

# 地震 ジャーナル

72

2021年12月

- エッセイ 近年の巨大地震と、これに伴った諸現象 ●三雲 健  
江戸・東京における有感地震回数の変遷  
—歴史時代の地震活動解析へ向けて— ●石辺岳男/佐竹健治——1  
上部地殻でも発生する低周波地震—それが  
地震発生メカニズムの理解を助ける?— ●長谷川昭/中島淳一——15
- M9地震の可能性に気付かなかった意外な要因  
—1894年庄内地震により生じた三角測量の  
スケール誤差— ●鷺谷 威——26
- 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) による  
震源データへの影響 ●石川有三——34
- インドおよびネパールSATREPS 課題の12年 ●額額一起——39
- 南海トラフ地震に備える—防災対策に資する  
南海トラフ地震調査研究  
プロジェクトの目的と計画— ●小平秀一/藤原広行  
/高橋成実——51
- 無人海上観測機を用いた海底地殻変動観測 ●飯沼卓史——57
- 書評——62  
●新刊紹介——65  
●ADEP情報——66
- 囲み記事 震災復興計画の宿題 青山 侑——14  
地震記者の回想—4— 川端信正——49

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

# 近年の巨大地震と、これに伴った諸現象

三雲 健

グローバルな地震観測体制が整備されて来た20世紀後半以降、最近までに発生したMw>8.5の巨大地震は、次の10回があげられる。

1952 Kamchatka Mw 9.0; 1957 Aleutian Mw 9.1; 1960 Chile Mw 9.5; 1964 Alaska Mw 9.2; 1965 Aleutian Mw 8.7; 2004 Sumatra Mw 9.0; 2005 Sumatra Mw 8.6; 2010 Chile (Maule) Mw 8.8; 2011 Sanriku Mw 9.0; 2012 Sumatra Mw 8.6.

ここでは観測されたこれらの巨大地震のうち4例と、これに付随して発生した地球物理現象の意義について、振り返ってみることとしたい。

(1) 1964年に発生したAlaska地震 (Mw=9.2) は、20世紀最大の1960年Chile地震 (Mw=9.5) に匹敵する巨大な地震であったことが明らかになった。この地震によって、周辺各地では最大4~9mを超える地面の上昇と、最大3mを超える沈下が明らかになった。各種の観測からプレートの沈み込みは平均9mに達し、これによる断層の滑り変位は最大22mにも達したとの報告もある。余震域は長さ800km、幅250kmにおよび、ここから発生した長周期の地震波は世界各地で観測された。またこの巨大地震によって発生した地球の自由振動が数週間継続して観測された。これとともに周期14分にも及ぶ異常な長周期の気圧波がCalifornia州で初めて観測された。

(2) 2004年にIndonesiaで発生したSumatra-Andaman地震 (Mw=9.2) は、Sumatra諸島西方よりAndaman諸島北部まで、総延長1,500kmに及ぶ長大な震源域で発生した。この巨大地震はIndonesia各地に甚大な被害をもたらした。震源域の大部分は海底下にあり、海面の隆起は約6m、沈降は約3mに及び、幅50~180kmの断層の滑り変位は最大20mに達したと推定されている。また1964年Alaska地震の場合と同様、地球の自由振動が約1カ月間継続して観測された。さらに、この地震によって生じた気圧波は、西太平洋のアレー観測点のほか約5,600kmの距離にある日本列島中部の松代など4観測点でも観測され、震源域周辺では4mを超える隆起が1.0~1.5分の間に起こったと考えれば説明できることが明らかになった。

(3) 2010年Maule地震 (Mw=8.8) は、世界最大の1960年Chile地震の北方約1,000kmに発生した。今回の大地震は太平洋側から沈み込むNascaプレートとの境界面に発生し、断層の長さは約500km、幅は約200kmに及んだと考えられている。これらのデータから見積られた断層面の滑り量は最大15mにも達した可能性がある。この大地震に伴う地殻上下変動から発生した気圧波は、南米大陸上の2観測点のほか、西側大西洋上と東側太平洋上のそれぞれ2観測点で、周期3~6分、最大振幅4~20Pa程度の大きさで観測された。

(4) 2011年には、日本列島周辺で最大の巨大地震 (Mw=9.0) が東北地方の太平洋沖で発生し、沿岸地方に最大9mを超える津波によって甚大な被害を与えた。各種の地震波観測、GPSによる測地測量、沿岸および海中の津波計測などの観測結果から、この巨大地震は、太平洋プレートが日本列島下へ沈み込むことにより、南北約500km、東西約200kmの震源域にわたり最大約50mにも達する滑りを起こしたために発生したと考えられている。この巨大地震によって誘発されたと考えられる中規模地震が日本列島内陸部の各地で発生し、数カ月にわたって観測された。またこの巨大地震によって誘起された地球の自由振動は、1カ月以上にわたりGPSで継続して観測された。さらにこの地震発生後5時間以内に、日本列島内および周辺の4観測点と、震央距離6,800kmまでのIMSの8観測点で周期10分以内の長周期気圧波が観測された。

以上に述べたように、近年、地球的規模の巨大地震が特に太平洋周辺各地で頻発しており、今後も重大な関心を払いつつ観測を継続していくことが重要と考えられる。



三雲 健

[みくも たけし]

**現職** 京都大学名誉教授

**略歴** 1953年京都大学理学部地球物理学科卒。1958年京都大学理学部助手、1960年京都大学防災研究所助教授、1973年同教授を経て1992年より現職。1993~1998年JICAメキシコ派遣研究員、1998~2008年メキシコ国立自治大学地球物理研究所教授。

この間、地震学会委員長、日本学術会議地震学研究連絡委員会委員長などを歴任。

**研究分野** 地震学、固体地球物理学、とくに地震発生機構、地震テクトニクスなど

# 江戸・東京における有感地震回数の変遷

## —歴史時代の地震活動解析へ向けて—

石辺岳男・佐竹健治

### 1. はじめに

日本では過去1,000年以上にわたって史料が残されており、歴史地震と呼ばれる、計器観測が始まる以前に発生した地震の研究に活用されている。近代地震学が誕生した明治末期以降、地震に関する史料の調査・収集ならびに史料集の編纂・刊行が繰り返行われてきた。最初の地震史料集は、田山 實による『大日本地震史料』甲巻(606頁)ならびに乙巻(595頁)(田山, 1904a, b)である。ついで武者金吉の編纂による『増訂大日本地震史料』第一巻(945頁)、第二巻(754頁)、ならびに第三巻(945頁)(文部省震災予防評議会, 1941, 1943a, b)が刊行された。1970年代からは、宇佐美龍夫を中心とする東京大学地震研究所によって全国にわたる地震関連史料の調査・収集が行われ、『新収日本地震史料』(総計22冊, 約17,000頁)(たとえば, 東京大学地震研究所(編), 1981), また宇佐美の退官後は『「日本の歴史地震史料」拾遺』(計8冊, 約6,400頁)(たとえば, 宇佐美, 1998)が刊行されてきた。

これらの収集された史料に基づき、歴史時代に発生した地震の発生日時および履歴の解明が進むとともに、主に史料中に記述された被害の程度ならびに分布に基づき歴史地震の震源域や規模が推定されてきた(たとえば, 宇佐美ほか, 2013)。その例として、史料に残された記録から、南海トラフ沿いにおける海溝型大地震の発生履歴が明らかにされてきた(たとえば, 石橋・佐竹, 1998)。また、公益財団法人地震予知総合研究振興会地震調査研究センターでは、文部科学省委託「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一環とし

て、近世の被害地震に関する史資料の系統的調査に基づき、それぞれの地震による被害や震度分布を推定し、地震の震源位置や規模の解明を進めてきた(たとえば, 松浦ほか, 2006; 松浦・中村, 2020, 2021)。さらに、これらの情報は地震調査研究推進本部による活断層や海溝型地震の長期評価ならびに強震動・津波評価(たとえば, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013, 2015, 2016, 2017a, b, 2019)やそれぞれの地域における防災・減災への啓蒙等に活用されてきた。日本におけるこれまでの歴史地震研究を国際的に紹介したものとして, Usami(2002)やIshibashi(2004), Matsu'ura(2017)などがある。

史料に記述された被害に基づく歴史地震像の解明には課題も存在する。まず、津波や火災、地すべり等が被害の主要因であるため、地震動による被害を詳細に把握することが困難な地震が少なくない。たとえば、弘化四年(1847年)に発生した善光寺地震は、地震動による家屋の倒潰に加え、地震後に発生した火災や斜面の崩落、崩落により形成された堰止湖の決壊による水害が発生した複合災害であった(内閣府, 2007)。計器観測時代に発生した1923年大正関東地震や2011年東北地方太平洋沖地震による死者の内訳においても、それぞれ焼死が87%程度、溺死が92%程度を占めており(内閣府, 2013)、地震動による被害を正確に把握することは必ずしも容易ではない。また、被害は人口分布に依存し、どれだけ強い揺れに見舞われても人が住んでいなければ(人的)被害は発生しない。そのため、被害に基づいて推定された震源は人口密集域に偏って分布する可能性がある。さらに、被害は建築物の耐震性や経年劣化、表層の地盤条件に強く支配される。

1830年文政京都地震では重量のある棧瓦葺屋根が普及し、耐震性が低下したことで被害が拡大した可能性が示されている（西山，2010）。

## 2. 有感記録を用いた研究とデータベース構築への流れ

史料には、被害に関する記述の他に、被害を伴わない有感記録が残されていることがある。これらの大半は発生日時とともに「地震」とだけ記述されたものだが、1855年安政江戸地震についての『破窓之記』のように、日毎の有感地震回数やその震度等を詳細に記録したものが存在する。図1には、後述の江戸・東京における有感地震の抽出に用いた『弘前藩庁日記（津軽藩御日記）』からの抜粋を示す。写真は元禄六年十二月の日記であるが、十三日の日付の下に「天気能 但午刻少地震」とあり、天候は晴れ、正午あたりに小規模の地震（揺れ）があったことが記録されている。

史料中の被害を伴わない有感記録を用いた調査研究は限られているものの、これまでも行われてきた。たとえば、尾池（1996）は史料中の有感地震記述に基づき、南海トラフのプレート間巨大地震の前後に近畿中北部で地震活動期を迎えることを指摘した。また、佐竹（2002）は、東北・関東の史料から江戸時代の千島海溝の地震活動の推定を試みた。松井・尾池（1997）は、有感余震数の分布を用いた歴史地震の震央決定を試みている。江戸・東京における有感地震回数についての

先行研究として、宇佐美（1980）や宇佐美・渡邊（2005）があげられる。

大地震の後には多数の余震が発生し、その数は時間とともに徐々に減少する。有感地震回数は、本震からの経過時間ならびに震源域からの距離に依存する（Omori, 1894; Utsu *et al.*, 1995）ため、史料中の有感地震回数およびその時間的な推移に基づき、歴史地震の震源域を制約できる可能性がある。また史料から抽出される有感地震回数の増減から、このような大地震前後の地震活動変化や誘発地震・群発的活動の発生を復元できる可能性がある。

しかしながら、既存の地震史料集はいずれも紙媒体であり、これらの歴史資料を検索可能な電子データベース化することは、歴史地震研究をより効率的に推進するために重要である。そういった背景から1980年代以降、地震史料のデータベース化の機運が高まり、テキストデータベース化が行われてきた（たとえば、岩崎ほか，1990）。古代・中世の歴史地震に関する史資料は、「[古代・中世]地震・噴火史料データベース」（石橋，2009；石橋・古代中世地震史料研究会，2011）として電子化され、公開されている。一方で、近世以降の地震史料はその数が膨大であるため、ひずみ集中帯プロジェクトにおける「古地震・津波等の史資料データベース」（[http://seismology.jp/eri\\_eqdb/](http://seismology.jp/eri_eqdb/)）や、都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクトにおける「江戸時代に関東地方で発生した歴史地震の史資料データバ

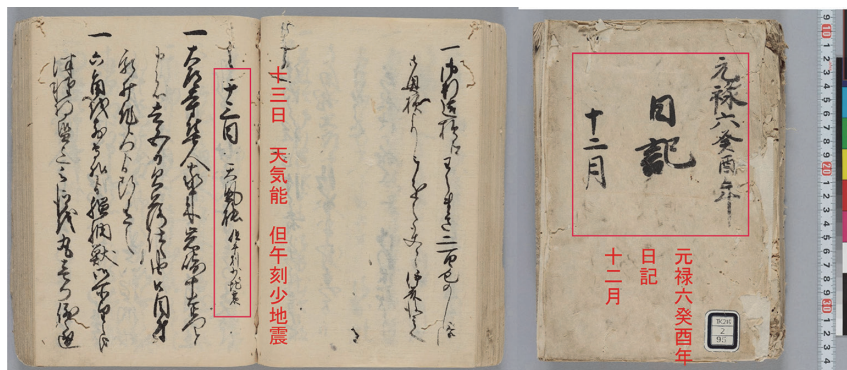


図1 『弘前藩庁日記』（弘前市立弘前図書館所蔵）に記録されている有感記録の例

日記史料有感地震データベース<sup>試作版</sup> データベースについて 操作マニュアル

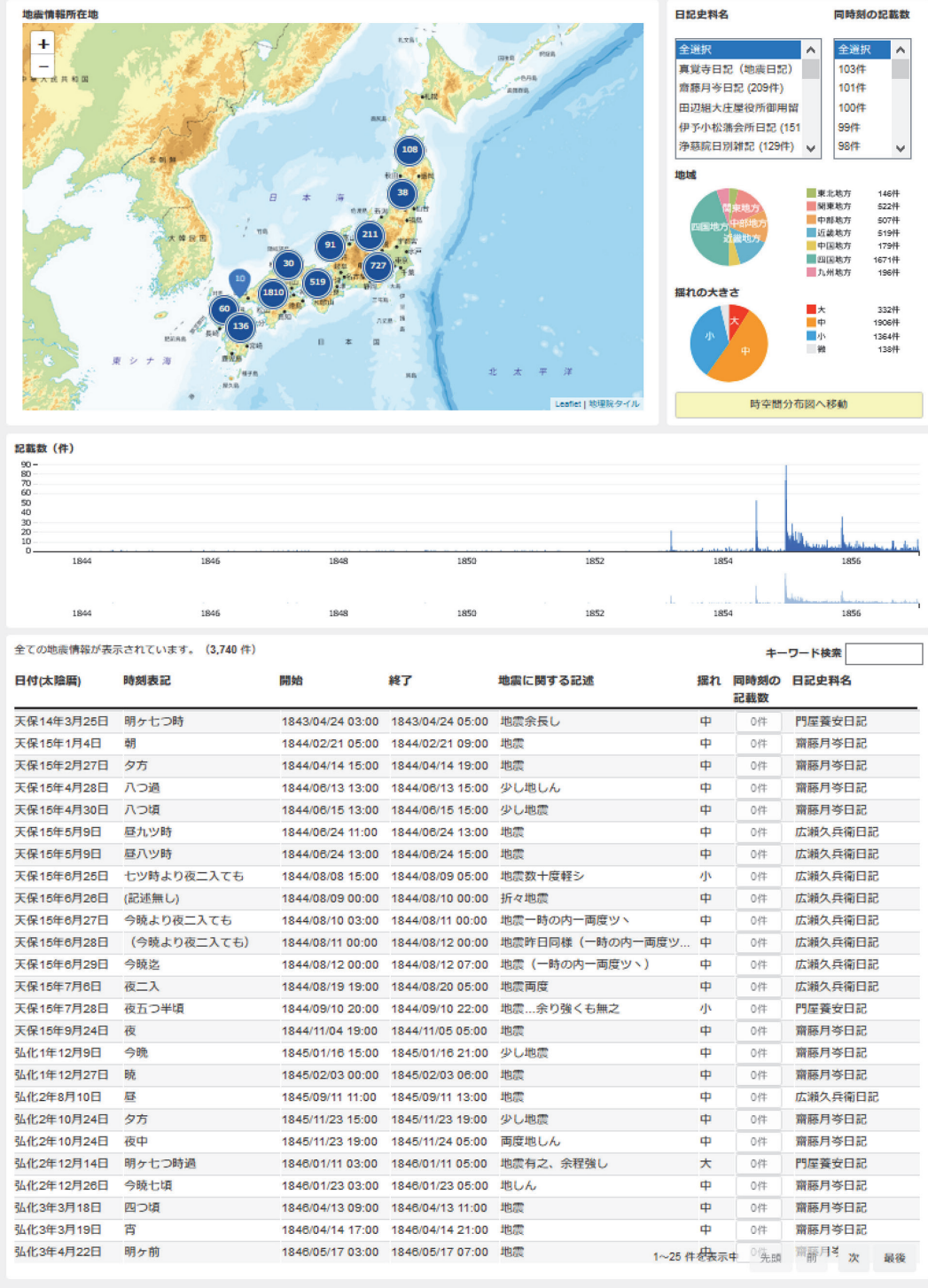


図 2 地震火山史料連携研究機構が構築を進めている日記史料有感地震データベース (西山ほか, 2021)

ス」(佐竹ほか, 2018; [https://seismology.jp/eri\\_eqdbt/](https://seismology.jp/eri_eqdbt/)) 等を除き, 多くは紙媒体のままであった。そこで現在, 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)の推進について(建議)」に基づき, 『新収日本地震史料』等のテキストデータ化が進められている。また, 近年では, 東京大学地震研究所と史料編纂所が連携して地震火山史料連携研究機構が設立され, 歴史学者と地震学者が協力して史料の収集・編纂と分析を実施し, 日本における地震・火山活動の長期的な情報を提供できる科学的なデータベースの構築が進められている。地震火山史料連携研究機構(2021)は, 上記の3データベースにおけるデータならびに新たにテキスト化したデータを統合し, 横断的検索を可能とした「地震史料集テキストデータベース」を公開している(<https://materials.utkozisin.org/>)。『日本歴史地震総表』(宇佐美・石井, 2019)については, 検索システム(「日本歴史地震総表検索システム」)が構築されており, その利活用の推進が図られている(山中・宇佐美, 2020)。

被害を伴わない有感記録に対しても調査研究を円滑に推進するために, 日時ならびに記述地点等のデータを抽出・整理した有感地震データベースの構築が必須であり, 地震火山史料連携研究機構

によって日記史料有感地震データベースの試作版(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>)が構築・公開されている(図2: 西山ほか, 2021)。これらの有感記録を用いた歴史地震研究は, 大地震の被害に基づく従来の研究とは異なった側面から, 歴史時代の地震活動を議論する新たな展開をもたらすものと期待される。

### 3. 藩日記による江戸における有感地震回数の変遷

長期間にわたる地震活動解析のためには, 均質なデータが必要である。筆者らは江戸時代の長期間にわたって地震を記録している藩日記と気象庁震度データから過去350年間程度の江戸・東京における有感地震回数を纏め, その変遷について論じた(Satake and Ishibe, 2020)。ここでは歴史時代を含む地震活動解析に向けた取り組みの1例として, その概要について述べる。

江戸時代の長期間にわたって, 江戸における最多の地震を記録している日記史料は, 弘前藩の公式藩政記録である『弘前藩庁日記』であり, 1668年から1868年までの約200年間に1,214冊が残されている。『弘前藩庁日記』には, 弘前城中における行政・司法・人事をはじめとする政務全般

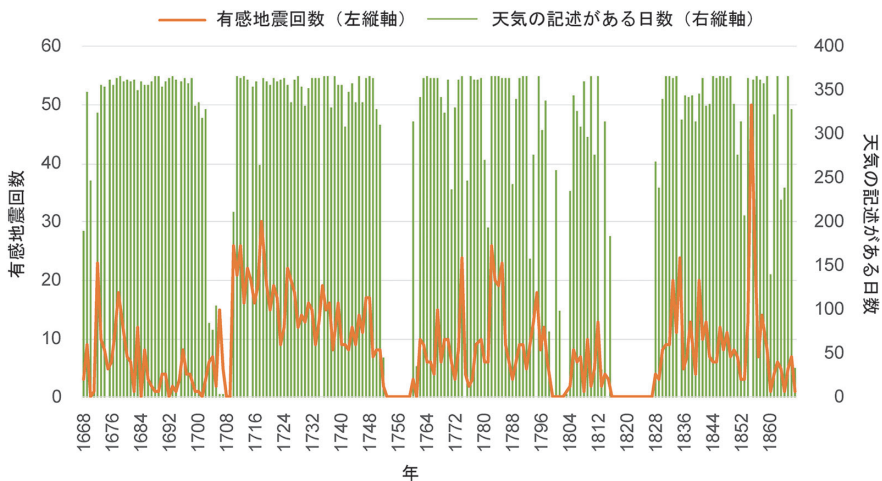


図3 『弘前藩庁日記』において, 天候に関する記述がある1年ごとの日数(緑棒グラフ, 右縦軸)ならびに有感地震回数(オレンジ実線, 左縦軸)。福眞(2018a)によるデータを使用

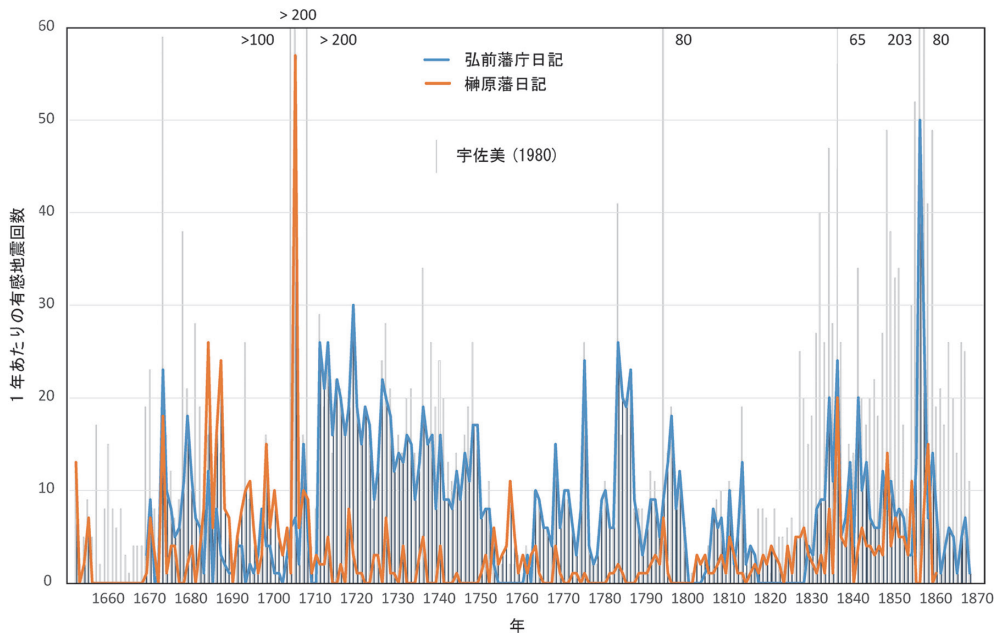


図4 『弘前藩日記』(青)ならびに『榊原藩日記』(オレンジ)に記録された1年ごとの有感地震回数と宇佐美(1980)(灰色)による有感地震回数との比較

の動向を記した「御国日記」(「国日記」とも呼ばれる)と、江戸における幕藩間の交渉、藩主の交際、江戸留守居役の交渉、藩邸内におけるできごと、国許との連絡事項などを記した江戸屋敷(上屋敷)の記録である「江戸日記」の2種類が存在する。元気象庁職員の福眞吉美氏によって纏められた『弘前藩日記ひろひよみ』(福眞, 2018a, b)は、1661年から1868年までの約200年間について、日々の気象・災害を纏めたデータベースであり、これによれば、江戸日記に記録されている有感地震回数は約1,670回である(図3)。このうち、日記が保存されていない期間が累計で約30年分(全体の約14%)あり、日記は保存されているが天気の記事がない日は累計17年分(全体の約9%)ある。残りの累計153年分(全体の約76%)には天気の記事がある。大多数の地震(例外は1,670回のうち18回)は天気の記事とともに記録されていることから、天気の記事がある日のみに地震が記録され得るとすれば、有感地震は1年あたり11回程度となる。この間、『新収日本地震史料』には約1,560回の地震(年平均8回)が記録されており、上記の回数は『新収日本地震史料』

よりも若干多い。一方で、播磨国姫路藩、越後国村上藩、高田藩の領主であった榊原家による『榊原藩(江戸)日記』には慶安四年(1651年)から安政六年(1859年)までの約200年間に約700回の有感地震が記録されているが、こちらにも1655~1667年など、地震がまったく記録されていない期間がある。

これらの2つの日記史料に残された有感地震回数を整理し、宇佐美(1980)による回数と比較したところ、1810年頃までは大地震発生に伴う余震を除き、両者は調和的であった(図4)。このことは、宇佐美(1980)による有感地震回数データはこれらの2つの日記に大きく依存していることが示唆される。一方で、大地震の発生後には、一時的に有感を記録する史料(報告数)が増えるために、両者には乖離が見られた。また、1810年以降では宇佐美(1980)による有感地震回数は系統的に多くなる。これは地震活動が活発化した可能性を完全に排除することはできないが、有感地震を記録する史料数が増えたために生じた見かけ上の変化である可能性が考えられる。

#### 4. 気象庁震度データベースと合わせた江戸・東京における有感地震回数の変遷

計器観測時代の有感地震記録については、気象庁による震度データベースに、1919年以降のデータが公開されている（2021年8月時点）が、1923年9月1日の大正関東地震（気象庁マグニチュード（ $M_{JMA}$ ）7.9）の直後の9月末までには、東京（大手町）における有感地震は1日の本震しか含まれていない。大手町において有感地震がふたたび記録され始めるのは1カ月後の1923年10月1日である。中村（1925）によれば、中央気象台では地震による被害は軽微であったが、火災によって記録や機器が焼失した。このため、気象庁による震度データベースでは、東京（大手町）で有感地震回数が最も多かった年は1923年ではなく、2011年となっている。

大正関東地震の余震については、中村（1924）が9月1日～12月31日の24時間ごと（正午～正午）の有感地震を纏めており、その合計は1,464回である。また中村（1925）は、9月～12月の10

日ごとに各震度（弱震弱キ方、弱震、強震弱キ方：おおむね震度2、3、4に対応）別の回数を表として掲載しており、12月末までの有感地震回数は1,333回とやや少ない。石垣（2007および私信）によれば、これらは文京区本郷（東京大学：当時東京帝国大学）における観測値であり、かつ地震波形記録の振幅から換算した震度データとのことであるが、今回はこれらのデータを追加して議論した。

このようにして作成した1668年以降、2019年末までの江戸・東京における有感地震回数の変遷を図5に示す。有感地震回数のいくつかの特徴的なピークと、長期的なトレンドの変化を見ることが出来る。最も有感地震回数が多かったのは1923年であり、これは大正関東地震に伴う余震によるものである。1年あたりの有感地震回数は、大正関東地震の発生後、地震前に比べて20～30倍程度、増加した。

ついで多い有感地震回数となったのは、東北地方太平洋沖地震（ $M_{JMA}$  9.0）が発生した2011年であり、震度1以上で463回、震度2以上で148回にそれぞれ及ぶ。これらは、東北地方太平洋沖

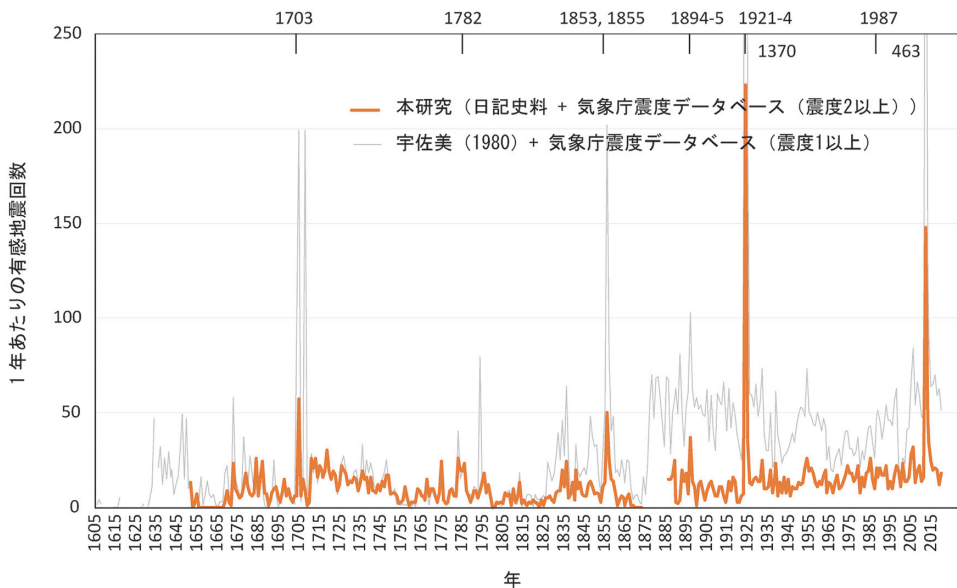


図5 江戸・東京における有感地震回数。オレンジは『弘前藩日記』、『榊原藩日記』ならびに気象庁震度データベース（震度2以上）から抽出したもの、灰色は宇佐美（1980）ならびに気象庁震度データベース（震度1以上）から抽出したものをそれぞれ表す



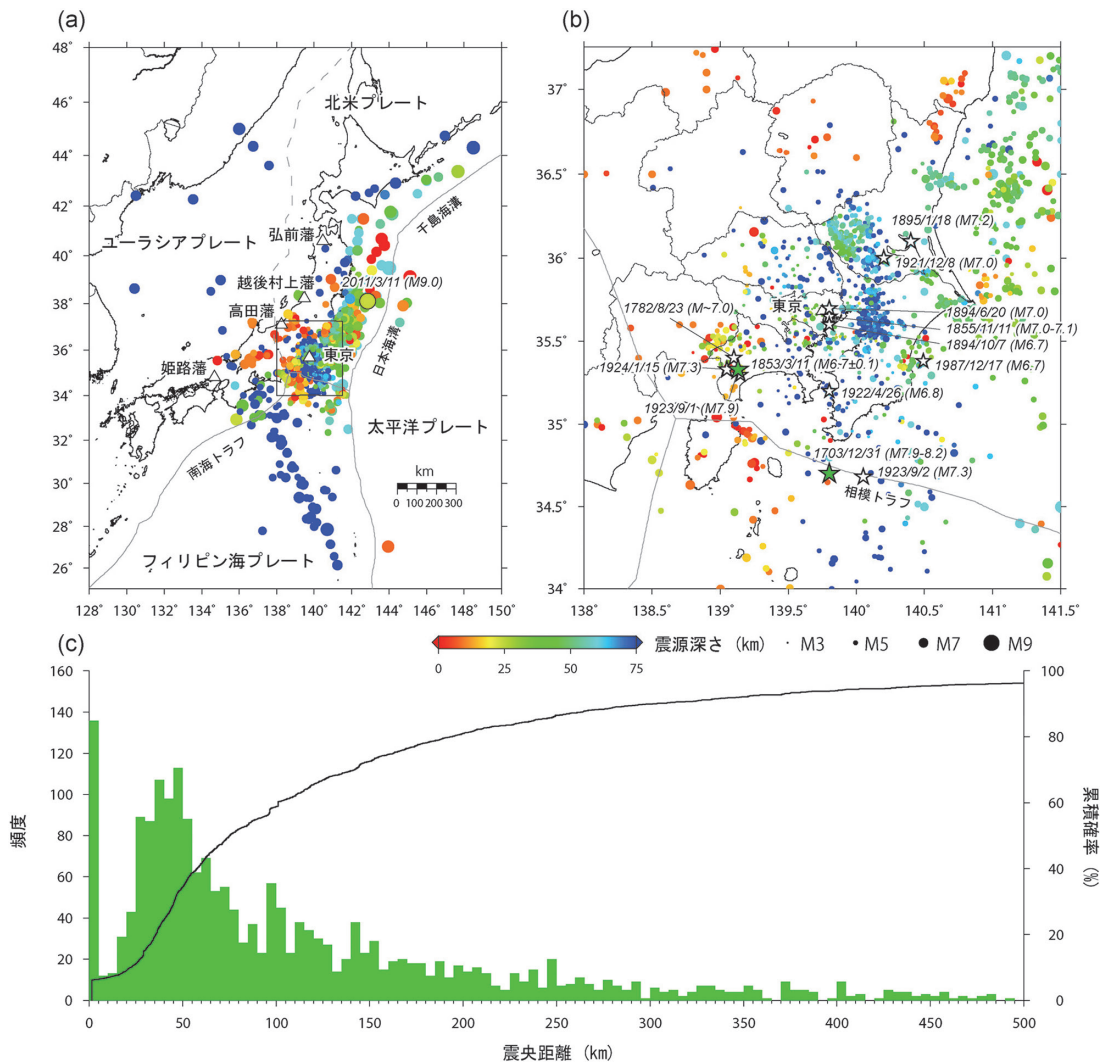


図 6 (a) 東京千代田区大手町の震度観測点において有感となった地震の震源分布 (気象庁震度データベースによる (1885~2019 年)). 矩形領域の拡大図を (b) に示す. (b) 東京千代田区大手町の震度観測点において有感となった地震の震源分布ならびに顕著地震の震源位置 (星印). (c) 東京千代田区大手町の震度観測点において有感となった地震の震央距離のヒストグラム (左縦軸) ならびに累積確率分布 (右縦軸)

