

**REPORT
OF
THE EXTERNAL REVIEW COMMITTEE
ON
THE STATISTICAL SEISMOLOGY
RESEARCH PROJECT**



December 2006

**Research Organization of Information and Systems
The Institute of Statistical Mathematics**

【表紙の説明】

正面玄関左壁のレリーフの模写

統計数理の『数』を表し、本研究所の第2代及び第5代所長 故 末綱 恕一理学博士による揮毫である。

**REPORT OF THE EXTERNAL REVIEW COMMITTEE
ON THE STATISTICAL SEISMOLOGY RESEARCH
PROJECT**

December 2006

Contents

1 Forward	1
1.1 External Review Committee	2
1.2 Statistical Seismology Research Group	2
1.3 Terms of Reference	2
Introduction	3
Quality and impact of academic activities	3
Statistical theory and methodology	3
1.4 Seismological theory and methodology	5
2 Cooperative research activities and contributions to the public good	7
2.1 Interinstitute activities	7
2.2 Contributions to the public good	8
3 Bringing up the next generation	9
4 Comments and suggestions for the future work plan	9
5 Overall conclusions and recommendations	12
References	13
Appendix 1: Schedule of External Review	14
Appendix 2: Summary of materials presented to the Review Committee	14
Appendix 3: Programme of the 4th International Workshop on Statistical Seismology	39

1 Forward

The Institute of Statistical Mathematics(ISM) was restructured to an independent agency, “Research Organization of Information and Systems”, under the National University Corporation Law in April 2004. Before this restructuring, ISM established a the Prediction and Knowledge Discovery Research Center in 2003 to perform strategically important research area of statistical science. This center studies the statistical modeling and inference algorithms to extract useful information from huge amount of data from complex systems, and aims to solve real world problems in a wide variety of scientific domains, in particular, life, earth, and space sciences. This center is currently composed of the following four groups.

- Molecular Evolution Research Group
- Data Assimilation Research Group
- Statistical Seismology Research Group
- Statistical Genome Diversity Research Group (from 2005)

ISM has carried out assessment of the Statistical Seismology Research Group to review research activities. To this end ISM formed the external review committee consisting of three foreign and two Japanese specialists. The reviewers worked on the related materials which were sent to them beforehand, attended the workshop, “the 4th International Workshop on Statistical Seismology”, organized by the research group and interviewed the group members. They also interviewed Dr. Matsu’ura to hear a reference opinion as a specialist of seismology.

The review report was finalized by Prof. David Vere-Jones, the chairperson of the committee and the other members of the committee and sent to ISM at the end of March 2006. ISM translated this English version into the Japanese version. We must be sorry that publication of the report was too late.

The enormous effort for the review paid by both reviewers and the research group will be rewarded only when the review report results in the improvement of the research system of the statistical seismology group in ISM. We will consider their evaluation and suggestions seriously and take necessary action to improve and activate the research group.

On behalf of the Institute of Statistical Mathematics, I would like to express my sincere gratitude to the members of the external review committee for their hard and concentrated work.

August 31, 2006

G. Kitagawa
Director-General

1.1 External Review Committee

The members of the committee and their home institutions are as follows.

Massimo Cocco	Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy
William L. Ellsworth	U. S. Geological Survey, United States of America
Manabu Hashimoto	Research Center for Earthquake Prediction Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan
Kunihiko Shimazaki	The Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan
David Vere-Jones	Victoria University and Statistical Research Associates, Ltd., New Zealand (Chair)

1.2 Statistical Seismology Research Group

List of members including postdocs and graduate students is as follows

Yoshihiko Ogata	The Institute of Statistical Mathematics (ISM) (Leader)
Shinji Toda	Visiting Prof. of the ISM (2005--) and Geological Survey of Japan, AIST-
Yasuaki MURATA	Visiting Assoc. Prof. of the ISM (2003--2004) and Geological Survey of Japan, AIST
Jiancang Zhuang	Research Fellow upon JSPS program (2001 -- 2005)
Kazuyoshi Nanjo	Research Fellow upon JSPS program (2003 --)
Takaki Iwata	Research Fellow of ISM (2005 --)
Masatsugu Wakaura	Graduate Student, The Graduate University for Advanced Studies
Ushio Tanaka	Graduate Student, The Graduate University for Advanced Studies
Akiko Kutsuna	part-time assistant

1.3 Terms of Reference

- (1) Academic Contribution in terms of
 - (a) Statistical methods: Outcome and Impact
 - (b) Seismology: Outcome and Impact
 - (c) Cooperative Research Activities
- (2) Contribution to the Society
- (3) Bring up Next Generation
- (4) Prospect of Future Development and Suggestions

Introduction

1. The Review Committee visited the Institute of Statistical Mathematics on Monday Jan 16th, 2006 to meet the Director General of the Institute, and to hear presentations from Dr. R. Matsu'ura, Professor Y. Ogata, Dr. J. Zhuang, Dr. T. Iwata and Dr K. Nanjo. It made a short oral presentation to Professor Kitagawa and members of the Statistical Seismology Research Group on Monday evening, and met more briefly on the following day to consider the structure of its report and to follow up some specific queries with Professor Ogata. Professor S. Toda and Dr. Y. Murata were not able to be present on these occasions, but their papers were available to the Review Committee. In addition, Dr Toda played a prominent role in the Statistical Seismology Workshop preceding the Review, where he met informally with members of the group. Details of the materials considered by the Committee, and of the presentations made to it, are summarized in Appendix 2.

The main body of the Report is divided into sections following broadly the sequence set out in the terms of reference.

2. Members of the Committee would like to express their appreciation to Professor Kitagawa for the opportunity to participate in the Review, and to Professor Kitagawa, to members of the Institute's administrative staff, and to members of the Statistical Seismology Research Group, for the many courtesies extended to them during their visit. They would also like to express their appreciation of the care and thoroughness with which the review materials had been prepared for them before the Review took place.

Quality and impact of academic activities

3. The work the Review Committee was asked to consider comprised papers published in the period 2003-2005, or in publication; contributions to conference proceedings over a similar period; and material presented to the Committee at the time of the Review. The material is summarized in Appendix 2. We consider the work separately from statistical and seismological viewpoints, with a short overview at the end of the section.

Statistical theory and methodology

4. The work of the Statistical Seismology Group is highly regarded within the statistical community, especially within the areas of spatial statistics and point processes. Their work provides a vivid illustration of how the demands of a particular field can trigger the development of new statistical approaches. In seismology, the extensive, high-quality earthquake catalogues which started to become available two or three decades ago in Japan and elsewhere, characterized as they are by high-dimensionality, power law dependencies, extensive clustering, and near self-similarity, raise problems which lie outside the framework of conventional statistical techniques, and require the development of new models and new methods for their effective analysis. Professor Ogata and his colleagues have made, and are making, fundamental contributions towards overcoming these problems. As similar data become available in other fields -

finance, medicine, population studies, and many others - the importance of the Group's work may increase, provided it can be communicated effectively to workers in these fields. Their work is also an outstanding demonstration of the value statistical methods can have in assisting the development of an observational discipline, and a tribute to the Group's ability to work alongside their seismologist colleagues.

5. Professor Ogata's papers have appeared in major general journals such as the *Journal of the American Statistical Association*, *Biometrika* and the *Journal of the Royal Statistical Society*, as well as in specialist journals and conference proceedings in point processes and spatial statistics. The extensive series of invitations he receives to international statistics meetings provide further evidence of his personal high standing. During the last few years he has been ably supported by Dr. Zhuang, but the more recent members of the Group strengthen the seismological rather than the statistical side of the work. Overall, and as the work of the Group expands, there is some danger of putting an over large burden on Professor Ogata's shoulders, requiring him to develop new, cutting edge ideas in statistics, to illustrate the effectiveness of these ideas within seismology and elsewhere, and to maintain the general oversight and management of the Group. In this respect the Group's overall position would be strengthened by the addition of a senior colleague on the statistical as well as on the seismological side.

6. Three aspects of the work under review may be singled out as topics to which the Group has made especially important contributions: the development of procedures for estimating the parameters of non-homogenous, rapidly evolving, space-time point processes ([2],[3]); the development of stochastic declustering algorithms for separating clustered point data into clustering and background components ([4],[5]); and the development of residual analysis methods for investigating discrepancies in the fit of time and space-time point process models ([1],[2],[5]). The methods were developed in the first instance around versions of the ETAS (epidemic type aftershock sequence) models, but they are capable of extension to wider classes of models and many different contexts. For example, the stochastic declustering approach has potential value in many situations where spatial clusters are developed over time, while the Group's work on residual methods includes both pioneering contributions and important recent contributions to a major focus of current interest in spatial statistics.

7. In all three aspects mentioned the work of the group is outstanding and establishes it as one of the leading groups worldwide developing practical statistical methods for handling higher dimensional point process problems. They have produced useful results also in other directions, for example in handling renewal models with errors in variables, and in point process data controlled by a combination of endogenous (clustering) and exogeneous (external predictor) variables. A second round of challenges from seismology may be expected in the near future, as the extensive data on earth deformation from GPS and other satellite measurements builds up, and invites analysis both in its own right, and in conjunction with the seismicity data. The Institute, and the Statistical Seismology Group in particular, is strategically placed to play a prominent role in tackling these challenges.

1.4 Seismological theory and methodology

8. The ISM Statistical Seismology Group is recognized worldwide as one of the most active, productive and innovative research groups in modelling the evolution of seismicity in space and time. Despite the small number of researchers, the number of research publications from the Group is rather high. The publication list of the four core members of the group contains more than 32 publications in the period 2003-2005, even though some of the postdocs joined the group only in 2004 or late 2005. Continuation of the present high quality level of the activity is attested by the number of papers submitted or in press. The journals where research papers from the group are usually published are of high international standing, suitable for the research tasks, and effective in publicizing their scientific results and promoting collaboration with other research groups in geophysics.
9. From the seismological point of view, the topics listed as goals or motivations in the Group's report are extremely important and focus on high priority topics that attract the attention and the research of many groups within the international seismological community. The goals are also robust, and of relevance for promoting advanced studies in related fields; they can be shared by many investigators in geophysics.
10. In particular, their contributions to the analysis of the space-time evolution of seismicity are excellent. This group has developed efficient models and numerical tools that allow remarkably important practical applications to analyze seismic activity both retrospectively and in real time. Among them the most important is the ETAS model, which represents a powerful tool for investigating the seismicity pattern, identifying the background seismicity and its spatial distribution, determining the rate of production of aftershocks and foreshocks, and modelling seismicity rate changes in space and time. The ETAS model is now used in different regions of the world (Italy, Germany, France, Switzerland, United States), which should promote further international collaborations with universities and research institutes. The fact that the models have been applied to numerous earthquake sequences, in different tectonic regions of the world, lends strong support to the conclusion that the models are robust and successful in accomplishing the tasks for which they were intended. Future developments based on stochastic declustering and the HIST (Hierarchical Space Time) models are also very important and should be encouraged.
11. One important outcome emerging from these studies is the use of statistical models as diagnostic tools to identify anomalous trends and other features of the seismicity pattern. The ETAS model itself is an extremely useful tool in detecting anomalous features in seismic activity, including aftershock activity, and in identifying and defining seismic quiescence. The results of comparing the actual seismicity rates with the rates predicted by the ETAS model have very interesting implications for the physical interpretation of the processes controlling the evolution of seismicity. The connections between seismicity rate changes and coseismic stress changes have been emphasized by the ISM group and discussed in several important recent publications. In particular, it is worth noting that the relative quiescence defined in relation to the ETAS model represents the best currently available definition and physical interpretation of the "stress shadow". In other words, this represents the most robust definition of stress shadow and the proposed numerical approach is the best solution to identify seismicity rate reductions. This has been recognized by the

scientific community.

12. The Group has a good record in opening up new ideas. For instance, the physical interpretation of their results on the seismicity evolution in terms of stress perturbations caused by earthquakes is extremely important and of relevance for many researchers in seismology and geophysics. The Review Committee also appreciates the value of linking Toda to the Group, where he has already contributed significantly through his expertise on Coulomb stress modelling and the theoretical predictions of seismicity rate changes with physical models based on laboratory derived friction laws. For instance, the possibility now being explored by the Group of selecting target areas for statistical analysis by reference to the pattern of Coulomb stress changes is very interesting.
13. The success of the Group and the recognition of its work by leading members in the international community are quite evident, as was effectively demonstrated by the successful STATSEI-4 workshop recently organized by Ogata. All members of the Review Committee participated in the workshop and had a useful opportunity to gauge the impressions of participants, as well as to see presentations by the younger researchers in the group. It is the Committee's view that the Group has a large impact within the scientific community, and is leading the field into new directions.
14. The work done by the younger researchers is good and promises well for the future. Zhuang in particular has contributed significantly to the development of new approaches and is well integrated into the Group's research work. The most recent postdocs are promising, enthusiastic and well-motivated. They come to the Group with their own fields of research, which then have to be integrated within the Group's strategic working plans. For instance, Iwata's studies on tidal triggering appear robust statistically, but problems remain with the physical interpretation. At present the studies seem somewhat academic, although the study of triggering mechanisms is extremely important; a promising direction for further work might be to join the ETAS model with the Dieterich model with arbitrary stressing rates. Nanjo's work on earthquake prediction seems to lie a little outside the main strategic working plan of the Group, although it might be interesting to perform a systematic comparison between the PI and the ETAS approaches. Overall, the Review Committee hopes that further new students and postdocs can join the Group and contribute to the opening up of new ideas and horizons (time-dependent seismic hazard, for instance).
15. The Group's participation in and collaboration with the Earth Simulator was outlined by R. Matsu'ura in a presentation to the Committee. It is interesting, stimulating, and should be further implemented and maintained in the future. It raises the wider issues, taken up in more detail later in the Report, of how the ISM Group can most usefully collaborate with other groups in Japan over issues such as validation tests for earthquake forecasts, analysis of GPS data, etc. All such considerations suggest that the Group needs to increase in size, since its present composition seems too small for the tasks and expectations placed on it.

2 Cooperative research activities and contributions to the public good

16. The Group enjoys productive collaborations with leading statisticians and seismologists both within Japan and internationally, and would be welcomed in further collaborations, particularly in testing of the ETAS and other statistical models developed by the Group. In a general sense, the major contribution of the Group to the public good is its development of statistical tools which are essential for analysis of seismicity. The ETAS model and other statistical tools developed by the Group are essential for the operational analysis and evaluation of seismicity carried out by the Japan Meteorological Agency, the Earthquake Research Committee, and the Committee for the Area of Intensified Measures against Earthquake Disasters (Jishin-Bosai-Taisaku-Kyoka-Chiiki-Hantei-Kai). Ogata himself is a valued member of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction. We elaborate on these points below.

2.1 Interinstitute activities

17. The Group has been collaborating for many years with leading statisticians and seismologists internationally, such as Professor Vere-Jones (New Zealand), Professor Baddeley (Australia), Professor Ma Li (China), Professor Chen (Taiwan), Dr. Console (Italy), and Dr. Hainzl (Germany). Within Japan, the group collaborates regularly with groups of seismologists headed by Professors Oike and Katao at Kyoto University and by Professor Shimazaki at the Earthquake Research Institute as well as Dr. Imoto at the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention and Dr. Maeda and other seismologists at the Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency. It also has close links with statisticians such as Professor Mase in Tokyo Institute of Technology.
18. The Fourth Statistical Seismology Workshop preceding the Review provided extremely valuable opportunities for interinstitute collaborations. The Group invited Prof. Dieterich for tutorial presentations on the fault constitutive law, implying forthcoming very fruitful collaboration of the Group with him and colleagues on modeling seismicity on the basis of the fault behavior. More than 65 researchers from various organizations in many regions and countries, such as China, France, Germany, Italy, Mexico, New Zealand, Switzerland, Taiwan, UK, and USA as well as Japan attended the three-full-day meeting and one-day excursion. Talks presented at the meeting invited the Group to collaborate with on-going or planned real-time testing of various seismicity models. Dr. Wiemer introduced a European framework for testing earthquake forecast models and Dr. Schorlemmer summarized the initial effort of the Regional Earthquake Likelihood Models (RELM) project for testing various earthquake potential models in California and described an expansion of the project to Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) on a global scale. At present 17 models are being tested and the ETAS model proposed by a UCLA group is included among them. Furthermore a CDROM containing software coded by the Group was distributed to the workshop participants, which should initiate more collaboration of the Group with the participants as well as accelerate dissemination of the excellent statistical tools developed by the Group. It might be an idea to include training sessions for beginners during future workshops.

19. The Group as such is not connected through formal collaborative agreements with other research groups, although in the past the Institute as a whole has had formal collaborative agreements which promoted the work in statistical seismology, for example with Victoria University in New Zealand. At present the Group rather informally collaborates with key and influential international research groups as was exemplified by the successful Statsei Workshop. If any formal research agreement is considered, the Institute should provide strong administrative support.

2.2 Contributions to the public good

20. Prof. Ogata is an active member of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, which meets every three months for discussion and exchange of ideas and information on the latest seismic and crustal activity in Japan. His presentations on changes in seismicity triggered or suppressed by a pre-seismic slip on faults of various recent large earthquakes attracted keen attention from other members of the Committee, although no supporting evidence for the existence of any individual aseismic slip is yet found. Triggering and suppression of seismicity by seismic slips are well established and less prominent changes are sought for prediction purposes. An analysis of GPS and other crustal deformation data, which appears to be the next research target of the Group, might be quite effectively connected with the ongoing effort of searching for pre-seismic slips on the basis of seismicity changes. If the crustal movement data supported the existence of an aseismic slip which had been independently inferred from seismicity changes, it would be a major breakthrough for earthquake prediction.
21. The Japan Meteorological Agency (JMA) operationally uses the ETAS model developed by Prof. Ogata for the analysis of seismic activity. The ETAS model is especially effective for earthquake swarms. At monthly meetings of the Committee for the Area of Intensified Measures against Earthquake Disasters, the results of residual analyses of seismicity in the Tokai region, based on the ETAS model, are regularly presented for evaluating the current seismic activity. An analysis of seismic activity based on the ETAS model is also presented meetings of the Earthquake Research Committee (ERC) which monthly evaluates seismic and crustal activities in Japan.
22. Probabilistic forecasts of aftershocks are issued by JMA and ERC after an occurrence of large earthquakes. Although the forecast is based on the Omori-Utsu formula and not on the ETAS model, both JMA and ERC adopt the maximum likelihood estimation of parameters developed by Prof. Ogata. ERC (2005) made public the 'Generalized National Seismic Hazard Maps' and plans to revise it in five years. The maps utilize probabilistic estimates of an occurrence of large earthquakes, which are mainly based on a renewal model of earthquake recurrence. For the revision, the uncertainty in the probabilistic estimates will be discussed and Prof. Ogata's statistical work on processing paleoearthquake data will be a useful guide to future directions.
23. It is clear that members of the Group would be welcome as participants in international projects involving real time tests and validation tests such as RELM in California, or those programmed within the NERIES project in Europe. Similar opportunities for testing statistical models and forecasts arise within Japan. The

Group's expertise is sought after in such applications, but hampered by its present limited membership.

3 Bringing up the next generation

24. The Review Committee is satisfied that a high quality of training is being offered to the graduate students and post-docs associated with the Group, but disappointed that the numbers are still small. It appears to the Committee that there are only a limited number of young researchers in statistical seismology, especially in Japan, and an urgent necessity to expand that number. Of course it is not an easy task for this Group only. However the Committee would like to suggest a number of actions that might be considered by the Group and by the Institute in order to increase opportunities for students to get in touch with this field.
25. The Committee notes that the ISM provides an annual open seminar to the public or young scientists. Any such seminar needs to be considered an important opportunity to publicize the activity of this Group. Coordination among the research groups in ISM is necessary, but in general the Committee recommends that the ISM, and the Statistical Seismology Group in particular, take every opportunity to impress on young scientists the Group's achievements and their significance in earthquake science.
26. Every spring and autumn, the Seismological Society of Japan (hereafter SSJ) holds its annual meetings. On average more than 500 papers on several aspects of earthquake science will be presented. Therefore it is not so easy for statistical seismology to be highlighted in the meeting. However the group can use other mechanisms provided by SSJ for this purpose. In particular, SSJ holds a Summer School on Seismology every summer, which is aimed exclusively at young students such as undergraduate students or master course students in graduate school. The theme of the summer school is selected from proposals or requests of SSJ members. Other societies may also have similar seminars. The Statistical Seismology Group could ask SSJ and other societies to periodically choose statistical seismology as the theme of the seminar. The participation of the Group in such activities would need to be supported by the Institute.
27. The credit exchange program with the Soken-dai and other universities could be used to attract the interests of young students. The best way might be to run lecture series for the students from other universities which have credit exchange programs. ISM is a part of the Soken-dai and they have a course of statistics including statistical seismology. Unfortunately there are very few lecture series on statistical seismology in Japanese universities at the present time. The main reason is the lack of experts in this field. University visiting professor or temporary lecturer positions can also offer useful opportunities to have lectures in other universities. The Group should consider the use of such programs.

4 Comments and suggestions for the future work plan

28. The Statistical Seismology Group within the ISM occupies a unique position, not only in Japan but even internationally, and its future development needs to be considered carefully. What is unique about its role is the way in which it has been able to develop new and practically effective statistical methodologies for

earthquake data, and to work hand in hand with professional seismologists in bringing these methodologies to bear on issues of central interest within earthquake research itself. In doing so it has drawn deeply on the background provided by the ISM and the special knowledge and skills of ISM scientific and technical staff. Also, by now it is sufficiently firmly established within the seismological community to have generated some pressure to expand its activities. Its mathematical roots within the ISM lie behind the Group's ability to find and resolve new technical problems on the modelling and methodological front. It seems as important to retain and strengthen these as to expand the general role of the Institute as the leading organization in Japan providing statistical advice on the many practical issues involved in the interface between seismology and society.

29. The goals of seismological research are as varied as the reasons society is willing to invest in them, ranging from the purely academic to the highly applied. The questions that society commonly asks earthquake professionals are typically something like "when will the next earthquake strike?", "how severe will it be?" or "what can be done to lessen its impact?" Precise answers to these questions are currently beyond our grasp, and may always be so. Within the seismological, earthquake engineering and emergency management communities, however, the value of even approximate answers to such questions is widely recognized. The new long-term earthquake forecast for Japan recently released by the Earthquake Research Committee (2005) exemplifies the integration of our current understanding of the hazard into a probabilistic framework. Future progress in reducing the earthquake threat will undoubtedly require a blending of physics-based and statistical models. Thus, there is likely to be a continuing need for statisticians with a good understanding of seismological issues over a wide range of both theoretical and practical problems.
30. Within the framework of the Group's current research program, the Review Committee particularly encourages the development of collaborative work with researchers in other fields to incorporate deeper physical modeling into the statistical analysis. As a primary example, it is important to deepen the understanding of the statistical characteristics of seismicity in relation to the physical processes taking place in the earth. Statistical seismology tends to treat earthquakes as just a sample from a random process, while observational seismology tends to focus on the characteristics of individual earthquakes. Both approaches are important, but statistical seismology has not won major popularity in earthquake science, especially in Japan. One reason may be the lack of physical understanding of the relation between individual earthquakes and groups of events. In this regard the work of the Statistical Seismology Group in trying to incorporate the Coulomb failure stress and rate-state dependent friction law into their modeling of seismicity is far-sighted and promising. It should be strongly promoted. Of course this must be done carefully, and at present there are many unresolved issues, which are likely to be resolved only by deep and extended discussions with researchers in other branches of seismology. Another extremely important example is the work already initiated by Ogata in crustal deformation data such as GPS time series, which can reveal the silent strain accumulation process that compensates seismicity. The Committee strongly recommends that the Group should link further with researchers in this field and try to model seismicity and crustal deformation simultaneously.

31. The Review Committee also strongly encourages further development of the program to rigorously evaluate

models and forecasts. The hierarchical space-time modeling of seismicity (HIST) holds great promise, and clearly represents frontier research at the leading edge of the field. As one example, the Coulomb failure stress model appears to be ripe for a carefully designed validation experiment, given the new information--rich earthquake catalogs available in Japan. While retrospective tests have been useful in the development of many hypotheses, a program of prospective testing is urgently needed. Such programs are in the early stages of development in Europe, New Zealand and the United States. These efforts would benefit from the statistical rigor that the Group could contribute to an international, coordinated program of prospective validation.

32. Beyond this, the Institute of Statistical Mathematics has the potential to expand its engagement in the earthquake problem at a number of levels. Many branches of statistical mathematics have key roles to play in probabilistic seismic hazard analysis and in the application of statistical models to loss estimation, risk reduction and decision analysis. The role of earth scientists, however, is usually limited to the identification and quantification of the hazard, including both the likelihood of occurrence of an earthquake and the estimation of the severity of ground motion it would produce. Earthquake engineers develop probabilistic models of building performance, often with the goal of defining the likely consequences for a particular structure when a ground motion level is exceeded. Economists and emergency managers commonly develop loss models by combining the earth science and engineering data when evaluating the risk to society. Statisticians can contribute to all of these elements, drawing from their knowledge across the span of the discipline. There is a potential role, therefore, for the Institute to contribute not merely to the development of new models for earthquake occurrence and related phenomena, but also to the wide range of associated societal issues. This is too large a job for the Statistical Seismology Group in its present format, but may warrant careful consideration by the Institute as a whole.
33. Statistical models of seismicity are already being applied in public policy decision analysis in Japan. The Japan Meteorological Agency uses the ETAS model to evaluate the aftershock potential following strong earthquakes in Japan. The national probabilistic seismic hazard map released in March 2005 by the Earthquake Research Committee relies upon simple point process renewal models of earthquake rupture sources. As valuable as these models have proven to be, they deserve a much more comprehensive treatment from both the seismological and statistical perspectives. The approximations that earthquakes are points and independent, identically distributed (IID) random variables have been very useful in probabilistic seismic hazard assessment, but can unquestionably be improved through the integration of geophysical and geological data with more realistic statistical and physical models of the earthquake process.
34. To highlight one particular example where the ISM might be able to contribute, for society, it is the shaking of the ground that matters far more than the rupture of the fault. The predicted intensity of ground motion controls the seismic design requirements for structures of all kinds. Trillions of Yen are invested every year in Japan in engineering solutions to protect lives and property from damage due to earthquake shaking. The risk of not doing enough is high, but so is the cost of doing more than is necessary. Better probabilistic models for ground motions could have a huge impact on both the cost and practice of seismic safety, particularly now that a new generation of earthquake strong motion data has been collected in Japan

by the K-NET.

5 Overall conclusions and recommendations

35. The Review Committee has no doubts about the high academic quality and scientific value of the work being done by the Statistical Seismology Group. The Group has initiated and carried through important developments as much from the seismological as from the statistical side. Its members, and Professor Ogata in particular, are highly respected in both communities for their innovative approach to problems of modelling and analysis of seismological data, their insights, and their ability to develop their work in collaboration with professional scientists in both fields. Their work should continue to be strongly supported and promoted.
36. The Committee was also very interested to learn about the scope of the work undertaken by the Institute, and impressed by both its breadth and depth. Many problems of critical importance to society are being investigated in partnership with leading experts from allied fields. The Committee was particularly interested to learn of the programs in risk evaluation and risk management. The work in financial and environmental risk represents important contributions to informed decision making in an increasingly complex and interconnected global economy. It seems only natural that a complementary program of research on earthquake risk would also pay a high return on investment to society. No country has a larger percentage of its population or national wealth at risk from earthquakes than Japan. The investment in defenses against earthquakes including civil protection, seismic resistant design practices, retrofitting of vulnerable structures and lifelines, alarm systems for tsunamis and strong shaking, and seismological and engineering research are unparalleled, and will undoubtedly continue to be expanded in the future. Public policymaking also deserves to be supported by the best science available. The Institute as a whole might consider its ability to contribute further to these aspects.
37. Greater difficulties present themselves in regard to the expansion of the Group and its ability to attract and train top quality graduate students. The Review Committee sees good work being done by students and post-docs, but the Group is not training sufficient numbers in this increasingly important area. At the same time there is a need for a senior staff member, particularly now on the statistical side, to assist Professor Ogata in the development of new statistical modelling and methodology and in further development of the program to rigorously evaluate models.
38. The Review Committee recommends that these issues be given serious consideration by the ISM management, not just in the context of the Statistical Seismology Group itself, but also in the wider context of the ISM's involvement with engineering, insurance, and risk management.

