

# 地震予知研究ノート No.1

佃 為成  
(東京大学地震研究所 地震地殻変動観測センター)

2007年12月

## 目次

	ページ
論文“地震確率予報の実用化 - 長期・中期・短期・直前予報および警報発令・解除 - ” の背景	2～ 5
地震確率予報の実用化 - 長期・中期・短期・直前予報および警報発令・解除 -	6～46

論文“地震確率予報の実用化 - 長期・中期・短期・直前予報および警報発令・解除 -”の背景

東京大学地震研究所 佃 為成

地震予知の研究の第1の主な課題は、前兆現象をどのように認識し、それをどのように検出するかであるが、その情報をどのように予知へ結びつけていくかを考えることも重要で、これは第2の主な課題である。この2つの課題はいわば地震予知研究の“車の両輪”を形成する。後者は、実用的な地震予知を目指す場合に必須な課題であると同時に、前兆現象研究を進める際にも、研究方法の立案やデータの扱い方などに関わってくる。

大地震の前兆現象は、地下でどのようにして大地震発生の準備が行われ、どのような過程を経て大地震に至るのかをさぐる重要な情報（データ）である。後者の課題では、主にそのデータの扱い方を研究する。その際、確率の考え方が重要になってくる。

地震予知とは、簡単に表現すると、前兆現象を検知して、いつ、どこで、どれくらいの規模の地震が起きるかを予測することである。予知の情報は、災害を防止したり軽減するのに役立つが、一方では、社会的混乱に導く場合もある。したがって予知情報は公的機関によって責任をもって発表されるのが望ましく、しかも場合によっては避難命令を伴う警報として発表することになる。このような状況では、地震予知という言い方よりも中国で用いられている地震予報という言葉が適切である。このノートでは公的機関の予知発表を地震予報と呼ぶことにする。

また、地震発生の予報には確率を用いるべきである。それは、第1に地震現象そのものが不確定な要素に支配されているからであり、第2に予知観測情報そのものにも不確定さがあるからである。したがって、予知を行う実際のプロセスは、ある条件のもとでの確率予測になる。

確率は、ある物事が起こることについて、その確実度（確からしさ）の表現である。地震がやってくる確実度を地震発生確率と呼ぶ。前兆現象の情報をかみ砕いて地震発生の予測を行い、その確実性の指標として確率を使う。

天気予報の降水確率は、いまではすっかり定着した。ある一定以上の降水に見舞われる確率を場所と時間を指定して発表している。地震予知に関する地震予報は、天気予報の降水確率とほぼ同列に考えて構わない。どちらも「あるか、ないか」で、もっとも単純な確率の部類に属する。

長期予測として、現在、政府はプレート境界型地震や内陸の活断層で発生する大地震発生の確率を発表しているが、この確率は予知の確率ではない。予知へ向

かうためには、前兆現象の検出を地震発生確率に反映させなければならない。

この長期予測確率を出発点にして、前兆現象が検出されたら、その観測項目の予知に対する貢献度を考慮して、最初に与えた確率を修正する。確率が何倍かに増幅される。別の前兆現象が検出されたときは、その倍率がさらにかかるので、確率の値はさらに上昇する。

一般の多くの確率は確率変数を複数個持つが、地震予報の確率は、確率変数がただ1つである。なぜなら、確率変数は地震が発生するか(1)、しないか(0)の2つのデジタル量だが、地震が発生しない確率は1から地震が発生する確率を引けば求まるから「地震が発生する」だけで済むからである。

このように、この世で最も簡単な確率であるにも関わらず、従来、一方では予知の確率として適中率、予知率などがあり、海溝でのプレート境界や活断層の長期予測では、地震発生確率と呼ばれ、長期予測の場合は確率モデルに基づく確率を用い、前兆現象を基に予測するときは適中率という概念が出てくる。

地震が起きるか起きないかの予測としては長期予測も予知も同じではないか、長期予測と前兆予測を結びつけることはできないのか、という疑問が湧いてくる。そこで、「両方同じだ。これを結びつけばいい。それには、ベイズの思想を取り入れればいい」と考えた。

事前確率というものがまず存在して、情報が入って条件が加わるとその確率が変化する。それを事後確率と呼ぶ。この考え方はベイズが提案して200年以上、大方に受け入れられなかった。事前確率のことを先験的確率と称したことにも一因がある。現在、ベイズの定理として知られている式は、何もベイズに登場願わなくても、頻度(数学では測度)の関係を考察することによって容易に導くことができる。そのもっとも分かりやすい方法が数学の集合を図の面積などで表現した方法である。佃(2003)やこのノートの論文に示した。

日常我々が見かける確率の世界をざっと分けると、“頻度確率”と“主観確率”になる。前者は“客観的確率”とも呼ばれ、数多くの実験の繰り返し可能な場合に保証されているとする考えに立脚している。その他は“主観確率”となる。“頻度”を念頭に置きながらも、仮説的なモデルを想定すればこれも“主観確率”になる。これらの立場はそれぞれ、“頻度説”、“主観説”と呼ばれている。

永い間埋没していたベイズの思想が最近数十年の間に復活した。逆問題の解法の中に取り入れられたことも大きい。ベイズの流儀は統計学の歴史家の分類では、“主観説”と言われる。ところで、いわゆるベイズの定理は、その式だけを取り上げると、“頻度確率”の世界でも働く。ベイズの定理だけがベイズ流ではない。ベイズ流の神髄は事前確率から事後確率へどのように“変身”するかのところに潜んでいる。

ベイズ流に考えると、長期予測の確率も前兆現象にもとづく確率も1つであっ

て、それに条件が付加して変化するということになる。そこから出発したら、確率としては「地震発生確率」1つを考えればいいことになる。付加する条件としては、ベイズの定理に現れる“条件付き確率”というもので表現される。これが2つあり、論文で予知率と空報率と呼んでいるものである。

予知率と空報率は、“頻度説”で求めることも原理的（理想的な場合）にはできるが、地震予知の場合は、変則的な“頻度説”という“主観説”によらざるを得ない。ちなみに長期発生確率の推定に際しても仮想モデルを設定するので、これも結局は“主観説”に属する。

地震予報による確率は、結局“主観説”の確率であるが、この主観が個人の主観ではなく、多くの人々の“主観”、すなわちだいたい合意が成立することがこの確率論の条件になる。それより良い考えは浮かばないというぎりぎりの選択で決定されると思う。そのために多くの人々の間で議論を深めていく必要が出てくる。その議論への糸口として、このノートにおいて、1つの考え方を提示した。

長期予測の地震発生確率を最初の事前確率として、これから出発して、条件が加わるごとに次々に事後確率を求めていく。その計算に必要な“条件付き確率”をどのようにして求めるかを少し説明する。

1つの有力な方法が実際の異常現象の観測結果を地震発生事象とともに記録した表をつくり、そのデータを活用することである。論文で2x2分割表と呼んでいる。このデータから予知率と空報率を求める。

ここまでくると先行研究と出逢う。故宇津徳治先生が1982年の論文で、この2x2分割表を使用された。そして、この表を用いて予知率（宇津先生の命名）と空報率（宇津先生は記号のみで名前はつけておられない）のほか、適中率などを定義された。1977年の論文では必ずしも明確でなかった適中率や予知率の定義が他の確率などとともにきちんと定義された。この表は元々は実験データ（観測データ）の結果を整理したものである。例えば、予知率とは発生した地震の回数に対し、前兆現象と思われる異常現象がその前に見つかった回数の比あるいは率である。このような統計量は野球の打率のような量で、これを監督は確率と考えて、この確率を参考にして選手を起用する。地震でも予知率を確率と見なすわけである。先の条件付き確率の1つがこれで推定できたことになる。

宇津先生はこの表をもとに、十分長い期間のデータをとったときの理想の場合について、予知に関係するいろいろな確率を組み立てられた。長い間のデータから割り出す平均的な地震発生率も考えられ、1999年発行の先生の本「地震活動総説」において永年の発生率と名付けられた。これは、この確率で予報を出すと、前兆現象など知らなくても偶然当たる確率という意味合いをもつ。前兆現象と思われる異常現象が見つかった回数に対する、その後地震が発生した回数の比あるいは率を適中率と言ひ、これが地震予知の予報の確率だということになって、それが現在、一般には定着している。

このノートの流れでは、ベイズの定理の式が最初に出てくる。この理想的な 2x2 分割表に当てはめることは容易で、宇津先生が求められた式はすべて簡単に導き出すことができる。宇津先生は表のパラメータの関係式を書き上げ、この代数式の四則演算で、いろいろな確率（率を理想化して）を表現された。先生の式には逆数の表現が多い。式のそれぞれの項をまとめるとき、その方が都合がよかったからだろうと推察する。多項目の観測に対してはベイズの定理に相当するものもある。

一方、このノートの論文では、予知率と空報率という条件付き確率を推定する以外は、2x2 分割表は必要ない。また、この表に依らなくても別の推定法もあり得ることが織り込まれている。

結局、考える必要のある確率は、地震発生確率（事前確率や事後確率になる）と予知率、空報率だけである。しかも、地震発生確率を決めるのは、予知率/空報率 という比（各現象についてただ 1 つ）だけである。

このノートの論文の方法は、今までのものと考えが少し違うだけで重要な式についてもすでに出されているのではないかと指摘する方がいる。しかし、考え方やアプローチの仕方、式の導き方が異なり、さらに、少なくとも次の 2 点は全く新しい成果である。

- 1) 前兆現象のデータが付け加わるたびに、事前確率を修正しながら事後確率を導く。そのときに有用な漸化式を導いた。
- 2) 予知率/空報率 という比が確率の変化を決める。

この論文は、実用的な地震予知へ向けての準備として、確率予報システムの試案を示したものである。まだ多くの解決すべき問題を抱えているが、佃（2003）で発表した原理的なデザインをもとに、これを応用する場合の諸問題や他の考え方との調和、応用の実例を取り上げ、このように予知確率システム実用化への道を模索していることを多くの研究者に知っていただき、ご意見を賜りたいと願って執筆したものである。

以上が、「地震予知研究ノート」の最初の巻に確率の話を採用した主な理由とその背景である。

## 地震確率予報の実用化

- 長期・中期・短期・直前予報および警報発令・解除 -

東京大学地震研究所 佃 為成\*

Realization for Earthquake Forecast based on Probability  
- Long-Term, Intermediate-Term, Short-Term and Immediate-Term Forecasts, and  
Earthquake Warning and its Cancellation -

Tameshige Tsukuda\*

Earthquake Research Institute, The university of Tokyo  
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

\* e-mail : tsukuda@eri.u-tokyo.ac.jp (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

## Abstract

Practical forecast of an impending large earthquake would be performed by issuing an occurrence probability of earthquake at an arbitrary time, or forecasting time. By detecting anomalous signals of observed data during a period preceding the forecasting time, which we call detecting period, the probability that an earthquake will occur for a period following the forecasting time, i.e. forecasting period, is obtained through the process presented by Tsukuda(2003). In his method, a prior probability is transformed into the corresponding posterior probability. This is regarded to be the next prior probability, which will be transformed into the next posterior probability and so on. A posterior probability is generally deduced from Bayes' theorem in terms of a prior probability and two conditional probabilities: "alarm-rate" and "null-alarm-rate". This paper provides supplements for the fundamental scheme of probability calculation and presents some practical applications.

Forecasts are classified into 4 terms: Long-term forecast has a role to provide the initial prior probability; Intermediate-term forecasting procedure, which partly depends on social conditions, is designed in such a manner that the warning or alarm should be practically effective; Short and immediate-term forecasts are set for preparations for warning. For an alarm cancellation process, two methods are presented: one based on the probability that the forecasting earthquake will occur, and the other the probability that the earthquake will not occur. The latter will be effective when the observation system is highly developed.

Previous statistic studies on the precursors of earthquakes have not evaluated the ratio, alarm-rate / null-alarm-rate. To incorporate the previous results into our forecasting system, the formula to deduce the ratio from the parameters obtained by previous studies is presented. In connection with reliability on precursor data, a statistic test is attempted to confirm how the parameters, the number of trials, prior probability, alarm-rate, and the ratio, contribute to the detection of precursory signals. The essence of our method is to estimate the ratio, alarm-rate / null-alarm-rate for each observation item. Some examples for obtaining this are presented.

