

予知はどこまで可能か—日本における地震予知の現状と展望

Present State of Earthquake Prediction in Japan

平 澤 朋 郎 (ひらさわ ともお)

東北大学教授 理学部 地震予知・噴火予知観測センター

1. はじめに

1995年1月17日未明、マグニチュード (M) 7.2の兵庫県南部地震が発生した。内陸直下の浅い地震で、神戸市を中心に犠牲者は5千人を超え、1948年福井地震 (M7.1) の死者3769人を上回る、戦後最大の悲惨な地震災害を蒙ってしまった。当該地域には活断層が存在し、M7クラスの地震が起こり得る地域という判断はしていたものの、地震の可能性に関する適切かつ有効な情報を提供できないまま、今回の地震の発生に至ってしまった。地震予知に関係する1人として、まことに残念である。

この地震は、いわゆる直下型地震のこわさをまざまざと見せつけた。最近日本で発生した被害地震の震源はいずれも海底であった。1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震などである。津波を別にすれば、これらの地震では一定の距離をおいた震源から伝播してきた地震動による災害であり、災害の大小は、地盤の良し悪しに強く依存していた。しかし、今回は、足下の断層が動くという異質のものであり、一瞬のうちに構造物が破壊するという場合さえあったようである。活断層が動くような内陸直下の地震の繰返し間隔は短くても千年程度と言われ、めったに起こらない。その恐ろしさはとかく忘れがちである。かくいう私でさえその傾向は否めない。今回の地震の教訓を活かすためにも、地震現象と地震予知の現状についての正しい理解が大切であり、本稿がそれに少しでも役立てば幸いである。

2. 地震予知への願望

太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート、北米プレートという四つのプレートの収束帯に位置する日本列島で生活してきた私たち日本人は、昔から地震による災害に苦しめられ続けてきた。鴨長明は、「恐れの中に恐るべかりけるは、只地震なりけりとこそ覚え侍りしか」と方丈記で述べ、数ある「不思議」の中で地震が最も恐ろしいとしている。その当時は、地震の難を避けるために神仏にすがっていたが、江戸時代になると少し変わってくる。いろいろな地震の記事に前兆現象についての記述が現れる点である。地震予知への素朴な願望をここにみることができる。

明治になってから近代地震学が始まり、1886年には世界最初の地震学の教授が日本で生まれた。東京帝国大学教授・関谷清景である。その関谷は、「地震ヲ前知スル

ノ法如何」と題する講演を1885年に行っている。これを見ても、日本の地震学が当初から地震予知を目指していたことがわかる。しかし、この目標には当時の地震学のレベルはあまりにも低く、1891年に発生したM8.0の濃尾地震後に組織された震災予防調査会の主たる目的は、地震に関する基礎的な調査研究と地震災害の軽減であった。その後長い間、個々の研究者の努力はあっても、組織的な地震予知観測研究の展開には至らなかった。

1946年暮れの南海道地震 (M8.0) を契機にして、学術研究会議会長に直属する地震予知研究連絡委員会が1947年に設置された¹⁾。その目的は、地震現象特に地震予測に関しこれに関係ある全国の研究および事業機関の間の連絡調整を図ることであった。この委員会は、実質的には1年7か月の短命であったが、「地震予知について、特に最近における大地震襲来説に対する意見書」を起案している。その緒言から起案に至った背景が読みとれる。その当時、1944年東南海地震 (M7.9)、1945年三河地震 (M6.8)、1946年南海道地震と、大地震が続けて起こっていた。そのため地震に対する一般の関心が強い一方、地震学者の不用意な言動も一因となって流言ひ語が流布し、社会不安を招きかねない状況であったようである。ともあれ、その意見書の中で、地震予知の方法、地震予知に関する施設の現状、地震予知の可能性に関する見解とともに、「いつ」、「どこに」、「どのくらいの大きさ」という、いわゆる地震予知の3要素が明確に述べられている。しかし、社会の要請に積極的に応えようとする地震予知推進派と地震予知は時期尚早とする慎重派が委員会内部で対立し、この意見書は公表には至らなかったが、15年後に出された地震予知の、いわゆる、ブループリントに大きな影響を与えた。