地震の震源域で発生した活発な余震に加えて、関東地方で地震活動が活発化したことが大きく寄与している (たとえば, Ishibe *et al.*, 2011, 2015, 2017). 東北地方太平洋沖地震の発生前 1 年間には、震度 1 以上が 53 回、震度 2 以上が 18 回であったが、発生後 1 年間には震度 1 以上で 488 回、震度 2 以上で 164 回と 9 倍程度、増加した。

3 番目に多かったのは 1704 年であり、これは元禄十六年十一月二十三日 (1703 年 12 月 31 日)

に発生した元禄関東地震に伴う余震による。1703 年元禄関東地震の規模は M8.2 程度 (宇佐美ほか, 2013) と、1923 年大正関東地震と同程度あるいはそれ以上と推定されているが、江戸 (東京) で記録されている有感地震回数は元禄関東地震によるほうが明らかに少ない。史料から推定された震度や津波高の分布などに基づく、1703 年元禄関東地震と 1923 年大正関東地震の震源域は一部が重複しているものの、完全には一致していない

可能性が示唆されている（たとえば石橋，1977；行谷ほか，2011；松浦・中村，2016）。有感地震回数は余震活動度（余震の活発さ）に加えて震源域からの距離などに強く依存する。大正・元禄関東地震発生後の江戸・東京における有感地震回数の顕著な相違は，これらの関東地震の震源域に関して示唆を与える可能性がある。

4番目に多かったのは1855年であり，これは安政二年十月二日（1855年11月11日）に発生した安政江戸地震（M7.0程度）に伴う余震によるものである。関東地方の複雑なテクトニクスならびに地震波減衰構造の不均質性もあり，この地震の震源（特に深さ）に関しては浅発地殻内地震（深さ10km程度）から沈み込む太平洋プレート内（深さ100km程度）まで諸説あるが（たとえば，Nakamura *et al.*, 2020），有感地震回数の変遷は震源距離（震源深さ）に関して有効な情報になるかもしれない。

より長期的なトレンドに目を向けると，1750～1760年や1800～1820年など，有感地震回数が少ない静穏な期間が見られる。しかしながら，これらは『弘前藩庁日記』の記録が消失している期間（1752～1760年，1815～1828年）に相当しており，『榊原藩日記』からはそのような静穏化は認められない。したがってこれらの期間における静穏化は，記録の消失による見かけ上のものである可能性が高い。一方で1670～1700年，1710～1750年，あるいは1900～1920年頃に見られる有感地震回数の減少は，記録が残されている期間であり，検知率に大きな時間的変化はなかったと考えられることから，実際に地震活動が静穏化した可能性がある。大地震の発生に先行して10年スケールでの地震活動静穏化が報告されており（たとえば，Katsumata, 2011），これらのうち，1670～1700年ならびに1900～1920年の有感地震回数の減少はそれぞれ，元禄・大正関東地震の発生に先行して（微小）地震活動が低下した可能性を示唆する。また，1710～1750年頃の有感地震回数の漸減は，1703年元禄関東地震に伴う余震活動の時間的減衰ならびにその地震サイクルにおける静穏期に対応する可能性がある。

ところで，『弘前藩庁日記』や『榊原藩日記』に記録されている有感地震はどこで発生した地震なのだろうか。限られた地点における有感記録から歴史時代の地震活動分布を復元することは困難ではあるが，近年の稠密地震観測網の展開以降に発生した地震のデータがその一助になる可能性がある。気象庁震度データベースから，東京千代田区大手町で震度2以上となった地震の震源分布ならびに震央距離に対する累積確率分布を描くと（図6），東京で有感となるのは，定常的に地震活動が活発な千葉県北西部や茨城県南西部，丹沢地域などの地震が多くを占め，およそ60%の地震が震央距離100km以内の関東地方で発生した地震によるものであることが分かる。計器観測時代と歴史時代の地震活動分布には相違があるものの，ある震度観測点で有感となった地震の震源分布と震源距離（あるいは震央距離）に対する累積頻度分布（あるいは確率分布）の把握は，その付近で記述された日記等における有感地震の範囲について，1つの判断材料となりうる。『弘前藩庁日記』や『榊原藩日記』に記述された有感記録についても，有感範囲の広い顕著地震の発生を除き，おおむね関東地方で発生した地震によるものと解釈するのが自然であろう。

## 5. 歴史時代の地震活動解析に向けて

本稿では，史料に記録された有感記録を用いて歴史時代の地震活動を復元することを目的とした調査研究や，有感記録のデータベース化に向けた取り組みについて紹介した。近年は，気象庁震度データベースならびに震度の距離減衰式を用いて大地震の震源域を推定する，あるいは地震活動変化を検出することができる可能性が示唆されている（石辺ほか，2021a）。歴史地震の震源域や規模の推定に関して，従来の被害に基づく解析は飽和状態にあるとも言え，有感記録を用いた解析は歴史地震研究におけるブレイクスルーになると期待される。

その1つとして，歴史時代の地震活動の復元があげられる。史料から抽出される有感地震回数の

増減は、歴史時代に発生した地震活動変化（静穏化あるいは活発化）や誘発地震・群発的活動の発生を示唆しており、大地震の発生とそれによる被害の解明とは異なる視点から歴史時代の地震活動を議論できる可能性がある。これまでも、1861年文久宮城地震の発生前に地震活動の静穏化があった可能性が示唆されたり（松浦・都司，2010）、小田原地震と関東地方の有感地震の変化について論じられたりしている（都司・日野，1992）が、より多くの事例に対して定量的な議論が可能になるものと期待される。また、歴史時代に発生した地震には、史料中の誤記などによって生じる偽地震や他の地震による被害記述が含まれている可能性がある（たとえば、石橋，1983；加納，2016，2017；佐竹，2018；原田，2021，Hayashi，2021）。たとえば、原田ほか（2017）は、明応七年六月十一日（1498年6月30日）の巳刻の日向灘大地震について、唯一の根拠である『九州軍記』にある大被害の記述や成立過程を検討し、その信憑性がきわめて低いことを明らかにし、明応日向灘地震が偽地震であることを示した。また史資料の再検討により、地震やそれに伴う諸現象（津波など）として考えられてきた事象が、台風や豪雨といった風水害であった可能性が示されることがある（たとえば、石橋・原田，2017；石辺ほか，2021b）。日記史料等の有感記録の網羅的収集と分析によって、今後、偽地震の同定や歴史地震の規模や震源位置の再検討が進むことも期待される。

有感記録を用いた歴史時代の地震活動研究の可能性が示される一方で、具体的な適用にあたっては課題も存在する。地震活動を解析するためには、史料に記録されている有感記述の品質（均質性・完全性）について、調査する必要がある。計器観測時代の地震カタログにおいても、マグニチュードの決定方法や観測網の移設・廃止等により均質性が必ずしも保持されるわけではなく、人為的な見かけ上の地震活動変化が生じる場合がある（たとえば、Habermann，1987）。史料中の有感記録においても、地震活動変化を議論するのに十分な均質性を有しているか、検討することが必

要である。

カタログ（史料）には欠測期間が含まれている可能性がある。どの期間の有感地震が漏れなく記録されているのか、有感記録がない期間がたんに記録自体がない欠測期間であったのか、検討する必要がある。本稿で紹介した『弘前藩庁日記』や『榊原藩日記』を用いた検討では日記中の天候に関する記述を1つの拠り所として均質な歴史時代の地震活動推定を試みたが、日記中に記された有感記録には、人為的な影響によるみかけの地震活動変化が含まれている可能性がある。また欠測がなかったとしても、筆者自身が移動することによって記録地点が時間とともに変化することもあり（たとえば、服部ほか，2020）、有感の記録地点に関しても注意を要する。

稠密地震観測網が展開された以降の近年に発生した地震データの活用も重要である。記述地点が明らかな有感を記録する史料が見出されたとしても、一般にその有感記録がどこで発生した地震によるものであったのかについて、単一地点の日記史料から論ずることは困難である。図6に示したような検討は、日記史料等に記述されている有感地震の範囲について、一助となり得る。近年のデータとの類似性から議論することも（たとえば、石辺ほか，2015）、歴史時代の地震活動復元に、今後必要になってくるものと思われる。

## 6. おわりに

日本における内陸活断層で発生する固有規模の地震の再来間隔は、一般的に数千年～数万年に及び、その繰り返し挙動や揺らぎに関する理解を深めるためには、史料を用いた歴史地震研究や、地形・地質学的調査に基づく古地震研究が必須である。またその成果は、地震のハザード評価や地域の防災教育等に対しても有用であり、これらの調査研究や研究成果の利活用にあたっては、さまざまな研究分野を横断した共同研究が重要である。歴史地震研究会では、理学・工学・歴史学・防災科学などの各方面から、研究者、防災行政・事業の実務担当者、郷土史家、報道関係者などが参画

し、歴史地震とそれに関連する諸現象について研究が進められている（歴史地震研究会，2021）。

また、東京大学地震研究所と史料編纂所が連携して設立した地震火山史料連携研究機構では、歴史学者と地震学者が協力して史料の収集・編纂ならびに分析が進められている（加納ほか，2021）。

長年にわたる歴史地震研究によって、歴史地震の発生履歴や被害の詳細、推定される震源位置や地震規模、既知の活断層やプレートの沈み込みとの関係などの解明が進められてきたが、依然として震源域や規模あるいは地震発生の有無に関して議論の余地がある歴史地震は少なくない。その一因として、特に古代・中世に関して残存する史料に限られることもあげられるが、それらの史料に記録された被害記述あるいは有感地震などにに基づき、歴史地震の地震像や歴史時代の地震活動を調査する地震研究者に限られていることも大きい。本稿で紹介したように、歴史地震研究の基礎資料である歴史資料のデータベース化が進んでおり、理系の地震研究者が歴史地震研究へ参画するための敷居は低くなっている。原史料の翻刻に関しても、近年では人工知能（機械学習）による画像認識技術の発展等を背景に、さまざまなくずし字解読システムやくずし字字典データベースの構築・整備が進められてきた（たとえば、井上，2013；山本・大澤，2016）。また、多数の人々が協力して史料の翻刻に参加し歴史資料の解読をすることを目的とした「みんなで翻刻」プロジェクトが進められており、そこではくずし字の自動認識が可能なAIプログラムも導入されている（橋本ほか，2020；加納，2020）。このように、理系の地震学者が歴史地震研究に取り組むための環境は整ってきており、積極的な参画が望まれる。

## 謝辞

本研究では、気象庁による震度データベース（石垣・高木，2000）の震度データを使用した。図の作成には、Generic Mapping Tools（Wessel and Smith, 1998）を用いた。『弘前藩日記』の写真画像については、弘前市立弘前図書館に使用の許可をいただいた。東京大学地震研究所・地震

火山史料連携研究機構 加納靖之准教授、（公財）地震予知総合研究振興会 松浦律子上席研究員、東京大学地域未来社会連携研究機構 五島朋子特任助教には原稿に関して貴重なご意見をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。なお、本研究の一部は令和元年度～令和3年度東京大学地震研究所共同利用（研究課題名：史料中の有感地震記録を用いた歴史地震研究の新展開，研究代表者：石辺岳男）の経費を用いて実施された。

## 参考文献

- 福眞吉美. 2018a. CD-ROM「弘前藩日記ひろひよみ【御国・江戸】」, 北方新社. <https://jcdp.jp/daily-diary-weather-records-jp/>
- 福眞吉美. 2018b. 「弘前藩日記」のデータベース化とその意義. 地学雑誌, **127**, 565-568.
- Habermann, R.E. 1987. Man-made changes of seismicity rates. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**, 141-159.
- 原田智也. 2021. 実在しない2つの安政二年（1855年）豊後国「被害地震」. *地震第2輯*, **74**, 87-93.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志. 2017. 明応七年六月十一日（1498年6月30日）の日向灘大地震は存在しなかった—『九州軍記』の被害記述の検討—. *地震第2輯*, **70**, 89-107.
- 橋本雄太・加納靖之・一方井祐子・小野英理. 2020. 『みんなで翻刻』の運用成果と参加動向の報告. 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, 39-46.
- 服部健太郎・中西一郎・大邑潤三. 2020. 日記の筆者が地震動を感じた地点の時間変化：近江八幡「市田家日記」の場合. *地震第2輯*, **73**, 65-68.
- Hayashi, Y. 2021. The Oldest Report of a 1537 Mexico tsunami based on Japanese literature is erroneous. *Seismol. Res. Lett.* doi:10.1785/0220200453
- 井上 聡. 2013. 「電子くずし字字典データベース」の課題と将来展望. 情報処理学会研究報告人文科学とコンピュータ (CH), **2013-CH-97(9)**, 1-5.
- 石橋克彦. 1977. 1703年元禄関東地震の震源域と相模湾における大地震の再来周期（第1報）. *地震第2輯*, **30**, 369-374.
- 石橋克彦. 1983. 1433（永享5）年会津地震（M6.7）の非実在性. *地震第2輯*, **36**, 169-176.
- 石橋克彦. 2009. 歴史地震史料の全文データベース化. *地震第2輯*, **61**, S509-S517.
- Ishibashi, K. 2004. Status of historical seismology in

- Japan. *Ann Geophys*, **47**, 339-368.
- 石橋克彦・原田智也. 2017. 744年天平肥後地震と869年貞観肥後風水災について. *地震第2輯*, **70**, 13-20.
- 石橋克彦・古代中世地震史料研究会. 2011. [古代・中世] 地震・噴火史料データベース. *歴史地震*, **26**, 86.
- 石橋克彦・佐竹健治. 1998. 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題—日本付近のプレート沈み込み帯を中心として—. *地震第2輯*, **50**, 別冊, 1-21.
- Ishibe, T., Shimazaki, K., Satake, K. and Tsuruoka, H. 2011. Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planet Space*, **63**, 731-735.
- Ishibe, T., Satake, K., Sakai, S., Shimazaki, K., Tsuruoka, H., Yokota, Y., Nakagawa, S. and Hirata, N. 2015. Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan. *Geophys. J. Intern.*, **201**, 112-134.
- Ishibe, T., Ogata, Y., Tsuruoka, H. and Satake, K. 2017. Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes. *Geosci. Lett.*, **4**, 5. doi:10.1186/s40562-017-0070-y
- 石辺岳男・佐竹健治・村岸 純・鶴岡 弘・中川茂樹・酒井慎一・平田 直. 2015. 関東地方において計器観測初期に発生した地震の調査のための近年の地震データの収集・整理と1922年浦賀水道付近の地震への予察的適用. *歴史地震*, **30**, 109-127.
- 石辺岳男・松浦律子・古村美津子・赤塚真弓・岩佐幸治・田力正好・佐竹健治・榎原雅治. 2021a. 有感記録ならびに震度の距離減衰式に基づく歴史時代の地震活動解析に向けて—気象庁震度データベースを用いた予察的検討—. *歴史地震*, **36**, 111-125.
- 石辺岳男・五島朋子・中村亮一・片桐昭彦・室谷智子・佐竹健治. 2021b. 気象災害であった可能性が高い1092年(寛治六年八月三日)の越後の大波. 第38回歴史地震研究会(オンライン苫小牧大会)講演要旨集, 25.
- 石垣祐三・高木朗充. 2000. 気象庁震度データベースの整備及び活用例について. *駿震時報*, **63**, 75-92.
- 石垣祐三. 2007. 明治・大正時代の震度観測について—震度データベースの遡及—. *駿震時報*, **70**, 29-49.
- 岩崎伸一・吉井敏尅・都司嘉宣・石橋克彦・笠原敬司・小見波正隆. 1990. 歴史地震史料集のデータベース化. 地震学会講演予稿集1990年春季大会, 182.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2013. 九州地域の活断層の長期評価(第一版), 81 pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2015. 関東地域の活断層の長期評価(第一版), 127 pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2016. 中国地域の活断層の長期評価(第一版), 70 pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2017a. 四国地域の活断層の長期評価(第一版), 57 pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2017b. 千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版), 130 pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会. 2019. 日本海溝沿いの地震活動の長期評価, 144 pp.
- 地震火山史料連携研究機構. 2021. 地震史料集テキストデータベース. <https://materials.utkozisins.org/>(最終閲覧日, 2021年8月13日).
- 加納靖之. 2016. 弘化四年(1847年)越後高田の地震における年月日の取り違い. *地震第2輯*, **69**, 41-47.
- 加納靖之. 2017. 地震年表や史料集における年月日の取り違い. *歴史地震*, **32**, 87-93.
- 加納靖之. 2020. 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—. *地震ジャーナル*, **69**, 59-63.
- 加納靖之・杉森玲子・榎原雅治・佐竹健治. 2021. 歴史の中の地震・噴火—過去が示す未来. 東京大学出版会, 228 pp.
- Katsumata, K. 2011. A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M=9.0). *Earth, Planets Space*, **63**, 709-712. doi:10.5047/eps.2011.06.033
- 松井 渉・尾池和夫. 1997. 有感余震数を用いた歴史地震の震央決定. *歴史地震*, **13**, 13-22.
- Matsu'ura, R.S. 2017. A short history of Japanese historical seismology: past and the present. *Geosci. Lett.*, **4**, 3. doi: 10.1186/s40562-017-0069-4
- 松浦律子・中村 操. 2016. 詳細震度検討による1703年元禄地震の新地震像(速報). *歴史地震*, **31**, 9-16.
- 松浦律子・中村 操. 2020. 近世・近代初期の歴史地震の系統的解析—20年間のまとめ. *歴史地震*, **35**, 221-224.
- 松浦律子・中村 操. 2021. 近世・近代初期の歴史地震の系統的解析—20年間のまとめ(改訂). *歴史地震*, **36**, 235-239.
- 松浦律子・中村 操・茅根一郎・唐鎌郁夫. 2006. 江戸時代の歴史地震の震源域・規模の再検討作業—7年

- 間の成果中間報告一. *歴史地震*, **21**, 255-256.
- 松浦律子・都司嘉宣. 2010. 文久宮城の地震前の地震活動度の静穏化—相馬吉田屋覚書日記のデータから. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集 (SSS013-05).
- 文部省震災予防評議会. 1941. 増訂大日本地震史料, 第 1 巻, 945 pp. (復刻版, 鳴鳳社, 1975)
- 文部省震災予防評議会. 1943a. 増訂大日本地震史料, 第 2 巻, 754 pp. (復刻版, 鳴鳳社, 1975)
- 文部省震災予防評議会. 1943b. 増訂大日本地震史料, 第 3 巻, 945 pp. (復刻版, 鳴鳳社, 1976)
- 内閣府. 2007. 1847 善光寺地震, 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書, 平成 19 年 3 月, 225 pp. [http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1847\\_zenko\\_jishin/index.html](http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1847_zenko_jishin/index.html) (最終閲覧日, 2021 年 8 月 18 日).
- 内閣府. 2013. 首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書. 内閣府首都直下地震モデル検討会 平成 25 年 12 月. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/index.html> (最終閲覧日, 2021 年 8 月 18 日).
- Nakamura, R., Satake, K., Ishibe, T., Nishiyama, A. and Muragishi, J. 2020. Characteristics of far field seismic intensity distribution for the 1855 Ansei-Edo earthquake. Proceeding of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE), 1a-0004.
- 中村左衛門太郎. 1924. 関東大地震報告, 震災予防調査会報告 (中央気象台編), 100 甲, 67-140.
- 中村左衛門太郎. 1925. 関東大震災調査報告, 震災予防調査会報告, 第 100 号甲, 21-66.
- 行谷佑一・佐竹健治・宍倉正展. 2011. 南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄地震と 1923 年大正関東地震の断層モデル. *活断層・古地震研究報告*, **11**, 107-120.
- 西山昭仁. 2010. 文政京都地震 (1830 年) における京都盆地での被害要因の検討—棧瓦葺屋根の普及による被害の拡大—. *地震研究所彙報*, **85**, 33-47.
- 西山昭仁・水野 嶺・吉岡誠也・片桐昭彦. 2021. 日記史料有感地震データベース (試作版). <http://www.weic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/> (最終閲覧日, 2021 年 8 月 5 日)
- Omori, F. 1894. On the after-shocks of earthquakes. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, **7**, 111-120.
- 尾池和夫. 1996. 京都とその周辺地域の有感地震データベース (416 年~1995 年) について. *歴史地震*, **12**, 61-70.
- 歴史地震研究会. 2021. <https://www.histeq.jp/> (最終閲覧日, 2021 年 8 月 20 日)
- 佐竹健治. 2002. 江戸時代の千島海溝の地震活動を東北・関東の史料から推定する. *歴史地震*, **18**, 18-33.
- 佐竹健治. 2018. 1586 年三陸における津波は「みなしご津波」か「偽津波」か?. *歴史地震*, **33**, 261.
- 佐竹健治・村岸 純・榎原雅治・矢田俊文・石辺岳男・西山昭仁. 2018. 江戸時代に関東地方で発生した歴史地震の史資料データベース. *歴史地震*, **33**, 61-77.
- Satake, K. and Ishibe, T. 2020. Toward homogeneous estimation of long-term seismicity from historical materials: number of felt earthquakes in Tokyo since 1668. *Seismol. Res. Lett.*, **91**, 2601-2610. doi:10.1785/0220200060
- 田山 實. 1904a. 大日本地震史料. *震災予防調査会報告*, 46 甲, 606 pp.
- 田山 實. 1904b. 大日本地震史料. *震災予防調査会報告*, 46 乙, 595 pp.
- 東京大学地震研究所 (編). 1981. 新収日本地震史料第 1 巻. 東京大学地震研究所, 193 pp.
- 都司嘉宣・日野貴之. 1992. 小田原地震と関東地方の有感地震の変化. *歴史地震*, **8**, 47-97.
- 宇佐美龍夫. 1980. 江戸における有感地震回数の変遷. *地震予知連絡会会報*, **24**, 244-247.
- 宇佐美龍夫 (編). 1998. 「日本の歴史地震史料」拾遺. 512 pp.
- Usami, T. 2002. Historical earthquakes in Japan, *Intern. Geophys.*, **81**, Part A, 799-802 (in International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A, edited by Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C. and Kisslinger, C., Academic Press). doi: 10.1016/S0074-6142(02)80254-6
- 宇佐美龍夫・石井 寿. 2019. 歴史地震総表について. *歴史地震*, **34**, 236.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子. 2013. 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 724 pp.
- 宇佐美龍夫・渡邊 健. 2005. 江戸 (東京) における毎年の有感地震回数の変遷. *歴史地震*, **20**, 274.
- Utsu, T., Ogata, Y. and Matsu'ura, R.S. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *J. Phys. Earth*, **43**, 1-33.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released. *EOS*

Trans., AGU, 79, 579.

山本純子・大澤留次郎. 2016. 古典籍翻刻の省力化：くずし字を含む新方式 OCR 技術の開発. *情報管理*, 58, 819-827.

山中佳子, 宇佐美龍夫. 2020. 歴史地震総表の WEB 検索システムの構築. 日本地震学会 2020 年度秋季大会, S10P-01.

石辺岳男

[いしべ たけお]

**現職** 公益財団法人地震予知総合研究振興会地震調査研究センター解析部主任研究員

**略歴** 東京大学大学院理学系研究科前期博士課程修了, 東京大学大学院理学系研究科後期博士課程修了. 博士 (理学). 東京大学地震研究所を経て, 2016 年から公益財団法人地震予知総合研究振興会地震調査研究センター解析部副主任研究員, 2018 年 4 月から現職. 東京大学地震研究所外来研究員 (2016 年 5 月～), 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構統計数理研究所外来研究員 (2021 年 5 月～)

**研究分野** 地震学 (地震活動, 歴史地震)



佐竹健治

[さたけ けんじ]

**現職** 東京大学地震研究所所長・教授

**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・巨大津波)

**著書** 巨大地震・巨大津波 (共著, 朝倉書店), 東日本大震災の科学 (共編, 東京大学出版会), 歴史のなかの地震・噴火 (共著, 東京大学出版会)



## 震災復興計画の宿題

1923年、関東大震災が発生して後藤新平が震災復興を担う内務大臣を引き受けたとき、一枚のメモをつくった。それには「欧米でも最新の都市計画を採用する。地主に対しては断固たる態度で臨む」と書いた。閣議では「地震は何度もくる。今後、大きな被害を出さないため、公園と道路をつくる」と宣言し、帝都復興計画をつくった。

結果として、幅44mの昭和通り、36mの靖国通りをはじめとして日比谷通り、晴海通りなど幅30mを超す主要な幹線道路がこのとき整備された。日本初の海辺公園と言うべき横浜の山下公園、日本初の川辺公園となった東京の隅田公園をはじめたくさんの公園、市民が集い議論するための日比谷公会堂など、人間生活中心の各種都市施設がつくられた。近代的な生活を目指した不燃建築の同潤会アパート、吾妻橋、駒形橋、言問橋、厩橋など、隅田川を橋の博物館とした鉄製の名橋もつくられた。

しかし、宿題が残された。

1つは、環状道路計画である。震災復興計画

は、消火・救援活動のため、そして効率的で快適な都市をつくるため、環状道路と放射道路を組み合わせた都市構造を決定した。具体的には、皇居を中心として、内側から順に環状1号線から5号線まで5本の環状道路をつくり、これに上記の放射道路と組み合わせる計画だった。震災後東京の人口は郊外に膨張したので4年後の1927年には環状6号線から8号線まで3本の道路を追加した。私が勤務した東京都は、これらを98年間つくり続けて、ようやく完成に近づいている。

2つ目には、消火活動と避難路確保のため、住宅地域の道路幅をすべて6m以上とする計画をつくったが、復興予算が大幅に削減されたため実行されなかった。この計画はいまだに実現していない。結果として、首都直下地震の被害想定では、高い火災危険度が示されている。

私たちは、この98年前の宿題を強く意識して地震対策を進めるべきだと思う。

(青山 侑：明治大学名誉教授、

令和防災研究所長、元東京都副知事)



# 上部地殻でも発生する低周波地震 —それが地震発生メカニズムの理解を助ける？—

長谷川昭・中島淳一

## 1. はじめに

震源から出る地震波の卓越周波数はマグニチュード (M) に依存し、M が大きくなれば卓越周波数は低くなる。ただし、M の割に異常に低周波が卓越する地震もある。「低周波地震」と呼ばれる地震である。たとえば、M 0~2.5 程度の微小地震の卓越周波数は、速度波形でみたとき 10~数 10 Hz であるが、M が同じ 0~2.5 程度であっても、卓越周波数が数 Hz 程度と著しく低周波が卓越する地震も発生する。一例として、図 1 (a) にそのような低周波地震の波形を示す。図 1 (b) の通常地震に較べて異常に低周波が卓越していることが分かる。

低周波地震と言えば、南海トラフ沿いのプレート境界で発生する低周波地震がよく知られている (Obara, 2002)。これは、プレート境界で周期的に発生するゆっくり滑りイベントに伴って発生するもので、その滑り域の中に点在する小さなアスペリティが動的に滑って低周波の地震波を出すことによると理解されている (Ide *et al.*, 2007)。このようなプレート境界の低周波地震は、世界中の多くの沈み込み帯やトランスフォーム断層などのプレート境界で見つかっている。

低周波地震は、陸のプレート内部でも発生する。その多くが火山下のマントル最上部~下部地殻で発生し、マグマや流体の急激な移動などに起因して発生すると考えられてきた (Aki and Koyanagi, 1981 ; Hasegawa and Yamamoto, 1994 ; Aso *et al.*, 2013)。ところが最近になって、火山から遠く離れた場所の上部地殻でも低周波地震が発生していることが判明した (Nakajima and

Hasegawa, 2021)。低周波地震がマグマや流体が関与して発生するのであれば、この発見は通常の地震の発生メカニズムを理解する上でも重要である。

本稿では、Nakajima and Hasegawa (2021) と長谷川・中島 (2021) に基づいて、低周波地震が上部地殻でも発生することを紹介するとともに、そのことから推測される地震の発生メカニズムについて概説する。

## 2. 深部低周波地震の発見

実は、陸域下の (プレート内の) 低周波地震のほうが、プレート境界の低周波地震よりずっと早く発見された。最初に発見されたのは、早くから地震観測網が整備されたハワイ島キラウエア火山下の深さ約 55 km においてである (Eaton and Murata, 1960)。キラウエア火山について 2 番目は、地震予知研究計画で高感度の微小地震観測網が整備されたわが国であり、岩手火山下の下部地殻の 2 カ所で低周波地震が発見された (高木・長谷川, 1976)。その後、地震観測網の整備が進むにつれて、世界中の多くの地域で次つぎと低周波地震が検出されるようになった。その多くが、火山下のマントル最上部~下部地殻で見つかつており、地殻内の地震 (浅発地震) の深さの下限 (脆性-延性転移の深さ) より十分深い深さ (多くは 15~45 km) で発生するので「深部低周波地震」と呼ばれている。本誌でも、以前に箱根火山下の深部低周波地震についての論文が掲載されている (行竹, 2020)。図 1 (a) に示したのは、磐梯火山下の深さ 30 km で発生した深部低周波地震の波形である。図 2 には、岩手山や秋田駒ヶ岳などの

直下で発生した深部低周波地震の震源分布を鉛直断面に投影して示す。深部低周波地震は、通常地震の深さの下限より十分深い延性的性質を示す下部地殻～マントル最上部でクラスターの的に発生していることが分かる。

深部低周波地震は、当初は、火山下のマントル最上部～下部地殻で検出されていた（鶴川・小

原, 1993 ; Hasegawa and Yamamoto, 1994)。しかし、1995年兵庫県南部地震後に整備された基盤地震観測網により日本列島の地震検知能力が格段に向上すると、火山の直下だけでなく、京都府南部や大阪湾など、火山から離れた地域のマントル最上部～下部地殻でも深部低周波地震が発生していることが判明した（鎌谷・勝間田, 2004）。

諸外国でも、地震観測網が整備されるにつれて、キラウエア火山以外に、ロングバレーカルデラ、ピナツボ火山、アイスランドのヘクラ火山、ドイツのラーヘルゼー火山など、さまざまな火山の直下に深部低周波地震が発生していることが分かってきた。また、火山から離れた地域で発生する深部低周波地震も、米国オレゴン州で、火山フロントより前弧側に20～50 km程度離れた4カ所のマントル最上部～下部地殻で検出された。

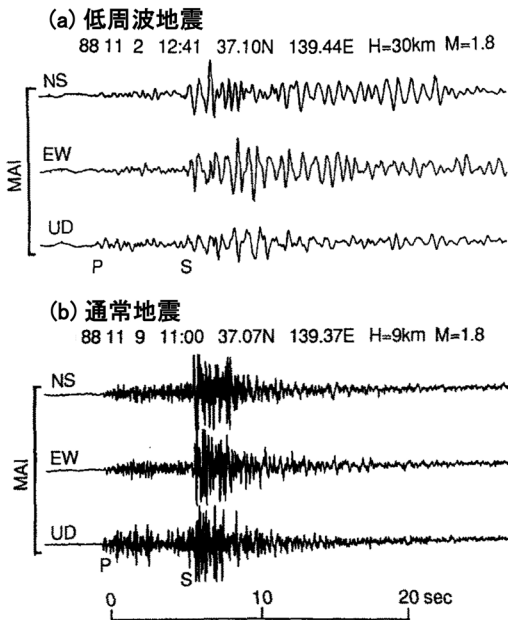


図 1 (a) 低周波地震と (b) 通常地震の波形例。発生時、震源位置、M を波形の上部に示す (Hasegawa and Yamamoto, 1994)

### 3. 浅部低周波地震の発見

上記のように、陸域下の低周波地震は、(地殻極浅部(数 km 以浅)で発生する火山の低周波地震を除けば) 通常は地震が発生しない延性領域であるマントル最上部～下部地殻で発生する深部低周波地震だけであると、これまでは考えられてきた。しかし最近になって、上部地殻で発生する低周波地震の事例が報告されるようになってきた。たとえば、野口ほか (2018), Yoshida *et al.* (2020)

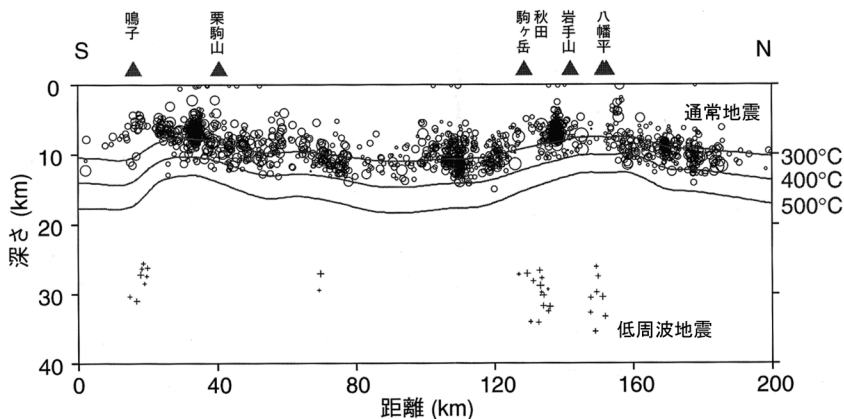


図 2 低周波地震 (+) と通常地震 (O) の震源分布。東北地方脊梁山地に沿う南北鉛直断面 (Hasegawa and Yamamoto, 1994)

は、北海道西部の函館付近で、地殻最下部から上部地殻にかけて、約5kmから35kmまで深さ方向に連続して低周波地震が発生していることを見出した。下部地殻で発生するのは低周波地震だけであるが、上部地殻では低周波地震と通常地震

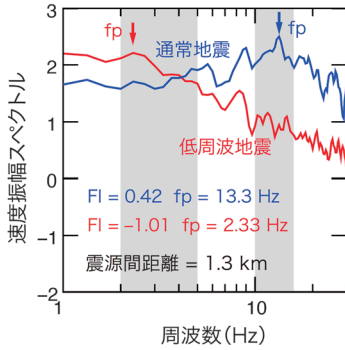


図3 ピーク周波数  $f_p$  と周波数指標  $FI$  の求め方.  $f_p$  は速度振幅スペクトルが最大となる周波数,  $FI$  は高周波帯域 (影で示した右側の帯域) と低周波帯域 (影で示した左側の帯域) の平均スペクトル振幅の比の対数

が混在して発生している. さらに Yoshida *et al.* (2020) は、上部地殻で発生し気象庁一元化震源で通常地震と判定された函館付近の地震の中に、実際は低周波地震が多数含まれていることを明らかにした. このことは、陸域下の低周波地震はマントル最上部~下部地殻に発生する深部低周波地震だけであるという従来の考えが間違っていることを示している.

