

地震 ジャーナル

71

2021年 6月

エッセイ 大災害・コロナ・戦争 ●五百旗頭真

東北地方太平洋沖地震から学んだこと—理学的視点から— ●松澤 暢——1

東日本大震災から得た工学的な知見と今後の防災

—津波工学的な視点から紹介— ●今村文彦——11

南海トラフ地震発生帯掘削計画が明らかにしたこと ●倉本真一——27

津波ハザードステーション (J-THIS) の開発 ●土肥裕史/中村洋光/
藤原広行——34

コロンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減に向けた

日本の貢献 ●熊谷博之——41

飛騨山脈の地震活動 ●大見士朗——50

機械学習と物理モデルのハイブリッドで地震の

揺れを予測する ●久保久彦——56

津波は地球を揺らす—遠地津波波形解析技術の向上— ●綿田辰吾——60

●書評——68

●新刊紹介——73

●ADEP情報——74

囲み記事 2021年2月13日福島県沖の地震 (M7.3)

岡田義光——24

ジオパークと地震

尾池和夫——48

地震記者の回想—3—

川端信正——66

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

大災害・コロナ・戦争 五百旗頭真

いちばん多くの犠牲をもたらす災害は何か。

記録される範囲では、関東大震災の10万5千の死者が最大である。そのうち9万は火災による。日本では火災が最も重大な災害であり、明暦の江戸大火（1657年）も東京大空襲（1945年3月）も約10万の犠牲とされている。

火災について多くの犠牲を強いる災害は津波であり、明治三陸津波（1896年）も、10年前の東日本大震災も、約2万2千の命を奪った。前者は、夕食後の夜の時間帯で気がつかなかった人も多かった程度の微少な地震であったのに、大津波が襲来し、海辺のまちを根こそぎ壊し、人々を殺した。L2の超巨大地震津波である東日本大震災と同規模の犠牲となったのである。

最大の内陸地震は、M8の濃尾地震（1891年）であり、死者は7,273名だった。しかし飛騨を中心に日本海沿岸・琵琶湖畔・太平洋岸にわたり大被害を出した天正地震（1586年）は、濃尾地震を上回る同時多発地震であった公算が高い。正確な記録が残される時代に限れば、阪神・淡路大震災の6,434名（1995年）、福井地震の3,728名（1948年）が続く。

台風や集中豪雨など風水害の最大は、5千名を超える犠牲を出した伊勢湾台風（1959年）である。その後、日本の家とまちが強くなったこともあり風水害は低減していたが、21世紀に入り地球温暖化の影響もあり、線状降水帯など強烈的な水害が増えている。それでも千名を超える犠牲は今のところ見られないが、今後はさらに巨大化する危険がある。

さて、今日のコロナ禍による日本の死者は9千名に近づいており、それは内陸部大地震を上回り、大津波の犠牲者に迫る勢いである。百年前のスペイン・インフルエンザ時の日本の死者は、内務省発表によると38万8千名であり、あらゆる大災害を上回った。全世界の死者は、第一次大戦中の国家機密であったため不確かであるが、4千万人程度かといわれる。第二波で猛毒化したウイルスに感染した若者が2~3日で死に至る事態であった。今、ワクチンが社会的に効くまで、変異強毒化させないよう耐えることができるだろうか。

これら諸惨禍を上回るのが、人為の災害・戦争であり、310万の日本人が第二次大戦で犠牲となった。米中対立が第三次大戦に帰結することをなんとかしても防がねばなるまい。



五百旗頭真

【いおきべ まこと】

現職 兵庫県立大学理事
長、ひょうご震災記念
21世紀研究機構理事
長

略歴 1943年生まれ。
京都大学法学研究科修
士課程修了。法学博
士。神戸大学法学部教
授、防衛大学校長、熊
本県立大学理事長を
経て2018年より現職。

この間、政府の東日本
大震災復興構想会議議
長、くまもと復旧・復
興有識者会議座長など
を歴任。

研究分野 日本政治外
交史

著書 「大災害の時代
未来の国難に備えて」
（毎日新聞出版）、「総
合検証 東日本大震災
からの復興」（編著：
岩波書店）

東北地方太平洋沖地震から学んだこと

—理学的視点から—

松澤 暢

1. はじめに

わが国の観測史上最大の地震である、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0；以後「東北沖地震」と呼ぶ）が発生してから10年が経過した。

この地震は地震学者—特に地震予知研究を行っていた研究者—に大きな衝撃を与えた。なぜなら当時、地震のポテンシャル評価や確率的評価はある程度可能であるとの認識が研究者の中でも広まっていたが、東北地方でM9の地震が発生するとはだれも考えていなかったからである。

なぜ、われわれは東北でM9の地震が発生するとは思わなかったのか、この地震によってわれわれが学んだことは何なのか、この10年間に地球科学的に明らかになった成果をもとに、振り返ってみることにする。

2. 東北沖地震が理学者に与えた衝撃

2.1 東北沖でM9の地震が起こりうる

日本海溝沿いの東北沖の領域は普段の地震活動が日本でいちばん活発であり、一方、南海トラフ沿いの駿河湾から四国沖にかけての領域は普段は地震活動が低調である。これは、日本海溝沿いではプレート境界の固着が弱いために地震活動が活発だが大きな地震は起こせず、一方、南海トラフ沿いは固着が強いため普段の地震活動は低調だが150~200年に一度、巨大地震が発生するからだと考えられていた。

海洋プレートと陸のプレートが衝突すると、海水で冷やされた海洋プレートのほうが相対的に重いので、海洋プレートが陸のプレートの下に潜り

込むのが普通であると考えられている。Kanamori (1977) は、この考え方をさらに進めて、沈み込み帯の地域性は、主として沈み込む海洋プレートの年齢によると提唱した。つまり、チリやアラスカのように若いプレートが沈み込むところでは、海洋プレートがまだそれほど冷やされておらず、軽いために浮力が働いてプレート境界を下側から強く押し付ける。これによりプレート境界の固着が強くなるので巨大地震を起こせると彼は考えたのである。一方、マリアナのような年老いたプレートが潜り込んでいる場所では、海洋プレートが冷たくて重いために簡単に沈み込んでしまうので、大きなプレート境界型地震は起こせない。

南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートは非常に若く、一方、日本海溝に沈み込む太平洋プレートは1億年程度の年老いたプレートなので、Kanamoriの説は、日本付近のプレート境界型地震の地域性をもよく説明できるようにみえた。また、日本海溝は海溝軸で堆積物がほとんど溜まらない「造構性侵食型」の沈み込み帯の典型であり、南海トラフは堆積物がトラフで次々と付加していく「付加型」の沈み込み帯の典型であることも、前者でプレート境界の固着が弱く、後者で強いと考えれば説明ができた。

一方、Ruff and Kanamori (1980) は、沈み込み帯で起こる地震の最大規模は、沈み込むプレートの年齢のみならず、プレート間相対速度にも依存し、相対速度が大きいほど、巨大地震を起こしやすいことを示した。相対速度が大きければ、プレート同士が水平方向に押し合うことになって固着を強めあうと考えれば、これも理解できる。日本海溝でのプレート収束速度は8~9cm/年程

度であり、これは世界でも非常に速い部類に入るので、これだけに注目すれば、東北沖でも巨大な地震が発生しておかしくないことになる。

しかし、Stein and Okal (2007) は、Ruff and Kanamori (1980) と同じ検討を新しいデータで行った結果、沈み込み帯の最大地震の規模とプレート間相対速度の相関はほとんど見られなくなったことを示した。しかし彼らの結果でも、海洋プレートの年齢と最大規模との相関はやや弱くなったとはいえ、依然として残ったままに見えた。もし、これが逆で、地震の最大規模とプレートの年齢との相関が見えなくなり、プレートの収束速度との相関が残っていたら、東北沖は M9 の地震の可能性の高い沈み込み帯のひとつとして注目されていたはずだが、残念ながらそうはならなかった。

もし東北沖地震が、青森県東方沖から三陸沖にかけて発生したのであれば、地震学者はそれほど驚かなかったかもしれない。この地域では 1968 年十勝沖地震 (M_w 8.3) や 1896 年明治三陸地震 (M_w 8.0~8.5)、1933 年昭和三陸地震 (M_w 8.4) など、 M_w 8 級の地震を何度も経験してきたからである。一方、東北沖地震の主破壊域である宮城県沖から福島県沖にかけての領域では、M8 を超える地震は、宮城県沖については 1793 年の地震 ($M7.9\sim 8.2$) が知られていただけで、福島県沖については、少なくとも江戸時代以降には M8 以上の地震の発生は知られていなかった。869 年に発生した貞観地震は、当時の国府（今の多賀城）に大きな地震動と津波の被害をもたらしたことが、「日本三代実録」に記載されていたものの、その実在が津波堆積物から明らかになったのは 1990 年頃のことであり、その後の調査から得られた津波堆積物の分布から推定された地震の規模は M_w 8.4 であった（佐竹ほか, 2008）。

以上のように、宮城県沖や福島県沖では M8 級の地震ですら非常にまれであり、青森県東方沖や三陸沖を含めても M9 級の地震はまったく知られておらず、固着が弱そうに見えた東北沖で M9 の地震が起こるとはまったく予見できなかった。

2.2 海溝付近のプレート境界は 50m も滑りうる

海で見られる普通の波は風が起こすものであり、動いているのは海水の表面付近だけで、海底の水はほとんど動いていない。これに対して津波は、海底が地震によって隆起または沈降することによって、その上の海水塊全体が動くために生じる。したがって、同じマグニチュードの地震であっても、震源断層が浅く、かつ高角で縦ずれの断層運動を生じる地震のほうが、大きな津波をもたらす。また、水深の浅いところの直下で大地震が起きても、その上の海水塊の体積が大きくないので、結果的に大規模な津波にはなりにくい。

海溝付近では水深が深く、プレート境界は浅くなるので、大きな津波を生じやすいことになる。しかし、海溝付近ではプレート境界はほぼ水平になるために、それが滑っても海底面の上下変動は小さいため、よほど大きくすべらなければ、大きな津波にはなりにくい。

一方、特に南海トラフ沿いでは、プレート境界から斜めに立ち上がってくる分岐断層が発達しており、巨大地震時には、この分岐断層も動くと考えられている。日本海溝沿いにも、分岐断層は見られるが、南海トラフ沿いと異なり、正断層的な分岐断層のほうが顕著なため、この正断層の分岐断層とプレート境界に挟まれたプリズム状の岩体が地震時にポップアップすることによって、効率よく海底面を持ち上げたという考え方が、東北沖地震発生直後の地震学者の間では主流であった。なぜなら、単純にプレート境界が滑って、あの大きな津波が生じたとすれば、海溝付近で約 50m という巨大な滑りが生じた必要性があることが、初期の頃の解析からも指摘されていて（Maeda *et al.*, 2011）、そのような大きな滑り量はあり得ないと、ほとんどの研究者は考えてしまったからである。

しかし、海底地殻変動観測データの解析結果（Kido *et al.*, 2011）や、マルチビーム深淺測量（水中音波を使った水深の詳細な探査）結果の東北沖地震前と後の比較（Fujiwara *et al.*, 2011）により、プレート境界の滑りが海溝付近で 50m にも達していたことが明らかになり、さらにマルチビーム

深浅測量データの詳細な検討により、前述の正断層では、少なくとも顕著な滑りは生じていなかったことも明らかになった (Kodaira *et al.*, 2012)。

海溝軸からすぐ陸よりのプレート境界で地震活動が低調なことは1980年代から知られていた (たとえば Hirata *et al.*, 1985)。これはこの領域では、海洋性堆積物がプレート境界に挟み込まれ、またまだ浅くて圧力も小さいために、プレート境界は固着が弱くて普段からずるずる滑っているためであるという解釈が、東北沖地震前の研究者の「常識」であった。実際、陸上のGPS観測データから滑り欠損分布 (固着度の度合いの分布) を求める際には、海溝付近での滑り欠損はゼロであるという仮定を行っている研究がほとんどであった。しかし、東北沖地震で海溝付近が50m滑ったということと、8~9cm/年のプレート間相対速度を考慮すると、この領域では約600年にわたってプレート境界が固着していたことになる。つまり、海溝付近のプレート境界で地震活動が低調であったのは、そこで非地震性滑りを生じていたのではなく、その領域がほぼ完全に固着していたためであったことになり、このことも世界中の地震学者を驚かせることとなった。

2.3 大滑り域と強震動生成域は異なる場合がありうる

東北沖地震発生直後に、その滑り量分布について数多くの研究がなされたが、地震波形を使った解析では、震源 (破壊の開始点) 付近で滑り量が大きくなる例が多く、津波や海底地殻変動データを使うと、海溝付近が最も滑り量が大きくなる例が多かった (たとえば Koketsu *et al.*, 2011)。

このパラドクスを解決したのが Lay *et al.* (2011) であった。地震による断層運動の規模を表す地震モーメントは、断層の滑り量と面積と剛性率 (弾性定数の一種) の積で表され、モーメントマグニチュード (M_w) は、この地震モーメントの対数に相当する。地震波から得られるのは、あくまでも地震モーメントの情報であり、それを滑り量に換算する場合には、剛性率の値を仮定する必要がある。一方、津波波形や海底地殻変動データから得られるのは海底の変位であり、海底

からプレート境界までの間で剛性率が大きく変化してなければ、その海底変位から推定されるプレート境界の滑り量は剛性率の値に大きくは依存しない。

Lay *et al.* (2011) は、上記のような違いに注目し、地震波形データの解析の多くは標準的な地球内部構造をベースにした剛性率を仮定していたために、海溝付近の柔らかい堆積物中の剛性率を過大評価し、それによってこの付近の滑り量を過小評価してしまっていることを指摘し、適切な剛性率の分布を与えれば、地震波形を解析しても海溝付近で滑り量が大きくなることを示した。実際、Yagi and Fukahata (2011) は、海域の構造探査データに基づく剛性率の分布を与えて遠地地震波形データを解析して滑り量分布を推定し、海溝付近で大きな滑りとなることを明確に示した。その後、Iinuma *et al.* (2012) が海陸の地殻変動データから慎重に推定した滑り量分布と、Yagi and Fukahata (2011) が遠地地震波形から解析した結果は非常によく似ている。

このように海溝付近で最も滑り量が大きかった

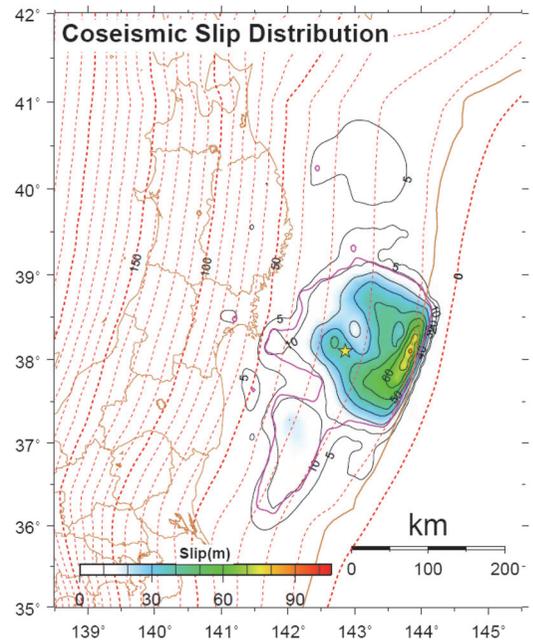


図1 陸上と海域の測地データから推定された東北沖地震の滑り量分布 (Iinuma *et al.*, 2012)

ことは間違いないことが確かめられたが、一方、遠地の観測から推定される高周波の地震波の発生源（たとえば Wang and Mori, 2011）や近地の観測から推定される強震動生成域（たとえば Kurahashi and Irikura, 2013）は、震源よりも陸側に位置していることが明らかになっている。これは、海溝付近では前述のとおり滑り量は大きくても、剛性率が小さいために地震モーメント解放速度や破壊伝播速度がそれほど小さくなく、そこでは短周期地震動を放出しにくかったためと考えられる。

以上のように、海溝付近で大きな滑りが生じて防潮堤を乗り越える高い津波を生み出したことと、次節で述べるように、広大な断層面が滑ったことにより長波長の津波が生み出されて、内陸奥深くまで津波が侵入したことが、さらに陸に近い側で強震動が生成されたことが、東北沖地震による被害が甚大なものになった主たる理由であった。

2.4 幅広い津波が被害を大きくする

前節では、三陸地域の防潮堤を乗り越えるような高い津波が生じた理由を説明した。一方、津波が危険なのは、その高さもさることながら、その波長が長いことがいちばんの理由である。このことは、津波の専門家にとっては常識であっても、一般の方のみならず津波の専門家以外の地震研究者にも、東北沖地震前には必ずしも理解されていなかった。

海で生じる通常の波は風で作られるため、どんなに大きなうねりがあったとしても、基本的には「寄せては返す」波である。一方、前述のとおり、津波は地震に伴う海底の隆起・沈降によって、その上の海水塊がすべて上昇・下降することによって生み出される。東北沖地震の場合、長さ約 500 km、幅約 200 km ものプレート境界断層が滑ったので、この約 500 km×約 200 km の広大な領域にわたって、海水が上昇または下降して幅広い津波が作られた。

このような幅広い波が生じたため、「寄せ波」は約 20 分にわたって継続した。これによって、平野部には津波が次々と侵入していき、海岸から内陸へ最大約 5 km、川沿いでは最大約 10 km も

入り込んで、甚大な被害をもたらした。

この現象は、津波を「波」と考えると、なかなか想像しにくい。東北沖地震前には、その危険性がほとんど認識されていなかったように思う。たとえば相馬における潮位観測データを見ると、最初に引き波が 20 分程度継続したのち、海面が上昇し始めてわずか数分の後に 5 m 以上になり、それから約 20 分にわたって海面が普段より 5 m 以上高い状況が継続したことがわかる。仙台平野はかなりの部分が標高 3 m 以下であり、かつ地震に伴って海岸付近は沈降したので、このように長時間にわたって海面が持ち上げられれば、当然、内陸奥深くまで津波が侵入する。このことを、地震学者は事前によく理解しておくべきであった。

2.5 断層強度が小さくても巨大地震は起こりうる

前述のとおり、東北沖地震が起こる前は、この地域のプレート境界の断層強度は弱いため、M9 の地震が起こせるほどの歪エネルギーは蓄えられないだろうと考えられていた。このため東北沖地震が起こった後、ここでは実は断層強度が強いのではないか、という議論が一時期まきおこった。

しかし、その後の研究結果（たとえば Hasegawa *et al.*, 2012；深畑ほか, 2012）により、東北沖地震発生前のプレート境界のせん断応力は 10 MPa 程度で、そのほとんどがこの地震によって解放されたと推定されている。これはプレート境界の強度が、摩擦係数に換算して 0.02~0.03 程度ときわめて小さかったことを意味する。たとえば言うならば、幅 1 m のテーブルの上に箱を置いておき、このテーブルの一方を 2~3 cm 持ち上げただけでその箱が滑る場合に、その箱とテーブル表面の間の摩擦係数が 0.02~0.03 となる。この摩擦係数は雪面とスキーの間や、アイスバーンと革靴の間に働く摩擦係数に近い。

このように低い強度では、M9 の地震が起こるまで断層が滑らないで持ちこたえられるとは思えないかもしれない。しかし、もしほぼ完全に固着している領域が海溝に直交する方向に 200 km、海溝に平行な方向に 100 km 程度あり、そのまわりで緩やかに固着度が下がっていくと、この状況が 1,000 年続いても、プレート境界のせん断応力

の増加は10MPa程度であることがシミュレーションにより確かめられている(飯尾・松澤, 2012).

実際には東北沖地震の震源付近から陸に近い領域ではM7級の地震が数十年に一度発生しているため、条件はもっと悪くなる。一方で、震源付近より海溝側の上盤側には、前述のとおり剛性率の小さな堆積物が存在しており、また東北沖地震のような地震の再来間隔は600年程度と見積もられている(たとえばSawai *et al.*, 2015)。したがって、少なくとも東北沖地震で滑り量の大きかった、震源よりも海溝側の領域では、摩擦係数が上記のようにきわめて小さくても、上盤を跳ね上げようとする力も弱いため、600年間滑らないで持ちこたえることは可能であると考えられる。

このようなきわめて低い強度は、プレート境界の間隙圧が高い(高圧の水が入り込んでいる)ことによって生じている可能性が高いと考えられるが、強度が本当に低いのかも含めて、まだ論争は続いている。また、このような地震活動の活発な領域で、そのような高間隙圧状態が600年間、安定でいられるのかも議論があるだろう。ただ、上記で述べていることは、600年間ずっと強度が低いということが必要とするわけではない。600年前に完全にせん断応力を解放するイベントがあり、そのあとは基本的に強度の高い状態が続き、間隙圧の上昇等によりときどき強度が低下し、あるタイミングで、せん断応力よりも強度が下回って東北沖地震が発生したとしても、矛盾はしない。

2.6 アスペリティは階層構造をしている

Kanamori (1981) は、断層中の強度の大きい領域を「アスペリティ」と呼び、地震の破壊過程の複雑性は、このアスペリティの分布で規定されているとする「アスペリティ・モデル」を提唱した。その後、Boatwright and Cocco (1996) は、このオリジナルのアスペリティ・モデルに対して、滑り速度-状態依存摩擦構成則による解釈を試み、この改良されたモデルを「カップルド・アスペリティ・モデル (coupled asperity model)」と呼んだ。この改良されたモデルにおいては、「ア

スペリティ」は速度弱化作性の顕著な領域(地震性滑りが卓越する領域)と同義である。

その後、東北沖の同じ場所で繰り返し大きな地震性滑りを生じている場合がある(Yamanaka and Kikuchi, 2004)ことが明らかになり、また同じ場所で定期的に繰り返し発生する地震群(繰り返し地震)が多数発見された(たとえばIgarashi *et al.*, 2003)。これらの現象は、地震性滑りが卓越する場所はあらかじめ決まっているとする「アスペリティ・モデル」でよく説明でき、また、アスペリティが孤立していれば、そこでは地震は定期的に発生することがシミュレーションでも再現でき、地震の長期予測は原理的に可能であるとの展望が開けた。

しかし、摩擦パラメータは連続量であり、地震性領域(アスペリティ)と非地震性領域の境目は、かなり曖昧である。実際、普段は非地震性すべりを生じるが、近傍で大きな地震性滑りが生じたときには「おつきあい」で地震性滑りを生じる場所があることが、上記のカップルド・アスペリティ・モデルでも示されていた。

東北地方太平洋沖地震は、その主破壊域については、大きなアスペリティ(顕著な速度弱化作域)の存在で説明できる(Kato and Yoshida, 2011)が、福島県沖から茨城県沖まで延びる広大な地震性滑り域は、単純なアスペリティ・モデルでは説明ができず、階層的なアスペリティ(hyper asperity)を考慮したモデルを考えないと説明が困難である(Hori and Miyazaki, 2011)。

このようなアスペリティの階層性は、前述のとおり、速度-状態依存摩擦構成則からの当然の帰結であり、このような階層性を考慮してアスペリティ・モデルを高度化しようとしていた矢先に、東北沖地震が起きてしまった。

2.7 M9地震でも破壊核形成過程は見えなかった

地震は断層が高速に滑ることによって生じるが、その滑りはある一点から始まる。この滑り開始点が「震源」である。このような高速滑りが生じる直前に、来るべき震源の近くでゆっくりとした滑りが生じて、その範囲がある程度まで広がってから高速すべり(つまり地震)に転じることが

岩石実験（たとえば Ohnaka *et al.*, 1986）で確かめられている。さらにこの現象は、滑り依存摩擦構成則によるシミュレーション（たとえば Matsu'ura *et al.*, 1992）や、滑り速度-状態依存摩擦構成則によるシミュレーション（たとえば Tse and Rice, 1986）でも再現されている。

この地震発生直前にゆっくりとした滑りが生じる現象は「破壊核形成過程」と呼ばれている。この破壊核の形成を観測からとらえることができれば、地震予知は可能ということになる。このような検討から、ある条件のもとでは、「東海地震」の予知も可能であると期待されていた。

しかし、M9 の東北沖地震ですら、その地震発生直前の破壊核形成過程はとらえられず、2 日前の M7.3 の前震に伴う余効滑り（地震後に生じるゆっくりとした滑り）が検知できたただけであった。

前述のとおり、アスペリティが階層構造を持つ場合があることを認めると、大きなアスペリティの中の小さなアスペリティの中で小さな破壊核が生じ、それが小さなアスペリティの破壊を引き起こした後、その上の階層である大きなアスペリティの破壊にまで至る場合があることがシミュレーションから明らかになった（Noda *et al.*, 2013）。このような場合、大きなアスペリティが破壊する際に、大きな破壊核は生じないこととなり、地震予知は実質的に不可能ということになる。

もちろん、アスペリティが階層構造を持っていたとしても、大きな破壊核が生じてから大地震に至る可能性もまだ残されている。しかし、近代的観測が始まって以来、明らかな破壊核が形成した後には大地震に至った例は皆無であり、そのようなことが生じる確率すら不明である。

以上のような観測とシミュレーションの結果から、破壊核の検知に頼った「東海地震」の予知は可能性が低いと判断され、直前予知により避難行動がとれることを前提として「東海地震」をターゲットとした防災体制から、直前予知はほとんど不可能という前提のもと南海トラフ沿い全体を対象にした防災体制に、2017 年 11 月から大きく切り替わった。

2.8 巨大地震のサイクルには粘性緩和が大きく影響している

1990 年代から、GPS に代表される衛星測位システムが整備され、また、2000 年代からは前述の「繰り返し地震」によりプレート境界滑りがモニタリングできるようになり、東北沖で生じる M6 以上のプレート境界型地震のあとには、「余効滑り」と呼ばれるゆっくりとした滑りが生じていることが明らかになった（たとえば、Nishimura *et al.*, 2000 ; Uchida *et al.*, 2003）。

東北沖地震の後も大規模な地殻変動が観測されたため、当初は大規模な余効滑りが生じたのだろうと考えられた。余効滑りは基本的に地震時と同じ方向に滑るため、プレート境界断層の上盤に位置する陸の衛星測位観測点は地震時と同様に東向きに動くことになる。海底地殻変動観測点も上盤に存在するため、余効滑りが生じていれば東向きに動くはずであるが、実際には本震後に西向きに動く観測点が多いことがしだいに明らかになり、これはマンツルの粘弾性緩和によるものであると解釈された（たとえば Sun *et al.*, 2014）。

この粘弾性緩和を理解するには、アスファルトを思い浮かべればよい。アスファルトの上に重い岩を載せると、しだいにその岩は沈降していく。次にその岩を別の場所に移動すると、今度はその新しい場所で岩は沈降していく。プレートの下にあるアセノスフェアと呼ばれる柔らかいマンツルは、このアスファルトとほぼ同様の挙動をすると考えられ、巨大な東北沖地震に伴ってプレートの相対位置が変化したことにより荷重分布が変わり、その下のアセノスフェアがゆっくりと変形していく様子を海底地殻変動観測点とはらえていたのである。

実際には粘弾性緩和以外に余効滑りも生じているのだが、陸の観測点では両者の影響は同じセンスに働くため、両者を分離することは陸の衛星測位観測点のデータだけでは困難であり、海底観測点のデータと繰り返し地震のデータが、両者の分離に非常に有効となる。

Sasajima *et al.* (2019) は、このような粘弾性緩和を考慮した巨大地震発生サイクルのシミュ

レーションを行った。彼らの結果によると、東北沖地震の後の海岸の隆起はしだいに減速しながらも約300年続き、それから沈降に転じてから約300年後に次のM9の地震が生じることになる。明治以来の測地測量のデータによれば、少なくとも東北沖地震前の約100年間、東北地方の太平洋沿岸は沈降を続けていたが、これから約300年間、海岸は隆起を続けることになる。つまり、今、生きている人間はだれも、2011年以前の沈降し続ける海岸を再び見ることはないということを、彼らのシミュレーションは示している。

3. 災害軽減のために理学者がなすべきこと

3.1 過学習をしてはいけない

東北地方でM9の地震が発生しうとは思わなかった理由はなぜか、いろいろな方々に問われて、前述のような説明をしてきた。これは、一言で言えば「過学習」してしまったのだと思う。

「過学習」は最近はやりの機械学習でよく使われる言葉である。あるデータセットを計算機に学習させる場合、同じデータセットを繰り返し何度も学習させると、そのデータセットについての正解率はどんどん上昇する。しかし、あまり学習させすぎると、今度は新しいデータセットについての正解率が下がってしまうことが知られており、これが「過学習」と呼ばれる現象である。

東北沖地震前にわれわれが知っていたM9地震は10個もなかった。そこから共通項を見出そうとさまざまな検討が行われて、得られたデータをうまく説明するモデルが見つかり、しかもそれが力学的にもっともらしかったため、それが真実であるかのように研究者は信じてしまっていた。

そのようなやり方は、科学の世界では当然のことであり、新しいデータが得られて、それが過去のモデルで説明できなければ、古いモデルを捨て去り、新しいモデルを構築していく、それが科学の営みである。しかし、災害科学としての地震学においては、データの不十分性をよく自覚し、現時点でのモデルの不確定性がきわめて大きいことにつねに留意する必要がある。

前述のように東北沖地震でわれわれは多くのことを学んだが、これをM9地震の典型として位置づけることは過学習に他ならない。われわれが東北沖地震から学びすぎると、次のM9地震はまた「想定外」となりかねない。それを肝に銘じる必要がある。

3.2 最もありそうなシナリオだけでなく、最悪のシナリオも検討し、社会に伝える

M9.0の地震が東北沖で発生したことにショックを受けていた筆者を見て、貞観地震のことに詳しくあったメディアの方が、「M8.4の可能性は貞観地震で証明されていたのだから、M9.0だからといって、そんなにショックを受けなくても良いのでは？」とおっしゃってくださったことがある。その方は、筆者を慰めようとしてくださったのだと思うが、M9.0とM8.4ではエネルギーも地震モーメントも約8倍異なり、断層の長さも幅も滑り量も2倍異なることを意味する。

実際、佐竹ほか(2008)が提案した貞観地震の最適断層モデルは、長さ200km、幅100km、平均滑り量7mであり、東北沖地震に比べて、すべて約半分である。すべて線形で計算できる範囲であれば、断層サイズが同じであっても、滑り量が倍になっただけで、津波の高さは2倍になり、被害の様相はまったく異なってしまふ。貞観地震が知られていたのだから、今回の地震の被害は予見できていたはず、とよく言われるが、そんなことはない。たとえば佐竹ほかのモデルでは、東北沖地震での三陸海岸のあの高い津波は説明できない。

一方、佐竹ほか(2008)をよく読むと、 M_w 8.4というのは、津波堆積物の分布を説明するために最低限必要なマグニチュードを示したにすぎないことがわかる。また、海溝で生じる津波地震タイプでは、貞観地震の津波堆積物の分布を説明できないが、今回の地震のように、幅広い津波に海溝付近で生じた高い津波も重なっていたとしても、津波堆積物の解析からは、そのことはわからない。

筆者は、東北沖地震の前から、佐竹ほか(2008)の結果は貞観地震の規模が M_w 8.4「以上」であることを示していることを知っていた。しかし、地震は規模が大きいほど、その発生頻度は小さくな

るため、 M_w 8.4と M_w 9.0の両方がデータを説明できるのなら、 M_w 8.4の可能性のほうが高いと考えてしまっていた。

筆者はまた、前震についても判断ミスをしていた。2011年3月9日のM7.3の前震が生じたあたりでは、1915年にM7.5程度の地震が生じた可能性があり、その後、1939年M6.9、1958年M6.7、1981年M7.0と、およそ20年間隔でM7前後の地震が発生していた。さらに1915年のおよそ20年前の1897年には、一回り大きなM7.7の地震も発生しており、この領域と1978年の宮城県沖地震の震源域の両方を破壊したのが、1793年のM8.2の連動型地震だと考えられていた。

1981年のM7.0の地震のあと、30年間もM7の地震が起こっていなかったのも、もうすぐM7の地震が起こり、それまで約20年間隔で発生したのが30年も待たされたのだから、M7.0より大きな地震が生じると危惧しており、最悪、1897年のようなM7.7の地震が起きたり、さらには1793年のようなM8.2の地震が生じたりしてしまうのが、当時考えていた最悪のシナリオであった。

そのような心配をしていたさなかに2011年2月に海溝付近でM5級の群発地震が発生し、東北大学や仙台管区気象台はかなり緊張した。1981年の地震の際にも、そのすぐ東側で群発地震が生じてからM7.0の地震に至ったからである。しかし2月は何事もなく過ぎて、警戒を緩めかけていた3月9日に、まさしく想定していた場所でM7.3の地震が発生した。

このとき筆者は、地震の再来間隔を基にした地震の長期予測が成功し、また、規模が前回より大きくなるだろうとした予測的中し、さらには群発地震を基にした短期予測にも成功した稀有の事例になったと興奮していた。大きな被害がなかったこともあって、そのような予測が「当たった」嬉しさと、心配していたM7.7やM8.2の地震にならなかったという安堵感の中、その日のうちにメディアの取材に応じ、自分の考えをまくしたてた。それは3月10日の河北新報の朝刊に「連動型 危険性低下か」という見出しとともに掲載された。

あのとき筆者は、上記のような状況の中、いちばんありそうなシナリオを説明したつもりであったが、その翌日の3月11日にM9.0の東北沖地震が発生することになる。今から考えれば、最もありそうなシナリオだけでなく、最悪のシナリオも説明すべきであった。

筆者は、研究者の一人として取材に応じてしまった。しかし、あのとき必要であったのは、研究者個人の意見ではなく、防災のための専門家としての安全サイドに立った見解であった。

4. おわりに

これまで述べてきたように、われわれは東北沖地震から多くのことを学んだ。それは、地震防災のための研究を志していたつむりの筆者としては、「失敗」の総括とも言える。これらを思い出すたびに、この地震で犠牲となられた方々に対して非常に申し訳ない気持ちでいっぱいになる。われわれの後継者である若い研究者の皆さんが、これを「失敗学」として学び、同じ失敗を繰り返さないでほしいと願うばかりである。

謝辞

普通のレビュー論文とはまったく異なる、このような文章を書く機会を与えてくださり、また、筆の遅い筆者の原稿を辛抱強く待ってくださった、本誌編集長の岡田義光氏に深く感謝いたします。

