

地震 ジャーナル

22

1996年12月

口絵 「ふよう1号」合成開口レーダー・データを干渉処理して作成した
兵庫県南部地震に伴う地殻変動を表す干渉図

エッセイ 大震災に学ぶ ●三木克彦

座談会 震源で何が起きているか ●司会:平澤朋郎——1

梅田康弘／山下輝夫／松浦充宏／大中康譽

合成開口レーダー ●村上 亮——15

測地観測センター ●矢口 彰——24

アメリカ版GPSアレー ●力武常次——31

飛び跳ねる自動車 ●翠川三郎——38

VAN論議の顛末 ●力武常次——44

地震と短歌 ●岡井 隆——54

首都高速道路の地震防災 ●勅使川原 勝——61

滋賀県の地震防災対策 ●今堀治夫——66

連載:その4 地震・津波碑探訪 ●力武常次——73

地震予知連絡会情報 ●石井 紘——82

●書評——86

●ADEP情報——90

地震予知総合研究振興会

大震災に学ぶ

三木克彦

阪神・淡路大震災の発生から2年を経ようとしている。体感した地震動の激しさと直視した被災の状況から、今後の震災対策には次の3点が重要課題であると思われる。

第1に、震災予防の観点から、地域構造の耐震性の強化についてである。都市機能や市民生活を支える交通情報インフラやライフラインは壊滅損傷して、その重要な役割を果たすことができず、建築物についても既存不適格や未確認のものにとどまらず、耐震設計基準改定後のものについても被害を生じ、家屋の倒壊は、痛ましい人命被害の原因となった。

広域インフラ・ライフラインを中心に、経験した地震動に対応した耐震技術の再検討や改修が行なわれているが、リダンダンシーの確保や建築物の管理利用段階におけるチェックなどにも配慮した地域構造全体の耐震性の向上が必要である。

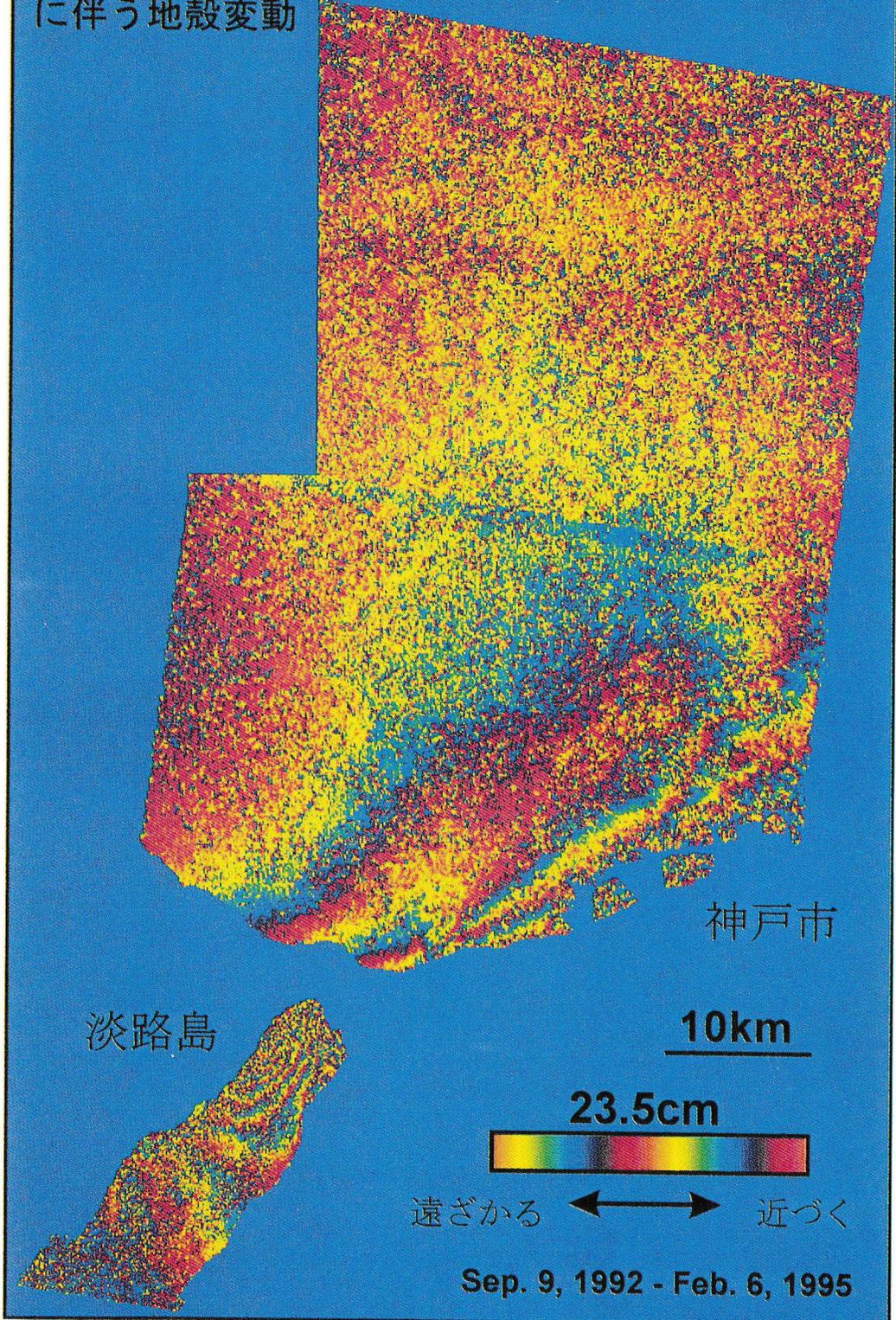
第2に、震災応急対策の観点から、即時防災力の充実についてである。地域の防災力が被災の規模や程度に及ばず、また被災したため、救急・医療・避難・救援などの対応に不足が生じ、他地域からの応援や国の支援も初動の機動性を欠き、不安や不満を生じた。

危機管理的発想からの情報把握・緊急対応体制の整備、緊密な連携支援による即時防災力の拡充、防災インフラの整備などが緊急的課題とされ、防災計画や防災システムの見直しが行なわれたが、緊急時に真に実効的に機能し得るかが眼目である。

第3に、地震発生の予測の観点から、発生の可能性、切迫度に関する調査研究の促進についてである。震災対策においては、地震発生のメカニズムを解明し、具体的発生の可能性・切迫度を予測する学界を中心とする科学的知見が、震災予防・応急対策の責任を担う公共の行政的知見と緊急時に初期対応の役割を担う市民や企業などの社会的知見（地震の発生や対応についての正しい理解）に的確に伝えられ、震災予防や応急対策の基準となり、震災時の行動の具体的指針となって、被災の拡大を最小限に阻止することができるものと思われる。阪神地区は地震観測の強化地域に含まれていたが、行政も市民も企業も地震発生の具体的危険の認識に乏しく、発生時において震災対応感覚が十分でないため、混乱が拡大したことも否定しがたい。

地震理論の研究、地震発生の歴史的解析、地震微動の観測、活断層の調査などのさまざまな試みの専門化と総合化により、発生の可能性やその切迫度の具体的把握に少しでも近づくことが期待される。地震の発生、とりわけて直下型地震の発生が、その特性から把握困難であるとすれば、当面は全国くまなく震災対策を強化し、いつでもどこでもの発生に備えるしかないが、その社会的負担と緊張はきわめて大きく重い。超長期の地球の自然的時間と人類の社会的時間の関係のなかで、不透明不確実でも具体的予測は可能か、目標に向けてひたむきな足どりが祈念される。

国産地球資源衛星「ふよう-1号」合成開口レーダーを利用して観測した兵庫県南部地震に伴う地殻変動



「ふようー1号」合成開口レーダー・データを干渉処理して作成した
兵庫県南部地震に伴う地殻変動を表す干渉図

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の地殻変動の詳細を明らかにする目的で、1992年2月に打ち上げられた国産地球資源衛星「ふようー1号」のデータを用いて作成された画像である。地震前の1992年9月9日および、地震直後の1995年2月6日の観測データの比較から、兵庫県南部地震に伴う地殻変動が明瞭に現れた。淡路島北部西岸に沿いながら北東-南西方向に走る野島断層の右横ずれ(約2m)および南東側隆起(約1.5m)の断層運動に伴う地殻変動、および六甲山系に沿って神戸市の海岸部と平行に走る一連の断層系の右横ずれ(約1m)に伴う地殻変動が、色彩変化の縞模様として直観的に理解できるように視覚化されている。さらに、このデータを数値的に解析することにより、地震を発生させた断層について、より詳細な情報がもたらされ、地震発生メカニズムに関する理解を深めることができる。この画像は、国土地理院と宇宙開発事業団の共同研究の成果である。

■座談会

震源で何が起きているか

震源核とその力学

ひらさわとも お
司会 ● **平澤朋郎** [東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センター:教授]

うめ だ やすひろ
梅田康弘 [京都大学防災研究所:助教授]

やましたてる お
山下輝夫 [東京大学地震研究所:教授]

まつうらみつひろ
松浦充宏 [東京大学大学院理学系研究科・理学部地球惑星物理学教室:教授]

おおなかみちやす
大中康譽 [東京大学地震研究所:教授]

〈発言順〉

平澤 この座談会は、「震源で何が起きているか」というテーマで、地震という破壊がどのように始まって大地震に成長し、また地震が終わった後、次の地震までどのような経過をたどるか、これがわかれば地震学の大きな課題が解決することになるわけでしょうけれども、その中でとくに大地震の始まりに注目して、お話を伺おうという趣旨のようです。

インバージョンからわかった断層運動

平澤 最近の地震波の解析から地震という断層運動の様子が、かなりわかってきたと思います。歴史的にみれば、くい違いの理論に基づいて、断層面に沿った一様なすべり運動を仮定した単純な断層モデルにより、観測された地震波形が説明できることが示されたのは1960年代です。

その後、すべり運動の断層面上における時空間分布を、観測波形から推定するインバージョンの手法が開発され、実際の断層運動は、決して一様ではなくて、あるところでは速く、あるところでは遅く、ときには一時停止することもあるというように、大地震の断層運動がきわめて複雑であることが明らかになってきました。

しかし、このように複雑なすべり運動の詳細をインバージョンで推定する場合には、当然、解の一意性が問題になります。近ごろの波形解

析の結果を、皆さん、どのように評価しておられますか。

どちらかという地震の観測、観測した波形の解析などから経験則等を導いて、理論的なモデルと結びつける、というような研究をされている梅田さんはどんなお考えをおもちですか。

梅田 いわゆるインバージョン法でいろいろ求められているのですが、伝播経路と震源で何が起きているかという2つの未知量がトレードオフしております。伝播経路、すなわち地殻構造が詳しくわかっておれば、それなりに震源のことも詳しくわかるのですが…、複雑な断層運動の分解能の現在の限界は、おそらく地震波の周期にして1秒より長いほう、その辺までではないでしょうか。多分、今日の話のメインになるのではないかと思うもっと短周期の波になってくると、今のインバージョン法では限界があると思うのです。

平澤 地震学理論がご専門の山下さんは如何ですか。

山下 やはりぼくらは、今、行なわれていることよりはるかに細かいことを知りたいという意欲が強いのですね。例えば今の手法だと、断層をせいぜい1枚とか2枚とか置いてやりますが、断層というのはかなり複雑な形をしていて、ある程度体積的にものごとを考えないと無理ではないかという気がするのです。仮定する震源を

体積状に分布させて、そして結果がどうなるか、つまりどのように体積的に破壊が広がっていくかということ、ある程度客観的な基準に基づいて知りたいのだけれども、それだけやれる十分な観測点もないし……。

松浦 構造も問題でしょう。

山下 そうですね。構造を厳密にしないと、断層がどのように始まってどのようにとまるか、ということがなかなかわからないですね。日本にもカリフォルニアのパークフィールドみたいなところがあれば、いろいろなことがわかるのでしょうけれど、そこら辺がネックになっているのではないかと思いますけど……。

平澤 インバージョンの理論を研究してこられた松浦さんはいかがですか。

松浦 現在のインバージョン理論の体系をつくってきた一人として指摘しますと、インバージョン解析をすれば何でもわかるのだというのは間違っています。結局、インバージョンの結果というのはモデルに依存してしまうのですね。モデルのうちの一つは、梅田さんが指摘されたように、地震波が伝わってくる構造です。これがわかっていないと、当然、解析をするときの構造と実際の構造の違いが、間違った形で答えの中に反映してきてしまうわけです。

構造の問題をクリアできたとしても、もう一つ、地震破壊が起こる場をどのように表現するかというのがあって、これは山下さんが先ほど指摘したように、例えば1枚の平らな面として断層破壊が起こる面を決めてしまったら、それ以外の答えは出てこないわけです。

さらに、断層面ですべりが時間的・空間的に広がっていく、その広がり方を、ある関数の重ね合わせで皆さんは表現するのだけれども、その際、柔軟性のない関数を使うと柔軟性のない答えしか出てこない。だから、非常にいい観測データがあって、インバージョンの方法で断層面のすべりが時間的・空間的にどのように広がっていくかという答えが得られたといっても、それがほんとうに断層面で起こっていることであるという保証はない。インバージョンの結果

は、すべてモデルに依存しているのです。だから、できるだけ柔軟なモデルを使う、つまり自由度の高いモデルを使って答えをみつける。

しかも、その見つけた答えがどれぐらい不確定か、それも併せて表現しないと、インバージョンの結果というのは実は意味がない、そういうことなのですね。

平澤 おっしゃる通りですが、柔軟性の高いモデルを使うと解が収束しにくくなりませんか。

松浦 柔軟性のあるモデル、つまり自由度の非常に高いモデルを使う場合、放っておけばインバージョン解析の結果が発散してしまう。そこで統計数理研究所の赤池先生が導入した ABIC という情報量基準を用い、柔軟なモデルを用いてデータに含まれている情報を最大限取り込んで答えを出す、そういう方法が既に確立しているわけです。

平澤 私は、「ABIC」といわれると、何か神様みたいな感じで（笑）、その内容がよくわからないのですが。

松浦 我々になじみのある最小二乗法というのは、尤度を最大にするという原理に基づいている解析方法です。ところが、ABIC というのは情報量エントロピーを最大にする原理というわけで、尤度を最大にする原理の上にランクされる原理なのです。

平澤 大中さんは一貫して岩石実験をされてきて、その結果に基づいて摩擦構成則、破壊の法則、とくに、破壊が始まる直前の過程に関心をもって研究してこられたわけですが、大中さん、このような波形解析から得られている地震の断層運動像をどのように評価しておられますか。

大中 皆さんが言われたように、観測のほうの分解能は、周波数にして1秒ぐらいが限度で、それより短周期についてはまだ信頼できる結果は得られていないという気がしています。私は地震という破壊の最初の過程がとくに重要だと考えておりますので、地震波解析の分解能はまだまだ不十分であるというのが私の印象です。

平澤 破壊の始まりなどを詳しく見るには分解能が十分ではないが、大局的な断層運動はわか

ってきたということでしょうか。つまり、震源での断層運動というのは決してスムーズなものではなくて、きわめて不均一な運動である。ちょっと極端な表現をすれば、大きな地震というのは、単一のなめらかな断層運動というよりは、多少分離できないいくつかの断層運動、あるいは、破壊が重なったものであるという見方もできるわけですね。

梅田 私はそう思っていますが、インバージョンをやっている人はそういう意識はあまりもっていないようですね。

断層のセグメンテーション

梅田 さきほど、分解能の話をしました。今度の兵庫県南部地震で、インバージョンに関してみんなよくわかったことがあると思うのです。それは、今まで大きな地震がくると、世界のエキスパートの誰かがインバージョンをやって、その解が出されれば、ほかの人はあまりやらなかった。それが正しい解だと思っていたのです。ところが今度の兵庫県南部地震の場合には、いろいろなデータセットが得

られた。それを使って、異なる周波数レンジに関心をもつ研究者達、地震屋、工学部の人、測地学の人達がインバージョンをやる。そうすると、異なる周波数レンジでいろいろ違ったものが見えてきたのですね。

それで、あ、インバージョンというのは、測地のデータを使うと断層のこういうところで地震モーメントの開放が大きいけれども、地震波動を使うとこっちのほうが大きい、こういう違いがあるんだと、いろいろなことがわかったと思うのです。

そのときに、長周期のデータを使っている人達にとって、セグメンテーションというのはあくまで数学的に断層をいくつかの割るという概念しかないのです。今、平澤先生がおっしゃったのは、もっと物理的なセグメンテーションの一つだと思うのです。その概念はほんのごく一部の人にしかない。とくに高周波地震動の発生は単純には求められない。工学系の人を非常に求めようとしているわけです。ですけど、1秒以上という長周期の波しか使えないので、何とかしようとして、加速度記録のエンベロップ・インバージョン、これは波形エンベロップの形から短周期が断層のどこから出てきたかというのを求める方法なのですが、そういうことをやって短周期の出どころを追求しています。

それぞれいろいろな周波数レンジによって断層運動像が違う。当然、サブフォルトの考え方が違うのです。

平澤 物理的なセグメンテーションという概念は大変重要だと思うのですが、なかなかイメージしにくいですね。

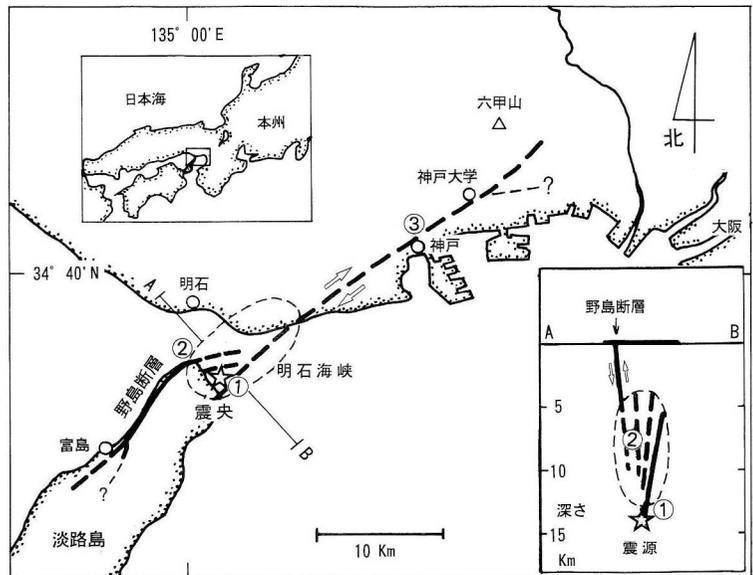


図1 1996年兵庫県南部地震の震源断層
点線で囲んだ領域は余震空白域。右下の挿入図は明石海峡の断面図。破壊は①、②、③の順に進行した。①から②へは断層の乗り移り現象（ステップオーバー）が起こった。

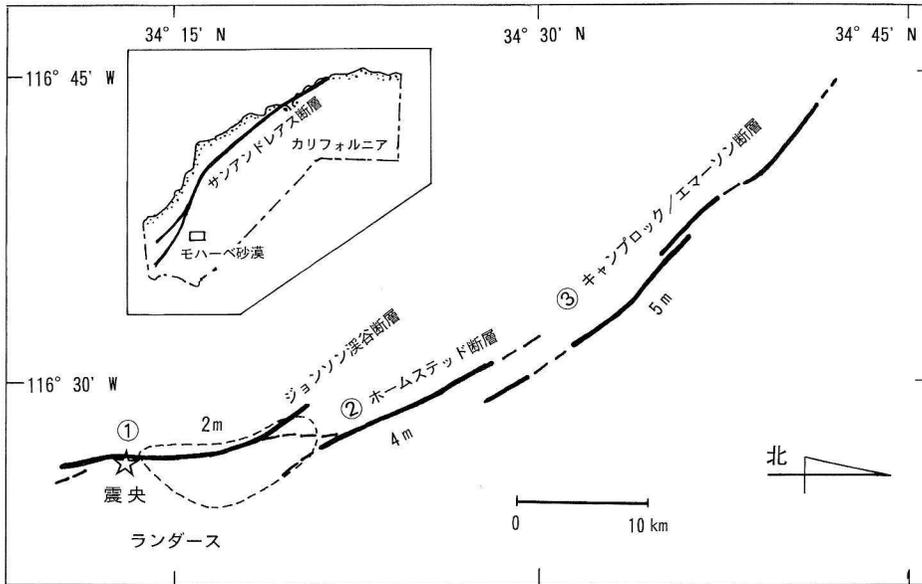


図2 1992年ランダース地震の震源断層
 点線で囲んだ範囲は激しい地震動によって地表の物体が飛散した領域。破壊は①、②、③の順に断層を乗り移り（ステップオーバー）しながら拡大していった。

梅田 兵庫県南部地震の場合、明石海峡直下で始まった破壊は神戸側へ伝播してゆくと同時に野島断層にも乗り移ったのです。遠方近似では1枚の断層のように見えたのですが、2つの断層は地表で4kmもステップオーバーしています。だからどうしても、幾何学的なセグメンテーションを考えざるを得なかった。

もし、断層が両方とも地表に出なくて、遠方で観測された記録しかなければ、先ほど言ったように遠方近似で1枚の断層面を誰かが求めて、兵庫県南部地震はこうでしたよ、と言って終わりだったと思うのです。ところが、ああいう顕著なことが出て、複雑さというのが目に見えて出てきたのです。

平澤 一つの大きい地震の断層運動を記述するときに、従来、その断層を分割してどこからどの程度の波が励起されたか、これは一種のセグメンテーションであるわけですが、それは、波のある特定の周波数帯でみたときの波動源としてのセグメンテーションに過ぎなかった。これからは断層運動の実態に立ち入ったセグメンテーションを考えていかなければいけない、ということでしょうか。

梅田 そうです。その方向に一部の人は向かいつつあるということです。

山下 兵庫県南部地震のときに、神戸の下では断層のアスペリティが割れたとかなんとか言われていますね。その実態が何かということをお我々は知りたいわけです。そういったものは、マルチプルショックというような表現が使われますが、実態は全然わからなかったわけです。ただ、梅田さんがおっしゃったように、兵庫県南部地震のときは、もしかしたら幾何学的な問題かもしれないということが言えるわけです。神戸の下はわかりませんが、明石海峡の下は幾何学的な問題ではないかということが言える。もう一つ、カリフォルニアのランダース地震のときにも高周波地震動を励起したのは、ステップオーバーしたところですから、アスペリティといわれるものとか、マルチプルショックといわれるものが幾何学的な問題に帰着するのではないかということが、最近、わかりつつあるという気がするのです。

大中 断層面の幾何学的な不均一さや複数の割れ目の存在とかの重要性は、いろいろな方面から指摘され出したのではないですか。

岩石実験と破壊核形成過程

平澤 地震波形データや測地学的データなどは、震源での断層運動をあとからみつけ出すのに使われているわけですが、それはとにかく地震が起こったあと、観測結果から断層運動がどう見えるかという問題でした。兵庫県南部地震の断層のステップオーバーについての話から、そういう結果を生ずるにはどうでなければいけないのか、あるいは断層運動の実態はどうであるべきかという話に移ってきたように思います。

岩石実験を通じて破壊核形成過程の研究をされてきた大中さんから始めていただきます。

大中 地震というのは高速破壊で、そこで弾性波が励起される、それを我々は地表で感ずるから地震であるといっているわけですが、しかし地震が起きる前、高速破壊が起きる前は地殻は静止しているわけです。その静止の状態から不連続的に高速破壊が生ずるのか、あるいはその前に何らかの準備過程があるのか、これは、少なくともサイエンスの視点からすれば大問題なのです。

現実の地震については、現在、それほどの分解能をもって議論できないとすれば、地震過程が破壊過程である限り、実験室で破壊過程を研究して、高速破壊に至るプロセスを十分調べあげようという考え方は当然出てくるわけです。

これまで、破壊の研究はいろいろな分野でされてきて、とくに工学分野などで長い歴史もっていますが、しかし工学分野で関心をもたれる破壊のモードは、主として引っぱり型の破壊であって、地震のような剪断型の破壊ではありません。

剪断型の破壊というのは、破壊が進行する過程で両方の面が破断面を通して絶えずインターアクションしていますから、これは幾何学的な不均一性の影響を“もろ”に受けてしまう。一方、引っぱり型の破壊は、破壊面に対して垂直方向に変位するわけですから、その影響を受けない。この点で両者は非常に違うのです。

もとに戻りますと、破壊の核はできることは確かなのですが、破壊の核というのは破壊の種みたいなもので、それが大きい



大中康譽 氏

か小さいかが問題なのです。現実の状況を考えると、破壊の核が全然存在しないということはちょっと考えにくい。地震についての震源というのは決まっています、そこから高速に破壊が伝播することがインバージョンなどでわかっているわけだから、震源でニュークリエイトしたことは明確なのです。ただ、それが小さいか大きいかなのです。

その大きいか小さいかを何が決めているかという問題なのですが、現実の地震発生下では、個々の領域の個性がそれぞれあって、それが決めているらしい。そういったことは、実験で現実の断層面の幾何学的な不均一性をコントロールするか、あるいは応力分布をコントロールするかということによってわかってきた。

最初の種は強度の低いところからできるので、最終的に高速破壊に至るクリティカルな長さになるまで破壊の種が成長する。その臨界長さを決めているのは、どうも幾何学的な不均一性ではないかという証拠が集まりつつあるのです。

梅田 質問ですが、破壊核には大小が存在して、それが幾何学的形状に依存するということが、破壊核は強度の低いところから出発するということの2つをおっしゃったのですが、断層の形状と強度の低いところとの関連はあるのですか。

大中 私の言い方は誤解を招くおそれがありますが、実際はもっと複雑なことを非常に単純化して話をしています。

私が、破壊は強度の低いところから始まると言いましたが、破壊エネルギーが低いところから始まると言ったほうがいいですかね。

もう少し丁寧に説明すれば、震源で破壊が拡大するという事は、破壊の先端で新たな破壊面をつくらなければいけないわけですから、そこで応力が低下するわけです。と同時に、応力が低下するためには、剪断破壊だったらずべりが進行しなければいけない。破壊の先端で応力がある一定の値まで低下するのに必要な最小限の臨界すべり量と破壊先端部の応力の低下量、その積のようなものが破壊エネルギーなのです。脆性領域では、応力の低下量・降下量は強度と正の相関にあるのです。だから、応力の降下量が低ければ強度も低い。

脆性領域ではなく、温度が影響を及ぼすような領域では、必ずしもそうでなくなる可能性があります。臨界すべり量は、あるクリティカルな温度を超えると温度の影響を強く受けますから、破壊エネルギーそのものと強度の大小とは必ずしもつながりはなくなってしまうのですが、常温ないし 300°C くらいまでだったら、正の相関があります。

平澤　ここで破壊核という言葉が出てきましたが、これは、平たく言ってしまうと、地震という大きな破壊に広がっていく種になるところということなのでしょうが、厳密にはどこを指すのでしょうか。地震の震源は破壊が高速伝播を開始した場所ですが、破壊核あるいは震源核といわゆる震源は同じところと考えてよいのですか。

松浦　断層面に働く力がだんだん大きくなると、地震の波は出さないけれどもズルズルと準静的にすべる弱いところがあり、ここが最初にすべる。すべることによって、そこに蓄えられていた応力を開放する。断層面の弱いところすべりが起こり応力を開放した場所、それを破壊核と呼んでいるのです。

応力を解放した破壊核の周辺には、逆に応力が集中した大変危険な場所ができるわけです。その応力が集中した場所で何かの拍子にダイナミックな、つまり地震波を出すような不安定な破壊がスタートするわけです。だから地震の震源といっているものは、核形成領域の周辺部、

あるいは核形成領域内のすべり残した部分にあるわけです。

平澤　震源核というと、いかにも高速の動的破壊が始まった場所みたいな感じがしてしまうけど、そうではないということですね。

松浦　岩石実験について、ほんとうは大中さんがもっと説明すればよかったのでしょうかけれども、さすがにご自分のなさったことなので、多少、遠慮されたようです。ぼくは大中さん達の岩石実験を脇で見ていて、非常にたくさんの実験から得られた成果を勉強させてもらい、それに基づいて破壊核形成理論というのをつくってきた側です。実際に起こっている地震をそのすぐそばに行ってみることはできませんが、岩石実験では、測ろうと思ったらすべてのものを測ってしまいうことが出来るわけです。岩石実験を通して、地面の中で見るこのできない自然地震の起こり方を見てしまいうことが出来る、これはいちばん重要な点だと思います。

次は、岩石実験で発生させる模擬地震というのが、自然地震と本質的には同じ現象なのかという問題です。昔から岩石の破壊実験をたくさんの方が行なってきましたが、それはまだ壊れていない岩石に力を加えていって、破壊を起すという実験でした。

ところが大中さん達の実験はそうではなくて、岩石をあらかじめ切断して、そしてそれをまた密着させて模擬断層面をつくり、それから力をかけてその模擬断層面をすべらせる、そういう実験なのです。こういう実験を通して、前に大中さんが説明されたような、いろいろなことがわかってきた。

岩石実験で扱うのは、おまけしても 1 m スケールの破壊現象でしかない。これに対して、マグニチュード 8 クラスの自然地震は、100 km スケールの破壊なのです。ですから、100 万倍スケールが違う現象なのですが、意外なことに、これが本質的には全く同じ現象だということなのです。これは非常に重要なことで、強調しておかなければいけないと思います。

破壊過程を支配する法則

大中 松浦さんのあとを継いで説明させていた
だきたいと思うことは、破壊過程を支配する法
則についてです。従来、そういった法則が存在
するかどうかは必ずしも明らかではなかったわ
けですが、弾性体に対するフックの法則に相当
するような破壊過程を支配する法則、つまり構
成法則、それが存在することがわかりました。
しかし、これは非線形で、フックの法則の弾性
定数に相当するようなパラメータも簡単ではな
いという問題はありますが、法則は存在する。
法則の存在がわかれば、あと、どういった条件
の基でその法則がどういうふうに記述されるか
という問題です。

もう少し具体的に言いますと、フックの法則
の弾性定数にしても、環境が変われば、つまり
温度が変われば変わります。圧力が変わっても、
わずかながら変わるわけです。このことと全く
同様に、破壊法則を規定するパラメータ自体も
温度が変われば変わります。破断面をとりまく
環境が変われば変わる。

それから、山下さんが先ほど強調されたよう
に、断層というのは決して理論的に想定するよ
うな1枚の平面ではない。きわめて複雑なのだ。
地質学のほうで断層帯という言い方をしますよ
ね。あるいは厚みがあるのだと…。この厚みの
中に複数の割れ目が存在することもあるのだろ
うし、断層面自体が複雑な形をしているという
こともあるだろうし、破碎粒子がその中に詰ま
っていることもあるでしょう。しかし、そうい
った断層帯をまたいでみたときに、このような
物質の違いとか幾何学的な構造の違いといった
ことが、破壊過程を支配する法則に非常に影響
を及ぼしているのですね。

とくに、先ほど出てきました臨界すべり量、
これはものすごくそういった構造に依存してし
まうのです。だからこそスケイリングができる
のです。松浦さんが実験室のサイズの破壊とフ
ィールドの巨大地震の破壊と同じ説明が可能だ

というのは、法則
が存在して、それ
がスケールにかか
わりなく適用でき
るということだ
す。



山下 水の問題な
のですが、断層帯
の中を水が移動すると、流体の移動と破壊のカ
ップリングが起きますから、その複雑な相互作
用を考慮した構成法則はどうなりますでしょうね。

大中 そういった細かいところまで現時点では
わかりませんが、基本的には変わらないと思う
のです。法則があると言いましたが、その法則
というのは、破断面が平面であれば、破断面上
の応力と、その破断面がすべるわけですから、
そのすべり変位との関係で記述できる。もちろ
んすべり速度の問題とか、ほかのファクターは
当然ありますが、しかし準静的な非常にゆっく
りした破壊過程から動的な破壊過程のすべてを
統一的に説明するような法則を考えるとしたら、
これは剪断応力とすべり変位との関係が第一義
的に重要とみなさざるを得ないのでですね(図3
参照)。

山下さんが言われたような水が流動する場合
でも、その細部はわかりませんが、この構成法
則は巨視的な破壊過程を支配するものですから、
水の効果を破壊法則のパラメータの中に含める
ことができるはずなのです。

松浦 断層帯を流れるような水があると、断層
の性質とっているものも時間とともに変わっ
てしまうということは、あり得ることですよな。

大中 非常にタイムスケールの長い現象を議論
するときには、水の効果だけに限らず、一般に
時間依存性や速度依存性が存在するということ
がよく言われるでしょう。一般的にはその通り
なのです。だけど、動的な破壊過程にはそうい
った現象は、無視できるか、あるいは全く存在
しなくなってしまうことがあるわけです。

だから水の件に関しても、例えば強度が回復
するプロセスとか、あるいは破壊核でもほんと

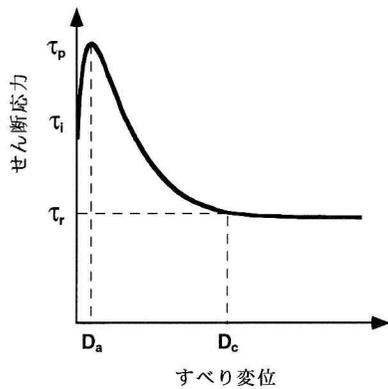


図3 剪断破壊過程を支配する構成関係
破損先端域では、応力はすべりの進行とともに始め増大し、すべり量 D_a で最大値 τ_p に達し、以後、残留摩擦レベル τ_r まで遷移的に低下する。応力が残留摩擦レベルまで低下するのに必要なすべり量が臨界すべり量 D_c である。 τ_i は破壊先端部における初期応力。

うにゆっくりゆっくり進展するような破壊の領域には重要な役割を果たして、時間依存性や速度依存性と同一ように考慮に入れなければいけなくなる可能性は大きいわけです。

破壊核形成モデル

平澤 皆さんの話を要約すると、地震のような高速の不安定破壊が始まる前には、破壊核形成過程と呼ばれるような準備段階があり、それを記述する法則が存在することが岩石実験で確かめられた、ということですね。

こういう実験事実に基づいた、破壊核形成過程のモデル化について、お話し下さい。

松浦 破壊核の形成過程を理論的にモデル化するというのは、大中さん達の岩石実験の結果からスタートしているわけです。その実験結果というのは、断層面のすべりが始まったとたんに、そこに加わっている応力がストンと落ちるのではなくて、すべりの進行とともに徐々に応力が低下していく。これをすべり弱化と呼んでいます。

従来、すべりが始まると同時に、そこに加わっていた応力があるレベルまで瞬間的に下がっ

てしまうという考えに基づいて、破壊の理論ができていました。けれども、実際はそうではないということが、実験からわかったわけですから、断層面に働いている応力が、すべりとともにある関係を保ちながらだんだんと低下していくように、破壊の条件を規定しなければいけないわけです。

断層面での破壊条件を断層面の摩擦法則で記述する。そうすると、地震の発生プロセス、つまり、地震の種がどういふふうにできてきて、それがだんだん成長して、やがて不安定になって、ついには地震波を出すような高速破壊になるという一連のプロセスが、全部理論的に計算できるようになりました。

この理論モデルを使って、大中さん達の岩石実験の結果が完全に説明できたわけです。

平澤 摩擦法則が与えられれば、直ちに実際の破壊核形成過程が再現できる、ということになるのですか。

大中 法則だけではなくて、それプラス、法則を規定するパラメーターの分布が空間的に不均一であることが、ゆっくりとした破壊の成長にとって重要なのです。

さらに、その法則には特性的な「臨界長さ」が含まれていることが重要です。応力の低下が始まる破壊の先端から残留応力レベルまで遷移的に応力が低下する空間的な領域で、長さが定義できます(図4参照)。その長さが特性的な臨界長さなのです。古典的なモデルであれば、臨界長さがないから、スケーリングできない。ところが、新しい破壊法則に基づくと、臨界長さによってスケーリングできる。

平澤 その「臨界長さ」は、先ほどの臨界すべり量と関係があるのですか。

大中 関係あります。これは理論的に関係していて、臨界すべり量の1000倍ないしそれ以上ですが、大体10000倍程度になります。

平澤 臨界すべり量というのは何でしたっけ。

大中 断層面上のある点で、応力が残留応力レベルまで低下するのに必要な最小限の変位量が臨界すべり量で、いま言っているのは応力低下

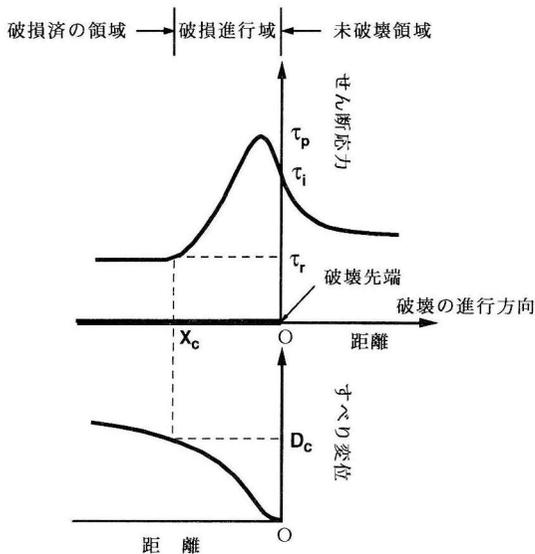


図4 破壊が進行する先端近傍における応力とすべり変位の分布

破壊進行領域では、応力は破損域内側に向かって距離とともに残留摩擦力レベル τ_r まで遷移的に低下する。その長さ X_c は特性的な距離で、臨界すべり量 D_c に比例する(より正確には、 $D_c/X_c \approx (\tau_p - \tau_r) / \mu \leq 10^{-3}$ [μ : 剛性率])であるが、およそ 10^{-4} 程度の値をとる)。応力のピークが破壊先端より内側にあるのは、図1の構成関係で、強度がゼロでない有限のすべり量 D_a で最大値となるためである。破損済の領域では、応力は残留摩擦力のレベルまで低下してしまっているが、すべりは依然として進行している。図3の構成関係から図4の破損領域モデルが導かれる。

の遷移領域の広がりを表す距離(長さ)です(図3, 4参照)。

松浦 断層面の強いところ、弱いところがありますね。その変化を特徴づけているような波長と考えてもよいと思うのですが……。

大中 というよりは、もっと単純に、応力と変位の間にある関係(つまり構成関係)がある。それに対応した関係が応力と距離の間にもある、というわけです。

平澤 いずれにしても、実際の破壊核形成過程を規定する重要な要素は、場の不均一性である……。

山下 場の不均一性と言った場合に、非常に概念があいまいで、何を言っているのかさっぱりわからないでしょう。機械的な不均一性、それと力学的な不均一性というふうに言ったほうが、

まだはっきりすると思うのです。断層面のでこぼこだけではなくて、例えば、ぼくとか梅田さんなどが強調しているのは、多数の破壊面があって、それがどのように分布しているかということが重要だということ……。

大中 確かにそういうふうに具体的に言うと、いろいろつけ足さなければいけなくなってしまうでしょう。そのうちの何が重要かということはあるのだけど、いろいろつけ加えていくと、複雑になってしまうのですね。だからひと言で、場の不均一性という便利な……。

山下 場はないと思うけども……。

大中 地震発生環境、あるいはもっと具体的に言えば、幾何学的な複雑さが非常に重要だということは、強調していいと思うのです。

山下 断層面というふうに規定してしまうのはどうかと思うのです。

松浦 断層面というのは、物理的には存在しません。山下さんのおっしゃる通り、それはフォールトゾーン、断層帯というのが存在するわけです。それを巨視的にモデル化するときには面として表現する。しかし、それを微視的にみようとしたら、その中にさまざまな複雑な構造がある。そして、今はどちらかという巨視的にみたときの話をしているわけですね。

平澤 それでは話を先に進めて、モデルの検証についてはどうですか。

松浦 地震が高速破壊として順調に広がっているようなときは、地震の最初の種がどんなふうでしたか、などということと全く関係なしに普通の地震波が出てきますから、破壊核形成モデルのチェックには全然ならない。地震の始まり、それを地震波形の観測で調べる。この部分がいちばん重要なのです。

これをいちばん最初に注目した人は、梅田さんなのです。

平澤 今の話は、地震という現象がもう始まったときですね。その前の段階でも何らかの観測の仕方はないのでしょうか。

松浦 もちろんそれはあります。それは地震の



松浦 充宏 氏

変動が生じます。ただ、それが実際の測地測量で、あるいは地殻変動観測でとらえることができるほど大きいかどうかは問題なのです。

山下 種といってもいろいろなモデルがあり得ますからね。例えば応力腐食破壊のモデルもあるし、水などの流体の移動のモデルもある。大中さん、松浦さんのも、その一つだと思うのです。モデルが異なると、前兆変形とかいろいろなパラメーターの関係がずいぶん違うと思うので、基本的には、梅田さんみたいな観測をやる人の結果から判断することが大事だと思うのです。

平澤 どういうモデルであっても、高速の破壊が瞬時に形成されることはあり得ない、ということでしょうか。

山下 それは、すべてのモデルで共通していることです。

大地震の始まりは？

平澤 では、地震の波形の最初の部分がどうなっているかというのがきわめて重要なポイントである、というお話でしたが、この方面の先駆的な研究者である梅田さん、どうぞ。

梅田 結論を先に言ってしまいますと、大きな破壊が始まる前に小さな破壊が必ずついてくる。そして、その小さな破壊の継続時間は地震の規模に比例しているということが、観測事実としてわかったのです。

私達は、地震はなぜ起こるか

種ができる過程では、地震の波は出さないけれども断層面でのすべりが徐々に進行しているわけですから、その断層面でのすべりに応じて地殻

という原理的なことはさておき、破壊はもう出発している、それがどうして大きくなるのか、その解明が実用的な地震予知の一つの方法だろう、と考えました。では、小さな地震と大きな地震で何か違いがあるか。そこが我々の研究の初めなのです。やり始めると、当時は高性能の地震計はありませんから、いろいろなものを継ぎ足して、分解能を上げてみると、どうも始まりのほうが大きな地震と小さな地震で違うのではないかと、そういうことに気がついたのです。

ダイナミックレンジが広く周波数帯域が広い地震計の記録が使えるようになるに従い、大きな地震だと初期破壊、今日、初めての言葉ですかね、大きな破壊の前に少し小さな破壊がある。それがたいがい見つかるようになった。その初期破壊の継続時間を規模別にプロットしてみると、大きな地震ほど初期破壊の継続時間が長い。

今、大きな地震ほど、と言いましたが、実際は逆ですね。初期破壊の継続時間が長ければ長いほど、結果として地震は大きくなる。これが正確な表現です。ということは、地震が大きくなるか小さくとどまっているかということがたためではないということ、つまり因果関係があるということです。

