

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月27日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20240027

研究課題名（和文）統計的地震予測研究の基盤の構築

研究課題名（英文）Construction of the foundations of statistical earthquake prediction research

研究代表者

尾形 良彦 (OGATA YOSHIKO)

統計数理研究所 名誉教授

研究者番号：70000213

研究成果の概要（和文）：

ETAS (epidemic type aftershock sequence) などの統計的点過程モデルで各地の地震活動の確率的予測を行う同時に、モデルを物差しにして静穏化・活発化などの地震活動異常を検出できる解析手法を確立した。地震活動予測からの逸脱による地震活動異常の空間パターンから、断層内の非地震性すべりによる地殻のストレス変化との因果関係を実証研究した。このような地震活動の異常性が殻歪変化のセンサーとして有用である。さらに地震活動異常と GPS による地殻変動データとの整合性を確かめ、大地震の前駆的なすべり現象の解明に迫った。

研究成果の概要（英文）：発音に基づく入力を有効にする

We established a method of analysis that can detect and test the quiescence or activation, relative to the predicted seismic activity using the ETAS (epidemic type aftershock sequence) related models. We studied spatial patterns of deviations of seismicity from the forecast of seismic activity, and demonstrated the relationship between the crustal stress changes due to aseismic slip in the fault. Deviation of such seismic activity may be useful as a sensitive sensor of changes in crustal strain, and can be verified the consistency with the crustal deformation by GPS data and these phenomena. The results urged further operational studies to elucidate processes of earthquake precursor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2009年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2010年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
年度			
年度			
総計	31,400,000	9,420,000	40,820,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：統計科学

キーワード：ETAS モデル, 地震活動静穏化・活発化, クーロン破壊ストレス, GPS 測地データ, 階層ベイズ時空間 ETAS モデル

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

現在わが国には気象庁、国立大学および防災科学技術研究所管轄の、日本列島に稠密に張りめぐらされた地震計測システムが統合され、マグニチュード0（ゼロ）までの微小地震の詳細なデータ（一元化震源カタログ）が1~2日遅れで公開されている。さらに、世界に類を見ない、稠密で恒常的なGPS観測網による精密な時空間測地データ（国土地理院GEONETデータ）がWEBやCDなどで公開されており、これらのデータは誰でも利用することが可能となっている。これらの恵まれたデータ環境に充分応えられる高度な解析をするためには点過程モデルをはじめ適切な各種統計的モデルが欠かせない。

地震統計や地震活動の予測は古くて新しい研究分野である。大森房吉や宇津徳治らによる余震および地震活動の先駆的研究を引き継いだ先進的な伝統のもと、我が国においては、多くの地震活動の研究結果が蓄積されている。本申請者による点過程に基づく定式化と最尤法を契機として、これらは飛躍的に発展し、定量的な地震活動の予測手法が進展した。なかでも、大森・宇津の余震減衰の公式のポアソン過程モデルによる最尤法推定は世界各地において実施され、たとえば日本（気象庁）やカルフォルニア（米地質調査所USGS）で広報されている余震活動の確率予測の計算には無くてはならないものである。さらに、点過程ETASモデル(epidemic type aftershock sequence model)の提案のインパクトは極めて大きく、Google検索からも分かるように、これは地震活動の標準モデルとして国際的に受け入れられて普及している。

統計数理研究所の地震予測研究グループ（研究組織参照）は、近来この分野（統計地震学）で世界を牽引してきたと言える。頻発している最近の大地震前の地震活動や余震活動について、ETASモデルを使って地震活動のシミュレーションや除群アルゴリズムなどの自前の解析技術で地震活動研究を進めた。

目的に応じて各種統計モデルの研究・開発を行い、実効的な地震活動予測の実用化に貢献する。統計的点過程モデルを中核に、これらの問題に取り組む本研究グループの統計地震学の研究は、伝統的な地震学・地球物理学の枠を超えたもので、統計科学における最新の成果との融合が生み出したものである。

これらは他研究分野における確率点過程モデルの統計的応用のレベルとしても世界的に類の無いものであるが、地震活動研究で

は一層深くインパクトが及び、その新局面を拓く先進的なものとして評価されている。これについては、たとえば、統計数理研究所 統計地震学研究プロジェクト外部評価委員会 報告書のWEB版、

<http://www.ism.ac.jp/~ogata/Ssg/news/YO-Rev-Both061226J.html> (日本語訳)

<http://www.ism.ac.jp/~ogata/Ssg/news/YORevEng060814E.html> (英語)