参考文献

- Boatwright, J. and Cocco, M. 1996. Frictional constraints on crustal faulting. *J. Geophys. Res.*, **101**, 13895-13909.
- Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. 2011. The 2011 Tohoku-oki earthquake: displacement reaching the trench axis. *Science*, **334**, 1240.
- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太. 2012. 2011年東北地方太平洋沖地震による絶対歪の解放：遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化. *地質学雑誌*,

- 118, 396-409.
- Hasegawa, A., Yoshida, K., Asano, Y., Okada, T., Iinuma, T. and Ito, Y. 2012. Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **355-356**, 231-243.
- Hirata, N., Kanazawa, T., Suyehiro, K. and Shimamura, H. 1985. A seismicity gap beneath the inner wall of the Japan trench as derived by ocean bottom seismograph measurement. *Tectonophysics*, **112**, 193-209.
- Hori, T. and Miyazaki, S. 2011. A possible mechanism of M 9 earthquake generation cycles in the area of repeating M 7-8 earthquakes surrounded by aseismic sliding. *Earth Planets Space*, **63**, 773-777.
- Igarashi, T., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. 2003. Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone. *J. Geophys. Res.*, **108**, B5, 2249.
- Iinuma, T., Hino, R., Kido, M., Inazu, D., Osada, Y., Ito, Y., Ohzono, M., Tsushima, H., Suzuki, S., Fujimoto, H. and Miura, S. 2012. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **117**, B07409.
- 飯尾能久・松澤 暢. 2012. 東北地方太平洋沖地震の発生過程：なぜM9が発生したのか？ *地質学雑誌*, **118**, 248-277.
- Kanamori, H. 1977. Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications. In: *Island Arcs, Deep Sea Trenches, and Back-Arc Basins*, ed. by Talwai, M. and Pitman III, W.C., pp. 163-174, AGU, Washington, D.C.
- Kanamori, H. 1981. The nature of seismicity patterns before large earthquakes. In: *Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Ser.*, 4, ed. by Simpson, D. and Richards, P.G., pp. 1-19, AGU, Washington, D.C.
- Kato, N. and Yoshida, S. 2011. A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: a numerical simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G04.
- Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R. and Ito, Y. 2011. Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L24303.
- Kodaira, S., No, T., Nakamura, Y., Fujiwara, T., Kaiho, Y., Miura, S., Takahashi, N., Kaneda, Y. and Taira, A. 2012. Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature Geosci.*, **5**, 646-650.
- Koketsu, K., Yokota, Y., Nishimura, N., Yagi, Y., Miyazaki, S., Satake, K., Fujii, Y., Miyake, H., Sakai, S., Yamanaka, Y. and Okada, T. 2011. A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **310**, 480-487.
- Kurahashi, S. and Irikura, K. 2013. Short-period source model of the 2011 M_w9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**, 1373-1393.
- Lay, T., Ammon, C.J., Kanamori, H., Xue, L. and Kim, M.J. 2011. Possible large near-trench slip during the 2011 M_w9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 687-692.
- Maeda, T., Furumura, T., Sakai, S. and Shinohara, M. 2011. Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 803-808.
- Matsu'ura, M., Kataoka, H. and Shibasaki, B. 1992. Slip-dependent friction law and nucleation processes in earthquake rupture. *Tectonophysics*, **211**, 135-148.
- Nishimura, T., Miura, S., Tachibana, K., Hashimoto, K., Sato, T., Hori, S., Murakami, E., Kono, T., Nida, K., Mishina, M., Hirasawa, T. and Miyazaki, S. 2000. Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary in northeastern Japan inferred from GPS observations. *Tectonophysics*, **323**, 217-238.
- Noda, H., Nakatani, M. and Hori, T. 2013. Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up—Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **118**, 2924-2952.
- Ohnaka, M., Kuwahara, Y., Yamamoto, K. and Hirasawa, T. 1986. Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high frequency elastic radiation during stick-slip instabilities. In: *Earthquake Source Mechanics, Geophys. Monogr. Ser.*, 37, ed. by Das, S., Boatwright, J. and Scholz, C.H., pp. 13-24, AGU, Washington, D.C.
- Ruff, L. and Kanamori, H. 1980. Seismicity and the subduction process. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **23**, 240-252.
- Sasajima, R., Shibasaki, B., Iwamori, H., Nishimura, T. and Nakai, Y. 2019. Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a

- gigantic earthquake cycle. *Sci. Rep.*, **9**, 5726.
- 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋. 2008. 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション. *活断層・古地震研究報告*, **8**, 71-89.
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Nakashima, R. and Tanigawa, K. 2015. Shorter intervals between great earthquakes near Sendai: Scour ponds and a sand layer attributable to A.D. 1454 overwash. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4795-4800.
- Stein, S. and Okal, E.A. 2007. Ultralong period seismic study of the December 2004 Indian Ocean earthquake and implications for regional tectonics and the subduction process. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**, S279-S295.
- Sun, T., Wang, K., Iinuma, T., Hino, R., He, J., Fujimoto, H., Kido, M., Osada, Y., Miura, S., Ohta, Y. and Hu, Y. 2014. Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, **514**, 84-87.
- Tse, S.T. and Rice, J.R. 1986. Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *J. Geophys. Res.*, **91**, 9252-9272.
- Uchida, N., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. 2003. Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1801.
- Wang, D. and Mori, J. 2011. Rupture process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0) as imaged with back-projection of teleseismic P-waves. *Earth Planets Space*, **63**, 603-607.
- Yagi, Y. and Fukahata, Y. 2011. Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L19307.
- Yamanaka, Y. and Kikuchi, M. 2004. Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307.

松澤 暢

[まつざわ とおる]

現職 東北大学大学院理学研究科教授

略歴 東北大学理学部卒業. 東北大学大学院理学研究科博士課程修了. 東北大学理学部助手, 東北大学大学院理学研究科助教授, 東京大学地震研究所助教授等を経て 2008 年 4 月より現職

研究分野 地震学



東日本大震災から得た工学的な知見と今後の防災 —津波工学的な視点から紹介—

今村文彦

1. はじめに

1.1 東北地方太平洋沖で発生した地震および関連被害の命名

東北地方太平洋沖で発生した地震（2011年3月11日午後2時46分頃）は気象庁により平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震と命名された。震災名については、直後には名称もさまざまに呼ばれ、東北関東大震災、東日本巨大地震、3.11大震災などがあったが、いまは、最も広域な表現である「東日本大震災」が一般に使われている。日本の観測史上最大の巨大地震であり、その直後に沖合で発生した津波も広域に襲撃し沿岸域を含めて多大な被害を出した。広域での複合災害であり、強震の後、津波、液状化、地滑り、火災に加えて原発事故も含めて多様な被害が連鎖して発生し、人類が経験のない被害となった。

1.2 学際的な研究の視点

未曾有の大被害を出した東日本大震災から10年が経過した。広域の複合災害であり、現在も影響が継続している状況も報告されている。このような震災を理解し、今後の防災・減災のためには多面的な視点での学際研究が必要であった。その実態は今も未確定の部分もあるが学術的な連携の中で研究が進んでいる。従来の自然科学としての側面のみならず、人文・社会科学、災害医学・健康科学として捉え、われわれが従来では知らない姿を炙り出し、将来における社会での防災・減災に不可欠な要点を明らかにしなければならない。

このような背景の中、大震災1年後に災害科学国際研究所が東北大学で設立され、災害科学は事前対応、災害の発生、被害の波及、緊急対応、復

旧・復興、将来への備えを一連の災害サイクルととらえ、それぞれのプロセスにおける事象を科学的に解明し、その教訓を一般化・統合化することを目的とした。さらに、東日本大震災における調査研究、復興事業への取り組みから得られる知見や、世界をフィールドとした災害科学研究の成果を社会に組み込み、複雑化する災害サイクルに対して人間・社会が賢く対応し、苦難を乗り越え、教訓を活かしていく社会システムを構築するために「実践的防災学」として体系化を目指している。

1.3 工学的な視点で整理

この中で、社会への応用を踏まえた工学的な視点で得られた知見や今後の対応について、紹介することが本文の目的である。一般に、工学とは、社会生活の中で利用されるために、計画・設計・製造・整備・維持管理を行う各段階において基礎的な科学を応用していく技術の総称であるといえる。したがって、先ほどの「災害科学」と「実践的防災学」の分野と重なり、東日本大震災などで得られた基礎科学的な知見を社会で活用していくことが肝要である。東北大学では、1992年に津波工学の研究分野が発足し、将来の津波研究を進展させ、影響を予測し、リスク評価や津波警報システムの提案等により被害の軽減や早期復興に向けた技術開発を目標としている。そこでは、発生メカニズムを考慮したハザード予測、社会脆弱性・暴露性を踏まえた被害予測・評価、その結果に対するさまざまな対策の提案とその減災効果の検討が主な内容になる (Imamura *et al.*, 2018)。

東日本大震災でのハザードに関しては、強震動の後に、リアルタイム観測波形や沿岸での津波痕跡データなどがあり、津波の浸水・冠水、浸食・堆積による地形変化、などの挙動も広く把握できた

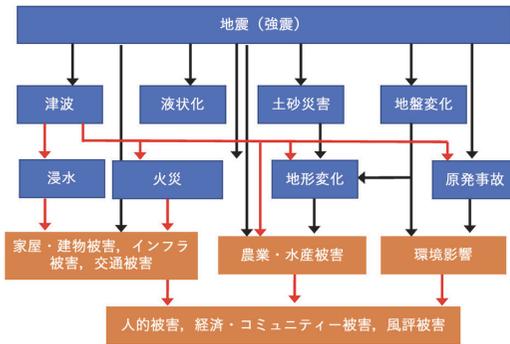


図 1 複合災害（連鎖する過程），今村（2020）に加筆

と考える。さらに、伴って発生した被害については、人的被害、家屋・建物被害、沿岸構造物・インフラ被害などに加えて、沖合での養殖筏、船舶などの漂流、さらには、可燃物の流出と火災、道路・鉄道（車両も含む）など交通網への障害・被害、そして、原子力・火力発電所など施設への影響などが報告され、その中には従来にない規模のものもあった。現在想定される複合的な津波被害のほとんどのパターンが発生したと考えられる。複合的なハザードによる連鎖的な被害はきわめて複雑であり、図 1 に示されたような過程の理解と定量化が必要である。今後も災害は進化し続け、その発生から拡大の過程は連鎖により複雑化していくと考えるため、東日本大震災で得られるこのような知見は非常に重要である。

2. 地震と津波の発生と観測・調査 —複雑な発生過程—

2.1 巨大地震および津波の概要

この震源は宮城県沖であり、事前に想定されていた地震（宮城県単独と連動）のわずか沖に位置していた。しかし、地震の断層破壊は3分以上続き、はじめは福島県・宮城県・岩手県沿岸を中心とした活動であったが、北は青森、南は茨城・千葉方向に強い揺れが広がった。現在の余震の分布も、東北・関東地方での東日本太平洋沖の広範囲に至っており、先日の2021年2月13日の深夜に福島県沖でM7.3、3月20日夕方に宮城県沖で

M6.9の余震が発生している。3月20日には津波注意報も発表された。当時の主な断層活動の範囲は、南北約500km東西約200kmにわたると推定され、断層のすべり量は最大で30mを超えたとされる。これによる海底変動が海面の変化をもたらし、巨大な津波が生じた。過去、この日本海溝沿いの地域は、三陸沖、宮城県沖、福島県沖、海溝沿い（沈み込み帯）、など個別地域でそれぞれ固有的な地震発生が評価されていたが、今回、一気に連動し超巨大地震が発生したことになる。

津波については地域により2つの姿があった。1つはリアス式海岸を有している三陸沿岸で最大遡上が40mを超えるような規模であり、過去の慶長、明治や昭和の三陸沖地震津波とほぼ同じような浸水範囲であった。ここでは、押し波だけでなく引き波の破壊力も甚大になっている。もう1つは、直線状海岸を持つ仙台平野より南側の低平地での津波であり、浸水範囲が広く最大規模は15m程度の津波高さが残されている。この津波規模は2011年以前に評価されていた宮城県沖地震津波（連動）の想定を遥かに上回り、防潮堤を越えた津波の浸水範囲も10倍以上になり、広大な範囲で長期間の浸水がみられた。

2.2 多段階の断層運動—時間差破壊と動的プロセス

巨大地震による広域で複雑な断層破壊が海底の変位を生み、海面変動を伴って津波が発生していった。観測された地震や津波波形を利用した断層運動の推定（たとえば、藤井・佐竹，2011）が検討されているが、特徴としては、宮城・福島沖での海底変化（断層のすべり量）が大きいこと、しかも、日本海溝沿いの値が大きいことが示唆されている。深い海域で大きな海底変化が生じると、それだけ大きな規模の津波が発生することになる。実際、各地で津波が観測されているが、図2に示されたように海域で6m程度（釜石、海底津波計）、沿岸で10m以上の規模が記録されている。特に津波波形を利用した断層運動の推定（たとえば、杉野ら，2013；藤井・佐竹，2011；東北大学，2011；Satake *et al.*, 2013）が行われているが、特徴としては、(1) 段階的に各セグメント（断

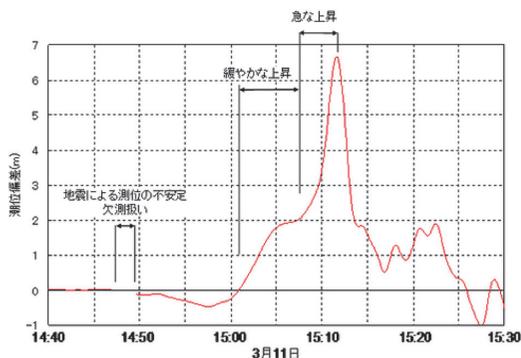


図 2 海底津波計 (TM2) で観測された津波波形 (東大・東北大による観測)

層)で破壊が生じたこと、(2)震源付近で初期の津波が発生しその後海溝沿いに移動していること、(3)宮城・福島沖での海底変化(断層のすべり量)が大きいこと、しかも、(4)日本海溝沿いの値が大きいことが示唆されている。

現在までに、津波波源モデル(根本ら, 2019)すなわち、津波を発生させた水位の変化が推定されている。地震発生から60秒前後で震源を中心とした宮城県沖、その後の15秒以降では、三陸沖北部などに移動していることが示され、今回の巨大地震が多段階の断層運動を伴って生じており、その結果としての津波も時間差破壊により発生し、動的なプロセスの重要性が示された(今村, 2015)。

2.3 観測された2段階での津波発生

従来の験潮記録のほか、沖合で津波が観測されて当時の発生状況を把握することができた。たとえば、先ほどの図2に示された、当時設置された沖合海域(深さ1,000m以上)でも波高5m程度(釜石海底津波計やGPS波浪計)であり、30分程度の押し波の成分(2m程度)の上に、5分程度の短い成分(3m程度)が重なった波形(2つの段階)がみられた。これは、多段階での断層運動の影響を示しているものであり、特に、海溝沿いで大きなすべりの影響が大きいことが示唆されている。

同様に、海底津波計に加えてGPS波浪計による記録でも確認できた(河合ら, 2011)。岩手県

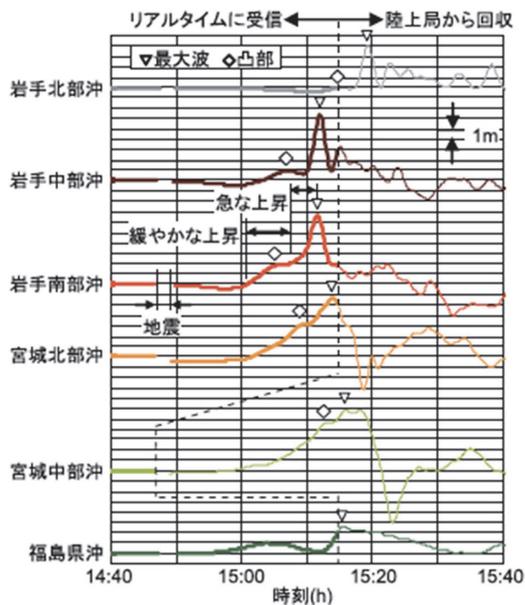


図 3 東北沿岸のGPS波浪計で捉えた津波初期の波形(河合ら, 2011)

北部から福島県沖に設置された6つのGPS波浪計は2段階の津波の発生を捉えていた(図3参照)。地震発生から10分後にはゆっくりとした海面の上昇がみられ、そのさらに約10分後には急激な水位上昇が生じており、ここでも2段階の津波が来襲したことが分かる。第1段階の津波は、1m程度の波高で周期が1時間程度(長周期成分)であると推定されるが、第2段階の津波は、その波高にして3m以上、周期が10分以下(短周期成分)であると読み取れる。これらは後ほど説明する逆解析に用いられ発生過程の理解に役立つうえに、当時、沿岸へ津波が到達するまで、リアルタイムで共有され、気象庁による津波警報(第2報など)の修正に活用された。

今回の大震災において、気象庁は地震発生3分後に津波警報の第1報を発表したものの、発表された津波の高さ予想が過小であったことなどにより住民避難が遅れ、被害の拡大につながった可能性が指摘された。この教訓を踏まえ、気象庁は、津波警報の改善に向けた検討を行い、より住民の避難につながる警報となるよう改善の方向性について整理し、早期に運用を開始することとした。

以下がその内容である。

具体的には、津波警報の第1報において、地震規模の過小評価の可能性があると判定される場合には、当該海域で想定される最大のマグニチュード等を適用し、また、予想される津波の高さを数値ではなく、「巨大」等の定性的表現で発表することにした。これにより通常の地震とは異なる非常事態であることを伝え、迅速な避難を促すこととした。また、津波の高さ予想の区分は、津波の高さと被害の関係や津波予測の誤差、とりうる防災対応の段階等を踏まえて、現状の8段階から5段階にすることとした（国交省、2012）。

2.4 沿岸での津波痕跡データ

大震災の発生後に、関係の専門家やエンジニアが東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループを立ち上げ、東北地方を中心に北海道から九州に至る全国で津波調査を実施し、津波痕跡などの測定を行った（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ）。最終的には、合計48研究機関、計148名もの研究者が参加した大規模な津波痕跡調査となった。さらに、5月以降には気象庁、国土交通省東北地方整備局、青森県・県土整備部、岩手県・県土整備部、宮城県・土木部、福島県・土木部などの実務者が加わり、より広範囲で痕跡データの提供をいただき、日本における津波痕跡データをほぼカバーできた。2011年7月初旬までに測量されたデータは合計5,000点を超え、世界的に見ても非常に大規模かつ空間的に高密度な津波痕跡高データセットが得られた。各調査班のデータは、事務局でスクリーニングを掛け、測量方法に応じて潮位および標高等の補正を行い統一データセットの作成を行った。潮位補正においては、三陸付近の潮位観測データ（津波により潮位計などが破壊）が不足していることに加えて、データ数が膨大であるため、数値シミュレーションを併用して、最大波到達時間の推定を行い、国立天文台の天文潮位データベースを用いて補正を行っている。

図4に3次元的な分布のイメージを示す。三陸沖を中心に、痕跡高が20mを超える地域が南北に約290km以上にわたり、宮古市や女川町付近

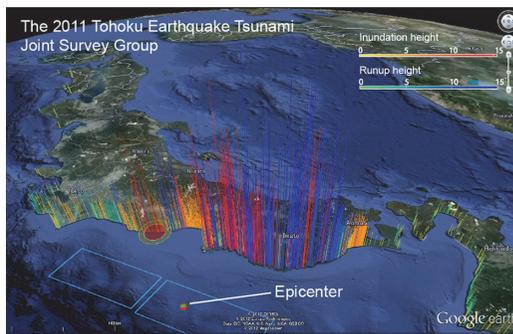


図4 調査で得られた津波高（暖色：浸水高，寒色：遡上高）（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ提供）

で30mを超える地域も広範囲に及んでいる。この地域では浸水高より遡上高が大きく、内陸に遡上していく過程で増幅が見られたことを示している。青森県から茨城県にわたる広域なエリアでは、痕跡高が10mを超えており約425kmになる。この距離は、今回の震源域の南北方向の長さに匹敵する。この地域では、浸水高と遡上高がほぼ同じ程度で分布しており、海域からの津波高さが同じレベルで内陸に浸水していったことを示唆する。なお今回の津波の遡上高さとしては、最高40.4mが記録されている（森、2011）。これらのデータは、津波数値解析の再現性の確認だけでなく、各地の復興計画の作成に活用されたうえで、津波防災のレベル1・レベル2の評価にも用いられた。

3. 津波の発生モデルの推定と今後のハザード予測

3.1 逆解析による波源モデルの推定

現在、地震動や測地のデータだけではなく津波波形も利用した断層運動の逆解析が行われており複雑な震源過程が推定されている。津波を考慮した場合には、2.2で述べたように、(1) 各セグメント（断層）で段階的に破壊が生じたこと、(2) 震源付近で初期の津波が発生しその後海溝沿いに移動していること、(3) 宮城・福島沖での海底変化（大すべり域や超大すべり域）が大きいこと、

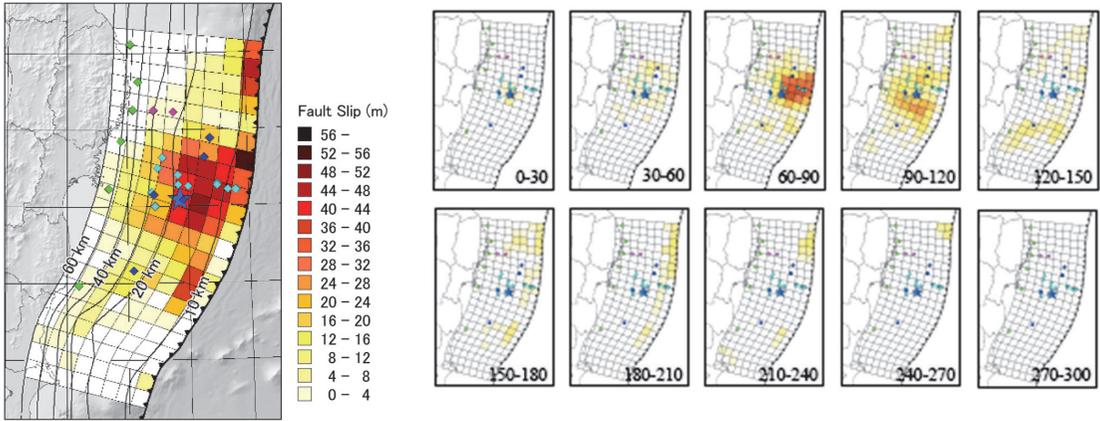


図 5 逆解析により推定された津波波源モデル（最終変位量と 30 秒ごとの時間変位量）（根本ら，2019）

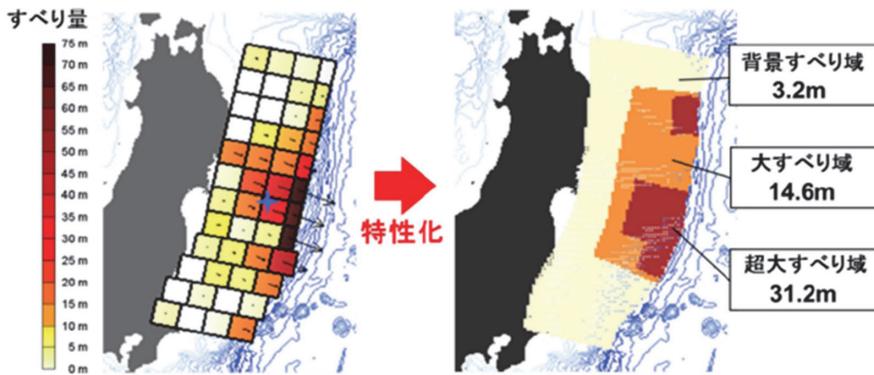


図 6 津波波源の特性化について（杉野ら，2014）

しかも、(4) 日本海溝沿いの値が大きいことが示唆されている。これらの特徴は、いくつかは地震動や測地によるモデルと異なっている。どのデータを使うかにより結果が異なる。最近では、沖合津波波形、津波痕跡高データに加えて陸域・海域測地データ、GNSS データを融合させて推定する事例がある（根本ら，2019）。その結果、図 5 に示すように、地震発生から約 1 分後に宮城県沖で主要な断層すべりが生じるとともに岩手県沖の海溝軸に沿って地震発生から 5 分後までゆっくりとしたすべりが継続する断層モデルが推定された。しかも、岩手県北部沖では、地震動にはない断層すべりが顕著であり、地すべり性津波の可能性も含めて注目されている。

3.2 波源モデルの特性化—将来の予測に向けて

今後、巨大地震の際に、津波をどのように推定するのか？特に超大すべり域がつねに伴うのか？その場所はどこののか？などの議論が活発に行われた。将来予測のためには、地震動などの断層モデルを参考にしつつも、プレート間地震による津波の波源域やすべり分布等の設定方法をルール化し、そこでの特性は保ちながらもある程度シンプル化する波源モデルが必要である。これは「特性化」と呼ばれており、東日本大震災における評価の問題点（過去のデータに基づく既往最大を中心にした考え）を解決し、不確定性も考慮しながら幅広く検討しながら確率的評価にも応用できる。現在、プレート間地震による津波の特性化波源モデルの構築が現在図られている（杉野ら，2013，

2014；文科省地震調査研究推進本部津波評価部会，2015）。特性化波源断層モデルの設定では，断層全体の形状や規模を示す巨視的波源断層特性および波源断層の不均質性を示す微視的波源断層特性という2つの特性を考慮して断層パラメータを与えることになる。図6に示したように大すべり・超大すべりの配置（位置）については，プレート構造などを考慮して，可能な範囲で選択することになる。場所などのパラメータ（破壊開始点やライズタイムなど）を変えた複数のケースを仮定すれば，確率的な津波高さの評価が実施可能となる。さらに，津波地震，アウターライズ地震などのケースも含めて適用範囲を拡げていくことになる。

なお，繰り返しになるが，逆解析（インバージョン手法）により，地震動，測地に加えて，津波そのものを活用し断層モデル（または，直接に海面変動）の推定を行うなか，本来であればそれぞれのモデルが一致するはずであるが差違が指摘されている。個々の事象の再現であれば大きな課題とはならないと思われるが，一定の断層モデルの下に地震動，地盤変動そして津波などを予測や評価する際には，避けては通れない問題となる。

3.3 広域高密度リアルタイム観測による精度向上

東日本大震災ではリアルタイム観測の重要性が再認識された。実際に地震等が発生した場合には，沖合観測のデータを活用すれば，沿岸に到達する前に津波を監視できるため，迅速な津波警報・注意報の更新や解除等の判断に有用な情報となる。現在，気象庁は，逆解析手法（tFISH）にも取り組み，リアルタイムで波源の推定精度を向上させるシステムの実用化を検討している。断層モデルを仮定しない手法でもあり，非地震性として地すべりや火山などに起因した津波に対しても適用できると考えられる。これに必要な観測網として，地震後に防災科学技術研究所は，図7に示されたように地震計と水圧（津波）計が一体となった観測装置を海底ケーブルで接続し，これを日本海溝から千島海溝海域に至る東日本太平洋沖に設置し，リアルタイムに24時間連続で観測データの取得を開始している。観測装置は150カ所に設

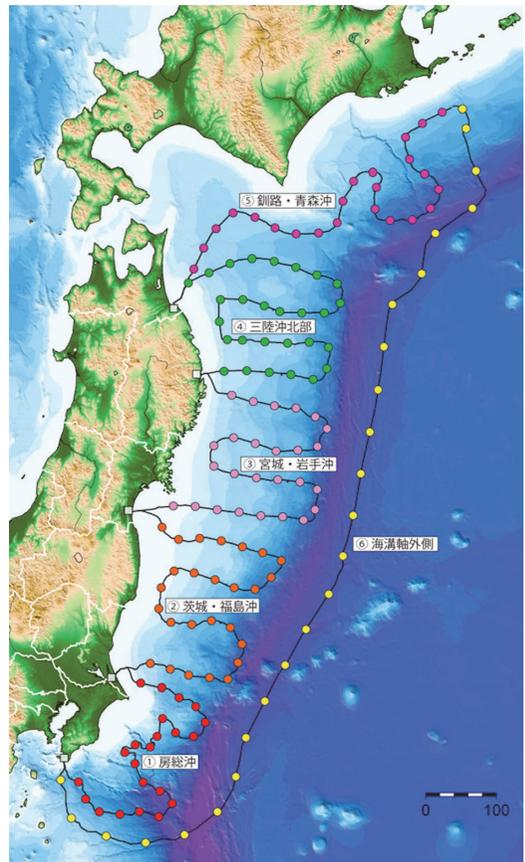


図7 日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の整備
<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>

置し，ケーブル全長は約5,500kmになる。海溝型地震や直後の津波を直接的に検知し，迅速かつ確実な情報伝達により被害の軽減や避難行動などの防災対策に貢献することが期待される（今村，2021）。

さらに，沿岸および沖合での津波の観測の強化と，観測データを活用したリアルタイムの津波予測技術の開発が進められている。Makinoshima *et al.* (2021) は，事前にスパコンなどを活用して得られる多数シナリオを想定した津波シミュレーションによる人工的な津波等の模擬観測データと予測地点での津波浸水波形の関係をAIに学習させておくことで，大地震発生時には，リアルタイムに得られる実観測データに基づき，AIが予測地点に到達する津波高の規模やその時刻の情報を含む津波浸水波形を即座に予測する方法を提

案した。学習済みの AI が沖合の津波の観測情報等から、予測点の津波の浸水波形を直接予測するため、津波波源推定のプロセスを省略できるほか、学習済みの AI による予測は通常の PC でも十分高速に実行可能なため、現実的な津波防災に向けた詳細な予測に際して従来必要であった大規模な計算資源を必要としないメリットがあり、実用性が高いと言える。

4. 沿岸域での巨大津波の実態—挙動と被害像

4.1 巨大津波の伝播—遡上—沿岸域での挙動

津波は深海から浅海を経由して沿岸域に達していた。図 8 に示された津波は、三陸沖合で発生し約 20~30 分で沿岸に到達した。過去においても、複雑な海岸線形状を持つ三陸沿岸では、津波の波高増幅がみられた。一方、仙台湾、福島沿岸では直線状海岸であり、石巻や東松島などは牡鹿半島の背後に位置していたため自然の堤防機能により、従来では大きな津波は見られなかった。しかし、東日本大震災の場合には、津波の発生域が宮城県沖・福島県沖さらには茨城県沖まで拡大したために、南側から直接に、巨大な津波がこの地域を襲ったことになる。

さらに、そこで発生した津波の水位が海水面より上昇するとそれが押し波となって陸上または河川を遡上した。浅海域になるにつれ津波の伝播する速度は遅くなるが、一方で流速は増加する。そ

のために、破壊力が増し被害が増大することになる。特に仙台湾では、波が壁のようになって来襲する波状性段波が観測されて、一気に陸上に遡上していった。砂州や防潮堤を越えて陸上に遡上した津波もあるが、河川や運河に沿って浸入した津波もあり、さまざまな報告や映像からスピードを変えながら市街地などに来襲していたことが示された（今村，2020）。やがて、内陸への遡上が終わるとその後、逆に海域へ「戻り流れ」となって逆流する。陸上部での地形勾配が大きいと、重力の斜面分力も加わり戻り流れは加速されて、大きな流速が生じ海岸線などで浸食などがみられた。

4.2 巨大津波による被害発生—過去にない被害像

この津波による影響は、従来から地震が多くリアス式海岸など複雑な形状地形を持ち、津波被害の大きかった三陸海岸地方（大船渡・陸前高田・気仙沼・女川）に加えて、過去においては、砂浜などの海岸線が直線状であり、津波による大きな被害を受けていなかった地域である仙台湾周辺（石巻、東松島、仙台、名取）や福島沿岸なども含まれた。大規模および長期間の浸水、沿岸構造物や建物などの被害メカニズム、漂流物（瓦礫、船舶、車両、タンクなど）による被害の拡大プロセス、大規模火災の発生原因などがあり、広い範囲にさまざまな被害が生じた。仙台市沿岸部では、伊達政宗の時代から植林されてきた防潮林が整備され、以前から津波の被害低減の効果が期待されたが、今回の津波の破壊力は大きく、多くの

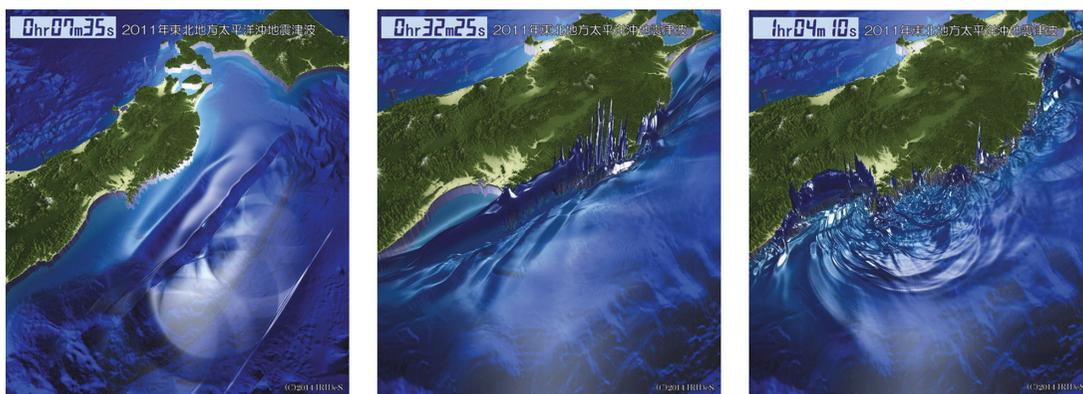


図 8 津波の伝播過程の様子

表 1 津波被害の誘因、素因、影響・被害例

誘因	素因	影響・被害事例
浸水・冠水	海底・沿岸地形、可燃物、土地利用形態、防護レベル、避難意識	人的被害（主に溺死、凍死、津波肺）、海水植物枯、農業被害、津波火災の発生（電線・バッテリーなどによる発火）、環境・生態破壊
流れ・流速（掃流力）	沿岸地形、土砂・堆積物、漂流物、インフラ、土地利用形態	家屋・施設被害、インフラ被害、建物・構造物への浸水・冠水、浸食・堆積（地形変化）、環境・生態破壊