これらの研究結果を受けて、Nakajima and Hasegawa (2021) は、日本列島全域の内陸浅発地震に対して、低周波地震検出のための系統的な調査を行った. 対象としたのは、一元化震源カタログで2003~2017年に日本列島陸域下0~35kmの深さに発生したM0~2.5のすべての地震、合計984,217個である. これらの地震に対して、震源に近い観測点で記録したS波波形のスペクトルを計算し、それに基づいてピーク周波数  $f_p$  および周波数指標 (frequency index)  $FI$  を求めた. 図3に示すように、 $f_p$  は速度振幅スペクトルで

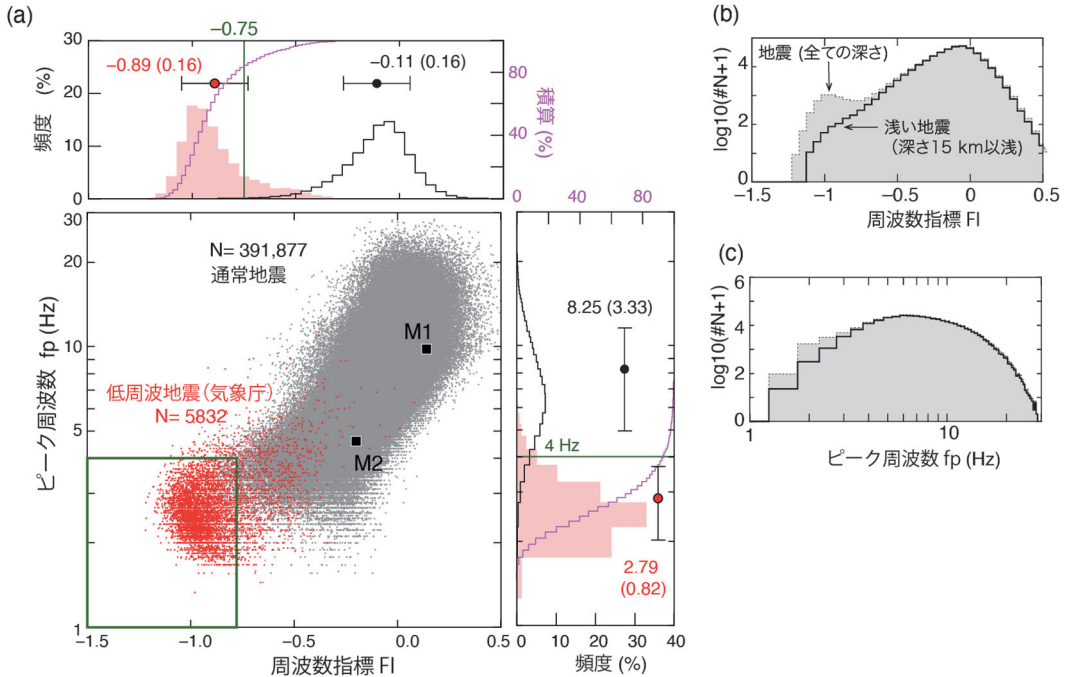


図4 (a) 低周波地震 (赤点) と通常地震 (灰色点) の  $FI$  に対する  $f_p$  のプロット. 緑四角: 低周波地震の判定に用いた範囲. 上図と右図: 通常地震 (黒) と低周波地震 (赤および赤紫) の  $FI$  と  $f_p$  の頻度分布と積算曲線. (b) 0~35km (灰色) と0~15km (黒線) の地震の  $FI$  の頻度分布, および (c)  $f_p$  の頻度分布 (Nakajima and Hasegawa, 2021)

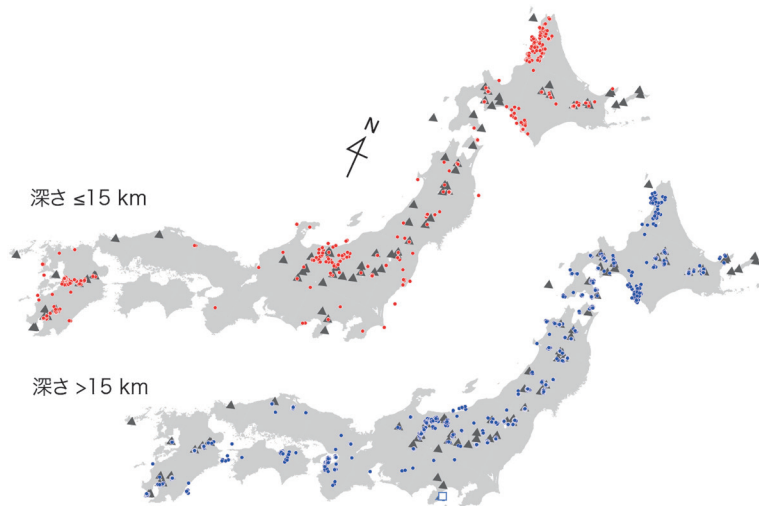


図5 低周波地震の震央分布. 上図：深さ ≤ 15 km, 下図：深さ > 15 km. ▲は火山を示す (Nakajima and Hasegawa, 2021)

振幅が最大になる周波数とし、FI は  $FI = \log(Ah/AI)$  で計算する。ここで Ah は高周波帯域 (10~15 Hz：図3で影を付けた右側の帯域)、AI は低周波帯域 (2~5 Hz：図3で影を付けた左側の帯域) における平均スペクトル振幅である。低周波地震の判定には、この fp と FI が用いられた。fp も FI も、異常に低周波が卓越する低周波地震では、通常地震に較べてずっと小さくなることが期待されるからである。

全地震のうち fp と FI の値が求まったのは 391,877 個であった。それらの地震に対して、fp を縦軸、FI を横軸にしてプロットしたのが図4 (a) である。予想どおり、一元化震源で低周波地震と判定された地震 (赤点) は fp と FI の小さい側に、一方、通常地震と判定された地震 (灰色点) は大きい側に分布する。ただし、赤点の低周波地震と灰色点の通常地震との間に明瞭な境界は見えず、その間では両者が混在している。それは、図4 (b), (c) の fp と FI の値の頻度分布からも見てとれる。Nakajima and Hasegawa (2021) は、 $fp < 4 \text{ Hz}$  かつ  $FI < -0.75$  (図4 (a) の緑の四角内) の基準を満たすものを低周波地震と判定した。したがって、一元化震源で低周波地震と判定されたもの (赤点) であっても、この判定基準を満たさないものがあり (緑の四角の外側に分布す

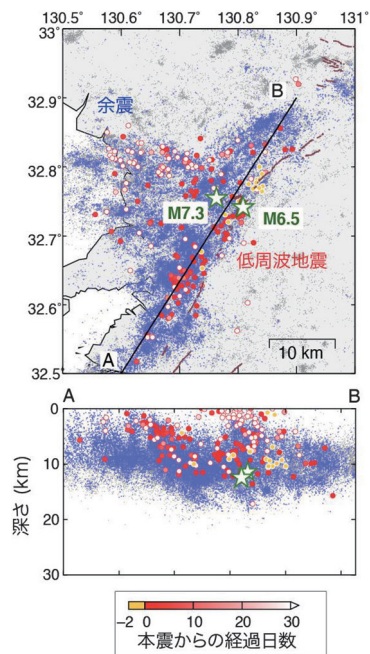


図6 2016年熊本地震の余震分布と低周波地震. 上図：震央分布, 下図：A-B に沿う鉛直断面. 低周波地震 (○), 通常地震 (青点). 大緑星：本震, 緑星：M6.5 前震. ここでの低周波地震は震源域で  $FI < \mu - 3\sigma$  の条件により再定義したもの ( $\mu$ ：平均値,  $\sigma$ ：標準偏差) (Nakajima and Hasegawa, 2021)

る赤点), Nakajima and Hasegawa (2021) ではそれらは通常地震と判定された。

図5は、このようにして判定された低周波地震の震央分布である。多くは下部地殻（15km以深）で発生しており、これらは従来から知られていた深部低周波地震である。一方で、上部地殻（15km以浅）にも一定数の低周波地震が発生している。これら上部地殻で発生する「浅部低周波地震」は、火山近傍に加えて、北海道北部や日高地方、東北地方南部から関東地方にかけての太平洋沿岸など、火山から遠く離れた地域でも発生している。図6には、2016年熊本地震を例として、大地震の余震に含まれる浅部低周波地震の震源分布を示す。余震の中に低周波地震が多数含まれていることが分かる。図5にみられるように、低周波地震は、マントル最上部～下部地殻で発生する深部低周波地震だけでなく、陸域下の上部地殻でも広域に発生していることが判明した。このことは、低周波地震発生の条件として、通常は地震が発生しない（地震発生層の下限より深い）延性領域である必要はないことを示している。しかも、上部地殻で発生する浅部低周波地震は、図6にみられるように、通常地震と混在して、かつ通常地震ときわめて近接して発生している。たとえば、図3にスペクトルを示した低周波地震と通常地震はどちらも熊本地震の余震であるが、互いに1.3kmしか離れていない。これらの観測事実は、低周波地震

の発生メカニズムを考える上で非常に重要である。

#### 4. 低周波地震の発生メカニズム

浅部低周波地震は発見されたばかりなのでまだであるが、深部低周波地震の発生メカニズムの研究はこれまでに進められてきた。その結果、深部低周波地震は、通常地震やプレート境界の低周波地震とは違って、断層滑り（せん断破壊）に対応するダブルカップル（DC）だけの発震機構では説明できないことが判明した。多くの場合、DC成分に加えて、体積変化成分と compensated linear vector dipole (CLVD) 成分とが重合した発震機構を持つ。しかも、それぞれの成分が寄与する割合がイベントごとに異なるという多様な発震機構を持つことも分かってきた。しかし、そのような多様な発震機構をもたらす発生メカニズムについては、いくつかのモデルが提唱されているものの、どのモデルが正しいのか、あるいは発生場所によって異なるメカニズムが働いているのか、現時点では必ずしもよく分かっていない。ただし、いずれのモデルもマグマか流体を含んだ発生メカニズムであり、深部低周波地震の発生にはマグマか流体のどちらかが関与していることはほぼ間違いないであろう。

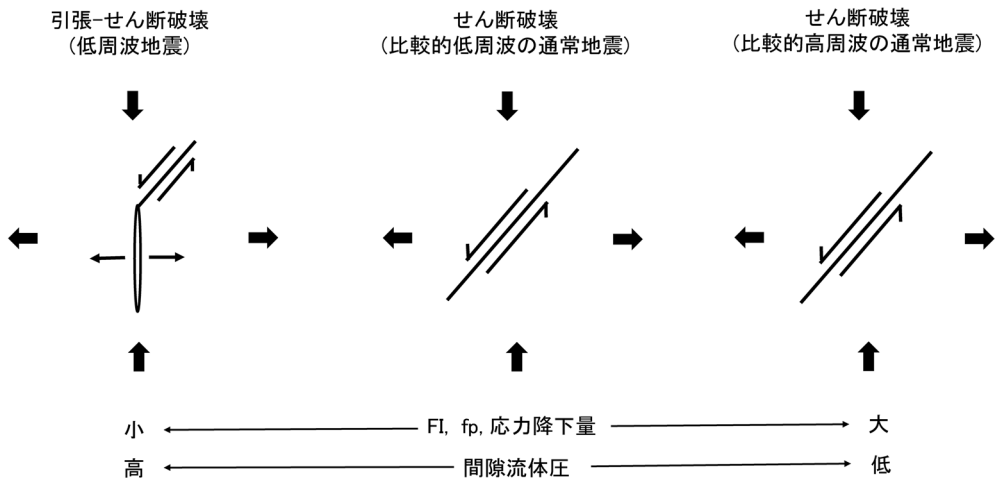


図7 引張-せん断破壊（左図）とせん断破壊（中図および右図）。主として間隙流体圧の高低が低周波地震か通常地震かを定める（長谷川・中島（2021）に加筆）

ところで、浅部低周波地震であるが、波形の特徴は深部低周波地震とまったく同じである (Yoshida *et al.*, 2020 ; Nakajima and Hasegawa, 2021). 加えて、函館付近の低周波地震のように、下部地殻から上部地殻にかけて、深部低周波地震→浅部低周波地震と空間的に連続して発生するという事例 (Yoshida *et al.*, 2020) があることも考慮すれば、浅部低周波地震も深部低周波地震と同じ発生メカニズムであると推測される。そうだとすると、浅部低周波地震と深部低周波地震とはたんに深さが違うだけであり、したがって、陸域下の低周波地震は、マントル最上部から上部地殻まで広い深さ範囲で発生していることになる。これは、低周波地震の発生メカニズムを考える上で強い制約を与える。低周波地震は、図5にみられるように、マグマが存在しない場所、たとえば前弧の上部地殻でも発生している。さらに、図6から分かるように、上部地殻では、通常地震と低周波地震は互いに別な場所で発生するわけではなく、むしろ混在し互いにきわめて近接して発生している。低周波地震がこのような起こり方をするのであれば、これまで提唱されてきたモデルのうち、マグマの存在を前提とするモデルは、発生メ

カニズムとして考えにくい。

マグマの存在を前提としないモデルとして残るのは、図7左図に模式的に示すような引張-せん断破壊 (tensile-shear crack) モデルである (Nakamichi *et al.*, 2003). このモデルでは、マグマか流体のどちらかが存在すればよく、流体の場合には通常地震と近接して発生しても不思議ではない。したがって、低周波地震はマントル最上部から上部地殻までの広い深さ範囲で発生し、その発生メカニズムは引張-せん断破壊であると推測される (Nakajima and Hasegawa, 2021). なお、これを支持する研究として、間隙流体圧の上昇に起因して、実際に深部低周波地震を引き起こしたと思われる引張-せん断破壊の痕跡が上部マントルおよび下部地殻の捕獲岩の中に残されているという報告もある。

## 5. 地震の発生メカニズム

陸域下の低周波地震は、上部地殻でも発生し (図5)、そこでは通常地震と混在して互いにきわめて近接して発生している (図6). さらに、低周波地震であればきわめて小さい値になると期待

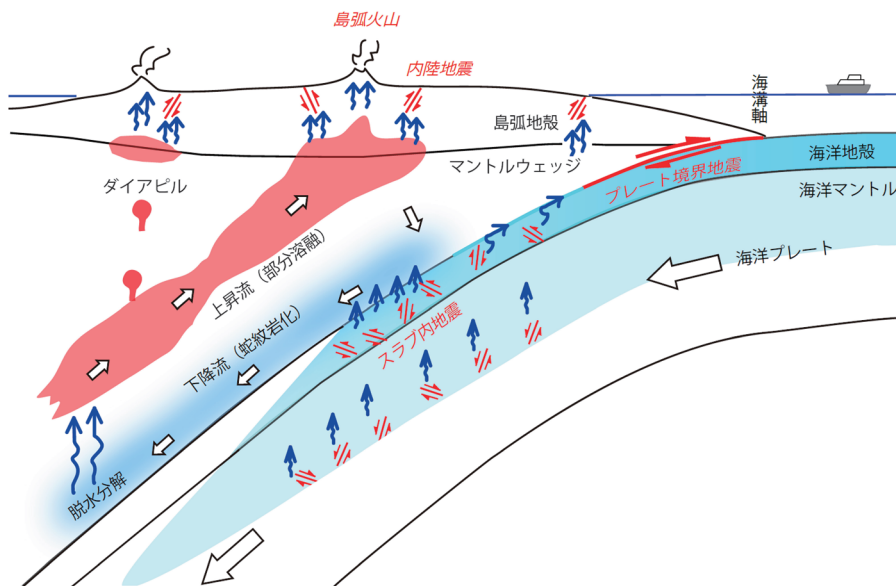


図8 プレート沈み込みに伴って移動する水と地震・火山活動。沈み込んだ海洋プレートから吐き出され移動する水の上昇経路 (青矢印) を島弧横断鉛直断面に模式的に示す (長谷川・中島, 2021)

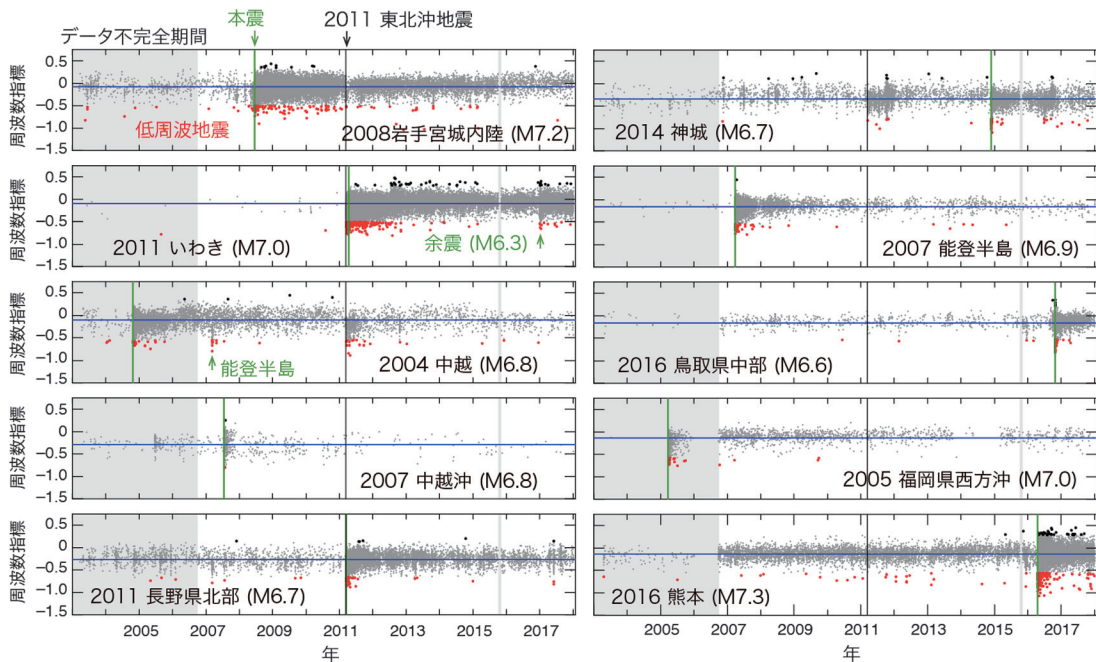


図9 内陸大地震震源域におけるFIの時間変化。FIを灰色点、その平均を青線、低周波地震を赤丸で示す。縦緑線および黒線は本震および2011年東北沖地震の時刻。ここでの低周波地震は図6と同様に再定義されたもの (Nakajima and Hasegawa, 2021)

されることから低周波地震の判定に用いたFIとfpであるが、図4にみられるように、それらの分布には、低周波地震と通常地震の間に明瞭な境界が見られず、むしろ連続的に分布している。これらの観測事実は、低周波地震と通常地震の間で、それぞれの発生メカニズムにある程度の共通性が存在することを示唆する。

通常地震は図7右図および中図に模式的に示すようなせん断破壊なので、低周波地震のメカニズムが左図のような引張-せん断破壊であれば、上記の「ある程度の共通性」が存在することになり都合がよい。引張破壊の寄与がゼロであれば、せん断破壊すなわち通常地震となるからである。引張破壊の寄与の割合の大小が、発震機構がDC型か、あるいはDC成分だけでなくCLVDおよび体積変化成分を多く含むかを決定する。そして、せん断破壊の滑り速度や破壊伝播速度の高低あるいは応力降下量の大小が、低周波が卓越するか否か、すなわちFIとfpの値の大小を決定すると考える。

では、異常に低周波が卓越する低周波地震か、それともそれに比べれば高周波が卓越する通常地震か、言い換えれば、せん断破壊の滑り速度や破壊伝播速度の高低あるいは応力降下量の大小を決めるのは何であろうか？ 断層面の摩擦特性の違いが決めているのであろうが、プレート境界の低周波地震の発生に高間隙流体圧の関与が指摘されていることも考え合わせると、そのうちでも主として間隙流体圧の高低が決めていると推測される(図7)。実際、水圧破壊実験で発生した地震の中にも低周波地震が見つかっており、それらは間隙流体圧が最も高い場所で起きている。間隙流体圧がきわめて高く静岩圧に近ければ引張破壊も出現しやすいので、低周波地震が引張-せん断破壊となることも容易に理解できる。一方、それに較べれば間隙流体圧がそこまでは高くない通常地震では、単なるせん断破壊となる。ただし、低周波地震はすべて引張-せん断破壊で、通常地震はすべてせん断破壊というわけではなく、多くの場合そのようになるということであろう。実際、通常地

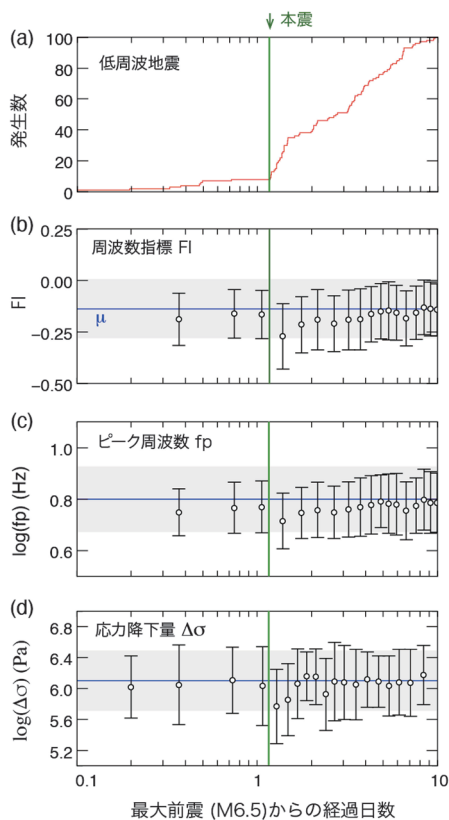


図 10 2016 年熊本地震震源域における (a) 低周波地震の積算回数, (b) FI 値, (c) fp 値, (d) 応力降下量の時間変化. 横軸は M6.5 前震からの経過時間. 縦線は本震時刻. 横青線および灰色の領域は, 全期間の平均値および標準偏差. ここでの低周波地震は図 6 と同様に再定義されたもの (Nakajima and Hasegawa, 2021)

震が引張-せん断破壊で発生したという報告もある (Hayashida *et al.*, 2020). さらに, 透水係数は空間的にきわめて不均質なので, 間隙流体圧は空間的に一様ではなく局所的に変化していると推定されることから, 通常地震と低周波地震とが互いにきわめて近接して発生することも容易に理解できる.

だとすると, 低周波地震と同様に, 通常地震の発生にも間隙流体圧が深く関与し, 言わばその発生をコントロールしていることになる. このことは, 内陸浅発地震の発生メカニズムを理解する上できわめて重要である. 沈み込み帯では, 図 8 に模式的に示すように, 沈み込んだスラブから吐き

出された水がマントルウェッジを経ていずれは直上の島弧地殻にまで上昇する. 直下のマントルウェッジから上昇してきた水を主成分とする流体は, 地殻を軟化させ, また断層に貫入すれば間隙流体圧を上昇させ断層強度を低下させるので地震発生の要因となる. われわれは以前にスラブ起源の流体による間隙流体圧の上昇が内陸地震の発生をコントロールするというモデルを提唱したが (長谷川ほか, 2012), 通常地震と混在して上部地殻で発生する低周波地震の存在は, それを支持しているようにみえる.

FI や fp の値および低周波地震の発生には, 顕著な時間変化・空間変化が認められる. FI や fp の値の大小および低周波地震の発生を決めるのが主として間隙流体圧であるなら, そのような時間変化や空間変化は容易に理解できる. 図 9 には, 10 個の内陸大地震 (2003~2017 年に発生した M6.5 以上の地震) の震源域における FI の値と低周波地震の活動度の時間変化を示す. 図から, 本震直後に低周波地震が活発化していることが分かる. さらに, 2004 年中越地震の震源域では, 2007 年能登半島地震や 2011 年東北沖地震に誘発されて低周波地震が活発化していることも分かる. 図 10 には, 2016 年熊本地震の震源域における低周波地震の積算回数, FI, fp, 応力降下量の平均値の時間変化を示す. 低周波地震の発生頻度は本震直後から急激に増加している. FI および fp の平均値は, 本震直後に低下し, その後しだいに上昇し本震前の値に回復している. 応力降下量も, 同様に本震直後に低下し, その後回復している. これらの時間変化は統計的には有意でないが, 互いに同期して変化していることから, 震源域で実際に起こったと推測される.

図 9, 図 10 にみられるような本震直後の低周波地震の活発化, FI や fp および応力降下量の本震直後の低下は, 地震発生の原因が過剰間隙流体圧にあるとするフォールトバルブ (fault-valve) モデル (Sibson, 1992) に従う震源域での流体の振る舞いを考えれば容易に理解できる. 本震が発生すると, 断層運動または強震動によって断層面上のバルブが破壊され開くので, 透水性が増加し



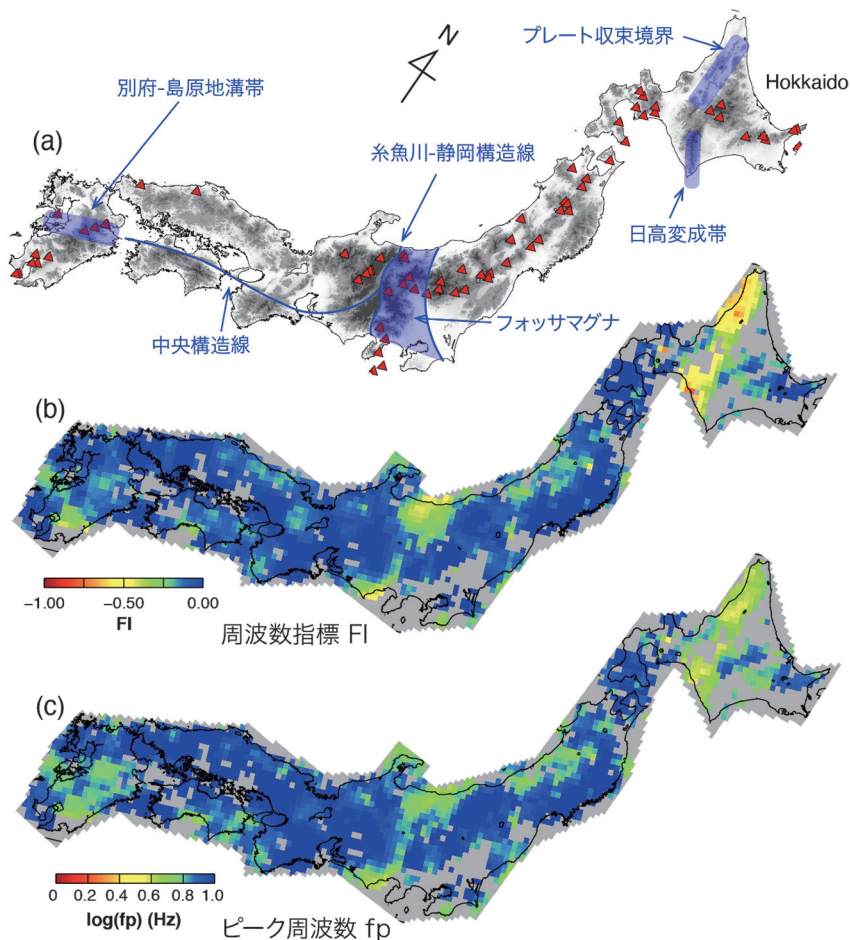


図 11 FI および fp の地域変化。(a) 日本列島の地形、火山 (▲) および主要な構造線・構造境界 (青線および青で影を付けた領域)、(b) FI, (c) fp の空間分布. FI, fp の値をカラースケールで示す (Nakajima and Hasegawa, 2021)

て本震震源断層深部あるいはその直下に溜まっていた流体が浅部に一気に上昇し、本震震源断層およびその近傍に再配分される。再配分された流体は、各地点で間隙流体圧を上昇させ余震の発生を促進する。それらの余震のうち、間隙流体圧がきわめて高くなった場合に低周波地震となる。それが、図9でみられた本震直後に活発化した低周波地震であろう。本震直後は、本震震源断層およびその近傍で全体的に間隙流体圧が上昇するのでFIやfpの値および応力降下量が低下し、その後は流体の拡散に伴って時間とともにしだいに間隙流体圧が低下するのでFIやfpの値および応力降下量が上昇し回復する。それが、図9、図10に

みられた時間変化であろう。

図11には、FIとfpの値の空間分布を示す。図から、FIとfpには明瞭な地域変化もあり、北海道北部から日高造山帯にかけての帯状の地域、糸魚川-静岡構造線、別府-島原地溝帯など顕著な構造線あるいは構造境界に沿って、FIおよびfpのどちらも系統的に小さくなっていることが分かる。FIおよびfpが小さいということは、間隙流体圧が高いことに対応する。すなわち、上記の構造線あるいは構造境界に沿って、間隙流体圧が局所的に高いことを意味する。間隙流体圧が高ければ地殻の強度が低下するので変形しやすくなる。実際、これらの構造線あるいは構造境界に沿って

はGPS観測などによって局所的に変形が大きいことが知られている。すなわち、これらの構造線あるいは構造境界に沿う現在の局所的な変形は、間隙流体圧が局所的に高いため変形しやすいことに起因すると考えられる。間隙流体圧が高い原因としては、直下からの流体の供給や過去に受けてきた造構運動の結果などが想定される。

## 6. おわりに

陸域下の低周波地震は、通常地震と混在して上部地殻でも発生することが判明した。さらに、低周波地震の判別に用いた $f_p$ とFIの値の分布には、低周波地震と通常地震との間で明瞭な境界がなく、むしろ連続的に分布する。この観測事実から推測されるのは、1) 低周波地震は引張-せん断破壊で起こる、2) せん断破壊で起こる通常地震の発生にも、低周波地震と同様に、間隙流体圧が深く関与していることである。高間隙流体圧には、ゆっくり滑りを起こしやすくする効果もある。だとすると、内陸大地震の発生には、断層面の間隙流体圧の上昇とそれによって生じるであろうゆっくり滑りが主要な役割を果たしていると考えられる。このことは地震発生予測の研究にとってきわめて重要であり、地下深部の間隙流体圧を間接的であっても適切に推定する手法や、微小なゆっくり滑りを高感度で検出する手法の開発などの研究を、今後格段に進展させることが望まれる。

## 参考文献

Aki, K. and Koyanagi, R. 1981. Deep volcanic tremor and magma ascent mechanism under Kilauea, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **86**, 7095-7109.

