

地震 ジャーナル

67

2019年 6月

エッセイ 「生きる，を支える科学技術 Science for Resilience」を

目指す防災科研 ● 林 春男

北海道中軸部の島弧-島弧衝突構造と 2018 年北海道胆振東部地震 ● 岩崎貴哉/伊藤谷生/津村紀子/

在田一則/松原 誠—— 1

2018 年北海道胆振東部地震における強震動と被害の概要 ● 高井伸雄/重藤迪子—— 10

建物の強震観測を用いた被災度判定技術 ● 楠 浩一—— 19

熊本地震被災住民における健康と生活について

—被災地での調査から— ● 古本尚樹—— 30

ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究

—2010～2014 年度 SATREPS 課題の概要— ● 山崎文雄—— 42

関東～九州地方の高精度重力図 ● 志知龍一—— 54

新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用 ● 内山庄一郎—— 58

● 書評—— 63

● 新刊紹介—— 67

● ADEP 情報—— 68

困み記事 地震の過剰報道？

MeSO-net 観測から見えてくるもの

地震の発生と地震の前兆現象の1つのアナロジー

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

「生きる、を支える科学技術 Science for Resilience」を目指す防災科研 林 春男

21世紀前半に国難災害の発生が確実視されています。南海トラフ地震では従来とは比較にならない大規模な被害が想定され、首都直下地震も時間的に近接するかもしれません。それらが生み出す苦境から立ち直るには長く苦しいプロセスが待っています。その間追い打ちをかけるように地球温暖化による気象の極端化の影響も懸念されます。

こうした国家的な危機を乗り越えるために、「日本の防災はどうあるべきか、防災科研はどのような役割を担うべきか」を、私たちは2018年の1月からブランディング活動を通して議論してきました。その答えとして、タグライン/ステートメント/ロゴマークからなる“防災科研のアイデンティティ”を2019年2月に新たに公開しました。

ブランディング活動の始まりはブランディング推進室の設置です。研究職と事務職合わせて50名ほどの有志が集まりました。ソーシャルリスニングとして、防災科研は社会からどのようにみられているのか、何を期待されているのか、を再認識するため、さまざまな方々からご意見をうかがいました。インナーリスニングとして、全職員を対象にしたワークショップ、ブランディング推進室の合宿など10回を超える会議を行い、防災科研の存在価値を一から議論しました。その過程を通して、積極的に意見を出し合いお互いの考えを共有して、職員一人ひとりが共通の価値観を見出していくことができました。最後に所内投票を行い、防災科研のアイデンティティが決定しました。なお、表記は変わりませんが、研究所の呼称を「ボウサイカケン」、英語で「エヌ・アイ・イー・ディー」として統一することにしました。

防災科研は、あらゆる種類の自然災害を対象に、予測・予防・対応・回復のすべての段階を対象として、総合的な研究開発を進め、人々の命と暮らしを支えていきます。「生きる、を支える科学技術」によって災害を力強くしなやかに乗り越える、この大きな挑戦への決意を込めたアイデンティティを掲げ、新たなステージへと進む防災科研の今後の展開に、どうぞご期待ください。



林 春男

〔はやし はるお〕

現職 国立研究開発法人防災科学技術研究所理事

略歴 1951年東京都生まれ。1983年UCLA Ph.D. 弘前大助教授、広島大助教授、京大防災研教授を経て2015年10月より現職。2013年防災功労者内閣総理大臣表彰受賞。

役職 文部科学省科学技術・学術審議会専門委員、日本学術会議特任連携会員、内閣府・防災教育チャレンジプラン実行委員長など

研究分野 社会心理学、危機管理

著書 「いのちを守る地震防災学」「しなやかな社会の挑戦」など

生きる、を支える科学技術

タグライン SCIENCE FOR RESILIENCE

地震、津波、噴火、暴風、豪雨、豪雪、洪水、地すべり。
自然の脅威はなくなるらない。

でも、災害はなくすことができると、
私たち防災科研は信じています。

この国を未来へ、持続可能な社会へと導くために、

防災科学技術を発展させることで

私たちは人々の命と暮らしを支えています。

さあ、一秒でも早い予測を。一分でも早い避難を。

ステートメント 一日でも早い回復を。

ロゴマーク  **防災科研**
NIED

北海道中軸部の島弧-島弧衝突構造と 2018年北海道胆振東部地震

岩崎貴哉・伊藤谷生・津村紀子・在田一則・松原 誠

1. はじめに

地球の表面は、何枚かのプレートに覆われている。プレートの厚さは100 km程度で、地球の表面に沿って運動している。その結果、プレート同士の境界では、一方のプレートが他方のプレートの下に沈み込んで島弧を形成したり、衝突して隆起しヒマラヤ山脈のような大きな地形をつくったりする。また、地震や火山活動を引き起こし、時には大きな被害をもたらす。

それでは、目を日本列島周辺に向けてみよう(図1)。まず、北海道から東北日本の太平洋沖では、太平洋プレートと呼ばれるプレートが、西北西の方向に年間約8 cmの速度で千島海溝-日本海溝から日本列島の下に沈み込んでいる。この沈み込みのために、北海道沖から東北沖にかけてマグニチュード(M)8クラス、あるいはそれ以上の地震が発生する。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、その典型的な例である。次に関東沖から西の領域に注目しよう。関東沖では相模トラフから、東海沖-西南日本沖では駿河-南海トラフから、そして琉球列島沖では琉球海溝から、フィリピン海プレートが北西方向に年間3~5 cmの速度で沈み込んでいる。この沈み込みによって、東海沖から四国沖でも1944年東南海地震(M7.9)や1946年南海地震(M8.0)のようなM8クラスの地震が繰り返し発生している。

さて、この論文のテーマである北海道中軸部は、ジュラ紀以降(約1.7億年前以降)の沈み込み・付加・衝突過程を経て形成された複雑な構造を持つ。図2は北海道西部から中部を構成する地質帯を示したものである。これらの地質帯は、ほ

ぼ南北の走向を持つ。このなかで、渡島帯から空知-エゾ帯の東部までは、東北日本弧およびその東側の前弧域を形成する地質帯の北方延長であると考えられている。古第三紀以降(約6,600万年前以降)、北海道中軸部では、ユーラシアプレート上の地塊と北米(オホーツク)プレート上の地塊の間で右横ずれを伴う衝突が進行した。それに引き続く中新世中期以降(約1,600万年前以降)は、北海道下において太平洋プレートが斜めに沈み込んでいるために、千島弧が西進して東北日本弧と衝突した。この衝突は北海道中軸部に衝上断層運動を引き起こし、急峻な日高山脈が形成された。実際、この衝上運動の結果として、山脈に沿って南北に延びる日高主衝上断層から東側に、千島弧側の深さ23 kmまでの地殻を構成する変成岩や深成岩が露出している。さらに、日高山脈の西側では、複雑に変形した厚い堆積層を有する褶曲-衝上断層帯が形成された。この島弧間の衝突によってできた複雑な地質構造を示す地域を、日高衝突帯と呼ぶ。

本論文では、まず日本列島の地殻・上部マントルの概略を説明し、それに引き続いて、上述の島弧-島弧衝突に起因する北海道中軸部の複雑な地質構造を紹介する。さらに、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震(M6.7)の本震・余震の発生様式を、この衝突運動と関連づけて考察することにする。

2. 地殻と上部マントル

第1節で述べたプレートは、地殻と最上部マントルから成り立っている。これらの部分を合わせてリソスフェアと呼ぶこともある。地殻とマント

ルの境界は、モホロビッチの不連続面（Moho面）と呼ばれる（図3）。

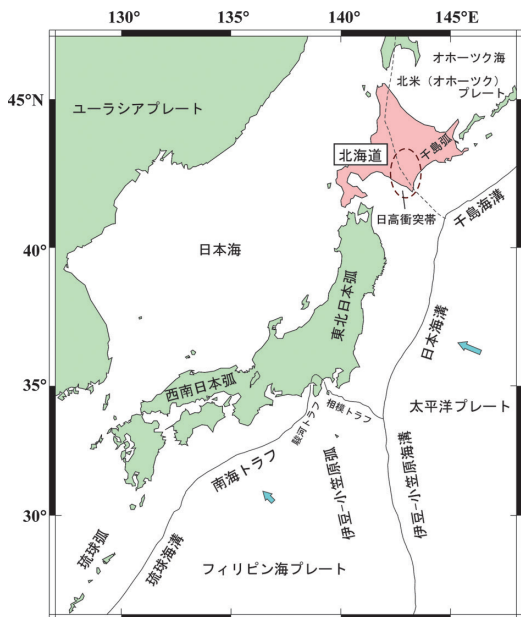


図1 日本列島周辺の広域テクトニックマップ。矢印はプレートの進行方向を示す

2-1. 制御震源地震探査

地殻や上部マントルといった地球の表面に近い部分の構造を調べる方法として、制御震源地震探査法（人工地震探査法）がある（図4）。これは、地表で人工的に地震の波（地震波）を発生させ、その波を地表に高密度で設置した地震計で観測することによって、地震波が伝わる経路周辺の地下のようすを探るものである。自然に発生する地震を使って地下を探る方法も有効であるが、制御震源地震探査では、波を発生させる場所（発震点）とその発震時刻を完全に制御することができる。このために、観測の精度が高い。しかしその一方、人工的に発生させる波のエネルギーは自然地震の場合に比べて小さく、そのために浅い場所（地球の表面付近）の探査に限定されてしまう。また、制御震源探査で用いる地震波は、P波と呼ばれる縦波である。地震波には、P波とともに横波（S波）も存在し、S波の情報は地下の物性推定に重要な枠割を果たす。しかしながら、この情報を制御震源探査で用いる例は少ない。これは、両方の

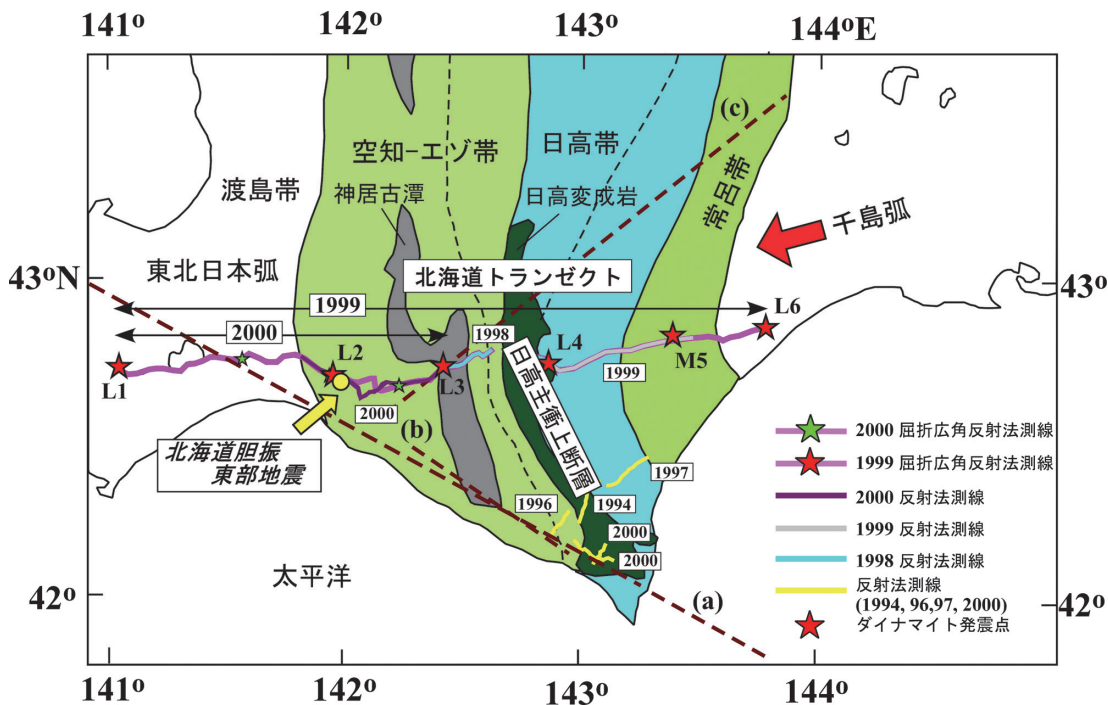


図2 北海道中軸部の地質帯区分図。これまで行われた地震探査測線も示した。(a), (b), (c)はそれぞれ1968~1969, 1984, 1992年の探査測線である

(a) 地殻と上部マントルモデル

(b) 地殻内地震発生頻度

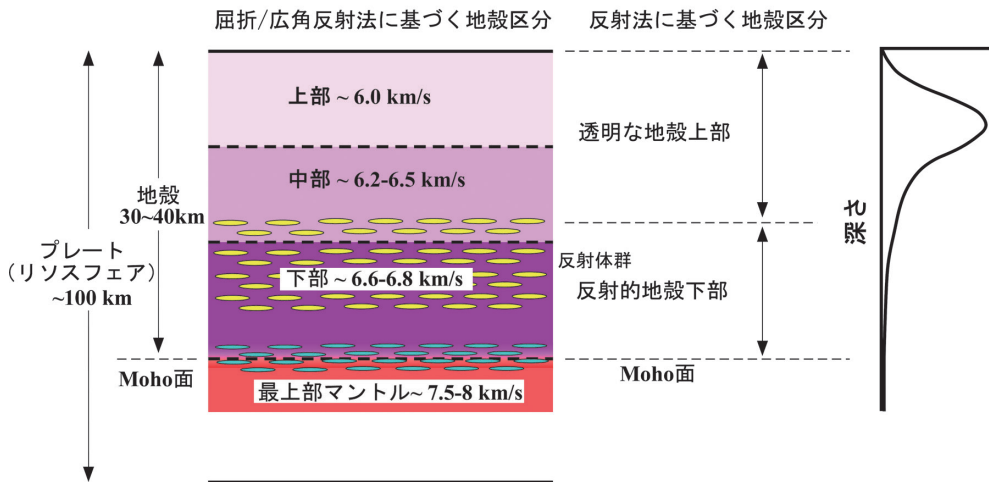


図 3 地殻・上部マントル構造の概念図。(a) 地殻・マントル最上部の模式図と屈折/広角反射法的および反射法的地殻区分。(b) 地殻内地震の頻度分布

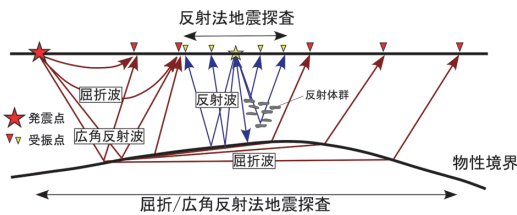


図 4 制御震源地震探査手法の概念図

波の情報が得られる自然地震の解析（たとえば自然地震トモグラフィ）と異なる点である。

制御震源地震探査には、屈折/広角反射法と反射法という2つの方法がある（図4）。一般的に、地下の物性は不均質である。したがって、その物性が急激に変わる場所に地震波が入ってくると、屈折や反射を起こす。屈折/広角反射法とは、発震点（人工震源）から受振点に到達する屈折波・広角反射波を用い、その波の伝搬時間（走時）や振幅から地下における波の伝搬する速度（地震波速度）と物性境界の形状を求めるものである。ここで、広角反射とは、反射を起こす面に入射するときの角度が臨界角をこえて全反射する場合を言う。したがって、広角反射波は、水平方向に伝わる距離が長い。地震波速度は、地下の岩石の組成・温度・圧力とともに、地下にどの程度割れ目

が存在するか、またその割れ目にどの程度水やマグマを含むかなどによって決まる。つまり、地震波速度は、地下の物性を知る有益な情報である。一方、反射法探査では、発震点と受振点を高密度（たとえば数10m）に設定する。そして各発震点から射出され地下で反射してその発震点に比較的近い受振点に戻ってくる反射波を用いる。これらの波は臨界角をこえない範囲で反射する 경우가多く、広角反射波とは対照的に、垂直方向に伝わる距離が長い。そして、このような反射波を集めて高度な処理技術を用いることによって地下の構造をイメージングする。物性が大きく変わる部分からは強い反射波が出るので、その部分はより明瞭な像となる。

このような、地下の物性（たとえば上述の地震波速度や密度など）や地層・岩層の形状、また反射体の分布などを“構造”と呼ぶ。屈折/広角反射法探査と反射法地震探査は、その解析・処理に用いる波形部分が異なるので、構造についての相補的な情報を与える。したがって、これらを同時に行うことが構造推定の信頼性を高めることにつながる。

2-2. 日本列島下の地殻と上部マントル構造

従来、地殻は上部と下部に分かれていると考え

られていた。しかし、1980年代からの屈折/広角反射法に基づく研究によれば、日本列島の地殻は、P波速度によって図3のように上部・中部・下部の3つの部分に分かれていると考えられる(岩崎・佐藤, 2009)。この図には、地殻の各部分と最上部マントルの代表的なP波速度の値も示しておいた。主として本州域で得られている結果によれば、地殻の厚さは30~40kmである。また、反射法地震探査によると、地殻の下半分(屈折/広角反射法的な地殻区分の中部地殻の下部と下部地殻に相当する部分)は反射体に富む領域であることがわかった。一方、地殻の上半分(上部地殻と中部地殻の上部に相当する部分)は、反射体が顕著ではなく“透明”である。日本列島の内陸部で起きる浅い地震を調べると、そのほとんどは地殻の上半分(透明な部分)で発生する。これは、地殻の上部での温度が比較的低いため、岩石の破壊(すなわち地震)が起こるためと考えられている。このような物性を“脆性”という。一方、反射体に富む(反射的な)地殻下部での地震は少ない。地殻の下部では、温度が高くなるために岩石は破壊せずに流動してしまう。このような性質を“延性”という。この延性的性質のために、地震が少ないと考えられているのである。反射法的には、反射体の少ない透明な部分と反射体に富む部分に地殻を区分することが多い。特に後者を“反射的地殻下部”と呼ぶ。

図3では、上部・中部および下部地殻の層を均質な板のように単純に示したが、実際にはずっと複雑な形をしている。さらに、地殻の三つの部分および上部マントルは、それぞれまったく同じ岩石でできているわけではない。地殻・上部マントルは、地球の進化とともに地質学的に複雑な過程を経て形成されてきた。そのために、各部分ともその組成や物性が複雑で、けっして均質ではない(不均質)のである。逆に、地下における、このような不均質な構造がわかれば、地殻や上部マントルの発達・進化・変遷の過程を理解する鍵が見つかり、また、地震や火山活動の成因の解明につながる。

3. 北海道の地質と地下の構造

北海道における最初の構造探査は、1968~1969年に、襟裳から積丹に至る測線(図2の(a))で行われた。その結果によれば、この測線の西側陸域部(図2の渡島帯部分)では地殻は20数kmから30kmの厚さで、日本海側に向かって徐々に薄くなっている。これは、中新世の日本海拡大によって地殻が伸張されたためである。その下の上部マントルの速度は7.5km/sであった(Okada *et al.*, 1973)。地殻の伸張も含めたこの構造の特徴は東北日本のそれとよい一致を示し、北海道の西部が東北日本弧の延長にあることを示している。1980年代から1990年代初めに行われた屈折法/広角反射法探査(図2の(b)と(c))では、北海道中軸部の構造が明らかになってきた(Iwasaki *et al.*, 1998)。これによれば、その構造は図2に示した地質帯に対応して水平方向に大きく変化している。また、西南側の空知-エゾ帯の褶曲-衝上断層帯においては、速度の遅い堆積層が複雑な形状を呈していることがわかった。通常、地震波速度は地下深くなるにつれて上昇する(すなわち物質が硬くなる)。しかし、この褶曲-衝上断層帯においては、周辺より速度の低い“低速度層”が挟まれていることも明らかとなった。

1994~1997年に行われた衝突帯南部における反射法地震探査は、地質学・地球物理学研究者に強いインパクトを与えた(Arita *et al.*, 1998; Tsumura *et al.*, 1999; 伊藤, 2000)。その結果を図5に模式的に示す。この図から明らかのように、千島弧側の地殻上部(23kmより浅い部分)が日高主衝上断層に沿って衝上している。この衝上している部分の下部は反射的である。つまり、この部分は、図3(a)で示した反射的な地殻下部の一部(上部)を含むものである。一方、千島弧側地殻の下部(すなわち“反射的地殻下部”の下部)は、西南側に傾き下がっている。すなわち、千島弧側の地殻が剥離し、2つに分かれてしまっているのである。このような構造をデラミネーション構造と言う。日高主衝上断層の南西側(前

縁側)では、顕著な反射境界(R1-3)が見られた。地質学的対応として、R1より上部は空知-エゾ帯東部のメランジュ(沈み込み・付加に伴う各種岩石の混合体)と考えられる。また、R2とR3に

挟まれた部分の少なくとも上部は、エゾ層群に対応づけられる。さらに、R3の上側と下側で反射体分布のパターンが大きく変化することから、この部分にかなり明瞭な物性境界が存在すると考えられる。

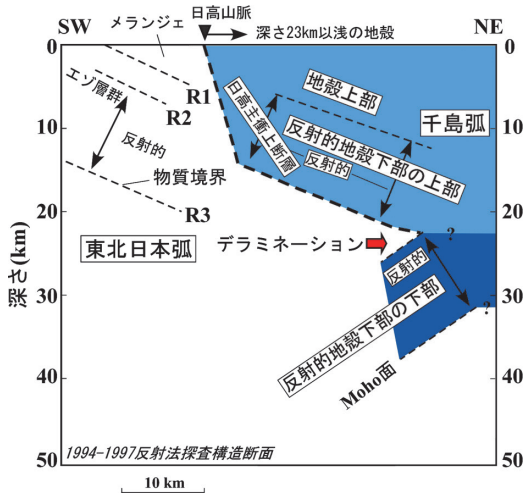


図5 反射法地震探査に基づく日高衝突帯南部の構造断面模式図。千島弧側の各部分は、反射的地殻区分に基づく(図3(a))。R1~R3: 前縁側の反射境界

1998~2000年に日高衝突帯北部で行われた地殻構造探査(北海道トランゼクト、図2,6)では、日高衝突帯の全体像がわかってきた(Iwasaki *et al.*, 2004)。この探査でも日高主衝上断層からの反射波がとらえられ、千島弧側の地殻が西に向かって衝上していることがわかった。屈折/広角反射法の解析によれば、日高主衝上断層のすぐ東側の深さ15~20kmまでの速度は6.0~6.3km/sで、それよりさらに東側の堆積層の下の基盤速度(5.5~6.4km/s)に比べて速い。これは、速度の大きい中部地殻あるいは中部地殻とともに下部地殻の一部が衝上して地表付近まで達していることを示している(図3(a)参照)。また、これまでの解析によれば、千島弧地殻の衝上はより深いところ(深さで25km以上)から起きていると思われる。この知見は重要である。上述のように、日高主衝

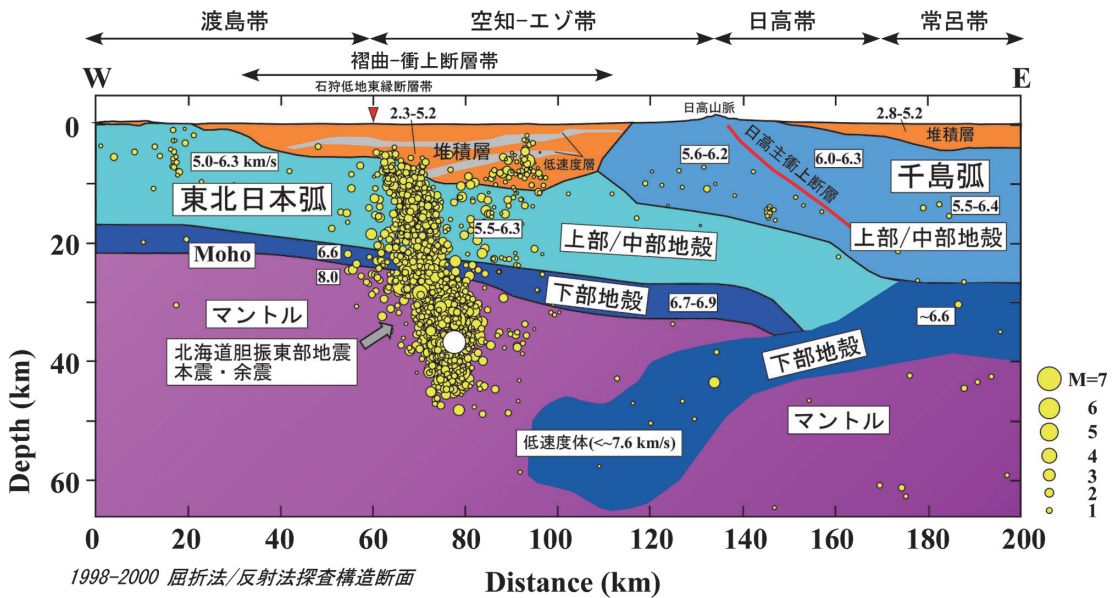


図6 屈折/広角反射法探査に基づく日高衝突帯北部の構造断面模式図と気象庁一元化震源による北海道胆振東部地震の本震と余震分布。地殻の各部分は、屈折/広角反射法的地殻区分(図3(a))に基づく。千島弧側から西に向かって入り込む低速度体(<7.6km/s)は、Matsubara *et al.* (2017)のトモグラフィの結果に基づく

上断層の東側に露出している変成岩は、岩石学的に深さ 23km より浅い部分に相当すると考えられている。したがって、衝突帯北部で乗り上げている地殻のうち、深さ 23km より深い部分は、日高主衝上断層より西側（前縁側）になければならない。つまり、千島弧側の中部あるいは下部地殻の一部が日高主衝上断層の西側にまで及び、そこで、東北日本弧側の上部・中部地殻と遭遇して複雑な構造を形成していると考えられる。実際、この部分では強い反射波を出す物性境界の存在が強く示唆されている。衝突帯北部において、千島弧側の地殻下部が沈み込んで衝突帯南部で見られるようなデラミネーション構造をつくっているかどうかは、北海道トランゼクトの構造探査の結果だけからは判断できない。しかし、第 4 節で述べるように、自然地震を用いたトモグラフィ解析によれば、東側（千島弧側）から西に傾き下がる低速度の領域が見られ、デラミネーション構造を形成している可能性が高い。

また、衝突帯北部でわかったもう 1 つの重要な知見は、図 6 に示すような、西側の東北日本弧の地殻が東に向かって徐々に深くまで入り込む様子がわかったことである。この東北日本弧の上には、深さ 8~10km 以上の堆積層が存在する。これは、本節前半で述べた空知-エゾ帯における厚い堆積層に対応するものであり、複数の低速度層も存在する。また、われわれの解析によれば、厚い堆積層の下の東北日本弧の地殻は、2 節で示した本州域の地殻に比べて薄く、その厚さは 16~22km 程度である。また、最上部マントルの P 波速度が 8km/s 程度であり、Okada *et al.* (1973) によって北海道西部（渡島帯、図 2）で得られた値（~7.5km/s）に比べて速い。このような地殻（浅い Moho 面）と最上部マントルの P 波速度（8 km/s 程度）の構造は、東北日本の前弧側（東側）のそれと共通する（たとえば Takahashi *et al.*, 2004）。

日高衝突帯周辺域の構造については、自然地震を用いたトモグラフィの結果が提出されている（Kita *et al.*, 2012）。この結果によれば、衝突帯南部においては、千島弧側の地殻全体と上部マント

ルの一部が、衝上しているとされている。われわれは、2012 年から、上述の制御震源探査データを最新の手法を用いて再解析を行ってきたところであるが、その解析でも図 5 に示される剥離構造がより明瞭にイメージングされており（たとえば Tsumura *et al.*, 2014）、Kita *et al.* (2012) によるトモグラフィの結果とは相容れない。

4. 北海道胆振東部地震

4-1. この地震の特徴

2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分に、北海道胆振地方東部で M6.7 の地震が発生した。奇しくも、この地震は、1998~2000 年の日高衝突帯北部の構造探査測線の真下で起こった。図 6 には、気象庁によるこの地震の本震と余震の位置も示してある。この図からも明らかのように、本震およびその後引き続く多数の余震の深さが 10~45km と深いことが、多くの地震研究者の関心を集めた。第 2 節で述べたように、日本列島内の地殻で発生する地震は 15~20km より浅い部分で発生する。この部分は相対的に温度が低く脆性的で、地震を発生させると考えられているのである。このような深さに比べて、胆振東部地震の発生域はかなり深い。

この地震の発生当初にその関連性が議論された石狩低地東縁断層帯は、南北方向の走向を持ち、余震分布の西側に位置する。しかし、過去に行われた反射法地震探査結果などに基づけば、石狩低地東縁断層帯を含む、褶曲-衝上断層帯における断層はゆるやかな東傾斜をしていて、今回の地震の余震分布が示す急傾斜の断層とは相容れない。しかも、図 6 に示したように、褶曲-衝上断層帯内では余震はほとんど発生していないのである。

第 3 節で述べたように、空知-エゾ帯には、褶曲-衝上断層帯の厚い堆積層の下に東北日本弧が入り込んでいる。その堆積層の下の東北日本弧の地殻の厚さは 16~22km とかなり薄い。この地震の余震域における Moho 面の位置は、26~28 km である。この地震の震源域の構造は複雑なので、震源の位置にも数 km 程度の誤差があると考

えられるが、われわれは、多くの余震が Moho 面の下で発生していると考え、これは、北海道以南の日本列島の地殻内地震発生の特徴と大きく異なっている (図 3(b) 参照)。

さらに、この地震は、破壊の開始時には、右横ずれ断層型であった。しかし、その後の主破壊は逆断層型であった。このように、破壊過程が複雑であることも、北海道胆振東部地震の特徴である。

4-2. 地震の発生と衝突構造

このような北海道胆振東部地震の特徴は、この地域の特異な構造に起因していると思われる。この地震の発生域およびその周辺で測定された熱流量はきわめて低く、 $60\sim 80\text{ mW/m}^2$ 以下である (田中ら, 2004)。低熱流量の原因の 1 つは、この地域下に存在する厚い堆積層と考えられる。しかし、胆振東部地震に限らずこの地域に発生する地殻内地震は、図 3(b) に示した平均的な地殻内地震に比べて深い。つまり、深いところまで地震が発生するということは、そこでの温度そのものが低く、そのために脆性的な性質が保たれていることを示している。

われわれは、上述の低温の地殻が深部まで及ぶ理由は、第 1 節と 3 節で述べてきた千島弧と東北日本弧の衝突にあると考えている。地震波トモグラフィの結果 (Matsubara *et al.*, 2017) を見ると、千島弧側から速度の低い低速度体が西に向かって垂れ下がっているように見える (図 6)。これは、衝突帯南部と同様に、剥離した千島弧側地殻の下部であると考え、興味深いことに、気象庁の震源によれば、この西に垂れ下がった低速度部分 (下部地殻) では、深さ $50\sim 60\text{ km}$ まで地震が発生している。やはり、この部分は温度が低いために脆性的になっている可能性がある。この剥離した冷たい下部地殻はマントルに達し、東北日本弧側の上部マントル・地殻の温度を下げる。また、このような温度の低い物質が存在すると、上部マントル内の熱的対流にも影響を与え、特に最上部マントルの温度を下げるであろう。これらのような状況は、東北日本弧側の地殻の下部や沈み込む太平洋プレートに近いマントル最上部 (いわゆるマントルウェッジ付近) をより脆性的にし、深い

