

12-6 大地震の確率予測と統計モデル

Probabilistic forecasts of large earthquakes using statistical models

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

大地震予測の手掛かりになるのは各種の観測データの異常現象であろう。しかし、それが大地震の前兆なのか、どの程度切迫性があるのかなどの識別には大きな不確定さが伴う。一般に切望されているような決定論的地震予知は難しく、「危険性が高い」「いつ起きても不思議でない」などの定性的な合言葉で終わらせず、危険性を数量的に示す確率的予測が必要となる。地震予知に繋がりそうな定性的な知見が出て、その定量的な予測モデリングが伴わないと困る。

地震予測において前兆（前駆）現象と異常現象（データ異常値など常時と違う状態）は明確に使い分ける必要がある。前者は既に大地震が起きてしまっただけの概念であり、後者は「前兆かもしれない異常現象」で、地震予測では異常現象が前兆現象である確率が問題となる。たとえば「前震」は本震が起きてから認定されるもので明らかに前者の概念であり、本報告では「前震かもしれない」地震の群の性質、たとえば時空間的な発生の集中度やマグニチュード系列の増減や地域性の違いを手掛かりとして前震の確率予測に結びつく統計モデルが必要である¹⁾。

大地震の確率予測の実用化には、各種観測の積み重ねによって「異常現象」を定義し、それらが「前兆」である確率を見積もり、その確率利得を求める必要がある。ここで確率利得とは「大地震の確率予測が基準の確率にくらべ何倍高くなるのか」という意味である²⁾。一種類の異常現象では高い予測確率を出すことは困難であろうが、いくつかの異常現象が重なって観測されれば確率は高められる³⁾。長期の確率予測のもとで、中期や短期の異常現象を探し、各々の予測確率を見積もり、それらを組み合わせるのが有望な策である^{2, 3)}。たとえば前震の識別は短期予測で、地震活動静穏化に基づく予測は中期予測である。

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)⁴⁾ は地震活動の統計的または物理的予測モデルの開発を促し、確率予測の観点から性能を評価することを当初の目標としている。それは、地震活動、地殻変動や電磁気変動などの様々な観測異常による各種の地震予測法の有意性と確率利得を評価できる科学的なインフラ（共通基盤）を整備することでもある。CSEP はまず、標準の確率予測を与えるために、世界の各地域に適合した基準の地震活動モデルの成立と、それらの改訂を進めようとするのである。その際、予測の成績を測るものとして「尤度」が合理的なものと考えられている⁵⁾。もし有用な知見が組み込まれた新予測モデルが出てくれば、基準のモデルと比較して、予測力が向上したか否かの評価ができる。この様に地震予測モデルは進化すべきものである。

もとより、大地震を少しでも高い確率利得で予測するためには地震発生の仕組みや観測異常現象の包括的な研究が不可欠である。そもそも何かしらの異常が認められたとき、それが来るべき大地震の前兆であるか否かの識別は容易でない。しかし、黒白の判別は不可能としても、この異常の出現は、この範囲、この期間の大地震の発生確率を、基準のものと比べて、この程度まで増加させると言えるようになればよい。このように、異常現象の大地震発生への前兆性や切迫性の不確定性を時空間的に見積もる必要があり、これには数多くの事例を研究し、各種因果関係を確率予測へ繋ぐ点過程モデルを構築しなければならない^{6, 7)}。それらの知見をどの様に組み込んで、相場のモデルを超える確率予測を実現するのが課題である。（尾形良彦）

