

先端技術で観測する地殻変動

—首都圏直下地震の予知に向けて—

日置幸介*

CRUSTAL DEFORMATION OBSERVATION BY SPACE TECHNIQUES —TOWARD THE EARTHQUAKE PREDICTION IN THE TOKYO METROPOLITAN AREA—

By

Kosuke HEKI

Seismic activity in the Tokyo metropolitan area has been unusually quiet since the great Kanto earthquake in 1923. It is, however, expected to get more active in the coming several tens of years from geophysical and historical viewpoints. Both the population and the political/economic activities in Japan heavily concentrate there and future earthquake damages in this region will obviously influence the whole country. Earthquake prediction is not only the subject of public demand but also one of the ultimate goals of geophysics. However, there is not even an agreement among geophysicists whether earthquakes are predictable in principle or not. This is coming from the shortness of the observing history of earthquake precursors and thereby the incompleteness of the theory describing how earthquakes start. It would therefore be essentially important to densify and improve the observing networks currently deployed in Japan to accelerate the progress of the earthquake prediction studies. Crustal deformation is one of the most fundamental items to be observed for both long- and short-term earthquake predictions. Space techniques, such as Global Positioning System (GPS), Satellite Laser Ranging (SLR) and Very Long Baseline Interferometry (VLBI), are now widely used in crustal deformation studies. In this article I review what kind of new roles they are expected to play in the future earthquake prediction program in this country.

[キーワード] 宇宙測地, 地震予知

Space geodesy, Earthquake prediction

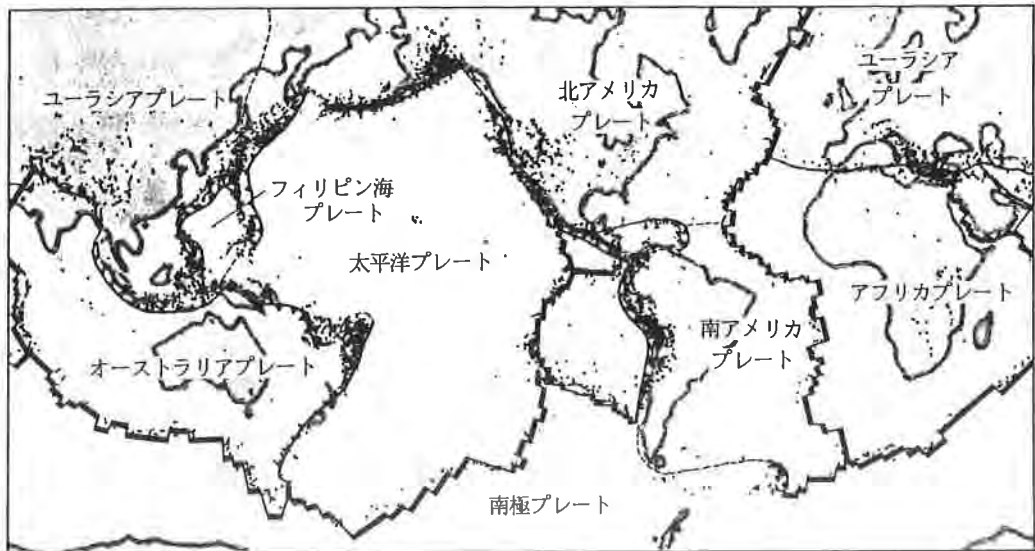
1. 地震はどうして起こる？

大地を構成する岩石には、多かれ少なかれ押されたり、引っ張られたりという力（応力）が働いており、力を除いた状態からみて「歪んで」いる。歪みが限界を超えたとき岩石はこわれ、その振動が地震波として四方に伝わる。岩石を歪ませる地震の原因は、今日では「プレート

