

# 地震 ジャーナル

65

2018年 6月

エッセイ 彼を知り己を知れば百戦殆うからず ●福和伸夫

東海地震予知から南海トラフ巨大地震対策へ ●平田 直—— 1

緊急地震速報の誤報と精度向上の改善策 ●堀内茂木——10

1911年に喜界島近海で発生した巨大地震に伴う津波の調査 ●後藤和彦/岩本健吾——18

1968年十勝沖地震・1978年宮城県沖地震を振り返って

—両地震がその後の建築耐震設計などに

どのような影響を与えたか— ●北川良和——28

光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る ●田中愛幸/黒石裕樹/

香取秀俊——36

余震統計式再考—指数則とべき乗則を結ぶ— ●萩原幸男——45

JST-JICA 国際共同研究プログラム「SATREPS」の概要 ●本蔵義守——51

●新刊紹介——55

●ADEP 情報——56

囲み記事 J-RISQ 地震速報

MOWLAS (陸海統合地震津波火山観測網)

**地震予知総合研究振興会**

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

## 彼を知り己を知れば百戦殆うからず 福和伸夫

地震学の進展は著しい。その知見に基づき、地震の長期評価が行われ、南海トラフ地震の切迫性が指摘された。一方で、現在の科学的知見では確度の高い地震の予測は困難だと判断が示された。多くの研究成果が報道発表されるなか、一般社会は困惑しているかもしれない。

南海トラフ地震は、「确实」「甚大」「限界」「衰退」で語れる。地震の発生は「确实」とされ、その被害は「甚大」で、現代社会の対応力の「限界」のため、回復が困難で国の「衰退」に繋がる可能性がある。筆者は、被災地に住む工学者として、予見されている災害を減らすために全力を尽くすのが地震に関わる人間の責務とも感じる。

過去の南海トラフ地震の犠牲者数を現在の人口に換算したり、東日本大震災の被災人口と予測被災地の人口を比較すると、国の予測死者数323,000人（直接死）は過大ではない。わが国は製造業で稼いだお金でサービス業を維持しているが、中部に集中地する中核産業が被災すれば経済的にも破綻する。しかし、国民の危機意識は希薄で、ライフラインや物流に依存しサプライチェーンで複雑に絡み合った産業構造の脆さに気づく人は少ない。

ユリウス・カエサルは「ガリア戦記」の中で「人間はものを見たり考えたりするとき、自分が好ましいと思うものや、自分がやろうと思う方向だけを見がちで、見たくないもの、都合の悪いことは見えないものである」と記している。胸に刺さる言葉である。

耐震工学の始祖の一人・佐野利器は、「然しながら、諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するのが実技である。建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない。」と述べた。同時代の物理学者・寺田寅彦は東大地震研玄関に掲げられる銘板に「本所永遠の使命とする所は地震に關する諸現象の科學的研究と直接又は間接に地震に起因する災害の豫防並に輕減方策の探求とである」と書き残した。学問の未熟さを踏まえつつ、それを活かす術を探し、少しでも災害を減らす努力が必要だと思う。

孫子の兵法「彼を知り己を知れば百戦殆うからず」を旨とし、地震ハザードと社会リスクを探索し、「君子危うきに近寄らず」と危険を回避しつつ、「転ばぬ先の杖」で備えを実践する心がけが必要である。科学的知見を災害軽減に活かすため、社会と会話し、真摯に悩み、災害軽減を実現しなければ、後世の人たちに顔向けができない。

「災い転じて福と成す」と言う。悲観的に想像し樂觀的に備え新たな時代を築きたい。



福和伸夫

〔ふくわ のぶお〕

**現職** 名古屋大学減災連携研究センター長・教授

**略歴** 名古屋大学大学院工学研究科修了、清水建設に10年間勤務の後、名古屋大学に転じ、工学部、先端技術共同研究センター、環境学研究所を経て2012年より現職、工学博士、日本地震工学会会長、地震調査研究推進本部政策委員会委員長

**研究分野** 建築耐震工学、地震工学、地域防災  
**著書** 「次の震災について本当のことを話してみよう」（時事通信社）など

# 東海地震予知から南海トラフ巨大地震対策へ

平田 直

## 1. はじめに

日本は、これまで繰り返し、地震、火山噴火、台風などによる大きな災害にみまわれ、そのたびに、法的な体系やそれに基づく行政的な制度などが整えられてきた。そのなかで、1978年に制定された東海地震の予知を前提とした大規模地震対策特別措置法（以下、大震法）とそれに関連する諸制度・計画は、まだ発生していない災害に対応するための枠組みとして他に例をみないものであった。

この制度は、防災対策としては画期的なものであったが、約40年を経た現在、法律制定当時と社会的環境が大きく変わり、また、地震学の進展により科学的認識も変わり、制度存続の是非が議論されるようになってきた。とりわけ、地震発生の予知を前提とした体制と、それに基づく厳しい対応策の是非が論点となった。2017年9月26日に中央防災会議の専門調査会「防災対策実行会議」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」が新しい防災対応のあり方についての報告書<sup>1)</sup>をまとめ、それを受けて当面の国の方針が示された。小論では、現在の南海トラフ地震に関する知見と、1970年代に地震予知体制が構築されてから今回の見直しに至るまでの経緯、地震学からみた今回の見直しの意味などをまとめる。

## 2. 南海トラフ地震のハザードと被害の予測

地震調査研究推進本部（以下、地震本部）・地震調査委員会は、南海トラフ巨大地震発生の長期評価と揺れの大きさ（地震ハザード）の予測を公表し、また、ハザードの予測に基づく南海トラフ

巨大地震による被害の予測（被害想定）は、中央防災会議から報告されている。まず、この二つを概観して、南海トラフの巨大地震と大震災発生の可能性がきわめて高いことを確認しよう。

### 2.1 南海トラフ長期評価

地震本部は、2013年5月に南海トラフの地震活動の長期評価を見直した<sup>2)</sup>。前回、2001年の評価<sup>3)</sup>では南海トラフを、「東海地震」「東南海地震」「南海地震」の3つの震源域に分けて、それぞれの領域で発生する地震の規模と発生確率を評価していた。これに対して、新しい評価では、「南海トラフ全域で地震規模と発生確率を評価し、個別の領域については評価しない」ことにした。

近年の研究で、過去の大地震の姿が明らかになるにつれ、毎回地震の発生様式（大きなずれを起こした領域、地震規模）が異なることが分かってきたからだ。つまり、東海地域の地震と南海地域の地震が同時に起きる場合（明心地震、宝永地震など）と、時間差があって発生する場合（安政地震、昭和地震など）があり、さらに東海地域の地震でも、御前崎より西側で断層のずれが止まる場合（1944年）、駿河湾奥までずれが広がる場合（1854年）がある。

つまり、歴史記録や津波堆積物の調査などから、南海トラフで発生する地震は多様性に富んでいて、日向灘から土佐沖、室戸沖、熊野灘、遠州灘、駿河湾までの南海トラフ全体が破壊される場合（最大クラスの地震）から、それらの一部だけが破壊される場合まで、さまざまな可能性があるということである。

その結果、南海トラフのどこかで発生する巨大地震の長期評価は、地震規模がマグニチュード（M）8～9、30年以内に発生する確率は公表時の値で、60～70%となった。2018年1月1日を基準とすると、確率は、70～80%になる。この確率

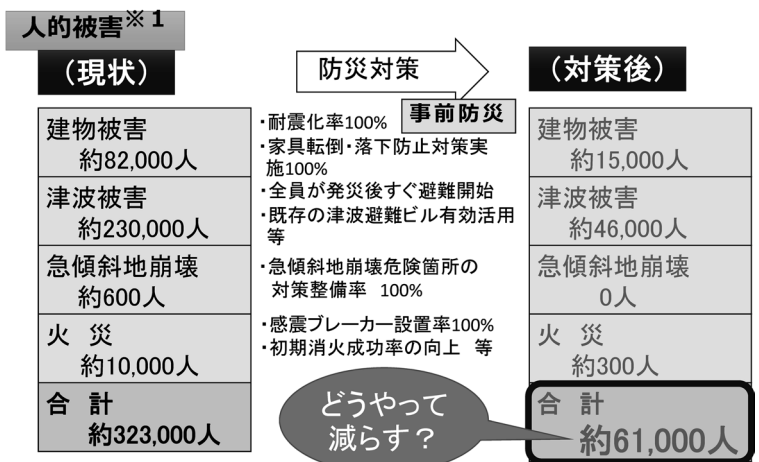


図1 南海トラフ巨大地震時における被害。 ※1：地震動（陸側ケース）、津波（ケース①）、時間帯（冬・深夜）、風速（8m/s）の場合。内閣府の推定

はたいへん高い。ただし、次に南海トラフで起きる地震の規模は、M8からM9の間で、発生場所も南海トラフの全域か、ある一部なのか、現時点では評価できない<sup>2)</sup>。

## 2.2 南海トラフ地震の被害想定

中央防災会議防災対策推進検討会議は、「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」を設置し、南海トラフ巨大地震を対象として対策を進めるために、施設等の被害および経済的な被害を検討し、2013年3月に「第二次報告」<sup>4)</sup>を発表した。この報告では、できるだけ過去にさかのぼって調査し、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波が検討された。「第二次報告」では、地震本部の検討した最大クラスの地震（M9.0～9.1）と同規模の巨大な地震を想定し、地震動と津波高が推定された。プレート境界で地震の起こる場所を変えて、地震動の計算には5とおり、津波高の計算には11とおりの場合について調べられた。この結果、神奈川県西部から鹿児島県にかけての広い範囲（約7.1万km<sup>2</sup>）で震度6弱以上の揺れが予想され、静岡県・愛知県・徳島県・高知県の中の計0.4万km<sup>2</sup>で震度7が予想される地域が現れた。これは、前回の中央防災会議（2003年）<sup>5)</sup>の想定に比べ、震度6弱以上となる面積は3倍、震度7では10倍の広さになっている。さらに、津波の予測では20mを超える高

い津波のくる地域が広がり、最大の津波高が高知県の一部で34mの場所がでるなど、たいへん大きな想定となった。これを受け「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」が、2013年5月に「最終報告」を発表した<sup>6)</sup>。その結果は、死者の想定は20～30万人、資産等への経済損失も170兆円という膨大なものになった。

この報告では、これらの災害に対して、防災・減災対策を行った場合の効果も試算されている。建物の現状の耐震化率（約79%）を100%まで向上させ、出火防止対策等を講じれば、建物倒壊による死者数を8万2,000人から1万5,000人へと18%に減らし、資産等の被害額は約80兆円へとほぼ半減させることができる。津波による犠牲者は、20mを超える津波に対しては早期に避難することが最も効果的であることが示されている。早期避難率が高い場合を低い場合と比較すると、死者数は2分の1～9分の1になる。全員が発災後すぐに避難を開始した場合には、10分の1以下にできる可能性がある。しかし、それでも約6万1千人が犠牲になるという想定である（図1）。

## 3. 見直しに至るまでの経緯

### 3.1 大規模地震対策特別措置法（大震法）

1976年の東海地震の発生の可能性を示す研究

発表と、1978年の伊豆大島近海の地震を受け、1978年に大震法が成立した。1979年には、大震法に基づいて、東海地震を想定した地震防災対策強化地域が指定され、東海地震の地震防災基本計画が策定された。これに伴って、気象庁に地震防災対策強化地域判定会（判定会）が設けられ、地震予知情報、警戒宣言などの枠組みも作られた。さらに、1980年には地震防災対策強化地域における地震対策緊急整備事業に係る国の財政上の特別措置に関する法律（以下、地震財特法）が制定され、強化地域の社会福祉施設や公立小中学校の改築等に補助が高上げされ、静岡県内などの地震防災のハード対策を進める財源となった。まだ発生していない自然災害に対してあらかじめ対応策を定めた画期的な制度ができたのである。

### 3.2 地震防災対策特別措置法

1995年に、兵庫県南部地震 M7.3 が発生し、死者 6,434 名、行方不明 3 名など大震災（阪神・淡路大震災）となった。この震災を受け、地震防災対策特別措置法（1995）が制定された。地震防災の観点からは、全国どこでも起こりうる地震に対応するための防災対策を計画的に進めるための根拠法となったことが重要である。都道府県が「地震防災緊急事業五箇年計画」を策定することによって、公立社会福祉施設や小中学校の耐震化等に地震財特法とほぼ同様の補助率の高上げがされ、2016年度から第5次の計画が推進されている。また、地震学の観点からは、地震調査研究推進本部（地震本部）とその下の地震調査委員会の根拠法であることが重要である。

### 3.3 南海トラフの地震防災対策

2001年の省庁再編を受け、防災担当官庁が旧国土庁からより権限が強い内閣府（防災担当）になり、形式的だった中央防災会議も実体化した。これに伴って、これまでは大震法だけであった「地域指定に基づく地震に関する法律」の見直しが行われ、新たな法制度の整備が進んだ。

2001年12月、「東海地震に関する専門調査会」が東海地震の想定震源域と強化地域の見直しを提言するとともに、東南海・南海地震対策の必要性を指摘した。それに伴い、東南海・南海地震対策

特別措置法（2002）が制定された。また、「東南海、南海地震等に関する専門調査会」の報告を受けて策定された東南海・南海地震対策大綱（2003）に、「今後10年程度経過した段階で東海地震が発生していない場合には、東海地震対策と合わせて本大綱を見直す」と明記された。これが、2016年夏から始まった今回の大震法を含む南海トラフの地震防災対策の見直しの検討につながる。

2012年に南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの下に「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（2012年7月～2013年5月）」が設置され、南海トラフの巨大地震の発生時期の予測可能性に関する科学的知見の収集・整理が行われた。この調査部会は、現在の科学的知見からは確度の高い地震の予測は難しいと結論した。ただし、ゆっくり滑り等プレート間の固着の変化を示唆する現象が発生している場合、ある程度規模が大きければそれを検知する技術はあり、検知された場合には、不確実ではあるものの地震発生の可能性が相対的に高まっていることは言えるとされた。

### 3.4 2016年防災対応検討ワーキンググループ

2016年秋から、中央防災会議は、専門調査会「防災対策実行会議」の下に「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」（以下、WG）を設置して、大震法に基づく防災対応の是非と、新しい南海トラフ沿いの地震対応の方向性について議論を進めた。WGは、まず大規模地震の予測可能性について検討を行い、その検討結果を踏まえ、南海トラフ沿いの地震観測やその評価体制のあり方と、観測・評価に基づく地震防災対応のあり方について検討を行った。2016年9月の第1回の会議から2017年8月の第7回までの会議を経て、2017年9月26日に最終報告が提出された<sup>1)</sup>。

WGでは、大震法とそれに基づく体制、判断基準に関して、以下の4つの問いが検討された。

- (1) 現状の地震発生予測の可能性・確度が、防災対策に役立つレベルなのか。
- (2) そもそも、東海地震だけを対象にしているのか。対象とする地域を南海トラフ全

体に広げる必要はないのか。

(3) どのような防災対策が行えるのか。

(4) 評価の体制が適切なのか。南海トラフの巨大地震に関する情報が得られて、評価できるのか。

これらに対して、以下のように報告された。

(1) 「現状の地震発生予測の可能性・確度」については、現時点では、大震法に基づく現行の地

震防災応急対策が前提としている確度の高い地震の予測はできないとされ、そのため、現行の地震防災応急対策は改める必要があると報告された。一方で、現在の科学的知見を防災対応に活かしていくという視点は引き続き重要であり、異常な現象を評価し、どのような防災対応を行うことが適切か、地方公共団体や企業等と合意形成を行いつつ検討していくことが必要であることも確認された。

(2) 「東海地震だけを対象にしているいいのか」という問いに対しては、南海トラフ全域を対象にすべきであるとされた。南海トラフでは大地震が発生することを示唆するさまざまな現象が観測される可能性があり、そのような観測され得る異常な現象のうち、観測される可能性が高く、かつ大規模な地震につながる可能性があるとして社会が混乱するおそれがある「典型的な4つのケース」について、どのような評価が可能であるかが検討された。以下に、4つのケースについて具体的にみてみよう。ただし、これは典型的な4つの例であって、これ以外の可能性が低いことを意味してはいないことに注意する必要がある。あくまで、例として検討したのである。

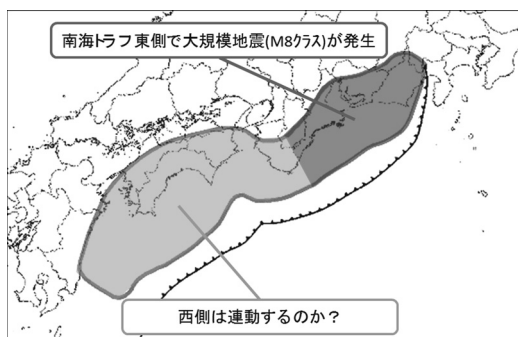


図2 南海トラフの東側だけで大規模地震が発生し、西側が未破壊の場合(ケース1)。過去の事例から、南海トラフの東側の領域が破壊される大規模地震が発生すると、西側の領域でも大規模地震が発生する可能性が高い。文献1)をもとに作成

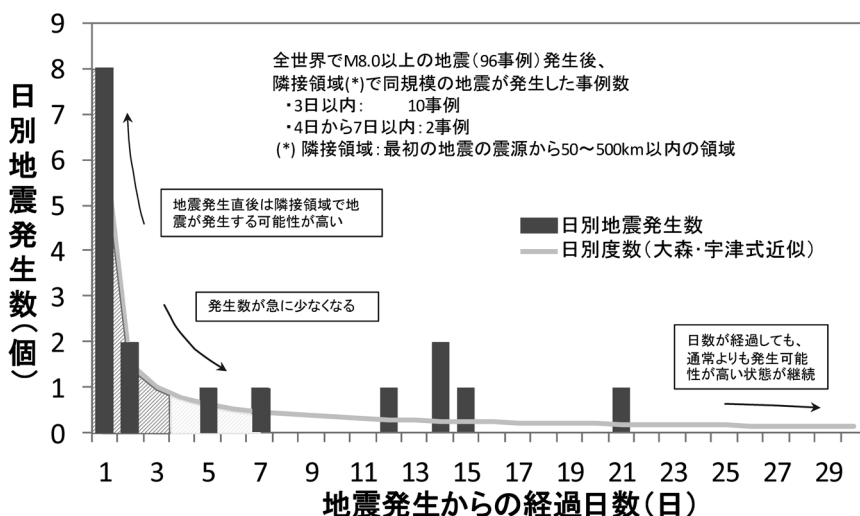


図3 隣接地域で大地震が発生した世界の地震。内閣府の資料に基づく隣接領域(\*)で同程度の地震が発生し、その後の発生頻度は時間とともに減少。出典: ISCGEM カタログ(1900~2013年)、USGSによる震源(2014~2016年)。(\*)最初の地震の震源から50~500km以内の領域。文献1)をもとに作成

ケース1：南海トラフの東側の領域で大規模地震が発生した場合（図2）。

全世界で1900年以降に発生したM8.0以上の地震96事例のうち、10事例で3日以内に隣接領域で同程度の地震が発生している。その後の発生頻度は時間とともに減少している（図3）。これまで南海トラフでは、東側と西側の領域でほぼ同時または32時間後に続けて地震が発生したことがあること、2~3年後に発生した場合があることにも留意する必要がある。

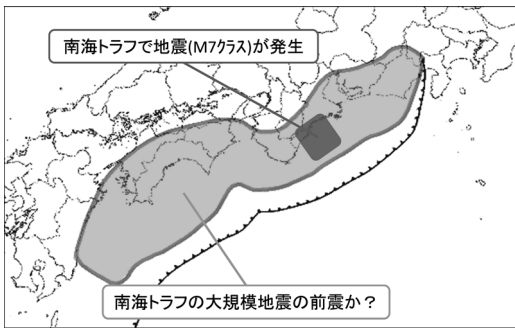


図4 M8~9クラスの大規模地震と比べて一回り小さい規模（M7クラス）の地震が発生する場合（ケース2）。文献1）をもとに作成

ケース2：南海トラフ沿いでM7クラスの地震が発生した場合（図4）。全世界で1900年以降に発生したM7.0以上の地震1,368事例のうち、24事例で7日以内に同じ領域で同規模以上の地震が発生した。その後の発生頻度は時間とともに減少している（図5）。

ケース3：ゆっくりすべりや前震活動などの現象が多種目で観測されている場合。短期的に大規模地震の発生につながると、ただちには判断できない。2011年東北地方太平洋沖地震の前に観測されたようなさまざまな現象が西南日本で観測される場合に相当する。

ケース4：これまでの東海地震予知情報の判定基準とされるようなプレート境界でのゆっくり滑りや、これまで観測されたことがないような広い領域での大規模なゆっくり滑りがみられた場合。地震発生の可能性が相対的に高まっているといった評価はできるが、その時点において大規模地震の発生の可能性の程度を定量的に評価する手法や基準は、現在のところないと判断された。従来は、一定の基準を満たした震源域での「ゆっくりとした滑り」を前兆滑りと認定することで、地震予知が可能であると考えられてきた。しかし、近年の

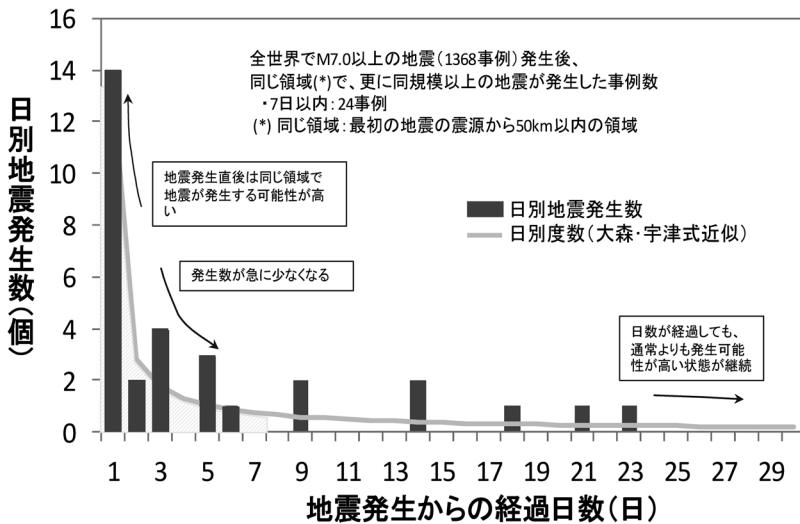


図5 比較的大規模の地震後に同じ領域でさらに同規模以上の地震が発生した事例。文献1）をもとに作成。日別度数は、大森~宇津公式を用いて近似した関数を1日ごとに換算して求めた日別の地震発生数。データの出典：ISCGEM カタログ（1900~2013年）、USGS による震源（2014~2016年）

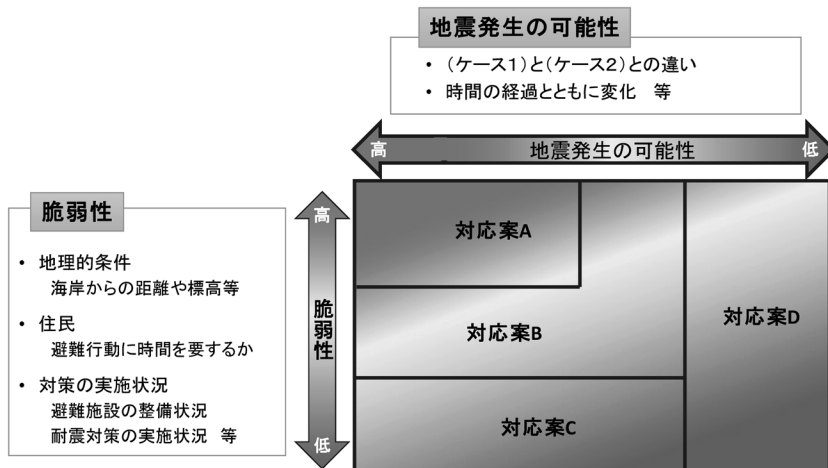


図 6 地震発生の可能性の高さや地域の脆弱性に応じた防災対応のイメージ。  
文献 1) をもとに作成

地震学の進展によると、そうした滑りが発生しても地震に至らないこともあるという理論的な研究が進んだ。つまり、ゆっくり滑りが大地震の前兆と考えることのできる前駆滑り（前兆滑り）であるか否かを判断することは、大地震が発生してから事後的にできるだけ、事前には難しいとされたのである。

(3) 「どのような防災対策が行えるのか」という問いに対しては、たとえば、ケース 1 の南海トラフの東半分の地域が破壊される大地震が起こった場合に、南海トラフの西半分での地震発生の可能性が高いと考えられ、なんらかの防災対応を行うことは意義があるとされた。防災対応の内容や期間は、可能性の高さだけでなく、防災対応によって得られる被害の軽減効果と防災対応に伴う損失のバランスをとる必要があり、地方公共団体や関係事業者等と社会的な合意をとって定める必要がある。この議論では、地震発生の可能性だけではなく、「社会の脆弱性」という考えが重要であるとされた。つまり、たとえば沿岸にある高齢者施設は津波発生時に避難する時間がかかる人が多いことから、津波災害に対して「脆弱性が高い」と考えられる。こうした施設では、地震発生の可能性が高まったときに早期に避難する必要がある（図 6）。

(4) 「評価の体制」については、迅速に現象を評価するために、海域の観測の強化が不可欠であり、特に南海トラフ西側の領域での強化が重要であるとされた。また、現象を緊急的に評価するために、迅速に対応できる学識経験者による評価体制の整備が必要とされた。さらに、観測機関は、データのリアルタイムでの公開、平時からのデータの持つ意味の説明に努めるとともに、異常な現象の発生時の評価結果を分かりやすく提供することが必要であるとされた。

#### 4. 当面の対策

WG の報告を受け、南海トラフ地震に対する新たな防災対応が定められるまでの当面の間の対応策が、以下のように、中央防災会議幹事会で定められた<sup>7)</sup>。