ところまで地震を起こしやすくすると考える。しかし、この考えはまだ定性的議論の域にあり、今後深部までの構造調査やシミュレーションなどの定量研究が必要であることは言うまでもない。

5. ま と め

北海道中軸部は、ジュラ紀後期以降の沈み込み・付加・衝突の過程のなかで複雑な構造を形成している。特に、中新世中期から現在までは、太平洋プレートの斜め沈み込みによって、千島弧が東北日本弧と衝突して日高衝突帯を形成し、しかもこの衝突は現在も進行中である。本稿では、これまでの構造探査によって得られた、日高衝突帯の地殻・上部マントル構造を紹介した。この衝突帯南部では、一連の反射法地震探査によって、千島弧側の地殻が剥離して深さ 23 km より上部が西に衝上し、それより深い部分が西に下降するデラミネーション構造をしている。一方、衝突帯北部における屈折/広角反射法探査および反射法地震探査によれば、衝突帯前縁部では、深さが $8\sim 10\text{ km}$ 以上に及ぶ厚い堆積層で特徴づけられる褶曲-衝上断層帯の構造が明らかになった。その下には、東北日本弧が東にゆるやかに傾斜しながら入り込んでいる。衝突帯北部においても、千島弧側の地殻の衝上は明瞭に見られるが、南部におけるような下部地殻の下降については制御震源探査データのみからは確認できていない。しかし、地震波トモグラフィ解析によれば、千島弧側から西に向かって低速度の物体が下降して東北日本弧側の上部マントルにまで及んでおり、衝突帯北部においても地殻の剥離 (デラミネーション構造) の存在が示唆される。

2018 年 9 月 6 日の北海道胆振東部地震は、このようなきわめて複雑な構造の場で発生した。この地震の本震および余震の発生域は日本列島の他の地域で発生する地震に比べてはるかに深く、東北日本弧のマントル内にきわめて活発な活動域がある。このような特徴は、この地域の衝突構造に起因していると考えられる。制御震源探査と地震波トモグラフィの結果を考え合わせると、千島弧

側から剥離した温度の低い下部地殻が東北日本弧側のマントルにまで達し、その結果として周辺の温度を下げ、より深部まで脆性的な地震を発生しやすい環境を形成していると思われる。

参考文献

- Arita, K., Ikawa, T., Ito, T., Yamamoto, A., Saito, M., Nishida, Y., Satoh, H., Kimura, G., Watanabe, T., Ikawa, T. and Kutoda, T. 1998. Crustal structure and tectonics of the Hidaka collision zone, Hokkaido (Japan), revealed by vibroseis seismic reflection and gravity surveys. *Tectonophysics*, **290**, 197-210.
- 伊藤谷生. 2000. 日高衝突帯-前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造. 石油技術協会誌, **65**, 103-109.
- 岩崎貴哉・佐藤比呂志. 2009. 陸域制御震源地震探査から明らかになりつつある島弧地殻・上部マントル構造. 地震 (第2輯), **61**, S165-S176.
- Iwasaki, T., Ozel, O., Moriya, T., Sakai, S., Suzuki, S., Aoki, G., Maeda, T. and Iidaka, T. 1998. Lateral structural variation across a collision zone in central Hokkaido, Japan, as revealed by wide-angle seismic experiments. *Geophys. J. Int.*, **132**, 435-457.
- Iwasaki, T., Adachi, K., Moriya, T., Miyamachi, H., Matsushima, T., Miyashita, K., Takeda, T., Taira, T., Yamada, T. and Ohtake, T. 2004. Upper and middle crustal deformation of an arc-arc collision across Hokkaido, Japan, inferred from seismic refraction/wide-angle reflection experiments. *Tectonophysics*, **383**, 59-73.
- Kita, S., Hasegawa, A., Nakajima, J., Okada, T., Matsuzawa, T. and Katsumata, K. 2012. High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and the origin of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-oki earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **117**, B12301. doi:10.1029/2012JB009356
- Matsubara, M., Sato, H., Uehira, K., Mochizuki, M. and Kanazawa, T. 2017. Three-dimensional seismic velocity structure beneath Japanese Islands and surroundings based on NIED seismic networks using both inland and offshore events. *J. Disas. Res.*, **12**, 844-857, doi:10.20965/jdr.2017.p0844
- Okada, H., Suzuki, S., Moriya, T. and Asano, S. 1973. Crustal structure in the profile across the southern part of Hokkaido, Japan, as derived from explosion seismic observations. *J. Phys. Earth*, **21**, 329-354.
- Takahashi, N., Kodaira, S., Tsuru, T., Park, J.-O., Kaneda, Y., Suyehiro, K., Kinoshita, H., Abe, S., Nishino, M. and Hino, R. 2004. Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.*, **159**, 129-145. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02350.x
- 田中明子・山野 誠・矢野雄策・笹田政克. 2004. 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 DGM P-5, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- Tsumura, N., Ikawa, H., Ikawa, T., Shinohara, M., Ito, T., Arita, K., Moriya, T., Kimura, G. and Ikawa, T. 1999. Delamination-wedge structure beneath the Hidaka Collision Zone, Central Hokkaido, Japan inferred from seismic reflection profiling. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1057-1060.
- Tsumura, N., Iwasaki, T., Ito, T., Sato, H., Kurashimo, E., Hirata, N., Arita, K., Noda, K., Fujiwara, A., Abe, S., Kikuchi, S. and Suzuki, K. 2014. Reinterpretation of the lithospheric structure beneath the Hidaka Collision Zone, Hokkaido, Japan 1. Outline, 16-th SEISMIX International Symposium (International Symposium on multi-scale seismic imaging of the Earth's crust and upper mantle), Castelldefels, Barcelona, Spain, Oct. 18-23, p. 34.

岩崎貴哉

[いわさき たかや]

現職 公益財団法人地震予知総合研究振興会副首席主任研究員。理学博士。

略歴 東京大学大学院理学系研究科博士課程 (地球物理学専門課程) 修了。北海道大学理学部助手 (附属海底地震観測施設), 東京大学地震研究所助教授, 同教授を経て現職

研究分野 制御震源地震学



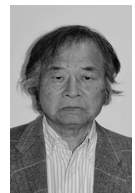
伊藤谷生

[いとう たにお]

現職 公益財団法人地震予知総合研究振興会副首席主任研究員。理学博士。

略歴 東京大学大学院理学系研究科博士課程 (地質学専門課程) 中退。同理学部助手・助教授。千葉大学理学研究科教授。平成帝京大学現代ライフ学部教授をへて現職

研究分野 構造地質学



津村紀子

[つむら のりこ]

現職 千葉大学大学院理学研究院准教授 博士(理学).

略歴 東北大学大学院理学研究科博士課程修了. 千葉大学理学部助手. 同 大学院理学研究科助教を経て現職

研究分野 地震学



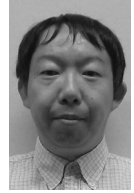
松原 誠

[まつばら まこと]

現職 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 主任研究員, 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会活断層分科会委員, 博士(理学)

略歴 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了. 防災科学技術研究所特別研究員. 地震予知総合研究振興会副主任研究員. 防災科学技術研究所研究員を経て現職

研究分野 地震学



在田一則

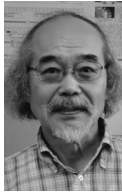
[ありた かずのり]

現職 特定非営利活動法人北海道総合地質学研究センター シニア研究員

略歴 北海道大学理学部卒業. 同 大学院博士課程退学, 北海道大学理学部助手, 助教授, 教授を経て現職

研究分野 衝突型造山帯に関する構造地質学的・変成岩岩石学的・年代学的研究

著書 Geology of the Nepal Himalayas (分担, Saikon Pub.Co.), ヒマラヤはなぜ高い (青木書店), 日本地方地質誌1 北海道地方 (分担, 朝倉書店), 地球惑星科学入門 (分担, 北大出版会)



2018年北海道胆振東部地震における 強震動と被害の概要*

高井伸雄・重藤迪子

1. はじめに

日高山脈は島弧-島弧衝突帯の造山活動により形成され¹⁾, その西側には石狩低地東縁断層帯, 東側には十勝平野断層帯を有している. 特に西側の石狩低地東縁断層帯は, 地震調査研究推進本部の評価において, 主要活断層の中では30年発生確率がやや高いグループに位置づけられており²⁾, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクトの対象地点としても取り上げられている³⁾. 2018年北海道胆振東部地震はこのような地域で発生したと考えられている. 本地震では, 多くの崖崩れによる建物被害, 地震動による建物被害が発生し, また発電所被害から拡大して, 北海道全域が停電することで, 札幌都市圏を含めた多くの都市部でも混乱が生じた.

この地震に関しては, すでに本ジャーナルで概要が報告⁴⁾されているが, 本稿では, 主に被害発生地域で観測された強震記録の特徴と被害に関して概要を報告する.

2. 地震概要

2018年9月6日3時8分に発生した, 北海道胆振東部地震(震源深さ37km, M_{JMA} 6.7)は, メカニズムと余震の震源分布から東北東-西南西方向に圧縮軸を持つ高角逆断層で発生し, 想定されている石狩低地東縁断層帯の主要断層の一部で発生したものではないと考えられている⁵⁾. 気象

*本稿は第46回地盤震動シンポジウム(2018年11月2日:日本建築学会地盤震動小委員会)の拙稿を基にしている.

庁(JMA)が発表した各地の震度は, 厚真町鹿沼の7を最大として, 震央から約60km離れた札幌市東区でも震度6弱が観測された⁶⁾. JMAによる震度5強以上の一覧を表1に示す. 防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netおよびJMAにより公開された加速度記録による最大加速度(PGA)の分布と, F-netの震源メカニズムを図1に示す. 広い範囲で大きな加速度が記録され, 札幌都市圏で震度5強以上が観測されている. 本地震の震源域では2017年7月1日に M_{JMA} 5.1, 深さ27kmの地震が発生し, 安平町で震度5弱が観測され, 人的被害が発生していた⁷⁾.

近地震記録に基づく震源過程(JMA⁸⁾)やInSARとGNSSに基づく断層モデル(国土地理院⁹⁾)があり, いずれも, 東傾斜の高角逆断層のモデルが提案されている.

3. 被害概要

震央付近の山間部では広範囲に崖崩れが発生し¹⁰⁾, それに伴い, 土木被害・建築物に被害が生じた. この建物の倒壊により多くの人的被害が発生し, 2019年3月6日現在での北海道庁発表による被害状況では¹¹⁾, 死者42名, 重傷47名であり, 住家被害は全壊469棟, 半壊1,630棟に上る. 震央距離50kmを超える札幌都市圏でも家具転倒による死者が発生した.

3.1 札幌都市圏における地盤被害

札幌市清田区, 豊平区, 北広島市等では液状化等による家屋被害が多数発生し, 特に清田区里塚と北広島市大曲並木での被害は甚大であった¹²⁾. 清田区里塚における大規模な液状化および地盤変状は, さまざまな規模の谷地形が宅地化された地

域であった¹³⁾。大規模な地盤変状が発生した地域以外でも清田区、豊平区、東区、北区においては多くの液状化に伴う噴砂、地盤変状が発生した¹³⁾。

北広島市大曲地区の大規模な地盤変状は、大曲川に沿って発生し、主な被害地点は宅地造成時の盛土部分に対応している¹³⁾。

3.2 大規模停電

地震により北海道電力苫東厚真火力発電所で1、2号機にボイラー設備被害、4号機でタービン設備被害が発生し、その他の送電設備における被害等と要因が複合して、北海道全域の停電（ブラックアウト）に発展した¹⁴⁾。発生当初約295万戸の停電が9月8日18時の時点では約4千戸にまで解消したが、配電設備の被害復旧を終えて完全に解消したのは10月4日であり¹⁴⁾、地震動被害を受けなかった地域においても、酪農・生産・流通等多岐にわたり被害が拡大し、全国にも影響が波及した。

4. 強震動の広域分布と距離減衰特性

本地震による強震動の周期帯域による空間分布を把握するため、K-NET、KiK-net および JMA による強震記録を用いて、加速度応答を求め水平合成し、最大値を求め、擬似速度応答に変換した値の北海道における空間分布を図2に示す。震央付近から特に北西にかけての石狩平野・勇払平野

でいずれの周期でも振幅が大きく、周期0.3~3秒の帯域では30cm/sを超える振幅が広範囲に分布している。なお、JMAでは長周期震度階級（試行）において、最大階級である長周期震度階級4を胆振地方中東部の厚真町鹿沼、石狩地方南部の千歳市・新千歳空港で発表している¹⁵⁾。

強震動の距離減衰特性を把握するため、PGA、最大速度（PGV）、および擬似速度応答値の震源距離との関係を図3に示す。既往の経験的な地震動予測式（PGA、PGV：司・翠川式¹⁶⁾、応答値：Kanno *et al.*¹⁷⁾）との比較でみると、PGA、PGV および周期1~3秒の応答で距離100km以内の地点での振幅が大きく、100cm/sを超える応答を記録している地点もある。しかし、震源付近でも地域によって卓越する周波数帯域が異なるため、震源からの放射特性と地下構造を併せての検討が必要である。

表 1 気象庁による発表震度（5強以上）

7	厚真町鹿沼
6強	厚真町京町*、安平町早来北進*、安平町追分柏が丘*、むかわ町松風*、むかわ町穂別*
6弱	札幌東区元町*、新千歳空港、日高地方日高町門別*、平取町振内*
5強	札幌北区太平*、札幌北区篠路*、札幌北区新琴似*、札幌白石区北郷*、札幌手稲区前田*、江別市緑町*、札幌清田区平岡*、千歳市北栄、千歳市若草*、千歳市支笏湖温泉*、恵庭市京町*、三笠市幸町*、長沼町中央*、苫小牧市旭町*、平取町本町*、新冠町北星町*、新ひだか町静内山手町、新ひだか町静内御幸町*

* 気象庁以外の震度観測点

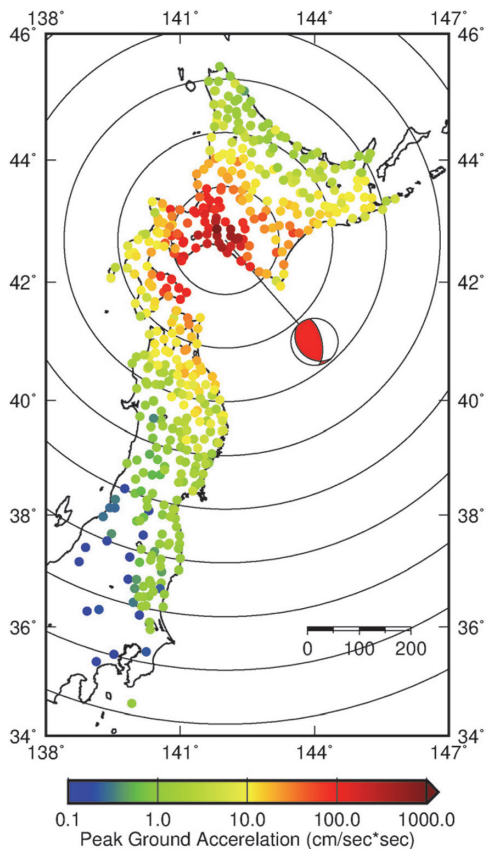


図 1 PGA 空間分布と震源メカニズム（F-net）

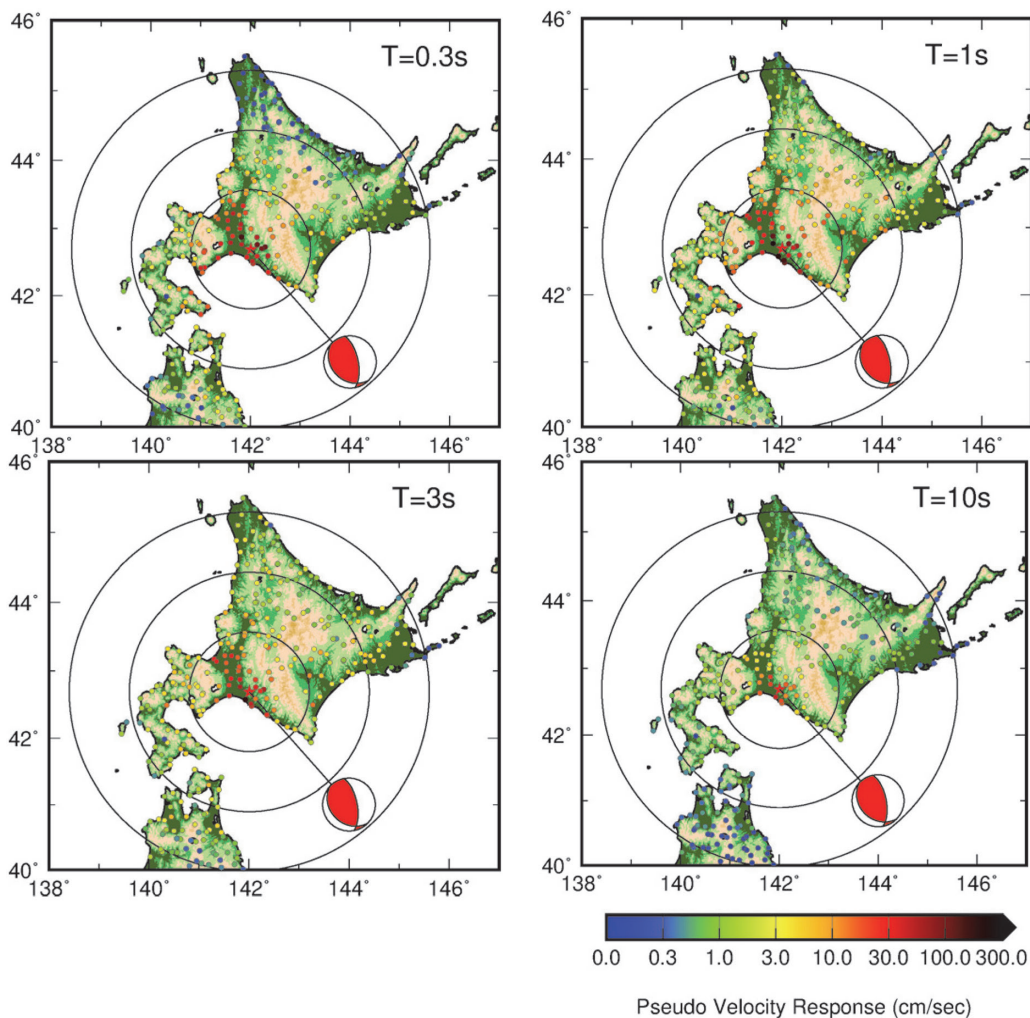


図 2 擬似速度応答値の空間分布. T は固有周期を示す. 同心円は 100km 間隔

5. 建築物の地震動被害と強震記録

ここでは、震源近傍（図 4）と石狩平野の代表的な強震記録に関して、その周辺の被害の概要と併せて述べる。地震動による建物被害は、むかわ町松風・花園と安平町早来に集中しているが、なかでも、むかわ町松風・花園は古い木造建物に層崩壊が発生しており、その建物被害集中域は K-NET 鶴川（HKD126）周辺である。また震度 7 を観測した JMA 鹿沼（47004）の震度計は旧鹿沼中学校の校庭に設置してあるが、校庭の地盤は流動化し、中学校校舎も大きく被害を受けてい

た。これらの加速度記録から積分した速度波形と加速度フーリエスペクトルを図 5 に示す。両観測点ともに 1 Hz 以下にピークを持つ地震動である。また、2003 年十勝沖地震 ($M_{JMA} 8.0$) 時に杭基礎に被害が生じた厚真町立厚南中学校の校庭に位置する KiK-net 厚真（IBUH03）では、さらに低周波数側でピークを持つ地震動である。K-NET 追分（HKD127）と KiK-net 追分（IBUH01）は PGA が 2g 近くに達する大きなものであったが、K-NET 早来（HKD128）とともに、1 Hz 以上の高周波数帯域でピークをもつ。なお、追分の 2 地点は同じ敷地内に位置し、直線距離にして 100 m 足らずであるが、短周期帯域での振幅が大きく異なってお

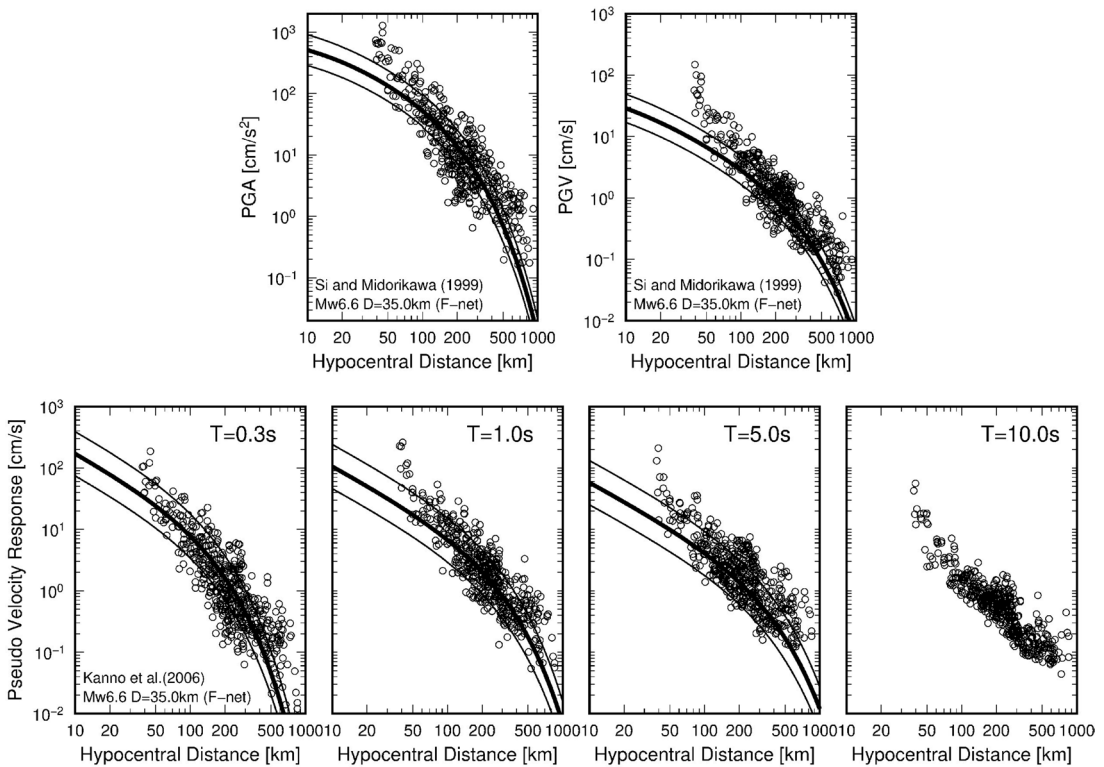


図 3 PGA, PGV および擬似速度応答値の距離減衰

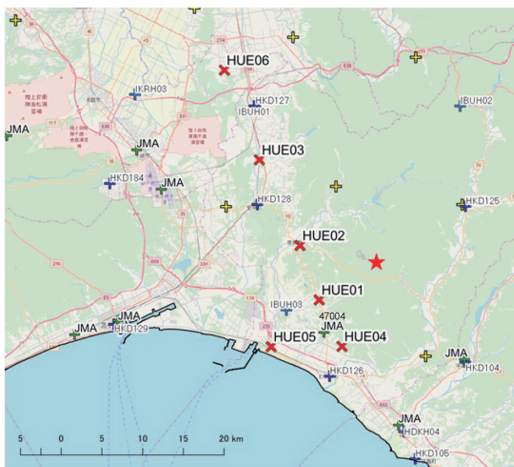


図 4 震央および強震観測点位置。臨時観測点の位置も同時に示す

り、今後地形と表層地盤の影響の詳細な検討が必要である。これら観測点の速度応答スペクトルを見ると(図6)、同時に示す1995年兵庫県南部地震のJR鷹取の応答と比較しても、K-NET 鶴川、

JMA 鹿沼において、1~2秒での応答が大きく、建築物に対する地震動の破壊力指標¹⁸⁾を考えた場合、周辺での被害が多いことと整合する。また、KiK-net 厚真では周期2~3秒でピークを持っている。一方、短周期成分の卓越するKiK-net・K-NET 追分、K-NET 早来ではRC建物の壁や床スラブのひび割れ¹⁹⁾、木造・石造建築物では外壁の剥落が目立った。また長周期成分の卓越しているK-NET 鶴川、JMA 鹿沼観測点では、NS成分と比較してEW成分の振幅が大きい。

前述の札幌都市圏における液状化発生地域に最も近い記録として、K-NET 北広島(HKD182)のNS成分を2003年十勝沖地震時の記録と加速度・速度波形、加速度フーリエスペクトルで比較すると(図7)、M8クラスの地震の後続波の振幅の大きさとともに、1Hz以上の本地震の振幅の大きさが理解できる。2003年十勝沖地震においても札幌市清田区では液状化被害が発生しているが、今回とは場所が異なっており、また今回の

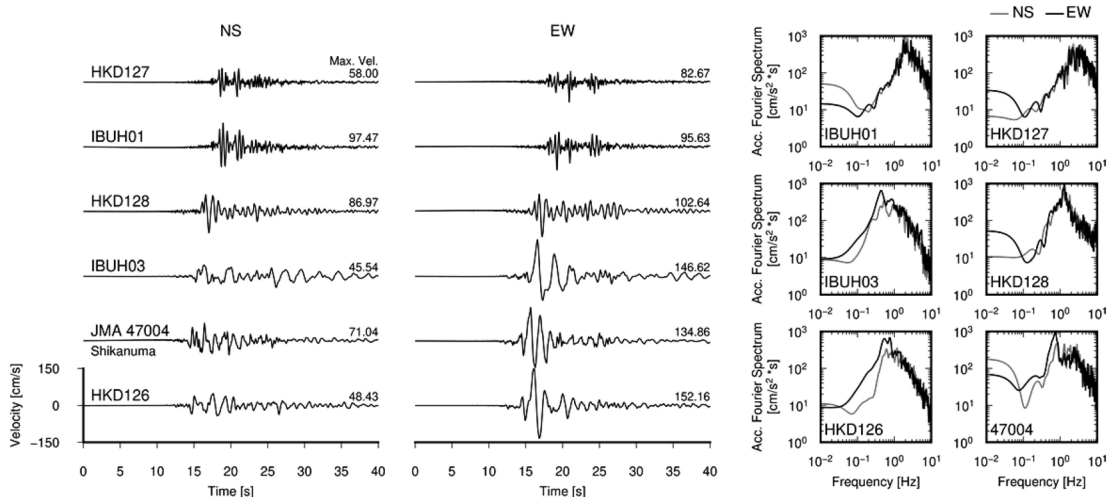


図 5 速度波形と加速度スペクトル。速度記録は 0.05 Hz ハイパスフィルターを施している

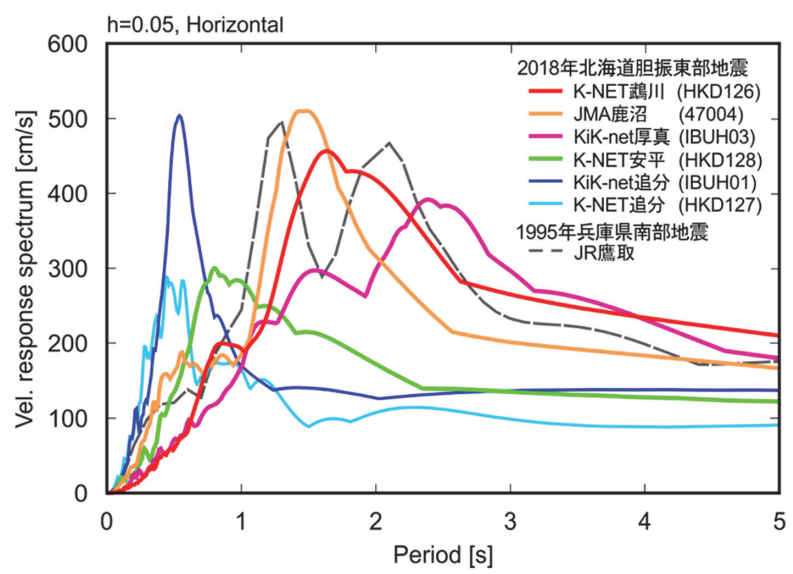


図 6 速度応答スペクトル (水平動, $h=0.05$)。1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取のスペクトルを同時に示す

ように大規模ではない。今後は被害地点の記録の推定を実施することで、液状化、大規模地盤変状発生への影響の検討も必要であろう。

6. 震源付近の地下構造

本地震の発生地域では、前述のとおり、鳥弧-鳥弧衝突帯を成因とした、ひずみ集中帯に関わる観測・研究をはじめ³⁾、衝突帯における地殻・堆

積層構造の推定が進められてきた¹⁾。勇払平野の強震動に関しては、Hatayama *et al.*²⁰⁾ が、2003 年十勝沖地震で苫小牧の石油タンク被害の原因となった周期 7~8 秒の長周期地震動励起の成因に関して、微動アレイ探査に基づく地下構造との議論を詳細に行い、表層 (~1 km) の軟弱な堆積層によりこの帯域の長周期地震動が励起されていることを示し、再現に成功している。その S 波速度構造モデルの鉛直断面によれば、K-NET 鶴

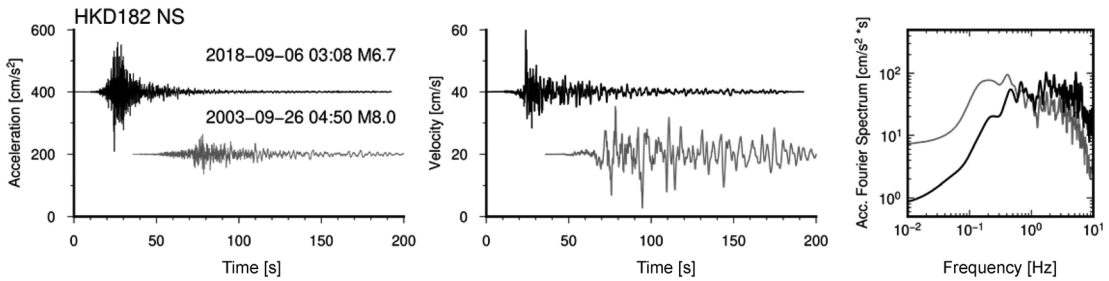


図 7 K-NET 広島 (HKD182) の NS 成分の加速度・速度波形, 加速度フーリエスペクトルの比較

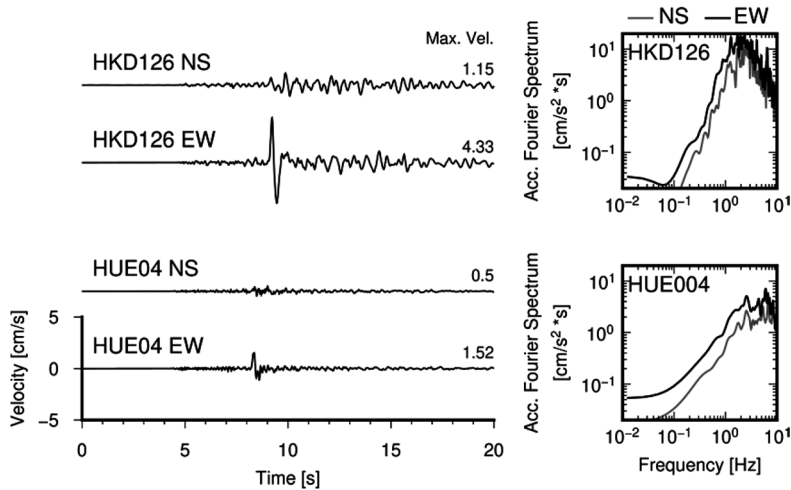


図 8 2018年9月14日6時54分の地震 (M4.6) における K-NET 鶴川 (HKD126)・HUE04 の速度波形および加速度フーリエスペクトルの比較