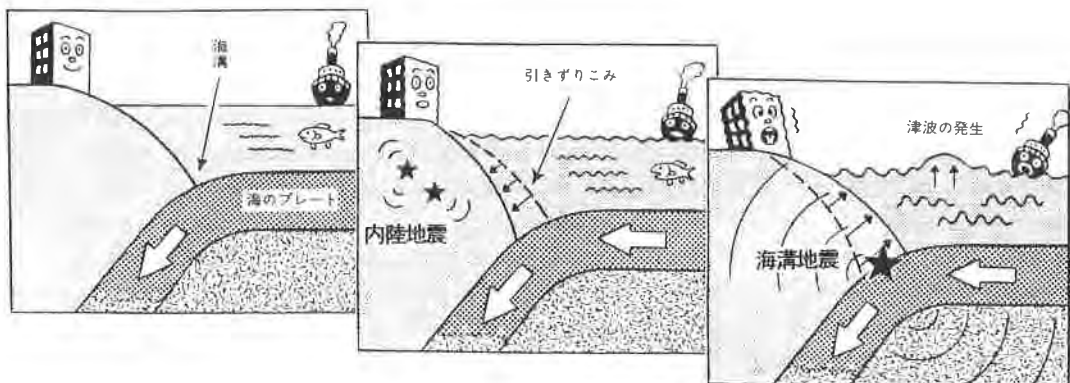
運動」という全地球的な水平方向の大地の動きであると考えられている。

地表の厚さ数十から数百キロの硬い部分はプレートとしていくつかのブロックに分かれて互いに動いている（第1図）。そのときプレートが境界で自由に動ければ良いが「ひっかかって」といって話がややこしくなる。境界の状態に構わずプレートが動き続けると、動くプレート中心部とひっかかって動かないプレート境界の間に「歪み」が蓄積され、やがて地震に至る（第2図）。ひっ

* 関東支所 宇宙電波応用研究室



第1図 プレートの境界と地震の分布図. 地表は厚さ百キロ前後の硬いプレート(岩盤)でおおわれており, それらのプレートが互いに動くことによって境界付近に地震が発生する.



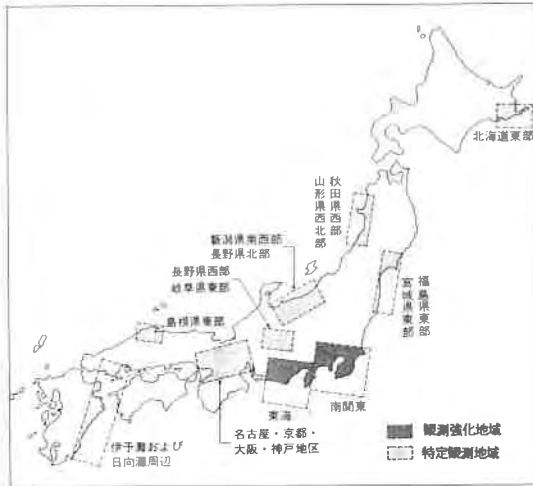
第2図 海溝型地震と内陸(直下型)地震. 海洋プレートの沈み込みに引きずられて陸側プレートに歪みが溜まる過程で内陸地震が発生する. 引きずり込まれた陸側プレートは数十年から数百年に一回規則正しくはねあがり海溝型地震が発生する(大竹⁽¹⁾の図に加筆).

かかった境界そのものがはずれて動くのが関東地震のような「海溝型」プレート間大地震であり, 境界近くの浅い部分が小規模にビクビキとこわれるのがプレート内「直下型」地震(内陸地震)である. プレート間地震はマグニチュード(M)8クラスの大きなものが多いが, 直下型はM7クラスと中規模地震が多い. M7地震はエネルギーではM8地震の30分の1しかないけれど, 震源が浅ければかなりの被害をもたらす.

2. 長期予知と短期予知

地震が「いつ」, 「どこで」, 「どれぐらいの規模で」発生するかを前もって知ることが地震予知である. これらのうち, 「いつ」に関しては大きざっぱで良いから広い地域を対象に地震発生のパテンシャルを評価するのが長期予知であり, そこで危なそうだとされた地域(地震予知計画における「特定観測地域」や「観測強化地域」, 第3図)に, より本格的な観測網を展開して地震の「前兆」を待ちかまえるのが短期予知(直前予知)である.