3. 地震予知計画の始まり

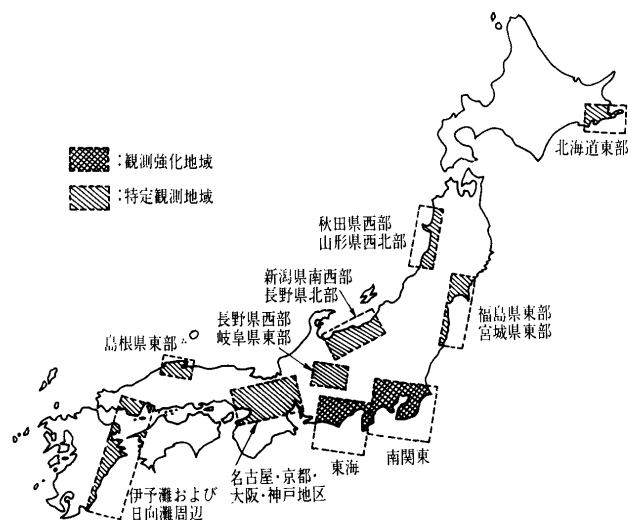
「地震予知—現状とその推進計画—」と題するこのブループリントは、地震学会を基盤として組織された地震予知計画研究グループ (世話人：坪井忠二、和達清夫、萩原尊禮) によって策定され、1962年に公表された。これをうけて、文部省の測地学審議会は1964年に「地震予知研究計画の実施について」を関係各省庁の大臣に建議し、翌1965年には、地震予知観測研究の国家プロジェクトが実施に移されることとなった。かくして、地震予知という高く険しい山への挑戦が、世界に先駆け日本において始まったのであるが、ここに至る道のりもまた、長

総 説

く険しいものであった。

よく知られているように、上述のブループリントの達成目標は、計画のすべてが直ちに実行された場合には、10年間で地震予知が可能かどうかの結論を出すことであった。そして1964年に出された測地学審議会の建議は、10年を目途とする「地震予知研究計画」であり、その目標は予知に有効な基礎データを全国規模で収集する体制づくりにあった。ところが、1965年に始まった松代群発地震は1966年には最盛期を迎え、また1968年5月には十勝沖地震（M7.9）が発生して、地震予知は大きな社会問題になり、計画を加速せざるを得ない状況になった。そこで、測地学審議会は、1968年7月に第2次計画となる「地震予知の推進に関する計画の実施について」を建議した。これにより、1965年から始まった第1次計画は4年で打ち切れ、1969年から第2次計画に移行した。第2次建議では、第1次の建議事項名にあった「研究」の文字が消えていることから察せられるように、予知が可能か否かについての明確な結論を待たずに、予知の実用化を究極の目標におくこととなった。計画のこの変質は、強い社会要請に応えるためにやむを得なかったのであろう。

このように、予知の実用化への道を歩み始めた中で、1969年には地震予知に関する情報の交換と総合的検討を目的とする地震予知連絡会が設置され、事務局は建設省国土地理院におかれることとなった。1970年に地震予知連絡会は、地震予知観測を重点的に充実すべき地域として、南関東地域を地震予知「観測強化地域」に、東海地域ほか7地域を「特定観測地域」に指定した。この指定には、将来大地震が発生する可能性だけでなく、地震予知観測の現実的な可能性と、地震による想定被害の規模なども考慮されたようである。その後1978年には見直しがなされ、東海と南関東が「観測強化地域」に、北海道東部ほか7地域が「特定観測地域」に指定された。問題の兵庫県南部地震の震源域は、当初から阪神地区として琵琶湖周辺域とともに特定地域に指定されていたが、こ



図一 地震予知連絡会による観測強化地域と特定観測地域 (昭和53年8月)

の見直しによりこれら二つが合体しかつさらに東に広げて、図一1のように、名古屋・京都・大阪・神戸地区となった。その選定理由として、歴史時代にM7クラスの地震があったこと、活断層が密集していること、社会的に特に重要な地域であることなどが挙げられている。

4. 地震予知のよりどころ

—長期的予知と短期的予知—

地震現象には予知に役立つ二つの基本的な性質がある。その第1は、ほぼ同じ場所で繰返し地震が発生することであり、地震の規模と場所を予測する長期的予知のよりどころである。第2は、大地震が起こる前に地震活動や地殻変動などに異常が発生すること、つまり、前兆現象があることであり、発生時期を予測する短期的予知のよりどころである。

