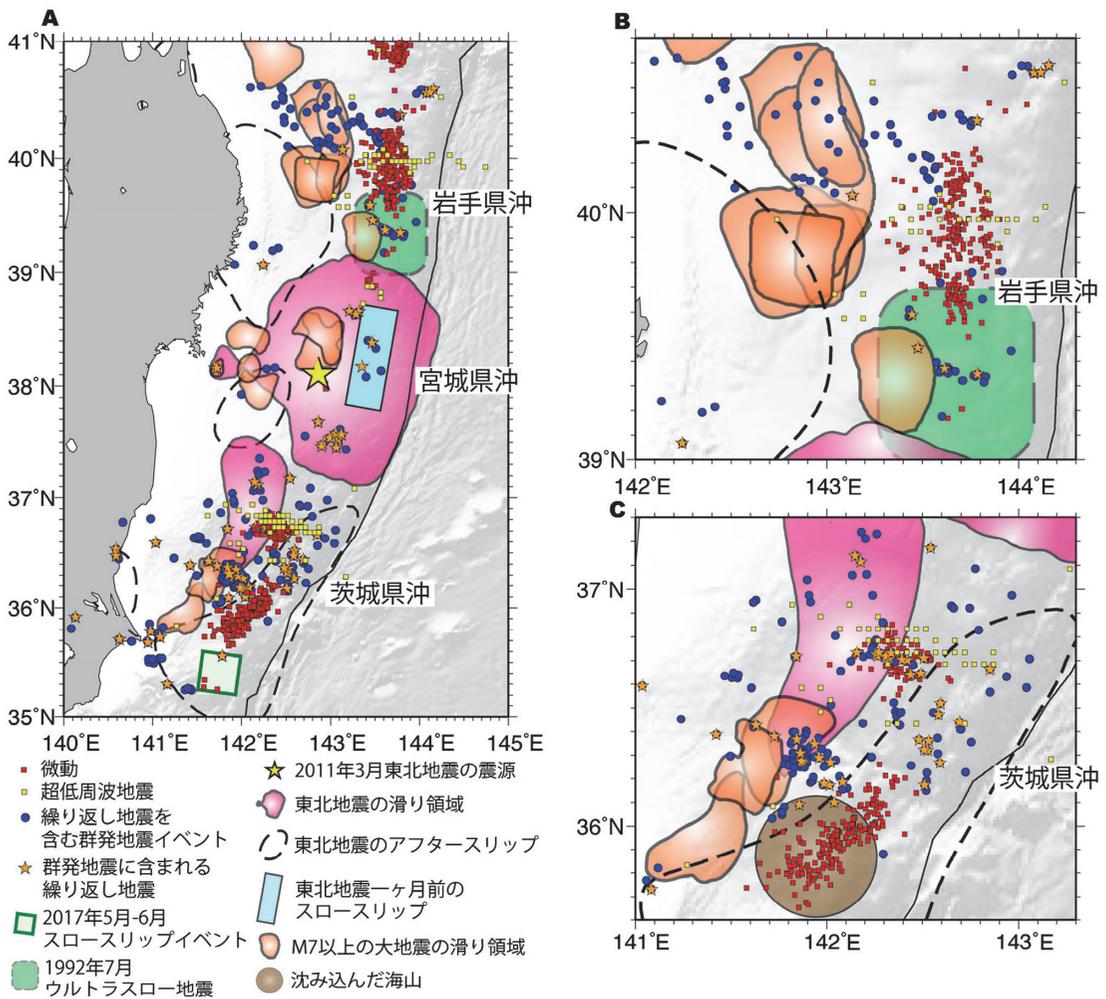


図4 (A) 日本海溝のスロー地震関連現象と大地震の滑り領域の分布。(B, C) 岩手県と茨城県のはるか沖合の拡大図。それぞれのシンボルは図中の凡例を参照。東北地震の滑り領域（滑り量10mのコンター）とアフタースリップ（滑り量0.4mのコンター）はそれぞれ Inuma *et al.* (2012) と Inuma *et al.* (2016) による。 M_j 7以上の大地震の滑り領域は Yamanaka and Kikuchi (2004), Mochizuki *et al.* (2008), 山中 (2005), Ohta *et al.* (2012), Kubo *et al.* (2013), Kubo and Nishikawa (2020) による。沈み込んだ海山の位置は Mochizuki *et al.* (2008) による。微動（継続時間80秒以上）は2016年8月から2018年8月までの期間に、超低周波地震は2005年1月から2018年8月までの期間に、スロースリップイベントは2017年5月から6月に、繰り返し地震を含む群発地震は1991年1月から2010年12月までの期間に検出された

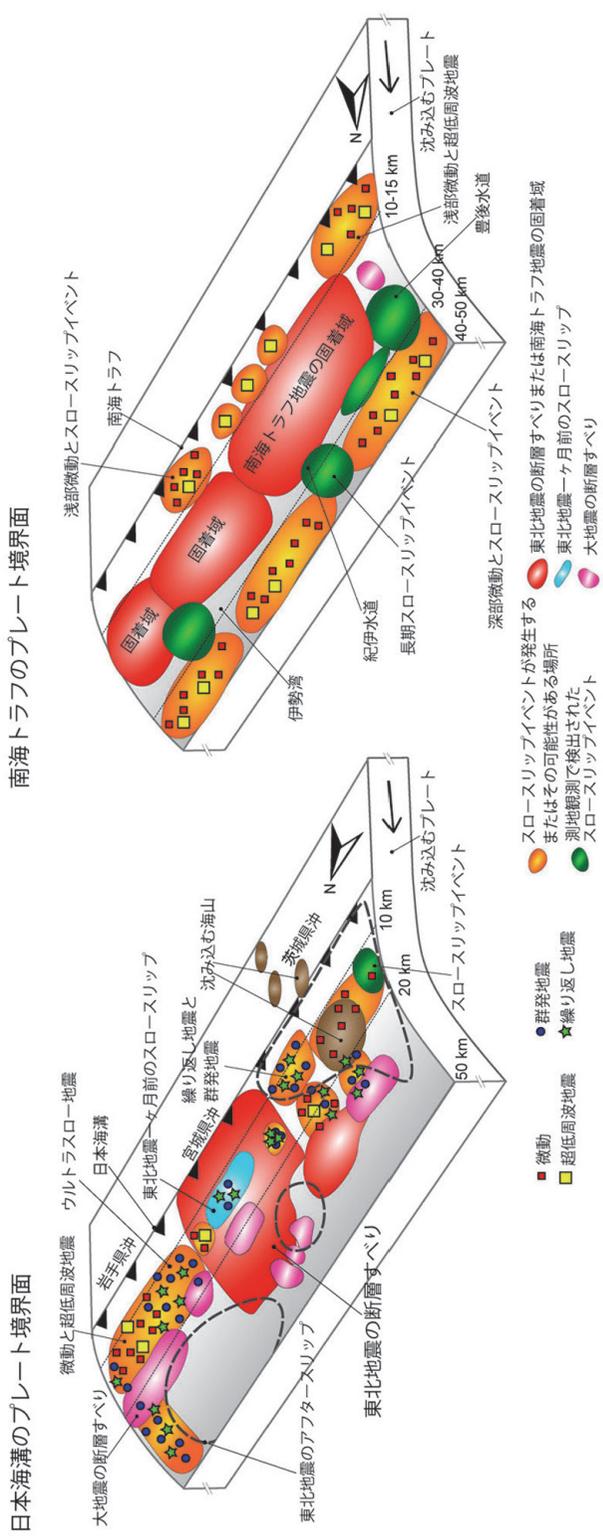


図 5 日本海溝と南海トラフのプレート境界面が発生する地震現象の分布をまとめた模式図。それぞれのシンボルは図中の凡例を参照

地震性滑りによって、蓄積したひずみエネルギーを解消していると考えられる。

4. 日本海溝の巨大地震発生プロセスにおける スロー地震多発領域の役割

前節で述べたように、岩手県のはるか沖合（北緯 39.0°~40.4°，東経 143.7° 付近）と茨城県のはるか沖合（北緯 35.7°~37.0°，東経 142.3° 付近）に位置するスロー地震多発領域は、東北地震も含め、1930 年以降に日本海溝のプレート境界面で発生したどの大地震の発生時にも大きく滑っていない（図 4B, C）。その一方、これらの領域では東北地震後に大規模なアフタースリップが発生した。これらの観測事実から、岩手県と茨城県のはるか沖合に位置するスロー地震多発領域は、大地震発生時の高速な断層滑りを妨げ、低速な滑りを促す性質をもつと推測される。これらの地域のプレート境界面は速度強化の摩擦的性質（断層面の滑り速度が増加すると摩擦力が増加する性質）を有するのかもしれない。つまり、大地震の破壊（高速な断層滑りの広がり）がスロー地震多発領域に到達するとプレート境界面の摩擦力が急激に増加し、大地震の高速な滑りが停止する。そして、地震後に、ゆっくりと時間をかけてプレート境界面が滑る（アフタースリップ）と解釈できる。ただし、これらの地域でスロー地震（自発的で低速な断層すべり）が頻繁に発生するという事実をふまえると、たんなる速度強化ではなく、断層の滑り速度が増加するにつれて速度弱体化（断層面の滑り速度が増加すると摩擦力が減少する性質）から速度強化に切り替わるような摩擦的性質が必要である。これは、純粋な速度強化の摩擦では自発的な断層すべりを引き起こすことができないためである。

以上の解釈によって、岩手県と茨城県のはるか沖合に位置するスロー地震多発領域で、東北地震の断層滑りが停止したことを説明できる。しかし、宮城県沖に関してはいぜん謎が残されている。宮城県沖では、東北地震の 1 カ月前に M_w 7.0 のスロースリップイベントが海底水圧計により観測されている（図 4A の水色の長方形）。図 4A

をみると、1991 年 1 月から 2010 年 12 月までの期間に宮城県沖の東北地震の滑り領域内部で、繰り返し地震を含む群発地震活動がいくつか検出されている。また、東北地震の滑り領域の北端（北緯 38.9°，東経 143.5°）では、超低周波地震が東北地震前（2005 年 1 月から 2011 年 3 月 10 日まで）の期間に、微動が東北地震後（2016 年 8 月から 2018 年 8 月まで、とくに 2016 年 11 月）の期間に観測されている。これらの事実から、東北地震の断層滑り領域内部では、岩手県や茨城県のはるか沖合と比べると頻度はかなり低いながらも、東北地震前後を問わずスロー地震が発生していたと考えられる。では、なぜ宮城県沖のスロー地震発生領域は、東北地震の破壊を停止させることなく、東北地震の発生時に大きく高速に滑ってしまったのだろうか？

この疑問に対する答えとして 2 つの仮説が考えられる。1 つ目は、東北地震前に同地震の滑り領域内部で発生したスロースリップイベント（以下、東北地震直前スロースリップ）は、東北地震の震源核の形成過程であり、岩手県や茨城県のはるか沖合で頻発しているスロー地震とは物理メカニズムが異なるという仮説である。地震（自発的で高速な断層滑り）が発生するためには、地震を引き起こす断層の一部が地震に先行して低速に滑り始め、周囲に応力を集中する必要があるということが、岩石を用いた摩擦実験や、断層の摩擦の物理、数値シミュレーションによって示されている（中谷，2013）。このように、地震に先行して低速に滑り始めている部分を震源核と呼ぶ。低速な断層滑りという点は、南海トラフや、岩手県・茨城県のはるか沖合で頻繁に観測されるスロー地震と同じである。しかし、震源核の形成過程は地震発生時の準備過程であり、震源核の形成領域に大地震発生時の高速な断層滑りを妨げ、低速な滑りを促すという性質はない。つまり、地震発生前には低速に滑っていた震源核形成領域も、地震の発生時には大きく高速に滑る。このことから、東北地震直前スロースリップが震源核の形成過程を観測したものであったとすれば、東北地震の破壊が宮城県沖のスロー地震発生領域で停止しなかった

ことを説明できる。

もう1つの仮説は、岩手県沖や茨城県沖と同様、宮城県沖のスロー地震発生領域も大地震発生時の高速な断層滑りを妨げ、低速な滑りを促す性質を有していたものの、東北地震の破壊を止めきれなかったというものである。高速な断層滑りを妨げる領域（以下、バリア領域）において大地震の破壊が停止するか否かは、バリア領域の面積とバリア領域に到達するまでに地震がすでに破壊した断層の面積に大きく依存する（たとえば Kaneko *et al.*, 2010）。バリア領域の面積が、地震がすでに破壊した断層の面積と比べて十分に大きい場合、地震の破壊はバリア領域内で停止する。しかし、バリア領域の面積の大きさが十分でない場合、地震はバリア領域内で停止せず、それを破壊してしまうことがある。このことから、東北地震の破壊が宮城県沖のスロー地震発生領域に到達したとき、すでにプレート境界面の広大な領域が破壊され、高速に滑っていたとすれば、宮城県沖のスロー地震発生領域が東北地震の破壊を止められなかったのも不思議ではない。

現在の観測データでは、上述の2つの仮説のいずれが正しいか（あるいは、いずれも正しくないか）結論づけることはできない。また、これらの仮説は必ずしも相反するものではないので、東北地震前の期間に宮城県沖では震源核の形成と、岩手県・茨城県沖と同様のスロー地震がともに発生していた可能性も考えられる。これらの疑問を解決するためには、宮城県沖のスロー地震活動を今後継続的に観察し、スロー地震の発生頻度や、スロー地震発生領域の面積、発生するスロー地震の種類が岩手県・茨城県沖と比べてどう違うのか詳細に検討する必要がある。

5. 日本海溝と南海トラフのプレート境界面で発生する地震現象の比較

図5に、日本海溝と南海トラフのプレート境界面を模式的に示した。プレート境界面上で発生する地震現象（巨大地震や、大地震、スロー地震）の空間分布には、日本海溝と南海トラフで大きな違いがある。南海トラフでは、プレート境界面が

深くなるに従って、浅部スロー地震、巨大地震、深部スロー地震の順に発生する地震現象が変化する。プレート境界面の深さが同じであれば、発生する地震現象はおおむね同じである。その一方、日本海溝では深さ方向のみならず、等深線に沿った方向にも地震現象が大きく変化する。たとえば、深さ10~20kmの等深線にそって岩手県沖ではスロー地震、宮城県沖では巨大地震、茨城県沖ではスロー地震の順に変化する。さらに、それぞれの地域の中でも異なる地震現象が複雑に分布している。たとえば、岩手県沖と茨城県沖のプレート境界浅部（深さ10~20km）では、微動・超低周波地震と繰り返し地震・群発地震が同じ深さで近接して発生している（図4B, C, 5）。これは南海トラフでは見られない特徴である。また、前節で述べたとおり、宮城県沖では東北地震の断層滑り領域の内部で、東北地震前後を問わずスロー地震（東北地震前の期間に超低周波地震とスロースリップイベント、東北地震後の期間に微動）が観測されている。このように、日本海溝のプレート境界面における地震現象の分布は南海トラフと比べてきわめて複雑である。

なぜ、日本海溝のプレート境界面では南海トラフに比べ地震現象が複雑に分布するのか、その理由は明らかではない。しかし、日本海溝と南海トラフには、沈み込むプレート上面の海底地形や、沈み込むプレートの年代（海嶺でプレートが形成されてから経過した時間）などさまざまな点で大きな違いがあり、これらの違いが地震現象の分布の複雑さの違いに影響を与えているかもしれない。たとえば、日本海溝では、茨城県沖において海山列が沈み込んでおり、沈み込んだ海山近傍で微動が頻発している（図4C, 5の茶色の領域）。その一方、宮城県沖や岩手県沖の沈み込む太平洋プレート上の海底地形には海山のような大規模な凹凸はみられず、比較的平坦である。このような沈み込む海底地形の違いは、プレート境界の断層形状や、プレート境界面上の物質の分布の違い、応力の違いを生み、日本海溝における地震現象の空間分布の複雑さの一因となっている可能性がある。また、日本海溝では古いプレート（プレート

年代一億三千万年程度)が、南海トラフでは新しいプレート(二千万年程度)が沈み込んでいる。プレートの年代はプレートの温度と強く相関する(古いプレートは冷たく、新しいプレートは暖かい)。このような沈み込むプレートの年代の違いに起因する温度構造の違いが、両沈み込み帯における地震現象の空間分布の違いの一因となるかもしれない。この他にも、プレートの沈み込み速度の違いや、プレートの沈み込み角度の違い、海溝を充填する堆積物の厚さの違い、構造侵食作用・付加作用の違い、プレートが沈み込む際に屈曲することで形成される正断層群の発達とそれに伴う加水作用の違いなど、両沈み込み帯にはさまざまな違いがある。これらの違いがプレート境界の変形プロセスに複合的に影響し、両沈み込み帯における地震現象の空間分布の違いを生んでいる可能性がある。

6. おわりに

S-netや陸域の観測網により、日本海溝のプレート境界面におけるスロー地震活動の全容が近年明らかになりつつある。日本海溝では、岩手県・茨城県のはるか沖合のプレート境界面(深さ10~20km)でスロー地震がとくに多発している。東北地震の滑り領域が位置する宮城県沖においてもスロー地震は発生しているものの、岩手県・茨城県沖と比較すると発生頻度はきわめて低い。岩手県・茨城県沖のスロー地震多発領域は、東北地震も含めて1930年以降のどの M_j7 以上の大地震の発生時にも大きく滑ってはいない。その一方、これらの地域では、東北地震後に大規模なアフタースリップが発生した。このことから、岩手県・茨城県沖のスロー地震多発領域は大地震の高速な断層滑りを妨げ、低速な滑りを促す性質をもつと推測される。今後、日本海溝以外の沈み込み帯においても、プレート境界面のスロー地震多発領域と大地震の滑り領域の空間分布を詳細に調査し、スロー地震多発領域が大地震の高速な滑りを妨げるという仮説をさらに検証する必要がある。

また、日本海溝と南海トラフでは、プレート境

界面で発生する地震現象(巨大地震、大地震、およびスロー地震)の空間分布に大きな違いがあることも明らかになった。日本海溝の地震現象の空間分布は南海トラフと比べてきわめて複雑である。南海トラフではプレート境界面が深くなるに従い、発生する地震現象が変化する。一方、日本海溝では深さ方向のみならず、プレート境界面の等深線にそった方向にも地震現象が大きく変化する。今後の課題は、日本海溝において地震現象の空間分布の複雑さを生む原因を特定することである。

いまだ世界の多くの沈み込み帯では、スロー地震活動の全容は明らかにされていない。日本周辺では、千島海溝や、伊豆・小笠原海溝、琉球海溝のスロー地震活動についてはいまだわからないことが多い。スロー地震研究のさらなる進展のためには、各地の沈み込み帯において観測研究を推し進め、スロー地震活動の詳細を明らかにする必要がある。あわせて、スロー地震活動にもとづいて世界各地の沈み込み帯を分類し、その分類と沈み込み帯の特徴量(沈み込む海底地形やプレート年代など)の関係を系統的に調査する取り組みが、沈み込み帯のスロー地震活動やプレート境界の変形プロセスを支配する物理メカニズムを解明する上で、重要になるだろう。

謝辞

井上智裕氏と岡田悠太郎氏には有益なコメントをいただきました。本研究は科学研究費補助金特別研究員奨励費(18J01056)の助成を受けて実施されました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- Linuma, T. *et al.* 2012. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.*, **117**, B07409.
- Linuma, T., Hino, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y. and Miura, S. 2016. Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nat. Commun.*, **7**, 13506.

- Ito, Y. *et al.* 2013. Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, **600**, 14–26.
- Kaneko, Y., Avouac, J.P. and Lapusta, N. 2010. Towards inferring earthquake patterns from geodetic observations of interseismic coupling. *Nat. Geosci.*, **3**, 363–369.
- Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S. and Hirata, N. 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **335**, 705–708.
- Kawasaki, I. *et al.* 1995. The 1992 Sanriku-oki, Japan, ultra-slow earthquake. *J. Phys. Earth*, **43**, 105–116.
- Kubo, H. and Nishikawa, T. 2020. Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity. *Sci. Rep.*, **10**, 12044.
- Kubo, H., Asano, K. and Iwata, T. 2013. Source-rupture process of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw 7.9) estimated from the joint inversion of strong-motion and GPS Data: relationship with seamount and Philippine Sea Plate. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3003–3007.
- Mochizuki, K., Yamada, T., Shinohara, M., Yamanaka, Y. and Kanazawa, T. 2008. Weak interplate coupling by seamounts and repeating M~7 earthquakes. *Science*, **321**, 1194–1197.
- 中谷正生. 2013. 地震発生物理と前兆現象. 地震学会モノグラフ, **2**, 30–39.
- Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T. and Ide, S. 2019. The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories. *Science*, **365**, 808–813.
- Obara, K. and Kato, A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, **353**, 253–257.
- Ohta, Y. *et al.* 2012. Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L16304.
- Uchida, N. and Matsuzawa, T. 2013. Pre- and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **374**, 81–91.
- 山中佳子. 2005. 8月16日宮城沖地震 (Mj 7.2). EIC 地震学ノート. No. 168. http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2005/EIC168.html
- Yamanaka, Y. and Kikuchi, M. 2004. Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307.

西川友章

[にしかわともあき]

現職 京都大学防災研究所学振特別研究員. 博士 (理学)

略歴 2013年3月東京大学地球惑星物理学科卒業. 2018年3月東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了. 2018年4月より現職

研究分野 地震学, 地震発生の物理, 地震活動の物理



余震はいつまで続くか

遠田晋次

1. はじめに

一般の人々にとって、「余震」は大きな地震「本震」の後に断続的に起こるゆれであろう。一方で、地震研究者にとって、余震とは本震を引き起こした断層（震源断層）とそこごく近傍で起こる本震よりも小さな地震である。ゆれをとともわずとも観測網で検知されるすべての地震が対象となる。群発地震と同様、時空間的にクラスターをつくる地震活動の1つである。

余震は震源断層の割れ残った（すべり残った）部分が破壊されるプロセスとみることもできるが、震源断層面以外にも多数発生する。特に震源断層との分離が明確な場合を「オフフォルト余震（off-fault aftershock）」という場合もある。オフフォルト余震がそれなりに遠方であれば「誘発地震」とされ、成因まで検討されずに称されることもあるが、両者の区別は難しい。

平成28年の熊本地震では、4月14日にマグニチュード（M）6.5の地震が発生し、この地震の余震活動中の16日に余震域でM7.3の地震が発生した。後者を本震とし、前者を後者の「前震」とよぶ場合が多いが、後者を前者の「余震」の1つとする考え方も可能であろう（定義の議論はさておき）。このような、余震という定義の難しさもあってか、その後、気象庁の公式見解から「余震」という言葉が消えた。

熊本地震をみても余震が最初の本震よりも大きくなる可能性もあり、余震といえども侮れない。また、本震発生後に最大余震（最大震度）とその発生時期を懸念する報道が多くなる。

さて、この「余震」はいつまで続くものであろうか。これが本稿のテーマである。ゆれをとともなう余震は本震後1カ月くらいで収まる印象がある

が、近年の高精度地震計・高密度地震観測網で検知されるごく微小地震も含めると、余震は数年～数十年続くというのが本稿の結論である。余震発生数（ N ）は、基本的に観測初日の地震数を K とすれば、大雑把に言えば本震以降一日あたり K/t (t は本震からの経過日) となる。これを余震の大森則という（Omori, 1894）。その後、この単純な減衰傾向は本震によってやや異なることがわかり、微調整ができる改良大森則もしくは大森-宇津則（Utsu, 1961）として、余震活動の予測などに使われている。ただし、改良大森則はあくまでも経験則であり、余震発生の物理過程の完全な理解に基づくものではない。特に、本稿テーマの継続時間も含め、最大余震の規模、余震の総数、活動範囲など、本震後の地震危険度評価につながる根本的な部分は研究途上だ。そのなかには、本震 M が大きいほど余震活動は長い、といった誤解もある。熊本地震のように、余震はまれに本震よりも大きくなる、また余震は震源断層よりも広範囲で発生する、と考えれば、余震継続時間の理解は地震危険度評価に直結する。

本稿では、この余震活動の継続期間に焦点をあてて、最近の研究成果と拙著 Toda and Stein (2018) の一部を解説する。そのうえで、地震長期評価への生かし方について示したい。

2. 合衆国南東部の地震活動は200年前の大地震の余震？

余震の継続を考えるうえで米国ミシシッピ川中流域の地震活動が興味深い。米国国土の確率論的地震ハザードマップには、中流域6州の接するところに目玉（地震危険度の高いところ）がある（図1, Petersen *et al.*, 2019）。この地域で中小規模の地震が多発しているためである。米国西部の地震活動危険度が高いことは沈み込み帯やサンア

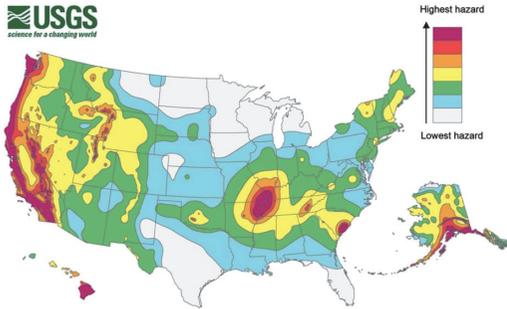


図 1 米国の地震ハザードマップ (米国地質調査所による一般向けの図. 確率値や詳細は Petersen *et al.*, 2019 を参照)

ンドレアス断層などのプレート境界があることで納得できる. しかし, なぜプレート境界からはるか内陸の安定地域で地震活動が高いのか, その理由を巡って以前から論争が続いている. 大地震の発生源がどうしてこの地域に存在するのか, という根本的な理由は未解明のままだが, 少なくとも Cottonwood Grove 断層, Reelfoot 断層という活断層が分布し, 1811 年 12 月から 1812 年 2 月に 3 つの M7.0~7.5 地震 (総じてニューマドリッド地震という) を起こしたとされている (たとえば, Hough *et al.*, 2000). メカニズムは差し置いても, 重要な論点は, いま観測されている地震活動が定常的な活動 (常時地震活動 background seismicity) かどうかである. 現在観測されている地震活動は上述の活断層沿いに発生しているが, 測地観測による同地域の定常的な歪みはきわめて小さく, 常時地震活動では説明できないという考えが大勢である. 最も有力な説は, 現在の地震活動は, 200 年以上前に発生した上記大地震群の余震という見方だ (たとえば, Mueller *et al.*, 2004). 上記活断層沿いに地震が多いのもそのためだという.

では, なぜニューマドリッド地震の余震が 200 年以上も続くのか. Stein and Liu (2009) は歪速度 (応力蓄積レート) に注目した. 彼らは世界の代表的な被害地震の余震継続時間は震源断層の歪速度に反比例すると主張した (図 2a). この考え方は, 断層の摩擦則に基づいて Dieterich (1994) に示されていたものでもある (図 2b). 図 2a と

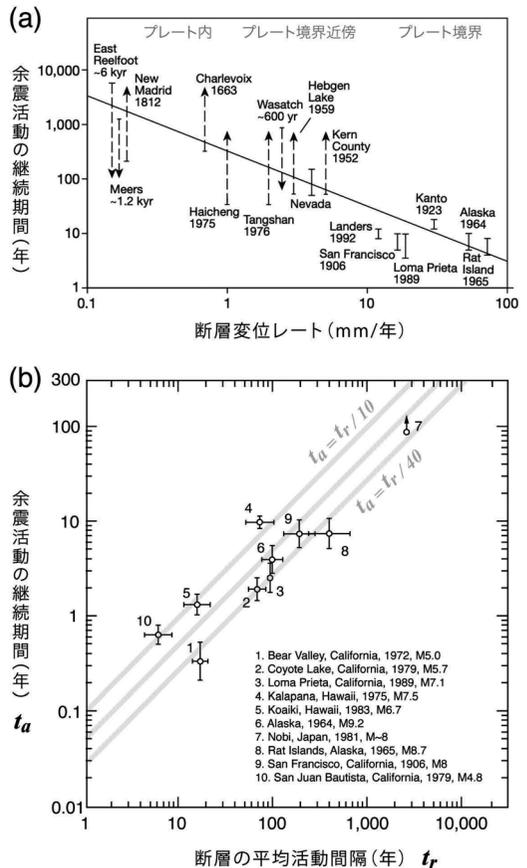


図 2 余震継続時間と断層の活動度. (a) 余震継続時間と断層変位レート (Stein and Liu, 2009). 断層変位レートは歪速度とほぼ同じ意味. (b) 余震継続時間と断層の平均活動間隔 (Dieterich *et al.*, 1994)

の違いは図 2b が横軸を断層の活動間隔としているため, 右上がりの直線になっている点である. 断層の活動間隔は歪速度に反比例するので, 両者のグラフは同じことを主張している. 分かりやすくいうと, 活発な活断層やプレート境界ほど余震継続時間は短く, まれに活動する断層では余震は長く続くということだ.