長期予知で重要なものは昔発生した地震の研究である。古文書をたどって歴史時代の地震発生を調べたり、地面に溝を掘って活断層を直接観察して歴史以前の活動を調べたりということがこれにあたる。最終的には、その地域における地学的な知識を総合したテクトニクスの理解が長期予知の鍵となる。たとえばプレートテクトニクスの登場によって大地の水平運動が定量的に理解できるようになったことは地震発生のポテンシャルの評価に大いに役立っている。昨今地震予知計画における「観測強化地域」や「特定観測地域」の外での被害地震の発生が



第3図 地震予知連絡会による特定観測地域と観測強化地域。

みられるが、これは早い話「長期予知の失敗」である。奥尻島民をひどい目に合わせた北海道南西沖地震が専門家に「意外」だったのは、日本海東縁がプレート境界であるというテクトニクスの認識が定着していなかったためである。

長期予知の結果地震発生のポテンシャルが高いとされた地域について、地震の前兆を捕らえるといった直前予知（短期予知）のための観測網が展開される。これには地殻変動、地震活動、地球化学、電磁気などあらゆる観測手法が用いられる。なかでも地震予知の基本中の基本である地殻変動と地震との基本的な関係について説明しよう。

3. 地震と地殻変動

3.1 地震と地殻変動の関係

大地を構成する岩石が歪みに耐えきれず「こわれる」のが地震の発生であるが、実際には「断層面」と呼ばれる平面を挟んだ両側に食い違いが発生する。食い違いの向きによって断層は横ずれと縦ずれに分けられ、縦ずれ断層は更に岩石が「引っ張られて」こわれた正断層と、「押されて」こわれた逆断層に分類される。また実際の地震では横ずれと縦ずれはしばしば混在する。

さて弾性体中で食い違いが生じるとそのまわり物質に「ゆがみ（変形）」が生じる。実は溜まった歪みが解消されるのが地震であるから、前回の地震以来ゆっくりと蓄積された「反対のゆがみ」がもとに戻ると言った方が



第4図 明治24年の濃尾地震のときに出現した根尾谷断層。この地震はマグニチュード8クラスの内陸地震としては極めて大きいものであり、断層面での食い違いは上下に6m、水平に3m程度であった。この断層崖は天然記念物として現在でも保存されている。

正解かも知れない。つまり地震と地震の間にゆっくり進行した地殻変形が、地震時に一気に解消される。前者が地震間 (Interseismic)、後者が地震時 (Coseismic) 地殻変動である。

地震時地殻変動はしばしば劇的な現れ方をし、明治24年の濃尾地震では根尾谷断層が現れて人々を驚かせた(第4図)。地震が浅い場合は断層そのものが見えることもあるが、普通はその「まわり」の変形だけが測量によって地表で観測される。大正12年の関東地震前後に陸地測量部(現国土地理院)によって三浦半島の隆起と丹沢山地の沈降が確認されたが、実際の地震断層は相模湾の海底から南関東に向かって傾き下がる面である。このような地下断層の形やそこでの食い違い量と地表変位の関係は理論的にもほぼわかっているため、地表変位からどんな断層が動いたかを逆に推定することもできる。

一方ゆっくりした地震間の地殻変動は精密測地測量の繰り返しによってしか検出されない。ここで蓄積された歪みが地震となって解放されるわけであるから、地震間地殻変動は地震時の地殻変動と逆符号で、ほぼそれを地震の繰り返し時間間隔で割った率で溜まってゆく。

3.2 地震前兆地殻変動

地殻変動が地震間のゆっくりしたものと地震時の急激なもの二種類だけなら、地殻変動は長期予知には便利でも直前予知には役に立たないだろう。地下に埋め込んだ歪み計や傾斜計などの地殻変動連続観測によって、なんとかみつけようとしているのは、地震の前兆としての「異常な」地殻変動である。ここでは力武⁽⁴⁾のまとめた文献中からいくつかの例を紹介しよう。

南海トラフでフィリピン海プレートが西南日本の下に最後にまとめて沈み込んだのが、昭和19年の東南海地震(熊野灘)と昭和21年の南海地震(潮の岬沖)の双子地震であるが、ここではかなり信憑性のある前兆地殻変動が知られている⁽⁵⁾。12月7日午後に起こった東南海地震の数日前から陸地測量部は静岡県掛川付近で水準測量の作業を行っていた。地震前日および当日午前中の水準測量結果が数日前までの結果と合わず、南に向かって数キロで数ミリという急激な隆起が見られたらしい。さらに地震直前には水準器の気泡がゆれ動いて測量そのものが不可能になったという。

