

# 地震 ジャーナル

17

1994年6月

- エッセイ 地震に備えて ●海老名香葉子  
プレートテクトニクスとは ●丸山茂徳——1  
Jアレー ●平原和朗——10  
VAN地震予知法 ●P.バロトウソス他 訳 上田誠也——18  
中央構造線は動くか ●伊藤谷生——27  
医療の地震防災対策 ●上原鳴夫——33  
制震と免震の原理 ●小堀鐸二／坂本光雄——39  
ランドマーク・タワーは大丈夫だ! ●山崎真司——48  
解説 第7次地震予知計画 ●平澤朋郎——54  
解説 静岡県の第2次地震被害想定 ●岩田孝仁——57  
ノースリッジ地震から学ぶもの ●井野盛夫——62  
地震予知連絡会情報 ●本蔵義守——65  
●書評——69  
●ADEP情報——72

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

## 地震に備えて 海老名香葉子

「何しろ、立ってるどころじゃなかったのよ。生まれて一年の赤ん坊のあの子を胸に抱いた途端、その布団に箆笥が倒れてきたの。夢中で、おんぶして、逃げようとしたら、おじいさんがお隣の土蔵の下敷になったの、皆んなで、やっとの思いで連れ出して、戸板に乗って、上野の山まで逃げたの、三の輪から。そりゃ、口では云えない、地獄、地獄だったわねえ。」

よくよく姑が口にしていた言葉です。

折々に伝えてくれる体験の言葉は貴重でした。

巷で、そろそろ東京に地震がある、と云われたしたのは昭和33年<sup>なか</sup>半ば、その頃から我が家では、いざ、のときの心算<sup>つも</sup>りをしなくてはならない、と思いたったのです。

家を建てたときは、何しろ基礎だけは頑丈に、で鳶の頭が驚くほどに基礎工事、骨組だけは完璧にしました。

子供達が、3~4年生になった頃、寄ると地震の話となり、姑の体験の話を許に、こんなことをしたら、いい、これはどうか、と対策にふみ込み始めました。

あの日、西丸震也先生が偶然、お出下さった折のこと、人類学者の先生に子供達は地震のことばかり質問しました。

すると、先生が「日本は、どこでも地震が起きるんですよ。」

「地震のないとこ、ないんですか。」子供。

すると、「そんなに地震が怖いんだったら佐渡ヶ島へ行きなさい。あそこはない。だけど、子供だけで行ってられるかな。」

それを聞き、子供達の地震対策熱心が嵩じました。姑が協力。備えあれば憂いなし。小さな対策運動開始。そうしたら、夫が、みんな偉い！で誉め、リーダーとなりました。

リーダーは笛を持ち、ときかまわずに、ピーと鳴らすんです。

テーブルの下、よし！柱にかじりつく、よし！トイレの扉あけとかない、ダメ！これじゃ頭がやられるぞ、ダメ！1つ1つ採点をつけ、避難袋の中身チェック、3階からのロープ下降訓練、避難地点まで走る、この際、防災頭巾、革靴。9月1日前後は一層にピー。あまりのピーで家族中が少々ぐったりの矢先、地球の裏側で大地震のニュースにて、またまた子供達が意気込み、家族中で一生懸命防災にとりくんだのです。

あの家族の輪は、よかった、と思えてなりません。

もうあの頃ほどの避難袋じゃなくなりましたが、玄関に3つ置かれてあり、ヘルメット・水・懐中電灯・ラジオもです。

いざのときは自分の身は自分で守る。火を出さない。新建材ゆえに煙に注意、こんな事も普段家族が地震について真剣に考え話し合うことによってずい分違ってくと実感しているのです。

そして先日、町内会の地震対策集会に出席して、尚更地域での対策を考え、かつ個々に憂いなし、を实行したいと思ったのです。

[えびな かよこ エッセイスト]



# フラームテクトニクスとは

地球の断層写真を読む

丸山茂徳

地球の内部はどうなっている？

航空機の発達によって、私たちは、地球のほとんどのところへ短時間で行くことができるようになったし、人工衛星が捉えた映像によって、地球上の津々浦々の入り江の形や植生までも、手に取るように見ることができるようになった。

そういう時代になっても、地球内部のこととなると、38万km先の月の表面ほどもわかっていない。地球の内部は、地球最後の未踏の地といえる。

もちろん、世界中の研究者が、しのぎを削っているのは言うまでもない。最近、海洋科学技術センターの無人探査機「かいこう」が、最新のロボット技術を携えて“地球の内部をのぞく窓”であるマリアナ海溝（水深約1万9百m）に挑んだが、観測装置の不意な故障によって、目標達成の目前で涙を飲んだ。高圧と暗黒が探査を阻む。

また、地殻を構成する物質を直接手にする方法として、石油採掘、あるいは純粋に科学的な目的のために地殻を掘削する研究も行なわれてきている。ロシアがその最深記録をもっているが、それもせいぜい地下13kmまでのことで、半径6400kmの地球のほんの表面と言っていい範囲だ。

かつて、地殻の薄い海洋底に穴を開け、直接マントルまで掘り進もうという、アメリカの「モホール計画」があった。最近では、関東地方の下に沈み込む3枚のプレートを串ざしのようにぶち抜こうという「ジャッジ計画」も注目を集めている（浦辺、1993）。400℃を超えるとストップせざるをえない現在の掘削技術では“夢のまた夢”のようなジャッジ計画ではあるが、人類の知的好奇心はどん欲である。

地球をスキャンする

そんな中で、今まで地道に続けられてきた地震波の観測データが重要な意味をもってきたのである。これが宝の山だったのだ。

地震波がその場所を進む速度の違いは、構成鉱物の種類と結晶構造が大きく変わる、上部マントルと下部マントルとの境界面（670km）のほかは、ほぼマントルの温度の違いで決まってくる。低温の場所ほど地震波の速度は速いのである。地震波速度の地域的な不均質は以前からわかっていたが、地球内部全体を三次元的に捉え、その不均質を説明する方法を私たちは持っていなかった。

ところが、医療の分野では、CTと呼ばれるコンピュータ断層撮影が一般的に行なわれるようになってきた。人体を輪切りにした断面に対して、さまざまな角度からX線を当て、透過しやすさの違いを、コンピュータを用いて再構築し、映像化する撮影法である。この方法により、人体を傷つけなくても、内部の様子が詳しくわかるようになった。

これと同じ原理で、地震波を使って、地球に潜ることなく、地球の内部をのぞこうというわけだ。これが地震波トモグラフィーという手法である。ボーリングが外科的診断なら、地震波トモグラフィーは、X線科の診断というわけだ。CTのX線は人工的に当てるが、地震は世界各地で発生し、CTの検出器に当たる地震計が克明にそれを記録している。

世界中の地震観測所で長年集められた大量の地震データを大型コンピュータで処理することによって、地球の三次元地震波速度分布が出る。これは即、地球の三次元的な温度分布でもある。初期

の頃の地震波トモグラフィーは、浅い部分のものであったが、最近の名古屋大学グループの地震波トモグラフィーは、全マントルを映し出すという画期的なものである (Inoue et al., 1990; Fukao, 1992)。まさしく、地球の断層写真だ。これは誰でも見ることができるが、今度はその地球の断層写真を“読む”技術、“読みこなす”読解力が必要になってくる。

### ブルームが見える！

名古屋グループのモデルを、日本ーハワイー太平洋中央海嶺ー南米大陸南部ーアフリカ大陸南部ーインドを通るような大円でまっぶたつに切った断面図を見てみよう (図1)。黒い部分と白い部分に注目してもらいたい。黒い部分は、地震波速度が速く、温度が低い。白い部分は、地震波速度が遅く、温度が高い。これがブルームだ。

ブルームとは、マントル層の中にある、まわりより高温あるいは低温のマントルの塊をいう。1個1個のブルームはほぼしずく状で、高温のホットブルームはマントルの中を地表に向かって上昇し、低温のコールドブルームは核に向かって落ちて行く。ブルームのしずくが次々に上がり、あるいは落ちていく場所に上昇流・下降流ができる。とくに太くて長い流れを超ブルームと呼ぶ。

図1では、ホットスポットで知られる南太平洋のハワイの下のあたりと、活発な火山活動で知られるアフリカ南部の2カ所に大規模な高温域つまり上昇流があるのが見える。また、日本海溝の斜め左下に向かって大きな下降流が見え、中国の下まで伸びている。これは太平洋プレートの沈み込みを表している。これらの超ブルームの直径は約5000 kmにもなり、マントルの底からプレートにまで及ぶ2900 km長にも達する流れである。固体の中を動くわけだから、それは何千万年とい

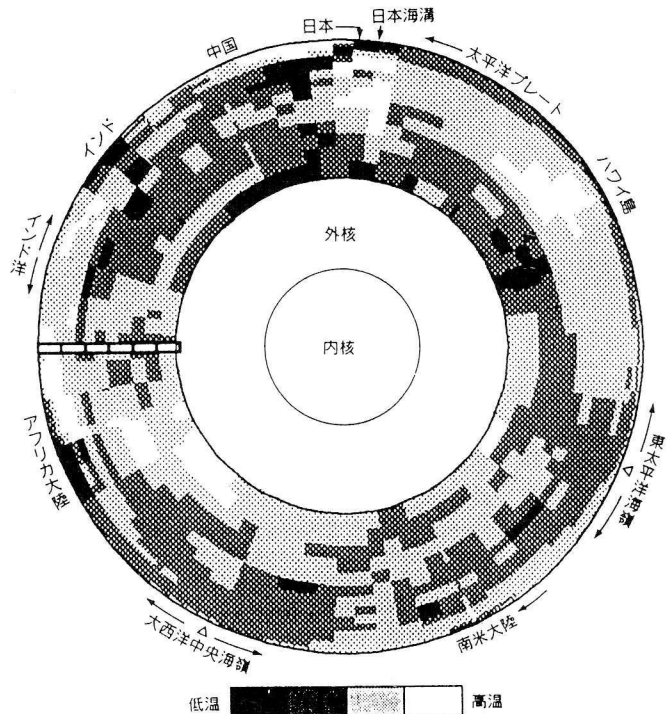


図1 地震波トモグラフィーによるマントルの画像 (名古屋グループによる; 井上, 1993)

日本ーハワイー太平洋中央海嶺ー南米大陸南部ーアフリカ大陸南部ーインドを通る大円で切った断面図である。黒い部分はマントルの低温部 (地震波の伝わりが速い部分)、白い部分は高温部 (地震波の伝わりが遅い部分)。

うスケールで動く。地球表層部のテクトニクスは、プレートが水平方向に動くことによって起きるけれども、プレートの下の世界は上下方向に運動するブルームでなりたち、マントル対流の実態は実はこのブルームだったのだ。

### ブルームが地球を支配する

プレートの下の様子がわかってくるにつれて、プレートテクトニクスが支配する領域は地球表層に限られることが明白になってきた。地球の大きさをリンゴに例えると、厚さ100 kmのプレートはリンゴの皮ほどの厚さでしかない。薄い皮のようなプレートの下の世界では、ブルームが物質の対流を支配している。核、ブルーム、プレートは、それぞれ別々の運動をしているのではなく、ひとつの体系の中で互いに拘束されながら運動してい

る。その体系は全地球テクトニクスとも呼ぶべきものである (Kumazawa & Maruyama, 1994).

地球内部でプレートテクトニクスが支配している領域は、プレートが沈み込むところでは深さ 670 km, プレートが生まれるところでは深さ 150 km よりも浅く、場所によっては地表も含まれる。しかし、これらより深いところでは径 5000 km もの規模の、円筒状の構造をもつ対流運動が地球のテクトニクスを支配しており、その範囲は地球半径の 8/9 を占めている。

このように、地球のほとんどの部分を支配している円筒状の対流運動によるテクトニクスを「ブルームテクトニクス」と呼ぼう。現在の地球は、南太平洋と南アフリカの下にある 2 つのホット超ブルームからの上昇流と、アジアの下にあるコールド超ブルームの下降流の運動が、地球の大局的な物質の対流を規定しているのである (Fukao et al., 1994, 図 2).

### 中央海嶺の下にホット超ブルームがない？

意外なことに、最大のプレートである太平洋プレートを生産している太平洋の中央海嶺（東太平洋海盆）の下には予想されるような大規模な高温領域がない。マンテル対流の湧き出し口だと思われる中央海嶺なのに、その下に高温領域はあることはあるものの、浅いもので、深部からの大規模な上昇流は、見あたらない。高温物質は海嶺の真下よりも、むしろハワイをはじめとするホットスポットの下の方が深いところまで続いている。

南太平洋ホット超ブルームの湧き出す場所は、

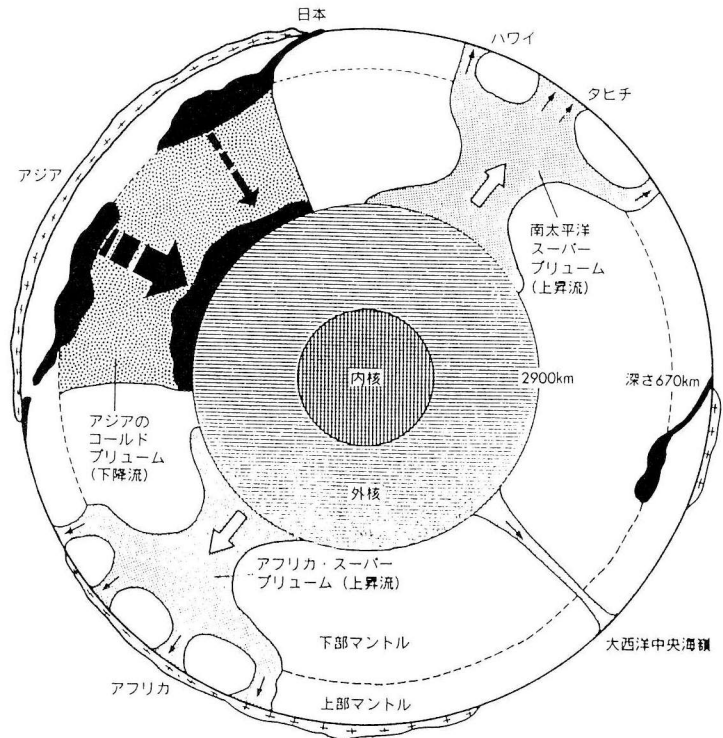


図 2 プルームテクトニクス模式図

地球内部には、2 つのスーパーブルーム（上昇流）と、1 つのコールドブルーム（下降流）がある。地下 670 km（上部・下部マンテル境界）より浅いところではプレートテクトニクスが働いているが、それより深いところではブルームテクトニクスがマンテルの運動を支配している。

もはや太平洋の中央海嶺ではないのだ。地震波トモグラフィーから見ると、南太平洋の超ブルームから枝分かれしたものが、いくつかのホットスポットへと湧き出していると思われる。

マンテル対流は、大陸の縁の海溝で沈み込んで、ぐるっと回って海嶺で湧き出すというような単純なものではないらしい。

### プレートテクトニクスは ずり落ちるテーブルクロス

実は、ホットブルームは、プレートテクトニクスを引き起こす「前半の主役」に過ぎないのだ。プレートが生まれ、海嶺からどんどん広がっていく大陸分裂の初期の段階では、確かに湧き出しが主役であり、深部からのブルームの上昇があった

のだろうが、いったんプレートの沈み込みが始まると状況が変わる。この沈み込みにプレート全体が引きずられ、海嶺からずると新しいプレートが受身的に引っ張り出される。太平洋の中央海嶺の下では、周囲よりも高温になっている部分があるが、これは、プレートが引きずり出される分ずつ、下の、より高温の部分からマントルが汲み上げられるための受身的なもので、中央海嶺の下のカーテン状の上昇流である。

沈み込んだプレートは670 km 深度にいったん滞留した後、落下してコールドブルームを作る。つまり、後半はコールドブルームへと主役が交代するのである。それは、テーブルクロスを引っ張ると、あるところからは自分の重さで勝手にずる落ちていくのと似ている。プレートは中央海嶺から長い旅をする間に、どんどん冷えて重くなっていく。機会があれば沈みたいというような状態になる。プレート相対運動の変化など何かのきっかけとともにプレートは沈み込み始める。そして、大陸のないプレートは大陸のあるプレートの下に沈み込む。大陸プレートは海洋プレートより密度が小さいからである。大陸のないプレート同士の衝突だと、年とったプレートが若いプレートの下に沈み込む。古いプレートは中央海嶺で生まれて長々と旅してくる間に冷やされて、冷却が進んでいる分、密度が大きいからである (Maruyama, 1994)。

太平洋のプレートは、もう沈み込みが主力の段階になっており、中央海嶺の場所自体も、沈むプレートに引きずられて、南太平洋ホット超ブルームの場所とずれてしまっている。アフリカホット超ブルームから生まれたプレートにはそれぞれ大陸が乗っているから、軽くて沈み込まない。大西洋に面したプレートは、まだ若くて湧き出しが主力であり、海嶺の下には深部からのホット超ブルームが見られる。

#### マントルの中を落ちていく プレートの行方を追って

プレートが沈んでいくとマントルの中が舞台に

なる。マントルの層は、主にカンラン岩でできていることに変わりはないが、地球中心に近づくほど温度と圧力が増すことによって、途中何度かマントル鉱物の結晶構造がよりコンパクトな形へと変化する。そのうち最大の変化が深さ670 km で起き、これより上を上部マントル、下を下部マントルと呼ぶ。上部と下部の性質の違いの1つは粘性である。上部マントルはよりサラサラしていて、下部マントルはドロリとしている。沈み込んだプレートは、周りのマントルより冷たく、固く重いから、上部と下部の境界付近までは板状のまま進んでいける。しかし、そこでプレートは、ドロリとしてもっと密度の高い下部マントルに入り込めないで、せき止められてしまう。しかも、地下670 km で起きる化学変化は熱を必要とする (Navrotsky, 1980) ので、温度が低いと起きにくい。沈み込んだプレートは低温のため、密度の高い状態に相転移しにくい。それでも周囲が高温なので徐々に相転移していくのだが、それによって熱を吸収されてしまうので、プレートの温度は遅々として上がらず、いつまでも低温のままである。結局、プレート物質は670 km ラインをなかなか突き抜けられず、長い間ここにたまっている。最終的に相転移が終わると、周囲のマントルと物質としては同じになるわけだが、サイズが小さいと落下することができない。しかし、後から後から送り込まれるプレート物質が相転移して一定のサイズ (許容量) を超えると、冷たい塊として一気にドサッとマントルの底に落ちていく (Honda et al., 1993, 図3)。このようにして、ある許容量を超えるプレート物質がたまるには、億年単位の時間がかかる。

地震波トモグラフィから、コールド超ブルームはアジアの下にあることが分かったが、この膨大な下降流のため、今の地球ではすべての大陸がアジアに向かって吸い寄せられつつある。巨大なブラックホールのようなものである。あと2億年もすれば、アジアを中心とした超大陸ができるであろう (Maruyama, 1994)。

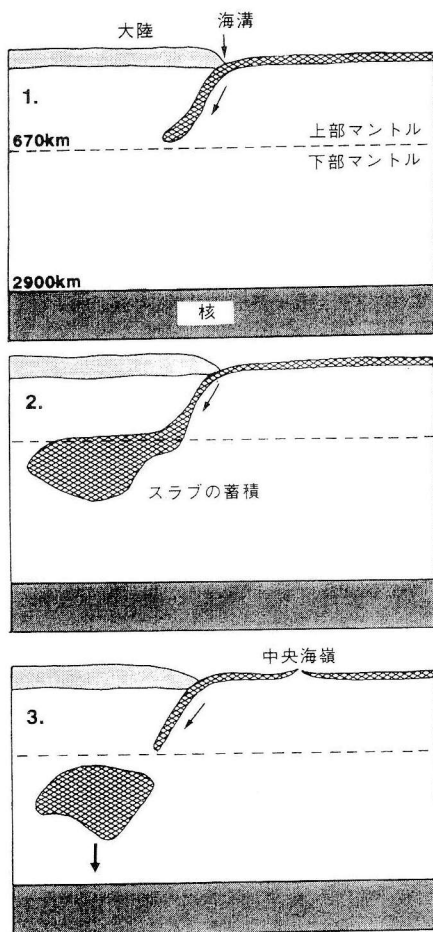


図3 沈み込んだプレートの行方  
沈み込んだプレートは、深さ 670 km でいったん滞留し、その後、崩壊して核の上に集積する。その時間スケールは 1~4 億年。

### 主役はコールドプルーム

核の上にコールドプルームが落ちると、核が部分的に冷やされ、外核に対流が起きる。この動きは外核が液体であるために、固体であるマントルの動きに比べると、ごく速い動きである。米国の研究者たちの計算機実験で、核とマントルとの境界面にちょっとした温度の不均一があると、そこからホットプルームが発生することがわかっている。コールドプルームはマントルの底の温度を不均質にするから、コールドプルーム近傍でホットプルームが励起されうるだろう。大陸の歴史を調

べてみると、ホットプルームの生まれる場所は、それに先立つ時代にコールドプルームがあった場所なのだ (Maruyama, 1994)。

つまり、プルームテクトニクスの原動力は地球の冷却にある。これを、風呂の冷却プロセスに例えてみよう。風呂を沸かしているときは、加熱により対流が起きる。次に火を消すと、水面近くの湯が冷めて底に沈み、その分、受動的に温かい湯が表層に上がる。これを繰り返しながら全体が徐々に冷めていくのである。地球も、核の形成が終わるまでの最初の 1 千万年を除いて、内部からの熱の発生が弱くなって外部からの冷却が主になったほぼ 46 億年の地球史を通して、地球のテクトニクスは冷却が主役であったであろう (Kumazawa & Maruyama, 1994)。

冷却が基本過程である今の地球では、下部マントルの中を落ちていくコールドプルームが主役であり、表層ではこれにプレートが引っ張られて動く。またコールドプルームの反作用で、ホットプルームが誕生し、大陸が引き裂かれる。

コールドプルームの核への落下の影響は地磁気にも及ぶであろう。地磁気は強まったり、弱まったり、向きが変わったりする。このように、コールドプルームを中心としたテクトニクスに、表層のプレートや、核のダイナミクスも支配されている。そういう観点で固体地球の表層から中心核までを 1 つのシステムとしてとらえ、全地球テクトニクスの枠組みを築こうとしている考え方が、プルームテクトニクスなのである (Maruyama, 1994, 図 4)。

### プルームテクトニクスで明らかになる地球の歴史のメカニズム

プルームテクトニクスは、現在の地球内部の様子を明らかにするばかりではない。現在を通過点として、誕生から未来(死?)までの壮大な地球の営みを、総合的に解き明かすことが、地球科学の大きな目的である。

プルームテクトニクスの考え方の導入に加えて、最新の研究、新技術のめざましい成果によって、

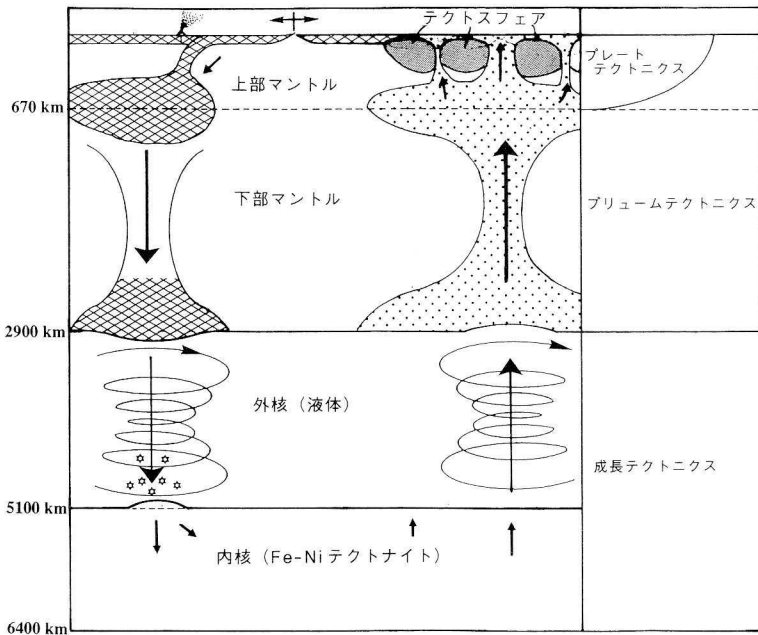


図4 全地球テクトニクス概略図 (Maruyama et al., 1994)

固体地球はプレートテクトニクスからなる表層部、マンツルの主部を占めるプルームテクトニクス、および成長テクトニクスからなる核でできている。それら三者の相互作用は 670 km 深度の熱境界層、2900 km 深度の物質境界層のおおのが持つ時間的不安定性に起因する。

地球の歴史は、急ピッチで明らかになりつつある。

### 「マグマの海」から 40 億年前にプレートができる

地球は、46 億年前、小惑星が衝突・合体を繰り返しながら成長したその創世期には、「火の玉」であった。表面はマグマオーシャン（マグマの海）で、地表までプルームが沸き上がっていた。

小惑星の衝突が次第に減って地球が冷え始めると、液体の水が存在できるようになる。そして、海が大量の炭酸ガスを吸収したため温室効果がなくなった。このため地球の冷却はさらに急ピッチで進み、マンツルの表面は固い板として振舞うようになった。40 億年前の、プレートの誕生である。

### 海洋が大陸を生んだ

地球内部では核の形成による熱が発生していた

から、マンツル対流（ホットプルーム）が表層に沸き上がっては冷え、次々に若いプレートを生んでいた。マンツルはカンラン岩でできているが、プレートを突き破って地表に湧き出すマグマの成分は、カンラン岩の成分の中でも溶け出しやすい玄武岩質成分である。こうして、プレートの上に厚さ約 20 km の玄武岩の地殻ができる。

この地殻は海水と化学反応し、結晶中に水分子を含む鉱物ができる。含水鉱物を含んだ海洋地殻を乗せたプレートは、後から後から生産される若いプレートに押されて移動し、海溝でマンツルに沈み込んでいく。

海洋地殻がプレートとともにマンツルに沈み込むと、含水鉱物を含んだ玄武岩地殻が約 20% 溶けてマグマになり、軽いので地殻の浅いところまで浮上して花崗岩を作る。いったん花崗岩地殻ができ始めると、マンツルより軽い玄武岩よりさらに軽いわけだから、永久に沈み込まず、どんどん蓄積、成長していく。海溝に沿った弧状列島の誕生である。

これに似た段階は、現在の地球上でも見られる。西フィリピン海のような状態である。大陸のないフィリピン海プレートの下には、同じく大陸のないプレートである太平洋プレートが沈み込んで伊豆・マリアナ島弧ができている。伊豆・マリアナ島弧では 40~30 億年前の地球と似た営みが行なわれているのである。

また、19 億年以前にできた造山帯を詳しく調べると、それらは数個の弧状列島が衝突、合体してできたものであることがわかる。こうして島状列島が衝突・合体して次第に大きくなり、大陸が成長した。



つまり、海がプレートを生み、大陸を生んだのだ（解りやすい解説については丸山，1993を参照）。

### 1000枚のマイクロプレートがひしめく

さて、沈み込むとき花崗岩成分を放出してしまったプレートは、沈み続けることができなくなる。というのは、花崗岩成分は、地下深部の圧力を受けて高密度の鉱物に変わり、より地球深くへとプレートがさらに沈んでいく「おもり」となるべきものだからだ。

花崗岩成分を失ったプレートは逆に浮き上がり、当時形成された大陸地殻の下に張りついて、地下400 kmに及ぶ「テクトスフェア」という軽い物質の層を作った。これが今も大陸地殻の「浮き」となっている。

プレートが沈み込まない、ということは、マントル物質の対流は、上部マントルと下部マントルの二層対流に分かれていた、ということである。形成後、まもなく地球の内部は高温であったために、沈み込んだプレートは670 km深度に達する前に温められてしまい、670 km深度では低温のプレートの墓場を作ることがなかったとも言い替えられよう。プレートのサイズは、対流の径とほぼ対応するので、マントル対流が二層対流ならば、当時のプレートのサイズは、数百 km 規模だったろう。なぜならば、上部マントルの厚さは670 km であるからだ。そうすると地球表面には、約1000枚のマイクロプレートが、ひしめいていたことになる。

ところが19億年前、最初の超大陸・ローレンシアが出現した。これは北米大陸のほとんど、グリーンランド、スカンジナビア半島にわたるもので、オーストラリアや南極の東部もその一部であったらしい。ローレンシア大陸の大きさは3000 km 以上もあるから、19億年前から、地球は現在と同じような全マントル（一層）対流の運動を開始していたはずである。

これ以降、大陸は分裂と、衝突・合体を繰り返し、超大陸は15億年前（未命名の大陸）、10億

年前（ロディニア大陸）、7～6億年前（ゴンドワナ大陸）、3～2億年前（パンゲア大陸）にそれぞれ存在した。このように、約4億年ごとに、超大陸の形成と分裂が繰り返される現象は、指摘した学者にちなんで「ウィルソンサイクル」と呼ばれている。

大陸を乗せて衝突・合体を繰り返すほどのプレートは、数千 km のサイズである。プレートがこのように大型化した裏には、対流規模の大型化があるはずだ。

19億年前ごろになると、地球はかなり冷え、プレートは沈み込んでも容易には溶けなくなり、花崗岩成分を放出しなくなった。このためプレ-

### 『資料・日本の地殻水平歪』 限定部数複製頒布のお知らせ

本書は、国土地理院の承認を得て、同院の技術資料 F・1No.6 [日本の地殻水平歪] を、当財団が研究資料として研究者の利便を目的とし、その複製版を限定発行したものです。

ご希望の方々のために、下記のような実費頒布を致しております。お問合わせ下さい。

### 日本の地殻水平歪 国土地理院編

- 体裁 上製・証判 本文 133 頁 2 色刷  
付録 カラー歪図 2 編
- 頒布実費 [送料を含む] 20,000 円
- 申込先  
〒101 東京都千代田区神田美土代町 3  
財団地震予知総合研究振興会  
☎03-3295-1966 FAX03-3295-1996
- 郵便振替口座 東京1-109120

なお、限定部数のため、在庫も少数となりましたので、お問い合わせ下さい。

財団法人 地震予知総合研究振興会  
〒101 東京都千代田区神田美土代町 3

ト物質は最終的には上部マントルの底まで沈んでいくようになったと考えられる。つまり、現在の地球の、マントル全層にわたる対流様式が始まったのだ。マントルの厚さ=対流の径=約 3000 km は、現在の地球にある約 10 枚のプレートの平均的なサイズである。

### 「大絶滅」の原因は、超大陸の形成

ウィルソンサイクルの約 4 億年の間に、大陸の形成だけでなく、海水面の上下動、氷河の発達（地球気温の低下）、生物の大絶滅が起きる。その原因は海洋底拡大速度の変化であるとされる。

プレート運動が進むと、大陸が集まるとともに、その下にどんどんプレートが沈み込むが、これは深さ 670 km まで進むと下部マントルの「壁」に突き当たる。先頭がつかえるのでプレートが進みにくくなり、上部マントルのためにプレートが滞留し、その密度が大きくなるにつれて、プレート引っ張り力は弱くなる。したがって、中央海嶺でプレートが生まれにくくなって、海洋底の拡大速度が落ちる。

すると、プレートは海溝に向けてゆっくりと移動するようになり、ゆえに十分に冷やされる。したがって重くなるので、海洋底の水深は大きくなる。器（海盆）が深くなったわけだから、海水面は下がる。

また、この時期に巨大氷河が発達するのは、プレートの生産速度が落ちると中央海嶺から出る炭酸ガスが減り、気温が低下するからではないだろうか。氷河が発達すると水を陸上にため込んでしまうから、これも海水面を下げる原因になる。

生物の大絶滅は、一般的に海水面の低下とともに起きており、大陸棚の干上がりも影響している、といわれている。寒冷化も当然影響しているだろう。なぜなら 90% 以上が水でできる生物にとって、0°C 以下の気温は致命的なのだ。

さて、670 km ラインで通せんぼされていたプレート物質は、後ろから送り込まれる速度がダウンしたとはいえ、約 4 億年もの間、そこにたまり続けると、滞留できる最大許容量を超えて、一度にマントルの底に落下し（コールドプルーム）、核の上に積もる。

先頭のつかえが取れたので、海洋底の拡大速度

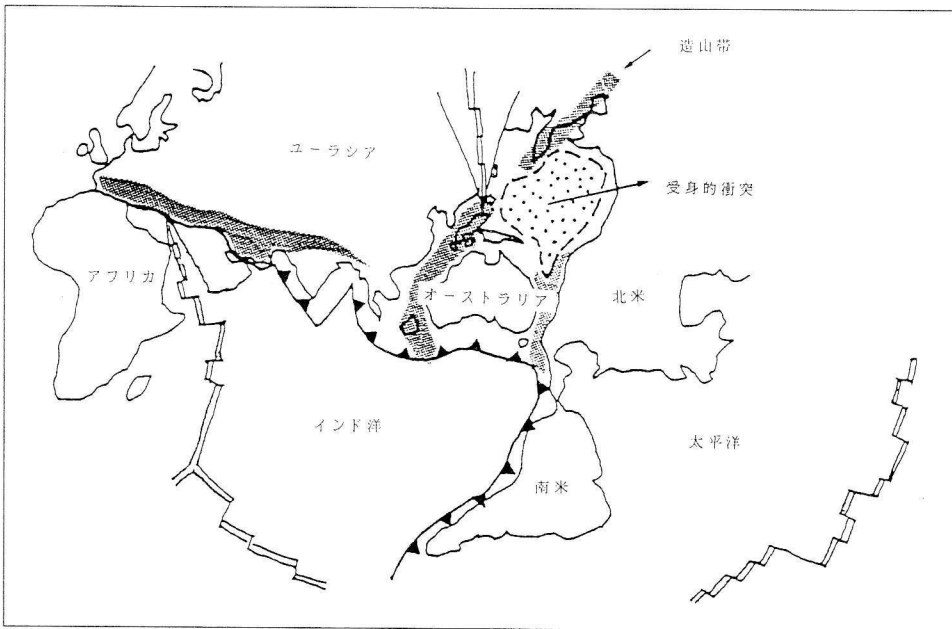


図5 2.5 億年後の超大陸 (Maruyama, 1994)

アジアの下のコールドプルームに引きずられ、すべての大陸がアジアに吸い寄せられ、超大陸が完成する。そのとき、大西洋が超海洋になっている。

は再び速まり、また、コールドプルームの下降流に対応して上昇流（ホット超プルーム）が発生する。この上昇流によって超大陸は破られ、また分裂していく。海洋底の拡大速度が回復したので、海盆は浅くなって海面は高まる。中央海嶺からの炭酸ガスの放出が盛んになって気温が上がり、氷河は解け、生物相は豊かになる (Maruyama, 1994)。

#### 次の超大陸は2億年後アジアを中心に

このように、プルームを持ち込むことによって、プレートテクトニクスでは現象としてしか扱えなかったウィルソンサイクルのメカニズムが、初めて理解できる。ただし、超大陸の最後のものであるパンゲアは、実は、その前の超大陸 Gondwana が分裂していく途中に出現した、見かけ状の超大陸、疑似超大陸である。超大陸の形成に要する時間は昔は4～5億年ほどであったが、現在はそのほぼ倍、約8億年を要するようになっている。これは地球が次第に冷えて、プレート運動の平均速度が、だんだん遅くなっているからだ。

アジアのコールド超プルームが生まれたのは約3億年前のことである。アジアはこのころに、10ほどの小さな大陸が次々に衝突してできた。その際、大陸と大陸との間にあった海洋プレートはすべてマントルに沈み込んだ。それらは数億年間、アジアの下670 km付近に滞留した後、コールドプルームになって核まで落下したらしい。このコールド超プルームに向けて、世界のすべての大陸が吸い寄せられるような運動がこのまま続くと、まず、5000万年後、オーストラリアが日本列島に衝突する。ハワイは東京に接近しているが、海面下に水没しているだろうから、残念ながらリゾートには向かない。

2億年後には、北米・南米大陸がアジアに衝突し、すでにアジアと合体済みのアフリカ、アラビア半島とともに超大陸が完成する (図5)。その

とき、今度は大西洋が超海洋になるわけである。そしてアジアの下からいずれ、ホット超プルームが生まれて、2億年後にできる超大陸を再び分裂させるであろう (Maruyama, 1994)。

#### 参考文献

- Fukao, Y., 1992, Seismic tomogram of the Earth's mantle: Geodynamic implications, *Science*, 258, 625-630.
- Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M. and Inoue, H., 1994, Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 4-23.
- Honda, S., Yuen, D. A., Balachandar, S. and Reuteler, D., 1993, Three-dimensional instabilities of mantle convection with multiple phase transitions, *Science*, 259, 1308-1311.
- Inoue, H., Fukao, Y., Tanabe, K. and Ogata, Y., 1990, Whole mantle P-wave travel time tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 59, 294-328.
- 井上 公, 1993, プリウムを証明する「証拠写真」, 最新・地球学, 97-104, 朝日新聞社.
- 丸山茂徳, 1993, 46億年 地球は何をしてきたか?, 岩波書店.
- Kumazawa, M. and Maruyama, S., 1994, Whole earth tectonics, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 81-102.
- Maruyama, S., Kumazawa, M. and Kawakami, S., 1994, Towards a new paradigm on the Earth's dynamics, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 1-3.
- Maruyama, S., 1994, Plume tectonics, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 24-49.
- Navrotsky, A., 1980, Lower mantle phase transitions may generally have negative pressure-temperature slopes, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 709-711.
- 浦辺徹郎, 1993, 地球に深い穴を掘る, 最新・地球学, 124-128, 朝日新聞社.

