

はじめに

この予告集に投稿された原稿を集めました。若干の編集を経て、近いうちに最終版を公表する見通しです。この予告集は、最終版公表と同時に削除されます。投稿予定の原稿は受け取り次第、この予告集に付け加える予定です。

なお、この予告集の原稿の順番は主著者の名字の ABC 順です。

避けて通れない出口戦略

東京大学大学院理学系研究科 ロバート・ゲラー

約 50 年前、日本の地震学コミュニティのリーダー達は「地震予知」をスローガンとして予算獲得に成功した。その後、理論もモデルも成功例もない地震予知は、1969 年には国土地理院に地震予知連絡会が設置され、同年「予知研究計画」から「予知計画」になり、さらに 1978 年の大地震対策特別措置法（大震法）によって“東海地震”の実用的予知がスタートした。これで、日本人は皆、地震は予知できるものであるという非現実的な期待を抱くにいった。しかし、阪神淡路大震災、そして 3.11 を経験した今、日本における震災の軽減に貢献すること及び日本における地震学研究の発展を促すためには、この「予知」を正直ベースで現実に切り替えることがどうしても必要不可欠である。そして、その出口戦略の第 1 歩は、大震法の撤廃である。

1. はじめに

1880 年にジョン・ミルンは、日本地震学会の学術雑誌に掲載された論文で、地震予知の可能性について触れた。その後も、国内外でしばしば予知の可能性について議論がなされ、さまざまな意見が出されたが、その多くは否定的であった。

当時の第一人者、Macelwane (1946) は、「地震予報という問題は、カリフォルニアをはじめ各地で、この 40 年間にわたり、重点的に調査されてきたが、問題解決に近づいたということは全くない。実際のところ、状況は、より絶望的になっている。」と述べている。さらに 1950 年代には、日本の代表的研究者（例えば、坪井・安芸, 1954）は、地震予知の可能性を完全に否定しないものの、その困難さについて論じ、近い将来の実現は期待できないと述べた。Richter (1958) はさらに否定的で、「今のところ、一般に考えられているような地震予知ができる可能性はない。」と述べた。1962 年当時、筆者は 10 歳であり、在米だったので定かな議論はできないが、日本の地震学の第一人者達が上述の予知に関する一連の国内外での慎重論を（完全若しくは大部分に）把握しなかったとは考えられない。

2. ブループリントを評価する

1962 年に提案されたブループリント（「地震予知一現状とその推進計画」）では、国家地震予知計画の設立が盛り込まれた。

一般に、研究計画を提唱する際、提唱者には、「立証義務」がある。つまり、提唱された方法及び期待される成果の妥当性・現実性を示唆しなければならない。その一環として、当該分野の既存研究をレビューし、その上で提唱した計画がこれまでの研究をさらに進展させる根拠を具体的に示すことが求められる。

この時、通常では、当該分野の成功した研究を土台として、提唱した研究がさらにこの分野を発展させることができるという理由を述べる。しかし、予知研究の場合、当時成功例はなく、失敗研究があったのみである。失敗例しかない研究分野で研究計画を提唱するというのであれば、まず、

なぜこれまでの研究は失敗したか、なぜ提唱した研究がこれまでの失敗例と異なり成功すると期待されるのか、物理モデルや方程式などを含め具体的な根拠を示すべきである。しかし、ブループリントにはそのような記述は皆無であった。

実際ブループリントには、1 頁目（緒言）と最後の 2 頁（期待される成果）を除き 29 頁にもわたって記載されているのは、観測網設置等の具体的な提案である。参考文献リストはなく、地震予知悲観論への回答もない。得られた観測データをいかに解析し、地震予知にどのようにつなげようとするのかについての記述も皆無である。これはなぜであろうか。

ブループリントをそのまま素直に読めば、まずはデータを取る、そして、データが取れば自然に「前兆現象」が見つかるだろう、という発想に基づいた計画としか理解できない。ただ、あえて行間を読むと以下のようになる。

ブループリントを公表した「地震予知計画研究グループ」の主要メンバーは、優れた業績を有する研究者であり、当然予知が困難であることを十分に承知していた。しかしながら、気象庁・国土地理院・大学が観測網設置・運用予算を獲得するためには、より積極的な理由づけが必要であると考えた。つまり、予算獲得のスローガンとして、「予知」を使用したと解釈できよう。仮にそうであれば、これは倫理上問題であると言わざるを得ない。しかし、残念ながらこのような予算獲得戦略は、他の分野でもしばしば使用されるテクニックである。

つまり、悪く言えば、成功する見通しはない「地震予知」を予算獲得方便とした確信犯である。一方、多くの分野で同様な方便が使われており、よくあるよくないこと、とも言える。

まとめると、以下の 2 点を指摘できる。（1）方便を使わなかったなら、観測網の予算を獲得できなかっただろう。（2）方便を使用したことは倫理上の問題であるが、予知研究だけではなく、日本の科学技術コミュニティと政府（公的支援）を巡る構造的な問題であり、ほとんどの分野で同様な問題が存在するだろう。

なお、ブループリント最終ページには、以下の記述がある。「地震予知がいつ実用化するか、すなわちいつ業務として地震警報が出されるようになるか、について答えられない。しかし、本計画のすべてが今日スタートすれば、10年後にはこの問いに十分な信頼性をもって答えることができるであろう。」

この記述は、研究者らしくない、たまむしいるの、抜け道だらけのものである。まず、“10年後”に誰がどの基準に基づいて答えるかについての記述は皆無である。また、「本計画のすべてが今日スタートすれば」と、巧みに条件を選定することで、数年後に開始された実際の計画とブループリント提唱は異なるものであるから上記の問いには答えられない、との逃げ口も残してある。つまり、提唱者の予知への科学的な本気度は極めて低かった。

3. これまでの日本での予知研究の評価

上述したように、ブループリント公表当時、提唱者の予知への“本気度”はきわめて低かった。しかし、好意的に見れば、提唱者は大型観測網を設置したなら、もしかして正確な前兆現象をみつけるのでは、と考えたのかもしれない。

しかし、ブループリント公表時から50年がたった。その間、多くの国で、多くの研究者が信憑性がある前兆現象を探そうとしてきた。結果、多くの観測事例の報告があったが、信用できる前兆はまだ見つかっていない。これは学界のコンセンサスである(Geller, 1997; Jordan et al., 2011)。また、東北地方太平洋沖地震(3.11)後、溯ってデータを調べても、顕著な前兆現象は認められなかった。

つまり、これまでの50年間にわたって投下された巨額の予算によって設置された地震及び地殻変動の観測網そのものが、3.11の前に顕著な前兆現象はないことをはっきりと示したわけである。ここに至り、原理的に予知が可能かどうかといった机上の議論は残っても、現時点で正確な予知はできないことは否定できない事実となった。

4. 1969年—1979年の3つの行き過ぎ

ブループリントは1962年に公表され、予知研究計画は1965年にスタートした。「予知」という方便は不適切ではあったが、社会的には大した問題ではなかった。しかし、1969年—1979年の間におきた、以下のできごとは事情を大きく変えた。

(1) 国土地理院に地震予知連絡会を設置

(2) 「予知研究計画」から「予知計画」への名称変更。

(3) 大規模地震対策特別措置法(大震法)の施行。

これらにより地震予知は、既に研究ではなくな

り、建前上、予知はできるものとなった。マスコミ及び国民は上記の3点を受け、予知はできる(かもしれない)と信じ込んだ。

筆者の知る限り、自然科学研究史上、ここまでの「大きな嘘」は前代未聞である。日本の一流研究者がこのような「大嘘つき」となったことは、もちろん彼らの倫理観の腐敗を表している。しかも、慢性的な嘘つきである。

筆者は1984年に来日したとき日本の地震学者の“嘘つき文化”に驚きを禁じ得なかった。問題は、嘘をついた者だけではなく、異常状態の存在を知りつつ沈黙した大多数の研究者にもある。

予知体制のバラ色宣伝と現状の間のギャップを世の中に知らせるために、筆者はネイチャー誌に意見論文を発表した(Geller, 1991)。故竹内均氏と島村英紀氏も予知の問題を指摘してきた。この批判は活字マスコミに報道されているが、電子媒体のマスコミ(特にNHK)は予知ができないことをほとんど報道しない。

阪神淡路大震災後も3.11後も地震学者に対しての風当りは瞬間的に厳しくなったが、同時に予知関連(推本の予算を含む)は著しく増えた。従って、この予算を使用している研究者が現状を批判することは難しい。

しかしながら、科学的根拠のない「東海地震」の実用的短期的(3日以内)予知及び確率的地震動予測を主体とする現行体制は、いずれも実現することはありえない(Geller, 2011a; ゲラー, 2011b; Stein et al., 2012; Frankel, 2013; Stein et al., 2013)。明らかに持続できるモデルではないのだ。

5. 出口戦略を探る

現状をまとめると、地震科学分野に現状潤沢な予算が割り当てられているが、その科学的根拠は極めて薄い。また、現体制は国民的誤解を誘発しており、必ずしも地震津波防災に的確に貢献していない。さらに、大型観測プロジェクト(海底観測網の設置など)も推進されているが、現在の予算の使い方はいうまでもなく、ベスト・ミックスと考え難い。

筆者だけでなく、恐らく多くの研究者も、現状の「嘘ベース」体制がいつまでも続くはずはなく、いずれかの時点で「正直ベース」へ切り替えていくことが望ましいと考えているだろう。また、正直ベースに戻さない限り、地震学が震災軽減に本当に役立つことはおろか、地震学自体が健全に発展していくことさえできない。

ここで、改革の第1歩として筆者は、今こそ、大震法の撤廃及び「東海地震」の予知体制の廃止を提唱する。これを突破口として、正直ベースに上手に切り替えることができれば、必要な組織や観測網すべてが消えてしまうといったようなことも避けられるのではないだろうか。

参考文献

- ブループリント, 1962, (正式題名:「地震予知—現状とその推進計画」, 地震予知計画研究グループ, 世話人人: 坪井忠二, 和達清夫, 萩原尊礼).
- Frankel, A., Comment on “Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it,” *Tectonophysics*, **592**, 200-206.
- Geller, R.J., 1991, Shake-up for earthquake prediction, *Nature*, 352, 275-276.
- Geller, R.J., 1997, Earthquake prediction: A critical review, *Geophysical Journal International*, **131**, 425-450.
- Geller, R.J., 2011a, Shake-up time for Japanese seismology, *Nature*, 472, 407-409.
- ゲラー, ロバート, 2011b, 『日本人は知らない「地震予知」の正体』, 双葉社.
- Jordan, T.H. et al., 2011, Operational earthquake forecasting, *Ann. Geophys.*, **54**(4), doi: 10.4401/ag-5350.
- Macelwane, J.B., 1946, Forecasting earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **36**, 1-4.
- Richter, C.F., 1958, *Elementary Seismology*, W.H. Freeman, San Francisco.
- Stein, S., R.J. Geller, and M. Liu, 2012, Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it, *Tectonophysics*, **562-563**, 1-25.
- Stein, S., R.J. Geller, and M. Liu, 2013, Reply to comment by Arthur Frankel on “Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it,” *Tectonophysics*, **592**, 207-209.
- 坪井忠二・安芸敬一, 1954, 地震は予知できるか, *科学*, 24(10), 517-521.

海陸統合観測網の時代

東北大学大学院理学研究科 日野亮太

東北地方太平洋沖地震の発生後、海域における地震・地殻変動観測網の重要性が認識され、その整備が進んでいる。海陸統合観測網が実現することにより、地震発生直後の地震動・津波の即時予測能力の飛躍的な向上、プレート境界すべりとプレート間相対運動との収支の評価、プレート間すべり速度の推移予測に基づく地震発生予測が可能となると期待される。得られる観測データは地震学の基礎研究振興の原動力ともなるはずで、その成果を地震・津波現象の予測や評価の高度化にフィードバックするための戦略的な研究計画が、海陸統合観測網の社会基盤としての価値を維持する上で必要である。

1. はじめに

1962年に発表された「地震予知 現状とその推進計画」（通称ブルー・プリント）は地震予知のために必要な観測項目とそれを実現するための方法論を提言したものである。その中では、全国一律に展開された測地・地震観測網の重要性が強調されている。そして、ブルー・プリントでは、観測網を整備することにより「地震予知への門を開こうとする」と提言の趣旨が説明されている。その背景には、観測データの蓄積から地震予知のための経験則を導くことが可能である、という期待が感じられる。ブルー・プリントの発表から50年経った今、日本列島の陸上部分をほぼ網羅する観測網が整備され、さらに海域への拡張が実現しようとしている。こうした観測体勢の整備にもかかわらず、地震予知につながる経験則を得るには至っていない。

一方で、ブルー・プリントでは「地殻歪の蓄積と地震発生との関係を究明」という目標も掲げられており、これについては、観測網の整備により多くのことが明らかになってきた。その反面、海溝型巨大地震の震源となる海域における観測網の欠如が、そこでの「地殻歪の蓄積と地震発生との関係を究明」を遅らせ、その結果として日本海溝沿いでの地震に関する長期評価に過誤を生じてしまった、ということもできよう。

これまで空白であった海域に観測網が展開されることにより、海陸統合観測網の時代を迎え、「地震予知への門」はいよいよ開くのだろうか？開いた門の向こう側には何があるのだろうか？本稿では、海域に整備される観測網が果たすべき役割について展望し、海陸統合観測網を足がかりとして地震予知の実現に近づくために何が必要なのか、私見を述べる。

2. ブルー・プリントの功績

ブルー・プリントがめざしたのは、「地殻変動を細密に捉え、その地震発生との関係を究明する」ために不可欠な観測網を日本全国に展開することであった。その中で、緩慢に進行する地殻変動を地震発生準備過程と捉え、その実態を広域・長期的に捉えることの重要性が強調されている点が注目される。提案時期がプレートテクトニ

クス前夜であったため、地震発生の準備過程に関する具体的なイメージは与えられていないが、地殻変動場から海陸プレート境界における固着度の分布を推定し、それをもとにして発生予測を行うおとしている現状を考えると、ブルー・プリントの提案者である先人たちの高い先見性を認めることができる。

ブルー・プリントのもう一つの重要なポイントは、地震発生の準備過程を理解するために必要な観測項目とその実施方法・体制について極めて具体的に提言している点である。こうした具体的な提言に基づいて始まった「地震予知計画」により地震・地殻変動観測網が次第に整備され、それに伴って、ブルー・プリントが目指した地殻変動と地震発生との関係に関する研究が大きく進展した。また、こうした観測網整備の営みの中で、観測技術やデータ処理・解析手法の高度化が進み、これが後の基盤観測網という広域稠密多点の観測網の整備とそのデータの活用に大きく貢献した。

地震予知計画や基盤観測網（地震予知計画とは独立に整備されたものである点に留意）による成果をここで詳しくレビューすることはしないが、これまでに我々が手に入れることができた高度な地殻活動の現状把握能力は、ブルー・プリントが目指したもののものである。さらに、ここで強調しておきたいのは、この現状把握能力は観測網整備やデータ処理・解析手法の開発だけで実現したのではなく、そうしたデータを用いて、この50年間に起こってきた様々な地震現象を理解するための基礎研究（これもまた、ブルー・プリントがめざしたこと）があつてはじめて結実したということである。

さらに、地球内部構造の理解に対しても観測網の整備が重要な貢献を果たしたことも言及しておきたい。地震現象を理解する上で、その発生場における環境要因の解明は不可欠であり、現状把握能力と地下構造に関する知識が両立してはじめて、後述する予測シミュレーションの前提となる地震発生の物理モデルの構築が可能となったのである。「物理モデルの構築」を「地殻変動と地震発生の関係の究明」と言い換えれば、これもまたブルー・プリントが指し示した方向性である。

3. 観測に基づく将来予測

観測している現象を支配する物理過程が十分に理解されていれば、現在の状態から次に起こることを予測することが可能である。たとえば、緊急地震速報や津波警報はその典型である。地震波あるいは津波の伝播過程に関する知識と地震観測により推定された震源パラメータを用いることにより、震源から離れた地点での地震動の強さ・津波の高さと到達時刻が予測される。

現行の「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が指向しているシミュレーションに基づく地震発生予測も、上記の強震動や津波の即時予測と同じ考え方に基づいている。すなわち、震源となる断層でのすべりが時空間的に発展する過程をモデル化し、観測から把握できる断層とその周囲の応力・歪を初期条件としてモデルを駆動することにより、将来発生するであろう地震の規模や時期を予測しようということである。

こうした将来予測には、予測の根拠となる現在の状態に関する情報の不十分さと、予測の対象とする物理過程に関する理解の不十分さによる、不確実性が付随する。発生と伝播の過程の理解が進んでいる津波の即時予測の場合では、予測の出発点となる津波波源のパラメータの推定誤差が予測精度に特に大きく影響する。2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）が発生した直後の規模推定が過小評価された結果として、予測された津波波高もまた過小になってしまったことは記憶に新しい。一方で、地震発生予測の場合には、予測に必要な断層における応力・歪状態の推定に大きな誤差が含まれる上に、断層すべりの時空間的な過程を支配する過程そのものとそれを記述するためのパラメータの不確実性も大きいため、結果として予測精度は低くならざるを得ないのが現状である。逆に言えば、現状把握能力の向上と予測対象とする現象の理解を進めることにより、予測精度は確実に改善させることができるはずである。津波の即時予測の場合では、発生した地震の規模推定手法の改善を通して予測精度の低下を防ぐための様々な方策が提案され、実装されようとしている（例えば、Ohta et al., 2012a）。

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、地震・地殻変動の観測データに基づく断層のすべり分布や応力場の推定精度の向上、断層周囲の不均質構造など地震発生場の環境要因の解明、そして、断層の構成法則に基づく多様な断層すべり現象のモデル化、といった地震発生を予測するために必要な個別の要素に関する研究の進展に大きく貢献した。しかし、地震発生予測が系統的・定常的に実施されるには至っていない。

津波予測の例に見るように、予測を実現してその結果を評価し、問題点を予測手法へフィードバックする過程が予測の信頼性向上には不可欠である。したがって、地震発生予測についても一刻も早く、予測システムのプロトタイプを実現・稼働させることが必要である。

4. 海域観測網が果たすべき役割

4-1 地震動と津波の即時予測

東北沖地震の発生を契機として大規模な海底観測網の整備が加速されている。すでに着手されていた南海トラフ沿いの海底ケーブル式観測システム（DONET, DONET2）（Kaneda, 2012）の整備の促進が図られるとともに、千島・日本海溝沿いに大規模なケーブル式観測網の敷設計画が進行中である（植平・他, 2012）。こうしたオンライン海底観測システムは、地震計と津波を検知するための海底津波計を備えており、海域下で発生した地震による強震動や津波の即時予測の精度向上への貢献が期待されている。地震が海域下で発生した場合には、震源から観測点までの距離が、予測の対象となるべき陸域までの距離に比べて短いので、結果的に予測情報の発信から実際の強震動または津波の到達時刻までのリードタイムは、陸域の観測網だけを頼りにしている現行の即時予測と比べて長くとることができる。しかも、震源に近い位置での観測は精度よく震源パラメータを推定することにも貢献するから、より早く、より信頼度の高い即時予測ができるようになる。

海底ケーブル式の観測網は、東北沖地震以前にも日本近海に存在していた（たとえば、Kanazawa and Hasegawa, 1997）。また、こうしたリアルタイム海底観測データを使った津波規模・到達時刻の即時予測手法の開発も進められていたが（Tsushima et al., 2009）、現業としての津波警報システムとして実装されるに至っておらず、東北沖地震の発生時にその効果（Tsushima et al., 2011）を発揮できなかったことは慚愧に堪えない。

実装が遅れていた理由の一つは、東北沖地震の発生前に存在していた海底観測網の密度が十分でないために、予測精度が地震の発生位置に大きく依存してしまうという問題があったことにあるだろう。観測網が整備されていない海底下で津波が発生した場合には、沿岸での津波の予測波高が大幅に過小評価されてしまうことが分かっていた（Tsushima et al., 2009）のである。しかし、広域海底観測網が整備されつつある現状では、こうした懸念も払拭されるのだから、今度こそ時期を逸することなく、海底観測データを活用した津波予測システムの実装を成し遂げなくてはならない。

海域に稠密な観測網が整備されると、陸域に地震波・津波が届くまでの伝播過程を実時間でモニタリングすることができる。そして観測点密度が十分細かければ、観測データの内挿によって波動場が推定でき、それを時空間的に外挿すれば、地震動や津波の予測が可能となる（干場, 2012; 前田・他, 2012）。こうした手法は、広域に展開された稠密なデータを必要とするが、震源（波源）の推定をすることなく、観測領域の外側での強震動や津波の即時予測が可能となる。稠密な海底地震・津波観測網が整備されることにより、迅速かつ高信頼度な即時予測に新たな途を拓くことができる。

4-2 大地震発生の長期予測

海底地殻変動観測により得られたデータは、東北沖地震の発生メカニズムを解明する上で重要な知見をもたらした（例えば、Iinuma et al., 2012）。海底観測の成果なくしては、海溝軸近傍での大きなすべりというこの地震が示す重要な特徴は、未だに議論の対象であったかもしれない。このことは、海域下のプレート境界上で発生するすべりの時空間分布を評価する上では、日本列島に稠密に展開された陸上観測網をもってしても、その能力が不十分であることがこの地震により端的に示されたということでもある。

プレート境界におけるすべり欠損の分布を把握することは、将来発生しうる大地震の規模を評価する上で最も基本的なことであり、それが不十分であったことが日本海溝沿いで M9 の超巨大地震が発生することを予見できなかった要因のひとつである。こうした反省のもとに、GPS/音響結合式（GPS/A）海底地殻変動観測のための海底基準局網の増強が、ケーブル式観測網の展開と同様に、南海トラフおよび千島・日本海溝沿いにおいて進められている（海上保安庁, 2012; 木戸・他, 2012）。

従って、これからの海底地殻変動観測が応えるべき最大の課題は、トラフ・海溝軸近傍でのプレート間すべり分布の実態解明である。海溝軸近傍での大きな地震時すべりがあったことは、地震発生の準備過程にあつては、そこですべり欠損の蓄積があったことが予想される。従って、海溝近くでの大きな地震時すべりを描き出すことに貢献した海底地殻変動観測のデータは、そこでのすべり欠損分布を把握する上で切り札的な存在となる。

ここで留意すべきことは、観測されるのは変位速度であり、そこから推定できるのはすべり（欠損）速度であるという点である。将来発生する大地震の規模評価に必要なのは、蓄積されたすべり欠損速度であり、それを知るには観測されるすべり欠損速度を地震発生の準備期間にわたって積分しなくてはならない。しかし、観測に基づくすべり欠損速度の情報があるのは、地震の発生サイクルからみてごく短い期間でしかないから、すべり欠損を推定するには、何らかの方法で長期的な平均すべり欠損速度を推定しなくてはならない。どのような方法をとるにせよ、尤もらしい平均速度を得るために本質的に必要なことは、観測をできるだけ長期にわたって、すべり欠損速度を、時空間的な揺らぎを含めて得ることである。

日本でGPS/A観測が本格的に開始されてから10年足らずしか経っていないが、東北沖地震以前においても、変位速度の時間変動を検知した実績がある（Sato et al., 2011）。従って、広域・多点での観測を定常的に維持できれば、GPS/A観測はプレート境界におけるすべり欠損速度の時空間分布の実態把握に大きな貢献を果たすことが可能である。

すべり欠損速度の時空間分布を知る上では、地震を含むプレート境界で間欠的に発生するすべりの分布を把握して、プレート運動との収支を明

らかにすることもまた重要である。非地震性すべりイベントのなかでも、特に浅部プレート境界で発生するものについては、陸上観測網で捉えることが非常に困難であった。しかし、海底における水圧の連続観測記録から、プレート境界沿いの非地震性すべりイベントと解釈することが可能な変動が検知された（Ito et al., 2012）。広域での海底水圧の連続観測は、ケーブル式海底観測網により津波観測の目的で実現されるから、そのデータを活用することにより、非地震性すべりイベント活動の実態把握が進むと期待できる。一方、プレート境界域で発生する地震については、陸上観測でも高い検知能力が期待できるが、海底観測によって震源位置あるいはすべり分布の推定精度と空間分解能が向上する。このように、海底観測は、プレート境界上での固着・非地震性すべり・地震性すべりのそれぞれの時空間分布を把握する上で重要な鍵を握っている。

東北沖地震の発生以前から、海陸プレート境界付近の地震波速度不均質構造とプレート間地震の地震活動度やプレート間大地震のすべり域の空間分布との間に相関が見られることが指摘されていた（例えば、Kodaira et al., 2000; Mochizuki et al., 2008, Yamamoto et al., 2011）。東北沖地震に関しても、地震時すべりが大きかった領域に対応するような地震波速度の空間変化が指摘されている（Zhao et al., 2011）。こうした対応関係が確実であれば、構造不均質を明らかにすることにより、大地震が発生する可能性をもつ領域を前もって示すことが可能であり、地震発生の長期予測に有効であると期待される。

これまでも、海域下の構造不均質とプレート境界地震の発生様式の対応関係に関する研究も数多く進められてきているが、人工地震探査による2次元的な構造モデルに基づく研究であったり、M8級の地震の震源域程度の空間スケールの地震波トモグラフィによるものであったりして、広域での構造不均質を系統的に調べることは十分に進んでいない。これから広域に展開される新しい海域地震観測網のデータを用いた研究による新しい展開が期待される。

4-3 プレート間すべりの推移予測

ここまでは、将来発生しうる地震の規模予測に対する、海底観測が果たす役割を考えてきたが、リアルタイムの海底観測網が安定して稼働するようになれば、プレート間すべり分布の推定精度の向上を通して、シミュレーションに基づく地震発生予測の性能向上にも大きな貢献を果たせるだろう。東北沖地震の発生前に捉えられた海底水圧連続観測のデータからは、地震発生直前にすべりの顕著な加速を認めることはできなかった（Ohta et al., 2012）。しかし、2日前の前震後に大規模な余効すべりが、プレート間地震の連鎖の伴いながら進行している状況は明瞭に捉えられていた。超巨大地震の発生が想定されているような予測シミュレーションがあつて、それを用いたすべりの推移予測が実現していたとすれば、

地震発生に至る2日間に得られた海底観測データをもとにして、大地震の発生が切迫している可能性は指摘できたかもしれない。

同様な局面は、東南海・南海地震の発生の際に起こる可能性は十分にある。これら2つの地震は時間差をもって連動発生するかもしれない、いずれかの地震が単独で発生した場合には、その後の推移の予測は非常に重要な意味をもつ。その予測を、海底地殻変動に基づく震源近傍でのすべり分布の時間発展に基づいて行うことができれば、時間差連動の可能性や発生時期の客観的評価を高い信頼度をもって提示できるだろう（堀・金田, 2012）。

5. 海底観測の課題

前節でみたように、海域への観測網の拡大は、地震発生直後の地震動・津波の即時予測や地震発生予測の信頼度向上に大きな貢献をすることが期待される。しかし、現在観測網の整備が着手・進行している海域は限られており、このままでは、多くの大地震の発生域が観測空白域のまま残されることになる。海溝に近い領域の固着状態は、将来の巨大地震とそれに伴う巨大津波の発生ポテンシャルを評価する上で不可欠な情報であるが、巨大津波の発生によって影響を受ける範囲は極めて広いため、評価対象とする海域に優先順位をつけることは適当でない。従って、海底地殻変動観測網の広域化は、今後の観測網整備を進める中で特に優先度が高い。

しかし、現状の海底地殻変動観測は、陸上の測地観測に比べて実施コストが高いため、長期間にわたって広域の観測網を維持するためには、大幅な技術革新の努力が継続して必要である。GPS/A観測を例にすれば、海上計測装置を自律したブイで実現できれば、船舶を利用している現状と比べて観測効率を大幅に改善できる。一方で、変形速度が小さい海域（たとえば日本海東縁部）では、海底側に電源を必要としないベンチマークを使って、海底測地測量を1～数年間隔で繰り返し実施する手法の方が現実的と考えられる。しかし、海底測地測量の試みはほとんど行われておらず、今後推進すべき重要な技術的課題である。

6. むすび

ここで示した海底観測の方向性は、「測地観測の時空間的密度の向上」、「地殻変動連続観測の推進」、「微小地震観測網の整備」というブルー・プリントで提言された内容と全く同じである。つまり、海域にもブルー・プリントが描いた観測網が行き届きつつある、ということができる。しかし、観測網の位置づけは、ブルー・プリント同時の「地震予知を目的とする測定」と比べると、今では非常に具体的なものとなっている。基盤観測網の整備事業の方針を示した「地震に関する基盤的調査観測計画」（地震調査研究推進本部, 1997）には、「基盤的調査観測等は、被害の軽減と地震現象の理解を目指して、長期的な地震発生の可能性の評価、地殻活動の現状把握・評価、地震動の

予測、津波予測の高度化、地震に関する情報の早期伝達等のための基盤的データの提供を目的として実施する」とされている。従って、観測網の整備・維持事業の達成度の評価は、地震動や津波の予測と長期評価への貢献度からなされるべきである。

本稿で述べた通り、これまで空白域であった海域へ観測網を拡大することにより、地震動・津波の予測や地震の長期評価の前提となる現状把握能力は大きく向上する。一方で、予測・評価の信頼度の向上には、観測体勢を充実させるだけではなく、地震学の総合的な底上げも不可欠である。基盤観測網が供給するデータから多くの重要な研究成果が挙げられていることからみても、観測網の整備とのデータの円滑な流通は地震学の基礎研究の振興に大きな役割を果たしている。そして、基礎研究の振興を通して、観測網がその存在意義を発揮しているといえる。しかし、こうした基礎研究の成果を、観測網整備・維持の本来の目的である予測・評価の高度化に効果的にフィードバックすることを意識しなくては、観測網に対するサポートを継続的に得ることは難しくなっていく可能性がある。

従って、観測網による大量・良質のデータを享受する研究者は、その代償として、それを予測・評価の高度化につなげるための方策を考案・開発してその成果を社会に対して（実際には、観測網の運用母体である地震調査研究推進本部などを介して）還元する努力をする必要がある。そして、それには組織的な研究開発計画が必要であろう。地震・津波現象が非常に長い時定数を持ち、多種多様な物理化学過程の複合・競合現象であることを考えると、その理解と予測・評価には、地震・地殻変動観測に加えて、多角的な情報を統合しながら、長期間継続して戦略的に取り組むことが不可避であり、それは、小さな研究組織や時間サイクルが短い単発の計画研究で成し遂げることはできない。ブルー・プリントでは「地震予知を目的とする測定」を実現するための国家的規模の事業計画の必要性が提言されたが、海陸統合観測網が整備されつつある今、その性能を活用して地震現象の予測や評価を目的とした研究を推進するための国家的規模かつ異分野横断型のプロジェクト研究の推進が必要であると考えられる。

参考文献

- 堀高峰・金田義行, 2012, 地震発生予測の試行実験と情報発信システム, 地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム。
- 干場充之, 2012, 実時間地震動予測—データ同化と実時間サイト補正による時間発展型の予測—, 日本地震学会講演予稿集, B31-02.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186, 2012.

- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Inuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- 海上保安庁, 2012, 南海トラフにおける海底地殻変動の観測を強化～海底基準局を搭載した測量船が出港～, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KIKAKU/press/2012/H240119_nankai.pdf.
- Kanazawa, T. and A. Hasegawa, Ocean-bottom observatory for earthquakes and tsunami off Sanriku, north-east Japan using submarine cable, *International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables, Comm. for Sci. Use of Submarine Cables*, Okinawa, Japan, 208–209, 1997.
- Kaneda, Y. Real-time monitoring on the mega thrust seismogenic zones around the Nankai trough, southwestern Japan –DONET and DONET2 development and data application–, 2012, Abstract 2012 AGU Fall meeting, OS52A-02.
- 木戸元之・藤本博己・田所敬一, 2012, 日本海溝沿いの海底 GPS 観測点の強化と観測の展望, 日本地震学会講演予稿集, A31-04.
- Kodaira, S., N. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, Y. Kaneda, 2000, Subducted Seamount Imaged in the Rupture Zone of the 1946 Nankaido Earthquake, *Science*, 289, 104-106.
- 前田拓人・小原一成・篠原雅尚・金沢敏彦・植平賢司, 2012, リアルタイム津波モニタリング法としての津波データ同化の適用可能性, 日本地震学会講演予稿集, C11-09.
- Mochizuki, K., T. Yamada, M. Shinohara, Y. Yamanaka, T. Kanazawa, 2008, Weak Interplate Coupling by Seamounts and Repeating M ~ 7 Earthquakes, *Science*, 321, 1194-1197.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Inuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono and N. Umino, 2012a, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, 117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750.
- Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Inuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, S. Miura, 2012b, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L16304, doi:10.1029/2012GL052430.
- Sato, M., H. Saito, T. Ishikawa, Y. Matsumoto, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, 2012, Restoration of interplate locking after the 2005 Off Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01312, doi:10.1029/2010GL045689, 2011.
- Tsushima, H. R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, F. Imamura, 2009, Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B063029, doi:10.1029/2008JB005988.
- Tsushima, H., K. Hirata, Y. Hayashi, Y. Tanioka, K. Kimura, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, R. Hino, and K. Maeda, 2011, Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planet Space*, 63, 821-826.
- 植平賢司・金沢敏彦・野口伸一・功刀卓・汐見勝彦・青井真・関口渉次・松本拓己・岡田義光・篠原雅尚・山田知朗, 2012, 日本地震学会講演予稿集, D11-09.
- Yamamoto, Y., R. Hino, and M. Shinohara, Mantle wedge structure in the Miyagi Prefecture forearc region, central northeastern Japan arc, and its relation to corner-flow pattern and interplate coupling, 2011, *J. Geophys. Res.*, 116, B10310, doi:10.1029/2011JB008470.
- Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, and H. Kanamori, 2011, Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0), *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17308, doi:10.1029/2011GL048408.

地震予知のための観測研究の歩み

— 阪神・淡路大震災以降 —

東京大学地震研究所 平田直

1995年の阪神・淡路大震災を契機に、日本の地震予知に関する研究の体制が大きく変わった。政府の地震調査研究推進本部の調査研究と、科学技術・学術審議会から建議された観測研究計画の二つの研究が、それぞれ政策課題解決型研究と学術的基礎研究として進められている。予知研究によって、プレート境界で発生する地震についての知見が蓄積され、アスペリティ・モデルが提出され、大地震の発生場所と規模の予測については一定の見通しが得られた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震(M=9.0)の発生を予測できず、研究計画の再点検が行われた。その結果、プレート境界の超巨大地震に関する研究をより強化することになった。

1. はじめに

日本における地震予知計画は、1965年から始まり、1999年3月まで第1次から第7次計画として進められた。1995年1月、阪神・淡路大震災を契機に第7次計画が見直され、1999年から「地震予知のための新たな観測研究計画」(以下、これ以降の計画を新観測研究計画と略す)が開始された。2004年度からの第2次の新観測研究計画を経て、2009年度からは、火山噴火予知研究と統合された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が5ヵ年計画として実施されている。これは、地震予知研究の新観測研究計画としては第3次目の5ヵ年計画にあたる。第1次計画から新観測研究計画発足にいたるまでの計画立案の考え方とその成果については、平田(2003)やHirata(2004)、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の立案に至る観測研究計画の経緯と成果の詳細については、平田(2009)の総合報告を参照されたい。小論では、これまでの研究計画の主な成果と今後の展望について論じる。

2. 1995年兵庫県南部地震の発生と新観測研究計画

第7次地震予知計画(1994-1998年度)では、長期的・短期的予知の方式を踏襲するとともに、地震発生のポテンシャルの評価を目指した計画が実施された。プレート境界地震と内陸地震のそれぞれのタイプの地震を対象として、プレート運動とそれに基づく広域応力場を把握し、地震発生サイクルの中で現時点を位置づけて地震発生の可能性を評価すること(ポテンシャルの評価)を目指した。1995年1月に兵庫県南部地震(M7.3)が発生し、同年4月に第7次計画が見直された。6月には、「地震防災対策特別措置法」が制定され「地震調査研究推進本部」(以下、地震本部と

略す)が設置された。第7次計画の期間に、日本列島を数10km程度の観測点間隔で覆う全国的なGPS観測網の構築が進み、地殻変動の迅速な把握が可能な体制が作られていった。7次までの地震予知計画によって、地震活動の諸特性、地震が発生する場及び地震発生の仕組みなどに関する多くの知見が蓄積された。一方、「時期」、「場所」、「規模」を地震発生前に予測するという地震予知の目標の達成は、地震発生現象の複雑性のために、地震の前兆現象の観測に基づく手法だけでは、一般に極めて難しいことも分かってきた。そこで、新観測研究計画では、基礎的研究を重視して、これまでの知見に基づいて、地震発生直前だけに注目するのではなく、地震発生に至る地殻活動全体をモデル化し、モニタリングとモデルに基づいて地殻活動の推移予測を行うことを新たな目標として掲げた。

新観測研究計画立案に先立ち、地震学界の有志は「新地震予知研究計画 -21世紀に向けたサイエンスプラン-」[地震予知研究を推進する有志の会(1998)をまとめた。この中で、研究計画の立案方針として以下のように記載されている。

『これらの地震の発生を予測するためには、応力が十分に蓄積(増加:引用者の註)していながらまだ地震が発生していない状態(準備過程の最終段階)にある場所とそこで進行している地殻現象を検出する必要がある。その検出には破壊現象の直前だけに着目するのではなく、地震発生に至る地殻活動の全過程を地殻現象の観測によって把握し、その推移を逐次予測して検証して行くことが必要とされる。(中略)本研究計画は、このような地殻活動の全過程の推移の予測・検証を通して、地震発生準備の最終段階を検出することをめざす。そのため、充実した観測網により、地殻及び上部マントルの状態と活動をリアルタイムで把握し、より対象を絞った特別観測と併せて、

地震の準備過程とその最終段階を予測するシステム(「地震発生総合予測システム」)を開発して、その実効性の検証を行う。総合予測システムの機能は、「定量的かつ能動的な推移予測」によって特徴づけられる。『地震予知研究を推進する有志の会(2008)』

このサイエンスプラン(科学計画)は、その後、測地学審議会から建議された「地震予知のための新たな観測研究計画」(新観測研究計画)の学術的な基礎となった。新観測研究計画は、1999年から5カ年の第1次計画と、2004年度から2008年度までの5カ年の第2次計画として実施された[測地学審議会(1998)、科学技術学術審議会測地学分会(2003)]。さらに、2009年度からは、火山噴火予知研究と統合されて「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が進められている[科学技術学術審議会測地学分会(2003)]。

新観測研究計画で目指した地震予知とは、天気予報を行うように、大型コンピュータを用いて、将来の地殻・マンツルの状態(内部の変形や応力分布)を計算によって推定して、大地震の起きやすい場所と地震の大きさを予測し、ある時期にその地震の発生する確率を計算することである。このためには、観測データに基づいて現在の地下の状態を推定し、その状態が未来に向かってどのように推移して行くかを計算し、さらに、どのような状態になった時に大地震が発生するかが分かっている必要がある。このような、大規模な観測システムと、地下の状態の予測システム(観測データをモデルに取り込み将来の地下の状態を計算して、地震発生の可能性を予測するシステム)を統合したものが、現在の地震予知研究計画で考えられている地震発生予測システムである。

現在のところ、プレート境界の地震については、プレート境界の摩擦法則をモデル化してコンピュータの中にプレート境界・力学数理モデルを作り、過去の地震活動の特徴が再現できるようになった段階である[Hori, (2006)]。2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、概念モデルとしてのアスペリティ・モデルや、この数理モデルに対する疑義が提出されている。しかし、数理モデルの元になった考え方に根本的な誤謬があったのか、モデル化する現実の事象がモデルより遙かに複雑であった(モデルが単純化されすぎていた)かは、議論の分かれるところである。筆者は、基本的な考え方に誤りがあったとは考えていないが、モデルに考慮されていない本質的な物理過程や現象があったことは事実である。概念モデルとしてアスペリティ・モデルと物理モデルについては、後でもう一度議論する。

一方、内陸の地震やスラブ内地震については、アスペリティ・モデルに対応する複数の概念モデルが提案されている段階である。また、地表での

変形は、GPSによる地殻変動の観測によって、リアルタイムで高精度にモニタリングができるようになってきたが、プレート境界に近い海域での地殻変動観測の精度と観測頻度は陸上に比べて一桁以上劣るのが現状である。また、過去の地震履歴(プレートの滑り履歴)や、滑り摩擦の性質は、まだ十分な精度で分かっていないし、データの量も圧倒的に少ない。従って、地震発生予測システムは開発途上であって、現時点ではまだ基本的なプロトタイプシステムの域を出ていない。

3. 「新観測研究計画」と「地震本部の調査研究」

地震本部は「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」(1999年4月、以下、「総合基本施策」という)[地震調査研究推進本部(1999)]を策定し、地震防災政策のために必要な調査研究の実施方針を定めた。その中で、「新観測研究計画」は当面推進すべき地震調査研究の4項目の1つとして位置づけられた。なお、4項目とは、

1. 活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成
2. リアルタイムによる地震情報の伝達の推進
3. 大規模地震対策特別措置法にも基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実
4. 地震予知のための観測研究の推進

である。

項目1が、地震本部によって国として新たに掲げられた調査研究の目標である。つまり、地震本部が進めている地震調査研究は、地震災害の誘因(地震ハザード)としての強震動の評価を行って、その結果を地震防災に役立たせるという「科学技術政策の実現のための研究」である。項目2は、気象庁による緊急地震速報、項目3は東海地震の予知業務として実施されている事項の高度化のための研究、項目4が予知研究である。

「総合基本施策」は制定後10年を経て改訂され、2009年からは「新たな地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」(以下、「新総合基本施策」という)に基づいて調査研究が行われている[地震調査研究推進本部(2009)]。さらに、これは2011年東北地方太平洋沖地震を受けて見直された。この見直された「新総合基本施策」では、以下のように地震予知計画と新観測研究計画が位置づけられた。

『地震調査研究は、平成7年に地震本部が発足して以降、基盤観測網の整備等により飛躍的な進展を遂げてきたが、これは旧文部省測地学審議会

(現在の科学技術・学術審議会測地学分科会)の「地震予知計画」や「地震予知のための新たな観測研究計画」に基づき、大学等の研究者を中心に、それまで30年以上にわたって着実に進められてきた基礎的研究の積み重ねがあって、初めて生み出されたものである。また、現行の総合基本施策の成果についても、基礎的研究の進展なしには達成し得なかったと言える。

「新総合基本施策」は、地震防災・減災の実現に資するため、政府として推進すべき地震調査研究の基本を定めた戦略的な計画であり、ここで示す基本目標の達成に向けては、科学技術・学術審議会測地学分科会における議論の上で、策定された学術的な観測研究計画である「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」等に基づく大学等における基礎的研究の成果を取り入れて推進していくことが必要である。』[地震調査研究推進本部, (2009,2012)]。

地震本部は、地震防災に資するために、地震災害の誘因(地震ハザード)としての強震動と津波評価のための調査研究を行っている。これらの研究は政策課題解決のためのトップダウン型の研究である。これに対して、旧文部省の測地学審議会、現在は科学技術・学術審議会から関係大臣に建議された観測研究計画は学界の自発的な意志に基づいて研究計画を立案して、学術組織(大学等)、防災関連業務機関(気象庁、国土地理院等)、研究開発独立行政法人(防災科学技術研究所、産業技術総合研究所、海洋研究開発機構等)などからなる国の審議会で議論して決定された、ボトムアップ型の研究計画である。どちらも国の審議会等でナショナルプロジェクトと位置づけられてはいるものの、計画の立案過程と実施方法に大きな違いがある。大地震の発生頻度は少なく、長期の観測と、人材育成を含めた持続的な学術研究の継続がなければ、政策に資する研究だけでは、健全な調査研究が進められないことから、ボトムアップ型とトップダウン型の両者の研究をバランス良く進める必要がある。

地震本部の政策に従って、国の基盤的な調査観測体制が整えられた。防災科学研究所による高感度地震観測網(Hi-net)、国土地理院によるGNSS観測網(GEONET)が整備され、活断層の調査が進んだ。これらは地震防災に資する基盤であり、地震予知研究にも有効に活用されている。

4. 新観測研究計画の成果

4.1 アスペリティ・モデル

新観測研究計画では、地震発生直後から次の地震発生に至る歪蓄積過程を地震発生準備過程と位置付け、その進行状況を把握するための観測研究を進めた。これらの研究に基づいて、プレート境界で地震が発生する仕組みとして「アスペリテ

ィ・モデル」(概念モデル)が提案された。一方、内陸の地震については、現時点ではアスペリティ・モデルに対応する概念モデル自体ができていない。

海洋プレートは、常時きわめてゆっくりと陸側のプレートの下に沈み込んでいる。二つのプレートがゆっくりと滑っていれば地震は発生しない。しかし、強く固着しているとプレート境界付近にひずみエネルギーが蓄積し、蓄積されたエネルギーは、二つのプレートが急激に滑ることで解放され、その際に地震が発生する。通常は強く固着して、地震時に急激に滑って地震波を放出する領域をアスペリティと呼び、プレート境界の深さ5~20kmくらいの範囲にある。なお、その深さでも、地震を起こさずにゆっくりと滑っている領域もある。

つまり、プレート境界地震とは、アスペリティの破壊であると言える。ある領域に大きなアスペリティが一つだけある場合と、複数のアスペリティが組み合わされている場合がある。アスペリティが孤立して存在すると、周辺の滑りによってアスペリティにひずみが集中してアスペリティが破壊される(地震が発生する)ことが繰り返さえるので、地震の発生間隔はほぼ一定で、地震の位置と規模もほぼ同じになる。このような地震を固有地震と言う。一般にアスペリティは隣接するアスペリティと相互作用をするので、プレートの沈み込み速度が一定でも、地震発生間隔は一定にならない。プレート境界のアスペリティの場所と大きさの分布があらかじめ分かっているならば、大地震の起きる場所と地震の大きさが分かる。しかし、複数のアスペリティが同時に破壊すれば、地震の規模は大きくなる。また、関係するアスペリティが破壊する直前の状態かどうか分からないと、正しい地震の大きさは分からない。地震発生予測システムを開発することによって、特定のアスペリティに加わっている力を観測データから推定して、ある地震に関するアスペリティが破壊する可能性を確率として評価することを目指している。現状では、アスペリティが孤立している固有地震についての発生確率が計算できる段階で、アスペリティの相互作用を評価するのは、今後の課題である。

どこにアスペリティがあるかは、プレート境界で大地震が発生した時の地震波の解析から求められている。[例えば、菊地(1991)の総合報告を参照]。滑り量の大きい領域は、地震発生前に断層面が固着していたところであり、アスペリティである。三陸沖で発生した幾つかのプレート境界の大地震では、同一のアスペリティが繰り返し破壊することが分かってきた[永井・他(2001)]。また、プレート境界に孤立した小さなアスペリティがあると、ほぼ同じ間隔でアスペリティが破壊

して、ほぼ同じ大きさの地震が発生することが、東北地方の釜石沖で確かめられた[Matsuzawa *et al.* (2002)]. さらに、アスペリティの周辺では定常的な滑りが進行していることも理解されてきた[Matsuzawa *et al.* (2004), Yamanaka and Kikuchi (2004)]これらの観測事実を総合して、「プレート境界では、非地震性滑りの進行によりアスペリティに応力が集中し、やがて地震発生に至る」という概念モデル(アスペリティ・モデル)が提唱された。アスペリティという用語は Lay and Kanamori(1980)などでも使われているが、ここで述べたような意味でのアスペリティの使い方は、日本の地震予知研究によって新しく提案された。アスペリティの意味やアスペリティ・モデルの内容についても、文献によって異なる使われ方がされている[この事情については、松澤 (2001), 飯尾・他 (2003) の総合報告を参照]が、建議された新観測研究計画で定義されたのは、上に述べた概念モデルである。アスペリティ・モデルを提唱したことが、第1次新観測研究計画における、プレート境界地震の準備過程の研究として最も重要な成果である。さらに、プレート境界では、定常的な滑りが進行する場所、固着と地震性滑りを繰り返す場所の他、非地震性のゆっくりとした非定常的な滑りや地震後のゆっくりとした滑り(余効滑り)が発生する場所のあることなど、歪蓄積・解放形態の多様性が明らかになった[Kawasaki *et al.*(2001), 広瀬・他 (2000), Ozawa *et al.* (2005)].

第2次新観測研究計画では、アスペリティ・モデルによって、プレート境界の地震発生に至る地殻活動が説明できるかが検討され、このモデルが妥当であると考えられる事例が蓄積した。2003年十勝沖地震の震源域は1952年十勝沖地震とほぼ重なり[Yamanaka and Kikuchi(2003)], 同じアスペリティが破壊したことがわかった。さらに、2003年十勝沖地震から2004年の釧路沖の地震発生に至る過程では、ゆっくり滑りの伝播による応力変化が地震発生に大きな影響を及ぼすことが、GPSや相似地震によるゆっくり滑りのモニタリング等の観測的研究によって明らかにされた[Miyazaki *et al.*(2004), Ozawa *et al.* (2004a), Murakami *et al.*(2006)]. 一方、2003年宮城県沖の地震では、1978年宮城県沖地震のアスペリティの一部が破壊されたことが示され、アスペリティの周辺の滑りの様子が小繰り返し地震のモニタリングによって明らかにされた[Okada *et al.* (2005), Uchida *et al.* (2006), Umino *et al.*(2006)]. これら一連のプレート境界の地殻活動がアスペリティ・モデルによって説明された。

4. 2 摩擦構成則による物理モデル

これまでの固着滑りの実験によって、滑り面の状態によっては、滑りが進むと摩擦が小さくなりより滑りやすくなる場合(滑り弱化、あるいは、速度弱化)と、滑り始めると摩擦が大きくなって滑りにくくなる(滑り強化、あるいは、速度強化)場合のあることが知られていた。滑り弱化の場合は、滑りが発生すると滑りはどんどん加速されるので、不安定滑り、つまり破壊となる。一方、滑り強化の場合には、滑り始めると摩擦が強くなり一定の速度で釣り合った状態で滑り続ける。これを安定滑りと言う。自然のプレート境界で発見されたゆっくり滑りは、滑り強化によって安定滑りが発生していると解釈できる。こうしたゆっくり滑りや、地震時の滑りの解析から、プレート境界の摩擦係数を推定する試みが行われている[Miyazaki *et al.*(2004)].

ゆっくり滑りの伝播が地震の連鎖を引き起こす可能性については、速度と状態依存の摩擦構成則[Dieterich (1979)]を用いた数値シミュレーション[例えば、Kato (2004)]によっても示され、地殻活動の理解を観測的研究と理論的研究によって進める手法の成果が挙がってきた。簡単な2自由度系のブロック・バネモデルを用いた物理モデルによっても、ゆっくり滑りの繰り返し発生が再現できた[Yoshida and Kato(2003)]. さらに、シミュレーションモデルによって過去の巨大地震発生サイクルの特徴が再現できるようになった[Hori (2006), Kodaira *et al.* (2006)]. このシミュレーションでは、速度・状態依存摩擦構成則の摩擦パラメータをプレート境界の位置の関数としてモデル化し、定常滑りの領域と固着・破壊の領域を表現した。このモデル化は、概念モデルとしてのアスペリティ・モデルをシミュレーションモデルに組み込んだと言える。滑りと時間に依存する摩擦構成則[Aochi and Matsu'ura(2002)]に基づいたシミュレーションモデルには Hashimoto and Matsu'ura(2002)がある。

4. 3 ゆっくり滑りと低周波微動の発見

これらの研究を進めるための基礎的な観測的研究の進展によって、沈み込むプレート境界付近の物理的性質や動力学に関する理解が進んだ。特に、プレート境界での固着・滑りの状態には、地震間の固着・地震時の滑りと定常的なゆっくり滑りのほか、地震発生領域よりも深部で発生している非定常的なゆっくり滑りがあることが観測的研究により明らかにされ、プレート境界での滑り全般の定量的な数値モデル化に大きく貢献している[Kawasaki (2004), Ito and Obara (2006)].

例えば、2000年後半から2005年にかけて、浜名湖の下のフィリピン海プレートと西南日本の陸側プレートの境界で、ゆっくりとした滑りが発生した [Ozawa *et al.* (2002)]. この滑りは、想定

東海地震の震源域になると思われる領域よりは深いところで、通常は固着しているプレート境界で発生した。国土地理院による GPS 連続観測によって明らかにされ、約 5 年間続いた滑りの総量は、地震の大きさに換算するとマグニチュード (M) 7.1 を超えた。プレート境界のさらに深い部分では、常時定常的に滑りが発生しているため、このゆっくりとした滑りは、想定東海地震を起こすアスペリティと、定常的な滑りの起きている深部の領域の間にある遷移領域の滑りの性質を表している。この滑りは、数年以上続くので、次に述べる数日間の滑りと区別して長期的ゆっくり滑りと言う。

一方、西南日本では、2000 年に、非地震性の深部低周波微動が発見された [Obara (2002)]。さらに、低周波微動発生時には、継続時間が数日から 1 週間程度の短期的ゆっくり滑りも起きていることが発見された [Obara et al. (2004)]。これらは、沈み込むフィリピン海プレートのアスペリティより深部のプレート境界で発生している。低周波微動の中には、通常の微小地震のように P 波と S 波が観測できる場合があり、これを低周波地震と呼ぶこともある。同様の微動が、火山地域で発生することはよく知られていて、それらはマグマや熱水の移動や振動によって生じていると考えられている。この類推から、西南日本の非火山性の深部低周波微動も、プレートの沈み込みに伴う水の関与が予想されている。この微動の発生する深さは 30km 程度であるので、地表からしみ込んだ水というよりは、沈み込む海洋地殻の鉱物の脱水反応によって、高温・高圧の水が発生したものであると推測されている。

東海地域では、気象庁によって地殻のひずみをはかる計測器 (ひずみ計) が設置されて、想定東海地震の前兆滑りを監視している。2005 年にこのひずみ計が、継続時間数日の短期的ゆっくり滑りを観測した [小林・他 (2006)]。ここでも、西南日本と同様に、ゆっくり滑りと同期して、低周波微動が発生している。プレート深部境界で、短期的ゆっくり滑りと低周波微動・地震が同期して発生していることが明らかにされたことは、ゆっくり滑りの時空間的推移を、測地学的方法とは相補的な手法を用いて高分解能で把握することが可能になった点で重要である。

これらのゆっくり滑りの発見は、プレート境界の滑り・固着には、完全な固着と破壊、完全な定常的な滑りの他に、その中間的な状態のあることを観測的に明らかにした点に意義がある。さらに、2003 年十勝沖地震で観測されたように、大地震では、余効的滑りが、本震の滑り域の周辺で発生していることもよく知られるようになった。

4. 4 東海地震の予知

東海地震の予知の体制は大規模地震対策特別措置法 (1978 年) によって作られたが、予知の方法については少しずつ修正されて、現在の予知と情報発信の体系になっている。新観測研究計画は、東海地震の予知を直接の研究目標とはしていないが、研究の成果であるプレート境界の滑りと固着の多様性の理解が東海地震の予知の実現には不可欠であるので紹介する。現在、東海地震の予知は、大地震の前に発生する「前兆滑り」を東海地域に設置されている 27 点の歪観測点 (平成 24 年 3 月 27 日現在) のデータによって検出することによって行っている。前兆滑りの検知による予知という現在の考えは、プレート境界の力学モデルの発達と近年のプレート境界のモニタリング能力の向上に基づいている。

東海地震の発生に至る過程は、次のように考えられている。通常は、フィリピン海プレートの沈み込みにより、陸側のプレートが引きずられ、地下ではひずみが蓄積する。東海地震の前には、この固着していた領域の一部でゆっくりとした「前兆滑り (プレスリップ)」が始まる。ゆっくりとした滑りが急激な滑りに進展して、東海地震が発生する。この考えは、実験室の観察によって得られた結果を物理モデル化して数理モデルにまとめられて理論 [Kato and Hirasawa (1997)] に基づいている。

現在の気象庁の監視能力では、フィリピン海プレートで前兆滑りのようなゆっくりとした滑りが発生すれば、その規模がマグニチュード 6 程度であればリアルタイムで検出することができる。前述のように、震源域の深部延長上のプレート境界では、年に数回は地震にならないゆっくりとした滑りが発生して、これは気象庁によってリアルタイムでモニターされている [小林・他 (2006)]。もし、実験室で起きているような前兆滑りが発生し、その規模がマグニチュード 6 程度であれば見逃しなく補足することができる。

しかし、前兆滑りが検出されて、必ず予知できるのだろうか？気象庁のホームページには、以下のように書いてある。「残念ながら、その答えは「いいえ」です。前兆すべりが急激に進んでその始まりから地震発生までの時間が短い場合や、前兆すべりの規模が小さかったり、陸域から離れた場所で起こったりして、それによる岩盤のひずみが現在の技術では捉えられないほど小さかった場合などには、東海地震に関連する情報を発表できずに地震の発生に至ることがあります。では、どのくらいの確率で前兆現象を捉えることができるのでしょうか？これも残念ながら「不明」です。」 [気象庁ホームページ (2012)]。

つまり、前兆滑りは実験室では再現されて、滑りを説明する理論モデルができていますが、実際の東海地震で観測されたことがないので、野外で理

論的な予測の通りのことが起きるかは不明である。このため、例えば静岡県では、東海地震に関連する情報が発表されたとき、警戒宣言が発せられたとき、突然大きな地震が発生したとき、それぞれについてとるべき行動を周知している[静岡県(2012b)]。もし、予知情報に基づく警戒宣言が発令されてから発災した場合、事前の避難・警戒行動により、東海地震による犠牲者の数は、被害が最大ケースの場合、約 9,200 人から約 2,300 人に減少するとされている[中央防災会議「東海地震対策専門調査会」(2003)]。つまり、予知できれば死者数は四分の一にすることができる。

さらに、経済被害は予知情報が出ずに突発的に発災した場合には約 26 兆円であるが、予知情報に基づいて警戒宣言が出た場合には約 22 兆円となる。一方、警戒宣言に伴い避難警戒体制に移行すると、震源域周辺で産業活動や東西幹線交通が停止し日本全国への影響が波及し、一日あたり 0.2 兆円の影響がでる。警戒宣言による経済的被害の軽減効果(約 6 兆円)は、避難警戒体制による影響(1日 0.2 兆円)と比べても大きな効果がある[中央防災会議「東海地震対策専門調査会」(2003)]。しかし、もちろん、警戒宣言がでて数日経っても地震が発生しなければ、一日 0.2 兆円の損失が出続けるのを覚悟するか、警戒宣言を解除して突発的な発災のリスクを覚悟するか、の厳しい決断を迫られる。警戒宣言が 1 月続けば、被害の軽減効果を上回る損失がでる。

東海地震に対する備えは以上のように、法律に基づいて規定され、最終的には行政的・政治的な判断にゆだねられている。しかし、実際の運用では、予知に失敗することを覚悟しなければなるまい。前兆滑りの規模が小さかったり、前兆滑りの発生から地震発生までの時間が数時間であったりすれば、警戒宣言の発令が間に合わないこともある。近年の研究では、そのような可能性があることがわかっている。ただし、検出可能な規模の前兆滑りが発生して東海地震に至る可能性もあることも忘れてはならない。

5. 2011 年東北地方太平洋沖地震と「見直し計画」

5. 1 マグニチュード 9 の地震発生

2011 年東海地方太平洋沖地震 (M9.0) の発生は、1995 年兵庫県南部地震と同じように、地震予知研究計画に対して大きな影響を与えた。新観測研究計画の成果である「プレート境界で起きる地震についてのアスペリティ・モデル」、「数理モデルに基づく予測手法」についても様々な議論が行われている。特に、東北地方太平洋沖に M9.0 の地震を起こすアスペリティがなぜ事前に理解できなかったのかという点が問題である。筆者は、概念モデルとしてのアスペリティ・モデルの有効

性は依然として重要であると考えている。しかし、このモデルを極度に単純化して、東北地方太平洋沖地震のような巨大な地震をモデル化できなかったことは、アスペリティの理解が不十分であったと言う点で、反省すべきである。

この地震の後の研究によって、東北地方のプレート境界で発生していた M7~8 程度の地震と M9 の地震を統一的に理解できるプレート境界での力学モデルを作ることが可能であったことが示された[Kato and Yoshida (2011)]。実際、この地震の前にも、階層的なアスペリティ・モデルが提案されていた[Hori and Miyazaki (2010)]。他にも地震時の急激な滑り伴う温度・圧力の上昇によって動的な強度低下が起こり大滑りに至るとするモデル[Mitsui et al.(2012)]など複数のモデルが提出されている。

東北地方太平洋沖地震のような極めて大きな地震の発生がこの計画の中で十分考慮できていなかったことを総括して、計画の見直しが行われた。何故プレート境界で M9 を超えるような超巨大地震が発生するか、その地震によって内陸の地殻とマントルにどのような影響が及んでいるか、超巨大地震の規模をリアルタイムで把握して津波の予測精度を向上させる手法の開発、海域での地殻変動・地震・地形調査観測をより拡充する計画などを盛り込んだ現行計画の見直し計画が、2012 年 11 月に科学技術・学術審議会から、建議された[科学技術・学術審議会(2012)]。

5. 2 伊豆東部の地震活動予測

地震予知研究と火山噴火予知研究が統合された現行観測研究計画の成果について紹介する。現在気象庁が業務として行っている地震の予知・予測は、想定東海地震の予知と、伊豆東部火山群の地震活動予測の二つある。まず、伊豆東部火山群の予測について紹介する。この情報は、気象庁が 2011 年 3 月 31 日から正式に公表することとしている[気象庁(2010a)、静岡県(2012a)]。情報のポイントは、

- 1) 地震活動に先行する地殻変動を検出し、地下のマグマの動きと量を推定し、
- 2) 地震活動が始まり活発化する前に、
 - ①マグニチュード 1 以上の地震回数、
 - ②最大地震の規模と震度、
 - ③震度 1 以上の地震回数、
 - ④活発な活動期間

を予測することである。この情報は、「地震活動の予測」と呼ばれているが、地震の発生時期、規模、場所を予め予測しているので、所謂地震予知とほぼ同じである。この例では、伊豆東部火山群での地震発生の仕組み[Morita et al.(2006)]が理解されていて、予測に必要なデータがリアルタイムで監視可能になったから可能となった。ただし、

この情報についても、「過去の地震活動から抽出した特徴を基にとりまとめたものであり、過去の活動と同様の形式で発生する地震活動を予測する手法である。そのため、過去の活動とは異なる形で地震活動が発生した場合は、本手法による予測の適用外となることに留意する必要がある。」と報告書で述べられている [気象庁 (2010b)].

