

地震 ジャーナル

76

2023年 12月

エッセイ 地震情報とSNS ●古村孝志——1

2022年のトンガ火山による大気ラム波が励起した

全球規模の津波の発生と成長と伝播 ●久保田達矢——2

海底津波計による津波の観測監視と将来の展望 ●松本浩幸——15

光ファイバセンシングによる新しい海底地震観測 ●篠原雅尚——30

強震動データベースの構築に向けた取り組み ●森川信之——40

アンケート調査から考える災害ならびに災害情報に関する

若者の意識と評価 ●中森広道——47

人工知能と自然知能の対話・協働による地震研究の新展開 ●長尾大道——64

津波予報 100年—津波予報は難しい— ●山本雅博——72

●書評——81

●訂正——84

●新刊紹介——85

●ADEP情報——87

囲み記事 2023年 2月 6日トルコ南部の地震について 楠 浩一——59

2023年 9月 8日モロッコの地震 (M_w 6.8) 加藤照之——61

大きな長周期地震動から身を守っていただくために

鎌谷紀子——79

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

地震情報と SNS

古村孝志

最近、SNSなどのネット情報が多くの人々の情報源となったことに伴い、地震の情報に関しても正しい科学の知識に基づかない言説が出回っているようである。たとえば、昨年3月の福島県沖の地震、11月の三重県南東沖の深発地震、そして本年2月のトルコ・シリアの大地震などについて、地震直後の不安を増長するかのようになり、自然の地震を悪意のある人工的な爆発であるとするような言説がSNS上で広まったという。このようなことは、地震研究所の一般公開でも見学者から何度か聞かれたことがあり、今に始まったことではない根の深さを感じる。

そのようなネット投稿では、K-NET 強震計の波形画像が示され、P波の立ち上がりが鋭くS波が不明瞭であることが人工地震（爆発型震源）の証拠だという主張がなされている。データが広く公開され、だれでも波形を見る機会が増えたのは、市民参加型のオープンサイエンスとして良いことだが、その一方で、データの正しい見かたがされないことには危険が伴う。近地の地震では、時間軸が詰まっているとP波とS波が繋がって、人工地震のように見える恐れがある。高周波数成分が強調されて見える強震計（加速度計）記録ではなおさらで、正しい見かたをするには専門的な知識や経験が必要である。

公開データに記録された膨大な地震波形の中には、地盤の影響による特異な形を持つものもある。三重県沖の深発地震を人工地震だという主張には、陸上の地震波形よりもP波振幅が大きく見える、相模湾の海底ケーブル地震計（平塚ST1）の加速度波形が示されていた。トルコ・シリアの大地震では、S波が不明瞭な波形として距離2,800 kmのキルギスの観測点（BTK）の波形が出ていたが、調べたところトルコ・シリアの地震とは関係なく、近地のカザフスタンの地震だった。たんなるミスである可能性もあるが、おそらく意図的なミスリーディングであろう。

こうした情報を発する人々は、基本的な科学の知見を軽視あるいは曲解していると考えられるので、地球深部探査船「ちきゅう」でも地下10 kmまで掘れないことや、大地震のエネルギーに相当する爆発物の量を考えると人工地震説はあり得ないことなど、科学的根拠を示しても理解しないだろう。非科学的な主張に対して、科学的根拠に基づく議論をしてもすれ違うだけだろうし、このような記事もそういう人々には無視されるだけだろう。SNS上のいかがわしい言説ではなく、科学に基づく正しい情報発信を続けることで、多くの人たちに地震と防災に関する正しい知識が伝わることを強く望む。

〔ふるむら たかし〕

現職 東京大学地震研究所教授・所長

略歴 北海道大学理学研究科地球物理学専攻博士課程修了。北海道教育大学助手・講師・助教授、東京大学地震研究所准教授・教授、東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター教授を経て、2023年4月より現職

2022年のトンガ火山による大気ラム波が励起した 全球規模の津波の発生と成長と伝播

久保田達矢

1. はじめに

2022年1月15日13時頃（日本時間）、南太平洋トンガ諸島のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山（Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, 以下、フンガ火山と呼ぶ）で大規模な噴火が発生した。この噴火に伴い、日本をはじめ、世界各地で津波が観測された。この津波は、通常地震により生じる津波とは異なる、特異な特徴を持っていた。Kubota *et al.* (2022) では、津波の発生と伝播の数値シミュレーションを通じ、この特異な津波の発生と伝播のメカニズムについて議論した。本稿では、今般の噴火と津波について概要を簡単に紹介したのち、Kubota *et al.* (2022) が提示した津波の発生と成長と伝播のメカニズムを解説する。

2. フンガ火山の活動と2022年噴火の タイムライン

フンガ火山は、南太平洋のトンガ海溝沈み込み帯の火山帯に位置する火山であり、これまで1912年、1937年、1988年、2009年、2014~2015年に噴火が生じたことが報告されている（Global Volcanism Program, 2022a）。フンガ火山は、もともとフンガ・トンガ島とフンガ・ハアパイ島の2つの島であったが、2014年12月から2015年1月にかけて生じた噴火活動により、2つの島が一体化し、フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ島となった（図1）。

2022年1月の噴火を含む一連の活動は、2021年12月20日に開始し、2022年1月5日にいったん収束したものの、1月14日に活動再開し、

翌15日の13時頃（日本時間、現地時間では1月15日17時頃）に大噴火に至った（Global Volcanism Program, 2022b）。気象衛星の解析から、噴煙が上昇した最高高度は50kmを超えたと推定されている（Carr *et al.*, 2022; Proud *et al.*, 2022）。噴火後、衛星の観測から、一体化していた2つの島は再び2つに分かれたことも明らかとなった（図1d）。

噴火後には、ニュージーランド国立水圏大気研究所（National Institute of Water and Atmospheric Research, NIWA）と公益財団法人日本財団により、トンガ噴火海底マッピングプロジェクト（NIWA-Nippon Foundation Tonga Eruption Seabed Mapping Project, TESMaP）が立ち上げられ、海底地形の詳細な調査が実施された（日本財団, 2022a, b; Williams *et al.*, 2022）。この調査によると、山の側面の地形変化は小さかった一方で、火山の中心部のカルデラは噴火前に比べて約700m陥没し、周辺エリアの地形も大きく変化していた（日本財団, 2022b）。

3. 過去の類似の大規模噴火： 1883年クラカタウ火山噴火

今回の噴火と類似の海洋島での大規模火山噴火イベントとして、1883年にインドネシアのクラカタウ（Krakatoa）火山の噴火がある。この噴火では、世界の気圧計と潮位計が変動を観測したことが報告されている（Scott, 1883; Symons, 1888, 図2a, b）。1883年の噴火における気圧と潮位観測点の位置を図2aと2bに示す（Symons, 1888）。これに対し、フンガ火山の噴火における、アメリカのIncorporated Research Institutions for Seis-

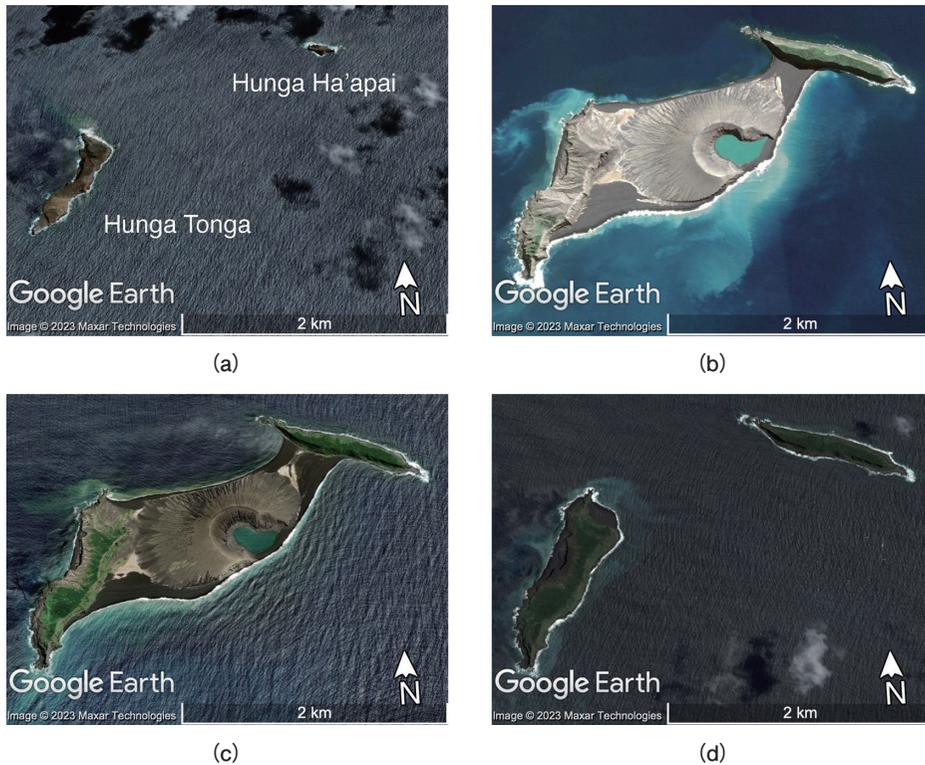


図 1 フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ島の全景。それぞれ、(a) 2014年2月、(b) 2016年5月、(c) 2020年11月、(d) 2022年2月のもの。画像はGoogle Earthより取得。Copyright: Maxar Technologies

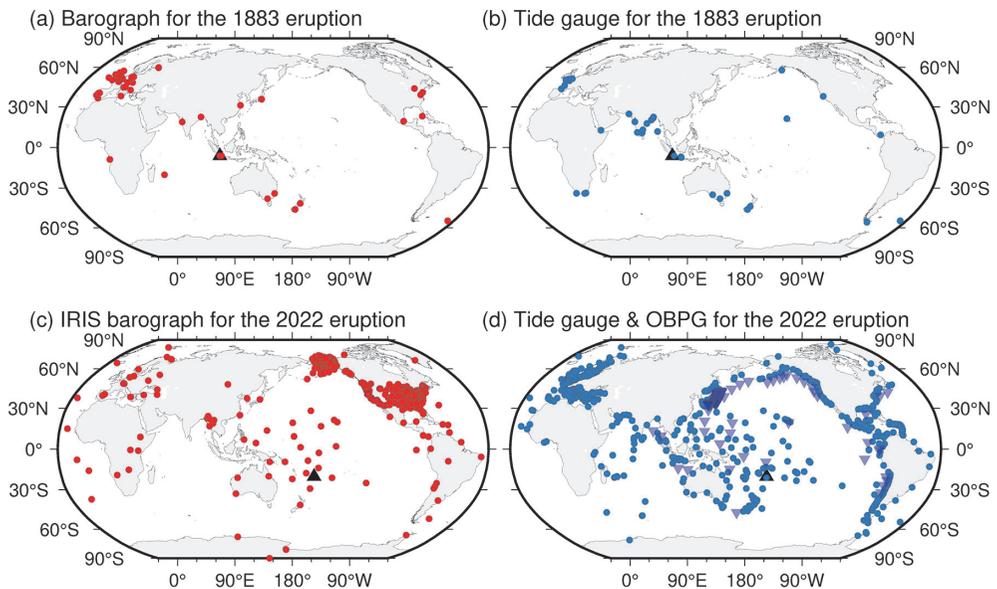


図 2 1883年の噴火時における (a) 大気圧観測点 (赤丸) と (b) 潮位観測点 (青丸) の位置 (Symons, 1888), および、2022年の噴火時における (c) IRISの微気圧計 (チャンネルLDO) の観測点の位置, および (d) IOCの潮位観測点の位置。それぞれの噴火における火山の位置を黒三角で示した。青逆三角はDART, S-net, DONETの海底水圧計観測点の位置を示す

mology (IRIS) による気圧観測点を図 2c に、Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) sea-level station monitoring facility による沿岸潮位観測点の位置を図 2d に示す。この図から分かるように、今般の噴火では 1883 年当時よりもはるかに多くの観測点においてデータが得られた (なお、今般の噴火においては、ここに示したほかにも多数の観測点がある点に注意されたい (たとえば、日本気象協会, 2022; ウェザーニューズ, 2022; Liu *et al.*, 2023)。1883 年当時で得ることができたデータは、これらの波形データに加え、現地の降灰分布の調査、目撃証言、噴火の音が聞こえたかどうかの聞き取り調査 (Symons, 1888) などに限られていたが、今般のトンガの噴火では、地震計 (たとえば、Matoza *et al.*, 2022; Tarumi and Yoshizawa, 2023)、気象衛星 (たとえば、Proud *et al.*, 2022)、気象庁のアメダスの温度計や風向風速計 (たとえば、Watada *et al.*,

2022)、宇宙測地技術を応用した電離圏の擾乱の観測 (たとえば、Themens *et al.*, 2022) 等、近代の多種多様な観測機器により噴火に関連した現象が詳細に記録された。これらの各種データにより地震学や火山学のみならず、津波工学、気象学や海洋物理学、惑星電磁気学といったさまざまなアプローチから本噴火に関する学際的な研究が進んでいる。

4. フンガ火山の噴火における気圧・津波観測

4.1 気圧観測

この噴火に伴い、世界各地で顕著な大気圧変化が観測された (図 3a, たとえば、Matoza *et al.*, 2022; 西田, 2022)。気象衛星の観測からも、火山から同心円状に大気の波が伝播しているのが確認された (気象庁, 2022; Watanabe *et al.*, 2022)。この波は大気ラム (Lamb) 波と呼ばれる、大気

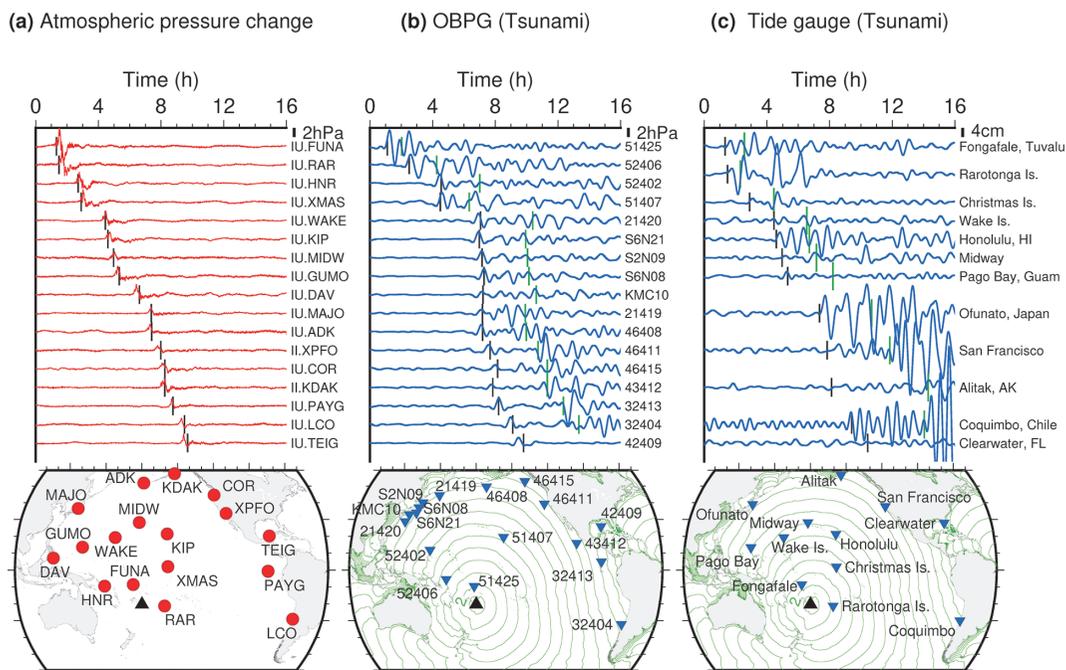


図 3 2022 年のフンガ火山噴火時の世界の観測データ。(a) 大気圧観測データ。(b) 海底水圧観測データ。(c) 沿岸潮位データ。黒線は大気ラム波が 300 m/s で伝播すると仮定した場合の予想到達時刻。緑線は海底地形から理論的に予想される津波到達時刻。それぞれの観測点の配置もあわせて示した。火山の位置は黒三角で示している。緑色のコンター線は理論津波到達時刻 (1 時間間隔)。Kubota *et al.* (2022) の図を改変

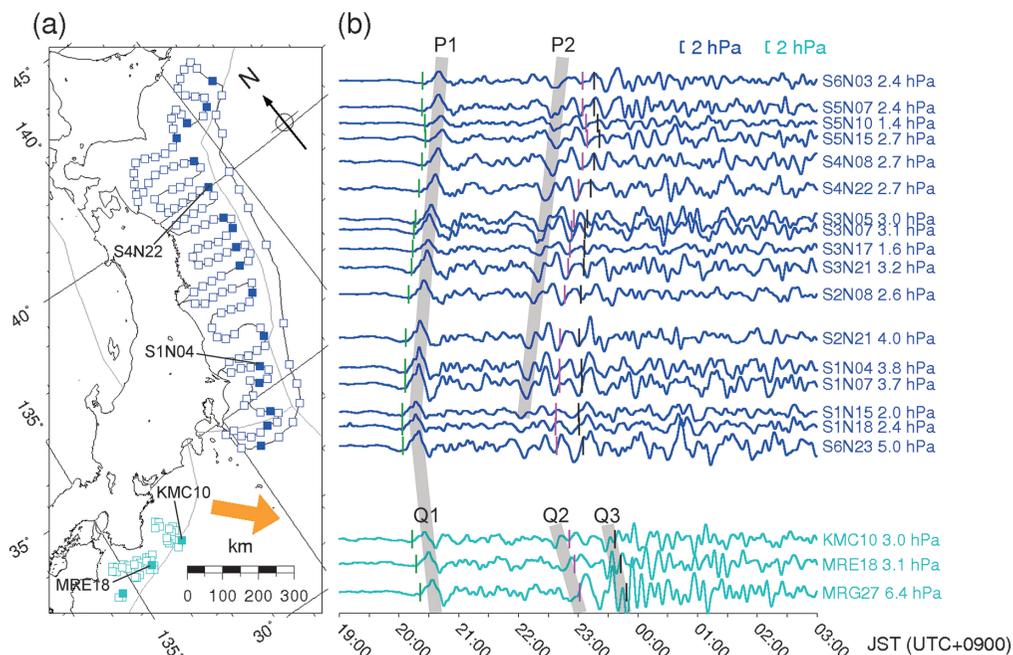


図 4 防災科研の S-net と DONET の水圧記録。(a) 観測点の配置。オレンジ色の矢印は日本からみたトンガの方向を示す。(b) 海底水圧観測波形。顕著な波群を灰色線で示している。緑とピンク色の線は津波が火山から 300 m/s および 220 m/s の一定速度で伝播した場合に予想される到達時刻を示す。黒線は実際の海底地形に基づいて理論的に予想される津波の到達時刻を示す。Kubo *et al.* (2022) の図を改変

中を音速で伝わる波（より正確には、大気境界波）の一種である（たとえば、Lamb, 1932; Watada and Kanamori, 2010; Nishida *et al.*, 2014）。大気ラム波は約 300 m/s の速度で伝播し、地球を 2 周以上周回したことも報告されている（西田, 2022）。大気ラム波は日本でも顕著に観測されており、気象庁の気圧計（気象庁, 2022）や防災科研の V-net の気圧計（Kubo *et al.*, 2022）において最大で数 hPa の気圧変化が観測された。また、株式会社ウェザーニューズが設置した気象観測機器「ソラテナ」（ウェザーニューズ, 2022）や、日本気象協会による微気圧変動観測網「インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク」（日本気象協会, 2022）においても、顕著な気圧変化が観測されたことが報告されている。

4.2 津波観測とその特徴

さらに、この噴火に伴って津波が生じ、近隣の島嶼地域に被害をもたらした。この津波は、火山から遠く離れた世界中の沿岸地域でも明瞭に観測

された（図 3c, たとえば、Carvajal *et al.*, 2022）。日本の沿岸でもこの津波による被害が生じた（Imamura *et al.*, 2022）。さらに、アメリカ大気海洋庁（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）により世界の海底に広く展開された Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) の海底水圧計のネットワークにおいても津波が明瞭に観測された（図 3b に青逆三角で示す。たとえば、Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022）。

日本近海の沖合では、東北沖の海域の日本海溝海底地震津波観測網 S-net（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench）と、南海トラフ海域の DONET（Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis）の海底水圧計が津波を観測した（図 3b の逆三角および図 4, Kubo *et al.*, 2022; Tanioka *et al.*, 2022; Tonegawa and Fukao, 2022; Yamada *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023）。これ

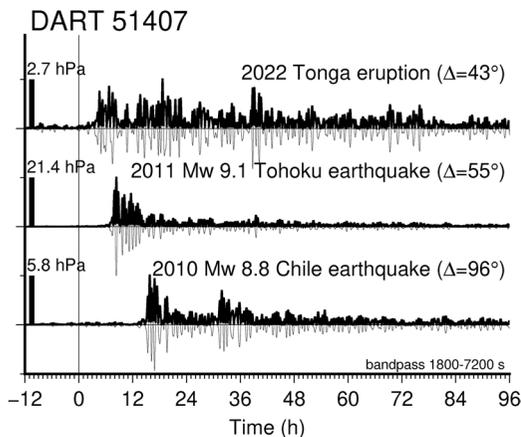


図 5 ハワイ諸島近傍の DART 51407 観測点における、今回の噴火、および 2011 年の東北地方太平洋沖地震、2010 年のチリ地震時の海底水圧観測データ。オリジナルの水圧波形を細い線で、二乗振幅による包絡線を太い線で示す。観測点から各イベントの震央までの角距離 Δ も示してある。なお、各時系列の最大振幅は異なる。Kubota *et al.* (2022) の図を改変

らの海底水圧計が記録した津波は、大きく 2 つの波群に分けられる。第 1 波の到達は気圧変化の開始、すなわち大気ラム波の到達とよく同期している (図 4, P1 および Q1)。さらに、第 2 波には複数のフェイズが存在することが、Kubo *et al.* (2022) や Ogiso and Tsushima (2023) などにより指摘されている (図 4, P2, Q2, Q3)。

今回の噴火による津波には、通常の地震によって生じる津波とは異なる 2 つの大きな特徴が見られた。1 つ目は、津波の第 1 波の到達時刻が、火山を波源として地震によって励起される通常の津波を想定した際に理論的に予測される到達時刻よりも数時間ほど早かった点である (図 3b, c)。この第 1 波は大気ラム波の到来とほぼ同時刻に到来し、太平洋での平均的な津波伝播速度 (約 200~250 m/s) よりも有意に速く伝播した。もう 1 つの特徴は、その継続時間が、通常の地震による津波と比べて数日と非常に長かった点である (図 5)。過去に発生した巨大地震による津波のときの波形と比べても、フンガ火山の噴火の場合には発生から数日が経過してもその振幅が減衰していな

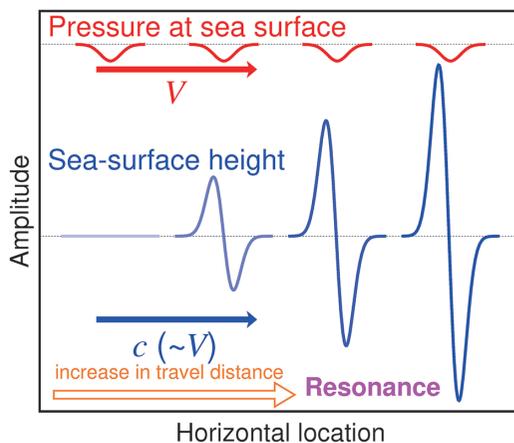


図 6 気象津波の発生と成長のイメージ。気圧変動の移動速度 V と、津波の伝播速度 c が近い値となると、共振が発生し、伝播距離の増大とともに海面波高の振幅が成長する

かったことが分かる。

5. 類似の現象：気象津波

今回のトンガの津波と類似した、大気圧変化と関連して生じる津波として、「気象津波」がある。気象津波は、通常の、地震による (地殻変動を原因とする) 津波と同様に波長の長い海洋波 (長波) の一種である。気圧の波と津波の伝播速度が近い値となると、伝播距離の増大に伴って海面変動の振幅が大きくなる「共振現象」(「 Proudman 効果」とも呼ばれる) が生じる (図 6, Proudman, 1929)。これが気象津波の原因である (気象津波の発生メカニズムの詳細については、高野 (2014) の解説を参照されたい)。気象津波は、地中海をはじめ、世界中で観測事例が報告されている (Rabinovich, 2020)。日本で観測された気象津波の例としては西日本で発生する「あびき」が有名である (Hibiya and Kajiwara, 1982)。東日本の沖合で発生した気象津波が S-net により観測された事例もある (Kubota *et al.*, 2021)。

6. 大気ラム波による津波のシミュレーション

Kubota *et al.* (2022) では、フンガ火山の噴火

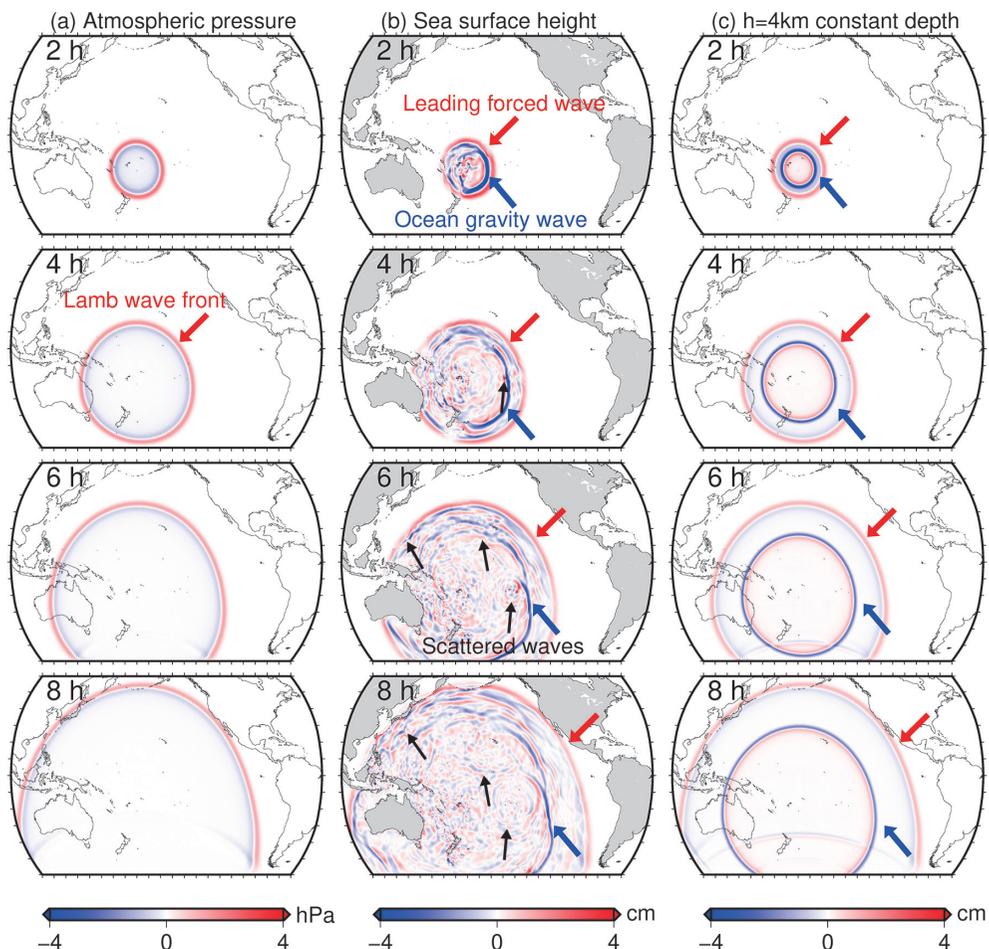


図 7 大気ラム波の伝播速度 300 m/s を仮定した津波のシミュレーションの時間変化のスナップショット。(a) 大気圧変化。(b) 海面高変化。(c) 水深 4km の海を仮定した場合のシミュレーションにおける海面高変化。顕著な波群を矢印で示している。Kubota *et al.* (2022) の図を改変

により励起された大気ラム波による海面気圧変化が津波を駆動したと考え、気象津波の発生・伝播シミュレーションで用いるものと同じ支配方程式に基づいて、津波の発生と成長、伝播のシミュレーションを実施し、今回の噴火によって生じた津波の発生と伝播のメカニズムを議論した。以下では、Kubota *et al.* (2022) による津波の発生と成長、伝播のシミュレーションの手法の概要とその結果について述べる。

本シミュレーションでは、まず、フンガ火山から励起された大気ラム波の伝播をシミュレートし、津波の駆動源となる気圧変化を計算した(図 7a)。本シミュレーションでは、解析対象となる

観測点はじゅうぶんに離れていることから、大気ラム波の励起源を点 (point source) で近似した(以後、「点源」と呼称する)。点源に一定の継続時間で気圧変化を与え、大気波動の伝播を記述する支配方程式を解いて、大気圧変化の時空間発展を計算した。本計算における大気ラム波の伝播速度は、大気圧観測記録(図 3a)をもとに 300 m/s と仮定した。

つづいて、大気ラム波による気圧変化によって駆動される津波をシミュレーションした(図 7b)。このシミュレーションにおいて用いた支配方程式は、気象津波と同じものである。最後に、本シミュレーション結果と海底水圧計の波形を比

較するため、大気ラム波により生じた大気圧変化と津波（海面高変化に伴う海底への荷重の変化）による海底圧力変化を足し合わせ、海底水圧計の波形を計算した。

シミュレーションにより得られた大気圧変化と海面波高変化のスナップショットをそれぞれ図7a, bに示す。顕著な海面変動として、まず大気ラム波と同じ速度（300 m/s）で伝播する海面隆起の波が確認された（図7b, 赤矢印）。この隆起の波は実際の観測波形の第一波をよく再現しており（図8）、世界中で予測よりも早く到達した第一波は、大気ラム波によって生じたものと解釈される。

この第1波は、大気圧変化が津波を生じさせたという点において前述した気象津波とよく似ていると言えるが、この波は伝播とともに増大する「共振」が見られない。共振が発生する条件として、大気圧変化の移動速度と津波の伝播速度が近い値になることが求められる（たとえば、高野, 2014）が、今回のケースにおいては大気ラム波の速度（300 m/s）と比べて太平洋での平均的な津波伝播速度（200~250 m/s）には差があり、共振が発生する条件には合致しない。したがって、この第1波は、「共振」現象を原因として生じる「典型的な」気象津波というよりは、大気ラム波が強制的に海面を変動させたことにより生じた、言い換えると「強制振動」で生じた気象津波と解釈したほうが良いのかもしれない。

第1波に続いて、太平洋上の島嶼部を2次的な波源とした微小な津波が生じている様子も確認された。この2次的な津波の発生は、たとえば、南太平洋の島嶼部、ハワイ諸島、マリアナ諸島において顕著に確認できる（図7b, 黒矢印）。さらに、津波の速度（約200~250 m/s）で伝播する海面沈降の波も確認された（図7b, 青矢印）。これら後続の沈降の波と微小海面変動の成因について考えるため、水深4 km 一様の海を仮定し、大気ラム波によって津波がどのように駆動されるかをシミュレートしたところ、海面沈降の波は生じた一方で、2次的な津波は生じなかった（図7c）。このことから、後続の微小な変動は、海底地形の形

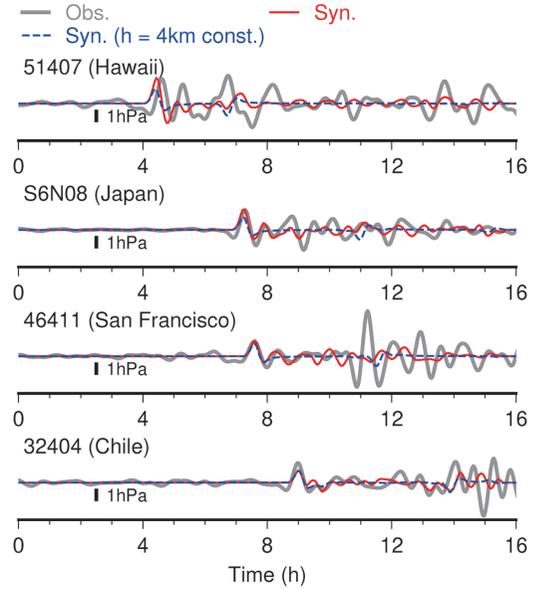


図8 代表的な海底水圧計観測点における、観測波形（灰色線）と計算波形（赤線）の比較。水深4 km 一定の海を仮定して実施したシミュレーションにおける計算波形を青破線で示した。Kubota *et al.* (2022) の図を改変

状に由来して生じたものであると解釈できる（詳細は後述）。そして、後続の沈降の波は、海底地形に由来するものではなく、大気ラム波に由来する隆起の第1波が周囲に伝播する際に火山周辺で海水の体積保存により生じた海面の沈降が伝播したものと考えられる。

しかしながら、実地形を考慮したシミュレーションによる波形と実観測波形を比較すると、第1波部分の再現度は高い一方で、後続部分の再現度は低い（図8）。たとえば、いくつかの観測点では、第2波の振幅が第1波よりも大きい。本シミュレーションはそれを再現できていない。このことは、実際の観測記録には、大気ラム波に由来する体積保存の沈降の波や海底地形に由来する津波以外の要因により生じた津波が含まれていることを示唆する（図9で後述）。

7. 発生メカニズムの考察

今回の噴火による津波の励起メカニズムの模式

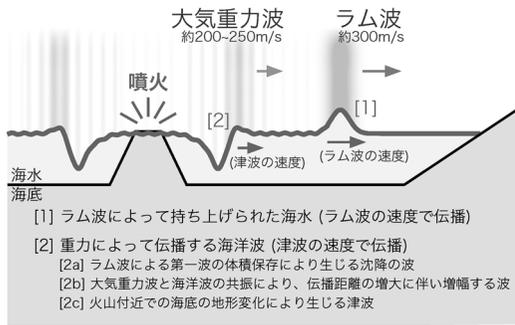


図9 噴火による津波の発生と伝播の模式図。
Kubota *et al.* (2022) の図を改変

図を図9に示す。大気中では約300 m/sの速度でラム波が伝播する。海面ではラム波が海水を強制的に押し上げることにより、ラム波と同じ速度で海面隆起の波が伝播する(図9中、[1]の波)。つづいて、津波の速度(約200~250 m/s)で伝播する波が到来する(図9中、[2]の波)。この[2]の波の励起には、大きく3つの要因が考えられる。1つ目は第1波として伝播する隆起の波の体積を保存するために生じる沈降の波である([2a]の波)。これは本シミュレーションでも確認されたものである。2つ目の要因としては、大気重力波と呼ばれる、約200~250 m/sの速度で伝播する大気境界波の一種と津波の共振により生じる波がある(図9中、[2b]の波、たとえば、Press and Harkrider, 1966; Harkrider and Press, 1967; Watada and Kanamori, 2010)。また、噴火に伴う海底の地殻変動(海底地形の変化や山体の崩壊)に由来する津波が生じていたことも考えられる(図9中、[2c]の波、Heidarzadeh *et al.*, 2022; Williams *et al.*, 2022)。噴火後に実施された海底地形の調査からは、カルデラ周辺で海底が沈降したことも確認されており(Williams *et al.*, 2022)、これが津波の生成に寄与していると考えられる。今回のシミュレーションでは、[2b]と[2c]の波については考慮しなかったが、これらも津波の生成に寄与したと考えられる。とくに、[2b]の大気重力波については、その伝播速度は太平洋の平均的な津波伝播速度に近いので、共振が発生する。地上気圧観測では大気重力波の振幅自体は小

さく、ほとんど確認できなかった(図3a, Watanabe *et al.*, 2022)ものの、共振による振幅の成長の効果により、津波の振幅に大きな貢献をしていると考えられる。また、大気重力波は方位ごとの伝播速度の違いが大きく、気象衛星の観測に基づく解析からは、火山の東側に向かって246 m/s、西に215 m/sの速度で伝播したと報告されている(Watanabe *et al.*, 2022)。この伝播速度の違いは、共振の起こりやすさにも関係すると予想される。実際、沿岸の潮位記録(図3c)を見ると、フンガ火山から見て北西方向にある、日本の大船渡では第2波の振幅は第1波と同程度かわずかに大きい程度であったのに対し、東方向にあるチリのコキンボ(Coquimbo)や北米のサンフランシスコでは、第2波が第1波に比べて倍ほどに大きい(図3c)。このように、最大振幅に違いが生じる原因として、大気重力波の伝播速度の違いによる共振の起こりやすさの差が考えられうる。そう考えると、第2波部分の振幅について正確に理解するためには、大気重力波の伝播の過程を正しく考慮することが重要であり、そのためには気象学の知見も取り入れることが重要となる。現在では、現実的な大気構造を考慮した大気波動伝播に基づいて、津波の生成を計算するような研究も進みつつある(たとえば、Nishikawa *et al.*, 2022; Mizutani and Yomogida, 2023)。

また、4.2節では、今般の津波は、通常地震の津波と比べて継続時間が長かったという特徴をあげた。この理由について、海底地形に由来して副次的な津波が生じていた点(図7b、黒矢印)を踏まえて説明する。この副次的な津波の発生をわかりやすく可視化するため、1次元の(x 方向)のみ伝播する)津波シミュレーションを実施した(図10)。300 m/sで伝播する大気ラム波を入力として(図10a)、水深4 km一定の海(図10b)と海底地形に単純な凹凸を仮定した海(図10c)のそれぞれにおいて生じる津波を計算した。海底地形を考慮しない場合、津波の振幅はずっと一定である(図10b)のに対して、海底地形を考慮すると海底地形に対応して津波の振幅が変化し、新たに津波が生じる(図10c)。このように津波が新

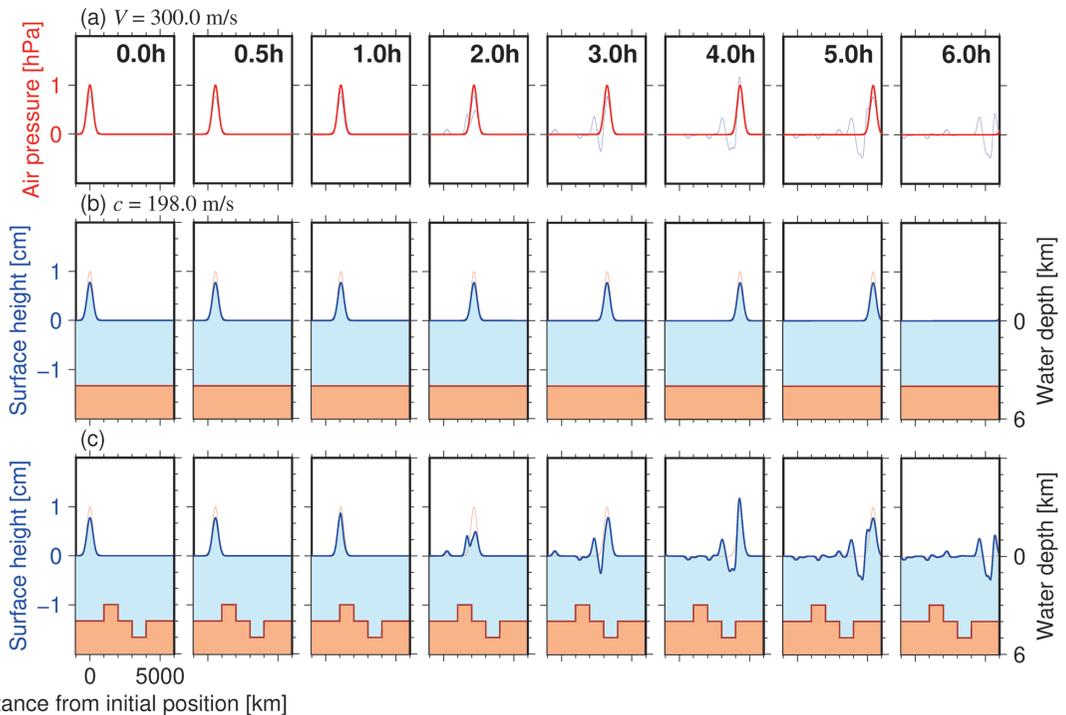


図 10 大気ラム波による津波発生の一次元シミュレーション. (a) 入力となる大気ラム波による大気圧の時空間発展. (b) 水深 4km 一定の海において生じる津波の時空間発展. (c) 水深の変化を仮定した際に生じる津波の時空間発展. 図 6 の場合と異なり, 気圧の波の移動速度 V が津波の伝播速度 c よりも十分に速い ($V \gg c$) 場合は, 本図のように気圧の高い場所で海面が上昇する