Key words: earthquake prediction, earthquake forecast, probability, alarm rate, null-alarm rate



## §1. 序論

わが国で地震予知の本格的な研究が開始されてまもなく、力武（1969）は予知の確率について一般的ないし基本的な枠組みを提案した。その骨子は、多くの地震予知データを分析してその確率モデルに基づいて将来の地震発生を予測するものである。その後、宇津（1977,1982,1983）は地震発生前の前兆現象（正確には異常現象）データを活用して地震予知を行う場合について、適中率、予知率などの確率概念を導入した。これによると、観測データに対する確率モデルの代わりに実際の経験的データを用いて確率予知（予測）を行うことができる。佃（2003）は、力武（1969）の“試論”の中に予知率、空報率という確率概念を注入し、実用的な問題設定を行い、地震発生確率の体系の簡素化した枠組みを示した。

これを活用すると、長期予測に基づく地震発生確率を出発点にして、様々な前兆現象データの情報を取り入れ、その確率の更新を行いつつ、直前の予報確率まで繋いで行くことができる。予報プロセスを表現するために必要かつ十分な確率概念は、地震発生の事前確率、条件付き確率（予知率と空報率）、それに地震発生の事後確率である。任意の予報時刻に対し、それ以前に検知対象期間、それ以後に予報対象期間が設定される。検知対象期間の観測データに異常が検出されると、予報対象期間における地震発生確率を算出する。その際、観測項目毎に与えられている条件付き確率を活用することになる。この異常データの入手以前の地震発生確率を事前確率、算出された確率を事後確率と呼ぶ。

異常データが検出される度に、いままでの事後確率が今度は事前確率に置き換わり、次の事後確率を生む。予報を発表しようとする時刻までに得られた最終的な事後確率がすなわち地震予報に用いる地震発生確率である。このようにして、長期的な予測に基づく地震発生確率と短期の予測に基づく地震発生確率が結びつくことになる。この理論では各種の予知観測データから求められるそれぞれの“予知率／空報率”というパラメータが重要である。

本論文では、実際の予報の体系の組み立てを試みる。主要な課題は以下の3点である。

- 1) 予報対象期間や検知対象期間を具体的にどのように設定したらいいのだろうか。この問題への解答は、前兆現象の研究のこれからの発展に左右されるが、現時点で考えられることはどんなことであろうか。予知研究者、予報を行い情報を公表する側、情報を受け取る側の3者の立場で検討する。
- 2) われわれの方法は事前確率と事後確率の連鎖で成り立っている。そして最終的な地震発生確率は、最初に用いる事前確率の値に強く依存している。これは長期予知（長期予測）の手法で求められるが、実際の方法についての若干の考察を行う。
- 3) 直前の予報はすなわち警報の発令であり、それによって何らかの防災対策が実行に移される。予報は

必ず当たるとは限らない、はずれる場合の方がむしろ多いと心得なければならない。警報が発令されたのち、地震発生に至らないとき、その解除が適切になされるかどうか大きな問題である。警報解除の手続きはどのようにすべきであろうか。実用的な地震予知において避けて通れない課題である。

また、前兆現象データから得られ、本論文の方法の鍵となる量、“予知率 / 空報率” について、下記のような考察を行う。

1) 出現した前兆現象の観測項目に対する“予知率 / 空報率” を媒介にして次のステップの地震発生確率（事後確率）を求めるのがわれわれの立場である。前兆現象データの2 x 2 分割表がその推定に用いられる。ところが、“予知率 / 空報率” を陽に求めず、直接、地震発生確率（この場合、適中率と呼ばれる）や確率利得[Aki(1980)]を推定する方法が存在する[例えば、Yamashina (1981), 前田 (1993), 井元 (2002)]。そのような過去の前兆現象研究の結果から“予知率 / 空報率” を推定し、我々の枠組みに注入したい。このようにして、地震発生確率の推定に際し、より多くの前兆現象データを活用することができる。

2) “予知率 / 空報率” が高いほど予報の確率は高くなる。しかし、その値を求める場合の統計的な評価が問題になる。データ数が多いほど求められた値の信頼性は高いと思われるが、その他のパラメータに対する依存性はどうか。異なった前兆現象について、そのデータの予報の確率に対する貢献度や性能を比較する。井元 (1994) は、データ数が多い場合について、前兆現象の性能評価法を提示した。この評価法が、われわれの立場ではどのように定式化できるであろうか。

3) 実際の前兆現象のデータから、“予知率 / 空報率” を求める具体的な方法を提示する。空報率を求めるための基本的な考え方をとくに強調する。

## §2. 確率による予報の原理

佃（2003）に示した確率予報の方法の要点を以下にまとめておく。用いる基本的特殊用語は、予報時刻、検知対象期間（異常検知対象期間）、予報対象期間、予知率、空報率だけである。ある地域において、予報対象期間に、ある規模以上の地震が発生する確率を求める。その確率には、すでに分かっている確率（事前確率）と、ある予報時刻において、それに先立つ検知対象期間の異常データが確認された場合に得られる確率（事後確率）の2種類がある。事後確率は、事前確率と条件付き確率から簡単に求められる。新たな異常データ検出に伴って、時々刻々、前の段階の事後確率は次の段階の事後確率に置きかわってゆく。予知率と空報率が、条件付き確率で、前者は地震が伴うという条件で前兆的異常が検出される確率、後者は地震を伴わずに前兆的異常が検出される確率である。理論の前提となる事柄を簡略化してまとめる。

**P1)** 対象とする地震は、ある一定の規模以上とする（主に被害を及ぼす大地震）。連鎖的に発生する地震は1回とみなす。

**P2)** 地震の予報対象地域を予め設定しておく。

**P3)** 予報の発表には、場所、発生時期、地震規模の3要素を述べる。その際、発生時期については、発表時からいつまでの間のことを明確に示す。その期間を“予報対象期間 (forecasting period)”と呼ぶ。

**P4)** 予報は任意の時刻に行うことができる（予報時刻:forecasting time）。

**P5)** 注目する現象やその異常の判定については、その特徴などについて予め定義をしておく。各観測項目の異常検出については、それぞれの観測項目に対して異常の“検知対象期間 (detecting period)”の長さが定められている。

**P6)** 各観測項目のデータは統計的に独立であるとする。

**P7)** 同じ種類の観測データでも、その変動の時定数が大きい現象と小さい現象がある。そのような場合は、時定数による区別を行い、別々の独立した観測項目として取り扱う。

**P8)** 対象とされる地震の発生については、予報を行う以前に、すでに、ある確率が与えられているとする（事前確率）。

**P9)** “予報対象期間”の長さは、すべての観測項目において同じとする。“予報対象期間”の長さが異なっている場合でも、同一になるように修正できる [佃（2003）]。

予報時刻、検知対象期間、予報対象期間と時間軸の関係を Fig. 1 に示す。まず、現在の時点を予報時刻に設定すれば、予報対象期間は未来を表す。予報時刻を過去のある時刻に設定し、予報対象期間も

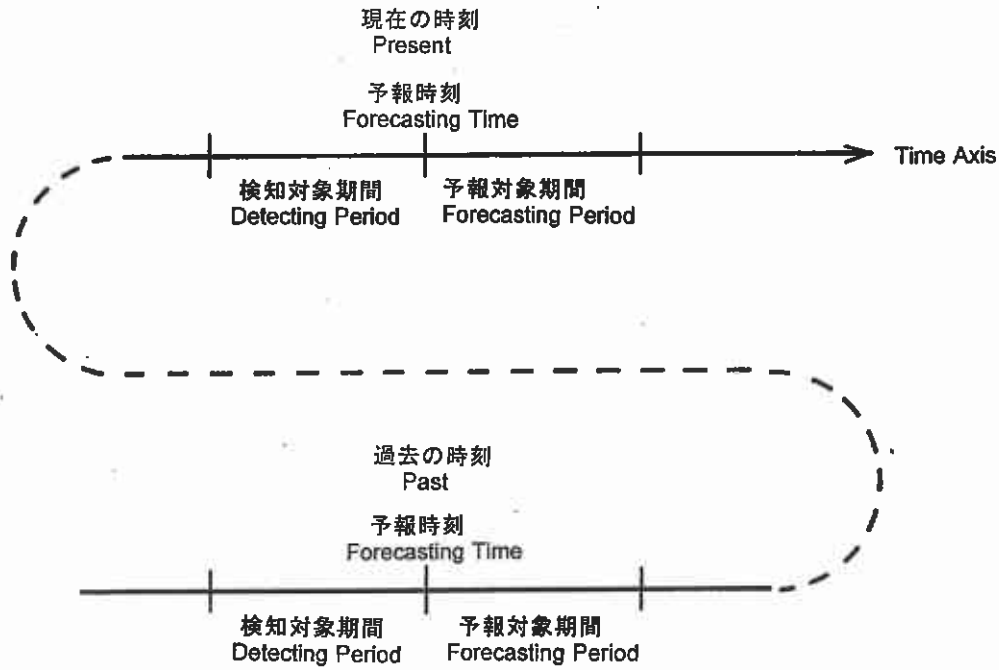


Fig. 1 Forecasting time, anomaly-detecting-period and forecasting period. When an earthquake forecast is assessed, we check if any anomaly of observation would be observed during the assigned anomaly-detecting-period prior to the forecasting time, and issue an alarm to the public if the probability that an earthquake will occur during the assigned forecasting period is estimated to be higher than an assigned threshold. This forecasting time scheme is extended to the past-time axis for summarizing records of earthquakes and their precursors. The forecasting period in the latter case implies the period after the hypothetical forecasting time.

Table 1. 2 x 2 contingency table for counting earthquake events and precursory signal events. Anomalies and earthquake events are picked up based on the chronological framework shown in Fig. 1.  $m, n, \mu, \nu$  registered in 4 boxes are the fundamental counting parameters. The subtotals  $M = m + \mu, N = n + \nu, F = m + n$ , and  $G = \mu + \nu$  are defined. The total number of trials is  $T = M + N = F + G$ . The alarm-rate and null-alarm rate are defined as  $q = m/M$ ,  $s = n/N$ , respectively.

	検知対象期間の前兆的信号 (Precursor)			
		あり (Yes)	なし (No)	合計 (Total)
予報対象期間 の地震 (Earthquake)	あり (Yes)	$m$	$\mu$	$M$
	なし (No)	$n$	$\nu$	$N$
	合計 (Total)	$F$	$G$	$T$

過去に設定することもできる。この場合は、予報を実際に行うのではなく、データ収集のための試行実験という意味合いになる。ここで重要なのは、前兆現象のデータを入手する場合も、これらの前兆現象を用いて予報を行う場合も、結局、同じ試行を行うことになるということである。この試行を行う回数に対する、事象が発生する回数の比が確率の推定に用いられる。

予報の実施にあたっては、予報時刻は予報発表の時点、すなわち現在の時点に設定するのが理想であるが、データの取得と確率の計算に時間を要するので、実際は少し前の過去の時点になる。予報時刻を設定したとき、その時刻を現在と見なして以下の考察を行う。

過去の前兆現象データは2x2分割表にまとめられる (Table 1)。予知率や空報率を推定するため、一般的な異常現象の特性に注目するのであれば、**P2)**あるいは場合によっては**P1)**の前提をはずし、ある地域の地震発生予測に対して、他の地域において得たデータを混合して用いることができる。

以上の前提に立って、確率の体系を以下のように構築した。予報対象期間内に地震が発生する事前確率  $p_0$  が与えられているとする。異常が検出された観測項目に番号をつけ、 $i$  番目の観測項目に対する予知率を  $q_i$ 、空報率を  $s_i$  とする。1, 2, ...,  $i-1$  番目までの観測情報に基づいた事後確率 (地震発生確率)  $p_{i-1}$  が分かっているとき、 $p_i$  を求めるには、ベイズの定理において事後確率を次の事前確率に繰り込んで、 $p_0$  を出発点とした次の漸化式を用いればよい [佃 (2003)]。結果は次のようになる。

$$p_i = \frac{p_{i-1}q_i}{p_{i-1}q_i + (1 - p_{i-1})s_i}. \quad (1)$$

これを整理して2つの漸化式に分けて書くこともできる。

$$p_i = \frac{x_i}{x_i + a_i}, \quad (2)$$

$$a_i = \frac{a_{i-1}}{x_{i-1}}. \quad (3)$$

但し、

$$x_i = \frac{q_i}{s_i}, \quad a_1 = \frac{1 - p_0}{p_0}. \quad (4)$$

漸化式(3)の代わりに、

$$a_i = \frac{1 - p_{i-1}}{p_{i-1}} \quad (5)$$

を用いることもできる。次のステップの  $x_i$  に対する予報対象期間の長さが変更になる場合に利用する。この式において、 $p_{i-1}$  の代わりに次の予報対象期間に適合するよう修正された  $p_{i-1}^*$  を用いればよい。

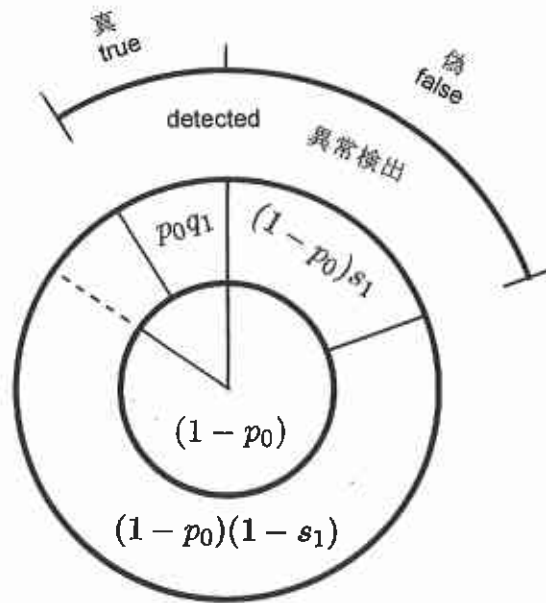


Fig. 2 Bayes' theorem is graphically demonstrated. The probability domain of the first ring is divided into two:  $p_0$  and  $1 - p_0$ , where  $p_0$  indicates the probability that an earthquake will occur, and  $1 - p_0$  that it will not.  $p_0q_1$  and  $p_0(1 - q_0)$  in the second ring occupy the domain that an anomaly was detected;  $(1 - p_0)s_1$  and  $(1 - p_0)(1 - s_1)$  that it was not, where  $q_1$ , and  $s_1$  are the conditional probabilities: alarm-rate and null-alarm-rate for the data 1, respectively. Then, the probability that an earthquake will occur when an anomaly of data 1 was detected is given as:  $p_1 = p_0q_1/[p_0q_1 + (1 - p_0)s_1]$

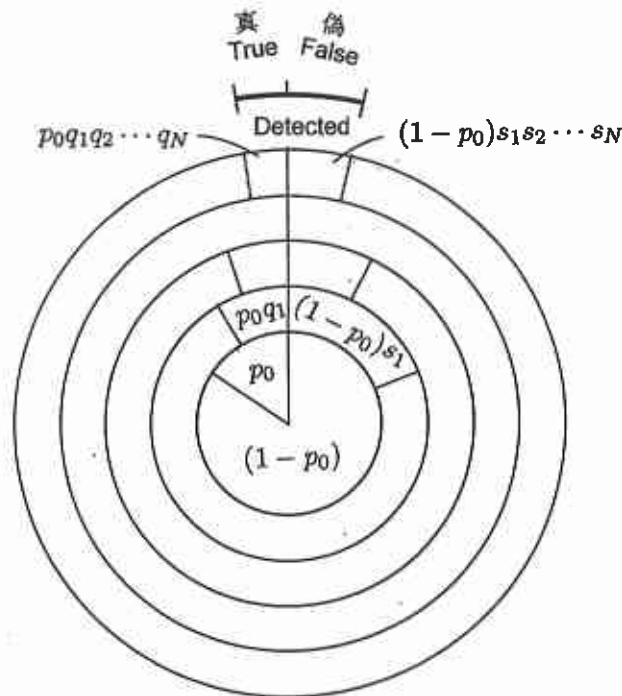


Fig. 3 Graphical arrangement for deduction of Eq.(7). The Bayes' theorem is repeatedly applied to the multi-layered probability rings.

