

地震 ジャーナル

50

2010年12月

特集 これだけやればこれだけわかる
—明日の地震予知総合研究に向けて

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

地震ジャーナル

50号 2010年12月

目次

特集 これだけやればこれだけわかる
—明日の地震予知総合研究に向けて

地震ジャーナル50号刊行に寄せて	高木章雄	1
地震システム科学の構築へ向けて	岡田義光	3
地震発生予測シミュレーションに向けて	平原和朗	6
統合地震シミュレーションの現状と展開	堀宗朗	11
地震予知研究と火山噴火予知研究の連携の強化	村上亮	16
海溝型地震予知の展望	松澤暢	22
緊急地震速報と巨大地震	堀内茂木	27
日本周辺域の海底観測ネットワークの構築	金田義行	32
グローバル津波研究の展開—過去100年の歩み	今村文彦	39
地震発生予測実験	平田直	47
アクロスと地震予知研究	山岡耕春	51
GNSS地殻変動観測の将来	今給黎哲郎	58
SARによる地震像の把握	橋本学	62
海底の動きを測る～GPS/音響測距結合方式による 海底地殻変動観測～	佐藤まりこ	68
応力連続観測と今後の地震予知研究 —ボアホール応力連続観測計器の開発による今後 の展開—	石井紘	73
ハイパー・ハイブリッド重力測定 —地殻内流体移動検出の高精度化を目指して	大久保修平	78
電磁気学的な地震予知研究が描く将来像	長尾年恭/竹内昭洋/鴨川仁	83
地下水位観測による地殻変動の推定—現状と展望—	小泉尚嗣	89
ミュオンを用いた断層のイメージング	田中宏幸	95
地震災害軽減のための国際協力	石川有三	100
地震予知連トピックス	野口伸一	105
書評		113
既刊総目録 [41号～50号]		114
ADEP情報		116

地震ジャーナル 50 号刊行に寄せて

高木章雄

地震ジャーナル 50 号が特別号として「これだけやればこれだけわかる—明日の地震予知総合研究に向けて—」のテーマで編集されると伺い「地震予知研究の歩みのこれまでを知り、そしてこれからを考える」時宜を得た企画であると思いました。特に 2011 年 1 月は当地震予知総合研究振興会の創立 30 周年を迎え、人生で言えばこれからを期待される節目の年でもあり、更に新公益財団法人移行に向け努力第 1 年の年でもあります。その魁となる地震ジャーナル 50 号は末長く記憶に残る特集号になると思います。

12 年間の長きにわたり地震予知連絡会会長の重職を果たされました萩原尊禮先生は、地震予知研究をはじめ夫々の分野で多岐にわたり行われている地震に関する研究を総合化し発展させて、その成果を地域社会の地震防災に役立て、国民の安全、安心の願いに応えるべく、1981 年、地震予知総合研究振興会を設立され、その後事業が円滑に進捗し定常的になりましたのを機会に、1986 年、地震ジャーナル 1 号が創刊されました。

当振興会が設立されました背景には、当時次々と地震に関する極めて重要な観測事実が報告されたからです。1965 年地震予知研究計画発足後、第一次、二次計画では夫々の機関において決して多いと言えない研究者がより S/N の良いデータの収集に努力したのですが、収集・処理能力の遅れは如何とも避けられませんでした。萩原尊禮先生は一貫して観測の蓄積を重視されてきましたので、この難点を打開するため第三次計画にテレメータによる集中観測方式が採用されました。この方式の実施後震源決定精度が格段と上がり、次々と新しい重要な成果が生まれました。緯 39 度線に沿った東西地震断面には二重深発地震面が発見され、かつその上下二面に分布する地震のメカニズムから沈み込む太平洋プレートの動態が実

感として理解でき、また 1978 年宮城県沖地震の観測からプレート境界地震のサイズモジュニックゾーン（固着域）は深さ約 15 km から 60 km であることなど、冷たい太平洋プレートの沈み込みに関する重要な情報が得られました。また、爆破地震動研究グループにより男鹿半島-気仙沼を結ぶ測線直下の地殻構造が明らかにされていましたが、その構造から 6 km/sec 層に地震が集中して発生していることが確かめられました。

関東平野直下は太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込み、かなり深部までさまざまなタイプの地震が活発に発生しています。1973 年国立防災科学技術センター（現在独立行政法人防災科学技術研究所）が埼玉県岩槻に 3,510 m の深井戸を掘削し地震計を設置、観測を開始しました。その後増設された江東、府中の深井戸観測点等による首都圏観測網の観測結果から 5 つのタイプの地震像が明らかにされ、首都圏直下の地震防災対策の重要な基礎資料となりました。

更に 1978 年、地震予知研究と防災対策が直接結びつく大規模地震対策特別措置法が制定され、1979 年この特別措置法に基づいて東海地域の 170 市町村が地震防災対策強化地域に指定されたことにより、地震観測が格段と強化され、検知レベルの相対的に低かった東海地方の地震防災に対する貴重な資料の蓄積が期待されました。以上述べた事象が地震予知総合研究振興会設立当時の地震環境でした。

阪神・淡路大震災（1995）を契機に、政府に地震調査研究推進本部が設置され、その実施機関として防災科学技術研究所により、一定規格で全国をカバーするような基盤的地震研究観測網が立案されました。その中で高感度地震観測網 Hi-net は内陸に発生する大きな地震の規模の評価に直接必要な地震発生層の厚さ、或いはその下限の深さ

の情報を得るため精度の高い震源決定を目指し、設置点の基盤の堅さにもよるが少なくとも深さ100 m以上の観測井の孔底に固有周期1秒3成分高感度速度計を設置しています。また観測点間隔は20 km、この数値はほぼ10 kmより深い震源を確実に決定するためです。

この計画を萩原尊禮先生にお伝えしました。大変お喜びになりましたが、しばらくして「5 km」にならないかと申されました。その時私のショックは今でも鮮明です。先生は全国一律に5 kmと申されたのではなく、その必要性を指摘されたのでした。実際に最近発生したM7クラスの地震には震源が10 kmより浅い事実が報告されています。改めて萩原尊禮先生の洞察力の偉大さを感じています。歪集中帯等の直下の深さ10 kmより浅い地殻の構造調査がこれからの大きな課題であり、既に潜在する撓曲構造帯について超稠密な高感度地震観測網による地震構造調査が始められました。

阪神・淡路大震災を契機に、地殻変動調査研究が国土地理院により格段と整備され、GPSによる日本列島全域の地殻歪のモニタリングが着実に実施されて、即時的な成果が得られるようになりました。

地震予知研究の道筋の一つとして、大きな地震発生に至る準備過程を理解してモデル化しそれを基にしてシミュレーションを構築して大破壊に至

る経過を予測し、モニタリングを実施する事が重要です。例えば、東北地方内陸の活断層直下では表面からモホ面深度まで連続する低速度帯が存在することや、その地域の歪み速度などを考慮したモデリングが可能であります。

また暖かいフィリピン海プレートの先端近くの等深線に沿って帯状に分布する低周波地震微動群活動と現在紀伊半島沖に構築されている海底地震観測網から得られるカップリング情報が期待されますから、そのモデル化とそれに基づくシミュレーションへの構築が可能となりましょう。

このようにしてこれからの地震の長期予測の精度が徐々に上がり、地震災害の軽減に大きく貢献するものと信じています。

高木章雄

[たかぎ あきお]

現職 (財)地震予知総合研究振興会会長、東北大学名誉教授
理学博士

略歴 東北大学理学部地球物理学科卒業、東北大学理学部助教授、教授、鹿児島大学理学部教授を経て現職

研究分野 地震学

著書 *Earthquake Prediction Techniques—Their Application in Japan* (with T. Asada et al., Univ. Tokyo Press) 1982, 『東海地震の予知と防災』(共編, 静岡新聞社) 1997



地震システム科学の構築へ向けて

岡田義光

1. はじめに

地震予知に対する人々の期待は、いつの時代でも大きい。

文部科学省科学技術政策研究所では、「デルファイ調査」と呼ばれる今後30年間の技術予測調査を1971年よりほぼ5年ごとに実施していて、第一線の研究者約4,000人による我が国の将来像予測が行われているが、そこでは「M7級の地震が数カ月程度の精度で予測できるようになる」といった項目が、期待を込めて常に上位を占めている。

このデルファイ調査では、エレクトロニクス関連や宇宙技術関連で挙げられた予想項目が次々と現実のものとなり、次回以降の調査では消えていくのに対し、地震予知関連の技術は、調査結果の常連の項目として毎回挙げられてくる。すなわち、予測は実現されないまま、「逃げ水」のように毎回登場してくるとというのが実情である。このような状態を打破し、我々が真の地震予知実現に近づくためには、一体何をなすべきなのであろうか。

2. シミュレーションの役割

わが国の地震予知計画は、1995年の阪神・淡路大震災を契機として、それまでの前兆現象発見に重点を置いた経験的なアプローチから、地震発生の全過程を理解してその予測を行おうとする基礎科学的なアプローチへと大きく舵を切った。本特集号においても、その方向に向けた様々の意欲的な取組が紹介されており、心強いかぎりである。ハード・ソフトの両面において、これらの研究がますます進展し、やがては大きな花を開かせることを強く望みたい。

現在の地震予知計画の底流をなす思想は、詳細

な地殻構造や正確な地殻活動状況をできるだけ精密に把握するよう努める一方で、現実に即した多彩なシミュレーション研究を実施し、そこから得られる予測結果を実際の観測結果と比較して相互にフィードバックさせることにより、地震現象の本質を理解し、科学的な地震発生予測を行おうという考え方である。

ここでは、観測体制の充実や観測技術の進歩と並んで、理論的な地震発生モデルと精密な観測データに裏打ちされたシミュレーション研究の大いなる発展が要請される。しかしながら、現在のところ、シミュレーションによる研究成果は過去の観測結果を説明するだけの「後追い」的な色彩に終始している観が強い。

シミュレーションの真価は、これから現れるべき現象を科学的に予測し、それを検証するためにはどこでどのような観測を行えばよいかという観測の指針を示せるようになることにある。そのようになって初めて、観測とシミュレーションは対等な立場となり、お互いのフィードバックが進んでいくようになるであろう。シミュレーション研究が今後ますます発展し、そのような実力を備えていくよう切望するものである。

3. シミュレーション研究の方向性

地震予知システムの重要な一環をなすシミュレーション技術については近年長足の進歩が見られるが、今後の方向性としてさらに推し進めるべきと思われる事柄を2つ挙げたい。そのひとつは人為的な領域境界をなくした全球シミュレーションの実現、もうひとつはプレート境界や断層面境界への離散的構造の導入である。

通常行われるシミュレーションでは、ある有限の対象領域を設定し、その外部から一定の力や運

動を与えるという構図が多く採用されている。ただ、このように境界を人為的に設定することは、そこにおける現象の反射や吸収など、シミュレーション結果に好ましくない影響をもたらす原因となり、また、一定の外力等を想定することは、作用・反作用の原理が適切に取り込まれない危険性がある。

このような難点を逃れるためには、地球全体をひとつの閉じた自律的な系として考え、これをシミュレーションの対象とすることが理想であろう。気候変動の分野では、地球全体の大気と海洋をひとつの系として扱う「全球モデル」が研究の対象となっているが、地震科学についても、固体地球全体をまるまる扱う「全球モデル」を設定しようということである、そして、これをひとつの熱機関とみなし、あらゆる空間・時間スケールにわたるシミュレーションを実施することにより、プレート運動や地震・火山現象を自発的に発生させるモデルを構築することが望まれる。これは、ある意味で地球の歴史そのものを再現する試みであるとも言えよう。

2番目は、プレート境界や断層面の境界を、連続体の構造ではなく離散的な接触をもった構造として捉えようという提案である。連続体の力学では、断層面の生成に伴って生じる周辺へのひずみ影響は距離の3乗に逆比例して小さくなることから、遠隔地における地震誘発などの現象を説明することは非常に困難である。これに対し、有限個のパッチで支えられた境界面の破壊を考える際には、ひとつのパッチの破壊が遠隔地のパッチに大きな負荷を与え、連鎖的な破壊を引き起こすということも考えやすくなる。

最近では、アスペリティ等の構造に対応させて摩擦パラメータを不均質に分布させた境界面を設定し、断層すべりを模試するシミュレーション研究が盛んに実施されている。これらはかなりの成功をおさめているように見られるが、今後はこのようなアプローチをさらに発展させ、たとえば、離散的な接触点をフラクタル的に分布させた境界面を導入した場合における断層すべりの挙動を予測するなど、さらなるバリエーションを持たせた研

究へと進展させることが期待される。

4. 地震発生の物理モデル

科学的な根拠に基づいた真の地震予知を実現させるためには、結局のところ、地球という巨大なシステムそのものを理解し、また、その中で地震という現象が生起するプロセスを理解して、観測とシミュレーションに基づく科学的予測を行わなければならないことを、前節までに述べた。

ただ、そのような予測に使用する地震の発生モデルは、1通りだけあればよいというわけではなからう。現在のところ、地震発生の物理モデルとして最も受け入れられ、成功を収めているように見られるのは摩擦の構成法則に準拠する震源核形成モデル (Dieterich, 1986) であり、それに基づいて実施されている不均質断層すべりのシミュレーションである。この理論からは、地震が発生する直前にプレスリップ現象が観測されると期待されており、東海地震を監視する地震防災対策強化地域判定会においても、体積ひずみ計によるプレスリップの検出が、東海地震の発生を予知する唯一の頼りとされている。

しかしながら、確かなプレスリップ現象は、これまで世界のどこにおいても観測されていない。これだけ高密度で高感度な観測網が張り巡らされた我が国でも、最近発生した大地震の震源ごく近傍でプレスリップを捉えたとする例は、残念ながら皆無である。東海地震に関連しては、1944年東南海地震の発生に先立って見出された掛川付近の異常傾斜変動が、プレスリップの出現をサポートする有力な材料であるとされていたが、この解釈についても疑念が提出されている (鷲谷, 2004)。

このような状況下で、プレスリップだけに頼った地震予知体制を続けていてよいのであろうか？ 言い換えれば、摩擦構成則に基づくシミュレーションのみを唯一の地震発生モデルとして追及していることは正しいのであろうか？

かつて1970年代には、地震発生モデルとしてのダイラタンシー理論 (Scholz et al., 1973) が、地震予知の決定版としてもてはやされた時代があ

る。当時、地震発生の先行現象として報告されていた異常地殻変動や地震波速度変化、地下水中のラドン濃度変化などを統一的に説明できるとして、地震予知の未来をバラ色に輝かせたこの理論も、観測の精密化に伴って、先行現象の存在自体が疑わしいものと見られるようになり、今では勢いを失っているように思われる。

では、プレスリップの出現を予測する摩擦構成則シミュレーションは、これに代わる唯一の地震発生モデルとして君臨できるのだろうか？ 落ちて考えてみれば、未だに確かな観測例がないという点では、ダイラタンシー理論の場合と状況はそれほど変わらないのではないかとすることもできる。

少なくとも、摩擦構成則シミュレーション側としては、期待される信号レベルが小さ過ぎるとか、予想される先行時間が短過ぎるとか、観測されなくてもやむをえない理由をシミュレーション自身によって示すべきであろう。さらには、摩擦構成則に頼ったシミュレーションのみに限定せず、これまでとは全く異なる考え方に基づいた新たな地震発生モデルを開拓してゆくことにも、大いに力を尽くす必要があるのではないか。

5. 地震システム科学へ

安芸(2002)は、地震に関する科学情報をマスターモデルという概念で統合し、それに基づいて、地震予知を含む公共社会向けの情報を提供すべきであることを説いている。その中で、予知科学においては、限られたデータからできるだけ多くの可能なモデルを考え、そこから予想される色々なシナリオを複眼的に思い描き、総合化していくことの重要性が強調されている。地震というきわめて複雑な地学現象に対して、ひとつの万能なモデルに頼って予知を行おうとすることには本質的な無理があるように思われ、できるだけ多くの科学者が多種多様のモデルを作成し、常に複数の可能

性を追求してゆく努力が求められるということであろう。

モニタリングとモデリングの密接な結び付きを常に意識しつつ、柔軟な発想力をもって様々な地震発生の物理モデルを考案し、それらの総体として構築される「地震システム科学」を発展させてゆくことによって、科学的でかつロバストな地震予知が近い将来に実現されるようになることを、是非期待したい。

参考文献

- 1) 安芸敬一(2002):地震予知のための物理モデル序説,地震ジャーナル,33,1-8.
- 2) Dieterich, J.H. (1986): A model for the nucleation of earthquake slip, in *Earthquake Source Mechanics, AGU Geophys. Mono.*, 37, edited by S. Das, J. Boatwright and C.H. Sholz, pp. 37-47.
- 3) 鷺谷 威(2004):1944年東南海地震の前兆的地殻変動再考,月刊地球,26,11,746-753.
- 4) Scholz, C.H., L.R. Sykes and Y.P. Aggarwal (1973): Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, 181, 803-810.

岡田義光

[おかだ よしみつ]

現職 独立行政法人防災科学技術研究所
所理事長
理学博士

略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程中退,東京大学地震研究所助手(富士川地殻変動観測所勤務),科学技術庁国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)地殻力学研究室長,地震前兆解析研究室長,地震活動研究室長,地震・噴火予知研究調整官,地震予知研究センター長,地震調査研究センター長,企画部長を経て現職

研究分野 地震学,地殻変動論

著書 『日本の地震断層パラメーター・ハンドブック』(共著,鹿島出版会),『現代測地学』(共著,日本測地学会),『最新 日本の地震地図』(朝倉書店),『自然災害の事典』(共著,朝倉書店)他



地震発生予測シミュレーションに向けて

平原和朗

1. はじめに

摩擦は日常生活でも身近な現象であり、現在でも研究が盛んに行われている重要な物理現象である(松川, 2009)。地震は断層でのこの摩擦現象であるとの認識に立って、1960年代後半から岩石摩擦実験が行われ、いくつかの摩擦構成則が提出されてきた。そのひとつである、すべり速度・状態依存摩擦(RSF)則(Dieterich, 1979; Ruina, 1983)は、すべりによる摩擦低下のみならず摩擦が時間ともに回復する強度回復過程を含んでおり、Tse and Rice (1986)に始まる、プレート境界地震発生サイクルの数値シミュレーションによく用いられている。

2. アスぺリティモデル

地震発生シミュレーションでは、断層面またはプレート境界面上に摩擦パラメータを分布させる必要がある。これには、最近の研究の中でアスぺリティモデルが重要である(松澤, 2009)。地震波形データの解析により得られた大地震発生時の断層面上でのすべり量の大きい領域をアスぺリティと呼ぶ。地震が発生していない地震間では、陸上のGPS観測から、アスぺリティ域は固着しそれ以外の領域ですべりを起こしていることが分かっている。このようにアスぺリティモデルでは、プレート境界はパッチ状のアスぺリティとそれ以外の安定すべり域に大きく分けられる。アスぺリティの位置は時間的には不変であるが、破壊するアスぺリティの組み合わせにより、再来間隔や発生する地震の大きさが変化することが分かってきた。地震発生サイクルシミュレーションでは、こういったアスぺリティと安定すべり域に特有の摩

擦パラメータを分布させ、複雑な地震発生の時空間パターンを再現する。

実際、東北日本の日本海溝沿いのプレート境界では、マグニチュード(M)7程度の大きさを持つアスぺリティが複数分布する、アスぺリティマップが作成されている(Yamanaka and Kikuchi, 2004)。三陸沖では、1968年十勝沖地震(M 8.2)で破壊した2つのアスぺリティのうちのひとつが破壊して、1994年三陸はるか沖地震(M 7.4)が発生している。Kato (2008)は、試行錯誤により求めた摩擦パラメータを各アスぺリティとその周辺部に適切に与えることによって、発生間隔や1994年三陸はるか沖地震後1年間に及ぶ余効すべりの伝播とそれにより余震の発生といった現象の再現に成功している。また、宮城県沖ではM 7.4程度の地震が40年程度の間隔で発生するとされ、前回の1978年から30年経過している。2005年にM 7.2の地震が発生したが、これは想定されたM 7.4の地震ではないとされている。詳細な解析からM 7.4地震領域に3つのアスぺリティの存在が確認され、1930年代にその各々が破壊しM 7程度の地震が連発した可能性が指摘されるなど、見直しが行われている(松澤, 2009)。この宮城県沖地震領域でも、過去の地震の発生履歴を再現する、摩擦パラメータ分布を求め、次期地震発生予測へとつなげる地震発生シミュレーションの実施が急務である。

3. 南海トラフ地震発生サイクルシミュレーション

今世紀前半にその発生が危惧されている南海トラフ巨大地震の人的・物的被害は西日本全域に及びその被害総額は日本の財政規模に匹敵する。このため、文部科学省委託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究」が平成20年から実施

されている (Kaneda et al., 2009). 筆者は、この研究中の「物理モデル構築・シミュレーション研究」に関わっているため、南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーションに話を移そう。

3.1 シミュレーションの実際

Hori (2006) に従い、シミュレーションの実際を見てみよう。まず、沈み込むフィリピン海プレート (PHS) の3次元形状を設定し、プレート境界にプレート沈み込み速度および摩擦パラメータを与える。プレート境界における、沈み込みからのすべり遅れによる応力とRSF則に従う摩擦力の釣り合いから得られる弾性体の準静的運動方程式を時間積分し、すべりの時空間発展を追う。この際、プレート境界を小断層に離散化する必要があるが、摩擦パラメータから決まる小さな小断層に分割する必要がある (Rice, 1993)。

PHSの3次元形状として、海陸の地震波構造研究や詳細な地震活動分布から得られた形状を設定する。また、沈み込み速度には、陸上GPS観測から推定した値 (Heki and Miyazaki, 2001) を用いており、駿河湾での2cm/年の速度から西方に増加し、紀伊半島西沖で6cm/年に達している。

重要なのは、プレート境界に与える摩擦パラメータ分布であるが、東北日本のようなアスペリティマップは作成されていない。南海トラフ巨大地震の震源域は、歴史地震から駿河湾での東海、紀伊半島沖の東南海、四国沖の南海アスペリティに分けられている。18世紀以降では、まず1707年宝永地震で全アスペリティが連動破壊した。約150年後の1854年安政地震は、東南海・東海アスペリティを破壊し、30時間遅れて南海アスペリティを破壊した。約90年後の1944年昭和の地震は、紀伊半島沖で発生し東へ伝播し東南海アスペリティのみを破壊し、2年後に紀伊半島西沖で生じた地震は西へ伝播し南海アスペリティを破壊している。しかしながら、昭和の2つの地震以降、M7クラスのプレート地震は発生していない。この2つの地震時すべり分布が唯一のアスペリティマップであるが、研究者によって解釈が異なっている。

従って、岩石実験データからの摩擦パラメータ

の温度依存性を参考に、まず温度すなわち深さ依存の摩擦パラメータ分布を仮定した。更に海域での構造探査で得られている不均質構造をヒントに、東南海と南海アスペリティの境界付近と東海沖に摩擦パラメータの不均質性を導入した。

3.2 現状におけるシミュレーション成果

成果として、まず、2つの昭和の地震と同じように、紀伊半島沖で毎回地震が発生した。これは、プレート沈み込み角度が急で地震発生域の幅が狭く、沈み込み速度も比較的大きいため、応力集中を起こし易いからである。このように、プレート形状と沈み込み速度が破壊開始位置を決めており、次の地震でも紀伊半島沖から破壊が開始する可能性が高い。次に、全アスペリティを連動破壊する1707年宝永タイプの地震の後、東南海・東海アスペリティが南海アスペリティに先行して破壊する、および東海アスペリティは毎回破壊される訳ではないといった、1707年宝永地震以降の連動・非連動パターンンの定性的再現に成功した (Hori, 2006)。これは平面断層での結果であるが、最近、3次元形状モデルでも摩擦パラメータの不均質を5%小さくすることで同じことを再現している (兵藤・堀, 2010)。

3.3 現状でのシミュレーション課題

では、モデルは完成しているかと言うと、いくつか問題がある。まず、150年から90年という再来間隔やほぼ同時から数年という東西アスペリティの破壊の時間差の大きな変化は定量的には再現されていない。また、津波堆積物の解析から1707年宝永地震クラスの超巨大地震は300~400年および700年間隔で発生するという、超地震サイクルの存在が示唆されている (岡村・他, 2006)。これに対しては、摩擦特性 (特に破壊エネルギー) の階層的な不均質摩擦モデルの導入により、大きな破壊エネルギーに対応する再来間隔の長い超巨大地震と、小さな破壊エネルギーに対応する再来間隔100~200年の通常の巨大地震を発生させるモデルが提案されている (Hori et al., 2009)。また、1707年宝永地震の破壊は日向灘にまで達していた可能性があり (古村・今井, 2009)、モデル領域を九州沖まで拡張する必要が

ある。

また、南海トラフ震源域深部で、長期・短期スロースリップイベント (SSE) が観測され、南海トラフ地震サイクル中に、その活動度が変化し、次期巨大地震発生の指標となる可能性がある (Ariyoshi et al., 2009)。こういった、長期・短期 SSE の発生も含む大規模マルチスケールシミュレーションを実行する必要がある。

3.3 連動性評価研究シミュレーション課題の5カ年目標

5カ年のシミュレーション課題の目標は、以下となる。まず、最近の地殻変動データに基づくすべり遅れ分布や過去の地震時すべり分布から、アスペリティ等の空間分布を把握する。次に、津波堆積物の解析から得られる数千年を超える期間の地震サイクルや、最近 120 年間の地殻変動データに基づくプレート境界でのすべりの時空間発展と整合する摩擦パラメータおよび変数の初期値を絞り込む。

更に時間軸を進め、長期・短期 SSE の活動度変化も含む大規模マルチスケールシミュレーションにより、南海トラフ地震の連動性を考える。ここまでは準静的解析であるが、地震発生直前では、動的破壊へ切り替える (Hok et al., 2010)。これが5カ年のシミュレーション課題で構築する第1世代の地震サイクルシミュレーションモデルである。

4. シミュレーションの高度化に向けて

現状のシミュレーションでは均質弾性構造を仮定し、単純化した媒質を用いている。実際の沈み込み帯では、付加体・マントルウェッジ・海洋性地殻・沈み込むスラブなど大きな不均質性が存在している。まず、こういった不均質弾性媒質中での準静的地震発生サイクルおよび破壊伝播コードの開発を行っている。また、南海トラフ発生前後に西南日本内陸地震の活動が高まると言われている。そのため、マントルの粘弾性を考慮した、内陸地震も含めた南海トラフ巨大地震サイクルシミュレーションを開発中である。更に、断層に含

まれる間隙流体圧は地震時および地震間の地震サイクルを通して大きく変動する。こういった間隙流体が地震サイクルおよび連動・非連動に及ぼす影響を評価中である。

これら媒質の問題を現実的な地震サイクルシミュレーションに組み入れるには、非常に多くの計算資源を必要とし、現状では困難であるので、単純化したモデルでの開発および影響評価を行っている (Hirahara, 2009)。

5. 地震発生予測シミュレーションに向けて

現状では摩擦パラメータは試行錯誤的に推定しているが、気象・海洋分野で開発された手法を用いて、摩擦パラメータおよび変数の初期値を推定するデータ同化手法の開発を進めている (加納・他, 2010, 光井・他, 2010)。

このデータ同化や前述した大規模マルチスケールシミュレーションの実現には、計算コードの高速化・省メモリー化が必須である。シミュレーションにおいて、プレート境界を N 個の小断層に分割すると、繰り返し計算する必要のある、すべり応答関数とすべり速度ベクトルの積の計算に $O(N^2)$ の演算回数およびメモリーを要する。これまで高速フーリエ変換を用いた高速化が図られてきたが (例えば, Kato, 2008), モデル空間の対称性を要する点や曲面断層が扱えないなど、沈み込み帯のシミュレーションでの適用には問題がある。そこで、高速多重極法 (平原・他, 2009) および H-matrices 法 (大谷・他, 2010) の適用による高速化が行われている。前者は、天体物理学等多くの分野で用いられている、 N 体間減衰相互作用の高速計算数値アルゴリズムで、 $O(N^2)$ の演算回数を $O(N \log N)$ で行う。すべり応答関数が多重極展開可能な関数形を持つ必要があり、全無限均質弾性体中でのみ定式化されている。後者は、マックスプランク研究所で開発された手法で、すべり応答関数が距離減衰する必要があるだけで関数形に制限はなく、半無限均質弾性体や不均質弾性体での数値解にも適用可能である。

同化すべきデータは、これまでは陸域のデータ

に限られてきた。海溝型地震では海域でのデータが必須となる。そこで、文部科学省委託事業「地震・津波観測監視システムの構築」(海洋研究開発機構)や大学・海上保安庁海洋情報部による海底地殻変動観測の高精度化研究など、海底地震・地殻変動観測網の構築に向け急ピッチで開発が進められている。

今後、海域での観測が実用化し、例えば、次期南海トラフ巨大地震発生直前や東南海・東海アスペリティが破壊して南海アスペリティが割れ残っている状態では、海陸データによるリアルタイムデータ同化が必須となる。第1世代モデルによる摩擦パラメータ分布や変数の初期条件を基に、海陸リアルタイム地殻変動・地震データを順次取り込みデータ同化を行い、摩擦パラメータ分布および初期条件を改良し、プレート境界でのすべりの発展、すなわち地震発生予測を行う。これが第2世代モデルと言える。気象の数値予測では高層観測を含む3次元空間データが同化対象となるが、地震の場合は海陸とは言えプレート境界から離れた地表での2次元地殻変動データが主となる点が大きく異なる難点と言えよう。プレート境界に近い深部の応力情報を持つ地震データを同化する必要がある。

前述のように現状のモデルは単純化されたもので、またデータ同化や高速化の上で技術的にも克服すべき点は多い。しかし、南海トラフ巨大地震の発生は間近に迫っている。気象の数値予報も簡単なモデルから始まり徐々に進化したように(新田・他, 2009)、神戸に建設される次世代スーパーコンピュータを駆使して、まずは現状のシミュレーションにデータ同化機能を加え、第2世代の予測シミュレーションのプロトタイプを構築する必要がある。これを実際に稼働させつつ、データ同化手法および媒質の問題を部分的に加え改良していくことにより、南海トラフ巨大地震の発生を迎え撃つ体制を作る必要がある。

この小論は平原・他(2010)に加筆したものである。20年前筆者は、気象の数値予報のように地震発生の数値予報は可能であろうか?といった小論を記した(平原, 1992)。地震発生予測シミュ

レーションシステム構築への道程は非常に厳しいことは確かであるが、この小論が今の私の答と言える。

参考文献

- Ariyoshi, K., T. Hori, J.P. Ampuero, Y. Kaneda, T. Matsuzawa, R. Hino, A. Hasegawa (2009) Influence of interaction between small asperities on various types of slow earthquakes in a 3-D simulation for a subduction plate boundary, *Gondwana Research*, 16, 534-544.
- Dieterich, J.H. (1979) Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, 2161-2168.
- 古村孝志・今井健太郎(2009)日本地震学会2009年秋季大会, A11-10.
- Heki, K. and S. Miyazaki (2001) Plate convergence and long term crustal deformation in central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2313-2316.
- 平原和朗(1992)数値地震予知, 月刊地球, 号外4, 174-178.
- Hirahara, K. (2009) Toward advanced earthquake cycle simulation, *J. Disas. Res.*, 4, 99-105.
- 平原和朗・光井能麻・堀 高峰(2009)地震発生サイクルシミュレーションコードの高速化:(1)検討と高速多重極法の適用, 日本地震学会2009年秋季大会, C31-02.
- 平原和朗・堀 高峰・加藤尚之(2010)地震サイクルシミュレーションの課題と目標, *科学*, 80, 794-796.
- Hok, S., E. Fukuyama and C. Hashimoto (2010) Dynamic rupture of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes using plate, coupling rates on the subduction interface, *JpGU Meeting 2010, SSS027-10*.
- Hori, T. (2006) Mechanisms of separation of rupture area and variation in time interval and size of great earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, *J. Earth Simulator*, 5, 8-19.
- Hori, T., S. Miyazaki and N. Mitsui (2009) A model of earthquake-generation cycle with scale-dependent frictional property—Preliminary results and research plan for a Project of Evaluation for Coming Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes *J. Disas. Res.*, 4, 111-117.
- 兵藤 守・堀 高峰(2010)フィリピン海プレートの3

次元形状が南海トラフ巨大地震発生に及ぼす影響, JMASTEC-R, 11, 1-15.

加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗 (2010) 余効すべり人工データを用いたアジョイント法による摩擦パラメータ・初期値の推定, 地震, 印刷中.

Kato, N. (2008) Numerical simulation of recurrence of asperity rupture in the Sanriku region, northeastern Japan, J. Geophys. Res., 113, B06302, doi : 10.1029/2007JB005515.

Kaneda, Y., K. Hirahara and T. Furumura (2009) New research project for evaluating seismic linkage around the Nankai Trough —Integration of observation, simulation, and disaster mitigation—, J. Disas. Res., 4, 61-66.

岡村 眞・松岡裕美・千田 昇・島崎邦彦 (2006) 見えてきた巨大南海地震の再来周期, 地震学会 2006 年度秋期大会講演要旨集, A27.

松川 宏 (2009) 滑りと摩擦の科学, 非線形科学シリーズ 4, pp. 95-228, 培風館.

松澤 暢 (2009) プレート境界地震とアスペリティ・モデル, 地震, 61, S324-S355.

光井能麻・堀 高峰・宮崎真一・加藤尚之 (2010) 2 次元平面断層上における地震発生サイクルモデルのデータ同化手法開発, 地震学会 2010 年秋季大会, B32-08.

新田 尚・二宮洸三・山岸米二郎 (2009) 数値予報と現在気象学, 東京堂出版.

大谷真紀子・平原和朗・高橋康人・堀 高峰・兵藤守・中島 浩・岩下武史 (2010) H-matrices を用いた大規模準動的な地震発生サイクルシミュレーション, 地震学会 2010 年秋季大会, P 3-43.

Rice, J.R. (1993) Spatio-temporal complexity of slip on a fault, J. Geophys. Res., 98, 9885-9907.

Ruina, A. (1983) Slip instability and state variable friction laws, J. Geophys. Res., 88, 10, 359-10, 370.

Tse, S.T. and J.R. Rice (1986) Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, J. Geophys. Res., 91, 9452-9472.

Yamanaka, Y. and M. Kikuchi (2004) Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, J. Geophys. Res., 109, B07307, doi : 10.1029/2003JB002683.

平原和朗

[ひらはら かずろう]



現職 京都大学大学院理学研究科教授

略歴 昭和 56 年 3 月京都大学理学博士,

昭和 58 年 6 月京都大学防災研究所助手,

平成 2 年 6 月同助教授, 平成 8 年 4 月名

古屋大学大学院理学研究科教授, 平成 13 年 4 月同大学

院環境学研究科教授, 平成 17 年 9 月京都大学大学院理

学研究科教授, 現在に至る

研究分野 地震学: 地震発生サイクルシミュレーション, レシーバ関数, 地震波干渉法

著書 Seismic Tomography, edited by H.M. Iyer and K. Hirahara, Chapman and Hall, pp. 842, 1993. 新版地

学教育講座 2 地震と火山 1 部 2・3 章, 東海大学出版

会, 1996. 東海地震がわかる本, 第 4 章, 東京新聞出版

会, 2003

統合地震シミュレーションの現状と展開

堀 宗朗

1. はじめに

地震防災には地震災害の発生を防ぐという明確な目的がある。その一方でこの目的を達成する手段にはさまざまなものがある。地震災害は過去に経験されたものであるから、災害発生のメカニズムを分析し、それに応じた対策を考案することになる。構造物の耐震設計、耐震・免震構造、耐震補強、そして組織の危機管理等はこの地震防災の対策の具体例である。

情報通信革命は産業界にいろいろな変化を引き起こしている。このため、過去には被害とみなされなかったことも地震災害となる可能性がある。例えば、商取引・金融の国際化が進むと、広域にわたる情報通信網の寸断が許容されない時代が来るかもしれない。ライフラインや交通ネットワークも同様である。各事業者に立案が要請されている事業継続計画では、疾病等の想定される災害に対して日単位で事業の再開を図ることが原則である。復旧に月単位の時間がかかるような地震災害が発生することは、事業継続の上では致命的ともなる。

過去に経験されていない地震災害にどのように備えるべきであろうか。リスクマネジメントの枠組みで考えると、まず、発生しうる地震災害そのものを認識することが第一歩となる。災害の規模や程度とともに、発生する確率を見積もることが必要であるが、この認識に基づき、災害に対処するかしないかを判断し、対処すると判断した場合、保険も含む事前の対応を行うことになる。

地震災害を認識するツールとしてハザードマップをあげることができる。地震動の大きさや地震被害の程度が図示されたハザードマップは地震防災を実践する上で大きな役割を果たしている。し

かし、未経験の地震災害を認識するためには不十分である。地震動や被害を計算するためには、過去のデータの統計分析に基づいた内挿・外挿以外の手段がなく、未経験の災害を見積もることは不可能なのである。

2. 統合地震シミュレーション

構造物の耐震設計には過去に観測された地震動を用いることが原則であるが、合理的な手法で計算された地震動を用いることも可能となっている。このような未経験の地震動に対しても、安全性が確保されるよう、地震応答が計算される。都市情報が整備されつつある今日、この都市情報から都市モデルを構築することも可能となっている。さらに構造物が被害を受けた場合の避難や復旧といった対応行動の数値解析手法も開発されつつある。図1に示すように、地震波動伝播・構造物地震応答・被害対応行動の数値計算手法を都市モデルに適用し、想定された地震が引き起こす地震動と、その結果生じる地震被害や被害への対応を計算することが統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) である。

IESに組み込まれた地震波動伝播の数値解析は地質規模から地盤規模のマルチスケールの数値解析手法である。構造物地震応答には、建物・社会基盤施設等、個々の構造物の種類に応じた手法が組み込まれている。IESでは、地震波動伝播で計算される強震動が構造物地震応答の入力、その結果の構造物の損傷が被害対応行動の入力となる。したがって、IESでは、入出力が連続する形で多種多様な数値解析手法を統合しなければならない。このようなシームレスなシミュレーションを都市全体で実現することがIESの課題であり、これには、都市モデルの構築、科学計算とシステム

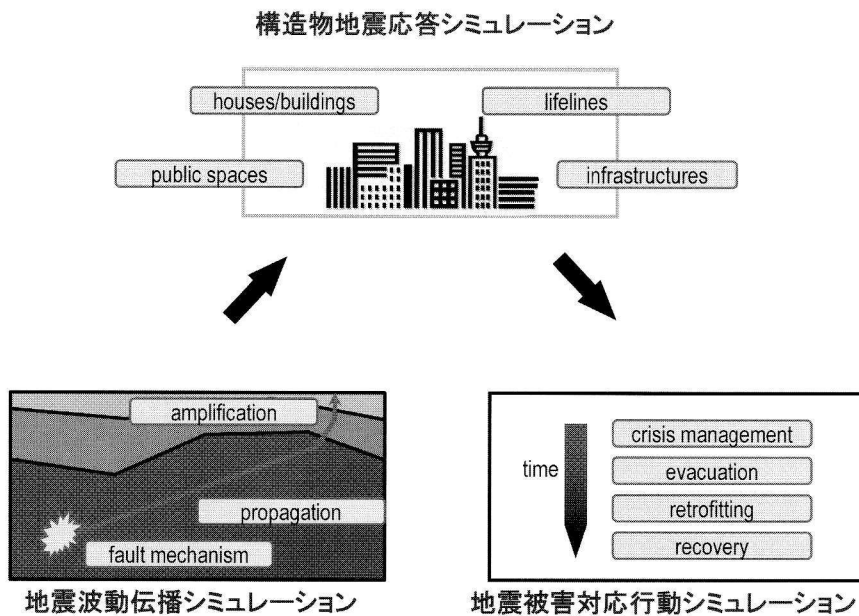


図 1 IES の概念図

計算の統合，という2つの技術的課題がある。

都市の建物・社会基盤施設の位置や形状の情報は地理情報システム (Geographic Information System, GIS) として蓄積されている。GIS は、例えば、カーナビゲーションで使われている。IES の都市モデルはこの GIS をデータとして構築される。都市モデルには、地震波動伝播用、構造物地震応答用、地震被害対応行動用が必要であり、一つの GIS のデータが異なる都市モデルに変換される。例えば、建物の場合、壁や柱のデータは構造物地震応答の構造モデルに変換され、内部の空間のデータは避難の経路モデルに変換されることになる。東京のような大都市では構造物の数は100万のオーダーとなるため、GIS から都市モデルへのデータ変換には高い堅牢性が必須となる。

地震波動伝播や構造物地震応答は、初期値境界値問題として記述される数理問題を数値解析するという科学計算である。これは IES の根幹の数値計算である。一方、IES は、巨大な都市モデルに数値解析手法をシームレスに適用するというシステムであるため、科学計算とは異なるシステムとしての大規模計算も必要となる。構造物地震応答を例にこのシステム計算を説明すると、建物・社

会基盤施設の構造物の種類によって適用する数値解析手法が異なるため、入力となる地震動は各数値解析手法に応じたものにフォーマットを変換しなければならない。さらに都市全体の応答を可視化するためには、数値解析手法の出力結果を合わせなければならない。これがシステム計算である。IES では科学計算とシステム計算の統合が必要となる。

3. 統合地震シミュレーションの現状

IES は断層から都市までの地震波動伝播の数値計算を行う。地震波の地震学的スケールは 10^3 m 程度であり、一方、強震動の地震工学的スケールは 10^{-1} m 程度であるため、空間分解能をあげる効率的なマルチスケール解析が必要となる。勿論、空間分解能は時間分解能も決めるため、地震工学に必要な 10 Hz 程度まで空間分解能をあげなければならない。断層から高周波成分を数値計算することは合理的ではないため、例えば 2 Hz 程度まで地震学的スケールで計算し、地震工学的スケールの計算では高周波成分を外挿することが必要である。東京大学地震研究所の計算環境では、

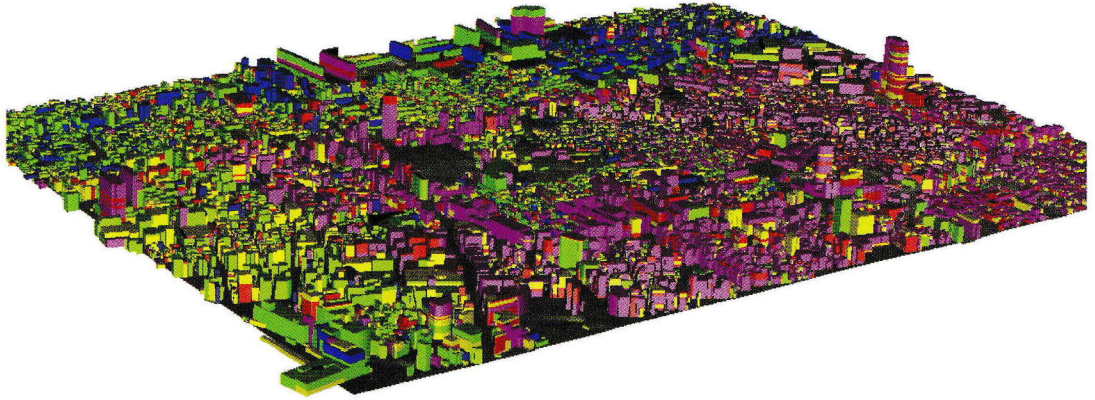


図 2 IES を使った東京 23 区の構造物地震応答シミュレーションの例：赤は被害大，黄色は中程度，緑は小被害，青は無被害

10 km 四方程度の領域の地震波動伝播の計算には 1 日程度の時間が必要である。

建物・社会基盤施設のモデルには，線形 1 自由度系という最も単純なモデルから，1,000 万単位程度の自由度を持つ高度な非線形有限要素法のモデルまでさまざまである。通常利用できる GIS のデータを使うと，各階を非線形のバネで結んだ非線形多自由度系モデルや，柱・壁をバネとした非線形骨組みモデルを構築することができる。個々の構造物に対して構築されたこのような非線形モデルに対し，地震波動伝播で計算された構造物の地点での強震動を入力し，非線形の応答結果を集めて都市全体の地震応答として出力することになる。東京大学地震研究所の計算環境では，200 万程度の構造物を持つ東京 23 区の構造物地震応答の計算に半日程度の時間が必要である（図 2 参照）。

4. 統合地震シミュレーションの将来

地震被害対応行動の数値解析として，現在 IES には，地震発生直後の群衆の避難と，地震による構造物被害の復旧の数値解析が組み込まれている（図 3 参照）。この数値解析は，避難する人や復旧作業をする技術者一人一人を模擬したエージェントを使うもので，マルチエージェントシミュレーション（Multi-Agent Simulation, MAS）と呼ば

れる。避難や復旧の MAS は，エージェントの数もさることながら，エージェントの種類も多く，システム計算で常用されるオブジェクト指向プログラミングでコード化することになる。科学計算に比べ MAS の歴史は浅い。そもそも人を模擬するエージェントのモデル化にも多くの課題が残されている。しかし，地震がもたらす構造物の被害から波及していく社会・経済活動の被害を予測するためには，MAS は一つの，そして多分有力な候補と考えることができる。

今後将来にわたって GIS の整備が進むことは期待できる。このような GIS を使うことで，IES はより高度な都市モデルを使うことになる。数値解析手法の高度化に伴って，GIS を使って構築される都市モデルの高度化は，より詳細で信頼性の高い地震災害のシミュレーションが可能となることを意味する。当然，このような IES のシミュレーションはより大規模な数値計算が必要となる。例えば，地殻・地盤構造がより詳細に分かれれば，対応する地下構造のモデルは精緻なものとなり，その結果，必要な数値計算は大規模化する。大規模数値計算技術を IES に取り込むことは必須である。

リスクマネジメントの枠組みに基づき，地震災害の認識に供する次世代ハザードマップとして IES を説明してきたが，IES には別の利用方法も考えられる。例えば，大地震発生直後の被害推定である。実際に観測された地震動を都市モデルに

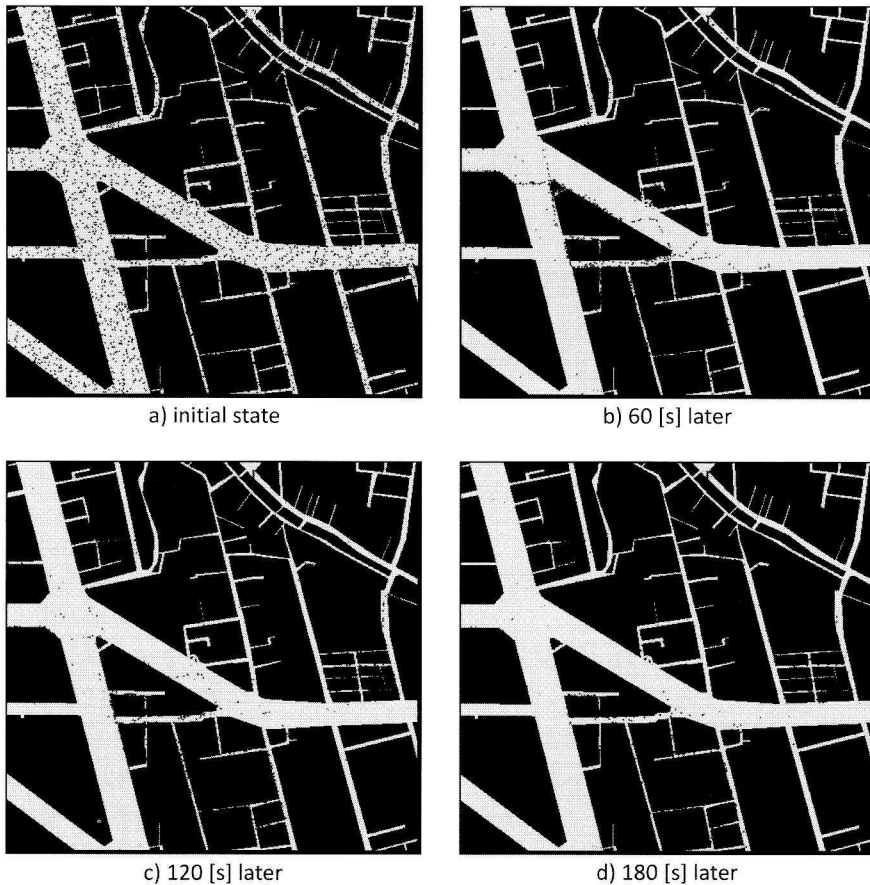


図 3 IES を使った東京 23 区の避難シミュレーションの例

入力し地震応答を数値計算することで被害をシミュレーションによって推定するのである。正確に被害を知るためには調査は不可欠であるが、IES を使うことで都市全域の被害を空間的に一様な精度で推定できることは重要である。大地震直後の被害推定のためには、大規模化とは別に、IES による計算の高速化が必須となる。

5. おわりに

過去に経験された地震被害の再発を防ぐことは地震防災の根幹であるが、高度化のためには、将来起こりうる未経験の地震被害を認識することも必要である。IES は地震波動伝播、構造物地震応答、被害対応行動の数値解析手法をシームレスに統合することで、地震防災の高度化を目指してい

る。IES のプロトタイプが完成している今日、個々の数値解析手法を洗練することは勿論、GIS から構築される都市モデルをより詳細なものとし、多様な数値解析手法のシームレスな統合を進めることが、IES の開発の技術的課題となっている。

IES の地震波動伝播と構造物応答のシミュレーションは地震学・地震工学の境界に位置するが、対応行動のシミュレーションは社会科学との境界に位置する。また、IES 自身、科学計算とシステム計算が融合したシステムであり、地震学・地震工学とコンピュータサイエンスとの境界に位置するとも考えられる。すなわち、IES の開発には、学際的な取り組みとそれを支援する仕組みが必須である。次世代スーパーコンピュータの課題の一つとして IES が取り上げられているが、この課題

では学際的研究推進体制を敷くことが計画されている。

参考文献

- HAZUS, 2007, "Supporting the HAZUS user community across the country," www.hazus.org
- Kawasaki Lab., 2007, "Earthquake disaster mitigation research center, national research institute for earth science and disaster prevention," www.kedm.bosai.go.jp/
- M. Hori and T. Ichimura, 2008, "Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster," *Journal of Seismology*, 12, 307-321.
- M. Hori, 2006, *Introduction to computational earthquake engineering*, Imperial College Press.

堀 宗朗

[ほり むねお]

現職 東京大学地震研究所教授

略歴 1984年学士(工学, 東京大学), 1985年修士(工学, ノースウェスタン大学大学院), 1987年博士(工学, カリフォルニア大学サンディエゴ大学院), 1989年東北大学工学部土木工学科助手, 1991年同講師, 1992年東京大学工学部土木工学科助教授, 1996年東京大学地震研究所助教授を経て2001年より現職

研究分野 応用力学, 計算地震工学

著書 Sia Nemat-Nasser and Muneo Hori : *Micromechanics : Overall Properties of Heterogeneous Materials*, Elsevier, New York, 1993. M. Hori : *Introduction to computational earthquake engineering*, Imperial College Press, London, 2006.