##### 4.1 気象庁の出す情報

気象庁は、2017 年 11 月 1 日から、従来の「東海地震に関連する情報」に代わって、「南海トラフ地震に関連する情報」を発表する。発表される情報は、「定例」と「臨時」の二つである（表 1）。

臨時の情報は、(1) 通常と異なるデータが得られたときに、大地震の発生に関係しているかの調査を開始した、(2) 調査の結果「大規模な地震発



表 1 南海トラフ地震に関連する情報

情報名	情報発表条件
南海トラフ地震に関連する情報（臨時）	○南海トラフ沿いで異常な現象（※1）が観測され、その現象が南海トラフ沿いの大規模な地震と関連するかどうか調査を開始した場合、または調査を継続している場合 ○観測された現象を調査した結果、南海トラフ沿いの大規模な地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まったと評価された場合 ○南海トラフ沿いの大規模な地震発生の可能性が相対的に高まった状態ではなくなったと評価された場合
南海トラフ地震に関連する情報（定例）	○「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」の定例会合において評価した調査結果を発表する場合

※1：南海トラフ沿いでマグニチュード7以上の地震が発生した場合や東海地域に設置されたひずみ計に有意な変化を観測した場合などを想定

生の可能性が平常時と比べて相対的に高まった」と評価された、(3) 地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まった状態ではなくなった、の3つである。

(2) の情報が、最も重要な情報であるが、それでも大震法で定められていた「地震予知情報」のような高い確度で地震が発生するという情報ではないことに注意する必要がある。可能性が平常時に比べて相対的に高まったという定性的な表現になっている。たとえば、南海トラフの半分の領域で巨大地震が発生したときに、残りの半分で巨大地震が発生する可能性は図2に示すように、最初の3日間程度はたいへん高く、1週間程度までは嚴重に注意する必要がある。過去の例でも、1854年安政東海地震（M8.4）の32時間後に西側で安政南海地震（M8.4）が発生している。しかし、この場合でも、97例中10例であり、10回に1回程度の頻度であり、地震が発生しない可能性のほうが高いのである。さらに、(3) は一種の解除情報であるが、それでも、「平常時と比べて相対的に高まった状態ではなくなった」と言っているのであって、決して安全情報ではない。平常時の南海トラフでの巨大地震の発生確率は、30年以内に70～80%とたいへん高いのである。しかし、図2のような場合、最初の1週間程度は大地震が発生する可能性はたいへん高く、3日間程度は嚴重に注意する必要がある、7週間程度経過するとその危険性は低下する。それでも、平常時の発生

確率が高いことのほか、1944年昭和東南海地震（M7.9）の2年後に1946年昭和南海地震（M8.0）が発生していることも考えると、(3) の情報は決して安全情報ではないことを強調しておく。

気象庁は、この情報の運用開始に伴い、これまで行われていた東海地震のみに着目した情報（東海地震に関連する情報）は発表しないことになった。「東海地震に関連する情報」には、異常の発生状況に応じ、「東海地震予知情報」、「東海地震注意情報」、「東海地震に関連する調査情報」の3種類があったが、今後はこれらの情報は出ないことになったのである。

この新しい情報発表のため、気象庁は「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」を開催する。最初の評価検討会は、2017年11月27日に開催され、同日最初の南海トラフ地震に関連する情報（定例）が公表された<sup>8)</sup>。その後、1月に1回定例会が開催され、2018年4月までに、定例情報が6回公表されている。

#### 4.2 国民への呼びかけ

南海トラフ沿いの大規模な地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まった旨の「南海トラフ地震に関連する情報」（臨時）が発表された場合に、政府は「関係省庁災害警戒会議」を開催する。この会議では、関係省庁による今後の取組みを確認するとともに、内閣府（防災担当）は、国民に対して、今後の備えについて呼びかけを行う。呼びかけでは、南海トラフの大規模地震によ

る被害が想定される地域の住民に対して日頃からの地震への備えの再確認を促す。呼びかける備えの例としてあげられているのは、家具の固定、避難場所・避難経路の確認、家族との安否確認手段の取決め、家庭における備蓄の確認である。これらの体制は、2017年11月1日から実施されている。

## 5. 地震学からみた今回の見直しの意味

1995年阪神・淡路大震災後に設置された地震本部のもとで、防災に資する地震発生の長期評価、全国地震動予測地図など長期的地震ハザードの研究が進展した。どこでも発生する地震が、いつ発生しても良いように備えるための基盤的な情報が整備された。一方、中央防災会議の被害想定が発表されて、甚大な被害の予想とそれへの事前防災の重要性が指摘されている。さらに、可能な事前防災を行っても防げない被害を軽減するための地震予知に基づく地震防災応急対策が、東海地震については行われてきた。

しかし、2016年11月からは、地震防災応急対策の科学的な根拠となった確度の高い地震発生予測はできないとされた。これは、地震学の未成熟性からきた結論なのだろうか。筆者はそうではないと考えている。地震発生を支配する自然環境は複雑で、地震学が進展しても、次に発生する地震を正確に予測することはとても難しい。しかし、研究が進展すると、次に起きる地震のさまざまな性質を予測することができるようになる。たとえば、揺れの強さや津波の高さである。これらに加え、地震が発生しやすい状態か否かも、現在はまだ定性的な予測であるが、将来は定量的に予測することができるようになる。しかし、いくら地震学が進歩しても、いつ、どこで大地震が発生するかを、防災情報として有益な確度で決定論的に予測する（予知する）ことはできない。定量的に「可能性」が予測されるのである。

今回の中央防災会議の報告は、このことを明確に述べている点が地震学としても意義がある。筆者は、地震予知の研究を現在も続けているが、地

震予知も確率論的な枠組みで進める必要があると考えている。

## 6. おわりに

災害を軽減するためには、将来起きる災害の姿を「予（あらかじめ）め知る（予知）力」「それに備える（予防）力」「発災後に災害から復旧する（回復）力」の3つの力が社会に備わっていなければならない。南海トラフで大きな地震が発生して、強い揺れと高い津波がくるという想定ができれば、賢い設計をして建物の耐震性を上げ、高い堤防や津波避難タワーを造ることができる。同時に、津波が堤防を越えて押し寄せてくる可能性も明らかになり、どのように避難するかをあらかじめ話し合い、災害への防災力と災害からの回復力を高めることができる。さらに、通常時に比べて巨大地震発生の可能性が高まったという情報を賢く使えば、助かる命は確実に増える。

現時点では、4章で述べたような当面の対応策（暫定策）しか決められていない。南海トラフ巨大地震の発生に対応する戦略は、大震法のそれと比べて複雑である。しかし、WGが示した方針は、日本で起きる他の大地震への対応策と同じである。まず、地震の発生予測に関する国民的な共通理解、つまり、防災上は地震予知できないということを通理解とし、その上で科学的な知見として地震発生の可能性を理解し、国、地方公共団体、民間事業者、地域住民がそれぞれの立場で、自分のこととして考えて備える必要がある。

国は、静岡県、高知県、中部経済界での議論を経て、中央防災会議・防災対策実行会議「南海トラフ沿いの異常な現象への防災対応検討ワーキンググループ」を発足させ、南海トラフ沿いで異常な現象が観測された場合の防災対応のあり方や、防災対応を実行するに当たっての社会的な仕組みを検討し始めた。現在の地震学の実力を活かし、社会全体で備える必要がある。

## 参考文献

(いずれも最終閲覧：2018年4月8日)

- 1) 中央防災会議 防災対策実行会議 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. 2017. 南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応のあり方について(報告). [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taio\\_wg/pdf/h290926honbun.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taio_wg/pdf/h290926honbun.pdf)
- 2) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会. 2013. 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may\\_nankai/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm)
- 3) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会. 2001. 南海トラフの地震活動の長期評価について. [https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/nankai.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai.pdf)
- 4) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ. 2013. 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)について. [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankai\\_trough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankai_trough_info.html)
- 5) 中央防災会議 東南海, 南海地震等に関する専門調査会. 「東南海, 南海地震の被害想定について」(第14回), 東南海, 南海地震の被害想定について, 平成15年9月17日, 中央防災会議事務局, 資料2. [http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai\\_nankaijishin/14/pdf/siryu21.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/14/pdf/siryu21.pdf)
- 6) 中央防災会議 「防災対策推進検討会議」南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ. 2013. 南海トラフ巨大地震対策について(最終報告). [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/index.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html)
- 7) 中央防災会議 幹事会. 2017. 「南海トラフ地震に関連する情報」が発表された際の政府の対応について(平成29年9月26日中央防災会議幹事会決定). [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankai\\_taiou.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankai_taiou.pdf)
- 8) 気象庁. 2017. 南海トラフ地震に関連する情報(定例). [http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nteq/teirei/201711271700\\_teirei.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nteq/teirei/201711271700_teirei.html)

平田 直

[ひらた なおし]



**現職** 東京大学地震研究所地震予知研究センター長・教授, 国立研究開発法人防災科学技術研究所首都圏レジリエンス研究センター長, 中央防災会議委員, 地震調査研究推進本部地震調査委員会委員長, 南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会会長, 理学博士

**略歴** 東京大学理学部卒, 同大学院博士課程退学, 東京大学理学部助手, 千葉大学理学部助教授, 東京大学地震研究所助教授, 同教授を経て現職

**研究分野** 観測地震学, 地殻構造論, 地震防災

**著者** 「首都直下地震」(岩波書店), 「巨大地震・巨大津波—東日本大震災の検証—(分担)」(朝倉書店) 他

# 緊急地震速報の誤報と精度向上の改善策

堀内茂木

## 1. はじめに

大きい地震が発生すると、気象庁から緊急地震速報が配信される。震度が5弱以上の地域が想定される場合は、テレビ、ラジオ、携帯電話で警報が流される。緊急地震速報が正しく発表されれば、配信後に揺れが始まることから、緊急地震速報は被害軽減に有効であると思われる。しかし、誤報だと、不必要に列車が止まる等の問題が発生する。

2018年1月5日11時2分に緊急地震速報が配信され、テレビや携帯電話でいっせいに警報音が鳴り出した。しかし、揺れは来なく、誤報であった。本報告では、緊急地震速報の誤報がなぜ発生したのか、どのようにすれば誤報は防げるのか、そして、今後の緊急地震速報の精度改善方法について提案する。

## 2. 緊急地震速報のための震源決定

日本全域約1,000カ所に気象庁、防災科学技術研究所の地震観測点が設置され、このリアルタイム波形データが気象庁、大学、国の研究所に送られている。緊急地震速報には、この観測点データが利用されている。平均的な観測点間隔は23kmである。

地震が発生すると、震源に近い観測点のP波到着時刻と振幅データが自動的に読み取られ、震源とマグニチュードが決定される。各地域での震度は司・翠川(1999)<sup>1)</sup>による予測式を用いて計算され、最大震度が5弱以上であれば、緊急地震速報が配信される。緊急地震速報は大きな揺れが到着する前の情報であることから、多くの観測点にP波が到着するのを待つと解析すると、情報

伝達が間に合わない。緊急地震速報が技術的に難しいのは、数点のP波到着時刻データのみを用いて、信頼できる震源とマグニチュードとを決定する必要があるからである。

Horiuchi *et al.* (2005)<sup>2)</sup>は、緊急地震速報のための震源決定手法を開発している。この方法は、着未着法と呼ばれている。大きい地震が発生し、ある時刻、 $T^{\text{now}}$ までに、ある観測点でP波が観測されなかったとする。地震が大きければ、その後、この観測点にP波は確実に到着するはずだが、 $T^{\text{now}}$ までにP波が届かないということは、この地震が、この観測点にP波が届いてはいけないという条件を満足するように発生したからである。着未着法は、P波の観測値の他に、P波が届いてはならないという条件を付加して、

$$P \text{ 波観測走時} = \text{理論走時} \quad (1)$$

$$T^{\text{now}} > \text{理論走時} \quad (2)$$

を満足する解を求める方法である。計算は、不等式が成立しない場合の残差が定義され、数値的に行われている。

P波到着時刻データは自動的に読み取られ、震源決定に利用されているが、ノイズや別の地震のP波、S波が読み取られる場合がある。この場合は、最良解が正しい位置から大きくずれる。解がずれると、(2)の不等式を満足する解が存在しなくなることから、着未着法では、間違ったデータを自動的に除去する機能を有している。この機能が開発されたことにより、99%の地震について、ほぼ正しい震源位置が求められるようになった。複数の地震が同時に発生する場合は、削除された到着時刻データを用いて、2個目の地震の震源決定が行われている。

一方、溜淵ら(2014)<sup>3)</sup>は、緊急震源の推定に従来用いられてきたB- $\Delta$ 法・主成分分析法(芦

谷ら, 2002<sup>4)</sup>; Odaka *et al.*, 2003<sup>5)</sup>) による震央距離・震源方位の推定結果に加え, P波検測時刻, 未着情報, 振幅データを同時に用いた統合震源決定手法 (Integrated Particle Filter 法: IPF 法) を開発している. IPF 法は 2016 年 12 月から気象庁による緊急地震速報の震源決定に組み込まれており, 複数の地震が同時発生した場合にも, ほぼ正確な震源決定が行えるようになった.

### 3. 2018 年 1 月 5 日の誤報の原因

上述のように, 緊急地震速報の震源決定は改良され, 複数の地震が同時に発生しても, 正しい震源が決定されるようになった. それでは, なぜ, 2018 年 1 月 5 日の誤報は発生したのであろうか. 気象庁ホームページ (図 1) によると, 当日, 富山県と茨城県で, 最大震度 3 の地震がほぼ同時に発生した. 着未着法と, IPF 法による震源決定は, 両者とも, 2 個の地震の震源とマグニチュードを, ほぼ正確に決定した.

気象庁の緊急地震速報システムでは, 震源が決定されると, 別のシステムが震源とマグニチュードを再計算するようになっており, このシステムが, 2 個に求められた震源を一個の地震と判断し, 震源を茨城県沖に, マグニチュードを 6.4 と求め, 誤報が配信された. マグニチュード決定では, 震源に近い観測点の振幅を用いるべきである. しかし, このシステムは, 到着時刻データが読み取られたすべての観測点の振幅データを用いるように設計されていたため, 茨城の地震のマグニチュードを, 遠くはなれた富山県の別の地震の振幅データを用いて計算し, マグニチュードが異常に大きくなった. 気象庁では, 今後, マグニチュード決定方法を改良することである. 今まで, 緊急地震警報の誤報はなんども配信されているが, その大部分の原因はマグニチュード決定のソフトウェアの不具合であり, このソフトが改良されると, 誤報は大幅に減るものと期待される.

## 4. PLUM 電文

2018 年 3 月 22 日より, 緊急地震速報の PLUM 電文が発表されるようになった. この電文には, 従来の震源とマグニチュードの値の他に, 緊急地震速報に使われている観測点で観測されたリアルタイム震度が含まれている.

気象庁は, 震度予測に PLUM 法 (Propagation of Local Undumped Motion 法) を反映した緊急地震速報の配信を開始した. 巨大地震が発生すると, マグニチュードが飽和するため, 緊急地震速報による予測震度はつねに過小評価となるが, PLUM 法は, この点を考慮し, 震源やマグニチュードの推定なしに, 震度の予測を行う. 具体的には, PLUM 電文を受信し, 自分が位置するところから半径 30km 以内の観測点のリアルタイム震度の最大値を求め, 地盤増幅率を考慮して, 自分が位置する場所での予測震度を計算する.

PLUM 法の長所は, 巨大地震発生時にも, ある程度正確な震度予測が行えることであるが, 欠点は, 30km 以内の観測点のデータを用いることから, 猶予時間が短いことである. また, 震度の最大値を用いることから, 予測震度はつねに過大評価になる傾向がある.

なお, 実際の運用では, 従来法と PLUM 法の早いほうの予測震度で発表し, 大きいほうの予測震度で更新するハイブリッド法が採用されている.

## 5. PLUM 電文を用いた震度予測の高精度化

PLUM 電文の配信が開始されたことから, PLUM 電文に含まれるリアルタイム震度のデータを用いた震度予測を行うことが可能になった. 次に, リアルタイム震度を用いた震度予測の高精度化について検討する.

緊急地震速報では, 気象庁マグニチュード ( $M_{jma}$ ) を司・翠川式に代入して, 予測震度を求めている.  $M_{jma}$  は, 変位の最大振幅で定義されている. 一方, 震度は, フィルター処理は行われているが, 加速度で定義されている. したがって,

現在の緊急地震速報では、変位を測定し、加速度を予測していることになる。たとえば、周期が1Hzと3Hzの揺れの場合、変位は同じでも、加速度は変位の2階微分であることから、振幅は9倍変わる。地震の卓越周期は地震ごとに変わることから、山本ら(2008)<sup>6)</sup>は、震度の予測は、変位ではなく震度を測定して行うべきであると指摘した。そして、観測震度を最も満足するマグニチュード、すなわち、震度マグニチュード ( $M_i$ )

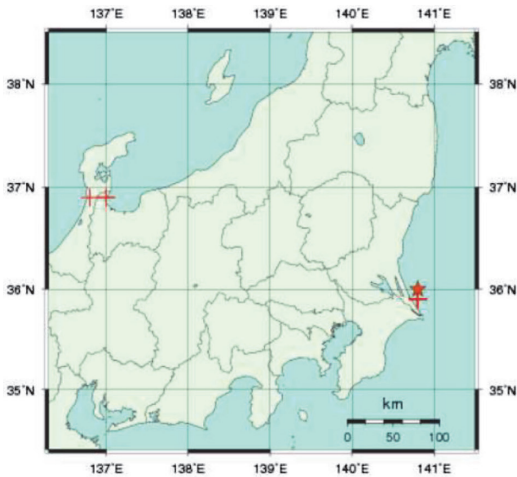


図1 2018年1月5日11時2分の緊急地震速報の誤報の原因となった同時地震の震央(気象庁ホームページによる)

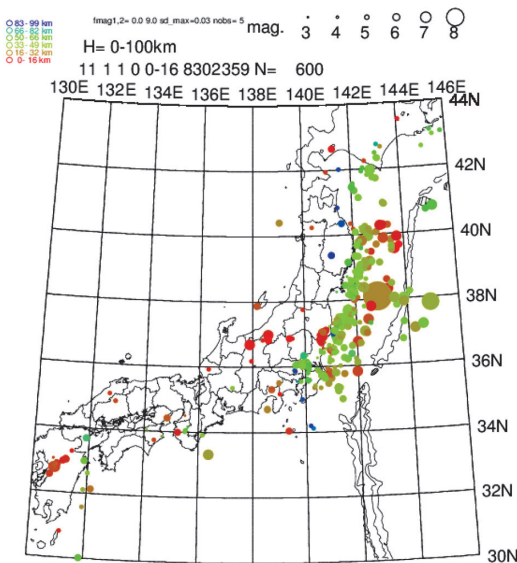


図2 解析に用いた地震の震央分布

を提案し、その有効性を示した。

彼らを用いた距離減衰式は、幾何補正に減衰の影響を考慮したものである。現在の緊急地震速報のユーザーは司・翠川式を用いており、距離減衰式を変えると、全ユーザーの端末のソフトウェアを変更する必要がある。そこで、ここでは、司・翠川式はそのまま、 $M_{jma}$ の代わりに $M_i$ を用いた場合の有効性について検討した。

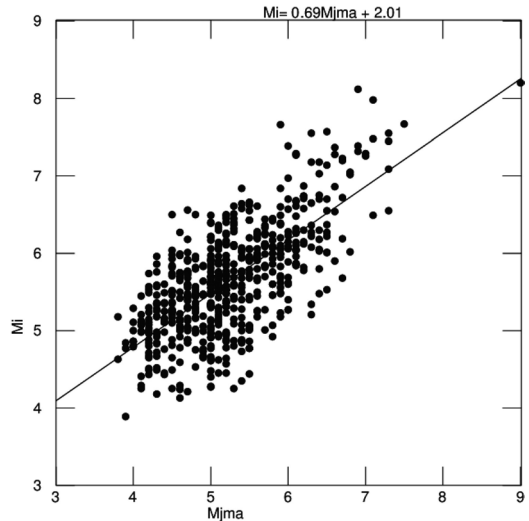


図3 震度マグニチュード ( $M_i$ ) と気象庁マグニチュード ( $M_{jma}$ ) との関係

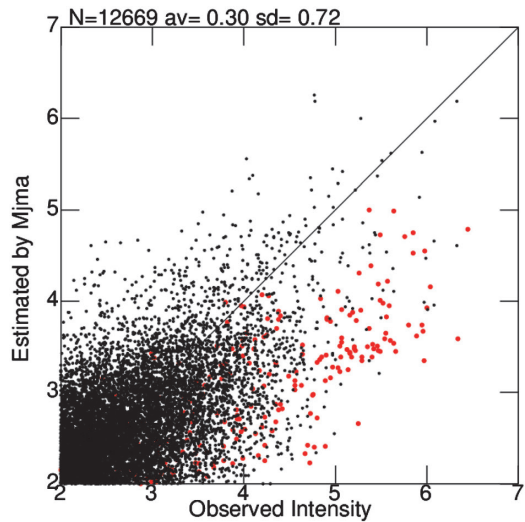


図4 気象庁マグニチュード ( $M_{jma}$ ) を用いる場合の予測震度(縦軸)と観測震度(横軸)との関係。赤丸は東日本大震災のデータ

緊急地震速報の理論震度は、司・翠川式に震央距離、深さ、 $M_{jma}$ 、地盤増幅率を代入して計算される。また、司・翠川式による予測震度は断層最短距離の関数でもあるが、断層最短距離は、 $M_{jma}$ から断層のサイズを推定し、求めるようになっている。

司・翠川式を変形すると、観測点ごとに、観測震度と理論震度とが一致する  $M_{jma}$  を求めること

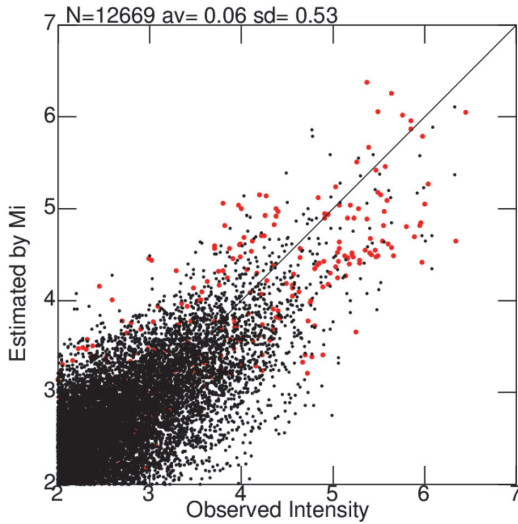


図5 震度マグニチュード ( $M_i$ ) を用いる場合の予測震度(縦軸)と観測震度(横軸)との関係。赤丸は東日本大震災のデータ

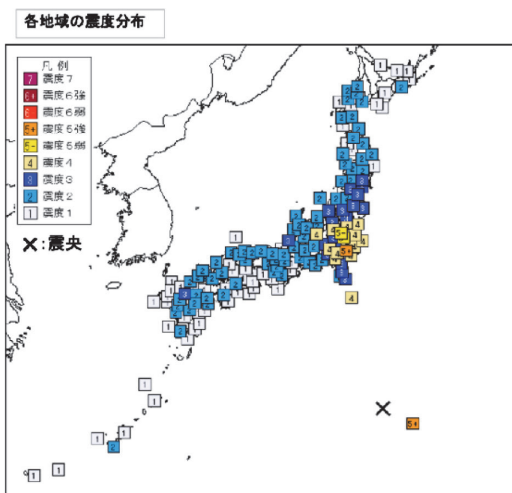


図6 2015年5月31日、小笠原諸島西方沖地震 ( $M_w=8.5$ ,  $H=682$ km) の震度分布 (気象庁発表)

ができる。 $M_i$ の定義は、観測震度を最もよく説明するマグニチュードのことである。したがって、観測点ごとに、観測震度と理論震度とが一致する  $M_{jma}$  を求め、その平均値を  $M_i$  とすればよい。次に、 $M_i$  を用いて震度予測を行う場合の予測精度について検討する。緊急地震速報ではP波部分の振幅を利用するが、以下では、全波形を用いる場合の予測震度を調べた。

解析に用いた地震の震央分布を図2に示す。対象は、2011年3月~2012年2月の1年間に発生したマグニチュード3.0以上の地震と、2012年3

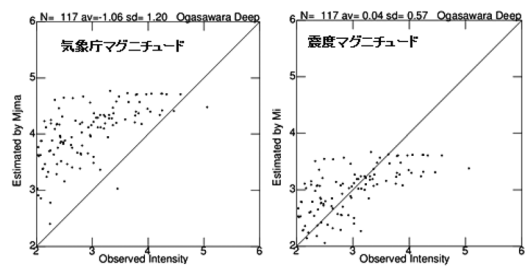


図7 気象庁マグニチュード(左)と、震度マグニチュード(右)を用いる場合の小笠原諸島西方沖地震の観測震度(横軸)と理論震度(縦軸)との関係

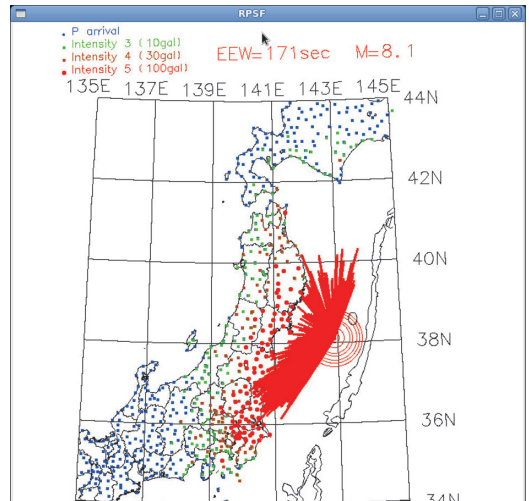


図8 リアルタイム震度データを用いた東日本大震災の断層面。赤線は、震度データから推定された断層面。赤線の円は、緊急地震速報の後続報による  $M_{jma}$  から推定される断層サイズ。陸域での丸のカラーは、震度を表している (堀内ら, 2011)<sup>7)</sup>

