

Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research  
of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes

BY

Seismology and Volcanology Research Department, MRI

気象研究所技術報告

第 63 号

東海地震の予測精度向上及び

東南海・南海地震の発生準備過程の研究

地震火山研究部

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN



## 序

1854 年の安政東海地震以来約 150 年が経過した東海地域では、M8 クラスの巨大地震の発生が懸念されており、1978 年の大規模地震対策特別措置法の公布・施行以来、地震予知のための対策がとられている。東海地震の想定震源域とその周辺では、2000 年前後から固着域とその周辺の微小地震活動の低下、2001 年初頭から 2005 年半ばにかけて浜名湖直下周辺でスロースリップ（プレート境界でのゆっくり滑り）、また東海地域西部のプレート境界深部で半年から 1 年の間隔で発生する比較的短期間のスロースリップが新たに見いだされた。一方、東海地震の想定震源域に隣接する南海トラフ沿いでは今世紀前半にも東南海・南海地震の発生が予測されることから、2003 年両地震に関する観測体制の整備が法律（東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関わる特別措置法）で義務付けられ、各機関による観測強化が進められている。気象研究所地震火山研究部はこれまでの特別研究の成果を土台にして、東海地震の予知のための監視ならびに東南海・南海地震に対する観測に役立てるため、平成 16 年度～20 年度「東海地震の予測精度向上および東南海・南海地震の発生準備過程の研究」と題する特別研究を実施した。本研究では、対象地域を東海地域を基本とする南海トラフとその周辺域に拡大し、スロースリップの発生から東海地震の発生に至る地震サイクルや東南海・南海地震の東海地震発生に対する影響について 3 次元数値モデルによる巨大地震発生シミュレーションにより探求するとともに、地殻活動の観測対象の適用範囲を広げ、潮位、GPS、レーザー式変位計、精密制御震源などを用い観測・解析手法の精度を向上させることを目的とした。本研究により得られた成果は地震学会や地球惑星科学連合大会などでも報告されており、東海監視業務ばかりでなく今後の地震予知研究の推進に貢献することが期待される。本研究の遂行に関しては気象庁内外の多くの方々のご協力を頂いたことに厚く感謝の意を表する。

気象研究所 地震火山研究部長

吉 川 澄 夫



## 概 要

本報告は、特別研究「東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究」(平成 16 年～20 年度)において得られた成果を、地震活動によるプレートの詳細構造の解明、精密制御震源(アクロス)を用いた地殻活動モニタリング、潮位記録による地殻上下変動の推定、新地殻変動観測手法の開発、三次元数値モデルによる巨大地震発生シミュレーションという 5 つのテーマに分けてまとめたものである。

第 1 章では、地震活動によるプレートの詳細構造の解明について報告する。本研究では紀伊半島周辺海域において自己浮上式海底地震観測を 10 回にわたり実施した。1.1 節では、それぞれの海底地震観測の概要と得られた震源分布、および技術的諸要素などについて述べる。1.2 節では、紀伊半島南方沖の南海トラフ周辺において実施した自己浮上式海底地震観測について述べる。当地域の観測によって、南海トラフのトラフ軸周辺において陸上の地震観測網では捉えられていない比較的活発な微小地震活動が存在することを見出した。さらに、この微小地震活動の中にいくつかの地震クラスターや線状の地震配列および地震の空白域などを見出すことができ、プレート構造とプレート運動との関連性において注目される。1.3 節では、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖の地震( $M_j7.4$ )の自己浮上式海底地震計による余震観測について述べる。余震活動は深さ 5～10 km の比較的浅い地震群と、深さ 15～30 km の比較的深い地震群の二群に分かれていることを示した。また、比較的浅い地震群の中にはいくつかの地震クラスターを見出すことができ、この地震クラスターが付加体の分岐断層で発生している可能性を示した。1.4 節では、二重走時差(Double-Difference)トモグラフィ法を用いて、西南日本下の地殻・上部マントルの 3 次元地震波速度構造を推定し、同時に震源を再決定した。その結果、東海地方から九州南部にかけての広い範囲で、スラブ内の地震活動の直上にスラブ地殻に相当する厚さ数 km の低 S 波速度( $V_s$ )・高  $V_p/V_s$  層が存在することが明らかになった。そして、この低  $V_s$ ・高  $V_p/V_s$  層とスラブ内地震の分布に基づいて、西南日本のフィリピン海スラブの形状を明らかにした。