さらに, 両グラフの隠れた要点は, 本震のマグニチュード (M) は余震継続時間に無関係ということである. たとえば, 1891 年に発生した M8.0 の濃尾地震の余震は少なくとも 100 年程度は継続したとみられている (現在も続いているという見方もある). 同じ M8.0 でも, 歪速度の速い南海トラフ沿いで発生した 1944 年東南海地震

(M7.9), 1946年南海地震 (M8.0) については現在余震とみられる活動は認められない。特に100~200年程度で繰り返す南海トラフ沿いの大地震の余震が100年も続くことは明らかにおかしい。その観点から図2bをみると、余震継続期間は本震断層の活動間隔の1/40~1/10 (図2bの灰色の対角線) と考えるのが妥当で、本震のMには依存しない。濃尾地震断層系の活動間隔は約2,000~4,000年 (たとえば、吉岡ほか, 2002) であるので、余震が100年以上続いていても不思議ではない。

3. 余震の継続期間の見積もり

ところで、図2のもとになった肝心の余震継続期間はどのように見積もられるのだろうか。下記に1例を示したい。

図3は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) の余震分布である。筆者は1998年発表の論文で、1995年の兵庫県南部地震の余震継続時間が 23 ± 7 年と見積もった (図4a, Toda *et al.*, 1998)。つまり、2011~2025年の

間に余震活動が終了ということだ。現在 (2020年9月) はこの誤差範囲内にある。求められた継続時間23年は、図4aにおいて右肩下がりで減衰する回帰直線が水平線と交わる位置である。この水平線が常時地震活動を表し、兵庫県南部地震前の地震活動のレベルを示すものである。常時地震活動レベルが高ければ水平線と減衰直線との交点は左に移動し継続時間が短くなり、常時地震活動が低ければ継続時間は長くなる。ただし、この常時地震活動の見積もりは意外に厄介で、余震範囲の設定や (図3の灰色の範囲)、本震前後で比較可能な下限マグニチュード (M_c) の見きわめなど、課題も多い。

兵庫県南部地震から25年半経過して結果はどうだったか。図4bは、現在までの減衰過程をプロットしたものである。べき乗則で減衰したのは明らかだが、対数グラフの特性もあり、現時点で常時地震活動に戻ったかどうか判断できない。最新プロット点には、逆に上昇 (バンプ) が認められる。これは、2013年4月13日淡路島中部地震 (M6.3) とその余震の影響である (図3)。淡路島

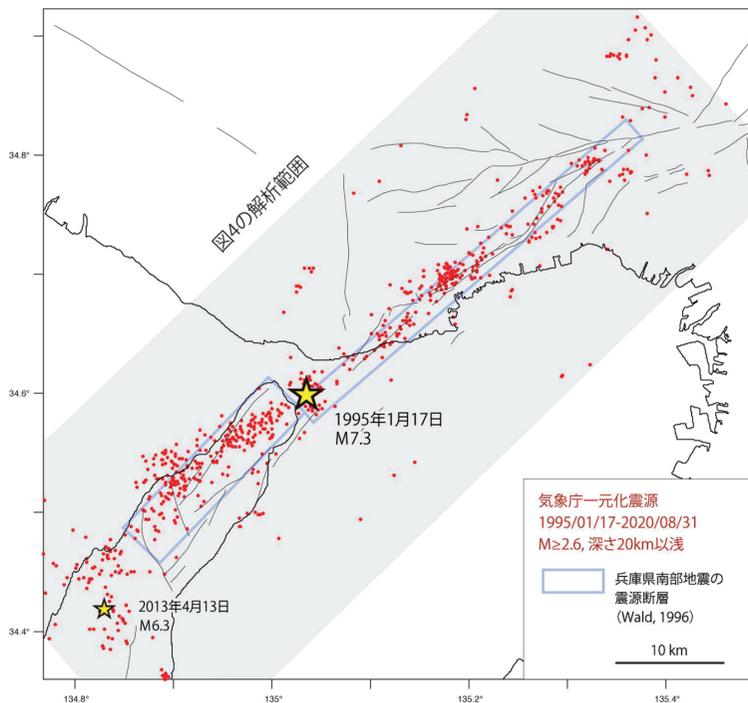


図3 1995年1月17日兵庫県南部地震 (M7.3) の余震分布

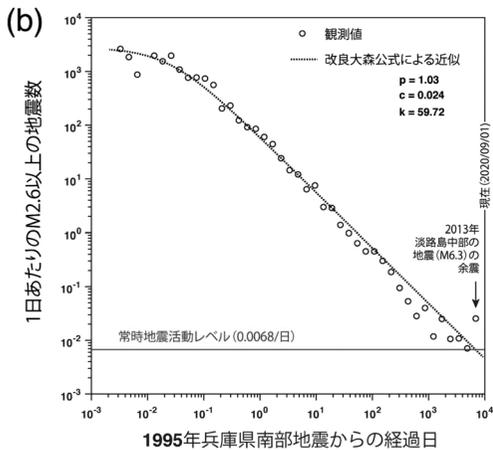
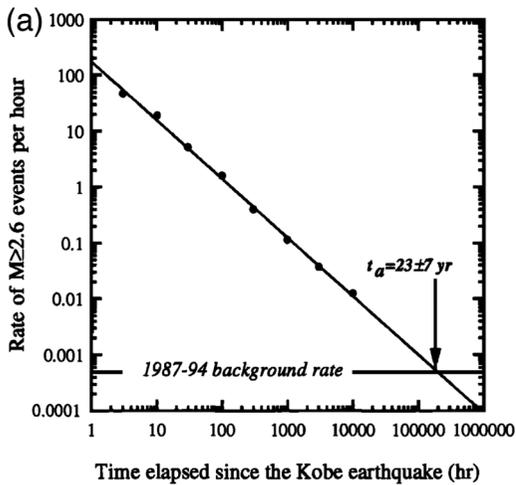


図 4 兵庫県南部地震 (M7.3) の余震継続時間の見積り。 (a) 本震直後の予測 (Toda *et al.*, 1998), (b) 2020 年 8 月までの余震活動の減衰

中部地震の震央は、兵庫県南部地震の震央から 28 km 南西、兵庫県南部地震の震源断層南端から 10 km 前後南西に位置する (震源断層モデルにもよるが、Wald, 1996 では 7 km, 図 3)。この地震は、兵庫県南部地震によって顕著に応力が伝播した地域にあたり、実際にオフフォルト余震の範囲にあることから、筆者は余震の 1 つと考えている。

4. 最近の地震活動にみる過去の大地震の「残存」

かりに 2 節で紹介した「余震の継続時間は断層の活動間隔に比例、載荷速度 (歪速度) に反比例

する」が正しいのであれば、兵庫県南部地震と同様に、日本の内陸活断層の余震は少なくとも数 10 年オーダーで継続するはずである。

そのための簡単な確認作業として、ごく最近の地震活動に過去の内陸大地震の「残像」がどの程度あるのかを調べてみる。図 5 には、直近 1 年間 (2019/09/01~2020/08/31) の気象庁暫定一元化震源の $M \geq 0.5$ の震央をプロットした。実際には 3 節のような厳密な検討が必要であり個別に注意を要するが、ざっと震央図をみただけでも、多くの地域で過去数十年間の内陸大地震の痕跡がうかがえる。図 5 にはわかりやすい箇所を数字で示した。ごく最近の 2019 年山形県沖地震や 2018 年胆振東部地震 (震源は 37 km と深い)、2016 年熊本地震は直近の地震なので余震活動は鮮明だ。一方で、すでに 10 年以上が経過している 2008 年岩手・宮城内陸地震や 2007 年能登半島地震、2005 年福岡県西方沖地震などでも震源断層の形状を推定できるほど余震活動が認められる。中国地方では、1927 年北丹後地震や 1943 年鳥取地震の余震とも解釈できる活動も見られ、Dieterich 仮説を支持する状況が垣間見られる。

図 5 で特に目をひくのが日本海東縁の地震活動である。北海道奥尻島沖から秋田沖にかけて中小地震の分布域が南北に 300 km ほど続く。この地域は、1983 年 5 月 26 日日本海中部地震 (M7.7)、1993 年 7 月 12 日北海道南西沖地震 (M7.8) の震源域にあたる。この 2 つの地震については、ユーラシアプレート (アムールプレート) と北米プレートの境界という考え方もあるが、複数の活断層群による内陸地殻内地震とみても良いだろう。長期間の検知最小マグニチュード M_c を考慮して、上記 2 地震震源域の地震活動について大森ダイアグラムを作ると、これらの活動は常時地震活動ではなく、余震活動としての減衰過程であることがわかる (図 6, Toda and Stein, 2018)。さらに南へ下ると、同じ日本海東縁地域の 1964 年 6 月 16 日新潟地震 (M7.5) の震源域でもいまだに地震活動がやや高く、2019 年 6 月 18 日に発生した山形県沖の地震 (M6.7, 図 5) も新潟地震の余震域東端あたりで発生した。

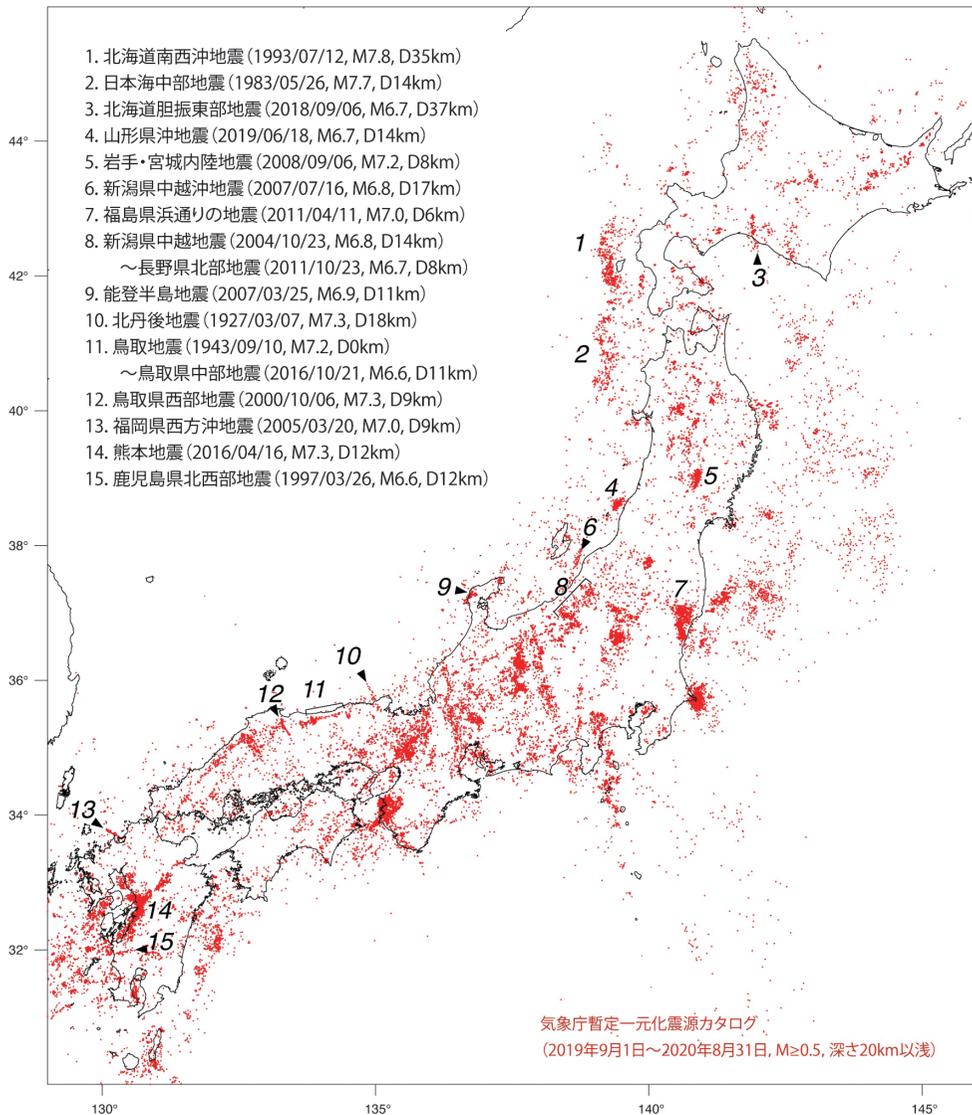


図 5 最近 1 年間の浅部地殻内地震と過去の内陸大地震

5. オフフォルト余震

繰り返しになるが、兵庫県南部地震の例や熊本地震の余震の広がり（図 5）でもわかるように、余震は本震の震源断層以外でも多数発生する（オフフォルト余震）。その誘因の多くは本震による周辺域への応力伝播で説明されており、具体的には均質半無限弾性体（Okada, 1992）でのクーロン応力変化（Coulomb stress change, Δ CFF）を

計算することで推定できる（たとえば、King *et al.*, 1994）。このようなオフフォルト余震も、これまで述べた余震継続時間と断層歪速度の関係が成り立つのであろうか。

実験と理論に基づく Dieterich 仮説の強みは、応力変化と摩擦則で余震発生を再現できることにある。そのため、オフフォルト余震も震源断層上の余震同様に時系列のモデル化が可能である。実際に、多数の観測事例から、オフフォルト余震も改良大森公式と同様の減衰傾向が確認され、同理

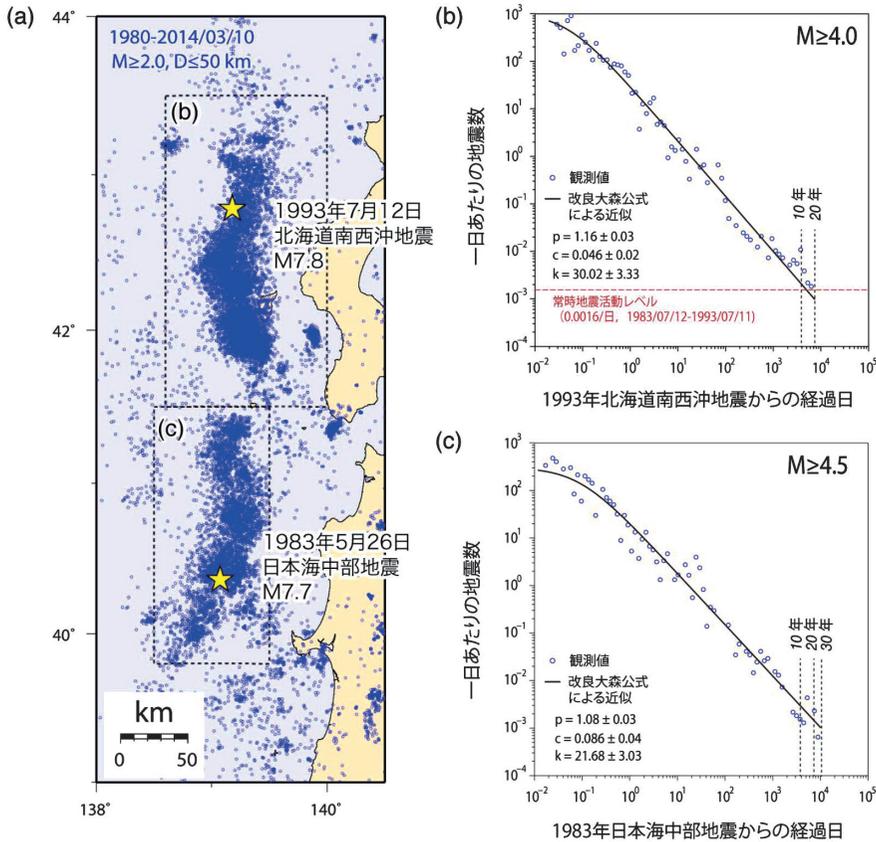


図 6 日本海東縁北部の地震活動 (Toda and Stein, 2018 に加筆). (a) 1980 年以降の中小地震の分布と 1993 年北海道南西沖地震, 1983 年日本海中部地震との関係. (b) 北海道南西沖地震の余震の時間減衰. (c) 日本海中部地震の余震の時間減衰

論の正しさが証明されている (たとえば, Stein, 1999). 活動継続期間についても, 影響を被った地域の歪速度に反比例することが期待される. 仮説の正しさを裏付ける観測結果も一部公表されている (たとえば, Toda *et al.*, 2002).

東北地方太平洋沖地震 (東北沖地震, M9.0) は応力擾乱範囲も広大で, 誘発地震活動 (オフフォルト余震) が広域で認められた. 応力変化が多様なテクトニック環境域で同時に起こったことから, 誘発地震活動の継続時間の地域性を調べるのに最適と考えられる. Toda and Stein (2018) では, 内陸 10 地域について誘発地震活動を調べた (図 7). その結果, 推定される継続期間は 1 か月 (すでに終了) ~ 1,000 年以上とさまざまだが, 地域の代表的な活断層の変位速度とおおよそ

逆相関が認められた. たとえば, 平均活動間隔が約 800 年の丹那断層に代表されるように歪速度が速い伊豆半島とその周辺では, 誘発地震活動は約 1 カ月で終息した. 一方で, 福島県浜通りや千葉県銚子周辺の活動は, 常時地震活動 (東北沖前の活動) の低さもあり, 今後傾向に変化がなければ, 少なくとも 100 年以上活動が継続するとみられる.

なお, 2016 年 11 月 22 日に発生した福島県沖の地震 (M7.4) は, 震央は海域だが浅部地殻内地震である. 福島県浜通り ~ 茨城県北部 ~ 福島県沖の浅部地震活動は今後長期化する可能性が高く, 地震の大きさ分布 (ゲーテンベルク・リヒター則) に極端な変化がなければ, 大地震の確率も高い状況が続くと考えられる.

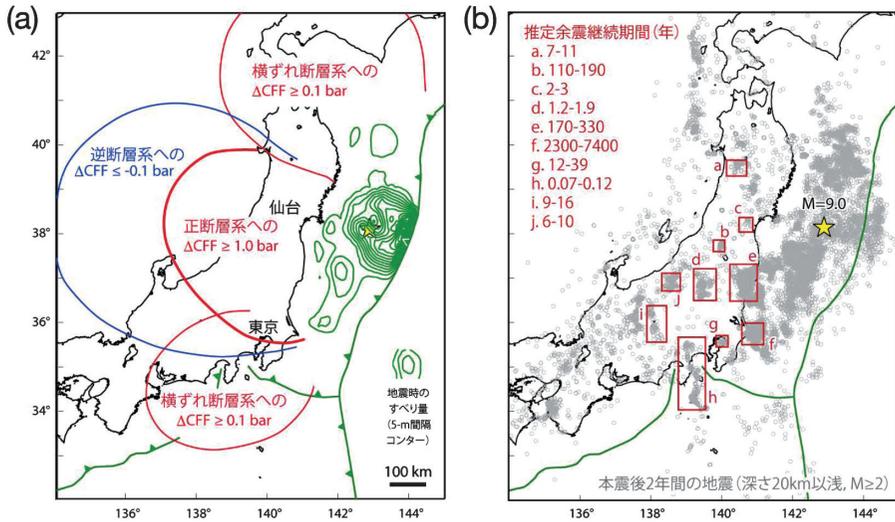


図 7 東北沖地震によるクーロン応力変化(ΔCFF)と誘発地震活動(Toda and Stein, 2018に加筆). (a) ΔCFF 0.1 bar 以上の地域の広がり. (b) 内陸において顕著な誘発地震活動が見られた地域と推定した余震継続時間

6. M が大きいほど余震活動が長い、 という錯覚

「本震の M が大きいほど余震継続期間が長くなる」は、観測からも理論的にも正しくない。これについては、第 2 節で南海トラフの東南海・南海地震、濃尾地震の比較を例に説明したが、上記の東北沖地震の誘発地震活動からも説明できる。

本震 M の大小は、まず震源断層の大小に直結する。震源断層の歪速度と余震継続時間についてはこれまで述べたとおりだが、さらに、本震 M はオフフォルト誘発域の大きさにも比例する。誘発地震のメカニズムは多様であるが、多くの場合、前述のクーロン応力変化 (ΔCFF) で説明可能で、 ΔCFF が +0.1 bar 以上で地震活動の活発化が観測されることが多く、その範囲も、震源断層の大きさと同様に本震 M とともに大きくなる。そのため、図 7 の東北沖地震にみられるように、応力擾乱域の拡大にともなって剪断歪速度の遅い地域が取り込まれる可能性が格段に高くなる。その結果として、余震継続期間が「みかけ上」長くなりやすい。海域に目を向けても、プレート境界面付近では歪速度は速いが、沈み込んだ海洋プレート内の断層はそれほどでもない(図 8)。

そのため、このような海洋プレート内の断層によ

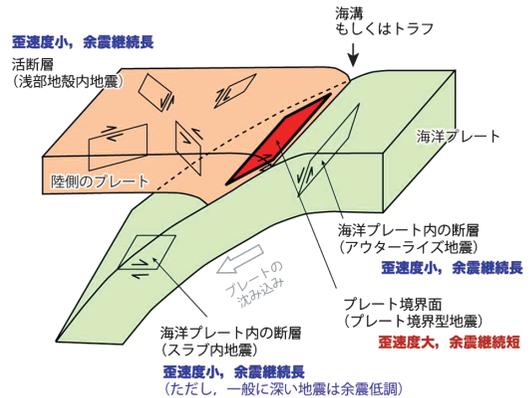


図 8 日本列島とその周辺で発生する地震のタイプ(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009)と考えられる余震継続時間の特徴

る大地震(たとえば、2003 年三陸南地震 M7.1 深さ 73km, Toda and Stein, 2018) や東北沖地震によって誘発された海洋プレート内の余震の継続時間は長くなる。

7. 本震後の地震発生確率評価への考え方

これまで示してきたように、余震継続期間は震源断層の活動間隔に比例し、歪速度に反比例する。防災・減災に寄与するために、このことを本

震後の周辺地域の地震長期評価にどのように生かしていけばよいのだろうか。

余震の危険性については、米国地質調査所が公開しているように、基本的には改良大森公式とグーテンベルグ・リヒター則（地震の大きさ分布）を組み合わせることで発生確率を示すことに尽きる。しかし、同時に本震前（通常時）に比べてどの程度変化したのか、といった確率利得（probability gain）を示すことも効果が高く、確率値そのものよりもわかりやすい。その意味で、余震継続時間の理解が重要となる。本震の発生状況によっては、余震活動が長期にわたる（確率利得が高い状態が続く）といった見解も示すべきではないだろうか。

また、余震は震源断層やごく近傍で発生しやすい一方で、応力擾乱によるオフフォルト余震も同時に長期化する。そのため、地域の断層分布によっては、周辺地域で本震と同程度以上の地震の確率が高まる（図9）。つまり、震源断層では本震以上の地震を起こすポテンシャルがなくなる一方で、周辺に活断層があると、本震と同等かそれ以上の大地震を引き起こす確率は高まる（図

9b）。

日本列島内陸では余震活動が長期化することを示した（図5）。同時に本震の応力伝播の効果も長続きする可能性がある。その意味で、最近数10年間に発生した内陸大地震の震源域周辺の活断層について、今後特に警戒が必要ではないだろうか。

謝辞

本稿で実施した地震活動解析には、気象庁一元化震源カタログ（一部2020年9月現在での暫定カタログも含む）を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- Dieterich, J. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, **99**, 2601–2618.
- Hough, S. E. *et al.* 2000. On the Modified Mercalli intensities and magnitudes of the 1811–1812 New Madrid earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **105**, 23839–23864.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2009. 日本の地震活動, 第2版, 496 pp.
- King, G. C. P. *et al.* 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**, 935–953, 1994.
- Mueller, K. *et al.* 2004. Analysing the 1811–1812 New Madrid earthquakes with recent instrumentally recorded aftershocks. *Nature*, **429**, 284–288.
- Okada, Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- Omori, F. 1894. On after-shocks of earthquakes. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, **7**, 111–200.
- Petersen, M. D. *et al.* 2019. The 2018 update of the US National Seismic Hazard Model: overview of model and implications. *Earthq Spec*, **36**, 5–41.
- Stein, R. S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, **402**, 605–609.
- Stein, S. and Liu, M. 2009. Long aftershock sequences within continents and implications for earthquake hazard assessment. *Nature*, **462**, 87–89.

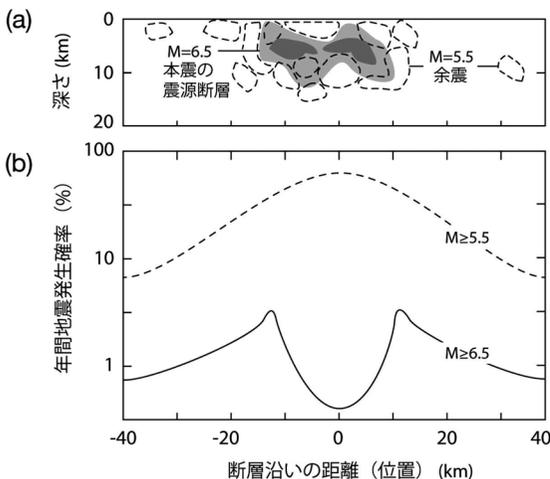


図9 大地震後の地震発生確率変化の概念図 (Toda and Stein, 2018 に加筆). (a) M6.5地震の震源断層 (灰色) と周辺の大きな余震の発生域 (断面図). (b) 余震継続期間中の地震発生確率. 中規模余震は本震の震源断層沿いで高いが、より大きな余震や続発大地震の確率は、むしろごく近傍で高くなる

Toda, S. and Stein, R. S. 2018. Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 1414-1426.

Toda, S. *et al.* 1998. Stress transferred by the M_w 6.9 Kobe, Japan, shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24543-24565.

Toda, S. *et al.* 2002. Evidence from the AD 2000 Izu islands earthquake swarm that stressing rate governs seismicity. *Nature*, **419**, 58-61.

Utsu, T. 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag.*, **30**, 521-605.

Wald, D. J. 1996. Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data. *J. Phys. Earth*, **44**, 489-503.

吉岡敏和ほか. 2002. トレンチ調査に基づく1891年濃尾地震断層系・温見断層の活動履歴. *地震* **2**, **55**, 301-309.

遠田晋次

[とおだ しんじ]

現職 東北大学災害科学国際研究所教授

略歴 鹿児島大学理学部卒業. 東北大学大学院理学研究科前期博士課程修了.