ところで、駿河湾から御前崎沖に至る駿河トラフ沿いに近い将来大地震が発生する可能性が高いという、いわゆる東海地震説が世間を賑わせ始めたのは1976年頃からである。この説が学会で広く受け入れられるなかで、大規模地震対策特別措置法が1978年に制定された。これは、地震防災応急対策の策定、地震防災対策強化地域の指定、地震予知観測体制の整備などの特別な措置を定めており、防災対策に予知情報が組み入れられる点で画期的である。ともあれこの法律に基づいて、翌1979年には静岡県を中心とする東海地方の170市町村が地震防災対策強化地域に指定された。これに伴い、2年前から設置されていた気象庁を事務局とする「東海地域判定会」は、「地震防災対策強化地域判定会」として気象庁長官の諮問機関に改組された。なお、この地震防災対策強化地域と地震予知連絡会が指定している観測強化地域とは、同じ「強化地域」という言葉を使っているため紛らわしいが、全く異なるものであることに注意されたい。

東海地域をめぐるこのような流れに沿って、1979年から始まった第4次地震予知計画では、主として地震の場所と規模を予測する長期的予知と、地震発生の時期を予測する短期的予知とを区別し、長期的予知の結果将来大地震が起こる可能性が高いと判断された地域には、予知観測を集中的に強化して短期的予知にあたる、という予知戦略を明確に打ち出した。かくして東海地域の地震予知観測体制は、短期的予知を目指して大幅に強化されることとなった。

5. 大地震はどこで起こるか—長期的予知—

図一2は、1885年から1993年までの間に起こった被害地震の震央分布である。この図でM7以上の大きな地震に注目すると、かなり限られた地域に発生していることがわかる。しかし、地震の繰返し間隔が数百年以上の場所が多いので、この図で大地震がないからといって安心はできない。1978年の宮城県沖地震（M7.4）の震源域は、約40年という例外的に短い繰返し間隔をもっており、1936年のM7.5、1897年のM7.4が図にプロットされている。一方、紀伊半島沖の南海トラフ沿いの二つの大きな丸は、1944年東南海地震と1946年南海道地震である。

同地域では、歴史資料から1854年の安政東海地震 (M8.4) と安政南海地震 (M8.4), 1707年の宝永地震 (M8.6) などが知られており, 100~150年の繰返し間隔のようにも思われるが, 図-2 からはもちろん読みとれない。なお, 1995年兵庫県南部地震とほぼ同じ場所, 明石海峡に位置する白丸は1916年の M6.1の地震である。また, 1983年の日本海中部地震 (M7.7) や1993年の北海道南西沖地震 (M7.8) の震源域では, これほどの規模の地震が過去に発生した記録が残っていない。このように, 過去の地震資料から繰返し発生する場所を特定す

は, 「プレート運動を主因とする偏差応力が働く場において, 脆性的な岩石中に存在する既存の弱面で地震というすべり破壊が繰返し発生する」ことである。したがって, 地震予知の第一歩は, これらの特性をもつ場所を特定することである。

日本列島とその周辺では, 海洋プレートである太平洋プレートとフィリピン海プレートが陸のプレートである北米プレートあるいはユーラシアプレートの下に沈み込んでいる。このため, 程度の差はあっても, 日本列島の至る所偏差応力が存在する。図-3 は, 東北地方中央部