第 2 章では、精密制御震源(アクロス)を用いた地殻活動モニタリングについて報告する。アクロス(ACROSS)は精密制御定常信号システム(Accurately Controlled Routinely Operated Signal System)の略称で、地中に向かって定常的に弾性波を送信することにより、送信点と受信点間の構造の時間変化を捕らえることを目的として開発された装置である。2006 年 3 月に東海地震想定震源域の真上にある静岡県森町に弾性波アクロス送信装置を設置し、フィリピン海プレート上面付近の能動的監視に関する研究を行った。2.1 節ではアクロスの原理を述べると共に、地震計の記録から伝播経路の伝達関数を求める計算法について述べる。2.2 節では森町に設置した弾性波アクロス送信装置の概要と特徴、森町に設置した理由について述べる。当装置の特徴は 2 つの偏心錘を結合・分離する機構をつけることにより、従来のものに比べて広い周波数範囲(3.5～15.0 Hz)で大きな加振力を得ることが可能としていることである。非弾性減衰や散乱体の影響を受けにくくなることを期待し、低周波側に送信周波数を広げた。2.3 節では弾性波アクロス送信装置の信号を解析した結果を示す。2.3.1 項では森町に送信装置を設置する前に予備的解析として、以前から東濃鉾山に設置してあった装置を使って解析した結果を示す。2.3.2 項では森町の送信装置を用いた解析結果を示す。伝達関数の記録断面から、方位によってかなり特徴が異なることがわかった。また、走時のミリ秒よりも小さい微弱な時間的変化も捕らえることが可能であることがわかった。どの観測点においても 1 年周期の変動が見られ、気温や降水量などの気象要素との相関があること、直達波よりも後続波の変動量が大きいなどの事実が明らかになった。2.4 節では伝達関数で見られる各波群の経路を識別するために実施した短スパンのアレイ観測の結果を示す。本研究では、送信装置から 20km の地点での短スパンの地震計アレイ観測によって、地殻の深い部分からの反射波と見られる比較的高速なみかけ速度を持つ波群などを同定し、相関の高い波群の SN 比が向上することを示した。

第3章では、潮位記録による地殻上下変動の推定について報告する。3.1節では、舞阪の潮位変化の解析結果を示す。2000年秋に始まった東海地域での長期的スロースリップイベント（SSE）のすべり領域の真上に近い舞阪検潮所の潮位データに、長期的SSEによる地盤の隆起を示す潮位変化が現れていた。舞阪の潮位データについて過去の記録を調べたところ、今回と同様な変化が1980～1982年と1988～1990年頃にも認められ、これらの時期にも長期的SSEが発生していた可能性があることを示した。3.2節では、潮位記録から地殻上下変動を推定するための津村(1963)の方法で用いられている海域区分について、1961年から2000年までの月平均潮位を対象に検証を行った。津村の区分はほとんどの地点で適切であるが、他の海域に区分した方が適切な検潮所もあることを示した。

第4章では、レーザー式変位計の開発について報告する。4.1節では、レーザー式変位計の必要性和その背景について述べる。東海地域では、2001年から長期的SSEによる地殻変動がGPS観測網によって観測されたが、歪計では検出されなかった。それぞれの観測機器の変動検出レベルを定量的に評価し、長期的および短期的SSEによる地殻変動量と比較したところ、機器の違いによるSSE検知の可否を説明できた。また、その結果は、長基線における伸縮観測が、長期的SSEをより短い時間分解能で観測できる可能性があることも示している。4.2節では、本研究で開発したレーザー式変位計の技術要素について述べる。長基線を実現するための光学設計・安定した長さ基準としてのヨウ素安定化レーザー・空気による影響を除くための高真空の光路などを採用した。開発したレーザー式変位計を静岡県内のトンネル内（天竜船明観測点）に設置し、基線長200mでの試験観測を2007年12月から約1年間行った。4.3節では、観測結果を示す。経年変化は $-4.2 \times 10^{-7}$ の縮みで、GPSから得られる広域歪場に比べて1桁大きい。観測された潮汐歪の振幅は理論的予測値のおよそ半分であった。気圧変化に対する歪応答は多成分歪計と同じ程度であった。降水影響は小さく、夏季の一時期にだけ見られた。トンネル内の温度変化が特に冬季に顕著で、歪に $10^{-8}$ 程度の影響を及ぼす。ノイズスペクトルは他のレーザー式変位計と同程度であり、評価された変動検出レベルは期待したレベルを達成している。レーザー式変位計は、2008年8月から9月に発生した短期的SSEによる地殻変動を検出した。温度変化を抑える対策をとったうえで、2009年3月から基線長400mでの本観測を開始した。