Aso, N., Ohta, K. and Ide, S. 2013. Tectonic, volcanic, and semi-volcanic deep low-frequency earthquakes in western Japan. *Tectonophysics*, **600**, 27-40.

Eaton, J.P. and Murata, K.J. 1960. How volcanoes grow. *Science*, **132**, 925-938.

Hasegawa, A. and Yamamoto, A. 1994. Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic

low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan. *Tectonophysics*, **233**, 233-252.

長谷川昭・中島淳一・内田直希・梁田高広・岡田知己・趙大鵬・松澤暢・海野徳仁. 2012. 沈み込み帯の地震の発生機構—地殻流体に規定されて発生する沈み込み帯の地震. *地学雑誌*, **121**, 128-160.

長谷川昭・中島淳一. 2021. 陸域下の低周波地震とその地震学のおよびテクトニクスの意義, *地学雑誌* (投稿中).

Hayashida, Y., Matsumoto, S., Iio, Y., Sakai, S. I. and Kato, A. 2020. Non-double-couple microearthquakes in the focal area of the 2000 western Tottori earthquake (M 7.3) via hyperdense seismic observations. *Geophys. Res. Lett.*, **47**(4), 1-9.

Ide, S., Shelly, D. R. and Beroza, G.C. 2007. Mechanisms of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L03308. <https://doi.org/10.1029/2006GL028890>

鎌谷紀子・勝間田明男. 2004. 火山から離れた地域で発生している深部低周波微動・地震. *地震II*, **57**, 11-28.

Nakajima, J. and Hasegawa, A. 2021. Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust. *J. Geophys. Res.*, **126**, e2020JB021391. <https://doi.org/10.1029/2020JB021391>

Nakamichi, H., Hamaguchi, H., Tanaka, S., Ueki, S., Nishimura, T. and Hasegawa, A. 2003. Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.*, **154**, 811-828.

野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・阿部信太郎・石田貴美子. 2018. 高密度観測網AS-netで捉えられた東北地方北部～北海道南西部の低周波イベントの分布と特徴, 日本地震学会2018年度秋季大会講演予稿集, S23-P26.

Obara, K. 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, 1679-1681.

Sibson, R.H. 1992. Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*, **211**, 283-293. doi:10.1016/0040-1951(92)90065-E

高木章雄・長谷川昭. 1976. 東北日本弧系における地震活動の特性と予知研究, 地震予知研究シンポジウム(1976), 15-20.

鶴川元雄・小原一成. 1993. 関東地方の火山フロント

下のモホ面付近に発生する低周波地震. *火山*, **38**, 187-197.

Yoshida, K., Hasegawa, A., Noguchi, S. and Kasahara, K. 2020. Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan. *Geophys. J. Int.*, **223**, 1724-1740. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa418>

行竹洋平. 2020. 箱根火山の深部低周波地震. *地震ジャーナル*, **69**, 31-41.

長谷川昭

[はせがわ あきら]

**現職** 東北大学名誉教授. 地震予知総合研究振興会顧問. 理学博士

**略歴** 東北大学理学部卒業. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程修了. 東北大学理学部助手, 助教授, 教授を経て, それぞれ2008年, 2017年より現職

**研究分野** 地震学, 特にプレート沈み込み帯の地震の発生機構

**著書** 地震学 (共立出版, 共著), *Magmatic Systems* (Academic Press, 分担執筆) など



中島淳一

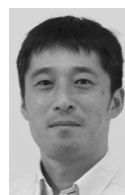
[なかじま じゅんいち]

**現職** 東京工業大学理学院教授. 博士 (理学)

**略歴** 東北大学理学部卒業. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了. 東北大学大学院理学研究科助手 (助教), 准教授を経て2015年より現職

**研究分野** 地震学, 地球内部物理学

**著書** 弾性体力学 (共立出版, 共著), 日本列島の下では何が起きているのか (講談社ブルーバックス), 日本列島の未来 (ナツメ社) など



# M 9 地震の可能性に気付けなかった意外な要因 —1894 年庄内地震により生じた三角測量のスケール誤差—

鷺谷 威

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生してから 10 年が経過した。日本列島で数百年ぶりに発生したマグニチュード 9 の巨大地震は、津波や原子力発電所の事故などにより甚大な被害をもたらした。さまざまな影響がいまでも日本社会を揺さぶり続けている。この巨大地震の発生は、社会はもちろん専門家にとっても予想外の出来事であった。

巨大地震の可能性を見逃した要因として、過去の地震や津波に関する情報が乏しく、869 年の貞観地震・津波に関する知見がようやく集まってきたところで 2011 年を迎えてしまった点があげられる。一方、松澤 (2011) は、地震学的な観点からの要因として以下の 5 つをあげた。① 日本海溝から沈み込む太平洋プレートは古くて冷たく、巨大地震が起きにくいと考えられていた。② 三角測量によると明治時代以降の約 100 年間に東北地方では東西短縮ひずみが見られなかった。③ 日本海溝沿いでは小規模ないし中規模の地震活動が高く、応力が解消されていると考えていた。④ 日本海溝沿いで起きた大地震は大きな余効すべりを考慮すると見かけ以上に規模が大きいことが分かり、ひずみは解消されていると考えていた。⑤ プレート境界で小繰り返し地震が起きており、プレート境界がずるずるすべっていることが分かっていた。これら 5 項目のうち、①、③、④、⑤ はデータの解釈に関係している。観測データに基づく地下の推定はつねに完全ではなく、誤った解釈に至ることもあるだろう。一方、過去 100 年間にひずみが蓄積していなかったという②

は観測データそのものに関する内容である。プレート境界の巨大地震はプレート運動によって蓄積された弾性エネルギーで起きるというプレートテクトニクスに伴う地震発生の理解の基本を揺るがしかねない指摘である。巨大地震は起きないという結論が間違っていたのだから、ひずみが見られなかったという根拠も見直す必要がある。

この東北地方のひずみに関する問題について、筆者は震災後にある仮説に基づいて調査を行い、その結果を論文にまとめた (Sagiya *et al.*, 2018)。本稿ではその概要を振り返り考察を行う。結論から言うと、明治以降の 100 年間に東西短縮ひずみが生じていなかった、という「常識」は、三角測量のスケール誤差に起因する誤った認識だった可能性が高い。そうした誤りが多くの専門家が何十年にもわたって繰り返し見てきた資料の中で見過ごされてきた経緯を振り返ることは、観測を通して自然や災害と向き合う科学者にとって多くの教訓を含んでいると思われる。

## 2. 東北地方の地殻ひずみ

日本列島では 19 世紀末に三角測量と水準測量の測量網が整備され、それから約 100 年後の 1990 年代には稠密な全国 GNSS 観測網 (GEONET) が整備された。これらの観測網により、日本列島は過去 130 年間の地殻変動が世界中で最も良く把握されている地域と言える。明治時代に設置された一等三角点は 1946 年昭和南海地震をきっかけとして全国的に測定し直され、その作業が終了したのは 1960 年代半ばであった。その結果を 1890 年代の測量結果と比較することにより、約 70 年分の水平地殻変動の様子が明らかにされた (たと

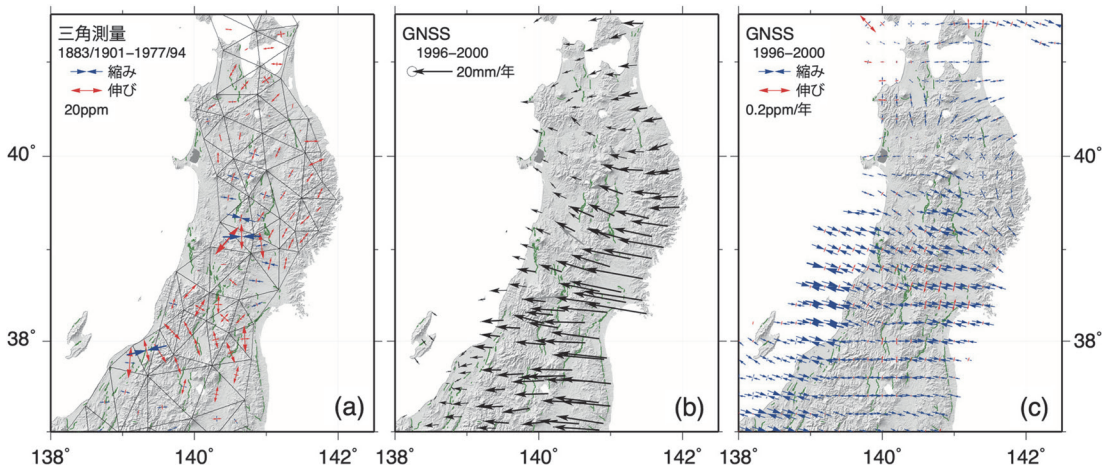


図 1 東北地方の地殻変動 (Sagiya *et al.*, 2018 を改変). (a) 三角測量による水平ひずみ (1883/1901 年と 1977/1994 年の比較). (b) GNSS による 1996~2000 年の地殻変動速度. (c) GNSS による 1996~2000 年のひずみ速度

えば原田・葛西, 1971). その結果では東北地方は南北方向に伸張しているとされた. 図 1a は, 1977~1994 年にかけて行われた測量結果と明治時代との比較による 100 年間の平均的なひずみ速度分布である. 全体的に赤い矢印が南北方向を向いており, この地域のひずみが南北伸張であることが分かる.

一方, 1990 年代以降に整備された GEONET により, 約 20km 間隔で設置された観測点の精密な座標値が毎日得られ, その結果から地殻変動速度 (図 1b) および水平ひずみ速度 (図 1c) が得られた (Sagiya *et al.*, 2000). 一見して分かるように, GNSS 観測では顕著な東西短縮が見られる. 電子基準点の観測は 4 年間という短期間の平均的な地殻変動を表しているが, その結果と長期の地殻変動とは見事なまでに食い違っていた. 両者を見た地震学者の多くは, 松澤 (2011) と同様に, 東北沖では地震が頻繁に起き, GEONET で観測されたひずみは 100 年の間に解消されると解釈した. 結果的に, この解釈は結果的に誤っていたわけだが, われわれはどこで間違えたのだろうか.

GNSS と三角測量によるひずみ分布の違いの 1 つは東西短縮の有無である. この点については, 100 年の間に起きた地震で解消されていたという考え方に一定の合理性がある. しかし, 両者にはもう 1 つ重大な違いがある. それは南北伸張の有

無である. 日本海溝で発生する地震により東西短縮を解消することはできるが, 南北伸張を説明することは難しい. この南北伸張はどうして生じたのだろうか.

### 3. 三角測量と基線測量とスケール誤差の可能性

東北地方の三角測量で得られた南北伸張の謎について説明するためには, 三角測量の原理を理解する必要がある. 簡単に説明しよう. 三角測量は基準点を頂点として三角網を構成し, 基準点間の角度を測定することによって基準点の座標値を決定する測量である. 明治時代には基準点間の距離を直接測定する方法がなかったため, 1960 年代以降に測距儀が実用化されるまでは, もっぱら角度の測定によって測量が行われた.

ここで小学校でも習う三角形の合同条件を思い出してほしい. 2つの三角形が合同であることを示すためには, 少なくとも対応する一辺の長さが等しいという条件が必要である. 3つの角が等しいだけでは三角形は相似になるが合同とは言えない. 明治時代は距離の測定ができなかったと説明したが, ではどのように大きさを決めたのか.

明治時代に三角測量網を設置した際, 沖縄から千島に至る全国に 15 カ所の基線が設置された. 各基線は 2~10km 程度の長さで両端に一等三角



図 2 スケール誤差により見かけ上の南北伸張のひずみが生じることを示す模式図 (Sagiya *et al.*, 2018 を改変)

点を有する。この基線を基線尺と呼ばれる長さ 4m の鋼鉄製のさしをつないで測定し、三角測量網の大きさ (スケール) を定義したのである。

こうした三角測量の原理を理解すると、東北地方の 100 年間のひずみ分布につながる可能性に思い当たる。すなわち、基線測量の結果が間違っていると、周囲の三角測量網全体に影響する。その影響の仕方は、三角測量網全体が系統的に大きくないし小さく見えてしまう、というものである。こうした誤差を以下ではスケール誤差と呼ぶことにする。

スケール誤差が東北地方の地殻変動に与えたと考えられる影響を模式的に示したのが図 2 である。プレートの沈み込みに伴って、GNSS 観測から得られていたように東西短縮のひずみが生じていたと考える。明治時代の測量のスケール誤差によって三角測量網が実際より小さく定義されていた場合、その後に行われた測量と比較すると、測量網全体が膨張するような見かけのひずみが生じる。この見かけの膨張は等方的、すなわち東西方向も南北方向も同じように生じる。実際の変形である東西短縮と見かけの等方的な膨張が足し合わされると、見かけ上の南北伸張が生じることになる。

このように、明治時代の測量結果は基線測量に起因したスケール誤差があり、それが地殻変動の誤った解釈につながった、という仮説を得た。問題はそのスケール誤差の大きさである。GNSS 観測によれば、東北地方 (東西方向におよそ 200 km の幅を持つ) は年間 2cm 程度短縮しており、ひずみ速度は  $10^{-7}$ /年 (0.1 ppm/年) 程度となる。100 年分の地殻変動は  $10^{-5}$  (10 ppm) の短縮となる。この東西短縮を打ち消すためには、基線測量によるスケール誤差が少なくとも 10 ppm 程度必要となる。はたして、こんな誤差が本当に生じていたのだろうか。

#### 4. 塩野原基線

基線測量によるスケール誤差が三角測量結果の誤った解釈につながった、という仮説を検討するためには、まず原因となった基線を特定する必要がある。図 3 は東北から南西諸島にかけての三角測量網を示すが、13 の基線場の位置も示してある。三角測量の誤差は基線場から離れるほど累積するため、一定の間隔で基線場を設置することで誤差の累積を防ぐことが意図されていた。東北地方には青森県の鶴児平基線と山形県の塩野原基線があり、その南は長野県の須坂基線となる。図 1 で示したように、南北伸張の特徴的なひずみが得られていたのは東北地方に限られることを考えると、塩野原基線に原因があるのではないかと推定された。

塩野原基線は山形県北部の新庄市および鮭川村に位置する東西方向に約 5km の長さを持つ基線である。この基線は東西の両端点 (一等三角点) が現存し、しかも直線道路で結ばれているため、現在でも設置当時と同様な測量を行うことが可能な日本で唯一の基線となっている。

塩野原基線の測量の詳細を調べるため、明治時代以降の測量記録の原本を保管している国土地理院を訪問して当時の測量原簿を調査した (図 4)。

塩野原基線の測量は、基線全体を 400m 程度の 12 区間に分割して行われた。各区間は早朝 (午前 4~8 時) と夕方 (午後 3~7 時) に 2 回ずつ合計 4 回測定されていた。測量全体が終了するまでに 1 カ月余りを要した。たった 1 つの基線長を得るためにかけられた多大な労力には感心するしかない。この 4 回の測定による測定結果はそれぞれ 5,129.5870m, 5,129.5808m, 5,129.5943m, 5,129.5867m となっており、標準偏差が 5.5mm (1.1 ppm)、最大と最小の差が 13.5mm (2.6 ppm) とたいへん高い精度で測定されたことが分かる。4 回の測定の平均値である 5,129.5872m が基線の距離として定義され、三角測量の網平均計算でも使われていることが確認できた。この測定結果を見るかぎり、基線測量に 10 ppm もの誤差は認められない

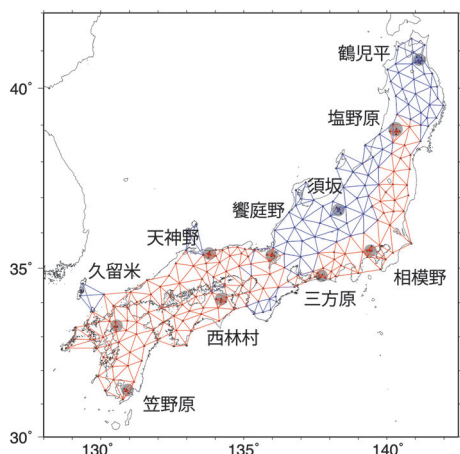


図3 本州，四国，九州の一等三角測量網 (Sagiya et al., 2018 を改変)．灰色の丸で基線場の位置を示す．赤で示した測量網は1894年庄内地震以前に，青で示した測量網は以後に測定された



図4 塩野原基線測量の測量原簿

と結論される．地殻ひずみの謎を解く試みはここで暗礁に乗り上げたかに見えた．

しかし，謎を解く鍵は意外な形であっけなく見つかった．先に述べたように，塩野原基線は基線測量が可能な形で現存する日本で唯一の基線である．そこで，2011年12月に塩野原基線を測量遺産として残す記念事業が行われ，現地に説明板が設置されたのである．このことを，私が塩野原基線を調べていることを知った国土地理院の方から送っていただいた国土地理院広報（2012年1月発行）の記事で知った．そこに示された説明板（図5）の内容を読んでいるうちに筆者は重大な事実初めて気が付いた．それは，塩野原基線が設置されたのが明治27年（1894）だったという点である．1894年には，同じ山形県を震源とし



図5 塩野原基線の説明板（筆者撮影）．1894年に設置したとの記載が見られる

てマグニチュード7.0の庄内地震が発生していたのである．

## 5. 1894年庄内地震とその影響

庄内地震は1894年10月22日に発生した．震源は庄内平野東縁断層帯と考えられており，現在の山形県酒田市周辺で726名の死者が報告されている（宇佐美ほか，2013）．塩野原基線は，庄内平野東縁断層帯から東に30kmほどのところに位置している．この断層は東に低角で傾斜した逆断層と考えられ，震源断層と基線との距離はさらに短い．

塩野原基線の測量が行われたのは，1894年5月31日から7月5日にかけてであった．すなわち，基線測量は庄内地震の発生前に終了している．一方，周辺の三角測量の角測定は地震の前後にわたって行われていた（図3）．地震の影響で基線の長さが有意に伸びた場合，地震前の基線長を用いて三角測量網の計算処理を行うとスケール

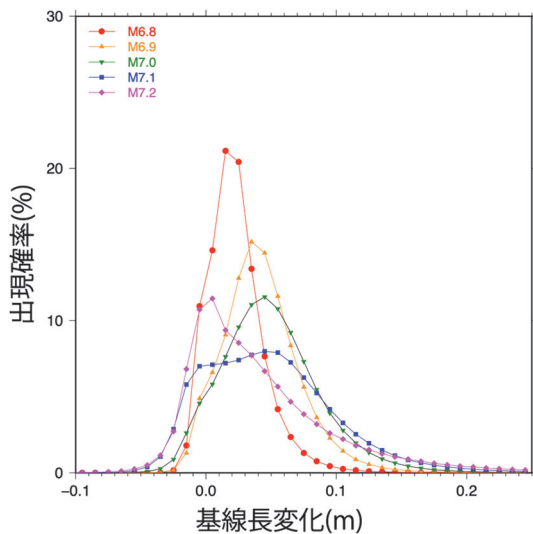


図 6 1894 年庄内地震による塩野原基線への影響を評価した数値計算の結果 (Sagiya *et al.*, 2018 を改変). 各曲線は、異なるマグニチュードを仮定して 100 万回の数値シミュレーションを行った際に、塩野原基線の辺長変化として計算された値の出現確率を示す

を過小評価することになり、その後には生じる東西短縮を検出できずに見かけ上の南北伸張を得る可能性がある。そこで、庄内地震が塩野原基線の長さを与える影響評価を試みた。

庄内地震については、定量的な観測データがほぼ存在しない。そこで、断層上端を庄内平野東縁断層帯に固定し他の断層パラメータをランダムに変化させながら一様なすべりを持つ矩形断層モデルを設定し、半無限弾性体における変位応答 (Okada, 1985) を用いて塩野原基線の辺長変化を計算した。地震規模はマグニチュード (M) 0.1 刻みで M6.8~M7.2 の範囲を考慮した。図 6 に示す計算結果からは、地震規模と基線長変化の関係は必ずしも単純ではなく、地震規模が大きすぎると基線長変化が小さくなる場合もあることが分かる。M7.0~7.1 の場合に約 5cm 基線長変化の出現確率が最大となっており、M7.0 程度の地震で塩野原基線の長さが 5cm 程度伸びる可能性が十分にあることを示している。5cm の基線長変化は塩野原基線の約 10 ppm の変化に対応する。

次に、塩野原基線の長さが庄内地震で 5cm 変化した場合、三角測量から得られるひずみにどの

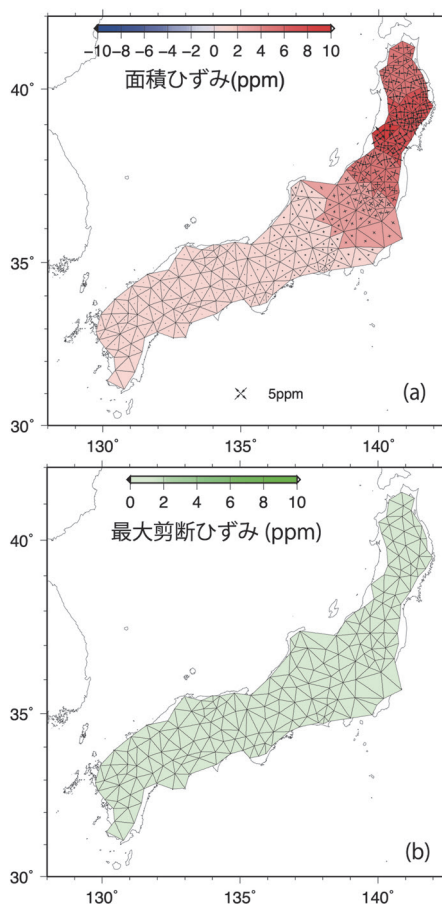


図 7 塩野原基線の長さを 5cm 変化させた場合の三角測量網のひずみへの影響 (Sagiya *et al.*, 2018 を改変). (a) 面積ひずみの変化. (b) 最大剪断ひずみの変化

ような影響があるかを評価した。すでに述べたように、三角点の角度の測定は庄内地震の発生前後を通して行われており、その影響評価は単純ではない。そこで、塩野原基線の長さを従来とした場合および 5cm 長くした場合と二通りの網平均計算を行い、両者の結果を比較してひずみの分布を調べ、面積ひずみ (等方的な膨張・収縮) と剪断ひずみ (形・角度の変化) に分けて示した (図 7)。この結果から、塩野原基線の長さを変えても剪断ひずみにはほとんど影響がない。一方の面積ひずみは、東北地方の中心として東日本の広域に最大 10 ppm 程度の影響 (等方的な膨張) が生じる。すなわち、誤った基線長の値を与えると、周囲には基線長の誤差と同程度の等方的なスケー



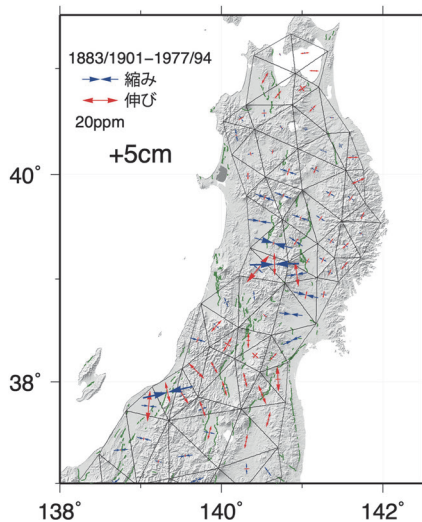


図 8 塩野原基線の基線長を補正して得られた 100 年間の地殻ひずみ分布 (Sagiya *et al.*, 2018 を改変)

ル誤差が現れるのである。

こうしたスケール誤差を考慮して 100 年分のひずみを計算し直した結果が図 8 である。図 1 に示した分布と比較すると、東北地方の中部から北部の南北伸張が小さくなり、東西短縮のひずみが顕著になることが分かる。2011 年以前にこのひずみ分布を見ていれば、東北地方のひずみは南北伸張で東西短縮は見られない、という誤解は避けられたのではないだろうか。

なお、図 8 では北緯 38 度付近には依然として顕著な南北伸張が見られる。この原因はいまだによく分かっていない。1964 年新潟地震の影響や三角測量網の幾何形状に起因するバイアスの可能性もあるが、さらなる検討が必要である。

以上のように、三角測量による東北地方の水平ひずみは、明治時代の基線測量に起因するスケール誤差の影響によって見かけの南北伸張が現れ、本来の変動である東西短縮が認識されなかった可能性が高いと結論される。

## 6. 塩野原基線の再測量

すでに述べたように、塩野原基線は両端点が現存しており、基線長の測定が可能である。そこで、2012 年 8 月に基線長の再測量を実施した。再測

量とは言っても、明治の基線測量を再現することはさすがに無理なため、測量は GNSS とトータルステーションを用いた近代的な方法で実施した。その結果は、明治時代の基線長と比較して 0.0652 m (+12.7 ppm) の伸びという結果であった。

1894 年に行われた基線測量以降、基線はさまざまな変化を経ていると考えられる。ここでは、地震間の定常的な地殻変動と大地震の影響を考慮してその変遷の再現を試みた。地震間の定常的な地殻変動は周辺の GEONET 観測点の速度データから補間することで 0.10~0.15 ppm/年程度と推定される。一方、地震の影響は、GEONET 観測点における変化や断層モデルに基づいて計算すると、2011 年東北地方太平洋沖地震の影響が最も大きく (+約 8 cm)、1894 年庄内地震 (+約 5 cm)、1964 年新潟地震 (+約 8 mm) などの影響が大きい。これらの補正を行って求めた塩野原基線の基線長の時間変化が図 9 である。ここでは地震間の地殻変動として 0.10 ppm/年と 0.15 ppm/年の 2 ケースを示しているが、後者のほうが庄内地震による変化とは整合的である。ただ、いずれの場合においても、三角測量に基づくひずみの議論が行われた 1970~1990 年代頃には、1894 年庄内地震によって基線長が変化する前と同程度の基線長になっていたと推測される。このことは、当時の三角測量結果で、明治時代と比較して東西短縮変形が検出できなかった事実と整合的である。せっかく両端点が現存しているので、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前に再測量を行えばより詳細な議論が可能であったが、そうした機会を逃してしまったのは残念である。

## 7. 考 察

東北地方の南北伸張ひずみは、2 度目の全国一等三角測量が終わった 1970 年頃から多くの研究で繰り返し指摘され、長い間観測事実として受け止められてきた (原田・葛西, 1971; Sato, 1973; 中根, 1973a, b; 多田, 1986; 橋本, 1990; 石川・橋本, 1999)。40 年以上にわたって測地の専門家が報告してきた内容に対して分野外から疑義を挾

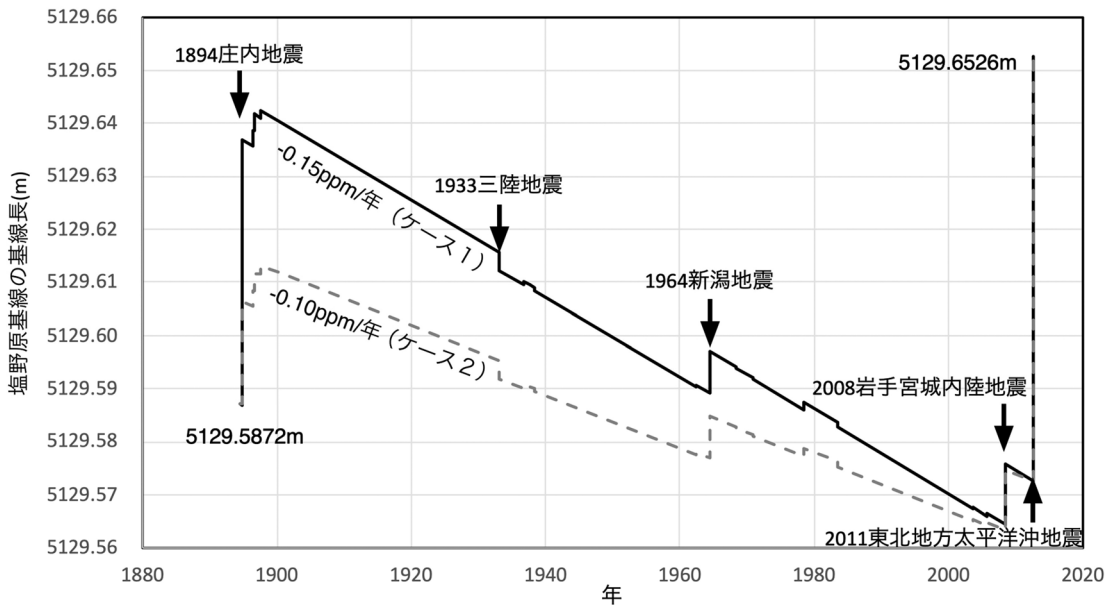


図9 塩野原基線の基線長の時間変化の2つのシナリオ (Sagiya *et al.*, 2018 を改変)

む余地はほとんどなかっただろう。そのため、松澤 (2011) が述べたように、三角測量結果で東西短縮が見られないことを根拠として大地震の発生ポテンシャルがない、と推定した判断には合理性があったと言える。一方、上記のいずれの論文においても、南北伸張ひずみに対して説得力のある説明は見られない。また、三角測量の性質上、東西方向と南北方向のひずみは独立ではないことも測地の専門家は理解していたはずであるが、南北伸張の議論が置き去りにされてしまった感は免れない。観測される地殻変動はさまざまな要因で生じるが、基本的には力学現象であり、大半の観測データに対して物理的な説明が可能である。この南北伸張について、そうした議論が不足していた点は専門家として大いに反省すべきである。筆者自身、スケール誤差の可能性を考えたことはあったが、2011年の地震発生まではそれ以上真剣に考えることがなかった。また、庄内地震の影響に気付く際の障壁となったのは、「庄内地震に関連する測量データは存在しない」という思い込みであった。これは、単純にそうした研究・解析結果を見たことがなかったことが理由で、データの存在を自らたしかめようとしなかった点も反省点である。このように、東北地方のひずみ分布につ

ては、地球科学者として反省し今後の教訓とすべき点が多い。

塩野原基線の測量に関して疑問なのは、なぜ庄内地震の発生後に再度測量が行われなかったのか、という点である。基線測量そのものは地震発生の3カ月前に終了していたが、周辺の角測量は10月まで実施されていた。また、庄内地震の3年前、1891年には濃尾地震が発生している。濃尾地震では三角測量が終了していた地域に顕著な地殻変動が生じた結果、地震前後に行われた測量結果が整合しなくなってしまい、日本で最初の震災復旧測量が実施されている。したがって、陸地測量部は大地震発生時に測量網が影響を受けることを知っていたはずである。しかし、塩野原基線は震源断層に近いものの、庄内地震の被害は庄内平野に集中しており、基線の周辺ではほとんど被害も報告されていない。そのため基線長に大きな変化は生じないと判断したのだろうか。それにしても、庄内地震の影響がこのような形で別の震災に影響するとはだれも想像しなかっただろう。

実際、本稿で述べた内容については、不幸な偶然の積み重ねとしか言いようがない。もしも塩野原基線が別の場所に設置されていたれば、もしも基線が南北方向に設置されていたれば、もしも庄内地

震の発生があと4カ月早かったら、もしも地震の規模がもう少し小さいか、もう少し大きかったら、こうした間違いは起きなかった可能性がある。さらに、もしも後世のわれわれが南北伸張という矛盾した結果に気付いていれば、地殻ひずみのデータを正しく解釈できていたかもしれない。しかしながら、自然災害はこうした多くの「もしも」をすり抜けて災厄をもたらす。研究を通して自然と向き合うわれわれは、あらゆる可能性を考慮に入れて注意深く自然と対峙し、観測データを愚直に読み解いていく必要がある。

東日本大震災の際に地震研究者の一人として何よりショックだったのは、これほどの巨大地震が発生する可能性について、事前の指摘がほとんどなされていなかった点であった。1995年の阪神・淡路大震災以降、国は地震調査研究推進本部を設置し、地震に関する調査研究の推進とその成果の社会への普及を進め、活断層および海域の地震の長期評価や、それに基づく地震動予測地図が公表されてきた。しかし、そうした評価の穴を、本来最も重視されるべき巨大地震がすり抜けてしまっていた。私自身、長期評価部会海溝型分科会として、2002年に公表された日本海海溝沿いの地震の長期評価に関わっており、科学者としての自分の至らなさを痛感した。日本列島では今回のような大地震が必ず繰り返して発生する。次に起きる災害に対しては、今回の経験を糧として、正しい現象の理解に基づいて適切な備えをしてほしい。

## 謝辞

本稿執筆の機会を与えていただいた津村建四朗博士および編集委員の岡田義光博士に感謝します。

## 参考文献

- 原田建久・葛西篤男. 1971. 最近60年間における日本の地殻の水平歪. *測地学会誌*, **17**, 4-7.
- 橋本 学. 1990. 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I): 本州・四国・九州, *地震*, **43**, 13-26.
- 石川典彦・橋本 学. 1999. 測地測量により求めた日

本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), *地震*, **52**, 299-315.