川付近で南東から北西にかけて急激に S 波速度 1.3km/s の層が深くなっており、今後、周期 1～2 秒が卓越した地震動の生成要因をこれら地下構造と震源特性とを踏まえて検討する必要がある。

7. 臨時余震観測による検討

高震度地域において、地下構造・震源特性を把握するため、6 地点で臨時の余震強震観測を実施した (図 4)。観測には加速度強震計ミットヨ社製 JEP-6A3 (2V/g)、データロガー白山工業社製 DATAMARK LS-8800 を用い GPS による時刻校正を行っている。電源供給は車載用鉛蓄電池と乾電池を併用し、すべての強震計はアスファルト舗装道に接着剤により固定した。観測期間は 2018

年 9 月 10 日～12 月 1 日である。9 月 14 日 6 時 54 分に発生した余震 ($M_{JMA} 4.6$) に関して、本震で周期 1～2 秒応答の大きかった K-NET 鶴川観測点と、その北約 4km の丘陵地に設置した HUE 04 観測点で得られた記録を比較すると、周波数特性が明瞭に異なる (図 8)。K-NET 鶴川観測点の本震時の地震動においても、直下の地下構造による影響が大きかったと推定される。なお、HUE 04 観測点の周辺では建物被害はみられないものの、近傍の墓地での墓石転倒率はほぼ 100% であった。

8. まとめ

2018 年北海道胆振東部地震の強震動と被害に

関して報告した。大加速度が観測された観測点においては高周波数域が優勢であり、大きな建物構造物に被害はみられなかったが、震源の南に位置する K-NET 鶴川観測点においては、木造建物に被害を発生させる周期 1~2 秒が優勢な強震動が観測されており、その近傍での木造建物被害も大きかった。HKD126 観測点に関しては、近傍の丘陵地での余震観測記録と比較し、直下の地下構造の影響が大きいことが推測できた。

謝辞

本観測の一部は文部科学省特別研究促進費「平成 30 年北海道胆振東部地震とその災害に関する総合調査（代表：高橋浩晃）」および科研費補助金（17H06215）により実施された。強震記録は、防災科学技術研究所および気象庁、1995 年兵庫県南部地震の強震記録は鉄道総合技術研究所²¹⁾による。作図の一部は GMT²²⁾ による。ここに、記して感謝する。

参考文献

- 1) 岩崎貴哉. 2019. 北海道中軸部の島弧-島弧衝突構造と 2018 年北海道胆振東部地震. 地震ジャーナル, **67**, 1-9.
- 2) 地震調査研究推進本部. 2010. 石狩低地東縁断層帯. https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/f006_ishikari-teichi/
- 3) 茂木 透. 2015. ひずみ集中帯発生に関わる地殻構造の研究. ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究総括成果報告書, 35-40.
- 4) 岡田義光. 2018. 2018 年北海道胆振東部地震（速報）. 地震ジャーナル, **66**, 70-73.
- 5) 気象庁. 2018. 「平成 30 年北海道胆振東部地震」について（第 5 報）. http://www.jma.go.jp/jma/press/1809/06i/201809061730_5.html
- 6) 気象庁. 2018. 「平成 30 年北海道胆振東部地震」について（第 6 報）. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1809/07c/201809071600.html>
- 7) 北海道. 2017. 胆振地方中東部を震源とする地震による被害状況等（第 2 報）. http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/20170701_iburichubu_jishin_higai2.pdf
- 8) 気象庁. 2018. 2018 年 9 月 6 日 胆振地方中東部

- の地震—近地強震波形による震源過程解析（暫定）—. <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2018090603075933near.pdf>
- 9) 国土地理院. 2018. 平成 30 年北海道胆振東部地震の震源断層モデル（暫定）. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic180912-index.html>
 - 10) 廣瀬 亘・川上源太郎・加瀬善洋・石丸 聡・輿水健一・小安浩理・高橋 良. 2018. 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う厚真町およびその周辺地域での斜面崩壊調査（速報）, 北海道地質研究所報告, **90**, 33-44
 - 11) 北海道. 2019. 胆振地方中東部を震源とする地震による被害状況等（第 120 報）. http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/20170701_iburichubu_jishin_higai2.pdf
 - 12) 西村 聡・渡部要一. 2018. 液状化被害（札幌市清田区・北区・東区および苫小牧港）. https://www.jiban.or.jp/?page_id=9397
 - 13) 廣瀬 亘・加瀬善洋・川上源太郎・小安浩理・ト部厚志. 2018. 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う地表変動および強震動による被害（速報）, 北海道地質研究所報告, **90**, 15-32.
 - 14) ほくでん. 2018. 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う停電関連のお知らせ. https://www.hepco.co.jp/h30_iburi_earthquake/index.html
 - 15) 気象庁. 2018. 長周期地震動に関する観測情報（試行）. https://www.data.jma.go.jp/svd/eev/data/ltpgm_explain/data/past/20180906030805/
 - 16) 司 宏俊・翠川三郎. 1999. 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式. 日本建築学会構造系論文集, **523**, 63-70.
 - 17) 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.
 - 18) 境 有紀・額額一起・神野達夫. 2002. 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案. 日本建築学会構造系論文集, **555**, 85-91.
 - 19) 日本建築学会北海道支部被害調査 WG-RC 造 SWG. 2018. 北海道胆振東部地震の建物被害に関する初動調査報告（RC 造）. http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/20180906_hokkaido/20180906_hokkaido.html
 - 20) Hatayama, K., Kanno, T. and Kudo, K. 2007. Control factors of spatial variation of long-period strong ground motions in the Yufutsu Sedimentary Basin, Hokkaido, during the Mw 8.0 2003 Tokachi-

oki, Japan, Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**, 1308-1323.

21) 中村 豊・上半文昭・井上英司. 1996. 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析 (II). JR地震情報, No. 23 d.

22) Wessel, P. and Smith, W.H.F. 1991. Free software helps map and display data. *Eos. Trans. Am. Geophys. Un.*, **72**, 441-446.

高井伸雄

[たかい のぶお]

現職 北海道大学大学院工学研究院・准教授, 博士 (工学)

略歴 北海道大学工学部卒業, 同大学院修士課程修了, 日本学術振興会特別研究員, 北海道大学大学院工学研究院助手を経て現職

研究分野 地震工学

著書 2015年ネパール・ゴルカ地震災害調査報告書 (分担) (日本建築学会), 地盤震動と強震動予測 (分担)



(日本建築学会), 東日本大震災合同調査報告 共通編1地震・地震動 (分担) (日本建築学会), 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法 (分担) (日本建築学会), 地盤震動—現象と理論— (分担) (日本建築学会)

重藤迪子

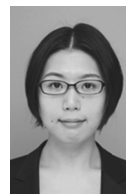
[しげふじ みちこ]

現職 九州大学大学院人間環境学研究院・助教, 博士 (工学)

略歴 北海道大学大学院工学研究院建築都市空間デザイン専攻博士課程修了, 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター非常勤研究員を経て現職

研究分野 地震工学

著書 2015年ネパール・ゴルカ地震災害調査報告書 (分担) (日本建築学会), 東日本大震災合同調査報告 共通編1地震・地震動 (分担) (日本建築学会)



地震の過剰報道？

最近の地震報道を聞いていると、やや過剰ではないかと感じることが時々ある。

本年の正月三が日も終わらんとする1月3日18時10分、熊本県北部でM5.1の浅発地震が発生し、震度6弱の揺れが和水町で観測された。緊急地震速報や震度速報は熊本県を4つに分けた地域単位で発表されるため、この地震の震源地は2016年熊本地震と同じ「熊本県熊本地方」と報道されたが、実際は福岡県境に近い県北部であり、熊本地震の震源域からは20kmほど離れていた。

しかし「また熊本で震度6」ということで、NHKはこの地震の速報を繰り返し、夜7時のニュースでは、政治・経済の問題や箱根駅伝で東海大学が初出場から46年目の優勝を果たした話題などをいっさい放送せず、この地震に関する内容の薄いほとんど同じことの繰り返しを30分間続けていた。過剰ではないかと疑問に感じたのは以下の3点である。

(1) 震度の偏重

今回、震度6弱は和水町の1点のみで、その南東に震度5弱が2点、周囲はほとんど震度4であった。阪神・淡路大震災以降、震度観測は器械化・高密度化されて大きな震度が出やすくなっている。被害との関連をみる場合、1点の極値ではなく、その拡がりが必要であろう。

この地震の規模M5.1は小地震(M3~5)と中地震(M5~7)の境目付近であり、NHKニュースを占領するほどの大事件ではなかったと思われる。地震のエネルギーはMが1違うと約30倍、2違うと1,000倍の差がある。科学的なマグニチュードよりも、人体感覚や被害に結び付く震度のほうが一般の人々に重要なことはわかるが、ことの重大さを判断するのにマグニチュードはまったく考慮されていないのではないかと懸念される。

(2) 津波の心配

最近の報道では決まり文句になっている「この地震による津波の心配はありません」が、今回も繰り返された。これを聞いて、「内陸のM5地震で津波なんかあったまるか」と反発したくなる気持ちが湧いた。

津波は、海域でM7程度以上の浅い地震が発

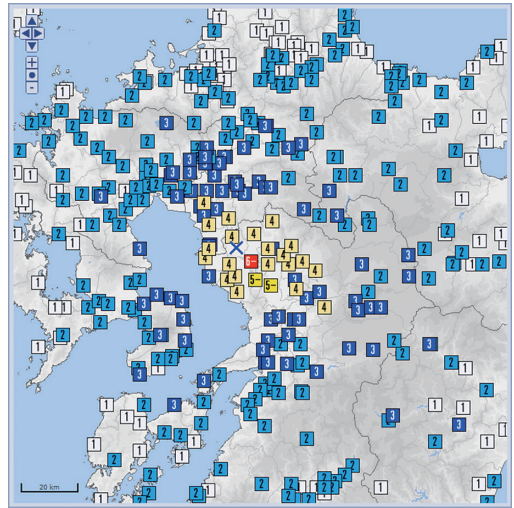


図1 2019年1月3日熊本県北部の地震(M5.1)による震度分布(気象庁による)

生して、その断層運動により海底が大きく隆起・沈降などの地殻変動を生じた際に発生する。津波に対する安心材料提供のつもりかもしれないが、「津波の心配なし」だけの繰り返しは人々の科学的リテラシー向上に役立たない。「心配なし」という結論だけではなく、そう判断した理由も付け加えてほしい。昔と異なり、現在は正確な震源の位置やマグニチュードが即座に求められる。「内陸の地震なので」、「規模が小さいので」、または「深い地震だから」などと説明すれば、地震報道は優れた学習の機会になるのではないと思う。

(3) 原発への影響

今回の地震でも官房長官がニュースに現れ、九州電力の玄海、川内、および四国電力伊方の各原発は正常に稼働しており、周辺の放射線量にも異常なしと発表していた。しかし、これらの原発が震度6弱に見舞われたわけではなく、各地の震度はいずれも2であったという。

震度2の揺れなら、全国で2018年の1年間に800回も発生している。いくら何でも、震度2程度で原発の故障を心配するのは、あまりに日本の耐震工学技術を信用していないことにならないだろうか。

(岡田義光：地震予知総合研究振興会)

建物の強震観測を用いた被災度判定技術

楠 浩一

1. はじめに

わが国は、地震・津波・火山・台風など、世界でも有数の自然災害がたくさんある国である。地震はその中でも、広域に災害を生じさせる、主要な災害である。巨大災害に対して、人命はもとより建物や構造物の被害を最小限に抑えるべく、耐震設計法や耐震技術を改善してきた。地震に対して建物を安全に設計するためには、まず、どういった建物に影響が大きいのかという地震の特徴を把握し、かつその大きさ（揺れの強さ）を適切に仮定する必要がある。そのため、まずは地震を「知る」ことを目的として、地震観測網が整備され、地震の揺れ（地震動）の記録が蓄積されてきた。本稿ではまず、地震観測の歴史を概観する。

近年、観測技術が飛躍的に進歩し、データ収集はインターネットケーブルで可能となるような通信の進歩とともに、建物の中にもセンサーが設置されるケースが増えてきた。地震の最中の建物が揺れているさまをそのまま計測できれば、建物の種類や高さに応じた建物の揺れの特徴や、建物の揺れを止める方向に作用する減衰力の大きさなどを議論することが可能となる。そういった議論は、耐震設計法や耐震技術のブレークスルーにつながり、わが国の強靱化に資すると思われる。

さらに近年、センサー自体が安価になってきていることから、1つの建物に設置するセンサーの個数も増加してきており、地震時のそれらの計測値を用いて、直接建物の被害の程度（被災度）を判断する手法の開発が精力的に行われている。この技術は「構造ヘルスマニタリング手法」と呼ばれており、本稿では1つの方法を紹介する。

2. 地震動の計測

建物が地震に対して安全であるように設計するためには、「建物の耐震性能（ R ）を評価する」ことと、設計で用いる「地震により発生する加速度や変位などの大きさ（ D ）」を規定しなければならない。そして、 R が D を上回っている必要がある。そのため、耐震工学は、「建物の性能を評価する技術」と「地震力の大きさを定義する知識」の2つの側面を改善してきた。特に後者は、地震そのものを測ってみる以外に手はない。

地震時の揺れを計測する試みは、古くから行われている。古くは、振り子の先に針を取り付け、地震により振り子が揺れるとその針が炭を塗った紙をこすってその変位を記録するものがあった。その1例として、「荻原式変位地震計」を写真1に示す。東京大学地震研究所では、この変位地震計の他にも、いくつかの古い地震計が動作するかたちで地震計博物館に保存されている。写真には、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震の際に、地震研究所で観測された揺れが示されている。

今日では一般的に、地震時の揺れを計測する際には、「加速度」を計測することが多い。これは「加速度計」と言われるもので、1933年にはアメリカのロングビーチ地震で、1940年には同じくアメリカのインペリアルバレー地震で地震時の揺れ（強震データ）が記録されている。わが国でも、1894年にミルン式地震計が開発されて以降、観測が続けられてきた。地震計の国内の設置個所は、地震発生のメカニズムの検討やより詳細な震度分布の把握を目的に、1995年兵庫県南部地震を境に急激に増加した。今日では、強震観測地点が約5,500地点、震度だけを計測する震度計設置点

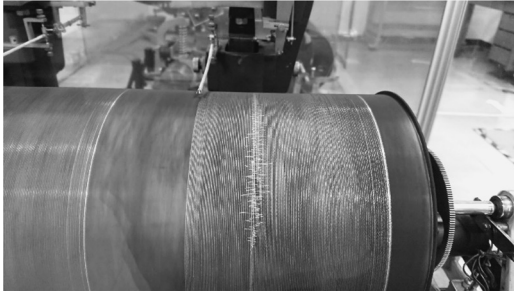


写真 1 萩原式変位地震計



写真 2 IT強震計の1例

が約 4,400 点ある。

さらに、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 型の加速度センサーの開発により、加速度センサーの価格は急激に低下し、およそすべてのスマートホンにも内蔵されるに至った。なお、スマートホンに内蔵されている加速度計は、落下時の衝撃に耐えるため、わざと感度を落としてあり、小さな揺れでは正確に計測することは難しい。また、建物など、その揺れる周期の幅が限られたものの揺れを計測し、インターネットケーブルで容易に接続でき、地震観測で一般的に用いられている地震計に比べて安価な「IT 強震計」の開発も進められている (写真 2)。この IT 強震計を用いた建物の強震観測が進められている。

3. 等価線形化法による建物の耐震性能評価

3.1 性能曲線

地震力は慣性力であり、慣性力は質量に加速度を乗じたものである。建物は竹竿のように揺れる

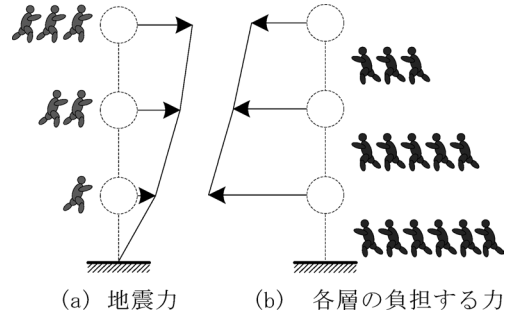


図 1 地震力と層せん断力

としなため、上層階にいくほど加速度は一般的に大きくなる。図 1 (a) は 3 階建ての建物に作用する地震力を模式的に示している。この地震力の高さ方向の分布形は、建物の重さと剛さ (剛性) によって決まる。つまり、弾性範囲であれば地震力の大きさに関係なく、各階の地震力の比率は一定となる。一方、地震力によりひび割れ等の損傷が生じて、一部で剛性が低下した場合は、その分布形が新しい剛性によって決まるため、弾性範囲での分布形から変化することになる。

一方、建物はこの地震力に耐え、安全にその力を地面に伝える必要がある。そのため、図 1 (b) のように、各層に作用している地震力だけではなく、さらに上層の地震力も負担しなければならない。つまり、下層にいくほど、強い耐力が必要となる。

建物全体をコンピュータの中にモデル化し、図 1 (a) に示したような地震力の分布に従って各階に地震力を作用させ (図 2)、その地震力の大きさを一方向に徐々に大きくしていく解析を「静的荷重増分解析」と呼ぶ。この解析を行うと、図 3 に示すような各層の「層せん断力 (図 1 (b) に相当する)」と「層間変形量」の関係を得ることができる。この解析は、いずれかの部材が所要の性能をもちや発揮できない (通常は鉛直荷重を支持できない) 状態に至るまで解析する。この状態に至る時点各部材の「安全限界点」と呼ぶ。

この層せん断力-層間変形量関係は、水平各方向で階数分だけ計算できる。建物の耐震性能を評価するために、まず建物を図 4 に示すように等価

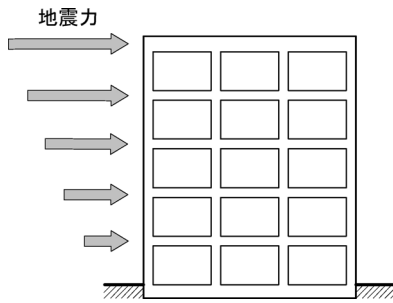


図 2 建物に作用する地震力

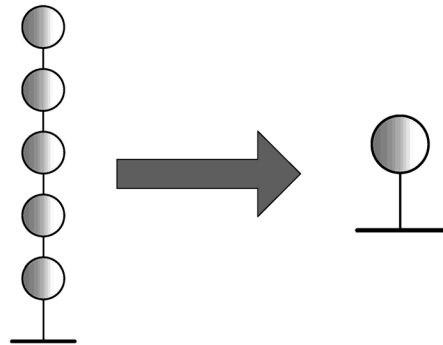


図 4 1自由度系への縮約

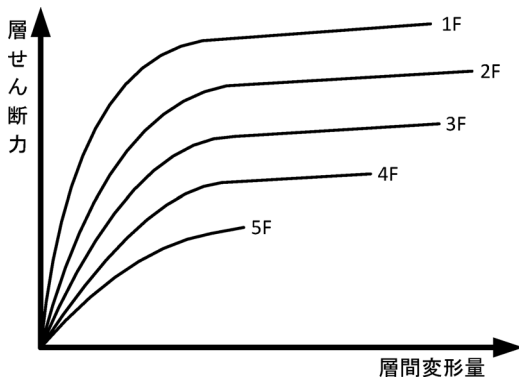


図 3 層せん断力-層間変形量関係

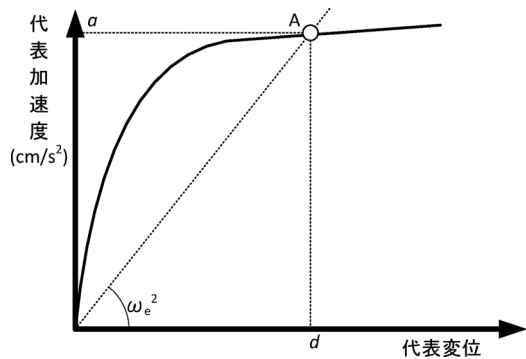


図 5 等価1自由度系での代表加速度-代表変位関係 (性能曲線)

な1自由度系に縮約する。これにより、図3に示した各層の非線形関係は、図5に示すような1つの水平力-変形関係に置き換えることができる。ここで、水平力は図3の1層のせん断力を重量(正確には1次モードの等価質量)で割ったもので、単位を加速度の単位に変換している。また代表変位とは、等価線形化の考え方をを用いて、図1(a)に示した建物の揺れ方から決まる。建物全体が、あるいはその部分が安全に自重を支えられず、人命を損なう恐れのある状態に達する点を建物の「安全限界点」と呼ぶ。これは通常、いずれかの部材が安全限界点に到達した状態として定義される。図5を得るための元となる図3がそもそも、部材の安全限界点までしか計算を行っていないため、図5の最終点は建物全体の安全限界点となる。つまり、建物は安全限界点以上の変形を強制すると倒壊・崩壊する危険性が高いことになる。

図5は建物の非線形領域での耐震性能を1自由度系で表したものであるため、性能曲線と呼ばれ

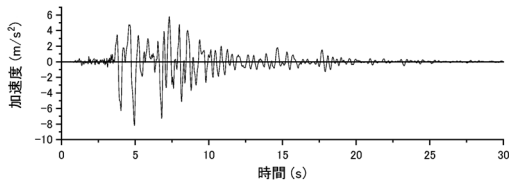
る。図のA点での傾き a/d は、応答加速度 a と応答変位 d の間に式(1)に示す関係があることから、 ω_e^2 が性能曲線上の各点での傾き(等価剛性と呼ばれる)となる。ここで、 ω_e は角振動数と言われ、式(2)のように、等価な周期 T_e の関数となっている。つまり、傾きは周期に依存しているとも言える。

$$a = \omega_e^2 \cdot d \quad (1)$$

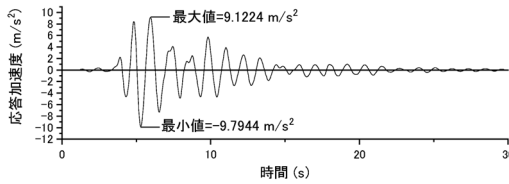
$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} \quad (2)$$

3.2 要求曲線

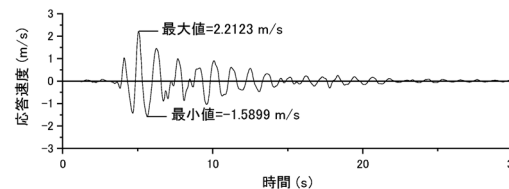
建物が弾性であるとき、図4の右図のような等価な1自由度系を考えると、この質点は弾性周期 T を持つこととなる。ある地震動が観測されたとき、この周期 T を持つ建物の時々刻々の応答



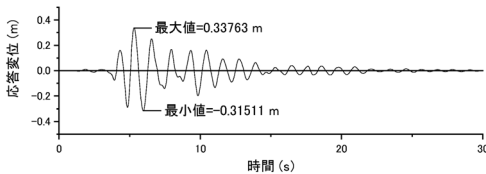
(a) 観測地震波 (JMA 神戸波の南北成分)



(b) 計算された応答加速度時刻歴



(c) 計算された応答速度時刻歴



(d) 計算された応答変位時刻歴

図 6 観測地震波と弾性応答計算結果

値 (時刻歴) は、動的応答解析という手法を用いて、逐一計算することができる。たとえば、図 6 (a) に示す平成 7 年兵庫県南部地震の際に、神戸海洋気象台で観測された地震波 (JMA 神戸波) の南北成分に対して、建物の弾性周期が 1.17 秒の場合の絶対加速度・速度・変位の時刻歴をそれぞれ図 6 (b)~(d) に示す。なお、建物の揺れが自然に減衰していく減衰効果を表す係数 (減衰定数) をここでは一般的に用いられる 0.05 (5%) と仮定している。実際の設計では、地震に対する建物の応答の最大値が重要となるため、加速度・速度・変位の最大値を抽出する。なお、ここで正方向というのは設置時にかりに決めたものであり、符号自体には意味がないため、絶対値の最大

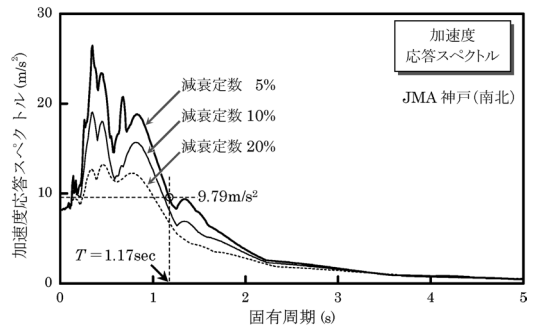


図 7 加速度応答スペクトル

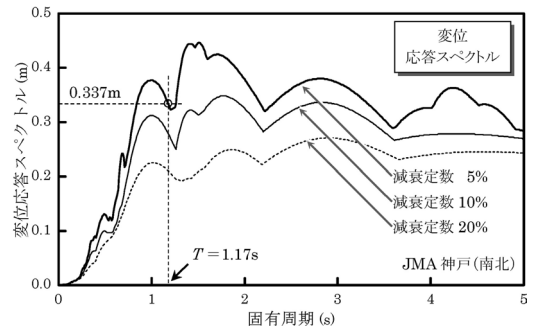


図 8 変位応答スペクトル

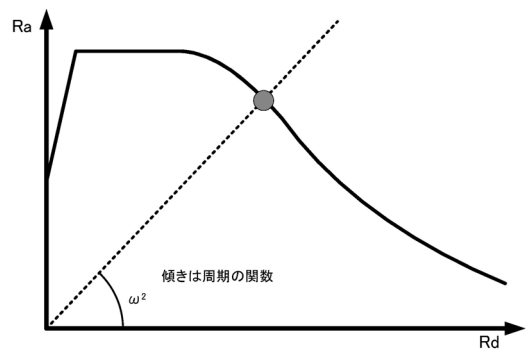


図 9 要求曲線

値をとる。たとえば、(b) 応答加速度では最大値は 9.7944 m/s² となる。これら最大値は、周期を微妙に変えるとその値が異なる。そこで、周期を少しずつ変化させて、それぞれの周期に対する最大値をプロットしたものを「応答スペクトル」と呼ぶ。このようにして求めた加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルをそれぞれ図 7 および図 8 に示す。図中には、減衰定数として 5% の他

に10%および20%の計算結果も併せて示している。減衰定数が大きくなると、応答値も小さくなる事が分かる。

さて、図7や図8に示した応答スペクトルは、各周期で地震動が建物に発生させる応答値の最大値を示している。これらの図の横軸は周期だが、式(1)を考慮して、加速度応答スペクトルの縦軸の値(Ra)はそのままとして、横軸を周期から変位応答スペクトルの縦軸の値(Rd)に変えると、各点の傾きは周期に対応する各振動数 ω に対して、 ω^2 となる。この関係は、図5に示した性能曲線と同じになる。この $Ra-Rd$ 曲線を要求曲線と呼ぶ。図9に要求曲線の模式図を示す。

3.3 耐震性能の評価

性能曲線と要求曲線を重ねたものが図10になる。どちらの曲線上の点も、原点と結んだ線(割線)の傾きは、その点での等価角振動数の2乗となる。つまり、同じ割線上の点は同じ周期をもつ質点の応答ということになる。両曲線の交点が、要求曲線に対する建物の応答点、つまり最大の代表加速度と代表変位の組み合わせとなる。図10に示す性能曲線上の第二折れ点(A)を過ぎると、鉄筋の降伏などの損傷により建物の剛性は大きく低下している。この損傷により、建物は地震のエネルギーを消費してくれることとなり、この消費により建物の揺れを止める減衰効果が大きくなる。図7や図8に示したように減衰定数が大きくなると応答が小さくなるため、結果的に要求曲線は小さくなる。つまり、図10中の曲線1(弾性

状態)から、性能曲線上の応答点が(A)点より大きくなるにしたがって、曲線2に示すように、曲線1を低減できることになる。よって、性能曲線と曲線2の交点(図中の(C))が、この要求曲線を規定している地震力に対する建物の応答点となる。この応答点(C)が、建物の安全限界点(図中の(D)点)より手前にあれば安全、超えていると危険と判断する。この判断方法は「等価線形化法を用いた耐震性能評価法」と呼ばれている。耐震設計では(C)点が所要の余裕をもって、(D)点を下回るように建物の各部材の配筋・寸法を決定する。

4. 加速度計を用いた地震後の建物の損傷評価

建物に加速度計を配置して、図1(a)に示した地震時の各階の応答加速度を計測することができた場合、建物の各層の重量が分かれば設計や図2に示す解析で用いていた地震力の鉛直方向の分布形を仮定する必要なく、性能曲線を得ることができる。性能曲線の縦軸が「代表加速度」であり、せん断力を重量で割った値になっているため、各層の重量の絶対値が必要なわけではなく、その比率が分かれば十分である。一般的に、建物の各階の用途が同じであれば、その比率は床面積の比率で代用もできるだろう。