上の漸化式より、異常が検出された観測項目が  $N$  個あるときは、結局、

$$p_N = \frac{x_1 x_2 \cdots x_N}{x_1 x_2 \cdots x_N + a_1}, \quad (6)$$

あるいは、

$$p_N = \frac{p_0 q_1 q_2 \cdots q_N}{p_0 q_1 q_2 \cdots q_N + (1 - p_0) s_1 s_2 \cdots s_N} \quad (7)$$

と表現される。ただし、この式は各観測項目に対する予報対象期間が同じである場合に適用されるのであって、それが異なる場合には、漸化式を用いて予報対象期間が同じになるように調整しながら多項目の観測による確率を計算する。

$p_0$  が非常に小さい場合は、式 (4) より、 $a_1 \sim 1/p_0$  である。そのとき、式 (6) は、ほぼ

$$p_N \sim \frac{p_0 x_1 x_2 \cdots x_N}{p_0 x_1 x_2 \cdots x_N + 1} \quad (8)$$

のように近似できる。さらに、観測項目  $i$  の“予知率/空報率”  $x_i$  のそれぞれが大きな値をとらず、 $p_0 x_1 x_2 \cdots x_N$  も 1 に比べ格段に小さいならば、式 (8) は、だいたい

$$p_N/p_0 \sim x_1 x_2 \cdots x_N \quad (9)$$

と考えてよい。

実際の予報における確率の計算には、上記の漸化式を用いるが、式 (1) や式 (7) を得るには Fig. 2, Fig. 3 に示した図式解法が簡単である [佃 (2003)]。Fig. 2 は最も簡単な場合のベイズの定理の証明にもなっている。すなわち、確率変数の集合領域を円グラフで表現した。この円グラフは実はリングを表しており、それを多重リングに拡張して、独立の前兆現象が多数観測されたときの確率の式の導出に応用したのが Fig. 3 である。

ある事前確率を出発点とし、異常を観測した観測項目の追加にともなって、事後確率の数列が成立している。次の節において論じるように、最初的事前確率として長期的な予測による確率を採用するが、予報時刻が変更されるとこの値も変更される。時間の経過にともなって予報時刻を変更すると、最初的事前確率の変更、異常データの取得、漸化式による確率計算のし直しを行う。そして最後の事後確率も変更される。確率が時間とともに変化するという意味はこのことである。

## § 3. 予報の体系

### 3.1 前兆現象の定義

前兆現象の個別的な検討は、別の論文で行うが、ここでは一般的な検討を行う。まず、前兆現象の定義づけが必要である。観測や観察によって見出される異常現象があり、その現象が出現した後、ある確率で地震が発生する場合、その異常現象を前兆現象という。それは、観測点によって、また観測項目によって、さらに、同じ観測項目であっても検知対象期間の時間的長さによって定義が異なってもよい。異常現象を見いだすには、精密な観測データの存在が理想であるが、いわゆる宏観異常現象のように人々の観察で認められる場合も、明確な判定材料を提供するものは、これを取り入れるべきである。そのようなものを含めて、以下のように異常現象に関する情報の質を、低いランクから高いランクに区分する。

Rank 1) ある現象について、式や数値で表現できないが、異常という特徴を明確に記述できる。

Rank 2) 1つの現象について、上の記述が複数存在する。その個数は数値化データの一つの成分となる。

Rank 3) ある現象について、簡単な測定がなされ、現象の記述に数値化データが含まれている。

Rank 4) 物理的ないし化学的な、ある量について、時間的に連続の観測値が得られている。その観測値に基づいて異常が定義されている。

ここで、観測データと異常検出の典型的な例を念頭において図示化してみる (Fig. 4)。(a) は生のデータのグラフを表現した。データは1成分とは限らず、複数の成分をもつ場合もある。(b) は異常を見いだすために処理したデータのグラフである。異常を示すインデックスと呼ぼう。(c) は異常を検出したときのフラグを示した。現象が始まる時刻、明瞭に確認された時刻、終了が確認された時刻などにフラグを立てる。フラグに上記のランクをつけることもできる。(d) は地震発生時刻を示す。異常現象は検知対象期間、地震は予報対象期間に発生するものを対象としている。ところで、前兆現象である確度は、必ずしも上のランクで決まるものではない。Rank 1であっても、極めて明瞭な事柄も存在する。例えば地下水の異常に関して突然自噴が起こったという証言 [Rikitake(2001)] などがある。このようなプリミティブなデータの場合は、上の (a), (b) の部分がなく、いきなり (c) が得られることになる。

今、“前兆現象発生時刻”を定義する。異常が始めて明確に確認された時刻はその候補の一つである。また、同じように異常の終了が明確に確認された時刻も候補である。異常検出の作業の観点からは、異常が最初に明瞭にとらえられた時刻が最も単純である。そこで、最初に明確に異常を検出した時刻を“前兆現象発生時刻”と定義する。現象によっては、異常終了時刻が明瞭に検出される場合があるであろう。その場合は、例えば“第2前兆現象発生時刻”と定義する。



次に“前兆現象発生時刻”から地震発生時刻までの時間が定義される。これは前兆現象の“先行時間 (precursor time)”と呼ばれているものである [例えば, Rikitake(1975)]。一つの前兆現象に対し, 先行時間は, ある統計分布をすると考えられる (Fig. 5)。今, 典型的な例として, この分布は山型をなし, いくつかのピークをもつとする。それぞれのピークに対し, 分布の主要な領域の時間的上限を“限界先行時間 (upper limit of precursor time)”と定義しよう。Fig. 5 に示したように, あるしきい値を定め, それぞれの分布曲線がそれを切る点を読むというのが一つの方法である。

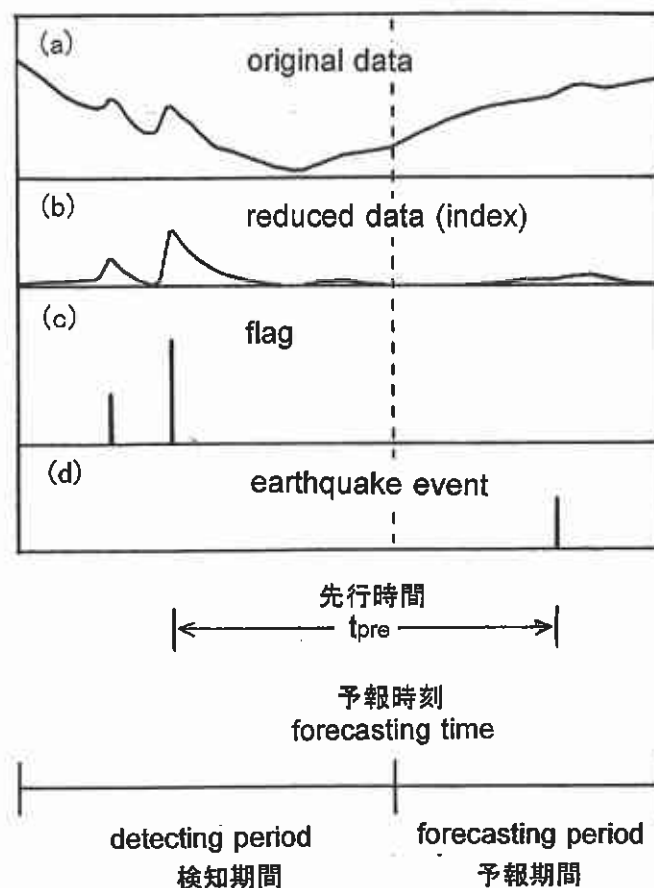


Fig. 4. Time sequence for detecting precursory signals: (a) Temporal variation of the original data; (b) Index chart by reduction of the data; (c) Flags for detection; (d) Earthquake event. Precursor time  $t_{pre}$  is defined to be a time-length covering from the forecasting time up to the occurrence time of the most remarkable precursor shown by a flag in (c).

### 3.2 検知対象期間と予報対象期間

任意の予報時刻に対して、地震を予報する期間、すなわち予報対象期間および、異常検知を目的としてデータを監視する期間、すなわち検知対象期間の設定方法は、前兆現象の現れ方に依存する。“限界先行時間”を用いて、以下の“提案”を行う。

**T1) 検知対象期間長の設定：**“検知対象期間”の長さは、“限界先行時間”とする。同じ観測項目であっても、現象の時間スケールによって、複数の“限界先行時間”が存在する場合がある。その場合は、それぞれに対する“検知対象期間”が定められることになる。但し、いくつかの“限界先行時間”の最大値を一つの“検知対象期間”に対応させることもあり得る。異なる時間スケールの現象を一纏めにして考える立場である。

現象の異常を確認した時刻から地震発生までの時間の最大値は“限界先行時間”と見なすことができる。よって、検知対象期間の最後に異常を検出するとき、つまり予報時刻の時点が“前兆現象発生時刻”に一致するとき、予報対象期間として必要な長さは“限界先行時間”である。このことから以下の“提案”を行う。

**T2) 予報対象期間長の設定：**“予報対象期間”の長さは“検知対象期間”の長さに一致させる。

予報対象期間の長さ設定の基本は上の通りであるが、実用上の要求や他の現象による設定と融和させるため、設定を多少修正することがある。警報を行う場合については3.5で述べるような設定を行う。

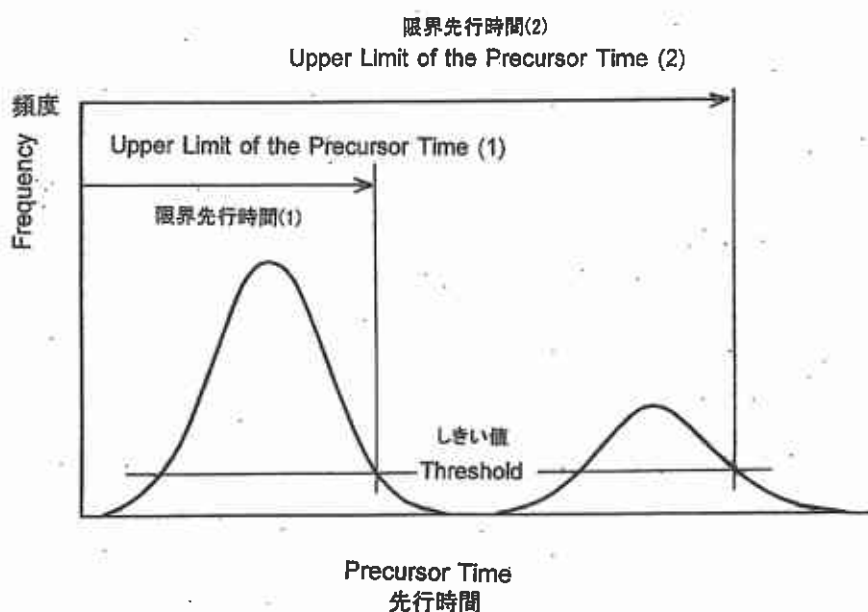


Fig. 5. Distribution for precursor times for an observation item. The case with two peaks in the distribution is shown. The upper limit of the precursor time for each peak is measured as shown in the figure.