References

- [1] Ogata, Y.(1988) Statistical Models for earthquake occurrence and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association*. **83**, 9-27.
- [2] Ogata Y., Katsura, K., and Tanemura, M (2003) Modelling of heterogeneous space-time seismic activity and its residual analysis *Appl. Stat (Journal of the Royal Statistical Society Series C)* . **52**, 499-509.
- [3] Ogata, Y. and Zhuang, J. (2006) Space-time ETAS models and an improved extension. *Tectonophysics* **413**, 13-23.
- [4] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *Journal of the American Statistical Association* **97**, 369-380.
- [5] Zhuang, J. (2006) Second-order residual analysis of spatiotemporal point processes and applications in model evaluation, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **67**, **68**, Part4, 635-653

Appendix 1: Schedule of External Review

Place: Meeting Room of the Institute of statistical Mathematics

Date: January 16, 2006

10:00 – 10:10 Introduction by Genshiro Kitagawa (Director General)

- * Objective of evaluation

- * Terms of reference

10:10 – 10:20 Preliminary meeting

- * Selection of chairperson

- * Schedule and method

10:20 – 10:40 Hearing from Dr. Matsu'ura

10:40 – 11:40 Report by Prof. Ogata

11:40 – 12:20 Report by group members

13:30 – 13:50 Report by group members

13:50 – 15:00 Questions and discussion

15:30 – 17:10 Meeting

- * Evaluation

- * Arrangement for making review report

17:10 – 17:30 Comments by review committee

Date: January 17, 2006

10:00 – 12:00 Meeting

- * Evaluation

- * Arrangement for making review report

- * Discussion

Appendix 2: Summary of materials presented to the Review Committee

(Notes: Page numbers of the table of contents are those paginated for original report presented to the Committee)

Progress Report on the ISM Project 2003-2007

Statistical Seismology Research Group

Prediction and Knowledge Discovery Research Center

The Institute of Statistical Mathematics

Research Organization of Information and Systems

Table of Contents

Motivations behind this project	2
(1) Hypocenter data	2
(2) Other geophysical datasets	2
(3) Point-process models	2
(4) Earthquake / Aftershock forecasting	3
(5) Exploration and modeling of the interface between physical and stochastic processes	4
(6) Space-time point-process modeling	5
References	5
Objectives of the project	7
Work Plan 2003 – 2007	8
Project Members	8
Research Accomplishments 2003 – 2005	9
Principal works during 2003 – 2005	9
(1) Coseismic activation / quiescence triggered by a large earthquake and Coulomb stress changes	9
(2) Relative quiescence in aftershock sequences and its mechanism	10
(3) Seismicity anomalies preceding large earthquakes and crustal stress changes	11
(4) Space-time ETAS modeling	13
(5) Modeling the interface between physical and stochastic process	15
(6) Simultaneous estimation of b-values and detection rates of earthquakes for the application to aftershock probability forecasting	16
Published papers 2003 – 2005	16
Refereed Journals	16
Main Proceedings	18
Future plans for the project	20
(1) Examination of scenarios for predicting asperity-slip based on the seismicity anomalies	20
(2) Effective space-time modeling of seismic activity and detection of seismicity anomalies	21
(3) Predictive space-time-magnitude characterization of foreshocks	21
(4) Prediction and inversion problem between seismicity changes and stress-changes	22
(5) Bayesian Probability assessments for Long-term prediction	22
(6) Statistical modeling for more effective use and quality improvements of datasets	23
References	23

Motivations behind this project

(1) Hypocenter data

The Hypocenter catalog of the Japan Meteorological Agency (JMA) is one of the most valuable databases for earthquake prediction. This is because it contains records of a large number of earthquakes dating back to 1925. The catalog covers the whole of Japan and its vicinity, although the records are heterogeneous in detection rate in space and time. The capacity for detecting earthquakes has been significantly improved recently following the unification of the seismic observation records among the JMA, universities and national institutes. Nevertheless, the conventional seismicity study has been using primary graphical methods such as cumulative curves and magnitude of earthquakes against time, space-time plot of earthquakes, etc., without complex statistical analysis, which does not convey all of the essential information included in the catalog. Indeed, we believe that an effective analysis of seismic activity can only be made by applying point-process models that are constructed based on physical speculations or hypotheses on seismic processes. For example, the data of earthquake mechanisms such as those in the F-net earthquake catalog is becoming increasingly useful and important in order to discuss stress changes of the crust.

(2) Other geophysical datasets

There are many precise geophysical records that are useful in discussing the relationship with seismicity such as records of extensometers, tiltmeters, volumetric strainmeters and the GPS. However, these records are usually affected by various noises or ancillary geophysical signals caused by the earthtides, and in particular, by meteorological factors such as barometric pressure, precipitation, temperature and humidity. Therefore, it is important to model the causal relationships and response functions of these effects in order to calibrate the records for genuine quantities of interest. For example, the computer program BAYTAP-G [Ishiguro *et al.*, 1984] used to implement the Bayesian deconvolution procedure for removing tidal effects has been used with much frequency by many researchers in seismology and geodesy in Japan. Additionally, Kitagawa and Matsumoto [1988] modeled the time series of observed water level, which is well decomposed into the four effects of convolutions of present and past values of the barometric pressure, earth-tides, the precipitations and error term. Much works on the similar modeling or nonlinear modeling of time series are required, especially with regard to GPS data.

(3) point-process models

Point processes. A point-process is a mathematical model of the stochastic occurrence of a series of events. The modeling of point-processes became a powerful tool in the field of applied statistics in the 1980's, for three reasons. Firstly, the concept of the conditional intensity function provided us with an extensive free hand with which to produce models describing the detailed interface between the physical mechanism of occurrences and some stochastic factors. This is the predictive occurrence rate function (roughly, the differential of the occurrence conditional probability) of the present time, the occurrence times of the past events and other relevant time series data such as magnitudes and other available geophysical records. Use of this function also made available a general effective simulation method using the thinning operation [Ogata, 1983]. Secondly, it became possible to write the likelihood function directly in terms of the conditional intensity function. The third reason was due to the availability of practical algorithms for optimizing non-linear functions using a computer, enabling us to obtain the maximum likelihood estimate (MLE), their error estimates, and the likelihood-ratio or the AIC to examine the

goodness-of-fit of models. Together with these revolutionary bases, a diagnostic analysis of the model and data became available with the time-transformation using the integral of the conditional intensity function [Ogata, 1983, 1988; Ogata and Shimazaki, 1984; Ogata, 1999]. Benefiting from these, a substantial number of applications became available, including the program packages TIMSAC84 [Akaike *et al.*, 1985] and SASeis [Utsu and Ogata, 1997] in the IASPEI Software Library.

The ETAS model. The epidemic type aftershock sequence (ETAS) model [Ogata, 1986, 1988, 1989] is one such model. It is generally accepted that each earthquake changes the probability of successive earthquakes in a region, the size of which scales with its magnitude, and by an amount that can be estimated using the Gutenberg-Richter magnitude distribution and the Omori-Utsu law for the rate of aftershocks, where aftershocks are allowed to be larger than the mainshock. The ETAS model forms the basis of many current probabilistic earthquake prediction schemes. Inherent in these models is the assumption that the probability of a large earthquake is completely determined by the sum of stresses transferred by prior earthquakes within a considered region. By a set of parameter values the ETAS model is well adapted to various seismicity patterns including the mainshock-aftershock type and swarm type.

Diagnostic analysis using the ETAS model. Since a sequence of aftershocks is triggered by complex mechanisms under fractal random media, it is difficult to calculate the transferred stresses within and near the rupture fault. That is, triggering mechanics within an aftershock sequence are too complex for us to calculate the effect of stress changes. Therefore, the statistical empirical laws of aftershocks are useful as a practical representation of the outcome due to the complex interaction of the self- or proximate triggering. On the other hand, the ETAS model is a statistical model constructed based on the empirical laws of aftershocks. Therefore, the model itself hardly describes the mechanism of affecting stress changes behind the seismicity changes. Diagnostic analyses of the model can reveal such new knowledge included in the data. That is to say, the activation and quiescence relative to the model's prediction could suggest exogenous stress-changes in the regions.

(4) Earthquake / Aftershock forecasting

Primary models for aftershock forecasting. It has been about a decade since aftershock probability forecasting [Reasenber and Jones, 1989] was implemented to inform the public in California and Japan. This is based on a combination of Gutenberg-Richter's law of magnitude frequency and a Poisson process model with the Omori-Utsu's decaying rate of aftershock occurrences [Omori, 1894; Utsu, 1961] where the characteristic parameters of both laws are adjusted from early observations by the maximum likelihood estimates [Utsu, 1965; Aki, 1965; Ogata, 1983]. It is known that the ETAS model usually fits better than the Omori-Utsu formula [Guo and Ogata, 1997], so the ETAS model will be taken as the primary model through which to compare the performance of forecasts with possible sophisticated physics-based models.

Anomalous aftershock activity. Precursory seismic quiescence as a predictor of large earthquakes has attracted much attention amongst seismologists in the last several decades, ever since Inouye [1965] first proposed the concept. This suggests that we need much more research into the relation between the quiescence and subsequent earthquake activity in order to obtain an effective prediction. We should also explain how quiescence can take place in a much wider area than the rupture source [Inouye, 1965; Ogata, 1992]. Studying many aftershock sequences should provide us with a better understanding of the physical mechanism of the precursory utility. For predicting

large aftershock, *Matsu'ura* [1986] noted the utility of the quiescence in aftershock occurrences relative to the Omori-Utsu decaying formula.

Using the ETAS model and on the basis of the proposed procedure, 259 aftershock sequences of various threshold magnitudes are investigated for the 76 main shocks of M6 class or over that occurred in and around Japan during the last three-quarters of the last century [*Ogata*, 2001]. Relative quiescence is revealed in ~40% of the aftershock sequences, and almost all of the others are developed normally; relative activation is rarely found. We have seen that the aftershock activity provides useful information for assessing the probability of a following large event (M6 class or over) in the neighbourhood. Namely, if the aftershock activity from the first event becomes relatively quiet compared to the expected normal decay, the occurrence rate of a larger event in the neighbourhood (within a distance of 3°) is a few times higher during the first decade after the main shock than would be the case for normal aftershock activity. However, it is not yet clearly understood the physical mechanism of the causal relationship between the relative quiescence and the forthcoming occurrences of large aftershocks or even large earthquakes of the similar size to the mainshock. The recently accumulated earthquake mechanism data may help better our understanding.

Seismicity rate change and Coulomb's failure stress change. We are concerned with the precise prediction of time- and history-dependent occurrence rates of an earthquake sequence, particularly, aftershock sequences, in order to test the hypothesis that abrupt stress-change due to a seismic or an aseismic slip triggers a seismicity-rate-change in the surrounding area. This is because stress changes in a region are very frequently affected by nearby events, which trigger further aftershock clusters. In principle, seismic activity should be enhanced in the zones where an increment of Coulomb's failure stress (CFS) is positive, and also activity should be reduced (seismic quiescence) in the stress-shadow zones. For example, some retrospective case studies have shown the stress shadow [e.g., *Harris*, 1998; *Toda and Stein*, 2002] due to large earthquakes to coseismically inhibit the activity in some neighboring seismic regions in California, in addition to many cases of activated seismicity triggered by an large event [e.g., *Toda et al.*, 1998]. A similar phenomena can be expected by the activation and quiescence relative to the predicted seismicity by the ETAS model.

(5) Exploration and modeling of the interface between physical and stochastic processes

External stress changes and swarms. It is well known that volcanic swarms and other swarms are affected by magma intrusion [*Dieterich et al.*, 2000; *Toda et al.*, 2002] and water migration [*Matsu'ura and Karakama*, 2005]. According to the Coulomb failure criterion, the variation of both, stress and pore pressure, can result in earthquake rupture. Aftershock sequences characterized by the Omori-Utsu law are often assumed to be the consequence of varying stress, whereas earthquake swarms are supposed to be triggered by fluid intrusions. Statistical models for describing the relationship are desired. Also, there are some papers reporting that occurrence rates of some swarms and aftershocks are correlated to certain components of earth-tide's time series [e.g., *Iwata*, 2002]. It is desirable to have models examining the causal relationship between mechanisms of earthquakes and stress tensors of stresses due to earth-tide.

Inversion. On the other hand, it will be informative to produce an image of the geophysical quantities in time and space, by making an inversion of the parameters of the statistical models of earthquake occurrences. Such examples include *b*-values of the G-R magnitude frequency [*Ogata et al.* 1993a and b], and *p*-values of the Omori-Utsu model for the aftershock decay [*Mogi*, 1967]. More examples should also be considered, making use of models such as the

extended space-time ETAS model, making use of a Bayesian framework. The geophysical quantities could include the stress distribution and temperatures of the crust, and the friction coefficients of the fault interface (asperities) etc.

Quiescence and activation relative to the ETAS prediction and crustal stress changes. Seismic quiescence and activation have attracted much attention amongst seismologists as the precursors to a large earthquake. Of particular interest is that the stress-changes transferred from a far-field rupture or silent slip can cause seismic changes in a region. On the other hand, since a sequence of aftershocks is triggered by complex mechanisms under heterogeneous fractal media, it is difficult to precisely describe the transfer of stresses both within and near to the field. In other words, triggering mechanics within an aftershock sequence are too complex to calculate the effect of stress changes. Nevertheless, we can use statistical empirical laws as a practical solution to aftershock triggering. That is to say, fitting and extrapolating a suitable statistical model for normal seismic activity in a situation without exogenous stress changes provides us with an alternative method through which to see the seismicity changes explicitly. Thus, our motivation is to show the possibility that the diagnostic analysis based on fitting the ETAS model, and its space-time extension, fitting to regional seismicity can be helpful in detecting small exogenous stress changes. Indeed, these changes are so slight that the geodetic records from the GPS network can barely recognize systematic anomalies in the time series of displacement records.

(6) Space-time point-process modeling

The relative quiescence before great earthquakes is discussed in wide seismic regions in *Ogata* [1992] for high threshold magnitudes of more than M5. However, these are too high to discuss intermediate strong earthquakes. The locations of earthquakes from hypocenter catalogs are now accurate enough to discuss the spatial aspect of seismicity, such as the clustering of aftershocks and seismicity gaps. *Ogata* [1998] considers several possible extensions of the ETAS model to space-time data, based on classical empirical studies of aftershocks, and also on a number of contrasting speculative hypotheses about the physical nature of the space-time clustering. Their goodness-of-fit is compared by the aid of the AIC for two data sets from tectonically distinctive areas in and around Japan. Further practical extensions of the models are suggested for the realistic but complex features such as non-homogeneous background seismicity and occasionally anisotropic clusters that is closely related to the mechanism of the mainshock.

However, as the data size increases, spatial heterogeneity of the seismic activity becomes conspicuous. For example, shape of the anisotropic clustering becomes more complex, differing from place to place. Even cluster sizes are significantly different from one another, especially between those in offshore and inland area [*Utsu*, 1969; *Ogata*, 2001].

Furthermore, according to **the restricted trigger model** [*Ogata*, 2001], secondary aftershocks of large cluster sizes are located around the boundary of the main rupture zone of the 1995 Kobe earthquake. To describe seismicity more accurately requires that the several parameters characterising the above space-time ETAS model should depend on the location of the considered region. Thus we need to make use of the objective Bayesian estimation procedure in a similar manner to *Ogata et al.* [1993] and *Ogata and Katsura* [1993].

References

- Akaike, H., Ozaki, T., Ishiguro, M., Ogata, Y., Kitagawa, G., Tamura, Y., Arahata, E., Katsura, K. and Tamura, R. (1985) *Time Series and Control Program Package, TIMSAC-84* (, Computer Science Monograph, No. 22/23, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan.

- Aki, K. (1965) Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **43**, 237-239.
- Dieterich, J., Cayol, V. and Okubo, P., The use of earthquake rate changes as a stress meter at Kilauea volcano, *Nature* **408**, 457-460 (2000).
- Guo, Z. and Ogata, Y. (1997) Statistical relations between the parameters of aftershocks in time, space and magnitude, *Journal Geophysical Research*, Vol. 102, No. B2, pp. 2857-2873.
- Harris, R. A. (1998) Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, *J. Geophys. Res.*, 103, 24,347-24,358.
- Inouye, W. (1965) On the seismicity in the epicentral region and its neighborhood before the Niigata earthquake (in Japanese), *Kenshin-jiho (Q. J. Seismol.)*, 29, 139-144.
- Ishiguro, M., Akaike, H., Ooe, M. and Nakai, S. (1981). A Bayesian approach to the analysis of earth tide, *Proceedings of the 9th International Symposium on Earth Tides*, (ed. J.T. Kuo), E. Schweizerbart'sche Verlagsbahndlung, Stuttgart.
- Iwata, T. (2002) Tidal stress/strain and acoustic emission activity at the underground research laboratory, Canada, *Geophy. Res. Let.*.
- Kitagawa, G. and Matsumoto, N. (1996). Detection of coseismic changes of underground water level, *J. Amer. Stats. Assoc.*, **91**, 521-528.
- Matsuura R.S. (1986) Precursory quiescence and recovery of aftershock activities before some large aftershocks, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **61**, 1-65.
- Matsuura R.S., Hirata, N. and Urabe, S. (1995) Quasi-real-time watch of the aftershock activity change of Hyogoken-nanbu Earthquake - Prediction of Jan. 23 23h 16m M4.7 aftershock (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **54**, pp. 600-607.
- Matsuura R.S. and Karakama I. (1986) A point-process analysis of the Matsushiro Earthquake Swarm sequence: The effect of water on earthquake occurrence, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1319-1346.
- Mogi, K. (1967) Earthquakes and fractures, *Tectonophysics*, **5**, 35-55.
- Ogata, Y. (1978) The asymptotic behavior of maximum likelihood estimators for stationary point processes, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol. 30, No. 2, A, pp. 243-261.
- Ogata, Y. (1981) On Lewis's simulation method for point processes, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-27, pp. 23-31.
- Ogata, Y. (1983) Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 31, pp. 115-124.
- Ogata, Y. and Shimazaki, K. (1984) Transition from aftershock to normal activity, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, **74**, 5, pp. 1757-1765.
- Ogata, Y. (1986) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Mathematical Seismology (I)*, 228-281, Institute of Statistical Mathematics, Tokyo.
- Ogata, Y. (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of American Statistical Association, Application*, Vol. 83, No. 401, pp. 9-27.
- Ogata, Y. (1989) Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, Vol. 169, pp. 159-174.
- Ogata, Y. (1992) Detection of precursory relative quiescence before great earthquakes through a statistical model, *J. Geophys. Res.*, 97, 19845-19871.
- Ogata, Y. (1998) Space-time point-process models for earthquake occurrences, *Ann. Inst. Statist. Math.*, **50**, 379-402.
- Ogata, Y. (1999) Seismicity analyses through point-process modelling: A review, in *Seismicity Patterns, Their Statistical Significance and Physical Meaning* M. Wyss, K. Shimazaki and A. Ito eds. Birkhauser Verlag, Basel, *Pure and Applied Geophysics*, **155**, pp. 471-507.
- Ogata, Y. (2001) Exploratory analysis of earthquake clusters by likelihood-based trigger models, *Festschrift Volume for Professor Vere-Jones, J. Applied Probability*, **38A**, pp. 202-212.
- Ogata, Y., Imoto, M. and Katsura, K. (1993a) 3-D spatial variation of b -values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto District, Japan, *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738.
- Ogata, Y. and Katsura, K. (1993b) Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogs, *Geophys. J. Int.*, **113**, pp. 727-738.
- Ogata, Y. and Zhuang, J. (2001) Statistical examination of anomalies for the precursor to earthquakes, and the multi-element precision formula: hazard rate changes of strong earthquakes ($M \geq 4$) around Beijing area based

- on the ultra-low frequency ground electric observation (1982-1997) (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, Vol. 66, pp. 562-570.
- Omori, F. On the aftershocks of earthquakes, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo* **7**, 111 -200 (1894).
- Reasenber, P.A. and Jones, L.M. (1989) Earthquake hazard after a mainshock in California, *Science*, **243**, 1173-1176.
- Toda, S. Stein, R.S., Reasenber P.A. and Dieterich J.H. and Yoshida, A. (1998) Stress transferred by the Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, *J. Geophys. Res.*, **103**, pp. 24,543-24,565.
- Toda, S. and Stein, R.S. (2002) Response of the San Andreas Fault to the 1983 Coalinga-Nuñez Earthquakes: An Application of Interaction-based Probabilities for Parkfield, *J. Geophys. Res.* **107**, 10.1029/2001JB000172.
- Toda, S., Stein, R.S. and Sagiya, T., (2002) Evidence from the AD 2000 Izu Islands swarm that stressing rate governs seismicity, *Nature*, 419, pp. 58-61, 5 September issue.
- Utsu, T., A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, **30**, 521-605, 1961.
- Utsu, T. (1965) A method for determinig the value of b in a formula $\log n = \bar{a} - bM$ showing the magnitude- frequency relation for earthquakes, *Geophys Bull Hokkaido Univ.*, **13**, 99-103 (in Japanese).
- Utsu, T. (1969). Aftershocks and earthquake statistics(I): some parameters which characterize an aftershock sequence and their interaction, *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Ser. VII (geophysics)*, **3**, 129-195.
- Utsu, T., Ogata, Y. and Matsuura, R. S. (1995) The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, **43**, 1-33.
- Utsu, T. and Ogata, Y. (1997) Computer program package: Statistical Analysis of point processes for Seismicity (SASeis), invited and accepted for IASPEI Software Library for Personal Computers, the International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, vol. 6, 13-94.
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *J. Amer. Statist. Assoc.*, **97**, 369-380.

Objectives of the project were as follows:

- (1) To develop practical space-time models that are sufficiently close to the real seismic activity. Specifically, the model must elaborate enough to spatially adapt to various different clustering patterns. In order to represent various seismicity patterns, we will adopt a hierarchical space-time point-process model, in which the parameter values are dependent on the location of the earthquakes.
- (2) To detect and evaluate anomalous features of general seismicity and aftershock activity relative to the modeled rate by the ETAS model, to explore its space-time features using statistical diagnostic methods and to make modeling of seismicity anomalies.
- (3) To explore the relation between the seismicity-rate-change in a region and the stress-change in the crust, which varies due to the fault mechanisms of earthquakes.
- (4) To statistically model the relationship between the occurrence time series of focal earthquakes in a region and the time series records of anomaly events, in order to enhance the performance of probability forecasting.
- (5) To model the heterogeneity of various datasets which are affected by some instrumental and geophysical factors, such as various noises, missing events or values, and detection rate changes of earthquakes in time and space.

Work Plan 2003 - 2007

We will undertake as many of the followings as early as possible:

- (1) We will apply the ETAS model to a number of sequences of earthquakes from various regions over a recent period to examine any significant deviation of the activity from the rate predicted by the model. We will explore matching such an anomaly and a crustal stress-change due to a co-seismic and a pre-seismic slip somewhere in order to examine whether such a seismic anomaly can be a sensitive sensor of stress change.
- (2) We will particularly be concerned with the anomalously quiet aftershock activity preceding a large aftershock.
- (3) We will make use of fault mechanism data of earthquakes to calculate the Coulomb-stress-change estimation transferred from a pre-slip or a slow slip in order to discuss the significance of the causal relation between stress change and seismicity anomalies.
- (4) We will try to make a statistical point process model to explain the causality between geodetic anomalies and seismicity anomalies in the same field.
- (5) We will publish a software package to make programs available such as the estimation and diagnostic procedure of the ETAS model for the seismologists, after testing the stability of such programs.
- (6) We will make a practical model to enable real-time probability forecasting of aftershocks immediately after a large earthquake (say, within 24hours), when the detection rate of aftershocks is extremely low, due to contamination of arriving seismic waves. This is urgent since the majority of large aftershocks are most likely to occur during this period, and hence forecasting during this time is most critical for public in the affected area.
- (7) We will develop methods of diagnostic analysis for space-time seismicity data by introducing a space-time seismicity-ratio of real seismicity to the predicted by the space-time ETAS model, and modeling it in Bayesian framework.
- (8) We will prepare a software package to publish the MLE and Bayesian procedure of the space-time ETAS model, and test the stability of such programs with many datasets.

Project Members:

Statistical Seismology Research Group, Prediction and Knowledge Discovery Research Center

Yosihiko OGATA, Prof. of the Institute of Statistical Mathematics (ISM)

Shinji TODA, Visiting Prof. of the ISM and Geological Survey of Japan, AIST, 2005 -

Yasuaki MURATA, Geological Survey of Japan, AIST, Visiting Assoc. Prof. of the ISM 2003 - 2004

Jianchang ZHUANG, Research Fellow upon JSPS program, 2001 - 2005

Kazuyoshi NANJO, Research Fellow upon JSPS program, 2003 -

Takaki IWATA, Research Fellow of ISM, 2005 -

Masatsugu WAKAURA, Graduate Student, The Graduate University for Advanced Studies
Ushio TANAKA, Graduate Student, The Graduate University for Advanced Studies
Akiko KUTSUNA, part-time assistant

Research Accomplishments 2003 – 2005

Principal works during 2003 - 2005

(1) Coseismic activation / quiescence triggered by a large earthquake and Coulomb stress changes

It is clearly seen that after a large earthquake, many off-fault activities with positive Coulomb stress increments are enhanced, while negative ones (stress shadow) are inhibited, in regions that include many earthquakes of similar fault-mechanisms detected down to small magnitudes. Such various examples are shown in western Japan, which was affected by the two great earthquakes of 1944 and 1946 in the Nankai trough, with other various ones being seen in Hokkaido inland and the southern offshore of Hokkaido which was affected by the 2003 Tokachi-Oki great earthquake. See also the published referred papers [4], [23], [32], [A8], and the main reported manuscript [A15], [A16], [A23] and [A24] for further examples of coseismic triggering. These papers and reports are listed in the end of this section under Research Accomplishments.

Seismicity changes in western Japan affected by the great earthquakes in Nankai trough [12, A4, A28]. Significant changes in seismicity (both quiescence and activation) took place during the period of 1944–1946 in some regions in western Japan. They are well explained by the corresponding changes in Coulomb failure-stress caused by the 1944 Tonankai earthquake of M7.9 and the 1946 Nankai earthquake of M8.0, both of which occurred in the Nankai trough. From the seismicity changes, with exception of coseismic changes, we identified precursory anomalies such as the quiescence in several regions before the Tonankai event and also the enhanced activity in southern Kii peninsula before the Nankai event. These quiescence and enhanced activity may be due to precursory aseismic slips in an area on the plate interface down-dip of the Tonankai rupture and slips transferring from the Tonankai to Nankai rupture zone. The records of felt shocks at the Wakayama Observatory during 1900–1995 provide support for the quiescence in the Wakayama District during 1944–1946, as well as a scenario of seismicity cycle until the next great event(s) in the Nankai trough, to occur sometime this century.

Seismicity-changes and stress-changes triggered by the 2003 Tokachi earthquake [A21, A33]. Coseismic activation and quiescence are conspicuous in the eastern inland region of Hokkaido after the 2003 great earthquake of M8.0 in the space-time occurrence of microearthquakes detected from 2001 through 2003 (depth ≤ 25 km). The Δ CFF for the receiver faults with N75°E right lateral strike-slip at the depth of 10km and the Tokachi-Oki event's slip model takes positive and negative values in the western and eastern part, respectively, which corresponds well to the regions of activation and quiescence in microseismicity. The exception is that the very active spot in the western region suddenly stopped the activity after the great event, but this is also well explained by the different alignment of the receiver fault from the rest of the western part of the microseismicity.

We found another triggered activation and quiescence in a complicated manner within the 3D volume down to 100km depth beneath the southern inland region of Hokkaido and its southern offshore area. This complex pattern of activation and quiescence is well explained by the receiver faults due to the tectonic structure of this area called the Hidaka collision zone model.

Coseismic activation and quiescence relative to the ETAS model [22, A19]. Fitting and extrapolating the ETAS model for normal seismic activity in a situation without exogenous stress changes provides us with an alternative method through which we can detect the relative changes of seismicity sensitively. Thus, the diagnostic analysis based on fitting the ETAS model is helpful in detecting small exogenous stress changes. For example, shallow earthquakes ($M \geq 1.5$) in the Tohoku inland region of largest ΔCFF values (ranging +5~+50 millibars) due to the 2003 May 26 Miyagi-Ken-Oki earthquake of M7.1 is seen to be activated relative to the predicted occurrence rate by the ETAS model. The foreshock activity during the first event of M5.5 and the mainshock of M6.2 (the both occurred at 26 July 2003) was more active than the predicted rate by the ETAS fitted in the preceding interval. But the aftershock activity the mainshock of M6.2 seems similar to the predicted rate.

(2) Relative quiescence in aftershock sequences and its mechanism

In order to extract regional stress-changes transferred from the slip of a far-field fault, we have to remove the effect of the complex, proximate triggering mechanics occurring within aftershock clusters. As a practical solution, the ETAS model is fitted to the sequence of events from the region in order to precisely mimic the normal activity there. We are primarily concerned with seismicity-rate-changes (enhancement and reduction) relative to the rate predicted by the ETAS model, and explore matching them to the pattern of Coulomb's stress-changes that occur due to a rupture or a suspected silent slip. We have shown a number of such examples from recent seismic activities in Japan. These lead us to a summarized observation that even a small CFS increment of the order of millibars can trigger such seismicity-rate-change, which is also supported by the seismicity-rate-equation of Dieterich. Thus, we expect that the anomalous seismic activity relative to the ETAS rates is sensitive enough to detect and measure slight stress-changes.