5. 3 東北地方太平洋沖地震の準備・直前過程

東北地方太平洋沖地震の前に、この地震の発生を予測することの出来る現象は起きていたのであろうか。とりわけ、前兆滑りに対応する現象が発生していたかが重要である。残念ながら、地震発生の前に明確にM9.0の地震を予想できるデータは得られていなかった。しかし、地震発生に至る直前過程と準備過程に対応する現象が幾つか発生していた。ここでは、直前過程の例として「直前に震源域で発生したゆっくり滑り」と準備過程の例として「長期的なb値の減少」の二つを紹介をする。

○本震に向かっていったゆっくり滑り

2011年東北地方太平洋沖地震には、明確な前進活動があった。2月の半ばから始まっていた地震活動と、3月9日に発生したM7.3の地震とその後の地震活動である。ただし、M7.3の地震が前震であると判断できたのは、M9.0の地震が起きたからであり、事前の予測という観点からはこの地震活動を用いることは出来なかった。地震活動の空間的な広がりやM9.0の震源断層の広がりには狭かったことが前震活動としての特徴である。気象庁によって決定された前震より小さな前震を、地震波形記録から直接検出して調べると、M9.0の地震の前に、震源域近傍の前震活動は、北から南に移動していることが分かった。さらに、ほぼ同じ場所で発生する波形の類似した地震(小繰り返し地震)の解析によって、3月11日のM9.0の地震の前に2回震源近傍でゆっくりした滑りが発生していたことが分かった。1回目の滑りも、2回目の滑りもM9.0の震源(破壊開始点)に向かって滑りが発生して本震に至った(図1) [Kato et al. (2012)]. この研究は、本震が起きた後に地震前のデータを解析して得られた結果であるが、もし、リアルタイムで結果が得られ、東海地震の予知のシナリオをそのまま適用したとしても、M9.0の地震発生を予測することは難しかった。東北地方太平洋沖で発生したゆっくり滑りは、東海地震の予知で期待されている前兆滑りと似ている点はあるが、M9.0の本震発生の直前に滑りが加速することは無かった。しかし、巨大地震が突然発生せずに、震源域でゆっくりとした滑りが発生したという点は、今後の東海地震の発生予測の判断にも生かす必要がある。

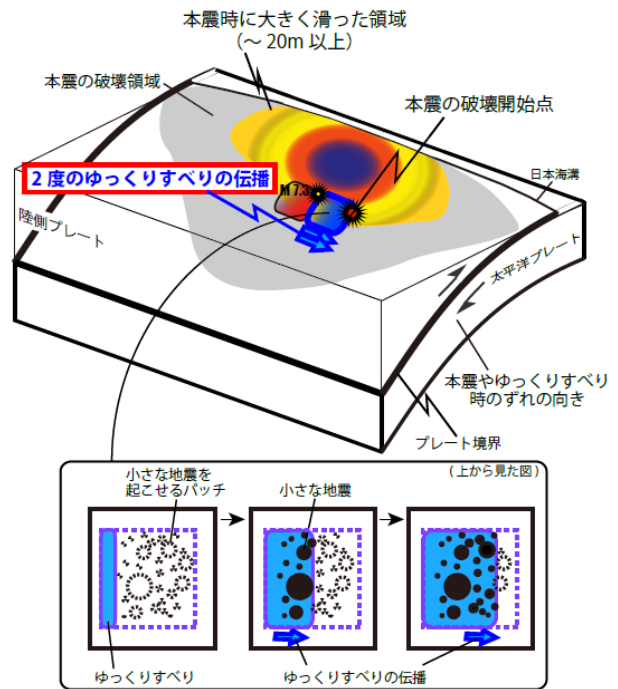


図1. 2011年東北地方太平洋沖地震の前に発生した2度のゆっくり滑り [Kato et al. (2012)].

○長期的なb値の減少

東北地方太平洋沖で発生する地震の規模別頻度分布を表すG-R則のb値が減少していたことが分かった。3月9日のM7.3の前震とその後の地震のb値は顕著に小さかった。b値が減少していた領域は本震で大きく滑った領域に集中するように、1965年ころから地震直前まで減少していた。1965年というのは、解析できる記録のある最も古い時期である。3月9日のM7.3の地震とその後の本震直前までの地震のb値は0.5以下に低下していた。本震後、この領域の地震のb値は0.8程度まで回復した [Nanjo et al. (2012)]. この様な十年以上にも及ぶ長期的なb値の減少は、2004年スマトラ地震(M9.1)でも観測されており、M9クラスの巨大地震の発生に特有な現象である可能性がある。この解析の副産物として、北海道十勝沖の海域でも十年以上にわたってb値が減少し、最近起きた最大の地震である2003年十勝沖地震(M8.0)のあとでも、b値は下がったままである事が分かった。この地域の歪みエネルギーが解放していない可能性を示している。

5. 4 東北地方太平洋沖地震の震源過程とリアルタイム・ハザード予測

この地震の震源過程については、多くの研究があったが、その詳細は小論の議論の範囲を超えるので割愛する。しかし、Ohta, Y., et al. (2012)によ

って、GPS データを用いて地震時の断層破壊過程をほぼリアルタイムで推定することが可能であることが示されたことは、現行観測研究計画の成果として特筆できる。この研究は、地震後に 1 Hz サンプルの GPS データを解析して行われた研究であるが、原理的にはリアルタイム処理によって、震源断層モデルを規模と滑り量ともにほぼ正確に推定でき、この情報を津波予測に用いることが示された点で重要である。

現行観測研究計画の見直し計画のなかで「5 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進、(2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究、ウ. 超巨大地震から発生する津波の予測」が新たに進めることとした。地震発生を予測するだけでなく、災害誘因としての地震動や津波到来を予測する手法の開発は今後の予知の為の観測研究では重要であり、これが実際に成果を上げる可能性を示している。

6. 結論

阪神・淡路大震災以後、日本の地震予知研究に関する環境が大きく変化した。その結果、国として地震防災に資する政策課題解決型の地震調査研究と、研究者の自主的な学術研究としての地震予知研究の二つのタイプの研究がおこなわれるようになった。その結果、基盤的な調査観測網としての高感度地震観測網、GPS 観測網 (GONET) が整備され、学術研究としての予知研究にも大きく貢献した。プレート境界の地震に関する知見が蓄積し、アスペリティ・モデルが提案された。2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、再び地震研究の方向性について議論が行われた。稀にしか発生しない超巨大地震についての理解を進めることが、次に来る巨大地震の発生予測には不可欠であることから、多くの研究が行われている。しかし、依然として地震予知の実現には多くの時間がかかる。それでも、研究の成果は地震防災に役立てられることが必要であり、地震発生予測の努力を続ける必要がある。さらに、今後は、この観測研究の成果が地震防災に役立つために、地震ハザード (災害誘因) の評価の研究を予測のための研究の一部として進める必要がある。

参考文献

Aochi, H. and M. Matsu'ura, 2002, Slip- and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, *Pure Appl. Geophys.*, **159**, 2029–2047.
中央防災会議「東海地震対策専門調査会」(2003), 東海地震に係る被害想定結果について <<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tou-tai/soutei2/kisha.pdf>> (参照: 2012-12-24)

Dieterich, J., 1979, Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161–2168.
Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 2002, 3-D simulation of earthquake generation cycles and evolution of fault constitutive properties, *Pure Appl. Geophys.*, **159**, 2175–219
平田直, 2003, 日本の地震予知研究の到達点と第 2 次新地震予知研究計画, *科学*, **73**, 9, 1020–1028.
Hirata, N., 2004, Past, current and future of Japanese national program for earthquake prediction research, *Earth Planets Space*, **56**, 8, xliii–l.
平田直, 2009, 日本の地震予知研究—地震予知のための観測研究計画—, *地震*, **2**, 61, 特集号, S592–S601.
広瀬一聖・川崎一郎・岡田義光・鷲谷 威・田村良明 (2000), 1989 年 12 月東京湾サイレント・アースクエイクの可能性, *地震*, **53**, 11–23.
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., 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.
飯尾能久・松澤暢・吉田真吾・加藤照之・平田直, 2003, 非地震性すべりの時空間変化と大地震の発生予測—三陸沖における近年の進展を中心に—, *地震*, **2**, 56, 213–229.
Ito, Y. and K. Obara, 2006, Very low frequency earthquakes within accretionary prisms are very low stress-drop earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L09302, doi:10.1029/2006GL025883.
地震予知研究を推進する有志の会, 1998, 新地震予知研究計画—21 世紀に向けたサイエンスプラン—
<<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/yoti-kenkyu/>> (参照 2008-9-15)
地震調査研究推進本部, 1999, 地震調査研究の推進について—地震に関する観測, 測量, 調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策—, <<http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu99a/h9s3b.htm>> (参照 2008-5-18)
地震調査研究推進本部 (2009,2012), 平成 21 年 4 月 21 日 (平成 24 年 9 月 6 日改訂), 新たな地震調査研究の推進について—地震に関する観測, 測量, 調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策— <<http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu12c/suishin120907.pdf>> (参照 2012-12-23)

- 科学技術学術審議会測地学分科会, 2003, 地震予知のための新たな観測研究計画 (第2次) の推進について (建議), <http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu0/toushin/03072401.htm> (参照 2008-5-18)
- 科学技術学術審議会測地学分科会, 2008, 地震および火山噴火予知のための観測研究計画の推進について (建議), <http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/07/08071504.htm>, (参照 2008-9-15) .
- 科学技術・学術審議会, 2012, 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の見直しについて (建議) <<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/kengi121128/Kengi121128all.pdf>>, (参照 2012-12-22)
- Kato, N., 2004, Interaction of slip on asperities: Numerical simulation of seismic cycles on a two-dimensional planar fault with nonuniform frictional property, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10.1029/2004JB003001.
- Kato, N. and T. Hirasawa, 1997, A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **102**, 51-68.
- Kato, N., and S. Yoshida, 2011, A shallow strong patch model for the 2011 great Tohoku-oki earthquake: A numerical simulation, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G04, doi:10.1029/2011GL048565.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and N. Hirata, 2012, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake", *Science*, **335**, 705-708, doi:10.1126/science.1215141
- Kawasaki, I, 2004, Silent earthquakes occurring in a stableunstable transition zone and implications for earthquake prediction, *Earth Planet and Space*, **56**, 813-821.
- Kawasaki, I., Y. Asai, and Y. Tamura, 2001, Space-time distribution of interpolate moment release including slow earthquakes and the seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench, *Tectonophysics*, **330**, 267-283.
- 菊地正幸, 1991, 震源過程の微細構造, 地震2, 44, 301-314.
- 気象庁 (2010a) 「伊豆東部の地震活動の予測手法」報告書の公表と今後の対応について (平成 22 年 9 月 9 日報道発表), <<http://www.jma.go.jp/jma/press/1009/09b/100909yosoku.html>> (参照 2012-12-22)
- 気象庁 (2010b) 「伊豆東部の地震活動の予測手法」報告書 <<http://www.jma.go.jp/jma/press/1009/09b/003shiryou.pdf>> (参照 2012-12-22)
- 気象庁 (2012) 気象庁 (2012) 気象庁ホームページ。「東海地震は必ず予知できるのか？」 <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tokai/tokai_eq4.html#4_d> (参照 2012-12-22)
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋, 2006, 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984~2005 年), 地震2, 59, 19-27.
- Kodaira, S., T. Hori, A. Ito, S. Miura, G. Fujie, J.-O. Park, T. Baba, H. Sakaguchi, and Y. Kaneda, 2006, A cause of rupture segmentation and synchronization in the Nankai trough revealed by seismic imaging and numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, **111**, B09301, doi:10.1029/2005JB004030.
- Lay, T. and H. Kanamori, 1980, Earthquake doublets in the Solomon Islands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **21**, 283-304.
- 松澤 暢, 2001, 地震予知の戦略と展望, 地学雑誌, 110,771-783.
- Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2002, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(11), 1543, doi:10.1029/2001GL014632.
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 803-811.
- Mitsui, Y. N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol.325-326, 21-26, doi:10.1016/j.epsl.2012.01.026.
- Miyazaki, S., P. Segall, J. Fukuda, and T. Kato (2004), Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06623, doi:10.1029/2003GL019410.
- Morita, Y., S. Nakao, and Y. Hayashi, 2006, A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **111**, B06208, doi:10.1029/2005JB003860.
- Murakami, M., H. Suito, S. Ozawa, and M. Kaizu, 2006, Earthquake triggering by migrating slow slip initiated by M8 earthquake along Kuril Trench, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L09306, doi:10.1029/2006GL025967.
- 永井理子・菊地正幸・山中佳子, 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の比較—, 地震2, **54**, 267-280.
- Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara, and K. Kasahara (2012), Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra

- quakes, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in Southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.
- Obara, K., H., Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, 2004, Episodic slow slip events accompanied with non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23602, doi:10.1029/2004GL020848.
- Ohta, Y., et al. (2012), Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, **117**, B02311, doi:10.1029/2011JB008750.
- Okada, T., T. Yaginuma, N. Umino, T. Kono, T. Matsuzawa, S. Kita, and A. Hasegawa, 2005, The 2005 M7.2 MIYAGI-OKI earthquake, NE Japan: Possible rerupturing of one of asperities that caused the previous M7.4 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24302, doi:10.1029/2005GL024613.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura, 2002, Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai Region, Central Japan, *Science*, **298**, 1009-1012.
- Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 675-680.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaizu, and Y. Hatanaka, 2005, Transient crustal deformation in Tokai region, central Japan, until May 2004, *Earth, Planets and Space*, **57**, 909-915.
- 静岡県, 2012a, 静岡県公式ホームページ: 伊豆東部火山群に「地震活動の予測情報」と「噴火警戒レベル」が3月31日13時より導入されました
<<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/izutoubukazangunosokujoujou20110331.html>> (参照 2012-12-22)
- 静岡県, 2012b, 静岡県公式ホームページ: 東海地震に関連する情報_「その時あなたは？」
<https://www2.pref.shizuoka.jp/all/file_download101600.nsf/pages/8DD5AD53B45369C6492576B60075C2F2>(参照 2012-12-22)
- 測地学審議会, 1998, 地震予知のための新たな観測研究計画の推進について (建議)
<<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/predict/zisin98.html>> (参照 2012-12-22)
- Uchida, N., T. Matsuzawa, S. Hirahara, and A. Hasegawa, 2006, Small repeating earthquakes and interplate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake (M7.2), *Earth Planets Space*, **58**, 1577-1580.
- Umino, N., T. Kono, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, N. Uchida, A. Hasegawa, Y. Tamura, and G. Aoki, 2006, Revisiting the three M7 Miyagi-oki earthquakes in the 1930s: Possible seismogenic slip on asperities that were re-ruptured during the 1978 M7.4 Miyagi-oki earthquake, *Earth Planets and Space*, **58**, 1587-1592.
- Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, 2003, Source processes of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21-e24.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *JGR*, **109**, doi:10.1029/2003JB002683.
- Yoshida, S., and N. Kato, 2003, Episodic aseismic slip in two degree-of-freedom block-spring model, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1681, doi:10.1029/2003GL017439.

地震発生予測システムによる予測試行実験と情報発信のあり方

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 堀高峰・金田義行

地震発生の予測は、場所・規模・時期のいずれをとっても不可避免的に曖昧さをともなうものである。それを前提とした予測システムの考え方をここに提案する。これは遠い将来のための提案ではない。システム自体は一日も早く実現し、地震発生前の予測の試行実験を行ない、現状のモニタリング結果とともに可視化して情報発信していくことを提案する。その際、一方的に発信するのではなく、様々な立場の受け手と、情報内容やそれを減災に活かす対策を共同して検討することが不可欠である。

1. はじめに

地震の発生予測というのは、地震発生以前に観測したデータと、その観測データと地震発生の時期・場所・規模（発生様式）を結びつける仮説やモデルにもとづいて、時期・場所・規模のすべて、あるいは一部を推定することである。地震の予測という、いつ起こるかに関心が行きがちであるが、場所や規模・発生様式の予測が、防災・減災にとっていかに重要であるか、またいかに困難であるかを、東日本大震災によって我々は思い知らされた（例えば、松澤，2011）。一方で、次に起こる大地震の規模の特定まではできないものの、プレート境界地震の履歴と現在のプレート間のすべり遅れによる地殻変動の観測データには、今後起こりうる地震の場所や規模・発生様式を、ある程度予測するための情報が含まれることも、この地震によって明らかになった（Hok et al., 2011; Hashimoto et al., 2012）。

一方、発生時期の予測については、これまで、研究の進展に応じて、時間分解能が上がったり、精度が上がったりするものと暗黙のうちに考えられてきた。しかし、時間分解能や精度は、どのような現象・データを用いて時期を予測するかに依存すると考えるべきである。すなわち、時間スケールの短い現象（例えば前駆すべり）が使える場合には短い時間分解能での予測が可能になり、そうでない場合には、曖昧さの大きな過去の地震発生履歴に依存せざるを得ないため、長期評価で扱うような数十年程度の時間分解能になる。また、従来は短い時間スケールの現象と地震発生とが1対1に対応する場合が主に想定されてきたが、その対応関係が複雑で多様であるという近年の研究結果を踏まえる必要性は以前から指摘されており（上垣内・東田，2006）、時間分解能が高い場合でも、予測の曖昧さは避けられない。ここでは、そのような状況を前提とした予測システムを提案する。

また、地震の規模や発生様式、発生時期の予測を行うシステムを構築するにあたっては、2つ重要なポイントがある。1つは、予測の検証は、事後評価だけでは不十分であり、本当に何が起きるかがわかっていない状態での *prospective* な予測の試行が必要だということである。すでに起きた

現象に対する *retrospective* な予測によるモデルの検証はもちろん必要であるが、それだけでは、後に起こる現象を実際には知っていることによる先見情報がどのくらい予測に影響しているかを客観的に評価することはできない。

もう1つは、予測にはかなりの曖昧さが伴うことを前提とした上で、予測システムは今から実用を見据えて準備する必要があることである。これは、時間分解能が現象次第ということとも関連する。すなわち、リアルタイムで観測をしていると、何らかの時間スケールで、地震発生と関連する可能性のある変化がいつ起こり始めるかわからない。したがって、それに対する対応を、情報発信から、情報にもとづいた対策に至るまで、事前に検討しておく必要がある。そこまで検討しておかないと、曖昧な予測をそのまま情報発信することは、場合によっては減災に対して逆効果の可能性も考えられる。我々の目的は、限られた知見、曖昧な情報を最大限活用して、我々が生きている間にも起こるであろう大地震による災害の軽減に、少しでも役立てることである。

以上のことから、本稿ではまず、2.1で地震発生予測の考え方を説明し、2.2で地震の規模や発生様式の予測のあり方、2.3で発生時期の予測のあり方について扱う。その上で、3.で予測の試行や予測システムの早期構築の必要性、4.で曖昧な予測情報の発信について議論する。

2. 地震発生予測システム

2.1 予測システムの考え方

地震発生の予測は可能かどうかといった議論はたびたび行われてきたが、要求する予測の精度や確度によって結論が変わってくる。ここではまず、精度や確度の高さや実用性は問題にせず、一般的な予測科学の方法論（例えば、樋口，他，2011）に準拠して、曖昧さを考慮した予測を地震発生に適用することを考える。この方法はデータ同化の一種であるが、データ同化というと、気象や海洋で主に行われている、決定論的な予測をイメージされてしまうので、以下ではこの用語は使わない。

予測したい系の時間発展を記述する数理モデルが存在し（それが数値シミュレーションの形で逐次時間発展を計算でき）、その数理モデルの変

数と観測可能な物理量との関係を結ぶ観測方程式が立てられるのであれば、一般に（方程式が非線形であっても）その系の予測は可能である。ただし、その数理モデルは対象とする系の真のモデルではなく、また、真のモデルを規定するのに必要なすべての変数を我々が知ることはできないし、まして十分な精度で観測できる保証もない。不完全なモデルと不十分なデータを用いるため、系の状態を確率変数の組で表す。そして、その変数の確率密度分布を、関数ではなく、多数の実現値の集合（アンサンブル）で表す。つまり、様々なモデルパラメータや初期値でのシミュレーション結果のアンサンブルで、曖昧さを含んだ系の状態を表現する。このため、ガウス分布のような特定の分布を仮定する必要もない。さらに、観測方程式（非線形でも可）に誤差を許容し、その誤差分布に応じて、シミュレーション結果とデータの残差から尤度を求める。また、注目する変数について、尤度に比例した重みをつけて平均や分散を求めることで、その後の平均的な推移やばらつきを予測することになる。

ここで提案する地震発生予測システムは、プレート境界地震を対象としたものである。これは、プレート境界地震の発生過程が、プレート境界でのすべりの時空間変化として近似的に数理モデル化されており、数値シミュレーションも可能であり（例えば、堀，2009）、すべりの時空間変化と地殻変動の観測データを結びつける観測方程式を立てることができる（例えば、Okada, 1992）ため、前述の、アンサンブルを用いて曖昧さを考慮する予測の枠組みを当てはめることが可能だからである。すなわち、プレート境界でのすべりの時空間変化を多数（数百やそれ以上）の場合について計算するとともに、そのすべりの時空間変化による地殻変動と観測される地殻変動との残差から尤度を評価し、尤度による重み付けを行うことができる。さらに、重みに応じて平均をとってすべりの時空間変化を計算すれば、その後の推移予測になる。このような多数計算は、最近まで非現実的だったが、京コンピュータのおかげで、現実的な計算時間で実行が可能になってきた。

誤解の無いように付け加えるが、地震発生モデルは不完全という認識であり、だからこそ曖昧さを考慮できる予測手法を用いるのであり、また、モデルを改善していくことが、予測研究の中心的課題であることは当然である。一つ重要なのは、ここで述べた予測手法が数理モデルを取り替えることに対して非常に柔軟な点であり、将来に渡って予測システムのベースとなりうる考え方ということである。

2. 2 規模や発生様式の予測

前述の予測は、プレート境界でのすべりの時空間変化の予測であり、それと地震発生の予測との

間にはギャップがある。ここではまず、地震の場所、規模や発生様式の予測をどのように考えるかを説明する。

最も単純な方法は、Hok et al. (2011)が示したように、プレート境界でのすべり遅れ率が、前回の地震から現在までの間一定の状態ですべり遅れを蓄積したと仮定し、破壊開始位置や強度の分布を仮定することで、一つのシナリオの震源モデルを得るというものである。すべり遅れ率一定というのはかなり大雑把な仮定であるが、数百年に一度の M9 クラスを想定する目的には有効であることを Hok et al. (2011)らは示した。この震源モデルは、動的な応力変化も含んだ破壊伝播シミュレーションなので、規模や発生様式の1つのシナリオを表現したものになっている。そして、その計算結果は、地震動や津波伝播の計算（例えば Maeda and Furumura, 2012）のためのインプットとして使うことができ、さらにその結果から都市の揺れや建物個々の揺れや損傷、津波の遡上計算、避難シミュレーションなどに受け渡していくことで、1つの地震発生のシナリオにもとづいたハザード予測の出発点となる（例えば Hori, 2011）。

これは1つのシナリオに対するものであるが、実際には、すべり遅れは大地震が再来する間に時空間変化し、破壊開始位置は事前には不明であり、強度分布もある程度は構造不均質や過去の地震の起こり方から絞り込むものの、様々な場合が想定しうる。したがって、多数のシナリオを考える必要がある。

その際に重要なことは、シナリオの結果として出てくる強震動や津波遡上が、過去にその地域で起きた被害の歴史や、津波堆積物等の地質学的証拠と整合する範囲で検討することである。つまり、前述のハザード予測のツールは、シナリオの妥当性評価にも重要な役割を果たすことになる。そうすることで、過去のデータと整合する最大規模や、過去によく起こったタイプを規定するなど、減災対策の検討に役立つ情報が出せると期待される。

もう一つ重要なことは、あるシナリオが、史料や地質学的痕跡と整合するのであれば、そのシナリオが近代観測になってからは知られていない地震像だとしても、その被害などを考慮することである。そうすれば、東北沖での M9 の地震やそれに伴う被害も検討対象から漏れないことになる。ただし、海溝付近での大きなすべり（例えば Fujiwara et al., 2011）が予測シナリオに加わるためには、すべり遅れの蓄積が海溝付近で地震間に生じているかどうかの情報が不可欠であり、それを今後実際の観測によって検証していく必要がある。そのため、日本海溝沿いはもとより、千島海溝や南海トラフ・琉球海溝、小笠原海溝に沿った海底地殻変動の観測を、少しでも早く開始して、まずは数年以上続ける必要がある。

なお、将来的には、すべり遅れの時空間変化を考慮する際に、過去の地震でのすべり分布や、GEONET データや DONET 等の海底ケーブル観測網のデータから推定される時空間変化を取り入れたり、2. 1 で述べたすべりの時空間シミュレーション結果を活用したりする必要がある。

2. 3 発生時期の予測

現在行われている発生時期の予測（長期評価）は、地域毎に同じタイプの地震が繰り返すとの仮定のもとで、そのタイプの地震と認定された過去の地震の再来間隔をデータとし、統計モデルを適用して発生確率を推定している。今後 10、20、30 年などに、仮定した地震が起きる確率が、毎年発表されている。東日本大震災を受けて、同じタイプの地震の繰り返しの仮定が問題になるなど、見直しに向けた検討が行われている。

では、そのような過去の地震の再来間隔にもとづいた予測ではなく、2. 2 と同様なアプローチで発生時期を予測しようとした場合はどうだろうか？その場合、現在（あるいは 10 年～30 年後）の応力と強度の分布を推定することになる。応力や強度は、過去のすべり遅れの履歴など不確定性の大きな量に左右されるため、発生時期の予測結果は相当ばらつきことが予想される。ただし、過去の地震発生履歴の示すばらつきよりも大きなばらつきを与えるモデルは、データと整合しないことになるため、少なくとも現在の長期評価と同程度の時間分解能を与えることになる。したがって、2. 2 のアプローチは、地震発生の場所・規模・様式、さらに時期の予測について、長期評価を見直す上で、一つの有力な枠組みと考える。なお、地震の再来間隔を超えて、正確なすべりの時空間変化のデータを蓄積していけば、遠い将来には、このアプローチでも、人間が切迫性を感じられる短い時間スケールの予測も可能になるかも知れない。

一方、はじめに述べたように、大地震が発生する前に生じると期待される何らかの前駆的な現象をリアルタイムに捉えて、その後の推移を予測するというのであれば、時間分解能はその現象に応じて短くなり得る。これは、プレスリップを待ち構えている東海地震予知（上垣内・東田, 2006）と同じだと思われるかも知れない。前駆的な現象を捉え、そのような現象が起きない限り予測精度が上がらない（不意打ちで地震が起きる）という意味ではその通りである。しかし、待ち構える現象の多様性と、現象を捉えた後の推移として想定するシナリオの多様性という意味では、全く異なるものである。

基本的な予測の仕方は、2. 1 で述べた通りで、あらかじめ、様々なパラメータや初期値で、プレート境界でのすべりの時空間変化のシナリオを用意しておく。その上で、観測している地殻変動に、

普段とは異なる何らかの変化が生じた際に、観測データと比較して、尤度がどのような分布になるか、尤度の高いものがその後どのような振る舞いをするかにもとづいて、推移予測をする。その後のデータの変化に応じて、逐次推移予測を続けることになる。

重要なことは、リアルタイム観測をしていて、何らかの変化が生じた時に、我々に何ができるのか、何をすべきなのか、ということである。例えば、東北地方太平洋沖地震が起きる 2 日前には、震源付近で M7 クラスの地震が発生した。当時、著者らはその地域のモデル計算をしていた訳ではなかったため、その意味を考えるには、過去の事例や理論等から、頭で想像するしかなかった。一方で、モデル計算のための準備を検討は始めた。しかし、本震はわずか 2 日で発生してしまい、モデル計算を行ったり、余効すべりの解析やその後の推移を検討したりする余裕はなかった。

一方、ここで提案している予測システムは、あらかじめ対象地域で起こりうる様々な現象を想定したモデル計算を行っておくため、たとえ 2 日間であっても、捉えられる余効変動に応じて、その後の推移を予測し、対策を検討するための助けになることが、期待できる。

似たような状況は、南海トラフ沿いの巨大地震でも起きる可能性がある。ここでは、紀伊半島沖の東と西で分かれて M8 クラスの地震が繰り返してきたことが知られている（Ishibashi, 2004）。分かれて起きる場合には、一方で地震が終わった後に余効すべりが発生し、他方を発生させる引き金となると考えられる。さらに、すべりの時空間変化のシミュレーションでは、余効すべりのすべり速度や伝播速度の大きさと、後の地震が発生するまでの時間間隔に相関が見られる。余効すべりは海底地殻変動を引き起こすため、海底地殻変動をリアルタイムで捉えることによって、M8 クラスの地震の後で、隣で M8 クラスの地震がどのタイミングで発生するかについて、ある程度予測できる可能性がある。まだ限られた事例での数値実験しか行っていないが、海底地殻変動の実際のノイズレベルを考慮した実験で、2つの M8 クラスの地震の発生間隔をある程度予測できる可能性が示されている（Hori et al., 2011）。

その他、普段と違う変化として起こりうる現象について触れておきたい。前駆すべりは、対象の 1 つである。それが捉えられれば、短期間で大地震が発生することが予測されることになる。それ以外にも、異なる時間スケールで、大地震の発生の切迫性に関わる現象が考えられる。

例えば、ゆっくりすべりの繰り返し発生。これは、東北地方太平洋沖地震の数年前から、震源付近で発生した現象であり（Ito et al., 2012）、すべりの時空間変化のシミュレーションでも、主要な

地震の前に見られる場合がある(例えば Kuroki et al., 2005)。「繰り返し」ということから明らかなように、ゆっくりすべりが起きたからといって、大地震発生と直結する訳ではない。つまり、もしこのゆっくりすべりの発生にもとづいて、大地震発生の警報を出すようなことをすれば、それは「空振り」になる可能性が十分ある。しかし、その現象が起きている間は、そうでない期間に比べて大地震の切迫性が高まっているとは言える。それがどの程度の高まりで、どのような対策であれば有効かを検討することが重要な課題である。

あるいは、M6-7の地震の余効すべりが、本震と同程度あるいはそれより大きなモーメントを持つ現象もある。これも、東北地方太平洋沖地震の数年前から見られたもので、大地震発生の切迫性を示す可能性がある(Suito et al., 2011)。ただし、この現象については、かなり長い時間スケール(800年程度の再来間隔に対して100年程度)でも見られる可能性があり、切迫性を示すものではない可能性もある(Ohtani, 2011)。ただその場合でも、現象が起きていない場合に比べて発生確率が高まることは言えるはずである。

以上のように、前駆すべりに限らず、様々な時間スケールで起こる現象を捉えることで、その後の推移を予測するとともに、大地震の発生可能性が普段よりも高まっていることを示すことができる。普段よりも発生可能性が高まっていることを定量的に評価する手法は別途開発が必要であるが、それについては、尾形(2012)が一つの方向性を示しており、参考にされたい。

将来的には、プレート境界のすべりだけでなく、地震活動の変化(東北地方太平洋沖地震前で指摘されたb値の低下(Nanjo et al., 2012)や潮汐との相関(Tanaka, 2012)等)をはじめ、他の物理量をデータとする予測を取り入れることも重要な課題である。

ただし、期待している現象を起こさずに大地震が発生する場合も少なからずあるため、こうした地震発生前の切迫度の高まりの情報は、注意や警戒を促すための情報であって、それが無いことが安全側の情報にはなり得ないことを忘れてはならないし、情報発信の際の難しい点でもある。

3. 予測の試行

前節までで、どのような考え方で、場所や規模、発生様式、発生時期の予測をしようとしているかについて述べた。次に、上記のような予測システムを実際に動かし、予測を試行することの必要性について述べる。

はじめにも触れたように、予測には、現象が起きる前に行う prospective な予測と、現象が起きた後で行う retrospective な予測がある。予測システムを構築して、その妥当性を検証するためには、最低限、retrospective な予測を、過去の事例に対

して行う必要がある。しかし、すでに起きたことがわかっている現象を相手にする場合、その先見情報が予測に影響しないようにしたり、予測への影響を客観的に評価したりすることは至難の技である。

一方、prospective な予測は、その結果の扱い(特に、情報発信をどうするか)が難しいため、地震予知・予測の研究として、ほとんど行われてこなかったのが実情である。そのため、まだ起きていない大地震の予測を意図して観測データが解析されることはほとんどなく、結果として、大地震が起きてから、「このような変化が事前に起きていた」あるいは「変化はなかった」ということが、研究結果として発表されてきた。

このような研究スタイルの前提には、いずれ確からしい予測が可能になるはずで、そうなるまでは retrospective な予測によって、確からしい予測かどうかを検証すべきである。prospective な予測を行って情報発信することで、社会に混乱を招くようなことをする訳にはいかない。ということがあるように思われる。

しかし、前節までで述べた通り、地震発生の予測は、場所、規模、発生様式、発生時期のいずれをとっても、かなりの曖昧さを伴ったものでしかあり得ない。しかも、その状況が、今後数十年の時間スケールで変わることは考えにくい。だとすれば、prospective な予測の試行を積極的に行うとともに、その曖昧な予測情報をどうすれば減災に役立たせることができるのかを、情報の受け手と共同して研究していくスタイルに、方向転換すべきではないだろうか?