(財)電力中央研究所研究員, 東京大学地震研究所助手, (独)産業技術総合研究所活断層研究センター研究員, 京都大学防災研究所准教授を経て2012年10月より現職

研究分野 地震地質学



南海トラフ海底地震津波観測網 N-net の概要

1. はじめに

西日本の太平洋沖にある南海トラフ沿いでは繰り返し巨大地震が発生し、そのたびに大きな被害が生じてきた。直近では1944年昭和東南海地震と1946年昭和南海地震の2つの地震として起こったが、1707年宝永地震のようにトラフ全域が一度に破壊したと考えられているものもある。このように南海トラフ地震の発生様式は多様であり、破壊が一度にトラフ全域に及ぶとは限らないが、マグニチュード8~9クラスの巨大地震が約100年から200年の間隔で繰り返し発生している。前回の地震からすでに70年以上が経過しており、地震調査研究推進本部（以下、地震本部）の想定によると、今後30年以内に70~80%の確率で大規模な地震が発生する恐れがあるとされている。また内閣府によると、関東から四国・九州の広範囲にわたり最大で震度6弱~7の激しい揺れと10mを超える巨大な津波が発生し、最大で23万人の死者・行方不明者と170兆円を超える直接的な経済被害が想定されている。

防災科学技術研究所（以下、防災科研）は地震本部の方針に基づいて、1995年阪神・淡路大震災や2011年東日本大震災を契機に陸域および海域に構築された地震や津波の観測網と火山観測網を陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）として運用している。2,100あまりの観測点からなるMOWLASは世界でも類のない大規模かつ稠密な全国規模の観測網であり、そこから得られる高品質なデータは、優れた研究基盤として学術的な研究成果の創出に大きく貢献するとともに、地震活動のモニタリング、地震発生の長期評価、地震や津波のハザード評価、地震工学などで活用されている。MOWLASのデータはリアルタイムで伝送され、気象庁が発表する緊急地震速報、津波警報、震度情報に使用されるほか自治体にも活用され

ている。また、新幹線の制御など民間事業者とも連携するなど、データの社会実装も確実に進められている。

海域におけるMOWLASの観測網は、千葉県房総半島沖から北海道沖日本海溝沿いをカバーする日本海溝海底地震津波観測網（S-net）と、熊野灘沖および紀伊水道沖をカバーする地震・津波観測監視システム（DONET）が運用されており、合計で200点あまりの観測点で地震と津波をリアルタイムで観測している。南海トラフ地震の想定震源域の東半分は、DONETおよび気象庁の東海・東南海沖ケーブル式常時海底地震観測システムによりカバーされているが、西半分である高知県沖から日向灘にかけての海域は観測の空白域となっている。震源により近い場所で観測することには、地震発生をより早く検知できるようになるため迅速な警報などが可能となるなど防災上大きなメリットがあり、また、地震発生のメカニズムや震源過程がより詳細に分かるなど学問的な見地からも大きな意義がある。特に、海域で起こる地震やそれに伴い発生する津波は、陸域からの観測だけでは遠方からの観測になるため、海域での観測により震源近傍でデータを得ることの重要性は特に大きい。南海トラフ地震の想定震源域の西半分における観測の空白域を解消するために、防災科研は現在、南海トラフ海底地震津波観測網（N-net：Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis）の構築を進めている（図1）。N-netは、震源域近傍において地震動および津波を観測することで地震動や津波の即時予測の迅速化および高精度化を可能にすることが期待される。また、海域における地震活動などのモニタリングを通したプレート間の固着やすべり状況の時空間変化をはじめとする震源域における現象の詳細かつ逐次的な把握や、予測の高度化も目的としてい



図 1 南海トラフ海底地震津波観測網 N-net のイメージ図

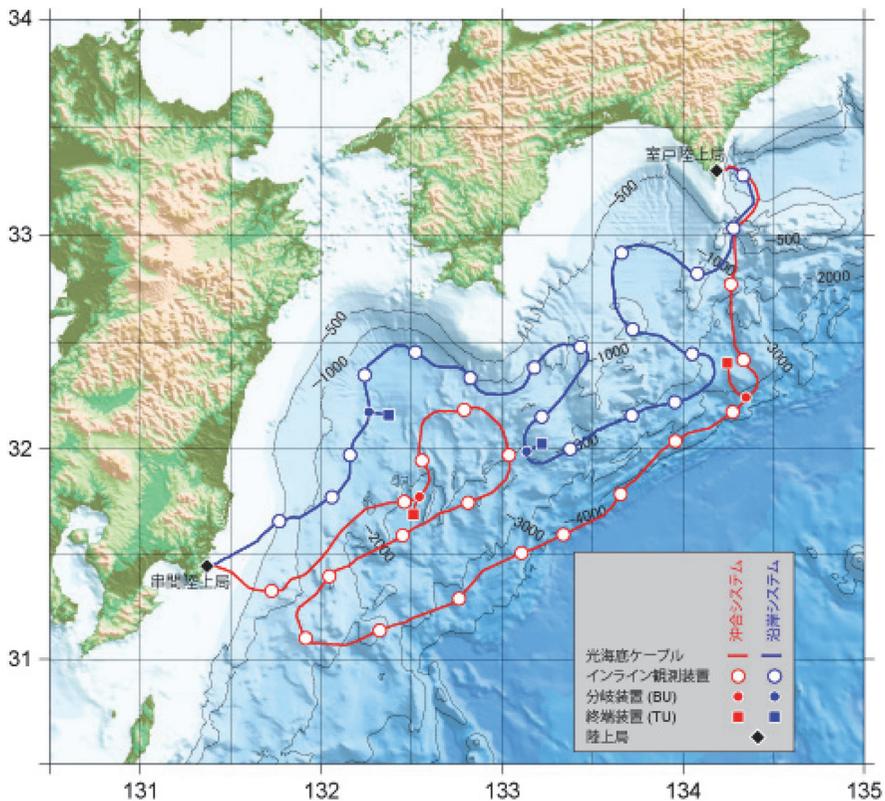


図 2 N-net のケーブルルートプラン

る。そして、観測結果やそれにもとづく情報の利活用を推進し社会に還元することで、巨大地震の被害軽減に結び付けることを目指している。これまで防災科研が構築してきた観測網の

多くは震災を契機に整備されてきたが、N-net は将来発生が懸念される南海トラフ地震への備えとして事前の整備を進めている。

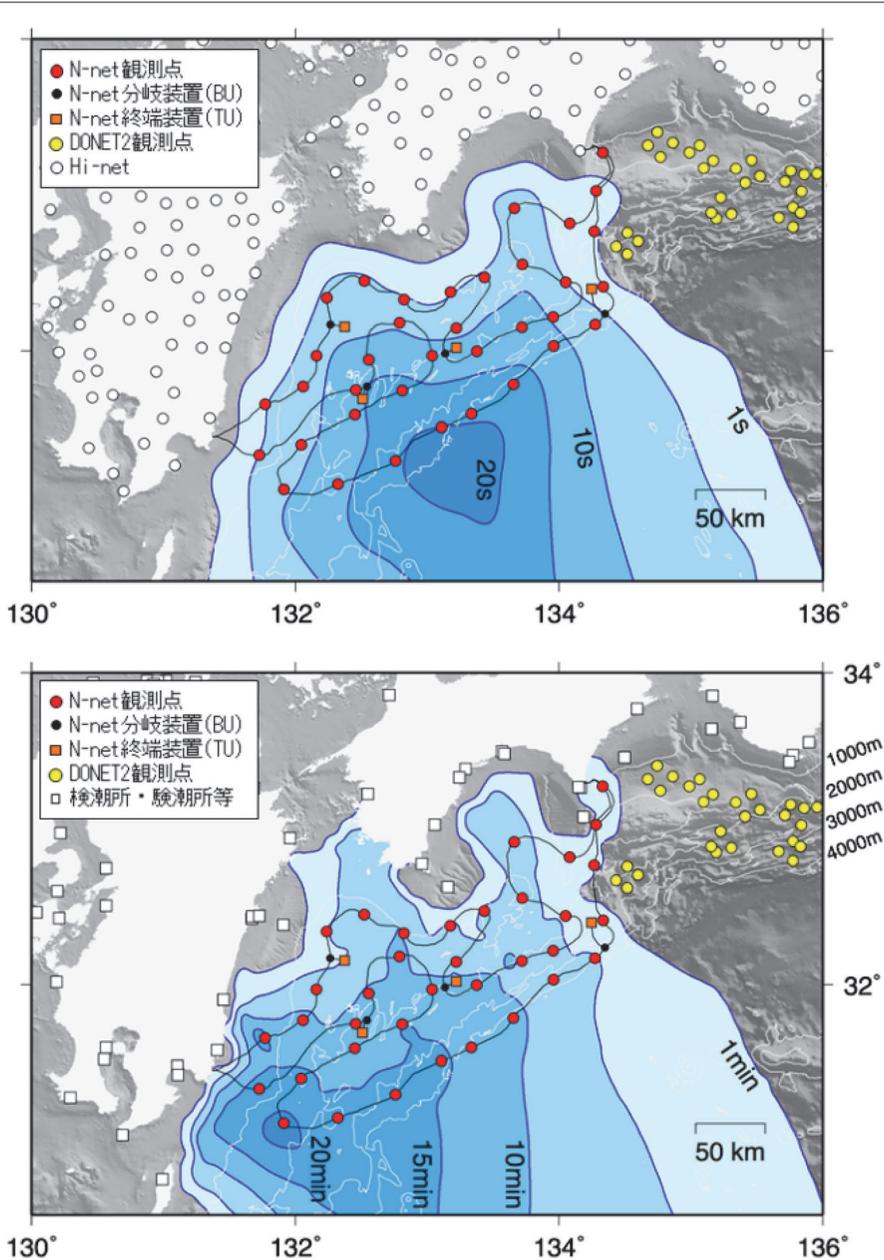


図 3 N-netの有無により地震動(上図)および津波(下図)の直近の観測点への到着時刻がどれだけ早くなるかを示すコンター図

2. N-netの構成

N-netは、海底に設置される観測装置とデータ受信や観測装置へ給電を行うため陸上局に設置される陸上装置、およびこれらを結ぶ光海底ケーブルなどにより構成される(図2)。平均

40 km程度の間隔で設けられる36の観測点には、地震を観測するための加速度型強震計および短周期速度計と津波を観測するための水圧計が筐体に納められた観測装置が設置される。N-netは沖合システムと沿岸システムの2つの

システムからなる。各システムはおのおの18観測点を持ち、それらは総延長約1,600 kmに及ぶ光海底ケーブルにより数珠のようにつながられる。その両端は高知県室戸市と宮崎県串間市に設置される陸上局に接続され、データ伝送と給電は右回りと左回りの2系統により行うことが可能となる。これにより、陸上機器の故障やケーブルの切断などの際にも重要なデータがリアルタイムで得られるように冗長性が確保される。

N-netは、S-netが採用しているインライン方式とDONETで採用されているノード方式の2つの方式を用いるハイブリッドシステムを採用している。インライン方式は観測装置が基幹ケーブルに直接接続されており、工場で接続された数百 kmに及ぶ一体のシステムは専用のケーブル敷設船に積み込み一気に設置することができることから、比較的安価に広域かつ迅速に観測網を構築することができる。一方、DONETで採用されているノード方式は、あらかじめ基幹ケーブルだけをケーブル敷設船により敷設し、次に観測ノードを既設の拡張分岐ノードに遠隔操作型無人機（ROV：Remotely Operated Vehicle）を用いて設置する方式である。拡張分岐ノードへは水中コネクタを介して機器を接続するため、将来的に新たに開発される観測機器を接続可能であるなど拡張性に優れている。N-netでは、インライン方式を基本としつつ、ノード方式とのハイブリッド方式を世界で初めて採用することで、広域かつ迅速に観測網を敷設可能とするとともに、拡張性も備えたシステムの実現を目指している。

3. N-netの効果

図3（上）は、ある場所で地震が起きた際に、MOWLASの観測点に最初に地震波が到達する時刻に対するN-netの観測点に加わった際の時刻との差である。たとえば、四国沖（図中で20 sで示された領域）で起きた地震であれば、現在に比べ20秒程度早く地震波を検知できることになる。同様に、図3（下）は、気象庁等



写真1 串間陸上局における誘導式水平ドリル工法による管路の工事風景

の津波観測計や国土交通省港湾局のGPS波浪計（ナウファス）が設置されている地点に津波が到達する時刻に対するN-netを加えた観測点に最初に到達する時刻との差で、大隅半島東方沖（図中で20 minで示された領域）で起きた地震に伴う津波であれば、直近の観測点への到着時刻が20分程度早まる可能性がある。現在の気象庁による津波警報は、津波に比べ伝播速度が速い地震波の解析により推定される震源位置やマグニチュードから予測される津波高や到着時刻に基づき、地震発生後3分程度で出される。この段階では、発生した津波の高さは間接的に推定されたものであるが、沖合で津波を観測することで津波の発生の有無や高さを直接的に確認することが可能となるため、確実に正確な検知が現在に比べ早まることが期待される。また、面的に多点で観測したデータを使用することで、沿岸の津波高だけでなく津波の浸水域や浸水深の推定を可能とする技術なども開発され、一部は社会実装されている。MOWLASの観測データ同様N-netのデータもリアルタイムで気象庁に伝送され、緊急地震速報や津波警報に活用される計画である。

4. おわりに

N-netは、国難災害ともいふべき震災が想定されている南海トラフ地震を日本が乗り越えるための、いわば守護神的なシステムとして構築

されるものである。南海トラフ想定震源域の西半分に広がる地震や津波のリアルタイム観測の空白域を解消することで、地震動や津波の「一秒でも早い予測」と「一分でも早い避難」を実現し、震災軽減への貢献を目指している。

N-netの開発・整備は2019年にスタートした。現在、システムの詳細設計や機器開発、センサー検証試験などを進めている。また、海洋調査などを行うことでケーブルルートと海底観測機器の設置位置を確定するとともに、海底

ケーブルを陸揚げするための誘導式水平ドリル工法による管路の工事も始まっている（写真1）。今後、機器の開発製造、陸上局の工事、ケーブル敷設などを着実に進め、早期の完成とMOWLASの新たな観測網としての運用開始を目指している。

（青井 真：防災科学技術研究所 南海トラフ
海底地震津波観測網整備推進本部副本部長/
地震津波火山ネットワークセンター長）

「地震月報」100年

岡田義光

1. はじめに

気象庁の地震月報は、わが国でもっとも基本的な地震カタログである。現在の地震月報は気象庁HP（ホームページ）上に公開されており、適時新しいデータが付け加えられると同時に、過去に遡ったデータの見直しや追加が行われている。

本年（2020年）7月15日には2018年9～12月の震源データが加えられ、これにより、地震月報は1919～2018年のちょうど100年間にカバーする地震カタログとなった。本稿では、この記念すべき100年カタログについて、その外形的特徴を調べてみた結果を報告する。

地震月報の内容は時代とともに大きく変遷してきており、その歴史は石川（1987）などに詳しい。また、「気象庁HP>各種データ・資料>地震月報（カタログ編）>震源データ>気象庁の地震カタログの解説」にも詳細な説明がある。

現在の地震月報のベースとなった地震カタログは、気象庁（1982）による地震月報別冊No.6「改訂日本付近の主要地震の表（1926年～1960年）」であろう。その後、地震月報には新しいデータが順次付け加えられる一方、最新の知見に基づいた過去の地震の見直しや震源再決定などが随時行われてきた。2002年2月には、浜田ほか（2004）の成果を踏まえて、関東地震を含む1923年の8月から1925年までの地震が遡及追加された。次に2012年4月には1923年1月～7月の地震が加えられ、2014年3月に1923年1月～2013年10月の地震データが「地震月報（カタログ編）」として気象庁HPより公開されるに至った。その後、2019年3月には1922年の地震が、また2020年1月には1919～1921年の地震が遡及追加され、今日に至っている。

一方、1995年阪神・淡路大震災を受けてわが国の地震観測体制は大きく見直され、1997年10月からは大学や関係機関の地震観測データも気象庁に集約され、震源決定のいわゆる一元化処理が行われるようになった。現在では、毎日600件前後の地震について速報震源が業務的に決定され、1日ごとの簡易震源リストが1～2日の時間遅れで「気象庁HP>各種データ・資料>震源リスト」より公開されている。月2万件に及ぶこの膨大な震源データには、その後さらに詳しい情報が付加され、また外国で発生した主要地震の情報もマージされて、数カ月分ずつの新規データが1～2年の時間遅れで地震月報に付け加えられている。

なお、現在の地震月報にはまだツギハギの状態が残っており、今後新しいデータの追加と同時に、既存データの改訂や1912年までの遡及など、たえざる変容が予定されている（気象庁、2020）。以下の内容は、あくまで本稿執筆時点（2020年9月）での瞬間値であることをお断りしておく。

2. レコード種別ヘッダと震源決定フラグ

1919～2018年の地震月報には約378万件の地震データが含まれている。おのおののレコードは96文字からなり、その中に31個の項目が詰め込まれている。96文字の先頭1文字はレコード種別ヘッダであり、その内訳は以下のようになっている。

J（気象庁による震源）	3,755,303件（99.3%）
U（USGSによる震源）	23,380件（0.62%）
I（その他の震源）	2,110件（0.06%）
合計	3,780,793件（100%）

IはISC（Intern. Seismol. Center）やIASPEI（Intern. Assoc. of Seismology and Physics of the Earth's Interior）などの国際機関を指す。

一方、96文字の最終1文字は震源決定フラグであり、その分布は表1に示すとおりである。ヘッダJの約376万件のうち、震源決定精度の良いフラグ=Kのデータは76.5%を占め、決定精度のやや良いフラグ=k, Aまで含めると全体の93.4%になる。なお、ヘッダIで1件だけフラグ=Kとなっているのは、1947年9月27日、石垣島北西沖で発生したM7.4の地震である。

ヘッダJ：19190104 1820～20181231 2358
 ヘッダU：19610106 0054～20181231 1135
 ヘッダI：19190101 1033～19830911 0501

表1 ヘッダ別に見た震源決定フラグの分布

震源決定フラグ	ヘッダ J	ヘッダ U	ヘッダ I	震源決定精度
K 気象庁震源	2,872,704	0	1	良い
k 簡易気象庁震源	152,269	0	0	やや良い
A 自動気象庁震源	482,052	0	0	
S 参考震源	175,809	0	0	
s 簡易参考震源	17,295	0	0	良くない
a 自動参考震源	55,174	0	0	
フラグ欄=空白	0	23,380	2,109	
合計	3,755,303	23,380	2,110	

3. 発震時とマグニチュード

100年間（1919～2018年）の地震月報に掲載された地震の最古および最新データの発震時範囲は

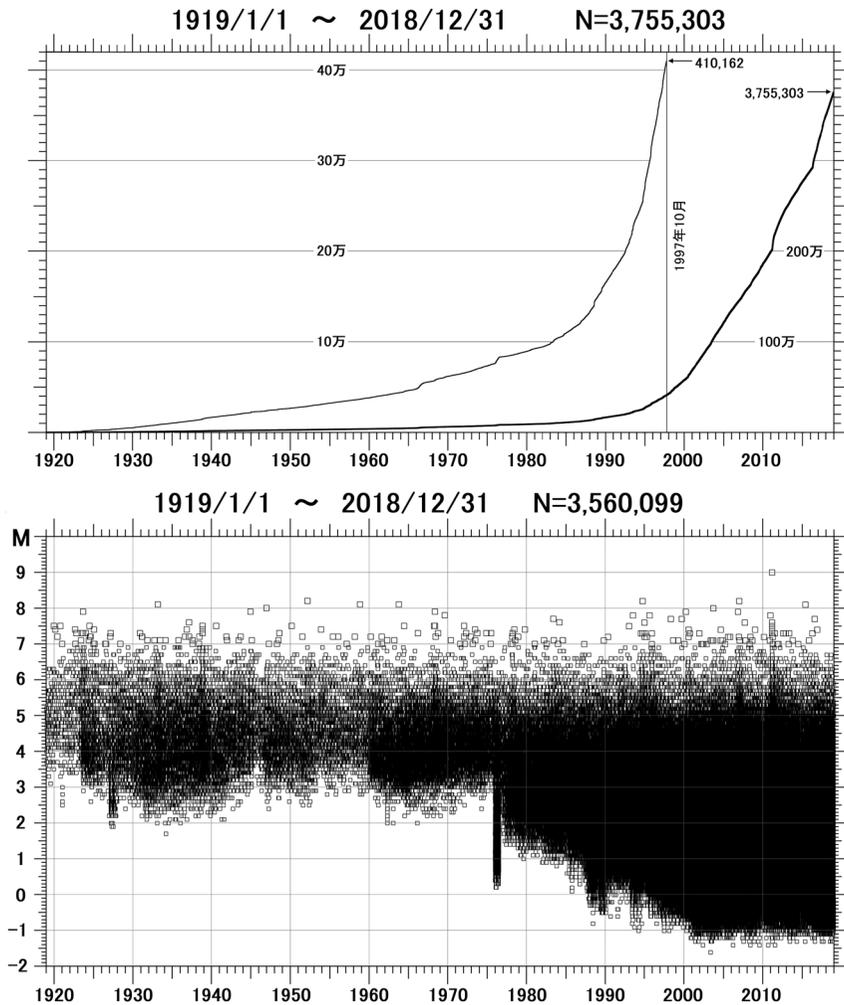


図1 地震月報のヘッダJに収録された地震数の累積カーブ（上段）とM-T図（下段）

となっている。

外国の震源は、1919年から1983年までをヘッダIがカバーし、1961年以降はヘッダUがその役割を引き継いでいるようである。

ヘッダJに収録された地震の発生数累積カーブは図1上段のようになる。1980年代からの増加は、観測網の増強やEPOS（地震活動等総合監視システム）など電算機処理の進展によっている。

1919年から一元化震源処理が開始された1997年10月までの79年間の累積数は約41万件だが、その後は急激に数を増し、2018年末までの21年間に約335万件の地震が積み増しされて約376万件に達している。同図下段のM-T図からわかるとおり、この急増はマグニチュードの小さな地震まで捕捉されるようになったためである。

同じことだが、これをマグニチュードレベルごとの地震累積数で見ると、図2のようになる。この100年間、M5以上の地震についてはその発生率がほぼ一定のように見られるが、それより小さな地震は近年急速にその数を増し、大量のデータが付け加えられてきた。なお、この図のほかにMが1より小さい極微小地震は1,788,212個あり、全地震の半数以上を占めている。また、M8以上の地震はこの100年間に10回発生しており、単純平均すると10年に1回はM8級の地震が日本周辺で起きてきたことになる。

ところで、地震月報の各レコードでは決定方式の異なるマグニチュードを2つまで登録できるようになっており、その分布は表2のようになっている。それぞれのマグニチュードM1、M2が定まっている震源数とその決定割合、およびカタログに含まれるマグニチュードの範囲をヘッダ別に見ると、以下のようにになっている。

表2 マグニチュード1、マグニチュード2の分布

マグニチュード	ヘッダJ	ヘッダU	ヘッダI
M1, M2 双方なし	195,204	264	243
M1のみ存在	3,527,762	14,116	809
M2のみ存在	0	4	181
M1, M2 M1<M2	13,316	2,981	581
双方とも M1=M2	4,406	715	85
存在 M1>M2	14,615	5,300	211
合計	3,755,303	23,380	2,110

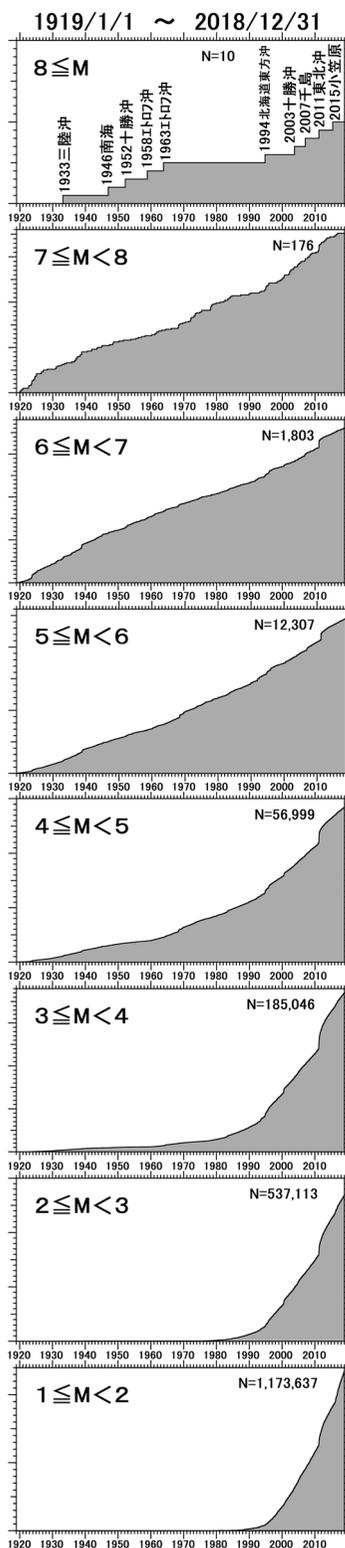


図2 地震月報のヘッダJに収録された地震のマグニチュード別累積カーブ

表3 ヘッド別に見た大地域区分番号の分布

大地域区分番号	ヘッドJ	ヘッドU	ヘッドI
1 北海道	319,066	3	0
2 東北	741,644	0	0
3 関東	631,073	0	0
4 中部	435,810	0	0
5 近畿	387,302	0	0
6 中国・四国	276,994	0	0
7 九州・沖縄	871,257	30	1
8 日本周辺	92,144	1,113	2
9 国外(遠地)	0	22,234	3
番号欄=空白	13	0	2,104
合計	3,755,303	23,380	2,110

M1については

ヘッドJ: 3,560,099件 (94.8%) $M = -1.6 \sim 9.0$

ヘッドU: 23,112件 (98.9%) $M = 2.9 \sim 8.3$

ヘッドI: 1,686件 (79.9%) $M = 5.0 \sim 8.4$

またM2については

ヘッドJ: 32,337件 (0.86%) $M = 1.9 \sim 8.4$

ヘッドU: 9,000件 (38.5%) $M = 0.8 \sim 8.8$

ヘッドI: 1,058件 (50.1%) $M = 4.8 \sim 8.6$

これによれば、ヘッドUの地震はおおむねM3以上、ヘッドIの地震はおおむねM5以上となっており、外国の地震については中規模以上の主要なもののみが掲載されているようである。

4. 震央の緯度・経度と大地域区分番号

100年間(1919~2018年)の地震月報に掲載された地震の震央緯度および経度の範囲をヘッド別に見ると、以下のようになっている。

ヘッドJ: 17.41N~54.97N, 114.78E~160.17E

ヘッドU: 64.70S~86.92N, 180.00W~180.00E

ヘッドI: 63.42S~78.10N, 179.95W~180.00E

当然のことながら、ヘッドJに含まれる地震の震央位置はわが国の周辺に限られている。

震源の決まった地震には大地域区分番号と小地域区分番号が割り振られ、レコード尾部に震央地名が記載される。なお、全カタログ中で1件だけ、J201704301551は緯度・経度・深さ欄がすべて空白なのに震央地名FAR FIELDが与えられ、かつ、震源決定フラグ=A(自動気象庁震源:決定精度がやや良い)となっており、謎である。

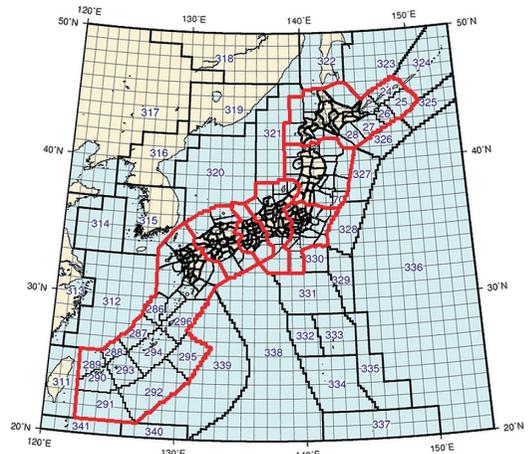


図3 大地域区分1~7(赤枠)と、小地域区分

各ヘッドの地震について、大地域区分番号の分布は表3のとおりになっている。この中では九州・沖縄地域の震源数がもっとも多く、東北地方がこれに次いでいる。なお、各番号の表す領域は図3に示すとおりである。

5. 震源の深さ

100年間(1919~2018年)の地震月報に掲載された地震について、震源の深さの範囲をヘッド別に見ると以下のようにしており、いずれも約700kmが最深の深さとなっている。

ヘッドJ: 0~698.4km

ヘッドU: 0~693.0km

ヘッドI: 0~720.0km

図4は、各カタログに収録された地震の深さ分布を5km刻みで示したものである。ヘッドJでもっとも多くの地震が発生しているのは深さ5~10kmの範囲であるが、ヘッドUでは30~35kmと10~15kmに2つのピークがあり、ヘッドIでは35~40kmの範囲を最多として、いくつものピークが存在していることがわかる。

6. 震源評価と震源補助情報

地震月報の各レコードには、震源要素のほかにいくつもの付帯情報が付与されている。その1つ

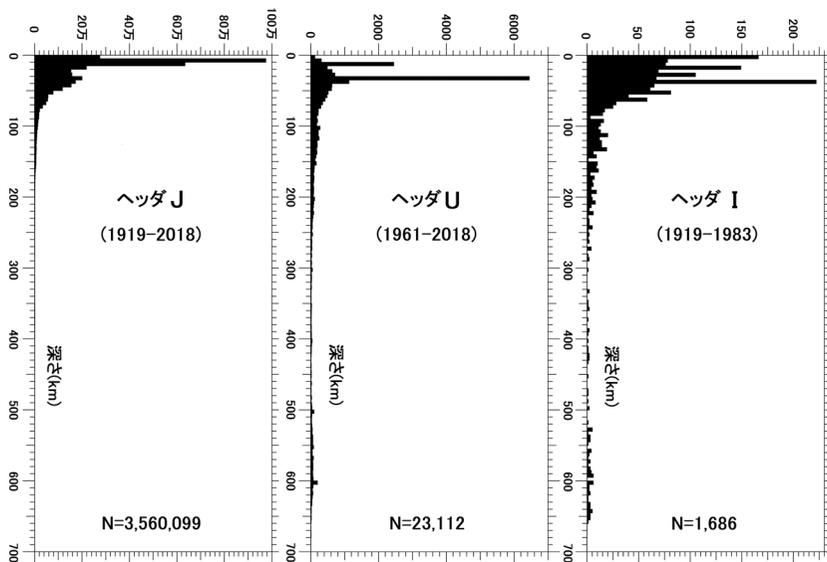


図 4 地震月報に収録された各ヘッダの地震の深さ分布

表 4 ヘッダ別に見た震源評価の分布

震源評価	ヘッダ J	ヘッダ U	ヘッダ I
1 深さフリー	3,113,261	0	0
2 深さ刻み条件	463,642	7	0
3 深さ固定等, 人の判断	4,256	2	0
4 Depth Phase 使用	0	1	0
5 S-P 使用	1,634	0	0
7 参考 (2016 年 3 月まで)	162,742	0	0
8 決定不能, 不採 用	0	0	0
9 震源固定 (直近観測点)	0	0	0
M Matched Filter 法使用	9,768	0	0
震源評価欄=空白	0	23,369	2,110
合計	3,755,303	23,379	2,110

である「震源評価」は、震源を決定するにあたっての初期条件（深さフリー、深さ固定、S-P 使用など）を示すものとして記載されている。各ヘッダの地震について、「震源評価」の分布は表 4 のとおりになっている。

