

(4). 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所

1. はじめに

1970年代、赤池情報量規準 AIC や赤池ベイズ情報量規準 ABIC が提案され、地球物理学の分野でも各種データの時系列解析など統計モデルへの応用で注目された。以来、統計数理研究所が大学共同利用機関になったことと相俟って統計数理の研究者が地球物理学関係の研究者との共同研究や研究会など研究上の組織的な接触を持つようになった。その結果、伸縮計、傾斜計、体積歪計、観測井戸の地下水位など地球潮汐、気圧、降水量、温度や観測システムの人為的变化などの多変量の時系列解析、重力異常の空間的平滑化、各種逆問題モデルのベイズの適用、および地震活動のための点過程モデルの開発とその解析法が展開された。これらは統計学的にも世界に先駆けるものであった。これらの共同研究のいくつかの成果は 1999 年度以前にも統計数理研究所や地震予知連絡会の関係機関などによって報告され論文に掲載されている。また大森・宇津公式（改良大森公式）を拡張し発展させた Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) モデルが提案され、これによる予測と実際の地震発生頻度の相違を測ることによって、地震活動の異常変化を検出する物指しとしての役割を果たすことになった。

2. この10年を振り返って

2.1 統計数理研究所の組織としてのかかわり

元予知連副会長の故宇津徳治先生は東京大学地震研究所を退任されて以来 2003 年度まで客員教授および外来研究員として統計数理研究所における地震活動の研究の推進について大きな貢献をされた。2001 年度から統計数理研究所の尾形良彦は臨時委員として地震予知連絡会に加わることとなり、現在まで予知連絡会報の下記文献リストを含む 23 の議題に関して報告した。地震予知連絡会報に掲載された、それらの報告の詳細は文献にあるように地震学関連学術誌に掲載されている。2004 年度の法人化に伴って統計数理研究所は組織替えを行い、3 つの研究系に加え予知見戦略研究センターを設け、そのなかに地震予測解析グループを置いた。その使命は「統計モデルによる地震（余震）活動の計測、異常現象の定量的研究、及び、それらにもとづく地震（余震）の発生確率予測とその評価法などについて研究する」ことである。ここで統計的方法の公開として ETAS モデルをはじめとする各種点過程解析についてのソフトウェアを発刊し、講習会を開くなど、関係研究者・実務者の利便を図った。

以下に地震予知連絡会で報告した内容を取りまとめた。

2.2 地震活動への因果関係の統計解析と予測^{1,22)}

地震活動の分野で従来から議論されているものとして、

地震発生の周期性（季節性など）や地域的関連性などがある。これらの統計解析のために、地震活動の続発性を組み込んだ点過程モデルが有効である。特に地域的関連性を調べた点過程モデルは各種異常現象の発生の地震発生への統計的因果関係を議論し、前兆現象たりうるか否かを調べることに応用できる。例えば 1982 年から 16 年間にわたる中国北京市付近における日別地電位異常強度データが地震発生 (M4 以上) の前兆たりうるかを AIC によるモデル適合度比較によって確かめた。電位異常強度データを考慮したほうが地震活動の良い予測を得られたが、実用的な確率予測として十分とはいえず、より多くの観測データを考慮して複合予測によって性能をあげる必要がある。

2.3 昭和南海トラフ巨大地震と西南日本の地震活動^{2,24)}

地震の誘発を促したり、活動を抑制したりする現象を説明するためにはクーロンの破壊応力の増減 (ΔCFS) を見るのが有効である。1944 年東南海地震 (M7.9) と 1946 年南海地震 (M8.1) のそれぞれによって増加・減少した各地域の ΔCFS を調べ西南日本各地の地震活動の活発化・静穏化が良く対応していることを示した。とくに従来から前兆と考えられていた各地の地震活動の異常をコサイスマックなものと同様のものに整理した。

