

地震 ジャーナル

32

2001年12月

エッセイ 祖父と関東大地震 ●片山恒雄

東海地震対策の再検討を ●茂木清夫——1

東海地震の警戒宣言における灰色情報 ●井野盛夫——8

東海の固着域と地震活動の変化 ●松村正三——13

陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化 ●伊藤久男——29

地殻下部の震源断層

—2001年インド・グジャラート地震— ●佐藤魂夫——38

被害分布とその特徴

—2001年インド・グジャラート地震— ●村上ひとみ——47

地震予知連絡会情報 ●長谷川昭——55

●書評——65

●執筆者紹介——70

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

祖父と関東大震災

片山恒雄

わたしの祖父は、片山正雄とって、日本で初めての本格的な独和辞典をつくった。昭和8年に55歳で亡くなったので、わたしは祖母や父からの話でしか祖父のことを知らない。祖父の辞書のうち、「双解独和小辞典」だけが、戦争後も細々と版を重ねていて、わたしが大学に入ってドイツ語を第二外国語に選んだとき、父がくれたこの辞書は、当時すでに歴史を感じさせた。なにしろ、ふつうのアルファベットではなく、古いドイツ語独特の花文字を使っていたのだ。

先日家内が図書館に行って何気なく片山正雄という名前を検索してみたらしい。あなたのお祖父さまの辞書を見てみたいと言いだした。そう言われて、わたし自身も何となく祖父の辞書をもう一度手にしてみたくなった。都内で会議があったある日、本郷消防署近くの南江堂という出版社に寄ってみた。約束もなく、夕方5時をすぎた時間だったが、取締役の高橋正男さんが話を聴いてくださった。南江堂は、戦災を受けたうえ、その後も火災を出したという。今はドイツ語の教科書や辞書は出版しておらず、医学の専門書の出版社として知られている。高橋さんは、若いとき短期間だがドイツ語の教科書や辞書の出版に関係されたそうで、祖父の辞書のことを覚えていてくださった。探してみましようということでその日は終わったが、数日後に「見つけました」というお電話をいただいた。

見つけた辞書は、昭和2年7月1日初版発行、昭和16年12月5日増訂第21版発行の「双解独和大辞典」(2,465ページ)、定価11円は当時すればずいぶん高い本だったようだ。

大辞典のたった2ページの前書きを、わたしは繰り返し読んだ。大学教授を続けるか、辞書づくりに専念するかで、祖父がたいへん迷ったということは、祖母から何度か聴いたことがある。教師は良い辞書を使うにもかかわらず、生徒は豆字引を使って、良い辞書を引きさえすれば解ることを、教師から秘伝のように口移しに教えられている。教師と生徒がいっしょに使える辞書をつくりたい。わたしは、これを読むまで、なぜ祖父が「双解」という文字を付けたのか知らなかった。

それにもまして、驚いたのは、次の一文である。

「大正4年の夏、南江堂の依頼に応じて一大決心を以って之を起稿し、大正12年には原稿は殆ど全部を、組版は大半を完成したが、同年9月1日の関東大震災のために紙型組版の全部と残余の原稿の大半を焼失したので、手元に残った校正刷の古紙を種に再びそれ等の復興に着手し、本年3月には原稿を、5月には印刷を完了して世に公にすることを得た。これがために私は私の生涯の中から取り返しのかね約4年の星霜を犠牲に供したが、(第1次世界)大戦終息後手に入れることの出来た新材料等に依って旧稿に多少の補訂を加へることを得たのはせめてもの慰藉である」

私も、かれこれ40年ほど土木工学、地震工学の教育や研究に携わってきたが、祖父が失った4年の星霜のどれだけを取り戻せたのだろうか。「昭和4年4月10日第1版発行、昭和27年6月1日改訂第21版発行」という、すり切れた革表紙の小辞典の方は、その後、家にあることがわかった。

東海地震対策の再検討を

茂木清夫

問題は何か

東海地方で大地震が発生するおそれが指摘され、それが起こる場合に備えて、事前に予知することによって災害を軽減しようという考えのもとに「大規模地震対策特別措置法」(以下、大震法と略記する)が1978年に制定、施行されて今日にいたっている。大震法の特徴は、大地震が高い確度で予知されることを前提とし、警戒宣言を発令してそれに対応する措置がとり決められていることである。しかも、この対応措置は後で説明するように、きわめて社会的影響の大きいものである。

地震の短期予知は前兆現象を観測することによっておこなわれるが、前兆現象のあらわれ方は場所により、時によって違う複雑性、不確実性がある、確度の高い予知は一般に困難であるが、「M8級の東海地震はほぼ確実に直前予知が可能である」という前提で大震法が制定された。これについては後述の通り大いに問題があるにもかかわらず、このような法律ができた。それは当時の地震専門家が地震予知についてかなり楽観的な見方をしていたからではないかと思われるかも知れない。

ところが、この法律制定のときに国会で参考人として意見を述べたほとんどの地震専門家(大学教授)は、法律制定には反対しないものの、現段階では確度の高い地震予知はむずかしいこと、地震予知はまだ研究開発途上の問題であるという意見をくりかえし、そのことを十分考慮すべきことを述べていたのである。また、内閣に設置された地震予知推進本部も地震予知はまだ開発段階にあり、判定会が発足したからといってすぐに確度の高い予知は期待できない、との見解を公表してい

た(科学技術庁、1977年)。

こういう確度の高い短期予知に慎重な意見が強かったにもかかわらず、政府(国土庁、気象庁)は確度の高い予知を前提とした大震法を成立させ、しかも、警戒宣言が発令されると、きわめて大きな社会活動への影響を与えるにちがいない強い対応措置をとることを決めて今日に至っている。

筆者はこれは実情に合わないことが気になっていた。地震の前兆現象出現の不確かさを考えると、地震が短時日のうちに発生する確率を100%(黒)か0%(白)に峻別し、黒の場合は全国の社会的機能をマヒさせかねない強い規制をとる現行の対応措置は適切でなく、このような二者択一ではなく、中間レベルの規制のゆるい「注意報的なもの」をも設ける必要があることを提言した。

1991年に地震防災対策判定会の会長(第3代)を委嘱されると、直ちに、気象庁長官、国土庁防災局にその趣旨を説明し、検討すべきことを訴えた。気象庁は一時この問題を真剣に考えたときもあったが、目に見える進展が見られず、1996年3月に会長を辞任した。これを契機に、ようやく各方面でこの問題の重要性が認識されてきたようであるが、具体的な動きがないままに経過している。多くの人が賛同の意見を寄せてくれているが、この問題がいかに重要で緊急な問題であるかをあらためて強調したい。

大震法の制定

法律の成立の経過は1979年に地震予知連絡会が出した「地震予知連会10年のあゆみ」に大震法の制定にかかわった気象庁の末広重二さんたちが執筆しているので、その一部を以下に紹介する。

同書の「第15節 東海地域判定会」に大震法成立直前の状況が記されている。

「駿河湾地震説の発表は、静岡県を中心とする東海地域に各種の社会的影響をおよぼし、地震予知の早期実現に対する要望は非常に大きなものとなってきた。また、地震予知の研究を推進する側においても、東海地域に展開している各種の観測で、もしかしたら大地震の前兆をとらえることができる場合も起こり得るのではないかと、また、直前予知に有効と考えられる観測項目や観測数を増やせばこの前兆捕捉がもっと確実になるのではないかと。このような場合には直前予知も可能ではないかというような意見が出てくるようなところまできた。このような動きに対応すべく、文部省測地学審議会は1976年12月『第3次地震予知計画の再度一部見直し』を建議した。」

ここでは、もしかしたら直前予知が可能かも知れないというように、予知の可能性についてかなりひかえめに書いてある。この認識は法案制定にあたって参考人として意見を述べた前述の大学教授（筆者も含む）とほぼ同じである。国会での議員と参考人の意見のやりとりについては、拙著「地震予知を考える」（岩波新書）でかなり詳しく紹介したので参照されたい。

ところが、つづく「第16節 大規模地震対策特別措置法」ではつぎのような記述からはじまる。「前述の判定会の発足にともない、東海地域での大規模地震について物事がすべてうまく進行した場合、直前の予知情報が出される可能性が出てきた。この際、予知情報を実効あるものとするために、防災対応措置を主とした対策をたてる必要があるとなってきた」として、「大震法」が1978年に成立、施行されたことが述べられている。

その中の「法律のあらまし」の中で、この法律の対象となる地震についてつぎのように述べている。「現在の地震予知の技術水準では、すべての地震を予知することは不可能であるが最近の予知技術の進歩にともない、直前予知に有効と思われる各種目の集中観測、常時監視体制を強化することにより、地震発生の前兆現象を比較的広範囲にかつ確実にとらえることができると考えられている

大規模な地震（現在の地震予知技術ではマグニチュード8程度）を対象とする。」そして、東海地震がその対象となった。

大震法直前のひかえめな記述に対して、「法律のあらまし」では「M8の大規模地震では前兆現象を比較的広範囲にかつ確実にとらえることができる」と、わずか1、2年の間に大きく飛躍したのである。そして、これが東海地震はほぼ確実に予知出来るという、予知を前提とした大震法の成立の根拠とされた。

地震予知の不確実性

これは当時の我々の一般的見解からは突出したものであったと思う。1980年に日本学会議の地震予知小委員会と地震学会の共催で開いた地震予知研究シンポジウムで、地震予知小委の委員長であった筆者と佐藤良輔地震学会委員長が連名で書いたプロシーディングスの序文に、次のような文章がある。

「前略一。ここで、なぜ東海地域の大規模地震の実用的予知の実施に踏みきったかの根拠について、ごく簡単に私見を述べてみたい。なぜならば、一部には地震を予知することは本質的に不可能であるという考えさえあるようである。もし、東海地域に大規模地震が起こる場合に、それを予知する可能性が期待できないか、あるいはその可能性がはなはだ低いのであれば、判定会もそれにもとづく法律その他の措置もすべて架空の絵物語であるということになるからである。

確度の高い実用的地震予知はまだ多くの場合成功していないのが実情である。中国の場合はいくつかの大地震の予知に成功しているようであるが、確たる方法が確立しているなどというものではないようである。また、世界中の地震の中には明瞭な前兆現象が観測された例が少なからずあり、これらのデータが参考になることはもちろんであるが、前兆現象の起こり方は場合によってちがいが、これらのデータをもとに東海地震の予知の実用化に踏みきる根拠にする訳にはいかない。特に、海溝やトラフ沿いの巨大地震についての情報

は大変少なく、その発生時期を実用的な正確度で予知したという例は全くないのである。」

この長い文章を引用したのは、大震法がスタートして2年という時点で東海地震の予知を楽観的に見ていない状況が読みとれるからである。東海地震の実用的予知体制をスタートさせたのは、確度の高い予知ができるという根拠があったからではなくて、東海地方という人口密集地域で地殻歪みが蓄積されている、いずれは大地震が起こることが予想されている所であるので、ここで実用的な地震予知に挑戦するのが地震研究者の責任であり、社会から要望されていることでもあるからであったと思う。したがって、確実な予知ができることを前提とした対応策はとるべきではなかったのである。

「東海地震」に前兆現象があるかどうかを予想する参考資料が全くなかったわけではない。実は、東海地域の西側隣接地で1944年の東南海地震が起こった時に、国土地理院は静岡県の掛川付近で水準測量を実施していた。筆者がはじめて東海地方で大地震が起こる可能性があることを指摘したのが1969年であるが、国土地理院の佐藤裕さん(1970, 1977)は掛川(図1参照)の水準路線の測量の往復のちがいを発見し、これは測量誤差を超えるもので、この地区で東南海地震直前に1秒以上の南上りの傾斜があったと見られることを報告した。この佐藤さんの指摘は、想定されて

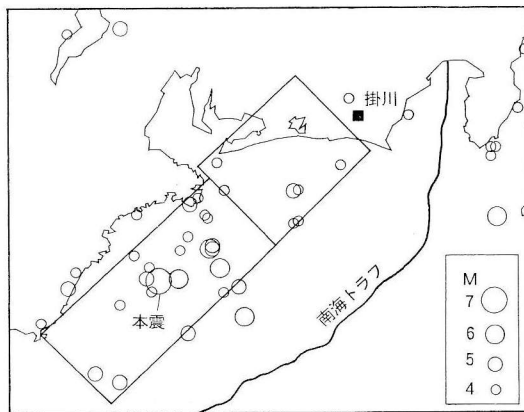


図1 1944年東南海地震の本震・余震分布(M4以上)と掛川的位置。

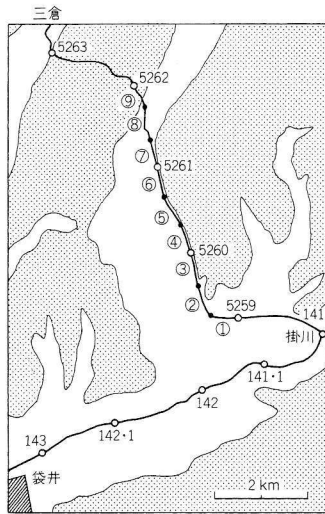
いる隣の東海地震でも前兆的地殻変動が期待できるかも知れないことを示唆する唯一のものであった。

しかし、この測定結果に疑問を持つ人もいた。たとえば、当時地震研究所で地震予知の研究に打ちこんでいた津村建四朗さんとこの問題について長時間話し合ったことを記憶している。1981年頃だった。彼はかつて国土地理院にいて水準測量に従事したことがあり、その経験では水準測量には誤差が起こりやすく、この「変化」は多分測量の誤差であると思うというのである。

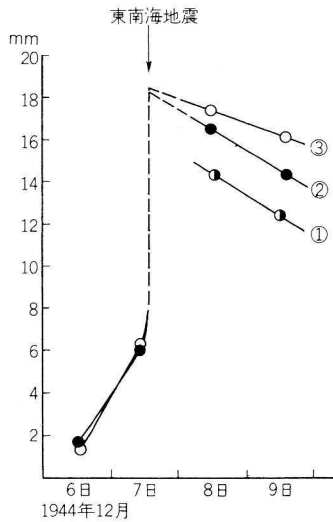
そこで筆者はこの変化が本物であるかどうかを徹底的に調べる必要があると考え、国土地理院に通って、当時の測量原簿にもとづいて検討した。同時に、掛川付近の水準点の現場を確認し、近くにある浜松測候所で、東南海地震の地震計による振動記録、地震発生前後の気温や風速も調べた。その結果、この変化は測定誤差によるものではないとの結論に達した。図2は掛川に近い水準路線の相隣る区間(700m)の高度差の変化曲線である。隣りあう区間の変化が非常に似ていることはこの測量結果が信頼できることを示している。

図3は一連の測量結果から推定したこの地区の地盤の傾斜量の時間的変化である。地震の1,2日前に明瞭な変化が見られる。もし、東海地震の場合に掛川でとらえられたような明瞭な直前の地殻変動があれば、今日のかかなり充実した観測網をもってすれば、十分とらえることができると思われる。現在の東海地震の判定会では、図3の曲線を参考にしようとしているようである。

しかし、掛川の地盤変動曲線が東海の場合にも再現されるとは限らない。第一の理由は、現在想定されている東海地震の震源域と掛川の変化が起こった1944年東南海地震の震源域とはちがうことである(同じところで起こっても、かならず再現するとは限らない)。第二の理由は、図1からわかるように、東南海の震源は紀伊半島沖にあり、その北東150km以上も離れた、震源域の端にある掛川でこのような変化が起こったが、その物理的な意味はまだわかっていないことである。



(a)



(b)

図 2 (a) 掛川から三倉に至る水準路線。白丸：一等水準点で、数字はその番号；小さい黒丸：測量中に仮設した固定点。（茂木，1982）

(b) 相隣る水準測量の区間②及び③の地震の直前、直後の高度差の変化曲線、縦軸の正は各区間の南東側の隆起を示す。①については地震直後の変化（掛川側隆起を正）のみを示した。（資料は国土地理院による）（茂木，1982）

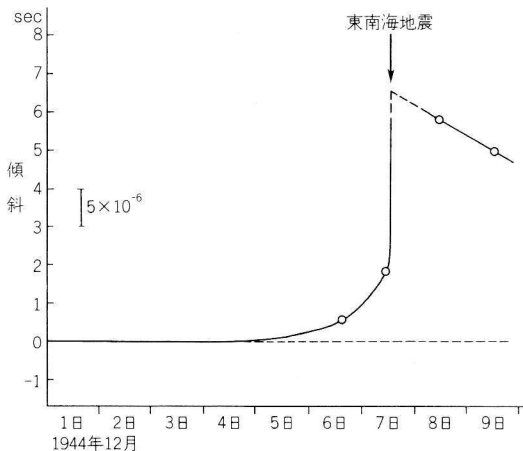


図 3 区間①②及び③から求めた地盤の傾斜量の時間的変化。（茂木，1982）

測地学審議会のレビュー

1997年、文部省測地学審議会は地震予知計画の実施状況などについてのレビューを発表した。大震法が制定されてから20年もたつのに、東海地震の予知の確実さについて、それまで公的に一度も検討されたことがなかった。この報告書でこの

問題を正面からとりあげ、状況を分析し、問題点を指摘した。その中で、予知の不確実性について述べているところを要約すると次の通りである。

「現在想定されている東海地震の隣接地で起こった東南海地震の前に掛川で水準測量をしていたところ、地震の前はかなり顕著な異常と見られる地盤の傾動があった。もし、将来発生するとされる東海地震の直前にも同じような変動が起こり、その時間的経過も同じであれば、警戒宣言を発令して予知することが可能であろう。しかし、同じ現象が東海地震で繰り返されるという保証は必ずしもない。時間経過が違う場合、変動が小さい場合は予知は困難である。東南海地震の事例だけからは予知が可能である場合の確率を推定することはできない。つまり、東海地震の直前に前兆現象が現われるかどうか、現われるとしてどの程度のものか、どういう時間経過をたどるかについて、それを予測する根拠が乏しく、どれくらい予知が可能なのかを推定することはできない。

大震法を受けて、判定会が設置され、体制面において業務として警報を出す形はできたが、『しかし、予知手法の科学的根拠と予知情報の社会へ

の影響については、更に検討すべき課題が残されている』(報告原文のまま).」

「注意報的なもの」の必要性

筆者が論文でこのことを初めて指摘したのは、1987年の地震予知研究シンポジウム(日本学術会議地震予知小委員会、地震学会共催)においてである。その論文集の中の「東海地域における地震予知の2,3の問題」の最後で次のように書いている。

「なお、大地震に結びつくと思われる明瞭な前兆現象が認められた場合に警報を発するわけであるが、やや不明瞭ではあるけれども気になる前兆的(?)変化が認められる場合もあるであろう。また、警報を解除したが、さらにある程度の警戒を続けることが必要な場合もあるであろう。そのような場合は注意報ともいべきものを出すのがよいのではなかろうか。東海地域のように膨大な人口を有し、各種の社会活動が活発な所では、きめの細かい情報の提供と、それに応じた適切な対応が非常に重要である。」

大震法ができると同時に、警戒宣言が発せられた場合、政府、地方自治体、各企業、一般市民がどのように対応すべきかが国土庁によって決められた(表1)。大震法では予知できることを前提としているために、その対応措置は間もなくほぼ確実に大地震が起こると考えられる時に取られるべきものと同程度の厳しい内容になっている。東海地震が起こった場合に震度6と想定される地域が静岡県を中心に防災対策強化地域に指定された。

表1 東京地震の警戒宣言と注意報による対応の違い

	警戒宣言	注意報(案)
新幹線	ストップ	徐行運転
高速道	閉鎖	徐行
銀行、郵便局	閉鎖	通常
スーパー、デパート	閉鎖	通常
病院外来	閉鎖	通常
学校	休校	通常
社会的コスト	7,200億円/日	大幅に減少

この地域は社会活動が活発であると同時に、東京と大阪の間に位置しているため、東海道新幹線、東名高速道、中央高速道という大動脈が走っている。

警戒宣言が発令されると、強化地域内では、これらの新幹線、高速道をストップさせ、銀行・郵便局の窓口を閉め、デパート・スーパーは店を閉じる。病院の外来診療も中止し、学校の児童生徒は帰宅させる。まるで戒厳令下の規制のようなものである。首都圏と中京・関西圏が突然分断され、その社会的損失が莫大なものになることは明らかである。

このような強い規制のもとでは何日ももたないであろう。ところが、1983年の日本海中部地震のように、前震発生から12日後に大地震が起こった例もある。このようなことを念頭におくと数日から10日間ぐらいは警戒を続けなければならないことになる。

このような重大な社会的影響を与えかねない規制を行う場合には、その必要性が確実にあること、それがどのような影響を与えるものであるかを事前に検討すべきである。つまり、アセスメントを行い、広く意見をきくべきである。

1991年、筆者が判定会会長になって、まず、このことに法的な責任をもつ国土庁の担当者に向うた所、そういうことは行っていないし、行方ないという。幸い民間のシンクタンクである日本総合研究所がこの問題の重要性を認識されて、警戒宣言を出した場合の経済的損失を試算して発表した。それによると、表1に示したように、1日あたり概算で7,200億円の損失があるという。警戒宣言は何日間続くかわからないが、それを出すと数兆円の損失を覚悟しなければならない。

ある地殻の異常変化が認められ、警報を発表したが空振りだったということは十分あり得る。米国のカリフォルニアのパークフィールドという所で、過去にどのような前兆現象があったかという経験をもとにして警報を出したが二回とも空振りに終わった。東海の場合はそういうデータのない所でのぶっつけ本番である。パークフィールドは過疎地での実験だったからほとんど社会的な影響が

なかった。しかし、東海の場合はちがう。数兆円の損失を覚悟して、白か黒かの二者択一の判定を求められている。

現行の大震法は、異常があったら“見逃し”はしないというのを基本的立場にしているの、僅かな変化でも警戒宣言を出すことになるかもしれない。その場合は当然空振りが多くなる。一方、その膨大な社会的コストを考えると、よほどの変化が起こるまで躊躇してしまう可能性がある。そうすると見逃すことになる。

この見逃しと空振りの両方をできるだけ避けるには、白か黒かの二者択一ではなく中間の灰色情報が必要となる。天気予報でも、0%と100%だけの降水予報ではなく、30%、50%などもある確率予報を行っている。天気予報の場合は、気象衛星で雲の動きを直接とらえるなどの充実した観測が行われ、しかも毎日が経験の積み重ねとなっている。それでも予報がなかなか難しいことを我々は実感している。それに比べ、地震は地下深部の破壊（又は急激なすべり）によって起こる。その発生に先行するわずかなシグナルを地表でとらえてその発生場所、大きさ、時期を予知しなければならぬ。しかも空振りのコストは膨大である。0%と100%だけの判定でそれに対応できるわけがない。したがって、もっと規制の緩い、社会的コストが小さい注意報が必要なのである。

緩やかな予報でも大きな効果

この注意報で取るべき対応措置としては、筆者の個人的考えでは、表1に示したように、新幹線や高速道路などはストップさせずにスローダウンにとどめ、病院外来や銀行・郵便局・デパートなどは閉めない。市民の日常生活への影響をできるだけ小さくしながら、被害を軽減するための情報を提供する。ここで重要なことは、注意報を出して各人の判断にまかせるのではなくて、行政が中心となって注意報に対応する社会の対応措置を前もって決めておき、混乱なく機能するようしておくことである。

高速で市街地を走っている新幹線は、大地震の

時には大きな災害をもたらす可能性が高い。しかし、徐行していれば災害は大幅に少なくなるだろう。1995年の阪神大震災の時に、地震が早朝に起こったために、高速の新幹線はまだ走ってなかったことは幸いであった。もし地震の発生がもう少しおそかったら、もう一つの大災害が起こっていただろうと言われている。ところが私鉄はすでに運転を始めていた。それにも拘わらず、ほとんど人的被害がなかったが、それは電車の速度がおそく、とっさの対応ができたからである。新幹線を完全にストップさせずに、徐行させるメリットは大いにあることがわかる。地震のある程度の切迫性が予報され、前述のような措置がとられ、家庭でも家具の固定や火元確認を行うなど市民が日常生活の範囲内で整然と備えるならば、地震が突然起こった場合に較べて被害は大幅に軽減されるだろう。

筆者が判定会会長に就任した時に気象庁長官だった立平良三氏は、確率予報の専門家であったためかも知れないが、筆者の提言の重要性を直ちに理解された。1年後に定年退官したが、翌1992年の雑誌『科学』の座談会で、「東海地震の警戒宣言が出たらこういう応急措置を取りなさいということがいろいろ決められています。その社会的コストはどの程度なのでしょう。発足当時から社会情勢も変化していることでしょうから、それが合理的なものかどうか検討の時期にきているのではないかと思います。」と述べている。数カ月前まで長官であった人がこういう意見を述べているのである。また、気象庁は翌年（1993年）の月例の判定会打合せ会で、今後の判定会の運営について述べた文書の冒頭で、「判定会長の指摘されるとおり、現行のシナリオだけを念頭においた判定会運営体制とそれに関連する世の中の防災体制は万全ではなく、いわゆる灰色判定問題を処理するなんらかの強力な改善策を計る必要がある」と述べ、灰色情報の問題に積極的に取り組む姿勢を示した。しかし、結局、「注意報が必要だといっても、大震法があるからできない」という状況が続いた。

最近の動向

筆者は1995年2月15日の衆議院科学技術委員会の参考人として出席し、原田昇左右議員の質問に答えた。原田議員は大震法の成立時に中心になって活動されたと聞いている。質問の冒頭で注意報問題についての説明を求められたので、その趣旨をややくわしく述べたところ、

「警戒宣言でなくて注意報ぐらいを出したらどうか、ちょっと危ないときに、一(略)それについて一つ、これは現行法でもうできている。現行法の運用の問題ですから、ぜひご検討おきいただきたい。たいへん貴重なご意見だと思う」と述べている。

ところが、いっこうに再検討の気配が見られないので、いかに現状が危機的状態にあるかを目に見える形で世に訴えるために、1996年3月に会長を辞任した。マスコミがこれを大きく報じたこともあって、「注意報問題」は多くの人々が注目するようになった。どうしてそういう当然と思われる提案が受け入れられないのか、という声が多い。

広瀬弘忠東京女子大学教授は次のように述べている。「東海地震の直前予知判定を『シロ』と『クロ』の間に『グレー』の領域を設けて三件法で行うというのは素人目にも至極当然の提案である。では、気象庁など東海地震対策を担う官庁は、なぜ、茂木の意見を採用しなかったのであろうか。理由は単純である。大規模地震対策特別措置法が、あいまいな『グレー・ゾーン』の存在を認めないからである。東海地震を100%直前予知できるという前提に立ったこの法律が、今日、科学的な防災対策をいかに非科学的に呪縛しているか、まさに驚くほかないのである。」

1999年7月、中央防災会議が「東海地震に備えた地震防災基本計画を20年ぶりに初めて改定したことがかなり大きく報じられた。しかし、最も緊急を要する注意報の問題には全く触れず、実質

的な見直しをほとんど含んでいないものであった。この発表のすぐあと、この問題の事務局である国土庁(現、国土交通省)の震災対策課長から大学の研究室に電話があって話をしたいとのことである。前出の原田議員から、今回の改訂に当って筆者の意見を聞いたか、聞いていなかったのであれば、すぐに話を聞いてくるように言われたとのことであった。翌日、課長補佐と二人で訪ねて来られ、長時間話し合った。それによると、「注意報問題」の重要性は十分認識していること、今回の見直しと報じられたものはそれを目指したものではなく、ほんの小さな手直しにすぎず、次にこの問題の検討に向かって行く考えであるとの話であった。しかし、いまだにそのような動きがあることを聞かない。このままでは大震法は単なる作文に終わりかねない。適切に予知情報を出して災害軽減に役立てるためには、直ちにこの重大な問題に積極的に取り組むべきことを改めて強調したい。

付記(1) 注意報を導入することの難しさをいう理由として、白・灰色・黒を分ける定量的な尺度がないことをあげる人がいる。しかし、白・黒を峻別する定量的尺度もないのであって、それ以上の難しさがあるのである。

付記(2) 気象庁が「東海地震の否定はできないが、警戒宣言を出すには至っていない」場合に、「観測情報」を出すという。この情報に対する対応措置を行政は決めておらず、各自の判断で行動せよというが、各自が判断して勝手に行動すれば大きな混乱をまねく。本論における「注意報」とは重要な点でちがうものである。

付記(3) 静岡県が「東海地震」に予知型と突発型の二つを想定して対応することにしたというが、これには、あまり明瞭ではない異常変化もできるだけ活用して予知に役立てて災害軽減をはかるという積極的な姿勢が見られない。

東海地震の警戒宣言における灰色情報

井野盛夫

東海地震対策において特筆すべき点は、昭和53年に制定された「大規模地震対策特別措置法」（大震法）による「地震防災対策強化地域」（強化地域）の指定と「警戒宣言」の発令である。「地震防災対策強化地域」は、内閣総理大臣が大規模な地震が発生するおそれが特に大きいと認められる地域で、地震が発生した場合著しい地震災害が生ずるおそれがあるため、地震防災に関する施設を強化する必要がある地域を指定することとしている。指定にあたっては、中央防災会議へ諮問し答申を受けおこなう。静岡県を含む6県167（当時170）市町村は、昭和54年8月に指定された。「警戒宣言」については、内閣総理大臣が気象庁長官から地震予知情報の報告を受けて、地震防災応急対策を実施する緊急の必要があると認めたとき、閣議にかけて発するとともに、地震に対する警戒体制を執るよう公示などをすることになっている。

国は大規模な地震を予知するため強化地域内に観測施設を設けており、静岡県下には地震計、歪計、傾斜計、GPSなど約400の観測点に及ぶ地震前兆現象監視システムが展開されている。異常現象が認識されたとき「地震防災対策強化地域判定会」が招集され、判定会が現象の判定を行った結果、大規模な地震の発生につながると判断したとき気象庁長官に報告される。

強化地域の指定が行われたときには、中央防災会議は地震防災基本計画を作成することとなっている。地震防災基本計画は、指定行政機関、指定公共機関、地方自治体が作成する地震防災応急計画及び特定の民間企業などが作成する地震防災応急計画の基本となるものである。計画の内容は、①警戒宣言が発せられた場合における国の地震防災対策の基本方針、②地震防災強化計画及び地

震防災応急計画の基本となるべき事項、③その他総合的防災訓練など政令で定める事項である。

1. 灰色情報による影響

灰色情報についての検討は、ここでは自然現象の変化を理学的に扱うのではなく、公的機関によって情報として社会に提供されたものとする。そのため警戒宣言が発令されないが大規模な地震の発生前に出現する現象、或は他の理由によって大規模な地震の発生前に出現する現象と似た現象について公的機関が発表した状況を想定する。気象庁や国土地理院などでは、地震予知観測網において地震防災対策強化地域判定会の招集基準に至らないものの一定の異常が認められた際に、「東海地域の地震・地殻活動に関する情報」を出すことになっており、これらの情報も状況によっては灰色情報となる場合がある。

また、灰色情報が社会全般に与える状況の変化については、情報の受け手が社会的に重要な機関や組織の規模が大きいなどによって異なる。例えば高速道路において速度規制やインターチェンジにおいて流入規制を行えば、人の移動や物流の停滞や停止が起り、その影響が経済や防災対策行動に表れる。一方、ライフラインのなかでも水道、ガス供給において、供給量を減じたり、圧力を低下させても影響が少ない場合もある。しかし、通常の社会的、物流において物資が停滞や停止することは、安全側か危険側のどちらかに傾くと考えられる。安全側に働くとは一時的であれ物資が備蓄され、危険側とは車両等が渋滞しているときに警戒宣言や発災した場合の想定である。

2. 灰色情報の取扱い

灰色情報の扱いについて、まず考え方を述べておきたい。警戒宣言発令前という特殊な状況下においてこそ情報の意義があるので、個人的に利用できる情報であってはいけない。あくまでも個人が行動するか否かは別にしても、大震法という指定地域内の社会全般が共通した認識を持つものである。この種類の情報を特定の機関や組織では、特に灰色情報と称さなくとも自衛手段として特別に行動する情報として扱うものと考えられる。そのため、情報の扱い方について機関や組織の計画に明示し、関係する機関や組織に独自の行動をとることを予め知らせておくことが、社会的混乱を防ぐこととして必要となる。それでは現行の警戒宣言の扱いはどうなっているのだろうか。