第5章では、3次元数値モデルによる地震発生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）を陸のプレートと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、南海トラフ沿いで繰り返し発生する巨大地震や浜名湖直下で繰り返し発生する長期的SSEのモデル化などを行った。5.1.1項では、アスペリティ領域の大きさや摩擦パラメータの値を様々に変えて、東南海・南海地震の発生順序や連動性を調査した結果を述べる。安政および昭和の東南海・南海地震のように東南海地震が先に起こるには、プレート収束速度や特徴的すべり量 $L$ を一定とした場合、東南海側のアスペリティ領域が小さいか、東南海側のアスペリティの摩擦パラメータ $a \cdot b < 0$ の絶対値が小さいかのどちらかであることがわかった。5.1.2項および5.1.3項では、現実に近い3次元プレート形状を用いることで、過去に南海トラフ沿いで発生した巨大地震の破壊開始点をシミュレーションで再現したことで、さらに観測されたGPSの地殻変動データに適合するよう、摩擦パラメータ $(a \cdot b)$ の値と深さ方向の広がりを推定した結果について述べる。5.2節では、東海地域の長期的SSEのシミュレーションについて述べる。摩擦パラメータの設定をトラフ軸方向に不均質にするとともに、東海沖に沈み込む海嶺を考慮した設定にすることで、浜名湖を含む領域で周期約30～40年の長期的SSEが繰り返し発生するモデルが得られた。そのモデルでは、最後のスロースリップは空間的に西から東へ移動しながらすべりが収まることなく加速し、結果的にプレスリップ（先行すべり）となり東海地震の発生に至った。5.3.1項および5.3.2項では、東海地震の想定震源域近傍で地震が発生した場合に、東海地震の発生時期がどのような影響を受けるかについてシミュレーションを行った。その結果、東海地震の発生時期は早まる場合も遅くなる場合もあるが、変動幅としては数日から数年程度で、東海地震発生1年以上前であれば、M6.5クラスの地震が近傍で発生しても東海地震を直接誘発する可能性は低いことがわかった。

## Summary

This comprehensive report presents the results of a special research project “Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes”, which was conducted by the Seismological and Volcanological Research Department, MRI, from FY 2004 to FY 2008 (five years). The report consists of five chapters: “Investigation of the crust and plate structure beneath the Tonankai and the Nankai areas”, “Analysis of underground physical properties using the signal from the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS)”, “Estimating vertical displacement by tide gauges”, “Development of the long baseline laser extensometer”, and “Prediction of the earthquake generating process by three-dimensional numerical simulation”.

Chapter 1 reports the investigation of the crust and plate structure from seismic observation. Section 1.1 describes seismic observations with pop-up ocean bottom seismometers. Ten terms of observations were conducted in areas along the Nankai trough. Observed seismicity and technical issues are described in this section. Section 1.2 discusses seismicity in the southern area off the Kii Peninsula. Seismic activity beneath the trough axis was found from four-term observations. Section 1.3 analyzes aftershocks of an earthquake that occurred on September 5, 2004 ( $M_J7.4$ ) southeast off the Kii Peninsula. Aftershocks were divided into two clusters, shallow ones and deep ones. The shallow cluster was considered to be related to splay faults over the subducting Philippine Sea plate. Section 1.4 describes the three-dimensional seismic velocity structure in and around the Philippine Sea plate subducting beneath southwestern Japan. The structure was obtained by using the double-difference tomography method. A low S-wave velocity ( $V_s$ ) and high  $V_p/V_s$  layer several kilometers thick has been clearly imaged at locations immediately above the top of intraslab seismicity in a wide area from Tokai to Kyushu. Based on the obtained location of the low  $V_s$  and high  $V_p/V_s$  layer and hypocenter distribution of relocated intraslab earthquakes, we estimated the configuration of the upper surface of the Philippine Sea slab in all of southwestern Japan.