2.4 余震確率予報の緊急化^{8,28)}

大きな余震は本震直後最初の 1 日のうちに、既に全体の半分ほど起こっている。したがって、データ取得の悪条件にも関わらず、本震発生 24 時間以内に行えるだけ早い機会に予報を与えるのは被災地にとって重要である。このために余震のマグニチュードの Gutenberg-Richter 式と大森・宇津の余震減衰公式に併せて、時間経過とともに変化する余震の欠測率（検知率）のモデルを考え、本震直後 30 分以後からの確率予報の可能性を示した。同様に、ある地点での震度の確率予報が可能である。すなわち、Gutenberg-Richter 式の b 値の代わりに地震波の最大振幅の石本・飯田の式の m 値と大森・宇津の余震減衰公式のパラメータと一定の強震計の余震検知率の時間経過を併せて推定するのである。

2.5 時空間 ETAS モデルとその適用^{3,32)}

広域地震活動のための階層的時空間 ETAS モデルを提案紹介した。これは経験則を踏まえたベイズのモデルである。地域によって異なる余震減衰率 p 値などの 5 つのパラメータを地震の位置の関数として、これらを推定することで各地の地震活動の違いを定量化して可視化できる。また各地の実際の地震活動と時空間モデルで計算された理論的活動度を直裁的に比較し、相対的静穏化や活発化の期間や領域などを可視化する。解析例として兵庫県南

部地震による丹波地域や和歌山地域の地震活動の活発化、浜名湖直下のスロースリップによる中部近畿地方各地の静穏化や活発化を図示した。それらの変化と ΔCFS のパターンとは良く一致する。また東北地方の東方沖におけるモデルの K 値 (余震の生産性) の高いところとアスペリティの位置とは相補的であった。また、その後 1996-2008 年の間に M6.7 以上の大地震の大多数が時空間 ETAS モデルの常時活動度パラメタの高いところに発生している²²⁾。常時活動度の低いところにおきた例外は、北海道南西沖地震、能登半島地震、福岡県西方沖の地震、紀伊半島沖の地震および 2005 年の三陸沖地震 (outer rise) であるが、これらはモデル推定に使った地震活動データ (1926 - 1995 年, M5 以上) では捉えられなかったということである。

2.6 地震活動異常とストレス変化との関係

地震活動が順調に推移しているか否かは MT 図や累積関数などの目視では良く分からないことが多い。そこで、理論的累積地震関数 (ETAS モデル発生率関数の積分) を物差しにして地震の実際の累積数との偏差を測る。途中から有意な変化 (地震活動異常) が認められ、特にその後の地震発生が ETAS モデルによる発生率に比べて少ない場合、「相対的静穏化」と呼ぶ。

報告した解析例は (1) 1936 年と 1978 年宮城県沖プレート境界大地震 (M7.4, M7.5) までの東北地方における地震活動異常とその後の地震活動^{5,27)}, (2) 2003 年十勝沖地震 (M8.0) 前後の北日本における地震活動異常^{11,30)}, (3) 2005 年宮城県沖地震 (M7.2) 前の周辺部の地震活動異常¹⁶⁾, (4) 福岡県西方沖地震と九州地方周辺の地震活動異常¹²⁾, (5) 2004 年新潟県中越地震 (M6.8) 前の周辺部の地震活動異常^{10,26)}, (7) 2007 年能登半島地震と能登半島周辺の地震活動異常²⁰⁾などがある。同様に余震活動についても解析した。(8) 2003 年の宮城県沖地震 (M7.0) の余震活動異常^{5,31)} (9) 2003 年宮城県北部の最初の地震 (前震 M5.5) の余震活動異常^{4,31)}, (10) 2003 年宮城県北部の地震 (M6.5) の余震活動^{4,31)} (11) 2003 年十勝沖地震後の余震活動異常や釧路沖までの周辺部における非地震性のすべりおよび北海道東部内陸地域の地震活動異常の関係⁷⁾, (12) 2005 年福岡県西方沖地震の余震活動異常および博多湾におけるオフフォールト地震活動の静穏化との関係^{13,29)} (13) 2005 年の宮城県沖地震 (M7.2) の余震活動¹⁶⁾ (14) 2006 年千島列島沖地震の余震活動^{19,23)} (15) 2007 年中越沖地震の前の新潟県中越地震余震活動²¹⁾などである。