月～2016年8月の期間に発生したマグニチュード5.0以上の地震である。解析に用いた地震は629個だが、図2の外側で発生した地震29個も含まれている。マグニチュード5.0未満の地震数は208個、5.0以上は421個で、マグニチュード5.0以上の地震は全体の2/3を占めている。解析には、防災科学技術研究所のK-NET観測点のデータを使わせていただいた。解析に用いた震度データは12,669個である。最小二乗法で求められた $M_{jma}$ と $M_i$ との関係式(図3)は

$$M_i = 0.69M_{jma} + 2.09 \quad (3)$$

となった。

図4に、気象庁マグニチュードを用いて予測した場合の観測震度(横軸)と司・翠川式による予測震度(縦軸)との関係を示す。赤丸は東日本大震災のデータであり、予測震度は観測震度に比べ大幅に過小評価になっている。予測誤差の標準誤差は0.72で、予測値は、観測値に比べ平均的に0.30小さくなっている。なお、司・翠川式は震度4以上が適用範囲であるが、ここでは震度2以上のデータを用いたため、両者の平均値は一致していない。

図5は $M_i$ を用いた場合の観測震度と予測震度との関係である。図4と同様に、赤丸は東日本大震災のデータであるが、巨大地震の場合にも、予測震度が過小評価になることはない。また、予測誤差の標準誤差は0.53で、気象庁マグニチュードを用いる場合に比べ大幅に小さくなっている。この結果は、 $M_i$ の導入により震度の予測精度が高まることを示している。また、 $M_i$ は観測震度を用いて計算されることから、誤報配信の可能性は小さいものと思われる。

$M_{jma}$ を用いた司・翠川式は、150kmより深い地震による震度を正しく予測できない。このため、現緊急地震速報では、深発地震は適用範囲外である。2015年5月31日、小笠原諸島西方沖で( $M_w=8.5$ ,  $H=682$ km)の地震が発生し、東京で最大震度が5強となった(図6)。しかし、深発地震は適用範囲外であるため、この地震の緊急地震速報は発表されなかった。

図7は、 $M_{jma}$ を用いる場合(左)と、 $M_i$ を用いる場合の、この地震の観測震度と予測震度との関係を比較したものである。司・翠川式は深発地震が適用範囲外であるため、予測震度は大幅に大きくなっている。 $M_i$ を用いる場合は、予測値と観測値とはほぼ一致しており、予測誤差の標準誤差は0.57と小さい。この結果は、 $M_i$ を用いることにより、深発地震や遠地地震の震度予測が可能になることを示している。

## 6. 巨大地震の断層面拡大のリアルタイム推定

巨大地震の発生直後には、いわゆるマグニチュードの飽和の問題があり、東日本大震災時に発表されたマグニチュードの第一報は7.9であった。マグニチュードが9.0に変更されたのは、地震発生3日後であった。地震発生直後に地震の規模を適切に評価できないと、津波や地震動による被害を過小評価するため、被害を拡大させる恐れがある。

気象庁マグニチュードを用いて東日本大震災の震度を予測すると、予測震度は大幅に過小評価になり(図4)、震度マグニチュードの場合は、適切な震度が求められる(図5)ことを示した。この結果は、震度分布からみると東日本大震災の $M_{jma}$ は7.9よりはるかに大きくなければ、震度分布を説明できないことを示している。

日本で用いられている $M_{jma}$ や、諸外国で用いられているリヒターマグニチュードは、マグニチュードの飽和の問題で、8より大きくならない。2004年スマトラ沖地震の場合にも、当初発表されたマグニチュードは8.0であったが、後から9.0に変更された。マグニチュードが9.0であれば、誰でも巨大津波が発生することは予測可能であり、スマトラ沖地震の場合も、発生直後のマグニチュードの過小評価が津波被害を拡大させた可能性が高い。

上述のように、震度マグニチュードには、このような飽和の問題が存在しないと思われる。したがって、リアルタイム震度の分布から地震が巨大であることを地震発生直後に検知できる可能性が



ある。

堀内ら (2011)<sup>7)</sup> は、リアルタイム震度の空間分布を用いて、震源域拡大をリアルタイムでモニターする手法を提案している。彼らは、司・翠川式の予測震度が観測震度を超えるのは、マグニチュードから予測される断層サイズに比べ、実際の断層サイズがより大きいことによると仮定し、観測点ごとに、観測震度を満足する断層最短距離を求めた。そして、震央と観測点とを結ぶ直線上に、断層最短距離をプロットすることにより、断層の先端の位置を求め、断層面の広がりを求めるようにした (図8)。推定された断層面は、東日本大震災のそれに近く、 $M_{jma}$  から推定される断層面 (図8の赤線の円) より格段に大きいことを示している。

## 7. ま と め

2018年1月5日に緊急地震警報の誤報が配信された。この誤報の原因は、気象庁のマグニチュード決定ソフトウェアが、P波到着時刻が読み取られたすべての観測点の振幅データを用いていたため、遠く離れた別の地震の振幅を用いて、異常に大きいマグニチュードを決定したためである。気象庁は、今後、震源に近い観測点の振幅を調べるように改善することなので、このような誤報は少なくなると思われる。

緊急地震速報のPLUM電文による配信が2018年3月22日より開始した。この電文には、震源パラメータの他に、各観測点でのリアルタイム震度の観測データが含まれている。リアルタイム震度を用いて震度予測を行うようにすれば、震度推定の精度は大幅に高められる可能性がある。ここでは、距離減衰式として司・翠川式を用いた震度マグニチュードによる予測の精度について調べた。その結果、震度の予測精度は大幅に高められ、深発地震や遠地地震の震度予測も可能になることが示された。将来、南海トラフ沿いで巨大地震の発生が懸念されるが、現緊急地震速報は、巨大地震が発生した場合に、マグニチュードの飽和の問題で、震度を過小評価する。震度マグニチュード

の導入で、適切な震度の推定が可能であると思われる。この他、リアルタイム震度を用いることにより、巨大地震の断層拡大をリアルタイムでモニターできる可能性があることを示した。現在の緊急地震速報は、誤報配信の問題も解決できていないが、システム開発に大学や民間の研究者も加わることにより、巨大地震発生時にきわめて有効な防災情報を提供できるようになるものと確信する。

## 参考文献

- 1) 司 宏俊・翠川三郎. 1999. 断層タイプおよ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.
- 2) Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K., Kamimura, A., and Fujinawa, Y. 2005. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 708-718.
- 3) 溜湖功史・山田真澄・Stephen, W.U. 2014. 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法. 地震 第2輯, **67**, 41-55.
- 4) 芦谷公稔・小高俊一・東田進也・横田 崇・加藤孝志・上垣内修. 2002. ナウキャスト地震情報とその早期地震警報への活用. 物理探査, **55**, 485-494.
- 5) Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., and Nozaka, D. 2003. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **93**, 526-532.
- 6) 山本俊六・堀内茂木・中村洋光・呉 長江. 2008. 緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性. 物理探査, **60**, 407-417.
- 7) 堀内茂木・堀内優子. 2011. 巨大地震の震度予測、津波警報のための震源域リアルタイム推定. 地震学会講演予稿集 2011 年秋期大会, B22-11.

堀内茂木

[ほりうち しげき]

現職 株式会社ホームサイスマメータ代表取締役

略歴 東北大学理学研究科修士課程修了、東北大学助教授、防災科学技術研究所固体地球研究部門長を経て現職

研究分野 地震学、リアルタイム地震学



## J-RISQ 地震速報

わが国では、大きな地震が発生すると約1分半後に気象庁より震度3以上を観測した地域名(全国を188地域に区分)と地震の揺れの発現時刻が「震度速報」として発表され、テレビ画面でテロップが流される体制になっている。

図1は、2016年4月19日に発生した熊本地方の地震(M5.5)の際に放映されたNHK画面の例である。当時は熊本地震(M7.3)の直後で、日奈久断層帯に沿って地震活動が南西方向に拡大しないか懸念されていた時期である。

熊本県における震度速報の発表地域は「熊本県阿蘇」「熊本県熊本」「熊本県球磨」「熊本県天草・芦北」の4つに分かれており、画面はそれぞれの最大観測震度が3, 5強, 4, 5弱であったことを示しているが、アナウンサーは「八代市で震度5強」を繰り返していた。

ここで問題なのは、「5強」を示すマーク(5+)が震央の位置(×印)よりずっと北側に描かれていることである。八代は震央の南側に位置する海沿いの市であるが、地理に疎い人はこの画面を見て、八代市は「5強」のマークが書かれた山間部あたりと誤解する可能性がある。

震度速報では、各地域区分の中での最大観測震度がその地域の震度として報道されるが、もちろん、その地域全体が一斉にその震度で揺れたわけではない。地震発生から約5分後には「各地の震度に関する情報」が発表され、細かい震度分布がわかるが、上記地震についての「詳細震度分布図」は図2(a)に示すとおりである。八代市で震度5強となった地点は「熊本県熊本」地域の南西端に位置し、その周辺だけが大きく揺れていることがわかる。

ただ、このように各地の細かい震度を示したとしても、所詮それは点の情報でしかない。一

方で面的な震度分布を求める試みも進められており、気象庁は最大震度5弱以上の地震が発生した場合、その約15分後に図2(b)のような「推計震度分布図」を発表している。ここでは、震度計で観測された震度をもとに、地表付近の地盤の増幅度を使用して1km四方の格子間隔で震度を推計し、震度計のない場所も含めて震度4以上の地域の面的な広がりを表現している。



図1 2016年4月19日熊本地方の地震に関する速報(NHK画面に加筆)

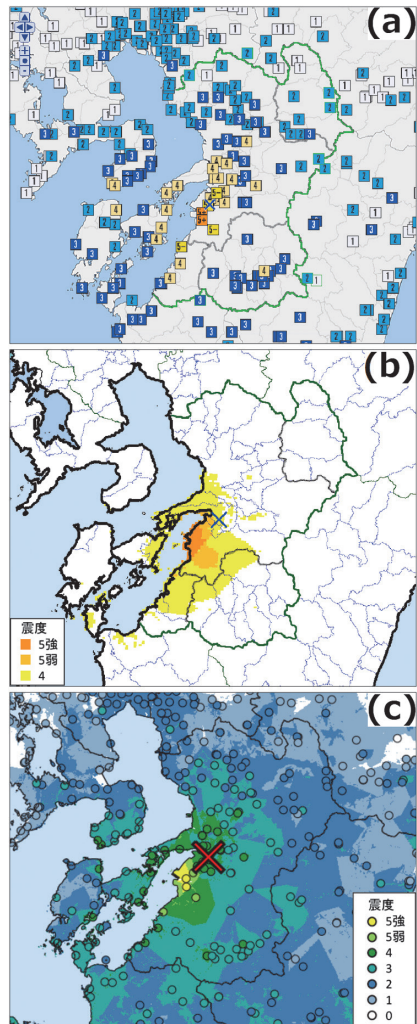


図2 2016年4月19日熊本地方の地震の(a)詳細震度分布図(気象庁資料に加筆)、(b)推計震度分布図(気象庁資料に加筆)、(c)J-RISQ地震速報。○印は震度観測点(防災科研資料に加筆)

同様の試みに、防災科学技術研究所の発表する「J-RISQ 地震速報」がある。こちらは、震度3以上が3カ所以上観測された地震について、震度観測データに250mメッシュの表層地盤増幅率データを組み合わせ、空間的に補間した推定震度の分布を準リアルタイムで発信している。上記地震についてのJ-RISQ地震速報による推定震度分布が図2(c)であり、震度0までの各震度について、きめ細かい分布が与えられている。

わが国では1998年から2017年までの20年間に、震度5弱以上の地震は298回、震度3以上の地震は6,860回発生しているので、気象庁の推計震度分布図にくらべて、J-RISQ地震速報は発信される機会がはるかに多い。また、J-RISQ地震速報は震度データを受信し始めてから1分程度で「第1報」が出され、その後、震度データが集まるにつれて報の更新がなされ、10分経過すると「最終報」が作成されるなど、速報性にも優れている。

J-RISQ地震速報のユニークな点は、図2(c)の震度分布図とともに表示される「主要都市の推定震度」である(図3)。ここでは、主要な市区町村を最大観測震度の順に並べ、それぞれの行政区に含まれる各震度階の250mメッシュ数を集計した結果が頻度分布として棒グラフに示されている。

八代市は最大震度5強だが、市内は震度2まで幅広く分布していることがわかる。つづく芦北町と氷川町はともに最大震度5弱だが、町内の大部分は前者が震度3、後者が震度4である。

次に、震度4を記録した市町村の中では、宇城市、熊本市南区、宇土市で実際に震度4が優勢なのに対し、ほかは震度3が大勢を占めている。また宇城、上天草、宇土の3市は局地的に震度5弱であった可能性が高い。同様に、震度3のグループでも長島、水俣、出水、雲仙、甲佐の各市町では局地的に震度4の揺れがあったと思われる。

このように、1つの市区町村内でも場所により

震度に差があるのは当然だが、それを分布として見られることは興味深い。なお、図3の「市区町村名」の右にある[全て表示](#)をクリックすると、最大観測震度が3以上を記録したすべての市区町村のデータが表示される。

これに加えて、J-RISQ地震情報には「行政区ごとの震度遭遇人口」も掲載されている。これは、250mメッシュの推定震度分布データに同メッシュの夜間および昼間人口データを組み合わせ、地震の発生時刻に応じた各震度の遭遇人口を行政区単位ごとに推定したものである。このデータは、さらにメッシュごとの建物データとも組み合わせることにより、地震による早期被害推定を可能としている。

このほか、J-RISQ地震情報には「この地域で起こった過去の主な被害地震」と「J-SHISから公表している地震ハザード情報」もつけ加えられており、以上のすべてを1枚のPDFファイルとしてコンパクトに出力するサービスも備えられている。

以上のように情報満載のJ-RISQ地震速報はパソコンでもスマートフォンでも利用できるようになっており、ぜひとも多くの読者に活用していただきたい。

(岡田義光：防災科学技術研究所前理事長)

主要都市の推定震度		(都市の最大観測震度と人口を考慮して掲載)		
最大(*) 観測震度	推定震度頻度分布 1 2 3 4 5-6-7	市区町村名 <a href="#">全て表示</a>	全人口：昼間(人)	震央距離 (km)
5強		熊本県八代市	130,000	13
5弱		熊本県葦北郡芦北町	18,000	38
5弱		熊本県八代郡氷川町	11,000	3
4		熊本県宇城市	61,000	5
4		熊本県上天草市	29,000	25
4		熊本県人吉市	38,000	43
4		熊本県熊本市南区	110,000	12
4		熊本県上天草市	89,000	50
4		熊本県下益城郡美里町	10,000	9
4		長崎県南島原市	48,000	38
4		熊本県宇土市	33,000	10
4		熊本県上益城郡益城町	30,000	23
4		熊本県球磨郡あさぎり町	16,000	44
4		熊本県葦北郡津奈木町	4,200	47
3		鹿児島県出水郡長島町	11,000	66
3		熊本県水俣市	29,000	51
3		鹿児島県出水市	55,000	65
3		長崎県雲仙市	44,000	54
3		熊本県上益城郡甲佐町	11,000	11
3		長崎県諫早市	140,000	66

図3 2016年4月19日熊本地方の地震における主要都市の推定震度(防災科  
研資料)

# 1911年に喜界島近海で発生した 巨大地震に伴う津波の調査

後藤和彦・岩本健吾

## 1. はじめに

1911年(明治44年)6月15日23時26分ころに奄美大島東方の喜界島近海で発生した地震は、日向灘～南西諸島域では過去最大規模のものである(以下では、明治喜界島近海地震と呼ぶ)。宇津(1979, 1982)は、この地震の震源を北緯28.0度、東経130.0度、深さ100km(図1のA)、マグニチュードを8.0としており、「理科年表」(1989年度版以降)や「日本被害地震総覧599-2012」(宇佐美ら, 2013)など多くの文献でこの値が引用されている。しかし、喜界島の南方約30kmに位置する震央付近でのプレート境界の深さは10km程度であり、深さ100kmで地震が発生することは現在の地震学の常識では考えにくい。

最近、後藤(2013)は古い地震記録や資料を見直すことによって明治喜界島近海地震の震源位置の再評価を行い、震央が喜界島の北東およそ60km(北緯28.7度、東経130.6度付近、図1のB)の浅い地震であり、大陸プレートとその下に沈み込むフィリピン海プレートの境界、あるいは海溝付近の沈み込むフィリピン海プレート内部で発生した地震としている。

明治喜界島近海地震が深い地震であったか、それとも浅い地震であったかを明らかにするためには、この地震に伴って発生した津波の規模が鍵となる。今村(1913)による明治喜界島近海地震の総合報告の中の津波に関する記載は、「鎮西村ノ三浦瀬相ニ於テハ其ノ夜津浪ノ来襲セルアリテ人家過半浸水セリト云ヒ又秋名ニ於テモ大震ニ引續キ漁師ノ海水異常ヲ注意シタルモノアリシト云フ」とあるだけである。このことを受けてと推察

されるが、宇佐美ら(2013)は「鎮西村に小津波」としている。また、羽鳥(1988, 1996)は今村(1913)の記載から加計呂麻島での津波高を3m程度として、明治喜界島近海地震に伴って発生した津波の規模は地震規模の割には小さかったとしている。

ところが、1995年に喜界島近海で発生したマグニチュード6.9の地震に伴う津波の現地調査の際に、明治喜界島近海地震で発生した津波が喜界島赤連では市街を越えて標高8mほどの丘のふもとまで、喜界島荒木では市街地の標高5.5mまで達したとの口頭伝承があることがわかった(都司, 1997)。津波高の最高値はこれまで知られていたより倍以上高くなったことになる。現地調査は短期間で行われ、かつ主な調査対象は1995年の地震に伴う津波であったことを考えると、明治喜界島近海地震に伴う津波の実態を把握するためには、さらに本格的な調査が必要である。そこで、われわれは2011年から2013年にかけて喜界島や奄美大島などで明治喜界島近海地震に伴う津波の聞き取り調査を実施した。本稿では、聞き取り調査で得られた情報をまとめ、その結果に基づいて明治喜界島近海地震に伴って発生した津波について考える。

## 2. 聞き取り調査の概要

津波の現地聞き取り調査は、喜界島、奄美大島とその南方に位置する加計呂麻島、与路島、請島、さらに徳之島とトカラ列島南端の有人島である宝島で行った(図1, 図2)。図2に現地での聞き取り調査を行った地点を示す。調査した集落の総数は108、聞き取り調査に協力してくれたのは417

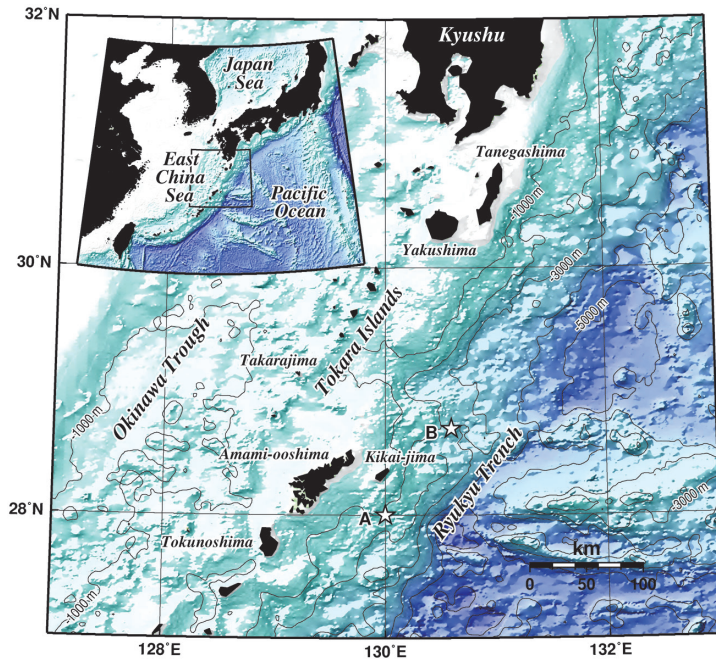


図 1 1911年に喜界島近海で発生した巨大地震 (M8.0) の震央。Aは宇津 (1979, 1982) の震央 (震源の深さは100km)、Bは後藤 (2013) の震央 (震源の深さは10km程度) である

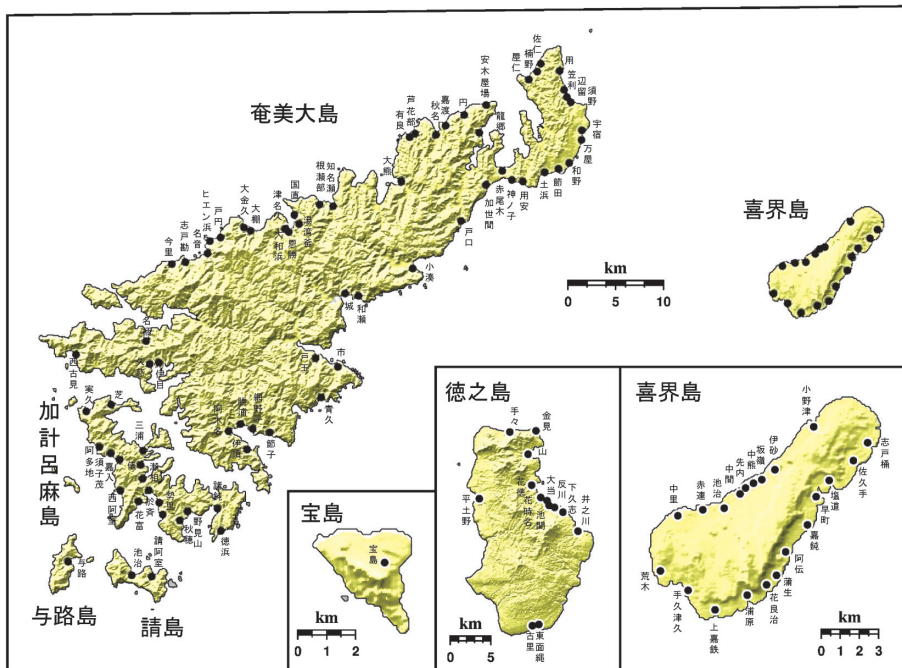


図 2 津波の現地聞き取り調査をした地点。喜界島の赤連に隣接する湾は図には示されていない

人である。喜界島では海岸沿いにあるすべての集落で、奄美大島では大島海峡に面する集落を除い

た海岸沿いのほぼすべての集落で調査を行った。また、加計呂麻島、与路島でもほとんどの集落で



図3 喜界島赤連の市街地。中央の森の中に天神山の高千穂神社の屋根が見える。津波は天神山のたもとまできた



図4 喜界島小野津。正面が小学校。当時海側にあった門から校庭に上がる階段の途中まで波がきた

聞き取り調査を行った。さらに、徳之島では主に島の北東部の太平洋に面した集落で、宝島では唯一の集落で調査を行った。調査は2011年11月～2013年9月までの延べ39日で実施した。

地震発生からすでに100年以上が経過しているために、得られた情報のほとんどは本人の体験談ではなく、親や祖父母から聞いた口頭伝承、あるいは集落などに残っている言い伝えである。それらの中にはいつの津波かはっきりしていない情報もかなりある。本稿では明治喜界島近海地震による津波の確証があるもの、またはその可能性が大きいと推測される情報に限定している。

### 3. 津波の初動と津波高

現地での聞き取り調査は津波に関することを中心に行ったが、地震動や地殻変動に関する情報も得られている。以下では津波の初動と津波高についての証言を集落ごとに紹介する（証言部分の括弧内は著者の注釈）。

地震発生時は大潮（月齢18程度）の満潮から2時間ほど後であり、奄美大島南瀬での地震発生30分後の潮位は平均潮位よりも35cm程度高い。聞き取り調査から推定される津波高の精度はせいぜい1m程度と考えられるので、本稿では津波到来時の潮位の補正は行わずに津波浸水の標高を津波高としている。また、喜界島などでは地震発生に伴う地殻変動が生じていた可能性があるもの

の、地震断層の位置やすべり量の空間分布などが明らかになっていないので、以下の津波高には地殻変動の影響は含まれていない。

#### 喜界島赤連および湾

喜界島西岸の島で最も大きな集落である赤連および湾では15名から証言を得た。集落に津波が来襲したため、人々は集落背後の天神山の高千穂神社に避難した（図3）。島の周回道路沿いにあった旧放送局（通称“親子ラジオ”，標高6m）は浸水し、天神山のたもと（標高8m）まで津波が上がった。さらに、高千穂神社の東方（港から離れる方向）の周回道路から山手にやや離れた民家（標高10m）では膝下まで水がきた。しかし、この民家の東方200m程度にある民家（標高11m）では浸水はなかった。

#### 喜界島池治

西海岸の池治では2名から証言を得た。海岸から200m程度離れた保食神社まで延びる道の途中の小さな上り坂の根元（標高6m）まで津波がきた。津波でボラが打ち上がったので、それを捕りに行った。なお、1995年の喜界島近海の地震を報じる新聞記事（朝日新聞、1995年10月25日鹿児島10版）に掲載された明治喜界島近海地震発生当時16歳だった老人の「島の夏祭りの前夜で、広場には夜遅くまで踊りの輪ができた。途中で涼を求めて友人と海岸に下りた。体が大きく揺れたのはその直後。立ってられず、しばらく腹ばいになって海岸の岩を懸命につかんだ。高台

を目指してはって逃げた。石垣がガラガラと崩れていた。すでに広場に人影はなかった。間もなく津波が襲った。海岸から約二メートル高い道路まで海水が襲ってきた。潮がどんどん上がってきた。怖いなんてものじゃなかった」との体験談は、今回の調査で池治での出来事であることがわかった。