文献：

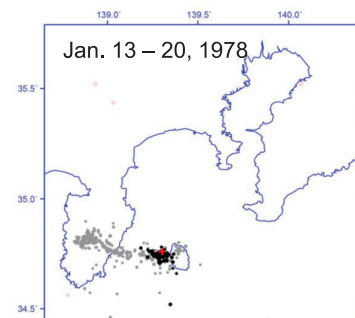
- 1) 統計数理研究所 (2011). 連絡会報 85 巻 (12-7), 440-444.
- 2) Aki, K. (1981). Earthquake Prediction (Maurice Ewing Series, 4), eds. D. W. Simpson and P. G. Richards, Washington, D.C.: American Geophysical Union, 566-574.
- 3) 宇津徳治 (1979). 連絡会報 21 巻, (7-4) 164-166.
- 4) 東京大学地震研究所 (2010) 連絡会報 85 巻(12-2) 433-436.
- 5) Akaike, H. (1985). Prediction and entropy, in *A Celebration of Statistics*, The ISI Centenary Volume, A.C. Atkinson and S.E. Fienberg, eds., Springer-Verlag, New York, 1-24.
- 6) 統計数理研究所 (2001). 連絡会報 66 巻, (10-4), 562-570.
- 7) 統計数理研究所 (2004). 連絡会報 72 巻, (11-7), 631-637.

1978年1月14日12時24分伊豆大島近海の地震(M7.0)



宇津 (1978予知連会報)

予測地震をM6 $\frac{1}{2}$ 以上としての前兆確率の試算



項目A: 1976年初からの隆起域の広がり等から考えて、
隆起が始ってから5年以内にかかる確率1/3 (0.02% per day)

項目B: 石廊崎と網代の埋込式体積ひずみ計に現れた異常や伊豆半島でのラドン、
井戸水位等の異常、前年の12月中旬から1か月以内にかかる確率1/10 (0.3% per day)

項目C: 1月14日午前大島西方の地震活動、前震確率1/10。
始ってから3日以内にかかる確率1/35 (1% per day)

項目D: 大地震の基礎確率 P_0 : 対象地域内で
30年に1回の割合で起っている場合 (Case I) (0.009% per day)
100年に1回の割合で起っている場合 (Case II) (0.003% per day)

複合的確率予測公式(宇津, 1977「地震」)

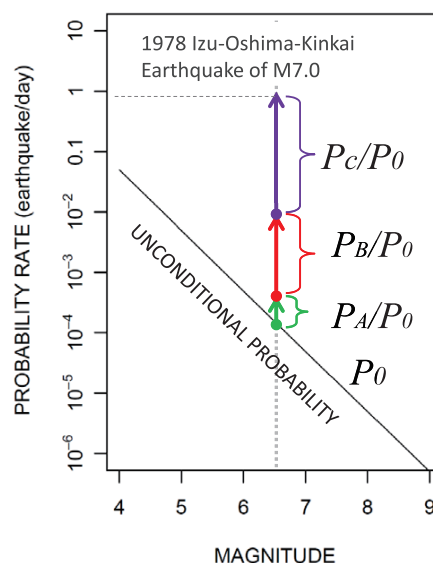


Aki (1981, Ewing series)

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P_A} - 1 \right) \left(\frac{1}{P_B} - 1 \right) \left(\frac{1}{P_C} - 1 \right) \cdots \left(\frac{1}{P_S} - 1 \right) \left/ \left(\frac{1}{P_0} - 1 \right) \right.}^{N-1}$$

$$\approx P_0 \cdot \frac{P_A}{P_0} \frac{P_B}{P_0} \frac{P_C}{P_0} \cdots \frac{P_S}{P_0} \quad \begin{matrix} (41\% \text{ per day}) \\ (89\% \text{ per day}) \end{matrix}$$

