

地震発生予測システムの構築に向けて¹

— 統計物理学者に望むこと —

東京大学 地震研究所 楠城 一嘉, 鶴岡 弘, 平田 直, 笠原 敬司²

(2009 年 8 月 12 日受理)

“地震及び火山噴火予知のための観測研究計画”の主要課題の一つは、地震の時期・場所・大きさを予測するシステム、いわゆる“地震発生予測システム”の構築である。この構築のために我々が目指すものは、地震予測研究の客観性・再現性を高めるサポートが出来る研究環境の整備である。その環境を活用して地震発生予測検証実験を今年度から実施する。この実験では、個々の予測モデルの性能評価がなされる。その評価結果を基にモデルの高度化・有効なモデルの絞り込みが期待される。このような予測研究に必要なデータは過去の地震情報である。しかしながら、現存の地震データセットは完全ではない。従って、予測研究を開始するためには、そのデータの品質評価からはじめる必要があることを指摘し、品質評価の例を示す。本課題では、地震予知・予測を厳密に実施し、客観的に評価するという意味で、地震の“予測科学”の枠組みを構築する狙いがある。このような整備されつつある研究環境を利用して、新視点から予測モデル構築の可能性を探究することは、検討すべき課題である。臨界現象として地震を理解する研究はこれまでも報告されてきたが、今後に期待される研究フロンティアは、その理解を基に地震発生を事前予測する高性能モデルの構築である。

1 はじめに

地震国日本では地震予知に対する社会からの要請は大きいため、信頼できる地震予測の実施は重要である。このために、提案された地震予知・予測手法が本当に有効か、あるいは、どんな条件下で有効か等について科学的に厳密な検討をすることが必要である。

一方、防災情報としての地震予知・予測では、限られた科学的情報から社会に役立つ防災・減災情報を選別し、行政的な総合的判断を行った上で、情報を発信して利用しなければならない。日本では、政府の地震調査研究推進本部や気象庁がこうした行政的な地震発生予知・予測を行っている。例えば、1995 年兵庫県南部地震以降の調査研究データの蓄積を基に地震調査研究推進本部が公表する“全国を概観した地震動予測地図”は 2005 年以来毎年更新されている⁽¹⁾。

¹本稿は、編集部の方から特にお願ひして執筆していただいた記事である。

²E-mail: nanjo@eri.u-tokyo.ac.jp; tsuru@eri.u-tokyo.ac.jp; hirata@eri.u-tokyo.ac.jp; kkasa@eri.u-tokyo.ac.jp

科学的な地震予知・予測の実現を目指したこれまでの地震予知研究計画では、地震発生 の物理・化学の解明と、物理モデルによる予測シミュレーションの開発が強調され [4], 科学的に厳密な地震発生予測システムの構築は、必ずしも中心課題ではなかった。ここで、地震発生予測システムとは、地震発生 の時期と場所及び地震の大きさを予測出来るモデルを用いて、実際に将来おきる地震を予測するシステムである。今年度からの5カ年計画“地震及び火山噴火予知のための観測研究計画”⁽²⁾では、これまでの研究計画に沿って得られた科学技術を集結して、予測システムの開発が主要課題となった。一方で、もう一つ重要なことは、提案された予測モデルが本当に有効かを厳密に検証することである。実際、地震発生予測モデルを構築し、その性能を評価する試みは日本でも行われてきた (例えば, [5, 14, 15, 16])。しかし、現在の予知研究計画では、より厳密な検証とそれに耐える予測モデルを作ることが重要な研究テーマとなる。このために、新しい地震予測学の潮流を開拓する必要がある [20]。

類似の世界的研究計画“Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability”⁽³⁾(CSEP) は、2006 年から米国を中心として進行中である [8]。CSEP の目的は、客観的かつ透明性のある地震予測実験が実行できる研究環境作りであり、その過程において地震の予測可能性を探ることである。このアイデアは、カルフォルニア限定で先行実施された Regional Likelihood Models (RELM) プロジェクト (Seismol. Res. Lett. **78**(1), 2007) から受け継ぎ、CSEP ではさらに実施環境の充実を目指している。CSEP 参加主要国は、米国・スイス・ニュージーランド・イタリア・日本であり、他国の研究者も CSEP に参加している。日本では、CSEP と共同して、第一回目の地震発生予測検証実験を 2009 年 11 月 1 日に開始する⁽⁴⁾。そのために、実験に参加する予測モデルを国際的に公募することから始めた [19]。

本稿では、我々の研究グループが行っている地震予測研究の概要を説明する。はじめに、地震予知・予測に必要な研究の枠組み作りを目指していることについて説明する。そして、現段階で期待されるアウトプットを議論する。次に、予知・予測の課題に取り組むために必要な準備的研究の重要性を指摘し、現在進行中の該当研究について簡単に議論する。このような整備されつつある研究環境を利用して、上述の地震発生予測検証実験を実施する。本稿では、より厳密な“予測科学”として地震予測・予知研究を行うために、基盤構築が重要であると強調する。しかし勿論重要なのは、信頼できる地震発生予測の実施に資するモデル作りである。純粹地震学者が、地震発生に至る過程の物理・化学の十分な理解を基に将来の地震を予測するモデル構築を目指すのは基本であろう。その一方で、新しい地震観で予測モデルの構築を探索することは検討すべき課題である。そこで、本稿では複雑系的視点で地震発生を予測する、今後検討すべき有力アプローチのいくつかを説明する。複雑系的視点で現象を理解することは本来統計物理学者が得意とするので、この事例説明は地震予測学参入への切り口となるだろう。今後、統計物理学者の更なる参入によりに、地震被害を最小限にすることへ貢献出来る予測・予知手法が開拓されることを期待する。

2 目指しているものと期待されるアウトプット

地震発生予測モデルの高度化の研究以前に、重要な問題を解決する必要がある。その問題とは、“どのように予測研究を遂行したら良いか？”という実施環境と関連する。つまり、予測研究で標準化がなされていないため、再現性や客観性に乏しいことが問題である。この問題解決のための一つのアプローチが、予測研究をサポートできる機関としての“検証センター”の運用である。そこで、CSEPと共同関係にある地震研究所は、所内に検証センターを構築した。現在、稼働試験を兼ねた予察的研究を遂行中である。検証センターの利点は以下のようにまとめられる。

- 予測期間の間、予測モデルの作成者(モデラーと呼ぶ)と独立して予測モデルを検証センターが管理し、その期間終了後に評価者となることで客観性・透明性を明瞭にする環境を提供出来る。
- 予測期間終了後も予測モデルの管理をセンターが行うことで、追試の必要性が出た時に再現性を保証出来る。
- 客観性・透明性をより厳密にするという目的で、本当の将来の地震を予測し、その妥当性を検証する研究をサポート出来る。この事前予測の必要性は、予測した時点で結果が原理的に分からないことで、予測手法が厳密に評価されうるとの認識からである。事前予測を比較的規模の大きい地震に対して行う研究は、短期間で完了されることが難しい。そこで、検証センターは長期間にわたり予測モデルを管理できる体制を提供する。