上述の事例に見られる実際の発生頻度と ETAS の地震発生予測との有意な相違 (異常) をよく説明できる仮説は、検討地域での地震 (余震) 活動の近傍の注目する断層で非地震性のすべりが起きて、そのストレス変化が伝

わり、それを契機に地震 (余震) の活動度が、予測されたものから系統的に外れるということである。予測より少なくなる場合と多くなる場合がある。後者が相対的静穏化である。その変化が地震 (余震) 活動に働くクーロン破壊応力の減少や増大と整合的に対応する。非地震すべりによる静穏化や活発化の物理的シナリオとして非地震性の滑りによる間歇的なストレス変化またはストレスのローディング率が変わったというモデルで Dieterich の rate/state of friction 則に基づいてシミュレーション計算を行い余震の発生率異常の再現性を確認できる²³⁾。

この様にして数多くの領域の地震活動を解析し非地震性のすべりの所在をつきとめることは大地震の発生率予測の実効率を上げるのに役立つであろう。たとえば 2004 年新潟県中越地震の断層すべりモデルによる、周辺部の地震の最頻断層角度のクーロン破壊ストレス (CFS) の変化量によって区分けされた 4 つの領域について、それぞれの 1997 年 10 月以降の時期の地震データに ETAS モデルをあてはめた。中越地震断層の中で仮に前駆的すべりが起きたとすると、ごく小さい変化であるが、断層近地をのぞいてほぼ同様の ΔCFS パターンになる。この変化によって理論的に地震活動が抑制されるべき領域と促進されるべき領域を示している。全ての領域で、地震活動に変化があったとする場合の当てはまりが良く、前者の領域では地震活動が予測されたものより静穏化を示し、後者の領域では予測されたものより活発化しており、それぞれの領域での CFS の増・減のパターンと一致している^{10,26)}。同様に、福岡県西方沖地震と九州地方周辺各地の地震活動異常や 2007 年能登半島地震と能登半島周辺の地震活動異常も CFS の増・減のパターンとよく一致している²⁰⁾。ただし、いずれも活動の変化は全く同時というわけではなかった。小さな非地震性のすべりが連続的または間歇的に起きていることを示しているのだろうか。しかし 2003 年十勝沖地震 (M8.0) 前の北東北地方周辺における地震活動異常の変化はほぼ同時であった^{11,30)}。十分強い前駆的すべりのインパクトがあったからかもしれない。

2.7 地殻変動異常^{18,20,21,26)}

前駆的なすべり運動があったとすると、原理的には、それに見合った測地学的根拠を示せるはずである。国土地理院の GEONET 時系列データによると、通常では観測基線距離の一定の縮みまたは伸びが一貫することが期待されるのに、中越地震の地震断層周辺で 3 - 4 年前から時系列の線形トレンドからの残差に系統的な偏差が認められる。S/N 比ぎりぎりのケースが多数あるが、断層最近接の観測点を含む基線を除いて、これは中越地震の断層の深部延長部の前駆すべりモデルから計算された地上の GPS 観測位置の変移と概ね調和的である。また同

様な基線距離の異常変動が能登半島地震の前、中越沖地震の前や福岡県西方沖地震の前に九州北部地域で観測され、これらのデータの異常性を前駆的すべりによって整合的に説明できる。