場所では根こそぎにされるなど大被害を受けた。

当時の映像や動画で記録された巨大津波およびその被害は圧巻であった。特に被害の様相はわれわれの想像を超えて甚大であり複雑であったが、誘因・素因などにより分類ができ、これにより今後の効果的な対策や対応に役立つものと考ええる。津波は海水そのものであるが、その関連した被害像は多様であり、場所によりその様相が異なる。一般に、誘因は災害（被害や影響）を引き起こす自然力（ハザードなどの外力）を示し、素因は地形・地盤条件など地球表面の性質にかかわる自然素因と人口・建物・施設など人間・社会にかかわる社会的素因とに分類される。表1にまとめたように、津波の場合、誘因は浸水・冠水、流れ・波力になり、素因は海底・陸上地形、土地利用形態、防護施設などがある。この表には大震災で報告された代表的な影響・被害などもまとめている。海水の浸水による被害は過去の事例にも見られたが、流れ破壊力が増すことによる漂流物発生と被害や地形変化などは規模が大きい津波ほど顕著になっている。

過去に報告がなかった津波被害像としては「黒い津波」がある。この大震災では、写真1にあるような黒い津波の映像が残され、関連した建物被害や健康被害などが報告され、特に、沿岸部都市部で顕著に見られた。海底に堆積された泥や砂などが津波により巻き上げられ、泥流となって陸域に流れ込んだためである。黒い津波の場合には、泥の混入による粘性が生まれ、波先端の勾配が大きくなることによる波力の増加、さらには、泥水を



写真 1 宮古市で記録された「黒い津波」の来襲状況（宮古市役所提供）

飲み込んでしまったために気管を閉塞させる、あるいは、乾燥した後の粉塵の混入（吸引）による津波肺などが、連鎖して生じたと考えられる。今後も発生の可能性のある津波災害像であり、対策が求められている。

4.3 漂流物

今回被害を大きくした要因としては、「漂流物」があった。自動車、船、防潮林となっていた松の木、港湾でのコンテナ、工場の機械、大きいものでは石油タンクなどさまざまな漂流物が流されて、それが被害を大きくした。漂流物も被害想定の中かで一部評価には入っているが、漂流物は時々刻々変化するものなので、その把握や評価すること自体が難しい。

たとえば、岩手、宮城、福島3県で、津波被害を受けた自動車が少なくとも23万6千台に上ることが推定されている。津波で浸水した世帯数などから台数を推計した数値であり、道路で移動中



写真 2 船舶および火災による被害（気仙沼市）
（著者撮影）



写真 3 防潮林の被害（名取市）（著者撮影）

や勤務地での駐車などを考えると実際にはさらに多いものと思われる。なお、宮城県では約 14 万 6 千台が被災したと算出しており、登録台数の 1 割に相当している。

漁船の場合には、さらに深刻である。青森、岩手、宮城、福島の前 4 県の被災漁船は計 1 万 9,000 隻に上る。4 県の登録漁船数のほぼ半数に当たり、多くが津波で陸上に押し流されたり、大破したりした。宮城は被災率が 87% に達し、4 県で最も高かった。被災漁船のうち陸上に打ち上げられた漁船は 1,400 隻確認され、被害拡大の一因となった（写真 2）。

対策として、漂流物については 2 つの考えがある。1 つは漂流物のエリアを囲って外に出さないようにすること。貯木場などではそこで囲いを

造って、そこから木材の流出を止めるようにする。もう 1 つは守るべきエリアを決めてフェンスを立てることである。学校などの重要な施設には簡単なガードレールや緑地帯をつくって、漂流物の流入を防ぐ、などが考えられる。

防潮林となっていた松の木が漂流物となり被害を大きくした事例があるが（写真 3）、防潮林帯も、その幅（林帯幅）が十分にあれば、津波を防禦する効果がある。津波の波力というのは平野などの沿岸部で強く陸地を遡上するに従ってだんだんと減衰する。十分な幅を確保すれば、そこに漂流物がトラップされ、それ自体が防潮堤として機能することになる。一方、幅がせまいとそれが全部流出されてしまうので被害を拡大させてしまう。

4.4 津波火災

大震災での被害拡大の要因の 1 つが火災である。地震直後から東北・関東地方の市街地や工業地帯で深刻な火災が多数発生した。一般に、わが国で大規模な地震が発生した直後は、多数の火災が同時多発的に発生する傾向にある。これは関東大震災や阪神・淡路大震災など都市部においてその典型例をみることができ、今回の震災における大規模火災は市街地のみならず沿岸地域およびコンビナート施設周辺においても顕著であった。気仙沼市鹿折地区では約 11.4 ha が延焼しており、阪神・淡路大震災時における最大の延焼領域（水笠西公園地区、約 9.7 ha）を超えた広大な延焼範囲となった。また市街地以外にも津波被災エリアから林野火災に延焼拡大したものが多々あり、地震後の火災の総延焼面積は、東日本大震災が卓越している（廣井ら、2012）。このことは、地震（強震動）だけでなく津波の浸水・冠水等により火災が発生した可能性がある。いわゆる、津波火災であり、新たな災害として注目された。

廣井（2012）による現地調査と消防・消防団・住民によるヒアリングの結果、出火の原因は主に以下のように推定された。

1. 破壊された家屋によるもの
2. 可燃物（プロパンガスボンベ等）によるもの
3. 自動車（バッテリー等）によるもの

これに加えて、電流の流れている電線や工業地

帯のプラントからも出火している。

1. の事例としては、地震直後何らかの原因で家屋から火災が発生し、津波によって山際に流されたとの証言があり、地震直後あるいはその後に家屋から出火し、または延焼し、それが津波によって火のついたまま移動した事実があったことが報告されている。さらに、バッテリーや化学薬品などは津波との化学的な反応の中で出火したり、漁港内の海底にたまっていたメタンガスが津波の来襲とともに涌きだし、漁船付近で発火した報告などがある。

さらに、延焼（拡大）要因として、ガスボンベ等から噴出した可燃性ガス、屋外タンクから流出したオイルなど、瓦礫など、建築物、船舶、自動車、山林などがあげられる。津波火災の原因はさまざまに至るところにあるので、すべての発生を防止することはたいへんに困難であると考えますが、拡大を防止することは重要であり、東日本大震災での実態によりその現象を理解し検討をしていかなければならない（今津ら、2014）。

5. 今後の津波防災に向けて —安全レベル形成と被害予測—

5.1 安全で安心なまちづくりのために

東日本大震災の被害を繰り返さないためには、ハード・ソフト対策そしてまちづくりなどの総合対策が不可欠であった。しかし、その役割の整理や体制の維持には多くの議論があった。そこで、地震や津波などの（1）発生間隔・頻度および規模や（2）影響（被害）を考慮し、地域、集落ごとの個別の（3）生活条件・地形条件などから、安全レベルを設定し、防災・減災への対策の（4）効果および費用を評価して、地域での減災レベルを合意形成する必要がある。（1）～（4）における個々の合理的な評価をもとに、住民および行政の間で目標（レベル）を作り上げていくことが、地域安全の確保のための第一歩であった。

中央防災会議などで合意した考えは以下のとおりである。中規模以下の通常の災害に対しては、ハード対策で対応することが原則となる。この場合、社会基盤整備は新設のみでなく、既存の施設

の有効活用や強度向上の視点も大切である。一方、巨大災害に対しては、まず人命被害を最小とすることが災害対策上求められる。そのためには、社会基盤施設のみでなく、ソフト対策との適切な組み合わせによってカバーする必要がある。つまり、大規模な被災を前提とするものの、影響の分散化（多重防御）、人命被害の最小化、復旧・復興の迅速性、などを考慮した施設の整備・管理が求められる。

そこで、津波防災に関する2つの安全レベルが提案された。発生間隔・頻度および規模を考慮して、外力レベルを想定することが重要である。すべての人命を守ることを前提とし、主に海岸保全施設で対応する津波のレベルと、海岸保全施設のみならずまちづくりと避難計画をあわせて対応する津波のレベルの2つを設定する必要がある。当時、土木学会（東日本震災特別委員会、津波特定テーマ委員会）においては、以下の2つの考えを中心に議論が行われた。

- ・レベル1：海岸線の津波防護レベル（海岸法2条・海岸保全計画・基本方針などに関連）
海岸保全施設の設計で用いる津波の高さのことで、数十年から百数十年に1度の津波を対象とし、人命および資産を守るレベル
- ・レベル2：地域の津波減災レベル（地域防災計画、津波対策変（災害対策基本法40条などに関連）

津波レベル1をはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル。対象となる貞観津波クラスの巨大津波の発生頻度は500年から1,000年に一度と考えられる。

さらに、2011年12月に、「人の命が第一」、「災害に上限はない」という考えのもと、「減災」の視点に立ち、最大クラスの津波を対象に「逃げる」ことを前提として、ハード・ソフト施策を組み合わせた「多重防御」の発想による津波災害に強い地域づくりを推進するため、「津波防災地域づくりに関する法律」（平成23年法律第123号）が成立した。同法に基づく津波防災地域づくりを推進するに当たっては、まず、国土交通大臣が定める

基本指針に基づき、都道府県知事が津波防災地域づくりを実施するための基礎となる津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水区域および水深）を設定する。その設定のために津波浸水シミュレーションを実施するに当たっては、東日本大震災の津波で見られたような海岸堤防、河川堤防等の破壊事例等を考慮し、最大クラスの津波が悪条件下において発生することを前提に算出することが求められる（国交省, 2012）。

このような津波に対する総合防災対策（復興の理念でもある）の基本が整理された。大震災直後では、これらの考え方の周知や理解、さらに、防潮堤などの施設設計に関する合意などで時間を要した。今後は、未災地における事前の復興計画を議論することが重要であり、発災直後での混乱時に議論するのではなく、平時に事前の備えとして、関係者と具体的な取組を始めておくことが必要である。南海トラフ地震の影響地域の自治体等では、すでに始まっている地域もある。

5.2 学際連携研究の推進

1.2で学際的な研究について述べたが、その中で実施された取組の一例を紹介したい。先日、地質学、歴史学、津波工学、海岸工学、災害情報学など学際分野の連携により、10年間で得られた知見をまとめた総説論文が掲載された（Goto *et al.*, 2020）。この論文中では、2011年東北地方太平洋沖地震津波が被災地域の環境や生態系に及ぼした直接的影響と、その後長期にわたる間接的影響の継続性について、震災後に得られた知見がまとめられている。また、震災前後において東北地方太平洋沖で発生し得る巨大地震津波についてどのような知見が得られており、それを基にどのような津波防災計画が立てられていたのかなど、政策決定に関わる分野についても検証と評価が行われた。加えて、今後において、2011年の震源域だけでなく北側や南側では、近い将来の地震津波リスクが高いことも指摘しており、実際余震も含めて以前より高い活動が見られている。

以上のように、複数の学術分野にわたる知見が学際的かつ体系的に整理されており、国内外各地での今後の津波リスク評価や、それを基にした政

策決定や対策立案の際に指針となり得る重要な論文であると思われる。また、東日本大震災後、今回の震災を後世に伝承するために震災遺構の整備が進められ、住居の高台移転などによる津波に強い街づくりが進められているが、本論文で歴史・地質・考古記録を精査した結果、このような巨大地震津波の伝承活動や、より安全な地域への住居の移転は過去の巨大地震津波発生後にも実施されていたことが分かった。しかしながら、過去の災害の伝承は後世の人々には十分に受け継がれておらず、地質学・歴史学・考古学的には「既知」でも社会的には「未知」であった2011年の地震津波により、「想定外」の被害がもたらされたとまとめている。

5.3 生存学研究—新たな融合領域

もう1つ新たな学術融合領域を紹介したい。それが「災害からの生存学」である。過去においても多くの犠牲者を出しているが、その死因の実態やそれに基づく生存のあり方については、検討がほとんどされていない。東日本大震災では、溺死に加えさまざまな亡くなり方が記録された。そこで、宮城県警察本部から提供された東日本大震災における犠牲者情報の分析を行っている。本データの特徴は、死因や遺体発見場所が記述されている点であり、このようなデータを用いた研究は世界初である。死因に着目したこの研究では、まず、疾病・傷害および死因の統計分類（ICD-10）に基づき分類し、法医学の視点で分類結果を統合する手法を検討した。検討手法を約140とおりの死因記載に適用した結果、東日本大震災における宮城県での死因は、12に分類できることが示された。これまで、東日本大震災における死因分類は4とおりで分類されていたが、本研究により、圧死・損傷死・その他が、9つの死因に分類された。また、本研究で提案した分類手法は汎用性が高いことから、発災後の犠牲者分析研究で、世界的に用いられるポテンシャルを有している（Seto and Imamura, 2020）。

また、これまで犠牲者の自宅住所に基づいた分析は行われてきたが、日中に発生した災害のため、実態とは異なる点も確認されていた。本研究

では、遺体発見場所に着目しているため、東日本大震災における実際的な犠牲者分布が示された。発見されたご遺体数の分布は、これまで明らかになっていなかった。また、防災・減災の研究に加え、震災伝承・慰霊の観点でも、きわめて重要な知見となると考える。

5.4 おわりに—被害予測に向けて

東日本大震災では、過去に経験のない規模の地震や津波が発生したが、当時の高密度観測データと現地での貴重な調査データがあり、未曾有のハザードと被害実態はかなり明らかになりつつある。その上で、ハザードからの外力を推定し、被害程度との対応を示す被害関数を推定すれば、今後に同様な状況が生じる場合に対して被害の推算が可能となり、事前にそれぞれに対策をとることにより事前防災や減災が実施できることが期待される。現在、そのようなアプローチで内閣府の検討会（モデル検討会と対策検討ワーキング）などで審議され、南海トラフに加えて日本海溝・千島海溝での最大クラスの地震をターゲットに対策が進められている。

この10年間の研究の中で実施された被害関数の研究事例としては、過去のデータや統計的なデータに基づいて、外力として浸水深や波高に対してどのくらいの死亡率（犠牲者率）または家屋破壊率になるか、などの関係式が提案されている（Suppasri *et al.*, 2016, 2019；宮本ら, 2020）。さらに、船舶、海洋生態（アマモ場）、などの評価も行われている（Muhari *et al.*, 2015；木村ら, 2020）。今回の震災で、より詳細な調査等により実態が分かるようになると、外力としては流速や流体力が追加されたり（Charvet *et al.*, 2015）、漂流物や津波火災などの要素も加わり複雑さが増してしまう状況も報告されている。また、人的被害においても溺死だけでなく死因が判明したり、家屋も年代により強度が変わる状況も分かってきた。

しかしながら、広域で複合的な災害に対しては、簡単ではない。津波来襲前の強震動や液状化の影響も考慮しなければならない。当に、複合型外力作用の中で、連鎖的な影響や被害が生じてい

たことになる。今後、さらなる解析が進み、このような場合においても被害予測が可能になるような取組みが不可欠であり、その成果を期待している。

参考文献

- Charvet, I. *et al.* 2015. Fragility estimations for Kesennuma City following the 2011 Great East Japan Tsunami based on maximum flow depths, velocities and debris impact, with evaluation of the ordinal model's predictive accuracy, *Natural Hazards*, **79**, 2073-2099.
- 藤井雄士郎・佐竹健治. 2011. 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源. http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- Goto K. *et al.* 2020. Ten years after the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunamis: geological and environmental effects and implications for disaster policy changes. *Earth-Sci. Rev.*, **212**, 103417.
- 廣井 悠ら. 2012. 東日本大震災における津波火災の調査概要. *地域安全学会論文集*, **18**, 1-8.
- 今村文彦. 2015. 東北地方太平洋沖地震による巨大津波のメカニズムと被害予測. *地震ジャーナル*, **60**, 16-23.
- Imamura, F. *et al.* 2018. The role of tsunami engineering in building resilient communities and issues to be improved after the GEJE. *Adv. Nat. Technol. Hazards Res.*, **47**, 435-448. https://doi.org/0.1007/978-3-319-58691-5_25
- 今村文彦. 2020. 逆流する津波—河川津波のメカニズム・脅威と防災—. 成山堂書店.
- 今村文彦. 2021. 巨大津波の発生・伝播の過程と今後の対応. *地震学会広報誌「なるふる」*, **2**, 4-5.
- 今津雄吾ら. 2014. 東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度評価指標の提案. *自然災害科学*, **33**, 127-144.
- 河合弘泰ら. 2011. GPS 波浪計で捉えた平成23年東北地方太平洋沖地震津波. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **67**, I_1291-I_1295.
- 木村裕行ら. 2020. 東日本大震災におけるアマモ場の被害実態と津波外力との関係. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **76**, I_937, I_942.
- 国土交通白書. 2012. 第1章 震災からの復興と国土交通行政の転換第3節. 震災後における国土交通行政の転換, 平成24年. <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/>

- mlit/h23/hakusho/h24/html/n1131000.html
- Makinoshima, F. *et al.* 2021. Early forecasting of tsunami inundation from tsunami and geodetic observation data with convolutional neural networks. *Nat. Commun.*, **12**, Article number: 2253. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22348-0>
- 宮本 龍ら. 2020. 建築年代を含めた建物津波被害の実態分析とそれを考慮した津波被害関数. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **76**, I_709-I_714.
- 文科省地震調査研究推進本部津波評価部会. 2015. 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ). https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami_recipe.pdf
- 森 信人. 2011. 津波合同調査の全体概要とその解析結果, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会: 予稿集. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000001-I058502864-00>
- Muhari, A. *et al.* 2015. Assessment of tsunami hazard in port and its impact on marine vessels from tsunami model and observed damage data. *Natural Hazards*, **78**, 1309-1328. doi:10.1007/s11069-015-1772-0
- 根本 信ら. 2019. 2011年東北地方太平洋沖震の津波断層モデルの再検討—津波関連観測データをフル活用した推定—. *日本地震工学会論文集*, **19**, 25-41.
- Satake, K. *et al.* 2013. Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**, 1473-1492.
- Seto, S. and Imamura, F. 2020. Classification of tsunami deaths by modifying ICD-10 categories in the 2011 Tohoku earthquake tsunami—a case study in Miyagi prefecture. *Intern. J. Disas. Risk Reduct.*, **50**. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101743>
- 杉野英治ら. 2013. 原子力サイトにおける 2011 東北地震津波の検証. *日本地震工学論文集*, **13** (特集号), 2-21.
- 杉野英治ら. 2014. プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案. *日本地震工学会論文集*, **14**, 5_1-5_18.
- Suppasri, A. *et al.* 2016. An analysis of fatality ratios and the factors that affected human fatalities in the 2011 Great East Japan tsunami. *Frontiers Built Environ. Sect. Earthq. Eng.* <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00032>
- Suppasri A. *et al.* 2019. Load-resistance analysis: an alternative approach to tsunami damage assessment applied to the 2011 Great East Japan tsunami. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **19**, 1807-1822.
- 東北大モデル. 2011. vers.1.1, 2011, 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施. http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf

今村文彦

[いまむら ふみひこ]

現職 東北大学災害科学国際研究所所長, 津波工学研究分野教授

略歴 1961年山梨県生まれ, 1989年東北大学大学院博士後期課程修了. 東北大学工学部土木工学科助手, 同大学院工学研究科附属災害制御研究センター助教授, 教授を経て, 2014年より現職

研究分野 津波工学, 自然災害科学

その他 中央防災会議専門調査会委員等. 一般財団法人3.11推進機構代表理事

著書 津波の事典 (共著, 朝倉書店), 逆流する津波—河川津波のメカニズム・脅威と防災— (成山堂書店) 他



2021年2月13日福島県沖の地震（M7.3）

2021年2月13日23時07分、福島県沖の深さ55kmでM7.3の地震が発生し、宮城県と福島県で最大震度6強の揺れが観測された（図1）。この地震により、死者1、重傷16、軽傷170の人的被害があったほか、全壊69、半壊729等の住家被害があった（消防庁：3月29日現在）。また、東北新幹線が電柱の折損や高架橋の損傷によって一部区間が10日間の運休となり、常磐自動車道では土砂崩れによる通行止めが多発するなど、交通に大きな支障をきたした。

国内におけるM7級地震の発生は2016年11月22日福島県沖の地震（M7.4）以来4年3カ月ぶり、また、日本国内で震度6強以上を観測したのは2019年6月18日山形県沖の地震（M6.7）以来1年8カ月ぶりであった。

この地震で、宮城県山元町の強震観測点では1,432ガルの加速度が記録され、これは2016年4月16日熊本地震（M7.3）の際に震度7となった熊本県益城町で記録された1,362ガルを上回った。防災科研（2021a）は、宮城県山元町の一部地域で震度7相当の揺れがあったとする面的推定震度分布を公表している。強震波形記録は短周期成分が卓越しており、構造物の被害

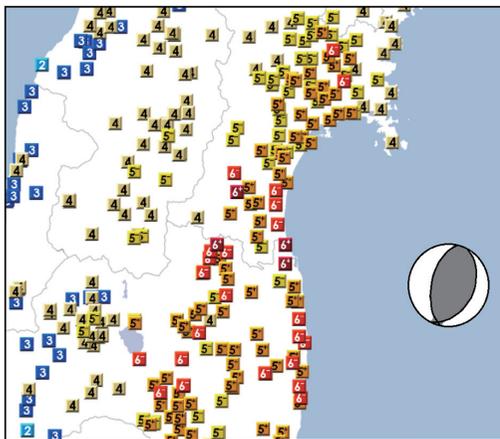


図1 2021年福島県沖の地震の震度分布、および本震の発震機構解（気象庁、2021）

を大きくした一因と考えられている。

余震活動は北東-南西方向の長さ約40kmの領域に集中し、本震はその北端付近の深い場所に位置している。図2は、S-net（日本海溝海底地震津波観測網）のデータを含め観測点補正值を用いて再決定した2月13~14日の余震分布を示す（防災科研、2021b）。これによれば、余震群は太平洋プレート上面よりも深部にあり、東傾斜する面に並んでいることが分かる。

すなわち、今回の地震は沈み込む太平洋プ

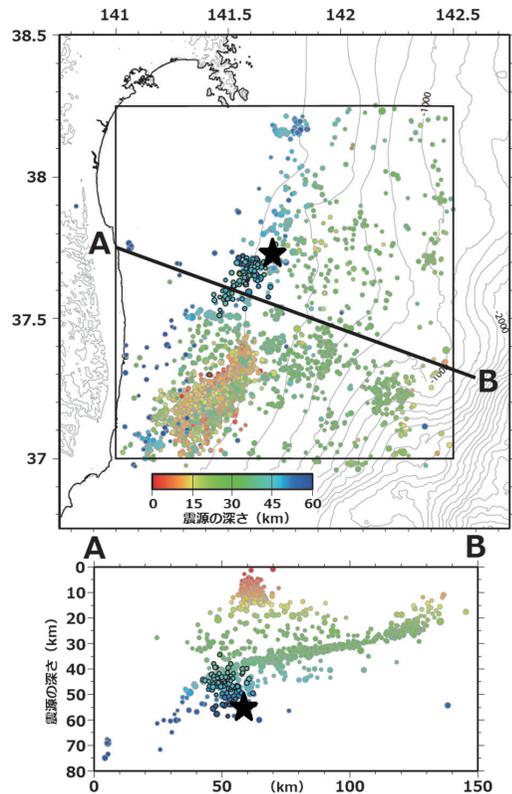


図2 観測点補正值を用いて再決定された2月13日の本震（星印）と2月14日6時までの余震分布。背景の色薄震源は2016年6月1日から2021年2月13日23時まで周辺で発生した地震を示す。上段は震央分布、下段はAB方向の垂直断面図（防災科研、2021bに加筆）

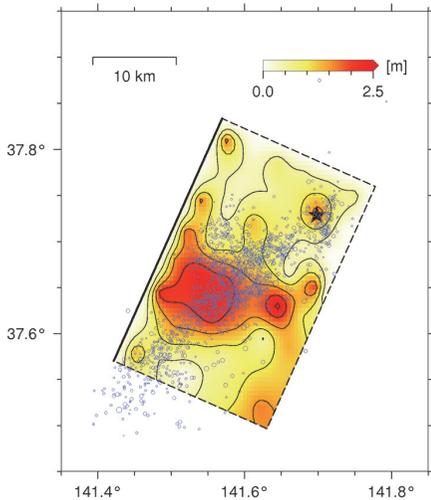


図 3 強震波形記録を用いた震源インバージョンによる 2021 年福島県沖地震の最終すべり分布。星印が本震（破壊開始点）、青丸は本震発生から 1 日以内に発生した余震の震源を示す（防災科研, 2021b）

レートで発生したやや深い地震であり、このために大きな津波は伴わず、宮城県石巻で最大 20 cm、仙台と福島県相馬でそれぞれ 10 cm の津波が観測されたのみであった。

この地震の発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型（図 1）であり、福島県浜通りの GNSS 観測点では西方向に 2 cm 弱の水平変動が観測された。国土地理院（2021）は、地殻変動データに基づいて走向 N37°E、南東に 36°で傾く長さ 44 km、幅 22 km の断層面上で、75 cm のすべりがすべり角 97°で生じたとする断層モデルを提出している。

一方、防災科研（2021b）は、強震波形記録を用いた震源インバージョン解析を行って図 3 に示すような最終すべり分布を求め、その最大すべり量は 2.7 m であったと報告している。

なお、本地震について、気象庁は 2011 年東

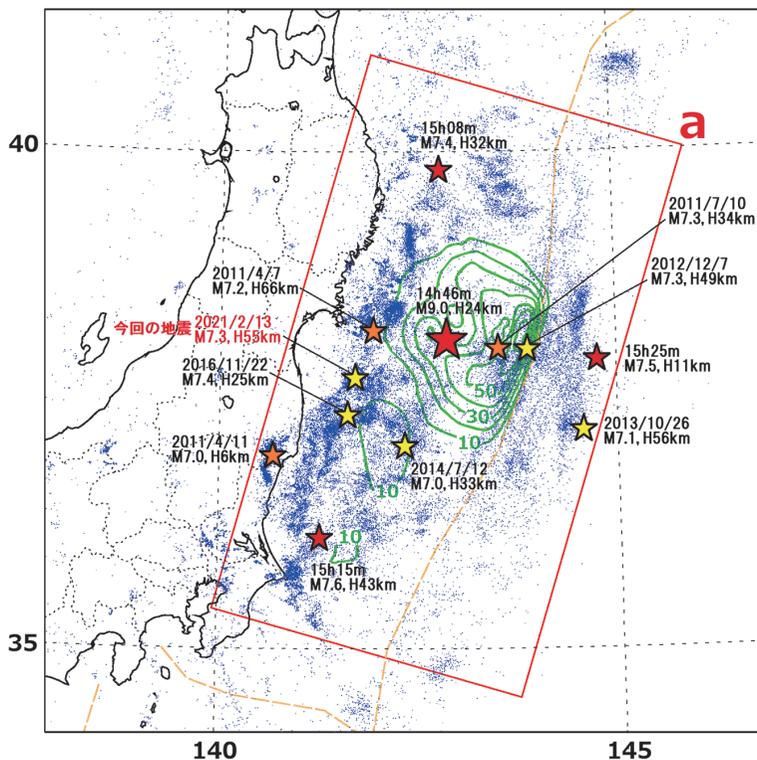


図 4 東北地方太平洋沖地震後 10 年間の地震活動。青点は M3 以上の地震、星印は M \geq 7 の地震（赤は本震と同日、橙は同年、黄は翌年以降の発生を示す）。a は気象庁の定める余震活動の領域、緑のコンターは Inuma *et al.* (2012) による本震の大すべり域を 10 m ごとに示す

北地方太平洋沖地震 (M9.0) の余震であると発表している。図4の青い点は、東北地方太平洋沖地震後の10年間に発生したM3以上、深さ100km未満の地震を示すが、震源は岩手県沖から茨城県沖にいたる南北約500km、東西約200kmの広大な範囲に分布している。

これまで気象庁は「ホームページ→各種データ・資料→顕著な地震の観測・解析データ→平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の中で、図4中の矩形領域aを「余震活動の領域」と定め、この領域内の地震は同地震の余震であるとしてきた。しかし、東日本大震災から10年となることを受け、気象庁は「余震と考えられます」という表現を今後は用いない方針に変更した(令和3年4月1日気象庁「お知らせ」)。

参考文献

- 防災科学技術研究所. 2021a. 令和3年福島県沖を震源とする地震クライシスレスポンスサイト.
- 防災科学技術研究所. 2021b. Topics 2021年2月13日福島県沖の地震. <https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushima210213/>
- Iinuma, T. *et al.* 2012. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data. *J. Geophys. Res.*, **117**, B07409. doi:10.1029/2012JB009186
- 気象庁. 2021. 令和3年2月13日23時08分頃の福島県沖地震について. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2102/14a/202102140110.html>
- 国土地理院. 2021. 令和3年(2021年)福島県沖の地震に関する情報. https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R3_fukushima_earthquake.html

(岡田義光:地震予知総合研究振興会)

南海トラフ地震発生帯掘削計画が明らかにしたこと

倉本真一

1. はじめに

南海トラフとは、駿河湾から九州東方沖までの約 750 km 続く海溝である。海溝とは海のプレートが陸のプレートの下に沈み込む場所で、一般的に深い溝のような地形を作っているためそう呼ばれている。南海トラフは、フィリピン海プレートがユーラシアプレート（西日本列島はこのプレートの一部）の下に沈み込んでいく境界部であり、海底に深い溝が刻まれているが、日本海溝などに比べると、その水深は比較的浅い（約 4,000 m 級）。ではなぜ南海海溝と呼ばないのかというと、その地形の発見の起源に遡るようである。深い海の水深を計測するには音波を使わなければならない。現在の海底地形調査装置が開発される前は、船から海底に向けて発振した音波が、海底で反射して船まで戻ってくる時間を計測して、水深に換算していた。音波が海水中を伝わる速さは、約 1,500 m/秒であることを利用しているのである。こうやって 1 点 1 点水深を計測していくわけだが、目で確認できない深海の地形を把握するのはきわめて困難な作業であり、西日本の沖合に細長く窪んだ地形があることがわかり、トラフ（舟状海盆あるいは舟状凹地）と呼ばれるようになった。1960 年代後半に提唱されたプレートテクトニクス理論が定着する前にこの地形が発見されたため、海溝であってもトラフという地形名称がそのまま使われたのである。

南海トラフ沿いでは、M8 以上の巨大地震が繰り返し発生していることでも注目されているが、同時にこの巨大地震を発生させているプレート境界断層のうち、上下のプレートが固着していると考えられる部分のいちばん浅い場所は、世界中の巨大地震発生帯の中でいちばん浅い場所に存在し

ていると考えられている。つまり南海トラフは、深海掘削によって巨大地震発生物質を取り出せる唯一の場所として理解されている。そのため、この南海トラフ巨大地震発生帯を掘削し、地震発生物質を採取し、さまざまな現場計測、リアルタイム孔内観測（モニタリング）を行うことが、「南海トラフ地震発生帯掘削計画」（以下「南海掘削」と呼ぶ、<http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/jnantroseize/>）であり、国際計画（IODP: 統合国際深海掘削計画、現在の国際深海科学掘削計画）として、2007 年より地球深部探査船「ちきゅう」（以下「ちきゅう」と呼ぶ）によって実際の掘削計画が開始された。「南海掘削」は、IODP の提案として 2003 年に提案され、2007 年 9 月より掘削が始まった。結果として 2019 年 3 月まで断続的に継続され、13 航海（Expedition）、17 サイトで 80 孔の掘削を行い、掘削総延長は約 38 km にもおよび、コア試料の総回収長は 4.7 km にも達した。延航海日数は 887 日である。本小論では、「南海掘削」の概要とその成果のトピックスを紹介し、巨大地震の理解がどれだけ進んだかを紹介する。

2. 「ちきゅう」の紹介

地震の研究にはさまざまなアプローチがなされているが、物質科学的なアプローチは、どうしても地震を発生させている現場に到達し、その場での観測・計測、そして試料採取が必須である。この目的のために地球深部探査船「ちきゅう」が建造された。「ちきゅう」は世界初の設計段階から科学掘削を目的として建造された掘削船であるが、その設計には当初から巨大地震発生帯を掘削することを念頭に、大水深での大深度掘削を可能とする技術が検討され、石油掘削でも用いられて

いたライザー掘削手法を採用した。また科学掘削船であるので、掘削試料をすぐに計測・分析できるように船内には最先端の研究室が備えられ (<http://www.jamstec.go.jp/cdex/j/sciencesupport/laboratory/>)、国際的に選抜された研究者が共同で作業、議論できる環境が整えられている。

「ちきゅう」は2001年度から足掛け5年の歳月を費やし、2005年7月29日に完工し、独立行政法人海洋研究開発機構（現 国立研究開発法人海洋研究開発機構）に引き渡された。主要目としては、全長210m、全幅38m、槽（やぐら）の高さは船底から130m、総トン数56,752トン、最大乗船人員200人、主機関はディーゼル・エレクトリック方式を採用している（図1）。「ちきゅう」の特徴はライザー掘削能力を持った世界屈指の科学掘削船であると同時に、最先端の洋上研究所であることである。ライザー掘削とは、「ちきゅう」と海底までをライザーパイプと呼ばれる鉄管（「ちきゅう」は内径約50cmのものを採用）で繋ぎ、その中を掘削パイプが貫通し、掘削パイプの先端に取り付けられた掘削ビット（削り歯）を回転させることによって掘り進む。掘削パイプ先端からは密度を調整した掘削流体（泥水：でいすい）を循環させ、掘削ビットから排出された泥水は、ドリルパイプとライザーパイプの隙間を通り船上まで戻ってくる。この泥水を循環させながら掘削を行うのがライザー掘削の特徴である。カッピングスと呼ばれる地層を掘るときに生じる岩石の破片を泥水とともに船上まで持ち上げて（rise）くるので、ライザー（riser）掘削と呼ばれる。ライザー掘削の詳しい説明は割愛するが、この泥水圧（泥水の密度×船から掘削孔の底までの垂直距離）と海底下の地層圧を均衡させることによって掘削孔をつぶれないようにすることができ、海底下深くまでの掘削を可能にする唯一の方法である。

「ちきゅう」は主に深海で掘削作業を行うため、錨を降ろして船を定点に固定することはできない。そのため、洋上に浮かんだままで定点を保持する技術が必要であり、その技術を定点保持システム（DPS：Dynamic Positioning System）とい