今年度から新しい5カ年の予知研究計画⁽²⁾が始まったこともあり、今後地震発生予測システム構築の方向性について議論がなされるだろう。そこで、現在我々の目指すものは、そのシステム運用に必要な研究環境のひな型となる検証センターを充実することである。この意味で、本課題では、地震予知・予測研究を“予測科学”として位置づけ、“次世代研究の枠組み作り”を狙う。

研究環境整備後の課題は、“どのような予測モデルを構築すべきか？”と言うことである。これに対して例題となるモデルを提案する必要がある。また、既存のモデルを基に予測手法の高度化を目指し、今後作られる次世代型高性能予測モデルの比較対象となる“基準モデル”を作成する必要がある。そのためには、上記の研究環境を活用して、既存の予測モデル間で性能比較を行う地震発生予測検証実験⁽⁴⁾を実施し、基準となりうる予測モデルの絞り込みとモデルの高度化が必要である。実験を実施して得られる高度な予測モデルが、現在期待されるアウトプットである。つまり、本課題は、“予測科学の枠組みの中で、地震予知・予測モデルのプロトタイプを構築する研究”としても位置付けられる。

3 検証研究のための準備

3.1 過去の地震データ

過去に発生した地震の時期・場所・大きさを知ることによって、将来の地震発生を予測することが基本と考えられている。その成功例の一つは、長期予測“全国を概観した地震動予測地図”⁽¹⁾である。短期・中期予測でも、過去の地震情報が有効であるかは検討課題である。他の有力候補は、電磁気シグナル・地下水中のラドンガスのような地震以外の信号に基づくものである(例えば, [12, 22])。

過去の地震情報を入手する方法はいくつかある。近代・現代地震学に基づいて決定された地震のリストを用いる方法, 古文書等の歴史資料記録を調べる方法, 活断層を調べる方法, 津波によって運ばれた堆積物を調べる方法等がある。以下で指摘するように, これらの手法により有史以前から現在までの地震の観測データを入手できる。断層面上で繰り返す地震の発生間隔は $10^2 \sim 10^4$ 年のオーダーである。地震発生に至るまでの歪蓄積を考慮に入れて予測モデルを構築する場合, 現在起きている地震のデータだけでは不十分である。その構築には, 少なくとも地震の繰り返し間隔の時間オーダーと同程度かそれより長い期間のデータが必要であろう。近代・現代地震学に基づく地震観測網が始まったのは高々100年前である。従って, それより以前の地震データを様々な手法により入手する必要がある。この様な認識により, 出来るだけ長期間の観測データを得ることが地震予測研究では望まれる。

過去の地震の情報を使用するために理解すべきことは, 人間の観測・調査に基づくため, 時空間的に不均質であることである。その完全な理解には深い知識が必要である。実際, 物理学者による, 間違った地震データの使用例をしばしば見ることもある。そこで, 地震データの理解を助けるために簡単なレビューをする。詳細は専門書を参照のこと。

日本には歴史資料が多数残っている。“日本書紀”等の有名なものや, 地方の寺院などに保管されている日記等に多数の地震に関する記述を拾い出すことが出来る。歴史資料を用いる長所は, 地震が発生した年, 日, 時刻が分かることである。また地震動の情報は, 建物の被害などから推定される。その情報から地震の大きさと位置を推測する。短所は, 地震の史料の十分残っていない時代があることである。例えば, 戦国時代には地震に関する史料が少ない。その理由の一つは, 戦火で史料が紛失しやすい点である。また他の理由として, そもそも地震について記述するより, 日々生きるか死ぬかの生活が大事であるために記録が無いことが挙げられるであろう。そのような時代の空白を埋める情報は, 土木・建築工事等に伴って行われる遺跡調査から得られる。それは, 液化現象の痕跡であり, 地震によって強くゆすられた地盤の割れ目から砂が噴出したものである。もし地層の重なり具合等から遺跡の年代が特定出来るならば, 大まかな地震発生時期が推定出来る。この発生時期の精度は古文書からのそれよりは良くないが注目に値する。古文書等の調査に基づく歴史地震のリストは [30] を参照のこと。

活断層は, 最近の地質時代(約4百万年前から最近)に繰り返し活動し, 今後も活動する可能性のある断層と定義されている。ある程度以上の大きさの地震が地下で発生すると地表にもずれ(地震

断層)が生じる。大地震が同じ場所で繰り返すと、地表に、食い違いの繰り返しの履歴が、地層や地形に残る。この断層地形が、活断層である。活断層に沿って地面を掘り、断層面の地層の食い違いを詳細に調べることで、その断層でどのくらいの大きさの地震がいつ発生したかが分かる。活断層調査の長所は、歴史資料に基づいていないため、人間の有史以前の地震発生を調べることが出来る点である。一方で短所は、調査に多大な時間と労力がかかるため、日本中の全ての活断層とその可能性のある地質断層を網羅的に調べるには、気の遠くなる時間がかかる点である。そこで、例えば、政府の地震調査推進本部は、全国規模の調査では、まず約 100 の主要な活断層を選んで調査を実施した。活断層の分布図と資料は“新編日本の活断層”[9]を参照のこと。また、活断層のデータベースはウェブページ⁽⁵⁾を参照のこと。

海底で発生した地震の場合、その地震が発生した断層を直接観察することは難しい。しかし、津波堆積物から繰り返し間隔や規模を推定することが出来る。2004 年のスマトラ (Sumatra) 地震のように、沈み込むプレート境界の巨大地震の多くは津波を伴う。津波により大量に運ばれる泥や木片等は沿岸域に堆積する。そのような場所を掘って地層を調べることで、津波で運ばれた堆積物の層とそれ以外の層を特定することが出来る。堆積物やその回りの地層の年代を調べることで、津波を起こした地震の発生時期を推定することが出来る。さらに津波堆積物の地理的広がりを調べ、それと共に津波シミュレーションを行うことで、津波の規模、つまり地震の規模を推定出来る。長所は、有史以前の海域の地震情報が入手出来る点である。この分野は今後期待されており、データの蓄積が望まれる。現段階でのデータに関して比較的網羅している論文は [24] である。

以上の方法によって入手される過去の地震のデータは非常に優れたものである。しかし、過去の地震全てを網羅しているわけではないため、時空間的に多数の空白があることを理解する必要がある。“全国を概観した地震動予測地図”⁽¹⁾では、このような不均質なデータを有効活用した結果の産物である。

