

地震 ジャーナル

19

1995年6月

エッセイ 東京の震災対策事始め ● 味岡健二

座談会 阪神大震災を語る ● 司会 柳川喜郎——1

田中寅夫／伯野元彦／衣笠善博／志方俊之／大町達夫

地殻破壊の科学 ● 梅田康弘——20

地震メカニズム論の変遷 ● 久家慶子——26

大森公式から1世紀 ● 松浦律子——33

P波によるマグニチュード ● 坪井誠司——45

地電流と地震 ● 長尾年恭——51

富士山の低周波地震 ● 鶴川元雄——60

中国の地震予知 ● 丸山卓男——68

鉄道と地震被害 ● 中村 豊——76

連載:その2 地震・津波碑探訪 ● 力武常次——81

地震予知連絡会情報 ● 笠原 稔／田中寅夫／安藤雅孝——92

● 書評——100

● ADEP情報——106

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

東京の震災対策事始め

味岡健二

阪神・淡路大震災で罹災した方々には同情を禁じ得ないが、なぜか関西の人たちは、関東とちがって地震はこないと思い込んでいたし、神戸市などは、それをよいことに——と考えたくなるほど——火災と地震の対策を怠った都市経営を進めてきた。

関西のビルには、地震に粘り強い鉄骨鉄筋コンクリート造よりも、安い鉄筋コンクリート造が一般的だし、上層階と下層階とで構造を変えているのも結構あり、その上、塩分の強い海砂を使っているため、至る所で弱さを露呈している。また、神戸市の消防費が一般会計に占める割合は、政令都市中最低で、上位都市の半分に過ぎない。

もっとも関東だって、1923年の関東大震災以来、ずっと地震を念頭に置いてきているわけではない。震災の教訓から、木造建物は屋根を軽くし、軸組の緊結には金具を使い、壁に筋かいを入れることとか、鉄筋コンクリート造は小規模のものに限ることなどは、関東では常識化していたけれど、地震への行政の対応や、個人の意識改革は、64年の新潟地震にはじまったのである。

しかし、それより3年前に、東京の大地震被害を数量的に想定し、独自の対策を進めてきたのが、東京消防庁だった。

東京消防庁では、かねてから、建築・化学・電気などの学者に、火災予防対策を諮問していたが、その委員会で、東京に大地震襲来などの予言が流布される実情に鑑みて、科学的に被害を想定して対策を立て、人心不安を除く必要がある、との意見が出され、地震学者を加えて研究に着手したのが59年、そして結果を発表したのが61年だった。

プレートテクトニクス理論は未だ知られていない時期で、関東大震災と同じ強さの地震が東京全域を襲う、という前提に立ち、倒壊建物、出火件数、都民の初期消火、消防の活動能力を、各段階で検討しながら——これが直ちに対策になる——予想して、焼失面積を算定したところ、最終的には、都市化が拡大した分だけ、震災・戦災を上回ってしまった。

新潟地震の半年後、東京都では防災会議に地震部会を設け、東京消防庁の被害想定に参画した学者のひとりが部会長として対策を進めることとなった。当面、都民の生命を救うには避難するほかはない、との判断で、42箇所の広域避難場所を探して指定したが、これが遠いために不評判で、そのためかえって都民の意識に定着してしまい、後に都市構成の不燃化が進み、防災体制も強化されて、逃げずに守る、という時代になっても、まだ避難するものと思いついていて多い人の中には困らされる。

今回の神戸市の火災を見ると、丸一日後には自然に焼け止まり、その面積も、東京の想定と比べて頗る小さい。ペシャンとつぶされた街区という条件はあるが、もっと調査する必要があるだろう。

備えありて、なお憂いあるのが震災対策だから、あらゆる面で今後、一層の充実が望まれる。

阪神大震災を語る

- 司会 ● 柳川喜郎 1)
田中寅夫 2)
伯野元彦 3)
衣笠善博 4)
志方俊之 5)
大町達夫 6)

《発言順》

地震意識は低かった

柳川 まず、今回の阪神大震災に関連して、一般に関西で大地震はないんじゃないと言われてたわけですが、このあたりの地震に対する意識について、田中さんは関西在住者として如何でしょうか。

田中 もちろん、関西に大地震がないということはないわけですが、一般的にはそういう意識は強かったと思います。東京は常にテレビで震度4の地震が起こったとか、そういう報道がされてますし、我々もちょっと東京に来てると地震を感じるがありますが、関西では普段有感地震も少ないですから、大地震があるという切迫感はありません。しかし、南海地震や福井地震もありましたから、60歳くらい以上の大人は覚えているはずなんです。全体的には地震はないという感じでしたね。私は、昨年12月ごろ、一般の人に講演をやりましたら「関西にも大地震があるんですか」という質問がきて、私が「もちろんあります。次の南海地震の前にはきっと活発になります」と言



凄まじく崩壊したビル 兵庫区新開地でも建物の東南角が崩壊した。[佐藤工業(株)中央技術研究所：提供]

っても、半信半疑というぐらいの意識でした。いずれにしても、地震というのは差し迫ったことではないという意識は強かったと思うんです。

柳川 兵庫県や神戸市の対策が不十分だったと思うんですが、そのへんは如何ですか。

伯野 神戸市は震度5までの地震に対する対策しか講じてなかったんですね。ですから消火用の貯水タンクを地下に埋めていても、そのタンクが地震のときに壊れるという対策はとられてなかった。ひびが入って漏れたのもあったのではなかろうか、と言われてるぐらいですから、すべて震度5に対して設定してた。それもやむを得ないところがあるんですね。過去に福井地震や南海地震があったといっても、南海地震で神戸はそんなに被害を受けませんでしたから、神戸で被害があったのは何年前か見当もつかないぐらい前じゃないかと思うんです。京都なんかはありますけど、神戸だったら、とても…。

田中 神戸では1916年にマグニチュード6ぐらいの地震がありました。塀が壊れたぐらいの…。

伯野 1916年というと80年ぐらい前ですね。80年たつと口から口への言い伝えがなくなるらしいんですよ。おじいさんが亡くなっちゃっ

1) 岐阜県御嵩町長・元NHK解説委員, 2) 京都大学防災研究所教授, 3) 東洋大学工学部教授・東京大学名誉教授, 4) 地質調査所環境地質部地震地質課長, 5) 帝京大学文学部教授・元陸上自衛隊北部方面総監, 6) 東京工業大学大学院総合理工学研究科教授。

て…。新幹線にしても、あそこは設計震度が0.2が採用されてるんですが、もうちょっと西へ行くと0.15に下がっています。そういうふうには設計では西に行くほど地震を小さくみていました。関西から西の瀬戸内ですから、地震は相当小さいと思われてたんじゃないですか。

大町 震度5より大きい震度を想定して対策をとれといっても、あの状況では無理でしょ。問題は、震度5に対する対策がちゃんととられていたかどうかということだと思うんですが、それが足りないんじゃないか。地震が起こるとすぐ想定が間違ってたというんですが、もともと想定はそんなに合うものじゃないですから、想定を精度を上げることじゃなくて、想定したことをどう処理していくかが大事なのに、想定で終わっちゃうんですね。その先が進んでなかったことが問題であって、震度5の想定が悪かったということにはならないと思うんです。

柳川 私も、10年ぐらい前に神戸で地震の講演をしたことがあるんですが、人ごとだという感じでしたね。まさか自分のところは、という感じだった記憶があります。地震予知総合研究振興会の力武先生は、“近畿は危ない”ということを前から言われていましたね。

田中先生も地震学者として、そういう危機感をもっておられましたか。

田中 私は、個人的にはもう少し後だろうと思っていたんです。私はかなり傷んだ家に住んでいまして、築後30何年の文化住宅ですからガタガタなんですけど、あと4年たって退職金を貰ってから建て直せば大丈夫だろうと思っていたんです。いま考え直して、ちょっと早く建て直さないといけなくなったのかなと思っていますんですけど…。10年はちょっと長いにしても、5、6年は大丈夫だろうと思っていたんですよ。

柳川 学者は腹の中で危機感をもっていても、どうして警告を出さなかったかと言われてますけど、このあたりは如何ですか。マスコミが中間にいるんでしょうけど…。

田中 私のところは防災研究所と銘打ってるわけですが、正直言って努力が足りなかったと思

います。普通に言ってるだけでは、とても通じませんし、もっと大々的にやる必要があったと思って、反省はしています。

志方 危機意識が薄れていくのは、基本的にやむを得ないことなんですね。その要因は二つあると思うんです。日本は水害を基準に災害対策基本法ができています。ちょっとした洪水でもたくさんの方が死んでいたのが、台風を追跡する技術ができて、どこで起こって、どういう経路をとって、どこに上陸して、どのぐらいになってとか、洪水制御のほうも、ある地点の水位の変化を正確につかめるようになった。そういうことで人間が自然を制御できるような錯覚に陥った。しかし、考えてみたら台風が起こることも制御できないし、台風を進路を変えることもできないし、大きさを変えることもできない。ただ、それをちょっと早めに知ることができるようになっただけなんですね。地震に関しては地震予知を一生懸命やってるけど、まだ完全ではないわけです。

第二の要因ですが、ニューヨークのハイデン博物館へ行ったら、地球の今までの歴史を1年間としたら、人間が生まれてきたのは12月31日の午後11時58分だということですね。そのくらい地球の大きいタイムスケールに比べて人間の歴史は短い。そうすると200年とか100年ごとの地震と言ったって、地球にしてみれば毎日のようにあったような感じなわけです。人間は100年も生きられないわけですから、自分の危なかった経験を伝承することができない。体験の伝承は35年で風化すると言われてますから、関東大震災のときの惨状をどうやって伝えるか。100年とか200年に1回しか起こらないようなことを、どうやって子孫に教えるかという、これはできないですね。

人間には怖かったことを忘れようとか、考えたくないことは考えないという性向があるんですよ。これは神様が人間の心に与えた安全弁で、いま地震が起きたらどうしようかと考えてたら、普通の生活ができませんよね。だから地震災害の場合は、いつも新しいことだと思うんです。

この前の奥尻島の経験を生かしてどうだとか、そんなものではないと思うんです。300年、400年に1回起こるような大きな震度の場合には常に新しいんだから、危機感がないのは当たり前だと思うんです。

衣笠 関西で地震が起きることは予想されてたけど、切迫感というところまではいってなかったんじゃないでしょうか。いつかはわからないけど、起きることは予想していた。しかし、切迫感をもって何らかの行動をするほどの知識は、我々も今のところ持ち合わせてないし、そのために、あの地域の人たちに対する訴え方の力が弱くなってんじゃないでしょうか。

田中 私は、所長ということで宇治市の防災会議に入ってるんですが、洪水だけで、地震は考えてないんですね。私も防災会議のメンバーとして“地震のことも心配しなければいけませんよ”と提言するべきだったでしょうけど、私もまだ多少は大丈夫だと思ってたから油断がありました。マグニチュード6ぐらいから始まるんじゃないかという気もしましたし、予想が甘かったと思います。

志方 切迫感がないと言われたけど、「陸幕地誌・阪神編」という陸上自衛隊がやった被害見積りがありますね。相当、分厚いやつです。あれは週刊誌にも取り上げられましたが、あれを見ると、今回の地震の被害に非常によく似てるんですね。読んでみると、カストロフィックな被害が見積られてる。それを自衛隊は神戸市にも兵庫県にも出していた。近隣の地方自治体には全部配ったけど、あまりにもカストロフィックなことが書いてあるので、一般の行政になじまないわけです。そんなことやってたら市役所も全部建て直しだなんていうことになっちゃう。切迫感がある人にはあったんだけど、それを受け入れる余裕が現実にはないと思うんです。

柳川 専門家には切迫感があったんですね。ただ、あんまり言いすぎるとオオカミ少年だと言われる。この問題は絶えずつきまとうでしょうね。

伯野 釧路沖とか奥尻島とか、北海道でいろいろ地震がありましたから、次はもうちょっと南だとおっしゃってた方もいるんですね。人によっていろいろなの



伯野元彦氏

で、次はどこかと言われても、難しいですよ。

田中 終戦後、福井地震の後、京大の佐々教授が京都地震説というのを出して、みんな戦々恐々になったことがあります。だから福井地震の後には、関西の人間も非常に意識が高かったわけです。昔、虹で地震を予知することで有名だった椋平という人は、私の生まれた丹後の人ですけど、あの人のことは新聞にも取り上げられましたし、よく予知の噂も流れましたね。だから関西でも大地震が起ることをみんなが気にしてたと思うんですが、それがなくなってしまったのは、この20～30年だと思うんです。100～150年間隔の南海地震の周期に合わせて、1946年の大地震の後には静穏になった。その静穏期に合わせたように関西の人間の意識も地震から遠ざかってる。

柳川 丹後地震の後には、意識の高まりがあったんでしょうね。

田中 ありました。3月7日の夕方にはサイレンを鳴らして黙禱をして、その時間になったら親が子どもに“こうだった”という話をするというのは、私が中学ごろまでやりましたね。私も都会へ出ましたし、丹後でもそういうことはやらなくなってしまった。震災記念館という立派な建物を建てて、その中にいろんな資料を置いてましたけど、そのうちに多目的利用のために廃止してしまうような話があったと記憶しています。現在は、地区の集会場として利用されているようです。資料などは、別に保存されているそうですが…。

衣笠 30年ぐらい前から、国として本格的な地震予知計画が始まりましたね。20年ぐらい

前は意識があったとおっしゃったけど、国が地震予知をしてくれるから、予知情報が出てからアクションを起こせばいいという意識はないですか。

直後の対応

柳川 発災直後の情報伝達とか危機管理について、自治体や政府の対応がお粗末だったということになってるんですが、このへんについてコメントを頂けますか。

志方 あのと看も現場に行くのは、マスコミが一番早かったんですね。特にテレビの映像がセンセーショナルに入ってくるわけですが、テレビの映像というのは絵になるものを撮りますから、火災があれば火災だけを撮る。高速道路がやられていれば、それだけを撮る。どの局もそれをやりますから、被害の全体図がわからない。虫眼鏡的な情報はたくさん集まってくるけど、鳥の目で見たと被害がわからない。5時46分に地震が起こって、最初の観測ヘリが7時14分に大阪の八尾から飛んだんですね。彼らの話を総合すると、明け方で空は明るくても下は暗かった。目で見ても倒壊してるのかどうかというのは、高いところからでは見えない。今でこそ空を飛ぶと青いシートがずっとあって、あそこがやられたんだなというのがわかるんですが、被災直後はやられてるか、やられてないか、ほとんどわからない。ビルなんかが相当傾いてればわかるんですが、3階と4階が潰れてるようなところまではヘリからは見えないんですね。

また、飛んでたヘリは映像伝送の装置を持ってなかった。いくらマイクで何々と言っても、こんな大きい被害を口で表現することはできないから映像が一番いいわけです。その映像もマスコミのようなスポット映像ではなくて、全体を撮る映像がいいんですが、それを撮って伝送する器材がなかった。

後から考えて何が一番よかったかというところから、航空自衛隊のジェット偵察機が飛んで、高いところから神戸全体がスポットで撮れるような遠赤

外の映像を撮ってますけど、ボルツマンの法則というので、地上の温度差によって解像度が3乗になるんですね。そういうので撮れば全体で1万戸ぐらいやられていて、そのうち普通の家が何軒ぐらいで、あの時間だったら家にいるわけですから、1軒の家に3人ぐらい住んでるとすれば3万人ぐらいがやられてるとか、そういう大きい鳥の目で見たと情報をつかむことができる。それをすぐ現像して総理官邸に送る。そういう作業がされなかったんですね。できなかったと言ったほうが正しいんでしょうが、そういう全体の被害状況に対して地方自治体が対応できるものなのか、あるいは国家的規模の救助活動があるのかという区別を最初に行なうことができなかったところが、初動が遅れたという非難を受けた原因の一つであると思います。

大町 少し明るくなったところに行って、やろうと思えばできるわけですね。

志方 明るくなってから行っても、映像伝送装置がないんです。急ぎよ、東京にあった器材を運んで行ったときは、もう屋ですからね。

伯野 地上から行くことはできないから空からでしょ。私も空を飛んだのですが、例えば木造家屋がぺちゃんこに潰れてますね。屋根瓦が落ちてるから屋根が土だけなんです。それを見て、これは木造家屋がぺちゃんこなんだとわかる人はあまりいないですよ。我々みたいに専門でやっても、最初から土でできてたのかなと思うような感じもありますからね。かなり低く飛んでも、あれが全部潰れたなんて本当かなと思いますよ。

志方 映像を送れないから実況放送みたいになるんですよ。野球の実況放送なら、みんなルールを知ってるからわかるけど、下を見てワッとしゃべっても、その情報量はほんとに少ないもんですよ。

衣笠 そのときの被害状況の把握というのは自治体に一義的な責任があるんですか、それとも国が負うべきことなんですか。マスコミはマスコミの論理でやるんでしょうけど、行政として被災状況を把握しなくてははいけない。

志方 地方自治体でヘリを持ってるところは、そのヘリが自動的に飛べるような規則をつくっておかないとだめですね。自衛隊は地方自治体の長から要請を受けたときに始めて出動できるのであって、軍隊はむやみに動けないようにしてあるわけです。あの場合は神戸市長か兵庫県知事から要請がなければ自衛隊は動けない。だけど実際には7時14分に飛んじったんですね。一種のフライングをしたわけです。実際に要請があったのは10時です。市長さんたちの事情もわかるんですね。自分たちは被災者ですから、当事者にいくら聞いても、どこにいるかわからない。市長さんが市役所へ行くのに3時間もかかったでしょ。被災地の外の人に責任がなければだめですね。気象庁から震度いくら以上という情報が入ったときには、国家にそういうことをやる権限を移譲する。自衛隊法でいえば、83条の第1項の2に入る。83条第1項の1は地方自治体の長が要請したときのみと書いてあるんです。

伯野 最初は、気象庁の震度発表には神戸はなくて、付近のどこかが震度5と言っていましたよ。それから6になって、7になったのは何日も後ですよ。

田中 私も地震で飛び起きて、すぐにテレビを見たら、最初に神戸は6と言ったんですけど、画面には出なかったんですね。しばらく見ると画面に5しか出なかったんで、どうしたのかなと思って…。

志方 これが5だとか6だとかわからないから、どんなことであっても自動的にヘリが出るという規則をつくって、その権限を自衛隊に与えておけばいいんですよ。

おじいさんが山へ山菜をとりに入って、夕方になっても帰ってこないということでも自衛隊は出てるんですから、マグニチュード2でも3でも出ればいいんですよ。その権限が与えられてないから出ないわけです。

大町 今度のことに関して思うのは、救援派遣が遅かったというよりも、やられてるという情報がどこもわかってない。それが一番の問題で

すね。出るか出ないかは後の問題で、なぜ自衛隊はそれがわからないのか。それは自衛隊の任務じゃないかと思うんです。

国内でそういう状況になってるとい

うことをつかんでなきゃいけないと思うんですよ。

伯野 自衛隊にあんまり動き回られても困るからでしょうね。

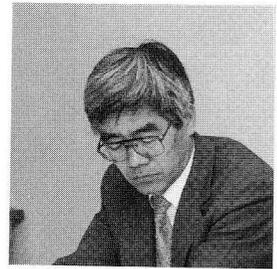
大町 動くか動かないかはシビリアン・コントロールすればいいんで、情報を持っておかなくてもはいけない。

志方 自衛隊は自衛隊法で動いてるわけですから、自衛隊法にないことはやらないんですよ。

伯野 シビリアン・コントロールが基にありますからね。アメリカでサッと動ける FEMA (Federal Emergency Management Agency: 連邦緊急事態管理庁) は、災害のためだけではないわけです。危機管理だから、暴動とか核戦争のためなんですよ。今度のオクラホマシティの爆発で連邦ビルが吹っ飛んだでしょ。あのときも、すぐ州兵が出てきますからね。州兵というのは銃を持ってるんですよ。向こうはボランティアが盛んだけど、失業者も随分いるようなので、下手するとすぐ略奪に変わるわけです。そういうのを阻止するためもあるんですね。

志方 自衛隊は武力集団ですから、鈍重にしておいたほうがいいですよ。アメリカの州兵の場合は州知事の命令で動きますから、自然災害のときには自分で活動できるんですよ。日本でいえば、兵庫県に自衛隊予備役部隊というのがあって、知事の命令でそれを出せるということですが、それが日本にはないわけです。

衣笠 被害状況を把握できれば、その後はいろんなアクションがとれると思うんですが、被害状況を把握するのは自治体なのか国なのか、国



大町達夫氏



衣笠善博氏

だとすれば、消防なのか警察なのか自衛隊なのか、よくわからないのですが、今までは幸いにしてマスコミが機能して、マスコミを通じて被害状況を把握して、それを基にいろ

んなアクションを起こしてたと思うんです。

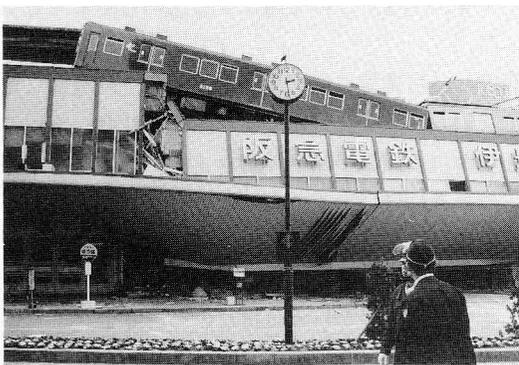
志方 建前では、国土庁ということになってるんです。

伯野 今度の被害を後から考えて、どうすれば一番よかったのかというと、やっぱり自衛隊ですかね。

志方 偵察の手段は自衛隊が一番持ってるんですね。

柳川 一義的には災害対策は地方自治体の責任で、国土庁は調整官庁にすぎないんですね。データが上がってきたのをまとめて、建設省とか自治省とか通産省に取り次ぎをするだけで、国土庁には実動部隊はないですね。防災局というのはありますけど、手足がないわけです。

志方 阪神地区なら阪神地区の防災計画をつかって、大阪市にダメージが多かった場合はA1、神戸に多かった場合はA2というのをつくっておいて、これはA2だと思ったらA1を立ち上がらせる。そういうふうにししないと、被害を受けた当事者に立ち上がれと言っても無理ですよ。



阪急電鉄伊丹駅の惨状 高架線の改札口など、ピロティ部分が押し潰され崩壊、停車中の車両も落下した状態が見える。[佐藤工業(株)中央研究所：提供]