[まるやま しげのり 東京工業大学教授]

# Jアレー

## 日本列島超大規模群列地震観測網

### 平原和朗

#### はじめに

地球内部には多くの地震波速度不連続面が存在し、地球はこれらの不連続面を境としていくつかの成層構造に分けられる。大きくは、地球はモホ面、マントル-核境界 (CMB) といった地震波速度の大きな不連続を持つ面により地殻・マントル・核の3層に分けられる。さらに、マントルは深さ 660 km あたりの不連続面で上部マントルと下部マントルに、核は深さ 5155 km あたりの外核-内核境界 (ICB) で外核と内核に分けられる。グローバルに存在する不連続面のうち、速度コントラストの大きなモホ面、CMB、ICB はそこで構成鉱物の化学組成が変わっている化学境界と考えられ、深さ 410 km, 510 km, 660 km あたりに存在する不連続面は、ある構成鉱物の高温高压型への相転移によるものと考えられている。これらのグローバルに見られる不連続面の他に、ローカルに深さ 220 km, 2600 km あたりに不連続面がみえる場所がある。後者は CMB 直上の D" 層の上面にあたる可能性があり、今脚光を浴びてい

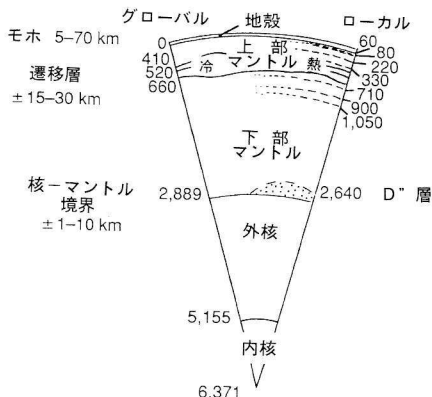


図1 地球の層構造と地震波不連続面 (Lay, 1992)

る。これらのグローバルおよびローカルに観測されている地震波速度不連続面は図1のようにまとめられる (Lay, 1992)。

1970年までの地震波速度構造の研究は主として、この成層構造モデル、すなわち1次元構造モデルの探求であった。1970年代中頃に始まったサイスミックトモグラフィーの研究により地球内部構造研究の主体は1次元構造から3次元構造の探求へと推移し、現在さまざまなスケールの3次元構造が明らかにされ、マントル対流などの地球のダイナミクスを理解する上で重要な役割を果たしている (Iyer and Hirahara, 1993)。しかしながら、サイスミックトモグラフィーは現在のところ、その空間的な分解能において限界を持っている。すなわち、長周期表面波および長周期実体波や初動走時をデータとする現在の全マントルグローバルトモグラフィーは波長 1000 km 以上の大規模な空間スケールの3次元構造しか分解できていない。細かな分解能を示すローカルトモグラフィーは地球の浅い部分の構造に限られ、深い部分の詳細な3次元構造はサイスミックトモグラフィーによってはまだ明らかにされていない。

さらに、現在のサイスミックトモグラフィーの多くは、滑らかに変化する地震波速度構造を仮定しており、速度が大きく変化する速度不連続面の深さが水平方向に変化している構造と速度そのものが水平方向に滑らかに変化する構造は区別できていない。

こういった数~数十kmスケールの微細な地震波速度不連続面等の構造は、やはり初動だけでなく後続波を含めた地震波形の詳細な研究から得る他に方法はないと思われる。

地震波不連続面に地震波が入射すると、P波からS波 (S波からP波) への変換波や反射波が生

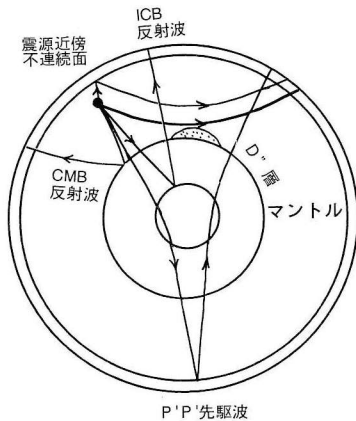


図2 地震波不連続面での反射波および変換波の模式図

じて(図2), 後続波として波形に現れる。地震波速度不連続面と述べたが, 詳細に見ると速度はある深さで完全に不連続的に変化しているわけではなく, ある厚さを持った遷移層内で変化している。この場合, 変換効率や反射効率は, 入射角や不連続層を挟んでのインピーダンス(速度および密度)コントラストだけでなく, 遷移層の厚さに対する入射波の波長に依存してくる。たとえば, ほぼ垂直入射をする場合, およそ遷移層の厚さの4倍以上の波長を持つ入射波に対してのみ反射波が観測される。このように色々な波長の地震波の変換波や反射波を調べるにより, 地震波不連続面(層)の詳細, すなわち, その遷移層の厚さや, 不連続層を挟んでの速度および密度コントラスト, そして不連続層の深さの水平方向の変化を捉えることができる。こういった地震波不連続面についての詳細な情報は, 高温高压実験データと照らし合わせることによって, 地球の組成と温度構造を知る重要な手がかりとなる。たとえば, 温度構造について言えば, 410 km および 660 km 不連続面はオリビーンスピネルおよびスピネル-ポストスピネル相転移によるものと考えられており, 高温高压実験データによれば, 相境界のクラペイロン曲線の勾配 ( $dT/dP$ ) は, それぞれ正および負となり, まわりに比べて温度が低い(高い)領域では, 410 km 不連続面の深さが上がり(下がり), 660 km 不連続面の深さは下がる(上がる)。このように不連続面の深さの変化は, 地

球内部の温度を測るいわば地球の体温計として使うことができる。

最近, 大量の長周期実体波波形を使って, マントルの不連続面の凹凸がグローバルに調べられている。例えば, Shearer (1991) の 660 km 不連続面のグローバルマッピングによれば, 沈み込むスラブの大陸側 1000 km に及んで不連続面が下がっている, と報告されている。こういった情報は沈み込むスラブの周りの温度構造ひいてはスラブの沈み込みのダイナミクスを考える上で重要である。

これに対して, 古くから行なわれている短周期地震波波形を用いた研究は, 長周期波形を用いた研究に比べ, 地震波速度の微細構造を捉え得る点で優れている。しかしながら, 不連続面が厚みを持つと短周期になるほど変換・反射効率が落ちてきて, 変換・反射波の振幅は小さくなりノイズに埋もれて, ひとつひとつの波形記録の上ではよく見えなくなってしまう。こいつの場合, 近接した地震観測点で得られた波形をうまくずらせながら(通常変換波や反射波は直達P波やS波とは到達時間だけでなく入射角または同じことであるがスローネスも異なって観測点に到達する。したがって, 隣あった観測点ではP波やS波との到達時間間隔が異なり, この時間差をうまく調節することにより)重ね合わせると, ノイズ部分は打ち消され, 変換波や反射波に対応するシグナル部分が浮き彫りにされてくる。この操作をアレー(群列地震観測)解析におけるスタッキング(波形重合)と呼んでいる。

世界に展開されたアレーは, 基本的には核実験探査を目的としたものが多いが, 地球深部の詳細な構造を調べる上で, 重要な役割を果たしてきた。世界的に有名なアレーとしては, ノルウェーのNORSAR, 米国のLASA, オーストラリアのWARAMUNGA があげられ, アレー解析に適するように地震観測点が配置されている。これに対し, 微小地震を観測するために配置されたいくつかの短周期地震観測網を連ねて大規模なアレーとみなし, 地球内部構造を探ろうとする試みが, 最近なされるようになった。これは従来の小さな

アレーを用いた研究と比べて大きな利点を持っている。すなわち、数千キロに渡って密に配置された地震観測点で得られた地震波形を並べ、フィルタリングや適当なスタッキングを行なうことにより、走時読み取り精度やスローネスの分解能を飛躍的に上げ、非常に弱い反射波などのシグナルを拾い出すことが可能になる。このように超大規模アレーは、宇宙の微細構造を探ろうとする天体望遠鏡や超長基線干渉計（VLBI）と同じように、地球内部の微細構造を探る、いわば地体望遠鏡の役割をする。実際、米国西部に展開された大量の地震観測点データを用いて多くの成果が挙げられている（例えば、Benz and Vidale, 1993）。

日本でも同様な試みが米国の計画とは独立に始められた。日本にも米国西部と同様に微小地震活動を捉えるために多くの短周期地震観測網が展開されている。この日本中に展開された地震観測網を連ねてひとつのアレーとみなし、地球深部の微細速度構造を調べようとするJアレー計画は、1990年頃から企画され、実際に1991年4月にその記録を取り始めた。財政的には苦しいが、なんとか今年いっぱいにはデータを収集する予定である。残念ながら、色々な理由でまだデータ収集段階にあり、十分な成果が得られているわけではないが、部分的なデータだけでもかなり面白い研究がなされつつある。米国西部のアレーに先を越された感があるが、Jアレー計画は全く独立に始められたものであり、これからその威力を発揮して、多くの優れた成果を生み出していくものと期待される。

ここでは、Jアレー計画の概要とデータ収集の現状、および期待される成果について、簡単に紹介する。

## Jアレー

日本には、地震予知計画に基づき、大学や各省庁の研究機関によって独立に展開された微小地震観測網が張り巡らされ、微小地震活動が監視されている。Jアレー計画とは、このように日本中に展開された独立の短周期地

震観測網をつないでひとつの超大規模アレーとみなし、地球内部の微細構造を探ろうとする計画で（J-Array Group, 1993）、重点領域研究「地球中心核」のプロジェクトとして始められた。これまで個々の地震観測網ではアレー解析が行なわれてはいるが、これらを結合したJアレーは過去のアレー解析をはるかに凌ぐ能力を持つ。つまり前にも述べたように、 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ に渡って200以上の地震観測点で観測された地震波形を並べ重ね合わせることによって、走時の読み取り精度およびスローネスの分解能が上がり、見えにくい小さなシグナルを拾い上げることができる。

Jアレー計画にデータを提供している機関として、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学（関東東海、和歌山、広島観測網）、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、および防災科学研究所、気象庁（最初：関東東海観測網、現在：九州、沖縄観測網）が、挙げられる。図3にJアレーの地震観測点配置を示す。この図からわかるように、Jアレーの大きさは北海道から沖縄まで約3000 kmの長さで、日本列島の幅方向に300

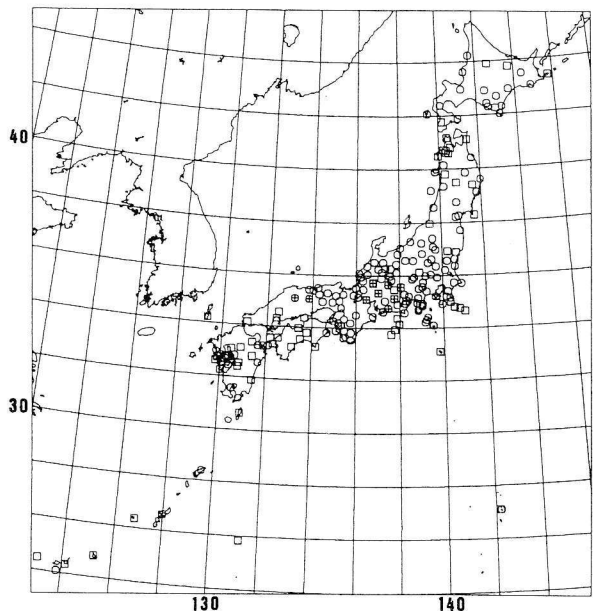


図3 Jアレー地震観測点分布  
○と□の記号は、それぞれ上下動1成分および3成分短周期地震計観測点を、また+は中周期地震計観測点を表す。



～500 km の長さを持ち、北東—南西方向の波線に対してスローネスについて、南東—北西方向の波線に対しては到来方向について高分解能を持つ。JアレーのJは日本のイニシャルJを意味するだけでなく、日本列島がJの形をしていることからもきている。

### Jアレー観測システム

前に述べたように、Jアレーは異なる観測システムを持ついくつかの観測網から成っている。また、観測網は微小地震を対象としたものであり、多くの観測網ではある基準でトリガーをかけた波形データのみを収録してきた。地球内部の不連続面での変換波や反射波は、初動からかなり時間がたつて到来する振幅の小さいものであり、それでトリガーされることは少ない。したがって、こういった信号を取り出すには、連続記録が必要とされる。また地球深部を伝わってくる波であるから、ある程度減衰を受けており、微小地震に必要なとされる高周波は含んでいない。したがって、サンプリング速度を 20 Hz に落とした連続収録システムが構築された（平野，1992）。システムは2台のパーソナルコンピュータと光磁気（MO）装置からなり、各観測網でのアナログデータを1台でデジタル化し、もう一台でMOに収録する。最大で30チャンネルのデータを圧縮された形で収録し、片面300メガバイトのMOに約4日分の連続データを収録できる。

データのほとんどは、固有周期1秒の短周期地震計の上下動成分であるが、30点以下の観測網では他の水平動2成分も含まれている。また、部分的には中周期の地震計によるデータが含まれている（図3）。

各観測網で収録されたMOは、京都大学防災研究所に設置されたJアレーデータセンターに郵送される。これらのデ

ータは編集された後、空MOは返送され、再度使用される。ほぼマグニチュード5.7以上の地震について1時間長データが保存される。

東北大学と東京大学の各ネットは独自の連続収録システムを持っており、データセンターの要請に応じて、1時間データを提供してもらうことになっている。

これらのデータはUNIXワークステーションに転送され、ワークステーションで解析可能な形で保存されることになっているが、膨大な作業量になるため、編集作業は遅れており、とりあえずJアレー収録システムで収録した全データのバックアップを8mm磁気テープに納めているのが現状である。

しかしながら、すでに1992年の5月までの代表的な60あまりの地震については編集され、各機関に配布されている。

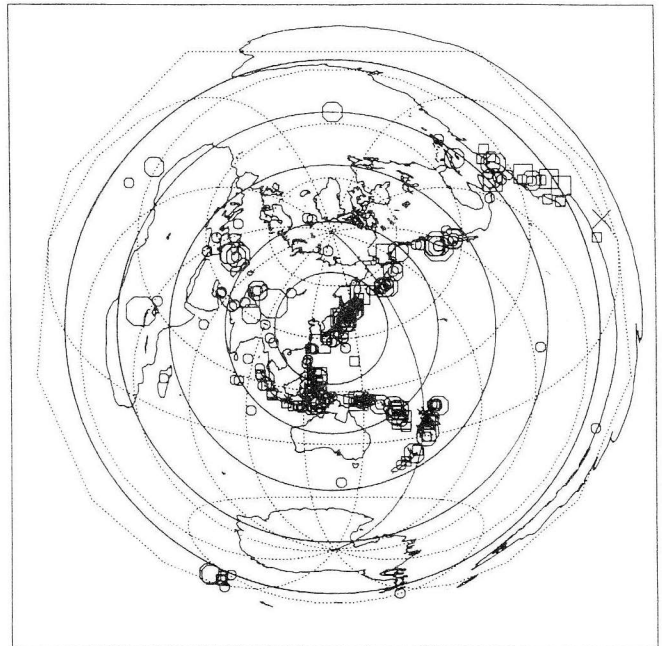


図4 Jアレーで収録された273個の地震（ $M_b \geq 5.7$ ，1991年4月～1992年10月）の分布  
Jアレーを中心とする正距正方方位図法で描かれ、地震の深さに応じて記号が変えられている。

0～33 km: ○, 33～200 km: □, 200～400 km: △, 400～600 km: +, 600 km～: ×

また、Jアレーからの震央距離は、30°から150°まで30°ごとの大円で表されている。

## 震央分布

図4に1991年4月から1992年10月までの期間に収録した273個の地震 ( $M \geq 5.7$ ) の分布をJアレーを中心とした、正距正方位図法で示す。この図からわかるように、震源分布は一様でなく、震央距離と到来方向が偏っている。したがって、Jアレーで調べることができる地球内部構造の領域も自ずと制限されてくる。

Jアレーから震央距離  $30^\circ$  以下の近距離では、多くの地震が日本周辺に、 $30^\circ \sim 60^\circ$  では、クリル〜アラスカ、ヒンズークシ、そしてインドネシアあたりに生じている。これらの地震からの記録は日本列島を中心とした沈み込み帯での上部マントルの速度構造の解明に役立つ。また、これらの地震からのマントルや核内の不連続面での反射波を詳細に解析すれば、これらの不連続面の微細構造の解明に役立つ。 $60^\circ \sim 90^\circ$  の震央距離では、フィジー〜トンガおよびカリフォルニアに地震が生じており、これらの地震からの記録は、D”層や沈み込み帯における上部マントル速度不連続面の微細構造の解明に威力を発揮する。 $120^\circ$  を越える震央距離では、中米から南米にかけて地震が発生しており、これらの地震からのJアレー記録は、核の構造を調べるのに有効である。通常、やや深発や深発地震は浅い地震に比べて、単純な波形をしており、深部構造の解析に適しており重要であるが、こういった地震は、北西環太平洋、ヒンズークシ、インドネシアや南米の沈み込み帯で生じている。

### Jアレーで 現在行なわれている研究

Jアレー計画はまだデータ収集段階にあり、限られたデータしか配布されていないが、以下の研究が始め

られている。一部ではあるが簡単に紹介しておこう。

(1) 地球中心核の構造 外核の速度がマントル最下部や内核の速度に比べ遅いことから、核内を通過する地震波は複雑な波線経路をとり、震央距離  $120^\circ \sim 180^\circ$  でコアフェイズと呼ばれる色々なブランチが存在する(図5)。これらのフェイズを丹念に読みとり、核内の微細構造を決定することができる。図5はJアレーで観測されたコアフェイズの例で、南米の地震からの波形例である。これらの走時を説明するために作られた北太平洋の核速度構造モデルで、スコチア弧からくる東インド洋下の核を通過する走時を説明できそうであるのは興味深い(Matsumura, 1994)。このようなコアフェイズのデータを集積して地球中心核のP波速度構造モデルおよびその地域性が明らかになるであろう。

小さな震央距離でのPKiKP波(ICBでの反射P波)の観測はICBの構造を探る上で重要であるが、その振幅が小さいため観測例が少ない。1992年5月の中国の核実験からのJアレーデー

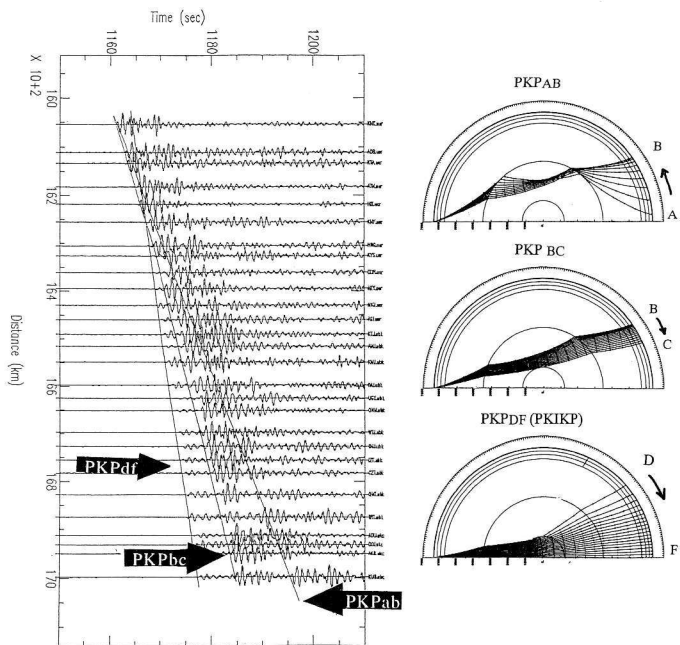


図5 コアフェイズのJアレー記録例(1991年5月南ペルー、深さ128 km、 $M_b=6.3$ ;  $0.7 \sim 1.5$  Hzのバンドパスをかけてある)と波線経路図

タをスタッキングすることにより、PKiKP 波が確認され、PcP の振幅と比較することにより、ICB での密度コントラストが推定されている (Yamada and Nakanishi, 1993). このような観測を積み重ねていけば、ICB 付近の水平方向の変化も含めた詳細な構造が明らかにされるであろう。

(2) D" 層の速度構造 J アレーで得られるトンガ・フィジーの深い地震からの波形を P 波から PcP 波の間でスローネスを変えてスタッキングしてやると、P 波と PcP 波の間に、D" 層の上部からの反射波と思われる小さな振幅を持つフェイズが現れることがある。まだ研究により結果が分かれているが (Shibutani et al., 1993; 森田・浜口, 1993; Yamada, 1994), 今後データを蓄積することにより西太平洋における D" 層内の速度構造が明らかにされるだろう。

また、近距離での PcP や ScP 波を解析して日本周辺の D" 層の上部にはあまり顕著な速度不連続面が無いと報告されている (Yamada, 1994).

(3) 上部マントル速度構造・速度不連続面 J アレーで観測されたトンガ・フィジーの深い地震で、P 波と pP 波 (一度地表で反射して観測点に到達した P 波) の間の部分にスタッキングによって P 波より小さなスローネスと大きなスローネスを持つフェイズが現れることがある。東北大学のアレーを用いた水田・他の研究 (1992) にもあるように、前者は震源を下向きにでた S 波が震源近くの深さ  $d$  km の不連続層で P 波に変換した SdP, 後者は震源を上向きに出た P 波および S 波が震源近傍の不連続面で P 波として反射した pdP, sdP 波と考えられる。660 km および 440 km 不連続面からの反射波や変換波が短周期 J アレーデータで観測されることから、両者ともかなり遷移層が薄いと推測される (Yamazaki and Hirahara, 1994). 日本での記録とカリフォルニアでの記録の比較からこれらの面の深さ分布も調べられている (Niu, 1994). SdP から深さ 920 km あたりに不連続層があると指摘されており (Kawakatsu and Niu, 1994), 上部マントルと下部マントルの境界に新たな議論を呼ぶ可能性がある。

地球の裏側で反射した P である P'P' の前に、裏側の地表に達する前に 410 km や 660 km 不連続面で反射した波 P'410 P' や P'610 P' が観測されることがある (例えば, Nakanishi, 1988). カリフォルニアのアレーでは、広い範囲で見事な記録が捉えられており (Benz and Vidale, 1993), 不連続面の水平的な連続性が議論されている。J アレーではまだこういった記録は捉えられていない。S/N は十分ある記録でも先駆波が現れないようである。J アレーを使っての P'P' の先駆波の研究を系統的に行なう必要がある。

クリル〜アラスカ、琉球〜台湾、伊豆マリアナで生じる地震を J アレーで捉え、20° 不連続を含む記録を解析しスローネスを精度良く押さえることにより、日本列島周辺の沈み込み帯での上部マントルの P 波速度構造 (水平方向の変化までも含め) の詳細を明らかにすることも、J アレーを用いた研究テーマとして有望であろう。また、日本列島下で発生した地震を J アレーで捉え、うまく処理することにより直接 410 km や 660 km からの反射波を捉えることができれば、日本列島下におけるこれらの不連続面の形状を直接描き出せるかもしれない。

これまで述べたアレー解析に限らず、J アレー記録を読み取れば日本列島下の上部マントルの 3 次元 P 波速度構造を求める走時トモグラフィーの強力なデータとなりうる。また、波形情報を用いれば、3 次元減衰構造を求める減衰トモグラフィーに重要なデータを提供すると思われる。

最後に、1991 年 6 月にサンチアゴでおきた深発地震について、初動到達時から地震発生後 1 時間の記録例 (5 秒のローパスをかけて後続波を見やすくしてある) を図 6 に示す。図には、標準走時表 (IASP91) にある様々な地震波フェイズの走時曲線を加えてある。このくらいの大きな深発地震だと、地震が発生して 1 時間くらいまで、色々な波線経路をとり地球を走り回ってきた地震波が観測される。このように観測された後続波を詳しく解析すれば、地球構造について新たな情報がもたらされる可能性がある。

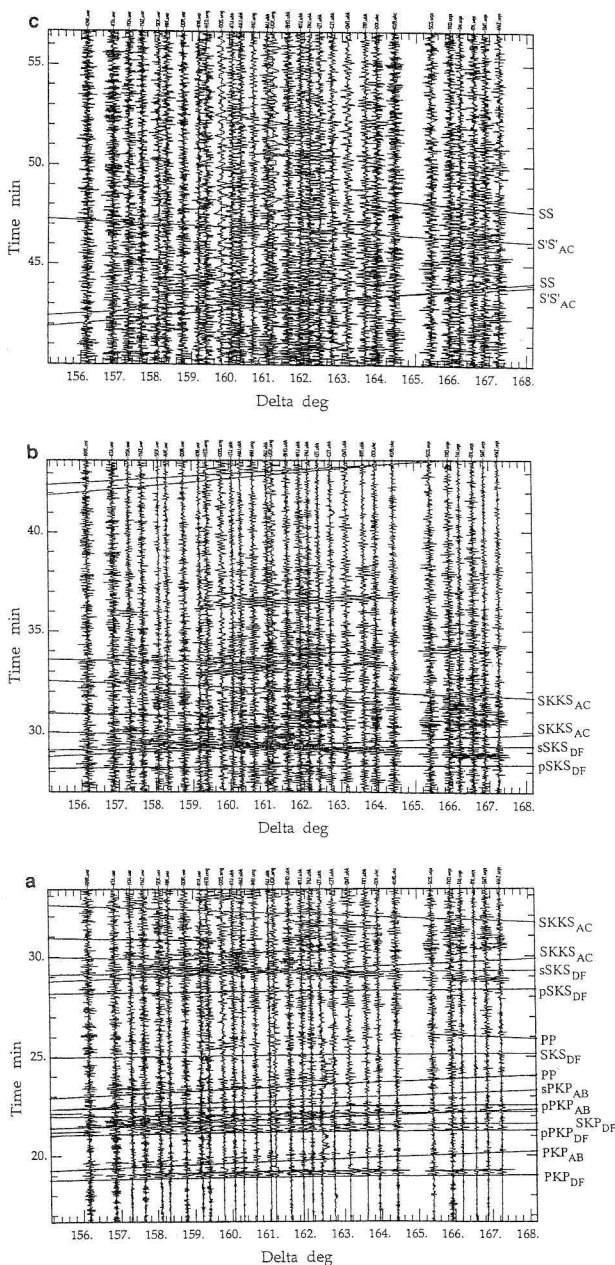


図6 Jアレーで捉えた1991年6月にサンチアゴで生じた深発地震(深さ581 km, Mb=6.4)記録は初動から発震時より1時間まで並べてある。

### おわりに

現在, Jアレーグループでは, 代表的な遠地地震の読み取りを行ない, 標準走時表と比較して, 各観測点の走時遅れをコンパイルしている。これ

は上に述べた色々な研究の基礎になるであろう。また, これまで配布されたデータを波形集の形で編集して配布する計画も進行中である。前に述べたように, これらのJアレーの地震波形記録は, 我々の想像もつかない情報量を持っており, 日本から世界へ発するような優れた研究を生み出す基本データであると期待される。また, 世界には北米・ヨーロッパにも同様とみなせる超大規模アレーがあり, Jアレーはこういった超大アレーデータと組み合わせて, 地球深部を探る新たな研究を切り開くこともできよう。

Jアレーは200点以上の観測点データからなり, その解析には大量のデータ処理を伴う。最初はパーソナルコンピュータによる処理を考えたのであるが, とても実際的な解析はできず, やはり大容量のハードディスクと高速のCPUを持つワークステーション無くしてはとても実用的なものになり得なかった。すなわち, 大量のJアレーデータを処理して優れた研究を生み出すには, 解析ソフトウェア・大容量高速コンピュータさらに波形合成などのシミュレーション技術の進歩が不可欠である。

いまや, ワークステーションを通して, 即時的にデータを利用できるシステムや, データそのものをCD-ROMに記録して大量データを配布するなどして, 世界に誇るデータとして利用しやすい形で提供する, ことを考えてゆく段階にきていると思われる。

残念ながら, Jアレーのデータ収集は今年で終了する予定であり, 実際, 色々なフェイズを研究するには期間が短かすぎるかもしれない。たとえば, カリフォルニアで見事なP'P'の先駆波が捉えられたといったが, P'410 P'については10年以上のデータセットの中で一つの地震にしか記録されていないそうである。色々な条件(地震の大きさ, 発震機構, 震源位置など)がそろってはじめて見えるフェイズもある

わけで、かなりの観測期間が必要であろう。幸いにも、現在、各微小地震観測網では収録方式の変更が行なわれており、連続記録が保存されるところが増えてきているので、Jアレー計画で目指したような地球深部の構造を探る研究は今後も可能で、ぜひとも継続していく必要があろう。

Jアレー計画は多くの研究者の協力と努力から成り立っている。日々のデータの保守およびデータを提供して下さる各観測網の研究者にまずお礼を申し上げたい。そして、予算の不足やデータセンターの力不足もあり、データ編集が遅れていることをお詫びしたい。

### 参考文献

Benz, H. M. and J. E. Vidale, 1993, Sharpness of upper mantle discontinuities determined from high-frequency reflections, *Nature*, 365, 147-150.

平野憲男, 1992, パソコンによる日本列島地震観測網の収録と波形処理, 京都大学防災研究所年報, 35, 401-412.

Iyer, H. M. and K. Hirahara (eds.), 1993, *Seismic Tomography: Theory and Practice*, Chapman & Hall.

J-Array Group, 1993, The J-Array program: system and present status, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 1265-274.

Kawakatsu, H. and F. Niu, 1994 Evidence for a 920-km discontinuity in the mantle, submitted to *Nature*.

Lay, T., 1992, Wrinkles on the inside, *Nature*, 355, 768-769.

Matsumura, Y., 1994, P-wave velocity structure of the core estimated from J-Array data, Master Thesis, Kyoto Univ.

森田裕一・浜口博之, 1993, 西太平洋下マントル最下部地震波速度構造(1), 地震学会予稿集, 331.

水田幸夫・森田裕一・浜口博之, 1991, Fiji 地域の 670 km 境界面, 地震学会予稿集, 189.

Nakanishi, I., 1988, Reflection of P'P' from upper mantle discontinuities beneath the Mid-Atlantic Ridge, *Geophys. J.*, 93, 335-346.

Niue, F., 1994, Examination and identification of mantle transition zone discontinuities:

comparison of Japan and US regional array data, Master Thesis, Univ. of Tokyo.

Shearer, P. M., 1991, Constraints on upper mantle discontinuities from observations of long-period reflected and converted phases, *J. Geophys. Res.*, 96, 18147-18182.

Yamada, A., 1994, Seismic wave velocity discontinuity in the D" layer: Western Pacific region, Master Thesis, Hokkaido Univ.

Yamada, A. and I. Nakanishi, 1993, The density jump across the ICB and constraints on P-reflector in the D" layer from observation of the 1992 Chinese nuclear explosion, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2195-2198.

Yamazaki, A. and K. Hirahara, 1994, The thickness of upper mantle discontinuities as inferred from short-period J-Array data, submitted to *Geophys. Res. Lett.*

[ひらはら かずろう 京都大学防災研究所助教授]

### ご 案 内

#### 地殻変動観測施設要覧の完成

- 内 容 北海道大学・東北大学・東京大学・名古屋大学・京都大学など国立11大学と気象庁・防災科学技術研究所・国土地理院など7つの公的機関を合わせて18機関が現在設置している地殻変動観測施設(観測所, 観測点観測線などを含む)は, 全国で211個所に及んでいる。この要覧は, これら地殻変動観測施設について, 第1部では各観測施設の位置を示す地理的情報, 第2部では地殻の歪みの蓄積や, 地盤の隆起・沈降・伸縮・傾斜変化などを測る計器に関する情報を中心に記述している。
- 体 裁 A4判 491頁 並製本
- 価 格 実費頒布 9000円(送料を含む)
- 申込先 〒101 東京都千代田区神田美土代町3 財団法人 地震予知総合研究振興会 『地殻変動観測施設要覧』 担当  
問合せ先 ● 電話: 03-3295-1966  
FAX: 03-3295-1996  
担当者: 事務局松本または茅野

財団法人 地震予知総合研究振興会



# VAN地震予知法

その基礎・方法・現状

P. バロツソス K. エフタクシアス M. ラザリドゥ

G. アントプーロス J. マクリス

訳 上田誠也

〈要約〉地震に先行する地球電場の一時的変化 (Seismic Electric Signals, “SES”) は、特定の場所でしか検出されず、しかも、個々のそれらの場所では特定の震源域からの SES しか検出されない (selectivity effect). SES の物理的性質を利用して、地震の震央、マグニチュード、発生時期を予知することができる。本稿では、地電流記録からのノイズ除去法、selectivity の物理的妥当性などに関して、我々がしばしば受けるいくつかの疑問に答えたい。また、最近7年間にギリシャで起きたもっとも被害の大きかった二つの地震活動に対する予知の成果についても述べる。

## はじめに

ギリシャで地球電場の地震前兆検出をめざす研究がはじめられたのは、約13年前である。開始の動機は、固体物理学、とくに格子欠陥の熱力学からの推論であった。それによれば、点欠陥あるいは線欠陥に伴う電気双極子を含む固体に徐々に応力がかかると、破壊の前に一時的電流が発生するだろうと結論された (Varotsos and Alexopoulos, 以下 V and A, 1986)。しかし、最近では、他の物理的モデルもいくつか提出されている (Dobrovolsky et al., 1989; Morgan, 1990; Lazarus, 1993; Slifkin, 1993)。

事実、地震前に持続時間 ( $\tau$ ) が0.5分ないし数時間の電場変化 (Seismic Electric Signal, 以下 SES) が検出された (V and A, 1984; 1987)。ただし、時には  $\tau$  が1カ月にもおよぶ Gradual Variation of the Electric Field of the Earth (GVEF) が重複してあらわれることもある (V and A, 1984; 1986)。

SES の振幅は、震央距離約 100 km, Ms 約 6.0 の場合で、10mV/km 程度だが、GVEF はそれより1桁程度大きいことがある。SES 発生から地震までの時間 (前兆時間,  $\Delta t$ ) は、孤立した SES と孤立した地震の場合には数時間から

2週間程度である。しかし、多数の SES が短時間の間に発生し (Electrical Activity [SES 活動] とよぶ)、それに続いて多数の地震が発生する場合には、 $\Delta t$  はもっと長くなることもある。SES 活動と地震活動の開始時間の差は2週間程度以内だが、最大 SES と最大地震との  $\Delta t$  は数週間となることもある (V and Lazaridou, 以下 V and L, 1991)。

SES の観測法、物理的性質、発生、伝播の理論的モデル等については最近詳論された (V, A and L, 1993; Nomicos and Chatzidiakos, 1993; Park et al., 1993) ので、本稿では、第1部で、VAN 法に対してしばしば発せられる疑問に答え、第2部では、最近7年間にギリシャで最大被害をもたらした地震活動とその予知について報告しよう。

## 第1部

1. テレメータ中にノイズを拾う可能性 地電位変化を実時間収録するテレメータシステムを要約すれば：各観測点で情報はデジタル化され、専用電話回線で、アテネ郊外 Glyfada (GLY) の中心観測点に伝送される。中心観測点では受信情報をアナログ化し、多ペン記録計に記録する (V and A, 1984)。システムの分解能は 0.1 mV で



ある。最近ではデジタル収録も併用されている。

このシステムは過去 11 年間連続稼働し、各観測点から 8 チャンネルのデータを収録してきた。通常テスト（送信データと受信データの一致の常時自動チェック）に加えて、最初 1 年間は現地記録も行なわれ、SES を転送中のノイズとする可能性は排除された。この点については、もう一つ独立な証拠がある。最近 2 年間は、4 カ所の遠隔観測点、IOA, ASS, KER, PIR（図 1）にデータロガーが設置され、現地収録されたデータは、1 日に 1 回まとめて公衆電話回線でアテネに転送されている。すなわち、全く独立の 2 方法でデータが送られているが、その両者の SES の間には全く違いが見られない（図 2 (a), (b) 参照）。図 3 (a), (b) は IOA 観測点での電極配置である。

2. 降雨の影響との区別 地電流観測における重要問題のひとつとして小嶋（1992）は、電極—土地間の接触抵抗の不安定性を強調した。しかし、降雨の影響などによるノイズは、各観測点で独立の電極を用いた複数測線観測をすれば、容易に認知できる（V and A, 1984）。この種のノイズは、通常独立の測線には同時には現われず、同時に現われることがあっても、その電位差変化は、 $(\Delta V/L)$  テスト（短基線）に合格しないからである。〈訳註： $\Delta V$  は電位差変化、 $L$  は測線長。この比が測線長によらず一定であるか否かのテスト〉

3. 地磁気誘導変化と SES の識別法 地磁気誘導による変化は 18 観測点すべてに同時に現われるので、それらを SES と誤認することはありえない（V and A, 1984）。SES はすべての観測点に同時出現することはないからである。もとより、電場と磁場が同時観測されている観測点では（図 2b）、伝達関数を用いる通常の方法で、地磁気誘導成分の除去が行なわれている（Hadjiannou et al., 1993）。

4. 人工ノイズと SES との識別法 この識別には、短測線網と長測線網の併用が必要である（V and A, 1986; V and L, 1991）。短長併用によって、近傍および遠方からの人工ノイズを両方とも識別できる。ここに近傍とは、短測線網の最大測

線長程度の距離、遠方とは短測線網から数 km までの距離を意味する。詳論はさけるが、小嶋（1992）の発言に「遠いところにソースがあるもの（ノイズ）はこのテスト（ $\Delta V/L$  テスト）に合格することは十分にあり得ることを彼らは知らないようである」とあるので、触れておこう。

まず、短測線、 $e_1w_1$  および  $e_2w_2$  の近傍に人工ノイズ源  $N$  があったとしよう（図 4）。この場合には、両測線に現われるノイズ強度は異なるだろうから、 $(\Delta V/L)$  テストによって、SES や地磁気誘導成分と識別される。

つぎに、遠方のノイズ源  $N'$ （既知）が短測線  $e_1w_1$ 、 $e_2w_2$  から数 km 離れた場所にある場合を考えよう。もとより  $N'$  からのノイズは両短測線にはほぼ同じ強度の電位差変化を生ずるだろう。しかし、このノイズは以下の方法で識別される。

- a)  $N'$  近傍に設置された短測線  $e_1w_1$  に現われるノイズ強度は、 $e_1w_1$ 、 $e_2w_2$  に現われるものよりはるかに大きい。
- b)  $E'N' \gg N'W'$  の条件を満たすように設置された長測線  $E'W'$  では  $e_1w_1$ 、 $e_2w_2$  とは逆極性を示す。これに反して、もっとはるか遠方の“地震”からの SES（地磁気誘導成分も）は上記すべての基線で同じ極性を示す。〈訳註：ギリシャの田舎ではノイズ源は数少なく、同定

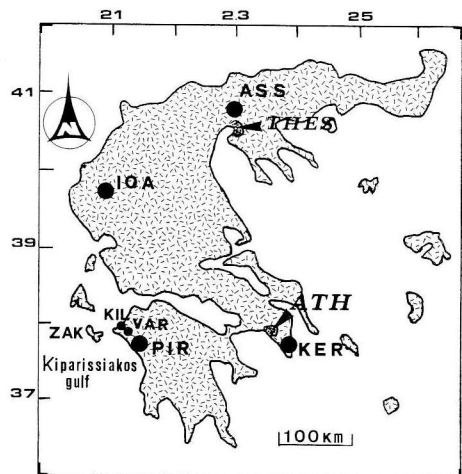


図 1 最近 2 年間、旧テレメータシステムと、新データロガーシステムが同時稼働している 4 観測点（IOA, ASS, KER, PIR）その他の地名は、本文参照。

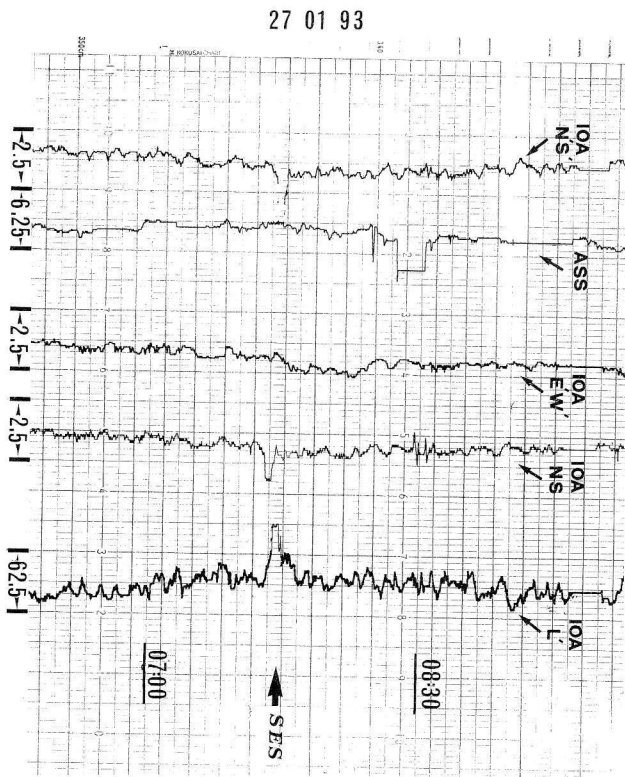


図 2 (a) 旧テレメータシステムにより、1993 年 1 月 27 日に記録された IOA 観測点での SES  
測線長: NS=100 m, N'S'=184 m, E'W'=50 m, L'=2.1 km, 測線配置は図 3.