これで非常に勢いづいて、大中さんと松浦さ

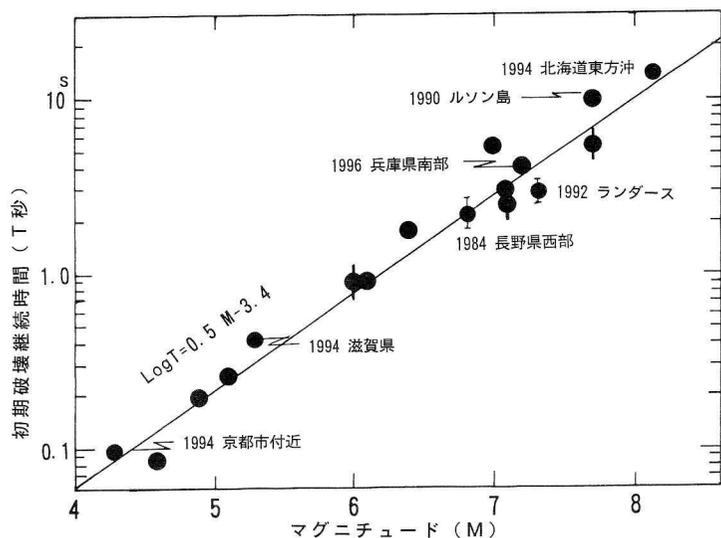


図5 初期破壊継続時間(T)を地震の規模(M)別にプロットした。初期破壊継続時間が長いほど大きな地震に成長することを示している。

んの研究とドッキングするところへいったのです。

平澤 初期破壊継続時間が大きいと大きな破壊に発展する。これと先ほどのモデルと、どういうふうにつながるのですか。

梅田 先ほどのいわゆる震源核形成過程では、すべりがじわじわと進行していく時間が長いと、特性的な長さも長くなるわけです。そうすると、結果として大きな地震になる、こういうご説明を大中さんと松浦さんはなさったのです。

平澤 なるほど。でも、ほんとうにその通りなのかしら……。

梅田 それは、今、司会者がそうお尋ねになったので、大中さん、松浦さんの流れから説明したのだけれども、実は我々はまた違う考えをもっていて、継続時間の長さをインターアクションで説明しようというのが山下さん達のグループで、私も片足ぐらい入れているという感じなのです(笑)。

山下 梅田さんが言い忘れたことが一つあると思うのです。初期フェイズがすべての地震に見えるわけではないですね。

梅田 そうですね。それははっきりっておかなければいけないです。最近、金森さんとか、米国のいろいろな人達には、そんなのは見えないという人も結構いるのです。どちらかというところ、おそらく見えない地震のほうが多いと思うのです。見えるのは、おそらく本震だけなのです。余震には見えないのです。

平澤 それは困ったものですね。

梅田 いいえ、それが非常に重要なのです。余震とか群発地震のようなものには、そういうのは現れないのです。つまり、大中さん、松浦さんのお言葉を借りて言えば、準備期間のないようなものは出ないだろうと……。核形成過程という準備期間が必要ないような、応力が急激に高まるという状態、群発地震がガンガン起こっている状態、あるいは擾乱だらけで地震がボカボカ起こっている状態では、そういうものは出ないだろう。むしろ、それなりの準備期間を経て起こるのは本震ですね。それは大きくても小

さくてもそれなりに出る。小さいものは短い……。

平澤 余震の中でも最大余震は、本震の余震域からちょっと外れるとか、へりぐらによく起こりますよね。そういう場合でも、見つからないのですか。

梅田 それは、見つかるのもあるのです。例えば日本海中部地震の最大余震、あれはそのときまでの余震域から北に離れたところでしょう。ちゃんと初期破壊があったのです。だからぼくは、あれを余震とは言いたくないのです。ほんとうの余震域、本震によって著しく擾乱を受けた場で発生する余震には初期破壊フェイズは見えない。ちょっと離れたところで起こるのは見えますね。

平澤 へー、面白いですね。あの最大余震は、半月ぐらいあとで起こったのでしたっけ。

梅田 1カ月ぐらいあとだと思います。

平澤 1カ月ぐらいの準備期間があるようなものは、出てもいいということになるのですか。

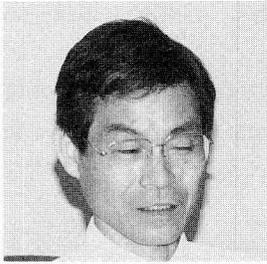
梅田 期間というより、空間的に、いわゆる余震域からちょっと離れていた……。ギャップがありましたでしょう、そういうことではないかなと思っているのです。

平澤 では、前震は……。

松浦 前震というのは、本震があるから前震という名前がつくわけで、本震の破壊過程の一部なのです。前震というのは、前震が起こることによって本震の破壊過程を加速するような役目を負っているものなのです。だから、本震というメインの破壊にとってみれば、前震というのも破壊の種をだんだん成長させていくそのプロセスの一部なのです。

平澤 その通りだと思いますが、そういう状況の中で前震が起こった。そのときには、本震と同じように初期破壊のフェイズが見えてもよさそうに思いますが。

松浦 観測データの分解能の問題です。梅田さんの経験則では、例えばマグニチュードが1違ったら、初期破壊の継続時間はどれぐらい違いますか。



梅田康弘 氏

梅田 継続時間の対数で0.5 Mです。ね。

松浦 そうすると、マグニチュードが2違うと1桁違ってしまふ。マグニチュード8の地震

の場合に10秒ぐらいだとすると、マグニチュード6だと1秒しかない。マグニチュード4だと0.1秒です。つまり、そんなものは見えないでしょう。

梅田 すべてがわかっているわけではないから、いいかげんな答えかもしれないのですが、初期破壊と言いましたが、私はあれはちゃんとした地震だと思っているのです。本震というか、でかいほうがマグニチュード7とすると、初期破壊はマグニチュード4程度、これもちゃんとした地震だ。前震も、たまたま大きな地震にならなかっただけで、マグニチュード4あるいは3で終わった。それはなぜかと言われると困るのですが、マグニチュード4が起こって、それが周りを擾乱して非常に大きな地震を誘発した、そう考えているのです。

平澤 なかなか微妙なお話ですね。とにかく、梅田さんは初期破壊継続時間に関する重要な経験則を見出された。それに対して、松浦さん、大中さんは破壊核形成過程に関するモデルで解釈されたわけですね。

松浦 地震の種、破壊核というのが大きく成長するためには、周りが強く壊れにくいことが必要です。つまり新しい破壊面をつくるには何がしかのエネルギーが必要なのですが、その破壊に要するエネルギーが大きな領域が、核形成領域の周辺に広がっているということなのですね。

破壊核が成長して、その壊れにくいところが不安定になると地震が始まるのだけど、開始した動的破壊が高速で伝播するようになるまでには、時間がかかります。この加速に要する時間が、ちょうど梅田さんが見つけた初期破壊の継続時間に対応しているということですね。

そして、それが大きな地震ほど長いという観測事実は、大きな地震ほど破壊の種の臨界サイズは大きいということを示しているというわけです。

梅田さんの経験則と宇津先生のマグニチュードと断層の広がりとの経験則に基づいたぼくの結論は、破壊核の臨界サイズの大きさは、最終的な地震断層の寸法の10分の1から20分の1程度である、ということです。

平澤 大中さん、つけ足すことはありますか。

大中 梅田さんが先ほど、すべての地震について初期フェイズが現れるわけではないということをおっしゃいました。その問題との関連で言いますと、これはほんとうに現象自体としてその通りなのか、地震計の配置が適切でないために観測できなかったのか、原因がこれと一つに特定できないのです。そのために研究者の間で議論が分かれています。

この問題は、今後、時間がたって解決していくと思うのですが、ただ松浦さんが、いま言われたこととの関連では、こういう室内実験があるのです。非常に粗い面と非常になめらかな面の両方で実験すると、非常に粗い面では非常にゆっくりした破壊しか現れないのです。規模の小さな室内実験だと、とうてい不安定破壊に至らないこともあり得るわけです。しかし非常になめらかなだと、たちまち不安定破壊が生じるわけです。

このことは何を意味しているかということ、不安定破壊に至る臨界長さは決まっています、いろいろなファクターに依存するわけですが、一つ重要なのが面の幾何学的な不均一さだと……。幾何学的に不均一であればあるほど、当然破壊エネルギーは大きい。それを壊すために、大きな歪エネルギーが周辺に蓄えられていなければいけないことは確かです。

亀裂相互作用モデル

平澤 山下さん達のモデルは、どういうものですか。

山下 ぼくはちょっと違った考えですが、ある意味では連っているのかもしれませんが……。

断層帯の中は亀裂密度が非常に高いと考えられていますし、亀裂の相互作用が非常に大きな役割を果たしているのではないかと、という気がしているのです。つまり、亀裂の相互作用というのは、亀裂の進展に対してそれを抑止する負の相互作用と促進する正の相互作用と2つあります。大地震の発生前には、むしろ負の相互作用が卓越していて、なかなか地震が起きにくいような状態がある、それが地震活動の空白域などを形成していると思うのです。

そういうところで大地震が何らかの拍子で起きると、初めはそれは抑制されているものから、破壊が非常にゆっくり進んで、振幅の小さな波しか出さない。だけどある程度進んでいきますと、それがクリティカルな長さになりますので、急激に大きなスピードで広がっていく。

そういう考え方に立つと、例えば余震などは正の相互作用が卓越しているような状況になっているので、初期フェイズが見えないのではないかと考えます。

平澤 本震が起こる前の亀裂の空間的な存在状況と、本震直後の存在状況とは違うとおっしゃっているのですか。

山下 そうです。というのは、本震が起きたあと、卓越的にものすごく大きな破壊面ができていますから、その影響がほとんどの亀裂を支配しているような状況なのです。つまり、本震の断層面がひとり勝ちしているわけです。ところが大地震の発生前は、そういったひとり勝ちしている王様のような断層はない。比較的大きく成長したのはあり得ますが……。

平澤 なるほど。本震という大きな亀裂が場を一変させている、というわけですか。

山下 そうです。

平澤 亀裂同士の相互作用が非常に重要であって、そのモデル化によって、梅田さんの見つけられた経験則、初期破壊継続時間とマグニチュードの関係を解釈できるということですね。

では、初期破壊の具体的なイメージはどんなも

のでしょうか。初期破壊のフェイズは、破壊の伝播速度が非常に小さいために振幅が小さいのか、あるいは、いくつかの微小地震の集まりみたいなものなのでしょうか。

梅田 私は後者だと思っているのです。その次に起こるのが異常な大きな地震で、初期破壊は初期破壊だけど、一人前の地震だと思っているのです。それは波形を見るとそうだからそう思っているだけで、物理的にどうかということとはわからないですね。

松浦 だけど、初期破壊の波形というのは振幅も小さいけど周期も非常に長い、そういう……。

梅田 確かに長周期成分も含んでいますね。これからは広帯域の地震計が出まわって、長周期から短周期まで全部記録できますから、はっきりすると思いますが、今まではそういうのが明瞭には見えていなかったと思うのです。

松浦 ぼくの予測で言うと、非常に長周期のトレンドの上に短周期の、梅田さんが言っている、小さな地震破壊に対応するような短周期の波が乗っているというのが現実ではないかと……。

梅田 観測記録をハイカットしていくと、そういうのが見えてきます。

松浦 それが主破壊を加速していくプロセスそのものなのですね。実際の破壊核が形成される領域は非常に複雑ですから、それにいろいろなアクセントがつくけれど、非常にゆっくりと加速していくような部分が、主破壊のプロセスを表しているのだと思いますけどね。

大地震と小地震の違いは？

平澤 それでは、結局のところ、大地震と小地震に何か本質的な違いがあるとおっしゃるのですか、それともないとおっしゃるのですか。

梅田 あるわけです。初期破壊の継続時間が違うので……。

平澤 ただし、いわゆる本震だけですな。

山下 余震は含まない。

松浦 金森さんは、地震が発生する場は応力が限界強度レベルぎりぎりまで高まっていて、ど



平澤朋郎 氏

こで破壊が起こってもおかしくないのだ、という考え方をしているようです。

そういう考え方をすると、応力レベルが地殻の強度

限界ぎりぎりまでできてしまっているのだから、どんな小さな亀裂あるいは種であっても、それがいったん不安定な破壊を起こせば、どこまでも広がり得る。とまるのは偶然に過ぎないということになります。ですから、大きな地震だから大きな種が必要だ、ということにはならないのです。

しかし、これでは、初期破壊の継続時間が大きな地震ほど長いという観測事実をうまく説明できません。

平澤 なかなか微妙な話ではありますね。地殻の至るところが同じ強度というわけではないですから、何をもち「限界」というのか、あまりはっきりしませんね。

松浦 とにかく、大きな地震というのは既存の断層、何度もすべて立派に発達した弱面で起こる。これは正しいと思っているのです。つまり、既存の発達した断層面をもたない岩盤を破壊して100 kmも広がるような大地震が起こるかということ、それは起こり得ないと思うんです。

平澤 その辺も非常に重要な問題ですね。

松浦 結局、そういうところで起こる地震は、局所的な不均一さを反映して小さな破壊で終わってしまうわけです。次にまた同じような地震が起こると、それらは山下さんの考えているような亀裂同士のインターアクションでだんだんつながって、地質学的な時間をかけて大きな断層をつくっていく。そういうふうにつくりあげられた大断層で大地震は起こる。だから当然、小さな地震が起こる場と大きな地震が起こる場では、そもそも断層の物理的な性質が違ってしまっているわけです。

平澤 金森さんを代表として異論を唱える人も

少なくないようですが、今日のお話では、どちらかという、既存の断層、弱面があって、それは必ずしも1枚ではなく、多数あってもかまわないけれども、そういうものの相互作用などを含めて地震の破壊核あるいは震源核が形成され、かつそれが大きい地震と小さい地震では発達の程度が違う。したがって、初期破壊の段階でこれが大きくなるか小さくなるかということがわかって然るべきだ、という考え方が主流であったようです。

このような立場にたてば、地震予知への展望も開けてくるような印象を受けますが、如何でしょうか。

大中 いろいろな考え方がありますが、地震の発生過程をサイエンスの対象として研究を続けていけば、地震の短期・直前予知が可能かどうかがいずれははっきりすると思うのです。私は個人的には可能になると信じているのです。ただ、それを可能にするためには、いろいろ解決すべき問題があります。

しかし、地震発生に至る過程がブラックボックスの状態であって、何かわからないけれども前兆現象なるものが存在して、それを待っているという手法とは違って、複数のモデルがあったとしても、それぞれのモデルが地震の発生過程を物理化学的視点から、よりよく説明するような方向に進んできているわけだから、未知の領域が狭まっていることは事実ですよ。時間がどれくらいかかるかは問題ですが、いずれ、直前予知ができるかできないかがはっきりするだろうと思うのです。

松浦 地震の種の大きさ、言いかえれば地震の始まり方が地震の大小によって違うかどうか、地震予知にとって決定的に重要な問題であるということ、特に強調しておきたいと思います。

平澤 まだまだお話はつきないようですが、震源核に関する研究が地震予知の可能性について明確な答えを出す日が近いことを期待して、この座談会を終わらせていただきます。

皆さん、どうもありがとうございました。

(完)

合成開口レーダー

その地震研究への利用

村上 亮

要 旨

合成開口レーダーは、人工衛星や航空機に搭載したセンサーから対象物を遠隔測定するリモートセンシング技術の一種である。これにより、1 cm という高い精度で地殻変動の面的な分布を明らかにすることができる。観測の面的密度も高く通常 100 km × 100 km 程度の広い範囲において縦横に 100 m ごとに並ぶ格子点上における地殻変動を計測する。この特長から、合成開口レーダーによる地殻変動観測は、地震を発生させた断層のモデル・パラメータの決定など、地震の発生メカニズムを明らかにするための強力な手段となる。最近、ヨーロッパの ERS-1、ERS-2 衛星や、わが国の地球資源衛星「ふよう-1号」(JERS-1) に搭載された合成開口レーダーを用いて、地震や火山活動に伴う地殻変動を検出したという報告が次々となされており、今後、この手法の適用例はますます増加するものと思われる。この手法は定期的に広い範囲を測定するのに適しており、地表で発生している様々な微小な地殻変動を面的に把握できるため、潜在的な活断層の発見や、それぞれの断層における地殻変動の蓄積を定量的にモニターすることを通じて、地震の研究に大きく貢献することが期待される。

はじめに

地殻変動の観測は、地震の発生メカニズムを解明したり、長期的な地殻歪みの蓄積を定量的に理解するために不可欠な情報を提供する。このため、古くから三角測量・三辺測量および水準測量がくり返し実施されている。一方、歪み計や伸縮計な

ごによる連続観測も行なわれ、これらの測地的観測は、地震を科学的に理解するために大きな役割を果たしている。

さらに近年では、汎地球測位システム (GPS) が登場し、これまでは長期間を要していた地殻変動の観測を連続的に行なうことを可能とした。わが国は、世界に先駆けて 600 点を超える GPS の連続観測を開始し、地震に伴う地殻変動に関する様々な新しい知見が提供されている。例えば、三陸はるか沖地震発生後には、余効的な地殻変動が観測され、この地域における地殻歪みの蓄積が再検討されるきっかけを与えた。

このように、GPS の導入によって、地震研究を目的とする地殻変動観測は目覚ましい進歩を遂げつつある。わが国の GPS 連続観測網は、さらに増強され、近い将来 1000 点規模に迫ろうとしているが、空間的な配点密度という点では十分なものではない。1000 点の GPS 観測点を日本列島に均等に分布させても、その平均的な点間距離は約 25 km である。M7 クラスの地震の発生に伴う地殻変動の空間的な分布の広さが、おおよそ 50 km 程度であることを考えると、地殻変動が観測されるのは、数点から 10 点程度の GPS 点においてである。これは詳細な地震発生機構モデルを構築するために必ずしも十分な点数であるとはいえない。このような背景から、さらに高密度に空間的に地殻変動を検出することのできる手法の登場が期待されて来た。

この期待に応える形で登場したのが、合成開口レーダーによる地殻変動検出手法である。この小論では、合成開口レーダーによる地殻変動検出技術の原理とこれまでの成果の例を簡単に紹介し、この新しい技術が今後の地震研究に与える影響について論じる。

合成開口レーダーによる地殻変動検出手法

(1) 合成開口レーダーとは 合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、対象物に直接接触することなく、計測を行なうリモートセンシングの一種である。マイクロ波のレーダーパルスを対象物に照射し、その反射波を解析することにより、対象物の起伏や構造を明らかにすることを目的として開発された。

上空からレーダーで地上を観測する場合、地表の細かい対象物を判別するための分解能を向上させることが重要である。分解能を向上させるためには、レーダーのアンテナの指向性を絞って細いビームを照射すればよい。アンテナの指向性を高めるための最も簡単な手段は、アンテナのサイズを大きくすることである。しかし、地上の 10m あるいはそれより高い分解能を達成するためには、アンテナの大きさ、すなわち「開口」が 1 km を超えることとなり、衛星に搭載するセンサーとしては非現実的な大きさとなってしまふ。そこで、移動する飛行体からマイクロ波を送受信し、大きな開口を持ったアンテナを使用した場合と実質的に同等な高分解能が得られるように、画像再生処理の段階で信号を「合成」するのが「合成開口レーダー: SAR」と呼ばれる技術である。

合成開口レーダーでは、飛行体 (人工衛星や航空機) の軌道に直交する方向の分解能を向上させる目的で発信周波数を変調するパルス圧縮技術を、また、軌道に平行な方向の分解能を高めるために軌道上で仮想的に大きなアンテナを構成する合成開口技術を用いる。この 2 つの処理を行なうことによって、地上に格子状のメッシュが構成され、その一つ一つの画素 (ピクセル、場合によるが通常は 20m × 20m 程度の大きさ) ごとに反射波の特性が測定される。

合成開口レーダーの信号を解析して得られるのは、地上の各画素ごとに与えられる反射波の強度と位相の 2 種類の情報である。この 2 種類の情報のうち、これまでも

っぱら利用されてきたのは反射強度の情報である。反射強度を明暗化すると、航空写真のような画像が得られ、地表の起伏や構造物の分布等が識別できる。この画像から、リモートセンシングの手法で様々な地上の情報を抽出する。しかし、画像の分解能は最良でも 10m 程度しかなく、反射強度の観測から対象物の位置に関する情報を抽出する場合は、10m 程度がその精度の限界となる。したがって、通常は数 cm 程度の観測精度が目標となる地殻変動観測には、反射強度による計測は利用できない。後で述べるように、地殻変動観測には位相を利用する。

ここで、まず、レーダーを用いるリモートセンシングの一般的な特徴を要約する。マイクロ波は雲などを通過するので、航空写真と違って天候に左右されることなく観測ができる。また、光学センサーと違い、マイクロ波を自ら送信するという能動的センサーであるために、目的に最適なパラメーター (波長・偏波特性など) を選択することができる。人工衛星搭載の合成開口レーダーは、地球のすべての表面を均等な密度で、雲などに遮られることなく、定期的に観測をすることができるという大きな長所を有しており、例えば、現在、「ふよう-1号」を利用して宇宙開発事業団が中心となって実施している、アマゾンや東南アジアの熱帯雨林の伐採状況のモニタリングを目的とした集中観測でも、この特長が遺憾なく発揮されている。

すでに簡単に紹介したように、この小論の本題であるレーダーの地殻変動観測への応用では、レ

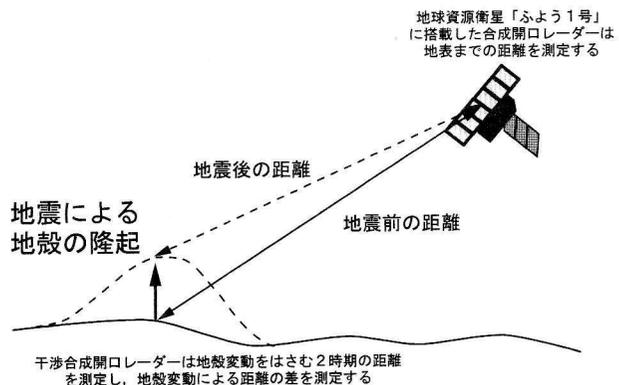


図1 干渉合成開口レーダーによる地殻変動検出

ーダー観測によって得られるもう一方の情報である位相を用いる。位相は画像化しても、対象に関する直感的な情報が得られないため、これまではあまり顧みられてこなかった。ここで位相といっている測定量は、マイクロ波である発射波と反射波の搬送波の位相の差をさし、それは、衛星と対応する画素までの距離の2倍（レーダー波は発射されてから、反射されて返ってくるまで、衛星と地表の間を往復する）をマイクロ波の波長で割ったものである。合成開口レーダーの波長は、数cmから1m程度であるので、何らかの工夫で位相情報を利用できるようになれば、これを位置計測の物差しとして、新しい高精度な位置の計測が実現する。本稿の主題である干渉合成開口レーダー技術は、非常に巧妙に反射波の位相を利用し、地上の地殻変動観測を可能とするものである。

(2) 干渉合成開口レーダー 干渉合成開口レーダーは、アンテナから地表までの距離の情報を含む位相を利用する。これにより高精度に土地の起伏および標高（干渉開口レーダーには、既存の地図がない地域で簡単に地形を計測し、地図を作成するという重要な応用分野もあるが、この小論では、本題から離れるので、これ以上述べないが）や地殻変動を測定する。この手法の実現性については早くから指摘されており、NASAのジェット推進研究所（JPL）において、航空機や衛星のデータを使用した先駆的な実験が行なわれた。衛星を利用した最初の応用例は、SEASAT（1978年打ち上げ）のLバンドの合成開口レーダーによってもたらされた（例えば Gabriel et al., 1989）。これらの研究により、干渉SARの技術的可能性が示されたが、データが幅広く提供されるまでには至らず、対象とされた地域も限られていたため、一部のリモートセンシング研究者のみが、この技術の高い将来性に注目していた。

ところが最近になって、合成開口レーダーを装備した航空機や衛星が次々と実用化され、データが簡単に利用できるようになったため、合成開口レーダーの位相情報を地殻変動観測へ利用した研究成果が相次いで発表されている。特に、1992

年カリフォルニア：ランダース地震に伴う地殻変動の様子をヨーロッパのERS-1を使用して明らかにした、MassonnetらやZebkerら（Massonnet et al., 1993, 1994 および Zebker et al., 1993）の業績によって、この手法が、にわかに注目されるようになった。

合成開口レーダーでは、位相はマイクロ波である発射波と反射波の電波の位相の差として定義される。これは、レーダーパルスが伝播したアンテナと地表の間の往復距離をマイクロ波の波長で割ったときの端数（あまり）である。ここで、注意しなければならないことは、合成開口レーダーで計測できるのは、距離をマイクロ波の半波長で割った結果そのもの、すなわち整数分まで含んだ波数の全体ではなく、整数分を取り除いた端数分であることである。取り除かれた整数分を事後処理で修復することは困難であり、測定された端数分のみの位相を、このままの形で情報として利用することは難しい。例えば、これを単純に画像化しても、五色の砂を紙の上に撒き散らしたように、色彩がランダムに分布するのみであり、これから何らかの意味のある情報を読み取ることはできない。

それでは、2回の観測を比較するとどうであろうか。そこで地上の同一の場所に対して、全く同一の軌道から2回のレーダー観測を実施し、それぞれの位相を比較することを考える（図1参照）。2回の観測の間で位相に変化が発見されれば、それは地表のターゲットの位置が変化したことを意味する。我々のターゲットは地表であるから、その位置の変化、つまり地殻変動が発生したことが、位相の変化として計測できる。逆に、地殻変動が生じていなければ、2枚の画像の対応する画素の位相の差は全て一定である。このようにして、2回の観測を比較することによってこの位相情報に意味をもたせることが可能となり、この原理を利用する地殻変動観測技術が干渉合成開口レーダーである。

図2に干渉合成開口レーダーの、一般化した概念図を示す。この図にあるように、2回の観測の軌道を厳密に一致させることは困難で、実際には

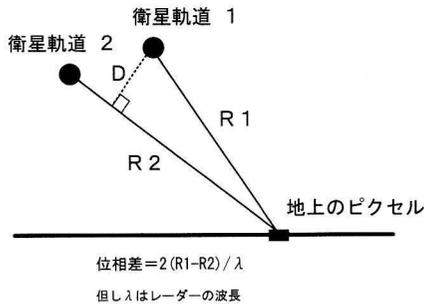


図2 干渉合成開口レーダーの原理図

2つの軌道は微妙に異なっている。この軌道の間隔(図中のD)は、いくら遠くてもよいわけではなく、例えば「ふようー1号」の場合、1 km程度がこの手法を適用する限界とされている。通常、この条件は十分満たされており、既に約4年間のデータの蓄積がある「ふようー1号」のデータは、地殻変動研究の貴重な資源となっている。

これまで説明したとおり、時期の異なる2つの時期に観測した画像の位相の差を取る処理、すなわち干渉処理を行ない、結果として得られた2つの時点の位相差に応じて色彩を割り当てて視覚化した画像を干渉画像(interferogram)と呼ぶ。軌道の距離が1 km以内であるなどの干渉条件が満たされれば、干渉画像には美しい縞模様が見れる。しかし、干渉画像に現れた縞模様を、直ちに地殻変動が現れたものと解するわけにはいかない。それは、2つの観測の位相の差は、地殻変動によるものだけではないからである。Massonnet et al. (1993) の分類によれば、衛星による干渉合成開口画像には地殻変動の他に、

- (a) 利用した2つの軌道が完全に同一でないことから生じる、規則的なストライプ状の縞模様
- (b) 地上の対象物の標高を反映する、等高線状の縞模様

が存在する。したがって、地殻変動を検出するためには、生の干渉画像から、これらの縞模様を除去する必要がある。(a)に関しては、軌道情報と地上のターゲットの位置から厳密にパターンが再現できるので、これを利用して補正する。また、(b)についても、対象となっている地表のデジタル標高データを利用すれば、幾何学を考慮した理論的な計算によって補正が可能である。日本では、国

土地理院の250mメッシュの標高データが全国をカバーしており、さらに詳細な50mメッシュの標高データを利用できる地域も、飛躍的に拡大しつつあり、この手法を適用する条件が急速に整いつつある。

さて、これらの補正には、衛星の正確な軌道の情報が必要である。ところが、一般に衛星の軌道情報は、無視できない誤差を持っていることが多く、補正を確実に実行するためには、注意が必要である。ただし、近年、干渉合成開口レーダーに関する研究の進展が目覚ましく、衛星の合成開口レーダーに関しては、ほぼ、完璧な補正が可能となった。

さらに、上の(a)、(b)以外にも、大気中の屈折率の違いによる電波伝搬の行路差、植生の変化、含水率による反射波の位相変化などによって、位相差が生ずることが知られている。特に、大気中水蒸気分布の非均一性によって生ずる、屈折率の空間分布の非均一さを原因として発生する位相変化は、極端な場合、距離に換算して数cm程度に達することが報告されており、これが、現在の干渉合成開口レーダーの精度を制限する最大の要因となっている。ただ、大気中の水蒸気分布は、ランダムに変化する量と考えられるため、この影響は合成開口レーダ観測を繰り返して平均を取ることによって、取り除くことができる。しかしながら、地震や火山噴火に関する応用では、できるだけ早く結果を知ることが重要であるため、何度もレーダー観測を繰り返すことは得策ではなく(「ふようー1号」の場合1回あたり44日が必要である)、大気中の水蒸気による誤差の除去方法について、さらに研究が必要である。

なお、この小論では、主に人工衛星の合成開口レーダーについて紹介しているが、航空機による干渉合成開口レーダーも、①高い精度、②即時性、③多方向観測などの特長があり、実用化されると人工衛星に対しても有利な点が多い。わが国でも、宇宙開発事業団および名古屋大学などを中心として、実用化に向けての先駆的な研究が進められており(藤井・他、1996)、今後の成果が期待される。

(3) 地球資源衛星「ふようー1号」[JERS-1]の合成開口レーダーとその干渉処理 通産省と宇宙開発事業団が1992年に打ち上げた、国産の地球資源衛星「ふようー1号」の場合、軌道高度は約568 km上空の軌道上を周回し、通常は、北から南へ向かう際に、波長23.5 cmのLバンドのマイクロ波を、伏角55度で被撮影地の東方より送信し、地表からの反射波を受信する(図3)。設計寿命は打ち上げ後2年であったが、既にそれをはるかに越えて運用されている。現在は当初の設計より小さい電力で運用されているため、さらに寿命が延びており、西暦2000年頃まで利用できる可能性が高いという説もあって、今後の安定したデータ提供に期待を抱かせている。

Lバンドのマイクロ波は植生に対する透過性が強く、かなりの割合で雑草や樹木の葉の部分透過する。このため、地面や樹木の幹など、時間的に形状が大きく変化しない対象物までの距離が直接計測可能となり、より短い波長(5 cm程度)を利用するヨーロッパやカナダの衛星に比べて、植生が多い地域について有効性が高くなる。短い波長を利用するこれらの衛星では、マイクロ波が、風などで常時動いている樹木表面の葉の部分で反射され、干渉させるための2枚の画像間での相関が低下する。その結果、深い植生に覆われた地域では、干渉が成立せず、この干渉手法を適用できない。一方、いったん干渉条件が成立すれば、波

長の短いレーダーのほうが、地殻変動検出に関する感度が高い。短い波長でも干渉が成立しやすい砂漠などでは、mmの精度で高さの変化が検出された例も報告されている。このようにレーダーの波長は、観測精度にかかわる重要な要素であるが、わが国のように国土の大部分が植生に覆われている地域への適用を考慮する場合には、短い波長では、そもそも干渉が成立する場所が限られるので、「ふようー1号」のようなLバンドのレーダーが最適の選択である。わが国が2002年頃に打ち上げを予定している、後継衛星でもLバンドレーダーの搭載が予定されている。

「ふようー1号」のデータは地上の約75 km四方を1単位として提供される。「ふようー1号」は44日ごとに同一地点上を飛行するので、時期の異なった2つの画像の間の位相の差をとり、画像ごとに位相差を色彩化する干渉処理を行なう。この結果、地表の位置の変化が色彩の変化として表現される干渉画像が作成される。画像再生処理には、多量の計算処理が必要であるため、ワークステーションで処理するのが標準的であるが、ある程度の処理時間がかかることを覚悟すれば、パーソナルコンピュータでも解析が可能である。現在、数種類の市販のソフトが入手できる。また、わが国の研究者が実験的に完成した処理ソフトが公開されていて、希望すれば利用が可能である。

国土地理院では、宇宙開発事業団と衛星を利用した地球観測に関する共同研究を実施し、「ふようー1号」の合成開口レーダーが撮影した画像を同事業団と共同で解析している。この研究によって、これまでに、アメリカのカリフォルニア州ノースリッジ地震に伴って発生した地殻変動(Murakami et al., 1996)、兵庫県南部地震に伴う地殻変動(村上・他, 1995)、伊豆東部の群発地震に伴う地殻変動、三原山カルデラ内地殻変動、1995年ネフチェゴルスク(北サハリン)地震に伴う地殻変動などが検出されて

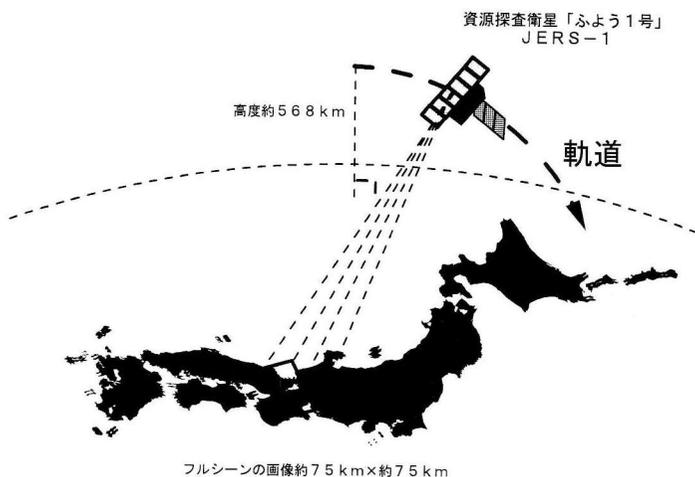


図3 国産地球資源衛星「ふようー1号」[JERS-1]の合成開口レーダー

いる。

以下において、「ふようー1号」による地殻変動検出の実例として、兵庫県南部地震に伴う地殻変動の解析について紹介する。

兵庫県南部地震による地殻変動の検出

1995年1月17日に淡路島および神戸市周辺に壊滅的な被害をもたらした兵庫県南部地震の前後で取得された「ふようー1号」のデータ処理を行ない干渉画像を得た(口絵カラー図参照)。これは、地震前の1992年9月9日に測定した位相と、地震後の1995年2月6日の測定した位相の差をとり、その位相差に色彩を対応させて、地殻変動を可視化した画像である。2回の観測間における軌道の違いと、地形による縞模様は、取り除いた。原画像に多少ノイズが含まれているため、ノイズ除去の空間平均フィルターをかけたため、画像の分解能を100m程度に落とす結果となっている。もっとも地殻変動の空間分布の波長は、100mよりかなり大きいので、地殻変動の様子を理解する上で、SNを向上させるために生じたこの分解能の低下は何ら問題ない。

この図において、色彩が周期的に変化する縞模様が見られるが、この縞(フリッジ)が地殻変動の発生を示している。もし、地震を挟んだ2回の観測の間に、地殻変動が生じていなければ、画像のどの箇所の画素においても位相は一定の値であり、画像に縞模様は発生しない。実際に縞模様が出現している事実が、地殻変動の発生の直接の証拠である。

画像の縞模様は周期的に変化する色彩から成り立っている。つながった縞上の画素に注目し、同一の縞の同じ色彩を持つ別の画素との間で、それぞれの地殻変動の大きさを比べることにする。

同一の縞に属するこの2点の間では、画素の色彩として表現された位相が等しい。言いかえると、同じ色彩をつないでできる曲線は、衛星から見た場合に距離の変化が同じ点をつなぎあわせた曲線である。次に、隣り合う縞の間で同じ色彩をもつ画素の位相を比較すると、これらの点同士では、

位相の差がちょうど一周分(360度)異なっている。これらの点の間では、地上と衛星の間の距離の変化(すなわち地殻変動の大きさ)が11.75cm(マイクロ波の半波長)だけ異なっていることになる。つまり、最初の点の衛星までの距離変化(すなわち地殻変動)に対して、他方の点の距離変化は11.75cmだけ大きい(または小さい; 距離変化の大小の向きは位相の変化の+/-符号で判別できる)。このように干渉図中において縞模様を持つ意味と、地図において等高線を持つ意味との間には強い類似性がある。

上にあるように、同じ色彩の画素をつなぐ「等色彩線」は、同じ距離変化差を持つ点を連結した線である。したがって、「等色彩線」は、同時に「等地殻変動線」でもある。このように、干渉図の縞模様を「等地殻変動線」と考えることによって、地殻変動の空間分布の様子を直感的に理解することが可能となる。さらに、位相そのものを数値として処理し、インバージョンその他の解析手法を適用することによって、詳細な科学的な解析検討がなされる。

既に説明したように、この縞は「等地殻変動線」であるので、これが狭い範囲内に密集している場所ほど大きな地殻変動が生じている地域である。図中において、縞は、神戸市の海岸沿いおよび淡路島北部において明瞭に現れている。地質学的調査、GPS調査など、他の様々な観測からも、これらの地域において大きな地殻変動が発生したことが裏づけられているが、口絵で明らかのように、合成開口レーダー観測からも地殻変動の存在を確認できる。

なお、干渉図中で色彩の変化が規則的ではなく、五色の砂を撒き散らしたようになっている場所は、地震前後で地表の反射の条件が変化するなどして、良好な干渉が得られなかった地域である。逆に、この干渉の善し悪し(干渉度、Coherenceとして数値化される)から、地表の反射特性の変化、地震の場合は、例えば建物の倒壊率などの情報が抽出可能であるが、ここでは、主題からやや離れるので、詳しくは述べない。

さて、この図からわかるのはあくまで衛星と地

表との直線距離の変化であり、これは一般に上下成分や水平成分の地殻変動が重なった結果生じるものである。このため、この図からだけでは、単純に上下変動と水平変動に分離することはできない。ただ、地震や火山のように、地殻変動がある程度規則的である場合には、後で紹介するように、モデルと組み合わせてインバージョンを実施することが可能であり、上下・水平変動をほぼ正確に分離することができる。

この図から、以下のような特徴があることがわかる。

- (a) 神戸市須磨区から東灘区にかけて、幅：数 km、長さ：20km ほどの帯状の地殻変動が見られる。これは、海岸とほぼ平行しており、海岸側ほど衛星から遠ざかる変化である。色彩の変化の向きから、断層の右横ずれ運動によるものと説明できる。画像の東側において、ノイズが増加し不明瞭さが増すが、変動の方向が東北東から北東に変化しているように見受けられる。これは、断層の走向が直線ではないことを示唆し、地質学的に知られている断層の位置との比較が目玉される。
- (b) 神戸市垂水区では上記：(a)と逆に海岸側ほど衛星に近づく変動が見られる。ちょうど垂水区と須磨区の境では、(a)と(b)の変化が不連続になっており、水準測量で観測された段差と一致している。
- (c) (a)のほぼ中央の神戸市中央区あたりに、直径約 1 km の変化が見られる。原因は不明であるが、沈降などの衛星から遠ざかる変動があったと考えられる。
- (d) 淡路島では、同心円状の変動が野島断層を中心とした地域に見られ、野島断層の右横ずれおよび南東側隆起によるものと説明できる。

なお、以上で紹介した地殻変動は大きいところでは、数十 cm を超えている。

さてこの干渉画像は、合成開口レーダーが測定した、衛星と地表との距離の変化、すなわち地殻変動の数値的な情報を画像化したものであるから、本来、数値的な取り扱いが可能であ

る。その一例として、小沢・他は、合成開口レーダーによる結果と GPS および水準データを組み合わせることでインバージョンを実施することにより、客観的に地震断層パラメータを推定した(小沢, 1996)。彼の結果によれば、これまで、GPS や水準測量など、従来の測地手法の成果単独では、再現できなかった詳細まで、断層の走向の様子を明らかにすることができた。図4において、インバージョンの結果と、既に知られている断層の走向との良い一致に注目して欲しい。干渉合成開口レーダーを用いた結果は、地質学的研究から、従来より知られている断層が動いた事を強く示唆している(図4)。

合成開口レーダーと GPS の大きな違いは、GPS が地殻変動の上下、東西の 3 成分の変動の全てを測定するのに対し、合成開口レーダーは、衛星とターゲット間の距離の変化しかわからないということである。しかし、逆に合成開口レーダーは、高い空間分解能で地殻変動の面的な分布を明らかにするため、インバージョンなどの適当な手段を用いて、地震断層の詳細なモデルを構築するために大きな力を発揮することが、今回の例において示された。また、インバージョンを利用して、モデルパラメータを推定する解析する過程で、上下地殻変動と水平地殻変動の分離も可能となっ

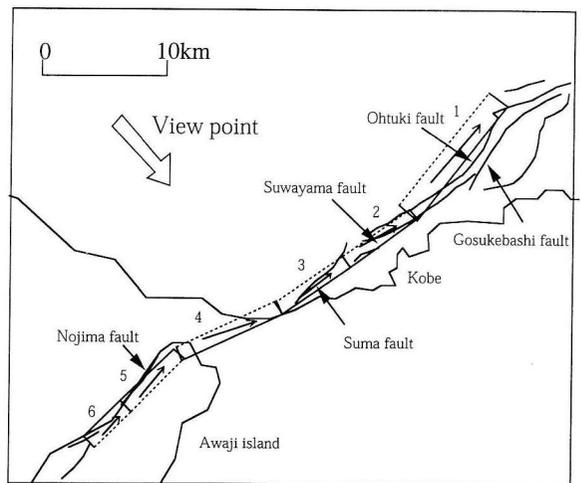


図4 干渉合成開口レーダー・GPS および水準測量データによる断層モデル推定インバージョン結果と既知の断層走向の比較(小沢による)

た。兵庫県南部地震に伴って発生した地殻変動の解明における合成開口レーダーの有効性は、今回だけに、特有のものではなく、この新しい地殻変動観測手法の特長を典型的に示すものである。

合成開口レーダーの地震研究への応用

兵庫県南部地震における解析は、GPS および水準測量等の従来の測地測量手法と合成開口レーダーを組み合わせ、相補的に使用することによって、地殻変動に関する情報量が飛躍的に増加することの典型的な例である。

次表において、GPS と合成開口レーダー（「ふようー1号」を用いた場合）の特長を比較する。

この表で、明らかであるように、GPS と合成開口レーダーは、お互い、見事なくらいに相補的である。したがって、この2つの近代的な測地技術を組み合わせる利用することによって、例えば、兵庫県南部地震における解析例のように、地殻変動に関する情報量を飛躍的に増加させることができる。

また、合成開口レーダーは、観測の対象とする地表に全く設備を必要としないので、GPS の設備がまだ整備されていない場所に対しても応用が可能である。このこともこの技術の地震研究への応用に期待が集まる理由となっている。

例えば、紙幅の都合で、ここでは詳細の紹介ができないが、1995年5月に発生した、ネフチェゴルスク（北サハリン）地震に伴う地殻変動もこの手法により検出され、地震断層モデルの解析が進んでいる（飛田・他、1996）。この例では、地震の前後の画像が、一方は降雪（結氷）時、他方は、溶解時と、地表の条件が相当異なるものであり、当初は、明瞭な干渉画像を得ることが困難視されていた。しかし、実際に画像処理を実施してみると、地殻変動を表すかなり明瞭な干渉縞が得られており、「ふようー1号」合成開口レーダーの応用性が相当高いことが示される結果となった。世界各地における「ふようー1号」の観測の蓄積は既に相当量があるので、今後、これまで通常の方法では、測地的な地殻変動観測が実施できな

GPS と合成開口レーダーによる観測の比較

比較要素\技術	GPS	合成開口レーダー
観測量	地殻変動の三成分 (上下, 東西)	衛星から地表までの 距離の変化: 1成分
観測頻度	毎日, 必要であれば毎秒	44日ごと
面的密度	25kmに1点	100mに1点
観測地域必要設備	地上に受信機	不 要