2.6 余震活動の時空間的变化と最大余震¹⁷⁾

余震活動の時空間的異常を比較的明瞭に見るために大森・宇津の余震減衰公式を当てはめ、理論的累積関数を使って余震の発生時刻を伸縮変換する。順調に経過している余震活動は全体として変換時刻のもとで一様な分布になるという統計的性質がある。この事に依拠して余震の変換時刻の時空間分布が一様に各部分で推移しているか否かを調べる。変換時刻の時空間分布が或る部分で非一様であれば、そこで大森・宇津の余震減衰公式と実際の余震発生の乖離があることを示す。この様にして異常が何処にあるかを比較的明瞭に見ることができる。

過去および最近の十数例の大地震について、余震活動の時空間異常から余震活動内部の部分的静穏化や空白領域が観測されることがある。これらは本震断層内の余震活動を延長して新たな破壊となるような大余震の断層付近の前駆的なゆっくりすべりや本震破壊の事後ゆっくりすべりによる部分的なクーロンストレス変化によるものと仮定して系統的に調べた。

3. おわりに

以上の報告は殆ど大地震発生の事後の研究である。地震活動や地殻変動の異常性が観測されたとしても、予測のためには、前駆的すべりの場所と断層メカニズムに関する想定シナリオを設定してのそれらの尤もらしさを確かめねばならない。これは生易しいことでは無い。例えば福岡県西方沖地震の余震活動の静穏化異常¹³⁾を4月6日の予知連合会議で報告したものの、そのシナリオは貧弱なものであった。警固断層のすべりの前兆ではないという逆予知を除いて、他のシナリオは該当しなかった。一ヶ月経って最大余震が起きてからの詳細な余震データと最大余震のメカニズム情報に基づいて、余震のどの部分が異常であるとか、オフフォールト群発活動の静穏化などをよりよく説明できるシナリオを与えることができた²⁹⁾。

地震予測は場所だけでなく時間も予測しなければならない。これはもっと難しい。それに、ゆっくりすべりは必ずしも断層の破壊が緊迫しているとは限らない事例が数多く報告されている。

現在のところ、余震の静穏化が観測されたとき、大地震の時空間的な確率予測として以下のようなことを述べるにとどまる^{6, 33)}。まず、一旦大地震が起きると、その近辺に同程度以上の地震が起きる確率(単位面積当たり)は遠方のどこかに起きる場合よりも大きい。これらはス

トレスの急変による地震の誘発現象を示唆している。さらに、ある地震の余震活動が相対的に静穏化した場合には、予測どおりに活動が推移している場合より、この先、新たな断層破壊を伴う大きな余震が起きる可能性が高い。相対的静穏化が長期間(たとえば数ヶ月以上)に及ぶと、日本においては、余震域近辺(たとえば200km以内)で、6年以内の期間に、本震と同規模以上の地震が起きる発生確率が、その他の場合より数倍以上も高い。

(尾形 良彦)

参考文献

予知連絡会報

- 1) 異常現象データと地震発生の相関解析および複合危険度予測:北京付近における日別地電位異常強度データ(1982-1997)を例として, 66巻, 562-570, 2001.
- 2) 1944 東南海地震および1946南海地震前後の地震活動の変化について, 70巻, 378-383, 2003.
- 3) 統計的時空間モデルで検出された中部・近畿地方の地震活動の変化(1995-2001), 70巻, 361-363.
- 4) 2003年宮城県北部の前震活動と余震活動および周辺部の地震活動の統計解析, 71巻, 260-267, 2004.
- 5) 宮城県沖プレート境界型大地震までの東北地方における地震活動, 71巻, 268-278, 2004.
- 6) 静的トリガリングと統計, 72, 631-637, 2004. 2004.2
- 7) 2003年十勝沖地震(M8.0)前後の北日本における地震活動の特徴について, 72巻, 110-117, 2004. 2004.2
- 8) 地震検出率とb値の同時推定と余震の確率予測, 73巻, 666-669, 2005. 2004.11
- 9) 2004年紀伊半島南東沖の地震(M7.4)の余震活動の特徴と本震の破壊断層モデルとの関係について, 73巻, 495-498, 2005. 2004.11
- 10) 2004年新潟県中越地震(M6.8)の余震活動の特徴と地震前の周辺部における地震活動の特徴について, 73巻, 327-331, 2005. 2004.11
- 11) 2003年十勝沖地震(M8.0)と2004年釧路沖の地震(M7.1)の余震活動および北海道東部の内陸地震活動の特徴について, 74巻, 83-88, 2005. 2005.2
- 12) 2005年福岡県西方沖の地震(M7.0)前の九州地方及び付近における中期的な地震活動の特徴について, 74, 523-528, 2005. 2005.04
- 13) 福岡県西方沖の余震活動について: 最大余震(M5.8)以前に報告された相対的静穏化と余震域をストレスシャドウにするような前駆すべりのシナリオ, 74巻, 529-535. 2005.05
- 14) 近年の顕著な地震の余震活動について, 75巻, 593-597, 2006. 2005.08