これは地震時の地殻変動の何分の一あるいは何十分の一といった地殻変動が地震に先だって発生したことを示し、断層面が本格的に食い違う前にさしたる地震もなく少しづつすべり始めたことを暗示する。信頼性はさだかではないが、地震に先だって潮が異常に引いて海底が現れたという記述は昔の地震の記録にしばしば登場し、いわゆる宏観異常現象としてよく引用される。これは「潮

が引いた」のではなく陸地が異常に隆起したと考えたと同様の前兆地殻変動と考えられる。このように地震に先だって断層面がすべり始めるのを「プレスリップ」と呼び、地殻変動観測で期待される前兆はこれと密接に関連している。

3.3 従来の地殻変動観測

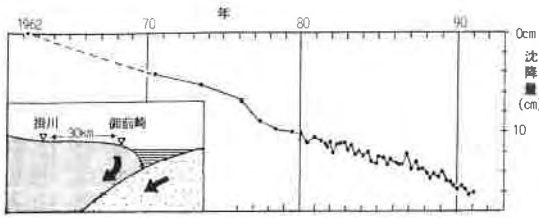
地殻変動の観測は従来「測地測量」と「連続観測」によって行われてきた。相互に見通しを確保した三角点(地上標石)どうしの角度(三角測量)や距離(三辺測量)の測定、道路に沿って標尺と水準儀を用いて行う水準測量などが(後述の宇宙測地に対して)地上測量と呼ばれる測地手法である。国土地理院は全国を覆う通常の測量の他に、地殻変動のなりゆきを把握するために特定観測地域ではより頻繁な測量も行っている。一方連続観測は地下のトンネルに土地の傾きや伸び縮みを検出するためのセンサー(傾斜計や伸縮計等)を置いて、そのデータをテレメータで離れたところから常時監視するものである。

連続観測は器械の読みとり精度が極めて高く、地殻活動を絶え間なく見張ることができるという利点を持っているが、気圧変化や雨降りなどによる局地的な擾乱に弱くデータの解釈が難しい。その点測地測量は広域的な歪みをとらえるのに適しているが、測点間に相互の見通しが必要なので数十キロより短い距離でしか使えない。そのため距離が長くなると個々の測量の誤差が溜まって大きくなってしまふ。また作業の性格上ある程度以上頻繁な測量は不可能であり、地震の直前予知には不向きである。

3.4 宇宙測地による地殻変動観測

1980年代半ばに本格的に実用段階に入ったVLBI(超長基線電波干渉計)、SLR(衛星レーザ測距)、GPS(汎地球測位システム)等の宇宙技術を用いた測地手法は、従来の地上測量に対して「宇宙測地」と呼ばれる。これらはいずれも相互の見通しを必要とせず、数百キロから数千キロといった長距離を仲介なしに一気に測位できるため、長距離でも誤差が累積せず連続観測なみの高い精度を保持する。特にVLBIとSLRは距離に比例する誤差成分がほぼ無視できるので大陸間の相対測位によるプレート運動などの測定に威力を発揮する⁽⁶⁾。

さらに宇宙測地が地上測量以上に局地的ノイズに強いことは以下の事例からわかる。東海地震予知のため、静岡県中部の掛川市から御前崎近くの浜岡町に至る測線で水準測量が毎年数回実施されており、掛川に対して浜岡が年間4~5ミリの割合でじわじわ沈降してゆく様子をはっきりとらえられている(第5図)。これは地震間に地殻歪みが溜まる過程をとらえた顕著な例であるが、昭