### 喜界島坂嶺

西海岸の坂嶺では4人から証言を得た。集落の西側の海岸から100m程度離れた周回道路沿いにある坂嶺小学校の隣の馬の競りをやっていた場所（現在はゲートボール場、標高6m）まで津波で海になった。大きな岩のような石がたくさんゴロゴロしていたが、それらは津波で海から運ばれてきた石だった。

### 喜界島小野津

喜界島の北西端にある小野津では7人から証言が得られた。地震の後に海が引いていき、ずっと沖まで浅瀬になった。湾内のところどころの潮だまりで魚が跳ねていた。集落の西端の海岸沿いにある小学校（現在と同じ場所）では、当時は海側に門があつて校庭まで階段となっていたが、津波は階段の途中（標高5m程度）まできた（図4）。さらに、学校の西側にある道沿いには波は上がって、現在の門付近の少し上（標高6m）まで浸水した。集落内では湾奥に近い複数の箇所から津波が浸水してきた。最も湾奥の道沿いでは郵便局の上のところ（標高4m）まで津波がきた。そのすぐ西側でも道沿いに浸水し、道沿いの民家（標高5m）と向かいの民家まで水が来て、水と一緒に魚が上がった。この辺りでは少し掘ると津波で運ばれてきた黒色の軽石が今でもでてくる。郵便局の北東150m付近でも道に沿って津波が上がってきて、道の曲がり角にある民家（標高3m）の入り口で波に流されてきたエラブチ（ブダイ）が捕れた。津波はさらに遡上し、（標高5mにある）民家の手前で道沿いに海水は回り込み、そのまま海のように下りていった。

### 喜界島志戸桶

喜界島の北東端の志戸桶では10人から証言を得た。奥行き500m程度の入り江の奥から150m



図5 喜界島上嘉鉄。旧上嘉鉄小学校があった海成段丘（中央の横長の屋根が見える場所）の下位の段丘面まで潮がきた

程度離れた集落のだいたい真ん中くらいまで潮が上がって、森先生宅の2、3軒下のところ（標高4m）まできた。一方、入り江の南側にある塩浜（標高3m程度）には潮は上がらなかった。

### 喜界島花良治

東海岸の花良治では15人から証言を得た。大きな揺れの地震があり、海水が沖のほうまで引いた。魚が港の中に取り残されてピチピチと跳ねていて、それを捕りに行った人たちがその後押し寄せてきた津波で流された。花良治では多くの証言を得ているが、ほとんどは地震動被害に関するものを除くと、「津波が上がってきたとは聞いていない」の類の証言ばかりである。

### 喜界島上嘉鉄

上嘉鉄は喜界島南端にあり、集落は入り江から250m程度離れた海成段丘の下から3段目にある。ここでは11人から証言を得た。段丘の4段目にあった旧上嘉鉄小学校の下の民家（標高9m）まで潮がきた（図5）。その200m程度東の同じ段丘面にある民家では石段の下（標高9m程度）の井戸の傍に石を彫って造られた浅い壺のような物があったが、そこまで潮が押し寄せてきて、潮が引いた後には壺の中で魚が泳いでいた。さらに、その100m程度東方の民家の前の道（標高9m）にも津波はきた。また、集落の東端の海側の民家（標高7m程度）では門まで潮が入ってきて、板つけ船が門のところまで打ち上げられた。



図6 喜界島中里. 中央部に見える茂み付近(遊歩道の入り口)の陸側まで波が押し寄せてきた



図7 奄美大島神ノ子. 津波で流された家屋は車が通過している位置の海側の茂みのところにあった



図8 奄美大島市. 集落の沖にあるトビラ島まで歩いていけるほど潮が干上がった

### 喜界島手久津久

島の南西岸にある手久津久では2人から証言を得た。海から100m程度離れた島の周回道路の山側の民家(標高7m)で、門口の辺りまで潮が押し寄せてきて、魚がたくさん打ち上げられてパチャパチャと跳ねていた。

### 喜界島荒木

喜界島の西端にある荒木では3人から証言を得た。集落に浸水してきた津波は、海岸から200m程度入った突き当りのT字路の石垣壁に当たって砕け、波はさらに60mほど山手の民家前の畑(標高9m)まできた。この民家の南東130mにある民家(標高7m)では、波が引いた後に家畜の豚がガジュマルの木(当時は台風シーズン前で枝打ちをしていたので高さは3~4m位とのこと)の上に乗っていた。このことから津波高は10m程度と推測される。なお、津波は海から直接きたのではなく、前述のT字路に至る道沿いの標高4mにある民家の裏山を乗り越えて押し寄せたとの証言が複数の人から得られている。

### 喜界島中里

西海岸にある中里では8人から証言を得た。飛行場の南西側から荒木集落まで今は遊歩道となっているが、その遊歩道の中里側の入り口付近では内陸まで潮が上がって、土手のような土盛になっているところ(標高10m)まで波が押し寄せてきた(図6)。また、遊歩道のある丘陵地は当時牧場であったが、地震後に見に行ったら繋いであった牛や馬は全部溺死していた(標高8m程度)。なお、奄美大島のほうに行った津波が跳ね返って中里のほうに流れて何人が亡くなった、との証言があることから、津波の初動は引き波だったと思われる。

### 奄美大島嘉渡

奄美大島の西海岸にある嘉渡では5人から証言を得た。地面が割れるくらい大きな地震があって、津波が島の周回道路まできた。集落内の周回道路の標高は3~6m程度であり、ここでの津波高は4mとしておく。

### 奄美大島龍郷

龍郷は笠利湾内の西岸にある。海が割れた後に海がなくなった(津波の初動は引き潮であったと





図 9 奄美大島節子。集落の背後にある前田山の麓まで津波がきた

思われる)。その後海水が小学校の校庭(標高5m。当時の小学校は現在地とは違い、集落南部の海岸沿いにあった)まできた(この証言は2003年7月に得たものである)。

#### 奄美大島屋仁

西海岸の屋仁では4人の証言を得た。海から川に沿って水が上がって田んぼにも流れていって、集落内でもだいぶ被害があった。今と違って、当時の川は蒲生神社の下の墓がある辺りにあって、そこから水は海に流れ出ていた。具体的な浸水地点は不明であるが、津波高は集落の平均的な標高の4m程度としておく。

#### 奄美大島佐仁

奄美大島の北端の西海岸沿いにある集落で8人から証言を得た。津波があつて集落内に押し寄せてきて、そのときに貝など海のものが流されてきた。自宅(標高5m)の庭に防空壕を掘ったら、そのときの貝やサンゴが出てきた。津波高は4m程度としておく。

#### 奄美大島神ノ子

東海岸の神ノ子では2人の証言が得られた。喜界島のほうからきた波と回り込んできた波がぶつかって道路を駆け上がり、船が打ち上げられた。集落から少し用安方向の道路の海側にあった屋敷(標高7m)が、津波が襲ったときに海に持っていかれた(図7)。その後押し寄せてきた津波でまた元の場所に戻ってきた(屋敷が元の場所に戻るとは考えにくく、移動した程度のことかもしれない)。津波高さは8m程度としておく。



図 10 奄美大島ヒエン浜。岬の手前にあるヒエン浜は津波で一面水浸しになった

#### 奄美大島和瀬

奄美大島東岸の和瀬では2人から証言を得た。ずっと沖まで潮がスーッと引いて、その後津波がきた。

#### 奄美大島市

奄美大島東岸の住用湾の南岸湾口付近にある市では4人から証言を得た。湾奥にある山間とか西仲間とかのほうに先に津波がいて、その余波みたいなものが後から市にきた。津波がくる前は、集落の西側の沖300m程度にあるトビラ島まで歩いていけるほど潮が干上がった(図8)。

#### 奄美大島節子

奄美大島東岸の伊須湾の北岸湾口付近にある節子では9人から証言を得た。集落に津波が来襲し、人々は背後の前田山に逃げた。前田山ではサツマイモを栽培する段々畑が一面に広がっていたが、津波はその1段目と2段目の間(標高8m)まできた(図9)。今でもその辺りでは黒い軽石が出てくる。集落ではいちばん大きな立派な屋敷(標高2m)の屋根のてっぺんだけが波の上に出ていた。今回の調査で明治喜界島近海地震を体験した唯一の生き証人である明治40年生まれの女性からは「津波があったことは本当だ。小さいときに抱っこされて前田山の上に逃げたことだけは確かに覚えている。逃げた先で周りの人が地震、津波と言っていた」との証言を得ている。

#### 奄美大島ヒエン浜

西海岸の戸円と名音の間にあるヒエン浜については1人の証言を得た。地震発生当時のヒエン浜

表 1 津波の初動と津波高

集落名	初動	津波高 (m)
<b>喜界島</b>		
赤連、湾	—	10
池治	—	6
坂嶺	—	6
小野津	引き	6
志戸桶	—	4
花良治	引き	—
上嘉鉄	—	9
手久津久	—	7
荒木	—	10
中里	引き	10
<b>奄美大島</b>		
嘉渡	—	4
龍郷	引き	5
屋仁	—	4
佐仁	—	4
神ノ子	—	8
和瀬	引き	—
市	引き	—
節子	—	8
ヒエン浜	—	3
大金久	引き	—
大和浜	引き	—
恩勝	—	3
<b>加計呂麻島</b>		
瀬相	—	3
花富	—	4
嘉入	—	4

には人は住んでおらず、道もなく、山際まで乾田（標高3m）が広がっていた。その乾田に津波が押し寄せて一面水浸しになり、波が引いた後には魚がウヨウヨしていた（図10）。

#### 奄美大島大金久

西海岸の大金久では3人の証言を得た。地震後に沖のほうまで潮がサーッと引いてから上がってきた。人々は集落の高いところに逃げた。集落が水浸しになったとは聞いていない。

#### 奄美大島大和浜

西海岸の恩勝湾の奥にある大和浜では1人の証言を得た。地震後に海水が引いてから上がった。

#### 奄美大島恩勝

大和浜の東隣の恩勝では2人から証言を得た。開饒神社の麓辺り一帯は津波で水浸しになった。昭和30年代初めに行われた護岸工事で地盤が高上げされており、開饒神社の麓辺りの現在の標高は最も低いところで3.4m程度なので、津波高は3mとしておく。

#### 加計呂麻島瀬相

大島海峡を挟んで奄美大島の対岸、加計呂麻島の北側海岸線の中央付近にある瀬相では5人から情報を得た。海からの水とあふれてきた川の水とが押し寄せてきて、かまどのところにも水が入って畳の上まで水に浸かった（標高3m）。

#### 加計呂麻島花富

加計呂麻島の南岸中央付近の伊予茂湾の西岸にある花富では1人から証言を得た。大きな波が集落のところまで押し寄せてきた。大波が集落の道路まで押し寄せてきて大変だった。そのときは川の隣にあった田んぼ、現在公民館になっているところとそれより高いところ（標高4m）まで波が入って怖かった。

#### 加計呂麻島嘉入

南岸西部の嘉入では2人の証言が得られた。津波があつて集落の中まで水が入った。浸水地点は分かっていないので、津波高は集落中心部の標高4m程度としておく。

### 4. 聞き取り調査のまとめ

津波に関して得られた情報は全部で78個であり、その半数以上の46個は喜界島で得られたものである。奄美大島では27個、加計呂麻島では5個の情報が得られている。しかし、その南に位置する与路島、請島、徳之島では地震動に関する情報は得られたものの、津波についての情報は皆無であった。

与路島では明治喜界島近海地震以前の津波についての口承を聞くことができた。250年から300年前に大きな津波が襲来し、波は集落の背後にある山の麓まで達し、南側と背後の山に逃げた人々は避難の途中で波に流され、北側の高台に逃げた

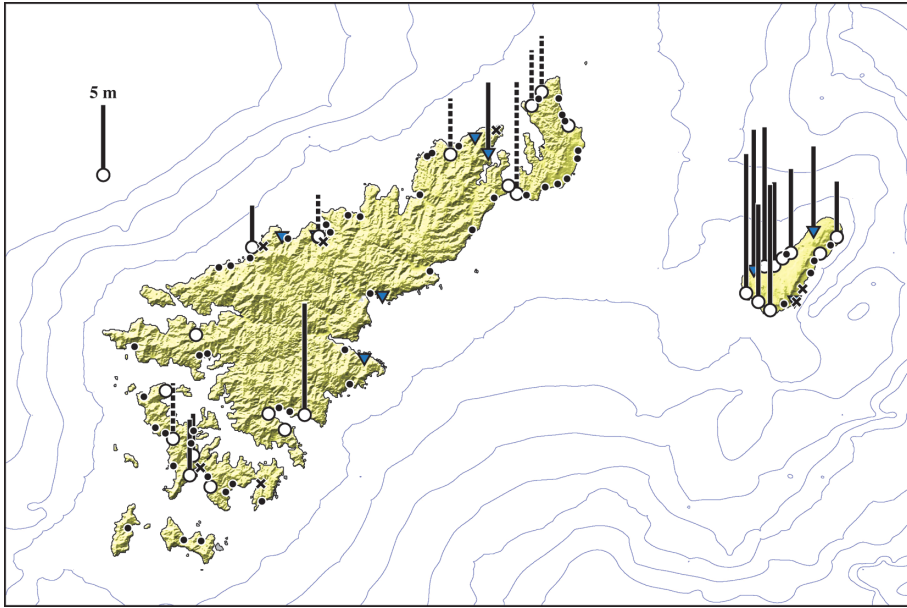


図 11 津波の聞き取り調査の結果。○印は津波の情報 が得られている集落，そのうち津波初動が引き潮の集落は▼印（上げ潮の集落はない），縦棒は津波高（実線は浸水地点が確定できているもの，破線は浸水地点が確定できていないためにおおよその津波高しか推定できないもの）である。×印は津波の情報はないが地震動の情報は得られた集落，黒点は津波および地震動の情報とも得られなかった集落である。等深線は 200m ごとに描かれている

人だけが助かった，というものである。このことは尾崎（2001）に詳細な記載がある。今回の調査では明治喜界島近海地震に伴った津波についての情報が得られていないことから，明治喜界島近海地震に伴った津波は口承で残るほどの規模ではなく，少なくとも 250 年から 300 年前の津波ほどではなかったと思われる。徳之島でもかなり広範囲で聞き取り調査を行ったが，津波についての情報は得られなかった。さらに，今回の調査期間中に徳之島伊仙町木之香の元小学校教員の良 宗二さん（明治 40 年生まれ）の回顧録を拝見する機会があった。その中に“地震のこと”の項があり，伊仙町鹿浦港の西側の岸壁が大きく崩れて落下し人家を押し潰して何人かの死者がでたこと，亡くなった人の中には知っている人がいたことなどが詳しく書かれていた。しかしながら，津波についてはいっさい触れられていないので，徳之島伊仙町では津波が襲来していたとしても，その規模は小さかったものと思われる。以上のことから，加計呂麻島よりも南の地域においては，明治喜界島

近海地震に伴う津波の規模はごく小規模であったと推定される。

奄美大島の北方に位置するトカラ列島南端の宝島でも津波の情報は得られなかった。ただし，津波の情報が得られなかったことでは与路島，請島，徳之島と同じであるが，聞き取り調査を行った印象は異なる。すなわち，与路島などでは明治喜界島近海地震に伴う津波についての話はなかったものの，同地震の地震動や他の時期の津波や地震動に関する情報は多く得られたのに対し，宝島では明治喜界島近海地震以外の地震動や津波に関する情報もまったく得られなかった。さらに，地震・津波のことに限らず昔の情報が口頭伝承としてあまり残っていないような印象でもあった。宝島では高度経済成長期に激しい人口流出（1950 年代半ばに 600 人を超えていた人口が 1970 年代半ばには 200 名程度に減少）が起こっており，そのために伝承があまり残っていないのかもしれない。宝島での明治喜界島近海地震に伴う津波の実態は，今回の聞き取り調査では明らかにできな

かったと思われる。

表1に聞き取り調査で分かった津波の初動と津波高をまとめた。また、図11には津波高のほか、津波の初動、地震動の情報だけが得られた集落、津波と地震動のいずれの情報も得られなかった集落が示されている。聞き取り調査の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 津波高には明瞭な地域差が認められた。すなわち、喜界島では東海岸よりも西海岸のほうが津波高は高く、なかでも南西部で最も高い。奄美大島では西海岸より東海岸のほうが津波高は高い。さらに、西海岸では北部ほど高い。
- (2) 加計呂麻島より南方の与路島、請島、徳之島では、少なくとも顕著な津波は来襲していない。
- (3) 最高津波高は喜界島の中里、赤連（湾）、荒木での10mである。また、奄美大島での最高津波高は8m、加計呂麻島では4mである。
- (4) 津波の初動は喜界島と奄美大島の少なくとも中部以北で引き潮である。

## 5. 明治喜界島近海地震の震源と津波の規模

喜界島の海岸沿いのすべての集落で聞き取り調査をした結果、喜界島での津波高は西海岸で高く、東海岸で低い明瞭な地域差が明らかとなった。東海岸の佐手久～浦原では43人の情報提供者から津波初動などの話は聞かれたものの、津波高を推定できるような情報はまったく得られておらず、西海岸での聞き取り状況とは大きく異なる。さらに、喜界島東海岸の塩道で男性（昭和11年生）からは、「子供の頃に中学校の先生の講話で、塩道ではそれほどではなかったが（喜界島西海岸の）中間や先内では大きな津波があったことを聞いた」という証言を得ている。この情報は今回の聞き取り調査結果と整合する内容である。もし明治喜界島近海地震の震央が喜界島の南方（宇津，1979，1982）だとすると、太平洋に面した喜界島の東海岸は震央を真正面に見る位置にな

り、津波高は高くなるはずであるが、今回の調査結果はそのような特徴を示していない。さらに、徳之島で顕著な津波が来襲したとは考えられないことも、震央が喜界島の南方に位置することとは整合しない。明治喜界島近海地震の震央は喜界島や奄美大島より北方とするのが妥当と思われる。

明治喜界島近海地震に伴う津波の高さは最大で10m程度であり、この規模は今村（1913）の報告以来知られていた高さを大きく超え、都司（1997）の報告をも上回っている。羽鳥（1996）によって示された日本近海に発生した地震の規模と津波の最大波高の関係に従うと、M8.0の明治喜界島近海地震で想定される最大波高は6.5m程度であり、調査で得られた最大波高10mはそれを超えている。さらに、羽鳥（1996）に従うと、M8.0の地震規模に対応する標準的な津波波高は3.9～10.8mとなり、最大波高10mは標準的な範囲に入っているなかでも大きめだったことになる。

ところで、羽鳥（2002）は、都司（1997）の喜界島赤連や荒木での津波高の報告を受けて、明治喜界島近海地震に伴う津波規模の再評価を行っている。しかし、再評価の結果は羽鳥（1988）と変わらず、明治喜界島近海地震に伴う津波規模は1.5であり、標準的な規模より1階級小さい（波高にしておよそ半分）。都司（1997）の赤連での報告値8mは、地震の規模と津波の最大波高との関係（羽鳥，1996）に従うと、標準的な津波波高の範囲に入っており、羽鳥（2002）とは矛盾することになる。この矛盾は、羽鳥（2002）では津波規模を最大波高ではなく、津波波高と震央距離との関係から求めていることに起因している。宇津（1979，1982）の震央を採用すると、津波波高の4データのうちの3つの津波規模は1.3～1.7である（羽鳥，2002）。ただし、喜界島赤連での津波高8mは津波規模2.3程度で突出した値となる。赤連の値は、局所的な津波波高として評価の対象から除外したのかもしれない。

前述したように、明治喜界島近海地震の震央は喜界島や奄美大島の北方に位置していると推測される。その場合には、羽鳥（2002）の図4で示された津波波高と震央距離の関係は大幅に変更され

ることになる。喜界島の北東に震央を求めている後藤（2013）の値を採用した場合を羽鳥（2002）の結果と比べると、たとえば加計呂麻島瀬相での津波規模は1.7から2.8に、喜界島赤連では2.3から3.5程度となる。地震規模と津波規模との関係（羽鳥，1996）から推定される明治喜界島近海地震の津波規模は2.5程度であり、瀬相や赤連で推定された津波規模は、地震の規模に対応した標準的な値あるいは大きめの値となる。

津波の最大波高あるいは津波波高と震央距離との関係から推定された津波規模が、いずれも地震規模に応じた標準的あるいは大きめの値となることは、明治喜界島近海地震の震源の深さは100km（宇津，1979，1982）に達するような深い地震ではなく、浅い地震であることを示唆している。

## 6. おわりに

喜界島や奄美大島などで明治喜界島近海地震に伴う津波の聞き取り調査をした結果、津波の規模は地震の規模に応じた標準的あるいはやや大きめであったことが明らかとなった。さらに、震央は喜界島や奄美大島の北方に位置し、震源の深さは浅い可能性が大きいことがわかった。今後は調査で得られた津波高の地域変化を定量的に説明できる地震断層の位置や拡がり、地震時のずれの大きさの空間分布などを求める必要がある。その際には、今回の調査で明らかとなった多くの地点で津波初動が引き潮であったことも推定の束縛条件として有効なデータになろう。

なお、今回の聞き取り調査では明治喜界島近海地震以外の地震やそれに伴う津波についても多くの貴重な証言が得られている。それらの紹介は別の機会に譲ることとするが、南西諸島域ではこの種の調査が不十分であり、今後さらに進めていく必要がある。

## 謝辞

津波の聞き取り調査では、喜界島、奄美大島、加計呂麻島、与路島、請島、徳之島、宝島の多く

の皆様にご協力いただきました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 後藤和彦. 2013. 1911年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源位置の再評価. 地震2, **65**, 231-242.
- 羽鳥徳太郎. 1988. 琉球列島における津波の規模と波源域. 地震2, **41**, 541-547.
- 羽鳥徳太郎. 1996. 日本近海における津波マグニチュードの特性. 津波工学研究報告, **13**, 17-26.
- 羽鳥徳太郎. 2002. 明治44年(1911)奄美大島近海地震による津波の規模. 津波工学研究報告, **19**, 47-51.
- 今村明恒. 1913. 明治四十四年ノ喜界島地震. 震災予防調査会報告, **77**, 88-102.
- 尾崎 一. 2001. 与路島(奄美大島)誌, 595 pp.
- 都司嘉宣. 1997. 1995年奄美大島近海地震による地震および津波被害について. 地学雑誌, **106**, 486-502.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子. 2013. 日本被害地震総覧 599-2012. 東京大学出版会, 694 pp.
- 宇津徳治. 1979. 1885年～1925年の日本の地震活動—M6以上の地震および被害地震の再調査—. 地震研究所彙報, **54**, 253-308.
- 宇津徳治. 1982. 日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表: 1885年～1980年. 地震研究所彙報, **57**, 401-463.