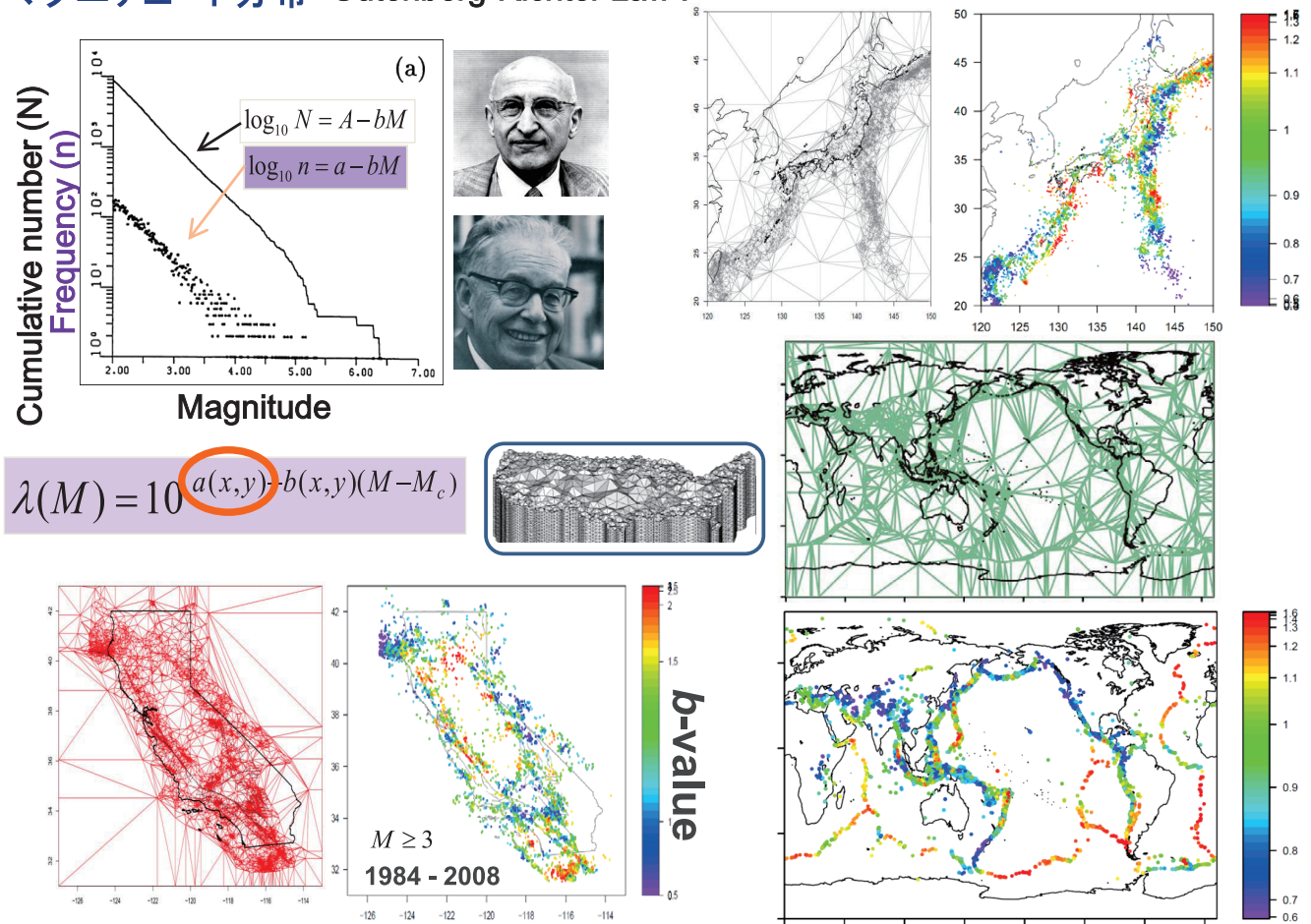
確率利得 = $\frac{\text{異常現象が大地震の前兆である確率}}{\text{大地震の基礎確率}}$



第1図. 複合的確率予測公式による遡及的確率予測の例. 確率利得と複合的確率予測の図解.

Figure 1. Retrospective forecasting example using the multiple elements prediction formula. Concept of probability gain.

マグニチュード分布 Gutenberg-Richter Law :



第2図. 小さい地震の頻度から大きな地震の標準確率を求めるグーテンベルグ・リヒター則の b 値の地域性モデル. a 値は下限マグニチュード M_c での場所 (x, y) 周辺における標準地震活動度

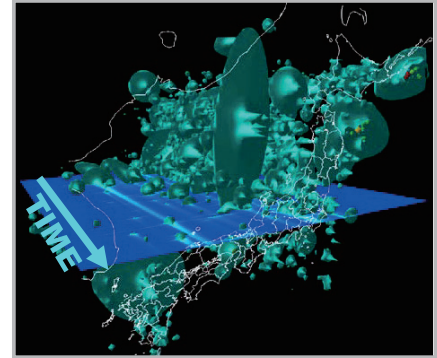
Figure 2. Location-dependent b -values of Gutenberg-Richter law to estimate probability of large earthquakes of the region. The b -values are indicated by the color table in the right side of the panels. The a -value represents seismicity around the location (x, y) .