第5図 国土地理院によって掛川から御前崎にかけて行われて
いる水準測量の結果（溝上⁽²⁾より転載）。

和19年の東南海地震の経験からは、来るべき東海地震の直前にはこの沈降が鈍りさらに隆起に転じて地震が発生するというシナリオが予想される。

一昨年秋からそれまで続いていた御前崎の沈降が鈍り、東海地震の前兆ではないかとの心配が生じてきた。国土地理院はその真相を解明するべくネットワークを静岡県東部に延長して測量したところ、「基準」としていた掛川の沈降が増加したため相対的に御前崎の沈降が鈍化したように見えただけであることが判明した（1993年11月22日朝日新聞記事）。このように地上測量網でも数十キロの範囲の相対変位だけを見ていると大局的な変動状況を誤認するおそれがあり、遠方の基準点を用いてより広い地域の地殻変動を把握できるのが宇宙測地技術の大きな利点である。

宇宙測地は高精度という連続観測の利点と局地ノイズへの頑健性という地上測量の利点の両方を兼ね備える。また宇宙測地観測は一般に従来地上測量より簡便なため（ただし初期の施設整備は別）、高い頻度でデータを取得することができ、態勢を整えれば準連続的な観測も可能である。近年建議が行われた第七次地震予知計画では今までにない宇宙測地の重要性が強調されており、地震予知における宇宙測地技術への期待の大きさを示している。

4. 首都圏直下地震

東京を中心とする首都圏地域には日本人の四人に一人が住み、良かれあしかれ政治経済の機能が集中している。高度情報社会の発展と共に国際都市としての機能を持つ東京がひとたび大地震に襲われると、影響は国内に留まらないだろう。首都圏を中心とした南関東地域では地震予知への社会的要請が極めて強いため、地震予知計画でも東海地域とならんで「観測強化地域」に指定されている。

歴史的にみて幕府が江戸に移されて四百年弱の間に東京で震度Vの強震以上を記録した地震は40回近いという（うち6回が震度VIの烈震、第1表）。平均すると十

第1表 東京（江戸）において過去に震度VI（烈震）を記録した地震（国土地理院⁽³⁾による）。

年	M	型	備考
1615（慶長20）	6.4	直下型	
1649（慶安2）	7.1	直下型	武蔵大地震
1703（元禄16）	8.2	海溝型	元禄地震
1855（安政2）	6.9	直下型	安政江戸地震
1894（明治27）	7.0	直下型	東京地震
1923（大正12）	7.9	海溝型	関東大地震

年に一回の割合であるが、これを意外に多いと我々が感じるとしたら、それは大正12年の関東地震以来首都圏では地震活動が静穏であったためである。一般に直下型地震の活動には消長があり、過去70年は「静穏期」と位置づけられる。裏を返せば今後首都圏が地震の活発期に入ると震度V以上の被害地震の発生頻度が高まってくるわけである。これを見越して中央防災会議では南関東における直下型地震の発生が20年以内と予測、震度VIの被害地震となる可能性があるとして対策を進めている。事実1985年10月に茨城・千葉県境で発生した地震により関東地震の余震活動が終息してから56年ぶりの震度Vの強震が東京で記録されたが、そのわずか7年後の1992年2月には浦賀水道直下で発生した地震が再び東京で震度Vを記録した。

直下型地震の活動の消長は地殻内部の歪みの溜まり具合に起因する。関東地震や東海地震のような海溝で発生するプレート間地震は百年から数百年という周期でかなり規則正しく発生する。このとき海溝の陸側での歪みは、地震直後の解消された状態から地震直前の限界近くまで溜まった状態に向かってゆっくり進行し、地震で再び解消されてふりだしに戻る。歪みが溜まった状態、すなわち海溝型地震直後より直前のほうがプレート内部での破壊、すなわち直下型地震が発生しやすいわけである。関東地方で言えば大正12年の関東地震で南関東の歪みが解消された後、百数十年後の次の海溝型大地震に備えた地殻歪みの蓄積が着実に進行しているわけで、首都圏での直下型地震がこれから活発期を迎えるという予測の根拠もそこにある。関東地震のひとつ前の海溝型大地震は元禄地震（1703）であるが、事実その地震の後しばらくは平穏期が続き、70年程たつと地震が増えだし、さらに70年たつと直下型の被害地震が頻発して関東地震につながったという⁽⁷⁾。

首都圏直下地震は起こる深さによって五つのタイプに分けられる⁽⁸⁾。地表近くの活断層が動いて発生するのがタイプ1であり、狭い意味での直下型地震である。首都圏で知られている荒川断層や立川断層などの活断層は活