- 松澤 暢. 2011. なぜ東北日本沈み込み帯でM9の地震が発生しえたのか—われわれはどこで間違えたのか?. *科学*, **81**, 1020-1026, 2011.
- 中根勝見. 1973a. 日本における定常的な水平地殻歪 (I). *測地学会誌*, **19**, 190-199.
- 中根勝見. 1973b. 日本における定常的な水平地殻歪 (II). *測地学会誌*, **19**, 200-208.
- Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.
- Sagiya, T., Matta, N. and Ohta, Y. 2018. Triangulation scale error caused by the 1894 Shonai earthquake: a possible cause of erroneous interpretation of seismic potential along the Japan Trench. *Earth Planets Space*, **70**, 120.
- Sato, H. 1973. A study of horizontal movement of the Earth crust associated with destructive earthquakes in Japan. *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **19**, 89-137.
- 多田 堯. 1986. 東北日本弧における地殻水平歪とその地学的意義. *地震*, **39**, 257-265.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子. 2013. 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 724 pp.

鷺谷 威

[さぎや たけし]

**現職** 名古屋大学減災連携研究センター教授

**略歴** 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程中退。国土地理院勤務を経て2003年より名古屋大学大学院環境学研究科助教授。2012年より現職

**研究分野** 地殻変動学。GNSS等の測地学的手法による地殻変動観測を行うとともに、そのデータを用いて地震やテクトニクスを研究している

**著書** 日本海東縁部の活断層と地震テクトニクス (分担, 大竹政和他編), 図説地球科学の事典 (分担, 鳥海光弘他編) など



# 日本海溝海底地震津波観測網（S-net）による 震源データへの影響

石川有三

## 1. はじめに

気象庁は、古くは中央気象台の時代から地震観測データを地震年報や地震月報で公表し、公開してきた。特にその中でも震源データは広く活用されてきた。ただ、時代とともに地震観測網の拡充や、処理システムの向上などによって検知能力が変わってきたことも知られている（浜松，1966，1981；石川，1987，2002）。特に1997年10月からは大学や国立研究機関の観測データを気象庁に集め一元的に処理するようになり、決定される震源数が飛躍的に増えた。一般にはこのときから一元化震源と呼ばれるようになった。これにより地震観測網は稠密になり地震の検知能力も向上した。ただ、ほとんどの観測点は陸上にあり、海域の観測点は東海沖など限られた地域にしかなかった。しかし、2020年9月1日から国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研と略す）が設置していた日本海溝海底地震津波観測網（以下S-netと略す）観測点を気象庁での震源決定処理に導入した。このことにより関東地方から北海道にかけての東側海域での地震検知能力が向上し、決定された震源位置も大幅に改善された。ここにそれを紹介する。

## 2. S-net による影響

S-net は、関東地方から東北地方と北海道の太平洋側に設置されたケーブル式海底地震計で、図1に示したように全150点が日本海溝と千島海溝の一部までの陸側海域と海溝軸外側海域に展開され、海底ケーブルによってリアルタイムで気象庁

に送られている。（<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>を参照）。これによりこれまで地震観測点がなかった地域に観測点が展開されたので、地震の検知能力が大幅に向上したと思われる。それを具体的に示す。

図2にこの地域の地震活動を示した。気象庁の一元化震源でS-netのデータが導入される前後を比較するため、前後各1年間の合計2年間（2019年9月から2021年8月まで）のすべてのマグニチュードの地震で、深さ60kmまでの震源を示した。図3では、図2の枠内の震源の月別個数を示した。2020年9月から個数が大きく増えていることがはっきり分かる。S-netのデータ導入で検知能力が大幅に向上したことがわかる。図4は、図2の枠内の震源の時空間分布図で、上側が東側で沖合になる。2020年9月から特に沖合のほうで地震が増えている。これはS-netのデータが貢献していることによると考えられる。

ただ、これらの図だけでは検知能力の向上を断定するわけにはいかない。たとえば、2020年9月から沖合の地震活動が急に活発化した可能性を否定できない。そこでこの期間に観測網が変化していない防災科研高感度地震観測網（以下、Hi-netと略す）の自動処理震源（観測点は陸域のみ）のデータと比べてみる。図5にHi-net自動処理震源による震源分布を示した。データを用いた期間は、2019年9月から2021年8月までと図2と同じである。図6に図5の枠（図2中の枠と同じ）内の震源の月別個数を示したが、この図では2020年9月を境にその前後で大きな変化はない。図7を見ても沖合で活発化はしていない。したがって、これらの図で見ると、2020年9月を境に地震活動が活発になったわけではないと結

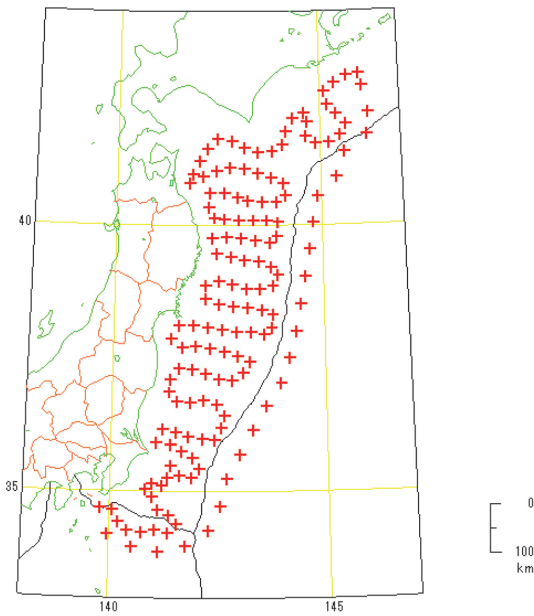


図 1 S-net 地震観測点網

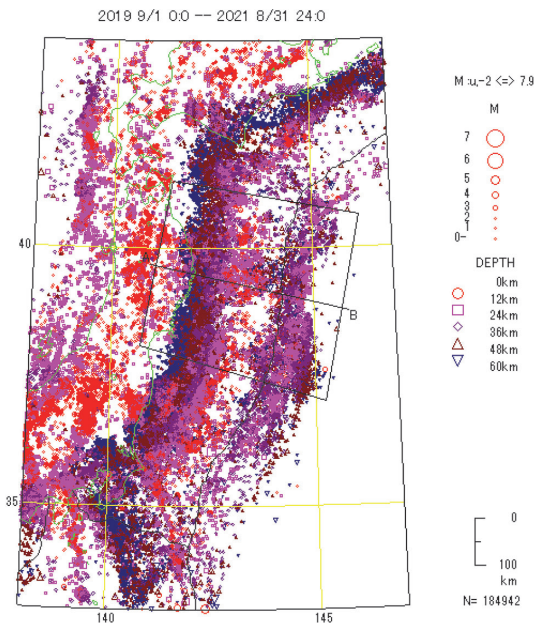


図 2 気象庁一元化震源 2019 年 9 月から 2021 年 8 月まで、M すべて、深さ 60 km までの震源。黒線は海溝軸

論づけられる。図 3 や図 4 で 2020 年 9 月を境に震源数が大幅に増えたのは、S-net の導入により、沖合での地震検知能力が向上したためと結論付けられる。

では、次に沖合の震源の検知能力がどの程度向

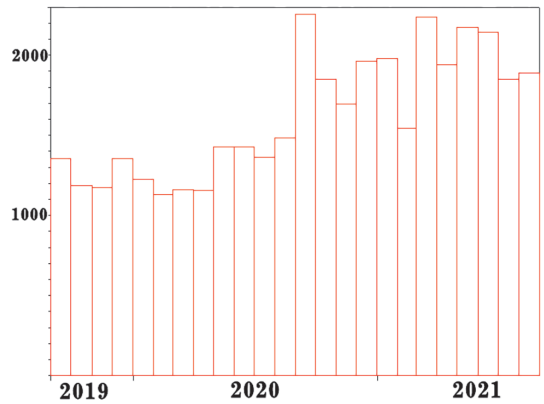


図 3 図 2 枠内の震源の月別個数。2020 年 9 月から個数が大きく増えている。S-net のデータ導入で検知能力が大幅に向上した

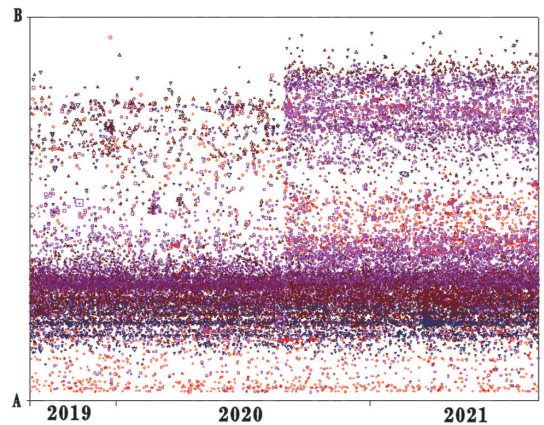


図 4 図 2 の枠内の震源の時空間分布図。上が東で沖合。特に 2020 年 9 月から沖合のほうで地震が増えている。S-net のデータが貢献している

上したかを調べてみる。図 9 を見ると 2020 年 8 月までは深さ 0 km や 40 km より深く決まっていた震源がかなりあったが、2020 年 9 月以降は、震源の深さが 5 km から 40 km までになっている。したがって、震源決定における深さの精度が大幅に向上していることが分かる。また、図 10 を見ると 2020 年 8 月まではマグニチュード 2 程度までしか震源が決まっていなかったが（この期間マグニチュード最小の地震は 1.5）、2020 年 9 月以降はマグニチュード 1 以下の地震でも震源が決まっている（この期間マグニチュード最小の地震は 0.3）。図 11 に震源数の月別変化を示した。これを見ると 2020 年 9 月以降は、それ以前の約 5 倍の震源が決まるようになっていることが分かる。

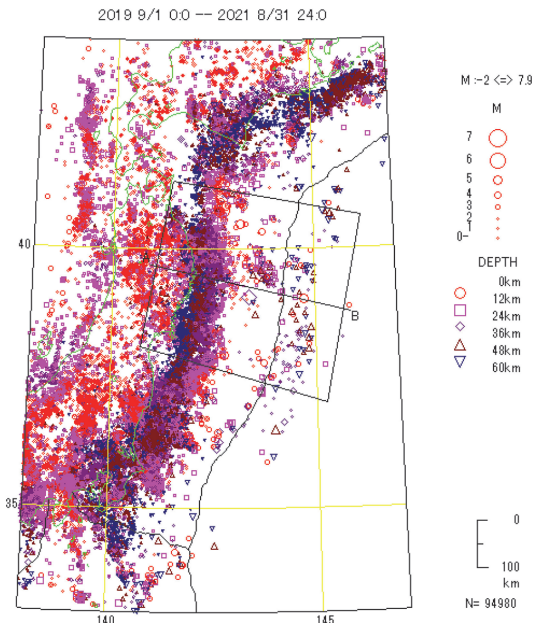


図5 Hi-net 自動震源（陸域の観測点のみ使用）による震源分布。期間は図2と同じ2019年9月から2021年8月まで。図2と比べると海溝軸付近に決まっている震源が少ない

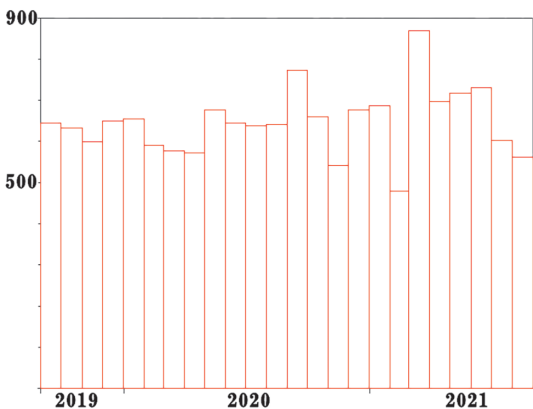


図6 図5の枠内の震源の月別個数。2020年9月を境に大きな変化はない。9月以降に地震活動が活発になったわけではない

図12に2019年9月から2021年8月まで深さ100kmまでの震源を示したが、青色はS-net導入前の1年間、赤色はS-net導入後の1年間の震源である。図13に図12の枠内の震源の断面分布を示した。左側に下がっているのは太平洋プレートの沈み込みに伴う地震活動で、S-net導入前後で差は見られない。一方、右側の青色の震源は、

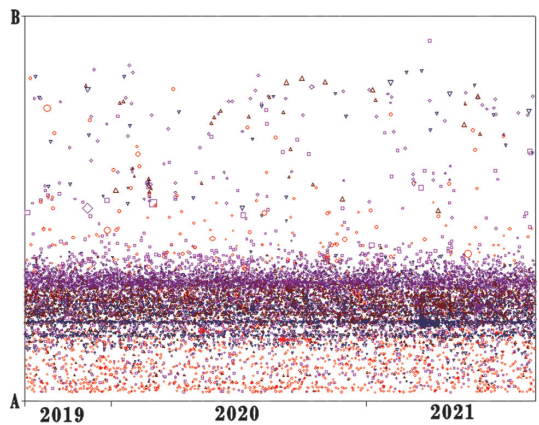


図7 図5の枠内の震源の時空間分布図。上が東で沖合。特に2020年9月から沖合のほうで地震活動が活発になってはいない

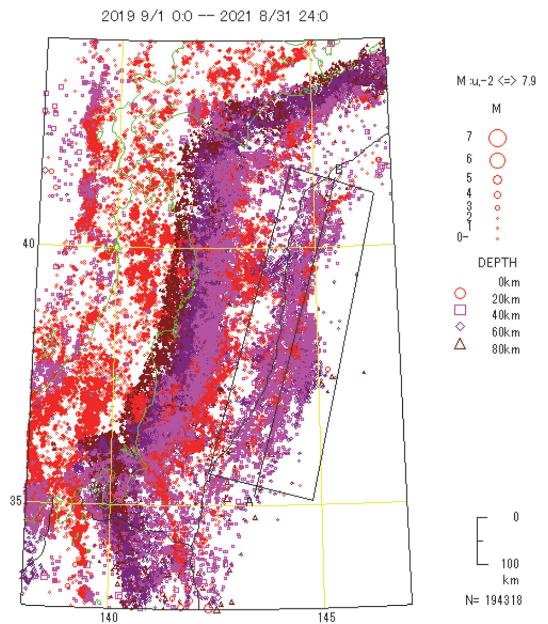


図8 気象庁一元化震源2019年9月から2021年8月まで、Mすべて、深さ80kmまでの震源。海溝軸付近の震源に注目

地表面に分布したり、深さ40~60kmと深いものが多い。しかし、赤色の震源は30kmより浅いところに分布しており、震源位置の信頼度が上がったと考えられる。ただ、それより右側では赤色震源も下に垂れ下がっており、この地域での震源位置の信頼度は低い。この場所は、図12で見ると海溝軸から少し沖合へ離れたところで、この直上には地震観測点がなく、現状では仕方がない。

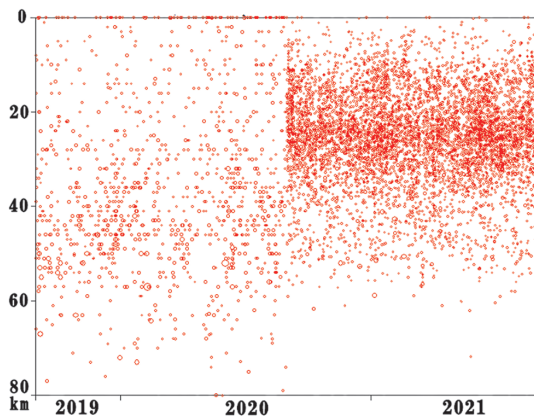


図 9 図 8 の枠内の震源の深さの時間変化。2020 年 8 月までは深さ 0 km や 40 km より深く決まっていた震源がかなりあったが、2020 年 9 月以降は、震源の深さが 5 km から 40 km までにほとんど決まっている

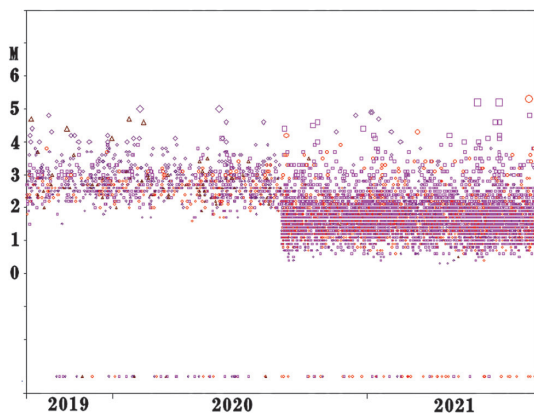


図 10 図 8 の枠内の震源のマグニチュードの時間変化。2020 年 8 月まではマグニチュード 2 程度までしか震源が決まっていなかったが、2020 年 9 月以降はマグニチュード 1 以下の地震でも震源が決まるようになった

### 3. 問題点

S-net の導入によって地震の検知能力が上がったことがはっきりしたが、気になることも見えてきた。図 14 に気象庁一元化震源の 2019 年 1 月から 2021 年 9 月末まで、マグニチュード 3 以上、深さ 60 km 以浅の震源分布を示した。これまでより長期間にしたのは、時間的変化の様子がより明確に見えるようにするためである。図 15 に図

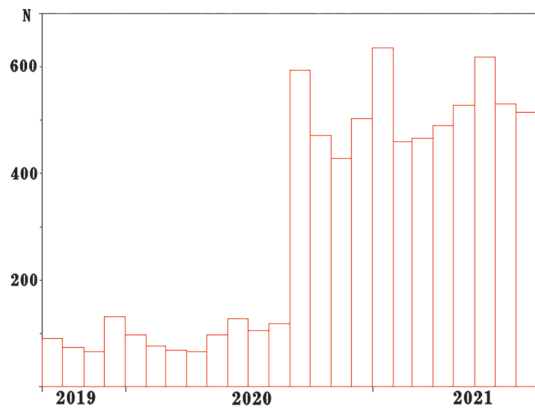


図 11 図 8 の枠内の震源の回数の月別変化

2019 9/1 0:0 -- 2020 8/31 24:0 2020 9/1 0:0 -- 2021 8/30 24:0

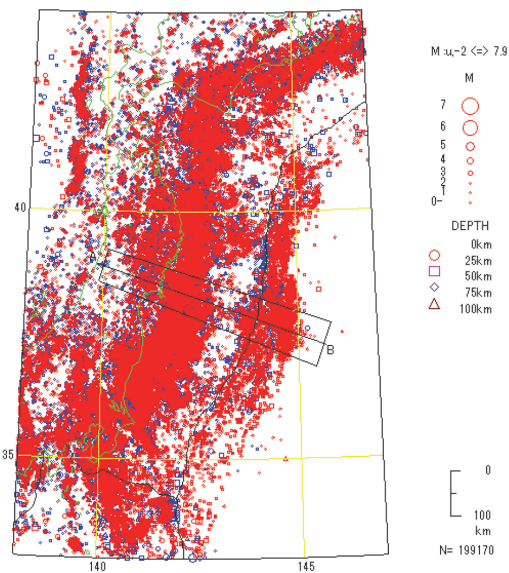


図 12 気象庁一元化震源 2019 年 9 月から 2021 年 8 月まで、M すべて、深さ 100 km までの震源。青色は 2019 年 9 月から 2020 年 8 月まで、赤色は 2020 年 9 月から 2021 年 8 月までの震源

14 の枠内の震源の数の累積変化を示した。対象は、日本海溝軸付近の活動である。この震源数の増加のようすを見ると途中で増加率が低下しているように見え、その時期がほぼ S-net 導入の 2020 年 9 月 1 日にあたる。地震数の増え方が減っていることは、先に示した S-net 導入によって地震検知能力が向上してきたことと矛盾する。この原因の可能性として考えられることは、S-net 観測点を震源決定に用いることにより地震の検知能力が

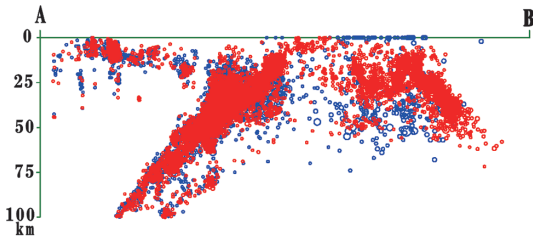


図 13 図 12 の枠内の震源の断面図. 右側が東. 縦が横に対して 2 倍に伸びている

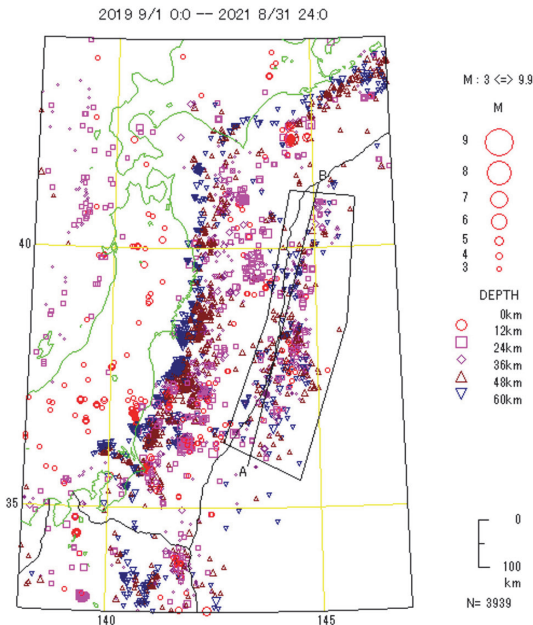


図 14 気象庁一元化震源の 2019 年 1 月から 2021 年 9 月末まで、マグニチュード 3 以上、深さ 60 km 以浅の震源分布

大幅に向上したが、S-net 観測点の振幅データをマグニチュード決定に用いるようになり、これまでの値からやや小さく決まるようになったことである。これは今後さらにデータの蓄積を待つ検証されるであろう。

#### 4. まとめ

S-net の導入によって海域での地震検知能力が向上したことが分かった。上野ら (2019) によると気象庁の震源決定手法も速度構造を改良したり、観測点の標高を考慮するようになったとされるが、詳細は今のところ分からない。一方、森脇

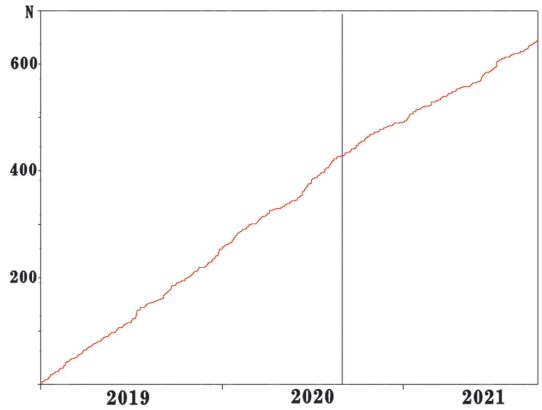


図 15 図 14 の枠内の震源の数の累積変化. 縦棒は 2020 年 9 月 1 日

(2021) も S-net 導入による影響を紹介している。参考にしていただければ幸いです。

#### 参考文献

- 浜松音蔵. 1966. 気象官署に於ける地震計観測の履歴活動. *地震第 2 輯*, 19, 286-305.
- 浜松音蔵. 1981. 地震観測史, 常時観測. *地震第 2 輯*, 34 (特別号), 73-92.
- 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.
- 石川有三. 2002. 気象庁地震観測網と処理システムの変遷. *日本地震学会ニュースレター*, 13 (5), 30-33.
- 上野 寛, 上田満治, 見須裕美, 横山博文, 岩崎友理子, 岩切一宏. 2019. 海域観測点の気象庁一元化処理への活用について, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会. SSS10-08.
- 森脇 健. 2021. 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の活用による一元化カタログの改善. *なみふる*, 127, 6-7.

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

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





# インドおよびネパール SATREPS 課題の 12 年

瀨瀬一起

## 1. はじめに

岡田編集長のご依頼でこの原稿を書かせていただいている。題名も編集長からいただいたものだが、もともと「10年」だったものを「12年」に変えさせていただいた。地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) プログラムの本蔵研究主幹 (当時、現推進委員) が「JST ならびに AMED と JICA が共同で実施している 3~5 年間の国際共同研究プログラムで、わが国の研究者と開発途上国の研究者が主として相手国で共同研究を行うというもの」(本蔵, 2018) と書かれている。そうならばインドとネパールの 2 カ国で最大でも 10 年のはずであるが、次のような事情がある。

SATREPS プログラムは行き届いていて、採択された最初の年度は準備期間とされ、その後に正式の研究期間が始まる。インドプロジェクトは 2009 年度採択で 2010~2014 年度が研究期間であり、ネパールプロジェクトは 2015 年度採択で 2016~2020 年度が研究期間であった。両者合計で 12 年となり、これが題名変更の事情である。ただし、後者は新型コロナウイルス感染症の影響により、2021 年 6 月まで 3 カ月間延長された。ここではまず両プロジェクトの背景となる自然環境を説明するが、インドプロジェクトが含む気象災害は別の機会とし、地震災害の背景となる自然環境、いわゆるテクトニクスを次節で説明する。

## 2. 背景となるテクトニクス

現在のインドが存在するインドプレートはかつて南のほうにあって、ユーラシアプレートとの間にはテチス海と呼ばれる広い海があったが、1 億年前に北上が始まり (図 1, 100 Ma), 4 千万年

前にユーラシアプレートに衝突してテチス海は消滅した (図 1, 40 Ma)。衝突とはいいながら、テチス海プレートのリソスフェアに続いてインドプレートのリソスフェアもユーラシアプレートの下に沈み込んでいる。先端のテチス海部分はあるとき、分離してマントルの中に切れ落ち、力のバランスが変化して、インドプレート部分は浅くなって現在のような低角 (小さい傾斜角) の沈み込みとなった (Avouac, 2007; 図 2)。プレート境界が分岐断層となって地表に現れているところは主前縁断層帯 (Main Frontal Thrust, MFT) と呼ばれている。

以上のように、インドやユーラシアプレート側ネパール付近における現在のテクトニクスは、日本付近のテクトニクスと似ている。大地震が主前縁断層帯に沿って発生するプレート境界地震であるという点も日本付近に似ているため、わが国における地震ハザードの研究や経験が両国に生かせるという特徴があった。また、類似するだけでなく、低角の沈み込みという日本にはない特徴も備えているので、両国は研究上の興味深さも持っている。そうした背景のもとに、まず 2009 年度を準備期間としてインドプロジェクトが開始され、その終了年度 2014 年度の翌年度、2015 年度がネパールプロジェクトの準備期間となった。

さらには、まったく偶然であるが、ネパールプロジェクト採択の内定通知が届いた 3 日後の 2015 年 4 月 25 日に、 $M_w$  7.8 のゴルカ (Gorkha) 地震がネパールで発生し、同国内だけでも死者・行方不明者 9 千人以上の被害があった。この大きな地震被害がネパールプロジェクト開始前に起きたことは不幸なことであった。それに加えて、もしゴルカ地震がプロジェクトで想定する予定だったシナリオ地震に一致していたら、プロジェクトの計画を大幅に変更しなければならない事態で

あった。しかし、ゴルカ地震は主前縁断層帯沿いの大地震ではなく、さらに北に沈み込んだ先のプレート境界で起きた大地震であったため、プロジェクトは計画どおりに行われることになった。

### 3. インドプロジェクト

インドプロジェクトの正式名称が「自然災害の減災と復旧のための情報ネットワーク構築に関する研究」であり、研究代表者は「日本のインターネットの父」と呼ばれる慶應義塾大学（以下、慶応大）環境情報学部の村井教授（当時、現同大教授（有期））であった。したがって、このプロジェクトは本来、情報ネットワークに関するものであったが、SATREPS プログラムの防災分野に応募する際に、東京大学（以下、東大）情報学環の鷹野教授（地震研究所兼任、当時）を通じて地震研究所に打診があり、筆者や鷹野教授などが参加して研究題目1「地震災害の軽減」を担った。なお、余談であるが、筆者の現職はこのときにできた人間関係に由来する。

この研究題目以外には、東大情報理工学研究科の江崎教授をリーダーとする研究題目2「気象観測プラットフォーム」、慶応大環境情報学部の武田教授をリーダーとする研究題目3「持続可能な通信インフラストラクチャ」、および慶応大メディアデザイン研究科の大川教授をリーダーとす

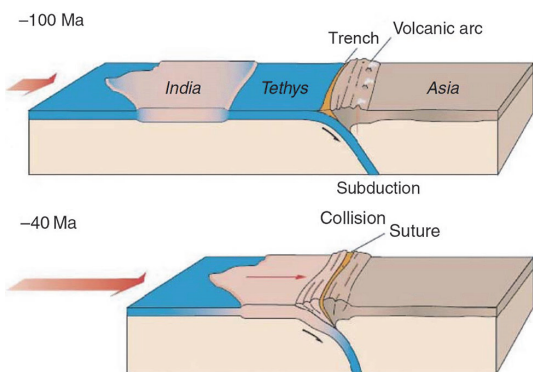


図1 1億年前(100Ma)からインドプレート(India)は北上し、4千万年前(40Ma)にユーラシアプレート(Asia)と衝突(Collision)してテチス海(Tethys)は消滅した。衝突ではあるが、インドプレートはテチス海に続いてユーラシアプレートの下に沈み込んでいる(Subduction)。Malavieille *et al.* (2002) による

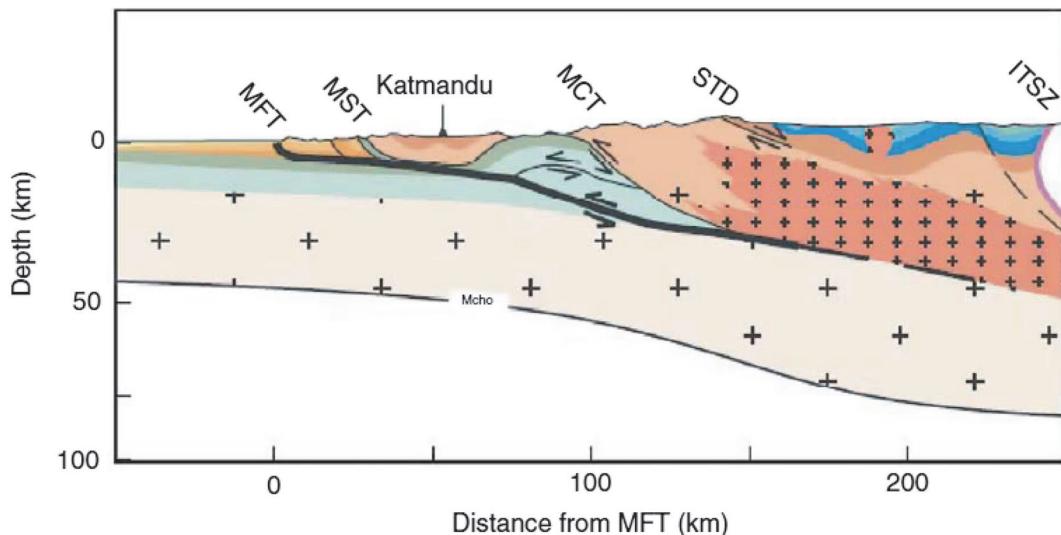


図2 現在のインドプレートとユーラシアプレートの状況。インドプレートは低角(小さい傾斜角)で沈み込んでおり、黒太線のプレート境界がそれを表している。主前縁断層帯(MFT)はプレート境界が分岐断層となって地表に現れているところ。Avouac (2007) による