田中 我々の観測体制でも、地元で混乱していましたから、東京大学の地震研究所に立ち上がってもらって助けてもらった。これが非常によかったですね。私たちは、とてもそこまでできない。突発災害の研究にしても立ち上げるのは大変ですし、観測網にしても東京大学にお願いする。突発災害研究体制のほうは防災研で対応しましたけど、やっぱり大変ですね。いわんや京都で地震が起こったら、とても動かないでしょうね。

伯野 どうすれば一番よくわかるか、ですよ。

田中 災害の全体を把握してからでは遅いと思うんです。地震の場合は被害が出ていようがないが、マグニチュード7を超えたら、ある程度の規模で動くようにしないと、大きくなればなるほど被害状況はつかみにくくなるでしょうね。

志方 突然と起こったときに、A1かA2かA3かということを決めて、A1発動とやっちゃえばいいんですよ。ある規準で即座にやる。結果的にA2だったかもしれないけど、それでもいいんですね。

柳川 マスコミの場合も災害対策は早め、厚めということをいつも言ってるんです。災害対策は早め、厚めというのは鉄則だと思いますね。救援の話がちょっと出ましたけど、救援の遅れということは否めないですか。

田中 遅かったとは思いますが、あの状況ではしょうがないでしょうね。

伯野 先ほどのようなことで、情報がなかなか入らんわけでしょ。我々がテレビを見てたって、死者なんて最初は十何人でしょ。12時になったってまだ何百人ぐらいと言ってるんだから…。

田中 私は地震を体感して、テレビをつけて見ていると、屋上から見たカメラで火の手も上がってないようでしたし、あのころで死者は最悪の場合、500人ぐらいかなと思いましたけどね。

衣笠 私はオフィスに行って、いろんなところにインターネットで情報を送ったんですが、今のところ十数人だという情報を送ったんですよ。

8時ごろ、これは大きな災害になりそうだという意識はあったんですが。

田中 京都にいても、いまにも家が潰れるかと思っただけど、やっぱり神戸ではひどかったんですね。

志方 高速道路が全部横に倒れたところがありましたね。あの絵を見て死者が十数名とは思わないですね。

衣笠 あれが出たのはずいぶん遅いでしょ。

田中 7時ごろ、テレビで言ってましたよ。高速道路が倒れてると言ってる人がいるとか。

衣笠 まだそんな状況で、映像そのものは出ないでしょ。

田中 神戸の市役所が潰れてると言う人がいるとかいう話はやってました。あの高い市役所が倒れたんなら相当なもんだなと思ってね。

伯野 そのときは、デマかもしれないというものもあるでしょ。映像がないから…。

直後の救援活動と問題点

志方 実際に救援活動をした人に聞いてみると、奥尻島のときは孤立した島であるということで最初からヘリで進入しなくてはいけないということが、すぐ頭にきたんですね。だから札幌のお医者さんなんかも全部ヘリで入ったんです。神戸のときは災害が起こったら陸の孤島になるという感覚がなかったので、みんな地上から行ったんですね。それで渋滞にまきこまれた。あのとき、自衛隊の中部方面には30機ぐらいヘリがあったんですから、最初からあれが孤島であれば、ヘリを使って上から進入したんですね。そういうことがありますね。

もし関東に地震があった場合も、関東にも神戸とよく似た地形がありますよ。山が迫っていて、海しかないというのが…。ああいうところは神戸と同じように孤島になってしまうんですね。これからの初動の進入は、なんでも空から行かなくてはいけない。それが一つの反省ですね。

伯野 そういう地形じゃなくても、東京の場合

は悪い点がありますね。いろんなところに被害が広がる。山手線の内側全体がやられたとしても、結構、広いですから、火災にしても性質がずいぶん変わると思うんです。神戸の火災は幅の狭いところで起こってるから、逃げようと思えばいくらでも逃げられるけど、東京の火災の場合は方々で起こるから、逃げるといってもなかなか大変ですよ。

衣笠 先ほどから自衛隊の出動の遅れが問題になってますが、実際の出動は法に基づいて要請がなくてはいけないにしても、出動準備というのは…。

志方 7時30分には出動準備にかかって、全員待機してますね。

衣笠 訓練とかなんとかいう名目で、現地へ行ってしまおうというのはだめですか。

伯野 実際に動くのは要請がないとだめなんですよ。それがシビリアン・コントロールなのです。

志方 あのときに自衛隊の阪神地区病院がすぐ救急医療班をつくったんですが、やっぱり厚生省から要請がないとだめなんです。自衛隊の医療陣は自衛隊員は診ることができるけど、ほかの人を診ることはやらないようになってるんですね。ちゃんと医師の免許もあるんですけど、医師会があるから、なかなかやらないんです。

大町 災害時でも、だめなんですか。

志方 要請がないとだめなんです。36時間、病院の中で今か今かと要請を待ってたんですね。その36時間の中に多くの人を助けられたんじゃないかという反省が残ってるわけです。

柳川 今まで防災の日なんかには“グラリときたら火の始末”ということだったでしょ。今度は火災も起きたけど、人的被害では圧死者が多いですね。自衛隊が早く出動していたら、瓦礫の下の人は助かったでしょうかね。

志方 現地に早く到着すれば助かったと思いますけど、自衛隊には瓦礫の中にマイクを降ろしていくとか、そういう装備がないんですね。

柳川 光ファイバー・スコープもないんですか。

志方 ないんです。そういうものを装備しなく



柳川喜郎氏

てはいけないという反省はできたんですけど、当時は、そういうものがいないから、耳をすまして聞くとかね、人間はたくさんいますから、人海戦術でやることはできるんですね。

柳川 外国の救援チームの受入れが、ちょっとごたごたしましたね。日本で災害が起こった場合、外国の救援隊は必要なんでしょうか。この前のインド南西部地震では、インド政府は断まりましたよね。プライドみたいなものもあるんでしょうけど…。

衣笠 私は日本の国際緊急援助隊として、フィリピンの地震とエジプトの地震のときに行ったことがあるんですが、それぞれ国の事情があるから一概には言えないですね。

柳川 今回の日本の場合はどうですか。

衣笠 来て頂いて、いいんじゃないですかね。

柳川 オープンにして、ウエルカムということですか。

衣笠 断わる理由は何もないはずです。

伯野 来て頂いて、いいんじゃないですか。

田中 6時間とか12時間とか、その間に何百人か助かってるだろうという…。

ボランティア活動の評価

柳川 今回はボランティアが非常に多く出ましたよね。このへんの現象はどう思われますか。

志方 2月に私は米国にいたんですが、米国の新聞に日本のボランティアの活動が予想以上に来て、今の若者も捨てたものじゃないという記事が出てました。もう一つは、暴動とか略奪ということが起こらなかった。日本の国民は一流であるとしてあるんですね。最後のほうに、国民は一流なのに、なんで政治は三流なのか、一流の国民が一流の政府をつくれなのかと書いてあるんですね。

大町 ボランティアは今回だけじゃなくて、関東地震のときだってたくさん出たと聞きますから、日本の中にそういう活動は根づいてるんじゃないでしょうか。それがうまくオーガナイズできてない。そこが難しい。

柳川 オーガナイズの問題は別なんですけど、数の点でもアメリカと比べると奥尻以前は少なかった。日本では物とか義援金は出すんですよ。ところが、危険をおかしてでも自ら労働を提供するというのは、少なくともこの数十年はなかったですね。もちろん、助け合いはやりましたよ。関東大震災のとき、神田佐久間町・和泉町が共同で地域を守ったというのは、一種のボランティア活動ですが、災害地域外から被災地域への大量のボランティアというのは、今度が初めてだと思うんです。

田中 最初に自発的に行ったのか、あるいは呼びかけたのか、記憶にないんですが、新聞やテレビで呼びかけたんでしょうか。

大町 後のほうでは呼びかけてましたけど、初めのころはどうだったんでしょうね。

柳川 初めは自然発生的なんですね。

志方 現地の様子を聞きますと、たくさん来て非常にいいんだけど、自分の寝具も持ってこない人もいますね。この前のオクラホマシティの連邦ビルの爆破でも、まっ先にFEMAが行って、警察・州兵・消防・ボランティア・救世軍・赤十字などの活動を調整しちゃうんですね。ボランティアは非常にいいことですから、大いに推奨して、うまく組織化していく中核体をつくらないとだめだと思いますね。

大町 いろんな種類の能力をもったボランティアがいて、どこかに必ず属しているということだとやりやすいですね。ただ善意だけで行くというんだと非常に難しい。

志方 ある地区にはいっぱい集まって、ある地区には誰も行かないとか、偏っちゃうんですね。

田中 外国人の留学生がボランティアで出かけたという話もありまして、そういうのに引っ張り出された面もあるのかもしれないという気がしますけどね。

地震屋は何をしたか

柳川 地震専門家は何をしたんでしょうか。

伯野 私は頭を下げることをしました。申しわけありませんでしたと…。

柳川 地震工学の人で、阪神大震災の以前から高速道路などが壊れることはないだと言ってる人と、言っていない人がいましたよね。そのへんはどう違うんでしょうね。哲学の問題になってくるのかもしれないけど…。

伯野 あんまり違わないのかもしれないですよ。私は大丈夫だとはあまり言わなかったんですが、内心では大丈夫だと思ってました。外国の被害を見ると、あまりにも無茶苦茶なんですね。本当に壊れてる。日本と比べると、桁違いに弱いのはなぜかというのが理屈でわかるわけです。

衣笠 理屈以前に、アメリカへ行って橋を見ると、橋桁が細いでしょ。

伯野 橋桁を支えているところが15センチ幅とかね。僕の手幅しかないんですから、これは落ちるのが当たり前だと思ったわけですよ。

日本は肩幅ぐらいあると思ってたんですよ。首都高速なんか、そういうのが多いでしょ。今度見たら、日本でも15センチ程度の幅しかないというのがありますね。落ちたのは、そんなのがあるんですよ。そんなのが日本にもあるとは知らなかった。

大町 古いのはそうかもしれませんね。

田中 鉄筋の溶接が悪かったとか…。

伯野 一番ショックなのは、橋桁落下防止装置というのがあるんですが、それがちぎれて橋桁が落ちちゃった。同じようなことですが、家具の留金もかなり引き抜けちゃってるでしょ。今までののが甘かったのは確かじゃないですかね。家具をチェーンで留めるのが推奨されてたけど、あんなのも吹っ飛んでますよね。

田中 家具を留めなかったら、家具が倒れたが家は壊れなかったけど、家具を留めたために家具に引っぱられて家が壊れたとか。それはちょっとオーバーですけど…。

柳川 予想外の揺れだったということに尽きるんじゃないですか。

伯野 それで免責だと思ってるのかと言われるんで、それはあまり言えない。

田中 直下型だったら、あのくらいの速度とか加速度はあり得るということですね。

伯野 今度のは八百何十ガルでしょ。1年前のロスの地震は千八百何ガルだったけど、大したことないでしょ。いまだにわからないんですよ。被害の主原因は加速度じゃないことはわかるんですけど、じゃあ速度かといえば、速度も向こうのほうが大きいでしょ。それですぐそばの家がひびが入ったぐらいでしょ。だからわからない。

柳川 一般の人は、学者は相当わかってると思ってるだろうけど、実際にはわからないことが多いんですね。

志方 わかることが起こるんだったら危機管理とは言わないのです。わからないことが起こるから危機なんですよ。地震というのは、それぞれに新しい条件にある。人間は少しずつ進歩していきますから、損害は少しずつ減っていくかもしれないけど、どんな洪水や地震が起こるかということ、あらかじめ知り得るんだったら危機ではないですよ。

伯野 全くわからないというんではちょっと困るんで、難しいところですね。

解析して、これだから壊れたと言うんだけど、実際の解析は破壊するところまでいってないですよ。応力をちょっと超えたから破壊してるんだと言ってるんだけど、それでいいのかということがあるんですよ。

クローズアップされた活断層

柳川 活断層というのが、にわかにはニュースの言葉になったんですが、今までの啓蒙というか、一般周知についてはどうですか。

衣笠 今となっては啓蒙が不十分だったという反省もあります。しかし、一方では活断層の活動の繰り返しの間隔は千年、2千年の単位です。我々もそこまでの知識しかないわけです。そこ

までの知識で“危ないぞ、危ないぞ”と言うことが、果たしていいことなのかどうかわからないのです。千年、2千年というのは、普通の人の生活のスパンからみれば桁違いに長いことなので、それに対してなんらかの対応を求めるべく啓蒙をする必要があるのかどうか、いまだによくわからない。

柳川 日本の有史以来の地震というけど、日本の場合、せいぜい1200年ぐらいなんです。それ以前は怪しげで、わけがわかりません。

伯野 それも文化が早くから開けた京都みたいなところでは、古文書に地震の記載があるんですが、北海道なんか全然わからない。東北もわからない。関東だってわけわからんでしょ。わかっているのは千年もないぐらいですよ。

柳川 活断層もそのくらいのスパンですから、これは人生観というか哲学の問題になってくるんだけど、近畿には活断層が多いんだというPRが、専門家として足りないところはなかったかということはどうでしょうか。

衣笠 我々は活断層の研究はやってたけど、それは学者のコミュニティの中での活動であって、社会に対して啓蒙していくという活動はほとんどなかったと思います。今後、どうしたらいいかというのはよくわからないんですが、なんらかの形でわかって頂くようなことをしなくてはいけないとは思っています。

田中 衣笠先生のおっしゃったことに尽きると思うんですが、洪水の場合ですと、何十年洪水ということで設計されるわけですね。100年に1回とか、小さい川だったら20年に1回とか。千年という単位は工学では対象にされないと思うんです。そういうことを考えたら、活断層を工学的な対象にしても、しょうがないという言い方もできると思うんですが…。それが衣笠先生も引かかっておられるところだろうと思います。

志方 さっき私が言った神が与えた忘却のメモリットというやつですね。2千年に1度しか起こらないような、活断層の活動のことなんか考えてたら生きていけませんもの。自分がその上に

いるというので、毎晩寝られなくなったのでは困りますからね。

田中 山があって、崖があって、平野につながる、その一番住みやすい山と平野の接点に活断層があるんですね。

伯野 今度の神戸の地震はしょうがなかったのか、これに対して何か手を打っておかないでよかったのかということになりますね。

衣笠 先ほど人生観だと言われたけど、まさに人生観であってね。千年に1回、2千年に1回のことでも、心配な人はそこに住まなければいいんだし、それは不幸だと思ってあきらめる人は、どうぞお住み下さい。ただ、非常に危険な施設などは、そこに設置することは避けるべきだと思うんです。そういう判断をして頂く素材を我々は提供しなくてはいけなかったと思うので、そういう知識を我々のコミュニティだけにしておいたことは反省すべき点だと思います。

大町 活断層が直下で動いたら、あのくらいの強さになるということは、我々のコミュニティの中ではわかってたんですね。それをオープンにする気分になかなか出来なくて、はばかってたようなところがあるんですね。

伯野 千年に1回なら、我々が生きてる間にはないだろうということになったんですね。

大町 ロサンゼルスでもあったし、最近の例はいくつかあるわけですね。ある1本の活断層に注目すると千年かもしれないけど、日本全体で見ると20年か30年に1回はあることになりすから、考えなくてはいけない。

志方 考えて公開すると言ったら問題が起きてくるんじゃないでしょうか。その上に家がある人にとっては自分の土地が安くなっちゃうとか、いろんなことが起こってくる。

大町 それはしょうがないんじゃないですか。事実なんですから…。事実がわかった上で、後は判断するしかしょうがないでしょうね。

田中 山崎断層も、活断層地形がずっとまっすぐ延びていて、高速道路を設計してつくることになって、これは活断層だということがわかったけど、結局はつくってしまったんですね。そ

のときは、まだトレンチをやってませんでしたから、地震の繰り返し歴史はわかってないんですが、我々も大丈夫だろうと思って絶対にやめるべきだとは言わなかったし、つくっちゃってる。四国にしても中央構造線沿いのところを高速道路が走ってるわけです。

伯野 活断層のあるところをつくりやすいですからね。

田中 あれもやめるべきだと、本当は言わなければならないんでしょうけど…。

伯野 新幹線なんか、あれだけ長いのですから、どこかで必ず活断層のところを通りますよ。

復旧をどうする

柳川 前から思ってるんですが、重要度指数みたいなものをつくって、絶対に壊れては困るのは手厚くする、壊れてもいいものはしょうがない。もう一つは、初めから壊れることを覚悟の上で、復旧の立ち上がりを早くすることを考えておくことが必要じゃないかと思うんです。

衣笠 もう一つ付け加えると、壊れた場合の代替機能のようなものが必要ですね。

柳川 フェールセーフをね。AがダメだったらBでいく、BがダメだったらCでいくぐらいの考えでないといけないですね。

衣笠 全部の施設を壊れないようにするというのは、コストの点からも不可能だと思います。

伯野 ただ、強い地震だと必ず壊れるものがあるんですよ。コスト的に丈夫にできない、電気とか水道とか、ライフラインは例外なしですね。震度6以上だったら必ずストップしてますよ。そういうものは最初から復旧を早くすることを考えなくてはいけません。今回、外国から医療団が結構来たけど、ほとんど何もできずに帰って行ったんですね。その理由は水と電気がないというのが決定的らしいですね。お医者さんは電気と水がなかったら何もできないんですって…。手術するといっても水がないわけですよ。

柳川 地震では水と電気が止まるのは当たり前ですからね。

田中 その準備ができてない。

伯野 地元のお医者さんですらポリタンクを買い占めて、まだ水の出る明石かなんかへ行って、何百というポリタンクを病院へ送って、なんとかやったのだそうですって…。

衣笠 ある病院では非常用発電機を持ってたけど、それが水冷式だったために、水道の水が止まって発電できなくなっちゃった、という話がありましたね。

伯野 過去の地震では、自家発電装置の8割は、それで使えないんですよ。水をちゃんと蓄えても、パイプがやられちゃうんですね。

衣笠 バックアップ・システムもよほど慎重に注意深く考えないといけないですね。あるところまでは考えるんだけど、そこから先は健全に機能することを前提にしたバックアップ・システムが多いような気がします。

柳川 最近は自家発がかなり普及しましたが、燃料と冷却用の水が問題ですね。ただ自家発を備えればいいやというだけではだめですね。

伯野 ライフラインについては、最初から機能しなくなるということを考えて、いろいろやらなきゃだめだというのが一つですね。

柳川 ライフラインは切れることを覚悟しておかなきゃいかんですね。

避難訓練の大切さ

伯野 だから難しいんですよ。最近のビルは窓がないでしょ。だから、避難訓練にしても明るいところでやってもしょうがないような気がするんですよ。超高層ビルだって電気が止まればエレベーターがストップしますから、真っ暗な中を50階からでも降りてこなくてはいけない。各階から人びとが降りてきたら、階段なんていっぱいになりますよ。避難訓練なんか遊びでやってるんじゃないかという気がするな。

志方 話が避難のことになったからちょっと付け加えますと、新聞でもご覧になったように、自衛隊に対する要請が遅れた一つの原因は、地元の大きな混乱だけではなくて、何十年という



志方俊之氏

間、自衛隊との防災訓練をやってなかったんですね。政治的な信条もあって、自衛隊の存在を合法と認めてない政党もあったわけですから、そういう人たちが自衛隊と共同訓練をや

るということは、自分の考えを否定することになるから、一線を画してたんですね。あの地域は自衛隊の指揮官が交代のときに行っても市長さんが会ってくれないんだそうです。存在を否定してる人が来たって会わないわけです。そういうことで40年間ぐらい訓練をしてないんですね。

関東の場合は、東部方面隊が防災計画の中に組み込まれてますから、いつも防災訓練を一緒にやってるわけです。私は北海道の総監をやってたんですが、横路知事は革新を母体にして出てきた人にもかかわらず、道民の命を守るためには嫌いな自衛隊とでも手を結んでやろう、ということで演習をやってたんです。ですから奥尻でも十勝の場合でも、どこでも早いですよ。大阪は横山さんになってからどうなるかわかりませんが、大阪府も自衛隊とは一線を画してたんです。

政治的な信条も大切だけど、それよりも市民の命のほうが大事だという、最低限の良識をもった人が地方自治体の長になってもらいたいと思うんです。あれはほんとに一緒にやってないんだめなんです。今回も、どこに電話をかけていいかわからないわけです。いつも共同訓練をしてみると顔までわかりますから、防衛部のなんとか班長に電話をかけてメッセージを伝えられるんですね。

神戸の港に至っては、終戦後、海上自衛隊の船は、一切入れてないんです。ああいうバースに対しては何度の角度で進入して行って、どのくらいまで近づいたときに、速度をどのくらいにして、そこでエンジンを止めて逆流をかける

とピタッと岸壁に着くんですよ。そういう訓練は日ごろからやってないとだめなんです。今度も救援物資を届けようとして行っても、一度も入ってない港に、入って来いと言ってもなかなかできない。年間、海上自衛隊の船がいっぺんも入らなかったから、今回は“早く来い、早く来い”と言われても非常に困るんですね。

もう一つは、伊丹空港に航空自衛隊の輸送機が救援物資を持っていったら、そこにいる運輸省の出先の人、ここは今までの規則で軍用機を一切降ろしたことがないから、私の権限で降ろすことはできないから帰れ、ということで帰っちゃう。災害派遣の要請がない場合には、自衛隊のヘリは地上に降りられないんですね。降りるためには場外着陸許可書があるんです。これは市長さんが発行するんですが、その市長さんがどこに行ったかわからない。だから降りられない。非常事態の場合と非常事態でない場合とのモードの切り替えをして、誰かがエマージェンシーだと決めたら、そこから先は事務的な手続をスキップしていいことにする。それを有事法制というんですが、有事法制というソフトウェアをつくらないとだめなんです。

さっき FEMA の話が出ましたが、FEMA というのは2500人しか人がいなくて、わずか800億円の予算でやってるんですね。それなのに、なぜあれだけ働けるかという、ソフトウェアがあるわけです。行ったら、その州兵も警察も全部おまえが統括してよろしい。FEMA が非常事態とした場合はそうなるわけです。そういうモードの切り替えが日本の法律にはないんですね。いま有事法制というものを出せば、政党間で見解が全部違うわけですから、そんなヤバいものは出すなということつぶされてしまう。40年間、有事法制ができなかったんです。そういうこともありますので、自衛隊に能力をつけるのもいいけど、能力だけじゃなくて、ここから先は非常事態だ、これは総理大臣が責任をもつ、おまえら動け、そうなった場合は、これだけの権限を与えるという歯止めみたいなものをつくっておかないと自衛隊も出ないです