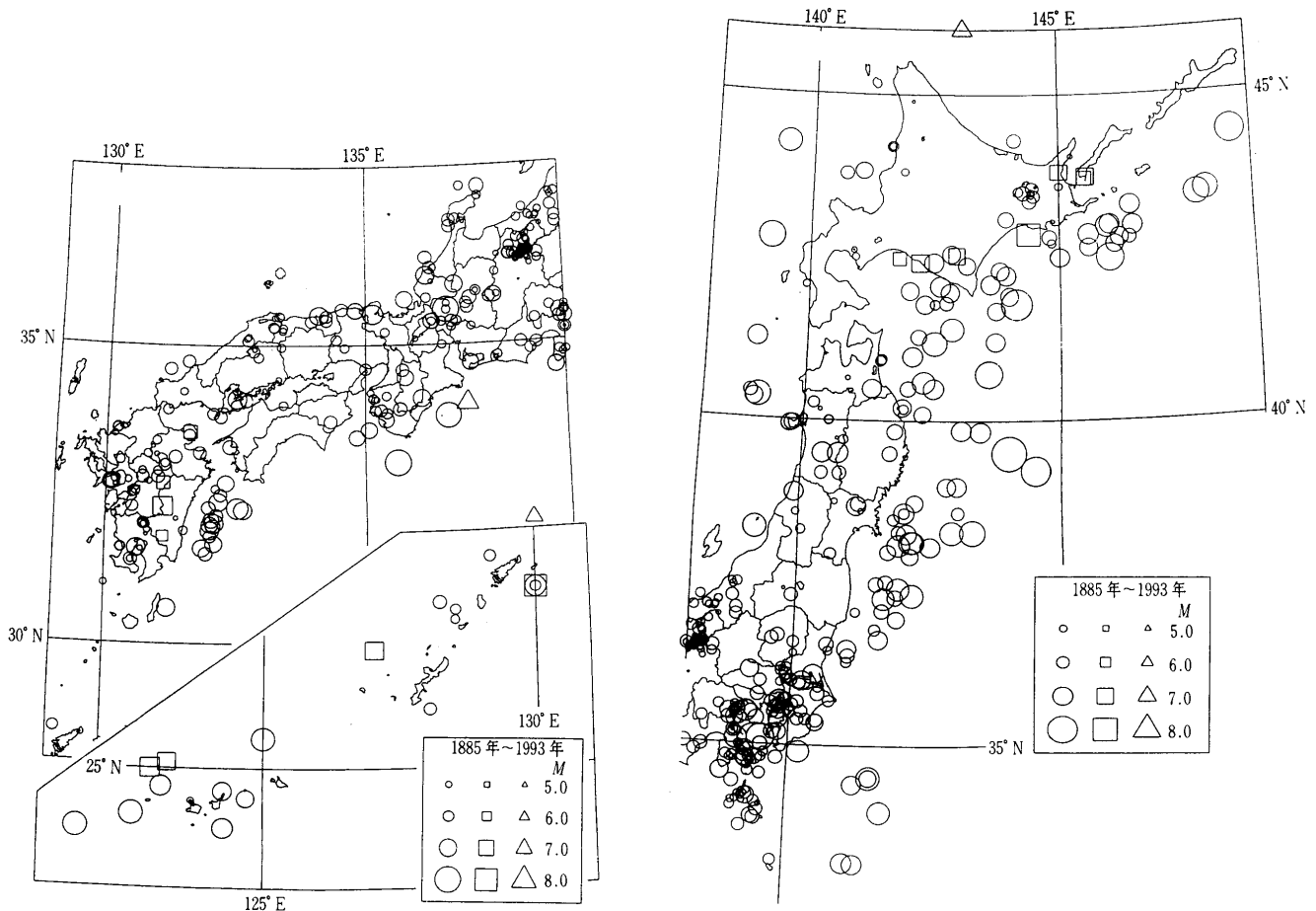


図-2 1885年から1993年までに発生した被害地震の震央分布

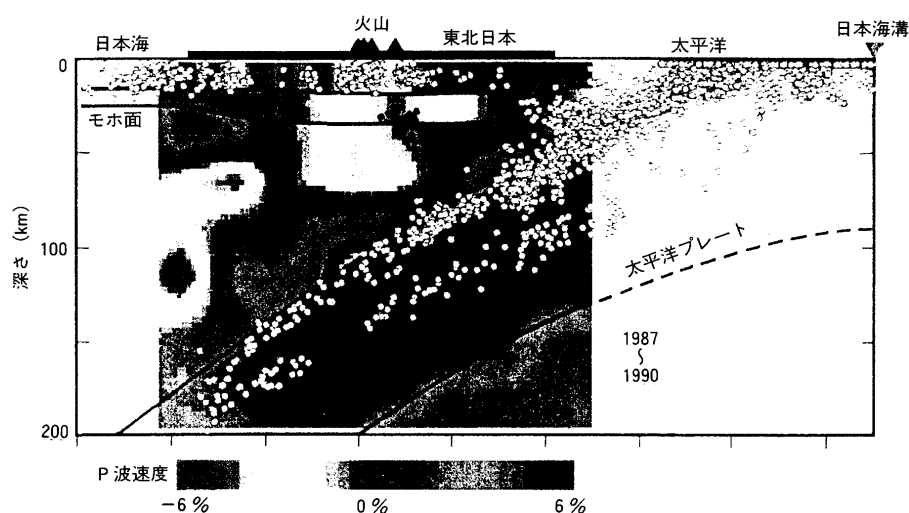
白丸は深さ100 km 未満, 正方形は深さ100 km から300 km 未満, 三角は深さ300 km 以上の地震。