この方向転換は非常に大きなものであり、地震発生予測の研究に留まらず、個人から国レベルまで、予測情報を減災に活用するためにどうするか、ソフト面だけでなくハード面、組織や法律の変更等にも関わることになると思われる。したがって、少なくとも10年以上は先を見越した長期的な計画のもとで、prospective な予測の試行とその活用を、早急に検討する必要があると思われる。

4. 情報発信

最後に、情報発信のあり方について少し述べておきたい。これまで述べてきたような曖昧さを多く含む予測情報を、ある程度 retrospective な検証をした後であれ、いきなり社会に発信することは、混乱を招くだけだと思われる。防災対策のためには、白黒はっきりした情報でなければだめだという意見もある。しかし、地下の現象は複雑・多様であり、予測だけでなく現象のモニタリング結果ですら、曖昧さを排除することはできない。そのような、本質的に曖昧さを含んだ情報しか発信し得ないことを、発信する側も、受け手側もまずは認識する必要がある。その前提に立って、防災・減災のために、どのような情報をどう発信するか、

それを受ける側でどういう判断の材料にするか、をあらかじめ検討しておく必要がある。

従来の防災対策は、国レベルの中央防災会議がもとになり、地方自治体はその結果を受けて対策を立て、最終的に地域や企業、個人はそれらの対策にもとづいて動くことが中心であった。しかし、片田（2011）も指摘しているように、それに頼ってしまうのではなく、それぞれの立場で自発的に考え、判断し、行動していくことが不可欠であり、東日本大震災によってそれが明白になった。

ここで重要なことは、自発的に考え、判断し、行動するということが、個人だけに当てはまることではないということである。地方自治体、企業（一般、ライフライン、原子力施設など）、学校・病院等の公共施設、地域コミュニティ、などの様々なレベルで、様々な情報にもとづいて、防災・減災のために、今何ができるか、いざという時に何ができるか、あらかじめ考え、対策をしていく必要があるはずである。

そのような検討をする際に、それぞれのレベルで、地下で起きる曖昧な現象の推移予測の情報が、どう役立てることができるのかを、情報を発信する側と受ける側と一緒に考えていくのであれば、情報の有効な活用の方向性が見いだせるはずである。その際、予測情報だけでなく、現状の地殻活動モニタリング結果の情報提供も重要である。まずは、曖昧な情報でも有効に活用したいという受け手と協力して、地殻活動情報や prospective な予測を可視化した情報を試行に発信していく必要があると考えている。

5. 結論

曖昧さを考慮した予測システムを構築し、情報発信の試行を行いつつ、曖昧な予測情報をいかに活用していくかを早急に検討する必要がある。

参考文献

Fujiwara T, S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi and Y. Kaneda, 2011, The 2011 Tohoku-Oki earthquake: displacement reaching the trench axis, *Science*, 334, (6060):1240, doi: 10.1126/science.1211554.
Hashimoto, H., A., Noda, M. Mats'ura, 2012, The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, 189, 1–5, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x.
樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮, 2011, データ同化入門（予測と発見の科学シリーズ6）, 朝倉書店.
Hori, M., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, 2011, Dynamic rupture scenarios of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B12319, doi:10.1029/2011JB008492.
Hori, M., 2011, *Introduction to Computational Earthquake Engineering*, 2nd, Imperial College Press.

堀高峰, 2009, プレート境界地震の規模と発生間隔変化のメカニズム, *地震* 2, 61, S391-S402.

Hori, T., M. Hyodo and S. Miyazaki, 2011, Numerical experiment of sequential data assimilation for crustal deformation between Tonankai and Nankai earthquakes, *Proceedings of International Symposium on Disaster Simulation and Structural Safety in the Next Generation 2011*, 175-178.

Ishibashi, K., 2004, Status of historical seismology in Japan, *Ann. Geophys.*, 47, 339-368.

Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophys.*, in press.

上垣内修・東田進也, 2006, 気象庁の東海地震短期直前予測戦略と新たな情報体系, *地震* 2, 59, 61-68.

片田敏孝, 2011, 人が死なない防災, 集英社新書.
Kuroki, H., H. Ito, H. Takayama and A. Yoshida, 2005, 3-D simulation of the occurrence of slow slip events in the Tokai region with a rate- and state-dependent friction law, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 2037-2050.

Maeda, T., and T. Furumura, 2013, FDM simulation of seismic waves, ocean acoustic waves, and tsunamis based on tsunami-coupled equations of motion, *Pure Appl. Geophys.*, 170, 109-127, doi:10.1007/s00024-011-0430-z.

松澤暢, 2012, M9 を想定するために何が欠けていたのか? 今後どうすれば良いのか?, 意見集「地震学の今を問う」, 東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会編, 9-13.

Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara, and K. Kasahara, 2012, Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.

尾形良彦, 2012, 地震予測研究の展望, http://www.ism.ac.jp/~ogata/12ISM_NL_WEBver/earthquakeForecast.html.

Ohtani, M., 2011, Large-scale Quasi-dynamic Earthquake Cycle Simulation, Master Thesis, Division of Earth and Planetary Science, Graduate school of Science, Kyoto University.

Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.

Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, 63, 615-619.

Tanaka, S., 2012, Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.1), *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL051179, in press.

地震予知と地震科学コミュニティの責任

信州大学工学部 泉谷恭男

「ブループリント」に始まる「地震予知計画」は、「警報につながるような地震予知は極めて困難」という結論を、ある時点で得ていた。その時点で「ブループリント」は初期の目的を達成したことになる。ところが「地震予知計画」はそれで終了とはならず、現在まで継続してきた。この主な理由は、(1)「ブループリント」に始まった「地震予知が可能かどうかについて研究する計画」が、「地震予知を実施するための計画」という国策に変更されてしまっており、「地震予知は困難」という結論が許されなくなっていたこと、(2)「地震予知は可能」ということを前提とした「大規模地震対策特別措置法（大震法）」が制定されたこと、(3)地震予知計画関係者が「地震予知」の定義を「長期予測なども含むもの」に拡大し、「地震予知は可能」と言い続けてきたこと、であろう。健全な地震科学を取り戻すためには、「地震予知計画」によってもたらされた負の遺産を直視しなければならない。地震科学コミュニティは、地震科学がその束縛を受け続けている「大震法」の廃止に向けて働きかけていく必要がある。また、巨額予算を伴う国策によってゆがめられてしまった地震科学を如何にして立て直すのか、社会的に失われてしまった地震科学に対する信頼を如何にして回復するのか、地震科学と他の防災関連分野や社会との乖離を修復して社会貢献を果すためにどのように行動するのか、という大きな問題に立ち向かわなければならない。

1. はじめに

地震科学を専門とする者にとって、「地震予知」は魅力ある研究テーマの一つである。また、「地震予知」を実現して地震災害防止に貢献したいという志を抱くことは、地震科学者としてごく自然なことであろう。日本の地震科学が地震災害防止という社会の願望と切り離せないものであることは、非常に多くの人が指摘している（例えば、藤井、1976；宇佐美、1981；長谷川、2012；橋本、2012；川勝・鷲谷・橋本、2012）。従って「地震予知」は、地震科学者の興味だけに基づいた社会から孤立した学問ではなく、社会と共に存在するものでなければならない。

「ブループリント（地震予知計画研究グループ、1962）」は、地震の発生を予知して地震災害を防止することに地震科学の総力を挙げようという試みであった。その前文には、「わが国は古来しばしば大地震に見舞われて、そのたびに多くの人命財産を失ってきた。大地震は今後も同じように起こるであろう。しかし、その災害は我々の手で防がねばならない。地震の予知の達成は国民の強い要望であり、わが国の地震学の絶えまない努力の目標である。」という高い理想が掲げられている。「ブループリント」賛同者の中には、「地震予知」を口実にして研究予算獲得を目論んだ者も含まれていたかもしれない。しかし多くの者は、「地震予知」の実現による地震災害防止への貢献、という理想に共感したものと思われる。「ブループリント」が作成された当時の様子を、宇佐美（1978）は次のように述べている。「ブループリントの特徴の1つは、計画が研究を主体としたものであるということである。当時、地震予知を白眼視する専門家もあったが、ブループリントに盛られた精神と計画ならびに設定目的は、そういう人々をも十分に納得させるものであった。」

「ブループリント」の作成から50年を経た今、「ブループリント」に対して非常に高い評価がある反面、非常に低い評価もある。どうしてこのように評価が極端に分かれるのか、「ブループリント」はどのような役割を果たしたのか、きちんと検証することが求められている。そうすることは、今後の地震科学の進むべき方向を定める上でも、非常に重要である。2012年10月16日に函館市で開催されたシンポジウムにおいて、「ブループリント」のきちんとした評価が行われるものと期待していた。しかし、全く期待外れのシンポジウムに終わり、「ブループリント」に関する検証を自分なりに行ってみたいと思うに至った。

本稿の目的は、「ブループリント」とそれ以後の「地震予知計画」の研究内容についての科学的評価を行うことではない。「地震予知」の歴史を辿って、「いま我々はどこにいるのか」を確認することである。まずはその確認が重要で、それがあって初めて、「これから我々はどこへ行くのか」について考えることが出来ると思うからである。例えば、「地震予知計画のお陰で観測網が充実して研究が進んだ。」という現状認識からは、「もっとお金を貰って観測網を充実させよう。」という発想しか生まれまいであろう。また、「大規模地震対策特別措置法（大震法）は政治的なものであって、地震科学とは直接関係ない。」という現状認識から出発すれば、地震科学が社会からますます孤立するような道しか見出すことが出来ないであろう。そのような皮相な現状認識から安易な出発をして良いのであろうか、という問題意識が、筆者に本稿を書かせた。

以下に述べるのは筆者による検証の結果である。歴史の検証を行う場合、検証者の視点によって評価が異なることは必然である。それを承知の上で読んでいただきたい。

2. 「地震予知」という言葉の定義

函館市でのシンポジウムが散漫なものになってしまった原因として、「地震予知」という言葉の定義が人によって異なっていたことが大きい。言葉の定義は実体の変化に伴って変わっていく。しかし、社会での使われ方を無視して専門家が勝手に定義を変えることは許されない。井出(2012)は、「言葉は生き物であり、社会に広く普及した言葉に対して、このように一方的に専門家が定義を与えるというのは僭越な態度であろう。」と述べている。

1962年に発表された「ブループリント」には、「地震を予知するといえば、時・所・大きさの3つの要素をかなりこまかく指定しなければ意味が少ない。」と記されている。また、「ブループリント」賛同者の一人である浅田(1984)は、「地震の発生を”予知する”とは、もちろん、いつ、どこに、どれくらいの大きさの地震が発生するかを予報することを意味する。」と断言している。

1978年には「大規模地震対策特別措置法（大震法）」が成立した。この法律では、「地震予知」は警戒宣言の根拠、とされている。この法律に基づいて警戒宣言が発令された場合の社会的影響（例えば、経済的損失）は非常に大きい。従って、「大震法」における「地震予知」の定義は、「警戒宣言発令に伴う損失を上回るメリットが期待できるような高い確度で、時・所・大きさを指定すること」となるであろう。つまり、「ブループリント」における定義と「大震法」のものとは一致している。

ところが、観測・研究が進められた結果、警戒につながるような「地震予知」は極めて困難、と認識されるに至り、地震予知計画関係者によって、「長期予測」や「確率予測」なども「地震予知」に組み入れられてしまった。特に、1995年兵庫県南部地震の後、「地震予知計画」が「新地震予知研究計画」に組み替えられた際には、この「地震予知」の定義の変更が、測地学審議会によって、いわば「公認」されてしまった。菊池(2003)は、「地震予知の実用化がきわめて困難な課題であるとの認識にたつて、今後は到達度の評価が可能な目標を設定して逐次的に計画を推進することが必要である。」との指摘を測地学審議会から受けたと記している。そして、地震予知計画関係者はそれに従って、「地震予知」という看板は掲げたままで研究内容を「達成できそうなものに」変更し、その後も「地震予知は可能」と言い続けた。その端的な例を、日本地震学会地震予知検討委員会(2007)による本の「帯」に書かれた言葉、「巷に氾濫する『地震予知不可能論』や『地震雲』への強力な反証」、に見ることができる。

井出(2012)は「地震予知」の定義を専門家が勝手に変更することへの違和感を表明したあと、定

義を変更した当事者である地震予知計画関係者もまた自分と同じような違和感を抱いているのではないかと推測している。研究や計画の途中で、しかも目的の根幹をなす言葉の定義を勝手に変えることは、許されることではない。それはゲームの途中で勝手にルールを変更することに等しい。このことを自分達でもよく承知していながら、「上からの指示」に従って看板はそのままにして内容を変え、相変わらず「地震予知は可能」と言い続けたということであろう。そこには、そうせざるを得ない「事情」があったはずである。この「事情」については、次章で検証する。

先日、函館市において、日本地震学会理事会が作成した「日本地震学会の改革に向けて：行動計画2012」が発表された。「地震予知」という言葉をIASPEI2011 (Jordan et al., 2011)による(1)の意味（警戒につながる確度の高いもの）として使うことが提案されている。「ブループリント」での定義も、「大震法」での定義も、これに整合している。

3. 「ブループリント」、および、その後の「地震予知計画」の果たした役割

3.1 地震予知研究に関する成果

「ブループリント」の「§9 期待される成果」には、「地震予知がいつ実用化するか、すなわち、いつ業務として地震警戒が出されるようになるか、については現在では答えられない。しかし、本研究のすべてが今日スタートすれば、10年後にはこの間に十分な信頼性をもって答えることができるであろう。」と書かれている。つまり、「ブループリント」の趣旨は、観測網を充実し、実用的な「地震予知」を目指して研究しよう、ということであった。

「地震予知」の方法は、例えば藤井(1967)が、「この予知計画は、地震を予知するという場合、天文学の日食予測などと異なり、現象を支配している本質的法則によって予測する、という方法はとらず、主として経験的に判定している地震発生の前兆となり得るあらゆる現象を広汎に張りめぐらされた観測網でキャッチし、これらの観測結果を総合的に判断して地震を予知しようというものである。」と記しているように、「前兆さがし」によるものであった。当時の観測網の貧弱さを考えると、地震科学者が、もう少し観測データがあればもっと確実なことが言えるだろうに、と残念な思いを抱いていたであろうことは察するに難くない。とにかく観測網を充実させて闇雲に前兆をさがした、というのがスタート時の実情のようで、科学的な方法論や予知実現の可能性についてきちんと検討されていたとは思えない。このことについては、ゲラー(2012)も批判している。また、力武(1976b)は次のように回想している。「正直のところ、当時の姿勢としては、地震の先行現象が

出そうな項目は何でも観測してみようという態度であった。つまり、地震予知の基礎となるデータを可能なかぎり集積しようというのがねらいであった。(中略) いわば、『やみくも』に近い状態で計画がスタートしたわけである。」

計画が軌道に乗った 1970 年代前半には、地震前兆現象に関する研究成果(地殻変動, 空白域, 前震活動, 地震波速度変化, ダイラタンシー, ショルツ理論, 等々)が続々と報告された。いろいろな「前兆らしいもの」については, 力武(1976a), 宇津(1977), 浅田ほか(1978), 茂木(1982)などに詳しい。そして 1975 年, 海城地震の予知成功のニュースが届いた(中国地震考察団, 1976)。地震予知計画関係者は, 「地震予知」の実現が手の届くところまで来ている, という期待に満ちていた。浅田(1984)は次のように述べている。「今後何年かのうちに地震予知が可能かどうか科学的に明らかにするのが発足当初の目的であったが, 計画が発足してからすでに十数年を経ており, 多くの関係者は地震の予知は可能との心証を得ているようである。」

ところがその後, 観測網が充実してデータが豊富になり, また, 報告された前兆現象についての再検討が行われた結果, 前兆現象として報告されたうちの多くの事例の信頼性が疑われ始めた。そして, 前兆さがしによる実用的な「地震予知」は困難ではないか, という空気が広がり始めた。深尾(1991)は, 地震特集号「1980 年代の地震学」の巻頭で, 「日本の地震学は, 体制的には地震予知計画を軸に発展してきた。(中略) 一方, 地震予知の理論的枠組みとしては, ダイラタンシーフィーバーのあとには地震断層論とプレートテクトニクスしか残らなかったかに見えるのが 1970 年代であった。(中略) それではつぎの 1980 年代になって, 地震学はどのように発展したろうか。」と述べている。しかし, その特集号に掲載された「地震予知」に関する論説は, あまりにも少ない。即ち, 1980 年代には, 日本における「地震予知」に関しては特筆すべき成果が無かった, ということであろう。

そして, 1995 年の兵庫県南部地震の発生に至る。内陸の M7 クラスの地震は東海地震のような「予知対象」になっていなかったとはいえ, 警報につながるような前兆現象は皆無であった。従って, 前兆さがしによる「地震予知」は極めて困難, ということをはっきりと認識せざるを得なかった。しかしながら, 「地震予知計画」の失敗が公に認められることはなかった。そして, 「地震予知研究」という言葉の定義を「長期予測等も含んだ, 地震発生に至る過程の研究」と拡大することが測地学審議会によって「公認」され, 「新地震予知研究計画」が開始した。

ここに至って, 宇佐美(1978)が以前から懸念し

ていた, 「予知という名目をうたえば, 測地学審議会の建議にさえつらなっていれば, 予算の獲得が容易になるという事実が徐々に形をあらわしてきた。」という状態がより明確になった。「予算を継続的に獲得するために」, これが, 地震予知計画関係者が「地震予知は可能」と言い続けなければならなかった「事情」のひとつであろう。そして, 『『地震予知』は予算獲得のためのスローガン』というゲラー(2012)の批判が, 妥当性を帯びることになる。

さて, 以上のように歴史を辿ってみると, 「前兆さがしによる実用的な地震予知は極めて困難」という結論がある時点で得られていた, ということがわかる。これは, 「ブループリント」に掲げられた研究目的が達成された, ということを意味する。ところが, この結論が得られるよりも前に, 国策によって, 「地震予知研究計画」は「地震予知計画」に変更されてしまっていた。それに伴って, この結論は「計画の失敗」を意味することとなり, 「許されないもの」となってしまっていた。このことについては, 次節で検証する。

3.2 「地震予知研究計画」から「地震予知計画」への変更

前兆さがしによる「地震予知」の可能性について楽観的な見方が支配的だった 1968 年, 十勝沖地震が発生し, 大きな被害がもたらされた。その 3 年前の 1965 年からスタートしていた「地震予知研究計画」に対して, 「まだ地震予知が出来ないのか。」とか「早く研究を進めて地震予知できるようにしてくれ。」という政治的圧力が加かったとしても不思議ではない。そして, 第 1 次 5 ヶ年計画は途中で打ち切れ, 1969 年から第 2 次 5 ヶ年計画が開始された。この時から「研究」の 2 文字が外されて「地震予知計画」となった。ゲラー(2011)は, 「地震予知研究計画」の「研究」を外して「地震予知計画」にしたのは政治家の入れ知恵に従った予算増額策である, という批判をしている。しかしここでは予算の問題はさておき, 「研究」の 2 文字の削除に伴う「計画の意味の変化」に注目して論じたい。

「研究」の 2 文字を外したことの意味は大きい。「地震予知が可能かどうかについて研究する計画」ではなく, 「地震予知を実施するための計画」に変化してしまった。もし「地震予知は困難」という結論を出したとすれば, それは「計画の失敗」を意味することになってしまった。宇佐美(1978)は「研究」の 2 文字が消えたことについて, その論説の中で実に 3 度も言及しており, 大きな懸念を示している。しかし, 「地震予知」は近い将来において可能になるのではないかという楽観的な見方が支配的な時期であった。多くの地震予知計画関係者にとっては, 国家という強力な後ろ盾を得て「地震予知計画」を推進することは, むし

ろ渡りに船で、「研究」の2文字を外すことへの躊躇はあまり無かったであろう。

しかしそれ以降、「地震予知計画」は国家主導の科学に必然的に伴う運命に縛られることになった。「地震予知は困難」という結論は「計画の失敗」を意味する以上、それは許されない。「地震予知」の困難さを徐々に感じ始めた地震予知計画関係者は、失敗を取り繕うために「地震予知」という言葉の定義を拡大し、「地震予知は可能」と言い続けなければならなくなった。これが、「事情」の二つ目である。

橋本(2012)はフリーマン・ダイソン(1997)の言葉「イデオロギーに推し進められた科学技術は失敗する。」を引用して、地震科学の現状に対する警告を発している。ダイソンの言葉を少し補足すると、「イデオロギーに推し進められた科学技術は失敗が許されない。失敗を取り繕おうとしているうちに致命的な失敗に至る。」ということである。このことは、原子力利用の分野において典型的に現れている(例えば、高木, 2000)。「地震予知計画」は正にその轍を踏んでしまった。

3.3 大規模地震対策特別措置法(大震法)

1978年に成立した「大規模地震対策特別措置法(大震法)」は、東海地震の予知はほぼ確実に可能、という前提に立った法律であり、地震の発生を予知することによって災害を防止する、ということが明確に示されている。その第四条に曰く、「国は、強化地域にかかる大規模な地震の発生を予知し、もって地震災害の発生を防止し、又は軽減するため、計画的に、地象、水象等の常時観測を実施し、地震に関する土地及び水域の測量の密度を高める等観測及び測量の実施の強化を図らなければならない。」この条文が、「地震予知計画」を下敷きにして書かれたものであることは明らかであろう。そして、地震が予知されて警戒宣言が発令された際の行政や住民の責務、更には、違反に対する罰則などについて、事細かに定められている。

この法律の成立前の様子を、茂木(1998)は、「地震予知推進本部の地震予知の現状についてのひかえめな見解や、国会に参考人として招致された大学教授たちの慎重な意見にもかかわらず、法案を提出した政府側(国土庁、気象庁)は東海地震の予知の確実性がひじょうに高いとして、予知を前提とした大震法の成立をはかった。」と記述している。つまり、地震科学の専門家は慎重な意見を述べたのに「大震法」が強引に成立させられてしまった、というわけである。茂木(1998)の文章には、地震科学者としては誠に不本意、という思いが籠められている。また、力武(1979)は、「観測も理論も不十分な状態で、地震予知の実用化を要請されるという社会情勢に直面している日本

の地震予知関係者の悩みは深刻である。地震予知を具体化するための手順、大げさにいえば戦略については、いまのところ確立された手法はない。」と述べている。更に、宇佐美(1978)も東海地震の予知判定に関して、「昭和51年には東海地震問題に端を発し、ついに翌昭和52年4月に東海地震判定会が生まれ、発生の可能性について判定せざるをえなくなった。これは予知科学の面からいえば、いわゆる見切り発車であることは明瞭である。」と述べている。

しかしながら、地震科学者がいくら慎重な発言をしようと、「地震予知計画」は既に「純粋に科学的な研究計画」ではなく、「国策」となっていた。従って、「大震法」の成立は国家の方針に則ったものであり、地震科学者は、ただ意見を陳述する機会を与えられただけに過ぎない。上に述べた茂木(1998)、力武(1979)、宇佐美(1978)による述懐は、「地震予知計画」が科学主導ではなく政治主導であったことを、明確に物語っている。こうして「地震予知計画」は「大震法」によって、更に強い束縛を受けることになってしまった。地震予知計画関係者が「地震予知は可能」と言い続けなければならなかった二つ目の「事情」は、更に強固になった。

そして今なお、地震予知計画関係者は東海地震に関して、「予知できる(警戒宣言が発令できる)可能性がある」と言い続けている。「可能性がある」ことは、論理的には正しい。可能性がたとえ低くてもそれを追求しようという科学者としての姿勢も正しい。しかし、そう言うよりも、「予知できない(空振り、または、見逃しの)可能性が大きい」と言う方が、現在の地震科学の実力に見合った素直な表現であり、社会に対する正しい情報発信ではないだろうか。地震科学者がそう言いさえすれば、今川(2012)が述べているように、社会は「不十分なこと(地震を予知できない可能性が大きいこと)」を前提とした防災対策へと向かうであろう。「予知できる可能性がある」という発言は地震防災のためにはマイナスであり、また、地震科学に対する社会の不信を招く大きな原因になっているのではないだろうか。「大震法」による呪縛の強さに、戦慄をすら覚える。

3.4 地震科学コミュニティに対するひずみ

イデオロギーと巨額資金によって推進された科学技術は、それが属するコミュニティ内に大きなひずみをもたらす。失敗が許されない科学技術においては小さな失敗の取り繕いが横行し、その結果、健全な批判精神やパラダイムシフトが阻害されてしまう。また、国策に従う科学者のみが潤沢な資金に恵まれ、その他の科学者は周辺に押しやられる。これによってコミュニティ内に無用な亀裂が作り出される。地震科学の分野においても、「地震予知計画」が地震科学コミュニティに対し

てこのようなひずみを与え続けてきたであろうことは、想像に難くない。

国策による大型プロジェクトである「地震予知計画」が地震科学コミュニティに対してひずみを与えていることについては、既に30年以上も前に、宇佐美(1978)が懸念を示していた。「予知という名目をうたえば、測地学審議会の建議にさえつらなっていれば、予算の獲得が容易になるという事実が徐々に形をあらわしてきた。こうしてだれも彼も同じテーマにとびつくことになり、独創性のない計画が助長されはしなかつたろうか。同じことを大勢の人々が研究し競争することは、学問の発展上望ましいことに違いない。しかし、現実には同様の計画に大勢が名のりをあげることによって、悪平等を助長しなかつたろうか。」宇佐美(1978)の言う「悪平等」とは、地震予知計画関係者内部における健全な批判精神の欠如である。そして、地震科学コミュニティ内に作り出された亀裂は、「地震予知」とは意識的に距離をおいた研究者からの批判を遮る障壁の役割をも果たした。

藤井(1967)は、「政治的な臭いのする、上からの研究費が与えられる、そういう研究費の貰い方が流行するとすれば、これは大きなマイナスであろう。」と述べている。藤井(1967)の言に従えば、「ブループリント」に始まる「地震予知研究計画」は科学者側の提案によるものと評価できる。しかし、「研究」の2文字が削られた「地震予知計画」は政治的な臭いを帯びることになり、その臭いは「大震法」が成立するに至ってますます強くなった、ということになるであろう。

原子力発電の分野においても、湯川秀樹が政治主導の原子力開発を批判して原子力委員会の委員を辞任したという有名な話がある(例えば、武谷, 1976)。自然の探求であっても、社会への貢献であっても、科学を手段とする場合には科学主導が当然であって、政治主導の科学の行き着く先は、ダイソンの言葉の通りになるのであろう。

いろいろなテーマについて自由に研究し議論しあうことが健全な科学のあり方なのは言うまでもない。社会貢献は、そのような科学を通して行われるべきである。政治主導によって背伸びさせられた状態で社会貢献しようとする、かえって社会に対して害を及ぼす。原子力発電所の事故を見れば、このことは明らかであろう。深畑(2012)、福島(2012)、中谷(2012)などによって提案されている「地震予知」を目指した新しい試みは、政治的な臭いのしない、批判精神に満ちた、健全な地震科学の環境下で行われなければならない。

3.5 他の防災関連分野や社会との乖離

今村明恒は、私財をも費やして「地震予知」の実現を目指した人、として知られているが、武村(2009)は、今村(1933)を引用しつつ、「今村は決し

て『地震予知』を中心に地震防災を考えていたわけではない。(中略)第一に耐震構造の普及、第二に地震知識の普及、そして、できうれば第三に地震予知ということである。」と述べている。今村が耐震構造の普及を第一に、「地震予知」を第三に考えていたのは、当時の耐震構造の貧弱さや、「地震予知」は技術的に未だ困難という自覚によることであろう。それはさておき、ここで注目したいのは、今村が、地震防災は「地震予知」のみで果せるものではないと考えていたことである。

ところが、国策として進められた「地震予知計画」は、防災を謳ってはいるものの、地震科学コミュニティ内部において進められた。そして「地震予知計画」に参画する地震科学者は、「地震予知」の研究さえしていればそれが直接防災に役立つ、という錯覚に陥った。武村(2009)は、「これによって地震学者と社会との接点は震災対策全般から地震予知に限られ、地震予知そのものが目的化された。このため地震予知を目指す研究者でさえ震災対策を異質なものと捉えるようになった面も否定できない。(中略)地震予知計画による研究の進展によって地震学が地球科学の中核としてその地位を高めた一方で、地震工学など他の防災関連分野との意識的な距離は拡大し、地震学者が震災対策から離れる傾向に拍車がかかったように思われる。」と述べている。藤井(1976)は、「日本の地震学をあとづけで見ることから、われわれは、地震学は震災対策を離れてはあり得ないことを再度発見することができるであろう。この立場こそ、今日の近代化された日本の地震学にもっとも欠けているものの一つに外ならない。」と指摘している。また、宇佐美(1978)も、「社会との関連にかかわる面の研究を予知計画に入れなかったことは反省されるべきであろう。」と述べている。宇佐美(1978)は更に言う。「予算獲得にまぎれて大切なことを忘れてはいなかったか、という反省がなされねばならない。ブループリントにうたわれた10年経過の時点で過去の成果が真面目に検討され、その上に立って新しい目標がたてられたのだろうか。元来、予知は国民のためのものであるが、そういう点を常に意識し、計画を作ってきただろうか。」