動度が低く、歴史的にこのタイプの地震はあまり知られていない。次にフィリピン海プレート上面で発生するタイプ2の地震である。東京直下では40キロ程の深さであり、首都圏直下型地震の本命がこれである。幕末の江戸に大きな被害を与えた1855年(安政2年)の安政江戸地震もこの仲間である。その下にも、フィリピン海プレートそのものがこわれて発生するタイプ3、その下の太平洋プレート上面で発生するタイプ4、太平洋プレート内部がこわれるタイプ5とつわものが揃っている。しかしこれらの震源は比較的深いため、明治27年の明治東京地震のように、かなりの被害をもたらすことが予測されるにも関わらず、前兆地殻変動が地表で見えることはあまり期待できない。

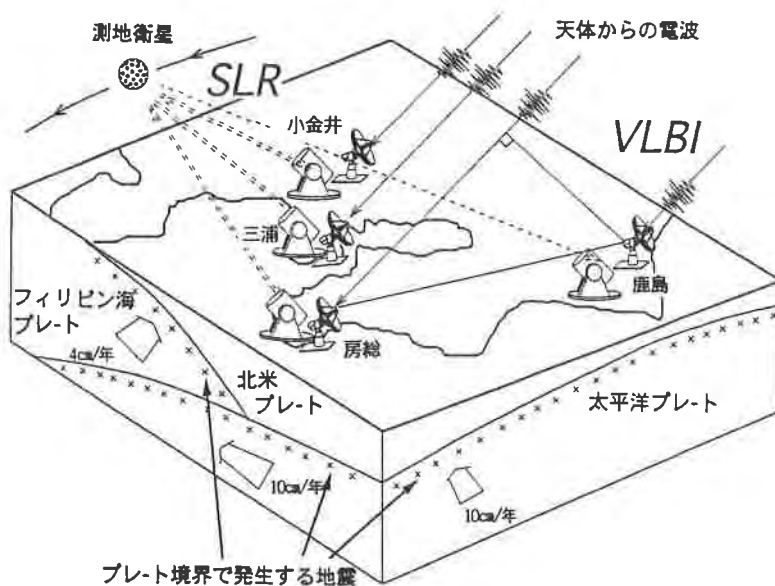
5. 首都圏直下型地震は予知できるか？

5.1 地震予知の可能性

地震予知は科学的にまだ確立していないだけでなく、予知そのものの可能性についても悲観的な見方をする研究者は多い。事実地震発生「後」にふりかえて地殻変動連続観測の記録等を探すと前兆があったという例は枚挙にいとまがないが、国内では実際に直前予知に成功した例はない。このように一向に先が見えない地震予知計画に対して、計画自体を見直すべきだとする意見もある⁽⁹⁾。しかしこれは我々が「どこがどうなるとどんな地震がおこる」かを知らない、すなわち地震予知がまだ「理屈」と「経験」に裏付けられていないために他なら

ない。一般に科学は観測(経験)と理論(理屈)が互いを刺激することによって進歩する。地震予知の進歩が人々の期待に反して遅いのは、前兆が観測されそうな大地震の発生頻度が最も多い地域でも百年に一度程度と(台風等の他の天災に比較して)低いためであり、必ずしも研究者の努力不足や能力不足とは言えない面がある。ましてや今我々が持っている知識だけで地震予知が不可能だと断言する根拠はない、地電流の観測では明るいニュースもあるようである⁽¹⁰⁾。

最近の大地震である日本海中部地震や北海道南西沖地震にしても十分な観測態勢が整っていない場所で発生した地震であり、多くの犠牲者の発生にも関わらず、また地震前兆を観測できる絶好の機会であったにも関わらず、地震の直前予知に関しては我々の知識に貢献していない。科学的予知の確立に重要なことの中でも積極的な努力が必要なのは地震前兆の「信頼性の高い」観測事例の蓄積だと思われる。それも地震前に歪み計が特異な変化を示したという類のものではなく、震源に近い測位点が地震の時の動きと同じ向きにじわじわと動きだしたといったような、地震との因果関係にある程度納得いくようなものでなければならない。この点字宙測地による地殻変動観測は今まで得られなかった新しい前兆像を我々に見せてくれそうである。良い前兆例さえそろえば、自然発生的に多くの地震研究者によって地震前兆発生理論が育ってゆき、かつ前兆観測のカンドコロもわかって事例も増えて行く、すなわち地震予知が科学として進歩してゆく