った地域においても、地震研究と連動した地殻変動観測が実施可能となり、貴重なデータを提供するものと思われる。

おわりに

干渉合成開口レーダーによる地殻変動観測手法は誕生したばかりであるが、Massonnet らによるランダース地震に伴う断層運動に関する成果や、本稿で紹介した筆者らの結果のように、地殻変動の研究に新しい可能性を切り開くものである。特に、これまでの、いくつかの解析例から、わが国の「ふようー1号」のデータが、植生に覆われた日本の国土に対しても、地殻変動の検出手段として問題なく利用できることがわかった。

この手法を利用するためには、地殻変動が発生する前後で撮影された画像が必要である。例えば、「ふようー1号」は、44日で再び地上の同一場所の上空を飛行するように軌道がコントロールされているため、44日に1回の割合で、世界の、どこの場所でも、この手法を応用して地殻変動の検出を行なうことが可能である。

今回は地震に伴って発生した地殻変動を画像化したのが、この手法は地震や火山噴火の前兆として現れる地殻変動の検出にも利用できる。そこで、この手法を取り入れることによって地震予知や火山噴火予知の手法がさらに高度化することが期待できる。また、この手法は氷河などを対象とすることもできるので、地球温暖化によるグローバルな環境変動の研究などにも応用可能であろう。

これらの期待される応用分野の広さを背景として、各国は、合成開口レーダーを搭載した宇宙ミッションの打ち上げを計画している。例えば、ア

アメリカは、シャトルを利用する合成開口レーダーミッションや、単目的で単価を絞りこんだ小さい衛星レーダーミッションを計画している。一方、わが国も、「ふようー1号」の後継として、新しい合成開口レーダー搭載衛星の打ち上げを2002年頃に計画している。また、合成開口レーダーは、航空機での利用も盛んであり、わが国でも、宇宙開発事業団や名古屋大学によって先駆的な研究が進んでいる。今後、これらのデータを利用した合成開口レーダー解析により、地震に関する理解が飛躍的に進むことが期待される。最近の世論調査によれば、地震を始めとする各種の災害に対して安全な国土の実現が、国民の第一の関心事となっており、ここで紹介した合成開口レーダーが、そのために少しでも貢献できることを祈りながら、この小論を閉じることにしたい。

なお、ここで紹介した干渉合成開口レーダー画像は、宇宙開発事業団から、国土地理院と宇宙開発事業団で実施している共同研究の推進のために提供を受けたデータを利用して作成したものである。ここに、関係者に深く謝意を表す。また、「ふようー1号」のデータの所有権は通産省および宇宙開発事業団が有している。

最後に、干渉合成開口レーダーの進展に興味をもたれ、さらに詳しい情報を希望される読者は、Internetの次のWWWホームページを参照されることをお勧めする。

<http://vldb.gsi-mc.go.jp/>
<http://www.gsi-mc.go.jp/>

これらには、干渉合成開口レーダーに関する最新の情報が掲載されており、また関連のWWW Siteへのリンク情報もあるので、これらをきっかけとして、合成開口レーダーに関する様々な情報を集めることができるはずである。

追記 以上のようにして、衛星の進行方向のアンテナの指向性を高める効果を得るのが合成開口技術である。合成開口が成立する条件とは、対象が一連の観測の間で変化せず、観測時間が前後しても、同時観測を行なった場合と同様な結果が得られるということである。水面など、絶えず変化している特殊な場合

を除き、地表が対象の場合はほとんど、以上の条件が成立している。このようにして衛星の進行方向に関する指向性が向上する。

以上のように合成開口レーダーは、実際には機構的に小さいアンテナを使用しながら、模擬的に大きなアンテナを使用した場合と同等の分解能を得る。ただし以上の説明は、相当に定性的であり、実際は一連の解析計算が一体として実施され、以上の分解能改善効果は総合的に達成されている。また、画像の分解能には他の要素（例えば、周波数安定性、信号のSN比、ドップラー補正をするための軌道の精度など）も、大きく影響を与える。

参考文献

- 小沢慎三郎, 1996, 地震学会秋期大会予稿集.
資源観測解析センター編, 1992, 合成開口レーダー (SAR) 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ5, 資源観測解析センター発行.
藤井直之・藤縄幸雄・村上 亮, 1996, 干渉 SAR : 原理, 応用, 将来性, 1996年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集.
村上 亮・藤原 智・齊藤 隆, 1995, 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, 国土地理院時報.
Gabriel, A. G., R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, 1989, Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94, No. B7, 9483-91, July 10.
Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaue, 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142.
Massonnet, D., K. Feigl, M. Rossi, and F. Adragna, 1994, Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake, *Nature*, 369, 227-230.
Murakami, M., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito and H. Masaharu, 1996, Coseismic Crustal Deformations of 1994 Northridge California Earthquake Detected by Interferometric JERS-1 SAR, *J. Geophys. Res.*
Zebker, H. A., P. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner, 1994, On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 99, B10, 19617-19634.
[むらかみ まこと 建設省国土地理院測量指導課長]

測地観測センター

GPS連続観測システムについて

矢口 彰

はじめに

国土地理院では、現在、全国で GPS 観測を連続的に行なうシステムの整備を行なっている。これまでに約 600 カ所の観測局を設置し、今年度約 300 カ所の増設を計画している。これらの観測施設から観測データを茨城県つくば市の国土地理院にある中央局へ送信してデータ処理を行なっている。

この GPS 連続観測システムは、システム稼働開始後まもなく発生した平成 6 年 10 月の北海道東方沖地震による地殻変動を直ちに捉えることに成功し、その後発生した規模の大きな地震による地殻変動は勿論、顕著な地震を伴わない地殻変動をも捉えるなど、既にその威力を発揮しており、今後ますます地震調査研究の重要なデータを提供するものとして期待されている。

また、この GPS 連続観測システムは、測量を迅速かつ効率的に行なうための新しい国家基準点システムとしても大きな役割を果たすであろうと期待されている。

そこで国土地理院では、本年 5 月に新組織として測地観測センターを設置し、システムの着実な発展と十分な機能発揮を図ることにより、幅広い利用が見込まれるこの GPS 連続観測システムへの期待に応えようとしている。

本稿では、国土地理院の GPS 連続観測システムに関して、システム整備の経緯、システムの概要、システムが捉えた地殻変動、今後の展望などについて述べる。

なお、本稿関連の GPS に関する情報については、本誌前号の村田一郎教授の論文に詳しい。

システム整備の経緯

国土地理院は、測量法に基づいて基本測量長期

計画というものを策定し、これに沿って事業を行なっている。平成 5 年度は、それまでの第 4 次基本測量長期計画の最終年で、ちょうど新長期計画を策定する時期に当たっていた。長期計画は技術革新の動向を見据えながら、新技術を適切に事業に生かすように作る必要があるが、測地分野では当然 GPS をどのように取り入れるかが大きなポイントであった。

いろいろな議論を経て、

- ① 精密測地網測量を EDM（光波測距儀）から GPS に切り替える、
 - ② 全国に電子基準点網を整備する、
- こととした。

ここで電子基準点とは、国家基準点体系の中に位置づけられた GPS 連続観測局のことである。

測量方式を EDM から GPS に切り替えても経費的に大きな問題は予想されないが、全国に電子基準点を設置するためには膨大な初期投資が必要であり、さらにその後のランニングコストをどうするかなど、いろいろ困難が予想されていた。

そのような時期に、平成 5 年度第 1 次補正予算が編成されることになり、南関東・東海地域に GPS 連続観測施設を設置する経費が認められた。これにより地震予知連絡会が観測強化地域として選定している東海・南関東地域を対象にする 110 個の観測局からなるシステムが、翌年の夏から本格的に稼働した。

その後、平成 5 年 7 月に北海道南西沖地震が起り、地震防災の重要性が再認識されたこともあって、平成 5 年度第 2 次補正予算で全国的な設置が認められた。これにより全国を対象にした 100 個の観測局からなるシステムが平成 6 年秋から稼働した。

さらに平成7年1月の兵庫県南部地震が起り、地震調査観測体制の強化充実が求められたこともあって、平成6年度補正予算および平成7年度補正予算で全国で増設が認められたため、現在は、それまでの210個の観測局も含め610個の観測局からなる機能強化・統合一体化されたGPS連続観測システムが稼働中である。

日本列島が地震の活動期に入ったせいなのか、ちょうどこの時期に大きな地震が連続して発生したことを契機に、バブル崩壊後の経済対策の時期とも重なり、数次の補正予算でシステムの整備が進んだ訳であるが、さらに約300個の観測局の増設を実施中で、このシステムは、まさに現在発展途上にあるシステムなのである。

測地観測センター

システム整備の経緯で述べたように、GPS連続観測システムは短期間に整備することになったため、これまで国土地理院に専門に担当する部所が無く、既存の部所が分担して対応せざるを得なかったが、本年5月に、ようやくGPS連続観測システムの運用を担当する新組織として測地観測センターが設置された。

測地観測センターは、衛星測地課および地殻監視課の2課からなり、スタッフとして地震調査官が設置されている。

測地観測センターは、GPS連続観測システム

の運用のほか、IGSのデータセンターや準解析センターとして国際的なGPSによる地球観測を行なう(衛星測地課)。さらに、海水面の高さの変化を観測する験潮、地殻の伸縮・傾動を観測する地殻変動観測なども合わせて行なって地殻変動のデータを収集し、地殻変動の監視を行なう(地殻監視課)。また、測地観測センターは、昨年制定された地震防災対策特別措置法に基づく地震調査研究推進本部の地震調査委員会の事務局を分担している。

なお、つくば市の国土地理院構内に地球観測データセンター(仮称)という新しい建物を現在建設中で、来年度には、スーパーコンピュータ、V LBI解析施設などとともに、測地観測センターもここへ移動し、GPS連続観測および地殻変動監視を本格的に実施することになる予定である。

システムの概要

GPS連続観測システムの構成を図1に示す。システムの基本は、全国に配置された多数の観測局とつくば市の国土地理院内に設置されている中央局で構成されている。さらにこの他、静岡県掛川市にある東海機動観測基地内に設置されていて東海地方の観測局のデータの処理を行なうことができる東海基地局と、全国の地方測量部などに設置されている各種処理結果の表示を行なうことのできる施設がシステムに含まれている。

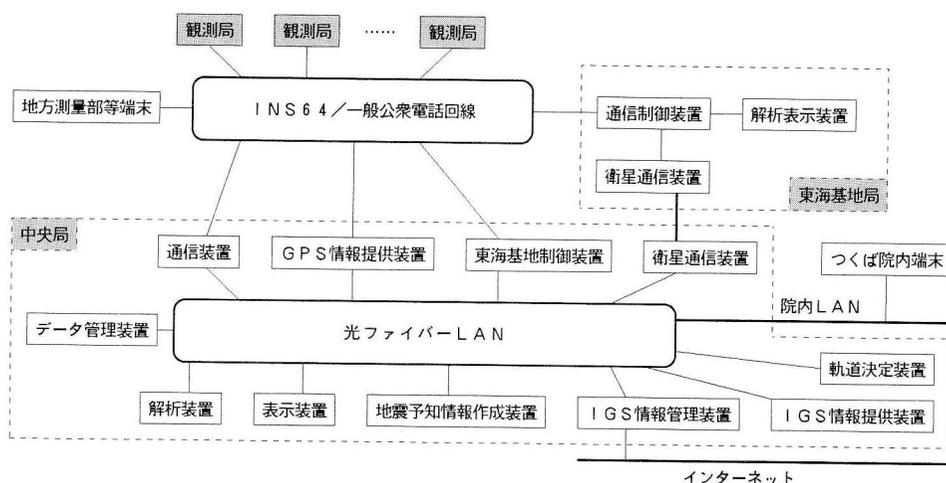


図1 GPS連続観測システム構成図

観測局では常時無人で GPS 衛星からの電波を受信する。観測されたデータは公衆電話回線を利用して中央局に送られる。中央局では観測データを解析し各観測局の位置を計算する。

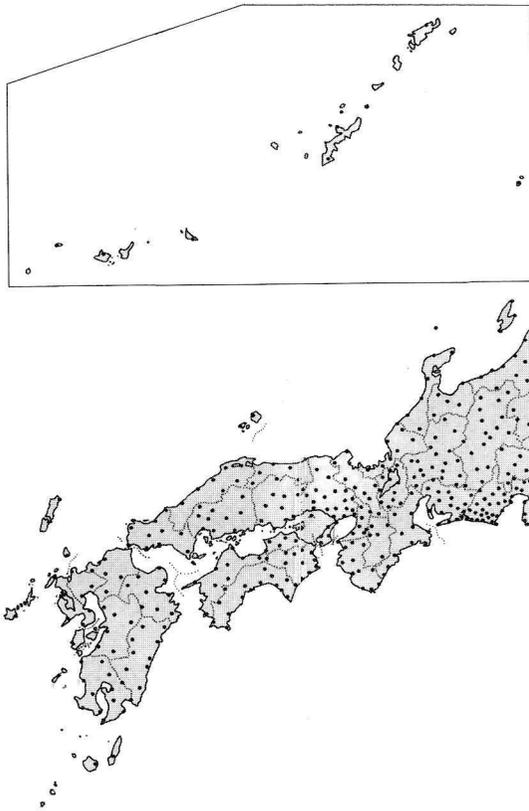


図2 観測局配置図

観測局から中央局へのデータ送信は、通常時は毎日1日分の観測データをまとめて夜間に送っている。地震発生などで緊急に地殻変動を把握する必要がある場合は随時データを回収する。

(1) 観測局 全国の観測局の配置を図2に示す。現在、総数は610で、地域により若干差があるが全体としての平均点間距離は約30kmである。

観測局は、アンテナ架台・GPS受信機・通信装置・無停電装置などで構成されている(図3)。

アンテナ架台は、地中に埋設された2m弱の立方体状のコンクリート製の基礎に固定された高さ5mのステンレス製の柱から成る。柱の先端部にアンテナを設置し、周囲の建物・地形・植生などによる電波障害を避けるようにしている。柱

の中央部に受信機などを設置する機器収納箱を設けている。収納箱の内部の気温の変動を抑えるために、換気装置および保温装置が装備されている。

アンテナ架台の基礎上部にステンレス製金属標が埋め込まれている。これは観測局を電子基準点として利用する場合、トータルステーションなどの測量機器

を設置するために用いる。

GPS受信機は、2周波の搬送波位相およびPコードが受信可能で、Pコードの暗号変更に対処できるAS(Anti-Spoofing)機能などが備わった高性能なGPS測量機である。通常は30秒周期で連続的に観測を行なっている。10メガバイトの内部メモリを備えており、万一中央局へのデータ送信が不調な場合でも約7日間分の観測データを記録して置くことができる。また将来、RTK(リアルタイムキネマティック)測量などの固定点としての利用を可能とするよう拡張性を持たせている。

全体の約5分の1にあたる120局については、地震発生前後の地殻変動を詳細に捉えるために1秒間隔の連続観測を行なっている。この場合は内部メモリを80メガバイトに増やし、約4日分の観測データを記録できるようにしている。

通信装置は、つくばの中央局からのコントロー

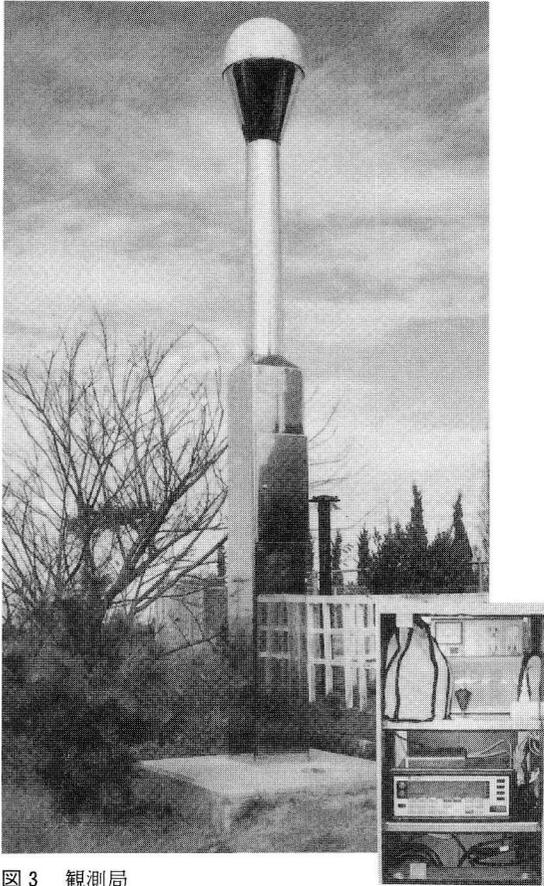


図3 観測局

ルにより必要な観測データの送信、観測プログラムの変更などを行なうものである。

無停電装置は、一時的な停電や瞬断による欠測を防ぐための機器で約5時間の停電まで対応可能である。

(2) **中央局** 中央局は、つくば市の国土地理院にあり、通信装置・データ管理装置・解析装置・表示装置などから構成されている。各装置は高速の光ファイバー LAN により結合され、高速大量データ処理を可能にしている。また、主要機器は同一機能に対して複数台を配備するなど、システムの信頼性の確保に留意している。

通信装置は、各観測局の通信装置と公衆電話回線で結び、観測局から観測データを回収するとともに、観測局の観測スケジュールや GPS 受信機のファームウェアの変更等を行なう装置で、通信用ターミナルアダプタ、モデムおよび通信管理用サーバからなる。1日分の観測データを毎日中央

局に送信するが、1観測局あたり約700キロバイトのデータ量になるので ISDN 回線を利用できる地域では、これを用いて通信の高速化を図っている。

解析装置は、観測データを用いて基線解析計算を行なう装置で、高速演算可能なサーバである。基線解析は通常2種類行なっている。一つは、GPS 衛星から受信した予報軌道情報（放送暦）を用いた即日解計算で、毎日、前日分の観測データを処理する。その結果は日々の観測データの良否の判定および地殻変動の迅速把握に用いられる。もう一つは、IGS（国際 GPS 地球力学事業）から提供される精密軌道情報（精密暦）を用いた精密解計算で、精密暦が得られ次第、計算を行なうが、通常観測日の20日程度後になる。

解析には、BERNESE、GAMIT および GIPSY の学術プログラムを使用している。これらのプログラムでは、長距離の基線解析で大きな障害となっていた大気中の水蒸気による電波遅延を、推定パラメータによって補正する機能があり、高精度の解析結果が得られる。さらに、IGS から提供される精密暦・地球回転パラメータ、世界各地の観測データを用いて解析し、世界座標系である ITRF 座標系に準拠した3次元座標値を決定している。これにより、100 km の長距離基線でも、水平成分で数 mm、鉛直成分で数 cm の高精度が実現できる。

この他、地震時の局所的な地殻変動の様相を把握するために、1秒間隔の観測データを用いたキネマティック解析も可能である。

データ管理装置は、ワークステーションで制御される磁気ディスク・光磁気ディスクおよび磁気テープで構成された装置で、観測データそのものと、ASCII コードで機種によらない共通フォーマットである RINEX フォーマットに変換したデータおよび解析計算結果などを蓄積し、高速に検索できる。

表示装置は、解析計算結果を、時系列変動グラフ・変動ベクトル図および地殻歪図で表示する装置で、ワークステーション及びプリンターである。

なお、中央局には一般商用電力の停電によりシステムの機能が停止するのを防ぐため、ディーゼル発電装置を設置している。

(3) **東海基地局** 国土地理院は、東海地域の測量調査観測を充実するため、平成7年度に静岡県掛川市に東海機動観測基地を建設した。ここに、東海地域の観測局の観測データの回収、基線解析、結果表示などができる装置を設置してある。機能は、中央局に準じたものになっている。

なお、東海基地局には衛星通信装置が配備されており、東海地方とつくばの間の通常回線が不調になった場合でも、東海基地局と中央局の間で情報交換が可能である。

システムが捉えた地殻変動

(1) **地震に伴う地殻変動** 図4は、本システムが稼働してまもなく発生した北海道東方沖地震（平成6年10月4日、M8.1）前後の地殻変動を捉えたもので、従来であれば数か月を要する結果が数日で得られるという本システムの有効性を如実に示した記念すべき図である。

その後、立て続けに発生した三陸はるか沖地震（平成6年12月28日、M7.5）および兵庫県南部地震（平成7年1月17日、M7.2）についても、地震に伴う地殻変動を的確に捉えている。三陸はるか沖地震では、地震の際の変動だけではなく、その後の余効運動が1年にわたって続く様子も捉えることができた。

最近では、宮城県北部地震（平成8年8月11日、M5.9）のような比較的規模の小さい地震においても、地震発生機構と整合すると思われる1 cm 程度の変動を捉えており、本システムの幅広い有効性が示された。

さらに、平成8年5月に房総半島東部で大きな地震を伴わず、数日かけ

て1 cm 程度移動するというゆっくりした地殻変動が起きていることを捉えることにも成功した。

5月19日から20日にかけて九十九里浜付近および勝浦付近でM3.9程度の地震が起きてはいるが、観測で捉えられた1 cm 程度の地殻変動を説明する規模ではないため、いわゆる「ぬるぬる地震」を捉えたのではないかと注目されている。

(2) **全国地殻変動速度図** このような地震に伴う地殻変動を迅速に捉えることも本システムの大きな役割であるが、日本列島はプレート運動などにより徐々に地殻の変形を生じており、このような長期間にわたる地殻変動の様相を捉え、地殻歪に基づく長期的な地震発生の可能性予測を行なう基礎データを提供することも、本システムの重要な役割である。

図5は、本システムが捉えた最近1年間の日本列島の地殻変動の速度図である。固定点をつくば市にしてある。固定点の取り方でベクトルの様子がかかなり変わるが、顕著なことは東北日本と西南日本で特徴が大きく異なることなることである。両者が異なるプレート上にあることが窺える結果である。南西日本が韓国との間で相対運動をしていないことから、東北日本はユーラシアプレートの上にはなく、北米プレートに属するという学説を裏づけることになる。

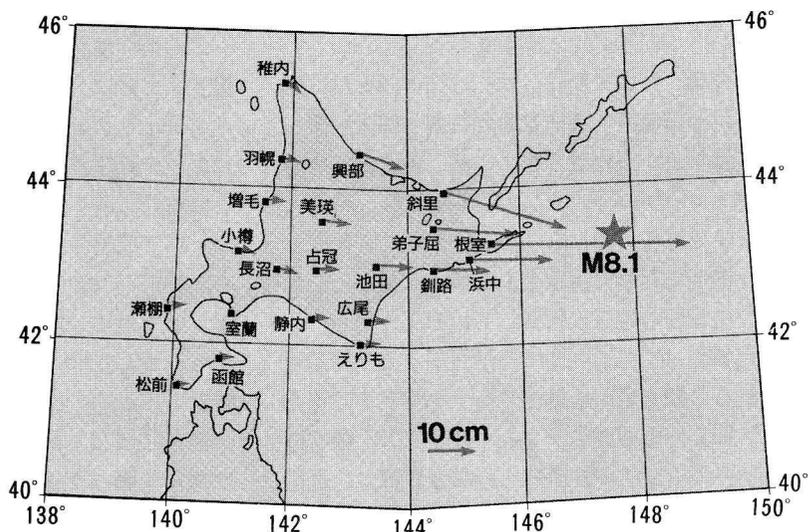


図4 北海道東方沖地震による地殻変動（水平成分）

東北日本については、前述の三陸はるか沖地震の余効運動が含まれている。

西南日本では、太平洋側と日本海側で変動ベクトルの向きが異なっている。大陸側と中国地方の日本海側に相対運動がないため、この図ではわかり難いが、中国地方の日本海側の観測局を固定してみると、紀伊半島から四国にかけて1年間に約5cmの速度で西に移動している様子がわかる。この地域では過去に東南海地震（1944年）や南海道地震（1946年）などの巨大地震が発生しており、フィリピン海プレートの沈み込みがそれらの原因と考えられているが、この速度図はその意味で注目される。

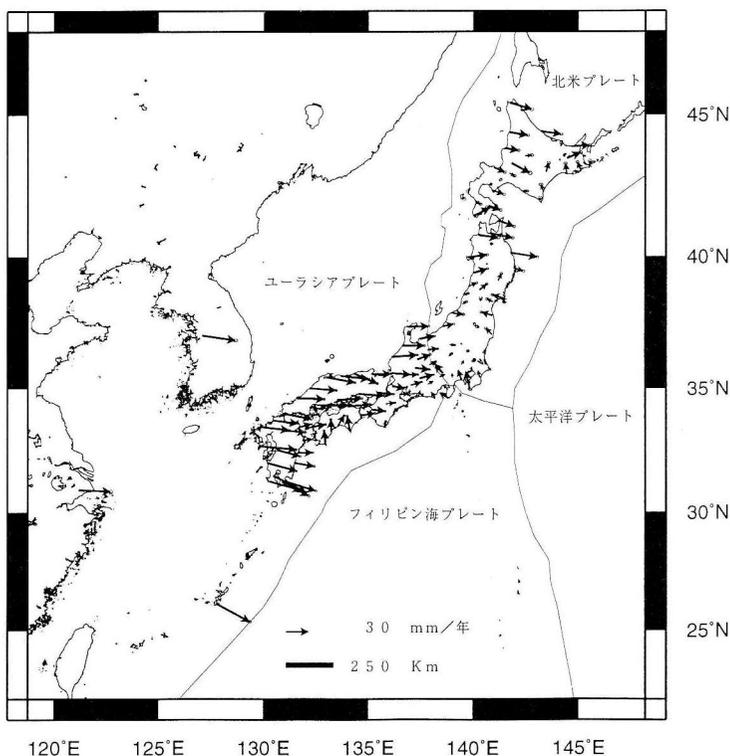


図5 地殻変動速度図

電子基準点網

GPS 連続観測システムは、地殻変動の検出だけでなく、測量の新しい国家基準点システムとしても大きな期待が寄せられている。

GPS を用いて測量を行なうには、新たに位置を求めたい点に GPS 受信機を設置するとともに、予め位置の求められている基準点にも GPS 受信機を設置して、同時に同じ GPS 衛星の電波を受信する必要がある。この際、基準点での GPS 観測が省略できれば、作業効率が大幅に増すことになる。そのためには、基準点で GPS 観測を連続的に観測していて、必要な観測データがサービスされるようになればよい。

GPS 連続観測局は、連続的に GPS 衛星の電波を受信している。したがって、この観測局が国家基準点体系の中に位置づけられて、その位置が予め求められていれば、まさに上のような条件を満たす基準点として利用することができる。このように国家基準点体系に位置づけ、基準点として利用する GPS 連続観測局を「電子基準

点」と呼んでいる。

昨年度、阪神大震災後の復興作業の円滑化のため、国土地理院は測量関係団体および測量機器メーカーの協力を得て、神戸市および周辺ならびに淡路島に、緊急的に8個の電子基準点を設置し、臨時的成果サービスを試験的に実施したが、これによっても電子基準点の有効性が確かめられた（復興用の通常の基準点が整備されたため、現在はこのサービスは終了している）。

現在、国土地理院は、電子基準点の運用に必要な測量法の規則の改正、成果サービス体制の整備などの準備作業を行っており、来年度にもサービスを開始する予定である。

また類似のものとして、地籍調査でも、調査実施期間に調査地区の基準点で GPS 連続観測を実施し、測量調査の効率化を図る実験を行なうことにしており、今年度 GPS 固定点を設置中である。

電子基準点の成果サービスについては、適当な通信方法と結合することにより、様々な形態の位置情報サービスが考えられる。阪神大震災を機に

GIS（地理情報システム）の効用が注目されているが、GPSはGISを活用するための重要な位置情報の提供手段としても期待されており、その意味でも国土全域にほぼ均等に設置されている電子基準点の特性を活用できるものと考えている。

おわりに

本システムは、これだけの規模のものは世界的にも例が無く、まだまだ発展途上の面が多いため、試行錯誤を重ねながら完成をめざしていく必要がある。今後の主な課題について述べ、本稿を終わりにしたい。

(1) システムの強化 まず、システムの信頼性を高めることが重要である。本システムの有効性が認識されるに従って、観測データをより確実に提供する責任が生じている。特に、地震前後の観測データを迅速に提供して地震メカニズムの解明、余震などの地震活動の推移の予測などに役立てることが必要である。このため、データ通信手段の重複化、リモートメンテナンス技術の開発などが課題である。

また、微小な地殻変動を捉えるために、観測精度を一層高めることも重要な課題である。解析方法の改良、水蒸気補正の精密化、季節変動の除去などに努力したい。

観測局の密度を高めることは、システムの信頼性・精度、いずれの向上にも有効である。今年度設置を計画している300弱の観測局の増設が行なわれるとシステムの強化が図られるが、現在は山間離島等、電力確保や通信が困難な地点の設置が十分でないため、そのような条件に耐える観測局の開発も行ないたいと考えている。

(2) 地殻活動総合解析 GPS連続観測システムにより得られるデータは、これまで不可能であった広域の地殻変動を時間的にも空間的にも高い分解能で観測したデータであり、他の地殻

変動観測データとともに、地震観測データや地殻構造調査データと合わせて解析して得られる地殻歪モデルに基づくシミュレーションを行なうことにより、地殻活動の予測分析が可能になるのではないかと期待されている。国土地理院では今年度スーパーコンピュータを導入し、このような地殻活動総合解析の研究に着手したところで今後研究の一層の推進を図っていききたい。

(3) データの公開 GPS連続観測のデータは、地震調査研究だけでなく測量にもその効用が期待されており、電子基準点に関連して述べたように積極的に情報公開を行なっていくことにしている。

各観測局における受信データは、大学などが地震調査研究用に独自に行なっているGPS観測データと合わせて解析する場合や、観測局を電子基準点として利用する場合に必要な。

観測局の日々の位置変化を示す時系列データや、一定期間の地殻変動量を示す変動速度データなどは受信データを解析して得られるが、これらのデータは地殻変動の特徴を把握するために有効であり、地震調査研究関係者・防災関係者などが必要としている。

また定期的な地殻変動の状況について、わかりやすい形でインターネットなどを通じて一般に公開したいと考えている。

(4) 国際協力 GPSの利用は、IGSなどで決定される衛星の精密な軌道情報や地球回転パラメータの値が不可欠であることからわかるように、国際協力に全面的に支えられている。国土地理院は、かねてよりIGSのデータセンターとして国内の観測データ（本GPS連続観測システムの一部の観測局のデータ）をIGSに提供するとともに、IGSから得られる観測データと解析データを国内の利用者に提供する窓口機能を果たしてきているが、さらに本年からは地域観測網準解析センターとして、世界座標系であるITRF系によるグローバルな基準点網の構築へ協力を開始しており、今後一層の国際貢献を行なっていききたいと考えている。

【やぐち あきら 国土地理院測地観測センター長】

資料：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：カラー歪み図 2編
頒布実費	20,000円 [送料共]

財団法人 地震予知総合研究振興会

アメリカ版GPSアレー

地殻歪と活断層

力武常次

本号には、国土地理院が測地観測センターを設けて実施している、全国600カ所あまりに設置されたGPS観測局による連続観測の概要が解説されている(矢口, 1996)。これは広域の地殻変動をリアルタイムで監視し、地殻歪の進行状況や地震直前の前兆的地殻変動を調べて、地震予知に役立てようとするものである。

最近アメリカでも、大規模なGPS連続観測をロサンゼルス周辺に展開し、地震災害予測に役立てようという計画が立案され、その概要ならびに計画への賛否についての論議がアメリカ地球物理学連合(American Geophysical Union, 略称AGU)の週刊機関誌EOS(vol. 77, No. 43, 417, 419, 427, 1996)に載っているのです。ここにその概略を紹介しよう。

1. SCIGN計画

[W. H. Prescottの解説による]

南カリフォルニアのすばらしい景観と快適な気候は、2000万人以上の人びとの住処であるとともに国家経済のきわめて重要な要素である。不幸なことには、この地域には強い地震を発生する数多くの活断層が走っている。いくつかの機関の科学者は、甚大な危険が想定されるこの大都市圏の地震災害を調べるための新しいアプローチを追究している。

南カリフォルニア統合GPS観測網(Southern California Integrated GPS Network, 略称SCIGN計画)は、現在のところ広域ロサンゼルス都市部をカバーする約40のGPS観測点からなる観測網である。このアレーを250点に拡大しようという非公式論議がなされてきた

が、今や公式にこの計画が提案されることとなった。高い精度を保つために、各観測点には標識(monument)が固定的に設置され、すべてのGPS受信機は連続的に作動する。このアレーの目標は、既知の断層の変形を固定するための正確かつ精密な(地殻変形の)速度場を求め、現存の地質構造モデルをテストし、かつ人口稠密な南カリフォルニアの地震危険度をより確かに見積ることにある。

現在SCIGNは38点からなり、カリフォルニア大学サンディエゴ校(University of California, San Diego, 略称UCSD)、アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration, 略称NASA)のジェット推

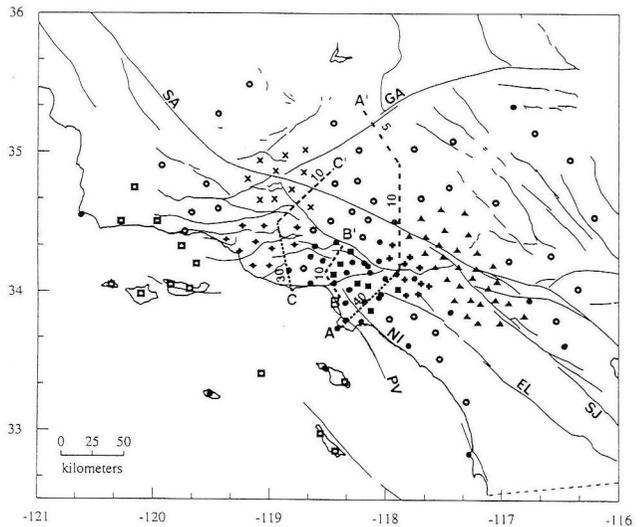


図1 SCIGNアレー固定観測点の分布

●は既存の点。他は予定点。プロフィールA-A'、B-B'およびC-C'はそれぞれ55、10および40観測点を含む。SA、GA、PV、NI、ELおよびSJはそれぞれサンアンドレアス(San Andreas)、ガーロック(Garlock)、パロヴェルデ(Palos Verdes)、ニューポート・イングルウッド(Newport-Inglewood)、エルシノーア(Elsinore)およびサンハチント(San Jacinto)の各断層を示す。

進研究所 (Jet Propulsion Laboratory, 略称 JPL) およびアメリカ地質調査所 (U. S. Geological Survey, 略称 USGS) により運営されている (図 1)。NASA および全米科学財団 (National Science Foundation, 略称 NSF) の研究費によって、さらに 70 点の建設が可能であり、他の機関からの追加的研究費支給が見込まれている。新しい観測点としては、30 km 間隔の全域をカバーする点と、図 1 の A-A', B-B' および C-C' のプロフィールに沿う 1~3km 間隔の密度の濃い配置が計画されている。すべてのデータは、UCSD および JPL で処理され、インターネット (<http://sceec.gps.caltech.edu/sci-gn.html>) 上で利用可能である。

SCIGN が提唱されているように 250 点にまで成長するとすれば、器械と建設のために 750 万ドル (約 10 億円) くらいが必要であろう。運営費を見積るのはむずかしいが、5 年間でおそらく建設費と同じくらい必要で、全体として 1500 万ドル (約 20 億円) を要すると思われる。これは国家の財源を有効に使うことになるであろうか？

2. 計画推進論

[W. H. Prescott による]

問題の EOS77 巻 43 号には、W. H. Prescott による計画推進論と J. C. Savage による反対論が掲載されている。この 2 人はともに USGS の職員で、測地の専門家である。前者は、SCIGN 連絡委員会の委員長であり、計画を推進する立場であることは当然といえよう。後者は地震予知学や測地学に関し、しばしば批判的論文を提出するいわば辛口派であるが、「何でも反対」的態度は、あまり建設的とはいえないかもしれない。

Prescott は、GPS 固定観測点群による地殻変動観測は今や十分な精度にまで発展し、ロサンゼルス大都市部に SCIGN を展開することは、科学的・技術的・経済的および社会的に正しい時期であるとしている。SCIGN は、最近地質学上問題となっている後述の「厚い表皮」(thick-skinned) と「薄い表皮」(thin-skinned) モデルに関する論争にキー・データを提供すると考えられる。

この地域における地震による損失の可能性を考えると、SCIGN に必要な経費は安いものであり、われわれは防災に関しできることは何でもしなければならぬ。

(1) 危機に直面している大人口 いかなる基準からみても、ロサンゼルス地域はアメリカでもっとも地震危険度の高いところの一つである。いちばんよく知られている断層はカリフォルニアを縦断しているサンアンドレアス断層で、マグニチュード 8 級の地震を起こす。南カリフォルニアにおけるこのクラスのもっとも新しい地震は 1857 年に起こった。1971 年のサンフェルナンド地震や 1994 年のノースリッジ地震のような地震は、ともにマグニチュード 6.7 で、よりしばしば起こり、きわめて大きな損害を与える。にもかかわらず、ロサンゼルスならびにその周辺地域では、測地学的研究があまり進んでいない。都市化、地形測量欠如さらには大気汚染までが、地形変化を調べる邪魔となっている。さらに、1987 年までは市の下に地震発生の可能性のある潜在断層の存在は知られていなかった。

(2) 測地学は地震災害の理解に重要 地震災害を見積るためには、地質学・地震学および測地学の 3 つの手法がある。トレンチングなどの地質学的手法は、過去数千年にわたってサンアンドレアス断層で起こった地震の時期と規模を明らかにした。このような古地震学的方法は、主として断層が地表にまであらわれている場合に有用である。

しかし、1983 年のマグニチュード 6.7 のコアリング地震のように、地表にあらわれない断層でも、重大な被害を生じる地震を起こすし、このことは 1994 年のノースリッジ地震で思い知らされた。しかし、このような地震でも測地学的シグナルを生じる。

微小地震観測を主とする地震学的方法は、活断層についてのデータ解釈に有力である。しかし現在の微小地震活動と大地震発生との関係はもう一つはっきりしない。カリフォルニアにおける地震学上の記録は大地震の再来間隔に比べて短すぎる。

測地学は災害を定量化するのに役立つ。地震学や地質学の重要な貢献にけちをつけるわけではな

いが、測地学もまた有用なのである。断層が起こす地殻変形の測地学的測定は、断層が埋もれているがいまいが、あるいは微小地震活動があろうがなかろうが、断層の危険度に関する知識を与える。SCIGN アレーの目的の一つは、このような測地学的解析に利用できるデータを改善することである。

(3) **超精密データの緊急度** ロサンゼルスは太平洋プレートと北アメリカプレートの境界に位置する。これら2つのプレートの相対運動の全量は50 mm/年に達する。しかし、この運動は南カリフォルニア全域に広がっているが、ロサンゼルス住民のほとんどが住んでいるサンガブリエル山系と太平洋の間では地殻の短縮率は約8 mm/年に過ぎない。このような地殻変形をよりよく知るためには、より精密な観測が必要である。測定のSN比をあげるには、2つの方法がある。1つは長い時間をかけてシグナルが大きくなるのを待つことであり、もう1つは個々の測定精度を高めることである。多くの人命と財産が危険にさらされているのであるから、断層運動のスリップレートを直ちに詳しく知ることが必要であり、とても20年も待てない。

(4) **精密な測地変化率** GPS 観測の精度に影響を及ぼす要因はつぎの四つである。観測点標識の安定性、気象条件、測定ミスおよび器機変更である。詳しい議論は省略するが、これらの原因によるノイズを避けて精密な測地変化率を求めるには、どうしても固定観測点における連続観測が必要である。

(5) **連続観測が最良** ノイズ減少のためばかりでなく、連続観測は地震による変形を捕えるためなどにも大切である。永年変形率を捕えることが重要であるが、マグニチュード5.5以上の浅い地震は、観測可能な地表変化をもたらす。これをモニターするためには、測定がしばしば行なわれることが必要である。大地震のあとでは復旧測量が必要であるし、余効的変形もあり、永年変形を地震と同時の変形を分離することはかなりむずかしい。これらの影響を最小限にとどめるためには連続観測を行なわねばならない。

(6) **地殻変形場のサンプリング** 測地観測点間の間隔は水準測量を除いて通常大き過ぎる。地震活動の盛んな地域では、10-20 km の距離で重大な変化があり得る。しかしながら、従来の測地学では、20 km 以下の測点間隔は希なことである。これは改善されなければならない。

南カリフォルニアでは、スラスト断層が地殻深くまでその伏角を保っている (thick-skinned model) か、あるいは、その角度が、水平に近くなっている (thin-skinned model) かについては大いに議論のあるところであり、後者の場合には、全体が滑るとすると、震源が浅いので震害が大きくなる。きめ細かい測地観測によって、どちらのモデルが真に近いかがわかるかもしれない。

(7) **アレーはコストに見合うよい選択である** 比較的貧弱な南カリフォルニアにおける地震損害軽減研究の予算のなかで、この計画はその正当性において他の計画に見劣りすることはない。この計画は建設費と5年間の運営費をあわせて約1500万ドルであるが、同地域の地震観測網としては約2700万ドルが提唱されている。USGSの三辺測量計画は、現在の通貨価値に直して、5年間で約1000万ドルであった。

SCIGN アレーは、固定点連続観測によらない計画に比較してはるかに精密な結果をもたらす。しかし、そのための経費の増加は思ったほど多額とはならない。SCIGN は測地学に重要な貢献をし、その測地学が地震損害軽減に重要な貢献をすることを考えると、このアレーを建設することは正当化されよう。

3. 計画反対論 [J. C. Savage による]

SCIGN 計画を正当化する議論は、ロサンゼルス地域における活断層とその永年スリップ率を5年間で正確かつ細密に同定するという根拠にしている。しかしながら、ここ数年間にわたる何人かの研究者の議論を参照すると、SCIGN は成功しそうもない。むしろ、GPS 連続観測と年1回測量との混合方式のほうが費用を考えて有効

であろう。

1994年のノースリッジ地震に際して、震央に近い2つのGPS連続観測点において地震発生の約3カ月前に異常な地殻変形が観測されたことが、ロサンゼルス地域における密度の高いGPSアレーの建設を提唱する根拠であった。しかし、その後この異常変化はデータ処理に際して導入された人工的結果であり、また測定回数の増加も標識点の不安定性を著しく改善しないことがわかってきた。この2つの点が現在のSCIGN計画の提唱に考慮されていない。

SCIGN支持者は、5年間の連続観測による地表変形速度測定標準偏差は1mm/年くらいであるとしている。ロサンゼルス全域にわたる地形変化シグナルは約9mm/年である。いっぽう、固定標識といえども相当に不安定で、ランダムに二乗平均誤差1.5mm/√年(3.3mm/5年)くらいでふらつくことがわかってきた。これは測定回数を増加しても小さくすることはできない。したがって年1回の測定でも、十分注意すれば、5年もしくはそれ以上の長期間の変化を計測するには十分である。連続観測を行なっても、標識のふらつきを克明に追跡するに過ぎない。