Aftershock activity of large earthquakes in Southern California [2]. The Hector Mine aftershock activity has been normal, relative to the decay predicted by the ETAS model during the 14 months of available data and no further large event has taken place in the vicinity up until now. In contrast, although the aftershock sequence of the 1992 Landers earthquake ($M=7.3$), including the 1992 Big Bear earthquake ($M=6.4$) and its aftershocks, fits very well to the ETAS up until about 6 months after the mainshock, the activity showed clear lowering relative to the modeled rate (relative quiescence) and the anomaly lasted nearly 7 years, leading up to the Hector Mine earthquake ($M=7.1$) in 1999. Specifically, the relative quiescence occurred only in the shallow aftershock activity, down to depths of 5 - 6 km. The sequence of deeper events showed clear, normal aftershock activity that fitted well to the ETAS throughout the whole period. We argue several physical explanations for these results. Among them, we strongly suspect aseismic slips within the Hector Mine rupture source that could inhibit the crustal relaxation process within "shadow zones" of the Coulomb's failure stress change. Furthermore, the aftershock activity of the 1992 Joshua Tree earthquake ($M=6.1$) sharply lowered in the same day of the mainshock, which can be explained by a similar scenario due to aseismic slip.

Consecutive earthquakes in Miyagi Prefecture and its offshore [22, A19]. Anomalous seismicity such as

quiescence and activation is defined by a systematic deviation of seismic activity from the predicted rate by the ETAS model that represents the normal occurrence-rate of earthquakes in a region indicating the empirical triggering effect by the previous events. The model is fitted to a dataset of origin-times and magnitudes of earthquakes or aftershocks during May-August 2003 in and around northern Japan. The detected quiescence and activation relative to the predicted seismicity rate are consistent with the coseismic changes of Coulomb failure stress (CFS) in the corresponding regions, transferred from certain strong earthquakes. Few results in the present manuscript agree with the claim that there should be a threshold value of ΔCFS capable of affecting seismic changes. Thus, we expect that significant deviation of actual activity from the predicted rates is sensitive enough to detect a slight stress-change. Furthermore, we offer a similar interpretation of the detected seismicity lowering relative to the modeled rates preceding the strong earthquakes, assuming some aseismic slips.

Anomalous aftershock activity of the 2004 Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of M6.8 [A30]. We are concerned with the drastic shift of the depth distribution of aftershocks against time, around 0.5 days after the mainshock when we have no major aftershock. The cross-section of ΔCFF diagram for the aftershocks of similar mechanisms to the mainshock's on the plane of fault's strike direction of the mainshock (reverse faulting) against depth shows positive and negative values in shallow and deep parts of the aftershock volume, respectively, by the assumed precursory slip of the large M6.1 event that occurred 3.7 days after the mainshock. The precursory slip can be triggered by the mainshock rupture with a large positive ΔCFF .

Relative quiescence reported before the occurrence of the largest aftershock (M5.8) with likely scenarios of precursory slips considered for the stress-shadow covering the aftershock area [30, A27, A35].

Monitoring of aftershock sequences to detect lowering activity, relative to the modeled rate (the relative quiescence), becomes realistic and practical in predicting the enhancement of the likelihood of having a substantially large aftershock, or even another earthquake of similar size to the mainshock or larger. A significant relative quiescence in the aftershock sequence of the 2005 March earthquake of M7.0 off the western coast of Fukuoka, Japan, was reported two weeks before the occurrence of the largest aftershock of M5.8 that also hit the Kyushu District. The relative quiescence was discussed in relation to the stress-shadowing as inhibiting the activity due to probable precursory slips. The reason of the shadowing was also retrospectively speculated in more detail in comparison with the 3D space-time feature of the main aftershocks by assuming a preslip in a zone between the main and secondary fault. The same slip should transfer the stress-shadow covering the active off-fault clusters which drastically lowered the activity. Likewise, another preslip around the largest aftershock can explain space-time feature of the relative quiescence preceding M5.0 event in the secondary aftershock sequence.

(3) Seismicity anomalies preceding large earthquakes and crustal stress changes

An earthquake prediction scenario from the implication of the relative quiescence can be based on the asperity hypothesis in the sense that precursory slip around asperities applies more shear stress to the asperities which promotes the rupture of the main fault. On the other hand, aseismic slips in a particular region are not necessarily a precursor to the large event but may be aseismic slips that are repeated in the same region with no subsequent large events. Therefore, identification of an aseismic slip leading to the rupture of an asperity remains a further difficult research theme in earthquake prediction. At present, this issue should be considered in terms of probabilistic prediction proactively making likely scenarios of precursory slips.

Intermediate-term seismicity anomalies preceding the rupture around the focal region of the 2004 Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of M6.8 [A27, 29].

The ETAS model is applied to four sequences of earthquakes ($M \geq 2$), which occurred from 1997 through to October 2004 in four respective regions divided around the source of the 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake. The four regions are divided North, East, South and East around the source by the boundaries of positive and negative CFS increments (i.e., the counters of neutral CFS increment) for the receiver faults (10km depth) of dominating angles in this region. The actual cumulative number of events deviates upward in region North and South, but downward in East and West, from the predicted cumulative curve after the change-point, consistently with the regions of the Coulomb increments. These show that precursory slip may have taken place in the Chuetsu mainshock fault plane.

Synchronous seismicity changes in and around the northern Japan preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake [21, A21, A25].

Preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake, we have observed the synchronized onset of quiescence and activation in four different seismic regions relative to the rate predicted by the ETAS model. Then, such activation and lowering of the seismicity relative to the predicted rates, in addition to the change in the distribution of fault mechanisms of moderate earthquakes during 1972-1996 and 1997-2003 in northern Japan, have been well matched with the pattern of the Coulomb's stress changes due to the possible precursory slow slip. These results have led us to a summarized observation that even a small size of CFS changes of the order of millibars can trigger such lowering and activation, which is also supported by the seismicity-rate-change equation of Dieterich. Thus, the investigation of seismicity changes by the ETAS can be a very sensitive stress change sensor.

Features of seismic activities in and around Tohoku District, northern Japan, prior to the large interplate earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture [29, A20].

This paper is concerned with the intermediate-term prediction of the forthcoming M7.4 ~ 8.2 earthquake on the plate boundary, off the east coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, which has the highest occurrence probability among the long-term forecasted events announced to the public. Seismicity and aftershocks in the regions of stress-shadow show significantly lower activity than the rate predicted by the ETAS model (the relative quiescence) during some years preceding each of the previous ruptures in 1936 and 1978, whereas the seismicity is normal or even activated in the regions of neutral or increasing Coulomb failure stress (CFS), which leads to the scenario based on the likely precursory slip within or near to the source.

Assuming such a scenario, a number of sequences of earthquakes or aftershocks during 1979-2004 from various regions in northern Japan are selected to analyze them by fitting the ETAS model. Then the results are examined in relation to the CFS increments in the considered regions using the source models of the 1793, 1936 and 1978 interplate ruptures, as well as the source model of the recently occurred 2003 Miyagi-Ken-Okii intra-slab earthquake of M7.1. It is likely that the results of the normal activity and relative quiescence in the respective activities are due to the preslip of the intra-slab earthquake rather than the preslip of the expected rupture on the plate boundary.

Anomalies in the aftershock sequences of the 2003 Tokachi-Okii earthquake of M8.0 and the 2004

Kushiro-Okii earthquake of M7.1, and seismicity changes in the eastern Hokkaido inland [A12, A27, A28, A33, A36]. The aftershock sequence ($M \geq 2.5$) of the 2003 Tokachi-Okii earthquake of M8.0 become quiet relative to the ETAS five months after the mainshock. Latitude coordinates of the aftershock epicenters against the transformed time by the ETAS model show that the quiescence took place in the southern part of the

aftershock area whereas the northern part was normal. This is explained by the shadowing of the ΔCFS assuming slips in or near the source of the 2004 Kushiro-Oki earthquake of M7.1. At the same time, this slip should affect contrasting ΔCFS pattern in eastern Hokkaido inland compared to the ΔCFS pattern due to the 2003 Tokachi-Oki rupture that has been mentioned above. Coincidentally, the contrasting activation and quiescence of the microseismicity in the area took place compared to the previous coseismic triggered activities as mentioned above. The similar space-time analysis of aftershocks of the 2004 Kushiro-Oki earthquake of M7.1, using the transformed time, showed quiescence in the western part of the aftershock region whereas the eastern part was normal. Afterslip in the southwestern part of the Kushiro-Oki source may explain the space-time features of the aftershock activity.

Seismicity in and around the Kyushu District, preceding the 2005 earthquake of M7.0 at the western offshore region of Fukuoka Prefecture [A34]. The ETAS model is applied to the sequences of events with $M \geq 1.5$ during the 10 year period from 1995 to March 23, 2005 in the 10 regions in which ΔCFS values are calculated for the most frequent angles of receiver faults for the respective depths, assuming stress transfer by the rupture on the fault model of the M7.0 earthquake. The activity is normal or activated relative to the ETAS prediction in the regions where ΔCFS values are positive, and the relative quiescence in the stress-shadow regions. This may support the hypothesis of precursory slips within the fault of the M7.0 earthquake.

On distributions of focal mechanisms [12, A11, A22, A25, A29]. We see a change of the normalized frequency distribution of ΔCFS values before and after 1995, calculated at the hypocenter of all earthquakes listed in the JMA earthquake mechanisms catalog in a wide area of northern Japan, assuming the suspected precursory slip of the 2003 Tokachi-Oki earthquake of M8.0. Normalized histograms are given for the arc-tangent transformation of ΔCFF . The ratio of the numbers of earthquakes with negative ΔCFF value to those with positive one drastically lowered after 1995. These indicate that either quiescence or activation occurred consistently with their receiver mechanisms overall in northern Japan. Similar changes took place in shallow earthquakes in central Japan before and after the 2000/2001 onset of slow slip beneath Lake Hamana.

Next, we discussed the likelihood of three rupture models of the 2005 earthquake of M7.4 off the coast of the Kii Peninsula. The three models by the GSI, ERI and IISEE are based on GPS data, and seismograms at the near and far field stations, respectively, and we still do not know the right model due to the inaccurate hypocenters estimates due to the earthquake's occurrence far offshore. Relying on the proposition that aftershocks should have been triggered by the main rupture, ΔCFF of aftershocks that occurred outside of the main fault are calculated for each rupture model using the F-net mechanism data. The model by the IISEE is most likely given the ratio of the number of aftershocks with positive ΔCFF to the one with the negative ΔCFF .

(4) Space-time ETAS modeling.

Stochastic clustering / declustering by the space-time ETAS model [13, 25, 33, A17, A18, A27]. On the basis of the space-time ETAS model and the thinning procedure, this paper gives the method of how to classify the earthquakes in a given catalogue into different clusters stochastically. The key points of this method are the probabilities of one event being triggered by another previous event and of it being a background event. Making use of these probabilities, we can reconstruct the functions associated with the characteristics of earthquake clusters to test a number of important hypotheses about the earthquake clustering phenomena.

We applied this reconstruction method to the shallow seismic data in Japan and also to a simulated catalogue. The results show the following assertions: (1) The functions for each component in the

formulation of the space-time ETAS model are good enough as a first-order approximation for describing earthquake clusters; (2) a background event triggers less offspring in expectation than a triggered event of the same magnitude; (3) the magnitude distribution of the triggered event depends on the magnitude of its direct ancestor; (4) the diffusion of the aftershock sequence is mainly caused by cascades of individual triggering processes, while no evidence shows that each individual triggering process is diffusive; and (5) the scale of the triggering region is still an exponential law, as formulated in the model but not the same one for the expected number of offspring. Thus, modification of the space-time ETAS has been made [25, 31].

Taiwan hypocenter data obtained during the 20th century is analyzed and discussed on the basis of the background and clustering seismicity rates. Specifically, we find that the areas of the highest clustering ratio correspond to the major strike-slip fault traces in and around Taiwan. Additionally, in the Taiwan inland region, during the period 1960–1990, the outputs for the declustered catalogue show a clear quiescence in background seismicity preceding the recovery of activation and the occurrences of the 1999 Chi-Chi earthquake of $M_L 7.3$, while the other active regions show stationary background activity. This could be interpreted as an effect of the aseismic slip in the Chi-Chi rupture fault, whereby the inland region around the Chi-Chi source becomes a stress shadow.

Hierarchical Space-Time Model for Regional Seismicity [1, A2, A5, A6, A9]. A space-time point-process model is specified in which earthquake intensity is modelled as a function of previous earthquakes' occurrence times, locations, and magnitudes. Specific forms of the function of locations and times are based on the established empirical laws, such as the modified Omori formula and the Utsu-Seki scaling law of aftershock area against magnitude, but their parameter values are known to be different from place to place. Thus the parameters are further considered to be functions of spatial locations (but not time) represented by linear interpolation over a tessellation based on observed locations of earthquakes. Using the smooth representation for each parameter function in the model, a penalized log-likelihood method is used for the fitting, where the optimal weights of the penalties are objectively tuned by an empirical Bayesian method. Having done that, our final goal is to detect the temporal deviation of the actual seismicity rate from that of the modeled occurrence rate. For this procedure we estimate the space-time residual function represented by linear interpolation over a 3-dimensional tessellation based on observed times and locations of earthquakes, carrying out the similar penalized log-likelihood method. According to the estimated residual function, there are a number of zones where temporal deviation from the fitted model, with quiet periods, occurred before large earthquakes.

Hierarchical Space-Time Model for characterizing regional seismicity and anomaly detection [11, A2, A5, A6, A9]. The regional earthquake occurrence rate is modeled as a function of previous activity for which the specific form is based on empirical laws, such as the modified Omori formula and the Utsu-Seki scaling law of aftershock area against magnitude. Its parameters, including the p -value of the aftershock decay rate, can vary from place to place, showing some geophysical feature appearing correlated with the crustal temperature. This model is used to visualize features of the regional seismic activities in and around Japan. Among the parameters of the model, the present paper is particularly concerned with spatial variation of the normalized K -values. This takes high values around the boundaries of asperities that are estimated in the wide area off the East Coast of Tohoku District, Japan, by the inversion of the historical strong motion seismograms.

Furthermore, this space-time model enables us to magnify anomalous periods and regions where the actual occurrence rates deviate systematically from the modeled one. Thus, the activation and quiescence relative to the model's prediction could provide sensitive detection of stress-changes in the regions. We are concerned with

relative activation and lowering of the seismicity to explore the regions matching the pattern of Coulomb's stress changes due to a rupture or silent slip elsewhere. For example, such anomalies as those seen in the seismic activity in most central Japan (M 2.5) during 1995-1999 and during 2001 are likely the consequence of the 1995 Kobe rupture and the interplate aseismic slip during 2001 beneath the western Tokai region, respectively.

(5) Modeling the interface between physical and stochastic process

Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling [14]. According to the Coulomb failure criterion, the variation of both stress and pore pressure can result in earthquake rupture. Aftershock sequences characterized by the Omori-Utsu law are often assumed to be the consequence of varying stress, whereas earthquake swarms are supposed to be triggered by fluid intrusions. The role of stress triggering can be analyzed by modeling the 3D elastic stress changes in the crust. However, fluid flows initiating seismicity cannot be identified without dealing with both pore pressure variations and earthquake connected stress field changes resulting in complex seismicity patterns.

We show that the ETAS model is an appropriate tool to extract the primary fluid signal from such complex seismicity patterns. We analyze a large earthquake swarm that occurred in the year 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, Central Europe. By fitting the stochastic ETAS model, we find that stress triggering is dominant in creating the seismicity patterns. This explains the observed fractal interevent-time distribution. External forcing identified with pore pressure changes due to fluid intrusion is found to directly trigger only about 1% of the total activity. However, a temporal deconvolution unveils a pronounced fluid signal initiating the swarm.

Model simulations are performed in which earthquakes are triggered by fluid intrusion as well as coseismic and postseismic stress changes on a fault plane embedded in a 3D elastic half-space. They reproduce the observed swarm characteristics including the temporal power-law increase of the seismic moment release. Analyzing these simulations, we find that the proposed deconvolution procedure is able to reveal the underlying pore pressure variations. This model may be applied to the swarm owing to magma intrusion [e.g., A7].

Analysis of observations on the ultra-low frequency electric field in the Beijing Region [24]. This paper presents a preliminary analysis of observations on ultra-low frequency ground electric signals from stations operated by the China Seismological Bureau over the last 20 years. The data analyzed consists of estimates of the total strengths (cumulated amplitudes) of the electric signals during 24-hour periods. The thresholds are set low enough so that on most days a zero observation is returned. Non-zero observations are related to electric and magnetic storms, occasional man-made electrical effects, and, apparently, some pre-, co-, or postseismic signals.

To investigate the extent that the electric signals can be considered as preseismic in character, the electric signals from each of five stations are jointly analyzed with the catalogue of local earthquakes within circular regions around the selected stations. A version of Ogata's Lin-Lin algorithm is used to estimate and test the existence of a pre-seismic signal. This model allows the effect of the electric signals to be tested, even after allowing for the effects of earthquake clustering. It is found that, although the largest single effect influencing earthquake occurrence is the clustering tendency, there remains a significant preseismic component from the electrical signals. Additional tests show that the apparent effect is not postseismic in character, and persists even under variations of the model and the time periods used in the analysis. Samples of the data are presented and the full data sets have been made available on local websites.

Microseismicity and Earthtide [15, A1]. This paper analyzes the microseismicity in the Tanba region during the two year period following the 1995 Kobe earthquake of M7.1 which was activated by the Kobe rupture. From the histogram of the number of superposed earthquakes on the interval of the lunar period, some correlation is strongly suspected between the earthtide related lunar motion. However, the seismicity includes the clustering and some decreasing trend after the Kobe event. The ETAS model that also includes the components of polynomial for the trend and Fourier series for the periodicity is applied to confirm the significance of the relationship. The paper [15] discusses the correlation between the b -value change of G-R magnitude-frequency of the underground AE data and tidal stress/strain due to lunar phase.

(6) Simultaneous estimation of b -values and detection rates of earthquakes for the application to aftershock probability forecasting [A31, A32].

It is known that the detection rate of aftershocks is extremely low during the period immediately following a large earthquake due to the contamination of arriving seismic waves. This has resulted in considerable difficulty in obtaining an estimate of the empirical laws of aftershock decay and the magnitude frequency immediately after the main shock. This paper presents an estimation method for predicting the underlying occurrence rate of aftershocks of any magnitude range, based on the magnitude frequency model that combines Gutenberg-Richter's law with the detection rate function. This procedure enables us to announce real-time probability forecasting of aftershocks immediately after the mainshock, when the majority of large aftershocks is likely to occur.

Published papers 2003 – 2005

Refereed Journals:

2003:

- [1] Ogata, Y., Katsura, K. and Tanemura, M. (2003) Modelling of heterogeneous space-time occurrences of earthquakes and its residual analysis, *Applied Statistics (J. Roy. Stat. Soc. Ser. C.)*, Vol. 52, Part 4, pp. 499-509 (2003).
- [2] Ogata, Y., Jones, L. and Toda, S. (2003) When and where the aftershock activity was depressed: Contrasting decay patterns of the proximate large earthquakes in southern California, *J. Geophys. Res.*, 108, No. B6, 2318, doi: 10.1029/2002JB002009.
- [3] Ogata, Y. (2003) Examples of statistical models and methods applied to seismology and related earth physics, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, Vol. 81B, HandbookCD#2, Chapter 82.
- [4] Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, *J. Geophys. Res.*, 108, B12, 2567, doi: 10.1029/2003JB002527,
- [5] Vere-Jones, D. and Ogata, Y. (2003) Statistical principles for seismologists, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, Vol. 81B, pp. 1573-1586.

2004:

- [6] Cho, I., T. Iwata, T. Shiga, T. Tokunaga, M. Fukuyo, and Y. Shinozaki, Data processing of circular arrays for an exploration method using microtremors: Applicability of Henstridge's method and new methods, BUTSURI-TANSA (Bulletin of Society of Exploration Geophysics of Japan), **57**, 501-516 (in Japanese).
- [7] Iwata, T., and Nakanishi, I. (2004) Hastening of occurrences of earthquakes due to dynamic triggering: The observation at Matsushiro, central Japan, *Journal of Seismology*, **8**, pp. 165-177.
- [8] Nanjo, K., Nagahama, H. and Yodogawa, E.. (2004) Symmetry in the Self-organized Criticality, *The Journal of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry (ISIS-Symmetry) Symmetry: Art and Science 2004* (Editors D. Nagy and G. Lugosi) ISIS-Symmetry, Budapest, Hungary, pp. 302-305.
- [9] Nanjo, K. and Nagahama H. (2004) Fractal Properties of Spatial Distributions of Aftershocks and Active Faults, *Chaos, Solitons and Fractals*, **19**, pp. 387-397, doi: 10.1016/S0960-0779(03)00051-1.
- [10] Nanjo, K. and Nagahama, H. (2004) Discussions on Fractals, Aftershocks and Active Faults: Diffusion and Seismo-electromagnetism, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2004, **29**, 2C, pp. 147-167.
- [11] Ogata, Y. (2004) Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. B3, B03308, doi:10.1029/2003JB002621.
- [12] 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**, B4, B04305, doi:10.1029/2003JB002634.
- [13] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction *Journal of Geophysical Research*, **109**, B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879.

2005:

- [14] Hainzl, S. and Ogata, Y. (2005) Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling, *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.B5, B05S07, doi:10.1029/2004JB003247 (2005).
- [15] Iwata, T. and Young, P. (2005) Tidal stress/strain and the *b*-value of acoustic emissions at the Underground Research Laboratory, Canada, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1291-1308.
- [16] Iwata, T., M. Imoto, and S. Horiuchi (2005) Probabilistic estimation of an earthquake growth to a catastrophical one, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19307, 10.1029/2005GL023928.
- [17] Nanjo, K.Z., Nagahama, H. and Yodogawa, E. (2005) Symmetry of fault patterns: Quantitative measurement of anisotropy and entropic heterogeneity, *Mathematical Geology*, **37**, 3, pp. 277-293, doi: 10.1007/s11004-005-1559-z.
- [18] Nanjo, K.Z., Turcotte, D.L. and Shcherbakov, R. (2005) A model of damage mechanics for the deformation of the continental crust, *J. Geophys. Res.*, **110**, B7, B07403, DOI: 10.1029/2004JB003438.
- [19] Nanjo, K.Z. and Turcotte, D.L. (2005) Damage and rheology in a fiber-bundle Model, *Geophys. J. Int.*, 2005, **162**, pp. 859-866, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02683.x.
- [20] Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Tiampo, K.F., Rundle, J.B. and Turcotte, D.L. (2005) Earthquake forecasting and its verification, *Nonlinear Processes in Geophysics*, **12**, pp. 965-977, doi: 1607-7946/npg/2005-12-965.
- [21] 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**, B8, B08305, doi:10.1029/2004JB003323.
- [22] Ogata, Y. (2005) Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor, *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.B5, B05S06, doi:10.1029/2004JB003245.
- [23] Toda, S., Stein, R.S., Richards-Dinger, K. and Bozkurt, S. (2005) Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *J. Geophys. Res.*, **110**, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- [24] Zhuang, J., Vere-Jones, D., Guan, H., Ogata, Y. and Ma, Li (2005) Preliminary analysis of observations on the ultra-low frequency electric field in the Beijing region, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1367-1396.
- [25] Zhuang, J., Chang, C., Ogata, Y., Chen, Y. (2005) A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models, *J. Geophys. Res.*, **110**, B5, B05S18, doi:10.1029/2004JB003157.

In press or accepted:

- [26] Nanjo, K.Z., Nagahama, H. and Yodogawa, E., Symmetry of earthquake patterns: asymmetry and rotation in a disordered seismic source, *Acta Geophysica Polonica*, in press, Volume 54.

- [27] Nanjo, K.Z., Rundle, J.B., Holliday, J.R. and Turcotte, D.L., Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan, *Pure and Applied Geophysics*, accepted.
- [28] Chen, C.C., Rundle, J.B., Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Turcotte, D.L., Li, S.C. and Tiampo, K.F., The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence, *Geophys. Res. Lett.*, 2005 accepted.
- [29] Ogata, Y., Seismicity anomaly scenario prior to the major recurrent earthquakes off the east coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, and its implication for the intermediate-term prediction, Special Issue on Dynamics of Seismicity Patterns and Earthquake Triggering, eds. S. Hainzl, G. Zoler and I. Main, *Tectonophysics*, in press.
- [30] Ogata, Y., Anomaly monitoring of aftershock sequence by a reference model: A case study of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Letters*, in press.
- [31] Ogata, Y. and Zhuang, J., Space-time ETAS models and an improved extension, Special Issue on Critical Point Theory and Space-Time Pattern Formation in Precursory Seismicity, eds. K. Tiampo and M. Anghel, *Tectonophysics*, in press.
- [32] Toda, S. and Matsumura, S., Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan, *Tectonophysics*, in press.
- [33] Zhuang J., Ogata Y. and Vere-Jones D., Diagnostic analysis of space-time branching processes for earthquakes. Chapter 15 of *Case Studies in Spatial Point Process Models*, Eds. Baddeley A., Gregori P., Mateu J., Stoyan R. and Stoyan D. Springer-Verlag, New York, in press.

Main Proceedings:

2003:

- [A1] Iwata, T. and Katao, H. (2003) Analysis of a correlation between the phase of the moon and the occurrences of microearthquakes in the Tanba plateau through the point-process modeling, *Programme and Abstracts of the 2003, Fall Meeting of the Seismol. Soc. Japan*, A062.
- [A2] Ogata, Y. (2003) A practical space-time model for regional seismicity (invited), EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, Geophysical Research Abstract, Volume 5, 2003, CD-ROM, ISSN: 1029-7006
- [A3] Ogata, Y. (2003) Seismicity-change-analysis by a space-time point-process model (invited) The 3rd Statistical Seismology Workshop, Juriquilla, Mexico.
- [A4] Ogata, Y. (2003) Seismicity quiescence and activation in western Japan associated with 1944 and 1946 great earthquakes near the Nankai Trough (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **70**, pp. 378-383, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A5] Ogata, Y. (2003) Seismicity changes in western Japan (1995-2001) detected by a statistical space-time model (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, Vol. 70, pp. 5-6 and pp. 361-363.
- [A6] Ogata, Y. (2003) A space-time model for regional seismicity and detection of seismicity changes (in Japanese), *Chikyū Monthly*, **25**, 10, pp. 783-787.
- [A7] Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Earthquake triggering by volcano-tectonic events: An example from the 2000 Izu Islands swarm (invited talk), XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 2003.
- [A8] Toda, S. (2003) A Fresh Look at the Triggering of Earthquake Pairs, Such as the Landers-Big Bear, Landers-Hector Mine, Izmit-Duzce, and Nenana-Denali, and March-May 1997 Kagoshima Events (invited talk), American Geophysical Union 2004 fall meeting.

2004:

- [A9] Ogata, Y. (2004) The 6th World Congress of the Bernoulli Society for Mathematical Statistics and Probability, and 67th Annual Meeting of the Institute of Mathematical Statistics, "Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes", July 25-29, 2004, Barcelona, Spain, (invited lecture)
- [A10] Ogata, Y. (2004) Statistical models of point processes and prediction and discovery in seismic activity (in Japanese), Spring Meeting of the Mathematical Society of Japan, March 30, 2004, Tsukuba, Japan (specially organized invited lecture)

- [A11] Ogata, Y. (2004) Static triggering and statistical modeling (in Japanese), The 156-th Meeting of Coordinating Committee for Earthquake Prediction, Geographical Survey Institute, Kudan, Tokyo, February 16, 2004, Japan (topics invited lecture)
- [A12] Ogata, Y. (2004) Synchronous seismicity changes in and around the northern Japan preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake of M8.0 (invited talk) International Conference in Commemoration of 5-th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taipei, Taiwan.
- [A13] Ogata, Y. (2004) Stress changes, seismicity changes and statistical models, Workshop on Seismic Activity and Probabilities of Major Earthquakes in the Kanto and Tokai Area, Central Japan, Wadati Memorial Hall, Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan (invited presentation), <http://kt-jisin.bosai.go.jp/WS/Program/index.html>, (invited talk)
- [A14] Nanjo, K.Z., Rundle, J.B. and Holliday, J.R. (2004) Pattern Informatics and Its Application to Forecasting Large Earthquakes in Japan, Abstract for AGU 2004 Fall Meeting, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract NG22A-07 (invited talk).
- [A15] Toda, S. (2004) Recent progress in earthquake triggering study and possible applications to earthquake prediction (in Japanese), The 156-th Meeting of Coordinating Committee for Earthquake Prediction, Geographical Survey Institute, Kudan, Tokyo, February 16, 2004, Japan (topics invited lecture)
- [A16] Toda, S., and Matsumura, S. (2004) Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan (invited talk), American Geophysical Union 2004 fall meeting.
- [A17] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Diagnostic analysis of space-time branching processes for earthquakes, Spatial Point Process Modeling and its Applications, Benicassim, Castellon, Spain, Spatial Point Process Modelling and Its Applications, Col-Lecco Treballis D'Infomática/Tecnologia, Num. 20, ISBN 84-8021-475-9 Publication de la Universitat Jaume-I, Castello de la Plana, Spain, pp. 273-292.
- [A18] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Visualizing goodness-of-fit of point-process models for earthquake clusters., Analysis of Natural and Social Phenomena: Data Science and System Reduction; an international workshop of the 21st Century COE program at Keio University, http://coe.math.keio.ac.jp/english/event/cherry_bud/index.html, (invited talk).
- [A19] Ogata, Y. (2004) Quiescence of the 2003 foreshock/aftershock activities in and off the coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, and their correlation to the triggered stress-changes (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **71**, pp. 260-267, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A20] Ogata, Y. (2004) Statistical analysis of seismic activities in and around Tohoku District, northern Japan, prior to the large interplate earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **71**, pp. 268-278, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A21] Ogata, Y. (2004) Seismicity changes and stress changes in and around the northern Japan relating to the 2003 Tokachi earthquake of M8.0 (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **72**, pp. 110-117, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A22] Ogata, Y. (2004) Static triggering and statistical modeling (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, Vol. 72, pp. 631-637, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A23] Toda, S. (2004) Recent progress in earthquake triggering study and possible applications to earthquake prediction (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **72**, pp. 624-626, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A24] Toda, S. (2004) Seismicity changes in inland activity before and after the 2003 Miyagi-Ken-Oki earthquake and its implications (in Japanese), *Chikyu Monthly*, **27**, 1, 56-61.
- [A25] Ogata, Y. (2004) On changes of statistical distribution of focal mechanisms of events prior to the main ruptures, *Programme and Abstracts of the 2005 Fall Meeting of the Seismol. Soc. Japan*, S023.