よ。

衣笠 自衛隊の問題もいろいろあるから、有事法制もすぐにはいかないと思いますけど、先ほど話題になった外国からの緊急援助の問題で、外国から医師が来ても日本の医師免許を持ってないからやっちゃいけないとか、犬が来ても検疫があるから入れないとか…。

伯野 薬もそうですね。薬事法の問題がある。

柳川 規制緩和ですか。

志方 モードの切り替えですよ。

衣笠 規制緩和はまた別の問題ですけど、モードの切り替えといういい言葉をおっしゃったんで、そういうことが必要じゃないですか。

大町 ふだんのモードでは無理ですよ。

志方 平時の常識が通用しないから有事というんですから、それを平時の法律でやろうとしても無理なんですよ。

衣笠 災害がもう少し大きくて、神戸市の機能が全く動かなくなるとしたら、自治体に責任を負わせてもだめだから、周辺の自治体が代わって何か行動するという制度も必要だと思うんです。

柳川 包み込み作戦というんでしょうか、周りからやってあげるということですね。

伯野 関東の場合は、普段、やってますね。東京都と神奈川県と埼玉県と…。

衣笠 それを可能にするような法律というか、システムがないとなかなか行なえないでしょうね。

柳川 自衛隊嫌いが災いしたかどうかは別として、たしかに関西の政治的風土の中にそういったものはありましたね。それは関東とか東海地震とは違いますね。

志方 今回の反省から、地方自治体は自衛隊をなるべく使いなさいと総理大臣も言われたから、少しは改善されるんでしょう。

柳川 そのへんが初動にかなり影響してたみたいですね。

志方 米国の FEMA の場合は、ここで何か起こったときには隣の州の州兵が行くんだというのは暴動を考えてるんですね。暴動が起こった

ところの州兵を使ったら、兄弟が入っていて親兄弟が争ったりするわけですから、隣の州兵を入れるわけです。

柳川 FEMA はものすごいもんだと思われるかもしれないけど、ブッシュ政権時代の FEMA はものすごく非難されてましたね。非能率だとか。今の FEMA になってからよくなったんだけど…。

前兆現象はあったか

柳川 つぎに前兆なんですけど、それらしい前兆はデータのあったんですか。

田中 明らかなのはなかったです。地震の前にそれらしいというのはなかったですね。私の所属は地震予知研究センターですが、微小地震の活動が活発になってるという意見はありました。これは兵庫県南部地震のためではなくて、次の南海地震の前ぶれとしてだんだんと活発化してると思ってたわけで、いま神戸にマグニチュード7が起こるとは思ってなかったです。

また理学部の報告によると、後からデータを見れば、六甲の活断層の一つで地下水の湧き出しが去年の11月ごろから異常に増えてるんですね。去年の夏はカンカン照りでしたので水は減ってこそ普通であって、増えるはずはないんですね。後からみればそういう現象は確かに異常だと思いますけど…。

柳川 水以外に宏観現象というのはありましたか。人間の五感で察知できるような…。

田中 犬が走って逃げたとか、後からそういう話はありますが、地震の前にはなかったと思います。いろいろ集めようということやっておられる先生もおられますけど…。

柳川 活動度なんていうのはあるんですか。

衣笠 長期間の平均的な変位速度のようなものは明らかにする方法はあります。両方の地層の年代を計って、変位量がわかれば、その地層の年代以後の平均的な変位速度がわかる。大ざっぱな話ですけど…。

再び救援活動について

柳川 最近「サリン事件」で阪神大震災が霞んだ感じですけど、復旧の問題に移りまして、直後の救援物資・義援金についてどうお考えですか。

大町 今回の場合は、輸送路が断たれたことが一番の問題だと思います。物はどんどん出したんですけど、それが届かないというのが一番の問題だったと思います。奥尻のときは受け付けの仕方が悪くて、何でもよこせと言っていたから、物がたくさん来すぎて困ったんですね。今度は最初からお金を出せと言っていましたから、物が来すぎて困るということはあまり聞こえてませんね。直後に輸送路が断たれて届かなかったということが一番多く聞いているような気がします。今回、問題だったと思うのは、送り先が現地の災害対策本部になってましたけど、一番混乱してるころへ物を送るわけですから、また混乱がひどくなるわけです。周りのところへ送って、そこからサポートしてやるというやり方をすると、ずいぶん楽になるんじゃないかと思います。

志方 新基地をつくらないとだめなんですね。渦中にドーンと送っても混乱を招くだけですから、周辺にサテライトみたいなものをつくって、水はここへ持って来い、衣類はここへ持って来いということですね。

大町 そこへ貯めておいて、必要な量を送っていくというシステムになると、ずいぶん楽だろうと思うんです。

志方 水は来るけど食料は来ないという場所もたくさんありましたから、配分の計画も全体を見て人がいないとだめですね。コマンド・センターのような形で…。

伯野 今度は配給が大変だったらしいですね。おにぎりが2日目の夜にようやく届いたところがあるとか…。

衣笠 大町先生が以前の論文で、救援物資を生命維持救援物資・生活維持救援物資・生活向上

救援物資の3つに分けてましたね。これは非常に面白い考え方だと思って、ほかの人にも読むことを勧めてるんですけど、今回のような壊滅的な被害が起きたときに、生命維持救援物資をどうやって届けるかというのが非常に難しい問題じゃないでしょうか。

大町 以前、東海地震の「大規模地震対策特別措置法」が出た直後に、国土庁が音頭をとって救援物資をどうやって届けていくかという調査をやったんです。食料がどこにある、テントがいくつあるという調査を日本中でやって、それをどうやって届けていくかということもやったんです。もう10年以上も前ですから、それが今回は全然生きてないようにみえますね。調査をやりっぱなしで、その後が全然フォローされてない。

伯野 担当が替わっちゃうんですよ。

志方 今回、王子公園というのが最後までヘリコプター基地に使われたんですね。生命維持物資は、まず渦中に持っていかなければ意味がないわけです。たまたま王子公園は、公園の番人が鍵をなくして鍵が開けられなかったために、人が入れなかったんですね。自衛隊のヘリが行ったときに、そこだけしか降りられなかった。ほかの公園は人が入っていて降りられないんですよ。生命維持物資については、降りられるスペースをきちっと確保することですね。そうすればそこへ全部集まる。生活維持物資は2日や3日後でいいですから、周辺の基地でいいと思うんです。

『セブン・イレブン』の社長さんは自衛隊の元将軍だったんです。彼の説としては、人間、パニックにならないためには、最低限食べられればいい、飲めればいい、これがあれば暴動が起きないと言うんです。それで彼はヘリを使ってにぎり飯と水をどんどん運んだんですね。それは生活維持で、当初は空輸しかない。空輸はスペースがなくてはいかんということです。

衣笠 いざとなったら、航空機から投下してもいいでしょ。

志方 落としてもいいけど、危ないんですね。

現地の人に聞きますと、一応、救命が終わったら情報を求めて街をさまよって、知らず知らずに気がついたら小学校に来てたと言うんですね。どうして小学校へ行ったのかというと、一種の帰巢本能だと思うんです。自分が小さいときに友達と遊んだり勉強してたところは情報交換の場でもあったわけです。気がついたら小学校に来てたというのは、そういう本能に基づいてたと思うんです。しかも歩いてこられた。小学校は一定の範囲に1つずつ配置されてるから、最初から小学校を防災拠点としてつくったらいと思うんです。建物は耐震設計にして、情報の端末、電源、非常用食料、水などを置く。トイレは学童10人に1つということで、100人の学校では便所が10個あるんですが、そういう基準ではなくて、3千人が避難するんだったら最初から3千人分のトイレをつくっておく。そういう小学校防災基地化というのをやればいい。

人間はいかにしたらカストロフィーを避けられるかということを考えて、自分が瓦礫の下に入っても3日、4日たてば必ず助けに来てくれるという国家に対する信頼感、隣人に対する信頼感があればパニックにならない。助けられて最寄りの小学校まで行ったら、そこに衣食住と情報があるというネットワークをつくるのが、災害は避けられなくても、その損害を小さくしてパニック状態を防ぐ一番いい方法だと思うんです。だから小学校の防災基地化を全国的にやったほうがいいと思うんです。

田中 丹後の地震にしても長田区にしても、地震で家が潰れて助けに来てくれるまでに火が来てしまうというケースが一番悲惨ですね。

伯野 消防の人も早くとりかかれなかった理由の一つは、それがあるんですね。水をかけ始めたら隣で声でするんですって…。助けてくれて…。そっちにみんなかかっちゃったと言うんですね。そんな声を聞きながら消火もできない。

田中 丹後の地震でも全部で2800人ぐらい死んでるんですが、同じようなことです。西宮の壊滅的に潰れたところは火事が出ませんけど、火事が出たところは、丹後とか福井と同じこと

を再現してるんですね。防災の近代化という以前の問題が大きいと思います。

伯野 原始に戻るんじゃないですかね。電気もなくなる、水もなくなる。

震度6ぐらいならできる初期消火が一切なかったみたいですね。そんなことできないですよ。家族が埋まってるんじゃないかと思うと、それを助けるほうを早くしないと…。

大町 私は救出作業をずっと見てたんですが、ものすごく手間がかかるんですね。人間を救出するというのは…。無茶苦茶にできませんから、えらい時間がかかるんですね。救援活動が遅かったといっても、あれだけ潰れると遅くならざるを得ないですね。

伯野 消防は早く行ったんだけど、助けてと声が聞こえると言うんですね。

衣笠 救急か消火かという判断ですね。

志方 救急か消火かという問題ですが、救急医療の場合はトリアージュというのがあって、重症の人は見捨てて、いま助ければ助かる人を先に助けますよね。消火もそうだと思うんです。いま、この火を消せばほかの90人が助かるという場合は、その火の下にいる人を助けるよりも、まずその火を消す。消せば酸欠状態になって死んでしまうけど、あとの90人は助かる。ある程度はしょうがないという、神様がやるような判断をモードを切り替えてやらなくてはいいかん。救急医療はモードを切り替えるからできるんですよ。ここから先は救急医療だと決めて神様の役目を医者がやるわけです。消防もその判断は現場の消防署長に任せると言えばやるんですけど、署長は躊躇しますよ。

伯野 消防署長が自分からそれを放棄して助けに行ったらいいですよ。

大町 そういうモードの切り替えを訓練のときにちゃんとやらないといけないんですね。



田中寅夫氏

志方 習い性にして、いくら助けてくれと言っても、その人は死んで頂くというぐらいにしないと…。それはお医者さんはやってるわけです。この間もテレビにも出てましたけど、その人は重症患者を診なかったと言ってますものね。医療でそれができるんなら火事でもできるはずなんですけど、それが訓練されてない。親方がやるべき判断を一番下の現場の人に任せてるというのが今の日本の政治のおかしいところですよ。

今回の教訓は何か

柳川 一番大事な教訓の話に移りまして、まず一つは地震予知の問題なんですけど、阪神大震災の前から、予知が果たしてできるのかという疑問が若手の地震学者から出ていたようですね。この傾向について如何ですか。

田中 もともと地震の予知はできないものであって、断層運動が全部終わってから大地震であったり、早く終わったために小地震ですんだということがわかるとする考え方がありますが、大地震はそれだけのエネルギーが蓄積されていることは間違いない。エネルギー蓄積の仕方を追究することを中心において、私は防災研究所というところにいる社会的使命からいって、地震の予知はできるとして取り組むべきだと考えています。長期・中期・短期と分けると、1カ月とか1週間といった中期のところが一番難しいと思いますが、長期的な予知は活断層の調査などで可能になると思います。直前というのは確率的予知になるでしょうけど、かなり差し迫っているという状況もある程度見込みがつくようになると思いますし、できれば1分とか30秒とか前に大地震が起こるという予知をして、とりあえずみんな飛び出すとか、新幹線のブレーキをかけるとか、そういうことが可能になるのではないかと考えています。破壊をどのように考えるかということになると思いますが、少し間があっても数時間前から異常が見つけれられるという可能性があると思っています。いずれにしても、そういう前兆になるような信号を

とられるネットワークを持ってるかどうかということにかかると思います。

柳川 マグニチュード8クラスの巨大地震については、ひょっとすればうまくいくかもしれない。しかし、今度のように7クラスの中規模になると、事前にしっぼをつかまえることは非常に難しいんじゃないですかね。

田中 範囲も小さいですしね。地震予知研究センターが発足したとき、どのように地震予知の研究を進めていくかということで議論をしたんです。地震が起こる場所を予知できれば、そこへ器械を集中して待っていて、いいデータがとれるわけですが、それができてない段階では、適当にバラバラと置いて、網は粗いけど広い網で待ってるという姿勢がいいのか、ヤマ勘でもいいから集中して“いちかばちか”の観測を続けるべきかということ議論したんですが、残念ながら神戸ということは考えなかった。研究の場所としては人為的な雑音が大きいの、土地代は高いし、そんなところで我々は地震予知の研究はできない。我々が考えたところは琵琶湖の北部とか、一応、起こり得るところで、しかも静かな場所で研究がしやすいところということになります。一応、議論をしたのに、そこへ集中するだけの確信と勇気がなかった。定常観測網を全部ひきはがして、そこに集中すべきかとも考えてたんですが、そうはしておりません。

昨年、退官された理学部の田中豊教授が六甲の新幹線用のトンネルとか、高速道路用のトンネルの中で活断層の観測を始めたんですが、新幹線のトンネルの中じゃなくて、自前でトンネルを掘って、いい環境のもとで観測をやるべきであったということは、教訓としては言えるかもしれません。ただ、30キロか40キロの範囲に観測点を何点か置いておかないと信頼できるデータはとれませんから、今回の地震でしたら、財政的にみてもそれだけのデータがとれたかどうかわかりません。

柳川 阪神大震災の後、予知無用論が出ましたが、どう思われますか。

衣笠 私も地震予知は可能だと思いますが、今

日、明日から実用化になるものではない。しかし、今日も明日も観測を続けないと実用化になる日が遠のいていくばかりである。今回の地震の経験から反省して、いっそう地震予知に力を入れるべきだと思っています。

先ほど、M8なら予知できるけどM7では難しいんじゃないかと言われましたけど、M7クラスの直下型地震は直上で観測ができるんですね。海溝付近で起こるM8クラスだと、はるか離れたところで観測しなくてはいけない。直下型地震は直上で観測できる利点がある。日本で過去に起きたM7クラスの直下型地震の多くは前震活動があるんです。そういう意味で、何らかの前震活動が全国的なネットワークで観測できれば、機動観測を集中してやるという作戦も一つあり得ますし、考えられるあらゆる手を打って、一日も早く地震予知の実用化に近づける必要があると思います。

田中 前震かどうかということは、これを見て後ろに大きな地震がいつてくるのか、それとも単発かということが区別できればいいですね。兵庫県南部地震でも、前の日に3つばかり、断層のところで地震が起こってますから、見分けるすべがあれば、これが一番いいわけです。

大町 教訓という意味では、今回、あのあたりで防災意識が薄かったこと、危機意識が薄かったことが問題だと思うんです。戦前は『稲むらの火』みたいないい防災の教材があって、それを国語の教材として何度も何度も繰り返し読んで、みんな頭に入ってたわけです。そういう国民的な規模で防災意識を持続させるような動きを日本全体でつくっていかないと、すぐ風化してしまう。今のように変化の激しい時代ですと、今回の災害も「サリン事件」のために新聞紙面から消えていくということですから、そこが一番大きな教訓じゃないかと思うんです。教材としては心を打つ美談のようなものがあると思いますけど、そういうものを残していくことが大事だと思います。

柳川 志方さんは如何ですか。提言でもなんでもいいんですが。

志方 さっき言ったように、小学校を防災拠点にするというのが一つです。これは人間の本能に結びついてるという意味で…。

もう一つは、SOP（標準行動要領：スタンダード・オペレーショナル・プロシージャー）というのがあって、ボタンひとつ押せばA、B、Cという行動が自動的に発起する。そういうことをしないと3日間ぐらいのタイム・センシティブな救援はできないと思うんです。それが最善の救援かどうかかわからないけど、少なくとも遅れない。ある程度の基準を決めなくてはいけません。自動的に自衛隊のヘリが観測に飛んで、偵察結果が自動的に総理のところへ集約されていく、そして作戦AならA、BならBということになって、Aが発動されたら警察はこうする、自衛隊はこうする、消防はこうするときちょっと決めてしまう。そういう具合にしないと、閣議を開いて各省庁から担当者集合なんて言ったら間に合わないですね。そういうところが今回の反省事項ではないでしょうか。

柳川 マニュアルというルーティーンですね。伯野さんは如何ですか。地震工学者総懺悔でも、なんでもいいんですが。

伯野 今度のことで自信まで喪失しちゃったんですが、震度6までとはちょっと変わった点もあったもんですからね。初期消火ができなかったとか、家具を据え付けても壁から崩れたから全然だめだとか、震度6までとは違うようなことがいろいろあったわけですから、そういうことも考えて今後の防災対策に生かさなくてはならないと思います。もう一つは、震度7でも壊れちゃいけないものもありますから、それをどうするかというのはかなり問題だと思うんです。新幹線なんかは桁が落ちちゃうと困る点があるんですね。転覆することは確実ですから。今まで新幹線は安全神話できてますね。死者が一人も出ていない。その方針を変えて、転覆することもあるけど、それでも乗って下さいと飛行機のように変えるのか、難しい点ですね。どんな地震にも壊れないようなものはできないことは理屈でわかりますけど、今度の地震ぐらいでは

壊れないようにはできると思うんです。全国の
新幹線をそうするには、結構お金がかかるんで、
それをどうするかですね。

柳川 ものすごく皮肉だと思うんだけど、地震
工学の場合、コンピュータが悪さしてるんじゃ
ないかと思うんです。昔は計算できなかったから、
橋なんかもガチガチに金をかけていた？

衣笠 地震予知総合研究振興会の仕事で、日本
全体で起き得る地震の大きさの図をつくったこと
があるんですが、神戸のあの地域はマグニチュード
7 3/4 ぐらいなんです。今回の地震の規模は
マグニチュード 7.2 ですから、起きるべき
地震というか、やや小さめな地震が起きたわけ
です。今後、日本のほかの地域でもあの程度の
地震が起きる可能性がある。そういうときに、
どうしなくてはいけないかという、伯野先生
が言われたように、壊れてもあきらめるものと、
絶対に壊れてはいけないものと、そういう区別
が必要ではないか。全部を壊れないようにする
ことはとても無理なことです。設計基準とかい
ろいろありますけど、あらゆるものと同じスタン
ダードを適用するのではなくて、先ほど志方
先生がおっしゃったような、防災の拠点には少
し上のレベルを適用するか、場合によっては
壊れるものだということも PR する必要がある
んじゃないかと思うんです。

伯野 その場合も難しい点があるんですね。今
回、一番死者を出してるのは個人の木造家屋な
んです。個人の家もつくるときは、建築基準法
である程度規制されてるかもしれないけど、大
して規制はないんですね。古くなると強度が下
がるけど、それは個人が補強するんですね。今
回の場合は 9 割が木造家屋の圧死ですから、死
者をなるべく減らすという意味では、それをよ
く考えなくてはいけないと思うんです。

衣笠 建築基準法というのは壊れないことを保
証するためではなくて、せめてこの程度の強さ
にはしておきなさいよという基準なんです。ね。
もっと言うなら、壊れる壊れないはオーナーの
勝手だけど、ほかの人に迷惑をかけないように
つくり方をしなさいよというのが建築基準法だ

と思うんです。建築基準法が甘かったとかなん
とかいう問題ではなくて…。

伯野 甘いと言ってるんじゃないくて、死者をな
るべく少なくしたいんですね。そのためには、
高速道路を強くするよりも住宅のほうを考えな
くってはいけないんじゃないか。

衣笠 その場合でも、建築基準法を満たしてい
れば壊れないんじゃないくて、せめてこれだけは
やっておきなさいよ、それ以上のことが心配な
ら自分で上積みしてつくりなさいよというこ
とで、建築基準法を満たしていても壊れるんだ
という宣伝が必要じゃないでしょうか。

伯野 それはしないでしょね。

大町 ああいうことになると、個人のもでも
みんなが責任を分担することになっちゃいます
から、定期的に点検して、とにかく補修させる
ようなシステムにしないと困るんじゃないで
しょうか。

衣笠 それは必要ですかね。

大町 そうしないと、みんなが迷惑するわけ
ですから。

衣笠 そういう意味では補修させる必要がある
けど…。

伯野 宮城沖地震のときに学童が何人も潰され
たからブロック塀が危ないと言われて、その後、
ブロック塀を生垣に替えましょうという運動が
されたけど、東海地震が騒がれてる静岡へ行っ
てもブロック塀は全然減ってませんよ。総論賛
成、各論反対ですから、個人が何かやるとい
うのは一切だめです。今度だって木造家屋で 9 割
の人が死ななければ、五百何十人ですんだわけ
ですよ。それをどうしたらいいのかわからん。

衣笠 私の持論なんですけど、死ぬ死なないは
個人の勝手ですね。ほかの人に迷惑を及ぼさな
いような死に方をしてくれればいいんで、地震で
家が壊れて死ぬのがいやな人は、安全なところ
へ引っ越すなり、そこに住みたい人は早めに家
を建て直すなりすればいい。

伯野 木造家屋をやめなさいと言ったら怒られ
たけど、木造家屋だから壊れるんですよ。時間
がたつとすごい勢いで強度が落ちていくから…。

コンクリートよりはるかに落ちていきますから…、40年もたてば半分腐っちゃうんだもの。

柳川 築後30年で点検して、レッドカードとかイエローカードを出すというのは今の制度にはないでしょ。

田中 レッドカードを出して、建て替える、その代わりお金は多少援助して貰えるとか、そういうことでやればできるでしょうけど、自分のお金で建て替えないといけない。そうすると退職金でもないといけないけど、現に雨露はしのげてるのに、なかなかやらないですよ。