指定行政機関や指定公共機関は、地震防災基本計画と防災業務計画によって、警戒宣言が発せられた場合における行動が規定されている。地方自治体は、地震防災基本計画と防災業務計画によって地震防災強化計画を作成する。これらは防災対策の方針が一貫し、関係機関が連携して防災対策が取れることを狙いとしていることから、地方自治体においては上位の機関に計画内容を協議し承認を得ることになっている。また、地震が予知された場合には、内閣総理大臣が発する「警戒宣言」から地震発生までの地震防災応急対応を地震防災応急計画として位置付けている。

強化地域指定6県ならびに市町村の地域防災計画地震対策編などにおいて、警戒宣言の発令から地震発生までの間、また警戒解除宣言が出されるまでの応急対策について、地震防災応急対策の中で扱っている。

それでは灰色情報はどこで扱うべきかと言うと、現行の防災計画では扱う場所がないので、改めて対策内容を書き加えることになる。計画に新しい事項を盛り込む場合、中央防災会議における決定事項や防災関係省庁からの通達などでは、取り扱い業務は比較的簡単であるが、その他の考え方を計画に位置付ける場合には困難を伴う。計

画化を図るには、まず内容の根拠を示す必要がある。新たに灰色情報による行動を計画に加える場合、警戒宣言に対して前駆的な情報としての位置付け、地震予知観測データなどから灰色情報と断定する基準、情報の法的位置付け、情報取り扱いの責任など従来の警戒宣言と連動した仕組みとすることが要求される。

このように述べると新しい提案ができないように見えるが、根拠や基準などを除き、県や市町村の防災会議の承認を経て計画化することが可能である。灰色情報を防災対策の有効な手段として捉え、地域住民が情報を生かして災害に備えるための仕組みであれば理想的である。これらの手続きとして、市町村計画であれば地方防災会議会長の市町村長から、県防災会議会長の県知事に協議があり、協議が整えば承認され計画として運用されることになる。灰色情報の扱いについては一市町村だけの運用では効果が発揮出来ないことから、県防災会議会長から中央防災会議会長への協議、あるいは防災担当省庁に制度化を要望することになる。いずれにしても地方自治体が単独で計画化はでき得ない。また、複数の自治体をまたがる施設では、個々に設置されている自治体に提案し、計画化されてから上位の計画に位置付けていく方法より、中央機関が決定してから下位機関に方針と計画を位置付けていく手法が通常である。

3. 現行制度において灰色情報を想定した場合

現行制度において、灰色情報が提供される状況を予測してみる。1998年11月、当時の国土庁、気象庁、消防庁は「東海地域の地震・地殻活動に関する情報の基本的な考え方について」として、いわゆる「東海地震」が発生する恐れがあると認めるときは、気象庁長官は内閣総理大臣に「地震予知情報」を報告しなければならないとされているが、判定会招集に至らないが、東海地域の監視を通じて、地震活動や観測データにあるレベル以上の変化を観測した場合には、その原因等について評価を行い、観測事実とその評価等の結果を発表することとしている。その区分として、「気象庁と

して、プレート境界の前兆的滑り等の東海地震の前兆現象とは直接関係ないと判断した現象、及び長期的な視点等から評価・解析した地震・地殻変動等に関する解説」を解説情報（仮称）と、「判定会招集には至っていないが、気象庁として観測データの推移を見守らなければその原因などの評価が行えない現象が発生した場合にその事実を発表する」ものを観測情報（仮称）としている。（報道参考資料）これらは、強化地域指定後に設けられた初めての予防的情報である。

更に、前述報道参考資料と「地震防災対策強化地域判定会招集基準」（1998年3月31日改正）との関連は大きく、灰色情報が他の情報と関連なく単独で発せられることは少ないと考えられる。前にも述べたように技術的な整理は除き、あくまでも灰色情報が発せられた状態に限って整理をしてみたい。

（1）東海地震に関連する情報の種類が多い

先に述べた「東海地域の地震・地殻活動に関する情報」として解説情報、同じく観測情報がある。また、地震防災対策強化地域判定会の招集が決定された旨を知らせる判定会招集連絡報、地震活動等の状況を伝える大規模地震関連情報、そして警戒宣言と5種類が設けられている。地域防災計画や応急計画から見ると指定地域内の自治体や企業において、情報の内容の違いが理解されていない恐れがある。

（2）灰色情報が予測される時期

地震前兆現象の常時観測が行われ各種情報が提供されているが、これら情報の流れの中で灰色情報の提供時期を想定してみる。地殻変動あるいは地震活動等に異常が出現し解説情報や観測情報が出されている間、観測情報から判定会招集に至る間、判定会招集から警戒宣言発令に至る間、警戒宣言解除後など数多くのケースが考えられる。これらの情報の流れについていくつかのケースを例示する。

① 観測情報→解説情報

② 観測情報→判定会招集→大規模地震
関連情報→解説情報

③ 観測情報→判定会招集→大規模地震

関連情報→警戒宣言

④ 観測情報→判定会招集→警戒宣言

⑤ 判定会招集→警戒宣言

⑥ 警戒宣言

以上を見ても、緊迫する状況において変化する情報の内容により防災行動をより高度に変化が付けにくい現状にあり、一層対応が難しくなるものと思われる。

4. 灰色情報が出された時の各機関の行動想定

先にも述べたように、行政やライフラインなど住民の生活と関連が深い機関が灰色情報によって行動を起こすと、その社会的な動き（影響）は次第に拡大していき社会全体の動きとなる。その動きは組織全体に及ぶものと、一部の担当者のみで収束するものがある。灰色情報を知りえた時、組織全体の行動がどこまで及ぶのかは個々により変わる。別表は住民と関連する部分の行動を予測したものである。灰色情報で表された状況の継続時間が長くなると、住民への影響が現れて来るものと、影響が縮小し消滅するものがある。ここでは数日以上継続した場合に出現する影響に*印をつけた。機関や組織が公的であるほど、他の機関や住民への影響が大きく、更に行動から流言が生じて、その影響する範囲が拡大していく恐れがある。（別表）

5. 灰色情報は東海地震対策に位置付けられるか（まとめ）

地震予知が実現する可能性が高いとした場合、現在の社会では突然警戒宣言発令状態に至れば市民生活に多くの支障が発生することは予測される。また、警戒宣言発令前に地震が発生することも含めて、準備的な情報によって減災されることは理解できる。現行制度においては、地震防災基本計画に位置付けられている判定会招集連絡報が組織内部における準備のための情報として利用されてきたが「東海地域の地震・地殻活動に関する情報」が設定され、更に前倒しとなる情報として

別表 灰色情報発令による住民への影響

* 灰色情報が長期にわたると出現するもの

区 分	予想される住民への影響と住民行動等
電 話	<ul style="list-style-type: none"> 行政、マスコミ等への情報確認増加 県外の縁者から（への）の連絡増加 家族相互の頻繁な連絡増加
電 気	<ul style="list-style-type: none"> 電力需要増加（ガス、灯油の代用） 産業用は減少（生産を控える）
マスコミ	<ul style="list-style-type: none"> 強化地域行政、住民等への取材増加 各地の前兆現象取材の増加
金融機関	<ul style="list-style-type: none"> 預金の引出し増加 不振産業への融資減少* 津波、山崩れ危険予想地域内の集金控える
鉄 道	<ul style="list-style-type: none"> 利用客減少（観光旅行者、出張者増加、遠距離買い物客） 帰宅時間帯の渋滞（早期帰宅者） 利用客の一時増加（観光客脱出、県外への疎開） 長距離運行の控え
道 路	<ul style="list-style-type: none"> 津波、山崩れ危険予想地域内の運行控え 幼稚園、小学校低学年生の早期帰宅（父母に替否） 放課後、クラブ活動の停止、欠席者増加（安全を考慮）
バ ス	<ul style="list-style-type: none"> 地震保険、共済への加入増加 預金の引き出し、郵便物の停滞（配達手段の不足）* 津波、山崩れ危険予想地域内の集金控え
学 校	<ul style="list-style-type: none"> 生活必需品買い求め客殺到 日用品、防災用品、非常用食品、医薬品等の不足（買い占め）
保 険、JA	<ul style="list-style-type: none"> 重症患者の県外輸送 ストレス等による患者の増加* 手術の延期、中止 難病患者、慢性患者に対する医薬品の増加
郵 便 局	<ul style="list-style-type: none"> 一時的な需要が増加（非常用飲料水確保） 安全性の確認問い合わせ増加 安全装置の需要増加 需要量の減少（代替え燃料の利用）* 利用客減少（観光客旅行、出張者） 利用客減少（観光客旅行、出張者） 出漁漁船の減少（津波危険、需要の低下、運搬手段の確保）* 強化地域外のルート確保 強化地域内から（への）の輸送量減少 特に混乱なし 荷物滞貨（輸送手段の確保） 緊急患者搬送の増加 危険物取扱施設の安全確認要求増加 生産、製造、輸送手段等の有無により対応の変化が生ずる 給油、暖房燃料買い求め客増加 商品不足（地震発生に備えて買い占め、輸送手段確保困難） 原材料の調達困難、輸送手段の有無により対応に変化が生ずる 新規住宅建設受注減少* 建設途中の早期完成、中止、延期の対応変化が生ずる 利用客の減少 地震発生後の思惑投資増加 不振産業、被害予想大産業等への投資減少* 危険物の使用、原材料、製品等の輸送手段確保困難 生産を控えるため停滞気味 住民からの問い合わせ増加（相談窓口開設） 警戒宣言発令に備えての準備（防災担当者など） 父母からの問い合わせ増加 授業継続中止かの判断で混乱 一部の住民が避難、自主防災組織との連絡始まる 父兄からの問い合わせ増加 園児引き取りに混乱（残された園児の対応に困る） 児童、生徒、学生等帰宅 授業継続中止かの判断で混乱 学校などへ避難行動を開始 安全な地域への移動 情報が入手できず、従来の生活継続 自主防災組織による移動の準備 安全な場所への移動開始 利用者、収容者への対応に混乱 安全を考慮して中止、又は延期 情報がスムーズに伝達されない場合には流言、飛語が発生 継続、中止の判断に悩む* 県庁内防災担当者会議開催 県民相談窓口の開設、問い合わせ増加 知事県民へ落ちついて行動するようにとのコメント 地震活動、前兆現象などの情報収集
スーパーマーケット	
病 院	
水 道	
都 市 ガ ス	
ホ テ ル	
船 舶	
輸 送	
下 水 道	
宅 急 便	
消 防	
卸 売 場	
ガソリンスタンド	
食 品 製 造 業	
住 宅 産 業	
飲 食 業	
証 券 業 界	
製 造 業	
市 町 村	
公 立 小 中 学 校	
幼 稚 園 ・ 保 育 園	
私 立 学 校	
高 等 学 校	
避 難 所	
独 居 老 人	
擁 護 施 設	
各 種 工 事	
情 報	
催 事、行 事	
県 防 災 担 当 部 局	

捉えている状況にある。先にもふれたように情報の種類が多く、その違いが理解されていない住民にとっては、その対応に変化をつけることが難しくなっている。緊急事態となり、立て続けに情報が変化していくことになれば一層混乱を招きかねない。

断定的であるが、灰色情報が地震法による法的

根拠を持ったもので、現在の関連する他の情報と整合が取れ、地域防災計画に掲載することが可能であれば、防災上効果のある情報となる。あくまでも単独組織の自衛的な情報ではなく、多くの防災関係機関が連携して減災に取り組むことができるものとなれば、東海地震対策として有効な手段であると信じている。

東海の固着域と地震活動の変化

松村正三

1. はじめに

最近、東海地域周辺の地震活動や地殻変動に異変が生じている、との報道がかしましい。きっかけは1999年8月を境に静岡県西部直下フィリピン海プレート内の地震活動が低下した、いわゆる静穏化が始まったことである。さらに2001年の半ばに至って、今度は、GPSで見る地殻変動に異変の生じたことが国土地理院から発表された。これらが観測開始以来の異変であることは間違いないとして、問題はそれが東海地震とどうつながるのか、ということである。東海地震は、昭和51年の石橋(1976)による警告を契機にしてこれを迎え撃つ国家的規模での防災体制が組まれてきたにもかかわらず、何の音沙汰もないままに20年以上が経過したという現状にある。ここに至って、“とうとう山が動いたのか?”という声が出るのも当然である。しかし、即断するわけにはいかない。私達の持つ情報は極めて限定されたものである。何が見えており、それは何を意味しているのか、ということは今こそ腰を落ち着けて吟味する必要がある。

私達の研究所では、ほぼ20年にわたって東海地域の微小地震活動を見つめてきた。その目で見る限り最近の変化は確かに“異変”と呼ぶべきものである。例えば、図1に沈み込んだプレート内に起きる微小地震(M1.5以上)の数の積算曲線を示す。当初数年間は、建設途上にあつたため立ち上がりが徐々に加速するという傾向が見えるが、80年代半ばに観測状況が安定してからは、地震活動は全く一定であった。そうした中、1999年になってデリケートではあるが明瞭な変化が出現したのである(円内)。しかも静穏化という前兆現象

としてはもっともポピュラーな形で!しかし、100年を超える地震のサイクルからみれば、このような異変も時々起きる単なる“ゆらぎ”のひとつに過ぎないのかもしれない。“前兆”なのかそれとも“ゆらぎ”なのか、それを事前に見極めることが可能なかどうか、正直なところ答えは未知数である。だからといって、監視の手を緩めるわけにはいかない。双方の可能性をにらみながら、多少なりともヒントをつかめればという願いを持って私達は分析を進めるのである。以下は、そのような想いを携えて微小地震データから描き出した東海地震の影像である。

2. 固着域とバックスリップ分布

海溝から沈み込むプレートが上盤プレートを引きずり込むため、その境界部に大地震が起きる。これがいわゆる海溝型地震発生のメカニズムであるが、海溝沿いではどこでもこのような地震が起きるというわけではない。大地震を生むためには、双方のプレートがぴったりとくっついてストレスを蓄積し続ける、という条件が必要である。そのような部分を固着域、と称する。それでは、東海には固着域が存在するのだろうか、また、その固着域はどのように認識されるのだろうか。

東海地域では沈み込んだフィリピン海プレートの上面の一部がユーラシアプレート下面に固着した状態でこれを引きずりこんでいる。そうした状況は地表で観測する地殻変動に反映される。古くは、三角測量により発見された静岡県西部の地表変形から(Mogi, 1970)、また、水準測量で確認された御前崎の年々の沈降から、その地下で着実に歪の蓄積が続いていることが推定されていた。最近では、整備されたGPS観測データに基づいて

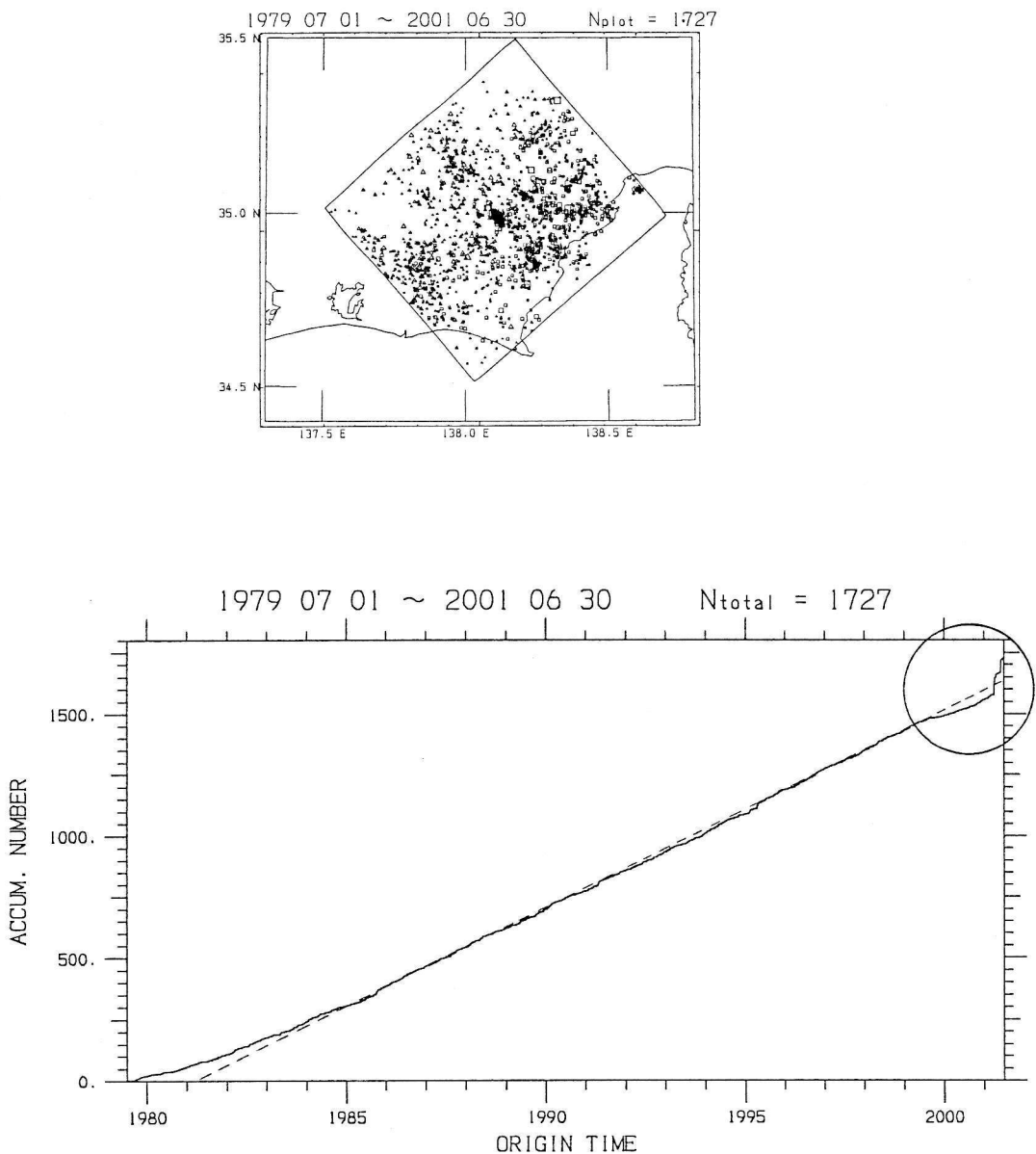


図1 モニタリングエリア（固着域）においてフィリピン海プレート内に起きた微小地震（M1.5以上）の個数積算図。円内が“異常”部分。

Sagiya (1999) がバックスリップ分布を求めている。バックスリップとはプレート境界における上盤プレートの引きずり込みのことを言い、沈降や収縮といった地表での変形量から、これを逆算で求めることができる。図2の曲線がバックスリップの速度分布を示している。鷲谷(2001)は同時に、この付近でのフィリピン海プレートの収束速度を求めており、両者を対比すれば、バックス

リップ分布の中心付近ではほぼ100%の引きずり込みが実現していることが分かる。ただし、後述するようにバックスリップ分布域がそのまま固着域に対応するわけではない。

微小地震観測からは、震源分布と同時に発震機構解分布が求まり、その場の平均的な応力パタンが推察される。図3は、静岡県西部をプレートの沈み込み方向に切った1枚の短冊の断面で見た時

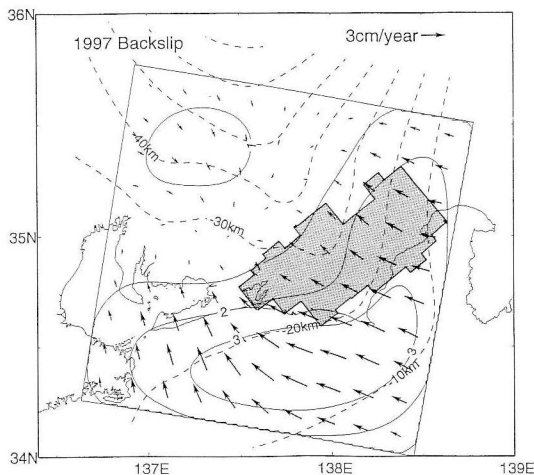


図 2 Sagiya による GPS データに基づいたバックスリップ分布 (コンターライン) と Matsumura による微小地震データに基づいた固着域 (影領域).

の (a) 震源分布, 及び (b) P 軸 (圧縮軸) の投影図である. 上盤内と下盤 (フィリピン海プレート) 内の活動がきれいに分離されて見えるが, 両者が接触する付近は, 若干の隙間 (図の q) を置いて地震密度が濃くなっていることが分かる. P 軸分布でも同様であるが, ここではその平均的な向きに特徴のあることが分かる. 同図下 (c) には, プレート境界の一部を固着させたまま沈み込みが続くとするとその周囲に生じるであろうストレスのパターンを計算でもとめて描いてみた. このモデルとデータを対比することで固着が生じているおよその範囲を見つめることができる. 下盤側のストレスパターンに注目すると, 向かい合った矢印, すなわち圧縮軸の向きは, 固着の浅い端ではほぼ水平な状態にあり, そこから時計まわりに回転して深い端ではほぼ鉛直となる (図 (b) の挿入図は P 軸の俯角の変化を示す). 地震密度が濃くなっている範囲は, 同時に, P 軸分布がそうした変化を示す部分にあっている. 以上から, 図 (a) で示された囲みの部分をこの短冊内における固着範囲であると同定する. Matsumura (1997) は, 静岡県西部を 10 数枚の短冊に切り個別の短冊ごとに上記の分析手法を適用することで全体としての固着域を導き出した. 図 2 で影を付したエ

リアがその結果である. およそ $4,000 \text{ km}^2$ の面積があり, 全部が一気にすべれば M8 級の地震となるはずである.

3. 東海地震の想定震源域

さて, 最新の観測データを駆使して描き出された図 2 であるが, ここには大きな問題がある. それは, 微小地震データから導いた固着域と, GPS データから導いたバックスリップ分布とが一致しないことである. 固着域が静岡県西部の内陸域にあるのに対して, バックスリップ分布の主要部は海域に外れてしまっている. どちらかが間違っているのだろうか. 実は, 筆者は (松村, 1999), これはある程度自然な結果である, と考えている (ある程度というのは, 原理的に双方が一致しない理由を説明づけることはできるが, この場合のずれが大きすぎるため, データの解析または解釈の仕方にまだ問題が残っているだろう, という意味である). 図 4 は, 固着沈み込みの状況を有限要素法を用いて簡単に表現したモデルである. 上図, 下図は, それぞれ図の矢印の 1 点を固定したまま下盤を沈み込ませた時, 上盤プレート内に生じる歪の分布, および変位の分布を示す. 歪の主要部は固定点の前方側に分布し, 一方, 変位は後方側に分布する. このようなずれが生じるのは, 上盤プレートが固定点に対して非対称なフリーサーフェスを持つことに起因している. 微小地震活動は歪ないしはストレス分布に対応づけられ, バックスリップは変位分布に対応づけられると考えると, 双方の分布が図 2 のように, すなわち固着域が内陸側に, バックスリップ領域がトラフ側にずれてしまうことが納得できる. 地震時には, 歪分布は主に強震動源として作用し, 変位分布は, 津波あるいは地殻変動源として作用すると思われる.

今般, 中央防災会議は専門調査会を発足させ, 東海地震の想定震源域の見直し作業に入った. 専門調査会では, 結局, プレート境界面の深さ 10~30 km の範囲を選んで図 5 のようなナス型のエリアを想定震源域としたが, これは, 前記の固着域,

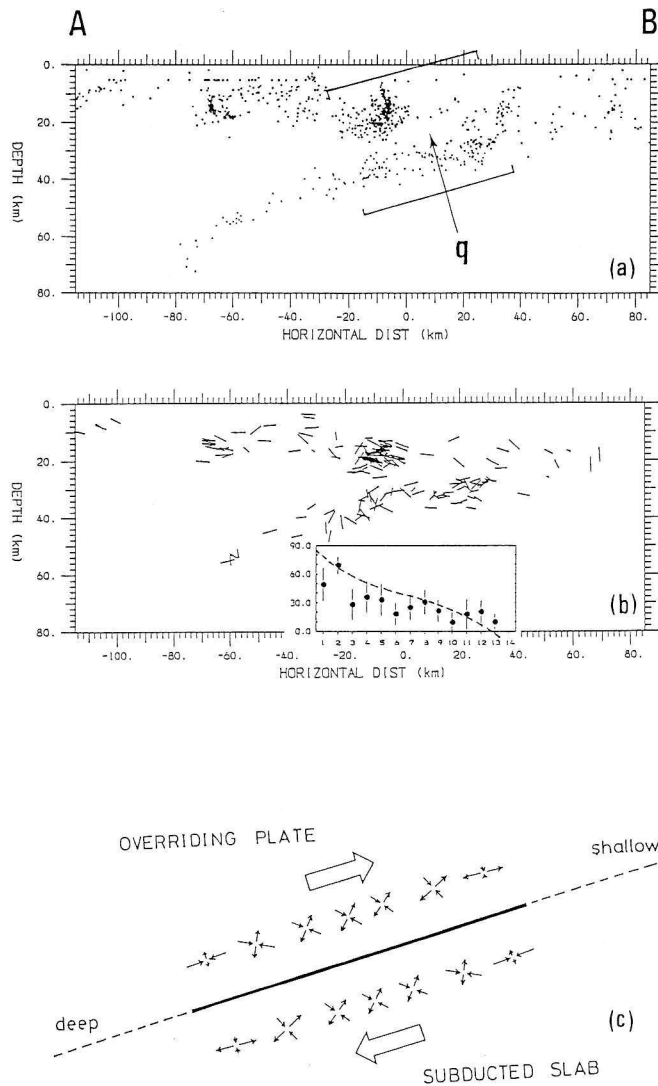


図3 静岡県西部を北西-南東方向の短冊で切ってみた断面図。(a)震源分布図。'q'は、上下盤の間に見える空白域。囲んだ部分が固着範囲であると推定する。(b)P軸投影図。挿入図はP軸の俯角の変化を示す。(c)固着沈み込みによって周囲に生じるであろうストレスパターンをモデルにより推定したもの。

バックスリップ領域の双方を概ね包含する結果となった(中央防災会議, 2001)。想定震源域をより正しいものに近づけるという作業は重要な意味を持つ。第1に、予知の実現可能性を高めるという意味である。デリケートな前兆を捉えようとするためには、ターゲットを正しく絞り込む必要がある故である。第2に、効果的な防災対策に役立つという意味がある。震災を起こす強震動を精度よく予測するためには正確な震源域を知る必要が

ある故である。

4. 地震活動の変化

前節までに紹介した作業で東海地震の主な発震源としての固着域の同定がなされた。次にすべきことは、その場所での地震活動を時間軸上で追っていくことである。Dieterich (1994) によって、日常的に活動している背景としての地震の発生率

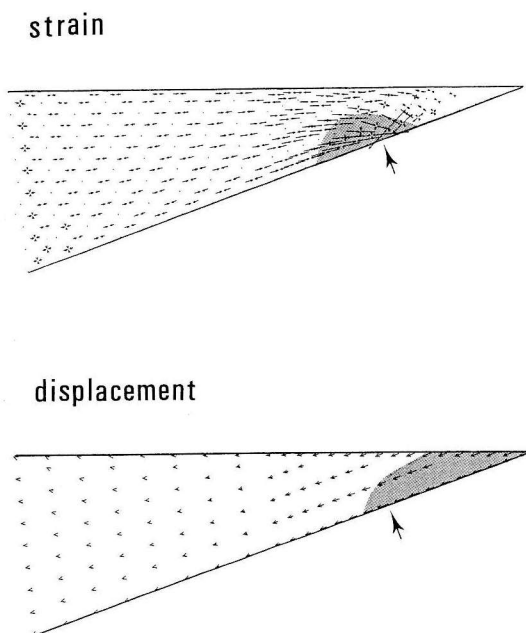


図 4 矢印の1点において固着した沈み込みによって生じる上盤内の歪(上図), 変位(下図)の分布。

は基本的にその位置でのストレスの増加率に比例することが示されている。つまり、地震発生率の変化をモニターすることは、即、固着沈み込みによるストレス増大の様子を観察することになるのである。ここでは、観察のためのモニタリングエリアを次のように設定した。固着域の西端は浜名湖付近であるが、ここには固着の edge effect に起因するとみられる特異な活動が存在するので、これを除外する。代わりに、北西-南東方向に若干引き伸ばした長方形を採用し、これをモニタリングエリアとする(図1参照)。さらに、同一エリア内を、プレート境界を境に上下に分割して観ることとする。図6は上下盤それぞれにおける地震発生数の積算曲線である(M1.5以上, 上図:地殻内, 下図:スラブ内)。図1と異なりここでは、余震や群発活動によるステップ的变化を除去するため declustering という操作を施している。また、建設途中の漸増区間をやりすごすため、期間は1986年6月からとしている。図を見て最初に気づくのは、90年代半ばまで双方共、発生率がきわめて安定していたことである。この間の発生率は上

- 新たな想定震源域の境界(案)
- Matsumura(1997)による固着域
- Sagiya(1999)によるバックスリップ分布

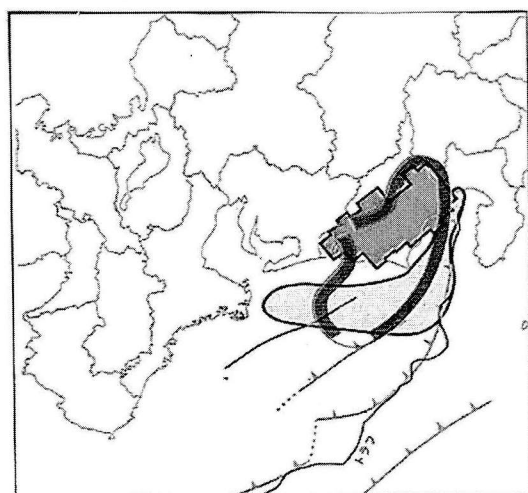


図 5 中央防災会議専門調査会による東海地震の想定震源域。

盤, 下盤ともに6.3個/30日と、その値までが見事に一致する。このことは、固着域をはさんで上下盤内のストレスが(正確にはその増加量が)対称であることを示唆する。ただし、震央分布図を見て分かるとおり、双方の地震分布パターンはまるで異なる。下盤の分布が空間的にも比較的均一な発生をしている一方、上盤では分布はクラスターのようである。

図の範囲で10年以上にわたって安定していた活動だが、1996年半ばあたりから上盤での活動が静穏化し始めた。他方、下盤では、もっと明瞭に1999年8月から静穏化が始まった。図7に最近3年間の拡大図を示したが、それぞれの活動は、2000年10月に至って次の転機を迎える(同図のe3)。この時には、上盤では静穏化の程度がさらに深まり、一方、下盤では、逆に活性化に転じた。ところでこの間プレートの進行状況に関連する変化はなかったのだろうか。図8は、固着域をはさむ(a)上盤、(b)下盤のほかに、(c)浜名湖付近、(d)プレート沈み込みに伴う深部活動域、(e)山梨県東部の5個の領域についての積算図を示す。(a)、(b)、(c)の3個の領域ではいずれも近年の

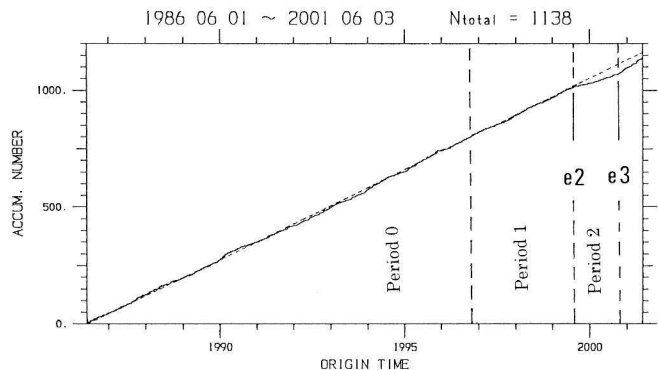
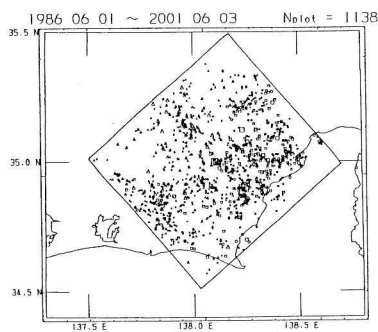
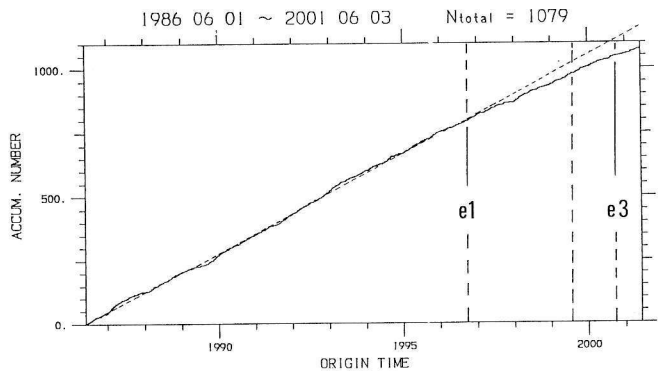
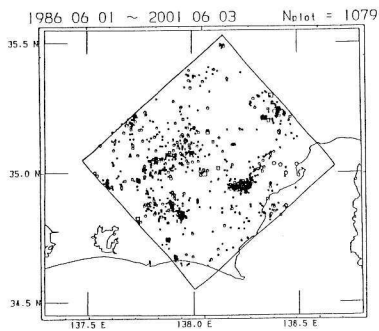