もし発生した地震が非常に大きく、建物には損傷が生じ、応答が非線形領域に入った場合、各階

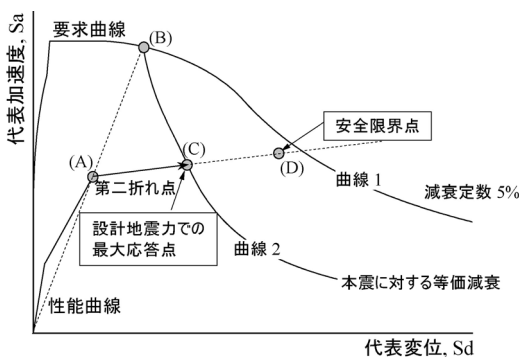


図10 性能曲線と要求曲線の比較

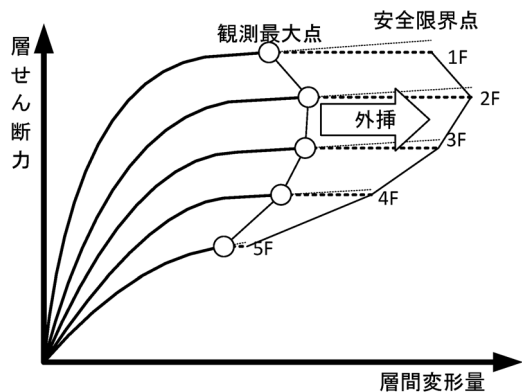


図11 実測した層せん断力-層間変形量関係

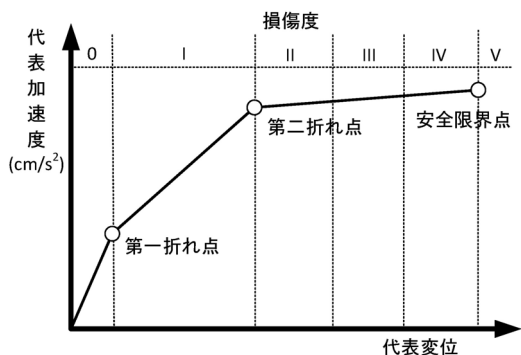


図 12 性能曲線と損傷度の分類

表 1 損傷度と構造の状態

損傷度	状態
0	目立ったひび割れも発生しておらず、ほぼ健全な状態
I	ひび割れは発生しているが大部分はまだ降伏には至っていない状態
II	降伏状態に至ったが、その塑性変形はまだ大きくない状態
III	II と IV の間
IV	安全限界点の近くまで塑性変形している状態
V	安全限界点を越えた状態

の加速度記録が取れていれば、図 2 に示したような荷重増分解析を用いる必要もなく、図 3 に示した、各層の層せん断力-層間変形量関係も実観測から得ることができる。ただし、図 3 のような曲線は、建物が倒壊しない限り、安全限界点までではなく、図 11 に示すようにその途中までの記録となる。そこで、観測最大点での層せん断力を保持したまま、外挿により安全限界点を求めると、図 10 と同じように等価線形化法を用いることができる。要求曲線についても、建物基部に設置した加速度計で実際に計測した加速度記録を用いて計算すると、実地震動の要求曲線を算出することができる。実際には、図 10 上の (C) 点は等価線形化法を使うまでもなく、図 11 に示したように実測によりすでに求まっている。

安全限界点までの性能曲線上の各点の損傷度を図 12 に示すように 0~V までに分類すると、計

測値から求めた観測最大点での代表変位の大きさと安全限界点との関係から、建物の本震時の損傷度を分類することができる。表 1 に、比較の変形性能に富む建物の場合の損傷度と想定される構造の状態を示す。これらはおおよそ、「無被害」、「軽微」、「小破」、「中破」、「大破」、「倒壊」に対応すると考えることもできる。

本震での損傷度を判定することは余震などによる二次被害を避けるために重要である。現在は技術者の目視により、柱や壁に残されたひび割れの幅を計測するなどして、損傷度を 1 棟 1 棟分類している。この方法だと判定に時間がかかり、かつ判定結果が技術者の経験によってばらつく可能性が高い。さらに、ひび割れなど地震後に残された痕跡のみから判定するため、玉虫色の「要注意」の判定が多くなりがちである。また、今日の超高層集合住宅などでは、構造体のほとんどは仕上げ材でおおわれているため、そもそも目視によるひび割れの観察自体が困難である。

そこでより直接的に余震に対する安全性を評価する方法としては、可能性のある最大余震を設定し、それに対しても等価線形化法を用いて最大余震での応答点を予測する方法が考えられる。ここでは 1 つの指標として最大余震は本震と同一、言い換えれば「もう一度本震が起こったら建物の損傷度はいくらになるか」を予測することを考えよう。本震と最大余震を区別せず、本震~最大余震を 1 つの非常に継続時間の長い（非常に長い無振動期間が間にある）地震と考える。そうすると、「本震+最大余震」を併せて図 10 に示すような等価線形化法が使えることとなる。

まずは、3.2 節に示した要求曲線を考える。要求曲線のもとなる加速度応答スペクトル、変位応答スペクトルはともに弾性解析における最大値をプロットしたものである。弾性解析では、本震と最大余震の間に十分な無振動期間を設けた場合、何度本震での地震動を連続して入力しても、最大応答値は変わらない。つまり、本震と最大余震をセットで考えても、弾性状態での要求曲線（減衰定数 5%）は、本震と変わらないこととなる。つまり、本震で観測された弾性状態での要求

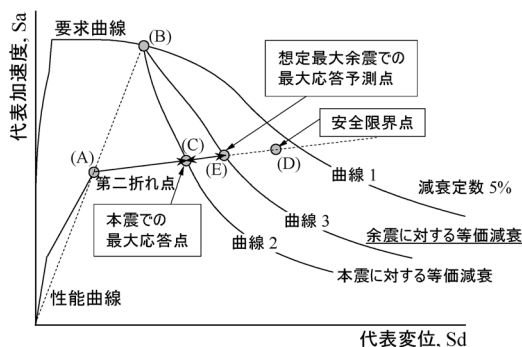


図 13 性能曲線と要求曲線（最大余震も含めて）の比較

曲線は、そのまま「本震+最大余震」でも使えることとなる。

一方の建物の性能曲線は、建物の性能を表すもので建物固有であり、地震動には拠らない。「本震+最大余震」では、そのぶん建物の応答時間は長くなり、繰り返し建物がゆすられる回数が増える。しかし、特に鉄筋コンクリートや木造のように変形で壊れる構造では、その繰り返し回数が安全限界点に与える影響はきわめて限定的であることが既往の研究で知られている。つまり、「本震+最大余震」でも同じ性能曲線が使えるわけである。

しかし、同じ大きな地震動が2回、建物を襲うと、建物の損傷は増えることが容易に予測できる。これは、たとえ要求曲線としては「本震だけ」の場合と「本震+最大余震」の場合で同じでも、建物に入力する地震のエネルギーはおよそ2倍になるためと考えることができる。変形が大きくなるということは、図10で示した曲線1からの低減が曲線2に比べて、小さくならないことを表している。つまり、「本震+最大余震」における等価減衰が、「本震だけ」の等価減衰よりも小さくなる。どの程度等価減衰が小さくなるかを、著者らは40,000を超えるケースに対して非線形地震応答解析を実施して検討した。その結果、「本震だけ」の場合のおよそ4割程度に等価減衰定数が低下することが分かった。

この知見を用いると、図13のように、図10に新たに最大余震に対する要求曲線である曲線3が

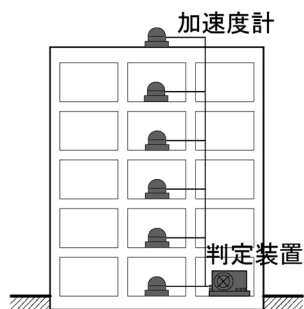


図 14 本システムの設置例

描ける。この曲線3と性能曲線の交点(E)が最大余震での最大応答予測点となる。(E)点が予測できれば、同じく図12を用いて、最大余震で予測される損傷度を求めることができる。また、(E)点(D)点と一致するように要求曲線を拡張することにより、本震に比べて何%の大きさの余震まで倒壊しない((D)点に到達しない)かを計算することができる。つまり、「本震の○○%の大きさの地震まで倒壊には至らない」と予測することも原理的には可能になる。

この被災度を判定するシステムの設置例を図14に示す。本例では、各層に1台ずつ設置しているが、直線補完により精度よく加速度を求めることができれば、いくつかの層の加速度計は線形補完で代用することも可能である。このシステムは、あらかじめ建物をコンピュータ内にモデル化するなどの作業は必要としない。基本的には、各センサーが代表する建物部分の重量と、安全限界変形に関する情報を用意するだけである。重量に関しては、先にも述べたとおり、絶対値は必要なく、その比率でよいので床面積等から推定が可能である。

5. 実観測例

2018年現在、日本全国で25棟の建物にこのシステムが導入されており、24時間観測を行っている。図15に示すように、それらの建物は関東、東海、中国・九州地方にわたっており、建物も木造・鉄骨造・鉄筋コンクリート造と主要な構造種

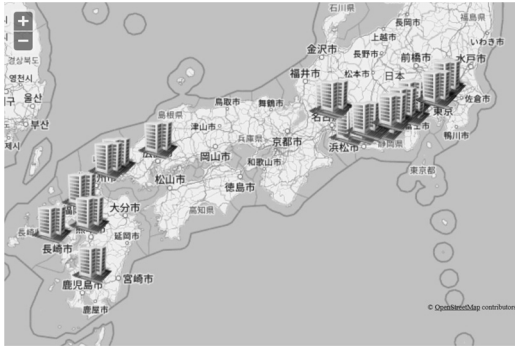


図 15 本システムの国内設置状況



写真 3 横浜国立大学建築学棟

別をすべて含んでいる。高さは、2階建てから28階建てまでである。ここでは、1つの建物の実測例と、1つの大型振動台実験結果について紹介する。

5.1 横浜国立大学建築学棟

横浜国立大学建築学棟は、高さ30.8mの鉄骨鉄筋コンクリート構造で、地上8階建てで、地下が1階ある。すでに耐震補強されており、2008年より観測が続けられている。2011年東北地方太平洋沖地震での観測結果をここでは紹介する。

建物は地下1階を有するが、周辺はほとんど土に接していないため、ここでは9階建てとして取り扱う。建物の基部および頂部で観測された加速度の波形を図16に東西・南北方向ごとに示す。頂部の加速度は基部に比べて4~5倍程度に増幅していることが分かる。最上階では地震により本棚から本が散乱した。

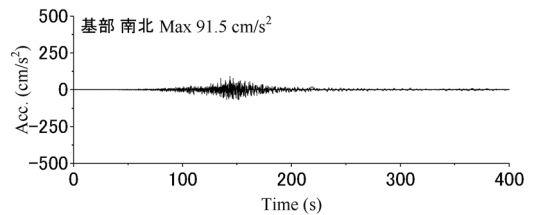
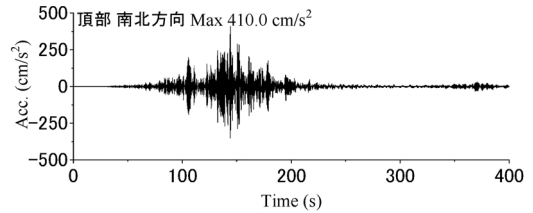
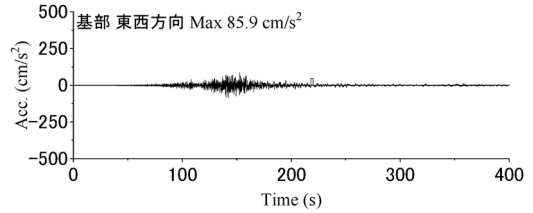
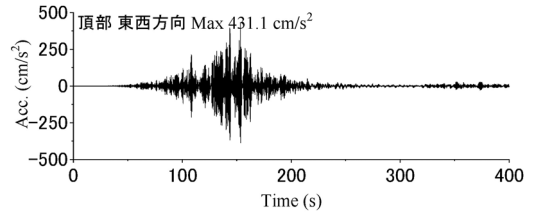


図 16 観測された加速度

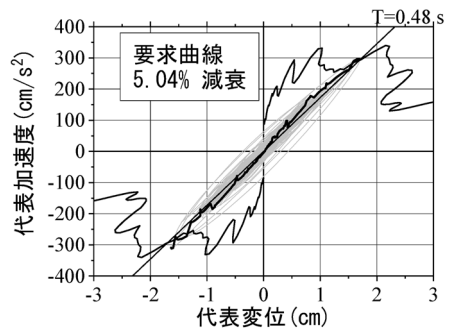


図 17 算出された性能曲線と要求曲線

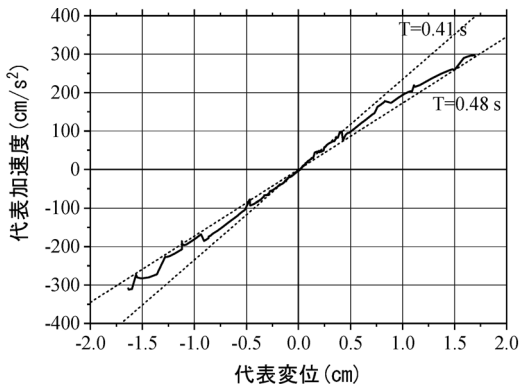


図 18 性能曲線の骨格曲線

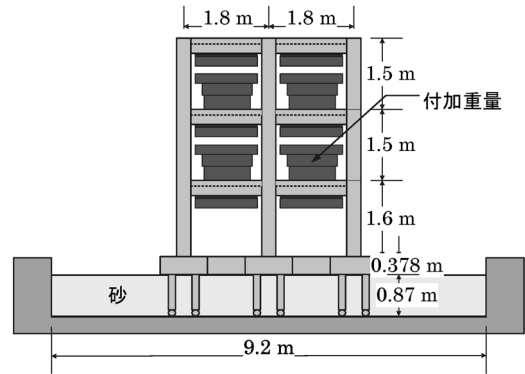


図 20 試験体

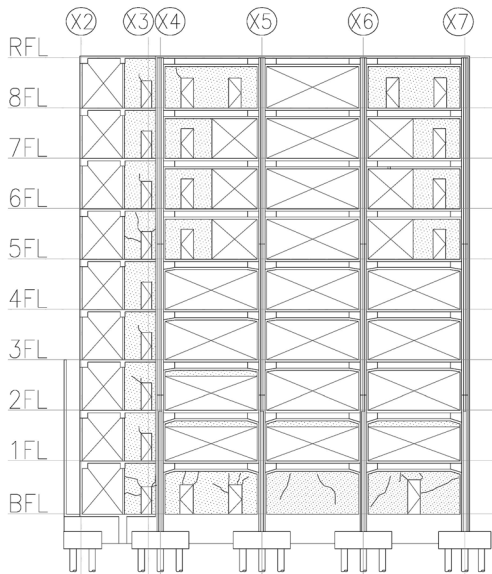


図 19 建築学棟のひび割れ状況

地震時に計測された各階の加速度を用いて、性能曲線と要求曲線を計算した結果を図 17 に示す。減衰定数を 5.04% としたときの要求曲線が性能曲線の最大点とほぼ一致した。最大応答点での等価な周期は 0.48 秒であった。性能曲線は少し紡錘形を描いている。性能曲線の骨格曲線が太線で示されている。

この骨格曲線のみを図 18 に示す。初期の変形が小さい間はおよそ等価周期で 0.41 秒だったが、 $\pm 100 \text{ cm/s}^2$ 程度の加速度を境に性能曲線の傾きが低下していることが分かる。この地震以前の小

表 2 各地震の大きさでの試験体の状況

地震の大きさ	台上最大加速度 (cm/s^2)	最大変形角 (上部構造)	最大変形角 (杭基礎)
100%	180	1/1,310 (1F)	1/160
200%	410	1/700 (1F)	1/33
300%	680	1/570 (2F)	1/7

さな地震で計算した性能曲線の傾きは、いつも等価周期でほぼ 0.41 秒だった。

しかし、図 18 をみるとまだ大きな剛性低下は生じておらず、図 12 で示した損傷度の定義からすると、損傷度 I であると判断できる。地震後に建物のひび割れ状況を確認した結果を図 19 に示す。最下層の耐震壁と各層の階段室廻りの開口隅角部に軽微なひび割れが観察されたのみであった。このことから、損傷度の評価結果は適切であったと言える。

5.2 杭基礎を有する 3 階建て縮小建物の大型振動台実験

実観測ではまだ、倒壊に至るまでの大きな被害は計測されていない。そこで、世界でいちばん大きな振動台である、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの E-Defense を用いて、3 階建て鉄筋コンクリート (RC) 造建物の振動台実験を行い、倒壊に至るまでの破壊を再現し、モニタリング手法の性能を検証した。試験体は、図 20 に示すように、加振方向は 2 スパンで、奥行き方

向は1スパンである。実際の建物の状況をできるだけ模擬するため、建物脚部には杭基礎を配して、RC造のボックスの中に砂を敷き詰めた。スケールはおよそ1/2で、その影響を緩和するために付加重量を載せている。

試験体に加える地震動は、表2に示すとおり、3度入力した。作成した地震動は、寸法効果から実寸では100%での入力が設計用地震力の半分となり、200%入力が設計用地震力の大きさとなる。表が示すとおり上部構造の最大変形角は300%入力でも1/570ときわめて小さく、ほとんど損傷を受けず、杭基礎部分に損傷が集中したことがわか

る。100%入力では杭基礎に若干のひび割れが生じ、200%入力では杭の中の鉄筋が降伏した。杭基礎部分の最大変形角は、1/33にも達している。しかし、加振後の目視による調査では、建物の沈下や傾斜、さらに周辺地盤の目立った損傷も確認することはできなかった。その後、300%入力では、杭頭のひとつが破壊し、試験体が傾斜して防護架台に着座した。防護架台がなければ倒壊していたと思われる。

試験体の被災度評価では、杭基礎があるため、杭基礎の先端を脚部とし、杭基礎部分を1階と考え、全体で4階建てとして評価をした。図21に200%入力でのシステムが計算した性能曲線と、その骨格曲線を示す。安全限界点は、杭基礎部分の予備試験結果から、杭基礎部分の変形角で1/37とした。図に示すとおり、判定の結果、200%入力では損傷度III（中破）、そしてもう一度200%の地震動を入力すると損傷度V（倒壊）と予測した。実験スケジュールの都合上、再度200%を入力することはできなかったが、300%入力ではたしかに倒壊した。

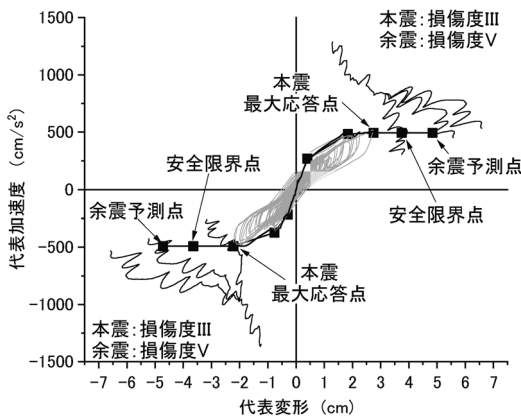


図 21 性能曲線と要求曲線

6. おわりに

地震の揺れを測るセンサーの低価格化・高精度

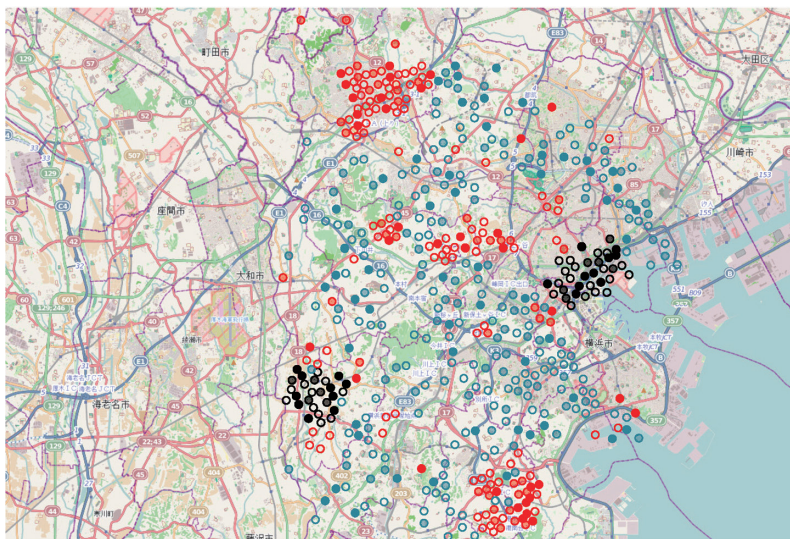


図 22 都市の被害把握のイメージ（横浜市）

化に伴い、一般建物の強震観測も可能な時代がきた。IoT 技術を用いれば、さらに設置自体を省力化できると考えられる。本稿では、建物の強震観測の活用方法として、建物の被災度判定方法を紹介した。この技術が普及すると、図 22 にそのイメージを示すように、建物の被災状況を都市レベルで把握することができ、災害対応に大いに資することができる。

また、建物基部の加速度計から求めた震度相当値を整理することにより、より細かい点で震度を計測することができるようになる。さらに、建物の強震観測データは、いろいろな構造種別・構造形式のほんとうの振動に関する知見を提供してくれることとなり、今後のわが国の耐震設計法の改正に大いに資すると思われる。そのためにも、観測データの学術利用を妨げない仕組みの確立も併せて望まれる。

謝辞

本稿で示した振動台実験は、平成 28 年度文部科学省委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト②都市機能の維持・回復のための調査・研究」の一部として実施されました。関係各位に謝意を示します。

楠 浩一

[くすのき こういち]

現職 東京大学地震研究所教授、博士（工学）

略歴 1997 年東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程修了。東京大学生産技術研究所助手、建設省建築研究所研究員、同主任研究員、横浜国立大学大学院工学研究院助教授、東京大学地震研究所准教授を経て、2018 年より現職

研究分野 耐震工学、地震工学、建築構造



熊本地震被災住民における健康と生活について

—被災地での調査から—

古本尚樹

1. 緒 言

2016年4月14日、4月16日の2回に最大震度7の地震が熊本県で発生した。国内で震度7の地震が発生したのは2011年の東日本大震災以来である。震度7の観測事例は九州で初めてのことであり、また、一連の地震活動において震度7が2回観測されるのは、1996年に現在の気象庁震度階級が制定されて以来初めてのことであった。

これまで発生した大規模地震では、発災後長期にわたる復興期において、被災者の健康、さらには孤独死と称される生命への危惧が問題視されてきた。生活手段を失った被災者は避難所や仮設住宅等へ移動するわけだが、その過程で孤独死に代表されるような、コミュニティや環境に関する影響が示唆されている¹⁾。被害規模の大きい地震ほど被災者が生活再建するのに年数がかかるが、昨今、避難の過程で居住する場所は、たとえばプレハブの仮設住宅のほか、みなし仮設住宅と称される民間賃貸住宅や、損壊した状態でも自宅に残る在宅避難など、多様な避難の形がみられる。特に熊本地震では、屋外での避難者が多かったり、自動車内での避難生活などもあり、その傾向は顕著だったと言えるだろう。それぞれの避難場所での課題も指摘されており²⁾、コミュニティや家族関係の変化、またみなし仮設住宅等の質の問題などによる被災者の健康、寿命への影響があげられている。

災害によるもっとも直接的な被害としては、地域医療への影響、すなわち、地域の医療機関の被災、医療や保健、福祉等各種サービスへのアクセス面における道路や鉄道などインフラストラク

チャ回復の遅れなども当然影響している。その一方、長期的な影響として、コミュニティなどいわゆるソーシャル・キャピタルとの関係で、災害後間接的に健康に及ぼす影響も少なくない。特に自力で再建しにくい低所得者層や高齢者層においては、本来の社会的サポートが特に介護的な要素を含めて必要であるし、地域組織への参加なども精神的な要素から重要となる。ただ、こうした必要な社会との関わりについては、災害発生にかかわらず、格差が存在する³⁾。災害を契機にして、この格差がさらに拡大するものと考えられる。

熊本地震においては復興の過渡期にあり、こうした中で、災害後1年を経て「熊本地震後の健康と生活に関する調査」を被災自治体との協力で行った。被災者が実際にどのような環境の中で、どのような意向を有しているのか、また健康への意識、コミュニティとの関係等ソーシャル・キャピタルに関する内容で調査することにより、今後の大規模災害後の災害医療における中長期的視野での被災者の健康・ケア問題を考える一助とした。

2. 調査の概要

日 時：2017年4月13、14、17～22日の計8日間。時間は午前9時から午後5時
場 所：熊本県西原村役場二階大会議室
対 象 者：西原村村民（村外への避難者を含む）
調査方法：面接式質問票による調査
有効回答者数：212人
調査題目：熊本地震後の健康と生活に関する調査
調査票の主な質問事項：

表 1 前震・本震発生時にいた場所

	本震時					その他	総計
	自宅	避難所 (自動車内)	避難所 (施設内)	医療機関・ 病院内	介護 施設内		
前震時							
自宅	166	5	3	1		8	183
自宅外 (自動車内)	5		1			1	7
自宅外 (施設外)	6	1				3	10
介護施設内					1		1
その他	6	1				4	11
総計	183	7	4	1	1	16	212

- ・前震・本震発生時にいた場所
- ・避難時の状況
- ・西原村の支援について
- ・健康の変化
- ・症状と通院・投薬の状況
- ・不安要素について
- ・近所の協力やボランティアについて等

※西原村の主な被害について

- ・2016年4月14日21時26分に震度6弱、同年4月16日に震度7
- ・死者（関連死の疑いを含む）5人、重軽傷者149人、住家全壊505、半壊776、一部破損1,549（2016年7月21日時点⁴⁾）
- ・現在、仮設住宅302戸に296世帯、829人が入居。いわゆるみなし仮設住宅には179世帯、516人が入居⁵⁾

3. 調査結果

調査対象の基本的な属性については、男性が114人、女性が95人、無回答が3人であった。年齢構成は60～69歳が76人で最も多く、50～59歳が48人、70～79歳が34人となっている。

各世帯の同居人数は2人と回答したのが81人で最も多いが、8人以上の世帯と回答したのも2人いた。村での居住歴は20年以上の人が136人いた。ほとんどの調査対象者に要支援・要介護度

の認定がない（202人）、いわば健康な人が多い。

以下に、いくつかの質問事項に対する回答の結果を示す。

○前震・本震発生時にいた場所

おおむね、前震と本震時ともに自宅にいた人が多かった（表1）。

○被害や避難の状況

有効回答者の全員が家屋に損傷があり、認定を受けている。なかでも半数近く（97人）が全壊になっている。

避難場所は指定避難所（屋内）が62人と多かったが、車中泊が指定外・指定を含めると合わせて85人で、それより多い。現在は、修復した自宅

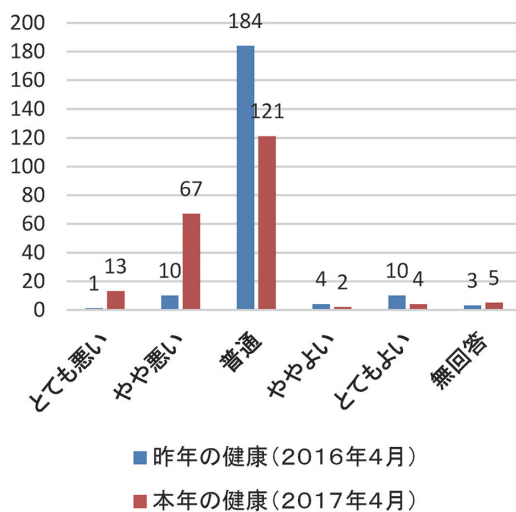


図 1 健康状況の変化

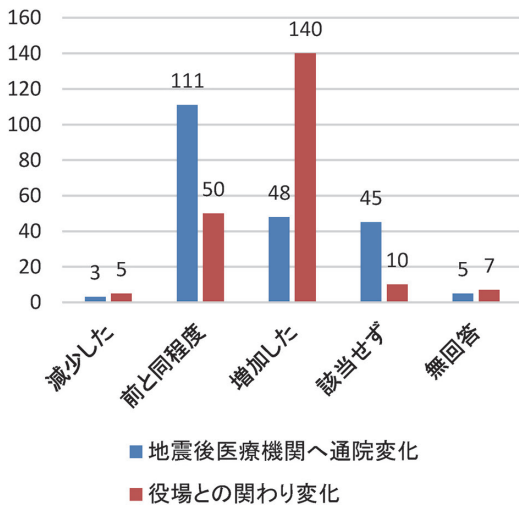


図 2 地震後の医療機関や役場との関わりの変化

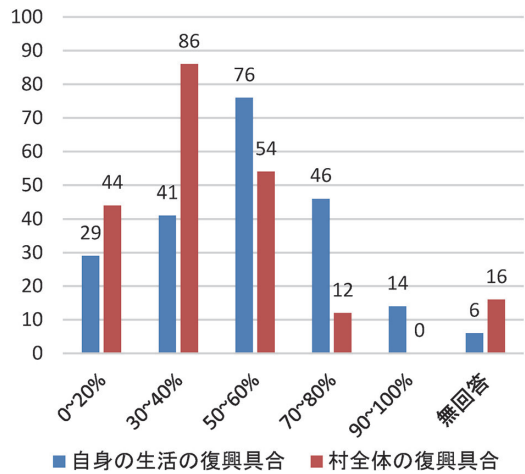


図 4 住民自身・村全体の復興具合についての意識

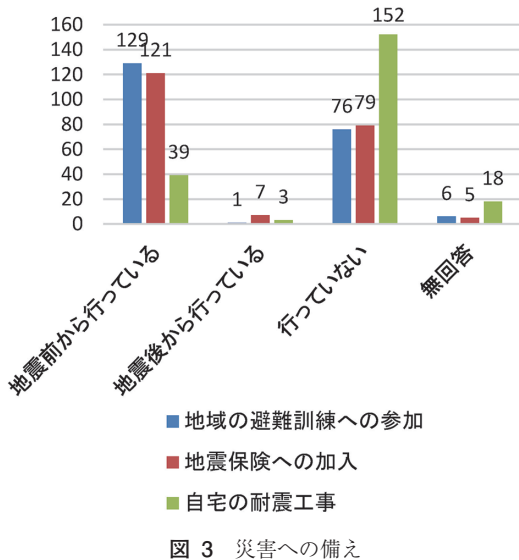


図 3 災害への備え

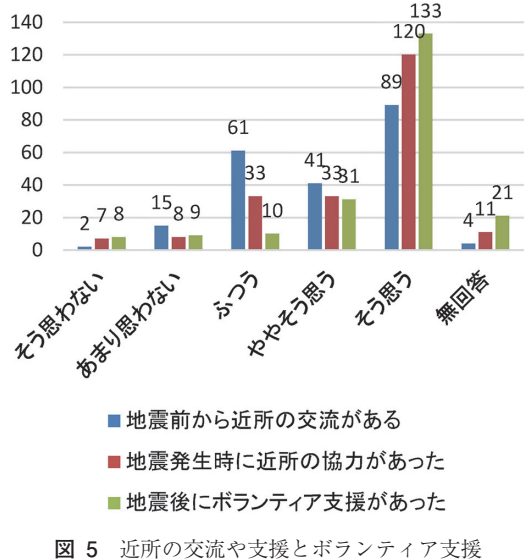


図 5 近所の交流や支援とボランティア支援

に住んでいる人が多く（92人）、ついで応急仮設住宅（68人）、いわゆるみなし仮設住宅（41人）となっている。

自宅外での避難生活期間は約2週間が最も多い（52人）が、ついで約3カ月（48人）となっていて、避難生活期間に長短の差がみられる。

○地震前と調査時の健康状況の変化

昨年「普通」と感じていた人が調査時には約3割減少し、「やや悪い」「とても悪い」の категорияが増加している（図1）。

○地震後の医療機関や役場との関わり

医療機関への通院は「前と同程度」や「増加した」が多く、役場へは各種手続きの関係等でかなり関わりが増加している（図2）。

○避難生活中的健康状態

避難生活中的「不眠」が73人と最も多く、ついで「腰痛・疼痛」が32人と多かった。また、通院や投薬等については、通院や市販薬の利用をしていない人が多かったが（112人）、医療機関へ「通院」している人も約3割いた（67人）。