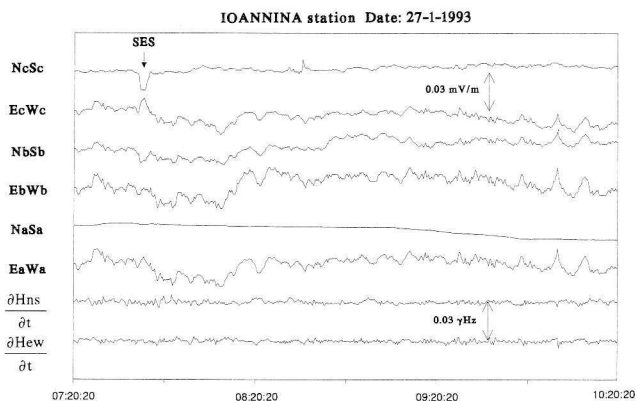


図 2 (b) 新データロガーシステムにより、IOA 観測点において現地記録されたおなじ SES  
下段 2 チャンネルは地磁気水平 2 成分時間微分値、他の 6 チャンネルは、a, b, c 地区 (図 3 (b)) での NS, EW 方向の地電位差. 第 5 チャンネル, NaSa は故障中. SES と付記してない変化は、すべて SES でないことが確かめられている. 他の記録についても同様.

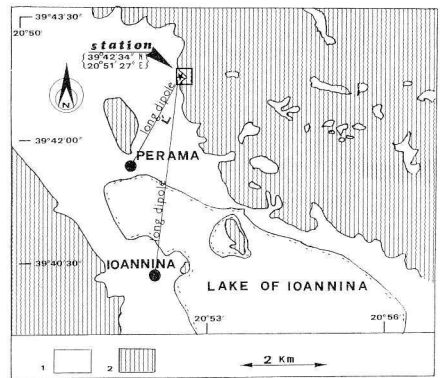


図 3 (a) Ioannina (IOA) 観測点での測線配置 (地質は D. Papanikolaou and E. Logos, 私信による)  
長測線; 1: 第四紀堆積物; 2: Ionian Unit の alpine formation (主として石灰岩).

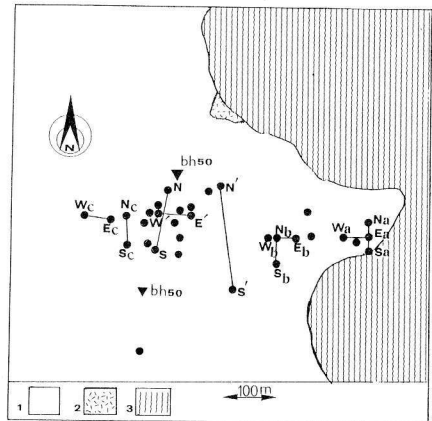


図 3 (b) 短測線 (図 3 (a) の四角枠の拡大図);  
1: 沖積層, 2: Ionian Unit のフリッシュ, 3: 同石灰岩.  
三角 (bh) は掘削孔.

しやすいようだ

5. 誰が, SES を有意義なシグナルと判断するのか? 以下の 4 条件すべてを満たす地電位差変動が SES であると判断される.

- 地磁気誘導による変動ではない.
- 短測線網において、直交 2 方向 (通常は東西, 南北) の各々で ( $\Delta V/L$ ) テストを満足する.
- 短長両測線に同時に出現する.
- 短測線, 長測線での極性が、はるか

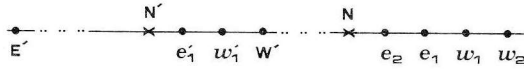


図4 近傍のノイズ源Nおよび遠方のノイズ源N'からのノイズを識別可能とする短測線・長測線の電極配置

遠方起源であることと矛盾しない。

これらを適用すれば、誰でも判断できる（次節参照）。現実にはアテネ観測点に在住するP. V.が、その責任を担当しているが、連絡のとれるメンバーや訪問中の外部科学者とも討議して行なうのが常である。

6. SES発生頻度の日変化 小嶋（1992）はまた、「かつて筆者は“SES”がノイズではないかチェックする有効な方法を提案したことがあったが、“それは解決済みの問題であるからその必要はない”とのことで、“SES”に関する情報の提供は拒まれ一蹴された」と述べている。これはSES発生頻度の日変化を調べよということだったと思われるが、この記述は不正確である。1991年3月、訪日時での討論の席での彼女の同趣旨の発言に対し、それはすでに調べたことを述べ、時間の関係上、詳しくは次の会合で話し合おうということになったと了解したが、そこには彼女は現われなかったのである。

この件については以下のようにまとめられよう。

- a) 日変化については既に検討がなされ、V and L（1991）に「日中に記録されたSESの数は、夜間に記録されたSESの数とほぼ等しい」と述べられている。
- b) これに必要なデータは、ある意味ではすでに公表されており、部外者でも調べることができる。アテネでの国際会議（1990年2月6～8日）では、それ以前の3年間にギリシャで起きた最大被害地震活動（Killini-Varthromio活動、 $M_s=5.5$  [1988年9月22日] および  $M_s=6.0$  [同年10月16日] を含む）および、それらのSES発生時を含む3カ月間（同年7月19日～10月19日）の連続記録のカラーコピーが出席者全員に配布されていたからである。これらの記録は、我々とは独立に他のグループ

によっても検討されているが、上田および長尾（私信）によれば、この期間のすべての通常のノイズレベルを超える“異常変化”（地磁気誘導成分を除く）の総数は338個に達し、その頻度は日中に有意に大きい。しかし、それらに上記の基準を課すると、主として3個のSES活動のみが残る。それはローカルタイムで同年、

8月31日 14h 25m～15h 10m,

9月29日 11h 50m および 17h 40m～22h 50m,

10月3日 03h 50m～05h 00m,

に発生したものであり、後述のように我々がKillini-Vartholomio地震活動のSESと認定したものと一致した。その発生時刻が日中とはかぎらないことは明らかであろう。

7. 選択規則（Selectivity） SESは地表上すべての地点では観測できない。SES検出に適した“ツボ”地点が存在する。しかし、そのような地点といえども特定の少数の震源域からのSESに対してのみ敏感なのであって、他の震源域に対しては（近傍であっても）不感である。この現象は選択規則とよばれ、震央予知に重要な役割を担っている。

ある“地点”についてSESを検出できる震源域を示す地図は、この地点のselectivity mapとよばれる。ある震源域が二つの遠くはなれた“地点”のselectivity mapに共通に含まれることもある。その場合SESはそれら2地点に同時に出現する。例えば、200kmもはなれたIOA, ZAK（図1）の2地点で同時に観測されたSES（Antonopoulos et al., 1993）などは、人工ノイズの可能性を否定するデータとしての意味も大きいだろう。

つぎに、小嶋のもう一つの主張、「この“ツボ”の概念がこれまでわれわれの目を曇らせてきた元凶である……。」について述べよう。確かに選択規則の正確な機構は未知ではあるが、以下のような物理学的考察が、その起源の理解にむけての助けになると考えられる：強度に不均質かつ異方的な固体内部の電源からシグナル（SES的性質を持つ）が発せられたとすると、表面での電場

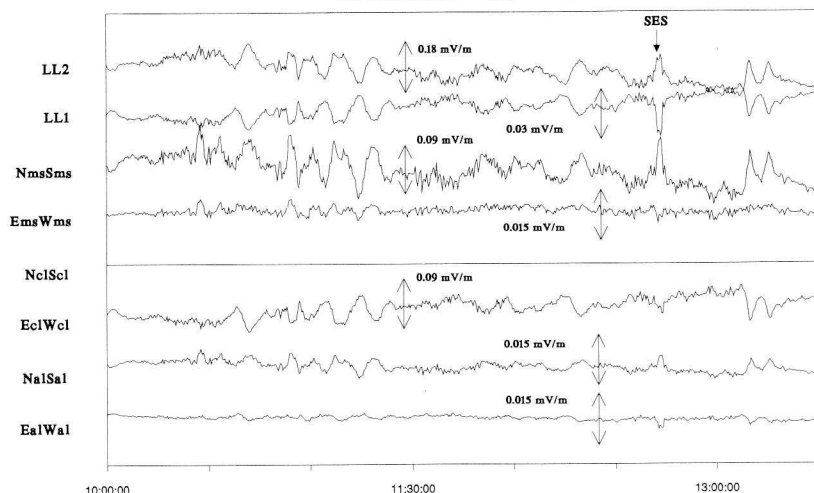


図5 ASS観測点の近傍3地点で同時観測されたSESの例  
 測線名に付加された記号の意味: al (沖積層), ms (雲母片岩), cl (石灰岩).  
 NclSclは故障中. LL1は長測線 EmsWcl (L=1.7 km), LL2はLagada  
 および短測線網(図6(a))近傍に電極をもつ長測線 (L=11.4 km).

強度は場所によって1桁ないし2桁異なりうることは、電磁気学の明らかなところである。異なる媒質の境界面では電場の直交成分は、媒質の電気伝導度の比に依存して、不連続となることに留意しよう。換言すれば、“高比抵抗地”での電場が、隣接する低比抵抗地でのそれよりはるかに強いであろうことは物理的に期待されるのである。

このように、ある地点では1 mV/100 m程度のSESが観測されるのに、わずか数kmはなれた別の地点では、0.1 mV/100 mよりはるかに小さく、したがって、人工ノイズレベル以下ということは物理的に不合理ではない。前者は“sensitive 地点”，後者は“insensitive 地点”ということになる。

このようなピクチャーは“sensitive 地点、ASS”周辺の多地点で最近得られた実験結果(図5)からも支持される。ASS観測点の周辺数km以内の地点で観測されたSES強度は“局地的構造(沖積層、雲母片岩、および結晶質石灰岩、図6)”によって、大いに異なるのである。

では、なぜあるsensitive地点が同程度の震央距離にあるすべての震源域にたいしてsensitiveではないのだろうか？我々は、この性質も以下のモデル(V, A and L, 1993)によって物理的

に理解できると考えている。震源から発射されるSESの電流密度はチャンネル(例えば周囲よりはるかに小さい比抵抗値をもつ地下水路)では大きいだろう。このような伝導チャンネルの露頭に沿って電場はまわりより大きく、それに近接する高比抵抗地点では前述のようにさらに増幅される。すなわち、ある地点がある震源域にたいしてsensitiveたりうるのは、震源近傍からその地点の近傍までシグナルを伝え

る伝導チャンネルが存在する時だけだということである。

8. どのようにしてVAN予知は発せられるか? : VAN予知は偶然? 実時間観測のおかげで、SESの認知、解析、予知は地震発生の充分前に可能である(V and L, 1991)。

震央については、(i) SESの極性、(ii) SESの東西、南北成分の比、(iii) 関係観測点のselectivity mapの組み合わせ、Mについては推定された震央位置とSES振幅を考慮して推定する。〈訳註: いわゆるVANの関係式を用いる〉

予知情報はギリシャ政府と約20の海外研究機関に伝えられる。海外研究機関への発信は、1988年5月からはじめられた。その動機は; a) 2,3のギリシャの地震学者が、予知が事前に行なわれることに疑念を表明していること(Drakopoulos et al., 1989)と、b) 予知情報を入手した外国の科学者が、その正否を独自に評価できることであった。

ここで、VAN予知は偶然であるとした小嶋(1992)およびMulargia and Gasperini (1992) [以下M-G]の主張に触れるが、まず、独立に行なわれた他の4グループの検討はまさにその逆の結果を得ていることを強調しておこう(上田、

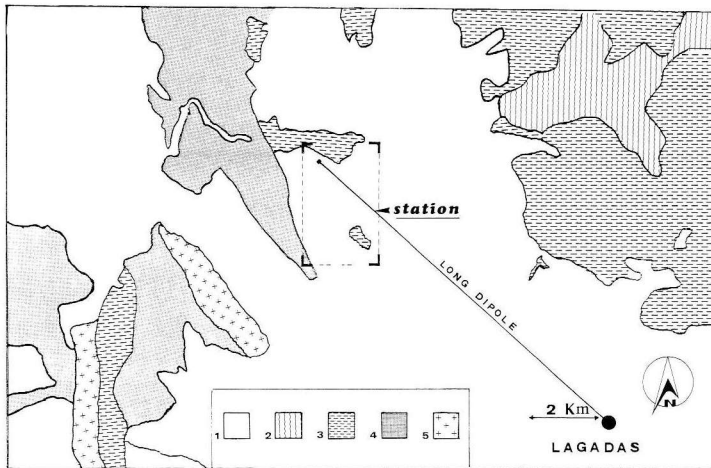


図6 ASS観測点の電極配置(地質は, D. Papanikolaou and D. G. Syskakis 私信による)

(a) 長測線; 1: Lagada 陸成層, スクリー, モラッセ, 2: カコウ岩, 3: 雲母片麻岩一片岩, 4: 結晶質石灰岩, 珪岩, 石灰質フリッシュ, 5: 砂質頁岩, レキ岩.

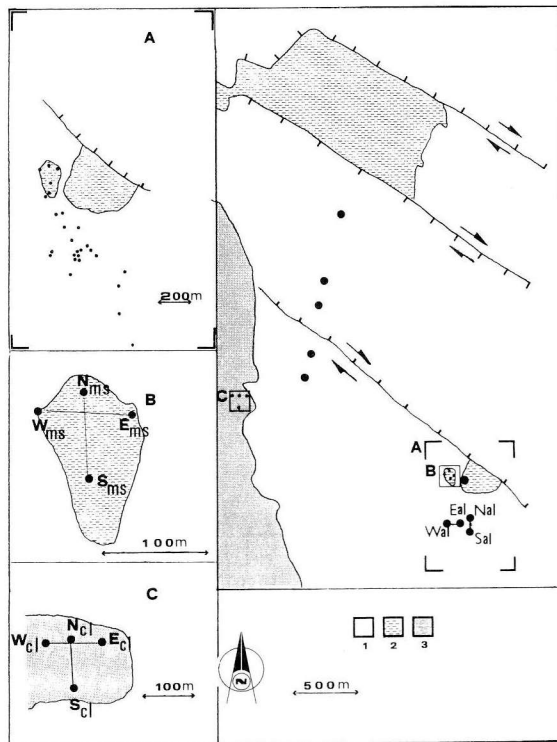


図6(b) 短基線(図6(a)内の四角枠にほぼ対応); 1: 陸成層, 2: 雲母片麻岩一片岩, 3: 結晶質石灰岩(A, B, Cはそれぞれ右図の四角枠に対応).

1991, Hamada, 1993; Shnirman et al., 1993; Nishizawa et al., 1993). 以下に引用する Hamada の結論からの数行は, 小嶋および M-G の主張に対する直接的返答を与えるものである.

「 $M_b$  (USGS)  $\geq 5.0$  の地震については, 予知された地震数と全地震数との比は 6/12 (50%), また出された予知の成功率も 6/12 (50%), 確率利得は 4 である. 予知対象地域の高い地震活動度を含む地域特性を考慮にいたれた地震発生ランダムモデルでこの成功率が説明できるということは, 99.8% の信頼限界をもって棄却される……」

小嶋 (1992) は, 「“SES” が現れるたびに, 例えば, おおざっぱに, アテネの西方 200~300 km くらいの地域に M-5 程度の地震が (20 日くらいの間に) 起こるのであろう, と “予知” したとすると, 予知の成功率がかなり高くなっても不思議ではない」とも述べている. これについても, 以下の Hamada の見解が直接の回答を与えている.

「 $M_b$  (USGS)  $\geq 5.0$  についての成功率がより高いこと, 地震総数に対する予知された地震数の比が M を高くとる ( $M_b = 4.0$  から  $M_b = 5.0$  へと) ことによって 6.6% から 50% へと劇的に増加することは, SES とそのあとで起こる地震との間に物理的関係が存在することを示唆する」(ランダムに予知したらこれは起きない).

「ほぼ 10 カ月間 (1987 年 6 月上旬から 1988 年 3 月末), SES ( $M_b \geq 5.3$  を期待させる) も地震 ( $M_b \geq 5.0$ ) も起きなかったことは注目すべきである」.

このような Hamada の結論は M-G の主張をも否定しざるものだが, M-G 論文に対する我々の回答 (Varotsos et al., 1994) は, R. ゲラー教授 (GRL 編集者) 企画の同誌 “討

論”に近く掲載される予定である。また、Taka yama(1993)は、震央をも偶然によって予知する確率という因子も考慮にいとると M-G の計算した偶然性の信頼限界は激減(1桁あるいはそれ以上)することを示した。

## 第2部

### 最近7年間での被害最大地震の予知

最近7年間での、被害最大の地震活動は、

- (a) Killini-Vartholomio活動:1988年9~10月
- (b) Pargos活動:1993年2~3月

であった。これら二つのケースともに、公的警報が発せられたが、第7図はその経過概要である。  
 <訳註:ここでの公的警報とは、メディアなどを通じて、一般大衆に報道されたという意味で、official という意味ではないようである>

a) Killini-Vartholomio 地震活動 1988年8月31日に IOA 観測点の短測線直交成分および長測線に強い SES 群が記録された(図7の上図および V and L, 1991 の Figs. 7 and 8 参照)。これに基づき、アテネの西北300 km,  $M_s=5.3$  あるいは西240 km,  $M_s=5.8$  の地震が予期されるという予知が、9月1日にギリシャ政府および海外研究機関へ発信された(V and L, 1991 の Fig. 21)。

この電報受信後、H. Tazieff 教授(元フランス防災相)は9月3日に A. F. P. およびフランス国営テレビを通じて、ギリシャ西部に被害地震あるべしと公表し、それは直ちにギリシャ国民にも伝えられた。最初の強い地震( $M_s=5.5$ )は9月22日、 $37.9^\circ N, 20.9^\circ E$ (第2の予想震央から2~30 kmの距離)に発生し、Killini 港の防波堤を破壊した。さらに9月29日および10月3日に新しい SES 活動があり、それに基づいて、新しい予知(V and L, 1991 の Fig. 26)が発せられた。内容は9月22日の震央から2~30 km 離れた地域で  $M_s=5.3$

クラスを含む地震活動(あるいはアテネ西北330 km,  $M_s=5.0$ )が続くであろうというものだった。はたして、10月16日、 $37.9^\circ N, 21.0^\circ E$ で  $M_s=6.0$  の地震が起き、Vartholomio 村に大きな被害をもたらした。これらの公的警報の社会的インパクトについては Yoshii (1993) 参照された。

b) Pargos 地震活動 1993年1月27日および同29日に IOA 観測点において一連の SES 活動が記録された(図7の下図および図2, 図3)。

これらの SES の諸特性は、前項での Killini-Vartholomio 活動のものとはほぼ同じであった。したがって、きたるべき地震活動もそれ(図7の上図)と類似するであろうと推論された。この予知情報と SES 記録のコピーは、1月30日に政府当局と海外研究機関に発信された。

2週間後の2月14日、地震活動が始まり、多数の小地震を伴った  $M_s=4.7$  地震(震央  $37.7^\circ$

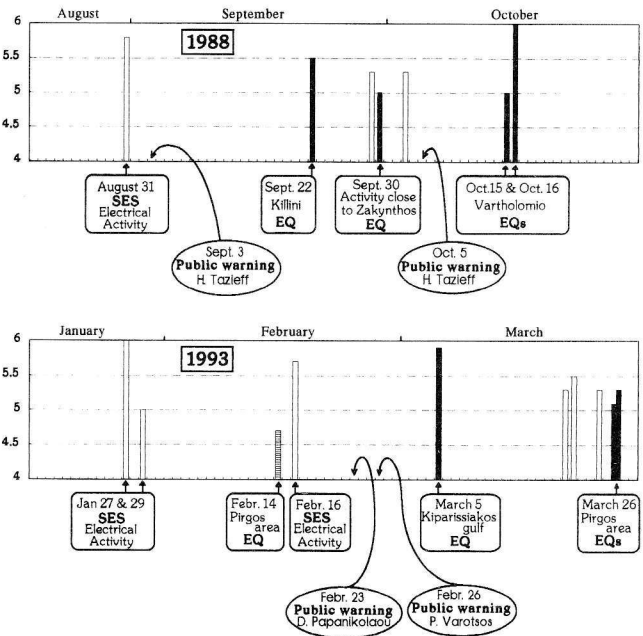


図7 最近7年間に起きた二つの最大被害地震活動についてのタイムチャート

白棒:SES活動, 黒棒:地震活動(関係期間中に  $36\sim 41^\circ N, 19\sim 22^\circ E$ 内に起きたすべての  $M \geq 5.0$ 地震EQ)。

上図: Killini-Vartholomio活動(V and L, 1991)

下図: Pargos活動(V et al., 1994b)



N, 21.3° E, Pirgos 市のごく近傍)が発生した。

2月16日には新たな類似のSES活動があり、2月23日、Papanikolaou教授(現Earthquake Planning and Protection Organization 会長)〈訳註:EPPOはギリシャ版予知連:ギリシャ語略称はOASP〉がメディアを通じて「もしPirgos市近傍の断層が活動すれば、 $M_s=6.0$ 地震が起きるかもしれない」と述べ、大多数の市民が避難をはじめた。その3日後、P. V.は市民に呼びかけて「今回もKillini-Vartholomioケースの時間経過チャート(図7の上図)に従う可能性が高いので、第2の主要地震は数日以内におこるであろう。その $M_s$ は2月14日の地震( $M_s=4.7$ )より0.5ないし1大きいだろう。しかし、震央はPirgos沖の海域(Zakynthos南方のKiparissiakos湾, 図1)と期待されるので、市民は恐れる必要はない」と述べた。それはPirgos市民のパニックを憂慮し、緊急に過去のSESすべてを検討し、消去法によって予想震央を推定した結果であった。現実には、1週間後の3月5日、 $M_s=5.9$ 地震がKiparissiakos湾、36.9° N, 21.3° Eで起きた。

3月20日、21日および24日に、IOA観測点で新たなSES群が記録され、24日に新しい予知が発せられた。特に24日のSES群は1月27日のSES群とおなじく、負の極性を示したので震央はPirgos近傍と推定された。しかも、期待 $M_s$ は5.5程度であったので、この予知電報には、地震予知委員会を緊急に召集するようとの要望が含まれていた。

しかし、当時のEPPO(OASP)会長はこれに同意せず、翌25日、Pirgos市民に対し、「Pirgos地域の地震活動は平生と変わらないから、大きい地震は期待されない」との公的発表を行なった。

翌26日、Pirgos市のごく近傍、37.5° N, 21.7° Eで一群の地震が発生し、甚大な被害をもたらした(最大地震の $M$ は、アテネ観測所によれば5.3、ウプサラ観測所によれば5.8)。大災害にもかかわらず、犠牲者がでなかったのは、EPPOの公的発表にもかかわらず、市民が対策を講

じたからであろう。因にDrakopoulos教授はEPPO会長を引責辞任、Papanikolaou教授が後任に任命された。

謝辞:上田誠也教授には、本論文の和訳、小嶋(1992)論文の英訳のみならず、本論文の内容についても、多大の助言を頂いたことを感謝する。

## 文 献

- Antonopoulos G., Kopanas J., Eftaxias K. and Hadjicontis V., 1993. On the experimental evidence of SES vertical component. *Tectonophysics* 224, 47-49.
- Dobrovolsky I. P., Gershenzon N. L. and Gokhberg M. B., 1989. Theory of electrokinetic effect occurring at the final state in the preparation of a tectonic earthquake. *Phys. Earth Planet. Inter.* 57, 144-156.
- Drakopoulos J., Stavrakakis G., and Latoussakis J., 1989. Physical properties of the variation of the electric field of the earth preceding earthquakes-discussion. *Tectonophysics* 161, 55-58.
- Hadjiannou D., Vallanatos F., Eftaxias K., Hadjicontis V., and Nomicos K., 1993. Magnetotelluric noise subtraction from the VAN measurements. *Tectonophysics* 224, 113-124.
- Hamada K., 1993. Statistical evaluation of the SES-predictions issued in Greece: Alarm and success rates. *Tectonophysics* 224, 203-210.
- Lazarus D., 1993. Note on a possible origin for Seismic Electric Signals. *Tectonophysics* 224, 265-267.
- Morgan D., 1990. A model for the explanation of SES-generation based on electrokinetic effect. *Int. Conf. on Measurements and Theoretical Models of the Earth's Field Variations Related to Earthquakes.* (Athens)
- Mulargia F. and Gasperini P., 1992. Evaluating the statistical validity beyond chance of VAN earthquake precursors. *Geophys. J. Inter.* 111, 32-44.
- Nishizawa O., Lei X. and Nagao T., 1994. Point Process analysis of Seismic Electric Signals. *Proceedings of the International Workshop on Electromagnetic Phenomena Related to Earth-*

- quake Prediction. (Sept. 6-8, 1993, Tokyo, Japan).
- Nomicos K. and Chatzidiakos P., 1993. A telemetric system for measuring electrotelluric variations in Greece and its application to Earthquake prediction. *Tectonophysics* 224, 39-46.
- Ozima M., 1992. Earthquake prediction-possibility by geoelectric current. *Jishin Journal* 14, 20-28.
- Park. St., Johnston M., Madden Th., Morgan D. and Morrison F., 1993. Electromagnetic precursors to earthquakes in the VLF band: A review of observations and mechanisms. *Review of Geophysics* 31, 117-132.
- Shnirman M., Schreider S. and Dmitrieva O., 1993. Statistical evaluation of the SES predictions issued in Greece. *Tectonophysics* 224, 211-221.
- Slifkin L., 1993. Seismic Electric Signals from displacement of charged dislocations. *Tectonophysics* 224, 149-152.
- Takayama H., 1993. Comment on "Evaluating the statistical validity beyond chance of VAN earthquake precursors" by Mulargia F. and Gasperini P. *Geophys. J. Inter.* 115, 1197-1198.
- Uyeda S., 1991. Greece; A country where earthquake prediction is in practise. *Zisin* 44, 391-405.
- Varotsos P. and Alexopoulos K. 1980. On the question of the calculation of migration volume in ionic crystals. *Philos Mag.*, A 42, 13-18.
- Varotsos P. and Alexopoulos K., 1984a. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I. *Tectonophysics* 110, 73-98.
- Varotsos P. and Alexopoulos K., 1984b. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude. *Tectonophysics* 110, 99-125.
- Varotsos P. and Alexopoulos K. 1986. Stimulated current emission in the earth: piezo-stimulated currents and related geophysical aspects. In: S. Amelinckx, R. Gevers and J. Nihoul (Editors), *Thermodynamics of Point Defects and their Relation with Bulk Properties*. North-Holland, Amsterdam, pp. 136-142, 403-406, 410-412, 417-420.
- Varotsos P. and Alexopoulos K., 1987. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, III. *Tectonophysics* 136, 335-339.
- Varotsos P. and Kulhanek O., 1993. Measurements and Theoretical Models of the Earth's Electric Field Variations Related to Earthquakes. (Proceeding of the International Conference held at Athens, Febr. 6-8, 1990). *Tectonophysics* 224. Special Issue.
- Varotsos P. and Lazaridou M., 1991. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics* 188, 321-347.
- Varotsos P., Alexopoulos K. and Lazaridou M., 1993a. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II. *Tectonophysics* 224, 1-37.
- Varotsos P., Alexopoulos K., Lazaridou M. and Nagao T., 1993b. Earthquake predictions issued in Greece by seismic electric signals since February 6, 1990. *Tectonophysics* 224, 269-288.
- Varotsos P., Eftaxias K., Vallianatos F. and Lazaridou M., 1994a. Basic principles for evaluating an earthquake prediction method. *Geophysical Research Letters* (to be published).
- Varotsos P., Uyeda S., Alexopoulos K., Nagao T. and Lazaridou M., 1994b. Prediction of recent destructive seismic activities in Greece based on Seismic Electric Signals. *Proceedings of the Intern. Conf. on Electromagnetic Precursors* (Chofu, Japan, Sept. 6-8, 1993).
- Yoshii H., 1993. Social impacts of earthquake prediction in Greece. *Tectonophysics* 224, 251-255.

[P. Varotsos, K. Eftaxias, M. Lazaridou, G. Antonopoulos and J. Makris: Solid State Division, Department of Physics, University of Athens, Greece (アテネ大学, 物理学部, 固体物理部門)] <Mailing address: Knossou str. 36, Ano Glyfada, Athens 165 61, Greece>

# 中央構造線は動くか

地下構造の新知見

伊藤谷生

## はじめに

中央構造線といば、米国カリフォルニアのサンアンドレアス断層、ニュージーランドのアルパイン断層などとともに、横ずれ活断層として世界的に有名である。活断層や地震の研究者の間では中央構造線の英語名 (Median Tectonic Line) の略称“MTL”で通用するほどだ。活断層ということは、何百年か何千年に一回の地震を伴いながら運動しているということである。全長 1000 km を越す中央構造線のうち、活断層であることがはっきりしているのは紀伊半島の中央より西の部分であるが、いつ、どこで、次の地震が起こるか、ということは、当然のことながら学問的にも社会的に重大な関心事である。

中央構造線に限らず、日本にはたくさんの活断層がある。それらの活断層に沿って、いつ次の地震が起こるか、やはり大きな研究課題である。そこで、中央構造線をはじめ主な活断層を対象とした綿密な地形・地質調査、トレンチ掘削調査などがこの間進められてきたし、今も続いている。これほどまでに、全国的規模で活断層の分布や、その活動性を精力的に研究している国は日本だけかもしれない。研究を担われてきた多くの方々と様々な研究機関に敬意を表するものである。

しかし、活断層は均質な更地のなかに新たに形成されるわけではない。活断層は既存の地殻構造のなかで成長しそれを改変していく。そしてまた、活断層は地殻構造のなかで互に関連しあっている。そうであるならば、日本列島の地質構造を捨象し、現在のプレートシステムだけで活断層や地震活動を論ずるわけにはいかない。活断層を3次元的地殻構造や具体的な地質構造のなかでとら

える本格的作業への転換こそが、活断層研究を飛躍的に発展させる鍵であるように私には思われる。

本小文においては、中央構造線という日本における第1級の断層の地下構造を最近のデータによって考察しつつ、あわせて中央構造線のうち紀伊半島中央部から四国中央部までの部分が近畿地方の活断層群と地下において深くかかわりあっていることについても論ずる。

## 中央構造線とは

もともと中央構造線は、地表上の境界線につけられた名称である。その北側には高温型変成岩を含む領家帯、あるいはそれを不整合に覆う和泉層群などの地層が、南側には高圧型の三波川変成岩類、あるいはそれを不整合に覆う新期堆積物が分布する。したがって、本来、両者を接触させる断層の地表トレスとしてのみ中央構造線という名称を用いるべきであるが、実際には、中央構造線という言葉は、すでに「断層」として慣習的に定着している。以後、とくに断らない限り断層の意味で用いることにする。

さて、この中央構造線は先に述べたように2つの異なるタイプの変成岩類を接触させる役割を担う重要な断層であり、白亜紀後期か古第三紀に形成された後も様々な運動の歴史が知られている。その最新のステージとしての活断層は、中央構造線を定義づける物質境界のトレスよりもわずかばかり北側を走っている場所が多い。両者を区分する必要がある場合は、物質境界中央構造線、活断層中央構造線と分けて呼ぶことにする。

## サイスミック・プロファイルの衝撃

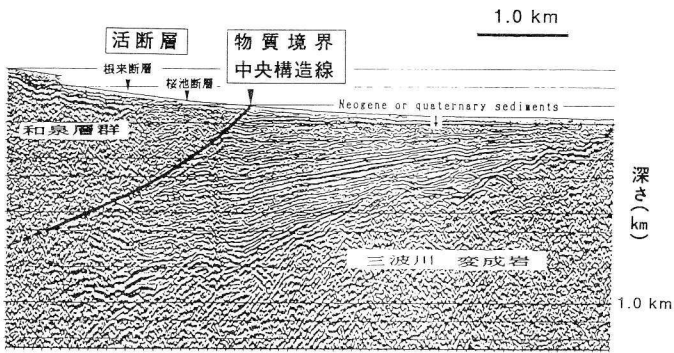


図1 紀伊半島西部和泉山脈南麓を横切る反射法地震探査プロフィール (吉川ら, 1987)

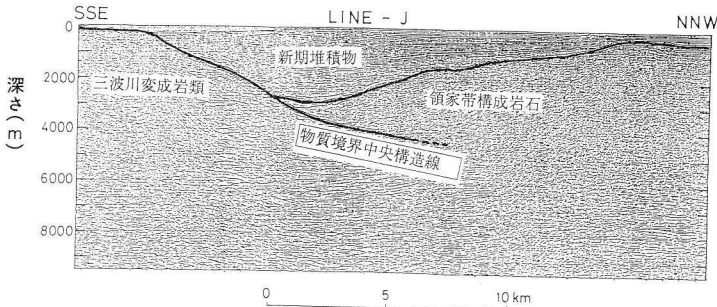


図2 別府湾沖豊後水道における反射法地震探査プロフィール (由佐ら, 1992)

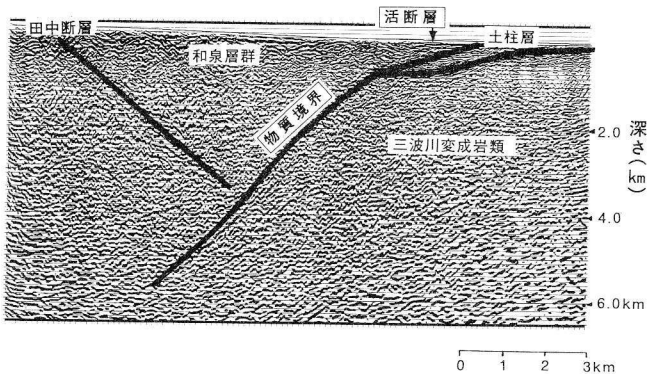


図3 四国東部国道193号線にそって反射法地震探査プロフィール (伊藤ら, 1993; 1994a)