3.2 地震のリスト

上記の入手方法で得られる過去の地震データに比べて、より不均質性が少ないものは、地震観測網で検知された地震のリストである。一般に地震学分野でこのリストは地震カタログと呼ばれるので、本稿でもそれに従う。日本の代表的な地震カタログは、宇津 [31] によって作成された 1885 年から 1925 年までの地震のリスト、1926 年以降については、気象庁から毎月刊行される月報がある(本稿執筆時での最新版は [11] である)。気象庁地震カタログは、公的機関である気象庁によって維持管理されているため、日本全土で起きる地震を網羅し長期的に安定している。従って、汎用性が高い本カタログの性質を以下に簡単に説明する。カタログデータは気象庁の FTP サイトや CD-ROM にて公開されている。他に、大学や研究機関でも独自の地震観測網を展開して、地震カタログを作成している。

気象庁地震カタログは、地震の震源決定方法やマグニチュードの決定方法の改良に伴い、何度も改訂されている。現在も、現行の基準で見直し中であるため、1965 年までの観測データまでしか遡って使用することが出来ない。つまり、1964 年以前のデータは改訂されていない。

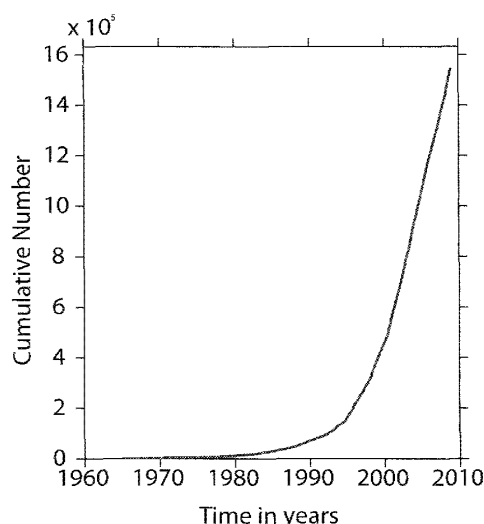


図 1: 気象庁の確定カタログを用いて、地震数の時間変化を示した結果。縦軸に累積頻度を取り、横軸に時間をとった。

地震計の改善や地震観測網の変遷により観測データの質・量とも時代によって変化する。最も顕著な変化は、1997 年 10 月に起きた。それは、防災科学研究所が管理する地震観測網 (Hi-net と呼ばれている) や、他の大学の観測網に属する地震観測点で観測された地震の波形データをリアルタイムで気象庁へ送り、気象庁が全ての記録の読み取りと震源決定を統一的に行う処理 (一元化処理) を開始したことである。図 1 は、気象庁地震カタログについて、地震数の時間変化を示す。マグニチュード $M \geq 0$ の地震を含んだ 2009 年 3 月までの地震の総数は約 1.55×10^6 である。1997 年から地震数の急激な上昇が見られる。これは地震活動が活発になったわけではなく、地震観測点の増加に伴い、規模の小さい (M が小さい) 地震まで観測された結果である。現在、約 1200 の地震観測点のデータが気象庁カタログ作成のために使用されている。

3.3 地震データの品質評価

次の問題は、不均質性を含んだ地震データの品質評価である。データセットの品質を理解せずに、不完全なデータセットを用いると、解析は不完全となる。つまり、地震予測研究にとって不完全なデータセットを使用すると、予測を正當に検証出来なくなる。例えば、過去のデータを取り込んで地震発生を予測するモデルを考える。もしそのモデルの予測精度が良くない場合があるならば、その不良は、モデルに依存するのか、過去のデータの不完全性に依存するのか不明となる。他の例として、もし予測の対象となる地震のデータセットが不完全であるならば、予測結果と比較すべき真の地震データが誤ったものなので、予測結果を正しく評価できない。現在のところ、近代・現代地震学に基づいて決定された地震のカタログ以外のデータ源は、定量的に議論できるほど質・量とも十分ではない。そこで本論では、気象庁地震カタログを使用した品質評価の例を紹介する。

今回用いる品質評価の手法は、 M が小さい地震ほど観測網で検出されづらく、ある閾値以上の M を持つ地震は漏れなく観測されるという地震学における基本的な仮定に基づいている。この閾

値となる M は、下限マグニチュード (Completeness Magnitude: M_C) と呼ばれる。つまり、予測研究で使用する地震のマグニチュードは、 M_C と等しいかそれより大きくある必要がある。 M_C は地震観測網に依存して大きく変動することが知られている (例えば, [33])。しかし、日本のような地震国でも M_C の時空間分布は自明でない。そこで、予測研究の準備として M_C による地震データの品質評価を行う研究を遂行中である [18, 26]。

気象庁が提供するカタログには暫定カタログと確定カタログがある。地震の位置・発生時刻・ M 等は、暫定的に地震発生後数日で決定される。その一方、確定解を得るには、数か月から 6 ヶ月程度かかる場合がある。考慮する点は、暫定解と確定解では M や位置にしばしば大きな違いが生じることが知られていることである。そこで、本研究では、不必要な不確定性を考慮に入れないで研究を行うために、確定カタログを用いることにした。つまり、暫定カタログを用いないという意味で速報性を犠牲にする代わりに、地震発生後 6 ヶ月かそれ以上待ち、確実な地震情報を用いる。

信頼性の高い品質評価を行うために、複数の手法を用いた。一つは、地震の規模別頻度分布を Gutenberg-Richter (GR) 則で近似して、 M_C を見積もる評価方法である。GR 則とは以下のように表される: $\log N = A - bm$ 。ここで、 N は $m \leq M$ の地震の頻度、 A は定数、 b は一般に 1 に近い値である。用いる仮定は、データが GR 則で近似されるならば、それは、地震は漏れなく観測されたことを示すというものである。言い換えるならば、データが GR 則に対して下方へ乖離することは、観測漏れを意味するという仮定に基づく。従って、与えられた地震群の規模別頻度分布を GR 則で最良近似し、GR 則から下方乖離するデータの中で最大のマグニチュードを M_C と定義し、その値を求める。GR 則を用いて M_C を計算する手法は多数提案されてきたが (例えば, [33])、本研究では [34] の手法を用いた。

図 2 は、2007 年に起きた深さ $d \leq 30\text{km}$ の地震について求めた M_C の空間分布である。南北 0.2° 刻みの格子を切り、格子点の各々について、最近接 200 個の地震の規模別頻度分布を考え、 M_C を見積もった。東京付近の一点 (139.7° , 36.2°) を取り、その規模別頻度分布を図 2 の左上に挿入する。使用した手法に基づく、この格子点では、 $m \geq 0.6$ の頻度について GR 則で近似出来、求まったパラメータ値は $(A, b) = (2.64, 0.88)$ である。この結果から、 $M_C = 0.6$ である。つまりこれは、マグニチュード 0.6 以上の地震は漏れなく観測されたことを示す。このような解析を全ての格子点について行い、それをプロットした結果が図 2 である。図からわかるように、 $M_C \sim 1.0$ が日本内陸での典型値である。最小値は $M_C = 0.5$ で、多数の内陸地点で得られている。最大値は、北海道函館付近の $M_C = 1.5$ である。海域の M_C は一般的に陸域のそれより大きい。これは海域には地震計が設置されていないため、微小地震が観測されづらいことによる。おおよそ海岸線から 100km 離れた地点では、 $M_C > 2.5$ である [18]。