ることができない地域が多い。

さて, 地震は, 静水圧からのずれ, 偏差応力によって起こる地下深部岩石の巨大なすべり (せん断) 破壊現象である。もし地下深部を構成する岩石が延性的性質であれば, 流動を起こすことによって偏差応力を解消してしまう。すなわち地震を起こす領域では, 構成する岩石の性質が脆性でなければならない。さらに, 地震という破壊が起こる場所のもう一つの重要な特徴は, 大きなきず (弱面) があることである。地震によって緩和される応力 (応力降下量) がきずのない岩石の強度に比べて極端に小さいことがその根拠の一つである。沈み込む海のプレートと陸のプレートとの境界面は大規模な弱面の例であり, 大小さまざまな活断層も弱面の例である。このように, 長期的予知のよりどころとなっている第1の性質

の東西鉛直断面に, 地殻および上部マントルの地震波速度構造と地震の震源分布を示したものである。モホ面は地殻とマントルの境界面であるが, 内陸下の地殻内では例外を除いて上部地殻でのみ地震が発生している。このことから, 上部地殻が脆性的であるのに対し, 下部地殻は延性的であると考えられる。黒丸は例外的な地震で, 長周期成分の卓越する地震波形が観測されることから, 低周波地震と呼ばれている。これらは, 下部地殻および上部マントルの低速度域の周辺で発生している。太平洋の下では, 日本海溝付近から沈み込んでいる太平洋プレートと陸のプレートの境界付近で多数の低角逆断層型の地震が発生する。これらは, プレート境界面で発生し, プレートの沈込み運動と直接連動している。しかし, このようなタイプの地震が発生するのは日本海溝から東北

総 説



図一 3 東北地方中央部の東西鉛直断面に示される地下深部の構造と地震の震源分布
1987年から1990年までに発生した通常地震が白丸、低周波地震が黒丸で表されている。P波速度の平均値からのずれが%で示され、火山の下では相対的に低速、沈み込みつつある太平洋プレートの内部は高速になっている。

地方の太平洋岸の直下あたりまでで、それより西側のやや深い所で起こっている地震はいわゆる稍深発地震である。上面と下面に分離しているが、上面の地震も沈み込むプレート内で発生しているのであって、プレート境界ではない。このことは、このあたりでは顕著な地震を発生しないでプレートがずるずると沈み込んでいることを示唆している。

活断層は地殻内の顕著な弱面が地表まで現れている場合である。したがって、規模の大きな活断層は大地震を発生する可能性を秘める場所である。地震予知連絡会²⁾によれば、日本の陸上部分だけでもM7級以上の地震を起こす可能性のある活断層の数は、102にのぼる。そのうちの約2割がA級活断層と呼ばれ、平均的なすべり量が年1 mm以上と推定されている。残りがB級活断層で、年0.1 mm～1 mmの平均すべり量である。M7クラスの地震のすべり量は1 mを超えるから、A級活断層でもその繰返し間隔は千年程度になる。さて、1995年兵庫県南部地震で動いた淡路島北西岸の野島断層はB級であり、数千年に1度の事件であった。

活断層の数が多くことも地震予知を困難にしているが、まだほかにも問題がある。米国カリフォルニアのサンアンドレアス断層系では、ある部分は小さな地震を起こしながら準安定的にすべるクリープ領域であり、ほかの部分では通常は固着している断層が間欠的に大地震を起こす。このように、通常はクリープしていて、小さな地震は起こすが大地震は起こさない活断層もある。したがって、第1の問題は、大地震を発生し得る活断層とそうでないものを区別する必要があることである。第2は、地震をひき起こす断層が必ずしも地表に現れているとは限らないことである。とりわけ、大都市は厚い堆積層の低平地に発達している場合が多く、地表の活断層を見つけにくい。このため、地下構造の精密調査や微小地震活動から埋没している断層を見出す努力がなされている。さて、図一4は、西南日本内帯における微小地震の震央分