2005:

- [A26] Murata, Y. and Ogata, Y. (2005) Surficial density estimation from gravity data using Delaunay triangular network, Joint meeting for Earth and Planetary Science, J031-004, Makuhari, Chiba Prefecture, Japan, May 2005.

- [A27] Ogata, Y. (2005) Seismicity anomalies measured by the ETAS model and stress changes (solicited), The General Assembly 2005 of the European Geosciences Union (EGU), , April 24-29, 2005, the Austria Center Vienna (ACV), Vienna, Austria (invited lecture).
- [A28] Ogata, Y. (2005) Seismicity changes in western Japan associated with the great earthquakes near Nankai trough and their contemporary implications, Specially organized session S095, invited talk.
- [A29] Ogata, Y. (2005) On the aftershock activity of the 2004 earthquake of M7.4 at the southeast off the coast of the Kii Peninsula, and constraints on the fault rupture models by the mechanisms and space-time pattern of the aftershocks (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **73**, pp. 495-498 Geographical Survey Institute of Japan.
- [A30] Ogata, Y. (2005) On an anomalous aftershock activity of the 2004 Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of M6.8, and intermediate-term seismicity anomalies preceding the rupture around the focal region (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **73**, pp. 327-331, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A31] Ogata, Y. (2005) Simultaneous estimation of *b*-values and detection rates of earthquakes for the application to aftershock probability forecasting (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, Vol. 73, pp. 666-669, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A32] Ogata, Y. (2005) Toward urgent forecasting of aftershock hazard - Simultaneous estimation of *b*-value of the Gutenberg-Richter's law of the magnitude frequency and changing detection rates of aftershocks immediately after the mainshock, preprint.
- [A33] Ogata, Y. (2005) Anomalies in the aftershock sequences of the 2003 Tokachi-Oki earthquake of M8.0 and the 2004 Kushiro-Oki earthquake of M7.1 and seismicity changes in the eastern Hokkaido inland (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **74**, pp. 83-88, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A34] Ogata, Y. (2005) Seismicity changes in and around Kyushu District before the 2005 earthquake of M7.0 in the western offshore of Fukuoka Prefecture (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **74**, pp. 523-528, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A35] Ogata, Y. (2005) Relative quiescence reported before the occurrence of the largest aftershock (M5.8) in the aftershocks of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, and possible scenarios of precursory slips considered for the stress-shadow covering the aftershock area (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **74**, pp. 529-535, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A36] Ogata, Y. (2005) Anomalies in the aftershock sequences of the 2003 Tokachi-Oki earthquake of M8.0 and the 2004 Kushiro-Oki earthquake of M7.1 and seismicity changes in the eastern Hokkaido inland, *Programme and Abstracts of the 2005 Fall Meeting of the Seismol. Soc. Japan*, S023.
- [A37] Toda, S. (2005) Style of stress accumulation and release in northern Honshu Japan: A concept to explain the coexistence of destructive inland earthquakes and interplate thrust earthquakes (invited talk), Spatial and Temporal Fluctuation in the Solid Earth, 21COE International Symposium 2005, Sendai, Japan.

Future plan for the project

(1) Examination of scenarios for predicting asperity-slip based on the seismicity anomalies

Anomaly monitoring of aftershock sequences to detect lowering activity, relative to the modelled rate (the relative quiescence), is now becoming realistic and practical in predicting the enhancement of the likelihood of having a significantly large aftershock, or even another earthquake of similar size or larger occurring. In order to predict the location of a large aftershock or another proximate large earthquake, we have to assume that a significant slip may have occurred within and near to the source of the suspected earthquake due to the acceleration of quasi-static (slow) slips on the fault as the time of rupture of the major asperity approached. This

is indicated, for example, by the analysis of small repeating earthquake data. Thus, we should look carefully at the activity in the stress-shadow, transferred from the slip. Such scenarios for the prediction should be useful for examining and explaining any such anomalous features.

In fact, given an anomaly of seismicity rate change, the difficulty lies in identifying the slip location and its imminence to a major rupture; most of them are unknown so far as no other data or constraints are available. For probable predictions, *Ogata* [2005c] explored and reported several scenarios of stress transfers from some thinkable slips, such as that they could have been triggered by the M7.0 rupture at 20th March 2005 off western Fukuoka city and moreover that the stress-shadows due to the slips should, in turn, have covered the majority of the aftershock region. These include a conjugate fault of the main fault rupture and several known active faults near the rupture fault. However, the largest aftershock that occurred two weeks later was not included in the suspected scenarios. The only exception was the predicted unlikely slip within the Kego Fault that runs through the urban area in the city of Fukuoka, since this results in a stress increase in the entire aftershock region, and no part of aftershock region can be the stress shadow.

(2) Effective space-time modeling of seismic activity and the detection of seismicity anomalies

In any application of the (hierarchical) space-time ETAS model, the data has to be homogeneous in space and time. The threshold magnitude of completely detected earthquakes throughout a long period and wide region is high, and the number of earthquakes above such a threshold magnitude is very limited compared to the number of listed earthquakes in a catalog. This is because the detection rate of earthquakes for each magnitude is dependent on time and location. Especially, the detection rate of aftershocks is extremely low during the period immediately following the main shock, due to contamination of arriving seismic waves.

For an estimation of the detection rate in time and space, we propose utilizing the statistical model introduced by *Ogata and Katsura* [1993] for the simultaneous estimation of the b -values of Gutenberg-Richter law together with the detection-rate (probability) of earthquakes of each magnitude-band from the provided data of all detected events, where both parameters are allowed to change in time. Thus, by using all the detected earthquakes in a given period and area, we can estimate the underlying ETAS rate of both the detected and undetected events and their b -value changes, taking the time-varying missing rates of events into account. It is our hope that it will become possible to give details of seismicity patterns such as aftershock productivity parameters to delineate asperities [*Ogata*, 2005a] over the period and region of the relative quiescence as given in *Ogata et al.* [2003].

As a primary step toward achieving this objective, *Ogata* [2005b] presents an estimation method for predicting underlying occurrence rate of aftershocks of any magnitude range. This procedure enables real-time probability forecasting of aftershocks immediately after the mainshock, when the majority of large aftershocks is likely to occur and when the forecasting is most critical for public in the affected area.

(3) Predictive space-time-magnitude characterization of foreshocks

Discrimination of foreshocks and clustering / declustering algorithms as a short-term prediction.

Discrimination of foreshock sequences from other clustering activity is an important problem in short term earthquake prediction. When sequential earthquake activity starts somewhere, it can be a swarm, a foreshock sequence, or simply a mainshock-aftershock sequence. Therefore, it is very desirable to know whether the activity is a precursor to a forthcoming significantly larger earthquake or not. *Ogata et al.* [1995, 1996 and 1999] and [*Ogata*, 1999b] investigated data sets of earthquake clusters to discriminate features of foreshocks from earthquakes of other cluster types in a statistical sense, and found several features of some predictive

value, including the fact that foreshocks were more closely-spaced in time than either swarms or aftershocks, the fact that foreshocks were closer together in space than other types of events, and that foreshocks' sizes were more likely to increase chronologically than the other types. By modeling such discriminating features they developed probability forecasts of an earthquake cluster being of foreshock type.

However the primary difficulty of this procedure is to find a suitable declustering algorithm for real-time forecasting of probability. There are two contrasting typical clustering algorithms, that is, the magnitude-based clustering (MBC) and the single-link-clustering (SLC) ones. The MBC based forecast performs very well, but a MBC cluster cannot be formed until the occurrence of the main shock. The SLC algorithm is better for the real-time recognition of a cluster, but does not perform objectively. Recently, based on the space-time ETAS model, *Zhuang et al.* [2002, 2005] proposed a stochastic clustering algorithm, which appears quite useful in such a forecasting. Because of its stochastic nature, a Bayesian predictive procedure will be useful.

(4) Prediction and inversion problem between seismicity changes and stress-changes

It is becoming important to study how to make predictions and how to solve inverse problems based on the quantitative relationships between seismicity rate changes (due to the ETAS) and stress-changes. In particular, we are concerned with the theory of rate/state-dependent friction and its application to the seismicity-rate-change equation of Dieterich [Dieterich, 1994; Dieterich et al., 2000; Toda and Stein, 2003].

(5) Bayesian Probability assessments for Long-term prediction

Inference of hazard of a fault rupture and its uncertainty from data of a small number of events, possibly with uncertain occurrence times. Conventionally, a probability of the next rupture during a future period is calculated by the predictive hazard function into which we plug the MLE values of BPT model [Matthews et al., 2002] estimated by the historical data of occurrence times. However, when the number of events in the data is small, the predictive hazard function based on the MLE usually causes a serious bias of hazard rates. Therefore, in order to see the uncertainty of estimated hazard functions, we use the Bayesian inference introducing a set of appropriate prior distributions. Furthermore, if a record of the slip-sizes of the events is available, *Ogata* [2001, 2002] proposes an extended renewal process for a stochastic version of the time-predictable model of *Shimazaki and Nakata* [1980] by assuming the same distribution of the ratio of the time interval of the successive pair of events to the slip size of the first event of the pair. Thus, we can estimate more effectively not only the hazard function of the next event but also its uncertainty based on the occurrence time data of the events associated with the records of corresponding slip sizes.

When paleoearthquake data is analyzed, our further concern is the raw data in which occurrence times of events themselves are uncertain and given by confidence intervals or some chronological likelihood function [e.g., *Sieh et al.*, 1989] inferred from geological evidences based on trench studies. For such records, we consider another Bayesian inference in which each uncertainty of occurrence time is interpreted as a prior distribution associated with the likelihood of a renewal process model [Ogata, 1999]. Integration of the posterior function with respect to the uncertain occurrence times and also the parameters of the renewal process model is implemented in order to compare the goodness-of-fit of competing renewal processes (e.g., log-Normal, Weibull and BPT models). Thus, the corresponding marginal posteriors of the model provide both estimates of distributions of the uncertain occurrence times and also the predictive hazard rates associated with the selected renewal process model. Particularly, in the case where occurrence time of the last event is uncertain, a natural assessment of current and future hazard of the forthcoming rupture can be provided.

(6) Statistical modeling for more effective use and quality improvements of datasets

There are many precise measurements such as geodetic extensometers, tiltmeters, volumetric strainmeters, GPS and so on. However, these records are always affected by some noises and other signals of various kinds caused by the motions of the sun, moon, and particularly meteorological factors such as barometric pressure, precipitation, temperature and humidity. Therefore, it is important to model the causality and response functions of these effects in order to know the genuine records of interest. Special care should be put to the GPS time series data to detect geodetic anomalies sensitively, since this dataset is now playing an important role similar to the earthquake catalog in the sense that the stations are very densely located throughout Japan. With regards to the earthquake catalog, the homogeneity in magnitude by its calibration will be main concern due to the changes of the seismographs for such a long period of about 80 years. Modeling of the detection rate change of earthquakes is already discussed above.

References:

- Akaike, H. (1998) *Selected Papers of Horotugu Akaike*, E. Parzen, Tanabe, K. and Kitagawa, G. eds., Springer Series of Statistics – Perspectives in Statistics, Springer, New York, 434pp.
- Aki, K. (1981) A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in *Earthquake Prediction: An International Review*, edited by D.W. Simpson & P.G. Richards, A.G.U., Washington, D.C., 566-574.
- Dieterich, J. (1994), A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geophys. Res.*, 99, 2601-2618.
- Dieterich, J., Cayol, V. and Okubo, P., The use of earthquake rate changes as a stress meter at Kilauea volcano, *Nature* **408**, 457-460 (2000).
- Matthews, M., Ellsworth, W.L. and Reasenberg, P. (2002) A Brownian Model for Recurrent Earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 6, 2233-2250, doi: 10.1785/0120010267.
- Ogata, Y. (1999) Estimating the hazard of rupture using uncertain occurrence times of paleoearthquakes, *J. Geophys. Res.* **104**, 17995-18014.
- Ogata, Y. (1999b) Real time discrimination of foreshocks (in Japanese), *Chikyu Monthly*, No. 24, pp. 167-173.
- Ogata, Y. (2001) Biases and uncertainties when estimating the hazard of the next Nankai earthquake (in Japanese), *Chigaku Zasshi (Journal of Geography)*, Vol. 110, No. 4, pp. 602-614.
- Ogata, Y. (2002) Slip-size dependent renewal processes and Bayesian inferences for uncertainties, *J. Geophys. Res.*, **107**, B11, 2268, doi:10.1029/2001JB000668, 2002.
- 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.
- Ogata, Y. (2005a) Simultaneous estimation of b-values and detection rates of earthquakes for the application to aftershock probability forecasting (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **73**, pp. 666-669.
- Ogata, Y. (2005b) Toward urgent forecasting of aftershock hazard: Simultaneous estimation of b-value of the Gutenberg-Richter's law of the magnitude frequency and changing detection rates of aftershocks immediately after the mainshock, preprint.
- Ogata, Y. (2005c) Anomaly monitoring of aftershock sequence by a reference model: A case study of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Letters*, in press.
- Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogs, *Geophys. J. Int.* **113**, 727-738.
- Ogata, Y. Utsu, T. and Katsura, K. (1995) Statistical features of foreshocks in comparison with other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, **121**, pp. 233-254.
- Ogata, Y., Utsu, T. and Katsura, T. (1996) Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, **127**, pp. 17-30.
- Ogata, Y. and Utsu, T. (1999) Real time statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters (in Japanese), *Tokei-Suri (Proc. Inst. Statist. Math)*, Vol. 47, No. 1, pp. 223-241.

- Ogata, Y., Katsura, K. and Tanemura, M. (2003) Modelling of heterogeneous space-time earthquake occurrences and its residual analysis, *Applied Statistics (J. Roy. Stat. Soc. Ser. C)*, **52**, Part 4, 499-509.
- Shimazaki, K., and T. Nakata (1980) Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Letters*, **7**, 279-282.
- Sieh, K., M. Stuiver, and D.R. Brillinger (1989) A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California, *J. Geophys. Res.*, **94**, 603-623.
- Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, *J. Geophys. Res.*, **108**, B12, 2567, doi: 10.1029/2003JB002527.
- Utsu, T. (1977) Probabilities in earthquake prediction, *Zisin(2) (J. Seismol. Soc. Jap.)*, **30**, 179-185 (in Japanese).
- Utsu, T. (1978) Calculation of the probability of success of an earthquake prediction (In the case of Izu-Oshima Kinkai Earthquake of 1978), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **31**, 129-135, Geographical Survey Institute of Japan (in Japanese).
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2002) Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *J. Amer. Statist. Assoc.*, **97**, 369-380.
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction *J. Geophys. Res.*, **109**, B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879.

Appendix 3: Programme of the 4th International Workshop on Statistical Seismology

In order to demonstrate work of the Group to the committee, STATSEI-4 workshop organized by Professor Ogata was held at the campus of the Graduate University for Advanced Studies (Soken-dai) before the meeting for the external review. The aim and programme of this workshop are as follows.

The 4th International Workshop on Statistical Seismology (Statsei4)

2006.01.09-2006.01.13

Introduction and Aims

The international workshop on Statistical Seismology (statsei) is hosted this time by the Institute of Statistical Mathematics, Tokyo. The workshop is also a memorial meeting of Professor Tokuji Utsu, who passed away in August 2004, for his substantial contributions to the statistical seismology.

This workshop has been held nearly biannually since 1998 at Hangzhou, China; in 2001 at Wellington, New Zealand; and in 2003 at Juriquilla, Mexico. Their purpose is to provide an opportunity for informal discussions of problems relating to statistical analysis of earthquake occurrence and forecasting. A feature of the previous Workshops was that they encouraged statisticians and seismologists to work together on these problems, and we hope that this tradition will be continued.

One of the main features of the workshop this time would be exploring the quantitative relationships between the seismicity rate changes and stress changes. In particular, we are concerned with the theory of rate/state-dependent friction and its application to the seismicity-rate-change equation of Dieterich. Therefore, we have invited Prof. Jim Dieterich to give tutorial or keynote lectures to stimulate our discussions.

More details other than described below, such as abstract and power-point oral and poster presentations, statistical soft-wares distributed at the workshop and photos, are given in the workshop home page, <http://www.ism.ac.jp/~ogata/Statsei4/index.html>.

The session structure consists of three themes:

Triggering; rate/state dependent friction law in relation to seismicity rate changes
Seismicity studies including statistical modeling
Predictions and evaluations including real-time and long-term probability forecast

Dates:

The workshop was held from the 9th January to the 13th January.

Jan 9: Registration and ice breaking

Morning, Jan 10 -- 12 Jan: Oral and poster sessions

We had excursion during the workshop on 13th January.

Workshop site:

The Workshop site was held at the campus of the Graduate University for Advanced Studies, which is located on a hill top of the Miura Peninsula where we can see Mt. Fuji over the Sagami Bay. The campus is a little distance out of the city Zushi, travel from the city taking 30 minutes by a bus that runs twice an hour in day time. Zushi itself is on the JR line, and can be reached directly by train (about 2-3 hours) from Narita Airport.

Organizing Committee

Ogata, Yosihiko (Chair); Tanemura, Masaharu; Tamura, Yoshiyasu; Higuchi, Tomoyuki; Iwata, Takaki; Jiancang Zhuang; Nanjo, Kazuyoshi

Sponsors and Collaborations:

Institute of Statistical Mathematics

Transdisciplinary Research Integration Center, Research Organization of Information and Systems:
Grant-in-Aid 17200021 for Scientific Research (A), Ministry of Education, Science, Sports and Culture

Graduate University for Advanced Studies

Advisory Board:

Benzion, Yehuda (Los Angeles); Chen, Yuh-Ing (Chung-Li, Taiwan); Console, Rodolfo (Rome); Dieterich, James (Riverside); Hainzl, Sebastian (Potsdam); Imoto, Masajiro (Tsukuba); Kitagawa, Genshiro (Tokyo); Ma, Li (Beijing); Matsuura, Ritsuko (Tokyo); Ohtake, Masakazu (Tokyo); Rhoades, David (Wellington); Shi, Yaolin (Beijin); Tiampo, Kristy (London, Canada); Wiemer, Stefan (Zurich)

Participants:

Adelfio, Giada (University of Palermo, Palermo)
Beauval, Celine (IRD - Géosciences Azur, Sophia Antipolis, France)
Bebbington, Mark (Massey University, Palmerston North)
Ben-Zion, Yehuda (USC, Los Angeles)
Brownrigg, Ray (Victoria University, Wellington)
Catalli, Flaminia (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome)

Chen, Yuh-Ing (National Central University, Taipei)
 Chiodi, Marcello (University of Palermo, Palermo)
 Christophersen, Annemarie (Victoria University, Wellington)
 Cocco, Massimo (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome)
 Cochran, Elizabeth S. (UCLA, Los Angeles)
 Console, Rodolfo (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome)
 D'Amico, Sebastiano (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome)
 Dieterich, Jim (University of California, Riverside)
 Ellsworth, Bill (USGS, Menlo Park)
 Enescu, Bogdan (DPRI Kyoto University, Kyoto)
 Felzer, Karen (USGS, Pasadena)
 Gomberg, Joan (USGS, Memphis)
 Gross, Susanna (University of Colorado, Boulder)
 Hainzl, Sebastian (University of Potsdam, Potsdam)
 Hashimoto, Manabu (DPRI Kyoto University, Kyoto)
 Hasumi, Tomohiro (Waseda University, Tokyo)
 Helmstetter, Agnes (Columbia University, Palisades)
 Huang, Chi-Shen (National Central University, Taipei)
 Imanishi, Kazutoshi (AIST, Tsukuba)
 Imoto, Masajiro (NIED, Tsukuba)
 Itaba, Satoshi (AIST, Tsukuba)
 Iwata, Takaki (ISM, Tokyo)
 Jiang, Minmin (Peking University, Beijing)
 Johnston, Steven (Victoria University, Wellington)
 Kanao, Masaki (NIPR, Tokyo)
 Katsumata, Kei (Hokkaido University, Sapporo)
 Kawada, Yusuke (Tohoku University, Sendai)
 Ma, Li (China Earthquake Administration, Beijing)
 Maeda, Kenji (MRI-JMA, Tsukuba)
 Marsan, David (Université de Savoie)
 Matsu'ura, Ritsuko (ADEP, Tokyo)
 Matsuzawa, Toru (Tohoku University, Sendai)
 Miyazawa, Masatoshi (DPRI Kyoto University, Kyoto)
 Murakami, Junko (SRA, Wellington)
 Murru, Maura (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome)
 Nalbant, Suleyman (University of Ulster, UK)
 Nanjo, Kazuyoshi (ISM, Tokyo)
 Neri, Giancarlo (Messina University, Messina)
 Ogata, Yosi (ISM, Tokyo)
 Rhoades, David (GNS, Wellington)
 Rotondi, Renata (CNR IMATI, Milano)
 Schorlemmer, Danijel (ETH, Zurich)

Scotti, Oona (IRSN, Fontenay-aux-Roses, France)
 Shi, Yaolin (GUCAS, Beijing)
 Shimazaki, Kunihiro (ERI, Tokyo)
 Tanaka, Sachiko (NIED, Tsukuba)
 Tamura, Yoshiyasu (ISM, Tokyo)
 Toda, Shinji (AIST, Tsukuba)
 Tsuruoka, Hiroshi (ERI, Tokyo)
 van Stiphout, Thomas (ETH, Zurich)
 Veen, Alejandro (UCLA, Los Angeles)
 Vere-Jones, David (SRA, Wellington)
 Wang, Ting (China Earthquake Administration, Beijing)
 Wiemer, Stefan (ETH, Zurich)
 Woessner, Jochen (California Institute of Technology, Pasadena)
 Yang, Wen-Hsi (National Central University, Taipei)
 Yoshida, Akio (NIPR, Tokyo)
 Zechar, Jeremy (USC, Los Angeles)
 Zhou, Shiyong (Peking University, Beijing)
 Zhuang, Jiancang (ISM, Tokyo)
 Zuniga, Ramon (Univ. Nacional Autonoma de Mexico, Queretaro)

Programme

- Tutorial, Utsu Memorial and Kenote lectures (cf., the blue colored frame) are sponsored by Transdisciplinary Research Integration Center , Research Organization of Information and Systems: Anyone is welcome to attend.
- We had two poster core sessions on Tuesday and Thursday. The size of the poster is 120cm in WIDTH and 190cm in HEIGHT in maximum.
- 20 minutes for each oral talk, 10 minutes for discussion.

Date Time

Jan. 9 (Mon)

Afternoon Registration
 Evening Welcome Party

Jan. 10 (Tue)

09:45-10:00 Opening remarks
 10:00-11:00 ***Tutorial 1**, D. Vere-Jones: Stochastic models for the analysis of seismicity data
 11:00-11:30 ***Utsu Memorial 1**, R. S. Matsuura: The late Prof. Tokuji Utsu: His career with geophysics and seismology
 11:30-12:00 ***Utsu Memorial 2**, Y. Ogata: Contributions of Professor Tokuji Utsu to statistical seismology and recent developments

12:00-13:30 Lunch

Statistical Modeling and Forecasting of Earthquake 1

13:30-14:00 K. Shimazaki: Long-term earthquake forecasts in Japan (1996-2005) Statistical models and forecasting of Earthquake 1

14:00-14:30 S. Wiemer, M. Cocco, G. Gruenthal, I. Main, W. Marzocchi, M. Gerstenberger, D. Schorlemmer: Towards an European framework for testing earthquake forecasts

14:30-15:00 M. Imoto: Statistical models based on the Gutenberg-Richter a and b values for estimating probabilities of moderate earthquakes in Kanto, Japan [abstract]
[presentation]

15:00-15:30 S. Zhu, Y. Shi: Improved stress release model and its application to earthquake prediction in Taiwan

15:30-15:45 Coffee break

15:45-16:15 D. A. Rhoades: Seismogenesis, scaling and the EEPAS model

16:15-16:45 S. Hainzl, T. Kraft: Analysis of complex seismicity pattern generated by fluid diffusion and aftershock triggering

16:45-17:15 Y. I. Chen, C. S. Huang: Time-dependent b value for aftershock sequences

17:15-17:45 K. Z. Nanjo, B. Enescu, R. Shcherbakov, D. L. Turcotte, T. Iwata, Y. Ogata: Aftershock relaxation for Japanese and Sumatra earthquakes

17:45-19:30 Dinner

19:30-22:00 Poster Session Core Time, Group A

G. Adelfio, M. Chiodi: Earthquakes clustering based on maximum likelihood estimation of point process conditional intensity function

R. Brownrigg: A statistical seismology software suite

Y. I. Chen, C. S. Chen, W. H. Yang, K. F. Ma The relationship between the earthquake rate change and the gradient of stress change

Y. I. Chen, C. S. Huang Analysis of aftershock hazard using power prior information

A. Christophersen, E. G. C. Smith Are foreshocks really mainshocks with larger aftershocks?

B. Enescu, J. Mori, M. Miyazawa, T. Shibutani,

K. Ito, Y. Iio, T. Matsushima, K. Uehira Quantifying the early aftershock activity of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake (Mw6.6)

K. Imanishi, W. L. Ellsworth Earthquake source parameters of microearthquakes at Parkfield, CA, determined using the SAFOD pilot hole seismic array

T. Iwata, H. Katao The correlation between the phase of the moon and the occurrences of microearthquakes in the Tamba region

S. Johnston An accelerating moment release version of the stress release model

M. Kanao, Y. Nogi, S. Tsuboi Spacial distribution and time variation in seismicity around Antarctic Plate before and after the M9.0 Sumatra Earthquake, 26 December 2004

M. Murru, R. Console, F. Catalli, G. Falcone Application of physical and stochastic models of earthquake clustering to regional catalogs

Y. Ogata Relative quiescence reported before the occurrence of the largest aftershock (M5.8) with likely scenarios of precursory slips considered for the stress-shadow

covering the aftershock area

Y. Ogata Toward urgent forecasting of aftershock hazard: Simultaneous estimation of b-value of the Gutenberg-Richter's law of the magnitude frequency and changing detection rates of aftershocks immediately after the mainshock

D. Schorlemmer, M. Gerstenberger, T. Jordan,

E. Field, S. Wiemer, L. Jones, D. D. Jackson From the testing center of regional earthquake likelihood models to the collaboratory for the study of earthquake predictability

S. Tanaka Tidal triggering of earthquakes precursory to the 2004 Mw = 9.0 Off Sumatra earthquake

A. Veen, F. P. Schoenberg Estimation of spatial-temporal point process models using the (stochastic) Expectation Maximization algorithm and its application to California earthquakes

T. Wang, L. Ma, Y. Li A study on the limited power law model [abstract] [poster]

J. D. Zechar, T. H. Jordan Comparative testing of alarm-based earthquake prediction strategies

F. R. Zuniga Interevent times within aftershock sequences as a reflection of different processes

Jan. 11 (Wed)

09:15-09:45 L. Ma, T. Wang, B. Yin, W. Wang, J. Huang, C. Zhang: Exploratory statistical analysis with the data of various observations in Tangshan well

Statistical Modeling and Forecasting of Earthquake 2

09:45-10:15 D. Marsan, G. Daniel, M. Bouchon: Seismicity shadows: Observations and modelling

10:15-10:45 D. Schorlemmer, M. Gerstenberger, T. Jordan, D. Jackson, S. Wiemer, Y. Kagan, L. Jones, N. Field: From the testing center of regional earthquake likelihood models (RELM) collaboratory for the study of earthquake prediction (CSEP) experiment in intermediate-term earthquake prediction: Possibility of an M8 earthquake occurring off the coast of eastern Hokkaido in 2005

10:45-11:15 K. R. Felzer: The snowball effect: Statistical evidence that big earthquakes are rapid cascades of small aftershocks

11:15-11:30 Coffee break

11:30-12:30 *Tutorial 2, J. Dieterich: Tutorial on stress- and state-dependent model of earthquake occurrence: Part1-model and formulation

12:30-14:00 Lunch

14:00-15:00 *Tutorial 3, J. Dieterich: Tutorial on stress- and state-dependent model of earthquake occurrence: Part2-applications

15:00-15:30 M. Bebbington, K. Borovkov: Producing Omori's law from stochastic stress transfer and release

Earthquake Triggering 1

15:30-15:45 Coffee break

15:45-16:15 R. Console, M. Murru, F. Catalli: Applying the rate-and-state friction law to an epidemic model of earthquake clustering

16:15-16:45 A. Helmstetter, B. E. Shaw: Estimating stress heterogeneity from aftershock rate
 16:45-17:15 S. Toda, R. S. Stein, K. Richards-Dinger, S. Bozkurt: Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer
 17:15-17:45 K. Maeda: Estimation of the fault constitutive parameter $A\sigma$ and stress accumulation rate from seismicity response to a large earthquake
 18:00-21:00 Party

Jan. 12 (Thr)

Breakfast

09:15-09:45 M. Jiang, S. Zhou: A new multiple dimension stress release statistic model based on co-seismic stress triggering

Earthquake Triggering 2

09:45-10:15 M. Cocco, L. Chiaraluce, Fl. Catalli: Seismicity migration and time-dependent stress transfer: Supporting and conflicting evidence from the Umbria-Marche (Central Italy) seismic sequence

10:15-10:45 S. S. Nalbant, S. Steacy, J. McCloskey: Real-time application of Coulomb stress modelling and related issues

10:45-11:15 E. S. Cochran: Tidal triggering of earthquakes: Response to fault compliance?