カタログフォーマットによれば、この「震源評価」欄は [空白/1/2/3/4/5/7/8/9/M] のいずれかとされているが、カタログにある全地震の中で 1 件だけ、U196412071758 にはこの欄に「0」が

表 5 ヘッダ別に見た震源補助情報の分布

震源補助情報	ヘッダ J	ヘッダ U	ヘッダ I
1 通常地震	3,672,147	2	0
2 他機関依存	15,764	0	0
3 人工地震	0	5	0
4 ノイズ等	82	0	0
5 低周波イベント	67,308	0	0
補助情報欄=空白		23,373	2,110
合計	3,755,303	23,380	2,110

記入されており、何らかの誤りであると思われる。一方、各レコードには「震源補助情報」という欄もあり、その内訳は表 5 のとおりである。ヘッダ J には相当数の低周波イベントが含まれている。また、ヘッダ U にある人工地震の 5 件は、中国の新疆自治区南部（1995 年 5 月、同 8 月、1996 年 6 月の 3 件）、インド・パキスタン国境（1998 年 5 月）、およびパキスタン南西部（1998 年 5 月）の地震となっている。

7. 最大震度・被害規模・津波規模

地震月報の各レコードには、災害関連の指標として最大震度、被害規模、および津波規模に関する情報も記載されている。各ヘッダの地震について、これらの分布は表 6～8 のようになっている。

表 6 ヘッド別に見た最大震度の分布

最大震度	ヘッド J	ヘッド U	ヘッド I
1 震度 1	67,622	46	0
2 震度 2	31,449	22	0
3 震度 3	10,300	5	0
4 震度 4	2,389	1	0
5 震度 5 (1996 年 9 月まで)	192	0	1
6 震度 6 (1996 年 9 月まで)	14	0	0
7 震度 7	6	0	0
A 震度 5 弱	193	0	0
B 震度 5 強	77	0	0
C 震度 6 弱	34	0	0
D 震度 6 強	13	0	0
L 局発地震 ($\Delta < 100$)	456	0	0
S 小局発地震 ($100 \leq \Delta < 200$)	132	0	0
M やや顕著地震 ($200 \leq \Delta < 300$)	30	0	0
R 顕著地震 ($\Delta > 300$)	37	0	0
F 有感地震 (1984 年まで)	4,905	0	0
X 付近有感 (1996 年 9 月まで)	4,235	0	0
最大震度欄=空白	3,633,219	23,306	2,109
合計	3,755,303	23,380	2,110

Δ : 最大有感距離 (km) 使用は 1977 年まで

表 7 ヘッド別に見た被害規模の分布

被害規模	ヘッド J	ヘッド U	ヘッド I
1 微小被害	268	52	0
2 小被害	214	168	0
3 複数の死者または家屋全壊	69	193	1
4 死者 \geq 20, 家屋全壊 \geq 1 千	16	95	1
5 死者 \geq 200, 家屋全壊 \geq 1 万	6	41	0
6 死者 \geq 2 千, 家屋全壊 \geq 10 万	7	14	0
7 死者 \geq 2 万, 家屋全壊 \geq 100 万	1	7	0
X 被害程度不明	4	0	0
Y 直前・直後の被害と区別不能	16	0	0
被害規模欄=空白	3,754,702	22,810	2,108
合計	3,755,303	23,380	2,110

X と Y は 1988 年まで

ヘッド J で震度 7 の 6 件は、1995 年兵庫県南部、2004 年新潟県中越、2011 年東北地方太平洋沖、2016 年熊本 (前震、本震)、2018 年北海道胆振東

表 8 ヘッド別に見た津波規模の分布

津波規模	ヘッド J	ヘッド U	ヘッド I
1 $H \leq 50$ cm	129	46	0
2 $H = 1$ m 前後	8	14	0
3 $H = 2$ m 前後	2	12	0
4 $H = 4 \sim 6$ m	0	8	0
5 $H = 10 \sim 20$ m	1	2	0
6 $H \geq 30$ m	1	0	0
T 津波あり (1988 年まで)	32	0	1
津波規模欄=空白	3,755,130	23,298	2,109
合計	3,755,303	23,380	2,110

H (波高) 使用は 1989 年より

表 9 震源決定に使用された観測点数の分布

観測点数	ヘッド J	ヘッド U	ヘッド I
0	8	0	420
1	52	0	0
2	40	0	1
3	43,484	0	0
4	78,864	0	1
5 以上	3,446,453	5	1,603
空欄	186,402	23,375	85
合計	3,755,303	23,380	2,110

部の各地震である。また、被害規模=7 は 1923 年関東地震、津波規模=5 は 1993 年北海道南西沖地震、同じく 6 は 2011 年東北地方太平洋沖地震によるものである。

8. 観測点数

地震月報の各レコードには、末尾から 2 番目の項目として、震源決定に使用された観測点の数が掲載されている。各ヘッドの地震についてこの項目の分布は表 9 のとおりだが、観測点数が 0~2 の例も少なからずあるのは、やや違和感がある。

9. おわりに

本稿では、このたびできあがった 1919~2018 年の 100 年分、総数約 378 万件の地震データを含んだ地震月報について、その外形的特徴のいくつかを眺めてきた。

この貴重なカタログは、今後もさまざまな地震学的研究テーマを産み出していくに違いない。わ

が国の地震検知能力に関しては、望月ほか(1978)や横山(1984)をはじめ、これまで多くの調査がなされてきたが、最近ではSchorlemmer *et al.* (2018)により、1923~2014年の地震月報データに基づいた詳細な分析が行われている。このような研究の今後の発展に期待するとともに、地震カタログの改訂・改善・増補に日々尽力されている多くの方々に心よりの謝意を表したい。

参考文献

- 浜田信生・吉川一光・近藤さや・鎌谷紀子・明田川保・松浦律子・鈴木保典. 2004. 日本の震源カタログの改善—1923年—1925年部分の新規作成と1926年以降の改善—. 験震時報, **68**, 1-24.
- 石川有三. 1987. 気象庁震源データの変遷とその問題点. 験震時報, **51**, 47-56.
- 気象庁. 1982. 改訂日本付近の主要地震の表(1926年—1960年). 地震月報別冊, No. 6.
- 気象庁. 2020. 1919年から1921年の震源決定の概要. 令和2年1月15日報道発表資料.
- 望月英志・小林悦夫・岸尾政弘. 1978. 1965年~1974年の気象庁の震源検知能力. 験震時報, **42**, 23-30.
- Schorlemmer, D., Hirata, N., Ishigaki, Y., Doi, K., Nanjo, K. Z., Tsuruoka, H., Beutin, T. and EucPer, F. 2018. Earthquake detection probabilities in Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 702-717.
- 横山博文. 1984. 最近の気象庁地震観測網の震源決定能力—1979~1983—. 験震時報, **49**, 53-65.

岡田義光

[おかだ よしみつ]

現職 地震予知総合研究振興会非常勤理事, 理学博士

略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程中退. 東京大学地震研究所助手(富士川地殻変動観測所), 防災科学技術研究所地震調査研究センター長, 企画部長, 理事長などを経て2016年より現職

研究分野 地震学, 地殻変動論

著書 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック(共著, 鹿島出版会), 現代測地学(共著, 日本測地学会), 自然災害の事典(共著, 朝倉書店), 日本の地震地図決定新版(東京書籍), 他



南アフリカ大深度金鉱山の地震リスク低減 —2010～2015 年度 SATREPS 研究成果の概要—

小笠原宏

1. SATREPS と南アフリカ鉱山プロジェクト

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)¹⁾ は、科学技術振興機構 (JST) と国際協力機構 (JICA) が連携し、開発途上国との共同研究と開発技術の社会実装を推進している。国連の持続可能な開発目標 (SDGs)²⁾ に資する成果が求められ、環境・エネルギー・自然災害 (防災)^{3,4)}・感染症・食糧などの問題解決に取り組んでいる。

南アフリカ (以下南ア) の金鉱山では、薄い板状の金鉱脈を地表から地下に向かって 120 年以上追い続け、人間がいくことができる地球上で最も深いところまで掘削された (図 1 左)。採掘が地震を誘発するため、南アの人達は採掘場所の広さ・配置・順番を工夫し、地震ハザード (発生危険度) が許容限度を超える前に坑夫達やインフラを別の採掘現場に移動させ、地震リスク (被る損失) が最小になるように努めている。だから、地質 (金鉱脈や断層など) と採掘計画の情報が入手できれば、いつごろどの辺りに地震が誘発されるかを予測でき、震源至近距離観測を計画できる。

この理由により、国際地震学地球内部物理学協会 (IASPEI) が、アパルトヘイト廃止直後の 1991 年に、南ア金鉱山を半制御 (地震発生) 実験場として承認した。南アと日本の地震の共同研究は、南アからの地震学会への共同研究の呼びかけで始まった^{5,6)}。2008 年までの日本の震源至近距離観測では、南ア金鉱山の微小・極微小地震の破壊過程が自然巨大地震と相似であることや前駆現象が観測可能であることなどの成果がでていた⁷⁾。さらなる発展が期待されたため、SATREPS 計画

「鉱山での地震被害低減のための観測研究」 (以下 SATREPS 南ア鉱山課題) が 2009 年に JST に条件付き採択された。2010 年 2 月に、JICA と南ア政府との間の SATREPS 南ア鉱山課題の MoU (覚書) が、JICA 南ア事務所長と南ア科技相によって調印された。2010 年 8 月に最初の JICA 専門家が南アに着任し、5 年間の SATREPS の取り組みが始まった。2010 年度からの各年度と終了時報告書などは、SATREPS ホームページなど⁸⁾ にアップロードされているため、ここでは、2009～2015 年の南ア鉱山課題、および、引き続き行われ成功した国際陸上科学掘削プログラム (ICDP) の中地震の余震発生帯の大深度掘削調査⁹⁾ の概略を紹介する。

2. 背景と目的

2.1 日本と南ア金鉱山の地震の違い

2011 年に東北地方太平洋沖地震が発生し、非常に多くの余震が続いている。この例外期間を除き長期間平均すると、日本の地震の発生数は世界の約 1 割を占める。日本ではマグニチュード (以下 M) 7 を超える地震が 1 年にほぼ 1 度の頻度で起こっている。一方、2010 年当時、南アにおいて金鉱山で採掘に誘発される M4 程度の小地震は、1 年にほぼ 1 度程度 (2010 年以前の日本のその 1/1,000 程度) であった。M4 程度の小地震は、日本で被害がまず出ないが、南アの地下採掘深度で発生すると数百 m 以上の範囲に甚大な被害がでる。

M2 の自然微小地震は、震源がごく浅い場合にのみ地表で有感となるが、震度は 1 程度である。一方、南ア金鉱山の大深度の震源直近では、M2

地震でも交通事故で受けるような強い衝撃（たとえば、重力加速度の10倍を超える約0.1秒間以下の衝撃）を受ける。このため、岩盤が坑道内へ突出したり落盤が起こったりする。そこに坑夫がいれば死傷者が出る。M0.9（被害域の範囲が数10m以内）の地震でも、落盤で犠牲者が出たり重要な坑内インフラに被害がでたことがあった。

2.2 日本の技術協力に対する南アの期待

2.2.1 鉱山防災

南ア金鉱山坑内の地震被害を低減するために、地下坑内では、平面図上で1km²の範囲に1つ以上の地震計を埋設し、地震活動の常時監視が行われている。これに基づき地震ハザードを評価する方法が南アで開発され、現在でも世界の鉱山や地下空洞の中期の安全管理に使われている。このハザード評価情報は、災害にリアルタイム対応する中央監視室に火災・浸水・停電等の情報とともに集約されている。この方法の開発当初は地震直前の待避の成功例もあり、その頃（1994年）に日本と南アの共同研究が始まった。しかし、その後、この方式の直前予知にも限界があることがしだいにわかり始め、南アでは打開策が模索されていた。

日本の高感度の石井式ボアホールひずみ計などの地殻変動観測技術、また、室内岩石破壊実験の微小破壊の観測技術や経験を用い、既存の坑内地震観測では見えないものを震源至近距離で詳しく観測したら新たな知見が得られ、地震の直前予知の道が開けると期待されていた。

また、地震が活発化する現場で、岩盤応力（ストレス）を測定できる技術が南アにはなかった。採掘計画を立てる際の岩盤応力計算機予測の精度を向上させるために、役に立つ日本の技術があれば、技術移転が必要だった。

M>5の中地震が10年に1度程度の頻度で金鉱山地区に発生し、坑内だけでなく地表でも被害が出るため、鉱山会社による微小地震だけを対象にした坑内地震観測網だけでなく、国立研究機関による地表強震観測網の増強も必要であった。ところが、2009年当時、国立の地表地震観測点は、日本の約3.2倍の面積をもつ南ア全土に23しかなかった。金鉱山地区には2~3点の観測点しか

なかった。日本には約3,000の地震観測点があり、多数の地震を処理する技術がある。それを南アに導入する必要があった。

2.2.2 南アの基盤産業と基盤研究分野の持続性

2009年当時、南ア金鉱山は労働者が十数万人であり、周辺産業や数倍の人口の鉱山街の人々の生活を支えていた。その後、労働者人口と金の生産量は減少したが、2015年当時でも、南アの総輸出額940億ドルの約1割が金が占めており、金の採掘は南アにとって非常に重要な産業であった。金以外にも多くの資源を産出する世界有数の資源国である南アにとって、鉱山の安全は、基盤産業の持続可能性を大きく左右する。

ところが、南ア金鉱山での犠牲者数は無視できない（図1右）。アパルトヘイト廃止後、南アで開催され南アが優勝した1995年のラグビー・ワールドカップの翌年、新しい鉱山保安衛生法が施行され、上述の常時地震監視も始まり、犠牲者の減少が金年間生産量の減少より早まった。これらは、くしくも、兵庫県南部地震が発生した年とその翌年のことであった。しかし、その後は、南アの金の年間生産量が減り続けているのに犠牲者数は下げ止まっている。図1（右）は、計算上の採掘可能年数（金の埋蔵量をその年の採掘量で割って得られる数値）も示している。これらは、採算に見合い、安全に採掘ができる範囲に残っている金がなくなりつつあることを意味し、より安全な採掘が南アにとってより重要になっていた。

南アは、かつては金の生産量が世界の2/3を占め、南アの研究成果は国際岩石力学界において非常に重要な役割を果たしていた。しかし、金の生産量の減少は、金鉱山会社の安全な採掘に投じる研究資金の減少を招いた。政府の予算配分の重点も黒人の疾病対策に移り、国立研究機関の鉱山工学や岩盤工学の部門の衰退が著しくなり、外国への頭脳流出と後進育成の停滞が深刻な問題になっていた¹⁰。日本の技術協力が南アの鉱山地震学と岩盤工学界の持続のために非常に強く要望されていた。

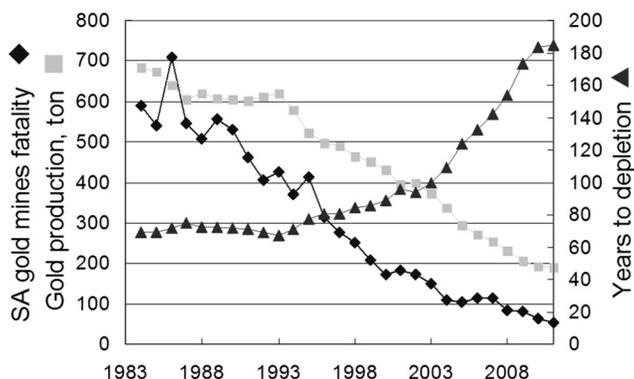
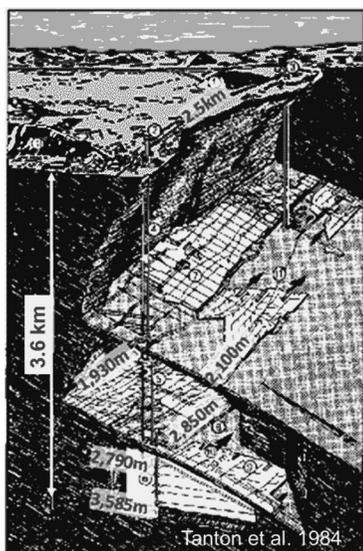


図 1 左：1984 年当時，世界最深の金鉱山の，南に傾斜した 2 枚の薄板状金鉱脈と採掘の模式図．薄板上の格子状の細い線は，鉱脈の下の水平坑道網．薄板上の小さな黒矢印で示す方向に採掘前線を進めていた．地表からの深度も示されている．現在の世界最深の金鉱山は，この図の右下延長部を採掘している．右：1984～2011 年までの，南アの金の年間生産量（単位はトン：■），年間犠牲者数（単位は人：◆），計算上の採掘継続可能年数（単位は年；埋蔵量/年間生産量；▲）．データは南ア資源省．SATREPS 計画以前，採掘前の岩盤応力の実測値は地下 2,700m までしか出版公開されていなかった．SATREPS で日本の測定方法が南ア鉱山に実装され，地震ハザードの大きい大深度でも浅部の高応力の残柱でも実測ができるようになった

2.3 南ア金鉱山でしかできない震源至近距離観測に対する日本の期待

地震学においては，数 cm 程度の小さな岩石試料を室内で破壊して得られた知見を，断層破壊域が数十 km を超える自然大地震に適用できるのかを確認するために，中間サイズの岩石破壊試験が求められていた．100m 前後の範囲の岩盤が破壊される M2 級の地震は，1つの採掘現場付近における 2～3 年の金の採掘で誘発されるため，この規模の地震の至近距離観測研究は非常に重要であった．

3. 取り組みと成果

3.1 取り組み

SATREPS 南ア鉱山課題では，以下の 6 つの活動グループを作った：「震源の岩盤変形（小笠原・立命館大）」，「震源の微小破壊（中谷・東大）」，「震源の動的破壊（矢部・東北大）」，「坑内観測地

震高度解析（川方・立命大）」「震源の岩石分析（佐藤・産総研）」「地表地震観測（小笠原・立命大）」．括弧内はグループリーダーである．目標とした成果は，「震源の岩石の性質を理解」，「地震準備と前駆変化を理解」，「地震発生の予測精度向上」，「坑内地震被害予測精度向上」，「地震情報の公的発信能力を強化し地震被害予測精度を向上」であった．図 2 は実施体制，図 3 は活動内容の模式表示である．南ア側は，鉱山地震と鉱山工学の研究と教育の中心的役割を果たしている CSIR（日本の産総研に似た研究機関）とウィットワータースランド（Witwatersrand）大，および，資源省傘下の Council for Geoscience（南アの地質調査所）であった．南ア側の代表者 Durrheim 教授（CSIR/Wits 大），グループリーダー Cichowicz 博士（CGS），小笠原とは 1994 年以降の交流があった．

3.2 成果の概略

SATREPS によって，2009 年度の条件付き採

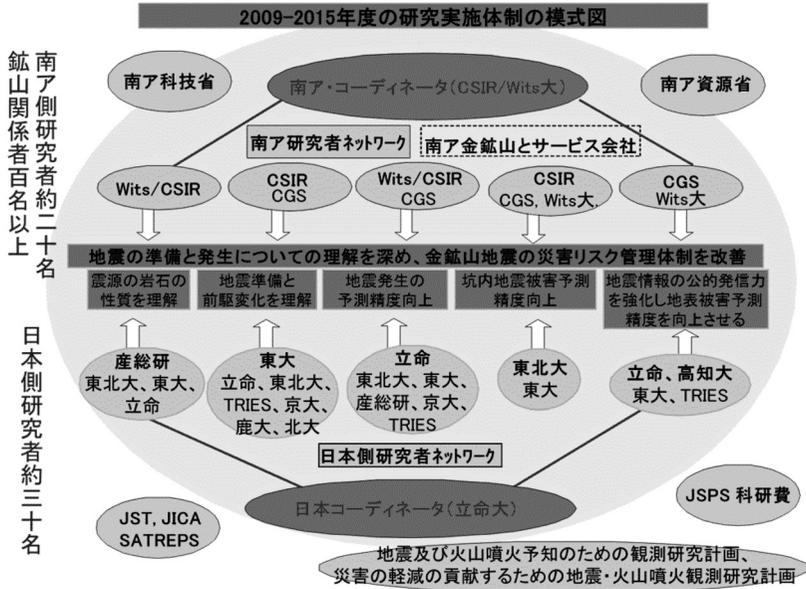


図 2 SATREPS の実施体制。Wits: Witwatersrand 大学。CSIR: Council for Scientific and Industrial Research (日本の産総研に対応する南アの研究機関)。CGS: Council for Geoscience (南アフリカの地質調査所)

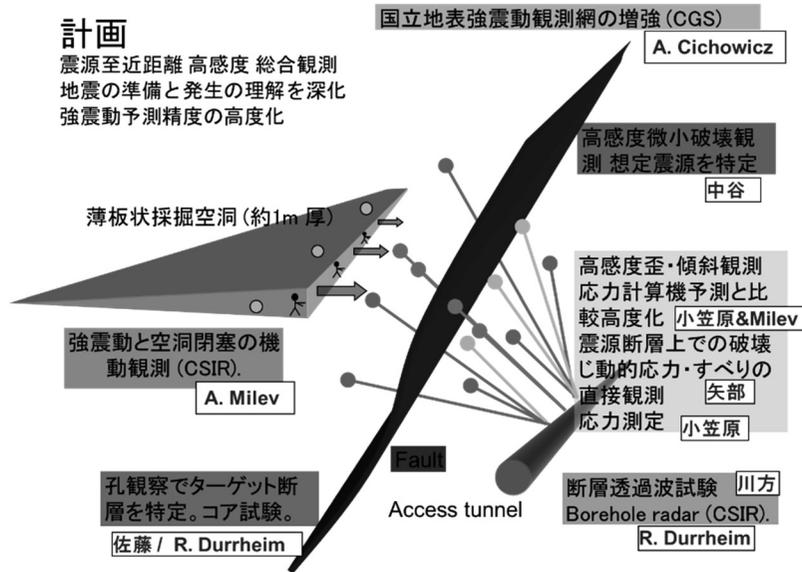


図 3 SATREPS 鉱山課題の活動の模式表示

沢からの6年間に、本プロジェクトに投じられた人的物的資源の規模(短期専門家派遣延べ人数65名、派遣期間延べ1,064日間、坑内技師 Full Time 雇用最大5名、ドリリング80本以上総延長2.8km以上、供与機材100台以上)は、1992

年以来続けられている日本の南アとの共同研究のそれよりも一桁多く、世界的に見てもまれな規模の取り組みであった。

「The History of Geophysics in Southern Africa (2016; African SUN MeDIA)」という本や、南

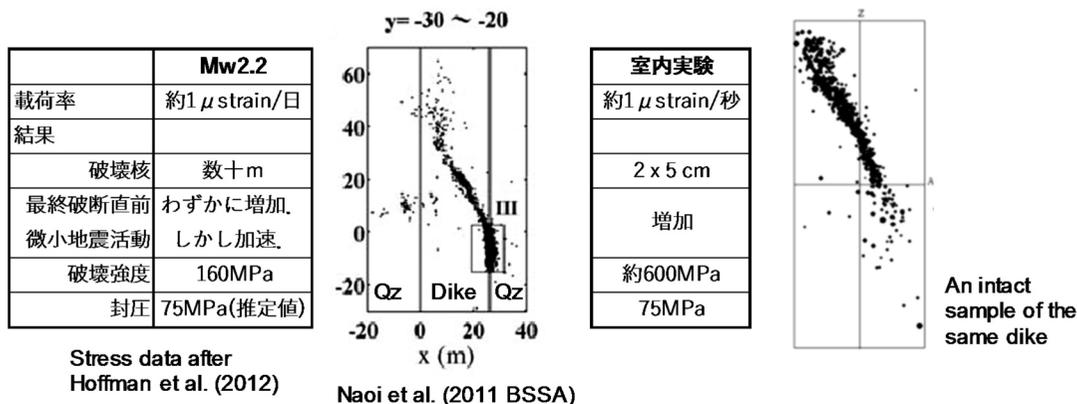


図4 左：図1左の上側の金鉱脈を右下方向に延長した部分に位置する Mponeng 金鉱山地下約 3.3 km のダイクに、中谷らが微小破壊センサーを埋設した。2007年に観測された Mw 2.2 地震の余震分布。前震もほぼ同じ面上で発生していた。Qz: 母岩の珪岩。右：同じダイクから採取した無傷な岩石試料を室内実験で破壊したときの微小破壊分布

ア科技省と在南ア日本大使館が共同出版した、日本と南アの科学技術協力協定10周年記念Booklet¹¹⁾でも大きく取り上げられた。坑内の観測は、5つの鉱山会社が所有する南アの6つの金鉱山の地下1.0~3.4kmで行われた。これらの鉱山には、世界で最も深い十大鉱山の第1, 2, 4, 6, 7位の5つが含まれる。

2012年から2015年まで、毎年、鉱山街でSATREPSセミナーを開催し知見を共有した⁸⁾。毎回、地震や鉱山に関するアカデミアや産業界から数十名の参加があった。2014年度には、南ア岩石工学会から鉱山地震学と岩盤工学の研究と後進育成のプロジェクト継続を望むレターを受け取った。2015年度以後に新しいSATREPS計画を立ち上げることはできなかったが、後述するICDP地震発生場掘削(DSeis)計画がその役割を果たした。

以下では、各成果目標に対する到達度の概略を記す。

3.3 震源の岩石の性質を理解

地下約3.3kmのダイク(岩脈)における2007~2008年の中谷らの微小破壊観測で、M2級の地震の前震・本震・余震活動を記録できていた。佐藤グループがダイクの無傷な試料を室内実験で破壊し、比較をした(図4)。実験を南アの若手研究者とともにやり、日本で室内岩石破壊実験法を教

授できた。

3.4 地震準備と前駆現象の理解

M2級の地震発生場の岩盤応力と前震活動の加速を矢部らが詳細に解析した。その論文が評価され、スイス・ダボスで開催された国際ワークショップに矢部らが招待された。

中谷グループが微小破壊観測センサーを多数埋設し、岩盤内の亀裂の時空間発展を詳細に観察することができた(図5)。観測現場は地下1kmであるが、掘り残されて岩盤応力が地下3km並に高かった部分であった。従来型の坑内地震観測ではまったく見ることができなかったものを詳細に解析して新しい知見を得た直井らの論文に対し、直井は2017年度に日本地震学会若手学術奨励賞、直井・中谷・矢部・森谷は日本岩の力学連合からフロンティア賞を受賞した。4.1で後述するICDP計画では、微小破壊活動域の母岩と破壊をほぼありのまま掘削回収することに成功し、南ア学生が日本で行った摩擦実験結果が国際雑誌に掲載された。博士論文にまとめられる予定である。これによって成果目標「震源の岩石の性質を理解」と地震の理解も深まった。

3.5 地震発生の予測精度向上

岩盤応力を、確実にその場で実測できる技術(円錐孔底ひずみ法; 国際岩石力学学会推奨法; Sugawara and Obara, 1999, 国際岩石力学鉱山科

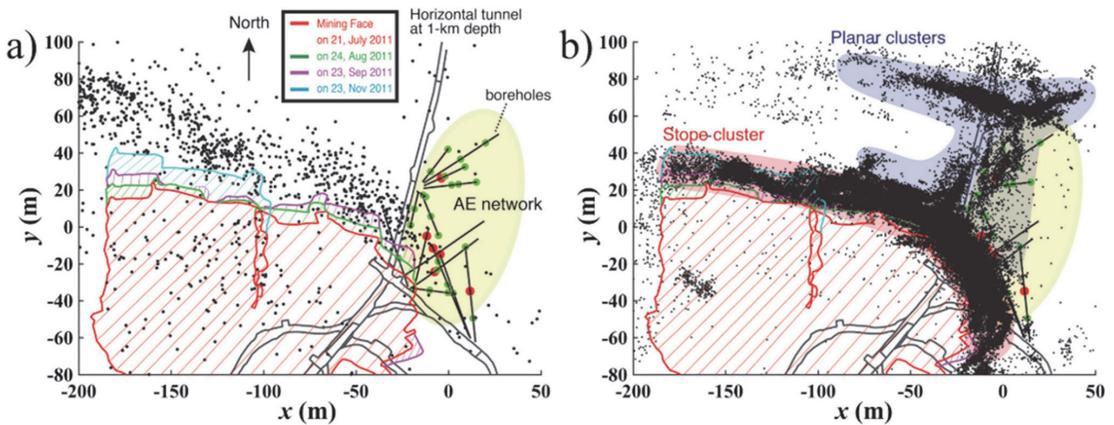


図 5 a) 既存の坑内地震観測網（微小地震しか検知できない）で検知された地震の分布, b) 同じ期間に SATREPS 中谷グループが埋設した微小破壊センサー（赤と緑のドット）で観測された微小破壊の空間分布. 直井 誠 (2018) 日本地震学会若手学術奨励賞受賞記念論文 (DOI: 10.4294/zisin.2017-13) より

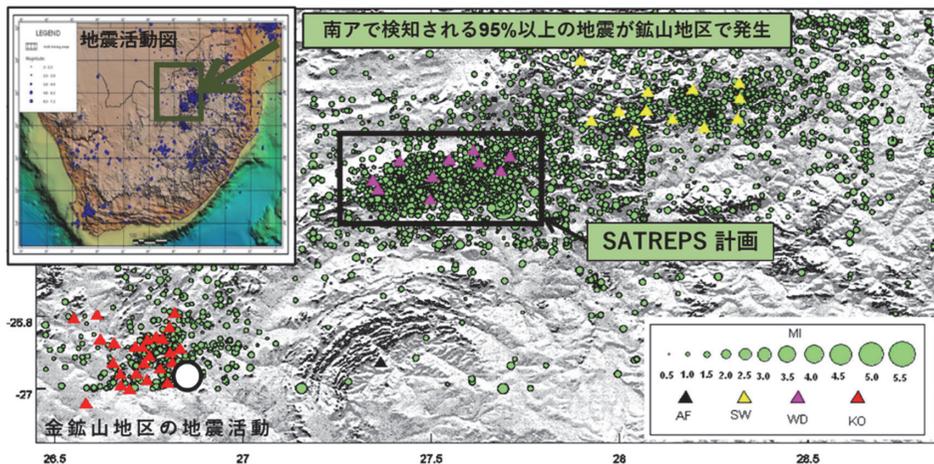


図 6 SATREPS 期に増強された CGS の国立地震観測網 (図は CGS からいただいた). ピンク色の▲: SATREPS によって増強された地表強震観測点. 黄色と赤の三角: 鉱山健康保安協会と資源省が増強した地表地震観測網. 左下の白丸: 2014 年 Orkney M5.5 地震. 記録された最大加速度等は図 7 参照. 堀内らの地震波到来時刻自動検出ソフトが実装された

学雑誌) を南ア金鉱山の深部での測定に最適化し、技術移転することに成功した (波及効果は 4.2 参照). 鉱山やコンサル会社による移転技術の自発的実装も一部進んだ.