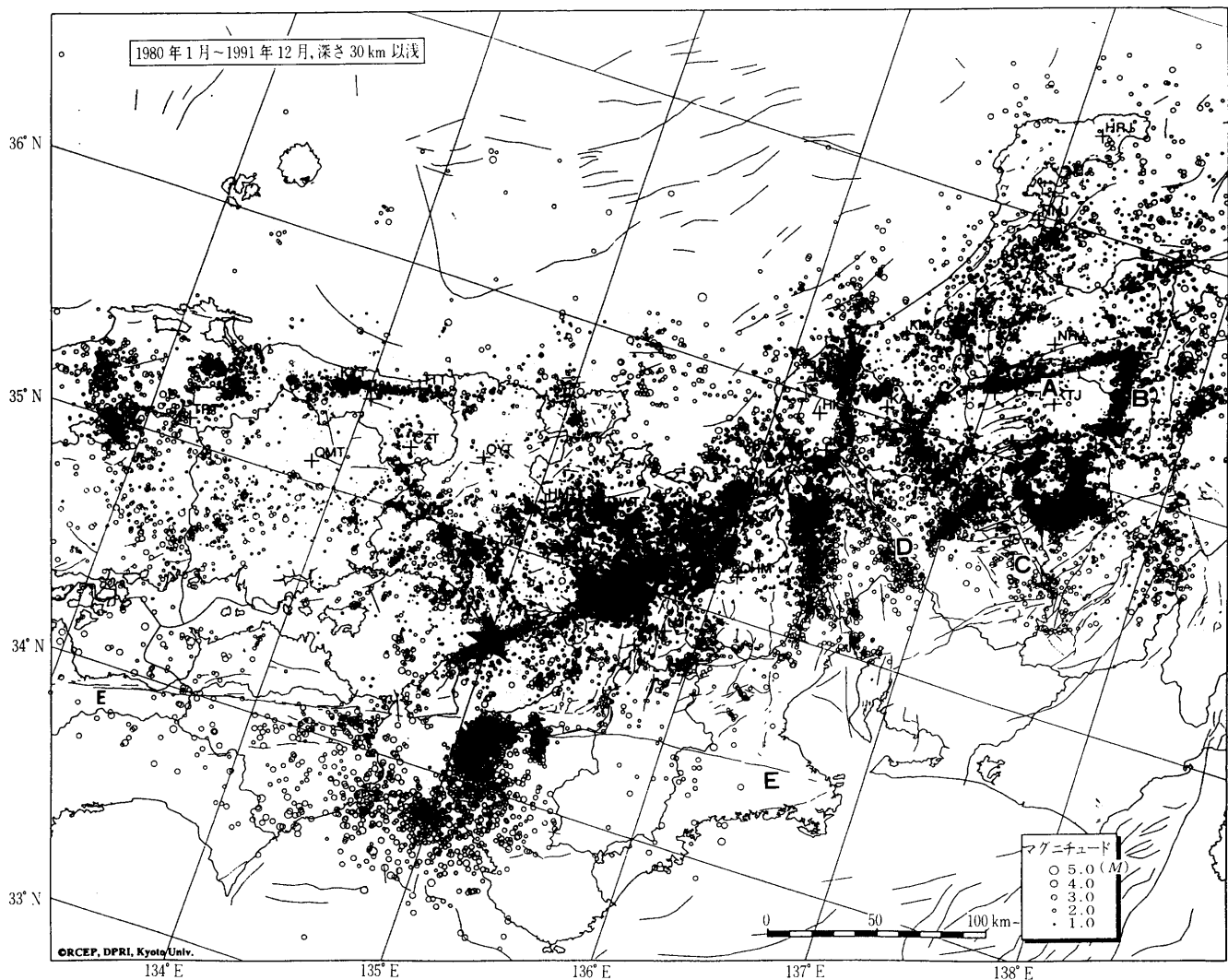
布である。見事な線状配列が各所でみられるが、これらのあるものは活断層と対応し、あるものは対応しない。なお、淡路島北部では野島断層の走行に沿って、それほど活発ではないが帯状の地震活動が見られるであろう。一方東北地方の場合には、微小地震分布から顕著な線状配列を見出しにくい。これは、東北では逆断層型の地震がほとんどであるのに対し、西南日本では横ずれ断層型が多いことによるものかもしれない。このように、微小地震活動から地下の断層を見つけにくい地域も多い。