たに生じる理由について, 定性的には以下のように解釈できる. 大気ラム波による気圧擾乱 ΔP が, 一定の速度 V で移動する際に生じる津波の振幅 η は, $\eta = 1/|1 - (V/c)^2| \times \Delta P$ と表される (Proudman, 1929; 高野, 2014). ここで, $c = (g_0 h)^{0.5}$ は津波 (海洋重力波) の位相速度である (g_0 は重力加速度, h は水深). この関係より, 大気ラム波の伝播途中に水深 h が変わると津波の位相速度 c が変化し, 津波の振幅 η が変化する. これを言い換えると, 水深が深くなると位相速度が速くなって津波の振幅は小さくなり, 水深が浅くなると位相速度が遅くなって津波の振幅は大きくなる. これによって, 当初の大気ラム波が運んでいた津波に重畳して, 海底地形の凹凸によって新たな海面の変化すなわち津波が生じることになる. この新たに生じた津波は海洋重力波として速度 c で伝播する. このような海底地形の変化に由来して生じる海洋重力波が, 副次的に生じる津波の要因であ

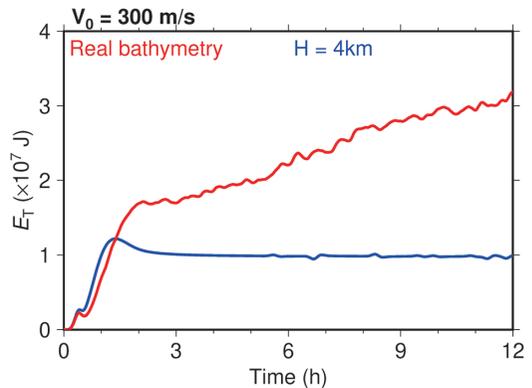


図 11 津波エネルギーの時間変化. 赤線は実際の海底地形を考えた際の津波エネルギーを, 青線は水深 4km 一定の海を考えた際のエネルギーの時間変化を表す

る. この新たな津波の発生は, 大気ラム波自身が持つエネルギーがなくなればかぎり継続する. これによって大気から海洋にエネルギーが継続的

に供給され続けることとなる。

さらに、津波により生じる運動エネルギーの総量（津波エネルギー） E_T (Tang *et al.*, 2012) を考える。図 7b で示した実地形におけるシミュレーション結果から E_T を計算すると、時間経過とともに増加した（図 11）。一方で、図 7c の水深一定を仮定した計算では、 E_T は一定となった。実地形を考慮したシミュレーションにおいては海底地形に由来して大気からエネルギーが継続的に供給され続けることを先述したが、これが津波の継続時間が地震による津波よりも長くなる理由である。大気ラム波による大気圧の変化は数日以上継続したことが報告されており（西田, 2022）、今般の津波の減衰プロセスも通常の津波と異なると考えられる。通常の地震による津波では、地震時の地殻変動によって海底から与えられたエネルギーがすべてであり、基本的にはエネルギーの総量が増加することはない。大気ラム波により生じる津波の減衰プロセスを正しく理解するためには、海水（津波）の持つエネルギーだけでなく、大気ラム波の持つエネルギーも考慮することが重要であろう。この点は、防災上の観点からも非常に重要な問題であり、今後の研究の進展が見込まれる。この津波の継続時間を詳細に理解するには、ラム波を含む大気波動全般の励起プロセスに関する理解（たとえば、Tonegawa and Fukao, 2023）や、大気波動の発生と伝播も含めた系を取り合った研究（たとえば、Nishikawa *et al.*, 2022; Suzuki *et al.*, 2023; Watanabe *et al.*, 2022）が重要になるであろう。

8. おわりに

沖合に展開された海底水圧観測網は、これまで地震に伴う津波の予測に非常に有用な情報をもたらしてきた。その一方で、これらの観測網の整備以降、今回のような大気波動を起源とする津波が記録された事例はなく、そのデータを活用して多くの知見が得られてきつつある。たとえば、地震による津波においては、海底水圧記録のなかの大気圧変化の影響は無視できるほど小さかったが、

今回の場合は大気ラム波による大気圧変化の影響は無視できない点など、通常の地震の津波とは異なる点も少なくない。今後の津波予測システムの精度向上に向けては、ここまで得られてきた知見を活かすことが必要であろう。

他にも、津波を励起するような大気波動が励起される条件について考えることも重要である。1991年に発生したフィリピンのピナツボ（Pinatubo）火山の噴火では、全球規模で大気ラム波と大気重力波が励起されたことが報告されている（Watada and Kanamori, 2010）。火山の爆発の規模を表す指標である火山爆発指数 VEI（Volcanic Explosivity Index）としては、フンガ火山の噴火もピナツボの噴火も同程度である（Global Volcanism Program, 1991, 2022b）にもかかわらず、ピナツボの噴火では津波が生じたという観測事実は報告されていない。どのような噴火において大気ラム波が励起され、津波が生じるのかを明らかにするためには、火山学の知見も重要となるだろう。ほかにも、海底火山がどの程度マグマを貯めているか、大気ラム波が津波との共鳴を引き起こす条件などについても、よく分かっていない点が多く残っている。将来に津波を引き起こすような大気波動を励起する噴火がどこで発生するかを考えるためには、さまざまな分野にまたがった学際的な研究を進めていくことが重要であろう。

謝辞

本稿執筆の機会を提供して下さった本誌編集長の加藤照之氏に深く感謝いたします。本稿の執筆にあたり、加藤氏のコメントは非常に有益なものでした。本研究の遂行にあたり、科学研究費特別研究促進費による突発災害調査研究「トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査」（課題番号：21K1353、研究代表者：佐竹健治）の支援を受けました。本稿の執筆のきっかけとなったフンガ火山の研究、ならびに本稿の執筆において、久保久彦氏、齊藤竜彦氏、西田 究氏との議論は非常に有益でした。記して感謝申し上げます。

参考文献

- Carr, J. L., Horváth, Á., Wu, D. L. and Friberg, M. D. 2022. Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098131. DOI:10.1029/2022GL098131
- Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A. and Garreaud, R. 2022. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
- Global Volcanism Program. 1991. Report on Pinatubo (Philippines) (McClelland, L., ed.). *Bull. Glob. Volcanism Netw.*, **16**(7). DOI:10.5479/si.GVP.BGVN199107-273083
- Global Volcanism Program. 2022a. Global Volcanism Program, 2022. Report on Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (Tonga) (Crafford, A.E. and Venzke, E., eds.). *Bull. Glob. Volcanism Netw.*, **47**(2). DOI:10.5479/si.GVP.BGVN202202-243040
- Global Volcanism Program. 2022b. Report on Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (Tonga) (Bennis, K.L. and Venzke, E., eds.). *Bull. Glob. Volcanism Netw.*, **47**(3). DOI:10.5479/si.GVP.BGVN202203-243040
- Harkrider, D. and Press, F. 1967. The Krakatoa air-sea waves: an example of pulse propagation in coupled systems. *Geophys. J. Int.*, **13**, 149-159. DOI:10.1111/j.1365-246X.1967.tb02150.x
- Heidarzadeh, H., Gusman, A. R., Ishibe, T., Sabeti R. and Šepić, J. 2022. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Eng.*, **261**, 112165. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.112165
- Hibiya, T. and Kajiura, K. 1982. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **38**, 172-182. DOI:10.1007/BF02110288
- Ho, T. C., Mori, N. and Yamada, M. 2023. Ocean gravity waves generated by the meteotsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets Space*, **75**, 25. DOI:10.1186/s40623-023-01775-x
- Imamura, F., Supparsi, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K. and Tanioka, Y. 2022. Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure Appl. Geophys.*, **179**, 1549-1560. DOI:10.1007/s00024-022-03058-0
- 気象庁. 2022. フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山の噴火による潮位変化のメカニズム等の分析結果と情報発信の運用改善について. https://www.jma.go.jp/jma/press/2204/07a/tonga_houkokusho.html
- 高野洋雄. 2014. 気象津波 (metero-tsunami). *天気*, **61**, 494-496.
- Kubo, H., Kubota, T., Suzuki, W., Aoi, S., Sandanbata, O., Chikasada, N. and Ueda, H. 2022. Ocean-wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks. *Earth, Planets Space*, **74**, 104. DOI:10.1186/s40623-022-01663-w
- Kubota, T., Saito, T., Chikasada, N. Y. and Sandanbata, O. 2021. Meteotsunami observed by the deep-ocean seafloor pressure gauge network off northeastern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL094255. DOI: 10.1029/2021GL094255
- Kubota, T., Saito, T. and Nishida, K. 2022. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **377**, 91-94. DOI:10.1126/science.abo4364
- Lamb, H. 1932. *Hydrodynamics* 6th ed., Dover Publications, 738 pp.
- Liu, S., Xue, Y., Chen, S., Yao, H., Jin, D., Wang, Y. and Li, Y. 2023. Characteristics of acoustic gravity waves from the Tonga Volcano monitored on the Chinese Mainland on January 15, 2022. *Pure Appl. Geophys.*, **180**, 2487-2509. DOI:10.1007/s00024-023-03307-w
- Lynett, P., McCann, M., Zhou, Z., Renteria, W., Borrero, J., Greer, D., Fa'anunu, O., Bosserelle, C., Jaffe, B., La Selle, S., Ritchie, A., Snyder, A., Nasr, B., Bott, J., Graehl, N., Synolakis, C., Ebrahimi, B. and Cinar, G. E. 2022. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, **609**, 728-733. DOI:10.1038/s41586-022-05170-6
- Matoza, R. S., Fee, D., Assink, J. D., Iezzi, A. M., Green, D. N., Kim, K., Toney, L., Lecocq, T., Krishnamoorthy, S., Lalande, J.-M., Nishida, K., Gee, K. L., Haney, M. M., Ortiz, H. D., Brissaud, Q., Martire, L., Rolland, L., Vergados, P., Nippess, A., Park, J., Shani-Kadmiel, S., Witsil, A., Arrowsmith, S., Caudron, C., Watada, S., Perttu, A. B., Taisne, B., Mialle, P., Le Pichon, A., Vergoz, J., Hupe, P., Blom, P. S., Waxler, R., De Angelis, S., Snively, J. B., Ringler, A. T., Anthony, R.

- E., Jolly, A. D., Kilgour, G., Averbuch, G., Ripepe, M., Ichihara, M., Arciniega-Ceballos, A., Astafyeva, E., Ceranna, L., Cevuard, S., Che, I.-Y., De Negri, R., Ebeling, C. W., Evers, L. G., Franco-Marin, L. E., Gabrielson, T. B., Hafner, K., Harrison, R. G., Komjathy, A., Lacanna, G., Lyons, J., Macpherson, K. A., Marchetti, E., McKee, K. F., Mellors, R. J., Mendo-Pérez, G., Mikesell, T. D., Munaibari, E., Oyola-Merced, M., Park, I., Pilger, C., Ramos, C., Ruiz, M. C., Sabatini, R., Schwaiger, H. F., Tailpied, D., Talmadge, C., Vidot, J., Webster, J. and Wilson, D. C. 2022. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**, 95-100. DOI:10.1126/science.abo7063
- Mizutani, A. and Yomogida, K. 2023. Source estimation of the tsunami later phases associated with the 2022 Hunga Tonga volcanic eruption. *Geophys. J. Int.*, **234**, 1885-1902. DOI:10.1093/gji/ggad174
- 日本気象協会. 2022. 微気圧振動（インフラサウンド）観測データ提供ネットワークにて トンガ諸島付近のフンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山 大規模噴火に伴う気圧変動を確認. <https://www.jwa.or.jp/news/2022/01/15589/>
- 日本財団. 2022a. トンガ沖の海底火山、噴火後初の調査（第一弾）を実施—火山周辺海域の変化や生態系の現状を発表. <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2022/20220525-71408.html>
- 日本財団. 2022b. 【調査報告】トンガ沖海底火山の噴火は、観測史上最大規模—トンガ沖で発生した海底火山の噴火に関する最終調査報告. <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/information/2022/20221124-81859.html>
- 西田 究. 2022. トンガ火山の噴火で励起された大気波動と海面変動. *日本地球惑星科学連合ニュースレター*, **18** (2), 15-17.
- Nishida, K., Kobayashi, N. and Fukao, Y. 2014. Background Lamb waves in the Earth's atmosphere. *Geophys. J. Int.*, **196**, 312-316. DOI:10.1093/gji/ggt413
- Nishikawa, Y., Yamamoto, M.-Y., Nakajima, K., Hamama, I., Saito, H., Kakinami, Y., Yamada, M. and Ho, T.-C. 2022. Observation and simulation of atmospheric gravity waves exciting subsequent tsunami along the coastline of Japan after Tonga explosion event. *Sci. Rep.*, **12**, 22354. DOI:10.1038/s41598-022-25854-3
- Osigo, M. and Tsushima, H. 2023. Ocean-wave gradiometry: visualizing and extracting propagation features of the 15 January 2022 tsunami wavefield with dense ocean-bottom pressure gauge arrays. *Seismol. Res. Lett.*, **94**, 626-636. DOI:10.1785/0220220151
- Press, F. and Harkrider, D. 1966. Air-sea waves from the explosion of Krakatoa. *Science*, **154**, 1325-1327. DOI:10.1126/science.154.3754.1325
- Proud, S. R., Prata, A. T., Schmauß, S. 2022. The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano reached the mesosphere. *Science*, **378**, 554-557. DOI:10.1126/science.abo4076
- Proudman, J. 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophys. J. Int.*, **2**, 197-209. DOI:10.1111/j.1365-246X.1929.tb05408.x
- Rabinovich, A. B. 2020. Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event. *Pure Appl. Geophys.*, **177**, 1193-1230. DOI:10.1007/s00024-019-02349-3
- Scott, R. H. 1883. Note on a series of barometrical disturbances which passed over Europe between the 27th and the 31st of August, 1883. *Proc. Royal Soc. Lond.*, **36**, 139-143, 1883-1884. DOI:10.1098/rspl.1883.0087
- Suzuki, T., Nakano, M., Watanabe, S., Tatebe, H. and Takano, Y. 2023. Mechanism of a meteorological tsunami reaching the Japanese coast caused by Lamb and Pekeris waves generated by the 2022 Tonga eruption. *Ocean Model.*, **181**, 102153. DOI:10.1016/j.ocemod.2022.102153
- Symons, G. J. 1888. The eruption of Krakatoa and subsequent phenomena. Report of the Krakatoa Committee of the Royal Society. Trübner and Co., London.
- Tang, L., Titov, V. V., Bernard, E. N., Wei, Y., Chamberlin, C. D., Newman, J. C., Mofjeld, H. O., Arcas, D., Eble, M. C., Moore, C., Uslu, B., Pells, C., Spillance, M., Wright, L. and Gica, E. 2012. Direct energy estimation of the 2011 Japan tsunami using deep-ocean pressure measurements. *J. Geophys. Res.*, **117**, C08008. DOI:10.1029/2011JC007635
- Tanioka, Y., Yamanaka, Y. and Nakagaki, T. 2022. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets Space*, **74**, 61. DOI:10.1186/s40623-022-01614-5
- Tarumi, K. and Yoshizawa, K. 2023. Eruption sequence of the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai explosion from back-projection of teleseismic P waves. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **602**, 117966. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117966>

- Themens, D. R., Watson, C., Žagar, N., Vasylykevych, S., Elvidge, S., McCaffrey, A., Prikryl, P., Reid, B., Wood, A. and Jayachandran, P. T. 2022. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
- Tonegawa, T. and Fukao, Y. 2022. Wave propagation of meteotsunamis and generation of free tsunamis in the sloping area of the Japan Trench for the 2022 Hunga–Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets Space*, **74**, 159. DOI:10.1186/s40623-022-01727-x
- Tonegawa, T. and Fukao, Y. 2023. Mesospheric pressure source from the 2022 Hunga, Tonga eruption excites 3.6-mHz air-sea coupled waves. *Sci. Adv.*, **9**, eadg8036. DOI:10.1126/sciadv.adg8036
- Watada, S. and Kanamori, H. 2010. Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption. *J. Geophys. Res.*, **115**, B12319. DOI:10.1029/2010JB007747
- Watada, S., Imanishi, Y. and Tanaka, K. 2022. Detection of air temperature and wind changes synchronized with the Lamb wave from the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2022GL100884. DOI:10.1029/2022GL100884
- Watanabe, S., Hamilton, K., Sakazaki, T. and Nakano, M. 2022. First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: evidence from the 2022 Tonga Eruption and from global reanalysis data. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 3027–3043. DOI:10.1175/JAS-D-22-0078.1
- ウェザーニューズ. 2022. 15日トンガ火山噴火による衝撃波に伴う急激な気圧変化を観測 気象観測機「ソラテナ」の気圧データを研究者向けに無償提供 全国3000カ所の観測網で17日も気圧変化を確認, 衝撃波が地球1周して再来か. <https://jp.weathernews.com/news/38708/>
- Williams, M., Mackay, K., Zwolak, K., Sharma, S. and Simpson, B. 2022. Mapping the seabed changes from the Hunga Tonga Hunga Ha'apai eruption. AGU Fall Meeting 2022, V16A-01. <https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1182911>
- Yamada, M., Ho, T. C., Mori, J., Nishikawa, Y. and Yamamoto, M.-Y. 2022. Tsunami triggered by the Lamb wave from the 2022 Tonga volcanic eruption and transition in the offshore Japan region. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098752. DOI:10.1029/2022GL098752

久保田達矢

[くぼた たつや]

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/地震津波防災研究部門 主任研究員

略歴 東北大学理学部宇宙地球物理学科卒業. 同 大学院理学研究科修士課程修了. 同 博士課程修了. 2017年4月防災科学技術研究所入所. 2023年4月より現職

海底津波計による津波の観測監視と将来の展望

松本浩幸

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)がもたらした東日本大震災は、わが国の津波警報のいくつかの課題を顕在化させ、その技術的改善や発表方法を見直すきっかけとなった。主要な課題の1つは、最初に発表した津波の高さの予測が実際の高さを大きく下回ったことが避難の遅れにつながった例があったと考えられる点である(干場・尾崎, 2012)。この改善策として、気象庁はそれまで津波発生の監視のみに利用してきた沖合の海底津波計の観測データを、2012年3月より津波警報の更新へ活用することを開始した。当初35地点による運用であったが、その後2016年7月からは日本海溝と南海トラフに整備された高密度な海底観測ネットワークの海底津波計の全地点の観測データを津波情報の活用に加した。さらに2019年3月からは、沖合の津波観測データを用いて津波の高さを予測する逆解析手法(t-FISH)(Tsushima *et al.*, 2012)を津波警報の更新に活用している。このように沖合で津波をリアルタイム監視することは、津波の早期検知につながり、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に結びつくため、津波防災上の利点は大きい(今村, 2021)。

本稿では、沖合で津波を観測監視して津波警報と津波情報の発表に利用される海底津波計の原理と観測技術について解説するとともに、これまでに海底津波計で観測された津波の事例を振り返る。ここでは、著者が所属する海洋研究開発機構(JAMSTEC)が主に開発と運用をしてきた海底観測ネットワークの海底津波計について、これまで発表してきた研究論文や報告書などからとくに興味深いと考える内容について、専門が地球科学

分野以外の読者にも理解できるよう平易な記述で再編集した。さらに海底観測ネットワークを運用しているときに得られた最新の知見ならびに将来の展望についても述べる。

2. 海底観測ネットワークと海底津波計

2.1 海底観測ネットワークの歴史

わが国の津波観測監視は、さまざまな機関によって管理されている津波観測計(検潮施設など)、GPS波浪計、ケーブル式海底津波計の観測機器により行われている。気象庁が津波情報に活用する津波観測施設のうち、ケーブル式海底津波計に分類される観測機器の位置を図1に示す。わが国における沖合の津波観測は、海底観測ネットワークの開発とともに歩んできて、その歴史は1970年代までさかのぼる。気象庁が1979年に東海沖(御前崎沖)に地震計と圧力計(海底津波計)から構成される「海底地震常時観測システム」(気象研究所地震火山研究部, 1980)を整備して以来、2000年代までに日本の周辺海域に同じタイプの海底観測ネットワークが展開された。2000年代までに設置された海底観測ネットワークは、海底ケーブル通信技術を利用して沿岸から数10km沖合の海底に地震計や海底津波計を数珠つなぎに接続して海底観測を行っている。1990年代からはデータ伝送がアナログ方式から光ファイバによるデジタル伝送方式に発展的に移行している。海底ケーブルに接続された地震計と海底津波計の観測データは、16~24 bitのA/D変換、1~8kHzサンプリングで陸上局にリアルタイム伝送される(藤原, 2003)。海底津波計の観測データは0.1~1秒サンプリングとなるよう陸上局でデータ処理されて、気象庁などへリアルタイム配信され、津波情報の発表などに利用されている。

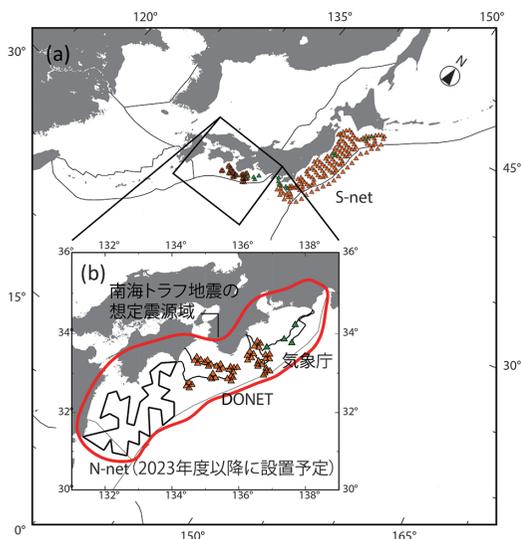


図 1 (a) 気象庁が津波情報に活用するケーブル式海底津波計の位置 (緑色と橙色の△は、それぞれ東日本大震災の前後に設置された観測点)、(b) 南海トラフ付近の海底津波計の位置 (N-net は防災科学技術研究所の資料をもとに作成)

日本における海底観測ネットワークは現在、気象庁、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構の各機関により運用されている。現在は太平洋側で 200 地点以上の海底津波計で津波の観測監視が行われているが、東日本大震災の前後で観測点の設置数は大きく変化する (図 1 (a))。これは、2011 年と 2016 年から 1944 年東南海地震の震源域とその西側でそれぞれ運用が開始された「地震・津波観測監視システム (DONET)」(Kaneda *et al.*, 2015; Kawaguchi *et al.*, 2015) の 51 観測点と 2016 年から 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域にあたる日本海溝で運用が開始された「日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)」(Kanazawa *et al.*, 2016; Uehira *et al.*, 2016; Mochizuki *et al.*, 2016) の 150 観測点が設置されたことによる。

DONET は、基幹ケーブルとよばれる海底ケーブルの途中に設置された拡張用分岐装置 (ノード) から約 10 km 先に観測機器を接続するシステムで、空間的に高密度の海底観測ネットワークとなっている。ノード方式とよばれる DONET

は、観測機器の設置と接続に無人探査機 (ROV: Remotely Operational Vehicle) が必要となるため観測点構築までの時間がかかるが、観測機器に障害が発生したときに水中機器の交換が容易にできる。一方 S-net は、地震計と津波計などを 1 つの円筒形の容器 (海底中継器) に収容して、海底ケーブルに接続している。2000 年代までに整備された海底観測ネットワークと設計思想は似ているが、たとえば 1 つの海底中継器には複数の海底津波計を収容して故障に対する冗長性をもたせること、陸上伝送路を二重化することなど、新たな仕組みを導入することによって障害に強い海底観測ネットワークとなっている (金沢, 2016)。インライン方式とよばれるこの観測システムのメリットは設置の時間が短いことであるが、デメリットは水中で障害が発生したときにはケーブル船が必要となるので、復旧までに時間がかかることである。DONET と S-net は全観測点において地震計と海底津波計が一緒に設置されており、高密度の海底観測ネットワークを構成していることも、それまでの海底観測ネットワークと比べて革新的な点である。

2.2 沖合の津波観測施設と海底津波計の原理

沖合で津波を観測監視する施設には海岸から近い順に、GPS 波浪計 (Kato *et al.*, 2005)、ケーブル式海底津波計、ブイ式海底津波計 (中田・西, 2014) などがある。ケーブル式とブイ式の海底津波計はともに圧力計を使用しており、津波にともなう水深 (圧力) の変化を計測する仕組みで津波を観測する (図 2)。いずれの津波観測点からも観測データは、リアルタイムで陸上まで配信される仕組みとなっている。

GPS 波浪計は、水深がおおむね 100~400 m までの沖合に設置された海面ブイに GPS 受信機を搭載し、陸上の固定基地局との相対的な位置変化を測位することで沖合波浪と潮位を計測する。現在、18 基の GPS 波浪計が太平洋側に加えて東北地方の日本海側にも整備されている。GPS 波浪計は沿岸からおおむね 10~20 km の沖合で津波を観測できることから、2011 年東北地方太平洋沖地震ではいち早く急激な水位上昇を観測したこと

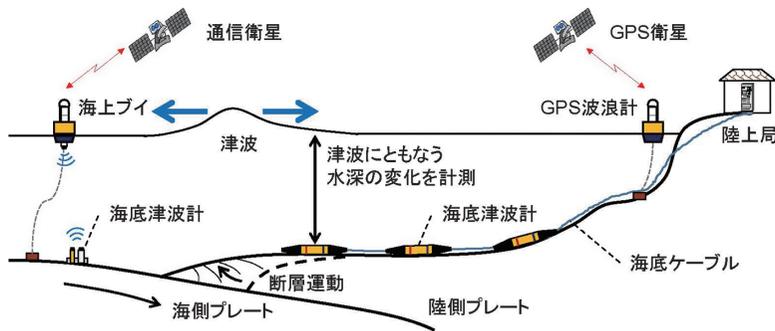


図 2 沖合で津波を観測監視する機器と仕組み

で津波警報の修正に活用された (気象庁, 2012).
 ブイ式海底津波計の先駆けは, 1997年に米国海洋大気局 (NOAA) が最初のプロトコルを開発した DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) である (González *et al.*, 2005). 2002年以降に太平洋を中心に整備が進められ, 2004年インド洋大津波以降は他の海域への設置が推進された. 現在までに, 世界各国の関係機関が DART あるいは DART 技術を継承したブイ式海底津波計を運用しており, 国際的な津波監視体制が確立されている. わが国のブイ式海底津波計は, 東日本大震災後の 2012年から日本海溝東側で 3基が整備され, S-net が設置される 2016年まで運用されていた.

ケーブル式海底津波計で利用される圧力計は, 圧力にともなう水晶の振動数の変化を計測することで圧力値に変換するタイプのものが採用されてきた. わが国で最初に整備された先述の御前崎沖の「海底地震常時観測システム」の海底圧力計の開発では, 複数の感圧方式を机上検討し, 米国での海洋観測の実績があり機器特性に優れている水晶振動式の圧力計が採用された (気象研究所地震火山研究部, 1980). それ以降に整備されたケーブル式海底津波計でも水晶振動式の圧力計が採用されており, 御前崎沖の「海底地震常時観測システム」の海底圧力計は設置から 40年以上経った現在でも稼働している.

著者が所属する JAMSTEC では, 1997年に高知県室戸岬沖に, 1999年に北海道釧路・十勝沖に「海底地震総合観測システム」の 1号機と 2号機

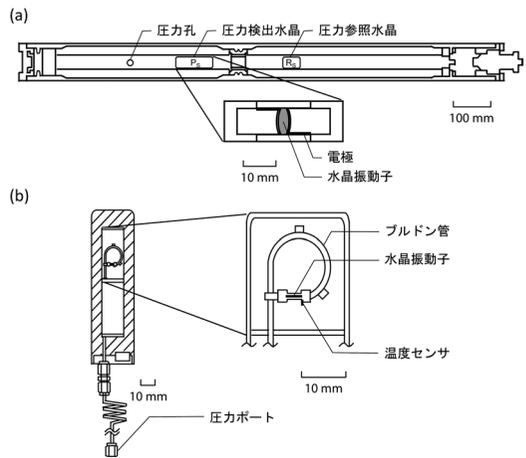


図 3 水晶振動式圧力計の感圧機構. (a) TSMR タイプの水晶振動式圧力計 (JAMSTEC の資料をもとに作成), (b) ブルドン管タイプの水晶振動式圧力計の構造 (Paroscientific 社の資料をもとに作成)

をそれぞれ設置した (Momma *et al.*, 1997; Hirata *et al.*, 2002). これらの海底観測ネットワークでは気象庁と同じシリーズの水晶振動式圧力計である Hewlett Packard 社のモデル 2813E を採用している. このタイプの圧力計は, Thickness-Shear Mode Resonator (TSMR) タイプの圧力計としてエネルギー産業分野などで利用されている (EerNisse and Wiggins, 2001). TSMR タイプの圧力計は, 竹の節のような円筒内に組み込まれた円盤が圧力を受感する機構になっている (図 3 (a)). すなわち, 竹を握るとその節のところに力が伝わるように, 圧力計に力がかかると円盤内部の水晶振動子に圧力が伝わる. Hewlett Packard

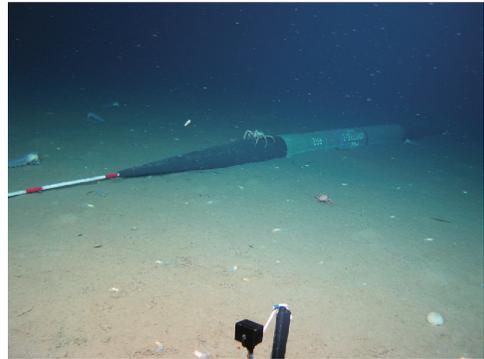
社のモデル 2813E の水晶振動子は図 3 (a) のレンズ状の筒所で、水晶振動子に直接媒体が接触しないように周囲は中空円筒水晶で覆われている。水晶振動子と中空円筒水晶は単一の水晶構造のため、水晶振動子は外圧を一様かつ弾性的な圧力として感知する。水晶の振動数は温度特性をもつため（気象研究所地震火山研究部・海洋研究部，1984），温度特性を補正するための圧力参照水晶が圧力変動のない区画に収容されている（図 3 (a)）。圧力検出水晶は外部圧力と外部温度を、圧力参照水晶は外部温度を感受する。一方、圧力参照水晶は圧力検出水晶と同一の温度－振動数（周波数）特性としており、圧力検出水晶と圧力参照水晶の振動数（周波数）の差分を計測することで、温度変化の寄与を補償（補正）する仕組みとなっている。

後年に JAMSTEC が開発した DONET でも水晶振動式圧力計を採用している。ただし、2000 年代までに整備した海底観測ネットワークで採用された圧力計とは異なる感圧機構をもつ水晶振動式圧力計である Paroscientific 社のモデル 8B7000-2-005 を採用している。水晶振動子の振動数を計測する仕組みは同じであるが、水晶振動子に圧力を伝える機構にブルドン管を使っている（図 3 (b)）。これは圧力ポートからつながるブルドン管の先端部に装着した水晶振動子の振動数の変化を圧力変動として計測する仕組みで動く（Houston and Paros, 1998）。ブルドン管を用いる圧力計でも温度特性の補正が必要となるため、圧力計内部には温度を計測する水晶（温度センサ）が装着されている。

2.3 海底津波計の性能

前節で述べたようにわが国の海底観測ネットワークは、開発した時期によって採用される圧力計のタイプは異なるが、いずれも圧力変化にともなう水晶振動子の振動数の変化を計測する仕組みで動く水晶振動式圧力計が利用されている。そのため水頭換算で 0.1~1 mm 程度の分解能をもち、波高が 1 cm 以下の微小な圧力変化（津波）を高精度に計測してきた（今村ほか，1991；Hino *et al.*, 2001 など）。

(a)



(b)

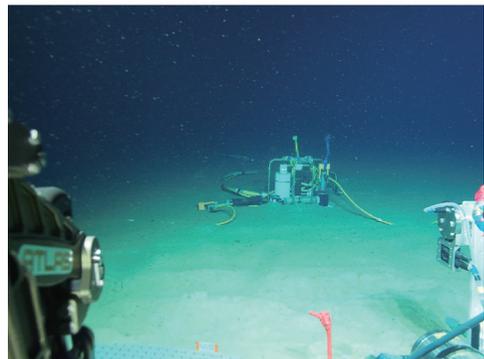


図 4 海底に設置された海底津波計（JAMSTEC 提供）。(a) 北海道釧路・十勝沖「海底地震総合観測システム」の KPG2 観測点、(b) DONET の MRC10 観測点

圧力計は海底津波計として組み立てられ、S-net などインライン方式の海底観測ネットワークの場合には海底ケーブルの敷設と同時にケーブル敷設船によって、DONET のようなノード方式の海底観測ネットワークの場合には ROV によって海底に設置される。インライン方式とノード方式の海底観測ネットワークの設置後の海底津波計の様子を図 4 に示す。図 4 (a) は北海道釧路・十勝沖「海底地震総合観測システム」2 号機の海底津波計 KPG2 の写真で、水深 2,248 m の海底に設置されている。写真の中央にある円筒形の容器（海底中継器）の中に図 3 (a) で示した圧力計が収容されている。図 4 (b) は DONET の MRC10 観測点の海底津波計の写真で、設置水深は 1,720 m である。DONET では圧力センシングシステムと

して、圧力計の他に差圧計、ハイドロフォンで海底の水圧を計測しており、それぞれのセンサで観測できる周波数帯域をカバーして、広帯域の水圧観測を実施している。

3. 海底津波計で観測される津波

3.1 2011年東北地方太平洋沖地震による津波

本章では、これまでに海底津波計により観測された津波についてレビューする。まず地震とともに津波として、海底津波計を津波警報の発表へ活用するきっかけとなった2011年東北地方太平洋沖地震を例にあげる。2011年東北地方太平洋沖地震の発生時には、日本の海底観測ネットワークはすべて稼働しており、ケーブル式海底津波計のリアルタイム観測データは陸上に伝送されていた。地震発生時に稼働していた日本周辺のケーブル式海底津波計を図5に示す。南海トラフのDONETについては、観測点の構築作業中で10観測点が試験運用されていた。図5には地震発生から24時間以内に発生した余震の位置も示している。津波を発生させる震源断層は余震の分布にほぼ一致するとみなせるので、2011年東北地方太平洋沖地震では南北に約500km、東西に約200kmにもおよぶプレート境界で断層運動が起こり、巨大津波の波源となったことを示唆する。著者らは、当時日本周辺に展開されていたケーブル式海底津波計と太平洋に展開されていたブイ式海底津波計(DART)で観測された津波の観測状況を取りまとめた(東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 2014)。それらの観測から、本稿では津波波源の近傍に設置されたケーブル式海底津波計で観測された水圧変動ならびに観測された津波について紹介する。

東北日本の千島海溝沿いから日本海溝沿いにかけて、JAMSTEC、東京大学地震研究所、気象庁が運用するケーブル式地震観測システムが設置されている(図5)。津波波源の北側に位置する北海道の釧路・十勝沖には先述のJAMSTECの海底津波計KPG1とKPG2(Hirata *et al.*, 2002)、東北地方の三陸沖には、1996年に設置された東京

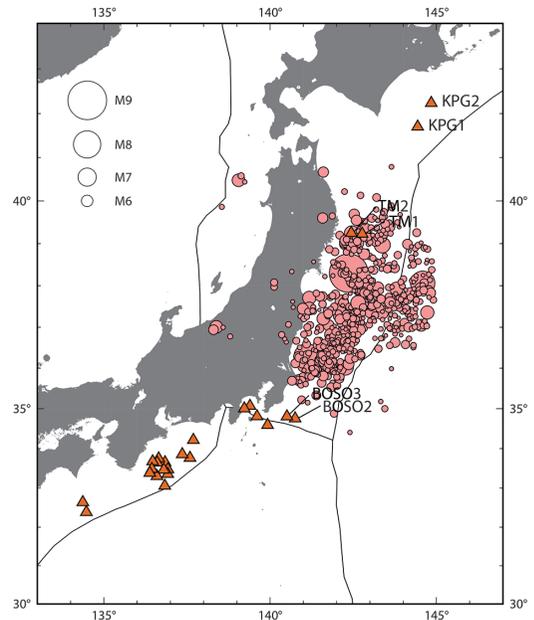


図5 2011年東北地方太平洋沖地震のときに運用されていたケーブル式海底津波計(試験運用を含む)と地震発生から24時間の余震分布(赤色の○)

大学地震研究所の海底津波計TM1とTM2(金沢, 2000)がある。また津波波源の南側に位置する房総半島沖には、1985年に設置された気象庁の海底津波計BOSO2とBOSO3(藤沢ほか, 1986)がある。2011年東北地方太平洋沖地震の震源から北海道の釧路・十勝沖のKPGまでは約420~490km、三陸沖のTMまでは約120km、房総半島沖のBOSOまで約420kmある。

図6は、3機関の海底津波計KPG, TM, BOSOのケーブル式海底津波計で観測された水圧変動を波高に換算して示したものである。図6(a)は2011年3月11日から2日間のオリジナルの観測波形である。KPGとBOSOは全期間のデータ取得ができているが、TMは津波が陸上へ来襲した時点で岩手県釜石市にある陸上局が被災して、以降の観測データは欠測となっている。地震が発生した時刻は14時46分(以下、いずれもJST)で、地震発生時の海底津波計には地震動などによる大振幅の短周期の水圧擾乱が含まれる。したがってオリジナルの観測波形から長周期の津

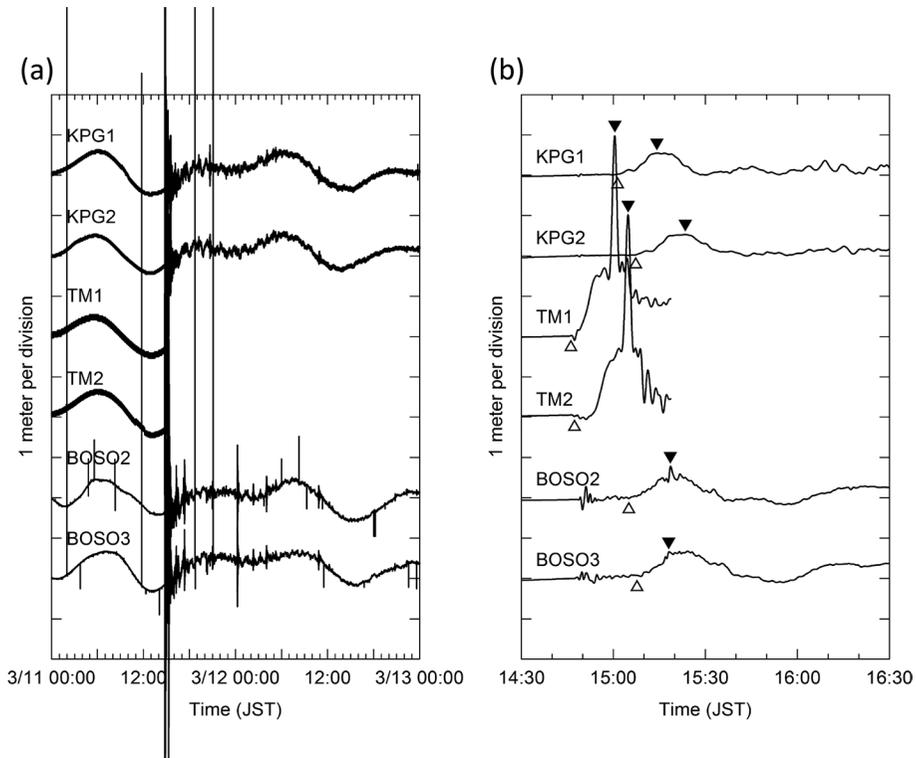


図 6 2011 年東北地方太平洋沖地震のときの北海道から房総半島までの海底津波計の観測波形（東日本大震災合同調査報告書編集委員会（2014）の図を改変）。（a）オリジナルの観測波形，（b）周期 120 秒以下の成分を除去した観測波形（白色の△と黒色の▼は、それぞれ津波の第 1 波到達と最大波高）