地震に伴う応力降下量推定の高精度化などの経験などが評価され、吉光が 2020 年度に地震学会若手学術奨励賞を受賞した.

これらによって、SATREPS 以前は困難だった高応力岩盤での定量的ハザード評価の高度化に貢

献した.

3.6 坑内地震被害予測精度向上

薄板状金鉱脈を採掘した後にできる薄板状の空洞 (典型的な被害現場) や、予想される震源断層上での強震観測を試みたが、観測網内での地震発生は残念ながらなかった.

3.7 公的地震情報発信能力強化

鉱山の地下坑内地震観測網は微小地震を対象にしたもので、中規模地震を振りきれずに記録した

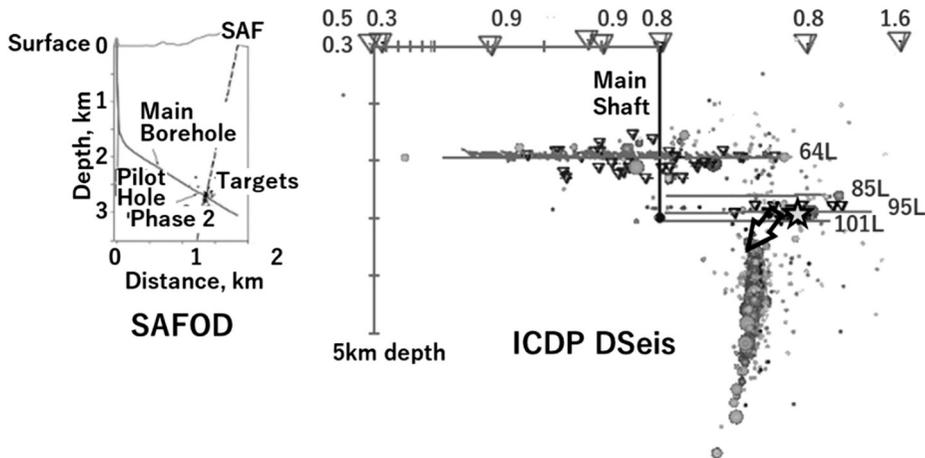


図7 2014年Orkney M5.5地震(右;南ア金鉱山地区で発生した最大の地震),それを地下2.9kmから掘削調査したICDP DSeis計画(矢印)とアメリカ・サンアンドレアス断層(左;プレート境界掘削計画)の比較。地表の大き目の三角は増強された地表強震計国立観測網(数値はM5.5地震で観測された最大加速度。単位はG)。地下の小さめの三角は鉱山の坑内地震観測点。これらの坑内観測点で決定された地震が丸で示されている。最深の101レベル(地下約3km)よりも下を、M5.5地震が破壊した。星印は日本の技術で岩盤応力が実測され、本震と余震活動を記録した石井式歪計が埋設されたおおよその位置

り正しく評価したりすることができなかった。SATREPSの期間中に、金鉱山地区のCGS地表国立強震観測網とCGSの地震情報発信能力が大幅に増強された(図6)。掘内らの地震波到来時刻自動検出ソフトが実装された。CGS若手研究者を日本に招聘し、ソフトの使い方を教育した。2014年にOrkney市近郊のMoab Khotsong 鉱山下で発生したM5.5の地震(金鉱山地区過去最大)の本震と余震は、この増強された観測網と、地下2.9および3.0kmに埋設された石井式歪計で振りきれることなく記録された(図7)。坑内地震観測網のデータと統合解析され詳細に描き出された地震断層面が、後述するICDP計画の掘削調査対象になった。

4. Post SATREPS

4.1 ICDP 南ア金鉱山地震発生場掘削計画

SATREPS南ア鉱山課題の成果は国際的に評価され、「南ア金鉱山地震発生場掘削計画」が国際陸上科学掘削プログラム(ICDP)に承認された。掘削開始時にはScience誌のニュースで紹介され

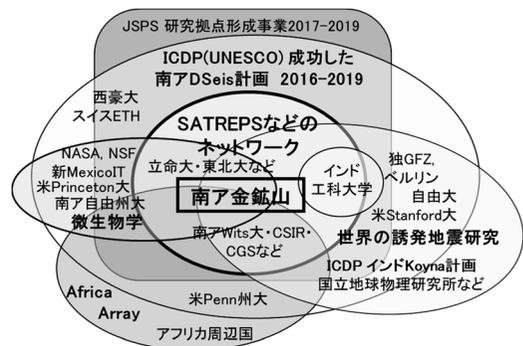


図8 ICDP DSeis計画開始時の実施体制。中心はSATREPSのアカデミアと産業界のネットワーク(図2参照)

た¹²⁾。図8に示すように、SATREPSの日本と南アの協力体制が中心となり、アメリカ・ドイツ・スイス・イスラエル・インド・オーストラリアが新規参画し、2019年度に成功裏に掘削を終えることができた⁹⁾。Wits大学が主催するアフリカ大陸地球物理人材育成プログラムAfrica Arrayとも連携した。「震源の岩石の性質を理解」がさらに進んだ。新規参加者は、自然地震だけでなく、地熱・資源開発・ダム貯水の誘発地震や、大深度微生物圏を研究対象としている。

DSeis 計画の第一段階である ICDP DSeis Workshop は、SATREPS が終了した 2015 年 8 月上旬の約 3 か月後に開催することができた。SATREPS メンバーが申請者になり、日本と南ア以外に、アメリカ・ドイツ・スイス・インド・オーストラリアからも合計 70 名の参加があり、掘削計画を固めることができた。

われわれの場合は例外的な速さで Full Drilling 計画が ICDP に採択されたが、掘削開始まで 2 年を要し、M2.8 と M3.5 の地震発生場の掘削調査は鉦山の閉山に間に合わなかった。しかし、ICDP 科学プラン 2014~2019 の挑戦目標とされていた、自然地震の発生地点まで掘削調査することが、鉦山下を破壊した中地震 (M5.5) を掘削調査することによって達成できた。成果は、ICDP の広報誌 “The Thrill to Drill”¹³⁾ でも大きく取り上げられた。

SATREPS で共同研究を行い、現場を熟知していた立命大・東北大・Wits 大の院生や学部生達が活躍し、阪大・スイス連邦工科大・プリンストン大・南ア自由州大の院生や若手研究者達、合計約 30 名が共同研究を進めた。

DSeis 計画を始めたとき、M5.5 地震については震源分布以外は何もわかっていなかった。余震発生帯上縁部から回収された試料の阪大グループ (廣野と学生; 2018 年から参画) による高知コアセンターでの解析から、マントル物質と水の作用で非常に弱くなった物質が重要な役割を果たしている可能性が浮かび上がり始めている。1996 年に実施された 3D 地震反射法探査データが残されていることがわかり、再解釈した結果、深部起源の岩脈の貫入の配置が余震活動帯と関係がありそうなことも見え始めている。この岩脈はマントルプレリウム活動が起源の 27~2 億年前までの超大陸の分裂の痕跡である。

われわれが掘削調査できた断層はプレート境界の断層の百分の 1 ほどの大きさでしかないが、アメリカのプレート境界掘削調査計画 (SAFOD 計画) や、日本の深海掘削調査船「ちきゅう」にもできていなかったことができはじめているのかもしれない。今後、研究をさらに進め、日本海溝や

南海トラフなどの巨大地震発生帯の下部延長域でマントル物質や水が関与して起こっていると想像されているスロー地震の理解を進めることにも貢献する知見が得られないかと期待している。

4.2 日本の実装技術のその後

金の採掘跡 (図 1 左) は、採掘直後、高さが 1 m 程度で横の広がり数百 m の薄い板状の空洞が残るが、時間とともに閉塞する。地震活動の常時デジタル監視ができなかった数十年前に危険と判断され放置された高品位の金鉱脈 (残柱) は、今は地震活動がないため、応力が緩和していれば安全な採掘が可能である。ところが、SATREPS 以前はその評価ができていなかった。SATREPS の技術移転後、岩盤応力の実測が確実にできるようになり、その技術はプラチナ、銅、ダイヤモンドの鉱山でも使われ始めた。JOGMEC と連携しチリなど第三国で活用する取り組みも始まった。「地震発生の予測精度向上」、「坑内地震被害予測精度向上」の成果である。

上記の技術では、坑道から 20 m 以上離れた岩盤内の応力をルーチ的に測定するのは困難である。DSeis 計画では、800 m を超える孔井内でも、掘削コアさえあれば、非破壊で簡単に応力を測定できる新しい手法 (コア変形法; Funato and Ito が開発; 2018 年度日本岩の力学連合賞受賞) によって応力分布を詳細に測定することができた。

図 5 の数十万個の微小破壊の震源決定は、堀内が開発した自動地震波到来時刻読み取りアルゴリズムによるものであった。このアルゴリズムは M5.5 の余震震源決定でも活躍した。堀内は、さらに新しいアイデアで、数十 m だけ離して地震計ペアを設置して波形処理することによって、従来よりもノイズが小さい地震記録を得ることができた。円錐孔底ひずみ法は、より容易に測定できるツールが加藤らによって開発された。

この応力測定ツールとコア変形法、および、新しい地震観測法は、2019 年に鉦山会社と関連会社に対し、技術講習会議を開催することもできた。

4.3 衰退が止まった岩盤力学・鉦山地震研究

鉦山の安全な採掘に関する研究を中心的に支え

ていた CSIR Miningtek は、SATREPS 期間中も規模縮小が続き、SATREPS の南ア側代表者も CSIR から Wits 大学に転出せざるを得なくなった¹⁰⁾。しかし、後進育成が非常に重要であることが再認識され、2015 年の国連 SDGs を南アで目指す国家開発計画 Phakisa（セストゥ語で急ぐという意味）の下の活動の一環として、CSIR に Mandela Mining Precinct が 2018 年 8 月に開設された。2015 年以降に大きな金鉱山がいくつか閉山したが、SATREPS の取り組みをともに行った鉱山実務者が海外に流出せず、Mandela Mining Precinct や Wits 大学に着任し、ICDP DSeis 計画の推進と若手育成に貢献した。

5. ま と め

これらの研究成果は、多くの査読付きの学術雑誌や国際学会論文集として出版された。アメリカ地球物理学協会 (AGU)、ヨーロッパ地球物理学連合 (EGU)、日本地球惑星科学連合 (JpGU)、オーストラリア・中国・インド、そして、著名な地震学者が招待されたスイス・ダボスで開催された誘発地震ワークショップなどでも、招待講演で成果発信をすることができた。2020 年には韓国の地熱開発で誘発された M5.5 Pohang 地震の記念フォーラムにも招待されている。

合計 10 名を超える日本と南アの若手研究者が学位取得や昇任を実現した。Wits 大学では黒人若手研究者 (Manzi) が准教授に昇任し、南ア NRF 賞を受賞しておおいに注目された。

ラグビーと南ア金鉱山での地震研究は本来無縁であるが、ICDP Workshop の開催期間は、偶然にもラグビー・ワールドカップで日本が南アを破ったときであった。南アの院生 2 名を日本に招き、高知コアセンターで分析を行うこともできたのは、日本でワールドカップが開催され南アが優勝した 2019 年であった。人間がいくことができる世界で最も地下深いところがある南ア金鉱山という、世界の他に類をみない環境での共同研究と、地震とラグビーという不思議な縁がある日本と南アの友好的な交流が今後も活発に続くことを

祈っている。

謝辞

本研究プロジェクト (2010~2015) とそれに続く DSeis 計画 (2016~2019) を実施するにあたり、地震が発生する高温多湿な地下大深度で、総延長約 5km の掘削と計器埋設と観測維持というたいへんな作業を行った。これがかできたのは、日本と南アフリカの研究者・研究機関、学生、多大な貢献をしてくださった故 Gilbert Molema 氏、南アフリカ 4 大金鉱山会社の 6 つの金鉱山、南アと日本の十以上の関連企業の皆様、研究活動を支えてくださった南アフリカ科学技術省、在日本南アフリカ大使館、JICA 本部、JST、JICA プレトリア事務所、在南アフリカ日本大使館、期間中現地に長期滞在しプロジェクトをさせてくださった JICA 業務調整員の宮良光一朗氏と高島 淳氏、立命館大学リサーチオフィス、村上 理氏、澤井晶子氏、辻田淑子氏など、200 名を超える方々のご協力のおかげです。ここに記して感謝いたします。

研究や技術協力に要した費用は、JICA、JST、日本学術振興会、ICDP、文科省、立命館大学、東北大学、南ア NRF、米国 NSF、ドイツ DFG、東京大学地震研究所と高知コアセンターの共同利用などによりました。

参考文献

- 1) 本蔵義守. 2018. JST-JICA 国際共同研究プログラム「SATREPS」の概要. *地震ジャーナル*, **56**, 51-54. <https://www.jst.go.jp/global/about.html>
- 2) https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/
- 3) 山崎文雄. 2019. ベルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究—2010~2014 年度 SATREPS 課題の概要—. *地震ジャーナル*, **67**, 42-53.
- 4) 金田義行. 2019. トルコマラマラ海域の地震・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—. *地震ジャーナル*, **68**, 25-39.
- 5) 飯尾能久・深尾良夫. 1992. 南アフリカ金鉱山に

- おける国際共同実験参加の呼掛け。日本地震学会ニュースレター, **3** (6), 8-9.
- 6) Nicolaysen, L.O. 1992. International semi-controlled experiment on seismic events: a review of the background and proposal. 日本地震学会ニュースレター, **3** (6), 9-27.
- 7) 小笠原宏, 南ア金鉱山半制御地震発生実験グループ. 2009. 南ア金鉱山で見えてきた地震発生の詳細像. 日本地震学会広報誌「なるふる」, **72**, 4-5. <https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol72.pdf>
- 8) https://www.jst.go.jp/global/kadai/h2114_south_africa.html
活動を象徴する写真は、以下をご覧ください：http://www.ritsumei.ac.jp/se/~ogasawar/SATREPS_photos.pdf
- 9) 小笠原宏. 2020. 地震発生帯の掘削調査に成功. 日本地震学会広報誌「なるふる」, **120**, 2-3. <https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol120.pdf>
- 10) Stacey, T.R. 2019. What happened to rock engineering research in South Africa. 南アフリカ金鉱山冶金境界雑誌, **119** (125周年記念版), 60-61. https://issuu.com/saimm/docs/saimm-201908-aug_e3f602e0e7dccb
- 11) 南ア科技省・在南ア日本大使館・南ア NRF・JICA. 2014. *South Africa-Japan Cooperation in Science and Technology*. <http://www.dst.tokyo/docs/SA-JP-Book2014.pdf>
- 12) Voosen, P. 2017. Deep in a South African gold mine, scientists drill for the heart of an earthquake. *Science*, **356**, 891-892. doi:10.1126/science.aan6905
- 13) ICDP. 2019. *The Thrill to Drill*. https://www.icdp-online.org/fileadmin/icdp/media/doc/The_Thrill_To_Drill_2018_HR_small.pdf

小笠原宏

[おがさわら ひろし]

現職 立命館大学理工学部教授

略歴 1988年京都大学理学研究科単位取得退学。1989年立命館大学理工学部助教授。2002年立命館大学理工学部教授。現在に至る

研究分野 地震の震源での科学的研究（震源至近距離観測，地震発生場掘削研究，南アフリカ大深度金鉱山での地震被害低減）

編著書 2002. Seismogenic Process Monitoring, Balkema, pp.426



ETAS モデルと感染症

Epidemic-type Aftershock Sequence モデル

どの地震でも更なる地震を誘発します。大きい地震は多くの地震を誘発し、小さい地震でもそれなりの確率で地震を誘発します。

時刻 t までの地震の発生時とマグニチュードのデータ系列 $\{(t_i, M_i), t_i < t\}$ に対して、ETAS モデルは履歴に依存した発生率 (条件付強度関数)

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{i: t_i < t} K_1 \cdot \nu(t - t_i + c) e^{\alpha M_i} \quad (1)$$

で次の瞬間の地震発生を予測します。ここでの和の数式記号は時刻 t までの先行地震 i に関する項の足し算です。(1) 式の関数 $\nu(\cdot)$ は

$$\nu(t) = (p-1)c^{p-1}/(t+c)^p \quad (2)$$

で、これは大森・宇津の余震減衰式 $K/(t+c)^p$ を $p > 1$ のとき積分が 1 になるような密度分布で書き直したものです。

計算機シミュレーションで ETAS モデルの地震数が発散しないためにはまず $p > 1$ で、さらに、マグニチュード系列が Gutenberg-Richter 則で独立に従うとすれば、その b 値に対して、

$$K_1 b \ln 10 / (b \ln 10 - \alpha) < 1 \quad (3)$$

である必要があります、さもなければ地震数は急激に増加してしまいます (Zhuang and Ogata, 2006)。

実際の地震データに ETAS モデルを当てはめると、不等式 (3) に従わないときや $p \leq 1$ のときも往々にしてあります。しかし、その場合は一過性で、いくつかのパラメータ値は常時定数でなく時間依存しています。

疫学モデル

このような地震の誘発性から分かるように、ETAS モデルのルーツは以下に述べるように疫学における感染確率モデルにも関係しています。

初期の条件付強度関数で定義された点過程モデルに self-exciting モデル (Hawkes, 1971)

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \mu + \sum_{t_i < t} g(t-t_i) \\ &= \mu + \sum_{t_i < t} A \cdot g_0(t-t_i) \end{aligned} \quad (4)$$

があります。(4) の後者の式は正値の関数 $g_0(\cdot)$ の積分が 1 になるように正規化した表現です。

時間区間を等分割し、各微小区間内での点の有無によって 0 または 1 の値をとり、点過程を確率変数の系列として離散的に近似すると (4) 式は過去の履歴の二値確率変数列について線形になっています。当時、統計数理研究所の赤池は、これを時系列解析における「自己回帰モデル」に擬えて、予測の立場から注目しました。それゆえ、周りの若手に、点過程の尤度と AIC によって直接的に多項式関数 $g(\cdot)$ の推定法の研究をするように指導しました (尾形, 2019)。このときから条件付強度関数のモデル化や応用の研究が、統計地震学で長らく先行しましたが、他分野では点過程のデータベースの整備や公開が進まず、大きな進展がありませんでした。しかし最近では、金融リスクや保険の分野での応用で急増しています。

Hawkes の self-exciting モデルのルーツは集団遺伝学や感染症学などで登場しました。たとえば Kendall (1949) は、出生死滅の確率分枝過程のモデルを導入し議論しましたが、Hawkes and Oakes (1974) によると、モデル (4) の実態は、個体 i が時刻 t_i で感染したとき、時間区間 $(t, t+dt)$ 中で確率 $A g_0(t-t_i) dt$ で発症し、全体集団では、これらが重なり合ったものとして表わされます (図 1)。(4) 式の係数 μ 値は集団外部からの感染者 (第 0 世代) の侵入率を示します。

感染症流行の定量的予測の研究の解説で、西浦・稲葉 (2006) は常微分方程式系のマクロ集団モデル (SIR model など) を紹介しています。基本再生産数と呼ばれる感染症伝播能力の指標

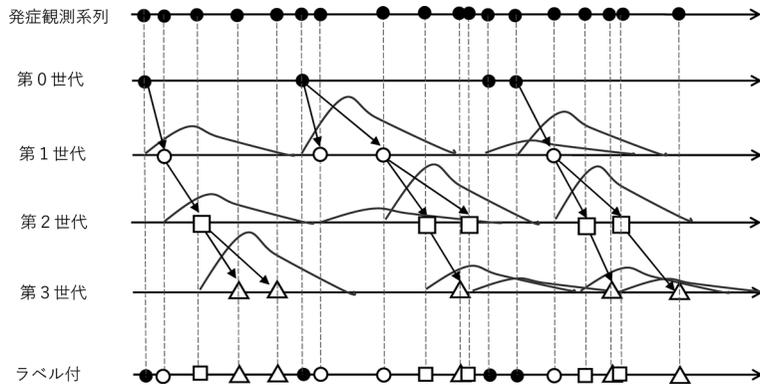


図 1 Hawkes 型点過程の図解。最上段の黒丸列は観測された事象系列。その下の黒丸は外部からの移住した事象 (0 世代)。白丸、四角と三角は第 1 世代から 3 世代までの子孫の事象への伝播関係の分離図。矢印は先行する世代の事象によって生成された事象とのクラスター関係を示している。最下段の図は、形状で示される重ね合わせである。このクラスター分離構造は直接観察される最上段の図からは分からないが、モデルによって確率的に推測できる (Zhuang *et al.*, 2002)。

が 1 より大きい小さいかで感染が蔓延するか消滅するかの分かれ目で、感染症伝播の定量的な予測に関係します。

他方 Hawkes のモデル (4) からは $A > 1$ なら感染者は指数的に増大再生産し、 μ 値が小さい限りは $A < 1$ なら収束に向かいます。

残念ながら、新型コロナウイルス (COVID-19) などのミクロな感染モデルを構築するためには、事象の発症時や所在などの詳細なデータが、少なくとも準リアルタイムでは不備です。地震カタログのような整ったデータベースによる予測のアプローチは困難と言わねばなりません。

もしも理想的なデータベースが整ったときのアプローチとしては、まず μ は時間や場所に依存していることが考えられ、(4) 式の A 値の大小は、ウィルスの個性起源の伝播能力というよりも、密閉・密集・密接状態の程度や接触時間の長さなどの複雑な環境条件に基づいた共変量に依存すると考えられます。また感染の時間遅れ (潜伏期間) を特徴づける (4) 式の誘発関数 $g_0(\cdot)$ 自体の推定も不可欠でしょう (西浦・稲葉, 2006)。それゆえ、階層的時空間 ETAS モデルや非正常 ETAS モデル (Ogata, 2017) のように、データ駆動の時空間的な非一様性や非正常性に関する予測モデルの適切な具

体化が求められると思います。

参考文献

- Hawkes, A.G. 1971. Spectra of some self-exciting and mutually exciting point processes. *Biometrika*, **58**, 83-90. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.1.83>
- Hawkes, A.G. and Oakes, D. 1974. A cluster process representation of a self-exciting process. *J. Appl. Probab.*, **11**, 403-503.
- Kendall, D.G. 1949. Stochastic processes and population growth. *J. R. Statist. Soc. B*, **11**, 230-264.
- 西浦 博, 稲葉 寿. 2006. 感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題. *統計数理*, **54**, 461-480. <https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/pdf/54-2-461.pdf>
- Ogata, Y. 2017. Statistics of earthquake activity: models and methods for earthquake predictability studies. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **45**, 497-527. doi:10.1146/annurev-earth-063016-015918.
- 尾形良彦. 2019. 統計地震学の発展と地震活動予測: 個人的経験と展望. *統計数理*, **67**, 215-228. <https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/pdf/67-2-215.pdf>
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. 2002. Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *J. Am. Statist. Assoc.*, **97**: 369-380.
- Zhuang, J. and Ogata, Y. 2006. Properties of the probability distribution associated with the largest event in an earthquake cluster and their implications to foreshocks. *Phys. Rev., E.*, **73**, 046134. doi: 10.1103/PhysRevE.73.046134

(尾形良彦: 統計数理研究所名誉教授)

新型コロナウイルス感染と地震活動解析

津村建四朗・石川有三

1. はじめに

新型コロナウイルスが2020年初めから中国で猛威を振るい始めたとき、日本でもこれほど大流行するとは予想されていなかった（非常事態宣言4月7日発令，一カ月間）。当初，われわれ地震活動の研究者はただ報道される内容を見ているだけであった。しかし，報道される内容は1日の新たな感染者数だけで，その感染者達がどのような構成になっているかなどの内容は示されなかった。そこで，津村が，新型コロナウイルス感染者データの解析にSeis-PC（地震活動解析ソフト，<http://catfish.the-ninja.jp/seis-pc/index.html>）を用いることを3月下旬に提案し，石川がすぐにそれを具体化した。地震活動の解析では，震源分布はもちろん，時間的な活動の盛衰，活動の移動，深さによる特徴などを調べるが，感染者の情報をこれらのパラメータに対応させて解析すれば，感染者の内容や傾向を簡単に詳しく知ることができると考えた。提案の具体的手法は，第2章に記載した。

2. 変換のルール

感染者データを以下のルールで震源パラメータに変換した。全国の感染者数データは，主にNHKの特設サイト（<https://www3.nhk.or.jp/news/special/coronavirus/>）と厚生労働省の新型コロナウイルス感染症国内事例のサイト（<https://mhlw-gis.maps.arcgis.com/apps/opstdashboard/index.html#/c2ac63d9dd05406dab7407b5053d108>

e) から毎日，各都道府県別の人数を入力した。その人数を地震の数とし，震央位置はほぼ県庁の位置または県内の中央に近い位置を使った。空港検疫で検出された人数は，北緯36度，東経142度の海域の位置にプロットした。年代は震源の深さ，たとえば20歳代は20km，10歳未満は09km，100歳以上は100km，非公表は0kmとした。性別の男性はマグニチュード（以下M）5，女性はM3，非公表はM0とした。時刻は震源時刻年月日とし，その日の00時00分00秒としたが，Seis-PCでは秒位まで同じ時刻では同一地震として読み込み時に読み飛ばすので，一人増えるごとに1秒加えた。こうして2010年1月4日以降の全感染者の都道府県と日付を入力した。

3. 具体的な解析例

図1に全国の感染者数の日別変化を示した。第一波，第二波が明瞭に見え，第一波のピークが第二波のピークよりかなり低かったことも分かる。また，最近では土曜，日曜のPCR検査実施件数が少ないことが公表されているが，当初は公表されていなかったので月曜日に感染者数が減ったことに安堵感をあたえるような誤った印象を与えていた。しかし，Seis-PCには曜日ごとの回数変化図を作成する機能があり，当初から月曜日の人数が異常に少ないことを指摘していた（図2左）。

このような曜日による感染者数の変化は海外でも見られるが，ソウルの場合は日曜日がいちばん少ない（図2右，データは<http://www.seoul.go.kr/coronaV/coronaStatus.do>より）。全国の日別の都道府県別感染者数の分布図と東京都区市町村