Chapter 2 reports on analysis of underground physical properties using signals from the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS), which has been developed for detecting temporal variation of the structure between the transmitter and the observed station. The Meteorological Research Institute deployed a seismic ACROSS transmitter at Mori-machi in March 2006, just above the source region of the anticipated Tokai earthquake, and has been studying the possibility of monitoring the status at the boundary between the Philippine Sea plate and its overriding plate. Section 2.1 explains the principle of ACROSS and the method of calculating the tensor transfer function. Section 2.2 presents an overview of the seismic ACROSS transmitter deployed at Mori-machi. The main feature of the Mori-machi transmitter is its higher seismic energy release at low frequency by introducing a mechanism that allows an optional addition of a large eccentric moment as low as 3.5Hz. Section 2.3 discusses the results obtained by the analysis of the seismic ACROSS transmitter. Section 2.3.1 describes the preliminary analysis using the Tono ACROSS transmitter, and section 2.3.2 presents the results obtained by analysis of the Mori-machi ACROSS transmitter. The characteristics of the record section of the transfer function depend on propagation direction. Stations in the E-direction have a rather simple waveform, and stations in the NW-direction have a long coda. In the next step, the temporal variation of the transfer function is derived. We can detect the sub-millisecond-order variation of travel time by this analysis. Annual variation can be observed in most of the stations and is correlated with such meteorological parameters as temperature and rainfall. Section 2.4 discusses seismic array observation deployed to monitor the ACROSS signal at 20km from the Mori-machi ACROSS transmitter. We deployed a small seismic array, and found that a coherent P-coda of relatively high apparent velocity was reflected from deep part in the crust, and the signal-to-noise ratio of coherent waves was increased with



array signal processing.

Chapter 3 reports the vertical displacement estimated by tide gauges. Section 3.1 discusses slow slip events (SSEs) detected with a tide gauge. The Maisaka tide gauge station is located near the center of the Tokai long-term slow slip area, which began slipping in the autumn of 2000. The tide level change indicates an uplift of the ground by the slow slip there. Similar changes are also recognized from 1980 to 1982 and from 1988 to 1990. Long-term slow slips also may have occurred during these periods. Section 3.2 examines the sea area divisions defined by Tsumura (1963) to deduce vertical crustal movement using monthly sea level data from 1961 to 2000. The divisions defined by Tsumura were confirmed to be appropriate at most of the stations, although several stations were found to be better grouped into different sea areas.

Chapter 4 reports the development of a long baseline laser extensometer. Section 4.1 describes the necessity of stable and high-resolution observation of crustal deformation. A long-term SSE had been observed in the Tokai district by the GPS network of Geographical Survey Institute since 2001. Strainmeters in the Tokai district established by Japan Meteorological Agency, however, did not detect abnormal changes related to the long-term SSE. We quantitatively evaluate detection levels of these observation instruments and compare evaluated detection levels with amounts of crustal deformation induced by short-term and long-term SSEs. Section 4.2 reports on technical issues of the laser extensometer. Optical parts suitable for the long baseline, an iodine stabilized laser, and a laser path of high vacuum were adopted to achieve stable and high-resolution observation. The laser extensometer was installed in a tunnel in Hamamatsu City, Shizuoka Prefecture. Obtained strain data is described in section 4.3. We experimentally observed crustal strain on the 200m-long baseline for one year, beginning in December 2007. The amplitude of the observed tidal strain was half that of the theoretically predicted one. The effect of atmospheric pressure change was the same as that of the multi-component strainmeter. The precipitation effect was small and limited to the summer. The power spectrum of noise strain of Tenryu-Funagira is similar to that of other laser extensometers, and the evaluated detection level achieves a preliminary estimate. The laser extensometer observed crustal strain caused by the short-term SSE from August to September 2008. We started regular observation of the 400m-long baseline in March 2009.