を参照されたい。

2. 研究の目的

21世紀になって成立した膨大な情報が含まれる世界に類の無い地震活動とGPS測地の絶好のデータ環境に対して、これらの情報を高度に解析できる各種統計モデルや統計的手法を提案し、その適用によって科学的新知見を蓄積する。同時に、大地震の実効的な確率的予測の実現を目指し、後継研究のための、統計地震学における解析方法の基盤を確立することを目論むものである。10数年前に成立した一元化震源データやGPS測地(GEONET)データ及び加速増大している地震発震機構(断層メカニズム)のカタログに対して、これらを詳しく解析する新種の点過程モデルをはじめとした時空間点過程モデルと解析方法の一層の展開によって、地震活動の新知見を輩出する。同時に将来に向けて、実効的な大地震予測をめざす国際的な後継の地震活動研究者にとって有用な手法とソフトウェアを整備し、世界各地の地震予測研究を加速する統計地震学の基盤を形成することを目標とする。

3. 研究の方法

ETASなどの統計モデルでデータの当てはめを最尤法や赤池情報量基準で求め、地震活動の変化の有意性を測る。地震活動のシミュレーションや確率的除群化を行い客観的な解析手法を提供すると同時に、モデルを物差しにして地震活動異常などを検出できるようにする。地震メカニズム解や断層モデルからストレス変化の空間分布を計算する。階層ベイズ時空間を推定するための実用的なソフトウェアを開発、使用する。

4. 研究成果

本グループは、点過程のモデリングによって地震カタログデータによる地震活動解析と確率予測の研究を牽引し、統計地震学(Statistical Seismology)という分野を復興活性化し、国際的リーダーシップを発揮し

た。研究期間中に発生した大地震について既往の地震活動の詳細について ETAS モデルを用いて研究した。断層の非地震性(ゆっくり)すべりによる地殻のストレス変化と ETAS 予測からの外れ方による地震活動異常の因果関係を研究した。これらの研究から地震活動の逸脱が地殻歪変化のセンサーとして鋭敏であり、これらの異常現象と GPS による地殻の一過性変動との整合性を確かめ、地震の前駆的なすべりの解明に迫る結論を多数得た。結果、この3年の本グループによる研究成果が統計学及び地球物理学の先端学術誌に多数掲載され世界的に広く知られることとなった。

また定期的に開かれる地震予知連絡会では進行中の地震活動に関する解析報告を積極的にを行い、社会的な貢献を果たした。それらの各報告や取りまとめ一覧については <http://www.ism.ac.jp/~ogata/yoti.html> や <http://www.ism.ac.jp/~ogata/yotiren/Yotiren2008ISM.pdf> を参照されたい。

統計的点過程モデルを中核に、これらの問題に取り組んだ統計地震学分野での本研究は、伝統的な地震学・地球物理学の枠を超えたもので、統計科学における最新の成果との融合が生み出したものである。これらは統計学や他の科学分野(犯罪学、ファイナンスや脳神経科学など)における応用を誘い、確率点過程モデルの統計的応用のレベルとしても世界的に類の無いものである。地震活動研究では一層深くインパクトが及び、その新局面を拓く先進的なものとして評価されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件、全て査読付き)

- Ogata, Y. (2010). Significant improvements of the space-time ETAS model for forecasting of accurate baseline seismicity, *Earth, Planet and Space*, 63, 217-229, doi:10.5047/eps.2010.09.001.
- Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2010). Precursory seismic anomalies and transient crustal deformation prior to the 2008 Mw=6.9 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 84, 93-97 B10312, doi:10.1029/2010JB007567.
- Ogata, Y. (2010). Anomalies of seismic activity and transient crustal deformations preceding the 2005 M7.0 earthquake west of Fukuoka, *PAGEOPH*, 167, 1115-1127, doi:10.1007/s00024-010-0096.
- Ogata, Y. and Toda, S. (2010). Bridging great earthquake doublets through silent

slip: On- and off-fault aftershocks of the 2006 Kuril Island subduction earthquake toggled by a slow slip on the outer rise normal fault the 2007 great earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JB006777.

Ogata, Y. (2010). Space-time heterogeneity in aftershock activity, *Geophys. J. Int.*, 181, 1575-1592, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x.

Adelfio, G. and Ogata, Y. (2010). Hybrid kernel estimates of space-time earthquake occurrence rates using the epidemic-type aftershock sequence model, *Ann. Inst. Statist. Math.*, 62, 127-143, doi:10.1007/s10463-009-0268-7.

Tanaka, U., Ogata, Y. and Stoyan, D. (2008). Parameter estimation and model selection for Neyman-Scott point processes, *Biomet., J.*, 50, 43-57.

Zhuang, J., Christophersen, A., Savage, M. K., Vere-Jones, D., Ogata, Y., and Jackson, D. D. (2008). Differences between spontaneous and triggered earthquakes: Their influences on foreshock probabilities, *J. Geophys. Res.*, 113, B11302, doi:10.1029/2008JB005579.

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.

Wakaura, M. and Ogata, Y. (2007). A time series analysis on the seasonality of air temperature anomalies, *Meteorological Applications*, 14, 425-434, doi: 10.1002/met.41.