伯野 先生のように退職金が入っても、それを家のために全部使っちゃったら困りますよね。

田中 5年後に地震が起るといことになればみんなやるでしょうけど、いつ起こるかかわからないものに対してやらないですよ。

大町 丈夫な住宅をつくって、そっちへ移らせばいいんですよ。土地は収用して…。

伯野 強制的にできればいいけど、今の日本で強制的なんていうのは絶対にできません。

衣笠 自分の身は個人で守るのが基本で、30年たった家は危険ですよとか、建築基準法ではここまでしか保証してませんよ、という逆の意味でのPRをするべきだと思うんです。

伯野 今は30年たっても40年たっても、ちゃんと補強すれば大丈夫ですよというPRをしてるでしょ。そうしないとみんな怖がって木造じゃなくしようとする。どんな新聞にもそういう広告が出てますよ。うちの木造は40年たっても大丈夫だったというような…。

志方 5500人ぐらい亡くなられたわけですが、もし3時間ぐらい遅れて9時ごろに起こってたら新幹線も走ってたし、満員の地下鉄は何両も地下に入ってたし、高速道路は車であふれ、通勤客の上にガラスの破片は落ちてくる、ビルが潰れてオフィス全員がやられるし、5万人ぐらい死んだかもしれないんですね。ベトナム戦争のときのアメリカ軍の死傷者が5万5千人ぐらいですし、広島原爆でも、その場で死んだのは6万人ぐらいですが、阪神大震災は戦争だったんですね。今回のようなことが起こったら、

政府は戦争するぐらいの気概で救援作戦を指導しなくてはいかんと思うんです。2日目になって“おれも行かなきゃなるまいかな”なんて言ったのではだめで、モードの切り替えをしないといけない。平時の常識ではやっていけないということですよ。おれが責任をとるから、おまえたちはこういう具合にして、こういう判断をなささいということをやれば、現地は結構、動けたんですね。こんなことやっていいのかなというので、みんなビクついてたんですよ。上が切り替えれば下も切り替えるわけです。そういうことをやって頂かないといけない、という気がします。

伯野 日本は戦時体制じゃなかったですからね。アメリカなんかロスでは暴動は起こってるし、核戦争の対応をやってるから、そういう切り替えはすぐ全員ができるんですね。日本は平和だったですから、なかなかね。

そのつもりなら、政府は木造家屋を全部政府資金でつくり直す。

大町 また税金が増えるじゃないですか。

伯野 戦争ですよ。戦争はすごい金がかかるわけだから…。

衣笠 今回の地震から多くの教訓が引き出せるけど、あれが昼に起きていたらどうなったかということも考えてみなくてはいけないですね。

田中 自然は、我々に警告を発してくれたと思うんです。

柳川 時間的にはラッキーでしたね。

志方 我々がいろんなことを学びとらなければ、あの5500人の人は浮かばれませんね。あの方たちの犠牲を無にしないように、救援とか建築基準とか、いろんな面で考えなくてはいけないし、政府の意思決定が遅いですよ。そういうことをやれば、亡くなった人の命もある程度報われると思うんです。

柳川 防災対策というのはいつまでやってもエンドレスだと思うんです。この議論もエンドレスなんですけど、このへんで終わりたいと思います。長時間ありがとうございました。

[完]

地殻破壊の科学

大地震と小地震とはどこが違うか

梅田康弘

はじめに

日本列島のような地震活動の活発なところでは、毎日おびただしい数の地震が起こっている。しかし、そのほとんどが微小・極微小地震で終わり大地震になるのはきわめて希である。いったい何がそうさせているのか、大地震は偶然にそうなるのだろうか。

破壊の出発が即、最終破断に至るような材料強度力学の分野では破壊の出発そのものが非常に重要であり、地震学における断層の動力学的研究もこの分野に負うところが大きい。しかし地震の場合、特に地震予知研究の場合はほとんど至る所で起こっている破壊の出発よりも、それが大地震にまで成長するか小地震にとどまるかといった問題のほうが重要ではないだろうか。それと同時に、大地震に成長する場としての条件と環境を予め認識することも必要である。

破壊が第2の破壊を誘発する

弾性体内でのクラックの先端付近は常に歪または応力が集中しており、それがあるしきい値を越えたとクラックは進展し始める。クラック進展に伴い、先端付近の応力場はますます増大するので、均質な媒質の中ではいったん進展し始めた破壊はどんどん加速・成長する。

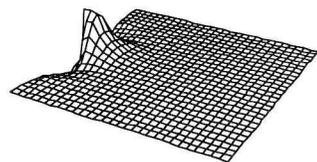
ところで、このクラック（断層）が食い違いを生じながら移動（進展）してゆくと、それに伴って地震波動を放出することにも注目しなければならない。地震波動の評価には変位・速度・加速度といったものが一般的であるが、空間的に拡大する波動場においては剪断破壊を励起する成分、す

なわち“剪断歪成分”を持っている。この剪断歪波動場を描いたのが図1である。この種の波動場は断層先端の歪集中に比べ、それほど大きくはないため、従来は余り注目されてこなかった。図1では現実に近い断層モデルとして、幅10 kmの断層が伝搬速度3 km/sで進行した場合の剪断歪場を描いてあるが、その値は 40μ strainに達し、決して小さくないことがわかる。

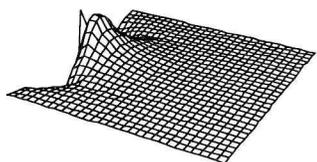
この図で重要なことを3点指摘しておきたい。地震が起こり得る地域を想定しているから、すでに全体がある程度の歪レベルに達しているはずであり、それに図1のような波動としての剪断歪が加わるわけであるが、このことが新たな第2の破壊を誘発させる原因（トリガー）となる。これが第1点であり、第2の重要な点は波動による剪断歪の励起は時間とともに空間的に広がるということである。

先に述べた断層先端に集中する歪は、その断層だけを駆動し加速させる作用をするが、波動によってトリガーする第2の破壊はもとの断層の面外に、すなわち空間的に分布

破壊開始2秒後



破壊開始3秒後



破壊開始4秒後

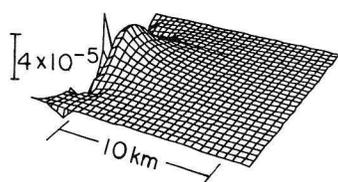


図1 地震波動による剪断歪場
幅10 kmの断層が伝播速度3 km/s、変位速度0.5 m/sで図の左上から右手前に進行してくるときの各時刻ごとの歪場の広がりを示す。

し得るという点にある。第3点は波動による歪励起は定常的に存在したり、あるいは常に大きくなったりするものではなく、あくまで波動の性質を持った一過性のものである。一般には破壊の伝播速度よりも波動の速度の方が速いので、図1に示した励起歪はどんどん先へ進んでしまうが、励起されたときにトリガーが掛からなければ、何事も起こらず歪波動は拡散してしまふこともあり得る。

以上を簡単にまとめると、最初の断層運動が放出する剪断歪波は空間的に拡がり、これが第2の破壊群をトリガーする。しかし、元々の歪場が非常に低い場合は、トリガーは掛からない場合がある、ということになる。

大地震の破壊成長

最近の広帯域強震計や解像力の良い観測によって大地震（本震）は、たいてい、いくつかの破壊から構成される、いわゆるマルチプルショックであることがわかってきた。我々の最近の研究¹⁾では、大地震の破壊は3つの段階から成ると考えている。その様子を模式的に示したのが図2である。図2(A)は初期破壊と呼んでおり、おそらく1枚の断層面上で、初めはゆっくり破壊が拡大してゆくときである。前節で述べたように、この破壊が放出する剪断歪波は周辺を励起し、同図(B)のように第2の破壊群を起動させる。この空間領域を地震のブライトスポットと呼んでおり²⁾、トリガーされた多くの小断層によって、それらから放出される短周期波が重畳し大加速度が生じる。この領域ではしばしば地表物体が飛散する^{3),4)}な

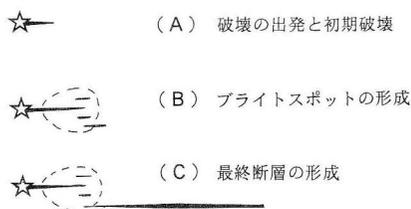


図2 ブライトスポットモデルとしての大地震の成長過程

星印が破壊の出発、黒い横棒は断層を示す。点線で囲んだ領域がブライトスポット。

どの著しい現象が見られるし、また歪が空間的に解放されるので余震が発生しにくく、いわゆる余震空白域となる。(C)に示したように、ブライトスポットの中からどれか1つの断層が抜き出して成長すると、結果として大地震になる。

1995年兵庫県南部地震の破壊過程

京都大学防災研究所上宝観測所で得られたSTS地震計による本震の記録を図3に示した。図中にP1, P2, P3, S1, S2, S3と印したように、この地震は3つの段階を経て大きく成長したことがわかる。近地の強震計記録、余震分布⁵⁾、測地、断層調査⁶⁾など、これまでに得られているデータに基づいて、震源モデルの立体的模式図を図4に示した。この図も含め暫定的ではあるが、前節の主旨に沿って以下にこの地震の破壊過程を時間順に述べる。

最初の破壊は1月17日05時46分57秒、明石

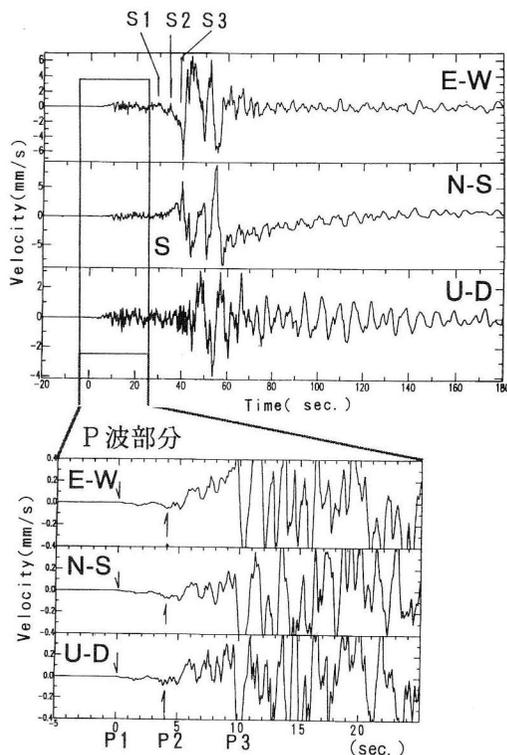


図3 上宝観測所のSTS地震計記録

震央距離は約280 km. 上は全波形、下はP波部分を拡大した。波形は瀧谷拓郎氏提供。

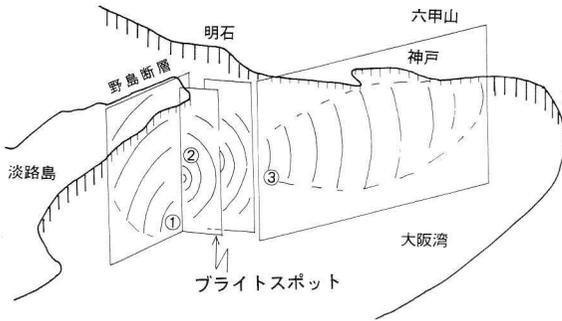


図4 1995年兵庫県南部地震の破壊成長モデルの立体的模式図
 矩形は断層面を示し、破壊域は余震分布を参考に楕円状の広がりで推定した。①が破壊の出発点、①と②の間が初期破壊、②がブライトスポット、③が最終断層の形成。

海峽直下14 Km付近から出発し(P1)、初めはゆっくり野島断層の基底部を円形状に拡大していった。上宝の記録を見ると、P1波より約4秒後のP2から、やや短周期で振幅が大きくなっており、新たな破壊段階に入ったことがわかる。すなわち、歪エネルギーの解放が1枚の断層だけでは追いつかなくなり図4に示すように明石海峡直下で複数の断層が形成された。これら小断層群がいっせいに進展したことにより、瞬時にして巨大なエネルギーが解放された。この領域がブライトスポットであり、歪が空間的に解放されたため本震直後からこの領域は余震空白域になっている。

小さな領域で複数の断層が進展しようとする、互いに牽制しあって、それぞれが停止に向かうが、相互作用の最も少ない一番東外側の新しい断層だけが須磨海岸から大きく成長した。この時点で大局的な断層運動は、淡路島の野島断層から神戸の新断層に移った(ステップオーバーした)。

この頃、破壊開始後7~8秒後には野島断層の破壊は終了していた。一方、神戸市直下での破壊の進展は明石海峡のそれに比べるとゆるやかだったが、波形のP3に見られるように約9秒後には非常に大きな破壊が起こった。

地震成長の因果関係

前節で述べた兵庫県南部地震の破壊過程を、ブライトスポットモデルにあてはめて説明すると以下ようになる。図3の(P1-P2)が図2(A)の初期破壊に相当し、その継続時間は4秒である。明石海峡の複数の破壊面の形成が同図(B)のブライトスポットの形成であり、(C)の最終断層は主として神戸市直下における断層の形成に対応する。

このような過程を経て大地震に成長するのは決して偶然ではない。我々はすでに「初期破壊継続時間が地震規模に比例する」という地震成長の因果関係を示す非常に重要な経験

式を観測結果から得ている(図5)¹⁾。すなわち、

$$\text{Log}(P1-P2) = 0.55M - 3.4 \dots\dots (1)$$

であり、兵庫県南部地震、 $M=7.2$ の初期破壊継続時間(P1-P2)=4秒もこれを満足している。「初期破壊継続時間が長いほど地震は大きくなる」ということは、破壊の初期の段階でそれが大地震に成長するか否かが決まるということであり、大地震になるのは偶然ではなく必然性があることを示している。

実はブライトスポットモデルは、この因果関係を説明するために作られたもので、すでに述べたように、破壊自らが第2の破壊を誘発するという自己励起モデルなのである。また当然のことであ

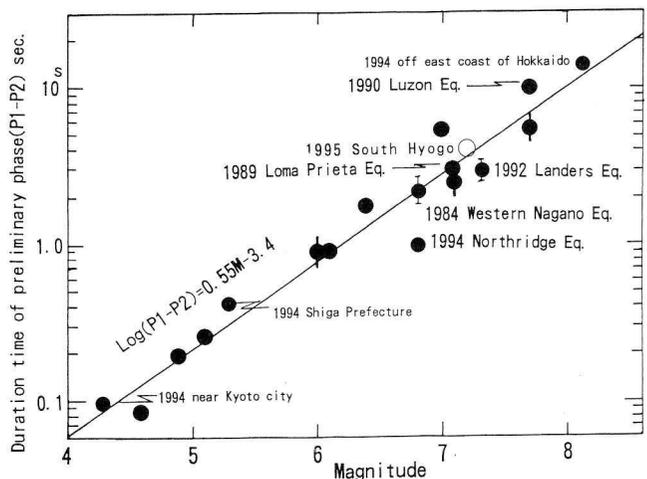


図5 初期破壊継続時間(縦軸)が長いほど地震規模(横軸)は大きくなることを示す。白丸で示した1995兵庫県南部地震もこの関係を満たしている。

るが、自己励起モデルで因果関係を説明するならば、それによって破壊の自己終結も説明しなければならない。

断層運動の停止メカニズム

断層が進展しやすいかどうかを示すパラメータとして、断層先端の応力拡大係数を検討する。断層面外の剪断応力を τ_{xy} とすると、長さ $2L$ の断層のモードⅢのそれは、

$$K_{III} = \tau_{xy} (\pi L)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。この式で K_{III} が L に比例していることは、断層は大きくなればなるほど成長しやすいことを示している。

ところが、ブライトスポットのように複数の断層が形成された場合の状況は全く違ってくる。上記と同じく長さ $2L$ で、今度は図6の上のように3枚の平行な断層が間隔 D を隔てて存在する場合を考える。各々の断層先端での応力拡大係数は、

$$K_{III} = \tau_{xy} \{D \tanh(\pi L/D)\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる⁷⁾。関数 $\tanh(\pi L/D)$ は図6の下に示したように、 L が大きくなっても、すなわち断層が大きくなっても一定値に近づく。したがって、(3)式は断層の間隔が狭いほど応力拡大係数は小さくなることを示している。これが断層運動

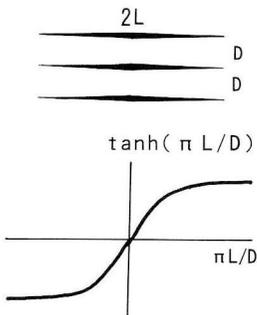


図6 上図は3つの断層が間隔 D で並列している場合
下図は関数 $\tanh(\pi L/D)$ が断層の長さ L によらず一定値になることを示す。

の抑止力であり、ブライトスポットの中で断層が密に形成されるほど速やかに停止する。

以上は解析的に基本的なことを述べたが、もう少し具体的な例として Yamashita and Umada⁸⁾ から数値計算の結果を図7と8に示す。図7-Aで初期破壊による断層 M が X の正の方向に進行しており、その前方に $S1$,

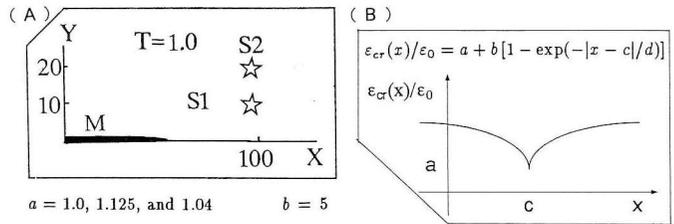


図7 (A) クラックの種 ($S1, S2$) があるところへ、最初の断層 M が進行しつつある状態を示す。
(B) 各クラックにおける限界歪の分布。

$S2$ という破壊の種 (クラック) があるという状態を示した。いずれも断層面は紙面に直交方向の $X-Z$ 面にある。初期破壊 M も含め図7-Bに示したように、いずれも破壊出発点での限界歪は小さくしてある。このことはクラック群においては元々ながしかの歪レベルにあるということと数学的には同等である。

このような条件のもとでの3つの破壊群の進展・停止の模様を示したのが図8であり、縦軸・横軸はいずれも無次元化した時間と距離である。初期破壊による断層 (M) が $X=80$ 付近まで進行してきたとき、 M の放出する剪断歪波動によって、まず $S1$ がトリガーされ双方向に進展し始める。すこし遅れて $S2$ もトリガーされて進行するが、これはすぐに停止してしまう。同図で曲線が縦の直線になっているのは時間が経過しても X

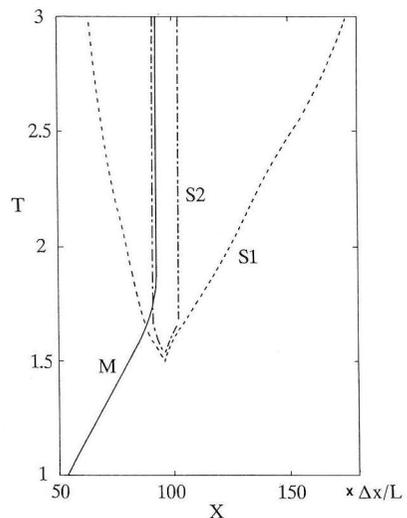


図8 最初の断層と2つのクラックの相互作用による、各破壊の進展と停止の様子。

の方向に進行しないこと、すなわち破壊の停止を意味している。あとからこの領域に進んでくる断層Mも徐々に減速させられ、ついには完全に停止してしまう。この例ではS1だけが生き残り、どんどん大きく成長した。

以上は1例であるが、要約すると、断層間の間隔が狭いと相互作用しやすく、互いに他を牽制するので停止に向かう。逆に間隔が広い場合は干渉しにくいので、大きく成長する。これが大地震と小地震に分かれる定性的な理由である。

大地震と小地震

地殻内には元々破壊の種と呼ばれるクラックや小さな断層が存在する。前節のとおりそれらの間隔、すなわち粗密が大地震か小地震かを決定する要因の1つである。その様子を図9に模式的に示した。星印で示した最初の破壊は出発すると同時に波動（ここで注目するのは剪断歪波動）を放出し続ける。破壊の種としてのクラック密度の高い、言い換えれば不均質度の高い同図（A）の場合は早い段階で面外のクラックを、この波動が一時的に励起し複数の断層を出発させる。しかし、励起波動が通過してしまうと各々のクラックの歪レベルは元に戻ってしまい、この場合はクラック間の間隔が狭いので全体が停止に至る。

一方、クラック密度が低い、均質な地殻（同図B）の場合は波動場が広がっても、なかなか励起させるべき面外のクラックに遭遇しない。したがって初期破壊は長く続き、波動場もどんどん広が

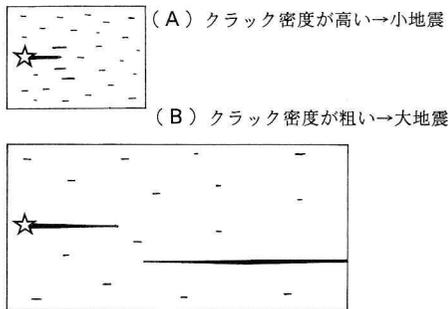


図9 地殻の不均質さによって地震の大小が決定づけられる。

ってしまう。このように時間が経過してから遠方のクラックを励起しても相互作用をほとんど起こさないため、トリガーされた後の第2の破壊は独走してしまい、結果として大地震になる。

不均質度の高い地殻で発生する地震は小さくどまり、逆に不均質度の低い所のほうが大地震に成長しやすい、というのがこのモデルの示すところである。

一般に破壊速度よりも波動の速度のほうが速いので、図9のAでもBでも、波動によってトリガーされた第2の破壊は初期破壊が到達する前に進行する。そのため、その周辺の歪が解放され、図8に示したように、あとから突入してくる初期破壊は徐々に停止させられる。図9-Bのように第2の破壊が独走してしまった場合は、再び断層の分裂が起こらない限りこのモデルでは停止させられない。この点で、すなわち最終断層の大きさを決定できない現在のブライトスポットモデルは未だ不完全と言える。

ここまで、大地震と小地震という使い方を不用意に用いてきたが、実はこれは地震規模だけでは分けられない。図2のモデルでは第1または第2段階で停止した地震が小地震であり、第3段階まで成長したのが大地震である。観測上の目安は初期破壊に続く大破壊の大きな振幅が検出されるか否かによるけれども、余震の場合はM~6クラスの地震でも、記録上に初期破壊が観測されないものも多い。そういう意味では、ここで言う大地震は本震を指しており、小地震は本震以外の余震や群発地震である。なお、このようなこと自体、大変重要なことである。すなわち、本震と余震とは初期破壊において決定的に異なっているということ自体、次に述べる地殻の急激な不均質場の形成に関係していると思われる。この種の研究は、今後非常に重要になるだろう。