A baseline probability model

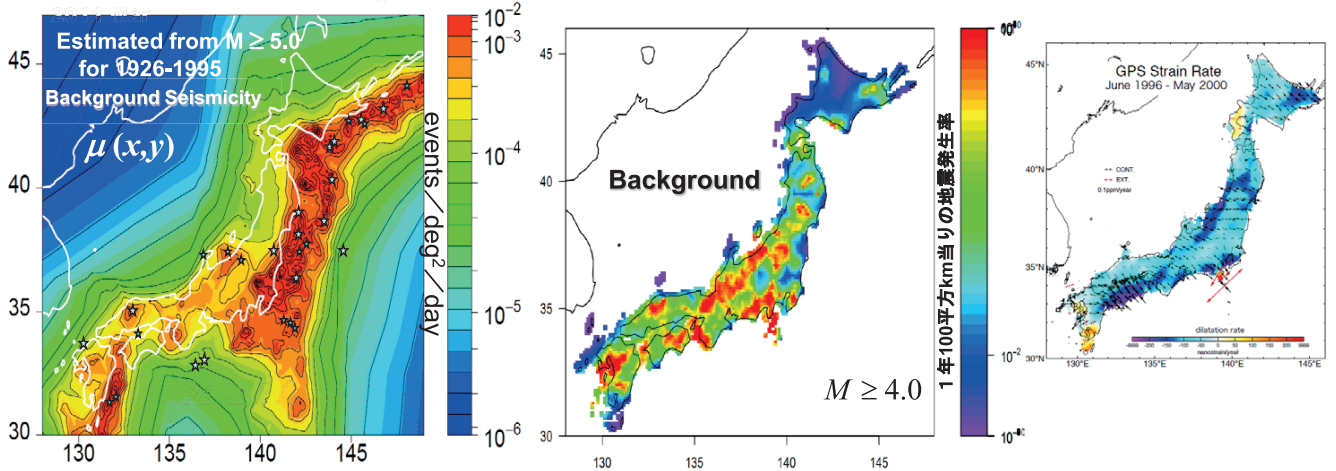
Hierarchical space-time ETAS model

$$\lambda(t, x, y) = \mu(x, y) + \sum_{\{j; t_j < t\}} \frac{K(x, y)}{(t - t_j + c)^{p(x, y)}} \times \left[\frac{(x - x_j, y - y_j) S_j (x - x_j, y - y_j)^t}{e^{\alpha(x, y)(M_j - M_c)}} + d \right]^{-q(x, y)}$$