Chapter 5 describes the numerical simulation of the earthquake-generation process using three-dimensional models. We intend to simulate the great earthquakes along the Nankai trough and the recurrent long-term SSE before the occurrence of cyclic great earthquakes, using a three-dimensional earthquake cycle model based on the rate- and state-dependent friction law. Section 5.1.1 describes our investigation of the mechanism of occurrence order of two adjacent great interplate earthquakes, the Tonankai and the Nankai earthquakes, along the Nankai trough by varying the size of the asperities or values of frictional parameters. Our result suggests that the Tonankai earthquake is followed by the Nankai earthquake when the size of asperity or the absolute value of negative frictional parameter  $a-b$  for the Tonankai earthquake is smaller than that for the Nankai earthquake for a given homogeneous plate convergence rate and the same characteristic distance  $L$ . Sections 5.1.2 and 5.1.3 describe our simulation of the initiation point of great earthquakes along the Nankai trough by using a realistic three-dimensional plate boundary configuration and our estimation of the value and depth distribution of frictional parameter  $a-b$  by comparing the simulation results of crustal movement and observed GPS data. Section 5.2 discusses our simulation of recurring SSEs with a period of 30 to 40 years beneath Lake Hamana, by applying small negative values to frictional parameter ( $a-b$ ) and small values to characteristic distance  $L$  for the western region of the Tokai district, and large values to  $L$  for regions off the Tokai district, where seismic structure surveys indicate the existence of a subducting ridge. In sections 5.3.1 and 5.3.2, we estimate the effects of nearby large earthquakes, such as the Shizuoka earthquakes (1935, 1965), on the timing of the Tokai earthquake. The results indicate that the nearby large earthquakes advance or delay the occurrence of the Tokai earthquake from a few days to a few years, depending on their locations and times.



# 目 次

第1章 地震活動によるプレートの詳細構造の解明	1
1.1 南海トラフ沿いの海域で実施した自己浮上式海底地震計観測	1
1.2 紀伊半島南方沖の南海トラフ周辺の微小地震活動について	36
1.3 海底地震計を用いた2004年紀伊半島南東沖の地震の余震観測	48
1.4 Double-Difference Tomography 法による西南日本の3次元地震波速度構造 およびフィリピン海プレートの形状の推定	67
第2章 精密制御震源（アクロス）を用いた地殻活動モニタリング	88
2.1 アクロスの原理と解析方法	88
2.2 森町のアクロス送信装置概要	103
2.3 受信データ解析	115
2.3.1 土岐アクロス解析	115
2.3.2 森町アクロス解析	124
2.4 短スパン地震計アレイ観測	149
第3章 潮位記録による地殻上下変動の推定	162
3.1 舞阪の潮位変化から推定される東海スロースリップの繰り返し発生	162
3.2 潮位記録を用いた地殻上下変動推定のための津村による海域区分の検証	168
第4章 新地殻変動観測手法の開発	186
4.1 必要性和その背景	186
4.2 技術要素	197
4.3 天竜船明観測点における観測の結果	217
第5章 三次元数値モデルによる巨大地震発生シミュレーション	239
5.1 東南海・南海地震の連動現象の再現	239
5.1.1 シミュレーションを用いた東南海・南海地震の発生順序について	239
5.1.2 南海トラフ沿い大地震の開始位置に与えるプレート境界の形状の効果	248
5.1.3 GPS データを用いた摩擦パラメータ ( $a-b$ ) の推定	255
5.2 東海地域の長期的スロースリップイベントおよび地震サイクルの再現の試み	266
5.3 想定震源域付近で発生した地震の東海地震への影響評価	285
5.3.1 想定震源域付近で地殻内地震が発生した場合の東海地震への影響	285
5.3.2 1935年および1965年の静岡地震による東海地震の発生時期への影響	295