図6 モニタリングエリア（固着域を含む）上下盤内の地震回数積算図。上図：上盤（地殻内），下図：下盤（スラブ内）。すべて M1.5 以上，declustering 処理後。変化のあった時期を epoch として期間を識別する（period 1, 2, …）。

静穏化が見られる。他方，(d)，(e) の 2 個では目立った変化がない，すなわち，前者の固着に随伴する活動全てに変化が出現し，後者の固着と無関係な活動では発生率が一定している。この結果から，プレートの沈み込みそのものは変化なく粛々と進行していたことが想像される。従って，今回出現した静穏化に代表される活動変化は，プレート運動に起因するものではなく固着状況に何らかの変化が生じたため，と結論される。

さらにそうした状況の中，2001 年 4 月 3 日に，静岡県川根町に M5.1 の静岡県中部地震が発生した（図 1 の右端）。この地震は，1996 年 10 月 5 日の静岡県中部地震（M4.3）の近傍に起こり，その様相にも類似点が多かったため，双方の地震の発生には共通の要因があるものと推察される。現時点で前出の“異変”は，まだけりがついたわけではないが，ここまでの活動変化を一旦整理し，そ

の意味を探ってみる。

5. 変化の空間パターンとその解釈

前節の最後に紹介した 2 個の静岡県中部地震はこの地域での活動としては注目すべき event であった。1996 年の地震は，それまで地震の起きなかったプレート境界に発生しプレート間固着を緩めるような地震だったのではないかと推測されている（松村，1998）。時期的にみて，図 6 でみた上盤の静穏化の始まりとこの地震の発生には何らかの関連があるとの推測がなされるので，これを最初の epoch (event 1) とみなす。他方，2001 年の静岡県中部は前者の東隣約 4 km の位置，深さは約 3 km 深くフィリピン海プレート内に発生した。この地震の余震が一旦収まった 1 カ月後から南東に尾をひく格好でさらに M4 クラスの群発活

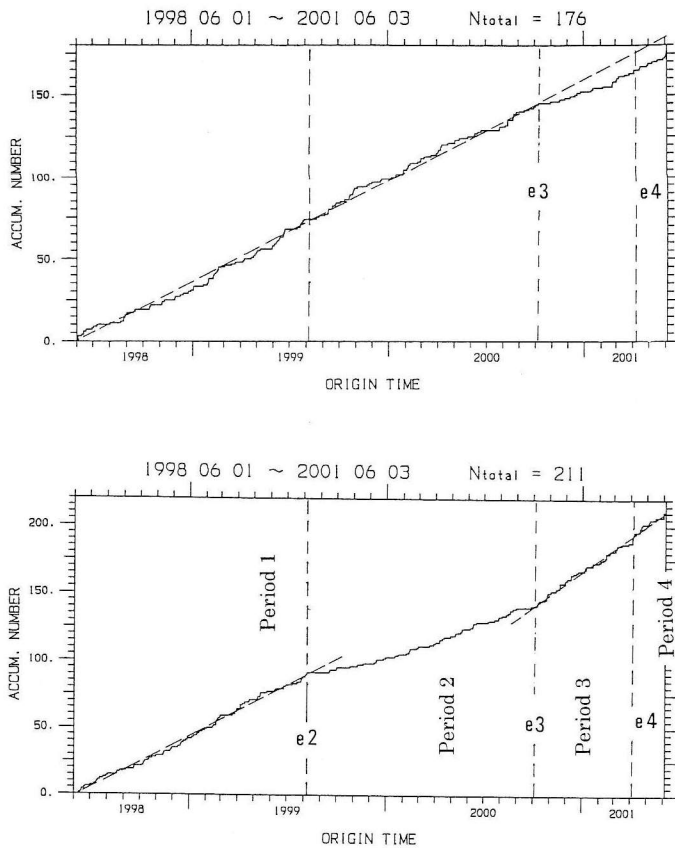


図7 図6の最後3年分の拡大図。上図：上盤，下図：下盤。

動が続いた。これをまとめて最新の epoch (event 4) とする。このほかに、目立った地震こそ伴わなかったが発生率の急変が見られた時期として、1999年8月 (event 2: 下盤の静穏化開始)、2000年10月 (event 3: 上下盤同時変化) の2個の epoch を追加する (以上、図6及び図7参照)。これらの event 時には固着域の内部に何らかの動き、例えば、ストレスを緩和するような微細なすべり、が起こり、ストレスが再配分されその分布パターンが変わったのではないかと推測される。

4個の event には含まれる3個の期間を、period 1, 2, 3とする。それ以前の変化のない期間を period 0 とし、この期間の発生率を基準として period 1~3 で静穏化した領域、活性化した領域を抽出してみた。図9に上盤 (a)、下盤 (b) それぞれの期間ごとの領域パターンを示す。ハッチが静穏化域 (基準値の50%以下)、黒塗り部が活

性化域 (基準値の150%以上) を示す。各期のパターンを見比べると興味深い特徴に気づく。それは、期ごとに全く異なって見えるパターンにある種の下地が存在することである。例えば、下盤の period 2 と period 3 ではそれぞれ、ハッチ部と黒塗り部がその存在を主張して見えるが互いの領域は侵しあわない。つまり、静穏化域と活性化域は予めその占有域が予約されており、時期にあわせて出現したり、消滅したりするだけである。この特徴は上下盤全ての時期に共通している。そこで period 1~3 を重ね合わせて共通の下地を抽出することができる。図10は、こうして描き出した上下盤それぞれの下地パターンを示す。さらに2枚を重ね合わせたものが図11である。ここでハッチ部が静穏化域、砂地部は活性化域を示す。若干重なる部分もあるが、概ね両者は地域を住み分けていることが分かる。これが何を意味

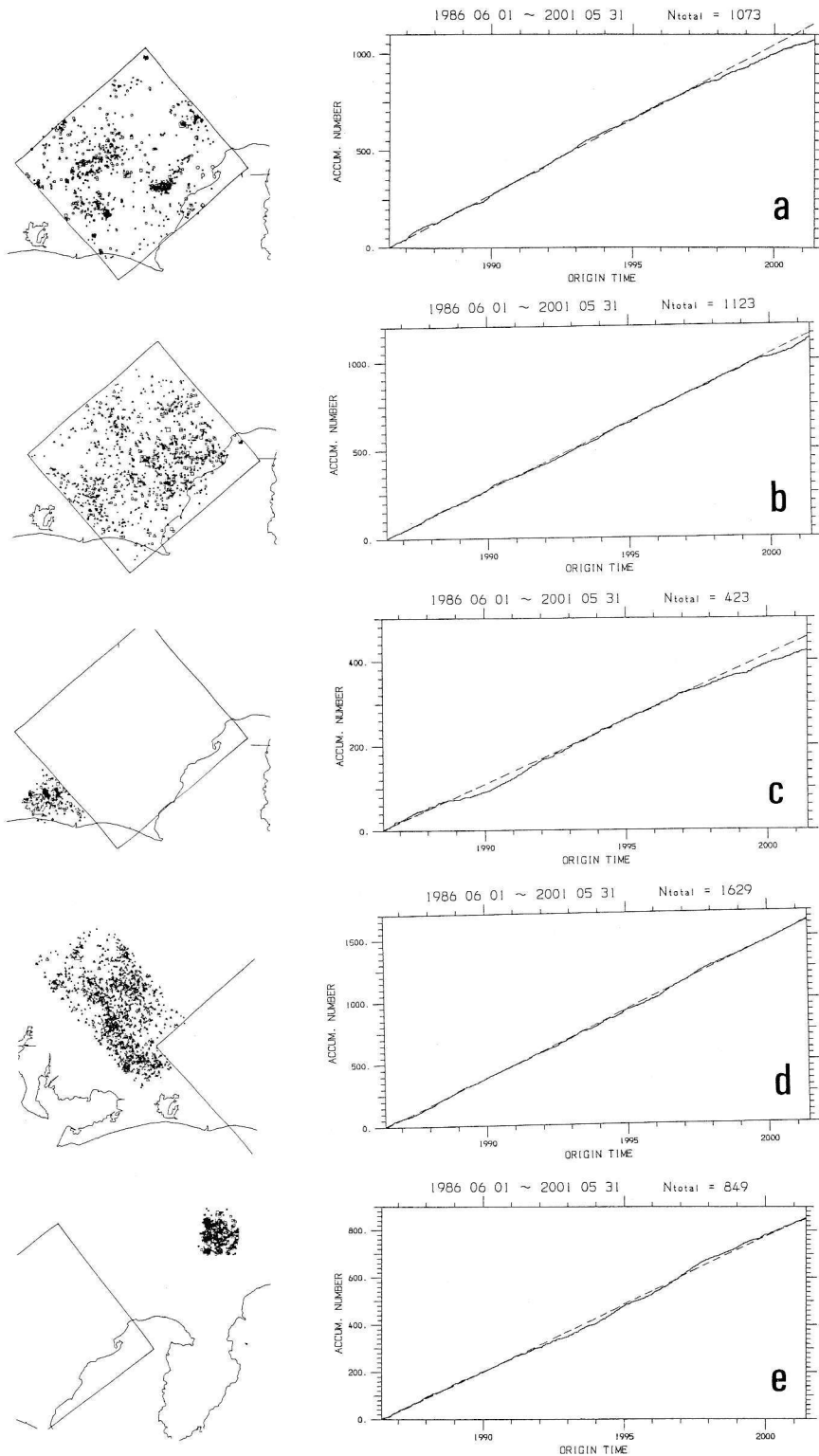


図 8 5 個の領域について地震個数積算図。(a) モニタリングエリア (固着域) 上盤, (b) 同下盤, (c) 浜名湖直下 (これも固着域内), (d) 沈み込んだスラブ内深部活動域, (e) 山梨県東部. すべて M 1.5 以上, declustering 処理後.

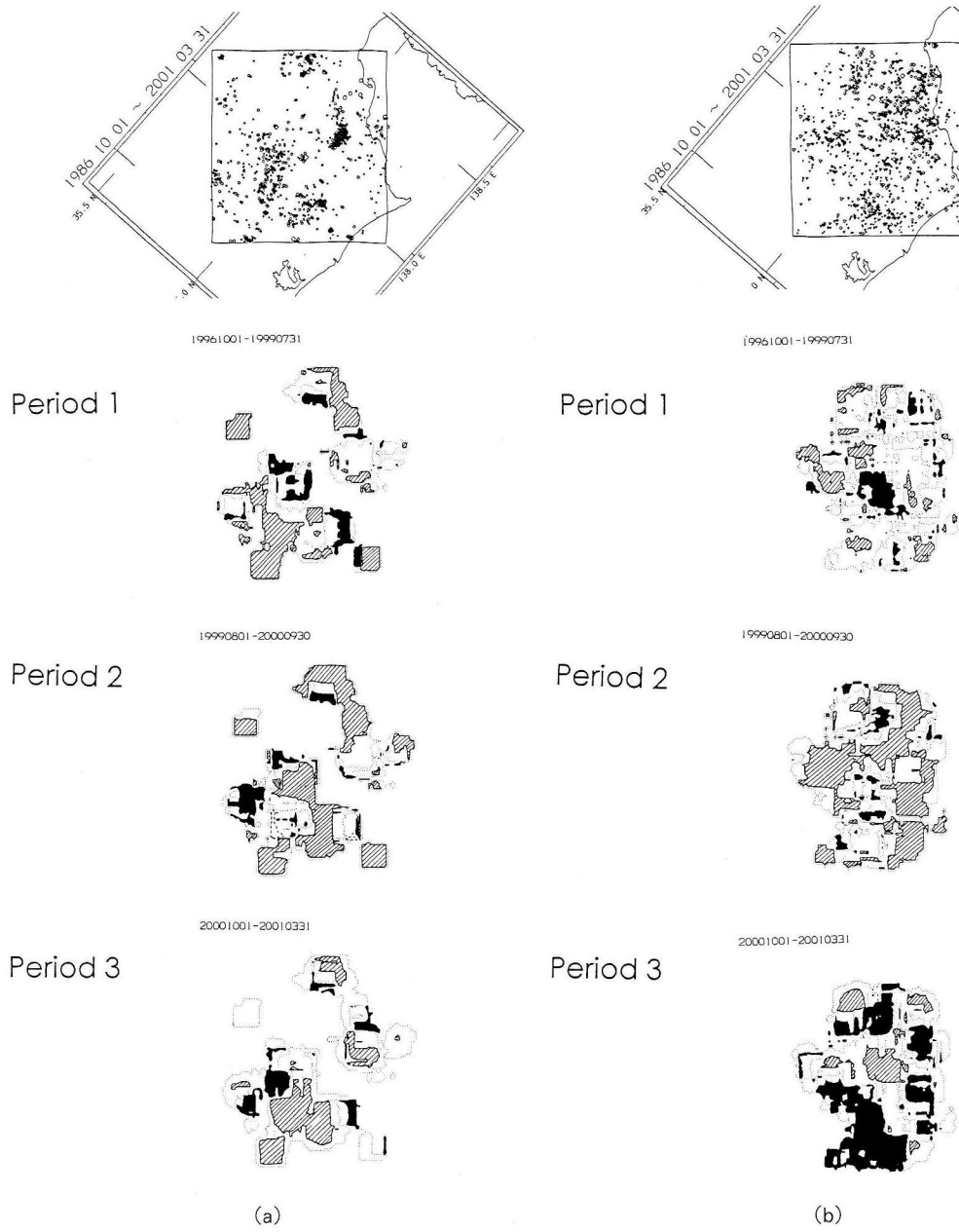


図 9 変化が始まってからの3期間について、基準期間と比較して50%以下の静穏化域（ハッチ部）、150%以上の活性化域（黒塗り部）を抽出した図。(a)上盤、(b)下盤。

しているのかを以下のように解釈する。

固着域は、上下盤のプレートがぴったりくっついていて歪エネルギーの貯蔵場所となる。ただし、固着状態が完全に均一というわけにはいかず、固着の強いところ、弱いところ、という不均質分布がもともとあったはずである。ストレスの

蓄積がまだ低いレベルにある間は、固着域全体でこれを支えるだろう。ところが臨界近くにまで達した時、固着域の内の相対的に弱い部分がずればじめ、強い部分に応力集中が始まる。静穏化域と活性化域の出現はこうした応力の再配分を表現していると考えられる。結局、図10及び図11の砂地は

強い部分, すなわち asperity の輪郭を表したものであるということになる. 図 11 中心付近の黒点は, 静岡県中部地震の震央分布であり, 西側 (砂地部内) が 1996 年, 東側 (ハッチ部内) が 2001 年の地震とその余震である. これらが, 活性化域と静穏化域の境界部に発生したことは興味深く, あたかも asperity をその境界から崩していく活動であるかのように思われる.

大地震発生前の微小地震活動の変化を報告した例は少なく, 筆者の知る限り, そのほとんどは Wyss とそのグループによるものである. 図 11 の添付図は, その 1 例として Wyss (1986) から引用したものであるが, Hawaii で起きたこの地震 (M6.6) のほぼ 2 年前から周辺の微小地震が静穏化し始めた. その際, 中心部だけは静穏化しないまま残り, 最終的な破壊はこの部分からスタートした. Wyss はこれを asperity であると認識している. Wyss らの報告した 4 例 (Wyss et al., 1981; Wyss, 1986; Wyss and Habermann, 1988; Wiemer and Wyss, 1994) は全てこれと同じ特徴を備えている. 筆者は, この 4 例から asperity の面積 (A_{nq} : km²) と静穏化の持続期間 (T_q : year) との間に相関関係のあることを予測して, 両対数グラフ上にプロットしてみた (図 12). 論文から読み取った asperity の面積と静穏化の持続期間は表 1 にまとめたとおりである. 図 12 の結果から, 両者には, $T_q = 0.27\sqrt{A_{nq}}$ という簡単な関係のあることが判明した. 最終破壊の直前まで持ちこたえている asperity の長さの次元に相当する大きさが臨界状態の持続時間を規定する, という関係式は合理的な結論であると考えられる. さて, 図 11 の東海では, 静穏化域が 3 個ないしは 4 個の asperity を取り囲む, というまさに Wyss の報告に似た状況を示している. 添付図と縮尺が揃えられているが, これから改めて東海の場合をあてはめてみると, 固着域内の asperity の面積は合計約 700 km² であり, その場合, 臨界状態の持続期間は約 7 年という結果が得られた (図 12 の白丸).

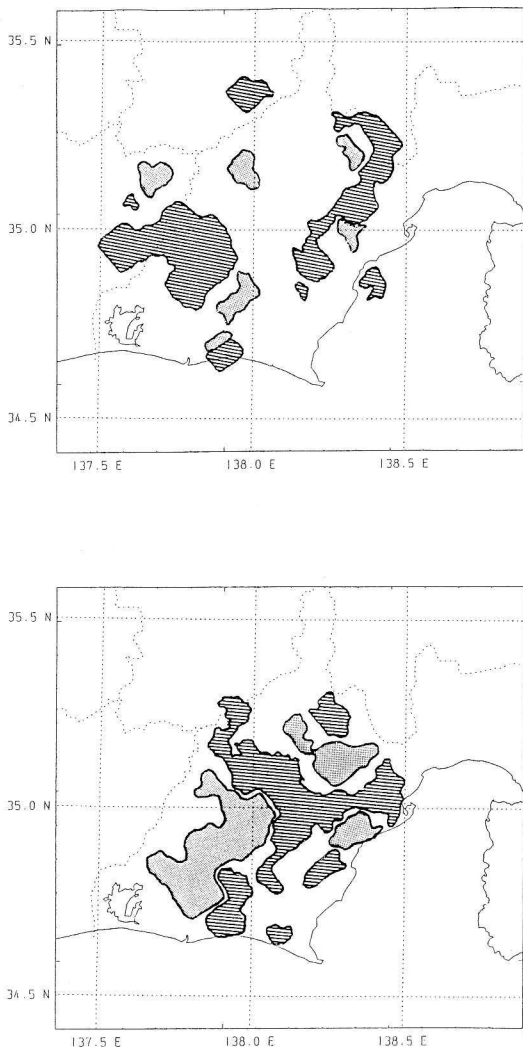


図 10 上下盤それぞれ (上図: 上盤, 下図: 下盤) について, 下地となっている静穏化域 (ハッチ部), 活性化域 (砂地部) を抽出したもの.

6. おわりに

予知研究に批判的な東京大学の Robert Geller 氏によって “起きる前から名前がつけられている珍しい地震” と揶揄されてはいるが, 東海地震は, 地震予知という課題からみても特別な地震である. 私達から見ると東海地震はその輪郭が浮かび上がりつつあり, 科学的な意味でも社会的な意味でも網を張ってこれを迎え撃つという態勢が取ら

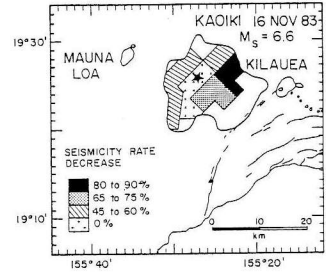
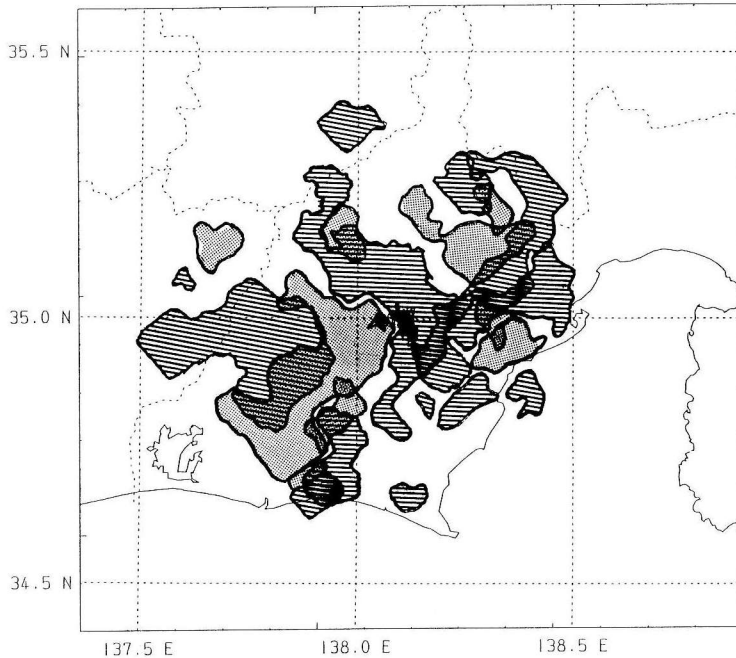


図 11 上下盤 2 枚を重ねた結果. 中心付近の黒点は, 1996 年と 2001 年の静岡県中部地震. 右側の添付図は, Wyss (1986) から引用したもの. ハワイの Kaoiki ($M_s=6.6$) earthquake の時に観測された静穏化パターンを示す.

表 1 Wyss とそのグループによる微小地震による静穏化の報告をまとめたもの. 4 例 (Wyss et al., 1981 ; Wyss, 1986 ; Wyss and Habermann, 1988 ; Wiemer and Wyss, 1994) について asperity の面積 (A_{nq} : km^2) を読み取り, 静穏化の持続期間 (T_q : year) は他のパラメータと並べて表にしたもの.

Earthquake		Mag.	A_{nq} (km^2)	T_q (year)	Reference
A : Landers	June 1992	M7.5	360	4.5	Wiemer & Wyss
B : Stone Canyon	Aug. 1982	M5.0	47	1.5	Wyss & Habermann
C : Kalapana	Nov. 1975	M7.2	130	3.8	Wyss et al.
D : Kaoiki	Nov. 1983	M6.6	59	2.4	Wyss
E : Tokai	???	(M8.1)	(700)	(7.1)	

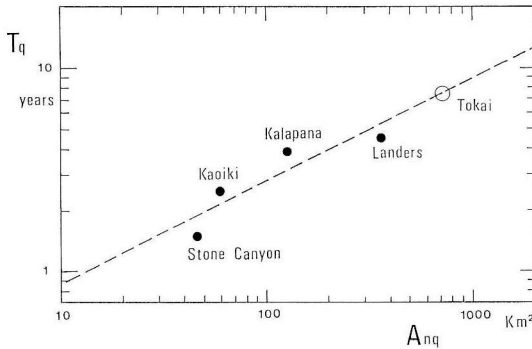


図 12 表 1 から asperity の面積 (A_{nq} : km^2) に対する静穏化の持続期間 (T_q : year) のプロット. 破線は, $T_q = 0.27\sqrt{A_{nq}}$ の関係.

れているということでは世界でもまれなケースと言える. 逆にいえば, 現在の異変, さらに今後引き続き起きるであろう様々な事態に対応するための手本となるべき前例は世界中にもほとんど無いということである. そうした条件のもとで私達は, 判断し, 対処を進めていかなければならない. 現在の異変が東海地震そのものに結びつくものであるかどうかを見極めることは今はまだできない. しかし, このような異変が現実を検知できているということは, 実際の予知の可能性を期待させるに十分な成果でもある. 成功するかどうかは

別にしても、東海地震の予知を志向しての研究を進めることは、地震学における大いなる挑戦のひとつと言えよう。

参考文献

- 中央防災会議, 2001, 中央防災会議東海地震に関する専門調査会, 第6回資料.
- Dieterich, J., 1994, A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *Journ. Geophys. Res.*, 99, 2601-2618.
- 石橋克彦, 1976, 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—, 昭和51年度地震学会秋期大会講演予稿集, 130-1.
- Matsumura, S., 1997, Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface, *Tectonophysics*, 273, 271-291.
- 松村正三, 1998, 1996年10月5日静岡県中部地震が示す東海地域のプレート間固着状況変化の可能性, *地震* 2, 50, 251-261.
- 松村正三, 1999, Back-slip 分布と固着域との関係, *地震* 2, 52, 105-108.
- Mogi, K., 1970, Recent horizontal deformation of the earth's crust and tectonic activity in Japan (1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, 413-430.
- Sagiya, T., 1999, Interplate coupling in the Tokai District, Central Japan, deduced from continuous GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2315-2318.
- 鷺谷 威, 2001, 東海地方周辺のGPS観測—最近の成果—, *月刊地球*, 号外33, 68-77.
- Wiemer, S. and M. Wyss, 1994, Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (M=6.5) 1992 earthquakes, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 84, 900-916.
- Wyss, M., 1986, Seismic quiescence precursor to the 1983 Kaoiki (Ms=6.6), Hawaii, earthquake, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 76, 785-800.
- Wyss, M. and R.E. Habermann, 1988, Precursory quiescence before the August 1982 Stone Canyon, San Andreas Fault, earthquakes, *Pure and Applied Geophysics*, 126, 333-356.
- Wyss, M., F.W. Klein and A.C. Johnston, 1981, Precursors to the Kalapana M=7.2 earthquake, *J. Geophys. Res.*, 86, 3881-3900.

K-NET, Hi-net, KiK-net, FREESIA

阪神・淡路大震災ののち、我が国では地震観測体制が抜本的に見直され、全国的に地震計を配備するいくつかの計画がスタートしました。一口に地震計といっても、地震による地面の揺れ方は様々です。人間にまったく感じない微小地震では、揺れ幅が0.001ミクロン(μm)レベル、振動数は数10Hz程度なのに対し、巨大地震では地面の揺れ幅が2~3m、周期は数10秒にもなります。このように、地震動の振幅および周波数の範囲はきわめて広いため、観測対象に応じて目的に合った性質の地震計が使用され、以下のような観測網が構成されています。

(1) 強震観測網 (K-NET)

どんなに強い揺れがきても、それを確実に記録する地震計が強震計です。大きな信号を相手にするため頑丈な構造となっており、通常は地表にそのまま設置して、地盤の構造や耐震設計など、主に工学的な研究に役立てられます。これに震度を計算する機能を付加したものが「震度計」です。

阪神・淡路大震災以前、我が国には地盤強震動を全国的レベルで観測する組織的な体制が不十分であったことを受け、防災科学技術研究所では全国を約20km間隔で覆う1,000か所の強震観測施設(写真1)からなる強震観測網(K-NET: Kyoshin-Net)を完成させました。集められた強震波形は、加速度分布図や各観測点の地盤情報などと共に、広く一般に公開されています。

(2) 高感度地震観測網 (Hi-net)

人間に感じないごく小さな揺れまで敏感にキャッチする地震計が高感度地震計です。微弱な信号を相手にするため、地表近くの雑微動を避けて深さ100~200m程度の縦孔内に設置されることが多く(図1)、主に局地的な震源決定や発震機構決定に用いられます。小さな地震は数多く発生しているため、短期間のデータで

も地下の構造や各地の地震活動度を精度よく推定でき、また、大地震の発生に先立つ前震の検知が期待されます。

阪神・淡路大震災発生当時、我が国では国立大学、気象庁、防災科学技術研究所等により約500点の高感度地震観測施設が稼働していましたが、その分布には地域的な偏りがありました。深さ15~20kmまでに発生する内陸地震の震源を精度良く決定するためには、約20km間隔で地震計を設置する必要があり、全国で約1,000点が必要です。そこで、観測の空白地帯となっていた地域を中心として新たに約500点の観測施設を整備する方針が、国の地震調査研究推進本部により「基盤的地震調査観測」の一項目として定められました。実際の整備は防災科学技術研究所によって進められ、2001年4月現在、520点が稼働しています。この新しい高感



写真1 強震観測施設 (K-NET)



写真 2 広帯域地震観測施設 (FREESIA)

度地震観測網を Hi-net (High Sensitivity Seismograph Network) と呼んでいます。

Hi-net から得られるデータは、気象庁の現業部門や大学の研究グループに分配されると同時に、既存の高感度地震観測点とあわせて防災科学技術研究所でデータベース化され、震源分布・震源リスト、各地における連続地震波形などが、広く一般に公開されています。

(3) 地中強震観測網 (KiK-net)

上記の Hi-net 観測点では、高感度地震計と一緒に強震計も地下に併設しています (図 1)。地中と地表の強震記録を比較することにより、地下からやってきた地震による強い揺れが地表付近では地盤の影響を受けどのように増幅されるのかといった問題を解く上で、このような地中強震記録は大変に貴重です。基盤的調査観測計画に基づく強震観測網という意味で、これを KiK-net (Kiban Kyoshin-net) と呼んでいます。地点としては Hi-net と同一です。得られたデータは、K-NET と同様にインターネットを通じ一般公開されています。

(4) 広帯域地震観測網 (FREESIA)

地面の速い振動から、非常にゆっくりとした振動まで、広い周波数範囲にわたって地動を記録できるのが広帯域地震計です。温度変化等に

よる影響を避けるため奥行き数 10 m の横坑奥に設置されることが多く (写真 2)、震源域での断層破壊の様子や地球深部構造の研究に用いられるほか、津波地震 (体に感じる揺れは小さいのに、巨大な津波を起こす特殊な地震) を的確に検知することが期待されています。

地震調査研究推進本部では、この広帯域地震計を全国に約 100 km 間隔で配備する方針を定め、防災科学技術研究所が整備を進めています。2001 年 4 月現在、64 点が稼働しており、この広帯域地震観測網を FREESIA と呼んでいます。FREESIA は、この観測網の母体となった特別研究「地震素過程と地球内部構造の解明に関する総合的研究」(Fundamental Research on Earthquakes and Earth's Interior Anomaly) の名称に由来しています。FREESIA から得られた観測データは、CMT 解の自動決定結果等と併せてデータ公開がなされています。

図 2 は、防災科学技術研究所が現在運営している地震観測施設の分布を示しています。なお、以上に挙げた K-NET, Hi-net, KiK-net, FREESIA の各データは、防災科学技術研究所のホームページ (<http://www.bosai.go.jp/jindex.html>) を通じてアクセスできます。

