

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.46

A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake
by Modeling the Generation Processes

BY

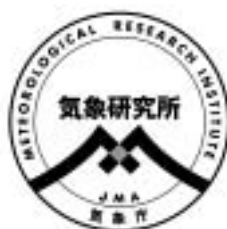
Seismology and Volcanology Research Department, MRI

気象研究所技術報告

第46号

**地震発生過程の詳細なモデリングによる
東海地震発生の推定精度向上に関する研究**

地震火山研究部



気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 2005

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director-General : Dr. Tokunosuke Fujitani

Forecast Research Department	Director : Mr. Yukio Takemura
Climate Research Department	Director : Dr. Akira Noda
Typhoon Research Department	Director : Mr. Hitoshi Sakakibara
Physical Meteorology Research Department	Director : Mr. Takehisa Sakai
Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department	Director : Mr. Tetsuji Sawai
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director : Dr. Hisao Ohno
Seismology and Volcanology Research Department	Director : Dr. Nobuo Hamada
Oceanographical Research Department	Director : Dr. Jun-ichi Ohyama
Geochemical Research Department	acting Director : Dr. Tokunosuke Fujitani

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Tetsuji Sawai

Editors : Makoto Ohzeki Yuhji Kuroda Naoko Kitabatake
 Kenichi Kusunoki Naoko Seino Masahisa Nakazato
 Takeyasu Yamamoto Toshiya Nakano Masao Ishii
Managing Editors : Yoshihisa Nakamoto, Takashi Inoue

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of technical reports, data reports and comprehensive reports on meteorology, oceanography, seismology and related earth sciences (hereafter referred to as reports) contributed by the members of the MRI and the collaborating researchers.

The Editing Committee reserves the right of decision on acceptability of manuscripts and is responsible for the final editing.

©2005 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

A Study to Improve Accuracy of Forecasting the
Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes

BY

Seismology and Volcanology Research Department, MRI

地震発生過程の詳細なモデリングによる
東海地震発生の推定精度向上に関する研究

地震火山研究部

気象研究所

序

平成11年度から開始した「地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生 の推定精度向上に関する研究」は、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震による甚大な被害が、我が国における地震防災の重要性を改めて認識させて以来、初めて企画された気象研究所における地震関係の特別研究である。気象庁は、大規模地震対策特別措置法により、東海地域で予想される大規模地震の監視に重大な責任を負い、観測、監視を行ってきたが、兵庫県南部地震による甚大な被害を目の前にして、改めてその任務の重大性を噛みしめることになった。気象庁がその任務を着実に遂行していくためには、過去の経験を踏まえ、最新の地震学の知見を取り入れた東海地震の発生過程のモデルを作り、監視のための技術的基盤を強化する必要がある。このような背景のもとに本特別研究は開始され、3次元数値モデルによる地震発生 のシミュレーション、地殻変動データ解析手法の高度化、地震活動評価手法の開発と改良を3本の柱に研究を進めてきた。本報告書は、これらの研究成果をまとめたものである。

この5年間に、判定会招集要請基準の改定や東海地震の想定震源域の見直し、観測情報・注意情報などの地震防災体制の見直しなどが行われ、監視体制が抜本的に改革されたが、過去の研究成果に加え、特別研究の成果も逐次これらの作業に生かされてきた。また兵庫県南部地震以降の、各種基盤的観測網の整備による観測精度の向上により、スロースリップなど従前の観測網では分からなかった現象も次々に発見され、あらたな研究材料が追加され、特別研究の成果を豊かなものになっている。

一方、21世紀に入り、過去に南海トラフ沿いで繰り返し発生してきた東南海地震や南海地震など、隣接地域を震源とする巨大地震についても、近い将来の発生が視野にはいる情勢となっており、防災対策推進のために「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法（平成14年法律第92号）」が制定された。このような状況に鑑み、気象研究所では、東海地震予知のいっそうの精度向上と、隣接地域で発生する巨大地震の発生との関連を解明するために、新たな特別研究を次年度から計画している。

これまでの研究で得られた成果が、今後の研究の推進に結びつくばかりでなく、今後の地震予知研究の推進や、気象庁の地震業務の改善に寄与することを期待するとともに、研究を遂行し成果をとりまとめるにあたり、気象庁内外の多くの方々のご協力や励ましを頂いたことに感謝する。