波を抽出するにはローパスフィルタを適用する必要がある。ここでは周期 120 秒以下の成分を除去するフィルタを適用して、津波の第 1 波を含む 2 時間分の波形を抽出した（図 6 (b)）。

津波波源の海底津波計 TM は、地震発生時から津波が陸上局に襲来するまでの間、特徴的な水位変動を詳細に記録している。TM1 では、地震直後の微弱な海面低下の直後から緩やかな水位上昇が見られる。その後 14 時 58 分頃から急激な水位上昇を示し、5m の波高、継続時間が 4 分のパルス状の水位変動を記録している。約 30 km 陸側にある TM2 でも、TM1 と同様に地震直後の微弱な水位低下の後、緩やかな水位上昇に続くパルス状の急激な水位上昇が 15 時 03 分頃から観測されている。この特徴的な水位変動は、沿岸により近い岩手南部沖に設置された GPS 波浪計でも観測されている（河合ほか、2011）。震源近傍の

TM で観測された特徴的な 2 段の津波は、海溝付近での大きなすべり量を示唆している。

津波波源より北側に位置する海底津波計 KPG1 では、津波は 15 時 01 分頃に到達して、15 時 15 分頃に第 1 波の最大波高が観測されている。津波は 7 分後の 15 時 08 分頃に KPG2 に到達する。KPG1 と KPG2 で観測された津波の最大波高は第 1 波で、ともに約 0.6m であった。

津波波源の南側に位置する海底津波計 BOSO は震源から KPG とほぼ同じ距離にあるため、KPG とほぼ同じ時刻に津波の第 1 波到達による水位上昇が出現する。BOSO2 では 15 時 05 分頃、BOSO3 では 15 時 08 分頃にそれぞれ津波の第 1 波が到達している。津波の第 1 波の波高は BOSO2 で約 0.7m、BOSO3 で約 0.6m であった。図 6 (a) のオリジナルの観測波形によれば、KPG、BOSO ともに地震発生から 1 日以上経過しても津波に伴

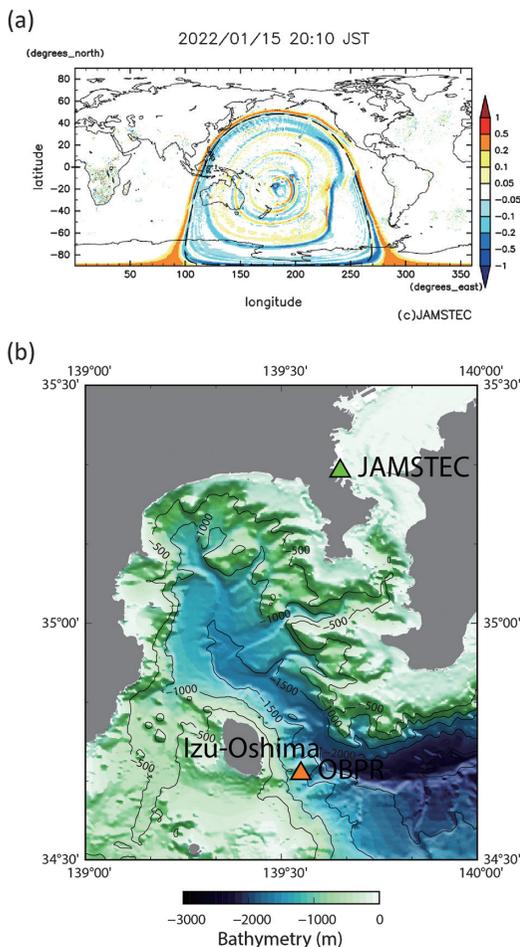


図7 (a) 2022年フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火の海面気圧の数値シミュレーション (JAMSTEC 提供), (b) 海底津波計 (橙色の△) と大気圧計 (緑色の△) の位置

う水圧変動を記録しており、太平洋側では津波の影響が長時間継続していたことがわかる。

3.2 2022年フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火による津波

津波は大部分が海底での地震で発生するが、まれに地震以外の原因で発生することがある。現在の津波警報は主として地震の情報にもとづき発表されるので、地震以外の原因で発生する津波に対しては正確な予測が困難な場合がある。2022年1月15日に発生したフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火では、津波の発生は予想されたも

の、津波の伝播速度から予想よりも早く潮位変化が観測されたこと、潮位変化の発生メカニズムが明らかでなかったために津波警報の発表までに時間を要したことなどが課題として浮き彫りとなった。

その後の研究と考察で、フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火によって大気擾乱が発生し、これが気圧波 (Lamb 波) として地球全体に伝播した。そして津波に先行した潮位変化は、Lamb 波によって励起されたことを示唆した。とくに水深が大きい海溝付近におけるプラウドマン共振効果により、この潮位変化の振幅を増大させたことが明らかとなった (Kubota *et al.*, 2022; Tanioka *et al.*, 2022 など)。

JAMSTEC では海域火山活動にともなう海底地殻変動を監視するため、相模湾の伊豆大島東方沖の水深 1,299 m の海底において、2021 年から自己記録式 (オフライン) の圧力計による長期連続観測を行っている (図7)。長期連続観測中は、定期的に ROV によるデータ回収と圧力校正のために海底の観測機器にアクセスしている。2022年6月にデータ回収する機会があったので、フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火のときに、伊豆大島東方沖の海底に設置してあった圧力計で観測した水圧変動を紹介する。図7 (a) に示すように、フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火によって発生した海面気圧の数値シミュレーション結果から、関東地方には20時10分頃 (以下、いずれも JST) に Lamb 波が到達することがわかる。図7 (b) には、伊豆大島東方沖に設置している圧力計と約 70 km 離れた JAMSTEC で計測している大気圧計の設置位置を示している。

図8に伊豆大島東方沖の海底で観測された水圧変動と JAMSTEC で観測された大気圧変動を並べて示す。圧力計の観測データは、天文潮汐の影響を除去するために周期 2,000 秒以上の成分を除去するフィルタを適用している。海底の圧力計と大気圧計は約 70 km 離れているものの、大気圧計で約 2 hPa の気圧変化が観測された 20 時すぎから海底の水圧も大きく変化した。気圧変化が発

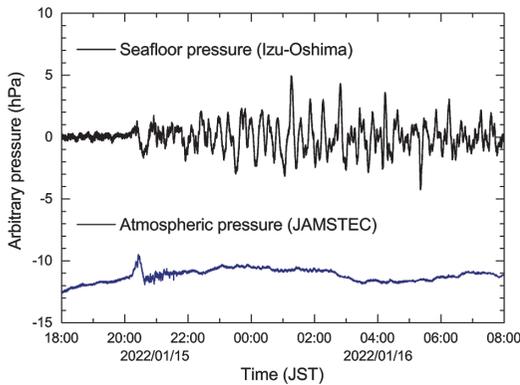


図 8 伊豆大島東方沖で観測された 2022 年フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山の噴火にともなう海底の水圧変動と JAMSTEC で観測された大気圧変動

生じたのとはほぼ同時刻の 20 時 34 分頃に海底の圧力計は -1.5 hPa の水圧変動を記録して、海面が 1.5 cm 低下したことを示唆する。海底の圧力計は、1 月 16 日の 01 時 15 分頃に最大値 4.9 hPa を観測した。すなわち海底の圧力計は、15 日の 20 時 34 分頃に Lamb 波によって強制的に海面変動が発生し、その後 16 日の 01 時 15 分頃に大規模噴火にともなう津波が到達したことを観測している。火山噴火に起因する津波の発生頻度は地震に比べて相対的に低い。沖合の海底津波計は火山噴火などの非地震性津波の早期検知に貢献することを示唆する。

4. 海底の圧力計が地震時に観測する動水圧

4.1 重錘形圧力天びんと室内実験

前章の 2011 年東北地方太平洋沖地震による海底津波計の観測からわかるように、海底に設置された圧力計は、地震時には津波による水圧変動以外にも大振幅の動水圧変動を記録する。海底津波計の運用で技術検討課題にもなっている地震時の動水圧変動について、室内実験と海底観測ネットワークの観測データから考察したので紹介する(松本ほか, 2022)。

著者らは、重錘形圧力天びんと恒温槽を組み合わせて、海底環境での圧力計の長期安定性の再現

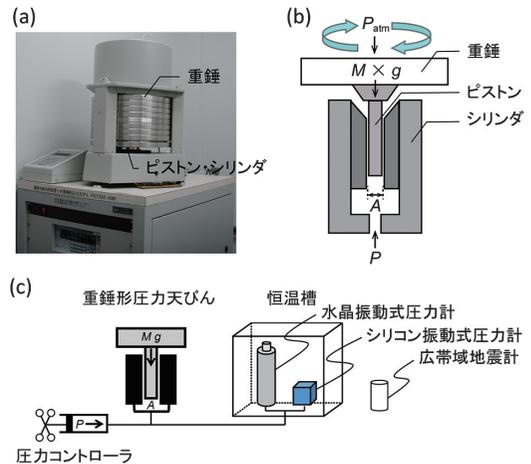


図 9 (a) JAMSTEC が運用する重錘形圧力天びん、(b) 重錘形圧力天びんの動作原理、(c) 室内実験の主要な構成機器

実験や圧力校正を行っている(図 9)。図 9 (a) に示す重錘形圧力天びんは、標準圧力を発生できるので圧力校正のために用いることが多く、ピストン・シリンダと質量が既知の重錘から構成される。図 9 (b) に示すように、ピストンおよび重錘に作用する下向き重力 ($M \times g$) とピストン底面に作用する圧力による上向きの力 (P) が平衡したとき、ピストンが浮上して一定の圧力が得られる。さらに重錘を回転させ、ピストン・シリンダ間の摩擦を低減することで、重錘形圧力天びんは高精度の標準圧力を発生させる。重錘形圧力天びんに接続された圧力計(図 9 (c) の恒温槽内にセットされた 2 種類の圧力計)には、重錘形圧力天びんの発生圧力に周囲圧力(大気圧: P_{atm})と高低差による圧力が加わる。

4.2 室内実験による考察

海底の環境温度に近い 2°C に保温した恒温槽に圧力計をセットして、水深 $2,000 \text{ m}$ に相当する 20 MPa を重錘形圧力天びんで発生させ、圧力計に連続加圧した(図 9 (c))。重錘形圧力天びんのピストン・シリンダの断面積が約 10 mm^2 なので、 20 kg の重錘により 20 MPa の圧力を発生させる。実験では感圧機構が異なる 2 種類の圧力計、すなわち海底津波計で採用される水晶振動式圧力計と主に産業分野で採用されるシリコン振動

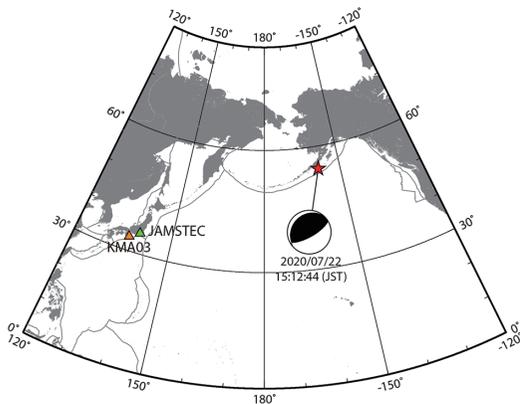


図 10 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震と海底津波計(橙色の△)ならびに室内実験施設(緑色の△)の位置(松本ほか, 2022)

式圧力計を1秒サンプリングで計測した。シリコン振動式圧力計は、空港や港湾施設などの土木構造物の不等沈下の監視に採用されている。シリコン振動式圧力計は、半導体素子を埋め込んだシリコン単結晶のダイアフラム(薄膜)に直接印加して、半導体素子の振動数の変化を圧力変動として計測する仕組みで動く(横河電機, 1989)。この実験に用いたシリコン振動式圧力計は、70MPaまで加圧できる横河電機社のモデルEJX610Aである。さらに広帯域地震計を設置して実験室の地動も100Hzサンプリングで計測した。実験中の2020年7月22日15時12分頃(以下、いずれもJST)にアラスカ半島でM7.8の地震が発生した(図10)。震央から実験室まで約5,100kmある。

まず実験室の広帯域地震計の観測データを解析した。広帯域地震計の観測波形(上下動成分)と地動に含まれる周波数成分の時間変化を調べるためスペクトログラムを計算した(図11)。15時21分頃からの短周期の地震動につづき、15時34分頃からは分散性をもつRayleigh波が明瞭に観測された。次に、重錘形圧力天びんから加圧していた水晶振動式圧力計とシリコン振動式圧力計の観測波形とスペクトログラムを図12に示す。圧力計の出力値に対して、重錘形圧力天びんによる標準圧力からの偏差を計算することで周囲圧力の変化の寄与を除去して、スペクトログラムを計算

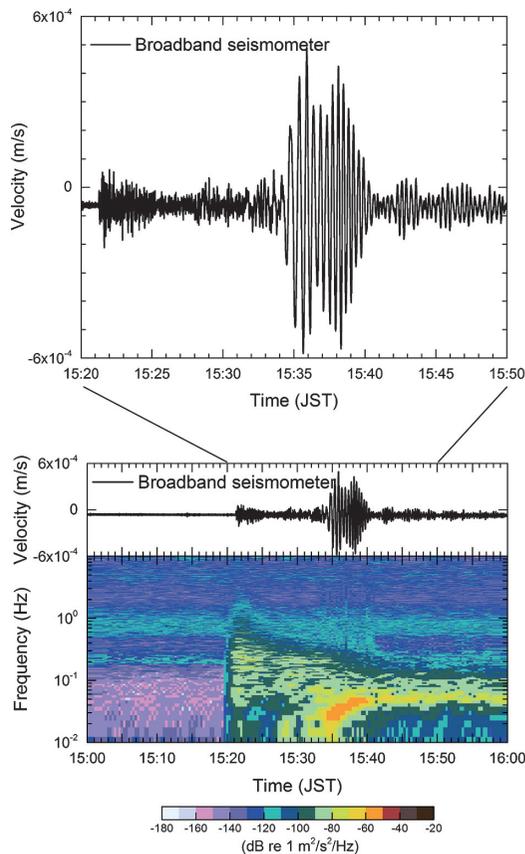


図 11 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震にともなう室内実験での広帯域地震計の観測波形とスペクトログラム(松本ほか, 2022)

した。圧力計は2℃の恒温槽内にセットしていたので、計測中に周囲温度が変化する影響は無視できる。水晶振動式圧力計ならびにシリコン振動式圧力計は、ともに15時21分以降に重錘形圧力天びんの20kgの重錘が地震動で揺れた影響で、動的な圧力変動が観測された。広帯域地震計と同様に短周期の圧力変動につづき、Rayleigh波による分散性の圧力変動が観測された。

圧力計が観測する動的な圧力変動と地震動との相互関係を検証するため、広帯域地震計との比較を行う。ニュートンの第2法則にしたがって、重錘に作用する加速度と圧力を関連づけ、圧力計の観測データを加速度の次元に変換する。そして広帯域地震計と圧力計のパワースペクトル密度を計

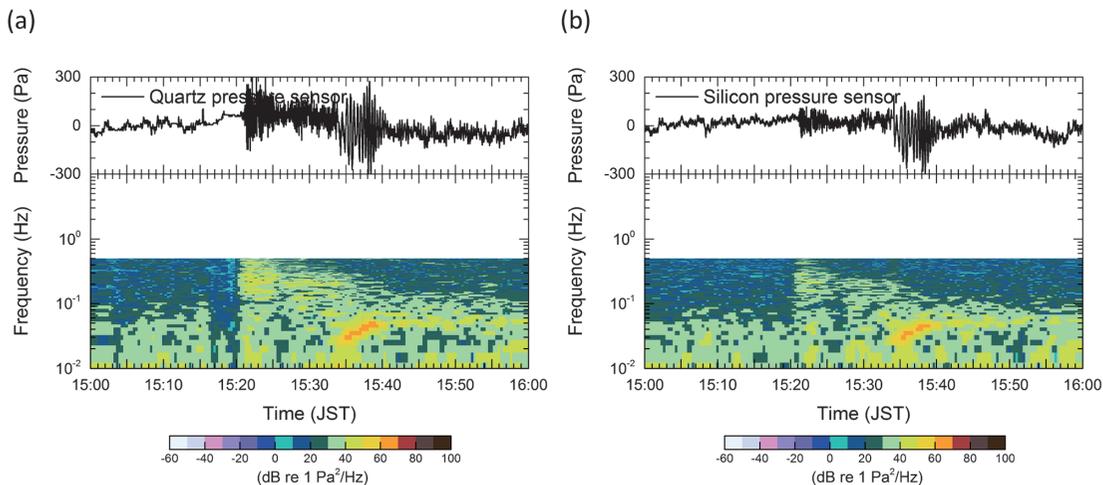


図 12 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震にともなう室内実験での (a) 水晶振動式圧力計, (b) シリコン振動式圧力計の観測波形とスペクトログラム (松本ほか, 2022)

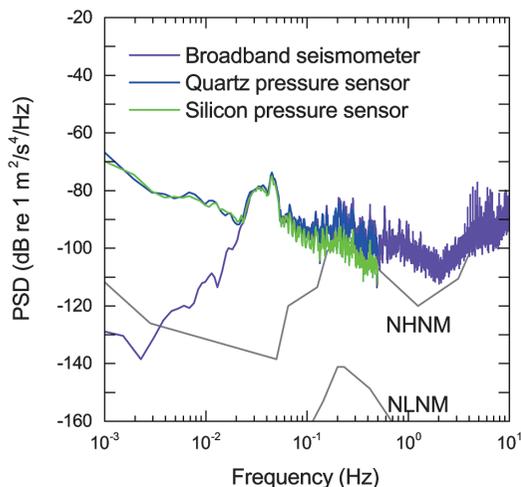


図 13 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震にともなう室内実験での広帯域地震計と水晶振動式圧力計ならびにシリコン振動式圧力計の観測記録のパワースペクトル密度 (NHNM と NLNM は, それぞれ典型的なノイズレベルの上限と下限) (松本ほか, 2022)

算したものを図 13 に示す。Rayleigh 波が卓越する 0.04 Hz で, 圧力計と広帯域地震計の振幅は一致する。両圧力計のスペクトルはさらに長周期の帯域 (<0.01 Hz) でも一致することから, 圧力計のタイプによらず, 津波の検知性能は同等であることを示唆する。一方, 0.1 Hz 以上の短周期の

帯域では差があり, シリコン振動式圧力計の感度は 10 dB 程度小さい結果となった。この周波数帯域 (>0.1 Hz) でも水晶振動式圧力計の振幅は広帯域地震計と一致する。室内実験から, 重錘形圧力天びんの浮上していた重錘が地震動により振動した影響で動的な圧力変動が発生し, 圧力計がこの圧力変動を観測したことを合理的に説明できた。

4.3 海底現場の観測データとの比較

地震発生時に室内実験では 20 MPa を圧力計に加圧していたので, 20 MPa の圧力に相当する設置水深が 2,000 m に近い DONET 観測点の海底圧力計データを解析する。水深 2,063 m に設置している KMA03 観測点の海底圧力計 (震央距離は約 5,500 km) で観測された 0.1 秒サンプリングの波形とスペクトログラムを図 14 に示す。15 時 21 分頃から短周期の地震波による動水圧変動を観測した。15 時 37 分頃から長周期の動水圧変動を観測したが, これは Rayleigh 波に起因する。15 時 37 分頃から観測された Rayleigh 波による長周期の動水圧変動の特徴は, 図 12 で示した室内実験と調和的である。

最後に, 室内実験と海底現場による観測データの周波数特性を考察する。KMA03 観測点の海底津波計で観測された動水圧変動のパワースペクト

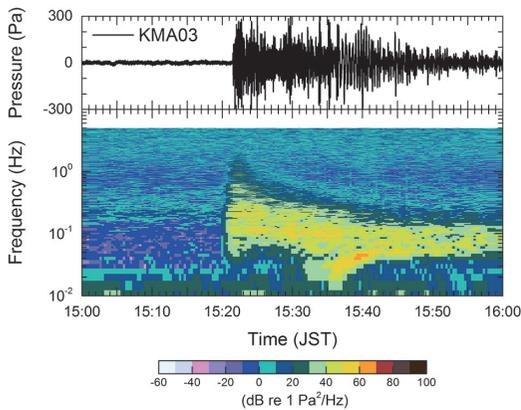


図 14 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震にともなうDONETのKMA03観測点の海底津波計の観測波形とスペクトログラム（松本ほか，2022）

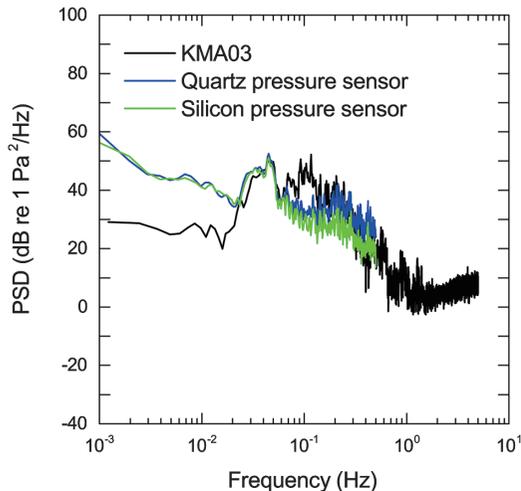


図 15 2020年7月22日にアラスカ半島で発生した地震にともなうDONETのKMA03観測点の海底津波計と室内実験での水晶振動式圧力計ならびにシリコン振動式圧力計の観測記録のパワースペクトル密度（松本ほか，2022）

ル密度を計算し、室内実験で観測された動的な圧力変動と比較した（図15）。パワースペクトル密度によれば、0.04 Hzで卓越する海底現場の動水圧変動の振幅は、室内実験の観測とよく一致する。これは、海底現場の海底津波計が観測する現象を室内実験で再現していることを示唆する。すなわち、地震時に海底津波計が観測する動水圧変

動は、直上の海水の慣性力によって発生し、その振幅は重量（水深）に依存することがわかった。一方、0.2 Hzで卓越する短周期の動水圧変動は、水晶振動式圧力計のほうが海底現場の観測に近い振幅を示した。これは、室内実験の水晶振動式圧力計がDONETで採用されている海底津波計と同じ仕様であることを反映している。KMA03観測点では0.1 Hzで卓越する動水圧変動が継続的に観測されたが、室内実験では再現されていない。これは実験室の広帯域地震計でも観測（卓越）しなかった（図13）。したがって、KMA03観測点の海底津波計で観測された特有の動水圧変動は、堆積層の海底に設置されていることに由来する可能性もあり、さらに考察が必要である。

5. 台風接近時の海底津波計の観測データ

5.1 自治体が運用する津波予測システム

海底観測ネットワークの海底津波計データは気象庁による津波警報の更新や沖合の津波観測情報の発表だけでなく、一部の海底津波計の観測データは、自治体が提供する津波情報にも活用されている（石橋ほか，2018）。和歌山県では2015年11月から、南海トラフで運用中のDONETの観測データにもとづき津波情報を提供する「和歌山県津波予測システム」を導入している。同様のシステムは、三重県でも「DONETを活用した津波予測・伝達システム」として2020年3月から導入された。千葉県では2022年7月から、日本海溝のS-netを利用した「千葉県津波浸水予測システム」の運用を開始した。いずれの自治体も気象庁から沿岸地域を対象とした津波予報業務の許可を取得して、独自の津波予測システムとして運用している。

たとえば和歌山県と三重県で運用されている津波予測システムは、DONETの海底津波計で津波を観測した場合に、対象エリア内の通信携帯端末に対して、沖合で津波を観測したことならびに避難を呼びかける緊急速報メールを自動配信する。このシステムにより津波を自動検知するための判定値を計算するアルゴリズムは、既往の研究

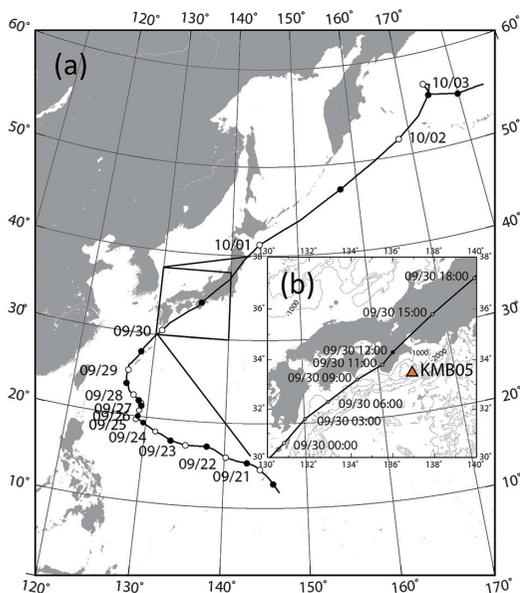


図 16 (a) 2018 年台風 24 号の経路. 経路上の白色の○と黒色の●はそれぞれ 00 時と 12 時 (いずれも UTC) の位置 (気象庁の資料をもとに作成). (b) 南海トラフ付近の拡大図ならびに DONET の KMB05 観測点の位置 (松本ほか (2020) の図を改変)

(Takahashi *et al.*, 2015) に詳しく記述されている. 観測点ごとに時間窓 50 秒の短時間平均 (STA: Short Term Average) と時間窓 300 秒の長時間平均 (LTA: Long Term Average) を 2 回計算して, STA と LTA の比率を監視する. しかしながら, このリアルタイム津波検知手法をこれまで運用してきたところ, 台風接近時にはこの判定値が津波検知のしきい値に近づくことがわかってきた (松本ほか, 2020). そこで DONET に強い勢力を維持したまま接近した台風について, 海底津波計の観測データを精査して, 判定値が津波検知のしきい値に近づく要因を考察した.

5.2 台風と海底津波計が観測するデータ

2018 年に発生した台風 24 号を対象として, DONET の海底津波計の観測データを解析した. 台風 24 号が発生してから消滅するまでの経路を図 16 に示す. 台風 24 号は 2018 年 9 月 20 日 06 時 (以下, いずれも UTC) に北マリアナ諸島付近で熱帯低気圧として発生し, 9 月 21 日 06 時に台風に発達した (図 16 (a)). 9 月 24 日 18 時か

ら 9 月 25 日 06 時の期間は中心気圧が 915 hPa まで低下し, 最盛期を迎える. その後, 台風 24 号が DONET に最接近したのは 9 月 30 日 12 時頃で, 中心気圧は 960 hPa であった (図 16 (b)). 9 月 26 日 00 時から DONET に接近する直前の 9 月 30 日 03 時まで, 長期間にわたり中心気圧は 950 hPa で非常に強い勢力を維持したままであった. 9 月 29 日 00 時から 10 月 3 日 00 時までの 4 日間の KMB05 観測点の津波検知の判定値を計算するアルゴリズムにしたがって潮汐を除去した観測データ, STA と LTA, ならびに STA と LTA から計算される津波検知の判定値の変化を図 17 に示す. 台風 24 号が四国沖に到達する 9 月 30 日 06 時頃から, 判定値は急激に大きくなり, 同日 16 時頃に最大値に到達する. 10 月 1 日 00 時頃に収束するまで, 判定値は長時間にわたり大きい状態が継続する.

同じ期間の KMB05 観測点における海底津波計の観測波形のスペクトログラムを図 18 に示す. 台風 24 号通過前後のスペクトログラムの変化から, 観測波形のノイズレベルが台風最接近の 1 日以上前から相対的に高くなっていることがわかる. 台風接近前の観測波形は, 風浪に関連する脈動 (10^{-1} Hz) ならびに内部重力波 (10^{-2} Hz) の周波数帯で卓越するエネルギーをもつ. 大気擾乱源が深海上にあるとき, 脈動が大きく観測されることは既往の研究 (吉村ほか, 1952) でも指摘されている. 脈動と内部重力波に加えて, 台風が最接近する 9 月 30 日 10 時頃から同日 20 時頃の期間には長周期波 (10^{-3} Hz) も卓越する. 9 月 30 日 14 時頃からは分散性の長周期波が厳然と観測されており, 台風にとまう高波が観測されたと考えられる. このように台風接近時の海底津波計の観測波形は, 脈動 (10^{-1} Hz), 内部重力波 (10^{-2} Hz), 高波 (10^{-3} Hz) の各周波数帯が卓越し, 広帯域にエネルギーをもつことがわかる. ここでは, DONET の代表的な設置水深にある KMB05 観測点 (水深は 1,998 m) を例として示したが, 台風からの距離や設置水深による振幅の違いを除き, 津波検知の判定値の変化や観測波形の卓越周波数の特徴は観測点間で一致する. 現在運用中の

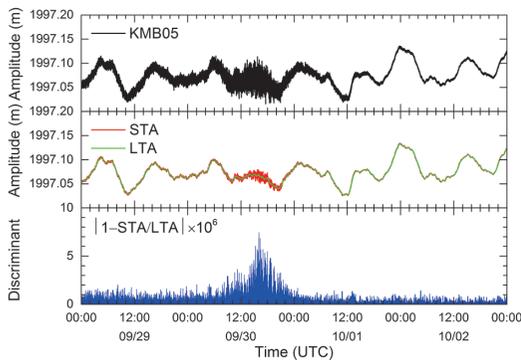


図 17 2018 年台風 24 号接近時の DONET の KMB 05 観測点の津波検知のための判定値の変化（上から順に、潮汐を除去した観測波形，STA と LTA，津波検知の判定値）（松本ほか，2020）

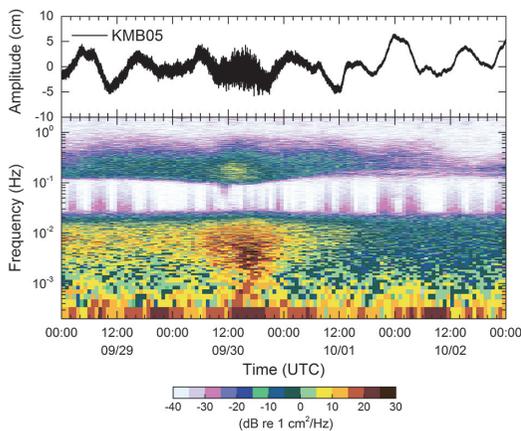


図 18 2018 年台風 24 号接近時の DONET の KMB 05 観測点の海底津波計の観測波形とスペクトログラム（松本ほか（2020）の図を改変）

リアルタイム津波検知の判定値が台風接近時に大きくなる要因は、内部重力波のエネルギーが卓越することによる知見を得た。

6. おわりに

東日本大震災で課題となった津波警報の発表方法の改善の取り組みとして、2013 年 3 月から津波警報への活用に海底津波計が追加された。沖合の津波観測に関する情報として、海底津波計が津波を観測した時刻や高さを発表するように変更さ

れた。現在の津波警報では、東日本大震災後に運用開始した DONET と S-net を含む 214 地点の海底津波計の観測データをリアルタイムで監視し、津波発生時には津波情報を発表する仕組みとなっている。DONET や S-net のリアルタイム観測データは気象庁の津波警報だけでなく、自治体の津波予測システムに組み込まれ、自治体が独自に発表する津波情報にも活用されている。

現在、南海トラフの想定震源域である高知県沖から日向灘の海域は、海底観測ネットワークの空白域となっている。そのため、文部科学省は「南海トラフ海底地震津波観測網（N-net）」の整備を進めている（青井，2020）。2023 年度以降に、図 1 (b) に示す海域に 36 地点の観測装置からなる N-net の設置が予定されており、気象庁の緊急地震速報や津波情報への実装が期待されている。N-net では海底津波計としてシリコン振動式圧力計を開発し、採用されることが決まっている。本稿で紹介した 2020 年 7 月 22 日にアラスカ半島で発生した地震のときの室内実験での観測は、シリコン振動式圧力計が水晶振動式圧力計と同等の性能で津波を観測できることを示唆した。南海トラフでは、既設の気象庁の東海沖の「海底地震常時観測システム」と東海・東南海沖の「ケーブル式常時海底地震観測システム」ならびに DONET の合計 55 地点の海底津波計にまもなく N-net が加わり、広域の海底観測ネットワークによる津波の観測監視体制が強化されることになる。

謝辞

本稿を通じて、海底津波計に関する技術や研究成果を紹介する機会を提供して下さった、本誌の加藤照之編集長に厚く御礼申し上げます。本稿で利用した海底津波計の観測データは、気象庁、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構から提供されたものです。末筆ながらここに記して、各機関の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 青井 真. 2020. 南海トラフ海底地震津波観測網 N-net. *防災科研ニュース*, **209**, 4-7.
- EerNisse, E. P. and Wiggins, R. B. 2001. Review of thickness-share mode quartz resonator sensors for temperature and pressure. *IEEE Sensors J.*, **1**, 79-87. DOI:10.1109/JSEN.2001.923590
- 藤沢 格・立山清二・舟崎 淳. 1986. 房総沖海底地震常時観測システムの概要. *測候時報*, **53**, 127-166.
- 藤原法之. 2003. 海底地震観測システム. *電気学会誌*, **123**, 224-227. DOI:10.1541/ieejjournal.123.224
- González, F. I., Bernard, E. N., Meinig, C., Ebel, M. C., Mofjeld, H. O. and Stalin, S. 2005. The NTHMP tsunameter network. *Nat. Hazards*, **35**, 25-39. DOI: 10.1007/s11069-004-2402-4
- 東日本大震災合同調査報告書編集委員会. 2014. 東日本大震災合同調査報告 共通編 2 津波の特性と被害. 丸善出版, 271pp.
- Hino, R., Tanioka, Y., Kanazawa, T., Sakai, S., Nishino, M. and Suyehiro, K. 2001. Micro-tsunami from a local interplate earthquake detected by cabled offshore tsunami observation in northeastern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3533-3536. DOI:10.1029/2001GL013297
- Hirata, K., Aoyagi, M., Mikada, H., Kawaguchi, K., Kaiho, Y., Iwase, R., Morita, S., Fujisawa, I., Sugioka, H., Mitsuzawa, K., Suyehiro, K., Kinoshita, H. and Fujiwara, N. 2002. Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **27**, 170-181. DOI:10.1109/JOE.2002.1002471
- Houston, M. H. and Paros, J. M. 1998. High accuracy pressure instrumentation for underwater applications. *Proc. 1998 Internat. Symp. Underwater Technol.*, 307-311. DOI:10.1109/UT.1998.670113
- 干場充之・尾崎友亮. 2012. 2011年東北地方太平洋沖地震での緊急地震速報と津波警報. *地震 第2輯*, **64** (3), 155-168. DOI:10.4294/zisin.64.155
- 今村文彦・首藤伸夫・岡田正実・永井孝志. 1991. 海底津波計による1990年マリアナ地震津波の観測及びその解析. *海岸工学論文集*, **38**, 166-170. DOI:10.2208/proce1989.38.166
- 今村文彦. 2021. 東日本大震災での巨大津波の発生・被害実態と今後の災害対応. *自然災害科学*, **40**, 151-162. DOI:10.24762/jndsj.40.2_151
- 石橋正信・馬場俊孝・高橋成実・今井健太郎. 2018. DONET 観測情報を活用した津波予測システムの社会実装—和歌山県の事例—. *自然災害科学*, **37**, 125-142. DOI:10.24762/jndsj.37.1_125
- Kanazawa, T., Uehira, K., Mochizuki, M., Shinbo, T., Fujimoto, H., Noguchi, S., Kunugi, T., Shiomi, K., Aoi, S., Matsumoto, T., Sekiguchi, S. and Okada, Y. 2016. S-net project: cabled observation network for earthquakes and tsunamis. *SubOptic*, 2016, WE2B3.
- 金沢敏彦. 2000. 「海底」ではかる海底地震計の開発. *土木学会誌*, **85**, 92-95.
- 金沢敏彦. 2016. 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net). *日本地震工学会誌*, **28**, 24-27.
- Kaneda, Y., Kawaguchi, K., Araki, E., Matsumoto, H., Nakamura, T., Kamiya, S., Ariyoshi, K., Hori, T., Baba, T. and Takahashi, N. 2015. Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis, In: SEAFLOOR OBSERVATORIES. Springer Praxis Books (GEOPHYS). Springer, Berlin, Heidelberg, 643-663. DOI:10.1007/978-3-642-11374-1_25
- Kato, T., Terada, Y., Ito, K., Hattori, R., Abe, T., Miyake, T., Koshimura, S. and Nagai, T. 2005. Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy. *Earth, Planets Space*, **57**, 279-301. DOI:10.1186/BF03352566
- Kawaguchi, K., Kaneko, S., Nishida, T. and Komine, T. 2015. Construction of the DONET real-time seafloor observatory for earthquakes and tsunami monitoring, Seafloor Observatories. In: SEAFLOOR OBSERVATORIES. Springer Praxis Books (GEOPHYS). Springer, Berlin, Heidelberg, 211-228. DOI:10.1007/978-3-642-11374-1_10
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己. 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. DOI:10.2208/kaigan.67.I_1291
- 気象庁. 2012. 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告. *気象庁技術報告*, **133**, 1-479.
- 気象研究所地震火山研究部. 1980. 海底地震常時観測システムの開発. *気象研究所技術報告*, **4**, 1-233. DOI:10.11483/mritechrepo.04
- 気象研究所地震火山研究部・海洋研究部. 1984. 御前崎南方沖における海底水圧観測. *気象研究所技術報告*, **9**, 1-90. DOI:10.11483/mritechrepo.09
- Kubota, T., Saito, T. and Nishida, K. 2022. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb

- waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **77**, 91-94. DOI:10.1126/science.abo4364
- 松本浩幸・柄本邦明・今井健太郎・高橋成実. 2020. リアルタイム津波予測のための台風接近時における海底津波計データの解析. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **76**, I_319-I_324. DOI:10.2208/kaigan.76.2_I_319
- 松本浩幸・梶川宏明・有吉慶介・高橋成実・荒木英一郎. 2022. 地震時に海底津波計が観測する動水圧変動に関するデータ解析. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **78**, I_169-I_174. DOI:10.2208/kaigan.78.2_I_169
- Mochizuki, M., Kanazawa, T., Uehira, K., Shinbo, T., Shiomi, K., Kunugi, T., Aoi, S., Matsumoto, T., Sekiguchi, S., Yamamoto, N., Takahashi, N., Shinohara, M. and Yamada, T. 2016. S-net project: construction of large scale seafloor observatory network for tsunamis and earthquakes in Japan. *AGU Fall Meeting, 2016*, NH43B-1840.
- Momma, H., Fujiwara, N., Iwase, R., Kawaguchi, K., Suzuki, S. and Kinoshita, H. 1997. Monitoring system for submarine earthquakes and deep sea environment. *Proc. MTS/IEEE OCEANS '97*, **2**, 1453-1459. DOI:10.1109/OCEANS.1997.624211
- 中田健嗣・西新三郎. 2014. プイ式海底津波計の紹介. *測候時報*, **81**, S101-S115.
- Takahashi, N., Ishihara, Y., Fukuda, T., Ochi, H., Tahara, J., Mori, T., Deguchi, M., Kido, M., Ohta, Y., Hino, R., Mutoh, K., Hashimoto, G., Motohashi, O. and Kaneda, Y. 2015. Buoy platform development for observation of tsunami and crustal deformation, In: Hashimoto, M. (eds) *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH). Intern. Assoc. Geod. Symp.*, **145**, 97-103. DOI:10.1007/1345_2015_114
- Tanioka, Y., Yamanaka, Y. and Nakagaki, T. 2022. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth Planets Space*, **74**, 61. DOI:10.1186/s40623-022-01614-5
- Tsushima, H., Hino, R., Tanioka, Y., Imamura, F. and Fujimoto, H. 2012. Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting. *J. Geophys. Res.*, **117**, B03311. DOI:10.1029/2011JB008877
- Uehira, K., Kanazawa, T., Mochizuki, M., Fujimoto, H., Noguchi, S., Shinbo, T., Shiomi, K., Kunugi, T., Aoi, S., Matsumoto, T., Sekiguchi, S., Okada, Y., Shinohara, M. and Yamada, T. 2016. Outline of seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench (S-net). *Eur. Geosci. Union Gen. Assemb.*, 2016, EGU2016-13832.
- 横河電機(株). 1989. シリコン振動式圧力センサ. *計測と制御*, **28**, 547-548. DOI:10.11499/sicej11962.28.547
- 吉村寿一・大枝良介・新垣隆夫・堤 良造. 1952. 脈動と波浪 (第1報). *験震時報*, **16**, 64-76.