地殻の不均質場をどうして知るか

地殻の不均質さの程度が地震の大小を決定する重要な要因であることがわかったが、それをどうやって知るかが次の大きな課題となる。一般的な

手段として、地震波動の散乱や減衰を調べる方法が開発されており、すでに色々な所で観測実績がある。

ところが、この不均質を作っている根源として地殻底の高温流動体があることに、我々は近年、特に注目している。高温流動体は火山地域ではマグマ溶融体、火山地域以外では熱水と考えられている。最近、群列観測のように稠密な地震観測がなされ波形処理の方法が向上するに伴って、このような流動体は地震波の反射面として全国のあちこちで発見されだした。

流動体が地殻底から上昇してくると、地震発生層の不均質さは大きくなる。しかし、この場合は大地震にはならない。1965年からの松代群発地震や近年の伊豆半島北東部の地震活動がこれに相当し、おびただしい数の地震が発生するが、いずれも小地震にとどまっている。火山島である伊豆大島周辺も同様で、むしろ大地震は伊豆半島の南端や同半島と伊豆大島の間で発生している。

このようなことから、我々は大地震に成長する不均質度の低い領域は高温流動体が深くなっている所、という仮説を立て、地震波の反射波を用いて流動体反射面の深さ分布を探ろうとしている。

おわりに

兵庫県南部地震の破壊域の北東延長上にあたる猪名川町では、昨年(1994年)11月から群発地震が頻発した。大半が微小地震であったが、震源が浅いため大きな音を伴った有感地震となった。この群発地震の直下には地震波反射面が存在することが、これまでの地震観測によってわかっている。松代や伊豆北東部と同様、おそらく高温流動体としての水が、この群発地震発生に関与したと思われる。この群発地震の頃から六甲トンネルにおける湧水が異常に増加し、1月17日の本震直後には以前の10倍以上にもなった⁹⁾。

本震直後の調査¹⁰⁾によると、猪名川町やその周辺の温泉では湧水量が増加し、地下水位は上昇している。猪名川町では地下深部の水が多くの割れ目を作りながら、すなわち群発地震を起こしながら

ら上昇してきたものと思われる。六甲山では既存の割れ目に沿って、また本震直後は地震断層に沿って、やはり地下深部の水が上昇してきたものと思われる。

前節で述べた理由で、猪名川町付近では不均質度が高く、群発地震で終始したと考えられているが、本震の出発した明石海峡まで地下深部の高温流動体はどのような深さ分布をしているのだろうか。本年夏から秋にかけて、全国大学合同の内陸地震研究グループは人工地震グループと共同して、このあたり一帯で群列地震観測を行ない、高温流動体の実体を地震予知を目指して探る計画である。

参考文献

- 1) 梅田康弘・山下輝夫, 1994, 地震の成長過程と地震予知. 地震予知研究シンポジウム, 日本地震学会出版, 53-62.
- 2) Umeda, Y., 1992, the Bright Spot of an Earthquake, *Tectonophysics*, 211, 13-22.
- 3) Umeda, Y., et al., 1987, High Accelerations Produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, Earthquake of 1984, *Tectonophysics*, 141, 335-343.
- 4) 梅田康弘ほか, 1991, 1990年フィリピン地震によって飛び跳ねた石, 京都大学防災研究所年報, 34, B-1, 211-219.
- 5) 京都大学防災研究所地震予知研究センター, 1995, 兵庫県南部地震の本震・余震分布について, 第113回地震予知連絡会資料.
- 6) 地質調査所, 1995, 地震断層のトレースと変位量, 第113回地震予知連絡会資料.
- 7) 村上裕則・大南正瑛, 1984, 破壊力学入門, オーム社, pp. 1-276.
- 8) Yamashita, T. and Y. Umeda, 1994, Earthquake Rupture Complexity Due to Dynamic Nucleation and Interaction of Subsidiary Faults, *PAGEOPH*, 143, 89-116.
- 9) 京大物理学部, 1995, 六甲高雄観測室における観測結果, 第113回地震予知連絡会資料.
- 10) 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター(佃・三浦), 1995, 兵庫県南部地震に伴う地下水変化と水温観測(序報), 第113回地震予知連絡会資料.

[うめだ やすひろ 京都大学防災研究所助教授]

地震メカニズム論の変遷

久家慶子

1. はじめに

地震が地球内部でどのような仕組みで発生しているのかは地球物理学的に大きな問題である。地震の発生機構は、地震動の観測システム・観測網の向上とともに次第に明らかにされてきている。

本稿では、地震の発生機構に関するモデルの変遷と最近のトピックをいくつか紹介する。

2. 断層モデル、ダブルカップルモデルまでの変遷

地震が起こる原因について、古くは、地中雷、地下の火山爆発、可燃性物質の爆発的燃焼、マグマの急激な運動など、多くの説があった。1906年に起こったサンフランシスコ地震で、サンアンドレアス断層（北アメリカプレートと太平洋プレート

のすれ違い境界と考えられている）に沿って、顕著な水平横ずれが観察された。地表に出現した大きな水平横ずれは、火山爆発などでは説明できない。これが地震は断層運動であるという概念を印象づけ、地殻内で蓄えられていた弾性歪みが断層でのずれによって急激に解放され、地震を発生するというReidの弾性反発説

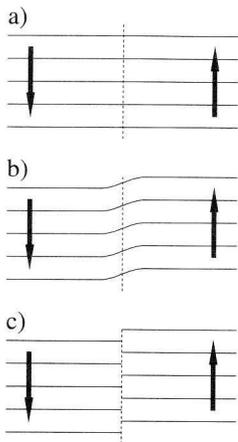


図1 弾性反発説
歪みが次第に蓄積され：b) 最後には、断層面（点線）での変位が生じ、地震：c) を起こす。

（図1）の提唱につながった。一方、日本では、1910年代、志田が、日本国内での観測から静岡県中部地震などの地震の初動（P波）の押し引きの分布が震源を中心に4象限や円形に分割されるという規則性を見いだした。円錐型の初動分布を重視し、マグマの急激な貫入こそが地震の根源であるという石本の強い反発もあったが、1922年に中村が初動の押し引きの4象限型を横ずれ断層と解釈し、1927年には和達が浅い地震の場合に断層型の地震が見かけ上円形の節線を生じることを示した。次第に地震は断層運動であるという概念が広がった。

地震は断層運動であるという考えが定着しつつある1950年代、震源に働く力はシングルカップル（一对の偶力）なのか、ダブルカップル（二対の偶力）なのか（図2）という大きな論争があった。Byerlyや中野は、地震は断層運動であり、

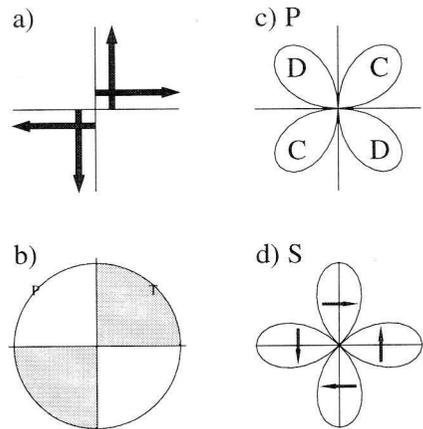


図2 ダブルカップルモデル

a) 断層運動と等価な2対の偶力。ここでは、図1の横ずれ断層の場合。b) 震源球による発震機構表現。メッシュ部分がP波初動の押し、白い部分が引きにあたる。c) P波放射特性（C：押し、D：引き）。d) S波放射特性（矢印が揺れの方）。

断層運動はシングルカップルであると主張した。シングルカップルは、直感的に、断層面に沿った歪みエネルギーの解放を示しているようにみえた。一方、本多は、S波の地震記録を基に、震源にはダブルカップルが必要であることを主張していた。シングルカップルとダブルカップルではどちらもP波の押し引きは4象限型になるが、S波の放射パターンが異なる。前者では、2象限型であるが、後者では4象限型となる。次第に蓄積されるS波、表面波などの観測がダブルカップルモデルを支持することがわかるとともに、1960年代、丸山らによって、面に沿ったすべりと等価なモデルはダブルカップルモデルであることが弾性論から理論的に示され、この論争に終止符がうたれた。

その後、P波の押し引きを用いて、世界中の地震のダブルカップルモデルが推定されるようになる。求められたモデルでは、P波の押し引きは4象限型となり、押し引きを分ける2つの節面のうち1つが断層面となる（もう一方は補助面；図2参照）。断層面でのすべり方向は補助面に垂直な方向で与えられる。このように推定された断層面がプレート境界と、断層面上でのすべりの方向がプレートの相対運動の方向と一致することがわかるようになり（例えば、Sykesのプレートすれ違い境界での横ずれ断層）、地震と断層、そしてプレートテクトニクスと地震という概念が揺るぎないものとなった。

1960年代前半、均一な特性をもつ世界的地震観測網（WWSSN）の設置が開始された。数多くの統一規格の地震波形記録の出現は、地震の発震機構を調べる上で、初動ばかりでなく、地震波形全体を利用することに目を向けさせた。実際、地震波形を用いることは初動だけより情報量を増やす。例えば、断層面を決める場合でも、P波の波形を使えば、押し引きだけではなく、振幅から節面にどれだけ近いかわかる。また、断層面の幾何だけでなく、断層面上でのすべりの時間関数も推定できる。斉藤が、ダブルカップルの点震源に対する表面波の理論地震波形が弾性論から計算できることを示すと、実際の地震波形を理論波形で説明するという手法により、地震断層の

走向、傾斜角、変位方向、相対変位の大きさなど、断層パラメタを推定する試みを金森らが盛んに行なった。得られた断層面や歪みの卓越方向、すべりの分布などが、沈み込み帯での低角逆断層の地震をはじめとするさまざまな地震の震源特性や断層パラメタの相似則などを明らかにしていった。

3. モーメントテンソルによる震源表現

断層面上でのすべり、あるいは等価であるダブルカップルとしての震源表現は、地震は断層運動であるという直感的な考えから、現在でも、頻繁に用いられている。一方、1970年代になって、より一般的な震源表現としてモーメントテンソルが提唱された（Gilbert, 1971; Backus and Mulcahy, 1976）。

地球は近似的に弾性体とみなせる。弾性体で平衡状態が成立していれば、地震のような弾性変動は起こらない。したがって、地震が起こるということは、弾性方程式の一部が実際の状態からずれて、方程式が成立していない部分（震源）があると解釈できる。モーメントテンソルは、震源で方程式を満たさなくなった実際の地中の応力が方程式を満たす応力からどれだけずれているのかを、震源領域にわたって積分した量として与えられる。モーメントテンソルは2次の対称テンソルであり、各成分は等価体積力として一組の反対向きの力（図3）で表せる。すべてのダブルカップルがモーメントテンソルによって表現できるばかりでなく、震源の体積膨張、収縮や伸張クラックなど、他のモデルが記述できる。モーメントテンソルは推定方法においても利点がある。ダブルカップルでは、パラメタを推定する逆問題は非線形であり、解の一意性の問題は避けられない。しかし、震源位置・時間が既知ならば、点震源としてモーメントテンソルを解く逆問題は線形であり、解は一意的に決まる。Dziewonski and Gilbert (1974)が、南米の深い地震に励起された長周期自由振動を用いて、はじめてモーメントテンソルによる震源パラメタを推定する逆問題を解いた。

1970年代になって、デジタル地震計が世界的

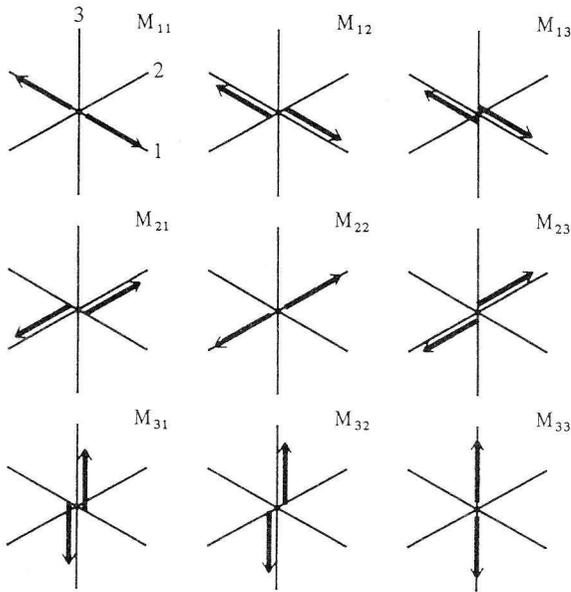


図3 モーメントテンソルで表現されるダイポール・偶力 (Kennet, 1983)

に設置され始めると (アメリカの IDA, SRO, DWSSN, フランスの GEOSCOPE など), モーメントテンソル逆問題はきわめて威力を発揮する. アナログデータ (WSSN など) の場合には, データ解析のためにまずデータをデジタル化することに多くの時間を費やさなければならなかった. しかし, デジタル地震計の設置は, この点で解析にかかる時間と労力を大幅に削減, 多量の地震の解析を可能にした. モーメントテンソル逆問題での解析は, 特に, アメリカの Harvard 大学や USGS において系統的・精力的に行なわれてきた. 現在では, $m_b \geq 5.5$ のほとんどすべての地震について解が推定されている. Harvard 大学では, 1977 年以降の世界中の地震について, これまでに 1 万個以上の解を求めている (Dziwonski et al., 1981). このように推定されるモーメントテンソル解は, 震源位置などとともに ISC カタログにも掲載され, 標準的な地震情報になりつつある.

図4は, Harvard 大学が推定した兵庫県南部地震のモーメントテンソル解の最適ダブルカップルである. コンピューターネットワークの急速な普及により, モーメントテンソル解は, 現在では準リアルタイムで求められ, 地震発生数時間後に

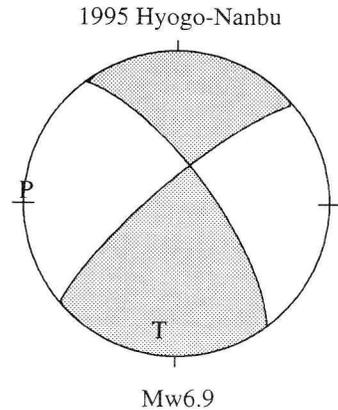


図4 兵庫県南部地震の Harvard 大学モーメントテンソル解 (最適ダブルカップル) 震源球は下半球投影.

は世界中の研究者のもとに配布されている.

図4の解は, 北東, 北西走向の2つの節面をもつ横ずれ断層を示す. 主圧縮歪み (P) 軸がほぼ水平な東西方向にあり, 近畿地方の地震は東西圧縮の広域歪み場を反映して起こっているというこれまでの考えと調和的である. 京都大学防災研究所から公開された余震分布 (図5) は, 北東方向にほぼ鉛直な面上に分布し, 図4の北東方向に走向をもつ節面と一致する. 兵庫県南部地震は, この北東方向に走向をもつほぼ鉛直な断層面上での右横ずれすべりによって生じたと考えられる.

4. ダブルカップルでない地震

モーメントテンソルでの震源表現はダブルカップルに限られていないにもかかわらず, これまで蓄積された解は, 多くの地震がダブルカップルに近いメカニズムであることを示す. このことは, 地震の発生機構が, 大方, 断層面上でのすべりによって説明されることを示唆する. 一方, 調べられる地震の数が多くなるにつれて, 解の中にはダブルカップルから大きく離れたメカニズムをもった地震が存在することも明らかになってきた. そのような地震は, 特に, 火山地帯や地熱地帯で頻繁にみられ, どのようなメカニズムで発生しているのか注目されるようになった.

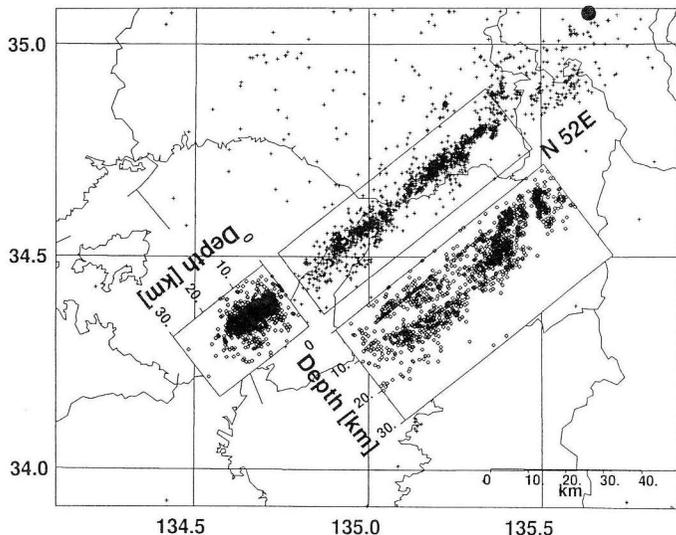


図5 京都大学防災研究所地震予知研究センターによって決められた1995年兵庫県南部地震の余震分布

図6は1980年にアメリカのLong Valleyカルデラで発生した一連の地震 (M_s 5.3~6.1) のモーメントテンソル解を示す。ダブルカップルモデルでは2つの節面が垂直に交わっている(図2参照)のに対して、図6の解のうち特に3つは、2つの節面が互いに離れ、ダブルカップルモデルから大きくずれていることを表している。Julian, Julian and Sipkin (1985) は、地中の鉛直

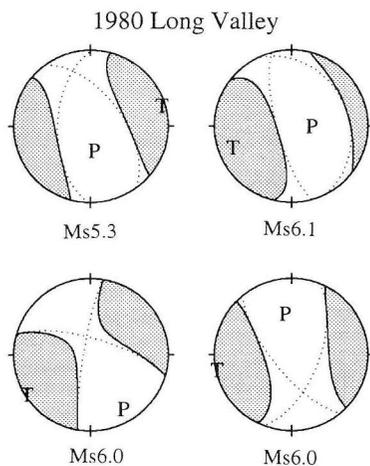


図6 1980年Long Valleyカルデラで発生した一連の地震のモーメントテンソル解 (Ekström and Dziewonski, 1985) 震源球は下半球投影。

なクラックが流体の圧力によって急激に水平方向に開いたことによってこれらの地震が生じたと考えた。一方, Wallace (1985) や Ekström and Dziewonski (1985) は、貫入クラックを原因としなくても、ほぼ同時に正断層と横ずれ断層の異なった断層面でのすべりが起こったことにより、ダブルカップルからのずれが説明できることを提唱している。

1984年鳥島沖での地震 (m_b 5.5) のモーメントテンソル解もダブルカップルとは顕著に異なっている (Kanamori et al., 1993)。鉛直方向に主伸張歪み (T) 軸をもち、水平方向はどの方向も圧縮歪みという

解である。鳥島近傍では、海底火山や海底での堆積層の存在が確認されている。金森らは、マグマが水を多く含む堆積層に水平方向に貫入、マグマの過熱により、10~40秒の間に水が急速に膨張して、地震波が放射されたと考えた。海底近くでの水蒸気の貫入は海底に効率よく上下変動を生じる。鳥島地震に伴って、地震の規模にくらべて大きな津波が日本の太平洋岸で観測されたことと彼らのモデルは調和的である。

アイスランドの地熱地帯では、数kmの深さでダブルカップルでない小さな地震が多く発生している (Foulger et al., 1989)。中央海嶺の延長に位置する地帯で、広域伸張歪み場を反映するダブルカップルの地震とともに、震源球の大部分が押しで、引きは細いストライプ状に分布するだけという発震機構をもつ地震、数個の観測点を除いてすべて引きを観測する発震機構をもつ地震などが確認されている。これらの地震は、貫入物の冷却に伴う伸張クラックの生成や、物質の急速な体積収縮や陥没により説明される。

マグマ、火山ガス、水蒸気などの貫入や体積変化が直接の原因と考えられる地震ばかりでなく、火山噴火や噴火・地震によって2次的に起きた地滑りが地震波を生じ、ダブルカップルでない地震として観測される場合もある。

ダブルカップルモデルから予想されるラブ波（表面波）の放射は4象限型である。1980年のSt. Helens火山の噴火に関して励起された表面波は、ラブ波、レーリー波とも2象限型を示し、水平方向に向いた実体力（single force）が震源に働いていたことを物語る（Kanamori and Given, 1982）。St. Helens火山の噴火に際しては、噴火、小中地震とともに大規模な地滑りが発生している。地震波から見積もられる力の方向と大きさは、その地滑りによって地球が受けた反作用の力と考えると調和的である。

1975年のKalapana地震（ M_s 7.1）でも、同じような現象があったのではないかと指摘されている（Eissler and Kanamori, 1987）。ラブ波の放射は、やはり4象限型よりも2象限型と調和的で、地滑りの反作用として生じた水平方向に働く力によってうまく説明される。この力はP波の押し引き分布や震源付近での地殻変動とも矛盾しない。地滑りと考えると、 $10^{15} \sim 10^{16}$ kgのものが数百から数千m移動したということになる。

以上、本節であげた例に限らず、ここ数十年の間に、ダブルカップルでない地震が起こっていることが明らかにされてきた。このような地震の存在の確認は、地震観測網の密度の増加や地震計の性能の向上・広帯域化によるところがきわめて大きい。地震計が震源の回りを十分におおっていないければ、地震波の放射様式が4象限型なのか2象限型なのか区別もつかないし、節面が直交しているのか否か判断も下せない。同様の理由で、ダブルカップルでない地震の発生機構を解明するためには、地震観測網の充実がますます不可欠である。

ダブルカップルでない地震の地震波放射様式や震源での時間関数を丁寧にみていくと、その詳細は、場所によって地震によって、大きなばらつきがあるようだ。特に、火山・地熱地帯では、水蒸気、ガス、マグマなどを介して、非常に複雑な岩石の破壊や変形過程が生じているのだろう。地震学的観測に限らず、重力、地殻変動、熱、電磁気など、さまざまな分野との多角的な観測がこの複雑なシステムの解明には必要であろう。

地震といっても、断層面上でのすべりによって

起こされるものだけでなく、本節で例をあげたように、地震波を励起する源とし、さまざまな物質・物体の1次的、あるいは2次的作用がある。このことは、断層面でのすべり以外で励起された地震波が、火山活動や地滑りなどに関する諸量について興味深い情報を含んでいることを示唆する。地震の断層モデルがプレートテクトニクスの発展に大きな貢献をしたように、今後は、本節でみてきたようなダブルカップルでない地震の存在と解析が、火山活動や地殻・地形変動などの理解に新たな貢献を与えていこう。