平成16年1月

気象研究所 地震火山研究部長

濱 田 信 生

概 要

本報告は、特別研究「地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震予知の推定精度向上に関する研究」において得られた成果を、地震活動評価手法の開発と改良、地殻変動解析手法の高度化、3次元数値モデルによる地震発生のシミュレーションという3つの大きなテーマに分けてまとめたものである。

第1章では、地震活動評価手法の開発と改良に関する研究について報告する。最初は、東海地域の地殻・プレート構造に関する報告である。東海地震の想定震源域の海域で自己浮上式海底地震計による観測を行い、この周辺の詳細な地震活動を調べた。その結果、気象庁カタログでは陸域からトラフに向かって深くなっている地震活動が実際にはトラフから陸域に向かって深くっており、フィリピン海プレートの沈み込みに対応していることがわかった。地震波走時トモグラフィを用いて、中部日本地域におけるP波およびS波の3次元速度構造を求めた結果、フィリピン海プレートに対応しているとみられる、トラフから少し高角度で沈み込み始めた後、なだらかに沈み込んでいる高速領域が検出された。さらに、東海地震の固着域の北西隣には、プレート間カップリングが弱い領域が見いだされた。次に、地震活動評価手法に関する報告が続く。S-P時間の違いを利用して、1941年から1995年までの期間における静岡県周辺域の地震活動度の変化を調査した結果、1944年東南海地震直前の地震活動の静穏化が見いだされた。1965年の静岡地震の前後にも地震活動度の変化が見いだされ、この方法の有効性が改めて確かめられた。東海地域で起きている地震の応力降下量の空間・時間変化を調査した結果では、長期的な時間変化は見られなかったが、応力降下量の地域性と深さ依存性が明らかになった。特に、スラブ内地震については本震の応力降下量が1番大きく、余震のそれは比較的小さいということが明らかになった。さらに、東海地域から西日本のフィリピン海プレートの沈み込み帯で起きている非火山性の低周波地震・微動について調査を行い、発生場所がマントル・ウェッジより上部であることを明らかにすると共に、低周波地震・微動の原因として考えられている水の存在が岩石の脱水反応に起因するというモデルを提案した。最後に、津波波形インバージョンによる1944年東南海地震のすべり分布の推定の結果、そのすべり領域が1854年の地震で破壊された東海地域にまで広がっていなかったことを明らかにした。この結果は、平成13年(2001年)の東海地震想定震源域の見直しに貢献した。

第2章では、地殻変動解析手法の高度化に関する研究について報告する。まず、GPSによる地殻変動観測データの精度と誤差の評価を行い、データ品質の改善手法を検討した。東海地域のGPS3時間解析の座標値については、ばらつきが半減することが判明した。GPS全国観測網の1日解析値に見られる年周的な季節変動のパターンが2000年頃を境に変化していることから、単純な年周変動除去では見かけの変動を引き起こす恐れがあり、期間に応じた適切な補正が必要であることがわかった。東海地域の検潮所に独自のGPS観測点を設置して観測を行い、GPS観測で得られた上下変動と潮位データから得られた上下変動を比較して両者が整合的であることを確認すると共に、2000年秋頃からの東海スロースリップによるとみられる傾向変化を明らかにした。次に、観測データに基づいて様々な地殻変動事例を検討した。潮位データを用いて1946年南海地震前後の地殻上下変動を調べ、地震直前の前兆すべりを示す可能性のある潮位変化を見いだすとともに、地震後の地域ごとに時定数の異なる余効変動を検出した。掛川-御前崎間の水準路線及び駿河湾西岸域の水準路線網のデータを時系列解析プログラムによって解析した結果、掛川に対する御前崎の沈降が1988-89年と2000年以降に加速していることがわかった。ただし、前の期間には駿河湾西岸の北部で沈降が目立ったが、後の期間では西岸域全体で沈降が大きくなっていることから、沈降の原因は異なると考えられる。2000年