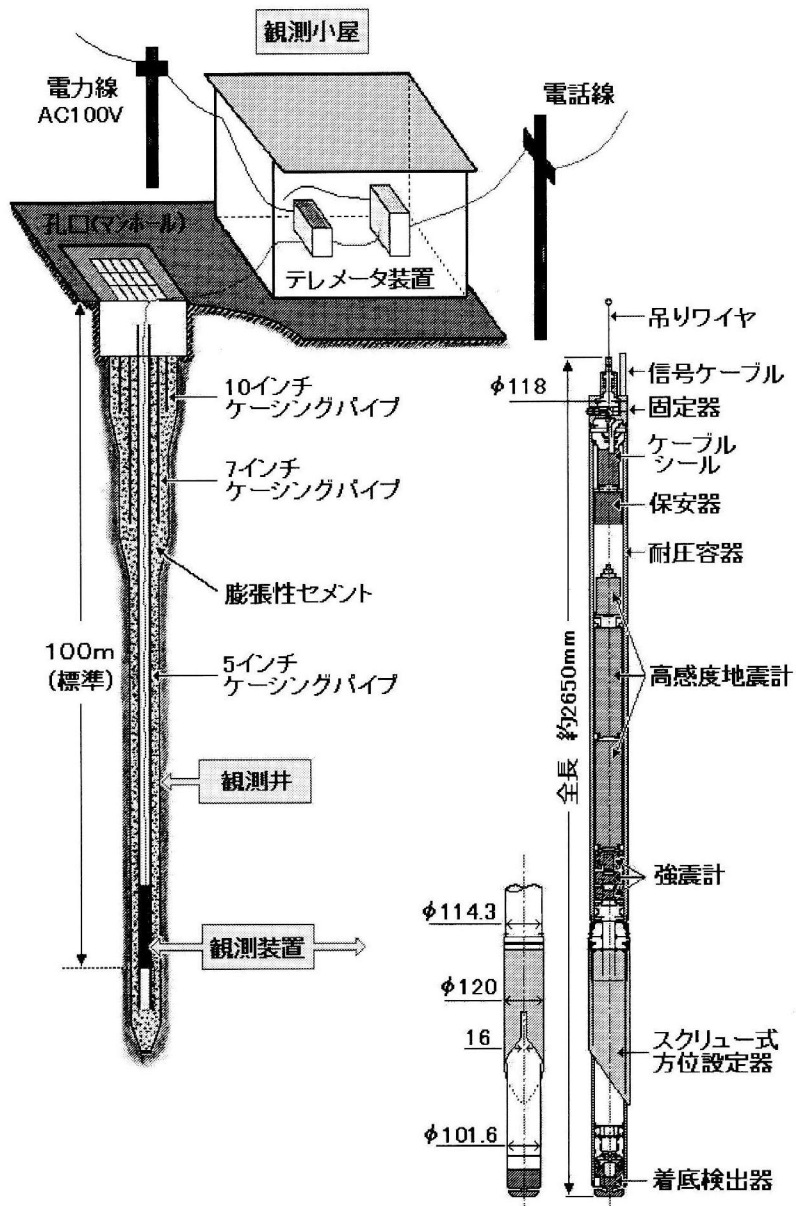
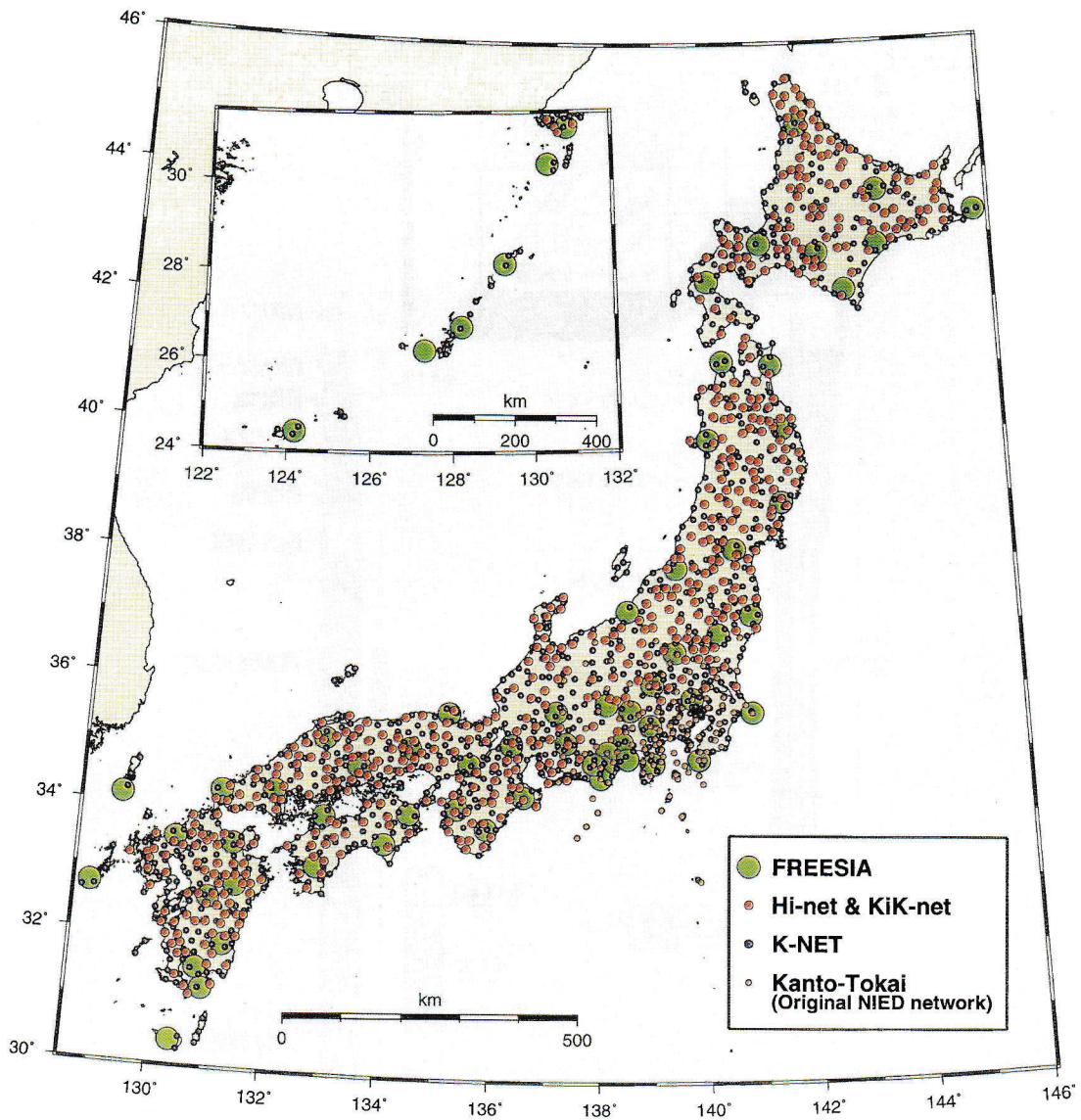


図 1 高感度地震観測施設 (Hi-net & KiK-net)



Seismic stations of NIED (as of Jan., 2001)

FREESIA	<i>Broadband</i>	64	vault
Hi-net	<i>High sensitivity</i>	520	borehole (locations are same as KiK-net)
KiK-net	<i>Strong motion</i>	520	downhole & surface
K-NET	<i>Strong motion</i>	1000	ground surface
Kanto-Tokai	<i>High sensitivity</i>	87	borehole or surface

(Borehole depths are usually 100-200m, but 23 stations are deeper than 1000m. IWT=3510m)

図 2 防災科学技術研究所地震観測網 (2001年4月現在)。K-NET: 1,000点, Hi-net & KiK-net: 520点, FREESIA: 64点, および旧来の関東・東海地殻活動観測網約100点(気象庁等の他機関の観測点8点を含む)が稼働している。

陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化

伊藤久男

要旨：科学技術振興調整費総合研究「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究」が平成11年度から開始された。本総合研究は陸域の大地震の発生にいたるしくみを、多岐にわたる調査・観測、物質科学的な分析、室内実験、数値シミュレーションなどを有機的な連携を保ちながら実施するとともに、これらの総合的な検討によって最終目標に迫るものである。

1. はじめに：研究の背景

陸域の大地震は我々が生活している地域の直下で発生するため、大きな被害をもたらすことが多く、その発生予測は地震被害を軽減するため大変重要である。現在、陸域における大地震の発生予測は、活断層の活動履歴の調査結果に基づく統計的な方法が採られている。この方法は、平均的な繰り返し間隔と最新の活動から次の大地震の発生時期を予測するものである。こうした手法では発生時期の見積もりに数百年程度の幅があり、将来の精度向上にも限界がある。より高い精度で大地震の発生を予測する手法が求められている。そのためには、まず、現在のところほとんどわかっていない、内陸地震のモデル化を行う必要がある。科学技術振興調整費総合研究「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究」は平成11年度から開始され、陸域震源断層に関する観測、物質科学的分析及び室内実験を組み合わせることにより、陸域の断層深部におけるすべり過程のモデル化に挑む。

2. 研究の作業仮説

内陸地震の決定論的な発生予測に道を開くた

め、下部地殻における断層のすべりと震源核形成に関する新しいモデルの構築を行う。モデル化に際しては、基盤の地震観測網によって得られるデータ、および、内陸において平均変位速度が最大級の活断層である糸魚川-静岡構造線北部および長町-利府断層において、本総合研究によって取得するデータを利用する。

内陸地震発生に関する従来の考え方は以下のよう要約される。弾性体と見なせる上部地殻内に既存の弱面である断層が存在する。日本列島周囲のプレートの「押し」により、上部地殻に応力が蓄積され、それが断層の摩擦強度を越えた時、地震が発生する。

しかしながら、内陸地震とその発生場について、従来の考え方では説明できない数多くの事実がある。

そこで、本研究では、内陸地震の発生過程に関して以下の作業仮説に基づいて研究を進めている (Iio and Kobayashi, 2001)。

- [1] 海洋プレートの沈み込みに起因する応力は上部地殻と下部地殻の両方に伝わる。
- [2] 下部地殻では変形が断層の延長部分に集中し、そこでゆっくりとした断層すべりが生じる。
- [3] 下部地殻内の断層すべりによって、上部地殻で固着している断層に応力が蓄積する。
- [4] 下部地殻内の断層すべりが加速して、上部地殻と下部地殻の境界付近に震源核が形成される。
- [5] 震源核が急激に成長して大地震が発生する。

この作業仮説の重要な点は以下の2つである。

第一は、大地震発生前に断層の下部地殻の延長部において、ゆっくりしたすべりが加速するという点である。そのすべりは、断層の深部全体という大規模なものである可能性があり、かつ、すべりが起こる場所が特定されるため、焦点を絞った観測を行えば、捉えられる可能性が高いことが期待される。実際に、日本海中部地震前に、断層の下部延長のすべりが加速したことを示唆する観測結果が得られている。

第二は、従来弾性体と考えられていた上部地殻も、非弾性的な変形を行う地域があるということである。現在、GPSによって日本列島の変形過程が精細にモニターされている。GPSがとらえているのは、歪み変化であって、応力変化と一対一に対応するものではない。したがって、GPSによる変動の大きなところが必ずしも地震発生の可能性が高いところではないのである。むしろ、歪みが小さいところに発生する可能性があることが、兵庫県南部地震のデータによって示唆されている。

この作業仮説の検証を行うことが、内陸大地震の発生予測にとって非常に重要であるが、その検証作業においては、以下に述べるような困難を伴う。

第一に、内陸の大地震は、ある活断層において数百年から数千年に一度しか発生しない、極めて稀な現象であることである。特定の断層にねらいを絞って観測を行うことは、通常は、世代を越えた仕事となる。

第二に、断層の深部延長という地下深くの現象は、地表付近の観測からは最も遠い場所で生起するものであることである。

3. 研究の内容

これらの困難を克服するために、本研究では、フィールドにおけるデータ収集と解析・室内実験・計算機シミュレーションを有機的に組み合わせ、以下のようなアプローチをとる(図1)。データ収集においては、地震観測、GPS、電気伝導度

構造探査、地質学的調査という多様な手法を用い、内陸において平均変位速度が最大級の活断層である糸魚川-静岡構造線北部および長町-利府断層をフィールドとする。

- 1) 断層の下部地殻の延長部の形態と物質およびそこでの環境条件を把握する。
- 2) 断層の下部地殻の延長部の定常的な運動形態をとらえる。
- 3) 断層の下部地殻の延長部を構成すると考えられる岩石を用いて、そこでの環境条件を考慮した室内実験を行い、変形特性とその環境条件依存性を推定する。
- 4) 震源核形成が開始されており、深部延長のすべりが加速する可能性のある地域において、試験的な観測を開始する。
- 5) GPSによる歪み速度の時空間的な変化と、微小地震の震源分布や地震波速度構造などの関係を調べ、応力が蓄積している領域や非弾性変形している領域の推定を行う。
- 6) 計算機シミュレーションにより、断層の延長部のすべりや震源核形成を再現する。

対象地域

本研究では「糸魚川-静岡構造線の北部」と「長町-利府断層」の2地域を対象にさまざまな観測と調査を行っている。

糸魚川-静岡構造線の北部

糸魚川-静岡構造線は日本列島の中央部を南北に横切り「牛伏寺断層を含む区間では、現在を含めた今後数百年以内に大地震が発生する可能性が高い」と評価されている。また、日本の内陸部では平均変位速度が最大級の活断層であるとともに、日本の活断層の中でも大地震発生の可能性が高いと評価されている。

三角測量による過去100年間の水平ひずみや最近のGPS(人工衛星利用の精密測位システム)による観測結果では、糸魚川-静岡構造線北部には地殻のひずみが集中しており、断層の深部すべりや活褶曲地域の塑性変形が観測できる可能性が高いと考えられる。

実施機関

- 国土交通省 気象庁気象研究所、国土地理院
- 独立行政法人 産業技術総合研究所、防災科学技術研究所、建築研究所
- 大学 東北大学、筑波大学、東京大学地震研究所、東京工業大学、愛媛大学、早稲田大学
- 民間 (株) 近計システム、(株) 地球科学総合研究所、(財) 地震予知総合研究振興会

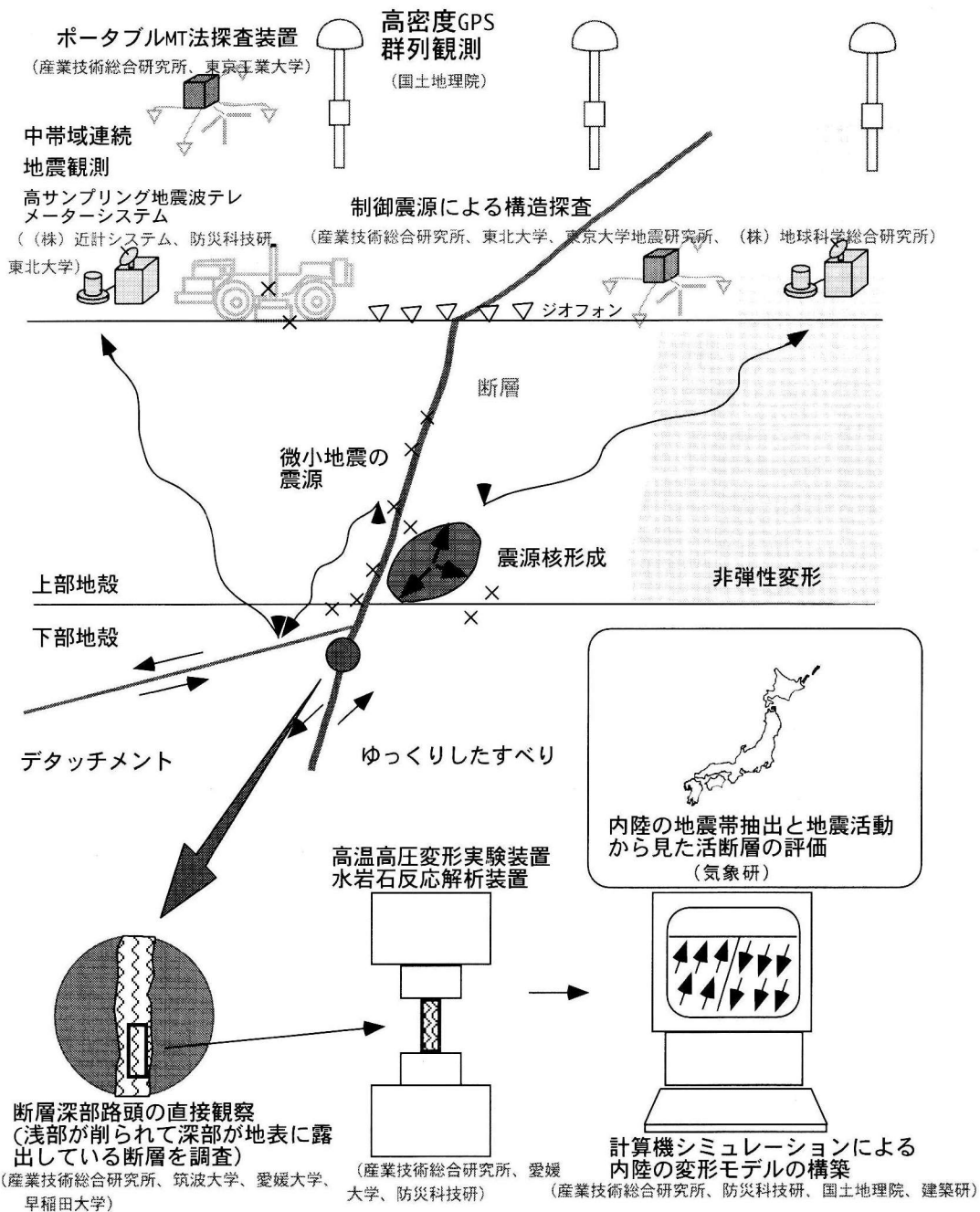


図 1 研究の概要

長町-利府断層

長町-利府断層は、仙台市の市街地中心部を北東-南西に貫き、地震関係基礎調査交付金による宮城県の調査が進められている活断層である。1998年9月15日に、この断層の最深部と想定される場所でマグニチュード5.0の地震が発生した。この地震は震源核の形成が始まったことを示すという解釈もあり、陸域の大地震が発生に至る過程を解明する上で、この断層周辺における観測データは大変重要である。

研究テーマ

[1] 下部地殻内の断層のモデル化に関する研究

1. 下部地殻内の断層のすべり機構に関する研究

断層深部のすべりの特性の解明のため、下部延長におけるすべりが大きいと推定される地域において稠密なGPSアレイ、地震計の観測により、断層近傍の変形の解明に関する研究を行う。また、既存の広域GPS観測網のデータを用いて、日本列島スケールにおける内陸の歪み場の特徴を明らかにし、プレートの相対運動との関係をモデル化する。

2. 下部地殻内の断層の変形機構に関する研究

浅部が削られて深部が地表に露出している断層の地質学的な調査解析を行い（(1)地質学的手法による深部断層岩の解析）、その結果および構造調査結果と実験結果を比較して、内陸活断層深部の物質構成、含水率などの環境条件の解明に資するため、上部下部地殻および境界相当の温度圧力条件において岩石の弾性波速度、電気伝導度等の測定を行い、モデル化に必要な内陸活断層深部の物性データを取得する。地殻深部の岩石の変形様式の解明のため、上部地殻および下部地殻相当の温度下で形成された岩石試料の地質学的解析、および上部下部地殻の境界相当の環境条件において岩石変形実験を行い、内陸活断層深部の変形機構の解明に関する研究を行う（(2)断層深部の変形機構・物性の解明）。

3. 断層深部の地球電磁気学的構造に関する研究

地震発生場の水の状態の解明に資するために、糸魚川-静岡構造線の北部において、下部地殻の電気伝導度構造に関する研究を行う。地震学的な構造と組み合わせることにより、上部地殻および下部地殻の不均質構造や流体の分布をより詳しく調べることが可能となる。この研究のために、GPS同期によるポータブルMT法探査装置を用いて、データを面的に取得し、下部地殻最上部におよぶ地震発生場の3次元的な電気伝導度構造を求めらる。

4. 地殻ブロック構造に関する研究

基盤の地震観測網から得られるデータおよび、既存データを総合的に解析することにより、地殻内で微小地震が帯状に分布している内陸地震帯の抽出を試みる。そして、日本列島の地殻ブロック構造とそのブロックの運動を明らかにし、地殻内地震の発生層の深さ分布特性の地域差を調べ、ここで取り上げる各地のフィールドの造構造論的バックグラウンドを明らかにし、活断層と地震活動との関連を解明する。

[2] 断層深部の動的構造モデルに関する研究

大地震の発生の可能性が指摘されている活断層を対象として、活断層の下部延長構造の推定、地下深部における破壊・変形過程の解明、震源核形成過程の検出を目指す。対象とする活断層は、仙台市街を北東-南西方向に貫く長町-利府断層である。これまで、1983年日本海中部地震や1995年兵庫県南部地震などの大地震では、本震に先行してそれぞれマグニチュード6.9、6.1の地震の発生が報告されている。長町-利府断層では、1998年9月15日に断層の下部延長部でマグニチュード5.0の地震が発生したが、これは震源核形成を強く示唆するものと考えられている。本計画では、震源核形成の兆しが具体的に見えてきたと推測されるこの地点をターゲットとして、高サンプリング稠密微小地震観測、制御震源を用いた断層深部構造調査、中帯域連続地震観測に基づいた地震学的な研究調査を実施することによって、内陸大地震の

発生場・発生過程の理解を深め、地震発生に至る一連の過程の中で現れるであろう現象の情報を抽出する。なお、高サンプリング稠密微小地震観測のために、機動的な観測に適し設置が容易でかつ精度の高いデータを安定して取得でき、準リアルタイムでもデータを解析できる高サンプリング地震波テレメーターシステムを開発する。

[3] 総合的検討

1. 陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化

計算機シミュレーションにより、内陸の変形および地震発生に至る過程を再現する。シミュレーションに用いる枠組みおよび境界条件等のデータは、基盤の地震観測網および既存観測網から得られるデータを活用するとともに、本研究による成果を順次取り入れて、モデルの検証および高度化を進める。

2. モデルの検証と高度化

過去の大地震の前駆的事象をその観測記録及び文献・資料を収集・整理・解析している。対象となる地震は1983年の日本海中部地震(M 7.7)、1982年の浦河沖地震(M 7.1)、1995年の兵庫県南部地震(M 7.2)であり、今後2000年の鳥取県西部地震(M_{JMA} 7.3)についても対象に加える予定である。

4. 現在までの成果の概要

本プロジェクトの成果を中心に国際シンポジウム—International Symposium on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region—が2001年11月に仙台で、文部科学省主催で開催された。海外からの招へい者を含め125名の参加者を得て盛会であった。本プロジェクトの現時点での成果が報告され、プロシーディングスとしてまとめられた。ここではその中から、GPS観測と長町-利府断層の構造調査の結果についてのみ簡単に述べよう。

4-1 GPS観測

長町-利府断層については、長町-利府断層の西側では周辺地域と比較してやや大きい東西圧縮歪みが観測されている。観測期間が短いため確定的な議論ができないが、定性的には長町-利府断層の深部で準静的なすべりが起きていると解釈可能である。

現在までのところ

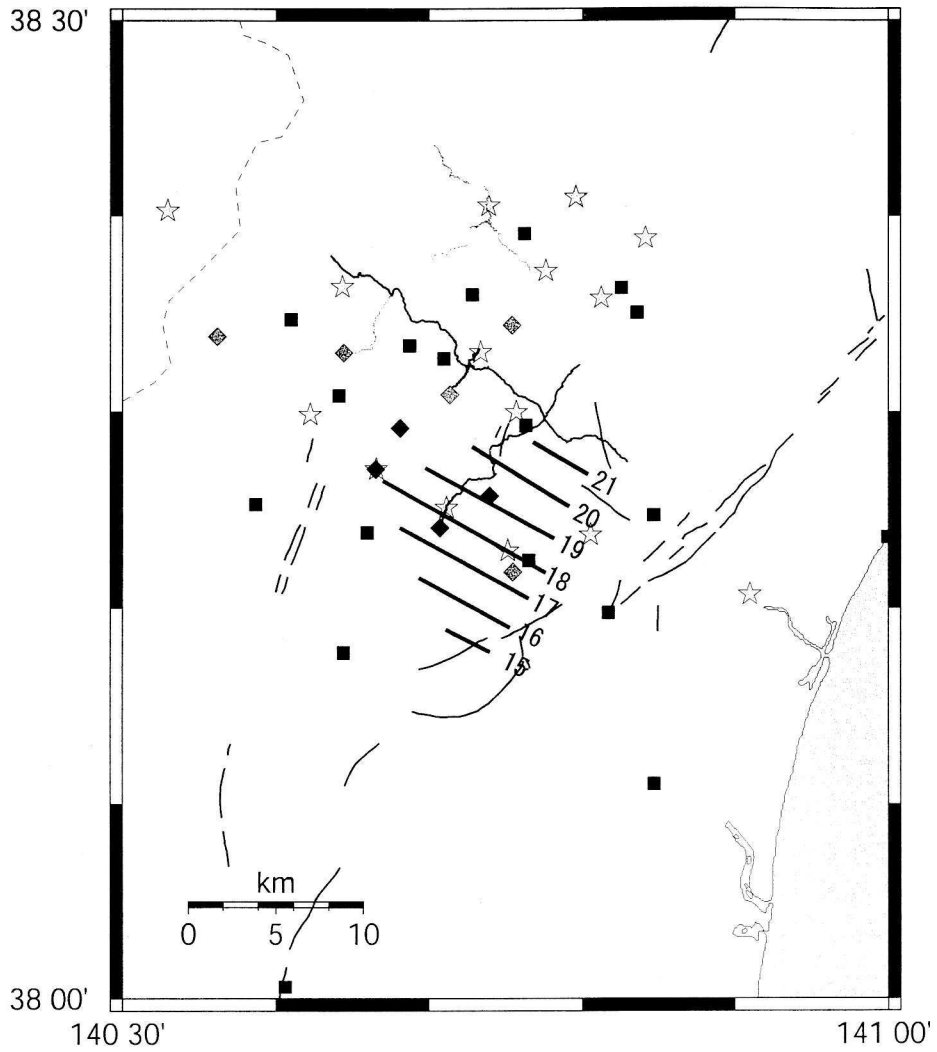
- 1) 長町-利府断層の西側で変形の集中が見られる
- 2) 変形の集中は断層の深部すべりによって説明可能
- 3) 深部すべりは深度10 kmよりも深い所で起こっている
と考えられる (Nishimura et al., 2001).

糸魚川-静岡構造線北部については、大町市付近の松本盆地東縁断層を横切る地殻変動プロファイルから、西北西-東南東圧縮の変形が断層付近の幅30 km程度の中で生じていることが分かった。変形の大きい部分は断層の位置よりも東側に少しずれており、断層が東側に傾斜していること、地表変形を起こす深部すべりが比較的浅い所(深度5~10 km)で起きていることが予想される(鷲谷他, 2001; Sagiya et al., 2001)。

4-2 長町-利府断層における構造探査

2001年6月~7月にかけて、長町-利府断層を対象に構造探査が行われた。探査は、震源としては4台のバイブレータ、15箇所の発破震源を用い、観測は図2に示す2本のほぼ直交する測線と独立型地震計・小スパンアレイ等によって行われた。解析は現在まだ継続中であるが、現在までの予備的解析では以下のことがわかりつつある。

- 1) 小スパンアレイによる散乱体解析では深度5 km, 12 km, 20 kmに散乱体が分布する。これらはそれぞれカルデラ構造、1998年9月15日のM 5.0の震源の深度、S波反射面の深度に相当する。さらに深度35 km付近にも散乱体が推定され、これはモホ面に相当すると考えられる (Imanishi et al., 2001).
- 2) 反射法解析では長町-利府断層の深部延長、S



- ☆ 発震点
- 〰 地科研側線
- 〰 LS8000
- 〰 ◆ DAT+LS7000
- 〰 ◆ 産総研アレイ
- 高サンプリング観測点
- 中帯域観測点
- Hi-net観測点
- 東北大学により求められたS波反射面の位置

図 2 長町-利府構造探査の概要

Reflection result with hypocenters of M5.0 earthquake

Line A

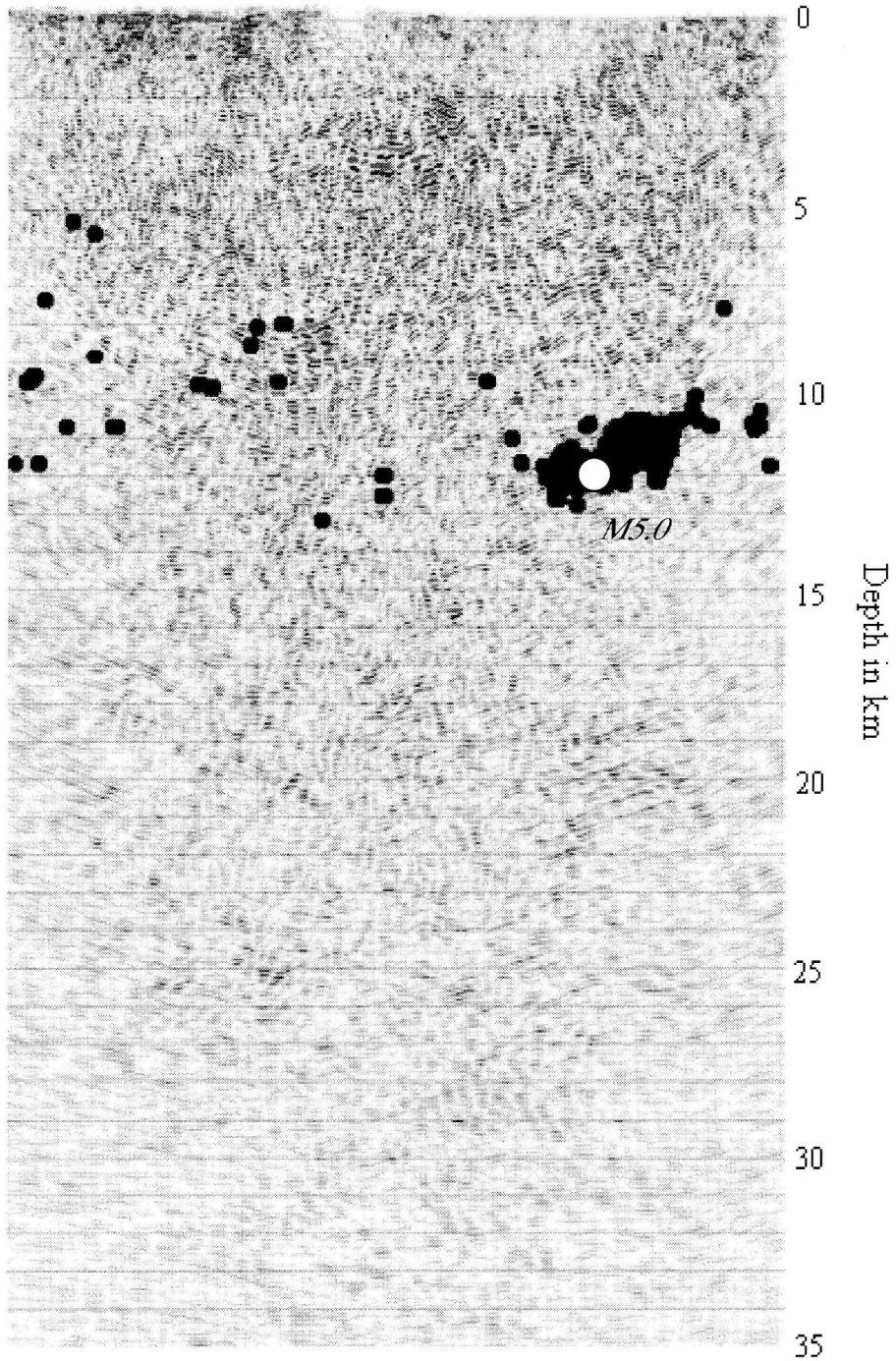


図 3 長町-利府構造探査の予備的結果

波反射面に相当する深度に反射面が存在する。ただし連続性は良くない。長町-利府断層の深部延長に相当する深度の反射面は深部で低角に移行すると考えられる。長町-利府断層の上盤側には多くの反射面が見えるが、下盤には比較的少ない(図3)。

- 3) 発破震源の大アレイによる解析では長町-利府断層の深部延長に相当する深度に7 km~10 km程度の広がりを持つ顕著なイベントが見られる(浅野他, 2001, Nakamura et al., 2001)。

GPSについては観測期間が短くあくまでも予備的な結果ではあるが、深部すべりが確認されつつあると言えよう。すべり面の深度・形状についてはまだ議論するには時期尚早であるが、今後構造探査の結果とも併せて、検討してゆく必要がある。

5. 今後の展開

内陸地震の発生過程のモデル化は、内陸地震の発生予測の高精度化においてブレークスルーとなるものである。現在、内陸地震の発生予測においては、活断層の過去の活動履歴の調査による統計的な予測手法がとられているが、予測の精度が数百年であり、今後とも著しく精度が改善される見込みは立っていない。内陸地震の発生場と発生過程を明らかにすることができれば、決定論的な新しい手法によるより精度の高い手法の開発に道が開かれることになる。GPSデータと地震・地球電磁気的なデータから非弾性変形を捉えることが可能となれば、地震危険度が低い場所を特定できることが期待される。また、断層の下部延長の定常的な動きが把握できれば、それをモニターすることにより、大地震発生に直接結びつくすべりの加速を検出できる可能性がある。さらに、震源核形成過程が解明されれば、それを検出するための観測の指針が生まれるので、震源核形成過程のモニターによる地震発生予測に道が開かれると期待される。本研究を通じて陸域における大地震の発生時期の精度を飛躍的に向上させる技術の基礎を

築くとともに、今後の活断層調査・観測計画の指針が得られることが期待される。

本研究は1995年兵庫県南部地震以降、従来の地震予知への見直しと具体的提案(「新地震予知研究」, 1998)を土台に具体的研究計画の一つとしてまとめあげたものである。このような研究計画は海外では例を見ないものであるが、最近米国でEarthScope計画(Dalton, 2000)が計画されつつある。EarthScope計画はまだ実現に至っていないが、本研究と相補的な関係をもつと考えられ、その動向を見守る必要がある。

平成13年度は研究の3年度目であり、中間評価を受けることになる。第II期へ向けてさらに研究成果の進展を図って行きたい。

参考文献

- 浅野陽一他, 2001, 長町-利府断層の深部構造推定一オ
フライン測線で得られたディタッチメントフォール
トからの反射?一, 日本地震学会講演予稿集2001年
度秋季大会, C32.
- Dalton, R., 2000, Deep thoughts, *Nature*, 405, 390-392.
- Hasegawa, A., H. Ito, T. Iwasaki and T. Ikawa, 2001,
Deep structure of Nagamachi-Rifu fault as in-
ferred from seismic expeditions, *Proceedings of
the International Workshop on Slip and Flow Pro-
cesses in and below the Seismogenic Region*, 9-1-9-
6.
- Iio, Y. and Y. Kobayashi, 2001, A physical under-
standing of the beginning of large intraplate
earthquakes, *Proceedings of the International
Workshop on Slip and Flow Processes in and
below the Seismogenic Region*, 1-1-1-5.
- Imanishi, K., H. Ito, Y. Kuwahara, Y. Mamada, T.
Yokokura, N. Kano, K. Yamaguchi and A. Tanaka,
2001, Deep structure of the Nagamachi-Rifu fault
deduced by small aperture seismic array observa-
tions, *Proceedings of the International Workshop
on Slip and Flow Processes in and below the Seis-
mogenic Region*, 49-1-49-6.
- Nakamura, A. and Research Group for Deep Struc-
ture of Nagamachi-Rifu fault, 2001, Estimation of
deep fault geometry of Nagamachi-Rifu fault from
seismic array observations, *Proceedings of the In-*

- ternational Workshop on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region, 45-1-45-4.
- Nishimura, T., T. Sagiya, T. Tada and S. Miura, 2001, High strain rate west of the Nagamachi-Rifu fault, northern Japan, observed by a dense GPS array, Proceedings of the International Workshop on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region, 55-1-55-6.
- 鷺谷 威・西村卓也・飯尾能久・多田 堯, 2001, 糸魚川-静岡構造線北部の地殻変動と牛伏寺断層のパラドックス, 日本地震学会講演予稿集 2001 年度秋季大会, A44.
- Sagiya, T., T. Nishimura, Y. Iio and T. Tada, 2001, Crustal deformation around the northern and central Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line* GPS observation and modeling, Proceedings of the International Workshop on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region, 12-1-12-4.
- 「新地震予知研究」, 1998, 月刊地球号外 No. 20, 229 pp.