後藤和彦

[ごとう かずひこ]

**現職** 地震予知総合研究振興会つくば観測技術センター所長, 理学博士

**略歴** 東北大学大学院理学研究科博士課程後期修了. 東北大学助手, 気象庁気象研究所研究官, 鹿児島大学助教授, 準教授, 教授を経て現職

**研究分野** 地震学



岩本健吾

[いわもと けんご]

**現職** 気象庁地震火山部

**略歴** 鹿児島大学大学院理工学研究科博士前期課程修了

**研究分野** 地震学



# 1968年十勝沖地震・1978年宮城県沖地震を 振り返って

## 一両地震がその後の建築耐震設計などに どのような影響を与えたか—

北川良和

### 1. はじめに

わが国は世界有数の地震国であり、地形や地盤などの各種自然条件が地震に対してきわめて脆弱な場合が多く、これまでに多大な人的・物的被害を受けてきた。

大都市への人口集中に伴う建物の過度な密集化や避難路等の未整備、ライフラインやコンピュータの発展・依存度の拡大など社会的・機能的条件と相まって、一度大地震に見舞われると都市災害としてこれまでに考えられなかった形態の被害や、個々の相互波及によるまったく新たな災害が発生する恐れがある。

このような地震災害を最小限に抑えるために地震対策は不可欠である。地震対策として安全性を保つには、耐震技術、免震技術、制震（振）技術を適用するなど、建築単体（点）や建築群（面）として都市を構造的に地震から強くする必要がある。

最近の若手研究者達の主たる地震災害への関心は2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災、 $M=9.0$ ）が中心であり、今や1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災、 $M=7.3$ ）も風化の一途をたどっている。

折しも今年には1968年十勝沖地震（ $M=7.9$ ）から50年、1978年宮城県沖地震（ $M=7.4$ ）から40年の節目にあたる。本稿では、この両地震が耐震設計へ与えた影響について、まず両地震の建物被害特徴について概観した後、その後の建物耐震設計に関する基・規準の流れとその内容について述べる。

### 2. 地震災害

耐震工学上重要な意味をもつわが国の代表的な地震を列挙し表1に示す。これらの地震災害を通じて得られた経験・知識は建物の耐震設計に活用され今日に至っている。前述した両地震の建物被害を以下に概観する。

#### 2.1 1968年十勝沖地震<sup>1,2)</sup>

十勝沖地震は1968年（昭和43年）5月16日に発生した。青森県東部を中心に北海道南西部、岩手県、およびその他の県に建物被害をもたらした。死者52名、全壊・大破および焼失した建物は約943棟におよんだ。この地震による建物被害の特徴として鉄筋コンクリート造建物（以下RC造建物）に振動的被害が生じたこと、木造住宅の被害が軟弱地盤や特殊地形地域に集中して生じたこと等があげられる。なかでもRC造建物の被害は八戸市、むつ市、函館市、野辺地町で生じたが、これらの多くの建物は当時の建築基準法に準拠して設計された学校、市役所などの公共建物であった。建物被害の様相を列挙すると、

- 1) 主として1階の柱がせん断破壊したもの
- 2) 柱が圧壊して建物の一部またはある階が崩壊したもの
- 3) 建物全体が振れて揺れ、柱が曲げ破壊したもの
- 4) 塔屋の一部が崩壊したもの
- 5) 基礎の不同沈下をおこしたもの

等である。被害の原因として、

- 1) 振動継続時間がかなり長く、2~6秒といっ

表 1 耐震工学上代表的な地震とその意義

年代	地震名	耐震工学上の意義
1880	横浜	日本地震学会の発足
1891	濃尾	輸入構工法（煉瓦材）の批判，震災予防調査会の発足，三角測量の実施，磁気観測の開始
1923	関東	震後大火災，内藤式計算法，市街地建築物法地震力（震度0.1），地盤と建物との被害関係
1927	北丹後	断層調査と三角測量（水準測量）
1933	三陸沖	津波
1948	福井	局地的な激震，気象庁震度階Ⅶの設置，RC造建物の崩壊（傾斜），強震観測事業
1964	新潟	地盤による被害（地盤の液状化），工場火災（沿岸工業地帯の被害）
1966	松代群発	地震予知研究
1968	十勝沖	RC造建物の崩壊（柱のせん断破壊），家具・物体の転倒，建築学会RC造規準の改正
1978	伊豆大島近海	鉄骨建物の崩壊，ブレース破断，非構造部材の被害
1978	宮城県沖	RC造建物の崩壊（壁の偏在，ピロティ形式を有する建物の崩壊），新耐震設計法
1983	日本海中部	地盤災害，津波被害
1993	釧路沖	大きな加速度値
1993	北海道南西沖	津波被害，火災
1995	兵庫県南部 （阪神・淡路大震災）	大きな加速度・速度値，震度Ⅶの帯，中低層RC造建物の崩壊，木造住宅の倒壊，厚肉鉄骨の破断，地盤災害，家具・物体の転倒，非構造部材の被害
2004	新潟県中越	新潟県中越大震災，大きな加速度値
2007	新潟県中越沖	柏崎刈羽原発被害
2011	東北地方太平洋沖 （東日本大震災）	日本の地震観測史上最大規模（M=9.0），津波被害，死者・行方不明者18,434人，関連死者3,641人，福島原発事故



写真 1 八戸工専校舎1階柱のせん断破壊，2階柱のせん断ひび割れ状況（文献3）より引用）

たやや長周期成分を有する波形の地震動を繰り返し受けたこと

- 2) 腰壁，垂れ壁などのため，見かけ上柱の長さが短くなり，その部分に応力（せん断力）が集中し，部分的に大きな斜めひび割れが発生したこと
- 3) 壁の配置が不均等のため，ねじれ振動を起こし，部分的に破壊したこと



写真 2 八戸工専校舎1階柱のせん断破壊状況（文献3）より引用）



写真3 三沢商高校舎（増築部分）1階での層崩壊状況（文献3）より引用

- 4) コンクリートの強度不足や鉄筋配置の不適正配筋により、じん性（ねばり強さ）が不足したこと

等が指摘されている。代表的な建物被害状況を写真1から写真5に示す<sup>3)</sup>。なお、十勝沖地震と類似の被害はその後の地震時でも生じており、1995年兵庫県南部地震の大災害へと至る。

また、この地震では東北・北海道など各地で最大加速度が $50\text{ cm/s}^2$ 以上の地震動波形が17記録されている。特にRC造建物に多大の振動的被害を生じた八戸市にある港湾でSMAC-B型強震計により記録された地震動波形は、直接被害地域内で記録されたこと、最大加速度がNS成分で $225\text{ cm/s}^2$ とあまり大きくないものの、建物の地震応答解析上大きな応答値を示す波形であったことから、工学的に着目され、その後の研究に多用されている。

## 2.2 1978年宮城県沖地震<sup>4,5)</sup>

宮城県沖地震は1978年（昭和53年）6月12日に発生した（なお、同じ地域で同年2月20日に $M=6.7$ の地震が発生している）。宮城県下の市町村および福島、岩手県で建物被害をもたらし、死者28名、全壊・大破した建物は約1,383棟におよんだ。なかでも、RC造建物の被害は仙台市東部または南部の地盤の弱い地域で著しかった。建物の被害様相は1968年十勝沖地震の際に生じた被害様相と同様であった。被害の原因として、

- 1) 南北方向に壁がないラーメン構造や壁が

あっても著しく偏心のある構造となっていること

- 2) 1階の剛性が他の階の剛性より著しく低くなっていること

等があげられる。ここで、地盤の良い旧市街地にあたる西部地域では多数のRC造建物が存在したにもかかわらず、顕著な被害はなかったが、市の周辺部の丘陵地域では著しい被害を受けたものが散見された。

被害を受けた建物は、用途的に事務所、店舗が多く、公共建物の被害は比較的少なかった。また被害を受けたRC造建物は後述するせん断力に対する規定が強化された1971年以前に設計されたものが圧倒的に多く、1968年十勝沖地震の際にみられた被害の大々的再現といえた。しかしながら、崩壊したものの中には、柱頭・柱脚部分で曲げ・せん断破壊し、軸力を支えきれなくなり、2階が層崩壊したものがあった。これは、1968年十勝沖地震の際にはみられなかった破壊形式である。

また、この地震では全国で191台の強震計が作動した。なかでも、東北大学工学部建築系建物（鉄骨鉄筋コンクリート造、9階建）は柱、耐震壁、床スラブにひび割れが生じたものの、耐震性能を損なうほどの損傷ではなく、耐震壁の重要性を検証した。この建物内でSMAC-M型強震計により記録された地震動波形では、1階での最大加速度値 $259\text{ cm/s}^2$ 、9階で $1,040\text{ cm/s}^2$ を示した。この値は建物の観測値（応答値）として世界最大値であった。このとき、時間軸で積分して得られた9階での最大速度値は $150\text{ cm/s}$ を示した。この最大加速度値は後述する「新耐震設計法」で規定されている標準せん断力係数 $C_0=1.0$ の基となっている。

## 3. 建物の耐震設計法

耐震工学は震害経験を母体として、これに実験や解析を加えて発展してきた<sup>6,7)</sup>。1923年関東地震（ $M=7.9$ ）の翌年に市街地建築物法が改正され、設計震度に基づく耐震設計法が規定され、1950年建築基準法に受け継がれた。この間、設





写真 4 函館大学校舎 1 階柱の崩壊状況（文献 3）より引用

計震度の値が 0.1 から 0.2 と変わったが、許容応力度も変わったため、建物の耐震性能には大きな差は生じていない。

RC 造建物は、1948 年福井地震（ $M=7.1$ ）での大和百貨店（7 階建）の崩壊、1964 年新潟地震（ $M=7.5$ ）での川岸町アパート（4 階建）の転倒があるが、前者は異種基礎を有する焼けビルの影響、後者は地盤の液状化による影響とみなされ、1964 年新潟地震まで一応建物は耐震的に安全と考えられていた。ところが、1968 年十勝沖地震では、前述したように RC 造建物の振動による被害として、柱のせん断破壊がさわめて多く、この被災建物が当時の建築基準法で建設された建物であったことから、建築構造家や研究者に大きなショックを与え、この地震によって初めて耐震設計法の存在価値が問われた。わが国の耐震設計法に与えたインパクトは大きく、これが 1980 年に公布された建築基準法の大幅な改正を促したばかりでなく、一般の建築技術者の意識改革をもたらし、新築建物の耐震性を従前に比べて向上させることとなった。また、いまだ大地震を経験していない地域での既存建物について不安が残り、これが後述する既存 RC 造建物を対象とした耐震診断法および改修設計等の普及と相まって建物の耐震化に多大に貢献することとなった。

以下に、1968 年十勝沖地震発生以降の耐震設計法、耐震診断法に係わる事項について概観する。

### 3.1 耐震設計法

震害経験や実験・解析から得られた知識・経験



写真 5 函館大学校舎 1 階柱のせん断破壊状況（文献 3）より引用

は構造計算、構造規定の形となって耐震設計法として活用されている。ここで、構造計算とは実際に建物に作用する地震力よりもはるかに簡略（単純）化された設計用地震力（荷重）に対して耐え得るように構造方式や部材断面を定め、建物の構造耐力を検討するための便法である。また、構造規定とは通常の構造計算からは得られないが、構造や部材に規定を加えることによって、建物の構造耐力を確保できるようにしたものである。

1968 年十勝沖地震は前述したように耐震設計された RC 造建物に対する構造家・研究者の自信を大きく揺るがした。曲げ破壊を想定して設計された柱がせん断破壊を招いた現象はその最たるものであった。ここでのせん断破壊とは、構造計算ではその存在を考慮しない非構造壁（窓の開口部の上下にある垂れ壁や腰壁）の拘束により、実際には見かけ上柱の短柱化（柱の有効長さが短くなる）が生じ、その効果により柱の剛性が高まることで、構造計算上想定したせん断力以上の応力が集中し、破壊する現象をいう。その結果、じん性

(ねばり)が確保されず、柱としての鉛直力支持機能を喪失して圧壊しやすい。また、設計用地震力として世界的にも大きな値を考えていたにもかかわらず、RC造建物が被害を受けたことは、設計用地震力をはじめとして、耐震設計法が再検討される動機となった。

このような状況のもと、柱の帯筋(横筋)量の増大(配筋状態の改善)によって、柱のせん断耐力を向上させて脆性的なせん断破壊を防止し、じん性のある曲げ破壊を先行させる方策を盛り込んだRC規準(日本建築学会)の改正が1970年に、建築基準法・同施行令の部分改正が1971年に行われた。これらの改正の主旨は、柱のせん断破壊を防止することにより建物にじん性を保有させ、大地震時には建物に損傷は生じても倒壊しない等、人命に係わるような重大な被害を防止することにあった。しかしながら、この時点での改正では、RC造建物について、柱の帯筋間隔を狭くする規定に代表されるように耐震設計法の枠組みは変更されず、構造規定の部分改正のみであった。

1972年に建設省総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」が五カ年計画でスタートした。この開発プロジェクトでは、これまでの被害経験をもとに、基盤に設定される地震動、表層地盤の影響、地震動に含まれるやや長周期成分、地盤と建物との相互作用、各種構造の弾塑性挙動など耐震設計上重要な課題の研究が行われた。その結果、1977年「新耐震設計法(案)」が提案された<sup>8)</sup>。ここでは、いたずらに慣行的技法を盲目的に行うのではなく、地震力の特性、構造物の特性、安全度の照査などの手順を念頭に置き適切な耐震設計を行えるよう設計手順の明確化が図られている。この(案)を実際の設計法として用いるためには建築基準法の改正が必要であり、そのため引き続き法令改正の準備が行われた。

この間、日本建築学会では新しい地震荷重を提案する動きがあり、1976年地震荷重第1案(建研案)、同第2案(京大案)が文献公表された<sup>9)</sup>。両案とも各種構造種別ごとの耐震性を論じたもので、その後の建築基準法の改正に大きく影響を与えた。

折しも1978年宮城県沖地震が発生し、前述し

たように仙台市とその周辺に建つRC造建物に大きな被害が生じたことから、新耐震設計法(案)の建築基準法への取り組み作業が急務となり、1980年建築基準法・同施行令が公布された。その内容は設計法としては大改正となったため、一般の構造家の理解を深めるために1年間の試行期間が設けられ、1981年建築基準法・同施行令が施行された。

この改正では、一次設計(許容応力度設計)に加えて層間変形角、剛性率、偏心率、保有水平耐力などを確認する二次設計を建物高さ(60m以下)との関連から義務づけたこと、および従来の静的な観点から、建物周期、地盤特性、構造物の塑性化を見越してじん性効果を導入した点などが眼目とされた。

その後、1995年兵庫県南部地震では多くの人命が失われ、多くの建物が甚大な被害を受けた。この地震から得られた教訓の1つとして、建物により高い安全性を確保するためには性能志向型の構造体系が必要であるとの認識から、2000年に建築基準法・同施行令の一部が改正され、性能設計法の導入、住宅性能制度の導入、建築確認の民間への開放が、さらには2003年限界耐力計算法、あるいはエネルギー法の適用が認められ、今日に至っている。

### 3.2 耐震診断・改修設計法

1960年代、梅村 魁博士は「超高層建物ではなく、一般の低層建物の耐震性が危ない」と力説し、学校建築を中心とした耐震化の具体策が検討されていた。1968年志賀敏男博士による壁率・柱率と被害との関連(志賀マップ)が、1975年日本建築学会より「鉄筋コンクリート造校舎の耐震診断及び補修方法」が公表された。この流れは1977年日本特殊建築保全センターより「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断及び耐震改修指針」の公表へと続いている。また、1995年兵庫県南部地震で全壊・大破したRC造建物は1981年以前に設計・施工された建物に集中していたことから、その教訓をもとに1995年12月耐震改修促進法が施行された。ここでは、1981年以前の耐震基準(以下、旧耐震基準)によって建設され

た既存建物を対象に、既存不適格建物として耐震診断や耐震改修を努めることが求められた。その後、2006年には耐震化の具体的な数値目標が掲げられ、2013年に一部改正され現在に至っている。この間、耐震診断や改修設計法に関していくたの関連指針が公表されている。

一方、新耐震設計法の開発を進める中で、既存建物の耐震性評価、補修方法が技術的・行政的に重要な課題となり、1981年建設省総合技術開発プロジェクト「震災建造物の復旧技術の開発」が五カ年計画で実施された。このプロジェクトでは、地震により被災した建物の被災度判定手法、復旧方法の開発など余震による二次災害の防止や被災建物の再利用に関する技術開発が行われ、その成果として「建物の災害復旧技術マニュアル」が公表された。その後、1991年建築防災協会より「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針」が発刊された。1995年兵庫県南部地震の経験をもとに応急危険度判定を見直し、1998年「被災建築物の応急危険度判定マニュアル」が、2001年「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」が発刊され、今日に至っている。

#### 4. ま と め

1968年十勝沖地震がわが国の耐震設計に与えたインパクトはいかに大きかったか、またその後の耐震設計などにどのような影響を与えたかについて基・規準を中心に概観した。

地震国で人命と財産を守るための建築基準法は日本国憲法29条財産権のもと、民法との関連から最低基準として、わが国の経済力・技術力を基として、社会的コンセンサスのもとその数値が決められている。このため、建築基準法に基づき設計された建物はすべての地震に対して絶対安全であるとはいえない。あくまでも実際に建物に作用する地震力よりもはるかに単純(単純)化された地震力(荷重)に対して安全であるといえる。このため、構造設計者の知識・経験よりも高度な構造規定をもって不備を補う必要がある。

最近のコンピュータによる自動構造計算による

耐震設計は構造設計者の知識・経験よりも計算結果に頼っており、おおいに憂慮すべきことである。今後、AI技術の導入などより高度化されたアグレッシブな耐震設計法の確立が切に望まれる。

#### 謝辞

本稿で用いた写真は伊藤 勝博士による文献3)から引用させていただいた。また、国土交通省国総研 建築研究部長 福山 洋氏より震災総プロ等について助言をいただいた。ここに関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 大沢 胖, 村上雅也・北川良和. 1968. 1968年十勝沖地震における建築物被害概報. 東京大学地震研究所彙報, 1451-1459.
- 2) 日本建築学会. 1968. 1968年十勝沖地震災害調査報告.
- 3) 伊藤 勝. 2009. 1968年十勝沖地震被害状況記録. 青山耐震フォーラム.
- 4) 建築研究報告. 1979. 1978年宮城県沖地震の被害調査報告書. 86.
- 5) 日本建築学会. 1980. 1978年宮城県沖地震災害調査報告.
- 6) 梅村 魁. 1989. 耐震構造の道. 技報堂出版.
- 7) 梅村 魁. 1994. 震害に教えられて—耐震構造との日月—. 技報堂出版.
- 8) 建設省総プロ「新耐震設計法の開発」の研究報告. 1977. 新耐震設計報(案), 建築研究報告. 79.
- 9) 日本建築学会. 1976. 地震荷重と建築構造の耐震性.

北川良和

〔きたがわ よしかず〕

**略歴** 1971年東京大学大学院工学研究科 建築学専攻 博士課程修了(工学博士). 建設省建築研究所研究員, 主任研究員, 室長, 部長を経て, 1995年建築研究振興協会技術参与. 1996年広島大学工学部教授, 2000年慶應義塾大学理工学部教授, 2006年慶應義塾特撰塾員  
**研究分野** 地震工学, 耐震工学  
**著書** 「免震設計入門」(共監訳, 鹿島出版), 「サステナブル生命建築」(共監筆, 共立出版) など



## MOWLAS（陸海統合地震津波火山観測網）

昨年11月29日、イノホール（東京都千代田区）において、「地震津波火山災害に強い社会を目指して～全国を網羅する陸海統合観測網の誕生～」と題するシンポジウムが開催された。

これは、主催者である国立研究開発法人防災科学技術研究所（防災科研）が全国の陸域から海域に展開する地震・津波・火山の統合観測網をMOWLAS（モウラス）と命名し、その本格的運用が開始されたことを紹介するとともに、遠くない将来に発生が懸念される南海トラフ地震や首都直下地震に向けた備えを考える集まりであった。

陸域および海域を網羅するという意味が込められたMOWLASという愛称は、一般公募に応じた99件の候補から選ばれ、“Monitoring of Waves on Land and Seafloor”の頭文字をとって名付けられたそうである。

MOWLASを構成する観測網は表に示すとおりである。Hi-net、K-NET、KiK-net、F-netは1995年1月の阪神・淡路大震災を契機として陸域に整備された約2,000点の地震観測網であり、一方、V-netは陸域の重要16火山について、おのおの数の観測施設を整備した火山観測網である。

また、S-netは2011年3月の東日本大震災を受けて房総沖～北海道沖にかけて整備された150点からなる海底地震津波観測網であり、

DONETは紀伊半島沖から室戸岬沖にかけて海洋研究開発機構が約50点を整備し、2016年4月に防災科研へ移管された海底地震津波観測網である。

図に示すMOWLASの観測点分布図では、南海トラフに沿ったDONETの両隣りに観測の空白域がみられる。このうち、東海地震の発生が想定される東隣の御前崎沖には気象庁のケーブル式常時海底地震観測システムが敷設され稼働しているが、南海トラフ地震の震源域の一部をなす西隣の足摺岬沖～日向灘にかけては観測点が存在していない。現在、この海域では新たな海底地震津波観測網を整備することが計画されており、いずれはMOWLASの一部をなすことになろう。

さて、以上の各観測網から得られたデータは気象庁に集約され、緊急地震速報、津波警報、震度速報、一元化震源などの業務に順次組み込まれてきている。

海域の観測では、日本海溝軸付近の25地点を除くS-net125地点、およびDONET31地点の海底津波計データが、2016年7月28日12時より津波監視業務に使われるようになった。

ついで2017年11月16日12時から、日本海溝軸付近のS-net25地点の海底津波計データも気象庁の津波監視業務に加えられた。

しかしながら、S-netおよびDONETの海底

表 MOWLASを構成する観測網（参考：防災科研ウェブページ）

陸域	Hi-net	高感度地震観測網	High Sensitivity Seismograph Network Japan
		全国約800ヶ所の地下100m以深に設置された高感度地震計による観測網。人が感じない微弱な揺れまで記録	
	K-NET	全国強震観測網	Kyoshin Network
		全国約1,000ヶ所の地表に設置された強震計による観測網。被害を及ぼすような強い揺れまで確実に記録	
	KiK-net	基盤強震観測網	Kiban Kyoshin Network
		Hi-netと同じ観測施設に地表と地中にペアで強震計を設置。これにより、強い揺れへの地盤の影響を解明	
F-net	広帯域地震観測網	Full Range Seismograph Network of Japan	
	全国約70ヶ所の横坑奥に設置された広帯域地震計による観測網。様々な周期の揺れを幅広く正確に記録		
V-net	基盤的火山観測網	The Fundamental Volcano Observation Network	
	全国の16火山に地震計・傾斜計・広帯域地震計・GPS等を備えた複数の観測施設を設置した観測網		
海域	S-net	日本海溝海底地震津波観測網	Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis
		北海道沖から房総半島沖までの海底150ヶ所に地震計・水圧計で構成される観測装置を設置した観測網	
DONET	地震・津波観測監視システム	Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis	
	紀伊半島熊野灘沖から室戸岬沖の海底約50ヶ所に地震計・水圧計ほかの各種観測装置を設置した観測網		



- Hi-net / KIK-net
- K-NET
- F-net
- ▲ V-net
- ◆ S-net
- ◆ DONET

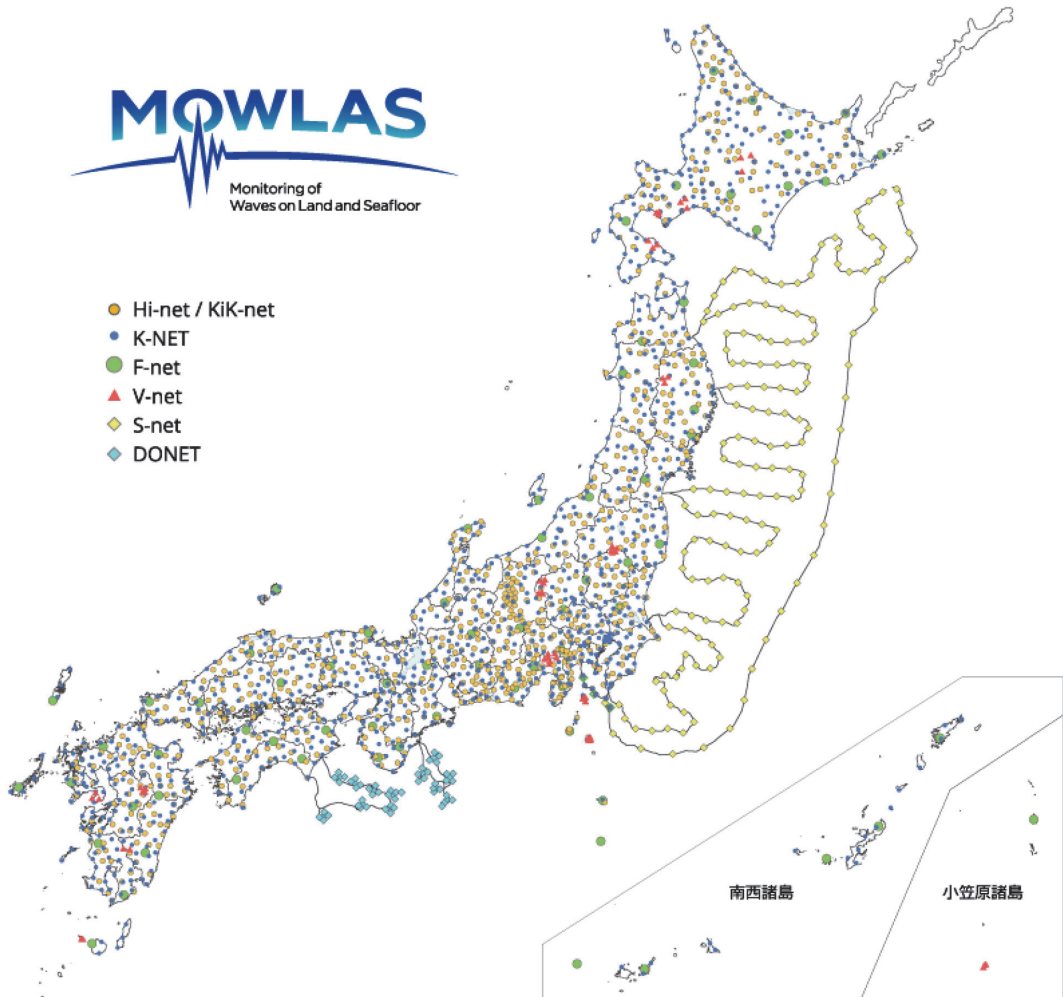


図 MOWLAS のシンボルマークと、観測点分布（防災科研ウェブサイトより）

地震計データを業務的に緊急地震速報や一元化震源に広く利用することは、現在のところまだ準備段階ということのようである。防災上の大きな効果が期待されるという理由はもちろん、高精度の震源データ蓄積によって明らかとなる海域の精密震源分布を早く見てみたいという理由からも、早期の実現を願いたい。

MOWLAS に望まれる役割としては、(1) 地震活動・地殻変動・火山活動等のモニタリング、(2) 緊急地震速報・津波警報への貢献、(3) 自治体や民間事業者への情報提供などの基本的

機能に加えて、(4) 地震や津波の早期検知と即時予測に関する研究、(5) 巨大地震発生の評価や予測に関する研究などに対する貴重なデータの提供があげられる。

このように、MOWLAS はわが国における地震・津波・火山の観測を下支えするたいへん重要なインフラ・ストラクチャーであり、今後とも長期にわたって安定的に運用されることを期待したい。

(岡田義光：防災科学技術研究所前理事長)

# 光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る

田中愛幸・黒石裕樹・香取秀俊

## はじめに

原子時計は衛星測位システム、高速通信、基礎科学など広範な分野で使われる現代社会の基幹技術である。国際単位系の1秒の長さは、およそ $5 \times 10^{-16}$ の精度をもつセシウム原子時計(6,000万年に1秒の誤差に相当)に基づいて定められている。現在、その精度を100倍以上改善する原子時計が開発されている。なかでも日本で提案された光格子時計(Katori, 2002; 香取, 2017)は、多数の原子を同時観測することで量子雑音を低減し、わずか数時間の計測時間で $1 \times 10^{-18}$ の精度(300億年に1秒の誤差に相当)を実現する。光格子時計は世界で30近くのグループで開発が進み、秒の再定義の有力候補の1つになっている(Riehle *et al.*, 2018)。

原子時計の精度が上がったことで、その測地学的応用が実現しようとしている。測地学の主目的に、高さの基準であるジオイド(平均海面に一致する地球重力のポテンシャルを持つ面)を定めることがある。一般相対性理論によると、1秒の長さ(固有時)はその場所の重力ポテンシャルの増加量に比例した減少を示す。原子時計による重力ポテンシャル測定を既存のジオイド測定手法と組み合わせることで、ジオイドを高精度に求める動きが欧州を中心に始まりつつある(Lisdat *et al.*, 2016)。