11:15-11:30 Coffee break

11:30-12:00 M. Miyazawa: Dynamic triggering with no and/or little time-delay

12:00-12:30 S. Gross: Statistical measures of dynamic triggering

12:30-14:00 Lunch

14:00-14:30 J. Gomberg, K. Felzer, E. Brodsky Earthquake dynamic triggering and ground motion scaling

14:30-15:30 *Keynote Lecture , J. Dieterich: Stress- and state-dependence of earthquake occurrence

15:30-15:45 Coffee break

15:45-16:15 J. Woessner, S. Wiemer, S. Toda: Correlating properties of aftershock sequences with earthquake physics

Physical Modeling of Earthquakes

16:15-16:45 T. Matsuzawa, N. Uchida, T. Okada, K. Ariyoshi, T. Igarashi, A. Hasegawa
 Quasi-static slips before and after large interplate earthquakes inferred from small repeating earthquake data

16:45-17:15 Y. Ben-Zion, V. Lyakhovsky Analysis of aftershocks in a lithospheric model with seismogenic zone governed by damage rheology

17:15-17:45 W. L. Ellsworth, S. H. Hickman, M. D. Zoback: Seismology in the source: The San Andreas Fault observatory at depth

17:45-19:30 Dinner

19:30-22:00 **Poster Session Core Time, Group B** (see below)

C. Beauval, S. Hainzl, F. Scherbaum: The impact of the spatial uniform distribution of seismicity on probabilistic seismic hazard estimation

F. Catalli, R. Console: An application of the Dieterich model for seismicity rate change to the

- 1997 Umbria-Marhe, central Italy, seismic sequence
- N. Chopin, E. Varini: Particle filtering of a state-space model for seismic sequences
- S. D'Amico, D. Caccamo, F. Parrillo, F. M. Barbieri, C. Lagana: Anomalies in the temporal decay of seismic sequences
- S. D'Amico, D. Caccamo, A. Zirilli, F. Parrillo, S. M. I. D'Amico, A. Alibrandi: Some analysis of seismicity in the Sumatra area
- T. Hasumi: Spatial-temporal statistics between successive earthquakes on 2D Burridge-Knopoff model
- S. Itaba, K. Watanabe: Seismicity cycle and large earthquake
- S. Zhou, R. Robinson, M. Jiang: The role of fault interactions in the generation of the 1997 Jiashi strong earthquake swarm, Xinjiang, China
- Y. Kawada, H. Nagahama: Temporal power-laws on preseismic activation and aftershock decay affected by transient behavior of rocks
- N. Kuehn, S. Hainzl: The effects of fault zone coupling on seismic cycling and aftershock generation
- G. Neri, B. Orecchio, D. Presti: Coulomb stress changes from grouped magnitude 7+ earthquakes in south Italy
- R. Rotondi, G. Zonno: Bayesian analysis of the local intensity attenuation
- D. Gospodinov, R. Rotondi: RETAS: a restricted ETAS model inspired by Bath's law
- O. Scotti, C. Clement, F. Bonilla: Earthquake recurrence models for faults: The crucial role of intermediate magnitude earthquakes in seismic hazard assessment
- H. Tsuruoka: Development of seismicity analysis software on Unix, Windows and Mac OS X
- T. van Stiphout, S. Wiemer: Testing the precursory seismic quiescence hypothesis
- D. Vere-Jones, J. Murakami, A. Christophersen: A further note on Bath's law
- A. Yoshida, G. Aoki: Enhancement and diffusion of seismic activity around major intraplate earthquakes in Japan law
- J. Zhuang, Y. Ogata: Properties of the probability distribution associated with the largest event in an earthquake cluster law
- G. Zoller, Y. Ben-Zion, S. Hainzl, M. Holschneider: Properties of seismicity and surface deformation generated by earthquakes on a heterogeneous strike slip fault in elastic half space law

Jan. 13 (Fri)

08:30-17:00 **Excursion**

(JAMSTEC 1; JAMSTEC 2)

統計地震学研究プロジェクト

外部評価委員会報告書

2006 年 12 月

目次

1 序文	47
1.1 外部評価委員会	48
1.2 統計地震学研究グループ	48
1.3 評価項目	48
はじめに	49
学術的活動の質とインパクト	49
統計学的理論と方法	49
1.4 地震学的理論と方法	50
2 共同研究活動と社会的貢献	52
2.1 研究所の対外的活動	52
2.2 社会的貢献	53
3 次世代への展開	54
4 将来の活動計画に対するコメントと提案	55
5 総括と推奨事項	56
参考文献	58
付録 1: 外部評価スケジュール	59
付録 2: 委員会に提出された研究資料	59
付録 3: 第 4 回統計地震学国際ワークショッププログラム	81

1 序文

統計数理研究所は平成 16 年 4 月に大学共同利用機関法人情報・システム研究機構の一研究所として再編された。これに先立ち、平成 15 年度には今後の統計数理の発展の方向を考慮して、「予測と発見」のためのモデリングや推論アルゴリズムなどの研究および統計ソフトウェアの開発を、ゲノム科学や地球・宇宙科学の具体的課題の解決を目指す組織として予測発見戦略研究センターを設置した。設立時は

- ・ ゲノム解析研究グループ
- ・ 動的磁気圏研究グループ
- ・ 地震予測研究グループ

の 3 グループによってスタートしたが、平成 17 年度には新たに 1 グループを加えるとともに

- ・ ゲノム解析グループ
- ・ データ同化グループ
- ・ 地震予測解析グループ
- ・ 遺伝子多様性解析グループ

に再編した。

このようなプロジェクト研究に関しては、自ら立てた目標、計画をどの程度まで実現したかの評価が不可欠である。今後順次、4 グループの中間評価、プロジェクト終了時の評価を実施していく予定であるが、その第 1 弾として平成 17 年度に外国人研究者 3 人、日本人研究者 2 人からなる外部評価委員会を構成し、地震予測解析グループの中間評価を実施した。評価委員会に先立ち評価委員には、評価のための資料を送付した。また、評価委員会に先立ってグループのリーダーである尾形教授を中心として、「第 4 回統計地震学国際ワークショップ」を開催し、グループメンバーの報告を評価委員に聞いていただく機会を設けた。このワークショップでは、尾形教授と 3 名のポスドク研究員が発表し、その後、評価委員からの質問に答えるという形で、研究内容に関しての実質的な評価を行った。このほか、外部有識者からの意見聴取のために、評価委員会では松浦律子博士へのインタビューも行われた。

評価委員会の委員長であるデーヴィッド・ベアージョーンズ教授(ビクトリア大学・統計研究アソシエイト有限会社、ニュージーランド)を中心にまとめられた英文の報告書は平成 18 年 3 月末に届けられた。添付している報告書の和訳は、民間翻訳会社により納入された和訳原文を統計数理研究所により専門的表現を監修したものである。諸事情により、評価報告書の公開が遅れたことお詫びしたい。

評価は評価者および評価を受けるものにとって多大の負担を伴うが、評価結果を将来の改善に活用してはじめてその苦労が報われることになる。統計数理研究所は研究グループのメンバーとともに、今回の評価結果を真摯に受け止め今後の改善に繋げたいと考えている。

最後になるが、この評価のために貴重な時間と労力を割いてくださった評価委員の方々には厚くお礼を申し上げます。

平成 18 年 8 月 31 日

統計数理研究所長
北川 源四郎

1.1 外部評価委員会

マッシモ・コッコ	国立地球物理火山研究所	イタリア
ウィリアム・エル・エルスワース	米国地質調査所	アメリカ合衆国
橋本 学	京都大学防災研究所地震予知研究センター	日本
島崎 邦彦	東京大学地震研究所	日本
デーヴィッド・ベアージョーンズ (委員長)	ビクトリア大学・統計研究アソシエイト有限会社	ニュージーランド

1.2 統計地震学研究グループ

尾形 良彦	統計数理研究所	教授
遠田 晋次	統計数理研究所	客員教授(2005－)
	産業技術総合研究所活断層研究センター	チームリーダー
村田 泰章	統計数理研究所	客員助教授 (2003－2004)
	産業技術総合研究所地質調査総合センター	グループ長
岩田 貴樹	統計数理研究所	プロジェクト研究員 (2005－)
庄 建倉	日本学術振興会	外国人特別研究員 (2001－2005)
楠城 一嘉	日本学術振興会	特別研究員(PD) (2003－)
若浦 雅嗣	総合研究大学院大学複合科学研究科	大学院生
田中 潮	総合研究大学院大学複合科学研究科	大学院生
忽那 映子	統計数理研究所	研究支援推進員

1.3 評価項目

- (1) 学術的活動
 - (a) 統計学上の成果と貢献
 - (b) 地震学上の成果と貢献
 - (c) 共同研究
- (2) 社会的貢献
- (3) 次世代への展開
- (4) 将来の活動計画の見通しと提案

はじめに

1. 評価委員会は2006年1月16日（月曜日）に統計数理研究所を訪問し、北川所長、松浦律子博士、尾形良彦教授、庄建倉（J. Zhuang）博士、岩田貴樹博士および楠城一嘉博士の報告を聴取した。評価委員会は月曜日の夕方に北川所長と統計地震学研究グループに、評価の概要を口頭で与えた。その翌日には、評価委員会は半日の会合を行い、評価報告書の構成について検討し、その後、尾形教授に出席してもらい、具体的な項目について試問を行った。遠田晋次教授と村田泰章博士は出席することはできなかったが、彼らの論文は評価委員会に提出された。さらに、遠田博士は評価に先立ち開催された統計地震学ワークショップの実行委員として主要な役割を果たしており、その際、各評価委員と非公式に会見している。委員会が検討した資料の詳細と委員会への報告の詳細の概要は、付録2に示す。

評価報告の本体は、ほぼ評価項目の順に、セクションに分けて記述されている。

2. 評価委員会の各委員は、北川所長に対して、本評価に参画する機会を頂いたことに感謝の意を表すとともに、所長をはじめ研究所職員および統計地震学研究グループに対して、丁寧な対応について感謝の意を表す。さらに、委員は評価の実施に先立ち、十分に配慮し徹底した評価資料を準備していただいたことに感謝する。

学術的活動の質とインパクト

3. 評価委員会が評価依頼を受けた業績は、2003年から2005年の間に発行または発行予定になった論文、学会予稿、および評価委員会において委員に口頭報告された研究を対象とする。資料の概要は付録2に示す。業績は統計学と地震学の二つの観点から別個に評価し、最後に総括を示す。

統計学的理論と方法

4. 統計地震学研究グループの業績は、特に空間統計と点過程などの分野で、統計学界において高く評価されている。本グループの業績は、特定の分野（地震学）での必要性によって新しい統計手法の発展が導かれた、一つの実例となっている。地震学では、日本およびその他の地域において、20~30年前から広範囲かつ高精度の地震カタログが利用可能となっている。このカタログから導かれる地震発生の特徴として、高次元性、ベキ従属性、高い集中性および近似的な自己相似性があることが挙げられる。このような特徴のため、従来の統計手法の枠組みでは解決できない問題が生じ、このような対象を効果的に解析するための新しいモデルと方法の開発が求められるようになった。尾形教授と彼の同僚は、これまでこれらの問題を解決するために基礎的な研究を続けてきた。ファイナンス、医学、人口問題など他の多くの分野で、同様なデータが得られるようになっているため、これら他分野の研究者と有効に交流していくことができるようになれば、本研究グループの研究成果の重要性は高まっていくであろう。本グループの成果は、観測データに基づいて行われる研究分野で、統計的方法がいかに役立つかを示す顕著な実例であるとともに、地震学研究者と共同した本研究グループの研究能力のあかしである。

5. 尾形教授の論文は、*Journal of the American Statistical Association*, *Biometrika*, *Journal of the Royal*

Statistical Society といった権威のある論文誌、および点過程や空間統計に関する専門誌や研究集会の報告集に掲載されている。尾形教授が統計学に関する国際的な会議に頻繁に招聘されていることは、この分野での権威であることを証明している。数年前から統計学が専門の庄博士が加わって研究しているが、最近の研究グループでは、統計学の側面というよりも地震学の側面の研究者が加わっている。概して、本研究グループの研究活動が拡大するに従い、統計学において先進的なアイデアを開拓していくこと、このアイデアが地震学や他の分野の研究に有効に利用できることを示すこと、また本研究グループの統轄と管理を行うことなど、これらの非常に大きな負担が尾形教授の双肩にかかっている危険性がある。この観点から、地震学だけではなく、統計学の面についても、中堅の同僚を加えれば、本研究グループの体制が強化されるものと考えられる。

6. 本研究グループの成果の中で、特に重要な 3 つの貢献が挙げられる。空間的に不均質で時間的に急速に変化する時空間点過程モデルのパラメータのベイズ的推定方式の開発 ([2], [3])、集中型の点配置データをクラスタ成分とバックグラウンド成分に分離する確率的除群アルゴリズムの開発 ([4], [5])、そして時間ないし時空間点過程モデルと実際のデータとの食い違いを研究するための残差分析に関する方法の開発 ([1], [2], [5]) である。これらは、始めは ETAS (epidemic type aftershock sequence) モデルについて考案された方法であったが、かなり広汎な種類のモデルや多くの別種の状況に拡張して適用できるものである。たとえば、確率的除群法は、時間の経過とともに空間クラスタが形成されるような多くの状況に対して、潜在的に有効である。また、本研究グループの残差解析法に関する成果は、現在の空間統計学の中心的研究課題に対する先駆的な貢献をしているだけでなく、研究者の興味を集めている問題に対して重要な貢献を果たしている。

7. 上記の 3 つの研究のすべてにおいて、本研究グループの成果は第一級のものであり、本研究グループを高次元点過程問題を取り扱う実用的な統計手法の開発を世界的にリードする研究グループのひとつと位置づけている。彼らは、これら以外にも有益な成果を得ている。たとえば説明変数に誤差を含む更新過程モデルの取り扱い、および内部発生的な変数 (クラスタ) と外因的な変数 (外的変数の予測式) を組み合わせによる点過程データの取り扱いなどである。GPS やその他の衛星観測による地殻変動データが蓄積されている。その結果、地震学における近い将来の研究の標的として、地殻変形の解析やそれと地震発生データと組み合わせた解析が行われることが予測される。統計数理研究所、とりわけ統計地震学グループは、このような試みに取り組むための主導的な役割を演じるように戦略的に位置づけられることになる。

1.4 地震学的理論と方法

8. 統計数理研究所の統計地震学グループは、地震活動の時空間変化をモデル化することにおいて、精力的で、業績の多い先進的な研究グループとして、地震学界において国際的に認識されている。研究者の数は少ないが、グループの研究発表件数はかなり多い。博士研究員が加わったのが 2004 年または 2005 年の年度末であったにもかかわらず、論文リストによると、グループの中心的な 4 人の研究者は、2003 年から 2005 年の間に 32 件を超える論文を発表している。高い水準の研究活動が維持されていることは、投稿論文または印刷中の論文の数に現れている。本研究グループが研究論文を投稿している学術誌は、国際的に高い水準をもち、研究内容に適合し、研究成果の公表に有効で、他の地球物理学の研究者との交流をはかるのに適したものである。

9. 地震学の観点から、本研究グループの作成した評価資料レポートで「目標」または「動機」として掲げられた課題は、非常に重要で、国際的な地震学の研究グループから注目され、研究を引き出すような優先度の高

い課題に絞られている。目標はロバストであり、関連分野の先進的な研究を誘導することのできる適切性がある。これらの課題は地球物理学の多くの研究者が取り組むべきものである。

10. 地震活動の時空間変化の解析に関する研究成果は特に優れている。本研究グループは、過去に遡った場合及びリアルタイムのいずれの場合においても非常に重要で実用的な解析を可能にする有用なモデルと計算ツールをいくつか開発している。これらの中でも特に重要なのが ETAS モデルで、地震活動パターンを解析し、バックグランド地震活動とその空間分布を識別し、余震や前震の発生強度を定め、地震発生率の時空間変化をモデル化することができる強力なツールである。今や ETAS モデルは、世界中のいろいろな地域(イタリア、ドイツ、フランス、スイス、アメリカ合衆国)で使われ、このことで一層、大学や研究機関との国際的な連携が促されている。このモデルが世界各地の異なった変動帯における多数の地震活動に適用されているという事実は、モデルの完成度が高く、想定された研究目的を達成するのに有効であることを示している。確率的除群と HIST (階層的時空間) ETAS モデルの更なる発展も非常に重要で、促進されるべきである。

11. これらの研究から得られた重要な成果のひとつに、統計モデルを診断ツールとして使い、地震パターンの異常な傾向やその他の特徴を抽出することがある。ETAS モデル自体は、余震活動をはじめとした地震活動の異常な特徴を検出するため、及び地震活動の静穏化を同定し定義するための非常に有用なツールである。実際の地震の発生率と ETAS モデルにより予測された発生率を比較することは、地震活動変化を定める過程を物理学的に解明する興味深い手がかりとなる。地震の発生率変化と地殻の応力変化との間に関連性があることを本研究グループは強く主張し、最近の発表論文でも指摘している。特に、ETAS モデルを基準にして定義される相対的な静穏化現象は、地震学の分野で議論されている「ストレスシャドー」の現時点における最も適切な定義と物理学的な解釈を与えている。言い換えると、相対的静穏化現象がストレスシャドーの最もロバストな定義であり、提案された数値的な取扱いが地震の発生率低下を識別するための最良の解法である。これは、関係分野の学界でその妥当性が認識されている。

12. 本研究グループは、新たな発想を展開することに関して良好な成績を持っている。たとえば、地震により引き起こされる応力変化に由来する地震活動の変化を物理学的に解釈することは、非常に重要で、地震学および地球物理学の多くの研究者の関心を集めている課題である。評価委員会は、本研究グループに遠田博士が関与していることを高く評価する。彼は、クーロン破壊ストレスのモデル化、及び岩石実験から導かれた摩擦法則に基づく物理学的モデルを使った地震の発生率変化の理論的予測により、すでに専門分野に多大な寄与をしている。たとえば、詳細な統計解析を実施するために、クーロン破壊ストレスの変化パターンを参照し標的領域を選択する本研究グループの研究結果は、非常に興味深いものである。

13. 尾形教授が開催した第4回国際統計地震学 (STATSEI-4) ワークショップでも証明されたように、本研究グループの研究結果の成功は、国際的な主要研究者により認知されている。評価委員会の全委員は、このワークショップに参加することで、各参加者の本研究グループの研究に対する評価の印象を感じ取るとともに、本研究グループの若手研究者の発表を聴取する良い機会を得た。評価委員会としては、本研究グループは関連分野の学界に大きなインパクトを与え、この分野を新しい方向へリードしていると考えている。

14. 若手研究員の研究成果の水準は高く、将来も約束されている。特に、庄 (Zhuang) 博士は新しい側面の研究に大きな貢献を果たし、本研究グループの研究テーマに深く参画している。その後参画した博士研究員たちも、将来が約束され、熱心で、高い意欲の持ち主である。彼らはそれぞれ別々の研究分野から本研究グループに参加し、本研究グループの戦略的研究計画に参加している。たとえば、岩田博士の地球潮汐の地

震誘発現象の研究は統計解析の成果としてはしっかりしているが、物理学的な解釈に関して研究の余地がある。地震の誘発メカニズムの研究は非常に重要であるが、現在の段階では、研究内容は十分現実的なものとなるに至っていない。恐らくこの研究の将来的な方向は、任意の応力率のもとでの Dieterich のモデルと ETAS モデルを統合したものに発展していくと考えられる。楠城博士の Pattern Informatics (PI) による地震活動異常の研究は、本研究グループ全体の主要な戦略的研究計画とは少し外れている印象であるが、PI 法と ETAS 法を系統的に比較研究することは非常に興味深いと考えられる。全般的にみて、評価委員会は、さらに新しい学生や博士研究員が本研究グループに参画し、新規な視野や方向性（たとえば、地震災害の時間依存性）へ展開されることを期待する。

15. 地球シミュレータに対する本研究グループの関与や共同研究について、松浦律子博士により評価委員会に報告された。興味深い研究計画であり、この共同研究が推進される必要がある。このことから提起されるように、より広い課題として、統計数理研究所の研究グループが地震予測の有効性に関する評価や GPS データの解析などの問題について、どのように国内の他の研究グループと共同作業できるかということがある。このことは報告の後半で詳細に採り上げる。現在の仕事の状況と周囲からの要請に対して、現状の陣容は小さすぎるため、このような方針を実施するには、本研究グループの規模を大きくする必要がある。

2 共同研究活動と社会的貢献

16. 本研究グループは国内および海外の統計学や地震学の先導的な研究者と有効な共同研究を行っている。さらなる共同研究が期待できる。特に ETAS モデルや本研究グループが開発したその他の統計モデルの実効性を試してもらうことが考えられる。本研究グループの主要な社会的貢献は、一般的な意味において、地震活動の解析に対して応用可能な統計ツールを次々と開発してきたことである。実際、尾形教授自身は地震予知連絡会の委員としてその解析で活躍しており、本研究グループが開発した ETAS モデルやその他の統計モデルは、気象庁、地震調査委員会、地震防災強化地域判定会が実施する、地震活動度に関する業務解析や評価に利用されている。以下に、これらの点について詳述する。

2.1 研究所の対外的活動

17. 本研究グループは、長年にわたり、Vere-Jones 教授（ニュージーランド）、Baddeley 教授（オーストラリア）、Ma Li 教授（中国）、Chen 教授（台湾）、Console 博士（イタリア）、Hainzl 博士（ドイツ）等の、世界のトップレベルの統計学者や地震学者との共同研究を行っている。日本国内では、本研究グループは、京都大学の尾池教授と片尾助教授や東京大学地震研究所の島崎教授が主宰する地震研究者のグループ、防災科学技術研究所の井元博士、気象庁気象研究所の前田博士など地震研究者と定常的に交流している。さらに、東京工業大学の間瀬教授のような統計学者とも密接な連携をはかっている。

18. 評価に先立って行われた第 4 回統計地震学ワークショップ (Statsei4) では、研究所間の交流をはかるという点で、非常に重要な機会が提供された。本研究グループは Dieterich 教授を招き、断層の摩擦構成則に関するチュートリアル講演を依頼した。これは本研究グループと Dieterich 教授や断層の振る舞いから地震活動度をモデル化すること考えている研究者との間で、将来、実りある共同研究が行われることを展望したものである。日本をはじめ、中国、フランス、ドイツ、イタリア、メキシコ、ニュージーランド、スイス、台湾、イギリスおよ

びアメリカ合衆国などの関連機関から 65 人を超える研究者が、3 日間の会議と 1 日間の巡検旅行に参加した。会議でのいくつかの講演では、本研究グループに対して、現在進行中または計画中の各種の地震モデルのリアルタイム予測試験に参加することの要請があった。Wiemer 博士はヨーロッパでの地震予報モデルの実験の枠組み(NERIES プロジェクト)について紹介し、Schorlemmer 博士はカリフォルニア州における各種の地震ポテンシャルモデルの予測試験に関する地域別地震尤度モデル (RELM) プロジェクトの初期的な取り組みの要約について講演し、地球的規模の地震予測可能性の共同研究 (CSEP) にプロジェクトを拡張することに言及した。現在、17 種類のモデルについて検討中で、その中には UCLA の研究グループから ETAS モデルを含めることが提案されている。さらに、本研究グループが開発したソフトウェアを収録した CD-ROM がワークショップの参加者に配布されたことで、参加者と本研究グループとの共同研究開始の機会を増すばかりでなく、本研究グループが開発した統計ツールの普及が促進されることが期待される。将来開催されるワークショップでは、初心者に対するトレーニングセッションの開催も検討されるものと考えられる。

19. 本研究グループは他の研究グループと公式の共同研究協定を締結して連携しているわけではない。しかしながら、過去には、例えば、ニュージーランドの Victoria University とは、統計地震学研究の促進のために、研究所全体として公式な共同研究協定を締結したことがある。現時点では、Statsei4 ワークショップの成功が示すように、本研究グループはこの分野で影響力を持つ主要な国際的研究グループと非公式な共同研究を行っている。公式の研究契約を考慮する場合には、研究所が実務面で強力に支援するべきであろう。

2.2 社会的貢献

20. 尾形教授は地震予知連絡会の委員で、3 ヶ月ごとに会議に参加し、日本における最近の地震と地殻の活動について、意見交換と情報交流を行っている。尾形委員は最近の幾つかの大地震において断層の前駆的非地震性すべりによる地震活動の活発化や静穏化に関する解析を報告している。非地震性のすべりの兆候を示す証拠は未だ確認されていないが、この指摘が他の委員から注目を集めている。地震性のすべりによる地震発生の誘発や抑制については十分研究されており、予知のために、それほど顕著ではない変化が探されている。GPS やその他の地殻変動データの解析は、本研究グループの次の研究目標であり、地震活動の変化を用いた地震前のすべりに関する現在の研究に効果的につながるものと考えられる。地震活動度の変化から独立に推論される非地震性のすべりの存在を地殻変動データが示したならば、地震予知における画期的な発見となるであろう。

21. 気象庁 (JMA) は、地震活動の業務解析のために尾形教授が開発した ETAS モデルを利用している。ETAS モデルは、とりわけ群発性の地震の解析に効果的である。地震防災強化地域判定会の月例の打ち合わせ会で、ETAS モデルに基づく東海地方の地震活動度の残差解析の結果が、最近の地震活動の評価結果として定期的に報告されている。日本国内の地震活動と地殻活動を毎月評価する地震調査委員会 (ERC) では、ETAS モデルに基づく地震活動の解析が報告されている。

22. 大地震が発生した後の余震発生の確率予報は、気象庁と地震調査委員会が発表する。この予報は ETAS モデルではなく、大森・宇津の公式を使っているが、気象庁と地震調査委員会は尾形教授が開発したパラメータの最尤推定を適用している。地震調査委員会 (2005) は、「全国を概観した地震動予測地図」を公開し、5 年ごとに改訂する予定である。この地図には、大地震発生について確率的推定が利用され、主に地震再発の更新過程モデルに基づいて計算されている。改訂のため、確率的推定の不確実性の問題が議論さ

れるであろう。また、古地震データの解析法に関する尾形教授の統計的研究成果が将来の方向性の有用な指針となるであろう。

23. 本研究グループのメンバーは、カリフォルニア州の RELM のようなリアルタイム予測や評価法の試験、または欧州の NERIES プロジェクトの計画のような国際的なプロジェクトへの参加要請を受けている。同様な統計モデルや予測の試験プロジェクトの機運は日本国内にもある。このようなプロジェクトへの参画で本研究グループの専門性が求められるが、現在のような人員が限られた陣容では儘ならない恐れがある。

3 次世代への展開

24. 本研究グループに参加した大学院生や博士研究員に対する質の高い教育訓練が行われていることについて、評価委員会は満足しているが、そのメンバー数が少ないことには不満を感じている。統計地震学の若手研究者は少なく、特に日本国内での少なさを評価委員会は実感した。統計地震学の研究者を増やしていくことが改善面の最優先事項である。当然、このことは本研究グループの努力だけでは、容易に解決することはできない。評価委員会は本研究グループ及び研究所が、学生がこの分野に関心をもつようになる機会を増やすことを提案する。

25. 評価委員会は統計数理研究所が市民や若手科学者を対象とした公開講座を毎年開催していることについて注目している。このような講座は、本研究グループの活動を公表する重要な機会と考えられる。統計数理研究所の研究グループ間の調整が必要であるが、評価委員会は一般的な問題として、統計数理研究所および特に統計地震学グループの功績と地震関連科学における成果の重要性について、若手の科学者に実感させる機会をより有効に利用することを推奨する。