断層による地震危険度を予測するには、深部における変形速度を地表における速度よりインバージョンによって求めなければならない。これはきわめて不安定な操作である。H. O. Johnsonは、1.5km間隔で観測点を置いた60kmのプロフィールが1,2または3本の断層を横切の場合を想定し、1本の場合を2本の場合と区別するためには、1.0mm/年以下の標準偏差を必要とし、2本の場合を3本の場合と区別するには、0.3mm/年以下の標準偏差が要求されることを示した。これは全体のスリップ率を9mm/年とし、深さについては一様なスリップ、スリップがゼロとなる深さを一定とするなどの条件を与えての話である。実際にはスリップ率や断層の傾きの深さによる変化を考えねばならない。つまり、詳しいGPS観測によっても、実際の断層状態を知るとは困難なのである。

したがって、従来から求められてきた地質学的

成果にボーリングや地震学的プロフィールの知識を追加し、さらに20点もしくはさらにいくつかの重要な点でのGPSによる測地学的データを補強して、各断層のスリップ率を推定するのがよいであろう。このためには、年1回程度のGPS測量で十分で、非常に高精度の観測を必要としない。

4. 地殻歪と活断層 日本における研究

(1) 地殻歪データの集積 日本では、明治以来伝統的に測地測量が重視されていて、例えば大地震を経験した地域における測地測量の繰り返しによって、地殻歪が 10^{-4} に達すると、地殻が破壊されて地震発生となることが、60年以上も前に明らかにされている(Tsuboi, 1933)。1965年に地震予知計画が発足して以来、この伝統はさらに強化された形で継承されてきた。1970年代からは、精密測地網基準点測量計画によって、一次基準網(一、二等三角点6000点)をほぼ5年間隔で改測することが行なわれてきている。この間測量技術の進歩は著しく、三角測量⇒三辺(光波)測量⇒GPS測量という変遷を経て現在に到っている。この測量結果に基づく地殻水平歪データは国土地理院(1987)に取りまとめられているが、毎年2回発行される『地震予知連絡会会報』には、最新の結果が報告されている。

特記すべきこととして、国土地理院(1987)の各20万分の1の地図シート上には、活断層研究会(1980)による活断層が水平歪とともに示されていて、関連大地震の震央も盛り込まれている。日本列島の活断層は、カリフォルニアの場合などと違って縦ずれ断層も多く、上記の歪と活断層のデータから直ちに断層のモデルを設定して、インバージョンにより深部を調べるというアプローチはあまり現実的ではないと思われる。しかし、歪進行率と活断層の関係について、以下のような議論を行なうことができる。

(2) 歪進行率とスリップ率 実際問題としては、いくつかの三角形によってカバーされている断層の場合には、各三角形の最大ずれ歪の値を各三角

表1 年平均地殻水平ずれ歪進行率の
平均値とその標準偏差

区 分	平均歪進行率 (10^{-4} /年)	標準偏差 (10^{-4} /年)
A	2.4	1.2
B	1.9	0.92
一等三角測量 (全日本)	1.3	1.0

形に含まれている断層の長さを用いて重価平均した量を2つの測量期間の年数で割って、平均年間歪進行率とする。当然のことではあるが、測量期間が長いほど精度がよい。

いっぽう、活断層の活動度は活断層研究者によって平均スリップ率として与えられ、スリップ率が1000年につき1-10 m, 0.1-1 m および0.1m 以下の3段階に分けて、それぞれランクA, B およびCとされている(活断層研究会, 1991)。

表1には19および37個のAおよびBクラスの活断層のスリップ率の平均値および標準偏差を示してある(Rikitake, 1983)。なお、この表には一等三角測量による日本全土の平均的地殻水平ずれ歪進行率の平均値を示してある。この表の値から、活断層地域の歪進行率は日本全土の平均的進行率より大きい、またAクラス活断層地域ではBクラス活断層地域より大きいことがわかる。したがって、このようにして求められた、活断層地域の地殻歪進行率には十分に地学的意味があると同時にその値は活断層のスリップ率が大きいほど大きいらしいことがわかった。

(3) 地震記録のある断層 最近のトレンチ調査などの古地震学的方法によって、断層の動いた年代の範囲が求められ、その期間の歴史地震の記録を参照して、ほとんどユニークに断層活動の時期が同定される場合がある。

目下のところ筆者の手元には、表2にあげたような32個の内陸活断層と2個の海底断層について、過去の活動時期についてのデータがある。これらのデータの出所はきわめて多岐にわたっているので、ここに全部をあげることはしないが、活断層研究会(1991)、萩原(1989)、寒川(1992) および松田(1995)

などによった点が多い。

上記の諸断層の位置は図2に示してあり、付随している番号は、別途調査に用いた380個の断層の番号と一致している。この図より北海道と四国には地震発生時期が同定された断層は全くないことがわかる。

表2をよくみると、かなりのばらつきはあるが、平均歪進行率(r)の大きい断層ほど、地震が新しい時期に起こっている。つまり最終地震(発生を西暦 t_0 年とする)から西暦2000年までの経過年数 $T(=2000-t_0)$ が短い傾向があることに気がつく。図3は $T-r$ グラフで、 r の小さい値に対応して T が大きくなる傾向が明らかにみられる。

いま、 $rT=10^{-4}$ で定義される双曲線Aを図3に盛り込むならば、2-3の例外を除いて、すべての点はその下方に位置する。つまり、歪が 10^{-4} にまで集積する以前に地震が発生してしまうことを示し、Tsuboi(1933)の見解と調和的である。 $rT=5 \times 10^{-5}$ を表す双曲線Bについては、各点はその周辺にばらつき、Rikitake(1975)が得た地殻の限界歪の平均値 4.7×10^{-5} と調和する。

なお、 rT が双曲線になることを仮定して、各断層が活動した平均的時期を求めると $rT=4.25 \times 10^{-5}$ となる。この関係がここに調べた断層以外の断層にも成



図2 過去における地震発生時期が同定された活断層の分布

表2 発生時期のわかった地震を起こした断層の諸要素

No.	断層	測量時期	測量 間隔 (年)	平 均 歪進行率 (10^{-7})	用いた 三角形 の 数	長さ (km)	活動度	地 震			
								M	発生年(t_0)	T($=2000-t_0$)	名称(地名)
22	津 軽 西	1901~1990	89	0.37	3	31	B	7.3	1766	234	(津 軽)
33	千 屋	1908~1990	82	3.6	7	57	B	7.2	1896	104	陸羽地震
39	観 音 寺	1905~1981	76	1.8	3	21	B	7.0	1894	106	庄内地震
47	白石-福島	1905~1986	81	1.6	2	45	B	6.5	1731	269	
51	会津盆地西	1904~1980	76	2.0	5	55	B	6.9	1611	389	
63	関 谷	1904~1980	76	1.1	3	30	B	7.0	1683	317	(那須野)
64	善光寺-飯山	1902~1988	86	1.2	7	70	A~B	7.4	1847	153	善光寺地震
71	深 谷	1900~1979	79	1.4	3	10	B	≥ 7.5	818	1182	
73	牛 伏 寺	1895~1986	91	0.38	2	10	B	> 6.5	1159	841	(松 本)
87	伊 勢 原	1928~1990	62	4.3	5	20	B	7.4	878	1122	
90	国府津-松田	1928~1990	62	4.0	2	10	A	6.7	1853	147	(小田原)
98	丹 那	1931~1990	62	7.0	5	15	A	7.3	1930	70	北伊豆地震
110	森 本	1903~1985	82	1.7	1	18	B	6.0	1799	201	(金 沢)
117	跡 津 川	1895~1986	91	2.5	6	60	A	7.0	1858	142	(飛 驒)
125	福 井	1950~1978	28	3.0	6	27	-	7.1	1948	52	福井地震
156	阿 寺	1895~1986	91	1.1	4	80	A	7.8	1586	414	天正地震
162	根 尾 谷	1893~1984	91	1.7	9	60	A	8.0	1891	109	濃尾地震
167	柳ヶ瀬	1895~1984	89	1.8	7	37	B	6.8	1909	91	江濃(姉川)地震
184	平 岡	1895~1986	91	1.3	2	20	B	6.5 ~ 7.5	715	1285	(三 河)
193	鈴鹿山脈西	1893~1984	91	1.6	4	60	B	7.3	1819	181	
207a	深 溝	1974~1989	15	3.4	3	17	-	6.8	1945	55	三河地震
208	木津川東部	1893~1984	91	1.3	3	20	B	7.3	1854	146	(伊賀上野)
222	郷 村	1928~1977	49	2.5	6	15	-	7.3	1927	73	北丹後地震
228	鹿 野	1958~1979	21	3.0	3	8	-	7.2	1943	57	鳥取地震
238	比 良	1894~1984	90	3.0	4	16	B	7.6	1662	338	(琵琶湖西岸)
239	三 峠	1893~1984	91	0.65	6	30	B	5.8 ~ 6.5	1449	551	(京 都)
247	亀 岡	1893~1984	91	1.2	3	15	B	6.5	1830	170	(京 都)
249	山 崎	1893~1984	91	0.92	10	80	B	≥ 7	868	1132	(播 磨)
259	有馬-高槻	1893~1984	91	2.6	4	44	B	7.5	1596	404	(畿 内)
272	生 駒	1893~1984	91	1.8	4	21	B	6.5 ~ 7	1510	490	(摂 津)
338	水 縄	1892~1990	98	0.56	2	20	B	6.5 ~ 7.5	679	1321	(筑 紫)
360	布 田 川	1892~1990	98	2.6	3	23	B	6.3	1889	111	(熊 本)
S U	駿河トラフ	1981~1989	8	3.8	-	-	-	8.4	1854	146	安政東海地震
S A	相模トラフ	1925~1991	66	4.7	-	-	-	7.9	1923	77	関東地震

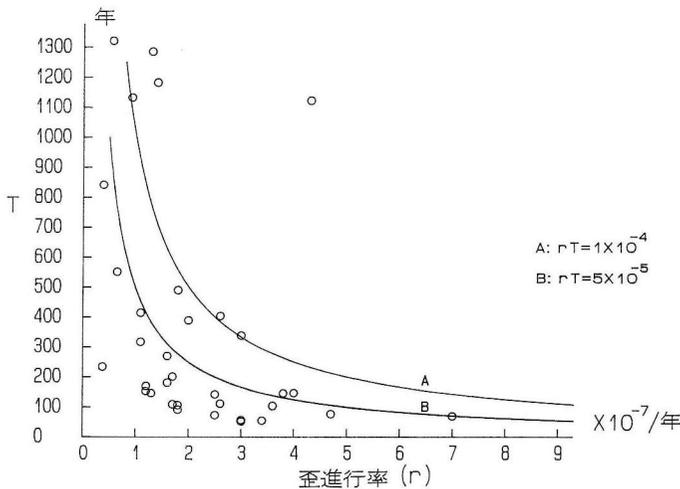


図3 表2の34個の断層に関する最終地震から西暦2000年に至る年数(T年)とその断層をカバーする地域の平均水平地殻ずれ歪の進行率(r: 単位 10^{-7} /年)との関係。AおよびBは、それぞれ $rT=10^{-4}$ および $rT=5 \times 10^{-5}$ に対応。

り立つと仮定すれば、その断層に関する歪進行率を用いて、将来における平均的地震発生時期の確率が算定可能となる。

(4) 歪進行率の異常値 表2および図3をみると、 $r = 4.3 \times 10^{-7}$ /年、 $T = 1122$ 年にプロットされている伊勢原断層の大きなずれが目につく。これはrが異常に大きい値をとることによると思われる。さらによく調べると、丹那や国府津-松田などの各断層のr値も異常に大きい。最近のGPS連続観測によると、南関東特に湘南-伊豆地区では異常に大きな歪進行率が得られている(多田堯, 私信, 1996)。水平ずれ歪進行率が全国ほとんどの地域で $1-2 \times 10^{-7}$ /年なのに、この地域では $3-5 \times 10^{-7}$ /年に達していることは明らかである。このような異常値は関東地震や北伊豆地震の余効や伊豆半島およびその東方の地下に存在するマグマの活動などの複雑な要因によるものと考えられる。いずれにしても、南関東地域については、歪進行率の評価やそれを用いる地震発生確率の算定に関して、他の地域とは異なった視点が必要であると思われる。

(5) GPS観測への期待 日本のGPS連続観測は、短期間のデータだけでも、従来蓄積してきた測地データに匹敵する成果をあげている。したがって、全国観測網がフル稼働すれば、より重要な

測地データの取得が期待され、活断層運動の解釈や地震発生確率算定などが画期的に進歩する可能性があると思われる。明治以来蓄積してきた日本の測地学成果との整合性を考えて、GPS観測がより一層発展することを望みたい。従来、日本の活断層研究はほとんどトレンディングを主とし、測地データと組み合わせることを考えていなかったが、本稿にのべたように、アメリカの例もあり、活断層学と測地学を組み合わせるアプローチをより重視すべきであろう。

参考文献

- 萩原尊禮編著, 1989, 続古地震—実像と虚像, 東京大学出版社, 434pp.
- 活断層研究会編, 1980, 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版社, 363pp. [新編 437pp., 1991].
- 国土地理院編, 1987, 日本の地殻水平歪(1985~1983), 国土地理院技術資料, F・1-No.6.
- 松田時彦, 1995, 活断層, 岩波書店(岩波新書), 242pp.
- 中根勝見, 1973, 日本における定常的な水平地殻歪(I), 測地学会誌, 19, 190-199.
- Prescott, W. H., and J. C. Savage, 1996, Great debates in Geodesy—Will a continuous GPS array for L.A. help earthquake hazard assessment?, EOS, 77, 417-427.
- Rikitake, T., 1983, Active fault and crustal strain, Earthq. Predict. Res., 2, 167-189.
- Rikitake, T., 1975, Statistics of ultimate strain of the earth's crust and probability of earthquake occurrence, Tectonophysics, 26, 1-21.
- 寒川 旭, 1992, 地震考古学—遺跡が語る地震の歴史, 中央公論社(中公新書), 251pp.
- Tsuboi, C., 1933, Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means, Jpn. J. Astron. Geophys., 10, 93-248.
- 矢口 彰, 1996, 測地観測センターGPS連続観測システム, 地震ジャーナル, 22, 24~30.
- [りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授]

飛び跳ねる自動車

兵庫県南部地震での激震動

翠川三郎

1. はじめに

「建物ごとゴジラに揺さぶられているのかと思った」「洗濯機の中でかき混ぜられるように揺さぶられた」「ジェットコースターに乗せられたように部屋が激しくうねった」

これらは、兵庫県南部地震での被災者の証言である。このような激しい揺れが定量的にどのようなものだったのかは、耐震工学の関係者ならずとも興味ある問題であろう。しかし、この地震の震度7の中心部では強震記録が得られておらず、激震域での地震動の特性については依然として不明の点が多い。

被災地の地震動強さを知るために、墓石の転倒調査がたびたび行われてきた。しかし、震度7に達するような激震時には、墓石はほとんどすべて転倒してしまい、墓石の転倒状況のみから激震時の地震動強さを推定するには限界もある。一方、激震時には石を始めとする物体の跳躍現象がしばしば報告されており、激震時の地震動強さを知る数少ない手がかりの一つとして注目されている(翠川, 1994)。

今回の地震でも、淡路島や六甲山地での石の跳躍現象(柳谷・梅田, 1995)や淡路島での鐘楼の跳躍現象(大町・本多, 1996)についての報告がある。筆者も神戸の激震域で跳躍現象について調査した。過去の地震で跳躍した石は、ある程度大きなもので多少地面に埋め込まれたものが多い。しかし、都市化の進んだ神戸の市街地ではそのような石はほとんど見あたらず、また、寺院の鐘楼の多くは倒壊し、明瞭な跳躍現象は確認できなかった。

筆者が自動車の跳躍現象の調査を始めたきっかけは、地震から約2カ月後のある新聞記事(『読売新聞』, 95/3/21)だった。

「炎は店に迫っていた。119番はつながらない。地震から20分後、Iさんはバイクで灘消防署へ走った。2台の消防車がガレージにあった。署員が首を振った。「衝突して動かせない。」」

このことは地震時に消防自動車が跳躍して壁や他の車に衝突したためだと思い、遅滞きながら各消防署を訪れて調査を始め、いくつかの消防署で消防自動車の移動の痕跡を確認した。その後、文献調査もしてみると、自動車の跳躍現象に関する証言が他にもいくつかみられた。ここでは、これらの事例について紹介し、これから推定される地震動強さについても考えてみたい。

2. 神戸市および芦屋市の消防署での自動車の移動事例

調査は地震から約3カ月後の4月中旬に行ない、神戸市および芦屋市の消防署で地震直後の消防自動車の移動の様子についてインタビューを行なった。補足的なインタビューを6月および12月にも行なった。地震の発生時刻が早朝であったにもかかわらず、消防署では24時間体制で常に署員が待機しているために、地震時および直後の様子がかかりはつきりと観察されていた。

a. 東灘消防署(JR住吉駅付近) 駐車してあった10台ほとんどが移動した。インタビューでは以下に示す4台について具体的な移動状況が確認された(図1参照)。

(1) スノーケル車が約3m後ろに移動し、後ろに駐車していた車のフロントガラスやバンパーを壊した。また、スノーケル車の右後輪前のステップの下(クリアランス約40cm)に高さ

東灘消防署

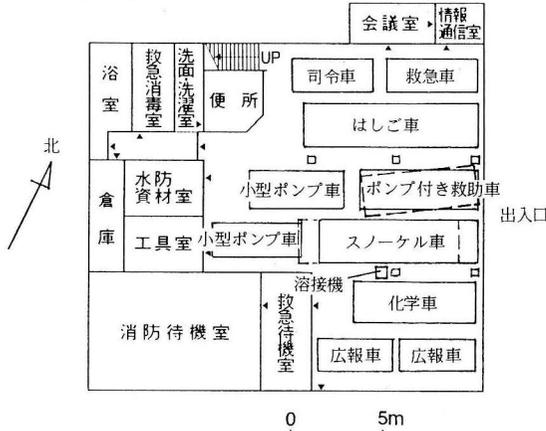


図1 東灘消防署での自動車の移動状況
実線は地震前の、破線は地震後の位置を示す。

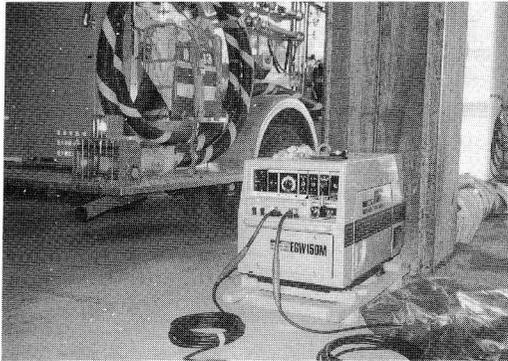


写真1 東灘消防署での消防自動車のステップにはさまれた溶接機 [同型機]

70cm のキャスター付きの溶接機がはさまれた。これは、地震時に車が飛び上がり、脇にあった溶接機がそのときちょうどステップの下に移動して、はさまれたためであろう。写真1に地震後に更新された同型の溶接機とスノーケル車のステップ部を示す。

- (2) ポンプ付き救助車が左右に揺れて柱や隣の車にぶつかり、ステップ・タイヤグリル・手すりなどが損傷し、最終的には左方向に回転した。
- (3) はしご車が左右に大きく揺れて横の柱にぶつかった。
- (4) 救急車が踊るように揺れた。

以下の署員たちの体験談でも自動車の移動の凄さがわかる。

“ものすごい衝撃で、ただの地震ではないと思

青木出張所

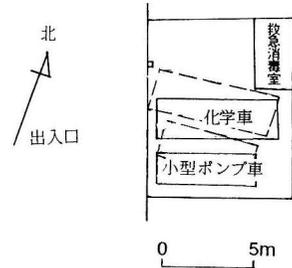


図2 青木出張所での自動車の移動状況
実線は地震前の、破線は地震後の位置を示す。

った。揺れが収まり、車庫に降りると、消防車やはしご車・救急車など、9台がごちゃごちゃになっていた”（毎日新聞大阪本社・毎日放送報道局、1995）。

“急いで車庫に出ると、暗がりのなかでガス臭が漂っていた。車庫内を見渡すと、スノーケル車は柱に寄りかかるように傾き、他の全車両が定位置から動いていた”（神戸市消防局『雪』編集部、1995）。

b. 東灘消防署青木出張所（倒壊した深江の阪神高速道路から約1km西） 2台の車が北に大きく（1.5m程度）移動した（図2参照）。

“ガレージでは2台の車が頭を北側に向けるように移動していた。化学車は後部がガレージの壁に激突しているようだった。”

と宿直中の署員は語っている（神戸市消防局『雪』編集部、1995）。

c. 生田消防署栄出張所（JR神戸駅付近） 7台の自動車のすべてが前後方向に移動した。救急車や小型ポンプ車は前に約1m移動し、シャッターにぶつかり、シャッターが変形しあきにくくなった（写真2参照）。化学車は後ろに約1m移動し、壁にあたって壁面をこわした（写真3参照）。他の車も後ろに2～3m移動した。

d. 兵庫消防署（湊川公園付近） 小型ポンプ車や救急車・指令車が1～3m前に移動した。写真4に示すように、地震直後には小型ポンプ車の先端は署員のいる位置まで移動していた。

“消防署の建物が分解するほどの揺れに見舞わ



写真2 栄出張所での消防自動車の追突で変形したシャッター
地震後に修理されており、地震直後はもっと変形していたという。

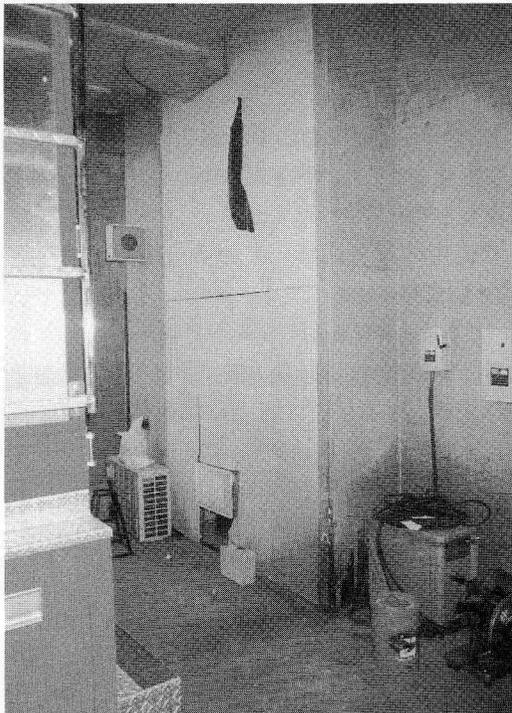


写真3 栄出張所での消防自動車の追突による壁面の被害



写真4 兵庫消防署での前方約3mまで移動した消防自動車

れた。揺れが終わると、非常灯が点灯し、事務所は踏み場もないほどに荒れ果てていた。ガレージでは車止めが散乱し、ポンプ車や救急車が歩道にまで乗り出していた。”

と署員は地震直後の様子を語っている（神戸市消防局『雪』編集部，1995）。なお、消防署では駐車中の車の前輪には車止めが置かれている。

e. 長田消防署（高速長田駅付近） 2台の車が車止めを乗り越えて約1m移動し、前面のシャッターに衝突し、フロントパネルなどが壊れ、シャッターが変形した。また、はしご車は、後方が約1m移動して右に回転した。指令車は右前輪がパンクしていた。これは跳躍して着地時に大きなショックを受けたためとの推測もできる。

f. 長田消防署大橋出張所（JR長田駅付近） 消防車が前面のシャッターに衝突し、シャッターが変形して開かなくなり、地震直後、消防車は出動できなかった。結局、シャッターは、地震の約1時間後に通りがかりのクレーン車に開けてもらったという。

g. 須磨消防署（JR鷹取駅付近） 署員が地震時にちょうど化学車の後部座席のステップに乗って点検していたところ、地震の揺れで振り落とされた。車が左右に横転しそうになりながらバウンドしたという。この車は最終的には1~2m後ろに移動した。

h. その他の消防署 この他、灘消防署、葺合消防署、水上消防署、兵庫消防署運南出張所でも、車が前後に1~2m移動した。一方、東灘消防署

深田池出張所、灘消防署青谷橋出張所、生田消防署、須磨消防署板宿出張所、同北須磨出張所、北消防署およびその出張所、西消防署およびその出張所、垂水消防署およびその出張所では、車の移動は確認されていない。

芦屋市では、芦屋市消防署で、1台が約50cm北西方向に移動し、柱にぶつかってミラーおよび車両の一部が破損した。東山出張所、芦屋浜出張所では移動はみられなかった。結局、神戸市および芦屋市の29の消防署（出張所を含む）の内の12カ所で自動車の移動が認められた。

3. 消防署以外での自動車の移動事例

警察署での自動車の移動についても調査し、断片的であるが、以下の移動例を確認した。西宮警察署では、大型バスが移動して数十cm離れた柱にぶつかった。生田警察署では、4輪駆動車や乗用車が1m程度移動して隣接の車に衝突した。兵庫区下沢通の自動車警ら隊駐車場では、2台の乗用車が1m弱離れた壁にぶつかった跡を残して、ほぼ元の位置に戻っていた。

被災者の体験談の中にも自動車の跳躍現象につ

いての事例がみられる。これらの内で最も印象的なものは、以下に示す新聞記者の体験談（神戸新聞社、1995）である。

“新谷と藤家に乗せたタクシーは三宮に向けて国道2号線を走っていた。中央区と兵庫区の境付近だった。新谷は約30m先に信号待ちのトラックをみた。タクシーがゆるゆるとスピードを落とす。軽くブレーキを踏んで停車しようとした瞬間、轟音とともに車が左右に揺れた。藤家のほうは追突されたような衝撃を覚えると同時に、目の前が光った。全身をかき回されるような激しい揺れ。（中略）正面を向き直ってギョッとした。信号待ちしていたはずのあのトラックが跳ね飛んでいる。ダーン、ダーン。4トンの車体は宙に浮いて、着地するたびに、すぎまじい音を立てる。”

この他にも、東灘区御影浜町では、西向きに停車中のタンクローリーがドーンというタイヤがパンクしたような大きい音とともに跳び上がり、車の右手の縁石も飛び跳ねたという運転手の証言がある。さらに、この地点から東のほうで、北向きに止めてあった同僚のタンクローリーは東へ飛んだのか、縁石に乗り上げたという

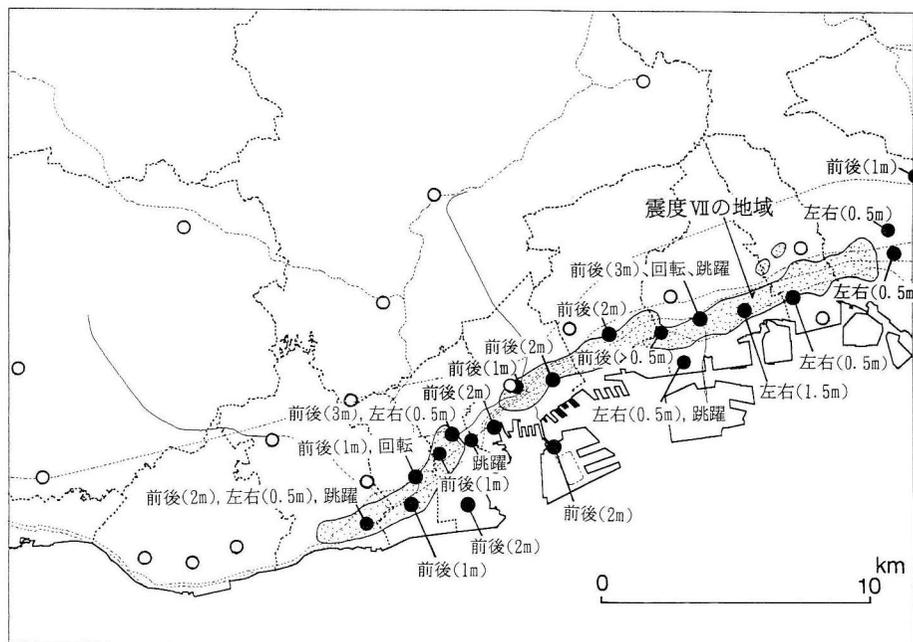


図3 各地点での自動車の移動状況

(佃, 1995).

東灘区御影石町では、車が高さ 12cm の車止めのブロックを乗り越えて北側へ移動した(白木, 1996). 西宮市甲東園では、自宅に駐車していた車が 1m 近く前へと移動していた。また、地震の衝撃で車は一旦、後退したらしく、建物とぶつかってトランクがグシャグシャとなっていた(田中, 1996). 西宮市市民運動場の西側(柳本町)でも駐車場に駐車していた車が跳躍して数十cm 北西に移動した痕跡がみられた(松田, 1995).

4. 自動車の移動から推定される地震動強さ

各地点での自動車の移動の様子を図3に示す。図中の黒丸は自動車の移動があった地点を示す。「前後(1m)」や「左右(1m)」はそれぞれ車が前後ないし左右に 1m 程度移動したことを、「回転」は車が水平面内で回転したことを、「跳躍」は車が上下に跳ね上がったことを示す。白丸は自動車の移動が確認されなかった消防署を示す。

最大の移動量は、前後方向で約 3m, 左右方向

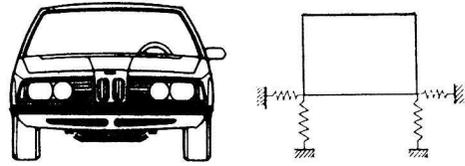


図4 簡単な自動車の振動モデル

で約 1.5 m である。移動方向は、おおむね南北方向のものが多く、今回の地震の震源域付近では断層と直交方向に地震動が卓越したこと(額、1996)と調和的である。図からわかるように、自動車が移動した地点は、震度 7 やその周辺の低地部に位置している。一方、六甲山やその周辺の台地部では自動車の移動は確認されていない。

自動車が移動した地点の付近で観測ないし推定された地震動(日本建築学会, 1996; 川瀬・他, 1996; 林・川瀬, 1996; 奥田・他, 1996)を整理してみると、前後方向の移動があった地点(葦合消防署・生田消防署栄出張所・水上消防署・生田警察署)付近では水平動の最大地動速度で 100 cm/s 程度の値が得られている。一方、左右方向の移動もあった地点(須磨消防署・東灘消防署青木出張所・芦屋市消防署)付近では 150cm/s 程度とやや大きな値が得られている。

地震時に自動車はどのように揺れたのだろうか。東灘消防署のスノーケル車や須磨消防署の化学車などの場合には、ポンポンと飛び跳ねながら移動した形跡がみられる。しかし、地震前後での移動距離だけしかわからず、自動車がどのような挙動をしながら移動したのかははっきりとしない場合が多い。

自動車の地震時の応答についていくつかの計算がなされており(小堀, 1982; 亀田・他, 1991), ロッキングやピッチングを含む複雑な振動をすることが示されている。実際に総重量約 10 トンの消防自動車のステップに地震計を設置して人力加振してみると、2~4Hz に複数のスペクトルのピークを持つ複雑な振動が測定される。

しかし、非常に単純化して考えれば、自動車は図4に示すような振動モデルで表せるであろう。このモデルはサスペンションを鉛直方向と水平方

ご 案 内	
地震ジャーナル ● 22号	
エッセイ 都市の地震防災 GPSとは ボリビア深発地震でわかったこと 鐘楼の跳ぶ話 再び起こるか!? 関東大地震 新しい震度階級の話 地震防災とマルチメディア 時間予測モデルとは パークフィールド探訪記 続 阪神淡路大震災と出版メディア 連載: その3 地震・津波探訪 地震予知連絡会情報	21 高秀秀信 村田一郎 杉 葉子 大町達夫/本多基之 橋本 学 北川良和 和田雄志 島崎邦彦 大志万直人 川端信正 力武常次 石井 紘
記	
ご購入料 1500円 [実費頒布: 送料共] お申込先 ☎101 東京都千代田区猿樂町1-5-18 財団法人 地震予知総合研究振興会 ☎ 03-3295-1966, 2217 [本誌綴込み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	

向のバネに置き換えたもので、水平振動ばかりでなく回転振動も生じる。その結果、水平動のみを入力してもモデルは水平方向ばかりでなく上下方向にも振動する。したがって、いくつかの地点で目撃されている車の跳躍が直ちに地震動の上下動成分が1gを越えたことを意味するものではなく、地震動による自動車の上下方向の応答が1gを越えたことを示しているに過ぎない。

このような自動車の応答によって、自動車は滑ったり放り出されたりして、移動したのであろう。物体の滑りに関して、タイヤと路面の間の動摩擦係数は、路面の状態にもよるが、タイヤがロックしているときで0.6程度の値をとる(服部, 1986)。タイヤと路面の間の摩擦係数を仮に0.5で一定とすると、初速度3m/sを与えると自動車は約1m滑ることになる。上下動の影響なども考えると、実際にはこれより滑りやすいものとも考えられる。物体の放出については、仮に放出角度を30°と仮定すると、物体に1mの移動を生じさせるには物体に約4m/sの初速度を与える必要がある。

これらの初速度は、地動そのものの値ではなく、自動車の応答量に対応するものである。仮に振動系の応答倍率を3倍と考えれば、概算ではあるが、100cm/s程度の地動速度があれば自動車の滑りによる1m程度の移動を、150cm/s程度の地動速度があれば自動車の跳躍による1m程度の移動が、それぞれ説明できることとなる。これらの概算値は、前述の自動車の移動が認められた地点付近で観測ないし推定された地震動強さとも整合している。

5. おわりに

ここでは自動車の移動事例について紹介したが、自動車の移動事例以外にも激しい揺れによって生じた現象は多数報告されている。これらの現象の中には、震源域での地震動特性についての情報が埋まっているはずである。残念ながら筆者の力ではこれを掘り出せずにいるが、今後も事例の収集やその解釈について検討を続け、震源域での地震

動特性を理解するための一助にできればと考えている。

謝辞 現地調査の際には、神戸市消防局はじめ関係各位のご協力をいただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 服部六朗, 1986, タイヤの話, 大成社.
- 林 康裕・川瀬 博, 1996, 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 481, 37-46.
- 亀田弘行・他3名, 1991, 耐震解析のための橋梁——車両連成系のモデル化とその動特性, 第21回地震工学研究発表会講演概要, 569-572.
- 川瀬 博・他3名, 1995, 余震記録に基づく兵庫県南部地震時の神戸市東灘区における本震地動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 476, 103-112.
- 小堀為雄, 1982, 応用土木振動学(改訂版), 森北出版.
- 神戸新聞社, 1995, 神戸新聞の100日, プレジデント社.
- 神戸市消防局『雪』編集部編, 1995, 阪神大震災 消防隊員死闘の記, 労働旬報社.
- 額嶺一起, 1996, カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震, 科学, 66, 2, 93-97.
- 毎日新聞大阪本社・毎日放送報道局, 1995, ドキュメント希望新聞——阪神大震災と報道, 毎日新聞社.
- 松田時彦, 1995, 活断層, 岩波新書.
- 翠川三郎, 1994, 地震時に物体の跳躍現象が生じた事例の調査, 地震, 47, 333-340.
- 日本建築学会, 1996, 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集.
- 奥田賢持・他5名, 1996, 兵庫県南部地震におけるNTT建物の地震記録について(その3)——常時微動による神戸駅前ビルの振動特性及び地表面波の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 547-548.
- 大町達夫・本多基之, 1996, 鐘楼の跳ぶ話——直下地震による跳躍現象, 地震ジャーナル, 21, 18-24.
- 白木万博, 1996, 阪神大震災の教訓と反省(体験記), 地震工学振興会ニュース, 146, 3-11.
- 田中康夫, 1996, 神戸震災日記, 新潮社.
- 佃 為成, 1995, 大地震の前兆と予知, 朝日新聞社.
- 柳谷 俊・梅田康弘, 1995, 1995年兵庫県南部地震による飛び石の調査, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会, 展示ポスター Q151.
- [みどりかわ さぶろう 東京工業大学教授]

VAN論議の顛末

不毛の論争か

力武常次

1995年5月11日～12日、ロンドンの王立協会 (Royal Society)で、地電流による地震予知法——いわゆるVAN法——に関する国際討論会が開かれ、その論議のプロシーディングスが刊行された。またアメリカ地球物理学連合の機関誌、*GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* (GRL)は、その23巻、1996年11号をVANに関する論争特集として発行した。

ギリシャの学者によって始められたこのVAN法は、特にマスメディアの注目するところとなり、日本でも「地震総合フロンティア研究」などの一環として、相当の国家予算をつぎこんで実施されようとしている。ここではVAN法発展と上記刊行物の概要を紹介しよう。

目次

1. VANとは

1.1 ロンドン会議

1.2 GRL 特集号

2. VANの始まりと経過

2.1 初期のVAN

2.2 VANと*Tectonophysics*誌

3. PROS & CONS

3.1 VANはあやしい?

3.2 VANはほんもの?

4. 今後の問題——特に日本での対応

または不当性をきちんと調べなければならないという気運が高まっていた。

1.1 ロンドン会議 上述のようなVANに関する情勢のもとに、国際学術連合会議 (International Council of Scientific Unions, 略称: ICSU) とイギリス王立協会 (Royal Society) はロンドンにVAN検討会議を招集し、9カ国から38人の学者が参加した。この会議はICSUの国際防災旬年 (International Decade for Natural Disaster Reduction, 1990-1999, 略称: IDNDR) 特別委員会委員長であるJ. Lighthill (高名な流体力学学者) が主催した。

課題は

(a) VANとは何か?

(b) VANによる地震予知は科学的に正しいか?

(c) VANには科学的に信頼できる根拠があるか?