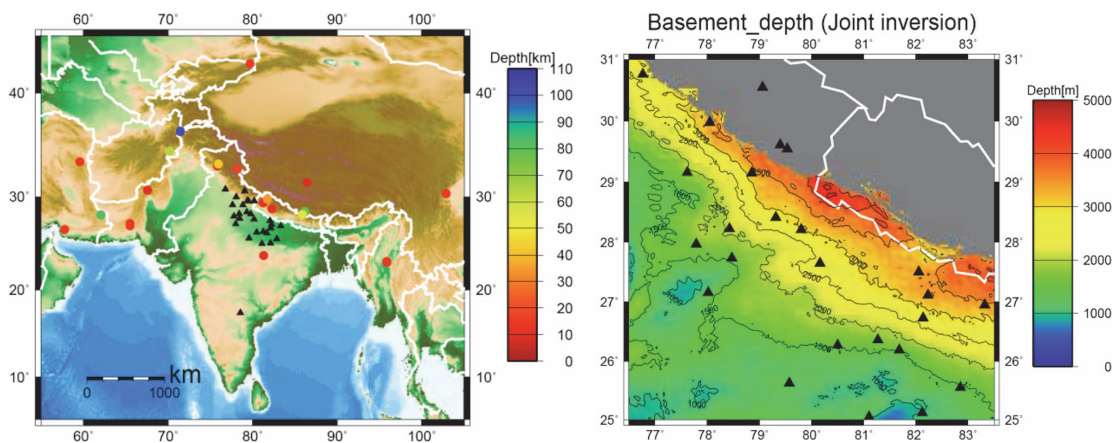


図 3 左：インドプロジェクトによる強震計ネットワーク (▲). 右：ネットワークのデータを用いて作られたヒンドスタン平野の3次元地下構造モデル

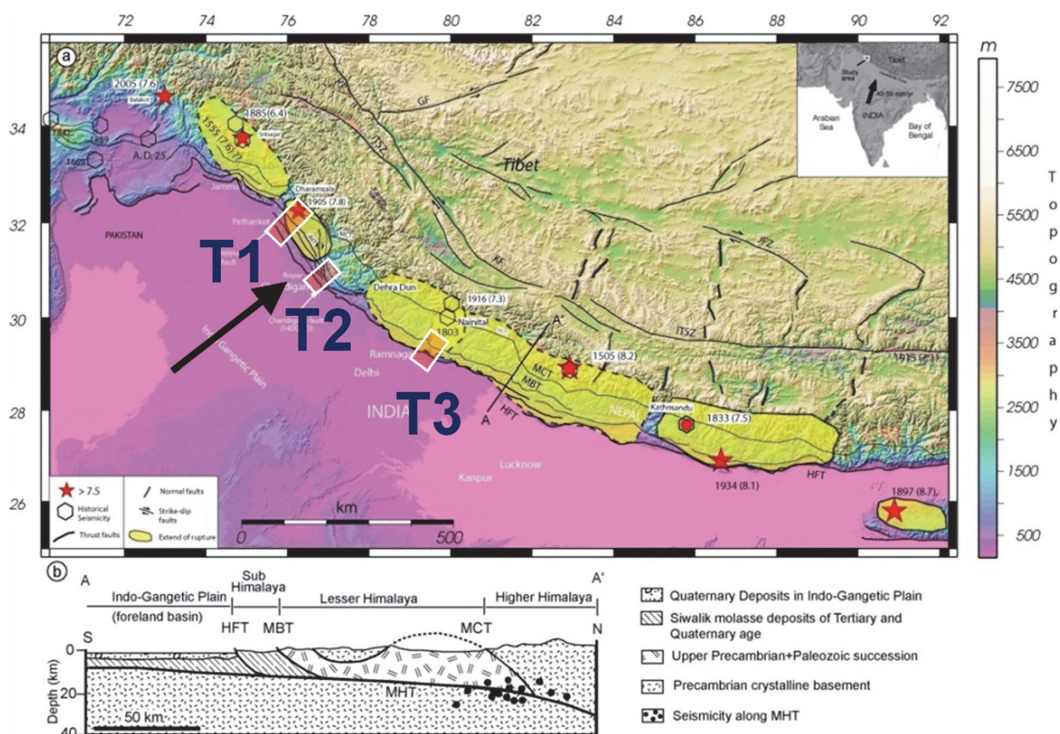


図 4 インドプロジェクトにおいてトレンチ調査とキャンペーン GPS 観測が行われた測線 (T1~3). 矢印はその付近におけるインドプレートの動き. 地図等は Malik *et al.* (2010) による

る研究題目4「緊急事態および減災のための情報通信プラットフォームの開発」がプロジェクトを構成している。これら3題目はプロジェクトの中心となる情報ネットワークに関するものだが、地震ジャーナルの読者には関心の外だと思われるの

で、ここでは筆者(東大, 当時)をリーダーとしたグループ1による研究題目1についてのみ述べる。グループ1だけで地震とそのハザード・リスクに関するものを担うため、グループをさらに3つのサブグループ、強震動サブグループ(リーダー

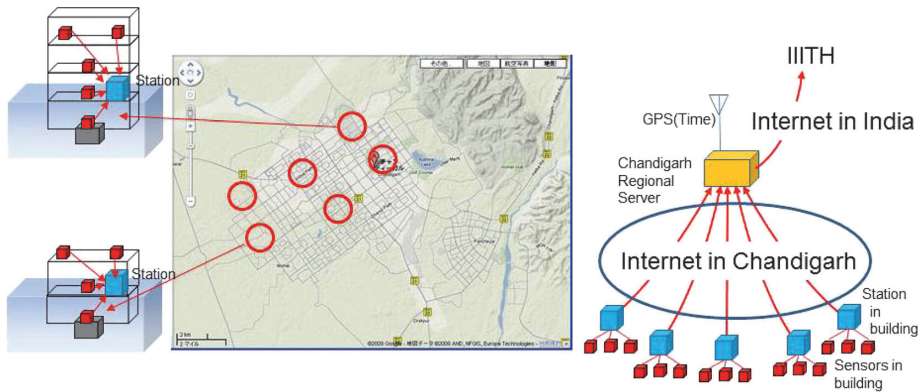


図5 インドプロジェクトによりチャンディガール (Chandigarh) 市に構築された建物センサーネットワーク

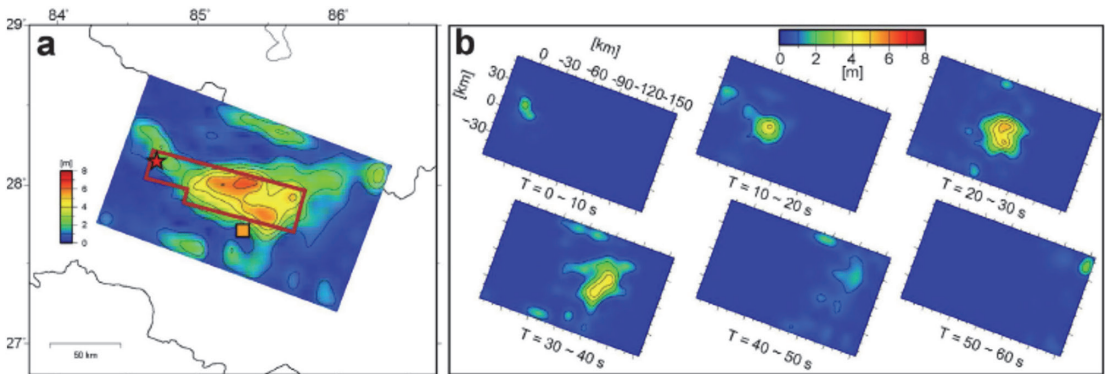


図6 2015年ゴルカ地震の震源インバージョンの結果。すべり分布 (a) とその10秒間隔スナップショット (b)。赤星印が破壊開始点 (震源), 橙色四角がカトマンズを示す。Koketsu *et al.* (2016) による

筆者, 当時東大), GPS サブグループ (リーダー加藤 (照) 東大教授, 当時・奥村広島大教授), 建物センサーサブグループ (リーダー鷹野教授), およびアウトリーチ活動を行うチーム (リーダー大木東大助教, 当時) に分けて活動を行った。強震動サブグループはインドの National Geophysical Research Institute (NGRI) をカウンターパートとして多数の強震計を設置し (図3左の▲印), そのデータの収集・分析基盤となるネットワークをグループ3, 4の成果をもとに構築した。また, 同ネットワークで得られたデータを用いて, ヒンドスタン平野 (Indo-Gangetic Plain) の3次元地下構造モデルを作成した (図3右)。

GPS サブグループは Indian Institute of Tech-

nology, Kanpur をカウンターパートとして, 主前縁断層帯に沿った3測線においてトレンチ調査とキャンペーンGPS観測を行った (図4のT1~3)。さらに, そのデータのデータベース化を, グループ4による災害情報システムの一部として行った。データベースの解析結果から, T1付近のM7.8の地震をシナリオ地震に設定し, その震源モデルを構築した。建物センサーサブグループは International Institute of Information Technology, Hyderabad をカウンターパートとして, T1に近い人工都市, チャンディガール (Chandigarh) 市に建物センサーネットワークを構築した (図5)。同ネットワークで得られたデータを用いて, 3次元フレームモデルによるフラジリ

ティ解析を行い、建物種別ごとにフラジリティ曲線を構築した。

#### 4. 2015年ゴルカ地震

2節で述べたように、インドプロジェクトとネパールプロジェクトのつながりである2015年4月にネパール中部、首都カトマンズの北西部にあるゴルカ（Gorkha）地方（かつてイギリス軍の傭兵であった「グルカ兵」のグルカ（Gurkha）はゴルカの英語訛）を震源域とする  $M_w$  7.8の大地震が発生した。この震源域を図2の断面図にプロットすれば、プレート境界上でカトマンズ（Kathmandu）直下の北寄り（右寄り）であり、プレート境界の傾斜角が浅いため、この付近でも

深さは10km程度である。

Koketsu *et al.* (2016) はこの地震の震源や地震動（地震による揺れ）の解析を行い、図6の結果（震源断層上のすべり分布とそのスナップショット）などを得た。その際、インドプロジェクトのカウンターパート、NGRIのDavuluri博士との共同研究となったので、同博士がKoketsu *et al.* (2016) の論文の第6著者となっている。第7から第9著者は次に述べるネパールプロジェクトのカウンターパートであり、同プロジェクトの準備期間において共同研究を行った。ゴルカ地震によってカトマンズに強い地震動が発生し大きな災害となったが、Koketsu *et al.* (2016) のもっとも大きな成果はこの強い地震動の生成メカニズムを解明したことである（図7）。

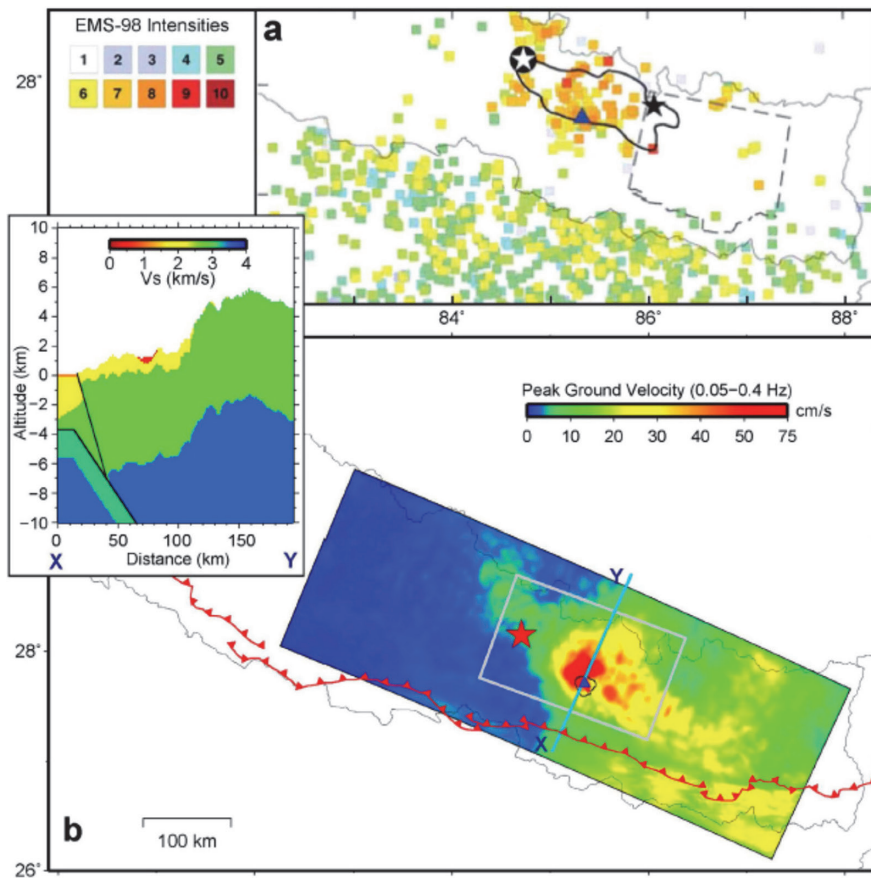


図7 a: 2015年ゴルカ地震の体感震度の分布 (Martin *et al.*, 2015). b: Koketsu *et al.* (2016) による地震動シミュレーションの結果。インセットは地下構造モデルの断面図、星印が破壊開始点（震源）を、三角がカトマンズを表す

図 6a に示されているように、カトマンズはゴルカ地震の震源断層の中に位置し、大きな断層すべりの領域の近傍にある。そうした断層近傍の地震動が大きくなるメカニズムとしてはディレクティビティ (directivity) 効果が知られている (この効果の説明には瀧野 (2018) などを参照)。ただし、ゴルカ地震のような逆断層型の地震の場合 (図 2 に矢印で示したように、プレート境界地震は上盤がずり上がる逆断層型になる)、断層破壊が断層面の傾斜方向上向きに伝播するときに、伝播方向の延長線上にある観測点においてこの効果が働くと考えられている。

ところが、実際のゴルカ地震では図 6b に示されているように、断層破壊が断層面の走向方向東向きに伝播しており、カトマンズはその伝播方向の線上にある。この矛盾点は、地震動の放射パターンが逆断層の傾斜角により異なることに由来する。傾斜角  $45^\circ$  前後の通常の逆断層の場合は断層面の傾斜方向が大きな振幅となるので、ディレクティビティ効果の建設的干渉も傾斜方向伝播により現れる (Koketsu *et al.* (2016) の Figure 4)。これに対して、 $10^\circ$  程度という低角のゴルカ地震の場合、断層面の走向方向が大きな振幅となり、

ディレクティビティ効果の建設的干渉は走向方向伝播により現れたのである (Koketsu *et al.* (2016) の Figure 5)。

## 5. ネパールプロジェクト

インドプロジェクトは、主前縁断層帯西部の地震とそのハザードやリスクに関して一定の研究成果を得たが、プロジェクト内 4 グループの中の 1 つで研究が行われたにすぎなかった。また、主前縁断層帯の主要部分である中部を研究対象にできなかった。さらには、SATREPS プログラムでは同じ分野、同じ相手国でプロジェクトが 2 回採択されることは非常に稀という事情があった。そうした問題意識で、インドプロジェクトの終了年度の前年度と終了年度に、プレート境界を越えた隣国ネパールを相手国、研究代表者を筆者 (当時、東大)、幹事を三宅東大准教授としたプロジェクトで SATREPS プログラムに応募した。幸いにも終了年度のもの採択されて、インドプロジェクトと連続するようにネパールプロジェクトの準備期間が始まった。4 節で述べたゴルカ地震の研究は主に、JST の国際緊急研究・調査 (J-RAPID)

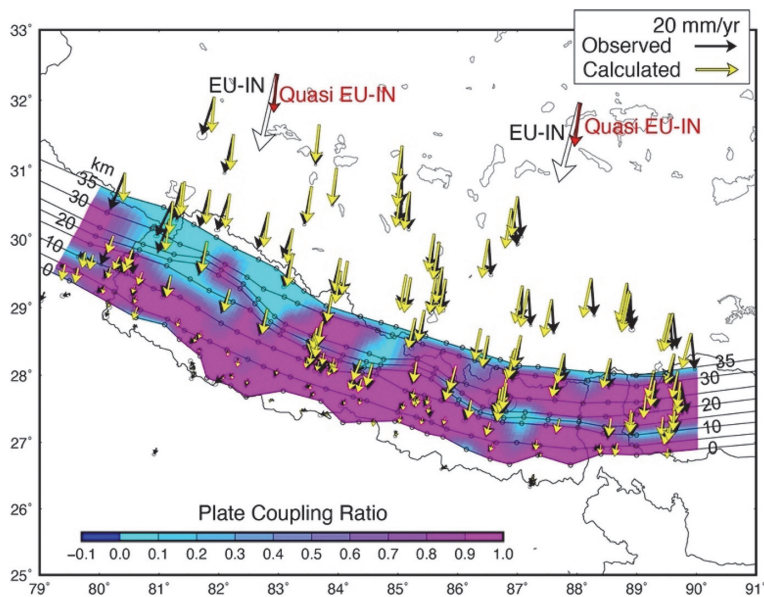


図 8 インドユーラシアプレート境界におけるプレート間固着率

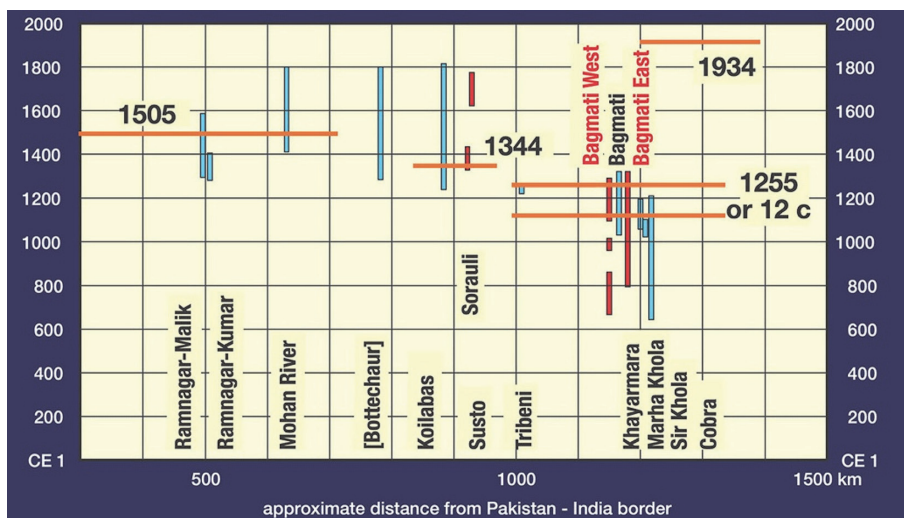


図 9 インド北部からネパール中部にかけて主前縁断層帯の最近 2000 年間の活動史。縦長のバーが、それぞれの調査地点で認定された地震イベントの発生時期を示す。赤色はネパールプロジェクトの暫定結果、水色は Wesnousky (2020) と Malik *et al.* (2017) による

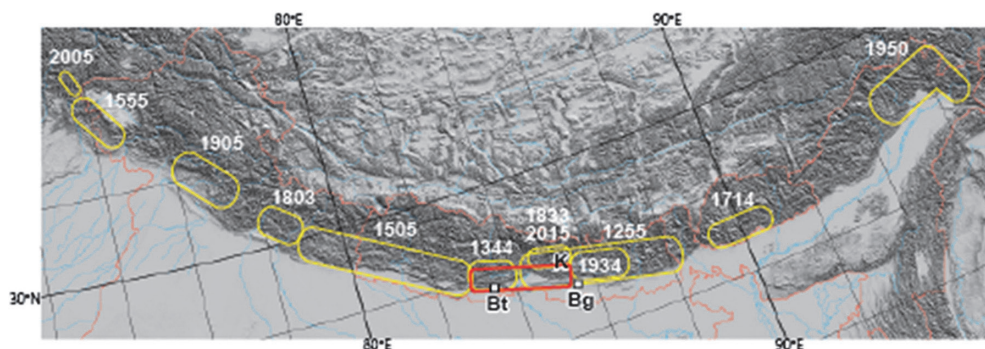


図 10 主前縁断層帯に沿った大地震の震源域 (黄色)。その分布と地震発生年から想定されたシナリオ地震の震源域 (赤色)

プログラムに応募して得た研究費で行われたが、ゴルカ地震のデータや解析結果はネパールプロジェクトにとっても有用であるので、準備期間の研究費も用いた。

ネパールプロジェクトの正式名称が「ネパールヒマラヤ巨大地震とその災害軽減の総合研究」であり、インドプロジェクトとは異なりプロジェクト全体が地震とそのハザード・リスクの研究に充てられている。したがって、プロジェクト下のグループが、インドプロジェクト・グループ1のサブグループに相当する。カウンターパートもほぼ

全体をネパール政府の Department of Mines and Geology (DMG, 鉱山地質局) が担い、部分的に Department of Urban Development and Building Construction (DUDBC, 都市開発建築局) とトリブバン (Tribhuvan) 大学の Central Department of Physics (中央物理学科) の協力を得た。

グループ1 (リーダー田部井高知大教授・奥村広島大教授) は研究題目1「ポテンシャル評価」を担当して、3つの研究活動、1-1 地殻変動観測と地震・地殻変動の評価、1-2 地質学・変動地形学調査による断層活動度の評価、1-3 地震ポテン

シャルの評価と震源モデルの構築，に取り組んだ。研究成果のうちプロジェクトのハイライトとなったものは以下の2点である。(1) インドプレートとユーラシアプレートの境界面は主前縁断

層帯から深さ 10km 程度まで強く固着しており，横方向の変化はほとんどないことを GNSS 観測から見出した (図 8)。(2) 主前縁断層帯で行ったトレンチ調査において，1255 年と 1344 年の歴史地震の痕跡を見出した (図 9)。

グループ 2 (リーダー高井北大准教授) は研究題目 2「地震動予測」を担当して，2つの研究活動，2-1 強震観測と速度構造モデルの検証・高度化，2-2 シナリオ地震の検討と地震動予測，に取り組んだ。研究成果のうちプロジェクトのハイライトとなったものは，(3) (1) と (2) の成果から 1255 年と 1344 年の歴史地震の震源域のうち，2015 年ゴルカ地震・1934 年ビハール地震の震源域に含まれない部分が，カトマンズ盆地のシナリオ地震 (将来の被害地震) の震源域と特定し (図 10)，特性化震源モデルを構築した (図 11)。その際，Koketsu *et al.* (2016) が作成した広域地下構造モデル (図 7 インセット) を参照して詳細な形状が決められた。

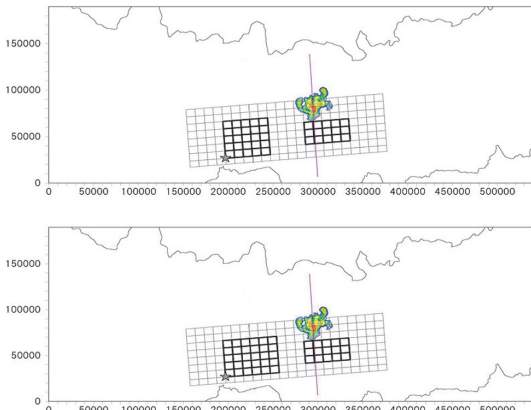


図 11 シナリオ地震の特性化震源モデルである S model (上) と M model (下)。灰色格子が震源断層，黒色格子がアスペリティを表し，カラー模様がカトマンズ盆地

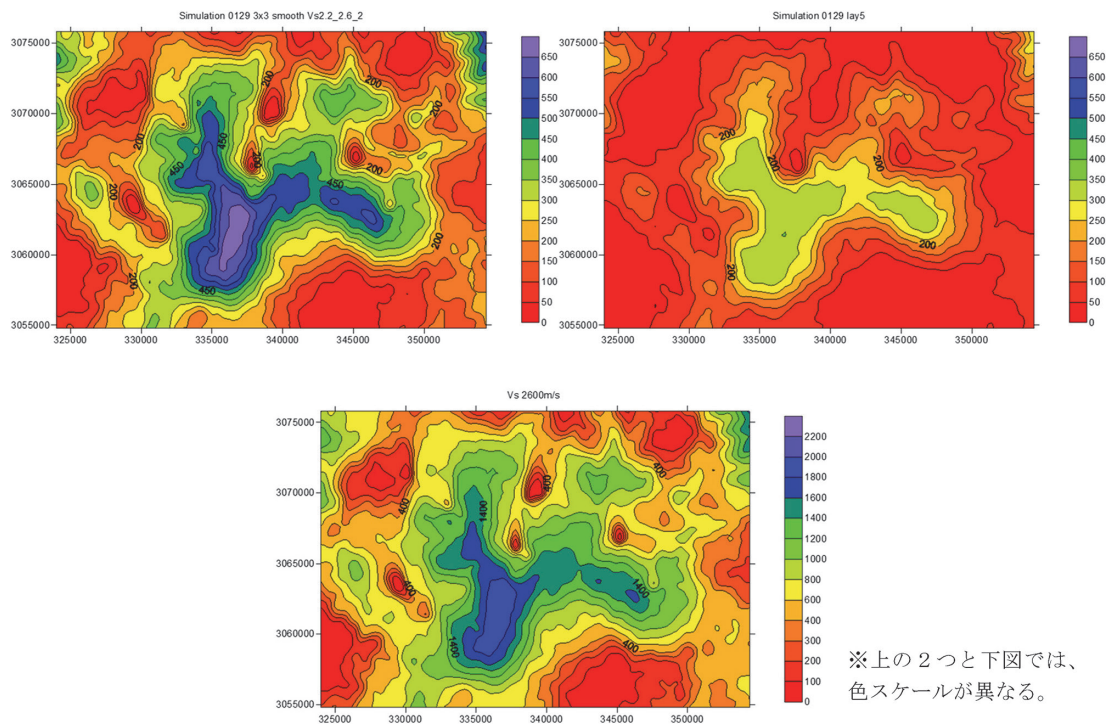


図 12 カトマンズ盆地の速度構造モデル。S波速度層上面の深度分布で左上：0.51 km/s 層，右上：2.2 km/s 層 (基盤)，下：2.6 km/s 層

※上の2つと下図では、色スケールが異なる。



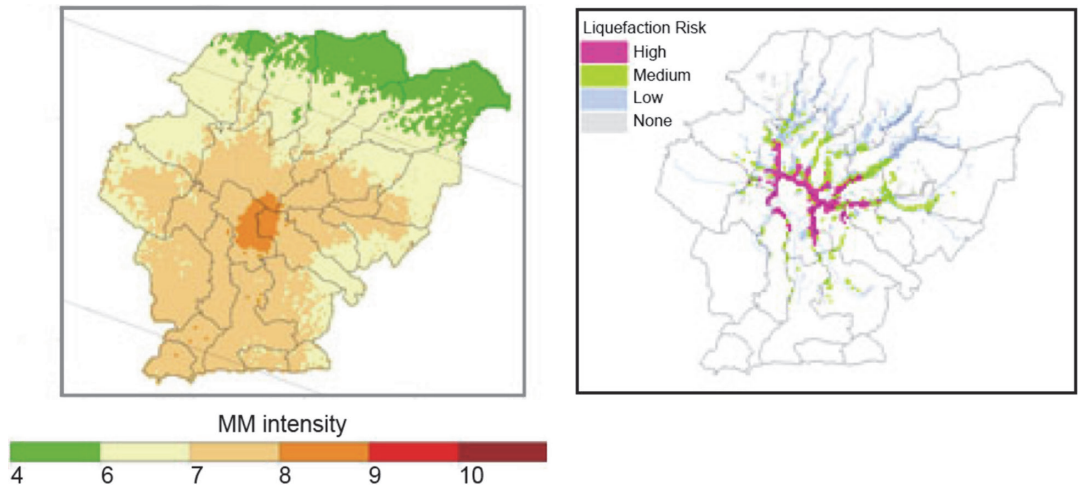


図 13 シナリオ地震 (Model S, 西の破壊開始点) に対するカトマンズ盆地の地震動ハザードマップ (改正メルカリ震度, 左) と液状化ハザードマップ (雨季, 右)

グループ 3 (リーダー松山応用地質技師長) は研究題目 3「ハザード評価」を担当して、3つの研究活動、3-1 速度構造モデル・地盤構造モデルの構築、3-2 地震動予測の高度化とハザード評価、3-3 地震災害リスクの再評価、に取り組んだ。研究成果のうちプロジェクトのハイライトとなったものは以下の 2 点である。(4) 強震観測 (グループ 2)・重力探査・反射法探査・微動探査の結果からカトマンズ盆地の 3 次元地下構造モデルが構築され (図 12), そのモデルから地盤増幅率マップ (揺れやすさマップ) を作ることができた。(5) (3) のシナリオ地震の特性化震源モデルと (4) の 3 次元地下構造モデルを用いてハイブリッド合成の地震動予測を行い、地震の揺れや地盤の液状化に関するハザードマップを作成した (図 13)。

グループ 4 (リーダー堀内ホームサイスマメータ社長) は研究題目 4「地震観測システム」を担当して、2つの研究活動、4-1 地震観測ネットワークの強化、4-2 地震データ処理の強化、に取り組んだ。研究成果のうちプロジェクトのハイライトとなったものは、(6) 日常の地震活動を監視するための地震観測網とそのデータの自動化処理システムを構築するとともに、カウンターパートの追加の要望に応じて既存の観測網と統合処理するためのインターフェースを提供し、試験的な統合処

理を行った。

グループ 5 (リーダー楠東大教授) は研究題目 5「教育と政策」を担当して、3つの研究活動、5-1 地震学の高等教育基盤の構築、5-2 地震学および地震工学の専門家研修、5-3 地震災害軽減のための政策提案、に取り組んだ。研究成果のうちプロジェクトのハイライトとなったものは次のとおり。(7) Ferro Cement による耐震補強技術やピロティ化建物の耐震性能評価法を提案するとともに、ワークショップや意見交換会を繰り返して、これらの提案や揺れやすさマップ、地震動と液状化のハザードマップを公知し、次期の耐震規定改定に備えた技術解説として出版することを建築行政のネパール当局である DUDBC と合意した。

## 6. おわりに

インドプレートとユーラシアプレートの境界における巨大地震とそのハザードに関する研究に 12 年 3 カ月の間取り組んできた。特に後半のネパールプロジェクトでは、インドプロジェクトの経験を踏まえて一貫した研究が行われ、十分な成果をあげることができた。また、国際科学技術協力として期待される社会実装も、その道筋を建築行政のネパール当局と合意できた。

そのほか、特筆すべきことをあげれば、カトマンズ盆地において史上初めて反射法探査を実施できたこと、日本だけでなく他の援助国による観測網も統合する第一歩を構築したこと、地震学の高等教育基盤のために英語版教科書 *Ground Motion Seismology* を執筆し出版できたこと、などがある。

以上のことはプロジェクトのメンバーの協力によるところであるが、研究者個人だけでなく、応用地質という実務に優れた民間企業にサポートいただいた点も大きい。記して感謝致します。

### 参考文献

- Avouac, J.-P., 2007. Dynamic processes in extensional and compressional settings - Mountain building: From earthquakes to geological deformation. In: Vol. 6 Crust and Lithosphere Dynamics, Watt, A.B. (ed.), *Treatise on Geophysics*, Elsevier, 377-439.
- 本蔵善守, 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, **65**, 52-54.
- 瀬戸一, 2018. 「地震動の物理学」. 近代科学社, 353 pp.
- Koketsu, K., H. Miyake, Y. Guo, H. Kobayashi, T. Masuda, S. Davuluri, M. Bhattarai, L. B. Adhikari, and S. N. Sapkota, 2016. Widespread ground motion distribution caused by rupture directivity during the 2015 Gorkha, Nepal earthquake. *Sci. Rep.*, **6**, DOI: 10.1038/srep28536
- Malavieille, J. *et al.*, 2002. L'océan perdu. In: Museum National D'Histoire Naturelle (France), Avouac, J.-P. and De Wever P. (eds.), Himalaya-Tibet, Le choc des continents, pp. 32-39, Paris: CNRS Editions et Museum national de'Histoire naturelle.
- Malik, J. N. *et al.*, 2010. Paleoseismic evidence from trench investigation along Hajipur fault, Himalayan Frontal Thrust, NW Himalaya: Implications of the faulting pattern on landscape evolution and seismic hazard. *J. Struct. Geol.*, **32**, 350-361.
- Malik, J. N. *et al.*, 2017. Paleoseismic evidence of the CE 1505 (?) and CE 1803 earthquakes from the foothill zone of the Kumaon Himalaya along the Himalayan Frontal Thrust (HFT), India. *Tectonophysics*, **714-715**, 133-145.
- Martin, S. S., S. E. Hough, and C. Hung, 2015. Ground motions from the 2015  $M_w$  7.8 Gorkha, Nepal, earthquake constrained by a detailed assessment of macroseismic data. *Seismol. Res. Lett.*, **86**, 1524-1532.
- Wesnousky, S. G., 2020. Great pending Himalaya earthquakes. *Seismol. Res. Lett.*, **91**, 3334-3342.