松本浩幸

[まつもと ひろゆき]

現職 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター 主任研究員

略歴 2001年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了. 2001年4月日本学術振興会特別研究員 (PD), 2002年4月海洋科学技術センター (現 海洋研究開発機構) 入所. 2021年7月より現職. この間, 2015年10月~2016年9月および2018年5月~2019年7月包括的核実験禁止条約機関 (CTBTO) コスト・フリー専門家. 博士 (工学)

研究分野 地震工学, 津波工学

光ファイバセンシングによる新しい海底地震観測

篠原雅尚

1. はじめに

従来情報通信などに使用されてきた光ファイバを用いて温度や振動等の物理量を計測する光ファイバセンシング技術が近年急速に発展してきている。通信に利用可能な低損失の光ファイバが開発された1970年代とほぼ同時期に光ファイバを計測に用いる技術として光ファイバセンシング技術の開発が始まった (Grattan and Meggitt, 2000)。また、光ファイバの技術開発にあわせてレーザー光源などの機器開発も進んだ (Fang *et al.*, 2012)。光ファイバセンシングは長距離区間にわたる測定が可能であること、観測する点の空間的間隔が短く分布的に観測ができること、計測のための電力が不要であること、電磁気の影響を受けないこと等の長所をもっており、温度分布や歪み分布などの測定原理が考案されてきた。この技術の1つである分散型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing, 以下 DAS) 計測は光ファイバの連続的な歪み分布を長距離区間にわたって短い時間間隔で繰り返し計測することにより振動を検知する技術である。DASはファイバに含まれる不均質によるレイリー散乱光の位相干渉計測技術を用いており、現在の計測原理の1つは2000年頃に発表された (Posey *et al.*, 2000)。振動を検知できることから開発当初からセキュリティ監視やパイプライン、線路、道路などのモニタリングを目的に使われ始め (Owen *et al.*, 2012)、資源探査の分野で Vertical Seismic Profiling などの地震探査に使われた (Mateeva *et al.*, 2014)。2010年代後半からは、DAS計測が遠距離にわたって空間的に高密度なデータが取得できることから陸上における自然地震観測に適用される (Lindsey *et al.*, 2017) とともに、光ファイバを内含している既設

の海底ケーブルによる観測も行われ始めた (Lindsey *et al.*, 2019)。本稿では、DAS計測のうち、地震観測に多く使われるものの原理、光ファイバ海底ケーブルを用いたDAS計測による地震観測とその取得データの評価、国内を主としたDAS計測を用いた現在の研究と今後の動向を紹介する。

2. 分散型音響センシング技術

DAS計測ではコヒーレントなレーザー光の短いパルスをファイバの端から送信する (図1)。なるべく遠距離までレーザー光を届かせるためにファイバにはシングルモードファイバを通常用いる。ファイバ内には分子分布のばらつきなどの光の波長 (約 $1.5\mu\text{m}$) よりも十分小さい不均質が多数存在しており、不均質は空間的にはほぼ一様に存在している。そのために、ファイバ内の不均質によりレイリー散乱された後方散乱光がレーザー光パルスを送信したファイバ端に連続的にもどる。観測事例が多いDASでは異なる位置に存在する2つの不均質からの後方散乱光を位相干渉計測し、2つの不均質の距離を高精度で相対的に求める。位相干渉計測は光の波長を基準として距離差が用いている光の波長の整数倍であれば、位相がゼロと計測される。原理を最初に示した論文では、2つの経路に差を持たせたマッハ・ツェンダー干渉計を用いている (Posey *et al.*, 2000)。レーザー光パルスを発信した直後から位相干渉計測を短い時間間隔で連続的に行う。位相干渉計測を繰り返す時間に光がファイバ内を進む距離が空間的なサンプリング間隔となる。この空間的なサンプリング間隔のことをチャンネル間隔と呼ぶこともあり、1回の位相干渉計測にかかる時間から数m程度となる。パルスを送出してから散乱波

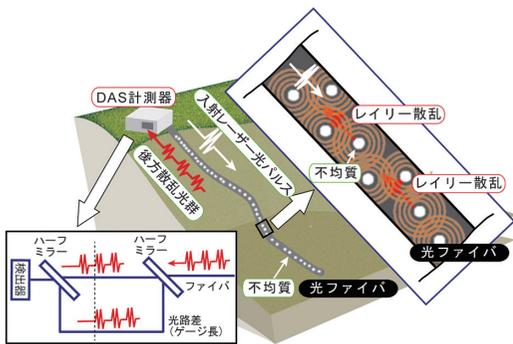


図 1 レイリー散乱光と干渉計測による分散型音響センシング (DAS) の原理概念図。ファイバの末端からレーザー光パルスを送信するとファイバ内に一様に存在する不均質でレイリー散乱が発生し後方散乱波が末端に次々と戻ってくる。戻ってきた後方散乱波を2つにわけ光路差を持たせた後に再び重ね合わせることで(マッハ・ツェンダー干渉計)により、距離の異なる2つの不均質から散乱光を干渉させ2点間の相対的距離を精度高く計測する。計測装置での光路差に相当する距離をゲージ長という。1回のレーザー光発信において発信直後から干渉計測を短時間で繰り返す。干渉計測を繰り返す時間に相当する距離をチャンネル間隔という。レーザー光発信を繰り返すことによりそれぞれの2点間距離の時間変化を把握する。1秒間のレーザー光発信の繰り返し数が、サンプリング周波数となる

を受光するまでの時間が観測点までの距離に対応するので、時間的に高密度な計測を繰り返すことからパルスを送出したファイバ端からの至近距離から遠距離まで連続的に計測することができる。また、計測ではファイバ内に多数存在している不均質のうち、ある2つの不均質に着目して、その距離をゲージ長といい、計測の空間的な分解能に相当する。チャンネル間隔とゲージ長は、送信するレーザー光のパルスの時間長に相当する空間的な長さよりも長くなる。さらに、レーザー光パルス発信を短い時間で繰り返すことにより、ゲージ長の時間変化、すなわち歪み変化を検出することができる。パルス送出の間隔(時間的サンプリング間隔)は光が総計測長を往復する時間よりも長くする。

現在、DAS計測器は国内外の複数の企業から



図 2 DAS計測器の例。通常19インチコンピュータラック4段から6段程度に収まるサイズである。内部にレーザー光発振装置、ファイバ、干渉計測装置などを収納しており、計測器自身の振動がノイズとなるので、注意が必要である

入手可能である。建築物や土木構造物の調査に用いられる総計測長が短い計測器もあるが、地震観測にも適している計測器ではチャンネル間隔が数mから数十m間隔であり、総計測長は120km程度までとなっている(図2)。これは地震計を数mから数十mの間隔で連続的に並べた長さが120km程度のアレイ観測を行うことと同様である。また空間的な分解能を示すゲージ長については、5mから200m程度までを選択できるようになっている。計測に使用される波長は通信にもよく使われる1,550nm付近であるものが多い。この波長は通信にも多く使われており、通信に使用されているファイバと同時に同じファイバを使用することは難しい。また、各製品とも計測データの質を上げるために、複数の波長のレーザー光パルスを同時発信するなどの工夫を行っているが、これらの技術については非公開となっていることも多い。

計測に用いる光ファイバについては、先に述べたようにシングルモードファイバを用いる。通信用にすでに敷設されている光ファイバを計測に用いることが多いが、現状の計測器は通信に使用していないファイバ(ダークファイバ)を用いる必要がある。さらに、光ファイバと地面のカップリングも重要である。地面の震動を確実に記録するためには、埋設や固定などにより光ファイバと地

面が強く固着していることが望ましい。通信用に敷設された光ファイバでは、地面との固着についてはあまり考慮されていないことが多いが、架空など地面から浮いている状況でないかぎり、ある程度地面の震動を捉えるようである。陸上において観測に用いることができる既設通信ケーブルは、道路や線路沿いに敷設されていることが多く、交通ノイズが多いことが欠点である。一方、海底ケーブルに内包される光ファイバを用いた海域の観測は、海底ケーブル自身の重量により海底とのカップリングも良好で、人工的なノイズも少ないことから有利である。

通常の地震計を用いた地震観測と比較すると、線状とはいえ、空間的にはるかに高密度な観測が長距離にわたって実施可能であることが、光ファイバによる DAS 観測の特長である。特に、陸上に比べて観測点が少ない海域観測について、観測の空間的密度を飛躍的に向上させる画期的なものである。計測原理からは、歪み変化を定量的に把握できることも期待される。また、DAS 観測の特徴としては、ファイバ方向の歪み一成分の観測であること、ゲージ長変化計測は Benioff 式水平伸縮歪み計と同じ特性を持っており (Benioff, 1935)、通常の地震計とは異なることがあげられる。また、大振幅により時間的サンプリング間隔内にゲージ長が光の波長よりも大きく距離変化すると記録の連続性が失われる (サイクルスキップ) 現象が発生する。さらに、光伝送路に光中継器が入っている場合は光中継器を乗り越えた観測は現在の DAS 技術では不可能である。また、稠密観測であるために生成されるデータが 1 日あたりテラバイトのオーダーになることもこれまでの地震観測とは異なる。以上のように DAS 計測による観測データは感度、計測周波数帯域などのデータの質と量が通常の地震計とは異なることから、計測されたデータについて評価、データ処理手法についての検討が必要である。

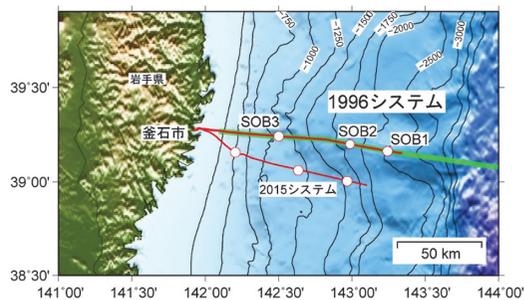


図 3 三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムの設置位置 (1996 システム, 赤線)。地震計と津波計が接続されて常時観測を行っているが、そのうち 3 台の地震計 (SOB1-3) の位置を示す。2015 年に設置した新システム (2015 システム) も併せて示す。緑色の線は 2020 年 11 月に行った制御震源と 1996 システムによる DAS 計測を用いた構造探査において制御震源を発生した測線を示す

3. 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムによる観測

三陸沖に海底地震津波観測を目的として 2 つのケーブル観測システムが東京大学地震研究所により設置されている。その 1 つが三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムである。このシステムはデータ伝送に電信電話伝送技術を中心に用いており 1996 年に設置された。さらに 2015 年にはデータ伝送とシステム制御にインターネット技術を用いた海底ケーブル式観測システム (Shinohara *et al.*, 2021) が設置されているが、内含するすべてのファイバがデータ通信に利用されている (図 3)。1996 年に設置された三陸沖光ケーブル観測システムは海底ケーブル全長が約 115 km のシステムであり、途中で観測測器が接続されている。なお、海岸から約 46 km 先まではケーブル保護を目的として海底下約 1 m に埋設されている。観測測器からのデータはデジタル形式で海底ケーブル内の光ファイバにより陸上局に送られているが、三陸沖光ケーブル観測システムの海底ケーブルには将来の拡張用として 6 本 (3 組) のファイバが用意されている。このファイバは 1,550 nm を中心波長とした分散シフト・シング

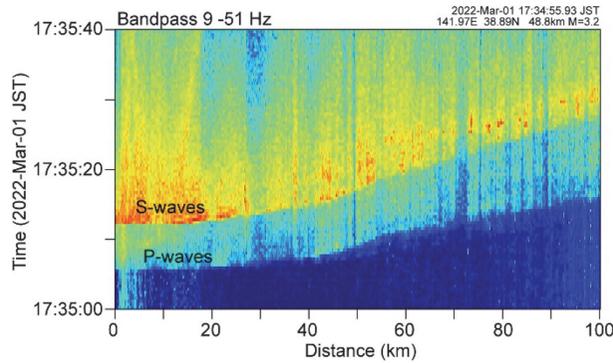


図 4 2022 年 3 月に行った DAS 観測により得られた地震記録。横軸は海岸からの距離、縦軸は時間である。9 Hz から 51 Hz までの周波数帯におけるエネルギーを図示化する FBE データを表示している。暖色が振動が大きいことを表す。P 波および S 波と思われる波群の到着を 100 km にわたって明瞭に見ることができる (Shinohara *et al.*, 2023 を改変)

ルモードファイバであり DAS 計測に適している。さらに、予備ファイバは光中継器などが接続されておらず先端まで無中継であり、長距離の DAS 計測が可能である。また、観測機器の一部として 3 台の地震計が接続されており DAS 計測による記録と従来の地震計による記録の比較ができる。そこで、光ファイバセンシング技術による新しい海底地震観測の技術開発として、三陸沖光ケーブル観測システムを用いた DAS 技術による海底地震観測システムの開発を開始した (Shinohara *et al.*, 2019)。

三陸沖光ケーブル観測システムを用いた DAS 計測は 2019 年 2 月から開始し、2023 年 9 月までに、計 10 回の観測を行っている。DAS 観測は生成されるデータ量が大量であることもあり、1 回の観測は短い場合は数日、長い場合でも数カ月である。通常 DAS 計測の開始前に光パルス試験器 (OTDR) を計測対象の空きファイバに接続し、計測に用いるファイバが健全であることを確認する。陸上局に設置した DAS 計測送受信器に海底ケーブルの光ファイバを光コネクタにより接続し、観測を開始する。観測総距離は 50 km から 100 km までの距離を設定することが多い。サンプリング周波数は 250 Hz または 500 Hz、チャンネル間隔は 2 m から 5 m 程度、ゲージ長を 10 m、40 m または 100 m とすることが多い。使用するレーザー光の波長は 1,550 nm である。DAS 計測

器は散乱光の干渉計測から得られる位相データ (Phase データ) に加えて、ある特定の周波数帯でのエネルギーを Phase データから計算して図示化する FBE (Frequency Band Extracted, 周波数帯抽出) データを表示することが多い。収録中に表示された FBE データの例を図 4 に示す。これは 2022 年 3 月 1 日 17 時 34 分頃 (日本時間) に発生した深さ約 50 km の地震の記録である。地震のマグニチュードは 3.8、震央は三陸沖光ケーブル観測システム近傍である。暖色系が震動が大きいことを示している。図 4 では海岸から 100 km まで示してあり、全部で 50,000 ch のデータが含まれている。周波数帯は 9~51 Hz である。P 波および S 波と思われる波群を明瞭に見ることができる。地震記録があまり明瞭でない距離の部分もあるが、これはこの部分の震動が小さくないことを示している。他の地震が観測された場合でも震動が小さくない場所は同じであり、光ファイバを内含する海底ケーブルと海底のカップリングがあまりよくないことを示しているのかもしれない。検知能力を検証するために 2019 年 2 月および 6 月に実施した試験観測の FBE データを用いて観測期間中に記録された地震の確認を行った (Shinohara *et al.*, 2022)。気象庁が決定した震源情報に基づき収録記録の確認を行ったところ、三陸沖光ケーブル観測システム近傍に決定されている地震についてはほぼすべて記録されていること

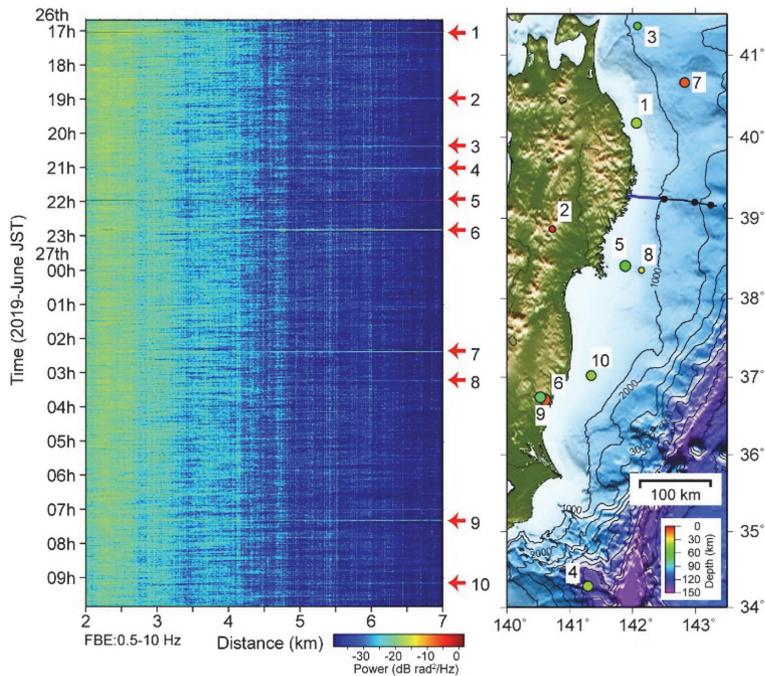


図5 2019年6月に行ったDAS試験観測により検出された地震。周波数帯域が0.5Hzから10HzのFBEデータ(左)を用いている。横軸が海岸からの距離、縦軸は時間を示している。色は暖色になると振動のエネルギーが大きいことを示す。この観測ではDAS観測に用いた海底ケーブル区間は海岸から7kmまでと短く観測に用いた全区間が海底下に埋設されている。FBEデータ右にある矢印の数字と、震央分布(右)の地震の数字が対応している。表示範囲に観測期間中に気象庁が決定した地震はほぼ観測できている。最も規模の小さな地震はマグニチュード1.3である(番号8)

がわかった(図5)。さらに、日本海下深さ490kmで発生したマグニチュード3.8の深発地震も明瞭に記録されていた。これらの結果からDAS計測が地震観測を行うために十分な感度を持っていると判断された。また、2019年2月および6月に行った試験観測では製造企業が異なるDAS計測器を使用した。計測器が異なっても計測器間の差異は大きくなく同じような地震観測が可能であった。

2020年11月にはDAS計測区間下の構造を求めることを目的として制御震源とDAS計測によるケーブル敷設ルートと測線とした構造探査実験を行った。構造探査は2020年11月5~7日に実施し、制御震源の発震は東京大学大気海洋研究所白鳳丸KH-20-11次研究航海により行った。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン(チャンパー容量1,500cu.in.)4台またはSercel社GI

ガン(チャンパー容量355cu.in.)2台である。DASの収録はサンプリングレート500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km(一部80km)で行った。測線は釜石市沖合の約10km地点から海底ケーブル敷設ルートに沿いケーブルの東端を超えて海岸から東に約200kmの地点までとした(図3)。エアガン発震には白鳳丸からストリーマケーブルを曳航した。DAS計測はエアガン発震期間を含むように連続観測を行った。三陸沖光ケーブル観測システムのスペアファイバのうち2本のファイバの末端に同一機種の計測器をそれぞれ接続し、2組のDAS計測を行った。これはエアガンを確実に観測できるようにする冗長化の目的以外にDAS計測の計測器の個体差や異なるファイバを用いた場合の記録の再現性を評価した。その結果、2つの記録はほぼ一致し、計測器の個体差がなく再現性の高い

観測ができることがわかった (Shinohara *et al.*, 2022).

DAS 計測器は刻時に内部の時計を用いている。通常は精度の高いルビジウム発振器などを内部時計に用いている。したがって、相対的な刻時精度は高いが、当初の DAS 計測器は絶対時刻の把握にインターネットの時刻同期プロトコル (NTP) 等を用いており絶対時刻の精度は高くなかった。近年の DAS 計測器は記録を開始する前に GNSS 等を用いて高精度に内部時計の時刻と絶対時刻を比較し、精度の高い絶対時刻の刻時を行っている。そこで、ファイバ・ストレッチャーを用いて、記録の絶対時刻刻時精度を検証した。ファイバ・ストレッチャーはピエゾ素子にファイバを多数回巻いて電磁信号によりファイバを物理的に引き延ばす装置であり、通常は光遅延特性測定等に使用される。ファイバ・ストレッチャーを DAS 計測器に接続し GNSS 基準時計が発する 1 秒間隔パルスファイバ・ストレッチャーに入力した。DAS 計測は最高サンプリング周波数である 20 kHz にて実施し、毎秒の立ち上がりファイバ・ストレッチャーの物理的な作動時間と考えられる 340 μ S 程度つねに遅れることが確認された。通常地震観測としては十分な絶対時刻精度を持っていると考えられる (Shinohara *et al.*, 2023).

4. 海底ケーブルシステムにより取得されたデータの評価

三陸沖光ケーブル観測システムによる観測では収録パラメーターの設定に依存するが 1 日あたり 1~3 TB の Phase データが収録される。Phase データは相対的なゲージ長を高精度に示しており、レーザー光パルス発信間のゲージ長差が歪み変化を示す。DAS 計測により得られた地震記録について Phase データを用いて距離時間軸断面を作成した (図 6)。地震は FBE データを表示した地震 (図 4) と同じである。記録は S/N 比を向上させるために 2 Hz から 20 Hz のバンドパスフィルタをかけた。またすべてのチャンネルを表示できないために 500 ch ごとに 100 ch 分の記録

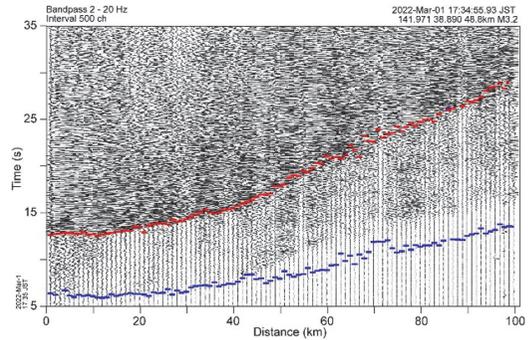


図 6 2022 年 3 月に行った DAS 観測で得られた地震の距離時間軸断面。地震はケーブルシステムの下約 50 km で発生した。マグニチュードは 3.2 である。記録は全部で 50,000 ch あるが、位相データについて 2 Hz から 20 Hz のバンドパスフィルタをかけたデータを 500 ch ごとに表示している。目視で読み取った P 波到着を青線で S 波到着を赤線でそれぞれ示す。P 波と思われる波群の到着、S 波と思われる波群の到着までに複数の波群が到着していることがわかる

だけを表示している。P 波および S 波と思われる波群の到着を波形として明瞭に確認できるだけでなく、P 波到着から S 波到着までの間にさまざまな波群が到着している様子を見ることができ

る。計測に使用した三陸沖光ケーブル観測システムには 3 台の地震計が接続されデータを収録している (図 3)。DAS 計測により得られた Phase データは干渉計測の原理から線形の式を用いて歪みに変換することができる (SEAFOM, 2018)。観測された地震波が平面波であると仮定すると、同じく線形の式で地動速度に変換することができる (Shinohara *et al.*, 2022)。そこで、陸に最も近い地震計 SOB 3 の記録と距離的に SOB 3 に近いチャンネルの DAS データを比較することとした。比較には 2019 年 2 月 15 日 6 時 10 分頃 (日本時間) に発生した深さ約 50 km の地震の記録を用いた。地震のマグニチュードは 3.0、ケーブルシステムからの距離は約 50 km である。歪み記録から地動速度記録への変換には S 波の伝播速度が必要であるが、地震の距離時間軸断面記録から当該チャンネル付近での S 波伝播速度を読み取った。その後、SN 比を上げるために SOB 3

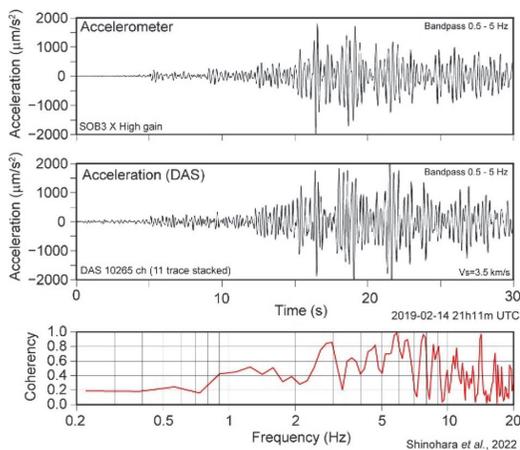


図7 DAS地震記録(中)と三陸沖ケーブル観測システムに接続されている加速度計による地震記録(上)の比較。DAS記録は加速度計(SOB3)のケーブル方向であるX成分と比較するために加速度記録に変換してある。構造探査実験のエアガン発震記録を用いてSOB3に最も近いDAS記録のチャンネルを選び、そのチャンネルを中心として隣接する11chの平均をとった。その後、伝わっている波が3.5km/sの平面波であると仮定して加速度に変換した。どちらの記録も2秒から5Hzのバンドパスフィルターをかけてある。また、加速計記録と加速度に変換したDAS記録のコヒーレンシーを計算した(下)(Shinohara *et al.*, 2022)

に近いチャンネルを中心に隣接した11チャンネルの記録を重合した。地動速度記録を微分して地動加速度記録としバンドパスフィルターをかけた後に加速度計の記録と比較した(図7)。計測している物理量が違うことや近似を行っていることから完全には一致しなかったが、よく似た記録となった。波形の類似度を示すコヒーレンシーも主要な成分が含まれる2~10Hzでは比較的高い値を示す結果となった(Shinohara *et al.*, 2022)。

DAS観測におけるノイズレベルを把握しておくことは、地震観測にとって重要なことである。そこで、観測された雑微動の記録を加速度に変換した後、スペクトルを計算した(図8)。スペクトル計算には、2019年2月14日23時51分(日本時間)頃の約524秒間の記録を用いた。DAS計測器からの距離が35、40、45kmおよび50kmの記録について計算を行った。一方、三陸沖光

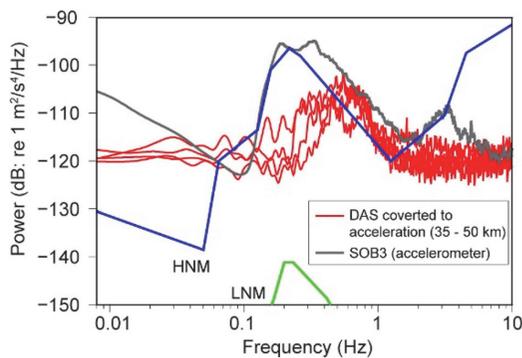


図8 DAS観測データによる海底の加速度領域における雑微動ノイズのスペクトル。DAS記録は平面波仮定(伝播速度500m/s)により加速度に変換した。スペクトルの計算には約524秒長のデータを用いた。海岸から35、40、45、50kmのDAS記録による雑微動スペクトルを赤線で示している。三陸沖ケーブル観測システムで海岸から約50kmにある加速度計(SOB3)のケーブル方向であるX成分の典型的な雑微動スペクトルを灰色で示す。また、Peterson(1993)による高ノイズモデル(HNM)と低ノイズモデル(LNM)を併せて示す。0.5Hzよりも高い周波数帯域でDAS記録のノイズレベルは加速度計のノイズレベルとほぼ同じであることがわかる(Shinohara *et al.*, 2022を改変)

ケーブル観測システムに接続されている加速度計(SOB3)についても雑微動スペクトルを計算した。SOB3は海岸から約50kmのところに位置する。また、ノイズモデル(Peterson, 1993)とも比較した。その結果、DAS記録では周波数約1.6Hz付近でノイズレベルが高くなることが確認された。この雑微動はエネルギーが大きく波形記録でも確認することができる。一方、1Hzよりも高い周波数領域では明瞭なピークを持たず比較的静かである。加速度計と比較すると高い周波数から0.5Hz付近まではほぼ同じノイズレベルだが、それよりも低い周波数ではDAS記録のほうがレベルが低くなる。これはDAS計測が0.5Hzよりも低い周波数帯域では感度が低下していることを示していると考えられる。しかし、0.5Hzよりも高い周波数帯域では高ノイズモデルとほぼ同じ大きさであり、かつ加速度計とほぼ同じノイズレベルであることから地震観測に適していることが

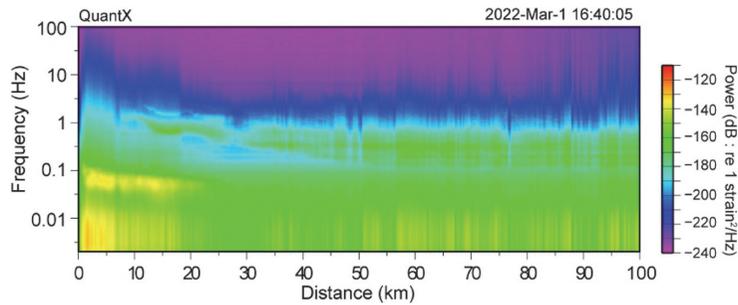


図9 2022年3月に収録したDAS記録による海底雑微動の空間分布。横軸は沿岸からの距離、縦軸は周波数である。海岸から100km沖合までの空間変化を連続的に求めることができた

わかる (Shinohara *et al.*, 2022)。DAS計測の長所は長区間にわたって空間的に高密度なデータを取得していることにあり、海底ケーブルでは沖合から海岸まで空間的に連続した記録を得られる。そこで、稠密なDASデータを利用して海底ケーブル沿いの海底における雑微動の空間変化を求めた(図9)。海岸から100km沖合まで50m間隔で雑微動のスペクトルを約655秒の時間ウィンドウを用いて計算した。計算に用いたのは2022年3月1日16:40頃(日本時間)のデータであり、2019年、2021年の観測でもほぼ同じ結果が得られている(Shinohara *et al.*, 2022)。海岸付近では0.07Hz付近にピークを持つ雑微動が見られ、約1Hzにピークを持つノイズが海岸からの距離10km程度で現れる。また、0.07Hz付近にピークを持つノイズは海岸から離れるにつれてピークの周期が長くなりつつ振幅が小さくなる。海岸から20km付近で0.07Hz付近にピークを持つノイズは消滅する。10km付近から現れる1Hz付近にピークを持つノイズも海岸から離れるにつれてピーク位置の周波数が小さくなっていく。この雑微動は深海底に見られる0.25Hz付近にピークを持つ脈動に対応すると考えられる。今回得られた海岸からの雑微動スペクトルの変化は脈動の生成と関係しているのかもしれない。

DAS計測データ解析にあたって、記録振幅の評価も重要である。2020年11月に実施した制御震源を用いた構造探査実験では、制御震源のそれぞれの発震エネルギーはほぼ均質である。そこで、制御震源の記録における最大絶対振幅と制御

震源と記録したDAS観測点の距離の関係を調べた(図9)。記録に2Hzから15Hzの帯域制限を施し制御震源からの直達波について隣接する10チャンネルの最大振幅の平均を計算した。このときに、DAS観測点の受震感度方向依存性が同じになるように制御震源発震点の真下のDAS観測点の記録を用いた。したがって、水深が制御震源とDAS観測点の距離となる。得られたデータに比較的安定している水深1,300m付近の記録を基準として距離の逆2乗則をあてはめた。その結果、得られた振幅分布は距離の逆2乗則でよく説明できることがわかった。距離の逆2乗則からのずれは地盤特性によって振幅が大きくなることや海底ケーブルと海底のカップリングが問題と考えられる。地動が小さい場合であるが、今回の結果からDAS計測において振幅特性の線形性が確認された(Shinohara *et al.*, 2023)。

5. 今後とまとめ

三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを用いたDAS計測による地震観測からDAS計測が有用であることがわかってきた。今後はDAS計測による震源決定、マグニチュードの決定、地震発震機構の決定の高精度化が期待される。震源決定については、三陸沖光ケーブル観測システムのDAS観測データと周辺の高陸観測点(S-net, Hinet)の併合処理を行う研究が進んでおり、従来の観測網データと比較して震源決定精度が倍以上向上することが明らかになりつつある。

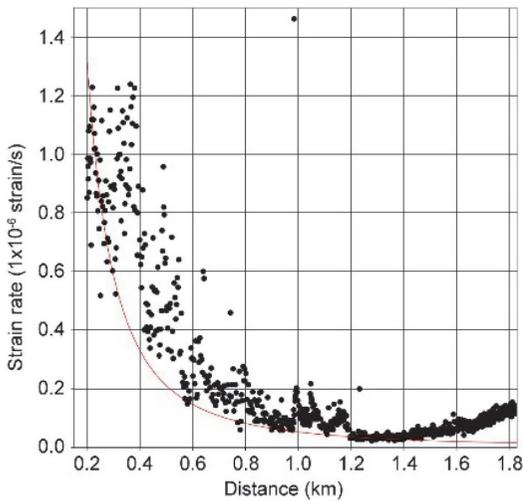


図 10 制御震源（エアガン）と観測点の距離による制御震源からの水中直達波の DAS 記録の振幅変化。距離による制御震源の振幅変化は、距離による減衰で説明することができる (Shinohara *et al.*, 2023)

一方、マグニチュードの推定については三陸沖光ケーブル観測システムの DAS 記録の最大振幅を用いた地震規模の推定が行われており、多数のデータを用いた信頼性の高いマグニチュード推定ができることがわかっている (Yin *et al.*, 2023)。発震機構については海外では陸上観測の DAS 計測データを用いた精度のよい発震機構解を求める試みがなされており (Li *et al.*, 2023)、三陸沖光ケーブル観測システムの DAS データへの適用が計画されている。

三陸沖光ケーブル観測システムによる DAS 観測データを用いた構造研究も進んでいる。稠密な観測データを活かして雑微動の地震波干渉法により堆積層および最上部地殻の高分解能な S 波構造が求められている (Fukushima *et al.*, 2022)。従来の海底地震計を用いた観測では浅部地殻については十分な分解能が得られていなかった。また、2020 年に実施した構造探査実験のデータを用いた浅部地殻構造の研究も進展中である。

国内では三陸沖光ケーブル観測システム以外にも既設光ファイバ海底ケーブルを用いた研究が行われている。海洋研究開発機構が高知県室戸市沖に設置している室戸沖ケーブルでも DAS 計測が

なされており、計測システムや記録の特性に関する研究が進んでいる (Ide *et al.*, 2021; Matsumoto *et al.*, 2021)。また、南海トラフ付近で発生する浅部低周波微動の観測に成功し、稠密データを用いた微動発生位置の推定が行われた (Baba *et al.*, 2023)。上記以外にも、観測を目的としている豊橋沖ケーブル、新潟県粟島沖ケーブルでも DAS 計測が行われており、さらに敷設されている通信用光ファイバケーブルを用いた DAS 観測も津軽海峡や鹿児島県三島村付近等で実施されている。海外では 2023 年 2 月にトンガ王国の通信用ケーブルを用いた海底 DAS 地震観測がトンガと日本の共同研究として行われ、多数の地震が収録された。陸上においても DAS 観測は積極的に行われている。国内では既設光ファイバが道路や線路沿いであることからノイズが大きいが、四国北東部では深部微動の観測に成功している。火山における地震学的観測では高密度に計測可能な DAS 観測は有利であり、福島県吾妻山において既設の光ファイバケーブルを用いた DAS 観測により火山性地震の高精度震源決定が行われた (Nishimura *et al.*, 2021)。今後、海域・陸上において超稠密なデータが取得できる DAS 観測は進展すると考えられる。一方、DAS 観測はファイバ沿いの線状のデータであること、ファイバ敷設方向の一成分しか計測できないこと、歪みの計測であること、現状では総計測距離が 120 km 程度に限られること、光中継器を乗り越えられないこと、比較的低感度でダイナミックレンジも限られることなどの問題点もあり、地動を計測する従来の三成分地震計と相補的な観測がより効果的であると考えられる。また、DAS 計測は短時間に大量のデータが得られることが特徴であり、今後はデータの流通・蓄積方法、DAS データ解析手法の検討・開発を行うとともに、リアルタイム処理などを用いた長期間計測が可能な観測システムの開発が望まれる。

参考文献

Baba, S. *et al.* 2023. Observation of shallow slow earth-

- quakes by distributed acoustic sensing using offshore fiber-optic cable in the Nankai Trough, southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2022GL102678. <https://doi.org/10.1029/2022GL102678>
- Benioff, H. 1935. A linear strain seismograph, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **25**, 283-309. <https://doi.org/10.1785/BSSA0250040283>
- Fang, Z. *et al.* 2012. Fundamentals of Optical Fiber Sensors. John Wiley & Sons, Inc.
- Fukushima, S. *et al.* 2022. Detailed S-wave velocity structure of sediment and crust off Sanriku, Japan by a new analysis method for distributed acoustic sensing data using a seafloor cable and seismic interferometry. *Earth Planets Space*, **74**, 92. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01652-z>
- Grattan, K. T. V. and Meggitt, B. T. 2000. Optical Fiber Sensor Technology. Kluwer Academic Publishers.
- Ide, S. *et al.* 2021. Very broadband strain-rate measurements along a submarine fiber-optic cable off Cape Muroto, Nankai subduction zone, Japan. *Earth Planets Space*, **73**, 63. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01385-5>
- Li, J. *et al.* 2023. Earthquake focal mechanisms with distributed acoustic sensing. *Nat. Commun.*, **14**, 4181. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39639-3>
- Lindsey, N. J. *et al.* 2017. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 11,792-11,799. <https://doi.org/10.1002/2017GL075722>
- Lindsey, N. J. *et al.* 2019. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing. *Science*, **366(6469)**, 1103-1107, doi: 10.1126/science.aay5881
- Mateeva, A. *et al.* 2014. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling. *Geophys. Prospect.*, **62**, 679-692. doi: 10.1111/1365-2478.12116
- Matsumoto, H. *et al.* 2021. Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable. *Sci. Rep.*, **11**, 2797. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82093-8>
- Nishimura, T. *et al.* 2021. Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system. *Sci. Rep.*, **11**, 6319. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85621-8>
- Owen, A. *et al.* 2012. OptaSense: Fibre optic distributed acoustic sensing for border monitoring 2012 European Intelligence and Security Informatics Conference, 362-364. doi: 10.1109/EISIC.2012.59
- Peterson, J. 1993. Observations and Modeling of Seismic Background Noise, U.S. Geol. Surv. Open-File Report 93-322. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
- Posey Jr., R. *et al.* 2000. Strain sensing based on coherent Rayleigh scattering in an optical fibre. *Electron. Letters*, **36**, 1688-1689.
- SEAFOM Measurement Specification Working Group. 2018. Measuring Sensor Performance—DAS Parameter Definitions and Tests (SEAFOM-MSP-02). <https://seafom.com/?mdocs-file=1270>
- Shinohara, M. *et al.* 2019. Distributed Acoustic Sensing measurement by using seafloor optical fiber cable system off Sanriku for seismic observation. OCEANS 2019 Seattle. doi:10.23919/OCEANS40490.2019.8962757
- Shinohara, M. *et al.* 2021. Development and operation of an Ocean Bottom Cable Seismic and Tsunami observation system (OBCST) in the source region of the Tohoku-oki earthquake. *Earth Space Sci.* doi: 10.1029/2020EA001359
- Shinohara, M. *et al.* 2022. Performance of seismic observation by distributed acoustic sensing technology using a seafloor cable off Sanriku, Japan. *Front. Mar. Sci.*, **9**, 844506. doi: 10.3389/fmars.2022.844506
- Shinohara, M. *et al.* 2023. Simultaneous seafloor seismic observation by distributed acoustic sensing and accelerometer using off-Sanriku optical cable observation system. 2023 IEEE Underwater Technology (UT). doi: 10.1109/UT49729.2023.10103378
- Yin, J. *et al.* 2023. Earthquake magnitude with DAS: a transferable data-based scaling relation. *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2023GL103045. <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>

篠原雅尚

[しのはら まさなお]

現職 東京大学地震研究所観測開発基盤センター教授・防災科学技術研究所技術統括，学術博士

略歴 九州大学理学部卒業，千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。東京大学海洋研究所助手，千葉大学理学部助教，東京大学地震研究所助教准教授を経て，現職

研究分野 海域地震学

強震動データベースの構築に向けた取り組み

森川信之

1. はじめに

日本初の本格的な強震計である SMAC 型強震計による強震観測は 1953 年に開始され、70 年にわたる歴史がある（功刀ほか，2009）。1995 年兵庫県南部地震を契機として、防災科学技術研究所（以下、防災科研）の K-NET や KiK-net、気象庁および地方自治体の震度計など、日本全国を高密度に網羅する強震観測網が整備され、観測点数は飛躍的に増加した。地方自治体および気象庁の震度計と、一部を除く K-NET から構成される震度情報ネットワークによる観測点の数は、2023 年 9 月 30 日時点で 4,371 となっている。また、他のさまざまな機関においても強震観測が実施されており、その中には記録が公開されているものもある。このような日本の強震動記録は量的にも質的にも世界最大級のものであるといえる。ここでは、これまでに得られているものだけでなく今後も蓄積され続ける膨大な量の日本の強震動データを有効に活用していくための強震動データベースの構築に向けた取り組みを紹介する。