しかしながら、宇佐美(1978)の指摘が真摯に受け止められて軌道修正が為された形跡は、残念ながら見当たらない。その結果、「地震予知計画の進展は地震学を他の防災関連分野から孤立させるという問題も生み出した(武村, 2009)」。そして、地震予知計画関係者は、「防災」を口にはするものの、自分のしていることが防災に対してどういう意味を持つのかに思い至るための想像力を欠くに至った(泉谷・武村・西村, 2012)。その典型的な例を、3.3節で述べた「東海地震は予知できる可能性がある」という発言に見ることが

できる。大木(2012)もこのことを的確に指摘している。「地震学ではわからないことが多く存在すること、わかってきたことにすら大きな不確実性が含まれていること、現段階の地震学の抱える限界、こういったことを示すことは、長期的な信頼関係の構築ばかりではなく、結果的に被害の軽減にもつながるだろう。逆に言えば、過剰な期待を抱かせるような情報発信や、誤解を与えるような行為は、コミュニティ全体に対する社会からの信頼を損なわせるものであり、社会からの不信感を後輩達へのツケとして残していく行為である。」

「地震予知」が地震防災に貢献できることは、ほんの僅かである。防災のための多くの問題は地震科学だけでは解決できない（例えば、武村2009；川勝，2012）。川勝(2012)は「トランスサイエンスの領域にいながら『科学で解決できる』と信じてことに当たっていることに、研究者・地震学界の苦悩の始まりがあるのではなからうか。」と述べている。等身大の地震科学を他の防災関連分野や社会に示して理解してもらう努力を尽くし、彼らとの間の溝を埋めることが出来なければ、地震科学が社会に貢献するための道はほぼ閉ざされている。

4. 地震科学コミュニティの責任

人は病気になった時には医者に診察して貰って治療を受ける。病気について正しく認識し治療することが、健康を取り戻すために重要だからである。前章までにおいては、「ブループリント」に始まる「地震予知計画」の健康な部分ではなく、病気の部分について考察した。それは健全な地震科学を取り戻すために重要だからである。

「地震予知計画」によってもたらされた負の遺産は、主に次の3つと考えられる。

- (1)「行動計画 2012」とは明らかに矛盾する「大震法」が存在し、地震科学がその束縛を受け続けていること。
- (2)イデオロギーと巨額予算によって地震科学コミュニティ内に無用の亀裂が作り出されたこと。その結果、健全な批判精神を伴った自由な研究によって生まれるべきパラダイムシフトが阻害されてしまったこと。
- (3)「警報につながるような地震予知は極めて困難」と認識しながら、「地震予知」の定義を勝手に変更して「地震予知は可能」と言い続け、これによって、地震科学に対する社会の不信を招いてしまったこと。また、「地震予知」が防災の中核であるかのような錯覚に陥り、地震科学と他の防災関連分野や社会との間に溝を生じてしまったこと。

「いま我々はどこにいるのか」を、はっきりと認識した上で、「これから我々はどこへ行くのか」について考えねばならない。

地震科学コミュニティと「大震法」との間には、

切り離すことの出来ない関係がある。「大震法」が存在する限り、地震科学は政治の束縛を受け続けるであろう。また、等身大の地震科学の現状を社会に示そうとしても、「大震法」は常に「凸レンズ」のような役割を果たしてしまう。地震学コミュニティはその廃止に向けての働きかける必要があるだろう。橋本ほか(2012)が言うように、科学者は施策に対して、常に「critic」としての立場を貫かねばならない。

また、地震科学コミュニティ内の無用の亀裂を無くし、健全な批判精神に満ちた自由な研究環境を取り戻すこと、更に、他の防災関連分野や社会に対する信頼を回復し、その上で地震防災に対してできる役割を果たしていくこと。為すべきことは多い。

実はこれら為すべきことは、東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会での議論の結果として、既に鷺谷(2012)によって、「我々研究者が、健全な批判精神を持って研究を取り巻く現状を正確に認識すること、および、学会の内外におけるコミュニケーションを深めること。」と纏められている。また、「行動計画 2012」にも、地震科学コミュニティが今後とるべき行動方針が示されている。ただし、「行動計画 2012」を公表しただけで問題が解決するわけではない。今すぐに、それらの実践に取りかからねばならない。それが、「地震予知計画」による負の遺産を処理して健全な地震科学を取り戻すための道でもある。地震科学コミュニティの責任は大きい。

付記

「巨額の予算を獲得して観測網が充実し地震科学研究が進んだ。これは『ブループリント』の大きな成果。」という意見があることは承知している。しかしながら、予算が得られればそれなりに研究が進展するのは当然のことで、本稿においてはそれについて論じる気は無い。「地震予知計画」ではなくて「地震科学研究推進計画」であったとしても、もし予算が得られれば、やはり地震科学研究は進んだであろう。それでも敢えて、「『地震科学研究推進計画』では予算獲得は無理で『地震予知計画』でなければダメだった。」との主張をされる向きがあれば、「『地震予知』は予算獲得のためのスローガン」というゲラー(2012)の、「ブループリント」に対するものとしてはやや見当違いに感じられる批判の矛先に、自ら飛び込むことになるであろう。

謝辞

増田徹、川勝均、橋本学、武村雅之、福島洋の各氏には草稿を読んでいただき、非常に多くの貴重なコメントを頂戴しました。記して深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 浅田敏, 1984, 地震 [第2版], 東京大学出版会, 278pp (初版発行, 1972).
- 浅田敏, 宇佐美龍夫, 松田時彦, 高木章雄, 吉井敏尅, 佐藤裕, 末廣重二, 脇田宏, 水谷仁, 石橋克彦, 1978, 浅田敏編著 地震予知の方法, 東京大学出版会, 264pp.
- 中国地震考察団, 1976, 中国地震考察団論文集, 地震学会, 83pp.
- フリーマン・ダイソン, 1997, *Imagined Worlds*, Harvard University Press, 216pp. (邦訳「科学の未来」, はやし・はじめ, はやし・まさる共訳, みすず書房, 197pp, 2005.)
- 藤井陽一郎, 1967, 日本の地震学, 紀伊國屋新書, 239pp.
- 深尾良夫, 1991, 特集号「1980年代の地震学」編集にあたって, 地震2, **44** (特集号), i-ii.
- 深畑幸俊, 2012, 世紀の難問「地震予知」に挑む, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 76-80.
- 福島洋, 2012, 地震発生予測研究のこれから, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 110-112.
- ロバート・ゲラー, 2011, 日本人は知らない「地震予知」の正体, 双葉社, 185pp.
- ロバート・ゲラー, 2012, 避けて通れない予知研究の総括, 日本地震学会講演予稿集, S-03.
- 長谷川昭, 2012, 地震学研究者・地震学コミュニティの社会的役割—行政との関わりについて, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 18-22.
- 橋本学, 2012, 地震科学の目標・目的と説明責任, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 73-75.
- 橋本学, 川勝均, 鷺谷威, 2012, 国の施策への向き合い方: advocates から critics へ, 日本地球惑星科学連合 2012年大会, U06-08.
- 井出哲, 2012, アスペリティ・連動型・地震予知, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 14-17.
- 今川一彦, 2012, 地震研究者コミュニティの社会との関わり方について, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 64.
- 今村明恒, 1933, 関東大震災の回顧, 地震1, **5**, 545-560.
- 泉谷恭男, 武村雅之, 西村裕一, 2012, 地震学と地震津波防災, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 135-140.
- 地震予知計画研究グループ, 1962, 地震予知 現状とその推進計画, 32pp.
- Jordan, T., Y. T. Chen, P. Gasparini, R. Madariaga, I. Main, W. Marzocchi, G. Papadopoulos, G. Sobolev, K. Yamaoka, and J. Zhou, 2011, Operational earthquake forecasting - state of knowledge and guidelines for utilization, *Annals Geophysics*, **54**, 316-391 (doi: 10.4401/ag-5350).
- 川勝均, 2012, トランスサイエンスとしての地震予知・長期予測, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 53-54.
- 川勝均, 鷺谷威, 橋本学, 2012, 地震学会は国の施策とどう関わるのか—地震学者・コミュニティの社会的役割とは何か, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 131-134.
- 菊池正幸, 2003, リアルタイム地震学, 東京大学出版会, 222pp.
- 茂木清夫, 1982, 日本の地震予知, サイエンス社, 352pp.
- 茂木清夫, 1998, 地震予知を考える, 岩波新書, 254pp.
- 中谷正生, 2012, 地震発生物理と前兆現象, 日本地震学会講演予稿集, S-06.
- 日本地震学会地震予知検討委員会編, 2007, 地震予知の科学, 東京大学出版会, 218pp.
- 大木聖子, 2012, 地震学のアウトリーチ—社会との信頼の構築—, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 113-117.
- 力武常次, 1976a, 地震予知論入門, 共立全書, 212pp.
- 力武常次, 1976b, 巨大地震, 講談社ブルーバックス, 269pp.
- 力武常次, 1979, 地震予報・警報論, 学会出版センター, 366pp.
- 鷺谷威, 2012, 地震学への提言—臨時委員会における議論の総括—, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 121-124.
- 高木仁三郎, 2000, 原発事故はなぜくりかえすのか, 岩波新書, 188pp.
- 武村雅之, 2009, 未曾有の大災害と地震学—関東大震災—, 古今書院, 209pp.
- 武谷三男, 1976, 原子力発電, 岩波新書, 207pp.
- 宇津徳治, 1977, 地震学, 共立全書, 286pp.
- 宇佐美龍夫, 1978, 予知計画の推移と問題点, 浅田敏編著 地震予知の方法, 東京大学出版会, 219-236.
- 宇佐美龍夫, 1981, わが国の地震学の歩み, 地震2, **34** (特別号), 1-36.

ブループリントと地震学の将来の方向

金森 博雄 (カリフォルニア工科大学)

Blueprint and Future Directions of Seismology

Hiroo Kanamori (California Institute of Technology)

日本の地震学はブループリントによって大きな影響をうけた。その結果を基にして防災科学としての地震学の進むべき方向を考える。

1. はじめに

ブループリントの目的は、「地殻変動を細密に捕え、その地震発生との関係を究明し、地震予知への門を開こうとするものであって、必ずしも地震直前に現れる地殻変動を捕えることに拘泥するものではない。」あるいは、「地震というのがどのような過程において発生するかを知ろうとするのが主眼であって、地震直前の前兆を捕えることのみこだわりのものではない。」とあるように、地震発生の基礎的過程の研究を目的とするものであった。研究が計画どおりに行なわれれば、10年程度の後には(1)観測結果と地震発生の関係が明らかになり、(2)実用的な地震予知ができるようになるかに答えることができると期待された。

その後、兵庫県南部地震以後、GPS や広帯域地震計等の進歩に伴って当初に考えられたよりはるかに優れた観測網が展開された。この観測網を用いて日本および世界の地震学は長足の進歩を遂げた。たとえば、二重地震面、繰り返し地震、地震破壊過程、スロー地震、トレマー、不規則な地殻変動、トモグラフィ、リアルタイム地震学等において、きわめて顕著な進歩が見られた。

この結果、上記(1)については、地震発生過程がきわめて多様で、地震前の観測結果と地震発生の関係はきわめて複雑であることがわかった。(2)については、地震予知の実用性は今もって不明というのが一般的な見方であろう。

まず、はじめにいくつかの成果について考える。

2. プレスリップ

ブループリントでは、地震の前に起こるかもしれないと考えられるゆっくりと

したすべり(プレスリップ)の可能性が述べられている。これについてはほとんどの地震ではっきりとしたプレスリップがないことが確かめられた。たとえあったとしても非常に小さいことがはっきりした。カリフォルニアの地震についてはプレスリップはモーメントにして本震の0.1%以下であった。また1993年の奥尻地震でもはっきりしたプレスリップはみられなかった。

一方、地震を伴わないスロースリップがCascadia、九州、東海、などで発生していることがわかった。琉球では、M6のスロー地震が半年おきに起こっていることもわかった。地震的現象が、ゆっくりと起こっているというのは新しい発見で、ブループリントが作られたときにはだれも考えてもいなかった。このような新しい発見がたくさんあったことはすばらしい。

2008年の福島県沖地震の前にゆっくりした変化がGPSでとらえられたのがプリカーサの唯一の例のように見えた。しかし、その前にM6の地震が起こったので、そのアフターリップとも考えられる。実際は何がトリガーで何がプリカーサなのかはわからない。要するに、地震現象は極めて複雑なのである。

2011年の東北沖についてもはっきりしたプリカーサはない。しかし、詳しく見ると加藤等によれば、3月9日の前震のときから本震にかけてスロースリップがあった。伊藤等によれば本震の近くに、M=7のスロースリップがあった。西村によると、福島付近で2010から2011年にかけて固着が弱まっていたように見える。スロースリップが始まっていたのかもしれない。

予知につながるかどうかは別にして、このような現象をくわしく調べることは、地震の物理、特に断層面上での摩擦の性質、を理解するために必要だ。

3. 高密度の地震観測網により地震活動の時間一空間分布が明らかになった。地震活動の活発化や静穏化から将来の地震活動を予測することは、しばしば行なわれているがその物理機構を理解することが大切である。

昔からいわれていることだが、「前震」は本震が起こってからそれとわかることが多い。東北沖でも3月9日に M=7.2 の地震があった。あとからみれば、誰にでも前震 と思えるが、その二日後に M=9の地震が起こることを予知できた人はいないだろう。要するに、前震 は一種の前駆現象と考えられるが、それだけで正確な地震の予知をすることは困難である。

4. 電磁気学的な観測は地震や地殻変動に比べて少ない。もう少し組織的な観測をして、その結果を物理的に理解しようとする試みがなされても良いと思う。

5. 予測

このように50年間で驚くほどたくさんの科学的発見があった。

沈み込みのメカニズムはかなりよくわかったといえる。リピーター地震もアスペリティの存在でよく説明できることがわかった。スロースリップの存在もはっきり確かめられた。これらの研究は良い観測網で、どんどん続けるべきだ。

アスペリティ同志の相互作用がある。ある場所は普段はクリープしているように見えるが、応力が急にかかると急にすべる。要するに、断層面上でのすべりは二重の性質をもつように見える。ある場合は、ゆっくりすべり、ある場合は地震的にすべる。東北沖ではとくにこの特徴が強いように見える。

科学的な基礎がわかってきて、ひずみの変化が GPS で正確に測定できるようになったので、地震活動の定量的な予測ができるようになった。

たとえば、2010年のチリ地震については、フランスのグループなどが優れた論文を発表している。175年前に地震が起こった場所(ダーウインギャップ)で、ひずみが蓄積し続けていることを見つけた。GPSの結果から12mのすべりが'蓄積'していることがわかり、このすべりが一度で起こればM8.5 程度の地震が発生する可能性があるとして2009年に予測した。実際は少し大きかったが、ほぼ予測通りに M=8.8 の地震が2010年に発生した。

また最近起こった2012年のコスタリカの地震についても同様な予測がおこなわれた。ここでの、歪みのたまり方から、M7・8の地震が起こる可能性があるとして2012年に予測された。実際に2012年9月6日に M=7・6の地震が、予測されたとおりに起こった。

このように、50年たって、物理モデルが働き始めている。

しかし、地殻を作る岩石の強度の分布は良くわかっていないからいつ破壊が起こるかを正確に予測することは困難である。また小さいパッチ(アスペリティ)が破壊すると思っていると複数のパッチが干渉しあって全体が破壊することもある。従って地震の大きさの予測にも大きな不確定さがともなう。ある意味ではいろいろなことがわかってきて、なぜ予測が不確定になるかがわかったともいえる。

東北沖地震についていえば、GPSの観測で、ひずみの蓄積があることはわかっていた。たまった歪が急激に解消されれば、地震になる。実際には、いくつかのパッチが干渉して破壊域が大きくなり、ふだんクリープしている場所で地震すべりがおこったため予測されたよりはるかに大きな地震になったと考えられる。東北沖地震の予測は考えの上では正しかったが、岩石の破壊強度や断層面での破壊の物理的性質についての知識が乏しかったために、予測の結果は大きく外れた。地震発生プロセスが確率的な性質をもっているために、このような

予測は大きな不確定さを伴うので、普通の意味での地震予知とは言えない。

6. ほかの地域で起こる地震との比較。

地震は日本だけでなく世界中でおこっているので、日本の地震をよく理解するためにはほかの地域の地震もよく調べる必要がある。明治の三陸津波地震は海溝近辺でおこったことがわかっていた。スマトラで1907年におこった地震は海溝附近で大きなすべりが起こった地震と考えられていた。また2010年のスマトラ、メンタワイ地震も同様である。このような地震を見ていた研究者は、東北沖的な地震をある程度考えていた。ただ、このような研究上での考えは現在の確率マップに頼る防災計画にはうまく組み込むことができない。地震活動のような複雑な現象を一枚の確率マップだけで表すことはできないので、いろいろな研究結果をとりいれ総合的な方法で地震活動の予測をすべきである。

7. リアルタイム地震学

自然現象は人間の力では変えられないので、普通には考えられないようなまれなイベントがどうしても起こりうる。稀なイベントは甚大な被害をもたらすことが多い。また、地震の発生は多くの場合突発的であるとかんがえた方がよい。従って我々はそのような稀な、あるいは突発的な事態に対処できるようにできる限りの努力をする必要がある。そのためには、リアルタイム地震学を発展させることが絶対不可欠と思われる。最近の地震学の進歩により、観測データを迅速に解析して地震の際にどのようなことが起こったかをきわめて早く決められるようになった。この成果は2011年東北沖地震の際にはっきりと示された。

津波警報については、地震波、GPS、海洋観測をもちいたいろいろのあたらしい方法がすでに開発されていて、近い将来に津波防災が著しく改善されることは間違いない。もちろん、津波予報を有効に使うための教育、訓練と施設が必要なことは言うまでもない。

地震警報は津波警報とくらべるとはるかに難しい。現在、気象庁による緊急地震即報等が実際に稼働している。メキシコ、台湾、アメリカなどでも開発研究が進んでいる。これから一番重要になるのは地震動が一番激しい震源付近で使える地震警報システムの開発である。原理的には、P波を常時モニターして、その振幅がある閾値をこえたら大きな振幅のS波が来る可能性を警告するもので、すでに新幹線などで使われている。このばあいには震源の近くでも、数秒で警報を出せる可能性がある。これからは、誤動作を減らし信頼度を増す技術を開発しなければならない。ある民間企業がそのようなシステムをすでに開発し実用化している。最近のいくつかの地震の際に、作業員や工作機械を強振動から

まもり、目覚しい実績を上げていることが報告されている。

不可解なことには、多くの地震学者は地震警報は地震学者の仕事ではないと考えているように見える。地震発生が如何に突発的なものであるかを身にしみて感じているのであれば、有効な地震警報の開発は地震学者にとって避けては通れない問題と思うべきだ。コンピューター技術やコントロール技術を最大限に活用すれば、有効な地震警報システムを作ることができると思う。

8. 結論

地震学と測地学の進歩により、地震活動の大体の傾向を長いタイムスケールで予測できるようになった。しかし、使われるデータや我々の知識には限りがあるためそのような予測には大きな不確定性が伴う。また地震現象のような破壊現象に伴う確率的揺らぎのため決定論的な予測は困難である。従ってこのような予測は普通に考えられている予知とは異なる。言い換えれば、このような予測は長いタイムスケールの現象を理解するのには役に立っても、“今日何が起こるか”というような非常に短いタイムスケールの出来事についてははっきりとしたことはいえない。この違いを正しく世間一般に伝えるコミュニケーションが大切である。

また地震学者はこのことをはっきり認識して、地震学の研究結果を、その不確定性を頭において、有効に防災に生かすべく努力をすべきと思う。また、複雑な自然現象では、まれなイベントが想定外の大きな被害を及ぼすことが多い。これに対処するためには、リアルタイムの方法を発展させることが必要不可欠である。

教育研究活動の強化と独創的かつ柔軟な考え方のできるリーダーの養成、研究結果と社会の要請のタイムスケールの違いを認識したコミュニケーションと長期防災対策の改善、及びリアルタイム地震学の手法の開発を三つの柱とした研究で地震学は社会の要請に答えるべきと思う。

“地震予知”に対する日本地震学会の取り組み

東京大学地震研究所（公益社団法人日本地震学会 会長） 加藤照之

地震予知研究は1960年台初めに地震学会会員の有志による準備会が母体となって計画案（ブループリント）が作成され、学会総会において決議されたのがそのはじまりと言えよう。地震予知研究は1995年兵庫県南部地震のあとに厳しい批判を受けたことから、それまでの実用化をめざした方向を修正し、より基礎的な研究へとシフトした。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を契機として、再び地震予知を含む多く課題が明らかになったことから、地震学会では臨時委員会を設けて検討を行うなど多くの議論が行われた。今期の地震学会理事会ではこれらの経緯をふまえ行動計画の一部として、地震予知については言葉の用法を整理して使うべきであるとの提言を行った。今後この定義にしたがった用法が期待される。

0. 言葉の定義

“地震予知”という言葉にはいろいろな用法や定義があるように思われるが、本稿では最初は特に定義をせずに広い概念を含むものとして扱う。なお、本稿の途中で定義を与えて、それを今後用いることを提言する。

1. 事始め

地震予知研究の国家計画は1960年頃当時の地震学会の有志によって検討がはじめられた。この会は「地震予知研究計画準備会」と称されたが、“同会が細部活動に至るまで総会の承認をうけることは自由で活発な活動のさまたげになる”こと、また“学会が一つのスローガンにしばられるべきではない”との理由により、地震学会からは切り離されて活動を行った（地震学会、1961a, 1961b）。この準備会における検討を経て、1962年4月30日の総会において、萩原尊礼会員より緊急動議として以下の決議が採択された：

「決議：今回学界有志よりなる地震予知計画研究グループは、地震予知達成のための推進計画を作成した。この計画は国家的規模において効果的に行われることが必要である。我々はこの計画が一日も早く実現することを強く望むと共に今後の計画が推進されてゆく場合にできる限りの協力を惜しまないものである。決議する。
昭和37年4月30日 地震学会」

この決議によって、（日本）地震学会は“地震予知研究計画”に対して製造物責任を負うこととなった（地震学会、1962）。

2. 東北地方太平洋沖地震以後の経過

地震予知研究計画開始以来の経緯については既に本特別シンポジウムで既に論じられたところであるのでここでは省略する（例えば、津村による解説を参照のこと）、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を契機として、これまでの地震予知研究に対する批判が巻き起こり、地震学会もその対応を迫られることとなった。この地震が地震学コミュニティに与えた衝撃は大きく、地震

予知研究だけでなく、地震学や地震学会のあり方など多くの面についての議論が巻き起こった。地震学会では東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会（委員長：鷺谷威）を設置してこれらの問題を討議した。この委員会のもとで2011年10月の地震学会の秋季大会において特別シンポジウムを開催したほか、意見を募集して「地震学会モノグラフ」として刊行した（地震学会、2012）。また、2012年5月の連合大会においてユニオンセッションを企画・実施した。以上の取り組みにおいて地震学会の理事会に対し多くの提言がなされた。理事会ではこれらの提言に対応して具体的な実行計画を策定して2012年10月の地震学会秋季大会において「行動計画2012」として公表した。この「行動計画2012」では地震学会としての今後の活動について広範な提案をしているが、地震予知に関してもそのうちの項目としてとりあげている。この部分を本稿の最後に再掲する。

2. 「行動計画2012」における“地震予知”について

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震を契機としてそれまでのブループリントに基づく国家計画としての地震予知研究に対しても批判が巻き起こった。このため、地震予知研究計画は見直しを迫られ、それまでの「地震予知の実用化」をめざして地震直前の現象を捉えて地震がいつ起きるかを予測しようとする「短期的予知」の手法の確立に重点を置いてきた方針を転換して、到達可能な目標に基づく基礎的な研究を推進することとなった。この地震後の政府の対応については他にゆずるが（例えば、長谷川（2012））、地震学会では、この地震の後、「地震予知検討委員会」を設置し、地震予知に関する様々なことを検討することとなった。初代委員長の石橋克彦は、委員会の紹介文の中で次のように述べている（石橋、2001）。“「地震予知」に対する考え方が多様化した今こそ、地震学会として、地震の予知・予測全般の問題をより根元的な問題意識にもとづいて正面からとりあげることが必要であると考えら

れます。とくに、社団法人となって社会的責任が明確化した現在、「地震予知」に関するサイエンスの議論にとどまらず、それを踏まえた社会的側面についても、現状と将来展望を整理して社会に示す責務があるでしょう。”

また、この委員会での検討課題としては以下のものを取り上げている。

(1) 地震科学における「地震予知」の位置づけと見直し

(2) 震災軽減における「地震予知」の位置づけと見直し

(3) 「地震予知」に関連する用語の整理

(4) 地震予知・予測情報が社会に与えるメリット・デメリットの整理

(5) 社会の「地震予知」に対する誤解の解消（社会への説明）

(6) 地震予知・予測情報発信に関するガイドラインの議論

このような方針のもとに「地震予知検討委員会」は様々な活動を行ってきた。主な活動としては学会講演会における特別セッションの企画や学会ホームページのQ&Aにおける“地震予知”の項の担当などがあげられる。こうした活動の集大成となったのが「地震予知の科学」の出版と言える。

2009年4月6日に発生したイタリア・ラクイラ地震(Mw6.3)においては、科学者を含むイタリア政府の地震委員会のメンバーが訴追されたことから、イタリア政府の市民安全局は国際委員会(International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection)を組織した。この委員会の役割は“地震の直前予知や予測に関する科学の現状を整理すること、確率論的地震被害予測を含めて大地震に先行する情報を市民の安全のためにどのように用いたらよいかについてのガイドラインを提案することであった”(山岡、2010)。日本からは当時地震予知検討委員会委員長であった山岡耕春が委員会に参加した。

同国際委員会は2009年10月2日に提言の要旨を公表した。山岡会員による地震学会ニュースレターの報告には同会員の監修による日本語訳が掲載されている(山岡、2010)。また、報告の全文も公表されている(Jordan et al., 2012)

この委員会の報告では“予知”と“予測”は以下のように定義されている(上記山岡会員監修による日本語訳を引用する):“地震予知とは、ある特定の地理的地域、時間およびマグニチュードの範囲を指定し、その範囲で将来に地震が発生するかしないかを知る決定論的な予測である。対照的に地震予測は当該の事象が発生する確率(ゼロよりも大きく1よりも小さい)で表現される”。そして、地震予測の現状として、“現在の科学的知識をもってしても、個々の大規模地震を数年またはそれより小さな単位で確実に予知することは

不可能である。言い換えれば、信頼性が高くかつ高度な決定論的地震予知は今のところ不可能である。”と述べている。

この報告に関しては、その後2011年6月にオーストラリア・メルボルンで開催されたIASPEI総会で、この報告書を支持することが決議された(佐竹、2011)。井出(2012)は、以上の経緯を踏まえたうえで、この報告書に関して“作成から国際的承認まで日本地震学会として関わっている報告書であり、その内容については、報告書がIASPEIで支持されていたという事実以上に日本地震学会として尊重すべきものである”としている。

東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会は、2011年10月の特別シンポジウムにおける議論やその後の臨時委員会での議論等を総括し、地震予知に関しては、委員会構成の再検討を提言する中で、“地震予知検討委員会については、「地震予知」を井出(2012)に倣って「決定論的直前予知」と厳密に定義すれば、名称や設置目的を含めた抜本的見直しが必要である”と提言している(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会(委員長鷺谷威)、2012)。

以上の経緯を踏まえ、理事会では、これら一連の経緯を尊重することとし、「行動計画2012」に組み入れたのである。「行動計画2012」における記載ではより一般的な議論の背景等に触れつつ、地震学会としては上記に述べてきた経緯に基づいて、前記のIASPEIで採択された国際委員会の報告にある“予知”と“予測”の用法を用いてはどうか、と提言した。その内容については末尾に掲げた文を参照してほしいが、これに付言すれば、地球という極めて複雑な系で発生する事象に関しては、将来を予測するには確率をもってしか語ることができないであろう、という考え方がその根底にはある。これを認めれば、将来の地震発生について語る場合には“予測”という用語をあてることが一般的には適切と考えられる。しかしながら、地震発生予測の確率が高まっていき、例えば「○○の地域でM7級の地震が3日以内に発生する確率は95%以上」などとなった場合はしかるべき公的機関から警報が発せられる可能性も考えられる。このような状況を“地震予知”と呼ぶことは差し支えないであろう。現状ではこのような“地震予知”ができる可能性は極めて低いと考えられるが、遠い将来そのようなことが可能になるかもしれない、ということも否定するものではない。“地震予知”は地震発生予測の極めて限られた特別の場合と言って差し支えないであろう。このように考えると“予知”と“予測”は対立する概念ではなく、前者は後者の中に含まれる特別な場合と考えてよい。

なお、誤解のないように繰り返しておくが、こ

こでの用語の整理は、地震学会として決定して会員等に強制するものではなく、あくまでも理事会として IASPEI によって採択された報告書における決定論的地震予知 (deterministic prediction) と確率論的地震予測 (probabilistic forecast) の定義を“尊重”しようという提案である。これによって、理事会が発出する文書やタイトルの表記などをこの定義による“予知”と“予測”の言葉の使い分けに合わせていくことを提案するものである。地震学会の中の組織に「地震予知検討委員会」があるが、前述のように用語を整理した場合、この委員会の名称はその活動内容からは適切さを欠くと考えられるので名称の変更は必要であろう。ただ、この委員会に関しては、名称の変更だけでなく、地震発生予測に関する最近の研究の急速な発展を考えると、臨時委員会からの提言にもあるように、当初に設定された活動内容についても見直しを図っていくことが必要であると考えられる。

なお、個々の研究者のレベルでみると、既に多くの関連する研究の課題や学会講演のタイトル・要旨等にはその内容に合わせて“予測”という言葉が使われ始めており、大きな混乱はないのではないだろうか。

このような用語の定義の明確化とその使用により、“地震予知”に関する一般社会と専門家の間の誤解や故なき批判が少しでも回避できることを期待したい。また、今後も進められるであろう地震予知や地震発生予測に関する研究の内容やその成果が、アウトリーチ活動などを通じて、一般社会に誤りなく伝えられていくことを切に願っている。

謝辞

本論に書かれている内容は多くのことを地震学会理事会での議論に依っている。議論に参加してくださった諸氏に感謝したい。

文献

井出哲、アスペリティ・連動型・地震予知、地震学会モノグラフ、第一号、14-17、2012。

長谷川昭、地震学研究者・地震学コミュニティの社会的役割—行政との関わりについて、地震学会モノグラフ、第一号、18-22、2012。

石橋克彦、新しい「地震予知検討委員会」について、地震学会ニュースレター、2001。

Jordan, T. H., Y.-T. Chen, P. Gasparini, R. Madariaga, I. Main, W. Marzocchi, G. Papadopoulos, G. Sobolev, K. Yamaoka, J. Zschau, Operational earthquake forecasting. State of Knowledge and Guidelines for Utilization, *Annals*

Geophysics, 54, 4, doi: 10.4401/ag-5350, 2011.