瀬戸一

[こうけつ かずき]

**現職** 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任教授

**略歴** 1980年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了, 東京大学地震研究所助手, 1987年理学博士(東京大学), 1989年 Australian National University, Visiting Fellow, 1993年東京大学地震研究所助教授, 1998年文部省学術調査官, 2004年東京大学地震研究所教授, 2005年東京工業大学都市地震工学センター特任教授, 東京大学総長補佐, 2020年より現職, 2021年東京大学名誉教授

**主要な著書・論文** *Ground Motion Seismology* (Springer, 2021), 理科年表・地学部地震(国立天文台(編), 丸善出版, 2001-2021), 地震動の物理学(近代科学社, 2018), 超巨大地震に迫る(大木・瀬戸, NHK出版, 2011), 地震・津波と火山の事典(藤井・瀬戸(編), 丸善, 2008), Koketsu, K. *et al.* (2016), 参考文献に記載. Yokota, Y. and K. Koketsu (2015), A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *Nat. Commun.*, **6**, DOI: 10.1038/srep28536. Koketsu, K. and M. Kikuchi (2000), Propagation of seismic ground motion in the Kanto basin, Japan. *Science*, **288**, 1237-1239.



## 地震記者の回想—4—

わたしが地震や台風、風水害などの自然災害の取材に本格的に取り組み始めたのは1974年伊豆半島沖地震からだ。もともと地震や風水害などには、子どもの頃から関心があった。1944年の東南海地震を静岡県浜松市で体験した。戦時中のことだったので、米軍の爆撃だと思って庭の防空壕に飛び込んだ。幸いわが家に被害はなかったが幼稚園生としての地震初体験だった。翌月には三河地震の揺れを経験した。戦後まもなくの1946年、南海地震が発生した。小学校2年生だったが、新聞に掲載された津波によって市街地に突入した漁船の写真をみて衝撃を受けた。のちに地震専門記者になる下地はこの辺にあると思っている。まもなく伊豆の伊東に転居し1949年、キティ台風に遭遇した。海沿いのわが家は堤防を乗り越えて打ち寄せた大波の被害を受けた。災害に対する関心がいっそう増したのはこの頃だった。

大学時代は伊東から東京都内まで遠距離通学だった。1958年の狩野川台風の日、朝は風雨が強くなかったので大学にいった。ところが帰宅はたいへんなことになった。東京駅から乗った下り湘南電車が途中で停まってしまったが、なんとか熱海までたどり着いた。その先は運休だという。熱海駅で電車内を避難所に、乗客が一夜を明かすことになった。風雨がおさまった午前2時、伊東線方面へ帰る人は線路を歩いて自宅を目指すことになった。総勢50人、都内へ通学する大学生・専門学校生だった。伊東線はトンネルが多い。停電で照明が消え危険だ。持っていた週刊誌に火をつけてトンネル内を進む。トンネルを抜けると線路が宙吊りになっていた。海岸に出て磯伝いに進む。伊東駅にたどり着いたのは5時間後、夜が明けていた。駅前には浸水していなかったが、街中に入ると水かさが増していく。自宅に着いたときは、首まで水に浸かっていた。それから1週間、家具や畳をトラックで捨てる作業の日が続いた。この経験

が、のちに報道記者になって役立った。災害廃棄物の処理、災害ヘドロの中をどのように歩行するか。通信途絶の中で生活情報をどう伝達するか。の貴重な体験だった。

大学卒業後、静岡市に本社がある静岡放送に入社した。1977年7月7日、静岡に24時間連続雨量508mmという「七夕豪雨」があった。猛烈な雨の中、冠水した道路を車で会社に駆けつけた。マイカーは床まで水に浸かっており、ブレーキが滑る、シフトダウンで停車した。

この七夕豪雨の日、静岡県では知事選挙が行われた。現職副知事と新人候補の元参議院議員との一騎打ちだった。雨が小降りとなった夜半、わたしたちは報道特別番組「知事選挙開票速報」を生放送した。激戦を極め開票は大接戦だった。そんな中、スタジオに視聴者から1本の電話がかかってきた。「開票速報どころじゃないぞ。洪水だ。いま浮いてきた畳に乗って電話している。開票速報を中止して、災害放送に切り替えてくれ」電話の主が叫んでいる。これを皮切りに水害を訴える電話が相次いだ。山崩れが起きた。堤防が決壊し住宅地に水が流れ込んだ。こんな被害情報が次つぎに寄せられ始めた。選挙開票速報は豪雨災害速報に切り替えられた。選挙事務所にいたテレビ中継車は災害現場に場所を移し被災現場の生中継が開始された。報道特別番組「県知事選挙開票速報」のタイトルで放送を開始した番組は、いつの間にか「豪雨災害特別番組」に切り替わった。豪雨被害は、死者27、浸水・損壊家屋は26,000棟以上にのぼる大きなものだった。

夜が明け、あたりが明るくなったころ、選挙に決着がついた。新人候補が知事選に勝利した。のちに東海地震対策に精力的に取り組むことになった山本敬三郎知事が誕生したのだった。山本新知事は県庁への初登庁を待たず豪雨の被災地回りが初仕事となった。豪雨災害の中で誕生した山本さんはその後、災害対策に真正

面から取り組むことになった。「地震知事」と世間でよばれる存在になった。

地震対策に熱心に、真面目に、取り組んだからこんなことも起きた。

山本知事が誕生した翌年の1978年、マグニチュード7.0の伊豆大島近海地震が発生した。このとき静岡県は知事名で県民に呼びかける「余震に関する連絡（余震情報）」を発表した。しかし、この情報が県民のあいだでパニックを起こした。地震の翌日開かれた地震予知連絡会で今後の地震活動の見通しが検討され、「今後1週間程度は大きな余震が起きることがある」というコメントが出された。それは規模の大きな地震の際に出される一般的な注意呼びかけだったが、この見解が国の非常災害対策本部から静岡県に伝えられた際、山本知事はふたたび大きな揺れが起きるのではないかと心配した。一晩熟慮した末、翌日、静岡県独自の「余震情報」を発表した。この「余震情報」が思わぬ混乱を呼んでしまった。静岡県が出した「余震情報の連絡」には「最悪の場合、今後M6程度の地震が起きる恐れがある。落ち着いた行動を」とあった。加えて「飲料水や食料の備蓄、住居の応急点検を」とあった。この「余震情報」は山本知事自らが記者会見で発表したから、メディアはきわめて重要な情報だと受け止めた。ニュース速報でこれを報じたテレビ局があった。字幕には「今後の情報に注意、落ち着いた行動を」とあったから、視聴者は「また大きな地震か」と思った。「余震情報」の発表文は「今後M6の地震」とあったから、“M6”をPM6、午後6時に地震が起きると勘違いした人がいた。静岡県では、東海地震に備えて業界ごとに防災連絡網ができていたので、「余震情報」はこのルートを使って伝えられたが、伝達過程で情報が変容し間違った内容で伝えられてしまった。県教育委員会ルートでは、情報を受けて臨時休校した小学校があった。町役場の広報車が「余震情報」を伝えて回ったが、広報車の放送は断片的にしか聞こえない。「今後も地震が」

「これから大きな地震が」とだけ聞く人、情報はさまざまに解釈されてしまった。

こうした災害情報を詳しく解析・研究したのは東京大学情報学環の廣井 脩さんだった。廣井さんは日本各地で地震や噴火、風水害が発生するとその情報伝達の過程や問題点、効果を詳しく調査分析した。そんな関係で私は廣井さんとは懇意にお付き合いさせてもらった。廣井さんは気さくな人だった。研究室を訪ね、用件を終えると、「このあと遊ばない」と声がかかる。秋葉原へ音楽ソフトを探しにいったこともあった。廣井さんはパソコンに音楽作成ソフトを入れて楽しんでいた。「奥飛騨慕情」「ああ上野駅」「小樽運河」などの歌謡曲が主体だ。

廣井さんとはよく居酒屋にいった。飲みながら、防災の話をする。廣井さんは焼酎の水割りが好きだった。グラスから水が上に飛び出して鼻に触るくらい入れる。その場で話題になったのが「災害時に個人の安否を伝えたい」「地震が揺れる直前に予告できないだろうか」と。のちに災害伝言ダイヤルや緊急地震速報になった。

そんな居酒屋談義の輪が徐々に広がり、行政、通信、メディアなどに携わる人達の“防災呑み会”に発展した。気象庁や防災官庁の担当者も加わった。東京大学地震研究所の阿部勝征さんは廣井さんと仲良しだった。阿部さんも会のメンバーに入った。廣井さんも阿部さんも、世の中の動きに強い関心を示す視野の広い人だった。飲みながら防災を語り合う仲間がどんどん増えていった。会の幹事役は気象庁OBの荒谷 博さん（元高知地方気象台長）。荒谷さんは気象庁広報室勤務の経験があり、防災仲間づくりに長けている。

廣井さん、阿部さん亡き後も、居酒屋で防災を語り合う。テーブルには、廣井さん・阿部さんの遺影を飾り、水割りが供えられる。

ただしコロナ禍の現在、この会は休会中だ。

（了）

川端信正（元静岡放送）

# 南海トラフ地震に備える

## —防災対策に資する南海トラフ地震調査

### —研究プロジェクトの目的と計画—

小平秀一・藤原広行・高橋成実

#### はじめに

東海沖から九州東方沖合に位置する南海トラフでは巨大地震・津波が繰り返し発生しており、国の地震調査研究推進本部の評価によると、南海トラフで今後30年以内にマグニチュード(M)8~9クラスの地震が発生する確率は70~80%とされている。一方で、中央防災会議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では「南海トラフで発生する大規模地震には多様性があり、地震の発生時期や場所・規模を確度高く予測することは困難である」と結論付けている。このように、時期・場所・規模は特定できないが、南海トラフ巨大地震の発生は確実に迫っており、その地震・津波による被害を軽減するためさまざまな対策が必要となっている。そんな中、2019年には気象庁により「南海トラフ地震臨時情報」の提供が開始された。この臨時情報は、南海トラフ地震の想定震源域において、その西側もしくは東側半分の領域で地震が発生した場合(「半割れ」地震)、想定震源域の一部で地震が発生した場合(「一部割れ」地震)などM6.8以上の地震が発生した場合や、想定震源域で通常とは異なるゆっくりすべりが発生した場合などに発令されるものである。臨時情報が発令された場合は、地震への備えを再確認するとともに、地震発生後の避難では間に合わない可能性のある要配慮者の事前避難などが求められている。

#### プロジェクトの目的

南海トラフ地震を取り巻くこのような状況のなか、南海トラフ地震に備えるために科学的情報の高精度化や即時発信とその情報の適切な活用が求められている。この必要性に応えるため、文部科学省科学技術試験研究委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」が2020年度より5カ年計画で開始された。本プロジェクトでは、最新の観測データに基づき想定震源域での地殻活動やプレートすべり・固着の現状とその推移予測に関する情報創生・発信を目的とする「地殻活動情報創成研究」、それらの情報も含み南海トラフ地震に関する情報を地震・津波被害軽減に最大活用するための防災対策やその実行の仕組みを創ることを目的とする「地震防災情報創成研究」、さらにそれら防災対策を自治体、企業等で活用するための社会実装とその成果検証を目的とする「創成情報発信研究」の3つの課題を推進する(図1)。以下ではこの三つの課題を紹介する。

#### 地殻活動情報創成研究

本課題では南海トラフ地震想定震源域周辺での地殻活動、想定震源断層のすべり・固着状況のモニタリング、さらに、通常と異なるゆっくりすべりや「半割れ」地震などが発生した際のその後のすべり・固着の推移予測を可能にするシステムを構築する。具体的には以下の三つの取り組みを実

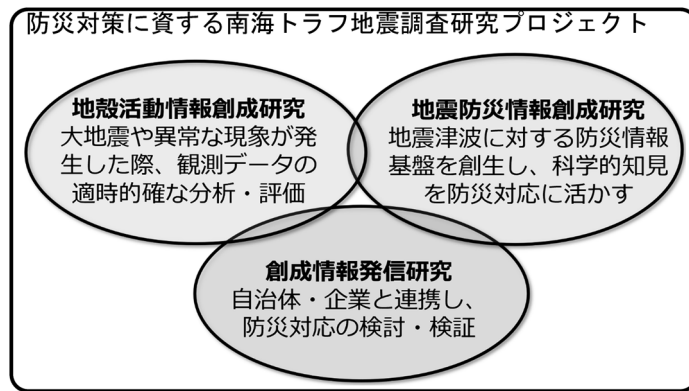


図 1 プロジェクト構成

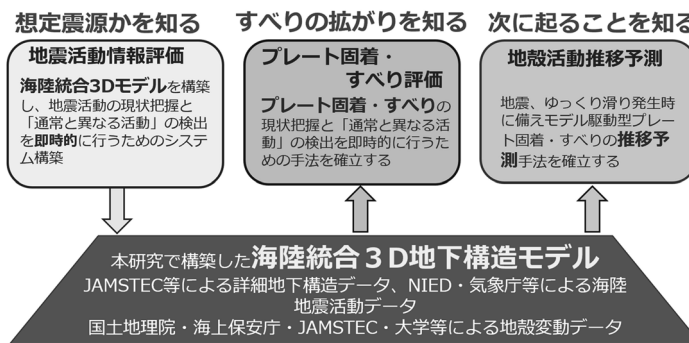


図 2 地殻活動情報創成研究構成

施する (図 2)。

### 1. 地震活動情報を正確に迅速に把握する

南海トラフ地震の想定震源断層はフィリピン海プレートと陸側プレートとの境界であり、その領域は西南日本の太平洋沿岸域から海底下に広がっている。このため、想定震源域の地下構造は陸の構造から海の構造へ三次元的に大きく変化している。これまでの即時震源決定システムでは単純な地下構造を用いており、震源の深さを即時的に精度よく決定することができず、南海トラフ周辺で地震が起きた際に想定震源断層で発生した地震であるかを即時的に把握することが困難であった。

そこで、本取り組みでは、これまでに得られた南海トラフ周辺の地下構造に関する情報を取りまとめて観測データに基づく海陸統合三次元地下構造モデルを構築し、このモデルを用いて即時的・自動的に震源決定を行うシステムを構築する。三

次元モデル構築では地震波のP波速度構造だけではなく、震源の深さ決定に重要な影響を及ぼすS波構造情報などを含んだマルチパラメータモデルを構築する。さらに、構築したシステムはリアルタイムに得られる地震波形データの解析に活用するだけではなく、これまでに観測された過去の観測データの再解析にも適用し、過去にさかのぼって地震活動の時間変化の検出をすすめる。

### 2. 想定断層のすべり・固着分布を迅速に把握する

想定断層の定常的な固着状況、一定規模以上の地震が発生した場合や、ゆっくりすべりが進行している場合にそのすべり域を迅速に把握することは、想定断層すべり・固着の現状把握のために最も基本となる情報である。しかしながら、震源情報の解析と同様に、現状の断層すべり・固着解析においても単純な地下構造を仮定した解析が行わ

## 地震防災情報創成研究

れており、その不確定さも評価されていない。そこで、本取り組みでは上記取り組みで構築した海陸統合三次元地下構造モデルを用いて、陸域・海域で観測される地殻変動データを用いて想定断層のすべり・固着を推定の不確定さを含めて即時的に推定するシステムを構築する。この際、観測される地殻変動データは地下の粘弾性の影響も含まれるため、解析に用いる三次元モデルには不均質粘弾性構造を追加する。これにより想定断層におけるすべり遅れの蓄積、地震時のすべり、ゆっくりすべり等の時空間分布を迅速かつ精度よく把握するとともに、その推定誤差を定量的に提示することが可能になる。

### 3. 想定断層のすべり・固着の推移を予測する

南海トラフにおいて半割れ地震が発生した場合や通常と異なるゆっくりすべりが進行した場合、その後の想定震源断層のすべり・固着時空間分布の推移予測情報は、避難行動や復旧行動の決定にあたって重要な情報となる。しかしながら、現状は具体的な推移予測情報を発信するシステムの構築は行われていない。そこで、本取り組みでは、過去の地震履歴や現状の断層のすべり・固着情報を用いて、半割れ地震等が発生した際に想定震源断層のすべり・固着の推移予測を行う手法を開発する。そのために、三次元不均質粘弾性構造を考慮した大規模有限要素モデルを構築し、前回の南海トラフ地震以降の地殻変動データと整合する物性パラメータを推定した上で、与えられたすべり・固着（半割れ地震やゆっくりすべり）の後のすべり・固着推移計算手法の開発を行う。

以上、本課題では現実的な海陸統合三次元地下構造モデルの構築と、それを用いた地震活動、想定断層のすべり・固着の現状把握・即時決定のシステムを構築し、それらの情報を活用して半割れ地震や通常と異なるゆっくりすべりが発生した際にその後の推移予測を行う手法開発を進める計画である。この課題で構築した地下構造モデルや発信される情報は次に述べる「地震防災情報創成研究」、 「創成情報発信研究」で活用される。

本課題では、発生が確実視される一方で地震発生様式（断層すべり域の広がり、発生時期）の時空間的な多様性が指摘されている南海トラフ地震に対し、地殻活動情報創成研究から発信される地震発生様式の情報も取り込んだ多様な地震発生シナリオによる地震・津波ハザードやリスクを評価する地震防災基盤シミュレータを構築する。さらに、それら情報を基に、南海トラフ地震・津波から人命、産業活動、都市機能を守る仕組み作りを目指す。具体的には以下の四つの取り組みを実施する。

#### 1. 地震防災基盤シミュレータの構築

南海トラフ地震に対して示されている多様な地震発生シナリオ（断層すべりモデル）に対して、地震・津波波形を高精度で効率的に計算できる手法を開発し、それに基づく長周期地震動を含んだ長継続時間・広帯域強震動、津波遡上を具体的な地震・津波像として格納するシナリオバンクを作成する。さらに、避難行動、産業活動、都市機能維持の観点からの活用を図るため、シナリオバンクに格納された多数のシナリオを類型化することにより、津波遡上、広帯域強震動、長周期地震動に関する代表的な広域災害シナリオを作成する。

この際、多様な地震発生シナリオの絞り込みには「地殻活動情報創成研究」で得られた現実的な想定震源のすべり・固着分布やその推移予測の結果も考慮する。また、地震動や津波波形の計算には「地殻活動情報創成研究」で構築された海陸統合三次元地下構造モデルの活用を目指す（図3）。

#### 2. 避難行動意思決定に資する情報提供

南海トラフ地震臨時情報は地震・津波発生前の事前情報として、地震・津波被害の大幅な軽減が期待される。一方で、現状の南海トラフ地震・津波に関する情報・知見は不確定性も含んでいる。

そのような不確定性も含んだ災害情報から被害軽減の効果を最大限引き出すには、事前避難すべきか否かの客観的な基準や避難先・避難方法に関する知見が必要となる。そこで、本取り組みでは

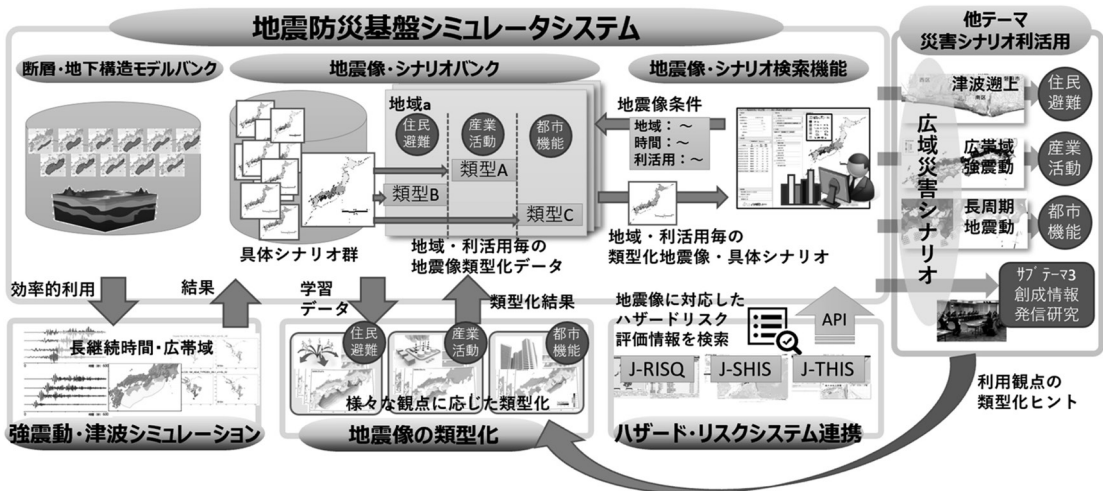


図 3 地震防災基盤シミュレータシステム概念図

地震防災基盤シミュレータによる津波遡上の情報を基に、事前避難の要・不要を診断するツールを開発し、モデル地域での実装を行う。そのために、先行プロジェクトで開発された津波避難訓練支援アプリ「逃げトレ」を活用し、津波避難訓練のたびに住民の空間移動に関するビックデータを蓄積するシステムを構築し、その情報に基づき、避難困難地域を同定することによって「事前避難要不要判断ツール」を作成する。同時に、避難時における人や車の空間移動動態を予測・実測し臨時情報発令時の「広域人口動態予測システム」の開発を行い、モデル地域に実装する。

### 3. 発災時の事業活動停止を防ぐ

南海トラフ地震臨時情報発令時には社会全体の活動が萎縮・低迷し企業の事業活動停止への影響も懸念される。そのため、臨時情報発令時においても多角的な状況分析により地域の事業活動の活性を保つための事前検討が必要となる。そこで、本取り組みでは、地域の事業活動が継続するために必要となる要素を構造化し、事前防災対策と事後対応を構成要素とした産業タイムラインモデルを構築することにより、都市インフラとサプライチェーンの回復力のリスク評価を行う。また、この評価に必要な人流、物流情報のモニタリングのため、地震センサー、自動車センサーからのデータ、都市インフラのデータなど社会のモニタリ

ングデータ利活用の高度化を行い、臨時情報発令時における俯瞰的な社会様相モニタリング手法の開発を行う。

### 4. 発災時の大都市機能の維持

南海トラフ地震発災時においても大都市の機能を維持することはきわめて重要である。とくに長周期地震動の影響がある首都圏は政治・経済・報道などの中枢管理機能が集中しており、たとえば高層ビルなどの被害は首都機能維持や国全体としての災害対応そのものに少なくない影響を及ぼすと考えられる。今後、大都市ではあらゆるものにセンサーが埋め込まれ、モニタリングが可能なスマートシティ時代を迎える。そこで、本取り組みではスマートシティ時代における新しい防災対応手法の確立もにらんで、「都市機能の維持」に必要な対策をリアルタイムで抽出するための研究を首都圏を対象として行う。具体的には、大都市における災害シナリオをダイナミックに自動生成する仕組みを構築し、これをもとに都市機能を維持するための対応タイムライン作成手法を確立する。また、これらの成果の社会への実装を進める際は、上記地震防災基盤シミュレータによる長周期地震動を対象とし、超高層ビル等の被害（エレベータ障害等）に着目して、モデル地域における復旧状況をシミュレーションする手法を開発し、都市機能を守るための大都市圏ならではの復旧オ



ペレージョンの検討を実施する。

## 創成情報発信研究

本課題では「地殻活動情報創成研究」、「地震防災情報創成研究」で得られた知見や情報、さらに、これまでの南海トラフ地震関連研究の成果を地域防災で活用する方策を検討する。研究成果をそのまま伝えても、なかなか地域防災への展開は進まない現状がある。そこで、本課題では、地域の被害を最小限に抑え、復興・復旧を早くさせることを目的に、情報発信検討会を実施することにより、情報の共有、地域防災に特化したリスク評価、情報リテラシーの向上の3つの取り組みを中心に進める。

情報発信検討会では、地域の拠点大学、自治体、インフラ事業者、地域企業関係者などと本研究の研究者が一同に会し、複合災害対応、ハザード評価、事業継続、人材育成などをテーマとして共通の防災上の特性に対する状況と対策の情報共有と意見交換を行う。ここでは先端的な地殻活動モニタリングの技術共有のみならず、各地域で行っている防災上の取り組みを地域横断で共有し、各地域で直面している課題解決に貢献することを目指す。

地域防災に特化したリスク評価では、上記地震防災基盤シミュレータ等による先端的な計算手法を持ち込んで強震動や津波による災害の再評価をいくつかの地域で実施する。具体的には、表層地盤によるエッジ効果等、三次元的な構造の影響を見積もり、港湾構造物や河川構造物の変形を評価する。これらの影響を踏まえた津波浸水と、これによる津波瓦礫の発生量・集積地や漂流物の評価につなげる。これによって、現実的な被災イメージを共有し、現在の防災計画の深化を地域とともに図る。

情報リテラシー向上の取り組みでは、さまざまな情報を得たときの適切な判断と行動につなげることを目的とする。地震や津波が発生したとき、あるいは、気象庁からの臨時情報が発表されたとき、どのような被災イメージを持って、どのよう

に判断・行動するかは、個々人が抱えている状況や地域の防災特性にもよる。現在何が起りつつあって、これからどのようなことが起り得るのか、といった情報が提供されたときに、個々人が適切な被災イメージを描き自ら判断して行動につなげていくために必要な知識や、過去も含めたさまざまな経験を共有し、各地域の情報リテラシー向上を図る。

## おわりに

本プロジェクトは国難級の被害が危惧されている南海トラフ地震に対して、科学的・定量的なデータに基づき南海トラフ地震想定断層でのすべり・固着の現状や「半割れ地震」「これまでと異なるゆっくりすべり」が発生した際、その後の推移予測に関する情報を迅速かつ精度よく評価し情報発信する手法の開発を行うとともに、それら発信された情報を被害軽減に最大活用するため、平時や「南海トラフ地震臨時情報」が出された場合、住民・企業等の防災対策のあり方や防災対応を実行するにあたっての仕組みについて研究を実施する。これらの取り組みを実施するため、本プロジェクトでは地球科学、地震学、工学、社会科学など多様な専門を持つ研究者が南海トラフ地震の被害軽減に向けて、学問分野の壁を越えて横断的にプロジェクト推進に取り組んでいる。南海トラフ地震に対応する取り組みは本プロジェクト以外の研究開発や事業との連携が不可欠である。特に、地震像の解明に向けては、想定震源域である海域の地震・津波・地殻変動観測網の構築は必須である。また、本プロジェクトで構築した地殻活動の即時決定システムは将来的には気象庁、国土地理院などの現業官庁での実装が必要となる。さらに、得られた情報や構築したツールの社会実装やその活用には自治体、企業等との連携も不可欠である。このように、本プロジェクトの成果を最大活用するためには、プロジェクト内の分野横断的な取り組みはもちろんのこと、それ以上にプロジェクト外との連携を進め、南海トラフ地震に備える必要がある。本プロジェクトがその推進の一

端を担えるようプロジェクトを推進していきたい。

小平秀一

[こだいら しゅういち]

**現職** 海洋研究開発機構海域地震火山部門 部門長、博士（理学）

**略歴** 北海道大学理学研究科地球物理学専攻修了。北海道大学理学部助手、海洋科学技術センター研究員、海洋研究開発機構上席研究員などを経て2019年度より現職

**研究分野** 海域地球物理学、海域観測によりプレート境界での地震、火山活動などの変動現象とそれらに起因するハザードに関する研究を推進



藤原広行

[ふじわら ひろゆき]

**現職** 防災科学技術研究所マルチハザードリスク評価研究部門長、博士（理学）

**略歴** 1989年京都大学大学院理学研究科中退、科学技術庁国立防災科学技術センター研究員、防災科学技術研究所主任研究員、同研究領域長などを経て2016年度より現職

**研究分野** 応用地震学、全国強震観測網K-NETの整備、全国地震動予測地図の作成、リアルタイム地震被害推定システムの開発などに従事



高橋成実

[たかはし なるみ]

**現職** 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、海洋研究開発機構海域地震火山部門上席研究員、博士（理学）

**略歴** 千葉大学大学院自然科学研究科修了、東京大学大気海洋研究所助手、海洋研究開発機構技術研究主幹、同グループリーダー、防災科学技術研究所副センター長などを経て2020年度より現職

**研究分野** 海洋地震学、地殻構造、地震活動モニタリング、津波予測システムの開発・高度化などの研究を推進



# 無人海上観測機を用いた海底地殻変動観測

飯沼卓史

## 1. はじめに

日本列島周辺の海域では、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0；以後「東北沖地震」）のような海溝型巨大地震が繰り返し発生し、強い揺れや大きな津波による甚大な被害をもたらしてきた。海溝型巨大地震は、陸側のプレートと、その下に沈み込む海洋プレートとの境界で発生するが、その規模や発生間隔について見積るためには、プレート境界のどこがどのくらいの強度で固着しているのかを知る必要がある。

とはいえ、海溝型巨大地震の震源域は海底下にある。特に、大きな津波の発生の有無に大きく影響するプレート境界のごく浅い部分は、陸から遠く離れた海溝軸近傍にある。そのため、海底での地殻変動観測を行って、プレート境界での固着やすべりの状況を把握することは、沈み込み帯での地震発生を予測するうえで非常に重要である。

海底での地殻変動観測のため、海上でのGNSS測位と海上-海底間の音響測距を組み合わせた手法（GNSS-A）が開発され、日本列島周辺には同手法のための観測点が多数設置されてきた（たとえば、Spiess, 1985; Spiess *et al.*, 1998; Asada and Yabuki, 2001; Kido *et al.*, 2015）。東北沖地震の際には、地震時に生じた数十mに及ぶ変位や、同地震後に起きた地殻変動の陸域とはまったく異なる様相など、海溝型巨大地震の発生過程の解明に資する多くの重要な知見がGNSS-A観測によってもたらされている（たとえば、Sato *et al.*, 2011; Kido *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2014; Tomita *et al.*, 2017）。

とはいえ、GNSS-A観測を実施するためには、有人の船舶の運航が求められる。近年では、船底に音響測距用の機器を搭載した船舶が用いられてきたが、調査航海の実施には多くの人員や燃料が必要となる。観測にかかるコストが高いため、多数の観測点が設置されていても、それらを頻繁に回って観測を実施して、海底での地殻変動を広域的かつ高時間分解能で把握するのが難しい、という状況も生じていた。

これに対し、海洋研究開発機構と東北大学は、2018年から共同で、無人海上観測機「ウェーブグライダー」を用いてGNSS-A観測を行うシステムの開発を開始し、試験観測を行ってきた。2019年に行った実海域試験により、システムが当初の目標を達成できることを確認したうえで、2020年の夏、秋および2021年の春に、東北地方太平洋沖に設置されている多数のGNSS-A観測点を巡回する長期運用を実施してデータを取得した。また、2020年冬には、青森県沖でマグニチュード5クラスの地震が続発したことを受けて、緊急観測を機動的に実施した。本稿では、開発したシステム、実施した観測航海および得られたデータの解析結果の概要、ならびに、今後の展望について述べる。

## 2. ウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測システム

### 2.1 ウェーブグライダー

ウェーブグライダーはLiquid Robotics社（米）の開発した、自動自律航行する無人海上観測機である。海上に浮かぶフロート部と、海中に位置するグライダー部から構成され、両者は約8mの長

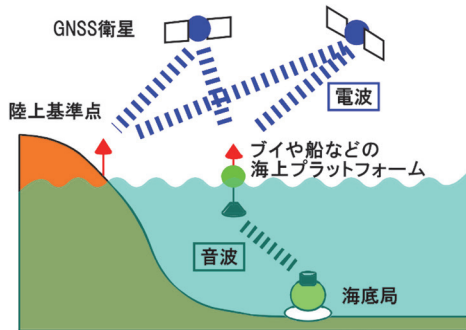


図 1 GNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測の模式図。船舶等の海上プラットフォームの位置をGNSS測位により決定するとともに、海底局の位置を音響測距によって計測し、両者を結合して海底地殻変動を検出する

さを持つアンピリカルケーブルで繋がれている。波浪によってフロート部が上（もしくは下）に動くのに追従してグライダー部も上に引っ張られる（もしくは自重で沈降する）が、その際にグライダー部に備わるウイングの向きが、そこに当たる水流によって前進する力を得られるように変わることによって、燃料や電力を消費せずに推進力を得る仕組みを実現している。巡航速度は波高に依存するが、平均して1.3ノット程度である。