地震予知研究と火山噴火予知研究の連携の強化

村上 亮

1. はじめに

文部科学省の科学技術・学術審議会の平成20年7月17日付けの建議「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」に基づき、それぞれの予知を目指した5カ年の観測研究計画が推進されている。平成21年度からスタートしたこの計画は、従来、制度的には別個の枠組みで進められてきた二つの予知研究を統合して、装いも新たに、国家的取り組みとして推進されるものである。

そもそも、我が国周辺で起こる地震・火山現象は、海洋プレートが日本列島下に沈み込む際に生じる地殻・上部マントルの構造不均質と力学的・化学的不安定が原因となって発生するという共通した地球科学的背景を持つ。加えて観測手段として、測地学的・地震学的手法が大きな役割を果たすことにおいても共通性が高い。このような背景を踏まえると、統一した視野のもとに両者を一体として扱う研究戦略は、極めて自然で当然のことと考えられるが、その実現には、両現象が発生する場を広くカバーする共通の観測が実施できることが大きな前提となる。投入できる資源に限りがある場合は、それぞれの個別の理解に焦点をあてた観測や研究が優先されるのはやむを得ない。これまで、必要に応じて連携の努力がなされてきたとはいえ、観測に投じることのできる資源には大きな制約があり、必ずしも十分な連携の効果が上がってきたわけではなかった。

このような状況を一変させたのが、世界に類を見ない稠密(ちゅうみつ)な地震・地殻変動の観測網などの整備である。これにより、研究資源を地震現象と火山現象の観測研究に有効活用することにより、効率的で効果的な研究を実施できる期

待が高まり、このことが両計画統合の大きな背景となっていると考えられる。

このようにして始まった新しい研究計画であるが、両者の連携の効果を実際に発揮させ、その後の計画にさらに発展させていくためには、具体的な連携研究が数多く活発に行われることが望ましい。

紙数の限りがあるため、この小論では、学問的な厳密性を多少犠牲にすることをお許しいただき、筆者が、従来から興味を抱いている未解決の問題を取り上げながら、両研究の統合的実施が、これらの問いの解答への道筋を与えてくれるのではないかとの期待を述べることにする。

2. 地震と火山現象の強い関連性

前節でも述べたように、我が国周辺で起こる地震・火山現象は、海洋プレートが日本列島下に沈み込む際に生じる地殻・上部マントルの構造不均質と力学的・化学的不安定が原因となって発生するという共通した地球科学的背景を持っている。実際、両者が密接に関連しながら現象が発展する事例もこれまでに数多く発生している。

我が国や同様の背景を持つ地域で発生している地震と火山現象の関連性に関しては、小山(2002)に要約されているように、研究事例も多い。小山(同)には、1960年チリ地震と同年のPuyehue火山噴火(Katsul & Katz, 1967)、1970年秋田県東南部地震と1970-71年秋田駒ヶ岳火山噴火(中村, 1971)、1974年伊豆大島噴火と1974年伊豆半島沖地震(中村・田沢, 1974)、1703年元禄関東地震・1707年宝永東海地震と1707年富士火山噴火、1990年フィリピン地震と1991年ピナツボ火山噴火(大倉・安藤, 1994)、1998年岩手山の火山異常と1998年岩手県内陸北部地震(Nishimura

et al, 2001) など、多くの研究事例が紹介されている(個別の参考文献は小山(2002)を参照のこと)。これら以外にも、1914年桜島噴火と活動中に発生した桜島地震や、1960年代の松代地震なども、地震と火山現象が関連して発生した地殻活動として有名である。最近でも、2000年三宅島噴火とほぼ時期を同じくして始まった、東海スローリップ現象や富士山深部の低周波地震活動活発化が記憶に新しい。これらに関連付ける機構は未知ではあるが、発生時期が偶然とは考えにくいほど近接していることから、何らかの因果関係の存在が強く示唆される。さらに、2008年に発生し大きな被害をもたらした岩手宮城内陸地震についても、震源域に含まれる栗駒火山が地震前に膨張していたことを示すGPS連続観測結果が得られており(村上, 2008)、両者が関連して発生した可能性がある。

このように特に規模の大きな火山活動と地震活動が相前後して発生した事例は数多くあり、それらの関連性や発生機構を明らかにすることは、それぞれの現象の理解を深めるためにも有効であると考えられる。

しかし、既に指摘したように、これまでは、観測資源の制約から、両現象の関連性の詳細な機構を明らかにするに十分なデータの取得には、大きな限界があった。この状況は、我が国における1990年代中期以降の、地震および地殻変動に関する基盤的観測網の整備とともに改善しつつある。

しかしながら基盤的観測網の整備がもたらした現象把握能力の向上によって、地震火山現象の関連を示唆する事例の認識精度が上がり、両者の関連性を強く示唆する個々の事例観測実績は増加したものの、関連性の直接の機構を解明するほどに十分詳細なデータが得られているわけではない。また、基盤的観測網は、地震観測と地殻変動観測のみであり、火山活動と密接に関連し、また、地震の発生への大きな関与が示唆される地殻内流体の挙動の把握に力を発揮する地球電磁氣的観測や、高精度な地下構造探査などは、一部の地域を除いて、まだ十分に実施されているとは言い難い。これは、極めて多彩な地殻活動が、現に日常

的に発生している場を対象とする我が国の地震・火山コミュニティにとって、もったいないことであるように思われる。

以下では、筆者が日頃興味を抱いている未解決の問題のいくつかを取り上げながら、具体的に考えてみたい。

3. 地震火山の統合的研究によって 解明が期待される未解決の問題

3-1 北海道南西部の地殻変動

最初に取り上げるのが、室蘭から苫小牧にかけての北海道西南部太平洋岸沿いで進行している顕著な沈降性の地殻変動である。

この地域に筆者が目をつけた直接の動機は、2000年に噴火した有珠火山の今後の活動推移を予測するため、有珠山地下のマグマ溜まりの挙動を探りたいと考えたからである。火山活動の予測には、マグマだまりの存在の有無やそこへのマグマの供給レートを知ることは極めて重要である。2000年に噴火した有珠山では、噴火時の地殻変動については詳細な観測によって詳しい時空間的分布が明らかになっており、その解析から、マグマは有珠山の地下およそ10kmの深さのマグマ溜まりから上昇を開始したことが示唆された。噴火の前には、より深部からマグマが同じマグマ溜まりに供給され、準備過程が進行していた可能性があり、さらに噴火後の現在も、同じ場所に供給が再開されている可能性もある。これらを調べるためには、有珠山周囲のやや広域の地殻変動の分布を与える長期間のデータが必要である。噴火時の地殻変動観測に極めて有用であったGPS連続観測網も、その開始は1996年であり、それ以降の短期間のデータだけからは、前回1977年噴火以降長期間をかけて、ゆっくりと進行していたと考えられる準備過程に伴う微小な地殻変動を抽出するのは難しかった。そこで、国土地理院が全国において繰り返し実施している水準測量のデータを用いて、それから示唆される有珠山へのマグマ供給系の挙動について調べてみた。

国土地理院は、有珠山の南の噴火湾沿いに通過

する路線について、過去から繰り返し水準測量を実施している。最初に、2000年噴火前に実施された2回的水準測量結果（1985年頃と1991年頃）を比較すると、両観測の間の約6年間に有珠山に近い虻田町付近を中心にして約2cm程度隆起していたことがわかった。これは、2000年噴火に向けたマグマの再充填を反映した変動と考えてよいであろう。しかし、同じ路線をさらに東にたどると、室蘭を経て登別から白老付近に近づくにつれ、全体で2cm程度沈降していたことも示唆された。とりあえず、有珠山周辺の地殻変動のみに注目すると、有珠山が噴火前に膨張していたことは、ほぼ確かであるが、空間的波長の長い沈降による寄与を適切に取り除かないと、有珠山のマグマ起源の地殻変動の理解には不確実性が残る。この領域の周囲では、太平洋プレートの潜り込み、有珠山、支笏湖周辺等いくつかのマグマシステム、北海道南西沖地震の余効変動等の地学現象が複合して進行しており、この沈降は、それらと関連している可能性が極めて高い。有珠山のマグマ供給系の完全な理解には、結局さらに広い視野での研究が必要であり、課題となっている。

実は、この沈降は、過去からの水準測量結果においても、また、1990年代中頃からのGPS連続観測結果にも共通して明瞭に認められることが知られている（図参照）。GPS連続観測による上下変動結果をまとめた村上・小沢（2004）でも、この系統的な沈降の存在については指摘した。

沈降現象には様々な原因が考えられる。確かに、ここで注目している沈降地域内にある苫小牧市では、過去の一時期、地下水汲み上げにより、市の北部に局所的な地盤沈下が発生した。しかし、その後取水が規制され、最近では地盤沈下が沈静化したと報告されている。地下水汲み上げによる地盤沈下は多くの場合局所的であり、その空間的な広がりはいささか小さい。一方、図には苫小牧から登別を経て室蘭に至る数10km程度の広い領域（胆振地方）が、系統的に沈降している様子が示されている。地盤沈下以外にも何らかのテクトニックな原因が存在し、それによって沈降が生じている可能性が高いが、その原因を突き止めるには至

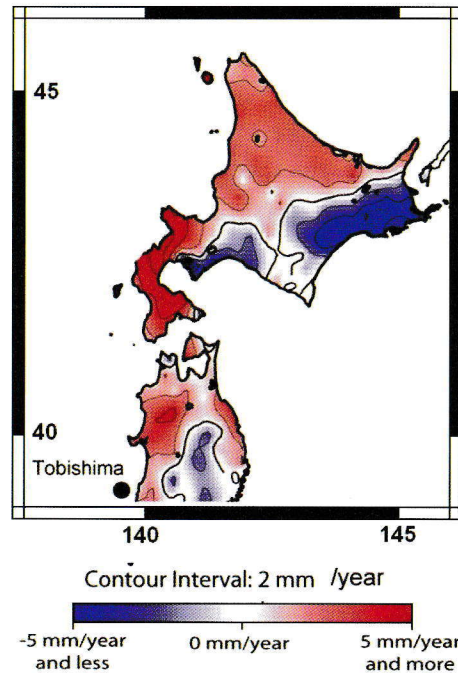


図 GPS連続観測による東北日本の上下変動（飛島固定）。村上・小沢（2004）を改変。北海道においては道東の太平洋側と室蘭から苫小牧を経て日高山脈西側に至る太平洋側の沈降が顕著である。

らなかつた。また、GPS連続観測開始後に発生した、この周辺の大きなイベントとしては、2003年十勝沖地震であったが、そのコサイスマック変動は、興味深いことにさらに沈降を増加させるセンスのステップ状のものであった。その後の余効変動によって、この沈降の幾分かは、解消されるかもしれないとも、以前は考えていたが、その後8年間経過しても、その兆候はほとんどなく、依然として、この領域は現在でも沈降を続けており、GPS結果からは、その沈降速度は年数mm程度であると見積もることができる。

このように、この地域ではGPS連続観測開始以来、大きな沈降が継続している。この沈降が、このまま未来にわたって継続するのか、それとも、例えば海溝型地震発生時のようなプロセスを経てリバウンドするのかは、重要な地学的な設問である。一方、この領域の近傍には、過去に巨大なカルデラ噴火を発生させた支笏カルデラおよびクッ

タラカルデラも控えており、この沈降は火山性のものであるのかもしれない。いずれにしても、この地域の防災を考える上でも、看過することのできない、不気味な現象であり、地震と火山の両方を視野に入れた統一的な視点で取り組むべき課題であると筆者には思える。

3-2 2008年岩手宮城内陸地震と栗駒山活動の関連性

2008年岩手・宮城内陸地震の発生した地域近傍では、2003年3月、活火山でもある栗駒山南東麓に国土地理院のGEONET点が設置され、連続観測が開始された。ところが、この観測点は、2004年の初めころから、隆起を伴いながら南西方向に動き始め、その動きは、若干の消長を伴いながらもほぼ一定速度で2008年の地震発生まで続いた(村上, 2008)。当時、栗駒山の山体付近には、GPS連続観測点はこの一点しかなかったが、火山との相対位置関係から考えて、変動の方向は山体が膨張していると考えて矛盾のないものであった。

この点は、一般的に地盤が弱いと考えられる火山地域の山麓、しかも傾斜地に設置されているので、変動の原因の特定には、慎重さが求められた。国土地理院の専門家が現地へ派遣され、地滑りの発生や、架台または観測タワーの傾斜など、考えられる限りの不安定要因について、徹底的な探索がなされたが、設置上の問題に帰するような現地性の原因は見出されなかった。特に、地滑りや設置箇所が法面に近い場合に発生するゆっくりした滑落など、重力に起因する上下方向の位置変化は、通常、沈降方向に発生する可能性が高いため、隆起を伴っている今回の変動の原因は、より深部に起源をもつ地球力学的な要因を反映している可能性が高いと考えられた。なかでも、火山への近接性から、何らかの火山活動に関連している可能性が高いと判断された。このため、国土地理院からは、栗駒山の膨張が示唆されるとする報告が、火山噴火予知連に数回なされている。2008年の地震発生までに蓄積した変動の総量は水平および上下ともに3cm程度に達しており、通常の観測誤差の範囲を十分超えていた。

この変動がgeodynamicな起源によるものである場合、その原因として2つの可能性が考えられる。1つめは栗駒山直下のマグマ溜まりの膨張である。栗駒山直下8kmに点力源を仮定し、 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 程度の膨張があったと考えると、GPS点で観測された水平および上下変動を再現できる。この膨張が惹起する応力変化(クーロン破壊関数)は、地震の破壊開始点において、破壊を促進する方向であることが興味深い。このような膨張が実際に発生していたとすると、1998年の岩手県南部地震に関してNishimura et al. (2001)が示唆した岩手山の西側の火山性膨張による地震の誘発現象に類似している。

もうひとつの説明は、震源断層面上の延性領域でゆっくり滑りが本震前に発生した可能性である。国土地理院が測地学データから決定した本震の断層面は栗駒山の下部にも伸びており、周囲に比べて火山の地下は高温であることを考えると、その場所の岩石は延性的で、本震発生前に徐々にその領域がすべりはじめ、脆性領域にまで滑りが達した時に本震が発生したという仮説も成り立ちうるであろう。実際、栗駒火山の地下8km付近で $8 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ の広がりを持つ領域が40cmの逆断層の滑りを起こしたと考えると、GPS点で観測された地殻変動を再現可能である。

地震前の地殻変動データは、この点におけるものに限られるので、以上のような興味深いシナリオが実際に発生していたかどうかをこのデータだけから特定することは困難である。しかし、この例でも明らかのように、もともと火山地域は地震の破壊開始に至るメカニズムを探求する観点からも、非常に興味深い領域である。火山は応力変化源として極めて有効に作用するし、火山の近傍には活断層が分布する事例が多い。火山周辺は、単に火山活動のみならず地震現象を理解するための格好の対象領域とも言える。GEONETは25km間隔で全国を覆っているが、火山と地震間の動的相互作用をとらえる観点からは、火山周辺の現状の密度は不十分であることを強調したい。火山周辺の観測密度を向上させることによって、地震現象の理解も深まることが期待される。

4. 具体的方策

これまで、筆者が興味を抱いている各種の未解決の問題に対して、地震火山の連携研究が効力を発揮してくれるのではないかと期待を述べてきた。その具体化のための方策に関しても筆者の考えを簡単に紹介させていただくことにする。

4-1 火山近傍で内陸地震を迎え撃つ戦略的観測

最近の約15年間でも、岩手山、栗駒山の活火山近傍で発生したM6クラスの内陸地震は、火山活動に刺激されて発生した可能性がある。今後も同様の発生確率で類似の現象が発生するとすれば、活発な活断層の近傍にある火山の活動が活発化した場合、大きめの内陸地震が発生する確率は通常よりは高まると考えてよいであろう。特に地下のマグマ活動によって周辺応力が変化したことが確実な場合は、地震、地殻変動、地球電磁気、地球化学など、総合的かつ稠密な観測を一定期間集中的に行うことが効果的と考えられる。もし、その期間中に大きめの内陸地震が発生すれば、多様なデータの効率的な取得が可能となる。このようなデータが獲得できれば内陸地震の発生機構の理解を飛躍的に進めるであろう。

4-2 リージョナルテクトニクス理解のための協同作業

我が国は、プレート沈み込みによって、地震火山現象が複合的に発生している。地震活動にしても地殻変動にしても、少し領域を広げて考察し始めると、両方の現象が重なっており、結局両方を理解しないと、全体を理解したことにはならない。例えば、地殻変動において、北海道南西部で継続する地殻変動の例を既に挙げたが、同様の事情は、富士山、箱根及び伊豆東部を含む伊豆半島周辺、阿蘇カルデラの沈降と周辺の地溝帯との関連等でも、見て取ることができる。これらの領域では、プレートの潜り込みと付随するテクトニック変動、複数の火山のマグマシステム、様々な地震の地震時変動や余効変動等の地学現象が複合し

て進行しており、地震現象や火山現象のそれぞれを深く理解するためにも、両者を統合した視点で考察する姿勢が重要であり、そのためにも両コミュニティが共同した議論の場を持つことが期待される。また、そのことによって、南海トラフで発生する巨大地震と富士山噴火との関連性等、地震と火山現象の興味深い関連性についても、理解が進むのではないだろうか。

4-3 防災に貢献する予測のための協同作業

三つめは、より、研究という視点からやや離れるかもしれないが、より、実務的な側面を持つ課題についても述べておく。現在は、大きな地殻活動現象が発生した場合、その評価や見通しについて専門的な検討を行う場として、地震活動については、地震調査研究推進本部地震調査委員会が、また、火山活動については火山噴火予知連絡会が、主としてその任にあっている。ところが、地殻活動には、当然、地震と火山活動が密接に関連しながら進行する現象があり、例えば、伊豆東部火山群では1970年代以降、一時的な中断はあったが、現在に至るまでマグマ貫入に伴う群発地震活動が数年おきに発生している。幸い、1989年の手石海丘噴火以降は、マグマの噴出に至る活動は発生していないが、将来、万一、噴火に繋がるような現象に発展した場合、今の体制のように、地震現象と火山現象を別々に評価・検討する体制で立ち向かわざるを得ないとすれば、国民の期待に応えるだけの迅速な対応がとれるか、若干の危惧を持つ。両方の予知計画が統合されたことを機会に、国民の安全・安心の実現に向けた防災的な取り組みにおいても、両コミュニティが定常的に交流を持ち、共同作業を進める機会が増えることが望ましい。また、このことによって、両方の研究の推進にとっても、必ずプラスの効果が生じると考える。

5. まとめ

地震と火山現象のそれぞれを深く理解するためには、両者を対象とする研究の密接な共同作業が

必要であることについて、筆者が興味を抱いている幾つかの未解決の問題を例に取りながら、考察した。また、それらの問題解決に有効と考える具体的方策について、筆者の考えの一端を述べた。

参考文献

- 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, 57, 209-231.
- 村上 亮 (2008) : 2008 年岩手宮城内陸地震前に発生していた地殻変動とその意義, 日本測地学会 2008 秋季大会講演要旨.
- Nishimura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, M. Tobita, H. Nakagawa, T. Sagiya, and T. Tada (2001) : The M6.1 earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry, Geophys. Res. Lett., 28,

635-638.

小山真人 (2002) : 火山で生じる異常現象と近隣地域で起きる大地震の関連性—その事例とメカニズムにかんするレビュー—. 地学雑誌, 111, 222-232.

村上 亮

[むらかみ まこと]

現職 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教授
理学博士

略歴 東京大学理学部物理学科卒, 国土地理院入職, 地理地殻活動研究センター長を経て現職

研究分野 火山物理学, 測地学, リモートセンシング, 防災学

著書 「現代測地学」(日本測地学会, 共著), 「火山の辞典」(朝倉書店, 共著)



海溝型地震予知の展望

松澤 暢

1. はじめに

「地震が起こる場所はあらかじめ決まっている。」こう述べることすら躊躇させるような雰囲気であった1990年代の状況は、大地震の震源域の解析や小繰り返し地震の発見に基づく2000年前後のアスペリティ・モデルの再評価によって打開された。少なくとも、「プレート境界上では、地震が起こる場所はあらかじめ決まっている」、というのは、「内陸では上部地殻内で地震が発生する」というのと同程度の確からしさを我々は手に入れることができた。下部地殻でも例外的に低周波地震を発生させるところがあるのと同様に、プレート境界においても、例外的に、あるときは地震を生じ、あるときはスローイベントが生じているような場所が存在していることに留意する必要があるが、この10年余りの状況の変化は劇的なものであった。

最近では、「釜石沖の地震は長期予知できる」と述べても、「周期性がある現象は予知できて当たり前で、そんなのは予知とは言わないでしょう」と言われることすらある。「地震発生に周期性がある」と主張しても「地震活動は無数にあるのだから、偶然、何個かの地震が等時間間隔で発生しているように見えることはありうる」と批判されていた時代（実際、釜石沖の最初の論文は、このように査読者に言われて却下されてしまった）が嘘のようである。

しかし、「すべての大地震は規則的に発生しているのか？」と問われれば、「そうではない」と返答せざるをえない。アスペリティ・モデルが正しいとしても、周期性や規模の再現性を乱す様々な作用があり、それをすべて明らかにして、初めて、大地震の予測は過去の履歴を元にした単純な予測

から次のステップに進めるはずである。

本稿は、このような考え方にに基づき、いかにしたら、海溝型地震の予測を高度化できるかについて議論する。なお海溝型地震と呼ぶ際には、必ずしもプレート境界型地震と限るわけではないと思うが、ここでは沈み込み帯でのプレート境界型地震のみを取り上げることにする。

2. 場所・規模・時期・破壊様式の予測

地震予知の3要素としては、場所と規模と時期の予測が挙げられるが、それ以外に、破壊様式の予測も重要である。将来発生するイベントが、津波地震的になるのか、逆に高周波が卓越するのか、それともスローイベントで終わるのかによって、被害の様相はまったく異なってしまうからである。さらに強震動には破壊の指向性が大きな影響を及ぼすため、主破壊域の位置のみならず、破壊の開始点も予測できることが望ましい。逆に言えば、時期の予測が困難であっても、上記の予測の精度が向上すれば、適切な対策を事前に講じることができるため、破壊様式を事前に予測することは極めて重要となる。

アスペリティ・モデルでプレート境界の地震がかなり説明できることがわかってきたので、基本的に過去の履歴が明らかになれば、位置と規模の予測はある程度は可能である。破壊様式については、間隙水圧の時間変化があると、毎回まったく同じ破壊様式というわけにはいかないが、かなりの地域においては、ある程度は再現性があると考えてよいと思われる。少なくとも、釜石沖の繰り返し地震のように、同規模以上のアスペリティが近傍にない場合には、ほとんど同じ破壊様式で地震は発生すると考えられる。同規模以上のアスペリティが近傍にあると、時には連動破壊、時には

単独破壊して様相が異なってくるが、現時点の我々の実力として、マグニチュードにして±0.3程度の不確定性で評価は可能と考えられる。たとえば宮城県沖については、 $M 7.5 \pm 0.3$ ($M 7.2 \sim 7.8$)と考えるおけば、2005年のような地震も、隣と連動したような巨大地震も範囲に含まれてくる。

もちろん、 $M 7.2$ と $M 7.8$ では被害はまったく異なるので、予測の幅を狭めることが重要なことは言うまでもないが、1990年代に議論されたような、小地震から巨大地震まで連続的に変化するというようなものではなく、あくまでも有限の個数のアスペリティの組み合わせを評価すれば良いので、対策は立てやすいはずである。

破壊の開始点については、東北地方では海溝側に位置することが多いことが経験的に知られている。その理由はまだ完全には明らかになっていないが、この領域で地震カップリング率が低いことが一番の理由である可能性が高い(Kato and Seno, 2003)。もし、摩擦面の性質や間隙水圧がほとんど時間変化しないのであれば、毎回、同じような場所から破壊が始まることが期待されるため、それに立脚した強震動予測はそれなりに根拠があると考えられる。

時期については、原理的には地震の1サイクルにわたって、すべり欠損をモニターして、前回の地震と同程度のすべり欠損に近づけば、そろそろ次の地震は近い、といった中期予測は可能となるはずである。ただし、現在の観測では、このすべり欠損のモニタリングは不十分である。これについては、次節で述べる。

短期予知について、今のところ決定的な方法は無いが、東南海・南海については、アスペリティにおける固着のはがれがGPSや海底地殻変動観測から検知できれば、時期の範囲を絞り込める可能性がある。さらに、この固着のはがれに伴い、深部低周波微動や超低周波地震の移動速度が速まり、また微動の再来間隔も短くなることが期待されており(Ariyoshi et al., 2010)、地殻変動観測のみならず、深部低周波微動や超低周波地震のモニタリングも重要と考えられる。

3. すべり欠損の推定の高度化

すべり欠損については、現状では、GPSによる推定がもっとも信頼度が高い。しかしながら、GPS観測点は基本的に陸上にしかないため、海底下のプレート境界のすべり欠損の推定は、誤差が大きくなるだけでなく、バイアスが入りやすいと考えられる。

観測点から離れた領域を推定する以上、誤差を低減させることは困難であるが、真実に近い構造ですべり欠損を推定すればバイアスは低減できると考えられる。現状では、均質半無限媒質を仮定することが多いが、もっともらしい3次元粘弾性構造を使用することがバイアス低減に重要となる。また、長期にわたる滑り欠損の推定においては、ボックスリップモデルで計算すること自体がバイアスを生じさせるので、今後は有限要素法等を用いて広域の3次元粘弾性構造をモデリングして解析することが必要である。

すべり欠損の推定の誤差を低減させるには、真上の観測点を増やすことが不可欠であり、海底におけるGPS-音響結合式の海底地殻変動観測点を増やすことが重要となる。ただし、均質半無限媒質を仮定した解析において、海底の観測点をそのまま入れると誤差が大きくなると考えられるため、ここでも3次元粘弾性構造を考慮した解析が必要不可欠となると考えられる。

4. アスペリティ・モデルの高度化

アスペリティ・モデルの再評価については、松澤(2009)に詳しく述べられているので、ここではアスペリティ・モデルの高度化に焦点を置いて議論する。

オリジナルのアスペリティ・モデルではアスペリティは強度の大きな領域であり、新しいモデルでは、地震性すべりが卓越している領域ということになる。しかし、どちらの定義においても、アスペリティ域と非アスペリティ域の境界はそれほど明確ではない。強度にしても、最大すべり速度

にしても、プレート境界上で連続的に変化していると考えるのが自然である。

にもかかわらず、釜石沖のように、震源断層の大きさが毎回同一の地震が発生するということは、プレート境界の性質が、比較的狭い範囲で急激に変化していることを示唆する。釜石沖のアスペリティのサイズは1 km 程度なので、100 m 程度の空間スケールで、摩擦特性が急激に変化していることになる。温度構造がそれほど急激に変わるとは考えられず、また、5年半程度の間隔で断層が破壊されていることを考えると、間隙水圧が空間的に急激に異なっているということも考えにくい。現状では、プレート境界に存在する物質に不均質性がある、ということが一番考え易い。たとえば、アスペリティは昔の海山の名残でプレート境界を挟んで固い岩石が接しているのに対して、非アスペリティ域では堆積岩が接していることが考えられる。

しかし、規則性が高い釜石沖の地震群を生み出すアスペリティの中ですら、一回り小さな繰り返し地震が発生していることが明らかになっている (Uchida et al., 2007)。このことは、釜石沖の地震群といえども、それほどプレート境界は単純ではないことを意味する。このような釜石沖のアスペリティの階層構造の原因はまだ完全には明らかになっていないが、Hori and Miyazaki (2010) は、摩擦パラメータの一つである特徴的すべり量 (新たな状態に遷移するために必要なすべり量) の違いで、この階層構造をある程度説明できることを示している。

このように、プレート境界型地震を深く理解するためには、アスペリティ・モデルを摩擦構成則の言葉で書き直して (たとえば, Scholz, 1990; Boatwright and Cocco, 1996), 観測された事象が数値シミュレーションで再現できるかどうかを確かめることが必要となる。単純化されたアスペリティ・モデルでは、アスペリティとそれ以外の領域が、強度やすべり速度の違いで二元論的に説明されているが、速度-状態依存摩擦構成則ではもっと話は複雑になる。古典的摩擦則では、摩擦パラメータは静止摩擦係数と動摩擦係数の2つだ

けだが、速度-状態依存摩擦構成則では、摩擦係数に相当するパラメータ a と b 以外に、特徴的すべり量が前述のとおり大きな役割を果たす。

摩擦応力は摩擦係数に有効法線応力を掛けたものになるので、摩擦パラメータのみならず有効法線応力の不均質性も考慮する必要がある。プレート境界では、間隙水圧が極めて大きいと考えられる (たとえば, Ariyoshi et al., 2007) が、もしこの間隙水圧が時間変化すれば、時期によって破壊の様相は極めて異なることになる (Seno, 2003)。また、間隙水圧が空間的に不均一であれば、それは摩擦パラメータに不均質性があるのと同様の効果をもたらす。

現在の摩擦構成則に基づくシミュレーションでは、基本的に均質弾性媒質を用いて、断層面での摩擦パラメータと有効法線応力に不均質性を与えているのがほとんどである。後者の有効法線応力の不均質性については、まだまだ十分な検討が行われているとは言えない。 $a-b$ が負で不安定すべりを起こせるよう領域が、有効法線応力が減少すれば条件付き安定領域となり、通常の地震は起こしにくくなるといった挙動は定性的には予想されるものの、定量的に示すにはやはり数値シミュレーションを行うしかないため、今後、間隙水圧の時空間変化を考慮したシミュレーションの実施が重要である。

また、媒質の不均質性の導入も重要である。不安定すべりを起こせるかどうかは、断層面の摩擦パラメータのみならず、そのまわりの媒質の剛性率に依存する。歪エネルギーは応力と歪の積で与えられ、応力は弾性定数と歪の積で与えられるため、歪エネルギーは歪の二乗と弾性定数の積で表される。もし剛性率が極めて大きければ、歪が小さくても応力が大きくなって断層の強度を越えやすくなり、僅かに歪エネルギーが蓄積されただけで断層が滑り、結果として大きな滑りを生じさせる地震には至らないことになる。つまり「柔らかい」岩石で囲まれた断層のほうが大きな地震を起こしやすくなるという、直感とは逆の現象が起こることに注意が必要である。直感とあわないのは、「柔らかい」というのが塑性変形しやすい (応

力が解放されても変形は残ったまま) という意味ではなくて、あくまでも弾性変形しやすい(応力が解放されれば変形は解消して元に戻る) という意味であることがイメージしにくいためであろう。

また、構造の不均質を考慮する際に、長期的には、粘性緩和やプレート内の地震や変形の影響も考慮に入れなければ、実際の現象との定量的比較にはやがて限界が来ると予想される。現行のほとんどのシミュレーションでは、蓄えられた歪エネルギーは、すべてプレート境界のすべりで解消されるとしているが、非常に広域に連動して巨大な地震が生じる場合には、再来間隔が数百年程度と長くなることが考えられ、この場合には、深部の粘性緩和の影響は無視できない。

さらに、現行のシミュレーションの多くは、バックスリップモデルを用いていることに注意が必要である。バックスリップモデルを用いている限り、モデル空間の外側は定常的にすべっていると仮定したのとほぼ等価となり、大幅に計算コストを削減できて、シミュレーションを安定化できるメリットはあるものの、隣接した領域で安定すべりが生じているとは考えにくい場合や、境界面が湾曲している場合には、バックスリップモデルでは誤差が大きくなってしまうため、もう少し現実的なモデルでの計算が今後重要となっている。

さらに、現在は、準静的な取り扱いのみがなされているケースが多いが、観測結果と詳細に比較しようとする、今後は動的効果も考慮に入れたシミュレーションが必要となってくる。

以上、ユーザーサイドから見た「要望」をまとめたが、現シミュレーションについての専門家による詳しい展望は、本特集号の平原氏の論文を参照されたい。

5. 構造推定の高度化

地震波速度トモグラフィの結果を見ると、高速度の領域で大きなすべりが生じていることが多い(例えば、Eberhart-Phillips and Michael, 1998; Yamamoto et al., 2006; Okada et al., 2007)。こ

のことは、アスペリティは断層面の性質のみならず、媒質の性質でも規定されている可能性を示唆する。

地震波速度が高速な場所では脆性変形が卓越していて、低速度域では粘塑性変形が卓越していると考えれば上記の対応関係は説明できるが、前述の歪エネルギーの蓄積という観点からの評価とは逆センスとなる。このため、低速度域が得られたとしても、それが粘塑性的振る舞いをしやすい領域なのか弾性的な領域なのかによって、解釈はまったく逆となるため、低速度域の性質を詳細に調べることが重要となる。粘塑性的媒質では地震波の減衰が大きいことが期待されるため、低速度域の解釈のためには、地震波速度構造のみならず減衰構造を求めることが有効であろう。構造探査によって弾性的性質と粘塑性的性質の両方が明らかになれば、歪エネルギーを蓄積しやすい場所や応力集中を起ししやすい場所が明らかになり、摩擦パラメータとは別の情報として、アスペリティの本質に迫れる可能性がある。

また、構造に時間変化が生じているとすれば、それは間隙水圧の変化というのが一番考えやすい。特にプレート境界からの反射波の時間変化を丹念に調べれば、間隙水圧の変化を捉えられる可能性がある。アスペリティ・モデルが正しいとしても、時期の予測の精度を上げるのは容易ではないが、間隙水圧の変化が、たとえばアクロス(Yamaoka et al., 2001)のような構造モニタリングから捉えられれば、大地震の発生が迫っていることを推定できる可能性がある。また、福島県沖のように、普段はM7の地震すら起こさないところで1938年の地震のようにまれにM7.5の地震が生じるのは、間隙水圧の時間変化を考えざるを得ず、このような場所においては特にプレート境界の間隙水圧のモニタリングが重要である。

6. おわりに

アスペリティ・モデルの発展により、プレート境界型地震については、過去の履歴から将来を予測することの根拠が得られた。しかしながら、地

震の1サイクルを十分な精度でモニターしていない限り、現状以上に予測の幅を狭めるのは困難である。これを克服するためには、一刻も早く、海底地殻変動観測網を整備することが重要である。これによって次の地震に至る過程を明らかにして、初めて、その次の地震の予測に役立てることができる。この意味で、地震予知研究というのは本質的に長期の観測を必要としている学問である。今後、観測データの整備とともに、解析手法についても高度化し、準リアルタイムでプレート境界の状態を正しく把握できるような日が早く来ることを願っている。

参考文献

- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2007, The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic slip propagation on a subduction plate boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 256, 136-146, doi : 10.1016/j.epsl.2007.01.019.
- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J.-P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth Planets Space*, in press.
- Boatwright, J., and M. Cocco, 1996, Frictional constraints on crustal faulting, *J. Geophys. Res.*, 101, 13895-13909.
- Eberhart-Phillips, D., and A. J. Michael, 1998, Seismotectonics of the Loma Prieta, California, region determined from three-dimensional V_p , V_p/V_s , and seismicity, *J. Geophys. Res.*, 103, 21099-21120.
- Hori, T., and S. Miyazaki, 2010, Hierarchical asperity model for multiscale characteristic earthquakes: A numerical study for the off-Kamaishi earthquake sequence in the NE Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10304, doi : 10.1029/2010GL042669.
- Kato, N., and T. Seno, 2003, Hypocenter depths of large interplate earthquakes and their relation to seismic coupling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 210, 53-63, doi : 10.1016/S0012-821X(03)00141-9.
- 松澤 暢, 2009, プレート境界地震とアスペリティ・モデル, *地震* 2, 61, S347-S355.
- Okada, T., A. Hasegawa, J. Suganomata, N. Umino, H. Zhang, and C. Thurber, 2007, Imaging the heterogeneous source area of the 2003 M 6.4 northern Miyagi earthquake, NE Japan, by double-difference tomography, *Tectonophysics*, 430, 67-81.
- Scholz, C.H., 1990, *The mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge University Press, 439 pp.
- Seno, T., 2003, Fractal asperities, invasion of barriers, and interplate earthquakes, *Earth Planets Space*, 55, 649-665.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W.L. Ellsworth, K. Imanishi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2007, Source parameters of a M 4.8 and its accompanying repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan: Implications for the hierarchical structure of asperities and earthquake cycle, *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi : 10.1029/2007GL031263.
- Yamamoto, Y., R. Hino, M. Nishino, T. Yamada, T. Kanazawa, T. Hashimoto, and G. Aoki, 2006, Three-dimensional seismic velocity structure around the focal area of the 1978 Miyagi-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi : 10.1029/2005GL025619.
- Yamaoka, K., T. Kunitomo, K. Miyakawa, K. Kobayashi, and M. Kumazawa, 2001, A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system, *Island Arc*, 10, 336-347, doi : 10.1111/j.1440-1738.2001.00332.x.

松澤 暢

[まつざわ とおる]

現職 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター教授
東北大学理学博士

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, 東京大学地震研究所助教授, 東北大学准教授等を経て現職。

研究分野 地震学, 特に地震発生に至る過程



緊急地震速報と巨大地震

堀内茂木

1. はじめに

地震波には、直達波と表面波がある。P波、S波は直達波で、それぞれの伝播速度は、約6 km/s、3.5 km/sである。P波の平均的振幅は、S波の約1/5である。表面波は、S波の後から到着し、長周期地震動の原因となる波である。地震被害の大半は、S波や表面波で引き起こされることから、P波到着直後に配信される緊急地震速報により、地震被害を軽減できる可能性がある。

緊急地震速報 (Earthquake Early Warning) の開発は、海外ではメキシコ (Espinosa-Aranda et al., 1995)、台湾 (Wu and Teng, 2002)、アメリカ (Kanamori et al., 1997, Allen and Kanamori, 2003) 等で行われている。日本では Odaka et al. (2004)、Horiuchi et al. (2005) によるシステムが開発され、2007年10月より世界に先駆け、緊急地震速報の本運用が始められた。

現在配信された緊急地震速報は、情報が間に合わない、誤報が多い、等の苦情が多く、緊急地震速報が開始された当初の期待と熱気が小さくなりつつあるようにも思われる。本稿では、現在の緊急地震速報の概要を紹介し、緊急地震速報が、東海、東南海、南海地震等の巨大地震の防災対策に極めて有効であることについて報告する。

2. 緊急地震速報の仕組みと課題

1995年兵庫県南部地震発生後、防災科学技術研究所は、日本全域、約800点からなる、高感度観測網 (Hi-net) を整備した。緊急地震速報には、この観測網と、気象庁の約観測点200点、計約1,000点の地震観測点のデータが使われている。観測点の平均的間隔は約25 kmである。

地震が発生すると、緊急地震速報のための自動解析システムは、地震観測データを自動解析し、震源位置とマグニチュード、地震の発生時刻を求め、大きな揺れが想定される場合には、緊急地震速報が配信される。地震発生からの時間経過とともに、P波を検出する観測点が増え、震源やマグニチュード等の決定精度は高くなる。観測点数が少ない場合は、精度が低く、ノイズと地震との区別が難しくなる。しかし、多くの観測点にP波が届くのを待つと、情報配信のタイミングが遅れることになる。緊急地震速報の自動解析システムには、少ない観測点の、少ない測定区間のデータのみに、信頼性の高い解を求めることが要求される。

Horiuchi et al. (2005) は着未着法を用いた震源決定法を開発した。これは、P波が観測されなかった観測点で、P波が観測されてはいけないという条件を不等式で表し、解を数値的に求める方法である。一般に、別の地震やノイズのデータを含めて、震源決定すると、計算される解は、真の解から大きくずれる。着未着法の優れた点は、複数の地震やノイズが混入しても、不等式を利用して、それを正確に除去できる点である。

震度の推定には、気象庁マグニチュードが用いられているが、推定誤差がやや大きいという課題がある。気象庁マグニチュードは、変位の最大振幅で定義されている。モーメントマグニチュードは、変位の積分値で定義されており、地震の断層の大きさを表す指標として適していると考えられている。我々が開発したシステムでは、モーメントマグニチュード (根岸他, 2002) を求めている。しかし、モーメントマグニチュードには、短い時間のデータを用いると震度を過小評価するという欠陥があった。

震度は加速度振幅で定義されていることから、気象庁マグニチュードを用いる場合は、変位振幅

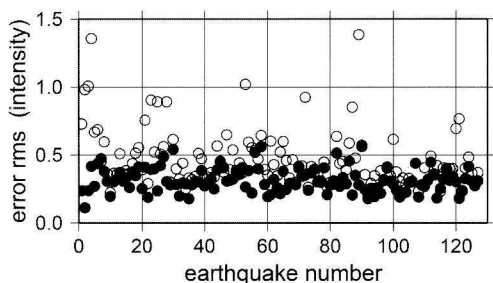


図1 震度マグニチュードを用いる場合の震度の推定誤差(●)と気象庁マグニチュードを用いる場合の誤差(○)との比較。

を測定して、加速度を予測することであるとも解釈できる。観測点が一点の場合、気象庁マグニチュードから計算される最大変位は、理論値と一致するが、計算される震度は、一致するとは限らない。なぜなら、地震波の周波数は一定でなく、地震により、高い周波数が卓越するものや、低い周波数が卓越するものがあるからである。変位振幅が同じでも、周波数が3倍変わると、加速度振幅は9倍変わり、震度は約2変わることになる。

山本他(2007)は、加速度の予測には、変位ではなく、加速度を用いるべきであると指摘し、震度マグニチュード導入の提案を行った。図1に、震度マグニチュードによる震度の推定誤差と、気象庁マグニチュードによるそれとの比較を示す。ほぼ全ての地震について、震度マグニチュードによる推定誤差は、既往の手法による推定誤差に比べ小さくなっている。推定誤差の平均的減少率は、22%である。

3. ホームサイズモメータ(家庭用地震計)普及計画

地震調査研究には、高精度の地震計が必要であるが、緊急地震速報用には、高精度の地震計は必要としない。しかし、観測点数が少ないと、地震検出に時間がかかり、情報配信のタイミングが遅れることになる。近年、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)型の安価な加速度計が製作されており、パソコンやゲーム機器等に広く使われている。Horiuchi et al.(2009)は、緊急地震

速報の受信装置に安価な簡易型地震計を組み込んだホームサイズモメータの開発を行った。緊急地震速報のユーザー数は、地震観測点に比べ、圧倒的に多い。簡易型地震計が組み込まれた受信端末が開発され、その観測データがリアルタイムで利用できる仕組みができれば、観測点数は飛躍的に増え、直下型地震の場合に、情報配信が間に合わないという課題は大幅に改善される。

通常、地震計は人工的ノイズが少ない場所に設置されている。ホームサイズモメータは、屋内に設置されることが前提となっている。室内では、子供が近くで飛び跳ねる等のことが想定され、屋外での観測に比べ、3桁-5桁大きなノイズが入ると想定される。ホームサイズモメータは、サンプリング間隔を、従来の地震観測の5倍の500 Hzにし、地震波とノイズとを正確に区別するアルゴリズムを組み込むことで、ノイズで誤動作することがないように設計されている。分解能は、0.3 gal程度である。振動台による試験結果では、震度の測定誤差の二乗平均平方根は0.04であった。

ホームサイズモメータは(株)エイツーが2007年度に科学技術振興機構の独創モデル化事業で、防災科学技術研究所と共同開発したものであり、現在1500ヶ所に設置されている(図2)。ホームサイズモメータの観測網が密な地域で発生する地震の場合は、気象庁の緊急地震速報が配信される数秒前に地震発生が検出されている。

日本以外の国では、高密度の地震観測網が整備されていない。緊急地震速報の本格的運用は行われていない。最近、中国等では、簡易型地震計を、携帯電話の基地局に設置する方式での観測網の整備を進めている。携帯電話の基地局には、商用電源と高速のインターネット回線が整備され、ホームサイズモメータは安価で、かつ、データ伝送の遅延時間も0.1秒程度である。このため、観測点の設置費用は、地震調査研究用の観測網の設置費に比べ1/100以下であり、データの遅延時間も小さい。近い将来、中国等で、日本以上に高密度の緊急地震速報のための地震観測網が整備される可能性があると思われる。

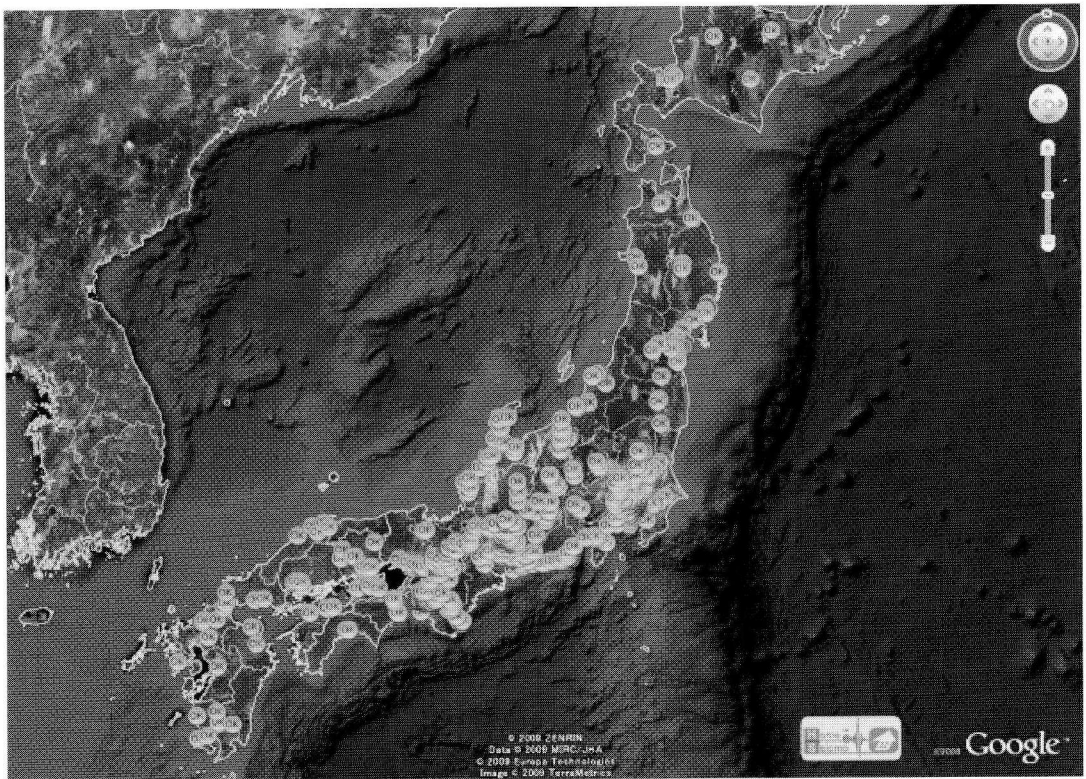


図 2 ホームサイズメーターの分布.

4. 巨大地震と猶予時間

東海から四国にかけての領域では、マグニチュード 8 クラスの地震が、今後 30 年間に、約 50% の確率で発生すると指摘されている。この地震は、フィリピン海プレートの、年 4~6 cm の割合での沈み込みに伴う地震であり、発生時期のずれはあっても、将来 100% の確率で発生する地震である。最悪のシナリオは、3つの地震が同時に発生し、東海から四国にかけての 700 km の領域を震源とする巨大地震が発生することである。これらの地震発生による被害は国家予算 1 年分に匹敵すると指摘されている。

2008 年 5 月 12 日、マグニチュード 7.9 の四川大地震が発生した。この地震による死者は 87,000 人で、被害総額は 12 兆円である。この地震の断層の長さは 280 km である。

地震のエネルギーは、断層運動により放出され

るが、断層運動が拡大する速度は S 波速度の約 80% の、2.8 km/s 前後であることが知られている。四川大地震では、地震の断層運動開始から、終了までの時間は約 100 秒間であった。

図 3 は、四川大地震の強震計の記録の中で、日本の気象庁による震度が 4.5 以上 (5 弱以上) の記録の 3 成分加速度波形の絶対振幅をプロットしたものである。図では、震度が 3 以上になった時刻以降を、色を変えて示している。P 波到着時刻は 2 秒に揃えられている。地震が発生した場所から遠く離れた観測点では、P 波初動付近の振幅は極端に小さく、時間の経過とともに大きくなっている。

図 4 は、この地震の、P 波到着から震度 3 になるまでの時間をプロットしたものである。大部分の観測点での P 波到着から、震度 3 の揺れが始まるまでの時間は、20~50 秒間である。一般に、震度 3 より小さい揺れだと、被害はなく、避難行動もできると思われる。従って、微弱な P 波が到着してから、大きな揺れが始まるまでの猶予時間が

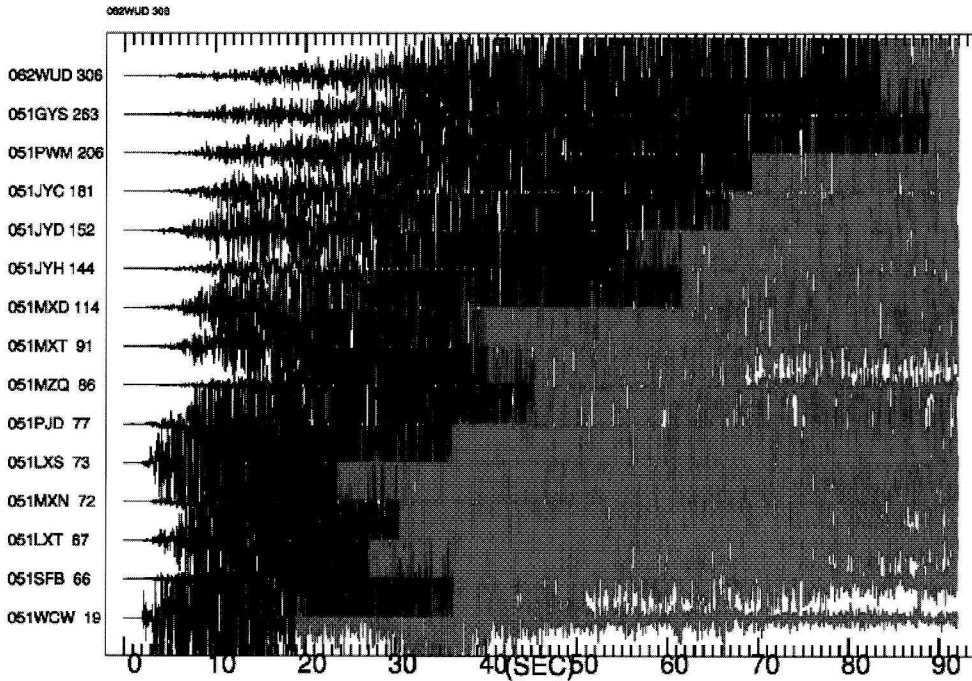


図3 2008年中国四川大地震の波形記録. 日本の気象庁定義による震度5弱以上となった観測点の3成分波形の振幅の絶対値がプロットされている. 震度3以上の揺れ到着以降は, 色を変えて表示されている. 巨大地震の場合は, 断層が長く, 大きな地震エネルギーが放出されるまでの時間は長い. このため, 大部分の地域で, P波が到着してから, 大きな揺れが到着するまでの時間は20-30秒以上と長い性質がある.

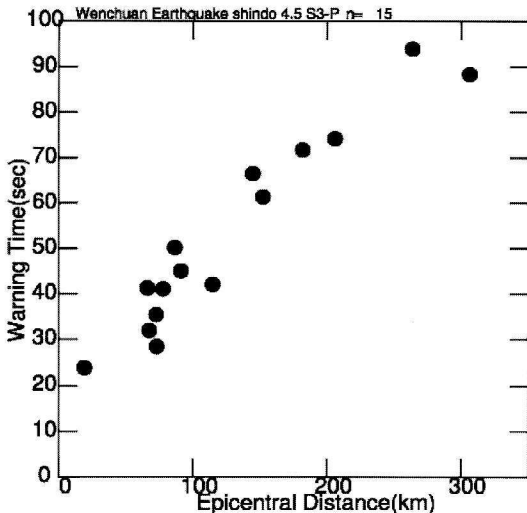


図4 中国四川省地震のP波到着時刻から震度3になるまでの時間の分布.

20~50秒間あることを示している. 緊急地震速報が整備されれば, P波到着前に情報配信できるこ

とから, 猶予時間は更に長くなる. 断層が拡大する速さは理論的に, 2.8 km/秒程度であることが知られており, 地震波は断層運動に伴って放出されるものであることから, 四川地震の猶予時間の分布の例は, 巨大地震の場合の一般的特徴であり, 特殊な例ではないと考えられる. このような巨大地震の場合, 断層が拡大する速度が2.8 km/秒程度であるため, 大部分の地域で, 猶予時間が数秒ということは, 理論的にありえないことである.