であって、VANの正当性、特にVAN法による予知の統計的当否が議論された。

討論の結果は「Lighthill編、*A Critical Review of VAN-Earthquake Prediction From Seismic Electrical Signals*, 376pp.(1996)」としてWorld Scientific Pub. Co.より刊行された。本書はLighthillの緒言に続いて、つぎのような6部構成となっている。

1. VANとは

本誌17号 (バロトゥソス他, 1994)にも紹介されているように、VAN法とはギリシャのP. Varotsos, K. Alexopoulos および K. Nomicos (以下敬称略) などによって、地電位差の異常変化 (Seismic Electric Signal, 略称: SES) を観測して、地震発生を事前に予知する方法で、創始者3人の名前の頭文字をとってVAN法と呼ばれる。

近年、VAN法は成功率が高く、ギリシャではこの方法によって地震予知が公表され、実際に被害 (特に人的) が軽減された例があるとして、マスメディアにより盛んに取り上げられるようになった。しかし、この地震予知は偶然当たったようにみえるに過ぎないとの意見も強く、その正当性

I. VAN とは何か?

上田誠也 [日], Varotsos et al. [ギ], Nomicos [ギ]

日本の高名なプレート・テクトニクス学者上田が VAN の提灯を持つというのはいささか奇妙だが、彼は後でも述べるように VAN の熱心な支持者の一人で、日本でも VAN 法を展開しようと努力している。ここでは上田は短期的地震予知における有用性について述べている。

II. SES のメカニズム

Lazarus [ギ], Slifkin [米], Hadjicontis and Mavromatou [ギ], Bernard and LeMouël [仏]

地震発生前に SES と呼ばれる異常電気シグナルが出現するメカニズムについての議論であるが、もう一つ具体的でない憾みがある。

III. VAN への反論

Geller [米・日], 須藤 [日], Mulargia and Gasperini [伊], Wyss [米]

ここに述べられている各反論はかなり強烈である。特に Geller は、そもそも地震予知そのものが不可能であるとし、85 ページにもなる反 VAN 論 (必ずしも同意できない) を展開している。詳細は後述するが、いささかヒステリックに過ぎると思われるし、反論にこれだけのエネルギーを費やすことに意味があるのだろうか。Geller は日本の教育公務員の一人らしいが、日本の納税者は彼にこのような仕事ぶりを期待しているのだろうか。

その他の反論は、主として地震データの統計的性質に基づくもので、肝心の地球電磁気学の立場はどこかへ行ってしまっている。

IV. VAN 支持論

Park et al. [米], 浜田 [日], 長尾他 [日]

浜田は VAN のデータを全く信用したとして、統計的に SES による予報の有意性を述べ、この論文は VAN 一派の心の支えの一つになっているようである。しかし、もしデータに疑問があれば、結論は異なることになるであろう。

長尾らは金沢大学による能登半島先端部における観測により、能登半島沖地震 (M=6.6, 1993) に先行する地電位差異常変化 (この地域はノイズの小さな地域なので、信頼できると思われる) を

キャッチしている。

V. 関連した実験的研究

本蔵他 [日], 藤縄・高橋 [日], 榎本 [日], Kulhánek [スエーデン]

本蔵らは兵庫県南部地震 (M=7.2, 1995) 直後に淡路島で観測を行ない、SES に類似の変化を得ているが、決定的ではない。その他の日本からの寄与はより高い周波数によるもので、VAN に直接関係しない。スエーデンではグァテマラで VAN 法を実施することを考えている。

VI. 討論会での反応

金森 [日・米], Backhouse [英], Browitt [英], Lighthill [英], Keilis-Borok [ロ]

このうちで地震屋としての立場からの金森の議論には、傾聴すべき点がある。

1・2 GRL 特集号 前述のロンドン会議のプロシーディングスと前後して、アメリカ地球物理学連合 (American Geophysical Union, 略称: AGU) の機関誌の一つである *Geophysical Research Letters*, 略称: GRL) に、「Geller 編, “VAN” に関する論争 (*Debate on “VAN”*)」と題する特集号 (23 巻 11 号, 1996 年 5 月 27 日発行, p. 1291-1452) が刊行された。編集者は反地震予知・反 VAN で凝り固まった R. J. Geller である。

いささかわずらわしいが、以下に簡略化した日本語版目次を記そう。

Geller : VAN 法評価—編集者序文

Varotsos et al. : VAN 法の基本原理

Wyss : VAN の地震データの不備

Varotsos et al. : Wyss への反論

Wyss and Allmann : 地震予知の偶然性の確率

Varotsos et al. : Wyss and Allmann への反論

Kagan : VAN 法の統計的評価

Varotsos and Lazaridou : Kagan への反論

Mulargia and Gasperini : VAN 法の正当性, I および II

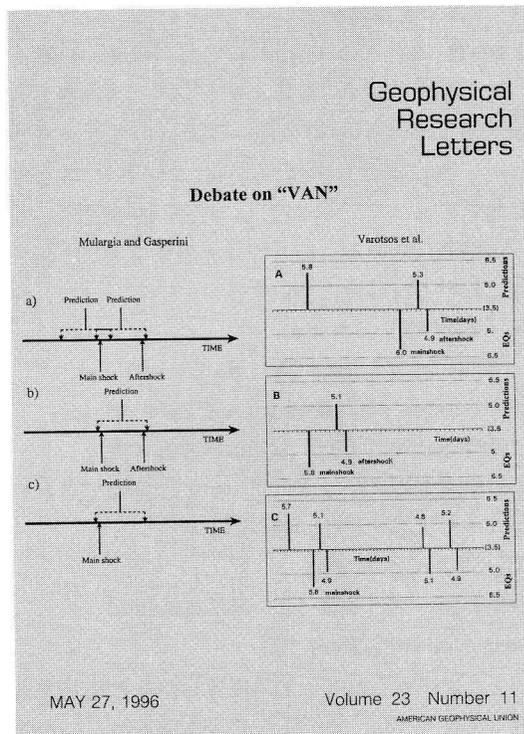
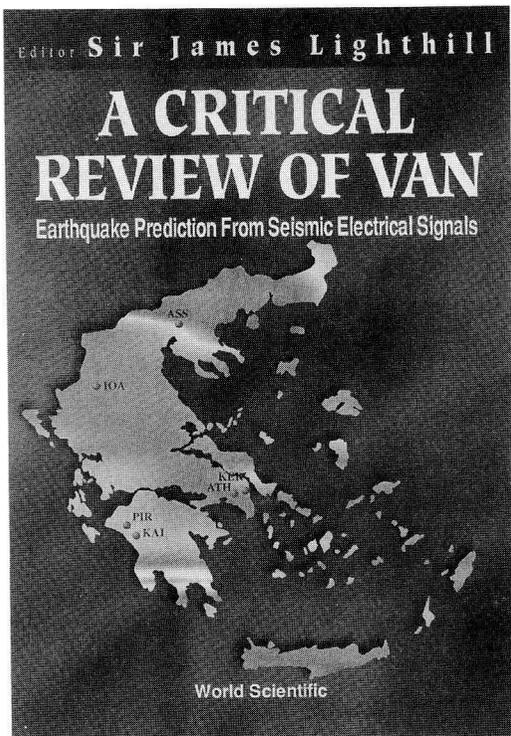


図1 ロンドン会議プロシーディングスとGRL特集

Varotsos et al. : Mulargia and Gasperini,
I および II への反論
 Mulargia et al. : Varotsos の反論に対する
再反論
 Varotsos et al. : Mulargia et al. への再々
反論
 Mulargia et al. : Varotsos et al. への再々
反論
 Varotsos et al. : Mulargia et al. への再々
反論への再々々反論
 Stavrakakis and Drakopoulos : VAN 法の
矛盾
 Varotsos et al. : Stavrakakis and Drako-
poulos への反論
 Drakopoulos and Stavrakakis : VAN の誤
報
 Varotsos et al. : Drakopoulos and Stavra-
kakis への反論
 Jackson : VAN 法の予知評価基準
 Varotsos et al. : Jackson への反論
 Rhoades and Evison : VAN 地震予知

Varotsos and Lazaridou : Roades and
Evison への反論
 Burton : 地震のさいころ遊び
 Varotsos and Lazaridou : Burton への反論
 Burton : Varotsos and Lazaridou への再反
論
 Varotsos et al. : Burton への再々反論
 Utada : 地震予知法の統計的評価の困難性
 Varotsos and Lazaridou : Utada への反論
 Stark : 地震予知の統計的意義
 Varotsos and Lazaridou : Stark への反論
 Riedel : 地震予知法の統計的テスト
 Tselentis and Melis : VAN について
 Varotsos and Lazaridou : Tselentis and
Melis への反論
 Honkura and Tanaka : ギリシャにおける地
震発生確率
 Varotsos and Lazaridou : Honkura and
Tanaka への反論
 Aceves et al. : 歴史地震カタログによる
VAN 法の統計的評価

- Varotsos and Lazaridou : Aceves et al. への反論
- Kagan and Jackson : VAN 地震予知の統計的テスト
- Varotsos and Lazaridou : Kagan and Jackson への反論
- Nagao et al. : VAN 法の独立したチェック
- Tselentis and Ifantis : 3年間の観測による地電位変化と地震
- Varotsos et al. : 冒頭の Varotsos et al. の論文による5つの示唆と本論争による追加的疑問

上記のように、うんざりするほどたくさんの論文が、160ページにわたって細かい活字で並んでいる。題目をみてわかるように、その多くはVANへの批判、それに対する反論となっている。反論への再反論などもあるし、どうも「水かけ論」的不毛の論争となっている気配がある。いずれにしても、これらの論文を克明に検討するエネルギーを持ち合わせている研究者は、あまり多くはないであろう。筆者もまたその一人である。それにしても、Varotsos一派が各論文に対し、いちいち反論（単にコメントと呼ぶのがふさわしい場合もある）している熱意とエネルギーには恐れ入るばかりである。

ところで、このように大勢の研究者が寄ってたかって論議した結果、何か決定的な結論に達したであろうか。それは以下の説明によって判断していただきたいが、筆者の考えでは非常に成功したとは思えない。

2. VANの始まりと経過

2・1 初期のVAN 1982~83年ごろと記憶しているが、AGUの機関誌 *Journal of Geophysical Research* (略称: JGR) 編集部より、筆者宛にギリシャの学者が投稿した地電流による地震予知に関する論文を評価して欲しいという要請があった。これは権威ある学会誌が投稿論文を処理するための標準的手続きで、通常複数の評者

の意見を求め、論文の独創性などが認められれば学会誌に掲載される。この論文は筆者にとってはじめてのVANへの接触であった。そのときの印象では、論文の記述はいささか杜撰であり、そのままでは受理がむずかしいというのが筆者の意見であった。

ところが、しばらくして日本の地球電磁気・地球惑星圏学会の機関誌 *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* (略称: JGG) に、先のJGRに受理されなかったのと全く同じ論文が送られてきて、またまた筆者に評価が要請されることになった。特に改善された点もなく評価の結果は明らかであった。JGRがだめなら、そのままJGG(恐らく他の雑誌にも送られたのではなかろうか)というのは、いかがなものであろうか。

1983年、ハンブルクで国際測地学・地球物理学連合(International Union of Geodesy and Geophysics, 略称: IUGG)の総会が開催されたとき、VANについての発表講演を聞く機会があったが、スライドはきたないし、論旨は不明確だし、あまり感心できなかった。そのころ、VANの観測室を訪れたアメリカの学者から聞いた話では、そこはアパートの一室であり、テレビのスイッチを入れると、記録がインパルスを示すということで、ちょっとお粗末に過ぎるということであった。

ところが、詳しいいきさつは覚えていないけれども、そうこうしているうちに、オランダElsevier社刊行の *Tectonophysics* 誌にVANについての論文(Varotsos and Alexopoulos, 1984 a, b)が発表された。筆者は少なくともこれらの論文の一部の評価にたずさわったように記憶しているが、あまり高くは評価しなかった。特に予知すると、その結果をギリシャ政府当局、日本(上田)、フランス(H. Tazieff, 高名な火山学者)、スエーデンの学者に電報を打つ(最近ではFAX)という点はあまり気に入らなかった。ギリシャ政府への打電はともかく、それ以外は事前に予知したという証拠を残すために、支持者に知らせているに過ぎないという風に受け取られても仕方がない。

日本では、かつて特別な虹を観測して地震を予知し、それを事前の日付の葉書で大学や気象庁などに知らせる人がいたが、何となく“はったり”かつ売名的であまり感心したものではなかった。この場合には、まず自宅宛にアドレスが鉛筆書きの葉書を出しておき（日付は消印で確認される）、後に宛先を消しゴムで消して、新しくアドレスを書き込み直接持参して郵便受けに投げ込んだとされている。VANの場合にも、このことが連想されたのである。また、この結果、予知がマスメディアに洩れたという説もある。

前述の IUGG ハンブルクの総会の際には、ユネスコおよび国際地震学および地球内部物理学協会 (International Association of Seismology and the Physics of the Earth's Interior, 略称: IASPEI) は 11 カ国の専門家を招集して、地震予知の基準（大げさには「地震予知憲章」）を討論する作業グループの会合をもった。日本からは筆者が参加した。その結果まとめられた基準に関する報告は、つぎのように、(a)予知の内容、(c)予知の評価、(c)予知の公表・伝達および、(d)外国地域の予知の 4 項目からなっている (IUGG, 1984; 力武, 1983)。

(a) 予知の内容——地震予知は今やデータ収集の段階を経て各種前兆についての仮説をテストする段階に達しているという認識のもとに、予知は地震発生を場所-期日-マグニチュードに関する確率的期待値として表現するよう努めるべきである。
(b) 予知の評価——地震予知は地震学界の適切な支持を得るべきである。したがって、地震予知にかかわる科学者は、予知情報を公開する前に、同僚科学者にその情報を批判してもらうべきである。地震予知に関する評価機関の存在する国においては、予知を指向する科学者は、その情報を当該機関にあらかじめ提供しなければならない。

地震予知を含む論文を掲載する学術誌の編集者は、当該の予知が地震学界の適切な支持を得ていることを確かめるべきである。

(c) 予知の発表・伝達——地震予知の情報を直接マスメディアに流すことは、場合によっては不

要な混乱を起こす基となる。したがって、予知を指向する科学者は、その情報を予知に対応すべき政府機関にまず提供するべきである。いずれにしても、科学者は不測の事態を引き起こす可能性のあるマスメディアへの対応について万全の注意を払わねばならない。

(d) 外国地域の予知——自国以外の地域に関する地震予知を指向する科学者は、その結果、引き起こされる社会的・政治的影響について、研究を始める前に熟慮しなければならない。また当該国の科学者の協力を要請しなければならない。最小限、当該国の適当な科学者および政府行政官が予知研究の進展状況をつねに把握しているよう取り計らうことが必要である。

VAN の情報取り扱い、この基準をきちんと守っているとは思えない。結果として情報が外国のマスメディアに洩れたりする点には批判がある。

2・2 VAN と *Tectonophysics* 誌 2・1 節

で述べたように、いくつかの専門誌では受理されなかった VAN 論文が *Tectonophysics* 誌では採用されて、1984 年に公表された。これは当時 *Tectonophysics* 誌の編集長をしていた上田の英断(?)によると思われる。この処置は前述の地震予知憲章 (b) 項に反するのではなからうか。筆者などを含む地球電磁気学専門家の否定的見解にもかかわらず、同誌への掲載を決定した上田の意図はどこにあったのであろうか。恐らく VAN 説を広く公開して、その当否をより広く論じようという点にあったと考えられ、その善意を疑うわけではないが、彼は当然その後の反響について、大げさに言えば「十字架」を背負ったことになる。

関東地震 (M=7.9, 1923) 前後から地震に関連する地電流観測 (Shiratori, 1925; 萩原, 1948) が行なわれている日本では、特に上田 (1985) の VAN 法紹介記事をきっかけとして、VAN に関する関心が高まった。このへんのいきさつは力武 (1985) に述べてある。

1984 年 1 月、駐日ギリシャ大使より連絡があって、ギリシャの地震対策委員会で VAN 法に



写真 Varotsos 夫妻

よる地震予知についての評価を行なうので、アテネに行って欲しいとのことであった。残念なことには、筆者は中国に出張する予定になっていたの、この会がどうなったのかはよく知らない。その後ギリシャ地球物理学連合より、VAN 法を詳しくレビューするよう大量のギリシャ国内出版物を添えて依頼があったので、いささか真面目に検討してみたが、VAN が地震前兆としている変化が確かにそうであるとするには、説得力に欠けているという結論となった。当時の記録によると、VAN がシグナルだとする変化は筆者にはノイズとしか見えなかった。

一方、同年後半 VAN 支持グループがアテネでワークショップを持ち、この研究を大いに推進すべきであるとする決議を行なっている。このようにして、VAN の研究はその後も続行され、日本への導入も上田およびそのグループ（例えば、上田・長尾、1994）などによって進められてきた。

このように述べてくると、VAN の中心人物である Varotsos (写真、夫人は M. Lazaridou) は、いかにも“はったり”に満ちた独善的人物であるかのような印象を与えるかもしれないが、それは間違いで、むしろ控えめな態度の好感の持てる物理学者である。彼はいつでも黒いネクタイをしているが、上田によると、彼は父の死を悼んで終生黒タイに徹すると言っているとのことである。Varotsos がなぜ VAN にのめり込んだかについては、上田 (1985) などの解説にゆずり、ここでは触れない。

3. PROS & CONS

ここでは、本稿の主題である 1・1 節のプロシーディングスおよび 1・2 節の特集号の主要論文の論旨を紹介しよう。あまりにたくさんの論文があるので、主として上田、Geller、Wyss および浜田などの所論に重点を置いた。

3・1 VAN はあやしい? ロンドン会議の冒頭における導入論文において、上田は VAN に対する批判の主要点は、つぎの 4 点であるとしている。

- (1) SES (異常信号) はノイズか?
- (2) VAN 予知の成功率は VAN 一派の主張より低いのか?
- (3) 偶然で説明可能?
- (4) 物理的メカニズム不明?

上田によれば、ポイント(1)のハード面についての疑問はほぼ完全に除かれているとしている。1990 年代になってから、レビューのために *Tectonophysics* 誌から筆者に送られてきた VAN の論文 (後に同誌に掲載) においては、観測装置が大幅に改善されているように見えることは事実である。初期においてはフィルターを使用していなかったこともあり、信号が甚だ見にくかった。長さの異なる 2 つの測線を用いて、地磁気変動による誘導電位差や人工的擾乱 (降雨の影響など) を除去するというソフト面の工夫もあり、ノイズはすべて除去されて、SES は抽出可能だとしている。筆者の長年にわたる経験によると、いわゆる「ほんもの」はパッと見てそれとわかるのが常であるが、SES はその域には達していないようである。

論点(2)と(3)については、統計をいかなる立場で行なうかによるとして、VAN は有意であるというのが上田の結論である。果してそうであろうか? 後述の各反論をどう評価するかで結論は異なる。

ポイント (4) については、ディスロケーションに伴う電流生成や流動電位など可能性はいくつ

かある。筆者の考えでは、メカニズムの理解はともかく、確実な変化を捕らえることがいざばんだ切であろう。

Geller の VAN 批判は長広舌に過ぎる。しかもいささか八つ当たり気味で、地震予知不可能論から始まっている。このような場違いの論議をここに詳説する気はないが、地震予知にケチをつけようとするいわゆる「為にする」議論が多いことは気に入らない。例えば、地震予知が出されるとすれば、都市を脱出しようとする自動車が高速道路を埋めて大渋滞を起こし、阪神・淡路大震災のときのように、高速道路が崩壊すれば、予知が出されていないときよりも大火災によりかえって多くの死者を出すなど、というのは詭弁としか受け取れない。

Geller はロンドン会議の上田の講演は、彼がしばしばやる通俗講演に過ぎない（ある程度は真か？）とこきおろし、VAN はいわゆる「病的科学」* (pathological science) だと断じている。これはノーベル賞学者の I. Langmuir (1989) がシンチレーションの計数などについて論じたもので、感度ぎりぎり、あるいは先入観念の強い測定などに際して、科学者が陥り易い研究だとし、脚注にあげるような場合に多くあらわれるとしている。Langmuir によれば、例えば「空飛ぶ円盤」(UFO, flying saucer) などは、その典型的なものだとされている。

しかし、VAN をこのように研究価値のないものだときめつけてよいであろうか。先年、筆者が日本地震学会の英文機関誌、*Journal of Physics of the Earth* (略称：JPE) に「地震宏観前兆」に関する論文 (Rikitake, 1994) を投稿したとき、論文の査読者の一人 (氏名不詳) から、「これは病的科学に過ぎない」と指摘され、対応

に骨を折ったことがあるが、ここでの VAN への批判と同等ということになる。しかし、地球科学では現象があまりすっきりしない場合でも、何がしかの真理を含んでいるとしたら解析しなければならぬことも多いのである。

Wyss によると、VAN が電報発信などに用いていたマグニチュードはどのようなマグニチュードであるかよくわからなかったが、近頃表面波マグニチュード M_s (VAN) であることが判明し、アテネ観測所 (Seismological Institute National Observatory Athens, 略称：SINOA) の発表する ML (ATH) との間に、およそ、

$$M_s (VAN) = ML (ATH) + 0.5$$

の関係があるとされている。

VAN は時に応じて、この両方を使い分けている場合もあり、地震発生後にマグニチュードを調整している場合もあるとされている。さらにアメリカ地質調査所 (U. S. Geological Survey, 略称：USGS) による暫定マグニチュード M_s (PDE) の使用や浜田による M_b (USGS) の導入などもあって、話が混乱している。

しかし、最近では予知されたマグニチュードと実際のマグニチュードの差を ΔM として、

$$\Delta M \leq 0.7$$

ならば、マグニチュードに関する予知は成功としている。Geller の言うように、これはエネルギーにすると 0.03~30 倍の広範囲にわたっている；つまり約 1000 倍のダイナミック・レインジをカバーしていることになり、SES の振幅にそんには大きな差がないことを理解しがたい。このマグニチュード差は、例えば関東地震 ($M=7.9$, 1923) を予想したのに兵庫県南部地震 ($M=7.2$, 1995) くらいのものである (もしくは、その逆) ということであり、実用的

*病的科学の症候 ▷観察される最大の効果はほとんど検出されないくらいの強さしかもたない原因の担い手によって生ずる。そして効果の大きさは、原因の強さにはまったく依存しない。

▷効果は検出の限界に近い大きさであり、また結果の統計的意味が非常に低いため多くの測定が必要とされる。

▷高い精度が主張されている。

▷経験に反する夢のような理論が提案される。

▷批判されると即座にアドホックな言い訳が考えられる。

▷支持者の批判者に対する割合が 50% 近くまで上がりはするが、その後徐々に忘れ去られる。

表1 VANの先行時間の変遷

時 期	先 行 時 間
1981年初め	数 分
1981年終り	7時間および20分
1983	6~11時間
1985~87	≤1週間
1991~95	1月のオーダー
1991~95	≤11日
1991~95	≤22日

には ΔM をもう少し小さくとらねばならないであろう。先行時間Tについても、VANは表1のようにいろいろと変化させている。VANによれば、SESのタイプによってTが異なるとし、例えばGVEF (Gradual Variation of Electric Field) と称する数週間にわたる電位異常については、Tは当然大きくなる。Wyssは、研究が進展するにつれて、仮定が変わることは当然かもしれないが、VANは何の断りもなく勝手に変更したとしている。VAN予知の評価に際して、浜田は、

$$\Delta T \leq 22 \text{ 日}$$

なら成功として取り扱うことにしている(少し甘いのではなかろうか)。

VANによれば、一つの観測点では特定の震源域からのSESだけが観測されるという不思議な(?) 選択規則(selectivity)があり、SESを観測すれば震源域の見当がつく。こうして震央が予知され、震央距離rの誤差を考えると、

$$\Delta r \leq 100 \text{ km}$$

なら、予知は成功とするのがVANの立場である。

ちなみに、SESの振幅(電位差)EとマグニチュードMとの間には、

$$\log(Er) = aM + b$$

という経験的關係があり、この式によってMが定まる。aとbとは観測点に固有の定数である。

Gellerによると、1987~1995年の期間で、ギリシャで起こった $M_s(ATH) \geq 5.8$ の大きな地震について、VAN法の成功・失敗を表示すると、表2のようになる。ここまで述べたことによって、判定条件をきびしくすれば、当然成功率は下がるが、表中の記事にあるような条件を考慮して、中立的および批判的判定を下せば、成功数がVANの8個に対し、それぞれ3および0個となってしまう、厳密な意味ではVAN法は役に立たないということになる。

VAN法および上田グループの日本国内における同様の観測を批判した小嶋(1992)は、当時のVANのデータ($M_s > 4.3$)について、上田が予知電報21回、成功数13回(うち M_s 不詳1回)、したがって成功率62%としているのに反論して、地震データは28個あり、成功数12個であるので成功率は43%となるとしている。さらに震央が2カ所予想された場合は、判定の基準から除くべきであるとして、7個の地震を除外すると成功率は18%に過ぎないとしている。

要するに、判定の基準をどうとるかによって、予知の成功率は大きく変化してしまうので、当たったとか当たらなかったという議論にはあまり意味がないのではなかろうか。筆者の意見では、「○○地域に○○年(月、日)から○○年(月、日)以内に、マグニチュード○.○(もしくは、それ以上)の地震が起こる確率は○○%である」というような情報を出すようにするべきである。あまりに断定的予知情報を出して、主観的な条件に基づいてその当否を論じて、あまり意味がないのではなかろうか。

3.2 VANはほんもの? 3.1節では

VANへの反論をクロズ・アップさせたが、つぎに述べるようなVAN法の肯定論もある。例えばロンドン会議のプロシーディングス中の浜田論文やHamada(1993)などではVAN法によ

表2 1987~1995の期間における $M_s(ATH) \geq 5.8$ に対するVAN予知(Gellerによる)

No.	年月日	成 功 ・ 失 敗			記 事
		VAN	中立的	批判的	
1	1987/02/27	○	○	×	記述不十分 群 衆 マグニチュードなし — $\Delta r \approx 140\text{km}$ $100 < \Delta r < 120\text{km}$ — $\Delta T > 31\text{日}$ — $\Delta T > 40\text{日}$ $ \Delta M > 0.7$ $ \Delta M > 0.7$
2	88/05/18	○	○	△	
3	88/10/16	○	×	×	
4	89/03/19	×	×	×	
5	89/08/20	×	×	×	
6	90/06/16	○	×	×	
7	90/12/21	×	×	×	
8	93/03/05	○	○	×	
9	94/02/25	×	×	×	
10	94/04/16	○	×	×	
11	95/05/04	○	×	×	
12	95/05/13	○	×	×	
成功数		8	3	0	

表3 マグニチュード別の VAN 予知成功率
(浜田による)

マグニチュード範囲	予知された地震数	全体の地震数	成功率
ML(ATH) ≥ 4.0	9	122	7%
ML(ATH) ≥ 4.5	6	33	18%
ML(ATH) ≥ 5.0	5	8	63%

る予知は有意であるという結論になっている。

浜田は、緯度 35.7~41.1° N, 経度 19.2~26.3° E のギリシャの領域において、1987年2月26日から1989年7月5日にわたる861日を選び、ML(ATH) ≥ 5.0の地震に関するVANの予知について調べた。この場合には24回の予知について、18回成功、6回失敗ということになる。判定の条件は前にも述べたように、 $\Delta T \leq 22$, $\Delta r \leq 100\text{km}$ および $\Delta M \leq 0.7$ (筆者には甘すぎるように受け取れる) である。もう少しマグニチュード幅を変えた範囲で調べると、表3のようになって、大きな地震ほど成功率が高いことがわかる。この点は重要で、数少ない大きな地震の予知がよりの確であることは、上田も指摘しているように、偶然に予知が当たったとは考えにくいことになる。

3・1および3・2節の結果をみると、予知が当たったか外れたかというのは、主として判定条件に支配されるので、その条件を規定しないで議論しても、全く不毛の水かけ論となってしまうことは明らかであろう。浜田のほかにも、VANの肯定論があるが、あまり煩雑になるので省略する。

なお、ここで注意しなければならない点として、VAN予知の対象となるM=5級地震の多くは、アテネ西方200km付近の地域で発生する。したがって、でたらめにときどき予知を出していれば、一見適中したように見えることもある。例えば、地震がよく起こる日本の茨城県沖合などで同様のことを行なえば、このような「by chance」の適中率はかなりあるかもしれない。しかし、このようなby chanceの影響を考へても、VAN予知は有意だと議論もある。

もう一度繰り返すが、そもそもVAN予知の基本となるSESの話はどこかに行ってしまうと、

多くの議論は地震統計に終始しているのが今回のVAN論議の特徴で、この点はあまり気に入らない。統計の前提条件を指定すれば、場合によっては結論はどうにでもなる。筆者の意見では、VANグループ以外(例えば上田グループでもよい)の研究者がギリシャに乗り込んで、VANと平行に比較観測を実施すべきであろう。このような独立な観測が同時にSESをきちんと観測すれば、信頼度は大いに高まるであろう。

折しも折り、1996年8月7日『朝日新聞』の夕刊(東京版)は、最近のGRLにアテネ大学の別のグループが、独自の地電流観測を実施して、VANがSESと判定した変化との同時観測から、VANの信号は人工的ノイズであるとする論文を発表したことを報じている。この論文(Gruszow et al., 1996)をまつまでもなく、独立な観測が重要である。

4. 今後の問題 特に日本での対応

阪神・淡路大震災のインパクトもあって、科学技術庁は地震・地殻変動などのメカニズムや前兆を解明することを目的として、創造的な基礎研究を行なうため、従来の固定化した研究体制を超えて研究者を結集させ、平成8年度より約10億円の予算規模で「地震総合フロンティア研究」(Earthquake Integrated Frontier Research)を開始する。この計画はつぎの3つに大別される。

(1) **新手法に係わる研究** 理化学研究所における「地震国際フロンティア研究」——地電流や電磁場等の前兆現象の基礎研究(VAN法を含む)

宇宙開発事業団における「地震リモートセンシングフロンティア研究」——衛星データを活用した地殻変動観測など(合成開口レーダーによる地殻変動検出、衛星による異常電磁波放射観測)

(2) **新観測研究** 動力炉・核燃料開発事業団による「陸域地下構造フロンティア研究」および

海洋科学技術センターによる「海底地下構造フロンティア研究」

- (3) 新地震防災研究 日本原子力研究所による「耐震安全・防災フロンティア研究」

このようなフロンティア研究全体の当否の論議はともかくとして、日本におけるVAN法のテストが本格的に取り上げられることとなったことは注目に値する。日本ではギリシャとは異なる地質構造、極端に多い電氣的ノイズなど、不利な点が多いが、VAN法類似の研究をきちんとやってみて、その限界を明らかにする必要がある。

過去において上田グループ（理化学研究所のフロンティア研究に参加するといわれる）は、不十分な予算でNTTなどの電極に依存する研究を続けてきたが、今回は年間億のオーダーの経費による研究ということになり、ここ数年、上田グループが模索を続けてきた経費の問題は一応解決をみたのではなかろうか。だとすると、これからが同グループの正念場である。VANについていささかはしゃぎ過ぎの感のあった同グループの腕の見せどころであり、健闘を祈る。

なお、詳細は知らないが気象庁や北海道大学でもVAN法類似の観測を実施すると聞いているので、これらのグループがそれぞれ有意な結果を導き出すことを期待したい。

ここで最後にマスメディアへの希望を述べておきたい。Geller 論文にもあるように、マスメディア（特に日本の）はVANについて異常ともいふべき関心を持ち（時にはオーバーで不正確）、自分で判断できる学者はともかく、科学行政当局は場合によっては迷惑したこともあるであろう。今後はより正確な報道に徹していただきたいし、メディアに應對する研究者も“はったり”的言辞は避けるべきである。

文 献

- R. J. Geller 編, 1996, Debate on "VAN", *Geophys. Res. Lett.*, 23, No. 11, 1291-1452.
S. Gruszow, J. C. Rossignol, A. Tzani and J.

- L. Le Mouél, 1996, Identification and analysis of electromagnetic signals in Greece :the case of the Kozani earthquake VAN prediction, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2025-2028.

萩原尊禮, 1948, 地震前兆に関する電磁現象, 学術研究会議, 震災予防委員会, 研究報告, 6, 1-28.

- K. Hamada, 1993, Statistical evaluation of the SES predictions issued in Greece :alarm and success rates, *Tectonophysics*, 224, 203-210.

- IUGG, 1984, Code of Practice for Earthquake Prediction, *IUGG Chronicle*, No. 165, 26, Feb.

小嶋美都子, 1992, 地震予知——地電流による可能性, 地震ジャーナル, 14, 20-30.

- I. Langmuir, 1989, Pathological science, *Physics Today*, 42, 36-48. 日本語版 (西尾成子・小島智恵子訳), 1990, *パリティ*, 5, No. 12, 20-29, 1990 ; *パリティ*, 6, No. 1, 32-38, 1991.

- J. Lighthill 編, 1996, *A Critical Review of VAN Earthquake Prediction from Seismic Electrical Signals*, World Scientific Pub.Co., Singapore, 376pp.

力武常次, 1983, 実用化をめざす地震予知——予知体制と実施基準, *科学*, 53, 697-702.

力武常次, 1985, ギリシャにおける地電流による地震予知, *科学*, 55, 729.

- T. Rikitake, 1994, Nature of macro-anomaly precursory to an earthquake, *J. Phys. Earth*, 42, 149-163.

- K. Shiratori, 1923, Notes on the destructive earthquake in Sagami Bay on the first of September, 1925, *Jpn. J. Astr. Geophys.*, 2, 173-192.

上田誠也, 1985, ギリシャの地震予知, *科学*, 55, 180.

上田誠也・長尾年恭, 1994, 地震予知: 観測と基礎研究, そして“地電流”法, 地震予知研究シンポジウム, 7-15.

- P. Varotsos and K. Alexopoulos, 1984a, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 110, 73-98.

- P. Varotsos and K. Alexopoulos, 1984b, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, Determination of epicenter and magnitude, II, *Tectonophysics*, 110, 99-125.

- P. バロトゥソス, K. エフタクシアス, M. ラザリドゥ, G. アントノプーロス, J. マクリス (訳: 上田誠也), 1994, VAN 地震予知法, 地震ジャーナル, 17, 18-26.

[りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授]

地震と短歌

岡井 隆

—

本誌の20号～21号に「阪神大震災と出版メディア」がのっている。そこに歌集・川柳集・詩集の名がみられるが、わたしは、二つの歌集を知っているだけで、詩集は（たまたま図書館で目にした一冊以外は）読んでいない。

短歌と地震について書くのであって、なにも阪神大震災の短歌について書くわけではない。しかし、材料は多に越したことはなく、詩や小説と比べながら考えるのは悪くない方法だ。そう思いつつ、また、別段、資料にとらわれることなく、書いてみよう。

大正十二年（1923）の関東大震災は、M7.9、死者99331、行方不明43476といわれている（『日本の自然』、岩波新書、中野尊正・小林国夫）。べらぼうな数の死者・行方不明者であるが、もちろんそれは、場所が関東南部の、いわゆる首都圏だったためだろう。

この時に、雑誌『アララギ』の編集者島木赤彦は、多くの会員の大震災関係の歌をあつめて『灰燼集（かいじんしゅう）』を作った。そして、その「巻末小言」の中で、次のように言っている。

「今回の震災の如き異常なる地変に対して、その感銘を捉へ得るのは、非常なる多力者に須たねばならない。浅くして妥協し、軽くして喧燥に終わるやうな作品の多いことは、大正歌人の誇りにはならない。」

これは、なかなか良いことを言っていると思う。明治の正岡子規による新派和歌（短歌革新の結果生まれた、近代短歌）は、日常生活に即して歌を作るという方法によって、ふるい〈和歌〉の体質（たとえば『百人一首』によって代表されるよう

な詠風）を、近代化しようとした。この際、近代化とは、言うまでもなく、西ヨーロッパの近代詩歌や、近代絵画の影響下にあつて、短歌を西欧化しようとする努力を指す。近代日本の文化や風俗と同じ軌道の上を走ろうというのである。

むろん、この近代化には、科学（自然科学や、それを源とした技術）の影響も大きい。短歌に科学の影響なんて、ほんとにあるのか。わたしは、いくつも証拠があがるように思えるが、この議論は省く。

さて赤彦は『灰燼集』の歌について「少なくとも三四ヶ月の苦心を累ねて居り、数に於ても、選ぶが上に更に厳選してゐる。」と言っている。この本は、震災から八箇月たった翌大正十三年五月に出ている。あとで言うが、『阪神大震災を詠む』（朝日新聞社歌壇俳壇編）は、震災の三箇月後、四月十日刊である。わたしは、この阪神大震災の歌どもに「浅くして妥協し、軽くして喧燥に終る」嫌いがあると思うのであるが、単なる偏見でなければ幸いである。

『灰燼集』の中でも、特に注目をひいたのは、横浜の築地藤子であった。すこしずつ、歌の解説を加えながら、引用する。

九月一日横浜の我家にて

地震のなかに眠りゐる子を抱き上げ歩むとすれば家はくづれつ
耳すませば此静けさや両肩に掛る柱をいかでかの退けむ

こういうところから始まっている。地震にあった人は、やはり、その瞬間の体験から話しはじめる。そして、短歌は、散文にくらべると、やはり描写力は弱いのである。上の歌をみても、眠って

いる子を抱き上げて歩もうとしたら家がくずれたとか、しんとしずまった中で、肩にかかった柱をどうしたら取りのぞくことができようか、と言っているだけだ。ただ散文とちがうのは「家はくづれつ」とか「いかに退けむ」といった「つ」「む」のような助動詞によって、感情を伝えようとしているところである。「つ」も「む」といった助動詞は、古語であって現代語ではない。口語でなくて文語である。つまり、ふつうの伝達の方法ではなく、少々風変りな伝達方法である。短歌が、散文の報告類にまじって多少の存在理由を主張できるとしたら、古風ではあるが、古来のことばの響きを保持した、こういう一見時代ばなれした表現にある、とわたしは思っている。逆説ともいえるが、文語を基本とした短歌のいいところは、ここにあるのである。だから、築地藤子の歌でも

つなみ来とたちまち伝ふる声ぞする今はた何を
驚くべしや

山の上へ逃るる我は子を背負へりかへり見すれば
家はすでに火なり

見ず知らぬ人が飯食む即ち行き吾子に給へと頭
を下げつ

知る知らぬ人も嘆きを共にせり清水汲みつつ相
ゆづるなり

のような、古典調の活きた作品に、むしろ惹かれる。もう作品発表の時には、大地震はすぎている。情報としては何も新しいことはない。反芻して伝えようとしているのは、情報ではなく、感情である。抒情詩の本質はそこにあるはずだ。ただ、その感情をのべるに必要な、最小限の事柄を、しっかりと核心をつかんで簡潔にのべることによって、感情は伝わるのである。言葉は古くてもかまわない。この五・七・五・七・七の詩型にふさわしい言葉でありさえすればいい（ただ、大正末ごろの日本人＝読者は、現代の人よりも文語表現に慣れていただろうことは考えられる。たとえば大正期の新聞の社説は文語調だったし、庶民の手紙文にも候文がまだ濃厚にのこっていた）。

もうすこし実例をあげてみる。津田百合子は「処用のため幼児を家に残しおき、横浜におもむ

きて震災にあふ」といった状況にあった。

我命あやふかりけるたまゆらも吾子を気づかふ
心せまり来
津田百合子
はりまさる乳しぼり居り吾子今は誰がふところに泣きてやあらむ

この場合もそうだが、皆、現在形で歌われている。この歌が歌集になる時点では、児の安否もわかっている。帰宅して無事だったとって泣く歌が、あとに出てくる。現在形で作って、臨場感をあらわそうとするのは、昨年の神戸の場合にも多くみられた。それと、多く女性の歌が、関東大震災の時に寄せられ、家族（子や夫や母や父）に関する歌が、多く作られたことも、当然のようだが、注意してよいことだろう。たとえば、この首都の大災害によって、日本はどうなるだろうとか、政府の対策はどうなのか、とか、他県からの救援はどうなのかといった歌は、あまり見られなかった。

高田浪吉は専門の歌人の一人として、この関東大震災の中で、東京下町で、母と妹三人を失った現実を、次のように歌って注目された。

母うへよ火なかにありて病める娘をいたはりかねてともに死にけむ

いとけなき妹よ泣きて燃えあがる火なかに一人さまよひにけむ

まがつ火のみなぎりし夜や明けはてて向ひの川岸に人よぶこゑごゑ

自分自身、川にとびこんで、やっと命を助かったのであった。浪吉の師の赤彦は、九月三日に信州の家を出て六日に震災地を訪れている。作られた歌は、しかし、浪吉の話をとり入れた形の、次のようなものだ。

現し世ははかなきものか燃ゆる火の火なかにありて相見けりちふ
赤彦

「相見けりちふ（お互いに相手をもとめたということだ）」に哀感はあるが、被災者と見舞うものの立場の差は、浪吉の歌や藤子らの歌とくらべ

れば、はっきりしている。赤彦が一つだけ、社会的な事件として記憶しているのは「相生警察署長が、群集に向ひて、被服廠跡に盾れよと言ひしは、当時にありて已むを得ざるに出てたるべし。責を感じたる心中推測に堪へず」と詞書して、書いた。

ひろ場^{には}に人を死なせむと思はめや己れを悔いて
命断ちつる

という一首であった（「この被服廠跡というひろ場で人を死なせようと彼が思ったのであろうか、そんなことを思ったわけではない。それなのに自責の念にたえず、彼は自殺してしまった」の意）。

二

中村憲吉は、周知のように、『アララギ』の初期同人で、島木赤彦や斎藤茂吉らと同じく伊藤左千夫門下の歌人であるが、この人は、大正十二年、大震災時には大阪に居た。毎日新聞の記者をしていて、情報の一番入りやすいところにいた。「九月一日には正午に近く、大阪でも微震を感じたが、それが関東地方に有史以来の大惨災を起してゐるとは、誰人も想像しなかった。唯、一時に帝都へ通ずる総ての通信機関が働かなくなったので、深い疑惑が人心を包んだのである。然し、夜に入るも帝都は依然として風聞にその音信を伝へぬため、人々は次第に不安の念に駆らるるに至った。」こういう前書きをつけて、次のような歌を並べている。

大きみの国のうれひの夜に入れり都のたより遂
にきこえず
すでに聞けば富士山帯^{なる}に地震おこり土裂けて湯
気を噴きてありちふ
みむなみの遠き島より呼ばしめし海底線も伊豆
に断れをり
みやこべへ言^{こと}かよふべく海にくがに術^{すべ}のつきつ
つ遂にさみしき
国こぞり電話を呼べど亡びたりや大東京に静か
にありぬ
常はただ其所に思ひしすめらぎの国の都^{こと}ゆ言の

通はぬ

海底電線によって小笠原かどこか南島から呼んでみたが、伊豆で切断されていた、とか富士火山帯についての（多分）流言のたぐいとか、生ま生ましい。「すめろぎ（天皇）」のいらっしゃる所として「帝都」という言葉（概念）によって「大東京」が考えられている。「国のうれひ」は、つまり、震災地が、首都であったところから、まずは、やって来ている。やがて深夜になって「紀州潮岬無線電信局から」第一報が入ったが、それも「ブツリと断れて、後は元の深い沈黙がつづいた。」首都圏の災害のシミュレーションを読んでいるような気分になって来る。国が首都を失うということが、どういうことなのか、テレビもラジオもない時代だから今とは違うといってもいいものだろうか。

それにしても、このような大局からみた歌が出来たというのは、憲吉の歌人としての力量による。また大阪の新聞社にいたという位置のよさもある。『アララギ』の主要な歌人として赤彦はじめ多くの友人知人を首都圏に持ったこともかわかりがあらう。

横浜が焼けほろぶとふ声きこゆ夜ふかくして潮
の岬より
夜の更くる空のいづこゆかよひけむこの恐しき
ただのひと言^{こと}
日の本の暗き夜きたれ今日をもちて国の都^なは亡
くなりけり

ほとんどが、前書きの散文の一部を三十一文字化したものである。さきに築地藤子や高田浪吉にみたように、表現は万葉調で重厚だが、今からみるといささか蒼古にすぎる嫌いもある。

だが、これは『アララギ』が子規以来、聞いて来た方法の一つなのであった。現実^に即して事実の細部をリアルにつかむという方式において（精神とか志向において）西欧のリアリズムを目さす。しかし言葉は、あえて万葉集の古語をよみがえらせている。古いものに溺れるばかりではないが、少なくとも古語文語の言葉にひびきの簡潔さを尊

重する。和魂洋才というより、洋魂和才の気持が
つよいが、しかし、古語のもつ言霊の力を借りよ
うとしている所は、どちらともいえない。

こうしたやり方は、現代では、どんどん消えて
行っている。第一、古語など使える人がおそろし
く減っている。それは、戦後の国語政策や国語教
育のためもあるし、アメリカナイズされてしまっ
た文化のあり方が、とくに実効主義（プラグマテ
ィズム）を主流としているためもある。コミュニ
ケーションに役立つ言葉は、一応、価値が低い
とされるのである。詩歌さえ、この実用主義、
実効過ぎの傾向の嵐の中では、城を守ることが
できないありさまなのである。その実例を出して
みようかと思うが、少しく話題をかえて、わたし
自身の歌について、述べたい。

三

わたしが、この文章を書くきっかけとなったの
は、「さびしき科学」（『文芸春秋』平成七年十二
月号所載）という八首の歌であった。昨年の秋に
も、今年と同じように、伊豆群発地震が報じら
れたし、事実、軽い地震は東京でもしばしば感
じられた。

生活というのは奇妙なものである。二人で生活
している時、一人が外出しているうちに大地震が
おきてしまえば、別々の事態が二人の上に来る。
共同生活をしているといっても、二人は二人の個
体であって、一心同体ではない。一人が西国へ旅
しているうちに、東国で地震がおきてしまえば、
別れ別れの運命をうけとめることになるかも知
れない。

生活は、ある予測の上に成り立つ。そしてその
事柄は、人間の力の及ぶ範囲ならば、一応、予測
は安らかに成り立つ。地震のような外的な災害は、
ふつうの個人にとって、予測の外にある。それを
無理やり、擬似的に予測可能のところへ引きず
り込むのが、巷の占師たちの占いである。

共同生活をしていると、「そんなバカな。占い
なんか信じないよ」といいながら、「だけど、十
一月三日あたりが危ないというわよ」などと、笑

いながらも言われると、週刊誌の女占師のメー
キャップの濃い顔が思い浮かんで来て、ちょっと
不安になる。世に暗合というものはないから
だ。

わたしが「さびしき科学」で、スケッチして
みたのは、一つは地震予知の「科学」である。もう
一つは生命の終焉＝死を予知し予告する医学とい
う「科学」である。わたしは三十三年間ほどの内
科の医師としての体験があった。今は医療をはな
れているが、癌にせよ成人病にせよ、「早期発
見」といわれる手段は、つまり死の芽を早く予知
予見して、それを摘みとるのが「早期治療」なの
だと教えられてきた。だが、現実には、その手段の
一端に関係してみると、どうも事がうまく行か
ない。誤診とか、患者への説明とかいった段階に
行く手前のところで、疑いがおきてくる。人間には、
———というか「科学」は、本当にそんなことが
出来るほど、成熟しているのか、とくに、それを操
作するのが、あやまちの多い人間という奴なので
ある。神ではないのだ。まだまだ、この領域を支配
しているのは、神とか悪魔とかいった、人間を
超えた存在ではないのか。

さびしき科学

東京を避けて地震ふる島の上に数箇の数字散ら
ばる見れば
本棚を打ちつくることもせず寝る天佑は来む
女のやうに

こんな風に、歌いはじめて見た。連作八首である
から、最初は瀬踏みであり、序章である。「島
の上に数箇の数字云々」というのは、テレビの報
道画面のアレである。震度階を示す3とか4とか
1とかいった数字が、伊豆七島の上に散らばって
いる。「ふむ、このごろの地震は、東京を遠巻き
にしているな」と思う。もちろん、これは、東京
に住んでいる人間の勝手な感想であり、たとえば
静岡とか三島とか、はたまた、仙台とか甲府とか
いった所の人には、自分の居住地を中心とした感
想があるだろう。そうした漠然として不安感（と
いっても、誰でも、たかをくくっていないと生き

ておれないから、この不安感は重くはない)を抱いて、あの震度階の地図上の散らばりを見ている。

地震で思うのは、ローカリズムというか、災害の局地性のことである。神戸に起きた時は、たとえば、東京ではない、のだ。仙台でもなく札幌でもない、まさに神戸(を中心とする一区域)だけなのだ。この点が、昭和十九年から二十年にかけての大空襲による災害とか、戦争そのものによる飢餓や荒廃といった災害とは違っていた。太平洋戦争が教えた教訓としては、戦争による災害は、一国内に関する限り、彌漫性(ひろく国全体に及ぶ)だということだ。病気にたとえると、全身性であり、一定の時間をかけて続くという意味では、慢性の病気に似ている。

地震は、それに比べれば、急性であり、激烈だが局所的であって、全身性ではない。

自分の歌をタネにしながらか、考えついたことを次々に書いている。もう少しこの話をつづけるなら、わたしは、戦争の時に地震がおきた地方に住んでいた。昭和十九年十二月七日の東南海地震である。わたしは名古屋にいて、旧制中学の5年生で、勤労働員のため陸軍の兵器工場で働いていた。猛烈な震動が来て、いっせいに工場から人がとび出して来た。わたしは偶然、工場の外に居た。記録では、M7.9で、死者・行方不明者1223人というから相当の災害である。寺がつぶれて下敷になって人が死んだなども伝えられた。ところが、そのころ毎日毎日、B29の空襲におびえていたので、死は日常茶飯といわないまでも、死にとなり合せて生きていたのは確かである。こういう時には、地震の災害は、相対的に軽視され勝ちだ。平和時の地震は、局地性が強調される。戦争時の地震は、戦争一般の重い状況の中へ、埋没してしまう。