Isosurface of $\lambda(t, x, y)$

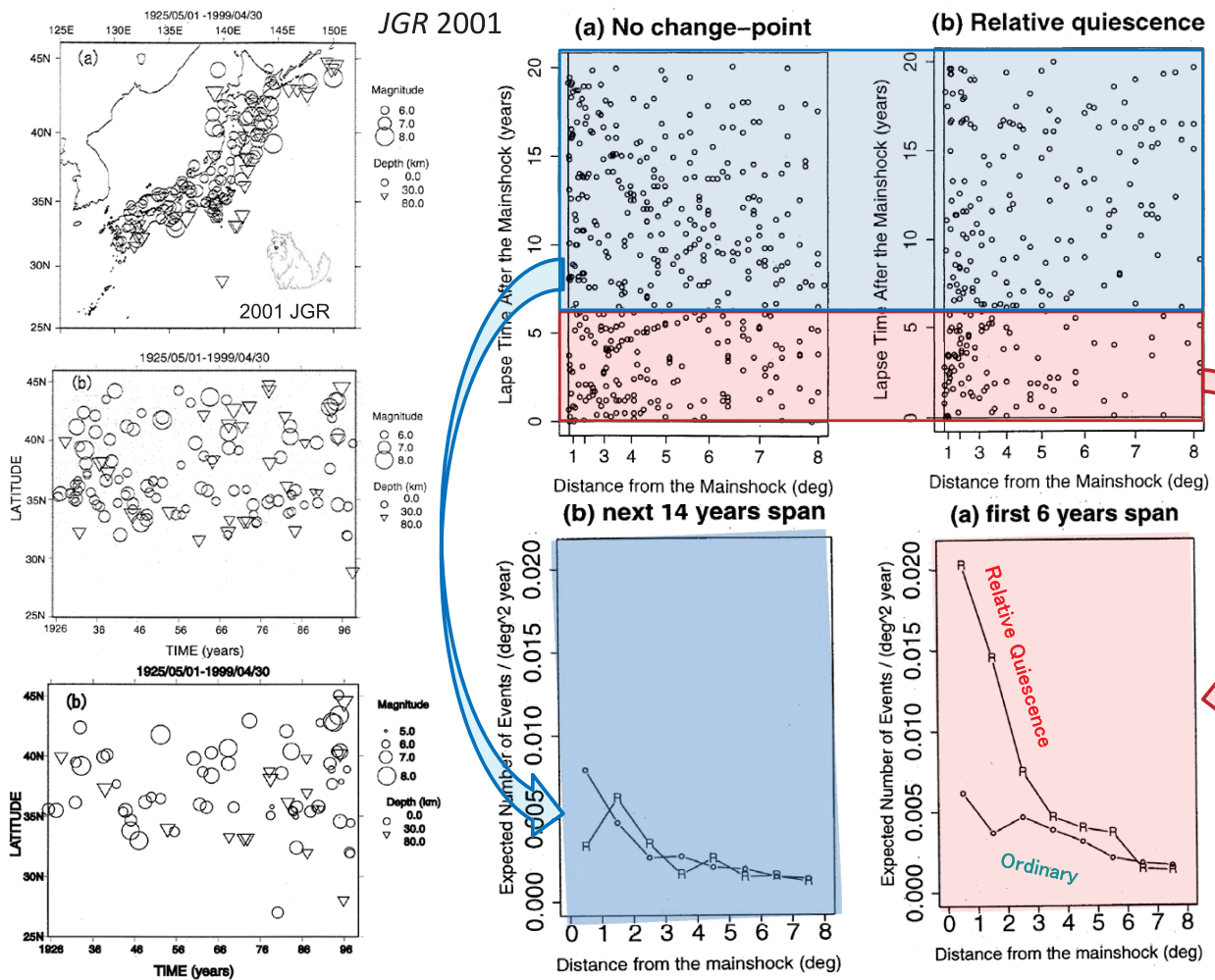


☆ = earthquakes of $M \geq 6.7$ during 1996 –



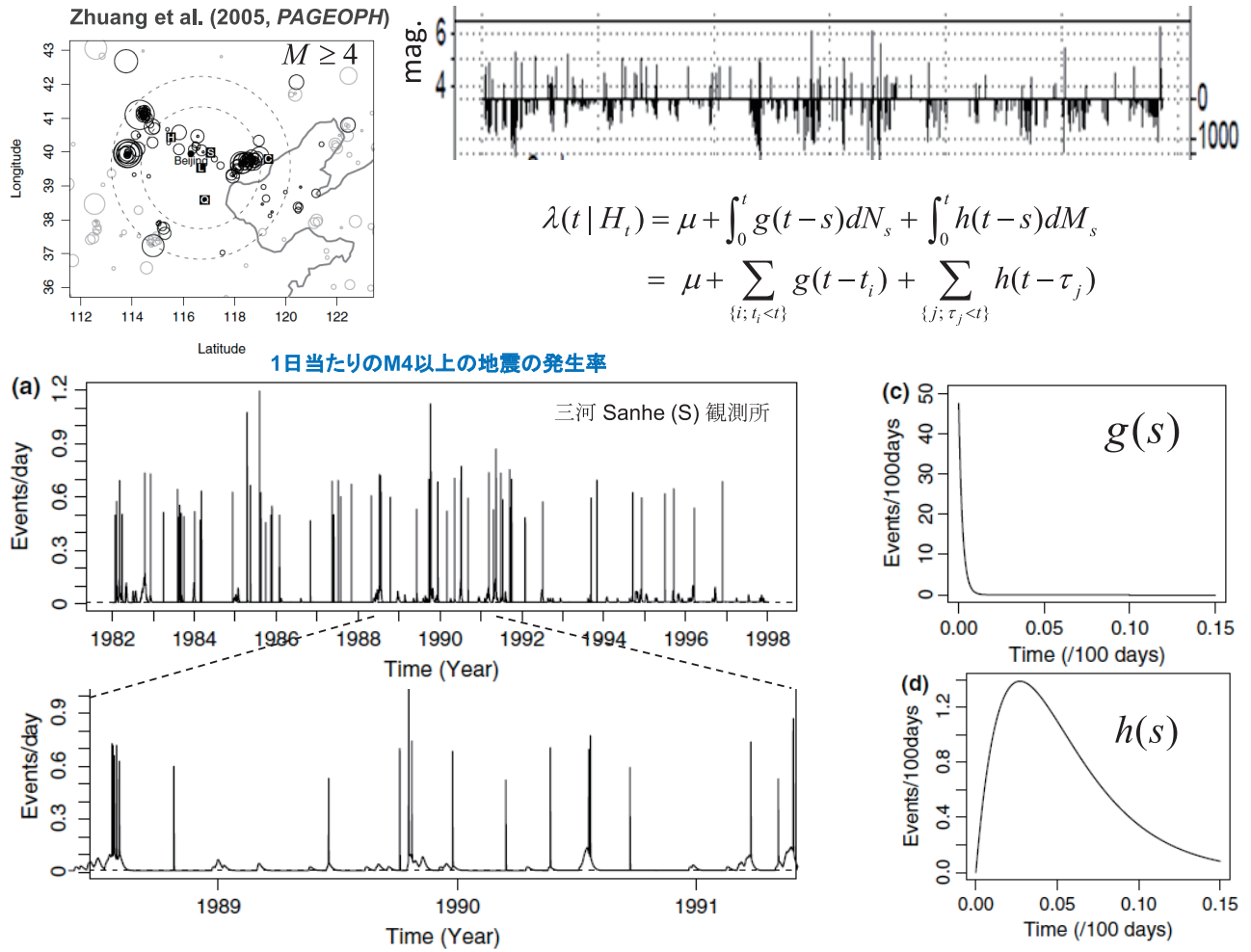
第3図. 時空間 ETAS モデルによる常時地震活動（左上数式の μ 関数）. [左下図] $M5.0$ 以上の地震が起きる単位面積時間当りの確率から大地震の確率予測を b 値の地域性と合わせて予測することができ、その後 15 年間に実際に起きた $M6.7$ 以上の地震が星印で示されている. [中下図] $M4$ 以上の内陸直下型地震が 1 年間に起きる単位面積当りの確率予測. [右下図] GPS 観測による歪み分布.

Figure 3. The baseline probability of $M5$ and larger in Japan evaluated by the location dependent background rate (μ -value) of the Hierarchical space-time ETAS model; which predicts probability of large earthquakes, by combination with the location-dependent G-R law in Figure 2. The stars represent earthquakes of $M6.7$ or larger occurred during 1996-2010 (bottom left). Similarly obtained background seismicity rates of earthquakes of $M4$ and larger in inland Japan (bottom middle). Areal strain rate estimated by GPS observations [right bottom].