5. 断層運動としての地震の多様性

大部分の地震が断層面上のすべりと等価なダブルカップルモデルによって説明できるということは、地震の震源過程を理解したという意味では決してない。地震波記録を通してみる断層運動は、いろいろな時空間スケールで複雑に起こっている。

1993年北海道南西沖地震（ M_{JMA} 7.8）では、断層面が1枚の平らな面ではなく、いくつかの断層群からなることが指摘されている。P波の初動から推定されるダブルカップルモデルは、西側に低角に沈み込む節面をもった逆断層であるのに対し、長周期表面波から推定されるモデルは、東側に低角に沈み込む節面をもった逆断層である。このモデルの違いは、地震のはじめの部分と後半の部分を起こした断層が異なり、各々違った角度、あるいは方向に傾いていることで説明できる。実際にP波など、地震波形から推定される震源過程は、破壊が南北に大きく分かれた2つの破壊群からなることを示し、その断層面が時空間的に変化していることを映し出している（久家ら、1994）。

1992年に発生したカリフォルニア、ランダース地震（ M_s 7.5）では、地震断層が地表に露出し、その軌跡を観察することができた。地震波形記録を用いた震源過程の詳細な解析（Wald and Heaton, 1994）が、断層の南側で始まった破壊が伝播速度を速くしたり遅くしたりと変化させながら、北に向かって広がっていく様子を明らかにした。地表に出現した地震断層は、雁行した数本

の断層群からなる。破壊伝播が遅くなったところは、露出した断層のステップの位置と良く一致する。すべりが雁行した断層を複雑な幾何に影響されながら伝播したことがわかる。

1992年ニカラグア沖の沈み込む帯で発生した低角逆断層地震 (M_s 7) では、マグニチュードから予想されるよりもはるかに大きな津波が生じた。ニカラグア地震の地震波には、他の同規模地震にくらべて顕著に長周期成分が卓越する。地震波形記録から推定される震源継続時間は全体で100秒にもわたり、すべりが北西と南東の両方向にゆっくりとなめらかに断層面を広がっていった様子を示す (菊地, 1994)。このゆっくりとしたすべり伝播が、小さな短周期地震動にくらべて大きな津波をもたらしたと考えられる。

一方、1993年釧路沖地震 (M_w 7.6) では、非常に短時間で歪みエネルギーが放出されている (Takeo et al., 1993)。地震波形記録から推定される震源継続時間は10秒足らずであり、歪みエネルギーの大部分が、余震域のごく一部分で、大きな応力降下を伴って解放されている。余震分布は、釧路沖地震が潜り込む太平洋プレートの内部を水平に切るように発生したことを示す。大きな応力降下量はプレートの破壊強度が高かったことによるのかもしれない。

地震の主破壊の多様性ととともに、地震のはじまりにおいても、一様なすべり伝播が生じているわけではないことがわかってきた。まず破壊核が形成され、その比較的ゆっくりした破壊 (すべり) の後に、断層全体に達するような急速な破壊につながっているらしい。Iio (1992) は、1984年長野県西部地震の余震観測で、P波にゆっくりとした立ち上がりが観察されることを指摘し、その継続時間が後の大きなP波相の継続時間と正の相関にあることを示した。Ellsworth and Beroza (1994) は、カリフォルニアの M 1~8 の地震の記録で、どの地震にも急激なP波の立ち上がりに先行してゆっくりとした立ち上がりが存在することをみつけた。そのゆっくりとした立ち上がりの大きさが後に破壊する地震全体の大きさと正の相関を示すことも指摘している。このような地震記

録での観測は、大中らによる岩石実験、芝崎らの slip weakening を考慮したすべり伝播の数値実験の結果からも支持される。

断層運動としての地震において、断層面でのすべりは決して一斉に起こるのではない。断層のごく一部分ですべりがはじまり、それが断層全体に複雑に広がり、最後に止まるという過程からなる。したがって、この一連の現象からなる地震を理解するためには、各々の過程がどのような物理法則に支配されているのかを解明していく必要がある。この素過程の解明が現在行なわれつつある。

6. 深い地震の発生機構

地球内部深くなると、温度や封圧が高くなり、岩石は脆性破壊よりも流動的な破壊・変形を好むようになる。したがって、脆性破壊や摩擦による不安定すべりという浅い地震の発生機構が起こるとは考えにくい。しかし、そんな地球内部数百kmの深さにおいても地震が起こっていることは1920年代からわかってきた。

深い地震は、主に、プレートの潜り込む地域の下に発生している。深さとともに地震の数は減少し、300~400 km 付近で最小となる。400~670 km の深さで再び地震活動が増え、深さ 670 km 付近で突然なくなる。浅い地震と異なり、余震はほとんど発生しない。浅い地震と同じ手法により地震波記録から推定される深い地震のモーメントテンソル解は、体積変化をほとんど伴わず、ダブルカップルで説明されるモデルを支持する。

深い地震を説明する物理機構として、これまで加速的延性変形説、間隙流体説、相転移引き金説など諸説があげられてきた (フローリッヒ, 1989) が、決定打に欠けていた。地球内部では、深さ 400 km 付近でマントル主成分のカンラン岩がスピネル相に相転移するといわれている。1980年代末、高圧岩石実験の結果から、300~400 km より深い地震の発生モデルとして、カンラン石のスピネル相への相転移に関係したアンチクラックモデルを Green and Burnley が提唱した (グリーン, 1994)。このモデルでは、低温のプレート

内部に存在する準安定カンラン石が、ある限られた温度範囲で、小さなレンズ状のクラック内でスピネル相に相転移、それらのクラック群が急速に連結するときにはせん断破壊的な地震波を放射するというものである。相転移が関係しているものの、直接地震波放射に関与しているのは既に形成されているスピネルクラックの連結なので、震源に体積変化を生じない。最終的に連結するクラック群は、最大せん断応力方向に雁行状に分布しているので、ダブルカップルモデルも説明できる。また、相転移が関係しているため、一度起こってしまうと同じ所では2度と起こらない。この点で、余震が少ないことを説明できる可能性がある。アンチクラックモデルは、深い地震の特徴をうまく説明しているように見える。問題もいくつかあげられているが、現在のところ、深い地震の発生機構として有力な候補と考えられている。一方、300 km より浅い地震については、スピネル相転移が期待できないので、このモデルでは説明できない。含水鉱物の脱水反応により地震波が放射されるのではないかという考えが強い。

7. おわりに

地震は断層面でのすべりだという考えが地震の発生機構を説明したような観があった。しかし、高性能広帯域デジタル地震計が世界中に高密度に展開されるようになり、その地震記録を通してみる地震の発生機構や震源過程はきわめて多彩である。断層運動に限らず、さまざまな時間スケールのさまざまな地球物理的作用に及んでいる。このような複雑な地震の発生機構を理解するには、高密度広帯域高性能地震計観測網の一層の充実とともに、地震学に限らずさまざまな分野との多角的な観測・研究が今後ますます求められるだろう。

本稿では、地球で起こる地震にのみ話題を絞ったが、月においても月震が起こることはアポロが設置した地震計によって明らかにされている。地震の発生機構の研究成果は、将来、このような月震の発生機構の解明にも貢献できるかもしれない。

参考文献

- 第2節に関しては、安芸(1978, 岩波講座地球科学8地震), 第3, 4節に関しては川勝(1991, 地震2, 44, 265-277)が詳しい。また、三雲(1992, 京大防災研年報, 35, 101-118)は本テーマをより専門的に扱っている。
- Backus, G. and M. Mulcahy, 1976, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 46, 341-361.
- Dziewonski, A. M. and F. Gilbert, 1974, *Nature*, 247, 185-188.
- Dziewonski, A. M., T. Chou, and J. H. Woodhouse, 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852.
- Eissler, H. K. and H. Kanamori, 1987, *J. Geophys. Res.*, 92, 4827-4836.
- Ekström, G. and A. M. Dziewonski, 1985, *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 75, 23-39.
- Ellsworth, W. L. and G. C. Beroza, 1994, *EOS*, 75, 426.
- Foulger, G. R., R. E. Long, P. Einarsson, A. Bjornsson, 1989, *Nature*, 337, 640-642.
- フローリッヒ, 1989, *日経サイエンス*, 3, 18-27.
- Gilbert, F., 1971, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 22, 223-226.
- グリーン, 1994, *日経サイエンス*, 11, 118-127.
- Iio, Y., 1992, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 477-480.
- Julian, B. R. and S. A. Sipkin, 1985, *J. Geophys. Res.*, 90, 11155-11169.
- Kanamori, H., G. Ekström, A. Dziewonski, J. S. Barker, and S. A. Sipkin, 1993, *J. Geophys. Res.*, 98, 6511-6522.
- Kanamori, H. and J. W. Given, 1982, *J. Geophys. Res.*, 7, 5422-5432.
- Kennet, B. L. N., 1983, *Seismic wave propagation in stratified media*, Cambridge Univ. Press.
- 菊地, 1994, *月刊地球*, 16, 116-123.
- 久家・菊地・J. Zhang, 1994, *月刊海洋*, 号外7, 21-28.
- Takeo, M., S. Ide, and Y. Yoshida, 1993, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2607-2610.
- Wald, D. J. and T. H. Heaton, 1994, *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 84, 668-691.
- Wallace, T. C., 1985, *J. Geophys. Res.*, 90, 11171-11176.

大森公式から1世紀

余震減衰に関する研究

松浦律子

はじめに

日本の地震学の祖ともいべき大森房吉先生が、余震の発生率の時間的変化が大森公式で表されることを1894年に、最初に発表してから昨年ちょうど100年たちました。この式は1957年に宇津徳治先生によって改良され、今日、改良大森公式として広く使用されています。この式は地震学の数ある経験則の中でも、最も普遍的に通用するものといえましょう。大森公式100周年を契機に、この1世紀の間の余震の時系列研究の成果を振り返ってみることにしました。

大森公式の誕生

1891年に発生した濃尾地震の半日ごとの有感地震数の減り方が、

$$n(t) = K \cdot (t+c)^{-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(ただし、 K と c は定数で、 $n(t)$ は本震から t 日経過後の地震数)でよく表されることが報告されたのが(大森, 1894)大森公式の始まりです。

物理的な現象の時間的減衰を表す式は、例えば原子核の崩壊のように、

$$n(t) = A \cdot \exp(-at) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と指数関数で表現できることが多いので、大森先生も最初このタイプの式をデータに当てはめられたようです。(2)式に従うならば、 $n(t)$ が半分になるまでの時間(半減期)が余震活動中のどの時期でも一定となり、(1)式よりも活動が早期に目立たなくなるはずですが、実際の余震活動は長く継続しており、(1)式のような時間のべき乗がよく適合したのです。

余震活動が長く尾を引くことは、濃尾地震の余

震が好例です。本震から8年間の岐阜での有感地震回数(1)式に従うことがOmori(1900a)によって報告されていますが、さらにデータを昨年末まで延長しても、岐阜で有感となる地震が、(1)式に従って発生していることは驚くべきことです(図1, Utsu et al., 1995)。岐阜で最近有感になる地震のすべてが濃尾地震の余震ではないはずですが、大森公式がよく適合するということは、逆に余震でない活動は無視できる程度に低い活動度ということになります。わずか数分で終了した地殻内の破壊が、1世紀以上もその周辺の地震活動を規定している不思議さを感じます。

大森公式はその後、1894年根室沖地震(Omori, 1900b)、1854年南海地震(大森, 1900c)、1904年台湾地震(大森, 1906)、1847年善光寺地震、1830年京都地震(Omori, 1908)、1915年

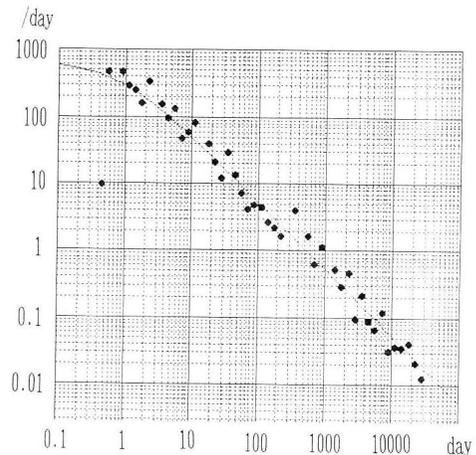


図1 濃尾地震の約半日後から1994年末までの岐阜における有感地震発生率(黒丸)と最尤法で求めた大森公式の発生率(点線; $K=534.7$, $c=0.830$)

時間の単位は日。左端の発生率データが低いのは1/4日間の個数という時間間隔の粗いデータを使用しているため。

アヴェツァノ地震 (Friedlander, 1918), 1922年島原地震 (中村, 1923), 1933年三陸地震 (Matuzawa, 1936) 等, プレート間・プレート内・逆断層・正断層・横ずれと, 地震の種類を問わずよく余震活動度の時間的減衰を表すことが確かめられました。

改良大森公式

(1)式の大森公式は本震から t 時間後の地震の発生率を表していますが, 発生率は直接観測できる量ではないので, データから算出する必要があります。この算出間隔が適当でない場合は, 発生率の誤差が大きくなります。一方, 時間 t までに発生した地震数 (累積地震数) $N(t)$ を用いれば, このような算出間隔の影響を受けずにすみます。発生率と累積地震数との間には,

$$N(t) = \int_0^t n(s) ds$$

の関係が成り立つので, もし発生率が(1)の大森公式に従うならば,

$$N(t) = K \ln(t/c+1)$$

となり, 累積地震数を $\ln t$ に対してプロットすると t の大きいところでは傾き K の直線になるはずですが, 宇津 (1957) はこの傾きがだんだん小さくなっていくものが多いことに気づき, 大森公式にもう1個のパラメーター p を足した改良大森公式,

$$n(t) = K \cdot (t+c)^{-p} \quad \dots\dots (3)$$

を提唱しました。 $p=1$ ならば, この式は元の大森公式となりますが, その他の場合累積地震数は,

$$N(t) = K \{c^{1-p} - (t+c)^{1-p}\} / (p-1) \quad \dots\dots (4)$$

となります。 $p>1$ では, 最終的な余震数 $[N(t \rightarrow \infty)]$ は $K/(p-1)c^{1-p}$ で有限個となりますが, $p \leq 1$ では無限大, つまり, いつまでも余震がなくなるならないということになります。

改良大森公式が提唱されてから40年近くの間, 世界の様々な地域の数百の余震活動について p 値が推定されており, 多くの p 値は1より少し大きい1.1程度ですが, 0.5から2程度まで, 余震活動の発生した地域の特性や, どの地震を余震とするかの時空間の範囲の取り方, あるいは p 値

の推定方法によりばらつきます。しかし, 改良大森公式は1964年アラスカ地震のような巨大地震 (Page, 1968), 1965年ヒズブークシュの稍深発地震 (Lukk, 1968), 1968年のネバダの核実験 (Rayall and Savage, 1969), 鉾山の小さい山はね (飯尾, 1984) と種々の余震活動の減衰をよく表すことが確認されています。

しかし, Benioff の影響の強かった人たちはすんなりと大森公式や改良大森公式を受け入れませんでした。こういう人たちは大きい余震ほど早く減衰するという思いこみがあり, 特に Richter (1958) などは, 活動の減衰を表すには Benioff (1951) の歪開放曲線を使うべきだと推奨していました。実際, 私が UCLA にいた間指導して下さった Knopoff 教授は Benioff, Richter の Caltech で教育を受けただけあって, 数だけだと小さい地震に重みがかかりすぎ, エネルギーだと大きい地震に重みがかかりすぎて, ちょうど中間の歪開放曲線 (これはエネルギーのルートの累積曲線なので, 物理的には訳のわからないものです) が地震活動の時系列 (余震ではありませんでしたが) を見るには良いと好んでおられました。物理の先生にしてはおもしろい癖といえましょう。

解析する地震のマグニチュードの下限 M_{th} を小さくしていくと, 歪開放曲線は, 実は地震数累積曲線に収束していきます。反対に M_{th} を大きくしていくと, M の大きい地震の効果から開放曲線の形は一定しません (Utsu and Hirota, 1968)。一方, 地震数の累積に基づいた改良大森公式の p 値は M_{th} を変えても変わらないことが Utsu (1962), Papazachos (1974) など, 世界各地の地震で確かめられています。Lomnitz (1966a), Ranalli (1969) らは, 同じことを「余震活動の時期によって Gutenberg-Richter の b 値が変わらない」という形で確認しています。大きい余震も小さい余震も減衰の仕方は同じであり, 不安定で意味も不明な歪開放曲線などを使うよりは, わずか3個のパラメーターで規定できる改良大森公式のほうが, 余震活動を定量的に表現するのにずっと適しているのです。これが広く認識されるには, かなりの時間が必要でした。

パラメターの求め方

改良大森公式を使って、これまで数百の余震活動に対してパラメターが求められていますが、以前の結果を使用するには注意が必要な場合があります。Ogata (1983) が後述する最尤法によって K , c , p の3パラメターの値を、余震1個々々の発生時刻から直接求める手法を導入するまでは、パラメターの値が求め方によっておかしなことになる場合もあったからです。以前に、一般的に用いられていたのはグラフ法でした。まず、適当な間隔で余震数から発生率を算出して、グラフに $\log n(t)$ 対 $\log t$ のプロットを作ります。これに(3)式の t を $\tau=t/c$ と変換して規格化した、

$$\lambda(\tau) = C \cdot (\tau + 1)^{-p} \quad (\text{ただし } C = Kc^{-p})$$

で、あらかじめいろいろな p に対して作っておいた $\log \lambda(\tau)$ 対 $\log \tau$ のカーブ群を当てはめます。その中から最適なものを探せば、まず p が決まります。さらにカーブのレベルから c , K が得られます (e. g. Utsu, 1961)。このグラフ法は現在のように複雑な計算を、パソコンでもすばやく手軽にできるようになる前には、なかなか優れた方法だったのですが、余震50個ごとに1点発生率を算出するというようにプロットする発生率の間隔を、その時点での余震活動度に応じて取ることが重要です。

論文によっては、後述するように c は物理的に本質的なパラメターではないので省略する、あるいは c は通常小さいので t の大きいところだけを使って発生率は、

$$n(t) = Kt^{-p} \quad \dots\dots (5)$$

として、 p だけ求める場合 (e. g. Mogi, 1962) もあり、このほうがつい最近まで多数派の観さえありました。Ranalli (1969) や Suhadolc (1982) が(5)式の場合の p 値の最尤解を使っていますが、多くの p 値は時間と発生率を両対数グラフにプロットし、グラフの傾きから読みとられていました。中には両対数データに普通の最小二乗法を使って、得られる直線の傾きとして p 値を得るといふ、乱暴な手法も使われていたのです。

また、人によっては時間 t までの累積地震数 [(4)式の $N(t)$] や時間 t 以降の累積地震数 [$N^*(t)$] の対数を $\log t$ に対してプロットして、 $p > 1$ の場合は $\log N^*(t)$ 対 $\log t$ から、 $p < 1$ の場合は $\log N(t)$ 対 $\log t$ から求めた傾きが、 $t \gg c$ では $1-p$ になることを使って p を求めています。ただ、これは誤差の多い方法で、実用にはなりません。 $N(t)$ や $N^*(t)$ の対数を使いますから、本震直後に1個余震を数え落としたり、まだこれから起こるかもしれない余震を1個含まないことによる誤差は、他の時期の余震何十個分も数え間違えたと同様の効果があるからです。

最尤解は地震発生率 $n(t)$ を点過程の危険度関数 $\lambda(t)$ と置き換えれば求められます。観測開始 T_s から観測終了 T_e までにある規準以上の余震が N 個発生し、その発生時刻が順に t_1, t_2, \dots, t_N であったとします。この余震活動が時間により強度 λ が変わる非定常ポアソン過程とすると、強度関数 $\lambda(t)$ は(1)式や(3)式の $n(t)$ となります。 T_s から T_e までの期間に t_i に地震が発生し、 t_i から $t_i + 1$ までは地震が発生しない、というのが地震の発生時刻の時系列データが持つ情報ですが、これを使ってこの時系列の尤度 L は、

$$L = \left\{ \prod_{i=1}^N \lambda(t_i) \right\} \exp \left\{ - \int_{T_s}^{T_e} \lambda(s) ds \right\} \dots\dots (6)$$

となります (Ogata, 1983)。この尤度の対数 $\ln L$ を最大にする(1)式や(3)式の K , c , p の値が最尤解となります。実際には数十から数千、数万個の余震の発生時間のデータを用いて、数値的に計算機で最大対数尤度となるパラメター値を捜すこととなります。現在では、計算機速度の向上で、余震数が数千個までであれば、CPUが486以上の数値演算プロセッサ付きパソコンが数分でできる程度の計算で最尤解が求められます。

この方法だと、余震1個々々の発生時刻から直接パラメター値を求めるので、以前のように発生率を算出する際の注意が不要となりました。また、宇津 (1957) が(3)式で $p > 1$ の場合が多いと気づいたのが累積地震数のグラフからであったように、最尤法は累積地震数のデータに最もふさわしい(4)式を捜すのと同じことになるので、発生率からパラメターを求めていた頃より細かい余震活動の部

分を検討できるようになりました。

3 個のパラメーターについて

(1) **c 値の存在** 歪開放曲線が廃れても、改良大森公式の c 値に関しては求めにくさもあって、あまり研究されてきませんでした。 c の値は t が小さいところで決まります。1970年代以前の観測ではドラム式の記録方式が多く採用されていましたから、本震直後数時間の非常に余震活動度の高い期間は記録が重なります。この時期は均質に余震の読みとりができないために、報告される余震数が実際より少なくなりがちです。最近の微小地震観測に使われている自動処理装置も、1個の地震データを処理中に発生した次の地震は抜け落ちますので、後で処理し直すまでは本震直後の余震データは抜け落ちてしまいます。また、本震の強震動で震源域に最も近い観測点が故障して、本震後数時間から数日間に亘り観測網全体としての余震の検知能力が低下することもしばしばです。今年発生して大震災を引き起こした兵庫県南部地震の際にも、ここ十数年間故障していなかった京都大学防災研究所阿武山地震観測所の無停電電源装置が1月16日に故障し、翌日発生した地震による停電時に作動せず丸4時間余震データが取れない事態になりました。