Nanjo, K.Z. et al. (Ogata, Y. 6/6 番目) (2007). Decay of aftershock activity for Japanese earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 112, B08309, doi:10.1029/2006JB004754.

Ogata, Y. (2006). Seismicity anomaly scenario prior to the major recurrent earthquakes off the east coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, *Tectonophysics*, 424, 291-306, doi:10.1016/j.tecto.2006.03.038.

Ogata, Y. and Katsura, K. (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10305, doi:10.1029/2006GL025888.

Ogata, Y. and Zhuang, J. (2006).

Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophysics*, 413, 13-23.

Ogata, Y. (2006). Monitoring of anomaly in

the aftershock sequence of the 2005 earthquake of M7.0 off coast of the western Fukuoka, Japan, by the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01303, doi:10.1029/2005GL024405.

Zhuang, J. (2010). Gambling scores for earthquake predictions and forecasts, *Geophys. J. Int.*, **181**, 382–390

Wang, Q., Jackson, D.D. and Zhuang, J. (2010). Are spontaneous earthquakes stationary in California?, *J. Geophys. Res.*, **115**, B08310, doi:10.1029/2009JB007031.

Zechar, J.D. and Zhuang, J. (2010). Risk and return: evaluating Reverse Tracing of Precursors earthquake predictions, *Geophys. J. Int.*, **182**, 1319–132638.

Vere-Jones, D. and Zhuang, J. (2008). Distribution of the largest event in the critical epidemic-type aftershock-sequence model, *Phys. Rev. E*, **78**, 047102, doi:10.1103/PhysRevE.78.047102,

Zhuang, J. and Ogata, Y. (2006). Properties of the probability distribution associated with the largest event in an earthquake cluster and their implications to foreshocks, *Physical Review E*, Vol. 73, 046134, doi:10.1103/PhysRevE.73.046134.

Toda, S., Stein, R.S., Kirby, S.H. and Bozkurt, S.B. (2008). A slab fragment wedged under Tokyo and its tectonic and seismic implications, *Nature Geoscience*, **1**, 771–776.

Toda, S., Lin, J., Meghraoui, M. and Stein, R. S. (2008). 12 May 2008 M = 7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L17305, doi:10.1029/2008GL034903.

Toda, S. and Matsumura, S. (2006). Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan, *Tectonophysics*, **417**, 53–68.

岩田貴樹 (2009). 地震活動の時空間分布を表すための定量的モデルの展開, **地震 第2輯**, **61** 特集号, 133–141.

Iwata, T. (2008). Low detection capability of global earthquakes after the occurrence of large earthquakes: Investigation of the Harvard CMT catalogue, *Geophys. J. Int.*, **174**, 849–856.

Iwata, T. and Katao, H. (2006). Correlation between the phase of the moon

and the occurrences of microearthquakes in the Tamba region through point-process modeling, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L07302, doi:10.1029/2005GL025510.

[学会発表] (計 19 件, 全て招待講演)

Ogata, Y., Modeling of temporal and spatial nonhomogeneity for space-time processes, **韓国統計学会 2010 年度春季大会**, 大田市(韓国), 2010 年 5 月 21 日, 基調講演(IL-SONG lecture).

Ogata, Y., Significant improvements of the space-time ETAS model for forecasting of accurate baseline seismicity, *The 3rd SCEC-ERI joint workshop on Earthquake Hazards in Urban Areas and Toward Constructing Forecast Systems of Earthquakes*, 東京大学地震研究所, 2010 年 3 月 16 日

Ogata, Y., Global earthquake catalogs and long-range correlation of seismic activity, *2009 Fall Meeting of the American Geophysical Union*, Moscone Center, San Francisco (USA), 2009 年 12 月 16 日.

Ogata, Y., Modeling for immediate aftershock probability forecasting, *1st Institute of Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting*, ソウル国立大学, ソウル(韓国), 2009 年 6 月 29 日.

Ogata, Y., Location dependent space-time models for wide regional and global seismicity, *6th International Workshop on Statistical Seismology*, Granlibakken Conference Center, Lake Tahoe, CA(USA), 2009 年 4 月 15 日

Ogata, Y. (2008). Anomalies in seismic activity and transient crustal deformation, ヨーロッパ科学財団研究集会 *New Challenges In Earthquake Dynamics: Observing And Modelling A Multi-Scale System*, Obergurgl University Centre, Obergurgl (オーストリア), 2008 年 10 月 20 日.

尾形良彦, 遠田晋次. 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—, **第 177 回地震予知連絡会議**, 九段第二合同庁舎, 2008 年東京, 5 月 19 日.

Ogata, Y., Space-time ETAS model, *CSEP Global Collaboration & Testing Meeting*, Southern California Earthquake Center, Los Angeles (USA), 2008 年 4 月 21 日.