伊豆諸島北部の地震・火山活動に伴う地殻変動について解析した結果、伊豆諸島北部に置いた変動源では説明できない変位が中部地方にあること、その変位が東海地域直下のプレート境界のスロースリップ開始時期を早めることにより説明できる可能性のあることを示した。このようなスロースリップに対して歪解析を行ったところ、浜名湖とその周辺での伸長歪と渥美半島と御前崎周辺における収縮歪の出現が明らかになった。プレート境界におけるすべりは御前崎付近における CFF（クーロン破壊応力）を増加させている可能性がある。これらの地殻変動の原因推定をより容易に行う上で、インバージョン機能を追加した地殻変動解析支援プログラムが威力を発揮した。

第3章では、3次元数値モデルによる地震発生のシミュレーションに関する研究について報告する。室内実験で得られた岩石の摩擦法則（すべり速度/状態依存摩擦構成則）をフィリピン海プレートの境界面上に適用することにより、大地震発生のモデル化を行い、仮想東海地震の前にどのような地殻変動が見られるか調べた。その計算結果を実際の観測データ（歪、GPS、地震活動）と比較したところ、3成分歪計の観測が前兆すべりを検知する上で効果的であることを示した。次に、1944年の東南海地震の破壊域が東海領域まで及ばなかったことに関連し、東海地域の周辺で起きた巨大地震の影響を評価した。その結果、1891年の濃尾地震は東海地震の発生時期を遅らせること、1923年の関東地震と1944年の東南海地震は発生時期を早めることを明らかにした。最後に、東海地域で観測されているスロースリップイベントをシミュレーションによって再現することができるかどうかを調べた結果、摩擦パラメータの深さ方向への不均質性の存在がこのイベントを再現する上で有効であることがわかった。

Summary

This comprehensive report, entitled “A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes,” was conducted from fiscal 1999 to 2003 by the Seismology and Volcanology Research Department, MRI, as a special research project. This study consists of three subjects:

- (1) Improvement of the quantitative method to evaluate seismic activity,
- (2) Development of the integrated method for analyzing crustal deformation data, and
- (3) Numerical simulation of the earthquake generation process using three-dimensional models.

The results are summarized in the three chapters in this report.

Chapter 1 reports the improvement of the quantitative method to evaluate seismic activity. First, reports on the plate structure in the Tokai region are presented. The seismicity around the Tokai region was studied in detail using the data acquired by pop-up ocean-bottom seismometers. The JMA earthquake bulletin reported that the seismicity around this region is declining from land to the Suruga trough. However, this study confirmed that the reverse inclination, agreeing with that of the Philippine Sea Plate, is preferable. Three-dimensional P and S wave velocity structures beneath Central Japan were determined by seismic wave travel time tomography. The high-velocity subducting Philippine Sea Plate was revealed: the plate subducts at a slightly high angle at first, then at a low angle. The obtained V_p/V_s ratio indicates that seismic coupling in the northwest neighborhood of the locked area of the Tokai earthquake is weak.

Next are reports on methods of evaluating seismic activity. The long-term variation of seismicity around Shizuoka City from 1941 to 1995 was surveyed by utilizing S-P time. Seismicity quiescence was observed just before the 1944 Tonankai earthquake, and the seismicity rate changed before and after the 1965 Shizuoka earthquake (M6.1). Spatial and temporal variations of stress drop of earthquakes occurring around the Tokai region were investigated. Rather than finding the long-term temporal variation of stress drop, we found its area and depth dependence. The stress drop of the main shock occurring within the Philippine Sea slab was found to be greater than that of the aftershocks. An investigation focused on the characteristics and causes of the non-volcanic low-frequency earthquakes and tremors related to the subducting Philippine Sea Plate beneath southwest Japan. The existence of fluid has been indicated as the cause of low-frequency earthquakes. The dehydration process of some rocks was proposed to model the source of the fluid based on data from high-pressure and temperature experimentation. The slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake estimated from tsunami waveforms reveals that the earthquake did not rupture the plate interface in the northeastern end of the Nankai trough beneath the Tokai region, which was ruptured by the penultimate earthquake in 1854.

Chapter 2 presents the result of the development of an integrated method for analyzing crustal deformation data. We first evaluated the precision and error of GPS observation data, and examined techniques of improving its quality. We investigated the coordinates obtained by an analysis using three-hour GPS data in the Tokai area. The existence of the group with high correlation of the variation corresponded to analysis clusters and monument/antenna type, and the variation was halved by the correction. We also analyzed the daily GPS coordinate data and found that the annual variation pattern had changed in 2000. This pattern change caused a false deformation in the simple method, removing the annual variation; therefore, appropriate removal was necessary in every period.