東海, 東南海, 南海地震が同時発生した場合には, 断層の長さは, 700 kmにも達する. この地震発生時の, 緊急地震速報の猶予時間は, 四川省の地震に比べ, 更に長いと見込まれる. 理由は, 震源域が海域であること, 海底地震計が, 想定震源域の中に設置されること, 緊急地震速報が整備されているからである. 数十秒の猶予時間があれば, 死者数を9割近く減らすことは十分可能であると思われる.

5. おわりに

日本では、専門家も含め、緊急地震速報は、数秒前の情報で、役に立たないとの意見が定着しつつあるように思われる。原因は、緊急地震速報が配信されるようになってから発生する地震は、マグニチュードが7前後以下で、巨大地震に比べ、断層の長さが一桁以上小さく、猶予時間が短かったからであると思われる。小さく、被害が発生しない地震は、巨大地震に比べ、圧倒的に多く発生するので、緊急地震速報の猶予時間が数秒以下であるとのイメージを払拭するのは容易ではない。しかし、このイメージを払拭できれば、緊急地震速報が有効であることは、だれでも理解できるのではないだろうか。また、緊急地震速報を用いた防災対策も大幅に進むのではと思われる。

前述のように、巨大地震の場合は、地震エネルギーが放出される時間が数10秒以上であるが、小さい地震は数秒以下である。小さい地震でも、震源に近ければ、揺れは大きい。巨大地震でも、断層運動が始まった地点から遠ければ、揺れは小さい。しかし、単独観測点の地震波形の特徴から、地震エネルギーが放出する時間を見積もり、5~10秒間程度の解析区間で、巨大地震と小地震発生とを自動的に区別するシステムの開発は原理的に可能である(堀内他, 2009)と思われる。違いが区別できれば、大きな揺れの20~30秒前に巨大地震発生中であるとの警報を出すことが可能になる。巨大地震発生を見分けるシステムを、大量販売できる目処が立てば、地震計や処理システム全てを200~300円程度のLSIにすることも可能である。将来、大きな揺れの20~30秒前に、巨大地震が発生中であるとの警報を出す火災報知器や、目覚まし時計等の開発も夢ではないと思われる。

参考文献

Allen, R.M., and H. Kanamori, 2003, The potential for earthquake early warning in southern California,

Science, 300, 786-789.

Epinosa Aranda, J., A. Jimenez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inosroza, and S. Maldonado, 1955, Mexico City seismic alert system, Seism. Res. Lett., 66, 42-53.

Horiuchi S., H. Negishi, K. Abe, A. Kamimura, and Y. Fujinawa, 2005, An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, Bull. Seism. Soc. Amer., 95, 708-718.

Horiuchi, S., Y. Horiuchi, S. Yamamoto, H. Nakamura, C. Wu, P. Rydelek, and M. Kachi, 2009, Home Seismometer for Earthquake Early Warning, Geophys. Res. Lett., 36, L00B04.

堀内茂木・堀内優子他, 2009, 巨大地震発生をリアルタイムで検出する地震センサーの開発, 日本地震学会秋期大会講演予稿集, A-21-05.

根岸弘明・堀内茂木・阿部 華, 2002, REIS (Real-time Earthquake Information System)の開発におけるマグニチュードの決定について, 日本地震学会秋期大会講演予稿集, C04.

Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake, and D. Nozaka, 2004, A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 526-532.

山本俊六・堀内茂木・中村洋光・呉 長江, 2007, 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.

Wu, Y.M., and T.L. Teng, 2002, A virtual subnetwork approach to earthquake early warning, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2008-2018.

堀内茂木

[ほりうち しげき]

現職 (株)ホームサイスマメータ代表取締役

略歴 1975年東北大学大学院博士課程中途退学。同年、東北大学理学部助手、1989年東北大学助教授、1997年防災科学技術研究所研究部長、2007年研究参事を経て、2007年、現職。

研究分野 地震学。緊急地震速報システムの開発に従事。
受賞等 緊急地震速報システムの開発で、平成18年、気象庁長官賞、つくば奨励賞、平成19年日経BP技術賞、ナイスステップな研究者2007、受賞。



日本周辺域の海底観測ネットワークの構築

金田義行

1. はじめに

西南日本沖の南海トラフ沿いで発生する東海、東南海ならびに南海地震の再来は、日本の最大級の防災課題であり、中央防災会議はそれらが同時発生した場合の経済的被害を最大で81兆円と予測している。過去3回の南海トラフの巨大地震では、3つの地震がほぼ同時発生したとされる1707年宝永地震、およそ30時間の時間差で東南海・東海地震と南海地震が連動発生した1854年安政地震、約2年の時間差で東南海地震と南海地震が連動して発生した1944年/1946年の昭和の地震というように、繰り返しの時間間隔をはじめ発生様式も多様であることが知られている。

このように発生様式の多様な南海トラフの巨大地震に対してどのように備えたらよいか？ 優先されるべき課題は、海底で地震、津波の観測監視ができるシステムを実現することである。1995年の兵庫県南部地震をきっかけとして、Hi-netやGEONET等の世界でも類を見ない広域稠密な観測網が実現した。一方、同様に重要とされた海域の観測ネットワークに関しては、観測機器の設置や維持管理が陸上と比較して難しい等の理由から、残念ながらほとんど手付かずで、気象庁の東海沖ケーブル、海洋研究開発機構の室戸沖ケーブル、釧路沖ケーブル等が挙げられるものの、広域稠密展開には程遠いものであった。しかしながら、2004年のスマトラ島沖地震やその大津波による甚大な被害を目の当たりにして、海溝型巨大地震への備えの重要性があらためて認識された。その結果、文部科学省は2006年より新たな地震研究プロジェクトとして、「地震・津波観測監視システムの構築」を開始した。この地震・津波観測監視システムは、海底での広域稠密な地震、津波

観測を実現するシステムで、略称としてDONET (Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis) と呼ばれている (図1)。

2. 海底観測システムの必要性

震源域が海陸にまたがる東海地震を除けば、東南海地震の震源域は紀伊半島沖熊野灘、南海地震の震源域は紀伊半島潮岬西方沖から日向灘に至る海域と、南海トラフ海溝型地震の震源域は広く海域に分布する。このため、地震、津波の早期検知の観点から、地震計、水圧計(津波計)を震源域直上である海域に設置することが必要で、かつ、リアルタイムのデータ伝送が可能でなければならない。また、地震発生準備直前過程を観測から捉えるためには、微小地震から地殻変動に至る広い周波数帯域での現象を精緻に稠密に観測できるセンサー群を震源域に広く展開しなければならない。

このような背景のもとで、文部科学省は、再来

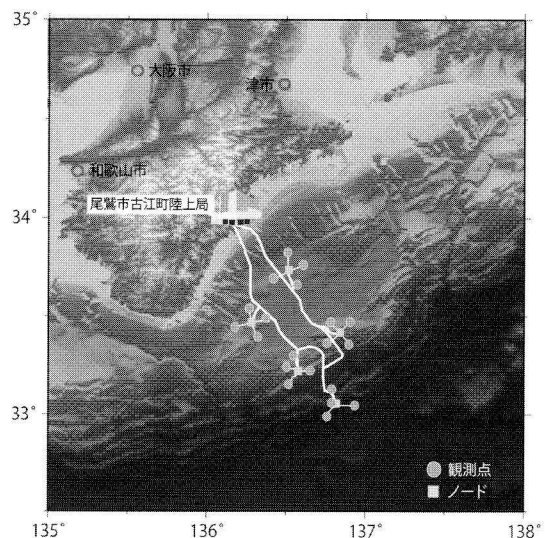


図1 DONET 概念図

が危惧される東海、東南海および南海地震の連動性評価ならびに緊急地震速報の高度化への貢献を目的として、地震・津波観測監視システムの構築という大規模プロジェクトを2006年よりスタートさせた。東南海地震の震源域である紀伊半島沖熊野灘に高精度な地震計、水圧計（津波計）等で構成された20か所の観測点を海底に設置し、広域かつ精度の高い連続観測を実現する。観測点と陸上局は海底ケーブルでつながれ、給電とデータ通信は瞬時に行われる。2010年10月現在では4点の観測点が稼働中で、2010年度末には計画した20点すべての観測点が稼働を開始する見込みである。さらに続いて、紀伊半島西方沖の南海地震震源域へ海底ネットワークを展開するプロジェクトが2010年度より開始した。これにより、紀伊半島を中心として海底観測ネットワークが整備され、東南海・南海地震とそれに伴う津波の早期検知が実現されるとともに、地震発生前後のスロイイベント等の地殻活動評価とシミュレーション研究等の総合研究により、東南海地震、南海地震の連動発生評価の高精度化がなされるものと期待される。

3. DONET システム（東南海地震の震源域に展開する海底観測システム）

1) DONET システムの構成

ここでは、現在、東南海地震の震源域である熊野灘の海底に構築中のDONETシステムの詳細について述べる。DONETは東南海地震が発生した際に地震、津波をいち早く捉え緊急地震速報の高度化に貢献する防災減災目的と、東南海地震震源域で進行する様々な現象を精緻に捉え、地震発生予測の精度を向上させる研究目的、ならびに次世代海底観測技術開発を目的としたシステムである。

DONETは、基幹ケーブル、中継器、終端装置、展張ケーブル、分岐装置、拡張用分岐装置（以下、ノード）、高精度観測センサー群からなる海底観測システムで、観測点は水深約1,900mから4,300mの深海に設置される（図2）。DONETは従来の基幹ケーブル内に観測センサーを整備するインライン式の海底ケーブルシステムではなく、基幹ケーブルから分岐装置、ノードにより観測センサー群を面的に展開できるのが特徴のひとつである。さらに基幹ケーブルの両端陸揚げによって冗

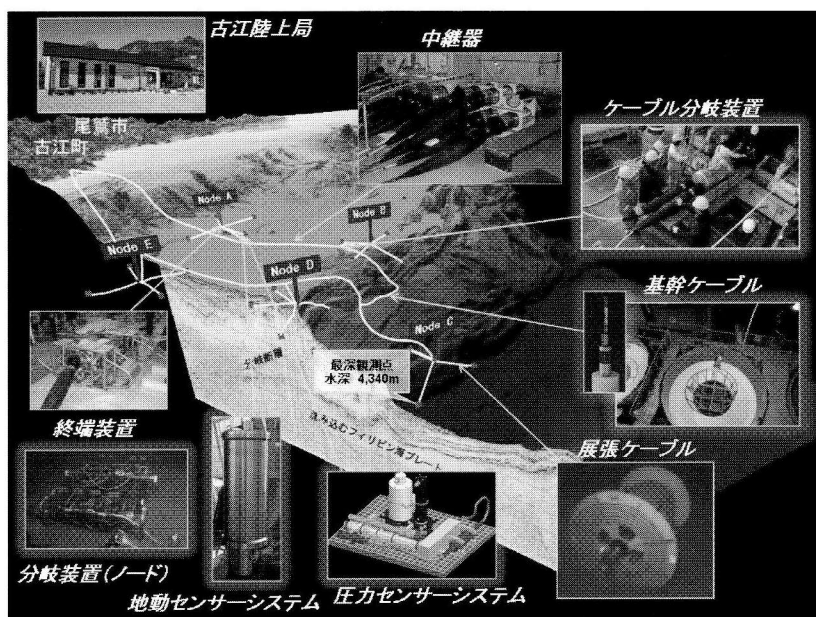


図2 海底ネットワークシステム構成

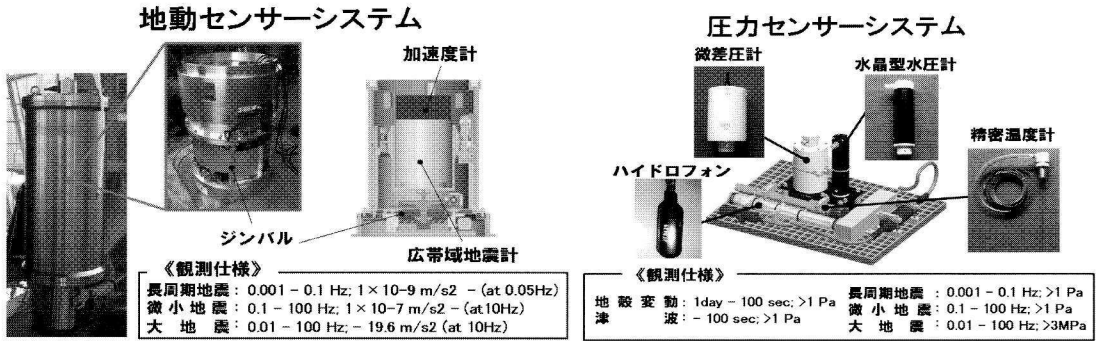


図 3 地動センサーシステムと圧力センサーシステム

長性を確保するとともに、分岐装置とノードによって拡張機能ならびに置換機能の向上も同時に実現している。ノードには観測装置展開のため8ポートを装備し、各ポートあたりの電力量は30Wである。しかし、当初は8ポートのうち、4ポートしか使用しない。残りは障害発生時や、今後の研究開発によってより高精度の観測機器が実現された際に利用される。観測機器をケーブル内部に埋め込まないため、より複雑なセンサーを装備することができ、これによって海底での広帯域観測が可能となる。さらに、海中ロボットを用いた保守が可能のため、障害発生時にも迅速に対応できるという特徴がある。DONETには地動センサーシステムと、圧力センサーシステムという2つのセンサーシステムが装備されている。地動センサーシステムは強震計、広帯域地震計からなり、圧力センサーシステムは高精度水圧計、微差圧計、ハイドロフォンならびに高精度温度計を組み合わせで作成した。地動センサーシステムについては、データ品質の向上のため、姿勢制御装置（ジンバル装置）上に強震計、広帯域地震計をセットしたパッケージを、原則として海底下数mに埋設する。圧力センサーシステムに関してはパレット上に各センサーを組み立て、海底に設置する。これらの観測センサーシステムは、震源域で発現するスロースリップならびに津波、微小地震からマグニチュード8クラスの巨大地震に至る広帯域の現象を精緻に捉えることができるように設計されている（図3）。

2) DONETに期待される地震津波被害軽減効果

DONETでは海域で地震波をキャッチすることができるとともに、沿岸に到達する前の津波を海底水圧計で直接検知することができる。これらの観測データを即時解析に取り込むことにより、さらなる避難猶予時間の確保とともに、地震動や津波高の予測精度が向上すると考えられる。

また、DONETによるリアルタイムモニタリングは、震源域で進行する地殻活動の微小な変化を明らかにする。この時々刻々と変化する状況を予測シミュレーションに同化することによって、地震発生に至るその後の地殻活動の推移を予測することが可能となる。この手法はデータ同化（図4）と呼ばれ、すでに天気予報のための数値気象予測等に広く用いられているが、地震発生予測においては同化するためのデータの不足が深刻な問題の1つである。DONETは、地震発生と、それに向けて変化する地殻活動を予測するために重要な震源域での情報を提供するシステムである。特にデータ同化に有効な連続的なデータとして、海底水圧計データが挙げられる。海底での水圧は海の深さに依存するので、その変化で海底の鉛直変位を捉えることができるためである。さらには将来、地震活動のような非連続、非定期的なデータ群を取り込むことができれば、一段の予測精度向上が期待できるだろう。また、地球シミュレータや次世代スーパーコンピューターをはじめとする大規模計算機の活用が、連続データの取得と合わせて、地震発生予測シミュレーション研究の進展の鍵である。

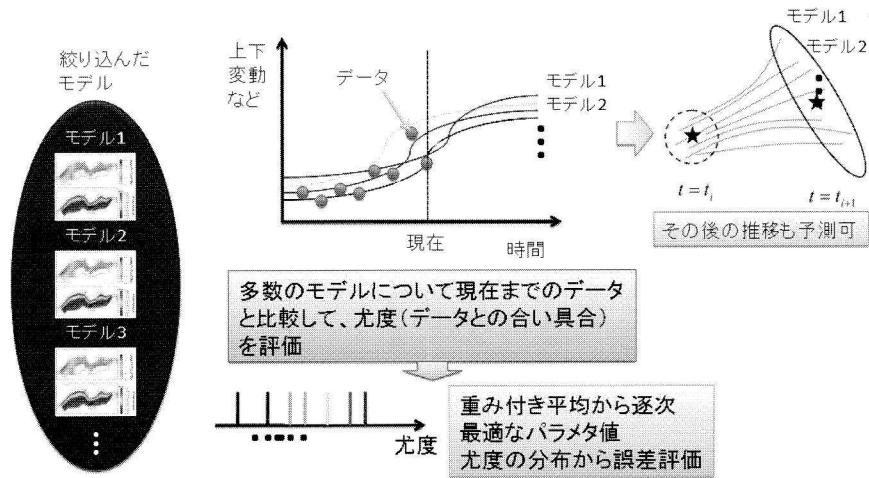


図4 地震発生予測シミュレーションにおけるデータ同化手法

3) DONETによって観測された地震、津波記録

2010年10月にすでに4点観測点が設置されている。図5は遠地地震によって励起された微小津波を海底水圧計で記録した例である。

4. DONET2システム（南海地震の震源域に展開する海底観測システム）

DONETに続いて、2010年度より、紀伊半島西方海域を対象としたDONET2の研究開発が開始された。DONET2はDONETを基礎として、さらに給電能力を高電圧システム（10kV）に改良することで、分岐を増やすことができるようになり、システムの広域展開が可能となる（図6）。DONETが東南海地震震源域の熊野灘に展開する中規模な海底観測システムであるのに対し、DONET2は7つの拡張用分岐装置（ノード）に29観測点を接続した大規模な海底観測網になる予定である。

DONETと同様に、DONET2のケーブルルート調査に先立ち、震源決定精度、スロースリップ等の地殻変動検知能力の事前検討を行った。あくまでシミュレーションの一例であることに注意しなければならないが、1944年東南海地震、1946年南海地震のように、東南海地震が先行し、南海地震が時間差連動する場合、地震発生に先行する異常な海底地殻変動が発生する可能性もある（図

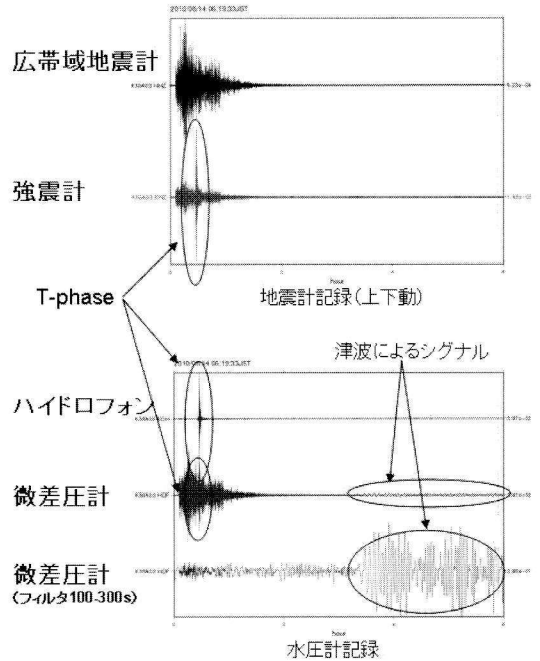


図5 2010年8月13日にマリアナ海域で発生したM6.9の地震の地震波と津波記録

7). こうした事前検討の結果にもとづいて策定したDONET2の展開案を図8に示す。この展開案は試案であり、今後の海底地形、地質の事前調査結果を踏まえて最終決定となるが、紀伊半島沖に展開するDONETとDONET2という2つの海底観測ネットワークは、緊急地震速報や津波予測の

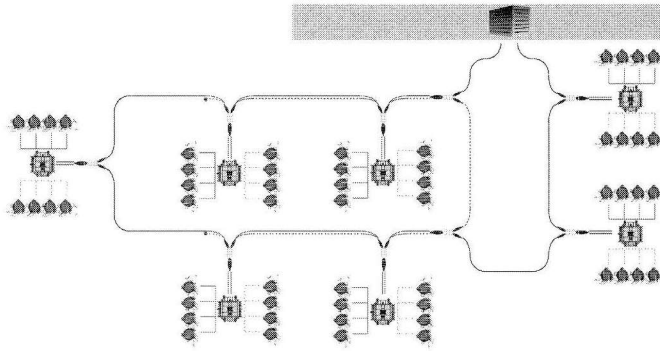


図 6 DONET2 概略図

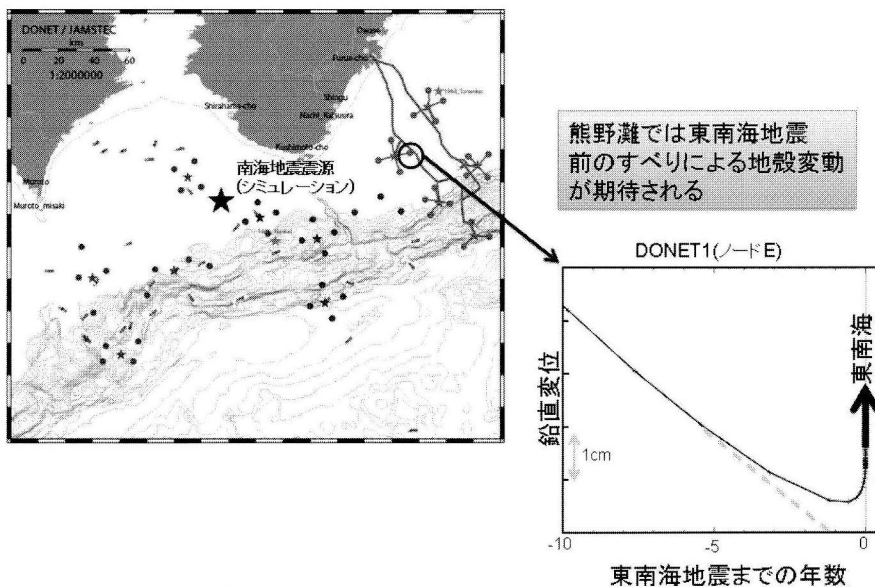


図 7-1 DONET2 展開案東南海地震発生前から東南海地震発生に至るまでに期待される地殻変動の 1 例

高度化に必要不可欠である。東南海地震、南海地震の発生の早期検知という防災への貢献に加え、準備直前過程におけるスローイベント等の現象の把握等の精緻な地殻活動データの総合解析、ならびに観測データの同化による地震発生予測精度の向上が期待される。

さらに、地震津波の早期検知による防災減災や地震発生予測精度の向上のため、足摺岬沖から日向灘に至る南海地震の西方海域へ、また、南海トラフに限らず、東北日本沖の日本海溝沿いや日本海への海底観測ネットワークの展開も望まれている。

5. まとめ

DONET および DONET2 は、南海トラフ巨大地震である東南海地震、南海地震の震源域の直上に複数の地震計や水圧計を稠密展開する世界最先端の海底観測ネットワークである。この先端的海底ネットワークの開発・構築では、長期、連続観測を前提とした技術的課題を克服し、さらにシステム機能を長期間維持するだけでなく、機能向上や観測センサー群の増強・強化を視野に入れた保守システムの開発や運用体制の確立が重要であ

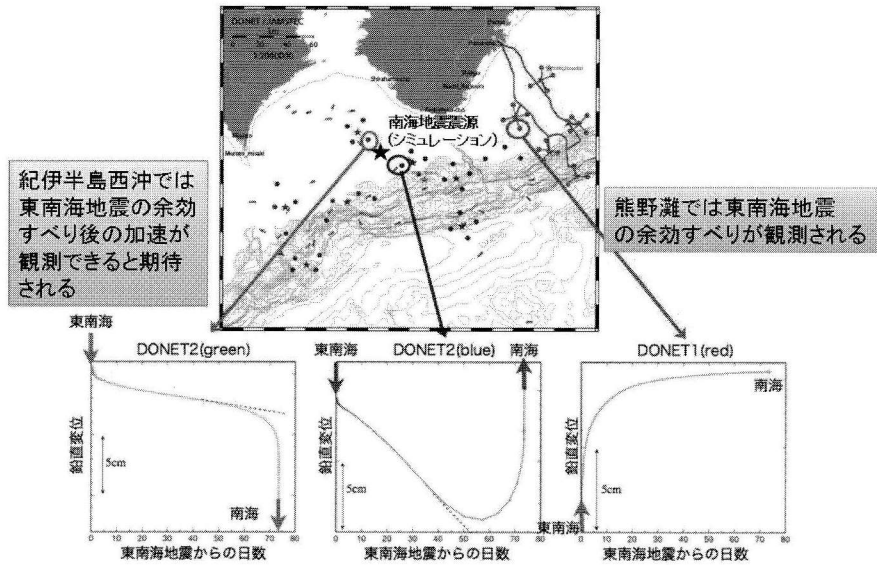


図 7-2 DONET2 展開案と東南海地震発生後から南海地震発生に至るまでに期待される地殻変動の 1 例

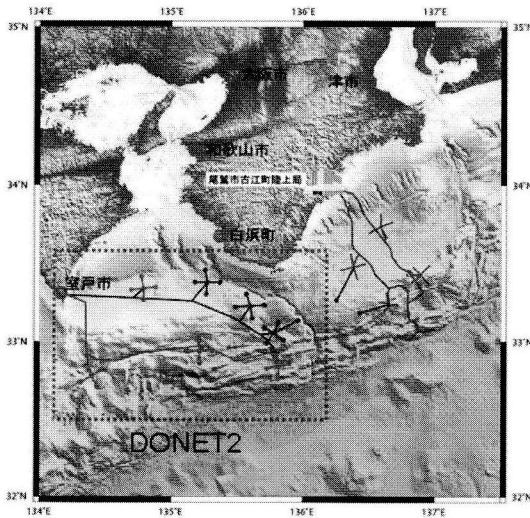


図 8 DONET2 展開案

る。さらに次世代の海底ネットワーク構築に向けた技術開発を継続していくためには、システム開発ならびに構築のコストダウンを図る一方、地震津波研究、防災研究ならびに海洋物理、環境モニタリングといった分野においても、海底観測ネットワークのリアルタイムデータの重要性や研究成果の情報発信が必要であると考えられる。

参考文献

- Ariyoshi, K., T. Hori, J.-P. Ampuero, Y. Kaneda, T. Matsuzawa, R. Hino, H. Akira, 2009, Influence of interaction between small asperities on various types of slow earthquakes in a 3-D simulation for a subduction plate boundary, *Gondwana Research*, 16, 3-4, 534-544.
- Baba, T., P.R. Cummins, T. Hori, Y. Kaneda, 2006, High precision slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake inferred from tsunami waveforms: Possible slip on a splay fault, *Tectonophysics*, 426, 119-134.
- Hori, T., M. Hyodo, K. Hirahara, 2004, Toward large scale numerical simulations of earthquake cycles on faults in a three-dimensional inhomogeneous viscoelastic medium, *Butsuritansa*, 57, 639-649.
- Hori, T., N. Kato, K. Hirahara, T. Baba, Y. Kaneda, 2004, A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai trough, southwest Japan: Lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 228, 215-226.
- Hori, T., S. Miyazaki, N. Mitsui, 2009, A model of earthquake-generation cycle with scale-dependent frictional property-preliminary results and re-

search plan for a project of evaluation for coming Tokai, Tonankai, and Nankai earthquakes, Journal of Disaster Research, 111-117.

Hori, T., Y. Kaneda, 2004, Physical criterion to evaluate seismic activity associated with the seismic cycle of great interplate earthquakes, Journal of Seismology, 8, 2, 225-233.

Kaneda, Y., K. Hirahara, T. Furumura, 2009, New research project for evaluating seismic linkage around the Nankai trough - Integration of observation, simulation, and disaster mitigation, Journal of Disaster Research, 61-66.

Kaneda, Y., M. Ohori, T. Nakamura, 2009, New proposed disaster mitigation and recovery for the next Nankai trough megathrust earthquakes, Journal of Disaster Research, 151-152.

金田義行, 佐藤哲也, 巽 好幸, 鳥海光弘, 2008, 「先端巨大科学で探る地球」東京大学出版会.

金田義行, 2008, 地震・津波観測監視システム (DONET) その1 紀伊半島沖海底ネットワークの構築, 地震本部ニュース, 12月号/6-7.

金田義行, 2007, 南海トラフ巨大地震震源域に展開する海底ネットワーク, 科学, Vol. 77, No. 3.

川口勝義, 金田義行, 荒木英一郎, 2007, 海底高密度リアルタイム観測ネットワークのデザインコンセプト,

海洋理工学会誌, Vol. 13, No. 1/79-86.

川口勝義, 2009, 深海底リアルタイムネットワークの構築, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 44/No. 1, 58-63.

川口勝義, 2007, 地震・津波稠密海底観測網の開発, Vol. 29, No. 8/338, 529-533.

金田義行

[かねだ よしゆき]

現職 独立行政法人海洋研究開発機構
リーディングプロジェクト 地震津波・
防災研究プロジェクト プロジェクト
リーダー



略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修士課程修了, 石油公団石油開発技術センター, 株式会社大林組技術研究所, 海洋科学技術センター海底下深部構造フロンティア, 海洋研究開発機構 地球内部変動研究センター プレート挙動解析研究プログラム プログラムディレクターを経て現職

研究分野 構造地震学

著書 「先端巨大科学で探る地球—地球システムをリアルタイムで診断する」(東京大学出版会)

グローバル津波研究の展開

—過去 100 年の歩み

今村文彦

1. はじめに

1896年6月15日夜、三陸沖での地震により微震の後に襲来した大津波で2万2千人を超える犠牲を出した。図1は、当時の津波被害の状況を描いた絵であり、筆舌にし難い悲惨な様子を残した画像資料である。これは「風俗画報」という雑誌に収められており、これはわが国初めてのグラフ雑誌で、1892（明治25）年から1916（大正5）年まで刊行されている。明治大正の世相風俗を映像で知ることができる貴重な資料である。さらに、僅か40年足らずの1933年3月3日早朝、再び津波災害がこの地域を襲う。激震の後に大津波が三陸地方に襲来し、3千人もの命が犠牲となった。また、第二次世界大戦終戦前後には、1944年東南海地震、1946年南海地震に伴う津波により多大な犠牲を出している。これらの津波のため、津波常襲地帯として世界的に知られることとなった。「Tsunami」という言葉が国際語になる1つの理由が、日本でこのような大災害が繰り返し発生していることである。

本文は、過去100年あまりを遡り、我が国での津波被害の実態、地域での予防・減災対策と関連させながら、津波研究の進展を整理するものである。自然災害の1つとしての津波に対する対策・対応は、我が国だけに留まらず、沿岸各国での共通の課題である。どのような研究が行われ、如何に基礎的な津波の発生・伝播論が展開し、被害実態調査、水理実験、観測データの融合と共にグローバルな地震・津波の研究活動が実施されてきたかを紹介したい。

2. 津波学の始め—明治時代の議論（大森・今村論争）

2.1 発生の理論

明治三陸地震津波に襲われた当時、地震による津波の発生機構に関しては十分理解されておらず、いくつかの学説が挙げられていた。その中でも代表的だったものが、同じ東大理学部に所属する大森房吉博士の海震説と今村明恒博士の海底変動説である。前者は、地震動に励起された湾内固有振動であり、なぜ大きな津波が海域で発生するかを説明しようとした。一方、後者は、津波被害が広域であること、地震発生からある程度の時間の経過後に襲来している状況を理由としていた。当時、地震および津波を観測する装置が限られていたため、実態を説明するには、不確定な要素が多くあった。幾多の論争を経て、津波の到達時間、沿岸での波高増幅、発生効率などの点から今村説が一般的な発生機構として認められており、現在の津波数値解析の基礎ともなっている。ただし、大森説の固有振動現象は、発生時の津波周期と湾内固有周期との対応として理解すれば、現在でも支持される（渡邊，1998）。

2.2 伝播の理論

津波は重力波の1つとして扱えるため、流体学的な理論によって伝播過程が評価される。代表的な理論としては、Kajiura (1963) による古典理論がある。海面の擾乱による波の伝播について Green 関数を導入して、第一波の減衰を理論展開した。長距離伝播における分散性の重要性も指摘している。

一般に、津波の波動現象を解析しようとする場合、その物理モデルにおいて非線形性と波数分散性が重要なパラメータとなる。非線形性は、その波高と水深との比に関連し、水深が浅くなるにつ

れ影響を増して、波高の増幅や波形の前傾化などの現象が生じる。一方、波数分散性は、その波長に対する水深の比に関係し、波長によってその波速が変化するという性質を持つ。津波のような長い周期の波に対してはその分散性が小さく長波理論が適用できる。従って、津波を再現する理論としては、目安として50 m以上の深海では線形長波理論、それ以下の浅海では非線形長波理論が用いられている。さらに、浅海域が長く続くと津波の山部ほど速度が速くなり、結果、波形勾配が大きくなる。その時、波先端での分裂現象が発生する。これは河川などの遡上でも観測され、非線形分散波理論が必要となる。

最終的には、津波は陸上部へと遡上していく。エネルギー損失は陸上で表面状態（土地利用）により変化すると言われ、数値モデルに粗度係数として経験的に与えられているが、その妥当性と与え方の基準が明確には決まっていない。陸上で土地利用によりその値を設定している方法7)、8)もあるが、今後の課題として残っている。

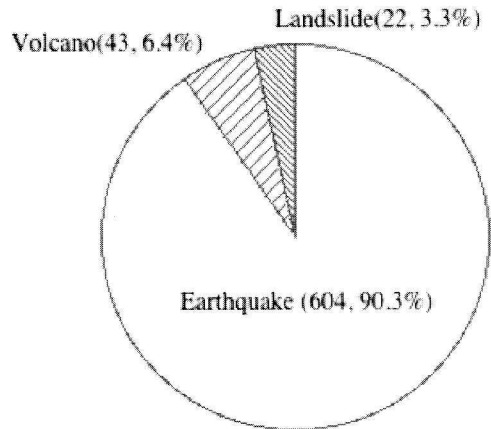
2.3 非地震性の津波

図1に示されているように、地滑り及びそれに伴う土石流により発生する津波は、通常のような断層運動により引き起こされる津波に比べて頻度は低いものの、歴史的にみてもその規模・被害ともに大きなものがある。1791年眉山崩壊によって発生した津波は有明海を伝播し、対岸の肥後・天草を襲い、5,000名以上の死者を出した。また、1741年渡島大島火山性津波では犠牲者は1,467名を数え、未だに、その発生メカニズムは断定されていないが、島北部に残された大規模地滑りが大いに関係していると考えられている。非地震により発生する津波の研究は、海底地震の断層運動のものに比べて本格的な研究が少なく、また津波発生モデルも十分に確立されたとは言えない(今村・前野, 2009)。

3. 津波警報システム—来襲前に避難するために

3.1 津波予警報システムの始まり

津波警報システムは米国で開始された。ハワイ



All tsunami data during 1790-1990

図1 過去200年間の津波発生原因

とアラスカで165人の犠牲者が出た1946年のアリューシャン地震を受けて、沿岸測地局USCGS(United States Coast and Geodetic Survey)によりシステムの構築が進められ、1949年に設立された。その後の太平洋津波警報センターPTWC(Pacific Tsunami Warning Center)である。ちなみに日本語であるツナミが国際語となったきっかけも、同センターの名前に使われて学術用語化したからと言われる。

我が国では、1941年に三陸沿岸を対象とした三陸沿岸津波警報組織が生まれ、震源推定後に、津波の有無を判断し、その後予報文、伝達ルートを伝えようとする先駆的なものであった。このシステムの全国拡大は、戦争や通信などの問題により実現できなかった。その間に、東南海地震津波(1944)、南海地震津波(1946)が発生し、多数の犠牲者を出してしまった。1949年、戦争の終了と共に進駐軍により、津波予報を有効かつ迅速に伝えるための組織化を指示され、1952年4月1日から全国的な組織としての津波警報システムが稼働したのである。

地震と津波の関係を利用したのが、1941年頃に始まった津波予報で用いられた津波判定図である。これは、過去に起きた地震のマグニチュードとその地震により発生した津波の規模の関係に基づいて、(a)津波の規模はマグニチュードで決まる、(b)津波の広がりによる減衰は震源からの距

離で決まる，ということ仮定して，経験的につくられたものである。

1951年システム開始当初の予報作業は，各地震観測地点で観測された地震のP波とS波の到達時刻が電話又は電報で津波予報中枢官署に送られ，そこで地図，チャート，鉛筆，コンパス，定規およびある種の計算機を使う手作業で地震の震源と規模（マグニチュード）を決定し，その後担当者が「津波予報図」（地震の震度や初期微動継続時間と全振幅との関係から，津波発生の可能性を判断できるよう，過去のデータに基づいて経験的に作成した図）により津波発生の有無を判断するものである。予報を出すまでに平均して17分ほどかかっていた。さらに，その判断結果を津波来襲地域へ伝達する手段は，電報や電話であった。

3.2 量的予報へ

その後，1994年4月には津波の有無を迅速に判断するため，従来の観測網を見直し，全国約180カ所に地震計を配置した津波地震早期探知網の展開が図られ，津波予報発表までの時間は3分まで短縮された。現在行われている津波予報は，近年の津波伝播シミュレーション技術の成果を取り入れた量的な津波予報であり，1999年4月に開始された。これは，地震による津波の発生と伝播の様子を，あらかじめ地震の発生場所，深さ，マグニチュードを変えて約10万通りのシミュレーション（数値計算）を実施してその結果をデータベース化しておき，地震発生時にはこの計算結果の中から実際に発生した地震に近いものを検索して，各地の津波の高さ等を発表するものである。過去の事例からの経験則に基づいていた従来の手法に比べ，地震の断層運動による津波の発生から沿岸への津波の伝搬までを実際にモデル計算した結果を利用するため，予報区および予測する津波の高さの細分化が可能となった（館畑，1998）。以上が津波予報体制のこれまでの発展の経緯である。

さらに，2006年から気象庁は，震源に近い地震計で捉えた観測データを迅速に解析し，主要動が到達する前に各地の到達時刻や震度を推定して防災に役立てようとする「緊急地震速報」の先行的な提供を開始している。その「緊急地震速報」の

自動処理技術を活用することにより，同年10月からは一部の地震では津波予報発表までの時間を最速2分以内に短縮することが可能となっている。

4. 1960年チリ地震津波のインパクト

—国際的連携と津波委員会発足

4.1 国際警報システム

国際協力体制の確立が不可欠であることは明らかであった。そのため，ユネスコ政府間海洋学委員会（IOC/UNESCO）第3回総会（1964年）の決議に基づいて，1965年4月にホノルルで「太平洋津波警報組織の国際協力に係る作業グループの会合」が開催された。この会合では次の2つの機関を設置するという重要な提案が行われた。一つは，地震発生時に関係各国の地震，津波に関する情報を収集し，収集した情報を関係国へ提供する情報センターであり，もう一つは，関係国間における情報交換，意見調整等を行うための国際調整委員会であった。前者の機関としてはホノルルの地磁気観測所が，太平洋津波警報センター（PTWC）として改組・発足し，また後者の機関としては，太平洋津波警報組織国際調整グループ（ICG/ITSU）が設立された。

4.2 学術組織の発足

1960年にヘルシンキで開かれたIUGG（国際測地学・地球物理学連合）の第12回総会において，津波に関する科学的・技術的情報を交換することを目的にTsunami Commission（津波小委員会）が設置された。津波の発生・伝播理論，数値解析，観測技術，予警報システムなど津波に関する幅広い研究テーマについて議論できる場となった。さらに，IUGGの2年後に国際津波シンポジウムがこの小委員会の主催で開催されており，2年に1回のペースで国際会議が開催されている。

5. 室内水理実験の始まりと役割

本格的な津波水理実験が国内で開始されたのは，1981年に東北大学において津波防災実験室が開設されてからであると思われる。津波の発生・

伝播・遡上の理論および数値解析の検証として、さらには、実際の地形を再現し、防波堤・防潮堤などの機能評価などが行われた。現地調査等では十分に計測・観測できない現象を再現し、検証を補完する役割として不可欠である。

津波の水理実験は、以下に大別できる。①水平2次元の地形模型の水平と鉛直の縮尺を変えることにより、広大な実地形での現象を室内水槽で再現するもの、②断面1次元での水平と鉛直縮尺を同一にし、より正確に伝播や遡上の過程を再現するものである(平石, 2007)。最近では、津波挙動そのものに加えて、作用波力、漂流物、砂移動(地形変化)、植生の効果、などの水理実験が盛んに実施されている。この際には、フルード則、レイノルズ則などの他に、剪断力、粒径、剛性などを考慮した様々な相似則を導入しなければならない。

6. 数値計算技術の普及 —TIMEプロジェクトの発足

6.1 1960年代の数値解析のはじまり

被害軽減を考えた津波防災のためには、迅速かつ精度の高い予報が重要であることは明らかであろう。津波の挙動は沿岸での地形の影響をうけて複雑に変化する。この挙動を知り、津波高さを推定するには、実際の海底地形を十分な精度で考慮して津波の伝播を予測する必要がある。これは、すでに解析的な研究の領域を超えて、数値計算による応用研究として取り組まなければならない。1960年頃に、数値技術とコンピュータの発展により、津波や高潮の数値シミュレーションによる解析が始まった(Isozaki and Unoki, 1964; Ueno, 1965)。さらに、1983年当時、三陸沿岸での海底地形データが作成され、初めて実用的な津波シミュレーション方法が検討されていた。過去の、比較的震源過程が分かっている地震の場合には、最高水位分布を誤差20%以内の精度で再現できることが示された(首藤ら, 1988)。

しかし、地震・津波観測網が発展し、詳細な津波調査が行われるようになると、地震波解析により推定される波源(断層モデル)と津波観測また

は調査から推定される結果に齟齬が生じることが指摘されはじめた。最近では、津波発生モデルでは今まで無視しうるとされてきた断層運動の動的な効果も指摘されている。

6.2 数値解析技術の移転

日本で開発された数値計算技術を津波の影響を受ける諸外国に提供することは意義がある。「国際防災十年」(1987年~1997年)の取り組みとして、国際測地学地球物理学連合(IUGG)とユネスコ政府間海洋学委員会(IOC)の共同事業の援助によるTIME(Tsunami Inundation Modeling Exchange)プロジェクト津波浸水域数値モデル移転)を立ち上げ、津波被害を受けたまたは受けると予想される地域への数値シミュレーション技術移転を行っている(今村, 1998)。ソースコードの公開だけでなく、充実したマニュアルも作成し配布されている(IOC, 1997)。さらに、現地の研究者が東北大の津波数値モデルコードTUNAMI(Tohoku University Numerical Analysis Modeling for Inundation)を取得し、研修や共同研究を実施しながら、対象地域の地形・土地利用データおよび想定地震などを入力し、予想される津波浸水域を算出、ハザードマップなどが作成されている。このプロジェクトへは、2009年までに23

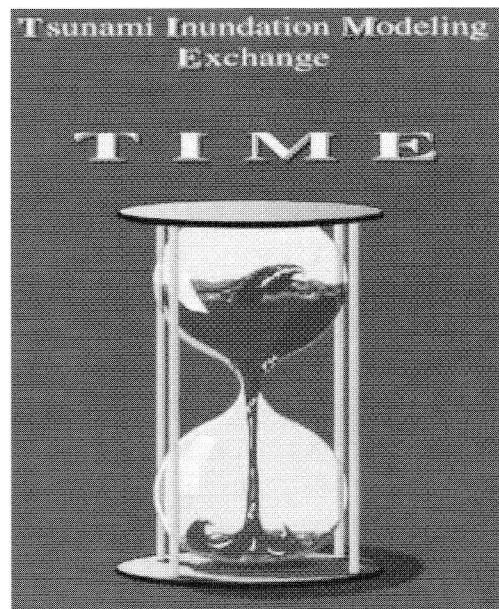


図2 TIMEプロジェクトのロゴマーク

カ国の 45 に及ぶ機関が参加している。また、国際測地学地球物理学連合の会議や津波警報実務者会議などで、常に本プロジェクトに対して感謝決議が上げられている。

7. 津波監視・観測システム

—超音波波高計, GPS 波浪計

津波観測の目的は、浅海域（沿岸域も含む）と深海域で若干異なる。まず、浅海域においては、津波発生の有無の確認と観測、津波来襲の直前監視、津波の沿岸域での変形（増幅）過程の把握（気象庁が行っている津波の数値予報の評価、および、基礎となるデータの取得）があり、一方、深海域においては、津波の早期検知、沿岸域での変形を受けていない津波波形計測による津波発生メカニズムの解析等が目的として挙げられる。以下、2つの新しい監視・観測システムを紹介する。

7.1 空中発射式超音波波高計

空中発射式超音波波高計は、センサーから発射された超音波が海面で反射し受波部に返ってくるまでの時間を計測することにより、センサーから海面までの距離を計測する。超音波の速度が気温に依存するため温度補償が必要である。サンプル間隔は波浪観測などが主目的のため一般に短い。数値的に処理することで、周期 1~2 秒の風波から数時間の潮汐を観測することができる。特長として、検潮所と同じく陸上設置のため、リアルタイムデータの取得が容易であること、検潮所と異なり、導水管のようなフィルターを通さない津波波形が計測できることが挙げられる。また、設置費用が比較的安価なので、市町村レベルでも設置が可能である。

7.2 GPS 波浪計

GPS 波浪計は GPS アンテナを搭載したブイの高さ変化を RTK-GPS 手法を用いてモニターすることで、津波を計測するシステムである。沖合では津波の振幅が小さいため高い精度の観測が不可欠である。沿岸に被害を及ぼすような大津波を観測する場合でも、1-2 cm の観測精度が必要である。RTK-GPS 手法は陸上から遠くなると精度

が悪くなるため、現在のところ海岸から十数 km までの範囲での運用が可能である。それでも、他の浅海用センサーに比べて、最も沖合で観測することができ、また設置も比較的容易であることが特長である。

8. インバージョンによる波源推定

沿岸部での津波の挙動が検潮記録として観測されると、その情報を利用して、津波の波源について知ることが可能となる。これは逆解析（インバージョン）による波源推定であり、Satake (1989) などにより精力的に始められ、断層運動の不均一性などの評価に有効であることが示されている。通常、断層運動に伴う現象としては地震動が代表であるが、津波のような海域での波動運動も生じる。様々な観測データを用いて、多角的に震源過程を推定することは意義があり、データの中でも津波成分は分解能の点で優れていると指摘されている。

数値シミュレーションの有効性は認められつつあるが、如何に迅速で信頼性の高い初期値（津波波源）を与えられるかが大きな課題として残されている。リアルタイムで波源域を正確に推定することは難しい中で、数値シミュレーションと観測技術とを融合した方法が検討されている。仮に断層運動の未知な部分があったとしても、さらに地震以外の原因で発生したとしても、沖合で津波を直接検知できれば、確実な津波シミュレーションの入力情報として活用できるはずである。現在、震源または波源の出来るだけ近くで地震動や津波を観測するために、海底地震計・津波計が設置されている。

9. 2004 年スマトラ沖地震・インド洋大津波 —学際研究分野の必要性

9.1 甚大な被害

スマトラ北西部沖地震 (M9.2) は 2004 年 12 月 26 日午前 8 時頃（現地時間）に発生した。この地震はユーラシアプレートとインド・オーストラリ

アプレートの境界でのプレート間のものであり、余震観測から震源域は約千キロメートルにも達し、この地域でも最大級の規模となった。地震より生じた津波は、直後にインドネシア沿岸を襲い、その後、タイ、マレーシア、バングラディッシュ、さらにはインド東岸、スリランカ（波源から1,600 km）にも達した。驚くべき事に、アフリカ（波源から約6,000 km）および南極へも来襲した。このようなインド洋全域に影響した津波は我々の歴史の中では初めてである。犠牲者は23万人を超えたと言われ、感染症などの2次災害も懸念されていた。未だに犠牲者数の実態も把握されていないというのが現状である。記録に残る津波災害の中でも最悪となるであろう。

9.2 被害などの特徴

M9による地震と津波による被害は甚大である。今現在でも正確な実態を把握することはできない。被害が大きい地域ほど、連絡をとることが難しく、情報が得られないからである。ここでは、被害の概要のみを紹介したい。まず、最も被害の大きかった地域は、インドネシア・スマトラ島であり、強震動と突然の大津波の来襲により沿岸地域は壊滅に近い状態であったと推定される。複合的な被害が生じた可能性が高い。タイやマレーシアでは、観光地を中心に大きな被害を出した。犠牲者には多くの外国人観光客を含んでいた。リゾート地での突然の大災害となった。ここでは、

復旧・復興の課題も残った。さらに、スリランカでは東部、南部の海岸沿いのほか、波源に対して背後に位置するはずの南西部のコロンボでも被害が出るなど、影響は全地域に渡った。海また、津波により列車も流されてしまい、乗客や避難した住民の命を奪っている。

現地からの膨大な映像がテレビを通じて報道されている（写真1）。ビデオカメラなどが普及し、観光地などでは、多くの方が手元に持っていたからであろう。これらの来襲する津波の映像は学術的に大変重要である。これらを収集して、衛星画像や数値シミュレーションなどと併せて解析を実施する必要がある。

9.3 リモートセンシング技術の発展

衛星画像から判読された建物被害情報と津波の外力情報を統合し、津波外力の大きさと建物被害の大きさを関連づけることができれば、従来の津波被害予測式よりも詳細な津波被害推定指標が得られると期待される。実際、バンダアチェなどでは新しい津波被害想定指標としての津波フラジリティを構築されている（Koshimura et al., 2009）。このような関数が適切に推定されると今後の津波被害推定に大変役立つ。

9.4 地学的アプローチ

津波堆積物は、過去の津波の発生時期や再来間隔を推定する手段として広く利用されている（例えば、Atwater, 1987；箕浦ほか, 1987）。ただし、



写真1 インドネシア・バンダアチェでの津波浸水状況（Metro TV撮影）

津波によって形成されたことが明らかな津波堆積物がどのような特徴を持つのかは、これまで良くわかっておらず、地層中から過去の津波イベントによって形成された津波堆積物を識別する手段が確立しているとは言えない状況にある。この点において、2004年インド洋大津波によって形成された津波堆積物は、津波堆積物を識別するのが容易であった。そのため、2004年インド洋大津波によって形成された津波堆積物がどのような特徴を有するのか、どのように分布するのかなどを詳しく調べることができ、多くの成果が出されている。タイ沿岸での浜堤など微地形の影響を受けた堆積分布やスリランカでのキリング漁港での津波来襲前後の極めて詳細な地形変化などのデータが得られている。

9.5 植生の役割

災害発生直後から、マングローブ林の津波防災機能に関する複数の報告が公表 (Danielson et al., 2005 など) され、総括的な報告も行われている。これらの報告は、いずれも現地での実測や観察に基づいたもので、実証を目指したもののだが、マングローブ林の破壊実態の把握・評価から防災機能の見積りに至る、包括的な防災機能を把握するために必要な力学をベースとした分析を行うところまでには至っていない。今後、沿岸域での植生は、環境だけでなく防災面での機能評価が求められているために、定量的な検討が必要である。

この中で、Yanagisawa ら (2010) はマングローブの破壊状況を津波の水理学的特性と関連させ、被害関数を提案している。この関数を用いて、植生の津波に対する抵抗 (減衰) とその限界を定量的に評価することが出来た。特に、バンダアチェにおいて、もし、本来の沿岸域での植生が維持できていれば、津波被害を大幅に低減できることを示した結果は大いに関心を持たれている。

9.6 サンゴへの影響

津波が海洋生態系に及ぼす影響に関する情報は、これまでほとんど得られていなかった。2004年津波では、インドネシア、タイ、スリランカ、モルジブなど、サンゴ礁が発達する地域に影響が及んだため、サンゴ礁保全を目的とした実態調査

が数多くなされている。いずれの地域でも、当初予想されていたよりも被害は小さく、例えばタイ南部の沿岸域では、一部地域で13~40%程度のサンゴが被害 (転倒、破壊、土砂の被覆) を受けたことが報告されているものの (Chavanich et al., 2005 など)、被害が発生していない地域も数多く報告されている。また、サンゴの形状別の被害差が顕著に見られ、塊状サンゴの横転・移動が多いのに対し、枝状サンゴなどの被害は少ない。川俣ほか (2009) は、タイ・シミラン諸島のサンゴ被害に対して数値計算を用いて評価し、津波の最大流速が約4.5 m/sを上回ると、サンゴ被害が甚大になることを報告している。

10. おわりに

過去100年にわたり我が国の津波研究がどのように展開され、国内外での被害軽減のための科学・技術の発展が生まれたかを紹介した。さらに現在は、自然現象に加え人間・社会現象を視野に入れた学際領域の1つとして進展しているが、その部分について省略した。いかに津波の予測技術が進歩し、信頼性の高い情報が出されたとしても、それが人々に対し効果的に伝わり、適切な対応・行動がとられなければ、それは失敗に終わってしまう。従って、予測技術の向上と並行して、地域での災害教育を行うことが重要である。

また一方で、河田 (1997) によれば、人的被害の90%以上は、5%以下の低頻度巨大災害 (数百年に一回の頻度) に起因している。また、原子力発電所などの重要施設においては、さらに低頻度 (最終的には十万年に一度の頻度) のハザードに対しても定量的に評価する必要がある。巨大津波災害は、人間の生活基盤となる沿岸環境にも甚大な影響を及ぼす。そして、被災後の復旧・復興活動、さらには自然修復によって、沿岸環境も安定した状況に回復するが、これが津波前の状況に戻るとは限らず、災害規模が大きいかほど不可逆的なプロセスになる可能性がある。このようなヒステリシスの状態変化を検討する研究も求められている。

謝辞

本文をまとめるに当たって、科研費研究（基盤研究 A；2004 年インド洋大津波の被害実態を考慮した新しい津波工学の展開，課題番号 18201033）の成果を参考にさせていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 今村文彦・前野 深 (2009) : 3.6 火山性津波，火山爆発に迫る一噴火メカニズムの解明と火山災害の軽減，井田喜明・谷口宏充編，東大出版会，pp. 161-173.
- 今村文彦 (1998) : 15 年間における津波数値計算の発展と今後，月刊海洋号外「津波研究の最前線」，No. 15，pp. 89-98.
- 岩崎伸一・平田賢治 (2007) : 津波の観測，津波の事典，朝倉書店，pp. 85-96.
- 河田恵昭 (1997) : 大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学，第 16 号，pp. 3-13.
- 川俣秀樹・後藤和久・今村文彦 (2009) : 2004 年インド洋大津波によるタイ・シミラン諸島でのサンゴ被害の数値的評価，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，B2-65 (1)，pp. 331-335.
- 館畑秀喬 (1998) : 津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋，号外 No. 15，23-30.
- 首藤伸夫・後藤智明・今村文彦 (1988) : 津波予警報に対する数値シミュレーションの利用，土木学会論文集，第 393 号/II-9，pp. 181-189.
- 箕浦幸治・中谷 周・佐藤 裕 (1987) : 湖沼底質堆積物中に記録された地震津波の痕跡—青森県市浦村十三付近の湖沼系の例—，地震第 2 輯，40，183-196.
- 平石哲也 (2007) : 実験による方程式の検証，津波の事典，朝倉書店，pp. 238-241.
- 渡邊偉夫 (1998) : 日本被害津波総覧 第 2 版，東京大学出版会，238 p.
- Atwater, B.F. (1987) : Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, 236, 942-944.
- Chavanich, S., A. Siripong, P. Sojisuporn, and P. Menasveta (2005) : Impact of Tsunami on the seafloor and corals in Thailand, *Coral Reefs*, Vol. 24, No. 4, pp. 535.
- Danielson, F., M. Sorensen, M. Olwig, V. Selvam, F. Parish, N. Burgess, T. Hiraishi, V. Karunakaran, M. Rasmussen, L. Hansen, A. Puerto, and N. Suryadiputra (2005) : The Asian Tsunami : A Protective

Role for Coastal Vegetation, *Science*, Vol. 310, 28, OCTOBER, pp. 643.