まず、1つのサイスミック・プロフィールをご覧頂きたい(図1)。京都大学防災研究所教授(当時)吉川先生らのグループが、紀伊半島西部和泉山脈の南麓を走る中央構造線を横切ってマルチチャンネル反射法地震探査を行なった結果である。このプロフィールは地質学研究者に対して外から与えられた衝撃的な問題提起であった。実に、

1960年代後半に中央構造線が右横ずれ活断層であることが明らかになって以来、大方の研究者にとって、中央構造線は地下深くまで垂直な断層であることは“自明な”ことであったのである。

第2の衝撃は、京都大学理学部地球物理学研究施設のグループが行なった中央構造線の西端、九州の別府湾および豊後水道での膨大なマルチチャンネル反射法地震探査データによってもたらされた。図2はその一部であるが、領家帯と三波川帯の境界としての中央構造線が、緩く北に傾斜していることが明瞭に読み取れる。中央構造線が高角断層という定説はここでも崩れた。

これらの結果を受けて、筆者らは文部省科学研究費によって1992~93年、四国東部でパイプロサイス震源を用いてマルチチャンネル反射法地震探査を行なった。ここでも物質境界としての中央構造線が30~40°で北に傾斜しているのが地下5km程度までは追跡できる(図3)。さらにこの結果は、同時に行なわれた重力探査(図4)、MT法の結果(図5)とも実によく一致する。こうして、中央構造線が紀伊半島から九州に至るまでの活断層地域全域、つまり西南日本でかなり緩く北に傾斜するということはもはや動かしたいことであると思われる。

### 変更迫られる中央構造線像

そもそも中央構造線が深部に至るまでほとんど垂直であると推定されるようになったのは、いくつかの理由があった。第1に、中央構造線の地表

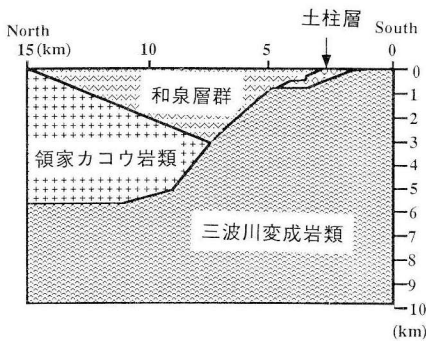


図4 重力探査から求めた最適地下構造プロフィール (伊藤ら, 1994a)

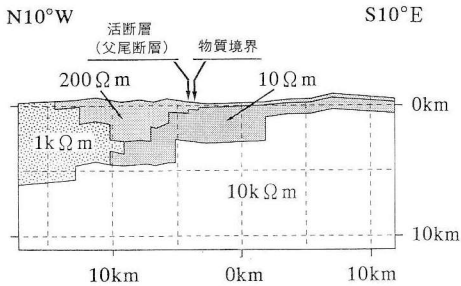


図5 四国東部中央構造線における電気伝導度構造プロフィール (後藤ら, 1993)  
10 Ωm 層が三波川変成岩類, 200 Ωm 層が和泉層群, 1 k Ωm 層が領家カコウ岩類に対応すると考えられる。

トレースが殆ど直線的であることである。第2に、地表およびトレンチで観察される中央構造線の断層は殆ど垂直であることである。しかし、よくよく考えれば、これらの理由は必ずしも地下深部まで垂直であることを要求しているわけではない。少なくとも地表近傍で垂直に近ければ十分である。結局のところ、中央構造線のような大断層、しかも、巨大な横ずれ断層の場合は、地殻を深くまで垂直に切断しているに違いないという漠然たる「確信」のみが根拠だったのである。

西南日本における中央構造線がかなり緩く北に傾斜しているとなると、中央構造線を垂直として組み立てられてきた活断層に関する常識も再検討しなければならなくなる。

#### 新しい中央構造線活断層モデル

従来から、地表における物質境界がしばしば低

角であることは知られていたが、それは地すべりなど地表面現象によるものであると考えられてきた。しかし、物質境界中央構造線が深部まで低角であるとするならば、地表で垂直な活断層中央構造線との関係は地下でどうなっているのか、という問題が浮上する。可能性としては2つある。1つは、活断層として我々が知っているものが物質境界から枝別れした地表近傍の派生断層であるというモデル (図6(a)) である。他の1つは、活断層がこれまでの物質境界を完全に切断しているもの (図6(b)) である。詳細は、今後の浅層高分解能反射法探査などによらねばならない、図1および図3にあるように、現段階で後者を支持するデータはない。そこで、前者に基づいて考える。この場合、北傾斜の物質境界中央構造線の上盤は楔型の形態をしている。この上盤が横ずれ運動をしているというのが、現在の姿ということになる。そして、楔の先端が地表における物質境界のトレースとなる。このトレースは地形に支配されるから複雑な形態をとるため、横ずれ運動の際は、垂直なショートカット断層が新たに形成されると考えるのは合理的であろう。このショートカット断層が活断層としての中央構造線ということになる。

#### 再活動を繰り返す断層

さらに地下深くなるとどうなるか、図2や図4に示唆されているように、地下数 km で殆ど水

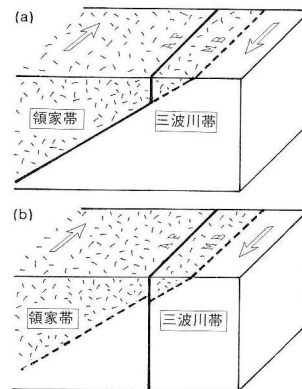


図6 物質境界 (BM) と活断層 (AF) との地下における関係

平な断層（デタッチメントという）に移化するのではないが、日本列島の地質構造が基本的には北傾斜の低角衝上断層群によって形成されているということはもはや常識となっている。しかも、それらは水平デタッチメントに収斂するのである。中央構造線もそうした構造の一部をなしていることはむしろ当然である。さて、こうした低角衝上断層群が最初に形成された時の運動は走向に直交する方向であったかもしれないが、長い地質時代のなかで変化する条件のもと、正断層運動や横ずれ運動に容易に転換することが明らかになっている。いわゆる断層再活動（fault reactivation）として最近世界的に注目されている現象である。実際、かつて中央構造線の一部であった佐志生断層（九州佐賀関半島）では、水平成分が垂直成分の2倍である衝上断層であることが明らかになっている（伊藤ら，1994b）。また、紀伊半島における秩父帯北帯／中帯の境界断層は、水平成分が相当あるような斜め衝上断層運動をした時期があったのである。こうしてみると、先端が楔型をした平板状の上盤が横すべりを起こしているという中央構造線の現在の運動モデルは決して特異なものではなく、過去の中央構造線を含めて日本列島地質構造形成史のなかで繰り返し行なわれてきた断層再活動運動の一部とみなすことができる。

### 西南日本のネオテクトニクスと中央構造線

中央構造線の運動を理解しようとする、西南日本において中央構造線の地表トレスより北側の上盤全体を考察の対象に広げる必要がある。上盤全体が東に運動しているために活断層域の東半分、すなわち四国中央部以東では圧縮的な応力場となる。このため、中央構造線には逆断層成分が生じ、阿讃山脈、和泉山脈の隆起に寄与している。藤田和夫先生によって明らかにされた近畿地方ネオテクトニクス（例えば、藤田ら，1973）は上記の中央構造線地下構造モデルによって極めて合理的に解釈される（図7）。図7(a)は断面図である。仏像構造線、中央構造線、有馬—高槻構造線は地下の水平デタッチメントから派生したものである。このデタッチメント上を上盤が東に運動している。それぞれの構造線に挟まれたブロックは南ほど東進速度が遅いため右横ずれの変位センスが構造線に生じるのであろう。図7(b)は、北西—南東方向の断面図である。六甲・金剛などの傾動地は中央構造線につながる水平デタッチメントから派生した衝上断層群によるものと考えるとわかりやすい。また藤田先生のいう「基盤褶曲」は fault-bend fold と解すべきであろう。

一方、西半分は伸張的となるため、高縄半島の

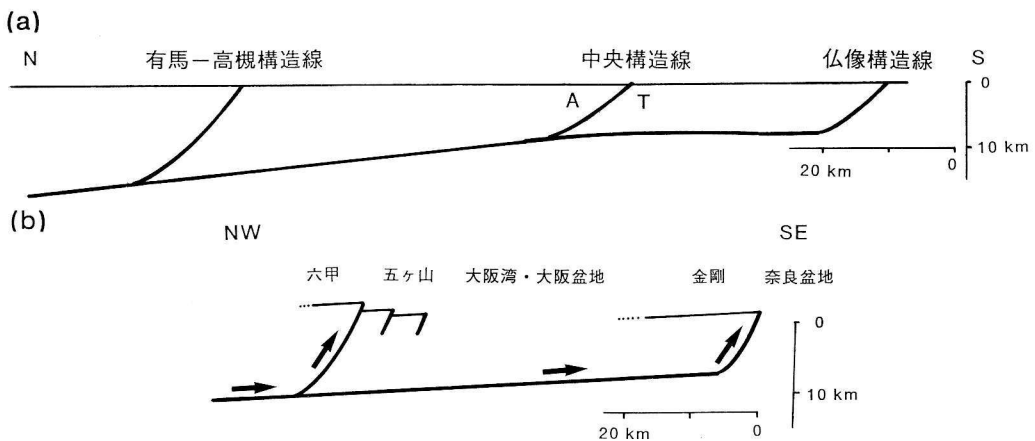


図7 近畿地方地下構造模式断面図  
 (a) 南北断面 A: away, T: toward  
 (b) 北西—南東断面



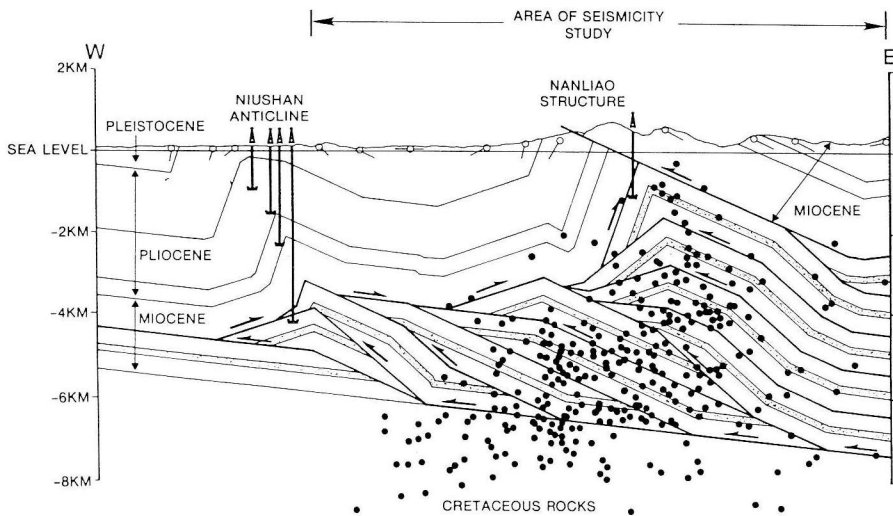


図8 台湾における微小地震（黒点）と活構造断面図（Namson and Davis, 1988）  
地表に到達している活断層は1つだけであることに注目。

ような例外はあるものの、別府湾から四国中部までは基本的には正断層成分が生じ、北側が沈降する。そして、そこに細長い堆積盆が形成される。別府湾から松山に至る低の重力異常はこの直接の反映である。この堆積盆の堆積形態は正断層成分を有する斜め横ずれ断層によって明快に説明できる（伊藤ら, 1994b）。

### 慶長の伏見桃山地震と中央構造線

このようなモデルによるならば、実は中央構造線による地震活動は現在の中央構造線のトレス沿いに起こるのではなくもっと広範囲に及ぶことになる。こうしたなかでまず注目されるのは、琵琶湖西岸域の活発な微小地震活動である。地下十数 km で緩く北に傾斜する地震活動の底面より上にびっしり微小地震活動がある（Ito, 1990）。この底面が水平デタッチメントに対応するのであろう。また、微小地震の密集域の南限はほぼ有馬一高槻構造線に一致しているように見える。ここでは東進する中央構造線上盤のフロントとして多数の伏在衝上断層（blind thrust）がデュプレックス（多数の岩体が重なり合っている構造）を形成しながら微小地震を引き起こしているのではあるまいか。次に和歌山周辺の微小地震が注目される。これらは仏像線と中央構造線の間で集中し

ているように見受けられる（平田ら, 1994）。また、香川—愛媛—徳島県境付近の浅部微小地震（佐藤ら, 1994）でも同様な傾向が認められる。これらの地域でも、地下で伏在衝上断層が運動しているに違いない。こうした例は短縮テクトニクス域、とりわけ衝突帯で普遍

的に認められる（図8）。

最近、1596年（慶長元年）に京都を中心に大きな被害を出した伏見桃山地震の際に中央構造線が動いたという指摘が岡田ら（1991）などによってなされている。地下における中央構造線の水平デタッチメントから近畿地方の活断層群は派生しているとすれば、伏見桃山地震との連動は十分ありうることだろう。

中央構造線の地表トレスにのみ注目していたのでは、中央構造線の本質を把握することはできない。今後、四国中央部から紀伊半島中央部までの活断層中央構造線の運動を考える場合、近畿地方の活断層群全体の地下構造なかで位置づけることがますます重要になってくる。そのためにも、地形、表層地質、構造地質、浅部から深部に至るまでの物理探査、地震など広い分野の共同研究の推進がなにより求められている。

### 文 献

- 後藤忠徳ら, 1993, 中央構造線（四国東部）の電気伝導度構造, Conductivity Anomaly 研究会 1993 年 論文集（CA グループ編）, 31-37.
- 平田 直ら, 1994, 地殻の不均質構造・活断層と地震活動の動的な関係を明らかにするためには？—まずキネマティック・モデルから, 日本地質学会第 101 年総会・討論会講演要旨集, 44-46.

藤田和夫ら, 1973, 近畿・四国の中央構造線のネオテクトニクス, 中央構造線(杉山編), 東海大学出版会, 97-109.

Ito, K., 1990, Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, Journ. Phys. Earth., 38, 223-250.

伊藤谷生ら, 1993, 四国東部, 中央構造線地下構造の総合物理探査(その1) 反射法地震探査, 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, 168.

伊藤谷生ら, 1994a, 反射法地震探査を軸とした物理探査による地質構造の解明. 日本地質学会第101年総会・討論会講演要旨集, 40-43.

伊藤谷生ら, 1994b, 佐賀関半島佐志生断層の年代値と中央構造線の運動. 日本地質学101年総会・討論会講演要旨集, 106-107.

Namson, J. D. and Davis, T. L., 1988, Seismically active fault and thrust belt in the San Joaquin Valley, central California. GSA Bull., 100, 257-273.

岡田篤正ら, 1991, 中央構造線の最新活動は慶長地震か?—中央構造線父尾断層の徳島県市場町上喜来トレンチ調査, 地震学会講演予稿集 No 2, 264.

佐藤隆司ら, 1994, 四国中央部中央構造線付近に発生する微小地震の震源分布, 地震, 46, 405-412.

吉川宗治ら, 1987, 紀伊半島西部地域における中央構造線の反射波構造(第2報), 地震学会講演予稿集 No 2, 162.

由佐悠紀ら, 1992, 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造, 地震, 45, 199-212.

[いとう たにお 千葉大学理学部教授]

## 護母致命の碑

文京区後楽園内の梅林の奥に、「藤田東湖先生護母致命之処」と題する碑がある。これは、幕末の水戸学派の儒者藤田東湖(1806~1855)が、小石川の水戸藩邸の住居で、安政江戸地震(マグニチュード6.9, 1855年11月11日)に遭遇し、倒壊した家屋の下敷きとなった母を救出する際に圧死したことを悼んだ碑で、もとは水道橋よりあったものを移建した。

江幡潤著『文京区史跡散歩東京史跡ガイド5』(学生社, 1992)によると、「逃げおくれた母を救おうとしてともども家屋の下になって圧死する」となっているが、史料によると東湖は圧死したが、母は助かったというのが事実のようである。また、江戸地震が1835年となっているのも間違いである。

後楽園は水戸徳川邸のあとで、江戸時代の初め徳川頼房や光圀によって築園され、中国の明より亡命した朱舜水の意見を用いた、中国趣味ゆたかな庭園である。この庭園は元禄地震(1703)、安政地震(1855)および関東地震(1923)の災禍によって、貴重な建物の多くを失っている。

庭園は水戸藩上屋敷に隣接していて、安政地震に際して『水戸藩史料篇乾』によれば、

「是の夜齊昭慶篤は難を後園に避けしが邸内の官舎



は傾倒破壊殊に甚だしく執政戸田忠大夫忠徹側用人藤田誠之進彪此の災に罹れり其の他邸内の死傷は即死四十六人負傷八十四人に及べり

とある。

今回は紙面もないので、この程度にとどめるが、いずれ機会をみてこのモニュメントの由来を、より詳しく紹介したい。

[R]

# 医療の地震防災対策

## 病院の備え

上原鳴夫

### 地震に対する病院の備え

日本は地震の予知と防災対策において世界の範となっているが、医療関係者の間では防災に対する関心や備えがまだ十分とはいえない。

自然災害に共通する保健医療ニーズは、広範な破壊が生じた場合の地域衛生対策や、避難民に対する保健衛生管理、被災者が被る心理的・精神的な損傷に対する対処、など公衆衛生面のものが多いが、地震の場合には次のような特徴が認められる。

- (1) 重度外傷や死亡者の比率が高い。
- (2) 大量の医療需要が瞬時に発生する。
- (3) 病院や職員など、医療供給側が同時に被災する。
- (4) 津波や火災、余震、土砂崩れなどの二次災害による死亡や受傷がある。

このため、地震災害においては医療、とりわけ病院の役割がより重要になる。

地震災害発生

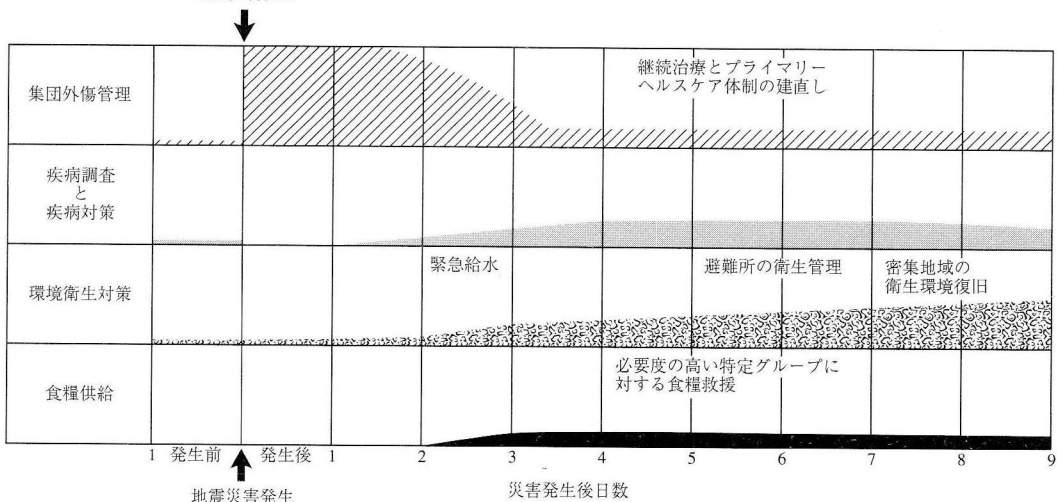


図1 地震災害後のニーズと優先度の推移

病院の災害対策計画は、通常、内部災害（病院の火事など）と外部災害（地域に発生した災害に対する救急医療）に備えるために作られるが、前者は患者・職員の安全確保、後者は集団外傷（Mass Casualty）の対処が主な目的になる。地震災害では、しばしば内部災害と外部災害の両方が同時に発生する。

入院患者は、老人や子どもと同様、もっとも犠牲になりやすい災害弱者である。1985年のメキシコ地震でも病院の損壊によって、患者や職員の多数が死亡した（保健省総合病院で約350人、フアレス病院で560人など）。

図1は地震発生後の保健医療ニーズの推移を示すが、医療需要は災害発生直後にピークに達する。災害後、しばらくの間は外部からの救援が期待できないため、被災地域の住民・医療関係者だけでこの需要に対応しなければならない。

災害医療では生存救出者が主な対象とされるが、1980年のイタリア南部地震からの報告では生存者の94%は初めの24時間以内に救出された人だ

った。

受傷の経緯から、裂傷や骨折など医師の治療を必要とする重傷者が多くなるが、それ以上に軽度の受傷も多発するため、軽重取り混ぜた受傷患者が救護所や病院に殺到することになる。メキシコ地震では死亡者数が5千人を越え、4万人が受傷、うち1万人は生命に危険のある重度外傷であったと報告されている。

一方で、病院や職員の被災のために医療を供給する側の能力が平時と比べ大幅に減じ（メキシコ地震では病院の損壊によって市の病床全体の約4分の1が失われた）、残された医療資源（人員、設備、医薬品・医療資材など）で過大な医療ニーズに対応しなければならない。

したがって、地震災害に対する病院の備えは「避難」「病院機能の確保」「集団外傷対策」という三つの課題を充足する必要がある。これまでの日本の病院防災対策は施設防災や避難計画に重点が置かれていたので、ここでは災害医療対策、すなわち、病院の機能面での備えを中心に概要を述べる。

### 集団外傷とトリアージュ

集団外傷とは、「ある時点において、さまざまな種類と程度の傷病者が、病院の通常の救急医療体制の人員と設備では対応できない数で、ほとんど予告なしに一度に押し寄せた場合の状況」を指す。集団外傷では全病院的な取り組みと、平時の救急医療とは異なる特別な対処の方策が必要となる。

診療能力が限られている中で、過大な需要に有効に対処するためには、診療の優先度判断、ボトルネックの解消、診療手順のスタンダード化、が重要なポイントになる。

(1) トリアージュ (Triage) トリアージュは災害医療の基本的要素であるが、日本の医療者の間にはまだ概念が十分に普及していない。トリアージュとは、一口でいえば「(患者を) 選び分けること」である。英米では通常の救急診療においてもトリアージュ・ナースを置いて、治療の緊急度

に応じた患者のより分けを行なっているが、もとはといえば第一次大戦後の英国で、戦線での負傷者を作戦遂行上の効率を考慮した優先度判断に基づいて後方医療施設に搬送することを、フランス語から借用してこう呼ぶようになったものである。

トリアージュは、「患者を外傷または疾病の重症度によって分類する」「治療の優先順位を決める」という二つの要素からなっている。

平時医療では「すべての」患者に「最善の」医療を行なうことを前提としているが、災害時のように医療能力が限られていて「すべて」に「最善」の医療が提供できないことがあらかじめ明白になっている場合には、治療に優先順位をつけざるをえない。優先度の判断基準はあくまでも治療の緊急性にあるが、ただし、需要に対して供給が著しく制約されている場合には、危篤患者を待機させることもありうる、というのが災害医療におけるトリアージュの特徴である。これは事実上治療を放棄することにも等しいので、平時では決してあってはならないことである。それが認められるのは法的には緊急避難、倫理的には社会的公正の原理が適用されるからである。たとえば、輸血用血液の数が限られている場合、適量量の輸血を行なえば助かると思われる複数の患者がいるのに、一人の危篤状態の患者のために全部使いきってしまって、結局、誰も助けられなかった、という状況になるよりは助かる可能性が高い患者に優先的に使用して一人でも助けることのほうが倫理的に正しいと考えられているからである。

トリアージュ分類はまだ世界的に統一されたものがなく、3群分類から5群分類までの分類法が並存しているが、基本的な考え方は共通している。

たとえばPAHO/WHOが用いている4群分類法の場合には、それぞれを色に対応させながら表1のように分類している。

3欄の「待機可能」は、緊急治療を要しないか、  
表1 トリアージュのための群分類

1 [赤]	——	大至急搬送(緊急治療)を要するもの
2 [黄]	——	至急搬送(緊急治療)が必要であるが、切迫度は1に次ぐもの
3 [緑]	——	待機可能なもの
4 [黒]	——	すでに死亡しているもの

または救護所での処置が適当と思われるものを意味するが、すでに危篤状態なため搬送しても回復の望みがないと判断されたものもこれに含まれる。

このほか、死亡群が無くて3欄を軽処置群、4欄を危篤患者群としている分類法や、3欄と4欄を一つにして「待機または搬送を要せず」とする方法も用いられている。

実地演習をやってみるとよくわかるが、緊急度や予後判定について現場の医師や看護婦の意見が一致することはむしろまれであって、各自が独自に判断し始めると現場が混乱に陥る危険性がある。したがって、トリアージュに際しては特定の人をトリアージュ担当者に指名して全権を委ね、複数判断を避けるようにするのが一般的である。

トリアージュ担当者に誰を指名するかは非常に重要である。

トリアージュの群分類が重傷度によって、ではなく、指示によって分けているのは、救命の可能性や緊急度の線引きが絶対的なものでなく需要と供給の関係によって決まる相対的なものだからであり、もし搬送手段や受け入れ体制が十分にあれば、危篤患者であっても搬送し救命に全力を尽くすべし、という意を含んでいる。

したがって、トリアージュ担当者は、災害規模とリソースを勘案したうえでの適切な状況判断が求められる。また、多数の受傷患者の病態を短時間のうちに手早く評価しなければならない。したがって、現場で十分な信頼と権威を維持できる経験豊かな人物を指名することが薦められる。できれば、外科系または救急を専門とする中堅以上の医師（状況次第では看護婦、救命救急士など）で重傷度評価や予後判定に堪能な人を選ぶのが望ましいが、トリアージュの考え方については平時に訓練を行なって十分な理解を得ておくことが大切である。

トリアージュは一度きりのものではなく、搬送の優先度を決定する時（災害現場、救護所など）や診療の優先度を決定する時（病院の入り口など）の、少なくとも2回は行なう必要がある。トリアージュが行なわれると、患者には、誰でも一目でわかるような色による識別標（タグ）をつ

ける（タギング）が、施設間でトリアージュの分類法や使用するタグが違っていると用をなさないため、トリアージュの方法とタグは、地域災害計画の中で統一し共同訓練などを通じて関係者の間で認識を共有しておく必要がある（本来は、学会などを通じて全国レベルで統一されるのが望ましい）。

(2) ボトルネックの解消 処置室ではスタッフの数に応じて多数の患者の診療を同時平行で行なうことが可能であるが、検査室やレントゲン撮影などは時間あたりに消化できる患者の数が限られるので、ボトルネックを生じることになり、患者がそこに溜まって診療が中断してしまう。ボトルネックを解消するには、次の3点を考慮する必要がある。

診療手順の変更、各部門ごとのトリアージュ、そして事前のキャパシティ評価（病院の受け入れ能力）、である。事前のキャパシティ評価では、各病院ごとにどれだけ患者の受け入れが可能かを評価した上で、地域内の受け入れ可能施設の許容量をマッピングしておく必要がある。集団外傷の際の病院の受け入れ能力については、次のような数字が参考にされる。

よく訓練された外科チームは、条件が整っていれば12時間で7件の重度外傷手術をこなす能力があると考えられている。しかし、災害時にはさまざまな制約が生じ、手術器具の不足や、消毒、患者の出し入れにかかる時間なども考慮されるため、実際に消化できるのはその4分の1と推定される。したがって、かりにスタッフや輸血などの資材が足りていたとしても、12時間で手術可能な件数は＝手術室の数×7/4が限度ということになる（手術室が4室だと12時間で7件）。

(3) 診療手順のスタンダード化 集団外傷での診療のスタンダードは平時の救急医療のスタンダードとは変えられる必要がある。検査やレントゲンも緊急を要するものに限定し、直接生命に危険を及ぼさないものについては待機的な処置を考える。また、普段救急医療に携わっていないスタッフも駆り出されることになるので、集団外傷時の処置や手順についてはそれ用のマニュアルを作成して



ときどき訓練を通じて周知しておくと同時に、現場では経験者が責任をもって指揮に当たる必要がある。そうしないと、(トリアージもそうであるが)医療者にとっては、こうしたほうがよいとわかっていることをやらないで済ますことには、ためらいが生じてしまうものである。

スタンダードの作成に当たって特に留意すべきことは、災害時の診療手順は資源と時間の節約(すなわち、思いきった「省略」と、患者の「救命」第一)が重要であること、および、単純で明快なものにしておくことである。

### 病院災害対策計画

病院災害対策委員会は、災害対策計画の立案のほか、表2のような役割を期待される。前述したように病院災害対策計画は病院自体の被災に対する対応と集団外傷に対する対応の指針を示すものであるが、計画立案に当たっては、施設間の役割分担と連携を含め地域全体の災害対策計画の中に位置づけて検討する必要がある。計画は無理がなく実施可能なもので、わかりやすいこと、とりわけ災害時の指揮系統と各職員の任務を明確にしておくことが肝心である。計画はマニュアル化して目につきやすいところに置くが、病院の体制自体が変わってゆくので、定期的な見直しと改訂をしないと計画が現実にそぐわなくなってしまう。また、実地演習は計画のピットフォールを点検する機会でもあるので、形だけのものではなく、本格的なシミュレーションを実施すべきである。トリアージの考え方や、災害時の診療スタンダードなどの標準手順は関係者に共有されている必要があるので、疑問や理解のくい違いは研修の機会を通じて事前に解消しておく。

表2 病院災害委員会の役割

<ul style="list-style-type: none"> <li>● 病院災害計画の立案</li> <li>● 各部門ごとの災害対策の立案</li> <li>● 病院職員の任務分担</li> <li>● 災害時医療の標準化</li> <li>● マニュアルの作成</li> <li>● 災害医療教育の実施</li> <li>● 実地演習の実施とこれによる点検</li> <li>● 定期的な災害計画の見直し</li> </ul>
--

### 病院の被災に対する対策

病院被災に対する対策は、ライフラインの破壊に対する備え、各部門の被災対策、患者の避難対策からなり、前二者は病院の機能維持を目的としている。

(1) ライフラインの破壊に対する備え ライフラインについては、とくに電気・水・燃料などが断たれた場合のことを想定して対策を立てておく。備蓄や代替源を備える必要があるが、大阪府と兵庫県の病院を対象にした鶴飼らのアンケート調査では、自家発電装置用の燃料備蓄は約78%の病院が12時間まで、水は約75%の病院が12時間までしかなく、停電によって滅菌装置やコンピューターは約3分の2の病院で完全に停止し、都市ガスの供給停止によって約8割の病院が給食不可能になると答えている(表3)。

とくに、現在の病院医療は機器への依存性が高いので普段から停電時の電気・電子機器の使用指針とメカニカルへの切り替えについて検討しておく必要がある。

通信は無線回線を用意することのほかに、電話回線が保存されたとしても、交換台は殺到する情報や問い合わせで、事実上使用不能になる可能性がある。緊急時業務用の回線と一般交信用の回線を分けられるようにしておく。

(2) 各部門の機能確保 各部門ごとに、シミュレーションを行なうなどしてリスクファクターを分析し、できることについては事前に然るべき措置を施しておく。とくに、機器・薬品などの倒壊・破損の防止と、薬品・医療資材類の備蓄と供給の確保が重要である。検査室や処置室などでは薬品棚や機器の固定の工夫によって倒壊、破損を予防できる可能性がある。静岡県放射線技師会ではレ

表3 病院の備蓄に関するアンケート調査  
[文献:7)より抜粋]

	6時間まで (%)	12時間まで (%)	12時間以上 (%)
水の備蓄量	49.7	75.1	24.9
自家発電装置用燃料の備蓄	57.0	77.8	22.2



ントゲン機械の倒壊や現像液の混入の可能性などをシミュレーションによって分析し、具体的な防止策の考案、普及に努めている。

薬品や医療資材、また前に触れた燃料、水、食料も、どの程度の期間持ちこたえるだけの備蓄が必要かは、地域内での備蓄量、ライフラインの防災対策、救援時期の予測などにより地域ごとに異なってくる。病院の患者受け入れ能力と地域災害計画での供給能力の試算をベースにして、各病院ごとの必要備蓄量（および種類）を試算しておく必要がある。とくに大災害の場合は、近隣地域からの救援と後方支援に依存することになるので、地域間の申し合わせも重要である。

とくに輸血用血液と外科、整形外科領域の薬品・資材は、その備蓄量が災害医療の律速因子になる可能性があるため、種類を限定して、分量を確保しておくことが重要である（先の鶴飼らの調査では、災害用に備蓄を行なっている病院は、医薬品で7.9%、医用材料で6.4%、食料で14.7%であった）。

### 災害医療対策

災害医療対策は、病院自身の被災の程度によって変更を余儀なくされる場合もあるので、指揮系統（意思決定と指示）と報告系統を明確にし、細部については状況に応じた柔軟な対応ができるようにしておくことが大切である。

(1) 災害医療計画の発動 いつ、誰が、災害医療体制を発動するかという、始動手順を明確にする。災害はいつ起こるかわからないので、特定の個人の決定に委ねるのは賢明ではない。管理当直など不特定多数に委ねる場合には、始動基準についてふだんから十分に研修を行なっておく必要がある。Savageらは、始動基準を段階的なものにしておくことを薦めている。院内各部署および院外職員への始動指示の伝達方法も明確にしておく。

(2) 病院機能の拡大 まず、搬送患者を受け入れる体制づくり、手術室をフル稼働させる準備、入院病床の拡張を行なう。災害規模にもよるが、通常は受け入れ口を1カ所とし、その前にトリア

ージュ用の広い場所を設定し、トリアージュ後の患者の流れを設定する（軽傷処置と重傷者の蘇生処置で診療場所を分ける）。集団外傷に備えてパッケージ化してある機材や薬品・資材を処置室に集める。

小手術や待機可能手術は延期し、また、あらかじめ計画で定めておいた方法に従って、入院患者を再配置して救急患者用の病床を確保する（軽症入院患者の退院も考慮）。通信・搬送体制が許せば、自分のところで適切な対応ができないと思われる患者は、無理に受け入れずにより適切な施設に転送することを考える。また、次々と運び込まれる患者に病床を用意する目的で、初療を行なって安定した患者は後方施設に転送することも時に必要となる。このため、リソースマップに基づいた地域レファラル体制についても十分検討しておく。

(3) 職員の任務配置 災害発生時にも入院患者の医療は継続する必要があるため、各病棟のスタッフを災害医療に動員する方法は、あらかじめ計画を立てておく。臨床検査室やレントゲン検査室、薬局などの臨床補助部門も、あらかじめ定めた方法に従って、緊急性のない検査は中止し、必要な検査の稼働を最大化し、消耗品の在庫状況が掌握

ご 案 内	
<b>地震ジャーナル 16号</b>	
エッセイ 有感の微動 パターン認識による地震予知 地震と電波 奇妙な小地震 地磁気と地震・火山噴火 1992年インドネシア・フローレス島地震 1992年インドネシア・フローレス島地震 ニカラグア地震津波の特徴 解説 アメリカ版二つの地震予知騒動 解説 津波の常識 地震に強い防災まちづくり 企業の防災対策	下鶴大輔 井元政二郎 芳野起夫 佃 為成 大志万直人 武尾 実 今村文彦 阿部邦昭 力武常次 相田 勇 箕田広美 芳賀正之助
記	
◇ご講読料 [実費頒布：郵送料共] 1500円 ◇お申込先 東京都千代田区神田美土代町3番地 財団法人 地震予知総合研究振興会 [本誌綴込みの振替用紙をご利用下さい]	
財団法人 地震予知総合研究振興会	

できるようにする。事務部門は保険や診療録の管理、手続きを災害時の手順に切り替え、守衛は車の出入りをコントロールし、中央材料室や厨房なども需要増加への対応と勤務体制の変更を行なう。災害時に各部門職員の果たすべき任務は、常時張り出しておくか、もしくはアクション・カードやタスク・カードにして目につくところに掲示し、災害時にすぐに参照できるようにしておく。アクション・カードは、各部門の各職種ごとにとるべき行動を災害発生後の時間的流れに沿って簡潔に記載したもので、タスク・カードはそれぞれの任務の内容を具体的に記したものである。

地域災害計画の中で救護所や救出現場での医療活動が期待されている場合には、医療チームを編成して救急出動を行なうが、人員が不足している場合は、むしろ後方医療に投入したほうが効果的な場合がある。

一方、救護所での医療活動は、軽症患者が治療を求めて病院に殺到するのを防止するという意義もある。

(4) 情報管理 災害時の情報管理は、患者および患者診療にかかる情報（ID、診療記録）のほか、災害対策実施の指揮にかかる情報と、外部（地域災害対策本部または災害管理センター）との交信、患者家族やマスコミへの対応などがある。

患者のID登録と病歴・診療の記録は、簡潔に要点だけを記載するような方法をあらかじめ計画しておき、診療記録の書式はトリアージュ・カードとともに災害時にすぐ使えるようにしておく。救出現場から病院までは、トリアージュ分類とともにID、被災場所、受傷の種類、初期治療などを書いたカードを患者の体につけて搬送するが、病院でも、少なくとも病室に入るまでは、患者情報はできるだけ患者の体につけるようにする。病院内に情報管理センターを設けて、患者の受け入れ状況や受け入れ余力、在庫資材の状況を把握し、地域災害管理センターに報告する。患者の家族やマスコミの問い合わせには、あらかじめ担当者を決めて対応する。

(5) 遺体管理 病院で死亡した患者にはID確認と死因登録を行なうが、遺体は集中管理が望ま

しいので、地域災害計画の中で遺体安置所や遺体確認、遺族への対応、法的措置などを計画しておく、病院はこれに従うようにする。

## おわりに

メキシコ地震のように病院が完全に崩壊するというようなことは、日本ではおそくないだろうと期待しているが、日本の病院は近年の著しい医療技術革新を小さなスペースに詰め込んできたところが多いので、機器の配置や資材・薬品管理なども無理を承知で、というところが少なくない。災害に備えるだけの余裕がないというのが本音と思われるが、それだけに、いったん病院の被災や集団外傷が発生すれば大きな混乱が予想される。

国際防災の十年（IDNDR）では今年度を病院と学校の備えを強化する年として、医療者の関心を喚起している。日本でも病院災害対策の充実をはかるよい契機になればと望まれる。

## 文 献

- 1) 上原鳴夫, 1991, 災害対策—「国際防災の10年」における保健医療の役割救急医学, 15巻, 13号, p. 1737-1743.
- 2) PAHO/WHO, 1987, Earthquake in Mexico Washington, D. C., p 1-2.
- 3) Bruycker, M., Grego, D., AnninoI., et. al., 1983, The 1980 Earthquake in Southern Italy-bulletin of the World Health Organization, 61, p. 1021-1025.
- 4) P. E. Savage, 1979, Disasters-Hospital Planning, Pergamon Press, Oxford.
- 5) Frederick, M. Burkle, Jr., 1985, トリアージ, 大災害と救急医療, 情報開発研究所, p. 48-82.
- 6) Garb, S. and Eng, E., 1969, Disaster Handbook, Springer Publishing Co. Inc., New York.
- 7) 鶴飼 卓・甲斐達朗・太田宗夫, 1992, 災害に対する病院の備えについて, 救急医学, 16巻12号, p. 1659-1664.
- 8) PAHO/WHO, 1981, Emergency Health Assessment after Natural Disasters PAHO Scientific Publications, No. 407.