第6図 通信総合研究所で整備が進められている首都圏広域地殻変動観測システム 首都圏を囲む4地点でVLBI, SLR観測を連日行うことが予定されている。

のではないだろうか。

5.2 首都圏直下地震の予知

本来地震予知に備えた観測体制が整えられているのは地震発生の可能性が高い地域であるはずだが、これまでの我々の経験からはこのような地域で前兆検出に適当な地震が発生する確率は低いと言わざるを得ない。従って現在の観測体制で前兆例を蓄積して予知を科学として立ち上げるのは結構気の長い話ではある。少なくとも予知計画で特定観測地域に指定されている場所だけでも、また可能なら世界中の地震が起こりそうな数多くの地域に東海地域なみの体制を整備することによって予知科学の進歩は加速されるだろう。これは大変な事業ではあるが、日本の予算規模と事の重大性を考えると不可能とは言えない。現に国土地理院によって日本列島 GPS「敷き詰め」計画が既に動き出しており、これは国内の地震前兆捕捉の可能性を広げる大きな一歩となろう⁽¹¹⁾。地震予知科学の確立には、国の潜在力や国内での必要性から日本が寄与できる部分が大きく、これは国際貢献としても深い意義をもつだろう。

さて、首都圏直下地震は最大 M7 級であり、地震の大きさとしては海溝型地震よりずっと小さい。従って前兆も小さく、生じる範囲も限られている等予知にとって不利な条件がそろっている。要するに前兆が観測に全くかからずに突然地震が起こって被害が生じる可能性は東海地震などに比べると大きいわけである。ここでは通信総合研究所の「首都圏広域地殻変動観測システム」という VLBI と SLR による準連続地殻変動観測システム（第 6 図）や国土地理院の GPS による連続観測網などが立ち上がりつつある。それらの地震予知に関して、我々の世代で実用的な成果を見ることは必ずしも約束されたものではないが、南関東の複雑な地殻活動の理解には大きな助けになることは間違いない。

南関東地域が観測強化地域として観測体制が整備され

つつあるのは、地震の発生の確率もさることながら、被害の大きさからくる社会的な予知の必要性の高さが大きな要因である。予知への可能性が少しでもある限り我々に出来ることをする義務があるのは当然であるが、あまりにも東京への一極集中をもたらした「何でもかんでも東京」という風潮を改めることも、わが国を災害に強い国家とするためのもうひとつの根本的な処方箋であることも忘れてはならない。

参 考 文 献

- (1) 大竹政和, “地球は生きている”, 小峰書店, 1993.
- (2) 溝上恵, “大地震は近づいているか”, 筑摩書房, 1992.
- (3) 国土地理院, “地震とその予知”, 建設省国土地理院, 1988.
- (4) 力武常次, “地震前兆現象予知のためのデータベース”, 東京大学出版会, 1986.
- (5) 茂木清夫, “1944 年東南海地震の前兆的地殻変動の時間的变化”, 地震, 34, pp.557-588, 1982.
- (6) 日置幸介, “VLBI でみる地球”, 科学, 59, pp.316-319, 1989.
- (7) 茂木清夫, “地震—その本性をさぐる”, 東京大学出版会, 1981.
- (8) 岡田義光, “首都圏直下に発生する地震のタイプ分け”, 地震学会秋季大会予稿集, pp.69, 1992.
- (9) 青木治三, 安藤雅孝, 井田喜明, 岡田義光, R.Geller, 立平良三, 藤井敏嗣, “地震と火山噴火はどこまで予知できるか”, 科学, 62, pp.568-581, 1992.
- (10) 藤縄幸雄, “アメリカでのギリシャ式地震予知”, 科学, 62, pp.537-538, 1992.
- (11) 西修二郎, 今給黎哲郎, “GPS 電子基準点の構築”, 地球惑星科学関連学会 1994 年合同大会, 1994.