設定された方向に進むのに必要な向きにグライダー部に備わるラダーを操作したり、接近する船舶からのAIS（船舶自動識別装置）信号を受信して必要ならば回避運動をとったりといった、自律航行を行うための機体制御装置がフロート部に搭載されている。必要な電力は太陽光パネルによって賄われる。ユーザーが別途搭載する観測機器を動作させるための電力もこの太陽光パネルから供給され、総消費電力が発電力を十分下回っていれば、外部から燃料の補給等を要さず長期間海域での運用ができる。航路の設定や観測機器への電力供給のオン・オフ、観測機器の制御やデータのダウンロードなどが衛星通信によって可能である。これらの機能を活用することで、観測点を巡回してGNSS-A観測を行い、また、取得したデータを陸上に準リアルタイムに伝送できる。広域的か

つ高頻度に、また、即時的に、海底地殻変動観測を行うためのプラットフォームとして有用であり、世界各地でも同機を用いたGNSS-A観測システムの開発が進められている（たとえば、Chadwell *et al.*, 2016 など）。

## 2.2 GNSS-A 観測機材の組み込み

GNSS-A観測を行うため、フロート部にGNSSアンテナと音響送受波器を搭載し、GNSS受信機や送受波器の制御装置、ジャイロ스코プ、観測機器制御およびデータ収録用の小型PCなどを収めた水密容器をフロート内部に格納した。また、ウェーブグライダー本体の制御を行うイリジウム衛星通信に加えて、観測機器の制御やデータ伝送を行うために、スラーヤ衛星通信システムを2020年度に導入した。

海底地殻変動観測点に設置されている海底局は普段は休眠状態にあるため、観測を行う際には、まず海底局を起動させる必要がある。観測点から一定の距離以内にウェーブグライダーが入ったら海底局を起動させるための音響信号の送信を開始し、その後は一定時間間隔で測距信号を送ってGNSS-A観測を継続するように、また、観測中に一定距離観測点から離れた場合には観測終了動作を行うように、小型PCから自動的に観測機器を制御できるようにした。

開発したシステムの実海域試験を、2019年7月に行われた東京大学大気海洋研究所の研究船共同利用航海KS-19-12航海（新青丸）にて実施した。青森県沖の海底地殻変動観測点G02において動作確認および試験観測を行って実観測データを取得した。得られたデータを解析したところ、船舶と同程度の精度で海底地殻変動の検出が可能であることが確認できた。このとき用いられたシステムの詳細、試された機能、取得データおよびその解析結果については、Inuma *et al.* (2021) に詳述されている。

2020年度には、スラーヤ衛星通信システムを介して、取得したデータや観測機器制御のログな

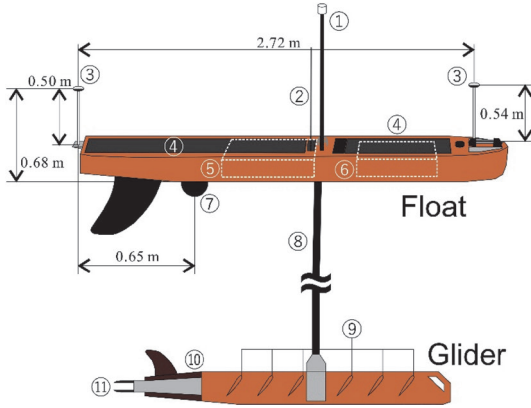


図 2 海底地殻変動観測用ウェーブグライダーと搭載機器 (Inuma *et al.*, 2021 より)。① 気象センサー・フラッシャー、② AIS アンテナ、③ GNSS アンテナ、④ ソーラーパネル、⑤ 制御ユニットおよびバッテリー（フロート内）、⑥ GNSS-A 観測用制御・収録機器（フロート内）、⑦ 音響トランスデューサー、⑧ アンビリアルケーブル (8m)、⑨ ウィング、⑩ ラダー、⑪ スラスタ

どの情報を陸上に準リアルタイムに伝送し、関係者に電子メールで配信する体制の整備を行った。海底局の起動が成功しているかどうかの確認や観測データの一部を陸上で解析できるようになり、次節に述べる長期的な観測航海や緊急観測の機動的な実施が可能となった。

### 3. 観測航海とデータ解析結果

2020年6月21日から7月28日にかけての38日間に、東北沖地震の震源域に設置された観測点14点を巡回してGNSS-A観測を行い、海底地殻変動を検出するに十分な品質のデータを取得することに成功した。また、同年10月9日から11月1日の23日間に8観測点を、2021年4月6日から5月25日までの48日間に17観測点をそれぞれ巡回する長期観測航海を実施した。

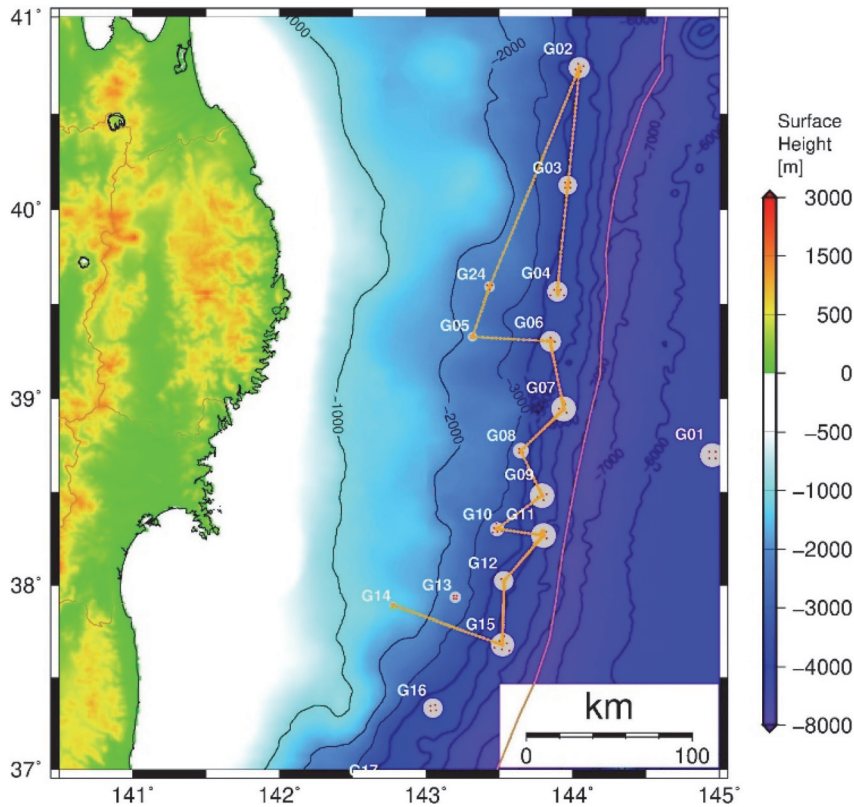


図 3 2020年6~7月の航海でのウェーブグライダーの航跡。G04観測点で投入し、G14観測点にて回収した

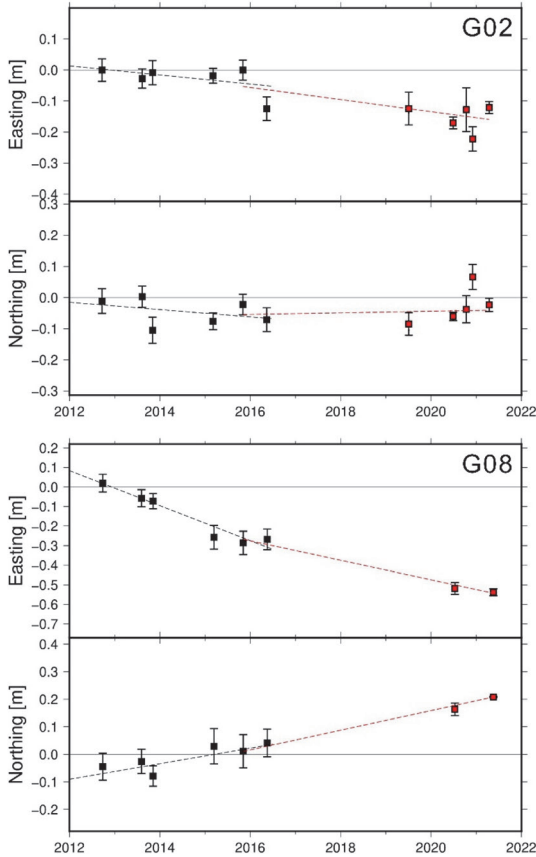


図 4 G02 (上段) および G08 (下段) 観測点での変位時系列. それぞれ上側が東西成分, 下側が南北成分. 黒と赤のシンボルはそれぞれ船舶とウェーブライダーを用いた観測で得られたデータによるもので, それぞれをもとに推定されたトレンドを黒と赤の破線で示す

数十日間の運用に要する費用は, 船舶を使用した場合のおよそ十分の一かそれ以下にとどまっており, 航行中に他船と接触したり, 内部機器に不具合が生じたりといった大きなトラブルを起こすことなく観測航海が実施できている.

これらの航海によって取得されたデータを解析して得られた海底地殻変動観測点の位置は, どの点も過去の観測と大きく乖離していることはなく, 長期的な海底地殻変動を検出するために十分と言える. また, 東北沖地震の地震後に, 地震時に大きく滑った領域周辺での大きな陸向きの地殻

変動を引き起こしていたマントル内での粘性流動 (たとえば, Sun *et al.*, 2014) が, 時間の経過とともに小さくなってきていることに対応して, 海底での地殻変動のレートも小さくなってきていることを示唆する結果がいくつかの観測点において得られている. 今後も日本海溝および千島海溝沿いに設置された海底地殻変動観測点での観測を繰り返し実施することで, プレート境界での固着状況の把握や, 周期的に発生するスロースリップイベントの検出が十分可能になると期待できる.

また, 2020年11月30日から12月11日の12日間に, 1968年十勝沖地震の震源域付近の観測点での緊急観測を行った. これは, 11月6日から7日にかけて, 同地域で M5 クラスの地震が連続発生し, 次の M8 クラスの地震の前震活動とも考えられる特徴を示したため, 震源域近傍のプレート境界でのすべりや固着の状態を把握すべく機動的に実施されたものである. 10月に行われた観測と比較することで, 顕著な地殻変動が起きていないかどうかをいち早く判断するために, データ取得と同時に観測データの準リアルタイム伝送を試みた.

陸上の環境整備が不十分であったため緊急観測期間中には解析結果を得られなかったが, 事後の解析により, G02 および G03 観測点では有意な変位は生じていないことが分かった.

#### 4. 今後の展望

これまでに実施した長期観測航海では, 天候に恵まれず太陽光パネルによる発電量が減少した時期 (特に秋冬季) があつたり, 強い潮流の影響を受けて, 思いどおりの方向に航行できないことがあつたりと, ウェーブライダーだけで GNSS-A 観測のすべてを賄えるわけではないことも明らかになった. 従来と同様の有人船舶を用いた観測は今後も必要であり, 互いの強みを生かして使い分けていくことが望ましい.

また, 観測データの準リアルタイム伝送および

その解析に関する環境についても今後整備をさらに進めていく必要がある。現在は、データの伝送にはスラヤー衛星システムを用いているが、日本列島周辺の高緯度では衛星仰角が低いため、データ送受信が円滑に行えなくなることもあった。また、観測データから海底局位置座標を推定するための解析手法の高度化や自動化にも取り組む必要がある。海底地殻変動の準リアルタイムモニタリングに向けては、これらの技術的な課題を克服するための開発体制の整備も求められる。

無人海上観測機を用いることで、高頻度また機動的な海底地殻変動観測が現実のものとなれば、プレート境界浅部（海溝軸近傍）での固着状態の変化や非地震性すべりの発生を検出できる可能性が高まる。これにより海溝型大地震の発生を繰り返す海域下のプレート境界で蓄積された歪を解消する過程の実態が詳しく明らかとなり、巨大地震の発生可能性評価の信頼度を大幅に向上させることができると期待できる。

## 謝辞

本研究の一部は科研費補助金（JP19H05596）により実施された。また、ウェーブグライダーの投入および回収の一部は、東京大学大気海洋研究所の共同利用研究航海（KS-19-12, KS-20-7, KS-20-16 および KS-21-5, すべて「新青丸」）にて行われた。記して感謝する。

## 参考文献

- Asada, A. and Yabuki, T. 2001. Centimeter-level positioning on the seafloor. *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*, **77**, 7-12. doi:10.2183/pjab.77.7
- Chadwell, C.D. *et al.* 2016. Campaign-style GPS-acoustic with wave gliders and permanent seafloor benchmarks. Proceedings of the Subduction Zone Observatory Workshop, Boise Center, Boise, ID. (Sep 29-Oct 1, 2016).
- Inuma, T. *et al.* 2021. GNSS-acoustic observations of seafloor crustal deformation using a wave glider.

- Front. Earth Sci.*, **9**, 600946. doi:10.3389/feart.2021.600946
- Kido, M. *et al.* 2011. Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L24303. doi:10.1029/2011GL050057
- Kido, M. *et al.* 2015. Progress in the project for development of GPS/acoustic technique over the last 4 years. International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), ed. Hashimoto, M. (Cham: Springer), 3-10. doi:10.1007/1345\_2015\_127
- Sato, M. *et al.* 2011. Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science*, **332**, 1395. doi:10.1126/science.1207401
- Spies, F.N. 1985. Suboceanic geodetic measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **GE-23**, 502-510. doi:10.1109/TGRS.1985.289441
- Spies, F.N. *et al.* 1998. Precise GPS/acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **108**, 101-112. doi:10.1016/S0031-9201(98)00089-2
- Sun, T. *et al.* 2014. Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, **514**, 84-87. doi:10.1038/nature13778
- Tomita, F. *et al.* 2017. Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake. *Sci. Adv.*, **3**, e1700113. doi:10.1126/sciadv.1700113

飯沼卓史

[いぬま たけし]

**現職** 国立研究開発法人海洋研究開発機構 主任研究員

**略歴** 2005年9月 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修了（博士（理学））。2005年10月 東京大学地震研究所産学官連携研究員、2006年5月 東北大学大学院理学研究科産学官連携研究員、2012年2月 同助教、2012年4月 東北大学災害科学国際研究所助教、2015年4月 海洋研究開発機構 研究員、2020年4月より現職

**専門分野** 固体地球物理学



# ■ 書 評 ■

## ● 地球表層のダイナミックな姿を伝える

平 朝彦・海洋研究開発機構

### カラー図解 地球科学入門 地球の観察—地質・地形・地球史を読み解く

評者 芦寿一郎

本書は副題を入れて長いタイトルとなっている。内容は副題のとおり観察を通して地球の「地質・地形・地球史を読み解く」で、主タイトルの地球科学の入門書としてみると扱う範囲に偏りがあり説明も十分でない箇所がある。これは「はじめに」の執筆に至った構想を読めば理解できる。本書は著者の平朝彦氏による大学生向けの教科書である「地質学1, 2, 3」(岩波書店)の副読本として、映像や写真で書籍の記述と現場のフィールド体験を合体させることを目指したものであった。このように書くと、これら3冊と合わせて読む必要があるように思われるであろうが、65頁にわたる「用語解説」が別冊として付いており本文のカラーの図と写真とともに内容の理解を助ける。また、各分野の専門家によるコラムが本文を補足する役割を果たしている。

次に本書の特徴である出版社の特設サイトとYouTubeにアップされた映像とのリンクについて紹介する。特設サイトには書籍で簡略化されたコラムの全文と追加の図が載っている。たとえば1章の「地球を眺める」では平氏による7頁にわたるコラム「Google Earthで地球・火星・月を観察する」がある。このほか補足写真、動画URL、参考文献、修正リストなどが載っている。特に動画は本書の最大の特徴で特設サイトのURLリストか本文のQRコードからYouTube(限定公開)や海洋研究開発機構のサイトの動画を見ることができる。動画の合計時間は500分以上あり大部分が本書のオリジナルである。

各章ごとの内容を紹介すると、1章「地球を眺める」では地球の海陸の大地形とその成因を説明している。2章「海底の世界」では深海映像をふんだんに用いて海底地質と底生生物の解説を行っている。3章「地層のでき

方」は、実験や野外の写真・動画を通して堆積学の基礎を解説する。特に河川から海への砂泥の移動でできた高知県三崎層群の成り立ちの解説は興味深い。4章「火山の驚異」はハワイ諸島、伊豆大島、雲仙、阿蘇における露頭を前にした解説により居ながらにして火山の生きた姿を実感できる。5章「プレートの沈み込みと付加体の形成」は南海トラフと四万十帯を例に平氏が長年にわたって携わった研究を中心に紹介し本書の中でお薦めの章の1つである。6章「地質学的に見た東北地方太平洋沖地震・津波」では掘削の成果をもとにした巨大津波の発生の解説と津波履歴の現地調査の紹介が行われている。7章「地球史と日本列島の誕生」は28頁の駆け足の紹介となっているが、日本海の拡大と付加体の形成をそれぞれ男鹿半島と三浦半島において動画をまじえ解説しており見所の1つと言える。また、博物館の研究者へのインタビュー形式の動画は展示物の見るべきポイントが示され興味深い。野外と博物館、いずれも映像を通して触れられ、後日、動画を案内人に露頭や博物館を訪ねてみるのもよいだろう。8章「海洋・地球を調べる」では海洋研究開発機構が有する装置と機器の紹介が行われている。

最後に気になった点をあげておく。動画の多くが解説付きであるが一部の海底や空撮などの映像が無音で寂しい。ナレーションがほしいところである。また、特設サイトの関連情報のURLはすでにリンク切れのものが複数ある。更新はたいへんな作業であるが書籍の価値を維持するためのメンテナンスを期待したい。本書評の導入部では地球科学の入門書としての疑問を呈した。しかし、事前の知識を持たなくとも動画によって地球表層のダイナミックな姿に触れることができ、そこからさらに詳しい情報への多様なアクセスが示されている本書は入門書の新しいアプローチと言えよう。

<講談社、2020年11月、A5判、本文210頁+別冊63頁、2,500円+税>

[あし じゅいちろう 東京大学大気海洋研究所准教授]



## ● 歴史学×地震・火山学

加納靖之・杉森玲子・榎原雅治・佐竹健治 著

### 歴史のなかの地震・噴火一過去がしめす未来

評者 小山真人

一般に、規模の大きな地震や火山噴火は長い時を経て再来する現象であるが、歴史時代の日本各地に多数の発生事例を見つけることができる。それらの日時・規模・様相や発生メカニズム、さらには当時の社会への影響を解明することは、未来の災害を未然に防いだり低減するための鍵となるだろう。

本来そうした研究は地震・火山学者と歴史学者が協働して行うことが望ましいが、意外なことにその歴史は浅い。戦前の大森房吉・今村明恒、戦後には宇佐美龍夫や都司嘉宜ら歴史資料の重要性に気づいた研究者が、地震・噴火史料の収集と解説を進めた。しかし、彼ら自身が理系研究者であったことや、限られた時間と予算の中で収集を優先したことにより、編纂された史料集は信頼性の低いものも大量に含んだ形とならざるを得なかった。1990年代になってようやく災害史に関心をもち始めた歴史学者たちとの共同研究が立ち上がり、2000年代には個々の史料の信頼度評定や解釈が付された古代・中世地震・噴火史料のデータベースが作成・公開され、一部地域の近世史料にも拡張された。しかし、こうした動きはあくまで数少ない特定の研究者に頼る細々としたものであり、次世代への継承も危ぶまれていた。

転換の契機は2011年東日本大震災であり、類似した津波災害が古代や中世に起きたことを示す研究が世に広く知られるようになると、歴史時代の地震・噴火研究を組織的に進める体制が一気に構築された。本書の著者らが属する東京大学地震火山史料連携研究機構もそうした流れの中で誕生し、東大内での地震・火山研究と歴史研究のそれぞれの総本山である地震研究所と史料編纂所のコラボレーションのもとで数々の研究成果を上げ続けている。

そんな彼らが、蓄積された研究成果を社会に発信するとともに後継者の育成も思い描き、東大教養学部前期課程での講義「歴史資料と地震・火山噴火」を立ち上げた。その中身をまとめたものが本書である。

本書は「第1章：東北の地震」「第2章：南海トラフの地震」「第3章：連動する内陸地震」「第4章：首都圏の地震」「第5章：歴史地震研究の歩みとこれから」の

5章から構成され、各章に付された総数19のコラムが内容を補完している。日本各地で起きてきた地震・噴火の各論である第1~4章では、まず近現代の機器観測下で起きた実例（東北地方太平洋沖地震、昭和東南海・南海地震、熊本地震、兵庫県南部地震、大正関東地震など）を地域別に紹介した後、それぞれの地域で近世以前に生じた顕著な歴史災害（貞観地震、明応・宝永・安政南海トラフ地震、富士山貞観・宝永噴火、天正地震、文禄畿内・豊後地震、明応・元禄関東地震、安政江戸地震など）の史料学的な研究成果を述べた後、確率論にもとづく長期予測結果を説明している。個々の中身も古典的なものから最新のものまで、主要な研究成果がバランスよく取り上げられている。

しかし一方で、元の講義対象が大学1~2年生であることを考えると、記述が一般的に過度に厳密かつ難解である点が気にかかる。初学者に対して文理融合研究のワクワクドキドキ感を伝えることをもっと意識して平易に書いてもよかったのではないだろうか。また、クオリティが低い図や写真が目立ち、本文の理解を助ける図表も不足している。通読に必要な基礎知識がコラムとして散在する点にも違和感があり、まずは基礎知識をまとめた総論を最初に設け、コラムは周辺的な話題に限ればよかったと思う。通常の教科書よりも小さい判型は、平易な一般向け解説書を連想させるため、そのイメージと異なる中身と書籍本体の高価格は読者に失望を与えそうである。

以上、辛口の評価も述べたが、他書には見られない貴重な視点と中身を誇る本であることは間違いないので、今後の改版による完成度向上に期待したい。

<東京大学出版会、2021年3月、四六判、260頁、2,600円+税>

[こやま まさと 静岡大学教授]

## ● 死者の語りを伝える

北原糸子 著

### 震災と死者—東日本大震災・関東大震災・濃尾地震

評者 矢島道子

2004年スマトラ沖地震の後、外国の雑誌の表紙の写真には、なんだか変な丸いものがいくつもあった。目を凝らしてみると、それは、海岸に打ち上げられた累々とした死体であった。このような写真は日本の雑誌には絶対出でこない。死についての考え方が日本と欧米とではずいぶん違うと思った。本書は、日本独自の精神的風土

の中で、災害における死についての情報を渾身込めて集め、記載し、そして伝えようとしている。震災後、遺体はどのように取り扱われたのか、行政、寺院、メディアなどの死者への対応などを、長らく災害社会史に関わってきた著者がまとめた。多くの当事者にとってたいへんな痛みの伴う問題を、よく記録にしていただけだと、頭の下がる思いである。

I部は聞き取りから得られた事実を中心に、東日本大震災での死者の行方について考察した何篇かの論文をもとに編まれている。II部、III部は東日本大震災以前に、関東大震災の寺院被害や東京市の震災焼失跡地の都市計画事業での墓地移転や、濃尾地震の死者の供養のために震災記念堂を建てた真宗本願寺派の僧侶の生涯を追っている。

東日本大震災では膨大な死者が出たが、この死者はその後、どう扱われたのだろうか。著者は、多くの関係者の聞き取りに取り組むと同時に、地方都市行政等の記録誌を丹念に読むことで、論考をまとめた。出てきた結果は壮絶である。

身元の判明したものもしないものも火葬しなければならぬ。しかし、大震災とともに火葬場も崩壊した。他県の火葬場を使用することになる。誰が運ぶのだろう。到底、間に合わないから、かなりの遺体が地中に仮埋葬された（最終的にはすべて掘り出されて火葬されたが）。そして、寺院も多く被災した。墓石も流失した。僧侶も亡くなっている。多くの寺院で遺骨を預かることになった。言葉で書くことは簡単だが、それぞれの場面で、多くの心の痛みが伴い、業務は困難を極めた。当事者に葬儀関係に知悉している者が含まれていると、比較的スムーズにことは運んだようである。著者は聞き取りに際して、「公の記録紙の裏に行政職員の声には出せない苦

勞があったことを改めて思い知らされた。」と記している。

福島県の寺院では、放射能汚染にさらされ、祖先が眠る墓地へ遺骨を埋納できないばかりか、住職も自坊へ戻るができないところがある。そして1つの自治体のなかに別の自治体が存在するという、例のない行政上の試みが遂行された。

もちろん、大切なこと、すなわち、東日本大震災では、思いもよらない避難地での災害が起こったことが本書にはきちんと記されている。陸前高田市と釜石市では、指定された避難所に向かった多くの人々が津波によって命を奪われた。両市とも、原因を真摯に問い、その結果を市民に公表している。

次に、過去の関東大震災と濃尾地震の場合と比較することになる。東日本大震災の生々しさと比べると、関東大震災と濃尾地震の報告は淡々としている。時間の経過だろうか。東日本大震災の記録も、時間がたったらこのように淡々としたものになる可能性がある。風化されずに次世代に伝わっていくことを心より願う。

2021年5月現在、いまだコロナ禍が続いている。第1部での「過酷な業務が一部職員の負担に偏らないよう、全職員で負担を分け合うマニュアル作りが必要。検視官の不足解消のため、地域の医療従事者との災害時を想定した連携をしておくこと。」という記録誌の記述を読むと、今、真つ最中のコロナ禍によく似ていると思う。記録の伝承の重要性を思う。災害についてのきちんとした記録を残し、そして、それを忘れないで伝えていくことが、災害の中を生きてきた人々の大切な義務だとひしひしと思う。

<筑摩書房、2021年1月、A5判、311頁、1,700円+税>

[やじま みちこ 東京都立大学非常勤講師]

●新刊紹介

藤田達生 著

**災害とたたかう大名たち**

KADOKAWA, 2021年4月, 四六変判, 256頁, 1,700円+税

倉本 圭 監

**NEWTON 大図鑑シリーズ 地球大図鑑**

ニュートンプレス, 2021年4月, B5変判, 224頁, 3,000円+税

今井健太郎 著

**二百年前に象潟で起きたこと**

秋田文化出版, 2021年5月, 四六判, 209頁, 3,000円+税

堤 之恭 著

**新版 絵でわかる日本列島の誕生**

講談社, 2021年5月, A5判, 240頁, 2,300円+税

関 陽児・永野勝裕・若月 聡 著

**地球をもっと理解したい人のための地球科学の基礎**

培風館, 2021年5月, B5判, 280頁, 3,200円+税

田近英一 監

**NEWTON 大図鑑シリーズ 地学大図鑑**

ニュートンプレス, 2021年5月, B5変判, 208頁, 3,000円+税

鹿島建設土木設計本部 編

**耐震設計 (土木設計の要点)**

鹿島出版会, 2021年7月, B5判, 380頁, 5,000円+税

池内 了 著

**寺田寅彦と物理学**

玉川大学出版部, 2021年7月, A5判, 176頁, 2,500円+税

土木学会地震工学委員会地盤と地形に刻まれた地震・災害痕跡データの公開促進小委員会 編

**地盤は悪夢を知っていた—地盤に残る地震痕跡—**

土木学会, 2021年8月, 新書判, 210頁, 850円+税

神沼克伊 著

**地球科学者と巡るジオパーク日本列島**

丸善出版, 2021年9月, A5判, 256頁, 2,800円+税

佐藤翔輔 監

**災害伝承の大研究 命を守るために、どう伝える？**

PHP研究所, 2021年9月, A4変判, 56頁, 3,200円+税

関谷直也 著

**災害情報 東日本大震災からの教訓**

東京大学出版会, 2021年9月, A5判, 640頁, 5,400円+税

原田隆典・本橋英樹 著

**フーリエ変換と応用 地震動・ランダム波動場の解析と数値計算法**

現代図書, 2021年9月, A5判, 280頁, 3,500円+税

西まさる・高田みのり 著

**戦時下の東南海地震の真相—中島飛行機半田製作所を中心に—**

新葉館出版, 2021年9月, 四六判, 218頁, 1,700円+税

伊藤和明 著

**平成の地震・火山災害**

近代消防社, 2021年9月, 新書判, 156頁, 900円+税

日本科学者会議 編

**日本の科学者2021年10月号—特集：南海トラフ巨大地震への備え**

本の泉社, 2021年9月, B5判, 56頁, 727円+税

# ADEP情報

## 事務所の移転について

2021年9月17日に「つくば観測技術センター」事務所を移転しました。  
新事務所：〒305-0032 茨城県つくば市竹園二丁目10番地8  
第三芳村ビル3階303号室  
電話・FAX 029-869-7345

## 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

### 死亡退職

棒田 明 つくば観測技術センター 事務グループ長 21.10.14

## 編集後記

今から100年前の1921年12月8日、茨城県南部を震源とする龍ヶ崎地震(M7.0)が発生し、千葉・茨城県境付近に家屋損壊・道路亀裂などの小被害をもたらした。

この地震は、翌1922年4月26日に東京湾口で発生し2名の死者を伴った浦賀水道地震(M6.8)と並んで、1923年関東地震直前の前触れの地震であったと考えられている。

両地震は、国の地震調査研究推進本部地震調査委員会が今後30年以内の発生確率を70%程度と評価している「南関東地域直下のM7級地震」に該当している。

本号の冒頭では、まもなく関東地震100周年を迎えるにあたって人々の関心が高まるであろう東京の地震を取り上げ、当振興会の石辺主任研究員および東京大学の佐竹先生に、江戸・東京における有感地震回数の変遷について解説をお願いした。

また、これに関連する首都圏の地震防災に関する話題として、元東京都副知事の青山先生より「震災復興計画の宿題」と題するコラム記事を頂戴した。後藤新平による復興計画の中で未達成なまま残された課題を指摘され、今後の地震対策に対するひとつの示唆を与えておられる。

さて、地震学の分野では、低周波地震に関する研究がこここのところ大きな話題となっているが、最近になって、陸域下の低周波地震は上部地殻でも発生していることが発見された。しかも、それらは通常地震と混在して互いにきわめて近接して発生しているという。この事実から、地震の発生メカニズムの謎に迫る根源的な知見が得られつつあることを、東北大の長谷川先生および東工

大の中島先生より紹介していただいた。

謎といえば、2011年東北地方太平洋沖地震の発生に先立つ約100年間、東北地方が東西方向にほとんど縮んでいなかったのはなぜか?という疑問があった。名古屋大学の鷲谷先生には、明治27年に山形県新庄市付近で行われた三角測量の直後に発生した庄内地震(M7.0)の影響を考慮することで、この謎が解けることを説明していただいた。鷲谷先生には、本誌62号でも1944年東南海地震発生時の掛川異常隆起に関する謎に迫っていただいている。

ところで、東日本大震災の発生を受け、わが国では海底地震観測網の整備が進められてきたが、2020年9月からは、S-net(日本海溝海底地震津波観測網)から得られた地震データが、気象庁のルーチン震源計算に使用されるようになった。これにより、東日本太平洋沖の海域での地震検知能力と震源決定精度は大幅に向上した。この間の事情について、元気象庁の石川先生に解説をお願いした。

一方、シリーズ化して掲載してきた国際プロジェクトSATREPSの個別テーマ紹介について、今回はインドおよびネパールで実施された2つのプロジェクトをまとめて、慶應義塾大学の瀬戸先生より紹介していただいている。なお、このシリーズは今回をもっていったん打ち切ることとなった。

次に、文部科学省が2020年度より開始した「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」について、そのめざすところと計画の概要を海洋研究開発機構の小平先生ほかより、詳細に解説していただ

いた。地殻活動情報と地震防災情報を創成し、その情報を社会に発信する研究が進められている。

同じく海洋研究開発機構の飯沼先生からは、ウェーブグライダーを用いた海底地殻変動の多点長期観測の話題を寄書として紹介していただいた。燃料や電力を消費せず、波の力により推進力を得て長期間自律航行できるウェーブグライダーは、海洋での長期無人観測に適した画期的な道具として、たいへんに興味深い。

最後になるが、今号でも元静岡放送の川端氏による囲み記事「地震記者の回想—4—」を掲載した。今回は、静岡県の本山敬三郎元知事の誕生や、1978年伊豆大島近海地震の余震情報騒ぎなどの話題が取り上げられている。なお、この連載も今回でいったん休止することになったが、今後また不定期にでも再開されることを期待したい。

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

(Y.O.)

### 地震ジャーナル 第72号

令和3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。