う。「ちきゅう」は直径約4mのスクリー（アジマススラスタ）を6基装備している。それぞれが独立に360度方向転換でき、同時に推進力を変化させることができる。このアジマススラスタは、船尾部に装着されている2基を除いて、すべて船底より上に格納することができる。このほかに船首にはトンネルスラスタが1基装備されている。これらのスラスタを個々独立に自動制御して、船にかかる外力に対して反対の力を発生させて、船を定点に固定させるというのが基本原理である。船にかかる外力（風、波、潮、うねりなど）は船に装備されたセンサーで計測され、そのデータを処理コンピュータによって0.5秒間隔ごとに外力のベクトルを計算している。処理コンピュータは同時に3系統で別々に計算処理され、結果を比較し、間違いのないことを確認しながらスラスタに指令を送るシステムとなっている。船の位置データはGNSS（Global Navigation Satellite System）を二系統（それぞれ2基を同時使用）使い、さらに位置精度を上げるために誤差情報を人工衛星経由で受信し、精度を上げつつ冗長性を確保している。また掘削時には海底に音響灯台（トランスポンダー）を複数設置し、水中部は独自の立体的な音響ネットワークを構築して、位置精度を確保している。また制御システムとしては、フィードフォワードシステムを導入していることも特徴の1つである。巨大な船が動き出してから、それを止める、あるいは方向を変えるということは、慣性力が大きく、そう容易なことではない。そのため、あらかじめモデル実験を水槽で行い、実機の外力に対する振る舞い方のデータを収集・解析し、そのモデルに基づいて船が動き出す前に動かないようにアジマススラスタをコントロールしている。

科学掘削船としての最大の特徴は、採取した試料をすぐさま船上で計測・分析する研究室を持っていることである。「ちきゅう」には4階建ての研究室が装備されている。掘削した試料は、温度、圧力の変化や酸素に触れることによって、生物（なまもの）のように掘削後すぐに変化していく。そのためなるべく素早く、必要な計測や分析がで

きるように研究室が設計されている。コアは約10mごとに掘削され、船上に引き揚げられる。それを1.5mごとに分割し、まず非破壊計測を行う。「ちきゅう」船上にはX線CTスキャナやマルチセンサーコアロガー（複数の物性計測センサーが並べられた台の上をコアが移動し、連続計測が行われるシステム）などが配備されている。非破壊計測によって、どこに重要な地質構造や地層が存在するのかを見極め、その後コアを半裁（縦割り）するまでに、さらに細かなサンプリングや計測などのポイントを決めるのである。非破壊検査と同時に重要なのが、微生物の採取である。なるべく地上の微生物との汚染がないようにして、これも掘削後すぐさまサンプリングを行い、そのまま凍結させてしまうものや、培養や染色して観察する物などに分けて作業が行われる。この他にも、磁気遮蔽（シールド）室を備え、船上でも地球磁場を約1/100にまで遮蔽し、高精度で試料の古地磁気測定が行われている。また各種高精度分析に欠かせない秤量のために、揺れる船内でも0.1g程度のものを0.5%以下の精度で計測ができる電子天秤システムを開発し、搭載している。このように「ちきゅう」は、設計段階から科学掘削を目的として建造された掘削船であり、世界でもユニークなファシリティとして誕生し、世界第一級の科学テーマを解明するために運用されている。

3. 「南海掘削」成果概要

掘削計画は紀伊半島沖の南海トラフ付加体に集中するように計画された（図2）。その理由は、南海トラフ沿いの地震履歴は、およそ1,000年以上にわたってその概要が分かっていることに加え、特に紀伊半島沖は東南海地震（1944年）と南海地震（1946年）の破壊開始点付近という特殊性が注目されたこと、そして反射法地震波探査によってプレート境界断層が比較的明瞭に可視化されたことも大きな動機となっている。全体計画としては、沈み込む前のフィリピン海プレート上での掘削から、南海トラフ付加体を横断するよう

にさまざまな地点で掘削を行い、前弧海盆である熊野海盆まで掘削範囲が広がっている。付加体とは、海洋プレートが沈み込む際に、海洋プレート上部の堆積物から玄武岩層程度までをはぎ取りながら陸側のプレートに貼り付けてできあがった地質構造を指している。つまり付加体が作られていく歴史は、巨大地震の歴史でもある。したがって、計画初期の掘削はこの付加体に働いている応力や地震発生領域に持ち込まれる堆積物（地震発生帯を構成する起源物質と考えられる）の組成を明らかにすることを目的として、比較的浅部掘削であるが、沈み込む前のプレート上面から海溝（南海トラフ軸）を超え、前弧海盆である熊野海盆までの横断掘削を行った。

まず掘削孔内での計測、つまり検層（logging）を行い、孔内壁の比抵抗イメージの解析から孔壁の破壊現象（borehole breakout）が起こっていることを明らかにした。この破壊現象は、掘削ビットによって円形に掘削した孔壁が亀裂を伴い楕円形に変形することを指し、その楕円の長軸方向に対して90度方向の水平圧縮応力が働いていると推定できる。この原理を使い、広域かつ深度方向にどのように水平圧縮応力軸の方向が変化するのかを計測できる。結果としては、南海掘削の地域では、現在のフィリピン海プレート沈み込み方向とほぼ平行に水平圧縮応力が働いていることが明らかになった（Tobin *et al.*, 2009）。また、付加体先端部（南海トラフ軸付近、つまり堆積物が付加を開始したばかりの場所）で発見された断層は、これまでそこは常識的には非地震帯（a-seismic zone）であって、地震を発生させるような高速滑りの様相を示す断層は存在しないと考えられていたが、実際、掘削してみると鋭利な断層面が発見され、高速滑りを起こしていたと考えられた。その後、断層面を含む周囲の堆積物の炭質物を用いた熱履歴（ビトリナイト反射率）を調べてみると、断層運動による高温の摩擦発熱の証拠を突き止め、やはりこの断層は高速滑りをしていたことが明らかとなった（Sakaguchi *et al.*, 2011）。海底まで突き抜けるこの断層は、おそらく地震時に海底地形の急激な変化を伴い津波を発

生させたと考えるのが自然であるが、まだその証拠は明らかではない。この南海掘削での成果を議論、論文化している最中に2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地震」と呼ぶ）が発生した。

東北地震発生直後から当該海域での調査も開始し、南海掘削の成果と合わせて、巨大津波発生のメカニズムについて議論が始まった。東北地震の震源は、地下約24km付近で発生したものが、プレート境界断層沿いに滑りを伝搬し、海溝まで

到達したと考えられている。地震前後の海底地形変化 (Fujiwara *et al.*, 2011) や、地殻構造の変化 (Kodaira *et al.*, 2012) から、日本海溝軸付近では、上盤側のプレートが水平方向（東方向）に約50m移動、そして同時に垂直方向に約7~10m隆起したことが示唆された。このような地震時の地殻変動は、これまでの経験では理解しがたいほど大きな変化であり、当初は多くの研究者がその結果に疑問を持った。地震時の短い時間に、これだけの変位をしたとすれば、断層面（プレート境界断層）では摩擦熱が発生し、それを計測できれば地震断層の性質を解明できるという仮説に基づき、国際研究チームによる緊急の掘削計画が立案され、2012年4月に掘削を実施することになった (JFAST: <http://www.jamstec.go.jp/chikyu/j/exp343/index.html>)。

掘削地点は、水深約7kmの大水深域であり、そこからプレート境界断層まで到達するには海底下約1kmの掘削を求められた。総延長8kmにもおよぶ掘削パイプの展開は「ちきゅう」としても初めてのことであり、さまざまな海気象条件でのパイプ強度の数値シミュレーションを行い、強



図1 地球深部探査船「ちきゅう」。2005年就航、2007年より南海掘削を開始した

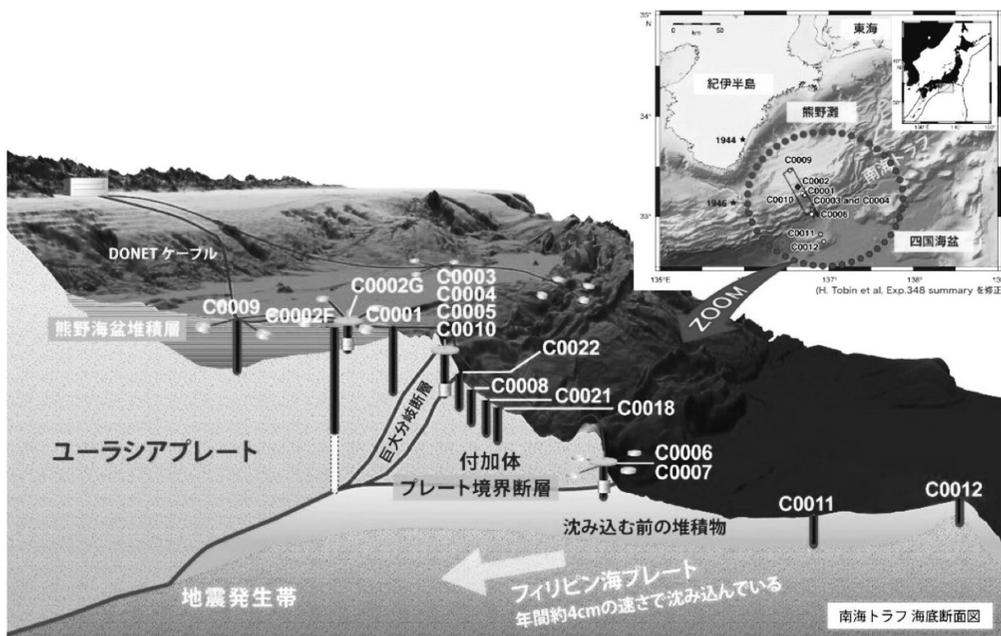


図2 紀伊半島沖南海トラフ断面図に掘削地点を模式的に示した

靱な掘削パイプ類の緊急調達を行った。結果としてプレート境界断層の掘削に成功し、コア試料の採取、検層データの取得に成功した。その結果、プレート境界断層は厚さ5m以下の薄い層であり、岩石としては粘土であることが判明した。断層を構成する粘土のうち約7~8割はスメクタイトと呼ばれる粘土鉱物から構成されていることも明らかになった。このスメクタイトは水を多く含む粘土鉱物で、この試料を用いた摩擦実験によると、粘土鉱物内の水が摩擦熱によって膨張し、透水率の低い粘土層内では異常間隙水圧となって、摩擦係数を低下させることに貢献することが明らかになった (Ujiie *et al.*, 2013)。結果として、プレート境界断層は動きながら自身の発生する摩擦熱によって断層面の摩擦係数を低下させ (thermal pressurization)、滑りやすくなり、50mにも及ぶ滑りに及んだと推定された。同時に海底の7mの隆起は、その上の7kmの水塊を持ち上げることになり、そのポテンシャルエネルギーによって津波が発生し、巨大津波となって陸域を襲ったのである。南海トラフでも過去に発生した海溝軸付近の断層活動によって発生した津波は、東北の津波と同じメカニズムであったと推定される。過去に起こった事例が明らかになった南海トラフは、この結果も加味して、将来の予測 (数値シミュレーション) にも取り入れられ、南海トラフ沿いの最大規模の地震・津波予想は更新され、最悪のシナリオとしてはM9クラスの地震が想定されるに至っている (内閣府, 中央防災会議, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>)。この成果は、掘削データから新たな巨大地震・津波像を浮かび上がらせ、防災への提言に直結した好例であろう。

南海掘削では、掘削孔の一部に地殻変動観測を行う長期孔内観測システムを設置し、孔内で高精度のリアルタイム地殻変動観測が行われている。現在までに紀伊半島沖の3孔に設置しており、それらは海底ケーブル (地震・津波観測監視システム: DONET) に接続され、常時観測が行われている。2016年4月1日に三重県南東沖で発生した地震 (M6.1) は、この長期孔内観測システム

によって高精度観測がなされた。その結果、1944年の東南海地震以来、約70年ぶりにプレート境界で中規模の地震が発生したと解析され、またスロー地震やその後に発生した遠地の地震に誘発された地震を多数観測することができた (Araki *et al.*, 2017)。今後の巨大地震発生に向けて、その発生に深く関係すると考えられているスロー地震 (Obara and Kato, 2016) の観測に、長期孔内観測システムによる高精度リアルタイム地殻変動モニタリングが大きな力を発揮すると期待される。今後は紀伊半島沖だけでなく、四国~九州沖にも長期孔内観測システムを展開し、南海トラフ全域にリアルタイム観測網を展開することが重要であろう。

2018年10月から半年間をかけて、南海掘削で最も深い掘削孔となったC0002サイトでの掘削を行った。このサイトでは、これまでに3航海を費やして、水深約2,000mのところから約3,000m掘削を完了していた (図3, 左側模式図)。さらにそこから約2,200m掘削し、巨大地震発生帯の最も浅い部分に到達する計画であった。これまでの掘削で地層がほぼ垂直に傾動しており、しかも非常に崩れやすい地層であることを経験していたので、泥水の比重や添加物の見直し、地層状況のリアルタイムモニタリングの導入、そして孔内を保護する拡張型ケーシングパイプの導入など、新技術を導入して対応した。しかし、複雑な地質構造と掘削孔周辺の急激な地質状況変化などに遭遇し、現在の掘削技術では計画どおりの掘削は叶わず、プレート境界断層に達することを断念した。結局海底下3,262.5mまで掘削したが (科学掘削の世界最深記録)、当初目的のプレート境界断層までは到達できなかった (図3, 右側模式図)。掘削試料 (カッティングス) を使った間隙率測定の結果では、掘削深度が深くなるにつれて指数関数的に間隙率が低下することから、深度とともに硬い岩石に変化していく、つまりプレート運動を歪みエネルギーとして蓄積できる岩石ができあがっていく過程のスナップショットが観察されたと考えている。

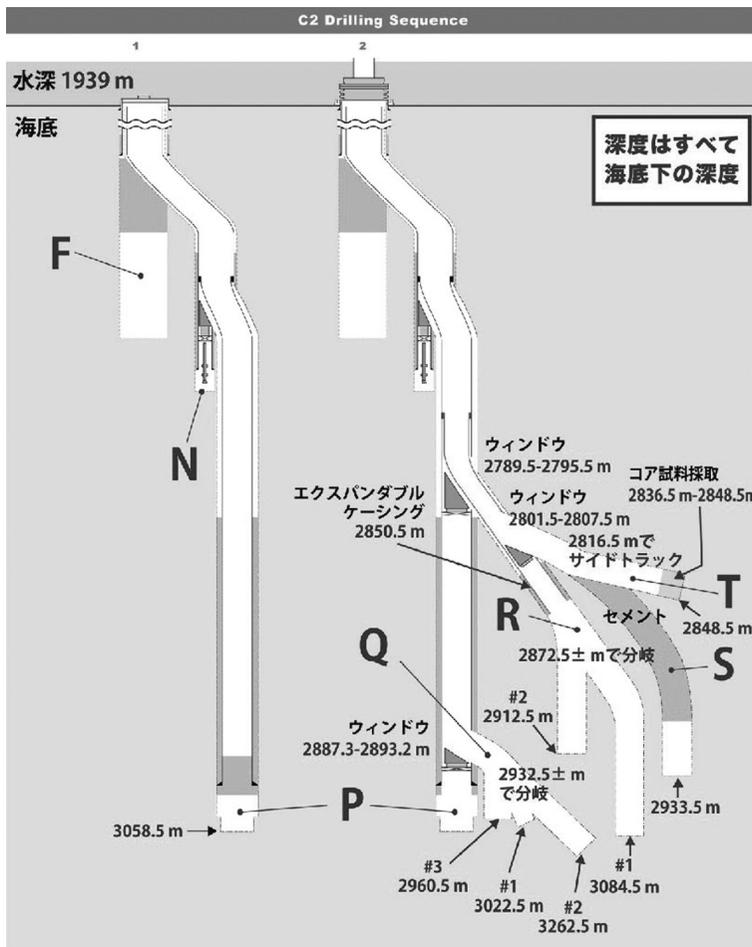


図 3 南海掘削のうち、いちばん深部まで掘削した地点 (C0002 サイト) の模式図。左図は、2018 年以前に掘削した模式図。右図は、Expedition 358 によって掘削した模式図。最深部は海底下 3,262.5 m まで達したが、今回の掘削では巨大地震発生帯までは到達できなかった

4. 今後の計画

プレートの沈み込み帯に刻まれた巨大地震の歴史を深海掘削によって掘り起こし、過去の地震・津波の描像が浮かび上がってきた。これまで想像しなかった海溝軸付近でのダイナミックな変動や、高精度孔内観測により、陸域から遠い沖合いでのスロー地震を捉えることもできるようになった。これらの成果から、現在も地下で確実に準備されている地震の実態を解明するためには、地震を発生させる現場そのものの理解、そして連続的

に地殻変動を高精度にモニタリングすることがきわめて重要である。そのためには深海掘削が唯一の手段であり、これからも「ちきゅう」を用いた科学掘削によって、地震・津波の発生メカニズム解明に深く切り込み、将来の地震・津波発生の予測に向けたモニタリングによるデータの蓄積、解析を続けていくことが重要であると考えている。掘削試料や計測データ、そして海底下の高精度リアルタイムモニタリングによって、新たな次元での地震・津波研究の地平が広がると確信している。また地震発生帯物質の採取はまだ成功していないが、ひき続き技術的な検討に加え、より地下

構造を明確に把握する技術革新も行い、再度挑戦していきたい。地震国に住む国民の安全で安心な社会の構築に、これからも深海科学掘削は大きな成果をもたらすであろう。

参考文献

- Araki, E., Saffer, D.M., Kopf, A.J., Wallace, L.M., Kimura, T., Machida, Y., Ide, S., Davis, E. and IODP Expedition 365 Shipboard Scientists. 2017. Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust. *Science*, **365**, 1157-1160.
- Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. 2011. The 2011 Tohoku earthquake: displacement reaching the trench axis. *Science*, **334**, 1240.
- Kodaira, S., No, T., Nakamura, Y., Fujiwara, T., Kaiho, Y., Miura, S., Takahashi, N., Kaneda, Y. and Taira, A. 2012. Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nat. Geosci.*, **5**, 646-650.
- Obara, K. and Kato, A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, **353**, 253-257.
- Sakaguchi, A., Chester, F., Curewitz, D., Fabbri, O., Goldsby, D., Kimura, G., Li, C.F., Masaki, Y., Sreaton, E.J., Tsutsumi, A., Ujiie, K. and Yamaguchi, A. 2011. Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores. *Geology*, **39**, 395-399.
- Tobin, H., Kinoshita, M., Ashi, J., Lallemand, S., Kimura, G., Sreaton, E., Moe Kyaw, T., Masago, H., Curewitz, D. and IODP Expeditions 314/315/316 Science Party. 2009. NanTroSEIZE Stage 1 Expeditions 314, 315, and 316; first drilling program of the Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment. *Sci. Dril.*, **8**, 4-17.
- Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J., Kameda, J., Brodsky, E., Chester, F., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists. 2013. Low coseismic shear stress on the Tohoku megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, **342**, 1211-1214.

倉本真一

[くらもと しんいち]

現職 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 理事

略歴 平成3年3月 東京大学大学院理学系研究科地質学専攻修了（理学博士）、平成5年4月 通商産業省工業技術院地質調査所、平成14年10月 海洋科学技術センター地球深部探査センター、平成28年4月地球深部探査センター長、平成31年4月研究プラットフォーム運用開発部門長、令和3年4月理事、現在に至る

専門分野 海洋地質学、掘削科学



津波ハザードステーション (J-THIS) ^{ジェイディス} の開発

土肥裕史・中村洋光・藤原広行

1. はじめに

わが国は古来より津波による被害を繰り返し受けてきた。2011年3月11日に日本海溝沿いで発生したMw 9.0の東北地方太平洋沖地震による巨大な津波（以下、2011年東北津波と呼ぶ）は、東北地方太平洋岸の広範囲に甚大な被害を及ぼした。発災から10年が経過した現在もなお、現地にもその爪痕を残している。こうした状況を踏まえ、近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震など、巨大地震・津波を対象に、事前の備え・対策に資する、多様な津波ハザード情報を提供するシステムを構築することは喫緊の課題である。

2011年東北津波発災の翌年、防災科学技術研究所（以下、防災科研と呼ぶ）は多様な地震津波に対する事前の備え・対策に資すること、および国の地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下、地震本部と呼ぶ）津波評価部会が進めることとなった確率論的な津波評価に資することを目的として、津波ハザード評価研究プロジェクトを開始した。本研究プロジェクトでは、過去に発生したことが知られていない巨大地震・津波を含む、多様な地震・津波を科学的知見に基づき合理的にモデル化し、将来の津波ハザード評価に取り込むことを目標の1つとした。具体的には、将来の予測や評価と不可分な不確実性や予測誤差を合理的に整理、導入し、的確な評価を行うため、わが国で従来多く用いられてきた決定論的な津波評価ではなく、確率論的な津波評価を行うこととした。

本プロジェクトの一環として、防災科研は確率論的な津波ハザードの計算を実施し、地震本部津波評価部会等での検討資料を提供することに加えて、専門家による「津波ハザード情報の利活用に関する委員会」（2013～2016年、委員長：東京大

学地震研究所 佐竹健治教授）および「津波ハザード・リスク情報の高度利用に関する委員会」（2017～2018年、委員長：東京大学地震研究所 佐竹健治教授；2019年～現在、岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂教授）を立ち上げ、確率論的な津波評価によって得られる津波ハザード情報の利活用に向けた議論を行っている。「津波ハザード情報の利活用に関する委員会」が取りまとめた提言において、津波リスク評価等を実施する専門家に対する多様な津波ハザード情報を利活用できる公開システムの必要性が指摘されている¹⁾。この提言を受けて、防災科研は多様な津波ハザード情報を利活用できるシステム「津波ハザードステーション (J-THIS) ^{ジェイディス}」（以下、J-THISと呼ぶ²⁾の開発を開始した。「津波ハザード・リスク情報の高度利用に関する委員会」では、利用者それぞれの目的に応じて効果的に利活用できるシステムであることを目指し、システムの高度利用に向けた具体的な仕様や要望等の検討を続けている。こうした議論を踏まえ、防災科研は2020年2月にJ-THISの運用を開始し、現在も改良を進めている。

本稿では、J-THISの概要、J-THISが提供する確率論的な津波ハザード情報についての評価手法、およびJ-THISの特徴について説明する。

2. J-THISの概要

2021年1月現在、J-THIS²⁾では「南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的な津波評価」（地震調査委員会、2020³⁾）について、より詳細な津波ハザード情報を公開している。

具体的には、南海トラフ沿いの大地震によって発生する津波を対象に、

1. 南海トラフ海域に面する海岸（50mメッシュ）に設定した地点（合計357,437点；以下、

ハザード評価点と呼ぶ)で、今後30年以内に一定高さ以上の津波が来襲する確率(南海トラフ沿いで大地震が起きたと限定した場合の超過確率;以下、たんに超過確率と呼ぶ)の分布、

2. ハザード評価点における津波高さと超過確率の関係(以下、ハザードカーブと呼ぶ)、

3. 津波伝播遡上計算に用いた波源断層モデルの断層パラメータおよびすべり量分布、

4. 波源断層モデルごとに計算された最大の津波高さ(以下、最大水位上昇量と呼ぶ)の分布、

5. 津波伝播遡上計算に用いた海底地形図、といった津波ハザード情報を提供している。

3. 確率論的津波ハザード評価手法

J-THIS²⁾が提供する、地震調査委員会(2020)³⁾の確率論的津波評価結果の手法について概説する。地震調査委員会(2020)³⁾は、①地震の発生可能性の評価、②波源断層モデルの設定、③海底・陸域地形のモデル化、④津波高さの評価、⑤ハザードカーブの作成、の手順で確率論的津波評価を行っている。詳細については、地震調査委員会(2020)³⁾の考え方とその評価結果を詳述した藤原ほか(2020)⁴⁾を参照されたい。

3.1 地震の発生可能性の評価

地震調査委員会(2020)³⁾は、南海トラフ沿いの大地震の発生がBPT(Brownian Passage Time)分布に基づく更新過程に従うと仮定したうえで、「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)」(地震調査委員会, 2013)⁵⁾の考え方に基づき、南海トラフ大地震の平均発生間隔を88.2年、ばらつきを0.22で設定し、評価開始時点2020年1月1日から30年間に次の南海トラフの大地震が発生する確率(30年発生確率)として算出される74.3%を用いている。

3.2 波源断層モデルの設定

地震調査委員会(2020)³⁾は、南海トラフ沿いで発生する地震の多様性を表現するため、さまざまな震源域の組合せや、不均質なすべり量分布が津波に与える影響を考慮し、合計2,720種類の波

源断層モデル群を設定している。具体的には、地震調査委員会(2013)⁵⁾が設定した、南海トラフ沿いで発生するプレート間地震の地震発生領域区

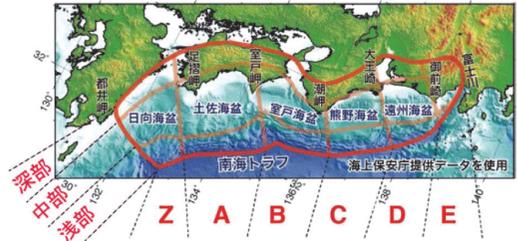


図1 南海トラフ沿いで発生するプレート間地震の地震発生領域区分。地震調査委員会(2013)⁵⁾に加筆

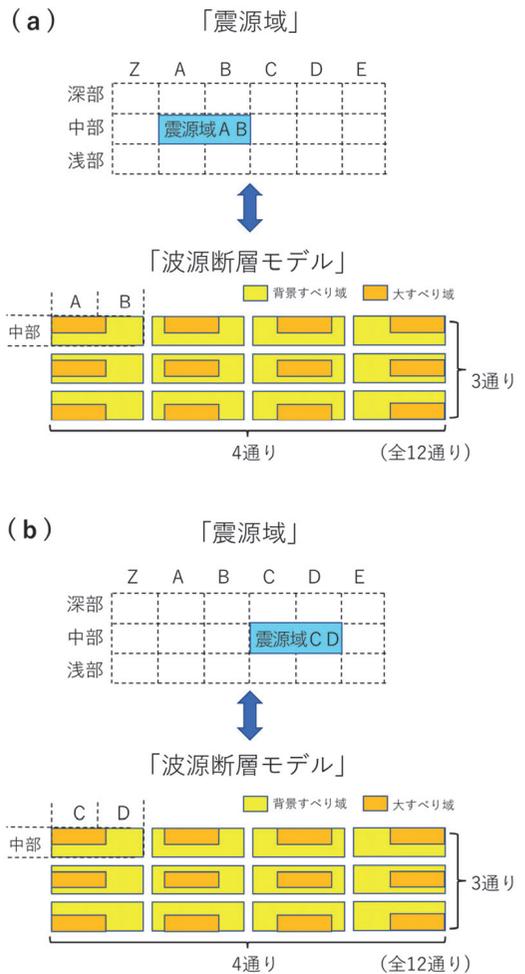


図2 震源域と波源断層モデルの対応関係。上段の(a)の震源域ABに、12とおりの波源断層モデルが対応し、下段の(b)の震源域CDにも、12とおりの波源断層モデルが対応している

分（図1）の組合せによって震源域を表現しており、設定した震源域に対して、大すべり域の空間分布の多様性を考慮した波源断層モデルを設定している（図2）。

J-THISでは、2,720種類の波源断層モデルの詳細（断層パラメータおよびすべり量分布）を閲覧することができる（4.2.1項参照）。

3.3 海底・陸域地形のモデル化

地震調査委員会（2020）³⁾は、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）」⁶⁾および「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会」⁷⁾が作成した海底・陸域地形のメッシュデータを使用している。メッシュのサイズは沖合から順に1,350, 450, 150, 50mの4種類とし、ネステイングを用いて津波伝播遡上計算を行っている。

J-THISでは、メッシュサイズごとに海底地形図を閲覧することができる（4.3節参照）。

3.4 津波高さの評価

地震調査委員会（2020）³⁾は、「波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）」（地震調査委員会、2017）⁸⁾に基づき津波伝播遡上計算を行っている。確率論的な津波評価では、津波伝播遡上計算によって得られる最大水位上昇量を、不確定性を含む確率変数として扱い、津波高さの真値がその周りにある確率密度分布で存在していると考ええる。

J-THISでは、2,720種類の波源断層モデルごとに計算された、各ハザード評価点における最大水位上昇量を閲覧することができる（4.2.2項参照）。

3.5 ハザードカーブの作成

地震調査委員会（2020）³⁾は、現在の南海トラフの地震サイクルにおいて、176種類の震源域の組合せ（以下、震源域パターンと呼ぶ）の中のいずれか1つのみが出現し、残りの175種類の震源域パターンは出現しないと考えている。同様に、348,345種類の波源断層モデルの組合せ（以下、地震パターンと呼ぶ）の中のいずれか1つのみが出現し、残りの348,344種類の地震パターンは出現しないと考えている。すなわち、震源域パターンそれぞれは互いに排反の関係にあり、地震パターンそれぞれも互いに排反の関係にあるといえる（図3、表1）。

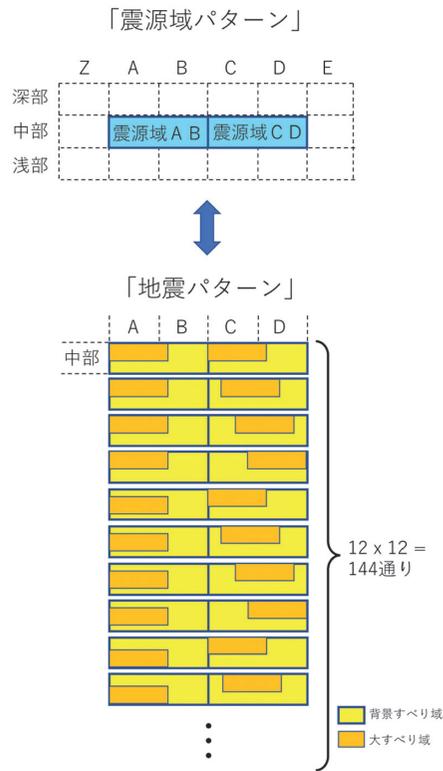


図3 震源域パターンと地震パターンの対応関係。震源域 ABを持つ波源断層モデルが12とあり、震源域 CDを持つ波源断層モデルも12とありの場合、震源域 ABと震源域 CDから構成される震源域パターンに対応する地震パターンは12×12=144とあり存在する。

ハザードカーブ、すなわち、ハザード評価点ごとに、評価開始時点 t （直近の大地震からの評価時点までの経過時間）から Δt 年間に、南海トラフの大地震によって発生する津波の最大水位上昇量 H がある閾値 h を超える確率（超過確率） $P(H>h;\Delta t)$ は以下のように表現される。

$$P(H>h;\Delta t) = P(t, \Delta t) \sum_k W(Q_k) P(H>h | Q_k) \quad (1)$$

ここで、 $P(t, \Delta t)$ は評価開始時点 t から Δt 年間に次の南海トラフの大地震が発生する確率であり、 $t=2020$ 年1月1日、 $\Delta t=30$ 年、 $P(t, \Delta t)=74.3\%$ を与える。また、 $W(Q_k)$ は k 番目の地震パターン Q_k の重み、 $P(H>h | Q_k)$ は次の南海トラフの大地震が k 番目の地震パターン Q_k として発生する場合に、海岸のある地点において、最大水位上昇量 H がある閾値 h を超える条件付きの超

表 1 地震調査委員会 (2020)³⁾ が設定した震源域、波源断層モデル、震源域パターン、地震パターンのまとめ

種別	数量	備考
震源域	79	断層の位置・大きさ・形状のみが指定され、すべり不均質が未指定のもの
波源断層モデル	2,720	震源域にすべり不均質が指定されたもの
震源域パターン	176	1つ以上の震源域の組合せ
地震パターン	348,345	1つ以上の波源断層モデルの組合せ

過確率である。

地震調査委員会 (2020)³⁾ は、 k 番目の地震パターン Q_k を構成する、 j_{\max} 個の波源断層モデル $E_{jk} (j=1, \dots, j_{\max})$ によってあるハザード評価点に対して計算された最大水位上昇量 H はそれぞれ確率的に独立であると考え、 $P(H > h | Q_k)$ を以下のように表現している。

$$P(H > h | Q_k) = 1 - \prod_{j=1}^{j_{\max}} \{1 - P(H > h | E_{jk})\} \quad (2)$$

ここで、 $P(H > h | E_{jk})$ は波源断層モデル E_{jk} で近似される地震が発生した場合に、当該ハザード評価点において、最大水位上昇量 H がある閾値 h を超える条件付きの超過確率である。

地震調査委員会 (2020)³⁾ は、すべてのハザード評価点で計算したハザードカーブをもとに、最大水位上昇量を 3, 5, 10m に固定し、今後 30 年以内に 3, 5, 10m 以上の津波が海岸に襲する超過確率 (30 年超過確率) を公表している。

J-THIS では、3, 5, 10m それぞれに対する 30 年超過確率分布と、すべてのハザード評価点 (357,437 地点) におけるハザードカーブを閲覧することができる (4.1 節参照)。

4. J-THIS の特徴

本章では、津波ハザード情報を 3 つの観点 (確率論的津波ハザード評価結果、波源断層モデル・津波伝播遡上計算結果、海底地形図) からとらえ、J-THIS²⁾ の特徴を解説する。

4.1 確率論的津波ハザード評価結果の表示

4.1.1 30 年超過確率分布

南海トラフ沿いで発生する大地震によって、今後 30 年以内に 3m 以上、5m 以上、10m 以上の津波が来襲する確率 (30 年超過確率) を選択し、地理院地図に重ねて表示することができる (図 4 (a))。また、地図を拡大すると、ハザード評価点ごとの南海トラフ地震に対する超過確率を表示することができる (図 4 (b))。この地図を見ることで、南海トラフに面した太平洋沿岸地域のどこの海岸が他に比べて相対的に津波に襲われる可能性が高いか低いかを知ることができる。

4.1.2 ハザードカーブ

30 年超過確率分布図 (図 4 (b)) 上で地点を選択すると、当該地点におけるハザードカーブを表示することができる (図 4 (c))。ハザードカーブにマウスカーソルを合わせると、最大水位上昇量に対応した、30 年超過確率の値を表示することができる。

4.2 波源断層モデル・津波伝播遡上計算結果の表示

4.2.1 波源断層モデルの断層パラメータおよびすべり量分布

J-THIS では、震源域パターンを選択したうえで、その震源域パターンを構成する波源断層モデルを選択する (図 5 (a)) (震源域パターンや波源断層モデルについては、図 3 および表 1 参照)。

波源断層モデルを選択すると、断層パラメータを表示するとともに、すべり量分布を地理院地図に重ねて表示することができる (図 5 (b), (c))。

4.2.2 津波伝播遡上計算結果

選択した波源断層モデルについて、津波伝播遡上計算によって得られる、海岸での最大水位上昇量を地理院地図に重ねて表示することができる (図 5 (d))。また、地図を拡大すると、ハザード評価点ごとに最大水位上昇量を表示することができる (図 5 (e))。