IOC, IUGG (1997) : IOC TIME project Numerical method of Tsunami simulation with the leap-frog scheme, IUGG/IOC TIME project, Manual and Guides No. 35 SC-97/WS-37.

Isozaki, I. and S. Unoki (1964) : The numerical computation of the tsunami in Tokyo bay caused by the Chilean Earthquake in May, 1960, *Studies on Oceanogr.*, Dedicated to Prof. Hidaka in commemoration of his sixtieth birthday, 389 p.

Kajiura, K. (1963) : The leading wave of a tsunami, *Bull. ERI Univ. Tokyo*, Vol. 41, pp. 535-557.

Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa, and F. Imamura (2009) : DEVELOPING FRAGILITY FUNCTIONS FOR TSUNAMI DAMAGE ESTIMATION USING NUMERICAL MODEL AND POST-TSUNAMI DATA FROM BANDA ACEH, INDONESIA, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 3, pp. 243-273, DOI No : 10.1142/S0578563409002004.

Satake, K. (1989) : Inversion of tsunami waveforms for the estimation of heterogeneous fault motion of large submarine earthquake ; the 1968 Tokachi-oki and the 1983 Japan sea earthquakes. *J. Geophys., Res.*, Vol. 94, 5627-864.

Ueno, T. (1965) : Numerical computations for the Chilean Earthquake tsunami, *Oceanogr. Mag.*, 7, pp. 87-94.

Yanagisawa, H., S. Koshimura, T. Miyagi, and F. Imamura (2010) : Tsunami damage-reduction performance of a mangrove forest in Banda Aceh, Indonesia inferred from field data and a numerical model, *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, C06032doi: 10.1029/2009JC005587.

今村文彦

[いまむら ふみひこ]

現職 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター長，教授

略歴 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了，東北大学助教授を経て現職
研究分野 津波工学，災害科学

著書 『Tsunami : 1992-94, their Generation, Dynamics, and Hazards』(共編，Birhauser)，『防災ハンドブック』(朝倉書店)，『Landslide tsunamis : recent findings and research directions』(共編，Birhauser)



地震発生予測実験

平田 直

1. はじめに

現在の地震学や地球物理学の知識では、確実な地震発生予測を行うことは難しい。これは、つまるところ発生を予測すべき大地震は希にしか起きないという理由による。モデルを作ってそれに基づく予測を行い、実際に地震発生を観測して予測が正しかったどうかを検証し、モデルを改良するというサイクルが実現できなかった。

一方、中小地震は頻発するために、かえって本当に予測が妥当であったのか、偶然に予測が「当たった」のかを見極めることが難しいという、地震予知研究特有の問題がある。これまで多くの予測の試みがあったが、その妥当性を検証できなかった。予測の検証の難しさのために地震予知・予測の研究が進まなかったのである。

一般に、地震規模 (M) とその M の地震発生数 (N) との間には、ゲーテンベルグ (G) とリヒター (R) の関係 ($\log(N) = a - bM$: G-R 則) が、かなり普遍的に成り立っている。この法則がいつも成り立っていれば、頻繁に発生する中小地震を用いて予測と検証を行い、その予測モデルを使って大地震も予想することができる。そのためには、まず、予測とその検証を行う地震発生予測実験の「枠組み」を作る必要がある。

2. 地震発生予測実験とは何か

私たちは、2009年の11月から「地震活動予測実験」を始めた¹⁾。この実験で重要なことは、単に地震発生予測をするだけでなく、できるだけ客観的で、統計学的に厳密な手法で予測結果の評価をすることを旨とする点である。そのためには、以下の点が特に考慮されている。(1) 予測モデルを作

る研究者 (モデラー) と、実際に予測してその結果を評価する組織 (テストセンター) を独立にして、モデラーが実験の途中で予測モデル (予測値) を修正できないようにする。(2) テストセンターは、あらかじめ決められた手続き (計算機コード) に基づいて予測と検証を行う。(3) 予測は本当の未来の予測を行い、結果を原理的にカンニングできないようにする。あるいは、結果に合わせてモデルパラメータを調整できないようにする。主な規則を以下に説明する。規則の詳細は文献2) を参照されたい。(1) 対象領域を決めて小格子に分割して、小格子内に発生する地震数を予測する。領域は、(i) 離島部も含む日本全体、(ii) 日本の離島を含まない領域、(iii) 関東地域だけの3つを選んだ。この対象領域で、(2) 予測期間 (対象 M) は、1日 (M 4以上)、3カ月 (M 4以上)、1年 (M 5以上)、3年 (M 5以上) とした。(3) 観測値 (実際の地震数) は、気象庁が決めた震源数 (気象庁一元化カタログ) を用い、(4) 予測のテスト (検定) には、対象領域全体での地震数 (N)、地震規模の頻度分布のテスト (M)、尤度テスト (L)、空間テスト (S)、尤度比検定 (R) を用いている。これらのテスト方法は、先行して研究を始めているカリフォルニアのグループ³⁾ が用いている方法と同じにした。それぞれのテストには、得手不得手があり、これらのテストに全て「合格」することが必要とされる。

昨年11月に始まった実験では、3つの領域、4つの予測期間の計12の予測クラスに対して、合計91の予測モデルが提出された。その内、3カ月予測の結果がまとまりつつある。3カ月予測に登録された予測モデルは、(i) 日本全体 (離島を含む) に対して9モデル、(ii) 日本の離島を含まない領域に対して9モデル、(iii) 関東地域に対して7モデルだった。どのくらいの学習期間のデータ

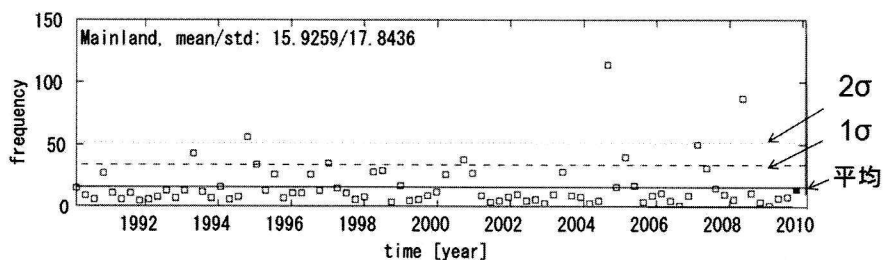


図 1 1990年から2010年までに離島を除く日本で発生したM4以上の地震の3カ月間に発生した数(四角:□)の推移。2009年11月1日から2010年2月1日の間には15個の地震が発生した(■)。この20年間の3カ月間地震数の平均は16個であった(実線)。標準偏差(σ)は18個で、 1σ と 2σ をそれぞれ太い破線と細い破線で示す。

を用い、空間的にどの程度平滑化するか、また、発生した地震が次の地震の発生にどのように(どのくらいの時間・空間の範囲に)影響を及ぼすかなどが、それぞれのモデルで異なる。

一例として、RI (Relative Intensity of Seismicity) モデル⁴⁾を説明する。このモデルでは、地震発生率は時間的には一定で、空間的に変動すると仮定する。G-R測が成り立ち、 b は時間的に一定で、過去の期間(学習期間)のデータ全体から0.9とした。 a は空間的に変化しているとして、その分布を小領域内で発生した地震を用いて求める。小領域の半径(平滑化半径)は10 km, 30 km, 50 km, 100 kmと仮定して、それぞれを独立した予測モデルとして登録した。

RIモデル以外では、G-R測の b の時空間変化を考慮したり、地震が発生するとその余震が発生するというものを考慮したりするモデルなど、もう少し複雑なモデルもある。初めて実施された3カ月予測は、2009年11月1日から2010年2月1日に発生する地震が対象であった。この期間、(ii)日本の離島を含まない領域では15の地震が発生し、9モデル中1モデルが3個の地震が起きると予測して過小評価になり、1つのモデルが31個起きると予測して過大評価になった。その他の7モデルは12から18個の地震発生を予測して、発生数(N)に基づくテストに合格した。図1をみると、テストの期間に発生した地震の3カ月間の地震数は、この20年間の平均の発生数と同じ程度であったことが分かる。空間的(S)テストによって、3つのモデルが棄却された。RIモデルでは、

平滑化半径を30 km, 50 km, 100 kmとしたモデルが棄却された。過去の地震からある場所の発生率を評価する場合には、あまり広い範囲の地震の数を平均すると現実とは合わないことを示している。空間テスト(S)に合格したRIモデルの予測と発生した地震分布を図2に示す。発生確率の高いところで実際に地震が発生していることがわかる。

3. 予測実験によって何がわかるか

予測実験によって目指しているのは、「標準モデル」の構築である。現在予測に使っているのは、過去の中小地震の発生数とその変化から将来の活動を予測するモデルである。カリフォルニアの研究では、その他に測地学データや活断層の分布等の地質・地形学的データが用いられている。測地学的なデータから地震活動を予測するためには、地殻の変形や応力の変化と地震活動を結びつける「物理」が必要であり、この知識が予測精度を向上させるためには不可欠である。現在の地震発生予測では、過去の地震活動が将来も続くという大変簡単な仮説(過去に地震活動の活発な場所は、将来も活発である)が予測の大前提にあり、この考えは、地震は空間的にランダムに発生するという考えよりはるかに現実の地震活動を説明できる。しかし、活動の時系列を考えた時には、地震は時間的にランダムに発生するのか、活発になり始めたらより活発になるのか、逆に静穏化したら大きな地震に繋がるのかは、地域や時期によって異なる。

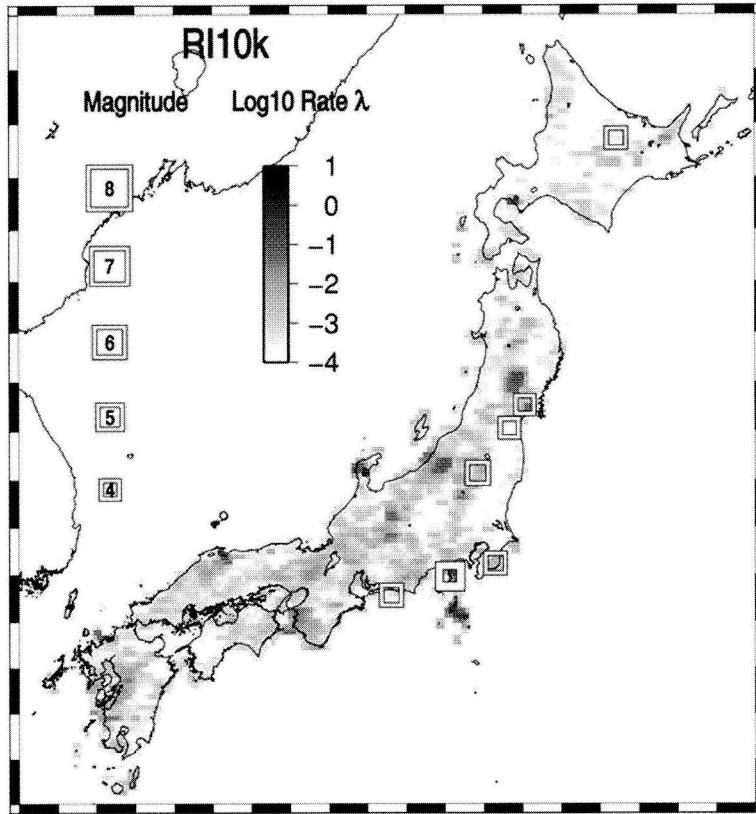


図 2 RIモデル（平滑化半径 10km）による 3 カ月予測と結果⁴⁾。色の濃い部分が地震発生確率の高いところを示す。四角印は、2009 年 11 月 1 日から 2010 年 2 月 1 日の間に実際に発生した M4 以上の地震。この期間に 15 個の M4 以上の地震が発生した。伊豆半島の東部では 9 個の地震が発生したが、図には 1 カ所に重なっている。

る可能性がある。これらの質問に答えるには比較対象とする標準モデルが必要である。標準モデルは、より複雑な物理を組み込んだ新しいモデルの性能を評価するときの「帰無仮説」として使うことができる。

4. まとめ

過去の地震活動から将来の活動を予測する複数のモデルを厳密に比較検討する地震活動予測実験を始めた。この実験の目的は、予測モデルを向上させるために必要な標準モデルを作りだすことにある。そのために、実験の結果が容易に利用できるような、透明性と説明性に優れた実験のルールを作った。全部で 90 を超えるモデルが提案されて、それらの予測性能の比較が行われている。

2009 年 11 月から始めた実験は約 1 年たち、最初の成果が出てきた。今後も研究を続け 3 年予測の実験を行い、最終的には物理モデルと統合した大地震の発生予測に適用できるモデルを構築していきたい。

参考文献

- 1) 楠城一嘉, 鶴岡 弘, 遠田晋次, 平田 直 (2008) 地震活動の評価に基づく地震発生予測：世界と日本の動向, 地震学会ニュースレター, 20 (4), 16-20.
- 2) 地震活動評価に基づく地震発生予測研究グループ, 第 1 回地震発生予測検証実験について, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ZISINyosoku/wiki.jp/wiki.cgi?page=2009Test_j
- 3) Jordan, T.H. (2006) Earthquake predictability, brick by brick, Seismol Res. Lett., 77, 3-6.

- 4) Nanjo, K.Z. (2010) CSEP earthquake forecasts based on the RI algorithm for the Japanese experiment, submitted to EPS.

平田 直

[ひらた なおし]

現職 東京大学地震研究所所長・教授,
地震防災対策強化地域判定会委員
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

著書 「地殻ダイナミクスと地震発生 (分担)」(朝倉書店)

アクロスと地震予知研究

山岡耕春

はじめに

アクロス (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) の開発を始めて 15 年となる。熊澤らにより、地下を見る (=監視する) 方法として弾性波と電磁波を用いる方法として提案され、能動的に連続して地下に向けて送信した弾性波や電磁波信号を受信・解析するシステムとして整理された¹⁾。このうち弾性波を用いるアクロスシステムについては、岐阜県土岐市 (原子力研究開発機構)、静岡県森町 (気象研究所)、愛知県豊橋市 (名古屋大学)、淡路島 (京都大学、東京大学、名古屋大学) に設置されて実験が継続されている。弾性波アクロスについては、数々の実験や継続的な研究により、技術的には一定の域に達したので、この場をお借りしてまとめて紹介しておきたい。図 1 に淡路島に設置してある弾性波アクロスの写真と、内部で回転するロータの写真を示しておく。

アクロスシステムとは

アクロスシステムの基本的なコンセプトを簡単にまとめると、1) 複数の正弦波を用い、2) 非破壊で送信し、3) 長時間連続して、4) 安定した信号を送信することにより、5) 加算 (スタッキング) により SN 比を高め、6) 伝達関数 (地下構造) とその時間変化を得る、ことである。ここで示した 1) から 6) のコンセプトは独立ではなく、相互に深く関連しているが、ここでは、それぞれについて一つずつ解説をし、現時点の到達点を解説していくことにする。

当初、「正弦波は周波数軸上でインパルスとなるため高い SN を得られる」ことが正弦波を用いる理由と利点と考えられていた。しかし今となって振り返ると、正弦波を用いるというコンセプトは「フーリエ変換・フーリエ級数という数学になじむ」という、より大きな利点であることがわかった。そのため、観測・解析手法の整理や新しい手法の導入に数学的直感を働かせやすい。例え

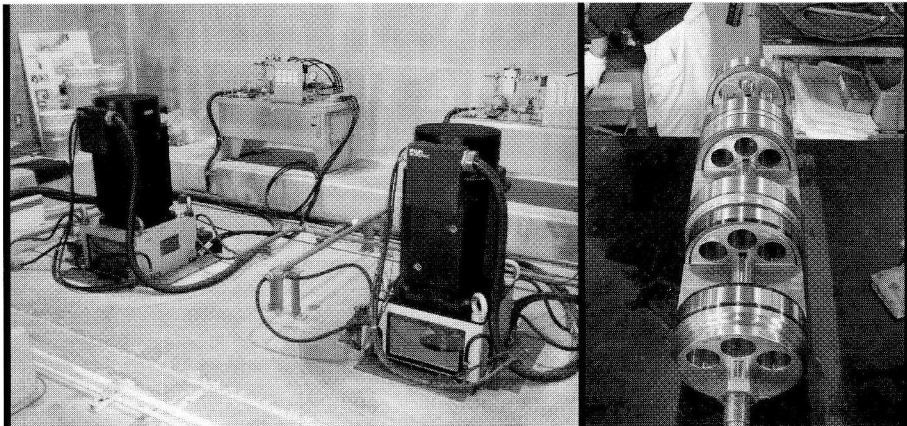


図 1 (写真左) 淡路島に設置してあるアクロス震源。左側が低速機、右側が高速機。後部に写っているのは潤滑油の循環ポンプ。(写真右) アクロス震源本体内部で回転するロータ。中心軸の下側に質量が偏っている。

ば、アクロスの震源は回転の加速・減速を一定周期で繰り返す運転（周波数変調）を行うが、その運転による発生力は有限個の正弦波を足し合わせたものと見なすことができ、その正弦波の周波数は周波数軸上で一定間隔に分布することがわかる。この性質を上手く利用すると、同じ周波数帯域の信号を複数の信号から送信しても、分離することが可能となる。またフーリエ変換により信号とノイズの比を容易に得ることができることなど、実用面で有用な点が多い。

アクロス開発の目的は地下構造の時間変化を知ることであることから、震源を設置した地盤を破壊しないことが重要である。例えばダイナマイトは構造探査用の震源として用いられるが、周辺岩盤を破壊してしまうため、地下構造の時間変化を知る目的には不適切である。正弦波で繰り返し加振をすることにより、地盤を壊さないで信号を送信することができる。また地盤を壊さないためには震源を固定するための基礎の設計も重要となる。通常、周辺の岩盤の強度を考慮して基礎の大きさを決める。

長時間連続して信号を送信するためには、装置の耐久性が問題になる。現在のアクロス震源は偏心したおもりの遠心力により加振する構造となっているため、耐久性のポイントは回転軸を支える軸受け（ベアリング）である。土岐市や淡路島に設置した震源は、最大発生力で運転し続ける場合の耐久年数を1年として設計されているが、現実にはそれを下回る力で運用されているため、土岐市の震源については、7年以上も壊れないで連続運転されている。

安定した信号を出すためには、回転速度を高精度で制御する必要がある。そのためには制御を同期させる時計の精度が重要であった。アクロスシステムを考案した15年前はちょうどGPSの利用が一般的になってきた時期であったため、GPSから供給される0.1マイクロ秒精度の時刻に震源を同期させることにした。アクロス震源はACサーボモータにより駆動され、モータの回転位置がモータの制御装置に入力されるパルス数と比例するように制御される。そこでGPSに同期して周

波数変調ができるような専用のパルスジェネレータが設計された²⁾。一方、信号を受けるデータロガーについては、当時はまだGPSへの同期技術が未熟だったため、専用のデータロガーの開発も行った。GPSへの同期が十分でないとSN比が劣化するからである。しかし、その後の各種の実験結果とデータロガーの技術進歩によって、現在ではほとんどの市販のデータロガーが現実的なSN比の範囲でアクロスの受信装置として利用できることがわかっている。ただし、逐次近似型のAD変換器を用いたロガーはAD変換の前段にカットオフ周波数の低いアナログフィルターを用いているため、温度変化による位相変動の影響が大きく、時間変化の観測には不適切であることが多い。

震源が非破壊であるためには発生力を余り大きくできない。その制約のもとでSN比を稼ぐためには信号の加算が必要となる。理論上、ランダムノイズに対するSN比は、加算時間の平方根に比例することが知られており、アクロス信号を数ヶ月にわたる長時間の信号加算をしても理論通りの結果になっていることが確認されている。なお、加算は周波数変調周期の整数倍の時間毎（通例100秒または200秒毎）に加算をしているが、加算をしてからフーリエ変換しても、全体を一度にフーリエ変換しても原理的には同じ効果になる。

このようにして得られた信号を、震源の発生力でデコンボリューション（周波数領域での割り算）することによって、単位発生力当たりの観測点での信号出力を得ることができる。これは周波数応答とも呼ばれることがあるが、アクロスでは伝達関数と呼んでいる。剛体回転を除くと震源と観測点の動きは3次元となるため、一組の震源と観測点に対する伝達関数は9通りある。この伝達関数は地下構造を反映しており、地下構造の変化は伝達関数にあらわれる。伝達関数の変化から地下構造の変化を知るためにはインバージョン解析が必要で、今後手法の開発が必要となる。

先進のオペレーション

上記で紹介したアクロスのコンセプトを支える

技術のうち、特筆すべきものは自動反転制御と非混信型周波数変調制御である。

自動反転制御とは、一定時間（通例2時間）ごとに、時計回りと反時計回りの回転を繰り返す制御技術である³⁾。従来の加振装置では、直線加振を再現するために反対方向に同期して回転する2つの偏心おもりを用いていた。アクロスでは、回転方向を自動的に反転させることにより、データ取得後の計算処理により任意の方向の直線加振を仮想的に実現させている。そのためPやSVを効率的に出すラジアル（波の進行方向と平行）方向の加振と、SHを効率的に出すトランスバース（波の進行方向と直角）方向の加振を得ることが可能となる。

非混信型周波数変調制御とは、複数の震源が周波数変調（回転の加速・減速を繰り返す）制御を行う際に、変調の中心周波数を適切にずらすことにより、同じ周波数帯域で同時に信号を出しても混信せずに分離できるという非常に優れた制御手法である。自動反転制御と同様、GPSに同期させる高い制御性能があって初めて実現できた技術である。この手法を積極的に用いると、たくさんの震源をアレイとして用い、後処理によって信号の指向性をコントロールすることが可能となる。

地震予知研究においてアクロスのめざすもの

アクロスは、地震予知研究においてはモニタリングの技術として位置づけることができる。特に断層面の固着や滑りのモニタリングに対して、ひずみ計測とは異なった手法によるモニタリングをめざすものである。近年、精密な岩石滑り実験から、滑り面（断層面）を透過する弾性波の振幅変化と面の摩擦強度の変化が比例関係にあることが示されている^{4),5)}。ただし、実際のフィールドの条件では、地表から送信して断層面を透過する波は地下深部に行ってしまうので捉えることは困難であるが、透過波の振幅変化は反射波の振幅変化としても捉えられる。このため、アクロスでは、常時高精度の信号を出し続けることにより、プレート境界面などの断層面の反射変化を捉えることを

めざしている。

現在、東海地域において3箇所の震源を常時稼働することができる段階にまで至っている。3箇所の震源を用いたモニタリングを継続することによって、東海スロースリップなどに関係した固着強度の変化や流体の移動や応力変化などを反映した地震波伝播特性変化を捉えることをめざしている。その目的にたどり着くために何が必要かを簡単に示したものが図2である。固着強度や滑りなどを知るためには、モニタリングによる変動源の推定だけでなく、固着変動の物理モデルから予測される変化に関する研究が必要である。さらに変動源を推定するためには、十分な精度の地下構造モデルが必要となる。連続的なモニタリングが実現した今、つぎにめざすものは地殻構造や現象の物理モデルと連携して、より説得力を持った変動源の推定と、関連する物理との関連を明らかにすることである。

淡路島におけるアクロス

淡路島の野島断層近傍には、兵庫県南部地震直後の1996年にアクロスの震源装置が設置された（図1参照）。装置は25 Hzで 2×10^5 N（ニュートン）の力を発生する「低速機」と35 Hzで 2×10^5 Nの力を発生する「高速機」の2台が設置されている。淡路島では断層解剖計画⁶⁾によって800 mと1700 mのボアホール底に地震計が設置されていることや、媒質が比較的単純な構造の花崗岩であること、また断層近傍であるため余効変化の影響も期待できるなど、アクロスの基礎的実験にとっては最適な場所である。淡路島では、数々の基礎実験の後2000年から15ヶ月間の連続モニタリング観測を実施し、地表の震源とボアホール地震計間の地震波伝播速度変化を測定し、長期観測における問題点の発掘をするとともに、強震動による地震波速度と異方性変化を捉えることに成功した^{7),8)}。またその後は、定期的な数ヶ月の連続運転によって地震波速度、減衰、S波の偏向異方性の長期的変化を捉えるための実験が継続されている。その結果、この10年間で地震波速度にして約0.4

アクロスによる
地震発生場の
モニタリング

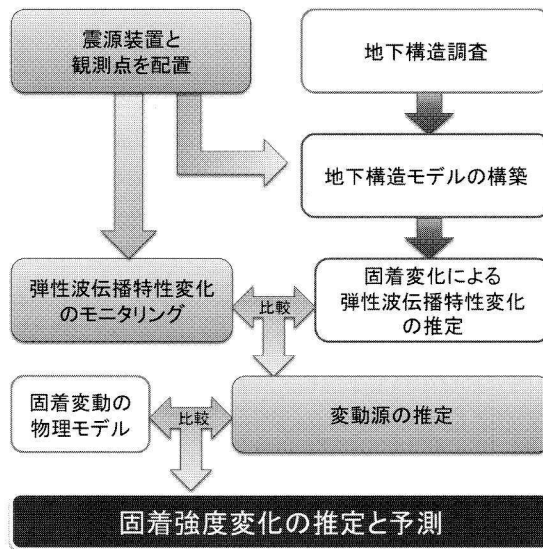


図 2 アクロスによる地震発生場のモニタリングの考え方. 十分な精度を持った地下構造モデルや固着強度に関する物理モデルの調査・研究成果とあわせて固着強度のモニタリングが可能となる.

パーセントの増加が捉えられている. ただ振幅については一定の傾向は捉えられていない⁹⁾ (図 3).

東海地震震源域におけるアクロス

アクロスの研究計画が始まった 15 年前からアクロスシステムがどのように「東海地震の予知」に貢献できるか, という具体的検討が進められてきた. 1997 年に設置された土岐のアクロス震源の信号の到達距離や, 2001 年に行われた東海地震震源域に於ける地殻構造探査結果¹⁰⁾ を検討した結果, アクロスの震源を用いて地殻内やプレート境界の反射波を, 現実的な観測によって捉えることは不可能ではないことがわかり¹¹⁾, 具体的な観測点の設置が行われた. 東海地域では, すでに設置されていた岐阜県土岐市の震源 (原子力開発研究機構) に加え, 2005 年度に静岡県森町 (気象庁気象研究所) に震源が設置され, さらに 2006 年度には愛知県豊橋市 (名古屋大学) に岐阜県各務原市に設置されていた震源の移設を行い, 東海地域に 3 箇所のアクロス震源装置がそろった (図 4). その後, 連続運転試験や統一した「先進のオペレーション」制御装置の設置などをすすめた. 特に東海地域に設置されている Hi-net 等の定常地震観

測点におけるアクロスの信号検出能力を実証するとともに, 3 箇所の中央に位置する愛知県新城市には 11 点からなる地震計アレイが設置され, 3 箇所からの信号の取得と詳細な解析をする体制が整った. 設置後の実験・解析で, 多くの成果が出てきているが, ここではそのうち主なものについて紹介したい.

プレート境界からの反射などを捉える等, 地下構造の時間変化を調べるためには, 十分な地下構造モデルがあり, 地下構造変化による定常観測点における波形変化があらかじめわかっていることが大事である. その手始めとして, 2008 年の夏に行われた静岡県から愛知県にかけての地震連続観測 (2008 年東海臨時地震観測)¹²⁾ を共同で実施した. この観測に於ける観測点はアクロスの森町送信点から土岐送信点を結ぶ線とおおむね一致しており, 約 1 km 間隔で 80 点での連続観測を 4 ヶ月間実施した. このデータを利用することにより, Hi-net 等の定常観測点の記録を空間的に補完する伝達関数が得られ, 地殻内やプレート境界からの反射と思われる相を認識することができた¹³⁾ (図 5). 特に, アクロス震源は仮想的にラジアル・トランスバース加振ができるため, それぞれの加振に対する観測点の伝達関数を得ることがで

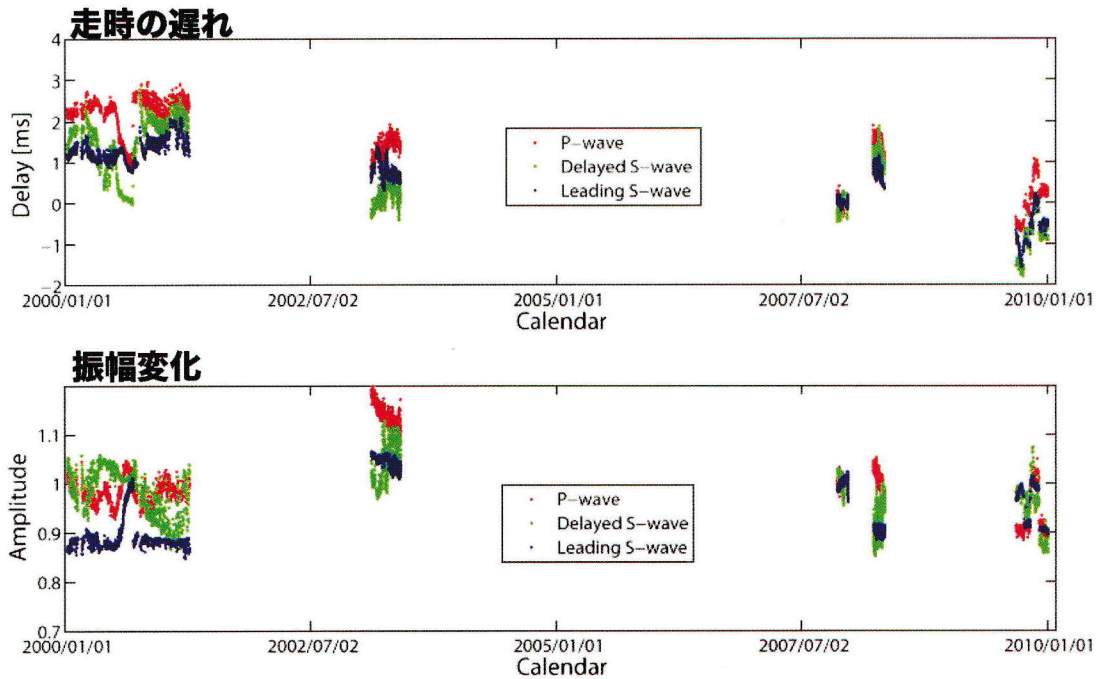


図 3 淡路島のアクロス震源でモニターをしている、震源と 800 m 深のボアホール内地震計間の 10 年間にわたる地震波速度と振幅の変化。ともに P 波、偏向した S 波の早い S 波と遅い S 波の速度及び振幅の相対的な変化を示している。地震波速度については長期的に早くなる傾向にあることがわかる。

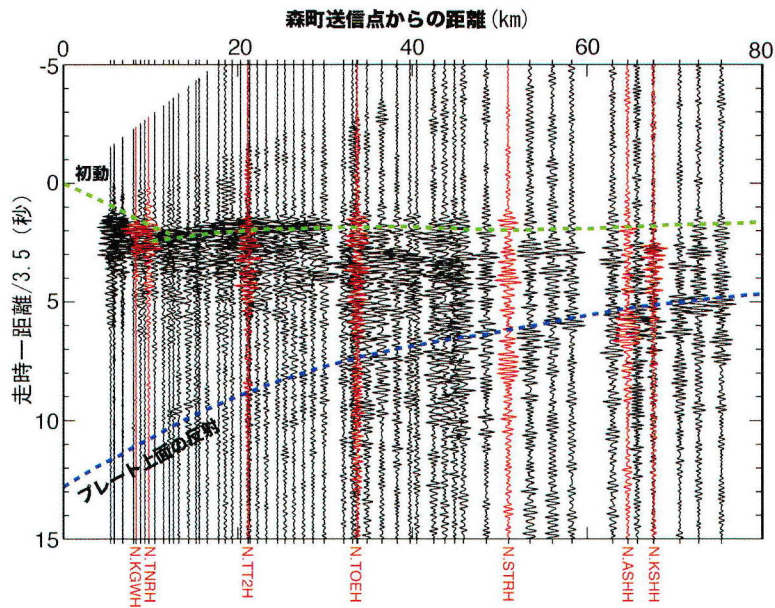


図 4 2008 年東海臨時地震観測¹²⁾によって捉えられた、アクロス森町送信点からの信号。森町から北西方向に 80 km の間の地震計によって捉えられた伝達関数。波の伝播方向に直角に加振した場合の SH 波の記録を並べたもの。破線は、S 波の初動走時とプレート上面での反射波の理論走時を示している (気象研究所¹³⁾による)

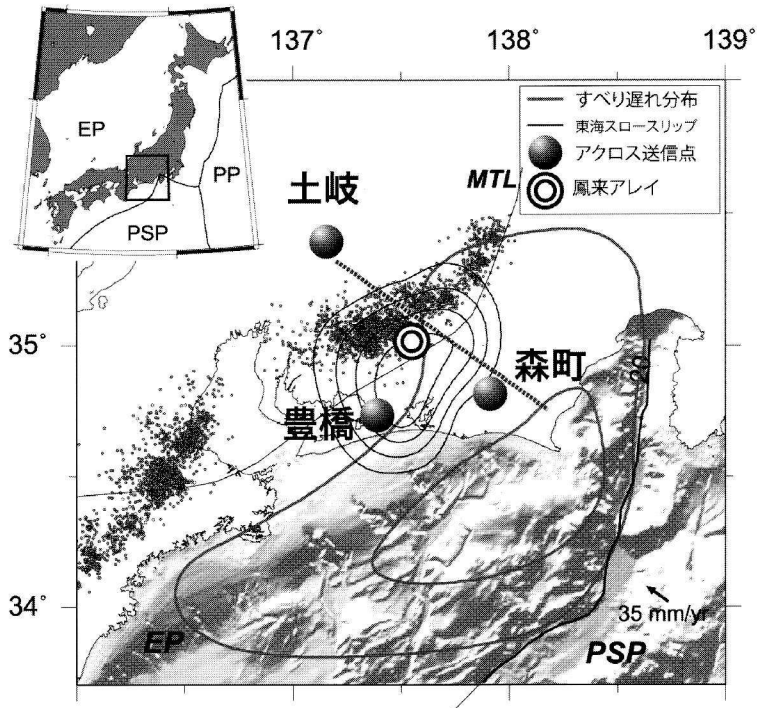


図 5 2008年東海臨時地震観測側線と東海地方に設置されている3箇所のアクロス震源と鳳来アレイの場所との関係。破線で示した臨時観測線が、土岐と森町のアクロス送信点を結ぶように設置されていることがわかる (Kato et al. (2010)¹²⁾の図に加筆修正)。図には低周波微動の震源、東海スロースリップのすべり分布およびプレートの固着域(すべり遅れ)が示されている。アクロスの震源は東海スロースリップ域における変化を捉えることを目的に設置されていることがわかる。

きた。今後はこのようなデータを元にして、プレート強化付近の構造変化が伝達関数のどの場所に現れるかを解明する必要がある。

3つの送信点の中央に位置する愛知県新城市(旧鳳来町)の地震計アレイ(通称鳳来アレイ)は、いずれのアクロス送信点からの信号も受信することができる。鳳来アレイは設楽(しだら)火山群の固い岩盤が露出する地域に設置され、地表に設置した地震計においても良好なSN比が得られる非常に良いフィールドである。またこのアレイの中心に位置するHi-net鳳来観測点はSN比の非常に良い観測点である。このアレイやHi-netの観測データを用いていくつかの研究が行われている。まず3つの送信点からの信号を方も含めてきちんと分離できることの検証が行われた。3箇所の送信点はいずれも5-15 Hzにかけての周波数帯域

で、かつ周波数変調の中心周波数をずらすことによって混信しない設計で送信されている。これらの信号が設計通り確実に分離でき、アレイによって信号の到来方向を推定できることを実際に確認した¹⁴⁾。

一方、Hi-netの観測点のデータを用いては、50 km離れた土岐のアクロス震源からの信号の時間変化を解析している。3ヶ月間スタッキングしてデータを求め、1ヶ月ずつずらしながら伝播特性の時間変化を解析した。その結果、直達波の部分は時間的に非常に安定していたものの、プレート境界からの反射波と推定される部分の変動は大きく、短期的スロースリップの発生と同期して変化している可能性が指摘されている¹⁵⁾。ただし、この変動の源を特定するためには、先に述べたような分解能の高い伝達関数を得る必要がある。

おわりに

本稿では、今まで積み上げてきたアクロスの技術と淡路島や東海地域におけるモニタリングの試みについて紹介をしてきた。アクロスは地震だけでなく、いろいろな分野に応用できる技術である。例えば火山については、常時モニタリングをすることにより、マグマの上昇などにもなう地下の地震波速度・減衰構造の変化を捉えることが可能であると考えられ、地震波伝播構造の変化が大きい気とが期待できる火山ではアクロスは大変有望な方法と考えられる。その他、資源関係など、地下モニタリングに関する様々な分野への応用が模索されている。

参考文献

- 1) 熊澤峰夫 (2004) 地殻の能動的監視観測法としてのアクロスの概説, 月刊地球, 号外 47, 16-25.
- 2) 國友孝洋・熊澤峰夫 (2004) 弾性波アクロスによる地殻構造のアクティブモニタリング—弾性波アクロスの開発と東濃鉱山からの連続送信—, 月刊地球, 号外 47, 26-33.
- 3) 國友孝洋・熊澤峰夫 (2004) 弾性波アクロスによる地殻構造のアクティブモニタリング—弾性波アクロスによる送受信技術—, 月刊地球, 号外 47, 44-52.
- 4) Yoshioka, N. and K. Iwasa (2006) A laboratory experiment to monitor the contact state of a fault by transmission waves, *Tectonophysics*, 413, 221-238.
- 5) Nagata, K. (2008) Experimental study of frictional behaviors using acoustic in-situ monitoring of frictional interface, 東京大学博士論文, pp. 126.
- 6) 安藤雅孝・島崎邦彦・竹村恵二 (1998) 総論; 断層解剖計画, 月刊地球, 号外 21, 6-12.
- 7) Ikuta, R., K. Yamaoka, K. Miyakawa, T. Kunitomo and M. Kumazawa (2002) Continuous monitoring of Propagation velocity of seismic wave using ACROSS, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2001GL013974.
- 8) Ikuta R. and K. Yamaoka (2004) Temporal variation in the shear wave anisotropy detected using Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS), *J. Geophys. Res.*, 109, B09305, doi : 10.1029/2003JB002901.
- 9) 京都大学防災研究所 (2009) 注水実験による内陸地震の震源断層の微細構造と回復過程の研究, 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画平成 21 年度年次報告書 (機関別) 368-373.
- 10) Iidaka, T., T. Takeda, E. Kurashimo, T. Kawamura, Y. Kaneda and T. Iwasaki (2004) Configuration of subducting Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, *Tectonophysics*, 388, 7-20.
- 11) 山岡耕春 (2004) アクロスは東海地震震源域でのプレート反射の変化を捉えられるだろうか, 月刊地球, 号外 47, 134-140.
- 12) Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki and N. Hirata (2010) Variation of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi : 1029/2010GL03723.
- 13) 気象庁 (2009) 東海地震予知技術と南海トラフ沿いの地殻活動監視技術の高度化に関する研究, 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画平成 21 年度年次報告書 (機関別), 652-654.
- 14) 名古屋大学 (2009) 駿河-南海トラフ周辺における多項目統合モニタリング, 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画平成 21 年度年次報告書 (機関別), 305-309.
- 15) 渡辺俊樹, 生田領野, 相馬知征, 山岡耕春, 藤井直之 (2007) 東海監視に向けた地震波アクロスと小規模地震計アレイによる試験観測, 月刊地球 29, 475-480.

山岡耕春

[やまおか こうしゅん]

現職 名古屋大学大学院環境学研究科教授

理学博士

略歴 名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了, 東京大学地震研究所伊豆大島火山観測所助手, 名古屋大学理学部助教, 同大学大学院環境学研究科教授, 東京大学地震研究所教授を経て現職

研究分野 地震学, 火山学

著書 「地震予知の科学」(東京大学出版会: 共著), 「Q&A 日本は沈む?」(理工図書) など



GNSS 地殻変動観測の将来

今給黎哲郎

1. はじめに

GPSによる地殻変動観測は、それ以前からの地殻変動観測研究を一変させてしまう大きな変革をもたらした。特に国土地理院が全国に展開しているGPS連続観測網GEONETは、地震調査研究のために基盤的観測網として整備された地震観測網・強震観測網(Hi-net, F-net, K-NET, KiK-net)とあわせて、最近十余年急速に進歩した地震発生に関わる様々な現象、プロセスの理解に大いに貢献してきた。GEONET構築・整備の経緯と、地殻変動観測を通じた主な地球科学的成果については国土地理院GEONETグループ(2004)¹⁾に詳しく紹介されているのでここでは省略させていただく。本稿では将来のGEONETがどのような方向で発展し、GPSだけでなく他の全世界的衛星測位システム(GNSS)も含むデータを活用した地殻変動観測を行うことで、どのように地震予知につながる新たな知見をもたらす可能性があるか、いくつかのキーワードを見出しに、未来への夢を論じてみたい。

2. 「次世代」

1993年に国土地理院が東海・南関東地域に110点のGPS連続観測システム(COSMOS-G2)を展開したときが第1世代、全国展開をしたGRAPESが第2世代と見れば、現在のGEONETは第3世代、あるいはそれ以降の観測点拡充やシステム増強の履歴などを考えれば、より下った世代のシステムと言えよう。解析戦略も順次高度化が進められて、精密暦と24時間分の観測データを用いた日々の解析についても、現在は「F3解」と呼ばれる第4世代(第1世代がF0解)となっている。し

かしながら、衛星測位の世界において「次世代」というキーワードが持ち出されると、まず最初に連想されるのは「GPS衛星の近代化」であろうか。米国はGPSの信号に新たな民生用コード(L2C, L1C)や新たな周波数(L5)を追加する「GPS衛星の近代化」を2005年から開始している。2010年夏現在では、L2CとL5を送信できる衛星が既に打ち上げられており、これら新しい信号を受信できる受信機も製造、販売されている。この「近代化」は、民生利用の増進を図ることが目的の一つとされていて、測位・航法の分野では、新しいコードを用いることでマルチパスの軽減やS/N比の向上、電離層補正の精度改善等の効果が期待され、搬送波を用いる測量分野でも、アンビギュエティの決定高速化など、RTK測量の効率化などのメリットがあると考えられている。位置情報のインフラとしての役割を担っているGEONETでも、利用者が近代化GPSのメリットを生かせるように対応を進める必要があり、2009年からは電子基準点(観測点)受信機の更新を進めるにあたり、近代化信号を受信できる機種を導入している。

一方で、地殻変動監視の立場から見ると、mmレベルの微小な変動を捉えようとするスタティック測量では、新たな信号や周波数を用いるメリットはあまり大きくないと考えられる。試験的な比較観測でも、GPSの近代化によりスタティック測量の精度が向上した、という報告例は見かけない。予想される利点としては、L5周波数の導入により、100km以上といった長距離基線でのアンビギュエティ決定率の向上が期待され、広域地殻変動、テクトニクスの監視には一定の効果を得られる可能性がある。また、GPS以外のGNSS(全世界的衛星測位システム)としてGLONASS(露)、Galileo(EU)、COMPASS/北斗(中国)、準天頂衛星(日本)などの展開が進んでいる。同時に観

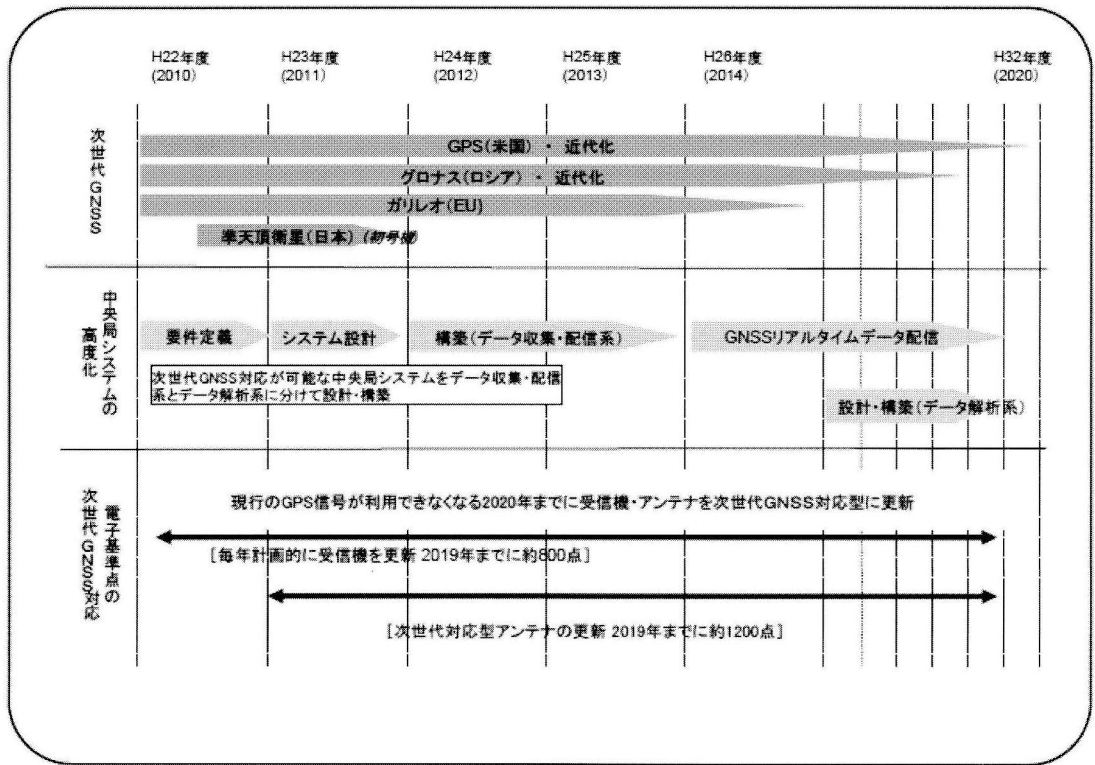


図 1 次世代 GEONET へのロードマップ (構想案)

測できる衛星数の拡大により測位・航法、測量の分野でのメリットは想定されるものの、定常的地殻変動監視に与えるインパクトは限定的なものとなるであろう。ただし、次項で述べるように、RTK 測量により短時間での地殻変動を追跡するような場面では、これらの衛星の信号が有効となる可能性もある。いずれにせよ、近代化 GPS と他の GNSS を含めた信号の利用が可能となるよう、次世代 GEONET は広範囲なユーザーの利便性を考慮した機能拡張が計画されているところである (図 1)。本稿、当初「GPS 地殻変動観測の将来」との題目で依頼があったものを、敢えて「GNSS 地殻変動観測の将来」としたのは、そのことを踏まえてのものである。

3. 「リアルタイム」

GEONET の大多数の観測点においては、1 秒サンプリングでデータが取得され、IP-VPN 高速

回線によりリアルタイムにつくば市の国土地理院にデータが送信されている。これらのデータについては、測量・測位を目的として民間事業者を通じた配信も行われている。また、大地震の際の 1 秒サンプリングデータを事後に解析することで、GEONET 観測点は変位地震計としての機能を果たし、このデータから震源過程の議論も可能であることが示されている (例えば Miyazaki et al. (2004) など²⁾)。

当然のことながら、データが 1 秒単位のリアルタイムで得られているのであるから、地殻変動もリアルタイムで検出したいところであるが、それにはまだ課題が残っている。試験的なシステムとしては、国土地理院でも 50-60 点程度の観測点について、リアルタイム解析を常時行って地殻変動を検出することも試みている。十数 km から数十 km の基線長について、リアルタイムで得られる解析結果は一般的に数 cm 程度の精度であるが、平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震時のデー

タを用いた地震時の地殻変動検出とそれを用いた震源断層モデル推定の性能評価では、M7クラスの地震が内陸で発生し、観測点における地殻変動が5 cm以上であれば、震源断層の位置、広がり、モーメントなどについて地震直後の防災情報として有効な推定結果を出せるとしている（西村ほか(2010)³⁾）。

気象条件が非常に安定しているときではそれよりも良い精度での結果が得られる場合もあるが、2009年8月11日の駿河湾を震源とする地震(M6.5)などでは、台風が東海地方の南方沖を通過中であったこともあり、リアルタイム解析では10 cm以上ものばらつきがある結果となっていて、地殻変動を即時的に検出することができなかった。大気圏の影響による誤差をどのように低減するかは、リアルタイム解析に限らずGNSSによる測量・測位における大きな課題である。現在でも詳細な地域的气象モデルを用いる手法などについての研究が進められているが、リアルタイムでの地殻変動監視についてはさらなる研究開発が望まれる。

GEONETによるリアルタイム地殻変動監視のもう一つの課題は、システムの処理能力である。1200点余の1秒データを常時解析するにはかなりの計算機資源が要求される。GEONET本体では、常時1秒データを解析することは現在していない。大地震などのイベントが発生した際には、その直前まで遡った1秒データを用いたキネマティック解析を対象地域を限定して実施している。海溝型の巨大地震などが発生した場合、地殻変動が観測される領域は非常に広がるが、このような場合に数百点の1秒データを処理することは現在のシステムでは困難である。単純には、より高速で能力の高い計算機を導入すれば対応可能であるが、平常時には使われない能力を持った計算機を整備するための予算を獲得することはなかなか昨今の情勢では難しいであろう。また、平常時に1秒データを処理してもシグナルのない結果を計算し続けることになりかねない。当面は、イベントが発生した、あるいは進行しつつある場合(火山現象など)に、リアルタイム解析を臨機応変

に出来る体制を引き続き整備していくことになるであろう。

4. 「統合化」

地震観測の分野では、気象庁、大学、防災科学技術研究所などの観測研究機関の観測点で得られた地震データを統合して、いわゆる「一元化震源」が決定されるようになってから久しい。地震データの流通・共有化はメリットが大きいことをコミュニティが認識し、最近では、この一元化震源決定に用いられないような局地的観測網のデータ(火山観測のための観測網など)についても、データの流通・共有化を進める動きが始まっている(火山噴火予知連絡会(2010)⁴⁾)。また、ひずみ計、傾斜計といった地殻変動連続観測についても、各機関のデータを統合してアーカイブすることが始まっている(山口ほか(2010)⁵⁾)。

GPS観測については、GEONETが日本全土をカバーして、データは生データ(RINEX形式)から日々の座標値まで、全て公開されているため、それだけで地殻変動やテクトニクス、さらには電離層や対流圏の研究が十分可能な状況であり、これまで多くの研究成果がここから上がってきていることは周知の通りである。また、より詳細に地殻変動を調べたい研究者は、GEONETを補完する形で空間的に密な観測網をそれぞれのフィールドに展開してデータを集め、研究を行ってきている。そのような、研究目的の観測では、得られたデータを使用する一義的な権利は、観測を行った研究者、機関、グループが持っていて、論文などで研究成果が報告されるまでは他者がアクセスすることができない。しかし、論文が執筆された後でも、それらのデータは容易にアクセスできるようなアーカイブに登録されることは少なく、1990年代以降数多く行われてきたGPSキャンペーン観測データについては、古いものなどでは散逸の危険もあるとも言われている。

一方で研究目的でなく、監視目的としてはGPSデータを統合処理する試みが既に始まっている。火山地域において、気象庁と防災科学技術研究所

が展開するGPS観測網のデータについては、GEONET観測点のデータと統合処理した結果が火山噴火予知連絡会に報告されるようになっていく。2010年現在では、このような統合解析処理を行うために、火山GPS統合解析システムと呼ばれるGEONET解析装置に外付けしたユニットが用いられているが、将来的には、GEONET以外のGPS(GNSS)連続観測データをオンラインで定常的に受け取り、それを統合解析する機能を実現するための研究開発を国土地理院では行っている。火山地域だけでなく、活断層周辺や海溝型大地震の震源域周辺などにおいて、詳細な地殻変動監視が実現し、例えば前兆滑りのような現象を検出する可能性が高まるといった期待も膨らむ。このような統合解析を行うことで、データのアーカイブも平行して行うことになり、そのデータベースには、過去のあらゆるGPS観測データを収集登録する、といった役割を持たせることができれば、十数年間にわたり日本において膨大に蓄積された地殻変動情報が、あらたな研究のための資源ともなることは間違いない。そのような統合的なデータベースを維持管理すること自体が大事業であり、ある意味GEONETの運用よりもさらに大変であろうことは想像に難くないが、一元化震源を実現したような、観測研究機関の連携による仕事として現実化させていくことが望まれる。

5. おわりに

GNSSを用いた地殻変動観測について、「近代化」、「リアルタイム」、「統合化」といったキーワードに寄せて、GEONETの将来展開を中心に、想像を膨らませた記事を書かせていただいた。

なお、「リアルタイム」については、海上局を中継したGPS/音響測距による海底地殻変動観測が応用分野として重要であることは承知しているが、これについては本誌の別記事で紹介されるとお聞きしていたので、本稿では省略した。

本文中、現在行われていることに関しては事実であるが、将来構想についてはあくまでも筆者の希望的観測を含むものであり、必ずしも全てが決

定されているものでないことをお断りしておく。ただし、GEONETを中心としたGNSS地殻変動観測の将来が、そのような実り多くなる方向で進むよう、私としても微力ながらも努力していきたいと考えている。それが、将来の地震予知に向けて貢献することになることを信じて。

参考文献

- 1) 国土地理院GEONETグループ(2004), GPS連続観測システム“GEONET”とその展望, 測地学会誌, 第50巻第2号, 53-65.
- 2) Miyazaki S., K.M. Larson, K. Choi, K. Hikima, K. Koketsu, P. Bodin, J. Haase, G. Emore, and A. Yamagiwa (2004), Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data, Geophys. Res. Lett., 31, L21603, doi: 10.1029/2004GL021457
- 3) 西村卓也, 今給黎哲郎, 飛田幹男(2010), GPSリアルタイム1秒データを用いた震源断層即時推定手法の開発, 国土地理院時報, 第120号, 印刷中.
- 4) 火山噴火予知連絡会(2010), 火山観測体制等に関する検討会報告, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/kansoku_houkoku.pdf
- 5) 山口照寛, 笠原 稔, 高橋浩晃, 岡山宗夫, 高田真秀, 一柳昌義(2010), 地殻変動データベースシステムの開発, 測地学会誌, 第56巻第2号, 47-57.