### 3.3 直前予報と短期予報

予報を受け取る側から考えると、最も強い関心が高いのは、緊急な対応が必要な場合、すなわち警報が発令される場合である。これを直前予報と呼ぼう。すなわち、予報確率が高くなり想定基準を超えるような場合の予報であり、行政的に拘束力を持たせるための情報である。経済的損失や忍耐の問題、効果的な避難の実現などを考慮する。経済や社会心理の研究を待たねばならないが、予報対象期間は数日～1週間ぐらいであろう。大地震発生の可能性が低くなったと判断されれば、警報解除を行う。これが解除できなければ、大きな社会的混乱を覚悟しなければならない。

予報確率がある設定値を越える事態のとき警報を発することになる。その設定値については、社会情勢に強く依存する。100%に近いことに越したことはないが、そのような高確率を期待できるだろうか？ 一方、数%のような小さい確率で一般の人たちは納得するだろうか？ 数回に1回ぐらいは当たるくらいの確率が最低必要ではないか。つまり、設定値は数10%以上に定めるのが妥当であろう。

警報が発令される前から、適切な情報を提供しておくことは、社会不安を抑制するために不可欠である。これを短期予報と呼ぼう。大地震発生が切迫しているかもしれないという予報である。まだ、確率値は警報発令時の基準に比べそれほど高くはない。期間は数ヶ月～1年とする。その理由は、先行時間が数ヶ月の現象は多く報告されている〔例えば、地震火山研究部(1990)〕ことと、直前予報へ向けての観測強化などの準備を行うために必要な時間と考えられるからである。新たに展開される各種観測は、主に直前の前兆現象検出の有力な武器になるであろう。また、予報を出す側の観測強化などの行動が、情報を受け取る側に防災への意識を高めていく動機を与える。

### 3.4 長期予報と中期予報

以上は警報発令へ向けての観点から考察したが、予報を発する立場からは、まず最初に長期的な予測を立てる。最初の事前確率を求めようとするプロセスが長期予報である。この場合は、前兆現象の観測に依らず過去の地震活動のデータのみから発生確率を推定する。

任意の予報時刻に対し、時間長  $T$  の予報対象期間において、地震が発生する確率を  $p$  とする。地震の発生がランダムだが、ある一定の平均値が存在するとき、地震回数  $k$  に対する確率分布は次のような Poisson 分布となる。

$$P(k) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T) \quad (10)$$

$\lambda$  は単位時間あたりの平均発生数、すなわち、地震発生率である。強度関数とも呼ばれる [例えば、Thompson(1988)]。この分布に支配される地震活動の特徴を言葉で表現するならば、発生頻度が低く、しかも時間的にランダムに発生するが、発生の平均値はいつも一定ということである。2x2 分割表 (Table 1) から定義される永年の発生率 [宇津 (1999)] はこの平均値の推定値である。

長い時間軸の中で、 $t$  の長さをもつ期間を取り上げる。Poisson 分布の式 (10) から、地震回数  $k$  が 0、すなわち、その期間に地震が発生しない確率を導き出すと、

$$P(k=0) = \exp(-\lambda t). \quad (11)$$

その期間に地震がともかくも発生する確率は、

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (12)$$

今、取り上げた期間  $t$  の始点を、ある地震が発生した時点とする。そのとき、式 (12) は、次の地震が経過時間  $t$  までの間に発生する確率を表している。時間軸のどの区間においても、地震発生が同じ Poisson 分布 (10) を満たすと仮定すれば、時間軸に地震発生時刻を示す点の集まりがあると考え、その 2 点間の間隔、すなわち地震発生間隔を確率変数とする累積確率を表していると解釈することができる。

地震発生間隔の区間  $(t, t+dt)$  における地震発生の確率は、

$$f(t)dt = \frac{dF(t)}{dt}dt = \lambda \exp(-\lambda t)dt. \quad (13)$$

上式は、地震発生時刻の間隔  $t$  を確率変数にとると密度関数を  $f(t)$  とする指数分布が得られることを示す。

次に、今度は強度関数  $\lambda$  が時間の関数として変化すると考える。そのとき、式(11)において、 $\lambda t$  の代わりに  $\int_0^t \lambda(t') dt'$  を用いるならば、Poisson 分布と同様の確率分布を得る [伏見(1987)]。プレート境界の巨大地震のように発生間隔に周期性が強い場合などは、そのような特徴を加味した確率モデルをデザインすることができる。

以上の確率過程は、地震発生を時間軸上の点で表現し、その点を分布させるプロセスであり、一般に点過程と呼ばれる [例えば、Thompson(1988)]。そして、ある微小の時間間隔に地震が生起される確率を強度関数と呼ぶ。一般的には、この関数は点過程の過去の履歴、すなわち、注目する点（地震発生時刻）より過去の点列の位置に関係すると考えることができる。過去の履歴に依らない場合は、確率過程がリセットされたと考え、再生過程または更新過程と呼ばれる。

強度関数  $\lambda(t)$  をもつ更新過程を考える。

$$\phi(t) \equiv \exp\left(-\int_0^t \lambda(t') dt'\right) \quad (14)$$

と置けば、地震の発生間隔  $t$  についての回数の累積確率関数と確率密度関数は、それぞれ式(12)、式(13)に準拠して、

$$F(t) = 1 - \phi(t), \quad (15)$$

$$f(t) = \lambda(t)\phi(t). \quad (16)$$

ここで、 $\phi(t)$  は、 $t$  までの間に地震が発生しない確率を表している。ある地震の発生時刻から時間  $t$  経過し、その時点から有限の時間長  $\Delta t$  の間に次の地震が発生する確率は、 $t$  まで地震が発生せず、 $\Delta t$  の間に発生したとしたときの確率、すなわち、(時刻  $t$  から  $\Delta t$  の間に発生する地震の数、または確率)/(時刻  $t$  から無限時間の間に発生する地震の数、または確率)は、以下のように表現できる。

$$p(t; \Delta t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} = 1 - \frac{\phi(t + \Delta t)}{\phi(t)}. \quad (17)$$

$\lambda$  が一定な場合の点過程 (Poisson 過程) の場合は、式(12)を適用して、

$$p(t; \Delta t) = 1 - \exp(-\lambda \Delta t) \quad (18)$$

を得る。この場合の確率は、経過時間  $t$  に依存しない。上の  $p$  は条件付き確率と呼ばれるが、そのありさまについては、Fig. 6 に図示した。第1リングは、時刻  $t$  までに起きていない確率 ( $\phi$ ) と地震が起きた確率 ( $1 - \phi$ ) を示す。第2リングでは、地震が起きていなければ、 $t$  以後に地震が発生する可能

性があることを表示する。その可能性のうち  $\Delta t$  の間に地震が発生するのは、 $p\phi$  で示された領域、その区間に地震が発生しないのは  $(1-p)\phi$  の領域である。

長期予報における地震発生確率推定は以下の場合に分けられる。

- 1) 予報を行う規模の地震の過去の情報が全くない。
- 2) 過去一定期間大地震が発生していないという情報のみ。

少なくとも過去  $T$  の期間は大地震がなかったという情報から、地震発生確率の上限を推定する。式(14)の、期間  $t$  に地震が発生しない確率  $\phi(t)$  を用いる。推定の危険率  $\varepsilon$  に対する統計的検定を行い、

$$\phi(t) > 1 - \varepsilon \quad (19)$$

を満たすような  $\lambda(t)$  のパラメータを決める。Poisson 過程の場合は  $\lambda$  は定数であるから簡単で、

$$\lambda < -\ln(1 - \varepsilon)/T. \quad (20)$$

- 3) 歴史や活断層の古地震調査で、地震発生間隔について平均値が推定されている。但し、地震発生間隔についての詳しい情報がなく、最新の地震発生時刻も不明である。

この場合の情報は平均発生率のみである。Poisson 過程モデルを適用する（しか方法がない）が、その平均値を強度関数（この場合、Poisson 率とも呼ばれる）とし、その一定の強度関数を地震発生確率と見なす。

- 4) 歴史や活断層の古地震調査で、地震発生間隔について平均値が推定されているが、地震発生間隔についての詳しい情報はない。但し、最新の地震発生時刻が知られている。

この場合も、最も簡単な方法として、平均値をパラメータにもつランダムな地震発生を仮定し、式(18)によって地震発生確率を得ることができる。高度な確率モデルを採用すれば、式(17)が使える。

- 5) 地震発生間隔の平均値や最新の地震発生時刻などの詳しい情報が得られている。

この場合は、詳しい確率モデルの適用が可能である。地震発生間隔の分布モデルとして、プレート境界の南海地震や東南海地震、宮城県沖地震では対数正規分布やBPT分布（Brownian Passage Time 分布）などがよい適合性を示す〔地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会(1999)、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2001)〕。さらに、プレート間地震には、時間予測モデル〔Shimazaki and Nakata(1980)〕に基づき、最新の地震の断層変位から次期の地震までの発生間隔の平均値を推定し、その制約を統計分布（対数正規分布など）に課するという方法も考えられている〔地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会(1999)、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2001)〕。

論理的には以上の区分以外にもあり得るが、実際上は上の区分で十分である。例えば、十分な地震間隔情報があるにもかかわらず、最新の地震発生時刻が不明という場合が論理的には存在する。地震間隔の詳しい情報は、歴史地震の記録が揃っている場合か、活断層のトレンチ調査などにて、かなり精度のよいイベント（地震発生）の同定が行われた場合である。それらの場合に、最新の地震の情報が欠けることは、非常に希なケースであろうと想像される。そのような場合は、3) と同様に処理する。

予報対象期間の長さは地震の再来周期などに依存する。例えば、再来周期のオーダーは予報対象期間の上限を決める。南海や東海などの巨大地震が100年程度～数100年であることを考慮すると、長期予報の予報対象期間は数100年以下である。

長期予報と短期予報の間を中期予報と呼ぼう。この段階の前兆現象としては、主に、地殻変動、地下水変動、地震活動変化（静穏化など）が考えられる。この期間の役割の一つは、想定震源域の大きさの確定である。そのため、空間スケールの大きい現象を扱うことになる。

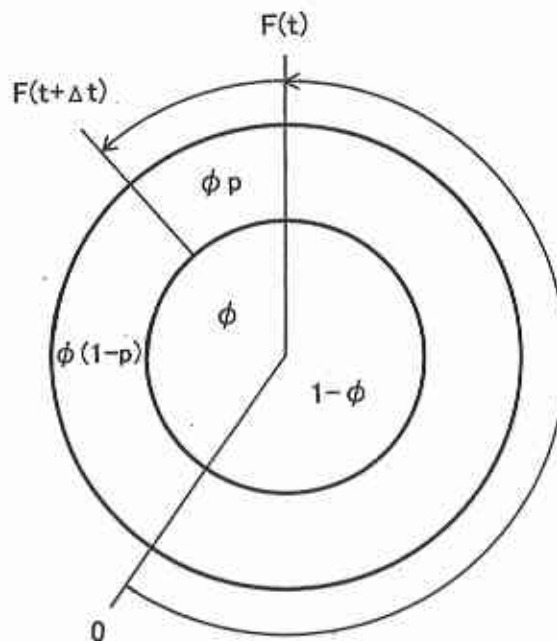


Fig. 6. Graphical expression of Eq.(17).

### 3.5 短期予報・警報システム

#### 3.5.1. 警報発令

地震予報の最終的な目標は、直前において、高い数値の確率を示すことである。そこに至るまでに、長い時間スケールから短い時間スケールに移行する段階的な予報プロセスがある。予報時刻は、時間経過とともに順次シフトする。それに伴って、予報対象期間もシフトする。長期予報の場合は、予報時刻が中期や短期の場合の予報対象期間の長さの程度シフトしても、予報期間や確率値には大きな変化は生じない。このことは中期予報が短期予報に対しても、短期予報が直前予報に対しても同様である。ところが、予報プロセスを1段階越えるときは予報期間のシフトだけでなく期間の長さの変更が必要である。地震発生時刻に近づくにつれ、予報対象期間は狭められるべきであるとの実用的な要請から、以下の“提案”を行う。

**T3 予報対象期間の推移：**長期予報，中期予報，短期予報と進むにつれて，予報対象期間の長さは短縮される。

長期予報の段階では、数10年間の予測として確率が公表される。もちろん、数日間の確率も計算できるが、極めて小さい数値であるので、数10年に数%～数10%程度という表現が用いられている。中期予報では、データの入手によって確率値が上昇し、数年間に数%程度以上の値になれば、一般に公表されるであろう。短期予報の場合は、数ヶ月に数%～数10%という発表が予想される。

短期予報によって確率がある程度高まった場合、直前予報へ向けての観測が格段に強化される。その中で、次々に異常現象が検出されると、その度ごとに確率が再計算されていく。その際、その異常現象について予め“予知率／空報率”の値が知られていることが必要である。その値が未知の場合は、類推や推定モデルに基づいて推定を行う(§4. 参照)。いずれにしても、確率の値を次々に更新しながら直前予報へと向かう。短期予報の段階から開始された観測強化体制にあって、前兆現象の現れ方やデータ取得状況は、刻々変化していくことが予想される。ある場合には、数時間の予報対象期間を設定して予報を発表することがあり得る。そのような異常が数時間経過した後、消えてしまう可能性もある。もし、そのような場合でも数日間の予報対象期間に対する確率のレベルが高いときは、警報は有効であり、予報対象期間の長さは延長される。したがって、以下の“提案”が成り立つ。

**T4 直前予報：**直前予報の段階では、予報期間の長さは、長短いずれの方にも臨機応変に変更される。

直前予報の段階では、頻繁に予知情報の検索を行い、地震発生確率を計算する。異常現象検知の頻度が増加し、確率が、受け手の了解が得られる一定のレベルを越えた場合に警報を発令する。



### 3.5.2. 警報解除

#### 3.5.2.1 警報解除の方法 その1

警報が発令されたのちも情報の検討は続行され、確率値の見直しがなされる。観測の強化も続く。直前の前兆現象の発現が増加せず、少し前の前兆現象の予報対象期間も終了し、その結果、確率値がある基準より低下すれば警報を解除する。直前のどの長さの予報期間についても、異常現象の発現が減少し、地震発生確率が著しく低下することが条件である。安全率を高めるため、以下の“提案”を行う。

**T5 警報解除の確率のしきい値：**警報解除のときの地震発生確率は警報発令のときの確率よりも低く設定する。

#### 3.5.2.2 警報解除の方法 その2

方法その1では、多くの観測のデータの中で、異常が発現したもののみを採用したが、異常が現れないことも貴重な情報である。これを活かす方法を考えよう。

もし、大地震が発生する確率予報を実用的に発表できるほどの観測態勢が整備されたとき、今度は、刻々入ってくるデータを用いて、地震が当分発生しないかについての確率を議論することができる。この場合、予報時刻、検知対象期間、予報対象期間はこれまでと同じように設定するが、地震が発生しない確率を問題にする。この問題の予知率は、地震が発生しなかった場合に前兆現象が現れなかった確率、空報率は、地震が発生した場合に前兆現象が現れなかった確率である。以下のように、 $P_0, Q_i, S_i$  を、それぞれ、この予報システムでの、事前確率、予知率、空報率とすると、

$$P_0 = 1 - p_0, Q_i = 1 - s_i, S_i = 1 - q_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