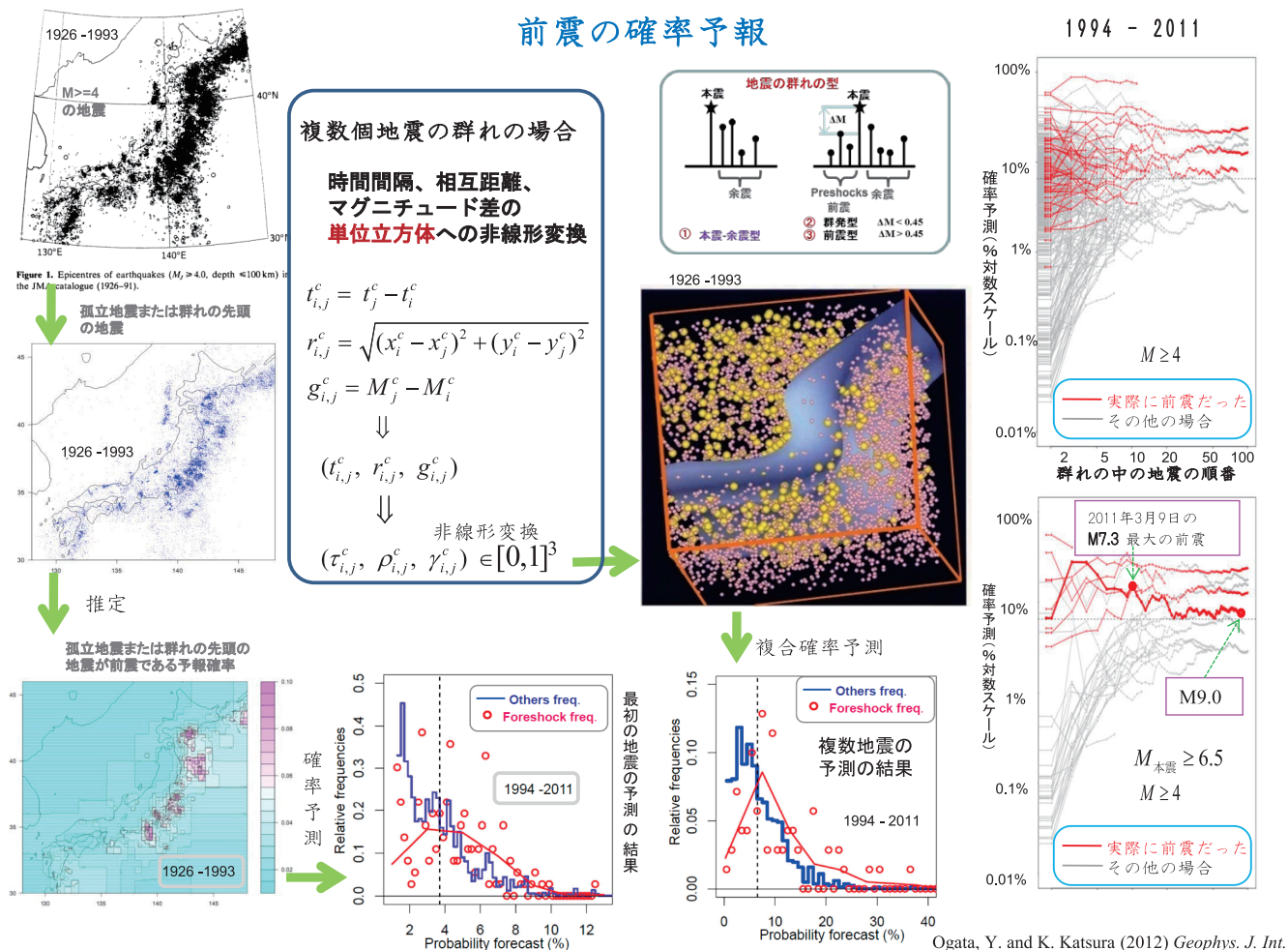
第4図. 大地震の震央と時空間 (左側3図). うち余震活動を解析したもの (左下). 重ね合わせ時空間図による地震のトリガリング現象の統計図 (右中4図). [上2図] 原点に左下図の各大地震, 横軸は左上中の全地震までの距離 (度) で面積に比例するよう変換している. 縦軸は経過年 (20年後まで). ETASモデルを物差しにして順調な余震活動のもの (左側) と途中から3カ月以上静穏化した場合 (右側) に分類. 中下と右下図は大地震が起きた単位面積当たりの経験確率 (距離の関数). いったん大地震が起きると遠方より近傍に数倍大地震が起き易く, 静穏化があると6年以内では更に4倍程度起き易い.