今給黎哲郎

[いまきいれ てつろう]

現職 国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター地理地殻活動総括研究官

略歴 東京大学理学部地球物理学科卒業, 同理学系大学院地球物理専門課程修士課程修了。(旧)建設省国土地理院採用後, 地殻調査部観測解析課長, 測地観測センター地震調査官, 地理地殻活動研究センター地殻変動研究室長等を経て現職に至る。科学技術・学術審議会専門委員(測地学分科会), 地震調査研究推進本部専門委員(地震調査委員会長期評価部会)

研究分野 測地学・地殻変動

著書 GPS測量と基線解析の手引き(土屋 淳博士と共著)



SARによる地震像の把握

橋本 学

はじめに

GEONETの完成以降、我が国においては地殻変動研究の主流はGPSであった。しかし、GEONETといえども平均観測点間距離は20 kmほどであり、これより詳細な地殻変動の分布は捉えられない。また、GPSは地上に受信機を安定して設置するためのコストと労力とスキルが必要で、特に発展途上国ではこれらの点が足かせとなっている。ここに、地表面の変動を面的にとらえるリモートセンシング技術である合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar：頭文字をとってSAR）の活躍の場がある。

SARは、人工衛星などにレーダー（RADAR: Radio Detection And Rangingからの造語）を搭載し、そのレーダーから照射したマイクロ波の地表からの後方散乱波を受信して地表面の情報や地表～レーダー間の距離を得るリモートセンシングの一種である。レーダーが移動することにより、見かけ上大口径のアンテナが生成できることから合成開口レーダーと呼ばれる。現在、我が国の「だいち」（ALOS）はじめ、10機近いSAR搭載衛星が地球を観測している。特に、「だいち」搭載のPhased Array-type L-band SAR（PALSAR）は、Lバンドという他の地球観測衛星には用いられていない波長の長いマイクロ波を用いているため、植生が深い地域や急峻な山岳部などにおいても、良好な観測結果を得ている。これらの衛星が取得したSAR画像は、運営している宇宙機関などから無償または有償で配布されており、地殻変動研究に大いに用いられている。

SARを用いた地殻変動検出法

SARを用いた地殻変動検出法は、後方散乱波の位相を用いるものと、強度（振幅）を用いる方法に大きく分かれる。位相を用いる方法の代表がいわゆる干渉法（Interferometry：これとSARをくっつけてInSARと称される）で、強度を用いる方法の代表がピクセル・マッチング（オフセット・トラッキングなど、いくつかの呼び方がある）である。InSARは複数の画像中で対応するピクセルの後方散乱波の位相差を計測する技術で、数cmの精度で変動を検出することができる。SARによる地殻変動検出は、主としてこの干渉法による。ピクセル・マッチングは、2回の観測強度画像（普通の写真のようなもの）を重ね合わせて、同じような強度分布をしている領域の相対的なずれを計測する手法である（飛田・他、1999）。精度は干渉法より劣るが、1mを超える大きな変動を検出するのに適している。

最近の大地震の観測例

近年、国内外で大地震が相次ぎ、大きな被害をもたらしている。2006年のALOS打ち上げ以降に限っても、2008年の中国四川地震、2010年のハイチおよびチリの地震など、十指にあまる大地震が発生しており、ALOS/PALSARはこれらの地震のメカニズム研究や災害状況把握に大きく貢献している。ここでは、従来の干渉法にとどまらない新しい取り組みを中心に紹介する。

2008年5月12日に発生した中国四川省地震は、Mw 8.0という内陸の活断層で発生する地震としてはまれにみる巨大地震であった。地震発生直後から、宇宙研究開発機構（JAXA）は四川盆

地北西部の震源域をカバーする PALSAR の観測を行った。しかし、データを解析してみると、地表地震断層が現れた周辺では、きれいな干渉縞が見られず、地殻変動に関する情報は何も得られなかった。地殻変動が大きすぎたために、InSAR が不適であったのだ。このような場合は、ピクセル・マッチングが威力を発揮する。この手法でデータを再解析したところ、図 1 が得られた。龍門山断層帯の中で、真ん中に位置する映秀-北川断層を境に、変位のセンスが逆転している様子が見事にとらえられている。断層の北側は衛星と地表間の距離が伸び、南側は縮んでいる。この解析

に用いた画像はすべて北行軌道から撮像されたものであるため、衛星は地表から見て西南西上空にある。したがって、距離が伸びていることは、東向きに動いたか沈降したことを示す。ピクセル・マッチングのもう一つの特徴は、衛星軌道に平行な変位成分も検出できることである。場合によっては後述の電離層の影響と考えられる縞模様が現れることもあるが、Kobayashi et al. (2009) は適切なフィルタリングで除くことに成功している。

2010年1月12日、カリブ海に浮かぶヒスパニョーラ島西部のハイチの首都ポルトープランスを Mw 7.0 の大地震が襲った。構造物被害を中心

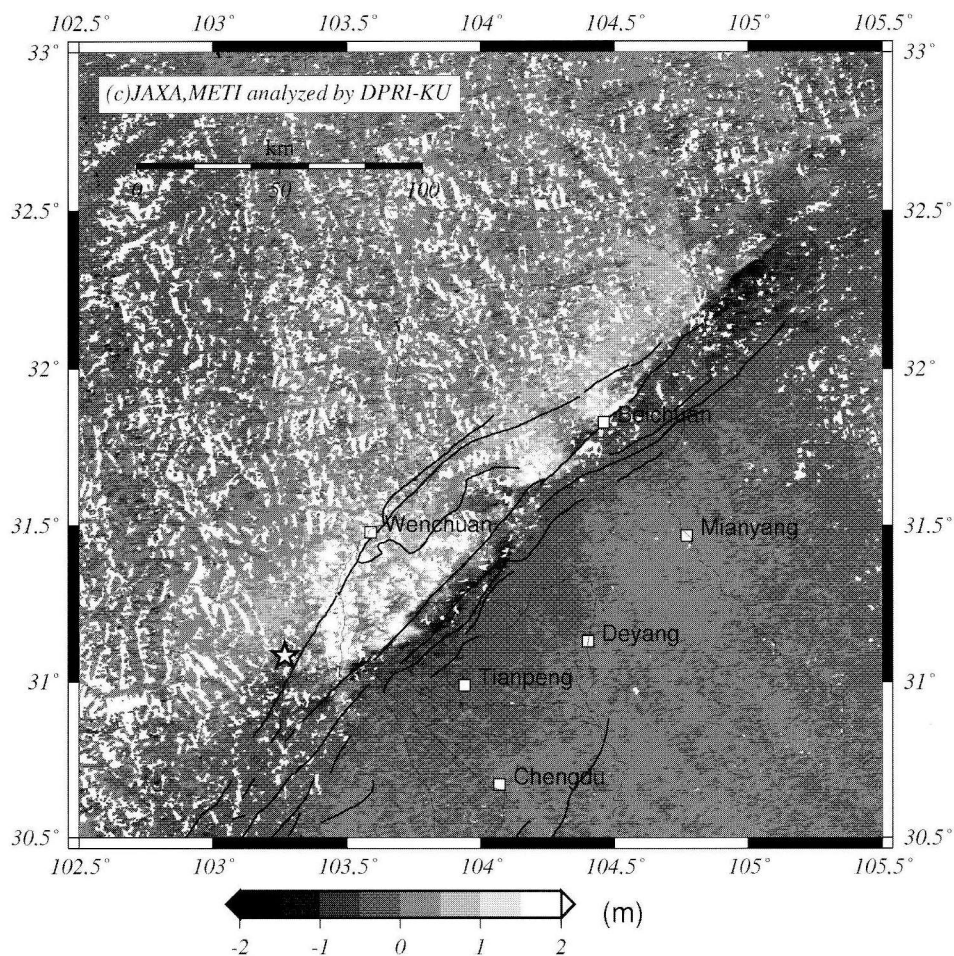


図 1 四川地震前後の「だいち」PALSAR 強度画像から作成したレンジ・オフセット分布。北行軌道から捉えたもので、衛星は西南西上空にある。濃淡の変化は、西南西-東北東方向の地表～衛星間距離の変化に対応し、白(黒)は衛星から遠ざかる(近づく)変位を表す。映秀-北川断層を挟んで、相対的に 4m 程度の変位が生じたことがわかる (Hashimoto et al. (2010) より)。

に20万人を超える犠牲者を出す未曾有の大災害となった。早速 PALSAR の観測が行われ、震源域周辺の地殻変動の様相を明らかにした。この地域では地震発生前に、北行と南行両方の軌道から撮像が行われており、地震後もこれら両軌道からの撮像が実施された。これにより、2方向からの地殻変動検出が可能となった。2方向からの干渉画像を組み合わせると、地殻変動の東西成分と疑似上下成分に分離することが可能となる。図2にその結果を示す。地殻変動の大きい領域は、震源断層と目されていたエンリキロ断層北側の平野部

(扇状地)に一致しており、ここで最大で60 cm程度の隆起があったことがわかる。一方、震央の南側の山岳は逆に沈降していることも読み取れる。これは不思議なことである。活断層ではほぼ同じ規模の地震がほぼ一定の間隔で繰り返し発生し、この活動が地形を作り出してきた、と考えられている。ところが、この PALSAR の画像は、2010年の地震に伴う地殻変動は地形とは逆の動きを示し、「これまで繰り返し起きてきた地震ではない」と主張している。実際、すべり分布と断層形状を推定すると、50°程度で北に傾く断層面が得られ

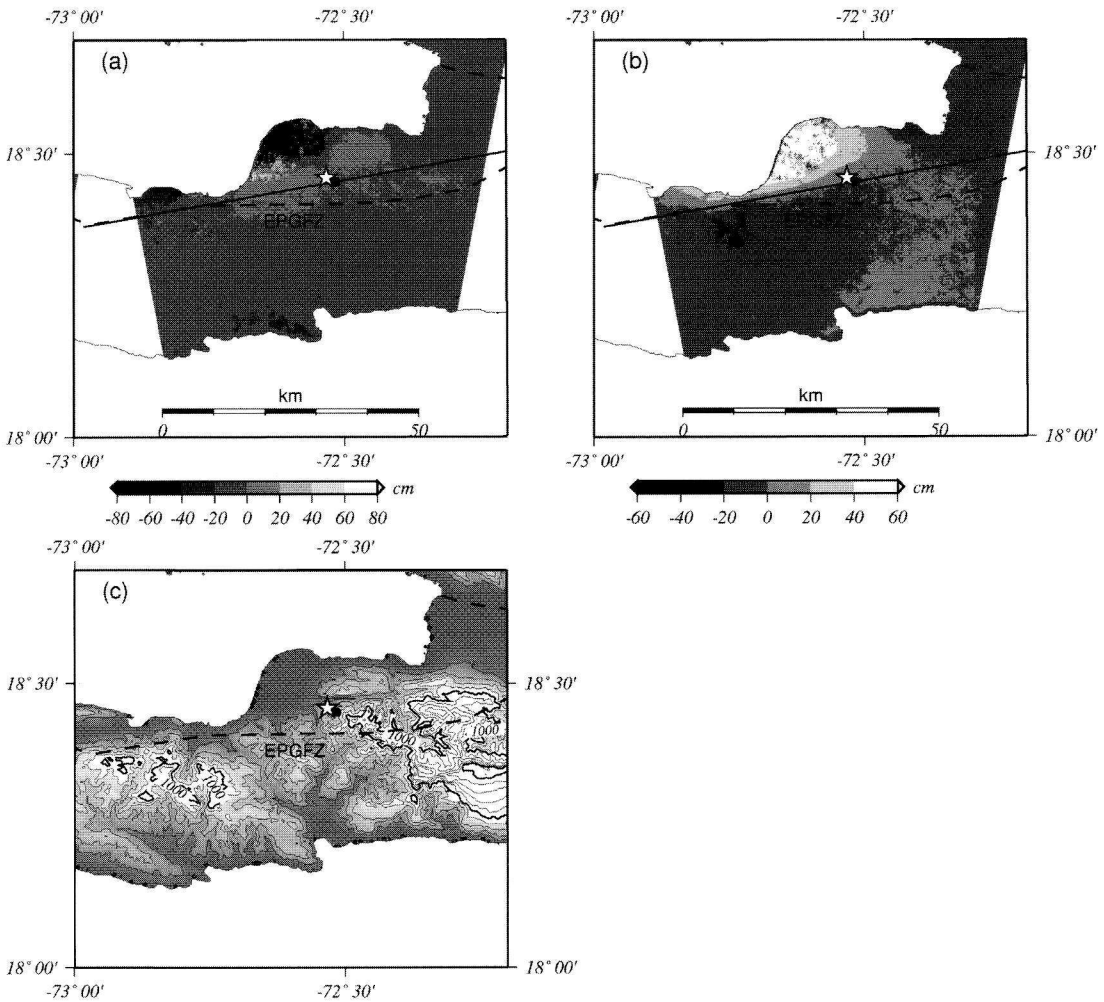


図2 ハイチ地震前後の2方向の PALSAR の干渉画像から作成した (a) 疑似東西, (b) 疑似上下変位. (c) は同じ領域の地形図. ☆印が USGS の震央で, 破線がエンリキロ断層の位置を示す. (a) (b) 中の実線は, 仮定した断層上端の位置. その北側の平野が隆起し, 南側の山地が沈降したことがわかる (橋本, 2010).

た。すべりの中心は、エンリキロ断層から数 km 北側の海底下に位置することがわかった (橋本, 2010)。2008 年にアメリカの研究者が、GPS 観測結果にもとづいてエンリキロ断層での地震発生危険性を指摘していた (Manaker et al., 2008)。しかし、この指摘も鉛直左横ずれ断層としてのエンリキロ断層を仮定したもので、これまで繰り返してきた地震について語られるべきものである。残念ながら、今回の地震は想定されていた地震とは言えず、単純な地震の繰り返しという考えに立脚した長期予測の脆弱性を如実に示すものであった。

ハイチ地震から 2 カ月も経たない 2 月 27 日、今度は南米チリを Mw 8.8 の地震が襲った。この地震では、津波と強震動によりチリ中部に大きな被害を出したにとどまらず、太平洋を渡って伝わってきた津波が、我が国の養殖漁業に多大な被害をもたらしたことは記憶に新しい。この地震に際しても PALSAR の観測を行うことになった。しかし、今度の相手は震源断層の長さが 800 km 前後で、地殻変動も沿岸から 500 km 以上内陸まで及ぶと予想される巨大地震である。普通の SAR 観測 (strip-map mode) では、観測領域は幅約 70 km に限定されるので、地殻変動の全貌をとらえるまでに長い時間がかかってしまう。しかも、その間には余震や余効変動が間違いなく発生するので、地震時変動と余震による変動や余効変動を分離することが極めて困難になる。ところで、PALSAR にはいくつかの観測様式があり、その中で広域観測モードと呼ばれるものがある。通常の strip-map mode ではマイクロ波の照射方向を固定して観測するのに対して、一定の時間間隔で照射方向を変えて広域の情報を得る wide swath mode (ScanSAR) である。ScanSAR はヨーロッパの Envisat などでも実施されており、2007 年のペルーの地震では地殻変動検出に用いられている (Pritchard and Fielding, 2008)。2008 年の四川地震では、PALSAR の ScanSAR 画像を使って、UCSD のグループが地殻変動検出を行った (Tong et al., 2010)。また、NEC のグループも独自で干渉処理法を開発していた (宮脇・他, 2010)。我々も 2009

年後半から、UCSD の Sandwell 教授の協力を得、PALSAR の ScanSAR 画像を用いた干渉処理を試みて、ハイチ地震の地殻変動を得るまでになった。チリ地震の発生を受け、地震 WG 内で大きな議論が巻き起こった。3 月 1 日に予定されている南行軌道での観測を、高分解能で確実に干渉処理ができる strip-map mode で行うか、それとも分解能を落としても広域をとらえる ScanSAR を用いるべきか、が問題となった。地震発生後できるだけ早い時期に地殻変動の全貌を捉えることは、引き続き余効変動との分離を容易にするためにも重要であり、断層すべりの推定精度を上げることにも寄与する。このような議論を受け、震源域のほぼ全域をカバーできる ScanSAR モードを用いることとなった。図 3 は、このような議論を経て撮像された 2010 年 3 月 1 日の ScanSAR 画像と、2008 年 4 月 1 日の画像の干渉処理結果である。アンデス山脈から太平洋沿岸域まで見事に干渉し、地殻変動を捉えている。首都サンティアゴ付近から太平洋沿岸コンスティテュション付近まで、25 サイクルほどのフリッジが数えられる。マイクロ波の半波長 11.8 cm をかけると、約 3 m の視線方向伸長の変動である。変位のピークはコンスティテュション付近とコンセプションの南の 2 カ所にあり、今回のチリ地震は 2 つのアスペリティを持っていることを示唆している。

これからの課題

「だいち」の打ち上げから、国内外の大地震に伴う地殻変動研究は飛躍的に向上した。解析処理のソフトウェアも複数整備され、研究者向けにはフリーで入手することが可能なものもある。ルーチ的な解析であれば、学部学生でもちょっと練習すれば干渉画像を作成することができる時代となった。前章で紹介したように、新しい観測・解析手法も積極的に導入され、SAR の可能性を広げている。海外では新しい SAR 衛星が打ち上げられ、2013 年度には「だいち」後継機である SAR 専用衛星 ALOS-2 の打ち上げが予定されており、ますます研究に弾みが付きそうである。

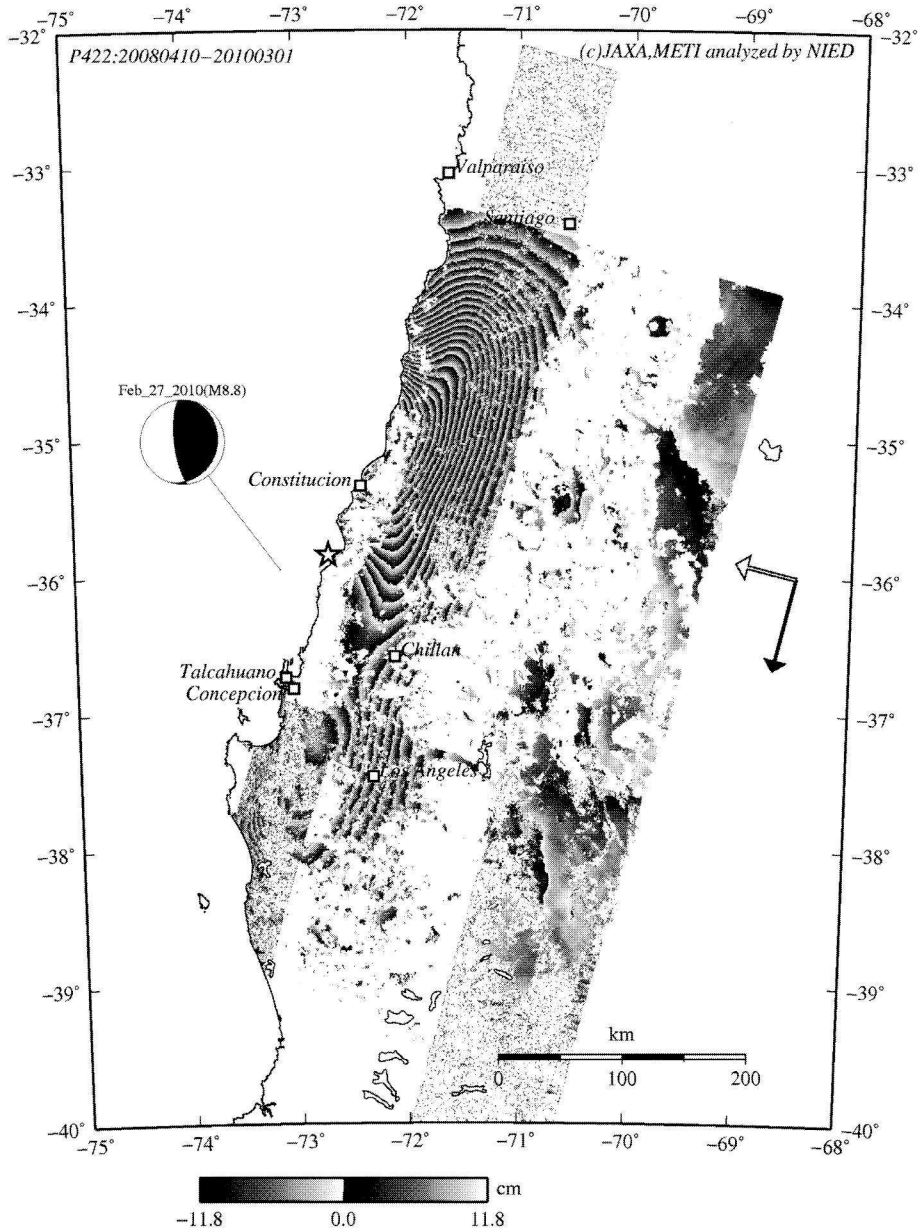


図 3 2010年チリ地震前後の PALSAR の ScanSAR 画像から作成した干渉画像 (防災科学技術研究所 小澤拓氏作成)。

しかし、この間の研究では、問題点も浮かび上がってきた。最も大きな問題は、電離層の影響である。電離層内の電子密度によりマイクロ波の屈折率が変化するのだが、PALSAR が用いている L バンド (波長 23.6 cm) という周波数帯は、他の SAR のもの (C バンド: 波長 5.6 cm, X バンド: 波長 3 cm) より 4 倍以上低い。屈折率に対する電離

層の影響は、周波数の 2 乗に反比例するため、16 倍以上も大きくなる。このためか、PALSAR の干渉画像には原因不明の波長の長い縞模様が表れることがよくある。プレート沈み込みに伴う経年的な変動など微小な地表面変動をとらえるためには、これが大きなノイズとなる。残念ながら、これを除去する工夫に関しては、まだ決定版は存在

しない。ALOS-2 搭載の SAR も同様に L バンドのマイクロ波を利用するため、この問題は付きまとう。ALOS-2 と「だいち」では観測時間が異なるので、影響の出方も異なると考えられるが、L バンドを用いる限り電離層の対策は急務である。

一方、マイクロ波は当然対流圏内の水蒸気の影響も受ける。しかし、最近研究が進み、気象数値モデルなどの活用により、補正が可能となりつつある（例えば、小澤・上田、2010）。

SAR は時間分解能が低いという大きな欠点を持っている。この点を根本的に解決するためには、同じ型の衛星を同じ軌道にたくさん配置するしかない。実際、イタリアの Cosmo-SkyMed 衛星は、同一軌道上に 4 機を配して、再来間隔 8 日を目指している。しかし、これは財政状況やロケットの運用状況を考えてみると現実的でない。他の SAR 衛星データの活用や、GPS との結合などにより、カバーしていくしかないであろう。

SAR の解析・データ処理については、上記以外にも種々の問題があり、それぞれ研究が進められている。一方、SAR データの地震モデル化研究への活用については、実はあまり進んでいない。SAR の高空間分解能に見合うモデリングができていないのである。地震断層のモデル化で主として用いられるのは、依然として Okada (1985) のディスロケーション・モデルである。SAR のデータは構造不均質や地形の影響などの情報を持っているはずであるが、その大部分を捨て去っているのが現状である。実にもったいない話である。モニタリングとモデリングは研究の両輪であるので、関連する研究者が対話しながら、両者がバランスよく進歩していくことが望まれる。

参考文献

Hashimoto, M., M. Enomoto, and Y. Fukushima (2010) Coseismic Deformation from the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Derived from ALOS/PALSAR Images, *Tectonophysics*, 491, 59-71, TECTO-124726 ; doi : 10.1016/j.tecto.2009.08.034.
橋本 学 (2010)「だいち」PALSAR で捉えた 2010 年 1

月 13 日ハイチ地震に伴う地殻変動とそのテクトニクな意義, 地球惑星科学連合 2010 年大会, SCG087-10.
Kobayashi, T., Y. Takada, M. Furuya, and M. Murakami (2009) Location and types of ruptures involved in the 2008 Sichuan earthquake inferred from SAR image matching, *Geophysical Research Letters*, 36, L07302, doi : 10.1029/2008GL036907.
Manaker, D.M., Calais, E., Freed, A.M., Ali, S.T., Przybylski, P., Mattioli, G., Jansma, P., Prépetit, C., and de Chabaliér, J.B. (2008) Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean. *Geophys. J. Int.*, 174, 889-903, doi : 10.1111/j.1365-246X.2008.03819.x.
宮脇正典・山口志野・木村恒一 (2010) PALSAR ScanSAR インタフェロメトリによる広域地殻変動検出の試み, 地球惑星科学連合 2010 年大会, STT072-05.
Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 75, 1135-1154.
小澤 拓・上田英樹 (2010) 三宅島における複数バスの干渉画像を用いた地殻変動の検出, 地球惑星科学連合 2010 年大会, STT072-01.
Pritchard, M.E., and Fielding, E.J. (2008) A study of the 2006 and 2007 earthquake sequence of Pisco, Peru, with InSAR and teleseismic data, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09308, doi : 10.1029/2008GL033374.
飛田幹男・藤原 智・村上 亮・中川弘之・Rosen, P. (1999) 干渉 SAR のための高精度画像マッチング, *測地学会誌*, 45, 297-314.
Tong, X., Sandwell, D.T., and Fialko, Y. (2010) Co-seismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS, and field data, *J. Geophys. Res.*, 115, B04314, doi : 10.1029/2009JB006625.

橋本 学

[はしもと まなぶ]

現職 京都大学防災研究所教授

略歴 京都大学大学院理学研究科博士課程修了, 建設省国土地理院地殻調査部観測解析課長, 京都大学防災研究所地震予知センター助教授を経て現職

研究分野 地殻変動, テクトニクス

著書 『防災学ハンドブック』(共著, 朝倉書店)



海底の動きを測る

～GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～

佐藤まりこ

1. はじめに

近年、日本で被害をもたらした地震といえば、2007年の能登半島地震や新潟県中越沖地震、2008年の岩手・宮城内陸地震など内陸の断層で発生する地震が記憶に新しいが、長期的に見ると、地震の多くは日本周辺のプレート境界付近で発生しており、過去において繰り返し大きな被害をもたらしてきた。特に、宮城県沖地震や東海・東南海・南海地震などのプレート境界地震は、地震調査研究推進本部の長期評価でも発生確率が高く評価されている上、想定される地震の規模も先に述べた内陸地震よりも大きく、将来発生する地震の被害低減のためにさまざまな調査研究が行われている。

地殻変動観測は、そのようなプレート境界地震を引き起こす歪みの蓄積状況を把握する有力な観測手段の一つであり、日本では、国土地理院や大学により稠密なGPS観測網が整備され、日々詳細な地殻変動がモニターされている。しかしながら、大きな被害をもたらすプレート境界地震の震源域の大部分は日本列島の沖合、すなわち海域にあるため、陸域のみならず海域で地殻変動データを取得することが重要である。

海上保安庁では、東京大学生産技術研究所の技術協力の下、海域の地殻変動観測を実現するべく、研究開発を進め、ようやく年間数cmの速度で移動するプレートの動きを捉えることができるようになった。我々のグループの他、東北大学グループや名古屋大学グループでも観測機器の開発や観測精度の向上等の研究を目的として同様の観測を行っている。

本稿では、海底地殻変動観測の概要とこれまで

に得られた成果を紹介するとともに、将来発生するプレート境界地震の発生予測に向けた課題について述べる。

2. GPS/音速測距結合方式による 海底地殻変動観測

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測は、船やブイを介して、「キネマティックGPS (KGPS) 観測」と「音響測距観測」といった異なる2つの技術を結合し、海底に設置した海底局の位置をセンチメートルの精度で測定する観測で、この観測を長期間行うことで海底の動き、すなわち地殻変動を検出する(図1)。海上保安庁及び大学が設置している海底基準点の配置を図2に示す。海底基準点は、三陸沖から室戸岬沖にかけての太平洋側の海域に約30点設置されており、船やブイによる観測が行われている(佐藤ほか, 2008)。

観測システムは、主に船上局と海底局から構成される。船上局は、GPSアンテナ/受信機、音響トランスデューサ(音響送受波器)、動揺計測装置からなり、時々刻々と変化する船の位置をGPSで計測しながら、海底局に対して音響測距観測を行い、音響トランスデューサ-海底局間の音響信号(音波)の往復時間を計測する。動揺計測装置は、KGPS観測で得られた船上GPSアンテナの位置から音響信号を送受信した瞬間の音響トランスデューサの位置を求めるのに必要な船の姿勢を計測する。海底局は、船上の音響トランスデューサから送信された音響信号を受信し、一定時間後に返信する機能を持つミラートランスポンダで、1箇所の海底基準点につき3、4台が設置されている。観測中は、音響測距観測で得られた音響信号

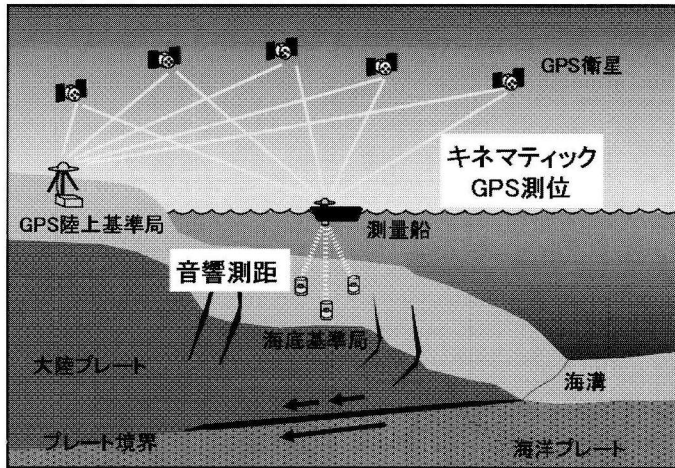


図 1 海底地殻変動観測の概念図

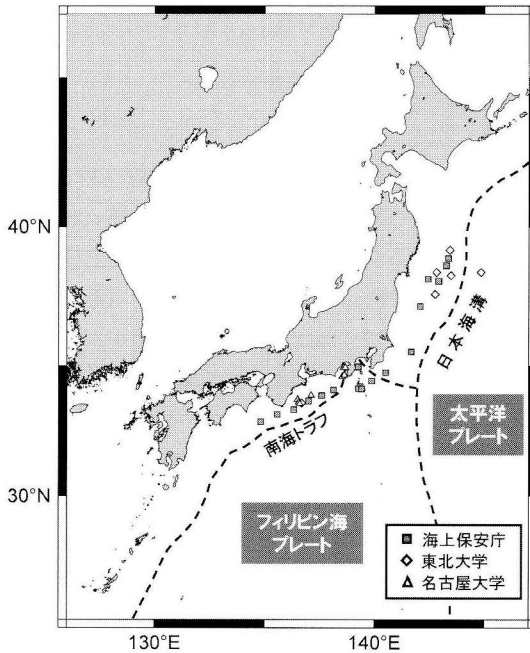


図 2 海底基準点の配置

の往復時間を距離に換算するのに必要な海中の音速プロファイルを取得するため、適宜 CTD 観測、XCTD 観測、XBT 観測を行っている。

このようにして得られた音響信号の往復時間、音響信号を送受信した瞬間の音響トランスデューサの位置、海中の音速度構造から、最小二乗法により各海底局の位置を求め、それらの平均位置を

海底基準点の位置として決定する。

この観測の最も大きな誤差要因は、空間的にも時間的にも絶えず変化している海中の音速度構造であるが、これを完全に把握することは不可能である。そこで我々の観測では、3, 4 台の海底局に対してできるだけ空間的にバランスよく音響測距観測を行うとともに、海中の音速度構造の時間的変化を解析的に推定することにより、海中の音速度構造の誤差による海底局の水平位置決定への影響を低減している。

3. これまでに得られた主な成果

3.1 海洋プレートの沈み込みに伴う地殻変動

観測データの蓄積により、現在では、多くの海底基準点で定常的な地殻変動が検出され、学会等で報告されている。ここでは、一例として海上保安庁が捉えた宮城沖・福島沖の地殻変動について紹介する。

宮城沖から福島沖にかけての海域には、3つの海底基準点「宮城沖1」(2001年設置)、「宮城沖2」(2004年設置)、「福島沖」(2001年設置)があり、測量船による繰り返し観測が行われている。2010年7月までの観測から得られた海底基準点のユーラシアプレートに対する移動速度を国土地理院の電子基準点の速度と併せて図3に示す。なお、宮城

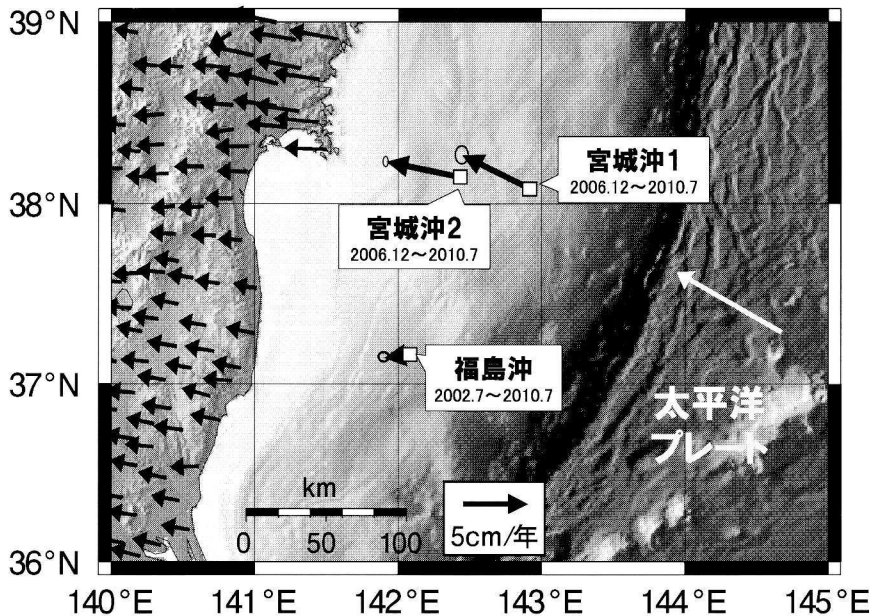


図3 ユーラシアプレート安定域に対する動き
陸上の矢印は、国土地理院の電子基準点（2009/4～2010/4）の動きを示す。

沖では、2005年8月16日にM7.2の地震が発生したため、「宮城沖1」及び「宮城沖2」海底基準点については、同地震による余効変動が終わり、再び海洋プレートの沈み込みによるプレート内変形が始まったと考えられる2006年12月以降の観測結果を使用した。「宮城沖1」海底基準点では、2005年の地震前に行われた集中観測により、西北西方向の動きが検出されているが（Fujita et al., 2006）、地震前後の移動速度は概ね調和的である。

図3より、宮城沖と福島沖とで移動速度が有意に異なっていることが分かる。これは、海底基準点付近のプレート間の固着度合いの違いを示していると考えられ、「宮城沖1」、「宮城沖2」海底基準点付近ではプレート間の固着が強く、「福島沖」海底基準点付近では固着が弱いことが示唆される。この結果は、GPS観測から求められたバックスリップ分布（例えば、Suwa et al., 2006）や小繰り返し地震の分布（Uchida et al., 2006）から推定される固着状況と整合的である。

3.2 地震に伴う地殻変動

3.2.1 2004年9月5日記伊半島南東沖地震

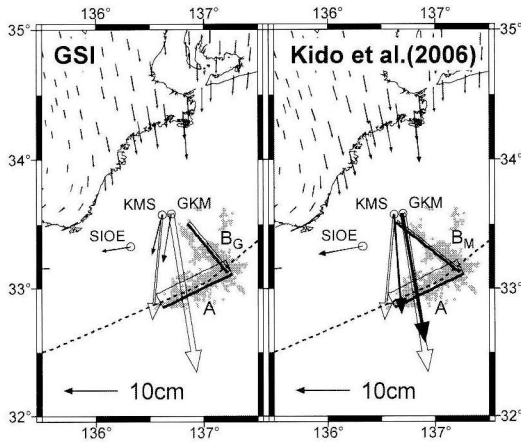
東北大学グループ及び名古屋大学グループは、

2004年9月5日の紀伊半島南東沖地震（M7.4, M6.9）の前後に実施した観測から、同地震に伴って熊野灘に設置されている基準点がそれぞれ南に約20～30 cm移動したことを検出した（図4（a）；Kido et al., 2006；Tadokoro et al., 2006）。これらの結果は、海底地殻変動観測が地震に伴う地殻変動を検出した初の事例である。さらに、Kido et al. (2006) 及び Tadokoro et al. (2006) は、陸上のGPS観測から推定された同地震の震源断層モデルでは海底地殻変動観測の結果を説明できないとして、断層モデルの改良を試み、海域の地殻変動データが沖合で発生する地震の断層モデルパラメータの拘束に有効であることを示した。

3.2.2 2005年8月16日宮城県沖の地震

海上保安庁では、2005年8月16日に宮城県沖の地震（M7.2）により、同地震の震央の東方約10 kmに設置されている「宮城沖2」海底基準点が、東に約10 cm移動したことを検出した（図4（b）；Matsumoto et al., 2006）。この結果は、陸上のGPS観測に基づく断層モデルから推定される変位と大きさ・方向ともに変調和的であった。一方で、震央から約60 km離れたところに位置する

(a) 2004年伊半島南東沖地震 (M7.4, M6.9)



(b) 2005年宮城県沖の地震 (M7.2)

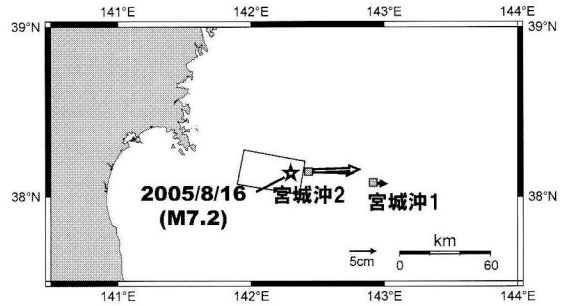


図4 地震に伴う地殻変動

白抜き矢印は、それぞれ観測結果、黒い矢印は、モデルによる計算値を示す。

(a) 2004年伊半島南東沖地震 (左: 国土地理院 (2004) の断層モデル, 右: Kido et al. (2006) により修正した断層モデル), (b) 2005年宮城県沖の地震 (断層モデルは国土地理院 (2005) による)

「宮城県沖1」海底基準点では有意な地殻変動は見られなかった。

4. 地震の発生予測への貢献をめざして

海底地殻変動観測技術は、この10年間で飛躍的に進歩し、地震に伴う地殻変動や海洋プレートの沈み込みに伴う定常的な地殻変動が検出できるようになった。得られた地殻変動は、海域を主たる震源域とする地震の断層モデルの高度化やプレート境界における固着状況の把握に大変有効であるが、観測精度、観測点数、観測頻度のいずれにおいても陸上のGPS観測には遠く及ばず、今後どこまで陸上のGPS観測に近づけるかが課題となっている。

観測精度については、現状では、1回の観測による位置決定精度は2~3cm (RMS) であり、海況等によっては5cm以上離れたところに位置決定される場合もある。また、定常的な移動速度については、年2,3回の観測を5年程度行うことで1cm/年の精度を得ることができるが、途中で大きな地震が起こればリセットされてしまうため、短時間で精度良く移動速度を求められるようにす

る必要がある。現在、海底局の位置決定に最も大きな誤差要因は、時空間的に変化する海中の音速構造だと考えられており、この影響を低減させることが観測精度の向上に不可欠である。

また、観測点数については、GPS観測点が全国に1,200点以上設置されているのに対し、海底地殻変動の観測点は大学を含めても約30点と桁違いに少ない。特に、巨大地震の発生が懸念されている宮城県沖や東海・東南海・南海地域には集中的に海底基準点を展開し、海域の地殻変動を時空間的にモニターすることが重要であり、そのためには、先に述べた1回ごとの観測精度の向上に加え、観測の効率化、観測コストの削減等が必要である。

観測頻度については、現状では、船を用いて行うため、一つの海底基準点につき年数回しか観測を行うことができない。そこで、東京大学生産技術研究所や東北大学では、船の代わりに自律型航行ロボット (AUV) や係留ブイを使用する次世代型観測システムの研究を進めている (Fujimoto, 2006; 望月ほか, 2008)。これらの技術が確立すれば、海域の地殻変動の詳細な時間的変化が明らかになると期待される。

5. おわりに

海底地殻変動観測は、近年、成果が出始めた新しい観測技術であるが、この観測で得られる海域の地殻変動データは、将来のプレート境界地震の発生に関連するプレート間の固着状況を把握する上で非常に有効な知見を提供すると期待される。今後も大学と海上保安庁が連携して、更なる高精度化、多点化、セミリアルタイム化を進め、海底地殻変動観測が陸上のGPS観測を始めとする他の観測とともにプレート境界地震の発生予測精度の向上に貢献することを期待する。

謝辞

「宮城沖2」海底基準点は、文部科学省のプロジェクト「宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測」（平成14～16年度）の一環として設置されました。また、海上保安庁の解析の一部には、国土地理院の電子基準点データを使用しています。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Fujimoto, H. (2006) : Ocean bottom crustal movement observation using GPS/acoustic system by universities in Japan, *J. Geodetic Soc. Japan*, 52 (4), 265-272.
- 2) Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O.L. Colombo (2006) : GPS/Acoustic seafloor geodetic observation : method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-275.
- 3) Kido, M., H. Fujimoto, S. Miura, Y. Osada, K. Tatsuka, and T. Tabei (2006) : Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planets Space*, 58, 911-915.

- 4) 国土地理院 (2004) : 9月5日紀伊半島南東沖地震断層モデル, 第159回地震予知連絡会資料.
- 5) 国土地理院地理地殻活動研究センター (2005) : 2005年8月16日宮城県沖地震による地殻変動と断層モデル, 日本測地学会第104回講演要旨集, 123-124.
- 6) Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006) : Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space*, 58, 1573-1576.
- 7) 望月将志・浅田 昭・浦 環・藤田雅之 (2008) : 海中ロボットを利用する次世代海底地殻変動観測システムの開発, *測地学会誌*, 54, 189-197.
- 8) 佐藤まりこ・木戸元之・田所敬一 (2008) : GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～観測成果と新たな取り組み～, *測地学会誌*, 54, 113-125.
- 9) Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato, and K. Tachibana (2006) : Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *J. Geophys. Res.*, 111, doi : 10.1029/2004JB003203.
- 10) Tadokoro, K., M. Ando, R. Ikuta, T. Okuda, G. M. Besana, S. Sugimoto, and M. Kuno (2006) : Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to M7 class offshore earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi : 10.1029/2006GL026742.
- 11) Uchida, N., T. Matsuzawa, S. Hirahara, and A. Hasegawa (2006) : Small repeating earthquakes and interpolate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake (M=7.2), *Earth Planets Space*, 58, 1577-1580.