Ogata, Y., Seismicity anomaly and crustal deformation anomaly, *Evison Symposium on Seismogenesis and Earthquake Forecasting*, Victoria University of Wellington (ニュージーランド)

ーギーランド), 2008年2月20日.
Ogata, Y., Modeling of heterogeneous datasets, *Workshop on Data-driven and Physically-based Models for Characterization of Processes in Hydrology, Hydraulics, Oceanography and Climate Change*, シンガポール国立大学(シンガポール), 2008年1月9日.
Ogata, Y., Diagnostic Statistical Analyses to Detect the Seismicity and Geodetic Anomalies Relative to the Normal Predictions, *5th International Workshop on Statistical Seismology*, "Ettore Majorana" Foundation and Centre for Scientific Culture, エリーチエ(イタリア), 2007年6月2日, **基調講演**.
Ogata, Y., Introduction of Short-term prediction experiments, *Workshop on Earthquake Predictability and Time-dependent Forecasting*, Swiss Re Centre for Global Dialogue, Rüslikon(スイス), 2007年1月29日, **基調講演**
Ogata, Y., Seismicity anomaly from the predicted rate by the ETAS model, *Southern California Earthquake Center and Earthquake Research Institute Joint Workshop on Earthquakes in Urban Areas*, Embassy Mandalay Beach Resort, Oxnard (USA), 2006年6月1日.
尾形良彦. 情報量規準の展望: 地球科学の視点から一地震活動予測と新知見の発掘一, **日本統計学会 75周年記念事業 5月研究集会**, 東京大学, 2006年5月7日.
Ogata, Y., Monitoring of anomaly in the aftershock sequence of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Japan, by the ETAS model, *2006 International Workshop on Earthquake Precursor*, 国立中央大学(台湾), 2006年3月6日.
Ogata, Y., Contributions of Professor Tokuji Utsu to statistical seismology and recent developments, *the 4th International Workshop on Statistical Seismology*, 総合研究大学院大学, 逗子市, 2009年1月10日, **基調講演**.
Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. Stochastic declustering: visualizing of the family trees in earthquake catalogs with uncertainty, *2007 Fall Meeting of the American Geophysical Union*, Moscone Center, San Francisco (USA), 2007年12月10日
Toda, S., Enescu, B. and Stein, R. S. Coulomb Express: Automated near-realtime forecasts of earthquake-induced stress transfer and expected seismicity rate

changes, *American Geophysical Union 2008 Fall Meeting*, Moscone Center, San Francisco (USA), 2009年12月15日
Iwata, T. and Katao, H. A comparison of the two statistical model to represent the lunar triggering, *Seismological Society of America annual meeting*, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, (USA), 2007年4月12日.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
○出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計◇件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ism.ac.jp/~ogata/Ssg/ssg.htm>
|

6. 研究組織

(1) 研究代表者
尾形良彦 (OGATA YOSHIKO) 情報・システム研究機構 統計数理研究所・教授 研究者番号: 70000213

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者

種村正美 (TANEMURA MASA HARU) 統計数理研究所 教授
研究者番号: 80000214

遠田晋次 (TODA SHINJI) 京都大学防災研究所 准教授

研究者番号 : 80313047

庄 建倉 (ZHUANG JIANCANG) 統計数理研究所
助教

研究者番号 : 70465920

岩田貴樹 (IWATA TAKAKI) 早稲田大学国際教
養学部 助教

研究者番号 : 80000214

楠城一嘉 (NANJO KAZUYOSHI) 東京大学地震
研究所 特任助教

研究者番号 : 80000214

鶴岡 弘 (TSURUOKA HIROSHI) 東京大学地震
研究所 助教

研究者番号 : 10280562

田村義保 (TAMURA YOSHIYASU) 統計数理研究
所 教授

研究者番号 : 60150033

佐藤整尚 (SATO SEISHO) 統計数理研究所 准
教授

研究者番号 : 60280525

川崎能典 (KAWASAKI YOSHINORI) 統計数理研
究所 准教授

研究者番号 : 70249910

島崎邦彦 (SHIMAZAKI KUNIHICO) 東京大学・
地震研究所 名誉教授

研究者番号 : 50012951

間瀬茂 (MASE SHIGERU) 東京工業大学情報理
工学研究科 教授

研究者番号 : 70108190

柴田里程 (SHIBATA RITEI) 慶応義塾大学理
工学部 教授

研究者番号 : 60089828

Andrea Llenos; M. I. T., Ph.D. Student

Sebastian Hainzl; GFZ German Research
Centre for Geosciences Researcher;

Jeffrey J. McGuire Woods Hole
Oceanographic Institution (米),
Associate Scientist

David Vere-Jones; Victoria University of
Wellington, Emeritus Professor

Adelfio Giada University of Palermo, Post
Doc. fellow