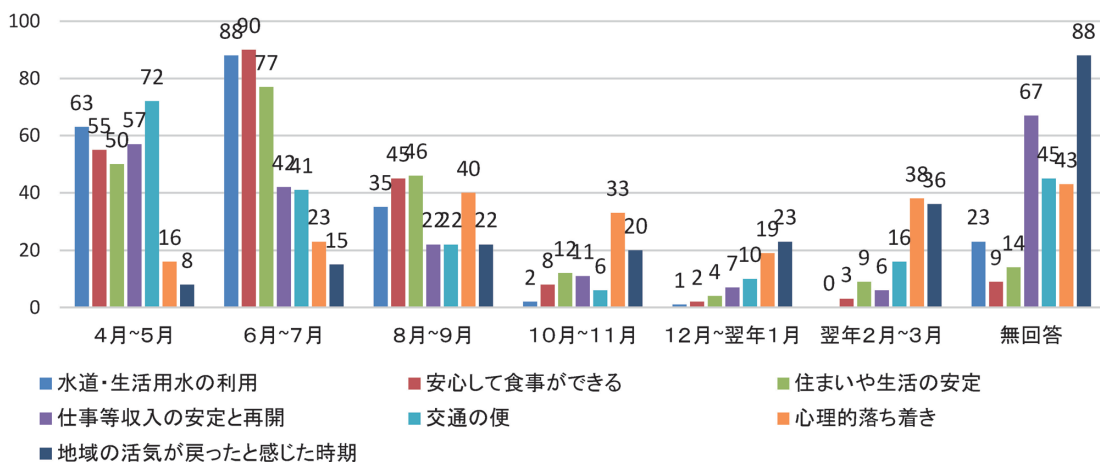


図 6 ある程度の立ち直り・落ち着きを感じた時期

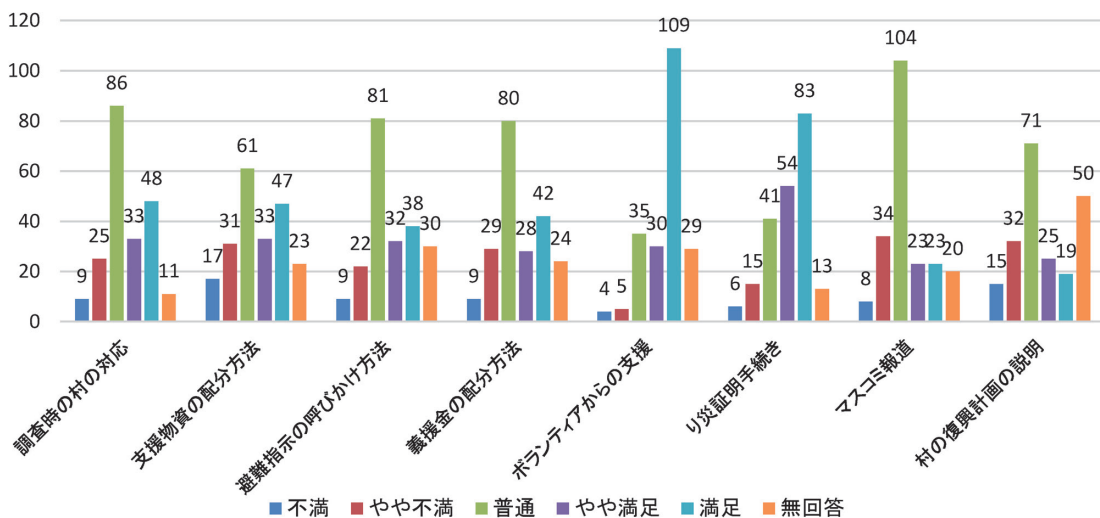


図 7 村の対応や支援、報道等についての満足度

○ 災害に対する普段の備え

全体の約 6 割の人が地域の避難訓練を行った
り、地震保険に加入していた。一方、自宅の耐震
工事は行っていない人が 7 割を超えていた (図 3)。

○ 復興具合への意識

住民自身の復興具合が 50% 以上に度数が多
いに対し、村全体では 30~40% に度数が多か
った (図 4)。

○ 地震前の近所との交流、地震発生時の近所の協
力、地震後のボランティア支援

各項目での交流や支援で「そう思う」を選択し

ている人が多いが、特に地震後のボランティアへ
の好意的意見が多かった (図 5)。

○ ある程度の立ち直り・落ち着きを感じた時期

水道や住まい、食事等への安定は地震後数カ月
でかなりの被災者を取り戻している。一方、収入
の安定や交通の便、心理的落ち着き、地域の活気
については調査時点で無回答が多く、いまだその
回復が遅れていると感じている住民が多い。特に
地域の活気についての復興は地震後 1 年後ではあ
まり意識されていない (無回答が多い) (図 6)。

○ 村の対応や支援、報道等についての満足度

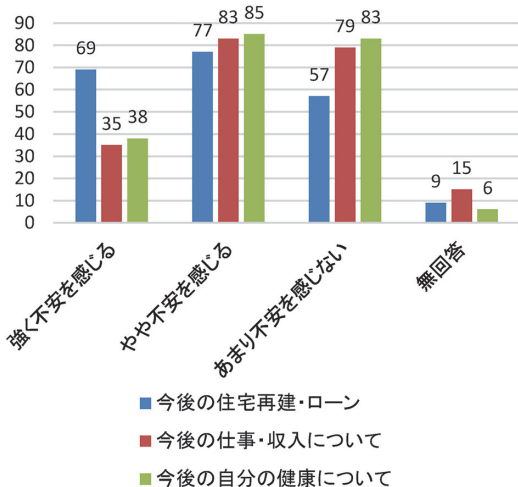


図8 住宅再建やローン，今後の仕事や健康

図7のとおりであった。

- 住宅再建・ローン，今後の収入，今後の健康
特に今後の住宅の再建やローンに関して強い不安を感じている人が約3割いる。この質問の各項目では「やや不安を感じる」カテゴリーに度数が多かった（図8）。
- 地震発生後に避難の呼びかけがあった人・組織
消防団や近所の人への呼びかけを認識している人が多かった（図9）。

4. 考 察

調査時点における被災者の健康状況と各項目との関連性を把握するため、 χ^2 検定^{6,7)}に基づく分析を行った。

- 被災直後の主な生活場所との関連
 χ^2 検定では、有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。
- 調査当時の住まいとの関連
同様に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。
- 自宅外での避難生活期間との関連
 χ^2 検定では、有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。
- 通院の程度との関連
 χ^2 検定では、有意差が認められた ($p < 0.05$)。通院の程度は増加傾向で、健康への意識では「や

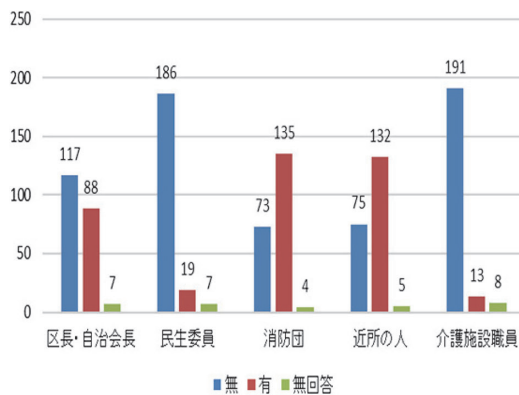


図9 地震発生後に避難の呼びかけがあった人・組織

や悪い」が度数として増えている中で、医療機関への通院の増減は調査時の健康に関連があるとされる。

- 役場との関わりの増減との関連
 χ^2 検定では有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。
- 避難生活中的の症状との関連
 χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。避難生活中に「不眠」を中心として、症状が出る出ない、症状の違いは調査時の健康と関連があるとされる。そこで、いかに避難生活中に軽症であっても罹患しないような対策が重要と考えられる。
- 医療機関への通院，市販薬等投薬の利用の有無との関連
 χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。医療機関や投薬の有無が調査時の健康と関連があると考えられる。特に医療機関への通院有・通院無で市販薬等も各階層と調査時の健康に関してそれぞれ有意差が認められる ($p < 0.05$) ことから、医療機関への通院とまったくのケアなしには、調査時の健康と関係があるとされる。そのため、疾病対策が可能な災害後の生活ができるかは、その後の健康に影響があると考えられる。
- 避難訓練の参加，地震保険の加入状況との関連
 χ^2 検定で有意差が認められた ($p < 0.05$)。避難訓練に参加の有無は、その後の健康に関連があると言える。非常時の危機管理対応を学んでいることへの安心と関連して、防災意識の高さに裏付け

られる災害時での対応は、メンタル面を含めて避難生活中的健康を維持できるかに関連があるといえるだろう。また、地震保険の加入により万が一の災害時における家計への影響や住居確保の目途など、セーフティネットがあることによる環境面の確保やメンタル面での負荷が少ないと考えられる。

- 自身の生活復興具合、また村全体の復興具合との関連

各 χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。自身の復興とともに、村全体の復興も被災者の健康に関連があるとされる。自分の生活再建が早く進むことは被災者の健康に貢献できるだろう。また、村の復興はインフラストラクチャの回復による医療等へのアクセス確保、地域医療の復興、日常生活での買い物などに不自由がなくなるなどの効果が健康に影響するものと思われる。また、将来地域社会への展望を見出せることも安心度につながると思われる。

- 地震前からの近所との交流状態における関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。これに関連して文献3)とともに、文献8)においてもコミュニティと「孤独死」や健康の問題が指摘されている。ただ、これらの記載は災害後のコミュニティ内での近隣関係と健康を論じているが、本調査では地震発災前の普段からの近隣関係と健康についても関連があるとの分析結果が得た。この背景には、災害以前に普段からのコミュニティ内で関係が良好であることによる連帯感と相互による助け合い意識、また安心して生活することによる健康への効果等が考えられる。災害が発生したとしても、その効果が持続する、もしくはその経験が避難生活における新規のコミュニティ内での付き合いを円滑にできることによる健康への効果が期待できよう。

- 地震発生時の近所との協力の関連

地震発生時の近所の協力と調査時の健康とは χ^2 検定で有意差が認められた ($p < 0.05$)。災害時に近所と協力ができるのは、災害以前に普段からの交流ができていなくてはならない。また地域社会での防災への取り組みなども不可欠であり、本調

査ではそれを証明した形になった。

- 地震後のボランティア支援との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

- 水道の利用復旧時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

- 食事が安定してできる時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。先の質問で水道の利用については有意差が認められなかったが、食事にも水道の利用は不可欠である。食事のほうに有意差が認められたのは、水だけでなく、食生活全体の安定が健康に寄与していることを示していると考えられる。

- 住居の安定時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

- 仕事（収入）の安定時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

- 交通の便が回復したと感じた時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。先述の村全体の復興具合と健康との関連では χ^2 検定で有意差が認められていたが、道路などのインフラストラクチャを中心として医療等各種サービスへのアクセス確保がされること等と健康との関連が明らかになった。少なからぬ住民が比較的近距离にある熊本市等の中核医療機関を利用することが多く、こうしたアクセス面の確保が災害後被災者の健康に不可欠な要素になっている。

- 心の落ち着きが感じられた時期との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$)。精神的安定と健康には関係があると思われ、その安定要因にはさまざまな内容が各人にあると思われるが、災害による直接的な影響と間接的な課題それぞれに対して、克服できる見通しを供与できるような支援と復興ビジョンにより、被災者に安心が提供される必要がある。

- 地域の活気が戻ったと感じた時期との関連

χ^2 検定では有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

● 2017年4月時点での村の対応との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$). 村の対応に対しては評価している人が多く、精神的安定にもつながっていると考えられる。健康への意識では「普通」「やや悪い」が多いが、健康状態の悪化を村の対応により抑止しているものと、ある程度は考えられよう。

● 支援物資の配分方法との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$).

● 避難指示の呼びかけ方法との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$).

● 義援金の配分方法との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$).

● ボランティアからの支援に対する満足度との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$). 地震後のボランティア支援の有無に関する χ^2 検定では有意差が認められなかったが、実際にボランティアの協力を受けたときの支援に対する満足度、すなわちその質に関しては、被災者の健康に関係があるとされる。

● 被災証明手続きの満足度との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$). 被災証明の手続きに関しては満足度が高く、また被災証明が発行されることで、さまざまな支援を受けることにつながっている。こうした内容を含有し、この手続きが円滑に進むかどうかは、被災者の健康に関与していることがわかった。

● マスコミの報道との関連

χ^2 検定では有意差が認められなかった ($p > 0.05$).

● 村の復興計画の説明に対する満足度との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$). 被災者の心の安定には、円滑な自身と村双方の復興とともに、将来的な安心が不可欠になる。復興計画が被災者にわかりやすく合意できる内容であるとともに、広く情報を周知することにより理解は促進されよう。逆にわかりにくい、また合意しに

くい内容だと被災者の健康に悪影響を与える可能性を示唆しているだろう。

● 今後の住宅再建・ローン等への不安度との関連

χ^2 検定では有意差が認められた ($p < 0.05$). 将来的な不安の有無と健康との関係がでている。家計への影響と将来的な住居の確保、特に高齢者における家計の問題を考慮すれば、この問題は災害とわが国の社会的課題の複合的な問題ともいえるだろう。災害後の将来的な不安を払拭できるかは、被災者の健康に大きく影響を及ぼしていることが分析により明らかになった。

● 今後の仕事・収入に関しての不安度との関連

χ^2 検定でも有意差が認められた ($p < 0.05$). 将来的な収入の確保と家計は重要な問題であり、特に高齢者層にはより深刻な問題である。この課題は被災者の健康に影響を及ぼしている。

● 今後の自身の健康についての不安度との関連

χ^2 検定で有意差が認められた ($p < 0.05$). 地震から約1年後の健康と、それ以降の健康への不安は関連があるとされる。将来的な健康についての不安を抑制するには、地域医療の復興やかかりつけ医の再興、また自治体等からの保健指導や積極的な予防医療など総合的な地域医療の復興が不可欠である。また、高齢社会の進展にともない、介護面でサポートも不可欠だが、自治体の財政面の問題や過疎地域では民間活力が入りにくい問題をどう対処していくかなど、課題も山積している。

● 地震発生後、区長や消防団等からの呼びかけの有無との関連

χ^2 検定ではいずれにも有意差が認められた ($p < 0.05$). 質問紙では「区長・自治会長」「民生委員」「消防団」「近所の人」「介護施設職員」であり、呼びかけがあったとされる人で特に多かったのが「消防団」「近所の人」であった。少数だった「民生委員」「介護施設職員」も含め、地震発生時に地域社会のだれもが避難の呼びかけをできるかは、被災者の健康（生命の安全を含め）に関わっていることが提示された。そのため、地域社会の連携とともに、どのような立場であっても避難の声掛けは障がい者や高齢者の生命を救うことにもつながっているといえよう。

5. 結 語

熊本地震の被災者が地震後1年を経過して、自らの健康や生活面でどのような意識を抱いているか、また村の復興等に関連した動向を把握し、特にソーシャル・キャピタルとの関連を調査して、今後の対応の糧とするべく分析を行った。

避難生活中の疾病が地震から1年後の健康意識に関与することが示唆され、自身の復興度合や村全体の復興度合でも同様の結果が出た。大規模災害からの復興には時間がかかるが、被災者個人の問題だけでなく、地域社会や外部からの支援など、一見関係の有無が表面化しにくい要素が被災者の長期にわたる健康維持に影響を及ぼしていることが明示されたと思う。

謝辞

調査や統計分析において、うつのみや市政研究センターの坪井壘太郎氏に多大な協力をいただきました。また、調査遂行にあたって、西原村役場震災復興推進課の山田 孝様をはじめ同村役場の方々、および西原村住民の皆様にも多大な協力をいただきました。ここに深謝いたします。

備考

本研究は、大和証券ヘルス財団平成28年度(第43回)調査研究助成を受けて、調査・研究を行いました。

参考文献

- 1) アルドリッチ, D.P. 2015. 災害復興におけるソーシャル・キャピタルの役割とは何か. ミネルヴァ書房, pp. 10-11, pp. 118-119, pp. 206-207.

- 2) 岡田広行. 2015. 被災弱者, 岩波書店, pp. 1-73.
- 3) 近藤克則・斎藤嘉孝. 2009. 検証健康格差社会. 医学書院, pp. 91-97.
- 4) 県北広域本部阿蘇地域振興局. 2018. 平成28年度熊本地震:阿蘇管内被害状況.
- 5) 西原村. 2017. 大規模災害からの被災住民の生活再建を支援するための応援職員の派遣の在り方に関する研究会(第3回). 平成29年5月30日.
- 6) 羽山 博. 2015. Excel統計入門. インプレス, pp. 114-177.
- 7) 住中光夫. 2014. エクセルデータ分析のコツと手法. KADOKAWA, pp. 34-40.
- 8) 浦野正樹・大矢根淳・吉川忠寛. 2007. 復興コミュニティ論入門. 弘文堂, pp. 98-99.

古本尚樹

〔ふるもと なおき〕

現職 公益財団法人地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所主任研究員

略歴

(学歴)

- ・北海道大学教育学部教育学科教育計画専攻卒業
- ・北海道大学大学院教育学研究科教育福祉専攻修士課程修了
- ・北海道大学大学院医学研究科社会医学専攻地域家庭医療学講座プライマリ・ケア医学分野(医療システム学)博士課程修了【博士(医学)】

(職歴)

- ・浜松医科大学医学部医学科地域医療講座特任助教
- ・東京大学医学部附属病院救急部特任研究員
- ・公益財団法人ひょうご震災記念21世紀研究機構阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター研究部主任研究員
- ・熊本大学大学院自然科学研究科附属減災型社会システム実践研究教育センター特任准教授を経て現職

研究分野 災害医療, 地域総合防災, 危機管理



MeSO-net 観測から見えてくるもの

1. はじめに

首都圏は、これまでに何度も大地震に襲われ、被害を受けてきた。大正関東地震（1923年）では、主に火災で10万人以上の死者を出してしまった。その後、復旧・復興が進み、首都圏は、政治・経済の中心地として、3,000万人以上が生活する大都市へと発展した。ただ、現在の首都圏が大地震に襲われたら、また、甚大な被害を受けることは、多くの想定で報告されている。そして、首都圏が大地震に見まわれる確率が低いことも、指摘されている。そのため、首都圏に被害を及ぼす地震活動や首都圏の地下構造に関する調査が進められている。

首都圏は人の活動が活発であるためノイズが多く、地震観測には適さない地域である。そこで、多点高密度に地震計を設置し、地震波を重ね合わせることで信号を強調して、逆にノイズを軽減するような観測システムを考えた。まず、房総半島において約3km間隔の直線状の地震観測網を作った（大都市大災害軽減化プロジェクト）。その観測データを用いることで、房総半島の下に沈み込むフィリピン海プレートの上面（大正関東地震の断層面の一部）を明瞭に示すことができた。そこで、首都圏全体の地下構造が鮮明に見えてくることを期待して、観測点を拡張したものが、首都圏地震観測網（Metropolitan Seismic Observation Network : MeSO-net）である。

2. 観測点の選定

地震観測網を作るにあたって、様々な方位から伝播するシグナルを強調させるためには、なるべく面的に均質な地震計の配置にする必要がある。そこで、首都圏に広く分布している学校の敷地を候補地として考えた。学校は、おおむね人口密度に応じて設置されているため、都心部で密に存在するため選択肢が多く、グラウンド等の設置可能なスペースがあり、観測に必要な電力線や電話線を引き入れることが可能であ

る等の利点が多い。さらに、学校の先生たちによって理科教育、防災教育に利用していただける機会が多いことも理由の1つである。

しかし、予算には限りがあるため、すべてを均等に配置するのではなく、線状に集中配置する観測網を組み合わせて構築することにした（図1）。まず、地図上で候補地を選定してから、関係機関を訪問して交渉を行った。教育活動の邪魔にならず、周囲に大きなノイズ源がなく、設置工事の可能性も考慮しながら、現場で相談した結果、多くの方々の協力を得ることができた。首都圏は、鉄道や道路等の交通ノイズだけでなく、工場、商業施設、自動販売機やエアコンの室外機までもがノイズ源となるため、理想的な観測を行える地点は少ないが、銀座や日本橋などの都心の一等地にも設置することができた。東京湾で唯一の陸地である人工島（第二海堡）では電気や電話がないため、太陽電池で発電し、無線LANを利用してデータ伝送している。その他海ほたるや風の塔にも設置することができ、全体として296点の観測網となった（現在は、301点）。

3. 設置と観測

地震計の埋設は、地下深いほどノイズを避け

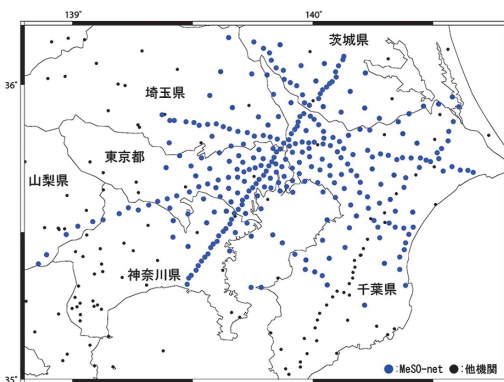


図1 首都圏地震観測網（MeSO-net）の観測点配置図。観測点間隔が2~3kmと狭い5本の直線状の分布および都心を中心として間隔が5km程度の面的な分布とを統合した

ることができるが、MeSO-netでは予算と工期の制約から深さ20mに設置した(図2)。そのための密閉容器を開発して、その中に三成分加速度計(航空電子製JA-40)を入れ、温度変化が小さい地下でデジタル変換している。それを受信した地表設置装置では、インターネット経由で地震研究所へ伝送する。そのとき、回線状況を検知して、伝送速度を自動的に変え、送り切れなかったデータは内部のSDカードに蓄積し、回線状況の好転後に再送する自律協調型テレメータ装置である。停電時にも収録が途切れないようにバッテリーで約2日間の電源を確保している。そのため、ほとんどデータの欠落

はない。

設置機器が自ら状況を伝えるシステムを開発したため少人数で観測網の状態を監視することができる。そのため、地震計の不具合の発見が早まり、データ欠落時間を短くすることができた。たとえば、湿度検知センサーを取り付けたため、容器内への浸水を早期に発見でき、電子基盤が水に浸って壊れる前に、密閉容器の修理をすることができた。地震計設置方法が簡単であるため、穴掘りから地震計設置まで約一週間で完了する。そのため、耐震工事や校舎の建て替え等、さまざまな原因で、観測点の移動や撤去をお願いされたときにも対応することが可能であった。

観測点を、直線状に並べたため期待どおりに微弱なシグナルでも判別しやすく、初動走時や振幅の揺らぎ、変換波、反射波、コーダ波の生成等がよくわかる(図3)。地震波以外では、鉄道や自動車だけでなくヘリコプターの通過が見えたり、特定の周波数に見える波(毎日定期的な1度だけ見える波)があったりと興味深い情報が多く隠されている。

4. おわりに

たくさんの地震計を稠密に設置することで、ノイズを軽減し地震波を強調させることは、以前から多くの研究者が行ってきたが、大都市の中心部で連続観測することは初めてであろう。2011年に東北地方太平洋沖地震が発生したときに、まだMeSO-netは完成していなかった。各地で停電し、電話網が寸断する中で、MeSO-netは全データを欠測することなく収録することができた。海岸近くの観測点では、地盤の液状化によって地上設置装置や引き込み柱が傾斜してしまい、後で修理が必要であったが、液状化する地盤への入力波を深さ20mで知ることができ、貴重な情報になった。

さらに、稠密な観測を続けていると、地震波による揺れは、その振幅や周波数に地域差が大きいことが見えてきた。図3で、たとえば、となり同士の波形を比較すると、似ているものもあれば、似ていないものもみられる。そこには、

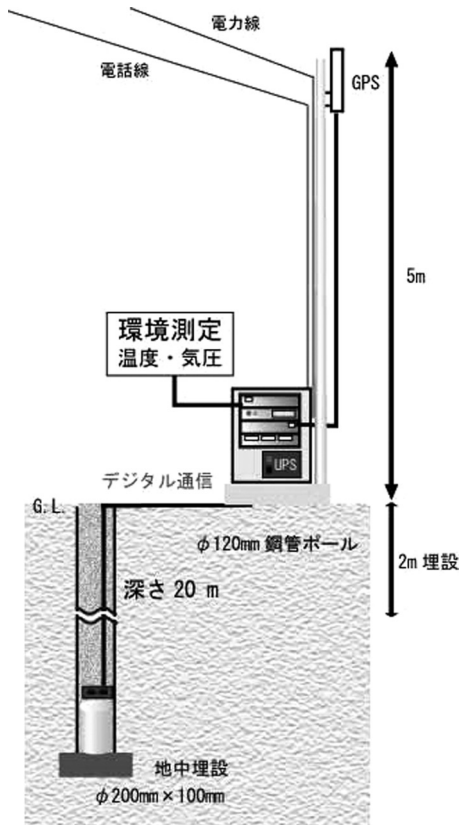


図2 MeSO-net観測点の概要。深さ20mの孔底に三成分加速度計が設置され、データは地上の観測装置から電話線で地震研究所に伝送される(現在は、つくばの防災科学技術研究所へ伝送)。バッテリーを併設しているため、停電時でも観測が継続されている。周辺の温度や気圧も併せて収録し、理科教育等にも利用されている

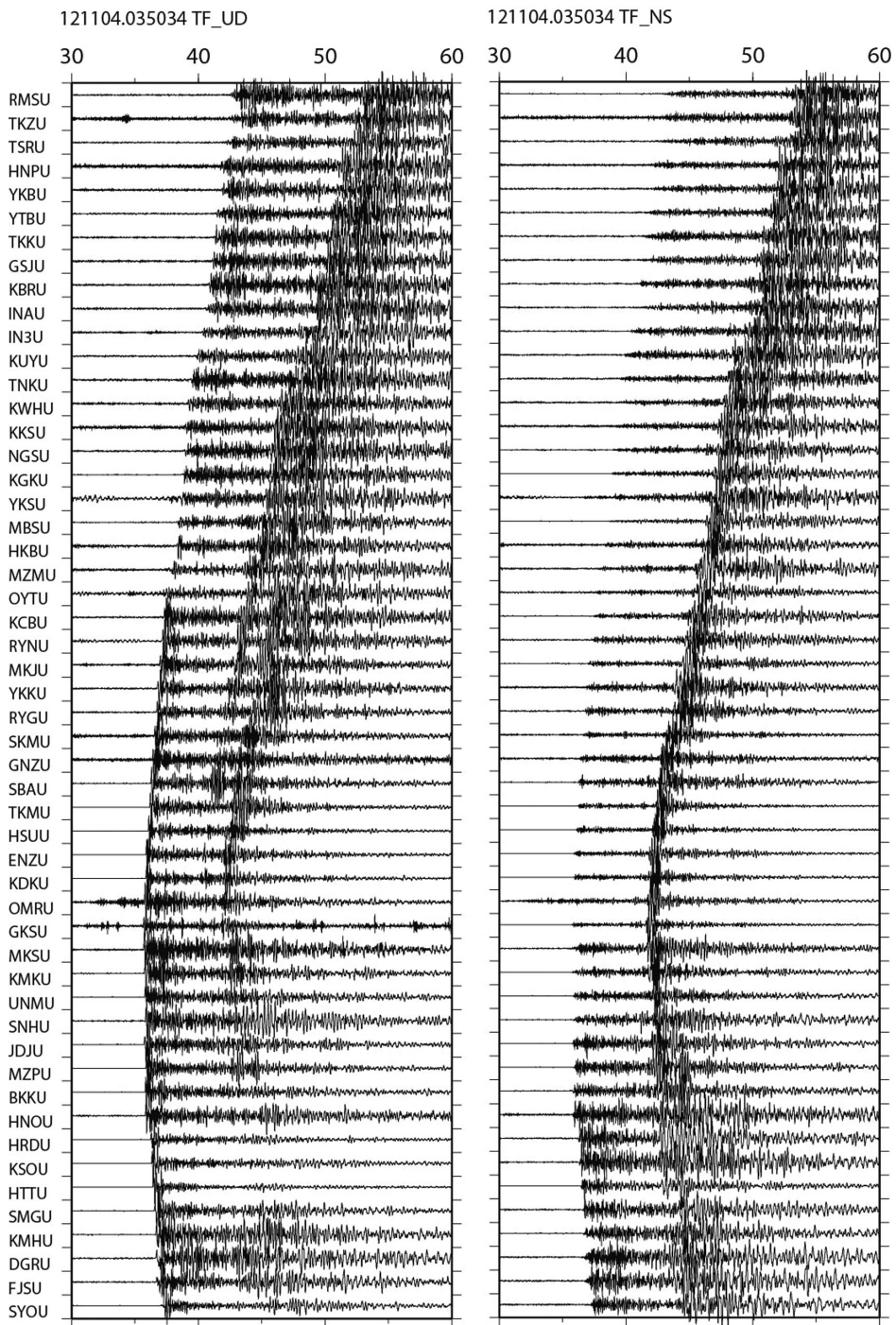


図 3 観測された波形例 (2012年11月4日, 東京都多摩地区, 深さ31km, M3.3). つくばから藤沢までの52観測点を北から順に並べた (左図: 上下動成分, 右図: 南北動成分). P波やS波だけでなく, 変換波や反射波等のさまざまな後続波が見られ, 地下構造や地盤の揺れやすさ等の情報が含まれている

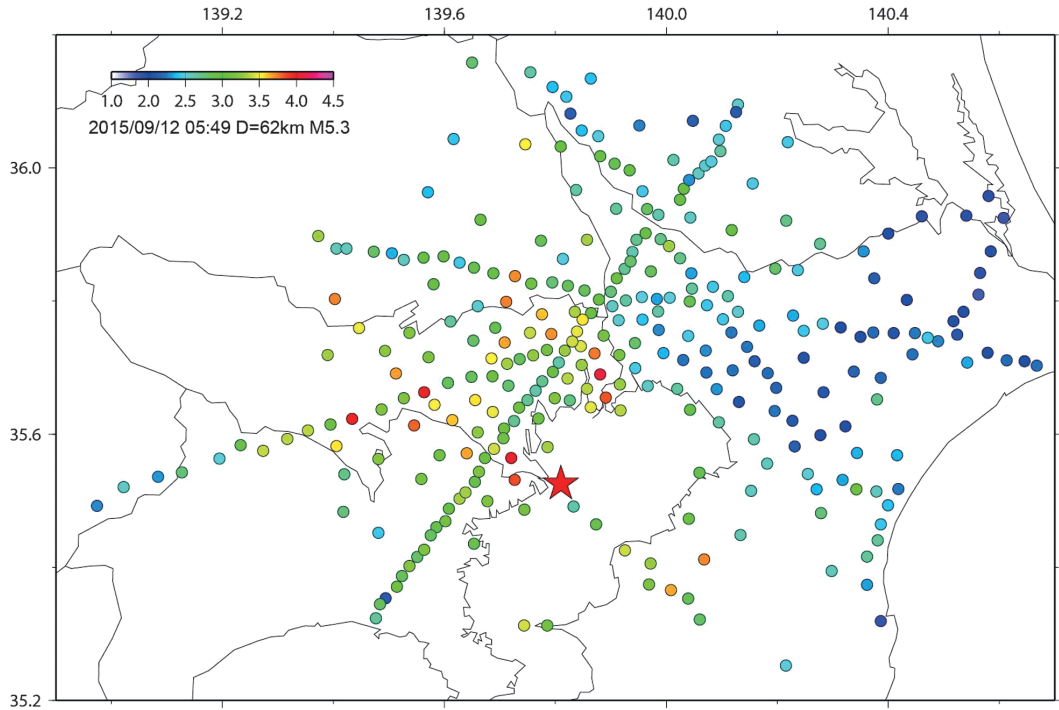


図 4 観測されたデータによる計測震度相当地の分布. 必ずしも、震源地(★)の直上で震度が大きくなるわけではなく、少し離れた地点でも揺れの大ききところがみられる。地盤や地下構造の違いの影響と考えられるが、あらかじめ観測して、対応しておくべきであると考えられる