6. 地震はいつ頃起こるか—短期的予知—

金属やコンクリートなどの材料に力を加えて変形させると、その巨視的破壊の前に超音波振動(AE)が発生することが知られている。

材料に潜在する微小なきずがもとになって発生する微視的破壊がその振動源である。もし強度が全く均一な材料であれば、あるとき突然巨視的な破壊が発生するであろう。ところが、均一な強度をもつように作られた材料にも微細なきずが残っていて、それが前兆現象の原因となる。地震を起こす自然の場の強度は当然不均一であり、大きな破壊(大地震)を起こす前に前震やプレスリップ(断層面上の先行すべり)などの異常現象が発生することは疑いない。問題は、(1)震源域から遠い観測点で異常を検知できるか、(2)検知した異常を特定の場所の地震の前兆と認識できるか、(3)認識した前兆から地震の発生時期を的確に予測できるか、である。

さて、前述のように、東海地域は1979年に地震防災対策強化地域に指定されて以来、短期・直前予知の態勢に入っている。この東海地域を例にとって、上記の三つの問題点を検討してみよう。まず(1)については、想定震源域から展開された予知観測網までの距離は、幸いあまり遠くない。しかも、1944年の東南海地震の前に掛川で異常地殻変動があったことが知られており、現在の観測能力からすれば同様な異常は十分検出できると考えられる。次に(2)については、想定地震の断層モデルだけでなく前兆的なすべりについてもシナリオが作られており、例えば、現在沈降が続いている御前崎が隆起に転じたときが直前の前兆とみなされている。もちろん現実がこの筋書きどおりにいくとは限らないが、この1～2年の間に、人工衛星を使った位置測定のための観測網がきわめて高密度に展開され、地殻変動の観測能力が格段に向上したことは大変心強い。したがって、シナリオから大きくはずれない限り特定可能と考えられる。しかし、最後の(3)が問題である。発生の日前くらいに「今後2～3日の間に地震が起こる」という予報が十分な確度をもって出せれば理想的であるが、なかなかこのようにはいくまい。シナリオから少しずれただけで発生時期の予



図—4 京都大学防災研究所による1980年から1991年までに発生した深さ30 km 以浅の微小地震の震央分布
明石海峡付近の星印は1995年1月の兵庫県南部地震の震央で、帯状網目領域はその余震分布を示す。A は1858年の M7.1 の地震と関係すると考えられている跡津川断層、B はその東端からほぼ真南に下がる地震の線状配列であるが顕著な活断層は報告されていない。C は阿寺断層、D は1891年の濃尾地震の際にも活動した根尾谷断層、E は中央構造線である。なお、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県などで地震がプロットされていないが、これは京都大学の地震観測網の検知能力の範囲外にあるためである。

測が狂う、という可能性を覚悟しなければならないであろう。

1979年の強化地域指定以来、約16年が経過したにもかかわらずいわゆる東海地震はまだ発生していない。これをもって、予知は不可能とする人がいる。しかし、これは間違いであって、問題があるとすれば、長期予測の精度に問題があったと思われる。もともと、いわゆる東海地震の震源域は、1944年の東南海地震の未破壊域である駿河湾奥から遠州灘にかけた領域に想定されている³⁾。その根拠は、1854年の安政東海地震の破壊域は駿河湾西岸にまで達していた⁴⁾のに、1944年のときにはそこまで達せず、大きな未破壊領域が残っている点にある。しかし、想定されている震源域で大地震が単独で発生したという歴史上の確かな証拠もない。したがって、2030年頃までに想定東海地震が起こらない場合には、安政型の大地震が発生する可能性が強くなるとされる。

ところで、地震予知観測の経験を積むにつれ、前兆と

も考えられる異常現象が震源から遠い観測点で検知されたという報告が増えている。1例を挙げると、1993年7月12日の北海道南西沖地震の約1か月前、震源から数百 km も離れた石川県珠洲市で地電位異常が検出された⁵⁾。これが真に前兆かどうかの議論はさておき、遠く離れた地点の異常を正しく特定の地震に事前に結びつけることは、実際上容易ではない。少なくとも、精度の高い長期予測がなされていない限り難しい。長期予測抜きの実用的な短期・直前予測は存在し得ない、と私は思う。

7. 地震予知の今後の展望

地震予知計画の実践的戦略では、長期的予知の観測結果から近い将来大地震発生の可能性が高いと判断された地域に、予知観測を集中的に投入して短期・直前予知にあたるということであった。しかし、現実には短期的予知の態勢に入っている地域は、前述のように、東海地域だけであり、一方では、北海道南西沖地震、北海道東方