佐竹健治、IASPEI, IUGG 総会報告、地震学会ニュースレター、日本地震学会ニュースレター、23 巻 3 号、49、2011。

東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会(委員長鷲谷威)、地震学への提言—臨時委員会における議論の総括—、地震学会モノグラフ、第一号、121-124、2012。

山岡耕春、地震予測に関する国際委員会、地震学会ニュースレター、21 巻 6 号、7-15、2010。

地震学会、学会記事、地震第 2 輯, vol. 14, 61, 1961a

地震学会、学会記事、地震第 2 輯, vol. 14, 120, 1961b

地震学会、学会記事、地震第 2 輯, vol. 15, 148, 1962

地震学会、地震学会モノグラフ, vol. 1, 171pp, 2012

「行動計画 2012」（日本地震学会理事会）より抜粋

4) “地震予知”への取り組みを見直すこと

東北地方太平洋沖地震の発生を契機として“地震予知”に対して多くの批判があった。また、この地域で M9 地震が発生することが事前に予測することはできず、地震研究者の間からもこれまでの研究に対して反省の声があがっている。同様の批判・反省は兵庫県南部地震の後にも見られ、地震予知研究計画の見直しにおいて、「地震予知の実用化」をめざして地震直前の現象を捉えて地震がいつ起こるかを短期的に予測しようとする「短期的予知」の手法の確立に重点を置いてきたそれまでの地震予知研究計画の方針を転換し、到達可能な目標に基づく基礎的な研究へと舵を切ることとなった。地震学会においては、“地震予知”の考え方の多様性に立って、その位置付けや用語の整理、予測情報に関するガイドラインの策定、等について学会として検討を行うために地震予知検討委員会を発足した（石橋，2001）。この委員会による検討の集大成が「地震予知の科学」（日本地震学会地震予知検討委員会，2007）の刊行であると言ってよいだろう。

“地震予知”に関しては、“予知”という言葉の定義に関しても多くの議論が交わされてきたが、国際的な地震研究者のコンセンサスといえる文章が、IASPEI2011 年総会で採択された (Jordan et al., 2011; 市民保護のための国際地震予測に関する検討委員会，2009)。このレポートでは地震の予測について(1)警報につながる確度の高いもの (deterministic prediction) と(2)確率で表現され日常的に公表可能なもの (probabilistic forecast) を明確に区別している。前者は社会的に期待の大きい直前の「地震予知」であり、後者は長期予測を含む、より一般的な地震の予測ととらえられる。レポートでは(1)が現時点で実現の見込みがないことを指摘し、社会に役立つのは(2)だとしている。レポートの作成、採択に関わった日本地震学会として、(1)の意味での「地震予知」が現時点で非常に困難という認識を支持し、かつ社会に対して説明し、同時に(2)の意味で地震予知という言葉を用いないよう努めるべきである。すなわち本原稿中で用いている“地震予知”（一般的に場所、大きさ、時間を特定して地震の発生を事前に予測すること）の用語法が適当でないということになる。なお、(1)が原理的に不可能であることが証明されたわけではなく、(1)と(2)を含めた地震発生予測の研究は、今後も基礎研究として継続する価値があることはいままでのない。

では、以上のような経緯をふまえ、今後地震学会は地震発生予測の問題にどのように取り組んでいくべきであろうか。重要なことは、前記にあげた「地震予知」は現状では非常に困難であり、地震発生予測は基礎的な研究の一分野として推進していくという認識に立ち、社会に対して研究の現状を丁寧に説明し、研究成果を社会に還元していくことであろう。

こうしてみると用語的に不適切である“地震予知”を連想させる地震予知検討委員会はその名称の変更を必要とする。また、その活動内容としては、社会からの誤解に基づく批判などを避けるためにも、地震発生予測に関する研究の現状をこれまでより一層丁寧に説明していくことが求められるであろう。このようなアウトリーチに関する活動は、より広い地震学のアウトリーチの一部として位置づけていくべきである。このことから地震学会はその主たる活動として社会に対するアウトリーチ活動を掲げ、当委員会は当面次項に示すアウトリーチ活動に参加していくこととし、この活動の本格化と共に名称だけでなく他の関係委員会と共に活動の抜本的な見直しを行うことを提案する。

私のブループリント

北海道大学理学研究院自然史科学部門 小山 順二

2012年地震学会秋季大会が10月16日から函館で開催されました。初日には、特別シンポジウム「ブループリント」50周年 - 地震研究の歩みと今後、と題する特別セッションが企画され、6名の招待講演と、活発な総合討論が交わされました。私は講演者ではなく、単にLOCを代表して、シンポジウムの開会をご案内しただけですが、シンポジウムを主催したゲラーさんから、このモノグラムに一文を寄稿せよとの、強いご要請があり、今筆を手にしているところです。

もともと、開会のご案内をお願いされた時、地震観測にも、地震予知計画にも関与してこなかった自分は適任ではないと感じておりました。しかし、地震予知計画が始まって間もない時に、予知計画を推進しておりました東北大学鈴木次郎先生の研究室に配属になり、その頃のVividな雰囲気は、今でも身に染みて記憶しております。もしここで、私の体験を書き残すことがなければ、永久に忘れ去られると感じ感想文を書き始めた次第です。

1971年のある時、先生は、「小山君、あと十年もすれば、県単位くらいで今の天気予報のような地震予報が可能になるのだよ。」と仰いました。私は、まだ何もわからない学生でしたから、すごいことだ、今できないことを可能にする研究を進めているのだ、と単純に考えました。そこにあったのは、(1) 将来に対する明るい展望と(2) 未知の前兆現象に対する研究意欲と情熱でした。

その地震予知計画は、地球物理学全般にわたる観測が主であり、新しい観測(組織・体制)で未知の地震前兆現象を見出そうという観測計画であることを後に知りました。それは大変魅力的でしたが、体力に自信がなかった自分は観測には向かないとも考えました。また、東北大学医学部には黒川先生というお医者様がおられて、先生は胃がんの早期発見・早期治療というテーマで、胃の集団検診というお仕事をなさってました。黒川先生は後に、文化勲章を受章されました。確かに、胃がんの予兆を早期に発見して、治療することで、胃がんの予防になることはわかります。しかし、もし地震の前兆現象を見出しても、自分は何をすればよいのか当時わかりませんでした。

このような背景のもと、今回の特別シンポジウムには、自分自身の特段の興味を抱いて参加しました。「ブループリント」から現時点までの地震学研究の歩みを知ることは重要で、この特別シンポジウムの価値はそこにあります。しかし、大変驚いたことに先に述べた、(1) 将来に対する明るい展望とか(2) 未知の前兆現象に対する研究の意欲・情熱は、これまでの研究の総括にもこれからの研究の展望にも、まるで感じられませんでした。

例えば、『伊豆半島の異常地殻活動に対して「中期地震予知に成功」と評価してよいような対応をしているように、予知できるケースがあれば予知しなければならないという意識は持ち続けていたので、顕著な先行現象があればその経過次第で予知成功例が生まれてい

たと思われる』(津村、2012)。これには(2)未知の前兆現象に対する研究の意欲・情熱、は全然感じられません。新たな観測(体制)で未知の前兆を探る、そのために観測を強化するとしたブループリントの基本的精神が文章上だけかもしれませんが、まるで希薄です。

また、『観測網設置・運用予算を獲得するためには、より積極的な理由づけが必要である』と考えた。つまり、予算獲得のスローガンとして、「予知」を使用したと解釈できよう』(ゲラー、2012)。これはご自身のお考えですから、それはそれでよいのですが、では明日の地震学のために、何を持って若者を魅了し、幻惑(ちょっと言葉が悪いか)させて、新たな地震研究に意欲を持って向かわせることができるのでしょうか。豊かで明るい将来の展望なくしては、若い人はついてきません。

さらに、私が失望したのは、『「現状把握能力の向上」と「地震発生モデルの発展」に海底観測データをいかに効果的に活用するのか、という検討が急がれる』(日野、2012)。私は新しい観測計画がどれほど進捗しているのかは知りません。しかし、その観測計画を踏み出す前に当然準備して、シミュレーションしてから、実施すべき観測計画が何も準備されていない、これから検討しなければならないとのこと。観測網の建設資金が天から降ってきたから、観測から期待される何ものかを知らずして、その資金を使おう、そういうことですか？

2005年札幌での地震学会の時、テキサス大学の中村先生に、月の地震探査に関してご講演をお願いしました。先生は最後に、惑星探査では何が起こるかわからない、だから、

Prepare for unexpected!

と言って、ご講演を締めくくりました。**Expected**がなんだかわからないのでは、探査ロケットは100%打ち上げられることはありません。

一度Failした地震予知の組織論では、のどを潤すことも腹を満たすこともできません。それを何度繰り返しても(長谷川、2012; 平田、2012)同じです。今ある地震予知体制を批判的に顧みることが出来なければ、今回の失敗を乗り越えることはできないと思います。私たちは、今回の失敗を将来の確実な教訓にすべきであり、そのためにはやぶさかに前に進むのではなく、今までなされてきたこの国における地震予知、その観測体制に関して、きちんとした科学的な検証が必要であると考えます。

もし上のような新しい観測計画のお金の使い方ではなく、現在の・明日の地震学の発展のために、若い地震学者の育成のために、そしてより安全で強固な国土の構築のために、過去50年間の投資が現に本当に役立っているのなら、ゲラー(2012)の批判は生まれなかったでしょう。黒川先生は大型バスを改造して、地方を巡回して胃のレントゲン検査を実施しました。今では、バリウムを飲むこの検査は日本中どこの病院でも可能です。私には、はじめから黒川先生が現在のような検診方法を望んでいたとは思えません。しかし、手段や道筋はどうあれ、いずれ税金は使わなくてはならないのです。もちろん今評価できない価値もあります。しかし、その検証は科学的であれ、対価効果の観点からであり、最低限、結果論で今評価されるべきものと考えます。

最後に、地震観測にも地震予知にも携わってこなかった一人の地震研究者として、自分の意見（小山、2012）から一部を引用し、加筆してまとめとします；

やらなければいけなかったこと、それは自分の頭で考えることでした。これは違うぞ、と思ったことは自ら責任もって、解決しなければならないし、だれもやってはくれない。やってよかったこと、それは地震学の知識や理解が社会一般に敷衍して、国民に安心を与え、災害に強い国土を一步一步構築していることです。

地震学の発展、その新しい知識や理解が国民の安全と安心に寄与するのです。それは、半分沈み込んだ海山の発見、深発地震面の二層構造、常時地球振動、スロースリップ・低周波微動の発見だったかもしれません。長年学生に地震学の講義をしても、自分自身がわくわくした思いを伝えることがなければ、何も知らない学生は興味を抱いてくれません。それでは地震学を次に支える若者を育てることはできません。今回の地震で日本という国は本当に底力のある国だと再認識しました。しかし、日本が持つ高度に進んだ技術だけが、国民の安全を保障するものではありません。自らの命は自らの力で守る、そういう態度も必要です。津波が来るときはとにかく逃げることを初等教育の基礎として、繰り返し教えることも重要です。そして、国・行政は、日本の国土を奥尻島のようなコンクリートの要塞、というような愚かしい考えを抱くのではなく、小さな子供たちも足腰の不自由なお年寄りも利用できる避難路を建設する、そのような新しい国づくり、新しい基礎教育のスタートに我々は今立っていると認識しています。地震学の成果が確実に社会に反映されることも今回の地震は図らずも示してくれたと考えます。しかし同時に地震学の知識だけでは自然災害により強い国土の構築は難しく、関連する自然災害科学との相互理解に欠けていたこと、その知識も工学的にきちんと応用されていなければ何にもならないことも、この地震は浮き彫りにしました。このことを心に強く記憶し、多くの犠牲を我々に強いた東北地方太平洋沖地震を後世に語り継がねばいけないと考えます。

（すべての文責は著者にあり、ご批判は自ら甘んじてお受けします。）

文献

グレー・ロバート、2012、日本地震学会講演予稿集、2012年度秋季大会、S-03.

長谷川昭、2012、日本地震学会モノグラフ、地震学の今を問う、18-22.

日野亮太、2012、日本地震学会講演予稿集、2012年度秋季大会、S-06.

平田直、2012、日本地震学会講演予稿集、2012年度秋季大会、S-03.

小山順二、2012、日本地震学会モノグラフ、地震学の今を問う、49-52.

津村建四朗、2012、日本地震学会講演予稿集、2012年度秋季大会、S-01.

地震発生物理と前兆現象

東大地震研 中谷正生

「壊れはじめている」タイプの準備過程にもとづく大地震の予知は原理的に可能なのか？という問題を、地震発生物理の最新の知見をとりいれて議論する。今世紀にはいつ動的破壊の開始だけでなく停止までを本格的に扱いはじめた地震物理は、やっとな、予知が原理的に可能かという問いにリンクした。破壊エネルギーの観察をみたくように設定された階層的な不均質の場では、大きな準静的震源核は、小地震の動的破壊から cascade up することで代用できるので、十分条件ではあるが必要条件ではない。しかし、cascade up ができるためには大地震の破壊域が全体的に「熱れきって」いることが必要にみえ、これを新たな必然的準備過程と認識すべきと提案する。

1. はじめに

本稿では、「地震予知は原理的に可能なのか」という問題について、ディベート的な言葉尻の論理ではなく、問題の核心についての実質的な議論を行いたい。不可能を証明できていないから不可能ではない、などというはなしではなく、わたしの意図は、将来の震源域が「壊れはじめている」ことから派生する physical precursor [Ishibashi (1988)] を利用した短期予知には十分な可能性があると積極的に論じることである。ただし、見逃しも空振りも多いだろうと考えており、社会の役に立ちうるものかはわからない。そもそも、社会の側からみた地震予測のパフォーマンスは、予測の時空間・規模幅、見逃し率、空振り率だけで明確に表現できるのであって、これらのパフォーマンスパラメータに応じて各々の予測をどう使えば社会的利益があるか、というまったく自明でない問題は、まず純粋に社会・経済的見地から追求されるべきである。自然科学としての問題は、どういったパフォーマンスがだせそうなのかということに尽きる。本稿では、そのなかでも、技術的フィージビリティはさておき、地震という物理現象の性質からみて、予知は原理的には可能そうなのかを議論する。

地震学の正当的・伝統的な「見立て」は、地震のサイズは、小さな規模で開始した動的破壊が、不均質な破壊成長抵抗の場でいつ止められるかによって決まる、実質的には偶然に支配されたもので、どこまでいくかの確率が GR 則という経験則に従うという以上のことはいえない（以降 GR くじびきと呼ぶ）、よって、大地震の発生を予測することは原理的に不可能というものである。この「見立て」に反論することが本稿の目的であるが、わたしの考えた限り、GR くじびき説がなにか物理の根本的法則に反するわけではない。しかし、様々な地震の観察、および、その発生メカニズムに関する現在の物理的理解からして、現実はそのようではなく、大きな地震が発生しやすい状態というのが決定論的な意味で存在するとみていいのではないか、という提案を行う。

Sykes *et al.* (1999) は、脆性破壊は非線形現象だから地震現象はカオスであり、また、GR 則はシ

ステムが自己組織化臨界状態 (SOC) にあることを示すから、地震予知は原理的に不可能であるという考え[例えば、Geller (1997), Main (1997)] は、地震予知が「特定の」断層セグメントが「次」に大きくすべるのはいつかを問うているに過ぎないことに注意すれば、全くの的外れであると指摘している。さらに、地震の準周期性や、第一種空白域の概念が統計的に支持されない[Kagan and Jackson (1991)] という点についても、特定の断層セグメントに関してはそうではなく、そのセグメントへの応力蓄積の追跡という原理 (Reid (1910) の弾性反発説の延長) で中・長期的な予測は可能であると論じている。測地観測と深部岩石の研究によって得られた、地震セグメント (ロック域) への载荷の直接的な要因が、主にロック域外側の定常的な滑りであるという最近の理解 [Scholz (2002)] は、応力蓄積の推定にとって大きな進歩である。準静的な滑りのモニタリングについては、地殻変動観測に加えて、トレマーや小繰り返し地震を利用した革新的な手法が発展している[例えば、小原 (2009), Igarashi (2010)]。また、隣接領域での大きな地震滑りによる応力の増減を現実的な幾何配置で勘定することも有効とおもわれる[例えば、堀 (2009)]。応力蓄積の推定を精密化して発生時期の予測精度を、繰り返し間隔の統計による倍半分の世界から向上させることは、ポスト神戸の見直し以降の新予知計画で中心的な課題として追求されている。

2. 特別な準備過程

しかし、予知は原理的に可能かという問の核心は、まだまだ応力が低いから大丈夫ということではなく、そろそろ危ないということがどの程度に推定しうるかであろう。Sykes *et al.* (1999) も指摘する通り、応力蓄積の追跡で平均繰り返し間隔の数分の一以上の絞り込みをすることは、初期値と閾値の推定精度を考えれば、非現実的であり、やはり本命の問題は、単なる漸進的なテクトニックな载荷ではない、特別な準備過程が大地震発生への過程に含まれているかということだろう。この問題に対して明るい答がでる可能性を感じていたからこそ、ブループリントにもとづく地震予知

研究は始まったのであろう。Sykes *et al.* (1999)は、特別な準備過程の代表格である震源核と大地震の予知可能性の関係については「未解決」としている。本稿では、4節以降、今世紀になっての震源物理学の新たな知見を踏まえて、地震破壊域が先行的に壊れ始めるというタイプの準備過程による地震予知の可能性を論じる。

大地震発生の切迫を示す特別な準備過程があるかという問いに答えるためには2つのアプローチがある。ひとつは徹底した観測によって、大地震の発生以前に、なにか変わったことがおこる傾向がないかを調べる経験主義である。神戸地震による見直し以前の予知計画では、前兆らしきもの[気象庁地震火山研究部 (1990)]は多数みつかったが、はっきりしない、という結論がえられている。この前兆らしきものとその定性的物理解釈は茂木 (1998)によくまとめられている。

神戸地震による見直し以前の時代の地震予知計画のシンポジウム講演集をよんでみたが、実用的予知という目標に対する意識が強かったせい、1対1対応に近い「再現性」のある「信頼できる」前兆現象をみきわめたいという方向性が強く感じられる。しかし、地震の動的成長過程に偶然的要素がはいっている以上、前兆現象にそういった性質が弱いのはあたりまえであって、それが「特別な準備過程」など幻で地震のサイズはGRくじびきであるという証拠にはならない。むしろ、統計的に地震発生と十分有意に相関していると認められる短期的(テクニクな応力蓄積の影響を無視できる時間)先行現象がひとつでもあれば、1対1にはほど遠くても特別な準備過程が実在する証明になる。

それなら、大地震の2割程度には前震がつくんだから、それでいいじゃないか、問題は、それが事前に「前震だ」と判別できないことだけであって、実用性はなくても、「特別な準備過程」は大地震の2割にはあるんだろ、といわれそうだが、最近この議論が成りたないことが証明されてしまった。余震という現象とGRくじびきだけで成りたつETASモデル[Ogata (1989)]で地震のカタログをつくと、ちょうどこの程度の割合で前震が出現することになるのである[Helmstetter *et al.* (2003)]. 前震という現象は、地震は余震をトリガすることを別の角度からみたにすぎず、さらには、前震のb値が低いという傾向さえ、大きめの地震がおこれば、かなりの余震がつくから、大地震は、比較的大きな地震の余震としておこるケースが相対的に多い、というだけで概略説明可能なのである。2割のなかのさらに一部である震源域に高度に集中するケース[大中・松浦 (2002)]に関しては、直前1時間に多数の微小なリピーターがおこるようなものまでみつかっており[Bouchon *et al.* (2011), Doi and Kawakata (2012)],

ETASでは説明できない特別な準備過程が起こったケースだと信じたいが、ここでいいたいのは、余震という現象があることで特別でないものが特別にみえてしまうことに注意が必要だということである。この「ETASみかけ前震」を使うだけで、100をこえる確率利得をもって大地震を短期的に予測することができる[Helmstetter *et al.* (2003)]が、それは、本稿で議論する「特別な準備過程」にもとづく地震予知ではない。

経験的アプローチは、本稿の主題でないので、これ以上は触れないが、自然科学の王道である。しかし、1対1的に近い明白な相関をもつものでなければ、大地震のような低頻度の現象について相関を統計的に評価するには、非常に長い時間がかかるだろう。

特別な準備過程に対するもうひとつのアプローチは、大地震が発生する物理メカニズムの理解から、なにがおこりそうかを想定する演繹的なものである。最たるものは、不均質材料の脆性破壊においては、巨視的破壊は、先行する多数の微小破壊の合体から始まる[佐藤・雷 (2009)]という、インタクトな岩石の破壊実験に基づく論である。いわば断層が「壊れ始めている」というタイプの準備過程である。壊れ始めずに壊れることはできないから、必然的な準備過程ということになり大変人気があった。微小破壊の発生とそれに伴う間隙水の移動で種々の現象を予測したダイラタンシーディフュージョンモデル[Scholz *et al.* (1973)]は地震予知計画でも重視され、地震発生過程の物理的理解とそれに基づく観測での検証という側面が強化された。しかし、必然的なはずの現象が観測されないでおこった地震が多く、地震学者の多くは予知に対して、再び悲観的に考えるようになった。

少なくとも中規模以上の地震は、過去に何回も地震滑りをおこし、インタクトな岩石より圧倒的に強度の低い既存断層の再滑りであるという理解がほぼ完全に受け入れられている現在では、摩擦震源核が特別な準備過程のなかでも本命的な位置にある[Scholz (2002)]. 地震がおこるとは、外部からの载荷の増加をまたなくても滑り域が自発的に高速拡大する(以後動的破壊とよぶ)ということであるが、そのためには、先行して滑る領域があって十分な応力集中が準備されていることが、エネルギーバランスの観点から必要である。摩擦実験で、臨界サイズまでは準静的な滑りで震源核が成長することが示されたこと、次節でやや詳述するように定量的な物理理論で裏づけられていることなどが信用の背景であるが、本稿でのポイントは、震源核も「壊れ始めている」タイプのメカニズムであるがゆえに、前述の微小破壊とおなじく「必然的な準備過程」として位置付けられていたことである。

3節では、この震源核というプロセスを認めるだけでは、地震予知が可能そうだという結論にならないことを論じ、そこから本稿の主要な論点となるが、その前提として、準静的に壊れ(滑り)始めるということ自体は高い一般性をもって認められると指摘しておく。本震によるステップ的応力変化から少々の時間遅れをもって発生する動的破壊である余震という現象や、隣あう断層セグメントで、少々の時間遅れをもって大地震が連続する傾向などは、地震が一般に遅れ破壊であることを強く示唆する。さらに、現在では、岩石を含めほとんどの材料の摩擦滑りが閾値的現象ではなく、滑り速度が載荷剪断力と(面のそのときの物理状態できまる)摩擦強度の差の連続関数としてあらわされる **Rate- and State-dependent Friction (RSF) law** に従うことが知られており、余震の時間遅れや震源核、および動的破壊の発生だけでなく、余効滑りや、様々なスローイベントが **RSF** 摩擦で統一的に説明されている [Scholz (1998), 芝崎 (2009)]. 滑り速度が(応力-強度)の連続関数になるというのが肝であるが、このことは、摩擦滑りにおいて広い一般性をもつはずだということが微視的物理解から定量的に説明されている [中谷・永田 (2009)].

遅れ破壊的性質を利用して、脆性破壊の切迫度を診断することは工学的に行われており、脆性破壊だからムリという理屈は地震にも通用しない、と片づけてしまえる。ここまでは、ガラパゴスナマズ [ゲラー (2011)] の諸先輩方が論じている。にもかかわらず、「地震の場合には」原理的にムリという論が強いのは、地震専門家のなかでの論争の核心が、そんな初歩的なことではなく、「たまたま止らなかったのが大地震なのか」問題だからであり、本稿は、21世紀のガラパゴスナマズとしてそれに反論するものである。

本稿では、震源域(の一部)が「壊れ始めている」というタイプの準備過程を中心に議論する。これは Ishibashi (1988) が **physical precursor** とよんだもので、まさしく特別な準備過程である。摩擦滑りといえども物的損傷を伴う [例えば Nagata *et al.* (2008)] から、さまざまな付随現象を産みださう。一方、Ishibashi が **tectonic precursor** とよんだ、本震破壊域の外でおこるなんらかのイベントによるローディングのふらつきについては、漸進的でないという点では確かに特別な準備過程であり、それが地震発生のタイミングに影響を与えるということは当然期待されるが、概念としては、載荷の増減を追跡するという長期予測に属するので、今回の論考の対象とはしない。しかし、近年の測地・地震観測の充実によって、ローディングはふらつくものであり、大地震の発生と対応している例も多く報告されている [例えば, Roeloffs (2006), Shelly (2009)]. 特に、過去に前兆的とされ

た地殻変動で大きいものについては、ロック域以深の滑りと結論されている場合が多く、地震発生のタイミングが外的要因で強く支配されている可能性を軽視するものではないが、「地震の予知は原理的に可能なのか」という長い論争のコアの部分、すなわち「たまたま止らなかったのが大地震なのか」という問には関わらないので、これ以上議論しない。なおロック域外部からの高圧間隙水注入のような外因性の強度低下についても同じ理由で議論に含めない。

3. 震源核の大きさ

さて、地震発生の不可避的な準備過程として準静的な震源核の成長があるはずなのに、どうして「原理的に不可能」だという説が説得力をもつのだろうか？ 答は簡単で、震源核の大きさと、地震の最終破壊サイズが相関しなければならないアプリアリな理由はないからである [吉田・加藤 (2005)].

震源核の臨界安定サイズ L_c は、既滑り域と未滑り域の境の応力集中から計算される静的エネルギー解放率 G (外部載荷の2乗、および既滑り域の長さの1乗に比例) が、断層の摩擦の性質できまる破壊エネルギー G_c (= 静・動摩擦の差とその遷移に必要な臨界滑り距離 D_c の積) と等しくなるという条件できまり、岩石中では、 D_c の1万倍のオーダーになる。地震サイズと G_c の非直感的なスケールが本稿の鍵であるので、混乱をまねかないように明記しておくが、ほぼ全ての文献と同じく、本稿をとおして G や G_c は単位断層面積あたりのエネルギー量であり、例えば、大きな断層で G_c が大きいといったときに、それは決して、面積をかけて総エネルギー量が大きくなるという話ではなく、単位面積あたりの量が大きいという意味である。

準静的プロセスであることを念頭において低速滑りの摩擦実験でみられる $D_c < 1 \text{ mm}$ をあてはめると、臨界核サイズ L_c は 10 m 以下ということになる。問題は、 10 m を超えて動的になった破壊がどこで止るかについて、震源核理論はなにもいっていないことである。また、摩擦実験でおこる動的破壊は、試料断層面全体を壊すので、これも破壊の停止についてはなにもいっていない。

そうすると、大地震の破壊域の一部を破壊する 10 m 以下の小さな地震が実際にあるのだから、天然の断層でも $D_c < 1 \text{ mm}$ であるはずであり、原理的にできるのは、 10 m 以下の震源核を捉えるたびに、 M_0 以上の地震がおこるという予知をすることだけだろうというのである。これを仮に断層ツルツル説と呼ぶことにする。もちろん、断層ツルツル説だって、破壊の停止については何もいっておらず、「応力と強度の複雑な分布」によって、破壊の停止は実質的には偶然に支配されるのだというおきまりの話をされるだけである。「複

雑な分布」を具体的に考えずして進歩はない。

かように、地震発生物理は、地震予知の原理的可能性について本質的には何もいえなかったのである。しかし、今世紀にはいつてその状況は変化している。4節でその端緒となった破壊エネルギーの観測からの示唆を、5節では、それにもとづいて「強度の複雑な分布」を具体的に考慮することで破壊の停止までを取り扱う新しいモデルを通じて震源核による予知の原理的可能性を論じ、さらに、6節では、「壊れ始めている」タイプだが震源核とは別種の準備過程による予知の可能性を論じる。

4. 破壊エネルギーと地震のサイズ

断層ツルツル説は、なにか根本的な物理法則に反するわけではない。しかし、Ide and Takeo (1997)が、神戸地震の動的破壊時の摩擦滑り弱さを観測地震波形から逆算してみせることに成功して以来、地震の動的な破壊の実証的・定量的な研究が進み、ツルツル断層は、地震の実態に全くにあわないことがわかってきた。ツルツル断層では臨界核サイズを超えて動的になった滑り域は、理論的には、すぐにS波速度ぎりぎりまで拡大するようになり、available energy (解放された歪みエネルギーから残留動摩擦による散逸をさしひいたもの)のほとんどが弾性波動として放射されることになる。実際には、破壊の拡大速度は、ほとんどの場合S波速度の7割程度であるし、観測された波動エネルギーを勘定してみると、available energyの半分程度[Baltay *et al.* (2011)]で、残りは破壊エネルギーに喰われているのである。別の言い方をすると、観察事実として、地震は自分がおこした断層のもつDcの2倍ほど滑ったら止まってしまうということだ。これは、大きな地震についても小さな地震についても同様の結果であって、Gcが地震の最終的破壊域サイズ(空間1次元のサイズLで表すことにする)に比例するという破壊エネルギーのスケールリング[例えば、Abercrombie and Rice (2005)]が広く受け入れられるようになった。

地震がいつとまるかで結果として決まるはずのLと、断層面が予め摩擦物性として持っているはずのDc、あるいはGcが比例するというのは気持ちの悪い話である。これを解決するには地震破壊が止まるメカニズムを具体的に組込む必要がある。上述の観察によれば、GはGcとかけはなれて大きくなってはいないから、地震を止める自然なカラクリがありそうだと思う。こうして、今世紀に入ってやっと破壊停止のメカニズムへの本格的なとり組みがはじまり、地震発生の物理が予知の原理的可能性の問題の核心にリンクするようになった。次節からいよいよその問題を論じるが、前提として、連続弾性体中でいったん動的になった破壊は、Gがその時点の破壊サイズ

に比例して増加するという正のフィードバックが働いたため、容易なことでは止まらないことを認識する必要がある。Rice (1993)は、離散的なバネ-ブロック連成モデルにおいて地震滑りの履歴によって自然に複雑な応力分布が維持され、様々なサイズの地震が産みだされる結果[例えば、Carlson *et al.* (1991)]は、モデルが連続体の適切な離散化になっていないためのアーティファクトであり、弾性体中のツルツル断層では、システム全体を壊す地震が繰り返すような姿しかうみだせないことを示した。断層の破壊を途中でとめるには、不均質な環境を設定するしかないということだが、少々の不均質ではあまり満足のいく結果は得られていない。次節では、思い切った不均質を導入したモデルを検討する。