2. 強震動データの利活用

強震動記録には、震源断層の破壊によってどのような地震動が生じたか、その地震動が観測点至るまでに伝播してきた地下構造によってどのように減衰あるいは増幅されたか、という情報が含まれている。そのため、強震動記録は大地震の震源断層における破壊過程、地下構造による地震動の増幅あるいは減衰特性や地下構造そのものの推定などの幅広い研究に活用されてきた。これらの研究成果により複雑な自然現象である地震に関する科学的知見が蓄積され、将来発生する地震に対

する強震動予測のための震源断層のモデル化手法（入倉・三宅，2001）や地下構造のモデル化手法（藤原ほか，2009; Koketsu *et al.*, 2012）の確立などに貢献してきた。これらのモデル化手法はさらに地震調査研究推進本部地震調査委員会によって震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）としてまとめられている。

一方、高さ 60 m を超える超高層建築物の設計には、地震動時刻歴を用いた動的解析による耐震設計が義務付けられており、長い間、米国のエルセントロとタフトに加えて港湾技術研究所（現、港湾空港技術研究所）の八戸港観測点において 1968 年十勝沖地震で観測された強震動記録が用いられてきた。建築・土木の分野では、防災科研の E-ディフェンスをはじめとした振動台実験による入力地震動として、1995 年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測記録などが用いられ、構造物の破壊メカニズムの解明が進められている。また、そのような入力地震動は、地震ザブトンのような地震動体験シミュレーターにおいても用いられ、多くの方々の防災意識の啓蒙・向上にも役立てられている。なお、これらの振動台実験や地震動体験の入力地震動においては、実際の観測記録の振幅を何倍かまたは何分の 1 かに変えて入力することや、地震動シミュレーションによるデータが用いられることもある。

最近では、地震観測網データを用いた即時解析技術と地下構造、建物・人口分布モデル等の情報を取り込み、被害全体をリアルタイムに推定する J-RISQ（防災科学技術研究所，2020）の開発が進められ、リアルタイムでの活用も視野に入ってきている。

以上はこれまでの強震動記録の活用事例を網羅したわけではないが、それでもさまざまな用途での活用がなされていることがわかる。

3. 強震動予測の観点で見た現状の課題

ここでは、著者の専門である強震動予測および地震ハザード評価の観点から、日本の強震動データ活用の現状と課題について述べる。

強震動記録の回帰分析などによって経験的に求められた地震動予測式は、海外も含めて多くの強震動予測や地震ハザード評価に用いられている。

日本における地震動予測式の先駆的な研究として金井（1966）があげられるが、その後の強震観測の発展によって強震動記録に基づく地震動予測式の研究は活発となっていった。特に、1,000以上の観測点で強震動記録が得られた世界初の地震である2003年十勝沖地震の後、2006年頃に多くの地震動予測式が提案された。さらに、日本周辺で発生した地震として観測史上最大級の2011年東北地方太平洋沖地震の強震動記録も用いた地震動予測式も提案されてきた。図1に震源（断層中央）深さ10kmの地殻内地震を対象としたこれらの地震動予測式の比較を示す。図1では、モーメントマグニチュード（ M_w ）5.5および7.5の2とおりについて比較している。 M_w 5.5では式による予測値の違いはそれほど大きくない。また、 M_w 7.5においても、断層最短距離が10km程度より遠い場合、日本の式による予測値の違いは小さいものの、それよりも近い断層最短距離では大きなばらつきがある。次に震源深さ30kmの海溝型プレート間地震を対象とした比較を図2に示す。図2では M_w 6.5と M_w 8.5の2とおりについて比較している。 M_w 6.5では式による予測値の違いはそれほど大きくない一方で、 M_w 8.5では予測値の違いが顕著である。

このように、日本の地震動予測式において、マグニチュードが8程度より大きな巨大地震や震源断層から数km程度以内のいわゆる断層近傍において大きなばらつきが認められる。図3は比較をした地震動予測式のうち、Morikawa and Fujiwara（2013）の導出に用いられた強震動記録における断層最短距離とマグニチュード分布であるが、 M_w が8程度以上や断層最短距離が10km以内の

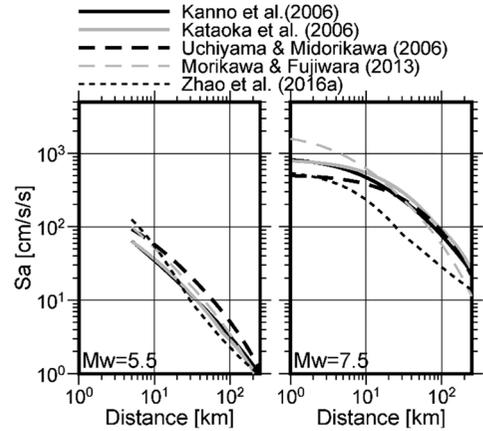


図1 震源深さ10kmの地殻内地震を対象とした地震動予測式の比較（周期1秒、減衰定数5%の加速度応答スペクトル）

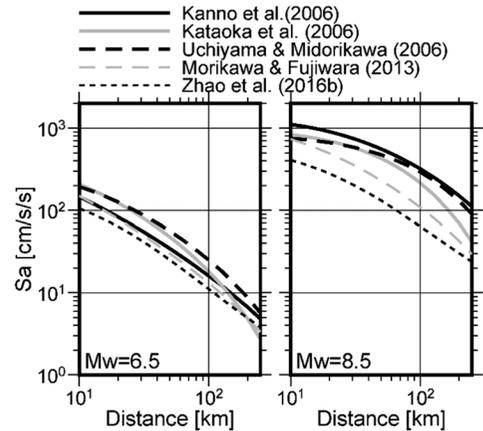


図2 深さ30kmの海溝型プレート間地震を対象とした地震動予測式の比較（周期1秒、減衰定数5%の加速度応答スペクトル）

記録は少なく、 M_w が7を超える地震では断層最短距離が30km以内の記録はない。すなわち、図1における M_w 7.5の地震への断層最短距離30km以内に関しては、外挿範囲となっていることが分かる。地震動予測式間のばらつきが顕著であるのは、このように強震動記録がほとんど得られていない地震規模や断層最短距離の領域となっているためである。

また、地震動予測式の構築には、強震動データから算出される地震動強さ指標と震源パラメータおよび観測点の位置だけでなくその直下や周辺の

地盤情報と紐づけたデータベースを作成する必要がある。日本において、上述のように多くの地震動予測式が提案されているが、その元となるデータベースもそれぞれで構築されているのが現状である。

公開されている強震動データにおいて、震源パラメータに関しては気象庁によって推定されている震源位置やマグニチュードと紐づけられているものの、地震動予測式では、 M_w と震源断層と観測点までの最短距離（断層最短距離）が入力パラメータとして用いられることがほとんどであり、これらの情報とは紐づけられていない。このうち、 M_w にはさまざまな機関による推定値があり、地震によっては異なる値が推定されている。たとえば、2003年十勝沖地震は、気象庁の M_w は8.0であるのに対して、世界的に利用されているGlobal CMTによる M_w は8.3となっている。また、断層最短距離に関しては、比較的規模の大きな地震（おおむね M_w 6.5程度以上）においては、震源断層モデルを設定して断層最短距離を算出する。このとき、余震分布や震源インバージョン解析によるすべり分布を参照して震源断層モデルが設定されるが、モデルによって数km程度位置が異なる。震源から数10km程度以上離れた観測

点であれば断層最短距離の違いにはそれほど影響しないが、断層ごく近傍の観測点では、断層最短距離が震源断層モデルによって数倍変わることも生じる。このように観測データがきわめて少ない巨大地震の規模や断層最短距離のデータベース間の違いは、地震動予測式の違いにも影響を及ぼすことは想像に難くない。すなわち、図1および図2で見られる地震動予測式間の顕著な違いには、データベースの違いも含まれている。一方で、アメリカのNGA-West 2プロジェクトでは、著者によるデータの取捨選択はあるものの共通のデータベースに基づいているため、同一地震の同一観測点の記録であれば、 M_w や断層最短距離が異なることは生じない。

甚大な地震被害を生じさせるマグニチュード8クラスかそれ以上の巨大地震や内陸の活断層で発生するマグニチュード7程度の地震の震源断層近傍を対象とした強震動予測は、観測データが圧倒的に不足している現状では大きな不確実さを有している。しかしながら、少なくともデータベース間の違いによって生じるモデルの不確実さは排除すべきであり、そのためには、日本における共通の強震動データベースを構築することが必要不可欠である。

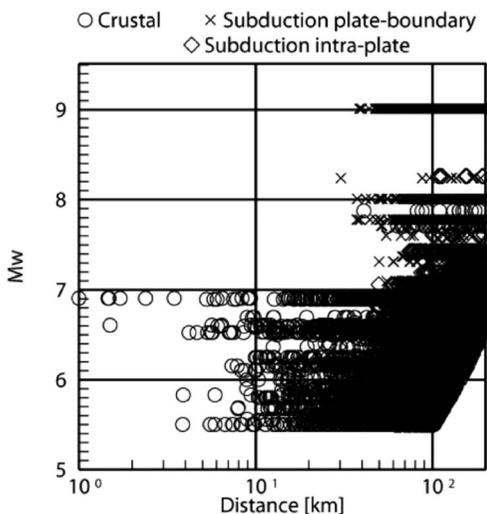


図3 回帰に用いられたデータの断層最短距離とモーメントマグニチュード分布. Morikawa and Fujiwara (2013)による

4. 強震動データベースとフラットファイル作成

以上のような問題意識のもと、防災科学技術研究所内に強震動データベース構築に関する検討を進めるワーキンググループを2019年4月に立ち上げ、K-NETおよびKiK-netの公開記録を対象として強震動データベースの構築を進めてきた。データを利活用する上では、だれもが容易に扱えるとともに、指標の追加や削除も容易に行えることが望ましいと考える。そこで、データを列挙したテキストファイル、すなわちフラットファイルを作成した。ここでは、その概要について紹介する。

強震動データベースとして、震源データ、観測点データ、強震動（地震動強さ指標）データの3つのデータベースを構築し、震源データにおいて

は地震ごとに、観測点データにおいては観測点ごとにそれぞれIDを付して強震動データと紐づけをしている。また、それぞれをフラットファイルとして出力する。

震源ファイルに含まれる情報を表1に示す。ここでは、防災科研のK-NETおよびKiK-net記録を対象としているため、1996年から2022年までの気象庁による震源位置やマグニチュードだけでなく、防災科研のF-netによって推定されたモーメントテンソル解と M_w も含んでいる。また、断層最短距離を算出するための震源断層モデルとして、Mai and Thingbaijam (2014)で整備されている震源インバージョン解析結果のデータベース(SRCMOD)を取り込んでいる。SRCMODデータベースには、1つの地震に対して複数の震源断層モデルが含まれる場合がある。震源データベースにはすべての震源断層モデルの情報を登録しているが、フラットファイルでは、断層最短距離の算出に用いる上で選定した1つの震源断層モデルの情報のみ出力している。また、主に内陸で発生する地殻内地震と主に海域で発生する海溝型地震では、地震動の伝播経路特性が異なるとともに、海溝型地震でもプレート内地震ではプレート間地震よりも強い短周期地震動が観測されるという特徴があることから、これらの地震タイプの判定結果も情報として含めている。地震タイプの判定は、地震調査委員会によって判断されている地震についてはそれを採用し、震源メカニズム解が推定されている地震については、沈み込む海洋プレートの形状モデルとの自動的に判定する仕組みを構築し、それにより判定した。震源メカニズム解が推定されていない地震については、震源位置と沈み込むプレート形状モデルにおける位置関係から判定している。これら3とおりの判定方法によって結果の信頼度が異なることから、どの判定方法によるかを示す情報も付加している。さらに、断層タイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)についても、震源メカニズム解が推定されている地震について、すべり角をもとに自動的に判定している。震源メカニズム解が推定されていない地震については、不明としている。

表1 震源ファイルに含まれる情報

番号	指標 (パラメータ)
1	地震ID
2	断層セグメントID
3	発震時
4	気象庁震源位置(緯度, 経度, 深さ)
5	気象庁マグニチュード
6	地震タイプ (地殻内, プレート間, プレート内)
7	地震タイプ判定方法
8	F-netモーメントマグニチュード
9	F-net震源メカニズム解 (走向, 傾斜, すべり角)
10	断層タイプ (横ずれ, 逆断層, 正断層, 不明)
11	F-netモーメントテンソル深さ
12	F-netモーメントテンソル値 (Mxx, Mxy, Mxz, Myy, Myz, Mzz)
13	F-netバリエーションリダクション
14	SRCMOD地震名
15	SRCMOD断層長さ, 断層幅
16	SRCMOD断層中心位置(緯度, 経度)
17	SRCMOD断層走向
18	SRCMOD断層傾斜

観測点ファイルに含まれる情報を表2に示す。観測点IDは、KiK-netの地表と地中で別々に付与するとともに、移設が行われた観測点は新たに観測点IDを付与している。観測点位置やPS検層データに基づいて算出されるK-NET, KiK-netから公開されている情報に加えて、防災科研の地震ハザードステーションJ-SHISから公開されている地下構造モデルの情報とも紐づけられている。また、深さが60km程度より深いやや深発地震や深発地震で見られる異常震域現象を表現するためのパラメータとして、観測点から火山フロントまでの最短距離も含めている。

強震動ファイルに含まれる情報を表3に示す。震源情報と観測点情報をそれぞれのIDによって紐づけられるようにし、オリジナルの波形データに関する情報として、波形ファイル名、記録長とサンプリング周波数も含めている。地震動強さ指標として、計測震度(相当値)、最大加速度だけでなく、最大速度、SI値ならびに工学的に利用

表 2 観測点ファイルに含まれる情報

番号	指標 (パラメータ)
1	観測点 ID
2	観測開始日
3	観測終了日
4	観測点コード
5	観測点名
6	観測点位置 (緯度, 経度, 標高)
7	観測点センサー設置深さ
8	観測網 ID
9	設置位置 (地表または地中)
10	火山フロントまでの距離
11	表層 10m, 20m, 30m 平均 S 波速度 (PS 検層データに基づく)
12	地域メッシュコード
13	表層 30m 平均 S 波速度 (J-SHIS 浅部地盤モデル V4 に基づく)
14	J-SHIS 深部地盤モデル V3.2 に基づく 主な層までの上面深さ

される減衰定数 5% の加速度応答スペクトルを採用している。応答スペクトルの周期については、周期 0.01 秒から 20 秒まで 69 ポイントを包含している。ただし、K-NET, KiK-net の公開記録は周期 0.033 秒以下の短周期成分がフィルターで落とされているため、扱いには留意が必要である。水平動については、南北 (NS), EW (東西) の各成分だけでなく、方位に依存しない RotD50 や RotD100 (Boore, 2010) といった成分も採用している。最大加速度、最大速度および減衰定数 5% の加速度応答スペクトルについては、上下動成分も独立に扱っている。また、有効周期帯、特に長周期側の限界について、Bozorgnia and Stewart (2020) の方法に基づいて一部の記録について自動的な判定を行うことを試みた。対象とした記録についてはおおむね良好な結果が得られたものの、P 波部分の記録長さが不十分な場合には自動判定が困難であることが分かった。そのため、有効周期帯が判定された記録は一部にとどまっている。最大速度は、オリジナルの加速度波形を積分して求めているが、長周期成分のノイズが大きい場合には異常に大きな値が算出される。上述のように、すべての記録の有効周期帯を自動判定する

表 3 強震動ファイルに含まれる情報

番号	指標 (パラメータ)
1	記録 ID
2	波形データファイル名
3	観測点 ID
4	地震 ID
5	記録長
6	サンプリング周波数
7	最大加速度
8	最大速度 (フィルター無し/周期 5 秒以上一律カット)
9	SI 値
10	計測震度 (相当値)
11	加速度応答スペクトル ($\zeta=5\%$; 周期 0.01~20 秒)
12	断層最短距離
13	有効周期帯 (未判定の場合は負値)

ことが困難であったことから、ここでは一律でフィルターなしの場合と、周期 5 秒以上をカットした場合の 2 とおりの値を算出している。

フラットファイルに含まれる強震動記録の断層最短距離と M_w の分布を図 4 に示す。全記録数は約 130 万 (3 成分で 1 記録, KiK-net の地表と地中は別に数えている) にも及ぶものの、図 3 と同様に、断層最短距離が 10km 未満の記録数は少なく、 $M_w 7.5$ 以上の地震において断層最短距離 100km 以内の記録が得られている地震は、2003 年十勝沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震 (2011 年 3 月 11 日 15 時 15 分頃の茨城県沖の地震) の 3 つしかない。1995 年以前の地震の記録や海外の記録を含めることで、 $M_w 8$ 程度以上の巨大地震や $M_w 7$ 程度で断層最短距離 10 km 未満の記録を補うことはできるものの、それでもその数は圧倒的に少ない状況にある。

5. 今後の展望

現在、フラットファイルに基づいて、ワーキンググループのメンバーを中心として複数のグループによって地震動予測式の構築を進めている。この中には、機械学習などを用いたデータサイエンス分野もある。これらのモデルで図 1 や図 2 のよ

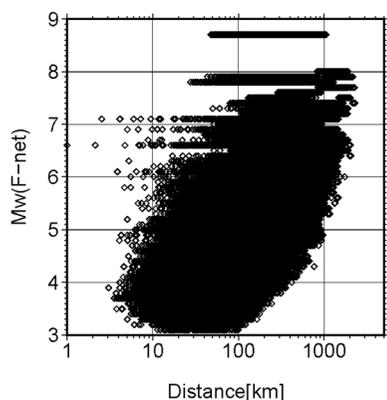


図 4 フラットファイルデータの断層最短距離とモーメントマグニチュード分布

うな比較を行った場合に、ばらつきがどのように変化するかは興味深いところである。

さまざまな機関から公開されている強震動データの書式が異なっている現状においては、多機関のデータを扱う際には書式を統一してデータベース化するという作業が利用者側で必要となっている。したがって、共通の強震動データベースの構築とフラットファイルの作成は地震動予測式の構築にとどまらず、限りある人的・経済的リソースの有効活用とともに強震動データそのものの活用の幅を広げることにつながるものであろう。それぞれのフラットファイルについては2023年中に公開を予定しており、利活用の促進を期待するとともに利用者からの意見のフィードバックによるデータベース・フラットファイルの改良につなげていきたい。

K-NET および KiK-net のデータについては毎年半自動的に更新する枠組みができつつある。一方、約4,000点あるK-NETを除く震度情報ネットワークの観測点や、1995年兵庫県南部地震やそれ以前の海溝型巨大地震による貴重な記録が得られているK-NET、KiK-netが整備される以前から実施されている強震観測記録については、データベース化および半自動的に更新の枠組みはできていない。オリジナルの波形データについてはすでに公開されていることから、ここでは最大加速度や応答スペクトルといった強震動強さ指標

をフラットファイル化している。K-NET、KiK-net以外の強震動記録についてもこのような枠組みでのデータベースならびにフラットファイル拡充の可能性について検討を続けている。

SRCMODにおいて、複数の震源断層モデルがある地震において、断層最短距離を算出するモデルは1つのみ選定したが、ワーキンググループ内での主観的な判断に拠っているのが現状である。データベースの説明性を高めるためには、できるだけ客観的な判断に基づくことが望ましく、そのための枠組みを構築することも必要であろう。

K-NET、KiK-netから公開されているデータは、震度1や2の比較的小さな地震動の記録も多く含まれているが、このようなデータの分析によって、地下構造モデルの更なる改良が期待される。必ずしも強震動とは言えない小さな揺れのデータも重要であるとともに、地下構造関連のデータベースとの連携や観測点情報の充実も強震動データの利活用促進に有用であるといえる。

謝辞

これまでの強震計の設置、維持と強震動記録の取得、保存、公開に係わられてこられた関係機関の皆様へ感謝申し上げます。強震動データベースの構築およびフラットファイルの作成には、防災科研のK-NET、KiK-netの公開情報、気象庁、防災科研のF-net、SRCMODおよびSRCMODに提供された震源情報、防災科研の地震ハザードステーションから公開されている地下構造モデル情報を用いています。本稿で紹介した強震動データベースとフラットファイル作成は、防災科学技術研究所の「強震動統一データベース構築に向けたワーキンググループ」メンバーの取り組みによるものです。

参考文献

- Boore, D. M. 2010. Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **100**, 1830-1835. DOI: 10.1785/0120090400

- 防災科学技術研究所. 2020. J-RISQ 地震速報. DOI: /10.17598/nied.0017
- Bozorgnia, Y. and Stewart, J. P. 2020. Data Resources for NGA-Subduction Project, PEER Report 2020-02. DOI: 10.55461/RDWC6463
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・若松加寿江・石川裕・奥村俊彦・石井 透・松島信一・早川 譲・遠山信彦・成田 章. 2009. 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, **336**, 415. DOI:10.24732/nied.00001950
- 入倉孝次郎・三宅弘恵. 2001. シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, **110**, 849-875.
- 金井 清. 1966. 地震動の振動特性に関する実験式, 日本地震工学シンポジウム講演集, 1-4.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y. 2006. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 879-897. DOI:10.1785/0120050138
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明. 2006. 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式. 土木学会論文集 A, **62**, 740-757.
- Koketsu, K., Miyake, H. and Suzuki, H. 2012. Japan integrated velocity structure model version 1. *Proc. 14th World Confer. Earthq. Eng.*, S10-038.
- 切刀 卓・青井 真・藤原広行. 2009. 強震観測—歴史と展望—, 地震2, **61**, S19-S34. DOI:10.4294/zisin.61.19
- Mai, P. M. and Thingbaijam, K. K. S. 2014. SRCMOD: an online database of finite-fault rupture models, *Seismol. Res. Lett.*, **85**, 1348-1357. DOI: 10.1785/0220140077
- Morikawa, N. and Fujiwara, H. 2013. A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, *J. Disas. Res.*, **8**, 878-888. DOI:10.1007/s10950-008-9106-2
- 内山泰生・翠川三郎. 2006. 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式. 日本建築学会構造系論文集, **606**, 81-88.
- Zhao, J. X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D. A., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Irikura, K. and Fukushima, Y. 2016a. Ground-motion prediction equation for shallow crustal and upper mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **106**, 1552-1569. DOI:10.1785/0120150063
- Zhao, J. X., Liang, X., Jiang, F., Xing, H., Zhu, M., Hou, R., Zhang, Y., Lan, X., Rhoades, D. A., Irikura, K., Fukushima, Y. and Somerville, P. G. 2016b. Ground-motion prediction equation for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **106**, 1518-1534. DOI:10.1785/0120150034

森川信之

[もりかわ のぶゆき]

現職 防災科学技術研究所主任研究員

略歴 北海道大学大学院博士課程修了. 防災科学技術研究所 特別研究員, 同 研究員, 2009年2月より現職

研究分野 強震動地震学, 地震ハザード評価

アンケート調査から考える災害ならびに 災害情報に関する若者の意識と評価

中森広道

1. 調査の目的と概要

日頃、学生と接している中で、学生など若者が災害に対してどのような意識を持っているのかについて気に留めることが少なくない。そこで、若者の災害に対する意識や評価について、その現状や傾向を見ていきたいと思い、筆者の研究室では定期的にアンケート調査を実施している。

本稿は、2023年3月に、全国に居住する20代・30代の男女を対象に、全国を8つの地域に分けてWEBによって実施した調査（クロード・パネル調査）の結果^{註1)}を中心として、災害・事故等に対する不安、災害情報に対する評価、災害時のイメージ、災害対策の現状などについて見ていきたいと思う。災害対策の現状については、かつての日本の多くの家庭での慣習となっていた、災害・非常時とは必ずしも関わりのない「モノの買い置き」についてと、入浴後も浴槽の湯をすぐに捨てないなど、日常に行われていた「浴槽の水の汲み置き」について、そして、このたびのコロナウィルスの感染が災害対策に与えた影響について質問を設けた。

関連調査としては、たとえば、国土交通省が2021年に「国民意識調査」^{註2)}、内閣府が2022年に「防災に関する意識調査」^{註3)}などを実施しているが、若者に特化した調査はあまり行われていないようだ。また、本稿で示すような、災害・事故などへの不安を網羅した調査や災害情報に関する詳細な項目を設けた調査は、他にないように思われる。

2. 災害・事故等に対する不安

2.1 「自分自身がそのうちに巻き込まれるのではないか」と思う災害・事故等

まず、「自分自身がそのうちに巻き込まれるのではないか・体験するのではないか」という不安を覚える災害・事故等について、31の選択肢を設けて複数回答で尋ねた。

最も回答が多かったものが「地震災害」で、全体の82.8%であった。ついで多かったものが「交通事故」の51.3%、その次に多かったものが「台風による災害」の50.5%で、以下、「豪雨災害」(47.0%)、「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」(41.8%)、「空き巣・不審者侵入」(34.5%)、「熱中症や高温による身体への影響」(30.5%)、「飲食物の中毒」(28.5%)、「大雪による災害」(28.0%)、「津波災害」(26.8%)の順であった(表1)。自然災害の中でも、特に地震に不安を覚える人が非常に多いことがわかる。また、台風による災害を経験することが、交通事故に遭うこととほぼ同じくらいの確率で起こると考えていることもわかる。そして、「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」と回答している人が4割を超えているが、参考までに日本でコロナウィルスの感染が全国的に広まる前の2019年3月に、筆者の研究室で実施した同様の調査(有効回答数100)^{註4)}では、「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」と回答した人が全体の22.0%であった。このたびのコロナウィルスの感染の経験が、感染症への不安を覚える人を増やしたことが、今回の調査結果からもうかがえる。また、日本でコロナウィルスの感染が始まった2020年3月に実施した調査(有効

表1 「自分自身がそのうちに巻き込まれるのではないか・体験するのではないか」という不安を覚える災害・事故等 (%)

(M.A. n=400)	
地震災害	82.8
津波災害	26.8
火山噴火・爆発による災害	12.8
台風による災害	50.5
豪雨災害	47.0
土砂災害	20.5
竜巻	10.5
落雷	19.8
雹(ひょう)による被害	12.0
大雪による災害	28.0
なだれによる被害	4.0
熱中症や高温による身体への影響	30.5
隕石等の落下による被害	6.8
原子力事故・放射能汚染による被害	10.0
大気汚染による身体への影響	12.8
公害(水質汚濁・大気汚染など)による生活・身体への影響	11.8
空き巣・不審者侵入	34.5
強盗・傷害	23.8
ストーカー	11.8
通り魔	20.8
詐欺	22.5
テロ	13.8
戦争	21.3
感染症・毒性のあるウイルスによる病気	41.8
飲食物の中毒	28.5
毒物による被害	8.0
薬害	9.3
危険(脱法)ドラッグなどによる事故・事件	4.0
交通事故	51.3
その他	0.5
あてはまるものはない	10.5

表2 「日本でひんぱんに起こるのではないか・近いうちに起こるのではないか」と思う災害・事故等 (%)

(M.A. n=400)	
地震災害	74.8
津波災害	30.0
火山噴火・爆発による災害	17.0
台風による災害	50.0
豪雨災害	53.0
土砂災害	33.0
竜巻	10.3
落雷	14.0
雹(ひょう)による被害	10.5
大雪による災害	26.0
なだれによる被害	10.0
熱中症や高温による身体への影響	32.0
隕石等の落下による被害	2.5
原子力事故・放射能汚染による被害	8.0
大気汚染による身体への影響	12.0
公害(水質汚濁・大気汚染など)による生活・身体への影響	9.5
空き巣・不審者侵入	25.5
強盗・傷害	30.0
ストーカー	16.0
通り魔	20.8
詐欺	27.5
テロ	13.8
戦争	15.5
感染症・毒性のあるウイルスによる病気 (今回のコロナウイルス感染の終息後)	22.8
飲食物の中毒	13.8
毒物による被害	7.0
薬害	9.5
危険(脱法)ドラッグなどによる事故・事件	8.8
交通事故	34.0
その他	0.5
あてはまるものはない	11.3

回答数250)^{註5)}で「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」と回答した人は全体の50.8%で、この頃に比べると感染症に不安を覚える人が少なくなっているようである。

2.2 「日本でひんぱんに起こるのではないか」と思う災害・事故等

次に、今後の日本で、「ひんぱんに起こるのではないか・近いうちに起こるのではないか」と思う災害・事故等について、同じく31の選択肢を設けて尋ねた。

最も回答が多かったものが「地震災害」で、全体の74.8%であった。ついで多かったものが「豪雨災害」の53.0%、その次に多かったものが「台風による災害」の50.0%で、以下、「交通事故」(34.0%)、「土砂災害」(33.0%)、「熱中症や高温による身体への影響」(32.0%)、「津波災害」と「強盗・傷害」(30.0%)の順であった(表2)。「自分自身がそのうちに巻き込まれるのではないか」と思われる自然災害と同様、「日本でひんぱんに起こる・近いうちに起こる」と感じている自然災害

も、地震による災害が圧倒的に多いことや、台風や豪雨による風水害についても半数近くを占めていることがわかる。一方、「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」と回答した人は、こちらでは22.8%である。このたびのコロナウイルスの感染が落ち着けば、新たな感染症が頻発すると感じている人は、そのうちに感染症に感染するかもしれないと感じている人よりも少ないことがわかる。また、参考までに、前述の2020年の調査で「感染症・毒性のあるウイルスによる病気」と回答した人は38.4%で、この結果からも、感染症への不安を覚える人が一時期に比べて少なくなっているように思われる。

3. 災害情報に対する評価

3.1 震度情報に対する評価

災害情報についての評価について見ていきたい。まず、震度情報についてである。「発表された場合、あなたが安否確認など『何らかの対応』を考える震度はどのくらいからですか」という質問に対し、最も多い回答が「震度5弱」で35.3%、ついで「震度5強」の21.1%、その次が「震度4」の17.8%の順であった(表3)。この調査結果を見ると、「何らかの対応をする震度」について、「震度1」から回答者を合計すると、「震度4」までで21.9%（「震度1」から「震度4」までの合計）、「震度5弱」までで57.2%（「震度1」から「震度5弱」までの合計）となる。

この結果を性別で見た場合、「何らかの対応をする震度」を「震度4以下（「震度1」から「震度4」までの合計）」としているのは、男性は15.5%であるのに対し女性は28.0%、「震度5弱以下（「震度1」から「震度5弱」までの合計）」としているのは、男性が47.0%であるのに対し女性は67.0%で、男性よりも女性のほうが「何らかの対応をする震度」の度数が低いことがわかる。また、同じ若者・青年層でも年代による差も見られ、「何からの対応をする震度」が「震度4以下」としているのは、20代が27.5%であるのに対し30代が16.0%、「震度5弱以下」としているのが、

表3 何らかの対応をする震度 (%)
(n=400)

震度1	0.3
震度2	0.3
震度3	3.5
震度4	17.8
震度5弱	35.3
震度5強	21.0
震度6弱	8.0
震度6強	3.5
震度7	2.3
わからない	8.3

20代が63.5%であるのに対し30代が50.5%で、30代よりも20代のほうが「何らかの対応をする震度」の度数が低いようである。

さて、参考までに、2004年に宮城県・東京都・静岡県に居住する男女320人に、筆者の研究室で実施した同様の調査^{註6)}で、「何らかの対応をする震度」は、最も多かったのは「震度5弱」の29.7%、次が「震度4」の25.6%、その次が「震度5強」の21.9%であった。「何らかの対応をする震度」を「震度1」から回答者を合計すると、「震度4」までが32.5%、「震度5弱」までが62.2%となる。調査に対象地域や年齢層に違いがあるため確実なことを言うのは難しいが、この約20年の間に、「何らかの対応をする震度」の度数が高くなったことがうかがえる。

次に、「震度の意味」の理解度である。震度は一般には市区町村名で発表されるが、その意味は、その市区町村全体の震度（面の値）ではなく、計測震度計が設置されている地点の震度（点の値）である。このことについて理解していたかどうかについて尋ねたところ、「知っていた」と回答した人が40.5%、「市区町村全体の震度と思っていた」と回答した人が31.0%、「市区町村の平均的な震度と思っていた」が28.5%だった。6割近い人が、震度の意味を正確に理解していないことがわかる。この結果を性別で見た場合、「知っていた」と回答した人は男性が47.0%であったのに対し女性が34.0%で、男性のほうが、震度の理解度が高いという結果となった。また、地域別に

見ると、「知っていた」と回答した人は東北地方が56.0%と最も多いという結果となった。

次に、震度5と6が「強」「弱」に分かれていることに対する評価について尋ねた。これについて、「今のままでよいと思う」と回答した人は49.0%、「『震度5弱』『震度5強』『震度6弱』『震度6強』を、『震度5』『震度6』『震度7』『震度8』と改めたほうがよいと思う」と回答した人は17.3%、「『震度5強』『震度6強』はそのままでもよいが、『震度5弱』『震度6弱』といった『弱』を使う表現はやめたほうがよいと思う」と回答した人は15.8%、「わからない」と回答した人は18.0%であった。この結果について地域別に見たところ、「『弱』を使う表現はやめたほうがよいと思う」という回答について、近畿地方では26.0%と他の地域よりも回答者が多い傾向が見られた。

参考までに、前述の2004年に実施した調査では、「今のままでよいと思う」と回答した人は49.1%であったのに対し、「『震度5弱』『震度5強』『震度6弱』『震度6強』を、『震度5』『震度6』『震度7』『震度8』と改めたほうがよいと思う」と回答した人は40.0%、「『震度5強』『震度6強』はそのままでもよいが、『震度5弱』『震度6弱』といった『弱』を使う表現はやめたほうがよいと思う」と回答した人は6.6%、「わからない」が3.1%であった。

3.2 緊急地震速報に対する評価

緊急地震速報に関する質問も設けた。まず、緊急地震速報に関する理解度である。「緊急地震速報」には、「予報」と「警報」がある。「予報」は「どこかで最大震度3以上の揺れが予想された場合、またはマグニチュード3.5以上等と予想された場合に発表するもの」であるのに対し、「警報」は「どこかで最大震度5弱以上の揺れが観測されることが予想される地震について、その地震で、震度4以上の揺れが予想される地域を対象に発表されるもの」で、一般に、テレビ・ラジオや携帯電話・スマートフォン（緊急速報メール）などから伝えられる「緊急地震速報」は、「警報」の「緊急地震速報」であるが、このようなことについて理解しているかについて尋ねた。その結果、「よ

く知っていた」と回答した人は10.0%、「ある程度は知っていた」と回答した人は35.3%、「『緊急地震速報』は知っていたが、このようなことまでは知らなかった」と回答した人は49.3%、「『緊急地震速報』という情報自体を知らなかった」と回答した人は5.5%であった。「緊急地震速報」自体の認知度は高いものの、一般に発表される緊急地震速報の意味を理解している人は半数近くであることがわかった。性別で見ると、「ある程度は知っていた」と回答した人は、男性が42.5%に対して女性が28.0%、「『緊急地震速報』は知っていたが、このようなことまでは知らなかった」と回答した人は、男性が39.0%に対して女性が59.5%と、緊急地震速報の詳細についての認知度は男性のほうが高いという結果となった。

次に、2023年2月から「長周期地震動」の予測情報も緊急地震速報として発表するようになったことについての認知度である。このことについて尋ねたところ、「よく知っていた」が5.8%、「詳しくはわからないが知っていた」が19.0%、「なんとなく聞いたことがあった」が21.5%、「知らなかった」が53.8%と、半数以上が知らなかったと回答している。性別で見ると、「知らなかった」と回答した人は、男性が49.0%であったのに対し女性は58.5%と、男性のほうの認知度が高いという結果となった。

そして、テレビ・ラジオにおける緊急地震速報の伝え方についてである。これについて、「自分の住んでいない地域が対象の緊急地震速報でも、積極的に伝えてほしい」「自分の住んでいない地域が対象の緊急地震速報は、伝えないでほしい」「テレビ・ラジオでは緊急地震速報を伝えないでほしい」の3つの選択肢を設けて質問をした。その結果、最も回答が多かったものが「自分の住んでいない地域が対象の緊急地震速報でも、積極的に伝えてほしい」の64.8%で、ついで「自分の住んでいない地域が対象の緊急地震速報は、伝えないでほしい」の29.3%、その次が「テレビ・ラジオでは緊急地震速報を伝えないでほしい」の6.0%の順であった。性別で見ると、「自分の住んでいない地域が対象の緊急地震速報でも、積極的に

に伝えてほしい」と回答した人は、男性が58.5%であったのに対し女性は71.0%と、女性のほうが「積極的に伝えてほしい」と考えている人が多いという結果となった。

3.3 災害情報・災害報道に対する評価

災害や災害情報について、11の選択肢を設けて複数回答で質問を行った(表4)。その結果、最も回答が多かったものが「大雨の際に伝えられる雨量『〇〇ミリ』という表現は、具体的にどの程度の雨なのかがわかりにくい」の50.3%で、以下、「震度情報など気象庁が発表する情報で『〇〇県東部』『〇〇沿岸西部』という表現が、どこを意味するのかがわかりにくい」の36.3%、「津波の高さ『1メートル』と台風などの波浪(高波)の『1メートル』の違いがわかりにくい」の32.3

表4 災害情報等に関する評価(%)
(M.A. n=400)

震度情報など気象庁が発表する情報で「〇〇県東部」「〇〇沿岸西部」という表現が、どこを意味するのかがわかりにくい	36.3
大雨の際に伝えられる雨量「〇〇ミリ」という表現は、具体的にどの程度の雨なのかがわかりにくい	50.3
津波の高さ「1メートル」と台風などの波浪(高波)の「1メートル」の違いがわかりにくい	32.3
発表される震度と、実際に感じた震度が違うと思うことが多い	24.8
災害情報の種類や発表回数が多くなりすぎて、かえってわかりにくい	18.3
予想される大きな地震として、「南海トラフの巨大地震」や「首都直下地震」のことばかりが話題になっているので、他に予想される地震についても取り上げるべきだ	29.8
「災害について必要な情報をどのように得ればよいか」という情報を、もっと伝えてほしい	23.8
自分自身の「自然災害を克服することは難しい」という思いが、以前よりも強くなっている気がする	21.5
災害対策や災害を引き起こす現象の観測に関する予算を、もっと増やしてほしい	21.0
災害や災害情報に関する解説を、日ごろから増やしてほしい	19.3
あてはまるものはない	17.0

表5 メディアにおける災害情報・災害報道に関する評価(%)
(M.A. n=400)

テレビの震度情報のテロップ(字幕)が多すぎるので、震度の小さい地震は速報を出さなくてよいと思う	16.0
テレビの震度情報のテロップ(字幕)が多すぎるので、自分の住んでいる地域に影響のない地震などは、震度の速報を出さなくてよいと思う	14.0
テレビのL字画面(逆L字画面なども含む)が頻繁に出るので、少なくしてほしい	10.8
災害に関するテレビのニュース速報が、必要以上に多すぎるように思う	8.8
災害について過敏になりすぎていると感じられる報道が多いと思う	11.5
大きな災害が起きたり、警報・避難の情報などが発表されると、テレビ・ラジオのアナウンサーが声を張りあげたり、語調を強くするようになったのは、良いと思う	25.8
大きな災害が起きたり、警報・避難の情報などが発表されると、テレビ・ラジオのアナウンサーが声を張りあげたり、語調を強くするようになったために、不快感を覚えたり、かえって気持ちが動揺することがある	11.5
大きな災害が起きたり警報・避難の情報などが発表されると、テレビ・ラジオのアナウンサーが声を張りあげたり、語調を強くすることは、やめてほしい	5.3
発生が予想される災害についての報道や番組は、危機感や恐怖感を煽っているだけで実際の災害対策に生かされていないと思う	9.3
被災者を扱う番組で、いわゆる「お涙ちょうだい」のような番組が増えているのは、かえって不快感を覚える	24.8
過去の大きな災害を「忘れるな」「語り継がなければならない」という話は、正直、違和感を覚える	9.3
災害報道で取り上げられる話題や取材される場所などが偏っているように思う	15.8
災害が相次いだことで、最近、テレビを見ることが多くなっていったと思う	5.3
災害が相次いだことで、最近、ラジオを聴くことが多くなっていったと思う	3.0
(災害に関係なく)ラジコ・ラジコ(スマートフォンやパソコンなどで聞くアプリやソフト)で、ラジオを聴くことが多くなった	6.5
災害時には、新聞が大きな役割を果たすと思う	8.8
災害時も、テレビ・ラジオよりはスマートフォンやSNSで情報を得ることが多いのではないかと思う	33.3
あてはまるものはない	23.3