なお、前述の確率論的津波ハザード評価結果の表示 (4.1 節) において、30 年超過確率分布図 (図 4 (b)) 上で地点を選択すると、津波伝播遡上計算結果のうち、当該地点における最大水位上昇量

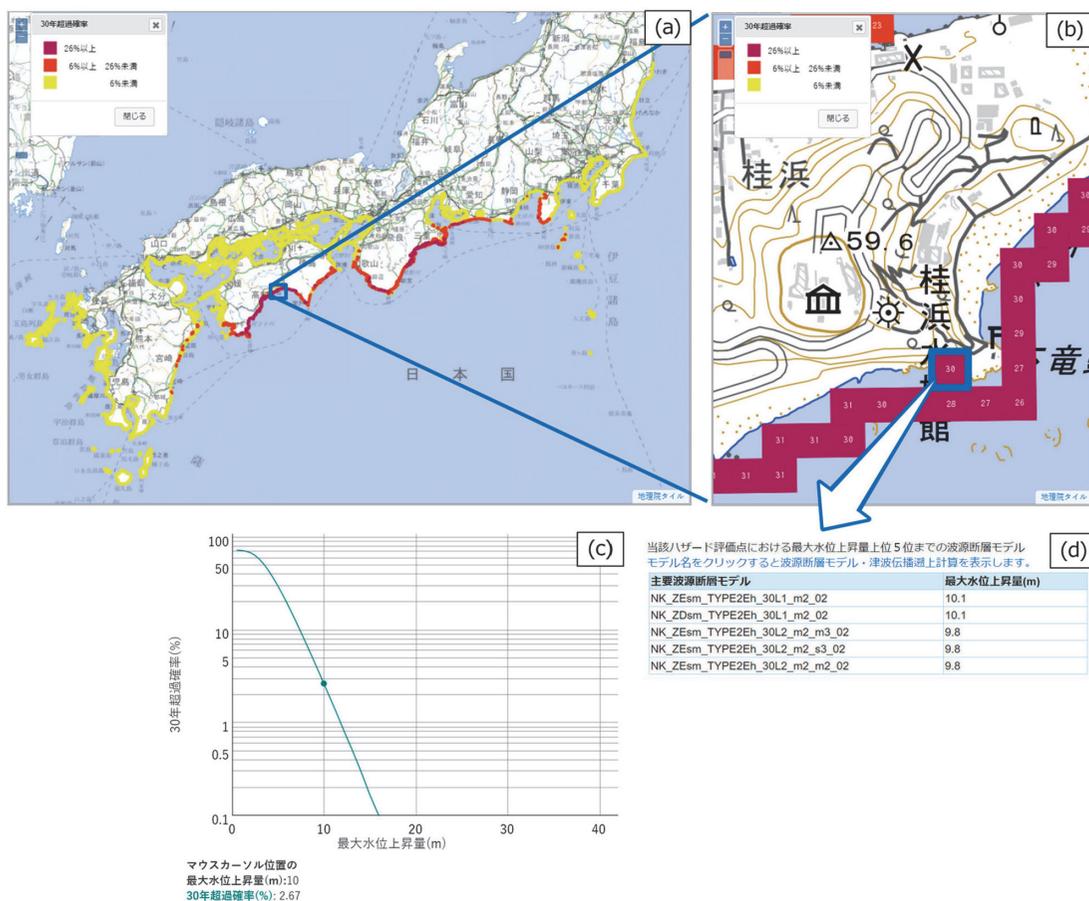


図 4 J-THISで閲覧できる確率論的津波ハザード評価結果。(a) 今後30年以内に3m以上、5m以上、および10m以上の津波が来襲する確率を選択し、地理院地図に重ねて表示できる(図では5m以上を選択)。(b) 地図を拡大し、ハザード評価点ごとに表示できる。(c) (b)で地点を選択すると、当該地点におけるハザードカーブを表示できる。(d) 津波伝播週上計算で使用した2,720種類の波源断層モデル群のうち、当該地点における最大水位上昇量上位5つを表示できる。モデル名をクリックすると、該当する波源断層モデルの断層パラメータとすべり量分布(図5(b),(c)参照)および最大水位上昇量分布(図5(d),(e)参照)を表示できる

上位5つを表示することができる(図4(d))。波源断層モデル名をクリックすると、当該モデルの断層パラメータとすべり量分布および最大水位上昇量分布を表示することができる。

4.3 海底地形図の表示

津波伝播週上計算に使用した海底地形図(1,350, 450, 150, 50mの4種類)を地理院地図に重ねて表示することができる(図6(a),(b))。

また、海底地形図を南海トラフ地震に対する30年超過確率分布図や最大水位上昇量分布図に重ねて表示することも可能であり(図6(c))、最大水位上昇量と海岸付近における海底地形の特徴

を比較することができる。

5. おわりに

利用者それぞれの目的ごとに、必要とされる津波ハザード情報は多岐にわたる。提供する津波ハザード情報がより広く効果的に津波防災対策に活用されるためには、その意義・有効性ととも、津波ハザード評価における仮定や限界をわかりやすく利用者に示すとともに、利用者のニーズや要望を参考とした、さらなるシステムの改良が必要である。

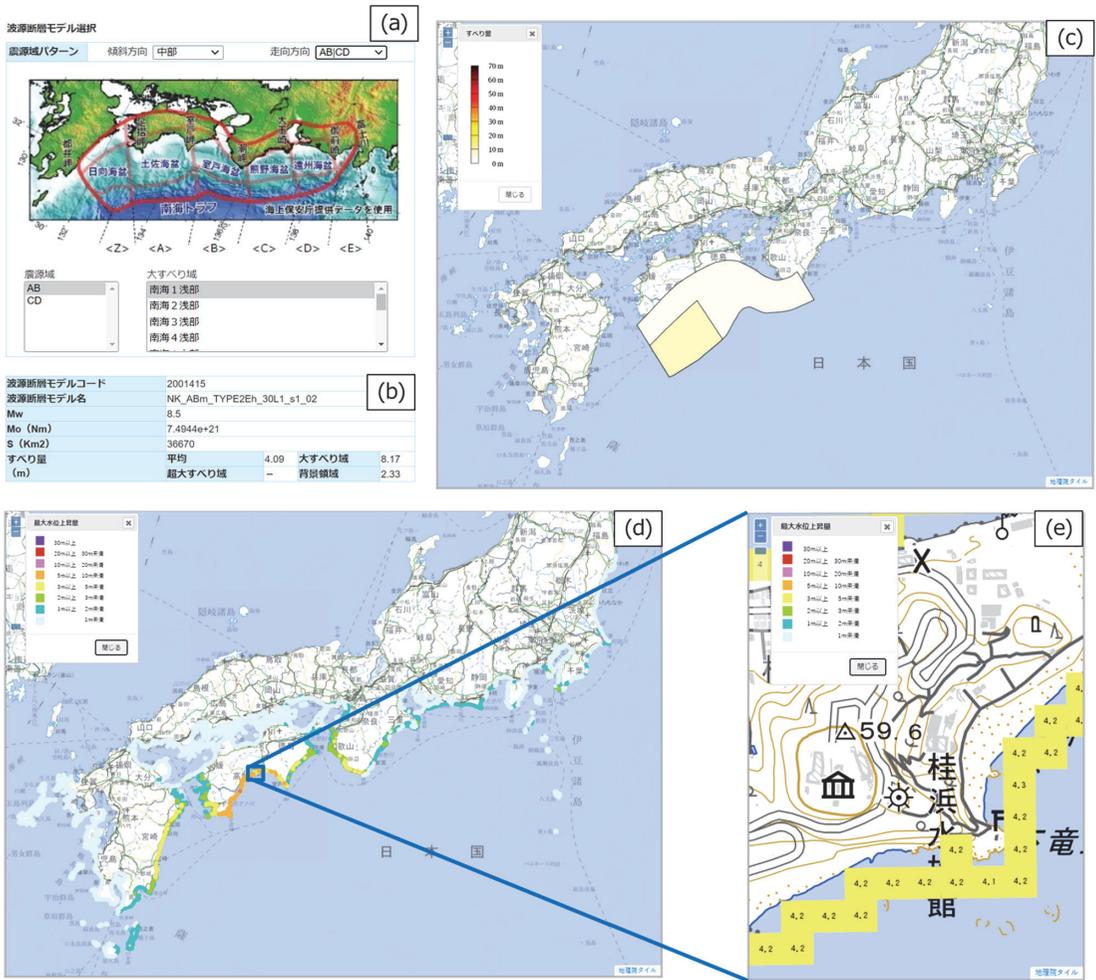


図 5 J-THIS で閲覧できる波源断層モデル・津波伝播遡上計算結果. (a) 震源域パターンを選択したうえで、その震源域パターンを構成する波源断層モデルを選択する. (b) 選択した波源断層モデルの断層パラメータ. (c) 選択した波源断層モデルのすべり量分布を地理院地図に重ねて表示できる. (d) 選択した波源断層モデルから得られる最大水位上昇量を地理院地図に重ねて表示できる. (e) 地図を拡大し、ハザード評価点ごとに表示できる

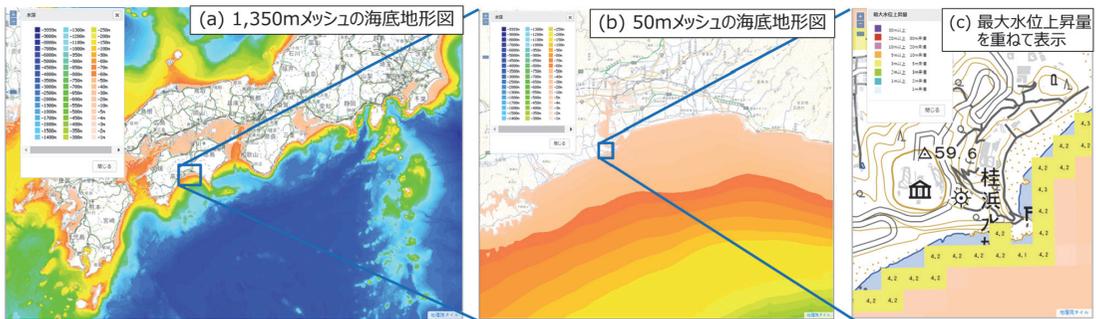


図 6 J-THIS で閲覧できる海底地形図. (a) 1,350mメッシュの海底地形図. (b) 50mメッシュの海底地形図. (c) 海底地形図 (50mメッシュ) を最大水位上昇量分布図 (図 5 (c)) に重ねて表示できる

J-THISの利便性向上を目的として、利用者が独自に構築したシステムにJ-THISが提供する津波ハザード情報を直接的に取得できる仕組み、すなわちWeb APIを公開する予定である。

津波防災に資するシステムとなることを目指して、利用者のニーズや要望を参考に、今後もJ-THISの改良を進める。

謝辞

J-THISは、防災科研運営費交付金プロジェクト「ハザード・リスク評価に関する研究」の一環として、地震本部津波評価部会等での審議を踏まえ開発が行われた。J-THISの開発において、「津波ハザード情報の利活用に関する委員会」(2013～2016年、委員長：東京大学地震研究所 佐竹健治教授)および「津波ハザード・リスク情報の高度利用に関する委員会」(2017～2018年、委員長：東京大学地震研究所 佐竹健治教授；2019年～現在、岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂教授)から貴重なご意見をいただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 津波ハザード情報の利活用に関する委員会. 2016. 津波ハザード情報の利活用報告書. 防災科学技術研究所研究資料, 406. doi/10.24732/nied.00002020
- 2) 防災科学技術研究所. 2020. J-THIS津波ハザードステーション. doi.org/10.17598/nied.0016
- 3) 地震調査委員会. 2020. 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価. https://www.jishin.go.jp/evaluation/tsunami_evaluation/#nankai_t (2020年12月26日閲覧)
- 4) 藤原広行ほか. 2020. 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 第一部 付録編. 防災科学技術研究所研究資料, 439. doi/10.24732/nied.00002258
- 5) 地震調査委員会. 2013. 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について. https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm (2020年12月26日閲覧)

- 6) 内閣府. 2021. 南海トラフの巨大地震モデル検討会. <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/> (2021年1月16日閲覧)
- 7) 内閣府. 2021. 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会. http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/model/index.html (2021年1月16日閲覧)
- 8) 地震調査委員会. 2017. 波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシピ). https://www.jishin.go.jp/evaluation/tsunami_evaluation/tsunami_recipe/ (2021年1月16日閲覧)

土肥裕史

[どひ ゆうじ]

現職 国立研究開発法人防災科学技術研究所特別研究員, 博士(工学)

略歴 2017年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 防災科学技術研究所入所. 津波ハザード・リスク評価研究に従事

研究分野 津波ハザード・リスク評価



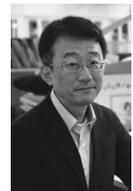
中村洋光

[なかむら ひろみつ]

現職 国立研究開発法人防災科学技術研究所副部門長, 博士(理学)

略歴 2001年東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程単位取得退学. 財団法人鉄道総合技術研究所研究員等を経て, 2019年より現職

研究分野 リアルタイム地震防災



藤原広行

[ふじわら ひろゆき]

現職 国立研究開発法人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(現: 防災科学技術研究所)入所. 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

研究分野 応用地震学



コロンビアにおける地震・津波・火山災害の 軽減に向けた日本の貢献

熊谷博之

1. はじめに

南米大陸の北西に位置するコロンビアは、南米ではブラジルに次ぐ約5,000万人の人口を有しており、コーヒーや石油・石炭の輸出などを通して安定的に経済成長が進んできた。アンデス山脈にある首都のボゴタは、800万人が暮らしている大都市である(図1)。

ボゴタ周辺には活断層が多数分布しており、歴史的にマグニチュード(M)が7クラスの大きな内陸地震が発生している。コロンビアの太平洋側からは、ナスカプレートが南米プレートの下に沈み込んでいる(図1)。このコロンビア沈み込み帯では、歴史的に津波を伴う大地震が発生し、沿岸地域に被害を起こしてきた。またコロンビアの北側にはカリブ海プレートがあり、南米プレートの下に沈み込んでいると考えられている(図1)。歴史的にはこのカリブ海沈み込み帯での大地震の記録はないものの、カリブ海沿岸は都市化が進んでおり、大地震が発生した場合の被害が懸念されている。

コロンビアのアンデス山脈は3つに分岐しており、その中央にある山脈には活発な火山活動を起こしているネバドデルルス火山やガレラス火山などがある(図1)。1985年に起こったネバドデルルス火山の噴火では、山頂の氷河が融けて生じた泥流により2万人を超える死者がでた。このように、地震・津波・火山災害を受けてきたコロンビアにとってそれらの災害の軽減は国家的な課題である。

2015年から2020年にわたって地球規模課題対応国際技術協力プログラム(SATREPS)「コロ

ンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減技術に関する研究開発」が実施された。このSATREPSプロジェクトは、コロンビアと日本の大学や研究機関(表1)の研究者が地震・津波・火山災害の軽減技術に関する研究開発を行い、それらの技術をコロンビアにおいて自立的かつ発展的に運用することを目的とし、日本の研究者の派遣やコロンビアの研究者の招聘による共同研究により数多くの成果が得られた。主な成果として、(1)地震と火山の監視能力の向上、(2)地震発生過程の理解、(3)強震動および津波被害の予測、があげられる。本稿ではその概要について紹介するとともに、今後の日本とコロンビアの防災分野における協力の展望について述べる。

2. 地震と火山の監視能力の向上

コロンビアにおける地震と火山の監視はコロンビア地質調査所(SGC)が行っている。SGCは衛星通信を用いて地震波形データの伝送を行うテレメータを南米では最も早く導入するなど、地震および火山の監視を先端的に進めてきた。このプロジェクトでは、それらの観測機材を活用するとともに、地震の監視のために新たに広帯域強震計をコロンビア全土に設置した(図2)。大きな地震が発生した場合、これまで用いられてきた広帯域地震計では振り切れて地動の記録ができない場合があるが、広帯域強震計はゆっくりとした揺れまでを振り切れることなく記録が可能である。これらの地震計は、後で述べる地震監視システムに活用されている。さらにネバドデルルス火山およびガレラス火山には、噴火に伴う大気の振動を記録できる空振計などを導入した。

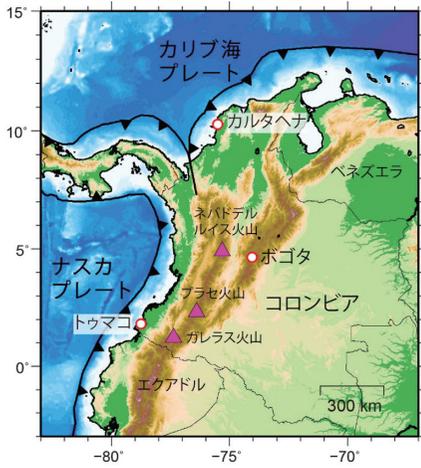


図 1 コロンビアおよびその周辺の地形とプレートの配置

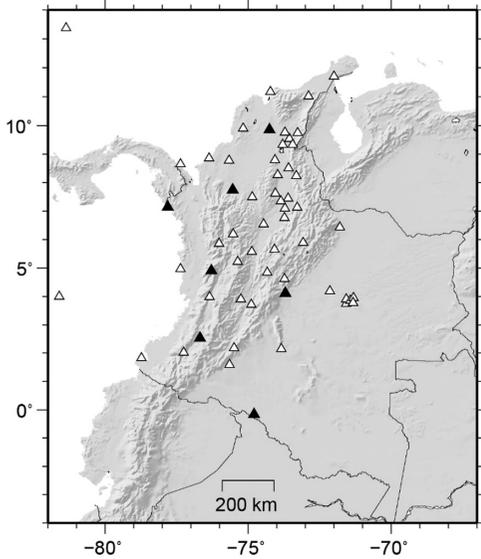


図 2 コロンビアにおける広帯域強震計（黒三角）と広帯域地震計（白三角）の配置

SGCでは、SeisComPと呼ばれる世界で標準的に使われている震源決定システムを運用している。このSeisComPによる震源情報（震源位置とマグニチュード）は、津波の監視を行っているコロンビア海洋機構（DIMAR）と防災情報を発出するコロンビア危機管理庁（UNGRD）およびボ

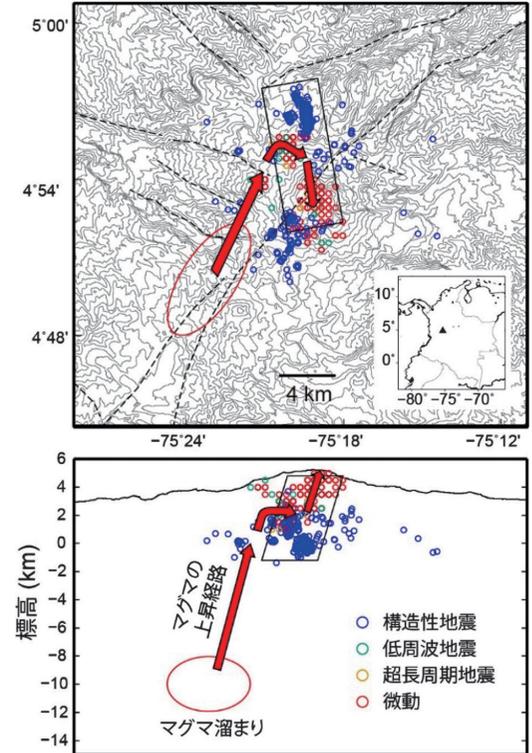


図 3 ネバドデルルイス火山におけるさまざまな地震と微動の震源分布と測地的に推定されたマグマ溜まりからのマグマの上昇経路（Kumagai *et al.*, 2019 を改変）

表 1 SATREPS プロジェクトの日本とコロンビアの参加機関とその主な役割

日本	コロンビア
名古屋大学（代表機関、地震・火山活動の監視と解析）	コロンビア地質調査所（代表機関、地震・火山活動の監視と解析）
防災科学技術研究所（強震動被害予測・情報伝達）	コロンビア危機管理庁（防災情報の発信）
東京工業大学（強震動被害予測・情報伝達）	ボゴタ危機管理庁（防災情報の発信）
東北大学（津波・強震動被害予測）	コロンビア海洋研究機構（津波監視）
東京大学（火山活動の監視）	ロスアンデス大学（強震動被害予測）
千葉大学（強震動被害予測）	コロンビア国立大学（津波被害予測）
広島大学（強震動被害予測）	
建築研究所（津波被害予測）	

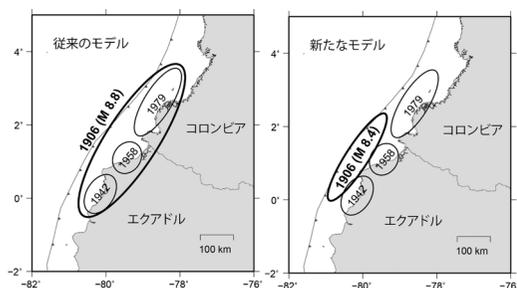


図4 エクアドル・コロンビア沈み込み帯における地震発生モデルの概念図。従来のモデル（左図）と Yoshimoto *et al.* (2017) に基づく新たなモデル（右図）

ゴタ危機管理庁 (IDIGER) と共有されている。DIMAR は、地震発生から3分程度で決まるSGCの震源情報に基づいて、津波到着時刻と波高を推定するシステムの導入をこのプロジェクトを通して行った。このシステムでは、コロンビア沈み込み帯で発生する可能性がある地震に対して、津波シミュレーションにより事前に津波到着時刻と波高の推定を行い、それをライブラリ化して用いている。さらにSGCには、地震のメカニズムと津波波高の推定を自動的に行うシステム (SWIFT-TSUNAMI) がプロジェクトを通して導入された。このシステムでは、観測された地震波形から推定された地震メカニズムを用いて断層すべりによる海底面の変形を計算し、それに基づいて津波波形シミュレーションを行うことで津波波高の推定を行う。よって、どのような地震に対しても津波波高の推定が可能であり、想定外ということがない。このシステムは、地震発生から10~15分で推定を行うことができ、広帯域地震計だけでなく広帯域強震計も用いているため、大きな地震が起こっても正確な推定が可能である。DIMARのシステムとSGCのSWIFT-TSUNAMIを組み合わせることにより、迅速かつ精度の高い津波推定がコロンビアにおいて可能となった。

火山監視に関しては、ネバデルルイス火山とガレラス火山に加えて、プラセ火山 (図1) を対象に、これらの火山で発生した地震の震源位置とマグニチュードを自動的に推定できるシステム (ASL) がこのプロジェクトにより導入された。

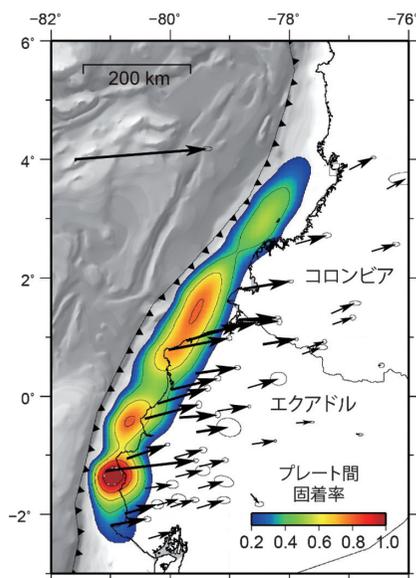


図5 GNSS観測値 (黒矢印) から推定されたエクアドル・コロンビア沈み込み帯でのナスカプレートと南米プレートの固着率の分布 (Sagiya and Mora-Páez, 2020 を改変)

火山で起こる地震は、マグマなどの流体が関与して発生するため、波形が複雑で走時の読み取りが難しいものが多く、SeisComPなどで用いられている走時に基づく震源決定手法が適用できない場合が多い。ASLは、高周波数の平均振幅を用いて震源決定を行っており、走時の読み取りができない複雑な波形に対しても適用することができる。このシステムの導入により、さまざまな地震や微動に対してリアルタイムでの自動の震源推定が可能となった。ASLにより推定されたマグマが関与した地震や微動の震源位置の分布から、ネバデルルイス火山におけるマグマの上昇経路に関する理解が深まった (図3, Kumagai *et al.*, 2019)。さらに空振計の導入により噴火活動を詳細に把握することが可能となった。噴火の発生と規模を把握することは火山防災において最も重要なことであるが、アンデス山脈にある火山の標高は4,000~5,000mと高いため、山頂は雲に覆われていることが多く、映像による噴火の把握は困難な場合が多い。空振計の記録により、どのような状況においても噴火の発生時刻と規模を推定することが可能となった。さらに衛星の赤外線画像を

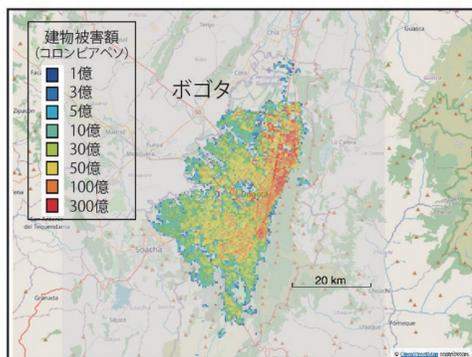
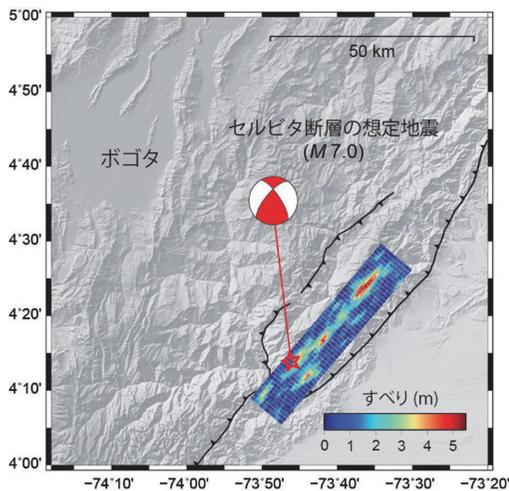


図 6 セルビタ断層による想定地震（上図）とそれによるボゴタでの建物被害の推定（下図）。この地震により、被害総額は約 33.6 兆コロンビアペソ（約 1 兆円）に達することが推定されている

用いた熱異常の自動検出システムも構築され、噴火の把握が多面的に行えるようになった (Castaño *et al.*, 2020)。

3. 地震発生過程の理解

1906年に発生したエクアドル・コロンビア地震は、エクアドル・コロンビア沈み込み帯における歴史上最大の地震である。その後も、この沈み込み帯では、繰り返しM7~8クラスの地震が発生した。従来の研究では、1942年、1958年、1979年に発生した3つの地震の震源領域が、1906年に一度に破壊されたことによりM8.8という巨大地震になったと解釈されていた(図4)。

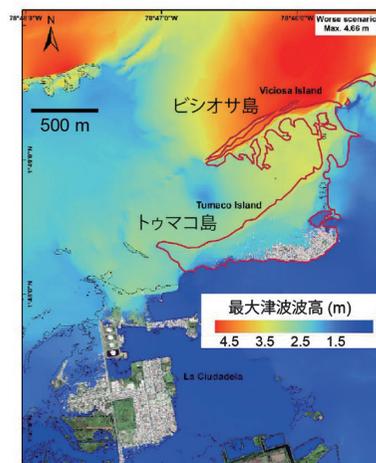
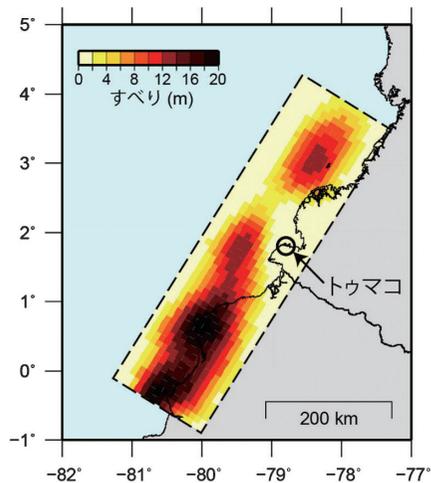


図 7 エクアドル・コロンビア沈み込み帯における想定地震（上図）とそれによるトゥマコにおける最大津波波高の分布（下図）。最大 4.5 m を超える津波によりビシオサ島とトゥマコ島の大部分が浸水することが推定されている (Escobar *et al.*, 2020 を改変)

しかしながら、1906年という近代的な地震観測が行われる前の地震であったため、マグニチュードの推定も含めて不確定な要素が多かった。このプロジェクトでは、当時測定が行われていたハワイと日本の潮位記録に、この地震の津波が記録されていることに着目し、その津波波形の解析からこの地震の震源過程を推定した。その結果、マグニチュードは8.4と従来よりも小さい値となり、断層すべりが起こった領域は上記の3つの歴史地震とは重ならない領域であったことが示された

(図4, Yoshimoto *et al.*, 2017). さらにこのすべりモデルに基づいて1906年の地震に伴う強震動の推定も行われ、観測された震度をおおむね説明できることがわかった (Pulido *et al.*, 2020). これらの結果は、従来の解釈とは大きく異なり、この沈み込み帯で発生した大地震は重なり合わないそれぞれの震源領域で断層すべりが起こったことを示している

SGCは地震・火山観測だけでなく、GNSS (GPS)を用いた地殻変動観測に関しても先進的に行ってきた。その長年蓄積されたGNSSデータにより、プレート間の固着度の推定がこのプロジェクトを通して行われた。ナスカプレートについては、エクアドル側の沈み込み帯で比較的高い固着が推定された一方で、コロンビア側では固着率は小さい値となった (図5, Sagiya and Mora-Páez, 2020). この領域では1979年にM8.1の地震が発生しており、トゥマコ (図1)などに津波被害をもたらした。これらの結果は、この沈み込み帯におけるエクアドル側とコロンビア側でのプレート固着の仕方が異なっているということを示している。一方、カリブ海プレートにおいては、カルタヘナ (図1)の下に固着率が大きい領域が推定された。この結果は、カリブ海プレートが南米プレートの下に沈み込んでいること、さらにこの領域で大きな地震が発生する可能性があることを示している。

繰り返し地震と呼ばれる、マグニチュードが小さく短期間で繰り返し発生する地震の解析が、これら2つのプレートの沈み込み帯で行われた。繰り返し地震は、小さなアスペリティと呼ばれる局所的に固着率が大きい領域が繰り返し破壊されることにより発生し、周辺の固着率が小さい領域のみで起こると考えられている。これら2つの沈み込み帯での繰り返し地震は、上記のGNSSデータから推定された固着率の小さい領域のみに存在すること、さらにコロンビア沈み込み帯の沖合にも存在することが示された (Bermúdez-Barrios and Kumagai, 2020). よって、繰り返し地震の解析結果は、GNSSによる固着率の推定結果を支持するとともに、コロンビア沈み込み帯では沖合まで固着率が小さい領域が広がっていることを示唆

している。

4. 強震動および津波被害の予測

ボゴタ周辺で地震が発生した場合に、ボゴタにおける強震動および建物被害の推定を行うシステムがこのプロジェクトを通して構築された。地震の揺れの大きさは、震源からの距離とともに小さくなるが、地表付近の地質に大きく影響され、柔らかい地盤があると増幅される。そのような増幅率の解析をSGCおよびIDIGERの強震計観測網で得られた地震波形データから行い、増幅率の推定式を導出した (Miura *et al.*, 2019). さらにボゴタにある個々の建物の位置・構造種別・価値に関するデータベースを作成するとともに、強震動に対して建物がどの程度被害を受けるかを評価できる被害関数を作成した。これらの関係を用いることで、地震の震源位置とマグニチュードを入力すると、ボゴタでの揺れと建物被害の推定を行うことができる。このアルゴリズムを用いてSGCによる震源情報に基づいて自動的かつ即時的に建物被害推定を行うシステムを構築するとともに、過去に発生した地震あるいは今後発生する可能性がある地震についても、強震動および建物被害推定が可能となった (図6)。

ボゴタは、アンデス山脈の標高2,600mの盆地に形成された都市である。盆地の堆積物は基本的に未固結の土壌であり、上述のように地震動の増幅を起こしやすい。さらに盆地構造は長周期の揺れも増幅しやすいという特徴がある。よってその構造を調べることは、強震動の推定において重要である。このプロジェクトでは、微動計と呼ばれる地動ノイズから地下構造を推定できる計測器をコロンビアに導入し、ボゴタにおいて1,000点以上の地点で微動観測を行うことにより、ボゴタ盆地の詳細な3次元の地震波速度構造を推定した。この構造モデルは、上述の強震動・建物被害推定システムの高精度化に寄与するだけでなく、高層ビルに大きな揺れをもたらす長周期地震動の評価にも用いることができる。

太平洋に面したトゥマコは、1979年の地震

(M8.1)による津波で、51名の死者・行方不明者を出すなど大きな被害が出た。その被害が出た地域に現在20万人が居住しており、津波に対して脆弱性が高い状態ある。このプロジェクトでは、津波伝播・遡上シミュレーション手法を用いて、トゥマコや他の沿岸地域における津波被害の定量的な評価を行った。さらに、衛星画像・現地調査・Googleストリートビューによりトゥマコにおける建物データベースを作成した。この情報に基づく構造モデルに対して数値計算を用いて津波に対する耐力の解析を行い、被害関数を構築した(Medina *et al.*, 2019)。これにより津波の浸水予測だけでなく、それによる建物被害の定量的な推定が可能となった。

5. 議 論

上記のプロジェクト活動を通して、コロンビアにおける地震・津波・火山災害を軽減するための包括的な研究が行われ、開発されたシステムの多くはコロンビアの関係機関に実装され運用されている。さらに、各機関のホームページやTwitterなどのソーシャルメディアを通して地震・津波監視や強震動・被害予測などに関する情報が発信されている。地震監視に関しては、隣国のエクアドルと地震波形データの共有を行うとともに、エクアドルにもSWIFT-TSUNAMIが導入されているため、両国でこのシステムの更なる技術開発が行われている。

コロンビアにおける2つの沈み込み帯における地震学および測地学的研究は、この領域での地震発生過程の理解に大きく貢献した。コロンビア沈み込み帯における地震の起こり方や固着率分布との関係や、カリブ海プレート沈み込み帯における高い固着率領域の存在については、今後さらに観測の増強とそれらのデータ解析を通して研究を進める必要がある。それと同時に、推定された固着率分布から将来の起こりうる地震を想定し、どの程度の強震動や津波被害が発生するかの評価を行っていく必要がある。それらの定量的な被害予測に基づいて各地域の避難計画の策定が可能とな

る。そのような想定地震に対する津波被害の評価に関する取り組みは、すでにトゥマコで進められつつある(図7, Escobar *et al.*, 2020)。

火山に関しては、監視能力の向上だけでなく、ネバドデルルイス火山の地震波速度構造とその時間変化の推定(Londoño and Kumagai, 2018)やガレラス火山の低周波地震の発生過程の解明(Taguchi *et al.*, 2018)などの基礎研究に関しても成果が上がっている。噴火活動の様式は各火山で大きく異なるため、監視能力を強化するだけでなく、過去に発生したさまざまな現象の理解を深めることが、火山活動が活発化した場合にその推移を予測する上で不可欠である。

地震・津波・火山災害を軽減することは、わが国においても容易なことではない。その原因は、これらの現象が大きな多様性を持っており予測が困難であること、さらに高度かつ複雑化した社会の脆弱性が高まっていることに起因している。その解決のためには、さまざまな沈み込み帯で研究を行い、その知見を共有することが重要である。沈み込み帯にはコロンビアのような途上国が位置しており、そのような国と共同研究を行うためには、各国の実情にあった技術や手法の導入や開発が必要である。多くの途上国においては、観測インフラを独自に整備することは予算的にも技術的にも可能になっている。その一方で、監視や被害予測のための技術や知見といったソフト面での要望が高まっており、そのような技術の導入と運用のためには人材の育成が必要である。これらの方向で、わが国が果たす役割は大きいと考えられる。このプロジェクトにおいてもコロンビアの研究員を留学生として受け入れて、修士および博士課程での教育・研究を行うとともに、若手の日本人材の育成も進めた。今後さまざまな枠組みを用いて、このプロジェクトを通して構築された両国の良好な関係を継続的に維持・発展させていくことが望まれる。

謝辞

SATREPSプロジェクト「コロンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減技術に関する研究開

発」は、科学技術振興機構（JST）と国際協力機構（JICA）による助成により実施された。プロジェクトの活動と成果の詳細は、終了報告書（https://www.jst.go.jp/global/kadai/pdf/h2606_final.pdf）に記されている。プロジェクトのグループリーダーのネルソン・プリード博士、松岡昌志博士、越村俊一博士および鷺谷 威博士との議論は、本原稿を執筆する上で有益であった。以上の皆様にお礼を申し上げる。

参考文献

- Bermúdez-Barrios, J. C. and Kumagai, H. 2020. Repeating earthquakes along the Colombian subduction zone. *J. Disas. Res.*, **15**, 645–654.
- Castaño, L. M., Ospina, C. A., Cadena, O. E., Galvis-Arenas, B. *et al.* 2020. Continuous monitoring of the 2015–2018 Nevado del Ruiz activity, Colombia, using satellite infrared images and local infrasound records. *Earth, Planets Space*, **72**, 8.
- Escobar, R.S., Diaz, L.O., Guerrero, A. M., Galindo, M. P. *et al.* 2020. Tsunami hazard assessment for the central and southern pacific coast of Colombia. *Coast. Eng. J.*, **62**, 540–552.
- Pulido, N., Yoshimoto, M. and Sarabia, A. M. 2020. Broadband wavelength slip model of the 1906 Ecuador-Colombia megathrust-earthquake based on seismic intensity and tsunami data. *Tectonophysics*, **774**, 228226.
- Kumagai, H., Londoño, J. M., Maeda, Y. and Acevedo, A. E. 2019. amplitude source location method with depth-dependent scattering and attenuation structures: application at Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **214**, 11,585–11,600.
- Londoño, J. M. and Kumagai, H. 2018. 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **358**, 105–123.
- Medina, S., Lizarazo-Marriaga, J., Estrada, M., Koshimura, S. *et al.* 2019. Tsunami analytical fragility curves for the Colombian Pacific coast: a reinforced concrete building example. *Eng. Struct.*, **196**, 109309.
- Miura, H., Okamura, T., Matsuoka, M., Leal, M. *et al.* 2019. Empirical models for surface- and body-wave amplifications of response spectra in the Bogotá Basin, Colombia. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **109**, 987–1004.
- Sagiya, T. and Mora-Páez, H. 2020. Interplate coupling along the Nazca subduction zone on the Pacific coast of Colombia deduced from GeoRED GPS observation data. *Geol. Colomb. Book*, **4**, 499–513.
- Taguchi, K., Kumagai, H., Maeda, Y. and Torres, R. 2018. Source properties and triggering processes of long-period events beneath volcanoes inferred from an analytical formula for crack resonance frequencies. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 7550–7565.
- Yoshimoto, M., Kumagai, H., Acero, W., Ponce, G. *et al.* 2017. Depth-dependent rupture mode along the Ecuador-Colombia subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 2203–2210.