26. 日本地震学会は、毎年、春季と秋季に大会を開催する。地震学に関するあらゆるテーマについて 500 件を超える論文が報告される。したがって、統計地震学がこの大会で脚光を浴びることは容易ではない。本研究グループは、この目的で地震学会の提供する機会を利用することができる。地震学会は、学部生や大学院の修士課程の学生を対象とする地震学に関するサマースクールを毎年開催している。サマースクールの主題は、会員からの提案または要請により選択される。他の学会でも、同様のセミナーが開催される。統計地震学グループは、セミナーの主題として統計地震学を定期的を選択することを、地震学会やその他の学会に依頼することができるはずである。このような活動への本研究グループの参加には、研究所による支援が必要である。

27. 若手科学者の関心を集めることには、総合研究大学院大学とその他の大学との単位互換プログラムを利用できる。その最良の方法は、単位互換プログラムを有する大学の学生に対して、連続講義を行うことである。統計数理研究所は総合研究大学院大学の一部の役割を担っており、統計地震学を含む統計学の各種コースが開講されている。残念なことに、現状では日本の大学で統計地震学に関する連続講義はほとんどない。それは、この分野の専門家が不足しているためである。大学の客員教授や非常勤講師は、他大学での講義を行うのにより機会である。本研究グループはこのようなプログラムを使用することを検討するべきと考える。

4 将来の活動計画に対するコメントと提案

28. 以上のように、統計数理研究所に属する統計地震学グループは、日本だけでなく国際的にも独特な位置を占めており、その将来の発展については十分考慮して検討するべきである。このグループの役割において類稀なことは、地震データに対して実効的な新しい統計的方法を開発し、この方法が地震学研究における中心的な関心事になることを目指して地震学の専門家と連携してきたことである。このことを実現するにあたって、本研究グループは、統計数理研究所の伝統的な環境と、研究所の研究者や技術者の特別な知識や技術に深く頼っている。また、グループの研究活動を拡張するように圧力をかけてきた地震学コミュニティの中で、本研究グループは十分強固な地位を占めるようになっていく。統計数理研究所の数理的な伝統は、最先端のモデリングと方法論的関わる技術的な問題を発見して解決する本研究グループの能力の背景となっている。このグループの役割を持続し強化することは、日本における先端的な研究組織としての統計数理研究所が地震学と社会にかかわる多くの実際的な問題に対して、統計学の観点から助言していくという研究所自体の役割を拡大していくことと同じように重要と思われる。

29. 地震学の研究分野は純粋な学問的研究から実際的な応用まであり、それらの目標に対して社会が投資する理由も異なる。社会からの地震専門家に対する大方の質問は、「次の地震はいつ起こるか」、「その大きさはどの程度か」、「被害を最小にとどめるには何が必要か」というようなものに集中する。このような質問に的確に答えることは、現在の我々の知識の範囲を超え、今後もその状況は続くと考えられる。地震学、地震工学および危機管理の専門家は、これらの質問に対する大まかな答えであっても十分な価値があることを認識している。地震調査員会（2005）によって最近公表された日本における長期間の地震予測は、危険度に対する現状の認識を確率論的な枠組みに統合することの例を示している。地震の脅威を低減させるために、将来に向けた進展には、物理学的モデルと統計学的モデルの結合が不可欠である。したがって、理論面および実際面の問題の両方について、幅広い地震学の課題を十分に理解した統計学者が継続的に必要になるものと考えられる。

30. 本研究グループの現在の研究プログラムの枠組みの中で、評価委員会は統計解析により高度な物理的モデルを適用するために、他の分野の研究者との共同研究を促進することを強く推奨する。第一の例として、地球内部で生じている物理現象と関連して、地震活動度の統計学的特性に対する理解を深めることが重要である。統計地震学は地震をランダム過程の一事象として取り扱い、観測地震学は個々の地震の特性に絞って研究する傾向がある。いずれの取り組みも重要であるが、特に日本においては地震関連科学の研究者の統計地震学への人気は高くない。この原因のひとつとして、個々の地震と事象群としての地震の関係に対する物理学的理解が十分でないことが挙げられる。この点から、地震活動度のモデルに、クーロン破壊応力と速度-状態依存摩擦法則を取り入れた統計地震学グループの取り組みは、先見性に富み、有益な結果が得られることが期待される。この取り組みは、強く推進していくべきである。もちろん、これは十分注意深く行う必要があり、現段階では未解決な課題もあり、地震学の他分野の研究者とともに検討を深めていく必要がある。これ以外に重要なものは、尾形教授により進められている、GPS 時系列などの地殻の変動に関する研究で、地震活動度を補完する静的な歪の蓄積過程を明らかにするものである。評価委員会は、本研究グループがこの分野の研究者との連携を深め、地震活動度と地殻変動を同時にモデル化することを推奨する。

31. 評価委員会は、モデルと予測を厳密に評価するための研究を一層推進することも、強く推奨する。地震活動度の階層的時空間モデル（HIST）は、将来が約束され、この分野の最先端の研究である。ひとつの例と

して、日本で情報に富んだ新しい地震カタログが与えられれば、クーロン破壊応力モデルを、入念に検討された評価実験のために十分用いることができる。仮説をつくるには過去に遡った評価実験が必要であるが、現状では、将来の予測に実効性のある評価実験が強く求められている。このようなプログラムは、欧州、ニュージーランドおよびアメリカ合衆国で初期的な開発段階にある。本研究グループが国際的な予測評価のプログラムに関与することにより、このような取り組みの統計的な厳密性が改善されるであろう。

32. さらに、統計数理研究所は、地震の問題に対して、あらゆる段階での関与が可能である。統計数学には、確率論的地震危険度解析のみならず、被害予測、リスク軽減および意思決定解析への適用などの分野において主要な役割を果たしうる。地球科学者の役割は、概して、地震発生の緊迫度とそれによる地震動の激しさを予測して外力を評価することに限定される。地震工学者は、建物の性能を表す確率論的モデルを開発することにより、地震動が或るレベルを超えたとき、対象とする建造物の振る舞いを明確にすることを目標とすることが多い。経済学者やリスク管理者は、社会に対する危険性を評価するときに、地球科学と工学データを組み合わせることにより、リスクモデルを作り出す。統計学者は、これらいずれにも対応可能で、既成分野の範囲を超えた知識を動員して取り組むことができる。したがって、統計数理研究所には、地震発生や関連事象に対する新しいモデルを開発するだけでなく、関連する幅広い社会問題に対応することのできる、潜在的役割がある。現在の陣容では統計地震学グループには過大な負担であるが、研究所全体として配慮すべき問題である。

33. 地震活動の統計的モデルは、日本においては既に公的な政策決定のための解析に適用されている。気象庁は、ETAS モデルを使って、日本における大地震に引き続き起こる余震の評価を行っている。地震調査委員会により 2005 年 3 月に公表された全国を概観する地震動予想地図は、地震源に対して、単純な更新過程モデルを適用することで作成されている。これらのモデルの価値が証明されることで、地震学と統計学の両面ではるかに包括的に取り扱われていくものと考えられる。地震を点とし、独立同分布する確率変数であると近似することは、確率論的地震危険度予測をするにあたり有用である。しかし、地球物理学と地質学のデータを組み合わせ、地震の過程についてより現実に近い統計的モデルと物理的モデルが得られれば、より良い結果が間違いなく得られる。

34. 統計数理研究所が関与すべき一例を象徴的に言えば、社会にとっての心配事は、断層が破壊することよりも、地表が揺れることである。地面の揺れの強さの予測は、あらゆる建造物の耐震設計要件に影響する。日本では毎年、地震による人命と財産を保護するために、建築技術に何兆円も投資されている。十分な対策が行われないことの損失は高いが、より多くを期待するには多額の費用が必要になる。特に日本においては地震動の新世代のデータを集める K-NET が作られているため、地面の揺れに対する優れた確率論的モデルが実現すれば、耐震安全性に対する費用面と実際面の両方に与えるインパクトは極めて大きい。

5 総括と推奨事項

35. 評価委員会は、統計地震学グループによる研究成果が、学術的水準と科学的価値という点で優れているということには疑いの余地がないと考えている。本研究グループは、統計学の分野と同時に地震学の分野の研究動機から始まり、数々の重要な成果を導いている。構成するメンバーと特に尾形教授は、地震データのモデル化と解析に革新的な研究を行っていること、その洞察力、及び二つの分野の研究者と共同研究を推進する能力をもつ点で、両方の学界で高い評価を受けている。その業績は継続的に推進されるべきでありその

支援が必要である。

36. 評価委員会は、研究所により実施されている研究の概要について知ること非常に興味があったが、その広がりや深さに感銘を覚えた。社会における多くの重要な問題が、関連する分野の専門家とともに研究することで解決されていく。評価委員会は、リスク評価とリスク管理のプログラムについて格段の興味を覚えた。金融および環境のリスクに関する研究は、複雑化と相互関連を深める世界経済において、情報に基づく決定に関して重要な貢献を果たしている。補足的プログラムである地震リスクに関する研究が、社会に対する多大な報酬をもたらすのは当然であるように思える。日本ほど大勢の人命や国民的な財産が地震のリスクに晒されている国はない。地震からの市民保護、耐震設計、強度不足の建造物とライフラインの耐震補強、津波と地震の警報システムなどの地震に対する防備や地震学や工学の研究に対する投資は類い稀であり、将来に向けて持続的に拡大すると予想される。公共的な施策は、最新の科学的な研究成果に基づいて策定されるのが当然である。研究所が、全体として、このような状況へのさらなる貢献の可能性を考えて行くといふ。

37. 本研究グループには、その組織を拡大させることと、優秀な大学院生を引き付け訓練することに関する大きな難しい問題が存在する。評価委員会は、学生や博士研究員による優れた研究を見てきたが、重要性が高まる学問領域であるにも関わらず、十分な数の学生を訓練していない。同時に、新しい統計モデルと方法の開発と厳密な評価モデルに対するプログラム開発について、尾形教授を補佐する統計学を専門とする中堅の指導的な研究員も必要である。

38. 評価委員会は、以上のことが統計数理研究所の経営幹部が重大に考慮する必要のある問題で、統計地震学グループのみの問題ではなく、広い意味で工学、保険およびリスク管理に統計数理研究所が関係することを推奨する。

参考文献

- [1] Ogata, Y. (1988) Statistical Models for earthquake occurrence and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association* **83**, 9-27.
- [2] Ogata Y., Katsura, K., and Tanemura, M. (2003) Modelling of heterogeneous space-time seismic activity and its residual analysis, *Appl. Stat. (Journal of the Royal Statistical Society Series C)* **52**, 499-509.
- [3] Ogata, Y. and Zhuang, J. (2006) Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophysics* **413**, 13-23.
- [4] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *Journal of the American Statistical Association* **97**, 369-380.
- [5] Zhuang, J. (2006) Second-order residual analysis of spatiotemporal point processes and applications in model evaluation, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **67**, **68**, Part4, 635-653

付録 1: 外部評価スケジュール

場所: 統計数理研究所会議室

日時: 2006 年 1 月 16 日

10:00 - 10:10 所長の挨拶と概要説明

- ・評価の目的
- ・評価項目

10:10 - 10:20 準備会議

- ・委員長選出
- ・スケジュールと評価方法の検討

10:20 - 10:40 松浦博士へのインタビュー

10:40 - 11:40 尾形良彦教授による研究・成果報告

11:40 - 12:20 グループメンバーによる研究・成果報告

13:30 - 13:50 グループメンバーによる研究・成果報告

13:50 - 15:00 委員からの質問及び委員とグループメンバーの討論

15:30 - 17:10 委員の会合

- ・評価の検討
- ・評価報告書についての相談

17:10 - 17:30 評価結果の研究グループ及び所長への講評

日時: 2006 年 1 月 17 日

15:30 - 17:10 委員の会合

- ・評価の検討
- ・評価報告書についての相談
- ・尾形教授と委員との討論及び講評

付録 2: 委員会に提出された研究資料

(注意: 次ページの目次のページ番号は委員会に提出された資料につけられた番号である。)

統計的地震予測の組織的研究(2003-2007)の中間報告

地震予測解析グループ

予測発見戦略研究センター

情報・システム研究機構 統計数理研究所

目次

研究動機	2
(1) 地震発生データ	2
(2) その他の地球物理学的データ	2
(3) 点過程モデル	2
(4) 地震・余震の確率予測	3
(5) 物理的モデルと地震活動の接面の解明	3
(6) 時空間点過程モデル	4
文献	5
研究の目的	6
研究実施計画 2003-2007	7
実施体制	7
研究成果 2003-2005	8
2003-2005 年 主要結果	8
(1) 大地震による周辺部へのコサイスマック地震活動変化と地殻のストレス変化	8
(2) 余震活動の相対的静穏化現象とこれに関するメカニズム	9
(3) 地震活動の前駆的な相対的静穏化および活発化と地殻のストレス変化	10
(4) 時空間 E T A S モデル	12
(5) 物理的素過程モデルと地震活動の接面の解明	13
(6) 地震の大きさ分布と地震検出率の同時推定および余震の確率予測	14
発表論文 2003 - 2005	14
査読付き論文	14
主な報告など	16
本プロジェクトの今後の展開について	18
(1) 静穏化現象のシナリオ追求による大地震・大余震の予測	18
(2) 時空間 E T A S モデルの効果的運用のための再モデル化	18
(3) 予測としての前震の識別確率	19
(4) ストレス変化と地震のメカニズム分布の変化	19
(5) 長期予測 - ベイズ的確率予測	19
(6) 各種データの有効利用と品質管理の為のモデリング	20
文献	20

研究動機

(1) 地震発生データ

気象庁の震源カタログは他の各種地球物理データの中でも収録が最も長い期間にわたり、検知能力の差はあるが地域を選ばず記録されている点で貴重である。特に一元化後の震源カタログは検知精度が飛躍的に上がり地震活動の詳細な研究が進むことが期待される。これを有効につかう手だてはいくらでもあろうが、特に地震活動の統計的研究にもっと組織的に使われてもよい。これを有効に使う鍵は、研究仮説や目的に応じて、点過程モデルを構成し当てはめ、そこからもっと詳しい情報を引き出すことである。また F-net などの発震機構データはストレス変化の議論に重要な役割を占めてきている。

(2) その他の地球物理学的データ

この他にも地球電磁気や地電流の変化、井戸の水位、地球化学成分の量的変化などの異常変化を客観的に分類したものと、実際の地震活動との量的関係について確率予測に有効に結び付けられるか、その様な研究が進められると考える。その為には、これら諸データの正常な推移がどのようなものなのか、その変動がどのような物理的・化学的変数で説明されるものなのか、これらの定性的な研究にのっとり、統計的入出力システムを構成しパラメータを調節し定量的な研究を進める必要がある。例えば井戸の水位、歪み計や傾斜計、GPSなどの測地的データは気圧、降雨量、地球潮汐、海洋潮汐、地震後余効変動などに関係しているのは明らかであるが、その時間遅れやサイズなどの量的関係のみならず空間的相関や非線型性は地域性・個性に依存してモデル化し調節せねばならない。その上で、これらの異常現象と地震の発生の確率変動への効果の有意性を検証するためには特有の統計モデルが有効である。

(3) 点過程モデル

点過程。点過程は地震発生のように突発的な確率的現象を抽象化した数学的モデルであるが、これが地震活動の研究に有効になりえた理由は1980年代頃から発展した「条件つき強度関数」によるモデル化と計算機環境の発展による最尤法の実用化である。条件つき強度関数は、ある時間や場所に事象(点)の発生する強度(確率の微分)をそれまでの履歴や他の情報で予測するという観点から定義された点過程の基本概念である。これを統計的予測点過程モデルとし最尤法で推定、Thinning 法で点過程イベントの発生シミュレーション[Ogata, 1983]、そして「残差」診断解析 [Ogata, 1983, 1988; Ogata and Shimazaki, 1984; Ogata, 1999] などの統計方法の進展が地震活動の解析に広い可能性を示しつつある。点過程の統計解析プログラム集としては TIMSAC84 [Akaike et al., 1985] や IASPEI Software Library の SASEis [Utsu and Ogata, 1997] が利用可能である。

ETASモデル。ETASモデルは元来、一般地震活動を表現するために、余震減衰の改良大森関数の重ねあわせたものとして創出されたものであるが、余震活動そのものを純粋な場合から群発型の複雑な経過までを量的に良く表現できる。また別の点過程モデルによって、異なる地域における地震活動間の因果関係(相互作用)の検証、季節性・検知能力や応力場の変化など第3因子の変化の探索などができる。この様に目的に応じて条件付き強度関数による自在なモデル化が可能である。

ETASモデルによる残差解析。余震発生の連鎖性・集中性は断層内のすべりに伴う急激で局所的なストレス変化による誘発のためであるが、余震の断層群がフラクタル的で複雑なため膨大な数の小断層破壊の記述は難しく、そのため余震を予測する物理的モデルが難しい。これに対して、統計力学の様にマクロな記述の、余震の経験則をもとに構成した統計的 ETAS モデルが必要で有効である。この様に、データに適合した ETAS モデルによっ

て余震効果を取り込んで地震活動を予測する。このことによって領域外の破壊やすべりが原因となって広域の相対的地震活動変化を促すストレス増減の変化が見易くなる。

(4) 地震・余震の確率予測

余震予測の帰無仮説モデル。確率予測は天気予報の様に常時計算されている必要がある。注目されている地域のみならず、なるべく全体をカバーするようにすることが確率予測の実績評価データを蓄積し改善するために有用である。改良大森減衰公式と Gutenberg-Richter のマグニチュード頻度分布を最尤法 [Utsu, 1965; Aki, 1965; Ogata, 1983] で推定し、これに基づく確率予測 [Reasenber and Jones, 1989] は既にカルフォルニアと日本で実用化されている。しかし余震についても一般に ETAS モデルの方が大森・宇津の公式より当てはまりが良い [Guo and Ogata, 1997] ので ETAS モデルによってより細かな確率予報が出せるようにしたい。ETAS モデルを超えるような、おそらく物理的知見を踏まえたモデルの出現は強く待望されるが、その予報の評価は先ず ETAS モデルと比べられるべきであろう。

余震活動の相対的静穏化。地震活動の静穏化や活発化などは大地震の前兆現象として数多く指摘されてきたが、これらの異常性がどのように大地震の発生に結びつくのかについての研究はあまり多くの事例ではなされていない。余震列を含め重要なのは多くの事例を集めた研究である。Matsu'ura [1986] は大森・宇津モデルをあてはめ余震活動に相対的静穏化が見られる場合、新たな断層破壊を伴う大きな余震が起きる場合を多数の事例を挙げている。その後兵庫県南部地震の最大余震の発生の事前に予測をした [松浦ほか, 1995] が、現在までこれが実用的なものとなるに至っていない。その一つの理由は、前述のとおり、多くの余震は大森・宇津(改良大森)公式より複雑であるものが多い [Guo and Ogata, 1997] ということである。

Ogata [2001] は日本における76個の本震について、異なる下限マグニチュードの259例のデータについて ETAS モデルを当てはめ解析している。そして余震活動に相対的静穏化が見られる場合、正常な減衰過程が継続中である場合より、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。その際特に注意しなければならないのは余震活動の静穏化の有意性を判定するには CHANGE-POINT に関する判定 [Ogata, 1992, 1999] をする必要があることである。さらに、静穏化が長期間に及ぶと、余震域近傍(たとえば 200km 以内)では6年内の期間に、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高い。余震の発振機構のデータが十分蓄積されつつある途上なので、その物理的メカニズムの解明はこれからの課題である。

相対的静穏化現象と近辺の断層内の先行すべりととの関係。このような現象のメカニズムの可能性として、余震域近傍の当該断層内において先行すべりがあったと仮定して、これに伴う応力変化のため余震活動の低下が起きたと考え、クーロンの破壊基準の stress-shadow と余震活動の相対的静穏化の時空間パターンとの対応がつかを調べてみることは意味がありそうである。余震群の大勢とプレスリップの断層メカニズムは、それぞれの本震とほぼ同様の震源メカニズムを持つものと仮定してもよいだろう。

(5) 物理的モデルと地震活動の接面の解明

外因性ストレス変化と群発地震活動。火山性の地震や各種群発地震は傾斜計や歪み計の変化に同期している事が観測されている。地球潮汐の変動と地震活動が時や場所によって同期したりすることも数多く報告されている。応力の蓄積と地震発生の力学的メカニズムの研究 [Dieterich et al., 2000; Toda et al., 2002] も急速に進んでいる。Iwata [2002] は鉾山の山はね(AE)発生データによる発生頻度と地球潮汐の月齢成分の因果関係を求める点過程モデルを作成し、解析をしたところ、因果関係の量的な知見が得られた。現在十分な密度のGPS観測網によって応力分布の時空間変化が捉えられるようになってきている。この様な地下の場変化の物理モデルと地震活動を結び付ける点過程統計モデルの作成を通じて震源カタログなどの地球物理各種データとの相関・因果関係や時間的遅れの統計的探索や検証をする。外因性の入出力モデルによる地震

発生システムの同定、パラメータの調節については最尤法でもベイズ法でも尤度に基づいており、これが自然で現実的な方法である。

逆問題と可視化。他方、地殻内の各種の変動素過程を捉えることは地表や限られた部分で観測されるデータの逆問題であり、ABIC などに基づく客観的かつ大規模パラメータのベイズモデルの構築と求解によることが多いと考えられる。これらの合理的なモデルによって得られた可視化情報に対応して、たとえば G-R 式の b 値 [Ogata et al., 1990]、ETASモデルの p 、 α 、 K 値などの地震活動モデルの時間・空間パラメータの変化などを求め、アスペリティや断層面の強度分布・応力分布や地震発生準備過程の研究などに資するような計量的把握を進めたい。

ETAS モデルと比べた異常活動と地殻の応力変化。地殻内における破壊応力の急変と地震活動の活発化や静穏化との相関、それによる大地震発生確率の評価、地殻変動やGPSなどの測地学的データとの関わりなどの研究が急速に進んでいる。一方、地殻や断層群は不均質・非一様・フラクタル性などの極端な複雑性があり、地震活動・発震機構のパターンは場所によって異なる。それゆえ余震群に内在する地震活動と応力変化の詳細な物理学的メカニズムの研究を進めるのは難しい。しかし、各領域の地震活動に統計的計測モデルをあてはめ、マクロ的で精度の良い予測を考え、これと実際の地震活動を比べ、その異常性を測ることによって、微弱な応力の変化を見ることが可能になると考えられる。たとえば地震活動の静穏化現象はETASモデルを物差しにして診断解析によって見ることで異常を感度良く検出できる。とくに、時空間的に広域の地震活動をリアルタイムでモニターするために大規模ベイズモデルによるアプローチを展望している。

(6) 時空間点過程モデル

最近の地震カタログの精度向上を考えると、一連の地震活動において時間・空間・マグニチュードやモーメントテンソルなど基本要素間相互関係の統計的性質の探求、地震活動の非定常性や地域的多様性の研究など、それらの基礎研究は大いにその余地がある。とくに時空間データを直接的に解析し、地震活動の地域差などを考慮の上に、これらを物差しに地震活動の微妙な静穏化や活発化の地域や時間の検出などの異常活動の検出能力を拡大する標準的地震活動計測モデルの進展が望まれる。

巨大地震に関わる静穏化は長期にわたるデータの均質性を保持するために、広領域にわたって 5.3 前後以上の中地震データを使って調べた [Ogata, 1992]。しかし、下限マグニチュードが下がるにしたがって解析は難しくなる、データが増えると地震活動のパターンの多様性が強まり、地域内の地震活動を単一の時空間 ETAS モデル [Ogata, 1998] によって適切に表現できない場合が多くなるからである。かくして地震活動の地域的多様性をどの様に取り扱うかという課題がある。この様な困難からの出口として現在検討を進めているのが、ETAS を基本にした、大量のパラメータを使うベイズ型統計モデルである。

制限付きトリガーモデル [Ogata, 2001] は各地震についての余震活動の特徴を同じものとし、ないモデルを考え、最尤法で推定した。これに基づいて、マグニチュードが与えられていない、発震時刻のみのデータから対応する余震数(クラスタ・サイズ)を推定し、これからマグニチュードを推定する方式を提案できる。1926年以來の日本全体での大地震の余震数を推定クラスタサイズで求めマグニチュードに対するプロットをすると陸域の地震と海域の地震では余震生成密度に明瞭な違いが見えた。1995年兵庫県南部地震の余震の空間分布とそれらの余震のクラスタサイズ分布は必ずしも余震のマグニチュードと対応しない。またクラスタサイズの大きな余震の震源は余震域の境界部分に多く分布することが見えた。これを広域なデータについて時空間モデルで表現するにはそのパラメータが場所の関数になるようにしデータの数倍もの更なるパラメータを使ってベイズ的モデリングをする必要がある。

地震の顔。他方、順調な地震活動であっても、最尤法で求められるモデルは平均的な地震活動の近似でしかない。実際、例えばマグニチュード頻度分布の b 値のように、データの下限のマグニチュードが小さくな

るに従って隣接地域でも地震活動の違いが浮き彫りになってくる(地域内の不均質性)。これはモデルのパラメータが場所によって有意に異なっていることで認識される。この問題は位置依存パラメータのベイズ型大規模モデルによって攻略でき、ETASモデルも同様の拡張の筋道を辿ることになる。この様にして求められた地震活動の地域的不均質性や時間的非定常性の変化と地質や応力分布、その変化などの地殻内の物理的諸過程との対応の探索を進めることになる。

文献

- Akaike, H., Ozaki, T., Ishiguro, M., Ogata, Y., Kitagawa, G., Tamura, Y., Arahata, E., Katsura, K. and Tamura, R. (1985) *Time Series and Control Program Package, TIMSAC-84* (, Computer Science Monograph, No. 22/23, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan.
- Aki, K. (1965) Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **43**, 237-239.
- Dieterich, J., Cayol, V. and Okubo, P., The use of earthquake rate changes as a stress meter at Kilauea volcano, *Nature* **408**, 457-460 (2000).
- Guo, Z. and Ogata, Y. (1997) Statistical relations between the parameters of aftershocks in time, space and magnitude, *Journal Geophysical Research*, Vol. 102, No. B2, pp. 2857-2873.
- Harris, R. A. (1998) Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, *J. Geophys. Res.*, 103, 24,347-24,358.
- Inouye, W. (1965) On the seismicity in the epicentral region and its neighborhood before the Niigata earthquake (in Japanese), *Kenshin-jiho (Q. J. Seismol.)*, 29, 139-144.
- Ishiguro, M., Akaike, H., Ooe, M. and Nakai, S. (1981). A Bayesian approach to the analysis of earth tide, *Proceedings of the 9th International Symposium on Earth Tides*, (ed. J.T. Kuo), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Iwata, T. (2002) Tidal stress/strain and acoustic emission activity at the underground research laboratory, Canada, *Geophys. Res. Lett.*
- Kitagawa, G. and Matsumoto, N. (1996). Detection of coseismic changes of underground water level, *J. Amer. Stats. Assoc.*, **91**, 521-528.
- Matsuura R.S. (1986) Precursory quiescence and recovery of aftershock activities before some large aftershocks, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **61**, 1-65.
- Matsuura R.S. and Karakama I. (1986) A point-process analysis of the Mutsu Earthquake Swarm sequence: The effect of water on earthquake occurrence, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1319-1346.
- 松浦律子・平田直・ト部卓 (2003) 兵庫県南部地震の余震活動度の準リアルタイム監視 - 1月25日23時16分M4.7の事前予測, 地震予知連絡会会報, 第54巻, pp. 600-607, 国土地理院.
- Mogi, K. (1967) Earthquakes and fractures, *Tectonophysics*, **5**, 35-55.
- Ogata, Y. (1978) The asymptotic behavior of maximum likelihood estimators for stationary point processes, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol. 30, No. 2, A, pp. 243-261.
- Ogata, Y. (1981) On Lewis' simulation method for point processes, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-27, pp. 23-31.
- Ogata, Y. (1983) Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 31, pp. 115-124.
- Ogata, Y. and Shimazaki, K. (1984) Transition from aftershock to normal activity, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, **74**, 5, pp. 1757-1765.
- Ogata, Y. (1986) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Mathematical Seismology (I)*, 228-281, Institute of Statistical Mathematics, Tokyo.
- Ogata, Y. (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of American Statistical Association, Application*, Vol. 83, No. 401, pp. 9-27.
- Ogata, Y. (1989) Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, Vol. 169, pp. 159-174.
- Ogata, Y. (1992) Detection of precursory relative quiescence before great earthquakes through a statistical model, *J. Geophys. Res.*, 97, 19845-19871.
- Ogata, Y. (1998) Space-time point-process models for earthquake occurrences, *Ann. Inst. Statist. Math.*, **50**, 379-402.