「本棚を打ちつくることもせず寝る」などとうそぶいてはいるが、落ちて来たらヤバイとは思いい、寝所にはなるべく本棚を置かないようにはしている。「天佑はやって来るかも知れない。それは好きな女があらわれるぐらい稀なことだろうが、マア、天佑を信じて寝ようじゃないか。」やぶれかぶれの人生観である。老人にありがちな捨てっ

ぱちである。

地震予知も^{カルチ}癌の早期発見もあいあいとして富士の筋雲

一瞬ののちの^{いのち}生命を知らぬもの食塩すこし減らして食はな

われを乗せ走る「のぞみ」は限りなき活断層の河を越えゆく

地震予知に懸命にとり組んでおられる人たちや、癌の早期発見の方法に一生をかけておられる人たちを、ヤユしているつもりはさらさらない。「あいあいとして」は、曖昧としてのつもりで、あいまいな形に、しかし、なにかのんびりとふんわりと、富士山の頂にかかる雲のように見えている。富士山や新幹線がしきりに出てくるのは、京都の大学へ週一回通勤しているためである。

わたしたちは、一瞬の後の運命を知らない。地震にせよ、急性の突発性の病気にせよ、交通事故にせよ、防ぐことのできない急激な病気とか、あるいは死とかがおそうことは充分ありうるし、現に、そういう運命のもとにあった人も常に、この地上にはおられる。それなのに、「長生きするためには、食塩は少なめにしよう」などと考えて実行している。人間の予期とか予防という考え方の、奇妙な矛盾。

あらかじめ知るあはざる悪意ゆゑ新鮮にしてさびし科学は

占ひの如く今夜がその日ならどうする、ししやも焼きつつ二人

たとえば、占星術師が、今日が〇〇大震災のおきる日だよと、まるでハルマゲドンの大予言みたいに言ったとしたって、どうしようもない。「どうする?」「どうしようもないさ。」そうやって朝食のための魚を焼いている。予知とは、あらかじめ知ることだが、自然の「悪意」は察知しにくい。だからこそ、不可能に向って緊張しつつ立っている「科学」には、新鮮ですこし寂しい姿がある。バプテスマのヨハネのような、剛毅で、しかも、無垢なかがやき。予言者の寂寥感がただよっている。

四

阪神大震災の歌は、多数作られた。そのうちのいくつかを、わたしは読んだ。そして、感心する歌、感動をうけた歌が少なかったのである。『瓦礫の街から—阪神大震災のうた』(眩短歌会編)から、わたしに良しと思えた歌をいくつか拾ってみよう。

国家とは見えず触れ得ず遠きもの死の崖淵に立ちて思ふも
坂西 香栄
情報はクロウの暗さ五千余の死者に四角のテレビ滂沱す
同
虹色のなかば咲きたるまま焼けし焼死の薔薇に陽の届きををり
同

「崖淵」は、通例では「崖縁」と記すところであろう。「淵」は、わざとこう書いているのかも知れない。関東大震災の時、中村憲吉が、大阪から遠望して、その滅亡を実感した国家を、坂西香栄は、このように表現した。「立ちて思ふも」の「も」は、「思ったことであつた!」といった、感動をこめた古い助詞である。古語が、ここでも生きていた。あとの二首も「クロウ(からす)」とか「滂沱す(テレビそのものが生きもののように流涙する)」とか、かなり強引な手法をつかって成功している。

大ていの短歌—とくに『阪神大震災を詠む』(朝日新聞歌壇俳壇)に代表される新聞短歌—は(わたしも二、三誌の選をしているからわかるが)テレビのあの映像のなまなましさに遠く及ばない。描写とか記録とかいう段階では、大正十二年の時とちがって、映像という強敵が、現代には立ちだかっている。言葉はひしひしと無力なのである。坂西香栄は、そこを、詩歌のもっている別の武器をつかって、映像に対抗した。別の武器とは、比喩であり、ことばの韻律の音楽性である。「焼死の薔薇」この漢字のもっている印象の、現実の外の現実といったなにげなさ。薔薇が、大災害の比喩として働いている。

人々は、どうしようもなく体からわいてくる叫

びを、短歌の中へ込めようともがく。しかし、古い詩型は、うまく作動してくれない。そうした、もどかしい、雑報的な歌を、たくさん読み続けてくると、かえって俳句のもっている寡黙さが、うらやましくなることがある。

俳句は、短歌とくらべて(短い季語の約束があるから)即興性や機会性は乏しい。その点、大震災向きではないと言われているのだが、そうだろうか。

もらひ風呂総身の恐怖流しけり 田村きみ子
火事あとに眞白き乳を喫きて捨つ 盛岡 翠月
妻ここに逝くとの告知雪降り 幡谷 秀美

無常のもあるが、言葉少なに言っているだけに、かえって雄弁だ。

誓子去り三宮消え氷雨降る 吉田 定雄
毛糸編む慰めすぎるラジオ切り 岩佐 栄三

山口誓子も逝き、三宮も消失した。ただそれだけで事象の奥にある感動をあらわしている。「慰めすぎるラジオ」とは、寸言よく、現実を刺しているのではないか。

こうしてみると、短歌が、なまじ俳句よりすこし長くて、描写の余地のあることは、長所であると共に、大きな短所だとも思えて来た。日本語は、短歌と俳句という二つの短詩を育て、残して来た。この二つの詩型が、大震災という偶然的試練をうけている。そしておのおのの長・短所をさらけ出しているように思えたのであった。

五

わたしは、最近、奇妙な歌を読んだ。まだ作者名を言う段階ではない(原稿が印刷されていないからだ)が、選考会の席で、応募作の一つとしてその連作を読んだ。

透明の膜ぐり抜けまたひとりM後の界より教室に来る
海風に拒まるる日のまひるまをMを見上げて佇ちていたりき

なつかしく小さき入り江 浦島のいそいな部落
岬にはM
ご利益なく神社懐れしとまくら振り地震学者は
Mを讃える
あやうくも表面張力ヒロシマを運ぶ吾をばMよ
揺するな
地元にも濃き淡きあり山越えて帰るところを持
つ人われは

作者は、阪神の人ではない。ところで、この歌の「M」とは何か、マグニチュードのMか、マグマのMか、マグニチュードについて注を加える必要は、本誌の読者には全くないであろう。素人としては、しばしば、あの7.6とか4.5とかいって示される数字が、常用対数による表現であることを忘れる。奇妙な数字なのである。ここに挙げた「M」の歌は、表現としては舌足らずのところがある。一読してわかりにくい。たとえば、透明の目に見えない膜を通りぬけて、またひとり教室へやってくる生徒は、どこからやって来たのか、地震のあとの世界をいうのに「M後の世界」というとすれば、「M」だけで地震をあらわすのは不完全だ。しかし、「M」によって地球のもっている、不気味なエネルギーそのものを表わしたと考えるなら、「M」を認識したあとの人間と、その前の人間のあいだに「M前」「M後」の区別があってもいいだろう。

「M」はある時には「見上げ」られる対象となり「讃え」られる対象にもなる。「ヒロシマ（原爆）」体験を、コップに入れた水のようにしてそろそろと運んでいる自分を「Mよ揺するな」と言ったりしている。そして「地元」神戸には、濃淡の差があって、それは体験のちがいとしてそこにあった。それを見ながら、わたしには（地元民でないわたしは）帰るべき地がある。

「M」は、たぶん、地震にかかわりある何か巨大なものの呼び名であろう。地震が、このような、シュールの画のような手法で「M」という記号によって擬人化されてうたわれたのを見るのは、わたしの経験でははじめてであった。

経験は、情報によってさまざまに歪曲されてし

まう。深化されることもある。歳月と共に、一つの災害の意味もかわって行く。はじめに考察の対象にした、『アララギ』の『灰塵集』は、震災後八箇月の時点で編まれていた。もし、一年たったらどうだろう。五年後にはどうか。東京は、大正十二年を境に、はっきりと江戸的なものを流し出し、大東京になったといわれる。文学も、その影響をうけて大きく変わったといわれる。第一次世界大戦がヨーロッパに引きおこした大きな変化は、日本では、関東大震災による「帝都」滅亡によって生じたといわれる。二〇世紀がはじまって、はじめの4分の1世紀のあたりのところで、大戦と大震災がおきたのは、不思議な暗合であった。この二つのことは、おのおのの二〇世紀のその後を規定した。

阪神大震災が、オウム真理教事件と、いわば二重化されて戦後五十年目の日本を複雑にいるどったのは記憶にあたらしいところだ。この二重性には、何か意味があったに違いない。そうしたことも、あと三年、五年、十年たつうちにわかるだろう。短歌も即席風に作られたものばかりでなく、今後は（「M」の歌のような）深いところでもとらえられた歌が出てくるかも知れない。

この夕べ煙らう雨は繭となり震えやまざる地表
を包む 『短歌研究』（三月号）道浦母都子
地震直後恐れ覗きし窓の外「空白喩」なる静け
さがあり

あかねさす生の側にて光り立つ黄の水仙とこの
わたくしは

道浦母都子は、吹田市で阪神大震災の経験をともに、このように歌った。おそらく、一箇月ぐらいの所で歌ったのだろう。「空白喩」は、歌論上の言葉であるが、ここでは、なにもないということが、事態の重大さの比喩になっている、その空しさをいっているのだろう。水仙と共に、生の側にのこされた地域差を率直によるこんでいるのもある。おのおの工夫のあとのみられる作歌である。こうした専門の作者の作品が論議的になるのも今後のことであろう。

【おかい たかし 歌人・医学博士】

首都高速道路の地震防災

勅使川原 勝

はじめに

平成7年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震は、従来の観測値と比較すると既往最大の揺れが生じ、このため尊い多くの命が失われるとともに、建物や鉄道・道路あるいはガス・水道など、あらゆるライフラインに未曾有の被害をもたらした。なかでも首都高速道路と同じ都市内高速道路である阪神高速道路の高架橋が、一部区間とはいえ倒壊したことは、首都高速道路公団としても重大な問題として受け止めている。

また、今回の大地震では、今までの防災体制における様々な問題点が浮き彫りとなり、数多くの貴重な教訓が得られている。現在、国（政府）では、その教訓を最大限活かすべく、災害対策基本法の改正（平成7年法律第110号および法律第132号）や防災基本計画の修正（平成7年7月18日中央防災会議決定）を始めとした防災体制の抜本的見直しを実施し、また、これを受けて各地方公共団体でも、地域防災計画の修正などを通じて防災体制の機動化と実効性の確保を柱とした抜本的体制の改革を実施しているところであり、当公団においても諸計画について所要の見直しを実施しところである。

首都高速道路地震防災対策の概要

1. 首都高速道路の概要

首都高速道路公団では昭和37年に京橋～芝浦間4.5kmを供用して以来、着実に整備を進め、営業延長は平成6年12月に供用した高速湾岸線3期・4期（横浜ベイブリッジ～羽田空港間16.4km）を含め、現在247.8kmに達しているが、その8割が高架橋であり、全路線の4割にあたる108kmが供用開始後20年以上を経過している。また、首都高速道路の1日平均利用台数は115万台（平成7年）となっており、東京大都市圏における経済活動や生活必需品物資輸送を支える基幹的交通施設としての役割を果たしている。

なお首都高速道路は、大地震発生時には、東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県各地域防災計画の中で、人命の尊重、被害拡大防止、災害の応急対策の円滑な実施に

配慮して行なう緊急輸送を確保するための道路、すなわち緊急交通路（緊急輸送路）としてその全線を指定され、一般国道や県道等の他の道路と共に「緊急交通路・緊急物資輸送ネットワーク」の一つとして組み込まれている。

2. 首都高速道路の地震防災対策

公団ではこれまで、関東大地震クラスの地震に対して落橋が生じないことを目標にした技術基準に基づき建設してきており、既に建設が終了した道路については、新潟地震・宮城県沖地震など、その後の地震から得られた最新の知見を踏まえ、その都度、必要な対策を実施することにより、地震防災対策の充実に努めてきた。

しかし、兵庫県南部地震における高架橋などの被害の甚大性に鑑み、地震防災対策のより一層の強化を図るため、①兵庫県南部地震クラスの地震に対しても落橋や倒壊を生じないことを目標とした高架橋の安全性の強化、②速やかな情報収集と伝達を目指した地震発生時の情報収集・伝達などのシステムの構築、③地震発生時のお客様の安全対策、の3項目を中心にその対策を実施することとした。その主な項目の概要は、以下のとおりである。

(1) 高架橋の安全性の強化 昭和53年の宮城県沖地震で、RC橋脚の鉄筋段落とし部で大きな損傷を受けたことから、昭和55年の道路橋示方書に橋脚段落とし部に関して新たな規定が追加された。

公団では、これを基に昭和55年よりも前に設計された橋脚については、鉄筋段落としに対して補強が必要か否かをチェックを行ない、必要なものについては、平成3年度から鋼板巻き立てによる補強を行ってきたが、今回の大地震を受けて、従来の震災点検により対策が必要とされてきた橋脚の耐震補強については、予定を早め平成7年度内に概成させてきた。

建設省では、被災原因の究明と今後の耐震設計のあり方などの検討を目的として、平成7年1月20日に耐震工学・橋梁工学などの専門家からなる「兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会」を設置した。この委員会は、今回の地震で被災した道路橋を復旧する際の当面の技術基準として、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」（以下「復旧仕様」という）を示した。

建設省は、今後実施される新設橋梁の設計および既設橋梁の補強の際にも、これを参考とすべく、関係方面に

通知をしている。

現在、公団で実施している橋脚などの各種耐震対策は、基本的にはこの復旧仕様によっており、これを参考として、橋脚などの耐震性の向上を図ることとしている。

ここでは、公団が現在実施している各種耐震対策の概要を述べる。

(a) 橋脚の耐震対策

(ア) 概要——首都高速道路の橋脚は、総数約 7200 基あり、RC 橋脚が約 5100 基で、鋼製橋脚が約 2100 基となっている。

公団では、全橋脚約 7200 基を対象に補強が必要か否かをチェックを行ない、平成 7 年度～9 年度の 3 年間で、必要な補強を概成することとしている。橋脚補強には、予算総額約 1500 億円が見込まれている。平成 7 年度は第 1 次・第 2 次補正予算、合わせて 681 億円、平成 8 年度は 491 億円をもって耐震補強事業を行っている。この予算については、公的助成が成されており、国・地方自治体（都・県など）、公団で 3 分の 1 ずつ負担している。

工事は、平成 7 年 11 月から本格的に実施しているが、一般道路の車線を規制して補強工事を行なう箇所もあり、一般道路を利用されている方々に不便をおかけすることから、沿道地域の方々や道路利用者および関係機関の理解・協力が得られるよう種々の広報活動を展開している。

また、関係機関（警視庁・建設省・東京都・日本道路公団）で首都高速等橋脚工事渋滞対策協議会を設けて、必要な工事調整や PR を行なっている（図 1）。

(イ) RC 橋脚の耐震補強——RC 橋脚については、復旧仕様に関する参考資料（㈱日本道路協会発行）に基づいて、「既設 RC 橋脚の耐震性向上設計要領（案）：平成 7 年 11 月首都高速道路公団」なる基準を設け、橋脚に鋼板を巻き立てる工法を基本として設計施工を行なっている（図 2、写真 1）。

(ウ) 鋼製橋脚の耐震補強——鋼製橋脚の耐震補強に関しては、復旧仕様ではコンクリートを充填した鋼製橋脚の考え方が示されている。

現在、更に効果的な方法で十分な耐震性能を得ることを目的とし、建設省土木研究所・阪神高速道路公団・日本橋梁建設協会・鋼材倶楽部と共同して、模型載荷実験などによる検討を実施中である。この共同研究では、各機関がそれぞれ分担して供試体を製作し実験を行なっている。

補強方法には、コンクリート充填による補強と鋼断面部の補強がある。

鋼断面部の補強は、コンクリート充填補強に比べると曲げ耐力の向上を最小限度に抑えることができ、粘



図 1 地震に耐える橋脚補強工事：鉄壁の守りへ（PR 用ポスター）

り強さの向上が図れるという特徴がある。この鋼断面部の補強において、矩形橋脚の場合は、柱を構成する 4 枚の板に補強鋼材を取りつけて補強する方法や柱角部を補強鋼材によって補強する方法があり、現在検討中である。さらに円形断面橋脚では、橋脚外面に鋼板を設置して二重鋼管とし、座屈後の変形性能を向上させ、粘り強さの向上を図る方法を考えている。

(b) その他の耐震対策

(ア) 落橋防止構造および支承の一層の強化——公団では、昭和 39 年の新潟地震で昭和大橋が落橋したのを契機として、「桁かかり長の確保」「落橋防止装置の設置」「可動支承の移動制限装置の設置」を目標として、基準の改訂を図りながら、改良・補強を行ない、落橋防止対策を実施してきている。

復旧仕様によれば、桁かかり長に余裕を持たせることや、落橋防止装置を複数設置することなどの考え方が示されており、支承についてはゴム支承の採用が望ましいとされている（図 3）。

工事の施工に際しては、既設橋梁の構造などから施工空間の狭隘性などで施工の困難が予想されるため、費用の面も含めて、現在具体的な検討を行ないつつある。今後、対策工法を早急に取りまとめて、橋脚補強工事に引き続き実施に移る予定である。

(イ) 液状化およびそれに伴う地盤流動対策——液状化

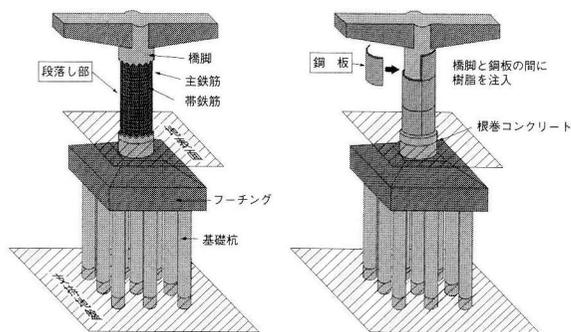


図2 鉄筋コンクリート橋脚の補強
(MEX, 平成8年度版, p. 28)

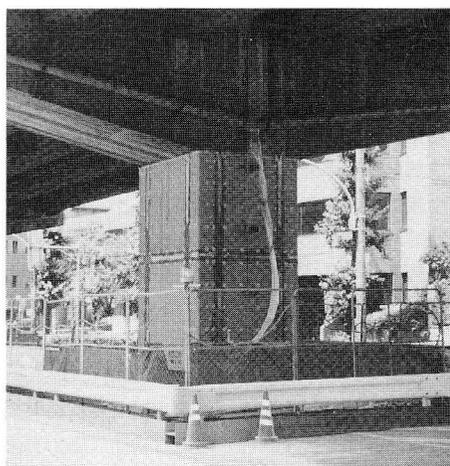


写真1 橋脚増強工事現場
世田谷区新町付近 [高速3号線渋谷線]

については、やはり新潟地震の際に、地盤の液状化により橋梁を含め様々な構造物が大きな被害を受けた経験から、昭和46年の『道路橋耐震設計指針』（社団法人日本道路協会発行）に液状化対策が盛り込まれた。そこで公団でも、昭和46年よりも前の基準で設計したものについて液状化による影響を検討し、首都高速道路の構造物の安全性を確認している。

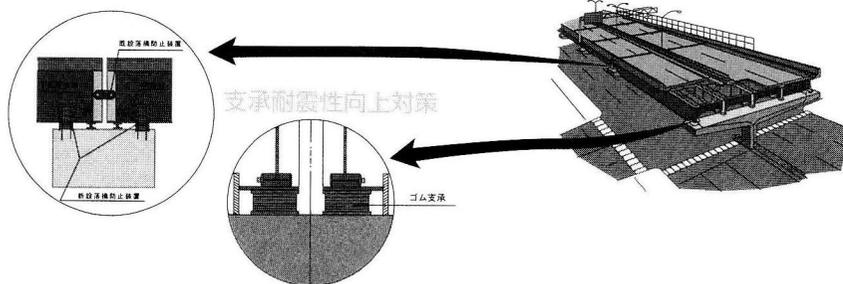


図3 連結装置耐震性向上策と支承耐震性向上策 (MEX, 平成7年度版, p. 28)

しかしながら、今回の震災の際にも液状化に伴う地盤流動による被害が報告されているとおり、首都高速道路が河川や運河を横断する部分もさることながら、河川に沿って路線が供用されている部分も少なくないため、これらの路線では、地盤の液状化に伴う地盤流動による橋脚基礎への影響の検討が急務となっている。公団では、地盤流動による影響の解明や適切な対策工法の確立を目的として、「地盤流動に伴う高架橋の影響に関する調査研究委員会」（委員長：塩井幸武 [八戸工業大学教授]）を組織して検討を行なっている。これらについても、早急に対策を取りまとめ、橋脚補強工事に引き続き実施に移りたい。

(2) 地震発生時の情報収集・伝達などのシステム構築

(a) 地震計測システムの構築——現在、公団では地震発生時に独自で地震情報を入力する手段がないため、気象庁発表の情報により、入口閉鎖と本線通行止めを行ない、緊急点検などの災害対策業務を実施している。

そこで大地震発生の際、局部的な被災情報をより早く把握し、緊急点検を集中化させ、二次災害を防止するなど、迅速な対応措置などの対応を可能とするべく、「地震観測システム」の構築に着手している。これは首都高速道路および管理用建物の24カ所に地震計を新たに設置し、東京第一管理部・東京第二管理部および神奈川管理部において地震の情報をリアルタイムに集約するものである（図4）。このシステムについては、建設省関東地方建設局をはじめ、地方公共団体との間で地震情報の交換にも役立てる予定である。

さらに、橋桁と橋桁の間に磁気センサーを取りつけることにより、桁間の異常変位を検知するシステムの設置を検討している。

これらの地震計測システムなどの整備により、より早く道路施設の点検に着手することが可能となり、異常のなかった場合にも、これまで以上に早く交通開放が可能となる。

(b) 通信網の整備——情報を収集するための通信ケーブルの切断による公団内の通信途絶に対応するバックアップシステムとして、

通信ケーブルをループ化し、ケーブルの一部が切断されても別ルートでの通信が可能となるバックアップ通信網（図5）を構築し、さらに防災対策を迅速に行なうために、平成7年度に簡易衛星通信設備を導入するとともに、

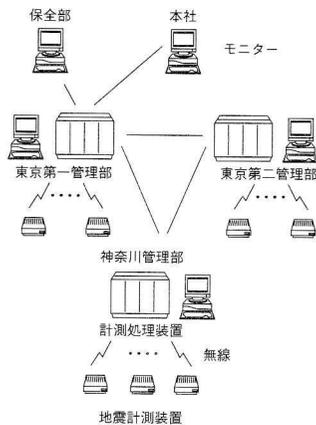


図4 地震計測系統図 (netway vol. 28, p. 14)

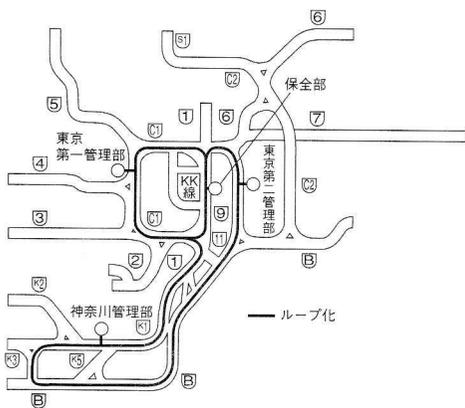


図5 バックアップ通信網 (netway vol. 28, p. 14)

平成8年度から10年度にかけて大量の情報を伝送できるマイクロ通信網の整備を実施することとしている。

(c) 電源バックアップの強化——ケーブル切断等により停電が起きた場合に備え、停電を回避する措置として既設ケーブルのほかに予備ケーブルの配線を行なった。

(3) 首都高速道路を利用されているお客様の安全対策の推進 公団では、震度5以上の地震が発生すると、首都高速道路の入口を閉鎖し、本線通行止めを実施し、安全確認のため、直ちに緊急点検を行なうが、点検には3時間程度かかる。その間、お客様は車を止め、ラジオ・道路情報板などから情報を収集し、公団や警察の指示があれば、それに従って行動していただくこととなる。さらに、お客様の安全を確保するために次の対策を実施している。

(a) お客様への情報伝達——地震時における情報提供装置としては、道路情報板・首都高速ラジオ(1620kHz)のほか、ラジオ放送・テレホンサービスなどを利用し、地震や首都高速道路の状況などの情報を、きめ細かく提供する手法について整備する。

(b) 避難・誘導施設の整備——公団では、首都高速道路

上から緊急に避難しなければならない場合、お客様に目につきやすく、わかりやすい大きな非常口案内板を全路線に設置した。

また夜間でも、首都高速道路から安全に避難できるように、高架部の避難階段にバッテリー内蔵の照明設備を設置している(写真2)。

(c) 地震時におけるお客様の行動等に関する広報——首都高速道路で地震に遭遇したお客様の安全を確保するためには、以上に述べた各種施策のほか、何よりもまずお客様自身の確かな行動が重要になるとの観点から、地震の際のとるべき行動等を周知徹底するため、パンフレットを作成するなど、積極的な広報活動を展開している。また各種報道機関からの取材にも積極的に応じるなど、様々な機会を捉えて公団の地震防災対策などをお客様に対して積極的にPRしている(図6)。

併せて、首都高速道路の防災設備に関するPRについても積極的に行なっているところである(図7)。

(4) 公団の防災体制の強化 勤務時間外に発生した兵庫県南部地震では「初期対応体制の確保」がその後の震災対応に非常に重大な影響を与えたことに鑑み、当公団でも平成7年9月1日に「参集訓練」を実施するとともに、同年10月、公団全役職員を対象に「参集状況調査」を実施して実態の把握を行なった。

現在、その調査結果を踏まえながら、「情報の受伝達」とそれに基づく迅速な対応および「お客様の安全確保」という初期対応業務を実施するための「初期対応体制の確保」策として、①「情報の受伝達」業務については、一定地域内に居住する公団役職員を「初期対応要員」として指定し、参集してきた「初期対応要員」が、たとえ少数人数であっても、発災直後の混乱状況下において正確な情報収集や伝達を的確に実施できるよう、「初期対応の手引き」などを整備し、②「お客様の安全確保」については、緊急パトロールおよび緊急点検を迅速に実施するとともに、二次災害防止のための各種措置を講じるこ

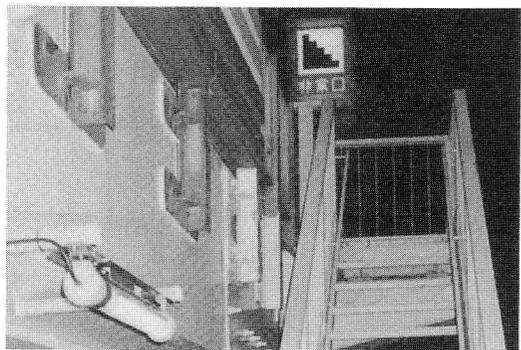


写真2 避難階段の照明設備 (MEX, 平成7年度版, p. 28)



図6 地震時におけるお客様の対処法（「地震！ その時、あなたはどのようにしますか？」）

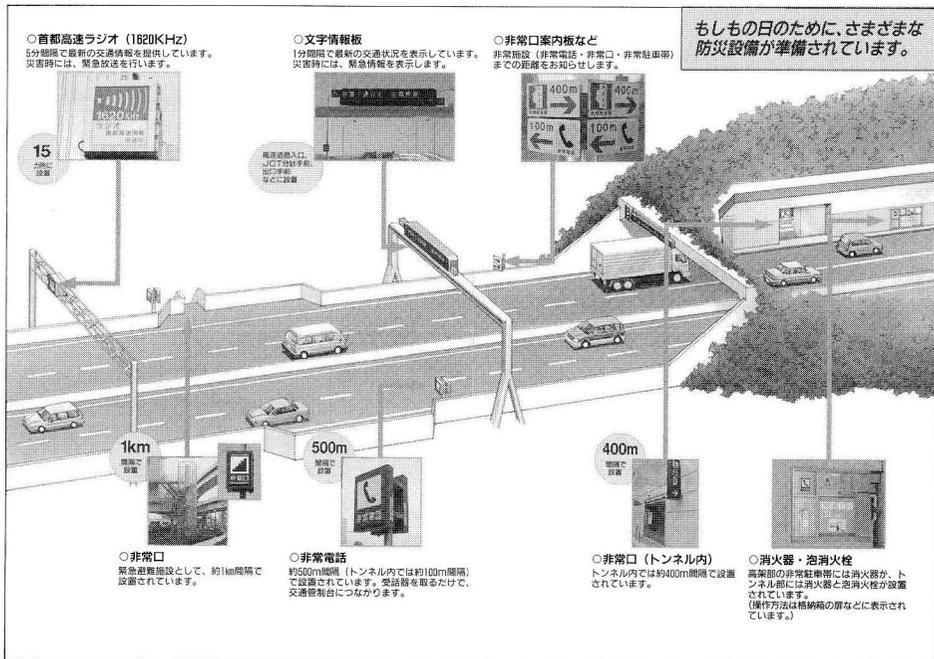


図7 首都高速道路の防災設備（「地震！ その時、あなたはどのようにしますか？」）

とができるよう、委託業者等との連携強化などを柱とした初期対応体制の強化整備を検討し、併せて公団の防災体制の確立強化を図ることとしている。

なお、初期対応業務の更なる充実と防災意識の高揚を図るため、平成8年9月1日に「非常参集訓練」と「初期対応業務実施訓練」を行なったものである。

おわりに

以上、先の兵庫県南部地震により得られた貴重な経験を踏まえ、上記に述べた各種施策を積極的に推進することより、大地震にも耐えられる首都高速道路を整備し、一日も早くお客様が安心して利用できる首都高速道路を提供すること、地震発生後の応急対策の円滑な実施のために首都高速道路を緊急交通路（緊急輸送道路）とし

て提供することが、公団の果たすべき重要な責務であるとする。

また、各種工事に伴って首都高速道路や一般道路の車線規制により、交通渋滞や騒音などが発生し、沿道地域の方々や首都高速道路をご利用のお客様にご迷惑をおかけすることとなるが、この事業の重要性をご理解いただき、何卒ご協力をお願いしたいと考えている次第である。

【てしがわら かつ 首都高速道路公団総務部調査役】

鉄筋段落とし部

RC橋脚の柱内部には縦横に鉄筋が埋め込まれているが、地震時に作用する水平方向の力に対しては柱の高さ方向の鉄筋が抵抗している。この鉄筋の量（本数）は根元で最も多く必要であり、柱の上に向かうにつれて必要本数は減少する。したがって設計上、必要でなくなる部分では鉄筋の本数を減少させている。この部分を「鉄筋段落とし部」という（図2参照）。

滋賀県の地震防災対策

今堀治夫

はじめに

阪神・淡路大震災の発生から3回目の冬を迎えようとしている。

あの日、私は自宅で、何か大きな怪物に体全体を揺さ振られているような気配を感じて目を覚ました。

すぐに地震だと気づき、体を起こそうとするがとても立てるような状態ではない。

この世に生をうけて以来、これほど大きな振幅の地震を感じたのはおそらく初めてであろうと思う。ちなみに本県の彦根地方気象台の地震計は震度5を記録していた。神戸から直線距離にして約100km離れている滋賀のわが家でこれだけの揺れを感じたのだから、震源直下の淡路島や神戸での揺れの大きさはいかばかりであったろうか。

その後、被災地から映像を通して次々と送られてくる惨状を目のあたりにして、直下型地震がもたらす威力の凄まじさとその前で人間の力がいかに弱いものか、まざまざと見せつけられるとともに、もし今、本県の直下で大地震が起こったらどんな事態になるのだろうか、と漠然とした不安に包まれた私の平成7年1月17日であった。

この日を境にして、本県でも大地震への対策について大きな関心が広がっていった。

「滋賀県を走る活断層は大丈夫か?」「琵琶湖をまたぐ近江大橋や琵琶湖大橋は大地震に耐えられるのか?」「琵琶湖の周辺では液状化現象が起こるのだろうか?」「耐震診断はどこで受けられるのか?」などなど、幅広い県民の皆さんから地震や防災全般に対する疑問や意見が寄せられた。

こうした背景の中で、滋賀県では、平成7年4月の組織機構改革で新たに生活環境部に地震対策担当主監を置くとともに部内消防防災課に地震対策室が新設されることとなり、私がその地震対策担当主監を拝命することとなった。

もとより私自身、防災行政に携わるのは初めてであり、地震に関する特段の知識も持ち合わせない中で、何から手をつけていけば良いのか戸惑いを隠せなかったというのが、着任当時の率直な心境であったが、とにかく地震

対策には一刻の猶予も許されないとの基本認識に立って、応急的に対策を構ずべきと考えられる事項について積極的に対処する姿勢で臨んで来た。

阪神・淡路大震災の驚きと教訓を踏まえて

現在の科学技術水準では、いっどこで地震が発生するかを正確に予知し、台風の襲来に備えるのと同じように、あらかじめ地震への防備を整えて地震の発生を待ち受けることは不可能であります。

このため、今を生きる我々がなすべきことはいつ起こるかもわからない地震から、県民の生命や財産を守るために、考え得る手立てを可能な限り講じておくことであります。

このため平成7年度は、間近で起こった阪神・淡路大震災で浮き彫りになった課題や教訓を基に、もし大地震が本県を襲った場合、講ずべき応急的な対策を全庁的に幅広く検討し、その具体化を図っていくための1年と位置づけ、以下の事項を中心に取り組んで参りました。

〈平成7年度に滋賀県が取り組んだ主な対策〉

1. 滋賀県地域防災計画（震災対策編）災害応急対策計画の抜本的見直し
2. 大地震を前提にした新たな被害想定の実施
3. 県職員全員を対象とした抜き打ち参集訓練の実施
4. 県職員の初動体制の強化（緊急初動対策班）と初動マニュアルの策定
5. 近畿府県合同による地震災害総合訓練の実施
6. 防災航空体制の整備（防災ヘリコプター「淡海」の導入）

このうち、今回は、1.の「滋賀県地域防災計画（震災対策編）災害応急対策計画の見直し」および2.の「大地震を前提にした新たな被害想定取り組み」について、その概要を紹介いたします。

□ I 滋賀県地域防災計画（震災対策編） □ 災害応急対策計画の抜本的見直し

本県では、昭和56年に滋賀県地域防災計画（震災対策編）を策定し、以後、平成6年度まで微修正を繰り返してきたが、阪神・淡路大震災の発生で明らかになった様々な課題や教訓を踏まえて、従来の計画全般について、

もう一度原点に立ち返って抜本的に見直す必要性が各方面から叫ばれたことから、平成7年度においては、まず、震災対策に係る県地域防災計画のうち、災害応急対策計画について重点的に見直しを行なった。

検討にあたっては、庁内関係課や防災関係機関等から推薦された委員による「滋賀県地震対策検討委員会」を設置し、この組織を中心に多方面にわたる検討を行なった。

基本的には阪神・淡路大震災での主な教訓を基に大きく12項目の課題を明らかにし、この課題に対する対応策を中心に見直し・検討を行なったが、以下にその概要を示す。

《阪神・淡路大震災の教訓を踏まえた見直し骨子》

1. 県職員による初期初動体制の確立

(1) 災害対策本部等の設置方法の見直し

県下で震度5の地震発生 ⇒ 災害警戒本部
 県下で震度6以上の地震発生 ⇒ 災害対策本部

} 自動設置

(2) 初動体制の確立

●緊急初動対策班の設置 災害対策本部および地方本部に人命に係わる対策を緊急かつ優先的に実施するため、通常の1課1班体制を超えた全庁にまたがる横断的組織としての「緊急初動対策班」を設置することとし、その要員はそれぞれの職員の居住地から県庁、各県事務所へ2時間以内に参集できるものの中から本部長が発令。

(3) 職員の自主参集基準の見直し 県下で震度5以上の地震が発生した場合、一般職員は、防災行政無線を設置している最寄りの県機関に自主登庁するという原則は同様であるが、次の修正を行なった。

ア. 土木や福祉などの専門的な技能をもった職員は、その専門技能を生かすことができる施設のうち、居住地から最も近距離の施設に参集する。

イ. 「緊急初動対策班」要員は、発災とともに所定の場所に参集し、所定の業務に着手する。

(4) 責任者不在時の意志決定手続きの明確化 緊急初動対策班の各班の中で、あらかじめ優先順位を定めて複数名の責任者を指名しておき、発災時にはこれら責任者の中で参集したもののうち、優先順位が最も高い者がその活動班の指揮や意志決定権を行使することとした。

2. 緊急時の危機管理

●知事的意思確認が困難な場合における自衛隊派遣要請手続きの明確化 何らかの理由で知事と連絡がとれない場合、①副知事⇒②生活環境部長⇒③同次長⇒④消防防災課長、の順で知事の代理として決裁を行ない、自衛

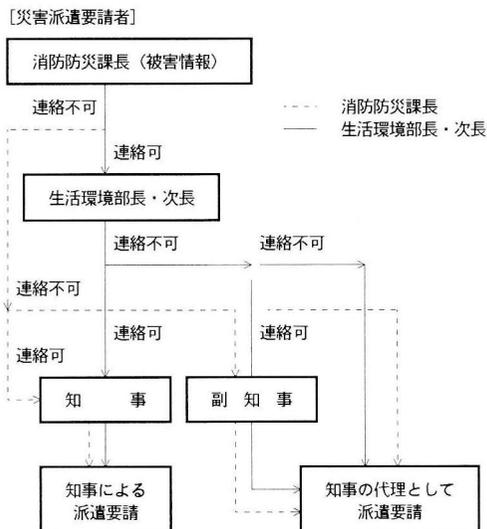


図1 災害派遣要請者と優先順位

隊への派遣要請を行なうよう改めた。

3. 広域支援体制の確立

●近隣府県との広域相互応援体制の明確化 平成8年2月20日付けで、福井県・三重県・滋賀県・京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・和歌山県および徳島県の間で「近畿2府7県震災時等の相互応援に関する協定書」を、また、富山県・石川県・福井県・長野県・岐阜県・静岡県・愛知県・三重県・滋賀県および名古屋市の間で、平成7年11月14日付けをもって「災害応援に関する協定書」をそれぞれ締結した。

4. 情報収集・伝達体制の整備

(1) 公共土木施設の被害状況に関する初期情報収集体制の整備 県土木部関係技術職員が居住地の近隣において、あらかじめ指定された重要な公共土木施設の被害状況を確認した上で登庁する体制を整備するほか、緊急初動対策班において、参集する職員から登庁途上で入手した被害情報を収集する体制を整備した。

(2) 自主防災組織等からの被害情報の収集体制の確立 大規模地震災害発生直後の混乱した状況下では、防災関係機関だけによる被害情報収集には限界があることから、地震発生時には、地域住民が負う責務の中に「被災情報等の防災機関への伝達(特に被災直後)」を規定した。

(3) マスコミとの連携強化 災害発生時に報道機関に対して、正確な情報提供を図るために県庁内に「災害プレスセンター」を設置するとともに専任の報道官(スポークスマン)を置いて、災害関連県政情報の受発信を一元化する。

(4) 県防災行政無線の回線の多重化 衛星系と地上系の2ルートで構成し、相互に補完する通信回線である新たな防災行政無線網を整備する(平成8年度完成)。

5. 緊急通行のための交通の確保

(1) 緊急通行道路の指定 県は地震により被災した地域の救援活動や消防、生活必需物資輸送等に従事する車両の円滑な通行を確保するため、次の基準で緊急時確保路線を指定する。

●第一次確保路線——高速自動車道・一般国道(指定区間等の広域的な主要幹線道路およびこれらを連絡する道路)。

●第二次確保路線——第一次確保路線と県庁・県事務所または市役所・町村役場等の防災拠点を相互に連絡する道路。

(2) 交通規制方法の明確化 地震発生時の交通規制の方法について、「地震発生直後」「災害応急対策期」「復旧期」に分け、その方法を明確化する。

(3) 民間企業との連携によるトラック等輸送手段の確保 滋賀県トラック協会と協定を締結し、緊急時における車両および陸上輸送要員を確保することとした。

(4) 湖上交通の活用体制の整備 災害時に琵琶湖を湖

上交通として活用するため、滋賀県漁業協同組合連合会・琵琶湖汽船(株)・(株)オーミマリンと協定を締結し、船舶および湖上輸送要員を確保するほか、港湾施設管理者や自衛隊と連携し、発災後、迅速に港湾施設を確保することとする。

6. 救助・消火対策の充実

(1) 住民による初期救助・消火機材の備蓄 初期消火を迅速に実施するため、自主防災組織等に可搬式ポンプ等の消火機材の備蓄に努めることを明確化する。

また、市町村は消防署・消防団器具置場・町内会集会所等に救急救助資器材を備蓄することとした。

(2) 自主防災組織の活性化 地域の安全は、住民自らで守るという意識を持ち平常時から災害に備える心構えと体制を確立する必要があることから、市町村が自発的な防災組織に対する指導の強化を図り、これら団体の協力義務および方法について市町村防災計画の中で明らかにするとともに、内容の周知徹底を期することとした。

また、地域住民が地震時に負う責務として以下の点をを明らかにした。

- ① 防災機関への協力
- ② 被害情報等の防災機関への伝達(特に被災直後)
- ③ 出火防止および初期消火
- ④ 初期救急救助
- ⑤ 災害弱者の保護
- ⑥ 家庭における水・食糧等の備蓄

7. 飲料水・食糧・生活必需品等の備蓄と確保

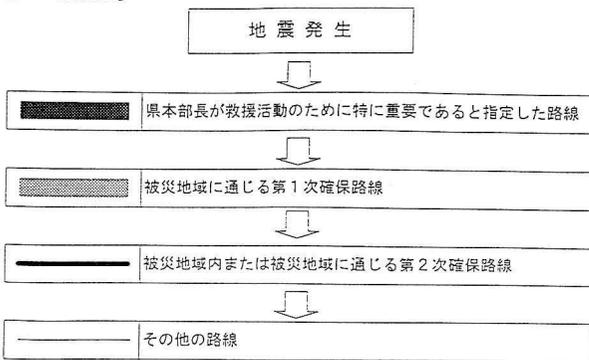
(1) 食糧および生活必需品の具体的な確保目標の設定 大規模地震災害時には、流通機構等の応急復旧に概ね3日間程度を要すると考えられる。

このため2日程度に相当する量の物資は、各家庭や自治会・自主防災組織と市町村が一体的に確保するものとし、概ね1日に相当する量の物資は、公的備蓄または流通在庫方式により県が確保することとした。

(2) 避難所等への輸送体制の確立 県内外からの緊急輸送物資は、あらかじめ指定した広域輸送拠点に集積し、滋賀県トラック協会等の協力を得て、市町村本部が開設する地域内輸送拠点へ配送する。

さらに市町村本部は、滋賀県トラック協会の協力を得て各避難所へ迅速・的確に配送する体制を整備することとした。

[応急復旧の優先順位]



[緊急時確保路線模式図]