過去の地震に遡って M_C を計算した結果を図 3 に示す。(a-c) は、それぞれ 1970 年代のデータ、1998 年のデータ、2002 年のデータに基づく。(a) から、1970 年代の内陸における典型的な値は $M_C = 2.5 \sim 4.0$ であることが分かる。徐々に M_C は減少し、2002 年には現在の M_C とほぼ等しい値となっている。(b) と (c) の比較から、1997 年 10 月に開始した一元化処理の効果が見られる。このような M_C の減少は地震観測網整備の進展を示している [18]。

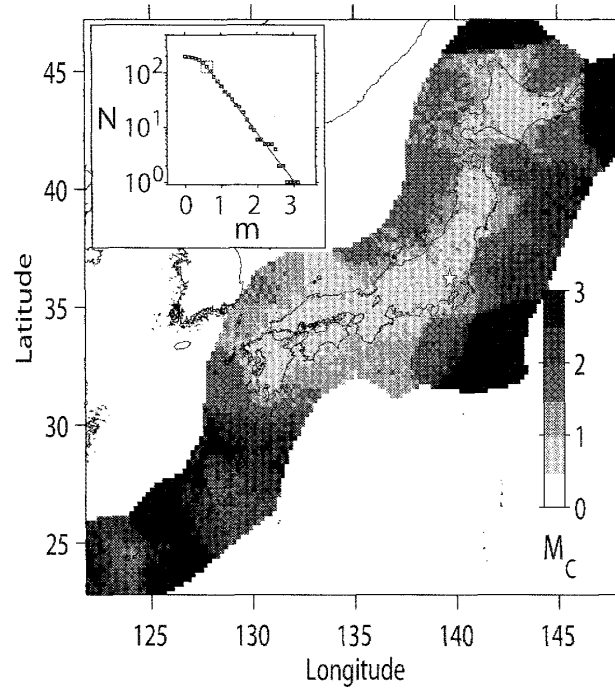


図 2: 2007 年に発生した深さ $d \leq 30\text{km}$ の地震に基づく M_C の空間分布. 挿入図は, 星印で示された点 (139.7° , 36.2°) における規模別頻度分布を示す. パラメータ値 $(A, b) = (2.64, 0.88)$ を持つ GR 則を直線で示す. $m = 0.6$ より小さい M の地震のデータは考慮されていないので, $M_C = 0.6$ (正方形)である.

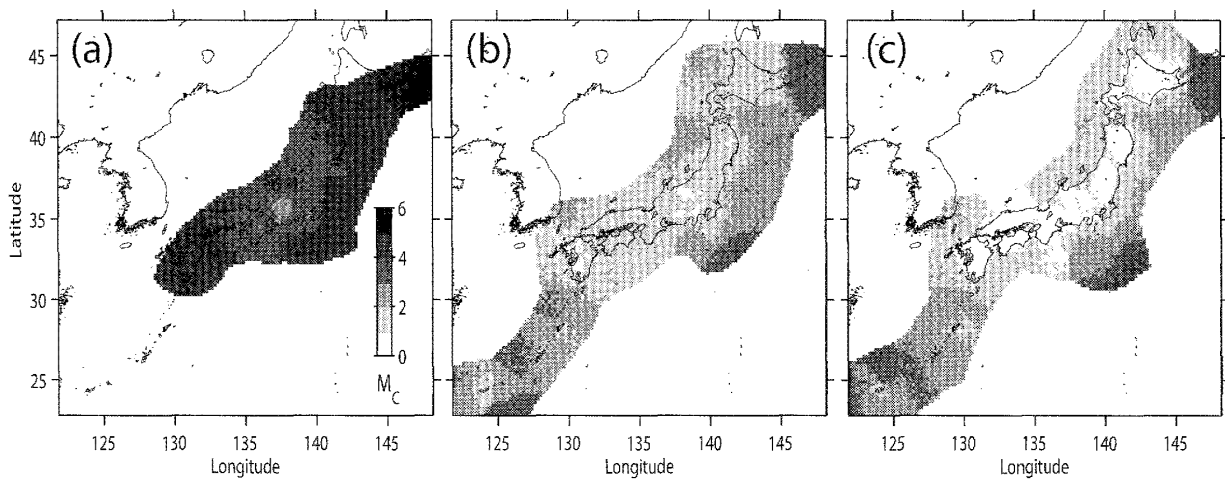


図 3: M_C の空間分布. (a)1970-1979 年, (b) 1998 年, (c) 2002 年に発生した深さ $d \leq 30\text{km}$ の地震に基づく.

M_C 値の信頼性向上のために用いる、もう一つの手法は Probabilistic Magnitude of Completeness (PMC) 法と呼ばれる。これは GR 則を仮定せずに、地震観測網と個々の地震計の観測性能を用いて M_C を見積もる手法である [17, 27]。PMC 法を用いると、小地震の発生数がもともと少ない場所の M_C を精度良く求めることができる。この手法を最近の日本のデータセットに当てはめた結果は、上記の結果図 2 とほぼ同様であった [26]。両手法に基づく結果の類似性から、図 2 で示したような M_C の空間パターンは手法に依存しない一般的な性質を示している。これにより、最近の $d \leq 30\text{km}$ の地震データの品質は M_C を使って定量的に評価されたことになる。今後は、PMC を用いて過去の地震の M_C を計算する必要がある。

類似の研究は世界各地の地震発生地帯で行われている (例えば, [17, 27, 33, 34])。それらと図 2 を比較した結果、近年の日本の地震観測網は、研究例の中で最も優れているカルフォルニアの観測網と同程度の地震検出能力があることが分かった [18]。

3.4 予察実験

上記の品質評価された地震カタログを使用して、地震発生予測を検証する本実験開始前に、検証センターの稼動試験を兼ねた予察実験を 2008 年 9 月から遂行中である。実験の条件は、原則的に CSEP に従うので、日本に特化した部分を説明する。予測の対象となる地震は、気象庁の確定カタログに基づく。深さ $d \leq 30\text{km}$ で日本本土とその沿岸域を含む領域をテスト地域とした。その地域を南北 0.1° 間隔の総数 (K)20062 の区間に区切り、個々の区間において、開始時刻 2008 年 9 月 1 日 00:00:00 から終了時刻 2009 年 9 月 1 日 00:00:00 までの一年間の予測期間に起きる、閾値 (本予察実験では $M = 4.0$) 以上の M の地震数 E_j を予測するとした ($j = 1, 2, \dots, K$)。ここで、テスト領域で $4.0 \geq M_C$ 確認している。つまり、予測の対象となる地震が観測網から漏れる可能性が無い。予測結果の評価法は、CSEP で標準的に使用されている N-テストに基づく。