総 説

沖地震 (M8.2)、兵庫県南部地震と、次々に被害地震が発生している。この原因は、長期的予知の目標を場所と規模の予測において、時期についてはあいまいにしていたことにある。したがって、長期的予知においても、今後のある期間、例えば20年間、に大地震が発生する可能性が十分高いことを示す必要がある。

上述の戦略をとってきたことにはもちろん理由がある。天気予報の長期予測が当たりにくいことからわかるように、一般に長期予測の方が難しく、従来の予知計画では精度の高い長期的予知を目指すことができなかった。かといって、東海地域なみの高密度観測網を全国的に展開することも財政的に不可能であった。しかし、約30年間の地震予知観測研究の成果の蓄積により、高精度長期予測の展望がようやく開けてきた。その結果、平成6年度から始まった第7次地震予知5箇年計画で、地震発生ポテンシャルの評価のための新たなプロジェクトを開始し、長期予測の高度化を目指すことになったのである。

この計画は、海・陸プレート境界域のダイナミクスに関する観測研究と、内陸の地震テクトニクスに関する観測研究の二つの柱からなる。前者は海洋プレートの運動のゆらぎを検出し、プレート境界型の大地震の高精度長期予測を直接の目的とし、日本列島広域ひずみ場の時間変動予測から内陸地震の長期予測に資することを間接の目的としている。その達成には、楽観的にみて10年程度かかると予想される。ただし、実際にこの予想どおりになるかどうかは、三陸沖や四国沖などにおける長期実時間海底観測が現実いつから実行できるかにかかっている。後者は、個々の活断層について地震発生ポテンシャルを定量的に評価することは、現在のところ不可能であるため、地下深部の精査、とくに地震断層などの弱面探査とその性質の解明に向けられている。内陸直下の地震がきわめて長い繰返し間隔をもち、また、地震を起こす応力場がプレート運動の間接的な影響下にあることから、これはやむを得ないことである。当面の目標は、予想される繰返し間隔の1～2割程度の幅で発生時期を予測する超長期的予測となろう。それでも個々の活断層についてトレンチ調査、応力測定、微小地震観測、地殻変動観測などを組織的に実施すれば、この百年間に大地震が発生する可能性がほとんどない活断層を識別する、非発生予測は可能であると思われる。10年単位の長期予測は、

プレート境界域に関する成果と内陸の地震テクトニクスの成果とが結合されてはじめて可能になる。

短期・直前予知を可能にする各種前兆現象の発生と伝達の物理的メカニズムについては、弱面における先行的すべりに直接関連する現象を除いて、未解明である。しかし、その原因がわからないからといって、予知に役立たないわけではない。確かな長期予測がなされていれば、各種前兆を捕捉するための系統的・集中的観測が東海地域以外でも現実になり、短期・直前予知への道が開けるとともに、地震発生との因果関係の解明にも結びつくことになろう。

地震災害の軽減には、長期・短期・直前という各段階の予知が的確になされることが理想であろう。例えば、長期的な都市計画には数十年あるいは百年といった単位の超長期的予測も重要であろう。一般的な地域防災対策には、おそらく十年単位の長期予測が効果的であろうし、個々の生命の安全を確保するためには短期・直前予知が有効である。現在のところ、このような理想的な予知は不可能であるが、超長期から短期・直前へと絞り込んでいく予知の実現を究極の目標にして、観測研究を続けているのである。「予知」の内容を豊かにし、質を高めることは可能である。そして、その各段階の予知の確実度に基づいた適切な対応・対策がなされることによって、地震災害が少しでも軽減されるよう願っている。

参 考 文 献

- 1) 萩原尊禮：地震予知連絡会10年のあゆみ，第1部，建設省国土地理院，pp. 13～30, 1979.
- 2) 地震予知連絡会：地震予知観測の成果(1)，(2)，(3)：地震予知連絡会特定部会報告，Vols. 4-6, 1994.
- 3) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾地震の可能性—，地震予知連絡会会報，Vol. 17, pp. 369～374, 1977.
- 4) 羽鳥徳太郎：安政地震(1854年12月23日)における東海地方の津波・地殻変動の記録，地震研究所彙報，Vol. 51, pp. 13～28, 1976.
- 5) 長尾年恭・朝井与志哉・河野芳輝・上田誠也：北陸地方で観測された自然電位異常と地震との関係，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集，p. 320, 1994.

(原稿受理 1995.2.20)