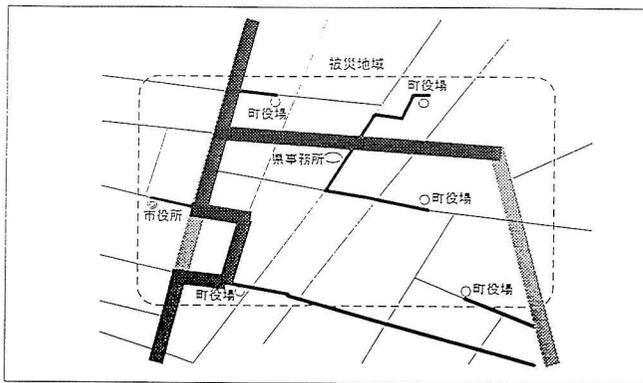


図2 緊急時確保路線のイメージ図

【緊急輸送ネットワークのイメージ】

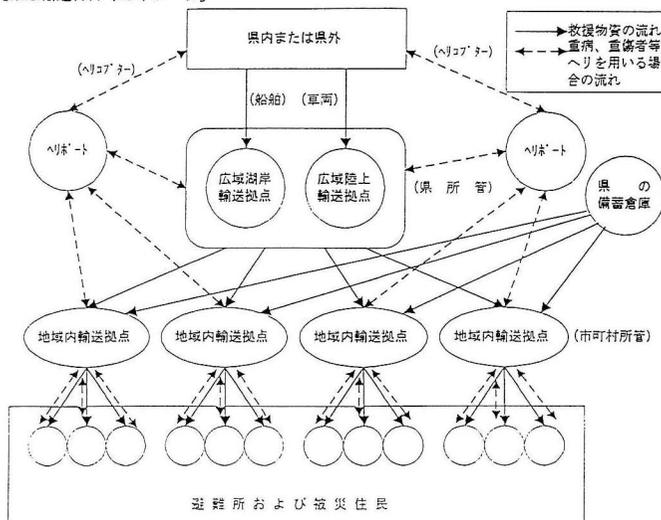


図3 緊急輸送ネットワーク体系図

8. 医療救護体制の整備

(1) 医薬品の備蓄の実施 大規模な災害時には、医薬品の不足が深刻な問題となると想定されることから、県下7医療圏の救急拠点病院等に、初期期における医療救護活動に必要な医薬品・衛生材料・医療機器を備蓄することとした。滋賀県医師会および滋賀県薬剤師会でも同様に協力を得て備蓄を行なう。

(2) 医師等の確保と市町村への派遣方法の明確化 日本赤十字社滋賀県支部・滋賀県医師会・滋賀県病院協会等の救護班を派遣する組織が具体的に規定され、県本部を中心とした連絡体制も明確化した。

(3) 医師・看護婦の初動体制の明確化 大規模地震が発生した直後、病院等が院内の被害状況を把握し、患者の受け入れや救護班の派遣可能・不可能等の状況判断を迅速に行なった上で、救護活動に必要な体制を整備し、救護活動を行なうことを明確化した。

9. 災害弱者への配慮

(1) 社会福祉施設入所者の避難支援体制の整備 社会福祉施設においては平常時から地震を想定した防災計画の策定、防災訓練の実施、自主防災組織・地域団体・ボランティア等との連携の強化や一定量の食糧等の備蓄に努めることとした。

(2) 社会福祉施設での相互受け入れ体制の整備 災害弱者の生活環境を確保するため、県本部が中心となって各施設間相互の受け入れ調整を行なう。また、避難所等での要援護者の社会福祉施設への一時的な受け入れについても県本部が調整を行なうこととした。

なお移送については、市町村本部が中心となつて行な

うこととした。

(3) 災害発生時の高齢者・障害者等の安否確認手続きの明確化 市町村は、平素から一人暮らし老人等の在宅の災害弱者の実態把握に努めるとともに名簿等の整備に努めることとした。

災害時には、これらを活用し居宅にとり残された災害弱者の迅速な発見に努める。

(4) 避難所における災害弱者優先の原則の明確化 避難所における生活環境の悪化は、災害弱者に対して悪影響を与え、時として生命の危険を伴う場合がある。

このため、避難所の運営にあたっては災害弱者について次の措置をとることを明確にした。

ア. 担当職員等による福祉ニーズ実態調査の実施。

イ. 早期に施設への入所が必要な場合の速やかな移送の実施。

ウ. 保健婦・ホームヘルパー等の派遣。

エ. 災害弱者に配慮した食糧の支給。

(5) 応急仮設住宅に関する災害弱者優先の原則の明確化 災害弱者の応急仮設住宅への入居に関して、次の措置をとる。

ア. 一定割合については、災害弱者を優先的に入居させる。

イ. スロープなどを設置し、災害弱者に配慮した構造の応急仮設住宅を建設する。

ウ. 保健婦・ケースワーカー等を派遣し、災害弱者の健康を確保する。

10. 環境衛生対策の充実

(1) 避難所等における保健衛生施設の設置 市町村本部は、水洗トイレを使用している地域においては、地域ごとに必要な数の仮設トイレを設置する。また、避難所には必要な数の仮設トイレを迅速に設置する。そのため、平素から仮設トイレの備蓄に努める。

(2) 火葬場の確保 大規模災害発生時には市町村で対応できる遺体の火葬には限界があるため、被災市町村のみで対応できない場合は、県において他市町村・他府県等へ応援要請を行なうこととした。

(3) 廃棄物の処理方策の確立 災害廃棄物の処理については、被災市町村が独自に対応できない場合は、県において他市町村・他府県等に援助要請を行なうこととした。

11. ボランティアの活用

(1) 災害時ボランティアの活用方策の確立 大規模災

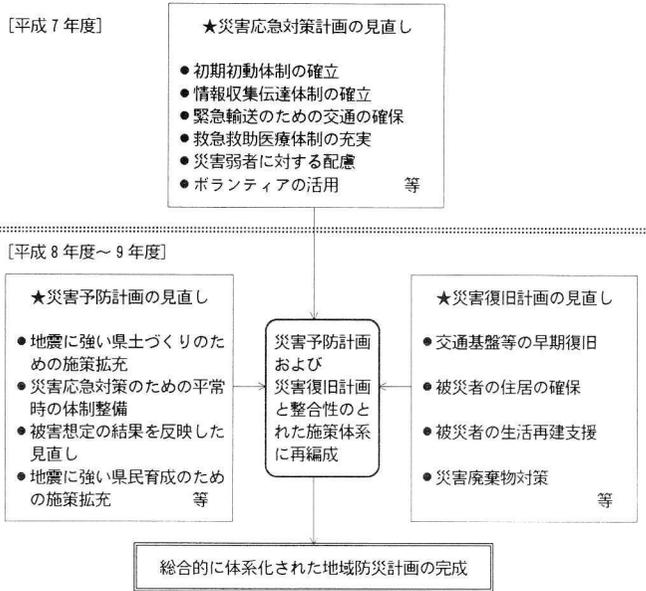


図4 滋賀県地域防災計画の再編成

害発生時に、県は災害ボランティアセンターを設置し、ボランティア活動に関する情報提供・相談・登録等の業務を行なう。

また、他府県に対してボランティアの相談窓口の設置を依頼し、それらの間での連携を図ることとした。

(2) 専門ボランティアの活用 建築物応急危険度判定士・ケースワーカー・カウンセラー等、専門技能を有するボランティアについては、県がそれら専門技能者の団体と連携し、募集・登録・派遣調整を行なう。

12. 琵琶湖の活用

(1) 水利の活用 災害時にはライフラインの途絶等による水不足が予想されるため、これらに対して琵琶湖の豊富な水を活用する。

まず、消防水利として活用するため、あらかじめ取水点を設定し、幹線道路を通過させるための経路を設定するほか、飲料濾水装置を使用して飲料水確保を図る。

(2) 湖上交通の活用体制の整備(再掲) 滋賀県漁業協同組合連合会・琵琶湖汽船㈱・㈱オーミマリンと協定を締結し、船舶および湖上輸送要員を確保するほか、港湾施設管理者および自衛隊と連携し、発災後迅速に港湾施設を確保することとした。

(3) 大型船による救護所・避難所の開設 県が保有する船舶を救護所や避難所として活用するほか、琵琶湖汽船㈱・㈱オーミマリンとの協定により民間船舶を確保し、必要な場合はこれらの船舶を避難収容施設として活用する。

以上が災害応急対策計画の見直しの概要ですが、

本県では平成8年度から2カ年をかけて引き続き、残る災害予防・復旧計画の見直しを行ない、平成9年度末には3計画が相互に体系化されたものへ再編して参りたいと考えております。

□ II 新たな被害想定の実施 □

次に、災害応急対策計画の見直しと併せて行なった被害想定について紹介致します。

本県では、昭和57年度から2次にわたる地震対策調査研究事業(「第1次:昭和57年度～昭和62年度」,「第2次:昭和63年度～平成4年度」)を行ない、県の地盤状況のマクロ的な分析や各地域の地盤情報を整備し、これらを基に家屋・道路・ライフライン等の被害想定を行なってきました。

また、平成5年度から8年度までの4ヵ年計画で液状化危険地域とその周辺地域を中心に、ボーリングデータを収集・分析し、これと県設置の6カ所の地震計観測データの分析等を基に、さらに精度の高い被害想定に関する調査研究に取り組んでいるところでありますが、これら調査の前提となる地震動の想定は、次に示す規模の近距離地震の発生により地域のすべての地点において基盤岩に同一の強さの振動が加わった場合の振動特性を想定したものであります。

マグニチュード (M)	7.00～7.25
震央距離 (Δ)	20～30km

こうした中で、平成7年1月に阪神・淡路大震災が発生し、我々に直下型地震による被害の規模が、想像の域をはるかに超えることをまざまざと見せつけられ、従来の被害想定を基にした防災対策で果たして大丈夫なのか、改めて議論が沸き上がり、滋賀県防災会議地震対策部会の専門委員の先生方にも意見をお伺いした結果、県内に実在の活断層を特定して、その活断層が地震の震源となった場合の被害状況を想定し、このデータを基にして防災計画を樹立する必要性が指摘されました。

こうした意見を踏まえて、今回新たに行なった被害想定概要を次に示します。

《今回の被害想定のお考え方》

1. 前提条件

滋賀県域で兵庫県南部地震と同規模の地震が起きた場合を想定する。また、兵庫県南部地震の被害分布の特徴を基に被害予測を行なう。

表1 想定震源活断層の活動度と規模

名称	活動度	確実度	長さ	マグニチュード	備考
比叡断層 (花折-比叡断層系)	B	I~II	21 km	7.0	
花折断層 (花折-比叡断層系)	B	I	34	7.4	
柳ヶ瀬断層	B	I~II	37	7.4	
関ヶ原断層 (関ヶ原-養老断層系)	A~B	I~II	[25]	[7.2]	姉川地震(1909) M=6.9
百濟寺断層 (多賀断層系)	B	I~II	[25]	[7.2]	文政2年の地震 (1819)M=7.4

活動度：平均変位速度S(m/1000年)。

A⇒S=1~10, B⇒S=1~0.1, C⇒S=0.1~0.01

確実度：I⇒活断層であることが確実なもの、II⇒推定されるもの。

[]：兵庫県南部地震と同規模の地震を想定。

2. 想定地震

対象地震は、県下の活断層の中から、その活動度・確実度・地震規模、過去の地震履歴からして、次の活断層を震源とする直下型地震とする。

- ① 比叡断層
- ② 花折断層

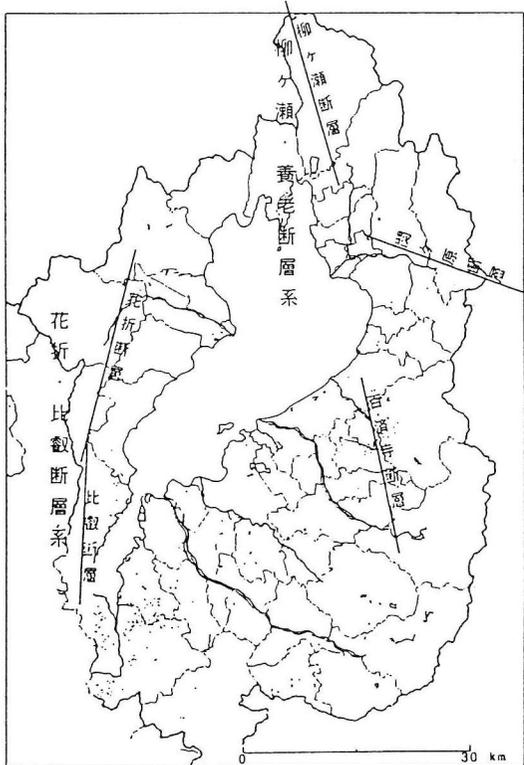


図5 想定震源断層の位置
想定震源断層は図に示すように直線でモデル化した。

- ③ 柳ヶ瀬断層
- ④ 関ヶ原断層
- ⑤ 百濟寺断層

3. 被害想定項目

- (1) 物的被害——市町村の建築物の全壊・半壊戸数の数量的予測
- (2) 人的被害——市町村の死亡・負傷者の数量的予測
- (3) 地震火災——市町村の火災発生件数の予測

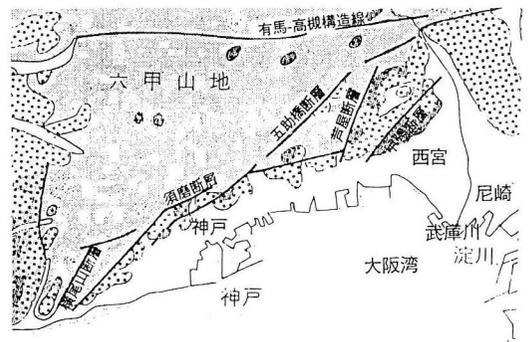
※なお、被害数の想定単位は市町村とするが、その集計は町丁大字単位の積み上げに基づくものとする。また、人的被害等の想定時刻は冬の夕刻5時とする。

4. 基本的考え方

被害想定の対象とする滋賀県域の主な活断層付近の地盤地質条件は、別図に示すように、兵庫県南部地震が発生した神戸・阪神地域の条件に類似している。

特に、花折-比叡断層系が分布する琵琶湖の西方や北方の地盤は、背後に比叡山地などの比較的急峻な山地が琵琶湖岸に迫っており、扇状地性の地形を呈している。

これは、六甲山系構造運動によって山地と海岸線の間



凡例

- 沖積地盤地域 1)
- ▨ 洪積地盤地域 2)
- 岩盤地域
- 断層

図6-1 神戸・阪神地域の地質構造
六甲山系の構造運動により、山地と海岸線の間は断層が発達している。

- 1) 1万年前～現在の間に堆積した軟弱な沖積層よりなる地域。
- 2) 180万年～1万年前までの間に堆積した硬質な洪積層よりなる地域。

地震・津波碑探訪

力武常次

江東区の地震モニュメント

「本連載：その1, 2, 3」（地震ジャーナル, 18, 19, 21）で墨田区・千代田区・中央区・文京区・台東区・荒川区などに現存する安政江戸地震や関東大震災の記念・供養碑を訪ねた。今回は隣接する江東区や葛飾区などに足をのばすことにしよう。

●浄心寺 [江東区平野2-4] 地下鉄都営新宿線「森下」駅で下車、南へ1キロメートルくらい行くと、多くの寺院が集中した「寺町」と呼ばれる地域がある。昔とは違って、すべて都市化した今日では、お寺といっても昔のようにこんもりと茂った森蔭にあるというわけではなく、自動車の往来が忙しい道路に面した鉄筋コンクリート造の建物が多い。日蓮宗法苑山浄心寺（図1）は、それらの寺院の一つである（図2の地図参照）。この寺は、乳母「三沢の局つばね」を記るために、徳川四代將軍家綱が万治元年（1658）に寺領百石を与えて創建したとされている。

浄心寺の境内には、「蔵魄塔」と呼ばれる白コンクリート造の直径数メートルの関東大震災供養塔（図3）がある。江東区教育委員会発行『文化財と旧跡』や細田隆善著『江東区史跡ガイド——東京史跡ガイド⑧』（学生社、1992）によれば、この地区では関東大震災のため多くの死者を出し、大正14年8月30日に建設されたこの供養塔に、付近町会で茶毘に付した遺体の遺骨を収納した。「本連載：その2」（地震ジャーナル, 19, 88, 1995）

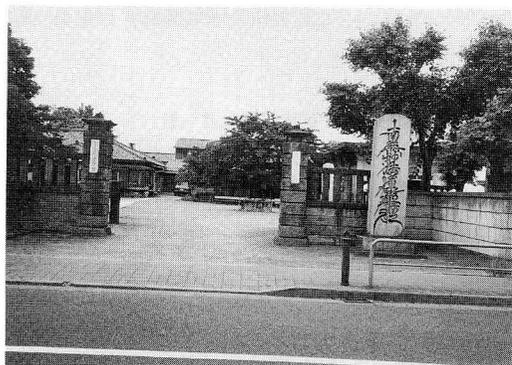


図1 浄心寺正門

にも示されているように、旧深川区の死者は2831人で、旧本所区の48493人に次いで多く、このあたりは震災の被害が激甚であった地区である。

図3に見るように、樹木が生い茂っていて、肝心の供養塔そのものはよく見えないというのが現状で、塔の周辺もあまり整頓されていないし、いささか扱いが粗末に過ぎる憾みがある。塔前面の空地は駐車場と化してしま



図2 江東区浄心寺および沢海橋周辺略図



図3 「蔵魄塔」（関東大震災供養塔）の現況（平成8年7月1日）と「大震災無縁供養」と刻んだ花立て



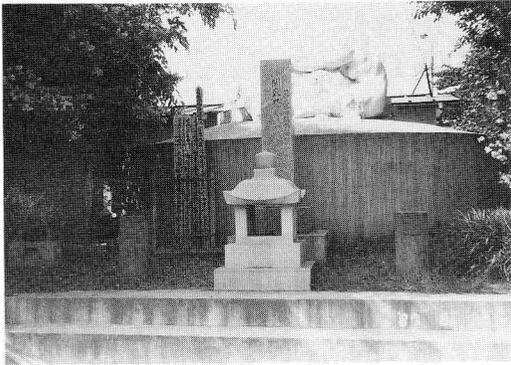


図4 昭和62年7月8日の「蔵魄塔」(山崎良雄撮影)

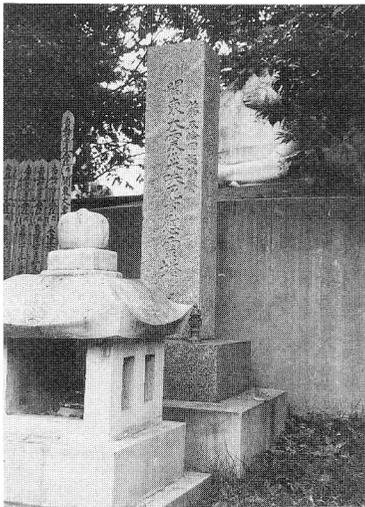


図5 第五拾回忌供養・関東大震災 歿死者慰霊塔

っているし、大震災を偲ぶ意識が風化しかかっていると
思わざるを得ない。図4は数年前に撮影された供養塔で、
全景を見るにはこのほうが宜しいようである。

◇ 震災の 思出遠く 深川の
供養塔には 草生い茂る

この供養塔の正面には「第五拾回忌供養・関東大震災
歿死者慰霊塔」(図5)があり、側面には「昭和四拾七
年九月一」という日付と「浄心寺第三十三世日壽」とが
刻んである。反対側の面には「建立 浄心寺総代門倉熊
太郎」とある。

さらに、その向かって左には「戦災殉難者慰霊碑」
(図6)がある。文献によると、これは昭和20年3月10
日の空襲によって、東陽一丁目、当時の州崎弁天町一、
二丁目で亡くなった人の供養塔が昭和21年3月10日
東陽一丁目に建立されたが、後に浄心寺に移したとある。

「本連載：その1」(地震ジャーナル、18、39、1994)、



図6 戦災殉難者慰霊碑

「同：その2」(地震ジャーナル、19、81、1995)にも述
べたように、墨田区東京慰霊堂、NTT旧墨田局「慰
霊」の碑、墨田区能勢妙見堂「戦災殉難諸精霊供養之
碑」など、東京下町では震災ならびに戦災による犠牲者
を一緒に祀ることは、共通の認識であるといえよう。

しかしながら、災害による悲惨な記憶を持続すること
はかなり困難なことのようである。むしろ年月の経過と
ともに痛恨な思出が徐々に薄れて行くので、人は生きて
行くことができるのかも知れない。このような心理的転
換が、防災意識の忘却低下につながる傾向があるのはど
うして防いだらよいのであろうか。浄心寺の供養塔の保
存状態などからみて、震災の教訓を持ち続け、つぎの災
厄に備えることがいかに難しいかがわかる。

◇ 震災も 大空襲も 忘れまじ
慰霊碑残る 浄心寺

●関東大震災殉難者供養塔 [江東区東陽3-8 沢海橋畔]

図2の地図にあるように、永代通り、営団地下鉄「木
場」駅近くの沢海橋畔の「沢海橋第二児童遊園」内に、
高さ2メートルの「大震災横死者供養塔」がある(図
7)。碑の裏面には、

「 十三回忌 昭和拾年九月一日

高野山金剛講員建立

賛助員芳名

堀六太郎	濱寿司	梶谷文吉
中村定吉	須藤亘啓	池 徳
佐藤豆腐店	栗山登一郎	
小高ハマ	宮本うめ	辰巳屋
花 福	原田忠七	……(以下省略)」

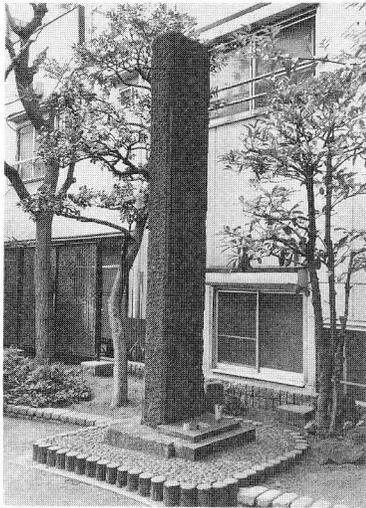


図7 江東区沢海橋第二児童遊園の「大震災横死者供養塔」

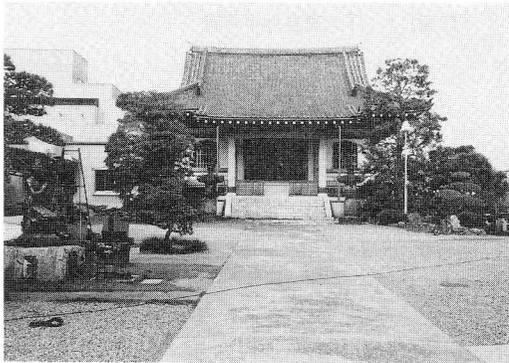


図8 持宝院

と刻んである。

この小公園には「皇太子殿下御降誕記念」などという碑文もある。なぜ、この供養塔がここにあるのか、その由来はつまびらかでない。

●持宝院 [江東区北砂 4-22] 城東警察署の近くにある真言宗の立派なお寺である(図8)。前出の文献『文化財と旧跡』や『江東区史跡ガイド』には「震災殉難供養碑」があると記載されているが、訪ねてみると比較的最近の境内整備によって取り片付けられてしまったようである。境内の片隅に取り片付けられた石碑が横たえられているが、これが問題の石碑の残骸であるか否かはわからない。いずれにしても、上記文献の記述は訂正されるべきである。

災害関係の古い石塔としては、境内の片隅にわずかに大正6年10月1日の台風による高潮犠牲者を祀る「津波殉難者供養碑」(図9)が残っているだけのようである。寺院側としても、檀家もない無縁仏同然の供養塔や

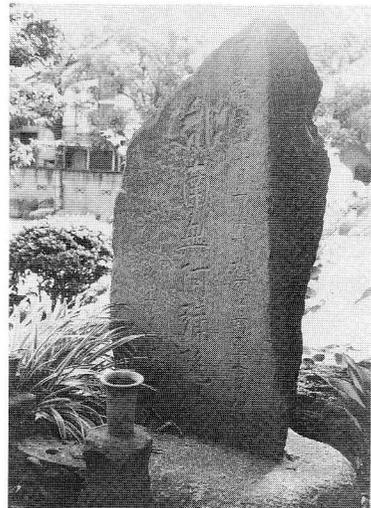


図9 大正六年十月一日海嘯横死者供養碑

記念碑を維持管理して行くのは大変であろうから、震災記念碑のような公共的性格を持ったモニュメントは、市・区などが保存を考えることが必要であろう。このことはまた地震防災意識の高揚にもつながることである。

葛飾区の地震モニュメント

葛飾区は東京都の東北縁に位置し、埼玉・千葉の両県に接していて、安政江戸地震(M=6.9; 1855年11月11日、旧暦安政2年10月2日)当時人口は希薄であった(現在の全区で1万人を若干上まわる程度か)と考えられ、したがって地震被害は、江戸市中に比してきわめて少なかったであろうと思われる。にもかかわらず、当区には本稿に述べるように、この地震の記念・供養碑がいくつかある。

『日本地震史料』のこの地震に関する総括文には、既に「本連載：その2」(地震ジャーナル, 19)にも引用してあるように、

「江戸及び其ノ附近、大地震。震害ノ著シカリシハ江戸及び東隣ノ地ニ限ラレ、直径五六里ニ過ギズ。(中略)近郊ニテ殊ニ被害大ナリシハ亀有ニシテ、田畑ノ中ニ山ノ如キモノヲ生ジ、ソノ側ニ沼ノ如キモノヲ生ジタリ(後略)」

とある。この亀有の件は『武江地動之記』の、

「近在にて殊に甚しかりしは亀有にて凡三万石の潰なる由、田畑の内小山の如き物一時に出来、側に大なる沼の如きものを生じたり」

という記述、また『大地震大風見聞記』にあるつぎのよ

うな記事によったものであろう。

「此度辺在尤荒たるハ亀有村のさき大やた村とかいえる
 辺 人家大方潰其さま家根を下にし床を上になせしと 田
 畑大いに割 砂泥を吹あげ山をなし 亦大なる堀も出来たりとそ
 」

つまり、葛飾区のほぼ中央に位置する亀有やその1キロメートルくらい北方の大谷田地区で地震動が強く、また地盤液化化現象も強烈に出現したらしい。このような記事から、安政江戸地震の震源はJR常磐線「亀有」駅付近と推定されたこともあるが、現在では荒川河口と考えるのが一般的であり、葛飾区中央部が沖積層の低地であるため、地震動や液化化現象が顕著であったと考えられる。

なお、いささか意外なことには、筆者の知る限り関東大震災のモニュメントは当区内にはないようである。

●東光寺〔葛飾区西小岩 5-21-20〕 図10の地図に示すように、JR総武線「新小岩」駅から平和橋通りを約1キロメートル西北進したあたりに、真言宗の医王山東光寺(図11)がある。境内には図12のような地藏堂があり、その内部には区登録有形民俗文化財の石造地藏像

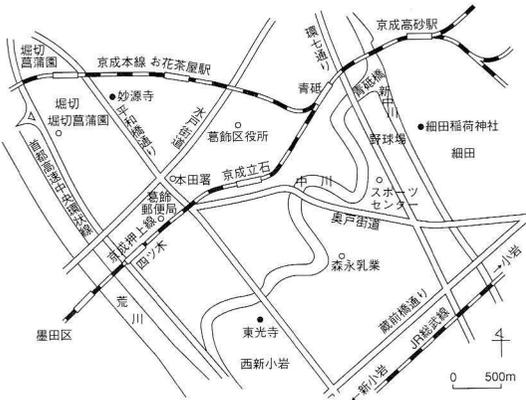


図10 葛飾区南部略図

(図13、高さ99cm)が安置されている。台石には、

(正面)「 奉彫刻石像子育地
 蔵大士一軀意趣者
 元有石像地藏尊在
 住安政二年冬罹震
 災殞滅矣干茲当寺
 鑑察司等謀再治之
 而勸道俗乞於喜捨
 之信績功以方成焉
 」
 (左面)「 今歳和州豊山能満
 院海如和尚為法留
 錫干当寺數旬因恭
 請導師而本開眼也
 矣仰願祈酬千此白
 浄信心善根 天下
 昇平五穀豐饒三有
 」
 (背面)「 六道自他平等圓
 三利之功惠云爾
 峯安政四巳年夏
 倒五月穀旦本願主
 医王山東光寺現住
 法印仁澄助主当寺



図12 東光寺地藏堂

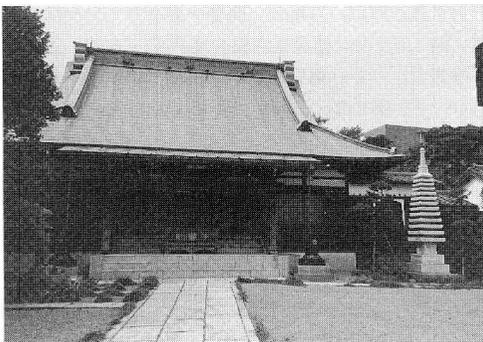


図11 東光寺本堂



図13 東光寺地藏像

◇ 地藏尊 慈悲にみちたる ^{かんばせ}顔に
 思うは難し ^{かた}安政の変

世話方

佐藤弥右衛門
 町山孫右衛門
 島邑仁兵衛
 川口嘉兵衛
 島邑仁右衛門 』
 京橋念仏講中
 当邑念仏講中
 志村忠左衛門 』

(右面)『

と刻んであり、堂の外にある説明板(図14)にあるように、安政江戸地震によって破損してしまった石仏を、住職らが喜捨を募って安政4年新しく建立したと記されている。葛飾区では、他の場合も同様であるが文化財に説明板をつけるなど、なかなかに行き届いている。

なお、読み易いように、説明板の記事を以下に再録しておく。

「 区登録有形民俗文化財

安政大地震の様子を伝える ^{せきどうじ ざうどう}石造地藏像

所在地 葛飾区西新小岩五丁目21番20号
 登録年月日 平成2年(1990)3月19日

安政2年(1855)10月2日夜、直下型大地震が江戸の街を襲いました。地震の規模はマグニチュード6.9程度で、死者は約7千~1万人にも上ると伝えられています。葛飾区の中ではとくに亀有付近が大きな被害に見舞われました。

この地震のために東光寺にあった石造の地藏も破壊されました。そこで住職たちが喜捨を募って新たに造ったのが現在の石造地藏像です。堀切妙源寺の石造題目塔や細田稲荷神社の石造鳥居などと共に、未曾有の災害に対処した当時の様子を今に伝えています。

東京都葛飾区教育委員会 』



図14 東光寺地藏像説明板

●細田稲荷神社 [葛飾区細田3-17-6] 図10の地図に示すように、京成本線「京成高砂」駅とJR総武線「小岩」駅の間あたり、新中川沿いに細田稲荷神社(図15)がある。この神社は、17世紀末の元禄時代より旧細田村の鎮守であった。神社正面の鳥居には「平成2年」と刻まれていて新しい石造りであるが、裏正面の石造り鳥居(高さ330km)には、図16のように左右の柱にそれぞれ、

「 安政二年乙卯冬十月二日
 夜為地震破壊今茲壬戌
 春再建之

杉浦與右衛門芳重 』

「 文久二壬戌年二月初午

氏子中 』

と刻んである。

つまり、当神社のこの鳥居は安政江戸地震で倒壊したが、文久2年(1862)に再建されたというわけであるか

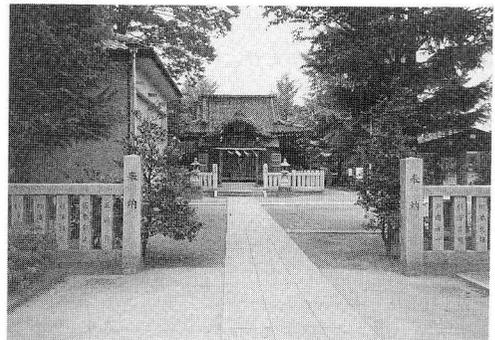


図15 細田神社全景

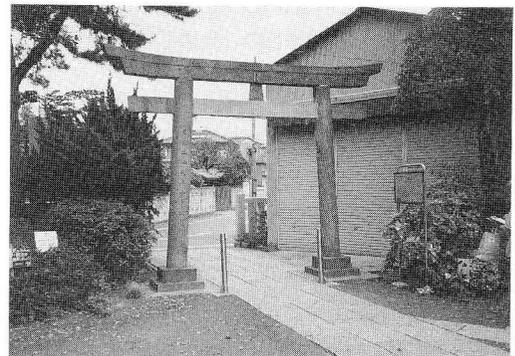


図16 細田神社鳥居と銘文



図 17 細田神社鳥居説明板

ら、この震度は恐らく6に達していたと推定される。鳥居傍には区当局により、図 17 のような説明板が建てられていて区登録有形民俗文化財であることが明記されている。説明文は以下の通りである。

「 区登録有形民俗文化財

せき ぞう とり い
石造鳥居

(安政大地震を知る)

所在地 葛飾区細田三丁目 17 番 6 号

登録年月日 平成 3 年 3 月 25 日

細田村は正保年間(1644~1647)隣接の曲金(高砂)の新田でしたが、元禄時代に(1688~1704)村となり当稲荷神社が鎮守となりました。

安政 2 年(1855)10 月 2 日夜江戸で大地震が起こりました。深川、本所、下谷、浅草が最もひどく、焼失面積は 1.5 km 四方におよび、死者は 1 万人近くにのぼりました。近郊では亀有の被害が大きく田畑の中に山や沼を生じたといえます。

この鳥居の左右の銘によると、この地震により細田稲荷神社の鳥居も壊れてしまいましたが、文久 2 年(1862)氏子の人々によって再建されたことがわかり、安政大地震の規模を知る貴重な資料となっています。

葛飾区教育委員会

◇ 安政の揺れを^{しの}へばす 石造り

細田神社の 鳥居再建

●妙源寺 [葛飾区堀切 3-25-16] 京成本線「堀切菖蒲園」駅より、平和橋通りを南西方向へ数百メートル行ったあたりに(図 10 の地図参照)、正覚山妙源寺という日蓮宗の立派なお寺がある。立派な本堂、広い境内(図 18)と墓地のほか、隣接して正覚会館(図 19)などという建物もある。

入本英太郎・橋本直子著『葛飾区史跡散歩——東京史跡ガイド②』(学生社、1993)には、この寺の沿革について詳しい解説がある。同書および葛飾区教育委員会発

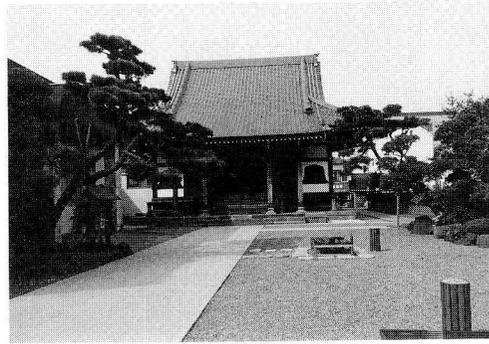


図 18 妙源寺本堂

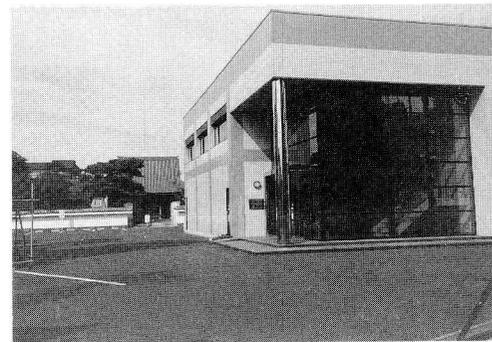


図 19 正覚会館と妙源寺全景

行『葛飾の文化財』(1996)によれば、当寺は嘉元 2 年(1304)の創立で、もともとは本所番場町(墨田区東駒形 1)にあったが、関東大震災で焼失し、1923 年当地に移転したとある。したがって、後述の安政江戸地震供養の題目塔もそのときに移されたと思われる。

墓地内には、安積良斎(1791~1860; 江戸後期の儒学者)の墓や、東條一堂(1778~1857; 江戸末期の儒学者: 佐久間象山や頼三樹三郎らの師)の百年祭記念碑など、学者・大名・役者などの墓が数多くある。

区登録有形民俗文化財の石造題目塔(図 20、高さ 238 cm)は、安政江戸地震の死者を供養するために、歌舞伎役者森田勘弥の妻が發起人となって建立されたもので、正面には、

「 南無妙法蓮華経 法界万霊 」

と「髭題目」が大きく刻まれている。

右面には、

「 牛込之住
法信院常修日統靈 加田通哲
爲安政二乙卯年十月二日夜大地震
横死焼 死 拾万余之群靈追薦供養 」

左面には、

「 維時、安政三 丙辰稔七月日造立之
正覚山二十六世進中院日甬

発起人 森田勘弥 妻 』

この石塔はももとは本所にあったわけで、葛飾方面の安政地震犠牲者のためのものではなく、本所方面の江戸市内の震災犠牲者を悼んだものである。したがって、この碑から葛飾方面の災害状況を知るべくもないが、安政江戸地震の災禍を示すものとしては、貴重な存在であろう。

区当局による説明板（図 21）には、次のように書かれている。

「 区登録有形民俗文化財

安政大地震の死者を供養した ^{せきざうがいもくとう} 石造題目塔

所在地 葛飾区堀切三丁目 25 番 16 号

登録年月日 平成 2 年 3 月 19 日

安政 2 年（1855）10 月 2 日夜、直下型大地震が江戸の街を襲いました。地震の規模はマグニチュード 6.9 程度で、死者は約 7 千～1 万人にも上ると伝えられています。葛飾区の中ではとくに亀有付近が大きな被害に見舞われました。



図 20 妙源寺題目塔



図 21 妙源寺題目塔説明板

この石造題目塔は安政大地震による死者を供養するために、歌舞伎俳優森田勘弥の妻が発起人となって建てたものです。

妙源寺はその当時、本所番場町（現在の墨田区東駒形）にあり、大正 12 年（1923）に当地に移転してきました。この塔もその時に移ってきたものと思われませんが、西新小岩東光寺の石造地藏像や細田稲荷神社の石造鳥居などとともに、未曾有の災害に対処した当時の様子を今に伝えています。

東京都葛飾区教育委員会 』

◇ 大正に ところ移せし 題目塔

今に伝える 安政の惨

●長伝寺 [葛飾区東水元 3-16-11] 図 22 は葛飾区北部の略式地図である。このあたりは、古くからしばしば水害に悩まされてきたが、治水事業の名残である小合溜を中心とする都立水元公園がある。金町方面から北へ行くと、花菖蒲園を過ぎたあたりに、真言宗の音水山長伝寺（図 23）がある。ここには区登録有形文化財の、図 24 のような宝篋印塔があり、安政江戸地震の記念碑となっている。

講談社版『日本語大辞典』には、宝篋印塔とは、

「宝篋印陀羅尼の経文を納める塔。北宋初期の呉越王の銭俶が金銅製の小塔八万四千に『宝篋印陀羅尼経』を納めて広めたのに始まる（日本にも数基現存）。日本では平安時代末～鎌倉時代から作られ、供養塔・墓碑塔として建てられた。石造りが多い。」



図 22 葛飾区北部略図

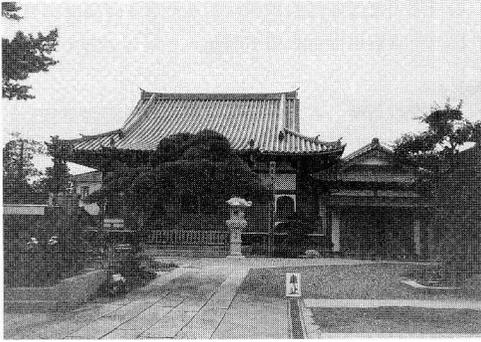


図 23 長伝寺本堂

と解説されている。当塔には、天明7年（1787）造立の銘がある。

『広辞苑』には、図 25 に示すような宝篋印塔の典型的模式図があるが、区の調査によると当塔の場合には、右記のような寸法になっている。

碑銘は風化によって判読がかなり困難ではあるが、葛飾区当局のご好意により、次のようになっていることがわかった。

[上基礎正面] 宝篋印陀羅尼経曰
 若有有情能於此塔
 蓮池妙問尼
 自覺妙觀尼
 一香一花礼拝供養
 八十億劫生死重罪
 一時消滅生免災殃
 死生仏家若有応墮
 阿鼻地獄若於此塔
 或一礼拝或一右邊
 塞地獄門開菩提路
 若人暫見是塔能除
 [上基礎右面] 一切災難罪障悉滅
 所求如意出現世安穩
 後生極樂云云爰信士
 等石刻宝塔以納神
 呪建之武州葛飾郡
 小合村大川勝右衛門
 [上基礎左面] 以此功德先亡靈位
 速得無生謹示之
 天明七丁未歲九月
 權大僧都法印快春
 (退刻)
 安政二卯十月二日夜地震
 宝牌崩安政三辰三月再造立
 恠存誌焉
 [下基礎右面] 石工戸ヶ崎



図 24 長伝寺宝篋印塔

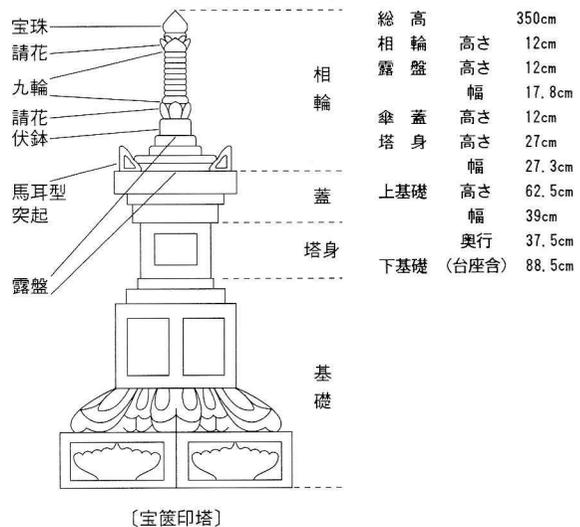


図 25 宝篋印塔模式図（『広辞苑』による）

[下基礎正面] 龜山幸右衛門
 施主
 小合新田
 大川勝衛門
 世話人
 猿又武八

葛飾区教育委員会発行『葛飾の文化財』（1996）には、碑銘からもわかるように、

「天明7年（1787）の造立銘があるが、地震で損傷したため、安政3年（1856）に修復したことが記されている。しかし、総体に当初の姿が良く保たれ、最上部の傘蓋は造立時のもので、降り棟四隅に雲珠をおき鈴鐸を下げた孔もみ



図 26 長伝寺宝篋印塔説明板

られる。

この種の塔は区内各所に在るが、地震による修復のこと、工作に戸ヶ崎の石工があたったことなどが知られる注目すべき文化財である。

と述べてある。

長伝寺は、史料に出てくる安政江戸地震の激震地亀有から、2キロメートル程度しか離れていないので、地震動は相当なものであったと想像される。なお、下記のように記された説明板(図 26)が塔の傍らに建てられている。

「葛飾区登録有形文化財

宝篋印塔

所在地 東水元三丁目16番11号

登録年月日 平成5年2月19日

この宝篋印塔は総高350cmで、天明7年(1787)の造立銘がありますが、地震で損傷したので安政3年(1856)に修復したことが、記されています。しかし、総体に当初の姿が良く保たれ、最上部の傘蓋は造立時のもので、四隅に鈴鐸を下げた孔もみられます。この種の塔は区内各所にありますが、地震による修復のこと、工作に戸ヶ崎の石工があたったことなどが知られる注目すべき文化財です。