- Ogata, Y. (1999) Seismicity analyses through point-process modelling: A review, in Seismicity Patterns, Their Statistical Significance and Physical Meaning M. Wyss, K. Shimazaki and A. Ito eds. Birkhauser Verlag, Basel, *Pure and Applied Geophysics*, **155**, pp. 471-507.
- Ogata, Y. (2001) Exploratory analysis of earthquake clusters by likelihood-based trigger models, Festschrift Volume for Professor Vere-Jones, *J. Applied Probability*, **38A**, pp. 202-212.
- Ogata, Y., Imoto, M. and Katsura, K. (1993a) 3-D spatial variation of b -values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto District, Japan, *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738.
- Ogata, Y. and Katsura, K. (1993b) Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogs, *Geophys. J. Int.*, **113**, pp. 727-738.
- 尾形良彦, 庄建倉 (2001) 異常現象データ (1982-1997) 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を例として
- Omori, F. On the aftershocks of earthquakes, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo* **7**, 111 -200 (1894).
- Reasenber, P.A. and Jones, L.M. (1989) Earthquake hazard after a mainshock in California, *Science*, **243**, 1173-1176.
- Toda, S. Stein, R.S., Reasenber P.A. and Dieterich J.H. and Yoshida, A. (1998) Stress transferred by the Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, *J. Geophys. Res.*, **103**, pp. 24,543-24,565.
- Toda, S. and Stein, R.S. (2002) Response of the San Andreas Fault to the 1983 Coalinga-Nuñez Earthquakes: An Application of Interaction-based Probabilities for Parkfield, *J. Geophys. Res.* **107**, 10.1029/2001JB000172.
- Toda, S., Stein, R.S. and Sagiya, T., (2002) Evidence from the AD 2000 Izu Islands swarm that stressing rate governs seismicity, *Nature*, 419, pp. 58-61, 5 September issue.
- Utsu, T., A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, **30**, 521-605, 1961.
- Utsu, T. (1965) A method for determinig the value of b in a formula $\log n = \bar{a} - bM$ showing the magnitude- frequency relation for earthquakes, *Geophys Bull Hokkaido Univ.*, **13**, 99-103 (in Japanese).
- Utsu, T. (1969). Aftershocks and earthquake statistics(I): some parameters which characterize an aftershock sequence and their interaction, *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Ser. VII (geophysics)*, **3**, 129-195.
- Utsu, T., Ogata, Y. and Matsuura, R. S. (1995) The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, **43**, 1-33.
- Utsu, T. and Ogata, Y. (1997) Computer program package: Statistical Analysis of point processes for Seismicity (SASeis), invited and accepted for IASPEI Software Library for Personal Computers, the International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, vol. 6, 13-94.
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *J. Amer. Statist. Assoc.*, **97**, 369-380.

研究の目的:

- (1) 地震活動を計測する統計的時空間モデルの開発を進める。地域(空間)的多様性・不均質性や時間的非定常性の変化を捉えるベイズ型モデルの開発と現実的な推定法の研究を進め、地殻内の応力分布や強度分布などの変化の研究に貢献する。
- (2) 地震活動の静穏化、空白域、前震、その他異常現象の大地震に対する前兆性の統計的吟味や時空間的特徴の調査をすすめ、応力場などの地下の物理場の変化などの物理的素過程モデルと地震活動を結び付ける統計モデルの作成とデータのあてはめを通じて、そのシステムを理解するように努める。
- (3) 一定のストレス変化のもとで地震活動変化を発震機構データの頻度分布変化に注目した研究を進める。
- (4) 震源カタログや関連地球科学的データに基づく、客観的でより有効な確率予測用の統計的モデルの開発とその予測評価の研究をすすめる。これを通じて地球物理各種データを入力とし地震活動を出力とするシステムの因果関係の適合度をはかるなどの統計的探索や検証を確率的予測効率の観点から評価する。

(5) 震源カタログや各種地球物理データの時間的空間的均質化、異常値欠測値の補間、地球物理現象の各種ノイズの除去、および各種データ間相互使用のための規格化標準化などデータの品質管理に関わる統計的研究をすすめる。

研究実施計画 2003 - 2007

以下の目標を時間の許す限り機会を捉えて着手し達成を追求する。

(1) ETAS モデルによる予測地震活動に対する実際の地震活動の逸脱がどのようなストレス変化によってなされたかをより多くの事例データをもとに解析し、このような地震活動の逸脱が地殻歪変化の鋭敏なセンサーとして有用である事を実証する。

(2) このことを特に余震列について解析し、大きな余震(最大余震など)の事前の余震変化について研究する。

(3) 地震発生機構(メカニズム)のデータカタログを使用して、前駆すべりやサイレント地震のとの関係での因果関係を論ずる統計モデルや解析法を研究する。

(4) 連続的な測地学的時系列データを地震発生に関する説明変数として取り込む為の基礎研究を重ね、地殻場変化の物理モデルと地震活動を結びつける時空間点過程などの高度の統計モデル作成を試みる。

(5) ETAS モデルのパラメータ推定やそのグラフィカル表示など、世界の地震活動研究者の使用に耐える頑健なソフトウェアの出版を目指す。

(6) 計測技術の制約から本震直後しばらく(1 日以内)の余震の大量欠測は避けられない。これは現在、気象庁が実施している余震の確率予報の弱点であるが、これに対して地震統計の経験則から情報を補う統計モデルの作成をする。

(7) 余震の時空間データに対して階層ベイズの時空間ETASモデルで予測される各地の地震活動度と実際の地震発生パターン比較のためモデリングを行い解析する。これらの発生率の比率である相対的地震発生率の変化と、地震発生機構(メカニズム)の時空間的变化を比較し、地球物理的解釈を進める。

(8) 階層ベイズ型時空間モデル (Hierarchical Space-Time ETAS model)など、数多くのデータ解析する事によって、多くの地震活動研究者の使用に耐える頑健なソフトウェアの出版を目指す。

実施体制：

予測発見戦略研究センター地震予測研究グループ

尾形良彦、統計数理研究所教授 モデリング研究系 時空間モデリンググループ

遠田晋次 統計数理研究所客員教授、産業技術総合研究所 活断層研究センター, 2005 -

村田泰章 統計数理研究所客員助教授 産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 2003 - 2004

岩田貴樹 統計数理研究所 プロジェクト研究員 (II), 2005 -

庄 建倉 (Zhuang Jiancang) 日本学術振興会・外国人特別研究員, 2001 - 2005

楠城一嘉 日本学術振興会・特別研究員 (PD), 2003 -

研究成果 2003 - 2005

2003 - 2005 年 主要結果

(1) 大地震による周辺部へのコサイスミック地震活動変化と地殻のストレス変化

大地震のもたらすストレス変化は極めて大きいので、微小地震レベルまでの地震活動を見れば多くの実際に起きた地震や抑制された潜在的な地震の数が大幅に増えるので、ETASモデルなどの残差解析をするまでも無くコサイスミックな活発化や静穏化は明瞭であり、これらがクーロンの破壊ストレス変化と調和的に対応していることも明瞭である。東南海地震 (1944, M7.9), 1946 年南海地震、そして最近の十勝沖地震について調べた。その他の日本内外の例として[4]、[23]、[32]、[A8]、[A15]、[A16]、[A23]、[A24]も参照。

南海トラフの巨大地震前後の西日本内陸部における地震活動 [12, A4, A28]。1944 年東南海地震の断層モデルと 1946 年南海地震の断層モデルによって、西日本各地域でのコサイスミックなクーロンの破壊ストレス変化(ΔCFS)の分布を調べた。これらの各地域での地震活動の変化は ΔCFS の値に調和的である。すなわち、正の ΔCFS の地域ではその巨大地震を契機に活動がトリガーされ活発化し、負の ΔCFS の地域ではその巨大地震を契機にそこでの活動が静穏化している。これによると、例えば和歌山、丹波、四国での静穏化は南海地震の前駆的すべりでは説明が難しいが、東南海地震のすべりによる歪変化が負に働いたと考えれば説明がつく。他方、和歌山市周辺、四国東部、兵庫県南部などでは東南海地震発生以前から静穏化がみられる。これは東南海地震の断層内または深部などでの前駆的すべりを示唆しているかもしれない。

南海地震による正の ΔCFS の地域で、地震後からの活発化が見られる一方、和歌山市周辺の ΔCFS は負で、活動は再開しているものの 1943 年以前の活動度より遥かに低い。とくに和歌山県北部(和歌山市)周辺と中部は時空間(緯度)パタンが北緯 34 度周辺を境に対照的である。北部は逆断層の割合が多く中部地域は横ずれが多いので、そのような特徴が反映していると考えられる。

紀伊半島南部は東南海地震や南海地震の断層の直上に近いので ΔCFS の絶対値は大きい、東南海地震の場合、正負の境界が微妙である。ここでは他の地域と違って二つの巨大地震をはさむ約 2 年間の地震活動は減衰することなく活発である。潮岬近辺の有感地震も同様な活動を呈し、最初は余震のように減衰するが、1945 年 10 月頃活発化し活動は維持されている。これらの活発化が東南海地震の余効すべりによるものか、南海地震の前駆的すべりによるものかどちらでも説明が付けられる。

2003 年十勝沖地震の周辺部における地震時の歪変化と地震活動変化 [A21, A33]。十勝沖地震の直後、阿寒、摩周、足寄町などの火山フロント沿いに浅い活動が活発化した。国土地理院の断層モデルに対して、受け手のメカニズムとして、この地域の震源分布から推定される走行の垂直横ずれ断層群を仮定すると、十勝沖地震のすべりでCFFが増加(数bars)している地域で活発化が起こったと考えられる。次に、日高南部・浦河沖の3次元的地震活動に次の様な特徴的な変化が見られる。すなわち浦河付近の浅い地震活動(0-20km)が活発化し、深さ 20-45km では静穏化し、45km 以深は活発化している。これらを説明するものとして、日高衝突帯モデルが考えられる。すなわち、20-45km では東北日本の地殻が日高山脈の下に潜り込む北東傾斜の逆断層が卓越し(-1~-5 bars)、その上部の浅発地震では南西-東北圧縮 strike-slip (+2~5bar)が卓越していると考えられる。45km 以深は十勝沖地震の断層の延長深部の境界逆断層型メカニズムで+5 ~ +10bar 前後のCFF増加が見込まれる。

ETASモデルで検出されたコサイスミックな静穏化と活発化 [22, A19]。2003年5月宮城県沖の余震活動は大森・宇津公式が良く当てはまり、M1.5以上(但し本震後20日以降のあてはめ)では、宮城県北部の地震(M6.2)による減衰曲線からのコサイスミックな相対的静穏化が明瞭に見られた。一方、宮城県北部・岩手県南部地域の内陸部の地震活動は2003年5月28日の宮城沖地震によってトリガーされ相対的に活発化したことが明瞭で、2003年7月28日の宮城県北部の前震活動も、この地域の標準的な活動より相対的活動度(比ETASモデル)は高い。これらの活発化・静穏化は双方の断層メカニズムによるCFFの増加・減少に調和的に対応している。

(2) 余震活動の相対的静穏化現象とこれに関するメカニズムの研究

地震活動の予測と実際の地震発生の相違(静穏化や活発化)を測ることで、地震活動が地殻中のストレス変化のセンサーになる可能性が出てきた。相対的静穏化や活発化は、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と考えられる。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の確率予測の効率を上げるのに役立つであろう。

南カルフォルニアにおける連発地震の余震活動 [2]。余震活動の相対的静穏化現象のメカニズムとして、余震域近傍の当該断層内での先行すべりを仮定した。これに伴う応力変化のため余震活動の低下が起きたと考え、クーロンの破壊基準(CFF)の stress-shadow と余震活動の相対的静穏化の時空間パターンとの対応を調べた。南カルフォルニアの1992年 Joshua Tree 地震の余震活動および1992年 Landers 地震(Ms 7.3)の余震がETASモデルによる解析の結果、とくに地殻浅部で有意な相対的静穏化がみられ、それぞれ Landers 地震と1999年 Hector Mine 地震(Ms 7.1)の断層内部での非地震性すべりによると考えると理論的な整合性が得られる事を示した。Hector Mine 地震の余震活動はデータがあった14ヶ月間正常に推移し、その後現在(2005年11月)に至るまで近辺で大きな地震は起きていない。

2003年宮城県沖、宮城県北部の余震列 [22, A19]。最初の余震系列の経過情報から、その後に近隣で本震に近い規模またはそれ以上の大きな余震や地震の発生の確率が高まるか否かを判断するのは地震予知の観点から重要である。実際、前者の地震の余震系列にETAS点過程を当てはめ、AICによる適合度を比較してみると、余震活動が静穏化している場合が多い。同様の解析によると2003年宮城県北部地域の前震も静穏化している可能性が大きい。

このほか2003年5月宮城県沖の余震活動は、M1.5以上(但し本震後20日以降のあてはめ)では、宮城県北部の地震(M6.2)によると思われるコサイスミックな静穏化が見られ、M0以上では前駆的な静穏化も見られた。2003年5月宮城県沖の本震前、その近傍周辺領域で数ヶ月に渡る静穏化が微小地震では見られる。

2004年新潟県中越地震(M6.8)の余震活動の特徴 [A30]。中越地震の後、本震(M6.8)と大きく変わらないマグニチュード6以上の大きな余震が頻発した。余震活動は小さな下限マグニチュード(例えばM3.0)では余震列全体としてはETASモデルに従い順調に経過しているように見えるが、深さ分布の時相経緯は非常に独特である。取らたてて大きな余震が起きていないにもかかわらず、本震発生後半日で深い余震が急に少なくなり逆に浅い余震が活発になっていく。この余震分布の移動現象を説明するものとして2004年10月27日のM6.1の余震の前駆的すべりを考えてみた。深さ7-8kmを境として浅いほうで正の ΔCFF 、深いほうで負の ΔCFF が見込まれる。ここに示された気象庁一元化震源が大学等の臨時観測で決められた震源より深めに決まっていることを考慮すると、特徴的な余震活動の推移を説明できるのではないかと考える。何れにしても、今回の事例は、余震全体がETASモデルで順調に推移していることをもって、大きな余震が当面無いとは言えない事を示すものである。余震活動の静穏化が見られる場合は余震域の大部分がstress-shadowで無ければならないと考える。

福岡県西方沖の余震活動での相対的静穏化とストレスシャドウと前駆すべりのシナリオについて [30, A27,

A35]。余震の確率予報によると M5.5 以上の大余震の可能性は高々 10% と見積もられていたが、本震後 1 ヶ月経って 4 月 20 日朝に M5.8 の最大余震が起きた。余震の確率予報は余震活動が改良大森関数に則って順調に推移している事を前提としているので、裏を返せば今回の余震活動はそうでなかった可能性が高い。余震活動の静穏化の有無を解析することによって大きな余震または付近での本震以上の地震発生の確率的な予測の利得があがることが期待されている。本震後 2 週間に開かれた予知連のため、この余震を解析したところ相対的静穏化が見られたので前駆すべりのシナリオをたて予測を試み報告した。その後さらに週間経って最大余震が発生したが、結果的には、警固断層内でのすべりで無いことを除き、考慮したシナリオのいずれでもなかった。しかし、その発振機構や 2 次余震の震源分布から、前駆的すべりのモデルをたてると本余震の静穏化や、時間経過とともに余震分布密度が浅いほうに移動していること、海の中道から博多湾のオフフォールト地震活動が最大余震 10 日前頃から顕著に低下していることが説明可能である。最大余震の余震、つまり 2 次余震についても解析した。これらの中で最大の M5.0 の余震が 5 月 2 日未明に発生したが、前駆すべりを仮定したストレス変化によって二次余震の静穏化や二次余震が M5.0 の余震に向かって収束している様子を説明できる。

(3) 地震活動の前駆的な相対的静穏化・活発化と地殻のストレス変化の関係

ストレス変化が小さくても、ETAS モデルによる統計解析によって、微小地震の活動の静穏化や活発化が感度良く見られても不思議ではない。そのようなストレス変化の原因は、或る地震の前駆的すべりかも知れないし、いわゆる常習的な間欠的スローリップかもしれない。問題は、ストレスの急変の源が何処であるのかを見出すことであろう。そのためには考えられるリップのシナリオを設定し、それによるストレスシャドウを照合させ、その可能性を見積る積極的な予測が望まれる。

2004 年新潟県中越地震付近の最近の地震活動 [A27, 29]。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 CFF 変化パターンになる。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 モデルをあてはめてみた。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、東と西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、南と北の領域では予測された地震活動より活発化している。これらは各領域での CFF の増・減のパターンと一致している。ただし、活動の変化は全く同時というわけではなく、2001 年から 2002 年にかけて起きている。

北日本における前駆的地震活動の静穏化・活発化とストレス変化の関係 [21, A21, A25]。北日本の一元化データを ETAS モデルで解析すると、(1) 1993 年北海道南西沖地震の余震活動が 1996 年に顕著に低下(相対的静穏化)している。この時期で十勝沖地震の震源断層またはその深部での先駆的滑りを仮定すると、余震域はストレスシャドウになっている。同時に、この滑りによって、東北地方内陸部や東北沖プレート境界部のスラスト型メカニズムの受け手断層では CFF が増加しなければならない。これに調和的に、ETAS モデルで (2) 東北地方内陸部の地震活動の活発化が示される(相対的活発化)。さらに (3) 1994 年三陸はるか沖の余震活動にも相対的な活発化が見られる。

ストレスの急変の源が何処であるのかを見出す手がかりとして発震メカニズムの統計解析を行うことが有望であると考えられる。地震のメカニズム解は概してその地震が発生する地域の応力変化を反映したものと考えられる。想定断層運動を仮定して、各発生地震のメカニズムを受け手としての ΔCFF の頻度分布の時間変化の有無を調べるのである。

宮城県沖プレート境界型の大地震までの東北地方と東北沖における地震活動の特徴 [29, A20]。宮城県沖プレート境界型大地震の再来の問題に関連して、本研究では、気象庁震源データにもとづいて、1936 年

(M7.5)および1978年(M7.4)それぞれの地震以前の周辺部における地震活動や余震活動についてETASモデルで解析し、トリガー作用の作業仮説をたてて宮城県沖地震の中期的な予測に参考になりそうな特徴を模索した。

解析したのは(1)1937年までの東北地方内陸部の地震活動、(2)1933年三陸沖地震の余震活動、(3)1964年新潟地震の余震を含む1980年までの日本海東縁・東北地方内陸部の地震活動、(4)1968年十勝沖地震の余震活動、(5)1978年2月の牡鹿半島沖地震の余震活動などである。これらの特徴を要約すると、宮城県沖の断層モデルにもとづき事前のすべりを仮定したとき、マイナス数ミリバール程度までの ΔCFF のstress-shadow地域の広域地震活動や余震活動には相対的静穏化がみられること、 ΔCFF が中立の地域や数ミリバール程度より弱い正の ΔCFF の地域における地震活動や余震活動は順調に推移している。

次に、来るべき宮城県沖プレート境界地震のプレスリップを仮定してこれまでのケースと同様の特徴が見られるか、近年のデータを解析してみた。解析例としては、(6)1983年日本海中部地震の余震を含む日本海沿岸・東北地方内陸部の地震活動、(7)1994年三陸はるか沖地震の余震活動、(8)1962年宮城県北部地震余震の最近の活動、(9)1996年宮城県鳴子町の余震活動、(10)1998年宮城県南部の地震の余震活動、(11)1998年岩手県雫石の余震活動、(12)2002年11月宮城県沖の地震の余震活動、そして(13)一元化データによる宮城県直下深部のプレート境界の地震活動である。これらの活動の静穏化などの特徴は宮城県沖の断層内の前駆的すべりによるものと考えより、2003年5月の宮城県沖地震断層内の前駆的すべりによるものと考えたほうが調和的に説明できる。

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[A12, A27, A28, A33, A36]。2004年12月(M7.1)の釧路沖地震までの2003年十勝沖地震(M8.0)の余震を解析した。十勝沖地震の余震域は大変広く、場所によって余震活動のパターンが異なっているので本震後しばらくの活発な全体の余震活動は一つのETASモデルで当てはめるのに無理がある。そこで12.5日以降から当てはめたところ、2004年2月末頃まで5ヶ月ほどの当てはまりは順調であったが、その後の余震活動に有意な相対的静穏化が見られた。余震活動の地域性を見るために時空間分布図で調べた。北緯42.1度より南部は相対的に静穏化しており、それより北部は相対的に活発化しているという様相である。

他方、釧路沖の地震の断層モデルで、この付近でのゆっくりすべりを仮定し、受け手の断層群として十勝沖地震の本震と同様のメカニズムをもつ余震に対して ΔCFS の図を描いたところ、中央部・南部がストレスシャドウになり北西・北東部がストレス増加ということで、十勝沖地震余震活動の時空間的特徴と調和的である。更にこの同じすべりのモデルによると北海道東部の ΔCFS の正負のパターンが2003年十勝沖地震によるものと反転する。これに照応するように北海道東部の微小地震活動が2004年3-4月に活発化と静穏化が反転して、それまで活発化していた西側の部分が静穏化、東側の部分が活発化している。

さらに、釧路沖の地震の余震活動のETAS変換時間による時空間図で見ると余震域西部では相対的静穏化が顕著であるが東部では順調に減少しているという特徴がある。このことを説明できる断層モデルとして余震域南西部での余効すべりが考えられる。

福岡県西方沖の地震(M7.0)の前の九州とその周辺の活動 [A34]。1995年から2005年3月23日までの10年間にわたる九州地方とその周辺の、卓越するメカニズムがあるような、各領域の地震をETASモデルで解析した。 ΔCFS が正またはニュートラルの地域では相対的活発化ないしはETASモデルに則って順調に推移しているが、 ΔCFS が負の地域では全て相対的な静穏化が有意である。これらの合致は、この10年間の内で福岡県西方沖の地震の前駆的なすべりが進行していた可能性を示唆するものと考ええる。 ΔCFS の値そのものは極めて小さいが、各地域の受け手の地震断層群の数は極めて多く、地震発生の促進・抑制に働きる ΔCFS 値の下限が無い限り、統計的に静穏化の効果が有意になりうる。

相対的静穏化・活発化現象と地震のメカニズムの分布 [12, A11, A22, A25, A29]。地震ネットワークの充実によって地震の発生機構が多数決定されるようになった。このような発震メカニズムの統計解析を行うことは地殻のストレス変化を捕捉するのに有力であると考えられる。

2003 年十勝沖地震(M8.0)の、北日本におけるいくつかの地域の地震活動の静穏化・活発化を議論し前駆的ストレス変化を前述したが、同時に 1995 年ごろを境に十勝沖地震の想定断層内または近辺で前駆すべりがあったと仮定して、起きた地震のメカニズムを受け手としたとき、 ΔCFS が負のものに対する正のものの比が顕著に減っている。これはストレスシャドウでは静穏化、 ΔCFS が正のところでは活発化していることを示して、これらに調和的な発震メカニズムの頻度分布の変化を指摘した。同様の発震機構の変化が東海・近畿地方の地震に 2000/2001 の浜名湖直下のスロースリップ開始前後で見られた。

次に 2004 年紀伊半島南東沖の地震(M7.4)の破壊断層モデルは、GPSや近地・遠地の地震波解析によって国土地理院、東大地震研、建築研究所などから報告されているが、互いに本質的なところで整合的でない。震源域が遙か沖合であるためあつて、余震の3次元分布の精度が期待できず、明確な結論が得られていない。ところで、余震は本震によってトリガーされるはずなので、余震の多数は ΔCFF が正でなければならないはずである。断層から十分離れた部分で ΔCFF が正の出現率は建築研究所モデルによるものが最も分が良い。

(4) 時空間 ETAS モデル。

時空間 ETAS モデルによる確率的除群法 [13, 25, 33, A17, A18, A27]。時空間 ETAS モデルにもとづいて thinning method を適用する事によって、群れ形成の不確定性を含む客観的な除群アルゴリズムを提案したが、これを用いて時空間モデルの空間や時間やマグニチュードとクラスタサイズのそれぞれの応答関数のノンパラメータメトリックな診断解析をした。

気象庁データでは概ね適合度が良好であることが実証できたが、マグニチュードに対するクラスタサイズの関係を表記するパラメータと、マグニチュードに対する群れの空間的広がりを表記するパラメータは違うことが示唆された。これに基づいて時空間 ETAS モデルの改良版を提案した[25, 31]。

20 世紀全般にわたる台湾気象庁データを確率的除群により解析し、クラスタ強度対常時活動比で台湾とその周辺の地震活動を特徴づけ、テクとニックな特徴との対応を議論した。とくに常時活動の活発な3つの活動域について 1999 年集集地震(M_L7.3)の前30年間の常時活動をみると台湾内陸中部で静穏化が顕著であるがその他は通常通りであった。これは集集地震断層の下部での前駆すべりを仮定すれば、3 地域とも ΔCFF パタンで説明できる。

階層ベイズ時空間 ETAS モデル [1, A2, A5, A6, A9]。広域的にみると地震活動には個性がある。それを具に捉えるために、地域的な違いを表現するベイズ型時空間モデルを開発した。これは時空間 ETAS モデルのパラメータ値が場所によって変動するものとし、それらで地震発生様式の地域性を表現、可視化する。すなわち階層的時空間 ETAS モデルは、常時地震活動度 μ が位置 (x, y) の関数、4つのパラメータ K 、 α 、 p 、 q も地震の位置の関数と考え、地震の位置を頂点とする3角形のデロネ分割上の極多面体として表現し、各地での特徴的な地震活動様式を定量化する。すなわち任意の位置 (x, y) における関数の値は、それを含むデロネ3角形内で線形的に内挿されたものである。

これらのパラメータ関数を決める、推定すべき係数はデータの地震数の5倍である。安定した解を求めるため、係数同士の関係に次のような制約をかける。関数の各三角面の傾きの 2 乗の積分に対しペナルティをかける、すなわち関数が定数(微分係数が0)から乖離することにペナルティをかける。そして、当てはまりの良さを測る対数尤度 (7) との釣り合いを、ペナルティ付き対数尤度 (I) を通して考えるのである。ABIC によって 5 つの関数それぞれのペナルティ(制約)の強さを客観的に決め、その上でペナルティ付き対数尤度を最大化する係数を解として得る。ここで、モデルのパラメータは位置には依存するが、時間変化 t に関しては無関

係としたが、これは以下の様な時間的な異常活動の検出に必要なことである。

気象庁震源データを用いて実際の地震活動の計測を以下の様に精密に行なった。最初に求めた上記のベイズ的時空間ETASモデルの条件付強度関数と、これによって予測される各地の地震活動度のと実際の地震発生数を比べる「相対的地震発生率関数」(時空間)をかけ合わせた条件付強度関数で尤度を定義し、ベイズモデルによる平滑化問題と考え推定した。相対的地震発生率関数の平滑化事前分布を定義するために、3次元時空間を発生時刻を含む地震の震源を頂点とするようにデロネ分割し、4面体上の面の傾きが小さくなるような平滑化事前分布を導入し ABIC 法によって事後分布の最適推定パラメータ (posterior mode) を求めた。

階層的時空間ETASベイズモデルによる地震活動パラメータの推定と異常地震活動検出 [11, A2, A5, A6, A9]。階層ベイズ型時空間モデルによって広域地震活動の地域的な個性(顔)を表現するパラメータ(位置の関数)を推定することで各地の地震活動様式の違いを定量化して可視化できた。たとえば階層的時空間 ETAS モデルを気象庁震源データにあてはめると、常時活動度、余震強度や余震減衰指数(p 値)などの、日本の各地の地震活動様式の定量的推定ができ、地殻熱流量やアスペリティ(断層面内の摩擦強度の強い部分、これが滑ると大地震になる)などの地球物理学的な性質との対応が議論できる。特に高い K -値はアスペリティの周辺境界地域に分布しており、これまでの詳細な余震分布の知見を再現している。

東海・近畿地方の地震活動に対して前述の相対的地震発生率関数を求めると特徴的なのは、もともと常時活動の活発な地域である、兵庫県南部地震震源域周辺の丹波地域と和歌山地域の相対的な活発化である。この現象は地殻のストレス変化によって活発化したことを示す。実際、これらは兵庫県南部地震の断層モデルに対する当該地域の地震の最頻メカニズムによる Δ CFF 分布と調和的である。更に両地域の地震発生をETASで解析すると、この活発化の始まりは兵庫県南部地震発生時より1年ほど先行していることが分かる。これは断層のどこかで前駆すべりがあった可能性を示唆している。さらに2001年の相対的地震発生率関数による相対的静穏化と活発化は浜名湖付近直下のすべりによる Δ CFF 分布に調和的である。

(5) 物理的モデルと地震活動の接面の解明の研究

地震活動の変化による水圧効果の推定 [14]。群発地震活動の統計的モデルによる解析と、物理的理論モデルに基づいた拡散過程による地殻内の地下水の移動とストレス変化の検出が可能になった。これはETASモデルの常時活動のパラメータの変化をモデル化して解析することで実現できる。3次元弾性体における物理モデルによる数値シミュレーション実験と実データの統計的解析結果は調和的である。明らかに、このモデルは火山性地震とマグマの移動現象にも適用できるものである [e.g., A7]。

地電位の変動データと地震発生危険度推移の相関性 [24]。1982-1998年の北京周辺における地電位の間欠的に起きる或る低周波帯の地電位変動の平均振幅と継続時間の積の総和を日別にまとめたもの(日総量)を入力時系列として、点過程モデルでマグニチュード4以上の地震発生との因果関係、相関関係について解析した。ざっと見て異常現象と言うには発生頻度が結構多く、観測所ごとに違うが、地震発生を除群化したデータのポアソン過程と比べると、AICの差で少なくても15多くても45ということで、日総量データを考慮したほうが当てはまりがはるかに良い。

1日当たりの地震発生の危険度は全期間の平均危険度より高い危険度の総日数は全体の3分の1ほどであるが、起こった地震の7割前後がそれらの日に集中している。4観測所の日総量データを合わせて複合的確率予測公式を使えば平均危険度以上の警戒日数が全日数の10%ほどまで少なくなり、地震の確率予測の実用化に近づくのではという感触を得た。

微小地震活動と地球潮汐 [15, A1]。兵庫県南部地震後約2年間の丹波山地の微小地震の発生は、トリガーされて活発化した後に次第に減少している。この様な傾向を多項式のトレンドで表現し、余震現象をETASモデル、そして地球潮汐の月齢成分を周期として持つフーリエ三角関数の3成分の点過程モデルによって解析をしたところ、地球潮汐に有意な因果関係が得られ、その振幅や位相が推定できた。論文 [15] は地下の岩石のAEデータのマグニチュードGR則の b 値変化と月齢に基づく地球潮汐のストレス変化の相関について議論している。

(6) 地震の大きさ分布と地震検出率の同時推定および余震の確率予測 [A31, A32]。

本震直後の合い重なる地震波のために小さな余震の捕捉は極めて困難であり、これに基づくデータ欠測は震源カタログの本質的な弱点である。現在気象庁で実施されている余震の確率予測の実用的な展開のために、この困難を克服する為のモデルを与えた。これは余震のマグニチュードごとの検出率の変化とGR則の b -値を同時に推定するものである。これによると従来本震発生後 1 日以降に与えられている確率予報が 1 時間以降に出せる可能性がある。

発表論文 2003 - 2005

査読付き論文:

2003:

- [1] Ogata, Y., Katsura, K. and Tanemura, M. (2003) Modelling of heterogeneous space-time occurrences of earthquakes and its residual analysis, *Applied Statistics (J. Roy. Stat. Soc. Ser. C.)*, Vol. 52, Part 4, pp. 499-509 (2003).
- [2] Ogata, Y., Jones, L. and Toda, S. (2003) When and where the aftershock activity was depressed: Contrasting decay patterns of the proximate large earthquakes in southern California, *J. Geophys. Res.*, 108, No. B6, 2318, doi: 10.1029/2002JB002009.
- [3] Ogata, Y. (2003) Examples of statistical models and methods applied to seismology and related earth physics, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, Vol. 81B, HandbookCD#2, Chapter 82.
- [4] Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, *J. Geophys. Res.*, 108, B12, 2567, doi: 10.1029/2003JB002527.
- [5] Vere-Jones, D. and Ogata, Y. (2003) Statistical principles for seismologists, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, Vol. 81B, pp. 1573-1586.