この実験では、異なる仮説に基づく 3 つの統計モデル (Triple-S, JALM, RI) が使用されている。実験開始前に予測モデルのプログラムコードを検証センターの計算機システムに取り込んだので事前予測を確実にした。図 4 は、 $M \geq 4.0$ の地震の期待値 E_j を示す地図である。異なる地震発生仮説に基づき、過去の地震活動が解析された結果、(a,b,c) の予測パターンが大きく異なっていることが分かる。今後は、このような統計則に基づくモデルの高度化に加え、地震発生に至る物理・化学過程の理解に基づいて地震発生を予測するモデルを構築することが重要課題である。

現在検証中のモデルの一つ、RI (Relative Intensity of Seismicity) モデルは簡単な地震発生仮説に基づいている。それは、過去に地震活動が活発な地域には、将来大きな地震が発生しやすいというものである。単純であるため、これまで多数の地震予測検証研究で帰無仮説を立てるために用いられてきた (例えば, [5, 14, 15, 16, 23])。また、[23] のカルフォルニアを研究対象とした RI 予測の性能は、米国地質調査所が中心となって作成した同地域を対象とする地震ハザードマップの性能と同程度であることが Zechar and Jordan [36] の研究より明らかとなった。このことから、RI モデルを日本の地震発生予測検証実験で試す価値があると考えられる。予測値 E_j を計算するために、気象庁確定カタログを使用した。カタログの品質評価結果を考慮した結果、1965 年以降の $M \geq 4.0$

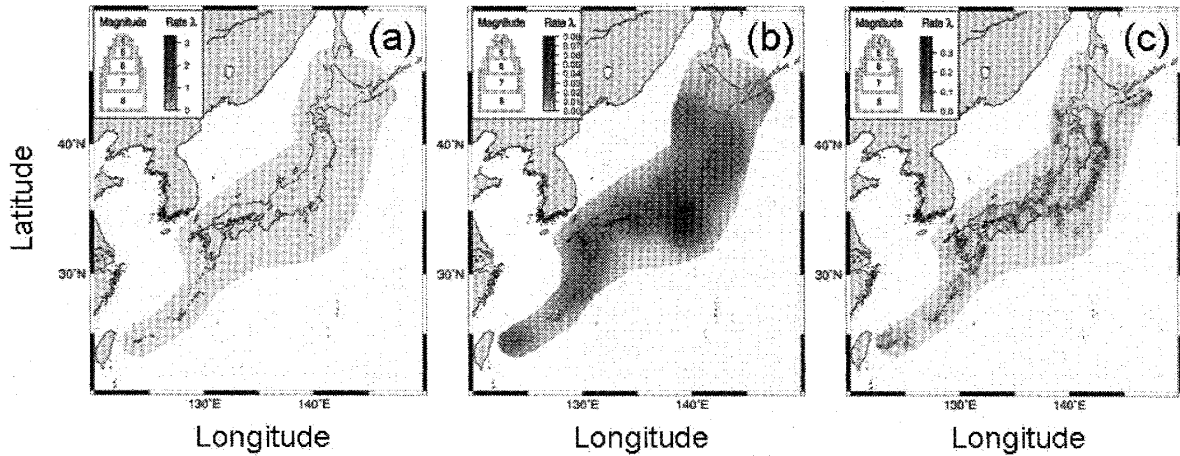


図 4: 予察実験中のモデルに基づく予測地図. (a) RI, (b) Tripple-S, (c) JALM. 予測期間 (2008 年 9 月 1 日 00:00:00-2009 年 9 月 1 日 00:00:00) に起きると予測される $M \geq 4.0$ の地震の個数 (Rate) を示す.

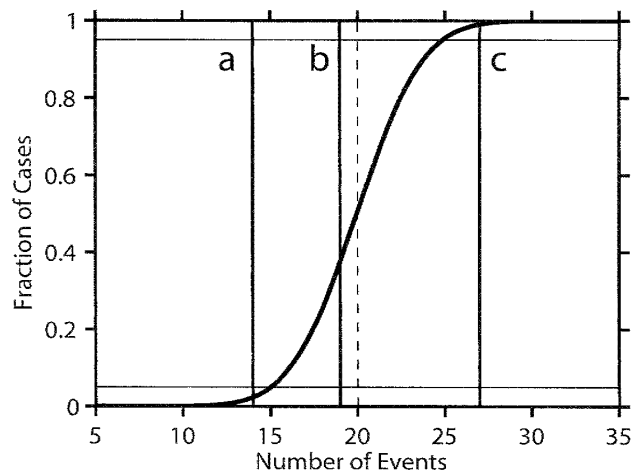


図 5: N-テストを説明する概略図. 地震数の期待値 (予測値) のばらつきを累積頻度分布で示す. ここで, その分布は規格化されているため, 縦軸 (Fraction of Events) は 0 から 1 の値で表現される. 横軸 (Number of Events) は, 地震の個数を示す. 分布の 5% と 95% を示す横棒と予測の中央値 (地震数が 20) を示す縦点線が書き入れられている. 地震の観測数が 14(a の縦実線), 19(b の縦実線), 27(c の縦実線) の三つのケースを考える. (a) の場合, 観測数が分布の 0 – 5% 内の値である. 従って, その観測数は棄却領域内の値である. この時, モデルは過大に予測している. (c) の場合, 観測数が分布の 95 – 100% で表される棄却領域内の値であるので, モデルは過小に予測していることになる. (b) の場合, モデルの予測は観測に対して妥当である.

の全地震を用いた。他の Triple-S, JALM については、それぞれ、[35] と [32] を参照のこと。

N-テストは、観測から得られる統計量 (テスト領域内で、予測期間に実際に起きた地震の数) と、地震予測モデルから期待される当該統計量を比べ、その妥当性を検証するものである [25]。予測の誤差を考慮するために、期待値 $E_j (j = 1, 2, \dots, K)$ と乱数により、模擬予測 $E_j^s (j = 1, 2, \dots, K)$ を発生させる。ここで模擬予測を Q 個作るとする ($s = 1, 2, \dots, Q$)。各模擬予測に対して $e^s = \sum_{j=1}^K E_j^s$ を計算し、 Q 個の e^s を基に頻度分布を求める。そして、その分布と観測値を比べる。N-テストの直感的な理解を助ける概略図 (図 5) に、観測された地震数 (縦実線) と、地震予測モデルを基にした期待数の分布を示した。ここで、これまでの研究に従い、頻度分布の代わりに累積頻度分布を用いる。観測数が期待数の分布から大きく乖離すると、そのモデルは棄却される。もし観測数が分布の上 5 % の棄却領域の値であるならば、モデルは過小に予測していることになる。もし下 5 % の棄却領域の値であるならば、モデルは過大に予測していることになる。それ以外は、そのモデルの予測は観測に対して妥当であることを示す。