地殻下部の震源断層

2001年インド・グジャラート地震

佐藤魂夫

1. はじめに

2001年1月26日、パキスタンとの国境に近いインド西部で大地震(Ms8.0)が発生した(図1)。3月20日現在のインド政府の発表によれば、この地震による人的被害は死者20,005人、負傷者166,000人(うち重傷20,717人)、行方不明247人へのぼる。文部科学省は2月16日に平成12年度特別研究促進費研究「2001年インド西部大地震の総合的調査研究」に科学研究費補助金を交付し、インド側の共同研究者4名を含む18名からなる調査団を結成した。詳しい調査団の構成等については、日本地震学会ニュースレター2001年3月

号を参照頂きたい。おもな調査・観測の内容は地表地震断層調査、余震観測、GPSによる地震後の地殻変動観測、および被害調査である。現地における調査・観測は2001年2月18日から3月13日にかけて実施された。調査結果については一部すでに速報として、関連の学会誌等で紹介されている(たとえば、文部科学省2001年インドグジャラート地震調査団, 2001)。さらに、近々、調査団による最終的な報告書(英文約100頁)も完成の予定である。ここではおもに筆者が参加した余震観測の結果をもとに、この地震の断層の特徴について解説する。

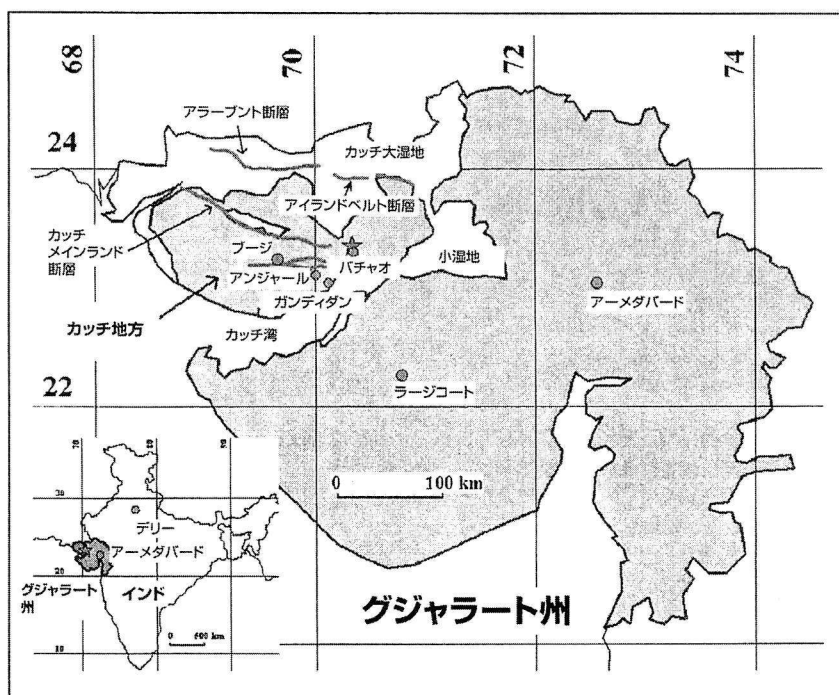


図1 グジャラート州の地図。★印は本震の震央。

2. テクトニクス

USGS/NEIC (米国地質調査所 / 国立地震情報センター) が最終的に発表しているこの地震の震源要素は、震央が北緯 23.42 度, 東経 70.23 度, 深さ 16 km, 地震の規模は Ms 8.0 である. インド亜大陸は安定地塊というイメージが一般的ではあるが, 震源域となったグジャラート州カッチ地方 (図 1) では過去にも 1819 年のカッチ地震 (M 7.5), あるいは 1956 年のアンジャール地震 (M 6.0) などの被害地震が発生しており, インドにおいては北部のヒマラヤ地方と同様, 最も地震危険度の高い地域になっている (Government of India, 2001). カッチ地方はインドプレートとユーラシアプレートが衝突する Himalayan Frontal Fault System の南約 300 km にあると同時に, Owens Fracture Zone, Makran subduction

zone および Chaman Fault の会合点の東約 400 km に位置している (図 2). この地方は安定な大陸地域 (Jhonston, 1996), あるいは安定な大陸地域から活動的なプレート境界地域へ移行する場所と見なされている.

地質時代を溯ると, この地方はインド亜大陸がアフリカ・南極大陸から分離・移動する際に形成された東西にのびるリフト系内に位置しており, リフト内にはジュラ紀・白亜紀の陸成・浅海性の堆積層が分布する (Biswas, 1987). これらの堆積岩はその後, インド大陸のユーラシア大陸への衝突・付加の過程において短縮変形を被り, 正断層から逆断層への反転運動によって隆起し, 現在では山地・丘陵をなしている. 現在この地方を支配する応力場の最大圧縮力軸の向きは南北あるいは北北東-南南西である (Gowd et al., 1992).

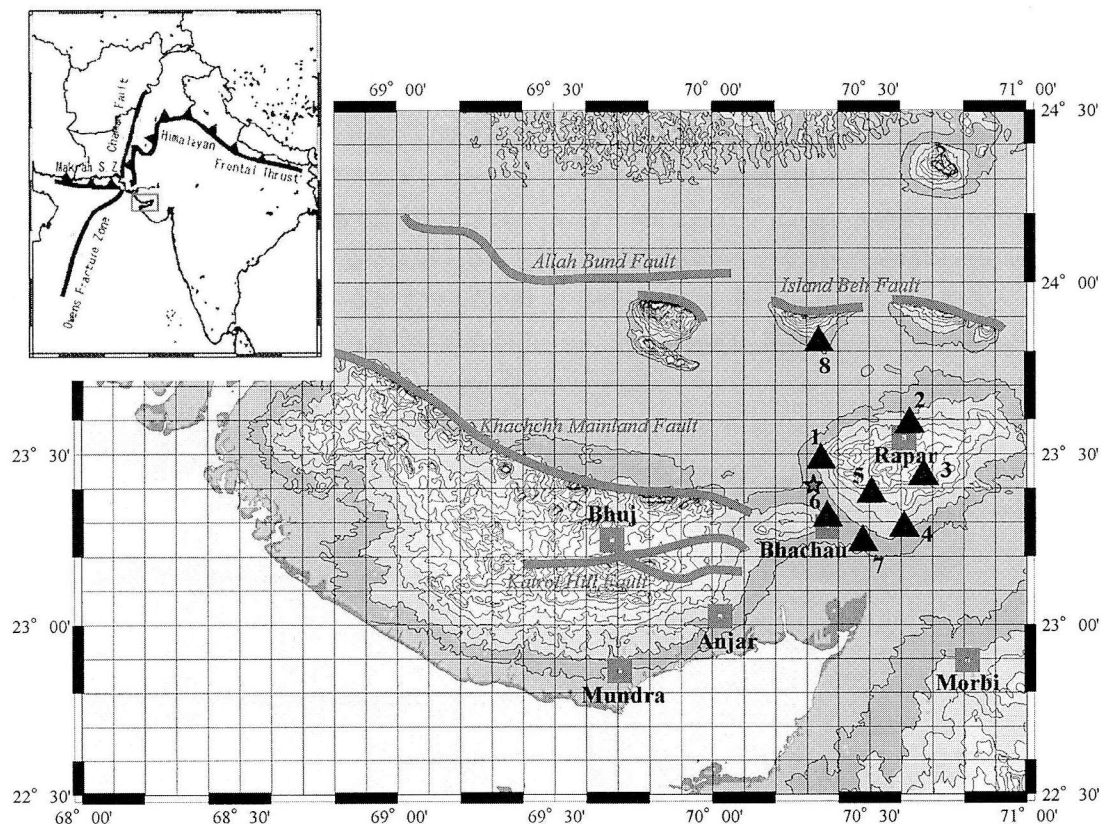
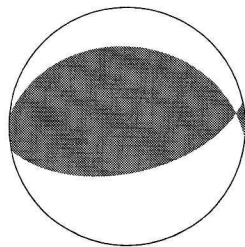


図 2 カッチ地方の地形図. ▲印は観測点の位置を示す. 左上はインド周辺の活構造.

3. 余震分布と本震の震源断層

余震の観測は本震発生から約一カ月後の2月28日から3月6日にかけて行われた。日本からはジェームズ・モリ（京大防災研究所）、根岸弘明（防災科学技術研究所）および筆者の3人が参加した。インド側からは Ramesh P. Singh 教授（インドカンパール工科大学）および Sushil Kumar 博士（ワディア・ヒマラヤ地質学研究所）が加わった。余震観測の目的は詳細な余震分布から本震断層の位置、大きさおよび形状を決定することである。地震発生の直後、諸機関により公表された震源メカニズム解はいずれも最大圧縮力軸（圧力軸）がほぼ南北を向く、逆断層型を示していた（図3）。しかし、これだけからは二つの節面のうちどちらが断層面であるかを決定することはできず、詳細な余震分布の公表が待たれた。

我々は日本から8観測点分の余震観測機材（1 Hz・3成分・連続観測用5式および2 Hz・3成分・トリガー観測用3式）を持ち込んだが、観測点の配置には頭を悩ませた。我々が日本を離れる頃、日本における被害の報道はカッチ地方の中核都市ブージに偏り、あたかも震源域がブージの真下にあるかの印象を与えていた。しかし、ブージの東約400 kmにあるグジャラート州の経済の中心地アームダバート（図1）から車でブージを目指す途中、我々はブージの東約70 kmにあるバ



Strike 78 Dip 58 Slip 81

図3 本震の震源メカニズム解（Kikuchi and Yamanaka, 2001）。

チャオ付近からすでに被害が大きくなっていることに気がついた。たしかに USGS の震央はバチャオの北10 kmに位置していたが、それがどの程度確かなのか当時不明であった。一方、インド気象局（IMD）が発表していた震央はブージのはるか北方にあり、USGS の震央とは約60 kmも離れていた。日本国内に発生する地震の場合、USGS の震源よりは気象庁の震源をあてにするのが自然であるが、ここではどちらの震源を頼りにすべきか判断がつかねた。このように、本震の震源（破壊の始まった地点）はあいまいであったが、マグニチュードが8クラスの地震であれば、本震の震源域（最終的に破壊した領域全体）、すなわち余震域は100 km程度に広がっていることが予想された。バチャオ周辺の被害の状況から、余震域はブージからバチャオ付近まで伸びているものと思われた。我々より2週間ほど先に現地地で余震の観測を行っていた米国テネシー州立メンフィス大学の地震研究情報センター（CERI）の観測チームと電話で連絡を取ったところ、彼らはブージに拠点を置き、おもにバチャオから西側の領域に観測点を展開しているとのことであった。これを聞いて我々はCERIの観測点との重複を避け、バチャオの東側に8台の地震計を展開することにした（図2）。観測点の間隔は大体20 km程度である。観測点番号1および2と8との間が他に比べ空いているが、ここにはカッチ大湿地と呼ばれる湿地帯が進入しており、地表に地震計を設置

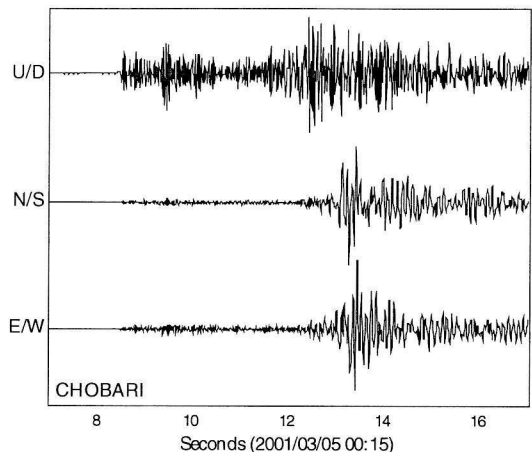


図4 観測された余震の波形。

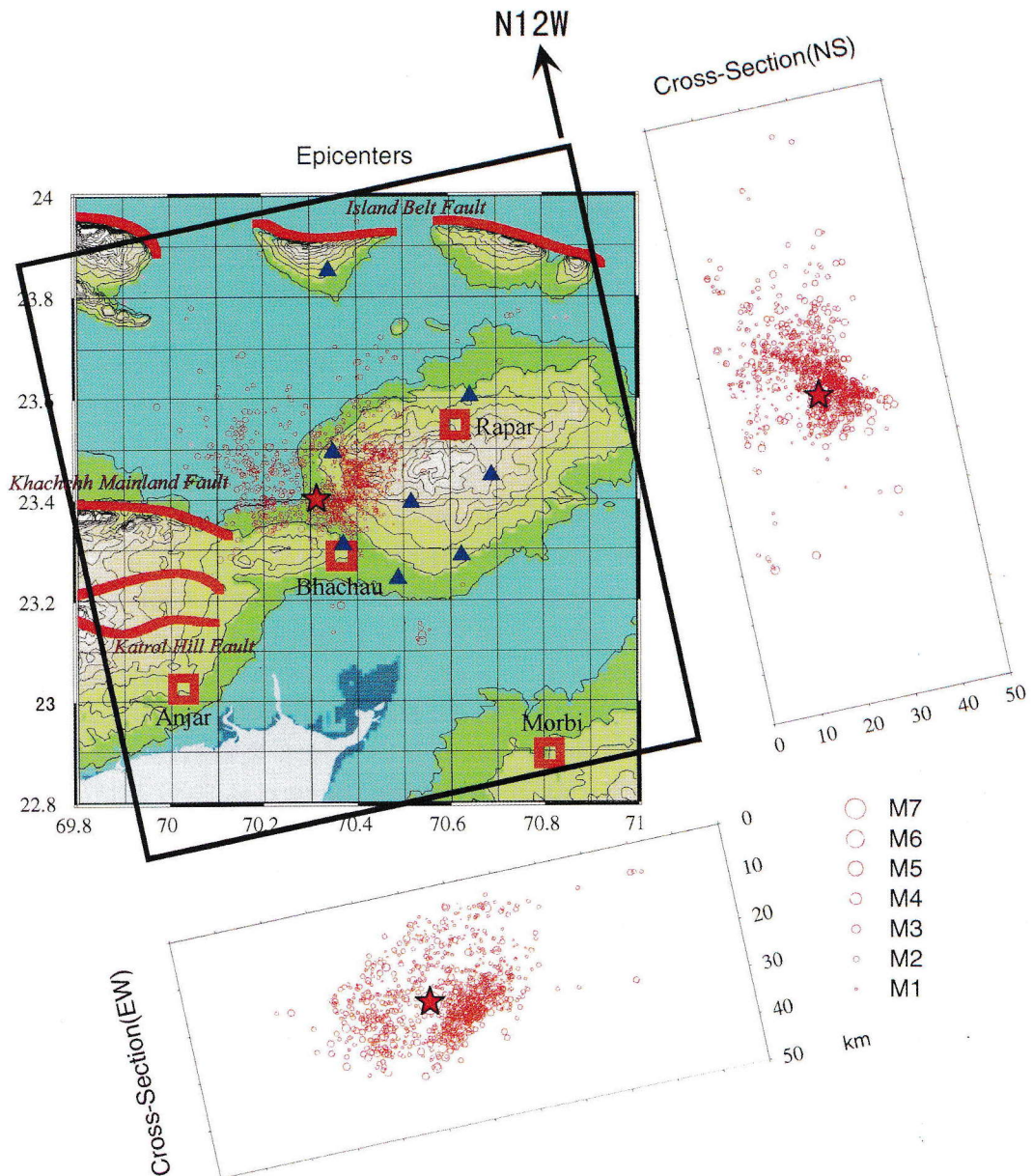


図5 余震の分布. ★印は本震の位置, ▲印は観測点の位置を示す.

することは不可能であった.

帰国後、震源決定の結果、この観測網は余震域の東半分を囲んでいることがわかった(図5). バチャオの東側に大きめに観測網を伸ばしておいたが、余震域はそれほど遠くには伸びていなかった. もうひとつ震源決定の結果わかった事実は、バチャオの西側に広がる余震域の西端がブージから40 kmも離れていたことである. これは観測点

設置当時、ブージが震源域内にあると予想していた我々にとって意外であった. この地震の余震域はマグニチュードの割には小さかったのである.

観測された余震の波形の1例を図4に示す. 直達P波・S波の他に、上下動成分には顕著な変換波とみられる相がいくつか認められ、この地域の地殻構造がかなり複雑であることを示唆している. 約1週間の観測期間中、1,400以上のイベント

が記録された。その中からP波およびS波の読み取り精度の良い1,130イベントを選び、連係震源決定法(JHD)(Engdahl et al., 1982)により震源と観測点補正值の同時決定を行った。速度構造はインド国立地球物理学研究所(NGRI)が人工地震探査から得た一次元構造を使用した。地殻の厚さは37kmになっている。決定された余震の分布を図5に示す。断面図は図3に示した震源メカニズム解のうち南に傾斜する節面の走向、およびそれに直交する方向に投影してある。

余震は主として北緯23.3~23.7度、東経70.1~70.5度、および深さ5~35kmの範囲に分布する。ただし、5~10kmの深さの余震は10km以深のものに比べ数は少ない。余震域は東西の走向方向に約40km、南北の傾斜方向に約40km伸びている。地殻内に発生するM8クラスの大地震の余震域としては、深さ方向の幅に対して走向方向の長さが短いことが特徴といえよう。地表で観察された亀裂や地滑りなどの地変の多くはこの余震域内に存在し、かつ、震度分布の等震度線はこの余震域を中心にほぼ同心円上に広がっている(Narula and Chaubey, 2001)。このことから、図5に示される余震域の範囲が本震の震源断層を表している

と考えて間違いのないであろう。USGSが決めた本震の震源は余震域のほぼ中央に位置し、その周囲では余震が少ない傾向が認められる。観測点設置当時はUSGSの震源に大きな誤差を見込んでいたが、余震分布との比較から判断すると、誤差はそれほど大きなものではなかった。

余震の深さ分布を南北の断面で見ると、全体的に傾斜角約45度の南傾斜の面が見える。このことから、図3に示される震源メカニズム解の2つの節面のうち、南傾斜の高角の節面が断層面と推定される。また、余震の深さが5~35kmに分布していることから、本震の主要なすべりは地殻の下部に存在し、断層は地表には突き抜けなかったと推測される。地表に地震断層が観察されなかったのはこのためであろう。

IRISによれば本震のモーメントマグニチュード(M_w)は7.7と与えられている(地震モーメント 4.5×10^{20} Nmに相当)。余震域の面積 40×40 km²は $M_w=7.7$ の地震のものとしては小さい。 M_w が等しい1999年集集地震の余震域の面積 40×100 km²(Hirata et al., 2000)と比較すると半分以下である。断層を円形と見なし、その半径を20~25 kmとして応力降下量を求めると13~24

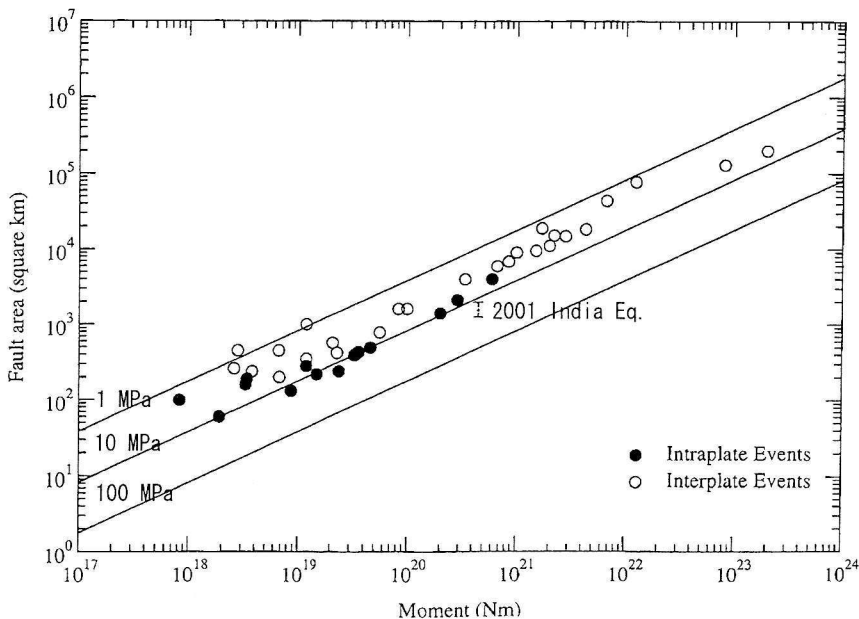


図6 断層の面積と地震モーメントの関係(Kanamori and Anderson, 1975)。

2001 India

1999 Taiwan

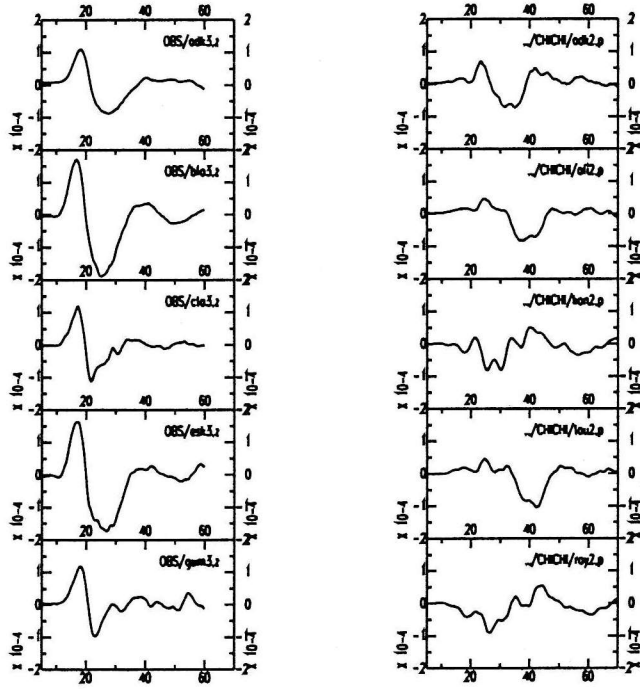


図 7 遠地で記録された P 波の記録。左が 2001 年グジャラート地震、右が 1999 年集集地震。横軸の時間と縦軸の振幅のスケールは同一にとつてある。

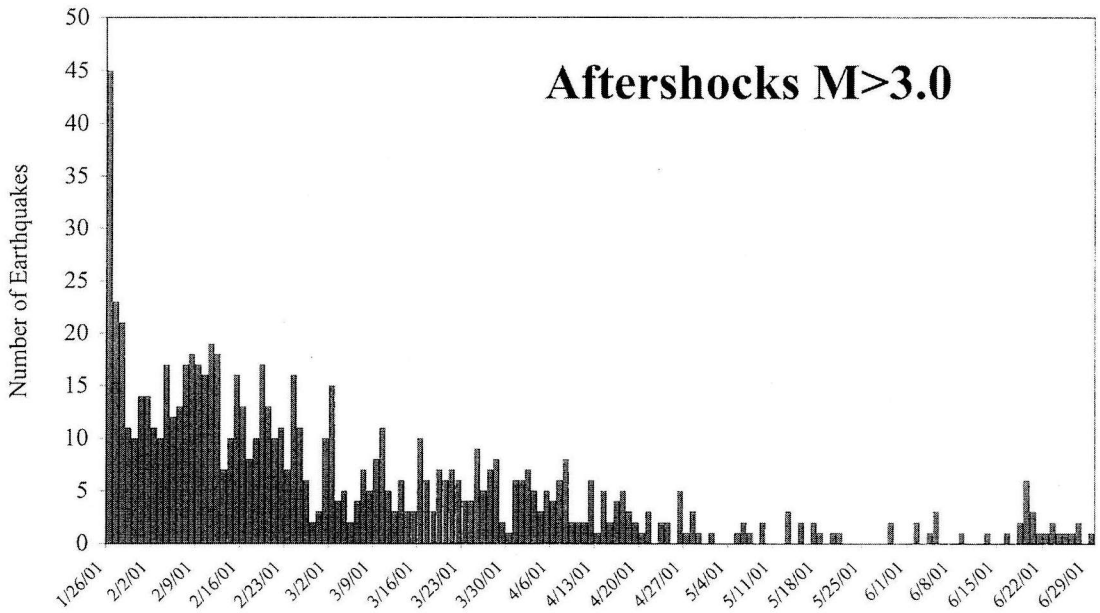


図 8 日別余震回数 (インド気象局発表)。

MPa が得られた。一般にプレート内地震の応力降下量はプレート境界地震のものに比べ大きな値を示すが、13~24 MPa の応力降下量はプレート内地震の中でも大きい方である (図 6)。また、遠地地震記録を用いた波形インバージョンの結果によれば、本震の震源付近には面積 $10 \times 20 \text{ km}^2$ 、最大すべり量 10 m に達するアスペリティが存在する (Negishi et al., 2001)。遠地の波形記録を 1999 年集集地震のものと対比させて見ると、グジャラート地震の方が継続時間の短い、振幅の大きな波を出していることがわかる (図 7)。これは比較的小さなアスペリティから強い地震波が放射されたことを表している。このようなアスペリティの影響は当然近地の強震動にも反映されるはずであるが、このことを確認できるような強震記録は残念ながら震源域近傍では得られていない。

図 8 はインド気象局による余震の日別頻度を示す。この期間に発生した最大の余震の規模は本震の 2 日後に発生した $m_b 5.9$ (USGS) である。本震の規模に比べ、最大余震の規模が小さいことが特徴である。これが幸いして、余震による顕著な 2 次災害は報告されていない。なお、今回の地震については前震の報告は全くない。USGS/NEIC (PDE) カタログによれば、図 5 で示される領域で 1973 年以降、本震直前までに発生した地震は 1982 年 7 月 18 日に発生した $m_b 4.8$ の地震一個 (北緯 23.34 度、東経 70.61 度、震源の深さ 33 km) だけである。

4. 地表地震断層と余効地殻変動

カッチ地方には震源域に近接した Kachchh Mainland Fault (カッチ・メインランド断層) や、その北方 40 km に位置する Allah Bund Fault (アラー・ブント断層) および Island Belt Fault (アイランド・ベルト断層) など、東西走向のいくつかの活断層が推定されている (図 2)。地震発生直後は地震の規模や震源が比較的浅かったこと、また既存の活断層が知られていることなどから、地表に地震断層が出現した可能性が高いと推測された。しかし、地上および小型航空機を

使用した空中からの調査では、おもに液状化と関連した亀裂以外の地表地震断層と特定できる断層は見いだせなかった (Malik et al., 2001)。応用地質 (株) の調査チームによって報告がなされていたカッチ・メインランド断層沿いの亀裂・プレッシャーリッジ (ブダモラ村付近: 北緯 23.34 度、東経 70.20 度) については、トレンチ掘削を行なった結果、地震動に伴って斜面上の表層近傍で発生した地滑りによることがわかった (Nakata et al., 2001)。米国およびインドの調査チームからも地表地震断層を発見したという報告はなく、今回の地震は大規模ではあったが、震源断層が地表まで到達しなかった可能性が高い。このような伏在断層の存在は、地表に現れた地震断層 (活断層) のみを対象とした地震危険度の予測が必ずしも十分ではないことを示す。地殻の下部に発生する大地震の原因の解明は、防災上の観点からもきわめて重要といえる。

余効地殻変動の GPS 観測は 14 の観測点を設置し、2 月中旬から 3 月上旬にかけて実施された。上記の短期間の観測では目立った変化は見られなかったが、5 月の中旬に実施された第 2 回目の観測との比較では数 cm 程度の上下変動が認められた。変動量は小さいものの、地震時の地殻変動と類似したパターンを示している。日本近辺で発生した M8 クラスの地震では余効変動が数十年にわたって続いた場合もあり、長期的な観測が望まれる。

5. 地震発生層の深さ

通常、大陸性地殻に発生する地震の震源は 15~20 km 以浅に限定されており (伊藤, 1989; Marone and Scholz, 1988)、地殻下部を震源域とする地震はきわめて稀である。地殻内の地震発生層の深さは地殻を構成している岩石の種類、温度、歪速度、水の含有率等種々の要因に依存するが、単純には冷たい地殻を仮定すれば地震発生層の深さを深くすることができる。Sclater et al. (1980) によれば、大陸地殻の平均的な熱流量は 55 mW/m^2 で、最も低いものは 40 mW/m^2 程度

である。もし、熱流量が $40\sim 45\text{ mW/m}^2$ 相当の地温勾配であれば、地震発生層の深さの下限を $25\sim 30\text{ km}$ 程度の深さまで伸ばすことができる (Johnston et al., 2001)。しかし、この地域では熱流量のデータが少なく、極端に冷たい地殻を裏付ける証拠は今のところない。

他の可能性としては震源域の下部地殻を構成する岩石が、特異なレオロジーを示す場合が考えられる。たとえば、マントルの主要鉱物であるオリビンは大陸地殻の主要鉱物であるコーツァイトなどに比べるとはるかに脆性的であり (Kohlstedt et al., 1995)、もし、オリビンが $20\sim 40\text{ km}$ の深度に存在していれば、その領域は脆性・半脆性的なふるまいを示すことが期待される。前述のようにグジャラート地震が発生したカッチ地方は、インド亜大陸がアフリカ・南極大陸から分離・移動する際に形成されたリフト系内に位置しており、震源断層付近では局所的にマントル物質が地殻下部に相当する深さまで貫入している可能性は否定できない。

なお、Johnston et al. (2001) は地殻下部に発生する余震の原因を、冷たい地殻に加えて、本震後の余効地殻変動がもたらす高歪速度に求めている。通常の低歪速度では塑性的にふるまう地殻下部も高歪速度のもとでは脆性・半脆性的にふるまうことが期待されるからである。彼らはこのような考えに基づき、余震活動は深い方から早く終息に向かうと予想している。

6. おわりに

筆者の知る限りでは、今回の地震で現地において臨時の余震観測を行なった観測チームは我々の他に、すでに紹介した CERI, インド地球物理学研究所 (NGRI), およびインド地質調査所 (GSI) がある。このうち、GSI を除く 3 チームはお互いのデータを交換し、震源域の 3 次元地震波速度構造等の共同研究を行なう計画を進めている。そのための第 1 回の集まりが 7 月上旬に CERI で開催された。CERI のあるテネシー州メンフィスの近くでは、1811 年から 1812 年にかけて $M7\sim 8$ の大

地震が 3 度にわたって発生した。いわゆるニューマドリッド地震と呼ばれる地震である。CERI は今回のグジャラート地震を大陸内部で発生したニューマドリッド地震と類似の地震として捉え、詳しい研究に乗り出している。安定大陸と呼ばれる地域に発生する地震の研究は、2001 年グジャラート地震の発生を機に新たな展開を見せようとしている。

参考文献

- Biswas, S.K., 1987, Regional tectonic framework, structure and evolution of the western marginal basins of India, *Tectonophysics*, 135, 307-327.
- Engdahl, E.R., J.W. Dewey and K. Fujita, 1982, Earthquake location in island arcs, *Phys. Earth Planet. Inter.* 30, 145-156.
- Government of India, 2001, <http://www.ndmindia.nic.in/eq2001/eq2001.html>
- Gowd, T.N., S.V.S. Rao and V.K. Gaur, 1992, Tectonic stress field in the Indian subcontinent, *J. Geophys. Res.*, 97, 11,879-11,888.
- Hirata, N., S. Sakai, Z.-S. Liaw, S.-B. Tsai and S.-B. Yu 2000, Aftershock observation of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *EOS, Transactions, Amer. Geophys. Union*, 81, F875.
- 伊藤 潔, 1989, 地殻内の地震発生層の深さ分布と内陸大地震, *月刊地球*, 11, 97-104.
- Johnston, A.C., 1996, Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions—I. Instrumental Seismicity, *Geophys. J. Int.*, 124, 381-414.
- Johnston, A., P. Bodin and P. Rydelek, 2001, An explanation for the deep aftershocks of the Republic Day earthquake in the ductile lower crust, *SSA Annual Meeting*, April 2001, San Francisco.
- Kanamori, H. and D.L. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in Seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- Kikuchi, M. and Y. Yamanaka, 2001, Western India earthquake, <http://www.eic.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>
- Kohlstedt, D.L., B. Evans and S.J. Mackwell, 1995, Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments, *J. Geophys. Res.*, 100, 17,587-17,602.