[うえはら なるお 国立国際医療センター国際協力局 兼外科：厚生技官]

# 制震と免震の原理

制震構造の研究開発と耐震設計

小堀鐸二 坂本光雄

## なぜ制震構造なのか

いくら激しい地震に襲われても建物が余り揺れもせず、安全であって、恐怖心や不安を感じずとも全くないような構造の仕組みを建物に与えることができたとしたならば、これほど素晴らしいことはないであろう。このことは、日本のような地震多発国に住む我々建築構造技術者の長い間の夢というか、根源的な願望であったと言ってよいのである。

とかく地震になったら、多くの人々は身に危険を感じて家から飛び出して逃げようとする。この発作的な行動は実は、我々の大切な仕事であり、かつ生活の場でもある建物の構造の仕組みをもともと信用していない証拠の表われなのである。むしろ地震になったら、外を歩いている人達までも、こぞって建物の中に逃げ込んでくるようではなければならない。そうした建物を我々建築構造技術者は社会に提供していかなければならないとかねがね考えていた。

さて、1994年1月にはロサンゼルス郊外のノースリッジを震源域とする地震が発生し、高速道路、低層建築を中心に多くの被害を受けた。地震被害とも1971年のサンフェルナンド地震とほぼ同程度であったが、日本と同様に地震頻発地域であるカリフォルニア州では、過去にも被害地震を多く経験しており、最近では1989年にロマプリエタ地震で、サンフランシスコ周辺地域が多くの被害を受けた。同じような被害がまたも繰り返されてしまった今回のノースリッジ地震では、地震の後には、地震予知の難しさについて改めて指摘されていた。

ひるがえって、わが国の場合はどうであろうか。

震源域に沿って存在する大都市の数はアメリカ西海岸の比ではない。そして、一部の地域では地震予知の研究が行なわれているものの、確実に大地震を予測するまでには至っていないようである。このことは、将来とも構造物の安全を脅かす地震動の予測が極めて難しいことを物語っている。

これは、建物の構造技術者にとっては大変に困ったことなのである。建物の敷地に生ずる地震動の性状が特定できないということは、地震の外乱という“原因”に関するデータが不明確なままに、建物の地震時の応答という“結果”を推量し、構造設計をしなければならないからである。しかも経済性という制約の下で、大地震に対して人命を損なうような破壊を起こしてはならないとされている。こうした論理矛盾を孕んだままで、現状は仮定した地震動による耐震設計が一般に行なわれている。経験を踏まえたとは言え、これでは仮定という首枷からして安全性の保証がいつでも成り立つとは言い難いのである。

ここに制震構造の発想が生まれる最大の理由がある。つまり、不確実で未知な要因の多い地震動に対して、ひたすら消極的に耐えしのぶという従来の耐震構造の設計思想を墨守することで完璧を期することは一般には難しいのである。これを超えるものとして、建物の構造それ自体がアクティブに地震動に立ち向かい、建物の応答を抑制する制震構造システムの研究開発と実用化が、先端技術の急激な発展と呼応して進められるに至ったのである。

地震動と建物の非定常的な共振振動を抑制するために、具体的には建物にエネルギー吸収機構を積極的に付与したり、剛性を可変にすることで非共振化を図ったり、制御力を加えて地震応答を抑制したりすることで、予測し難い地震動特性の不

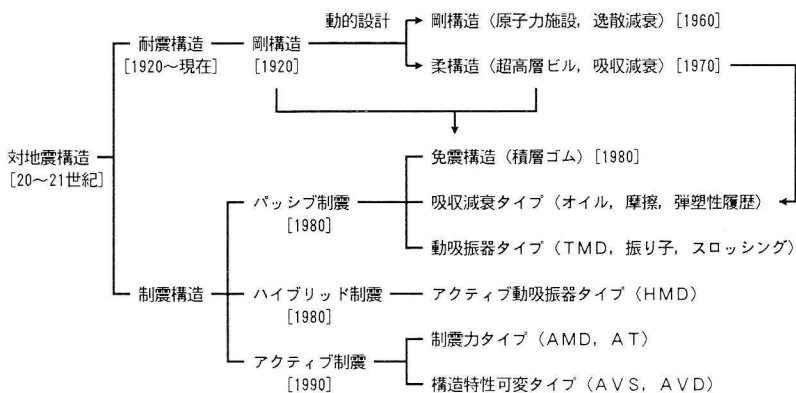


図1 対地震構造の発展の流れ

確かさにかかわりなく、建物に万全な安全性と快適な居住性を確保しようとするものである。

以下、こうした概念の実現を目指して研究開発と実用化が進んでいる制震・免震構造の現状と、中でも大きな振動抑制効果が得られるアクティブ制震構造の例を紹介する。

### 耐震構造と制震・免震構造

日本における対地震構造を、発展の流れに沿って分類整理して図1<sup>1)</sup>に示す。100年の耐震構造の歴史は大きな地震災害を教訓として、その都度新たな設計法の改善がなされ、そして、現在のような超高層ビルが出現したのが、今から26年前の1968年である。それまでの剛構造を主体とする静的な強度設計による耐震構造が、動的な揺れを評価する柔構造の設計手法の研究により、超高層ビルを可能としたのである。これには、強震計の開発、コンピュータ技術の進歩が大きく寄与しており、1981年の建築基準法改定はこれらの成果の集大成といえる。こうした動的設計の定着により、建物が地震時にただひたすら耐えようとする受け身の耐震構造から、更に積極的に建物に制震力を加えたり、建物の動特性を変化させて応答振動の低減を目指すアクティブ制震と免震構造を含むパッシブ制震技術の実現へ発展してきている。

地震による建物の応答振動は、同じ固有周期を持つ建物でも減衰が大きければ小さく、また同じ減衰性能を持つ建物でも固有

周期が長いほうが小さい。こうした特性を積極的に構造物に取り入れて、地震や強風による応答振動を制御しようとする、すなわち、応答制御設計がこれからの制震(免震)設計である。動的設計の定着と新素材、新装置、制御理論・技術、マイクロコンピュータなどの先端

周辺技術の発達により、こうした応答制御設計が可能となってきたのである。

制震設計の基本的な考え方には減衰効果をねらった設計と非共振効果をねらった設計の2つあるが、これを実現させる方法も大きく分けて2つある。1つはアクティブ制震といわれている方法で、制御・機械装置を用いて、付加質量を駆動して制御力を与える方法(AMDシステム、HMDシステム)や建物の剛性を変化(可変剛性)させて非共振化を図る方法(AVSシステム)である。もう1つはパッシブ制震と言われているもので、効果的に減衰装置を配置し建物の減衰性能の向上をねらったものや、免震構造のように地震動の建物への伝達をできるだけ少なくするための一定の装置を建物の基礎部分に設けるやり方(Base Isolationといわれ海外で技術的な発展をみた)である。これらの制震・免震構造で、これまでに実現している方式を分類したのが表1および図2である。

こうした制震構造は従来にない振動制御効果が得られるが、装置の特性、制御システムなどを組

表1 制震・免震構造の分類

	アクティブ、ハイブリッド	パッシブ
減衰	アクティブ・マス・ドライバー(AVD)システム アクティブ・マス・ダンパ(AVD)システム ハイブリッド・マス・ダンパ(HMD)システム	チューンド・マス・ダンパ(TMD) スロッシング・ダンパ 摩擦ダンパ 鋼製弾塑性ダンパ 鉛ダンパ 粘(弾)性ダンパ オイル・ダンパ
非共振	アクティブ・ヴァリアブル・スティフネス(AVS)システム	
避共振		ベース・アイソレーション(免震)システム

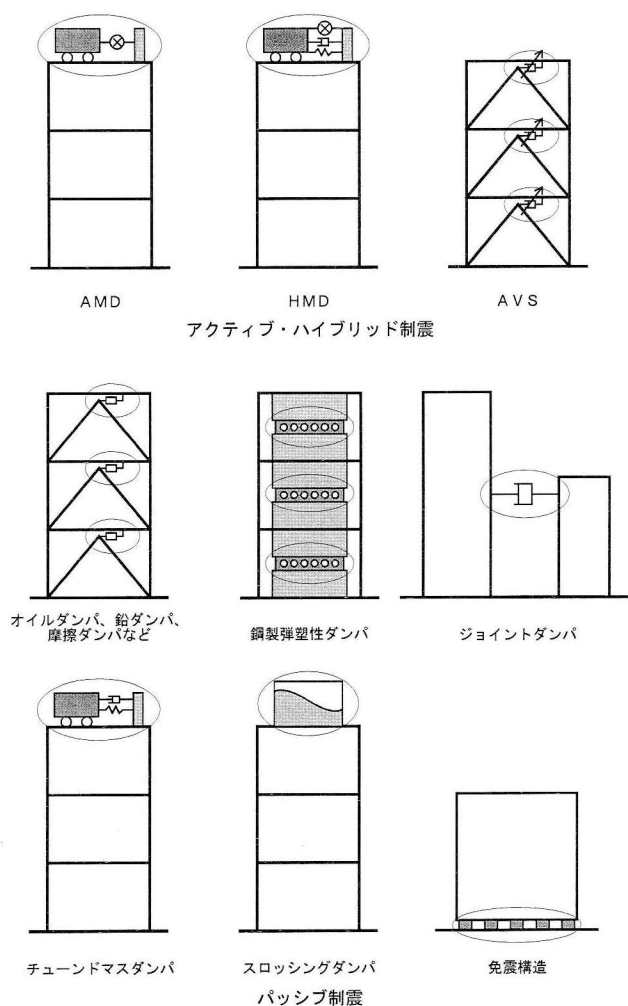


図2 制震・免震システムの各種方式

み込んだ動的解析による高度な設計によることになる。筆者による本格的な研究開発の提唱<sup>2)</sup>以降、実用化に向けた技術開発が盛んになってきており、免震構造を含むパッシブ制震構造では大地震を対象とした構造物も多く実現している。また、アクティブ制震では、今までに実用化された例では中規模程度の地震を対象としたシステム（AMDシステム、HMDシステム）が多いが、大地震を対象としたシステム（AVSシステム）も筆者らによりすでに実現が図られている。

#### 制震・免震構造の研究開発と実建物への適用

制震構造または制震装置を取りつけた建物で、これまでに国内において完成した建物を一覧表に

したのが表2である。パッシブ制震では機構の違いはあるが、35件のうち15件がチューンド・マス・ダンパ（TMD）と呼ばれる装置を設置した構造物である。これらは主に塔状構造物で強風時には不快な揺れが生じやすいため、構造物の周期に同調させた動吸振器を設置して応答振動の低減を狙ったものである。対象外乱としては主に再現期間5年程度までの強風である。設計用地震を対象として応答低減を図った例としては、ブレースなどを利用して構造骨組に鋼製弾塑性ダンパ、鉛ダンパ、粘性ダンパ、オイルダンパなどを内蔵したものがある。これは地震時の層間変形をダンパ部に集中させることで地震エネルギーの吸収を図り、構造物の減衰効果を高めて応答低減を図るものである。

一方、システムに組み込まれたコンピュータでコントロールして、振動外乱の種類や性質によらず大きな応答制御を実現するアクティブ制震については、1989年には中小地震（強震）、強風を制御対象としたアクティブ・マス・ドライバー（AMD）システムが、筆者らにより世界に魁けて完成した。また、1990年には設計用の大地震を制御対象としたアクティブ・ヴァリアブル・スティフネス（AVS）という独特なシステムを備えた建物の実現を、やはり筆者らにより世界で初めて果たし、これらは国際的な評価を得ている。

また図3は、日本建築センター性能評定シート（免震、'93.8現在）から免震構造が適用された建物の地上階数の分布を示したものである。周期が2～3秒の積層ゴムを用いる免震構造では、中低層建築で応答低減効果が大きいことを利用したのものとなっている。適用建物を見用途別に見ると住宅が22%と多く、事務所、実験施設で20～30%、そして電算センターは10%程度である。しかし、事務所ビル内の電算室への床免震の適用をも合わせて考えると、地震時に機能維持の重要な電算施設や、大地震時に多くの人命を失う恐れのある住



表 2 (a) 制震構造の実施例

分類	システム/装置の名称	開発者	実施建物	完成年(予定)
パッシブ	鋼製弾塑性ダンパ	松下清夫	日立本社ビル	1984
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	日建, 三菱製鋼	千葉ポートタワー	1986
	スーパースロッシング・ダンパ	清水建設	横浜マリントワー	1987
	フック・ダンパ	三井建設	ゴールドタワー	1988
	チュンド・マス・ダンパ	松田平田, NKK	MHSビル	1988
	摩擦ダンパ	日建, 住友金属	ソニックシティ	1988
	ジョイント・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	鹿島K1ビル	1989
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	日総建, 三菱重	東山タワー	1989
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	日建, 三菱製鋼	福岡タワー	1989
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	日建, 住友金属	アサヒビールタワー	1989
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	竹中工務店	クリスタルタワー	1990
	鉛ダンパ	フジタ	フジタビル	1990
	ハニカム・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	王子製紙本社ビル	1991
	鉛ダンパ	オイレス	エクシブ鳥羽アネックス	1991
	鉛ダンパ	オイレス	新倉ビル	1991
	粘性ダンパ	住友建設	TV静岡メディアアシティ	1991
	粘性ダンパ	清水建設	芝浦シーバンスS棟	1991
	スーパースロッシング・ダンパ	清水建設	新横浜プリンスホテル	1992
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	清水建設	ハウステンボス	1992
	ハニカム・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	シーフォートタワー	1992
	ハニカム・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	鴨川グランドタワー	1992
	粘性ダンパ	大日本土木	佐藤ビル	1992
	ジョイント・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	ららぽーと 茅ヶ崎	1993
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	竹中工務店	六甲アイランド P&G	1993
	スロッシング・ダンパ	梓設計	新東京国際空港管制塔	1993
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	安井建築, 梓設計	東京国際空港管制塔	1993
	粘性ダンパ	川崎製鉄	千葉市総合体育館	1993
	チュンド・マス・ダンパ (TMD)	大林組	法華クラブ池之端	1993
オイル・ダンパ	大成建設	志村三丁目独身寮	1993	
ハニカム・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	イオングループ本社	(1994)	
チュンド・マス・ダンパ (TMD)	日建設計	秋田タワー	(1994)	
ハニカム・ダンパ(鋼製弾塑性ダンパ)	鹿島	S H I P計画住宅棟	(1995)	
高減衰オイル・ダンパ	鹿島	A Sビル	(1995)	
鋼製弾塑性ダンパ	大成建設	神戸ファッションプラザ	(1995)	
高減衰オイル・ダンパ	鹿島	S Kビル	(1996)	

表 2 (b) 制震構造の実施例

分類	システム/装置の名称	開発者	実施建物	完成年(予定)
アクティブ	AMD (アクティブ・マス・ドライバー)	鹿島	京橋成和ビル	1989
	AVS	鹿島	鹿島技研振動台	1990
	(アクティブ・ヴァリアブル・スティフネス)		制御棟	
	AMD (アクティブ・マス・ダンパ)	竹中工務店	千駄ヶ谷インテス	1992
	HMD (ハイブリッド・マス・ダンパ)	竹中工務店	阪急アブローズ	1992
	HMD	三菱重工, 安井	関西空港管制塔	1992
	HMD	清水建設	大阪ORC200	1992
	DUOX	鹿島	安東錦町ビル	1993
	HMD	三菱重工	ランドマークタワー	1993
	AMD	日建, 藤田隆史	長銀本店ビル	1993
	HMD	松田平田	K S計画	1993
	HMD	I H I・鹿島	新宿パークタワー	1994
	HMD	三菱重, 日建設計	A C Tタワー	1994
	AMD	大林組	リバーサイド隅田	(1994)
	HMD	三菱重, 日建設計	大阪WTCビル	(1994)
	DUOX	鹿島・小堀鐸研	同和火災新本社ビル	(1995)
	HMD	三菱重, 日本設計	りんくう 3号タワー	(1995)
	HMD(G・LAPUTA)	藤田隆史, 三菱製鋼, フジタ	広部ミヤケビル	(1995)

宅などへの免震構造の適用が進んでいることがうかがえる。

アクティブ、ハイブリッド  
制震システムと地震観測

筆者らは、これまでに実際の建物にアクティブ

またはハイブリッド制震システムを設置、さらに制御効果の確認と今後の開発のデータを得る目的で地震観測を実施している。これらのシステムの概要と観測結果、制御効果について紹介する。

(1) AMD システム (京橋成和ビル)<sup>3)</sup> 建物の外観を写真1に示す。この建物には制震装置としてアクティブ・マス・ドライバー (AMD) システムが設置されている。AMD システムの全体構成を図4に示す。システムは駆動部、制御部、監視部からなっており、制御力を与える重錘は最上階に2台設置され、中央部のAMD1 (4t) と端部のAMD2 (1t) がそれぞれ短辺方向の並進と捩じれの振動を制御する。制御は、地下と装置設置位置の相対速度にゲインを乗じて制御力を与えるフィードバック制御であり、フィードバックゲインは全状態量に対して評価した最適フィードバックゲインと等価な制御効果が得られるような値を設定している。

(2) AVS システム(鹿島技研 21 号館制御棟)<sup>3)</sup> 建物の外観を写真2に示す。この建物には可変剛性型のアクティブ制震装置アクティブ・ヴァリアブル・スティフネス (AVS) システムが組み

込まれている。このシステムは非共振型の制震システムであり、大地震までを制御対象としている。システムの全体構成を図5に示す。3階建ての建物の短辺方向両側面に逆V型のブレースを設け、ブレース頭部と梁がON, OFF 機構を持つ可変剛性装置により接続され、装置の真ん中に設けられた弁の開閉によりフリー、ロックの状態を作る



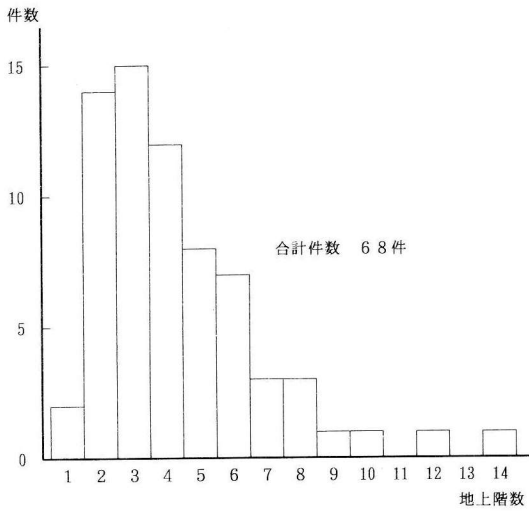


図3 免震構造建物の階数分布

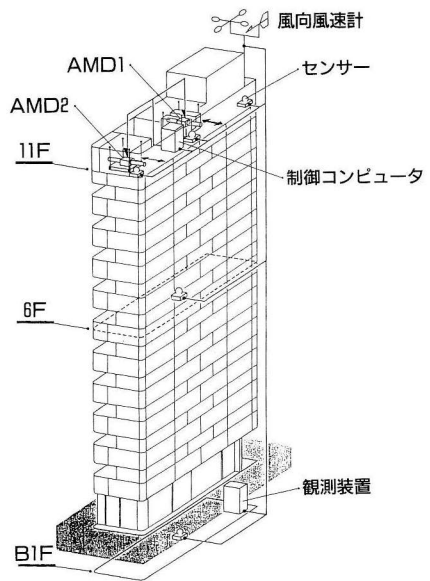


図4 AMDシステムの全体構成



写真1 京橋成和ビル

ことにより、建物の剛性を変化させる仕組みである。

制御方法は、図6に示すように1階での地震動をバンドパスフィルターにより分析し、建物の持つ剛性の範囲の中から最も応答振動の少ない剛性または剛性分布を選択して変化させるフィードフォワード制御である。

(3) ハイブリッドシステム (安東錦町ビル)<sup>4)</sup> 建

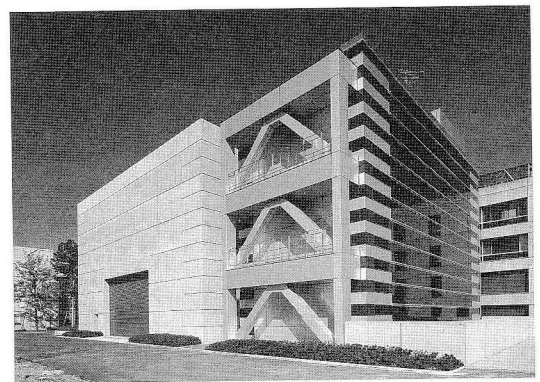


写真2 鹿島技研21号館制御棟

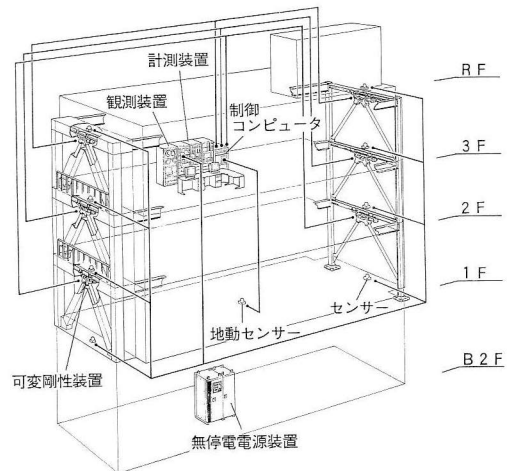


図5 AVSシステムの全体構成

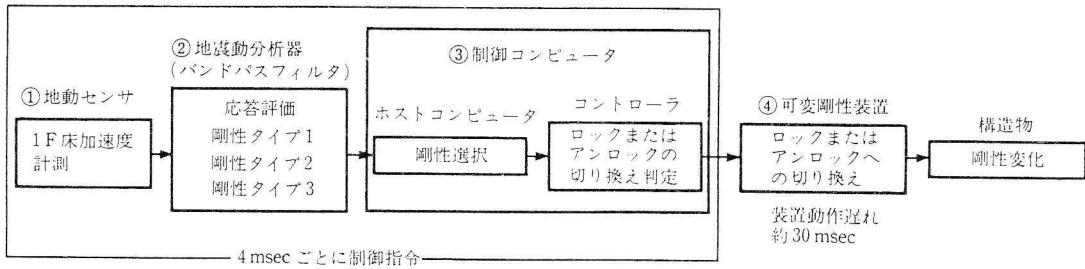


図6 AVSシステムの制御方法



写真3 安東錦町ビル

物の外観を写真3に示す。この建物にはAMDシステムとパッシブ動吸振器を組み合わせ、AMDシステムと同等の制御性能を有するハイブリッドタイプの制震装置（DUOXと呼ぶ）が設置されている。また、建物の平面形状が正方形に近いので制御方向は水平2方向としている。装置の大きな特徴は、従来の動吸振器の上に動吸振器重量の10～15%の重錘をもつ小さなAMDを重ねるだけで良いことである。

システムの全体構成、機器の構成を図7、図8に示す。DUOXの動吸振器部分の重量は建物地上重量（約2600t）の0.8%の20t、AMDの重り重量はその1/10の2t、すなわち、建物重量の0.08%にあたる。このほか、動吸振器はバネと支持機構を兼ねる中空積層ゴム、減衰を与えるオ

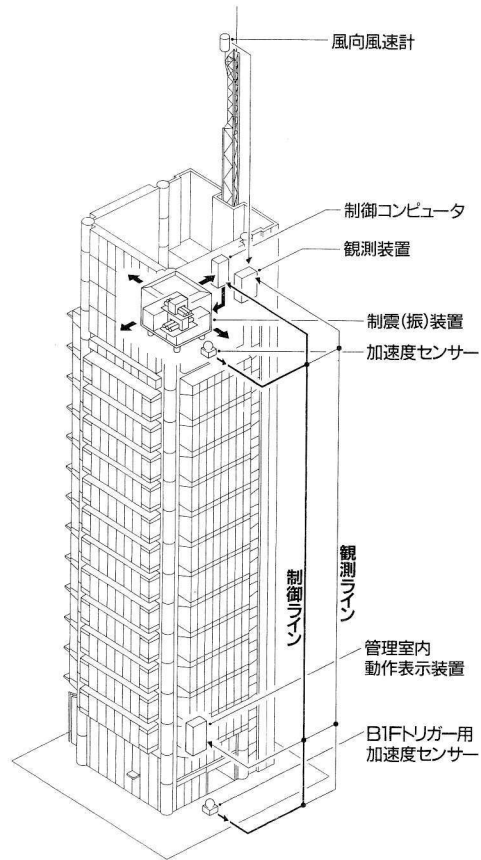


図7 DUOXシステムの全体構成

イルダンパよりなる。この動吸振器の上にACサーボモータ、ボールねじにより駆動するAMDが直交二方向に重ねられアクティブに二方向に制御される。

### 地震観測と制御効果

以上、紹介したアクティブ制震システムを装備した建物では、いずれも地震（強風も同時に観測）観測システムを備えている。観測記録は筆者

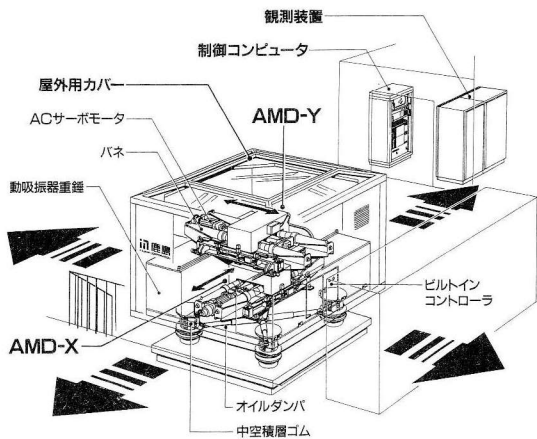


図8 DUOXシステムの機器構成

の研究室内に設けられた観測センターと電話回線を介して接続され、集中処理が可能となっている。観測センターの構成を図9に示す。地震時のデータは、観測センターから最大値、集録状況が確認され、必要な記録を選択の後電話回線によりデータが転送される。また、観測センターでは、データの分析や大型計算機またはワークステーションを用いての無制御時のシミュレーション解析、制御効果の確認などが行なわれる。

表3は、これまでに得られた「地震観測記録一覧」である。これらの記録の中から建物ごとに主なものを制御効果の比較を含めて紹介する。

(1) 京橋成和ビル (AMDシステム) これまでに

観測された中で最も大きな地震である1992年2月2日の記録を図10に示す。時刻歴の記録は、本敷地での観測記録をもとに制御、無制御の比較を解析的に行なったものである。いずれの地震でも、当初の制御目標を満足する結果が得られ、本システムが震度階V程度まで制御可能であることが示された。

(2) 鹿島技研21号館制御棟 (AVSシステム) この建物に設置されているAVSシステムでは、1階の加速度が $10 \text{ cm/sec}^2$ 以上で制御状態となるが、1990年11月の完成から現在までに制御状態に入った地震は1991年11月19日と1992年2月2日の地震の2回あり、そのうち1991年11月19日の記録について無制御(ブレース構造)時の解析結果と重ねて図11に示す。図から剛性変化により大きく応答が低減しているのがわかる。

(3) 安東錦町ビル (ハイブリッドシステム) 1993年7月の完成から約1年、この間強風による制御状態の記録は多く得られているが、体感レベルに達する地震は一例だけである。1993年10月12日の地震であり、そのときの記録を図12に示す。このビルでは動吸振器の加速度を記録しており、その記録をもとにシミュレーション解析によって無制御状態を求めて制御時と比較している。建物の1次周期付近の成分が小さな地震であったため、加速度の低減は少ないが変位は大きく低減してい

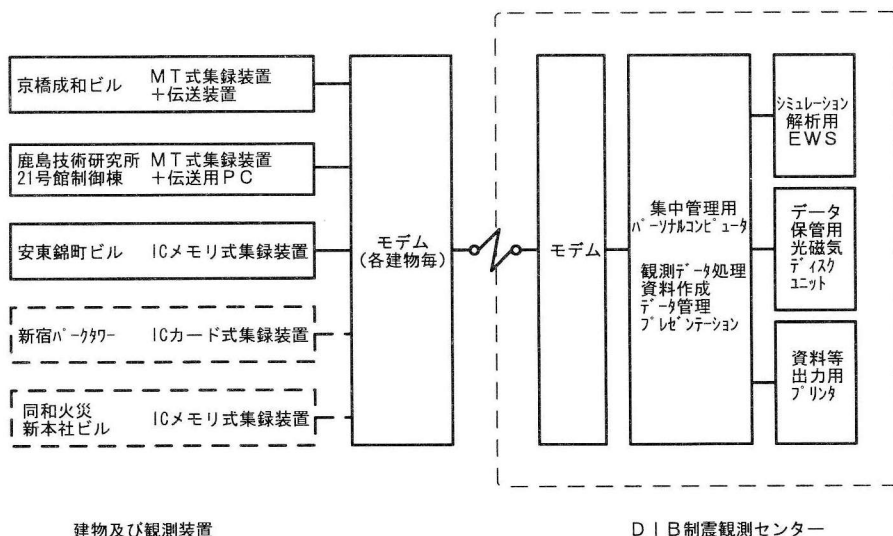


図9 観測センターの構成

表3 地震観測記録一覧

年月日	震源地	マグニチュード	震源深さ (km)	震度	京橋成和ビル		鹿島技研		安東錦町ビル	
					記録	地動Acc.	記録	地動Acc.	記録	地動Acc.
1989. 9. 5	千葉県中部	4.5	70	II	○	7				
10.10	千葉県中部	4.8	78	III	○	13				
10.14	伊豆大島近海	5.7	21	III	○	9				
1990. 2.20	伊豆大島近海	6.5	6	IV	○	6				
6. 1	千葉県東方沖	6.0	59	III	○	7				
6. 5	神奈川県	5.4	123	IV	○	9				
8. 5	茨城県沖	5.8	39	II	○	3				
8. 5	神奈川県西部	5.1	14	III	○	5				
8.23	千葉県中部	5.4	50	III	○	15	○	6		
8.23	千葉県中部	5.2	50	III	○	15				
1991. 7.14	長野県東部	5.4	87	III	○	16				
9.29	千葉県北部	4.9	80	II	○	8				
11.19	千葉県沿岸	4.9	80	IV	○	23	○	15		
1992. 2. 2	東京湾	5.9	92	V	○	114	○	64		
4.10	東京都東部	4.6	80	III	○	15	○	7		
4.14	茨城県南西部	4.9	62	III			○	6		
4.23	茨城県南西部	4.3	58	II			○	2		
5.11	茨城県北部	5.6	56	II	○	9	○	3		
5.20	東京湾	4.8	92	III			○	3		
6.17	埼玉県東部	3.9	59	II			○	1		
8.30	東海道はるか沖	6.6	325	III	○	8	○	3		
11.19	神奈川県	3.9	40	II	○	4	○	9		
1993. 1.15	釧路沖	7.8	107	III	○	6	○	4		
5.21	茨城県南西部	5.4	61	IV	○	22	○	14		
9.18	茨城県沖	4.9	35	II					○	3
10.12	東海道はるか沖	7.1	390	IV	○	19	○		○	14

注) ○ : 地震記録が得られたもの、なお地動加速度は全て基礎レベルで観測されたものである。

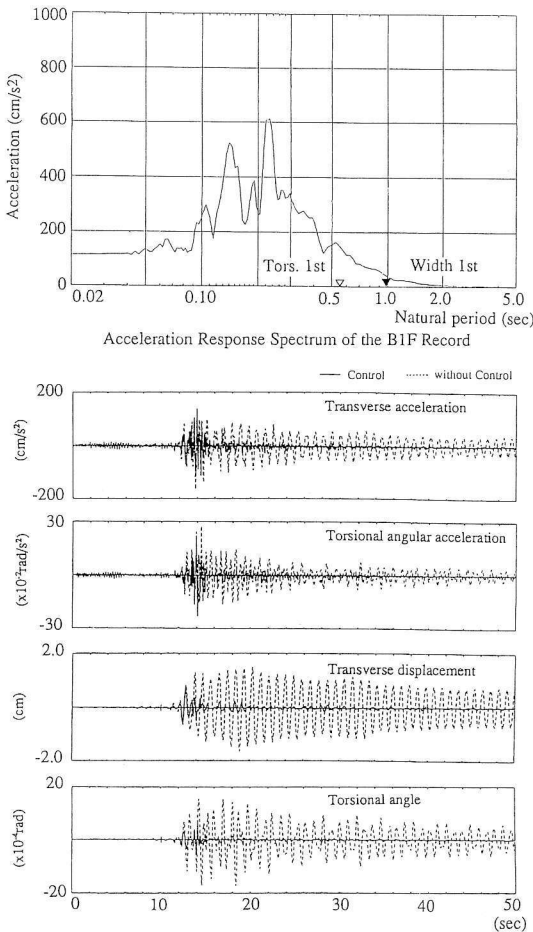


図10 AMDシステムの制御効果 1992.2.2地震

制震・免震構造は、各種の素材、装置を制御理論、振動理論によりシステム化して構築される技術で建物の規模や形状、用途、重要度などにより、どのような構造システム技術を選んだらよいか、これから21世紀を迎えてまだまだ新しいアイデアが生まれ、経済的で制御効果の大きいシステム

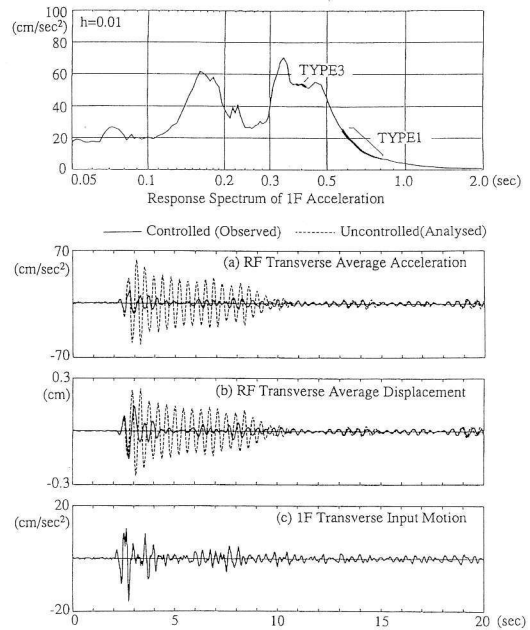


図11 AVSシステムの制御効果 1991.11.19地震

るのがわかる。

おわりに

地震災害の低減というきっかけから、従来の耐震構造を超える技術として開発、適用が急速に進められてきている制震・免震構造についての概略を紹介し、特にアクティブ制震構造のシステムの概要と観測結果について報告した。四半世紀足らずで日本の超高層ビルが普及したことを考えると、より高度な技術を必要とするアクティブ制震構造も、21世紀初めにはその設計法も十分に確立できであろうと考えている。

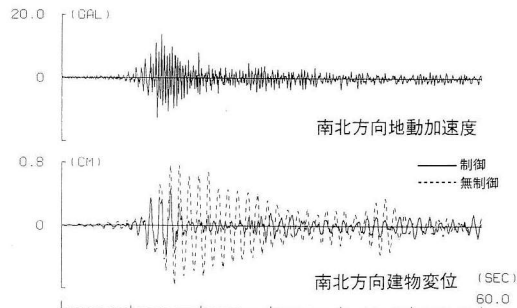
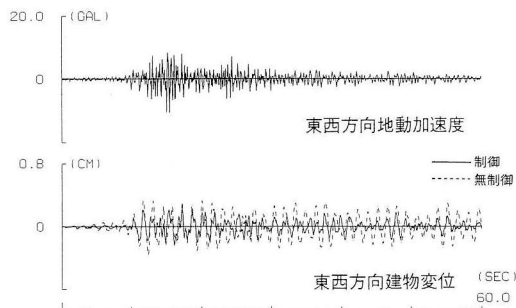
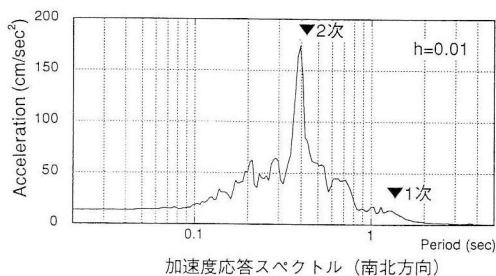
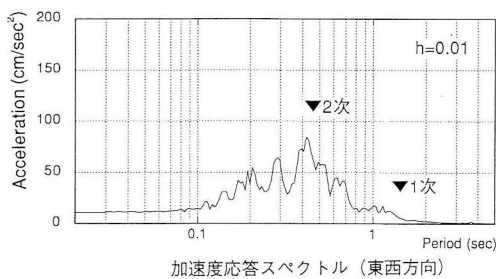