さらに細かな地質や地盤構造の違いが影響しているようである。観測された計測震度の分布は、必ずしも震源からの距離だけによるわけではない(図4)。建物ごとの被害を推定する際には、平均的な値ではなく、その違いを十分に考慮する必要があると思われる。そのためには、観測点の密度をさらに向上させて、その地点での揺れを測っておく必要がある。多くの地震計を設置するには、できる限り簡単な観測装置の開発が不可欠である。そこで、携帯電話回線を利用したデータ収録が可能な小型軽量低消費電力地震計を開発し、鳥取県西部地震の震源域において1,000点観測を行った。消費電力を抑えたため、乾電池48本だけで1年以上の連続観測を成功させた。

このような超高密度観測になると、個別に観測点を選ぶことが困難になってくる。設置効率を優先して、道路沿いに置かざるをえなくなり、必ずしもベストな観測点にならない。しか

し数の力は大きく、たとえノイズレベルが高くても、押し引き分布だけで高精度な発震機構解が見えてくる。今後、点ではなく面で観測できるようになれば、3次元の波動場が直接得られるようになり、そこから新たな地震像を構築できるのかもしれない。

謝辞

東京都、千葉県、茨城県、埼玉県、神奈川県、山梨県をはじめとした多くの方々のご協力により実現した観測網である。ここに記して、感謝の意を表したい。この観測網 MeSO-net は、文部科学省委託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(2007-2012)」によって作られ、「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト(2012-2017)」と「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト(2017-2022)」によって運用されている。

(酒井慎一：東京大学地震研究所准教授)

ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究 —2010～2014 年度 SATREPS 課題の概要—

山崎文雄

1. SATREPS ペルー・プロジェクト

地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) は、科学技術振興機構 (JST) と国際協力機構 (JICA) が連携して平成 20 年度より開始された日本が主導する国際共同研究の枠組みの 1 つである。地球規模課題を対象として、開発途上国とわが国が国際共同研究を推進することにより、課題の解決と科学技術水準の向上につながる知見を獲得することを目指している。研究分野の 1 つとして「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」が指定されている。

筆者らは、ペルー側と事前協議を重ねたうえで、2008 年 11 月に提案書を JST に提出し、2009 年 4 月に条件付採択課題に選ばれた。同年 6 月に、JST と千葉大学で暫定研究の契約を締結し、日本側でのプロジェクトが開始された。研究代表者 (山崎) は、2009 年 8 月に JICA の詳細計画策定調査団の一員としてペルーを訪問して討議を行い、JICA 調査団長とペルー国立工科大学 (UNI) 学長との間で合意文書が取り交わされた。このあと 2010 年 1 月に、JICA, UNI, ペルー国際援助庁 (APCI) の間で討議議事録 (R/D) が署名された。これにより、SATREPS ペルー・プロジェクトが正式に開始された。本文では、5 年間にわたる研究活動を紹介する。

2. プロジェクトの背景と目的

ペルーは、日本と同様に環太平洋地震帯に属する地震・津波の多発国である。近年においても、2001 年 6 月 23 日に、ペルー南部の沿岸部を震源

とするマグニチュード 8.4 の地震が発生し 100 人を超える死者が生じるとともに、4 万棟を超える建物が倒壊・大破した。また 2007 年 8 月 15 日にも、ペルー中部 (イカ州ピスコ沖) でマグニチュード 8.0 の地震が発生し、500 人を超える死者が生じるとともに、8 万棟を超える建物が倒壊・大破した。いずれの地震も、ナスカプレートが南アメリカプレートに沈み込む境界で発生した海溝型地震で、津波による被害や犠牲者も発生している (図 1)。

このように地震・津波災害の危険性の高い国はアジア太平洋地域に数多いが、なかでもペルーは日系移民が多いなど日本と関係が深く、地震工学・地震防災の分野でも、国立工科大学 (UNI) の土木工学部の中に日本-ペルー地震防災研究センター (CISMID) が 1987 年に設立されるなど、永年にわたって交流が続いてきた。しかし、1990 年代に入って政情不安や治安悪化などが深刻となり、関係がやや疎遠になった。しかし、近年は政情も安定し、科学技術分野での交流も復活の兆しにある。このような背景のもとで、永年培ってきたペルーとの地震防災分野での交流を再び活性化し、持続性のある技術協力関係を築くことは両国にとってきわめて重要と考えられた。日本に留学して学位を取得した研究者達も、地震防災分野における指導的な立場になり、ペルーで頻発した大地震による社会的関心の向上と合わせて、ペルーと日本の関係を深める絶好の時期といえた。以上の背景より、アジア太平洋地域の中から、地震・津波による災害軽減のニーズが高いペルーを科学技術協力事業の対象国として選んだ。

本研究では国際的・学際的な連携のもとに、フィールドに立脚した実践的研究を推進し、ペ

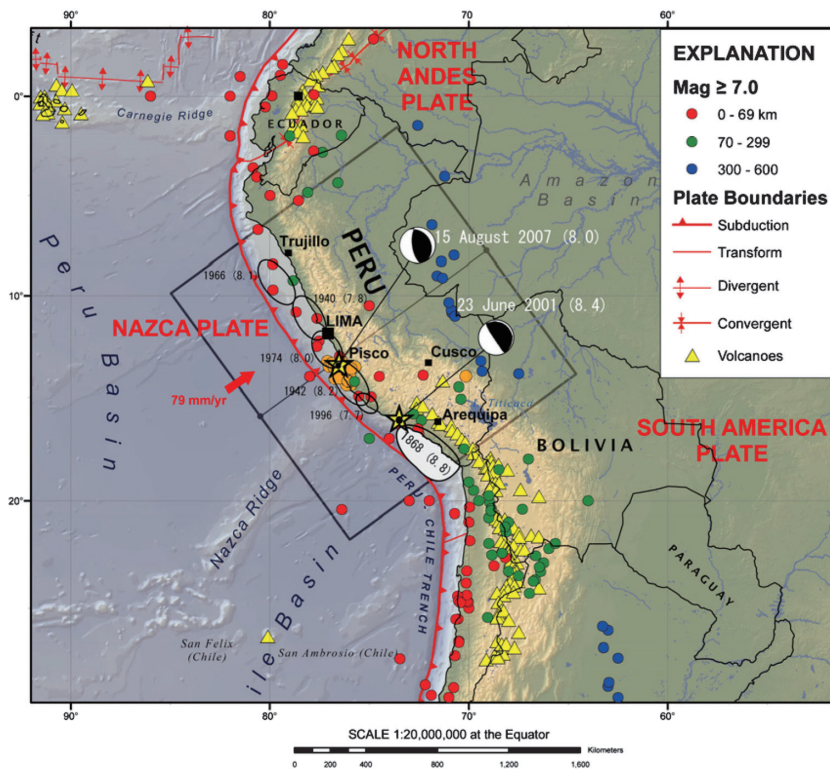


図 1 ペルーとその周辺のプレート境界と発生地震 (文献^{1,2)} に加筆修正)

ルー社会への地震・津波技術の実装を目指した。地震動予測と地盤ゾーニング (G1), 津波予測と被害軽減 (G2), 建物耐震性の向上 (G3), 空間基盤データ構築と被害予測 (G4), 地域減災計画 (G5) の5つのグループを設け、密接な連携のもとに、地域特性を考慮した総合的な共同研究を推進した。

3. 研究プロジェクトの概要

研究プロジェクトの組織構成を図2に示す。日本側は千葉大学が研究代表機関となり、山崎文雄が研究代表者とG5のリーダーを務め、中井正一がG1のリーダーを務めた。主たる共同研究機関としては、東北大学 (G2: 越村俊一), 建築研究所 (G3: 齊藤大樹), 東京工業大学 (G4: 翠川三郎) が加わり、さらに多数の研究機関の研究者が参加した。

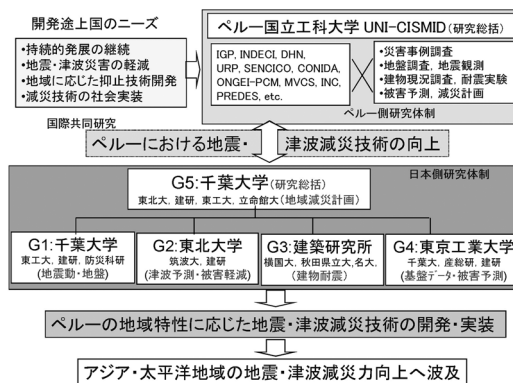


図 2 ペルー地震・津波減災プロジェクトの組織構成

ペルー側はUNI-CISMIDを代表機関として、Carlos Zavalaを研究代表者として、CISMIDの研究者が多数参加した。このほか、地球物理庁 (IGP), 市民防衛庁 (INDECI), 水理航行部 (DHN), 航空宇宙研究開発委員会 (CONIDA), 防災研究センター (PREDES), 文化庁 (INC),

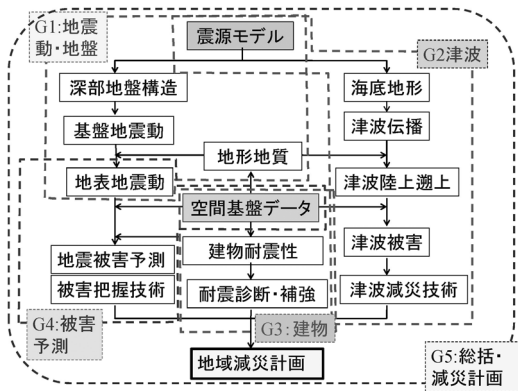


図3 研究項目とその関係および各グループの分担

住宅建設衛生省 (MVCS), 国立建設産業訓練機構 (SENCICO), Ricardo Palma 大学 (URP), 国家電子情報局 (ONGEI-PCM), さらに対象地域の自治体などの技術者・実務者が参加した。

研究項目とそれらの関係を図3に示す。震源モデルから始まり、地震動や津波を予測し、建物耐震性を評価し、被害予測と減災計画立案という、一連の防災研究の流れとなっている。

4. プロジェクトの実施内容

4.1 地震動予測と地盤ゾーニング

リマ首都圏と南部のタクナを対象に、地震観測や微動観測を通じてこれら地域の深部地盤構造を把握するとともに、表層地盤ゾーニングを行った。また、歴史地震の被害記録や近年の地震記録の分析に基づき、発生が懸念されるプレート境界型巨大地震を設定し、地震動予測を行った。また、地形・地盤構造に着目した斜面の震動特性についても検討した。

ペルーではプレート境界付近における海溝型巨大地震が頻発することを考慮し、IGP, CISMID と共同で 1746 年ペルー中部地震, 1868 年ペルー南部地震の 2 つの巨大地震を選定した (図4)。このシナリオでは、これらの地震と同等のものが周期的に起こると仮定しており、ペルー中部では長さ約 500 km, 幅約 160 km の震源域を持つ M_w 8.9 の震源モデルを設定した。Inter-Seismic Cou-

pling (ISC) 手法の結果、2 つの強く固着しているプレート境界の領域の存在が示唆され、1 つはリマの沖合でもう 1 つはピスコの沖合にある (図5)。広帯域震源モデルを構築し、空間的なランダム位相を使うことにより、12 の広帯域すべり震源モデルを作成し、9 つの異なる破壊開始点 (図5の星印) を仮定し、合計 108 の断層破壊シナリオを計算した³⁾。最終的に、シナリオ地震によるリマ首都圏における地震動の PGA, PGV (最大地動加速度, 速度) の分布を求めた。図6はすべての想定破壊開始点についての PGA および PGV の平均値分布である。平均値+標準偏差を用いた場合には、PGA, PGV がそれぞれ 1G, 100 cm/s を超えた地点もある。

また、微動観測と地震観測による表層地盤増幅特性の検討結果に基づき、リマ市全体における表層地盤の固有周期と増幅率のマイクロゾーニング図を作成した (図7)。

4.2 津波予測と被害軽減

ペルーにおける既往の地震津波災害履歴と被害の状況を検証し、発生位置・規模・被害・復興状況についての基礎情報をまとめた。次に、地域ごとの津波予測を行うための海底・陸上地形、土地利用、建物のデータを整備し、既往地震や想定地震に基づく津波伝播・浸水シミュレーションを実施した。この結果に基づき、ペルーにおける津波災害の被害および社会的影響を評価した。

代表的な成果としては、リマの沿岸部を対象領域として、津波の陸上遡上に伴い発生し得る建物被害とインフラ被害を推定した。津波遡上シミュレーションから得られる津波外力 (波高・浸水深・流速) と、津波外力に応じた被害率曲線を組み合わせ、津波氾濫流により発生し得る家屋被害の棟数と程度を推定した。地震シナリオとしては、最新のプレートのカップリングを考慮した 12 ケースのシナリオと、既往最大とされる 1746 年の津波記録から復元したシナリオを採用し、それぞれに対する津波浸水解析を行った。その結果を図8に示す。上記の結果を用いて、Callao 市 La Punta 地区の建物被害推定を行った (図9)。東日本大震災の事例から得られた被害関数を適用

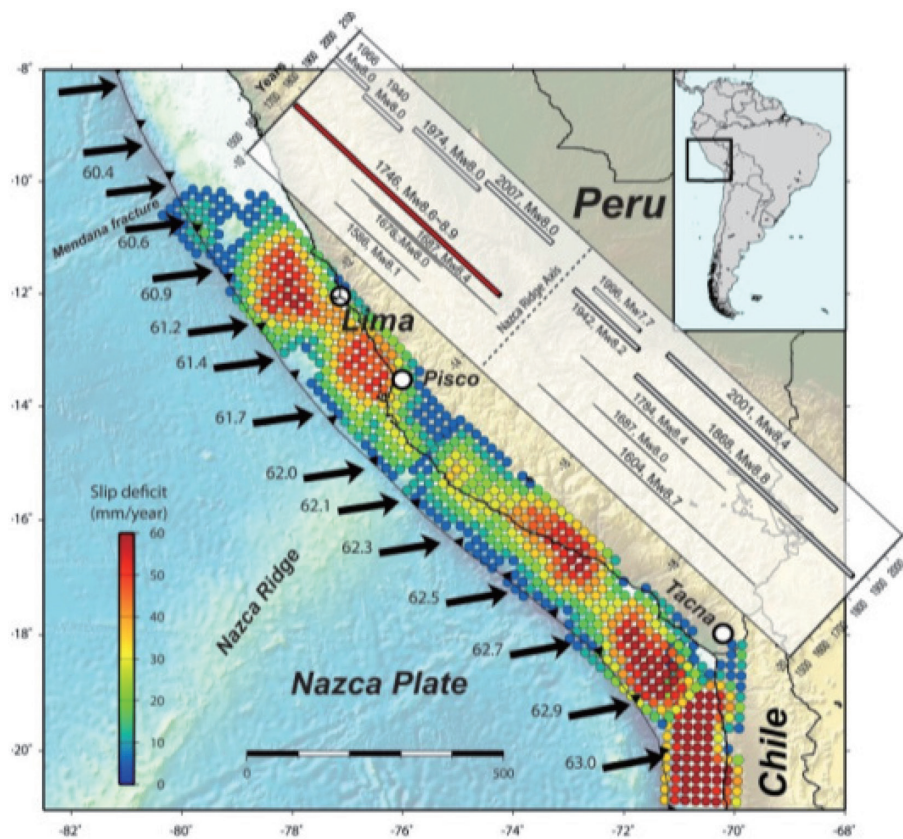


図 4 ベルーにおける測地測量³⁾ から得られたプレート境界のすべり遅れ分布とナスカ沈み込み帯に沿った歴史地震の範囲

して、予測した津波浸水深に対する建物被害の有無を推定することができた。

次に、津波浸水予測結果を用いて、Callao 市 La Punta 地区での避難計画をマルチエージェントシミュレーションにより評価した。さらに、社会実装の一環として、CISMID、INDECI、DHN および Callao 市の協力を得て、La Punta 地区の避難訓練を実施し、児童を含む市民約 2,000 人（地区人口の 40%）の参加を得ることができた（図 10）。

4.3 建物の耐震性向上

ペルーの都市および地方の建物現況調査および過去の地震被害分析等から、都市・地域の建物群の脆弱性を評価し、その耐震化戦略を構築した。次に、耐震性向上のための補強技術を開発し、その効果を構造実験や数値解析により検証した。ペ

ルーの建物は、都市部では鉄筋コンクリート造や組積造が、山村部などでは日干しレンガ造などが多く、さらに歴史的建築物や世界遺産も数多いことから、それぞれの構造様式・用途に応じた耐震性向上を目指した。

代表的な研究成果としては、ペルーの建物構造種別に応じた耐震診断法および耐震補強技術を開発し、都市・地域の建物群の脆弱性評価と耐震化戦略に繋げた。また、リマ市内の複数の建物に強震計を設置し、地震時の建物性能をモニタリングするシステムを構築した（図 11）。

また、CISMID に構造実験装置を搬入し（図 12）、ペルーに特徴的な低靱性 RC 壁の破壊実験を行い、その部材性能を明らかにした。また、煉瓦壁の面外崩壊挙動を解明するための振動台実験と個別要素法を用いた解析手法の開発を行い（図

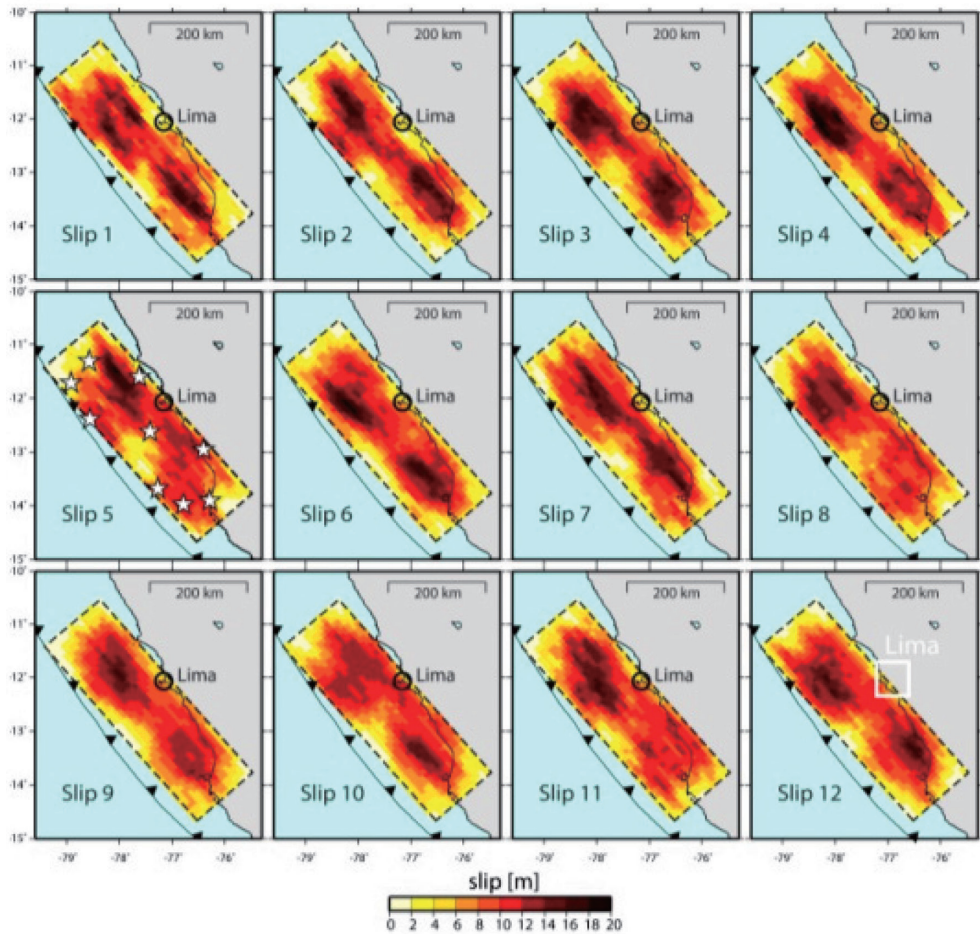


図 5 広帯域震源モデル³⁾

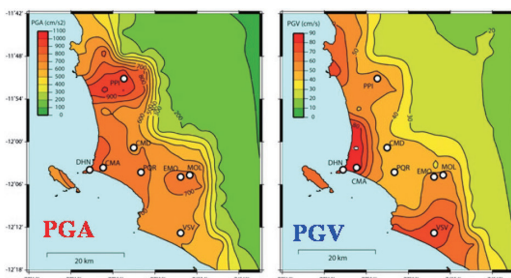


図 6 リマ市の想定地震シミュレーション結果 (Slip 5 の平均)

13), 高度な耐震診断を可能とした. さらに, 低靱性 RC 壁の補強方法として, 炭素繊維シートを部分的に用いた安価な補強技術を提案し, その性

能検証実験を行った (図 14).

4.4 空間基盤データ構築と被害予測

リモートセンシング技術を利用して, 建物台帳データを構築するとともに, 衛星画像の立体視による広域での標高・地形モデルを構築した. また, 2007 年ピスコ地震の前後の衛星画像を用いて被害検出を行い, 現地調査結果と比較して被害把握手法の適用性を検証した. これらのデータを用いて, シナリオ地震に対する被害予測を行った.

具体的な成果としては, 国勢調査統計データや現地調査した建物情報および衛星画像に基づき作成した数値表層モデル (DSM) を利用して, 建物高さや構造形式を考慮した世帯数の推定手法を提案し, リマ市全域について建物台帳データを構

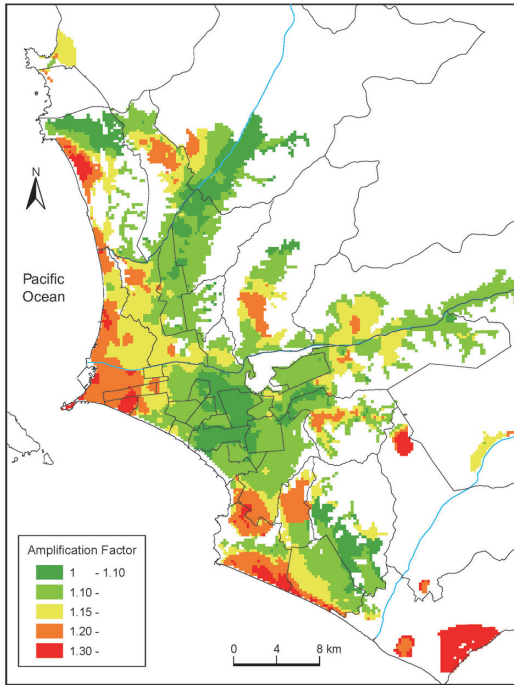


図 7 推定されたリマの表層地盤増幅特性

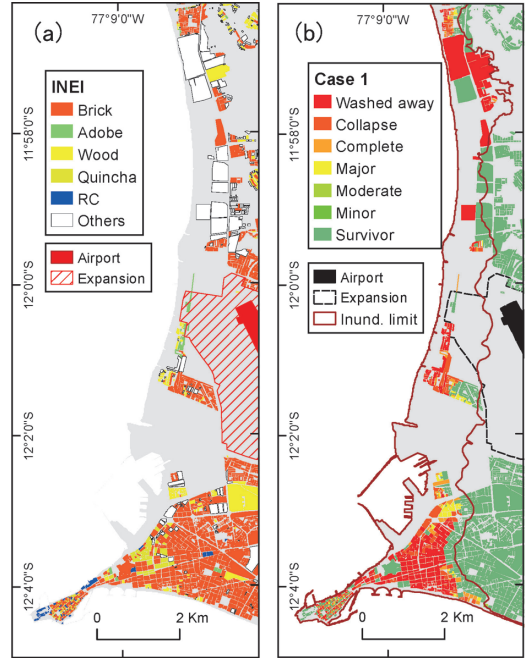


図 9 (a) 建物構造別分布と (b) 推定津波被害分布

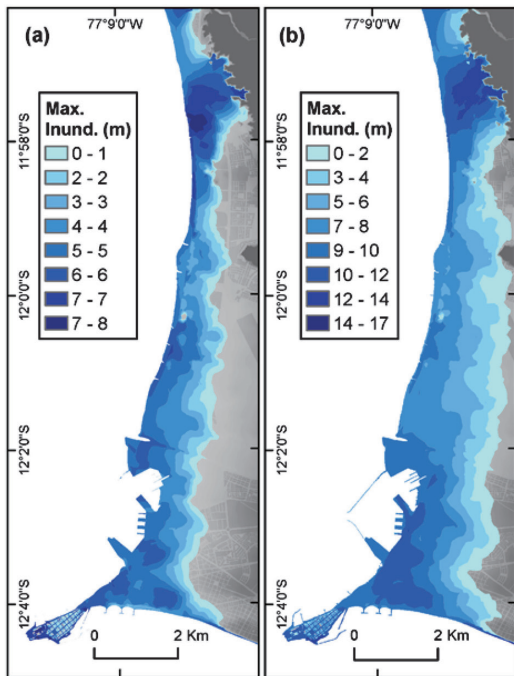


図 8 想定地震シナリオによる津波の予測浸水深 (a) Pulido *et al.*³⁾ のシナリオ, (b) 1746 年地震の復元



図 10 (a) Callao 市 La Punta 地区の避難訓練のバナー, (b) 海軍学校校舎への避難状況, (c) 避難訓練後に開催された市長や関係者との協議の様子

築した。図 15 は、構造形式や建物高さごとに構築した建物台帳データの一例として、全建物に対するアドベ造および耐震性の低い組積造建物の割合を示したものである。

また、衛星搭載の合成開口レーダ (SAR) 画像を利用したペルーにおける地震被害域の早期かつ半自動的な把握技術手法について検討した。2007 年ペルー地震のピスコ市における建物被害

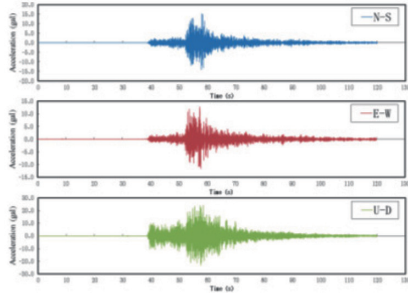


図 11 リマ市内の複数建物へのネットワーク強震計の設置. 日本からもインターネット経由で地震時建物挙動をモニタリング可能

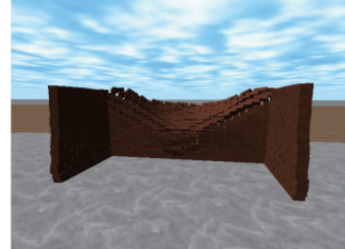


図 13 煉瓦壁の面外破壊挙動を再現する振動台実験 (上) とそのシミュレーション解析 (下)



図 12 CISMID に導入した油圧式加力システム



(a) 補強無し (b) 全体補強 (c) 部分補強

図 14 炭素繊維シートを用いた RC 壁の補強実験

の現地調査データを活用することで、ペルーの建造物や被害の特徴を考慮した建物被害率の推定手法に改良した。ALOS PALSAR 画像から推定した建物被害率の分布を図 16 に示す。さらに地震の震度情報に基づく被害関数と統合し、より精度よく建物被害率を推定するモデルへと拡張した。

これに加えて、リマ首都圏の地震被害予測を

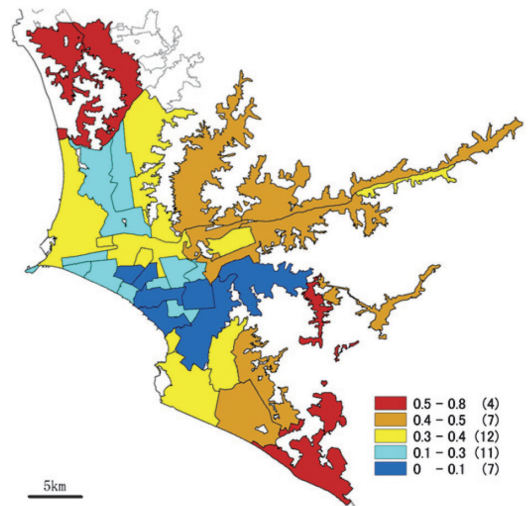


図 15 国勢調査統計データ、衛星画像および現地調査による建物情報を利用して構築した建物台帳データ (全建物に対するアドベ造と耐震性の低い組積造建物の割合の分布)

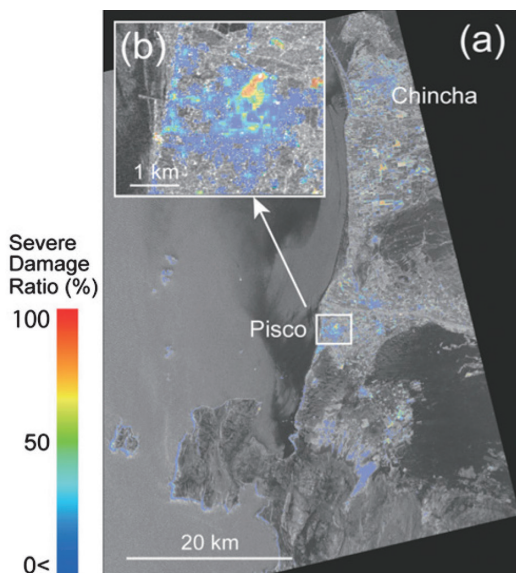


図 16 ALOS PALSAR 画像による 2007 年ピスコ地震の建物被害率推定

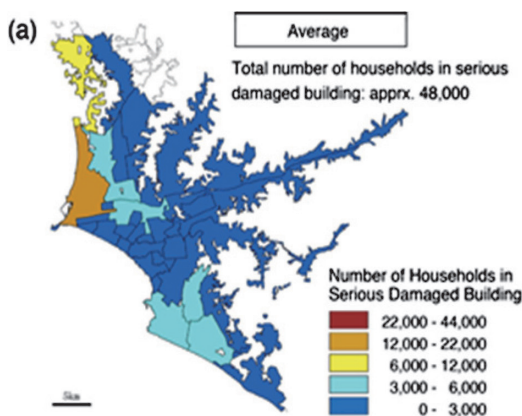


図 17 想定リマ沖地震に対する被害予測結果

行った。PGA の平均値を入力した場合の大被害世帯数の分布を図 17 に示すが、PGA が相対的に大きい地域および耐震性が低い組構造建物が多く分布している地域で大きな被害が予測された。