- Malik, J. N., Nakata, T., Sato, H., Imaizumi, T., Yoshioka, T., Philip, G., Mahajan, A. K. and Karanth, R. V., 2001, January 26, 2001, the Republic Day (Bhuj) earthquake of Kachchh and active faults, Gujarat, western India, *Active Fault Research*, 20, 112-126.
- Marone, C. and C.H. Scholz, 1988, The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 621-624.
- 文部科学省 2001 年インド・グジャラート地震調査団, 2001, 2001 年インド・グジャラート地震の総合的調査研究, *自然災害科学*, 20, 89-102.
- Nakata, T., Yoshioka, T., Sato, H., Imaizumi, T., Malik, J. N., Philip, G., Mahajan, A. K. and Karanth, R. V., 2001, Extensive surface deformation around Bhudarmora associated with the January 26, 2001 Republic Day (Bhuj) earthquake of India. *Active Fault Research*, 20, 127-136.
- Narula P.L. and S. K. Chaubey, 2001, <http://www.nicee.org/NICEE/Gujarat/narula.htm>
- Negishi, H., J. Mori, T. Sato, R.P. Singh, S. Kumar and N. Hirata, 2001, Aftershocks and slip distribution of mainshock, In: *Report on the 26 January 2001 Earthquake in the State of Gujarat, India*, T. Sato (ed.), 33-45.
- Sclater, S.J., Jaupart and D. Galson, 1980, The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat loss of the earth, *Rev. Geophys.*, 18, 269-312.

被害分布とその特徴

2001年インド・グジャラート地震

村上ひとみ

1. はじめに

グジャラート地震 ($M_s=8.0$) は 2001 年 1 月 26 日午前 8 時 46 分 (現地時間), インド西部グジャラート州に発生し, カッチ地方やア-メダバード市など都市, 農村地域に激甚な構造物被害・人的被害を引き起こした。なお, モーメントマグニチュード (USGS) は 7.7 である。人的被害は, 死者 20,005 人, 負傷者 166,000 人 (うち重傷 20,717 人), 行方不明 247 人に上る (2001.03.20 現在, Government of India, 2001)。家屋被害は全壊家屋 370 千戸, 半壊家屋 922 千戸, 被災総額 2,126 億ルピー (約 6 千億円) と報告されている (表 1)。最近の大地震として記憶に新しい, 1999 年トルコ・コジャエリ地震の被害 (死者 15,466 人, 大破・崩壊住戸 60 千戸, 中破住戸 59 千戸, 文部省, 1999) に比べて, また, 1995 年兵庫県南部地震による被害 (死者 6,400 人, 全壊世帯 181 千戸, 半壊世帯 275 千戸) に比べて, さらに被害が膨大であることがわかる。

文部科学省の科研費補助金による調査チームのうち, 被害調査班 (リーダー: 筆者) は日本側 10 名, インド側カウンターパート 3 名から成り, 2001 年 3 月 4 日~3 月 13 日の間, 現地調査を行った。調

表 1 家屋被害総数 (単位, 千戸)

	Pucca 恒久 住宅	Kachcha 非恒久 住宅	Huts 小屋	Total 合計
Fully destroyed	187	167	16	370
Partially destroyed	501	387	34	922
Total	688	554	50	1292

Ref.: Gov. of India, Krishi Control room, 20 Mar 2001 report

<http://www.ndmindia.nic.in>

査メンバーは, 村上ひとみ (山口大), 澤田純男・林康裕 (京都大), 久田嘉章 (工学院大), Venkataramana Katta (鹿児島大), S. Pareek (日本大), 目黒公郎・上半文昭・P. K. Ramancharla (東京大), 斧志保 (毎日放送), D. K. Paul, R. N. Dubey, A. Kumar (インド, ルールキー大学) である。ここでは, 調査結果及び被害統計資料を基に, 被害の分布とその特徴についてまとめる。なお, 詳細については, 文献 (日本建築学会, 2001; Sato, 2001) を参照して頂きたい。

2. 被害の背景

宇津による世界の被害地震データベース (東京大学地震研, 2001) からインドで死者 100 名以上の地震を検索し, 地震規模と人的被害の死者総数の関係を図 1 に示す。今回の地震はインドにおいて, 今世紀最大の被害地震であったこと, 死者数は地震規模とマクロな相関関係にあるが, 今回の地震死者数がマグニチュードから想定される数より数倍大きいこと, などが挙げられる。

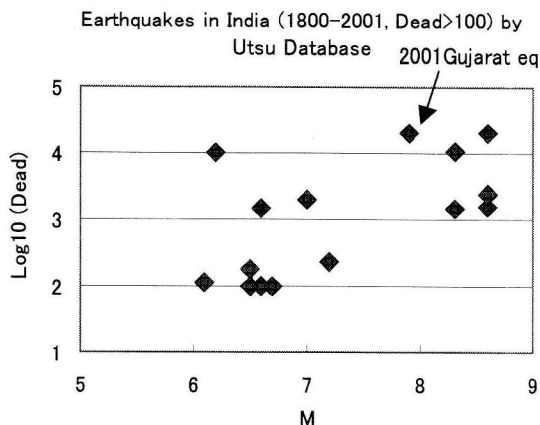


図 1 地震の規模と死者数

グジャラート州の人口は41,310千人で日本の約1/3、面積は196千km²で日本の約1/2に達し、人口密度が211人/km²となる(表2)。グジャラート州の人口増加傾向はかなり急速であり、1989年から1991年までの増加率が21%となっている。

表2 グジャラート州の基本統計

State Capital	Gandhi Nagar
Population (thousand in 1991)	41,310
Area (thousand sq. km)	196
Females per 1000 males (1991)	934
Literacy rate (1991)	61.3
Ratio of urban population (1991)	34.5
Net Domestic Product (Rs. million at current prices in 1992-93)	322,400
Per Capita Income (Rs. at current prices in 1992-93)	7,586
Principal Language	Gujarati
Population density (person/sq. km)	211

なお、インドの地震危険度ゾーニングマップによれば、カッチ地方は危険度V(最大級、想定震度はMMI=IX)に、アーメダバードは危険度III(中級、想定震度MMI=VII)に指定されていた。

3. 震度分布

今回の地震で震源域に最も近い強震観測点は、ルーキー大学によるアーメダバード市(震央距離約250km)の加速度記録のみであった。9階建てRC建物の1階で100gal、最上階で300gal程度と報告されている。(Roorkee University, 2001)

調査チームではMSK震度階の解説表に基づきアドベ造、組積造、RC造などの建物種別ごとの被害調査に基づき震度分布を推定した(久田・目黒, 2001)。またアンケート震度調査を実施してMSK震度の推定を試みた(村上・他, 2001)。久田らによる推定震度分布を図2に示す。最大震度はパチャウを含む東西60kmの範囲でXに達し、これは気象庁震度階VIIに相当する。震度分布は地

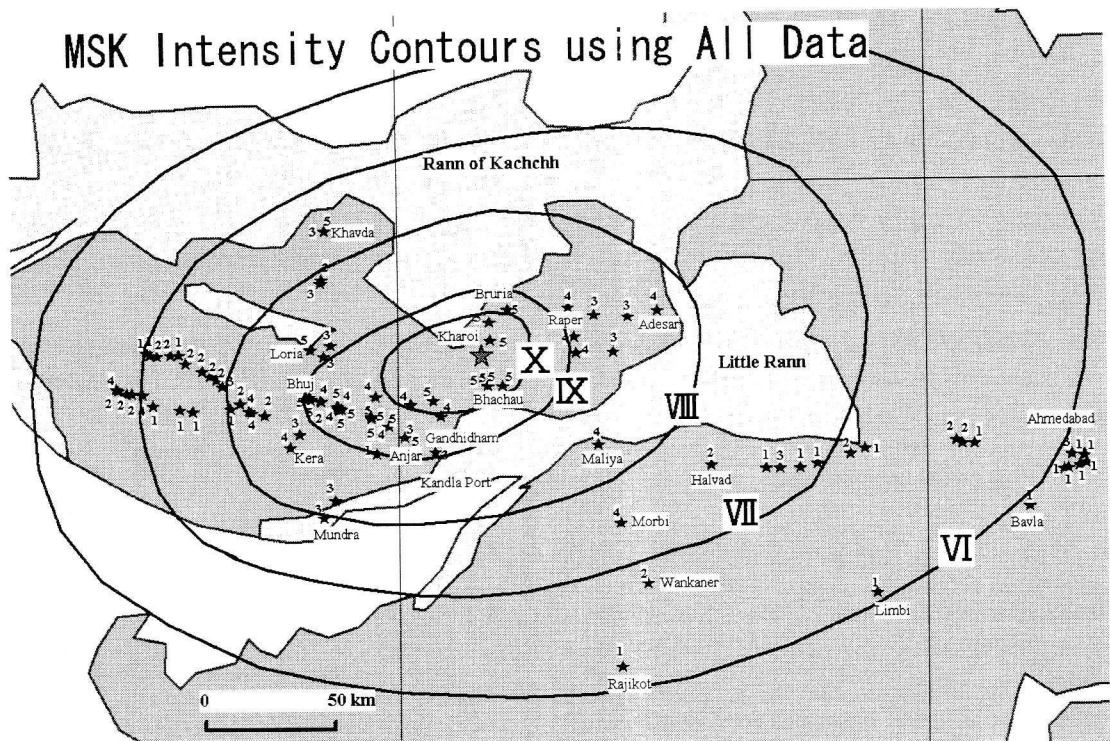


図2 建物被害調査による推定MSK震度コンター(久田・目黒, 2001)



写真 1 バチャウ市内の被害、RC 構造物と組積造の倒壊



写真 2 ブージ旧市街の被害状況

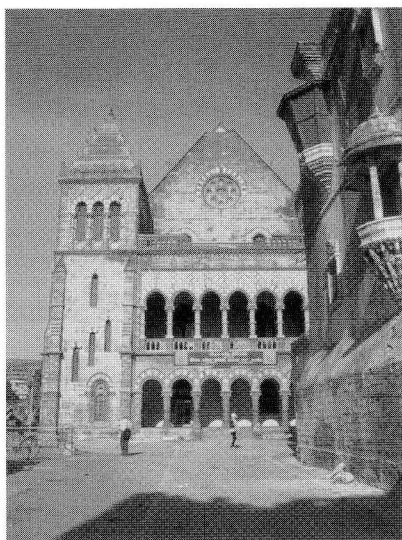


写真 3 ブージ旧市街、パレス



写真 4 アーメダバード市、高層アパートの手前側ブロックが倒壊



写真 5 タベル村、見渡す限りガレキばかり



写真 6 組積造住宅被害、ロリア村

震断層の走向方向に長軸を持つ楕円状に広がっている。ブージュの震度はおよそⅧ（気象庁震度でⅤ弱）である。

4. 人的被害の分布

グジャラート州における人的被害と人口を表3に示す。人的被害（死者20,005人）の92%（18,416人）がカッチ地方で発生した。アーメダバード地方（人口580万人）の中心アーメダバード市では、集合住宅のうち、中低層（約60棟）及び高層RC造（3棟）が倒壊し、約750名が亡くなっている。

表4に震源地であるカッチ地方の被害統計を示す。RC造被害に加え、Kuchcha（カッチャ、泥壁、藁葺きなど非恒久的住宅）やPucca（パッカ、レンガ造、組積造など恒久的住宅）と呼ばれる脆弱な伝統的な組積造家屋に被害が集中し、18,403人の死亡者が出ている。郡別の死亡率を示す地図（図3）をみると、特に震央距離12kmのバチャウ郡（Taluka, バチャウ市と周辺町村）で最も被災度が高く、ここだけで全死者数の3分の1以上に相当する7,424人が亡くなり、死亡率が6.4%に

表3 地方（district）別の人的被害

S.No.	Districts	Human Death	2001 Census Population	Human Death %
1	Ahmedabad	751	5808378	0.01
2	Amreli	0	1393295	0.00
3	Anand	1	1856712	0.00
4	Banaskantha	32	2502843	0.00
5	Bharuch	9	1370104	0.00
6	Bhavnagar	4	2469264	0.00
7	Gandhinagar	8	1334731	0.00
8	Jamnagar	119	1913685	0.01
9	Junagadh	8	2448427	0.00
10	Kachchh(Bhuj)	18416	1526321	1.21
11	Kheda	0	2023354	0.00
12	Mehsana	0	1837696	0.00
13	Navsari	17	1229250	0.00
14	Patan	38	1181941	0.00
15	Porbandar	9	536854	0.00
16	Rajkot	433	3157676	0.01
17	Surat	46	4996391	0.00
18	Surendranagar	113	1515147	0.01
19	Vadodara	1	3639775	0.00
20	Sabarkantha	0	2083416	0.00
21	Valsad	0	1410680	0.00
	Total :	20005	46235940	0.04

2001 population in Kachchh district is estimated.
<http://ndmindia.nic.in/eq2001/eq2001.html>

表4 カッチ地方の郡別被害統計

Taluka name	House-holds	1991 Population	Number of Dead	Dead %	Collapsed Pucca % : #3	Collapsed Kuchcha % : #3	Epic. Dist. km
郡名	世帯数	1991年人口	死者数	死者%	恒久住宅倒壊率%	非恒久住宅倒壊	震央距離 km
BHUJ	55486	277215	4503	1.62	57	67	68
MUNDRA	13945	68652	65	0.09	77	85	85
MANDVI	27876	146034	72	0.05	49	83	118
ABDASA	17070	86402	19	0.02	22	23	152
LAKHPAT	7416	36759	2	0.01	16	8	162
NAKHATRANA	21610	116944	23	0.02	12	26	108
RAPAR	24273	150517	732	0.49	69	91	38
BHACHAU	22944	114759	7424	6.47	95	95	12
Anjar : #1	32176	160640	4702	2.93	77	81	43
Gandhidham : #2	20743	104585	861	0.82	45	54	43
Total	243539	1262507	18403	1.46	59	63	

#1 : ANJAR Taluka except for Gandhidham ガンディダム市を除くアンジャ郡

#2 : Gandhidham city area

#3 : Pucca and Kuchcha damage statistics in villages from UNDP web page

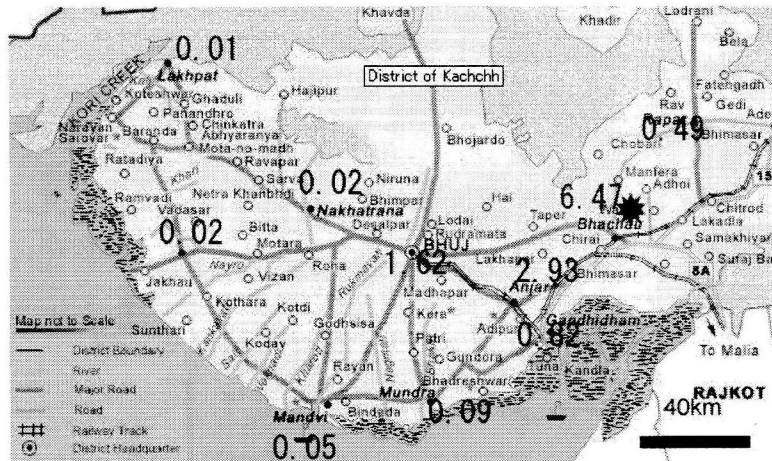


図3 カッチ地方の郡別死亡率(%) 星印★が震央

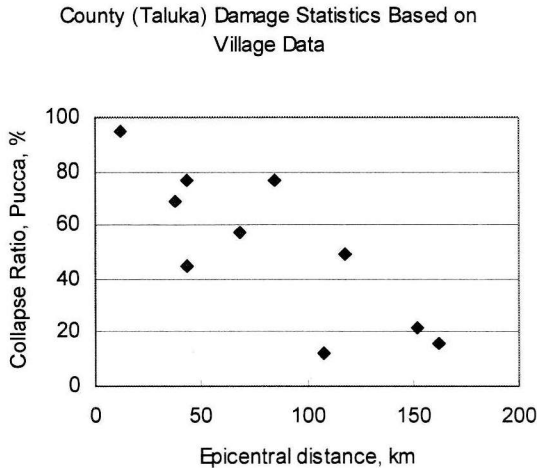


図4-a 震央距離に対する郡別パッカ住宅倒壊率(町村部のみ)の被害データ

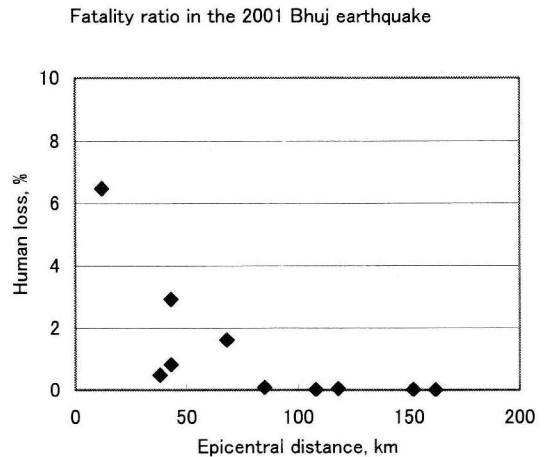


図4-b 震央距離に対する郡別死亡率(%)

達している。町村部の Pucca 家屋倒壊率でもバチャウが95%と最も高く、アンジャ、ムンドラの77%がこれに次ぐ。震央距離に対する家屋の倒壊率は、ばらつきがあるものの明らかな減衰傾向が認められる(図4-a, 4-b)。

カッチ地方の町村統計部局がとりまとめた被害統計(UNDP)によると、同地方の犠牲者の69%が市部で、31%が町村部で発生しており、人口の割合と逆転している。市部の死亡率が高くなる背景として、多層階の住宅が多く犠牲者が増えた、家屋の倒壊により街路も埋まり救助が難しかったことなどが推察される。

カッチ地方町村部の学校は62%の教室が倒壊、27%が半壊の被害を受けた。医療施設は566棟の内14%が倒壊、52%が半壊した。

5. 緊急対応と再建に向けて

災害の緊急対応はグジャラート州が中心になり、カッチ地方役所(District Collectors' Office)に現地対策本部を置いて救援に当たった。中央政府農業省にも緊急対策本部(Crisis Center)が設置され、省庁や軍の支援対策を統括した。

国際赤十字はブージュ市内の大学敷地にキャンプ

を展開して各国のチームが医療介護などの支援に当たっている。

被災地では倒壊家屋だけでも37万戸に達し、約185万人が家を失った。半壊の92万戸についても補強のため、何らかの仮設住宅を必要とする。州対策本部によれば、雨期(6月)に入る前に最小限の仮設シェルターを与える必要があり、その材料給付等の準備を進めているとのことである。州政府の震災再建政策はつぎの4つである。

- (1) 倒壊率70%以上の256村(内、カッチ地方の172村)が対象。村の正式申し入れにより移転を促進する。被災各村について、企業、他の州政府、民間組織のボランティア復興資金援助(総費用の1/2)を「養子(adoption)」という形で募る。
- (2) 倒壊率70%未満の村が対象。元の場所での再建・補修補強費用を支援する。州が被害調査に基づき技術的アドバイスを与える。
- (3) 震央から遠距離の被災地域が対象。再建、補修費用を支援する。
- (4) 被害激甚な都市であるブージ、アンジャ、パチャウ、ラパルが対象。軸組構造・組積造の建物種別に応じて多層階建物も含めて住戸所有者に資金援助。

6. おわりに

カッチ地方では最も高い地震危険度が想定されながら耐震規定が実施されず、特に地震に殆ど抵抗力のない伝統的な組積造(Kuchcha, Pucca)が軒並み倒壊し、人的被害をさらに大きくした。RC構造物もピロティが弱い、壁が少ない、鉄筋が少ない、柱・梁接合部が弱いなどの原因から多くが倒壊した。今後グジャラート州を皮切りに耐震規定の強制導入を検討中と聞いている。今回の痛切な教訓が生かされて防災対策の進むことを願う次第である。

現地調査の段階では仮設住宅はまだまだ少なかった。長期に亘る困難な住宅・公共施設・職場の再建には、日本からも多くの支援を望みたい。

参考文献

- Grunthal, G. Editor (1998). European Macroseismic Scale 1998.
- Government of India (2001).
<http://www.ndmindia.nic.in/eq2001/eq2001.html>
- Goyal, A. et al. (2001). <http://www.civil.iitb.ernet.in/BhujEarthquake/Report1.htm>
- Gujarat State Disaster Management Authority (2001). <http://www.gujaratindia.com/>
- 久田嘉章・目黒公郎(2001). 建物被害調査から推定される地震動分布, 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会, 日本建築学会災害委員会, pp.17-25.
- 文部省1999年トルコ・コジャエリ地震調査団(1999). 1999年トルコ・コジャエリ地震とその災害に関する調査・研究, 自然災害科学, 18, 3, 369-379.
- 村上ひとみ, A. Kumar, ヴェンカタラマナ・カッタ(2001). アンケート震度調査による2001年インド西部グジャラート地震のMSK震度推定, 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会, 日本建築学会災害委員会, pp.26-31.
- 日本建築学会災害委員会(2001). 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会, 86pp.
- 日本建築学会災害委員会(2001). <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Saigai/>
- Roorkee University (2001). <http://vision.rurk.iu.ernet.in/depts/earthquake/bhuj/>
- Sato, T. (2001) editor. Report on the 26 January 2001 Earthquake in the state of Gujarat, India, Ministry of Education and Science.
- 東京大学地震研究所(2001) <http://www.eprc.eri.u-tokyo.ac.jp/utsuweqk/utsu.html>
- UNDP Bhuj (2001). <http://www.undpquakerehab.org>

世界で初めての地下鉄地震被害

写真は、1995年の兵庫県南部地震で被害を受けた地下鉄大開駅の状況を示す。地下鉄の上下線路の間の鉄筋コンクリート製の中柱が圧潰している。中柱には上下方向の主鉄筋は結構な数入っているようだが、それと直角方向の主鉄筋を巻くような、コンクリートのせん断破壊を防ぐための帯鉄筋が入っているのはわかる。だが殆ど見えないような細いのが30 cm 間隔くらいでやっと入っているような状況である。実は1968年の十勝沖地震で、学校建築の鉄筋コンクリート製の短柱が数多くせん断で壊れたことがあった。この破壊を防ぐため1981年の新耐震設計法では、帯鉄筋をもっと密に10 cm 間隔に巻くことに改正された。

勿論、この地下鉄はそれよりずっと以前の建設であるから、帯鉄筋の間隔の疎なのは仕方のないことである。それより何より、この地震以前には、地下鉄は世界の何処でも地震によって壊れたことはなく、地下鉄は地震に対して最も強い構造とされ、地震時には地下鉄に避難した方がよいといわれたくらいである。したがって、地震に対して非常に神経質な日本でも30年程前までは、全く耐震設計をしていなかった。この地震で地下鉄も地震で壊れることがあるのだということがわかって、全国の地下鉄で中柱の鉄板巻きなどの耐震補強がなされたことはご承知の通りである。

(M. H.)



ところ変われば品変わる：野良いのしし？

写真は、2001年2月にインド・グジャラート州で起こったM7・7の大地震の被害調査に行ったときの光景である。いのししが街中を闊歩しているのである。いのししだけあって、豚とは違って顔付きが精悍である。トラックの傍なのでまさに街中である。インドでは、牛を殺してはいけないので、街中を悠々と歩いている牛を見かけることはしょっちゅうであるが、いのししが歩いているとは思わなかったので驚いた。そう思って注意してみると、いるは、いるは、たいていは数頭の群れになっているようだが、写真は非常に撮りにくかった。牛のように悠々ととはしておらず、殆ど何時も走り回っているからである。そして、犬、猫と同じように人間を恐れるという気配は全くなかった。この理由を色々考えてみたのだが、この地は独立の英雄ガンジーの生まれ故郷であって、肉食主義の地である。魚を含めて動物性たんぱく質を一切とらない。日本だったら街中を野良いのししが歩いていたら1日もしないうちに鍋になってしまうところが、この国では悠々と歩いているのではないかというのが私の結論である。つまり食べられもしない動物を捕まえても仕方がないのである。ただ犬猫のように愛玩動物とも

なれば別であるが、そのような用途も無いようである。また狼のように害獣というわけでもない。

したがって、人間は餌もやらなければ捕まえない。ごみ捨て場には、捨て牛とこのいのししが集まって食べ物を探している。余談だが、牛には、捨て牛と飼牛の2種類あって、労役や牛乳の生産ができる間は飼われていて、それが出来なくなると捨てられてしまうのである。街中を悠々と歩いているのは捨て牛であり、これは悠々ではなくて栄養失調のため元気に歩けないのではないかと思う。もう一つ余談だが、肉食主義の料理というのは我々には非常にまずいということである。我々の料理を美味しくしているのは、色々な動物性蛋白である。例えば、鶏がら、牛肉自身のだし、煮干などである。勿論、それらの代わりに多すぎるほどの香辛料が使われているが、これらは動物性蛋白にかけてこそ美味しくなる。例えば胡椒は、ピフテキにかけて美味しいが、野菜にかけてもそれ程美味しくはならない。いずれにせよ、世界には私などの知らないことがまだまだいくらでもあるということである。

(M. H.)



■地震予知連絡会情報■長谷川 昭■

2001年8月20日に第144回地震予知連絡会が開かれた。2001年5月から7月の期間の全国の地震活動と地殻変動の概況が報告され、それらに対する質疑応答が行われた。続いて、関東地方、伊豆地方、東海地方、東北地方の地殻活動についての観測研究成果が報告され議論された。トピックスとしては、「兵庫県南部地震の前兆—兵庫県南部地震の前兆とその予測可能性—」がとり上げられた。各機関から地震活動、測地・地殻変動、活断層、地下水、電磁気などの調査研究成果が報告され、それらを基に議論が行われた。

第145回地震予知連絡会は11月19日に開催された。はじめに、在り方検討ワーキンググループからの中間報告が行われた。その後、2001年8月から10月の期間の全国の地震活動と地殻変動の概況が報告され、それらに対する質疑応答が行われた。続いて、関東地方、東海地方の地殻活動についての観測研究成果が報告され議論された。さらに、防災科学技術研究所から話題提供として、西南日本の地殻底部低周波微動、地殻岩石の粘性係数に関する報告が行われた。トピックスとしては「沈み込みプレート境界におけるアスペリティ」がとり上げられ、各機関から研究成果が報告された。その後、それらを基に議論が行われた。

1. 全国の地震活動

日本列島およびその周辺で発生したM5以上の地震は、2001年5月～7月の期間に17個、8月～10月の期間に16個であった。陸域の浅い地震としては、2001年8月25日に京都府南部でM5.1の地震が発生した。この期間では、北海道およびその周辺域の地震活動が目立った。2001年5月25日には択捉島付近の深さ30kmを震源として、M6.6の地震が発生した。8月14日には青森県東方沖の深さ43kmを震源として、M6.2の地震が発生した。10月4日には千島列島の深さ324kmでM6.0の深発地震が発生した。また、8月18日には沖縄本島近海の深さ43kmを震源として、M6.3の地震が発生している。

2. 東海地方の地殻活動

東海地方におけるフィリピン海プレート上部境界面の推定固着域周辺の地震活動については、上盤側（地殻内）では1996年頃からの静穏化の傾向が現在も続いている。一方、下盤側（スラブ内）では1998年頃から活動度が低下していたが、2000年10月頃から活動度が上がって以前の活動度に戻りつつある。

水準測量の結果によると、浜岡の水準点2595は掛川の水準点140-1に対して、今期間も沈降が継続している。観測値から年周変化を補正した後の結果をみても、以前からの沈降傾向は継続しており、通常の変動の範囲を超えてはいないと考えられる。

東海地域のGPS観測データから、この地域のプレート間すべりの時間変化を検出したことが報告された。1997年1月からの観測データを用いて、各成分ごとの平均速度および年周変化を推定し、観測データからそれらを取り除いた結果、浜北、浜松などの東海地域西部のいくつかの観測点では、2001年4月頃から水平地殻変動のパターンに特異な変動がみられた（図1、図2）。また、名古屋大学による過去25年間の2地域（掛川-相良、蒲郡-田原）の光波測量の観測結果は、2地域とも4～5年ほどで、距離が縮む期間（短縮加速期）と短縮変動が停滞する期間（短縮緩和期）が交互に現れ（図3）、それらが三ヶ月-掛川間の水準測量による上下変動の進行期と停滞期に合致することが示された。これらの短縮緩和期は1980年前後と1990年前後の2回確認され、それらが今回の2001年東海地域GPS異常変動と同様な変動に対応している可能性が報告された。2001年東海地域GPS異常変動、辺長変化の短縮加速期（1985～1987年頃）および掛川沈降の加速期における変動速度を説明するプレート境界における非地震性すべりのモデルが報告された（図4）。現在進行中の異常変動は過去にも繰り返して発生していた可能性があり、この異常地殻変動が直ちに東海地震に直結するとは考えられない。しかし、推定された非地震性すべりは東海地震の想定震源域の周辺部で生じており、周辺でのこのような非地震性すべりの繰り返しにより、想定震源域が取り残され、最終的に大地震を発生させるというシナリオは考えられる、という報