5. 階層アスペリティモデルと震源核サイズ

破壊サイズとともにGcが増えていくメカニズムについてはいくつか提案があるが、本稿では、破壊の停止の部分まで明示的に議論しているIde and Aochi (2005)を出発点とする。彼らは、大きなGcをもつ大きなまとまった領域(大パッチ)の中に、部分的に小さなGcをもつ狭い領域(小パッチ)をおくことを提案した。このようなモデルを以後IAモデルと呼ぶ。これは、基本的には小パッチの破壊が小地震、大パッチの破壊が大地震になるモデルである。設定の蓋然性については8節で議論するとして、ここでは設定の特徴と、地震予知への含意を議論する。

4節で述べた破壊エネルギーの観察にあわせて、各パッチのGcは、対応する臨界核サイズLcがパッチサイズの数分の一となる程度に設定する。Gcの値はパッチの半径に比例することになるから、考慮する地震のサイズ範囲に応じて、何桁にもわたるGcの不均質が設定される。Ide and Aochi (2005)では2桁以上にわたるGcやパッチを扱っているが、ここでは、簡単のために大と小の二つのサイズだけで考える。

小パッチのサイズを大パッチのLcより小さく設定すれば、小パッチが地震をおこしても、その応力集中では大パッチは破壊しない。大パッチが地震をおこした場合には、もちろん小パッチも破壊する。大パッチ破壊中の小パッチの役割は、高周波成分を少し増やす程度であって、大パッチの成長がどこまでいくかには影響しない。大は小を気にしないというのは、弾性的応力集中からの帰結であり、それがなりたたない基石モデル[大塚(1971)]のようなものは、地震物理の根本的な部分を見落している。

各々のパッチの地震が途中で止まることは滅多におこらない。破壊核の臨界サイズがすでにパッチの数分の一と大きいので、はじまった破壊をパッチのサイズ以下でとめるほどの応力ムラができることは難しいからである。したがって各パ

ッチは、途中で止まることのない動的破壊の最小単位としてふるまう。アスペリティという言葉は様々な意味に使われるが、分割不可能な破壊の最小単位であることは常に暗黙の仮定である（ここを外せば、アスペリティという概念はなんの意味もなくなってしまう、最後の一線である）。

オリジナルのアスペリティモデル[Lay *et al.* (1982)]では、アスペリティの外側は応力がたまらないクリープ域としたので、破壊の最終サイズも規定してしまっている。IA モデルの場合は、パッチの外側は、より Gc の高いバリアであり、場合によっては、後で述べるように、外側の大きなパッチを破壊する cascade up が起りうるが、基本的にはそのパッチだけの破壊で終わってしまい、つまり「どこまで広がるか」も基本的にはきまっている。この意味でも、IA モデルは、アスペリティモデルに階層性をもたせたものであると位置付けられる。以後、階層モデルの大パッチを大ペ（大アスペリティの略）、小パッチを小ペとよぶ。

なお、IA モデルは、様々な特徴からフラクタルアスペリティモデルと呼ばれることもあるが、Seno (2003)がフラクタルアスペリティとして提案したような、小さいアスペリティの密集クラスターが大きなアスペリティであるというモデルとは全く異なる。小さな Gc の小パッチが密集したものをまとめても Gc は大きくならない（あくまで単位面積あたりで規定された量である）から、破壊エネルギーのスケールリングを満たせない。小があつまって大をつくる話ではなく、大のなかに小があつてよいことを認める、あるいは、高い Gc が連続的に分布する広い領域の存在（すなわち大ペ）を認めるというのが肝である。

Ide and Aochi (2005)の論文自体の眼目は、cascade up である。小ペは基本的にその段階で破壊が終わる程度に小さく設定しているが、小ペがもうひとつ隣にあればそれは連動して壊れる（連動という言葉は、同サイズのペの連続的破壊に限定して用いることにする）。そうすると、小ペを2つあわせたサイズのクラックと同程度の応力集中ができ、これが、大ペの Lc より大きければ、そのまま大ペの動的破壊を起こしてしまう。この cascade up のメカニズムによって、大ペの Gc にみあう大きな準静的震源核（以下、大核）をつくることなく、大ペ全体がこわれる大きな地震を起すことが可能になる。もちろん、周囲に連動できる小ペがない場合には小ペの地震はそれだけでおわる。こうして、地震サイズと破壊エネルギーのスケールリングを満たしながらも、どんなサイズの地震でも、等しく小さい震源核とその破壊からはじまり、地震の最終サイズは、パッチのランダムな配置によって実質的には偶然で決まるといって、正当的・伝統的な地震観が成立しうると示したのである。

地震の動的破壊の階層的な成長自体は、Fukao and Furumoto (1985)が提案しているが、弾性体の応力計算をする具体的な物理モデルによって、地震の停止までを扱うことができたのは地震発生物理において画期的な進歩であり、これでやっと「地震予知は原理的に不可能なのか」=「たまたま止らなかったのが大地震なのか」という問題を具体的に考えられるようになった。

さて、小ペの配置の偶然しだいで、小さな震源核しかないのに大きな地震がおこりうることは確かめられた。しかし、IA モデルは、そもそも、大ペに高い Gc を認めるモデルである。ならば、大ペ自体の大きな震源核が成長して地震をおこすことも十分可能であろう。Ide and Aochi (2005)は、準静的な滑りは計算せず、最小ランクのペをひとつ選んで破壊してみたときに、その破壊がどこまで広がるかを計算したものであり、そもそも準静的核は考慮していない。そこで、野田ら (2012)は、階層パッチモデルに、準静的滑りを計算するための RSF 摩擦則と、外部定常滑りによるローディングを組みこんで、地震サイクルのシミュレーションをおこなった。結果は、小ペサイズが大ペの Lc と同程度の場合は、小ペだけが壊れる地震、小ペが cascade up しておこる大地震、大ペ自身の大きな震源核ができてそこから始まる大地震が、長い歴史のなかですべて起こり、それらの割合が、小ペのサイズに依存するというものであった。つまり、大地震に大核という特別な準備過程が伴うこともあるというのである。したがって原理的不可能論者のいうとおり、大核は大地震発生の必要条件ではない。しかし、一方で、大核なしで大地震がおこったケースの発見が、次の大地震に大核が先行する可能性を排除するものではないことになる。毎回同じでないからといって大地震の発生に、地震予知の意味での predictability [Sykes *et al.* (1999)]がないということにはならない。複数回の地震サイクルのゆらぎの詳細まで決定論的な力学モデルで再現した Barbot *et al.* (2012)の Parkfield モデルは興味深い例である。

6. 広域な固着の剥れと熟れ熟れ状態

ここまでは狭い意味での震源核、すなわち、滑り域が臨界サイズに達してそのまま加速し、動的破壊にいたるようなものがどの程度期待できるのかということ議論した。3次元のシミュレーションをアニメーションでみていると、大であれ小であれ、震源核の形成は単純な解析近似式 [Dieterich (1992)]通りにきれいにおこる。一方で、3次元のシミュレーションでは、固着域が外側から剥れてゆく[例えば、Kato (2003)]（といっても、滑り速度は、プレート相対速度よりも十分低い）。時にはプレート速度を超える過渡的なスロースリップイベント(SSE)になることもある[Lapusta

and Liu (2009)]. しかし、大ペの剥れは大ペ地震サイクルのかなりの長い期間を通してじわじわ進行するし、ロック域内での SSE も、時期・規模とも気紛れで、地震の発生の切迫とよく対応するわけでもない。しかし、野田ら(2012)は前節で触れたシミュレーションのなかで、おもしろいことに気づいた。cascade up の大地震は、大ペ自身の震源核の形成を待たずにおこったものであるから、時期が前倒しになっていると期待されるが、そういう効果はほとんどみえない。そこで、大ペ全体での平均滑り速度の推移をみてみた。cascade up する小地震が小ペでの小さな核形成をおこす少し前の期間で大ペ全体での平均速度をみると、小地震で終る小地震の小核形成の直前に比べて、あきらかに大ペ平均滑り速度が高く、むしろ大地震に大核が先行する場合の大核発生直前の大ペ平均速度に近いのである。RSF では、すべり速度の対数はつねに強度と応力の差と線形な関係をたもつから、大ペ内のかなり広い部分で平均的に強度が低下している状態でない、小地震がおこっても cascade up はできないということを示唆する。つまり、最終的な大核がスキップされるにしても、実は、いまにも大核ができそうなくらいに、大ペ全体が熟れきっていないと大地震はおこれないらしいのである。これは、十分に「特別な」壊れ始めているタイプの準備過程といえるだろう。あくまで必要条件的準備過程でしかなく、大核のように現行犯逮捕というわけにはいかないが、前倒し効果がないということは、熟れ熟れ状態はそう長く継続しないということであり、切迫性をかなり絞りこめそうである。

ただし、野田らは、熟れ熟れ状態について、なにかのパラメータで閾値を設けてすっぱり判別できるようなものではなさそうだと指摘している。たとえば、大ペ平均速度がかなり高い状態でも、cascade up しない小地震がおこることはある。しかし、その場合、余効滑りが異常に大きく、そのあと大核が成長して大地震をおこしてしまう。逆手にとれば、よく熟れた状態を、応力擾乱への応答性で検出できるということになる。2011 年東北太平洋沖地震の数年前から、その破壊域内の広い範囲で出現した変化 [例えば, Suito *et al.* (2011), Tanaka (2012), Kato *et al.* (2012), Ohta *et al.* (2012), Ito *et al.* (2012)]には熟れ熟れ状態を思わせるものが多い。ここでいう熟れ熟れ状態は、面の強度低下であるから、物的損傷を伴う physical precursor であり、非力学的な付随現象もおこしうる。測地は、滑り速度に線形な感度しかもたないが、面の強度の実態ともいえる粗面の真実接触面積は、滑り速度の対数に線形な量である [Nagata *et al.* (2008)]. こういうものの変化は、滑り速度が、たとえば、0.01 $\mu\text{m/s}$ から 10 $\mu\text{m/s}$ に変化する広域剥れの段階のほうが、狭い領域でのたとえば、0.1 mm/s から 1 mm/s への変化である、最終段階

の震源核での変化よりずっと大きいと期待される。非力学的な前兆現象らしきものの多くは、震源核でも载荷のふらつきでもなく、熟れ熟れ状態をひっかけていたのかもしれない。

7. 議論 1. 静的 G_c のスケーリング

破壊の停止機構までを視野にいれた階層アスペリティモデルは、現在までに知られている地震の姿を全体的確にとらえている。本稿では、大きな地震をおこす大パッチは大きな G_c をもつ、という IA モデルの本質的な特徴に着目して、大地震に先行する大核は、cascade up でスキップされやすいとはいえ、実際に出現する可能性があること、さらに、大ペ内の広域な剥れ（強度低下）の十分な進行が大地震発生の必要条件であって、これを、十分条件的な狭義の震源核とは別種の、しかし「壊れはじめている」タイプの特別な準備過程として認識すべきであることを論じた。どちらも、静的に大きな G_c があるということが前提である。実は、4 節で述べたスケーリングに用いられている G_c は、本震の動的破壊中の G_c を本震の動的破壊の観測から推定したものであって、Andrews (2005) や Rice *et al.* (2009) が提唱するように、動的破壊の最中だけ additional に巨大な G_c が生じる散逸プロセスを仮定して説明することもできる。一方、わたしの主張は、静的な G_c が既に十分大きくないと成立しない。

この点については、まず 2011 年東北太平洋沖地震においては $M9$ の破壊域の一部で 2 日前に $M7.3$ の地震がおこって止ったことを思いおこしてほしい。 $M7.3$ がつくった 50km サイズクラックの応力集中に周囲が 2 日間耐えたのは、 $M9$ パッチの静的 G_c が非常に大きかったことを示す。Kato (2012) は、もっと一般性のある指摘をしている。深部定常滑りによるローディングは、ロック部に対してプレート速度と前の地震からの経過時間の積との食い違いによる応力集中をつくり、その G がロック部のもつ静的 G_c に達した時点で地震になるのであるから、地震の繰り返し時間から静的 G_c の推定ができると指摘し、南海パッチに対して 0.1-1 MJ/m^2 、東北 $M9$ に対して G_c が 6-20 MJ/m^2 とみつもっている。とてもタフでないと数 m もの食い違いによる応力集中に耐えられるはずがないのは当たり前なのだが、つい応力集中のことを忘れて、静摩擦強度 vs 载荷応力という子供でもわかる図式に囚われて、こんな基本的なことがいままで指摘されなかったのだろう。

さらにもう一歩進めると、食い違い量を、破壊域サイズ L で割ったのが静的応力降下量 ($\Delta\tau$) であるから、実は、 $\Delta\tau$ の地震サイズ非依存性は静的 G_c とパッチサイズ L との比例則を示していると考えることもできる。実際、パッチサイズに依存しない G_c をおいて地震サイクルを回してみると、パッチ径の -0.4 乗で、大きいパッチほど $\Delta\tau$ が小さ

くなってしまう[吉田, 私信]. また, よく指摘されることだが, 応力降下一定則の理由を静摩擦と動摩擦の差がスケールによらないこととする単純な説明は, じゃあ, なぜ $\Delta\tau$ が深さに比例して増えないのか, という疑問に答えられない. 静的 G_c に対して IA モデルのようなスケーリングを仮定することの妥当性は, よく確立した地震の静的な相似則からも要請されるということだ.

野田ら(2012)は, パッチ径 R の L_c に対する比を脆性度とよび, それを 3 と設定した. 脆性度が 1 以下ではスロー地震しかおこらず[Kato (2003)], 逆に脆性度が高ければ, 準静的滑りの役割は小さくなる. 4 節で述べた G_c のスケーリングからすれば脆性度 3 は, 小さすぎはしないが, あれはあくまで動的 G_c の値である. 上に静的 G_c も R に比例し, 相当に大きいと論じたが, 動的なときだけ働く散逸プロセスを認めれば, 動的な G_c より小さいはずである. 前震領域や地震の初期フェーズからの推定では脆性度は 10 程度とされており[例えば, 大中・松浦(2002)], 野田らの設定した 3 は甘過ぎるかもしれない. 脆性度をあげれば, cascade up はおこりやすくなるし, 大核自体も小さくなるだろう. 熟れ熟れ状態の規模も小さくなるだろう. しかし, 熟れ熟れ状態の継続時間が短くなるという, 有利な効果も考えられる. その場合, 数日から数時間前に局在するような前兆現象[例えば, Nemeč *et al.* (2008), Le *et al.* (2011)]すら, 現行犯的な直前過程ではなく, 熟れ熟れ状態による短期前兆に過ぎない可能性がある.

8. 議論 2. 小ペの分布

IA モデルのような G_c の分布パターンにしっかりした物理的裏付けがあるわけではない. Ide and Aochi (2005)もそうしているように, 不均質の空間波長と G_c の比例関係は, 断層形状のフラクタル性と関連して, 以前から提案されてきた[大中・松浦 (2002)]. しかし, その議論は, 実験試料の面の粗さ(フラクタル上限波長)と G_c の関係, あるいは, 粗面摩擦の微視的モデルを基礎にしようとするもので, これらは, 面のもつフラクタル上限波長より十分広い範囲の平均の結果としてなりたつものだから, 断層のフラクタル上限波長以下でおこる地震へ適用できる保証はない. 結局, 大きな地震のことは大きなまとまりで大きな G_c を採用し, 小さな地震のことは, 小さなまとまりで小さな G_c を採用して考えるしかないから, ひとつの場所に複数の G_c をアサインしようか, などということになり, (それは正しいのかもしれないが) とらえどころのない話になる. それに対して IA モデルは, 空間の一意的関数として G_c をアサインしており, 大胆だがすっきりしている. 5 節で述べたように, 大の破壊中には, 小の存在などどうでもよいことなので, 破壊が止まるかどうかを考えるには, IA モデルで用が足り

るだろう.

では, 小ペの密度はどれくらいだろうか? フラクタル面ではどこであろうと, 一部分だけとりだせば, 短波長しかみえないから, ありとあらゆるところが小ペであるということになりそうな気がするが, この議論は正しくない. 不規則形状の接触面のある部分を取りだして仮に滑らせたとして, その部分の平均としての挙動は, 二面のそこでの位相関係によって, 滑り弱化にも滑り強化にもなりうる. その部分だけで地震をおこするのは, 十分鋭く滑り弱化するような位相関係のところだけである. IA モデルの小ペは, そういう, そこだけで地震を起しうる部分を取りだしたものと考えるべきである.

$b = 1$ の GR 則に含まれる小地震が全て, 大ペのなかの小ペであるとする, 大ペは小ペで埋まることになり, 全ての地震が cascade up でおこりそうだが, それはやりすぎである. 小地震の多くは大断層の部分破壊ではなく[例えば, Hauksson (2010)], もともと大地震には成長しえないものである. あるひとつの大断層の一部が滑った地震だけをとりだせば, 小地震の数は, 大地震の頻度から GR 則で期待されるものに対して圧倒的に少ない[例えば, Ishibe and Shimazaki (2009, 2012)]. 「原理的に不可能」論者のいうほど, 大地震になりそこねた残骸が大量にころがっているわけではないのである.

したがって, 小ペの密度は, 小地震を, 大断層の一部(小ペ)の破壊とみなせるものと, そうでないものに区別する精度をあげて, 実際のところをよりよく推定するしかないだろう.

少なくとも, 大きな断層の一部が小地震として滑ったところは全て小ペをおいていいだろう. Ide and Aochi (2012)は, 過去の M7 級地震の場所に小ペをおいて 2011 年東北沖 M9 地震の破壊過程の詳細を再現している. それだけでは cascade が途中で止まってしまうので, 1 個だけ追加しているが, 観測データのある期間内に滑っていない小ペがあるのは当然である. なお, 日本海溝はプレート境界面が滑る地震だけで GR がほぼなりたちうる例外的な場所である.

もちろん, 小ペの独立地震がおこっていないからといって小ペがないとは限らない. 野田ら(2012)は, 小ペが大ペの L_c よりある程度以上大きければ, 小ペ独立の小地震も大核からの大地震もおこらず, cascade up の大地震のみになることを示している. 最も危険な大きめの小ペは隠れるのが得意だということだ. (厳密にいうとこの場合は, 小ペとはよべず, むしろ大ペの意地悪な内部構造というべきかもしれないが, IA モデルの小パッチではあり, 簡潔のため, 小ペと呼んでおく). 南海地震(M8)が繰り返し起こっている領域は, インターサイスマックな期間に, その一部が

滑った可能性のある M5 以上の地震が 1 つしかない [石辺ら (2008)]. M5 以上のパッチがないから、大地震には必ず大核が先行するとみてよいのか、それとも、かなり大きな小ペが隠れていて、その小ペの Lc 以上の震源核は生じえない構造になっているか、のどちらかであろう。後者の場合、小ペが「大きめ」な分、その Lc も大きめになるが、大ペの Lc とは格が違う。

9. まとめ

地震発生の物理モデルが破壊の停止までを本格的に扱えるようになったのは最近のことである。地震予知は原理的に可能かという論争の核心は、「たまたまとまらなかつたのが大地震なのか」という点であるから、地震予知と地震発生物理の本当のリンクはやっと始まったばかりである。

Gc と地震サイズがスケールアップするという観察を足掛りに Gc を空間的にうまく配置 (タフな大パッチのなかにフレンジな小パッチをおく) することで、この問題を具体的に扱えるモデルが提出された。この考えは、地震破壊に関する実に多くの重要な観察をうまく説明できている。このモデルにおいては、空振りの少ない現行犯的な直前準備過程である、大きな準静的震源核の形成は、小さな震源核しか先行しない小地震からの cascade up として大地震が発生することによってスキップされるので、空振りは少なくとも見逃しの多い準備過程といえる。

一方、cascade up の大地震ですら、それが可能となるには、大ペ内で広域の強度低下が、いまにも大核が発生しそうな程度におこっている必要があり、狭義の震源核とは別種の、しかし「壊れはじめていっている」というタイプの準備過程と考えることができる。これは、必要条件であるだけでなく、条件によっては、時期の切迫に関してかなりの絞り込み情報となる可能性がある。その検出には、広域にわたるわずかな滑り速度増加、強度低下=物的損傷による様々な付随現象に加えて、潮汐・小地震等の応力擾乱に対する非地震性滑りの応答増加が期待できる。

大きな震源核も熟れ熟れ状態も、大きな静的 Gc が実在することが前提であるが、現実はその支持しているようにみえる。一方、cascade up でおこつたろうという大地震の例は既にくつもあるのだから、小ペの大きさや密度についての推定を進めるべきである。そのためには cascade up して大地震になりうる、大断層上の部分破壊としておこつた小地震がどれだけあるかを理論と観測を融合させて評価するべきである。小断層でおこつた地震が大部分をしめる GR 統計は、地震予知の観点で重要 [ゲラー (2012)] な意味をもたない。ミクロに満すべきは断層の具体的な姿、マクロに満すべきは、ある場所だけがいつまでも滑り遅れていることはできないという

こと (Reid の考えの延長) だろう。

なお、本稿は、「原理的に無理」派が最も無理だと思っているという理由で physical precursor (大地震の震源域が壊れはじめていっているタイプの準備過程) の蓋然性に焦点をあてたが、外的な要因による地震発生時期への影響 (tectonic precursor) を軽視すべきだといいたいわけではない。また、小ペの密度うんぬん以前に、大ペのスペックがまちがってはいくどうしようもないから、時間軸によらないポテンシャル評価が正しくできていることは前提である。

10. 結論

「大きくてタフなパッチ=大ペ」というものを認める限り、最低限、大ペ熟れ熟れ状態という physical precursor が必然的準備過程として存在しそうであり、これにもとづく短期予知は原理的に可能である。観察からみて、タフな大ペは事実とおもわれる。熟れ熟れ状態から、さらに現行犯的準備過程である大ペ自体の震源核を経るかどうかは、小ペの詳細に左右され、ここには確率的要素がはいるが、大ペ熟れ熟れ状態自体は、大ペの Lc オーダー以上の粗視化情報で、決定論的な発想で扱えるだろう。地震は弾性体中の食い違い応力集中による現象だから、小から大への影響は限定的で、非線形現象だから全てを正確にしろないと予測性がなくなる、なんてことにはならないはずである。「実用的」にこだわらなければ、「壊れはじめ」の前兆現象を追求する予知らしい予知の研究は十分に成果がみこめる。もちろん、基石モデルや SOC の方が知的にグラマラスではあるが、現実の地震は、どうやら、意外とつまらない現象のようにみえる。

参考文献

- Abercrombie, R. E. and J. R. Rice, 2005, Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening?, *Geophys. J. Int.*, **162**, 406-424, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02579.x.
- Andrews, D. J., 2005, Rupture dynamics with energy loss outside the slip zone, *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2004JB003191.
- Baltay, A., S. Ide, G. Prieto, G. Beroza, 2011, Variability in earthquake stress drop and apparent stress, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L06303, doi:10.1029/2011GL046698.
- Barbot, S., N. Lapusta, and J.-P. Avouoc, 2012, Under the hood of earthquake machine: Toward predictive modeling of the seismic cycle, *Science*, **336**, 707-710.
- Bouchon, M., H. Karabulut, M. Aktar, S. Özalaybey, J. Schmittbuhl, and M.-P. Bouin, 2011, Extended nucleation of the 1999 Mw 7.6 Izmit earthquake, *Science*, **331**, 877-880.
- Carlson, J. M., S. Langer, B. Shaw, and C. Tang, 1991, Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff

- model of a fault, *Phys. Rev. A*, **44**, 884-897.
- Dieterich, J. H., 1992, Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength, *Tectonophysics*, **211**, 115-134.
- Doi, I. and H. Kawakata, 2012, A non-accelerating foreshock sequence followed by a short period of quiescence for a large inland earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11308, doi:10.1029/2012GL051779.
- Fukao, Y. and M. Furumoto, 1985, Hierarchy in earthquake distribution, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **37**, 149-168.
- Geller, R. S., D. D. Jackson, Y. Y. Kagan, and F. Mulargia, 1997, Earthquakes cannot be predicted, *Science*, **275**, 1616-1617.
- ゲラー ロバート, 2011, 日本人は知らない「地震予知」の正体, 双葉社, 185 pp.
- ゲラー ロバート, 2012, 防災対策と地震科学研究のあり方: リセットの時期, 日本地震学会モノグラフ, **1**, 5-8.
- Haucksson, E., 2010, Spatial separation of large earthquakes, aftershocks, and background seismicity: Analysis of interseismic and coseismic seismicity patterns in Southern California, *Pure Appl. Geophys.* **167**, 979-997
- Helmstetter, A., S. Sornette, and J-R. Grasso, 2003, Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: How do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JB001991.
- 堀高峰, 2009, プレート境界地震の機微と発生間隔変化のメカニズム, *地震* **2**, **61**, S391-402.
- Ide, S. and H. Aochi, 2005, Earthquakes as multiscale dynamic ruptures with heterogeneous fracture surface energy, *J. Geophys. Res.*, **110**, B11303, doi:10.1029/2004JB003591.
- Ide, S. and H. Aochi, 2012, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- Ide, S. and M. Takeo, 1997, Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, *J. Geophys. Res.*, **108**, 27, 239-391.
- Igarashi, T., 2010, Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20304, doi:10.1029/2010GL044609.
- Ishibashi, K., 1988, Two categories of earthquake precursors, Physical and Tectonic, and their roles in intermediated-term earthquake prediction, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 687-700.
- Ishibe, T. and K. Shimazaki, 2009, Seismicity in source regions of large interplate earthquakes around Japan an the characteristic earthquake model, *Earth Planets Space*, **61**, 1041-1052
- Ishibe, T. and K. Shimazaki, 2012, Characteristic earthquake model and seismicity around late Quaternary active faults in Japan, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **102**, 1041-1058
- 石辺岳男・中谷正生・鶴岡弘・島崎邦彦, 2008, アスペリティが部分的に破壊することはあるのか?, 日本地球惑星科学連合大会 2008 年大会, S143-008.
- Ito Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inzau, Y. Ohta, T. Inuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- Kagan, Y. Y. and D. D. Jackson, 1991, Long-term earthquake clustering, *Geophys. J. Int.*, **104**, 117-133.
- Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., and Hirata, N., 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *Science*, **335**, 705-708.
- Kato, N., 2003, Repeating slip events at a circular asperity: Numerical simulation with a rate- and state-dependent friction law, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **78**, 151-166.
- Kato, N., 2012, Fracture energies at the rupture nucleation point of large interplate earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **353-354**, 190-197.
- 気象庁地震火山研究部, 1990, 地震前兆現象のデータベース, 気象研究所技術報告 26 号, 329 pp.
- Lapusta, N. and Y. Liu, 2009, Three-dimensional boundary integral modeling of spontaneous earthquake sequences and aseismic slip, *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2008JB005934.
- Lay, T., H. Kanamori, and L. Ruff, 1982, The asperity model and the nature of large subduction earthquakes, *Earthquake Pred. Res.*, **1**, 3-71.
- Le, H., J. Y. Liu, and L. Liu, A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002-2010, 2011, *J. Geophys. Res.*, **116**, A02303, doi:10.1029/2010JA015781.
- Main, I., 1997, Long odds on prediction, *Nature*, **385**, 19-20.
- 茂木清夫, 1998, 地震予知を考える, 岩波書店, 254 pp.
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, 2008, Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06310, doi:10.1029/2007GL033146.
- 中谷正生・永田広平, 2009, 速度・状態依存摩擦とその物理, *地震* **2**, **61**, S519-526.
- Nemec, F., O. Santolik, M. Parrot, and J. J., Berthelier, Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity, 2008, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L05109, doi:10.1029/2007GL032517.
- 野田博之・中谷正生・堀高峰, 2012, 速度・状態依存摩擦則で支配される断層における階層アスペリティの地震サイクルシミュレーション, 日本地震学会 2012 秋季大会予稿集, A31-07.
- 小原一成, 2009, フィリピン海プレート沈み込みに伴う西南日本のスロー地震群の発見, *地震* **2**, **61**, S315-327.
- Ogata, Y., 1989, Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, **169**, 159-174.

- Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Inuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, and S. Miura, 2012, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L16304, doi:10.1029/2012GL052430.
- 大中康誉・松浦充宏, 2002, 地震発生の物理学, 東京大学出版会, 378pp.
- 大塚道男, 1971, 地震の起こり方のシミュレーション(第一部 一つの機械的モデル), *地震* **2**, **24**, 13-25.
- Reid, H. F., 1910, The mechanics of the earthquake, in "The California earthquake of April 18, 1906, Report of the state earthquake investigation commission, vol.2", Carnegie Institute, pp. 1-192.
- Rice, J. R., 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, **98**, 9885-9907.
- Rice, J. R., E. M. Dunham, and H. Noda, 2009, Thermo- and hydro-mechanical processes along faults during rapid slip, in *Meso-Scale Shear Physics in "Earthquake and Landslide Mechanics"*, edited by Y. Hatzor, J. Sulem, and I. Vardoulakis, pp. 3-16, CRC Press.
- Roeloffs, E., 2006, Evidence for aseismic deformation rate changes prior to earthquakes, *Ann. Rev. of Earth and Planet. Sci.*, **34**, 591-627.
- 佐藤隆司・雷興林, 2009, アコースティック・エミッション-地震発生過程研究のための実験的研究-, *地震* **2**, **61**, S535-540.
- Scholz, C. H., 1998, Earthquakes and friction laws, *Nature*, **391**, 37-42.
- Scholz, C. H., 2002, *The mechanics of earthquakes and faulting*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, New York, 471 pp.
- Scholz, C. H., L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal, 1973, Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, **181**, 803-810.
- Seno, T., 2003, Fractal asperities, invasion of barriers, and interplate earthquakes, *Earth Planets Space*, **55**, 649-665.
- Shelly, D. R., 2009, Possible deep fault slip preceding the 2004 Parkfield earthquake, inferred from detailed observations of tectonic tremor, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L17318, doi:10.1029/2009GL039589.
- 芝崎文一郎, 2009, 沈み込み帯深部で発生するスロースリップイベントのモデル化, *地震* **2**, **61**, S415-423.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, **63**, doi:10.5047/eps.2011.06.053.
- Sykes, L. R., B. Shaw, and C. H. Scholz, 1999, Rethinking earthquake prediction, *Pure Appl. Geophys.*, **155**, 207-232.
- Tanaka, S., 2012, Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.1), *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L00G26, doi:10.1029/2012GL051179.
- 吉田真吾・加藤尚之, 2005, 前駆すべりと地震の最終的サイズとの関係, *地震* **2**, **58**, 231-246.