4.5 地域減災計画

シナリオ地震に対する被害予測結果にペルーの生活習慣や文化に起因する地域特性を考慮して、ペルーの研究機関と共同でリマにおける将来的な地域減災計画のあり方をシナリオ・シミュレーションにより検討した。リマでは 20 世紀後半に、

地方からの居住者が急増してきたが、多くは不法滞在者となり、都市整備の行われていない地区に住み、劣悪なスラム街を形成してきた。こうして拡大してきたリマの人口増加傾向を考慮して、将来的な土地利用と耐震化等の施策による減災効果を評価した。

過去 10 年間 (2003~2013) の人口の自然増加傾向を用いて、2030 年における人口を推計した。そのうえで、減災戦略として、(X1) 建物耐震化 (耐震化率 20% と、60% の 2 パターン) と (X2) 土地利用規制 (全規制、半規制、規制なしの 3 パターン) の 2 つの政策を設定した。また減災効果を推定するために、(X3) 地震シナリオ (地震の有無) を設定した。シミュレーション・モデルにより、減災戦略全 6 パターンの地震の有無による地区ごとの脆弱性 (人口と建物) を推定した。リマ首都圏の行政区区分を考慮し、それらを 30 地区に分割した。入手したデータを利用して、当該地域の土地利用、人口、建物の脆弱性、土地価格等を地区ごとに算出したうえで、分析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 厳格な土地利用規制を布いた場合、中央部の人口増加が抑制され、人口は郊外に分散される。また地震後に、人口は東部と北部の郊外地区に移動する。
- 2) 耐震化が成功すれば、人口急増地区において脆弱な建物の比率を有効に低下させることになる。逆に耐震化がうまくいかないと、被災後の脆弱な建物比率をいっそう増加させてしまう。
- 3) 厳格な土地利用規制を布いた場合、脆弱な地域に住んでいる人口を低減させることができる。また地震の発生は、すべての地区で脆弱地域の人口を増加させる傾向がある。

5. 研究成果のまとめ

当初設定した研究目標は、ほぼ達成することができた。各グループにおける共同研究の成果は、原著論文 (和文誌 9 件、英文誌 51 件) を始めとして、国際学会論文 86 件および主要な国内学会論文 31 件などの成果をあげることができた。と



図 18 キックオフ全体ワークショップ (2010年3月リマで開催)



図 19 第2回全体ワークショップ (2011年3月千葉市で開催)

くに本プロジェクト^{4,5)}で *Journal of Disaster Research* 誌に2度にわたって特集号を発行できたことは、この成果につながったものと考えられる。

本プロジェクトの最大の成果としては、準備研究も含めると6年間にわたる共同研究において、日本、ペルー2国間の研究機関、政府防災機関の間で、強い人的な繋がりができたことをあげたい。とくにペルーから、文部科学省国費留学生(博士後期課程)をSATREPS枠で5人、その他で2人受け入れることができたことは、将来にわたって両国の交流を続けるのに大いに役立つものと思う。また、日本から短期派遣した研究者は延べ80人を数え、その半数以上は40代以下の若手研究者や大学院生であり、今後の交流を続ける礎になると期待している。

具体的な成果としては、複数の最新の実験・観測機器をペルー側に提供したことで、先方の研究体制の飛躍に繋がった。たとえば、CISMID に提

供した地震計10台を中心とする観測網で得られた地震記録は、ペルーで初めてインターネット上で公開されている。また、具体的に提示した地震動予測や地盤ゾーニングは、ペルーの国の基準に反映されることになった。新たに提供した構造実験設備を使って、すでにペルーに特有な建築構造形式の実験が行われ、耐震基準の見直しに取り入れられる見込みである。また、地震防災に関するソフト技術も、ペルー側に多数伝授された。たとえば、震源断層モデルによる地震動シミュレーション、津波の伝播・遡上シミュレーション、避難シミュレーション、建物の崩壊シミュレーション、リモートセンシングと現地調査による建物台帳構築技術、都市施策効果シミュレーションなどは、これまでペルー側に経験のないもので、今後これらの技術をペルーの実情に沿うように、防災実務へ適用していくことが期待される。

プロジェクトの進捗を確認するために、毎年3月にペルーと日本で交互に計5回、全体ワークショップを開催した(図18, 19)。この全体ワークショップに合わせて、また8月に開催した合同調整会議に合わせて何度も公開シンポジウムを開催し、広報普及活動に努めた。とくに、2013年8月にLa Puntaで実施した津波避難訓練は、メディアなどからも大きく注目された。また2014年3月には、SATREPSチリ・プロジェクトと合同で、東京にて「中南米地域の地震・津波防災に関する国際シンポジウム」を開催し、本プロジェクトの成果の中南米諸国への展開を図った。

謝辞

本研究の実施に当たっては、JICA 地球環境部、同ペルー事務所、JST 地球規模課題国際協力室、在リマ日本国大使館など、多数の方々のご支援を受けたことを記す。

参考文献

- 1) Chlieh, M., de Chabalier, J.B., Ruegg, J.C., Armijo, R., Dmowska, R., Campos, J. and Feigl, K.L. 2004. Crustal deformation and fault slip during the seis-

- mic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations. *Geophys. J. Int.*, **158**, 695-711.
- 2) USGS. 2007. Poster of the Ica, Peru Earthquake of 15 August 2007—Magnitude 8.0, Earthquakes Hazard Program USGS.
- 3) Pulido, N., Aguilar, A., Tavera, H., Chlieh, M., Calderon, D., Sekiguchi, T., Nakai, S. and Yamazaki, F. 2015. Scenario source models and strong motion for future mega-earthquakes : application to Lima, Central Peru. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 368-386.
- 4) Yamazaki, F., Zavala, C. *et al.* 2013. Special issue on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru. *J. Disas. Res.*, **8**, 224-234.
- 5) Yamazaki, F., Zavala, C. *et al.* 2014. Special issue on enhancement of earthquake and tsunami disaster mitigation technology in Peru (II). *J. Disas. Res.*, **9**, 916-924.

山崎文雄

[やまざき ふみお]

現職 防災科学技術研究所災害過程研究
部門主幹研究員/千葉大学名誉教授

略歴 東京大学大学院修士課程修了。清水建設株式会社大崎研究室研究員，東京大学生産技術研究所助教授，千葉大学大学院工学研究科教授を経て，2019年4月より現職。工学博士

研究分野 都市インフラ，地震工学，防災科学



地震の発生と地震の前兆現象の1つのアナロジー

わが国の地震調査事業の創始者である関谷清景は、明治18年11月7日に理医学講談会で「地震ヲ前知スルノ法如何」という講演を行った。その速記録が残っているが、当時までの地震予知研究の概要を評価を加えながら紹介し、結論として現代風に言えば、精密な地震観測と地殻変動の観測が有望であるとし、「学問ノ力ハ怖キモノナレバ地震ノ学問ノ進歩スルニ從ヒテ地震ヲ前知スルノ法則並ニ器械ヲ發明シ、又之ヲ全国各所ニ備エ置テ世人ニ地震ヲ前以テ知スル様ニナルノハ遠イ事デハナイト存知マスル」と結んでいる（東洋学芸雑誌、1885）。

しかし、それから100年以上を経ても、なお地震予知の手法は確立せず、最近、地震予知は原理的に不可能であって、予知研究は無駄な努力であるとの意見もきかれる。地震予知計画研究グループのブループリントの検討段階から30年以上予知の研究や実務に携わってきた筆者には、実証を欠いた不可能論には到底賛成できないが、計画発足時にくらべて予知の難しさ

を実感していることも事実である。平成6年6月29、30日に日本学術会議で行われた地震予知研究シンポジウムの議論をききながら、地震予知の難しさを考える上で参考になるかと思われるアナロジーが浮かんだので席上コメントした。プロシーディングスには載せられなかった図を含めて簡単に説明させていただく。

地殻の歪みの蓄積と大地震の発生を、爆発物の集積と爆発というアナロジーで考えてみる。大きく図の(A)と(B)の2つに分けられる。

(A)は爆発物の集積に伴って自然に、たとえば温度が上昇したり、変質したりして爆発するケース（「自然発火型」）であり、(B)は爆発物の近くに生じた何らかの火種が引火して爆発するケース（「引火型」）である。さらに、両者とも爆発物の集積が十分行われないと発火あるいは引火しない(A-1, B-1)と考えるか、途中でも爆発してしまい大爆発になるかどうかは偶然である(A-2, B-2)と考えるかによってケースが分かれる。後者の場合は、規模の予知

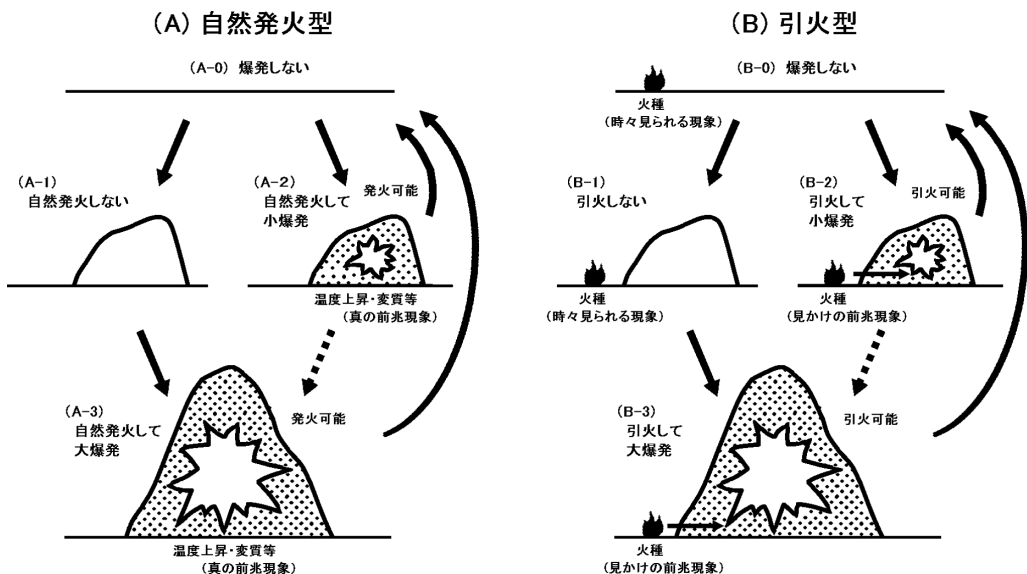


図 自然発火型（左）と引火型（右）の爆発現象

はきわめて難しいことになるが、すくなくとも、東海道沖や南海道沖の巨大地震は、過去の事例から考えて、characteristic earthquake的に起こっており、M6や7程度の中規模で破壊してもよかったものが偶然に大きく破壊したとは思えない（大きなブロックがいくつ連動して破壊するかという問題は別として）。

(A-3)の温度上昇に相当する変化は地震の場合ほぼ瞬時に進行し、実用的な予知にはつながらないという考え方もありうるが、多少の時間的余裕のあるケースが皆無であると結論するのも早計であろう。自然発火型のケースでは、温度上昇に相当する現象（真の前兆現象）をとらえれば確実に予知できるのに対して、引火型では、火種に相当する現象は、平常起こっているものと同じであってもよいので、それだけをいくら詳しく調べても前兆と識別することは不可能であるかもしれない。たとえば、1978年1月の伊豆大島近海地震（M7.0）は、顕著な前震を伴ったことで知られているが、1990年2月にすぐ南側に隣接して発生したM6.5の地震はまったく前震を伴わなかった。1つの解釈として、前者はたまたま発生した群発地震が隣接部分で発生条件が整っていた大地震の引き金を引いた（B-3）にすぎないとみることもできる。また、パークフィールドの空振りに終わった1992年の警報の根拠となった地震は、（B-1）に相当するとも解釈できる。しかし、爆発物が十分蓄積していることが分かっている（長期的予知がなされている）場所で、自然発火型の前兆を認めたときはもちろん、これらのような引

火型の火種に相当する現象（いわば見かけの前兆現象）を近くに認めた場合にも、引火爆発のおそれがあるとして警戒するのが防災上当然の措置であろう。

自然発火型であっても引火型であっても、短期的前兆のみから時期のほかには規模まで予測できるとは考えられず、爆発物の集積状態に相当する歪みの蓄積状態を把握し、大規模な爆発を起こしうる状態にあるかどうかを知ること、つまり長期的予知が短期的予知成功の前提として重要であり、第7次地震予知計画の1つの目玉である地震発生のパテンシャル評価の研究の成果を期待したい。

[自然災害総合研究班発行『災害科学研究通信』No. 51, p. 1~2 (1994年12月)より転載]

追記: この文章が再録される機会に読み直してみても、さらに次のような考えが浮かんだので、記しておきたい。

(1) 自然発火型でも引火型でも起こり得るが、通常は自然発火型で発生に至る前に引火型として発生してしまうと考えれば、自然発火型として理論的には期待されるような現象が実際には観測されないことが説明できる。

(2) 引火型の火種に相当する現象がごく微弱で現在の観測では検知できない場合、引火型とは認知できずに、突然発生したことになる。

(2019年4月)

(津村建四朗：山形大学理学部、
現 地震予知総合研究振興会)

関東～九州地方の高精度重力図

志知龍一

1. はじめに

重力研究を始めて以来かれこれ40年の歳月を重ね、「名古屋の重力」と評価される実績をあげるに至った。この成果は、時を同じくして開始された日本の地震予知計画に深く関わっている。同計画に基づき、名大でも微小地震・地殻変動・地球電磁気・岩石物性等々の分野が整備され、その一環として1978年にラコステ重力計が導入されたのを契機に重力研究が開始された。

当初の主な目標は、それまで大量に残っていた重力データの空白域の解消に据えられ、まず名大独自の重力グループを立ち上げ、精力的に測定を積み重ねる作業を開始した。その一方、40を超える他機関の重力研究グループにも参加を呼びかけて西南日本重力研究グループを立ち上げ、データベース(SWJGDB)の編纂と公表に努力を続けてきた。ここでは、現時点での到達点を報告する。

2. 重力測定点分布図

図1に、これまでコンパイルされた重力測定点の分布を示す。データの出所を分かりやすくするためカラー表示にしてあり、赤っぽい暖色で表しているのがSWJGDBによるもの、青っぽい寒色調のものがその他の機関＝地質調査所や資源関係の機関によるものである。

データの無空白化にSWJGDBは大きく貢献しているが、その足跡は以下のとおりである。まずは名大に身近な(1)中部山岳地域に始まり、全域が膨大な空白域であった(2)四国地方を手始めに、(3)近畿地方、(4)中国地方、そして最も

重要な地域として(5)関東地方へと進んだ。ここには膨大なデータが存在していたが公開される見込みがなく事実上の空白域だったことに鑑み、独自に測定を実施し、空白を解消した。これについて(6)新潟から始まり、(7)東北地方へ、その後(8)九州地方の全域を踏破し、全体の目標をほぼ達成した。SWJGDBの測定点が占める面積は優に日本列島の半分を覆い、ほぼ60%に近いと思われる。

この間、2001年には西南日本の重力データベース公開を実施したが¹⁾、同じころ地質調査所からは東日本を中心とした大きな重力データベース(GSJGDB)が2000年に公開された²⁾。両者は互いに独立なものであったが、当然のこととして、この2つを統合した全日本重力データベース(JGDB)の作成が望まれるところとなった。重複データの排除、異常値の修正など骨の折れる作業が続けられ、新たな測定値も加えたデータベースは2011年に公表された³⁾。現時点のJGDBには約45万点の重力データが含まれている。

図1を見ると、北海道にはまだ広い空白域が見られるが、実際にはここに大量の未公表重力データが存在している。これらが公開され、JGDBに加えられることを期待したい。

3. 高精度重力図

図2に、現時点でのJGDBに基づいて作成された、関東地方から九州地方にかけての重力異常(ブーゲー異常)の分布を示す。重力異常とは、重力の実測値と、理論モデルから予想される重力値との差であり、地下における構造や密度の異常などを反映している。



図3 大阪府周辺の重力異常分布と活断層

図中に見られる無数の線状の帯は地形図での等高線にあたり、密集して黒く見えるところは急峻な崖であることを表している。これを「重力急変帯」と呼び、長い地質時代を通して地球の内部にできあがった断層に対応している。

この断層構造には、(1) 古い時代に活動を停止・固結してしまったものと、(2) 現在進行形で活発な活動を続け、将来も活動していく可能性が高いものがある。後者は「活断層」と呼ばれ、地震活動と密接に関係している⁴⁾。

図3は、2018年6月に大阪府北部地震(M6.1)が発生した大阪府付近を拡大した重力異常図で、六甲・淡路島断層帯、上町断層帯、有馬-高槻断層帯などが重力急変帯としてはっきり読み取れる。

このほか、図2には、①重力値のえくぼ・にきび(凸凹)が房総南部、東海地域、阪神地域などに見られること、②千葉県北部および周辺に波長10kmほどの規則的な波状構造が見られること、③伊豆大島に螺旋状の構造が見られること、など興味深い特徴が散見される。これらについては、今後の重力研究に期待したい。

謝辞

飯吉厚夫中部大学理事長には同大での重力研究に力強い励ましと支援を賜った。故 中川一郎京都大学名誉教授には精密重力測定の手ほどきを

いただき、環太平洋重力結合の経験も積ませていただいた。名古屋大学関係では、本重力図の出版にご尽力いただいた足立 守名誉教授、いろいろとご議論いただいた古本宗充、水谷伸治郎の両名誉教授に感謝する。また、ともに仕事を進めてきた山本明彦前愛媛大学教授、工藤 健中部大学教授をはじめ、さまざまなご協力をいただいたすべての機関、および地方自治体の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) The Gravity Research Group in Southwest Japan (Reps. Shichi, R. and Yamamoto, A.). 2001. Gravity measurements and database in southwest Japan, gravity database of Japan (CD-ROM). *Bull. Nagoya Univ. Museum, Spec. Rep.*, 9.
- 2) 地質調査所(編). 2000. 日本重力CD-ROM. 数値地質図P-2, 地質調査所.
- 3) Yamamoto, A., Shichi, R. and Kudo, T. 2011. Gravity Database of Japan (CD-ROM). *Earth Watch Safety Net Res Cent, Chubu Univ.* 1 (Special Publ).
- 4) 萩原幸男. 2008. 重力異常から活断層がわかる!?. *地震ジャーナル*, 45, 24-26.

志知龍一

[しち りゅういち]

現職 名古屋大学名誉教授, 理学博士

略歴 名古屋大学理学部地球科学科卒業. 名古屋大学助手(犬山地殻変動観測所), 同助教授, 教授, 中部大学工学部教授を経て現職

研究分野 測地学・固体地球物理学

書籍 日本列島重力アトラス: 西南日本および中央日本 (CD-ROM) (共著: 東京大学出版会) など



図1, 図2の画像は、地震本部HPの「素材集」で「重力」を検索することによりご覧いただけます。また、著者のご好意により図1, 図2のA1判ポスターを無償配布致します。ご希望の方は、お名前、発送先を明記の上、下記あてお申込みください。なお、発送は「着払い宅急便」とさせていただきます。

申込み先: (公財)地震予知総合研究振興会 岡田
Fax: 03-3295-3136 E-mail: okada@8f.adep.or.jp

新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用

内山庄一郎

1. はじめに

SfM (Structure from motion) は、画像処理をベースとした撮影位置推定技術や三次元形状復元技術であり、これらがパッケージされた低価格、あるいはオープンソースのソフトウェアの登場によって、一般的な PC でも写真から三次元モデルを作成できるようになった (内山ほか, 2014a)。そして、この SfM と写真測量とを組み合わせさせた、低コストで実用的な観測手法の登場は、自然災害の研究にも新たな転機をもたらしつつある。本稿では、3つの応用事例とともに、新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用について検討を行う。

2. 既存の地表面観測手法

地形や地物の形態や状態を定量的に把握すること、つまり地表面の観測手法は、技術の進歩とともに多様化し、より広域を、より細かくみることができるようになってきた。既存の手法を観測機器と対象物との距離で分類すると、遠いところから順に、人工衛星によるリモートセンシング、航空機による撮影やセンシング、人間による現地踏査の3つがあげられる。観測における空間分解能は、対象とする現象のサイズを、精度は検出可能な変動量を、それぞれ規定する。一般的な傾向として、観測対象との距離が離れるほど広域を観測でき、空間分解能は低下する。また、人工衛星や航空機の観測は専門機関により行われるため、ユーザーは、観測済みのデータを探して購入する

必要がある。

このような観点で既存の観測手法を整理すると、人工衛星および航空機と、現地踏査との間には、空間分解能、観測対象や範囲と観測機会の自由度に、大きなギャップが存在する。換言すれば、研究者自身が観測対象と観測タイミングを決め、高い空間分解能で観測できる手法が欠落しているということができる。

3. 写真測量と SfM 技術の融合

写真測量は、地表面の観測手法の代表例の1つであり、たとえば、国土の基本図たる2万5千分の1地形図の作成に利用されてきた。写真測量では、撮影範囲が重複するように撮影された垂直写真のペアを用いて、空中の2つの視点から地表のある1点への角度を計測する。このとき、写真の撮影位置が既知であれば、地表の任意の地点の位置について、三角測量によりその三次元座標を求めることができる。しかしながら、これにはメトリックカメラ (写真測量専用のキャリブレーション済み大型カメラ) と、それを搭載する航空機、そして空中三角測量による解析処理が必要であり、研究者自身が、必要なときに必要な場所の計測を行えるような手法ではなかった。

こうした伝統的な写真測量と比較すると、SfM 写真測量は、特に実用性の面で異色といえる。新しい手法のため、SfM 写真測量という言葉は、必ずしも学術用語として一般的とはいえないが、ここでは、SfM 技術を用いた写真測量と定義する。SfM とその関連技術 (以下、一括して SfM と称する。) は、コンピュータビジョン分野の要

素技術として開発された。カメラの映像から周囲の三次元空間をリアルタイムに計算する、いわば「ロボットの目」となる技術である。こうした用途のため、自動で、高速な処理が求められた。このSfMの技術的な特徴は、写真測量に必須となるパラメータ（撮影位置とカメラの向き、およびレンズの光学的な歪み）が自動で推定される点にある（図1）。

この特徴をうまく活かせば、メトリックカメラなどの専用機材がなくても、写真測量を行うことができる。このためSfMは、デジタルカメラやスマートフォンのカメラ、あるいはドローンなど無人航空機（以下、UAV）のカメラなど、低価

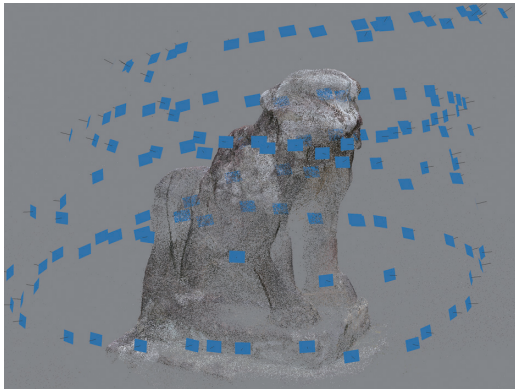


図1 写真撮影位置（青い四角）とカメラの向き（黒い棒）の自動推定の例

格な民生用機材との親和性が高い技術といえる。このように、技術的な源流は同じだが、それぞれが異なる用途で発展し、再統合された観測手法がSfM写真測量である。

4. SfM 写真測量の適用事例

ここでは、SfM写真測量の活用事例として、雪崩災害、土石流災害、そして津波石碑の判読事例の3例を紹介する。

4.1 2017年那須町雪崩災害

2017年3月27日午前8時30分ころ、栃木県的那須岳国有林内において表層雪崩が発生し、登山研修中の高校生等が雪崩に巻き込まれた。この雪崩により、死者8名を含む人的被害が発生した。この雪崩の範囲を明らかにすべく、発生から6日後にUAVによる撮影とその写真のSfM解析（以下、UAV-SfM）を行った。その詳細は文献（内山ほか、2018）に譲ることにして、ここでは、積雪表面に発見された模様（同文献では、積雪表面形態と呼称）について紹介する。

図2に示す積雪表面形態は、雪崩が発生した斜面上およびその周辺にのみ観察される特徴的な模様である。これらが分布する場所およびその形態的特徴から、雪崩によって積雪層に対する引っ張りや圧縮の応力が生じ、積雪層の状態が変化して

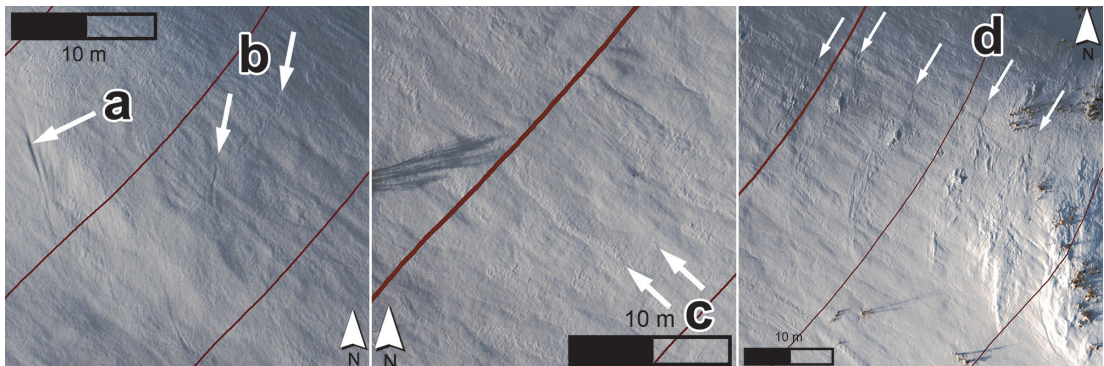


図2 積雪表面形態（内山ほか、2018より引用、加筆）。a: クラックのような条線（直線状）、b: クラックのような条線（円弧状）、c: 蛇行する筋状の条線、d: ほぼ等間隔に並ぶ条線群

形成されたものと推定される。全層雪崩の場合は、グライドクラック、こぶ状起伏、雪しわ（遠藤・秋田谷，1977 など）といった積雪層の形態変化から、雪崩の発生時期を予測する研究もある。しかし、表層雪崩には同様の研究例は少ない。これは、表層雪崩が発生から収束までの時間がきわめて短いこと、発生場所の予測が難しいこと、再発の危険があり立ち入りができないこと、そして、全域を高い空間分解能で観測する手法がなかったことが理由である。ここでは、UAV-SfMの適用により積雪表面形態の存在が新たに見出された。さらに、低コストで簡便な UAV-SfM であれば、シーズンを通じた連続的な観測も現実的に可能である。これにより、積雪表面形態の発生から消失までの変化を時系列で観測し、表面形態の変化をプロセス的な意味で明らかにできる可能性がある。この例は、UAV-SfM の活用により、これまで未知であった自然環境の変化プロセスの存在が指摘された事例である。

4.2 2014年8月豪雨による広島土石流災害

2014年8月20日未明、広島市内は集中的な豪雨に見舞われた。これにより土石流が発生し、扇状地上の住宅密集地に流れ込んだことにより、同市安佐南区を中心とした地域で74名の犠牲者を伴う甚大な被害が生じた。被害の全体像把握をとおして捜索救助活動を支援するため、発生から4日後に UAV-SfM 調査を実施した（内山ほか，2014b）。この意図は、災害前に撮影された空中写真（国土地理院）を入手して SfM 解析を行い、災害後の UAV-SfM と合わせて災害による地表面の高さ変化を求めれば、土石流によって流失した家屋の位置や、厚く土砂が堆積した場所を明らかにできると考えたものである。

図3に、八木3丁目（広島市安佐南区）の災害前後の地表面高さ変化図を示した。地表面変化の凡例は、暖色系がプラス（土砂堆積など）、寒色系がマイナス（家屋流失など）、無着色が変化なしを示す。図3のAの範囲では、上下70mの区間にあった住宅7棟が流失し、20名の犠牲者を

生じた。図3のB付近には、土石流で流失した2014年4月完成のアパートがあったが、災害前の空中写真では未完成で空き地であったため、高さ変化の見かけ上はプラス（堆積）にみえた。図3のC付近は土石流の主流路となったが、土砂の堆積はほぼみられなかった。この部分は、土石流の流速が速かったものと考えられる。図3のD付近では、主流路の突き当たりにあるアパートの駐車場に、層厚2mを超える土砂が堆積した。

土砂災害の捜索救助活動では、流失家屋の元の位置や、土砂の流れ止まりの位置の把握が求められる（消防庁，2015）。また、掘削による捜索では、元の地表面の高さを現場で確認できないため、掘り下げすぎることがあり、捜索効率の低下をもたらす。捜索支援地図から、こうしたニーズや課題に対応するために有用な情報を読み取ることができる。UAV-SfM の活用により、局地的ではあるが適切なタイミングで迅速に被害状況の把握が行われた。これまで人海戦術が中心であった災害対応の初期フェイズの最前線において、情報を活用した活動の展開の可能性が示された事例である。

4.3 津波石碑の判読事例

最後の事例は、石碑の文字列を対象とした SfM による三次元モデルの作成である。この石碑は千葉県南房総市白浜町の巖島神社境内にあり、1927年に建立されたものである。この地域では、1923年に発生した大正関東地震により海岸が隆起し、灯台が崩壊するなどの被害を受けた。石碑には、海岸の隆起量（六尺）や被害の様相が記録されているが、石碑の文字は、苔の繁茂や風化によって読み取りが難しくなりつつある。この試みの目的は、石碑の表面に浅く掘られた文字列を三次元モデルとして再現し、その判読を容易にすることである（内山ほか，2014a）。

図4の右に、石碑の三次元モデルから作成した陰影図を示した。なお、左が石碑の正面写真である。浅く掘られた文字の凹凸が、陰影処理によって強調されている。さらに、三次元モデルでは石の色や苔などによる変色の影響も受けないため、