佐藤まりこ

[さとう まりこ]

現職 海上保安庁海洋情報部技術・国際課海洋研究室主任研究官

略歴 平成12年海上保安庁入庁。水路部航法測地課、海洋情報部海洋調査課航法測地室、警備救難部環境防災課、海洋情報部海洋調査課航法測地室を経て、平成21年4月より現職



応力連続観測と今後の地震予知研究

—ボアホール応力連続観測計器の開発による今後の展開—

石井 紘

1. はじめに

地震の発生予測をする上で地震発生域の応力の状態を知ることが重要である。しかしながら現在、応力の連続観測は出来ていない。歪の連続観測は出来るが媒質の弾性定数により変化量が異なり、地震発生に直接関連する情報を得るには十分でない。そこで我々は応力の連続観測可能な計器を開発して深部ボアホールに設置し、観測データを蓄積しつつある。応力の連続観測により今後の地震予知研究にどのような展開が期待できるかについて述べる。

2. 応力と歪と地震発生予測

地震は断層面に作用する応力が摩擦強度を超えると発生すると考えられている。地震発生域の応力分布と断層強度の時空間モニターが地震予知研究の最終目標である(例えば飯尾, 2010)¹⁾。従って歪の観測よりも応力の観測の方が直接的であり望ましい。歪の場合には媒質の弾性定数の違いにより変化量が異なるため応力を求めるには媒質の弾性定数を知らなければならない。現在、応力の測定は水圧破砕法や応力解放法などにより行われているが、知ることが可能なのは測定地点の測定時の応力値のみであり連続観測値はわからない(地球, 2004a & 2004b)^{2),3)}。

3. 応力連続観測計器の開発

開発した応力計の原理や構造は別の機会に述べる。歪計と異なる点は圧力を受ける有限の面積を有する受圧面を付加したことである。この応力計

に3種類の検定を行うことにより、応力と歪の両方の観測が可能になる。この検定は圧力検定、加重検定と歪検定である。圧力検定とは水圧を可変することが可能な容器に応力計をセットし、水圧の変化に対する出力電圧の関係を求める方法である(石井, 2005)⁴⁾。加重検定とは受圧面に荷重を付加し、荷重と出力電圧の関係を求める方法である。水圧検定と加重検定はどちらも応力と出力電圧の関係を求めるための検定である。信頼性を高めるために異なる二つの検定をしているがほとんど同じ結果が得られている。歪検定とは受圧面に作用させる変位を変化させ変位と出力電圧の関係を求めるものである。感度検定結果の一例として図1を示す。これは応力計が搭載している水平4成分と鉛直成分の中で鉛直成分の検定結果のみを示している。加圧と減圧を繰り返して得られた結果であるが、圧力がゼロから12MPaまで出力電圧と直線の関係を示している。12MPaは1200mの水圧に相当する。このような応力と出力電圧の関係が水平成分にも得られており、深部ボアホー

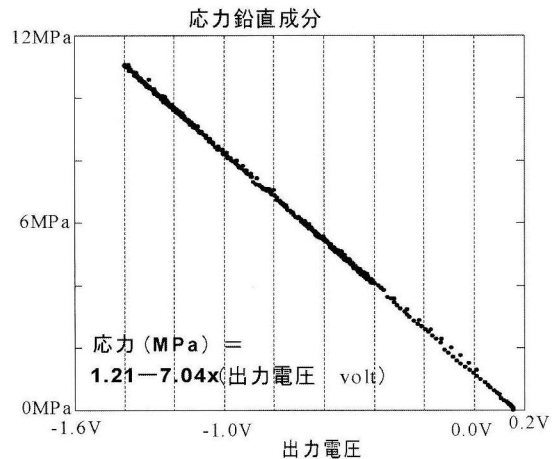


図1 応力計の鉛直成分の感度検定結果。水平成分も同様な結果が得られているが省略

ルにおいて応力の連続観測を可能にしている。出力電圧と応力の関係式から測定応力成分の相対的な応力変化のみならず応力計設置地点の応力値を知ること出来る。これに関しては別の機会に述べる。センサーのドリフトはチェックによると応力換算で小さいものは年に数 kPa 程度であり、応力蓄積を知るにも十分役に立つと考えている。

4. 開発された応力連続観測計器

地震に関連する信号を高い S/N 比で観測するには深いボアホールが最適である。東濃地震科学研究所ではボアホール総合観測装置の開発を進めるとともに東濃地域にボアホールのアレイ観測網を構築し、観測データに基づいて地殻活動や地震のメカニズムなどの研究を行っている（東濃地震科学研究所ホームページ参照⁵⁾）。応力の連続観測の重要性を認識し、前項で述べたように応力計を開発した。現在2台の応力計が深部ボアホールに埋設・設置され稼働している。図2は応力計も搭載した新型の総合観測装置の見取り図であり、研究所のボアホール観測点（陶史の森：深度512m）に埋設・設置し良好なデータを蓄積している。従来、歪計が搭載されていた部分を応力計に置き換えたものである。計器は全長約8mで総重量約290kgである。1本のボアホールで地震、地磁気、温度、傾斜、歪と応力など22成分の観測が可能である。観測データは光ケーブルにより地上まで伝送される。このような多成分の観測を1台で可能なボアホール計器を開発しているのは世界的に見ても日本の東濃地震科学研究所だけである。新型の総合観測装置が開発される前のタイプの歪計を搭載した総合観測装置は今までに東濃地震科学研究所のほか大学や研究機関により採用され南海地震、東南海地震や東海地震の予知研究のために30カ所以上の深部ボアホールに設置され連続観測データを蓄積している。

5. 応力連続観測計器による観測の例

ここでは実際に応力計により観測されたデータ

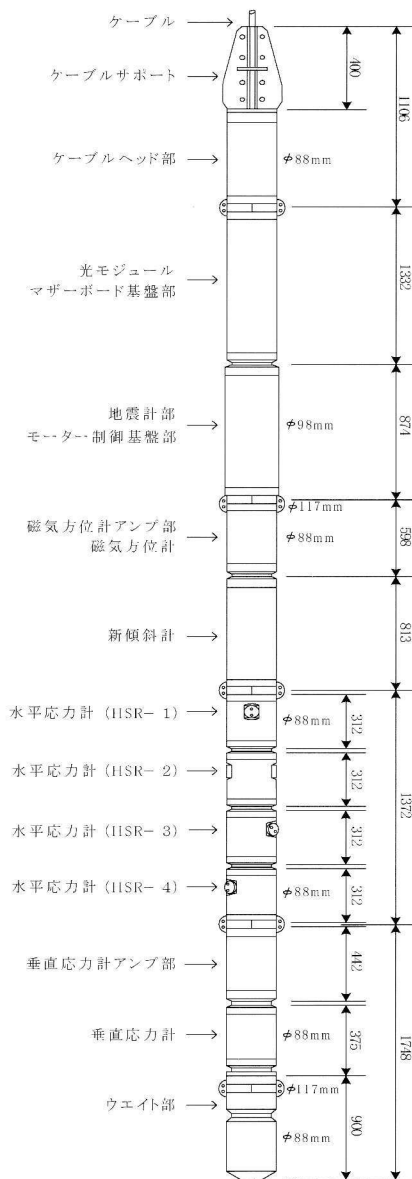


図2 応力計を搭載した地殻活動総合観測装置の見取り図

の例を示す。図3は2010年4月14日に中国の青海省で発生した地震（M 6.9, 震央距離 3500 km）の記録である。研究所のボアホール観測点 陶史の森（深度：512 m）と屏風山観測点（深度：1020 m）で観測したそれぞれ応力地震動と歪地震動の記録を示している。応力地震動の最大振幅は1 kPa 程度であり、歪地震動の最大振幅は約 5×10^{-8} 程度であることが分かる。

歪計を搭載した従来のボアホール地殻活動総合観測装置による成果については石井・山内(2007)⁶⁾にまとめて報告されているが、ボアホール観測により従来得られなかった地震に関する興味ある結果が得られている(東濃地震科学研究所・名古屋

大学, 2005; 大久保, 2006; 浅井, 2006)^{7)~9)}. すなわち歪地震動や歪変化のデータから他の観測からは得られないような震源過程や低周波地震に伴う変動に関する情報が得られている. 応力連続観測に関するデータは今までに得られていない物理量であり, 今後, 解析法の開発により, 更なる情報を得ることが出来ると考えている. 東濃地震科学研究所の近くにある JAEA の瑞浪深地層研究所の立坑の深度 200 m ステージに埋設・設置した応力計のデータの一例が図 4 に示されている. 設置点の近傍には NNW 断層が存在している(石井, 2009)¹⁰⁾. 地球潮汐の応力振幅は 1 kPa 弱であるのが分かる. 2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾の地震(M 6.6)の地震波到達に対応して応力計に顕著な変動が記録されている. この変動は 8 月 13 日までに鉛直応力成分で約 40 kPa 程度増加変動し, 同じボアホール内に設置してある水圧計は 30 kPa 程度で同じような変動を示している. 水平応力成分は 3 成分とも減少を示している. このような変動は地震波の到達による振動により, 断層表面を覆っている物質が除かれ, 透水率の変化による間隙水圧の変化により生じる現象であると考えられている(Asai, 2006)¹¹⁾.

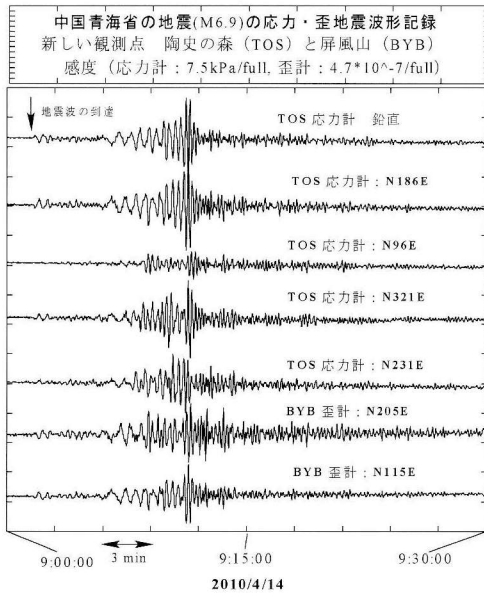


図 3 2010 年 4 月 14 日に中国青海省で発生した地震 (M 6.9) の応力地震波形と歪地震波形

200m ステージボアホールで観測された応力計の記録 (2009/8/8 - 8/13)

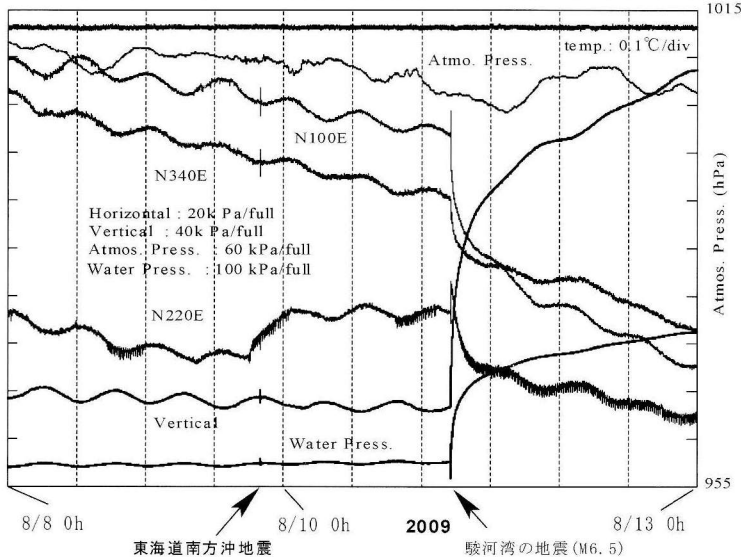


図 4 NNW 断層近傍の 200 m ステージのボアホールで観測された応力計の記録

6. 応力連続観測などによる活断層の活動検知

次に応力の連続観測などによる活断層の活動検知の例を述べる. 図 4 に見られた駿河湾の地震で生じた変動の主応力を計算してみると図 5 のようになる. この主応力変化は NNW 方向に沿って右横ずれの変動を示している. この変動は近傍の NNW 断層の固有の動きに対応している. この観測事実は駿河湾の地震による地震波の到達により, 前述のように間隙水圧が変化し, それに伴い NNW 断層の固有の動きである右横ずれの変動が発生したと同等の応力変

主応力・最大せん断応力とNNW断層（右横ずれ）の方向
 (2009/8/11 05:04 - 8/13 00:00)

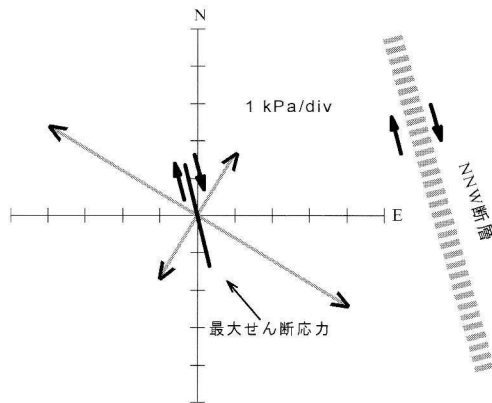


図5 駿河湾の地震に伴って生じた変動の主応力と最大せん断応力およびNNW断層

動が生じたと解釈される。

別の例としては茂住断層の近傍に掘削されたボアホールに設置された歪計により時々断層運動に相当する歪変動が観測されると報告されている (Ishii et al., 2007)¹²⁾。

そのほか断層近くのボアホールにおける揚水実験により、揚水時には断層近傍に設置された歪計に断層固有の運動に相当する歪変化が観測され、水位の回復時には断層固有の運動と逆の変動が観測されている (石井, 2009)¹⁰⁾。

これらの結果から活断層等はわずかではあるが時々動いている可能性が考えられる。断層近傍における応力連続観測などによりその動きがモニターでき地震予知研究に有効な情報を得ることが期待される。

7. 前兆的変動の観測例

次項の「今後の展開」と関連するので過去に明瞭に観測された前兆現象の例を簡単に述べる。伊豆の群発地震の前兆現象の研究においては (石井ほか, 1998; Okada et al., 2000)^{13), 14)} 変動成分の時間軸上の変動を見ているだけではわからないことも傾斜のベクトル表示や歪のテンソル成分の表示の時間変化をみることにより前兆変動が明らかになった。応力の場合には直接地震発生と関連する

情報が得られることが期待できるのでこのような方法の適用はより有効と考えている。

8. 応力連続観測による今後の展開

新しく開発された応力計による応力の連続観測データや応力地震波形は新しい解析法を開発することにより、特に震源情報や低周波地震に伴う地殻変動などに関しても新たな情報を得ることが期待される。

我々の目的は地震予知研究に貢献することである。物質が破壊する前には必ず物質が変形する前兆的变化がみられることは我々の身の回りにおいてもしばしば経験していることである。GPSによる地表の地殻変動観測は全体的な大きな変動を知るには有効である。連続観測の場合には感度は地表の観測より二桁以上良いことが分かっている (例えば Ishii & Kato, 1989)¹⁵⁾。十分深いボアホールにおける高感度の観測はS/Nのよい観測を可能にし、微弱な信号の捕捉を可能にする。

地震発生を推定するには対象としている地域の応力場 (応力分布) や応力蓄積を知ることが最も基本的な観測量であり、地震発生直前の変動を高感度で観測することも重要である。断層の強度を知ることが必要であるがこれは現在のところ推定するしかない。天気予報を精度よく行うには気圧分布とその時間変動を知ることが基本であるが地震予知の場合も同様である。しかし、応力の場合には同じ圧力であるが固体における量であるのでテンソル量であり6成分存在する。

人工的ノイズや気象の影響を受けない深いボアホールに設置された高感度の応力計を現在の地震計のハイネットのように数十キロ間隔で展開することが出来れば地殻内の応力場とその時間変化を詳細に知ることが出来る。天気図のような気圧分布のコンターに相当する応力分布のコンターが得られる。地震発生に関しては特にずれ応力分布が注目される。応力分布により将来発生するであろう地震の場所や地震断層のタイプの予測の可能性が大きい。応力分布のコンターの時間的変動は天気気圧コンターと異なり時間的にはゆっくりし

ていると考えられる。しかし地震発生が近づくにつれて変化は加速し、判りやすくなると考えられる。前項の前兆解析のような手法の適用や応力観測データ固有の解析法の開発により多点の応力変化の時間変動を比較しながら監視することになる。

また、前述の新しい総合観測装置の場合は、応力計のほか傾斜計、地震計、磁力計や精密温度計を搭載している。多項目の観測結果が得られることから、総合的な理解が可能になり、一層正確な判断が出来ると考えている。

上述のことは夢物語ではなく応力連続観測が可能になることにより、現実のこととして、更なる将来の地震予知のための計画を立てることが出来ると考えている。

一方で多点観測を可能にするには、これらの計器の信頼性をより確実にする研究を一層進めるとともに、計器の価格やボーリング経費を軽減する努力が必要なことである。

9. ま と め

1. 連続観測可能なボアホール応力計を開発し観測において良好なデータを蓄積している。
2. 連続観測による高感度の応力値は地震予知研究にとり新しい基本的な観測量であり、今後新しい情報の取得が期待される。
3. 活断層などの活動状況が応力計でモニター出来る可能性がある。
4. 応力連続観測が可能になることにより、地震の予知・予測に向けての今後の戦略を立てることが可能になり、その一例を示した。

参 考 文 献

- 1) 飯尾能久 (2010), 内陸地震はどうして起こるのか?, 地震ジャーナル, 49, 1-8.
- 2) 月刊地球, 地殻応力の絶対測定(上)―その現状・問題点・今後の課題―, (2004a), 26, No. 1.
- 3) 月刊地球, 地殻応力の絶対測定(下)―その現状・問題点・今後の課題―, (2004b), 26, No. 2.
- 4) 石井 紘 (2005), 歪計検定システムの構築, 東濃地震科学研究所報告, 16, 3-13.

- 5) 東濃地震科学研究所ホームページ, <http://www.tries.jp/>
- 6) 石井 紘・山内常生 (2007), 地殻活動総合観測システムの開発と観測された成果および今後の連続観測について, 測地学会誌, 53, No. 2, 99-111.
- 7) 東濃地震科学研究所・名古屋大学 (2005), 深部ボアホール歪観測による地震研究の情報について, 地震予知連絡会報, 74, 561-568.
- 8) 大久保慎人 (2006), ボアホール型ひずみ地震動観測システムの開発とその応用, 博士学位論文(名古屋大学).
- 9) 浅井康広 (2006), 屏風山地殻活動総合観測測点で観測された移動性深部低周波微動活動と同期した異常地殻歪変化―2006年1月―, 東濃地震科学研究所報告, 20, 77-84.
- 10) 石井 紘 (2009), 断層は通常どのようにふるまっているか?, 東濃地震科学研究所報告, 23, 151-158.
- 11) Asai, Y. (2006), Study on the mechanism of coseismic groundwater level changes, 博士学位論文(北海道大学).
- 12) Ishii, H., T. Yamauchi, Y. Asai, S. Matsumoto and A. Mukai (2007), Interesting phenomena detected by the continuous observation of strain and in-situ stress measurements in the vicinity of the active Mozumi-Sukenobe Fault, Geodynamics of Atotsugawa Fault System, 157-162.
- 13) 石井 紘, 中尾 茂, 松本滋夫, 平田安廣 (1998), ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震の前兆的地殻変動, 東京大学地震研究所特定共同研究「地下深部における地殻変動連続観測に向けて」研究会集録, 47-51.
- 14) Okada, Y., E. Yamamoto and T. Ohkubo (2000), Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 105 (B1), 681-692.
- 15) Ishii, H. and T. Kato (1989), Detectabilities of Earthquake Precursors using GPS, EDM and Strain Meters, with Special Reference to the 1923 Kanto Earthquake, J. Geod. Soc., 35, 75-83.

石井 紘

[いしい ひろし]

現職 財団法人地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所所長

略歴 東京大学地震研究所を経て現職

研究分野 地殻変動学, 地震予知



ハイパー・ハイブリッド重力測定

—地殻内流体移動検出の高精度化を目指して

大久保修平

1. はじめに

ハイブリッド重力測定という言葉は、筆者の造語であり、1999年1月29日13:35に、地震研究所談話会の場で初めて用いられた。その意味するところは、FG5重力計などの絶対重力計と、スプリングを用いたラコステ・ロンバーグ重力計・シントレクス重力計等を同時に用いた計測である。これにより、「絶対的な」重力の時空間分布を検出し、地殻内流体移動を検出することができるようになる。このハイブリッド重力測定は、翌2000年の三宅島噴火・伊豆諸島群発地震の際にも実施され、カルデラの陥没や群発地震発生に関与するマグマの移動について、顕著な成果をあげることができた（大久保，2001；Furuya et al., 2003）。また、2003年十勝沖地震などの海溝沿いの大地震にともなう重力変化の場を明らかにすることにも、一定の成果をあげている（大久保ほか，2005）。その一方で、これまでの10年間余りの経験から、次に述べるようなさまざまな課題が明らかになってきている。

（課題1：陸水起源の擾乱によるマスキング効果）

土壌水分変動や地下水流動は、10マイクロガルを超える有意な重力擾乱を引き起こすことがある。たとえば、累加雨量が100mmを超える降雨があると、数マイクロガル～数十マイクロガル程度の重力擾乱が生じる（Kazama and Okubo, 2009）。これによって、地震火山活動起源の重力変動（数マイクロガル～100マイクロガル程度）がマスクされる場合も、しばしば生じる。したがって、環境起源の重力擾乱を如何にして補正・除去し、高品位な重力データを得るかが課題となって

くる。

（課題2：逆問題解の非一意性）

重力だけを用いて地殻内物質の移動経路を明らかにしようとしても、ポテンシャル逆問題解は一般に一意に定められないという本質的な問題がつきまとう。重力以外の適切な観測データを付加して、一意に解を得ることが課題となっている。

今回、提唱するハイパー・ハイブリッド重力測定は、上記の課題を克服して、地震・火山・テクトニクスに関する、地殻内流体の移動を検出するための重力観測法である。以下ではその概略を述べ、それが目指すものについて夢を語ることにする。

2. 重力データの高品位化—陸水起源の重力擾乱の除去

2.1 従来の手法とその難点

陸水起源の擾乱を見積るために、大きく分けて、次の2つの手法が従来から用いられてきた。すなわち経験的補正と陸水観測補正とである。経験的補正では、タンクモデルや自己回帰モデルなど数理モデルを仮定することが多い。例えば1mm当たり降雨量に対する即時応答（ステップ量）や、降雨後の重力変化速度等のパラメータ（＝システム特性）を調整することにより、現実の降雨（＝入力）に対する重力擾乱（＝応答）を説明しようとするものである（Harnisch and Harnisch, 2006）。この手法は簡便ではあるが、地下水流動の問題が本質的に非線形（土壌浸透率が土壌水分の関数など）であるため、モデルの有効性・汎用性に疑問符がつく。また、経験的補正であるために、重力データにオーバー・フィッティングすること

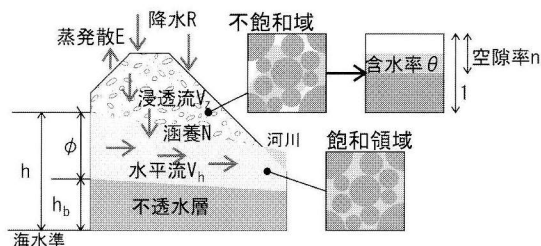


図1 陸水輸送の物理モデル. 全水頭 h と体積含水率 θ が主変数となる

もあり、その場合は重力シグナルそのままで除去される恐れもある。

一方、陸水観測に基づく補正では、当然ながら実際に地下水位及び土壌水分を観測点の回りで十分な密度で観測することが求められる。観測点の状況によって帯水層の深さは数 m～数百 m まで大きく異なるであろうから、その範囲で土壌水分を計測することはかなり困難である。また、重力観測点近傍の数百 m の範囲で、ある程度密に陸水データを得ることは、さらに難しい。したがって、この方法は特に選ばれた連続重力観測点でのみ実施可能であり、ハイブリッド観測で想定しているような多数の野外重力点については事実上、適用不能である。

2.2 Kazama and Okubo の方法

従来の補正法の難点を克服すべく、Kazama and Okubo (2009) は、地下水流動を理論的・定量的にモデリングすることを考えた。その要点は、次のようにまとめることができる。

(1) 地下水 (数値) モデリング

未知変数として、地表に最も近い不飽和層における水分の体積含水率 θ と、その下にある不圧 (unconfined) 飽和帯水層の全水頭 h を選ぶ (図1)。不圧飽和帯水層の下にあると想定される、被圧 (confined) 帯水層については、水の体積弾性率が十分に大きく、水を非圧縮として取り扱えることから無視する。体積含水率 θ に関する非線形拡散方程式 (Richards の式) と、飽和帯水層の全水頭 h の拡散方程式 (Boussinesq) を連立させて、適当な境界条件と初期条件の下で解く (図2)。

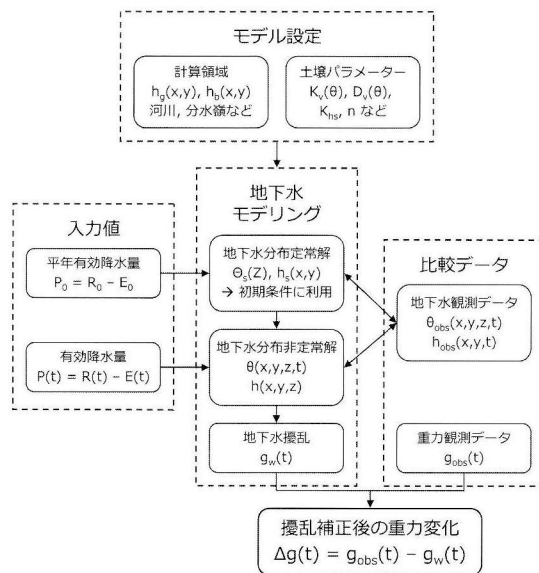


図2 重力に与える陸水効果の補正

(2) 陸水モデル設定と観測による比較検証

上記の数値モデリングには、表層土壌と地下水層の空隙率や透水係数のパラメータが必要とされる。最上層部については、土質試験で得ることができる。下層部についてのパラメータを推定するには、独立に土壌水分観測や地下水位観測を行い、そのデータと、(1) のシミュレーション結果とが一致するように、パラメータをチューニングする (図2)。

(3) 陸水の及ぼす重力 (=地下水擾乱) の計算

(1) 及び (2) により、重力観測点近傍の陸水の時間空間分布が得られる。これの及ぼす引力、すなわち地下水擾乱を、直接積分で求める (図2)。

以上の (1)～(3) が Kazama and Okubo (2009) の方法の概要である (図2)。この手法で陸水起源の重力擾乱を数マイクロガル程度の Accuracy で補正できるようになった。実際、図3の浅間火山における連続観測で明らかになったように、台風などの豪雨時に生じるステップ的な重力変化も数マイクロガル程度の誤差で再現できるようになっている。

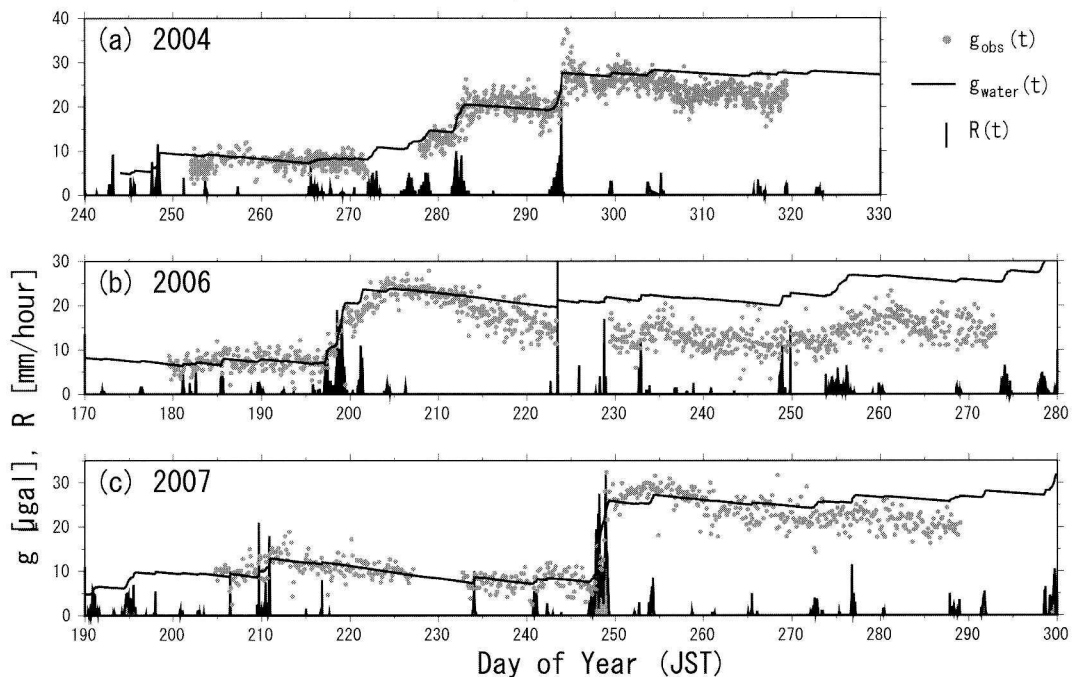


図3 2004年、2006年、2007年の浅間火山における絶対重力測定値（ドット）と、地下水モデリング予測値（実線）。縦棒で示した時間降雨量が顕著な豪雨時、重力は10マイクロガルを超える変動を示す

3. 逆問題解の非一意性と、その解決

数値モデリングに基づく陸水補正を施せば、「いつでも、どこでも」、地震・火山・テクトニクス起源の重力変動を検出できること、及びその検知能力は数マイクロガルより高いことを示した。しかし、例えば図4の火山のマグマ頭位を重力データのインバージョンで求めようとしても、解は一意に定まらない。これを取り除くには、物質の移動経路についての拘束条件と、出来る限り稠密な観測点が必要となる。

とりあえず、物質の移動経路は定まったとして、火山のマグマ頭位を推定する問題を考えてみよう。図4から明らかなように、1観測点のデータしかない場合、同一の重力値に2つの頭位 H が対応しており、解を一意に定めることができない。もし、多数の観測点（図4ではa~dの4点）のデータが使えれば、頭位 H を一意に定められることは明らかである。

次に、物質の移動経路の拘束について考える。

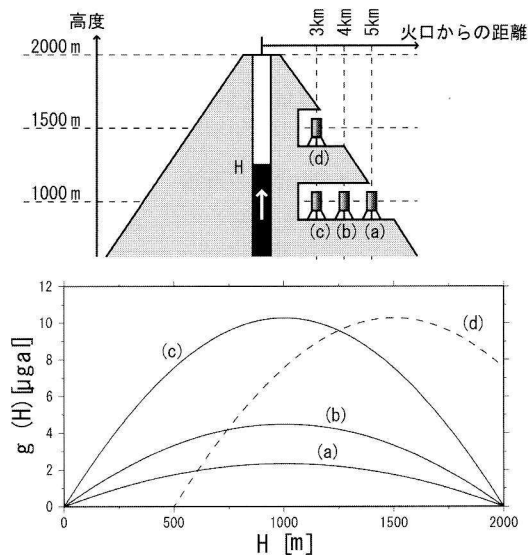


図4 インバージョン解の非一意性の解決には、複数観測点データが必要

地殻内流体として想定されるマグマや水が効率良く輸送される場合には、何らかの経路が確立しているはずである。火山であれば火道がそうであ

り、地震・テクトニクスの問題では、断層面・破碎帯などがそれに相当する。それらの位置や形状が分かっているならば、モデルの空間次元を3次元から1次元もしくは2次元に低下させることができ、インバージョンの解の非一意性を除くのに大いに役立つ。これらの構造のイメージングは、従来から地震波を用いて試みられてきた。しかし、地震波の波長より短いものはイメージングできないことから、10~100 m レベルの空間分解能での構造決定はかなり困難である。一方、近年、宇宙線に含まれる高エネルギーミューオンを用いて、地殻浅部（とくに表層付近）の密度構造が、10 m 程度の空間分解能で決定できるようになりつつある（田中、本号）。これまでのところ、いくつかの技術的条件をクリアーできるような限定的な場所での適用にとどまっているが、筆者のグループでは、田中氏を中心としてボアホール対応型や雑音低減型などの新型のミューオン・イメージング装置を開発している。これらが実用になるのは、数年後と見込まれている。ハイパー・ハイブリッド重力観測に、新型ミューオン・イメージングを組み込むことは、近い将来に当たり前のこととなるだろう。

4. 地震・火山・テクトニクス研究への応用 —現状と未来

ハイパー・ハイブリッド重力測定は、主として地殻内流体の移動を高精度にかつ、連続的に検知することに使える。この測定法の要件をまとめると次のようになる。

（要件1）高精度な重力の絶対値が、空間的に稠密に、かつ時間的に連続観測されていること。絶対重力計のアレーや、絶対重力計でドリフト補正した超伝導重力計のアレーが考えられる。

（要件2）観測点近傍の陸水補正が可能であること。地下水観測が行われているか、あるいは地下水モデリングが可能であること。

（要件3）地殻内流体の移動経路について、幾何学的拘束が与えられること。これには、ミューオン・イメージングなどが想定されている。

ハイパー・ハイブリッド測定の第一例として、筆者らは、京大防災研究所・京大理学研究科との共同研究として、2006年から活発な活動を再開した桜島火山の活動モニターに取り組んでいる。その内容は、前記要件（1）~（3）を最低限ではあるが、満たすものとなっている。具体的には、2010年5月からは、絶対重力計2台が桜島島内の2か所で連続観測を続けている。また、その2点では土壌水分観測と陸水モデリングに基づいて陸水補正值も計算されている。桜島南西麓には、従来型のミューオン・ラジオグラフィ装置が設置され、火道の位置、形状サイズが判明しつつある。これらの観測に基づいて決定される火道内のマグマ頭位は、火山活動と良く対応していることが判明しつつある。

このハイパー・ハイブリッド重力測定を、東海地方、房総半島及び豊後水道などのスロー・スリップ・イベントに対して適用することも検討中である。それには、ボアホール対応のミューオン・イメージング装置開発や、稠密な絶対/超伝導重力計観測網の構築が必要となる。これができるようになれば、プレート境界からの水の移動とスロー・スリップ・イベントの関りも明らかとなり、地震発生予測の研究にも貢献するものと期待される。

謝辞

図版は、風間卓仁氏作成の原図に加筆修正して作成した。

参考文献

- Furuya, M., S. Okubo, F. Kimata, R. Miyajima, I. Meilano, W. Sun, Y. Tanaka, and T. Miyazaki, 2003, Mass budget of the magma flow in the 2000 volcano-seismic activity at Izu-islands, Japan, *Earth Planets Space*, 55, 7, 375-385.
- Harnisch, G. and M. Harnisch, 2006, Hydrological influences in long gravimetric data series, *J. Geodyn.*, 41, 276-287, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.018.
- Kazama, T. and S. Okubo, 2009, Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gra-

vity : Theory and application to Asama Volcano, Central Japan, J. Geophys. Res., 114, B08402, doi : 10.102.

大久保修平, 2001, ハイブリッド重力観測で追う, 地震・火山活動—2000年三宅島火山活動と伊豆諸島群発地震活動, 地震ジャーナル, 31, 47-58.

Okubo, S., W. Sun, T. Yoshino, T. Kondo, J. Amagai, H. Kiuchi, Y. Koyama, R. Ichikawa, and M. Sekido, 2002, Far-field deformation due to volcanic activity and earthquake swarm, International Association of Geodesy Symposia, 125, 518-521.

大久保修平ほか9名, 2005, ハイブリッド重力観測による, 2003年十勝沖地震の解析, 月刊地球, 号外49, 112-117.

大久保修平, 2006, 重力変動と地殻変動, 測地学会誌, 52, 4, 245-252.

田中宏幸, 2010, ミュオンを用いた断層のイメージング, 地震ジャーナル, 50, 95-99.

大久保修平

[おおくぼ しゅうへい]

現職 東京大学地震研究所教授
理学博士

略歴 東京大学理学部地球物理学科卒業, 同大学院理学系研究科地球物理学専攻修士課程修了, 同博士課程単位取得退学, 東京大学地震研究所助手, 同助教授を経て現職

研究分野 測地学, 固体地球物理学

著書 『EARTH REVEALED—地球を探る』(共著, 丸善), 『大地の躍動を見る—新しい地震・火山像』(共著, 岩波書店), 『地球が丸いってほんとうですか?』(編著, 朝日新聞社)



電磁気学的な地震予知研究が描く将来像

長尾年恭, 竹内昭洋, 鴨川 仁

1. はじめに

短期・直前予知の実現は各種アンケートで常に実現してほしい科学技術の上位にアンケートされる。しかしながら現在の“公式”見解は「東海地震以外の直前予知は不可能」というものであり、さらに M7 クラスのいわゆる直下型地震の予知は(将来も)不可能であろうというのが地震学界の“常識”となっている。しかしながら 1980 年代になり、電磁気学的な手法を用いた直前予知が学界を賑わせるようになった。特にギリシャの VAN グループの成果は特筆に値する。彼らは「地震活動は臨界現象である」という仮説のもと、ナチュラルタイムという新しい時系列データ解析手法を開発し、電磁気学的先行現象 (SES) と微小地震活動データを併せて解析する事により、予測精度を数日程度にまで向上させている。これらの結果は近年 AGU でも注目され話題となっている¹⁾。

この VAN 法の日本への適用可能性については、兵庫県南部地震後に実施された理化学研究所・地震国際フロンティア研究で検証が試みられた。その中で先行的な地電流変化が捉えられたが、5 年間のプロジェクトという事もあり、伊豆諸島・神津島での観測例²⁾ 以外は統計的な議論が出来るほどの事例収集は困難であった。なお伊豆諸島の観測は現在新地震予知研究計画の下で東海大学を中心にさらなる研究が続けられている。

2. 先行現象は存在するか?

東海地震の予知ではプレスリップのみを唯一の先行現象として定義している。はたしてそれ以外の先行現象は存在しないのであろうか。ここでは地震学・測地学以外の先行現象について例を示し

たい。図 1 は神戸市内における兵庫県南部地震前のラドンの濃度変化である³⁾。12 年間のデータでいかにこの地震の直前の変化が異常であったかがわかる。また図 2 は四川地震の震源地近傍で体内時計研究のために飼われていたマウス 8 匹の概日リズムと行動量である⁴⁾。地震前後に大きく乱れていることが見て取れる。実際にはこれらの観測結果が何を意味しているのかわからなければ予知には使えないが、先行現象の存在自体を否定する事は科学的な態度とは言えないのではないだろうか。

3. 電磁気学的な先行現象について

VAN 法についてはすでに数多くの議論がなされているので本論では簡単に紹介するに留める。1980 年代に入り、ギリシャで地電流観測を用いた短期予測が行われているとの報告がなされるようになり、その有意性は第三者による統計でも示された。すでに 30 年近くが経過しているが淘汰される事なく、最近ではさらなる成果をあげている¹⁾。

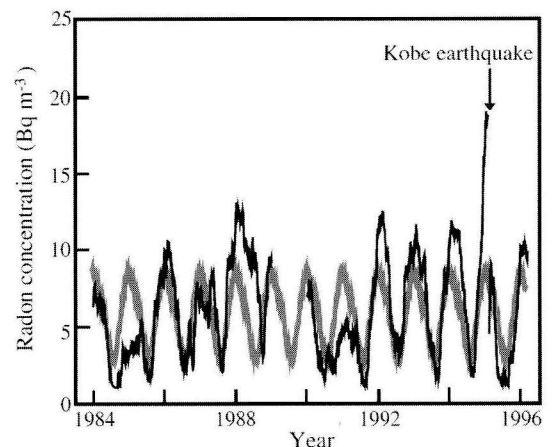


図 1 1984 年から 1996 年までのラドンの時系列変化。黒実線が観測値。グレーの線は 12 年間の平均的な変動を示す。

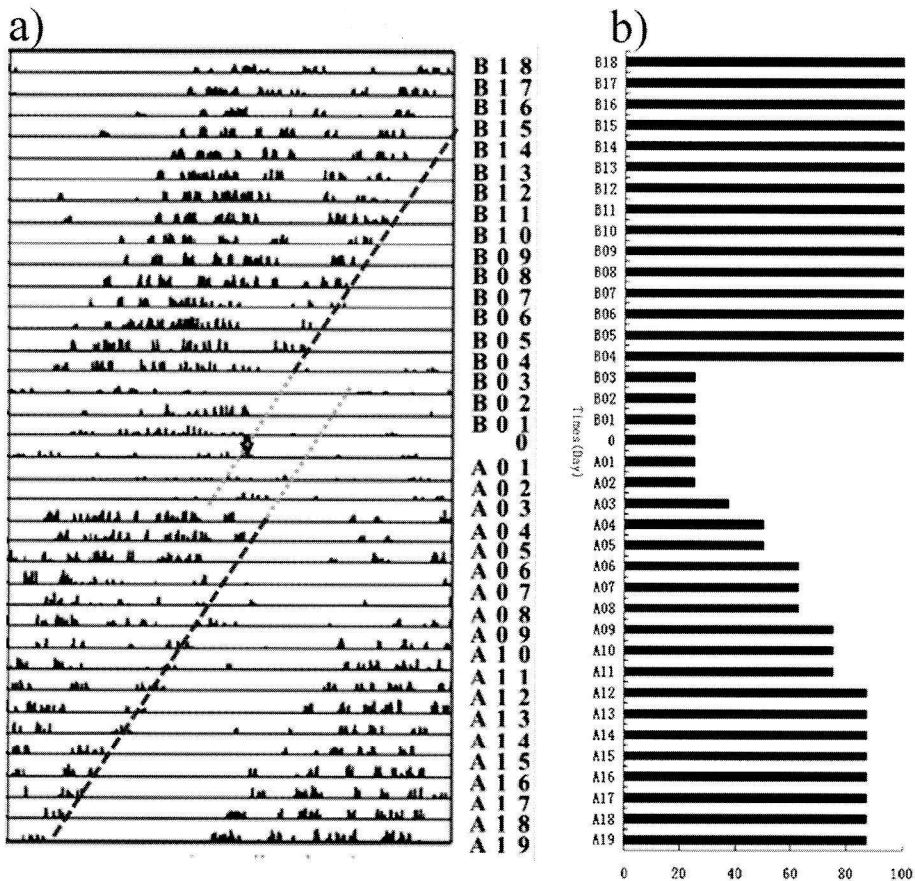


図 2 四川地震直前の全暗黒状態で飼育された 8 匹のマウスの概日リズムの変化。なおこの観察は当然ながら地震とは全く無関係になされたものである。a) マウスのはずみ車の回転を用いた体内時計のずれ。中央の 0 が地震発生日。このグラフでは地震発生前後の 38 日間の観測結果をしめしている。地震前 3 日から地震後 2 日ほどは体内時計が狂っていた事を示している。b) 規格化されたマウスの行動量の変化。地震後 10 日ほどで元に戻った事が見て取れる。なお図中の点線は筆者らによる加筆で、体内時計が全暗黒では進む (24 時間より短い) 事を示している。

ULF 帯の地磁気変化は 1989 年のロマ・プリータ地震の前に極めて顕著な先行的変動があった事から注目されるようになった。しかしながらこのような顕著な現象はめったに発生しないという事もわかってきており、電磁気学的な先行現象が万能ではない事もまた明らかである。

さらに地震の前に先行的な電磁波が観測されたという報告が 1980 年代からなされるようになった。それ以外にも色々な事例が報告されているが、榎本らの 10 年以上におよぶ北海道・襟裳での観測事例などは、最も信頼性の高いデータと言えるであろう (図 3)⁵⁾。なお本章については著者 (TN)

の著書⁶⁾ および総合報告⁷⁾ を参照していただければ幸いである。

4. 地圏-大気圏-電離圏結合モデル (LAI Coupling Model)

地震に先行する大気圏・電離圏の異常が存在するのではこの報告が 1980 年代後半になされるようになった。大気圏で何らかの擾乱 (異常) が発生しているとの指摘は VHF 帯電波伝搬観測^{8),9)} により統計的にも示された。下部電離圏においては VLF 帯電波伝搬観測が異常の検出に最も有効

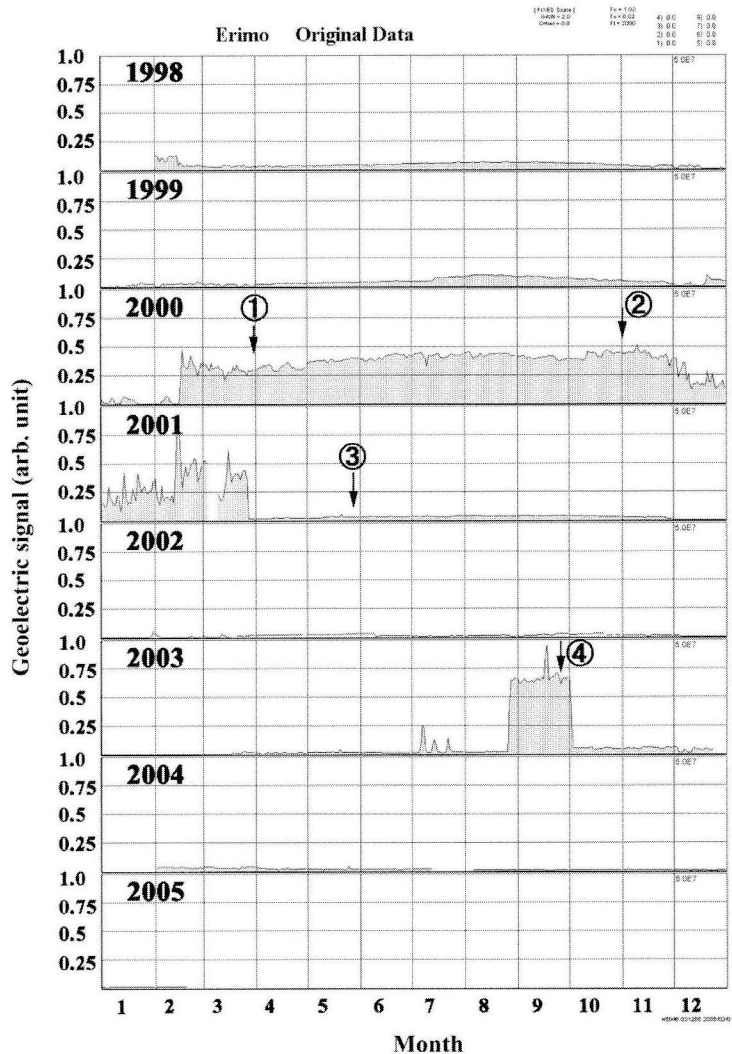


図 3 榎本らによる襟裳での観測例。彼らは鉛直方向の高周波電界変動を計測していた。図は 8 年間にわたる強度の変化を示したものである。図中の①は有珠の噴火、②は火山活動の衰退時期、③は火山活動の収束時期、④は十勝沖地震 (M 8.0) である。

である事もわかってきた¹⁰⁾。さらに電離圏観測ではイオノゾンデや GPS-TEC が有効な手段である事が確認され、F 層の電子密度が地震前に有意に減少しているとの報告もなされている¹¹⁾。

これらの現象は衛星観測でも十分検知ができると考えられ、短期間で全球的な調査ができるという事から、人工衛星を用いた観測が注目されるようになった。フランスは 2004 年に地震に関連する電磁気現象ないしは電離圏異常を調べる目的で DEMETER と呼ばれる観測衛星を打ち上げた。

Némeç らは 40 km より浅いマグニチュード 4.8 以上の 9,000 個の地震を統計的に解析し、地震の 4 時間前に夜間において VLF 帯の電波強度が数 dB 低下すると報告し、さらにマグニチュードが大きいほどこの現象が顕著であると報告した (図 4)¹²⁾。その後の詳細な解析では、震央が浅くかつ大きな地震ほど信号が顕著に検知でき、震央が海ないしは陸における結果の差は見られないと報告している¹³⁾。現時点では地上観測で得られた結果との相補的な解釈はできていないが衛星観測は地震現象

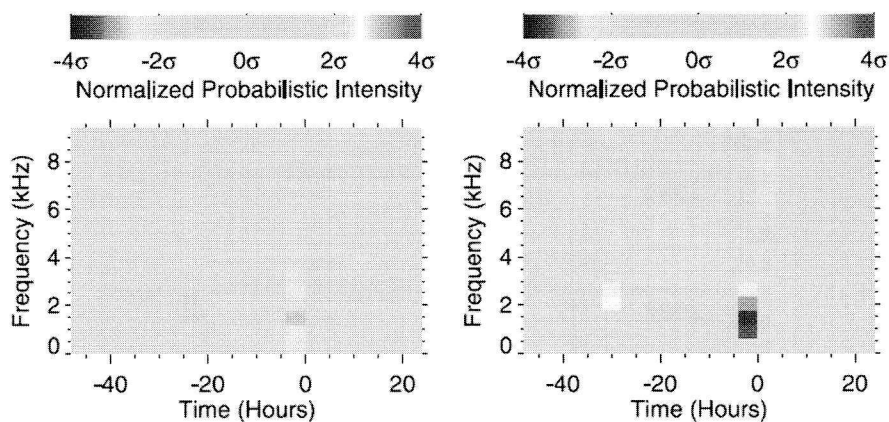


図 4 DEMETR 衛星による VLF 帯電磁波の強度の観測結果の一例。縦軸が電波の周波数、横軸が時間 (0 が地震発生の時間)
 (左) 衛星軌道から 330 km 以内でかつ 40 km より浅い M 4.8 以上の 9000 個の地震を重ねあわせた解析結果。地震前 4 時間あたりに強度が有意に小さい部分がみられた。
 (右) マグニチュードスレシールドを 5 とした場合の結果。地震前の異常がさらに顕著となっていることがわかる。

が電離圏にまで影響を与えている事を証明する有力なツールである事は明らかであろう。これらの観測事実をふまえ、地震に関連する地圏-大気圏-電離圏結合という新しい概念が打ち出されるようになった¹⁴⁾。

5. 電磁現象発現メカニズム研究の進展

地震電磁現象に関する最も一般的な疑問は、「なぜシグナルが地震時ではなく先行的に観測されるのか」という点であろう。我々はなぜ先行現象が大きな異常として観測されるのかについて答えていく必要があるが、観測される現象の周波数ごとに異なったメカニズムが必要な事が混乱に拍車をかける。ULF 帯のシグナルでは界面導電現象や VAN のオリジナルモデルである圧力刺激電流が有効なメカニズムであろう。さらに高い周波数の現象となると微小破壊面からのエキソ電子の放出¹⁵⁾や、帯電した微小亀裂面の絶縁破壊¹⁶⁾なども有効な仮説であろう。

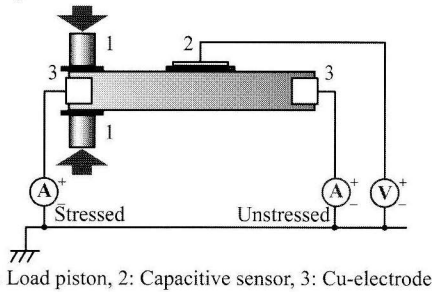
さらに我々が注目しているのが正孔キャリアによる仮説¹⁷⁾である。Freund・竹内らのグループは、自然乾燥させた火成岩試料に偏った荷重をかけると、自発電流や正帯電が現れる事を発見した

(図 5)。石英粒子をほとんど含まない斜長岩やハンレイ岩にも電流・帯電が現れることから¹⁸⁾石英の圧電効果によるものとは考え難い。発生した電流の方向や岩石表面が正に帯電しているという観測事実を考慮すれば、圧縮部にて発現した正孔が非圧縮部へと拡散したというモデルでうまく説明できる。この状況下の岩石は P 型半導体と同様な電気伝導特性を有する事になり、これまで観測されてきた例えば地震前の ULF 帯シグナルや赤外異常なども説明できる可能性を秘めている¹⁷⁾。

6. 地震現象のさらなる解明に向けて

地震が地殻に蓄積された弾性エネルギーの放出である事は明白であるが、突き詰めて考えるとそれは地球の熱放出(冷却)プロセスの一つと言える。例えば、金森は講演会等で「地震は地球のエネルギー放出の一部にすぎない」とも述べており、弾性エネルギーとして放出されているのはごく一部であり、別の一部が電磁気学的な現象として放出されている可能性に言及している。一方で、電磁気現象が地震を誘発しているとの報告もある^{7),19)}。我々は地球を熱機関として位置づけ、地震も火山活動もそれに付随する電磁気学的な変動

(a) Set-up



(b) Result

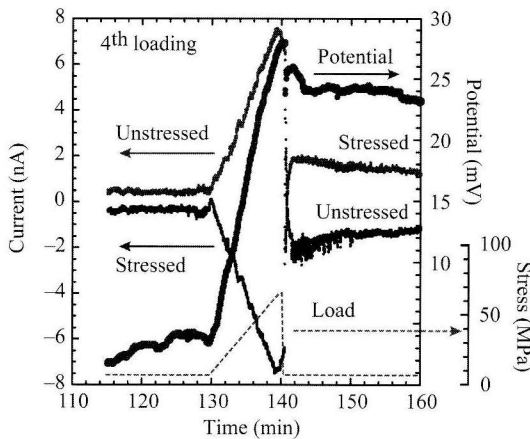


図5 (a) 花崗岩ブロック (120 cm×15 cm×10 cm) の一端のみを一軸圧縮した際に現れる電流および帯電を計測するための実験装置概念図。ブロックの両端はそれぞれ電流計を通して接地されている。非圧縮部表面には容量性アンテナが設置され、電圧計を通して接地されている。
(b) 結果例。4度目の圧縮に伴い、2つの電流計 (Stressed と Unstressed) は概念図上で時計回りの電流を検出し、電圧計 (Potential) は非圧縮部の正帯電を検出した。

も一連のものとして捉える事が、ひいては地震現象のさらなる理解につながるものと確信している。

引用文献

- 1) Uyeda, S. and M. Kamogawa (2010), Reply to comment on "The prediction of two large earthquakes in Greece", *Eos*, 91, 161.
- 2) Orihara, Y., Y. Noda, T. Nagao, and S. Uyeda (2002), A possible case of SES selectivity at Kozu-

shima Island, Japan, *J. Geodyn.*, 33, 425-432.