平均的な地殻変動からのずれ（精密暦）

3/27-各期間のデータに直線フィットして地殻変動量を推定したもの。
2000年1月までのデータから平均速度及び年周変化を推定している。

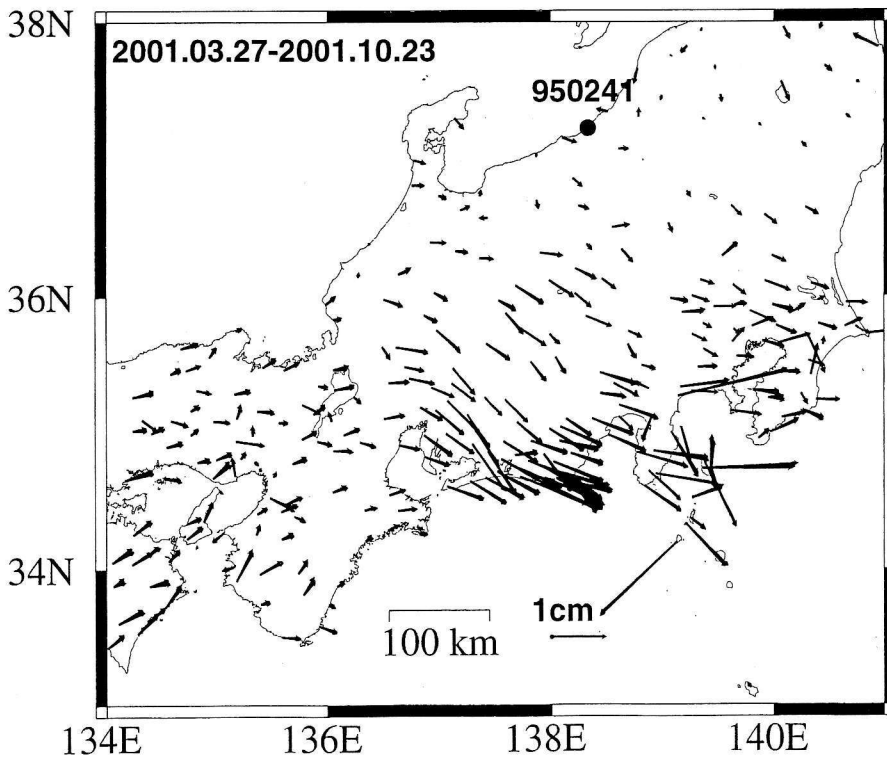
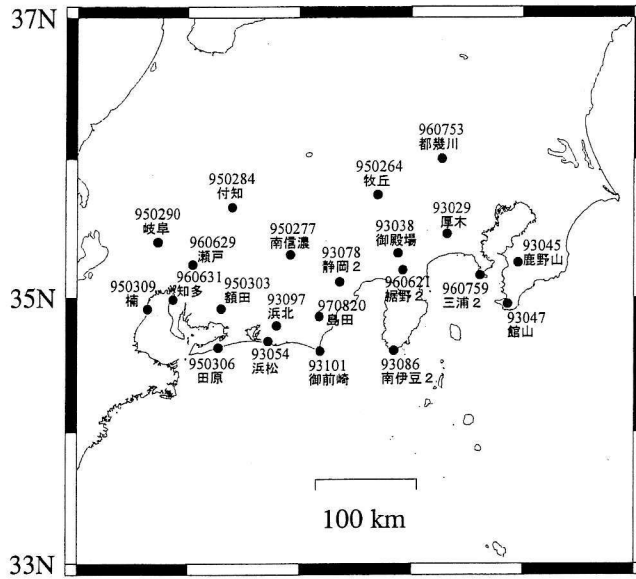
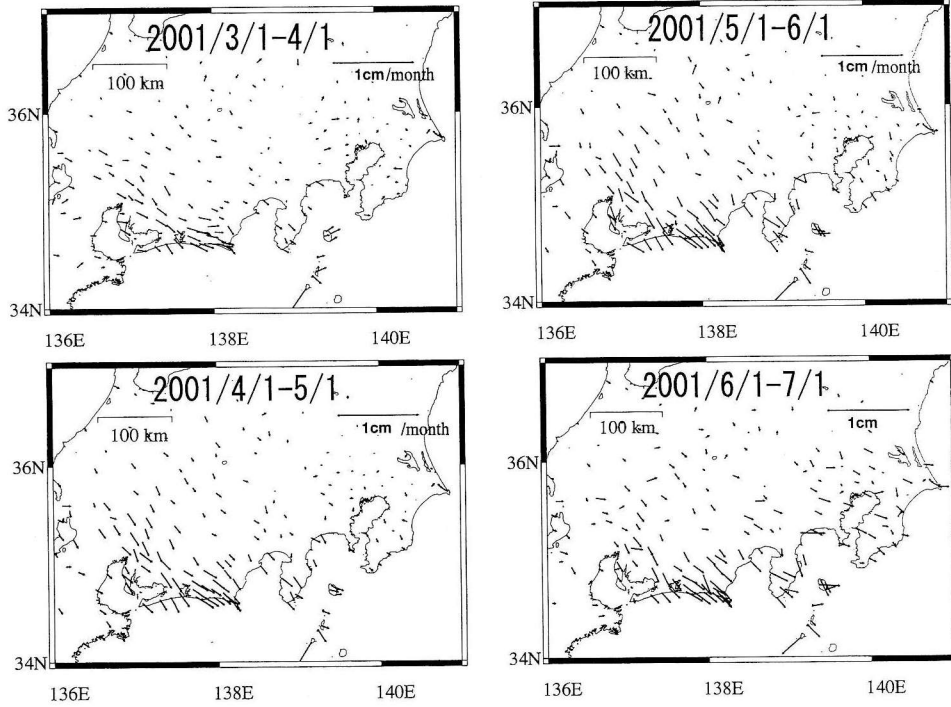


図1 東海地方の地殻変動。観測点配置と2001年3月27日～10月23日の変動（国土地理院資料）

東海地方の地殻変動（1）



東海地方の地殻変動（2）

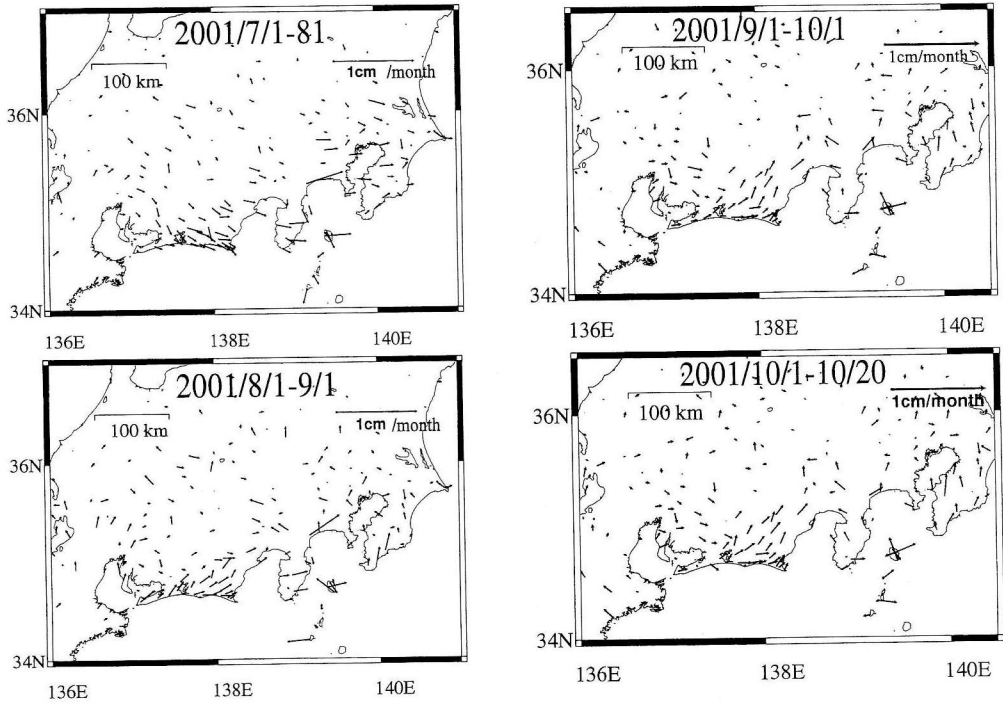


図2 東海地方の地殻変動. それぞれの期間ごとの変動 (国土地理院資料)

告があり、その後、質疑応答があった。

3. 2000年広域非地震性すべりの発生の可能性

1993年から開始されたGPS連続観測のデータを全国規模で詳細に調査した結果、これまで伊豆諸島、東海、房総半島、伊豆半島、南関東に見いだされてきた2000年7月～10月の期間の非正常すべりの分布は、より広域に

及んでおり、糸魚川-静岡構造線をはさんで、日本列島を東西に分断する地殻変動のパターンがあることが明らかになった。この変動は、仮に東北日本を不動と仮定すると、西日本が広い範囲でこの期間に東進したことが示唆される。変動量は最大でも1cm弱であり、測定精度と同程度であるが、観測された変動のパターンには規則性が見られ、真の地殻変動である可能性がある。この非正常変動が系統的に見られる地域は、中国地方から北陸地

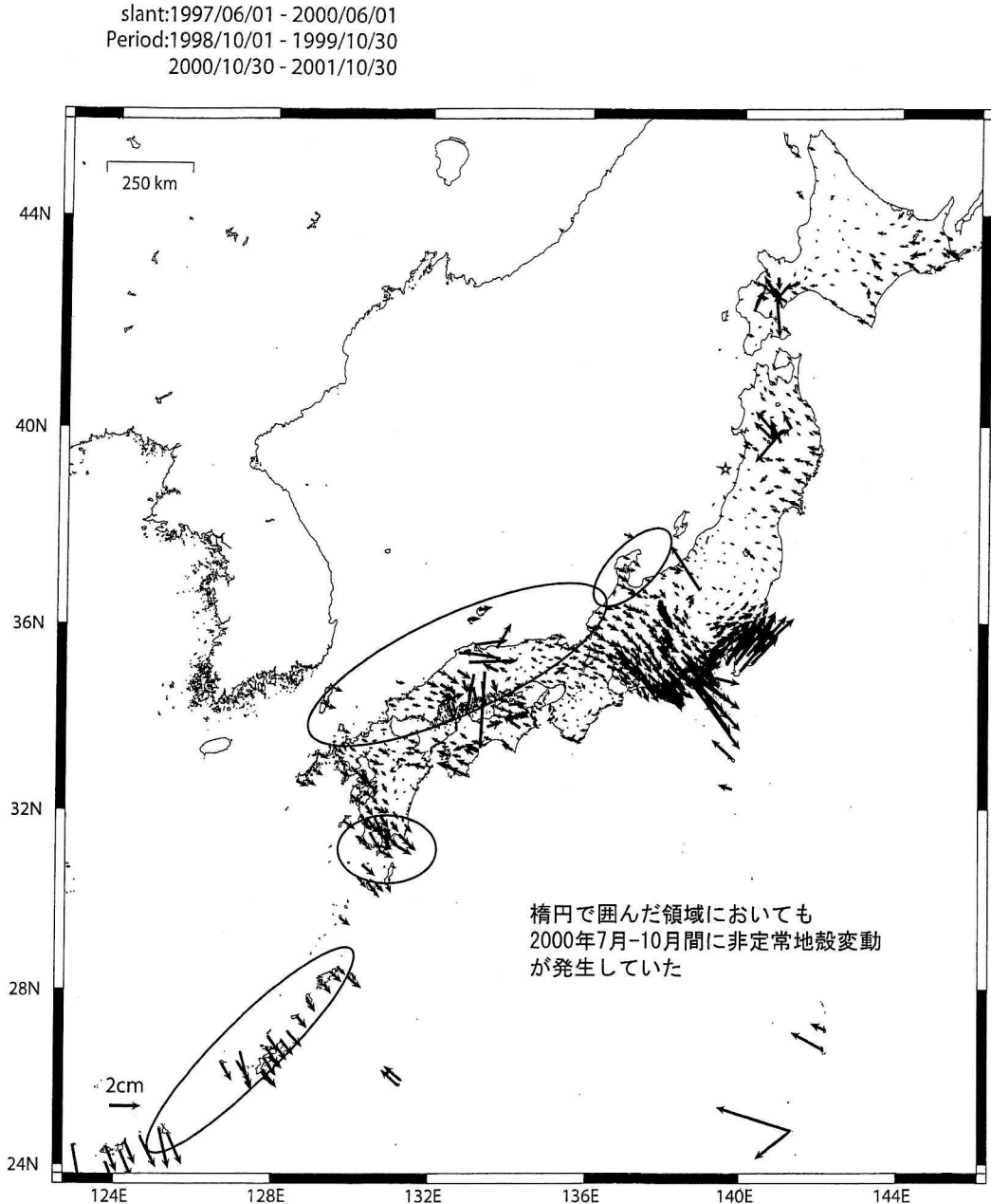


図5 2000年7月-10月の非正常地殻変動の分布(国土地理院資料)

東海地域における辺長変化と上下変動(1978-1996)

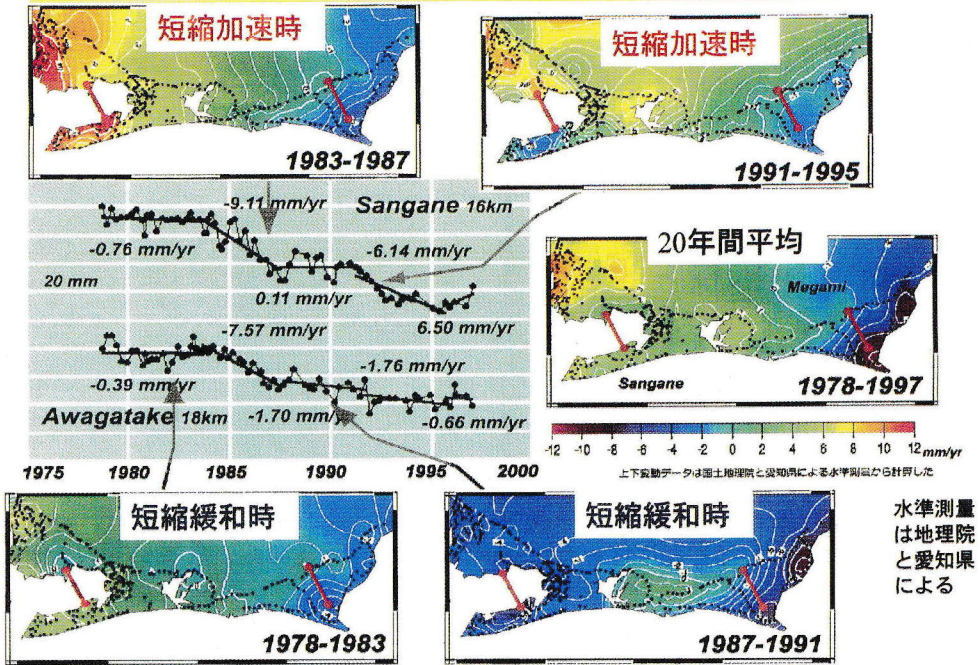


図3 東海地域における辺長変化と上下変動 [1978年~1996年] (名古屋大資料)

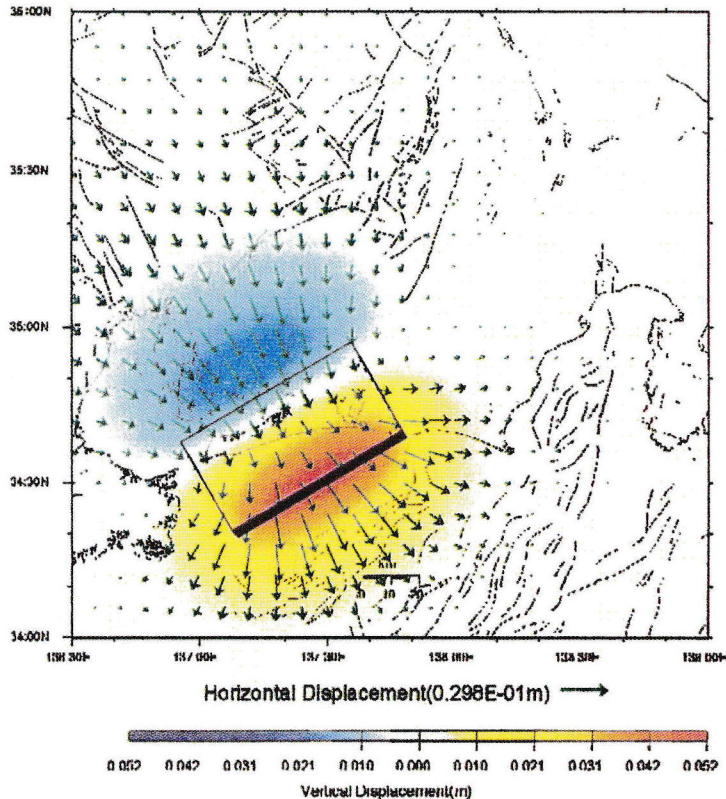


図4 東海地域の異常地殻変動を説明する、プレート境界における非地震性すべりのモデル (国土地理院資料)

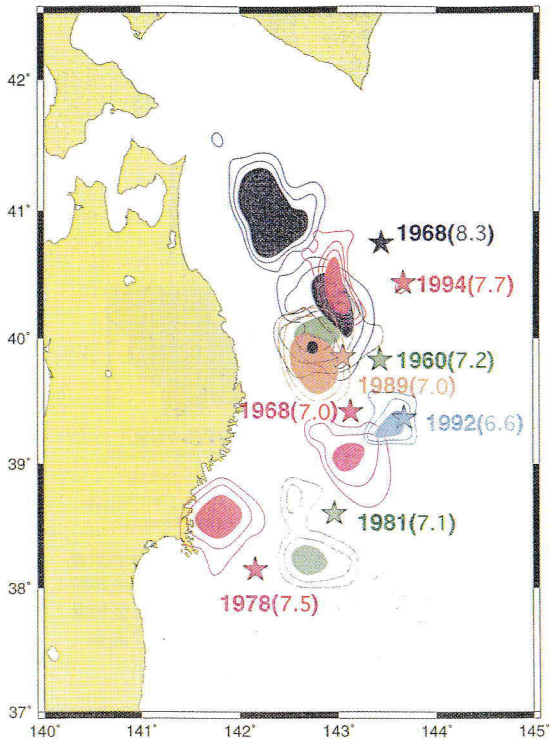
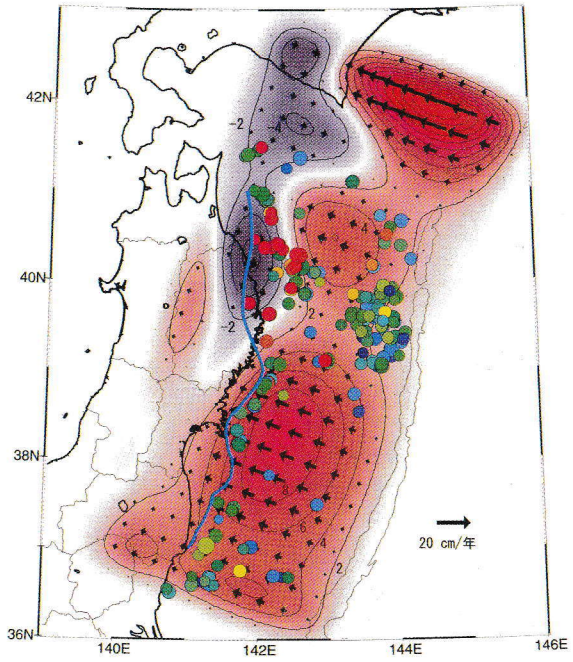


図 9 地震波形解析による東北沖のアスペリティ分布 (東大地震研資料)



コンター: GPSデータから推定されたプレート間すべり速度偏差 (1996年4月 - 1999年3月の平均)

丸印: 相似地震データから推定されたプレート間すべり速度 (1992年4月 - 2000年7月の平均)

図 11 GPSデータと相似地震データから推定したプレート境界のすべり速度分布 (東北大資料)

方の日本海側、九州南部、南西諸島であり、これまでGPSで観測されていた定常的な地殻変動の東進成分の大きい地域と概ね一致しているようである(図5)。

4. 箱根周辺の地震活動

2001年6月下旬から8月下旬にかけて、箱根で地震活動が活発化した。震源はほぼ南北方向にのびる帯状の領域とそれに直交して東西方向にのびる帯状の領域とに分布しており、震源の深さは5km程度と浅い。最大の地震はM2.9であった。湯河原の体積歪計やGPSの観測データにも地震活動に関連すると思われる地殻変動が記録されており、これらの活動は火山性のものであると考えられる。

5. 西南日本で発見された地殻底部低周波微動

高感度地震観測網(Hi-net)による観測データにより、西南日本の広い範囲で地殻底部を震源とする低周波微動が発生していることが、初めて明らかになった。観測された微動のエンベロープ記録の振幅の時間変化は、異なる観測点間で相関が見られる。観測点間のエンベロープ振幅変化の相関が最大になる時間差から走時差を推定し、それを用いて微動発生源を決定した。得られた微動源は、長野県南部から豊後水道に至る、長さ約600km

の範囲に分布しており、フィリピン海プレートの幾何学的形状(等深線)と非常に良い関係を示す(図6)。微動源の深さは約20~30km程度である。この微動は、いったん発生し始めると数日間、あるいは2~3週間継続する場合がある。しかも、微動源は一カ所に留まらず、空間的に移動することが多い(図7)。この微動は周囲の地震活動の影響を受けやすく、地震により活発化する場合や、逆に沈静化する場合がある。また、継続している微動の中に、低周波地震が発生していることもあり、気象庁により震源決定されているものもある。微動の継続時間が非常に長いこと、微動源が移動することから、微動発生メカニズムに地下の流体が関与していると考えられる。フィリピン海スラブと微動源の空間的關係から、流体はスラブからの脱水反応に起因しているものと推定される。

6. 兵庫県南部地震の前兆

—兵庫県南部地震の前兆とその予測可能性—

第144回地震予知連絡会のトピックスとして、1995年兵庫県南部地震の前兆が取り上げられた。活断層、地震活動、地殻変動、地下水、電磁気などの観測データを現在の我々の知見で再検討した場合、地震発生の予測が可能であったか否か、あるいは、地震発生予測を実現するためにはどのような問題点があったか、に関する議論が行われた。

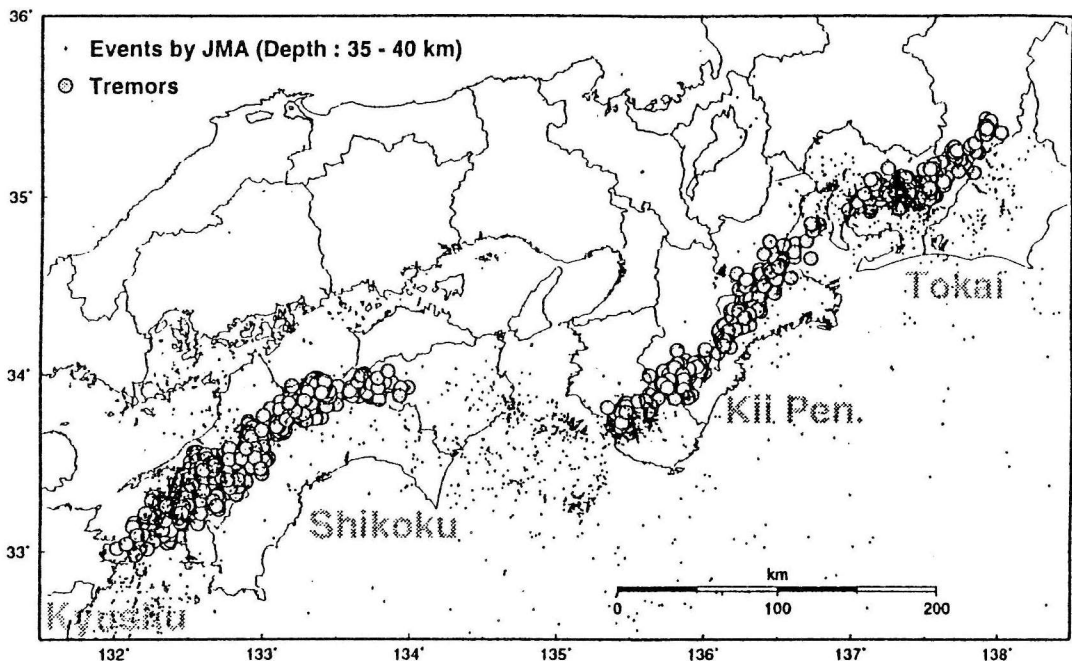


図6 地殻底部低周波微動の発生源の分布 [2001年1月~9月] (防災科技研資料)

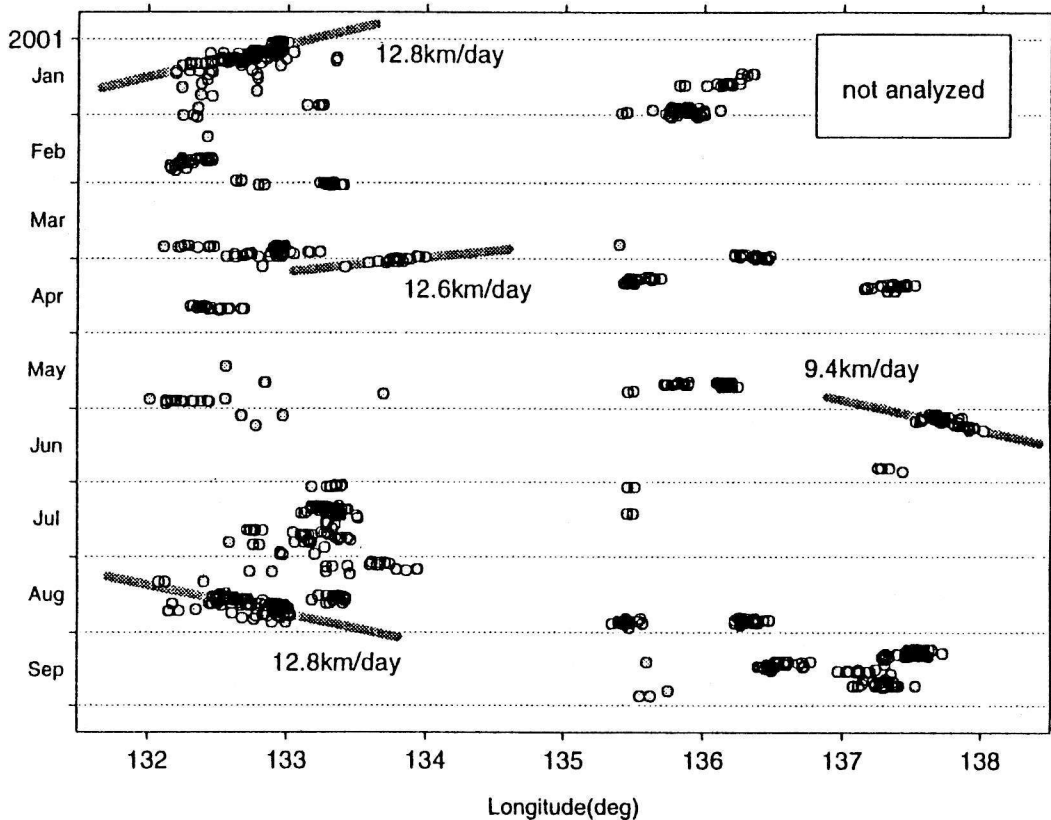


図7 微動源の時空間分布 [2001年1月~9月] (防災科技研資料)

長期予測の立場から次のような報告があった。地震発生後に実施された活断層のトレンチ調査の結果からは、淡路島から有馬-高槻構造線に至る活断層系の系統的な調査が事前に実施されていれば、今回の兵庫県南部地震の発生が切迫していることに気づいた可能性が高い。これを踏まえて、琵琶湖西岸断層系において、1662年琵琶湖西岸地震との関連を含めて、現在、詳しい調査を実施している。また、長期の地震活動データによると、兵庫県南部地震も2000年鳥取県西部地震も中規模の地震活動があった地域で発生しており、注意すべき活断層として取り上げることが可能であった。

中期・短期予測の立場から以下の報告があった。今回の兵庫県南部地震の震源域では事前に地震活動が静穏化しており、地震の発生場所の特定に役だったと思われる。また、周辺地域では本震の発生の数カ月前から地震活動が静穏化しており、地殻活動の異常の検出は可能であった。さらに、兵庫県南部地震の震源域周辺では、地震発生直前の数年間でグーテンベルグ・リヒター式のb値が低下していた。M2以上の地震のフラクタル次元が1994年の丹波山地の地震活動以後に急激に減少した

ことも明らかになった。ただし、このような解析により前兆を検出するには、地域性に応じたパラメータの組み合わせを探す必要がある。

短期・直前の現象として、震源域の真上付近での地下水観測による前兆現象の事例、電磁気観測データによる前兆現象の観測例が報告された。これらの前兆現象から震源域を特定するのは必ずしも容易ではなく、組織的な観測により異常の原因を絞り込んでいくような観測体制の整備が重要である、などの指摘がなされた。

7. 沈み込みプレート境界におけるアスペリティ

第145回地震予知連絡会のトピックスとして、沈み込みプレート境界におけるアスペリティが取り上げられた。「地震で大きくずれる場所をアスペリティと呼ぶ」として、将来起こる大地震のアスペリティを予測する手法についても議論を行った。

地震時に大きくずれる領域がアスペリティであり、通常は強く固着している。個々のアスペリティの位置は時間的に不変である。複数のアスペリティが互いに近接し

て存在している場合には、連動してすべることがあり、その場合、より大きな地震となる。アスペリティは初期破壊開始点から離れている場合が多く、余震はアスペリティの周辺部に多く発生する。アスペリティの大きさ、分布には顕著な地域性が見られる(図8)。一例として、東北沖のアスペリティの分布を図9に示す。この地域では個々のアスペリティが単独で動けばM7クラス、複数

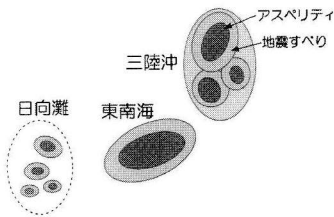


図8 アスペリティ分布の地域性(東大地震研資料)

が連動するとM8クラスの地震という発生パターンが見られる。

岩手県釜石沖のプレート境界で $M4.8 \pm 0.1$ の地震が、平均間隔 5.35 ± 0.53 年で繰り返し発生している。これらの地震は、波形、発震機構ともほとんど同じ相似地震である。このような特徴的な地震活動は、安定すべり域に囲まれた小さなアスペリティの繰り返しすべりによるものと解釈される。付近に他のアスペリティが無いことが、発生間隔がほぼ一定になる原因と考えられる。次の活動は遅くとも2001年中であろうと予測されていたが、2001年11月13日に予測通りの規模の地震が予測通りの場所で発生した(図10)。

安定すべりの領域に囲まれた小さなアスペリティの繰り返しすべりは、釜石沖以外にも起こっている可能性がある。それらは波形が互いに相似になることが期待される。そのような相似地震が太平洋下のプレート境界付近

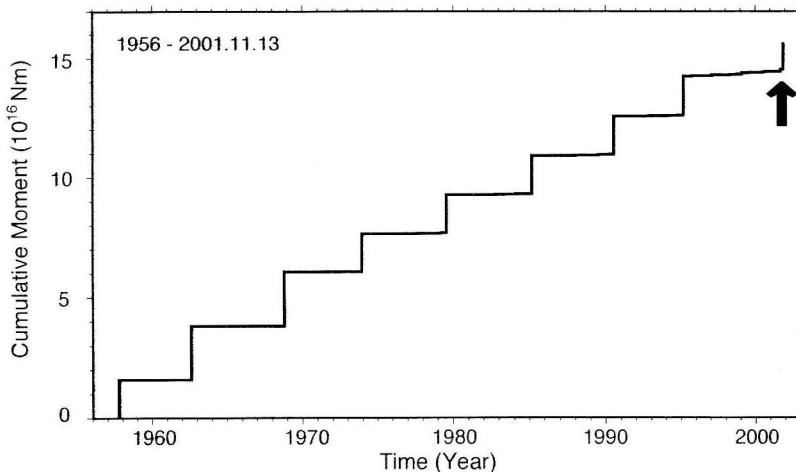
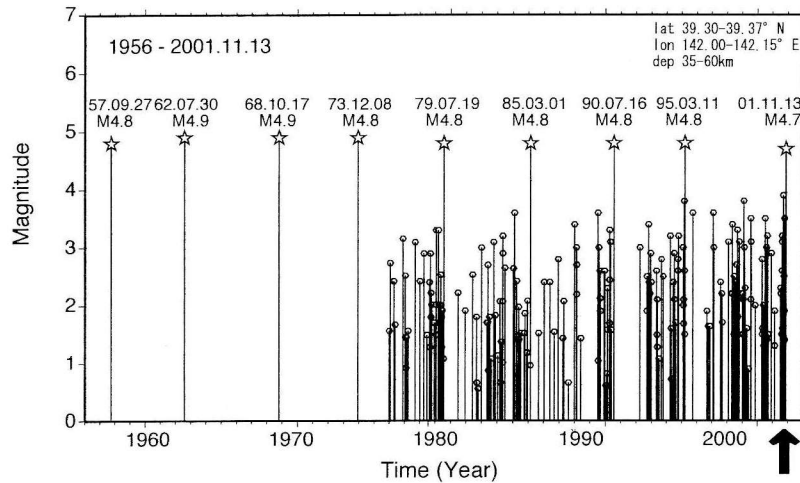


図10 岩手県釜石沖の固有地震的地震活動のM-T図とモーメント積算分布(東北大資料)