本稿執筆当時、2008 年 12 月までに発生した地震は確定カタログに収められている。そこで、2008 年 9 月 1 日 00:00:00 から 2008 年 12 月 1 日 00:00:00 の 3 ヶ月間に発生したと確定された地震を基に観測値とした。比較のために、1 年予測の値を 4 で割り、3 ヶ月予測に変換した値を用いた。RI, Triple-S, JALM の評価結果は、それぞれ図 6, 7, 8 に示す。縦実線は観測値 (29 地震) を示す。モデルから予測された地震数の累積頻度分布の中央値は縦点線で示す。例えば RI の場合、中央値は 69 地震である。全てのケース (図 6-8) で、地震数の過大予測を示すことがわかる。このように、事前予測して、その予測精度を計算出来、さらにその結果を表示出来ることは、検証センターが正しく作動していることを示す。

この実験で過大に予測する理由は以下のようなものである。2002-2007 年の 6 年間にテスト領域で発生した $M \geq 4.0$ の地震を基に、1 年間の平均地震数を計算した。結果は 216 である。従って、3 ヶ月間に相当する地震数は 54 である。この値と、モデルから予測された地震数の中央値 (縦点線) との差は、観測値 (縦実線) との差よりはるかに小さい。このことから、過去の地震活動と比べて、2008 年 9 月 1 日からの 3 ヶ月間は地震活動が低いため、モデルは過大に地震数を予測していることが分かる。仮に 54 個の地震が予測期間に発生したとすると、どのモデルにとっても妥当な予測となる。この観測された少ない地震数は、地震活動の通常の揺らぎの範囲である可能性と、地震活動の経年的な変化である可能性の両方がある。そこで、1 年間の予測期間終了を待って、再評価する必要がある。予測モデルで仮定した地震活動の性質の (モデル間での) 差が、実際に発生する地震活動の統計的な揺らぎを上回るためには、長期にわたる実験を続ける必要がある。

以上のような予察実験を踏まえ、日本の地震活動を予測するモデルの妥当性を検証する実験研究を行う。第一回目の実験開始日は 2009 年 11 月 1 日である⁽⁴⁾。この研究のために、予測モデルの公募を行った。さらに、新たな地震予測の精度を検証する方法の開発と応用を目的とした検定方法の公募も行った [19]。この公募を踏まえて、実験参加者の相互理解と実験詳細打ち合わせをするために、国際シンポジウム“地震発生予測システムの構築に向けて”を地震研究所で開催した。同種の検討会は今後も行われ、第二回目以降の実験も繰り返す予定である。

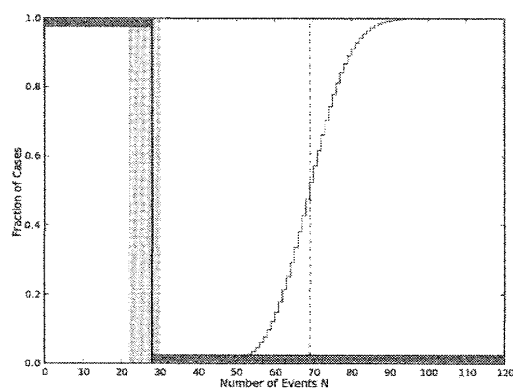


図 6: RI の N-テストの結果. 3ヶ月間 (2008 年 9 月 1 日 00:00:00-2008 年 12 月 1 日 00:00:00) に期待される $M \geq 4.0$ の地震数とその期間に実際に発生した 29 個の地震に基づく. 棄却域 (分布の 0 – 5% と 95 – 100%) を濃い灰色の領域で示す. 縦点線は予測の中央値を示す. 縦実線は実際に上記期間に発生した地震の個数 (29) を示す. 縦実線を含む薄い灰色域は, 地震の位置の決定誤差に由来する.

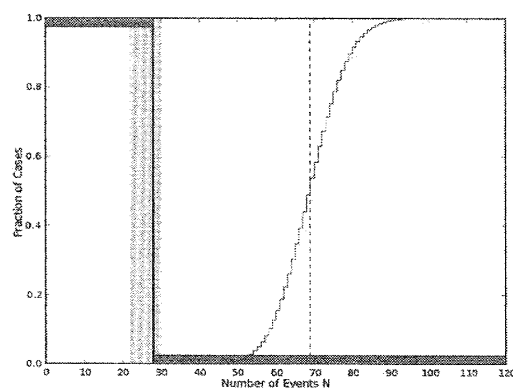


図 7: Tripple-S についての N-テストの結果. 図 6 の注釈も参照.

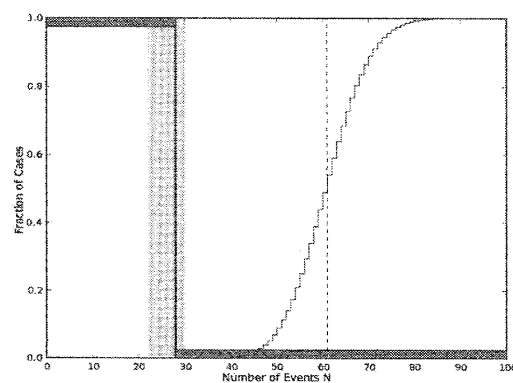


図 8: JALM についての N-テストの結果. 図 6 の注釈も参照.

4 議論と統計物理学者に望むこと

本稿では、現予知研究計画の主要課題である地震発生予測システムの構築に向けた取り組みについて説明した。はじめに、これまでの地震予測研究を基にすると、客観性・再現性の向上が必要であることを述べた。その向上のためには、関連研究をサポート出来る機関としての検証センター作りとその運用が解決策の一つである。更なるサポートをするために、基準となるモデルの高度化が少なくとも必要である。地震予知・予測を“予測科学”として位置付ける本課題は、“次世代研究の枠組み作り”を目指す。

これまでの多数の研究例を見ると、過去に発生した地震の情報を基に、将来の地震発生を予測することが一つのアプローチである。その情報は、地震カタログを用いる方法、古文書等の歴史資料記録を調べる方法、活断層を調べる方法、津波堆積物を調べる方法等によって入手可能である。データベース等へのアクセスをしやすくするために参考文献・ウェブサイト等を付記した。重要なことは、現在使用可能なデータは、人間の観測・調査に基づくため、時空間的に不均質であることである。そのため、地震予測研究の開始前にデータの品質評価が必要である。本研究では、下限マグニチュード (Completeness Magnitude: M_C) という指標を導入し、地震カタログに収められているデータの品質評価を行った例を紹介した。今後は、歴史資料記録を調べる方法、活断層を調べる方法、津波堆積物を調べる方法等で得られる地震データの品質評価を行い、それを有効活用する地震発生予測研究が必要である。