%,「予想される大きな地震として、『南海トラフの巨大地震』や『首都直下地震』のことばかりが話題になっているので、他に予想される地震についても取り上げるべきだ」の29.8%の順であった。

次に、テレビ・ラジオならびにその他のメディアにおける災害情報や災害報道について、18の選択肢を設けて複数回答で質問を行った(表5)。その結果(「あてはまるものはない」を除いて)、最も多かったものは、「災害時も、テレビ・ラジオよりはスマートフォンやSNSで情報を得ることが多いのではないかと思う」の33.3%で、以下、「大きな災害が起きたり、警報・避難の情報などが発表されると、テレビ・ラジオのアナウンサーが声を張りあげたり、語調を強くするようになったのは、良いと思う」の25.8%、「被災者を扱う番組が増えているのは、かえって不快感を覚える」の24.8%、「テレビの震度情報のテロップ(字幕)が多すぎるので、震度の小さい地震は速報を出さなくてよいと思う」の16.0%、「災害報道で取り上げられる話題や取材される場所などが偏ってい

るように思う」の15.8%の順であった。

3.4 情報を入手する手段

若者は、日常、情報をどのように入手しているのだろうか。また、災害時に、どのように情報を入手しようと考えているのだろうか。

まず、「あなたが、日ごろ、災害に限らず、世の中の出来事の情報やニュースを得る主な手段は何ですか」という質問を19の選択肢を設けて行ったところ(複数回答)、最も多かったものが「インターネット・ホームページ」の55.3%で、ついで「民間放送テレビ」の51.8%、以下、「ツイッター」の41.3%、「LINE」の37.3%、「NHKテレビ」の29.8%、「インスタグラム」の28.5%の順であった(表6)^{註7)}。この結果を性別で見ると、顕著なものとしては、「ツイッター」をあげた人は男性が36.0%であったのに対し女性が46.5%、「LINE」をあげた人は男性が27.5%であったのに対し女性が47.0%、「インスタグラム」をあげた人は男性が15.5%であったのに対し女性が41.5%であった。日ごろ、いわゆるSNSから情報を得ている人は男性よりも女性のほうが多い

表6 日ごろ、災害に限らず、世の中の出来事の情報やニュースを得る主な手段(%)

(M.A. n=400)

NHK テレビ	29.8
NHK ラジオ	6.8
民間放送テレビ	51.8
民間放送ラジオ (AM)	8.0
FM (コミュニティ FM 放送を除く)	8.0
コミュニティ FM 放送	3.5
ケーブルテレビの自主放送	1.8
CS 放送 (スカパーなど)	2.8
新聞	14.3
インターネット・ホームページ	55.3
雑誌	7.0
自治体の広報紙・チラシ	8.3
フリーペーパー	4.5
ツイッター	41.3
フェイスブック	6.8
LINE	37.3
インスタグラム	28.5
TikTok	6.5
その他	1.0

表7 災害が起きた場合に、あなたが情報を得るために使う(使うと思う)主な手段(%)

(M.A. n=400)

NHK テレビ	45.3
NHK ラジオ	18.5
民間放送テレビ	43.3
民間放送ラジオ (AM)	14.5
FM (コミュニティ FM 放送を除く)	13.0
コミュニティ FM 放送	5.0
ケーブルテレビの自主放送	3.3
CS 放送 (スカパーなど)	3.0
新聞	10.3
インターネット・ホームページ	57.0
雑誌	2.5
自治体の広報紙・チラシ	4.0
フリーペーパー	3.0
ツイッター	40.5
フェイスブック	6.0
LINE	44.3
インスタグラム	19.3
TikTok	5.8
その他	0.5

傾向にあることがわかる。

次に、「災害が起きた場合に、あなたが情報を得るために使う（使うと思う）主な手段は何ですか」という質問を、同じ19の選択肢を設けて行ったところ（複数回答）、最も多かったものは「インターネット・ホームページ」の57.0%と変わらなかったが、次に多かったものは「NHK テレビ」の45.3%で、以下、「LINE」の44.3%、「民間放送テレビ」の43.3%、「ツイッター」の40.5%の順であった（表7）。日ごろはNHK テレビを視聴していない人も、災害時にはNHK テレビを視聴する（視聴したいと思っている）人が多いことがわかる。この結果を性別で見ると、「インターネット・ホームページ」をあげた人は男性が50.5%であったのに対し女性が63.5%、「LINE」をあげた人は男性が37.0%であったのに対し女性は51.5%、「インスタグラム」をあげた人は男性が12.0%であったのに対し女性が26.5%と、日常だけでなく災害時においても、いわゆるSNSから情報を得ようとしている人は、男性よりも女性のほうが多いことがわかった。

4. 災害時に生じる問題・被害等のイメージ

4.1 災害時に生じると思われる問題

実際に大きな災害が起こった場合にどんな問題が起こるのか、どんな被害が予想されるのかについてのイメージについてである。まず、「もし、あなたの住んでいる地域で大きな災害が起きた場合、あなたご自身にとって何が大きな問題になると思いますか」という質問を、32の選択肢を設けて複数回答で行った。

その結果、最も多かったものが「電気が止まる」の71.3%で、以下、「水道が止まる」(70.5%)、「水や食料が手に入らない」(63.0%)、「携帯電話・スマートフォンの通話ができない」(62.8%)、「携帯電話・スマートフォンの充電ができない」(61.5%)、「ガスが止まる」(60.0%)、「トイレが使えない」(59.0%)、「LINEが使えない」(51.0%)の順であった（表8）。これらの質問についても、性別で回答に差が見られる。たとえば、通信関係

表8 あなたの住んでいる地域で大きな災害が起きた場合にあなたご自身にとって大きな問題になること（%）

(M.A. n=400)

テレビを見ることができない	36.8
ラジオを聴くことができない	13.8
新聞を読むことができない	9.8
固定電話が通じない	12.5
携帯電話・スマートフォンの通話ができない	62.8
携帯電話・スマートフォンの充電ができない	61.5
Eメールのやりとりができない	16.0
LINEが使えない	51.0
ツイッター・フェイスブックなどのSNSが使えない	22.5
WEBサイト・ホームページを見ることができない	21.8
Wi-Fiが使えない	39.5
電車・バスなどの公共交通機関が使えない	28.0
電気が止まる	71.3
ガスが止まる	60.0
水道が止まる	70.5
水や食料が手に入らない	63.0
風呂に入れられない	50.0
トイレが使えない	59.0
冷房・暖房が効かない	49.8
睡眠がとれない	38.3
体調が悪くなる	34.0
感染症にかかる	28.8
医薬品が手に入らない・ケガや病気の治療が受けられない	32.3
仕事・アルバイトができない	22.5
学校に行くことができない	3.8
家族や友人・知人との連絡がとれない	32.5
友人・知人と会えない	12.3
ゴミや廃棄物の処分が難しくなる	19.5
ガソリンが手に入らない	28.3
銀行・ATMが使えなくなる	25.5
その他	0.8
特に困ることはない	10.8

の回答について見ると、「携帯電話・スマートフォンの通話ができない」は、男性が53.0%に対して女性が72.5%、「携帯電話・スマートフォンの充電ができない」は、男性が53.5%に対して女性が69.5%、「LINEが使えない」は男性が39.5%に対して女性が62.5%、前述していない選択肢としては「Wi-Fiが使えない」（全体39.5%）は、男性が33.5%に関して女性が45.5%、「ツイッ

ター・フェイスブックなどのSNSが使えない」(全体 22.5%) は、男性が 16.0% に対して、女性が 29.0% といった結果となっている。大きな災害の際に生じる通信の問題について、男性よりも女性のほうが不安を覚えている人が多い傾向にあるようである。また、年代によっても回答に差が見られるものがあり、たとえば、「テレビを見ることができない」(全体 36.8%) と回答した人は、20 代では 29.5% だったのに対し 30 代では 44.0% という結果になっている。若者の「テレビ離れ」の一端を表す結果のようにも思える。

4.2 地震時に起こると思われること

次に、「あなたが住んでいる地域が大きな地震(多くの建物が壊れるような地震)に襲われた場合、あなたの住んでいる地域でどんなことが起こると思いますか」という質問を、19 の選択肢を設けて複数回答で行った。

その結果、最も多かったものが「しばらくは食料や水が届かなくなる」の 54.3% で、以下、「パニックが起きる」(50.8%)、「人々が商店やスーパーマーケットに殺到する」(50.3%)、「避難す

表 9 あなたが住んでいる地域が大きな地震に襲われた場合に起こると思うこと (%)
(M.A. n=400)

パニックが起きる	50.8
流言やデマにより混乱が起こる	23.3
大規模な火災や爆発が起こる	17.5
窃盗・強盗などの犯罪が起こる	23.8
あちこちでケンカや口論がはじまる	11.0
行政や自治体が機能しなくなる	24.8
人々が商店やスーパーマーケットに殺到する	50.3
避難する場所が人であふれる	42.8
しばらくは食料や水が届かなくなる	54.3
病院で治療が受けられない人が多くなる	35.0
感染症がはやる	18.8
衛生面での問題が起こる	35.0
情報がほとんど入らなくなる	27.0
孤立する	15.0
住む場所がない・見つからない人が増える	22.0
まったく救援が来ない	10.8
多くの報道関係者が訪れる	10.0
その他	0.3
特に生命・財産がおびやかされるような事態は起こらない	10.3

る場所が人であふれる」(42.8%)、「病院で治療が受けられない人が多くなる」(35.0%)、「衛生面での問題が起こる」(同じく 35.0%)、「情報がほとんど入らなくなる」(27.0%) の順であった(表 9)。これらの質問に関しても性別で差が見られた。たとえば、「しばらくは食料や水が届かなくなる」は、男性が 43.0% に対して女性が 65.5%、「人々が商店やスーパーマーケットに殺到する」は、男性が 41.0% に対して女性が 59.5%、「病院で治療が受けられない人が多くなる」は、男性が 27.5% に対して女性が 42.5%、「衛生面での問題が起こる」は、男性は 26.5% に対して女性は 43.5% といった結果となっている。生活のための物資や生活機能についての不安を覚える人が、男性よりも女性のほうが多いという傾向がみられる。

5. 災害対策の現状

5.1 モノの買い置き

日頃の災害対策の状況は、どのようになっていのだろうか。まず、「モノの買い置き」についてである。災害対策に関係なく、以前は、飲み物や食料品などモノを買い置きしている家庭が多かった。しかし、近年、モノの買い置きをしている家庭が少なくなってきているように感じる。まず、この点について確かめようと思った。

「災害とは関係なく、あなたは日頃、飲み物や食料品の買い置き・備えをしていますか。次の中から、あなたの傾向にもっとも近いものを 1 つ選んでください」という質問をしたところ、最も回答が多かったものが「3・4 日分程度の買い置きをしている」の 29.8% で、ついで、「ほとんど買い置きをしていない」の 27.5%、以下「2 日分程度の買い置きをしている」の 23.3%、「5 日分以上の買い置きをしている」の 10.5%、「1 日分程度の買い置きをしている」の 9.0% の順であった。

この質問で、あまり買い置きをしていない人(146 人。「1 日分程度の買い置きをしている」と「ほとんど買い置きをしていない」を選択した人)にその理由を 11 の選択肢を設けて複数回答で質問したところ、もっとも多かったものが(「わか

表 10 買い置きをしない理由 (%)

(M.A. n=400)

コンビニエンスストアや遅くまで営業しているスーパーマーケットなどがあるので、買い置きの必要がないから	21.2
あまり家で食事を作らないので、必要以上の食料品は買わないから	12.3
買い置きしたものを保存する空間がないから	24.0
冷蔵庫がないから	2.1
金銭的余裕がないから	21.9
ほとんどを通信販売や宅配で購入しているから、自分から買いに行くことはないから	0.7
買い置きのことなど考えたこともなかった	13.0
何とかなると思うから	12.3
なんとなく	11.0
その他	3.4
わからない	24.0

らない」を除く)「買い置きをしたものを保存する空間がないから」の24.0%、次が「金銭的余裕がないから」の21.9%、その次が「コンビニエンスストアや遅くまで営業しているスーパーマーケットなどがあるので、買い置きの必要がないから」の21.2%であった(表10)。

この結果を性別で見ると、「金銭的余裕がないから」をあげた人は、男性が14.5%だったのに対して女性が30.0%であった。また世代別で見ると、「コンビニエンスストアや遅くまで営業しているスーパーマーケットなどがあるので、買い置きの必要がないから」をあげた人は、20代が15.5%だったのに対して30代は29.0%であった。

参考までに、前述した2019年3月に実施した同様の調査(有効回答者数100)で、同じ質問を行ったところ、最も多かったものが「ほとんど買い置きをしていない」の36.0%で、ついで「3・4日分程度の買い置きをしている」の22.0%、以下、「2日分程度の買い置きをしている」の16.0%、「5日分以上の買い置きをしている」の14.0%、「1日分程度の買い置きをしている」の12.0%の順であった。また、2021年3月に実施した同様の調査(有効回答者数300)^{註8)}で同じ質問を行ったところ、最も多かったものが「2日分程度の買い置きをしている」の26.3%で、ついで「ほとんど買

い置きをしていない」と「3・4日分程度の買い置きをしている」が同じ24.0%、以下、「5日分以上の買い置きをしている」の15.7%、「1日分程度の買い置きをしている」の10.0%の順であった。このような傾向を見ると、このたびのコロナウイルス感染による物資の不足などの騒ぎや不安などが、日ごろの買い置きにも影響したのではないかと感じられる。

5.2 浴槽の水の汲み置き

以前は、入浴後の浴槽の湯をすぐに捨てないなど、浴槽に水の汲み置きを行う家庭が少なくなかった。しかし最近では、浴槽に水の汲み置きをしている家庭が、以前ほど多くないように思われる。浴槽に水の汲み置きをすることは防火や災害時の生活用水等に役に立つのであるが、水の汲み置きをしなくなってきているということは、防火や災害対策にも影響を与えているということである。現代の若い世代は、どの程度、浴槽の水の汲み置きを行っているのだろうか。

このことについて尋ねたところ、「まったく汲み置きをしていない」と回答した人が最も多く59.0%を占め、ついで多かったのが「ほとんど汲み置きをしていない」の14.5%であった。この2つの回答を合わせると73.5%となるが、つまりは7割以上の人が浴槽の水の汲み置きをしていないということである。以下、「ときどき汲み置きをしている」(11.8%)、「よく汲み置きをしている」(10.5%)、「住んでいる住居に風呂がない」(4.3%)の順であった。

この結果を性別で見ると、「まったく汲み置きをしていない」と回答した人は、男性が54.0%であったのに対して女性が64.0%であった。また世代別で見ると、「まったく汲み置きをしていない」と回答した人は、20代が64.5%であったのに対し30代が53.5%であった。男性よりも女性のほうが、また、世代が若いほうが浴槽に水の汲み置きをしていない人が多い傾向にあることがわかる。

浴槽に水の汲み置きをしなくなった理由としては、浴室のカビを防ぐことや、以前のように風呂の残り湯を洗濯に使わなくなっていること、さらには浴槽を使わずシャワーだけですます人も少な

くないことなどがあげられると思われる。

なお、昨今、災害対策のために浴槽の水の汲み置きを勧める意見がある一方^{註9)}、衛生や安全等の観点から浴槽の水の汲み置きに対して否定的な意見もある^{註10)}。このような意見が、浴槽の水の汲み置きをしない人を増やしている一因になっているのかもしれない。

5.3 コロナウイルス感染の経験と災害対策

このたびのコロナウイルス感染の経験は、災害対策にも影響を与えたのであろうか。この調査では、12の選択肢を設けて、「今回のコロナウイルス感染における対応と経験は、今後の大規模な災害時の生活に役立つ、または役立てることができると思いませんか」という質問を行った(複数回答)。

その結果、最も多かったものが「リモートによる会議や打ち合わせが円滑に行える」の43.5%で、ついで、「手洗いや除菌などの習慣ができたので、災害時においても、ウイルスの感染や衛生上の問題を防ぐことができると思う」の36.3%、以下、「学校に通学できない場合の遠隔授業が円

滑に行える」(32.3%)、「しばらくの間、友人や知人と直接会えなくなっても我慢できると思う」(30.3%)、「外出できない場合の過ごし方がわかった」(23.5%)、「不自由な生活をするに、ある程度耐えられるようになったと思う」(22.8%)、「友人・知人とのリモートやインターネットによる顔出しでの会話が抵抗なくできる」(21.8%)の順であった(表11)。災害時における対人関係やコミュニケーションに関する選択肢をあげる人が多いことがわかる。この結果を性別で見ると、「しばらくの間、友人や知人と直接会えなくなっても我慢できると思う」をあげた人は、男性が22.0%であったのに対し女性が38.5%であった。

なお、「非常時の買い置きをするようになった」と回答した人が21.5%を占めていた。前述したように、今回のコロナウイルス感染の経験が、災害対策のための備蓄を進める契機になった人も少なくなかったようである。

6. まとめにかえて

最後に、考察をまとめておきたい。まず、災害・事故等に対する不安であるが、自分自身がそのうちに巻き込まれるかもしれないと思っているものも、これからの日本でひんぱんに起こるのではないかと思っているものも、ともに「地震災害」が最も多かった。それだけ若者が、日常において、潜在的なものではあるかもしれないが地震災害に不安を覚えていることがわかる。また、このたびのコロナウイルス感染については、日本で感染が始まった頃には感染症に対する不安を大きくしたものの、現在は、その時期に比べて不安を覚える人が少なくなってきたように思える。

次に、災害情報に対する評価である。震度情報については、特に東日本大震災を引き起こした地震以降、比較的強い地震が多く発生していることもあってか、「何らかの対応をする震度」の度数が以前に比べて大きくなっているようである。また、震度の意味であるが、震度を本来の「点の値」ではなく「面の値」と考えている人が相対的に多いことがわかった。そして、震度5と6が「強」

表 11 このたびのコロナウイルス感染が今後の災害時に役立つこと (%)

(M.A. n=400)

学校に通学できない場合の遠隔授業が円滑に行える	32.3
リモートによる会議や打ち合わせが円滑に行える	43.5
友人・知人とのリモートやインターネットによる顔出しでの会話が抵抗なくできる	21.8
不自由な生活をするに、ある程度耐えられるようになったと思う	22.8
しばらくの間、友人や知人と直接会えなくなっても我慢できると思う	30.3
非常時の買い置きをするようになった	21.5
非常時のために何が必要か、何をを用意すればよいかがあった	15.8
手洗いや除菌などの習慣ができたので、災害時においても、ウイルスの感染や衛生上の問題を防ぐことができると思う	36.3
外出できない場合の過ごし方がわかった	23.5
ストレスの発散がしやすくなったと思う	8.0
その他	0.3
特に役立つもの、役立てることができるものはない。わからない	21.8

「弱」に分割されて20年以上になるが、現在のよ
うに「強」「弱」と分けたままでよいと回答した
人が半数近くを占めている。なお、この「強」「弱」
という表現が浸透してきているのか、「強」「弱」
を積極的に改めたほうがよいと考えている人は、
以前に比べて少なくなっているようである。

次に、緊急地震速報についてであるが、緊急地
震速報の認知度自体は全体の94.5%と非常に高い
ことがわかるが、緊急地震速報に「警報」「予報」
があることの認知度と理解度は、まだまだ高くない
ようである。また、緊急地震速報は、自分の住
んでいない地域が対象の速報でも積極的に伝えて
ほしいという人が過半数を超えており、緊急地震
速報のニーズもある程度高いことがわかる。そし
て、長周期地震動の予測情報が緊急地震速報とし
て発表されるようになったことであるが、長周期
地震動情報の公表が始まってから時間が経ってい
ないこともあり、長周期地震動自体の認知度が、
まだまだ低いようである。

次に、災害情報に対する評価であるが、発表さ
れる数値については、震度などに比べて「雨量」
の示す意味がわかりにくいと感じている人が過半
数を占めていた。また、これは地域によってであ
るが、「東部」「西部」などと表される地域名称も
わかりにくいと感じている人が多いことがわか
る。そして、メディアの災害情報・災害報道につ
いてであるが、災害を伝える際に語調を強める最
近のテレビ・ラジオの報道に一定の評価が示され
ていることや、被災者を扱う番組について批判的
な評価をする人も少なくないことがわかる。さら
に、災害時の情報は、通常使用している「イン
ターネット・ホームページ」を入手手段として使
用するだろうと考えている人が過半数を占めてい
る一方で、マス・メディアに関してみると、「民
間放送テレビ」よりも「NHK テレビ」から得よ
うと考えている人が多いこともわかった。

次に、自分自身にとって災害時に問題となるこ
ととして、「電気」「水道」「ガス」「トイレ」とい
った、いわゆるライフラインが機能しなくなるこ
とをあげる人が多いことに加え、「携帯電話・ス
マートフォン」「LINE」といった通信が機能しな

くなることへの不安をあげる人も多かった。若者
にとって「通信」が欠かせないものになっている
ことがうかがえる。また、大きな地震が起きた際
に地域で生じると思われる問題については、生活
物資の入手が難しくなることに不安を持つ人が多
いこととともに、「パニックイメージ」を持って
いる人が少なくないことがわかった。

最後に、災害対策の現状としてあげた3つの質
問についてである。まず、モノの買い置きにつ
いてであるが、以前の調査に比べて、買い置きを
していると回答した人が多くなっているように思
える。また、浴槽の水の汲み置きについては、非
常に多くの人が、まったく、あるいはほとんど行
っていないことがわかる。浴槽の水が防火や災害
対策につながることを見直し、衛生や安全等に
配慮しながら防火・生活用水の備蓄を進めてい
くことも必要ではないかと思われる。そして、こ
のたびのコロナウイルス感染の経験が災害対策
に与えた影響であるが、災害時のコミュニケーションの
とり方や過ごし方がわかったと思っている人が少
なくない。それとともに、コロナウイルス感染の
経験が、モノの買い置きをする人を増やした1つ
の要因になっていることもわかった。

註

- 1) 有効回答数は400。内訳は、性別は、男性200・女性200。年代は、20代200・30代200。地域は、北海道、東北、関東、北陸・甲信越、東海（三重県を含む）、近畿（三重県を除く）、中国・四国、九州・沖縄の8地域で各50。調査主体は日本大学文理学部社会学科・中森研究室である。
- 2) 国土交通省，“国土交通白書 令和3年版”，<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/html/n1224000.html>（2023年9月17日閲覧）
- 3) 内閣府，“防災に関する意識調査”，<https://survey.gov-online.go.jp/r04/r04-bousai/index.html>（2023年9月17日閲覧）
- 4) 調査対象は20代の男女。調査対象地域は、北海道・東京・静岡・大阪・広島の5地域である。
- 5) 調査対象は20代の男女。調査対象地域は、東北・関東・静岡・大阪・広島の5地域である。
- 6) WEB調査（クローズド・パネル調査）。調査対

象は、10代以上男女の320人である。

- 7) WEB調査の場合、「NHKテレビ」よりも「民間放送テレビ」の接触率が高いという結果がでることが少なくない。
- 8) 調査対象は18歳から24歳までの男女。調査対象地域は、宮城・東京ならびに神奈川・静岡・大阪・広島の5地域である。
- 9) たとえば、「東京都防災ホームページ」, <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/1002147/1008042/1008079/1008092.html> (2023年9月26日閲覧) など。
- 10) たとえば、「ダイヤモンドオンライン」, <https://diamond.jp/articles/-/157680> (2023年9月26日閲覧) など。

中森広道

[なかもり ひろみち]

現職 日本大学文理学部社会学科教授

略歴 財団法人都市防災研究所研究員, 日本大学文理学部社会学科助手, 同専任講師, 同助教授(准教授)等を経て2008年より現職

研究分野 災害社会学・災害情報論・社会情報論

2023年2月6日トルコ南部の地震について

1. はじめに

2023年2月6日、現地時間の午前4:17頃、トルコ南部の東アナトリア断層沿いのガズィアンテップ県とカフラマンマラシュ県の境界付近を震源とする M_w 7.8の地震が発生した。その後、同日の13:24（現地時間）には、今度は先の地震からやや離れた北側の別の断層付近で M_w 7.5の地震が発生し、被害が拡大した。そこで、日本建築学会災害委員会では協議のうえ、正式に日本建築学会災害調査団の派遣を決定し、派遣検討WGの主査として楠（東京大学地震研究所）を指名した。その後、土木学会、地盤工学会、および文部科学省科学研究費補助事業（特別研究推進費）の「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」研究グループと相談し、4団体合同で調査団を派遣することとした。また、調査日程を3月28日～4月4日とし、調査団団長を楠とすることとした。

2. 調査団の構成

調査団は、団長を楠、幹事を真田（大阪大学）、日比野（名古屋大学）、毎田（東京大学）がつとめ、総勢27名である。人数が多いため、基本的には「RC造」、「観測点・組積造」、「免制振・継続性」、「制度・非工学建物」、「RC造詳細調査」、「地盤工学」のグループに分かれて調査を行った。一方、トルコ側は日本側の調査対象範囲を鑑み、総勢22名の研究者が参加した。研究者は、ITU、ボガチッチ大学、イズミール工科大学、ハラン大学、MEF大学、ミマル・シナン芸術大学、イスタンブール・キュルテュール大学、イルディス工業大学、ゲゼブ大学、およびイスタンブール市職員である。

調査対象都市を図1に示す。調査対象地域はベースとしたGaziantepを中心に南北方向に数百キロに及ぶ。本報告では、紙面の都合上、観測点周りの被害率とRC造建物の被害について紹介する。

3. 強震観測点周りの被害

トルコでは、首相府防災危機管理庁（AFAD）が防災管理を行う組織となっており、今回の地震でも強震記録をいち早く公開した。その後、一部の観測点では観測点と観測記録の精査が行

われ、その後取り下げられた。調査では、比較的強い揺れが観測された観測点の状況調査と併せて、周辺の建物の被災度を調査して被害率の算定を試みた。

図2に調査した8点の観測点位置を示す。調査項目は構造形式、総数、被害程度とし、被害程度は原則EMS-98（Grünthal, 1998）に従った。この判定方法は、被害建物の目視調査からその被害程度を0～5の6段階分類し、3・4が大破、5が倒壊にあたる。調査棟数は全211棟で、RC造と組積造がほぼ半数ずつであった。1例として、Nurdagiは気象庁震度階で6強の揺れが観測されたが、記録のPGAはNS・EW・UD方向でそれぞれ 552 cm/s^2 、 589 cm/s^2 、 315 cm/s^2 であった。調査は観測点の周辺の33棟の建物を対象に行い、RC造はそのうち82%、組積造は15%を占めた。倒壊率（大破・倒壊建物数の全調査棟数に対する割合）は27%であった。被害の例を写真1に示す。鉄筋コンクリート造耐震壁が水平方向にスリップ破壊し、縦筋が座屈・破断していることがわかる。比較的配筋も多く、大きな振動に見舞われたことが推察される。

同じく震度6強を観測したNarli, Balarumudo,

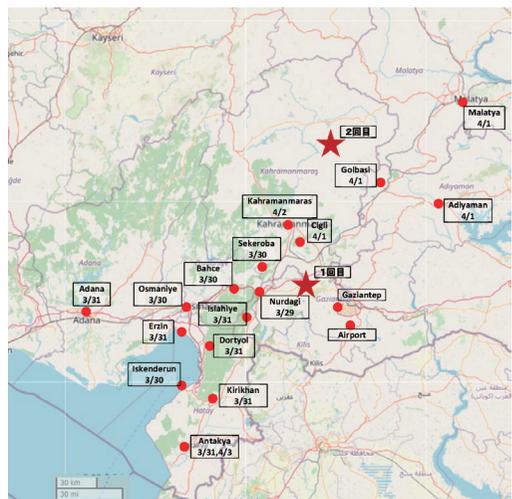


図1 調査対象都市と調査日（★は1回目・2回目の地震の震源位置）



図 2 観測点位置 (カッコ内は観測点番号)



写真 1 RC 造壁の被害

Guzelce では、倒壊率はそれぞれ 10%, 54%, 27% であった。

4. RC 造建物の被害

RC 造建物の被害調査地域は 1 度目の地震の震源を中心として、図 1 に示す北東の Malatya から南西の Antakya までの 350km 超に及ぶ。すべての地域で甚大な被害が見受けられた。なお、トルコの耐震規定は、最近では、1999 年、2007 年、および 2018 年に改訂されている。

トルコの建物の特徴として、非常に扁平率の高い矩形の柱 (幅に対してせい長い柱) が用いられていることである。所要の曲げ強度を確保するため、特に 1 階の柱脚に配筋が多い。さらに、脚部で主筋が重ね継ぎ手されているため、主筋の空きがきわめて狭いものが建設年代によらず被害建物では多く見られた。

また、写真 2 に示すようなパンケーキ破壊を生じた建物も多く都市で散見された。建物によっては、2 度目の地震で倒壊したとのことであった。2018 年以降の建物では、全体崩壊形を形成したもの、その応答変形がきわめて大きくなったと思われるもの、建物脚部から転倒したものも見受けられた。

5. まとめ

2023 年トルコ・シリア地震により被害を受けた地域の災害調査を実施した。調査では日本側



写真 2 パンケーキ状に破壊した建物 (Antakya)

27 名、トルコ側 22 名が参加したが、国際協力によりきわめて有効に実施することができた。その結果、広い範囲の調査を実施することができた。本報告で示したように、広範の地域で強い揺れが観測されており、その周辺の建物の倒壊率は 10~54% に達した。また、RC 造建物では、特に扁平柱の過密配筋や、層崩壊・パンケーキ破壊を生じている建物が散見された。今後、2023 年末をめどに報告書を出版する予定である。

謝辞

本地震で亡くなられた方々に弔意を、また被災された方々にお見舞いを表します。

本調査は日本建築学会により実施された。日本建築学会 災害委員会委員長 塩原 等教授に謝意を表します。また、調査の実施に際しては全国耐震ネットワーク委員会および日本建築センターからも補助していただきました。さらに、調査においては、在トルコ日本大使館、国際協力機構、国土交通省、トルコ環境都市気候変動省、イスタンブール工科大学をはじめとする各大学の研究者各位、AFAD 等、たくさんの方々のお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

Grünthal, G. ed. 1998. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 15. 1988.

(楠 浩一：東京大学地震研究所教授)

2023年9月8日モロッコの地震 (M_w 6.8)

2023年9月8日22時11分(UTC)(日本時間9日7時11分),モロッコの首都カサブランカから南西約300km,深さ19.0kmのところでは M_w 6.8の地震が発生した.震源近くには旧首都で世界遺産などもあるマラケシュがあり歴史的建造物にも大きな被害が出ているとの報道がある(たとえば,CNN記事(参考Web2)).国連人道問題調整事務所(UNOCHA)報告(参考Web4)では9月18日までに約3,000人の死者と5,000人以上の負傷者がでているとのことである.被害の最新状況についてはアジア防災センター(参考Web1)やUNOCHAのWebサイトなどを参照されたい.モロッコの

地震としては宇津(2004,改定・更新版,参考Web6))によれば死者1万人以上をだした1960年アガディール地震(M 5.8)以来の大きな地震である.本稿では,米国地質調査所(USGS)(参考Web5)やヨーロッパ地中海地震学センター(EMSC)(参考Web3)によるWeb情報に基づいて,どのような地震であったのか概観する.また,テクニクな背景についてGNSS観測の結果も紹介する.

モロッコの北はジブラルタル海峡をはさんでスペインと向かい合っているが,海峡付近が東西に延びるアフリカプレートとユーラシアプレートの境界になっており,両プレートは数mm/yrで収束している.今回の地震はこの境界から派生するように伸びているアトラス山脈で発生したが,同山脈もプレート境界の南側の変動帯にあつて地震活動は活発である(たとえば,Michard *et al.*, 2008),

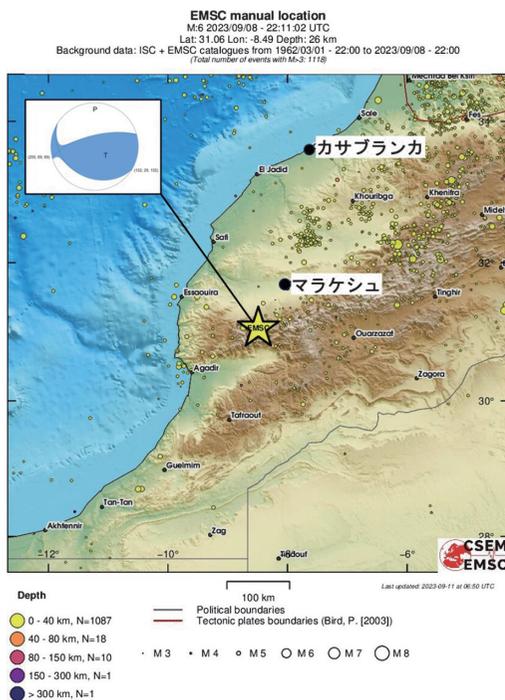


図1 EMSCによるモロッコ周辺の地震活動マップ. ISCカタログ(1964~2004)およびEMSC即時解(2005~)を描画.星印は2023年モロッコ地震の震央(参考Web3)に加筆.左上にUSGSによるWphaseを用いたモーメントテンソル解を付記(参考Web5))

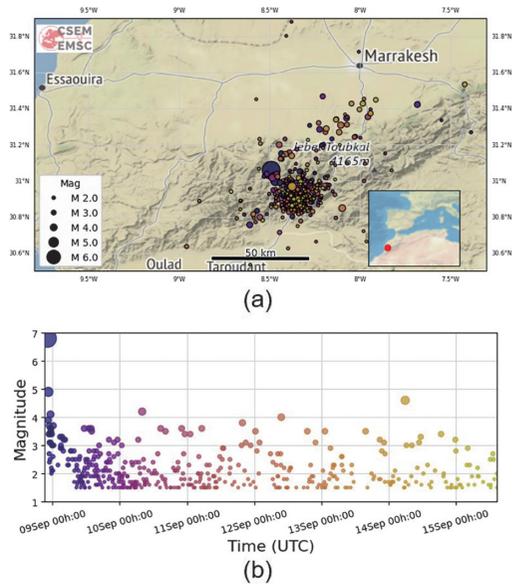
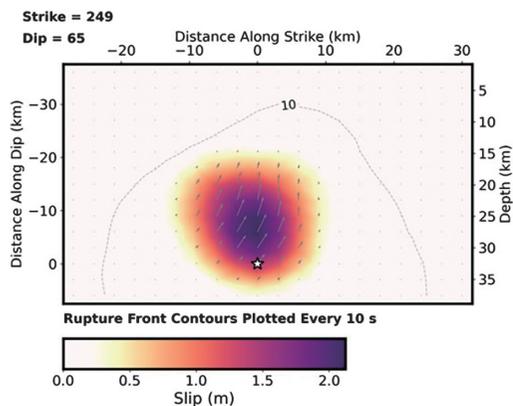
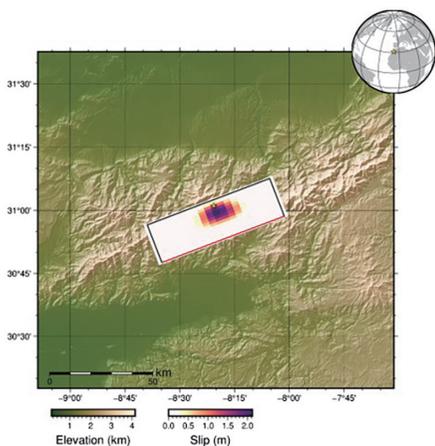


図2 EMSCによる2023年モロッコ地震の(a)余震分布,および(b)余震のM-T図(参考Web3))



(a)



(b)

図3 USGSによる遠地地震波形とInSARデータの同時インバージョンを用いた断層モデル。(a)断層面上のすべり分布。星印が震源位置を示す。(b)断層面の平面投影。赤線が断層上端(参考 Web 5)

USGSによると、震央はモロッコ中央部を東北東～西南西に走るアトラス山脈の中で、震央付近の震度は改正メルカリ震度階 (MM) VII～VIII程度 (日本の震度階では5強～6弱程度) である。図1はEMSCによる1964年から本震直前までの地震活動図に本震位置を付記した図である。同図にはUSGSによるWphaseを用いたモーメントテンソル解を挿入してある。この発震機構から地震は南北圧縮の逆断層型であると考えられる。また、同図からはアトラス山

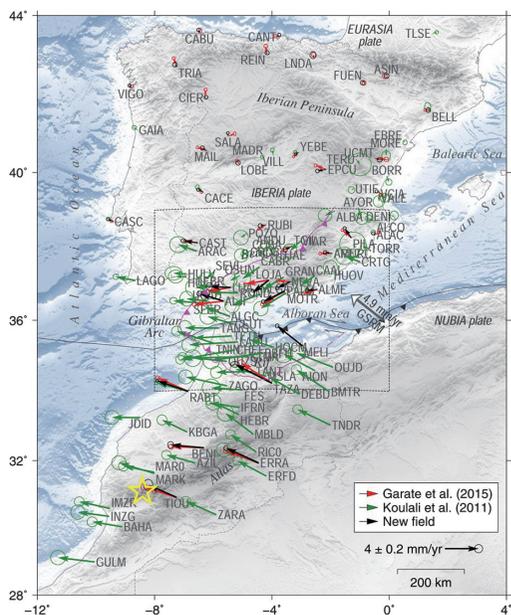


図4 Garcia-Armenteros (2023) によるGNSS変位速度ベクトル場に2023年モロッコの地震の震央位置を星印で加筆。変位速度場はユーラシアプレート (図ではイベリア半島を含む北方の領域) を固定している。モロッコでは約4mm/yrでユーラシアプレートに対して西北西に移動していることがわかる

脈に沿って地震活動帯が見られるほか、山脈の北側にも地震活動が集中している地域が見られる。図2はEMSCによる、余震活動と本震以後約6日間のM-T図である。余震分布には震央部に集中している領域とアトラス山脈の活動帯に沿って東北東に延びた余震の活動帯が見られる。また、図3はUSGSによる遠地地震波とInSARの同時インバージョンによる断層すべりモデルを示しているが、断層面はほぼアトラス山脈の走行に一致している。また、断層すべりは震源から両側に10km程度の広がりであるため、図2のM-T図などを参照すると余震活動は本震のすべり域からさらに東北東延長上に拡大しつつあるように見える。図に示してはいないが、USGSによるとモーメントレート関数から断層滑りは12秒程度で収束したと考えられる。

今回の地震はプレート収束の影響を受けて南北圧縮の場の中で発生したと考えられるが、一方、図4に示すモロッコ周辺のGNSS変位速度ベクトル場は(Garcia-Armenteros, 2023), アフリカプレートがユーラシアプレートに対して西北西に移動しており, 収束方向が南北からはかなりずれているように見える. Michard *et al.* (2008)によれば, アトラス山脈の造山運動は始新世後期の4千万年前頃より続いているとされるが, GNSS観測に示されている収束の方向はCalais *et al.* (2003)によると3百万年前頃にアフリカプレートのユーラシアプレートに対する収束方向が地中海の収束帯では約20度反時計回り方向に回転したと結論付けている. 今回の地震の圧縮軸方向がプレート収束方向と異なっているのはこのような理由によると思われる.

被害の全容把握とともに, 地震像のさらなる解明が望まれる.