熊谷博之

[くまがい ひろゆき]

現職 名古屋大学大学院環境学研究科教授、博士（理学）

略歴 1993年名古屋大学大学院理学研究科博士課程中退。1994年名古屋大学にて博士（理学）取得。名古屋大学理学部助手、米国地質調査所客員研究員、防災科学技術研究所主任研究員を経て、2013年より現職。

専門分野 火山地震学、地震発生物理学



ジオパークと地震

日本のジオパークは、現在43カ所となった。日本ジオパーク委員会が発足したのは2008年、それから10年間委員長をつとめ、2018年から中田節也さんにバトンパスした。世界ユネスコジオパークも、43カ所のうちの9カ所が登録されている。

2008年、当時のユネスコ事務局長であった松浦晃一郎氏に、今までのジオパークは安定大陸から生まれたものが中心であり、古い地質の大地が多いが、変動帯にある日本が参加すると、生まれたばかりの山が、あるいは生まれたばかりの岩盤の大地が加わることになるということ伝えた。

そして2012年、第5回ジオパーク国際ユネスコ会議が島原市で開催されたとき、最終日に発表された宣言の中に、ジオパーク活動に自然災害を学ぶという役目があるという項目が加えられた。

大地を形作る変動帯の現象には、その大会が開かれた島原ジオパークのように火山の噴火があり、室戸ジオパークのように砂岩と泥岩の互層が物語る巨大地震の繰り返しがあり、三陸ジオパークのように大災害をもたらす大津波がある。

ジオパークの中にある大地震の典型的な例として、1930年北伊豆地震がある。南から来た火山の贈りものというキャッチコピーの伊豆半島ユネスコ世界ジオパークであるが、火山噴火は人類の歴史の中にはまだほとんど登場することなく、大地震は繰り返し発生していることが分かっている。承和8(841)年の北伊豆地震と1930年の北伊豆地震は、日本の活断層の中では珍しく、同じ活断層帯である丹那断層に歴史上2回の大規模地震が起こったことが分かっている例である。

そのことについて、私は1つの仮説を提唱して新聞に書いた。つまり東海道線を通すための

丹那トンネルを掘ったことによる大量の湧水が地下水の大規模な移動を生み、そのため、活断層帯に本来ならもっと先で発生するはずの大規模地震を早めに誘発してしまったのではないか、という疑問を投げしてみた。

私は今、静岡県立大学学長の立場で仕事をしているが、その大学にはグローバル地域センターという研究組織があって、そこでの研究課題の1つが「地震予知」である。ここで地震研究会をときどき開催して議論する中で、この仮説のことを話した。専任の研究者の中に楠城一嘉氏がいて、関心を示してくれて、可能性を考えてみたいと言ってくれている。

まったく別の観点から、川勝平太静岡県知事もこの仮説に関心を示した。鉄道のための大規模なトンネル工事が地下水に大きな影響を与えるのは、今話題になっているリニア中央新幹線の工事でも同じであるという観点である。

静岡県は、東北日本と西南日本の大地の接するフォッサマグナ地域を持っている。今年から静岡でしばらく仕事をするようになったが、その機会にまた静岡県内の各地を訪れながら、そのような大地の成り立ちを学び直してみたいと思っている。

三陸ジオパークは、2011年東北地方太平洋沖地震の前にジオパークの申請を出そうとしていて、巨大地震による大津波を受けてしばらく体勢を立て直した上での申請であった。私は委員長として、ジオパークになることが大規模災害からの地域の復興の後押しになるはずと考えて、準備不足を承知の上で実現を支援した。ジオパークとして広大な地域が関与することが元で、関係者はたいへん苦勞して、さまざまな工夫をしながら、現在まで少しずつ進展を見せている。

たとえば、田老地区では巨大な堤防が何重にも設置されて、海がほとんど見えない漁村が生

まれている。堤防の中に住むことを必須としての復興であるが、地域の住民の考え方の多様性がさまざまな問題を生みつつある。

阿蘇ユネスコ世界ジオパークでは、2016年熊本地震で、南阿蘇でも大規模な震災を経験することになった。それからようやく今、鉄道が開通し始めているが、地域の産業が復興するまでには時間がかかる。南阿蘇の自慢の赤牛がようやく出荷できるようになって美味しい赤身の肉をまた食べられるようになってきた。

室戸ユネスコ世界ジオパークでは、いずれ2040年頃と予測されている南海トラフの巨大地震に備えなければならない。ジオパークの活動によって、住民の1人ひとりの防災意識の高まりにつながっていくことを期待している。

山陰海岸ジオパークは、1925年但馬地震、1927年北丹後地震、1943年鳥取地震と、活断層の大地震が連鎖的に起こった地域にあり、大規模地震はしばらく起こらないという保証のできるジオパークである。日本海のもたらす豊かな海産物を愉しむことができる。

北陸地域には、恐竜渓谷ふくい勝山ジオパーク、白山手取川ジオパーク、立山黒部ジオパーク、そして糸魚川ユネスコ世界ジオパークと並んでいる。日本海の暖流から蒸発する水が大陸からの季節風で大量の雪を降らせて豪雪地帯を生み出している。そこでは日本列島の生い立ちから学ぶことができる物語がある。

大地の仕組みを知り、自然のもたらす恩恵を深く理解して、その地域の文化と歴史を知り、自らの住む土地の豊かさに気付いて、それを来訪者に分かりやすく伝えることができるガイドになるというのがジオパーク活動の最も重要な面である。なんと言っても住んでいる人びと自身がその地域の価値を深く知ることが重要である。

私が俳句を詠むようになってようやく30年になるが、俳句を詠むための三原則というのを

「現在の現象を現場で詠む」という「三原則」ということにしている。この三原則は地球科学のフィールドワークにも通じる。俳句を詠むためにジオパークを訪れると、それまで見逃していた景観を発見し、その地域に生まれ育てられた文化に接し、人びとの暮らしの知恵を学ぶことができる。

私は2013年から今年2021年3月まで、京都芸術大学の学長だったが、その間、芸術系の学生たちに「自然と芸術」というタイトルの講義をしてきた。自然の仕組みをできるだけ理解した上で、自然を超える芸術作品を生み出してほしいと話してきた。日本列島は変動帯にあって、基本的な自然現象は、火山噴火、地震、それらによる津波であると語った。それらによって豊かな大地が生まれ、さまざまな農作物が生産され、世界で最も多様性のある海洋に囲まれており、海の幸、山の幸を愉しむことのできる国土を持つ。

その芸術系の学生たちが課外活動として、私が提唱する地震火山庁の設置と、地震火山予報士の制度化という提言を広めるためのアニメーション作品を完成してくれた。新型コロナウイルス感染症拡大の中、キャンパスに入れない状態でリモート会議を繰り返して完成し、完成度の高い作品として公開されている。そのアニメーションの主題は、気象情報との対比で、空は自分の目で見ながら、気象予報士の説明を聞くことができるが、地下は目で見ることができないということから始まる。それを地震火山予報士が適切に観測データを使いながら、解説を繰り返すことによって、地下の現象を見えるようにしていこうというものである。

自然は豊かな恵みをもたらししてくれるが、時には大災害を起こす。それでも変動帯に住む人びとはそこを離れることはない。

(尾池和夫：静岡県立大学学長、元京都大学総長)

飛騨山脈の地震活動

大見士朗

1. はじめに

飛騨山脈は、通称北アルプスと呼ばれ、本州中央部を南北に富山・新潟県境から岐阜・長野県境に沿って延びる山脈である。ここには標高3,190mの奥穂高岳を代表とする3,000mを越す山々が聳え、日本の代表的な山岳地帯となっている。また、飛騨山脈を含む、いわゆる日本アルプス地域には、飛騨山脈南方に位置する御嶽山を含め、北から、弥陀ヶ原（立山）、焼岳、アカンダナ山、乗鞍岳、御嶽山の5つの活火山が認定されている（気象庁、2013）（図1）。

飛騨山脈では、しばしば、浅い群発地震活動が発生している。たとえば、古くは1998年8月に上高地付近で始まった群発地震活動は約1年半にわたって継続し、その最大地震はMj 5.6（Mjは気象庁マグニチュード）という活発なものであった。これは、1970年代後半に京都大学防災研究所が飛騨山脈周辺で地震観測を始めて以来、最大の活動であった（和田ほか、1993、1994、1999、2000等）。その後も飛騨山脈では断続的な群発地震活動が見られ、2011年3月、2013年10月、2014年5月、2018年11月などの地震活動の報告がある（たとえば、大見ほか、2012；大見、2015、2016、2019など）。また、大見（2018）には飛騨山脈全域の地震活動に関する解説がある。

これらに引き続き、2020年4月から7月にかけては、1998年以来ともいわれる活発な群発地震活動が発生した。本稿では、上述のような当地域の過去の地震活動との比較を行いながら、2020年の群発地震活動の概要を述べる。

2. 2020年の群発地震活動

2.1 地震活動の経過と特徴

図2に2020年の活動、および比較のために1998年の地震活動の震源分布図を示す。また、図3には2020年4月から7月末までの震央の時空間分布図を示す。図3には、それぞれの時期の活動の特徴を併記している。2020年の活動は、4月6日に前駆的と思われる活動が見られた後、4月22日から活動が本格化し、7月上旬まで消長を繰り返しながら地震活動が継続した。

図4に、1998年以降の飛騨山脈南部の群発地震の震央分布を、年別に色分けして示す。図4に見られるように、当地域ではそれぞれの活動域が過去の群発地震活動のそれと大きくは重ならず、「棲み分ける」傾向がみられていたが、2020年の活動ではこの状況が破綻して、1998年の活動域に重なるように地震が発生した。また、同様に、過去の活動域は飛騨山脈の主稜線（岐阜・長野県境）に分断される傾向がみられ、1998年の活動を除いて、それぞれの一群の活動が主稜線を越えて拡大することは稀であった（図4）。しかしながら、2020年の活動は、1998年の活動以来22年ぶりに、飛騨山脈の主稜線を越えて活動域が拡大した。なお、1998年には、地震活動は、活動開始から約一カ月後には鷲羽岳付近を越えて北方に拡大したが、2020年は1998年ほどには北方への拡大は見られなかった（図2）。

2020年4月に始まった群発地震活動は、同年7月の一応の終息までの間にMjが5を超える地震が5回発生し、1998年以来の活発な群発地震活

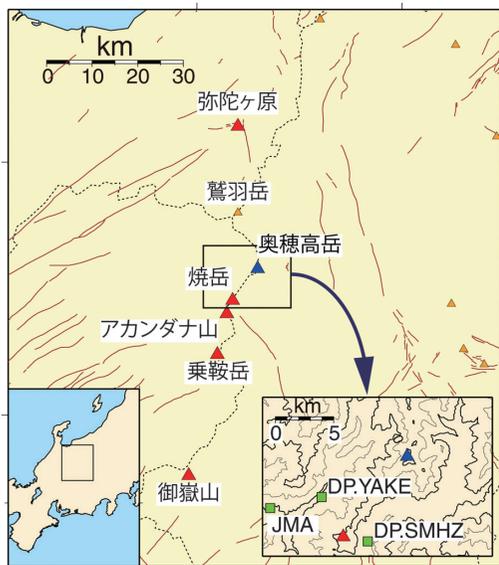


図 1 飛騨山脈の概念図。三角形は活火山（赤）、第四紀火山（橙）、および飛騨山脈の最高峰（青）。茶色の線は活断層。拡大図中の緑色の四角は強震観測点

動となった。Mjが5を超える地震が発生したのは、4月23日午後（2回）、4月26日未明、5月19日午後、5月29日夕刻の5回である。図3の時空間分布図によれば、今回の活動には数回のバースト的な地震発生が見られ、それらは、4月23日、5月13日、5月19日、5月29日、および7月5日を中心としたそれぞれ数日であった。5月13日にはMjが5を超える地震の発生はないものの、Mj4.5を超える地震が4回発生するなど活発な活動が見られた。

2.2 震度観測に基づく主たる地震の分布

当地域は急峻な山岳地帯であることから震度観測点の設置密度が低いこともあり、揺れを感じても気象庁からの公式発表が見られない、いわゆる現地有感の地震が多いことが知られていた。われわれは2011年秋に気象庁の震度情報の発表点として使用される「岐阜県高山市奥飛騨温泉郷栃尾」（図1の挿入図のJMA）よりも飛騨山脈の稜

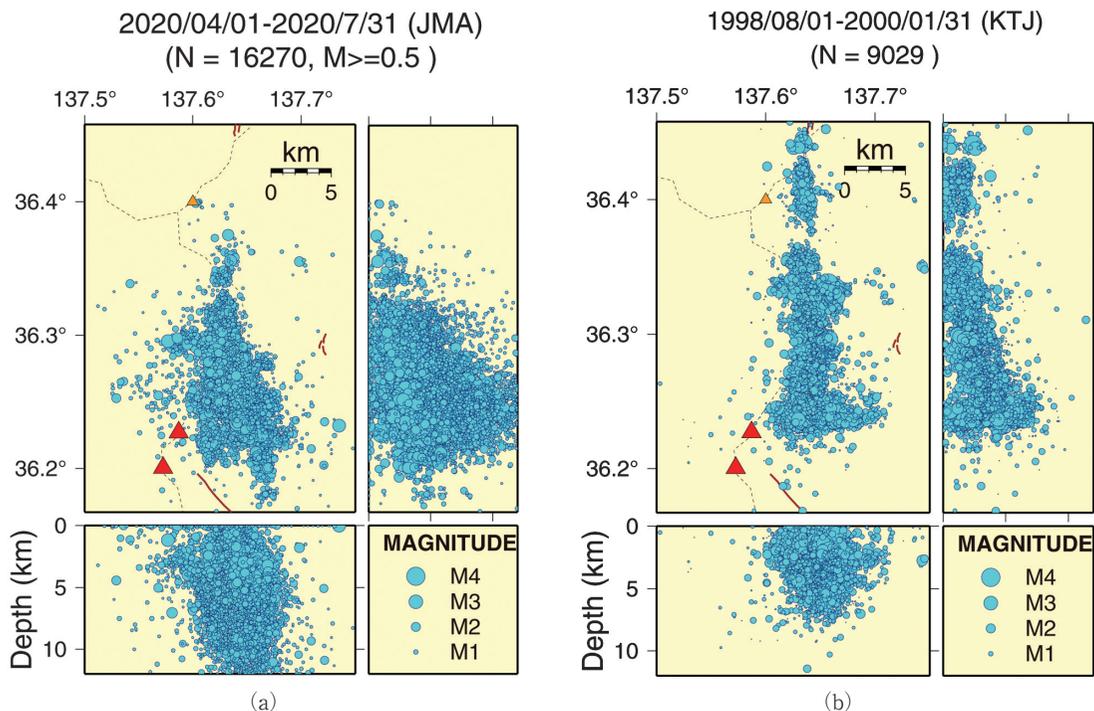


図 2 (a) 2020年の活動の震源分布。気象庁カタログによる。(b) 1998年の活動の震源分布。和田ほか(1999)の結果による

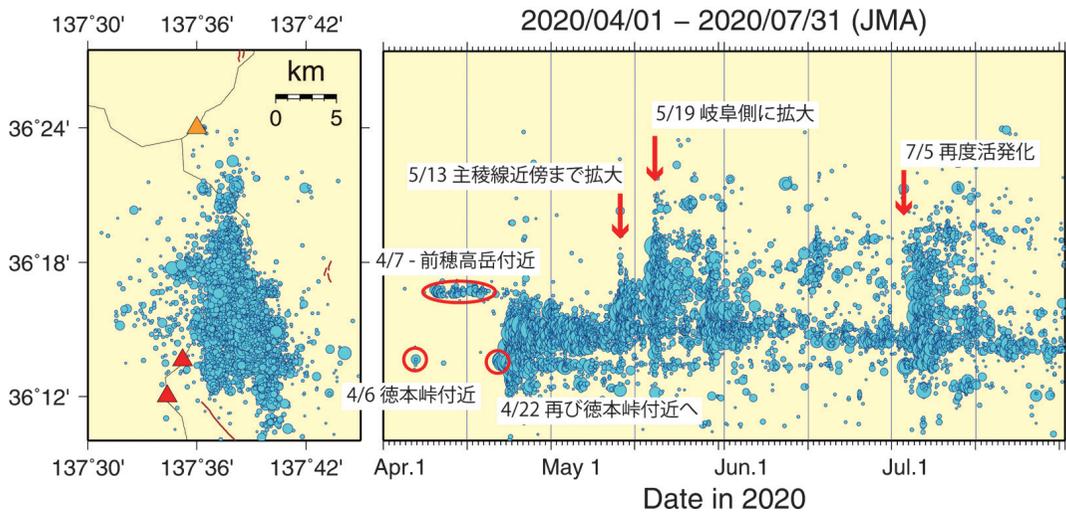


図 3 2020 年の活動の時空間分布図

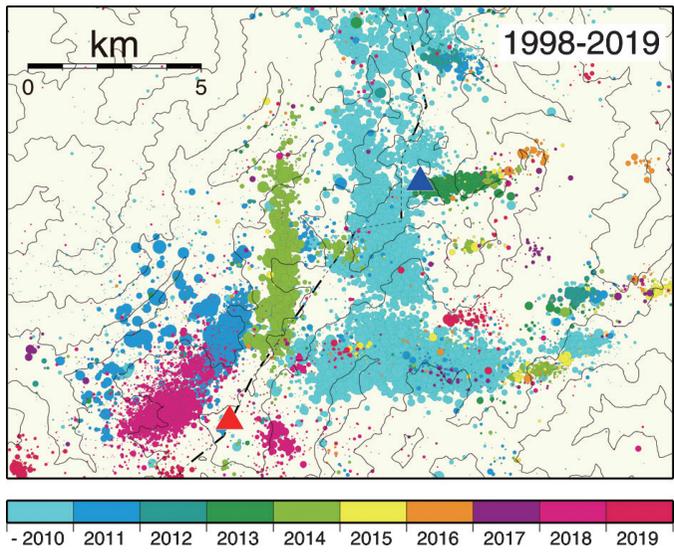


図 4 1998 年からの震央を年別に色分けしたもの。ただし、1998 年から 2010 年までは同一色としてある。気象庁カタログに基づく

線に近い DP.YAKE 観測点（図 1）に強震計を併設して計測震度の計算を開始した。これにより、2014 年の地震活動の際の現地有感地震の発生状況を捉えることができた（大見，2016）。今回、これに加えて、2020 年 5 月末に図 1 の DP.SMZHZ においても強震計を稼働させ同様の観測を開始した。これらによると、2020 年 4 月から 7 月末ま

での期間に気象庁の「奥飛騨温泉郷柘尾」で震度 3 以上を記録した地震は 18 個で、最大震度は 4 であったのに対し、DP.YAKE 観測点では震度 3 相当以上の地震を約 150 回観測し、そのうち震度 5 弱相当の地震が 7 回という結果を得た。

図 5 に DP.YAKE または DP.SMZHZ のいずれかで計測震度 3 相当以上の揺れを観測した地震の

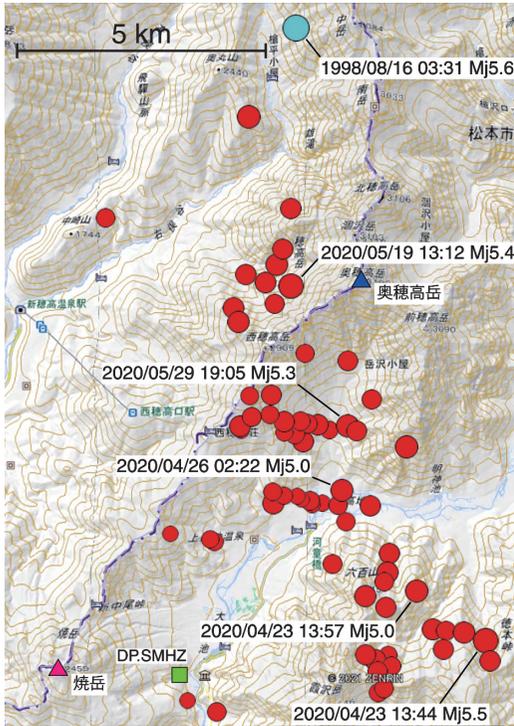


図 5 DP.YAKE または DP.SMHZ のいずれかで計測震度 3.0 相当以上の揺れを観測した地震の分布. Mj が 5 以上の地震にタグをつけてある. 水色の丸印は 1998 年の地震活動の最大地震

うち、精度よく震源再決定ができた地震約 70 回の震央分布を示す. それぞれの震央位置は、京都大学および他機関が奥飛騨温泉郷や上高地地区に展開している短周期地震計観測網のデータ（大見ほか、2017）も利用して再決定したものである. これによれば、今回の地震活動において大きな揺れを伴った、比較的「大粒」の地震は、徳本峠から上高地の谷底を経て奥穂高岳と西穂高岳の間を抜けて飛騨側に至る帯状の地域で多数発生したことが見てとれる（地名は図 5 参照）.

図 6 は、図 5 に表示した地震の発震機構解である. ここには、防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net のデータを使用して再計算したモーメントテンソル解のうち、精度よく解が求められたものを示している. 当地域は北西 - 南東圧縮の広域応力場にあり（Kaneshima, 1990）、1998 年

2020/4/22 - 2020/7/31

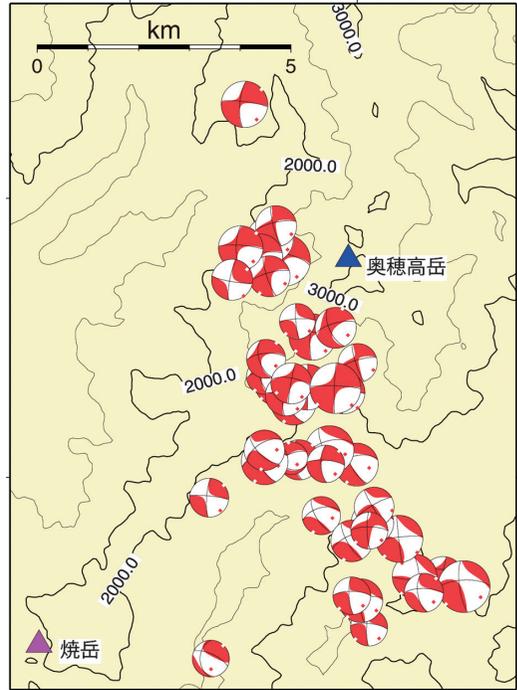


図 6 DP.YAKE または DP.SMHZ にて計測震度 3.0 相当以上を観測した地震のモーメントテンソル解. 防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net のデータを使用して再計算を行った結果を表示

以降の地震活動もほぼこれを反映する発震機構を示している. 2020 年の地震も、ほぼ同様の応力場を示しているが、Non Double Couple 成分が大きな地震が散見される.

3. 群発地震の発生原因に関する考察

当地域で頻発する群発地震の発生原因については、いくつかの説が提唱されている. その 1 つは、いわゆる Silica Cap モデルと呼ばれるもので、Kusakabe *et al.* (2003) や日下部 (2018) などで解説されている. これによれば、陸水起源の地下水は周囲の岩石から石英を溶出させながら地下に浸透し、マグマや高温岩体に近づくにつれて温度が高くなる. しかし、高温・高圧の、ある温度圧力条件下では逆に温度上昇につれて石英の溶解度

が減少する条件が存在し、この条件を満たす領域では石英は再度結晶として沈殿し、結果としてマグマ等の熱源の頂部を覆う石英のキャップが形成される。このキャップの下にマグマ起源の高温高压流体が蓄積してゆき、キャップが耐えられなくなると破碎し、それに伴う高温熱水による水圧破碎が浅部の群発地震を起こすというモデルである。

また、川崎（2020）は、2020年や1998年の群発地震のマグニチュード2以上の地震を精査すると、時空間的に複数のクラスタが同時に活動する例はほぼ皆無であることを見出した。これを説明するために、当地域の群発地震のクラスタはその下にそれぞれに対応する熱水混合層が分離して存在し、それらがゆるやかに連結しているというモデルを提唱した。これは、特定のクラスタで突発的に熱水が溢れ出て地震活動が発生すると、連結したすべての熱水混合層で水圧が下がってそれまでの地震活動は鎮静化し、結果として特定のクラスタのみが活動するというモデルである。

さらに、大見・西村（2020）は、奥飛騨・上高地地区に設置・運用中のGNSS観測網により、群発地震活動に伴う地殻変動が今回初めて観測されたことを報告し、今回の地震活動がマグマ貫入に伴う開口断層形成による可能性を指摘した。

4. おわりに

飛騨山脈の立山から乗鞍岳の間は群発地震の多発地域である。上述のように、当地域の群発地震活動の原因を熱水活動に求めるものとマグマ活動に求める説の双方が提唱されている。後者は地殻変動データの解析により今回の2020年の活動の際に初めて可能性が指摘されたものであるが、データ取得開始後の日が浅く、過去の群発地震活動との比較が困難であるのが弱点である。おそらく、双方を原因とする群発地震が存在するものと推察されるが、今回の群発地震の震源域は活火山焼岳にも近く、その発生モデルの解明は当地域の火山防災にとっても重要である。本稿で紹介し

た、過去の群発地震活動域の「棲み分け」や、飛騨山脈主稜線による活動域の分断なども関連させて、当地域の群発地震の地震発生機構の議論が深まることを期待している。

謝辞

本稿の執筆に際しては、気象庁の地震観測データおよび地震カタログ、防災科学技術研究所の高精度地震観測網Hi-netおよび同・広帯域地震観測網F-netの地震観測データ、ならびに国土交通省北陸地方整備局の地震観測データを使用しました。また、一部の図表では国土地理院地図KMLデータを使用しました。記して感謝します。

参考文献

- Kaneshima, S. 1990. Origin of crustal anisotropy: shear wave splitting studies in Japan. *J. Geophys. Res.*, **95**, 11121-11133.
- 川崎一朗. 2020. 1998年と2020年の飛騨上高地群発地震一時空間的に分離した活動域の移動現象一. 日本地震学会2020年度秋季大会, S09-04.
- 気象庁. 2013. 日本活火山総覧(第4版)II 関東・中部・伊豆・小笠原編. 東京, 1,098 pp.
- 日下部実. 2018. 熱水地球化学から見た乗鞍火山列群発地震の発生メカニズム. 川崎一朗・諏訪浩・岡田篤正(編), 飛騨山脈とその周辺の自然災害リスクを考える. *自然災害科学*, **37-1**, 62-72.
- Kusakabe, M. et al. 2003. Helium isotope ratios and geochemistry of volcanic fluids from the Norikura Volcanic chain, central Japan: implications for crustal structures and seismicity. Simmons, S. F. and I. Graham (ed.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth. Soc. Econ. Geol. (Spec. Publ.)*, **10**, 75-89.
- 大見士朗・和田博夫・濱田勇輝. 2012. 飛騨山脈焼岳火山周辺における東北地方太平洋沖地震後の群発地震活動. *地震*, **2**, **65**, 85-94.
- 大見士朗. 2015. Matched Filter Methodによる群発地震解析の試み～2013年飛騨山脈穂高岳付近の地震活動の例～. *地震*, **2**, **68**, 1-15.
- 大見士朗. 2016. 飛騨山脈南部脊梁部で発生する地震による震源域近傍での震度について—2014年5月飛



驛山脈の地震活動の例一. *地震* 2, **69**, 113-118.

大見士朗・井口正人・飯尾能久. 2017. 飛驒山脈焼岳火山の研究監視観測網の現状. *京都大学防災研究所年報*, **60B**, 402-407.

大見士朗. 2018. 飛驒山脈とその周辺の地震活動. 川崎一朗・諏訪 浩・岡田篤正 (編), 飛驒山脈とその周辺の自然災害リスクを考える. *自然災害科学*, **37-1**, 15-25.

大見士朗. 2019. 2018年11月下旬以降の焼岳火山近傍の地震活動について. *京都大学防災研究所年報*, **62B**, 310-317.

大見士朗・西村卓也. 2020. 2020年飛驒山脈群発地震—地殻変動から推定されたダイク貫入イベント—. 日本地震学会 2020年度秋季大会, S09-05.

和田博夫ほか. 1993. 焼岳火山付近の群発地震観測. *京都大学防災研究所年報*, **36B-1**, 291-303.

和田博夫・伊藤 潔・小泉 誠. 1994. 飛驒山脈の地震活動—1993年槍ヶ岳付近の活動—. *京都大学防災*

研究所年報, **37B-1**, 365-380.

和田博夫ほか. 1999. 1998年飛驒山脈群発地震. *京都大学防災研究所年報*, **42B-1**, 81-96.

和田博夫・伊藤 潔・大見士朗. 2000. 飛驒山脈の群発地震 (その2) —周辺活動域への影響—. *京都大学防災研究所年報*, **43B-1**, 115-121.