2004:

- [6] 長郁夫・岩田貴樹・志賀卓弥・徳永健人・福興径夫・篠崎祐三 (2004) 微動を用いた構造決定のための円形レイデータ解析: 実データに対する Henstridge 法, 新手法の適用性の検討, *物理探査*, 57, pp. 501-516.
- [7] Iwata, T., and Nakanishi, I. (2004) Hastening of occurrences of earthquakes due to dynamic triggering: The observation at Matsushiro, central Japan, *Journal of Seismology*, 8, pp. 165-177.
- [8] Nanjo, K., Nagahama, H. and Yodogawa, E. (2004) Symmetry in the Self-organized Criticality, *The Journal of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry (ISIS-Symmetry) Symmetry: Art and Science 2004* (Editors D. Nagy and G. Lugosi) ISIS-Symmetry, Budapest, Hungary, pp. 302-305.
- [9] Nanjo, K. and Nagahama H. (2004) Fractal Properties of Spatial Distributions of Aftershocks and Active Faults, *Chaos, Solitons and Fractals*, 19, pp. 387-397, doi: 10.1016/S0960-0779(03)00051-1.

- [10] Nanjo, K. and Nagahama, H. (2004) Discussions on Fractals, Aftershocks and Active Faults: Diffusion and Seismo-electromagnetism, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2004, 29, 2C, pp. 147-167.
- [11] Ogata, Y. (2004) Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. B3, B03308, doi:10.1029/2003JB002621.
- [12] 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**, B4, B04305, doi:10.1029/2003JB002634.
- [13] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction *Journal of Geophysical Research*, **109**, B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879.

2005:

- [14] Hainzl, S. and Ogata, Y. (2005) Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling, *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.B5, B05S07, doi:10.1029/2004JB003247 (2005).
- [15] Iwata, T. and Young, P. (2005) Tidal stress/strain and the *b*-value of acoustic emissions at the Underground Research Laboratory, Canada, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1291-1308.
- [16] Iwata, T., M. Imoto, and S. Horiuchi (2005) Probabilistic estimation of earthquake growth to a catastrophic one, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19307, 10.1029/2005GL023928.
- [17] Nanjo, K.Z., Nagahama, H. and Yodogawa, E. (2005) Symmetry of fault patterns: Quantitative measurement of anisotropy and entropic heterogeneity, *Mathematical Geology*, **37**, 3, pp. 277-293, doi: 10.1007/s11004-005-1559-z.
- [18] Nanjo, K.Z., Turcotte, D.L. and Shcherbakov, R. (2005) A model of damage mechanics for the deformation of the continental crust, *J. Geophys. Res.*, **110**, B7, B07403, DOI: 10.1029/2004JB003438.
- [19] Nanjo, K.Z. and Turcotte, D.L. (2005) Damage and rheology in a fiber-bundle model, *Geophys. J. Int.*, 2005, **162**, pp. 859-866, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02683.x.
- [20] Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Tiampo, K.F., Rundle, J.B. and Turcotte, D.L. (2005) Earthquake forecasting and its verification, *Nonlinear Processes in Geophysics*, **12**, pp. 965-977, doi: 1607-7946/npg/2005-12-965.
- [21] 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**, B8, B08305, doi:10.1029/2004JB003323.
- [22] Ogata, Y. (2005) Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor, *J. Geophys. Res.*, Vol.110, No.B5, B05S06, doi:10.1029/2004JB003245.
- [23] Toda, S., Stein, R.S., Richards-Dinger, K. and Bozkurt, S. (2005) Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *J. Geophys. Res.*, **110**, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- [24] Zhuang, J., Vere-Jones, D., Guan, H., Ogata, Y. and Ma, Li (2005) Preliminary analysis of observations on the ultra-low frequency electric field in the Beijing region, *Pure and Applied Geophysics*, **162**, pp. 1367-1396.
- [25] Zhuang, J., Chang, C., Ogata, Y., Chen, Y. (2005) A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models, *J. Geophys. Res.*, **110**, B5, B05S18, doi:10.1029/2004JB003157.

In press or accepted:

- [26] Nanjo, K.Z., Nagahama, H. and Yodogawa, E., Symmetry of earthquake patterns: asymmetry and rotation in a disordered seismic source, *Acta Geophysica Polonica*, in press, Volume 54.
- [27] Nanjo, K.Z., Rundle, J.B., Holliday, J.R. and Turcotte, D.L., Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan, *Pure and Applied Geophysics*, accepted.
- [28] Chen, C.C., Rundle, J.B., Holliday, J.R., Nanjo, K.Z., Turcotte, D.L., Li, S.C. and Tiampo, K.F., The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence, *Geophys. Res. Lett.*, 2005 accepted.
- [29] Ogata, Y., Seismicity anomaly scenario prior to the major recurrent earthquakes off the east coast of Miyagi Prefecture, northern Japan, and its implication for the intermediate-term prediction, Special Issue on Dynamics of Seismicity Patterns and Earthquake Triggering, eds. S. Hainzl, G. Zoler and I. Main, *Tectonophysics*, in press.
- [30] Ogata, Y., Anomaly monitoring of aftershock sequence by a reference model: A case study of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Letters*, in press.

- [31] Ogata, Y. and Zhuang, J., Space-time ETAS models and an improved extension, Special Issue on Critical Point Theory and Space-Time Pattern Formation in Precursory Seismicity, eds. K. Tiampo and M. Anghel, *Tectonophysics*, in press.
- [32] Toda, S. and Matsumura, S., Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan, *Tectonophysics*, in press.
- [33] Zhuang J., Ogata Y. and Vere-Jones D., Diagnostic analysis of space-time branching processes for earthquakes. Chapter 15 of *Case Studies in Spatial Point Process Models*, Eds. Baddeley A., Gregori P., Mateu J., Stoica R. and Stoyan D. Springer-Verlag, New York, in press.

Main Proceedings:

主な報告など:

2003:

- [A1] 岩田貴樹・片尾浩(2003)点過程モデルを用いた月齢と丹波山地の微小地震発生の相関に関する解析, 日本地震学会講演予稿集, A062.
- [A2] Ogata, Y. (2003) A practical space-time model for regional seismicity (招待講演)ヨーロッパ地球物理学会連合アメリカ地球物理学会連合同大会, ニース、フランス, *Geophysical Research Abstract*, Volume 5, 2003, CD-ROM, ISSN: 1029-7006
- [A2] Ogata, Y. (2003) A practical space-time model for regional seismicity (invited), EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, *Geophysical Research Abstract*, Volume 5, 2003, CD-ROM, ISSN: 1029-7006
- [A3] Ogata, Y. (2003) Seismicity-change-analysis by a space-time point-process model (invited) The 3rd Statistical Seismology Workshop, Juriquilla, Mexico.
- [A4] 尾形良彦 (2003) 1944 年東南海地震および 1946 南海地震前後の西南日本における地震活動変化について, 地震予知連絡会会報 70, 378-383, 国土地理院.
- [A5] 尾形 良彦 (2003) 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変化 (1995-2001), 地震予知連絡会会報, 第 70 巻, pp. 5-6 and 361-363, 国土地理院.
- [A6] 尾形良彦 (2003) 広域地震活動の時空間統計モデルとその活動変化解析, 月刊 地球, 25 巻 No. 10, pp. 783-787, 海洋出版.
- [A7] Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Earthquake triggering by volcano-tectonic events: An example from the 2000 Izu Islands swarm (invited talk), XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 2003.
- [A8] Toda, S. (2003) A Fresh Look at the Triggering of Earthquake Pairs, Such as the Landers-Big Bear, Landers-Hector Mine, Izmit-Duzce, and Nenana-Denali, and March-May 1997 Kagoshima Events (invited talk), American Geophysical Union 2004 fall meeting.

2004:

- [A9] Ogata, Y. (2004) The 6th World Congress of the Bernoulli Society for Mathematical Statistics and Probability, and 67th Annual Meeting of the Institute of Mathematical Statistics, "Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes", July 25-29, 2004, Barcelona, Spain, (invited lecture)
- [A10] 尾形良彦 (2004) 統計的点過程モデルと地震活動の予測と発見 (特別企画講演), 日本数学会 2004 年度年会 特別企画講演予稿集.
- [A11] 尾形良彦 (2004) 静的トリガリングと統計, 156 回地震予知連絡会トピックス招待講演
- [A12] Ogata, Y. (2004) Synchronous seismicity changes in and around the northern Japan preceding the 2003 Tokachi-oki earthquake of M8.0 (invited talk) International Conference in Commemoration of 5-th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taipei, Taiwan.
- [A13] Ogata, Y. (2004) Stress changes, seismicity changes and statistical models, Workshop on Seismic Activity and Probabilities of Major Earthquakes in the Kanto and Tokai Area, Central Japan, Wadati Memorial

- Hall, Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan (invited presentation), <http://kt-jisin.bosai.go.jp/WS/Program/index.html>, (invited talk)
- [A14] Nanjo, K.Z., Rundle, J.B. and Holliday, J.R.. (2004) Pattern Informatics and Its Application to Forecasting Large Earthquakes in Japan, Abstract for AGU 2004 Fall Meeting, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract NG22A-07 (invited talk).
- [A15] 遠田晋次 (2004) 地震トリガリング研究の地震予知への展開, 156 回地震予知連絡会トピックス招待講演
- [A16] Toda, S., and Matsumura, S. (2004) Spatio-temporal stress states estimated from seismicity rate changes in the Tokai region, central Japan (invited talk), American Geophysical Union 2004 fall meeting.
- [A17] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Diagnostic analyses of space-time branching processes for earthquakes, Spatial Point Process Modeling and its Applications, Benicassim, Castellon, Spain, Spatial Point Process Modelling and Its Applications, Col-Lecco Treballis D'Infomática/Tecnologia, Num. 20, ISBN 84-8021-475-9 Publication de la Universitat Jaume-I, Castello de la Plana, Spain, pp. 273-292.
- [A18] Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Visualizing goodness-of-fit of point-process models for earthquake clusters., Analysis of Natural and Social Phenomena: Data Science and System Reduction; an international workshop of the 21st Century COE program at Keio University, http://coe.math.keio.ac.jp/english/event/cherry_bud/index.html, (invited talk).
- [A19] 尾形良彦 (2004) 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, 地震予知連絡会会報, 第 71 巻, pp. 260-267, 国土地理院.
- [A20] 尾形良彦 (2004) 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, 地震予知連絡会会報, 第 71 巻, pp. 268-278, 国土地理院.
- [A21] 尾形良彦 (2004) 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, 地震予知連絡会会報 第 72 巻 pp. 110-117, 国土地理院.
- [A22] 尾形良彦 (2004) 静的トリガリングと統計, 地震予知連絡会会報 第 72 巻 pp. 631-637, 国土地理院。
- [A23] 遠田晋次 (2004) 地震トリガリング研究の地震予知への展開, 地震予知連絡会会報 第 72 巻 pp. 624-626, 国土地理院
- [A24] 遠田晋次 (2004) 2003 年宮城県沖の地震前後の内陸地震の活動変化とその意味, 月刊地球, 27, 1, 56-61.
- [A25] 尾形良彦 (2004) 破壊応力変化と発震機構分布の変化について, 日本地震学会講演予稿集, S023.
- 2005:**
- [A26] 村田泰章・尾形良彦 (2005) ドローネ三角形分割による重力データの平滑化と地殻表層密度推定, 地球惑星科学関連学会合同大会 2005 年 5 月.
- [A27] 尾形良彦 (2005) 昭和の南海トラフ巨大地震前後の西南日本における地震活動と最近の活動, 地球惑星合同学会 特別セッション S095 招待講演
- [A28] Ogata, Y. (2005) Seismicity changes in western Japan associated with the great earthquakes near Nankai trough and their contemporary implications, Specially organized session S095, invited talk.
- [A29] 尾形良彦 (2005) 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, 地震予知連絡会会報 第 73 巻, 495-498, 国土地理院.
- [A30] 尾形良彦 (2005) 2004 年新潟県中越地震(M6.8)の余震活動の特徴と周辺部における地震活動の特徴について, 地震予知連絡会会報 第 73 巻, 327-331, 国土地理院.
- [A30] Ogata, Y. (2005) On an anomalous aftershock activity of the 2004 Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of M6.8, and intermediate-term seismicity anomalies preceding the rupture around the focal region (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, 73, pp. 327-331, Geographical Survey Institute of Japan.
- [A31] 尾形良彦 (2005) 地震検出率と b 値の同時推定と余震の確率予測, 地震予知連絡会会報 第 73 巻, 666-669, 国土地理院.
- [A32] Ogata, Y. (2005) Toward urgent forecasting of aftershock hazard: Simultaneous estimation of b -value of the Gutenberg-Richter's law of the magnitude frequency and changing detection rates of aftershocks immediately after the mainshock, preprint.
- [A33] 尾形良彦 (2005) 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, 地震予知連絡会会報 第 74 巻, pp. 83-87, 国土地理院.

- [A34] 尾形良彦 (2005) 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, 地震予知連絡会会報 第 74 巻, pp. 523-528, 国土地理院.
- [A35] 尾形良彦 (2005) 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, 地震予知連絡会会報 第 74 巻, pp. 529-535, 国土地理院.
- [A36] 尾形良彦 (2005) 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, 日本地震学会講演予稿集, S023.
- [A37] Toda, S. (2005) Style of stress accumulation and release in northern Honshu Japan: A concept to explain the coexistence of destructive inland earthquakes and interplate thrust earthquakes (invited talk), Spatial and Temporal Fluctuation in the Solid Earth, 21COE International Symposium 2005, Sendai, Japan.

本プロジェクトの今後の展開について

(1) 静穏化現象のシナリオ追求による大地震・大余震の予測

地震活動の予測と実際の地震発生の相違(静穏化や活発化)を測ることで、地震活動が地殻中のストレス変化のセンサーになる可能性が出てきた。ETAS モデルは余震減衰の経験法則に基づき、地震活動の個性を表現し、地域的に将来の活動を予測する。近傍で大きな地震や非地震性のすべりが起ると、断層周辺部の応力(ストレス)が急激に変化してストレス変化が伝わり、そこでの地震(余震)の活動度が予測されたものから系統的に外れる。そのような相対的静穏化や活発化は、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と考えられる。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の確率予測の効率を上げるのに役立つ。

解析事例を積み重ねる事によって、地震活動が地殻歪やストレス変化の鋭敏なセンサーとして有用である事をより確実化する。また、ストレス変化を介在して、測地学的時系列データを地震発生に関する説明変数として取り込み、地殻場変化の物理モデルと地震活動を結びつける時空間点過程などの高度の統計モデル作成の手掛かりが得られる。これは震源カタログに基づく地震活動パターンと応力変化を反映した地殻変動との相関・因果関係の統計的探索や検証ができるようにするために必要であると考えからである。これによって、まとまった地震学的な知見を生み出すと同時に、多くの地震活動研究者の使用に耐える統計ソフトウェアの提供を目指す。

(2) 時空間 ETAS モデルの効果的運用のための再モデル化

階層ベイズ型時空間モデル (Hierarchical Space-Time ETAS model) によって時空間的に地震活動の予測と実際の地震発生の相対比をベイズ法により推定する方法が確立しつつある。この際、解析の足枷となるのは、地震カタログにおける微小地震の検出率の時間的・空間的不均質である。できるだけ多くのデータを使用できるようにデータの不均質構造を考慮に入れたマグニチュード分布をモデル化してベイズ型時空間モデルの拡張を図る。近年、気象庁地震観測網の検知能力が向上したのみならず、各大学や防災科技研の地震観測網からの基礎データの統合(一元化)によって、検知地震数や決定精度が飛躍的に伸びるマグニチュード以下のものまでが捕捉されている。これに伴い地震データのマグニチュードの下限が時間的に変化している。これに加えて検知率は従来から空間的に、例えば内陸と海域では、大きく異なる。このような時空間不均質データに対応するベイズ型時空間モデルの拡張モデルの開発をめざす。

さらに本震直後の重なる地震波のために小さな余震の捕捉は極めて困難であり、これに基づくデータ欠測は震源カタログの本質的な弱点である。この様な欠測構造を考慮して余震の確率予測実効を上げ、新展

開を図る。

(3) 予測としての前震の識別確率

短期予測としての前震の識別と除群アルゴリズム。ある所で地震活動が始まる。それは間違いに大きな地震の前震かもしれないし、ほぼ同規模の地震が続く群発型地震かもしれない。単なる本震・余震型の場合も多い。これらのいずれの型であるかはその地震活動が終息してからでないとは決定的には分らないが、何らかの情報で逐次変動する確率が予測できるならば防災上の価値は高い。Ogata *et al.* [1995, 1996 and 1999], Ogata [1999b] は地震群（複数の地震）の時間的・空間的集中度とマグニチュード列の増減パターンに関する識別情報に基づいて、この活動が来るべき格段に大きな地震の前震であるか否かの確率を予測する宇津・安芸の複合予測公式 [Utsu, 1977; Aki, 1981] を拡張した logit モデルを考え、そのような確率予測の性能評価をした。確率予測は平均的な確率値（無情報）からの変動幅が大きいほど予測の情報が効率的なので、そのような識別情報を探す必要がある。

この研究は、あるところに地震が起きた時点で、そして逐次それに続く群れの地震の発生時刻・位置・マグニチュード列のパターンに関する情報を使うことによって、群の型（特に前震型）を有効にリアルタイムで予測するような条件付き確率の統計モデルを見いだすことであった。しかし、この研究の難所の第一は地震の群れを同定することである。Ogata *et al.* [1995, 1996 and 1999] と Ogata [1999b] はマグニチュードに基づく除群法（MBC法）と Single-Link Clustering 法（SLC法）の二つの相補的なアルゴリズムを採用し予測モデルの頑健性を試した。MBC法は大きな地震から順次マグニチュードによって群を構成するのに対して、SLC法は地震間の時空間の距離による近さでのみで構成し、然る後に群の中の最大地震を本震として定める。MBC法は地震統計の経験則に沿って決められているが、その短所は本震が起きるまで（結局、活動が終了するまで）群が決められないことであり、現在進行中の地震活動を予測するのに支障があることである。これに対してSLC法は距離だけに基づいており、現在までの時点での群を決めることができる点でリアルタイム予測の観点から、やや優れているが、SLCの最適パラメータを決めるにあったって難点がある。最近、時空間 ETAS モデルによる確率的除群法 [Zhuang *et al.*, 2002] が提案されているが、これに基づいて確率予測をする方式はこの点を克服できる点で十分価値があり、この観点からの研究を追求し、上記の logit モデルをベイズ的に拡張したい。

(4) ストレス変化と地震の発生率の変化

Dieterich の摩擦構成則に基づく理論式は、地震の発生率変化の量的な予測を記述する拠り所のひとつである [Dieterich, 1994; Dieterich *et al.*, 2000; Toda and Stein, 2003]。測地学的データと地震発生や発震機構のデータによって地殻のストレス変化と ETAS に基づく地震活動変化にかんする断層内の順問題・逆問題を研究するのはこれから重要になると考えられる。

(5) 長期予測 - ベイズ的確率予測

詳細な地質学的活断層データについて対応するベイズ的推論に基づいた直下型大地震の予測確率の実用化。固有地震と思われるデータに対して更新過程の分布のパラメータが推定されると、それを危険度関数に代入して次の地震発生の確率予測を出す。しかしデータ数が少ないとき最尤推定値を採用すると、予測危険度関数の誤差が大きいだけでなく危険度関数や確率予測について偏りが生ずる場合がある。予測危険度関数の誤差や偏りを調べるには尤度関数（事後分布）全体を見ることが必要である。そもそも最尤法が典型的に優れているのは尤度関数が対称で周辺部の裾が軽い場合であり、非対称で裾が重い場合には偏った推定値となる。一般に尤度関数そのものがデータと更新過程モデルの係わりについての全ての情報を持っており、偏りのない適当な事前分布に対する事後分布をもとに最尤法以外の統計的推論を考えることができる。ひと

つは事後分布の平均値(ベイズ推定量)を考える事である。もう一つは危険度関数族の事後分布による平均をとった予測危険度関数(predictive hazard rate)を考えることである。これらによって偏りのない危険度や確率の評価が可能になる。予測確率の誤差評価には、データ数が少ない場合は事後分布をつかって計算する方法が有効である。

BPT モデル[Matthews et al., 2002] とスリップサイズデータを使う時間予測モデルを拡張し予測危険度関数による確率予測を提案した [Ogata, 2001, 2002] が、これをイベントの区間時刻データ [Ogata, 1999] ひいてはイベントの発生時刻尤度データ [e.g., Sieh et al., 1989] と合わせてベイズ的確率予測する方式をまとめてみたい。

(6) 各種データの有効利用と品質管理の為のモデリング

日本のような高度情報工業国、気象現象の変化の激しい土地柄では各種地球物理データには非定常非線形な各種ノイズも混入し、単にデータを蓄積するだけでS/N比があがることを多くは期待できない。このためには各種ノイズの変化の統計的なモデルを通して有用な情報を取り出すことを考える必要がある。季節変化、地球潮汐、気圧変化や降雨効果を分離するBAYTAP-Gや状態空間時系列モデルなどのベイズ型モデルは、まだごく限られた現象にしか応用されておらず、モデル自体もそれぞれのデータとニーズに応じた創造的拡張発展を迫られている。とくに GPS などの測地データは日本全土に稠密に展開されており、地殻ストレス変動の異常と断層のすべりは地震性・非地震性を問わずよく対応しているが、その異常は小さくなるにしたがってノイズに埋もれておりこの除去が課題である。

また折角多大な努力で採取した膨大なデータも長期にわたる均質性を維持するのは大変である。計測器の特性や計測手法の変化などを考慮したデータの品質管理について多くの努力を注ぐことは地味ではあるが重要な課題である。データの不均質性の中味を探る解析や検出力の時空間的变化などを推定する統計モデルも数多く考案されてよい。例えば気象庁地震カタログの検知能力の変化を推定して検出された全てのデータを有効利用して日本全土のb値や地震活動度の変動の解析をする統計モデルも既に提案されている。いずれにしても、定常的にデータを編集している各関係機関内で直面する共通の技術的な問題として重要視して積極的に取り組んでいかねばならないと考える。歴史地震、明治・大正の地震発生などの記録は世界の何処でも期待できないほど情報量が多く貴重である。これらのデジタル化など解析のための整備・編集などは重要である。

文献

- Akaike, H. (1998) *Selected Papers of Horotugu Akaike*, E. Parzen, Tanabe, K. and Kitagawa, G. eds., Springer Series of Statistics – Perspectives in Statistics, Springer, New York, 434pp.
- Aki, K. (1981) A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in *Earthquake Prediction: An International Review*, edited by D.W. Simpson & P.G. Richards, A.G.U., Washington, D.C., 566-574.
- Dieterich, J. (1994), A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geophys. Res.*, 99, 2601-2618.
- Dieterich, J., Cayol, V. and Okubo, P., The use of earthquake rate changes as a stress meter at Kilauea volcano, *Nature* **408**, 457-460 (2000).
- Matthews, M., Ellsworth, W.L. and Reasenberg, P. (2002) A Brownian Model for Recurrent Earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 6, 2233-2250, doi: 10.1785/0120010267.
- Ogata, Y. (1999) Estimating the hazard of rupture using uncertain occurrence times of paleoearthquakes, *J. Geophys. Res.* **104**, 17995-18014.
- Ogata, Y. (1999b) Real time discrimination of foreshocks (in Japanese), *Chikyu Monthly*, No. 24, pp. 167-173.
- Ogata, Y. (2001) Biases and uncertainties when estimating the hazard of the next Nankai earthquake (in Japanese), *Chigaku Zasshi (Journal of Geography)*, Vol. 110, No. 4, pp. 602-614.

- Ogata, Y. (2002) Slip-size dependent renewal processes and Bayesian inferences for uncertainties, *J. Geophys. Res.*, **107**, B11, 2268, doi:10.1029/2001JB000668, 2002.
- 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.
- Ogata, Y. (2005a) Simultaneous estimation of b-values and detection rates of earthquakes for the application to aftershock probability forecasting (in Japanese), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, **73**, pp. 666-669.
- Ogata, Y. (2005b) Toward urgent forecasting of aftershock hazard: Simultaneous estimation of b-value of the Gutenberg-Richter's law of the magnitude frequency and changing detection rates of aftershocks immediately after the mainshock, preprint.
- Ogata, Y. (2005c) Anomaly monitoring of aftershock sequence by a reference model: A case study of the 2005 earthquake of M7.0 at the western Fukuoka, Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Letters*, in press.
- Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogs, *Geophys. J. Int.* **113**, 727-738.
- Ogata, Y. Utsu, T. and Katsura, K. (1995) Statistical features of foreshocks in comparison with other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, **121**, pp. 233-254.
- Ogata, Y., Utsu, T. and Katsura, T. (1996) Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, **127**, pp. 17-30.
- Ogata, Y. and Utsu, T. (1999) Real time statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters (in Japanese), *Tokei-Suri (Proc. Inst. Statist. Math)*, Vol. 47, No. 1, pp. 223-241.
- Ogata, Y., Katsura, K. and Tanemura, M. (2003) Modelling of heterogeneous space-time earthquake occurrences and its residual analysis, *Applied Statistics (J. Roy. Stat. Soc. Ser. C)*, **52**, Part 4, 499-509.
- Shimazaki, K., and T. Nakata (1980) Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Letters*, **7**, 279-282.
- Sieh, K., M. Stuiver, and D.R. Brillinger (1989) A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California, *J. Geophys. Res.*, **94**, 603-623.
- Toda, S. and Stein, R.S. (2003) Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, *J. Geophys. Res.*, **108**, B12, 2567, doi: 10.1029/2003JB002527,
- Utsu, T. (1977) Probabilities in earthquake prediction, *Zisin(2) (J. Seismol. Soc. Jap.)*, **30**, 179-185 (in Japanese).
- Utsu, T. (1978) Calculation of the probability of success of an earthquake prediction (In the case of Izu-Oshima Kinkai Earthquake of 1978), *Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, 31, 129-135, Geographical Survey Institute of Japan (in Japanese).
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2002) Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *J. Amer. Statist. Assoc.*, **97**, 369-380.
- Zhuang, J., Ogata, Y. and Vere-Jones, D. (2004) Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction *J. Geophys. Res.*, **109**, B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879.

付録 3: 第 4 回統計地震学国際ワークショッププログラム

評価の参考にするために、評価委員会開催に先立ち、第 4 回統計地震学ワークショップを総合研究大学院大学葉山キャンパスにおいて開催した。プログラムについては英文版を参照のこと。

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

〒106-8569 東京都港区南麻布 4 - 6 - 7

Tel 03-5421-8706 (総務課庶務係)

Fax 03-3443-3552

URL <http://www.ism.ac.jp/>

統計地震学
研究プロジェクト
外部評価委員会
報告書

2006年12月

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