参考文献

Calais, E., DeMets, C. and Nocquet, J.-M. 2003. Evidence for a post-3.16-Ma change in Nubia-Eurasia-North America plate motions?. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 81-92. DOI:10.1016/S0012-821X(03)00482-5

Garcia-Armenteros, J. 2023. Topo-Iberia CGPS network: a new 3D crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco based on 11 years (2008-2019). *GPS Solutions*, **27**:155. DOI: 10.1007/s10291-023-01484-8

Michard, A., Frizon de Lamotte, D., Saddiqi, O. and Chalouan, A. 2008. Chapter 1 Continental evolution: the geology of Morocco. Lecture Notes 1, *in Earth Sciences 116*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-31. DOI:10.1007/978-3-540-77076-3

参考 Webpage URL (2023年9月18日閲覧)

- 1) アジア防災センター. https://www.adrc.asia/view_disaster_jp.php?NationCode=504&Lang=jp&Key=2634
- 2) CNN. <https://www.cnn.co.jp/world/35209045.html>
- 3) EMSC. https://www.emsc-csem.org/Special_reports/?id=316
- 4) UNOCHA. <https://reliefweb.int/report/morocco/morocco-earthquake-flash-update-3-11-september-2023>
- 5) USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000kufc/executive>
- 6) 宇津徳治 (2004. 改定・更新版). <http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html>

(加藤照之: 大正大学地域構想研究所客員教授)

人工知能と自然知能の対話・協働による 地震研究の新展開

長尾大道

1. はじめに

第三次人工知能（AI）ブームが始まって、はや四半世紀が経とうとしている。当初は、囲碁・将棋・チェスのように、定められたルールの下で明確な目的を達成する場合において人間の頭脳を上回る性能を示すにすぎなかったが、最近では生成系 AI が世界各国で大きな議論を巻き起こすなど、1960 年代の第一次 AI ブームや 1990 年代の第二次 AI ブームがそれぞれ 10 年ほどで冬の時代を迎えたことに比べると、第三次 AI ブームが終息する気配はまったくない。これは、GPU 計算機の汎用化や機械学習ライブラリの充実により、昔から考案されてきた AI 技術のアイデアが具現化し、ようやく人間の生活や社会に影響を及ぼすツールとなってきたことが大きいものと思われる。

地震研究においても AI の導入（地震 AI）が国際的に進められており、地震 AI に関する論文数は 2017 年以降に急激に増えている（Mousavi and Beroza, 2022）。情報科学と地震学の融合が急速に進み始めたこの 2017 年を、筆者は「情報×地震」元年と呼んでいる。地震学において AI と最も親和性が高いテーマは、すべての地震研究の第一歩とも言える、地震波形データからの P 波・S 波といった地震波の検出である。2017 年以降、地震波検出のための AI 技術が多数発表されているが、その先駆けとなったものはカリフォルニア工科大学が 2018 年に提唱した Generalized Phase

Detection (GPD) 法 (Ross *et al.*, 2018) であることは国際的に認められているところであろう。GPD 法をはじめとする地震波検出 AI の検出能力は、時には経験豊かな地震学者の目を上回ることもしばしばであり、数十年前から気象庁などで日常的に用いられている統計学に基づく地震波検出手法が、いずれこれらの AI に置き換えられる時代が到来することは確実視されている。

わが国では、1995 年兵庫県南部地震を契機に整備された二千点以上の地震計からなる地震観測網に加え、近年、民間会社が持つ振動計や個人のスマートフォンに内蔵された加速度計を活用した地震研究が検討され始めている。これが本当に実現すれば、データ品質の違いはあれど、実質的に数千万点ないしは数億点もの地震観測点が誕生することになる。このような「地震超ビッグデータ」から現実的な時間内に情報を余すことなく引き出すためには、地震研究に AI の導入を検討することは自然な流れと言える。そのような背景を受け、わが国においても「情報×地震」元年の 2017 年度から科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST 「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学とによるインテリジェント地震波動解析 (iSeisBayes)」(研究代表者：平田 直 東京大学名誉教授) が 5 年半にわたり実施され、複数観測点の地震波形データから地震波検出を行う畳み込みニューラルネットワーク (Yano *et al.*, 2021)、解析対象に合わせて地震観測点を選択するアルゴリズム (Nagata *et al.*, 2023; Nakai *et al.*, 2023)、ガウス過程回帰による大地震発生直後の余震の時

間分布推定手法 (Morikawa *et al.*, 2021), データ同化によるプレート境界面における摩擦パラメータ空間分布の不確実性推定手法 (Ito *et al.*, 2023) など, 最先端の情報科学技術に基づく地震データ解析手法が多数開発された. iSeisBayes以降も, 2021年度より開始となった文部科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」(STAR-Eプロジェクト)をはじめとする地震学と情報科学の専門家が参画する大型プロジェクトが次々に発足し, 「情報×地震」は地震学において1つの分野を築きつつあると言っても過言ではない.

STAR-Eプロジェクトの研究課題の1つとして, 東京大学地震研究所は大阪大学大学院基礎工学研究科などの情報科学の専門家との連携による「人工知能と自然知能の対話・協働による地震研究の新展開」(SYNTHA-Seis)を実施しており, 筆者はその研究代表者を仰せつかっている. 現在のAIは, しばしば人間が予想し得ない結果を出してくれるものの, それに至った思考過程を人間が理解可能となるような形で示すことができない. そのため, SYNTHA-Seisでは, 人工知能によって得られた結果の検証やそれに基づく手法の更新を, これまで長期間にわたり「自然知能」と言うべき人間の頭脳によって蓄積されてきた地震研究のノウハウをフルに活かすことにより実施するという, AIと経験豊かな地震研究者の頭脳の「対話・協働」による地震AI技術の開発を目指している. SYNTHA-Seisの特徴の1つとして, 現代の地震計によって得られるデジタルデータである「波形信号データ」のみならず, それを画像化した「波形画像データ」も対象としていることがあげられる. 本稿では, SYNTHA-Seisにおいて実施している研究の例として, 波形信号データからの地震波検出のための深層学習器の開発 (Tokuda and Nagao, 2023), および波形画像データからの低周波微動検出のための深層学習器の開発 (Kaneko *et al.*, 2021, 2023) について紹介する.

2. 地震波形信号データからの地震波検出のための深層学習器の開発

上述のGPD法は, 与えられた地震波形をP波, S波, ノイズの3つの波相に判別する畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network; CNN) である. CNNは多数の重み行列 (これをフィルタと呼ぶ) をデータに掛け合わせることでデータの特徴的なパターンを特徴量として抽出し, データ分類を行う手法である. むろん, 特徴的なパターンは対象データごとに異なるため, フィルタもデータごとに決める必要がある. そのために, 真の分類結果があらかじめわかっているデータ (学習データ) を用いて, CNNを用いた分類結果がそれに合うように最適なフィルタを同定する (これを学習または訓練という). 本研究では, CNNを訓練するための学習データとしては, P-相とS-相の開始点が波形データの中心に揃うように長さ4秒の波形を抽出し, さらに波形の最大振幅が1になるように規格化したものを用いる (図1). このような訓練を通じて, CNNはデータ駆動的に地震波に関する何かしらの特徴量を把握する. その後, 地震波を, 検出したい地震波形に長さ4秒の時間窓をスライドさせながら学習済みCNNを適用し, P-相・S-相・ノイズ-相が時間窓に含まれている確率を算出する. しかしながら, GPD法は地震波を少々敏感に検出しすぎる (ノイズを小さな地震波と誤判定する) 傾向にある.

そこでTokuda and Nagao (2023) はGPD法を発展させ, 4秒波形の全体情報に加え, 前半と後半の2秒波形の局所情報をCNNに取り入れることにより, より精度よく地震を検出できる改良手法を開発した (図2). しばしば, CNNの構築には「当てずっぽう」に近い試行錯誤が行われるが, 本研究のこの着想は自然知能による地震波形の定性的な観察から得られたものである. 図1において, 3相の波形が異なることは明らかである

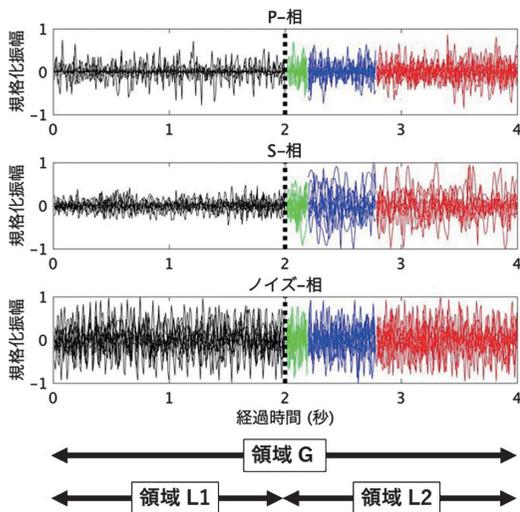


図 1 畳み込みニューラルネットワークを訓練するための学習データの例。上から P-相、S-相、ノイズ-相に対応する波形（上下成分）を多数重ね合わせている。振幅は波形ごとに 3 成分（上下、南北、東西）の最大振幅で規格した。色はマルチプル・クラスタリング手法（本文参照）で得られた 4 つのデータ領域を表す

が、着目すべき点は波形全体（領域 G）としてだけでなく、波形の前半部分（領域 L1）あるいは後半部分（領域 L2）の局所領域に限定しても 3 相が異なる特徴を有していることであり、このことはマルチプル・クラスタリング（Tokuda *et al.*, 2017）と呼ばれる統計学的手法によって確認できる。マルチプル・クラスタリングとは、特徴量の選び方によって複数の独立なクラスター解が存在することを仮定し、特徴量分割、および対応するクラスター解（混合ガウスモデルを適用）の同定を行う手法である。本研究では波形の各データ点の振幅を特徴量として、P-相、S-相、ノイズ-相を含む波形データに対してマルチプル・クラスタリングを適用した。その結果、図 1 に示すようにデータ点が 4 つの領域に分割され、領域ごとに異なるパターンの波形分類（クラスター解）が存在することがわかった。この結果は、この 4 領域から構成される領域 L1、領域 L2 も波形分類につい

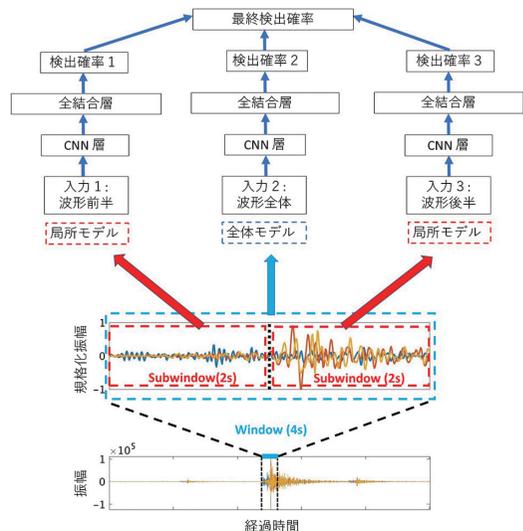


図 2 波形信号データから地震波とノイズを分類抽出する CNN のアーキテクチャ（Tokuda and Nagao (2023) を改変）

て異なる情報をもっていることを示唆している。この局所領域における 3 相の違いが全体波形から得られる違いと異なる情報を持っていれば、その情報を活用することによって判別性能が向上するものと期待される。

このような従来の GPD 法の結果および地震波形の分析という「人工知能と自然知能の対話・協働」を踏まえ、入力波形の領域 G および各局所領域 L1・L2 における地震波判別結果を統合する CNN の構築を行った（図 2）。各領域に対する CNN は GPD 法と同様のニューラルネットワーク層によって構成し、学習データを用いて独立にパラメータ推定を行った。次に、入力波形データに対しては、各領域に対する CNN で得られた検出確率のべき乗積として波形相 x の検出確率を $P(x) \equiv P_G(x)^{w_G} \times P_{L1}(x)^{w_{L1}} \times P_{L2}(x)^{w_{L2}}$ と定義した。ここで w_G, w_{L1}, w_{L2} は非負実数値の重みであり、簡単のため本稿ではいずれも 1 に設定した。検出確率 $P(x)$ が大きくなるためには、3 つの CNN による検出確率 $P_G(x), P_{L1}(x), P_{L2}(x)$ がいずれも大きな値を持つことが要求される。この仕組

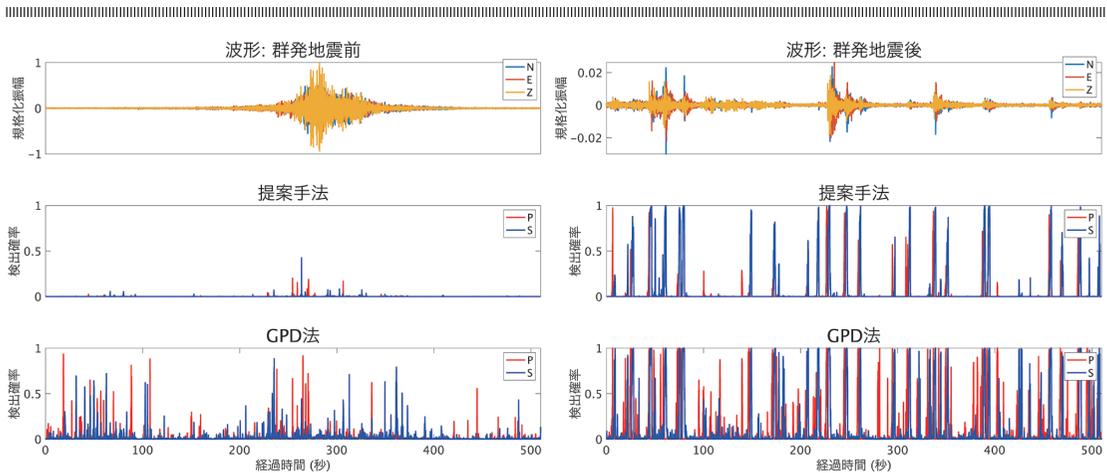


図 3 2016 Bombay Beach swarm データへの提案手法と GPD 法の適用結果の比較 (Tokuda and Nagao (2023) を改変). 提案手法および GPD 法による検出確率は 0.1 秒ごとに表示した (赤: P-相, 青: S-相)

表 1 2016 Bombay Beach swarm データへの提案手法と GPD 法の適用によって得られた検出数

波相	群発地震発生前		群発地震発後	
	P-相	S-相	P-相	S-相
提案手法	2	0	923	5,667
GPD 法	18	4	1,336	3,481

みによって提案手法は誤検出を減らし、ノイズに対する頑健性が増すことが予想される。

提案手法の性能を確認するため、2016年に米国・カリフォルニア州で発生した群発地震(2016 Bombay Beach swarm)の発生前後5時間の波形データに対して適用し、従来のGPD法の結果との比較を行った(図3および表1)。表1で注意すべきこととして、GPD法では検出確率が閾値0.98を上回った場合に「地震波検出」と判定するのに対し、提案手法では閾値を0.50に設定している。すなわち、提案手法はGPD法よりも地震波検出の判定基準を大きく下げているにもかかわらず、特に本来は地震が非常に少ない群発地震発生前において、GPD法の懸案事項であった地震波の過剰検出をかなり抑えられていることが分かる。

3. 地震波形画像データからの低周波微動検出のための深層学習器の開発

1995年兵庫県南部地震を契機に地震観測網が全国的に整備されたことにより、21世紀初頭に「スロー地震」という、通常の地震とは異なる現象が発見された(Obara, 2002)。スロー地震は人間の身体では感じるできない低周波の振動が、時には非常に長時間続くこともあるのが特徴で、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震や、100~200年周期で発生している南海トラフ地震のようなプレート境界型大地震と関連していると推測されており、現代の地震学におけるホットな研究テーマとなっている。規模が小さなスロー地震は「低周波微動」と呼ばれ、その発生時刻や場所をリスト化した微動カタログが精力的に作成されているが、当然ながら地震観測網整備後の約20年分しか存在していない。プレート境界型大地震の発生周期がもっと長いことを考えると、20年以上前の微動カタログを作成することがきわめて重要であることは明らかである。

SYNTHA-Seisでは、東京大学地震研究所が約50年前に運営していた和歌山観測所熊野観測点

の地震計によって得られたペン書きの紙記録から微動を検出する AI 技術を開発した。残念ながら、熊野観測点で当時用いられていたペン書き方式の地震計は現存していないが、それよりも古い時代から採用され、やはり紙に波形を直接記録する煤書き方式の地震計が東京大学地震研究所にて動態

保存されている (図 4)。煤書き記録方式からペン書き方式への変遷については、気象研究所技術報告 (1983) を参照のこと。紙記録は約 1 日分の地震波形が金属製の筒に巻かれた 1 枚の紙にペンで直接記録されており、広げると約 150 秒の波形が下から上に 500 本ほど描かれている。本研究の目的は、大量の紙記録の 1 枚 1 枚に微動が含まれている確率を計算する CNN を構築することである (図 5)。まずは、微動が含まれているかどうかの正解が分かっている画像データを CNN に学習させる。本研究では、実際の紙記録を模した人工波形画像を使って事前学習を行い (図 5A)、次に現代の地震観測網のデジタルデータを画像化したデータを使って、正答率が 98% 以上になるまで学習 (ファインチューニング) を続けた (図 5B)。

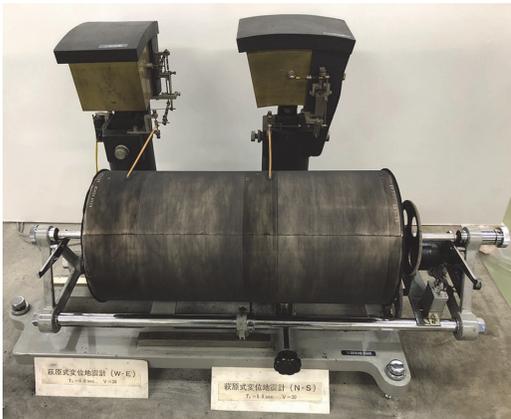


図 4 本研究で用いた地震計紙記録を出力したペン書き方式よりも、さらに古い時代の煤書き方式による地震計 (東京大学地震研究所所有の萩原式変位地震計)

このようにして構築した CNN を熊野観測点の 1966~1977 年の紙記録に適用 (図 5C) したところ、これまでに知られていなかった多数の微動を検出することに成功した (図 6)。本研究で工夫したことの 1 つとして、Grad-CAM と呼ばれる手法を用いて、紙記録 (図 6 左) のどの部分に

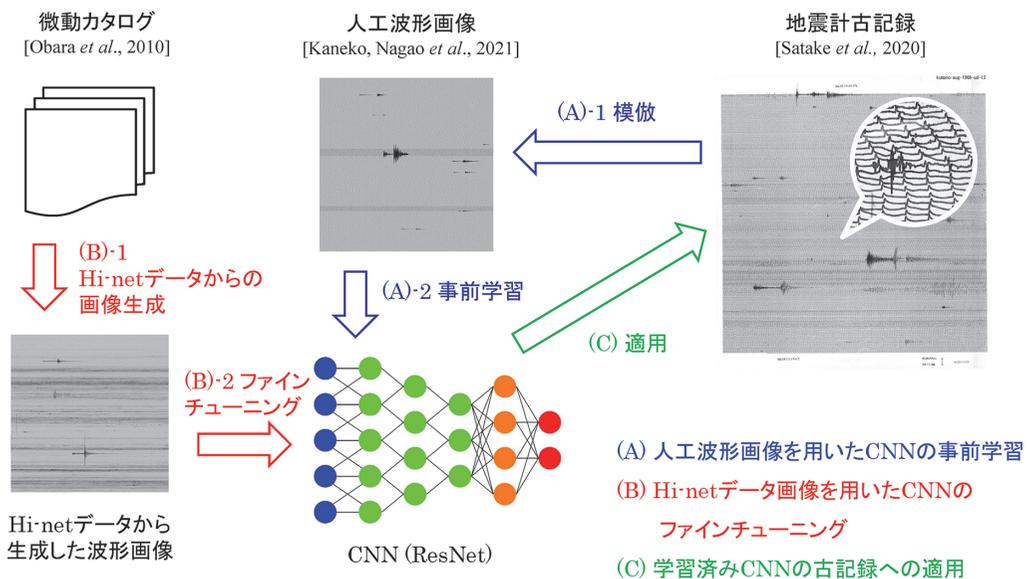


図 5 地震計紙記録から低周波微動を検出する CNN の開発

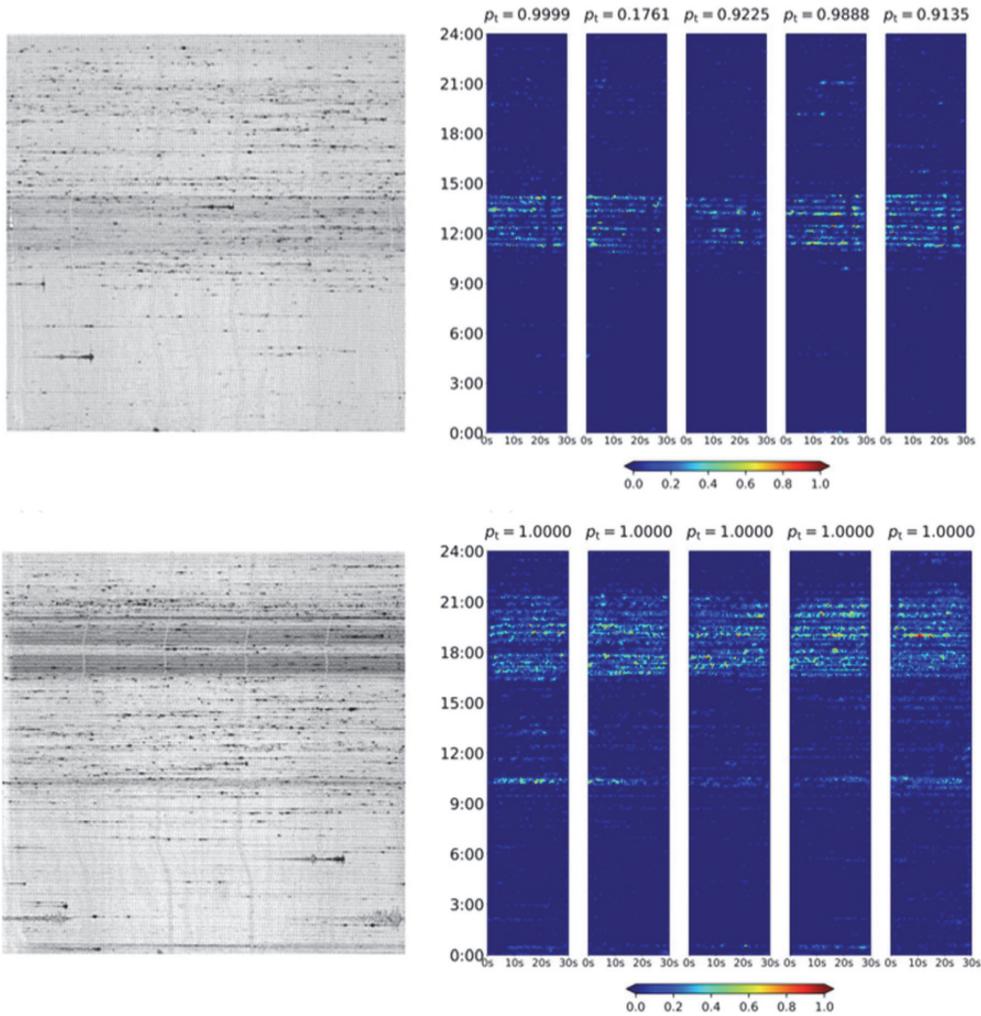


図 6 CNN によって熊野観測点の地震計紙記録から検出された低周波微動の例 (Kaneko *et al.* (2023)). (左) 上からそれぞれ 1974 年 9 月 17 日～18 日, 1974 年 9 月 19 日～20 日の約 24 時間分の地震波形記録 (画像化の際に上下左右が反転). (右) 紙記録を縦 (時系列を分断する方向) に 5 分割した小画像に CNN を適用し, 微動を検出した結果. 各パネルの上の数値は, 各パネル内に微動が存在する確率. なお, 縦軸の時刻スケールは結果を分析するための目安であり, 不正確であることに注意

CNN が強い反応を示したかを可視化したことがあげられる (図 6 右). これにより, 微動の存否確率だけでなく, 微動カタログ構築に必要な微動の発生時刻を同定するための情報も与えることができた. しかしながら, 必ずしも検出がうまくいかなかった例もある. その原因を自然知能によって分析したところ, 実は紙に波形を描いた際

のペンの太さが長い時間スケールで変化するという紙記録に独特の原因が存在することが判明し, 描画線が太い期間については微動が発生し続けていると CNN が誤判定していたことを突き止めた. このような「AI と自然知能の対話」を通じ, CNN を改良するための方策として, 描画線の太さを変化させたより大量の画像データに基づく大

規模学習を実施すれば良いという見通しを立てることが可能となった。今後はSTAR-Eプロジェクトを通じて手配した強力な最新式GPU計算機を利用してこの改良案を実行することにより、信頼性の高い微動検出が可能なAI技術を開発していく予定である。

4. おわりに

地震学におけるデータ解析やモデリングのための情報科学的・統計学的手法の開発は、もちろん以前より実施されてきたが、地震AIをはじめとする現在の「情報×地震」分野は、ほぼ毎日のように論文が出版されるほどの活気に満ちている。昨今のAIブームも相まって、さまざまな学術分野において情報科学の専門家のニーズがきわめて高くなっており、彼らの激しい争奪戦が繰り広げられている。本分野においてわが国が主導権を取り、超ビッグデータ時代を迎えつつある地震学の発展に遅れを生じさせないためにも、iSeisBayesやSTAR-Eプロジェクトのように、今後も地震学と情報科学の専門家が強固に連携する数多くの「情報×地震」関連プロジェクトを実施し、情報科学分野の専門家が参入しやすい環境を作り続けていくことが重要であることを、むすびの言葉としたい。

謝辞

本研究は、文部科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト)」(JPJ010217)の支援を受けて行われた。また、本研究内容の一部のアイデアは、国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業CREST (JPMJCR1761, JPMJCR1763)、日本学術振興会科研費基盤研究(A)(23H00466)、挑戦的研究(萌芽)(20K21785)、国際共同研究加速基金(海外連携研究)(23KK0181)、東京大学地震研究所共同利用(2023-A-03, 2021-B-01, 2022-B-06)との交流を通じて得たものである。

本稿執筆の機会をお与えいただき、原稿に貴重なご助言をいただいた編集長の加藤照之博士、ならびに原稿執筆にあたって多大なご協力をいただいた徳田智磯博士、渡邊篤志博士、吉田美和氏には、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- Ito, S., Kano, M. and Nagao, H. 2023. Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault. *Geophys. J. Int.*, **232**, 671–683. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac354>
- Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Obara, K. and Tsuruoka, H. 2021. Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images. *Lect. Notes Comput. Sci.*, **12705**, 31–43. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75015-2_4
- Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Tsuruoka, H. and Obara, K. 2023. Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **128**, e2022JB024842. <https://doi.org/10.1029/2022JB024842>
- 気象研究所地震火山研究部. 1983. 83型強震計の開発. *気象研究所技術報告*, **7**. <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.07>
- Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S. and Hirata, N. 2021. Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression. *Geophys. J. Int.*, **226**, 1018–1035. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab124>
- Mousavi, S. M. and Beroza, G. C. 2022. Deep-learning seismology. *Science*, **377(6607)**, eabm4470. <https://doi.org/10.1126/science.abm4470>
- Nagata, T., Nakai, K., Yamada, K., Saito, Y., Nonomura, T., Kano, M., Ito, S. and Nagao, H. 2023. Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model. *Geophys. J. Int.*, **233**, 33–50. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac443>
- Nakai, K., Nagata, T., Yamada, K., Saito, Y., Nonomura, T., Kano, M., Ito, S. and Nagao, H. 2023. Observation site selection for physical model parameter estimation toward process-driven seismic wavefield recon-

- struction. *Geophys. J. Int.*, **234**, 1786-1805. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad165>
- Obara, K. 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296** (5573), 1679-1681. <https://doi.org/10.1126/science.1070378>
- Ross, Z. E., Meier, M.-A., Hauksson, E. and Heaton, T. H. 2018. Generalized seismic phase detection with deep learning. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**(5A), 2894-2901. <https://doi.org/10.1785/0120180080>
- SYNTHA-Seis ホームページ. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/SYNTHA-Seis/>
- Tokuda, T., Yoshimoto, J., Shimizu, Y., Okada, G., Takamura, M., Okamoto, Y., Yamawaki, S. and Doya, K. 2017. Multiple co-clustering based on nonparametric mixture models with heterogeneous marginal distributions. *PLoS One*, **12**, e0186566.
- Tokuda, T. and Nagao, H. 2023. Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms. *Geophys. J. Int.*, **235**, 1163-1182. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad270>
- Yano, K., Shiina, T., Kurata, S., Kato, A., Komaki, F., Sakai, S. and Hirata, N. 2021. Graph-partitioning based convolutional neural network for earthquake detection using a seismic array. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **126**, e2020JB020269. <https://doi.org/10.1029/2020JB020269>

長尾大道

[ながお ひろみち]

現職 東京大学地震研究所准教授, 博士 (理学)

略歴 京都大学理学部卒業, 同 大学院理学研究科博士課程単位取得退学, 核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター客員研究員, 海洋研究開発機構研究員, 統計数理研究所特任研究員, 同 特任准教授を経て, 2013年9月より現職

研究分野 固体地球科学に資する統計学的手法の研究, 情報地震学

津波予報 100 年—津波予報は難しい—

山本雅博

1. はじめに

ハワイで最初の津波警報が公表されてから 100 年が経過する。現在も適切なタイミングでの津波警報の発表と解除は、いぜん難しい状況が続く。筆者は世界の津波警報体制の構築の分野に長く従事していた。

大きな転換点となったイベントについて、インドネシア、ハワイ、GHQ と中央气象台での津波警報の進展と経緯について新しい資料を含めて紹介したい。

2. 津波が来襲中の津波警報の解除

インドネシアのスラウェシ島付近で地震が発生。BMKG（気象気候地球物理庁）の津波警報センターはいつものように作業手順に従って、5 分後に「発生した地震 $M: 7.7$ で 3m 程度の津波が予想される」との津波警報を発表する。

その後は周辺の潮位データを監視し観測された津波の最大振幅は 6cm で小さな津波であることを確認する。さらにメカニズム解析でも水平横ずれ断層だったことが判明する。このため BMKG は躊躇なく作業手順どおり警報発表から 29 分後に津波警報を解除する。

順調な作業と思えたが、震源から 70 キロほど離れたパル湾の沿岸一帯は地震発生直後から最大 10m の津波が来襲していて死者行方不明者は 3,000 人以上の大惨事となる。2018 年 9 月 18 日のことである（UNESCO-IOC, 2020）。

パル湾沿岸は軟弱地盤地帯で囲まれている。

人々が立ってられないほどの強震動で地盤は液状化する。そして湾のあちこちで海底地滑りとなってパル湾に流れ込んで津波を引き起こした。湾の周辺の各地の監視カメラ（CCTV）は、強震動で人々が座り込むシーンから 1~2 分後に津波が来襲する様子の映像を記録していた。

BMKG は、地震と同時に通信障害が発生し地元のパル气象台と連絡できず、現地の津波の状況を確認できないまま「津波解除」を出している。

そもそも地震発生と同時に発生する津波は「5 分後に発表することを目標とする」BMKG の津波警報では対処できない課題が残る。自主避難の重要性が再認識される津波であった。

実は、チリの津波でも津波が来襲している最中に津波警報を解除している。2010 年 2 月の $M: 8.8$ の際の出来事である。チリ海軍の津波警報センター（SHOA）は、太平洋津波警報センター（PTWC）の連絡を受けて 17 分後に津波警報を発表する。

ところがどうしたことか地震発生の 1 時間過ぎに「津波の危険は去った」として SHOA は津波警報を解除する。大津波がチリ沿岸各地に来襲中の解除であった。

背景にはさまざまな事情があったが、いちばん重要なのは担当者の対応能力にあった。津波警報システムは運用する人達の能力が重要であることを示した例である。

3. 予期できなかった津波

惨事は「ジャワ島とスマトラ島の間にあるスンダ海峡周辺」で発生する。2018 年 12 月の週末の

クリスマスと年末休暇の重なる時期で周辺は多くの観光客で賑わっていた。夜の9時半過ぎ一帯は突然の津波に襲われて400人以上の死者数となった (UNESCO-IOC, 2020)。

スンダ海峡の中央部にあるクラカタウ火山は1883年の大爆発で山体は消失したが、44年後の1927年から海底噴火が始まりアナク・クラカタウ島 (クラカタウの子供) として再現する。その後も火山活動が続き山体も大きくなる。2018年時点で、標高330mまでに成長し火山活動が継続していた。

今回の津波は、噴火に伴う大規模な山体崩壊の発生により引き起こされたが、津波警報センター (BMKG) は、何の情報も出すことができなかった。

その後、火山監視体制は強化され、火山に近接する潮位観測地点の設置や津波の自動検出手法を導入して津波早期警戒システムを強化している。当然のことながら、今回の津波の前に準備しておくべきことであった。

4. インドネシアの地震観測

1908 (明治41) 年にオランダがジャカルタにウィーヘルト地震計を設置してインドネシアの地震観測が始まる。1984年には、フランスの国立地球物理学研究所 (LDG) が提供したシステムを用いた全国的な地震観測が始まる。ジャカルタの地震センターには各地からの地震電報データと一部の波形データを集めて地震情報を発表する。短周期地震計だけなので発表するマグニチュードはmbで、最終処理に30分を要していた。

1997年以降は23地点での現地収録方式のJISNET (Japan-Indonesian Seismic NETwork) や、6地点の包括的核実験禁止条約 (CTBT) の広帯域地震計の整備が始まる。

一方、2003年に開催された「1883年クラカタウ噴火と津波—120年記念」のワークショップでBMKGの南西太平洋およびインド洋を対象とした津波警報システムの早期整備が緊急課題とな

る。対応策としてBMKGはJISNETを中核とする既存の観測システムを統合する「早期津波警報プロジェクト」の準備を進めていた。

その最中に「2004年インド洋津波」が発生する。プロジェクトは、よりいっそう大規模なプロジェクトとして蘇る。

5. 2004年インド洋津波 (M: 9.1)

2004年12月26日の日曜日09時58分 (日本時間) にインドネシアのスマトラ北部で巨大地震 (M: 9.1) が発生する。16分後、太平洋津波警報センター (PTWC) はスマトラ北部でM: 8.0の発生を速報、Mは、1時間後にはM: 8.5、さらに1日後にはM: 9.0と大きくなる。筆者は六本木の危機管理宿舎で報告を受けた。

翌年1月の国連世界防災会議 (神戸) でユネスコの政府間海洋学委員会 (UNESCO/IOC) が中心となり、インド洋の津波警報システムを構築することとなる。3月以降パリとモーリシャスで調整作業会議を開く一方、IOCは他の国連機関と共同してインド洋周辺各国の津波対策の現状と課題を調査する調査団を送る。筆者もその一員として参加した。各国の要請は、信頼できる地震津波情報を速やかに受領することであった。

8月には27カ国の周辺国が参加する第1回インド洋津波警報体制 (ICG/IOTWMS) 会議を豪のパスで開催する。太平洋では、チリ津波から第1回会合までに8年を要したが、今回は約半年ばかりで準備を終える。

インド洋の警報システムが安定に運用を開始するまで、気象庁とPTWCは暫定的な「インド洋津波監視情報」を2013年3月まで提供した。

6. インドネシア早期津波警報システム (InaTEWS) の構想

インドネシアが目標としたのは地震発生後3分以内に震源を決め、5分以内に津波警報を発表す

る津波警報システムの構築であった (BMKG, 2012).