- 3) Yasuoka, Y., Y. Kawada, H. Nagahama, Y. Omori, T. Ishikawa, S. Tokonami, and M. Shinogi (2009), Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain, *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 34, 431-434.
- 4) Li Y., Y. Liu, Z. Jiang, J. Guan, G. Yi, S. Cheng, B. Yang, T. Fu, and Z. Wang (2009), Behavioral change related to Wenchuan devastating earthquake in Mice, *Bioelectromagn.*, 30, 613-620.
- 5) Enomoto, Y., H. Hashimoto, N. Shirai, Y. Murakami, T. Mogi, M. Takada, and M. Kasahara (2006), Anomalous geoelectric signals possibly related to the 2000 Mt. Usu eruption and 2003 Tokachi-oki earthquake, *Phys. Chem. Earth*, 31, 319-324.
- 6) 長尾年恭 (2001), 地震予知研究の新展開, 近未来社, 210pp.
- 7) 長尾年恭, 鴨川 仁, 服部克己 (2006), 電磁気学的手法による短期的地震前兆の観測的研究の現状, *地震*, 59, 69-85.
- 8) Fujiwara, H., M. Kamogawa, M. Ikeda, J.Y. Liu, H. Sakata, Y.I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y.J. Chuo, and Y.H. Ohtsuki (2004), Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110.
- 9) Moriya, T., T. Mogi, and M. Takada (2010), Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 180, 858-870.
- 10) Hayakawa, M., Y. Kasahara, T. Nakamura, F. Muto, T. Horie, S. Maekawa, Y. Hobara, A.A. Rozhnoi, M. Solovieva, and O.A. Molchanov (2010), A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by sub-ionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, A09305.
- 11) Liu, J.Y., Y.I. Chen, Y.J. Chuo, and C.S. Chen (2006), A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly, *J. Geophys. Res.*, 111, A05304.
- 12) Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, and J.J. Berthelier (2008), Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05109.

- 13) Němec, F., O. Santolík, and M. Parrot (2009), Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes : A statistical study, *J. Geophys. Res.*, 114, A04303.
- 14) Kamogawa, M. (2006), Preseismic lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, *Eos*, 87, 417&424.
- 15) Enomoto, Y. and H. Hashimoto (1990), Emission of charged particles from indentation fracture of rocks, *Nature*, 346, 641-643.
- 16) Takeuchi, A. and H. Nagahama (2002), Interpretation of charging on fracture or frictional slip surface of rocks, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 130, 285-291.
- 17) Freund, F. (2010), Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals, *Act. Geophys.*, 58, 719-766.
- 18) Takeuchi, A., B.W.S. Lau, and F.T. Freund (2006), Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks, *Phys. Chem. Earth*, 31, 240-247.
- 19) Velikhov, T.P. and V.P. Panchenco (2010), Large-scale geophysical surveys of the Earth's crust using high-power electromagnetic pulses, in *Active Geophysical Monitoring*, (eds. Kasahara, J. et al), *Handbook of Geophysical Exploration*, 40, Elsevier, 29-53.

長尾年恭

[ながお としやす]

現職 東海大学海洋研究所教授, 地震予知研究センター長
理学博士



略歴 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了, 金沢大学理学部助手, 東海大学海洋学部助教授を経て現職

研究分野 地震予知, 固体地球物理学

著書 『地震予知研究の新展開』(近未来社)ほか

竹内昭洋

[たけうち あきひろ]

現職 東海大学地震予知研究センター特定研究員
博士(理学)



略歴 東北大学大学院理学研究科博士課程後期修了, サンノゼ州立大学理学部物理学科客員研究員等を経て現職

研究分野 実験地震電磁気学, 放射化学

鴨川 仁

[かもがわ まさし]

現職 東京学芸大学教育学部物理科学分野助教
博士(理学)



略歴 早稲田大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻修了, 早稲田大学理工学部物理学科助手を経て現職

研究分野 地球電磁気学, 大気電気学, 非線形物理

地下水位観測による地殻変動の推定

—現状と展望—

小泉尚嗣

1. はじめに

小泉・他(2007)は、多孔質弾性論(応力・歪・含水量・間隙圧の相互関係を示した理論)を用いて地下水位変化(間隙圧変化)を地殻変動(主に体積歪変化)に換算することで、地下水観測による地震予知研究における理論面の弱点を克服できると書いた。さらに、「地下水データを地殻変動データに換算することのメリット」として、以下の4点をあげた。なお、下記の(4)をあえて書いたのは、地震予知で震災軽減を図るのならコストのことは無視できないと思うからである。

- (1) 帯水層の広がりに対応する範囲の空間的な平均値を測定できること。
- (2) 地殻変動を測定する通常の観測機器とは独立した観測であることから、それらの地殻変動観測機器と比較・検討することで観測データの信頼性が増すこと。
- (3) 既存の地下水データ・地下水位観測設備の利用により、近代的観測の行なわれていない場所・時代での地殻変動データが提供できること。
- (4) 地下水位等の観測機器は、通常の地殻変動の観測機器に比べて安く扱いも簡単なこと。

本論では、主に、地震による地殻変動を把握するための地下水位観測の役割について、「夢」も含めて筆者の考えを述べたいと思う。なお、我々は一部の井戸で、地下水位の代わりに地下水圧や湧水量を観測しているが、下記では原則として「地下水位」と記すものとする。また、厳密にいうと、この「地下水位」の変化と地下水を含む帯水層(地層や岩盤の割れ目系)の間隙圧変化は必ずしも一致しないが、ここでは単純に地下水位変化＝

間隙圧変化とする。

2. 地殻変動観測

2.1 地殻変動を連続的に観測する測器について

現在、連続的に地殻変動を測定できる代表的な観測機器としてGPS・歪(ひずみ)計・傾斜計がある。歪計・傾斜計には、地上付近の横穴で測定する伸縮計や水管傾斜計と鉛直方向のボアホールに設置するボアホール型歪計・傾斜計がある。

GPSは、地表の1点の変位を測定している機器である。比較的安価なことから、広域にわたって多点に展開できる。また、観測誤差の評価もしやすい。1点あたりの誤差は水平変位数mmになっており(国土地理院, 2010)、10km以上の区間であれば、歪にして $1E-7$ (10の -7 乗)のオーダーの精度を達成できる。国土地理院のGPS連続観測網(GEONET)は、まさに、そのようなGPSの特徴を生かしたものであり、日本全国に平均20-30km間隔で約1200点以上の観測点を設置したことで、日本全国の水平地殻変動を $1E-7$ またはそれ以上の精度でモニターできるようになった。ただし、精密な解析のためには時間がかかるという欠点がありリアルタイムモニタリングという点では課題を残している。また、1点毎に数mmの精度ということから、狭い範囲で歪として考えると観測誤差が悪化する。つまり、広域でゆっくり生じる地殻変動には強いが、局所的に短い時間で生じる地殻変動には弱いという欠点を持つ。

伸縮計や水管傾斜計は、数m~100m程度の区間の平均的な歪や傾斜を測定する測器である。歪で $1E-8$ 、傾斜で $1E-8$ rad(ラジアン)かそれ以上の精度を持つが、地表付近の横穴で設置するた

め、降雨も含めた地表付近からの擾乱によるノイズ除去に苦労することが多い。また、観測に適した横穴の構築には多額の経費がかかり、場所の確保も容易ではない。横穴での観測には他にもいくつかの問題があり、橋本(2007)によつて的確に指摘されている。

ボアホール型の観測機器は、ボアホールの直径に相当する狭い範囲(数 cm~10 cm 程度)の歪や傾斜を測定していて、局所的な不均質構造の影響をうけやすい。ただし、鉛直方向に深く掘ることによって、地表の擾乱によるノイズを軽減することができる。観測精度は歪計で $5E-9$ 、傾斜計で $3\sim 5E-8$ rad 程度である(気象庁, 2010; 防災科学技術研究所, 2010)。横穴にくらべれば、地表における専有面積は小さいことから場所の確保もしやすい。傾斜計は歪計より設置もしやすく安価なので、防災科学技術研究所は、基盤の高感度地震観測網である Hi-net に傾斜計を併設して、全国にほぼ均一なボアホール型傾斜計観測網を作り上げ、南海トラフでの短期的ゆっくり滑りの検出等で成果をあげている(Obara and Hirose, 2006)。他方、ボアホール型歪計は、価格も高く設置も難しいので設置されている点数は傾斜計よりはずっと少ないが、精度は傾斜計より数段良い(気象庁, 2010; 防災科学技術研究所, 2010)。

2.2 地殻変動を推定するための地下水位観測

上述のように、通常用いられている地殻変動観測機器も長所もあれば欠点もあり、1つの観測機器のみで地殻変動の全体像をつかむことはできないことがわかる。

地下水位は、地殻変動を直接測定するものではないが、多孔質弾性論によって地殻変動(体積歪)に換算できる。多孔質弾性論は、応力・歪・含水量・間隙圧との相互関係を示す理論であるが、現状の我々の解析では、観測された地下水位変化から体積歪変化を求め、その後は弾性論でモデル等を作る、あるいは、弾性論のモデルから体積歪変化を計算し、それから地下水位変化を求めて観測量と比較するといった単純な一方の解析のみ行なっていて、地下水位変化と地殻変動が相互に影響しあうような効果は考えていない。この単純な

解析の場合の新たなパラメーターは歪-地下水位の換算係数(以降、地下水位歪感度とする)1つのみで、それは、主に地球潮汐による地下水位変化の観測結果に基づいて求められる。この地下水位歪感度は、対象とする地下水を含む帯水層の物性(帯水層の弾性定数や密閉度等)によって異なり、 $1E-8$ の歪あたり最大で10 mm 程度である(Roeloffs, 1996; Itaba et al., 2008, Lai et al., 2010)。地下水位歪感度が比較的高い所を選んで地下水位観測網を作っても、歪に換算した精度としては、ボアホール型歪計より数倍程度悪い(Matsumoto et al., 2007)。

地下水位によって求めることのできる体積歪変化が、どの程度の空間の平均値を表しているかということについては、観測対象とする地下水の帯水層の空間スケールに依存する。我々の観測点では、帯水層の厚みは数十 cm~10 m 程度である。水平方向については、地質構造が複雑な所では、深さが同じでも少し距離が離れただけで地下水位歪感度が異なることがある。実際、我々の観測では、10 m 程度離れた150 m 程度の深さの井戸の地下水位歪感度が異なっていたことがある。代表する空間スケールとしては、鉛直方向で数十 cm、水平方向で数 m 程度と考えるのが無難なように思われる。

地下水位観測を地殻変動推定手法として用いるときの大きな欠点は、いったん生じた地下水位変化は地下水の移動(拡散)によって戻ってしまい、保持されないという点である。すなわち変形が累積しても、地下水位が一方に累積して変化していくということはないのである。要は、体積歪の時間変化率がある程度大きくないと地下水位は変化しない。目安としては地球潮汐による歪変化と同じレベルの $1E-8$ /日である。これを年間の変形率に直すと $1E-6$ /年のオーダーになり、日本の歪集中帯での変形率 $1E-7$ /年よりも一桁大きいので(Sagiya et al., 2000)、日本では長期的な地殻変動を地下水位観測で検出するのは困難であると考えられる。台湾のように、場所によって $1E-6$ /年のオーダーで変形が進んでいる所では(Chang et al., 2003)、長期的な地殻変動を地下水

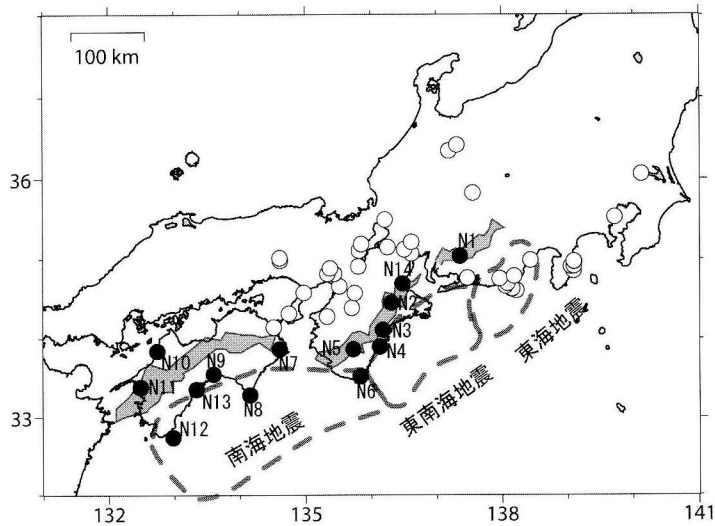


図 1 地震予知研究のための産総研の主な地下水観測点。● (N1-N14) は、東南海・南海地震予測のために 2006 年度以降に新たに設置した観測点で○はそれ以前からある観測点。四国～紀伊半島～愛知県にかけて灰色で示したのは、深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りが定期的な発生していると考えられる場所を地表に投影したもの。

位で検出できるかもしれない、台湾の研究者と取り組みを進めている（小泉・他，2010）。

2.3 地殻変動の詳細を知る為に必要な地下水位観測

弾性論（応力と歪の相互関係を示す理論）の近似を進めたのが多孔質弾性論と考えられるから、含水量や間隙圧（すなわち地下水位）の観測抜きで、地殻変動の詳細を理解することはできないことになる。例えば、土から水が抜けていって固化する過程では、外部応力がかかっていないのに土は変形していくわけで、この現象を弾性論では記述できないから多孔質弾性論が考案されたという経緯がある（Biot, 1941）。地下水の過剰揚水による地盤沈下も同様な現象である。また、降雨によって、歪・傾斜が変動するのはよく知られた現象であり、これらは通常ノイズとして扱われるが、含水量や間隙圧が変わることによって生じる実際の変形をとらえていることは間違いない。

問題は、地表付近はともかく、地下深部の間隙圧や含水量の推定が非常に困難であるということである。2000 年台前半に、地震後の地殻変動を多孔質弾性論で解釈した成果がいくつかでたものの（例えば、Jonsson et al., 2003）、その後下火になっ

たのは、結局は、地殻変動と比較し得る十分な含水量・間隙圧の測定データがなかったからだと筆者は考える。前節で、我々の解析において地殻変動と間隙圧の相互作用を考慮できていないのもデータが不十分だからである。データが少なければ、より単純なモデル・理論を用いるというのは物理学の基本であろう。しかし、だからといって、我々が、地下水も含めて十分計測可能な地表～深さ 1 km 位までの地殻変動を、いつまでも弾性論のみで解釈しては、地震に起因する真の地殻変動に肉薄することはできないと考える。

データが足りないのならデータを取るのみである。2006 年度から、四国～紀伊半島周辺に、東南海・南海地震予測のために我々は地下水等総合観測点と称して、地下水・地震・地殻変動を同時に並行して観測する施設を作っているが（図 1, 2）、そこでは、深さの異なる 3 つの井戸で地下水位を測定するとともに、歪・傾斜（場所によっては GPS）の測定も行なっている。地殻変動連続観測としては高サンプリングである、1 Hz～数十 Hz で観測データを収集しリアルタイムで産総研にデータを送っている。同観測網の一義的な目的は、後述する 1946 年南海地震前の地下水位低下

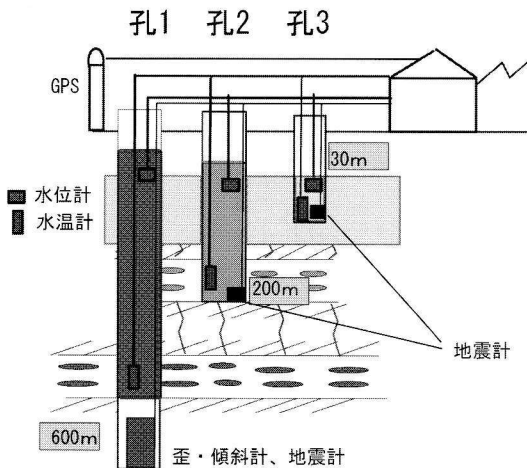


図2 図1のN1-N14における典型的な観測システム。1つの観測点で深さの異なる3つの井戸を設け地下水・地殻変動・地震の観測を行っている。

のメカニズム解明やプレート境界における深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りの詳細なモニタリングと解析であるが (Itaba et al., 2010), 間隙圧変化と地殻変動の相互関係について基本的なデータを収集するという目的もある。2007年中越沖地震 (M 6.8) や2010年チリ地震 (Mw 8.8) の表面波に伴う地下水圧変化が同観測網で捉えられ、ダイナミックな歪変化に対する地下水圧変化について興味深い結果が得られている (図3) (Itaba et al., 2008)。

3. 地殻変動観測機器なしで地殻変動を推定

3.1 地殻変動が観測されていない場所での地殻変動の推定

地震リスクが高くても、地殻変動観測が不十分な地域や国々はたくさんある。たとえば、日本に近い東南アジアの国々もその一例である。しかし、そのような国々でも、地下水の観測は行われている例が多い。降雨の影響が少ない、揚水の影響が少ない、地下水歪感度が高いといった条件で観測井戸を選び出して地下水圧観測網を作れば、即座に「簡易」地殻変動 (体積歪) 観測網ができることになり、我々が東海地方で運用している

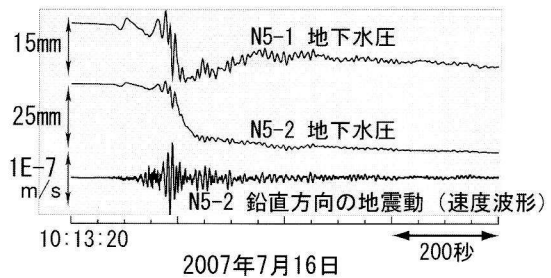


図3 2007年中越沖地震 (M 6.8) の表面波到達時にN5観測点の2つの密閉した井戸 (N5-1, N5-2) で水圧が振動しながらステップ状に変化する様子。地震動には100秒のローパスフィルターがかけてある。水圧のサンプリングは1Hz, 地震動のサンプリングは200Hz. Itaba et al. (2008) の図を一部修正。

「地下水圧変化によって地震の前兆滑りを検出するシステム」 (Matsumoto et al., 2007) を適用することが可能になる。また、以前の地下水圧データを地下水歪感度を使って洗い直すことで、過去にさかのぼって地震前後の地殻変動を推定することも可能になる。以上のことから、その地域の地震災害軽減に低コストで貢献できると考えられる。これは、台湾の成功大学と地下水観測による地震予知研究について2002年から我々が共同研究を行っている目的の1つである (小泉・他, 2010)。

3.2 地殻変動が観測されていない時代での地殻変動の推定

過去の津波についての古文書の記録や地質学的な痕跡等の調査から、当時の津波の高さや浸水域を推定することで巨大地震の定量的なモデルが作られるようになった (例えば, Satake et al., 2003)。これと同様なことを、地震前後の地下水の挙動に関する記録からやれないかといったことを夢想している。

過去の南海地震の際に、道後温泉や湯峯温泉で繰り返し地下水位・湧水量の低下が記録されており、その一部については、地震時の体積歪変化で説明できる (Itaba and Koizumi, 2007)。1946年南海地震前には、紀伊半島や四国の太平洋岸を中心に多数の地下水位低下があったことが知られており (水路局, 1948; 梅田・他, 2010), それをプレート境界のすべりによって説明しようとする

と、同地震の震源域の深部延長がすべらなければならぬ (Linde and Sacks, 2002). 1946 年南海地震については、他にもいくつかの地変が地震前にあったことが報告されておりそれらと地下水変化を合わせて、南海地震の予測モデル (シナリオ) 構築に貢献することを考えている (梅田・板場, 2010).

4. ま と め

地震前後の地殻変動を正確に推定することが地震予知にとっては重要である。そのためには、間隙圧の地殻変動への寄与をきちんと評価する必要がある。また、大地震は低頻度でしか発生しないので、近代的な地殻変動観測が行なわれていない場所や時代における、地震前後の地殻変動をできるだけ定量的に評価する必要がある。その両方において、地下水位観測とそのデータの解析が重要であると考えている。

参 考 文 献

- Biot, M.A. (1941) General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Geophys.*, 12, 155-164.
- 防災科学技術研究所 (2010) 短期的スロイベントと微動の準リアルタイムでの検知能力, 地震予知連絡学会報, 84, 577-590.
- Chang, C.P., T.Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.C. Lee and S.B. Yu (2003) Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system : Constraints from GPS observations and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 115-127.
- Itaba, S., N. Koizumi, N. Matsumoto and R. Ohtani (2010) Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 167, 1105-1114.
- Itaba, S. and N. Koizumi (2007) Earthquake-related changes in groundwater levels at the Dogo hot spring, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 2397-2410.
- Itaba, S., N. Koizumi, T. Toyoshima, M. Kaneko, K. Sekiya and K. Ozawa (2008) Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 1161-1168.
- Jonsson, S., P. Segall, R. Pedersen and G. Bjornsson (2003) Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients, *Nature*, 424, 179-183.
- 橋本 学 (2007) 地震予知のための横穴式地殻変動観測研究戦略に内在する困難, 測地学会誌, 53, 183-195.
- 気象庁 (2010) 歪計による短期的スロースリップイベントの検知について, 地震予知連絡学会報, 84, 560-564.
- 小泉尚嗣・松本則夫・板場智史 (2007) 地下水と地震予知—地下水観測による地震前後の地殻変動の推定—, 地震ジャーナル, 43, 11-22.
- 小泉尚嗣・松本則夫・頼 文基 (2010) 台湾国立成功大学と産業技術総合研究所との共同研究「台湾における水文学的・地球化学的手法による地震予知研究」について, 地質調査研究報告, 印刷中.
- 国土地理院 (2010) GPS 連続観測に基づくプレート境界面状のすべりの検知能力, 地震予知連絡学会報, 84, 565-576.
- Lai, W.C., K.C. Hsu, C.L. Shieh, Y.P. Lee, K.C. Chung, N. Koizumi and N. Matsumoto (2010) Evaluation of the effects of ground shaking and static volumetric strain change on earthquake-related groundwater level changes in Taiwan, *Earth Planets Space*, 62, 391-400.
- Linde, A.T. and I.S. Sacks (2002) Slow earthquakes and great earthquakes along the Nankai trough, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203, 265-275.
- Matsumoto, N., Y. Kitagawa and N. Koizumi (2007) Groundwater-level anomalies associated with a hypothetical preslip prior to the anticipated Tokai Earthquake : detectability using the groundwater observation network of the Geological Survey of Japan, *AIST, Pure Appl. Geophys.*, 164, 2377-2396.
- Obara, K. and H. Hirose (2006) Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone, *Tectonophysics*, 417, 33-51.
- Roeloffs, E. (1996) Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, in *Advances in Geophysics*, edited by R. Dmowska, Academic, San Diego, Calif.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000) Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 157, 2303-2322.
- Satake, K., K. Wang and B.F. Atwater (2003) Fault

slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions, J. Geophys. Res., 108, doi : 10.1029/2003JB002521.

水路局 (1948) 昭和 21 年南海大地震調査報告 (地変および被害編), 水路要報, 201, 1-117.

梅田康弘・板場智史 (2010) 1946 年南海地震前の四国太平洋沿岸の上下変動, 地質調査研究報告, 投稿中.

梅田康弘・重富國宏・尾上謙介・浅田照之・細 善信・近藤和男・橋本 学・木村昌三・川谷和夫・大村 誠 (2010) 南海地震前の井戸水の低下について—一次の南海地震の予知に向けて—, 地震 2, 63, 1-10.

小泉尚嗣

[こいずみ なおじ]

現職 独立行政法人産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 地震地下水研究チーム チーム長
理学博士



略歴 京都大学大学院理学研究科博士後期課程地球物理学専攻単位取得退学. 京都大学防災研究所助手, 工業技術院地質調査所主任研究官を経て現職

研究分野 地下水の調査・観測による地震予知研究

ミュオンを用いた断層のイメージング

田中宏幸

はじめに

地下の岩盤に力が加わって割れ、割れた面に沿ってずれ動くことで作られる断層には断層破碎帯と呼ばれる地質構造が見られることが多い。ここでは断層面周辺の岩盤は大きな力で破碎され、岩石の破片の間に隙間の多い状態となっている。砕かれた岩石破片の隙間に大量の水を含み、地下水の通り道となっていることも多い。そのため、トンネル工事で大量出水事故の原因となる地質構造として有名である。しかし、このような比較的浅部の狭い断層破碎帯構造を地震波探査などの従来の地球物理学的手法で解析することは一般的に難しい。そのため、トンネル掘削などでは前もって周辺地形の空中写真判読が行われることが多い。この方法では空中写真を観察することにより地表を立体的に見て地形等を判読する。空中写真判読により、地震断層等の存在を判断する手掛かりとなる変動地形やリニアメント等の地形を見つけることが出来る。しかしこの方法が適用できるのは地表が長期にわたって安定的に保存され続けてきた場合に限られる。例えば、地すべり地帯などでは地表の形状は短い周期で変化してしまうので、この手法を用いることが出来ない。もし全く新しい方法で断層破碎帯を可視化する技術が実現すれば災害予知なども含めてその社会的意義は大きい。

1. ミュオンの利用

素粒子を用いた透視の歴史は、今から100年以上も前、1895年のレントゲンによるX線の発見にさかのぼる。また、レントゲンはX線の透過力に注目して、X線写真撮影の実演も行った。その

後のX線透視術の発展は非常に早く、現在では医療から工業にわたるまで幅広く利用され、私たちの生活になくてはならないものになっている。一方、1930年ごろから始まった宇宙線の観測実験では、X線の発見後50年の間に数々の新粒子が発見された。これらの粒子の中には驚くほど貫通力の強いものがあり、それらの正体はミュオンとニュートリノであることが分かった。X線の透過力をはるかに超える新プローブの発見であったため、これらの粒子を用いてX線で撮影できる被写体よりもはるかに大きな物体を対象に透過像撮影を行おうとする行為はきわめて自然な流れであった。そこで早くも1955年にはオーストリアの山岳地方で氷河の厚みの測定にミュオンが利用された(Georg, 1955)。また、巨大物体の「レントゲン写真」(ミュオグラフィ)撮影を試みたのがアメリカの物理学者ルイ・アルバレである。1967年、アルバレのグループはエジプトのピラミッド内部にミュオン検出器を設置して、斜め方向から飛来するミュオンを用いて、東西南北全ての方向についてミュオン粒子数を測定した(Alvarez, 1970)。その後、ミュオン検出器、解析手法に多くの改良がなされ、2006年には、火山内部を透視することに世界で初めて成功した(Tanaka et al., 2007a; Tanaka et al., 2007b; Tanaka et al., 2009)。このように、ミュオンの透過経路による吸収の違いを見ることで地殻浅部の構造を求めようとする動きはすでに50年以上続く長い歴史を持ち、現在でもその研究は世界各地で精力的に続けられている。

それではなぜ、ミュオンを用いた断層破碎帯の観測に対して有効なのか？ それはミュオン測定によって、対象内部の密度分布が直接導けるからである。密度分布を求めることが出来れば、周囲より空隙率の高い、つまり平均密度の低い破碎体

のイメージングを行うことが可能である。その原理を以下に示そう。ミュオンが物質を透過するとき、エネルギー損失は直接、物質密度の関数となる。したがって、一旦密度長（密度×経路長） X が与えられると、経路に対して透過できるミュオンの最低エネルギー E_c が得られる。そのため、 X を透過できる宇宙線ミュオンの強度を計算できる。逆に山体透過後の宇宙線ミュオン強度を測れば密度長 X がユニークに決定される。つまり、ミュオンの透過経路に沿った平均密度が直接推定できる。

ここでミュオンが地層内部を見るのに優れているもう一つの点はミュオンが地震波と異なり直線透過性が非常によいということである。つまり、検出器の角度分解能を上げることで、像の解像度を上げられる。しかし、ミュオン測定が地震波測定に対して劣る点もある。それはミュオンは水平より高い仰角からしか飛来してこないのので、検出器位置より下の情報を得ることが出来ない点、そして、地震波よりも透過力が弱く、対象がせいぜい数 km の厚さに限定されることである。そのため、ミュオン検出器の地下の情報を直接得ることは出来ない。そのために、断層が走っている地域の内、起伏のある部分を利用するか、ボアホールに検出器を挿入するなどして、水平より高い仰角から飛来するミュオンが利用できるように工夫する必要がある。とはいえ、地層の内部構造をこれまでにない細かい空間分解能で直接密度測定が出来るといことは断層研究において全く新しい情報をもたらす可能性がある。

2. ミュオンによる断層破碎帯の観測

糸魚川静岡構造線 (ISTL) は新潟県糸魚川市から諏訪湖を通過して静岡県静岡市に伸びる大断層線である。ISTL の北部と中央部は活断層領域であると考えられている (例えば Okumura et al., 1994)。UNESCO 世界ジオパークに認定されているフォッサマグナパーク内には ISTL の断層露頭を確認することが可能である。西側の古生代の変ハンレイ岩と東側 (フォッサマグナ側) の新生代

中新世中期の安山岩が、断層破碎帯を境に接している。これまでの地質学的調査で断層破碎帯の右側は 1600 万年前の安山岩で左側のやや暗緑色の変ハンレイ岩は 2 億 6000 万年よりも古いものであることが分かっている。また、この断層は少なくとも 4 回の地震を経験したことも分かっている。

発見されたこの断層は ISTL とは平行ではなかったため、付近に ISTL と平行な主断層があるだろうと考えられているが、付近のエリアは地すべり地帯であることで有名で、空中写真判読により、地震断層等の存在を判断することは難しい。しかし、この断層露頭は地層の空隙率分布を調べるためのミュオン観測には適している。それは、断層がほぼ垂直に立っており、丘の南斜面に位置しているため、水平方向より仰角の高いミュオンを利用することが可能であるからである。設置されたミュオン検出器の面積は 3969 cm² で断層露頭からは 6 m はなれている。検出器の方向はすでに発見されている断層露頭について地質学的調査を行った結果から分かっている断層の向きと一致するように設定された。

ISTL でのミュオン観測では幅 7 cm 長さ 70 cm のシンチレータ 18 枚でセグメント検出器プレーンをつくった (Tanaka et al., 2009)。2 枚のセグメント検出器プレーンを x 方向および y 方向に配列して作られる位置敏感検出器内でのミュオン通過位置は内部のシンチレータストリップが出す信号のコインシデンスによって決定される。同様にもう一つの位置敏感検出器を作成して、空間的に 2 点を決定すれば、ミュオン飛跡を決定することが可能である。通常、対象物での位置分解能 ($\Delta X, \Delta Y$) は、検出器での角度決定精度 ($\Delta\theta, \Delta\phi$) と対象物と検出器との距離 (L) とで決まる。すなわち ($\Delta X, \Delta Y$) = $L \times (\Delta\theta, \Delta\phi)$ である。したがって、検出器位置での高い角度分解能は対象物での位置分解能を上げることに貢献する。

ミュオンデータ解析の手順としてこれまで行われてきた密度分布のマッピング (Tanaka et al., 2007) を行った結果、すでに発見されている断層の向き ($\phi=0$ mrad) に一致する方向に対して周

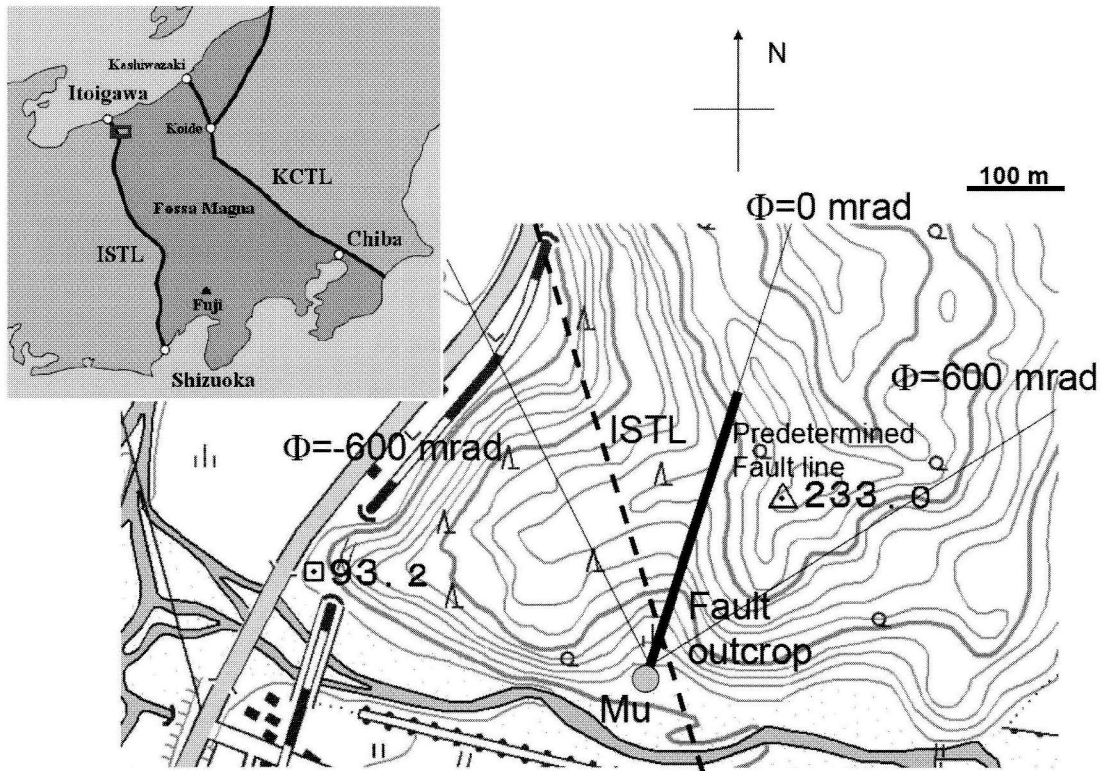


図1 ミュオン検出器の配置図。Muはミュオン検出器の位置を示す。点線はISTLの予想ライン。太線は地質学的調査により明らかになった断層線。地形図はインセット内の四角形の枠の部分である。

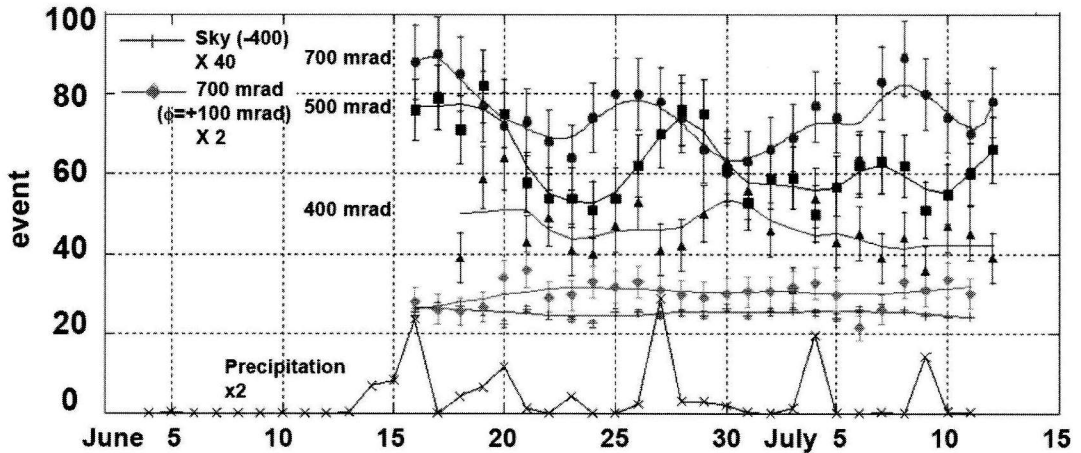


図2 すでに発見されている断層破砕帯を透過してくるミュオン強度の日変化と降水量の比較。空から直接飛来するミュオン及び、断層とは異なる場所を透過してきたミュオン強度の日変化も参考にプロットしてある。

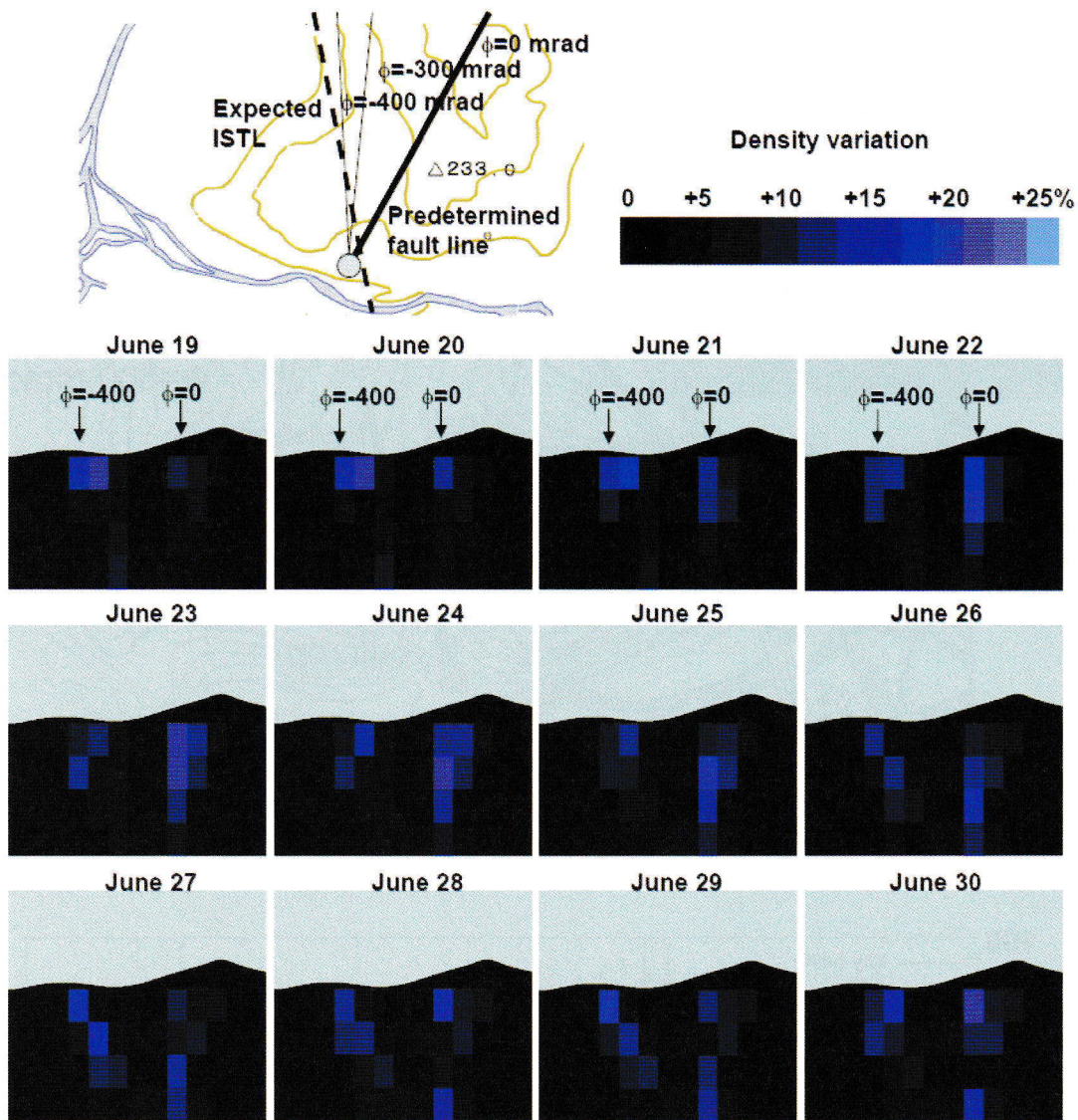


図3 ミュオン透過強度の変化から導かれた密度の相対変化量の日変化を検出器の視野角全てにおいてカラープロットしたもの。

囲より 20% 程度密度が低い低密度領域が現れた。しかしそれ以外の方向 ($\phi = -400$ mrad) でも低密度領域が現れた。この領域を精査すべく、 $\phi = 0$ mrad, $\phi = 400$ mrad 両方の方向に対して、降水にトリガーされた該当領域においてミュオン透過強度の日変化を調べた。もしこれらの低密度領域が破碎帯によるものであれば破碎された岩石の間に雨水がトラップされて密度が上昇するはずである。図2が降水のイベントとすでに発見されてい

る断層 ($\phi = 0$ mrad) の異なる深さの領域を通ってきたミュオン強度の日変化を示すグラフである。降水イベントと透過ミュオン強度に相関が見られる。降水イベントの後には岩石の間にトラップされた雨水が徐々に抜けていき、平均密度が低下することによってミュオン強度が再び上昇する。さらに一般的なトレンドとして、ミュオン透過領域が深くなるにつれて、降水イベントとミュオンイベントの増減との相関に遅れが生じて

いる。この遅れから透水速度を見積もることが出来る。値はそれぞれ表面から 5 m and 30 m の間では ~ 300 mm/h, 30 m and 50 m の間では ~ 200 mm/h であった。深くなるにつれ、透水係数が減少するのは地下の厚密によるものと考えられる。同様の解析を $\phi = 400$ mrad の方向に対しても行ったところ、同じような傾向が見られた。それ以外の方向では降水イベントと透過ミュオン強度との間には顕著な相関が見られなかった。図 3 にはミュオン透過強度の変化から導かれた密度の相対変化量の日変化をとったものが全ての方向に対して、カラーマッピングされている。図のそれぞれのピクセルサイズは今回用いたミュオン検出器の角度分解能と一致している。

ま と め

これまで主に火山内部の探索に利用されてきた宇宙線ミュオンを用いた方法が地震断層の構造解析にも利用できることが分かった。今後はポアホール挿入型ミュオン検出器を開発するなどして、地形的な起伏が無い場所での観測やより深部の構造の解析できるように工夫していく必要がある。また、今回行った日ごとの解析法はリアルタイムに断層の密度変化を捉えることが可能であることを示している。地震ヒーリングの現象が地震波速度の変化や精密な測地によって間接的に確かめられてきている。空間分解能の高いミュオンイメージング法をリアルタイムに運用していくことにより、このような現象に、より直接的に迫れるだろう。本研究は糸魚川ジオパークとの共同研究である。また、糸魚川ジオパーク推進室/フォッサマグナミュージアムの宮島宏氏との共同研究である。

参 考 文 献

Alvarez, L.W. (1970) Search for hidden chambers in

the pyramids, *Science*, 167, 832-839.

George, E.P. (1955) Cosmic rays measure overburden of tunnel, *Commonwealth Engineer*, July 1, 455-457.

Okumura, K., Shimokawa, K., Yamazaki, H., Tsukuda, E. (1994) Recent surface faulting events along the middle section of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line—trenching survey of the Gofukuji Fault near Matsumoto, central Japan—, *Zisin*, 46, 425-438 (in Japanese with English abstract).

Tanaka, H.K.M., Uchida, T., Tanaka, M., Taira, H. (2009) Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 36, L01304.

Tanaka, H.K.M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H., Niwa, K. (2007a) Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan, *Geophysical Research Letters*, 34, L22311.

Tanaka, H.K.M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E., Tsuji, H., Niwa, K. (2007b) High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 263, 104-113.

田中宏幸

[たなか ひろゆき]

現職 東京大学地震研究所准教授
理学博士

略歴 2004年名古屋大学環境学研究所
短縮修了。2001年理化学研究所ジュニア
リサーチアソシエート、2004年カリフォルニア大学
リバーサイド校物理学専攻博士研究員、2008年東京大
学地震研究所特任助教を経て2010年より現職

研究分野 主な研究分野は高エネルギー素粒子を用いた
固体地球内部物理学



地震災害軽減のための国際協力

石川有三

1. はじめに

地震による災害は過去にも大きなものであったが、文明が発達した20世紀以降でも大きな災害が起きている。例えば今年になってからも1月12日のハイチ地震マグニチュード(M)7.1では、死者・行方不明222,570人と大惨事になってしまったが、その後も、2月27日のチリ沖地震M8.8で557人の犠牲者、4月13日の中国青海省北部の地震M6.9では2,968人の犠牲者を出している。

このような災害への対策は、震災国では大きな課題であり、これまで個々の国でそれぞれ独自に取り組まれてきた。しかし、先に述べたハイチ地震では、首都近郊の活断層を震源としたため、首都で大きな被害が起き、国の機能自体がマヒしてしまった。そのため、自国だけの救援・復興が十分行えないだけでなく、国際社会からの救援活動もかなり困難があったようである。このような小さな国での地震災害を軽減するためには、国際協力は不可欠であり、ここでそのことについて取り上げてみたい。

ここでは、地震災害軽減の活動を地震発生と時間の関係で見ている。そして、それぞれの段階での国際協力の可能性を検討してみた。

2. 地震発生前の震災軽減

1) 地震予知による震災軽減

古来より地震発生を予知して災害を軽減することは人々に広く望まれてきた。しかし、それは長い間夢物語の域をでなかった。しかし、中国で実際に予報を出して住民を避難させ、人的被害を大幅に少なくさせることに成功したのが世界に伝わり、大きな衝撃を与えた。これがよく知られた

1975年海城(Haicheng)地震M7.3である。この地震予知成功が海外に伝えられたときは、世界の研究者が注目し、地震予知への関心が非常に高まった。ところが中国ではこの地震以前にも、1971年8月16日と17日に四川省馬辺付近で起きたM5.8の2回の地震でも予報を出し、住民を避難させていた。これらの地震の場合、四川省の地震部門が13日に馬辺や自治州に耐震補強を直ちに行うよう指示し、各地方行政機関は指示を受け、家屋を検査・補強し、危険な家屋から住民を出し、大衆観測を強化し、地震当番制を行ったと報告されている。その後、地震が起きたので、これらの処置により被害は最小限に抑えられた(これらの地震による死者7人)。

このような地震予知成功例はあるものの、予知の失敗による大きな被害も経験し被害軽減の方策として地震予知だけに頼るのではなく緊急救援隊の増強や建物の耐震化も進めてきた。しかし、先に述べた今年の青海省地震以外にも、2008年四川大地震M7.9では、87,398人の死者・行方不明者を出し、構造物の耐震強化に本格的に取り組み始めた。また、これまで地震予知研究は一貫して行われて来たが、基本的に対象地域は国内に限られており(石川, 2008)、海外での予知活動へは踏み出していない。

日本では、東海地区での地震予知はよく知られているが、今年から東海地震予知以外に伊豆半島東部地区での群発地震の活動予測を始めた。東海沖での地震予知は、第一種地震空白域の考えに基づくものであるが、最初に指摘以降30年以上経過し、西隣地区との連動性の懸念も議論されている。しかし、このような地震空白域に基づく長期的発生予測は地震防災対策を進めるうえで重要な情報となる。

国際的には、トルコの北アナトリア断層のイス

タンブール南方マルマラ海に地震空白域があることが世界の研究者に知られている。そのため地元カンディリ観測所などが、地震動早期警報システムを構築し、イスタンブールでの被害軽減を目指している一方、日本を含む海外の研究者が各種観測装置を設置し、地下構造の解明や異常現象の検出に努めている。

またインドネシアでは、Kerry Siehらを中心としたスマトラ大断層の研究はよく知られているが、2004年、2005年のスマトラ地震以降に、スマトラ島南方沖海域に地震空白域が指摘され、別の被害地震の発生が懸念された。そのため、そこで大地震が起きれば被害が予想されるパダン市で2005年9月に日米を中心に地元研究者を含めた国際ワークショップが開催された。そこでは、現状での地震発生予測の議論とともに地震発生後の減災にむけての提言を地元自治体などへ報告した。

これまで個別活断層調査を国際共同で行うというのは、韓国のヤンサン断層やフィリピンのマニラ市近傍の活断層であるバレー断層や西マリキナ断層などがあったが、地震空白域に基づく事前災害軽減活動は、ようやく行われ始めており、この分野での国際共同活動は、直接的に災害軽減に結びつくものであり、今後の更なる推進が求められている。

2) テクトニクスの理解

地震活動の予測には、その地域のテクトニクスの理解が不可欠である。米国沿岸測地局 (United States Coast and Geodetic Survey) が世界に展開した世界標準地震計観測網 (World-Wide Standardized Seismograph Network) は、世界のテクトニクスを理解する上で極めて重要な役割を果たしてきた。この地震観測網によって得られた震源データは、その空間分布が明瞭なプレート境界を示していることはよく知られている。

これは世界的なテクトニクスについてであるが、ローカルな理解でも地震観測網の相互利用は重要な情報を提供する。2004年スマトラ地震を契機に構築されつつあるシンガポールを中心とした地球観測所 (Earth Observatory of Singapore :

<http://www.earthobservatory.sg/>) は、東南アジアの地震活動とテクトニクスの解明に大きな力となると思われる。また、日本と極東ロシア、韓国、中国東部の地震観測網の協力は、日本列島のテクトニクスを理解するうえで重要なアムールプレートの正確な形状と運動を解明するうえで不可欠であり、北米プレートの腕の先端にあたる東北日本の運動を理解するためにも必要なことである。現在、日本の気象庁と韓国気象庁の間では協力が進み始めているが、その他はまだであり、今後の発展が望まれる。

また、歴史地震の調査でも国際協力は重要である。国の中央部で起きた地震の解明は、単独の国の資料でその地震の推定は行えるが、国境地域とか国の周辺域で起きた場合は一つの国の資料では震源位置の推定すら問題になってくる。例えば、1700年壱岐・対馬の地震のように日韓両国で有感であり、当初は両国別々に震源位置を推定していたことがある。両国双方の資料を総合してマグニチュードや震央の推定がより正確になってくる訳で、国際共同研究が重要である。

3) 建造物の耐震強化による震災軽減

耐震建築技術の普及という点では、地震多発国である日本が国際貢献できる部分は大きい。

1988年当時ソ連邦に属していたアルメニアのスピタクでマグニチュード6.8の地震が起き約25000人が犠牲になった。被害の多くは住宅の倒壊に寄ったが、地震後の耐震モデル住宅の展示が行われているところに日本企業のものがあった(図1)。またパキスタンでは、2005年マグニチュード7.6の大地震で数万人の犠牲者を出した。これを契機に国際協力機構が現地の住宅事情に合わせた耐震建築法を提案している。

このように日本企業の優れた耐震・制震技術は世界の耐震技術向上に大いに貢献できるものであり、積極的に情報発信すべきである。

3. 地震発生後の震災軽減

1) 震動予測の速報

震災軽減の動きでは、ユレダスや緊急地震速報



図 1 アルメニアのスピタク地区で耐震モデル建築物として展示されている所で紹介されていた日本企業の免震装置のパネル。

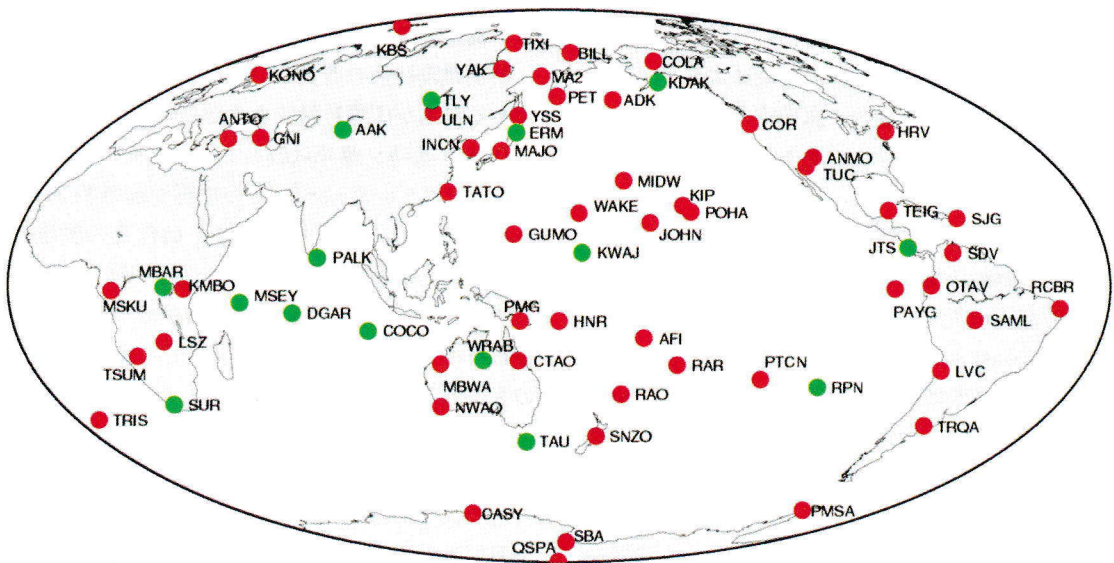


図 2 気象庁精密地震観測室でインターネット経由で入手している世界の地震観測点の分布。

(EEW) が実用化されている。ユレダスは鉄道に限定されたシステムであったが、どちらも地震発生後に震源近傍の観測点で P 波を捉え、それから震源とマグニチュードを推定し、主要動の S 波が

到着する前に各地で警報を出すものである。したがって地震動警報と呼ぶ方が正確な表現である。この方法は、震源が内陸にある場合は、震源断層直近では間に合わないが、少し離れた場所や、震

源が海域であれば有効な情報となる場合があり、重要である。ただ、これを有効活用するには慣れが必要である。気象庁が行っている緊急地震速報については、中国地震局が2008年四川大地震後に大いに関心を示し、調査団を気象庁へ派遣したり、システムの導入テストフィールドとして北京首都圏とならぶ福建省へ気象庁職員を招聘し、類似システムの導入を検討している。

トルコやメキシコでも想定される地震空白域での地震発生に備え震源域近傍で地震波を捉えて、大都市域で地震動警報を出すことを行っているが、メキシコでは一般に公開されている (<http://www.cires.org.mx/>)。ただ、これまでの実績を見るとマグニチュードの推定に課題があり、改良の余地はありそうである。従ってこの分野は、今後、日本が海外協力できる分野であり、積極的に技術協力を推し進めるべきである。

2) 被災後の対応

中国の地震局には、1990年代から地震予知だけでなく、発災後の救援活動にも力を入れてきた。そのため中央政府の地震局だけでなく各省地震局にも震災緊急救援隊が存在する。それと共に海外の地震災害についても発災後の緊急救援部隊の派遣を積極的に行って来ている。日本の国際緊急救援隊も四川大地震後の活動は、現地で大変高い評価を受けた。日本が大きく国際貢献できる分野であり、今後さらに強化していくことが望まれる。

地震発生後に如何に発生した現象の正確な情報を得るか？は災害軽減のためには、極めて重要なことである。よく知られているのは、ハワイにある太平洋津波警報センター (Pacific Tsunami Warning Center) の活動である。これは1946年アリューシャン地震 M 7.4 での被害を契機に1949年に設立された。ここでは太平洋とその周辺で大地震が発生すると、それによる津波を警戒し、関係国に警報・情報を発信している。米国地質調査所は世界に展開している地震観測点のデータを用いて震源位置とマグニチュードを求め、速報値をメールやホームページで公表している。ただ、2004年スマトラ超巨大地震のような規模の地震では、規模を過小に評価し、問題点として指摘さ

れた。

また、システムだけの導入では課題が残ることが先月のスマトラ沖地震 M 7.7 で明らかになった。ドイツの協力のもとにインドネシアでは、津波警報システムが完成していたが、2007年 M 8.4 の余震と思われる今回の地震でも残念ながら数百人の犠牲が出たようである。

一方、気象庁精密地震観測室 (長野市松代町) では、米国地質調査所が運営している LISS (Live Internet Seismic Server) と国際的な地震観測協力組織である IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) が運営している BUD (Buffer of Uniform Data) からインターネットを通じて世界各地の地震波形データを2003年頃から活用を始め (古館, 2003), 2004年スマトラ超巨大地震では、早期に信頼度の高い震源パラメータを求め、関係機関から高い評価を受けた。この活動は現在も続けられており、防災機関での活用は可能である (<http://www.grn.janis.or.jp/~matu-jma/>)。また、Max Wyss らは、米国地質調査所の緊急震源のパラメータを元に、人口分布などを組み合わせたデータベースと組み合わせて、世界の大地震後に被災推定を試み発展途上国での救援活動への情報提供を試行している (<http://www.wapmerr.org/>, <http://big-mac.ethz.ch:8080/Wapmerr/singleEvents/recent.html>)。このような活動は注目される。

4. 将来への備え

地震後の応急対応として仮設住宅が臨時に建てられることが多い。しかし、その後の再建では必ず耐震を考えたものにするべきである。よく知られたようにトルコのアナトリア断層に沿った震源域の移動や、最近ではスマトラ沖での大地震の続発など、プレート境界での大地震は、一度起きた震源域の隣接地で続発する例が多い。活動期であると指摘されているユーラシアプレートとインド・オーストラリアプレートの境界域だけでなく (Ishikawa, 2006), ハイチ地震の場合もそのような恐れが考えられるので十分注意が必要である。

参考文献

- 石川有三, 2008, 中国の地震と地震予知, 「なるふる 69号」 pp. 6-7.
- Yuzo Ishikawa, 2006, ACTIVE PERIOD ALONG THE INDIAN PLATE BOUNDARY, Asian Seismological Commission (ASC) Bangkok, O102.
- 古舘友通, 2003, LISS データの利用と震源計算, 気象庁精密地震観測室技術報告, No. 20, pp. 17-22.