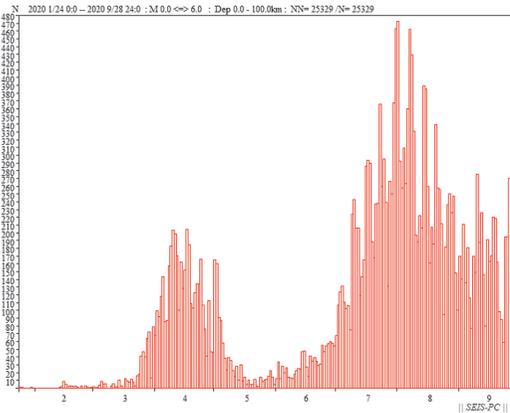


図 1 日本全体の感染者数の日別変化。第一波と第二波の感染者数の違いがはっきり分かる。非常事態宣言（4月7日発令）で第一波が収まった

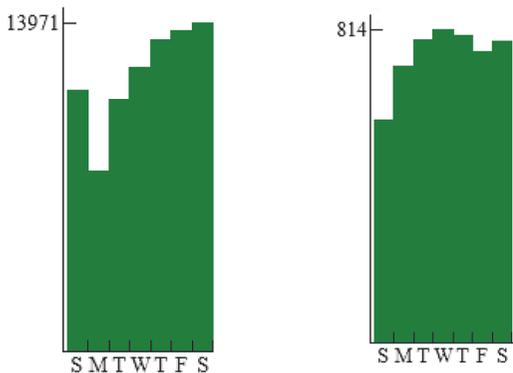


図 2 (左) 日本の感染者数の曜日による変化。横軸は左から日、月、火、水、木、金、土、曜日。日本は月曜日が少ない。縦軸の数値は感染者数が最大の曜日の人数。(右) ソウルでの感染者数の曜日による変化。日曜日が少ない

別日別感染者数の分布図は毎日、塩井宏幸氏のホームページ (http://h-shioi.la.cocacn.jp/COVID-19/COVID-19_JapanDaily.htm) で更新して示している。

Seis-PC にはいろいろな機能があり、その1つに時間円表示図（以下、TC図）がある（津村，1993）。これはあまり知られていない表示法で、その作図法は以下のとおりである。まず地図を適

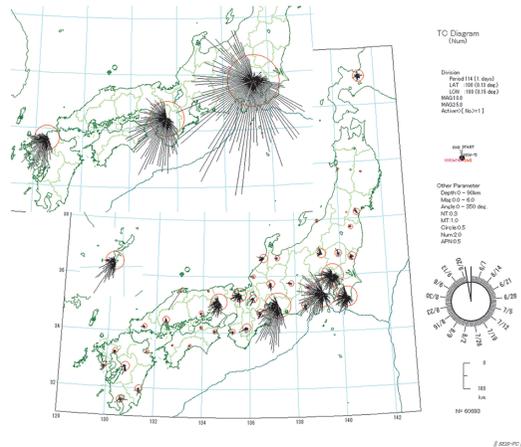
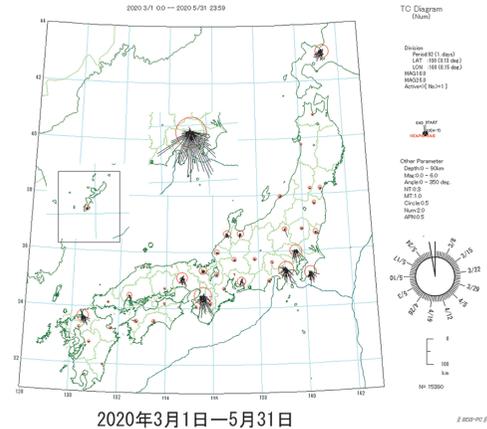


図 3 全国の都道府県別の日別感染者確認数の推移を表した図（第1波の期間（上）と第2波の期間（下）の比較図）

当なサイズのメッシュに区分して、それぞれに小さな円を描く。この円周を時計の文字盤とみなして、たとえば、1日ごとのそのメッシュの地震回数に比例した長さの針を時期に対応した方向に描くと、各地域の地震発生回数の変化を示すTC図になる。つまり、各メッシュごとの通常の日別地震回数の棒グラフを、縮小して各円周上に展開したものである。同様に、外向きの針の長さや方向で、各メッシュで発生した地震のマグニチュードと発生時期を示すTC図を描くこともできる。今回は、地震回数の代わりに都道府県別（図3）や東京都区市町村別の日別感染者確認数にこの方法

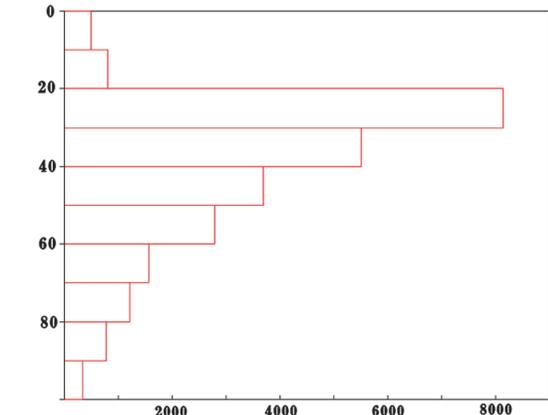
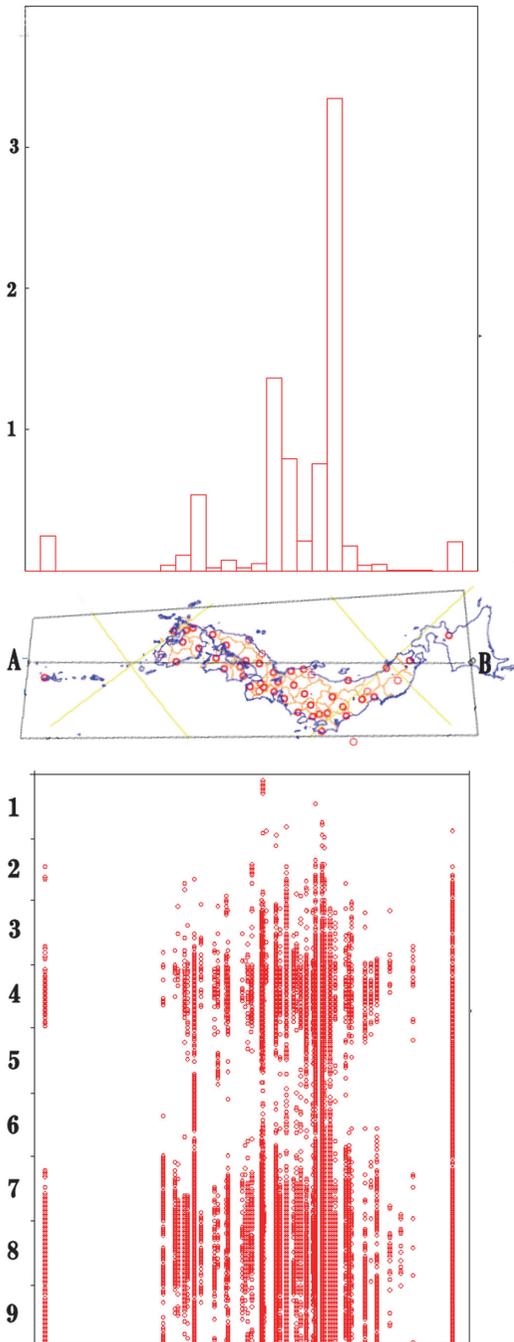


図 5 各年代別の患者数. 20代が突出して多い

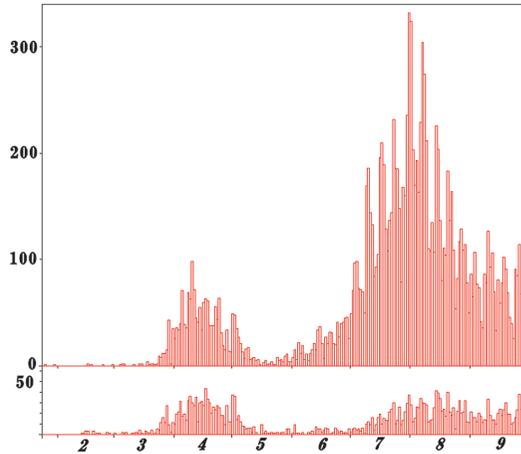


図 6 東京における感染者数の 20代, 30代 (上図) と 60代, 70代 (下図) の感染者数の日別変化. 縦軸は人数で上図, 下図とも同じスケール. 横軸の数値は月. 第二波は若い世代の感染で起きていて, 始まりも早かったことが分かる

図 4 地域別感染者数. (上段)中段の地図の直線 AB (沖縄から北海道) を 30 分割したそれぞれの带状地区内の感染者数. いちばん高いピークは東京を含む地区. 次が大阪を含む地区. 左端は沖縄で, 右端は北海道. 縦軸の単位は, 万人. (下段) 各都道府県の感染者を時間的に投影した時系列図. 横軸は中段図の直線 AB に対応. 上端が今年 1 月 1 日で, 下端が 9 月 28 日. 縦軸の数値は月. 第一波が収まっていったのは地方からだったことや, 第二波が首都圏や大阪圏から広がったことも見てとれる. ここでは空港検疫の人数は除外した

を応用したものである。その他の具体例は塩井宏幸のホームページ (http://h-shioi.la.coccan.jp/COVID-19/COVID-19_TokyoDaily.htm) や、石川有三のホームページ (<http://catfish.the-ninja.jp/event/2020corona.html>) に示されている。

また、Seis-PCには図4のように、帯状に区分けた地区内の感染者数の分布を示すことができる。図4下段図は、直線ABに感染者を投影した時系列図で、感染が空間的に収まっていった様子や、逆に拡大していった様子を分かりやすく示すことができる。図5は、各年代別の感染者数を示していて、20歳代がいちばん多いこと、高齢者は少ないことが分かる。図6は、20代、30代(上図)と60代、70代(下図)の感染者数の日別変化を示していて、第二波は若い世代での感染が主であったことが分かる。このほか、男女の違いによる感染状況の違いなども示せるが、紙面の関係で割愛した。

4. ま と め

地震活動解析ソフト Seis-PCは、ここに示したようにいろいろな現象のパラメータを震源パラメータに対応させて置き換えることで、地震活動以外の他種類のデータの解析にも用いることができる便利なソフトウェアであることを示した。

謝辞

今回作成した各種の図をホームページで公表するに当たり、塩井宏幸氏の力が大きかった。ここ

に感謝いたします。

参考文献

津村建四朗. 1993. 時系列情報を含む地震活動度分布図—時間円表示図— (地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予稿集, 225). http://h-shioi.la.coccan.jp/Earthquake/TC/T-C_DiagramPreliminaryScript.pdf

津村建四朗

[つむら けんしろう]

略歴 京都大学理学部地球物理学科卒業、理学博士。東京大学地震研究所助手、同助教授、気象庁地震予知情報課長、同地震火山部長、山形大学理学部教授、(公財)地震予知総合研究振興会副首席主任研究員などを歴任。地震調査研究推進本部地震調査委員会委員長に3期6年就任

研究分野 地震学



石川有三

[いしかわ ゆうぞう]

現職 静岡大学防災総合センター客員教授。産業技術総合研究所活断層・火山研究部門客員研究員

略歴 京都大学大学院理学研究科博士課程中退、気象研究所地震火山研究部研究室長、気象庁松代地震観測所長、同地磁気観測所長を経て2011年より現職。(公)日本地震学会副会長2期4年就任

研究分野 地震学、地震予知、テクトニクス



1920年海原地震について

司 宏俊・陳 文凱

1. はじめに

2020年の12月でちょうど100年前、1920年12月16日に中国の海原県を震源とする M_S 8.5の内陸巨大地震、海原地震が発生した。この地震の震源地とされている海原県は当時甘粛省に属していたため、甘粛地震とも呼ばれていた。この地震は多くの犠牲者をもたらし、当時各地の地方政府による統計では23万人を超える死者数となり、最も被害の大きい地震となった。現地を調査していた中国の地質学者たちは、海外で発生したリスボン地震やイタリアの地震で報告されている数万人程度の被害者を大きく超えたことに驚きを隠せなかった（翁文灝，1922；謝家榮，2007）。また地震当時の中国政府はいわゆる北洋政府で、政権は軍閥により支配されていたが、1920年7月の軍閥間の戦争により政権が交代し、そのあとも権力闘争による政治混乱が続いていた。このこともあり、地震後の1921年1月に被災地の1つである固原県から救援を要請する電報が届いたにもかかわらず中央政府による現地調査や救援活動が行われたことは報告されていない（馮銳，2018）。1921年2月ごろからようやく主に水害や干ばつなどの災害の救済で活動している国際連合救済会（United International Famine Relief Committee）が地震災害の救援にも動き、同年3月に現地調査団を組織し、現地調査が始められた。その後、4月15日より北洋政府による調査団が地質学者などにより構成され、現地調査に赴いた。

[注] 中国の省・県は、おおむね日本の県・市（または郡）にあたる。

その後、中国は北伐戦争や国内戦乱が続き、海原地震に関する調査研究はあまり進められなかったが、1958年ごろより中国地震局による本格的な調査研究が始まり、地震の断層、被災状況等本格的な研究が始められている。今年は、海原地震の100周年に合わせて、AGU 秋季大会と関連学術誌 JGR で特別セッションや特集号が企画されている。本文はこれまでに明らかにされている海原地震の概要を簡潔に紹介することを目的にしている。

2. 地震の概要

2.1 震 央

地震当時、詳細な震央位置は確定できなかったが、現地を調査したメンバーの1人である王烈氏は地震時に聞こえた地鳴りと地震による揺れがほぼ同時に報告された所が震源地という観点から海原県にあることを主張している（王烈，1921）。中国地震局などでは震源の位置を $36^{\circ}38'N$ 、 $105^{\circ}21'E$ 、震源深度約18kmと示している。最近では、Ou *et al.* (2020) が海原地震を記録した世界中の遠地記録を数値化して解析したところ、震央位置は $105.540 \pm 0.251E$ 、 $36.481 \pm 0.256N$ と推定している。また、震源メカニズムは(110, 90, 10)と推定され、傾斜角が高角である左横ずれ断層で、震源深さは6kmと浅かった。図1は海原地震の震源を概略的に赤丸でプロットしたものを示しているが、この地域はチベット高原の東縁にあり、当時でも地震が多発していた地域であることが分かる。

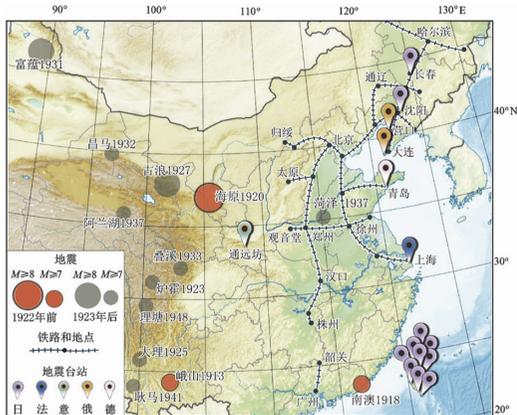


図 1 1920 年海原地震前後の地震活動の状況，鉄道の分布状況および地震観測点の整備状況 (馮銳 (2018) より引用)

2.2 海原地震の観測記録とマグニチュード

海原地震の時代においては，地震観測は日本で開発された大森地震計や欧州で開発された Wiechert 地震計が世界中に設置され観測されていた。中国でも上海，瀋陽，青島，大連と營口，台北およびその他 5 カ所に地震計が設置されていたが，海原地震の際には上海の地震計のみで観測記録が得られている。図 2，図 3 には，海原地震の観測波形の例として，Omori (1921) によりまとめられた東京での観測波形と上海における観測波形をそれぞれ示す。なお，海原地震は世界中で 96 点の観測記録が得られているが，これらの観測記録は極性などの情報を備えていなかったので十分に活用されていなかったようである。

海原地震の時代には，地震の規模を示す指標としてマグニチュードがまだ提案されていなかったが，のちに Gutenberg and Richter (1941) は世界中の表面波観測記録により 8.5 と推定している。この値は現在でも広く使われている。その後も，それぞれの研究機関によりマグニチュードが推定されている。一方，現代の地震学でよく使われているモーメントマグニチュードも観測記録に基づいて推定されているが，値の範囲は M_w 7.9~ M_w 8.3 とばらついている。最近では，Ou *et al.*

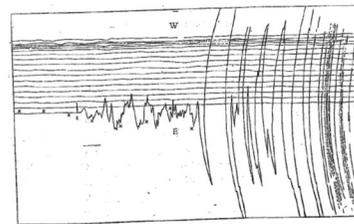
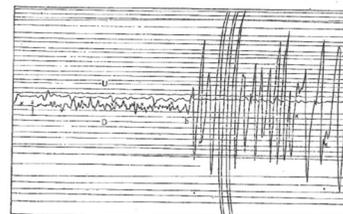
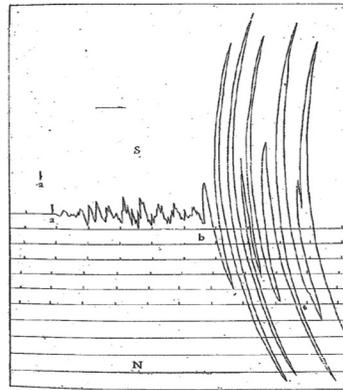


図 2 Omori (1921) による海原地震の観測波形 (「一九二〇年海原大地震」より引用)

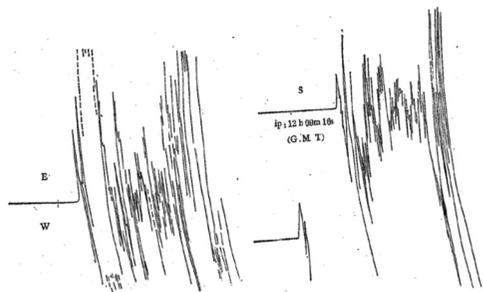


図 3 上海における海原地震の観測波形 (「一九二〇年海原大地震」より引用)

(2020) が前述のように，図 4 に示す世界中の観測記録を数値化して解析し，震央位置の決定，震

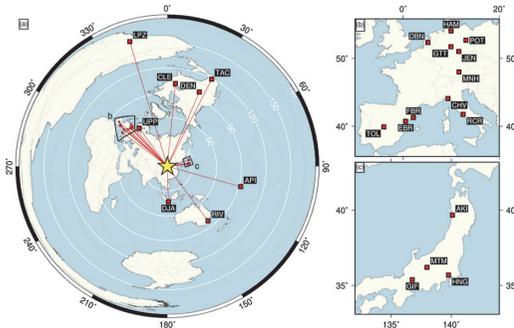


図4 Ou et al. (2020) で用いられた海原地震の観測波形を記録した観測点分布図

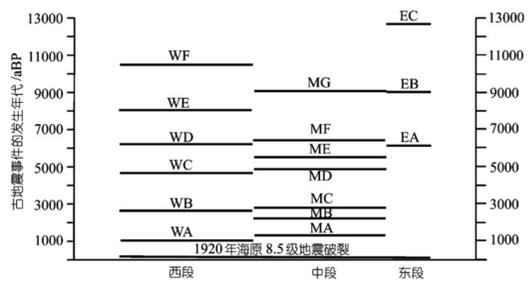
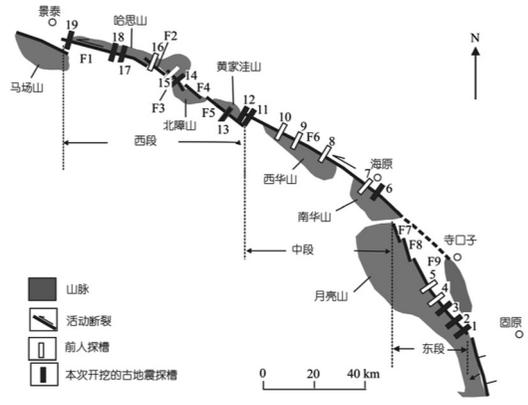


図6 (上段) 海原断層のセグメント区分とトレンチ調査箇所, (下段) トレンチ調査で判明したそれぞれのセグメントの活動歴 (張ら, 2003 より引用)

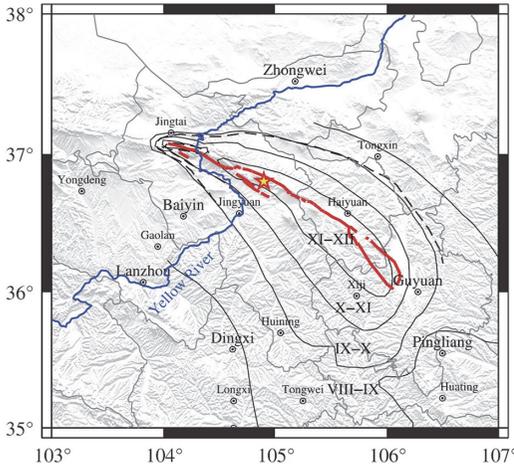


図5 海原地震に伴う地表断層と震度の分布図 (Xu et al., 2019 より引用)

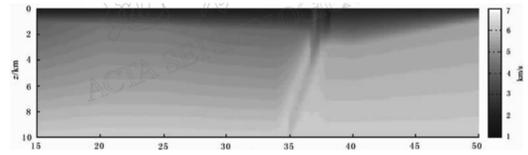


図7 弾性波探査で確認された海原県西安州付近における中部海原断層の深部形状 (樊ら, 2004 より引用)

源メカニズム解を求めるとともに、マグニチュードについても M_W は 7.94, M_0 は 7.9, M_S は 8.1 と推定している。

2.3 震源断層

海原地震に伴う地表断層は地震発生 30 年後の 1950 年代から始めた調査によって 237 km 程度の長さ に及んでおり、地震に伴う最大断層変位は 10.2 m 程度であることが確認されている。図 5 に示す赤線は確認された地表断層の位置を示すものである。図 6 には海原地震を引き起こした海原断層のイラストを示す。図 6 上段では、海原断層が西部、中部および東部の 3 つのセグメントに分け

られ、これらのセグメントに対してトレンチ調査を行い、活動歴が調べられた。その結果は図 6 下段に示すように、約 12,000 年前に東部断層が活動し、それ以降それぞれのセグメントは数回活動したのち、1920 年海原地震においては 3 つのセグメントが同時に動いたとされている (張ら, 2003)。

また、海原断層の地下深部における形状についても調べられており、その結果を図 7 に示す。こ



図 8 海原県城における被害の様子。建物は鐘楼と洞窟 1カ所以外はすべて倒壊したようである（写真は鄧，2011 によった）



図 9 固原県役所玄関部分の被害（謝，1922）



図 10 隆徳と固原の間にある瓦亭における建物の被害状況。一部は修復して利用しているが耐震性のない建物にしては被害が比較的軽く見える（Close and McCormick, 1922）

の図から、調査地における海原断層は深部において約 70° 傾斜していることが分かった。

2.4 海原地震による被害

1920 年海原地震により当時の甘粛省をはじめとして陝西省などでは深刻な被害を受けた。図 5 は中国地震局で調べた当該地震の震度分布図を示している。中国で採用されている震度は修正メルカリ震度とほぼ同様で、最大震度は 12 度になっているが、海原地震は震度 12 が報告されている唯一の地震とされている。震度の決定は、震度の定義に基づき、(1) 地表変形分布；(2) 建物倒壊などの被害状況；(3) 地形的な改変状況などによって行ったと思われる（国家地震局蘭州地震研究所・寧夏回族自治区地震隊，1980，以降中国地震局（1980）として引用）。図 5 から、地表断層の周辺では震度が大きいことが分かる。また、被害地域の北部では震度の減衰が大きいのに対し、南部では、減衰が小さく、震度の大きい地域の面積が広いことが分かる。

海原地震による人的被害は甚大なものであった。現地調査した地質学者謝家栄氏によれば、甘粛省だけでも 234,117 人にのぼると集計されている（謝，2007）。近年では、劉ら（2003）が甘粛省以外の被害も含めて既存の資料をもとに再検討したところ、地震による死者数の中央値は 273,465 人になり、当時もっとも被害の大きい地震であることが分かった。また、家畜などの被害は 1,104,068 頭になり、家屋の倒壊は 590,635 棟以上になるとも報告されている。被害の直接要因は地震動による建物の倒壊による死者と黄土高原における山崩れや斜面崩壊などによるものと報告され、特に死者数の半数近くが後者によるものとの報告もあり（許ら，2018）、海原地震の特徴の 1 つとされている。また、Close and McCormick (1922) による現地調査の結果では、固原県の南では山崩れや斜面崩壊による被害が大きい、それより以北では振動による建物の被害が主であることを示唆している。

また、被害が大きくなってしまった原因として

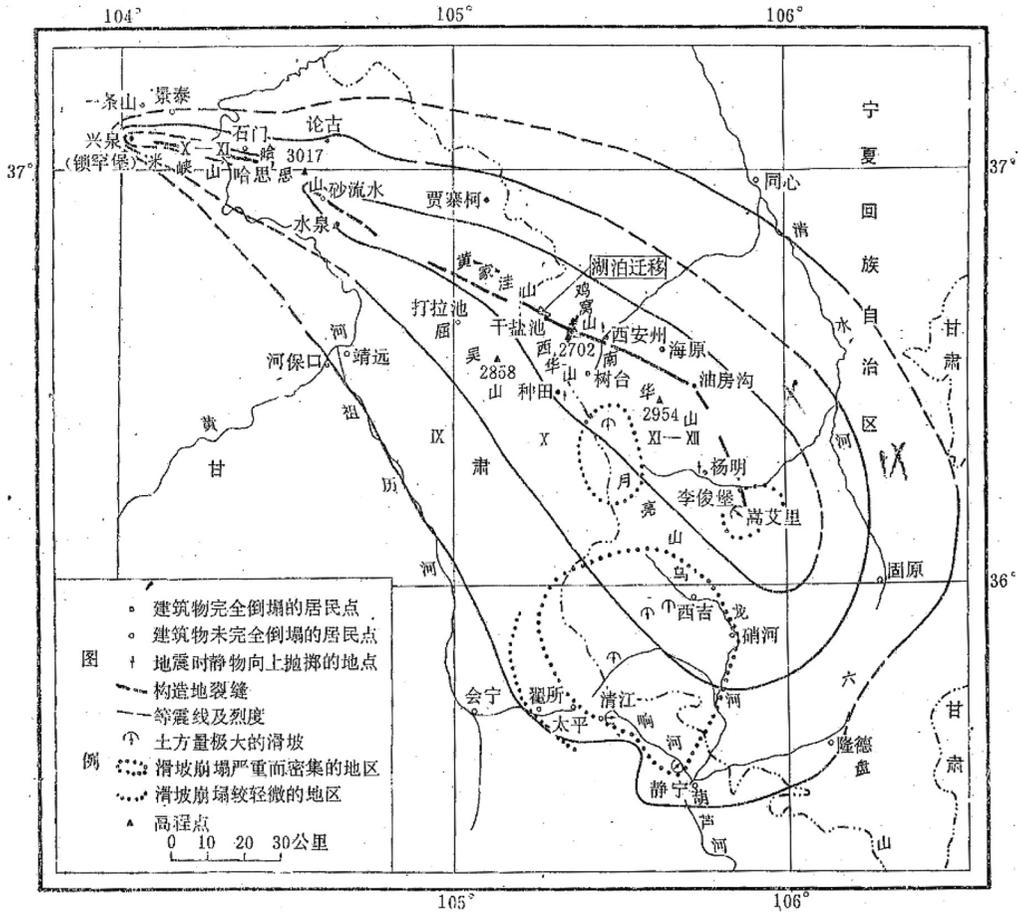


図 11 震度分布と主な斜面崩壊（点線で囲んだ地域）の位置図（中国地震局（1980））

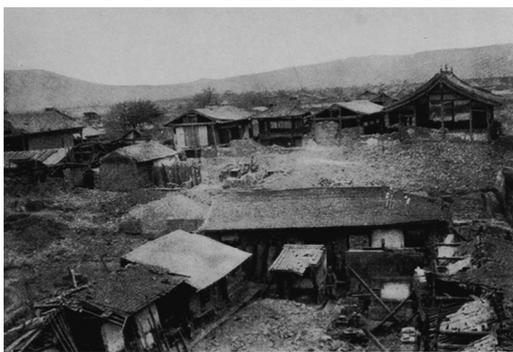


図 12 隆徳県の役所における被害の様子。知事は失踪、知事夫人は犠牲になったようである (Close and McCormick, 1922)

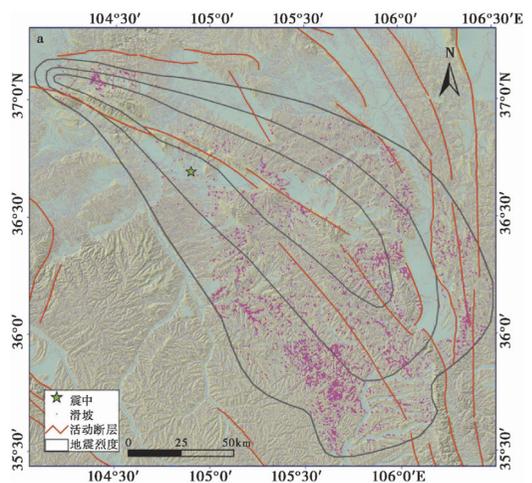


図 13 許ら（2018）により推定された海原地震による深い斜面崩壊の分布



図 14 Close and McCormick (1922) により撮影された、村が斜面崩壊で埋められた事例。災害を逃れた人たちは簡易のテントで生活している



図 16 静寧付近で発生した斜面崩壊により形成されたダム湖 (Close and McCormick, 1922)



図 15 静寧付近で発生した山崩れと斜面崩壊 (Close and McCormick, 1922 より引用)

は、(1) 地震の規模が大きく、震度の大きい地域の面積が広いこと、(2) 多くの住民が黄土高原に掘削された洞窟を住居として利用しているか、建物も多くは土などの素材で建設され、住居の耐震性はかなり低かったことが主な要因と考えられている (中国地震局, 1980)。

図 8 に、地震断層に最も近い海原県城の写真を示す。県城にある建物は鐘楼と洞窟一カ所以外はすべて倒壊したようである。また、証言によると、市内では石の跳躍現象も報告され、揺れの激しさ

を物語っている。地震後海原県城は移設されている。図 9 に海原県の南に位置する固原県役所の玄関口部分の被害の状況を示す。固原県内の建物の多くは比較的堅牢だったようで、被害も比較的軽かったようである。

図 10 は固原県城より南西方向へ下り、図 11 の右下に位置する隆徳と固原の間にある瓦亭という集落の建物の写真を示しているが、耐震性が低いにもかかわらず建物が立っている様子がかげえる。さらに南西方向に下った隆徳県役所の様子を図 12 に示すが、倒壊を免れている建物も多数存在することが分かる。

図 11 は震度 9 以上の激震区の震度分布と山崩れや斜面崩壊の位置図を示し、図 13 には Google earth と衛星映像を用いて推定された斜面崩壊の分布図を示している。これらの図から、主な斜面崩壊は海原県城より南方にあることが確認できる。図 14 は Close and McCormick (1922) の調査で分かった、村が斜面崩壊の土砂で埋められた後の様子を示している。

図 15 と図 16 は Close and McCormick (1922) の調査で見つかった大規模な斜面崩壊の様子と、斜面崩壊でできたダム湖の様子を示している。

3. ま と め

1920 年海原地震は 20 世紀に発生した世界の地

震で被害がもっとも大きい地震であり、今年でちょうど100年になる。地震後多くの研究者の努力により、地震像と被害の状況は分かるようになったが、まだ課題がたくさん残されていると感じている。同様な地震がふたたび起きても被害を最小限に抑えるために、海原地震で得られた教訓と知見が活用されることを期待する。

参考文献

- Close and McCormick. 1922. When the mountains walked. *Nat. Geogr.*, **XLI**, 445-463.
- 鄧 起東. 2011. 在科学研究的實踐中學習和進步. 地震地質, **33**, 1-14.
- 樊 計昌・李 松林・張 先康・劉 明軍. 2004. 海原断裂在地殼深处的幾何形状及其動力学意義. 地震学報, **26** (増刊), 42-49.
- 馮 銳. 2018. 中国近代地震学史綱要. 中国地震, **34**, 172-206.
- 国家地震局蘭州地震研究所・寧夏回族自治区地震隊. 1980. 一九二〇年海原大地震, 1-134.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F. 1941. Seismicity of the Earth (Special Papers, Number 34). New York, Geological Society of America.
- 劉 百箴・張 俊玲・吳 建華・郭 華. 2003. 1820年12月16日海原8.5級大地震的傷亡人口再評估. 中国地震, **34**, 172-206.
- Omori, F. 1921. Note on the Kansu Earthquake of Dec. 16, 1920. 震災予防調査會觀測録, 大正10年11月, 第一號.
- Ou, Q., Kulikova, G., Yu, J., Elliott, A., Parsons, B. and Walker, R. 2020. Magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake reestimated using seismological and geomorphological methods. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **125**, e2019JB019244. doi:10.1029/2019JB019244
- 王 烈. 1921. 調查甘肅地震之報告, 1921年6月23日晨報.
- 翁 文灝. 1922. 調查甘肅地震大略報告. 寧夏回族自治区地震局による「寧夏回族自治区地震歴史資料彙

編」.