これに必要な観測網として計画されたのは、160点の広帯域地震計と80点の潮位計のリアルタイム観測を中心に、40点のGPS観測、22点のブイによる沖合での津波観測であった。海岸線の長さから見ると、潮位計の数は少ないが、ゼロからのスタートなので大きな目標であった。

ドイツの地球科学研究センター (GFZ) は地震データ処理の専用のソフトウェア (SEISCOMP3) を開発し、BMKGは2008年11月から津波警報システムの運用を開始する。インド洋津波によるドイツ人の死亡者が500人を超えたのでドイツ政府は強い関心を持っていたと思われる。

BMKGは、現在まで22回の津波警報を発表している。このうち15回は津波を観測しているが、7回は津波の発生は確認されていない。平均すると年に1回程度の津波の発生となる。地震・津波観測網は2018年の2つの津波以降強化され、現在の地震観測点は438点、潮位観測点は382点となり大幅に強化されている。一方、課題は津波ブイである。スダ海峽にも当初は津波ブイが設置されていたが、2018年の津波のときは観測休止中で津波を沖合で検知できなかった。その後、再開したものの不安定な状況が依然として続く。多額の運用経費が課題である。

7. この百年間の世界の津波警報システムの進展状況

世界最初の津波警報を発表したのは、ハワイ火山観測所 (HVO) を創設した Thomas Jaggar である。1922年のチリ地震 ($M: 8.5$) では、予想していた時刻にヒロに津波が到達したことを確認している。この経験をベースにして世界最初の津波警報を公表する。

1923 (大正12) 年2月3日早朝、HVO観測員は、大規模地震の発生を確認する。震源はアリリューシャンからカムチャッカ方面で、ハワイ島

に津波が到着するとすれば12時過ぎになるので港湾当局者に「津波警戒」を呼び掛ける。しかし当局は完全に無視し何の対策も講じなかった。津波は予測どおりヒロを襲う。最大で6m以上となり操船中の漁師1名の死亡を含む港湾施設に大きな被害を与えた (Finch, 1924)。

1933 (昭和8) 年の三陸津波も予報している。津波がハワイを襲うとすれば8時間後の午後3時半ごろと推定し港湾管理者に呼び掛ける。ハワイ島では積極的な津波対策が実施されて船舶を沖合の深い場所に避難させた。ハワイ島の西海岸のコナでは、予想どおり津波が到着する。津波の最大は3m以上となり建物に被害がでたが人命を守ることができた。

8. 三陸沿岸の津波予報業務の開始；日本で最初の津波警報システム

宮城県立測候所は1939 (昭和14) 年に国有化されて仙台地方气象台となる。これに伴い中央气象台地震掛の森田 稔が地方台長として赴任する。森田は「将来も過去におけると同様、津波の襲来に逢うと、ただその為すがままにまかせ、過去におけると同様の浪害を甘受するのは科学の恥辱である。」と書いているように三陸沿岸住民の永年の課題であった津波対策に取り組む (森田, 1942)。

森田が目にしたのは1936 (昭和11) 年に改正された「地震観測法」である。前編は本多弘吉が、後編の「大地震勃発に対する処置」は和達清夫が担当している (中央气象台, 1936)。

和達は過去の津波を伴った地震について、大きな津波を伴った地震から小さな津波だった計5つの地震について「震央距離別 (初期微動時間) に100km間隔の平均的な最大振幅と震度の関係を示した表を作成した。さらに、表には地震規模の大小を知るため北伊豆と北丹後地震の内陸地震を含めている。

和達は津波を伴う地震記録の特徴として「初動

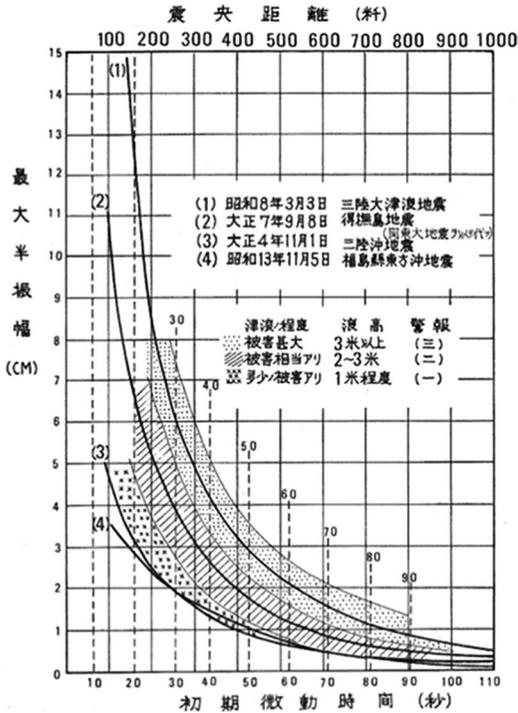


図1 仙台地方気象台の津波予報図(草野・横田, 2011)

は不明瞭で初期微動時間も不明瞭のままに主要動に移る。」そして「主要動の継続時間は長くて周期も緩慢」であると解説している。

人体感覚も同様で「振動は水平動が強くて次第に振幅が大きくなる。そして緩やかな大きな振動が長く続く」と地震記録の波形と人体感覚を解説し、地震記録と身体感覚の特徴から津波を伴う地震であるかどうか判断できることを示唆している。

森田は、この表を、予想される津波の規模に対応する最大振幅と距離の関係を示す図にした。予想される津波の程度を、図1のように三種類(津波が3m以上、2~3m、1m程度)と分類し、観測した最大振幅を初期微動時間の場所にプロットすれば、予想される津波の程度が判断できる「津波判定図」となる。

当時の最大の課題は通信インフラで、各地の地震観測データをセンターに集めて総合的に解析し

て津波警報をだすという手順は時間的に不可能であるので、自官署のデータだけで独自に発表する方法を採用した。図1は仙台地方気象台の津波予報図である。

さらに森田は、「津波の有無及び程度の判定には、過去の津波を発生した地震記録も参照する事」とし地震記録波形の重要性を指摘している。つまり津波を伴う地震は「特有の顔付き」があると言う。

津波の程度は、(1) 軽微な津波、(2) 相当な津波と(3) 大津波、の3種類に分類された。

津波警報の伝達は迅速で確実な方法が必要であるので各地元放送局と県警察に電話で通達することにした。

気象台から津波警報を受けると、放送局はただちに臨時放送する。県警察は警察電話で県下各警察署へ伝達し、各警察署は管下各派出所等へ、そして派出所から住民に伝達される。

森田は、この方法で地震発生後10~20分で伝達されて避難に十分な余裕があると考えた。

日本全国一斉の実施とはならなかったが、青森、八戸、盛岡、宮古、石巻、小名浜、仙台は、1941(昭和16)年9月に三陸津波警報組織を発足させる。政府機関が行う世界最初の津波警報システムであった。なお、以降三陸の官署が独自に発表した津波警報の事例はない。

9. ハワイの政府機関による津波警報システムの始まり

1946(昭和21)年4月1日の朝、ヒロは5~10mの津波に襲われヒロでは96人、ハワイ全島では159人の犠牲者をだす大規模な被害津波となった。大津波を発生させた地震は午前2時前にアリューシャンで発生したM: 8.6であったのでだれにも気付かれなかった。

米国の地震観測業務は、1925(大正14)年に気象局(Weather Bureau)から沿岸測地局(USC & GS)に移管されていた。地震観測は光学式記

録紙を用いており、記録紙を現像するまで地震の発生は判らない。事前に大地震の発生を知っていれば津波災害を大きく軽減することができたことから沿岸測地局は強い非難・批判を受けた。

沿岸測地局は急遽、津波警報体制に必要な4本柱の実施計画を策定する。開発事項は、

1. 大地震の発生を知るための連続可視地震記録計の開発。
2. 津波の到着を自動的に通知する潮位計の開発。
3. 津波が震源からハワイや各津波監視局へ到達する時間を示す津波伝搬図の作成。
4. 陸海空軍や民間航空会社の既存の通信網を用いた緊急津波警報伝達通信網の確立。

の4項目であった。

準備を整え1948(昭和23)年8月、ハワイを対象とした津波警報システム(SSWS: Seismic Sea Wave Warning System)が発足する。運用開始時の地震観測点は、沿岸測地局のハワイ、アラスカ2点、本土のわずか4点のみが選定された。また、津波監視局としてアラスカや太平洋各地の10地点が選定された。津波警報センターは沿岸測地局のホノルル観測所(HO)が担当して、津波警報をハワイ、太平洋全域の米軍基地および信託統治国への伝達を開始する(Kong *et al.*, 2015)。

運用開始後の最初の地震($M: 7.5$)は9月に発生する。各地の地震観測の報告値から震源はトンガ付近に決まる。津波が発生したとすると、ホノルルへの到達時間は6時間35分後と予想されるので津波警報センターは、防災担当機関に「スタンバイ」情報を出し各地の津波監視局からの観測された津波の報告を待つ。各地の津波監視局から報告されてくる観測情報は、いずれも観測された津波は小さく、警報センターはスタンバイを解除する。実際にホノルルで観測された津波は15cmであった。なお、東京からの地震報告が翌年からシステムに組み込まれている。

ハワイの津波警報は遠地津波を対象として開始したが、1975年にハワイ島周辺で発生した地震

($M: 7.7$)で津波が発生する。津波警報をだすことができず、大きな津波災害となる。津波監視体制の見直しを進めて急遽、近地津波監視体制が構築された。

10. 連合国最高司令官総司令部(GHQ)と中央気象台

ハワイの津波警報体制の開始はGHQにとっても大きな関心事があった。

中央気象台は戦後、GHQが指名した米軍の第2143気象隊の管理下に置かれ、気象隊の許可がなければ何もできない状態にあった。しかし気象隊には、地震・津波関連の業務を評価し判断できる能力はなかった。

GHQは日本の地震学のレベルを評価するために1947(昭和22)年6月にカリフォルニア工科大学のゲーテンベルグを日本に招聘する。彼は中央気象台や東京大学理学部や地震研究所を訪問し、中央気象台の地震観測状況の現状や大学と気象台の連携状況について調査している。同時に中央気象台の地震学のレベルを高く評価する一方、他機関との連携強化を提言している。

11. 「地震の報告および津波の予測に関する指令」(SCAPIN1957)

GHQは、1949(昭和24)年1月に中央気象台に対し「震度III以上の地震が発生した場合、震源地と津波の有無と程度を直ちに羽田の第2143気象隊に速報する」よう指令をだす。

当時の津波予報体制は三陸沿岸を除いて存在しなかったが、中央気象台は指令を安易に解釈して、たんに「国内地震電報式の改正」と「地震観測現業体制の確立」して「あたかも津波予報体制が実在するかのような形」で対応した。

羽田の気象隊は2月中旬には中央気象台の津波警報を迅速かつ確実に太平洋各地の米軍機関に通知・伝達するための作業手順(SOP)(Standing

Operating Procedure for Dissemination of Tidal Wave Warnings) を作成して準備を完了している。

なお、国会図書館に気象台関係の文書が保存されている。気象台が提供する津波警報の例文を見ると、「米国の西岸やハワイで予想される定量的な津波の高さ」など実現できそうにもない項目が含まれており、気象隊と気象台側とで技術的な事前の調整が行われていないことが解る。

1月からおおむね毎月10回程度の緊急「地震報告」が提出されていたが、9月までは連絡はすべて「津波の心配なし」の地震報告であった。津波に触れた最初の報告は9月23日の青森県東方沖 $M: 5.9$ の地震で「下北半島で、検潮儀で記録される程度の小津波が予想される」と報告された。

しかし、この報告形式は気象隊が持っている手順書 (SOP) にはなく、ようやく中央気象台とGHQ側との認識の大きな隔たりがあることが明らかになった。その後のGHQ側と気象台側とのやり取りの資料はまったく見当たらないが、どうやらGHQ側は「気象台には津波警報システムは存在しない」と認識した模様である。

その結果、直後の昭和24(1949)年10月3日付けで、連合国最高司令官から再度、「津波警報機構を(今日から)60日以内に組織し、それから30日以内に警報機構の実施テストを完了すること」を指示する指令(SCAPIN第2049号)がだされた。

これを受けて日本政府は指令から60日後の同年12月2日に「津波予報伝達総合計画」を閣議決定して、日本の全国的な津波予報の開始となった。

「津波警報伝達訓練」は12月20日に宮城県で実施され、末端の津波警報発令責任者までにおおむね10分程度で伝達されることを確認している。各津波予報中枢では12~13分以内に津波判定を終えているので、最悪の場合でも地震発生後25分以内には避難行動が開始されるものと推察される。

なお、後の1960年1月に締結された日米地位

協定の第八条に、米軍に提供する気象業務として「地震観測の資料(地震から生ずる津波の予想される程度及びその津波の影響を受ける区域の予報を含む。)」と明文化されている。

短期間で計画がまとまったのは、モデルとなる三陸沿岸津波警報組織があったためである。基本となるのは森田 稔が作成した津波予報図であった。この予報図の概念は1999年に量的予報に移行するまで長く活用された。

12. 最初の津波被害地震

運用を開始以降3年目の1952(昭和27)年3月4日に十勝沖地震 $M: 8.2$ が発生する。前日は昭和三陸地震津波の記念日で、三陸沿岸では津波警報の伝達・退避訓練が実施されていたので津波当日の津波警報は短時間で沿岸住民まで伝達された。さらに、仙台管区気象台はかねてから三陸沿岸のみを対象とした津波警報を実施しており、津波予報担当者の技術レベルはきわめて高かったと言える(中央気象台, 1953)。

津波予報実施報告の中で担当者は次のように報告している。「10時24分頃地震を感じる。「地震(動)の性質から津波の襲来を直感」する。地震験測(地震波や振幅の読み取り作業)を地上係員が担当し、地震係員は判定作業を行う。仙台におけるP~S、震度、初動方向からかりの震央を決定する。その後は各地の気象台から入電する電報で予想される津波の大きさを推定するとともに震央を再確認する。」と述べている。つまり、仙台の地震係員は、仙台の1点の記録だけで「津波有り」を判断し、後は入電する各地の電報での確認作業であった。津波警報は地震から11分後に発令された。

対照的に札幌管区気象台は逆の判断となる。「地震と同時に根室、釧路の通信線が障害となる。このため札幌と苫小牧の地震データだけで震央を内陸地震と判断し、「津波なし」を発令した。」と報告している。

13. 1960 (昭和 35) 年 5 月 24 日チリ津波：
太平洋津波警報組織の構築

この日の新聞の朝刊を見ると「日本時間 23 日 19 時 50 分に 1.8m の津波がハワイ島のヒロ市を襲い、被害が甚大で死者が出ている」ことを伝えている。

朝刊が各家庭に配布されているころ三陸沿岸は巨大な津波に襲われていた。ハワイが津波に襲われたとの報道は「通信・新聞・放送機関」のみに入電しており、気象庁には何の連絡もなかった。唯一、宮古測候所の職員が 3 時過ぎのラジオの深夜放送でこの報道を聞いている。当時の和達長官は、国会での質問に対し「私どもの業務用の通信には、ハワイへ非常に大きなのが来たというのが不幸にして参りませんでした」と答弁している。

ハワイの津波警報センターは「ハワイに対する津波警報を解除」した日本時間の 24 日午前 1 時過ぎに津波警報業務を終了している。日本に津波が到達する前である。この津波を契機に 1968 年に太平洋津波警報組織が構築され、以降 2023 年のトンガまで、ほぼ 2 年ごとに計 30 回の会議を開催している。なお東京でも 2 回開催している。

(あとがき)

筆者は 1971 年に津波予報業務に入る。津波予報の生き字引きのような酒井乙彦さんから夜勤で昔話を聞きながら当番者の心得を学ぶ。当時は地震電報が入電するのは、地震発生から 5 分以降になるので、東京の感震器が鳴動すると震度と地震記録をじっくりと観察してから作業に入る。この過程でだいたいの勝負がつく。後は各地の気象台から入電するデータを地図に書き込み、コンパスを使っただけの確認作業で微調整となればすべてがうまくいく。

その後はコンパス不要の計算機の時代に入り、今や揺れる前から震度速報がでる時代になった。それでもシナリオにない津波が発生したときに

は、担当者の対応能力が問われる。今も津波予報は難しい。

参考文献

- 中央気象台. 1936. 地震観測法, pp. 1-94.
中央気象台. 1953. 昭和 27 年 3 月十勝沖地震調査報告. 験震時報, 17, 1-135.
Finch, R.H. 1924. On the prediction of tidal waves: monthly Weather Review. 52, 147-148. <http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/052/mwr-05203-0147.pdf> (accessed June 6, 2013).
Kong, L., Dunbar, P. and Arcos, N. (ed.). 2015. Pacific Tsunami Warning System: a half century of protecting the pacific, 1965-2015. United States Govt Printing Office, pp. 1-40.
草野富二雄・横田 崇. 2011. 津波予報業務の変遷. 験震時報, 74, 35-91.
Meteorological, Climatological and Geophysical Agency (BMKG). 2012. Tsunami Early Warning Service Guidebook for InaTEWS. 2nd ed. <https://www.gitews.de/tsunami-kit/en/E3/tool/Tsunami%20Early%20Warning%20Service%20Guidebook%20for%20InaTEWS.pdf>
森田 稔. 1942. 講話 三陸沿岸に対する津波予報. 測候時報, 13, 37-43.
UNESCO-IOC. 2020. Summary Statement from the International Symposium on lessons learnt of the 2018 Tsunamis in Palu and Sunda Strait, Jakarta, Indonesia. 26-28. September 2019. UNESCO, Paris. (IOC Brochure 2020-1)

山本雅博

[やまもと まさひろ]

略歴 1969 年 3 月気象大学卒業。1971 年 4 月観測部地震課勤務。以降、科学技術庁福岡管区気象台などの勤務を経て主に地震火山部各課勤務。1997 年から 5 年間ウーンに新設された包括的核実験禁止条約機構 (CTBTO) に派遣。2004 年 4 月地震津波監視課長を経て 2005 年 10 月から 7 年間 UNESCO/IOC に新設された津波ユニットに派遣し世界各地の津波警報システムの構築に従事

大きな長周期地震動から身を守っていただくために

長周期地震動とは

地震による揺れの中には、カタカタという短周期の波からユ～ラユ～ラという長周期の波まで、さまざまな周期の波が含まれている。その中で、周期の長い大きな揺れのことを長周期地震動と呼ぶ。長周期地震動は、比較的大きな地震によって発生する。また、遠くまで伝わりやすく、三大都市圏など堆積層の厚い平野で増幅するという特徴がある。建物にはそれぞれ固有の揺れやすい周期（固有周期）があり、地震波の周期と建物の固有周期が一致すると共振して大きく揺れる。高層ビルの固有周期は低い建物の周期に比べると長いので、長周期の波と共振しやすい。その場合、特に高層階のほうがより大きく揺れる傾向がある。平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震発生時に、新宿の高層ビルが右に左にと大きくゆっくり長時間揺れている動画を見たことがある方は多いだろう。このときは、震源から約700km離れた大阪市（震度3）でも、高層ビルの内装材や防火扉の破損、エレベーターの停止による閉じ込め事故が発生した。

長周期地震動階級の導入

近年、特に都市では高層建築物が多く建てられ、長周期地震動による影響を受ける人口が増加している。しかし、従来気象庁が発表してきた震度の情報だけでは、長周期地震動による高層ビルなどでの揺れを適切に表せないことが課題となっていた。このため気象庁は、2011年に有識者および関係機関からなる「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」を立ち上げて検討を進めた結果、高さ45m以上（おおむね14、15階建以上、固有周期が1～2秒から7～8秒）の高層ビルを対象とした「長周期地震動に関する情報」が必要、との結論を得た（長周期地震動に関する情報のあり方検討会・気象庁地震火山部、2012）。また、その検討会を引き継いだ「長周期地震動に関する情報検討会」は、情報の発表に用いる指標として長周期地震動階級およびその関連解説表（図）を提案した（長周期地震動に関する情報検討会・気象庁地震火山部、2013）。気象庁はこれに基づき、地上に設置している地震計の観測データから求めた絶対速度応答スペクトル（建物の床そのものの揺



図 長周期地震動階級関連解説表説明図（気象庁ホームページより）

れの大きさ、S_{va}、減衰定数5%)の、周期1.6~7.8秒までの間における最大値の階級をその地点の長周期地震動階級とすることにした。

緊急地震速報で予測を発表

気象庁は、長周期地震動に関する観測情報の試行的な提供を2013年から気象庁ホームページ上にて開始した。一方で、長周期地震動による被害軽減のためには、緊急地震速報のような予測情報が提供できれば非常に有効であると考えられることから、長周期地震動の予測技術や予測情報のあり方についてさらに検討を進めた(長周期地震動に関する情報検討会・気象庁地震火山部、2017)。その結果を踏まえ気象庁は、国立研究開発法人防災科学技術研究所の開発した手法に基づき、緊急地震速報で推定したマグニチュード、震源位置と予測対象地点間の距離、および距離減衰式(Dhakal *et al.*, 2015)と予測対象地点の揺れやすさ(補正值)を用いて長周期地震動階級を予測することとした。そして、2023年2月1日より緊急地震速報で長周期地震動の予測を発表するという取り組みを開始した。緊急地震速報の従来の発表基準に長周期地震動階級の予測を追加するというもので、長周期地震動階級3以上が予測された場合には緊急地震速報(警報)を、そして長周期地震動階級1以上が予測された場合には緊急地震速報(予報)を発表することとした。東北地方太平洋沖地震について行ったシミュレーションでは、大阪府南部は従来の緊急地震速報(警報)の発表基準には達しないが、新たな発表基準では緊急地震速報(警報)が発表されるという結果が得られている。気象庁は、2023年2月1日から9月25日までの間に緊急地震速報(警報)を発表した15の地震のうち、12の地震で長周期地震動階級の予測を含んだ緊急地震速報(警報および予報)を発表した。

身を守っていただくために

上記のように緊急地震速報の発表基準は変わったが、緊急地震速報を見聞きした際にとるべき行動は従来と変わりはない。大きな揺れに備えるということに変わりはなく、猶予時間は短いからである。これまでどおり、慌てず、まず身を守る行動をとっていただきたい。

大地震はいつ発生するか分からない。大きな長周期地震動に見舞われた場合、特に高層建築物の上層階では家具や什器が動き回り、人に被害を及ぼすことも考えられる。気象庁からの緊急地震速報をご利用いただき、身を守っていただきたい。

参考文献

- 長周期地震動に関する情報検討会・気象庁地震火山部。2013。長周期地震動に関する情報検討会平成24年度報告書。 https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_joho_kentokai/hokoku/siryoku.pdf
- 長周期地震動に関する情報検討会・気象庁地震火山部。2017。長周期地震動に関する情報のあり方について(長周期地震動に関する情報検討会平成28年度報告書)。 https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_joho_kentokai/hokoku/28/siryoku2-1.pdf
- 長周期地震動に関する情報のあり方検討会・気象庁地震火山部。2012。長周期地震動に関する情報のあり方報告書。 https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_kentokai/hokoku/siryoku.pdf
- Dhakal, Y.P., Suzuki, W., Kunugi, T. and Aoi, S. 2015. Ground motion prediction equations for absolute velocity response spectra (1-10 s) in Japan for earthquake early warning. *日本地震工学会論文集*, 15, 91-111. DOI: https://doi.org/10.5610/jaee.15.6_91
(鎌谷紀子：気象庁地震津波監視課長)

● 大陸移動の過去と将来を机上でリアルに再現

吉田晶樹 著

大陸はどのように動くのか 過去と将来の大陸移動

評者 木下正高

今年（2023年）は大正関東地震から100年にあたる。あちこちで展示会や講演会・イベントが開催されている。東大地震研や国立科学博物館には、100年前にすでに運用されていた地震計やその記録が保存されている。当時はウエゲナーの大陸移動説こそ出版されていたものの、プレートテクトニクスは登場しておらず、関東地震がフィリピン海プレートの沈み込みによる海溝型巨大地震であるとは、想像すらされていなかった。関東（特に江戸）の人々は地震には慣れてはいたはずで、鯨が地震を起こすという絵図は残っているが、原因が分からないというのはさぞかし不安であっただろうと想像する。

現在では、プレートが沈み込んでいる証拠が徐々に蓄積され、関東地震や南海トラフ地震のメカニズムについてはほぼ定見が確立した。ではなぜプレートが沈み込むのか？ 地球の形成以来、表面から冷却し続けているが、その過程でマントルが対流するからだ。うーんその証拠は？ 物理的にありうる現象なのか？ 好奇心に基づくこれらの疑問にたどり着く。本書はそちらの方向へのガイドである。ところで、それがわかると「地震防災」「火山防災」に役立つのか？ 地震予知ができるようになるのか？ 一般の方々・中高生・そしてメディアの方々の質問は結局この辺にある。本書には直接その解答は記載されていないが、地震への備えとして、日ごろの防災意識を保つためには「〇年以内に〇%の確率」よりも「〇年に1回起きる地震」を意識することが重要、と指摘している。

本著は中高生向けに執筆された「あとがき」に書かれている。一般の啓蒙書の範疇を超えた「突っ込んだ」説明が随所にあり、著者が後進の育成に気合を入れていることが感じられる。レビュー論文かと思うほどの過去の研究事例の紹介があったかと思えば、手塚治虫の「ジャングル大帝」に大陸移動説が紹介されたこととか、

大陸分裂する様子を「七輪で焼いた餅」に例えるとか、野心的な試みが見られる。

第1章～第3章では、プレート運動・大陸移動、そしてそれらの原動力となるマントル対流についての説明と、過去の大陸移動に関する知見が紹介される。これは第4章へのイントロと考えることもできるが、最新の知見を丁寧に紹介しており、たいへん勉強になった。

第4章では、過去の地球の大陸移動を復元する、数値計算の方法がそうとう丁寧に説明されている。吉田氏の本領発揮であり地球科学の専門家にとって有用である。マントルの構造をどうやって推定するのか、粘性率がカギであるということ、実際に値をいろいろ変えて計算しその結果を紹介しているのは、わかりやすい。

第5章では日本列島の形成史とゆく末を、第6章では将来の地球の予測を語っている。プレート運動による大陸の離合集散については、本書のメインのトピックであり詳細な説明も納得だが、それに加えて、何億年も先の人類・生命の運命をも語っている。大陸移動により3億年後には次の超大陸が形成、6億年後に海水がなくなってプレート運動が停止する、10億年後にCO₂が減少(!)して温度が低下し光合成ができなくなる(酸素を使う生物が絶滅)、同じく10億年後に太陽の輝度が上がって海水が蒸発する、といったシナリオである。遠い将来の話だが、地球生命の寿命があと10億年しかないとしたら、悲しいことだ。

イラストはたいへん美しい。その多くは計算結果そのものを著者が作成したものであろう。惜しむらくは、これらの多くは動画のスナップショットと思われる(図4-4など)ため、実際にマントルがどのように対流するのか、頭の中で再構成するのが難しい面があった。著作権の問題があるのかもしれないが、どこかのサイトで動画も公開してもらいたいと希望する。

最後に蛇足だが、ページの左下に表示された、大陸移動のバラバラ漫画、昭和時代のいい味を出している。索引があるのは本書がたんなる啓蒙本を超えていることの証左だが、項目に「つまらない10億年」というのがあった。著者のこだわりを感じた。

＜技術評論社、2023年2月、四六判、紙版・電子版、216頁、2,200円＋税＞

[きのした まさたか 東京大学地震研究所教授]

● 世界の屋根はいつ、 どのようにできたのか

酒井治孝 著

ヒマラヤ山脈形成史

評者 高木秀雄

本書は、酒井氏が1980年に青年海外協力隊でネパールに派遣されて以来40年余にわたるヒマラヤの地質学的研究の多数の成果を中心に、ヒマラヤ山脈の形成の歴史を紐解いている力作である。B5判のため図もわかりやすく、口絵のカラーページも14頁にわたり、また12のテーマのコラムも設けられており、読者の理解に役立っている。

本書の構成は15章にまたがる。第1章は「ヒマラヤ山脈の地形と地質の概観」、第2章は、ヒマラヤのテクトニクスの根底にある「大陸衝突とその証拠」を扱っており、導入部分として読者の興味を惹きつける。第3章「レッサーヒマラヤに記録された19~16億年前の地球史」以降は、著者の地質学的研究成果を中心としたストーリーが展開されている。第4章「レッサーヒマラヤに残る超大陸パンゲアの痕跡とテチス海の消滅」では、インド亜大陸が Gondwana 大陸から分離して北上しテチス海が消滅するまでの堆積環境の変化などが記述されている。第5章「沈み込み、変成したインド亜大陸とその再溶融」では、ヒマラヤの中核をなす高ヒマラヤ帯のヒマラヤ変成岩について扱っている。なかでも MCT (Main Central Thrust) を境にヒマラヤ変成岩の下盤を構成するレッサーヒマラヤの逆転変成作用とチベットの中部地殻が南方に向かって押し出されたモデルとの関係が解説されている。第6章は、「ヒマラヤの誕生—1500万年前の変成帯の地表露出」について述べられている。

評者は「チョモランマの渚」というTV番組にいたく感動したことを記憶している。地質学者がエベレスト山頂に登って海の化石を採取してくるという話で、このときの学術隊長として酒井氏が出演していた。さらに、高ヒマラヤ変成岩最上部のイエローバンドと、その上位に乗るチョモランマ層の境界をなす正断層（デタッチメント断層）の存在も明らかにされた。口絵10-2, 3に紹介されたデタッチメント断層の露頭写真に方位が示されてい

れば、運動方向が読み取れるのでよかったと思う。第7章「テチス海に5億年にわたって堆積した1万メートルの地層」、第8章「北方にすべり落ち、横臥褶曲したテチス堆積物」では、テチス堆積物の堆積と変形について述べられている。第9章「レッサーヒマラヤに押し被さった巨大な変成岩ナップ」、第10章「変成岩ナップの運動史を探る」では、ナップの運動メカニズムや移動速度の見積もりも含めて、詳細に解説している。第11章「変成岩ナップ、レッサーヒマラヤ、高ヒマラヤの熱履歴を探る」では、レッサーヒマラヤのジルコン FT 年代の南北変化の説明がなされている。第12章「前縁盆地と深海扇状地の堆積物からヒマラヤの謎を解く」では、南部のシワリク丘陵の河川堆積物やベンガル湾の海底掘削コアなどの研究が紹介されている。高ヒマラヤ変成岩の上昇時期は、堆積物中の鉱物組成の時間変化を調べることによっても明らかにされている。その結果、陸上における検討結果（第6章）と一致して約1500万年前に変成岩が地表に露出するようになった。第13章では、第四紀の活動としてレッサーヒマラヤ南部の「前縁山地マハバーラトの上昇」を扱っており、MBT (Main Boundary Thrust) などいくつかの衝上断層の活動との関係に触れている。第14章では、「現在の地殻変動—地震・活断層・温泉」と題し、現在進行形の現象を扱っている。興味深いこととして、ヒマラヤ・チベット地域で発生した地震のメカニズム解が、ヒマラヤ前縁部、チベット南部、チベット高原~中央アジアでおのおの異なることを示している。さらにインド亜大陸の衝突は、アジア大陸全域のテクトニクスに影響を及ぼしていることが述べられている。最後に第15章では「ヒマラヤ山脈形成のメカニズムを探る」と題し、ヒマラヤ山脈形成の歴史を地震波トモグラフィーの情報も加えつつ総括しており、これまでの多岐にわたるストーリーを最後にまとめて理解するのに役立っている。取り上げた章の中で、衝突境界とされているインダス—ツァンボ縫合帯についても少し解説があると良かったと思うが、本書はチベット高原からベンガル湾に至るまでのヒマラヤを横断する各地帯の形成史をほぼ網羅している解説書としては他に類を見ないものであり、地質学を学ぶ学生やヒマラヤ造山運動に関心をもつ研究者に一読を薦めたい。

＜東京大学出版会、2023年3月、B5判、240頁、7,200円+税＞

【たかぎ ひでお 早稲田大学教育・総合科学学術院教授】

● 巨大災害からの復興の系譜を見直す

北原糸子 著

震災復興はどう引き継がれたか 関東大震災・昭和三陸津波・東 日本大震災

評者 地引泰人

本書は、東日本大震災の復興の基本方針は、関東大震災の復興の基本方針に遡ることができる、という仮説を検証することを目的とした大著である。著者は災害史研究の第1人者であり、著者自身の言葉を借りると「災害救済についての研究」、「歴史災害研究」を続けてきた。折しも、関東大震災から100年を迎えた今年に本章は刊行された。本稿では、原著の構成を簡潔に紹介し、その後、評者なりの理解のもとづき3つの特徴を説明する。最後に、本書の課題と評者の所感を述べる。

本書は3部構成である。第I部は書下ろしで、関東大震災—昭和三陸津波—東日本大震災の連関についての考察であり、本書のタイトルそのものに応える内容である。第II部は、2011年に朝日新聞出版から刊行された著者の書籍の再版であり、関東大震災の社会史を扱っている。最後に、第III部では、関東大震災の関係資料が整理されている。

評者として、まず、私が紹介したい1つ目の特徴は、研究課題設定の独自性が際立っていることである。1923年発生の関東大震災、1933年発生の昭和三陸津波、そして2011年発生の東日本大震災の3つの事例を比較するには、発生時期、社会的背景や法制度、ハザード特性などが異なるため、比較は難しいと考えてしまいがちである。しかし、著者はそこで思考停止してしまうのではなく、既往研究や資料群を丹念に検討し、「復興の進め方」、「復興とはどうあるべきなのか」という次元で3つの事例の関係性を説明するという課題設定をしてみせたところに、本書の最大の特色があると感じた。

本書の2つ目の特徴は、人文・社会科学分野におけるデータ収集とデータの活用について考えさせられた点である。第II部において、「行政簿冊」から両毛線沿線に逃れた避難民の受入を分析するという着想を得たことが、ごく簡潔に記述されている。私は、このことに、データ収集とデータの活用方法に目を見開かされる思いがした。行政資料の情報公開が進んでいるが、恥ずかしながら評者は歴史的な資料発掘にまで思いを巡らすことができなかった。しかし、著者は情報公開制度を活用し、着

実に行政簿冊を収集している。第III部においては、東京都慰霊堂に保管されている「震災死亡者調査票」による、関東大震災における避難者の動向の解明が紹介されている。本書執筆当時は、この調査票の全数調査はできなかったようであるが、震災発生後の100年を契機となる2023年に、すべての調査票のデータ化と研究目的に限っての閲覧が可能になるという報道があった（時事通信による）。著者の取組みの今後の展開が期待され、継続的なデータ収集の重要性を再認識した。

特徴の3つ目は、重要な文献情報を提示していることである。昭和三陸津波と東日本大震災の復興手法の類似点や、復興策の継承を論考した既往研究として、岡本健太郎氏と後藤・安田記念東京都市研究所の著作が紹介され、著者の論考の土台となっていることがわかる。学術書籍として、重要な文献を読者に示すことは当然のことではあるものの、災害史研究の第1人者である著者が本文内で繰り返し言及する文献は、読者の理解をさらに深める情報としてとても有用である。

最後に、本書の課題について触れたい。すでに著者本人が述べていることだが、「福島第一原子力発電所の事故からの復興」は分析対象外とせざるをえなかったことが本書の課題である。しかし、評者個人の認識では、福島第一原子力発電所の事故からの復興の理解・説明の難しさがあり、これは、本書の価値を損ねるという類の問題ではなく、評者を含めて、今後の研究者の課題であると思う。

評者の専門である国際防災政策では、仙台防災枠組で提唱された「Build Back Better（より良い復興）」が有名である。本書は「原形復旧ではなく改良された復興」という信念が、関東大震災から昭和三陸津波を経て東日本大震災へと引き継がれてきたことを指摘しており、わが国の文脈を国際防災政策の取組みに位置づけることを考えさせられた。

参考文献

- 後藤・安田記念東京都市研究所. 2017. 『東日本大震災からの復興と自治—自治体再建・再生のための総合的研究』。https://www.timr.or.jp/publish/200_all.pdf (2023年10月6日閲覧)
- 時事通信. 「死者調査票」5万枚公開へ—研究者対象、「検証進む」と歓迎—関東大震災100年, 2023年08月17日07時11分。https://www.jiji.com/jc/article?k=2023081600558&g=soc (2023年10月6日閲覧)
- 岡本健太郎. 2017. 『「三陸津波」と集落再編—ポスト近代復興に向けて』, 鹿島出版会。
 <藤原書店, 2023年1月, A5上製, 512頁, 5,300円+税>
 [おびき やすひと 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター客員准教授]

.....

【訂 正】

「地震ジャーナル」75号（2023年6月20日発行）に掲載された「今村明恒著「地震の征服」（南郊社，1926）について」（62～64ページ）のURLに不備がありましたので、以下のように訂正いたします（津村建四朗）。

訂正箇所：64頁

訂正前：

<https://www.amazon.co.jp/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E3%81%AE%E5%BE%81%E6%9C%8D-%E5%9B%BD%E7%AB%8B%E5%9B%B3%E6%9B%B8%E9%A4%A8%E3%82%B3%E3%83%AC%E3%82%AF%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3%E4%BB%8A%E6%9D%91%E6%98%8E%E6%81%92-ebook/dp/B01B5XMFV6>

訂正後：<https://dl.ndl.go.jp/pid/1019981/>

.....

●新刊紹介

藤岡達也 著

SDGsで考える日本の災害 ①地震・津波

大修館書店，紙版，2023年4月，B5判，64頁，3,200円＋税

日本建築学会 編集

地盤震動研究とその応用

日本建築学会，紙版，2023年4月，B5判，423頁，6,000円＋税

武村雅之 著

関東大震災がつくった東京 首都直下地震へどう備えるか

中央公論新社，紙版・電子版，2023年5月，四六判，248頁，1,800円＋税

大学女性協会 編

災害の記憶をつなぐ

すびか書房，紙版，2023年5月，四六判，216頁，1,800円＋税

国崎信江 監修

防災学習ガイド もしものときにそなえよう 地震

金の星社，電子版，2023年6月，3,200円＋税

北國新聞社 編

珠洲地震 特別報道写真集 2023.5.5

北國新聞社，紙版，2023年5月，A4判，64頁，909円＋税

蛭川雅晴 著

教養としての地学 激変する地球の未来を読み解く

PHP研究所，紙版，2023年6月，A5判，192頁，1,750円＋税

電子版，2023年6月，1,455円＋税

杉村 新 著

大地の動きをさぐる

岩波書店，紙版，2023年6月，A6判，308頁，1,520円＋税

藤井敏嗣 著

火山 地球の脈動と人との関わり

丸善出版，紙版・電子版，2023年6月，新書判，280頁，1,500円＋税

小池 武 著

ライフラインの耐震設計法

京都大学学術出版会，紙版，2023年8月，A5判，280頁，3,800円＋税

森まゆみ 著

聞き書き・関東大震災

亜紀書房，紙版，2023年8月，四六判，340頁，2,000円＋税

電子版，2023年9月，2,000円＋税

小滝 晃 著

次の関東大震災までに何をなすべきか「3・11」からの教訓

中央公論新社，紙版・電子版，2023年8月，四六判，192頁，2,000円＋税

五百旗頭真 著

大災害の時代 三大震災から考える

岩波書店，紙版，2023年8月，A6判，394頁，1,430円＋税

牧 紀男 著

平成災害復興誌 新たななる再建スキームをめざして

慶應義塾大学出版会，紙版，2023年8月，四六判，224頁，2,500円＋税

電子版，2023年9月，2,500円＋税

鈴木 晶・小川輝光・藤田賀久 編著

神奈川の関東大震災 100年後の視点

えにし書房，紙版，2023年8月，B5判，189頁，2,000円＋税

宮地美陽子 著

首都防衛

講談社，紙版，2023年8月，新書判，224頁，920円＋税

電子版，2023年8月，870円＋税

石井正己 編

関東大震災 文豪たちの証言

中央公論新社，紙版，2023年8月，文庫判，304頁，900円＋税

神沼克伊 著

巨大地震を生きのびる

ロギカ書房，紙版，2023年8月，四六判，252頁，2,200円＋税
電子版，2023年9月，2,200円＋税

中島陽一郎 著

関東大震災 その実相と歴史的意義 新装版

雄山閣，紙版，2023年8月，A5判，296頁，3,000円＋税

北原糸子・武村雅之・鈴木 淳・森田祐介・高野宏康 著

関東大震災絵図 揺れたあの日のそれぞれの情景

東京美術，紙版，2023年8月，B5判，144頁，2,600円＋税

目黒公郎 著

首都直下大地震 国難災害に備える 関東大震災100年 防災対策の意識改革，コストからバリュー，そしてフェーズフリーへ

旬報社，紙版，2023年8月，A5判，152頁，1,600円＋税

ニコラス・シュラディ 著，山田和子 訳

リスボン大地震 世界を変えた巨大災害

白水社，紙版，2023年8月，四六判，288頁，3,800円＋税

旧制第一高等学校の生徒たち 著，木戸崇之・竹田亮子 編

一高生が見た関東大震災 100年目に読む，現代語版 大震の日

西日本出版社，紙版，2023年9月，四六判，514頁，2,400円＋税

小菌崇明・東京都慰霊協会 著

写真集 関東大震災 被害→避難→救援→慰霊→復興

西日本出版社，紙版，2023年9月，B6横変判，200頁，2,000円＋税

青山俊樹 監修

都市防災ハンドブック

エヌ・ティー・エス，紙版，2023年9月，B5判，760頁，30,000円＋税

後藤忠徳 著

日本列島大変動 巨大地震，噴火がなぜ相次ぐのか

ポプラ社，電子版，2023年9月，820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

就任		
當麻 純一	専務理事 (代表理事)	23. 6. 22
採用		
水野 嶺	本部地震防災調査研究部 副主任研究員	23. 10. 1
退任		
澤田 義博	専務理事 (代表理事)	23. 6. 22
退職		
當麻 純一	地震調査研究センター兼本部地震防災調査研究部 副首席主任研究員 (注) 専務理事就任に伴う退職 地震調査研究センター 所長の職は継続	23. 6. 22
配置換等		
山口日出男	本部 事務局長 (旧) 本部 事務局 次長	23. 7. 1
関根 正夫	本部 事務局 参事 (旧) 本部 事務局長	23. 6. 30

編集後記

少し地味ではあるが本誌には新刊紹介のコーナーがある。この記事について紹介したい。12月刊の今号は本年4月から9月までの半年間に出版された書籍(紙版と電子版)をいくつかのWeb等で情報収集し、その中から編集委員らによる投票をもとに委員会で選考を行っている。本年は関東地震100周年ということもあり、特に8月頃から関東地震や震災に関する新刊書が急増した。本誌は地震に関係する理学・工学関係の論説や書評が主体であるが歴史・社会的な論説等も取り入れるようにしている。さらには、数少ないもののジャーナリズム、文芸関係の記事も時には取り入れるなどしていることもあって、その分野の書籍も新刊紹介の候補には入れるようにしている。このためか、とりわけ震災やその後の100年という切り口で書かれたさまざまな分野の新刊書がたいへん多くなり、情報収集の段階で本誌の性格になじまなさそうな書籍を除外して候補リストを作成し投票を依頼した。それでも、通常よりかなり多数となり、投票された諸氏も困ったのではなからうか。短期間での選考ということもあり、ひょっとすると重要な図書が漏れているかもしれないとの懸念が残るがやむを得ないとこ

ろだろう。

さて、今号も執筆をお願いした先生方にはたいへん興味深い記事をご寄稿いただいた。先号の特集号と異なり、今号は通常に戻っていろいろな分野の方々からご執筆をいただいたのであるが、期せずして津波の話題が複数取り上げられた。防災科研の久保田先生には2022年1月に発生したトンガ火山の噴火に伴う津波に関してたいへん興味深い論説をご寄稿いただいた。また、JAMSTECの松本先生にお願いした海底津波計の論説でもトンガ火山の噴火による津波に関する記録が紹介された。さらに、気象庁OBの山本先生には津波予報100年というタイトルで津波予報がいかに難しいものであるか、との論考をいただいた。これらを合わせ読むことにより、津波の発生過程の多様性や記録の取り方、またその予報の難しさについてよく理解ができる。複数の記事を合わせ読むことで津波についてより理解が深まるのではないだろうか。こういうところが編集者としての醍醐味かもしれないと感じた次第である。

最後になったが、冊子体を受け取られている方々はすでにお気づきのことと思うが、最近本誌の体裁を少し変更させていただいた。たとえば巻頭エッセイをこれまでの表紙裏から第一頁に移動したこと、最後の編

集後記を表裏紙裏から最後の頁に移動したこと、また、各記事の最後の著者紹介の写真をはずしたこと、などである。これらは先号で紹介したこと、本誌がJ-Stageに登載されることになったことを契機としてページ構成等を見直したものである。このような措置により、「地震ジャーナル」がより多くの方々の目に触れることを期待したい。

(T.K.)

地震ジャーナル 第76号

2023年12月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区神田猿樂町1-5-18
公益財団法人
地震予知総合研究振興会

<https://www.adejp.jp>
TEL: 03-3295-1966
FAX: 03-3295-3136

発行人 金沢敏彦

編集人 加藤照之

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。