石川有三

[いしかわ ゆうぞう]

現職 気象庁地磁気観測所所長, 日本地震学会副会長

略歴 京都大学理学部卒, 同修士課程修了, 中国国家地震局地球物理研究所に1年留学. 2008年4月より現職.

研究分野 地震学, 地震予知, テクトニクス

著書 「地震・火山の事典」(東京堂出版), 「地震の科学」(丸善), 「地学辞典」(平凡社), 「ゆれる日本列島」(新草出版)



■地震予知連トピックス■野口伸一■

定例の地震予知連絡会は、第187回が2010/8/20、第188回が2010/11/19に開催された。第187回連絡会では、重点検討課題運営部会の山岡部会長から、今後の運営方法と課題選定方針についての検討結果が報告された。地殻活動のモニタリングに関する検討では、2010年7月23日の千葉県北東部のM4.9の地震について、東大震研から本震と最大余震はフィリピン海プレート境界の逆断層型であるが、多数の正断層型の余震がスラブ内で観測されたことが報告され、発生メカニズムと応力場について討議された。第188回連絡会の地殻活動のモニタリングに関する検討では、名大・琉球大による琉球海溝付近の海底地殻変動観測によって、沖縄本島南方沖の観測点が北西方向へ約4cm/年で移動していることが明らかになり、琉球海溝の浅部プレート境界に固着域が推定されることが報告された。重点課題として、第187回連絡会では「地震活動について」(コンビナー:尾形委員)、第188回連絡会では「プレート境界すべり現象に関する今後のモニタリング戦略」(コンビナー:小原臨時委員)を検討した。

1. 地震活動について

コンビナーの尾形委員より、伝統的分野であり統計的方法と切り離せない「地震活動」について、最近の飛躍的な蓄積データに基づく定量的予測手法の重要性、期せずして主要地震国間の連携プロジェクトCSEP (Collaboratory for the study of Earthquake Predictability) に日本も参加して標準的予測モデルの開発・評価に取り組んでいること、地震活動の異常性等に基づく大地震の予測研究に重点を置くべきこと、が述べられた。この趣旨に沿って第1部ではCSEP関連、第2部では地震活動異常の定量化と予測に関する検討、の2本立てで討議された。

1.1 わが国のCSEPプロジェクト

「CSEP日本の取り組みについて」平田氏(東大震研)。日本の地震予知計画(H20年建議)では、予測手法の開発で統計モデルや物理モデルに基づく地震活動の評価が謳われている。一方、カリフォルニアで始まった地震発生予測モデルの比較・評価システムRELM (Regional Earthquake Likelihood Model) は、国際的な共同研究CSEPに発展、現在4地域にテストセンターを設置している。日本はCSEPへの参加準備、モデル公募を経て2009年11月に日本版CSEPの第1回予測検証実験を開始した(図1)。3つのテスト地域(All Japan, Mainland, Kanto)と4つのテストクラス(1日、3ヶ月、1年、3年の予測期間)を対象に、JMA確定震源カタログを用いた91のモデルが参加、テストセンター(東大震研内)で各モデルの予測と観測の一致度の有意性、およびモデル間の比較テストにより予測性能を評価している。今後もモデルの改良を進め、テストセンターの自動化を図る予定である。

「G-R則および改良G-R則を用いた地震発生予測—MGRモデル—」弘瀬氏(気象研)。地震の規模別度数の分布則(G-R則)、及び最大地震のMに上限を設定した改良G-R則を用いて陸域の浅い地震の発生予測を目的としたCSEPモデル(総称MGRモデル)。地域毎に両分布則のパラメータを推定して良い方の分布則を採用し、2001年~2008年まで1年毎のM \geq 5.0の発生予測マップを作成した。この間、発生率の年毎の変化は大きくないが、地域的には地震活動が普段から活発またはb値が小さい領域は発生率が高く、またG-R則のみよりも改良G-R則を併用した方が予測モデルとして良い結果が得られた。

「b値とETASモデルにもとづく日本列島の標準的地震発生予測」統数研(尾形委員)。地震活動

CSEP: Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability

CSEP日本ルール 요약

- 実験開始: 2009年11月1日
- テスト地域
 - All Japan, Mainland, Kanto
 - 0.1° 0.1° 0.05°
- テストクラス
 - 1日: $4 \leq M \leq 9$ 34°
 - 3か月: $4 \leq M \leq 9$
 - 1年: $5 \leq M \leq 9$
 - 3年: $5 \leq M \leq 9$
- JMA確定震源カタログ
- 評価手法: L, M, N, S, R-テスト
- 結果の公表
 - 関連研究者にだけ公開予定

予測期間: 2009年11月1日 00:00:00 - 2010年2月1日 00:00:00
 学習期間: 1965年1月1日 00:00:00 - 2009年11月1日 00:00:00

2010年2月
187回地震予知連絡会「CSEP日本の取り組みについて」東京大学地震研究所
1

図 1 日本版 CSEP の第 1 回予測検証実験が 2009 年 11 月に開始された。[187 回: 東大震研, 平田氏資料]

の標準的モデルである ETAS モデルを一般化した階層的 ETAS モデルに基づき, All Japan と Kanto の 4 つのテストクラス (期間) を対象とした予測モデル. ETAS モデルのパラメータと b 値の場所による違いを空間的に滑らかにして地域毎の $M \geq 5$ 地震発生率を求めた. 結果は予知連会報第 83 巻 (2010) に報告している.

「Operational forecasting の勧告について」山岡部会長 (名大). 2009 年 4 月 6 日のラクイラ地震 (M_w 6.3) 後, イタリアの防災当局は世界の地震予測の現状の情報収集のため国際委員会を設立 (9 カ国 10 人の委員, 座長は南カリフォルニア大学 Thomas Jordan 氏), 委員会は「実用的地震予測 (operational earthquake forecasting)」の報告を作成し, イタリア市民保護部 (DPC) へ勧告している. 報告では決定論的予知 (prediction) と確率論的予測 (forecast) の相違, 各国の実用的地震予測の現状等が述べられ, 確率論的地震予測

の必要性, 地震のモニタリング, 地震予知可能性の調査, 長期及び短期予測モデルの開発等, 8 項目について勧告している. 勧告の内容は CSEP とも関連して重要である.

「CSEP 日本版クーロンモデル」遠田氏 (京大防災研)・Enescu 氏 (防災科研). 現在の地震活動は過去の大地震の断層運動による応力擾乱の履歴を反映していることを考慮して, クーロン応力変化 ΔCFF を取り入れた予測モデル. 日本列島と周辺の 1890 年以降の大地震の断層モデルと, 最近の地震のメカニズム解と活断層の分布に基づき, 断層面とすべりの向き (レシーバ断層モデル) を求めた. さらに摩擦構成則に基づく ΔCFF の時間依存性の情報, 除群法による定常活動度を与えて地震発生率を求めた. 内陸ほど応力蓄積速度が遅いため余震の継続時間が長く, また大きい地震や最近の地震ほど応力擾乱による周辺の地震活動への影響が大きい等の結果が得られた. プレー

ト境界の応力蓄積速度、中規模地震による ΔCFF 等を含むモデルへ改良予定である。

1.2 地震活動異常の定量化と予測に向けて

「地震活動の短期・中期予測の確率利得と警報型地震予測の性能評価について」尾形委員（統数研）. 時間的・空間的集中度が高く確率利得が大きい前震活動に着目して短期予測を試みた. 日本周辺の地震データから、時空間的に集中するクラスターをリンク法で取り出し、地震間の時間間隔、震央間距離、マグニチュード増減を標準化して、集中度と増加率の高い前震型クラスターを抽出した. これに基づき最近の地震カタログに適用した結果、地域によって良い予測成績が得られた. また時空間 ETAS モデルによる地域的予測モデルでは、本震後、余震活動に静穏化が現れると付近に大地震の起こる確率が高い. 警報型地震予測に関して、中国の年間地震予測の例が紹介された.

「2003年十勝沖地震前の静穏化」勝俣氏（北大）. 地震活動度を視覚化して統計解析するプログラム ZMAP を用いて、2003年十勝沖地震 M 8.0 前に顕著な静穏化現象を見出した. データは、記録を読み取り震源を再決定した約 10 年間のカタログである. ある時間窓の定常的活動度を基準として統計量 Z 値を計算し、静穏化（Z 値が正）と活発化（Z 値が負）の時空間変化を追跡した. その結果、本震の 4~5 年前に Z 値が +3.9 以上となる著しい静穏化が太平洋プレート内に 2 か所検出された. シミュレーションによると、 $Z \geq 4.0$ は 15 年に 1 度、2 か所の Z 値がともに $Z \geq 3.9$ となるのは 83 年に 1 度の稀な現象であった.

「地震活動特有パタンの再現と固有地震」松村氏（防災科研）. プレート境界で繰り返し発生する固有大地震の前に、地震活動が特有のパターンに変化することが見出された. 茨城沖の調査では、1982 年の M 7.0 の地震前のある期間を基準に、時間枠をずらしながら空間分布パタンの相関を追跡、2008 年の M 7.0 の直前に相関係数が増大して 1982 年の M 7.0 の前と似たパターンが再現された. 十勝沖について、同様に 1952 年の M 8.2 の前を基準に活動パターンを追うと、2003 年 M 8.0 の地震

の数年前から 1952 年の地震前と同様のパターンが表れた. 固有大地震の前に特有の活動を促すプレート境界の応力変化が推定され、有用な予測手法である. 東海と東南海についても 1980 年代後半から 1944 年東南海地震の前と類似の活動パターン傾向にある.

「前震による確率予測」前田氏（気象研）. 本震の前の地震活動から、本震の予測に最も有効な前震活動を取り出す手法を検討した. 前震候補の対象とする小区域と期間、および M 範囲と地震数をパラメータとして、その後本震がある期間に起きた場合に前震と判定する. 本震の予測のため、複数の予測性能の指標を用いて、最も効率の良い前震パラメータを評価した. 北日本の太平洋海域の $M \geq 6$ の本震を予測対象として、1980 年~1993 年の期間では、比較的高い適中率と予知率となる前震パラメータが得られたが、1994~2009 年の期間では、前震パラメータの適中率、予知率はともに低下した. 前震を伴う大地震の活動が長期変化することが原因として考えられる.

「地震活動の予測的な評価手法の検討について」宮岡氏（気象庁）. 地震活動の様々な観測事例の蓄積とともに、予測可能性のある事例も増えてきた. そのような事例に基づいて、実用的な予測情報を目指す「地震活動の予測的な評価手法検討小委員会」が地震調査委員会の下に設置され（2009 年 8 月、主査は島崎会長）、技術的検討を行っている（図 2）. 伊豆半島東部の群発地震活動については、既にひずみ変化量と地震活動との相関に基づく予測式から、地震活動の規模の予測が試みられている. そのほか、予測的評価の可能性が高い検討対象事例は、茨城県沖の M 7 クラス地震、九十九里浜付近の地殻変動と群発地震活動、別府付近の群発地震活動が挙げられる.

「房総半島周辺の群発地震の統計分析と東京湾のゆっくりすべりの可能性検討」井出氏（東大理）. スロースリップとそれに伴う群発地震活動の因果関係を明らかにすることで、モニタリングをより効果的に行うことができる. スロースリップによる応力変化と ETAS モデルによる群発活動のバックグラウンド活動度に関する研究結果に

予測情報の検討体制

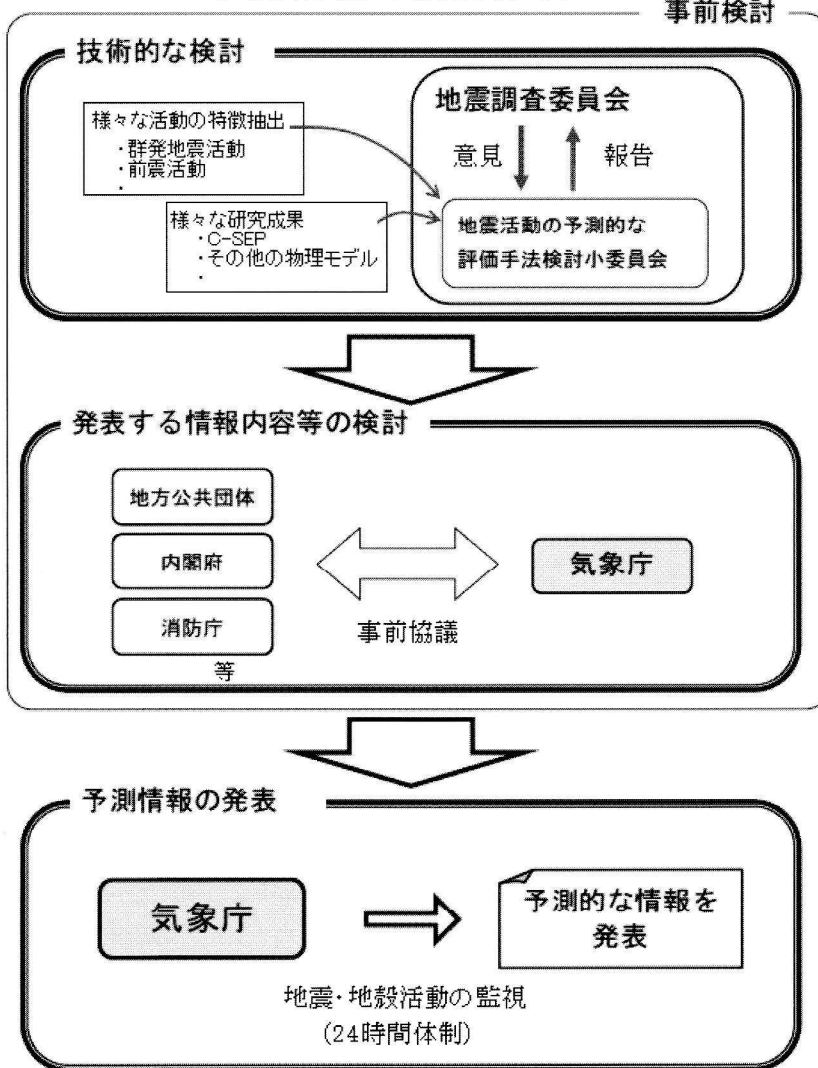


図 2 地震活動の予測的な評価手法の検討における予測情報の検討体制. [187 回: 気象庁, 地震予知情報課資料]

基づいて、2002年と2007年の房総沖スロースリップに伴う群発地震活動を解析した。ETASモデルを期間毎に分けて適用する複雑なモデルよりも、バックグラウンド活動度のみが過渡的に変化する単純なモデルの方が、データを良く説明する。この手法を2005年6月の東京湾北部の群発地震活動に適用すると、群発活動はスロースリップに伴って発生した可能性があり、スケーリング則からM 5.0~5.7のスロースリップが推定された。

「注水誘発地震の統計的な特徴」桑原委員(産総

研)。中国四川盆地の天然ガス田における注水による誘発地震活動の統計的解析から、地震活動の予測に有用な結果が得られた。注入量と地震活動度は概ね比例する。規模分布のb値と震源分布のフラクタル次元は、最大地震前に系統的な時間変化を示した。またETASモデルを用いて、注水による外部誘発地震(バックグラウンド活動)と地震自身による自己誘発地震(大森公式に従う余震活動)に分けて、両活動度の時間変化を調べると、バックグラウンド活動度は、注入初期は8%、注

入量最大期間は45%、注入量が減少する最終期間は65~90%と著しく変化した。これは間隙圧による既存断層面のクーロン破壊応力変化 ΔCFS で説明される。即ち注入初期の高応力レベル時期は、小さな ΔCFS で主に余震活動が促され、応力レベルが低下する後半は、地震を誘発するための ΔCFS の閾値が大きくなり注水による地震活動が支配的になる、として合理的に説明された。

2. プレート境界すべり現象に関する今後のモニタリング戦略

プレート境界の多様なすべり現象に関する重点検討課題はこれまで3回取り上げられた。コンピュータの小原委員（東大震研）から、今回はすべり現象に関する最新の知見、すべり現象発生現場である地下構造の詳細とその時間変化について理解を深め、さらにモニタリング手法の高度化に向けた今後の取り組みについて検討したいとの趣旨が述べられた。

2.1 プレート境界すべり現象モニタリング最新結果

「深部低周波微動の深さ依存性」小原氏（東大震研）、プレート境界の深部低周波微動は、微動源決定手法の高精度化が測られ、地域の特徴がより明瞭になってきた。四国西部や紀伊半島・東海では、微動は浅部と深部に分かれて分布し、微動の時空間活動にも深さ依存性がある。継続時間が12時間程度以下の小規模な微動は、四国西部と紀伊半島の深部側で定常的に発生する。継続時間24時間程度以上の大規模活動はほぼ全域に分布するが深部では少ない。浅部側の微動は短期的スロースリップイベント（SSE）と同時に数ヶ月間隔で周期的に活発化する。微動活動のこのような深さ依存性は、プレート境界で固着すべりから安定すべりへ遷移する摩擦特性を表し、流体の分布を反映したものと考えられる。

「深部低周波微動の線状構造・継続時間・移動様式・潮汐応答」井出氏（東大理）、四国西部の深部低周波微動の詳細な解析から、微動活動の新たな物理的・テクトニックな特徴が見出された。微動の発生場所は、継続時間が短い微動と長い微動

ですみわけ、微動域全体の周辺部に短い微動、中央部に長い微動が分布する。微動の移動様式も、継続時間の長い微動は拡散的に伝播し伝播速度は単一の定数で記述される。これに対し短い微動に移動はみられず、同じ場所で散発的で、かつ発生のタイミングは潮汐応力に敏感で海面潮位が高い時間帯である。さらに微動の空間分布に北北西と西北西の二つの方向の線状構造が見出された。この方向はそれぞれ現在と5百万年前のフィリピン海プレートの沈み込み方向を示し、ウェッジマンントル及び上盤プレート下部の構造と関係した海山の沈み込みを反映したものと推定される。

2.2 地下構造に関する最新研究成果

「茨城沖におけるアスペリティと地下構造」望月氏（東大震研）、茨城沖のM7級の地震とアスペリティ、沈み込む太平洋プレート上の海山との関係が、構造探査と海底地震観測から明らかにされた。地殻構造の特徴的な反射断面から同定された海山の位置と1982年M7.0の破壊過程を比べると、破壊は海山の深部側ふもとで開始してプレート境界の深部へ進み、すべり量の大きい震源域は海山の北側に分布、海山上ですべりはみられない。通常地震活動も海山の基底部周辺に集中し海山の上は非地震域である。したがってアスペリティは沈み込む海山の深部側に形成されていて、海山上のプレート境界は従来の予測と異なり固着強度が弱いことが示された。

「房総沖 SSE と底付作用」木村氏（防災科研）、房総沖のプレート間すべり現象の発生領域（巨大地震、スロースリップイベント SSE、相似地震）の構造探査データを解析して、すべり現象が地下深部の構造形成と関係していることを明らかにした。相模トラフのフィリピン海プレート地殻最上部のVCR層（火山性砕屑物および火山岩からなる厚さ2-4kmの層）を追跡すると、その下面はプレート境界深部では相似地震の上側に位置することが見出された。相似地震はプレート境界の指標であることから、VCR層は上盤プレートへ底付けしたものと解釈される。房総沖のプレート境界の遷移領域で間歇的に発生するSSEが、この底付け作用を担っていると推定され、巨大地震の

発生メカニズムの解明に重要な知見が得られる。

「東海における長期的 SSE・微動と地下構造」加藤氏（東大震研）. 高密度の地震観測によるトモグラフィ解析等から東海地域の地殻構造を求め、プレートに沿う流体分布とスロースリップとの関係を推定した。フィリピン海プレートの海洋地殻の最も顕著な低速度異常と高 V_p/V_s 領域には、沈み込んだ海山が推定され、その上側に長期的スロースリップ (LTSS) の中心が位置する。沈み込み方向への速度構造の顕著な変化から、変成作用により脱水した流体がプレート内に分布し、海山部分で最も流体圧が高いと解釈される (図 3)。その深部側の V_p/V_s が高いスラブからプレート上方への流体の移動で、蛇紋岩化したマントルウェッジが推定される。低周波地震 (LFE) と微動は、そのプレート境界に沿って発生する。これに対し、前弧側の上盤プレートの地殻下部は高速度体が傾斜して分布し地震活動が高い。スラブ内に推定されるこのような流体圧の変化と流体の移動がスロースリップのコントロール要因と考えられる。

「プレート境界における電磁気学的地下構造探査」後藤氏（海洋機構）. 南海トラフのプレート境界に沿う比抵抗構造は、流体分布と強く対応することが調査事例から推定される。比抵抗構造と速度構造を比べると、紀伊半島下の深部低周波微動発生域と周辺のウェッジマントルは、低比抵抗かつ高 V_p/V_s であり、低比抵抗域はその上の下部地殻に繋がるが、高 V_p/V_s 域はマントルウェッジのみである。また低比抵抗域内で地震活動が極めて低い。巨大地震のアスペリティ域は高比抵抗域である。これらのことから低比抵抗域は流体の分布そのものを表すことも考えられる。その詳細解明のため、観測装置と解析法を高度化して解像度を上げ、立体的な比抵抗構造や比抵抗の異方性を解析することが今後の課題である。

2.3 今後のモニタリング手法高度化への取り組み

「アクロスによるプレート境界状態変化検出の試み」気象研（吉田氏，名大と共同研究）. 弾性波送信装置アクロスから、東海地域下のプレート境界へ送信した弾性波信号反射強度をモニターして、固着強度の変化を検出することを目指してい

る。3 機関の 4 台の送信装置のデータを観測点毎に重合して信号スペクトルを分離し、プレート境界面からの反射波を解析した。低周波微動の発生時期に反射波群のエネルギーの増加が観測され、プレート境界面の反射係数の変化を捉えた可能性はある。今後の詳細な解析が期待される。

「歪計による短期的 SSE の検知能力」気象研（木村氏）. 東海地域に展開されている気象庁の歪計観測網で検出された短期的スロースリップイベント (SSE) の検知能力と検知条件をまとめた。1990 年 9 月以降、体積歪計と多成分歪計の 2 種類の歪計で約 60 の短期的 SSE の事例が検出された。SSE の検出限界は、良質な観測点で 5 nstrain (5×10^{-9}) 程度、検出規模の限界は M_w 5 の前半であるが、検出条件は、降水の影響が無く、低周波地震が発生し、複数観測点で同期変化することである。検出にはまた歪変化の継続時間が 2~3 日以上であることが必要である。

「GPS による短期的スロースリップイベント検出の可能性」国土地理院（西村氏）. 東海地域の GEONET の観測データに、空間フィルターでノイズ軽減を施して解析し、これまで困難であった短期的スロースリップ (SSE) の発生に対応する変動を見いだした。GPS 観測点の水平成分の座標時系列に空間フィルターを適用して、一定期間毎のステップ変化の有無を統計的に判断して有意なステップ変化を取り出した。水平変動ベクトルに変換し、低周波地震および短期的 SSE の発生時期と比較すると、SSE による変動と推定される系統的变化例が見出された。GEONET による短期的 SSE 検出の可能性が得られ、今後、検出事例の増加が期待される。

「モニタリング手法高度化への取り組み」防災科研（廣瀬氏）. 短期的 SSE の自動検出手法や浅部超低周波地震の精密な検出手法等、より客観的・詳細なモニタリング手法の開発、高度化への取り組みが紹介された。プレート境界上に SSE を仮定して傾斜データをモデリングし、観測点毎の異常傾斜変動の誤検出等を評価して、短期的 SSE の自動検出手法を開発した。これにより、手動計算と同じ回数の SSE が客観的に検出された。

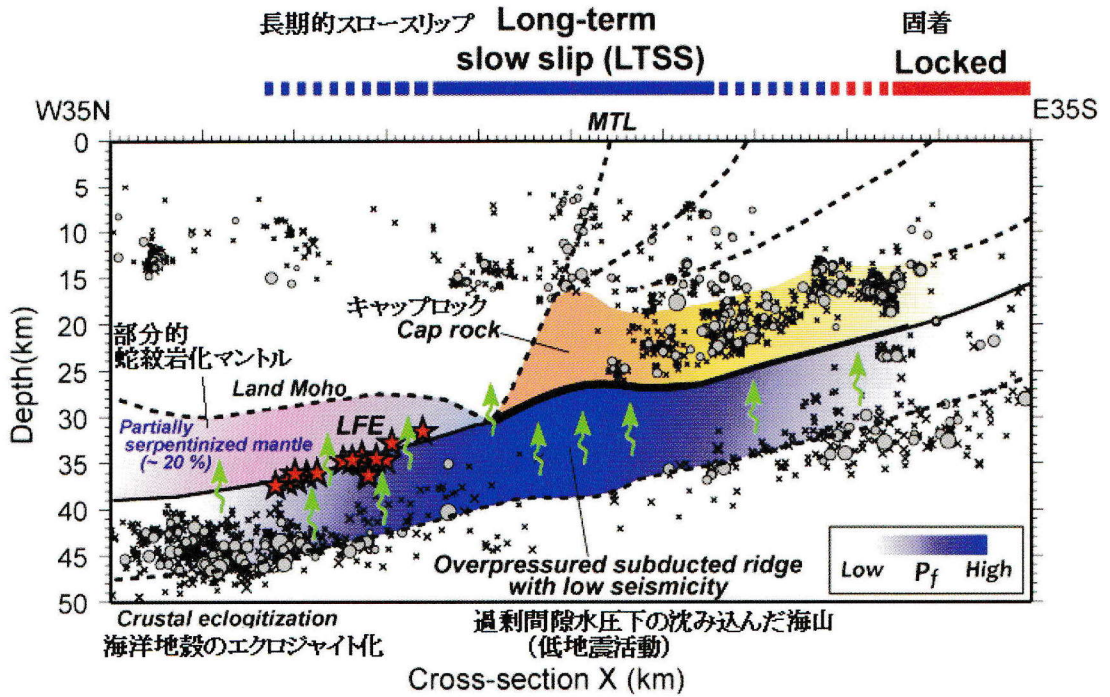


図 3 東海地域下のスロースリップと流体分布モデル。[188回：東大震研，加藤氏資料に加筆]

短期的ゆっくりすべりの検知能力

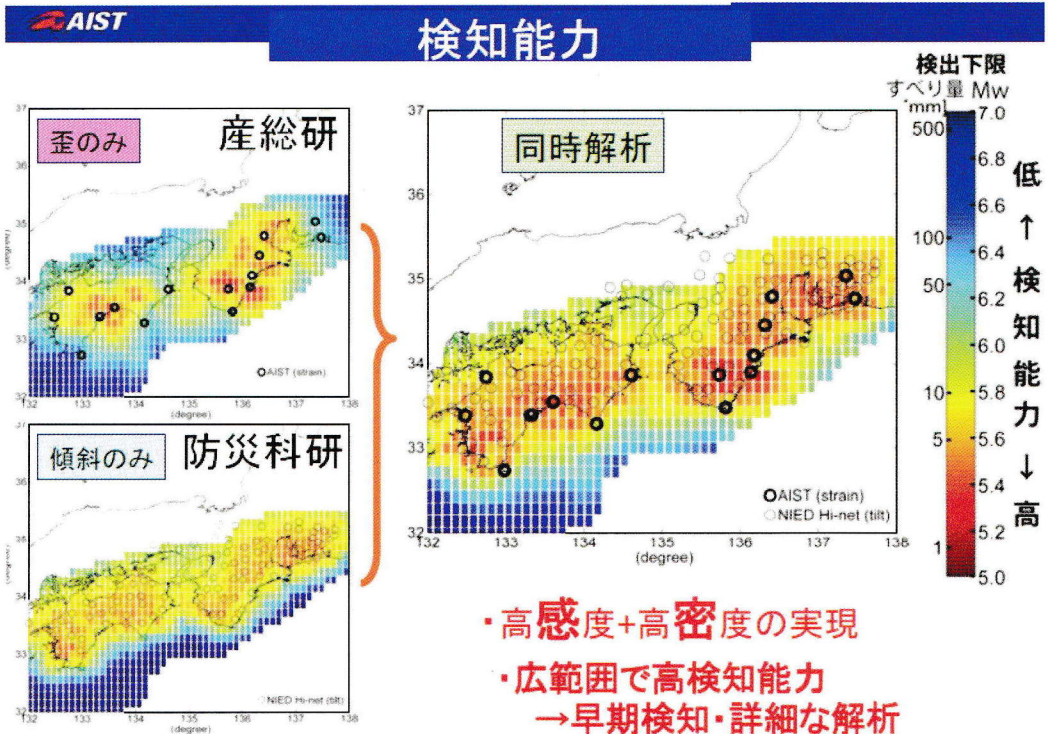


図 4 歪計と傾斜計を合わせた短期的ゆっくりすべりの検知能力。[188回：産総研，小泉氏資料]

浅部超低周波地震のモニタリングでは、高感度加速度計のアレイ解析とともに、フィルタリング処理した F-net 記録も使用して、より高精度の検出に取り組んでいる。また深部低周波微動の移動現象と地殻構造の詳しい解明を目的として四国西部で微動観測アレイが予定されている。

「ひずみ計多点展開の効果，地震計鉛直アレイによる微動検出」産総研（小泉氏），南海・駿河トラフ周辺の産総研の地下水等総合観測網（3 深度の地震観測，歪計・傾斜計，GPS の平行観測等）の歪計観測網と，防災科研の傾斜計観測網を合わせて，短期的 SSE の早期検知・詳細な解析を目指す取り組みが計画されている。プレート境界面上の仮想ゆっくり滑り，および両観測網の各観測点の閾値に基づいて検知能力を評価すると，高感度・高密度，広範囲の検知能力の向上が期待される（図 4）。また地震計鉛直アレイによる微動検出

では，1 地点の波形でセンブランス解析を行うことで，検知能力はエンベロープ相関法の約 10 倍である。今後防災科研とのデータの共有，共同開発等により，スロースリップと微動の検出の高度化を図る予定である。

野口伸一

[のぐち しんいち]



現職 (独)防災科学技術研究所総括主任研究員
理学博士

略歴 北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了，科学技術庁国立防災科学技術センター研究員，(独)防災科学技術研究所海溝型地震研究室長を経て現職。

研究分野 サイスマテクトニクス，地震活動のフラクタル性など

■ 書 評 ■

● 日本の地形学への批判

太田陽子, 小池一之, 鎮西清高,
野上道男, 町田 洋, 松田時彦 著
日本列島の地形学

評者 衣笠善博

「まえがき」によれば, 本書は, 「日本における発達史地形学の最新成果の総括であり, 同時に日本列島の地形特色を強調した地形学の教科書を目指している」とされ, 以下の6章からなる。1 変動帯日本列島の成り立ちと編年, 2 変動帯を特色づける山地・平野・火山の形成史, 3 第四紀における気候・海面変化に伴う地形変化, 4 変化しつつある日本の地形, 5 自然災害と地形の人工改変, 6 未来の地形と地形学の未来。

このうち, 第5章までは, 本書の著者とほぼ同一の編者らによる「日本の地形 I 総説」(以下, 「総説」と略す)の内容と基本的に同じであり, 「総説」が349頁であるのに比べ, 本書の第5章までは178頁であることから察せられるように, 本書は「総説」の簡略版とも言えよう。

本書の「まえがき」には, 「最新成果の総括」と記されているものの, 「総説」が出版された2001年以降の文献としてあげられているものの殆どは, 既往の知見に係わるデータ拡充に類するものであり, 日本列島の地形に関する新しい知見は盛り込まれていない。「総説」から10

年を経て, 盛り込むべき新しい知見がないとしたら, 日本の地形学全体の怠慢である。この点についての「総括」は, 本書には見あたらない。

本書の特徴を挙げるとしたら, 第6章の「未来の地形と地形学の未来」であるが, そこに記されているのは, シミュレーションの重要性の指摘のみである。

第5章までは, 発達史的な地形学の記述に充てられており, シミュレーションの基本となる営力論的地形学の記述は無いため, 唐突の感は否めない。また, シミュレーションにあたって必要となる地層・岩体の物性, 気候, 風化速度などのパラメータについては, 「値が得られていないものについては, とりあえず仮の値を与えてシミュレーションを行い, 将来の地形学の進歩を待つことになる」としている。

さらに, シミュレーション結果の検証については, 「地形発達シミュレーションはそれ(検証)を可能とするか, 少なくともそれを目指す」と述べられているのみで, 具体的な道筋・手順は示されていない。

「総説」が出版された2001年以降の地形学をとりまく社会的な状況の例としては, 地球環境変化に対する関心の増加と, 火山噴火等に対するハザードマップの作成と利用を挙げることが出来ようが, 本書ではそれらに関する実質的な記述は皆無である。これらの課題こそ, 地形シミュレーションが果たすべき分野であるとともに, 厳しくその結果が検証される分野である。日本の地形学は, なぜにこのような社会的課題に無関心なのであろうか?

<東京大学出版会, 2010年1月, B5判, 220頁, 4,500円>

地震ジャーナル・既刊総目録

[41号～50号]

41号・2006年6月

エッセイ 古きをたずねて今を想う 津村建四朗
地球潮汐による地震のトリガー作用 田中佐千子
地震と荷重の微妙な関係 日置幸介
「新潟県中越地震」と人々の対応

—住民調査から考えるいくつかの課題— 中森広道
新潟県中越地震の早期検知と脱線 中村 豊
宏観異常判定システムの構築 萩原幸男/糸田千鶴
地震の基礎知識 岡田義光

13 地震を起こす原動力
14 海溝型地震・内陸型地震・スラブ内地震

囲み記事・地震動早期検知システム 中村 豊
・地震早期検知システムは、長周期地震動
による共振被害防止に有効である 伯野元彦
・自律防災 中村 豊
・耐震計算偽装 伯野元彦
・志賀原発差し止め判決への疑問 伯野元彦

地震予知連絡会情報 岡田義光
◇第167回 [2006.02.20] ◇第168回 [2006.05.22]

書評・若松加寿江ほか著 日本の地形・地盤
デジタルマップ CD-ROM 付 翠川三郎
・クニ・トシロウ著 津波から人々を救った
稲むらの火 今村文彦
・武村雅之著 手記で読む関東大震災 北原糸子

新刊紹介 編集部

ADEP 情報 平成18年度前期の人事異動

42号・2006年12月

エッセイ 平成の大合併で防災力は低下する 井野盛夫
先進的の海底ネットワークシステム—紀伊半島熊野灘沖
における海底地殻活動観測網の整備— 金田義行

巨大地震災害の発生を目前に控えて
～新しい地震防災研究～ 河田恵昭
21世紀の安全に再構築を 吉村秀實

長い取材体験から見た「最新地震論」—予知中心
から幅広い地震研究・防災に— 横山裕道

発展途上国の組積造物向けの耐震補強法の開発
目黒公郎
地震の基礎知識 岡田義光

15 海溝型地震と津波
16 内陸型地震と活断層

囲み記事・地震予知をめぐるさまざまな思い 横山裕道
・確定報・最終報 岡田義光

地震予知連絡会情報 岡田義光
◇第169回 [2006.08.21] ◇第170回 [2006.11.20]

書評・町田 洋ほか編 日本の地形5 中部 岡田篤正
・杉原義得著 巨大地震は必ず来る！
その10秒が命を守る 萩原幸男
・川崎一朗著 スロー地震とは何か 加藤照之

新刊紹介 編集部

ADEP 情報 平成18年後期の人事異動

43号・2007年6月

エッセイ 傍目八目 名和小太郎

口絵 衛星データから見た地震災害
(バム地震、ムザファラバード地震) 中山裕則

緊急地震速報の提供に向けて 斎藤 誠
地下水と地震予知—地下水観測による地震前後の
地殻変動の推定— 小泉尚嗣/松本則夫/板場智史

変わりゆく南極の地震像

—南極観測50年— 神沼克伊
ものがたり「松代群発地震」

—マダグダイヤビルによる 脇田 宏
安政江戸地震の際の武蔵国入間郡の災害—埼玉県入間郡

毛呂山町大谷木の山崩れと地盤沈下— 新井健司
原子力発電所の新しい耐震指針

—何がどう変わったのか— 大竹政和
地震の基礎知識 岡田義光

17 本震・余震・群発地震
18 地震の周期性と活動期・静穏期

囲み記事・活断層の成熟度と地震の規模頻度予測 隈元 崇

・「津波」という言葉はいつから
使われはじめたか? 都司嘉宣

・地震後火災を大火にしないためには
耐震補強 伯野元彦

地震予知連絡会情報 岡田義光
◇第171回 [2007.02.19] ◇第172回 [2007.04.09]

◇第173回 [2007.05.14]

書評・山中浩明ほか編著 地震の揺れを科学する
木下繁夫

・北後 寿著 近代都市の巨大地震災害を追う
伯野元彦

新刊紹介 編集部

ADEP 情報 平成19年度前期の人事異動

44号・2007年12月

エッセイ 地震学のすすめ 金森博雄
南海トラフの巨大地震再来間隔変化の
メカニズム解明に向けて 堀 高峰

1707年富士山宝永噴火 小山真人
長周期地震動による被害と対策

—主に石油タンクを対象として— 座間信作
動き始めたE-ディフェンス

～地震災害の軽減を目指して～ 井上貴仁
報道される地震災害死者数の時間的推移に
関する数理モデル 萩原幸男

地震の基礎知識 岡田義光
19 地震の予知

20 東海地震
囲み記事・新潟周辺は異常に地震が多いか? 岡田義光

地震予知連絡会情報 野口伸一
◇第174回 [2007.08.20] ◇第175回 [2007.11.19]

**書評・金 凡性著 明治・大正の日本の地震学—
「ローカル・サイエンス」を超えて—** 藤井陽一郎

・日本地震学会地震予知検討委員会編
地震予知の科学 松澤 暢

新刊紹介 編集部

ADEP 情報 平成19年度後期の人事異動

45号・2008年6月

エッセイ 津波警報システム 長谷川 昭
福井地震から60年 吉井敏尅

想定宮城県沖地震の震源域では何が
起きているのか? 海野徳仁

迫り来る宮城県沖地震に備えて—地域の地震・地盤
環境に調和した地震対策の展開に向けて— 源栄正人

2007年新潟県中越沖地震の震源断層面と
柏崎刈羽の強震動 縮纏一起/三宅弘恵

囲み記事・重力異常から地盤のゆれやすさがわかる!?
河野芳輝

・重力異常から活断層がわかる!? 萩原幸男
地震予知連絡会情報 野口伸一

◇第176回 [2008.02.18] ◇第177回 [2008.05.19]

書評・佃 為成著 地震予知の最新科学 川崎一朗

新刊紹介 編集部

ADEP 情報 平成 20 年度前期の人事異動

46 号・2008 年 12 月

エッセイ 耐震工学にも横たわる溝

—それをいかに越えるのか

関東地域の特異な震源分布

2008 年岩手・宮城内陸地震で 4000 ガル

中国の地震

地震に負けない力を身につけるための防災教育

中島正愛

岡田義光

青井 真

石川有三

福和伸夫

「緊急地震速報」に関する対応と意識

—「平成 20 年岩手・宮城内陸地震」における

調査からの考察—

囲み記事・原発の耐震安全性に関する 6 つの誤解

地震本部トピックス/測地学分科会トピックス

地震予知連トピックス

◇第 178 回 [2008.08.18] ◇第 179 回 [2008.11.17]

書評・日黒公郎ほか監修 緊急地震速報

—揺れる前にできること

・東京大学地震研究所監修 地震・津波と

火山の事典

武村雅之

木村政昭

新刊紹介

ADEP 情報 平成 20 年度前期の人事異動

47 号・2009 年 6 月

エッセイ 地震予知の可能性を最初に唱えた人?

津波予報の半世紀

(1) わが国の津波予報業務

津波予報の半世紀

(2) 世界の津波警報体制の現状とその課題

2008 年汶川地震による被害と復旧のための

日中技術協力

汶川大地震と天然ダム—唐家山天然ダムの

形成と防災対応—

2008 年中国汶川地震による都江堰市内の学校建築の

被害 壁谷澤寿海/李 康寧/楠 浩一/壁谷澤寿一

諏訪湖の「御神渡り」成因論再考

地震予知連絡会の歴史小論

囲み記事・震度で見た地震回数と M で見た

地震回数

・大地震に伴う気圧変動

地震本部トピックス

地震予知連トピックス

◇第 180 回 [2009.02.16] ◇第 181 回 [2009.04.10]

◇第 182 回 [2009.05.15]

書評・茂木清夫著 とらわれずに考えよう 地震・

火山・岩石破壊

新刊紹介

ADEP 情報 平成 21 年度前期の人事異動

48 号・2009 年 12 月

エッセイ 駿河湾で地震が起きた

新しい気象庁震度階級関連解説表

地震予知の夢

1894 年東京地震による飯能の斜面崩壊—「飯能町

「久美山中」で 350~360 間崩壊墜落した山腹」

はどこか?

平田 直

横田 崇/川上徹人/下山利浩

佃 為成

新井健司

四川大地震の地震像と被害の概要

超高層ビルの大型振動台実験

長江拓也/梶原浩一/井上貴仁/中島正愛

地震予知連トピックス

◇第 183 回 [2009.08.21] ◇第 184 回 [2009.11.20]

書評・林 愛明ほか著 四川大地震 中国四川

大地震の地震断層と被害写真集

新刊紹介

ADEP 情報 平成 21 年度前期の人事異動

49 号・2010 年 6 月

エッセイ プレート境界の固着の状態とその変化

内陸地震はどうして起こるのか?

2007 年中越沖地震の予測について

1960 年および 2010 年のチリ沖地震津波について

津波の力について

囲み記事・津波は海から来る洪水である

・編集委員会からのお知らせ

地震予知連トピックス

◇第 185 回 [2010.02.15] ◇第 186 回 [2010.05.21]

書評・川崎一朗著 災害社会

・里村幹夫編 地震防災

新刊紹介

ADEP 情報 平成 22 年度前期の人事異動

50 号・2010 年 12 月

特集号 これだけやればこれだけわかる

—明日の地震予知総合研究に向けて

エッセイ 地震ジャーナル 50 号刊行に寄せて

地震システム科学の構築へ向けて

地震発生予測シミュレーションに向けて

総合地震シミュレーションの現状と展開

地震予知研究と火山噴火予知研究の連携の強化

海溝型地震予知の展望

緊急地震速報と巨大地震

日本周辺域の海底観測ネットワークの構築

グローバル津波研究の展開—過去 100 年の歩み

地震発生予測実験

アクロスと地震予知研究

GNSS 地殻変動観測の将来

SAR による地震像の把握

海底の動きを測る~GPS/音響測距結合方式

による海底地殻変動観測~

応力連続観測と今後の地震予知研究—ボアホール

応力連続観測器の開発による今後の展開—

ハイパー・ハイブリット重力測定-地殻内

流体移動検出の高精度化を目指して

電磁気学的な地震予知研究が描く将来像

地下水観測による地殻変動の推定

—現状と展望—

ミュオンを用いた断層のイメージング

地震災害軽減のための国際協力

地震予知連トピックス

◇第 187 回 [2010.08.20] ◇第 188 回 [2010.11.19]

書評・太田陽子ほか著 日本列島の地形学

地震ジャーナル・既刊総目録 [41 号~50 号]

ADEP 情報 平成 22 年度前期の人事異動

林 愛明

野口伸一

伯野元彦

編集部

島崎邦彦

飯尾能久

茂木清夫

今村文彦

有川太郎

伯野元彦

萩原幸男

野口伸一

武村雅之

加藤照之

編集部

高木章雄

岡田義光

平原和朗

堀 宗朗

村上 亮

松澤 暢

堀内茂木

金田義行

今村文彦

平田 直

山岡耕春

今給黎哲郎

橋本 学

佐藤まりこ

石井 紘

大久保修平

長尾年恭/竹内昭洋/鴨川 仁

小泉尚嗣

田中宏幸

石川有三

野口伸一

衣笠善博

ADEP情報

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

増尾 健二 東濃地震科学研究所参事 22. 6. 1

退職

工藤 輝夫 東濃地震科学研究所参事 22. 5. 31

松村 稔 研究業務支持機構主任研究員 22. 9. 30

編集後記

地震ジャーナルはこの度50号を発刊するに至った。当財団設立50周年を記念して第1号が創刊されて以来、25年の歳月が経ったことになる。この間、地震学およびその周辺領域の観測研究は多大な進歩を成し遂げた。本誌の巻頭言には、本財団高木会長が25年の進歩の歴史を振り返って、主な出来事を記述している。創刊号から50号まで迎えて見ても、一連の成果が滲み出て見えるような気がする。

特に1995年の阪神淡路大震災を契機に基盤観測網の整備が進み、高感度地震観測と共に、強震計観測および地殻変動観測の稠密なネットワークが日本列島をカバーできることとなった成果は大きい。その結果、日本列島の4次元的な動きを逐一追及できる迄になったのである。今や地震学はその周辺領域を巻き込んだ総合的な「地震システム科学」に発展したと言える。

またもう一つの成果は従来の理系分野を中心とした地震科学だけではなく、地震災害を視野に入れた工学分野との連携強化である。つまり地震システム科学はひとり理系分野に限らず、災害工学をも含んだ広領域科学を意味する。理工連携の意図は高感度地震観測網に強震計観測を加えることで一応の実現を見た。強震計観測は断層破壊の伝播を時間の経過と共に把握することを可能にした。しかし当該分野を除いて、更に広い意味での理工連携は、実現したとは言い難い。

本財団の創立者である萩原尊禮先生の財団設立の意図は地震予知総合研究の実現、すなわち地震学とその周辺領域科学との連携、さらには地震災害軽減のための理工連携の実現にあった。財団の名称「総合研究」は理系における総合性だけではなく、工学をも含めた幅広い総合性が意図されたもので、創立者の先見性には今更ながら驚きをもって接する他はない。我々は先生のご意志を汲み取って、総合性を常に心しなければならぬ。

地震ジャーナルは早くから総合化を行ってきたと言える。初代編集長を15年にわたって務められた力武常次先生の頃より、掲載する論文は理学系のみならず、工学系、時には社会学系の領域をもカバーしてきた。現在編集会議は理学2名、工学2名、それに事務局側委員2名の構成になっていて、領域の配分を考慮しつつ「総合研究」に相応しい内容の維持に努めている。

本誌創刊以来25年の節目の時に当たり、多くの執筆者のご協力を得て、この50号を特集号「これだけやれば、これだけわかる一明日の地震予知総合研究へ向けて一」として発行することができた。そこでは、これ迄の研究成果を振り返るのではなく、むしろ研究成果を踏まえて、近い将来達成できるであろう「夢」に重点を置いてご執筆願ったのである。今後25年、果たして夢が実現するか否か、研究の進展を大いに期待したい。なお特集号の性格上、また総ページ数の制限もあって、今回の

特集号は理系領域に限られたが、いづれ工学領域の特集号も企画する方針である。

編集後記または「編集会議からのお知らせ」を通して予告して来たように、本誌51号より無料化を実施する。無料化しても本誌の体裁や内容がこれ迄と大幅に変わることはない。読者層に多くの若手研究者を取り込むが、これ迄継続している読者の方々への配送を止めることもない。本財団の公益法人への移行を目前にして、公益性を高める事を期待しての無料化である。本誌編集の方針として、急激な変革をすることなく、時代の推移と研究の発展に伴って、徐々に改訂を重ねて来たし、今回もこの方針には変わりはない。読者諸賢におかれては、今後ますます本誌を愛読活用され、ご意見ご批判を賜れば幸いです。(Y.H.)

地震ジャーナル 第50号

平成22年12月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区猿樂町1-5-18
☎03-3295-1966
財団法人
地震予知総合研究振興会

発行人 高木章雄

編集人 萩原幸男

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/ (財)学会誌刊行センター