大見士朗

[おおみ しろう]

現職 京都大学防災研究所地震防災研究部門准教授

略歴 1989年九州大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学, 1989年国立防災科学技術センター, 1994年京都大学防災研究所附属地震予知研究センター (助手), 2007年より現職. 博士 (理学)

研究分野 観測地震学, 観測火山学



機械学習と物理モデルのハイブリッドで 地震の揺れを予測する

久保久彦

1. はじめに

深層学習に代表される AI・機械学習の発展によって、囲碁や将棋などでの強化学習の成功や自動運転を可能とする物体認識技術の確立など、さまざまな分野において革新がもたらされています。地震学を含めた地球物理学でも使われ始めており、成果をあげつつあります^{1,2)}。ここでは、機械学習によって地震の揺れ（地震動）の予測を試みた Kubo *et al.*³⁾ を紹介します。この研究では、利用可能な観測データに対して機械学習を単純に適用することから始めていますが、強い揺れが極端に少ないというデータ特有の性質のために、機械学習モデルによる予測に好ましくないバイアスが生じることが分かりました。そして、この問題への解決策として、機械学習と物理モデルに基づく既存の予測式を組み合わせたハイブリッド予測アプローチを提案しています。

2. 単純に機械学習してもうまくいかない

ある規模の地震がある場所で発生したという情報が与えられたときに、任意の場所での地震による揺れの強さ（震度や地表最大加速度などの指標）を予測することを考えます。これまでは、過去の記録に基づく経験式（地震動予測式）が使われてきました⁴⁾。地震動予測式は、地震の揺れに関係する効果を地球物理学の知見に基づいてモデル化したうえで、揺れの強さの指標と入力パラメータを結び付けた関数を仮定して、過去の記録

に基づく回帰分析を行うことで得られる方程式です。その計算の手軽さから、大量の計算が必要な地震ハザード評価や、迅速な計算が必要となる緊急地震速報などで活用されています。

このような式ベースによる揺れの強さの予測を、機械学習ベースで行うことが近年試みられており⁵⁾、今回紹介する研究もその1つとなります。機械学習はさまざまな要素が複雑に影響しあう事象について、データに基づく予測を精度よく行うことができます。地震動予測の場合、従来は事前に仮定していた方程式の関数を、データに基づいて導き出せることが大きな利点であり、予測精度の向上につながると考えられます。また、今回の研究には含みませんが、これまでは方程式に組み込むことが難しかった情報を柔軟に追加できることによる性能向上も期待されます。

ここでは、5つの入力パラメータ（震源と予測地点の間の水平距離、地震の規模、地震の深さ、予測地点の直下の堆積層の厚さおよび表層付近の地盤の軟弱さ）から地表最大加速度を予測することを行います。機械学習アルゴリズムにはアンサンブル学習を行うランダムフォレストの一種を使用しました。データには、防災科学技術研究所が運用する陸海統合地震津波火山観測網 MOWLAS⁶⁾ の1つである強震観測網 K-NET, KiK-net⁷⁾ の約20年間の地震動記録を用いました。K-NET, KiK-net は強い揺れを振り切れることなく、確実にとらえることを目的とした観測網であり、全国約1,700カ所にて観測しています。訓練データとして1997年から2015年までに発生した2,082地震による計186,310の地震動記録を用意しました。

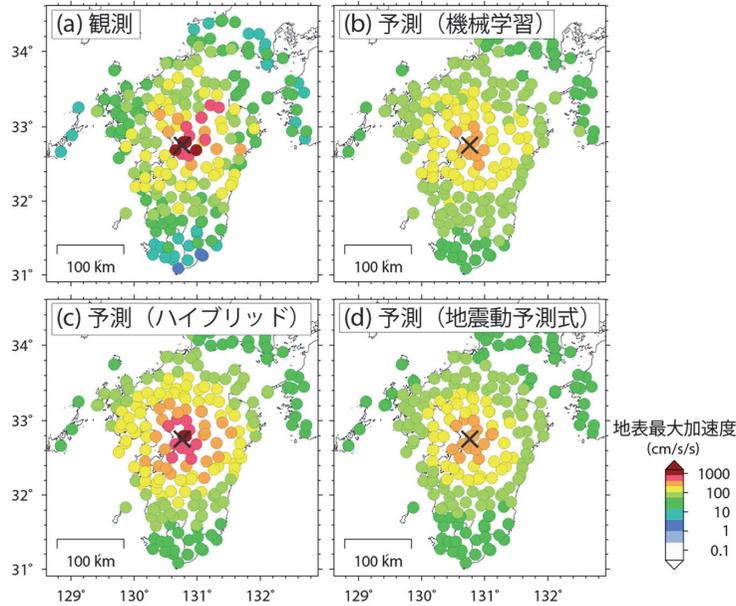


図 1 2016年熊本地震本震における地表最大加速度の (a) 観測, (b) 機械学習モデルによる予測, (c) ハイブリッドアプローチによる予測, (d) 地震動予測式による予測. 各地点での揺れの強さを色で示しており, 暖色ほど地震の揺れが強いことを表す. 図中の×は同地震の震央位置を表す

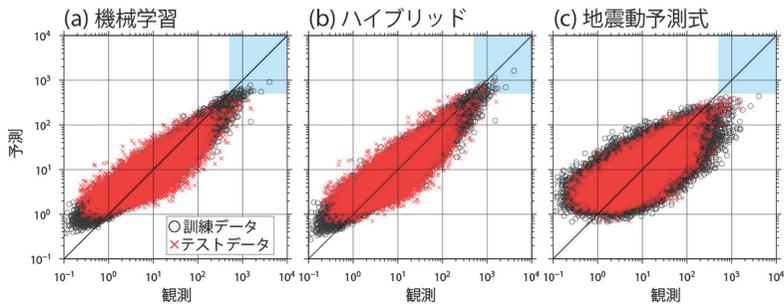


図 2 訓練データおよびテストデータにおける観測値と予測値の比較. (a) は機械学習モデルの結果, (b) はハイブリッドアプローチの結果, (c) は地震動予測式の結果を示す. 図中の薄青色の領域は観測値と予測値が 500 gal 以上の領域を表す. 対角線よりも下にプロットされている場合, 観測に対して予測が過小評価されていることを意味する

またテストデータとして 2016, 2017 年に発生した 208 地震による計 22,323 の地震動記録を別途用意し, 性能検証に用いました.

テストデータに含まれる 2016 年熊本地震本震において機械学習モデルによる予測を行い, 観測と比較した結果を図 1 (a, b) に示します. この地震の際には 1,000 gal を超えるもしくはそれに迫る強い揺れが観測されていますが, 機械学習に

よる予測ではこの強い揺れを再現できておらず, 半分以下の予測値となっており, 強い揺れを過小評価していることがわかります. データ全体における観測と予測の比較を図 2 (a) に示します. 観測値が 500 gal を超える場合, 予測値が観測値よりも小さい, つまり強い揺れが過小に評価されるというバイアスが機械学習モデルによる予測にはあることがわかります. たとえ全体の予測性能

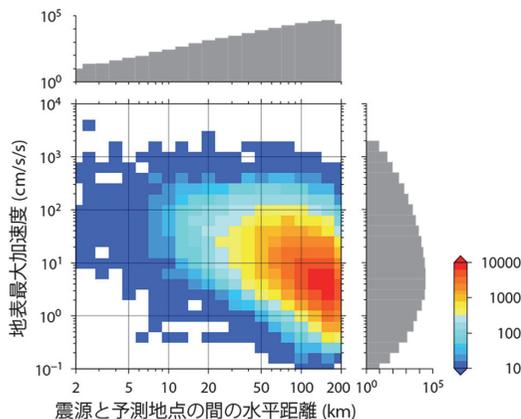


図3 震源と予測地点の水平距離および地表最大加速度でプロットしたときの訓練データの分布。暖色ほどデータ数が多い、寒色ほどデータ数が少ないことを意味する

が良かったとしても、強い揺れは建物などの被害に直結するものであり、このバイアスは防災・減災上看過できないものです。

3. データの不均衡とハイブリッド予測

なぜこのようなバイアスが生じてしまったのでしょうか。機械学習はデータに基づいて予測・識別を行うため、データ内部に大きな偏りがある場合、機械学習モデルの出力にバイアスが生じることがあります。その1つの例が顔認識アルゴリズムをめぐる議論です。ジェンダー・肌の色によって顔認識アルゴリズムの認識性能が異なることが指摘されており、白人男性が多いという訓練データの偏りが原因とみられています^{8,9)}。図3に今回の訓練データの分布を示します。1,000 galを超えるような強い揺れの観測記録は非常に少ない一方で、弱い揺れの観測記録が豊富にあり、地震動データも大きな偏りを持つ不均衡データであることがわかります。このようなデータをそのまま学習したために、強い揺れの過小評価という予測バイアスが引き起こされたと考えられます。

この地震動データ特有の困難に対応するために、機械学習と物理モデルに基づく既存の地震動

予測式を組み合わせたハイブリッド予測アプローチを考えました。地震動予測式はこれまでの学術的知見に基づく物理モデルを方程式の形で表現しているため、発生頻度が少ない事象を予測する場合でも、ある程度の予測性能を発揮することが期待されます。具体的には、従来の予測式による予測と観測の残差を学習した機械学習モデルを作成し、予測式による予測と機械学習による予測のそれぞれを足し合わせた値をハイブリッドアプローチの予測とするやり方を考えました。

2016年熊本地震本震およびデータ全体における、ハイブリッド予測アプローチの結果を図1と図2に示します。これらの中では先行研究に則って今回の訓練データで作成した地震動予測式での結果も示しています。比較の結果、ハイブリッド予測アプローチは単一の予測手法に比べて予測性能が良く、機械学習のみで予測した際に見られた強い揺れの過小評価が改善されていることが確認できました。

4. 議 論

極端な自然現象はごくまれにしか起きません。今回は強い揺れの話でしたが、たとえばM9クラスの巨大地震は数えるほどしかわれわれは経験していません。このような自然データの不均衡への対応として、各機関の観測データの統合がまず考えられます。地震動に関しては国内および海外において統合的なデータセットの作成が進められており^{10,11)}、更なる展開が期待されます。他方で観測だけでは限界があるため、手法面での工夫も重要です。今回取り上げたようなやり方以外にもさまざまなやり方¹²⁾が提案されていますので、うまく使いこなしていくことが重要です。またシミュレーションやAI・機械学習に基づいて生成された模擬データの活用も今後必要になっていくと考えられます。

AI・機械学習のアルゴリズムを実世界に実装していくにあたっての1つの壁として、そのブラッ

クボックス性があります。このブラックボックスへの対応策として、説明可能 AI (eXplainable AI, XAI) に関する研究が近年精力的に取り組まれています。XAI は、予測結果やそれに至るプロセスが人間にとって説明可能・解釈可能な形になっており、脱ブラックボックス化した機械学習モデルのことを指します。実場面での適用も行われており、久保ほか¹³⁾では地震動指標の予測問題に XAI 技術を適用しています。

5. おわりに

今回紹介した研究は、機械学習の導入が地震の揺れの予測における性能向上につながることを示すとともに、単純に機械学習を適用しただけでは発生頻度が少ない極端事象を予測する場合に問題が生じ得ることを示唆しています。この問題を長年にわたって検証されてきた物理モデルと機械学習のハイブリッドによって解決を図るというアプローチは、他分野でも応用可能なものであり、機械学習の社会導入にあたっての 1 つのモデルケースとなりうるものと考えます。

参考文献

- 1) Kong, Q. *et al.* 2018. Machine learning in seismology: turning data into insights. *Seismol. Res. Lett.*, **90**, 3-14. <https://doi.org/10.1785/0220180259>
- 2) Bergen, K.J., Johnson, P.A., De Hoop, M.V. and Beroza, G.C. 2019. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, **363**, 6433. <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
- 3) Kubo, H., Kunugi, T., Suzuki, W., Suzuki, S. and Aoi, S. 2020. Hybrid predictor for ground-motion intensity with machine learning and conventional ground motion prediction equation. *Sci. Rep.*, **10**, 11871. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68630-x>
- 4) 日本建築学会. 2005. 地盤震動一現象と理論一.
- 5) 石井 透. 2021. 人工知能を活用した強震動予測. *日本地震工学会誌*, **42**, 29-32.
- 6) Aoi, S. *et al.* 2020. MOWLAS: NIED observation

network for earthquake, tsunami and volcano. *Earth, Planets Space*, **72**, 126. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01250-x>

- 7) 防災科学技術研究所. 2019. NIED K-NET, KiK-net. <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 8) Buolamwini, J. and Gebru, T. 2018. Gender shades: inter-sectional accuracy disparities in commercial gender classification. In *Proc. Machine Learning Res. Conf. Fairness, Accountability, Transparency*, 77-91.
- 9) Raji, I. and Buolamwini, J. 2019. Actionable auditing: investigating the impact of publicly naming biased performance results of commercial AI products. In *AAAI/ACM Conference on AI Ethics and Society*.
- 10) 森川信之ほか. 2020. 地震ハザード評価のための強震動データベースの構築に向けて. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS04-P01.
- 11) Ancheta, T.D. *et al.* 2014. NGA-West2 database. *Earthq. Spectra*, **30**, 989-1005. <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>
- 12) 宮本 崇・浅川 匡・久保久彦・野村泰稔・宮森保紀. 2020. 防災応用の観点からの機械学習の研究動向. *AI・データサイエンスシンポジウム論文集*, **1**, J1, 242-251. https://doi.org/10.11532/jsceiii.1.J1_242
- 13) 久保久彦・功刀 卓・鈴木 亘・木村武志・青井真. 2020. 説明可能な地震動指標のランダムフォレスト予測器の構築に向けた取り組み, 2020年度人工知能学会全国大会, 4Rin1-94. https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2020.0_4Rin194

久保久彦

〔くぼ ひさひこ〕

現職 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター 研究員. 博士 (理学)

略歴 2010年3月神戸大学理学部地球惑星科学学科卒業. 2012年3月神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士課程修了. 2015年3月京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 (地球物理学分野) 博士後期課程修了. 2015年4月防災科学技術研究所入所. 2019年7月より現職

研究分野 強震動地震学



津波は地球を揺らす

—遠地津波波形解析技術の向上—

綿田辰吾

1. 遠地津波の遅延と初動反転

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M9.0)(以下2011年東北地震と呼ぶ)により発生した津波は、2万2千人を超える死者・行方不明者を出すなど東北地方沿岸を中心に甚大な被害をもたらした。その津波は太平洋へ広がり、7時間後にハワイ、10時間後に北米沿岸、さらに22時間後に南米南端に到達した(図1)。その伝播の様子は、太平洋域の大陸沿岸や島嶼部に設置されている潮位計に加え、環太平洋地震帯を取り囲むように深海(水深2~5キロ)に設置された津波計が捉えていた(図1三角印)。これら深海津波計は、22万人を超える死者・行方不明者を出した2004年スマトラ地震津波を契機に、津波の早期検知を目的として米国海洋大気局を中心に整備されたもので、整備後に太平洋を横断するような津波は2010年チリ地震津波について2度目であった。図1では、白丸で示された2地点の観測波形と予測波形を比較している。近地(北西太平洋、走時約1時間)では観測波形はほぼ津波シミュレーションで再現されるのに対し、遠地(南米沖、走時約17時間)では観測波形はシミュレーション予測から15分ほど遅延し、さらに津波の初動が反転している。

同様の遠地津波の遅延と初動反転は2010年2月27日に発生したチリ地震(M8.8)津波でも観測されていた(図2)。気象庁は2010年チリ地震発生直後より国内外から地震情報と、しだいに日本に近づきつつある津波情報をリアルタイムに取

得し、津波への警戒を呼びかけていた。観測記録と比較すると、予測された津波波高は若干高めで予想到達時刻は太平洋沿岸では多くの地点で10~30分程度早かった。この津波の遅延現象は同年5月13日に気象庁で開催された津波の専門家らによる「津波予測技術に関する勉強会(第5回)」でも報告・指摘され、翌年3月11日午前に開催された同勉強会(第6回)においてなお原因不明とされた。同日午後、太平洋の反対側で発生した東北地震津波でも遠地津波の遅延と初動反転が確認されたことから、津波伝播における成因不明の現象として広く認識されるようになった。

2010年と2011年津波はどちらも観測走時が従来の計算走時に比べて系統的に1~2%増加した(Watada *et al.*, 2014)。近地では津波の伝播距離自体が短く走時遅延量が小さいため認識されにくい。太平洋を横断するような遠地津波になると長波津波シミュレーション波形と比較し遅延が認識される。太平洋を横断する1960年チリ地震津波の津波シミュレーション研究では、当初から南米や日本などで10~30分程度計算が観測よりも早く到達することが指摘され、数値格子の粗さや観測点周辺の沿岸地形の影響だと推定された(今村ほか, 1987, 1990)。

初動反転の指摘の報告は少ない。津波は非分散性の長波であり、波源域海面の初動(上下運動)の情報を保持しながら遠地まで到達すると考えられていた。近地と遠地で津波初動が逆転する(図1, 2)ことは、遠地津波の初動を用いた津波波源域の海底運動の判定が逆転することを意味する。1960年チリ地震津波では北海道から沖縄まで太

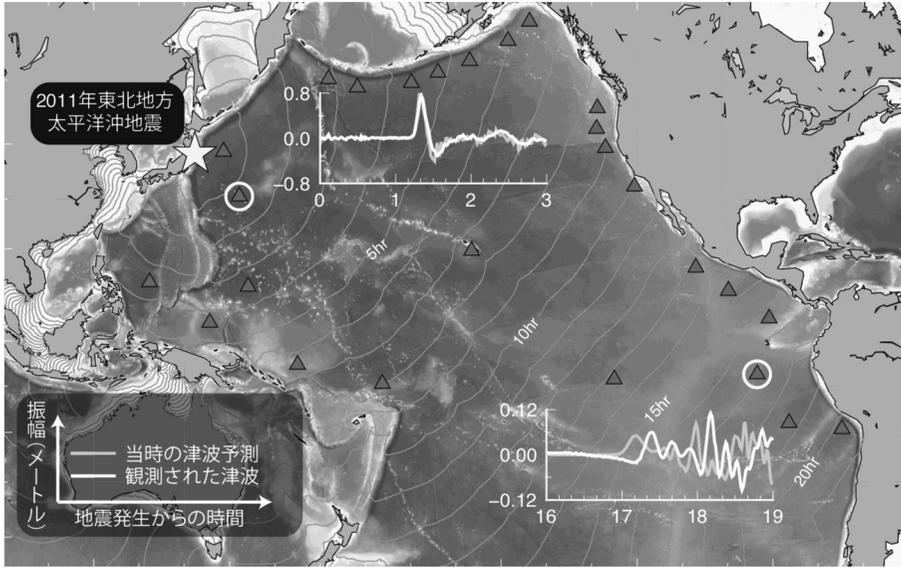


図 1 太平洋を横断する 2011 年東北地震津波（観測と長波予測の比較）

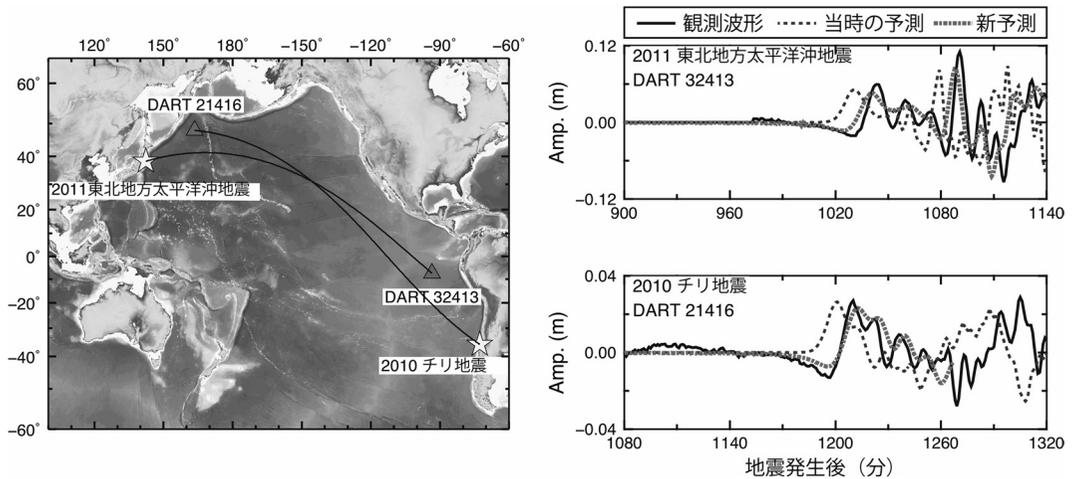


図 2 太平洋を横断する，2010 年チリ地震津波と 2011 年東北地震津波

平洋沿岸の多くの検潮記録に先行波があると報告があるが，潮位計付近の沿岸地形の影響を受け (Nakamura and Watanabe, 1961) 微弱な初動反転の判別は難しい。

2. 津波は地球を揺らす

津波は，非圧縮性流体である海水が，変形しない海底面上を，重力の位置エネルギーと運動エネルギーをやり取りしながら伝播する波動現象である，とする従来の仮定を取り外し，海水の圧縮

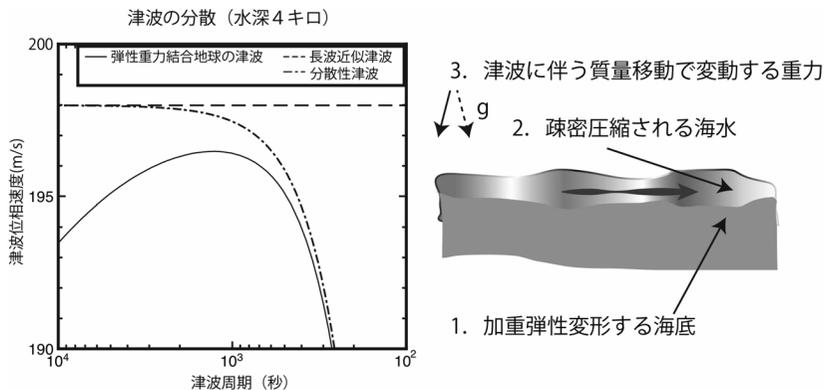


図 3 (左) 津波の分散関係のグラフ (周期が長いと左, 短いと右になることに注意). (右) 荷重変形する海底と圧縮される海水と重力変化を受けながら伝播する津波

性・海底の荷重変形の影響 (図 3 右) を考慮すると津波速度は 1.5% 程度低下する (たとえば松澤 (1950), Nakamura (1961)). このような日本人による先行研究があることは多くの現役津波研究者に知られておらず, 私は論文改定作業中に偶然知ることができた. Watada *et al.* (2014) は, これらの影響に加え, 海洋底の弾性変形や津波による海水移動による質量分布の変化に伴う地球重力場の変化が津波伝播速度に及ぼす影響 (図 3 右) を含めると, 長周期では津波速度が 2% 程度低下することを示した (図 3 左). 実際に深海底で計測された津波波形解析から得られた位相速度データは, 長周期で津波速度が減少する逆分散性をもつ理論分散曲線とよく一致していた (Watada *et al.*, 2014).

固体地球や海水の弾性, 津波の伝播時の物質運動に伴う重力変化を同時に考慮する, 重力弾性結合をした海洋-固体地球系の津波のシミュレーション手法は Watada *et al.* (2014) や Baba *et al.* (2017) が提唱している. Watada *et al.* (2014) は, 従来の実海底地形に対する長波津波シミュレーション波形に位相補正を施すと重力弾性結合系の津波波形となる簡便な手法を開発し, 長周期での逆分散が津波初動を反転させていたことを明らかにした (図 2). 遠地遅延と初動反転は, どちらも重力弾性結合系の津波の特徴であった.

3. 遠地津波予測技術の向上

遠地津波予測技術の向上により, これまで困難であった遠地津波波形の定量的解析が可能になった. 以下に 2011 年東北地震津波から時間を遡り, 遠地津波予測技術が使われた遠地津波研究を紹介する. 対象となった地震は図 4 の世界地図に示している.

3.1 2011 年東北地震津波 (M9.0)

Ho *et al.* (2017) は, 海水圧縮性に起因する海水の鉛直密度勾配を考慮するなど, 位相補正法の精度を向上させ, 近地・遠地の津波データに適応した. 近地 (走時 3 時間以下) データのみを利用して, 遠地 (走時 3 時間以上) データのみを利用してほぼ同様な震源域直上の津波初期波高分布が得られ, 遠地データのみから得られた地震発生直後 4 分間の津波波源の時間空間発展が, 近地データのみから得られた結果と遜色ないことを示した. Watada *et al.* (2014) の簡便な遠地津波波形の計算手法は, インバージョン問題においてグリーン関数 (津波波形) を準備する計算負担を軽減した.

3.2 2010 年チリ地震津波 (M8.8)

チリ沖合の深海津波計データを使った, 旧来の長波近似の津波波形解析による断層滑り分布イン

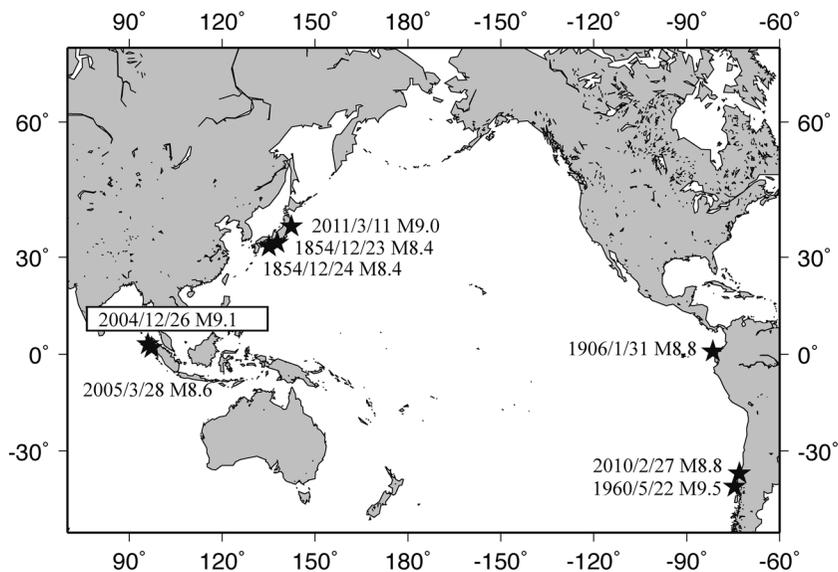


図 4 世界の遠地地震

バージョンでは、走時 10 時間のデータを含んでいた。実際より早く伝わる長波シミュレーションの波形に合わせるため、求められた断層滑り分布は、地震波や測地データ解析から推定されていた滑り分布よりも海から遠く、すなわち大陸側深部断層に集中していた。Yoshimoto *et al.* (2016) は計算精度が向上した津波シミュレーションを使い、地震や測地データ解析と同様の断層滑り分布を得た。走時 10 時間以上の遠地深海津波計記録から求めた滑り分布は、10 時間以下の近地津波計記録と同等であった。近地津波記録から求めた断層滑りは日本付近の遠地津波を精度よく予測し、リアルタイム近地津波波形データ利用による遠地津波予測が可能であることを示した。

3.3 2005 年ニアス地震津波 (M8.6)

津波波形データは 1 点を除き、すべて遠地 (4 時間以上) の津波波形データである。インド洋やアフリカや南極大陸沿岸で観測された津波波形を解析すると、ニアス島直下の深部プレート境界に滑りが集中したことが、大きな地震規模にもかかわらず巨大津波が発生しなかった原因であったことが判明した (Fujii *et al.*, 2020)。求めた滑り分

布はニアス島付近に展開していた GPS 等の測地データ解析から得られている断層滑り分布と類似しており、精度が向上した遠地津波データ解析は、巨大地震津波に対しては局所的な GPS 観測網に匹敵する断層滑り推定能力を持つことが示された。

3.4 2004 年スマトラ地震津波 (M9.1)

Titov *et al.* (2006) と Rabinovich *et al.* (2017) は、潮位計記録のスペクトル分析からスマトラ地震津波の一部は東進しオーストラリアの南方を迂回して太平洋へ進み北米に到達し、一部は西進しアフリカ南端と南米南端を通過し太平洋に到達したと主張している。Fujii *et al.* (in preparation) は、伝播経路を正しく評価し、米西岸沖に到達する遠地津波波形のシミュレーション精度を向上させ、新たな断層滑りモデルを構築した。地震発生 36 時間後に北米西岸沖の深海津波計で観測された孤立波は、スマトラ地震から東進した津波であることを波形シミュレーションにより示した。

3.5 1960 年チリ地震津波 (M9.5)

太平洋域で計測された潮位計記録が多く残っているが、長波津波理論に基づく波形モデリングで

は多くの観測点の走時を合わせることができず、太平洋全域の津波波形記録を用いた震源滑り分布は求められていなかった。Ho *et al.* (2019) は、精度が向上した遠地津波シミュレーション法と潮位記録のランダムな時刻ずれを許容するインバージョン法を組み合わせ、巨大地震の滑り分布が3つの大きなアスペリティに分かれていることを示した。

3.6 1906年エクアドル-コロンビア地震 (M8.8)

沈み込むナスカプレート上面で繰り返し被害地震が発生しており、コロンビア沖合の巨大地震履歴の中心的研究対象になっている地震である。北米 (走時約11時間) 2観測点、ホノルル (12時間) や日本 (20時間) 4観測点、パナマ太平洋岸 (2時間) の津波記録がある。Yoshimoto *et al.* (2017) では、1979年、1952年、1958年、2016年の地震断層破壊域よりも海溝軸に沿った浅部を1906年の主な滑り域としている。一方、Yamanaka and Tanioka (2021) らが異なる観測点を使って推定した断層すべりは、ナスカプレートが南米大陸に沈み込む海溝沿い浅部に大滑り域をもち、1906年と1979年の主破壊域は重なりとされた。

3.7 1854年安政東海・南海地震 (ともにM8.4)

1854年12月23日 (嘉永7年11月4日) 午前9時45分すぎに東海沖で、さらに翌24日に紀伊半島から四国沖にかけて地震が発生した。東海地震の発生時刻の特定は、当時日露和親条約締結のため下田に停泊していたロシア船が、地方時午前9時45分過ぎに発生した地震を経験し、10時ごろに下田を襲った津波で損壊を受けたことが記載された航海日誌による (加納ほか, 2021)。当時の時刻は太陽の南中時の正午に時計を合わせる下田の地方時 (現在の日本標準時+16分) なので、グリニッジ標準時でほぼ00:30となる。一方、この2つの津波は北米西海岸の3地点の検潮記録に残っている (Kusumoto *et al.*, 2020)。月や太陽の運行に基づく天文潮は正確に予報でき、潮位記録の絶対時刻を推定することができる。東海地震断層モデルを設定すれば、サンフランシスコ (走時

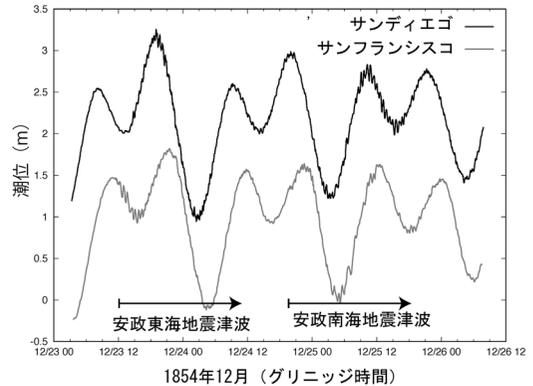


図5 安政東海・南海地震津波を含む、米国サンフランシスコとサンディエゴの検潮記録 (Kusumoto *et al.*, 2020 より)

約11時間) やサンディエゴ (12時間) の検潮所で津波波形予測ができ、逆算して東海地震の発生時刻が推定できる。Kusumoto *et al.* (2020) によれば東海地震の発生時刻はほぼグリニッジ標準時00:30であり、航海日誌から読み取った発生時刻と一致する。図5の潮位記録には安政東海地震津波と30時間後に発生したとされる安政南海地震津波が見てとれる。2カ所以上の同一の検潮記録に東海と南海の2つの津波が記されているため、今後の研究の進展により、東海地震と南海地震の発生時刻のみならず発生位置関係や規模の比較などの定量的研究の進展が期待される。

4. おわりに

遠地津波予測技術の進展は、遠地での津波記録から巨大地震の震源過程を求めることを可能にした。従来のシミュレーション手法で走時や波形が合わないことから、手付かずであった1850年代から潮位記録に残る過去の津波イベントは、定量的津波研究の対象となった。巨大地震の震源域の滑り分布が解明され、繰り返される海溝型巨大地震の履歴の一端が明らかとなりつつある。

参考文献

- Baba, T.S. *et al.* 2017. *Ocean Modelling*, **111**, 46-54.
Fujii, Y. *et al.* 2020. *GJI*, **223**, 1162-1171.
Ho, T.-C. *et al.* 2017. *JGR: Solid Earth*, **122**, 10,155-10,175.
Ho, T.-C. *et al.* 2019. *JGR: Solid Earth*, **124**, 2812-2828.
今村文彦ほか. 1987. 海岸工学講演会論文集, **34**, 172-176.
今村文彦ほか. 1990. 地震, **43**, 389-402.
加納靖之ほか. 2021. 歴史のなかの地震・噴火. 東京大学出版会.
Kusumoto *et al.* 2020. *SRL*, **91**, 2624-2630.
松澤武雄. 1950. 地震学, 角川出版.
Nakamura, K. 1961. *Science reports of the Tohoku University, Ser. 5, Geophysics*.
Nakamura, K. and Watanabe, H. 1961. 1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告, チリ津波合同調査班.

- Rabinovich, A.B. *et al.* 2017. *JGR: Oceans*, **122**, 7992-8019.
Titov, V. *et al.* 2006. *Science*, **309**, 2045-2048.
Yamanaka Y. and Tanioka Y. 2021. *JGR: Solid Earth*, **126**, e2020JB021375.
Yoshimoto, M. *et al.* 2016. *GRL*, **43**, 659-665.
Yoshimoto, M. *et al.* 2017. *GRL*, **44**, 2203-2210.
Watada, S. *et al.* 2014. *JGR: Solid Earth*, **119**, 4287-4310.