図 12 DUOX システムの制御効果 1993.10.12 地震が実現する可能性を多く秘めている魅惑的な研究・開発分野なのである。また、本年 8 月までには、このための国際学会 (IASC: International Association For Structural Control) が設立され、第 1 回の国際会議 (1<sup>st</sup> WCSC: First World Conference on Structural Control) が 8 月 3 日～5 日にわたりロサンゼルスで開催され

ることになっている。こうした趨勢の中で日本は主導的な立場に立っているが、今まで述べてきたように制震・免震構造は、より変化に富んだ安全で快適な建築を生むための幅の広い技術的課題を包含していると見ることができる。単なる防災技術という認識以上に、この技術の開発推進と普及発展は、これからの人類が営む生活空間を、より一層静謐で文化の薫りの高い豊かなものにしていくに違いない。

## ご案内

### 地震ジャーナル 10号 特集：迫りくる東京圏直下地震

エッセイ 10周年記念号の発刊に際して  
カラー口絵 版画と文 地震と瓢箪と鯨  
江戸ー東京の直下地震  
首都直下のプレート構造  
どうやって予知する？  
直下地震の危険度は？  
川崎市と直下型地震  
直下型地震に備える  
液状化対策は？  
ライフラインの安全性  
そのとき社会は？  
金融・経済へのインパクト  
損害保険はどうなる？  
災害は進化するか

萩原尊禮  
井野盛夫  
萩原尊禮  
石田瑞穂  
萩原幸男  
力武常次  
杉山孝志  
荒 孝一  
浜田政則  
片山恒雄  
廣井 脩  
織田 薫  
長島秀隆  
柳川喜郎

- ご講読料 1500 円 [ 郵送料を含む ]
- お申込先 〇 助地震予知総合研究振興会  
[ 本誌綴込みの振替用紙をご利用下さい ]

財団法人 地震予知総合研究振興会

## 参考文献

- 1) Kobori T., July 1992, Current Aspects of Active Control of Structural Vibrations, Proceedings of the National Symposium/ Workshop on Structural Response Control, Japan Panel on Structural Response Control Research.
- 2) 小堀鐸二, 1986. 5, 耐震構造の新しい展開, 内藤多仲生誕 100 年記念文集.
- 3) 小堀鐸二, 1993. 9, 制震構造, 鹿島出版会.
- 4) Kobori T., et. al., Nov. 1993, Research, Development and Application of Active-Passive Composite Tuned Mass Damper, Fourth International Conference on Adaptive Structures, Nov. 1993, Cologne.  
[こぼり たくじ 京都大学名誉教授, 鹿島最高技術顧問, (株)小堀鐸二研究所代表取締役, 工博]  
[さかもと みつお 鹿島小堀研究室制震構造研究部長, (株)小堀鐸二研究所構造統括部長]



# ランドマーク・タワーは大丈夫だ!

## 横浜ランドマーク・タワーの耐震設計

### 山崎真司

#### はじめに

この建物は、東京湾ウォーターフロントにおける新都市開発、みなとみらい 21 地区内に位置している。

みなとみらい 21 事業は、横浜の自立性の強化と、国の核都市構想の先導的実現を図る事業として位置づけられており、昭和 58 年以来、横浜市並びに住宅・都市整備公団により、埋立事業・基盤整備事業が着々と進められてきた。

この建物は、みなとみらい 21 事業における最初の大規模民間開発で、当街区の街づくりの先導的役割りを果たすものである。

ランドマーク・タワーは地下 3 階、地上 70 階、塔屋 3 階、高さ 296 m、延床面積 231,060 m<sup>2</sup> の規模の超高層建築で、現在、わが国で最も高い建築物である。地上階は、49 階以上がホテル、48 階以下がオフィスの複合用途となっている。

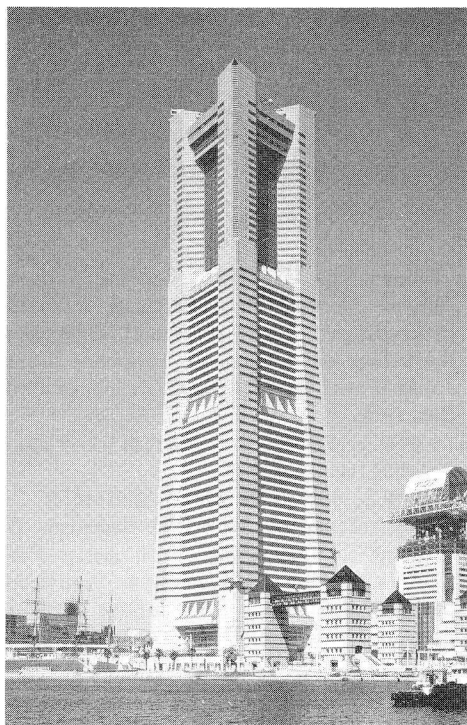


写真1 ランドマーク・タワーの外観

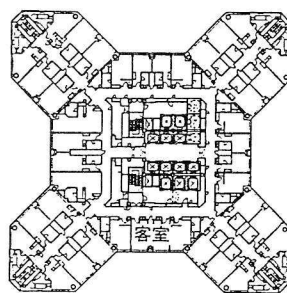
建物外観を写真 1 に、基準階平面を図 1 に示す。

ランドマーク・タワーは独特な形状の高層建築である。正方形の四隅が張り出した平面形状で、下層から上層に向かって平面形が縮小している。上層に向かって連続的にセットバックする隅角部の張り出した部分は、建築デザイン上、平面形がかなり異なる上層のホテル、下層のオフィスの二つの部分を上下に繋いで視覚的に統一する意味を有するとともに、構造計画上水平荷重に対する抵抗と安定性確保の上で重要な役割をもっている。

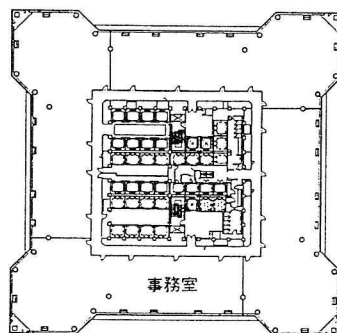
わが国の構造物は、強い地震動および台風による強風を受ける。建物の構造設計においては、これらの外力に耐える安全で合理的な架構計画の検討が中心課題となる。

#### 日本の超高層建築

わが国における超高層建築第一号は、1968 年に竣工した地上 36 階の霞が関ビルである。その後の超高層建築の歩を建物高さについてみると、図 2 のようになる。



ホテル階



事務室階 (20階)

図1 基準階平面図



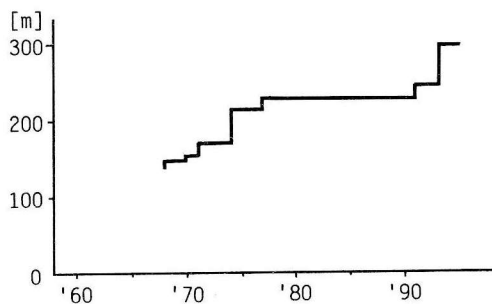


図2 各年代における最高建物高さ

同図は、各年代における最高高さの建物を示したものである。霞が関ビルの竣工より四半世紀が経過し、現在のランドマーク・タワーに至り高さが約2倍になっている。

### 地震時に建物に生じる力

ここで、簡単なモデルにより地震時に建物に生じる力について考えてみる。

建物を、最も単純化したモデルは、図3に示すように、質量と剛性を持ち地上に固定された一本の棒（線材モデル）である。

この棒に水平方向の静的な力が加わると、図4aの破線のように変形し、棒の内部には応力（内力）が発生する。応力の大きさは、図4b,cに示すようなせん断力と曲げモーメントの大きさを表すことができる。

質量と剛性を持った棒の固定端が地震動を受ける場合を考えると、棒は振動し、ある瞬間を考えると、棒（建物）は図5に示すように変形し、このとき棒の内部には水平荷重が静的に加わったときと同様な応力が生じる。

地震の継続時間内において、応力は刻々と変化する。建物の安全性の点からは最大の応力（すなわち最大の変形）が生じたときが検討の対象になる。各位置において発生する最大のせん断力、曲げモーメントは大略図5c,dのような分布形となる。せん断力、曲げモーメントともに固定端に近いほど大きな値となる。固定端におけるせん断力を建物重量で除した値（無次元量）をベースシ

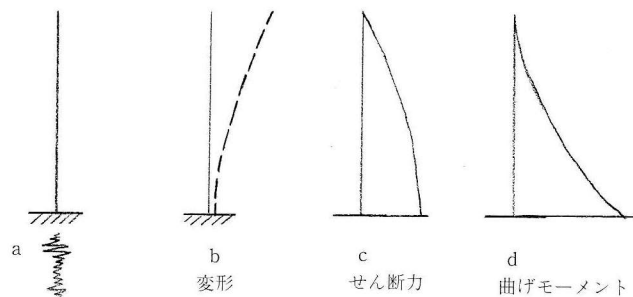


図5 地震によって生じる変形と応力

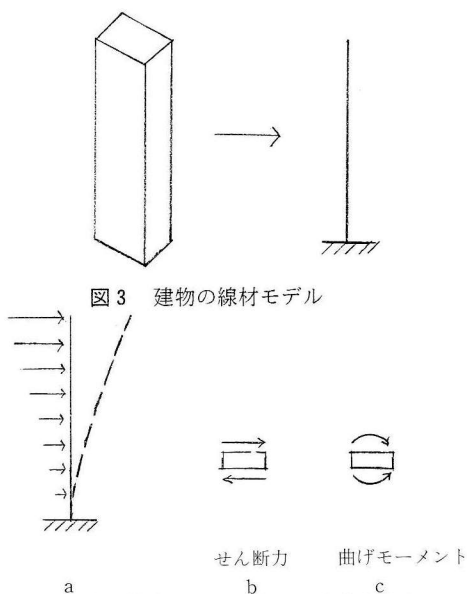


図3 建物の線材モデル

図4 水平荷重によって生じる変形と応力

アー係数と呼んでいる。

ここで、図6に示すように、平面形状が同一で高さの比が1:nの二つの建物を考える。建物重量の比は、当然、1:nである。高層建築では、経験的に固有周期は建物高さとはほぼ比例関係にあるので、固有周期の比は1:nとなる。

地震時に生じる内力の大きさは建物の固有周期に依存し、ベースシアー係数は固有周期にほぼ反比例する傾向がある。建物最下部に生じる最大せん断力は建物重量とベースシアー係数の積であるから、二つの建物のせん断力の比は、

$$1 : (n/n) = 1 : 1$$

となる。せん断力の比が1:1であれば、静的水平力の場合から類推できるように、曲げモーメントの比は1:

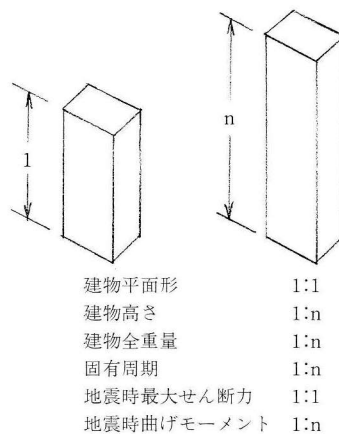


図6 建物高さと地震時応力

nとなる。

以上より、高層建築の場合、その高さが増すに従ってせん断力は変わらないが、モーメントはおおむね比例的に増大することがわかる。

したがって、超高層建築の設計では、高さが増すほど曲げモーメントに対する抵抗の確保が重要になってくる。

### 超高層建築の構造計画

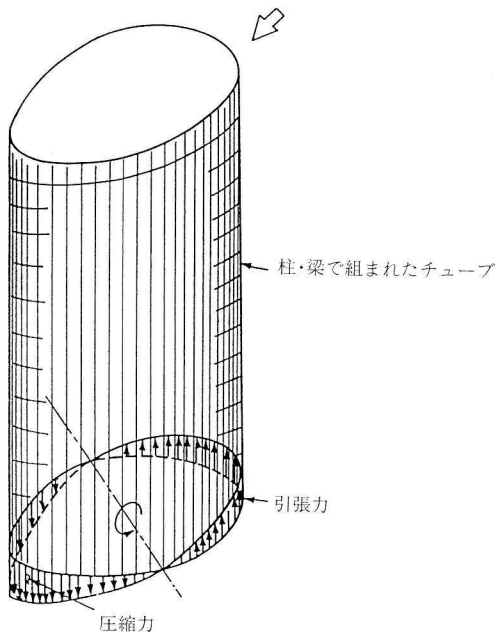


図7 チューブ構造

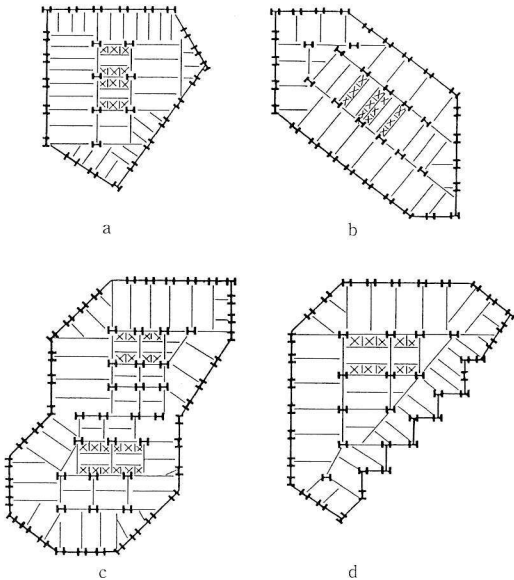


図8 チューブ構造物平面の例

### 1. 基本的な構造方式

- (1) チューブ構造 超高層建築の骨組形式として基本的なものにチューブ構造がある。チューブ構造とは文字どおりチューブ、すなわち管の構造で横力に抵抗する構造である。図7のように、建物の外面にとりかごのような柱梁で組んだ骨組を設け、全体で筒状の構造体を作る。図7は円形の平面の場合であるが、チューブ構造はどのような形状の平面に対しても適用でき、図8のように、建物の外側に骨組を組むことによってチューブを形成する。チューブ構造は、曲げモーメントに対する抵抗として合理的な構造形式で、超高層建築の構造として最も典型的なものである。チューブ構造は1961年シカゴの43階建てのビルに初めて適用された。チューブ構造の建物の例として、ニューヨークのワールド・トレード・センター（110階、高さ417m）がある。この建物では外壁に約1m間隔で柱を設け、筒状の構造体を作っている。
- (2) 塔構造 建物は樹木のように地下に根を張っているわけではない。水平荷重による転倒させようとする力（転倒モーメント）に対しては、建物自身の重さによって抵抗している。写真2のエッフェル塔は、4本の足で大地に踏ん張った架構形状をしており、水平荷重を受けたときの転倒に対して最も安定した構造形式である。近年、建物が益々高くなるのに伴い、塔の構造の建築への応用とも言うべき、「建物の外側に大きな柱を設けて転倒に対する安定性の高い構造体を作る」という考え方が出現している。

このような構造についての名称は特に無いが、こ



写真2 エッフェル塔

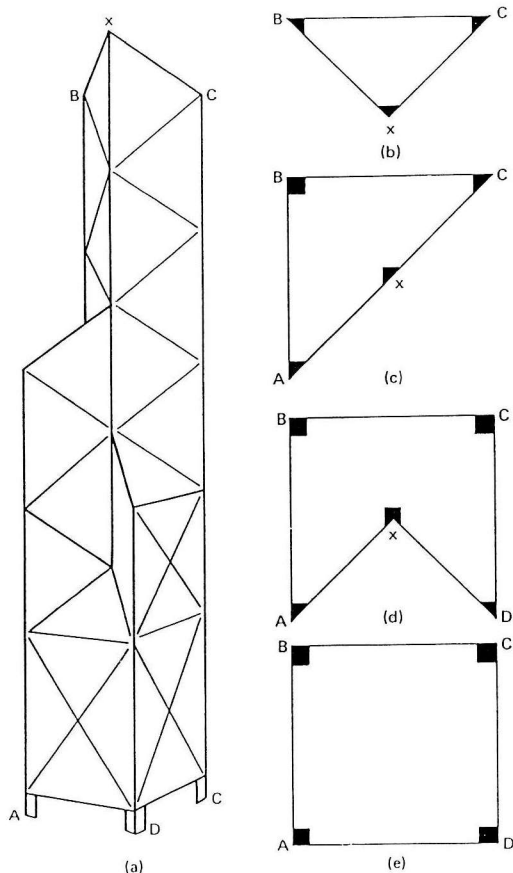


図9 中国銀行建物の骨組み  
(a) 立面図, (b)~(e) 各高さの平面図。

では仮に塔構造と呼んでおく。塔構造の代表な例として、香港に建設された中国銀行の建物が挙げられる。この建物は地上72階建てで、現在東洋で最も高い建物である。骨組形状を図9に示す。建物は四隅の大きな柱によって支持されている。

## 2. ランドマーク・タワーの構造

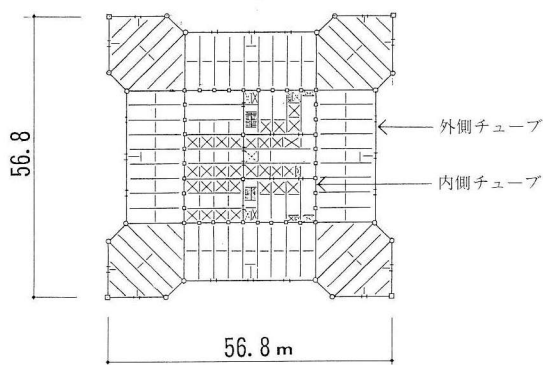


図10 平面図(40階)

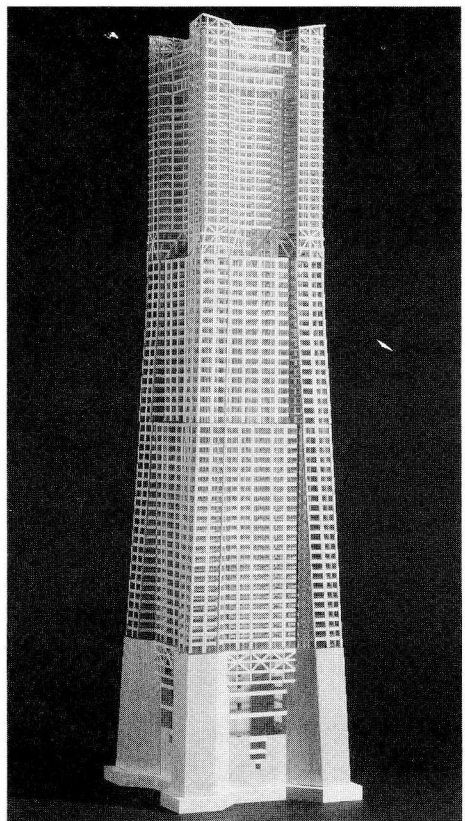


写真3 ランドマーク・タワーの骨組

ランドマーク・タワーの骨組を写真3に示す。ランドマーク・タワーの構造は、ワールド・トレード・センターのようなチューブ構造と、中国銀行のような塔構造を組み合わせたものとなっている。

建物外周部の自重(建物の重量)を建物四隅の張り出した部分の架構で支えることにより、転倒モーメントに対して最大の安定性を実現している。隅角部の架構は、エッフェル塔の足、中国銀行の四隅の柱と同じ役割を持ったものである。

骨組平面を図10に示す。ランドマーク・タワーの場合は、建物の外壁に沿う外側のチューブと、建物中央部のコア(エレベーター、階段などのスペース)を囲む内側のチューブとの二重のチューブで構成している。

## 制振装置

### 1. 装置の概要

近年、建築の快適性に対する関心が高まっている。風や地震による建物の揺れを軽減し、不快を感じさせないような配慮が望まれる。

ランドマーク・タワーは複合用途の建物で、48階以下が事務所、49階以上がホテルに供される。建物上部

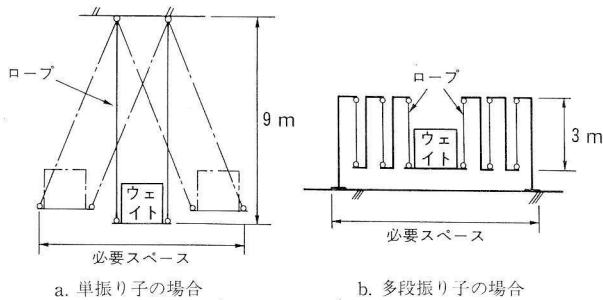


図11 多段振り子単振り子比較模式図

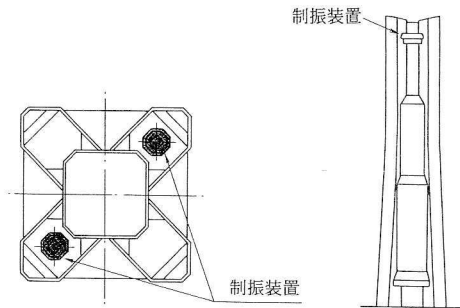


図13 制振装置設置位置

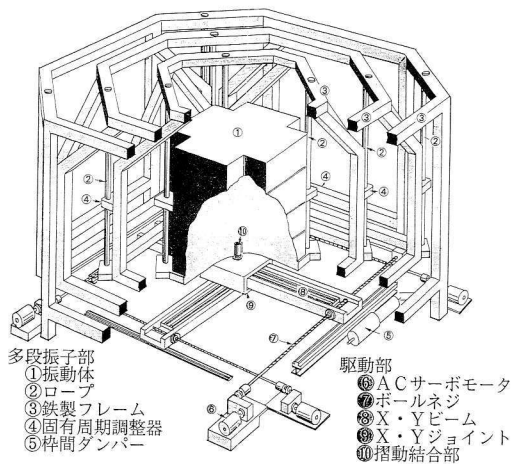


図12 制振装置機構概要

のホテル客室の居住性向上のため、新機構の制振装置を開発した。

一般に、塔状の構造物の最上部に、揺れの固有周期が構造物の固有周期と一致するような振り子を置くと、建物が風などにより揺れ始めると振り子の重りも振動し、建物の振動を低減する効果がある。

この原理を利用した制振装置は、観光タワーの風揺れ対策などで若干の例があるが、この建物用に開発した装置は次のような新技術が取り入れられている。

(1) 多段振り子機構 ランドマーク・タワーの固有周期は約6秒であるが、図11aのような通常の振り子(単振り子)では、ロープ長が約9mとなる。制振装置を小型化し省スペース化を図るために図11bのような多段振り子の機構を開発した。多段振り子の合計のロープ長を単振り子のロープ長に等しくすると、両者は同じ固有周期で振動する。図11は基本原理を示したものであるが、実際の装置では重りが2方向に移動できるよう立体フレームを用いて構成している。

(2) 制御力の付加 振り子による制振装置では重量を増せばその制振効果が向上するが、装置の規模の点で実用上は限界がある。そこで、振り子による反力に制御力を

付加することにより、その性能向上を図った。建物床に設置したセンサーによりとらえた建物の動きをコンピュータに入力し制御力を算出する。その力を電動モーターによって振り子の移動質量に作用させる。

装置の機構概要を図12に示す。

多段振り子部は、三重の鋼製フレームの中心に移動質量(170t)があり、それらは長さ3mのワイヤーロープによって互いに結ばれている。そして、最外部のフレームのみ建物床に固定されている。フレーム間には機構の安定性と安全性のために、枠間ダンパーを配置している。

制御駆動部は装置下部にあり、ACサーボモーター、ボールねじ、X・Yビーム、XYジョイントおよび駆動部と移動質量を連結する摺動結合部により構成されている。摺動結合部は、上下変位に対し自由なユニバーサルジョイントとなっており、摺動結合部に2次応力が加わらない様工夫している。

図13のように、塔屋1階に2基の装置を設置している。

装置の質量比(移動質量の建物1次モーダル質量に対する比)は、0.65%である。装置の基本仕様を表1に示す。

## 2. 装置の性能

当建物の制振装置は主に比較的頻度の高い強風時の揺れの低減を目的としたものであるが、地震に対しても振動を低減する効果がある。

風については、例えば数年に一回程度発生する風速

表1 制振装置の基本仕様

(1) 寸法(D×W×H)	9×9×4.9m(1基)
(2) 付加振動体重量	170t×2基=340t
(3) 振幅(最大)	170cm(片側)
(4) 振幅(許容限界)	150cm(片側)
(5) モーター	ACサーボモーター8台 (2台×2方向×2基)
(6) 最大制御力	40t/方向(モーター4台)
(7) 最大出力	360kW/方向(モーター4台)

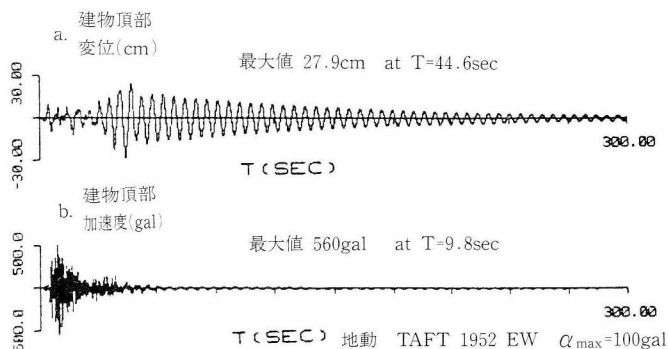


図 14 建物頂部の変位と加速度（非制振時）

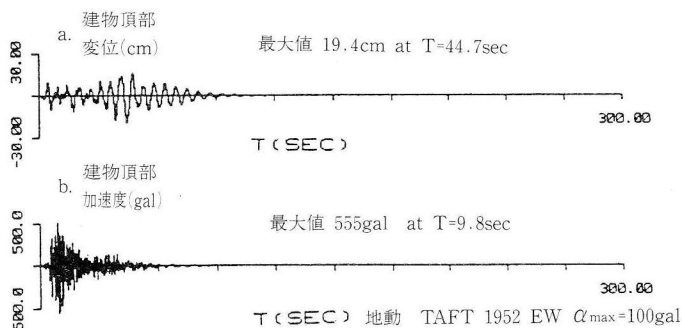
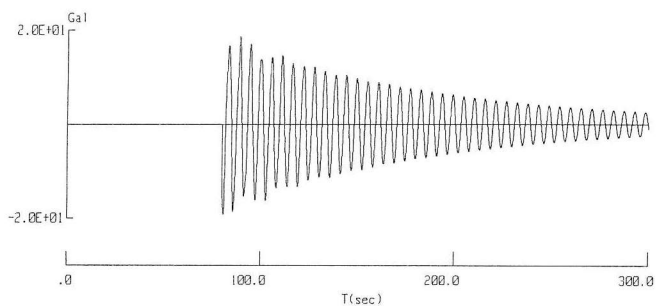
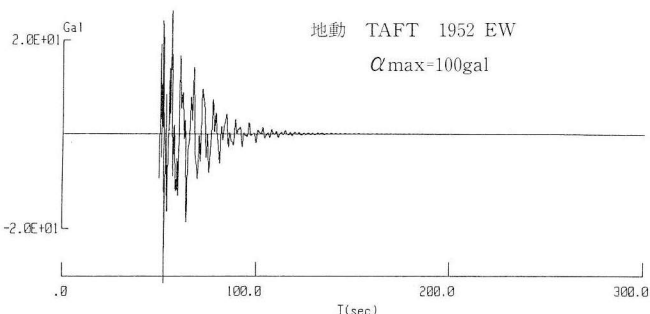


図 15 建物頂部の変位と加速度（制振時）



(1) 非制振時 加速度



(2) 制振時加速度

図 16 非制振時・制振時の地震後揺れの比較

(建物頂部位置での平均風速で毎秒 40 m) に対し、応答加速度を 1/2 以下に低減することができる。

ここでは、地震動に対するシミュレーションの結果を示す。地動としては、TAFT 1952 EW、最大加速度 100 gal を用いた。図 14, 15 は、それぞれ制振装置が無い場合、有る場合の応答である。

図 14, 15、それぞれの b の波形を比較すると、地震開始後比較的初期の時点で生じる加速度の最大値に対しては殆ど制振装置の効果は見られない。一方、同図の a の波形でみると、建物の変位は地震の継続に伴い徐々に成長しこの場合では約 45 秒後に最大となっているが、制振装置の効果がかなり見られる。

地震に対して制振装置の効果が顕著に現れるのは、主要動が終わった後のいわゆる後揺れに対してであると考えられる。図 14, 15 では後揺れの状況が比較にくいので、制振装置が無い場合と有る場合について、加速度が 20 gal 程度以下になった後の波形を比較したものを図 16 に示す。高層建築は減衰が小さいので、非制振状態では自由振動が後揺れとして長く残ってしまうが、制振装置により短時間で揺れを止めることができる。ランドマーク・タワー程度の固有周期 (5~6 秒) の建物では、人体は最大加速度で 2~3 gal 以上の場合揺れを感じるので、制振装置の有無による応答の差がビル内の人々の心理面に与える影響 (居住性) の違いは大きいと思われる。

なお、制振装置は居住性の改善が目的で、比較的頻度の高い強風、強震を対象としている。骨組の安全性に対する設計で対象とする、発生確率の小さい極めて大きな地震、風に対してはこの種の装置の限界を超えるものであるので、構造骨組の耐力設計においては制振装置の効果は期待していない。

## おわりに

横浜ランドマーク・タワーの地震に対する設計の基本的な考え方について紹介した。

[やまぎき しんじ 三菱地所株式会社  
技術開発室副室長]

# 第7次地震予知計画

その特別観測研究のねらい

平澤朋郎

この4月から始まった第7次地震予知5ヶ年計画では、時間的・空間的なゆらぎを伴うプレート運動の把握に基づいて、広域にわたる応力場の変動を予測し、大地震発生のポテンシャルを評価するために、プレート境界域のダイナミクスと内陸の地震テクトニクスに関する特別観測研究を新たに発足させた。

## 第7次計画策定の背景

平成5年度で終了した第6次地震予知計画は、第4次計画（昭和54～58年度）の基本的枠組みを引き継いでいた。その第4次計画の建議で、「長期的予知」を地震の場所と規模の予測、「短期的予知」を発生時期の予測、というようにその概念を明確にした。この定義には曖昧さが残るものの、それぞれの主たる目標を端的に表しており、一般の人に理解され易い分類である。

かくして、(1)長期的予知に有効な観測研究の充実、(2)短期的予知に有効な観測研究の集中的実施、(3)地震発生機構の解明のための研究の推進、(4)地震予知体制の整備、が第4次計画の4つの柱となった。

(1)については、日本列島全域にわたる測地測量、大・中・小地震観測など、長期的予知に有効な観測研究を拡充するとともに、特定観測地域における微小地震観測など長期的予知に有効なその他の観測研究を拡充して、観測強化地域および地震防災対策強化地域の指定にも資することとした。(2)については、観測強化地域およびその他必要な地域において、短期的予知に有効な観測研究を集中し、地震の前兆現象の把握に努めることとした。

さて、地震予知計画開始以来、30年近くが経過した。この間に得られた最大の成果は、一言でいうと、地震現象に関する理解が飛躍的に向上したことである。実用的地震予知を性急に期待される人には、これは成果と言うよりも副産物に過ぎない、と思われるかも知れない。実際、「地震予知」への批判の中には、計画が始まって以来、大きな被害を伴うような大地震を一度も予知してない、したがって計画は失敗であった、という意見もある。予知のカラ振りの失敗はなかったが、大地震の発生を正確に予測し、かつその情報を公表した成功例がなかったことも事実である（ただし、1978年の伊豆大島近海地震 [M7.0] のときに本震発生約1時間半前に気象庁が

地震情報を出した例がある）。しかし、社会との深いつながりを考えると、たまたま好運に恵まれたことによる予知成功事例がなかったことは、むしろ幸いであったと言えなくもない。運不運に頼らない確実な予知を可能にするためには、地震に関する科学の全般的なレベルアップが絶対に必要である。

主観が入るおそれはあるが、成果の具体的な例を挙げてみよう。

- (a) VLBI, GPS などの新手法の導入により、プレートの巨視的運動が実測できるようになった。
- (b) プレートの形状もしくは構造がかなりの精度で明らかになった。
- (c) 地殻および上部マントルの3次元不均質構造の解明が進み、地震活動との関連が明らかになりつつある。
- (d) 日本海中部地震や北海道南西沖地震など、大地震の断層運動がきわめて複雑であり、その破壊拡大過程が地殻構造と密接に関連していることが明らかになった。
- (e) ある地域における大地震の発生が広い地域の地震活動に影響を与え得るという認識が深まった。
- (f) 中規模地震の場合にも、予想外の遠隔地でその前兆とも考えられる異常現象が報告される事例が少なくない。これは、前兆現象に依存した「地震予知」が容易ではないことを意味するが、これら異常現象の発現過程を(e)の事実との関連において理解することの重要性が認識された。
- (g) 地震の核形成過程に関する理論的・実験的研究が進展し、前兆現象発生過程の解明の鍵としてその重要性の認識が深まった。

一方、反省すべき点、改善すべき点もあった。前述のように、長期的予知に関する観測研究と短期的予知に関する観測研究が並行して進められてきたが、とくに後者については網を仕掛けた中で実際の現象が発現しないと成果があがりにくい状況にあり、「待ち」の観測研究の限界が指摘されていた。また、特定観測地域の見直しの是非が論ぜられる中で、地震空白域や地殻歪の経年変化など、従来からの長期的予知手法に加えて、これらとは質的に異なる新たな長期的予知手法の開発が強く望まれるようになった。第6次計画までは、地殻構造調査、内陸地震に関する基礎的研究など、研究的色彩の強い比較的小規模なプロジェクトは「基礎研究の推進と新技術の



開発」の枠の中で実施されてきた。

一方、大型のプロジェクト的観測研究は、それが大学などの研究機関によるものであっても、気象庁や国土地理院などによる業務的観測調査が主体とならざるを得ない「長期的予知」と、観測強化地域における監視観測が最大の任務となる「短期的予知」の枠組みの中で推進されてきたところに、若干の問題があった。大学のような研究機関による観測研究は、研究の進展に伴って柔軟に変わり得る形態が必要である。また、個人の独創に発する萌芽的な基礎研究を支援するような開かれた体制も望まれていた。

## 第7次地震予知計画の概要

第7次地震予知計画の建議案策定に先立ち、測地学審議会の地震火山部会は、平成4年7月に第6次地震予知計画の進捗状況に関する報告書をまとめた。その作成にあたって、はじめての試みとして第三者による評価を導入した。この第三者による評価・批判を十分に配慮し、前述のような成果と反省を踏まえて、第7次地震予知計画の建議が策定されたのである。

その基本方針は：

- (1) 長期的予知の結果に基づいて前兆現象の捕捉を主目的とする短期的予知手法を集中するという、第4次計画以来の実務的予知の戦略は踏襲するものの、この方式による観測研究を「地震予知の基本となる観測研究」として位置づけて一本化する。ここで地震予知の基本となる観測研究とは、将来の実用的地震予知にとって必要な観測データを確保するため、長期にわたって継続することが必須な観測研究であり、必然的に気象庁・国土地理院等による業務的観測調査が中心となる。また、実用的地震予知の成功に向けて最大限の努力が要求されている「東海地域における短期的予知観測研究」は、この項目に入っている。
  - (2) 新たな課題として「地震発生のポテンシャル評価」を取り上げ、そのための特別観測研究を実施する。
  - (3) 独創的な発想に基づく萌芽的研究の育成に配慮しつつ、「地震予知の基礎研究と新技術の開発研究」を広い視野から推し進める。
  - (4) 幅広い研究協力の促進、萌芽的研究の支援を図るための大学における研究体制の整備や火山噴火予知研究との緊密な連携など、「地震予知体制の充実」を図る。
- 第7次計画の最大のポイントは、(2)の地震発生のポテンシャル評価のための特別観測研究である。(1)との違いは時限的・研究的な点にあり、(3)との違いは大型プロジェクト的な点にある。その最終目標は、プレート運動のモデル化に基づいて日本列島およびその周辺の応力場の

時空間変動を予測し、地震発生のポテンシャルを評価する手法を確立することである。

この特別観測研究は、(a)海陸プレート境界域のダイナミクスと、(b)内陸の地震テクトニクス、の2課題からなる。これらは互いに密接に関連し合っているが、第6次計画で「内陸地震に関する基礎的研究」がすでにスタートしていたこともあり、また、この5年間における観測研究の達成度に関する予想にも基づいて、2つに分けられている。

## 特別観測研究のねらい

日本列島および周辺における広域応力場の最大の支配要因は、海のプレートの運動にある。陸のプレートに対するその相対運動は、もちろんプレート境界で起こっているが、その実態を知り得るのは大地震発生時にほぼ限られている。地震に伴うすべり量はプレート境界での全すべり量に較べるとほんの僅かである。したがって、これまで計測不能であった非地震性すべり運動を新たに検出することが、課題(a)の当面の目標になる。東北地方太平洋側の海陸プレート境界を例にとると、カップリングしていると思われる浅部境界面でも、岩手県沖のように小・微小地震活動は活発であるが大地震が過去に発生した形跡がない領域もある。すなわち、海と陸のプレートの結合状況が場所によって異なっている。また、かりに深部では安定すべりが常時発生しているとしても、中間深度では間欠的な非地震性すべりが発生している可能性がある。