プレート沈み込み帯に位置する日本は欧州大陸と異なり、地殻変動も大きく地震・火山噴火が多発する。国土地理院の地殻変動観測網にみられるように、欧米流のグローバルな測地学と比較して、日本の測地学はより局所的な、より精密な時間変動を追い求めることで、地震・火山研究に大きく貢献してきた。本稿では、まずジオイド決定

における原子時計の利用について概観した後、光格子時計の地震・火山研究への応用の可能性を探っていく。とくに、重力ポテンシャル計測により地殻の上下変動が監視できることに着目する。地表近傍では、標高差1cmの上昇につき時間の進みは $1 \times 10^{-18}$ 速くなる。光格子時計ではこのわずかな時間の進みを数時間で計測し、1cmの変動を検出可能になる。これはGNSS(全球測位衛星システム)による同時での上下変動の検出精度を上回る。光格子時計とGNSSを組み合わせた地殻変動監視の高精度化が期待される。

## 相対論的測地

地球の重力ポテンシャルは、その定義により、地球の全質量による引力のポテンシャルと地球回転(自転)による遠心力のポテンシャルから構成される。長期的な平均海面に最もよく一致する静的なポテンシャル面を求めたものがジオイドである。ジオイドを求める手法はいくつかあるが、空間分解能がそれぞれの手法で異なる。人工衛星による測定からは、地球を周回する軌道面の選び方や測定方式によって地表における重力ポテンシャルの空間分解能は異なるが、一般に衛星高度が高くなるほどより大きなスケールのジオイドの空間変化(おおむね数100km以上)しかとらえられない。地形(質量)の細かな起伏に伴って生じるポテンシャルの変化が、上空では大きく減衰しているためである。陸上や海上の観測で取得した重力は、1~2kmから数10kmまでの、より小さな空間スケールの変化を推定するのに用いられる。また、ある地点においてGNSSと水準測量のそれぞれで測定した高さの差をとる「GNSS-水準法」ではその点でのジオイド高が求まる。空間分解能の異なるこれらのデータを統合して、すべて

のデータを最もよく説明するジオイドのモデルを最小二乗法で構築する方法がよく用いられている (Web テキスト測地学新装訂版 <http://www.geod.jp/jpn.org/web-text/index.html#gsc.tab=0>, 「ジオイド決定」)。

最新の人工衛星の観測データを用いて決定されたジオイド・モデルは、100km の空間分解能で約 1cm の精度をもつ (同テキスト「GOCE がもたらしたもの」)。これに対し、GNSS-水準法の精度は、20km の測定点間長に対して 2cm 程度である。人工衛星と異なり、ある地点におけるジオイドを算出できるが、測定点間の距離が伸びると精度はさらに劣化する。

これらの手法が古典論に基づいてポテンシャルを求めるのに対し、時計を利用する手法 (chronometric leveling) は、一般相対論の効果を直接観測することから相対論的測地と呼ばれる。相対論的測地のアイデアは 1980 年代からあった (Flury, 2016)。この手法では、測定点間の距離が伸びても誤差が累積せず、GNSS-水準法に比べてはるかに短時間で、かつ、連続的に計測が可能になる。重力ポテンシャル差は地表の平均重力値 ( $g=9.8\text{ms}^{-2}$ ) で割ることで近似的に標高差に換算することができる (ジオイドも同様に高さ (長さの単位) で表される)。時計の歩度 (比) と重力ポテンシャルは、

$$\frac{d\tau}{dt}=1-W/c^2 \quad (1)$$

で関係付けられる。ここで  $\tau$ ,  $t$ ,  $W$ ,  $c$  はそれぞれ観測点位置における固有時、慣性系である地心座標時、重力ポテンシャル、光速である (黒石, 2017)。測定点の標高が  $\Delta h$  高くなると、 $W$  が  $g\Delta h$  増加し、計測される 1 秒の長さは  $g\Delta h/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-18} \Delta h \text{ cm}^{-1}$  だけ短くなる。セシウム時計の精度 ( $5 \times 10^{-16}$ ) は、標高差の測定精度にして約 5m になるので、従来の測地学的手法によるジオイド決定の精度のほうが優れている。ところが、最近の原子時計は  $1 \times 10^{-18}$  の精度に達し、これは標高差測定に換算し 1cm になる (Ushijima *et al.*, 2015)。今後、時計の精度向上により mm レベルの標高精度も達成できる見込みがある

(Katori *et al.*, 2015)。

大陸に位置する欧米では、各国が採用している標高基準系の中に 10cm を超える不整合があることが知られており (Gruber *et al.*, 2012)、グローバルに統一されたジオイド・モデルに基づく標高基準を構築することが国際測地学協会 (IAG) の中心課題の 1 つに位置付けられている。原子時計の測地応用に関する研究グループも IAG 下に設立され、原子時計と既存のジオイド決定手法を比較する国際プロジェクトが物理学、測地学の連携で進められている (Margolis *et al.*, 2013, <http://projects.npl.co.uk/itoc/>)。

日本においては、GNSS や水準測量の稠密なネットワークがあるために、すでに標準偏差が約 2cm の高精度なジオイド・モデルが構築されている (Miyahara *et al.*, 2014) が、光格子時計の計測を付加すれば GNSS-水準法における長距離間の誤差の累積を拘束し、ジオイドの長波長成分の絶対的な精度がさらに改善することが期待できる (黒石, 2017)。光格子時計の実証試験の第一歩として、理化学研究所 (和光)-東大 (本郷) 間の光格子時計で測定したポテンシャル差が、水準・重力観測の結果と比較され、誤差内 (5cm) で両者が一致することが確認された (Takano *et al.*, 2016)。現在、東京スカイツリーでの実験が計画されている。

### 地球の重力ポテンシャルの時間変動

高さの基準として用いるジオイドは、超巨大地震による広範囲で大きな地殻変動の発生や、最終氷期にあった氷河の融解に対する粘性的なアイソスタシー応答によるマントル内での長期にわたる質量再配分などによって、地域的に変化する。ただし、実用的なジオイド・モデルでは、これら特別な状況を除き、時間変動しないものとして求められている。しかし、光格子時計と比較する場合、時計が置かれた地表上での重力ポテンシャル値は、重力以外の潮汐などにより乱されている。このため、時計比較による重力ポテンシャル差測定を標高差決定に応用するためには、正確にモデル化

された固体地球潮汐・海洋潮汐を用いて、その乱れの影響を測定値から取り除く必要が生じる。潮汐の空間スケールは比較的大きいため、2点間の距離が短ければポテンシャル変化の差は無視できるが、日本国内で測定した場合でも光格子時計で優位に計測可能な数 cm 以上の変動が観測される可能性がある（黒石，2017）。

ジオイドを時間変化させる他の地球物理現象には、大気圧、陸水、非潮汐性の海底圧力の変動、氷河の消長に伴う変動等がある（たとえば Wahr *et al.*, 2004; Wouters *et al.*, 2014）。（注：これらの論文では測定結果をジオイドから等価な水位に換算している。詳細は Wahr *et al.*, 1998 参照）。これらはさまざまな空間スケールのジオイド変動を引き起こすが、振幅は潮汐よりもおおむね一桁以上小さい。

では、地震・火山活動を生じる地域で時計を用いる場合、それらの活動に伴うポテンシャル変化はどの位のオーダーだろうか？ここで、地表に置いた時計で観測するポテンシャル変化には、質量分布の変化に伴う寄与のほかに、測定点の高さの変化による寄与も含まれることに注意する。高さの変化による影響は位置エネルギーの変化を思い浮かべればよく、近似的には式（1）で計算できる。

例として2011年東北地方太平洋沖地震を考える。図1は、Tanaka *et al.* (2015) の手法で理論的に見積もった、地震が引き起こした質量分布の変化によるジオイドの高さ変化を示す。牡鹿半島沖で2cmほどの減少、その南東部で2cmほどの増加がみられる。牡鹿半島では地盤に1mの沈降が観測されたが、その位置において地震の変動が無視できる遠方を基準としてポテンシャル差を測定したとすると、観測される変化のうち98%は地盤高変化の寄与になる。次に、大噴火の例として、桜島の1914年大正噴火によるジオイド変化を考える（[https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/sakurajima/text/exp01-5.html#](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/exp01-5.html#)）。噴出量 $1.3\text{km}^3$ が深さ10kmにあったマグマだまりから失われたとして、最も簡単な質点のポテンシャルの式で計算すると、地表のジオイドの減少は最も大きい

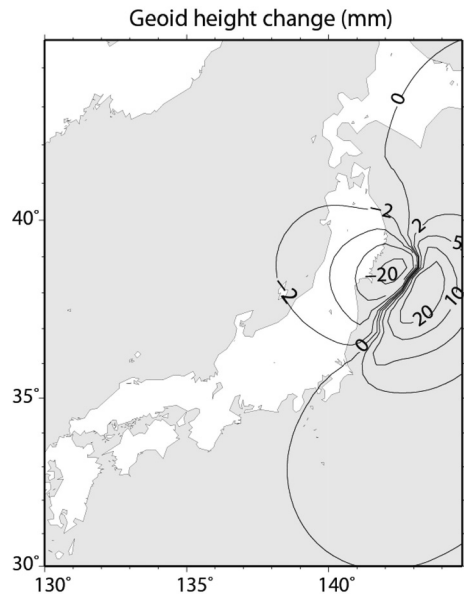


図1 東北地方太平洋沖地震に伴うジオイドの変化

ところで2mmとなる。噴火の前後で、桜島の周囲を通る水準路線で約80cmの沈降が生じたことが推定されている。厳密にはジオイドを測定したのと同じ地点の高さを用いなければならないが、それらを同一視すると、質量変化によるポテンシャル変化は、高さの寄与の数%にすぎない。

M9地震や大噴火によるジオイドの正味の変化は高々数cmで、高さ変化の寄与のほうがずっと大きい。M8以下の地震やプレート沈み込みによる年間の隆起・沈降に伴う正味のジオイド変化は、1mmよりもさらに小さくなる。

### 地殻の上下変動を測る

地表で測定した重力ポテンシャル差から質量変化の情報を得るために、そのほとんどを占める高さ変化の寄与を分離するのは困難が予想される。しかし、このことは、高さ変化を測定するという視点からみれば逆に強みとなる。つまり、原子時計は高度計として利用できる（たとえば Bondarescu *et al.*, 2015）。

高さを測定する手段の1つに水準測量がある。路線長 $S$ に対する観測誤差は $2.5\sqrt{S/\text{km}}$  mmで



見積もることができる。したがって、20km 程度より長い路線で測定する場合、光格子時計のほうが高精度に測定しうる。また、水準測量には非常に多くの時間を要し、路線の起伏によるが代表的な計測速度は2km/dayである。この点、光格子時計の計測時間は、距離が伸びようとも数時間で済むために、圧倒的な高速化が図れる。地震・火山とは関係ないが、水準測量の代替技術ということでは、光格子時計は地盤沈下の監視やGNSSの信号を受信できない大規模トンネル内の測量にも応用できるかもしれない。

では、GNSSと光格子時計では、どちらのほうが高さを精度よく測定できるだろうか？

この問いに答える前に、まず、測地学的時間スケールにおける日本列島の上下変動速度がどの程度かみてみよう。水準測量やGNSSから求められた日本列島の上下変動速度はおおむね±1cm/yrの範囲に分布する(村上・小沢, 2004)。この速度は、後氷期変動の影響の大きい北欧を除く、欧州地域の平均的な上下変動速度より一桁大きい([http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coordinates/posvel\\_map.php](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coordinates/posvel_map.php))。また、2011年の東北地方太平洋沖地震以降は、日本国内の広い範囲で1cm/yr以上の変動が現在も継続している(図2)。地震が引き起こした急激な応力変化がマンツルの粘弾性によって徐々に解放されているこ

とが原因と考えられている。

GNSSの測位精度をみるため、図3(上)に国土地理院のGNSS観測網GEONETによる日々の座標の例を示す。解析手法は一般的な相対測位である。座標値のばらつきは、東西(赤)、南北(緑)成分で2~3mm、上下成分(青)で約1cmである。このばらつきは主に後述の大気ノイズによるものである。水平成分のほうがばらつきは小さく、mmオーダーの変動の追跡ができ、4月ごろの南北成分に後で述べるスロースリップが検出されている。図3(下)は1日より短い時間での測位精度の例を示す(Choy *et al.*, 2017)。解析には精密単独測位方式が用いられている。時間とともに精度がよくなり、6時間での高さの標準偏差は約3cm、24時間での精度は約1cmである。また、リアルタイム測位の精度は10cm前後である(Choy *et al.*, 2017)。したがって、光格子時計の精度はGNSSと同等かそれ以上である。

### GNSSの限界—大気によるノイズ

上記のGNSSの精度は、衛星からのマイクロ波が電離層や対流圏を通過する際に受ける遅延量をモデル化して取り除いた上で評価していることが重要である(図4)。遅延量は、時間差に光速を乗じて距離に直すと電離層で1~10m程度、対

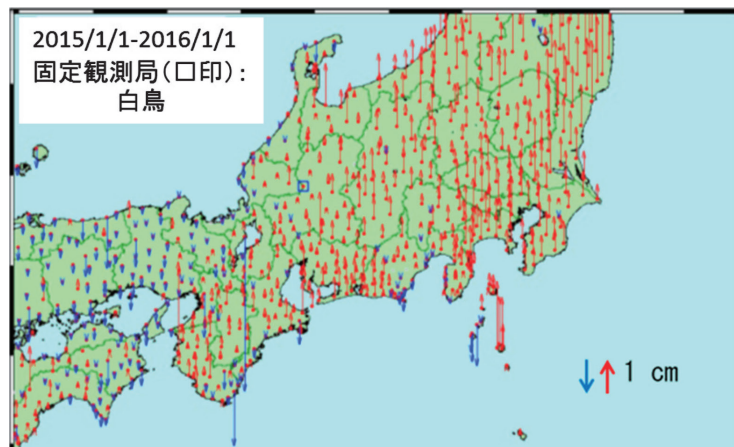


図2 GNSSで観測された2015年初から2016年初の1年間に生じた隆起(赤矢印)・沈降(青矢印)。国土地理院WEBサイトで作成

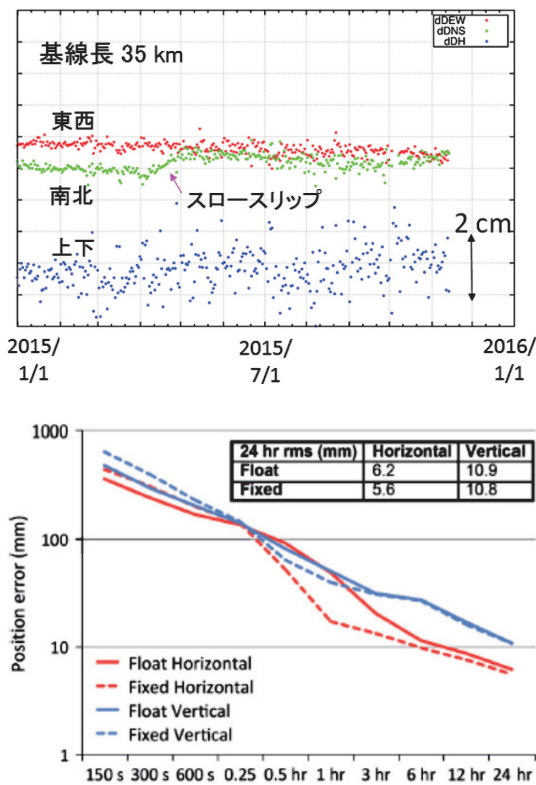


図 3 (上) GEONET 日々の座標の例。西表島局に対する波照間島局の相対変化を示す。(下) 精密単独測位の精度 (Choy et al., 2017)

流圏で 2.5m 程度である (測地学テキスト「GPS 気象学」) が、観測や解析手法の工夫で遅延量を推定・除去することによって、その影響を最終的には数 cm 程度まで減らすことができる。この遅延量は、最小二乗法のパラメータとして座標値と一緒に解く。長時間 (たとえば 24 時間) 観測を行うと衛星の位置が移動していき、さまざまな高度角、方位角からの信号を地上のアンテナが受信する。その結果、方位角に関してはマイクロ波入射分布の対称性により遅延量が打ち消され、水平方向のばらつきは小さくなる。しかし、高度角に関しては、どれだけ長時間観測したとしても地球の裏側からの信号は受信できない偏在性のため、遅延量のモデル誤差が残存し、鉛直座標の誤差へと押し付けられる。その結果、高さの精度は水平よりも悪化する。

もう 1 つ重要なのは、GNSS の精度は多くの場

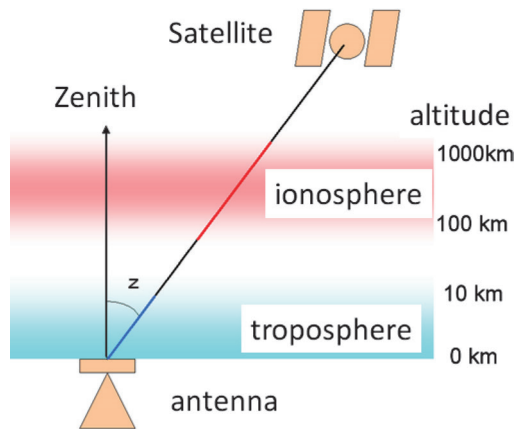


図 4 上空大気による GNSS のマイクロ波の遅延 (測地学 WEB テキストより)

合、より長時間の観測によって得られた平均値に対する 2 乗平均平方根 (RMS) で評価していることである。これは、同じような時空間分解能で測位が行えるのは、基本的には GNSS しかないからである。したがって、再現性は検証できるものの絶対値との比較はできないので、遅延量のモデルにバイアスがないかどうかは検証できない。さらに、大気の影響は環境に起因するノイズであるため、平均時間を長くすればどこまでも精度がよくなるというものではない。図 3 (上) の日々の座標のばらつきが、実質的な精度の限界である。

高さの誤差は水平にも入り込む。図 5 はある GNSS 観測局の 1 年間の日々の座標値を示す。高さのばらつきが夏場に大きいが、このとき水平成分のばらつきも大きくなっている。また、よく見ると年周・半年周の変化が重なっており、水平成分にも数 mm の振幅がみられる。このような変化は真に地殻が変動しているのか、大気遅延のモデル誤差による見かけの変動なのかよく分かっていないが、三角関数をフィットして差し引くことが地殻変動研究者の間で一般的に行われる。

### 光格子時計による GNSS の進化から期待されること

光格子時計比較の標高差相当の精度 1cm は、大気遅延の環境ノイズを最小二乗法的にパラメー

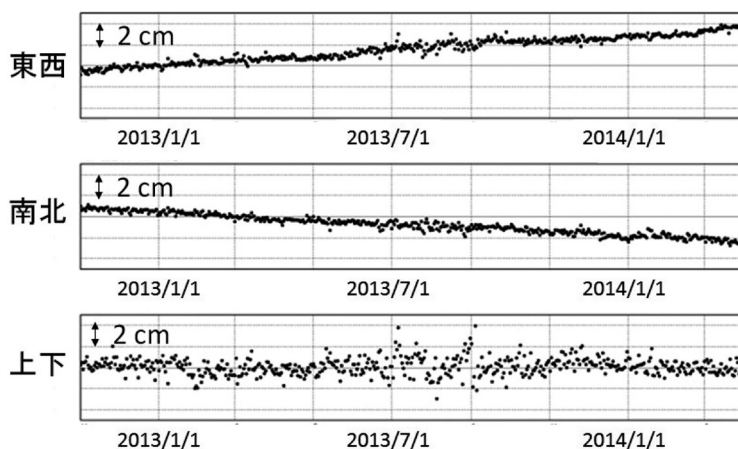


図 5 GEONET の日々の座標にみられる年周・半年周変動。国土地理院 WEB サイト (<http://www.gsi.go.jp/kanshi/faq.html#3>, 夏季の気象状況による影響) による

タ推定する GNSS 測定モデルを使わずに達成できる。GNSS と同等またはそれ以上の精度が期待できるため、GNSS 観測局に配置して上下変動の監視精度を高めることが可能となる。また、光格子時計と GNSS とで並行観測を行うことで、大気遅延モデルの絶対的な誤差を、より正確な高さに基づいて検証することが初めて可能となる。光格子時計による高さを真値として GNSS で遅延量を推定することで、遅延モデルの誤差を低減する研究を推し進めることができ、その結果、水平・上下成分のばらつきやバイアスを改善できる可能性がある。

とくに、図 5 で見たように、座標が変化しているのか見かけの変動なのか区別がつかないときには時計は大きな威力を発揮する。西南日本の大地震が秋から冬にかけて起こりやすいことが指摘されているが (Ohtake and Nakahara, 1999), その原因はよく分かっていない。秋から冬にプレート沈み込みが加速するような地殻変動が生じていることを観測により実証できれば、この原因の一端を解明することができる。また、近年ぞくぞくと発見されているスロースリップ (Obara and Kato, 2016) のうち、継続期間が比較的長いもので、年周・半年周の変動を除去することで振幅が過小評価されたり、発生期間が不明瞭だったりしたイベントがより明瞭に検出できるようになる。

時系列データの様式が年周・半年周変動に近いようなスロースリップが実在していれば、それらを新たに検出できる可能性もある。

比較的短時間で発生する地殻変動の、より正確な検出にも期待できる。Nishimura (2014) は西南日本の 14 年間の GNSS データから 223 個のスロースリップを検出したが、そのうち 93 個は検出精度が低いことを述べている。時計により後者の検出精度がどう改善するかは興味のある課題である。スロースリップの正確な検出は、プレート沈み込み速度の変化をとらえ、地震発生予測へ貢献するものである。

上下変動の把握は、火山で行われる重力観測でも重要になる。現在、桜島ではマグマの火道中の移動を重力変化から検出しようとしている (大久保ほか, 2017) が、観測点が上下すると見かけの重力変化が生じてしまう。噴火の程度にもよるが、こうしたマグマによるシグナルは数 cm の上下変動で生じるのと同程度である。したがって、できる限り正確に観測点の上下変動を測り、見かけの重力変化を除去する必要がある。2015 年 8 月 15 日にはマグマの貫入によると思われる山体膨張が 10 数時間で発生した。このような短時間に生じる上下変動を 1cm 精度で GNSS で測るのは難しいので、光格子時計による測位がどこまで高速・高精度化できるか期待される。

測地学的な上下変動に比べて、地形学的な上下変動の速度は一桁小さく、0.1 mm/yr のオーダーである。0.1 mm/yr の精度で速度を求めるには現状の GNSS では 20 年分のデータが必要となる。光格子時計と連続比較観測をすることで、互いの観測精度の長期安定性を検証し、上下変動のトレンドをどこまで正しく求められるか明らかにする必要がある。地形の成り立ちを解明するために、ある場所が現在、隆起しているか、沈降しているか厳密に知りたいような場合、このような高い精度での議論が求められる。

GNSS 観測局の時計を光格子時計に置き換えることの利点は他にもある。時計の精度が高いため受信機時計誤差の推定が不要になる。さらに鉛直座標の変化もポテンシャル変化から決めれば未知数が 2 つ減り、これまでより迅速な測位が可能になる。地震断層をより早く決定することで、津波の早期警戒等に役立つ。

### 驗潮システムの高度化

もう 1 つ地殻変動に関連することとして、驗潮場での利用が考えられる。驗潮場には GNSS が取り付けられているものも多いが、その目的は驗潮場の隆起・沈降を GNSS によって観測し、潮位観測から海水位の変動を区別することにある。驗潮場で観測される潮位に含まれる海水位変動には、海水柱の総量が変化する質量変化を伴う水位の変化と、塩分と温度変化による密度変化（ステリック成分）に伴う容積変化とが含まれる。光格子時計では感応する前者を見積もることができ、沿岸部の海底圧力の変化が推定できる。この海底圧力を用いて、地震発生に寄与する中・長期的な地殻変動を見る際にノイズとなる、非潮汐性海洋荷重変形の寄与を評価できる。荷重変形は主に上下変動を引き起こすが、海底地形に応じて水平変動にも寄与する。沿岸部では 10~20 年程度の周期 ([http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a\\_1/sl\\_trend/sl\\_trend.html](http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html)) で、高さにおいて mm オーダーの変位が生じ得るので、補正が必要である。なお、海水位の変化において質量とステ

リック成分の寄与を分離することは、海流や海面上昇のメカニズム解明にも資すると考えられる。

### まとめと展望

原子時計を用いた重力ポテンシャル差測定に基づくジオイド決定が欧州で始まろうとしている。そうした測地応用に加え、地震・火山研究に時計をどのように応用できるか検討してきた。地震や火山活動が引き起こす質量分布の変動に伴うポテンシャル変化は高々数 cm で、観測点の上下動のほうが大きい。つまり、実質的に計測されるポテンシャルのほとんどは高さの変化で説明できる。これを利用して、光格子時計を上下変動の監視に利用できる。

GNSS で常時監視された地殻変動データは、地震・火山噴火予測の基礎資料として欠かせないのである。しかし、GNSS には大気遅延によるノイズという宇宙測地技術に固有のボトルネックがあり、24 時間平均した高さの精度は、遅延モデルによる補正を施したうえで 1 cm が限界である。大気遅延モデルの誤差は水平変動の検出精度にも影響し、とくに季節変動でそれが顕著である。

このようなボトルネックを打ち破るには、上空の大気を経由しない地上観測によって、GNSS と同等またはそれ以上の精度で高さを測定しなければならない。光格子時計は GNSS よりも短い計測時間で 1 cm 精度を実現でき、さらに精度が改善される余地もある。地上で観測を行う光格子時計と GNSS を組み合わせることで、遅延モデルの絶対精度の検証に基づいた、より高精度な測位を実現するための研究を推進できる。また、時計の高精度化により受信機時計誤差の推定が不要になり測位時間も短くなる (図 6)。