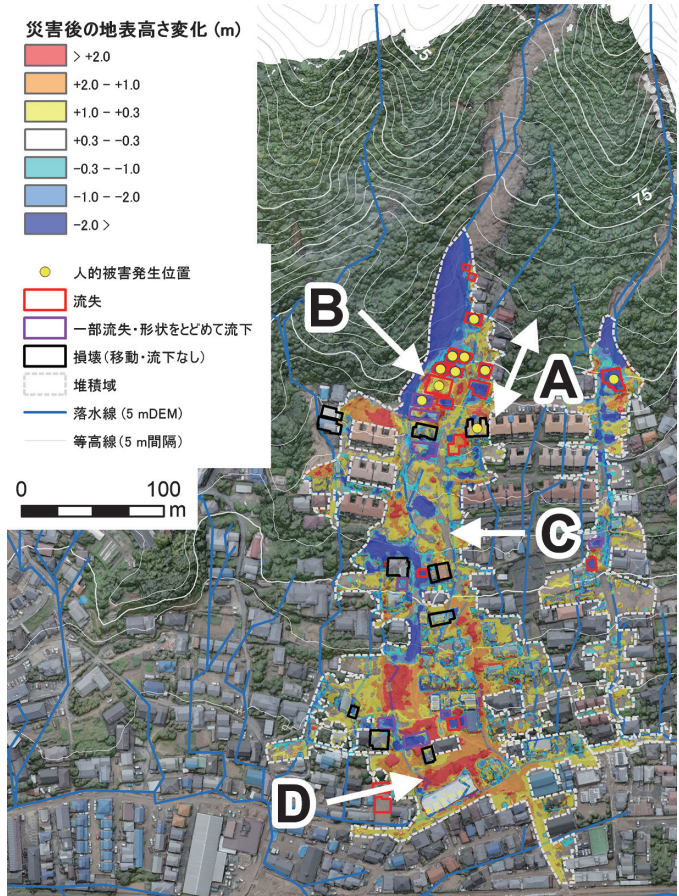


図 3 災害前後の高さ変化図。A：住宅が流失した区間，B：災害直前に完成したアパートがあった地点，C：堆積がみられない領域，D：下流部の厚い土砂堆積域

文字の判読が容易になった。文字列から読み取ることのできる大意は次のとおりである。

「震災復興記念碑 大正 12 (1923) 年 9 月 1 日、関東大地震で海底が約 1.8m 隆起した。私達の白浜の漁港では潮が引き、船がすべてだめになった。この後、住民は村当局と力を合わせて、毎日朝から晩まで復興のため岩石をうがち、海底をさらう作業を行った。大正 13 (1924) 年 3 月に起工し、大正 15 (1926) 年 6 月 10 日に完了した。工事の総額は約 15,000 円であった。野島は隆起して岬となったが、この地にあった灯台が倒壊するなど、たいへんな被害を受けた場所であった。この被害に比べて村全体の被害が小さかった。こ

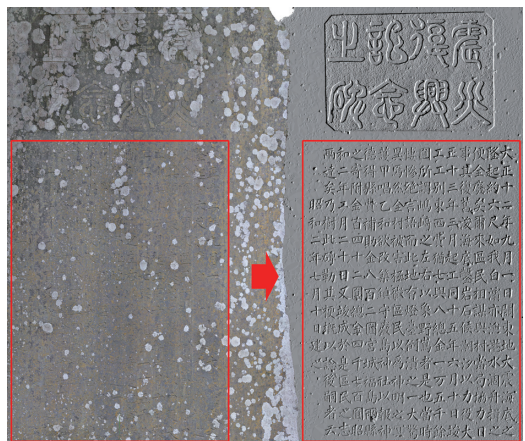


図 4 石碑の三次元モデル化による文字の明瞭化

れは神様が守ってくださったからであり、そのため、鎮守である厳島神社を改築しようということになった。神様のご神徳に報いるお金として、補助金 802 円と宮城・福島両県からの寄付金 142 円を合わせ、総額 4,700 円を得た。そして、昭和 2 (1927) 年 2 月 20 日に竣成し、住民たちの希望がかなった。このことを子孫に念入りに伝えるために、あらましを石に刻み石碑を建てる。昭和 2 (1927) 年 7 月 10 日建之」

この例のように、計測を目的としない三次元モデルの作成であれば、データの取得は手持ちのカメラで対象物の写真を撮るだけでよい。これは非接触の作業のため、対象物に影響を与えることもない。このため、石碑の判読の補助としてのみならず、低コスト、簡便であることから、多数ある歴史資料のアーカイブにも適用できる。この実用性を活かし、高知県と徳島県の沿岸にある地震津波碑のアーカイブに活用されている（谷川ほか、2017 など）。

5. ま と め

UAV や手持ちカメラによる SfM 写真測量は、必要なときに、高い空間分解能で簡便に三次元情報を得ることができた。これに対して、人工衛星や航空機による既存の観測手法では、空間分解能の低さにより小規模な現象を特定できないことや、観測頻度の低さにより複数の地表変動の影響を分離できないことが課題であった。一方で、SfM 写真測量では、機材コストを劇的に小さくすることができ、自動化された解析により簡便な運用が可能となった。こうした特性により、人工衛星・航空機と現地踏査との間にある観測手法の特性のギャップを埋める、新しい手法としての地位を確立しつつあるのではないかと。今後、それぞれの観測手法の特徴が相補的に活かされるような、役割の再編が生じることが考えられる。

SfM 写真測量の活用により、地表面の変動を

ともなうプロセスは、より詳細に計測され、現象の理解が促進される。また、研究にかぎらず、災害対応への適用や、アーカイブ技術としての活用など、社会における実用的応用の発展も期待される。

参 考 文 献

- 遠藤八十一・秋田谷英次. 1977. 斜面積雪の挙動の研究 VI:「こぶ」状起伏の形成とその機構. 低温科学, 物理篇, **34**, 99-110.
- 消防庁国民保護・防災部参事官付. 2015. 平成 26 年度救助技術の高度化等検討会報告書:土砂災害時の救助活動のあり方について(資料編).
- 谷川 亘・浦本豪一郎・内山庄一郎・折中 新・山品 匡史・原 忠. 2017. 高知県の地震津波碑の保全に向けたデジタルアーカイブ化計画. 歴史地震, **32**, 127.
- 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子. 2014a. SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, **81**, 37-60.
- 内山庄一郎・井上 公・後藤秀昭・中田 高・井田康之・梅田 篤. 2014b. 平成 26 年 8 月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた捜索支援地図の作成. CSIS DAYS, **2014**, 16.
- 内山庄一郎・鈴木比奈子・上石 勲・中村一樹. 2018. 雪崩災害調査への UAV-SfM の適用:2017 年那須町雪崩災害の事例. 自然災害科学, **37** (特別号), 119-135.

内山庄一郎

[うちやま しょういちろう]

現職 国立研究開発法人防災科学技術研究所マルチハザードリスク評価研究部門特別技術員. 博士(環境学)

略歴 東北学院大学大学院文学研究科博士前期課程修了, 東京大学新領域創成科学研究科博士後期課程修了, 2003 年より現職

研究分野 地球人間圏科学, 地理学

著書 「必携ドローン活用ガイド」(東京法令出版)



■ 書 評 ■

● あいまい情報をどう生かすか

山崎 登 著

地震予知大転換 最近の地震災害の現場から

評者 横山裕道

ずっと地震予知の問題に関心を持ち続けてきたので、本のタイトルの『地震予知大転換』に引かれた。しかも著者は、まさに「予知大転換」を打ち出した政府の「南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループ(WG)」の委員を務め、会議でも積極的に発言してきた人である。

石橋克彦さんが1976年に東海地震説を提唱し、1978年には大規模地震対策特別措置法(大震法)が成立した過程などを振り返りながら、著者は「こうして地震学者の予知に対する前のめりな姿勢と、地震予知と防災に対する社会の期待と、当時の政治の思惑と、メディアの協力によって、地震予知への幻想と東海地震は作り上げられたらいいと思う」と厳しく総括した。

その後、阪神・淡路大震災や東日本大震災を経て東海地震の予知は容易ではないことが分かってきた。たとえ前兆をとらえることができたとしても、「地震発生の可能性が相対的に高まっている」というくらいしか言えないというのだ、と指摘する。そして自らが属したWGが2017年9月に「現時点においては、地震の発生時期や場所・規模を精度高く予測する科学的に確立した手法はない」とする報告書をまとめたことに言及する。

「可能性の高まり」というあいまいな情報をどう生かしていけばいいのか、難問だが、「情報を出す側がどのような情報なのかを丁寧に説明し、情報を受けたときにどう受け止めればいいのかを周知し、それをメディアが噛み砕きながら繰り返し伝えることが必要だ」と元NHK解説委員らしくメディアの役割の重要性を強調する。予知が可能になれば被害を大幅に減らせるため「将来の地震予知を目指した研究はあきらめないで欲しい」と願う。

気象庁が東海地域に設置しているひずみ計が普段と違う地盤の変化を観測した場合でも、「可能性の高まり」以上のことは現段階では何も言えないというのが政府の

立場だ。それなら「地震予知はできません」と言いきったほうがすっきりするのではないかと、現に自治体側はいまなお南海トラフ地震の前に国が何か言ってくれるという期待を抱いている。そのへんのことに言及していないのが物足りないが、著者は最新の動きの「予知大転換」に触れながら、どうすれば地震国日本の防災の質を高めることができるかに主眼を置いたようである。

その意味で興味深い指摘が何点もある。たとえば東日本大震災以降、多くの自治体や住民の関心の重点が津波対策に移っているが、住宅など建物を地震に強くすることが、地震防災対策の根幹だということを熊本地震は改めて教えたとし、耐震化の重要性を何度も主張した。現在の耐震基準を満たしている住宅の割合は1998年で68%、2008年で79%、2013年で82%と上がってきたが、全国の住宅の5軒に1軒は耐震性が足りない状況だと嘆く。

南海トラフ巨大地震の被害想定で、全国最高の34mの津波が襲うとされた高知県黒潮町の取り組みの紹介もなるほどと思わせる。避難をあきらめる人などが出てきたため積極的な対応が必要だとして、黒潮町は防災対策を緊急かつ最優先の課題と位置づけ、津波の避難場所・避難路の見直しや整備にすぐ手を付けたほか、津波で大きな被害を受ける場所にある消防署の移転を決めるなど中長期的な課題を整理した。185人の職員全員が61ある集落の防災担当になったという。

さらに自治体のトップに災害時の重い責任を負わせながら、そのための研修や判断を補佐する仕組みがないことを問題視し、選挙で当選した市町村長が災害を経験した市町村長から直接研修を受けるような仕組みを作することを提案している。被災地で取材した何人かの市町村長が「災害時に待たなしの判断を求められ、あれほど孤独を感じたことはなかった」と話したという。

どの話も説得力があり、あまり深く踏み込まなかった「予知大転換」のほうは付け足しのように感じてしまった。震度5と6は震度階の変更で弱と強に分かれたが、まだ「震度6以上の地震」「震度5や震度4の強い揺れ」のような表現があることも少し気になった。

<近代消防社、2018年4月、四六判、160頁、1,400円+税>

[よこやま ひろみち 科学・環境ジャーナリスト]

● 北海道大地の成り立ちを知る

木村 学・宮坂省吾・亀田 純 著 揺れ動く大地 プレートと北海道

評者 安藤寿男

2018年9月6日の北海道胆振東部地震は、日本地質学会第125年学術（札幌）大会中のことであった。2日目以降の行事の中止を余儀なくされたが、6日当日は、朝からブラックアウトの中、北海道大学の会場（旧教養部）に多くの会員が集まり、心配げに行事や町の復旧、そして帰路の行方について情報交換する姿がみられた。停電中の午後のポスター会場の一角で、木村 学氏と宮坂省吾氏がコーナーを設けて、北海道での地質学会や北海道命名150年という佳節に合わせて出版された本書を販売している姿を見つけその場で入手した。本書を読み始めたのは、地震の当日に著者から紹介され、揺れ動く大地の謎を知りたいがためであった。

本書は12章からなり、10章までは、1) 周囲の海底地形も含めた北海道の地形、2) プレート配置とその運動、3) 北海道の地質や地質構造の特徴、4) 日本列島や東アジアも視野に入れた、ジュラ紀以降の北海道の地質発達史が、一般の読者にもわかるように入門的な解説を交えて、包括的に書かれている。地球科学系研究者にとって役立つ概念図や地図、衛星画像、地質図、それに地震分布図や地震波速度分布図などが、多くはカラーで掲載されており、重要な露頭写真も少なくない。何より、日本列島の構造地質学研究を先導してきた木村氏の文章は説得力がある。自身のものを含めた最新研究や世界の研究動向を踏まえ、先駆的研究やいくつかの異論も尊重しながら、重要な論点を整理して、現在の推論にたどりついた経緯が論述されているので、臨場感に溢れている。

評者は北海道を含めた日本の白亜紀前弧堆積盆の層序・堆積相・化石相のような、どちらかと言えば地味な実証的な研究に携わってきた地質古生物系研究者なので、中生代から現在、北米プレートからユーラシアプレートといった、長大・広域の時空レベルで日本列島や北海道を捉える姿勢は大いに参考になる。ここまで読み進んでくると、北海道の成り立ちを理解することは、日本列島の複雑な形成史を読み解く鍵になることがわかってくる。また、2つの島弧（本州弧と千島弧）衝突帯の現在の変形フロントの1つが、石狩低地東縁断層帯であることを教えてくれている。言うまでもなく北海道胆振東部地震との関連が注目されている。北海道に沈み込む太平洋プレートの境界地震とは別に、上盤側の北海道中央部南部（日高山脈西方～石狩低地帯）にも東西圧縮に

よる逆断層型の地震分布域があることが示されている。タイムリーなことに、今回の地震の可能性を地震学の情報から指摘していたのである。

11章は「地球環境と北海道の現在そして未来」として第四紀の環境変動が概説され、12章は「北海道に住むヒトとその未来」と題して結章になっており、木村氏の北海道の大地やヒトに対する現状分析や所論が披瀝されている。さらに付章として「北海道の大地研究のルーツ」があり、氏の日本の地質学史や科学史に対する造詣の深さや歴史観が散りばめられている。本章だけで科学史分野の総説として独立させてもよいと思えるほど、豊富で興味深い内容が紹介されている。たとえば、ライマン、ナウマン、原田豊吉といった地質学草創期（明治初期）の日本の地質学者を、当時の世界情勢や人間評価を含めて、彼らの長短を複層的に再評価するあたりは、実に感心する。

各章の間には、合計12項目の重要な用語（たとえば、日高造山運動、イザナギプレート、ネフチェゴルスク大地震など）が亀田氏や宮坂氏によって解説されており、各章で参考にした文献も巻末にあげられている。

本書は、木村、宮坂両氏の北大教養部時代の師である松井 癒先生が編者となった、『北海道創成記』（1984年、北大出版会）の改訂版の意義を込めて企画されたとのこと。古本を手に入れて両者を見比べてみると、学問の進歩の早さと、その内容の違いに隔世の感がある。11、12章が1～10章の内容と大きく異なりやや違和感を感じたが、これは先の書の構成を踏まえてのことと合点がゆく。35年前の書に携わった木村、宮坂両氏が、木村氏のもとで育った亀田氏とともに、地質学の最新の視点から北海道創成記を書き改められたことに敬意を表したい。

はじめにの結文にある「地球の大自然の偉大さと、北海道の自然・大地への愛着の念、そして時には荒れ狂う自然への備えを一層ましていただければ、私たちにとって望外の喜びである」を噛みしめながら、北海道から無事水戸に戻って来られたことを、今のこのように思い出す。

<北海道新聞社、2018年8月、A5判、185頁、1,800円+税>
[あんど] ひさお 茨城大学理学部教授]

● 150 年来の謎と向き合う

藤岡換太郎 著

フォッサマグナ

日本列島を分断する巨大地溝の正体

評者 小山真人

フォッサマグナは中学校社会科や高校地学の教科書にも取り扱われて知名度は高いが、それを主題として取り上げた一般向けの解説書は過去になかったように思う。フォッサマグナの成因については長い論争がある上に、その定義や範囲すら混沌とした状況にあるので、あえて誰も手を出さなかったのだろう。その難題に正面から立ち向かった著者の試みを大いに評価したい。

著者の藤岡さんは、東京大学海洋研究所や海洋研究開発機構などで海洋地質の研究に携わる傍らで、最先端の研究者を招いた普及講演会「湘南地球科学の会」を25年以上200回近くにわたって主催し、まさに博識を絵に描いたような方である。退職後は普及啓発書の執筆に取り組み、わかりやすい語り口で読者を魅了する著作を数多く刊行されている。そんな藤岡さんが本書を出されたというので、二つ返事で評者をお引き受けした。

本書は8つの章から構成されている。それらは「序章：ナウマンの発見」「第1章：フォッサマグナとは何か」「第2章：地層から見たフォッサマグナ」「第3章：海から見たフォッサマグナ—日本海の拡大」「第4章：海から見たフォッサマグナ—フィリピン海の北上」「第5章：世界にフォッサマグナはあるか」「第6章：＜試論＞フォッサマグナはなぜできたのか」「第7章：フォッサマグナは日本に何をしているのか」であり、目次をただで読む気まんまんにさせられる。また、各章末には「フォッサマグナに会える場所」として日本各地のジオパークの紹介コラムがあり、読者を旅へと誘う。

実際に読み始めてみると、1875年にナウマンがフォッサマグナを「発見」した経緯を語る序章から始まり、第1章にはフォッサマグナとその関連事項についての基礎概念や論点が要領よく説明され、すんなり頭に入る。この調子なら、読者が途中でくじけることもなさそうに思えた。

しかし、思いがけなく、評者は第2章以降で何度もつまづいて考え込んでしまった。その原因は、ひとえに著者の博識と熱意が災いして、話題を盛り込みすぎたせいではないだろうか。

フォッサマグナの成因や、それに関連する現象につい

ては多数のモデルが提案され論争が続けられてきた歴史があるが、すでに決着のついたものとそうでないものが十分整理できていないように感じられた。たとえば、古地磁気学の確固たるデータによって、日本海の「観音開き」や海溝後退によるフィリピン海の拡大はすでに明らかだから、わざわざ他のモデルを対立項として取り上げて話をややこしくする必要はなかったように思う。その結果、議論全体が混沌として未解決の印象を与えすぎているようにみえる。フォッサマグナの成因や東縁問題については、最近の高橋雅紀氏（産総研）の一連の研究によってかなり納得のいくレベルに達したと評者は考えているが、著者はそうでないのだろうか。

さらに、気の利いた解説図表が少なく、説明も簡略すぎて話についていけない箇所が多々あった。海溝三重点は本来不安定なものだが、それが近くにあるがゆえにフォッサマグナの構造が保存されたという理屈も、説明不十分でよくわからない。主題と異なる話題の集まりである第7章を思い切って削ってしまったほうが、根幹の説明を手厚くできたのではないだろうか。また、地質学用語が多い第2章も、さらに噛み砕いて平易にしてほしかった。

以上、後半はやや辛口の紹介となってしまったが、一般読者にとっては的外れなことを書いたかもしれない。フォッサマグナ全般に関する、現在のところ唯一の貴重な普及解説書である点はゆるぎなく、第7章があるがゆえに広範な興味を喚起することも間違いないので、ぜひ一度手にとってみることをお勧めしたい。

＜講談社ブルーバックス、2018年8月、新書判、

240頁、1,000円＋税＞

〔こやま まさと 静岡大学教授〕

● 災害対策における社会科学的アプローチの重要性

Robert Meyer, Howard Kunreuther
著、中谷内一也 訳

ダチョウのパラドックス 災害リスクの心理学

評者 関谷直也

ダチョウは飛べない。リスクに直面したときに頭を砂に突っ込みやりすごそうとするという（実際はそういうわけではない）。だが、飛べないという肉体的限界を織り込んで、リスクに直面した場合、猛スピードで走って逃げ去ることができるように進化した。われわれも、リスクに直面したときにそこから目をそらそうとする。そ

の心理的なバイアスから逃れられない。ならば、まずそれを認識したうえで、DNAに組み込まれた心理的なバイアスという認知的限界を織り込んで災害対策を考えることはできないだろうか。それが本書の意図である。そこで本書では、さまざまな形で指摘される、災害の危険性に直面したときに適切な意志決定を妨げる心理的なバイアスを「近視眼的思考癖（双曲割引、現在バイアス）」「忘却癖」「楽観癖」「惰性癖」「単純化癖」「同調癖」の6つに類型化し、解説している。

本論の難点は2点ある。

第一に、過度に「心理主義的」な点である。社会現象と心理現象を架橋しようという心理学は、心理的な法則、その総体としての社会的な法則の両面の関係を明らかにしようとする取り組みである。だが、著者は「行政や企業など組織の意志決定」と、「個人の意志決定」に関する一般的な法則を意図的に混在して論じている。たとえば、タイの気象庁が津波警報システムを導入しなかったこと、ハリケーン・アイヴァンの被災後にニューオーリンズ市が限定的な改善しか行わなかったためにハリケーン・カトリーナによる甚大な被害を生んだことなどを、「結果はシステム1（評者注：直感的、感情的に行う意志決定）によるもの」といって変わらない。どの行動を起こすべきかという優柔不断な議論の末、何も決めないという決定に至ったのだ」とし、組織や緊急事態担当者の不作為を、心理的バイアスの帰結とする。すなわち、個人の心理バイアスによって、社会が説明できるというのである。これでは社会課題解決に対する構造的な行政や組織の不作為はすべて、人間の心理のみで説明できることになってしまう。

第二に、過度に「一般化」している点である。一事例と、意志決定に関する一般的な法則を過度に結びつけすぎている。たとえば7章では1977年のビバリーヒルズ・サパークラブで165名が亡くなった事象を紹介している。このクラブのクリスタルルームの人々のみが逃げ遅れ、出口付近で多くの人々が亡くなったというもので、「パニック」の事例としてよく取り上げられるものである。筆者は、この事例を惰性癖と群集への同調癖の結果として紹介する。

だがパニック研究として、あまりにも有名なこの事例には追記すべき周知の見解がある。サパークラブ火災という同じ状況でも、クリスタルルーム一部屋でしかそのような問題は発生してなく、サパークラブにいた1,350人の9割は避難している。筆者のいう心理的バイアスの

結果としての逃げ遅れやパニックは同じ状況下であっても起こる場合と起こらない場合がある。パニックという集合現象は、特定の心理的条件や社会的条件のときに必ず起こるものではない、むしろ逆で多くの人が合理的に対応すること、また個人の心理の足し算の結果が集合行動を生むわけではなく、同じような条件でも異なる集合現象の帰結を生むことの証左として使われる事例なのである。

他にも流言、流行、世論、選挙における投票行動やグループシンクといわれるような社会心理的な現象は、個人の心理の延長線で語れるものではない。元の例でいうならば、議論や検討があつて対策をとらなかつたにしろ、議論や検討がなくて対策がとられなかつたにしろ、それは社会的、組織的な意志決定の結果であり、個人の意志決定の延長線で議論はできない。多くの社会心理学的研究は、個人の意志決定の集積が集合的、集団的意志決定とは一致しないことを明らかにしてきたのだが、本書ではさまざまな事例、集合的、集団的な意志決定はすべからず個人の意志決定の延長線上で語られてしまっている。

ただし、非常に首肯できる点もある。

災害対策における心理学や行動経済学など社会科学のアプローチの重要性を強調している点である。人間の心や社会の動きはそう簡単に変えることはできないとの前提に立ち、コントロールしようとするより、まずは観察しようという点だ。社会工学的な立場から人間の心に抗するような無理な教育を行ったり、社会の動きに抗するような経済的、技術的な施策を実施したりしてもうまくいかない。まずは人間の心にそった制度設計、インセンティブ（オプトアウト、複数年契約の洪水保険、制度の単純化、規範、報酬金や見返りなど）の仕組みを考え、災害に対処していこうという。災害被害を減らそうとするならば、人の心理に沿う合理的な災害対策を進めるべきだという。

これは強く賛同する。

合理的な災害対策のためには、その裏付けとなる社会科学的研究が必要である。心理学的研究やコミュニケーション研究は「手段」ではない。人の心や社会の動きの基礎にある心理現象も、地震や火山など地球の物理現象と同様に、深淵な学術研究の対象なのである。

<丸善出版、2018年9月、B6判、192頁、2,800円+税>

[せきや なおや 東京大学准教授]

●新刊紹介

北海道新聞社 編

報道写真集 2018.9.6 北海道胆振東部地震

ほるぷ出版, 2018年10月, A4判, 128頁, 1,080円

河宮未知生 著

シミュレート・ジ・アース—未来を予測する地球科学

ベレ出版, 2018年10月, 四六判, 264頁, 1,836円

中島淳一 著

日本列島の下では何が起きているのか—列島誕生から地震・火山噴火のメカニズムまで

講談社, 2018年10月, 新書判, 295頁, 1,188円

平井一男・水田洋司 著

耐震工学入門 第3版・補訂版

森北出版, 2018年10月, 菊判, 192頁, 2,916円

山賀 進 監修

日本列島 地震の科学

洋泉社, 2018年11月, A4変判, 111頁, 1,404円

鈴木猛康・上石 勲・橋本隆雄・山本吉道 著

防災工学

理工図書, 2018年11月, B5判, 318頁, 3,780円

安田 進・石川敬祐 著

建設技術者を指す人のための防災工学

コロナ社, 2018年12月, B5判, 133頁, 2,592円

瀬戸 一 著

地震動の物理学

近代科学社, 2018年12月, A5判, 363頁, 4,860円

高橋正樹 著

火山のしくみパーフェクトガイド

誠文堂新光社, 2019年1月, B5判, 176頁, 1,944円

巽 好幸 著

火山大国日本 この国は生き残れるか—必ず起きる富士山大噴火と超巨大噴火

さくら舎, 2019年1月, 四六判, 232頁, 1,620円

川島一彦 著

耐震工学

鹿島出版会, 2019年1月, B5判, 336頁, 6,264円

吉田英嗣 著

はじめての自然地理学 [第二版]

古今書院, 2019年2月, B5判, 118頁, 2,592円

水永秀樹 著

はじめの一步 物理探査学入門

九州大学出版会, 2019年2月, A5判, 370頁, 3,888円

岡田篤正・八木浩司 編著

図説日本の活断層—空撮写真で見る主要活断層帯 36—

朝倉書店, 2019年2月, B5判, 216頁, 5,184円

井田喜明 著

予測の科学はどう変わる? 人工知能と地震・噴火・気象現象

岩波書店, 2019年2月, B6判, 128頁, 1,296円

宇田川義夫 著

地質工学—ジオドクターの処方箋—

デザインエッグ社, 2019年2月, B5判, 208頁, 2,700円

福和伸夫 著

必ず来る震災で日本を終わらせないために

時事通信社, 2019年3月, 四六判, 380頁, 1,944円

秋山充良・石橋寛樹 著

南海トラフ地震 その防災と減災を考える

早稲田大学出版部, 2019年3月, A5判, 152頁, 1,620円

福和伸夫・飛田 潤・平井 敬 著

耐震工学 教養から基礎・応用へ

講談社, 2019年3月, B5判, 304頁, 3,564円

高橋正樹・栗田 敬・鶴川元雄・加藤央之・磯崎行雄 著

眠れなくなるほど面白い 図解 地学の話

日本文芸社, 2019年3月, A5判, 128頁, 810円

岡田義光 著

日本の地震地図 決定新版

東京書籍, 2019年3月, A5判, 280頁, 1,944円

ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

退職

衣笠 善博	本部地震防災調査研究部 副首席主任研究員 (非常勤)	19. 3.31
鈴木 保典	地震調査研究センター 主任研究員 (非常勤)	19. 3.31
菅原 光滋	つくば観測技術センター 副主任研究員	19. 3.31

採用

岩崎 貴哉	本部地震防災調査研究部 兼 地震調査研究センター 副首席主任研究員 (非常勤)	19. 4. 1
光井 能麻	東濃地震科学研究所 主任研究員	19. 4. 1
堀口 美央	つくば観測技術センター 副主任研究員	19. 4. 1

配置換等

松浦 律子	地震調査研究センター 上席研究員 (旧) 地震調査研究センター 解析部長	19. 4. 1
古村美津子	地震調査研究センター 解析部長 (旧) 地震調査研究センター 解析部長代理	19. 4. 1

編集後記

今号は、年号が平成から令和に代わってから初の発行となる。本誌は1986（昭和61）年6月の創刊なので、三つの年号にわたり出版を続けてきたことになる。

平成の時代は、阪神・淡路大震災、新潟県中越地震、東日本大震災、熊本地震、北海道胆振東部地震など、大きな地震災害が相次いだ。令和はどのような時代になるのだろうか。

今号のトップには、昨年9月に発生した北海道胆振東部地震に関する論説を2編掲載した。この春に東大地震研を退職された岩崎先生ほかには、この地震の地学的背景を解説していただき、また北大の高井先生ほかには、この地震に伴った強震動の特徴と被害の様子について寄稿をお願いした。間もなく発生から1年を迎えるこの地震について、あらためて考え直す一助になれば幸いである。

最近、AI（人工知能）やIoT（物のインターネット）という用語をよく見聞きする。地震観測の分野においても、地面の揺れのみならず、建物の各部に数多くの強震計をとりつけることにより、構造物の地震時の挙動を分析したり、地震後の被災度判定を行おうとする技術が急速に発展しつつある。このあたりの事情について、東大地震研の楠先生より最新の状況を解説していただいた。

ところで、地震で被災した住民に

は、生活面や健康面でさまざまな困難が待ち構えている。2016年熊本地震の被災地で行われた住民へのアンケート調査により浮かび上がった諸問題について、当振興会東濃地震科学研究所の古本主任研究員による調査結果を掲載した。

前号（66号）より、SATREPS（地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム）の各個別課題について、研究代表者の方からご紹介をいただいている。今回は、南米ペルーでのプロジェクトについて、この春に千葉大を退職された山崎先生に解説をお願いした。長年にわたるペルーと日本との交流実績に根ざして、広範な分野での研究協力が行われたことがわかる。

これに続いて、今号では2編の寄書に掲載している。1つは、名大名誉教授の志知先生に、長年取り組んでこられた重力測定の実績を紹介していただいた。本文中の図で細部を読み取ることは困難だが、原因の画像は地震本部（地震調査研究推進本部）のウェブページに掲載されている。トップ画面の左側にある「素材集」ボタンをクリックし、検索オプションで「重力」を選ぶか、またはキーワードに重力と入力すれば閲覧できるはずである。なお、希望者にはA1判のポスターも頒布している。

もう1つの寄書では、防災科研の内山先生に、SfM技術を応用して、

津波石碑の判読を行った事例を紹介していただいた。本来、SfMは地すべり等の自然災害で変形した地形の三次元モデルを多数の写真から構成し、災害調査に役立てる技術であるが、石碑のような歴史災害資料を調査する際にも、強力な道具として使えることがわかる。

また、囲み記事としては、首都圏における高密度地震観測を実現したMeSO-netについて、東大地震研の酒井先生より解説記事をいただいたほか、地震の発生と地震前兆の関係を自然発火と引火になぞらえた考えを、当振興会の津村副首席主任研究員より披露していただいた。

今号は、理学、工学、社会学、国際協力、技術紹介と、幅広い分野の記事構成となった。今後も、このように多彩な話題を取り上げてゆくことにしたい。（Y.O.）

地震ジャーナル 第67号

令和元年6月20日 発行

発行所 ☎101-0064

東京都千代田区神田猿樂町1-5-18
公益財団法人

地震予知総合研究振興会

<http://www.adepe.or.jp>

TEL: 03-3295-1966

FAX: 03-3295-3136

発行人 金沢敏彦

編集人 岡田義光

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

●製作/一般財団法人学会誌刊行センター

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