現在整備されつつある実施環境を活用して、予測システムを築くためには、地震発生予測検証実験が有効であることを指摘した。稼動試験を兼ねた予察実験を現在遂行中であり、第一回目の本実験は2009年11月1日に開始する⁽⁴⁾。本格運用のために、地震活動予測モデルを広く公募したが、2009年7月現在、のべ50以上の予測モデルが投稿予定である。これは科学的実験である。従って、“トライ・アンド・エラー”の精神で何度も試行を繰り返す。実験結果を基に、地震発生予測モデルの高度化に必要な検討材料が得られる。それを基に改良されるモデルを用いて、地震発生予測システムの構築に貢献する。

今年度開始の本実験⁽⁴⁾では、予察実験で用いた一年予測に加えて、三つのテストクラスを考える。それらは、1日・3ヶ月・3年予測である。これらのクラスは“全国を概観した地震動予測地図”⁽¹⁾で採用された予測期間30年より短い。これは、短期・中期予測に適用可能なモデルの妥当性検証を目指すという認識による。そのため、非常に挑戦的な取り組みと位置付けられる。

1日・3か月予測のターゲットマグニチュードは $4 \leq M \leq 9$ であり、1年・3年予測については $5 \leq M \leq 9$ である。前者二つのクラスは、いわば地震の“天気予報”を目指す検証実験である。時間スケールを考えると余震予測が狙いである。そのため、比較的小さい地震も予測の対象にする必要がある。後者二つのテストクラスのマグニチュードの最小値($M = 5$)より小さい値($M = 4$)を採用した。1日・3か月予測クラスの有力候補の一つは、統計数理研究所の尾形良彦教授が開発したETAS(Epidemic-Type Aftershock Sequence)モデルである(例えば、[21])。余震の統計的性質を考慮しているので、本震の予測より、余震を予測するのが得意と考えられている。1年・3年予測モデルの例は、本論で挙げた3つのモデルの他に、RELMプロジェクトの特集号(Seismol. Res.

Lett., **78**(1), 2007)に記載されているので参照のこと。これらは、余震予測よりも本震予測を得意とする。

以上のような記述を踏まえて統計物理学者へ望むことは、地震予測学分野への参入である。これは、優秀な次世代予測モデルの可能性を新視点から探る意味で重要であるという認識による。実際、類似の認識で新しい潮流を開拓した例として、エルニーニョの予測が挙げられる [2]。このような成功を期待して、参入を歓迎する。

統計物理学者にとって馴染み深い切り口の一つは、臨界現象として地震発生を捉えるアプローチであろう。“地震＝臨界”の状況証拠については、いろいろ解説があるので、説明を省略する(例えば, [6, 13, 29])。地震が臨界現象であるから、地震は予知できないと議論する地震学者 [3] がいる。しかしその一方で、必ずしもそうとは言い切れないと主張する地震学者もいる。後者の立場で興味深い点は、地震の臨界性を利用して地震予測・予知に成功した例がしばしば報告されることである。ここで、臨界点近傍を表現する力学系のアイデアを利用して地震現象を説明するだけではないことに注意してほしい。ここ 10 年の新展開であるこのアプローチは評価が高い一方で、正当な批判もある。以下に幾つかのアプローチについて概要説明をする。紹介される手法は未だ開発段階にあるが、手法の高度化によって予測性能の向上を目指す課題は検討に値すると考えられる。

第一の例は、比較的大きな空間的広がりの中に見られる地震活動の活発化に基づく手法である。ここで言う広がりとは、断層面と同程度かそれ以上のスケールのことを指す。つまり、 $M = 7$ クラスの地震の発生前に、その発生場所を含む比較的広範囲で $M = 5$ かそれ以上の地震の活動が活発になるような現象を用いる手法である。そのような現象は、相関距離の増加を伴って起きる臨界状態に向かうダイナミクスに類似することが指摘されている(例えば, [1])。一例は、1906 年のサンフランシスコ地震に先行して発生した広域の地震活動である。その地震によって放出されるエネルギーの時間変化は、臨界値に近接する物理量がべき乗で発散するような振る舞いを示すことが報告された [28]。この成果は、地震の発生時期を予測するのに有効のように見える。しかしながら、この研究では、予め予測する地震の位置を知ったうえで、その周辺の地震について解析しないとべき乗増加は観測されないことが指摘されている [5]。今後は事前予測に適用できるように手法を改良することが期待される。

第二の例は、ロシアのグループにより開発されてきた、“M8”または“CN”と呼ばれる中期的な地震予測法である [10]。これも、大地震前に広域的な長距離相互作用が起き、それが地震活動に見られると言う、地震と臨界現象の関連性に基づく。パターン認識の技術を用いて、直径 500km の円形の領域で起きる地震活動が主に解析される。もし彼らの地震予測の手法に従い、地震活動の活性化している地域を検出したならば、その地域にアラームが発令される。このような予測は、1980 年代からなされており、いくつかの成功例が報告されている。例えば、1988 年のアルメニア (Armenia) で起きた地震、1989 年のカルフォルニアで起きたロマプリエタ (Loma Prieta) 地震が挙げられる。最近では 2003 年 12 月 22 日にカルフォルニアのサンシメオン (San Simeon) で起きた地震 ($M = 6.5$)、2003 年 9 月 25 日に十勝沖で起きた地震 ($M = 8.1$) が挙げられる。しかしながら、その一方で、いくつかの巨大被害地震の予測には成功しなかったことも指摘されている [5]。そ

の例として、2004 年 12 月 23 日のマコーリ諸島 (Macquarie Island) 沖で発生した地震 ($M = 8.1$) や 2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ (Sumatra) 地震 ($M = 9.0$) に関してアラームは発令されなかった。

上記の手法とは異なった、統計力学を基に地震発生予測をする手法が研究されてきた。Rundle を中心とする研究グループは、地震と相転移との類似性から、地震活動の活発化又は静穏化する場所で大地震が発生するというアイデアを提唱し、そのアイデアをモデル化して予測を試みている [23]。上記でも議論したように地震活動の変化が将来の大地震と関連あることは多数の地震学者によってこれまで提唱されていた。しかし Rundle らは、大地震と無関係の活発化・静穏化している場所を、関連のある場所と区別して、除去することに成功しているように見える。パターンインフォマティクス (Pattern Informatics: PI) と呼ばれる手法により、大きい地震が将来の 10 年以内に起きやすいと期待される地域を示す予測地図を作成することが出来る。これまで PI 法を用いて、日本及びカルフォルニアの地震予測研究は行われてきた (例えば, [5, 14, 15, 16, 23])。さらに、全地球規模での地震予測にも PI 法を適用してきた [5]。ここで、カルフォルニアの適用例を紹介する。2000 年から 2009 年までに起きる $M \geq 5$ の地震の場所 (ホットスポット) を予測する地図を作成した。作成された予測地図は 2002 年に公表された [23]。2000 年以降に起きた $M \geq 5$ の地震の数は 17 である。そのうち予測地図が公表された 2002 年以降に、12 個の地震は発生した。17 個のうち 15 個の地震がホットスポットで起きている。つまり、その 15 個の地震の場所を予測することに成功している [5]。一方で、PI と RI の予測を比較した Zechar and Jordan [36] は、予測精度の差に統計的優位性は見られないことを報告している。使用した評価手法は ROC ダイアグラムであり、天気予報の予測評価にしばしば用いられている [7]。今後、2009 年までのデータを基に予測の精度評価を再度行うことが必要である。これらの研究例は、地震発生予測が未開拓な領域であることを示している。