- 15) 活動域における顕著な余震活動とそれまでの常時地震活動の様式との比較について, 75 巻, 598-601, 2006. 2005.08
- 16) 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M7.2) の周辺部の活動と余震活動について, 75 巻, 129-131, 2006. 2005.08
- 17) 余震活動の時空間的異常とストレス変化の空間分布, 76 巻, 590-597. 2006.05
- 18) 地震活動異常と地殻変動異常 2004 年中越地震と 2005 年福岡県西方沖の地震の前の中期的変化について, 77 巻, 452-459, 2007.2006.08
- 19) 千島列島沖の地震活動の時空間パターンとストレス変化, 78 巻, 60-66. 2007. 2007.02
- 20) 能登半島周辺の地震活動と地殻変動について, 78 巻, 399-404, 2007. 2007.04
- 21) 2007 年中越沖地震の余震活動および周辺部の地震活動と地殻変動について, 79 巻, 345-352, 2007. 2007.11
- 22) 最近 30 年の大地震発生と指定地域について, 79 巻, 623-625, 2008. 2007.11
- 23) 2006 年千島列島沖地震の余震活動の時空間変化とストレス変化 –アウターライズ地震の前駆すべりの可能性–
- western Fukuoka, Japan, by the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1, L01303, doi:10.1029/2005GL024405.
- 30) Ogata, Y. (2005). Synchronous seismicity changes in and around the northern Japan preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake of M8.0, *J. Geophys. Res.*, 110, B5, B08305, doi:10.1029/2004JB003323.
- 31) Ogata, Y. (2005). Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor, *J. Geophys. Res.*, 110, B5, B05S06, doi:10.1029/2004JB003245.
- 32) Ogata, Y. (2004). Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, *J. Geophys. Res.*, 109, B3, B03308, doi:10.1029/2003JB002621.

論文誌

- 24) Zhuang J., Vere-Jones D., Guan H., Ogata Y. and Ma L. (2005). Preliminary analysis of observations on the ultra-low frequency electric field in a region around Beijing. *PAGEOPH.*, 162: 1367-1396, doi:10.1007/s00024-004-2674-3 (with data).
- 25) Ogata, Y. (2004). Seismicity quiescence and activation in western Japan associated with the 1944 and 1946 great earthquakes near the Nankai trough, *J. Geophys. Res.*, 109, No. B4, B04305, doi:10.1029/2003JB002634.
- 26) Ogata, Y. (2007). Seismicity and geodetic anomalies in a wide area preceding the Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of 23) October 2004, central Japan, *J. Geophys. Res.*, 112, B10301, doi:10.1029/2006JB004697.
- 27) Ogata, Y. (2006). Seismicity anomaly scenario prior to the major recurrent earthquakes off the east coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, *Tectonophysics*, Vol. 424, 291-306, doi:10.1016/j.tecto.2006.03.038.
- 28) Ogata, Y. and Katsura, K. (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 10, L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
- 29) Ogata, Y. (2006). Monitoring of anomaly in the aftershock sequence of the 2005 earthquake of M7.0 off coast of the