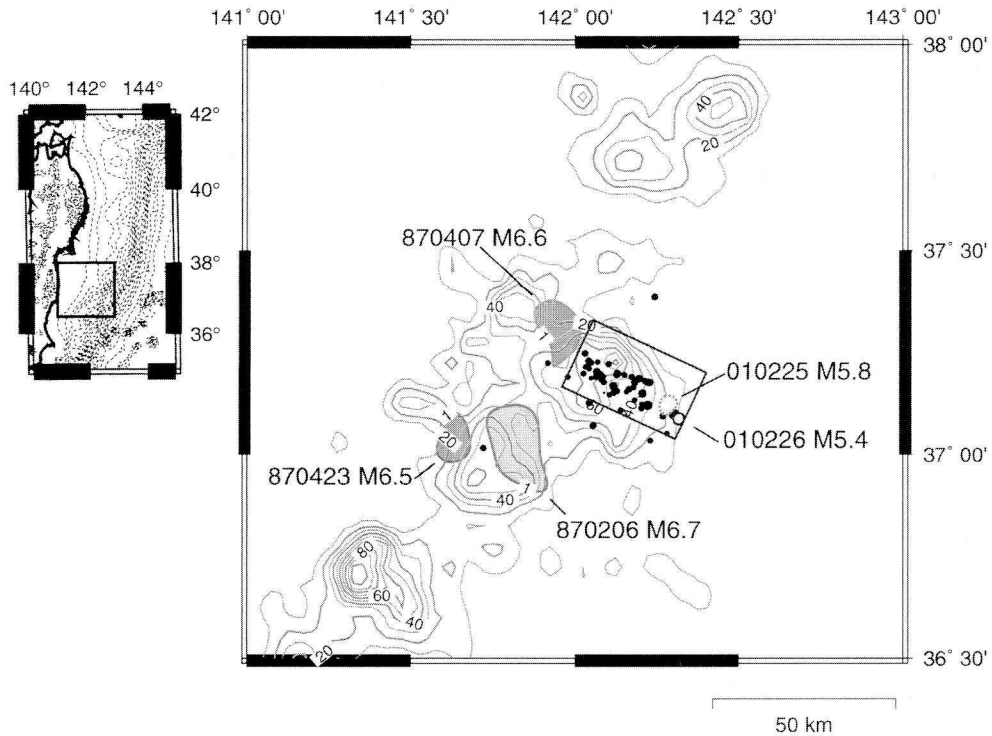


図 12 福島県沖の地震発生頻度分布 (コンター)。陰影の領域はアスペリティ、四角の領域は今回の余効すべり域、黒丸は余震を示す。(東北大資料)

に多数見いだされた。さらに、Nadeau and Johnson (1998) のスケーリング則に基づいて、相似地震の時空間分布から、プレート境界でのすべり速度の空間分布を推定した結果、GPS 観測データに基づく推定結果と比較的良好一致を見た (図 11) が報告された。

1987年にM6級の地震が多発した福島県沖は、その後、地震活動が低調であったが、2001年2月25日にM5.8の地震が発生した。いわき沖のGPSデータから、M5.8の地震後約半年間にわたって、プレート境界面上のおよそ20km×35kmの範囲で非地震性すべり(余効すべり)が発生したことが推定された。すべり量は約40cmに達し、Mw6.7に相当する。今回の非地震性すべりの領域は、1987年のM6級の3つの地震のアスペリティの手前で停止しており、いまのところその内部には及んでいない(図12)。したがって、今回の非地震性

すべりの結果、隣接するこれらの3つのアスペリティに応力が集中しつつあり、次の地震はこれらのアスペリティが破壊するときと予測されることが報告された。

静岡県西部下の東海地震想定震源域では、1996年後半から地殻内で、また、1999年8月からスラブ内で微小地震活動の静穏化が始まった。活動の増減は過去に4回見られる。時期に応じて活動の増減の空間パターンは異なるが、それらの中には共通の特徴が存在するように見える。すなわち、活性化する地域と静穏化する地域は互いに重ならない。活性化地域はパッチ状に出現する(本誌22~23ページ、図10, 11参照)。活性化域-静穏化域のパターンに共通の特徴が存在するということは、アスペリティが固着域の中に予め割り付けられていた、と考えることができると報告された。

■ 書 評 ■

● プレート運動の原動力の解明、 その遠い目標への一里塚

瀬野徹三 著

続プレートテクトニクスの基礎

評者 橋本 学

待ちに待っていたものが、やっと出た。前巻「プレートテクトニクスの基礎」が出版されて、はや6年の月日が経過した。この間、地震予知を中心に固体地球科学をめぐる社会環境は大きく変化し、評者個人も立場が変わった。しかし、これだけの時間を要したことを、決して著者の責にすべきではない。「まえがき」に書かれているように、日進月歩の研究のために、著者をもってしてもこの続編の主題はまとめるのに長い時間を要するテーマであった、ということである。そのため、固体地球物理を志す学生が大学院入試に備えての必読本となった前作に比べ、この続編はより“瀬野色”の濃い内容となっている。

テーマは、ずばり応力場とプレート運動の原動力である。1960年代に提出されたプレートテクトニクスにより、地球表面を覆うプレートの運動が地震・火山などの地学現象の要因であることが理解されるようになった。さらに、この考えは1980年代の宇宙測地学の進歩により実証され、“仮説”から“理論”へと昇格しつつあると言える。しかしながら、ウェーゲナーの大陸移動説がその原動力に対する批判に答えられなかったがために、当時の学会で受け入れられなかったように、プレートテクトニクスもその原動力を解明しない限り、砂上の楼閣に留まらざるをえない。著者はこの大問題に対して、プレート内応力という切り口から取り組んだ。このアプローチは一見、プレートテクトニクスの基本的な仮定を否定するものである。すなわち、プレートは剛体であり変形しないという仮定が、プレートテクトニクスの基本にある。しかしながら、実際はプレート内部といえども変形し、地震も発生する。このことは、プレートテクトニクス“理論”は現時点でさえ、第0近似に過ぎないことを示している。著者はこの認識に立って、より近似の高いモデルを構築することにより、“理論”の完成を目指

しているといえよう。

プレート内応力を再現することにより、プレート運動の原動力を探る研究は1970年代末のRichardsonらの有限要素法を用いた研究を始め、決して新しいものではない。しかし、著者は可能な限り解析的なアプローチを用いて、第1近似としての応力場とプレート運動の原動力の関係を示そうとした。第1章において、プレートに働く種々の力とその定式化をおこなっている。中でもリッジ押し力など不均質構造による力の定式化は、最近議論に上るGravitational Potential Energy (GPE)の基本概念であり、関心のある方はチェックされたい。第2章は、プレートの熱構造のモデル化であり、その研究の歴史もたどることができる。第3章は、スラブにかかる力とスラブ内応力場の問題を扱っている。ここでは、豊富な地震の発震機構/モーメント・テンソルのデータから沈み込み帯のスラブ内応力場に基づく分類を行っている。さらに、この分類結果とトモグラフィーの結果と合わせて議論し、スラブの応力を決めるのは、地震で見えないスラブを含めたいろんな要素の総合であると言いきり、これまでのモデル研究の見直しを暗に迫っている。第4章は、分厚い地殻をもつ大陸と島弧の熱構造・応力場の問題を取り上げている。特に、この章の後半において、九州と北海道の異常なGPS速度場の成因として、オホーツク海と東シナ海に湧き出しがあるのではないかと、との大胆な仮説を提唱している。このあたりは現在の研究の最先端であり、議論の沸騰するところであろう。第5章のテーマは、マントル対流の理論であり、全マントル対流か、あるいは2層対流か現在固体地球科学で最もホットな話題が紹介されている。そして、プレート運動速度を説明するためには、2層対流の方がベターであると説く。

第1章からの議論は、それだけで十分教科書として成り立つ内容であるが、すべて準備であり、圧巻は第6章である。これまでのプレート運動原動力の研究の多くは、剛体プレートにかかるトルク・バランスに基づいて推定されてきた。その中で主役の座を占めてきたのは、スラブ引張り力である。しかし、トルク・バランスの議論は、「想定した仮定が想定した結果を生み出すという一種のトートロジーとなっている」と著者は主張するくだりに、思わず拍手を送りたくなったのは評者だけではない。そこで、変形するプレートの概念を持ち込み、

応力場を再現するような原動力を推定してみると、スラブ引張り力の相対的重要性に疑問を投げかける結果となっている。

「まえがき」にもあるように、現在どんどん新しい研究が進み、内容が書き換えられている分野であるため、すべての研究を網羅することは不可能であろう。とはいえ、評者としては、不均質構造を扱った数値モデルによる研究成果やプレートの曲げに基づくレオロジー研究などの紹介が欲しかったところである。また、この本の中では最近流行のバックスリップ・モデルによる研究成果が一切紹介されていない。このモデルは、島弧の変位場を説明するモデルとしてもはやされている。しかし、バックスリップ・モデルはプレート境界にのみ偶力を仮定するモデルであるので、プレートにかかるすべての力を丹念に評価していく著者のやり方とは相容れないものがあるのだろうか？著者の見解を聞きたかったところである。とはいえ、現在まさに動いている最前線の研究の一端を紹介するだけで、これだけのページ数を要していることを考えると、ちょっとぜいたくか。

プレート運動の原動力の解明は、まだまだ遠い目標である。しかし、我々は着実に研究を進めつつあり、本書はその目標への一里塚となることは間違いない。なお、本書と相前後して、現在最先端の研究者による著書が出版された（唐戸俊一郎著「レオロジーと地球科学」、高橋正樹著「島弧・火山・マグマ」など）。これらの書と合わせて読まれることをお勧めする。

<朝倉書店、2001年4月、A5判、162頁、本体3,800円>

● 地球科学を志す大学生に

萩原幸男，糸田千鶴 著

地球システムのデータ解析

評者 斎藤正徳

データ解析は地球科学、とくに評者が専門としている地球物理学の研究にはなくてはならない道具であり、そろばんと計算尺の時代から先輩たちが苦勞してきたところである。したがってデータ解析の教育は地球科学のカリキュラムの中では重要な位置を占めるべきはずのものである。しかし重要性は理解できるとしても、現実には簡単ではない。教育する方としては最新の技術を教え込もうとするが、教育を受ける学生はおそらく学部2、3年生で、教えられる技術がどのような場面に役にたつかという動機付けに乏しい。そこでとおり一辺に講義を聴いて単位を取っておしまいということになりがちである。

卒業研究に取りかかったり、修士に入って研究対象が具体的になるにつれて、あどきに教わったのはこういうときに役に立つのだということが実感できるようになる。最近のもう一つの問題は、ソフトウェアの発達によってデータを入れてマウスをクリックしさえすればともかく答えが出てきてしまうということがある。どのような過程で答えが出るのか、この方法の落とし穴は何か、というようなことを全く知らずに結果が出てきてしまうことは恐ろしいことである。

前置きが長くなってしまったが、本書は上の問題をかなりの程度解決したすぐれた教科書である。話の進め方が非常にユニークで、なるほどこういうやりかたがあるのかと感心させられるところが多い。例として第1章「まずデータを整えよう」を取り上げる（このタイトルがまずユニーク）。この章では差分法、内挿法、数値積分法などが取り上げられているが、普通の教科書のように個別に議論されているのではなく、「虫（異常データ）取り」、「虫食い（欠測データ）の補間」という目的のために取り上げられている。目標が明確なことは理解するのに非常に役に立つ。少しばかり複雑な式でも追いかけてみようとする気を起こさせるものである。虫は2階差分を計算することで見つけ、虫食いは4階差分方程式を反復法で解くことによっている。ここまでくればスプライン補間はもう一歩である。例は数値として与えられているので、電卓で確かめてみるができる。これも非常に大事なことで、数値を書き写すこと、またグラフ用紙にプロットすることで、数値計算に対する勘が養われることになる。第2章「入力から出力を知る」でも、まず群発地震から地殻変動を予測するという問題が提示されてから本論に入っていくという具合である。

データ解析の教育で問題になることの一つに例題がある。現実のデータは教育者の専門によって分野が狭く固定されたり、もっと悪いことには大量のデータになりがちで実際的ではない。かといって人工的なデータでは現実味がない。本書では20以上の適当な大きさの現実のデータが例題として取り上げられており、著者たちの関心の広さと努力をうかがわせる。数例をあげれば、アジの漁獲量と地震数、海水温と海水準、二酸化炭素サイクル、地層の対比、セイシュ、昭和新山の隆起、汚染域の拡大、などである。これらは本書には数値としては与えられていないが、著者たちの講義では学生に数値として与えられて演習に使用されたものと想像する。

各章の内容に立ち入る前に予定の行数が尽きてしまった。本書は1次元データについてはほとんどのトピックが取り上げられており、また2次元データ、移流項を含んだ2次元の熱伝導方程式までも含んでいる。実用に十分役に立つ教科書で、学生だけではなく研究者にも薦め

たい本である。最後にもう一つ、科学用語に英訳がつけられているのは学生にとっては論文を読むときに役に立つであろう。

<朝倉書店、2001年6月、154頁、本体3,200円>

● 地震学教育のバイブル

宇津徳治 著

地震学 第3版

評者 吉井敏尅

最近ではほとんど見られなくなったいわば正統的な地震学の教科書である宇津の「地震学」が、第3版として装いも新たに登場した。1977年の第1版出版以来、多くの研究者や学生に利用されてきた名著であるが、とりわけ教師の立場にある者にとってはまことにありがたいバイブルのようなものである。こうした本の性格上、前の版(1984年出版)に比べて全体の構成に大きな違いがあるわけではない。しかし、この間に得られた新しい知見はきちんと取り込まれていて、図や表も最新のデータに基づき改められている。ざっと見ただけでも、フィードバック地震計、反射法探査を含む地殻構造調査、摩擦すべりの構成則、モーメントテンソル、震源過程のインバージョンなどの記述が追加・補強されているほか、2000年の鳥取県西部地震など、内外の最近の地震までもさまざまな形で取り込まれている。

引用文献が充実していることは、第1版以来の本書の特徴である。この第3版では第2版の発行以降の最近の研究を含む多くの文献が追加されていて、その総数はほぼ2倍の1,000にもなった。この充実した引用文献は、評者のような不勉強な読者にとっては、本当にありがたいことである。評者の研究室では、学生からの質問に詰まったときなどには、「困ったときの宇津頼み」と言って本書を読むように勧めている。それで答が見つかることが多いのだから、ありがたいことである。もっとも、地震研とは違って、今の職場が目的の文献をすぐに見ることができるような環境でないのは残念であるが、

うっかり見過ごしてしまいそうな表紙のデザインにも、著者らしい仕掛けがある。正方形の格子を半々の確率でランダムに濃い薄いに塗り分けただけのものであるが、こうした本来はランダムである図形になんらかの「規則性」を認めてしまうような間違いを、注意している。

見かけよりもはるかに多くの情報が詰まっているとい

うのが、本書の最大の特徴である。大まかな構成こそ第2版と大きな違いはないが、新しい情報を取り込むことで、外見だけでなく実質的な内容も一新された。第2版を愛用した読者も、ぜひこの新しい版を求めていただきたい。

<共立出版、2001年7月、376頁、本体5,000円>

● 社会に浸透する地震の恐怖

宇野江子 著

淡墨桜

評者 力武常次

表紙の帯紙にある「東海地震への警鐘 現実と幻想の混合の中に地震への警告を描いたこの作品はいま最もホットな小説だ」という文句に釣られて、本書を読むこととなった。まず小説の筋をざっと紹介することにしよう。

岐阜県本巣郡根尾村には、樹齢1,500年以上の天然記念物「淡墨桜」(うすずみざくら)があり、シーズンには観光客でたいへんな賑わいである。この巨木の花は咲きはじめは淡いピンク色だが、次第に白っぽくなり、ついには淡い墨色となることで知られている。この淡墨公園に土産物店を出している根尾村の一家を実家としている西川双美という女性がこの小説の主人公である。

双美は東京の大学を出てOLをしているが、花見の忙しいシーズンには休暇をとって、実家の土産物店の手伝いをするようになっていた。この年にはその手伝いの際中に高校の同級生三輪不二子に遭うというストーリーになっている。不二子は既に2人の子持ちであった。

この奇遇の後、不二子は近くにある濃尾地震(M8.0, 1891)の際出現した根尾谷断層を観察できる「地震観察館」を訪れる。ここからこの小説と地震のかかわり合いがはじまる。

根尾谷断層が再び活動するのは、1,000年以上先のことだとしながらも、明応地震(M8.2~8.4, 1498)以来、宝永(M8.4, 1707)、安政東海(M8.4, 1854)、同南海(M8.4, 1854)、東南海(M7.9, 1944)、昭和南海(M8.0, 1946)、……など多くの大地震で日本全土がいためつけられていることが述べられる。

いっぽう双美は地震の脅威にさらされている東京でのOL生活を続けるが否かの屈折した思いに悩まされている。ここで安政江戸地震(M6.9, 1855)や関東地震(M7.9, 1923)の大被害が述べられている。不二子の幸福そうな姿もあり、双美は最終的には故郷に帰ることを心に

きめて、とりあえずは岐阜の叔母の家に寄宿して職を探すことになる。結婚相手の候補者もみつきりそうである。

以上特にエキサイティングな小説というわけではないが、日本の地震危険性や地震情勢の見通しについて現在地震専門家の多くが考えているポイントをほぼ正しく伝えているという点で、とすればむしろかくなる地震の話の小説の内容に含ませて分かりやすく一般の人びとに伝える本ということができよう。

このような小説が書かれるということは、日本の人びとはいつも地震への恐怖を心に抱いていること、また一般の人びとの地震知識はかなり高いことを物語っている。

＜鳥影社、2001年3月、263頁、本体1,500円＞

● 地震の可能性・被害想定を調べる

島崎邦彦ほか 著

あした起きてもおかしくない大地震

評者 力武常次

政府の地震調査委員会の有力メンバーである島崎君が、地学的地震・火山問題の第1部を担当し(64ページ)、残りの第2部は関連する防災・医療・通信などの社会問題7人の専門家が各項目を比較的短く執筆している。

島崎君のことであるから、さぞかし高度の地震発生確率の論議が述べてあるかと思っただが、難しい数学的記述は全面的に省かれていて、専門家にはやや物足りないかもしれない。用語の総合的解説を目的とする「イミダス」(集英社編)の特別編集とこのことであるので、社会人から高校生を含めた一般国民向けの地震・火山問題解説書ということのようである。

ただし、きわめて最近の知識をふんだんに取り入れてあるので、従来からの解説書を補完していて、一読することは大いに有益である。

予想される大地震としては

- 首都圏直下地震
- 東海地震
- 南海地震
- 函館平野西縁断層帯による地震
- 宮城県沖地震
- 糸魚川-静岡構造線活断層系による地震
- 大阪・上町断層による地震
- 大分・別府-万年山断層帯による地震

などを取り上げて解説している。

詳細は省略するが、首都圏直下地震の発生はかなり切迫していると考えられていて、東京都・神奈川県・千葉県・埼玉県などでは、被害想定が実施されている(たびたび改訂)。マグニチュード7.2を想定した場合、家屋倒壊・地盤液状化・火災などの被害も著しいが、帰宅困難者が371万人に達するという試算もある。30年くらいの間隔でM7級の地震が起こる宮城県沖では、ここ10年以内に地震発生となる確率は30%程度と考えられている。

東海地震については、従来からの見解に付け加えて、最近の情勢が述べてある。具体的数値をあげていないが、発生の確率はかなり高まっている(ここ10年で30%くらいか?)。静岡県の被害想定はかなり詳しく実施されている。第3次想定では、死者数は「予知なし」の場合4,016人、「予知あり」では790人などとなっている。

最近中国・近畿地方の地震活動が活発化しているが、いろいろの根拠からつぎの南海地震は2040年頃といわれている。

神戸地震以後、政府は活断層調査に力を入れているが、その成果に基づいて、内陸活断層の活動によるいくつかの地震についての予想が述べられているが、何とかして発生確率をより正確に求めたいものである。

書評の紙面は尽きたが、主な火山についての活動の予想もある。また各専門家による社会問題の解説も重要である。いずれにしても、本書は最近の地震・火山問題を手っ取り早く理解しようという人々の役に立つであろう。

＜集英社、2001年7月、95頁、本体1,300円＞

● 地震予知の夢は叶うか?

上田誠也 著

地震予知はできる

評者 力武常次

本書の著者である上田君は、評者の親しい後輩で、地球熱学やプレート・テクトニクスですばらしい業績を挙げたことで知られている。その上田君が「海のものとも山のものとも」分からない、地電流観測による地震予知の研究にここ10年あまり取り付かされている。

この研究は、もともとはギリシャのパロツォス(P. Varotsos)らによるいわゆるVAN法(この研究を始めた3人の学者の名前の頭文字をとって命名)を日本で

チェックしようということで始まったようである。VAN法による予知はギリシャではかなりの成果を挙げているとのことであるが、1980年代初期にV氏の観測室（アパートの一室）を訪問したアメリカの学者から聞いたところでは、テレビのスイッチをいれると地電流記録紙上に異常シグナルとそっくりのずれが出るとのことであって、当時テクトノフィジックス（Tectonophysics）誌からVAN一派の投稿論文を審査するよう依頼された評者にはあまりアピールしなかった。しかし同誌の編集長であった上田君の英断（？）でこの論文は世に出ることになった。

上田君が上記の決断に責任を感じたのかどうかは分からないが、自分の主宰するグループでVAN法類似の観測を実行することになった。上田君の名声もあり、理化学研究所の「地震国際フロンティア研究」として億単位の予算が支出され、若干の成果があったことが本書に解説されている。この研究が予算打ち切りの苦境に瀕しているらしいが、どうせお金をかけるのならばもっと徹底的に問題に取り組むべきであろう。

なお、V氏は新聞報道などによると、いかにも「はったり」に偏しているような印象をあたえるが、実際は生真面目で控え目な物理学者で、なかなか好感のもてる人物であることを申し添えておく。

VAN法関連の話が長くなったが、本書には地震予知研究の歴史やVAN法以外の各種周波数を用いた地震予知へのアプローチが解説されている。歴史については、120ページの小冊子であるのでいささか消化不良で、より詳しく知りたい向きは、萩原尊禮『地震学百年』東京大学出版会（1982）や力武常次『地震予知—発展と展望』日本専門図書出版（2001）などを参照されるとよい。

いずれにしても、大地震にともなって、あるいは先行して震源域上空の電離層に異常が出現したり、パルス状異常電波が放射されたりすることは、ほぼ確立された現象となってきた。短期・直前の地震予知としては、これらシグナルの性質をより明らかにし、実際の予知に利用することを考えるべきであろう。

<岩波書店、岩波科学ライブラリー、2001年6月、
120頁、本体1,000円>

執筆者紹介

<掲載順>

氏名 片山恒雄

[かたやま つねお]



現職 独立行政法人
防災科学技術研究所
理事長, 東京大学名
誉教授

Ph. D. (ニューサウスウェールズ大
学)

略歴 東京大学工学部土木工学科卒
業, 同大学院修士課程修了, ニュー
サウスウェールズ大学 Teaching
Fellow, 中央大学理工学部土木工
学科専任講師, 同助教授, 東京大學生
産技術研究所助教授, 中央大学理工
学部土木工学科兼任講師, 東京大學生
産技術研究所教授, 同附属国際災
害軽減工学研究センター(INCEDE)
センター長を経て現職

研究分野 都市防災, 地震工学, 災
害軽減における国際協力

著書 『構造物の振動解析』(技報堂
出版), 『唐山大地震—今世紀最大の
震災』(監修)(朝日出版社), 『大地
が揺れ, 海が怒る』(オーム社), 『防
災』(部分執筆)(東大出版会), 『東
京のインフラストラクチャー』(部
分執筆)(技報堂出版), 『東海地震の
予知と防災』(部分執筆)(静岡新聞
社), 『市民のための災害情報』(早稲
田大学出版部)

氏名 茂木清夫

[もぎ きよお]



現職 (財)地震予知
総合研究振興会理
事, 東京大学名誉教
授

理学博士

略歴 東京大学理学部地球物理学科
卒業, 東京大学地震研究所教授, 同
所長, 日本大学教授を経て現職

研究分野 地震学, 岩石力学

著書 『地震—その本性をさぐる』

(東大出版会), 『日本の地震予知』
(サイエンス社), 『Earthquake
Prediction』(Academic Press),
『地震予知を考える』(岩波書店)他

氏名 井野盛夫

[いの もりお]



現職 富士常葉大学
環境防災学部学
長, (財)静岡県防災
情報研究所所長, 中
央防災会議専門委
員, 地震調査研究推進本部専門委員

理学博士

略歴 東京教育大学理学部地学科卒
業, 静岡県防災局長を経て現職

研究分野 地下水探査, 防災行政

著書 『抗震』東海地震へのア
プローチ(静岡新聞社), 『今だから知
りたい東海地震』(共著・静岡新聞
社), 『名水を科学する』(共著・技報
堂出版), 『地震予知がわかる本』(共
著・オーム社), 『地域防災計画の実
務』(共著・鹿島出版会)等

氏名 松村正三

[まつむら しょうぞう]



現職 独立行政法人
防災科学技術研究所
固体地球研究部門副
部門長

理学博士

略歴 東京大学大学院理学系研究科
地球物理専門課程博士課程中退, 科
学技術庁国立防災科学技術センター
(現防災科学技術研究所) 研究員, 同
地震前兆解析研究室長, 高度震源解
析研究室長を経て現職

研究分野 地震学, 地震予知

著書 *Seismotectonics in Con
vergent Plate Boundary* (共著,
TERRAPUB)

氏名 伊藤久男

[いとう ひさお]



現職 独立行政法人
産業技術総合研究所
地球科学情報研究部
門主任研究員

略歴 東京大学理学部地球物理学科
卒業, 同大学院理学系研究課程(地
球物理学専攻)中退, 現職

研究分野 地球物理学, 地震学

氏名 佐藤魂夫

[さとう たまお]



現職 弘前大学理工
学部教授
理学博士

略歴 東北大学理学
部天文及び地球物理学第二学科卒
業, 東北大学大学院理学研究科博士
課程を単位取得退学, 弘前大学理学
部助手, 助教授を経て現職

研究分野 地震学(短周期地震動の
放射機構, 地震波トモグラフィ)

氏名 村上ひとみ

[むらかみ ひとみ]



現職 山口大学工学
部助教授(理工学研
究科環境共生工学専
攻)

工学博士

略歴 北海道大学工学部建築工学科
卒業, 同大学院理学研究科博士課程
修了, 北海道大学工学部建築工学科
助手を経て現職

研究分野 建築防災学, 防災システ
ム工学

氏名 長谷川 昭

[はせがわ あきら]

現職 東北大学大学院理学研究科教授
理学博士

略歴 東北大学理学部天文及び地球物理学第二学科卒業，東北大学大学院理学研究科博士課程中退，東北大学理学部助手，助教を経て現職

研究分野 地震学

著書 *Magmatic Systems* (M. P. Ryan 編, Academic Press) (分担執筆)



氏名 橋本 学

[はしもと まなぶ]

現職 京都大学防災研究所教授

略歴 京都大学大学院理学研究科博士課程修了，建設省国土地理院地殻調査部観測解析課長，京都大学防災研究所地震予知センター助教授を経て現職

研究分野 地殻変動，テクトニクス

著書 『防災学ハンドブック』(共著，朝倉書店)



氏名 斎藤正徳

[さいとう まさのり]

現職 横浜市立大学理学部教授

略歴 東京大学大学院数物系研究科博士課程修了，東京大学理学部助教授，神戸大学理学部教授，東京工業大学理学部教授を経て現職

研究分野 地球物理学

著書 『文化財探査の手法とその実際』(共著)



氏名 吉井敏尅

[よしい としかつ]

現職 日本大学文理学部地球システム科学科教授
理学博士

略歴 北海道大学大学院理学研究科博士課程修了，東京大学地震研究所助手，同助教授，教授を経て現職

研究分野 地震学

著書 『日本の地殻構造』(東大出版会)，『理科年表読本：地震』(共編著・丸善)，『新編・日本の活断層』(共編著・東大出版会)，『地震の事典(第2版)』(共編著・朝倉書店)等



氏名 力武常次

[りきたけ つねじ]

現職 (財)地震予知総合研究振興会顧問，東京大学・東京工業大学名誉教授
理学博士

略歴 東京帝国大学理学部地球物理学科卒業，東京大学地震研究所助教授，同教授，同所長，東京工業大学理学部教授，日本大学文理学部教授を歴任，現在に至る

研究分野 地球物理学(地球電磁気学，地震予知論)専攻

著書 *Electromagnetism and the Earth's Interior, Earthquake Prediction* (いずれも，Elsevier)，『地球電磁気学』(岩波書店)，『なぜ磁石は北をさす』(講談社)，『地震予知』(中央公論社)，『地震前兆現象』(東京大学出版会)，『固体地球科学入門』(共立出版社)他



編集後記

ここ1~2年、地震関連の研究は目覚ましい発展を遂げた、プレート境界面上のアスペリティーの研究である。境界面上には、平常時から「非地震性すべり」が続いている領域があり、それに囲まれて「固着域」が存在する。固着域は一気にすべり運動を起こすので地震が発生する。したがって、この研究成果を地震予知に活用するとすれば、研究の焦点は固着域の大きさと場所を確定することに絞られる。このような地震像が見えてきた背景には、高感度地震計やGPSの観測網が整備されたことがある。高密度GPS観測網が整備されなかったら、「非地震性すべり」の領域が発見されなかったであろうし、高密度地震観測網がなかったら「固着域」の存在は確定できなかったであろう。広範囲な陸域プレートが一気に弾ね返る弾性反撥説の時代からみれば、大きな研究の進歩と言える。地震計さえ列べておけばよかった時代は去り、今や地震学は「地震システム科学」の時代に入りつつある。

もう一つの大発見はプレートの等深線上に発生する長周期微動の発見である。微動の震源は東海地方から紀伊半島・四国地方と、フィリピン海プレートの深さ30km付近に配列している。微動の原因と考えられるものは、プレートの沈み込みに伴って取り込まれた水分が高温高压下に絞り出されたものらしいが、いまのところ判然としない。この研究成果はプレート上面で何が起きているかを知る上できわめて貴重な資料となる。

地震予知は病理と臨床という2つの柱をもつ医学に例えられる。人体の構造やその働き、病気の原因の究明なくしては臨床的判断はできない。風邪や腹痛で片付けられる病気ならいざ知らず、少し高度な症状には病理の知識なしには治療ができません。

「そんな難しい研究よりも、地震予知に精を出してくれ」との要望はよく判る。しかし地震は風邪や腹痛程度の簡単な現象ではなさそうである。前述のような、一見予知とは無関係な研究成果が予知の基礎を形成することを知らなければならない。

近年、地震発生に伴う異常な電磁波の存在が取り沙汰される。これを用いれば予知は可能とさえ言う人がいる。必ずしも地震の専門でない人がこの研究に携わっているためか、地震の専門家が電磁波に見向きもしないという一面だけが強調される節もある。しかし異常な電磁波の原因究明がされない以上、研究者は興味を示さないのである。前述した長周期の微動が水との関係で発生するならば、もしかすると異常な電磁波の発生と結びつくかも知れない。そうなれば、多くの研究者が興味を示すことであろう。こう言った基礎研究の後ろ盾があってこそ、予知研究は学問技術としての市民権を持つのである。

そうかと言って、学問技術の成果を待ってはいられない。地震災害軽減のためには、地震システム科学の研究者だけの知識では役立たない。行政の理解、一般住民の協力なしには災害軽減は実現しない。本誌の重大な目標の一つは研究・行政・住民の橋渡しを実現することにある。しかし本誌の内容は「難し過ぎて理解できない」との批評をよく受ける。批評に応じて、少しでもこの目標に向けて努力しようと、理学だけではなく、工学の側面をも取り入れるように配慮してきた。

本号でも、灰色情報問題やインド・グジャラート地震の被害調査報告を掲載した。しかしまだ理学偏重の立場は堅持されている。前述したように、本誌は病理に例えて基礎研究の必要性を強調する立場をとってきた。いわゆる研究者が編集陣を構成している以上、理学偏重は止むを

得ないとも考えている。それでも本誌の内容の改善と、読者層を意識した取り組みを怠るべきではないと、つねつね自戒していることもまた事実である。

地震学が「地震システム科学」に昇華すれば、それに伴ってまた多くの専門的知識の導入が必要となる。これを紹介しようとする、ますます一般読者層の要望から離れた「研究誌」になってしまうであろう。そうかと言って基礎研究を重視する立場を崩しては、本誌の重大な使命を失ってしまうことにもなりかねない。要はバランスの問題である。バランスを保ち続けるためには、多くの読者の素直なご意見、ご批評が支えになる。編集後記の紙面を借りて、読者へのお願ひというのは申し訳ない気もするが、本誌へのご意見、ご批評を宜しく願ひたい。読者諸賢からの建設的なご意見、ご批評があれば今後それを掲載することも考えている。批評者は実名、匿名いずれも可。頂いたご批評が今後の編集の上にとどのように活かされるかを見守って頂きたい。(Y.H.)

地震ジャーナル 第32号

平成13年12月20日 発行

発行所 ☎101-0064
東京都千代田区猿樂町1-5-18
☎03-3295-1966
財団法人
地震予知総合研究振興会

発行人 高木章雄

編集人 萩原幸男

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/ (財)学会誌刊行センター