- Xu, X., Zhang, Z., Hu, F. and Chen, X. 2019. Dynamic rupture simulations of the 1920 Ms 8.5 Haiyuan Earthquake in China. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **109**, 2009-2020. doi: 10.1785/0120190061
- 謝 家榮. 2007. 民国九年十二月甘肅地震報告. 謝家榮文集, 第1卷, 地質学 (一), 北京, 地質出版社, pp. 33-74.
- 許 冲・田 颖颖・馬 思遠・徐 錫偉・周 本剛・吳 彦・庄 建琦・高 玉欣・吳 熙・黄 学強. 2018. 1920年海原8.5級地震高烈度区滑坡編録与分布規律. 工程地質学報, **26**, 1188-1195.
- 張 培震・閔 偉・鄧 起東・毛 鳳英. 2003. 海原活動断裂帶的古地震与強震復發規律. 中国科学D輯: 地球科学, **33**, 705. doi: 10.1360/zd2003-33-8-705

司 宏俊

[し こうしゅん]

現職 株式会社サイスマ・リサーチ代表取締役/東京大学地震研究所外来研究員, 博士 (工学)

略歴 株式会社構造計画研究所技術担当, 室長, 東京大学地震研究所特任研究員, 東京工业大学総合理工学研究科特別研究員を経て現職

研究分野 強震動地震学



陈 文凯

[Chen, Wenkai]

現職 中国地震局蘭州地震研究所副研究員, 理学修士

略歴 M8.0四川地震, M7.1青海玉樹地震, M6.6甘肅岷県地震, M6.4青海門源地震, M7.0九寨溝地震の際の応急対応, 災害損失評価および震度分布図作成などを担当

研究分野 GISとリモートセンシングを活用した地震災害応急対応



迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい

横山裕道

1. 大きな転換点となった報告書

東海地震説が1976年に唱えられ、国は法律（大規模地震対策特別措置法＝大震法）まで作って東海地震の直前に警戒宣言を出すことを目指した。その後、かつて夢見たピンポイントの地震予知は困難であることが分かってきた。現在は「地震発生の可能性の高まり」を捕らえて南海トラフ地震の臨時情報を出す仕組みに大きく変わった。新しい仕組みが複雑で分かりにくいこともあり、自治体や住民が戸惑っている。一方でこの間、民間人の科学的根拠のない予知予測がはびこるようになり、地震予知が迷走を続けている印象を与える。なぜこんなことになったのか。

毎日新聞記者や大学教員として一連の動きを追いつけてきた筆者は、中央防災会議・南海トラフ巨大地震対策検討WGの「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（南海トラフ調査部会）」が2013年5月にまとめた報告書が大きな転換点となったと理解している。この報告書は「南海トラフ沿いの大規模地震の規模や発生時期の予測は不確実性を伴い、直前の前兆すべりを捕らえ地震の発生を予測するという手法により、地震の発生時期等を確度高く予測することは、一般的に困難である」と結論づけた。これまで予知を目指したのは東海地震だけであり、その東海地震を含め予知は一般的に困難だと専門家として初めて打ち出したのだ。

ところが報告書はこうも述べる。「ゆっくりすべりが拡大しているなど、プレート間の固着状態に普段と異なる変化が観測されている時期には、不確実ではあるが、地震が発生する危険性が普段

より高まっている状態にあるとみなすことができる」。この中の「危険性」は後に「可能性」に置き換えられる。「地震発生の可能性の高まり」は正に地震の予知予測にわずかながら可能性を残したものだ。これによって地震予知の終焉とはならず、問題をいっそう複雑にした感がある。

2. 南海トラフ「可能性の高まり」の3例

警戒宣言の発令とはいかなくても、政府が何らかの形で「可能性の高まり」の情報を出せるならば、津波危険地域などの人びとは安全な場所に逃げる準備をするなど被害軽減に役立つ可能性がある。さらにいえば、東海地震の予知の全面否定でない点も、大震法を制定した政府には都合だろう。信じたくはないが、「可能性の高まり」を持ち出したのは、地震予知の夢を追った内閣府（防災担当）や気象庁が仕組んだつじつま合わせ・責任逃れだったのでは、という思いがよぎる。

そして「可能性の高まり」はその後の議論で重要な意味を帯びてくる。まるで最初から筋書きができていたかのような。一連の報告書を受け、政府は2019年3月、大震法に代わる「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）」を作成した。南海トラフ地震の発生可能性が高まった場合に自治体や企業、住民がどう防災対応したらいいのか、にスポットを当て、地域での今後の検討の参考とした。

防災対応を取るケースとして、ガイドラインは①半割れケース＝南海トラフの想定震源域内で大規模地震（M8クラス）が発生し、残りの領域で大規模地震の発生可能性が高まったと考えられる。②一部割れケース＝大規模地震に比べて一回

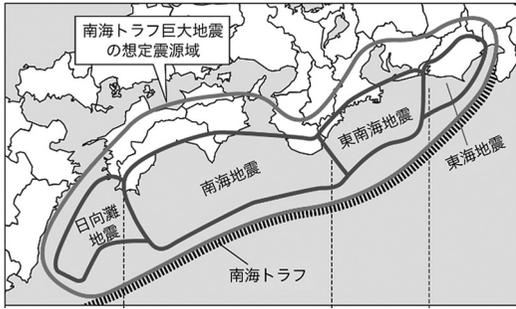


図 1 南海トラフ巨大地震の想定震源域（『いま地震予知を問う』（化学同人）から）

り小さな地震（M7 クラス）が発生した後に、より大きな M8 クラスの地震が発生する可能性がある。③ゆっくりすべりケース＝基準を超えたひずみ計の変化を捕らえることでプレート境界面の大きなすべりが観測され、前例のない事例として学術的に注目され、社会的にも関心を集めている、の3つを示した。

半割れケースでは気象庁が南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）を発表し、一部割れケースとゆっくりすべりケースは臨時情報（巨大地震注意）をだす。半割れケースでは津波の危険性が高い地域としてあらかじめ定められた「事前避難対象地域」の住民に1週間程度の避難を呼びかける。一部割れケースでは一部の沿岸地域の住民は避難を開始するなど1週間を基本とした防災対応をとり、ゆっくりすべりケースでは住民は一定期間、地震への備えの再確認などを行う。

南海トラフ調査部会の報告書では「可能性の高まり」はゆっくりすべりケースだけをあげたが、その後、あまり議論がないまま半割れケースと一部割れケースが加わった。ゆっくりすべりケースに代わって半割れケースが主役となり、ガイドラインではその記述が大部分を占める。

3. 疑問が多い半割れケース

想定震源域の東側（あるいは西側）で M8 級の巨大地震が発生する半割れケースはいくつか問題

がある。これは予知の失敗なのだが、そのことは表面にはでてこない。すでに南海トラフ地震の1つが発生し、太平洋側全域に大津波・津波警報がでていいる。各地から甚大な被害が報告され、余震も頻発して日本中が騒然としている。そんなときに「残り半分も危ない」と臨時情報（警戒）をだす意味があるのか、との疑問がつきまとう。

しかも気象庁が臨時情報をだすのは最初の地震の発生から最短でも2時間後。専門家による南海トラフ地震評価検討会で検討するから時間がかかるのだ。臨時情報を待って自治体などの防災対応が動き出すが、時間差をおかず次の大規模地震が発生する可能性が少なからずあるため、2時間のタイムラグが津波危険地域の住民の避難を遅らせ、致命傷になるケースも考えられる。半割れケースを「可能性の高まり」に含めた弊害だろう。半割れケースはいつ M9 の南海トラフ巨大地震に発展してもおかしくないと考え、気象庁が業務として対応すべきだ。それなら問題は少ない。

一部割れケースは東日本大震災を起こした東北地方太平洋沖地震（M9.0）の2日前に M7.3 の地震が起きたことを教訓にした。もともと南海トラフの想定震源域内で M7 クラスの地震が発生すれば、南海トラフ地震との関係が大きな関心と呼ぶものだが、そんな前触れがあるとは限らない。ゆっくりすべりケースは、気象庁が前兆現象としてキャッチし、東海地震の警戒宣言に結び付けようとしたものだ。本来なら「可能性の高まり」の主役なのだが、ゆっくりすべりの拡大や加速がかりに観測されても、大地震直前の前兆すべりかどうかの評価は難しいと分かり、脇役に回された。「地震予知は一般的に困難」という結論を受けたものでもある。静岡県などの自治体はゆっくりすべりケースで防災に役立つ情報がでることを期待していたので、肩すかしを食った格好だ。

4. 難航する自治体の防災対応

国の中央防災会議（会長・首相）は2019年5

月、防災対応検討ガイドラインの作成に伴って南海トラフ地震防災対策推進基本計画を修正した。南海トラフ地震が発生した場合の災害応急対策の基本的方針に「初動体制の確立」の項目が加わり、「南海トラフの想定震源域内において M8.0 以上の地震が発生したときは、内閣総理大臣は、ただちに閣議を開催し緊急災害対策本部を設置する」などと記述された。指定行政機関や都道府県など自治体が作成する地震防災対策推進計画の基本となる事項に新たに「時間差発生等における円滑な避難の確保に関する事項」が入り、市町村が推進計画に事前避難対象地域を示すとともに、後発地震に備えて一定期間避難生活する避難所、避難経路、避難実施責任者等を含む津波被害の特性に応じた避難計画を明示するよう求めた。

ガイドラインの内容をこと細かに推進基本計画に盛り込んだが、それに伴う自治体の作業は難航している。南海トラフ地震で深刻な津波被害が予想され、津波避難対策特別強化地域に指定された 14 都県 139 市町村は 2020 年 3 月までに事前避難対象地域を指定し、推進計画を作り直すことを求められたものの、4 月時点で 6 割が未指定だ（朝日新聞 2020 年 4 月 27 日朝刊）。新たに避難所の新型コロナウイルス対策問題も浮上した。一方、これらの自治体は被災後のまちづくりに向けて前もって体制や手順などを定める「復興事前準備」の策定も必要なのだが、2019 年末時点で 8 割が未策定と分かった（毎日新聞 2020 年 4 月 10 日朝刊）。

5. はびこる村井氏らの民間予測

直前予測による警戒宣言から「可能性の高まり」を捕らえた臨時情報に、その変化への対応に人手やノウハウのない自治体側は苦慮し、南海トラフ地震を迎え撃つ体制は整わない。地震予測の迷走がもたらした 1 つの側面だ。こんな間隙を縫うように地震のいい加減な民間予測が幅をきかせる。ツイッターなどでは「1 週間以内に M0 の地

震が発生」「どこそこが危ない」などの情報が飛び交い、それに大勢の人が「いいね」や「リツイート」で反応する。「地震を研究している学生」が英雄気取りで予測を披露する例もある。

民間予測の代表は村井俊治東大名誉教授だろう。同氏が会長の株式会社地震科学探査機構（JESEA）は有料会員約 5 万人を抱えるまでになった。同社は 2013 年 1 月に設立され、9 月から本格的な地震予測を始めたというから、南海トラフ調査部会が「地震予知は一般的に困難」とする報告書をまとめた時期（同年 5 月）と重なる。測量工学が専門の村井氏は測位衛星による国土地理院の電子基準点データを基に地震を予測する。そのデータはさまざまなノイズ（天候や周辺樹木の影響）で変動するが、それを実際の地殻変動とみて「危ない地域」を列挙する。最近では地震の AI 予測や地震雲にもご執心だ。

当然当たらないが、週刊ポストや夕刊フジ、フジテレビなど一部メディアが村井予測の応援団となり、「的中率 85%」などと報じるため騙される人が多い。一方で大手紙や NHK は村井予測のデータメブりを知りながら、報道しようとしなない。日本地震学会や気象庁は見ても見ぬふりをするし、データを悪用される国土地理院も何も言わない。村井氏が長く会長を務めた日本測量協会は、同氏の地震予測の講演会を CPD（技術者の継続教育）認定プログラムにしたりする。NTT ドコモやまぐまぐは村井氏を側面支援している。

村井問題を何とかしたいと思った。2020 年 2 月に読売テレビのバラエティ番組「そこまで言って委員会 NP」（関東は放送なし）から、地震予知をテーマに取り上げるのでゲスト出演してほしいと依頼があった。ニジを見て地震を予知するという民間人の椋平広吉さんのトリックを 1976 年に見破ったことを話すのが筆者の主な役割。それよりも東大名誉教授の肩書を利用した現代の村井氏のほうがずっと悪質と考え、収録ではそのことに言及した。だが放送では固有名詞の部分は削られ、同氏を称賛するメディアの名前も出なかつ



写真 1 「そこまで言って委員会 NP」の一場面（中央が筆者）



写真 2 地平ニジについて報じた1976年9月26日毎日新聞朝刊

た。「そこまで言ったのに」と残念なのだが、テレビ局側は波風を立てたくなかったのだろう。村井氏告発に横たわる「厚い壁」を実感した。

6. 「地震予知はできない」の徹底を

地震予知不可能論で知られるロバート・ゲラー東大名誉教授が同番組の準レギュラーで、その日も出演した。国が南海トラフ地震の今後30年以内の発生確率を70~80%としていることをまったく意味がないと否定し、予知予測に取り組む専門家を「御用学者」と批判。筆者は「御用学者はやめましょうよ」と言い返し、テレビ局側は画面

に「激論！ゲラー VS 横山」の字幕を入れた。筆者には村井氏、ゲラー氏の両東大名誉教授が地震予知の実像をゆがめていると思えてならない。

気象庁は2020年6月から、産業技術総合研究所が和歌山、高知県など12カ所に設置したひずみ計のデータを活用し始めた。ゆっくりすべりケースで臨時情報をだすには、東海地方周辺のひずみ計だけに頼るのでは限界があり、当然の措置だろう。内閣府や気象庁は、直前予知から「可能性の高まり」という不確実な予測に変わったことが社会に知られていないことや、防災対応検討ガイドラインの内容が難解なことを考慮し、十分な説明を行うべきだ。事前避難対象地域の指定などに四苦八苦する自治体の支援も必要だろう。

大震法はもとより、新たな南海トラフ地震評価検討会と一体運用されている地震防災対策強化地域判定会は速やかに廃止すべきだ。一足早く気象庁の地震予知情報課はなくなった。大震法に基づく地震防災対策強化地域の指定も早急に解除すべきだろう。国と地震学者が協力し、かつて夢見た日時を特定するような地震予知はできないことを一般の人にしっかり理解してもらうことが欠かせない。そうした努力によって民間予測の出番をなくしてほしい。このままでは南海トラフ周辺で小さな地震が頻発するなど、いざという時に社会に混乱をもたらしかねない。

横山裕道

[よこやま ひろみち]

現職 科学・環境ジャーナリスト

略歴 東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。毎日新聞社会部、科学部、科学環境部長、論説委員、淑徳大学教授、客員教授などを経て現職

著書 いま地震予知を問う 迫る南海トラフ巨大地震（化学同人）、気候の暴走 地球温暖化が招く過酷な未来（花伝社）、さまよえる地震予知 追いつけた記者の証言（紫峰出版）他



地震記者の回想—2—

長い記者生活で、研究者、行政マンなど大勢の人たちとのふれ合いがあった。

石橋克彦さん（当時、東京大学助手）が東海地震説を公表したのは1976（昭和51）年。この年9月、石橋さんは「駿河湾を震源に大地震発生の恐れ」と地震学会で発表した。学会を取材したわたしは石橋さんにSBS（静岡放送）に出演してほしいとお願いした。

翌月、石橋さんがスタジオにきた。ともに出演するのは、静岡県行政が東海地震を担当する部署として新設した地震対策班の班長越井一郎さんだった。番組前の打ち合わせで越井さんが石橋さんに質問した。「若いあなたが教授になる頃までには、地震は来るだろうな」と。石橋さんの答えはなかった。越井さんはすでに他界した。石橋さんは神戸大学の教授を定年退官している。人間生活と地球の“物差し”の違いをつくづく感じる。

静岡県地震対策班は、翌年「地震対策課」に格上げされて、本格的に大地震対策が始まった。越井さんが初代課長になった。地方自治体の組織で「地震」の名が付いたのは全国初だった。越井さんの立ち振る舞いはユニークだった。プロ野球・巨人軍の熱烈なファンだ。部下の職員が決裁文書をもたらすには、ちょっとしたテクニクが必要だった。「昨日のナイターは巨人が勝った。決済承認のチャンスだ」巨人が勝つと越井さんは上機嫌だ。勝った翌日は課長の決裁文書箱がいっぱいになる。わたしたちメディアの取材ももっぱら巨人が勝ったときにする。勝つと多弁だった。ある朝、出勤した越井課長の姿を見て課員が驚いた。「おい、課長がネクタイを2本しているぞ」。無頓着でおおらかな人だった。朝、出勤準備にネクタイを締めたのを忘れてもう1本ネクタイを結んで出勤した。ネクタイを2本結ぶのは“高度な技術”が必要だ。越井さんは山本敬三郎知事からの難し

い課題を手際よく解決した。静岡県の地震対策を強力に推し進めた原動力は、このユニークさから湧き出したものだろう。

その山本知事もユニークな存在だった。情報収集力が抜群だったから、県議会議員からは煙たがられた。山本知事は県議会の答弁で「地震予知はできるのです」が口癖だった。地震予知に対して、研究者、行政、住民ともに“バラ色”の期待を寄せていた時代のことである。山本知事は“電話魔”だった。わたしもしばしば知事からの“電話攻勢”を受けた。夜、自宅に「山本ですが」と電話がかかってくる。知事からは思わないから最初は驚いた。山本さんは熱心に質問する。「地震予知連で、きょう萩原尊禮先生がいったことを、あなたはどう思いますか。」「浅田 敏先生の考えを記者としてどう受け止めますか」と質問は厳しい。

山本さんは旧制静岡高校の出身。浅田さんも同じ静岡高校だから頻繁に情報交換していた。中曽根康弘さんも静岡高校出身で、地震対策の進め方についてしばしば意見を聞いていたらしい。「大規模地震対策措置法」が成立しても、財政的な裏打ちがなければ地震対策は進まない。「財政特例法」を作って諸々の対策を進める必要がある。しかしその制定に大蔵大臣がウンと言わない。業を煮やした山本知事は田中角栄宅に出向いた。山本さんの大親分の角栄さんに地震財特法の制定に力を貸してほしいと懇願した。角栄さんは山本さんの目の前で竹下大蔵大臣に電話した。「竹下君、山本君が困っているよ」といった。これが良かったと山本さんはいう。他県の知事と手を組んだり、あるときは財界人を巻き込んで、さまざまな方策を考えて大地震対策を進めた。後日、知事引退後の山本さん宅を訪ねた。引退後に住む伊豆高原のマンションで語ってくれた。書斎の机の上には地震の本が置いてあった。引退後も「東海地震はい

つ来るんですかね」と気にかけていた。

静岡県には「地震市長」と呼ばれる地震熱心な首長がいた。大津波被害の恐れがある焼津市の市長、服部毅一さん（在任 1975～1991 年）である。夜間抜き打ち防災訓練をしばしば企画した。市民も防災には積極的だ。「どこまで逃げれば津波に追いつかれないか。市長、今からやってみよう」と、地震対策は大きく進んだ。

山本知事は地震予知連絡会会長の萩原尊禮先生を頼りにしていた。静岡県庁を訪れる萩原さんの姿が、しばしば目撃された。地震予知連絡会の会長、地震予知総合研究振興会の理事長としてお元気な日々だった。萩原さんは、東京・北区の自宅から神田美土代町のオフィスに通っていた。仕事の息抜きと称して、奥さんの目を避けつつウイスキーを傾けることがあった。その席には、たいてい力武常次さんが一緒だった。グラス片手に会話が面白かった。わたしが地震予知振興会を訪れたある日の会話はこうだ。

某日、宮内庁から「萩原先生に質問です」と電話があった。「大きな地震は小さな地震を数多く発生させることで肩代わりできるでしょうか」というのだ。陛下（昭和天皇）からのご質問だという。「それは難しいことです」と萩原さんは答えた。しかし陛下はなおも「できるだろう」とおっしゃる。下々のわたしたちが考えることと同じだ。電話による数度のやりとりの結果、萩原さんは皇居に出向いてご進講することになった。この話に力武さんが口をはさんだ。「陛下は生物学がご専門だから、対数でものを考える地震学は難しいな」と。大きな被害を及ぼす地震などの自然災害に、日ごろから深い関心をよせられる陛下のお気持ちがにじみ出るエピソードだ。

別の日、萩原さんと 1935 年静岡地震の話になった。萩原さんは「卒業後、初めて余震観測に出かけたのが静岡地震だった」という。「こ

の地震で、倒壊した煉瓦の下敷きになってお子さんが亡くなった。ご遺族がその香典を地震研究所に寄付してくれたので観測計器を揃えた」という。その話からしばらくたって、わたしは、地震の犠牲になったお子さんの法要を行うという話を聞き込んだ。萩原さんにその話をしたところ、「墓参りしたい」という。萩原さんは法要の日、静岡を訪れた。そのエピソードを交えて墓参りをテレビニュースで放映させてもらった。

萩原さんの自宅をおたずねしたこともあった。書斎の本棚などは壁面にしっかり固定されていた。地震対策は万全、萩原さんは地震対策を実践する人だった。

浅田 敏さんも静岡県の地震対策に欠かせない人だった。子どもの頃から機械いじりが大好きだったそうだ。マイカーは軽自動車のスバル 360。メカニックなところが気に入っていた。おっとりした性格が物腰ににじみ出た人だった。こんなことがあった。ある年の地震学会でのこと。休憩ゾーンでコーヒーを飲んでいると浅田さんがきた。朝一番の学会会場は閑散。コーヒーポットの前にお盆が置いてあり、その上には 10 円硬貨 2 枚がのっていた。浅田さんがいった。「学会の担当者は気が利いていますね」と。浅田さんは続けた。「コーヒーは 30 円です。お盆に最初から 20 円置いてあるのは、50 円硬貨でも最初からおつりがある」。なるほど、浅田さんらしい頭のひらめきだ。おおらかな研究者浅田さんらしい発想だと感心した。気象庁で地震判定会が終了すると、つづいて記者会見が行われる。記者会見室の前で待っていると、浅田さんが小声でささやく。「川端さん、今月は何も面白いことはありませんよ」と。何かあると面白いのだろうか、それは微妙なのだが

川端信正（元静岡放送）

■ 書 評 ■

● 津波から身を守るために 知っておきたい情報

今村文彦 著

逆流する津波—河川津波のメカニズム・脅威と防災—

評者 谷岡勇市郎

2011年東日本大震災の経験を生かしながら進展してきた最新の津波予測技術、津波工学研究、防災減災研究を踏まえ、津波工学研究の第一人者である著者が、津波の脅威と防災について河川津波の観点から分かりやすくまとめた本である。タイトルからは一見、河川津波に特化した著書のように見えるが、津波の基礎から観測技術・予測技術・計算方法・津波防災技術から避難行動指針まで丁寧に一般向けに書かれている。津波災害の軽減について知識を得たい方々や、津波災害の危険性のある沿岸に住んでいる方々に読んでいただければ、多くの人々の防災意識を高めることができると期待される好著である。

第1章では、津波とは何かについて、その発生から伝搬、遡上にいたる一連の挙動を、実際に発生した津波を例にあげながら分かりやすく説明している。第2章では本書のメインである河川を逆流する津波の発生と伝搬の特徴、またその脅威について実例を示しながら書いている。さらに東日本大震災で明らかになったヘドロを巻き込んだ黒い津波が越流・遡上してきた場合の脅威についても分かりやすく説明している。第3章では津波が及ぼす被害について詳しく書いている。河川津波のみならず堤防や防潮堤を越流し、遡上してくる津波が構造物や家屋さらには人間に及ぼす被害を、津波の高さや流速を指標として、実際の被害状況や避難状況と比較することで、分かりやすく説明している。さらに、時には津波による災害だけが発生するのではなく、火災・土砂災害・原発事故など複合的な災害が発生し、緊急対応を困難にすることが事例を基に示されている。第4章では現在の津波観測設備についての説明とともに津波予測のしくみについて書いている。津波予測に用いられる数値計算についての一般的な説明から気象庁の津波予測システムの

解説まで分かりやすく書かれている。さらに国や自治体においてハザードマップを作製する上で重要な浸水予測計算について紹介するとともに、津波による土砂移動を含めさらに高度化した数値計算の重要性にも触れている。第5章（最終章）では、津波、災害に対する防災・減災について多角的に書いている。東日本大震災の経験から著者が先頭に立って取り組んできたテーマであり、最も多くの紙面が割かれている。まず、津波から避難するプロセスとして、①災害・危険情報入手する、②危険を認知して行動に移す、③安全に避難する、の3段階があることを示し、それぞれのプロセスがどれだけ迅速にかつ的確に実施することができるかにより、津波来襲時の生死が分かれることが書かれている。次に車避難の危険性、避難を的確に実施するための認知マップ修正の重要性、津波緊急避難ビルの設置手法、防災施設としての防潮堤・防波堤の設置基準とその限界、多重防御による安全な沿岸地域づくり等、さまざまな角度から防災・減災対策を進めることの重要性が示されている。さらに、それらを踏まえ、リアルタイム情報に基づき最適な経路を的確に把握するための避難訓練を提案している。またそのために開発された最新の携帯アプリも紹介されている。最後に震災の経験や教訓を伝承するための取り組みを紹介し、その重要性を説いている。