実際に発生した余震より少ないデータに改良大森公式を当てはめると、 t の小さいところで発生率が実際より少ないので c の値が大きく推定されます。既存のカatalogからのデータを使用して求めた c 値には少なからずデータの欠落による見かけの影響があるはずで、そこで、余震活動のレベルを表す K 、減衰の程度を表す p は物理的に意味があっても、 c は便宜的なもので意味がなく、本当は $c=0$ で発生率は(5)式であると考え人もいます。もし $c=0$ ならば $t=0$ で発生率が無限大になってしまいます。Kagan and Knopoff (1981) は、 $t=0$ の本震そのものが無限に近い数の非常に小さい地震の重ね合わせで構成されるとすれば、 $c=0$ で $n(0)=\infty$ も説明できています。しかし、本震は余震群のマグニチュ

ード分布から飛び抜けて大きい「特異なイベント」であり、この説は合理的とはいえません。

もし本当の発生率が(5)式であるのに(3)式が適合するほどデータが欠落していたとすると、時間 t で $100 \cdot \{1 - (1+c/t)^{-p}\}$ % の余震が見落とされていることとなります。これは、 $p=1$ ならば $t=c$ で半分の地震が、 $t=2c$ で $1/3$ の地震が見落とされていることとなります。例えば、堂平微小地震観測所の連続流し記録から注意深く作成した余震リストを使った1972年2月のM7.2八丈島東方沖地震の余震活動で考えてみましょう。この余震活動は $M \geq 3.7$ で $K=16.9$ 、 $c=0.05$ 日、 $p=0.79$ となりましたから (Matsu'ura, 1986)、もし c が本当は0であるのにデータの欠落で c が正の数となったとすると、本震から1.2時間後に42%の余震を見落としていることとなります。本震発生から5分もたてば、連続流し記録なので、本震による表面波の揺れに重なって発生する余震が次々に見えますから、1時間も経ってからとも4割も見落とせはしません。余震の数で考えると、この例では、本震5分後から1時間の間に $c=0$ ならば $M \geq 3.7$ が何と43.3個発生するはずですが、 $c=0.05$ では5.6個となり、実に37個以上をも観測し損なったこととなります。 c 値の原因をすべてデータの欠落にするのは不可能です。

データを注意深く用意した解析例では、最尤法を使わなくても (e. g. Yamakawa, 1968; 広田, 1969) c は正の数になります。本震直後のデータが不足していて決まらない場合以外は、きちんとした最尤法を用いれば c は数分から数時間程度の値となります。 c 値と本震の破壊過程とに関係があるという報告があります。例えば、Yamakawa (1968) は破壊過程が複雑な本震の余震は c 値が大きいと考えています。確かに簡単に割れたと思われる小さい地震の余震の c 値は通常数十分以下と小さくなります。 c 値の物理的意味については、注意深く本震直後から作成されたデータを使って、最尤法による結果の例がもう少し集積されれば、さらに明らかになってくるでしょう。

(2) **p 値の地域性** p 値は地震の発生場所によって異なります。Mogi (1962) は p 値が日本海側

の余震活動では大きく、太平洋側では小さいことを指摘しています。確かに1964年新潟地震は $p=1.6$ (Ogata, 1983) と大きいのですが、1983年に秋田県沖に発生した日本海中部地震は $p=1.04$ 、その北側の1993年北海道南西沖地震は $p=1.25$ (ともに Utsu, et al., 1995)、さらに北の1940年積丹半島沖地震については余震が少ないことが前から指摘されていましたが、当時の気象庁の札幌の報告を原簿から拾って最尤法で求めると、 $p=1.55$ となり、同じ日本海側といっても震源域が違えば違ってきます。ただし、日本海中部に関しては、二次余震やクラスターも考慮した計算をすると $p=1.23$ となります (Matsu'ura, 1986)。 $p=1.05$ というのは、こういう二次余震やクラスターが何個も付くという性質まで包含した日本海中部地震の震源域の性質を表しています。

Mogi (1967) は $p \geq 1.3$ の速い余震活動の減衰は、地殻の温度の高い地域で応力緩和が速いためと考えていますが、南カリフォルニアでも Kisslinger and Jones (1991) は地殻熱流量の大きいソルトトラフでは p 値が大きく、熱流量の小さい所では p 値も小さい傾向を見つけています。Creamer and Kisslinger (1993) は、東北日本の23個の余震活動から震源での温度 T ($^{\circ}\text{C}$) と p の間に、正の相関を報告しています。

では、プレート間地震とプレート内地震、太平洋プレートに絡む地震とフィリピン海プレートの絡む地震で平均的 p 値に違いはあるのでしょうか？松浦 (1993) が最尤法で二次余震なども考慮して1969年以降の日本付近の $M \geq 6.0$ の地震に伴う余震活動を気象庁データで調査した結果では、プレート間やプレート内、太平洋、フィリピン海とグループ分けした p 値の中央値は、どれも1.1~1.2で差がありませんでした。減衰の程度は、余震域そのものの温度などの影響で大きく変わり、より広域的な歪の蓄積レートなどによる特長は見えません。

(3) 活動レベルの地域性 余震活動のレベルを相互に比較するには、本震の大きさ M_0 や、数える余震の下限 M_{th} を考慮しなければなりません。本震を除いた余震だけの集合には、Guten-

berg-Richter の関係が成り立つことを使えば、G-R 式の b 値を使って(3)式の K を、

$$\log K = A - b (M_0 - M_{th}) \quad \dots\dots (7)$$

と書き換えられます。この A を使えば、 M_0 や M_{th} が違う余震活動のレベルを比較できます。その結果、余震活動度はプレート間地震のほうがプレート内地震よりレベルが高く、太平洋プレートによる地震のほうがフィリピン海プレートによる地震よりレベルが高くなりました。同じ大きさの本震が発生すると、プレート間地震のほうがプレート内より余震がたくさん付き、したがって大きい余震の発生の可能性も高くなります。同様に三陸沖の地震のほうが日向灘の地震より余震が多く付きます。減衰はマイクロな震源域の条件を反映しているようですが、活動度の高低は、マクロな歪蓄積レートの大小の影響を受けるようです。

ETAS モデル

改良大森公式は1つの余震活動の時系列をたいへんきれいに表しますが、もっと広い空間領域を取って一般的な地震活動を取り扱う場合はどうでしょうか。通常浅い地震活動のかなりの部分は過去に発生した地震の余震が含まれているので、この場合も改良大森公式が威力を発揮します。例えば、宇津カタログと気象庁の震源ファイルを組み合わせて1885年から1993年までの東北日本の太平洋側の沖合いで発生した $M 6$ 以上の地震活動を取り扱うような場合、どれが本震でどれがどの地震の余震かが判断しにくいのですが、改良大森公式を拡張した Epidemic type aftershock sequence (ETAS) モデル (Ogata, 1988) を用いると、たった5個のパラメーターしか用いないのに、実際の地震活動度にかなりよくあてはまります (図2)。このモデルは時間 t における地震発生率 $\lambda(t)$ を、

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t_i < t} \kappa e^{\alpha (M_i - M_{th})} (t - t_i + c)^{-p} \quad \dots\dots (8)$$

で表します。第1項の μ はバックグラウンドの一定の発生率を表します。第2項は過去に発生した地震による履歴効果を表します。もちろん、我々

の使える地震データは器械観測によるものが高々百数十年であり、さかのぼれる過去は限られていますから、 μ のなかには、履歴効果を考慮している地震よりもっと前に発生した過去の活動の余震効果も含まれていることとなります。履歴効果は、時間 t_i に発生した大きさ M_i の地震による改良大森公式で表されるような余震型としています。このほうが、(2)式のような指数型の減衰が速い履歴効果より現実の地震データによくあいます。 κ , α , c , p は、解析している領域では地震によらず共通とし、 α で i 番目の地震の大きさに応じて履歴効果の強弱がどの程度変わるかが調整されます。 α が大きい場合は、単純な改良大森公式で表される本震-余震型の活動が解析した期間中に発生した大きい地震の数だけ重ね合わされたとはほぼ同じになり、 M の大きい地震だけがその後の活動に影響する通常の余震活動を表します。逆に α が小さいと小さい地震後にもたくさんの地震が発生する群発的な活動を表せます。

(8)式の第1項を時間的に変動する関数に置き換えると、かなり複雑な群発地震活動の時系列でも定量的に表せるようになります(Matsu'ura and Karakama, 1995)、地震の大きさに応じた改良大森型の持続する履歴効果というのは、どう

も種々の地震活動に普遍的に存在する性質のようです。1960年代に1年以上続いた松代群発地震のような、一見ランダムにいろいろな大きさの地震が発生しているように見える群発活動中であっても、1個地震が発生すると、そのために少し地震が発生し易くなっていたのです。しかも、地震発生のある水の量の多寡によって、この余震効果の強弱が変わります。

ETASモデルは、発生した地震すべてがその大きさに応じて余震を発生させる、誰でも収入に応じて子孫を残す民主的(?)モデルです。 α は小さいほど民主性が高いこととなります。これに対して、以前よく通常地震活動の表現に使われていたトリガーモデルは、選ばれた本震だけが余震をもち、本震の数だけ改良大森公式を重ね合わせたもので、いわば、結納金の高額な社会で大金持ちのみが子孫を残せる封建的モデルです。実際の地震活動がトリガー型ではなく、ETAS型が適合するのは、どんな地震もその大きさに周囲に歪みや応力の変化を及ぼすことを考えれば、当然といえます。

通常の単一の余震活動も、数える余震の下限をたいへん小さくすると、改良大森公式よりもETASモデルのほうが良く適合する場合があります。

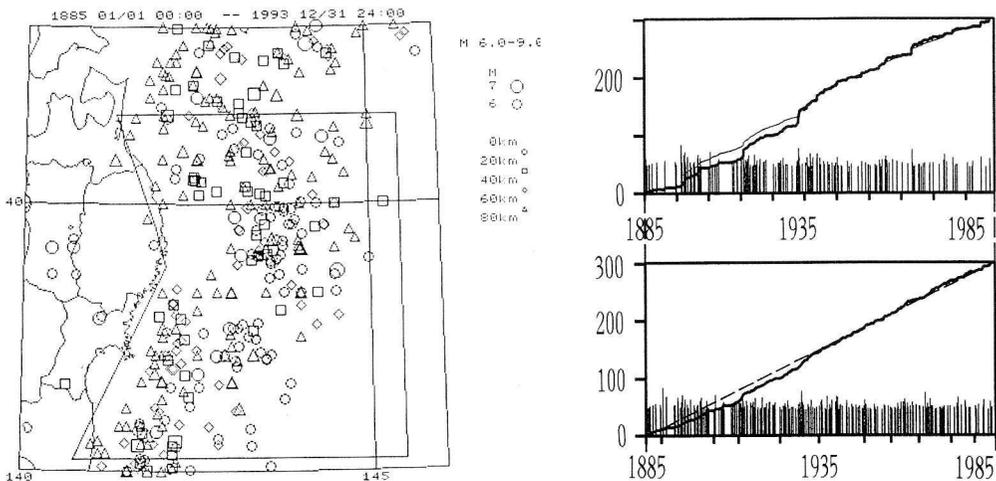


図2 東北日本沖(地図中実線で囲んだ範囲)に1885年~1993年に発生したM6.0以上80km以浅の地震のM-T図(棒グラフ)、累積地震数(太線)とETASモデルによる予想累積地震数(細線)上は通常的时间軸、下はETASモデルによる予想累積地震数に比例するように調整した時間軸に対してプロットされている。時間軸には両図とも10年ごとに目盛りがいられてある。 $(\mu=0.00222, \kappa=0.0200, \alpha=1.48, c=0.0169, p=0.990)$ [左図はseis-PC(石川)を使用]

ます。例えば、本震がM7で $M \geq 1$ の余震をみると、M4, 5の中ぐらいの余震の後に小さい余震が群れて発生しているのが見える場合があります。このような余震活動は(3)式よりも(8)式のほうが良く表せます。しかし、ETASモデルを使用するには個々の地震のMが均質に良く決まっている必要があります。また、本震と考慮する余震のMの下限の差が3乃至4程度であれば、わざわざ α の大きい余震活動にETASを使う必要はありません。改良大森公式は依然として余震活動の定量的解析に有用な式なのです。

余震とは何か？

いままで「余震」という言葉を多用してきましたが、実は余震の定義は厳密に確立されているわけではありません。大森先生の頃は震源の深さという概念も確立していなかったので「大きい地震の後にその地域で発生する多数の小地震」と現象論的に定義され、現在もそのまま使われています。深発地震の存在がはっきりしてくると、これに本震が「浅い」条件が加わりましたが、微小地震観測網が整備されてくると、大きい深発地震の後も浅い地震同様に改良大森公式に従うように減衰する小さい地震の発生が捉えられる様になり、活動レベルが浅い地震に比べて極めて低いものの、深い地震にも余震があることがはっきりしました。

余震の時間的性質は最もはっきりわかっていて、時間的に改良大森公式に従って減衰するものが余震です。そして本震よりMで3~4程度小さい余震までだけを見る限り、余震の余震はありません。しかし、特別な余震にそれ自体の余震（二次余震といいます）が付く場合があります。例えば、1927年の丹後地震では25日後に発生した大きい余震に二次余震を伴いました。この二次余震も大森公式に従って減衰していたので（Jeffreys, 1938）、鷺坂（1927）は、この大きい余震は本震とは独立した地震と指摘しています。確かにこれは本震の断層と直交する断層を形成しました。同様の例は1984年長野県西部地震の翌日発生した最大余震があります。このように、本震の断層の

端から新たな隣接領域を破壊して発生する「次の本震」には、それ自体の余震活動が伴います。ただし、大きい余震にすべて二次余震が付くわけではありません。例えば1952年十勝沖地震の最大余震は余震域の中央部で発生し二次余震は伴いませんでした。丹後地震の場合も同程度の大きさの余震でもほかの余震に二次余震は見られません。

本震の大きさは余震の規模別頻度分布（Gutenberg-Richterの関係）から予測されるMより大きすぎます。逆に言えば、本震と余震が一つのG-R式で表されるような1群のフラクタル集合に属しているのではなく、本震は余震群から図抜けて大きいボス、余震はその子分となります。余震は時間的減衰からも規模分布からも、本震の子供なのです。「地震はGutenberg-Richterの関係のように指数分布に従うフラクタル構造だから予知できない」という主張がありますが、本震は余震群の指数分布から逸脱した現象なので、この主張は間違っています。フラクタルから飛び抜けている本震や二次余震を伴うような大きい余震は、十分予知する可能性があります。

余震の空間的範囲は本震断層とその極近傍です。だいたい本震から1時間以内に多数の小さい地震が発生する場所として把握できます。まれに数時間から数日かけてこの余震域が拡大する場合があります。多くの地震では1時間以内に地震の発生した領域は1日以内、1カ月以内の領域とほぼ同じになります。ただし、この領域の中で本震発生の際になった部分（破壊核）には余震は発生しないので、本震の破壊開始点の周囲は本震断層の長さの十分の一程度の大きさの余震のない部分が生じます。これをUmeda（1990）は、余震分布図で白く抜けることからブライトスポットと呼んでいます。余震は本震の断層面の極近傍で発生し、しかも破壊核のように長時間かけて準備されて変位した部分では発生しない性質があります。これと前述の二次余震の発生条件とを考慮すると、余震は本震によって短時間に破壊の進行した領域で発生する遅れ破壊と予想できます。

上述の余震を狭義の余震として、さらに空間的に広い範囲の活動を広義の余震とする場合があります。

ます。例えば、1974年伊豆半島沖地震の後には石廊崎を通る本震の断層近傍以外に天城峠付近の伊豆半島中央部でも地震が発生しました。この天城の活動のようなものが「広義の余震」です。また、1968年十勝沖地震の後に十勝岳で地震活動が活発化しました。これは本震の断層から離れすぎていますが、本震の影響によって発生した活動ではあります。このように本震断層から離れている活動は、「誘発地震」とすべきで、余震に含めるのは不適切です。本震とは別の要因で地震の発生条件が整っていた地域で、本震による応力や歪みの変化で地震が発生しやすくなって起こった活動は、「広義の余震」とは呼ばずに「誘発活動」とすべきです。1993年北海道南西沖地震 M 7.8 の最大余震は江差沖の M 6.5 と言われていますが、地震の空間分布でみると、この江差沖は奥尻島周辺の多数の余震とは明らかに飛び離れています。これも実際は誘発された地震なのでしょう。

余震の発生メカニズムがわかれば、現象論的ではなく「物理的な本震との関係」で余震を規定できるでしょうが、現段階でも少なくとも「余震」は本震の発生にその原因の殆どが帰結される活動（従来の狭義の余震）に限定すべきです。余震の本震との物理的関係を探る上で必要条件となる経験則で最も確かなものは、時間的減衰が改良大森公式に従うという点です。私見では、急激に破壊を起こした断層面近傍に生じる、岩石の空隙中の水を媒介とした遅れ破壊が余震だと考えています。水が絡むことによって濃尾地震のように100年も活動が継続したりすることがあるでしょう。余震活動が見られる断層というのは、いまだ本震後の緩和ステージにある状態で、次の地震の準備として歪みの蓄積の進行していない「心配のない断層」といえるのではないのでしょうか。

余震の発生予測

(1) 確率予測 普通の余震は改良大森公式で表されるような非定常ポアソン過程で発生するので、決定論的に余震の発生を予測することは不可能になります。しかし、非定常ポアソン過程の

強度関数が改良大森公式とわかっているのですから、発生確率を計算することは可能です。(4)式と(7)式から時間 T_s から T_e までの期間に M_{th} 以上の地震の予想発生個数 N_e は、

$$N_e = N(T_e) - N(T_s) = 10^{A-b(M_0 - M_{th})} \cdot$$

$$\{(T_s + c)^{1-p} - (T_e + c)^{1-p}\} / (p-1)$$

となります。そこでこの期間に $M \geq M_{th}$ の余震が1個以上発生する確率 P は、

$$P = 1 - \exp\{-N_e\}$$

となります。 N_e が 0.1 以下の時には $P \approx N_e$ が成り立ちます。 A, b, c, p の値を求めれば、ある期間中に発生する M_{th} 以上の地震の発生確率を一応計算できます。アメリカ (Reasenber and Jones, 1989, 1994) や日本 (細野・吉田, 1992; 阿部, 1991, 1994) の場合にそれぞれ平均的な A, b, c, p の値を使った確率の表が提出されています。ただし、この確率は本震直後以外は非常に低く、あまり実用的ではありません。また、あらかじめ用意された表と実際の予測する余震活動の A, b, c, p 値が違くと確率が異なるので、実際には本震直後数時間程度の余震データからこれらのパラメータを緊急に求め、その活動に応じた確率を使う必要があるでしょう。また確率よりも、 p 値が1より大きい場合に限られますが、

$$N_E = N(\infty) - N(t) = 10^{A-b(M_0 - M_{th})}$$

$$\cdot (t+c)^{1-p} (p-1)$$

を計算して「 M_{th} 以上の余震が、これ以後 N_E 個発生する可能性がある」という具合に個数で表したほうが一般にはわかり易いかも知れません。

(2) 飛び抜けて大きい余震の発生予測 前項で述べた確率は、非定常ポアソン過程として、改良大森公式に従って発生する通常の余震の予測方法ですが、通常でない余震、つまり二次余震を伴うような大きい余震（あるいは隣りに発生する次の地震）の発生は予測する手法があります。これは、異常なイベントの前には本震の余震発生が通常の改良大森公式からはずれることを使った定量的で客観的な手法です。

大きい浅い地震が発生すると多数の余震が付くのが普通です。直下型地震に見舞われてようやく避難した被災者にとっては、グラグラと次々有感

余震が発生して精神的に追いつめられやすいのですが、逆にこれは余震活動が普通で順調に余震が発生している証になります。順調に余震が発生しないのは「異常」なことなのです。普通に余震が発生しなかった後に、隣を震源とする次の本震が続発した例は、古くは1898年福岡県西部地震でM 6.0の最初の地震には余震が3個しかなく、34時間後に発生したM 5.9の地震には通常通り余震が多数付いた例（大森，1900d）があります。Lomnitz（1966b）の図中にも、1960年チリ地震の前震の余震が「少なかった」ことが見られます。

ある程度大きければ余震であっても被害が生じやすい中国においては、大粒の余震の前の余震活動の検討が盛んで、大余震前には余震活動度が通常と異なっていたという指摘は多いのですが、活動度が変化する、上昇する、低下すると、研究者により様々です。この中で、Wang and Wang（1983）は、大きい余震の前、数日から十日程度は余震活動が低下すると報告をしています。このほか、大竹（1970）が1969年上高地に発生したM 4.7の余震活動が2日後のM 5.0の発生前に減少した例を、Schenkove et al.（1982）はイタリアのフリウリの1976年5月のM 6.4の余震活動が、いったん8月に静穏化した後回復し、9月にM 5.9、6.1、6.0の一連の活動があった例、1978年ギリシャのM 5.9の余震活動がM 6.6の数日前から静穏化した例、1979年ユーゴのモンテネグロ地震の前震の余震活動の本震前の静穏化の例を、Robinson（1994）はニュージーランドのウェヴァーで1990年2月に発生したM 6.1の余震活動が5月のM 6.2の35日前から減少した例を報告しています。

Matsu'ura（1986）は、定量的手法で飛び抜けて大きい余震発生前の余震活動に前兆変化が存在するかどうかを調査しました。日本付近でM 7程度以上の本震に、Mで1.2以内の大きい余震があった場合の余震活動度をデータが入手できるものはすべて調べた結果、二次余震が付くような大きい余震の発生前には、本震の余震活動度が改良大森公式から予想されるものの数分の一以下にいったん減少した後、活動度が再び回復あるいは

は以前より活発化するという前兆的变化が多数の例で存在すること、この活動度の変化は統計的に有意な変化であることがわかりました。特に1923年関東地震（M 7.9）の翌日発生した勝浦沖地震（M 7.3）の前や、1984年長野県西部地震（M 6.8）の翌日発生した最大余震（M 6.3）の前の余震活動度の静穏化と回復は非常に明白です。この様に一目で明らかな変化でなくとも、最尤法とAIC（Akaike, 1974）という道具を使えば、短期間に対しても改良大森公式のパラメータ値の変化として活動度の変化を捉えられました。