綿田辰吾

[わただ しんご]

現職 東京大学地震研究所准教授

略歴 1995年カリフォルニア工科大学
Ph.D取得. 同年防災科学技術研究所研
究員, 1997年東京大学地震研究所助手,
同助教を経て2018年より現職

研究分野 地震学, 津波



地震記者の回想—3—

1970～1980年代、伊豆半島では群発地震が相次いだ。被害地震、中伊豆で地殻の異常隆起、群発地震の多発、挙げ句の果てに伊東沖で海底噴火に至った。

これら一連の地震・火山活動に、地元からは不安の声が多数寄せられた。地震活動が激しくなり、街中で石垣が崩れるなど被害がでるとメディアへの情報提供や問い合わせが相次ぐ。

伊豆川奈沖の海面に大きな波紋が出現し、いつまでも消えずに漂っている現象があらわれたことがある。池に石を投げ入れると水面に波紋が起き、徐々に広がっていきやがて消える。ところが、このとき海面に現れた波紋は四方に拡がらず、海面に漂ったままだった。発生場所は川奈港にほど近い場所。伊豆東方沖群発地震の震源付近だ。現れた波は普通の波紋とは異なった様相を呈していた。波紋が拡がったまま消えず、いつまでも位置を変えず水面に漂ったままだ。「群発地震の影響か。それとも海底噴火のような火山活動の予兆なのか。住民の間に不安が広がっている」という通報だった。わたしは現場に向かった。

湾を見下ろす高台に喫茶店があった。噂を聞いて、この不思議な波を見ようと店は見物客で混みあっていた。波の中心あたりには気泡などが上がっている様子は見えない。波紋は同心円を描いたまま四方に拡がることもなく静かに漂ったままだった。「もう1時間近くも波紋はそのままです」男性客が首をかしげる。喫茶店主は興奮気味に波の写真を撮り続けていた。

わたしは火山噴火予知連の下鶴大輔会長に写真を送って「この現象は何でしょうか」と尋ねた。下鶴さんは、「うーん」と唸るだけだった。後日、再度、下鶴さんに質問した。しかし下鶴さんは「あれが何だったのか、今もって判らん。お化け波だな」と。話はそれ以上の進展はなかった。この“お化け波騒動”は手石海丘が噴火する前のこと。手石海丘に近い海域だった。

伊豆の群発地震に関してはこんなこともあった。東伊豆の住民からの通報で、「小室山付近で微動が出ている」というのだ。東大地震研究所の宮崎 努さんに現地へ来てもらった。小室山の山頂に立つと、たしかに微動らしき音がする。音がする方向を確かめて、宮崎さんがいった。「まっすぐ北に富士山が見通せませす。音はあの方向からです。自衛隊が演習しています。砲弾の音が響いてきますね」と宮崎さん。3月は微動の通報が多いらしい。「会計年度末は予算調整があるから、実弾演習が多いらしい」と巷の声があった。

伊豆で群発地震が始まると、市民からの問い合わせが増える。さまざまな噂が街に流れる。国道を「東大地震研究所」と書いた車が走ると市民は敏感に反応する。「きっと何かあるに違いない。」そんな噂が飛び交い、メディアはなんにも報道しないが何らかの情報を持っているのではないかと、問い合わせが相次ぐ。「きのうはNHKの車がやってきた。新聞社の車も頻繁に走る」「近いうちに大きな地震か噴火があるのだろうか」と話は増幅されて情報が伝搬する。

「伊東市宇佐美の地下には、むかしの噴火で上がってきたマグマの塊が、地表に到達せず地中に残っているらしい。ここは火口だろう」などの話もささやかれた。小室山、大室山、一碧湖とここは“単成火山”の地。それが理解されていないこともさまざまな噂を呼ぶ一因だろう。

宇佐美地区に住む温泉掘削業の黒川義男さんは自宅の井戸で水温や湧出量を毎日測定していた。黒川さんは群発地震があると水温・湧出量が微妙に変化することに気付いていた。温泉業者の勘は鋭い。「近く群発地震があるかも知れない」そんな予感がしばしばあったそうだ。しかし黒川さんは世間を騒がせてはいけないと考えて誰にも話さなかった。黒川さんが長年の観測データを持っていることに東大地震研究所の茂木清夫さんが注目した。それらは論文にな

り、地震学会でも報告された。

東伊豆の群発地震活動は長期間続いたから、取材エピソードが数限りない。1978年伊豆大島近海地震が発生した際、東伊豆の熱川バナナ・ワニ園で、普段は鳴かないワニが地震発生前に突然鳴いた。一報を受けて取材に駆けつけた。園長は言う「ワニは普段は鈍感だが、近くの伊豆急行に見たこともない新型電車が来ると、どうしたわけか鳴く。いつもと異なる電位を感じると鳴くらしい」。地震の前兆として電位の変化を感じてワニが鳴くのだろうか。

異変はまだある。これも伊豆大島近海地震のときだ。富士山麓にあるミミズの養殖場で地震発生前にミミズが大量に這い出して凍死した。これも現地取材した。地震が起きたのは1月。真冬の富士山麓、早朝は氷点下だ。露天にミミズを養殖する木箱が数段積み重ねられていた。ミミズが大量に這い出し凍死していたのは最下段の地面に密着している飼育箱からだった。その数は数千匹。地震の直前に何らか、地面からの信号を感じて這い出したのだろうか。「こんなことは初めてです」とミミズ養殖会社の社長は語るが、はたしてミミズは地震を予兆したのか否か、真相は不明だった。取材後、わたしは力武常次さんにこの事実を報告した。

高校生による地震予知観測学習が静岡県で行われたことがある。東海地震対策の一環として県内の高校9校を地震予知観測モデル校に指定。高校生の手で微小地震、地殻の傾斜、地電位、地下水位の観測を行うほか、学校や地域の特色を生かした防災活動を展開しようというものだった。観測の指導は京都大学の尾池和夫さんが行った。地震観測は学校の裏山や校内の古井戸に観測機器を据えて行われた。山間地の高校が行った地電位の観測では野ねずみにケーブルをかじられることが再々あった。鉄道線路に近い高校では電車の電流が観測を邪魔した。生徒たちは電車の研究に切り替えた。上りと下りの電車、どちらが来るか、地電位の波形で判別できるというのだった。

伊豆半島の地震・火山活動が活発化したの

は、1974年伊豆半島沖地震からだった。この地震が発生したとき、わたしはラジオで生放送のワイド情報番組を担当していた。放送の最中にスタジオが強く揺れた。天井から吊ってある鎖が緩んでマイクロフォンがテーブルにずり落ちてきた。スタジオでは放送機器の収納ラックが倒れそうになった。大揺れの最中、わたしは放送を続けた。「いまスタジオが大きく揺れています。身の安全を図ってください」つづいて「リスナーの皆さん、お宅の地域がどうだったか、スタジオに一報ください。放送いたします」と告知した。すると、各地の状況が次々と寄せられた。その1つに「山の向こうに土煙が上がりました」というのがあった。石廊崎近くからの通報だった。そこで伊豆南部に取材班を投入することを即刻決めた。テレビとラジオの中継車を天城峠越えて現地に向かわせた。別の取材班は沼津港からモーターボートで駿河湾を南下し南伊豆へ急行した。被災地に向かう中継スタッフは前進するのに難渋した。行動をとともにした警察機動隊、自衛隊と一緒に崖崩れの土砂を排除しながら、落石を縫っての天城峠越えだった。石川さゆりの歌ではないが「揺れ落ちる山を越え、くらくらとする地を這って」南伊豆町中木地区にたどり着いた。

ところが中継に思わぬハプニングが発生した。現地へ電源車を同行させなかったため、テレビ中継用の照明がない。仕方がないから中継車のヘッドライトで代用することになった。ところがである。夕闇が迫るなかりポーターがカメラの前に立つと照明が当たるのは膝までだった。顔を照らすにはリポーターがあぐらをかいて座らねばならない。画面をバストショット（胸から上）にすれば、リポーターが立っているように映る。グットアイデアとばかり、座って中継を始めた。その途端、1匹の犬が画面に迷い込んできた。リポーターのうしろを犬が横切った。テレビをみていた人は驚いたことだろう。リポーターのうしろ首のあたりを犬が横切ったのだ。犬は宇宙遊泳でもするようにテレビに映った。

川端信正（元静岡放送）

■ 書 評 ■

● 深海 10 km の海底から 46 億年の歴史を辿る旅路

藤岡換太郎 著

見えない絶景 深海底巨大地形

評者 木戸ゆかり

バーチャルな海底地形の旅と評して、まさに COVID-19 新型コロナウイルス拡大防止のために外出自粛を余儀なくされている昨今に相応しい格好の海洋底探検誌である。

本書は 5 章に分かれているが、なんといっても、第 1 章：「深海底世界一周」のバーチャル海底旅行記が圧巻である。宮古港を出港すると、さっそく大陸棚、急崖があり、日本海溝へ落ち込んでいく。ここで大きな海底地滑りにあったのは、のびたとドラえもんの海底探検の巻だったか。

そして独特の視線で海嶺、海溝、断裂帯、海台、深海大平原という 5 つの代表的な大構造を通る絶妙なコース選定がなされる。ここで使われる図 1-2「深海底世界一周のコース」は、本書最高の図面と言えよう。大圏コースとその下に地形プロファイルが描かれ、まさに主要大構造が地表 3,000 m、水深 5,000 m といった凹凸のジェットコースターである。コースの説明の後に、第 10 景までお気に入りの解説が続く。

著者の研究室には、常時、大きな地形図が貼られていた。特に天井に大きく貼られた日本周辺の海底地形図は圧巻であった。いつも眺めては、瞑想にふけてこうした書き物の構想を描いていたのかもしれない。日本のジュール・ヴェルヌと書いたら誉めすぎか？ネモ船長率いるビビッドな表現は、51 回という誰もこえることができない潜航経験から醸し出されるものである。

ブラックスマーカーを吐き出すチムニー群、そこに群がるシロウリガイ、海溝での黒くて深い巨大割れ跡、そうした絶景の数々、その中で、絶叫光景が現れる。なんと深さ 6,500 m の日本海溝で発見されたマネキンの首である。多くの海底に漂うビニールゴミ。マイクロプラスチック化し、環境問題を引き起こしている元祖である。本書は SDGs として大きく取り上げられる環境問題にも警鐘を鳴らしている。見えない絶景の広がる母なる海ははたして次世代に残せるのか。

著者は、実は地形の特徴を抽出し気の利いた名付け親として名高い。国際水路機関とユネスコ政府間海洋学委員会の下に設置されている国際機関「海底地形名称委員会」における長年の功績から海上保安庁長官表彰を受賞されている。本書に登場する仮想潜水艇バーチャル・ブルー号で巡る、ラビユタ、ゴジラ・メガマリオンにマンガン銀座、板没する国の坂東深海底。なんとも遊び心を感じる名称ではないか。水に覆われた深海には、こんなにも活動する大地の動きが刻まれているのである。

折しも今年は、国連海洋科学の 10 年のスタートを切り、The NIPPON FOUNDATION-GEBCO SEABED 2030 プロジェクトにて世界の海底地形図の空白域をなくす国際的な動きが始動している。はやぶさ 1 号、2 号が地球外惑星からサンプルを持ち帰る昨今ではあるが、海水に覆われた海洋底は、実は、いまだすべての測量が終わっていない。たった 24% の測量カバレッジ (2020 年 11 月時点) から、2030 年までに全世界の海洋底を 100% カバーできるような測量網を敷いて、海洋底の様相を明らかにしようとするものである。詳細な海底地形を見てみたいが、だがしかし、148 p をも割いて、時には人間臭く、泥臭い描写に、好みとするか否かは別としても、読者に鮮明なイメージを沸かせる「見えない絶景」は、地球科学への興味を誘う。

伊豆-小笠原-マリアナ海溝の陸側では、蛇紋岩海山の存在が知られており、わざわざ寄り道してまでも紹介されている。生命の起源とも言われる蛇紋岩海山は、きわめて重要な項目であり、高解像度の海底地形図付きでの解説をいただきたいかったが、次の稿に期待したい。

第 2 章では、「深海底巨大地形の謎に挑む」と題して、世界一周して眺めてきた大地形の成り立ちや謎に迫る。この章では、たいへんプリミティブな疑問を列挙し、著者なりの解説を模索している。第 1 章で紹介された「見えない絶景」が生まれたシナリオについての壮大な仮説である。自ら「想像地質学」と造語するほどである。つづく第 3 章「プレートテクトニクスのはじまり」も、第 4 章「冥王代の物語」も、想像だけではなく、最先端の研究成果をわかりやすく紹介している。特に冥王代にスポットを当てているのは、本書の特色といえる。しかし、第 3、4 章の解説に今ひとつ踏み込みのないことから物足りなさを感じるのは私だけであろうか。終章「深海底と宇宙」では、最大の疑問であった「深海底の地形

はなぜ巨大なのか」に再度立ち戻っている。地形の巨大化へのシナリオ～著者なりの独特の地球観～宗教観～自然観へと誘われるが、不思議と押し付けがましくなく、独特の語りに乗せられていくのも良いものだ、と思わせるのは、懐かしい「ファンタジア」が奏でる世界も手伝ってだろうか。

著者の本は、数値情報がたくさん散りばめられていて、イメージしやすい。今となっては懐かしい令和の始まりに、チャレンジャー海淵での世界最深記録達成が紹介されている。世界で最も高いヒマラヤ山脈から最も地球深部に近い深海底まで、さらに時間軸も冥王代から現生まで、いや銀河発祥の135億年にまで遡る。とてつもない長い時間軸には、人の達成した年代が細かく刻まれている。また本書中には、海底探検に関わってきた貢献者達が実名で掲載されている。潜水調査船のパイロット、技術者、母船の船長、船員に至る幅広い人脈からの情報網と情報量が文学的素養と織りなすハーモニーにつねに現場を大事にしてきた著者の思いを感じた。索引、参考図書の豊富さなど、初学者から研究者に至るまで、幅広く興味をそそるに違いない。

折しも、COVID-19の影響で、本当にヴァーチャル航海についての議論が進められている。本書は先駆けて、ヴァーチャル・ブルー号によるヴァーチャル探検を提案した。地球を考えるきっかけとなる、初学者に読んでいただきたい書である。

「おわりに」に最も訴えたかったことが集約されている。昨今、有人潜水艇は科学の発展に本当に必要か、という議論がなされている。30年もの長きにわたり、無事故で1,580航海数あまりの実績を誇る「しんかい6500」だが、多額の費用をかけて1潜航でわずか1名ないし2名の研究者に海底を目視する権限を与えることは、費用対効果という経営的な観点からは、無駄に写るのかもしれない。なんとも夢のないせちがらい世の中である。しかし一方で次世代を担う若手にこそ深海底での実践研究を味わってほしい。「ガチンコファイト航海」と称しクラウドファンด์までして、第1弾（2019年8月）、第2弾（2021年3月）と学部生向けのイベントを実施した経緯がJAMSTECにはある。一人でもバーチャル・ブルー号の第2、3、4章へ明解な答えを探す若手が後に続くことを期待する。いや若者でなくてもよいかもしれない。「観測に夢中になっていたが調査が終わると急に寒くなった」という著者のように、目前の新たな世界に無我夢中になれる心ある研究者にバーチャルでなく本物を味わってほしいものである。

<講談社、2020年5月、新書版、240頁、1,000円+税>

[きど ゆかり 海洋研究開発機構 研究プラットフォーム
運用開発部門 技術主任]

● 論理能力を 向上させてくれる書

瀬戸 一起 著

地震：どのように起きるのか

評者 川崎一郎



SCIENCE PALETTE



本書を手にしたたいへん驚いた。「ダブル・カップルと断層モデルの等価性」や「P波やS波の4象限型の放射パターン」などの物理数学的な定式化は地震学の核心である。「なぜP波とS波が存在するのか?」、「なぜ地震は断層滑りなのか?」などは物理数学的な定式化によって納得されるようになった。それらが基本的な証明とともに専門外の読み手の理解を助ける簡潔な解説を加えて190ページの「新書」サイズに収まるとは想像を超えるものであった。

あえて不満を探すとすれば、「微小歪みの弾性論」という重要なキーワードは落とさないで欲しかったし、「モーメントの物理的次元はNm（ニュートン・メートル）でエネルギーと同じ」といえば、読み手の地震モーメントに対する納得感も増したであろうという程度であった。

本書の第3章では、2回の世界大戦の間に繰り広げられた「マグマ貫入説と断層説」の論争や「シングル・カップル説とダブル・カップル説」の論争に言及している。それらは、1960年代に入って、丸山卓男先生などによって、「弾性体内部の変位不連続がダブル・カップルに等価」であることが数学的に証明されて決着した。

日本では、かつてマグマ貫入説やシングル・カップル説を唱えた人々はネガティブに描かれてきたように思われる。評者は、それが日本の地震学において、間違いを恐れさせ、大胆な仮説検証型の研究を遠ざける一因になっているような気がしてならない。本書では、対抗し

た両説の理論的な違いとそれが克服された過程などに言及するのみである。評者にはこのような抑制的な書きぶりがうれしく思える。

ダブル・カップル説の証明の節に現れる波数積分表示は初学者には過度に複雑に見えるかもしれない。しかし、論理構造としては比較的簡明である。「なぜ地中に不連続面が無いのにレーリー波が発生するのか?」、「なぜ屈折波は直達波に比べて短周期成分に乏しいのか?」などの地震学にとって不可欠の諸問題は、本書の延長として、半無限媒質や多層構造媒質の計算を試みないと理解できない。そのときには波数積分表示が必要になる。

波動理論は、日本の研究者達が重要な役割を果たしてきた知的資産である。地震学を志す学生さんには、先達への尊敬も兼ねて、波数積分表示も含めて紙と鉛筆で解きほぐす努力をすることを勧めたい。必要なら著者の前書「地震動の物理学」を参考にするとよい。

リンカーンは、議員になってから、論理と言語の能力を向上させる目的でユークリッドの幾何学原論を読み親しんだと聞く。本書を手にする理系の読み手には、数式の詳細はともかく、論理の展開を追うのは困難ではないはずである。強く一読を勧めたい。特に隣接分野で地震に興味のある方には、論理能力を向上させる絶好の素材として読んでいただきたい。

評者がこのようなことを強調するのは、トーマス・クーンの「科学革命の構造」の中に、「新しいパラダイムは、必ず、非常に若い研究者か、他分野から参入した研究者によってもたらされる」という主旨のことが書かれているからである。本書が道案内になってクーンが言うようなことが起こることを期待している。

<丸善出版、2020年5月、新書判、192頁、1,000円+税>
[かわさき いちろう 元京都大学防災研究所教授]

● 活断層研究の新たな地平

岡田篤正 著

中央構造線断層帯—最長活断層帯（四国）の諸性質—

評者 伊藤谷生

ずっしりと重い本書を手にとらせていただくと、中央構造線という日本列島の地殻全体を切断しながら縦断し、日本海拡大以前はロシア沿海州の中央シホテアリン断層にも接続していたと考えられている地体構造上の大断層と、それに随伴する中央構造線活断層帯解明に半世紀以上にわたって挑み続けてこられている岡田篤正先生

の気迫、そして四国において集積された貴重なデータを今後の研究の礎として全面的に提供するという姿勢にまず心を打たれる。B5判378頁全6章の中になんと186図、12表、61写真が大きなスペースをとって記載されており、それらの中にはすでに失われた露頭の詳細な記載や中央構造線に関する基本的な解説なども含まれている。四国をはじめ西南日本の地質構造を隈なく調査・研究され続けておられる村田明広氏が「研究者だけではなく、多くの教育機関や自治体関係者、四国に住んでいる方々にとっても必読の書」¹⁾と指摘されている所以である。

その本書からは、先生が切り拓かれ、新たに発展させられた活断層研究の真髄を学ぶことができる。変動地地形学・第四紀テクニクス研究者である石山達也氏は岡田先生の研究の基軸は「オーソドックスな野外地質調査をベースとした地形学・第四紀地質学的手法」²⁾であると述べられているが、私も改めてそのことを理解したところである。他の変動地地形学研究者の方々も同様な見解^{3,4)}を述べられているので、ここでは繰り返さず、岡田先生がナウマン以来連綿と続く中央構造線研究史において新たに切り拓かれた地平を明らかにすることを通じて本書の意義を考えてみたい。

1973年、文字どおり若手研究者であった岡田先生が、中央構造線に沿う活断層運動の研究成果をもって編者の杉山隆二先生をはじめ並みいる地質学研究の泰斗のなかに斬りこまれたのが『中央構造線』（東海大学出版会）である。同書掲載の論文⁵⁾は地質学や地球物理学の領域に大きな影響を与え、中央構造線研究分野が新たに拡大・前進する契機となった。以後、多くの研究者が「地形学・地質学的手法」（石山氏、前述）によるトレンチ掘削や自然露頭観察を全国の活断層に対して展開し、地形学と地質学の共同作業として大きな成果をあげていることは周知のとおりである。このことが活断層研究の新たな地平の真髄といえよう。

さて岡田先生はすでに前掲の論文⁵⁾のなかで中央構造線に随伴する活断層を中央線（現在では中央構造線と標記）活断層系（現在では地震調査推進本部に従い活断層帯と標記）と呼び、地質境界としての中央構造線と区分して議論されている。そして両者の関係解明が活断層の評価に関わる本質的に重要な課題であるという鋭い問題意識を一貫して堅持され、本書もその視点によって貫かれている。この問題意識に最初に応えたのが吉川宗治先生⁶⁾や由佐悠紀先生⁷⁾京都大学の地球物理学のグループであった。以後、反射法地震探査等地球物理学的手法による中央構造線地下構造の解明作業が活断層帯との関係も含めて精力的に進められ、私もその一端を担わせていただいた。これは地表ならびに浅部で観察される活断

層とそれを形成させる震源断層の関係解明という今日の課題に直結している。ここに岡田先生が切り拓かれた新たな地平の先駆性がある。

このような活断層研究の新たな地平を引き継ぎ、中央構造線とそれに随伴する活断層帯の研究をさらに進めるうえで重要と思われる課題を僭越ながら2つほど示させていただく。

第1は、中央構造線活断層帯のセグメント区分の再検討である。本書は四国内に限っての区分となっているが、地震本部は豊予海峡や別府湾における海域での反射法地震探査の成果も考慮し、別府湾を経て由布院までも活動区に含めて検討している⁸⁾。これは四国中央部において中央構造線の方向が約15°反時計回りに回転し、伊予灘から別府湾にかけて狭長な堆積盆が中央構造線の北側(上盤側)に断続的に連なり、さらに別府-島原地溝帯へと接続しているとも考えられるからである。今後、構造地質学的、地球物理学的手法による地殻構造解明作業などと連携する研究が期待される。

第2は、中央構造線の起震力評価である。中央構造線は白亜紀に500kmとも考えられている左横ずれ運動を受け、その後もプレートシステムの転換に伴ってさまざまな変位センスの活動を経験して形成された幅広いdamage zoneと破碎帯⁹⁾を持つ、いわば成熟度が高いという「個性」を有している。現在、活断層が引き起こす地震の評価においては断層の「個性」に関わりなく一律の剛性率を用いているが、成熟度の高い中央構造線などに一律の剛性率を適用するのが妥当なのか、再検討の時期に来ているように思われる。活断層評価をよりリアリスティックなものにするうえで岩石物性学などと連携した中央構造線破碎帯研究の新たな展開が重要と考えられる。

こうした新たな課題を進めるに当たってつねに立ち返らねばならないのは本書において系統的に記載されている中央構造線の「現場」である。その意味でも本書は今後いっそう重要となるに違いない。それゆえ、私は中央構造線に関する研究や調査に携わっている方々が手許に置かれることをお勧めしたいと思っている。

- 1) 村田明広. 2020. 日本地質学会 *News*, **23**, no. 8, 6.
- 2) 石山達也. 2020. 日本地震学会ニュースレター, **73**, no. 3, 16.
- 3) 堤 浩之. 2020. *地理学評論*, **93**, 469-470.
- 4) 杉戸信彦. 2020. *活断層研究*, **53**, 67-68.
- 5) 岡田篤正. 1973. 中央構造線, 杉山隆二編, 東海大学出版会, pp 49-86.
- 6) 吉川宗治ほか. 1987. *地震学会講演予稿集*, **2**, 162.
- 7) 由佐悠紀ほか. 1992. *地震 II*, **45**, 199-212.

8) 地震本部. 2017. https://jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/rs_chuukozosen/

9) Ikeda, M *et al.* 2013. *Tectonophysics*, **601**, 78-86.

<古今書院, 2020年6月, B5判, 378頁, 9,800円+税>

[いとう たにお 地震予知総合研究振興会]

● 実務家を意識した意欲的な大著

吉田 望 著

液状化現象—メカニズムから数値解析まで—

評者 國生剛治

本書は液状化に関するメカニズム、予測・設計法と数値解析の3部から構成され、幅広い読者のニーズに応えることを意図した大著である。しかしメカニズムと予測・設計法については類書も多いため、その特徴はあくまで数値解析が主目的で、前2部はその導入・解説と捉えたい。

著者の吉田 望氏は、液状化に関する数値解析の分野で良く知られた研究者の一人である。特に建設業・コンサルタント業での数値解析業務を中心とした豊富な実務経験に加え、大学などで教育研究生活や海外留学も経験し、現場の設計実務にも精通した異色の技術者・研究者として活躍されてこられた。本書は著者の経歴を反映し、実務経験に裏打ちされた液状化の設計計算に関わる実務家を意識した意欲的な大著であると感じた。

「はじめに」の中で液状化解析技術の発展とともに歩んでこられた著者は、その数々の経験を通して「液状化の解析は単にプログラムがあれば正しい答えが得られるというわけではなく、技術者が考えるべきことが沢山ある」、「液状化はよくわかっている現象ではなく、研究はいまでも進行中であるが、…実務技術者が知っておいたほうがよいと考えられる事項に的を絞った」と述べており、本書でのねらいを整理し、液状化解析が抱える数々の問題を十分認識したうえでの労作と感じた。

第I部では液状化を理解するための基礎知識からメカニズムと力学特性について述べ、第II部では各種設計指針による液状化発生予測と構造物設計法を要約したのち、本書のコアである第III部では有効応力による地盤の地震時応答解析について、応力~ひずみ関係、ダイレイタンシー特性などのモデル化、地盤の離散化手法、解析上の留意点、解析例と精度などについて述べている。

とりわけ興味深いのは、10.3節の比較解析における一

斉解析やブラインドテストと解析結果との比較評価である。勝手な抜粋を許していただくと、「現状では、解析プログラムによりかなり差があり、…解析の精度が悪く役に立たないようにも見えるが、現象が説明できた例は多いし筆者はそうは思わない。結果が分かればそれなりに合わせることができ、対策工法の比較検討には役立つ。設計では安全側評価であれば必ずしも正確である必要はない」と、液状化問題での解析信頼度についてのさまざまな経験と苦労に基づきかなり本音が述べられている。

上部構造物の解析と異なり、液状化解析で対象とする地盤は自然の造形物で不均質性に富み、初期せん断荷重の下で地震時に繰返し非排水せん断されダイレイタンスー現象により強い非線形挙動を示すが、この複雑な現象には実に多くの不確実性が含まれる。解析法としては、従来の等価線形や全応力による解析に加え、L2地震動も対象に地盤の強い非線形挙動を理論的には再現可能な有効応力非線形解析が多用されるようになってきている。しかし、これにより本書が目指すようなブラインドテストの高精度な予測ができたとしても、実務での設計的観点からは地盤のモデル化や非線形物性、入力地震動などに含まれる多くの不確実性による振れ幅を考慮することが必須となる。また、個々の解析ソフト特有のパ

ラメータの決め方に一般的な解析技術の解説書では説明の及ばない詳細なノウハウが含まれ、「結果が分かればそれなりに結果を合わせることができる」との受け止めにもつながっている。したがって、等価線形など種々の簡易評価に足場を確保しながら、設計値を工学的に判断する必要性が残されることになる。

本書で液状化問題での有効応力非線形解析技術を学ぶ読者への書評としては、まず技術の全容を幅広く知るうえにおいて、多少高度ではあるが適切な入門書と言えよう。一方、かなり経験を積み非線形液状化解析自体が抱える問題点を感じている実務家の方々へは、著者のこの解析技術に対する思いを十分理解したうえで、大ひずみ挙動の再現精度を突き詰めることばかりに躍起になるのではなく、地盤の非線形物性の適切な考慮の上にとって2・3次元地盤の不均質性や構造物との連成現象が離散化モデルによりバランスよく再現できることが数値解析を実施する最大のメリットであること、さらに大地震時の解析には多くの不確定要素が含まれているため、種々のパラメータによる解の振れ幅を定量把握した上で設計値を決定すべきことを指摘したい。

<森北出版、2020年8月、B5判、384頁、10,000円+税>

[こくしょう たかじ 中央大学名誉教授]

●新刊紹介

平 朝彦 著, 海洋研究開発機構 監

**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**

講談社, 2020年11月, A5判, 280頁, 2,500円+税

講談社 編, 田近英一 監

地球のふしぎ (講談社の動く図鑑 MOVE)

講談社, 2020年11月, AB判, 192頁, 2,000円+税

Donald Turcotte・Gerald Schubert 著, 木下正高 監
訳

ジオダイナミクス原著第3版

共立出版, 2020年11月, B5判, 632頁, 11,000円+税

日本建築学会 編

大振幅地震動に対する免震構造の設計

日本建築学会, 2020年11月, A4判, 180頁, 3,600円
+税

中島淳一 著

**日本列島の未来 これからも起こる地震や火山
噴火のしくみ**

ナツメ社, 2021年1月, 四六判, 240頁, 1,400円+税

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**

筑摩書房, 2021年1月, 四六判, 288頁, 1,700円+税

鎌田浩毅 著

首都直下地震と南海トラフ

エムディエヌコーポレーション, 2021年2月, 新書判,
312頁, 891円+税

ゲルハルト・H・ヴァルトヘル 著, 内田次信・竹下哲
文・上月翔太 訳

西洋古代の地震

京都大学学術出版会, 2021年2月, A5判, 360頁, 4,800
円+税

ひょうご震災記念21世紀研究機構 編, 五百旗頭真・
御厨 貴・飯尾 潤 監

総合検証 東日本大震災からの復興

岩波書店, 2021年2月, A5判, 376頁, 4,000円+税

ルーシー・ジョーンズ 著, 大槻敦子 訳

**歴史を変えた自然災害 ポンペイから東日本大
震災まで**

原書房, 2021年3月, 四六判, 304頁, 2,800円+税

河北新報社 編

**東日本大震災10年 復興の歩み 宮城・岩手・
福島**

河北新報社, 2021年3月, A4判, 128頁, 1,300円+税

斎野裕彦 著

**市民の考古学 東日本大震災と遺跡に学ぶ津波
防災**

同成社, 2021年3月, 四六判, 194頁, 1,800円+税

矢守克也 著

防災心理学入門 豪雨・地震・津波に備える

ナカニシヤ出版, 2021年3月, 四六判, 164頁, 1,900
円+税

S.I. レズニック 著, 国友直人・栗栖大輔 訳

**極値現象の統計分析 裾の重い分布のモデリ
ング**

朝倉書店, 2021年3月, A5判, 432頁, 7,200円+税

東北大学災害科学国際研究所 編

**東日本大震災からのスタート 災害を考える11
のアプローチ**

東北大学出版会, 2021年3月, B5判, 230頁, 3,000円
+税

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 過去がしめす未来

東京大学出版会, 2021年3月, 四六判, 260頁, 2,600
円+税

ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会（ADEP）の人事異動について

採用

千葉 慶太	本部地震防災調査研究部 副主任研究員	21. 4. 1
草野 淳一	つくば観測技術センター 副主任研究員	21. 4. 1

退職

伊藤 谷生	本部地震防災調査研究部 副首席主任研究員	21. 3. 31
-------	----------------------	-----------

編集後記

東北地方を中心として未曾有の大災害をもたらした東日本大震災から10年の月日が流れた。

本号巻頭のエッセイには、この東日本大震災で政府の復興構想会議の議長を務められた五百旗頭先生よりご寄稿をいただいた。犠牲者数の観点から諸々の災禍を比較し、戦争がもっとも悲惨であるとの結論を述べられている。

ついで本文の冒頭では、東日本大震災からわれわれが得た知識や学んだ教訓の数々について、東北大学の松澤先生には理学的視点から、また今村先生には工学的視点から、それぞれ総括的に詳しい議論をしていた。

松澤先生からは、東北地方太平洋沖地震がなぜかくも巨大化したのか、そしてなぜ予測できなかったのかについて素晴らしいレビューをしていただいたのち、今後に向けた貴重な教訓を述べていただいた。

また今村先生からは、東日本大震災に伴った津波災害の特徴とその諸要因を紹介していただいたのち、津波発生モデルの高度化や、ハザード予測の高精度化に向けた学際連携研究推進の必要性など、今後の津波防災に向けた大切な提言を述べていただいた。

なお、奇しくも東日本大震災10周年を目前にひかえて本年2月13日に福島県沖で発生したM7.3の地震については、その概要を囲み記事として速報している。

さて、東日本大震災に引き続いて現在懸念されているのが、南海トラフを舞台とする巨大地震である。海洋研究開発機構では、その南海トラフで地震発生帯の掘削計画を進めている。その成果と今後の計画等について、同機構の倉本先生に解説をお

願いした。

このような海溝部で発生する大地震でもっとも警戒すべきは、大きな津波による災害である。防災科学技術研究所では、大地震がもたらす強震動を評価する地震ハザードステーション (J-SHIS) に続いて、津波を評価するための津波ハザードステーション (J-THIS) を開発し、運用を開始している。このシステムの詳細について、同研究所の土肥・中村・藤原の各先生に紹介していただいた。

一方、シリーズ化している国際プロジェクト SATREPS の個別テーマ紹介について、今回は南米コロンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減に向けたプロジェクトを取り上げた。その概要と得られた成果、そして今後に向けた展望について、プロジェクトリーダーを務められた名古屋大学の熊谷先生より、わかりやすいご報告をいただいた。

以上に加えて、本号では興味深い3編の寄書と2つの囲み記事を掲載している。

最初の寄書は、昨年(2020年)の初夏、長野県上高地付近で活発化した群発地震の話題を取り上げている。今回の活動とその背景などについて、飛騨山脈の地震活動を長年研究してこられた京都大学の大見先生より、詳細な解説記事をいただいた。

つづいて、防災科学技術研究所の久保先生からは、地震による揺れを予測する問題に関して、AIによる単純な機械学習ではうまくゆかなかった問題が、物理モデルを組み合わせることによって解決できたという例を紹介していただいた。

もう1つの寄書は、東大地震研の綿田先生による遠地津波波形解析技術の向上に関する話題である。これまで考慮されてこなかった地球の弾

性、海水の圧縮性、重力場の変化等の影響を厳密に取り入れることで、従來說明困難だった津波到達時刻のずれや初動極性の謎が解決されたという。精密科学の勝利といえる好例であろう。

次に、囲み記事としては、「ジオパークと地震」というタイトルで、日本ジオパーク委員会の初代委員長を10年にわたり務められた京都大学元総長の尾池先生よりご寄稿をいただいた。日本が国際ジオパーク活動に参加した際、自然災害を学ぶという役目が新たに追加されたとのことである。

もう1つの囲み記事は、元静岡放送の川端氏による「地震記者の回想—3—」である。今回は1970~1980年代における伊豆半島東部の地震・火山活動についての話題が取り上げられている。私事ではあるが、編集子の青春時代に重なることから、楽しく読ませていただいた。

今号もバラエティー豊かで賑やかな内容となっている。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71号

令和3年6月20日 発行

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

地震予知総合研究振興会

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

発行人 金沢敏彦

編集人 岡田義光

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

●製作/一般財団法人学会誌刊行センター

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