Figure 4. Space-time cross-correlations (top right two panels) of large earthquakes (top and middle left panels) relative to the main shocks (bottom left) whose aftershocks are analyzed by the ETAS model. The middle column panels are the case of normal aftershock activity, and the right ones are case where the relative quiescence lasted three months or more. These indicate that probability gain is a few-fold within 100km distance compared to the far field, and furthermore that the probability gain is about 10-fold larger within 100km distance during the first 6 years if the relative quiescence is observed.



第5図. 地震と異常信号との因果関係推定をみる点過程モデル (数式). [右上図]北京近郊三河 (SANHE)観測所での地下電位超低周波帯(0.1~1Hz)日別異常累積量 (右上パネル下向き線分) および周辺 300km 以内の M4 以上の地震発生時刻とマグニチュード (右上図上向き線分). [中下図]点過程出入力モデルによる確率利得 (相対危険度) の推移 (右側) および異常信号や地震の因果性の時間遅れ応答関数 (右側).

Figure 5. Point-process model to investigate the causal relationship between anomalies (unusual intensities of ground electric-potential by day) and earthquakes. The conditional intensity rate of earthquakes of M4 or larger within the circular region of 300km radius from Huailai station shows that probability gains except for the aftershock effects vary in the range of 1/3 ~ 3 fold rate of the background seismicity rate.



第6図. 或る地域で中規模の地震（たとえば M4 以上）が起き始めたとき、これが余震を伴って無事終了する（本震余震型）のか、一回り大きな地震が来る（前震本震型）のか、またはその他（群発地震型）なのかの予測が関心事である．目標は現在進行中の地震の起こり方のデータから統計的に判別して、前震本震型の確率予測することである．第一に、前震の起こりやすい場所とそうでない場所がある．孤立地震と群れの先頭の震央座標がデータである．色付きの地図はこれらが前震であった経験確率を 1993 年までのデータから求めたものである．これで予測すると確かに有意性はあるし予測確率と実際の前震の出現率は整合している．第二に、地震が群れとして続いた場合それらの時間間隔、震央間距離、マグニチュードの増減量の統計をとって分かることは、前震は時間空間的に他の型の群より集中度が高く、マグニチュードの差は減少しない場合が比較的多いといった特徴である．そこで、群内の地震間の時間差や距離やマグニチュードの差の値を夫々の累積関数を使って変換して単位立方体に詰め込み、その各部位での前震の比率を使って判別の予測確率を求める．[右上図]地震群内に新しい地震が加わる度の前震の予測確率の変移で地震の順番（横軸）とその確率（縦軸）．実際に前震だった群れの確率予測が赤折れ線、その他の地震群が灰色折れ線で表している．[右下図]右上図のうち本震が M6.5 以上だったものである．[中下右寄り図]予報確率とその結果の正規化した相対度数、そして縦の点線は複数地震の群れの場合の前震の全国平均（7.2%）である．確率予測と出現率は調和的で有意である．

Figure 6. A cluster of earthquakes can be classified as foreshocks, swarm or aftershocks. Discrimination of foreshocks is an important issue in short-term earthquake prediction. Namely, it is desirable to forecast whether or not an ongoing cluster of earthquakes will be followed by a significantly larger earthquake. See Ogata and Katsura (2012, *Geophys. J. Int.*) for the details.

まとめ

📖 地震予知の特効薬はなく、複雑で多様な地震発生を予測するには、**確率予測**が避けられない。

📖 各地域に適した**基準の地震活動**の確率予測(長期・短期予測の**相場**の**モデル**)を与える(**CSEPの目標**)。

→ 統計的点過程モデルの改訂を進める必要がある。

📖 **異常現象**が、大地震の**前兆**なのか、どの程度切迫性があるのかななどの不確定さを見積もる。

→ 大地震の発生確率を、基準のものと比べて、この範囲、この期間、この程度まで増加させる(**確率利得**)と言えるようになればよい。これらを偏りなく見積もる必要がある。

→ **異常現象と大地震の因果性を記述する点過程モデルの作成**

📖 大地震を少しでも高い確率で予測するために、各種の観測データの有意な異常現象を多数考慮して、**確率利得を高め、複合的に予測**することが有力である。

第7図. まとめ
Figure 7. Conclusions