と書ける。各異常現象に対する予知率  $Q_i$ 、空報率  $S_i$  はTable 1 に示した 2x2 分割表を用いると、

$$Q = \nu / (n + \nu) = 1 - s, S = \mu / (m + \mu) = 1 - q \quad (22)$$

である。

あとの手続きは地震発生の予報を行う場合と同様である。地震が発生しない確率の漸化式は

$$P_i = \frac{P_{i-1} X_i}{P_{i-1} X_i + (1 - P_{i-1})}, \quad (23)$$

ただし、

$$X_i = \frac{Q_i}{S_i}. \quad (24)$$

ここでは、監視している観測項目が異常を示さないものをプロセスに取り込み、地震が発生しない確率を求め、基準を上回るようになった時点で警報を解除する。最初の確率  $P_0$  は、警報発令時の発生確率を  $p_0$  と置くと、 $P_0 = 1 - p_0$  である。最終的な確率を  $P_N$  ( $N$  個の前兆なし観測結果) とすれば、地震が発生する確率は  $1 - P_N$  となる。

この方法は、地震発生確率が上昇していったとき、これに応じて多くの観測点が新たに設置される状況下で威力を発揮する。それは、多くの観測点において異常が検出されないとき、その1の方法が使えないからである。その1では、異常検出によって確率値が変化するが、その2では異常不検出によって値が変化する。

#### § 4. “予知率／空報率”に関して

##### 4.1. 地震発生確率などから“予知率／空報率”を推定すること

バックグラウンドの地震活動から異常な活動を前兆現象として認め、大きな地震発生を予測する研究がある [例えば, Yamashina (1981), 前田 (1993), 井元 (2002)]. これまでのこの種の研究では, 予知率には触れるが, 空報率の概念は重要視されていなかった. 従来の研究では, ある前兆的現象についての理論的 2x2 分割表の地震発生率 (適中率) や永年の発生率とその比, すなわち確率利得 [Aki(1981)] を調べた. 例えば, 井元 (2002) は, 前震的活動の発生を経験的な確率関数で表現して, データに基づく平均的な地震活動, これを永年の発生率 (われわれの立場では事前確率) とし, 直接, 確率利得を求めた. このような解析結果から, われわれの立場での地震予知の効果を示す“予知率／空報率”の値を求めてみよう. こうすることによって, 他の前兆現象に対する“予知率／空報率”とともに, 彼らの結果をわれわれの体系に組み込んで総合的な地震発生確率を導き出すことができる. ここで総合的とは, 検知した異種の前兆現象をすべて扱うという意味である.

一つの観測項目に対して理論的 2x2 分割表 (Table 1) の永年の発生率  $p_0$  と適中率  $p$  あるいは確率利得  $g$  が分かっているとき, “予知率／空報率”  $x = q/s$  を求める. 式 (1) において,  $p_{i-1}, p_i$  をそれぞれ,  $p_0, p$  と置けば,

$$p = \frac{p_0 q}{p_0 q + (1 - p_0) s} \quad (25)$$

この式から,

$$x = \frac{p(1 - p_0)}{p_0(1 - p)} = \frac{g}{1/p_0 - g}(1/p_0 - 1) = \frac{g}{1/p - 1}(1/p - 1/g). \quad (26)$$

但し,  $g = p/p_0$  は確率利得である. このようにして, 従来の研究の成果,  $p_0, g$  あるいは  $p, g$  を我々の体系 ( $x$ ) に組み込むことができる. すなわち, 多種目の前兆現象に基づく, 地震発生確率の式の 1 つの種目の“予知率／空報率”として活用すればよい. ただし, それぞれの前兆現象のデータが統計的に互いに独立であるという条件がある.

## 4.2. 前兆現象の性能評価

それぞれの前兆現象は“予知率／空報率”を通して予報の確率に貢献する．この因子が大きいほど貢献度が大きいと言える．しかし、前兆現象のデータからその因子を推定する場合の統計的な信頼性は、推定されたこの因子だけで決まるだろうか．推定値が同じであっても、用いられるデータの量が多いほど信頼性が増すであろう．そこで、そのことを確かめるため、井元（1994）の手法に習い、統計モデルの適合性評価の問題として取り扱ってみる．井元（1994）の提示した考え方やその論文の一般的なスキームを、ここでは、この論文の前提や仮定に適合するように翻訳して議論を進める．

Table 2(a) に示したのは、ある決まった地域について、ある前兆現象に対するデータを整理した  $2 \times 2$  分割表である．簡単のため、検知対象期間と予報対象期間は長さが同じで、それを単位時間にとる．そうすれば、 $T(=m+\mu+n+\nu)$  はデータ取得の全試行回数であると同時に全対象時間の長さでもある．このデータを Table 2 の (b) と (c) のように分割する．(b) は“検知対象期間”に異常現象を検出したデータに対する分割表であり、(c) は異常を検出しなかったデータに対する表である．これらのデータは、ある一定の強度関数で規定される確率法則に従って造り出されていると考える．(a) はデータの全サンプルについてであるが、強度関数  $\lambda$  で地震を発生させる母集合のサンプルであり、(b) と (c) はそれぞれ  $\lambda_1, \lambda_2$  の強度関数をもつデータのサンプルであるとする．このようにサンプルを分離したのは、異常を検出した場合とそうでない場合に分割した確率モデル  $M1$  と分割しないモデル  $M0$  との間の違いの有意性を論ずるためである．時間の各区間  $i$  について、モデル  $M0$  は、確率  $p_i(\lambda)$  によって地震が発生し、モデル  $M1$  では、 $p_i(\lambda_1)$  と  $p_i(\lambda_2)$  の混合とする．尤度は、モデル  $M0, M1$  に対応して、それぞれ、

$$L_0(\lambda) = \prod_i p_i(\lambda), \quad (27)$$

$$L_1(\lambda_1, \lambda_2) = \prod_i p_i(\lambda_1) \prod_i p_i(\lambda_2) \quad (28)$$

の形をとる．モデル  $M1$  とモデル  $M0$  の差異が大きいほど前兆現象の効果が大きいと判断されるから、その判断の規準に尤度比  $L_1/L_0$  を用いることにしよう．あるいは対数尤度の差を規準にしてもよい．また、赤池の情報量規準 AIC [坂元ほか (1983)] を用いるならば、その差  $dAIC$  を規準にすればよい．自由度 1 のモデル  $M0$  と自由度 2 のモデル  $M1$  の AIC と対数尤度を、それぞれ、 $AIC_0, l_0$  および  $AIC_1, l_1$  と書けば、 $dAIC$  は

$$dAIC = AIC_0 - AIC_1 = 2(l_1 - l_0) - 2 \quad (29)$$

のように記述される．

これから具体的な定式化を行う。Table 2 のデータについては、独立の量は  $m, n, \mu, \nu$  の4個である [佃 (2003)]。われわれはこれらの量の関数であるいろいろな変数を用いるので、まずその整理をしておこう。

$$M = m + \mu, N = n + \nu, F = m + n, G = \mu + \nu, T = M + N, \quad (30)$$

$$q = \frac{m}{M}, s = \frac{n}{N}, x = \frac{q}{s}. \quad (31)$$

ここで、 $M, q, s$  はそれぞれ、地震の回数、予知率、空報率である。

さて、データを作り出す確率過程は Poisson 過程（すなわち  $\lambda$  一定）であるとし、Table 2 の (a), (b), (c) に対応する強度関数の推定値は Poisson 率である。(a) の表では、全試行回数  $T$  に対し、“予報対象期間”において  $M$  回の地震を記録し、(b) の表では、全試行回数  $F$  に対し、“予報対象期間”において  $m$  回の地震を記録している。(c) では、全試行回数  $G$  に対し地震発生は  $\mu$  回である。したがって、

$$\lambda = \frac{M}{T}, \lambda_1 = \frac{m}{F}, \lambda_2 = \frac{\mu}{G}. \quad (32)$$

単位時間の各区間 ( $t = 1$ ) 毎に、地震が発生したか発生しなかったかを調べる。強度関数を  $\lambda$  とすると、地震が発生しなかったときの確率は、式(11)より  $\exp(-\lambda)$  であり、地震が発生したときの確率は、式(12)において  $\lambda$  が小さいとして近似すると、 $\lambda \exp(-\lambda)$  であるから、Table 2 (a) の尤度  $L_0$  と、(b) および (c) に分割した場合の尤度  $L_1$  は、それぞれ、

$$L_0 = \lambda^M \exp(-\lambda T), \quad (33)$$

$$L_1 = \lambda_1^m \exp(-\lambda_1 F) \lambda_2^\mu \exp(-\lambda_2 G). \quad (34)$$

また、対数尤度  $l_0, l_1$  を用いると、

$$l_1 - l_0 = m \ln(\lambda_1/\lambda) + \mu \ln(\lambda_2/\lambda) \quad (35)$$

が導かれる。

今、4個の独立変数として、 $x, q, M, \lambda$  を選ぶ。“予知率／空報率”  $x$  は、予報の確率に直接貢献する因子であるから選ぶのは当然である。 $M$  は、データにおける全地震回数であり、 $\lambda$  は地震発生頻度を表している。 $M$  を先に選べば、 $\lambda$  の代わりに全試行回数あるいは全観測期間の長さに比例する量  $T$  を選んでもよい。 $x, M, \lambda$  を選べば、予知率  $q$  の代わりに、 $s$  でも、 $F$  でも、 $G$  でもよい。まず、

$$a = \frac{1 - \lambda}{\lambda} \quad (36)$$

と置くと、式 (35) は独立変数  $x, q, M, \lambda$  を用いて、

$$l_1 - l_0 = qM \ln\left(\frac{1}{\lambda} \frac{x}{x+a}\right) + (1-q)M \ln \frac{1-q}{1-q\lambda(x+a)/x} \quad (37)$$

と表される。これを  $M$  でくくって次のように表しておく。

$$l_1 - l_0 = M f(\lambda, q, x). \quad (38)$$

上式を式 (29) に代入すれば、AIC 規準による評価になるが、実質的には上式を用いて、データの比較評価を行えばよい。式 (37) を見ると、データの地震発生数  $M$  が大きいほど前兆現象の性能が高いと言える。しかし、変数、予知率  $q$  や “予知率／空報率”  $x$  に対する偏微分の式をみると、符号がプラスにもマイナスにもなり得るので、これらの変数については、値が大きい場合でも前兆現象の性能が高いとは限らない。そこで、数値的に式 (37) あるいは式 (38) の  $l_1 - l_0$  の様子を調べてみる。式 (38) の  $f(\lambda, q, x)$  をグラフに表したのが Fig.7 である。 $x$  が大きいほど地震発生の確率を高くすることができるが、関数  $f(\lambda, q, x)$  の値は小さくなるので、5.0 までの値を表示した。永年発生率  $\lambda$  はふつう小さな値であり、また小さいほど関数  $f(\lambda, q, x)$  の値は大きくなるので、0.5 までについて表示してある。Fig. 7 からわかるように、関数  $f(\lambda, q, x)$  は 5.0 以下の値に収まっている。式 (37) の値が大きいほど、そのデータは前兆現象と判定する場合の信頼性あるいは性能が高いのだから、結局、データに含まれる地震の数  $M$  が多いほど信頼性が上がることになる。例えば、大きい  $x$  の  $f(\lambda, q, x)$  は小さいが、小さい  $\lambda$  や大きい  $q$  のデータより地震のデータ数を多くすれば、性能を上げることができる。

ここで、3つの注意点を述べる。まず、

$$g = \frac{1}{\lambda} \frac{x}{x+a} \quad (39)$$

と置くと、 $g$  は確率利得である。実際、式 (2), (3) において、 $p_0, x_1, a_1$  をそれぞれ  $\lambda, x, a$  とし、 $g = p/p_0$  とすればよい。この  $g$  を用いれば、式 (37) は、 $M, g, q$  の3個の変数で記述されやや簡単になる [井元 (1994)]。しかし、独立変数は4個であるので、実は、 $g$  と  $q$  は独立に値を与えることはできない。なぜなら、 $M$  と  $q$  をまず独立変数に選ぶと、 $g$  の表現には独立変数があと2つ必要であるので、仮に  $g$  を独立変数に選びたいと思っても、あと1つの独立変数の値がすでに与えられていると、かつてな値をとることができないからである。

次は、データの取得についての注意である。Table 2 の 2x2 分割表は、ある一つの前兆現象に関する予知率と空報率を求めるために、様々な地域のデータを混合して作られることもある。この場合の強

度関数は、どこかの地域の地震発生率を表すのではなく、データセットの中の発生頻度を表す。この場合でも Poisson 分布を仮定すれば、上記の考察は成立するが、式 (39) の  $g$  は確率利得という意味を失う。また、この場合、永年の発生率  $\lambda$  も単なる平均発生率である。

最後に、この節で議論した「性能」は予知情報（データ）の信頼性を評価する一指標であることを断っておく。確率を高める効果とデータの信頼性を高めることとは必ずしも一致しない。また、データが多いとこのような評価法が可能であるが、一般にはこの評価の実施は困難であろうと著者は考えている。

Table 2. 2 x 2 contingency table for statistics of earthquakes and precursory signals. For each statistical trial, we count up either of the numbers  $m, n, \mu, \nu$  registered in four boxes: (a) For total statistical trials; (b) For those with precursory signals; (c) For those without precursory signals.