このようなプレートの沈み込み運動や結合状況の空間的・時間的ゆらぎを検出することは容易ではないが、歪場の時空間変動やプレート内に発生する地震の起震応力の変化を調べるなどが一法であろう。さらに、巨視的には定常的なすべりの中で、微小地震や極微小地震が発生している可能性もないわけではない。1992年の三陸沖の地震(M6.9)に際して、時定数約半日の余効的歪変化が観測された。この変化は、本震の震源域で本震と同規模以上の余効的すべりが発生したとすると説明できる。つまり、余震を起こしながら巨視的には準定常的にすべった、という解釈が可能である。また、既存断層をもつ岩石試料のすべり実験においても、巨視的には定常的な安定すべりの中でAE活動が検出されている。さらに、テクトニックな状況は異なるが、サンアンドレアス断層のクリープ領域でも微小地震活動は活発である。このような理由で、プレート境界で発生する微小地震の活動度の時空間変化を調べることも重要であろう。

このために必要な観測としては、海底における地震・地殻変動長期観測がまずあげられるが、このほか、高

SN 比地殻変動連続観測，超稠密 GPS 連続観測，超高度微小地震観測，などがあげられる。間欠的な非地震性すべりの検出には，地殻変動連続観測がもっとも有効であろう。しかし，そのためには，たとえば降雨の影響を歪量にして  $10^{-8}$  程度に抑える必要がある。従来，測地測量のデータと伸縮計や傾斜計などによるデータとの間には時間的・空間的に大きなギャップがあった。GPS 連続観測にはこの間を埋める役割が期待される。近ごろ地震観測では，広周波数帯域化，広ダイナミック・レンジ化が指向されている。これは大変望ましいことであるが，その一方で，より小さな地震の震源と発震機構をより精度よく決定するための超高度化への地道な努力もぜひ必要である。

課題(b)の当面の目標は，弱面を含む 3 次元不均質構造とそれ由来する地殻の動的特性の解明である。内陸の活断層とプレート境界はどちらも構造的弱面であり，そのダイナミクスには共通する点が少なくない。計画で予定されている構造探査のための大規模観測実験などの他に，数キロメートルに達する深層ボーリングや地下深部

の地殻応力測定も，弱面の科学の理解に重要である。第 7 次計画の特別観測研究では，(a)と(b)の課題に分けられているが，将来，これがひとつに融合したとき，広域応力の入力に対する地殻の局地的変形応答ないし地震テクトニクスの解明，そして地震発生のポテンシャルの定量的評価，すなわち長期的予知の高精度化が達成され，かつ，それが短期的予知観測研究の効果的推進にも役立つに違いない。

第 7 次計画における特別観測研究のねらいは以上の通りである。本稿では研究的側面にポイントを置いたので，もしかしたら，従来に較べて「実用的予知」からやや後退したかの感を与えるかも知れない。しかし，地震予知という堅固な城を攻めるにあたって，プレート運動のゆらぎや地殻の動的構造といった外堀から少しずつ埋めていく正攻法が，結局は早道なのである。人間の手の届かない地下深部の破壊を的確に予測することの難しさは，いくら強調しても強調し過ぎることはない。おそらく究極の科学のひとつであろう。

[ひらさわ ともお 東北大学理学部教授]

## 関東大震災記念碑

関東地震の大火災に際して，東京都千代田区神田和泉町・佐久間町一帯が，住民の決死の消火によって焼け残ったことは有名な話である。現在，三井記念病院横の和泉小学校校門脇に「防火守護地」と題するモニュメントが建てられ，防火の大切さを強調している。



震災予防調査会報告第百号火災篇の中村清二博士の報文によると，

「此ノ實ニ見事ナ焼残りデ震災後暫時ノ間ハ東京ノ大焦土ノ中ニ『アフリカ』ノ砂漠ノ中ニ在ルト云フ『オアシス』ノ觀ヲ呈シタ。他所ノ人ハ奇蹟トシテ驚キ町内ノ人ハ土地ノ誇トシテ喜ンダ…」

とある。同報文によれば，東側の浅草方面より押し寄せてきた火勢は，到着直前，風向が変化して北に向かった。さらに，

「且ツ此一帯ノ地ハ幕府時代の火事ニモ其厄ヲ免カレタコトガアルト云フ事實を語り傳ヘテ，土地ノ人ニ

不焼ト云フ信念ガアルノデ，非常ナ決心デ消防ニ努力シタト云フコトデアル。要スルニ此所ノ焼残りハ種々ノ原因ガ極メテ有利ニ助ケ合ッタノデアル。奇蹟ト云フ語デ表現サレル様ナ偶然ノ出来事又ハ神秘的ナ事實デハ断ジテ無イ。」と述べられている。

記念碑は柵に囲まれて，まことに見えにくくなっていて，正面から写真を撮ることもむずかしく，恐らくその存在を見過ぎてしまう人が多いのではなかろうか。この有様では，保存には有利であろうが，防火の重要性を一般に衆知させるためには，もっと工夫して欲しいものである。

[R]

### 防火守護地

この附近一帯は大正二二年九月一日関東大震災のときに町の人々が一致協力して防火に努めたので出火をまぬがれましたその町名は次の通りであります

佐久間町二丁目 三丁目  
四丁目  
練堀町  
平河町  
和泉町 東神田三丁目  
松永町二丁目  
御徒町三丁目 一部

昭和四十三年四月二十二日  
佐久間小学校  
地元有志  
秋葉原東部連合会

# 静岡県の第2次地震被害想定

とくに人的被害について

岩田孝仁

## はじめに

地震や火山など、地学現象に起因する災害を、我々が経験する機会は非常に少ない。このため、どうしても災害への備えはおろそかになりがちで、時には対策の必要性そのものすら忘れてしまうことも多い。最近では多くの自治体で地震災害を予測した被害想定を実施している。その目的は、対策の効果的な目標を設定することとともに、各地域の災害の特徴や危険度を住民自らも知ってもらい、より防災対策を推進しようということである。

静岡県では東海地震説が発表された直後の、1978年に地震被害想定を実施している。その後15年の対策の評価もふまえて現状を見直すため、今回2度目の地震被害想定を実施した。以下には、今回行った想定概要と、とくに人的被害の発生要因についてその現状を述べる。

## 被害想定の基本方針

1978年11月に制定された「大規模地震対策特別措置法」により、東海地震に対しては法制度として地震予知を行い、予知を前提とした措置を講じることも可能となった。このため津波や山崩れのように、予め危険性が予測される災害に対しては、的確な地震予知を行なうことにより、被害は大幅に軽減できると期待される。

また、静岡県が東海地震対策を始めて17年余が経過し、この間、7,660億円に上る地震対策事業の実施や、地震対策に関する諸計画の策定、自主防災組織を核とする地域防災の充実などにより、地震による被害の軽減を図ってきている。しかし、この間には社会システムの複雑化や都市機能の過密化が進むなど、新たな災害の要因も生じてきている。こうした状況をふまえ、今回の被害想定を実施した。また、想定の内容は被害の実数を単純に推計するだけでなく、各要因別に被害の発生過程が明らかになるような算定式を用いることに努め、今後の対策のポイントを明らかにしている。

このため、今回の想定では前回想定しなかった地盤の液状化現象による被害、人工造成地に起因する被害、ブロック塀や落下物による被害など、新たな地震被害の要因も加味し、また警戒宣言の発令を知った住民の行動

パターンや防災対策の進捗状況も考慮して、人的被害の想定を行なった。

## 想定的前提条件

東海地震（マグニチュード8程度）の前提となる地震断層モデルは、石橋（1976）が提案した断層モデル（東西70km、南北115km、もぐり込みの角度34°の逆断層モデル）を使用し、かつ地震が発生する季節は春または秋、時刻は昼食時と仮定し、次の3つのケースについて想定を行なった。

- ケース1（予知なし、事業有り） 地震が予知されず、突然発生し、かつ、これまでに実施してきた地震対策が効果を発揮した場合。
- ケース2（予知有り、事業有り） 地震の発生が予知され、かつ、これまでに実施してきた地震対策が効果を発揮した場合。
- 仮想ケース（予知なし、事業なし） 地震が突然発生し、かつ、これまで実施してきた地震対策を全く行なわず現在に至っている場合。

想定単位として、地震動や液状化の危険度は約500m四方の地域標準メッシュ単位で、建築物などの被害の想定は各市町村の町丁目（主には自主防災組織で、3,900町丁目）単位、人的被害は市町村（静岡県は74市町村）単位で実施した。

想定の対象は、地震動や地盤の液状化、津波、山崖崩れ、火災などの要因別に人的被害や建築物の被害、ブロック塀の倒壊や屋外落下物の被害、さらに生活関連施設の被害として、電気やガス、水道、電話などのライフライン施設、道路や港、鉄道の緊急輸送施設も対象とした。

## 自然現象の想定結果

地震に伴う自然現象として、地震の揺れの強さ、地盤の液状化危険度、津波、山崖崩れの様相を想定し、物的被害などの推定の基礎とした。

東海地震で想定される静岡県内各地の震度は、震源から離れた山間地域の一部では震度V強の地域があるものの、概ね震度VI～VIIの強い揺れが想定される（表1）。また、地盤の液状化現象も、沿岸の低地や沖積平野を

表1 東海地震で想定される推定震度

推定震度	V強	VI弱	VI強	VII	合計
面積 (km <sup>2</sup> )	1,136	5,424	1,051	103	7,714
面積率 (%)	14.7	70.3	13.6	1.4	100.0

表2 東海地震で想定される液状化危険度

危険度ランク	大	中	小	なし	合計
面積 (km <sup>2</sup> )	215	692	826	5,981	7,714
面積率 (%)	2.8	9.0	10.7	77.5	100.0

表3 津波浸水予想面積の推移

区分	1978年	現在	軽減率
浸水予想面積	55.3 km <sup>2</sup>	33.8 km <sup>2</sup>	38.9%

流れる河川の旧河道を中心にかなり広い範囲で想定される(表2)。

津波の想定は、従来は過去の安政東海地震の津波の痕跡や古文書の記録からおおむねの推定を行っていたが、痕跡記録の不足や海岸地形の変化、新たに構築された海岸構造物の効果を考慮するために、今回は全海域で数値シミュレーションを行ない、185 m ごとに津波高を求め、沿岸での浸水域を想定した。

想定される津波高は、駿河湾の最奥部、沼津市内浦地区で10 m と推定されるなど、おおむね過去の痕跡記録に見合う高さを示している。

津波の想定浸水域は堤防などの構築により、浸水面積を39% 軽減してきた(表3)。しかし、依然として開口部の多い港周辺では浸水域が広く残っている。また堤防などに併設されている陸こうや手動水門などを、もし緊急時に閉止しなければ、浸水面積は5.3 km<sup>2</sup> 増加し、39.1 km<sup>2</sup> となると想定される。

### 物的被害想定結果

各要因別の建物被害想定結果を表4に示す。建築物の被害は、静岡県内に存在する約143万棟の建築物を、木造や鉄筋、鉄骨等5つの建築構造区分、設計の基準の違いを加味するため3つの建築年代区分、かつ専用住宅や店舗、工場等12の用途区分に分けて想定を行なった。

想定結果では「予知なし」の場合に、大破は15万5253棟、中破が27万8302棟であり、「予知あり」の場合は、延焼火災による被害がほとんど発生しないことから、大破被害は9万3777棟と試算した。また、仮にこれまで地震対策を行なわなかったと仮定した場合は、大破が19万6376棟となり、大破被害で換算すると、これまでの対策の実施により、20.9%の被害が軽減されたと

表4 要因別物的被害想定結果

(単位: 棟)

被害要因	被害区分	予知なし	予知あり
地震動・液状化	大破	82,357	82,357
	中破	272,860	272,860
	一部損壊	327,816	327,816
人工造成地	大破	4,376	4,376
	中破	13,123	13,123
津波	大破	4,878	4,878
	中破	9,379	9,379
	一部損壊	17,203	17,203
	床下浸水	6,537	6,537
山崖崩れ	大破	2,943	2,943
	中破	6,872	6,872
延焼火災	焼失	67,014	81
建物被害合計	大破	155,253	93,777
	中破	278,302	292,017
	一部損壊	316,005	335,031
	床下浸水	3,664	3,918

注●対象建物棟数: 1,425,814

●大破: 倒壊および復旧が困難

●中破: 柱・梁・基礎などに被害があり復旧に大修理が必要

●一部損壊: 壁や基礎に複数の亀裂、瓦の落下など中程度の被害

●建物被害合計: 要因別の重複被害を排除した棟数

表5 ブロック塀や屋外落下物の被害

	対象箇所数	被害箇所数
ブロック塀・石塀	257,293	26,634
屋外落下物	38,417	5,364

推定される。

この他、ブロック塀や石塀の倒壊、ビルの外壁や看板などの屋外落下物の被害を表5に示す。

### 人的被害の想定手法

過去の地震災害では、主に建物の倒壊や火災、津波、山崩れに起因して人的被害が発生していることから、これらの物的被害量を指標に回帰式を求めて試算した。しかし、最近の地震災害では、ブロック塀の倒壊や屋外落下物、家具の転倒など、身の回りに存在する器物が凶器となり被害を受けるケースも増加している。また自ら転倒し負傷するケースも稀に報告されており、これらについても可能な限りの試算を行なった。

また、人的被害の程度は地震が発生したときの人間の行動に大きく依存することが予想されるため、想定する被害要因ごとに屋外・屋内の人口密度等を指標に、回帰式の基となった地震が発生した地域と時刻での人の分布と、現在の静岡県の各市町村毎の被災可能な人の分布を

表 6 人的被害想定手法—(1)

<b>【想定項目】 第1項：建物の被害による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b> <死者数> = 0.0676 × (全壊棟数) <負傷者数> = 0.217 × (ゆれによる全負傷者数)	<b>《バックデータとの補正係数》</b> 一世帯あたりの存在者数 (静岡現況) × 一世帯あたりの存在者数 (関東・宮城県沖) *死者の想定は関東[3.5人/世帯] 負傷者は宮城県沖[2.6人/世帯]	<b>《警戒宣言時対応係数》</b> × (1 - 警戒宣言時対応係数) [0.863]
<b>【想定項目】 第2項：津波による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b> <死者数> = 0.072 × (大破+1/2中波) <sup>1, 018</sup> <重傷者数> = 1.074 × 10 <sup>-4</sup> × (大破+1/2中波) <sup>1, 061</sup> <中等傷者数> = 4.510 × 10 <sup>-4</sup> × (大破+1/2中波) <sup>1, 061</sup>	<b>《バックデータとの補正係数》</b> 一世帯あたりの人員 (静岡現況) × 一世帯あたりの人員 (東南海) [4.59人/世帯]	<b>《警戒宣言時対応係数》</b> × { 危険地指定率 × { 警戒宣言時 1-対応係数 } } [0.908] + (1 - 危険地指定率) × { 警戒宣言時 1-対応係数 } } [0.403]
<b>【想定項目】 第3項：山崖くずれによる死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b> <死者数> = 0.181 × (大破棟数) <重傷者数> = 0.306 × (大破棟数) <中等傷者数> = 2.4 × (重傷者数)	<b>《バックデータとの補正係数》</b> 一世帯あたりの人員 (静岡現況) × 一世帯あたりの人員 (伊豆大島近海) [3.51人/世帯]	<b>《警戒宣言時対応係数》</b> × { 危険地指定率 × { 警戒宣言時 1-対応係数 } } [0.909] + (1 - 危険地指定率) × { 警戒宣言時 1-対応係数 } } [0.406]
<b>【想定項目】 第4項：火災による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b> <死者数> = 0.008 × (焼失棟数) × (一棟あたりの存在者数) <重傷者数> = 0.017 × (焼失棟数) × (一棟あたりの存在者数) <中等傷者数> = 0.045 × (焼失棟数) × (一棟あたりの存在者数)		
<b>【想定項目】 第5項：ブロック塀・石塀の倒壊による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b> <死者数> = 0.003 × { (ブロック塀の倒壊件数) + (石塀倒壊件数) } <負傷者数> = 0.043 × (ゆれによる全負傷者数)	<b>《バックデータとの補正係数》</b> 屋外人口密度 (静岡現況) 屋外人口密度 (宮城県沖) [1689.16人/㎡]	<b>《警戒宣言時対応係数》</b> × (1 - 警戒宣言時対応係数) [0.978]

補正するため、「バックデータとの補正係数」を個々に求め、従来の回帰式に乗じることにより、人口分布の変化や時刻による人口動態を加味した「被災可能人口」を求めた。

同様に、東海地震特有の対応として、警戒宣言発令時に適切な対応をとる人は被害を受ける可能性がなくなると考え、静岡県で2年に1度行なっている県民の防災意識調査などから求めた「警戒宣言時の対応係数」をさらに乗じることにより、被災可能人口の変動としてとらえることとした。

以上の考えに基づき作成した人的被害の想定式の基本型は以下のとおりであり、各要因別の想定式は表6に示す。

$$\bullet \text{ 人的被害数} = \text{基本式} \times (\text{バックデータとの補正係数}) \times (1 - \text{警戒宣言時の対応係数})$$

なお、要因別に求めることができない負傷者（例えば振動による建物被害、ブロック塀、落下物など）については、宮城県沖地震の仙台市の例を参考に、住家被害率（H）を指標とする回帰式を以下のように定め、各市町村毎の重傷者（R）、負傷者（r）を求めた。

$$\bullet \text{ 重傷者 (R) : } \log R = 0.676 \times \log H - 1.534$$

$$\bullet \text{ 中等傷者 (r) : } \log r = 0.676 \times \log H - 0.473$$

宮城県沖地震の被害例から負傷者原因別比率を以下のように推定し、各市町村ごとに求めた重傷者、中等傷者の総数を、要因別に配分した。

表6 人的被害想定手法一(2)

<b>【想定項目】 第6項：落下物による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b>	<b>《バックデータとの補正係数》</b>	<b>《警戒宣言時対応係数》</b>
$\langle \text{死者数} \rangle = 0.2 \times (\text{ゆれによる全死者数})$ $\langle \text{負傷者数} \rangle = 0.050 \times (\text{ゆれによる全負傷者数})$	$\times \frac{\text{屋外人口密度 (静岡現況)}}{\text{屋外人口密度 (宮城県沖)}}$ [1689.16 人/km <sup>2</sup> ]	$\times (1 - \text{警戒宣言時対応係数})$ [0.978]
<b>【想定項目】 第7項：屋内器物の移動・転倒による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b>	<b>《バックデータとの補正係数》</b>	<b>《警戒宣言時対応係数》</b>
$\langle \text{死者数} \rangle = 0.0002 \times (\text{負傷者数})$ $\langle \text{負傷者数} \rangle = 0.386 \times (\text{ゆれによる全負傷者数})$	$\times \frac{\text{一世帯あたりの存在者数 (静岡現況)}}{\text{一世帯あたりの存在者数 (宮城県沖)}}$ [2.6 人/世帯]	$\times (1 - \text{警戒宣言時対応係数})$ [0.937]
<b>【想定項目】 第8項：道路上の自動車への落石・崩土による死者・負傷者</b>		
<b>《基本式》</b>		<b>《警戒宣言時対応係数》</b>
$\langle \text{死者数} \rangle = 5.2 \times 10^{-4} \times (\text{走行台キロ})$ $\langle \text{重傷者数} \rangle = 0.2625 \times (\text{死者数})$ $\langle \text{中等傷者数} \rangle = 0.4375 \times (\text{死者数})$		$\times (1 - \text{警戒宣言時対応係数})$ [1.0]
<b>【想定項目】 第9項：その他の要因による負傷者</b>		
<b>《基本式》</b>	<b>《バックデータとの補正係数》</b>	<b>《警戒宣言時対応係数》</b>
$\langle \text{死者数} \rangle = \text{死者は出ない}$ $\langle \text{負傷者数} \rangle = 0.178 \times (\text{ゆれによる屋内全負傷者})$ $\langle \text{負傷者数} \rangle = 0.126 \times (\text{ゆれによる屋外全負傷者})$	$\times \frac{\text{一世帯あたりの存在者数 (静岡現況)}}{\text{一世帯あたりの存在者数 (宮城県沖)}}$ [2.6 人/世帯] $\times \frac{\text{屋外人口密度 (静岡現況)}}{\text{屋外人口密度 (宮城県沖)}}$ [1689.16 人/km <sup>2</sup> ]	$\times (1 - \text{警戒宣言時対応係数})$ [0.208] $\times (1 - \text{警戒宣言時対応係数})$ [0.079]

注1：「バックデータとの補正」の項に記載されている数値は、単位あたりの被災可能人口のバックデータでの値。また同項（静岡県現況）には市町村毎の値を用いる。

注2：「警戒宣言時対応係数」の項の「危険地指定率」とは、該当被害の発生する危険がある地域を各市町村の避難計画で危険地域に指定している割合。

注3：[ ]で示した数値は、各項で用いた係数。

- 建物被害 : 21.7%
- ブロック塀・石塀 : 4.3%
- 屋外落下物 : 5.0%
- 屋内器物の移動転倒 : 38.6%
- その他 : 30.4%

までに実施した地震対策により、32.1%の被害軽減効果が現れていると試算した。

### 人的被害の発生原因

結果は、「予知なし」の場合 2,574 人の死者が発生し、「予知あり」の場合には 376 人の死者が発生すると想定された（表7）。地震が予知されても人的被害が発生する理由として、危険地域からの適切な避難や、屋内や屋外の危険性に対し適切な行動をとらない（または“とれない”）人がいるという、住民の意識調査結果などを反映している。また、仮にこれまでの地震対策を行なわなかったとした場合の死者は、3,793 人と想定され、これ

(1) 振動に伴う建物被害に起因する死者・負傷者 死者の発生は、屋根が崩落するなどの全壊建物に起因している。このため事前に耐震診断を行ない、建物の危険性を知っていることにより少なくとも警戒宣言発令時には被害を免れることができる。しかし、耐震診断の実施率は 6.1%と低く、必ずしも危険建物からの退去が完全に行えない可能性がある。

(2) 津波による死者・負傷者 駿河湾内の津波は、地震



表7 要因別人的被害想定結果  
(単位:人)

被害要因	被害区分	予知なし	予知あり
建物倒壊	死者	540	109
	重傷者	1,568	228
	中等傷者	18,107	2,478
津波	死者	510	52
	重傷者	868	84
	中等傷者	3,630	339
山崖崩れ	死者	487	202
	重傷者	820	317
	中等傷者	1,965	734
火災	死者	510	0
	重傷者	1,076	0
	中等傷者	2,729	0
ブロック塀・石塀の倒壊	死者	104	6
	重傷者	262	17
	中等傷者	2,765	67
屋外落下物	死者	159	7
	重傷者	209	13
	中等傷者	2,051	77
屋内器物の移動転倒	死者	24	0
	重傷者	2,373	165
	中等傷者	27,229	1,719
道路への落石崩土	死者	240	0
	重傷者	81	0
	中等傷者	116	0
その他	死者	0	0
	重傷者	2,043	1,716
	中等傷者	23,454	19,590
人的被害合計	死者	2,574	376
	重傷者	9,300	2,540
	中等傷者	82,046	25,004

注 ●対象人口: 3,686,090人  
 ●死者: 発災後24時間以内に死亡  
 ●重傷者: 手術等の入院治療が必要  
 ●中等傷者: 医師の治療が必要だが、入院の必要はない

避難対象地区の指定が遅れている市町村もあり、住民へ危険箇所を十分に周知されていないケースがある。また、津波と同様にあくまでも避難行動をとろうとしない人が約9%見られることから、警戒宣言が発令されても犠牲者の発生が想定される。

(4) 火災による死者・負傷者 平常時の火災においても逃げ遅れて犠牲者が発生していることから、突発地震の際には多くの犠牲者が想定される。

(5) ブロック塀や石塀の倒壊による死者・負傷者 危険な塀の改修は多少進んでいるものの、依然としてブロック塀や石塀の倒壊被害は多く想定される。通行中の人にとって、そばのブロック塀が危険か危険でないかは判断で

発生直後から沿岸地域に襲来を始めること想定されることから、突発地震の場合、緊急避難のための高台や避難ビルが適切に居住地近くに確保されていない地域では、多くの犠牲者が想定される。

一方、警戒宣言が発令されても、住民へ浸水予想地域が適切に周知されていない場合や、また意識調査の結果、約9%の人は、危険性を知っていても避難行動をとらないため、周知されていても避難行動をとらない人が、犠牲者の発生として想定される。

(3) 山崖崩れによる死者・負傷者 事前に避難計画を定めておく避

きないため、宮城県沖地震など過去の事例と同様に犠牲者が発生することが想定される。

(6) 屋外落下物による死者・負傷者 偶然、犠牲に合うケースが多く、所有者の定期的な点検や改修が必要である。

(7) 屋内器物の移動・転倒による死者・負傷者 建築物の耐震化が進む反面、家具の固定など屋内の耐震対策の実施率は37%と少なく、多くの負傷者が発生することが想定される。

(8) 道路上の落石・崩土による死者・負傷者 警戒宣言発令に伴い、危険箇所では交通規制が行なわれることから、地震予知の効果は大きい。

(9) その他の要因による死者・負傷者 偶然、不注意、心理的な動揺などから、転倒、ガラスの破片での怪我などのケースが過去の地震でも多く見られた。負傷の程度は小さいものの、多くの負傷者が発生することが想定される。

### 今後の防災対策の課題

建築物の耐震性に関しては、耐震設計基準の改正に伴い、利用者が知らなくても少しずつ耐震的な建物が用意されるようになった。津波や山崩れ災害に対しても直接的には防潮施設などの整備が実施されている。しかし、これらの直接的な施設の整備だけで完全な防御を期することは困難である。

今回の被害想定結果からも、地震災害のように各個人で繰り返し経験を積むことが困難な災害に対しては、画一的な防災対策事業だけでなく、自然災害の発生や拡大防止をしっかり目標に据えた街造りが不可欠である。一方で、防災に対する社会全体の成熟が不可欠であり、このためにも個人レベルでの災害環境の熟知、対応の充実を図るため、系統だった防災教育がぜひとも必要である。

### おわりに

今回、静岡県の地震被害想定の実施にあたり、とくにご芳名は列挙いたしません、多くの専門家、諸先生方が快く相談を受けて頂き、また専門的な見地から貴重なご意見、示唆を頂いたことに感謝いたします。

### 参考文献

1) 静岡県地震対策課: 第2次地震被害想定結果報告書(人的・物的被害編), 1993.

[いわた たかよし 静岡県総務部地震対策課: 1994. 3. 10]

# ノースリッジ地震から学ぶ

## 井野盛夫

日本時間の1994年1月17日午後9時31分、米国カリフォルニア州ロスアンゼルス市郊外ノースリッジを震源として、M 6.8の地震が発生した。死者57名、負傷者7671名のほか、フリーウェイの高架橋の落下、建物の破損、ガス・水道管の破裂など、都市型災害の様相を呈したことから、静岡県では被災の状況、防災関係機関の対応や市民の行動などについて1月25日から28日まで現地調査を行なった。

### 地震の概要

地震は現地時間で17日の朝4時31分に発生、震源はロス市中心部より北西約35kmのノースリッジ地区であった。地震の規模(M)は6.8で、震央付近の震度は改正メリカル震度階級で8~10、気象庁震度階級の5~6に相当する激しい揺れとなった。なかでも、ターナザ地区( $\Delta$ 7km)では1.8G、上下方向で1.18Gに及ぶ加速度を記録した。

### 地震災害の特徴

ロス市中心部から西へ10kmのサンタモニカ・フリーウェイ(州道10号)の高架部分の橋げたが、約50mにわたって一般道路上に崩落し、高速道路上を走行中の2台の車が橋げたを支えていた橋脚に衝突した。橋脚のコンクリートが剥げ落ち、縦と帯鉄筋が曲がり、内部コンクリートも、ばらばらに破壊されて提灯状に変形した。この高架橋は1961年に設計、1963年に竣工したが、1971年の設計基準の改正に基づき帯鉄筋の量を3倍に増加させてあったという。この道路は、1日30万台以上の車が通行する幹線道路で、アメリカで最も交通量が多い部分である。そのためロス市災害対策本部では、コンピューターによる信号連結システムによって、迂回路となる幹線道路を制御し、交通渋滞の解消を図っていた。

その他、シミパレー・サンフェルナンドパレー高速道路(州道118号)におい

ても、高架部分の橋げたを支える橋脚が破壊して、橋げたが約200mにわたって一般道路に落下した。また、一部の橋脚が沈下し、橋げたも約50cm沈下したが、被害の大きかった南西側の橋げたおよび橋脚を取り壊し、残った北東側の橋脚を補強して、その上に乗る沈下した橋げたの嵩上げ工事が精力的に行なわれていた。

ビルと木造家屋は、ノースリッジを中心にパサディナ、シャーマンオークス、ハリウッド地区などで約2万1000棟が被害を受けている。木造家屋の被害は1階が駐車場となっている2~3階建アパートに多く、平屋建では壁がひび割れている程度で倒壊したものはない。しかし、窓やショウウィンドウのガラスが割れたり、飾りの煙突が破損している箇所は至る所に見られた。鉄骨造の被害は、ロス電話局の外壁のひび割れ以外にはほとんど見られない。RC造の州立ノースリッジ校とブロックズ・ショッピングセンター(ノースリッジ)の立体駐車場は、一部の躯体を残して崩壊した。また、5階建のカイザークリニック(ノースリッジ)は2階の圧壊と妻壁の崩落によって4階建のような状態になっていた。

ノースリッジ地区の住宅地には、隣接境界にブロック塀が普及しているが、鉄筋がほとんど入っていないため至る所で倒壊した。このブロックは、縦横ともに鉄筋が入る隙間がなく、耐震性を持たすことが難しい構造となっている。

テレビ報道によって最も印象が強かったのが、ガス管



木造3階建の倒壊 [グレンデール地区]

と水道管の同時切断である。震源から約6 km北、バルボア通りのグラナダヒル地区は静かな住宅地で、直径30 cmのガス用鋼管と100 cmの水道用鋼管の幹線、さらに30 cmの鋳鉄製の配水管の3系統が、地下約2 mに埋設されていたが、小高い丘の麓でサントサザナ(Santa Susana)断層の走向に直交する方向に引っ張られるような形で3系統が損壊した。ガス管は4 kg/cm<sup>2</sup>程度の中圧管で、遮断弁の位置が特定できず、地震2日後まで放散しつづけ、漏れたガスに引火して輻射熱により道路を挟む住宅5軒が焼失した。

水道管の破損によって水が下部部へ流れ、掘割のような形で交差するフリーウェイ118号に多量な土砂が流れ込み、さらに橋脚を洗って沈下させて両方の道路は使用不能となった。また、住宅に流れ込んだ水は窓ガラスを破損し、家具を押し流し、庭の芝生をはぎ取った。付近の家庭は5日間ほど断水し、その間、学校に設けられた給水所に飲料水を受け取りに通った。

### 応急対策の状況

被災した建物の安全性の判定は、余震による2次災害の防止や、補修の有効性を判断するのに必要である。わが国でも、静岡県・神奈川県で被災建物の判定組織、運用体制、技術講習、判定士の登録などの整備が進められている。今回の地震発生後、直ちに50名の判定士の資格を持つ市職員が集められ、市役所や消防署などの重要な施設の判定作業を行なった。また、民間建物の判定作業を行なうため、市内および災害応援協定を結んでいる周辺市の技術者、州軍の建築工兵、ボランティアを加え、約1000名が集められ、2万5148棟(1月26日現在)を判定した。その結果、危険(Unsafe)が6%、立入制限(Limited entry)が17.2%、検査済(Inspected)が52.5%で、残りがほとんど被害のない物であった。英語を使わない住民にはスペイン語、中国語で書かれた判定結果表が準備され、短時間に処理できるようにチェックシートや記入要領が作られており、ロマプリエタ地震後に改善された点が認められた。

災害が発生した後、行政や赤十字、宗教団体などによって各種の受入れ組織が開設された。連邦危機管理庁(FEMA)は現地事務所として災害申請センター(Disaster Application Center: 略称 DAC)をロス市内16カ所で開設し、地震によって家や財産、勤め先を失い、また保険やその他の手当てがつかない被災者を対象に、失業保険の支払や税金の還付などを行なうほか、必要な資金の貸付や助成を行なった。

避難所はいち早く赤十字・救世軍などによって、164地域の高等学校や中学校、レクリエーションセンターの施

設内に開設され、医薬品の支給や証明書の発行、被災者や災害救援者に対して食事を提供した。その他、有料の移動公衆電話、移動市立図書館などが設置された所もあった。発災後4日目に豪雨が予測され、連邦軍は州災害対策局(OES)の要請を受けて、屋外で避難生活をしてきた人のために6カ所の公園でテントを展開し、約6700名を収容した。

上水道の断水中、給水車によって学校など9カ所を拠点として給水量の制限なしに供給し、別に5カ所では水の供給も行なったが、通常の給水状況に戻るまでに約7日を要した。

地震により家族や家を失ったり、地震の揺れに見舞われて精神的に不安定になった被災者のために、病院や保健所など、9カ所に相談所(Counseling)が置かれた。また、ペットについても収容施設が4カ所に設けられた。

被災者への救援活動も盛んに行なわれたが、赤十字・救世軍などは地震後、直ちに応援を求めたい業務や必要とする物資を新聞広告に掲載して善意を募った。例えば、運送・清掃・カウンセリング、ペットや家畜の世話など専門的な業務と、食料と水・毛布などの物資が求められた。とくに、赤十字は物資の寄付は受け付けず、募金のみに限定している。また、物資は企業から直接多量に寄付を受け、どうしても必要な物は購入して被災者に届けている。同じような活動をしているのは、救世軍やカソリック教会などで、救援は現金か小切手の募金のみに限定している。

今回の地震は、電話の被害が少なかったこともあり、政府機関やライフライン管理者、救済団体、保険会社などは、新聞紙上に電話番号を掲載し、とくに英語以外でも対応できるような窓口も準備して相談に応じた。被災した建物の危険度判定を受けたい人のための電話窓口も開設された。

### 地震被害からの教訓

今回の地震は、比較的恵まれた条件の下で発生した。南カリフォルニアの気象は、降水量が年間平均400 mmで少なく、気温は年間10~30℃と温暖である。このような気候から木造家屋の屋根は薄板葺きで、住宅本体に重量の負担が少ないこと、気温が温暖のため、暖房器具の使用が少なく、地震後の避難生活においても屋外生活が容易にできた。また、地震発生が休日の早朝で、家庭での火器の使用と道路上の車が少なかったことは幸運であった。

ボランティア活動についても自発的に人が集まってくるのではなく、構造設計資格試験の際に合格したら災害時にボランティアとして協力するとの一札を取っており、

効果的に活動ができるようにボランティア指導者を普段から研修をして緊急事態に備えている。企業もボランティア活動として、ビールの生産ラインを止めて飲料水を缶詰にして届けたり、募金に応じたり、従業員を奉仕活動に参加させるなど、積極的な活動を見ることができた。これらの活動は、国民が相互扶助の精神を持って対応している現れであり、一朝一夕にできたものではないことを学びたい。

地震災害の原因と被害を調査し、状況を資料としてまとめ対策に反映させることを目的に、FEMAの援助を受けて、地震工学研究会 (EERI)、州災害対策局 (OES)、米国地質調査所 (USGS)、カリフォルニア州鉦山地質局 (CDMG) の4機関が専門家を派遣して資料配布所 (Clearing House) を設けた。わが国では、地震後の被害調査は各機関が自主的に行なっているため、被災地では何回も同じような調査を受けることになる。無駄をなくし、被災者の負担を少なくするため、一般的

な調査内容については共同調査の方策も検討すべきではなからうか。

行政機関の地震後の応急対策は、誠に素早く、数日後にはフリーウェイの被災箇所が片づけられ、被災箇所を迂回する案内表示とラジオによる道路情報が昼夜流された。また、カリフォルニア州交通局 (CALTRANS) は、直ちに復旧工事に着手し、FEMAも11カ所のDACを発災2~3時間後に設け、被災者の資金援助や就職の世話などを行ない、また、悩み事相談を受ける電話を数多く設置し、地元紙も避難所などの電話番号を掲載して住民の不安を解消した。この結果、とくに心配された暴動なども起こらず、行政の積極的な対応が住民を安心させ、大いに評価されたと考えられる。住民生活に密着した対応をいかに早く実施するかが、災害発生時の民生安定につながっていくことを証明している。

[いの もりお 静岡県総務部防災局長]

## 津波への警鐘—浸水の碑

川奈という古くからの有名なゴルフ場で知られている。伊豆半島北東部の相模湾に面した小さい漁港が、このゴルフ場の下にある。この川奈をはじめ伊豆半島の北東部は、静岡県のなかでも安政東海地震の津波の影響が少なかったところである。その代わり、大正12年の関東地震では大きい津波に襲われた。熱海では津波の高さが8m前後といわれており伊東では6m前後であった。下の図に示すここ川奈でも5~6mであった。静岡県では東海地震発生の危険性が指摘されて以来、津波の到達地点を住民に知らせ、地震発生時の避難行動の指針とするため、各地に津波の浸水高さを示す標識をたてている。