地震予知研究の分析と提言

日本大学・理工学部・電子情報工学科 高野忠

これまでの地震予知研究は、東日本大震災により、地震を予知できるレベルではないことが明らかになった。その研究方法を見直すに当たり、十分な科学的検討を加えないまま国から研究資金を取ったり、反面予知可能性を否定し国民の期待に応えないという態度は、いずれも望ましくない。本論文は地震学者ではないという立場から、地震予知の研究からシステム開発までについて分析を試みる。地面の揺れを0次の現象とすると、応力・岩石破壊は1次効果、さらにその2次効果と考えて、予知に適した信号の種類とその検出方法を探索すべきである。この地震予知技術は、地震学と同一ではない。従ってこの解明には、異分野の協力が必要である。

1. はじめに

これまで公の地震予知研究は主に、いわゆる地震学者により遂行されてきた。そして予知の成功例は無いものの、それまでの研究方法は正しいとの自負に満ちていた[地震予知検討委員会 (2007)]。しかし2011年3月11日の東日本大震災により、日本あるいは世界の地震予知研究は、とても地震を予知できるレベルではないことが明らかになった。これは1962年のブループリント[地震予知計画研究グループ (1962)]以来続けられてきた研究を、見直すことに働いた[堀, 他 (2012)]。

筆者は岩石破壊実験を通して、地震探知(予知ではない)の可能性を追求してきた。この実績を踏まえて、地震学者ではないという立場から、地震予知の研究について持論を述べたい。最後に、筆者自身が行う電磁気学に基づく地震予知の可能性について、述べる。

2. 地震予知の歴史的背景

ブループリントでは、次のように謳っていた：「5年後にはある程度の、10年後にはかなり充分な地震予知に必要な観測資料が得られるようになる。――(途中省く)――地震予知がいつ実用化するか、すなわち、いつ業務として地震警報が出されるようになるか、については現在では答えられない。しかし、本計画の全てが今日スタートすれば、10年後にはこの間に十分な信頼性をもって答えることができるであろう。」。随分悠長な話である。さすがにこれでは国の予算も取れなかった。

しかし1964年新潟地震が発生し人が死ぬと、国・行政が慌てて、しかる後施策提案のため悪のりした。地震予知をしなければいけないと言う雰囲気、ブループリントの脆弱な研究計画に、国家プロジェクト「地震予知研究計画」としての予算を付けてしまったのである。そして1968年の十勝沖地震後には、地震予知連絡会ができ、地震予知のための体制強化と予算増が行われた[インターネット (2012)]。

ところが地震予知の成果が出ない。それでも政

府は予知が可能だというシナリオに拘り、1969年には看板を書きかえて「地震予知実施計画」として、さらに研究費増額を図った[ゲラー (2011)]。地震学者にとってその狙いは、地震観測網強化だったが、それは達成された。しかし地震予知は、できなかった。

さらに1995年阪神淡路大震災が発生すると、さらに地震予知のニーズだけが認識され、予算が劇的に増やされた。その結果、種々の観測システムが開発された。高感度地震観測網(Hi-net)や強震観測網(K-NET)、広帯域地震観測網(F-net)、首都直下地震観測網(MeSO-net)、さらには国土交通省によるGPSを利用した地形変動観測網GEONETも作られた。この時の理由が、「兵庫県南部地震の予測及び発生メカニズムを解明する為に十分な基礎データの蓄積が無かったことを教訓」とすることであった[ウィキペディア a (2012)]。この地震の前に観測網の増強が行われているのに、である。このように地震予知は、大地震が起こるたびに、焼け太りしてきた感がある。

極めつけは、東海地震説であろう。「駿河湾地震は切迫している恐れがある。正確に言うと、長期予測の結果として、前兆現象がいつ始まっても不思議ではない状態である恐れが強い。」という曖昧な文で[石橋 (1976)]、大衆が脅かされた。その動きを受けて、静岡県が驚き、国・政府が悪のりして、観測網の建設と公共工事に動き出した。

大衆を守るのが地方自治体や国政府の役割ではあるが、諸説の真偽を判断することも重要である。このようにニーズに対し、その基礎となるシーズを判断することが極めて甘い。このような資金の供与は、民間企業では考えられないことである。ただそのお陰で静岡県民が、地震に対して準備をしている姿勢は注目に値する。それは防災で最も大事なことであるが、巨額の金を要しない。

以上の地震予知研究の歴史では、挫折と看板掛け替えが度々行われたことが分かる。ところが3.11地震の後でも、地震予知を地震予測に言い換えるとのこと、まさしく日本の処理である。いまままで予知ができるというおきながら、できない

となると土台を壊す。これに対し欧米流なら、言葉は同じでも定義を変えて、従来の検討を反省し結果を生かしつつ新しい道を探る。例えば Caltec/NASA のジェット推進研究所は、以前ロケット推進系の研究していた。それがロケット研究を止めた後も、名前は同じにして中身を変えている。重要なのは名前ではなく、歴史の保存と中身なのだと言う認識である。

種々の分野の研究歴史を見ると、いかなる研究路程と言えども、必ず見直す必要がある。前の世代の決定事項については、現代の研究者が自分の責任で見直すことである。ところが地震予知の研究歴史においては、自発的な見直しではなく、地震勃発などに伴う外部批判に依っていることが目につくようである。

3. 地震予知と地震学

地震学者は地震予知研究を行ってきて、地震波の伝搬速度測定や岩石電磁気学の実験を行い、地殻構造を部分的に解明し、多大な成果を挙げた。

以上の地震学的方法も含めて、地震予知法として下記の方法が提案されている[ウィキペディア b (2012)].

- (1) 機械的方法： 地面の変位、ひずみ、低周波微震動、プレスリップ（前兆すべり）、前震の観測
- (2) 歴史や周期性： 歴史資料、津波堆積物調査、
- (3) 電磁気的方法： 地電流、地電位、ULF 法（300 Hz-3 kHz）、中波帯域（300kHz - 3MHz）、超短波・極超短波、電離層の状態
- (4) 化学的・地質学的方法： ラドン濃度、地下水、温泉
- (5) 生物学的方法： 宏観異常現象
- (6) 気象学的方法： 発光、地震雲

地面が揺れることが直接効果すなわち 0 次効果とすると、その源になる岩石への応力・破壊は 1 次効果であろう。上記項 (1) は殆どが 0 次か 1 次効果であり、地震学者が最も有力視しているものである。それにも拘わらず、過去の研究歴史の節々で、地震予知ができないことを悟り、かつ外部に告白してきた。その失敗の原因としては、彼らが得意とする方法からのみ、予知しようとしてきたこともその一つであろう。また生起確率にガウス分布を仮定せざるを得ないが、巨大地震はその延長に乗らないのではないか。何故なら事例が少なく、かつパラメータ依存性が把握されていないためである。

それに対し項 (4) は、1 次効果により岩盤に亀裂が入り、たまたまそこにあるラドンや地下水が噴き出したりすることなので、2 次効果と言えよう。同じく項 (3) は 2 次効果であり、項 (5) は有るとすれば電磁氣的刺激により引き起こされるであろうから、3 次効果である。項 (2) は、

地震が局所的現象であり、局所条件が変わらなければ繰り返し発生することを仮定している。

以上の事実を考えると、地震予知学は地震学と別物と言うべきである。例えて言えば、下記の対比で理解できよう。

肝臓の研究： 生理学、生態学 <--- 肝臓そのものを扱う。

肝臓の病の研究： 病理学、医学 <--- 肝臓から発するいろんな信号を扱う。

従って地震予知を研究する人は、幅広く興味を持ち、いろんな信号を扱うべきである。そしていろんな情報に埋没しないよう、諸技術の真偽、良否を、自ら考え自ら判断する必要がある。

現在地震研究者は予知に絡めて、ほぼ全員がアスペリティや断層が大事と言う[山本 (2009)]. しかしアスペリティは今のところ、非常に直感的な一種のアナロジーでしかないと考えて良いのではないか。何事も定量的に理解しないと、応用することはできないはずだからである。地震予知を研究する人はそうではなく、知識を広く求める必要があろう。上記項 (1) と項 (2) に限らず、項 (3) ~ 項 (6) に、興味を持つべきである[別冊宝島編集部 (2012)]. また地震雲や電離層の諸現象を信じないなら、その反証を考えるべきだ。

項 (3) に絡んでは国内外で、岩石に応力をかけると電流が流れたりポテンシャルが生じたりするという、実験結果が報告されている。これは、前述の 1 次効果から発生する 2 次的効果と考えられる。しかし低次効果より高次効果が顕著な例は、たくさんある。地震研究者は、地震コミュニティの外で行われている岩石実験[福井、他 (2001)] [Freund et al. (2006)] をどれだけ把握しているだろうか？

反面、地震を理解したいというなら、基礎研究としてやるべきである。しかしこの点でも、地震の原因は地震だけを調べても分からない、と言われている[寺田 (1924)]. 実際、地震の原因を考える上で重要な発見は、地震学者でなく軍事のための海底探査で行われた。海底の様子を調べて地震発生との関係を解析すると、極めて強い相関があることが分かったのである。これが海洋底拡大説となった。さらにこの説は、現在地震学で大きく取り上げられているプレートテクトニクスになったが、残念ながらこの仕事は外国で行われた[武村 (2009)].

4. 予知研究とシステム開発

それでは予知研究の成果として、予知の可能性が示せたとしよう。次はそれを社会に還元し、実際に監視・警報などの機能を実現するシステムを開発することになる。この研究段階からシステム開発への移行判断は、種々の要素を考えて慎重に行う必要がある。

その理由は、研究には頭を使うが比較的金を使

わないのが普通なのに対し、システム開発には頭をあまり使わないが金を使うという、大きな違いがあるためである。特に開発段階で国から巨額な金を貰うことは、社会契約の証しと考えるべきである。言い換えれば、地震予知研究に金を貰うことにより、予知を可能にするという責務を負うことになる。

また研究と開発の関係は、シーズとニーズとの関係[高野 (2007)]に連係する。すなわち研究の成果として技術基盤すなわちシーズが生まれる。そしてある需要すなわちニーズが生まれているところに、シーズが存在すれば実際の応用としてシステム開発が始まる。従ってシステムを開発する時は、シーズすなわち研究成果が確固として存在していなければならない。

地震予知はニーズとして極めて強いが、現在の研究レベルでは不可能であることが明らかになった[ゲラー (2011)]。そのように考えてみると、地震予知はまだシーズが確立していない。言い換えれば、大規模システムを開発すべき段階ではないと言うことである。

それができるかの如く言って、大きなシステムを開発することは、研究を縛ることになり、研究者にとっては天に唾するようなものである。地震を地震学として理解したいというなら、大金を要しない基礎研究としてやるべきであろう。研究と前述のシステム開発は、明確に区別し進めることが極めて重要である。今年の連合大会で住教授が言っていたように、気象分野で現業・システム開発と研究を分離したことを、見習うべき時がきた[住 (2012)]。

5. 研究者と行政

シーズが大規模システム開発に値するか判断するには、研究者と行政の距離が重要である。工学分野の研究者は研究成果を挙げた後、さらに研究の奥を極める方に行くか管理者の道に行くか、選択の自由がある。それと同じように、地震研究者にも選択があると思われる。それが、地震やその予知に研究を進めるか、行政に発言権を持つか、と言う分かれ道であろう。

日本地震学の現状を見ると、この分化が充分行われていないように感じる。これは世界的に同じ傾向がある。例えばイタリア・ラクイラ地震においては、行政担当者と共に地震学者が同一歩調を取った。そして地震学者は地震学者外からの地震予知情報を握りつぶし、結果として大惨事になった。そのため、行政担当者と共に地震学者も有罪判決を受けることになった。これはまた、前に述べた研究契約説に照らせば、当然のことである。

外部からの説を握りつぶすのと逆に、研究者が行政を煽るという場合もある。東海・東南海の地震説は、これに当たるのではないか。そこで大地

震が起こるという確証は無い。それにも拘わらず、日本の中枢部で大災害が起こるかもしれないという[石橋 (1976)]、政府や大衆は怯えて大騒ぎとなる。そして大金を渡して、予知の研究をさせようとし、研究者はそれをありがたく受け取ってしまう。研究契約説に則れば地震予知まで約束することになり、これは研究者にとって極めて危険なことである。

6. 地震電磁気学に基づく予知研究

電磁気学的信号は、地殻内部の応力分布に対し派生するので、主に地震の研究手段でなく地震予知法として用いるべきものである。これまで、次のような方法が提案されている[早川 (監修) (2012)]。

- (1) 地電位への特異な波形の混入： VAN 法 [Varotsos et al. (1993)]
- (2) 地電流の特異な変化： 超低周波の磁界観測[Hattori et al. (2012)]
- (3) 地中の変化が電離層に与える擾乱： TEC (電子密度) 変化[Heki (2011)]、電子密度の変化の位相異常[Molchanov et al. (1998)]、電子温度の変化[Oyama et al. (2008)]
- (4) 数10 MHz 電波の伝搬異常： FM 放送波の伝搬観測[Moriya et al. (2009)]
- (5) 温度上昇と赤外線放射[Tramutoli et al. (2005)]
- (6) マイクロ波など高周波数電波の発生 [Takano et al. (2009)]

周波数的には直流からマイクロ波、赤外線、測定対象は電界や磁界、電子密度、観測手段は地上から地上や地上から宇宙、宇宙から地上、と様々である。これらの幾つかは、研究室での実験で確認されている。しかしあるものは、実験で確認されて居らず、また物理的にその成立が説明できていない。すなわち可能性が、未だ不確かなのである。

さらに信号の有無という定性的な議論では不十分で、所望信号の電力が不要信号の電力の何倍有るかを明らかにする必要がある。すなわち信号を雑音から分離できることを示すため、信号対雑音の電力比 (S/N比) の特定まで論を進める必要がある。そして新しい技術・シーズは仮説を立てて説明し、しかる後実験や解析により証明できて、初めてシステム開発に移行することが許されるのである。この検証過程は、地震予知研究一般に必要である。

電磁気学に基づく予知法を提案する研究者は、地震学会あるいは政府や大衆に対し説明責任がある。また地震予知を担当しとめる立場の人は地震学者と言えども、他分野の研究者の説・提案に対して、理解し説明する責任がある。あるいは特定の予知法が信じられないと言うのであれば、自らがその方法に誤りを学問的に証明あるいは論破する必要がある。どの分野でも研究者は新し

い提案をするだけでなく、間違った提案を見分けることが責任となっている。

筆者等は、岩石を圧縮破壊する時、1 MHz から 2 GHz の強い電波が発生することを発見した[牧, 他, (2006)]. そして高周波数の波形を確認し、そのエネルギーを特定することができた。種々の検討の結果、岩石への応力・破壊を1次効果とすると、2次効果が物質内の電位差発生[Takano et al. (2010)], 3次効果が微小放電, 4次効果が高周波電波発生 [牧, 他 (2004)], と考えられることを示した。

またそのような高周波電波は、地面に亀裂が入れば、低い損失で地表に伝搬できることを示した[三枝, 他 (2012)]. 同じ電磁気現象でも、地表でかつ遠方で検出するには、元の電位差信号より派生の電波信号の方が、遥かに検出しやすいのである。さらに岩石破壊に拘わる0次現象に対し、信号エネルギーを外挿により推定できるので、その検出への適用性が判断できる[Takano et al. (2009)a]. 地震や火山火口壁崩落の探知はその例である[Takano et al. (2009)b].

7. まとめ

地震予知について、可能と言う人と不可能という人の両極端が居る。それらの立場について、歴史的、技術的、そして政治的に分析した。その結果、不確かなことに対し十分な科学的検討を加えないまま、国の政策に取り入って研究資金を取ったり、反面可能性を否定し国民の期待に応えないという状態が顕著である。

それに対し、地震予知の可能性があるかも知れないこと、地震予知技術は地震学とは異なることを示した。当然ながら、地面の揺れを観測するだけでは、地震の予知はできない。地面の揺れが0次の現象なら、その結果生じる1次の派生效果、さらにその2次の効果という具合に、予知に適した信号の種類とその検出方法があるはずである。

岩石破壊による高周波電波の発生現象は、地面の揺れに対して高次の派生現象であるが、低次現象より検出しやすいことを示した。従って地震探知に、有望な手段となる。しかし、1次効果である地面揺れ直前での岩石の応力状態、あるいは破壊状態が分からない。この解明には、地震学者や地質学者の知識と経験が必要である。すなわち異分野・学際協力が望まれるところである[高野, 他 (2012)].

参考文献

Freund, F. T., A. Takeuchi, and B. W. Lau, 2006, "Electric currents streaming out of stressed igneous rocks - A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions", *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 389-396.
Hattori, K., Peng Han, Chie Yoshino, Febty Febriani,

Hiroki Yamaguchi, Chieh-Hung Chen, 2012, "Investigation of ULF Seismo-Magnetic Phenomena in Kanto, Japan During 2000-2010: Case Studies and Statistical Studies", *Surveys in Geophysics*, DOI 10.1007/s10712-012-9215-x.
Heki, K., 2011, "Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake", *Geophys. Res. Lett.* 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908.
Molchanov, O., and M. Hayakawa, 1998, "Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes", *J. Geophys. Res.*, vol.103, no.17, pp.489-504.
Moriya, T., T. Mogi and M. Takada, 2009, "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.
Oyama, K. -I., J. Y. Liu, M. Kamogawa, and T. Kodama, 2008, "Reduction of electron temperature in low latitude ionosphere at 600km before and after large earthquakes", *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2008JA013367.
Takano, T., Takashi Maeda and Shingo Yoshida, 2009a, "Experiment and Theoretical Study of Earthquake Detection Capability by Means of Microwave Passive Sensors on a Satellite", *IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing*, Vol.6, No.1, pp.107-111.
Takano, T., Takashi Maeda, Yoji Miki, Sayo Akatsuka, Shingo Yoshida, Kohei Nagata, Katsumi Hattori, Masahide Nishihashi, Daishi Kaita, and Takuya Hirano, 2009b, "Signal Detection of Microwave Frequency due to Rock Fracture in Volcanic Activities", EGU2009-9176, GII/MPRG22, EGU 2009 General Assembly, Vienna, April.
Takano, T., Hirokazu Ikeda, and Takashi Maeda, 2010, "Consideration of the Mechanism of Microwave Emission Due to Material Destruction", *J. Appl. Phys*, 108, 083722, pp.1-5.
Tramutoli, V., V. Cuomo, C. Filizzola, N. Pergola, C. Pietrapertosa, 2005, "Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (Izmit) earthquake, August 17, 1999" *Remote Sensing of Environment*, 96: 409-426.
Varotsos, P., K. Alexopoulos and M. Lazaridou, 1993, "Latest aspects of earthquakes prediction in Greece based on seismic electric signals", *Two, Tectonophysics*, vol.224, pp.1-37.
石橋克彦, 1976, "東海地方に予想される大地震の再検討 -駿河湾大地震について", 地震学会講演予稿集, No.2, 30-34.
インターネット, 2012, "地震予知研究の歴史", <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/yamaoka/outreach/books/history.html>.
ウィキペディア, 2012 a, "高感度地震観測網", <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%AB%98%E6%84%9F%E5%BA%A6%E5%9C%B0%E9%9C%87>

- %E8%A6%B3%E6%B8%AC%E7%B6%B2.
ウィキペディア, 2012 b, ”地震予知”, <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E4%BA%88%E7%9F%A5>.
- ゲラー, R., 2011, ”日本人は知らない地震予知の正体”, 双葉社, 東京.
- 三枝健二, 細野浩二, 雨海貴大, 高野忠, 2012, “地中亀裂のマイクロ波伝搬損失の基礎検討”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J95-B, No. 10, pp. 1364-1371.
- 住明正, 2012, “地震学への気象学からの提言”, 地球惑星科学連合大会, U06-06, 5月.
- 高野忠, 2007, “特集「宇宙ミッション」に寄せて- その意味とねらい“(巻頭言), 日本航空宇宙学会誌, Vol.55, No.642, pp.181-182, 7月.
- 高野忠. 服部克己, 前田崇, 2012, “短期予知研究のための組織提案“, 地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム, JPGU, 99, Tokyo, July.
- 武村雅之, 2009, ”未曾有の大災害と地震学 — 関東大震災”, 古今書院, 東京.
- 地震予知計画研究グループ, 1962, ”地震予知 — 現状とその推進計画”.
- 地震予知検討委員会, 2007, ”地震予知の科学”, 東大出版会, 東京.
- 寺田寅彦, 1924, ”地震雑感”, 大正大震火災誌, 改造社. (「寺田寅彦全集」第6巻, 岩波書店, 1997, に収録).
- 早川正士 (監修), 2012, ”地震予知研究の最前線 — 地震予知学・耐震工学・地震学の融和をめざして —”, 日本専門図書出版, 東京, 2月.
- 福井勝則, 大久保誠介, 寺嶋卓文, 2001, “一軸圧縮試験における岩石からの電磁波の発生”, 資源と素材, vol.117, pp.703-710.
- 別冊宝島編集部, 2012, ”地震の前兆150”, 宝島社, 東京.
- 堀高峰, 八木勇治, 松澤暢, 2012, “東北地方太平洋沖地震を何故想定できなかったのか — これからの地震学にむけた問題点の洗い出し —”, 地球惑星科学連合大会, U06-02.
- 牧謙一郎, 高野忠, 2004, “衝突破壊に伴う放電によるマイクロ波放射解析”, 電気学会全国大会, 1-081, p.87.
- 牧謙一郎, 相馬央令子, 石井健太郎, 高野忠, 吉田真吾, 中谷正生, 2006, “岩石圧縮破壊に伴うマイクロ波放射の観測”, 日本地震学会・地震, 第58巻, 2号, pp.375-384.
- 山本寛, 2009, ”地震学のウソ — 地震学会への提言”, 工学社, 東京.

地震予知への提言

日本学士院 上田誠也

地震予知では短期予知が最重要であるが、それには前兆現象の検知が必要である。現在の予知体制ではそれは不可能として殆ど放棄されている。予知計画の名のもとに、短期予知以外のことに国費を独占的に費消してきたことは改めるべきである。

1. はじめに

地震予知に関連して、地震学会は混乱しているように見える。意見に広い分布があるのは健全だが、各人の立場、研究費状況、利害関係などによって支配されている部分も多いようだ。この際、少時、これらを離れて、問題を素直に考えてみよう。

「人が自分の態度を事前に決められる情報を提供すること」という金森の地震予知の定義(2012)は明快である(ここでは簡潔のために、予知・予測・予報など用語の問題(井出, 2012)には触れない)。

地震活動の過去例などに基づく確率的長期・中期予知にも都市防災計画などの策定に意味はあろうが、通常の意味での検証は不可能であるし、従来の長期予知は概して否定的結果を示している(Geller, 2011)。検証可能であり、一般市民の生命・財産の安心・安全のために最も重要なのは短期予知であろう。

科学的短期予知には前兆現象、あるいは先行現象の取得が必要である(ここでも簡単のため用語は前兆現象としておく)。とすれば、そのためにはなすべきは前兆現象の研究であろう。前兆現象のありかを探るために当時考えられるすべての観測を始めようというBlue Print 1962はその出発点だった。

長年にわたって、各国で前兆現象として報告されてきたものの大部分は信ずるに足りないが、中には否定困難なものもある。それらには地震そのものにかかわるものもあるが(静穏化、前震活動など)、地震計では測定できない電磁気、地球化学的、あるいは動物異常行動なども多い。これも周知の事実であろう。

2. 短期予知研究の歴史・現状と今後の見通し

ではそれらの研究は十分行われてきたのか？その答えは否と言わざるを得まい。地震予知計画は1960年代の発足以来、前兆現象に否定的な地震学者主導のもとで行われ、予算・人員の大部分は終始、地震計測に独占されてきた。おかげで、世界最高の地震観測網ができ、地震学の進歩には多大の貢献を果たしつつあるのは喜ばしいことだが、短期予知は殆ど進歩していない。

この体制は次第に既得権益化し、Blue Print 1962の精神はいまや殆ど失われている。特に兵

庫県南部地震以降は、地震予知はその“研究”も諦め、今後は“地震の基礎研究”に集中しようという建前になってしまった。“地震予知”はもはや科学研究の対象ではないということで、殆ど禁句となった。

1999年には予知計画は「地震予知のための新たな観測研究計画」なるものに変容され、現在はその3回目の5ヵ年計画の実施中という。タイトルが巧妙に仕組まれたこの計画は、「観測計画」なのであって予知は名目にすぎないのである。

前兆研究などは科研費でやればいと言われるが、地震予知は科研費の枠にもなかった。しかし、2009年の地震学会総会では、少なくとも科研費の枠には入れるべきで、排除すべきではないという提案がなされ、激しい反論もあったが、結果としては25年度から地震発生予測・火山噴火予測のキーワードが一応入ることにはなった。一筋の光明か？

Geller (2011)の主張「日本政府は、欠陥手法を用いた確率論的地震動予測も、仮想にすぎない東海地震に基づく不毛な短期的地震予知も、即刻やめるべきだ」「今こそ、地震予知が不可能であることを率直に国民に伝え、東海地震予知体制を廃止して、大震法を撤廃する時である」には筆者も概ね賛成である。しかし、彼の「地震予知は全部やめよ」との見解は認めることはできない。ゲラー自身(2012)も認めているが、地震短期予知が原理的に不可能だという証明はない。のみならず、事実、地震予知学(地震学ではない)ではそれが不可能ではない可能性は高まってきているからである。

例えば、VAN法は開始以来30年、益々成果を上げており、最近ではNatural Timeなる新しい時間概念の導入によって、発震時の予測精度を格段に上げている(S. Uyeda and M. Kamogawa, 2008, 2010)。伊豆神津島でのVAN法の電気信号が統計的に有意であったという我々の結果は最近PNAS誌でも特に優れた論文として出版された(Orihara et al., 2012)。ULF帯の磁場変動でも地震との関係が統計的に調査され、その有意性が示されている(Hattori et al., 2012)。

3.11地震にも有意な短期予知情報をもたらしたVLF~LF電波の伝播異常の成果(Hayakawa et al., 2012)に基づいて予知情報を広報するシステムが私企業として成立しつつあるのも無視でき

ないだろう (earthquakenet.com/principle.html).

電波伝搬異常では、VHF 帯においても兵庫県南部地震以来幾つかの有意の成果が得られている (Moriya et al., 2010, 串田, 2012). また、電離層での電子密度の異常変化 (Heki, 2011) は大きな関心を集めた。既に諸外国では衛星観測が多数実施・計画中であるが、ようやく我が国でも衛星計画が進捗しつつある (Kodama and Oyama, 2011). 電磁氣的側面以外にも、兵庫県南部地震直前のラドン異常 (Yasuoka et al., 2009) などは特筆に値しよう。

これらの試みは有望とはいえ、多くは未解決問題を抱えて実用的予知段階とは程遠い。徹底的な“基礎研究”が喫緊必要なのである。しかし研究費のみならず、実働人員の殆ど無い現状では物事の正否を判断するにたる観測などはいつまでたっても出来ないだろう。若い研究者のための短期予知ポストが全くないのは最大の問題である。

3. 地震学会の今後

社会は上述の推移を殆ど知らない。筆者の経験では、地震学会以外のどの集まりでも短期予知の現状の話をする、聴衆は 100%驚く。「地震予知はまだ出来ないが、年額数百億の国費が費消されているのだから、短期予知研究も進められているにちがいない」というのが、高度の学術諸団体を含めての、社会一般の認識なのである。地震学会はまったくの特殊社会といわねばなるまい。

イタリア・L'Aquila 地震裁判の結果から、これからは、地震学者は失敗を恐れて発言ができなくなるなどという論調が横行しているが、これはやや的外れであろう。L'Aquila の場合には地震短期予知不可能論の地震学者たちが「安全宣言」に加担してしまったことが問われているのであって、刑の大小は別として、無責任発言に対するいい戒めだった。科学者として正直でさえあれば、予知情報の広報は堂々と進めて悪いわけではない。

一方、3.11 地震を想定外としか言えなかったことを、地震学の敗北などと重く受け止めて反省する地震学会員も多い。それと“予知村的会員”との複雑なしがらみが地震学会の予知問題の混乱の一因にもなっているようだ。ここで、再度それらを離れて考えてみよう。

前兆現象は次第に高まるストレスによって、地震発生準備過程の副産物として、本震前に派生すればよい。それを観測すれば、地震発生のメカニズムそのものが解明されなくとも、「短期予知」は可能である。しかも前兆現象は地震を起す要因でなくても良い。地電流異常が地震を起すなどとは考えられない。

従って短期予知は広義の地震科学 (ゲラー, 2012) の一部ではあるべきだが、狭義の地震学の主目的ではあり得ない。だから地震学者が前兆現象に興味を持たないのは当然だし、短期予知がで

きなかったとって反省する必要は勿論無い。長期予測にしても、過去 100 年程度の近代的地震観測結果に関する限り、asperity model などはほぼうまくいっていたのだから、そう落胆することはない。自然科学は新しい観測事実によるモデルの検証・改良で進むのだ。

地震学会が反省すべきは、地震計測結果以外にあまりにも目を向けなかった点だろう。短期予知での前兆現象無視も、長期予測で津波堆積層の地質学情報などを軽視したのも、同じ通性のあらわれなのだ。これを改めれば地震学会の前途は明るい。もっと深く反省すべきは、前兆現象即ち短期予知研究以外に予知予算を独占的に流用してきた体制を許容し便乗させしてきた点であろう。例えば強振動研究を予知研究に含めるのは、筆者にとって違和感が大きい。強振動予測は予知研究と無関係に推進すべき重要な研究であり、これこそ地震学が最大級の貢献可能な分野であろう。

4. 結論

地震短期予知は多方面の研究者の参加による前兆現象の研究によっては可能なのだからなんとしても達成せねばならない。地震学会が総力を上げて取り組むべき性質のものではないが、そのためには、研究費、人員配分の抜本的改革が必要である。

参考文献

- 金森博雄, 地震研究堂々と進めよ, 毎日新聞, 11月5日, 2012
- 井出 哲, アスペリティ・連動型・地震予知, 地震学会モノグラフ, 第一号, 14-17, 2012
- Robert Geller, Shake-up time for Japanese seismology, *Nature* 472, 407-409 (28 April 2011)
- ロバート・ゲラー, 防災対策と地震科学研究のあり方: リセットの時期, 地震学会モノグラフ, 第一号, 5-8, 2012
- S. Uyeda, and M. Kamogawa, The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece, *Eos Trans. AGU*, 89(39), doi:10.1029/2008EO390002, 2008
- S. Uyeda & M. Kamogawa, Reply to Comment on “The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece”, *Eos Trans. AGU*, 91(18), doi:10.1029/2010EO180004, 2010
- Y. Orihara, M. Kamogawa, T. Nagao, and S. Uyeda, Pre-seismic anomalous telluric current signals observed in Kozu-shima Island, Japan, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, doi: 10.1073/pnas. 1215669109, 2012
- K. Hattori, P. Han, C. Yoshino, F. Febriani, H. Yamaguchi, and C-H. Chen, Investigation of ULF Seismo-Magnetic Phenomena in Kanto, Japan During 2000–2010: Case Studies and Statistical Studies, *Surveys in Geophysics*, doi: 10.1007/s10712-012-9215-x, 2012.
- Hayakawa, M., Y. Hobara, Y. Yasuda, H. Yamaguchi, K. Ohta, J. Izutsu, and T. Nakamura, Possible

precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/low frequency propagation, *Ann. Geophysics (Italy)*, vol. 55, no. 1, 95-99, doi: 10.4401/ag-5357, 2012

Moriya, T., T. Mogi, M. Takada, 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, 2010

串田嘉男, 地震予測, PHP 新書, 339pp, 2012

Heki, K., Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.* 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908, 2011

T. Kodama, K. -I. Oyama, The ELMOS Small Satellite Constellation, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, June 5-12, 2011

Y. Yasuoka, Y. Kawada, H. Nagahama, Y. Omori, T. Ishikawa, S. Tokonami & M. Shinogi, Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain, *Phys. Chem. Earth*, 34, 431-434, 2009