	検知対象期間の前兆的信号 (Precursor)	
	あり (Yes)	なし (No)
予報対象期間の地震 (Earthquake)	あり (Yes)	$m$
	なし (No)	$n$

(a)

		Precursor	
		Yes	No
Earthquake	Yes	$m$	0
	No	$n$	0

(b)

		Precursor	
		Yes	No
Earthquake	Yes	0	$\mu$
	No	0	$\nu$

(c)

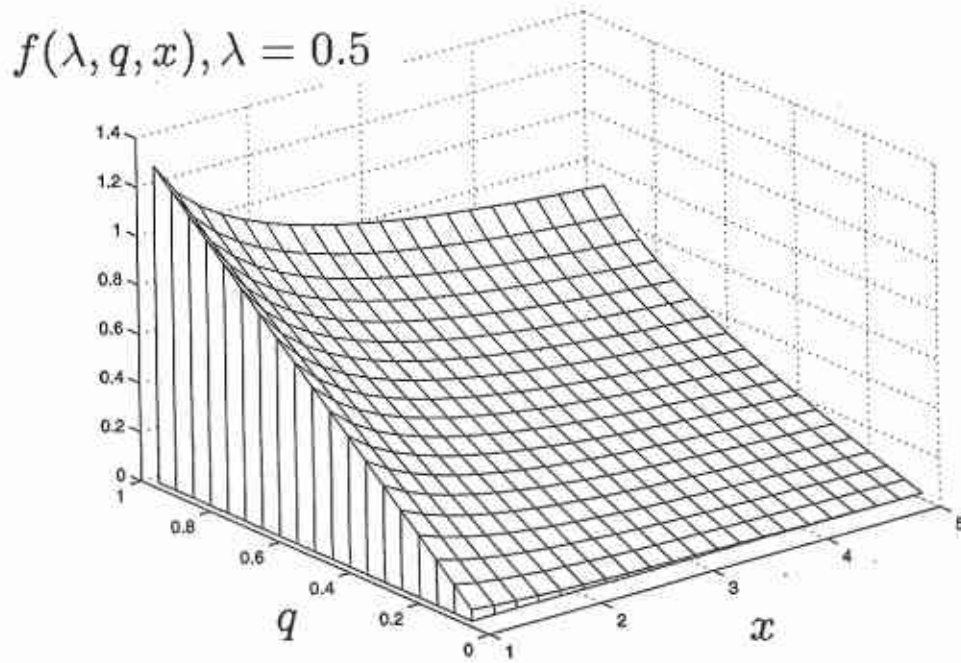
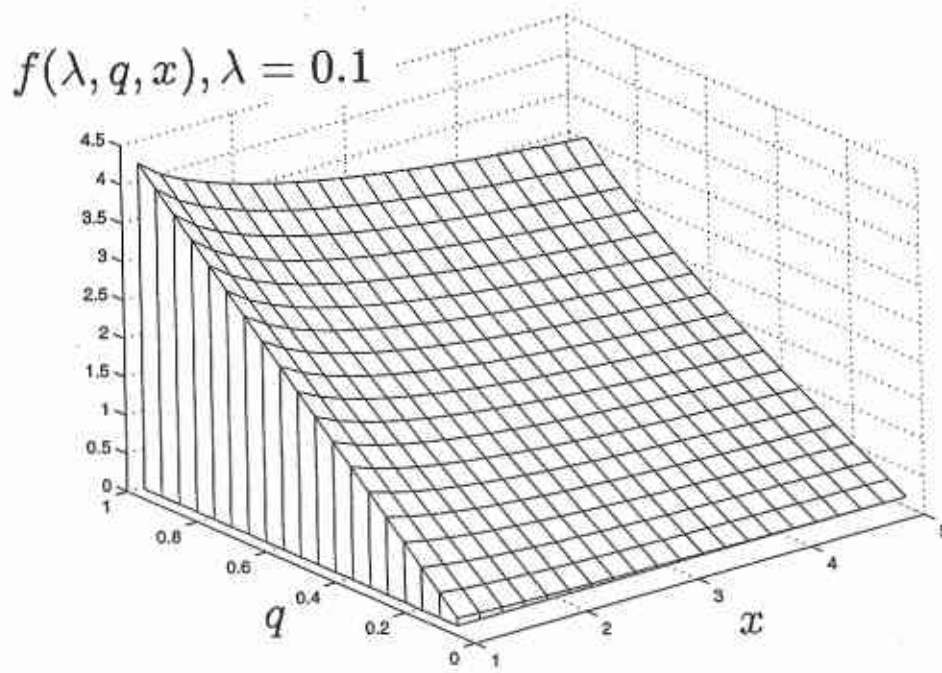


Fig. 7(a). Function  $f(\lambda, q, x)$  defined by Eq.(38) /  $M$  for the reliability test of the precursory data in Table 2, as a function of  $x, q$ .



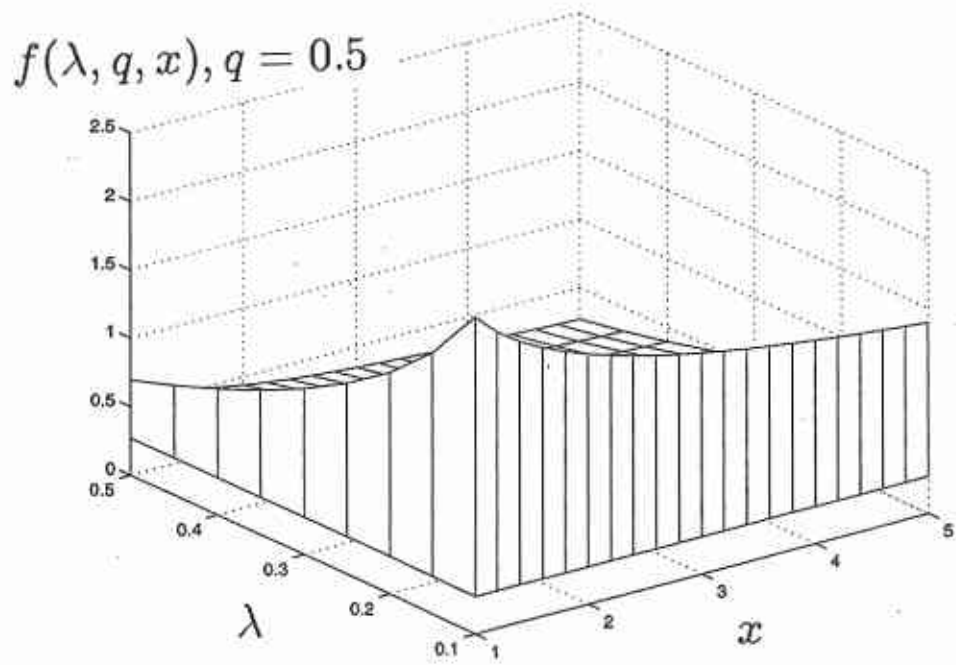
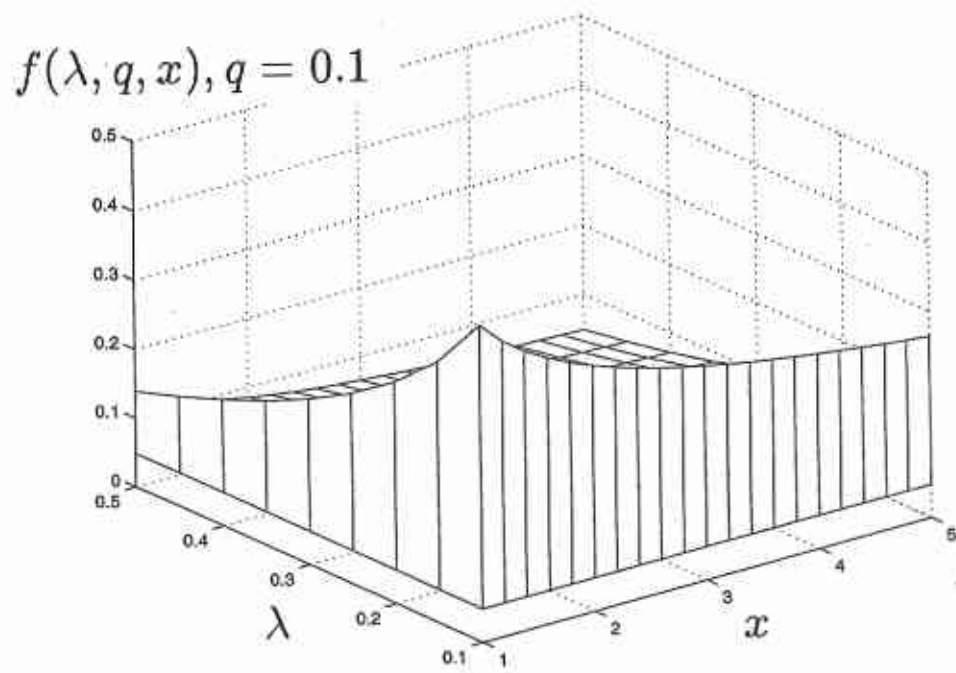


Fig. 7(b). Function  $f(\lambda, q, x)$  defined by Eq.(38) /  $M$  for the reliability test of the precursory data in Table 2, as a function of  $x, \lambda$ .

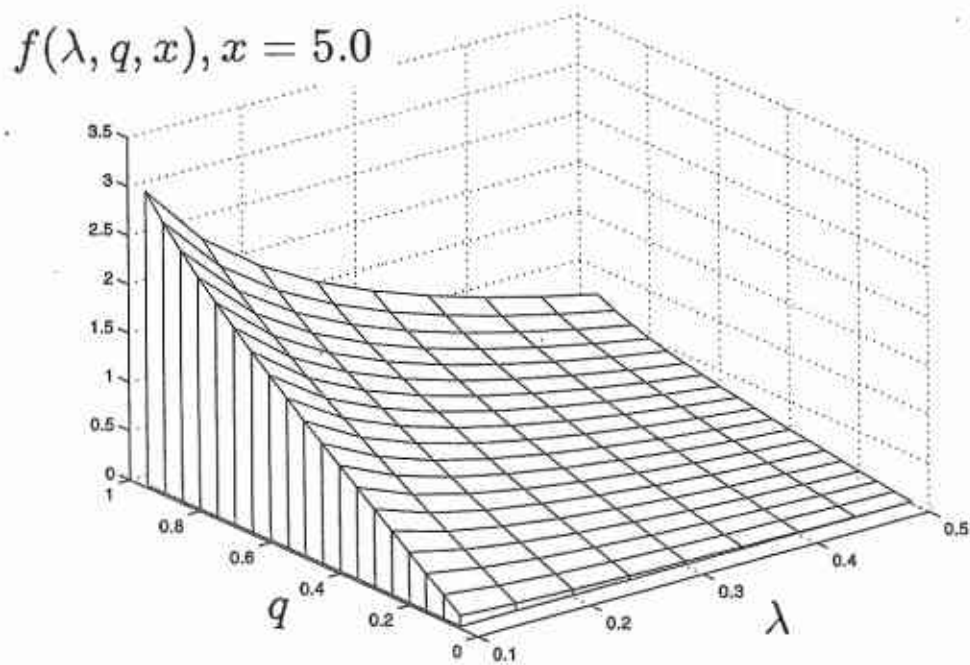
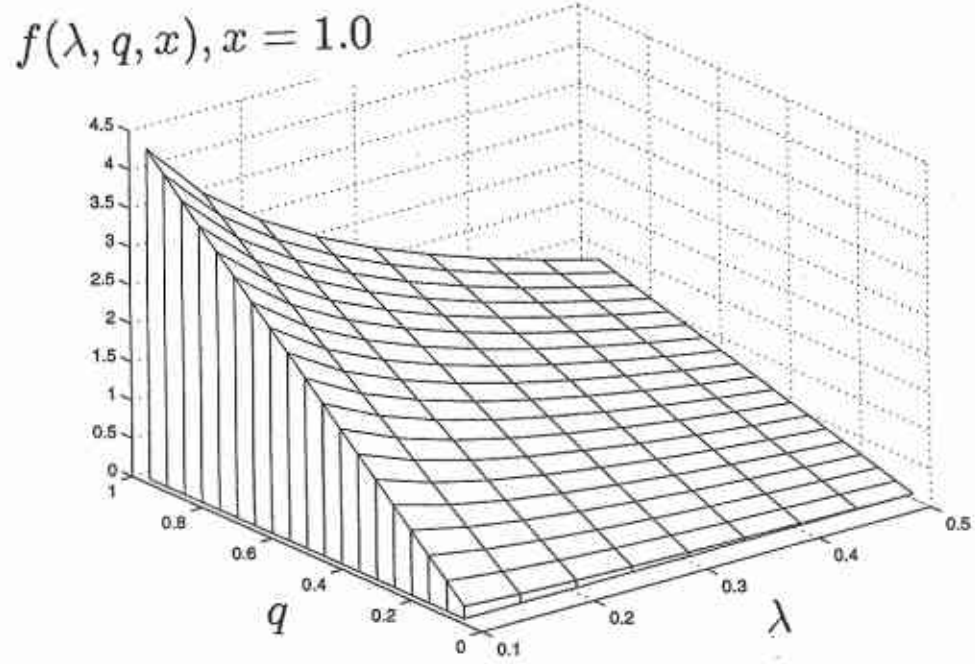


Fig. 7(c). Function  $f(\lambda, q, x)$  defined by Eq.(38) /  $M$  for the reliability test of the precursory data in Table 2, as a function of  $\lambda, q$ .