右の写真は川奈の慈眼院の石段の麓、下図の黒丸印の位置にたてられている関東地震の津波の浸水到達点を示す標石である。〈高橋博先生のご好意による〉



川奈では下図の左端に位置する海蔵寺の石段の7段目まで、関東地震の津波で浸水した。またこの石段には、元禄16年の地震津波では上から3段目まで浸水したという言い伝えがあり、関東地震の津波より3mくらい高いことがわかる。元禄地震は関東地震の1つ前の相模トラフ沿いのプレート間地震である。両者はおなじプレート間地震として比較されるが、房総半島で大きい津波被害があったことなど、元禄地震のほうが一回り大規模なものであったようである。

海岸に住む人々にとって、津波のときの避難の判断が生死を分けることになる。日頃からの津波の知識の啓発、危険への警鐘としてこの津波浸水標石はたっている。 [A]

# ■ 地震予知連絡会情報 ■ 本蔵義守 ■

地震予知連絡会第107回は2月21日に、第108回は5月16日に開催され、いずれも66件の報告事項があった。そのうち本稿では、御前崎の沈降傾向の鈍化、伊豆半島の地震・地殻活動について、前回(『地震ジャーナル』16号)に引き続いて現在の状況を紹介する。また、最近の特筆すべき地震活動として、2月13日に鹿児島県北部で発生したM 5.7の地震と、4月30日に大隅半島沖で発生したM 6.4の地震、および新島・神津島付近の群発地震活動について紹介したい。その他、断片的ではあるが、他の地域の地震活動についても簡単に報告するつもりである。

## 東海地方の地殻変動・地震活動

最近の傾向として、掛川に対する御前崎の沈降が停滞ぎみであることが指摘されているが、第106回の地理院の検潮データの報告(『地震ジャーナル』16号参照)では、内浦を基準にした場合には御前崎の沈降が鈍っているとはいえないことがわかり、掛川に対する御前崎の水準測量データだけから、御前崎の沈降の詳細を検討することが必ずしも適切でない場合もあることが認識された。

いずれにしても、その後の御前崎の沈降傾向が気がかりであった。第108回の地理院の水準測量結果の報告では、これまで通り掛川を基準にすれば、季節変化を補正した場合、これまでに比べると御前崎がやや下がりとなるが、全体的にみて1992年以降の沈降速度鈍化の傾向が続いていると判断される。ただし、1992年頃までみられていた季節変化がこの2年間みえていない。この原因については地下水との関連が議論されているが、今のところよくわかっ

ていない。

御前崎の沈降を議論するには、掛川自体の上下変動も問題にする必要があるため、最近では掛川-御前崎の水準路線をさらに北側に延ばして森町を基準にした上下変動データが検討されている。第107回の報告では、森町に対し、掛川や御前崎の沈降がむしろ加速しているようにみえる。しかし最新の結果は、図1に示すように上昇に転じている(第108回:地理院資料)。しかし、この程度の変動は過去にもみられ、季節変化の影響による可能性もあることが指摘されている。

いずれにしても、森町に対する掛川-御前崎の沈降は続いていることは確かめられる。森町まで延長した水準路線でも今後年に4回測量が実施されることになったの

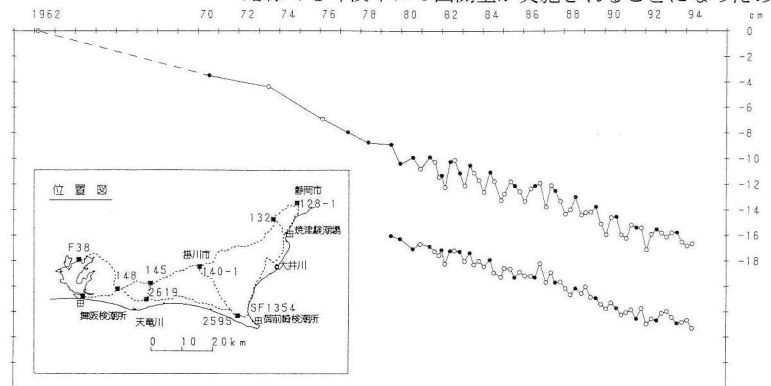
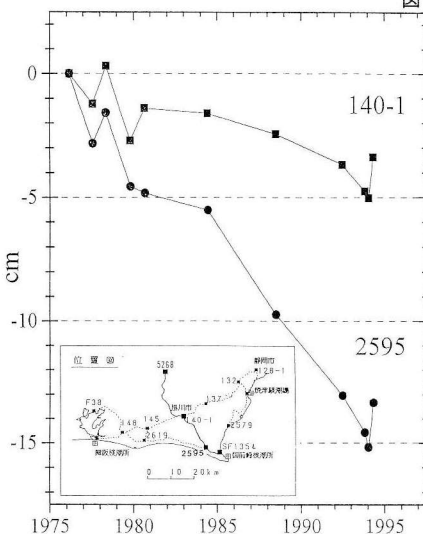


図1

水準点140-1(掛川)を基準とした場合の水準点2595(浜岡町)の経年変化(上段は観測値、下段は年周変化を補正した値)、および水準点5268(森町)を基準にした場合の水準点140-1と2595の経年変化(第108回:地理院資料)

前者の場合、これまではっきりみられていた年周変化がここ2年間みられなくなってきていること、および補正後のデータをみると2595の沈降傾向が鈍ってきていることが注目される。

後者の場合、140-1および2595の沈降傾向が加速したかにもえたが、最新のデータはむしろ上昇を示している。この程度のばらつきは過去にもあることを考慮すると、長期的傾向として、掛川および浜岡町いずれも森町に対し沈降し続けているといえる。





で、御前崎の沈降傾向については、よりはっきりした検討が可能となるものと思われる。

東海地方の地震活動とくに変化はなく、最近の活動は低い。長野県西部地震の余震域で活動が南北方向に並ぶ傾向がみられ、以前の活動状況に戻ったようにみえる(第108回:名大資料)。

東海地方の地震活動および発震機構によるスラブの構造についての研究が防災科で進められており、その概略についての報告があった(第108回:資料)。フィリピン海スラブ内の微小地震活動から推定される現在の固着域は、想定されている東海地震の震源域よりは少し西側に位置し、固着域の南西端が浜名湖付近になる。現在、浜名湖周辺で地震活動が活発なのは、このことと関係があるらしい。また、駿河湾西岸下には、ユーラシアプレートとフィリピン海プレートに挟まれた別の地震帯が認められ、いわば遷移帯として解釈されている。

### 伊豆半島の地震・地殻活動

1993年11月以降、伊豆半島の地震活動は小規模ながらも依然として続いている。昨年の暮れから今年にかけて、大室山から冷川方面に延びる北西方向に地震が多発した。しかし最大のものでもM2.3で、ほとんどはM2より小さい地震である。ところが、2月下旬から富戸沖でM3.8を含む群発地震活動が始まった。この活動は1ヶ月程度で終わったが、同時に、陸側の地震活動も低調になった。最近では、手石海丘の北方北緯35度を越えた海域でややまとまった地震活動がみられる。しかし規模はいずれも小さい。このような最近の地震活動の全体的特徴は図2(第108回:気象庁資料)に示されているが、最近の地震活動は全般に低調であるといえよう。しかし最近、全磁力に異常らしき変化が観測されており、35度を境に逆の変化がみられること(第108回:震研・東工大理資料)、また網代における水管傾斜計データにも異常らしき変化がみられることから(第108回:震研資料)、地震活動の監視に加え、諸観測の強化が必要であろう。

最近、地震研究所がケーブル方式による海底地震観測点を富戸沖の3ヶ所に設

置していたが、そのうちの1点が今回の群発地震活動のごく近傍に位置していた(第108回:震研資料)。今後、海底地震観測点のデータ処理が進むにつれ、海域の地震活動の様相が細かくモニターできることが期待される。

伊豆半島における水準測量に関しては、1993.6-8から1993.11-1994.2の間に、冷川付近を中心として最大5cm程度の隆起、また河津付近で4cm程度の沈降という結果が報告されたが(第107回:地理院資料)、後者に関しては更に検討の余地がある。前者との関連では、伊東地区における最近のGPS連続観測がその威力をいかに発揮している。今や、辺長、比高ともに数cm程度の変化量が連続的にモニターできる体制にある。実際、昨年9月頃から12月頃まで続いた辺長や比高の変化に関しては、辺長で最大5cm、比高で最大10cm程

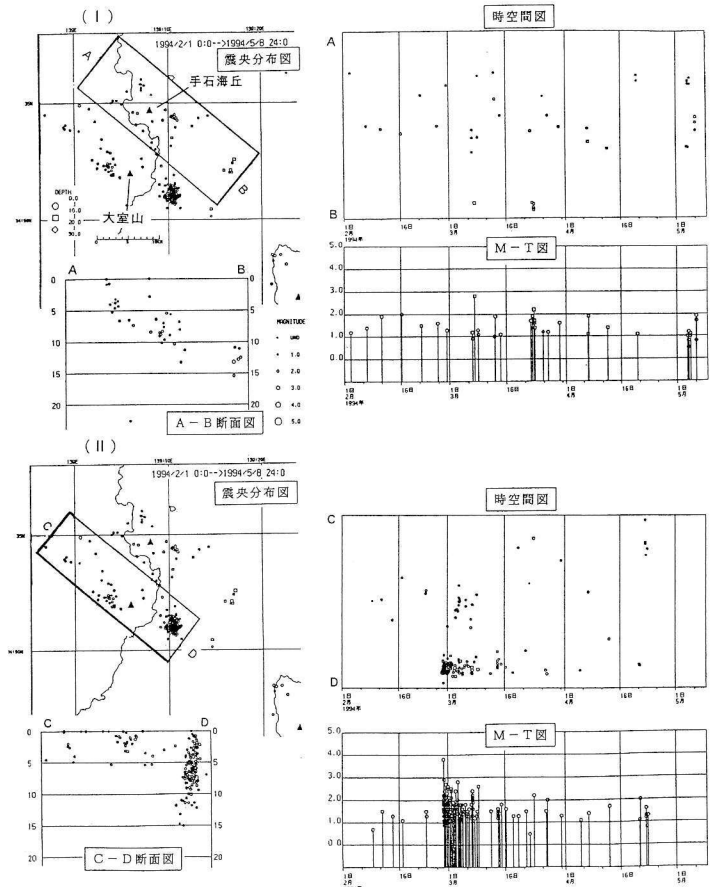


図2 伊豆半島東部における最近の地震活動(1994年2月1日~5月8日)(第108回:気象庁資料)

2月から3月にかけて富戸沖で群発活動がみられる。また、大室山から北西方向にみられた地震活動は3月上旬でおさまっているようにみえる。これに対し、5月になって北緯35度を越えた手石海丘北方海域に少しまとまった活動がみえる。しかし、いずれも規模が小さく、M4を越える規模の地震は起こっていない。



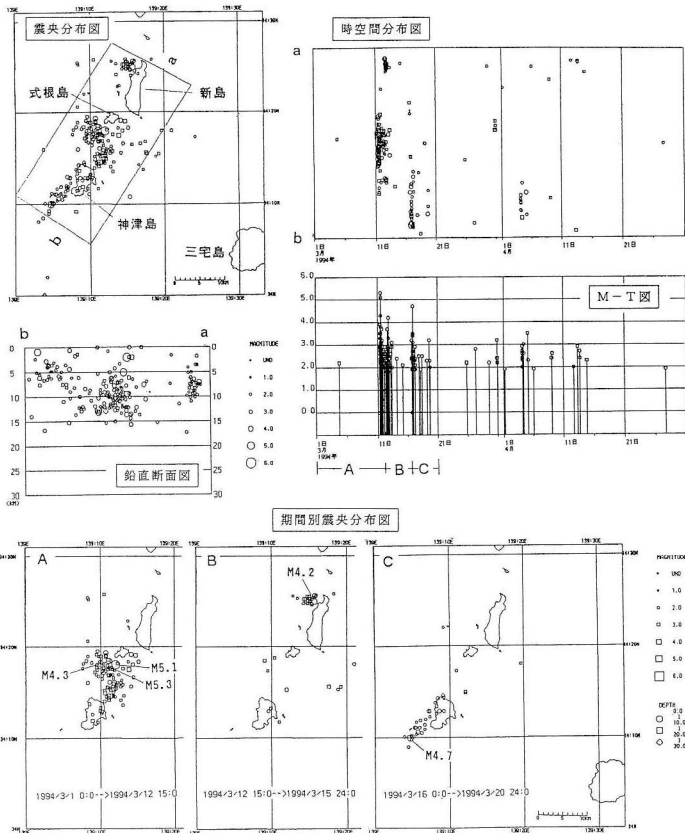


図3 新島・神津島付近の群発地震活動（1994年3月～4月）（第108回：気象庁資料）

3月11日に新島と神津島の間でまとまった活動があったが、その後活動は12日には新島北部、さらに16日には神津島南西部に移動し、4月上旬を過ぎるとおさまったようにみえる。

度変化する様子が刻々モニターされていた（第107回：地理院資料）。GPS観測点はさらに増える予定であり、伊豆半島北東部の地殻変動がさらに詳しくモニターできる体制が整いつつあることは力強い限りである。ちなみに、現在上記の変動は止まっており、異常は認められない（第108回：地理院資料）。

### 新島・神津島近海の群発地震活動

今年に入ってから新島・神津島近海で群発地震活動が始まった。1月頃は神津島の北方海域でややまとまった活動があったが、2月に入ると神津島と三宅島の間に活動が集中し、2月9日にM3.8、2月11日にはM3.9の有感地震が発生した。この付近には三宅島の火山活動との関連でM6クラスの地震が発生することがある。たとえば、1962年の三宅島噴火の前後にM5.8が2回、1983年の三宅島噴火のときは、M6.2、M6.4の地震が発生している（第107回：気象庁資料）。

3月になって活動はピークを迎える。このときの活動は、図3に示すように神津島と新島の間集中しているが、新島北部と神津島南西部にもややまとまった活動がみられる。このときは地震の規模も大きくなり、活動集中域で3月11日にM4.3、M5.1、M5.3（気象庁暫定値）が続けて発生した。さらに3月12日には新島北部でM4.2（暫定値）の地震が、また3月16日には神津島の南西でM4.7（暫定値）の地震が発生した。4月になると活動はおさまり始め、M4を越える地震は発生していない（第108回：気象庁資料）。

今回の地震は、海底地形や単成火山から推定される北東-南西および北西-南東方向の構造線に沿って起こっているという傾向がみられる（第108回：震研資料）。

地理院の伊豆諸島精密歪測量によると、1980年1月から1993年10月までの間に新島と神津島との距離が9cm伸びていたが、1993年10月から1994年3月までの間では、1cmの伸びしか観測されず、今回の群発活動に伴う大きな地殻変動があったとは考えにくい。

### 九州の地震活動

九州南部に規模のやや大きい地震が発生している。2月13日には、鹿児島県北部でM5.7の地震が発生したが、落石や壁のひび割れなどがあったものの、目立った被害は生じていない。図4に示すように、本震は宮崎県青島と熊本県牛深を結ぶ地震列上に位置していることが指摘されている。この地震は深さ約10kmで起こったもので、余震分布は東西方向に並ぶ。発震機構解は東西に節面をもつ左横ずれ断層であろうと考えられている（第107回：九大理・鹿児島大理資料）。

4月30日には、大隅半島沖でM6.4の地震が発生した。宮崎、油津、都城で震度IVを記録している。この地震は余震がほとんどないことが特徴的で（気象庁）、図4に示す鹿児島大理の資料（第108回）でも、余震はほとんど観測されていないことがわかる。この地震はフィリピン海プレートの上面で起こった低角逆断層タイプの地震であろうと考えられている。日向灘にはM>6の地震が過去に数多く発生しており、今回の地震とはほぼ同じところにも1961年にM6.0の地震が発生していた（第

108回：気象庁資料).

この他、2月27日には種子島東方海域でM5クラスの地震を含むまとまった活動があった(第108回：気象庁資料).

### その他の地域の地震活動

4月22, 23日に日本海南西部で地震が発生した。M 5.2, M 5.3, M 4.9の浅い地震がたて続けに発生し、島根県浜田などで有感となった(第108回：気象庁資料)。この付近の浅い地震は稀ではあるが、実は1940年に今回の地震とほぼ同じところでM 6.6の地震が発生しており、その地震の後、山陰地方で鳥取地震など、被害地震がいくつか発生していることが指摘されている。

関東地方の地震活動は比較的静穏であるが、11月23日に川崎市の周辺で地震が頻発したことが報告されている(第107回：震研資料)。この一日にM 3.7, 4.3, 3.8と3個の地震が深さ30~40kmで発生し、M 4.3の地震では東京で震度IIを記録した。

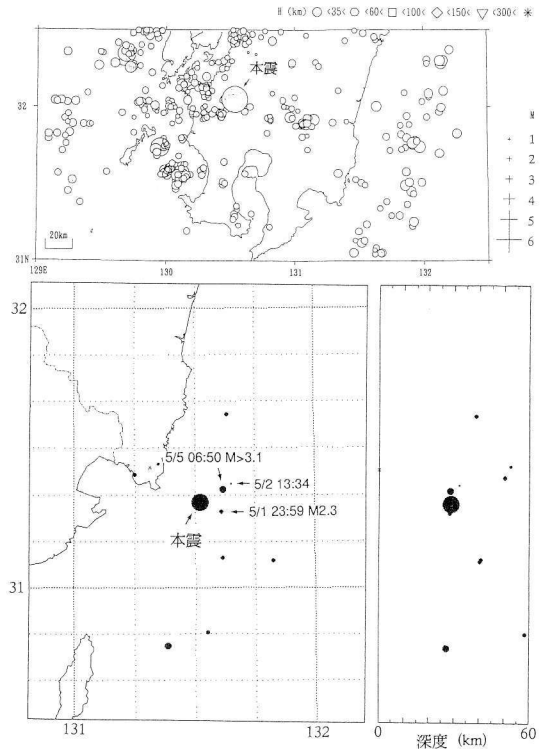
東北・北海道地方における顕著な地震として、4月8日に三陸はるか沖、千島海溝と日本海溝の接合部付近で発生したM 6.6の地震があげられる。日高山脈でM 3.4の地震を本震とする前震-本震-余震型の地震活動が4月7日に終わった後に、この地震が発生したことが指摘されている(第108回：北大理資料)。

北海道南西沖地震の余震活動は徐々におさまりつつある。また、北海道北部日本海東縁部では、活構造線に対応するような微小地震活動がみられることもあり、北大ではこの地域の観測を強化するために地震観測点を3点新たに設置することになっている(1点はすでに稼働中、第108回：北大理資料)。

1993年釧路沖地震に関し、1990年にサハリン中部で深発地震(M 7.8)が発生しており、これまで指摘されてきた浅い大地震と深発地震との関係(たとえば1952年十勝沖地震)が認められると茂木会長から指摘があった。また、1975-1987年の13年間、釧路沖地震の震央域近傍では低調であった地震活動が、1988-1992年の5年間に活発化していたことも指摘された(第108回：日大資料)。

### その他

今回は海外で発生した地震について、調査団メンバーとして調査に加わった予知連関係者から報告があった。1993年9月30日のラトウル(インド)地震(M 6.3)と1994年1月17日に発生したノースリッジ(カリフォルニア)地震(M 6.8)である。前者は、これまでほと



震源分布  
本震の震源は31.3082N, 131.5214E, 28.9km.

図4 2月13日に発生した鹿児島県北部の地震の本震の位置とこの地域に発生した過去の浅発地震の震央分布、および4月30日に発生した大隅半島沖の地震の震央と余震分布(第107回、108回：九大理・鹿児島大理資料)前者は西北西-南南東方向の地震列にのっているようにみえること、後者は余震をほとんど伴っていないことが特徴的である。

んど地震が起こっておらず、Hazard Mapでもっとも安全とされていたところで発生した。にもかかわらず、1年前にM 4を含む群発地震活動があったことは、この活動が前兆現象であったのではないかと考えられる点で注目される(第107回：日大資料)。

後者に関しては、余震分布および地震モーメント解から、南落ちの潜在逆断層の活動によるものと思われる(第107回：京大防災研報告)。GPS観測によると、震源に一番近いところで地震前後で20cmの水平変動、40cmの上下変動が検出された(第107回：防災科研報告)。また、GPS連続観測データに前兆的異常現象がみられたとの報告があった(第108回：震研資料)。震央から30km離れたジェット推進研究所で4ヶ月半から3ヶ月前に、50km離れたパロスベルデス地点では半年から4ヶ月前に、いずれも東西成分に異常が現れていたという。

[ほんくら よしもり 東京工業大学理学部教授]

# ■ 書 評 ■

## ●大胆かつ不正確な臆測

木村政昭 著

噴火と地震の科学 噴火と地震の科学

### 力武常次

本書では、相模・駿河―南海トラフ関係の巨大地震と三宅島・伊豆大島・富士山などの活動との関係を中心として、地震と火山噴火の関係を一般化し、それぞれの予知まで論じている。結論的に言うと、本書の所論はきわめて雑駁であり、説得性に欠けると言わざるを得ない。

本書は約15年前に東大出版会より刊行された著書の改訂版とされているが、内容の不十分さはそのまま、重版しなかった出版会は賢明であったと言えよう。帯カバーには「'93 釧路沖、北海道南西沖地震も中!!」とあるので期待して読んだが、そのように喧伝する根拠は見当たらなかった。このレベルの原稿を刊行した出版社の意図は理解しにくい。

伊豆大島三原山噴火が巨大地震に先行する理由として、著者はプレート内ストレスの高まりによるマグマ絞り出し説、いわゆる「フラスコ・モデル」を適用している。これは故中村一明君が提唱したもので、わかりやすいせいか多くの信者がいるようだ。しかし、水平方向にストレスが高まれば、マグマ溜まりはその方向には縮むけれども、それと直角方向には伸びるわけで、静水圧下の変形とくらべて、体積変化はわずか3分の1に過ぎない。定量的考察によると噴火活動をもたらすだけの量のマグマを絞り出すのはむしろさしうである。本書の著者だけではないが、定量的実験、観測または計算を抜きにして、感覚的にわかりやすいアイデアを採用することには疑問がある。

また、噴火と地震との関係にしても十分な相関があるとは説明できない。たとえば、それぞれ正弦曲線的に変動する2つの量をくらべているようなもので、どの山が互に対応するのかよくわからないし、都合のいいように解釈している傾向がある。浜田和郎君によれば、三宅島と伊豆大島噴火の関係については、後者が時間的に任

意であるとする仮定は5%以下の危険率で棄却されるが、伊豆大島噴火後の巨大地震発生については棄却するためには20%以上の危険率となり、地震が任意に起こっていると考えてもおかしくない。富士山噴火については、むしろ東海沖地震の前50年間に起こっているほうが多いという有様で、三宅島と伊豆大島の火山活動の相関以外は統計的に有意であるとは言えない。現在の知識では三宅島噴火→伊豆大島噴火→巨大地震または富士山噴火などとおどかすのは、世を誤ることと言ったほうがよさそうである。

ただ、著者が自分の所論を裏づけるべく（必ずしも成功したとはいえないが）、身体を張って三原山火孔内の溶岩レベルを調査した点は評価できる。自然科学に従事する者はすべからくこのような実証性を重視すべきであろう。評者としては、著者に今後ともこのような研究態度を要望したい。

最終章の地震予知に関する記述において、取り上げた地震のマグニチュードや発生日が、よく引用される『理科年表』や宇津の「カタログ」などと異なる例が目につくが、そうしなければならない理由があるのだろうか。さらに安政江戸地震（1855）などをプレート内地震ときめつけているが、最近ではフィリピン海プレート上面のプレート境界地震とするほうが一般的のように思われることを指摘しておきたい。

〈論創社、1993年9月、四六版、250頁、2266円〉

〔りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授〕

## ●地震・火山用語を一般向けに解説

勝又 護 著

地震・火山の事典

### 茅野一郎

北海道南西沖地震津波、ロスアンゼルス地震と地震のニュースが続き、雲仙普賢岳の活動は1990年以来続いており、フィリピン―ピナツボ噴火の印象もまだ生々しい。これらのニュースを見聞きしていると、時折聞きなれない言葉がでてくる。例えば、雲仙噴火で登場した「火砕流」という言葉など、時折は解説もあり、いまや

定着したかに思われるが、一応なんとなくわかったような気がするものの、人に聞かれるとちゃんと説明できないという場合が少なくない。

本書は、このような地震と火山に関係する言葉を集め、適切な解説をしたものである。これから地震・火山の勉強をしようとする、あるいは周辺分野の学生にも役立つだろうし、地域の指導者・防災担当者・学校の先生たちにはぜひ参照して欲しいし、一般の家庭でもテレビの脇にでも置いて（ちょっと高いし、ちょっと難しいかもしれないが）、聞きなれない言葉が出てきたらすぐひいて欲しいものである。学校や図書館には必備書であろう。

事典という題名だが、50音順に言葉を単位として採り上げられている。こうすると関連する項目があちこちに飛び離れてしまう嫌いがあるのだが、巻頭に分類目次があって、内容的関連がよくわかるように行き届いた配慮がされている。

自然科学、特に地球物理学に関する領分を主とするが、耐震工学や災害対策、社会の対応などにも及んでいる。

「全体の体裁を整え、項目間の調和を図るため、……編者によりかなり大胆かつ強引な調整を行なった」と序文に述べられているが、実はかなり遠慮がちであったようで、本文中に（ ）に入った説明がかなり多くて、これがどうやら編者による加筆ではないかと想像できるのだが、別に（ ）に入れる必要もないと思うところが多い。

ガル (p. 47) には、 $\text{cm/s}^2$  と書いてあったほうがよい (p. 49 の図には併記してあるが)。剛構造 (p. 71) の説明で、軟構造という言葉が出てくるが、柔構造という言葉もよく耳にする。どう違うのだろうか。国土地理院の項 (p. 73) で、陸軍測量部は陸地測量部であろう。「前兆スオーム (または前兆的群発地震) とよばれるが、必ずしも群発地震とはかぎらない (p. 130)」と説明されているが、スオームという項目は見あたらないし、スオームと群発地震がどう違うのかよくわからない。三松ダイアグラムの項 (p. 243) では三松正夫と名前も書いておいてほしかった。

死火山、シアル、シマなど、かつて広く用いられ、教科書などにも必ずといってよいほど出ていたが、現在では使われなくなった言葉 (概念) がきちんと注釈してあるのは大変よいことだ。

口絵と見返しと付録に日本と世界の主な地震の分布・海底を含む地形・活火山の分布、日本と諸外国で使われている主な震度階 (震度階級というのは気象庁方言)、地震回数に関するデータ、主な被害地震 (20世紀以前は重要なもの少数に限られているのは賢明な処置、新しいところは1993年7月12日の北海道南西沖地震まで出ている) と火山災害の表などが載っている。世界の火山災害の表 (p. 303) で1947年ヘラクはヘクラのミスブ

リント。遠地震の記録例 (p. 272~273) には震央距離を書いてほしかったし、日本の磁気図 (p. 274) は網を掛けなくて載せてほしかった。

〈東京堂出版、1993年9月、A5判、318ページ、5800円〉

〔かやの いちろう 地震予知総合研究振興会主任研究員〕

## ●新地震学をめざして

川崎一郎・島村英紀・浅田 敏 著

### サイレント・アースクエイク

地球内部からのメッセージ

## 木下 肇

この著書は、専門をある程度こなしてきたものにとっでは非常に面白い。専門と言うのは地震学のみならず、周辺の各種の問題についての背景を知っているものと言う意味である。著者3名は、いずれもこの学会では著名な方々で、研究活動の場においても日本をリードしている方々であり、著述の内容と描写が生生ききとして、まるで現場に身をおいているような錯覚に陥る。挿入話も説明資料も完璧ではないが好く洗練されていると言えよう。

この著の内容は次のようであろう。第2次世界大戦後の日本が経済復興を成し遂げるに従い、海洋底研究にもその余波が及んできた。その状況をはやくから認識し、日本の優れた地震観測/研究事業を海にも広げるべきであると確信した時期。そのためには、いかに高性能の地震/地殻変動検出システムを構築するかに没頭した日々、やがてその中から、海底の地震を超高感度でキャッチすることを願って開発に努力した経緯。その装置 (自己浮上型海底地震計) が美しい形に完成品となり、日本のみならず世界の海洋底での観測事業に活躍している今日の雄姿。このような高感度 (同時に高精度) の測定機器 (海底のみならず陸上の機器、ソフトウェアも含め) を利用して入手できる資料を基にして地球の内部で起こりつつある超長周期地震/地殻変動をいかなる地球鼓動のメッセージとして読み取るか、を地震学以外の情報にも触手を伸ばして理解することこそ、今後の基礎固体地球科学の進むべき道ではないか、と問い掛けている。

この著述は愉快であり、現在、手詰まりの様態を示し始めた地震学全般に対して、今後、進むべき道に一筋の光明を与えている。著述の内容はさておき、やや気になる点がない訳でもない。それはこの著者達を知らない人が読むと、かなり学会の全体から遊離して、この問題こそが唯一無二であり、すべて独歩で築き上げられてきた

こと、世界の人達は何も気づいていないのではないかと読み取られてしまうことであろう。やはりその辺りの配慮を何らかの記述を通じて読者に知らしめることが責任であろうと思われる。この記述形式によって読者層がかなり限られてしまうことは著者にとっては残念であろう。このことはむしろ著者達の狙いである、とも読める。もう一つ難点をいえば超長周期地殻変動のキーワードで著者の論点を繋ごうとした狙いが必ずしも鮮明になっていない。それには章の順序を前後中の順に変えたほうが良かったのではないかと惜しまれる。

しかし、本書の指摘している問題点はかなり焦点を絞り、将来性を十分に含ませ、また畢竟、結論はこうであるなどと安断言をしていないところが自然科学者の基本的態度としては称賛されるし、これからこの分野で学究の道に入ろうとする研究者にとって大いに薬になるであろう。

本書に関しては、基礎知識、すなわち、電子、振動／流動、海洋、そしてテクトニクスなどの副読本の助けを借りて熟読することが本書の価値を一層高めることになるであろう。

〈東京大学出版会、1993年10月、四六版、254頁、2884円〉

[きのした はじめ 東京大学地震研究所教授]

## ●最新の知識にもとづく「読める」教科書

Peter Francis 著

### VOLCANOES

A Planetary Perspective

## 小山真人

火山学には日本語で書かれたよい教科書や啓蒙書が少ない。本当に困ったものだといつも思っている。まったくないというわけではないが、内容が古くて問題が多い。ここで言う「火山学」とは、地質学のおよび地球物理学的観測からマグマの移動・噴火現象とそれが及ぼす影響を扱う総合的学問のことを指す。とくに1980年代以降のこうした火山学の発展には目をみはるものがあるが、その成果がきちんとレビューされた書物は意外なほど少ない。近年の日本には被害噴火が相つぎ、マスコミや一般人の火山に対する関心は異例と言えほどの高まりを見せているが、最新の成果に基づく火山の一般像を正しく伝える書物がないのは憂うべきことである。

火山学のうち、とくに火山地質学の基本を扱う教科書としては、『Volcanic Succession - Modern and Ancient』(Cas & Wright 著, Allen & Unwin,

1987年)が有名である。この本は、その網羅的な特徴ゆえに語句や事項の意味をしらべるために便利だが、内容の記述が表面的であり、理屈や本質を理解するためには原文献に当たる手間を必要とする。このようなフラストレーションを取り除いてくれたのが、ここに紹介する書物である。

本書は、その“まえがき”に述べられている通り、火山や地質学に関する専門的知識をもたない読者層に、火山学の面白さを共有してほしいとの願いをこめて書かれている。このような意図が、本書に専門書には通常見られないほどの「読みやすさ」を備えさせた。本書を際立たせるこの特徴は、第一に引用文献の呈示を行なわなかったことに起因している(ただし、各章の末尾に鍵となる最小限の文献リストがある)。引用文献の呈示は、論文を簡潔明瞭にし、学問的貢献の出所を明確にするが、教科書の場合には逆に「読み下しやすさ」を犠牲にする。本書は、引用文献を示さない代わりに、よくかみくだかれた表現を用いて物事の理屈を注意深く説明することにより、解説書としての完成度を高めている。

本書のもうひとつの特徴は、比較惑星学的な視点をつねに意識した構成と内容である。本書は、まず惑星に火山を発生させる根本原因である「熱」がどこから発生するかという問題提起に始まり、なぜマグマが発生するのか、惑星内部の熱放散システムとしてのプレートテクトニクスとホットスポット、地球と他の天体の玄武岩の比較などの話題へと進んでゆく(第1～3章)。以後はオーソドックスな火山地形・地質学の話に入り、著名な4つの歴史噴火の話(第4章)、マグマの組成と物性、基本的な噴火様式、溶岩流の特徴と成因(第5～7章)、噴煙柱のダイナミクス、降下火砕堆積物・火砕流・サージ・岩なだれ・ラハールの特徴と堆積機構(第8～13章)、カルデラ、海底火山活動とその産物、火山地形とその浸食(第14～16章)、の順につづく。第17章は、火山噴火と気候変動の関係をテーマとするユニークな章であり、最終の第18章は、地球外天体(月、水星、金星、火星、イオ、エウロパ、トリトン)の火山に関する最新の成果の解説のために、本書全体の頁数のほぼ10%をさいている。

本書は、その取りつきやすさゆえに啓蒙書的なものとの誤解を受けるかもしれないが、内容の高度さ・最新さは他の専門書をしのぐ点が多い。本書が火山に興味をもつ学生や他分野の研究者に広く読まれ、最新の火山地形・地質学の内容や思想にたいする理解が深められることを期待する。

〈Oxford Univ. Press, 1993年, 443頁, 42.95 \$,  
丸善価格 7200円〉

[こやま まさと 静岡大学教育学部助教授]



# ADEP情報

## 南関東地域直下の地震による津波

中央防災会議の「地震防災対策強化地域指定専門委員会」は、1988年8月に、関東大地震のような相模トラフ沿いの巨大地震の発生は先のこと、当面、潜り込むフィリピン海プレート境界の一部の歪開放によるマグニチュード7級の南関東地域直下の地震発生の切迫性があると発表した。それによると、発生地域は特定できないとして、プレート境界面に19個の震源断層を設定している。

一方、南関東地域直下の地震として近世の代表的歴史地震は、安政2年(1855)の江戸地震および寛永10年(1633)、天明2年(1782)、嘉永

6年(1853)などの小田原地震があげられる。とくに安政2年の江戸地震と嘉永6年の小田原地震の間には、さらに安政元年の安政東海・南海大地震がはさまっている。これは東海地震発生の可能性が高いとされている現在、たいへん注目される過去の事実である。

いままで地震防災対策は、関東地震、安政東海地震のような、マグニチュード8級の大地震を想定して策定されてきたが、以上のようなことから、マグニチュード7級の直下地震に関しても対策の検討が行なわれるようになった。静岡県でも、県東部地域は、過去の小田原地震のような地震によって被害を受ける可能性があり、とくに伊豆半島北東部では、この種の直下地震によってどのような津波が起り、被害が生じるか検討する必要がある。

このような観点から、静岡県地震対策課では、地震予知総合研究振興会に「南関東地域直下の地震による津波影響調査」を委託された。また熱海市および伊東市でもこれに呼応して両市全域にわたる津波浸水域を調査する「津波対策災害予測調査」を委託された。

伊豆半島東岸に津波をもたらす地

震として、中央防災会議の想定断層19個のうち南西端の3個と、過去の津波を伴った小田原地震を含めて、もっとも影響の大きい嘉永6年の小田原地震を、これから起り得る直下型の想定地震とすることにした。

結果は、幸い関東大地震の際の津波を上回ることはなく、とくに伊東市富戸以南では津波の高さが急減する。また近年の海岸防災工事、道路工事により、海岸線の標高が4mまたはそれ以上のところが多く、港など必要上やむを得ず標高が低い場所のみが浸水する程度にとどまることがわかった。しかしながら、海岸線が高くなったため、内側に低い土地が残されていることがあり、このようなところでは、排水溝などの小水路から水が吹き上げるような現象に注意が必要である。また津波を発生する断層が海岸間近であることから津波警報は間に合わない可能性が高い。激しい地震動を感じたとき直ちに海岸から離れ、高所に一時避難することが肝要である。

市民への配布用として、以上のような、調査の概略と注意事項をまとめた、パンフレットも作成した。以上は平成6年3月完了した。

[A]

## 編集後記

今号もまたまた標準の48頁を大幅に超える大冊となった。しかもエッセイから書評まで、多方面の先生方の興味深い論説・紹介が満載されていて、これを手にした読者は、まずどの記事からお読みになったのだろうか。本号の上原先生による「医療の地震防災対策」によると、災害時一時に多数の負傷者が発生した場合、その救急診療の順序を決めるための“患者の選り分け(トリアージュ)”が行なわれるのだそうである。なにか恐ろしい感じがしないでもない。

この『ジャーナル』を手にしたと

き、さて何から読むかという判断は、それぞれの読者の専門分野、興味の対象、それにそのときの余裕時間などで決められるのだろう。まさにトリアージュが行なわれるのだろうか。かくいう筆者は、ちょうど携わっていた仕事の関係から、地球内部の最近の話題、丸山先生の「ブルームテクトニクスとは」と、地表に現れている大構造線の新しい知見、伊藤先生の「中央構造線は動くか」から拝見した次第である。

「地震予知連情報」は本号から本蔵先生に交代した。前任の青木先生に厚くお礼申し上げる。 [A]

## 地震ジャーナル 第17号

平成6年6月20日 発行

発行所 ④101 東京都千代田区神田美土代町3  
☎ 03-3295-1966  
財団法人  
地震予知総合研究振興会

発行人 萩原尊禮

編集人 力武常次

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。

●印刷・製本/理想社 ●装丁/鈴木 堯