(安政地震)

安政2年(1855)10月2日夜、江戸を中心に大地震が起こりました。深川、本所、下谷、浅草あたりの被害が最もひどく、焼け野原となり死者は1万人近くにのぼりました。葛飾では亀有の被害が大きく、田畑の中に山や沼ができたほどと言われています。

葛飾区教育委員会

◇ 有難や地震に堪えて 陀羅尼經

今に残れる 天明の塔

[りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授]

富士山の身代金

近頃の書店には、『震源』と題する分厚い文庫本が平積みになっている。これは、本誌16号(73, 1993)に『地震とサスペンス』と題して紹介した本が文庫版となったものである。これと同様の「火山とサスペンス」ともいうべき、表題の本(藤山健二著、新潮社、290ページ、1995年3月20日発行)があるので紹介しよう。著者がどういう人物かはわからない。

話は太平洋戦争末期の昭和20年6月、当時の陸軍が富士山に横穴を掘っていたというところから始まる。指揮者は参謀本部から異例の配置換えとなった成沢少佐で、参謀本部でもほとんど知られていないこの「富号作戦」の立案者であった。現地の兵員には、前年に起こった東南海地震の影響で富士山の大噴火が迫っていて、この噴火によって日本が壊滅するのを防ぐため、マグマのガス抜きをするのが目的だと説明されていたが、実は人工爆破により噴火を起こして上陸してきた敵軍を壊滅しようとするものであった。

さて、話は50年後にシフトする。富士山麓を走っていた自衛隊のトラックが襲われて、爆薬10トンが奪われた。ここで元自衛隊員堂垣が登場し、防衛庁長官秘書の秘密指令を受けて調査活動を開始する。

話は再び飛躍して、酷寒の富士山測候所が舞台となる。吹雪について登ってきた数人の武装テロリストによって、測候所は占拠され、測候所員は人質とされる。テロリストの主犯片桐という男は、ここから警察庁警

備局長に直接電話し、「5億ドルを現金で用意しろ」と脅迫する。指令通りやらないと富士山内に持込んだ10トンの爆薬を用いてリモコン操作で富士山の大爆発を起こすというのである。慌てた政府は富士山周辺を固めるとともに、測候所空爆(測候所員の犠牲はやむを得ない)計画などを準備する。

いっぽう、秘密司令下の堂垣はいろいろなハプニングの末、山麓のある神社の神官となっている成沢を発見し、教えられた旧陸軍の坑道を富士山内部へ進入する。この間、堂垣は何度も危機を乗り越えるが、紀元前に中国から渡来した一族の末裔だという美女姉妹に遭遇する。片桐は姉妹の一人をおどして、地下通路の存在を知ったらしい。この奥には旧陸軍が残した爆薬50トンが残っているのである。

片桐の政府脅迫は続き、ついに爆薬の半分を爆破する。これによって、富士山直下を震源とする低周波地震が続発し出し、一般にはあまり知られなかったが危機感が増大した。

設定されたタイムリミットぎりぎりのところで、堂垣は火薬を水びたしにすることに成功し、爆破ひいては富士山大噴火は回避される。パラグライダーで脱出したテロリストは、ヘリによって西湖に投下された5億ドルのトランクを拾って、湖底の水路を通り本栖湖に浮上し、ここから車で逃走しようとするが、待ち受けた堂垣によって射殺される。

この話はサスペンスとしてはよいかもしいないが、もっと地球科学的エピソードを盛り込んでほしかった。そうすれば、地震や火山への一般の人びとの関心をより高めることになったであろう。

[R]

■ 地震予知連絡会情報 ■ 石井 紘 ■

地震予知連絡会は第120回が8月19日、第121回が11月25日に開催され、それぞれ72および80件の報告がなされた。取り扱われたルーチン観測の解析期間は1996年5月から1996年11月であった。秋田・宮城県境付近に8月11日に最大地震(M5.9)の地震が発生し被害を発生させたため話題になった。東海地方の地殻活動については、10月5日に静岡県中部に発生したM4.4の地震が、最近十数年地震活動の見られなかったところに発生しており議論があった。

東海地方

東海地方の地殻活動に関しては、御前崎の沈降の鈍化や駿河湾における地震活動の増加などが指摘されていたが、1996年7月の測量により網平均した結果では鈍化の傾向から再び沈降の変化を示した。1996年10月の測量では7月と比較して大きな変化は観測されなかった(図1、第121回:地理院)。この上下変動は、時間・空間に関して連続的な変化としてみるとわかり易い(第121回:地震研)。また、東海地域におけるGPS観測によると、掛川一御前崎や静岡一西伊豆など、大きいところでは年間数mm程度の縮みが明瞭に観測されているように見える(第121回:地理院・防災科技研)。1996年10月5日に静岡県中部に発生したM4.4の地震は、深さ26kmで十数年間地震の発生していないところに発

生しており(図2、第121回:気象庁・防災科技研)、メカニズムや震源位置などが議論された。メカニズムは高角の正断層タイプで、プレート境界地震ではなく境界に近いところで発生した(第121回:気象庁・防災科技研・地震研)。応力降下もプレート境界地震より大きく、フィリピン海プレート内で発生した地震と解釈している(第121回:地震研)。また、東海地震が発生すると考えられている固着域が、深いところから浅いところへゆるみはじめているとの考えも議論された(第121回:防災科技研)。

一方、GPS観測から東海地方における変位ベクトルの短期間の分布(図3、第121回:地理院)が時系列的に提出されるようになり、異常な地殻水平変動の検出に有効なデータとなることが期待される。

伊豆地方

伊東沖の群発地震活動は7月2日から地震活動があり、8月まで約180個の震源が決定され傾斜計にも変化が記録された(第120回:気象庁・防災科技研・地震研)。その後、10月15日から再び活動が始まり、10月末まで約1700個の震源が決定された(図4)。体積歪計・傾斜計・3成分歪計などに群発地震活動と関連した変動が記録された(第121回:気象庁・防災科技研・地震研)。この地震は活動の最初から震源が浅いほうに移動した後

拡散し、18日頃からは内陸部にも震源が決められた。1995年9月から10月にかけて起こった群発地震の震央よりも若干西よりであるとともに、分散した震央が初めて35度線よりも北に起こったのが特徴的である。1993年からの震源分布を見ると空白域を埋めるように起こっているが、まだ空白域が残っているこ

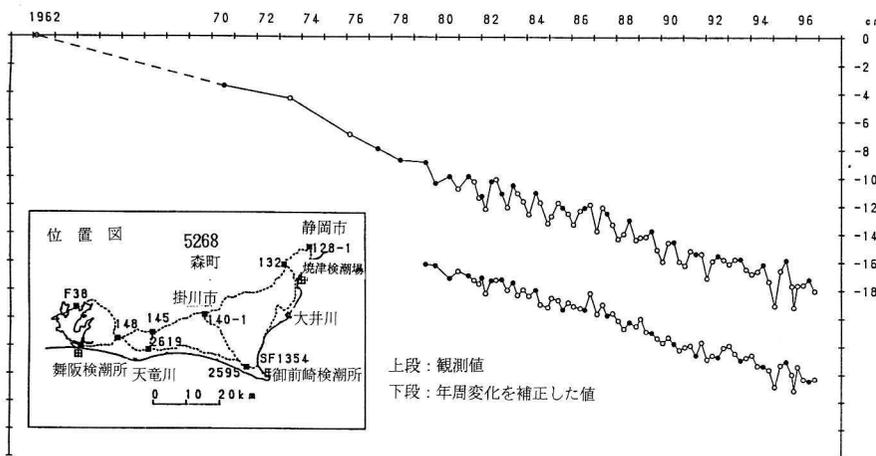
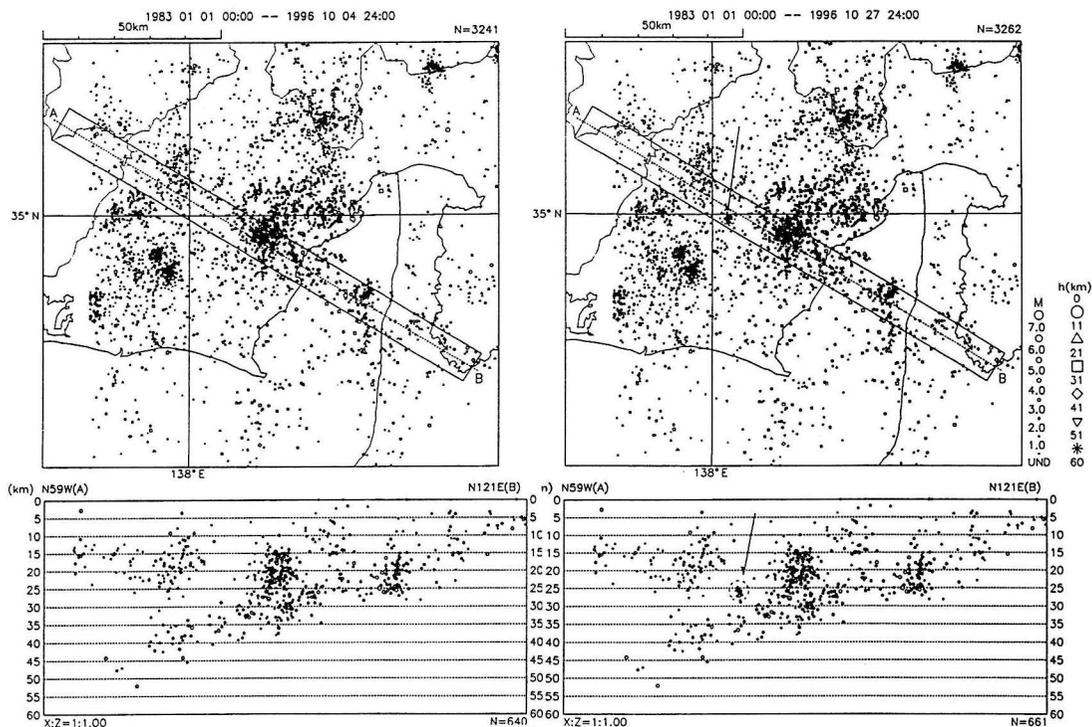


図1 掛川に対する浜岡の水準点2595の変動(第121回:地理院)
上段は観測値、下段は年周変化を補正した値を示す。黒丸は網平均計算をした結果。



左：防災科学技術研究所とルーチン以外のデータ交換を行ない震源精度を高めた。
 右：気象庁・防災科学技術研究所・東京大学・名古屋大学のデータを利用。〔気象庁・防災科学技術研究所作成〕

図2 10月5日からの静岡県中部地震の震源位置

左：1983年1月1日から1996年10月4日までの地震の震央と深さ分布，右：1983年1月1日から1996年10月27日までの地震の震央と深さ分布および10月5日からの静岡県中部地震の位置（第121回：気象庁）。

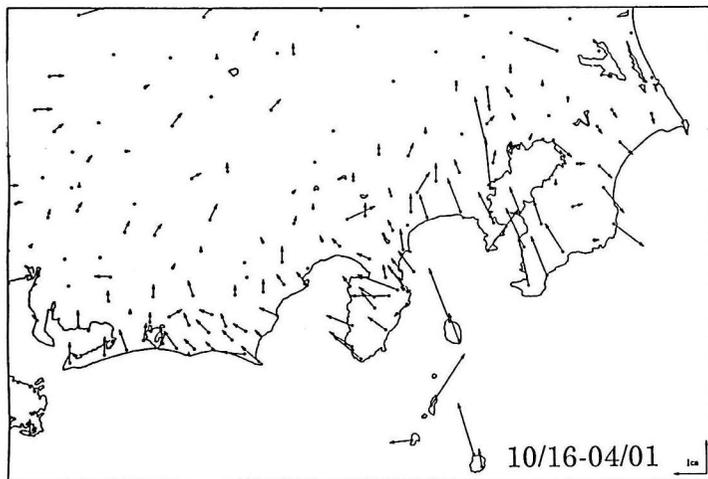


図3 GPS観測により得られた1996年4月1日から10月16日までの地殻水平ベクトル（第121回：地理院）

とや活動期間中4個の非常に浅い低周波地震が観測されたことも報告された（第121回：地震研）。傾斜計の変化は今まで4回のeventにおいて似た変動を示している（図5）。伊東における地下水位観測によると、1995年の

ときは地下水位が上昇したが1996年のときには低下した（第121回：東大理）。水準測量による結果を見ると1995年のときよりも広く、量も大きい。水平変動では、初島や宇佐美には変動が及ばず、内陸部の変動が大きい（第121回：地理院・地震研）。

新島・神津島付近では活発な地震活動が継続している（第120回，第121回：気象庁・地震研）。この付近の活動は1990年頃から活発になっている。駿河湾の20万分の1のシービームマップが得られ20m間隔の等深線の海底地形図が得られた（第120回：水路部）。

東北地方

秋田・宮城県境付近に1996年8月11日からM5.9の地震を始めとし、M5.7、M5.4やM4.9などが発生し（図6）、被害が起きた（第121回：東北大，気象庁）。約4500個の震源が決定されたが、本震のメカニズ

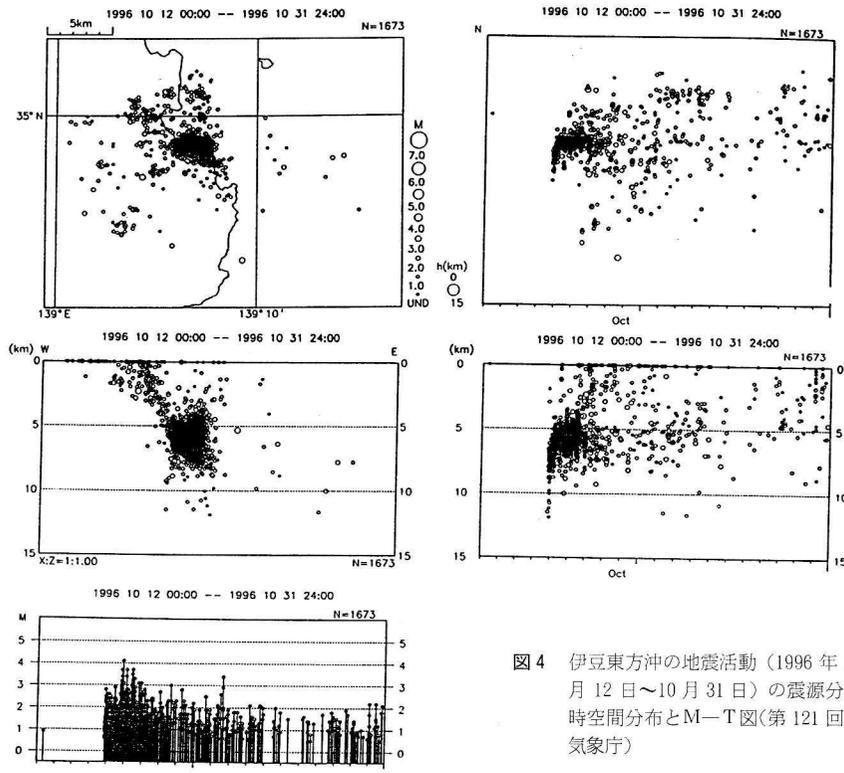


図4 伊豆東方沖の地震活動(1996年10月12日~10月31日)の震源分布、時空間分布とM-T図(第121回:気象庁)

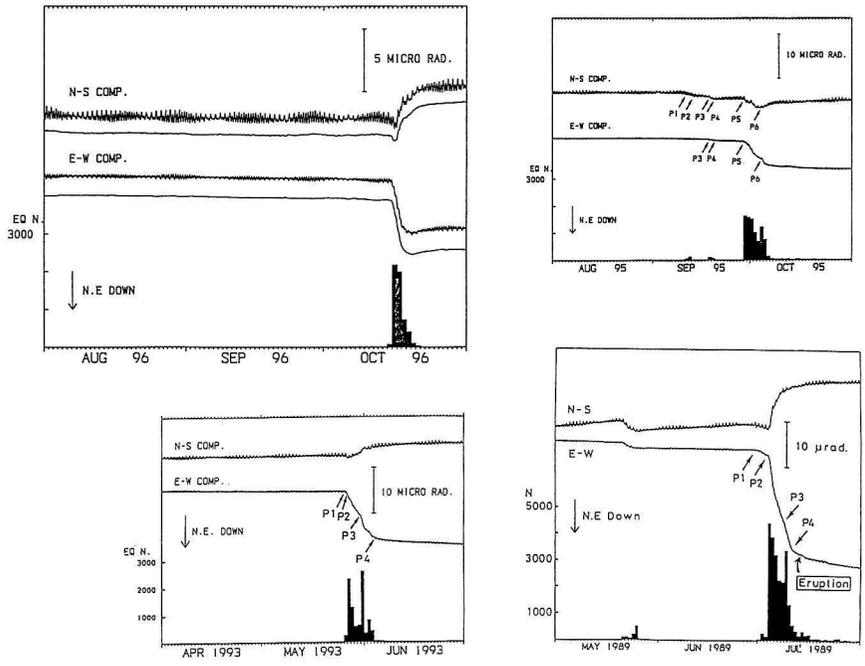


図5 伊豆東方沖の地震活動に伴って観測された伊東観測点における傾斜変化の比較(第121回:防災科技研)

ムはほぼ東西圧縮の逆断層タイプであった。また、東北 なた。雌阿寒岳は11月21日に8年ぶりに小噴火をした。

地方日本海側には、地震活動が静穏化していた可能性のある領域が見出されている(第121回:東北大)。

関東地方

1996年9月11日に銚子沖でM 6.2の地震が発生した。そのメカニズムは北東-南西張力の正断層タイプであった。静穏化が指摘されていた房総半島沖の領域の南側の部分でM 6.0の地震が11月20日に発生した。山梨県東部における地震活動は8月9日にM 4.6とM 4.1が発生し、10月25日にM 4.5とM 4.1が発生した。発生域を変えながらたびたび発生しているが、ほぼ北西-南東圧縮の逆断層型の地震がほとんどである(第121回:気象庁)。首都圏広域地殻変動観測システムVLBI連日観測により、鹿嶋・小金井と三浦間の水平変動が観測されるようになってきた(第120回, 121回:通信総研)。また、リアルタイムVLBI観測にも成功した。

北海道地方

雌阿寒岳では、1996年8月末から地震活動が断続的に活発になっていた。同時に、十勝支庁北部の地震活動も9月末には雌阿寒岳と同期するように活発になった。雌阿寒岳は11月21日に8年ぶりに小噴火をした。

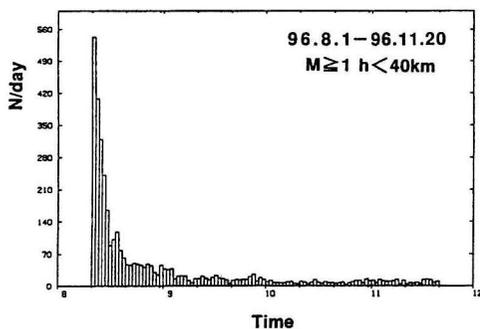


図6a 秋田・宮城・山形県境付近に発生したマグニチュード1以上の地震の日別頻度回数(1996年8月1日～11月20日)。ただし、8月13～20日および10月30日以降のデータは自動処理による。

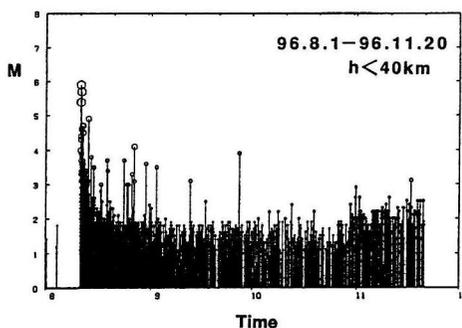


図6b 秋田・宮城・山形県境付近に発生した地震のM-T図(1996年8月1日～11月20日)。ただし、8月13～20日および10月30日以降のデータは自動処理による。

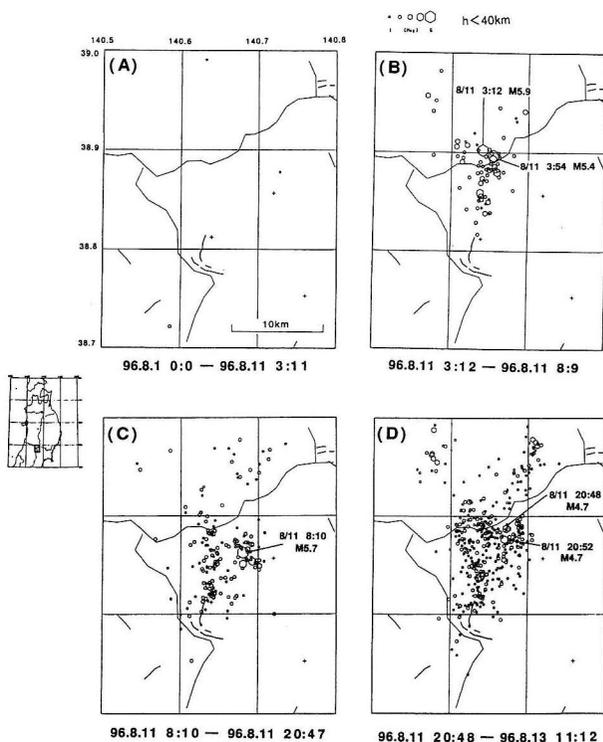


図6c 秋田・宮城・山形県境付近に発生した地震の震央分布 (A) 1996年8月1日～8月11日のM 5.9の地震の発生直前, (B) 8月11日3時12分～8時10分の地震(M 5.7)の発生直前, (C) M 5.7の地震の発生—20時48分の地震(M 4.7)の発生直前, (D) 8月11日20時48分の地震の発生—8月13日11時13分の地震(M 4.9)の発生直前(第121回:東北大)。

近畿地方

5月末から6月初めにかけて、京都市の西で群発地震活動があった。その後、7月18日に京都市東部、花折断層南端付近でM 4.0の地震が発生し、7月30日には琵琶湖北東岸でM 4.1の地震が発生した。兵庫県南部地震の余震も減少しており、最大の余震は兵庫県南東部のM 3.7であった。兵庫県南部地震の際に地表変位の最も大きかった野島平林において断層を貫く坑井(深度750m)が掘削され、採取したコアや検層などの測定から野島断層の地下地質構造・速度構造などが調べられた(第120回:地質調査所)。それによると深度557m-713mが断層破砕帯であり、その幅は30m以下であった。

中国・四国・九州・沖縄地方

9月9日に種子島の陸域で活断層に沿ってM 5.7の地震と余震が発生した。その後、この余震域を深き方向に延長した付近に前震を伴ったM 6.2の地震が10月

18日に発生した(第121回:気象庁・鹿児島大)。また、M 5クラスの前震を伴ったM 6.6の地震が、日向灘で10月19日に発生した。メカニズムは5月2日に発生したM 5.2の地震と同じ北西-南東方向の圧縮軸を持つ低角逆断層タイプと考えられる(第121回:気象庁・京大防災・九州大・鹿児島大)。地理院のGPS観測ネットは、この地震に伴った地殻水平変動を観測した。最大は南東方向に3cmの変位であった(第121回:地理院)。喜界島における地震活動は減衰しているが、まだ活動が続いている(第121回:気象庁、鹿児島大)。九州と四国間の1984年の日向灘地震(M 7.1)の北方延長域に空白域が見られることが指摘された(第121回:気象庁)

その他

1995年に北部サハリンのネフチェゴルスクで発生した地震に伴う地殻変動が、「ふよう1号」の合成開口レーダー(SAR)によるデータ解析により検出された(第121回:地理院)。

[いしい ひろし 東京大学地震研究所教授]

■ 書 評 ■

●地方分権と危機管理を考える

小松左京 著

小松左京の大震災 '95

評者 井野盛夫

大震災本と称するものは約300冊以上出版されたと言われているが、この本ほど、幅広く阪神・淡路大震災に関する情報が詰まった本を知らない。昨年の4月から1年間、『毎日新聞』に掲載された記事を纏めたもので、話題となったフィクション『日本沈没』の筆者ならではの内容から、忌まわしい経緯を再び繰り返してはならないという決意が読み取れる。

最新の地震発生メカニズム研究の現状、兵庫県南部の地震はなぜ予知ができなかったか、震度7を判定した仕組みと、今後、主流となる計測震度計による全国一律の速報システムの紹介、活断層直上の異常な被害の理由、地震発生前に現れた前兆現象の記録、木造家屋の倒壊によって多くの死傷者を生じた理由、我が国ではようやく緒に着いたばかりの被災者の心のケアの現状、神戸人特有のモダン気質から再建にかける意気込みなど、筆者は各界の専門家を取材し、専門的で難解な部分については対談を通して読者に迫っている。

災害発生時の初期対応で指摘された災害対策本部の運営について、筆者は「露呈した役所組織の欠陥」と章を起こして、災害発生時の国の緊急対応は公式情報によって起動する点を指摘し、一方「マスコミから非難された県の責任者の行動は、交通事情から止むを得なかった」と好意的でもある。しかし、備えがない組織において災害が突然発生したときの危機管理がいかに難しいか、まさに重要な教訓として受け止めるべきである。

県災害対策本部機能の一つは、各部局や防災関係機関が災害対策に対して共通認識を持つことであり、本部長、すなわち知事の指示事項が防災対策要員に徹底され、また、現場から本部長への報告は特別なものを除いて、対策要員も同じように周知しておきたい。災害対策本部員会議が定期的開催されていたが、本部統括部局の調整

がされないまま対策執行状況が報告されるので、その量が膨大なものとなり、報告のための資料作りに追われ、指示事項も一方的になってしまったものが多いと聞く。

また、県と政令指定都市間において災害応急対策の執行が、従来の行政と同様に対応できなかったことも対策を難しくした理由であろう。自衛隊の災害派遣要請（震災後、止むを得ない場合に限り市町村も可能と変更）、緊急支援物資の配分調整、被害報告の取り纏めなども県の業務であり、普段から行政処理では解決されない点がいくつかあった。地方分権が叫ばれている昨今、防災面では地方への権限移譲は慎重に行なわなければならない。

この本は様々な事例を紹介しており、地方公共団体や企業の防災担当者にとっては、所属する組織の地震防災計画や災害時行動マニュアルと対比点検するための絶好の事例集である。また、地震災害史に残る被害状況や防災関係機関の機能、専門用語について解説を欄外に設けて使い易く配慮され、一般読者にも勧められる本である。

〈毎日新聞社、1996年6月、四六判、365頁、1500円〉

[いの もりお (静岡県防災情報研究所長)]

●木造住宅の耐震性向上に願いを込めて

杉山英男 著

地震と木造住宅

評者 渡辺孝英

1995年兵庫県南部地震では6000人以上の方が亡くなり、1923年関東地震以来の大惨事となった。ことに死者の8割以上が住宅の崩壊による圧死であったことは、建築に携わる者に大きな衝撃を与えた。発展途上国では耐震性の乏しいレンガ造建物の崩壊により、しばしば多数の死者を出してきたが、耐震構造の発達したわが国で神戸のような惨事が起こるとは、多くの人は予想していなかった。

著者は建築構造、特に木質構造の研究・指導を40年以上にわたり行ってきた方である。本書では、今回の震災で多くの木造住宅が崩壊した原因を、構造力学の観点に立ち、しかし難しい式を使わず、豊富な図を用いて直感的にもわかるように説明している。また耐震性が低

い建物が作られてきた歴史的な経緯も詳しく述べている。こうして世間、あるいは専門家さえも誤解している多くの事柄についても、誤りを正している。

たとえば、阪神大震災では「木造」が壊れて、「プレハブ」が大丈夫だったという意味のことが一部で報道されたが、これは言葉の定義がおかしいために起こった混乱であると述べている。著者ら研究者は、在来木造（軸組構法）、木質プレハブ（パネル構法）、ツーバイフォー（枠組壁構法）などを包括して「木質構造」と呼んでいる。したがって、「木造」と「プレハブ」は対立するものではなく、「一つのファミリー」であるべきものと考えている。そうして今回の震災で大きな被害を受けたのは一部の在来木造であったことを明確にしている。また、わが国伝統の和風木造建築の様式・構法の優秀性を賛美するあまり、それらが地震に強いと思っている人達には、「ズバリって江戸時代の木造建築は地震に弱かった。庶民の住家、特に町屋の耐震性はゼロに近かった」と、認識を改めることを求めている。

著者らは、阪神大震災前から、在来木造の耐震性の弱点はほとんどわかっていたようで、被災地で被害を受けた建物と、無被害のものを調べた結果は、「木質構造の耐震化の手だてをしっかりと掴み得た」と、明るい見通しを述べている。現在の知識と技術と材料で耐震性のある住宅を設計・建設することが可能であることを示している。また世界の木材資源についての考え方が大きく変わりつつあり、普通の材木である製材の利用が急激に減少し、合板などの木質材料が多量に使われるようになり、在来木造とツーバイフォーとプレハブ構法が限りなく似た構法に近づくであろうと長期的な予想をしている。

本書は、木質構造の特質を正面から捉え、木造住宅の耐震性向上の方策を示し、今後の地震災害の軽減を希望する著者の願いが込められている。住宅の設計・施工に携わっている実務者、建築学の教育者・学生諸氏はもとより、地震や建物に興味を抱く一般の方々にも読んでいただきたい書である。

〈丸善株式会社、1996年7月、四六判、366頁、3090円〉

〔わたなべ たかひで 清水建設(株)和泉研究室〕

●最近の予知への風潮に意気込みを読む

パリティ編集委員会編〔力武常次責任編集〕

地震の科学

評者 松澤 暢

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震以来、数多くの地震関係の書籍が出版されてきた。それらは活断層に重点を置いた本や、地震工学、地震、地盤の前兆現象など、入門書から専門書まで幅広い領域にわたっている。特に防災に重点を置いた書籍が目立ったのが今回の特徴であろう。しかしながら、地震現象一般について最新の研究を要領よくまとめた書籍は、ほとんどなかったのではなかろうか。

本書は、その意味で地震関係の最近の研究のトピックをまとめたものであり、最新の地震学、特に災害科学としての地震学を概観するのに有用であると思われる。最新のトピックという関係上、専門的な用語を理解しないと、この手の本はとっつきにくい、この本では編者による地震学のガイダンスが先頭に記述され、また難しい数式を極力使わないようにするなど、初学者にとっても読み易いように配慮がなされている。とは言え、これだけの説明で、例えば中学生が理解できるかと言われれば、やはり無理であろう。この本は、もともと物理学関係の雑誌である『パリティ』に連載されたものをまとめたものであり、その意味でも、大学である程度、物理をかじった人向きに書かれており、そのような人々に薦められる本である。

内容は4部構成で、第1部が「地震学入門」、第2部が「発震のメカニズムとプロセス」、第3部が「地震の予知と観測」、第4部が「地震災害と防災」となっており、その中にいくつかのトピックが、それぞれの分野でユニークな研究をしている人々によって執筆されている。私個人としては、私の専門外の活断層の話や防災、津波の話などが興味深かったが、この本の最大の特徴は何と言っても「地震予知」について、かなりのスペースを割いていることである。

最近、地震予知に対して悲観的な風潮が研究者の間でも広がっている中で、このような本を出版したことは、これまで地震予知に真っ向から取り組んできた編者の意気込みを感じさせる。残念ながら、この本に書かれている地震予知に関する部分の話は、まだ学界内部でもかなり議論があるところであり、初学者はその点に注意して読む必要がある。これは最新のトピックを取り込みたいという主旨の関係上、仕方のないことであり、この本に書かれている内容、特に地震予知にからむ部分は、もしかすると10年後には否定されているかもしれないし、あるいは地震予知の有効な手段として脚光を浴びているかもしれない。しかし、そのような大胆な仮説の提示とその検証こそが科学の醍醐味であろう。

近頃、純粋科学としての地震学に取り組みたいとする若い学生が増えているが、この本を読んで、地震予知も含めた災害科学としての地震学も結構面白そうだと考え

る若い学生が増えてくれれば、編者としては、おそらくそれが一番嬉しいのではないだろうか。

〈丸善出版、1996年9月、四六判、260頁、1648円〉
[まつざわ とおる 東北大学理学部：地震予知・噴火予知観測センター助手]

●地震と地震防災のための本

京都大学防災研究所 編 巨大地震の予知と防災

評者 松浦律子

1995年1月17日早暁に発生した兵庫県南部地震は、日本の大都市がいかに脆いかを見せつけました。そして震災のあまりの甚大さは、これまでの地震防災研究だけに留まらず、自然現象としての地震研究の環境をも激変させています。本書は、ちょうど組織の改組の最終段階で阪神・淡路大震災の教訓を取り込んだ京都大学防災研究所の、地震防災に関する研究成果の社会還元のひとつとして編纂されました。NHK教育テレビ「人間大学」シリーズで4回にわたり1995年9月25日～28日に放送された内容に、加筆されています。

放送当時はまだ震災の記憶も生々しく、地震関係の本の出版や番組の放送が洪水のようであったので、単なる災害現象の説明ではなく、将来の防災学研究の発展につながる話題を4テーマ選んで、防災研究所の特色を生かした構成になっています。

「第1章：地震予知の現状」では、地震の発生場所や観測手法、地震活動などに表れる前兆の例やその把握の現状、来るべき南海地震への備えについて書かれています。特に最後の南海地震を予知するために、海底地殻変動観測・海陸GPS・海底深層ボーリング・陸上深層ボーリングなどの開発段階の手法を駆使する総合的観測体制が提案されています。どれもなかなか技術的壁が残されている手法ですが、『10kmも深さがあれば申し分ない』という風にあっさりと言われると、読者としては希望を持ってそうです。

「第2章：強震動の予測」では、構造物の直下の地下構造によって地震による強震動が全く異なること、活断層の直上でなくとも近距離の地域では、地盤次第で『震災の帯』が生じることが述べられています。そして、強震動を予測して必要十分な構造物の強度を推定するためには、従来バラバラであった活断層の調査と、基盤と表層との地下構造調査とを併せて、地盤特性を反映した詳

細な強震動予測の必要性が提起されています。

前の2章が、地震の発生前に災害軽減のためになされるべき研究の紹介とすれば、後の2章は地震が発生してしまった後の社会や人間の困難を最小にするために、予め備えておくべき社会システムや緊急用の備品に関する研究の紹介となっている。「第3章：災害情報」では、緊急時に誰もが使いやすいGIS（地理情報システム）を利用した町の種々の情報蓄積が、いかに災害発生後の被災者の迅速な救済を可能にするか、「第4章：被災者の心のケア」は、肉親を悲惨な形で失ったり、財産を失った被災者のトラウマ（精神的外傷）を癒すための研究が述べられています。従来は国民の生命・財産を守るというハードばかりに着目されていましたが、これだけ日本社会が豊かになり、徒手空拳から追いつく意欲を持続し難い現在の状態では、当然災害発生後の心の平安をたもつ工夫が重要となります。

〈創元社、1996年9月、四六判、155頁、1648円〉
[まつうら りつこ 地震予知総合研究振興会主任研究員]

●新刊紹介

宇佐美龍夫 著

新編 日本被害地震総覧 増補改訂版 416-1995

東京大学出版会、1996年8月発行、B5判、495頁、25750円

1974年に初版が出版されたこの著者による『総覧』は日本の地震カタログとして定評を得ているが、その後の多くの歴史地震史料の検討を経て1987年に刊行された『新編』に引きつづき、今回の『増補改訂版 416-1995』が、1995年12月までの地震を収録して出版された。1985年以降の新しい地震資料の追加のほか、最近の研究成果によって歴史地震の記事の改訂が行なわれている。また遺跡に残された地震痕跡に関する研究の成果を付表として一覽できるようにしてある。

深尾良夫・石橋克彦 編

阪神・淡路大震災と地震の予測

岩波書店、1996年8月、B5判、380頁、3800円

雑誌『科学』に1985年1月から1996年6月までに掲載された地震関係の論文から、約70篇を選び、その内容によって次の5部にとりまとめ、単行本として出版された。

I. 兵庫県南部地震 自然現象として兵庫県南部地震

の、震源、地震活動、地殻の動き、強震動の特徴などの分析。

Ⅱ. 阪神・淡路大震災と防災 この地震による、土木・建築構造物、ライフライン、火災などの被害、さらに今後の震災軽減に関する問題などが取り上げられている。

Ⅲ. 地震の予測可能性 地震という自然現象の発生を予測することが可能であるか、地震発生の物理学的な検討。

Ⅳ. 地震予知の探究 地震を予知できるとしたら、そ

の科学的方法は何か、さらに社会的関わりについて、
Ⅴ. 地震・津波とテクトニクス 地震発生の背景となるプレートの運動や地下構造など、テクトニクスの問題と、津波とその震源過程など。

地震の種から始まり、地表に断層をあらわし、重力加速度に匹敵する大震動を起こし、多くの人命・財産を奪うに至る広範な現象の科学が、一冊にまとめられている。最近、急速に進展しつつある地震学あるいは地震工学の重要な問題を、兵庫県南部地震の教訓を踏まえて理解させることを目指している。

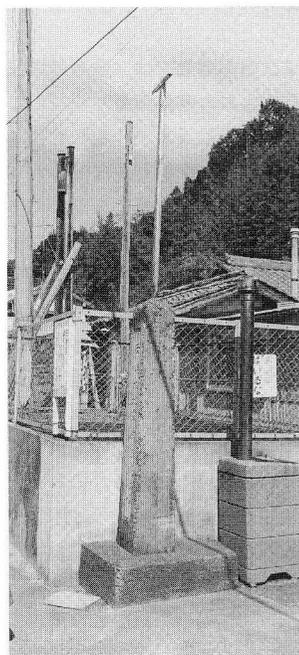
前回の体験

この12月で、1946年南海地震以来満50年になる。これを機に、和歌山県と田辺市のご支援で、歴史地震研究会が9月12～14日に田辺市で開催された。田辺市は、典型的なV字型の田辺湾の湾奥に位置し(下図参照)、文里(もり)を中心に津波の大きい被害を受けたところである。研究会の最終日、この市内をかわきりに、過去の津波の痕跡を尋ねるバス旅行があった。その中で、図に丸印で示した内之浦で、右写真の津波の高さを表す標石を見学した。写真を撮った角度が下手で、よく写っていないが、標石には「南海大地震津浪潮位標」と刻んであった。標石の上には鉄のアンクルが立てられ、さらに最上端には水平にアンクルがつけられている。つまり津波はこのてっぺんまできたというのである。標石の高さは地上から約2m、したがって、ここでは津波の高さは地上約4mに達したことになる。ほかにも市内の各所にこのような標石があり、前回の津波の体験を後に伝える努力がなされている。

ところで、この標石から200mほどのところの山祇神社の石段にそって、右下の写真のように2つの標石が立てられている。手前のものは、昭和21年(1946年)12月21日の南海地震津波がここまで達したことを示す標石であり、奥に見える標石は、前前回の津波、安政元年(1854年)の安政南海津波がここまで上がったことを表している。つまり前前回の津波は、前回の津波より石段の数にして5～6段ほど高かったことを示している。

では次の津波に対してわれわれはどちらに備えればよいのだろうか。南海道のような地震が繰り返り発生するところでは「時間予測モデル」(島崎邦彦:本誌21号参照)がなりたつという。とすれば次の地震は平均的な再来時間間隔よりかなり早く来る可能性があるが、その規模を予測することはできない。

われわれは前回の体験だけにとらわれず、その前のより大きかった津波にも備えなければならない。 [A]



ADEP情報

材料・構造物の衝撃的破壊現象 とその防止に関する調査

兵庫県南部地震では、最高の震度7と判定された密集市街地域などにおいて、甚大な災害が発生した。

特に高架橋や中層ビルなどの大きな構造物の被害が顕著であり、その状況には今まで経験されなかった新しい形態が見られた。例えば、高架橋の鋼製円柱橋脚の一部が円環状に膨らんだ坐屈破壊、RC橋脚柱の水平ひび割れや縦方向の圧縮破壊、RC中層ビルの中間階の崩壊、高層ビルの鋼製大断面支柱の横断方向に割れたぜい性破壊等である。これらは直下型地震発生直後の上下・水平方向の強震動が、同時に作用した衝撃

的破壊を強く示唆するものであった。

この事実は、従来の土木・建築物の設計基準が、水平地震動を主体に耐震性の評価がなされてきたことに対し、直下型の上下および水平方向同時の衝撃的な地震動による構造物の動的挙動と破壊メカニズムの解明による耐震性の評価、という新たな視点からの技術的対応も要請されることとなり、今後、このような災害を防止するための研究課題として、その重要性が認識されるに至った。

しかしながら、この問題には震源直上の強震動の定量的評価、地震応力波の地盤から構造物、更には構造物各部への伝ば・透過・反射による構造物中における応力集中、それに対する構造物および各部の動的挙動など、破壊のメカニズムを解明するための定量的評価手法の確立という、複雑かつ困難な課題があり、研究を早急に推進する必要がある。

本調査は、上記の趣旨から平成8年度科学技術振興調整費により、研究の前段的調査として、当振興会に委託されたものであり、土木・建築工学、衝撃工学、破壊工学、材料工学の専門家による総合的・学際的な検討により、下記の研究の枠組みを提案している。

短歌・俳句などは少ない言葉で表現するだけに、それを見る人によって、それぞれ異なったものを、文字のそとに感じてよいのではないかと勝手に思う。岡井先生は本号の論説のなかで、“描写とか記録とかいう段階ではテレビの映像のなまなましさには速く及ばない”とっておられる。しかし短いことばで、体験を歌ったものは一読胸をうつものがある。文明社会が限りなく発展していくなかで、防げ得ない災害に、人の心のケアの問題がクローズアップされている。自然科学だけでは片づかないものがある。 [A]

まず直下型地震の衝撃的な強震動の特性を明らかにし、地震力が基盤から地層、更には構造物の下部構造および上部構造に伝ばし、構造物内に発生する応力・ひずみ・速度などを定量的に把握するため、地層構造、構造物の形状や境界条件、材料の特性などを全体としてモデル化し、断層の破壊条件を与えて、3次元の大規模数値シミュレーションによる構造物の破壊挙動の研究を行なう。

上記解析と並行して実験的な確証を得るため、既存の試験装置の利用および衝撃複合負荷構造試験装置を開発し、構造物のスケールモデルにより破壊挙動の実験的研究を行なう。

更に、構造物などの各種材料の衝撃力による特性変化および応力-ひずみ関係など、破壊条件を明らかにするため、材料実験による研究を行なう。

以上の結果を踏まえ、構造物の衝撃的破壊事例を検証するとともに、現行の設計基準・補強法の問題点も明らかにし、衝撃的破壊防止のための新しい構造概念を確立する。

この研究の成果は、直下型地震に対する構造物の耐震性評価、合理的設計法の確立のために非常に重要であり、その推進を期待したい。[SU]

編集後記

座談会「震源で何が起きているか」は、いま地震学で最も注目されている課題の一つである。それだけに議論もはずみ、速記録ではこの3倍もの頁数になったのを、平澤先生に短くとりまとめて頂いた。筋道のたった議論の展開で、地震の直前予知への展望が開けていくような感じがよくわかるが、なお異論もあるようである。自然科学の問題は、あいまいを残さず、理論・実験・観測あらゆる面からすべての人を納得させる結論が得られなければならないだろう。

地震ジャーナル 第22号

平成8年12月20日 発行

発行所 101 東京都千代田区猿樂町1-5-18

☎ 03-3295-1966

財団法人

地震予知総合研究振興会

発行人 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