本書に書かれた情報はすべて津波の防災・減災に重要なものであり、津波災害が懸念される沿岸の住民の方々が防災に携わる方々に読んでいただき、避難訓練などの実際の減災対応に役立ててほしい。

<成山堂書店、2020年3月、A5判、160頁、2,000円＋税>

[たにおか ゆういちろう 北海道大学地震火山研究
観測センター教授]

● 日本の大地震を知る

山川 徹 著・寒川 旭 監 地図でみる 日本の地震

評者 鶴岡 弘

地震防災をはじめするためには、「日本の過去の大地震を知ることによりはじまる。」が、この本のコンセプトです。地震の歴史を知ることにより、これから起こるで

あろう首都直下地震や南海地震等への備えのヒントを学んでもらうことが著者の考えです。そのため、過去に日本で起きた大きな地震を網羅し、飛鳥時代679年の筑紫地震から2019年の山形県沖地震まで数多くの地震の特徴を8つの地域別に解説しています。子供ができる防災対策を念頭においた本であるとのことですが、多くの皆様に日本の過去の大地震を知るためのよい本となっています。特徴は、青を基調とした親しみやすい地図の絵をふんだんに用いて日本における過去の大地震を丁寧に解説している点です。各地域の地震活動の特徴は落ち着いた赤の文字で1ページあるいは2ページでまとめ、データの説明は黄色で色分けするなど、カラーを効果的に使っているのも印象に残る本です。2011年東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）から解説がスタートして、震度7の揺れが2度襲った2016年熊本地震で締められています。また、千年以上前の地震の特徴を知るための手がかりについても述べられています。歴史書や日記などにおける地震の記載を調べること、遺跡発掘調査などです。現代の地震観測により明らかにされる調査よりは精度は劣りますが、過去の地震を調べることは将来の地震を予測するのと同様に大切なことであること、理学と文学の融合研究の重要性も併せて強調していると思います。

本書のコンテンツは、過去の大地震の特徴の解説はもちろん、コラムを用いて地震の知識が適切に整理されて蓄積されるように構成されています。地震には二つの意味（地震そのものと地震によりもたらされる揺れ）があり、一般のかたが混同しやすいマグニチュードと震度の違いのコラムから、昨今の通信ネットワークの発達・発展により世界中の情報が自分の手元のスマートフォンで取得できるようになった現代において、戦争中に発生した鳥取地震、東南海地震、三河地震などは報道すらされなかったというコラムは、戦争というものがありとあらゆる情報を寸断してしまうことの怖さも説明しています。

本書に何かを付け加えるとすれば、以下の2つをあげます。1つは、防災科学研究所で管理・維持・運用されているMOWLAS（Hi-net, F-net, K-NET, KiK-net, V-net, MeSO-net）をはじめ、気象庁および国立大学法人等で運用されている昨今の地震火山観測ネットワークは、世界と比較すれば高密度・高精度のネットワークであり、それらのデータは1997年10月から気象庁により一元処理が行われて震源が決定されており、その震源カタログの活用です。この本で取り上げられた大地震だけでなく、微小地震を含めた最近の地震活動の特徴（グーテンベルグ・リヒター則や大森-宇津則など）の説明は地震を知ることの1つになります。

もう1つは、震源と震源域の関係をもう少し詳しく説

明していただけるとよいように感じました。たとえば、東日本大震災をもたらした東北地方太平洋沖地震の震源域は岩手県沖南部から茨城県沖までに及んでおり、その長さは約400km以上、幅は約200kmです。震源域の大きさを理解することも地震を知ることもう1つだと思います。

最後になりますが、本書は100頁あまりですが、日本の地図帳とともに各家庭に必携の1冊といえます。索引前の日本の地震年表をすべて頭にインプットすれば地震博士の第一歩になることでしょう。

<偕成社, 2019年12月, A4判変, 100頁, 2,000円+税>
[つるおか ひろし 東京大学地震研究所地震火山情報センター長]

● オランダ商館長の視点から、江戸時代の文化や知恵を読み解く

クレインス・フレデリック 著・磯田道史 解説

オランダ商館長が見た日本の災害

評者 廣井 悠

本書はタイトルが示すとおり、オランダ商館長の日記を紹介した書籍である。しかし日記とはいえ本書は、ただ起きた事実を淡々と記録するだけのものではなく、江戸時代の代表的な災害である明暦の大火、元禄地震、肥前長崎地震、天明の大火、そして「島原大変肥後迷惑」で有名な雲仙岳の火山性地震に直面した商館長や周囲の人々が、どのように行動し、どのような感情を抱いたかが手に取るようにわかる、見聞録といった性格のものになっている。構成は、各章でほぼ独立に各商館長の日記が紹介されているのに加え、著者のフレデリック・クレインス氏が日記をもとにした各商館長の体験や所感を紹介したのち、磯田道史氏が当時の風習や制度について詳しい解説を加えるという工夫がなされている。このため、江戸時代・災害に詳しくない中高生をはじめとした読者にとっても平易に読み進めることが可能な、たいへん読みやすいものとなっている。しかしながらその内容は濃く、また記述内容や豊富な関連文献との対比などは「災害史」と評するに十分なほど詳細なものである。事実、大学で都市防災の歴史に関する講義を担当している立場からは、「江戸時代についてはこの書籍を読んでください」といっても良いくらい、網羅的な知識が充実している。

本書の第1章では明暦の大火に直面したオランダ商館長のワーヘナールについて、第5章では天明の大火に直

● ～科学の証言を防災に～

岩田孝仁・北村晃寿・小山真人 編 静岡の大規模自然災害の科学

評者 伊藤和明

静岡県は災害の見本市といってもいいほど、あらゆるタイプの自然災害の発生頻度が高い県である。歴史的にも、駿河湾内から西へと延びる南海トラフは、100～150年の間隔で、プレート境界地震を引き起こしてきたし、内陸では、地質的に日本列島を東西に分ける糸魚川＝静岡構造線が走行しており、富士川河口断層帯の活動も懸念されている。

山梨県との県境には、富士山という飛び抜けて巨大な火山が聳えていて、歴史時代以降もしばしば大噴火を発生させては、甚大な災害をもたらしてきた。

また県の東部には、伊豆半島という地学的に特殊な存在が、大室山をはじめ、多数の単成火山からなる伊豆東部火山群や、内陸直下地震の震源となる活断層が広く分布している。

気象災害についても、南から吹き寄せる暖湿流が、南アルプスなどの山地にぶつかることによって、集中的な豪雨が起きやすく、しばしば水害や土砂災害に見舞われる。また、安倍川上流部の大谷崩れのように、大地震による大規模な山地の崩壊も発生してきた。

これらの自然災害について、静岡大学の教授陣が、それぞれ専門の立場から科学的論証を行い、まとめ上げたのが本書である。

本書では、まず第1部に、2011年3月、東日本大震災をもたらした東北地方太平洋沖地震と巨大津波発生のしくみ、および津波堆積物の調査分析からしられる新知見を紹介、第2部では、静岡県下の地質の特性、地殻変動と地震の関わり、断層活動と直下地震、さらには南海トラフ地震の歴史的検証も含めた最新の知見などが紹介されている。

第3部では、富士山および伊豆東部火山群の噴火史と防災対策について詳しくまとめるとともに、これら火山のマグマ供給系に関する現在の知見が紹介されている。

第4部では、1976年に提起された「東海地震説」以後、地震先進県と評されるほど、静岡県が積極的に進めてきた地震・津波防災対策の歩み、地震や台風に伴う土砂災害の歴史とともに、ハード・ソフト両面での防災対策、必ず来る南海トラフ巨大地震への備えなどについて詳述している。

1つの県が、過去に県内で起きた、あるいは将来起きるべき自然災害について総合的にまとめ、防災対策の充

面したファン・デーレの日記について詳述している。ここでとりわけ目を引いたのは、「避難や消火活動の用意は生活の一部になっていた」といった記述や、まちの迅速な復興過程についてである。このように、市街地火災対策が1つの文化ともなっていた江戸時代と比べ、わが国の現代市街地は、建物の耐火性能は高くなり、近代的な消防組織を備え、そして住宅用火災警報器やスプリンクラーなどの対策も進んでいる。しかしながら、市街地火災およびその避難に対する意識や知識は、江戸時代の人々よりも現代人はかなり衰えているような肌感覚を筆者は持っており、本書を読み解くことでこれを再認識するに至った。2018年12月に発生した糸魚川市大規模火災による大規模延焼や、首都直下地震に関する内閣府想定推計被害量を見ても、わが国の地震時の市街地火災リスクはまだ解決したとは言えない状況であることはたしかである。本書によって、市街地火災が頻発した時代の「常識」と現代の実態との大きな差異に改めて気付かされた。

評者の専門である都市計画の分野では、「まちづくりや地域創生で重要なのは若者、よそ者、ばか者」としばしば言われることがある。この標語がすべての地域に当てはまるかどうかはさておき、新しい工夫や解釈を生み出すには、他者の視点がとりわけ重要であることを示唆する言葉と考えられる。災害対策も同様であろう。おそらく江戸時代の日本人による日記であれば、出火防止を含めた市街地火災に対するさまざまな配慮や迅速な復興は当たり前のものであり、江戸時代のまちに住まう人々の火災に対する意識の高さ、防災対策を生活の一部とすることで無理なくリスク低減を行おうとした知恵、そして日本人独特の災害観などをここまで明瞭に記述することはなかったものと思われる。すると本書は、「災害史」という性格の読み物であるのみならず、災害多発時代に生きる人々の生活や災害観などの特殊性を明確に伝えるものとも言えないだろうか。

ここで紹介されたオランダ商館長が、東日本大震災や熊本地震などで災害から逃れ、助け合い、復興への道を進んでいるわが国の現代人をかりに見聞したとすれば、どのような感想を抱き、彼らはどう記録として残すのだろうか。またわれわれはそれをどう解釈し、どのように安全で幸せな社会づくりの参考とすればよいのか。本書の読後、評者はこのようなさまざまな思いを馳せるに至った。

<講談社、2019年12月、新書判、288頁、960円+税>

[ひろい ゆう 東京大学大学院工学系研究科准教授]

実を訴えた書籍はきわめてユニークであり、他に類を見ないのではないだろうか。

とりわけ本書では、静岡県下でのさまざまな歴史災害について、その根源となった自然現象を最新の科学の視点でひもとき論述している。それはいうまでもなく、将来同様の現象が発生したときの防災対策に活かされることが期待されるのである。

「過去は未来への鍵」という言葉がある。過去に起きたことは、必ず将来も繰り返される。多様な自然災害に数多く見舞われてきた静岡県下であるだけに、それは重要な視点といえよう。

本書を一読すると、一般住民にはやや専門的で難解な

記述も見受けられるが、全体としては最新の研究成果がもれなく散りばめられていて興味深い。

もちろん災害の態様には、地域それぞれの自然環境、社会環境に応じた特色がある。それだけに、たとえば県下の各自治体の防災担当者が、本書の記述から地域ごとの“災害環境”を把握し、将来に備える対策の一助とすることを期待したい。

科学の証言を未来の防災に活かすことの重要性を紙背に読み取ることのできる1冊である。

<静岡新聞社、2020年3月、A5判、261頁、1,600円+税>

[いとう かずあき 元NHK解説委員、防災情報機構会長]

【訂 正】

地震ジャーナル69号に掲載された「みんなで翻刻—歴史地震研究とオーブンコラボレーションの交差点—」(59~63ページ)の図キャプションに不備がありましたので、以下のように訂正いたします(加納靖之)。

図1 歴史資料の例(東京大学総合図書館所蔵『[嘉永七年寅霜月大坂大地震]』)

図2 「翻刻!石本コレクション」の例(右側の資料は図1と同じもの)

●新刊紹介

原田隆典・本橋英樹 著

入門・数理地震工学—生産・社会インフラ施設の地震・津波対策の基礎知識と数学的方法—

技法堂出版, 2020年4月, B5判, 240頁, 3,500円+税

成田史生・大宮正毅・荒木稚子 著

楽しく学ぶ破壊力学

朝倉書店, 2020年4月, A5判, 144頁, 2,300円+税

伊藤和明 監修

明日の防災に活かす災害の歴史

1. 日本列島の誕生～奈良時代
2. 平安時代～戦国時代
3. 安土桃山時代～江戸時代
4. 明治時代～昭和時代中期
5. 昭和時代後期～平成・令和時代

小峰書店, 2020年4月, A4判変, 各55頁, 各3,400円+税

アルフレッド・ウェゲナー 著, 竹内 均 訳, 鎌田浩毅 解説

大陸と海洋の起源

講談社, 2020年4月, 新書判, 400頁, 1,500円+税

釜井俊孝 著

宅地の防災学 都市と斜面の近現代

京都大学学術出版会, 2020年4月, 四六判, 3,300頁, 2,000円+税

藤岡換太郎 著

見えない絶景 深海底巨大地形

講談社, 2020年5月, 新書判, 240頁, 1,000円+税

瀨藤一起 著

地震：どのように起きるのか

丸善出版, 2020年5月, 新書判, 192頁, 1,000円+税

日本地球惑星科学連合 編

地球・惑星・生命

東京大学出版会, 2020年6月, 四六判, 280頁, 2,300円+税

丸山茂徳 監修

地球と生命の誕生と進化

清水書院, 2020年6月, B5判, 176頁, 2,800円+税

岡田篤正 著

中央構造線断層帯—最長活断層帯（四国）の諸性質—

古今書院, 2020年6月, B5判, 378頁, 9,800円+税

「GEO ペディア」制作委員会 編

最新 巨大地震と火山噴火をよく知る本!

清水書院, 2020年7月, B5判, 160頁, 2,800円+税

運上茂樹 著

ここが聞きたい! 耐震設計の基本 Q&A40

建設図書, 2020年8月, A5判, 240頁, 2,000円+税

東京鉄道局写真部 編

関東大震災 鉄道被害写真集 惨状と復旧 1923-24

吉川弘文館, 2020年8月, B5判, 304頁, 18,000円+税

大平 徹 著

予測学—未来はどこまで読めるのか—

新潮社, 2020年8月, 四六判変, 208頁, 1,200円+税

吉田 望 著

液状化現象 メカニズムから数値解析まで

森北出版, 2020年8月, B5判, 384頁, 10,000円+税

「地震による地すべり災害」刊行委員会 編

地震による地すべり災害 2018年北海道胆振東部地震

北海道大学出版会, 2020年9月, B5判, 370頁, 6,300円+税

地震ジャーナル・既刊総目録

[61号~70号]

61号・2016年6月

エッセイ 稠密地震観測網の成果と今後の期待

2016年熊本地震(速報) 小原一成
岩石破壊実験 岡田義光
人材育成による世界の地震・津波災害軽減への挑戦 吉田真吾
古川信雄
濱田政則
後藤和久
吉田明夫
天野賢一
編集部

臨海コンビナートの液状化・流動化対策
書評・藤原 治著 津波堆積物の科学
・山岡耕春著 南海トラフ地震
・永原慶二著 富士山宝永大爆発

新刊紹介 編集部
ADEP 情報 人事異動

62号・2016年12月

エッセイ 東海地震説から40年 石橋克彦
故阿部勝任会長の近影 編集部
追悼 阿部勝任先生 佐竹健治
南海トラフ地震震源域のひずみ蓄積状況 西村卓也
南海トラフ地震の中短期予測をめざして 松本則夫
1944年東南海地震発生時の掛川異常隆起は本当か?
鷺谷 威
高山峯夫

熊本地震での建物被害と耐震設計
震度データを用いた地震の中期予測—地震発生の
「相場観」を理解してもらうために—
小泉尚嗣/今給黎哲郎

囲み記事・「震度7」の違和感 岡田義光
訂正・2016年熊本地震(速報) 岡田義光
書評・中西正男・沖野郷子著 海洋底地球科学
馬場聖至
中林一樹
編集部

・平田 直著 首都直下地震
新刊紹介
ADEP 情報 人事異動

63号・2017年6月

エッセイ 地震予測と防災 山岡耕春
会長就任のご挨拶 金沢敏彦
平成28年(2016年)11月22日福島県沖地震による
津波について—その実態と対応 今村文彦
2016年10月21日鳥取県中部の地震(M6.6)について
香川敬生

オクラホマ州の誘発地震 楠瀬勤一郎
1855年安政江戸地震の川越における被害 新井健司
寄書・2016年6月16日南茅部(函館)地震
谷岡勇市郎/権名高裕
・韓国慶州マグニチュード5.8地震 石川有三
・津波碑は犠牲者を減らすことができたのか?
佐藤翔輔

囲み記事・SARによる地殻変動観測の原理 青木陽介
書評・佐藤比呂志著 巨大地震はなぜ連鎖するのか
—活断層と日本列島 横山裕道
・山賀 進著 科学の目で見る日本列島の地震・
津波・噴火の歴史 中川和之
編集部

新刊紹介 編集部
「地震ジャーナル」全号電子アーカイブ化に伴う
著作権委譲に関するお願い 編集部
「地震ジャーナル」著作権規定 編集部
ADEP 情報 人事異動

64号・2017年12月

エッセイ 地震学の社会貢献 MORI, James Jiro
房総半島沖スロースリップイベント 福田淳一
日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の最初の成果
植平賢司
わが国の海底地殻変動観測の現状 藤本博巳
三次元大振幅振動台と地震体験システムの開発
熊谷仁志

GEMの活動概要と日本の貢献 藤原広行/郝 憲生
囲み記事・GNSSとGPSの違いについて 辻 宏道
・美濃焼:濃尾震災にめげず日本一の産地へ
木股文昭

書評・遠田晋次著 活断層地震はどこまで予測できるか
加藤照之
・末広 潔著 海洋地震学 石澤あずさ
・井出 哲著 絵でわかる地震の科学 相原延光

新刊紹介 編集部
ADEP 情報 人事異動

65号・2018年6月

エッセイ 彼を知り己を知れば百戦殆うからず 福和伸夫
東海地震予知から南海トラフ巨大地震対策へ 平田 直
緊急地震速報の誤報と精度向上の改善策 堀内茂木
1911年に喜界島近海で発生した巨大地震に伴う
津波の調査 後藤和彦/岩本健吾
1968年十勝沖地震・1978年宮城県沖地震を振り返って
—両地震がその後の建築耐震設計などに
どのような影響を与えたか— 北川良和
光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る
田中愛幸/黒石祐樹/香取秀俊

寄書・余震統計式再考—指数則とべき乗則を結ぶ—
萩原幸男

・JST-JICA 国際共同研究プログラム「SATREPS」
の概要 本蔵義守
囲み記事・J-RISQ 地震速報 岡田義光
・MOWLAS(陸海統合地震津波火山観測網) 岡田義光
編集部

新刊紹介
ADEP 情報 人事異動

66号・2018年12月

エッセイ 警報の鉄則と宿命 西出則武
2018年6月18日大阪府北部の地震
岩田知孝/飯尾能久/松島信一
2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への
影響 遠田晋次
北海道東部沖の巨大地震の可能性 佐竹健治
福島県で節目を迎えた自然災害—1888年磐梯山噴火と
1938年福島県東方沖地震— 室谷智子
2015年5月30日小笠原諸島西方沖深発地震と異常震域
の謎 古村孝志

フィリピン地震火山監視強化と防災情報の利活用推進
<平成22~26年度SATREPS課題の概要> 井上 公
寄書・ハワイ島で起きる地震の原因と特徴 山田卓司
・地震の揺れを伝えない技術への挑戦 梶原浩一
・2018年北海道胆振東部地震(速報) 岡田義光

囲み記事・地震波干渉法とは何か 中原 恒
・福井地震から70年 澤田義博
・韓国初の液状化被害 大保直人

書評・NAMAZUの会編 新編・鎌倉震災誌 石橋克彦
・矢田俊文著 近世の巨大地震 堀川晴史
・河野宣之・日置幸介著 動く地球の測り方
—宇宙測地技術が明らかにした動的地球像
加藤照之

新刊紹介
ADEP 情報 人事異動

編集部

67号・2019年6月

エッセイ 「生きる、を支える科学技術 Science for Resilience」を目指す防災科研 林 春男
北海道中軸部の島弧—島弧衝突構造と2018年北海道胆振東部地震

岩崎貴哉/伊藤谷生/津村紀子/在田一則/松原 誠
2018年北海道胆振東部地震における強震動と被害の概要 高井伸雄/重藤迪子

建物の強震観測を用いた被災度判定技術 楠 浩一
熊本地震被災住民における健康と生活について

—被災地での調査から— 古本尚樹
ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究

—2010~2014年度 SATREPS 課題の概要— 山崎文雄
寄書・関東~九州地方の高精度重力図 志知龍一

・新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用
内山庄一郎

囲み記事・地震の過剰報道？ 岡田義光
・MeSO-net 観測から見えてくるもの

酒井慎一
・地震の発生と地震の前兆現象の1つのアナロジー 津村建四朗

書評・山崎 登著 地震予知大転換 最近の地震災害の現場から 横山裕道

・木村 学ほか著 揺れ動く大地 プレートと北海道 安藤寿男

・藤岡換太郎著 フォッサマグナ 日本列島を分断する巨大地溝の正体 小山真人

・ロバート・マイヤーほか著 ダチョウのパラドックス 災害リスクの心理学 関谷直也

新刊紹介 編集部
ADEP 情報 人事異動

68号・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

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

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 課題の概要— 金田義行

寄書・深海魚と地震 織原義明
・茨城県の地震の特異性 松村正三

囲み記事・2019年6月18日山形県沖の地震 (M6.7) 岡田義光

・蛇籠を用いた簡易補強工法の検証実験 中澤博志

・いにしへのジャーナル記事 岡田義光

書評・中島淳一著 日本列島の下では何が起きているのか 小林洋二

・額綱一起著 地震動の物理学 竹中博士

・岡田篤正ほか著 図説日本の活断層 —空撮写真で見る主要活断層帯36— 白濱吉起

新刊紹介 編集部
ADEP 情報 人事異動

69号・2020年6月

エッセイ チリ地震津波から60年 三藤伸夫
インドネシアを襲った2つの特異な津波 有川太郎

津波に強い地域づくりのための津波ハザード推定技術 富田孝史

2019年カリフォルニア・リッジクレスト地震 三宅弘恵
箱根火山の深部低周波地震 行竹洋平

全国を対象としたリアルタイム地震被害推定システム (J-RISQ) の開発 中村洋光

寄書・地震発生を重力でとらえる 亀 伸樹

・—P波到着前の地震シグナル検知— 亀 伸樹

・みんなで翻刻—歴史地震研究とオープンコラボレーションの交差点— 加納靖之

・地震記者の回想 川端信正

囲み記事・「津波の心配はありません」とは 福満修一郎

・津波の高さ 岡田義光

・不確かな確実/確かな不確実—コロナ禍を通して見た臨時情報— 矢守克也

書評・貝塚爽平ほか編 写真と図でみる地形学 増補新装版 田力正好

・横山裕道著 さまよえる地震予知 川端信正

・追い続けた記者の証言 川端信正

・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・バーシック②) 古宇田亮一

新刊紹介 編集部
ADEP 情報 人事異動

70号・2020年12月

エッセイ 地震のリスクと共存する新しい生活様式とは？ 佐竹健治

スロー地震多発領域が東北地震の破壊を止めた 西川友章

余震はいつまで続くか 遠田晋次

「地震月報」100年 岡田義光

南アフリカ大深度金鉱山の地震リスク低減 —2010~2015年度 SATREPS 研究成果の概要— 小笠原宏

寄書・新型コロナウイルス感染と地震活動解析 津村建四朗/石川有

・1920年海原地震について 司 宏俊/陳 文凱

・迷走する地震予知: 課題の解決急ぎたい 横山裕道

囲み記事・南海トラフ海底地震津波観測網 N-net の概要 青井 真

・ETAS モデルと感染症 尾形良彦

・地震記者の回想—2— 川端信正

書評・今村文彦著 逆流する津波—河川津波のメカニズム・脅威と防災— 谷岡勇市郎

・山川 徹著 地図で見る 日本の地震 鶴岡 弘

・クレインス・フレデリック著 オランダ商館長が見た日本の災害 廣井 悠

・岩田孝仁ほか編 静岡の大規模自然災害の科学 伊藤和明

訂正・みんなで翻刻—歴史地震研究とオープンコラボレーションの交差点— 加納靖之

新刊紹介 編集部
地震ジャーナル・既刊総目録 [61号~70号]
ADEP 情報 人事異動

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

採用

今村 和清 本部 参事 20.12. 1

退職

光井 能麻 東濃地震科学研究所 主任研究員 20. 9.30

村上 理 東濃地震科学研究所 副主任研究員 20.10.31

配置換等

関根 正夫 本部 事務局長
(旧) 本部 事務局 参事 20. 7. 1

櫻井 清人 本部 事務局 参事
(旧) 本部 事務局長 20. 7. 1

編集後記

長引く新型コロナウイルスの影響で、本誌の編集会議も対面での開催はままならず、リモートでのメール会議により編集作業が続けられている状態である。

そんなコロナに関連して、本号では3つの関連記事が掲載されている。まず、東大地震研の佐竹所長からは、ウィズコロナの時代に対比して、地震学と社会との関係を論じた冒頭エッセイを頂戴した。

また、地震活動のETASモデルの開発により2019年度日本地震学会賞を受賞された統計数理研究所の尾形先生からは、地震活動モデルと疫学モデルとの関連を解説したコラム記事をいただいた。Epidemicは「伝染性の」という意味であり、ETASモデルは感染症の問題とも縁があるようである。

さらに、元気象庁の津村・石川両先生からは、「新型コロナウイルス感染と地震活動解析」と題する寄書をいただいた。石川先生が開発した地震活動解析ソフト Seis-PC を、津村先生の発案によって、新型コロナウイルスの感染者数の解析に活用してみた事例が紹介されている。

次に、本文の論説では、まもなく10周年の節目を迎える2011年東北地方太平洋沖地震について、M9.0という超巨大地震の大きさが何によって決められたのかという問題について、京大防災研の西川先生に論じていただいた。地震後に整備されたS-net（日本海溝海底地震津波観測網）で明らかになった、東北沖のスロー地震多発領域がその鍵を握っているらしい。

また、東北大の遠田先生からは、大地震に伴う余震活動はいつまで続くのかという古くて新しい問題について、たいへんに興味深い考えを披露していただいた。余震継続期間は震源断層の活動間隔に比例し、歪速

度に反比例するようであり、これを本震後の地震長期評価にどう生かすかは一考すべき課題であろう。

このほかの論説としては、このたび100年分の地震データを包含することになった気象庁の地震月報について、その外形的特徴を報告する記事を掲載したほか、国際プロジェクト SATREPS の個別紹介として、今回は南アフリカで実施された金鉱山での地震被害低減をめざした観測研究を取り上げ、そのプロジェクトリーダーを務められた立命館大学の小笠原先生に解説をお願いした。このプロジェクトは、その後ICDP（国際陸上科学掘削計画）の一環として発展を遂げているようである。

以上のほか、本号では2編の寄書を掲載した。その1つは、今から100年前の1920年12月16日に中国寧夏自治区で発生し、甚大な被害を生じた1920年海原地震（M8.5）についてであり、(株)サイスマ・リサーチの司先生および中国地震局蘭州地震研究所の陳先生より解説をお願いした。

理科年表によれば、20世紀に世界で発生した地震のうち、死者数が最も多かったのは1976年唐山地震（M7.8）の242,800人、ついで1920年海原地震の235,502人、第3位が1923年関東地震（M7.9）の105,000人である。しかし、近年の研究によれば海原地震による死者数は273,465人と見積もられ、20世紀最悪の地震だったことになる。

もう1つの寄書は、元毎日新聞の横山氏による「迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい」である。東海地震から南海トラフ地震へと防災対策の主たる対象が移る中で、さまざまの曖昧さが生じている問題などを指摘すると同時に、あやしげな民間地震予測がはびこる現状を憂いている。まことに同感する部分が多い内容である。

さらに本号では、囲み記事として興味深い2つの話題を提供している。その1つは「N-net計画」である。南海トラフ地震想定震源域の東半分海域にはDONET1、DONET2と称する観測網がすでに整備されているが、西半分海域は観測網の空白域となっている。現在、ここでは新たな海底観測網の構築が進められており、その概要について防災科学技術研究所の青井先生に紹介をお願いした。

もう1つの囲み記事は、元静岡放送の川端氏による「地震記者の回想—2—」である。前号にひき続き、東海地震説が世に出された前後の裏話的な話題が軽妙なタッチで綴られており、今後とも続編を期待したい。

末筆になったが、当振興会創設者の萩原尊禮先生を継いで第2代会長を務められた高木章雄先生が、10月15日95歳にて永眠された。晩年に至るまで地震の話になるといつも熱気を帯びる高木先生には、本誌の発展に関してもいろいろと励ましをいただいた。心よりご冥福をお祈りする。

(Y.O.)

地震ジャーナル 第70号

令和2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.adepe.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。