わが国は、いち早く GNSS 観測点のネットワークを稠密化し、地殻変動の高精度な監視を実現することで、測地学的な地震・火山研究をこれまでリードしてきた。現在、同様のネットワークは世界の他の地域にもみられるが、この優れたインフラをさらに高度化できるのは、それを実現可能とする光格子時計とその比較技術を保有し、かつ、

災害大国であり、その被害軽減への社会的需要の大きい日本において他にないだろう。

原子時計による地殻変動の検出はまだ行われていない。実証試験の第一歩として、既存の地殻変動観測が重点的に行われている地域を選ぶのがよいだろう。御前崎では、GNSS 連続観測と年2~4回の水準測量との間で、経年的、季節的な上下変動の比較検証が行われてきた。また、油壺は東京との間で水準測量が年1回行われている。御前崎も油壺も駿潮場に近いので、荷重変形の効果も検証できる。また、桜島では、重力や素粒子によるマグマ変動の観測が行われており、光格子時計による高さ測定は重力観測の精度向上に有用である。これら少数点での実証を経て、西南日本のスロースリップ域へ展開できれば理想的である。

光格子時計と組み合わせた新しいGNSSネットワークを形成し、時間変動の検出に取り組むことは、次世代の国際原子時の形成の観点からも重要である。将来的に18桁で1秒の長さを決める際、標準時計を置く場所の標高により、また、時間により1秒の長さが変動してしまうことが問題となる。より安定した標準時を提供するために、潮汐をはじめとしたさまざまな時間変動の補正 (Voigt *et al.*, 2016) をどのように行うか、突き詰めれば1秒をどう定義するかが課題となる。地殻の上下変動が大きく、また海洋の影響も大きい日本のような島弧では、ポテンシャルの時間変動の要因はより多く、安定な欧米では観測できないような面白いデータが取得できると同時に、時間変

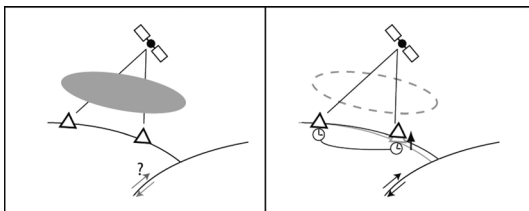


図 6 (左) 従来の GNSS 観測。大気ノイズを受け上下変動が不明瞭になる。(右) 光格子時計と組み合わせた GNSS 観測。地上のポテンシャル観測と組み合わせることで大気ノイズを軽減し、かつ測位時間を短縮した、より高度な地殻変動モニタリングが可能

動の補正をより厳密に考えなければならない。技術的・社会的アドバンテージに加え地の利をいかし、早い段階から時間変動に関する研究事例を蓄積することで、より普遍的な時間標準の構築へ向けた補正手法を、国際コミュニティで提示することが期待される。

## 参考文献

- Bondarescu, R., Schärer, A., Lundgren, A., Hetényi, G., Houlié, N., Jetzer, P. and Bondarescu, M. 2015. Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion. *Geophys. J. Int.*, **202**, 1770-1774. doi:10.1093/gji/ggv246
- Choy, S., Bisnath, S. and Rizos, C. 2017. Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solut.*, **21**, 13-22. doi:10.1007/s10291-016-0545-x
- Flury, J. 2016. Relativistic geodesy. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **723**, 012051. doi:10.1088/1742-6596/723/1/012051
- Gruber, T., Gerlach, C. and Haagmans, R. 2012. Intercontinental height datum connection with GOCE and GPS-levelling data. *J. Geod. Sci.*, **2**, 270-280, ISSN (Print) 2081-9943. doi: https://doi.org/10.2478/v10156-012-0001-y
- Katori, H. 2002. Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement, in *Proc. 6th Symp. Freq. Stand. Metrol.* (ed. Patric Gill) 323-330 (World Scientific).
- Katori, H., Ovsianikov, V.D., Marmo, S.I. and Palchikov, V.G. 2015. Strategies for reducing the light shift in atomic clocks. *Phys. Rev. A*, **91**, 052503.
- 香取秀俊. 2017. イーサククロックどこでも光格子時計一。電子情報通信学会誌, **100**, 1303-1308.
- 黒石裕樹. 2017. 固体潮汐・海洋潮汐荷重に伴う、地表における重力ポテンシャルの摂動—ポテンシャル差計測への精密時計比較の応用に向けた評価一。測地学会誌, **63**, 33-43.
- Lisdat, C. *et al.* 2016. A clock network for geodesy and fundamental science. *Nat. Commun.*, **7**, 12443.
- Margolis, H.S. *et al.* 2013. International timescales with optical clocks (ITOC), *2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, Prague, 908-911. doi: 10.1109/EFTF-IFC.2013.6702183
- Miyahara, B., Kodama, T. and Kuroishi, Y. 2014. Devel-

opment of new hybrid geoid model for Japan, "GSIGEO 2011". *Bull. GSI*, **62**, 11-20.

村上 亮・小沢慎三郎. 2004. GPS 連続観測による日本列島上下地殻変動とその意義. *地震*, 第2輯, **57**, 209-231.

Nishimura, T. 2014. Short-term slow slip events along the Ryukyu Trench, southwestern Japan, observed by continuous GNSS. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 22-34.

Obara, K. and Kato, A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, **353**, 253-257. doi:10.1126/science.aaf1512

Ohtake, M. and Nakahara, H. 1999. Seasonality of great earthquake occurrence at the northwestern margin of the Philippine Sea plate. *Pure Appl. Geophys.*, **155**, 689-700.

大久保修平・山本圭吾・井口正人. 2017. 重力と地殻変動連続観測に基づく桜島火山の火道状態の診断. *地震研究所彙報*, **92**, 91-99.

Riehle, F., Gill, P., Arias, F. and Robertsson, L. 2018. The CIPM list of recommended frequency standard values : guidelines and procedures. *Metrologia*, **55**, 188-200.

Takano, T., Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Akatsuka, T., Yamaguchi, A., Kuroishi, Y., Munekane, H., Miyahara, B. and Katori, H. 2016. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks. *Nat. Photon.*, **10**, 662-666

Tanaka, Y., Hasegawa, T., Tsuruoka, H., Klemann, V. and Martinec, Z. 2015. Spectral-finite element approach to post-seismic relaxation in a spherical compressible Earth : application to gravity changes due to the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophys. J. Int.*, **200**, 299-321. doi:10.1093/gji/ggu391

Ushijima, I., Takamoto, M., Das, M., Ohkubo, T. and Katori, H. 2015. Cryogenic optical lattice clocks. *Nat. Photon.*, **9**, 185-189.

Voigt, C., Denker, H. and Timmen, L. 2016. Time-variable gravity potential components for optical clock comparisons and the definition of international time scales. *Metrologia*, **53**, 1365-1383. doi:10.1088/0026-1394/53/6/1365

Wahr, J., Molenaar, M. and Bryan, F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field : Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30205-30230.

Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V. and Velicogna, I.

2004. Time-variable gravity from GRACE : First results. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L11501. doi:10.1029/2004GL019779

Wouters, B., Bonin, J.A., Chambers, D.P., Riva, R.E.M., Sasgen, I. and Wahr, J. 2014. GRACE, time-varying gravity, Earth system dynamics and climate change. *Rep. Prog. Phys.*, **77**, 116801 (41pp). <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/77/11/116801>

田中愛幸

[たなか よしゆき]

**現職** 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻准教授

**略歴** 2002年東京大学大学院理学系研究科中退. 博士(理学). 国土交通省国土地理院, ドイツ地球科学センター GFZ, 東京大学地震研究所を経て, 2018年より現職

**研究分野** 測地学, 地殻変動, 地球重力の理論・観測研究に従事



黒石裕樹

[くろいし ゆうき]

**現職** 〈投稿時〉東京大学地震研究所教授. 博士(理学). 〈現所属: 2018年4月より〉国土交通省国土地理院測地観測センター地震調査官

**略歴** 京都大学理学部卒業, 同大学院理学研究科修士課程修了. 建設省(現国土交通省)国土地理院, 米国立測地局・ドイツ・ダルムシュタット工科大学・シュトゥットガルト大学客員研究員を経て現職. 日本測地学会賞坪井賞

**研究分野** 物理測地学



香取秀俊

[かとり ひでとし]

**現職** 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授, 理化学研究所香取量子計測研究室主任研究員

**略歴** 1988年東京大学物理工学科卒業. 1991年同大学博士課程中退, 1994年論文博士, ドイツ・マックスプランク量子光学研究所客員研究員. 1999年東京大学工学部助教授. 2010年より現職. 2011年より理化学研究所香取量子計測研究室主任研究員(兼務)

**研究分野** 量子エレクトロニクス, 光格子時計の提案, 実証とその応用に関する研究



# 余震統計式再考

## —指数則とべき乗則を結ぶ—

萩原幸男

### 1. はじめに

従来の統計学や統計力学は指数関数系の理論をベースに発展してきた。しかし現実には自然科学分野はもとより、経済・社会分野の多くの現象にべき乗則が見出されてきた。いち早くべき乗則統計解析の重要性を認識し実行に移したのは地震学の分野である。べき乗則の代表格とされる地震マグニチュード分布のゲーテンベルク・リヒター則は1941年に発表された。本論で取り扱う余震数の大森公式<sup>1)</sup>に至っては実に120年以上も前に発表されたものである。この公式は後に改良大森公式<sup>2)</sup>の形に拡張されたとはいえ、他分野に比べて地震学分野のべき乗則研究の歴史的な古さは突出している。

ケプラーの第3法則や重力の距離逆2乗則もべき乗則とすれば、その発見の歴史はさらに古い。しかし指数則とべき乗則の間の溝を埋める数理科学的研究が一応の完成をみたのはきわめて最近のことである。ツァリス<sup>3)</sup>が従来の指数則系のボルツマン・ギブス統計力学を変換してべき乗則系のツァリス統計力学を樹立したのは1988年である。そこでは指数則とべき乗則とを結ぶ変換式として、通常の指数関数に新たにパラメタ $q$ を加えた $q$ -指数関数を提案した。この関数は最近になって複雑系現象の基礎的数理として各種の分野で応用が試みられている。

経済統計の分野では所得分布にマタイ効果と呼ばれるべき乗則現象が見出されており、所得分布のべき乗則統計解析にパレート分布が応用されて

きた。最近では上記の $q$ -指数関数を加味した拡張パレート分布が登場するに至った。物理学との整合性を追求する経済物理学と呼ばれる分野も存在すると聞く。地震学の分野と異なり、この分野では競争的利益追求の色彩が強く、その研究内容や成果も研究者間、企業間で秘密とされることが多いらしい。しかし隠れた研究はかなり高度に進展していると思わざるを得ない。

経済統計研究の内側を知る由もないが、地震学の分野でも経済統計が目指すように物理学との整合性を重要視しなければならない。その手始めとして $q$ -指数関数を余震統計式に適用することで、指数則とべき乗則との関連を追及することは重要と考える。この重要課題を追求する手段の第一歩として、本論ではツァリスの指数関数と改良大森公式とを結びつける方法を模索する。

### 2. 改良大森公式

統計式を用いて時間とともに減衰する現象を記述するとき、多くの場合指数則が用いられる。 $t$ を時間、 $\lambda$ を減衰レートとする減衰曲線

$$f(t) = \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

は $t$ の増加とともに減衰し、曲線は尾を引く。減衰曲線を図化すると、通常座標で式(1)は図1(a)に、縦軸を $\ln f(t)$ 、横軸を $t$ とする片対数座標で式(1)は

$$\ln f(t) = -\lambda t \quad (2)$$

となって勾配 $-\lambda$ の直線(図1(b))に、両対数座標では曲線は(c)になることが分かる。

本震発生時を $t=0$ とするとき、余震回数の減

衰曲線が指数関数ではないと気付いた Omori<sup>1)</sup> は直角双曲線を採用した。単位時間あたりの余震回数  $N(t)$  は

$$N(t) = K(t+c)^{-1} \quad (3)$$

により表されるとした。式 (3) を大森公式と呼ぶ。

余震データが豊富になるにしたがい、式 (3) から外れた事例が数多くみられるようになった。宇津<sup>2)</sup> は式 (3) を

$$N(t) = K(t+c)^{-p} \quad (4)$$

と拡張した。これを改良大森公式と呼ぶ。また  $K$ ,  $c$ ,  $p$  を余震パラメタと呼ぶ。なお本論ではしばしば本震発生時の余震回数  $N(0) = Kc^{-p}$  に対する比をとって

$$u(t) = N(t)/N(0) = (1+t/c)^{-p} \quad (5)$$

を用いることにする。

さて式 (5) の両辺の対数をとると

$$\ln u(t) = -p \ln(1+t/c) \quad (6)$$

となる。式 (6) を上記の式 (2) とともに片対数座標 (図 1 (b)) に表すと、 $\ln f(t)$  (直線) に比べて  $\ln u(t)$  は長く尾を引く特徴を持つ。経済統計学の分野でも、商品の売り上げ数などが同様の特徴を示すことから、この特徴をロングテールと呼んでいる。重い尾 (ヘビーテール)、または太い尾 (ファットテール) と呼ぶこともある。実際のところ余震数の時間的減衰は経済現象よりもさらに長く尾を引く傾向を示すようである。

### 3. 余震パラメタ

明田川<sup>4)</sup> は 1923 年関東地震から 2007 年能登半島地震まで 53 地震の余震パラメタを表にまとめた。この数値を基に作った余震パラメタ  $p$  値および  $c$  値のヒストグラムを図 2 (a) および (b) に示す。 $p$  値は 0.7~1.8 の範囲に分布し、その中心部分は 1.0~1.2 である。これに対して  $c$  値は 0.0~1.0 の範囲に広く分布するが、その大部分は 0.0~0.1 の狭い範囲に集中している。

余震パラメタは余震のマグニチュード  $M$  の下限値、すなわちデータの足切り値  $M_{th}$  によって異なる可能性がある。文献 4) は 14 例について  $M_{th}=3.0, 3.5, 4.0\sim 5.0$  それぞれの余震パラメタ値を求めている。そのうち 2 例は  $c=0.0$  を含むので、これを除いた 12 例について余震パラメタの  $M_{th}$  依存性を調べることにする。

図 3 (a)~(c) にそれぞれ  $\ln K$ ,  $\ln c$  および  $p$  値の  $M_{th}$  ごとの変化を示す。 $\ln K$  および  $\ln c$  の数値は  $M_{th}$  の増加とともに減少する傾向がみられる。これに対して  $p$  値は  $M_{th}$  の増減にほとんど影響されない。この理由については、 $M$  の小さい余震数は観測データから読み取れないケースがある、すなわち観測漏れが多いための過小評価といわれる。しかしはたしてそれだけであろうか。次節において余震パラメタの  $M_{th}$  依存性に

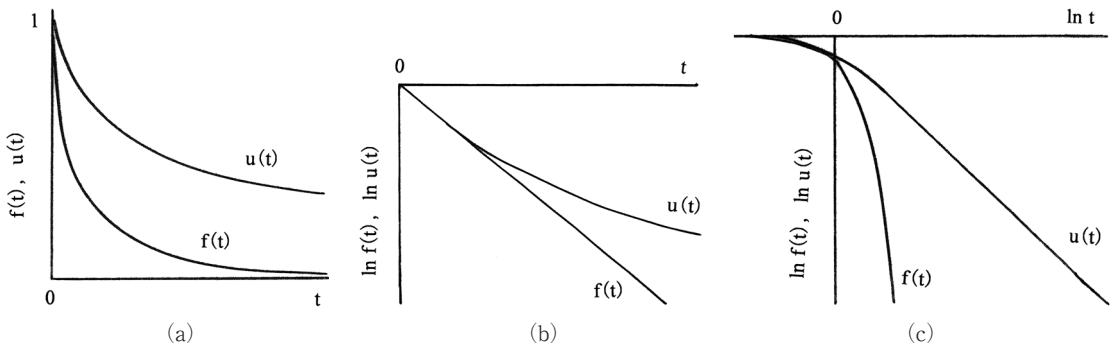


図 1 減衰曲線の模式図。  $f(t)$ : 指数関数 (式 (1) (2)),  $u(t)$ : 改良大森公式 (式 (5) (6))。 (a) 通常座標, (b) 片対数座標, (c) 両対数座標



ついて再度考えてみたい。

#### 4. べき乗則

指数則にしたがう現象は片対数座標上に直線となって表れた。これに対してべき乗則にしたがう現象は両対数座標上に直線になるという特徴がある。ロングテールを示す余震回数にはべき乗則が当てはまるに違いない。

これを検証するために、縦軸を  $\ln u(t)$ 、横軸を  $\ln t$  とする両対数座標上に式 (6) を表すことにする。図 4 は式 (6) の動態を概念的に描いた図である。図からは曲線が 2 領域に分かれる様子

がみとれる。図の左端、 $\ln t$  が主に負の領域では  $u(t)$  が小さい値であって曲線は横軸に接している。この領域を非スケーリング領域と呼ぶ。このように呼ぶ理由については後述のスケーリング領域の説明を読めば理解できる。

これに対して図の右半分、 $\ln t$  が正の領域では曲線は直線状になる。これは式 (6) の右辺括弧内で  $t/c$  の値が 1 に比べてきわめて大きくなるため、式 (6) は

$$\ln u(t) \sim -p(\ln t - \ln c)$$

すなわち

$$u(t) \sim (t/c)^{-p} \quad (7)$$

となり、 $u(t)$  は近似的に  $t$  のべき乗に従うこと

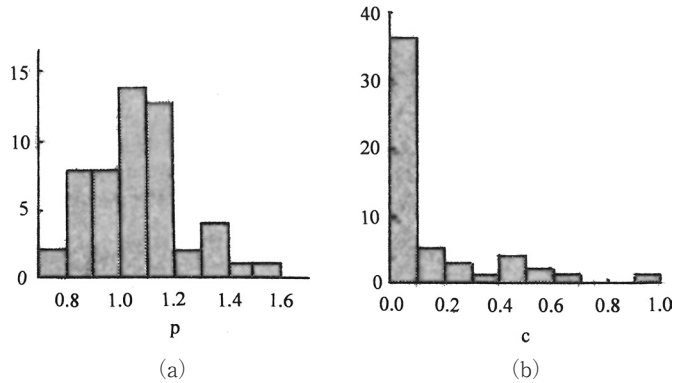


図 2 余震パラメタのヒストグラム。(a)  $p$  値, (b)  $c$  値 (文献 4) より作成)

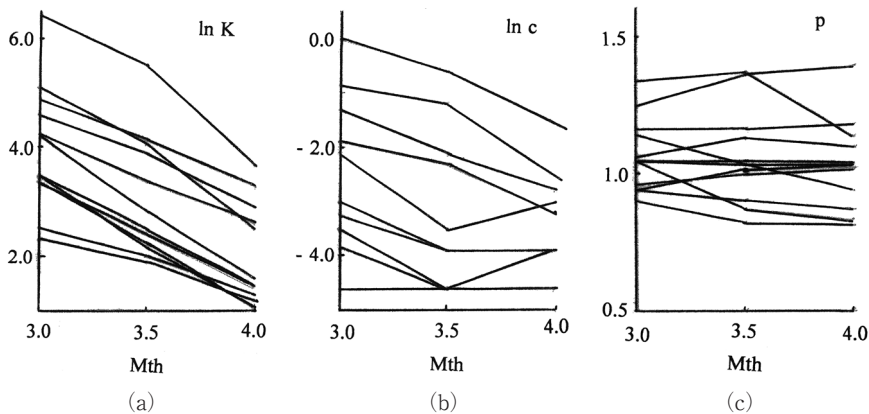


図 3 余震マグニチュードの採用下限値  $M_{th}$  による余震パラメタの違い。(a)  $\ln K$ , (b)  $\ln c$ , (c)  $p$  値 (文献 4) より作成)

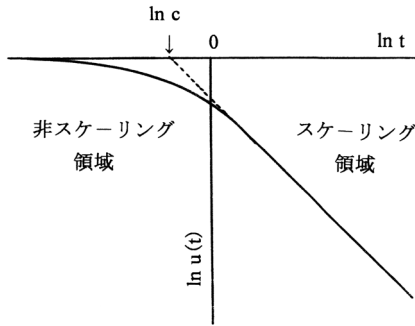


図 4 両対数座標上の改良大森公式（概念図）. 点線はスケール領域（直線部，勾配  $-p$ ）の漸近線， $\ln c$  は横軸（ $\ln t$ ）との交点

がしれる。

べき乗則はスケール則とも呼ばれ，べき乗則が成り立つ領域はスケール領域と呼ばれる。物差しの単位をスケールという。式 (7) において  $t/c$  値を計測するとき，物差しをいろいろと変えても， $u(t)$  が  $t/c$  の  $-p$  乗に比例するという性質は保たれる，この性質をスケールフリー性という。（改良）大森公式の時間  $t$  に日時等の単位がつかないのはこの性質のためである。

単位時間内の余震の個数  $N(t)$  をカウントする立場からすると，カウントは  $t \geq 1$  単位（すなわち  $\ln t \geq 0$ ）から始まる。実際のところ本震の規模が大きいくほど，発震直後の余震数はきわめて多く，個々の余震を分離してカウントすることが不

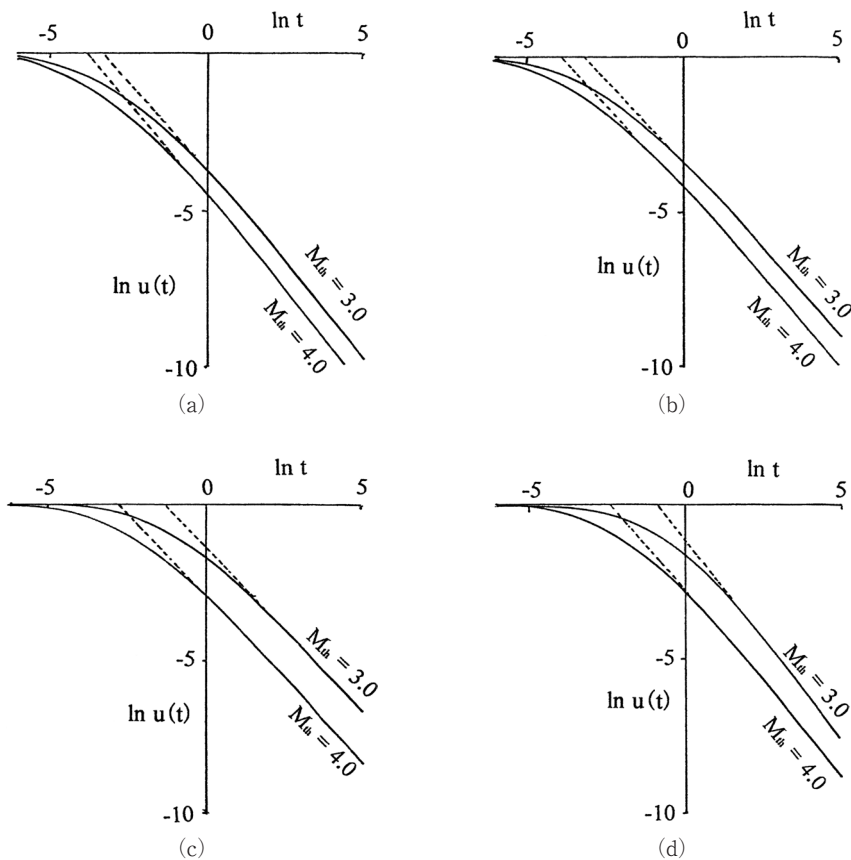


図 5 改良大森公式の実例. (a) 1995 年兵庫県南部地震 M7.3, (b) 2004 年新潟県中越地震 M6.8, (c) 1994 年三陸はるか沖地震 M7.6, (d) 2004 年紀伊半島南東沖地震 M7.4

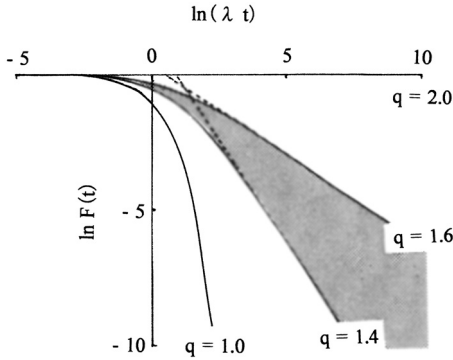


図 6 両対数座標上の  $q$ -指数関数 (式 (12)), 陰影部 ( $1.4 \leq q \leq 1.6$ ) は余震発生範囲

可能なほどである。したがって観測期間の大部分はスケーリング領域に限られる。すなわち観測の立場からすれば、余震回数は経過時間のべき乗則に従うと結論できる。極端な言い方をすれば、改良大森公式は不要となり、代わって式 (7) を用いればよいこととなる。

これまでの記述で改良大森公式の説明は大略終わった。実際の代表的な余震データを文献 4) より選んで両対数座標上に紹介し一応のまとめとする。図 5 (a), (b) は陸域地震, (c), (d) は海域地震である。(a) と (b) のスケーリング領域では  $M_{th}$  の異なる 2 本の直線は互いに良好な平行性を保っている。これは  $p$  値に  $M_{th}$  依存性がほとんどないことを示している。これに対して海域地震では平行性が相対的に乏しい。一方  $c$  値は陸域で小さく、相対的に海域で大きい。わずかに 2 例ではあるが、この傾向は他の例にも共通してみられる。これは陸域と海域との構造的な違いによるものかもしれない。しかし一般には  $M$  の小さい地震データに観測漏れがあるものと思われる。海洋底地震観測網が充実しつつある今日、この種の観測漏れはしだいに解消されるものと期待される。