#### 4.3. 予知率/空報率の推定ないし算出の例

前兆現象（先行異常現象）の検出に基づいて大地震発生確率を求めるためには、予知率や空報率の推定が必要であるから、その推定の実例について検討してみよう。

##### 4.3.1 検知対象期間5～10年の例

空白域の形成を例に取る。佃（1998a）によると、注目する地震の震源域の中に小規模の活動が発生した後、時間とともに空白域が拡大したケースが、日本のM7以上の内陸地震8個の内4個に見いだされた。予知率は50 % ということになる。地震の規模をM6.9以上にとると、内陸地震の数は11個で、空白域拡大が求められたのが、5個である。M6.9以上の地震では予知率は45 % になる。

では、空報率はどうか。これについてはまだ、系統的な調査はなされていない。ただ、1983年日本海中部地震の震源域の例では、そのような空白域拡大が認められるのに、地震発生がなかったケースが見つかっている (Fig. 8)。この地域のデータのみから、空報率を推定してみる。また、予知率についてもこのデータから求めてみる。この地域にはM6.9以上の地震が2回発生している。注目する地震の震源域の中心付近の小規模活動の後、5年～10年かけて空白域が拡大し、大地震が発生する。拡大から5年ほど経過すれば、異常が確認できる。過去の地震データについて試行実験を行う。検出対象期間や予報対象期間を、時間軸に対してFig. 9に示したようなオフセット ( $T_{off}$ ) 毎にずらしていくものとする。検知対象期間と予報対象期間の長さは5年とする。この長さのオフセットをFig. 8のA1, A2, ....., A8のようにとれば、40年間の観測にて、8回の試行実験を行うことになる。実験を整理した結果がTable 3である。8回のうち2回の試行において地震が発生している。大地震を伴わなかった空白域生成はG1, G2の2回あった。1964年の地震の前の空白域 (G1) の拡大は明瞭ではない。G1を認める場合とこれを認めない場合に分ける。後者の場合、予知率は50%となる。この場合に対して以下の議論を行う。この値はM7以上の日本内陸部全体のデータについての結果と同じである [佃 (1998a)]。Fig. 8において地震を伴わなかった試行回数6に対し、明瞭な空白域拡大を確認したのが1回あるので、空報率は $1/6$  (17 %) となる。“予知率/空報率”  $x$  の値は3.0で、この現象を予報に活用する場合は確率が3倍に増加する。検知期間と予報期間の長さはそのままオフセットを1年ずつずらした期間を採用すると、 $q = 3/10, s = 3/25, x = 2.5$  となる (Table 3)。この場合は厳密には独立のデータセットにはならないが、このような実験設定でも、約3倍の確率増加の結果を得る。

空報率の調査を系統的に行うのは困難であるが、抜き取り調査は容易である。日本海中部地震のケー

ス以外では、明瞭な空白域拡大が確認できるにも関わらず大地震が伴わなかったケースは見いだされていない。そこで、より多くのデータによっても、上に求めた空報率より値が上回る可能性は低いと推定される。

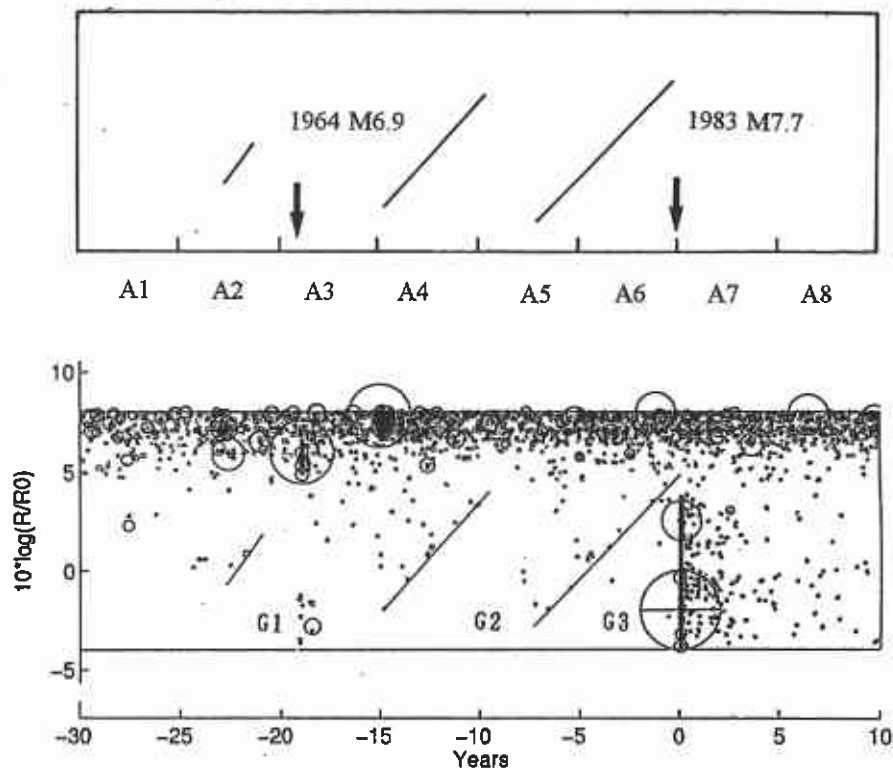


Fig. 8 Time-space diagram for the 1983 West Off Northern Tohoku earthquake[after Tsukuda(1998a)]. G1,G2 and G3 indicate periods when the expansions of seismic gap occurred.  $R$  in the ordinate is the distance between the hypocenters of the mainshock and that of a surrounding earthquake.  $R_0$  denotes the representative value of the radius of the source region of the mainshock of 1983. Time is measured in reference to the origin time of the mainshock. The area of the plotted circle is proportional to the source area of the event with reference to the that of the mainshock which is represented by the circle with a cross located in contact with the end point of the radius of the mainshock source region. The upper figure shows the tentative time intervals for detection of anomaly with the time of the 1983 mainshock and that of the 1969 event which took place close to the 1983 event epicenter.

Table 3. Experiment on the forecasting process for the 1983 Japan Sea earthquake (See Fig. 8). The parameters  $T$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $m$ ,  $n$  are the same as in Table 1.  $x$  denotes the ratio:alarm-rate/null-alarm-rate.  $T_{off}$  is defined in Fig. 9. G1, G2 indicate seismic gaps without accompanying a large shock shown in Fig. 6.

$T_{off}$	Detected	$T$	$M$	$N$	$F$	$G$	$m$	$n$	$x$
5 years	G1, G2	8	2	6	3	5	2	1	6.0
	G2	8	2	6	2	6	1	1	3.0
1 years	G1, G2	35	10	25	9	26	9	6	5.0
	G2	35	10	25	6	29	3	3	2.5

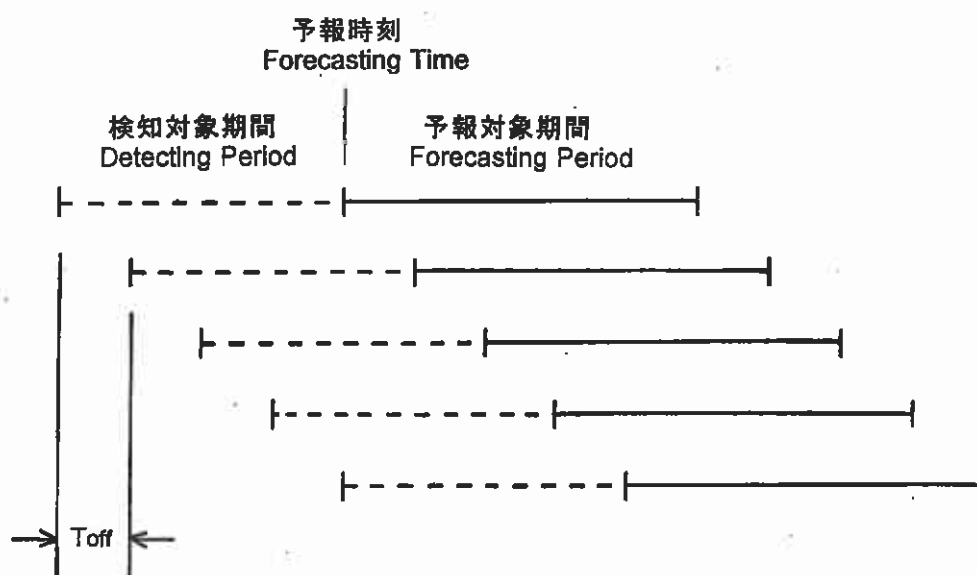


Fig. 9 Time offset for shifting the framework with forecasting time, detecting period, and forecasting period.

#### 4.3.2 検知対象期間数日～10日の例

前震というのは、多くの場合、本震が発生してから認定される。前震を予め判定することは非常に難しい。ある地震ないし、ある地震活動が前震である可能性、すなわち、本震を伴う確率がどの程度なのかを少し調べてみる。大地震のほとんどは空白域に発生するので、このような地震の前震で、空白域内に発生する場合は、まず、異常地震活動として識別が容易である。そこで、ある空白域内において、検知対象期間と予報対象期間をそれぞれ10日として地震活動監視を行うことを考える。通常地震活動のレベルが分かっていると、異常地震活動の定義は、1) その地域の通常の活動では大きいクラスの地震、2) 通常の最大級以下のレベルであるが群発性、3) その他の特異性を有する活動、のいずれかとする。

このような地震活動異常に対する予知率を推定するため、4.3.1 で取り扱ったM6.9以上の内陸型地震を調べてみた。用いた気象庁の震源データによる対象地震の震源リストは佃(1998a)のTable 1にある。気象庁の震源データで、上に定義した前震活動が確認できたのは1995年兵庫県南部地震のみであった。そこで、鈴木(1985)も参考にした。ただし、この本の1時間以内の直前の前震は除外した。その結果、11の地震のうち、1995年兵庫県南部地震にのみ、前日に異常地震活動が求められた。その場合、予知率は、9%である。但し、1943年鳥取地震にも3日前に、有感地震1回が発生している。現在の地震観測体制であれば、もっと多くの地震を検知したかもしれない。これを採用すると、予知率は、18%となる。

次に空報率を見積もるため、東大地震研究所で実施している地震予知研究プロジェクトのデータを用いてみる。長野県白馬村地域の地震空白地域( $M \geq 4$ )にて、1978年1月から2000年1月までの22年間に異常が2回確認された[佃(2000)]。まだ、大地震は発生していないので、このデータから予知率についての推定はできない。空報率は、 $2/(22 \times 365/10) = 0.0025$ である。先に求めた予知率を用いると、“予知率/空報率”が36～72倍となる。この異常現象は、予知率が高いとは云えないが、もし、この異常が検出されたならば、確率を1桁以上高めることができる。

#### 4.3.3 検知対象期間不要の現象

天体の運動によって、地殻変形が発生し、地震をトリガーすることが考えられる。例えば、新月や満月のとき、月と太陽の引力が重なって大きな変形を及ぼすから、地震発生頻度が高くなるのではという仮説がある。このような問題を扱うにはどうしたらよいか。

29.5日の周期で月齢が変わり、新月と満月はその間にそれぞれ1回訪れる。検知対象期間を特に設けなくても予報ができる。今、簡単のため、予報対象期間は新月や満月が訪れる日の1日間(0～24時)

とする。Table 1 および 式(30) の記号を用いて、 $q = m/M, s = n/N, n = F - m, N = T - M$  と表す。この場合の“異常”は、試行回数  $T$  の内、 $F$  回となるが、比  $\alpha = F/T$  は一定の  $2/29.5$  である。結局、“予知率／空報率”を  $q, \alpha, M, T$  を用いて表すと、

$$x = q/s = (1 - M/T)/(\alpha/q - M/T) \quad (40)$$

となる。予知率  $q$  の推定については、注目する地域に限定してもよいが、世界各地の地震のデータを用いてもよい。 $M$  については、注目する地域の地震回数を用いるべきである。すると、 $M/T$  の値は、大地震の場合、たいてい数100年以上の再来周期を持つから、 $10^{-5}$  より大きいことはない。式(40)は、事実上、

$$x = q/\alpha \quad (41)$$

である。 $\alpha$  は、地震活動が月齢に対して無関係、すなわち、どの日も同じ発生頻度を持つとした場合の予知率に相当する。したがって、上式の意味するところは、地震発生頻度が平均的な値よりどの位上回っているかが、確率を上昇させる倍率となる。宇津(1979, 1999)によると、日本の地震の場合  $q \sim \alpha$  であり、特殊な地域や状況においてわずかに  $q > \alpha$  となる程度であるので、“予知率／空報率”は1程度であって、一般的には、天体を用いるこの方法は実際の予知に対して有効ではない。ただし、大地震の準備が整ったところで、潮汐力がトリガーの作用をする場合があり得る。その場合は、条件を絞った考察を行う必要がある。

#### 4.3.4 予知率推定が困難な現象

いわゆる宏観異常現象のように発現の定量化が困難な場合や極めて特異な条件が満たされた場合のみ発現する現象をどのように扱ったらよいか。1995年兵庫県南部地震の約2日前に明石海峡でヘドロの上昇によると思われる海水面の変色が、定期航路の客船の船員に目撃された。これは筆者による聞き込み調査で明らかになった[佃(1998b), Tsukuda *et al.*(2005)]。海底での地下水の噴出が原因と考えられる。現場は、本震の震源および前日の前震活動域の真上に位置する。これは極めて異常な現象で、赤潮などの変色とは直ちに判別できる。このような現象はその航路にて少なくとも50年位の間で初めてのことにし、3日程度の検知期間および予報期間を設ける。空報率は、だいたい  $1/((365/3) \times 50) = 1.6 \times 10^{-4}$  以下である。このような現象がどの地震でも普遍的に発生することはない。ある特殊な条件のもとに発生する。このような場合は理論的研究が有効である。簡単なシミュレーションを行う。活断層の調査から、あの地域の大きな地震の発生場所、発生形式がおおよそ分かっているとする。このような断層の地

震を起こす前に断層付近にて地下水噴出を伴う確率（予知率）を $q_w$ ，全長50kmの断層のうち明石海峡にかかる3kmほどの部分に発生する確率を $p_f = 3/50$ として，予知率が $q = p_f q_w$ のように求められる。 $q_w$ の推定には，媒質について多くの知識が必要である。現在の我々の知識では推定が無理なので，仮に $q_w = 1/10$ とすれば，予知率が0.006と推定される。このような仮定のもとでは，“予知率／空報率”は約38倍となる。以上は非常に荒っぽい推論であるが，現象の理解や地震発生場の知識，地震発生理論が進めば，より正確な推定が可能となろう。その際，地震発生過程の理論の中に，地震に伴う特異現象についての記述ができるような研究の進展が期待される。その理論にはやはり確率の要素が入るであろう。