We conducted GPS observation at tide gauge stations established in the Tokai area. A comparison of vertical displacements obtained by GPS observation and those obtained by the tidal data confirmed the consistency between the two and revealed a tendency change caused by the Tokai slow event. Next, we examined the various cases of crustal deformation based on observation data. Using the tide gauge data, we investigated the vertical change before and after the 1946 Nankai earthquake. We determined the sea-level change that may signify a pre-slip just before the earthquake, and we discovered after-slips that have different time constants. Analyzing the data along the leveling route between Kakegawa and Omaezaki, as well as other leveling routes in the area west of Suruga Bay, we found that the subsidence at Omaezaki relative to Kakegawa accelerated in 1988 and 1989, and after 2000. However, acceleration of the subsidence was noticeable in the northwestern coast of Suruga Bay in the former period, while in the latter period the subsidence accelerated in the whole western coast. We investigated the crustal deformation accompanying the seismo-volcanic activity around the northern Izu Islands in 2000. We demonstrated that displacement that cannot be explained by the sources of the northern Izu Islands remained in the Chubu district; it can be explained by the slow slip on the plate interface of the Tokai region starting earlier. According to the strain analysis for the slow-slip event observed by GPS in the Tokai area since 2000, expansion in and around Hamanako Lake and contraction around the Omaezaki Spit and the Atsumi Peninsula were clearly associated with the event. Generation of the slip in the plate boundary beneath Hamanako Lake possibly caused a concentration of the changes in the Coulomb fracture stress (CFF) in the eastern Tokai area. We coded a computer program to assist in crustal deformation analysis, such as estimating the sources of crustal deformation mentioned above.

Chapter 3 details the numerical simulation of the earthquake generation process using three-dimensional models. We estimated the first crustal deformation prior to the hypothetical Tokai earthquake based on a three-dimensional simulation model of earthquake cycles governed by rate- and state-dependent friction law designed to explain laboratory observations acting on the Philippine Sea Plate interface in the Tokai region. We compared the simulation results with the observation results (strain, GPS, seismicity) and suggested that the pre-slip of the earthquake could be more effectively detected by a three-component strainmeter. We then evaluated nearby large earthquake's effects on the timing of the Tokai earthquake in order to determine why the fault motion of the 1944 Tonankai earthquake did not extend to the Tokai region. It is suggested that the 1891 Nobi earthquake delayed the Tokai earthquake, while the 1923 Kanto and the 1944 Tonankai earthquakes advanced it. A slow-slip event has been observed on the plate interface in the Tokai region since October 2000. We examined how the Tokai slow-slip event is reproduced and discovered that the inhomogeneity of the friction parameters in the depth direction contributes to the occurrence of this event.

目 次

第 1 章 地震活動評価手法の開発と改良

1.1 自己浮上式海底地震計観測による東海沖の地震活動	1
1.2 3次元速度構造	32
1.3 静岡市周辺域での長期的な地震活動の変化	36
1.4 東海地域で起きた地震の応力降下量の時空間分布	46
1.5 フィリピン海プレート沈み込み帯における深部低周波微動	53
1.6 津波波形インバージョンによる1944年東南海地震の震源断層推定	62

第 2 章 地殻変動解析手法の高度化

2.1 GPS 3 時間解析値のグループ補正	69
2.2 GPS 1 日値に見られる年周パターンの変化	82
2.3 東海地域の検潮所におけるGPS観測	87
2.4 潮位データによる東南海・南海地震前後の上下変動	97
2.5 東海地域の水準測量データの解析	111
2.6 2000年伊豆諸島北部の地震・火山活動に伴う地殻変動	118
2.7 体積歪計における東海スローイベント検出の試み	128
2.8 東海スローイベントによる地殻変動	137
2.9 地殻変動解析支援プログラムの開発	156

第 3 章 3次元数値モデルによる地震発生のシミュレーション

3.1 地震サイクルのモデル化	160
3.2 シミュレーション結果と観測結果の比較	172
3.3 周辺域巨大地震の影響評価	186
3.4 スロースリップイベントの再現	195