## 5. $q$ -指数関数の適用

数学公式集を紐解くと次の公式を見出す。

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} (1 + \alpha t)^{1/\alpha} = \exp(t) \quad (8)$$

$\alpha$  が 0 の極限では上式の左辺は指数関数  $\exp(t)$  に収束する。この式において  $\alpha = 1 - q$ ,  $t$  を  $\lambda t$  に置き換え、かつ  $q \geq 1$ ,  $|(q-1)\lambda t| < 1$  を想定すると

$$f(\lambda t) = |1 + (q-1)\lambda t|^{-1/(q-1)} = \exp_q(-\lambda t) \quad (9)$$

と書き換えることができる。ここに添字  $q$  を付した  $\exp_q(-\lambda t)$  をツァリスの  $q$ -指数関数と呼び、 $q \rightarrow 1$  のとき  $\exp(-\lambda t)$  に収束する。

通常の指数関数  $\exp(-\lambda t)$  に新たなパラメタ  $q$  を加えることにより、拡張された指数関数として  $\exp_q(-\lambda t)$  を理解することができる。このような拡張を行えば、従来の指数関数から外れた複雑な現象を説明できる可能性がある。 $q$ -指数関数がしばしば複雑系の現象の解明に供されるのはこのためである。

実は式 (9) が拡張された指数関数として用いられるのは  $q < 2$ ,  $|(q-1)\lambda t| < 1$  の範囲であって、それを超えるとスケーリング領域に入る。すなわち  $f(\lambda t)$  はべき乗則

$$f(\lambda t) \sim |(q-1)\lambda t|^{-1/(q-1)} \quad (10)$$

となる。改良大森公式 (7) と比べると

$$p = 1/(q-1) \quad (11)$$

のときに式 (7) と式 (10) は一致する。

図 3 (c) によれば  $p$  値は 1.0 に近い値をとる。式 (11) の第 1 式によれば  $p = 1.0$  は  $q = 2.0$  の場合に等しく、これでは  $q$ -指数関数の適用範囲を超える恐れがある。実は余震数の時間的減少は  $q$ -指数関数  $\exp_q(-\lambda t)$  よりさらに長く尾を引くロングテールなのである。そのため余震統計に応用するときには通常の  $q$ -指数関数にもう一工夫を施す必要がある。本論においてはこの必要性に応

じて、式 (9) をさらに拡張して

$$F(\lambda t) = \{1 + (q-1)\lambda t\}^{-(2-q)/(q-1)} \quad (12)$$

を用いる。

$f(\lambda t)$  に代わって  $F(\lambda t)$  を適用することとして、式 (12) を改良大森公式 (7) と比べると、式 (11) に代わって次の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} p &= (2-q)/(q-1) \\ 1/c &= \lambda(q-1) \end{aligned} \quad (13)$$

この第 1 式から  $p=1.0$  は  $q=1.5$  に対応することがしれる。したがって  $q < 2$  の範囲内に収まるから  $q$ -指数関数の適用範囲を超えることはない。

図 2 (a) によれば実際の地震の  $p$  値は 0.7~1.8 の範囲にある。これを  $q$  値に換算すると 1.4~1.6 の範囲になる。図 6 は両対数座標上に式 (12) の曲線を描き、 $1.4 \leq q \leq 1.6$  に陰影を施したものである。余震を伴う地震はこの陰影領域に収まる。なお  $q=1.0$  の場合は通常の数指数関数的減衰、 $q=2.0$  の場合は無減衰に対応する。

## 6. おわりに

本震発生時を原点とする時間の対数を横軸に、単位時間あたりの余震回数対数を縦軸とする両対数座標上に改良大森公式の曲線を描く。すると曲線は 2 領域 (非スケーリング領域、スケーリング領域) よりなることがわかる。主に観測にかかる領域は曲線が直線状を示すスケーリング領域に限られるため、余震回数の時間的減少はべき乗則であると一般に結論されている。

一方拡張された指数関数と考えられるツァリスの  $q$ -指数関数の曲線もまた上記と同じ 2 領域からなり、数式は改良大森公式と類似している。もし改良大森公式と  $q$ -指数関数とを同等な式とみ

なせば、一般にべき乗則と考えられている改良大森公式を拡張された指数関数として理解できるのではなからうか。本論においては  $q$ -指数関数そのものではなく多少変形した式を用いたが、一応所定の結論を得ることができた。

しかしこの結論はあくまでも数式上の類似性に限ったもので、改良大森公式を構成する余震パラメタの統計物理学的意味に立ち入ったものではない。複雑系を研究対象とするとき、その特殊性や多様性を捨象して、むしろ逆に基本的モデルに立ち戻るほうがよい成果を得る場合がある。更なる研究は余震パラメタをツァリスのエントロピーと結びつける方向で続行されるべきであろう。

## 参考文献

- 1) Omori, F. 1894. *J. Col. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, **7**, 111.
- 2) 宇津徳治. 1957. 地震 **2**, **10**, 25-45.
- 3) Tsallis, C. 1988. *J. Stat. Phys.* **52**, 479-487.
- 4) 明田川保. 2008. 験震時報, **71**, 19-33.

萩原幸男

[はぎわら ゆきお]

**略歴** 1931 年生まれ。東京大学理学部卒、同大学院数物系研究科修士課程修了、(旧)日本鉱業株式会社中央研究所勤務、東京大学地震研究所教授、(旧)科学技術庁防災科学技術研究所長、日本大学文理学部教授・同学部次長、(公財)地震予知総合研究振興会理事(非常勤)を経て現在日本測地学会名誉会員、東京大学名誉教授、理学博士

**著書** 「地球重力論」(共立全書)、「測地学入門」(東京大学出版会)



# JST-JICA 国際共同研究プログラム 「SATREPS」の概要

本蔵義守

## 1. はじめに

「SATREPS」という国際共同研究が研究者の間でよく知られている。これには防災分野も含まれていることから、地震・津波防災研究者の間でも関心が高まっているようだ。ただし、国際共同研究という性格上、わが国の社会一般への関心の拡がりには恐らく限定的ではないかと思われる。そこで本稿では、SATREPSの概要を紹介することとし、個別SATREPS課題の詳細、具体的研究開発の成果およびその現地社会における社会実装の現状などについては、次号以降に予定される研究代表者からの寄稿に期待したい。

## 2. SATREPSの概要

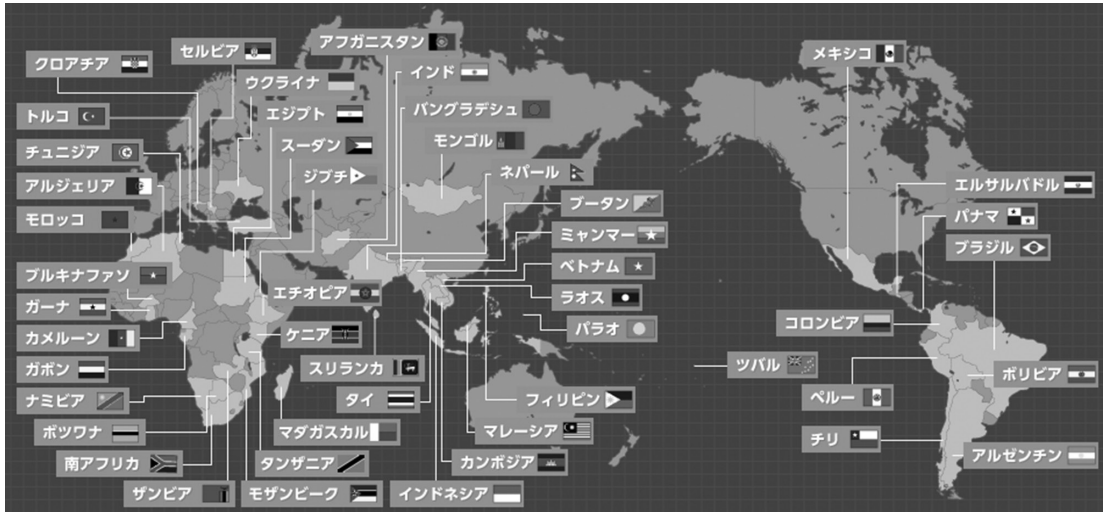
SATREPSは2008年に始まった地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development）の略称で、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）ならびに国立研究開発法人日本医療研究開発機構（AMED）と独立行政法人国際協力機構（JICA）が共同で実施している3～5年間の国際共同研究プログラムで、わが国の研究者と開発途上国の研究者が主として相手国で共同研究を行うというものである。地球規模課題としては環境・エネルギー、生物資源、防災、感染症の分野が設定されている。これまでの10年間にすべての分野を合わせて世界50カ国、133

プロジェクトが実施されたところである（図参照）。これらの細部については、たとえばJSTの<https://www.jst.go.jp/global/>に詳しく説明されている。ちなみに筆者はこの間、主としてJSTにおける防災分野の推進に関わってきた。本稿では防災分野、とくに地震・津波の研究開発面を考えてみるので、以下では、主としてJSTの見地からの解説を試みることにする。

## 3. SATREPSの方向性と目標

SATREPSの特徴として2つの大きな方向性があるといえる。JSTの立場では、科学技術の振興、とくに研究開発の促進と成果の活用によるイノベーションの創出を目指す取り組みが重要である。一方、JICAの立場では、途上国の開発への科学技術を通じた援助・協力が重要で、いわゆる科学技術外交としての方向性を有する。つまり、SATREPSはたんなる国際共同研究ではなく、途上国の開発に貢献することが求められるということである。

このような方向性に照らせば、個々のSATREPS課題の具体的目標が以下のように設定される。科学技術の研究開発面では、防災課題を地球規模課題と位置づけてその解決を目指し、関連科学技術コミュニティに貢献することが期待される。国際貢献の面では、開発途上国において露見している課題への対応およびそのために必要な相手国のキャパシティ・ディベロプメントへの貢献である。つまり、一方では個々のプロジェクトが掲げ



SATREPS 実施国 (出典: <https://www.jst.go.jp/global/>)

る研究開発を進めながら、もう一方では研究開発成果を活用し、相手国の問題解決に資するというミッション、一言で言えば社会実装、それと社会実装を担う相手国の人材の育成である。人材育成には相手国の研究者・技術者などを日本側研究機関に招聘して技術移転を進めることや若手研究者等の留学生教育を行うことなども含まれる。

SATREPS の研究開発面での長期的展望としては、世界をリードするわが国の科学技術力のさらなる強化を図ることであり、そのためには、SATREPS 終了後も持続的研究開発が望まれるし、それを担う研究者の確保も必要である。とくに、将来の優秀な研究者の確保という点では、プロジェクト実施中に日本側の若手研究者の育成を図ることが重要で、この意味では、大学院生を含む若手研究者のプロジェクトへの積極的参加が期待される。

#### 4. 地震・津波研究における SATREPS の メリット

地震関連の海外での研究というと、多くの研究者は日本学術振興会 (JSPS) の科学研究費 (科研費) の海外学術調査や国際共同研究などによるサ

ポートを想定するであろう。筆者も 1981 年以來、数回の科研費を得て、トルコの北アナトリア断層の調査研究を断続的に実施してきた。とくに、1999 年 8 月 17 日に発生し、大被害を引き起こしたイズミット地震 (M7.4) では、筆者たちの研究グループが震源断層の直上で電磁場の観測中で、たいへん貴重なデータが得られたことで有名になった (本蔵, 2000; 大志万, 2000)。地震時の記録には地震波形と似た電場、磁場の変化が明瞭にみられ、地震ダイナモ効果と呼ぶことになる研究の先駆けとなった。さらに、地震発生前の記録の解析により、地震の 20 分ほど前から地震破壊域における電磁応答が変化しているらしいことをみつけ、この変化がイズミット地震発生につながったのではないかと考えていた (本蔵, 2014)。

しかし、これだけでは地震発生過程の理解には至らない。その後、この変化と同期した前駆的微小地震活動が近くの地震観測点で検出されていたことがトルコ研究者によって発表され、いわゆるスロースリップが本震前に出現したのではないかと解釈につながった。これに触発されて、電磁場データを MT (マグネトテリユリック) 法を用いて徹底的に解析し、地震断層近傍の地殻比抵

抗変化の検出を試みたところ、想像していたとおり約 20 分前に比抵抗が変化していることを突き止めた。この研究成果は Nature Communications に掲載された (Honkura *et al.*, 2013)。筆者が大学院生として研究者の駆け出しの頃に活発であった日米地震予知セミナーなど、地震予知研究が華やかになりし頃にこの論文が出ていれば筆者も注目されたかもしれないなどと勝手に当時を回想しているが、地震予知は無理という現在の風潮ではこの論文はあまり注目されないようである。しかも、この現象の追試は現在でも容易ではない。なぜならば、比抵抗変化は地震発生域直上で、しかも直前にしか出現しそうにないので、この現象を検出するにはあらかじめ地震発生場所を知っており、その近傍で観測しなければならないからだ。

一般に大地震の発生は稀であることから、地震発生過程の解明には時間がかかる。一方、世界に目を向けると、トルコのように研究に適したところはいくつか見当たる。ならば海外に出かけ国際共同研究を行えば良いと思うだろう。この意味では 5 年間連続して研究を行える上に、必要観測機材の相手国への供与が可能で、しかも人材育成も行うことが想定されているので、長期的(持続的)研究が容易となる SATREPS はたいへん素晴らしいプロジェクトと言える。もちろん、SATREPS の目標はたんなる研究ではなく、基本的には被害軽減を目指す社会実装も重視されるのではあるが、このような素晴らしい SATREPS に多くの応募があるのは当然であろう。次章では、地震発生過程研究に限らず、広く地震・津波に関連した過去の採択プロジェクトを列挙する。

## 5. 地震・津波関連の SATREPS プロジェクト

以下は <https://www.jst.go.jp/global/> からの引用である(研究代表者の肩書は課題採択当時)。

＜平成 20 年度(2008 年度)採択課題＞

課題： インドネシアにおける地震火山の総合防災策

研究代表者：佐竹健治(東京大学地震研究所教授)

相手国： インドネシア

＜平成 21 年度(2009 年度)採択課題＞

課題： フィリピン地震火山監視強化と防災情報の利活用推進

研究代表者：井上 公(防災科学技術研究所災害リスク研究ユニット総括主任研究員)

相手国： フィリピン

課題： 鉱山での地震被害低減のための観測研究

研究代表者：小笠原宏(立命館大学理工学部教授)

相手国： 南アフリカ

課題： 自然災害の減災と復旧のための情報ネットワーク構築に関する研究

研究代表者：村井 純(慶應義塾大学環境情報学部教授)

相手国： インド

課題： ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究

研究代表者：山崎文雄(千葉大学工学研究科教授)

相手国： ペルー

＜平成 23 年度(2011 年度)採択課題＞

課題： 津波に強い地域づくり技術の向上に関する研究

研究代表者：富田孝史(港湾空港技術研究所アジア・太平洋沿岸防災研究センター副センター長)

相手国： チリ

＜平成 24 年度(2012 年度)採択課題＞

課題： マルマラ海域の地震・津波災害軽減とトルコの防災教育

研究代表者：金田義行(海洋研究開発機構地震津

波海域観測研究開発センター上席技術研究員)

相手国: トルコ

<平成 26 年度 (2014 年度) 採択課題>

課題: コロンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減技術に関する研究開発

研究代表者: 熊谷博之 (名古屋大学環境学研究所教授)

相手国: コロンビア

<平成 27 年度 (2015 年度) 採択課題>

課題: メキシコ沿岸部の巨大地震・津波災害の軽減に向けた総合的研究

研究代表者: 伊藤喜宏 (京都大学防災研究所准教授)

相手国: メキシコ

課題: ネパールヒマラヤ巨大地震とその災害軽減の総合研究

研究代表者: 額縁一起 (東京大学地震研究所教授)

相手国: ネパール

<平成 28 年度 (2016 年度) 採択課題>

課題: ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発

研究代表者: 青木孝義 (名古屋市立大学芸術工学研究科教授)

相手国: ブータン

## 6. おわりに

SATREPS プログラムが発足してから 10 年経つが、この間地震・津波に関するプロジェクトは 11 カ国で計 11 件実施されてきた。アジアや中南米の地震多発 10 カ国に加え、南アフリカの金鉱山の 1,000 m を超える深度の採掘坑道における地

震発生至近距離での地震・ひずみ観測というユニークな研究も行われ、地震発生過程などに関する多くの基礎研究成果が得られてきたと思う。また、わが国の地震防災研究の知見が相手国の実践的地震防災に随所で活用されている。とりわけ、相手国研究者との共同研究によって築かれてきた地震・津波研究の人的ネットワークは、長期的観点からもといたへん貴重なわが国の財産となるはずである。地震ジャーナルの次号以降、上記プロジェクトのいくつかの詳細な紹介記事が掲載されることが予定されていると聞いている。各国のフィールドで実施されてきた研究開発と社会実装の現状をご理解いただけるものと期待している。

SATREPS の詳細については、ぜひ <https://www.jst.go.jp/global/> をご参照いただきたい。

## 参考文献

- 本蔵義守. 2000. 観測網の中でおこった地震. 科学, 70, 100-112.
- 本蔵義守. 2014. 1999 年イズミット地震 (トルコ) に先立つ電気抵抗変化, 地震ジャーナル, 57, 35-40.
- Honkura, Y. *et al.* 2013. Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone. *Nat. Commun.*, 4, 2116. doi: 10.1038/ncomms3116
- 大志万直人. 2000. トルコ・イズミット地震, 地震ジャーナル, 29, 1-10.

本蔵義守

[ほんくら よしもり]

**現職** 東京工業大学名誉教授

**略歴** 東京大学大学院地球物理学専攻博士課程修了, 東京大学地震研究所助手, 東京工業大学大学院理工学研究科教授, 東京工業大学理学部長, 文部科学省研究開発局科学官, 東京工業大学理事・副学長を経て現職

**研究分野** 固体地球物理学

**著書** 「地球内部ダイナミクス」(共著), 「Solid Earth Geomagnetism」(共著), 「日本列島の地震」(共著)





●新刊紹介 .....

畑中弘子 著・なかざわまゆこ 絵

**地震がおきたら**

BL出版, 2017年10月, A4判, 29頁, 1,200円+税

鎌田浩毅 著

**日本の地下で何が起きているのか**

岩波書店, 2017年10月, B6判, 154頁, 1,400円+税

福和伸夫 著

**次の震災について本当のことを話してみよう**

時事通信出版局, 2017年11月, 四六判, 280頁, 1,500円+税

河野宣之・日置幸介 著

**動く地球の測り方—宇宙測地技術が明らかにした動的地球像**

東海大学出版部, 2017年11月, A5判, 136頁, 1,800円+税

小山真人 著

**ドローンで迫る 伊豆半島の衝突**

岩波書店, 2017年12月, B6判, 147頁, 1,700円+税

原田隆典・本橋英樹 著

**入門・弾性波動理論—震源断層・多層弾性体の地震動や地盤振動問題への対応**

現代図書, 2017年12月, B5判, 325頁, 10,000円+税

水谷武司 著

**東京は世界最悪の災害危険都市 日本の主要都市の自然災害リスク**

東信堂, 2018年1月, A5判, 176頁, 2,000円+税

藤岡達也 著

**絵でわかる日本列島の地震・噴火・異常気象**

講談社, 2018年2月, A5判, 192頁, 2,200円+税

翠川三郎 著

**強震動—観測記録とその特性—**

朝倉書店, 2018年2月, B5判, 116頁, 4,000円+税

西澤英和 著

**耐震木造技術の近現代史 伝統木造家屋の合理性**

学芸出版社, 2018年3月, A5判, 432頁, 6,000円+税

若松加寿江 著

**そこで液状化が起きる理由(わけ)被害の実態と土地条件から探る**

東京大学出版会, 2018年3月, 四六判, 276頁, 2,400円+税

廣井 悠・地下街減災研究会 著

**知られざる地下街 歴史・魅力・防災, ちかあ  
るきのススメ**

河出書房新社, 2018年3月, A5判, 169頁, 1,600円+税

今泉俊文・宮内崇裕・堤 浩之・中田 高 編

**活断層詳細デジタルマップ 新編**

東京大学出版会, 2018年3月, B5判, 154頁, 32,000円+税

矢田俊文 著

**近世の巨大地震 歴史文化ライブラリー 463**

吉川弘文館, 2018年3月, 四六判, 248頁, 1,800円+税

# ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

## 採用

阿部信太郎	本部 地震防災調査研究部長	30. 4. 1
中元 真美	本部 地震防災調査研究部 副主任研究員	30. 4. 1
石辺 岳男	地震調査研究センター 解析部 主任研究員	30. 4. 1
古本 尚樹	東濃地震科学研究所 主任研究員	30. 4. 1
後藤 和彦	つくば観測技術センター所長	30. 4. 1
	(兼) 本部 地震防災調査研究部 副首席主任研究員	
長谷川世里子	つくば観測技術センター 主任研究員	30. 4. 1
菅原 光滋	つくば観測技術センター 副主任研究員	30. 4. 1

## 退職

荒井 政二	本部 事務局 次長	30. 3. 31
野村 幸司	つくば観測技術センター 主任研究員	30. 3. 31

## 配置換等

針生 義勝	つくば観測技術センター 総括リーダー (昇任)	30. 4. 1
-------	-------------------------	----------

## 任務解除

澤田 義博	専務理事	
	<任務解除> 本部 地震防災調査研究部長	30. 3. 31
吉田 敏雄	地震調査研究センター 副所長	
	<任務解除> つくば観測技術センター所長	30. 3. 31

## 編集後記

本年1月23日、草津白根山の白白根山が何の前触れもなく突然噴火した。地震よりは予知がしやすいとされる火山だが、それでも小規模な水蒸気噴火の予知はきわめて困難だ。

地震についても、小さな地震は無理としても大規模な地震については何とか予知の実現をということで各種の努力が続けられてきた。なかでも「東海地震」については、陸域直下で起きるM8級の巨大地震であり前兆捕捉が期待されるという点と、発生した場合の影響の甚大さことから特別の扱いがなされ、今から40年前の1978年6月15日、世界に例をみない大規模地震対策特別措置法が公布された。しかし、観測や研究が進むにつれ、地震予知の困難さが浮き彫りにされ、また東海地震と南海地震との連動性も問題とされるようになってきた。

そんななか、国の中央防災会議の調査部会は、昨年8月にとりまとめた報告書の中で「現時点においては地震の発生を確度高く予測する科学的に確立した手法はなく、(中略)確度の高い地震の予測はできない」と断じた。地震予知関係者には大きな衝撃であったが、このような結論に至った事情について、新しく気象庁に組織された「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」の会長である東大地震研の平田先生に解説をお願いした。

予知はむしろかしいとしても、地震現象をモニタリングする能力を強化し、それにより緊急の情報を発信したり、被害の状況を即時に推定したりすることは、防災上の観点からたいへんに重要である。

だが、2007年10月に本運用が開始され10年を経過した緊急地震速報にも、思わぬ弱点がある。まだ松の内の本年1月5日、茨城県沖と富山県西部でほぼ同時に発生した2つの地震により、関東地方や福島県に

誤った警報が発令される事態となった。気象庁の緊急地震速報評価・改善検討会技術部会の委員も務める堀内先生に、この事例で浮かび上がった問題点の解説と、解決に向けた提言等を述べていただいた。

ところで、南海トラフの先には、奄美諸島から沖縄、そして台湾の沖へと連なる南西諸島海溝が横たわっている。東日本大震災の100年前にあたる1911年6月、奄美諸島の北東部に位置する喜界島の付近で、この地域では有史以来最大の規模であるM8.0の大地震が発生し、同島には大きな津波が押し寄せた。この津波に関して現地で行われた丹念な聞き取り調査の結果について、鹿児島大学南西島弧地震火山観測所の後藤所長よりご寄稿をいただいた。

さて、わが国ではかなりの頻度で被害地震が発生するため、毎年のように有名な地震が周年を迎える。今から10年前の2008年には岩手・宮城内陸地震(M7.2)、40年前の1978年には1月に伊豆大島近海地震(M7.0)、6月に宮城県沖地震(M7.4)があり、50年前の1968年には十勝沖地震(M7.9)、70年前の1948年には福井地震(M7.1)という具合だ。

これらのうち、1968年十勝沖地震と1978年宮城県沖地震は、わが国の耐震基準を語る上で忘れられない地震であり、現在「新耐震」と呼ばれている新たな建築基準法が1981年より施行されるきっかけとなった。このあたりの経緯について、慶応大学の北川先生より詳しい解説をいただくことができた。

地震予知や地震学を新たな方向に発展させていくためには、革新的な観測手法の開発や、新しい理論の提唱が鍵となる。

今号では、「300億年に1秒の誤差」という超高精度の光格子時計をGNSS観測と組み合わせることにより、従来にない利点を持った地殻変動計測が実現でき、地震や火山研究

への大きな貢献が期待される可能性について、この道の第一人者である3人の先生方よりたいへんに夢のあるお話をいただいた。

また、本誌の前編集長である萩原先生からは、近年提唱された指数則とべき乗則をつなぐ関数を用いて、余震統計式の再考を促す原稿をいただいた。本震直後に多発する余震の法則性を理解する上で新たな地平を開く手がかりを与えるものと期待される。

わが国の地震学や地震工学は世界のトップレベルにあり、諸外国との技術協力により世界の地震防災に貢献することは社会的使命と言える。

この10年あまり、文部科学省のJST(科学技術振興機構)と外務省のJICA(国際協力機構)はタッグを組んで、SATREPSと名付ける大型国際プロジェクトを推進してきたが、その重要な一翼に防災分野がある。この分野で長年にわたり研究主幹(リサーチスーパーバイザー)を務められた本蔵先生にSATREPSの概要を紹介していただいた。

今号もバラエティ豊かな記事を取り揃えたが、読者諸氏には忌憚のないご意見・ご批評を賜りたい。

(Y.O.)

### 地震ジャーナル 第65号

平成30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.adepr.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