5 最後に

現在の予知研究計画⁽²⁾で最重要課題の一つは、地震発生予測システムの構築に資する予測モデルを作ることである。そのためには、地震発生に至る物理・化学過程の理解に基づいて地震発生を予測するモデルを構築することが重要である。同時に、新視点からの予測モデルの構築可能性を厳密に検討することも重要である。このような、予測研究をサポート出来る環境整備の必要性を本稿では強く指摘した。地震予測・予知研究の基盤構築を目指す本課題は、遠回りのアプローチのように見えるかもしれない。しかしながら、地震によってもたらされる災害にはしばしば甚大なものがあり、その被害を最小限にして、安全で安心な社会を実現するという観点から、予測・予知手法が本当に有効か、あるいはどんな条件で有効かを厳密に検討出来る研究環境が必須である。

6 関連ウェブサイト

1. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm
2. http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/07/08071504.htm
3. <http://www.cseptestng.org>
4. http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/ZISINyosoku/wiki.jp/wiki.cgi?page=2009Test_j
5. <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>

謝辞

本稿の解析では気象庁地震カタログを用いた。また、地震研究所の波多野恭弘博士には本稿の執筆を薦めて頂いた。さらに、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの研究費を用いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] D. D. Bowman, G. Ouillon, C. G. Sammis, A. Sornette, and D. Sornette, *J. Geophys. Res.* **103** (1998), 24359.
- [2] D. Chen, M. A. Cane1, A. Kaplan, S. E. Zebiak1, and D. Huang, *Nature* **428** (2004), 733.
- [3] R. J. Geller, D. D. Jackson, Y. Y. Kagan, F. Mulargia, *Science* **275** (1997), 1616.
- [4] N. Hirata, *Earth Planets Space* **56** (2004), xliii-1.
- [5] J. R. Holliday, K. Z. Nanjo, K. F. Tiampo, J. B. Rundle, and D. L. Turcotte, *Nonlin. Processes Geophys.* **12** (2005), 965.
- [6] 伊東敬祐, *科学* **65** (1995), 257.
- [7] I. T. Jolliffe and D. B. Stephenson eds., *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* (John Wiley and Sons, Chichester 2003).
- [8] T. H. Jordan, *Seismol Res. Lett.* **77** (2006), 3.
- [9] 活断層研究会 (編集), *新編日本の活断層, 分布図と資料* (東京大学出版会, 東京 1990).
- [10] V. I. Keilis-Borok, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **93** (1996), 3748.
- [11] 気象庁, *平成 21 年 4 月地震・火山月報* (気象庁, 東京 2009).

- [12] 長尾年恭, 地震予知の新展開 (近未来社, 名古屋 2001).
- [13] 中西 秀, 日本物理学会誌, **49** (1995), 267.
- [14] 楠城一嘉, J. R. Holliday, C.-c. Chen, J. B. Rundle, and D. L. Turcotte, 統計数理 **54** (2006), 281.
- [15] K. Z. Nanjo, J. R. Holliday, C.-c. Chen, J. B. Rundle, and D. L. Turcotte, Tectonophysics **424** (2006), 351.
- [16] K. Z. Nanjo, J. B. Rundle, J. R. Holliday, and D. L. Turcotte, Pure Appl. Geophys. **163** (2006), 2417.
- [17] K. Z. Nanjo, D. Schorlemmer, J. Woessner, S. Wiemer, and D. Giardini, Geophys. J. Int. (2009 in press).
- [18] K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, N. Hirata, and Y. Ishigaki (2009) In Japan Geoscience Union Meeting 2009 (16-21 May 2009, Chiba, Japan), S220-016.
- [19] 楠城一嘉, 鶴岡弘, 平田直, 地震活動の評価に基づく地震発生予測研究グループ, 日本地震学会ニュースレター **20** (2009), 6.
- [20] 楠城一嘉, 鶴岡弘, 遠田晋次, 平田直, 日本地震学会ニュースレター **20** (2008), 16.
- [21] Ogata, Y., Geophys. Res. Lett. **33** (2006), L01303.
- [22] 力武常次, 予知と前兆—地震「宏観異常現象」の科学—, 近未来科学ライブラリー, シリーズ Vol. 8 (名古屋, 近未来社 1998).
- [23] J. B. Rundle, K. F. Tiampo, W. Klein, and J. S. Sa Martins, Proc. Natl. Acad. Sci. **99** (2002), 2514.
- [24] K. Satake, Treatise Geophys. **4** (2007), 483.
- [25] D. Schorlemmer, M. C. Gerstenberger, S. Wiemer, D. D. Jackson, and D. A. Rhoades, Seismol. Res. Lett. **78** (2007), 17.
- [26] D. Schorlemmer, N. Hirata, F. Euchner, Y. Ishigaki, and H. Tsuruoka, In The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (24-27 Nov. 2008, Tsukuba, Japan), Y3-214.
- [27] D. Schorlemmer and J. Woessner, Bull. Seismol. Soc. Am. **98** (2008), 2103.
- [28] L. R. Sykes and S. C. Jaume, Nature **348** (1990), 595.

- [29] D. L Turcotte, Rep. Prog. Phys. **62** (1999), 1377.
- [30] 宇佐美竜夫, 新編日本被害地震総覧 (東京大学出版会, 東京 1995).
- [31] 宇津徳治, 震研彙報 **57** (1982), 401.
- [32] S. Wiemer and D. Schorlemmer, Seismol. Res. Lett. **78** (2007), 134.
- [33] S. Wiemer and M. Wyss, Adv. Geophys. **45** (2002), 259.
- [34] J. Woessner and S. Wiemer, Bull. Seismol. Soc. Am. **95** (2005), 684.
- [35] J. D. Zechar, In International Symposium “ Toward Constructing Earthquake Forecast Systems for Japan ” (27 May, 2009, Tokyo, Japan).
- [36] J. D. Zechar and T. H. Jordan, Geophys. J. Int. **172** (2008), 715.