## § 5. 議論

予報のプロセスは、長期、中期、短期、直前の4段階を踏む。大地震の発生頻度から長期予報の予報対象期間の長さが定まり、警報発令や解除の実用的見地から直前の予報対象期間の長さが提案された。短期予報は、過去の研究によって前兆現象の典型的なものの存在や、直前予報の準備段階という実用的見地からその予報対象期間の長さが定められた。中期予報は長期と短期の橋渡しの段階にある。

Table 4 は、予報プロセスの段階毎に、検知対象期間や予報対象期間の長さがどのようなものになるかを示したものである。異常現象検知の立場からは、検知対象期間や予報対象期間の長さは同じにするのが妥当である(3.2 の T2)。但し、予報を受け取る立場からは、予報対象期間を実用的な見地から設定する。

上の4段階は、過去、1975年海城地震の予知などの中国における実績においても適用された[尾池(1978)]。中国では、直前予報を臨震予報と呼んでいる。海城地震では、地震直前に警報が発令され予知が成功したが、定量的な予報、すなわち確率予報ではなかった。1960年代後半から1980年代にかけて、中国では専門家と一般大衆の共同(専群結合と呼ばれた)による地震予知事業の高揚があり、大量のデータの取得とその評価が試行錯誤的に行われた。だが、それぞれの観測項目についての“予知率/空報率”を調べるだけのデータの蓄積や検討および、それぞれの観測方法についての精度やノイズの調査や研究も不十分であった。それでもなお、その合理的な予報体系構築や予知事業への取り組みの思想性については高く評価すべきである。

長期予報において中国で以前試みられたように[尾池(1978)]、地震活動移動のような広域の地殻活動を考慮した予測についても、今後、そのようなデータを用いた確率予報の手法を研究すべきである。本論文では考慮しなかったが、次の課題として、広域テクトニクスの変動に基づく長期予報の確率推定にも取り組むべきである。

地震予知研究において最も基本的に考慮しなければならないのは、言うまでもなく自然現象としての前兆現象の出現の特性である。予知研究者の立場はこの点を重視する。さらに、前兆現象に関する確固たる裏付けを得るために、地震発生へのプロセスの詳しい理解が必要である。その立場から見ると、実用的な予報に関する考察はまだ早いと思われるかもしれない。しかし、頭で考えられることは考えておいて損にはならないのである。どのような自然の理解が得られようとも、どのような前兆現象が見つかるだろうが、今、考えられることは存在する。その考察に基づき、データと確率の関係を知った上で、前兆現象の研究することが望ましい。

地震予知の確率に対する以前の考え方や立場と佃（2003）が提示した考え方は、まったく相容れないものではなく、以前の考え方に基づく概念や手法も取り込んで発展させることができる。いったい地震予報の確率は、地震発生確率が過去のデータ、とくに前兆現象のデータによって、情報が得られる度に変わるものである。ここで強調しておかねばならないのは、自然現象としての“地震発生確率”が存在するわけではないことである。だから、その確率のことを、予報を行った場合の適中する確率と考える立場〔宇津（1977, 1982）〕が生じたことは至極もつともなことである。しかし、地震予報を受け取る立場での最大の関心事は、地震が起きるかどうかである。

一方、長期予報の確率の議論で特に見られるように、自然の法則として地震を発生させる確率が存在し、実際の地震発生現象はその確率にしたがって起きるとする立場がある〔井元（2001）など〕。その場合、点過程の強度関数が基本的に重要な意味をもつ。すべての確率を根元的な強度関数を出発点にして考えるのである。長期予報の確率についての政府の説明〔地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会（1999）、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2001）〕も、点過程の枠組みの中でまず強度関数が定義され、それを出発点とする問題の設定を行っている。

長期予報の段階では、そのような自然法則と考えた確率を導入してもよいが、短期予報（直前予報を含む）では、その際の確率予報は、前兆現象の情報が十分得られるかどうかによって左右される。一部の現象については、自然法則的確率が存在するかもしれないが、多くは、最大限の努力をして前兆現象を検出し、得られた情報から確率を推定するもので、絶対的な意味での確率を求めたわけでは決してない。量子力学の理論において、波動関数（複素数）の絶対値の2乗が粒子の出現確率密度を表すというのがある。この場合の確率は自然の本性を表現している。これに対して、地震予知（地震予報）の確率はこのような意味の確率ではない。最初の事前確率がまず与えられ、観測で検出された異常現象の情報（具体的には“予知率／空報率”）をもとに事後確率を推定する。最初の事前確率や前兆現象の情報が与えられなければ確率（事後確率）は存在し得ない。したがって、予報の正確さを客観的に評価するべきがない。このことはしっかりわきまえていなければならない。

活断層による長期予報の場合についても、データに依存した結果であって、データが不足している場合、やはり自然現象としての発生確率というより、われわれの所有するデータに強く依存した推定である。地震の場合の確率はそもそもそのようなものである。したがって、データが不十分な断層での確率値が高く、データが比較的多い断層でかえって確率が低くなるようなことがでてくるわけである。そのことを、多くの国民に理解してもらう必要がある。

従来の研究において、確率利得の概念がよく用いられてきた。それよりもプリミティブな概念が“予知率／空報率”である。確率利得は最終的に地震発生確率を求めたとき用いる量であって、前兆現象データの評価のときは、それぞれの前兆現象に固有の“予知率／空報率”という量を取り扱う方が合理的である。§4で述べたように、前兆現象の性能の統計的な評価の場合も、確率利得の活用は、以下の2点において不利である。

- 1) “予知率／空報率”と地震発生率を独立変数の一つに選ぶ以上、確率利得を独立変数には選べない。
- 2) 2x2 分割表 (Table 1) において、様々な地域のデータを混合して用いる場合には、確率利得という量は存在しなくなる。

確率の考え方をより基本から掘り起こすという意味で、長期予報の場合についても、地震がランダムに発生しながらある発生頻度が平均値をもつモデル（すなわち Poisson 過程）をもっとも素朴な試行実験から記述した。一定の強度関数をもつ定常 Poisson 過程を出発点にして、時間に依存する強度関数をもつ非定常 Poisson 過程に拡張すれば、より一般的な確率過程モデルに発展する。

地震発生の確率を算出する際には、各データの“予知率／空報率”が必要である。これをどのように求めるかについて、§4で例を挙げて説明した。そのとき、データ取得を試行実験と考え、2x2 分割表を作成することが重要であった。空報率を求めるには、想定予報対象期間に地震が発生していないケースのサーベイが必要である。多くのケースは、検知対象期間に異常がなく、予報対象期間に地震がないということになる。つまり、地震が発生しなかった期間の長期の観測が必要である。そのようにして空報率が求められる。地震が発生したときだけそのちょっと前の過去（検知対象期間）を振り返るやり方では、予知率を知ることは出来るが、空報率は求められないのである。そのことを理解しなければならない。長期連続観測の意義の一つは地震が発生しない場合のデータをきちんと取得することである。

なお、これまで述べてきた体系では、予知しようとする地震が予め決まっていて、その地震の準備期間において、震源域およびその周辺での地殻活動の信号をとらえることに焦点を合わせてきた。もっと一般的な地震予知の問題では、来るべき大地震がどこで起きるかについて、それをまず探索し、想定震源域を特定するための方策も考えておかねばならない。この論文ではそのことには一切触れなかった。これは今後の課題であり、現在、そのための観測研究や予報システム構築の案を練っている。この立場の一つの試案が力武（1969）に与えられている。今の時点では、GPS を主体にした地殻変動観測、高感度地震計による微小地震観測に加え、これらの観測点密度よりさらに高密度の地下水、地中ガスなどを検知する観測点を張り巡らせなければならないことになろうと考えている。最後の項目の補助として宏

観異常現象や電磁気異常現象の観測も有効であろう。異常現象が発生しつつある地域の分布や範囲を特定することは最低必要な作戦だと考えている。その上に確率のモデリングが行われる。

Table 4. Detecting and forecasting periods for 4 stages of earthquake forecasting. It is reasonable to assign both the detecting and forecasting periods in the same time length. However, the short-term and immediate-term cases would be dependent on practical demands such as evacuation plans, preparations for the coming disaster, and so on.

	検知対象期間の長さ Time Span of Detecting Period	予報対象期間の長さ Time Span of Forecasting Period
直前予報 Immediate Term Forecast	数日～1週間 several days～a week	数日, 1日, 数時間 several days , one day, several hours
短期予報 Short Term Forecast	数ヶ月～1年 several months ～a year	数ヶ月 several months
中期予報 Intermediate Term Forecast	1～数10年 a year～several tens of years	1～数10年 a year～several tens of years
長期予報 Long Term Forecast	数10年以上 more than several tens of years	数10年以上 more than several tens of years

## § 6. 結論

本論文は佃（2003）に示した方法を応用するときを生じる問題について、具体的な解決法を提案したものである。その要点は以下の通りである。

- 1) 地震の確率予報は、長期、中期、短期、直前の4段階にわたる合理性を論じた。地震発生頻度や再来周期から長期予報の予報対象期間が決まり、主に実的要請から直前予報や短期予報の予報対象期間が決まる。後者は当然、前兆現象の発現の特性にも依存する。特に、直前予報の場合は、予報対象期間の長さは細かく変動する可能性がある。
- 2) 前兆現象検知は地震発生確率を増加させるが、確率値の大きさを決めるには、最初の事前確率が必要である。長期予知の確率はその役割を担う。
- 3) 直前予報において、警報の発令と解除する方法について論じた。一つの方法は、異常現象の検出によって推定された地震発生確率に基づくもので、この確率が警報のしきい値を越えた後、別のしきい値以下に降下したとき警報を解除する。もう一つの方法は、多数の観測項目に異常が検出されないという情報を活用するもので、観測体制が高度に整備された将来の構想に基づいている。
- 4) 地震発生確率や確率利得が示されている従来の研究の成果を、佃（2003）に示した方法で利用する場合に、“予知率／空報率”を求める手順を示した。
- 5) 予報の確率を高める要素は“予知率／空報率”であるが、その信頼性はこれを推定するために用いたデータの量などが関わっている。前兆現象検出の性能を互いに比較し評価する統計的方法を井元（1994）に基づいて定式化した。前兆現象の性能向上には“予知率／空報率”だけでなく、データの量や予知率などのパラメータも考慮する必要がある。特にデータに含まれる地震の数が多いほど向上効果は大きい。
- 6) 前兆現象のデータから“予知率／空報率”を求める方法について、前兆的地震空白域形成や前震活動、天体の運動との関連など、実例に基づいて解説した。過去のデータを用いた予報の試行を行うことが根本である。

## 謝辞

地震予知に関心をお持ちの多くの方々との日頃のディスカッションにおいて考えさせられることが多かった。また、防災科学技術研究所の松村正三氏には原稿を丁寧に読んでいただき、表現の誤りや説明が不十分なところのご指摘をいただき、細かい数式の検査もしていただいた。これらの方々には深く感謝いたします。

## 文献

- Aki, K., 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in *Earthquake Prediction: An International Review*, edited by D.W. Simpson and P.G. Richards, A. G. U., Washington, D.C., 566-574.
- 伏見正則, 1987, 理工学者が書いた数学の本 7 確率と確率過程, 178pp., 講談社.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会, 1999, (改訂試案) 長期的な地震発生確率の評価手法について, 74pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2001, 長期的な地震発生確率の評価手法について, 99pp.
- 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, 第26号, 332pp.
- 井元政二郎, 1994, 前兆現象の性能評価について, 地震2, 47, 137-142.
- 井元政二郎, 2001, 経験則に基づく強度関数の有効性について, 地震2, 54, 331-333.
- 井元政二郎, 2002, 前震活動に基づく中規模地震の発生確率 - 関東の地震について -, 地震2, 55, 223-227.
- 前田憲二, 1993, 直前の前震による本震発生の経験的予報 - 伊豆の場合 -, 地震2, 45, 373-383.
- 尾池和夫, 1978, 中国の地震予知, 日本放送出版協会, 235pp.
- 力武常次, 1969, 地震予知論試論, 地震研究所彙報, 47, 107-128.
- Rikitake, T., 1975, Earthquake precursors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 1133-1162.
- Rikitake, T., 2001, Predictions and precursors of major earthquakes - The science of macro-scopic anomalous phenomena, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 197pp.
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎, 1983, 情報量統計学, 情報科学講座 A.5.4, 共立出版, 237pp.
- Shimazaki, K. and T. Nakata, 1980, Time predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 279-282.
- 鈴木雄次, 1985, 前震の記録, 個人出版, 164pp.
- Thompson, W. A. Jr., 1988, Point process models with applications to safety and reliability, Chapman and Hall, 146pp.
- 佃 為成, 1998a, 静穏化現象として見た地震空白域の形成過程, 地震2, 50 別冊, 101-113.
- 佃 為成, 1998b, 兵庫県南部地震前の特異な現象 - 明石海峡での地下水噴出と三木市上空での持続性発光現象 -, 日本地震学会講演予稿集 (秋季大会), A67.
- 佃 為成, 2000, 最近の地震活動の推移, 平成11年度地震研究所特定共同研究 (A) 報告 (佃 為成編), 8-13.

佃 為成, 2003, 地震の確率予報, 地震2, 56, 11-20.

Tsukuda, T., K. Gotoh, and O. Sato, 2005, Deep groundwater discharge and ground surface phenomena, Bull. Earthq. Res. Inst. (in press).

宇津徳治, 1977, 地震予知の適中率と予知率, 地震2, 30, 179-185.

宇津徳治, 1979, 日本の大地震は月齢と関係があるか, 地震2, 32, 495-497.

宇津徳治, 1982, 地震予知の適中率と予知率 (第2報), 地震研究所彙報, 57, 499-524.

Utsu, T., 1983, Probabilities associated with earthquake prediction and their relationships, Earthq. Predict. Res., 2, 105-114.

宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 876pp.

Yamashina, K., 1981, A method of probability prediction for earthquakes in Japan, J. Phys. Earth, 29, 9-22.