しかも使用した余震データの均質性が高い例で模擬的に実験したところ、この前兆的静穏化とその回復は大きい余震が発生する前に検出可能な変化であることが確認できました。これまで多くの地震前兆の報告がありますが、多くは残念ながら地震発生後に検出できる「後予知」前兆でした。この大きい余震前の前兆が事前に検出できるのは、本震によって注目すべき場所（空間範囲）が事前に指定される、「変化」が改良大森公式を使って定量的に表せる、の2つの好条件があるからです。

この余震活動度の静穏化→回復はIASPEI（国際地震学地球内部物理学協会）の地震前兆評価委員会から「確かな前兆」と認められたのですが、この論文の後、日本付近では1994年北海道東方沖地震まで大きい余震を伴うような大地震の発生がなかったこと、予知できるのが余震であって本震ではないことなどから、気象庁気象研究所の地震予知支援システムに組み込まれた以外はリアルタイムでの実用化の方策は取っていませんでした。ところが、今年1月17日兵庫県南部地震が発生し、人口密集地神戸が直撃を受けて多大な人的物的損害を被りました。私の出生地西宮や幼少期に4年間住んだ芦屋も甚大な被害を受け、通っていた精道小学校は避難所となりました。避難生活の人は言わずもがな、幸いにも家屋の倒壊を逃れた人でも引き続き有感余震に精神的に相当苦しめられ、さらに大きい地震に襲われないか不安が大きかったようです。そこで、せめてM 6クラスの余震は予知できればと、初めて東京大学地震研究所和歌山微小地震観測網の自動処理による

リアルタイム震源データを使用して、リアルタイムで余震活動度の変化の監視を試みました。

幸いにも兵庫県南部地震には M 5 や M 6 の大余震は発生しませんでした。1 月 25 日 23 時 16 分に M 4.7 が本震断層の北東端で、2 月 18 日 21 時 37 分に M 4.9 が南西端で発生しました。残念ながら南西端の M 4.9 の発生前は余震活動度の変化が生じませんでした。北東端の M 4.7 の発生前には 21 時間半の著しい静穏化の後 15 時間の活動度の回復が出現しました (図 3)。しかも、これまでの事後の病理解剖的解析ではなく、リアルタイムデータを使って事前に静穏化の開始や終了を検出できたのです。気象庁大阪管区

の自動処理震源データを使っても同様の結果が得られています。海域で発生する地震と異なり、内陸浅部の地震は余震予知も二次災害防止や被災者の保護などに重要です。幸いなことに、日本では長年の地震予知計画の成果で微小地震観測網が整備されていますので、内陸地震の余震であれば自動処理データによっても活動度の変化を監視できるまでになっているのです。

わずか M 4.7 の地震の前兆が今回検出できたのは、今回の兵庫県南部地震の余震活動がそれまで 1 週間改良大森公式に模範的に従って発生していたこと、内陸の観測網に囲まれた地域で発生した活動であったことなど、好条件に恵まれていたからです。同じ内陸地震でも、今年 4 月 1 日に発生した M6.0 新潟県北部地震では活動が群発的で単純な改良大森公式では活動度の変化が捉えられませんでした。また、前項で確率予測されるような「普通の余震」で大きいものや、近隣に誘発される地震にはこの手法は無効です。静穏化の検出による特別な大きい余震の事前予知が本震後の二次災害防止策のオールマイティではありませんが、「前兆の出る大きい余震だけでも事前に警報を出す」ことが社会的に認知されれば、実用化できるところまで来ているのです。

おわりに

地震災害に遭ったときに忘れてならないのは、浅い大地震の後には必ず多数の余震が付くということです。もし順調に余震が発生しない場合は、さらに何か「次のイベント」が控えている可能性が高いので安心できません。グラグラと、ときどきゆるるのは順調な経過と割り切って、寝る場所だけでも落下物の危険のない所にして、概略時間に反比例してゆっくり減衰していくのを心静かに待つほかないのです。なにしろ岐阜は 100 年前の地震のために、未だに年に数回は有感地震があるのですから、逆に

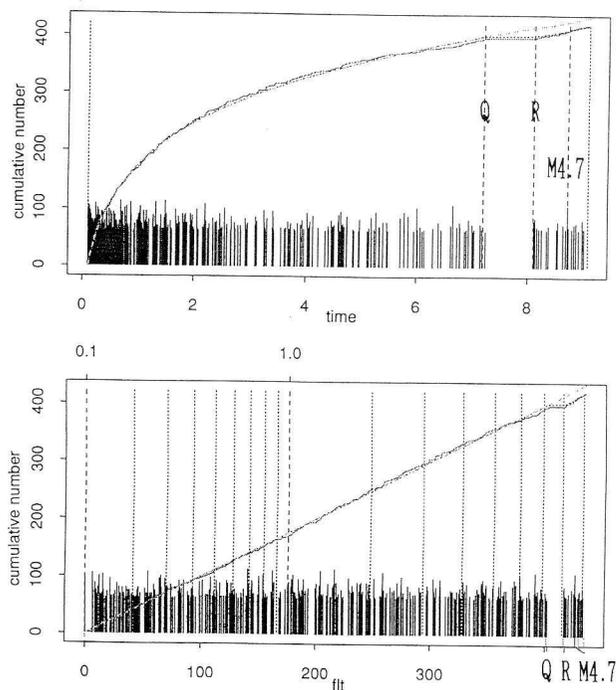


図 3 兵庫県南部地震の 0.1 日後から 9 日までの M 2.5 以上の余震の M-T 図 (棒グラフ) と累積地震数 (点線) 活動の静穏化の開始 (Q), 回復の開始 (R), 僅かな二次余震を伴った M 4.7 の時点が示されている。活動の静穏化を含んだ最適モデルの予想累積地震数 (破線), 静穏化がなかった場合の予想累積地震数 (一点鎖線) も示されている。上は通常的时间軸 (単位は日), 下は一点鎖線で示された予想累積地震数に比例するように調整した時間軸 (frequency-linearized time) に対してプロットされている。下図には 0.1 から 1 まで 0.1 刻み, 1 以降 1 刻みで通常的时间目盛りも破線と点線で示してある。

余震が続いている間は次回の本震はまだ先のこととして安心していられます。改良大森公式に従って発生するのが普通の余震であり、この式からズレるかどうかを監視して、二次余震を伴う大きい余震を事前に予知する手法が実用段階まで来ているぐらいなのですから。

1970年代初めに地震予知が直ぐにも達成されそうにバラ色に輝いていた頃には、余震は地震前兆を隠すゴミとして厄介者扱いされ、「カタログから余震を除くと……」というような記述が散見されました。しかし通常の地震活動のかんりの部分が過去の地震の余震ですから、余震を除いてしまうことは、地震活動のなかにあるその地域の物理的状態の情報の大半をむざむざ捨ててしまうこととなります。余震を織り込んだETASモデルのような解析を進めていけば、その親である本震の予測にも近づけるのではないのでしょうか。

100年も前から時系列的性質が大森公式としてわかっている余震ですが、まだまだその発生メカニズムは明らかにされていません。改良大森公式のパラメーターの値から震源域でのどんな物理的状態がわかるのかなど、理論的にも実験的にも明らかにされるべきことは多いのです。地震の時系列データを点過程として最尤法を使用すれば、100年前とは比較にならない量の情報を引き出すことが可能になりました。この種の細かい解析によって、震源域の温度とか、岩石の空隙中にある水の量や圧の程度が式のパラメーターに影響する例などが明らかになりつつあります。余震研究は、今、再びおもしろい時期を迎えているのです。

参考文献

- 阿部勝征, 1991, 余震の確率予報, 地震, 第2 掲, 44, 145-146. (訂正, 1994, 地震, 第2 掲, 47, 239.)
- Akaike, H., 1974, A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Automat. Control, AC-19, 716-723.
- Benioff, H., 1951, Earthquakes and rock creep. Part 1. Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks, Bull. Seism. Soc. Am., 41, 31-62.
- Creamer, F. H. and C. Kisslinger, 1993, The relation between temperature and the Omori decay parameter for aftershock sequences near Japan, EOS, 74, No. 43, Supplement, 417.
- Friedlander, I., 1918, On the aftershocks of the earthquake of 13 Jan. 1915 in Avezzano, Gerl. Beitr. Geophys., 14, 318-326.
- 広田知保, 1968年1月29日色丹島沖地震の余震活動——とくに本震直後の余震について, 北海道大学地球物理学研究報告, 21, 33-43.
- 細野耕治・吉田明夫, 余震活動の予報, 気象研究所研究報告, 42, 145-155.
- 飯尾能久, 1984, 余震を伴う微小破壊, 地震, 第2 掲, 37, 599-606.
- Jeffreys, H., Aftershocks and periodicity in earthquakes, Gerl. Beitr. Geophys., 56, 111-139.
- Kagan, Y. and L. Knopoff, 1981, Stochastic synthesis of earthquake catalogs, J. Geophys. Res., 86, 2853-2862.
- Kisslinger, C. and L. M. Jones, 1991, Properties of aftershocks in southern California, J. Geophys. Res., 96, 11947-11958.
- Lomnitz, C., 1966a, Magnitude stability in earthquake sequences, Bull. Seism. Soc. Am., 56, 247-249.
- Lomnitz, C., 1966b, Clustering in aftershock sequences, The Earth beneath the continents, AGU Geophysical Monograph 10, ed., J. S. Steinhart and T. J. Smith, 502-508.
- Lukk, A. A., 1968, The aftershock sequence of Dzhurm deep-focus earthquake of 14 March 1965, Izv. Phys. Solid Earth, 319-320.
- Matsu'ura, R. S., 1986, Precursory quiescence and recovery of aftershock activities before some large aftershocks, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 61, 1-65.
- 松浦律子, 1993, 改良大森公式中のパラメーター値について——日本付近の $M \geq 6$ の余震活動(1969-1991), 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, 224.
- Matsu'ura, R. S. and I. Karakama, 1995, The point process analysis of the Matsushiro earthquake swarm sequence—the role of the water to the earthquake occurrence—, submitted to Tectonophysics.
- Matuzawa, T., 1936, Seismometrical studies of the earthquake of 2 March 1933, III, Earthquake frequency before and after the large earthquake. General remark on aftershocks,

- Bull. Earthq. Res. Inst., 14, 38-67.
- Mogi, K., 1962, On the time distribution of aftershocks accompanying the recent major earthquakes in and near Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 40, 175-185.
- Mogi, K., 1967, Earthquakes and fractures, Tectonophys., 5, 35-55.
- 中村左衛門太郎, 1923, 千々石灘地震について, 気象集誌, 第2輯, 1, 1-2.
- Ogata, Y., 1983, Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, J. Phys. Earth, 31, 115-124.
- Ogata, Y., 1988, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, J. Am. Statist. Assoc., 83, 9-27.
- 大竹政和, 1970, 上高地付近に発生した地震群について, 東京大学地震研究所彙報, 48, 65-71.
- 大森房吉, 1894, 余震について, 震災予防調査会報告, 2, 103-139.
- Omori, F., 1900a, Note on the great Mino-Owari earthquake of Oct. 28th, 1891, Pub. Imp. Earthq. Inv. Com., 4, 13-24.
- Omori, F., 1900b, Note on the after-shocks of the Hokkaido earthquake of Mar. 22nd, 1894, Pub. Imp. Earthq. Inv. Com., 4, 39-45.
- 大森房吉, 1900c, 余震に関する調査第2回報告, 震災予防調査会報告, 30, 3-29.
- 大森房吉, 1900d, 明治31年8月福岡激震に関する調査(第2回報告), 震災予防調査会報告, 32, 47-54.
- 大森房吉, 1906, 台湾地震に関する調査一斑, 震災予防調査会報告, 54, 1-223.
- Omori, F., 1908, The after-shocks of the Zenkoji (1847) and the Tempo (1830) earthquakes, Bull. Imp. Earthq. Inv. Com., 2, 185-195.
- Page, R., 1968, Aftershocks and microaftershocks of the great Alaska earthquake of 1964, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1131-1168.
- Papazachos, B. C., 1974, On the time distribution of aftershocks and foreshocks in the area of Greece, Pageoph, 112, 627-631.
- Ranalli, G., 1969, A statistical study of aftershock sequences, Ann. Geofis., 22, 359-397.
- Richter, C. F., 1958, Elementary Seismology, 768pp., Freeman, San Francisco, p69.
- Robinson, R., 1994, Shallow subduction tectonics and fault interaction: The Weber, New Zealand earthquake sequence of 1990-1992, J. Geophys. Res., 99, 9663-9678.
- Ryall, A. and W. U. Savage, 1969, A comparison of seismological effects for the Nevada underground test BOXCAR with natural earthquakes in the Nevada region, J. Geophys. Res., 74, 4281-4289.
- 驚坂清信, 1927, 北丹後烈震余震調査, 験震時報, 3, 107-124.
- Schenkova, Z., V. Schenk, and V. Karnik, 1982, Foreshocks and aftershocks in recent earthquakes, Earthq. Predic. Res., 1, 287-318.
- Suhadolc, P., 1982, Time evolution of the aftershock sequence relative to the September 16, 1977 Friuli earthquake, Boll. Geofis. Teor. Appl., 24, 57-65.
- Umeda, Y., 1990, High-amplitude seismic waves radiated from the bright spot of an earthquake, Tectonophys. 175, 81-92.
- 宇津徳治, 1957, 地震のマグニチュードと余震の起こりかた, 地震, 第2輯, 10, 35-45.
- Utsu, T., 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys. Mag., 30, 521-605.
- Utsu, T., 1962, On the nature of three Alaskan aftershock sequences of 1957 and 1958, Bull. Seism. Soc. Am., 52, 279-297.
- Utsu, T. and T. Hirota, 1968, A note on the statistical nature of energy and strain release in earthquake sequences, J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII, 3, 49-64.
- Utsu, T., Y. Ogata, and R. S. Matsu'ura, 1995, The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, J. Phys. Earth, 43, 1-33.
- Yamakawa, N., 1968, Foreshocks, aftershocks, and earthquake swarms (IV) -Frequency decrease of aftershocks in its initial and later stages, Pap. Met. Geophys., 19, 109-119.
- Wang, B.-Q. and C.-Z. Wang, 1983, Temporal and spatial features of aftershock sequences, Acta Seism. Sinica, 5, 383-396 (in Chinese).

[まつうら りつこ 統計数理研究所外来研究員]

P波によるマグニチュード

その応用の可能性

坪井誠司

はじめに

日本近海では昔から、大きな津波を発生させ被害をもたらす地震がよく発生している。近年では1933年の三陸地震、1983年の日本海中部地震および、1993年の北海道南西沖地震などである。このような地震では震源が海岸に大変近いために、津波の早期警報を出すためには、地震の規模をできるだけ早く推定することが必要である。地震の規模の推定にはマグニチュードを使うことが一般的であるが、今までは実体波の後に到着する表面波の振幅をもとに決めるマグニチュードを使っていたため、表面波の到来時刻まで待たなければならなかった。このため、もっとも早く到着する実体波のP波を基にしてマグニチュードを正確に推定する方法が、最近考案されるようになった。本稿では、我々が最近開発した方法および、気象庁で開発され津波警報に用いられている方法について簡単に解説する。

実体波マグニチュードについて

地震のマグニチュードには様々な種類がある。マグニチュードを定義したのは、リヒターが南カリフォルニアの地震に対して求めた M_L が最初である。今までよく用いられてきた表面波マグニチュードは、リヒターがもつめた M_L に一致するようにグーテンベルグが表面波の最大振幅から計算する方法を考案したものが基礎となっている。気象庁のマグニチュードも、概ね表面波マグニチュードと一致する値を示している。また、実体波を用いたマグニチュードには、やはりグーテンベルグにより考案された実体波の振幅と周期を用いる

m_b 、およびP波の最初の数秒を用いる m_b がある。このうち、 m_b は国際地震センター (ISC) や米国地質調査所 (USGS) の地震カタログで用いられている。これらのカタログで報告されている実体波マグニチュードは、表面波の場合と比較すると高周波数の地震波から決められているので、地震の全体の規模をよく反映しておらず一般的に表面波マグニチュードより小さい値を与える。ISC や USGS が使用していた地震記録は、国際標準地震観測網 (WWSSN) で得られたものであるが、WWSSN は、本来地下核実験の探知を目的として作られたものである。地下核実験で励起される地震波は自然地震と比較すると表面波の振幅が小さく、規模の推定には m_b を用いることができたのである。もっとも、自然地震の場合に m_b が適さないのは WWSSN の時代に使われていた地震計が特定の周波数の地震波を捉えるように作られていたためであり、後で述べるようにより広い周波数帯域の地震波を捉えるように作られた最新の地震計を使えば実体波を使っても地震の規模を正しく推定することはできる。マグニチュードで地震の規模を推定するとき、もうひとつ注意しなければならないことは、マグニチュードの飽和ということである。表面波マグニチュードでも、実体波マグニチュードでも、地震の規模が非常に大きくなるとマグニチュードの値はあまり大きくなり頭打ちになってしまう。このような現象を解決するために考えられたのがモーメントマグニチュード M_w である。地震のモーメントは長周期地震波の解析から求められる地震の震源域の面積と断層変位量に比例する物理量であり、地震の規模に比例して大きい値になる。モーメントマグニチュードはこのモーメントに基づいてマグニチュードを推定するものであり、大きい地震でも

飽和することはない。これらの考察から、早期津波予測のためには実体波のP波初動部分からモーメントマグニチュードを推定できればよいことがわかる。また、マグニチュードの推定にあたっては、必ず値が決まらなければ防災上意味がないので、できるだけ簡単な方法が望ましい。

広帯域P波モーメントマグニチュード M_{wp}

1980年代になるとWWSSNに代わる次世代の汎世界的な地震観測網が各国により展開されるようになったが、そこで使われた地震計がスイスのストレッカイセン社のSTS-1型に代表される広帯域地震計である。それまでの地震計は特定の周波数成分をもつ地震波を記録できるように作られていたので、例えば、短周期（高周波数）地震計で記録された実体波P波初動は、その周波数で見た地震の震源の情報しかもっていなかった。しかし、広帯域地震計では広い周波数帯域を1台の地震計で記録することができるので、地震の震源の

全体像を求めることが容易にできるわけである。具体的に言うと、遠地で観測される実体波の地動の変位は地震の震源を断層に沿っての変位の食い違いでモデル化したとすると、断層上での破壊の進行過程を反映したものだと思えることができるので、広帯域地震計の実体波P波記録をみただけでこの震源の破壊過程を調べることができると予想される。実際、Kikuchi and Ishida (1993)は、関東地方に展開した広帯域地震計の観測網で捉えられた局地的な地震を調べた結果、広帯域地震計のP波初動記録が、震源の破壊過程を示す関数の良い近似になっていることを示している。ここでは、まず、このことを利用して広帯域地震計のP波記録からモーメントマグニチュードを求める我々の方法(Tsuboi et al., 1995)を説明する。図1は1994年10月4日の北海道東方沖地震を、東大地震研筑波地震観測所の広帯域地震計で記録したもののP波部分の波形である。上段の記録は、地震計の出力で地動の速度を示している。中段は、地震計の出力を時間で1回積分したもので地動変

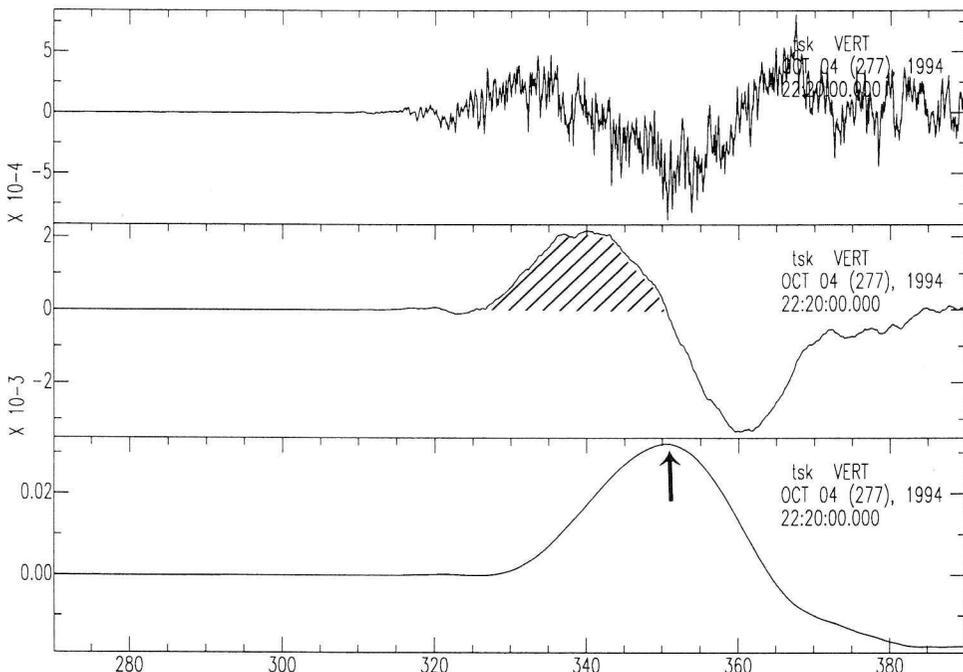


図1 北海道東方沖地震（1994年10月4日）の東大地震研筑波地震観測所における広帯域地震計記録（22時24分30秒より2分間）

上段：速度記録（m/sec），中段：変位記録（m），下段：変位の積分記録（m・sec）。

下段の記録の矢印の値を複数の観測点で読み発震機構の補正をすることで M_{wp} が求まる。

位を示している。この地動変位の記録のP波部分が震源の破壊過程を反映したものになっており、図の斜線部分を積分した値がモーメントの近似値となる。下段は中段の変位記録をさらに積分した波形で、矢印で示したピークの値を読めば、中段の斜線部分の面積が求まり、震央距離によって減衰の補整を行えばモーメントの近似値が得られる。ここで注意しなければならないのは、さらに発震機構の補整をしないとモーメントの絶対値は意味がないという点である。このためには、リアルタイムで発震機構解が得られれば補正できるが、この方法では複雑さを避けるため、以下に述べるように複数の観測点を使って補正することにした。まず、各観測点ごとに発震機構の補正をせずにモーメントの近似値を求める。次にモーメントマグニチュードをこのモーメントの近似値から求める。次に、各観測点のモーメントマグニチュードを平均し、平均値に0.2を加える。0.2の根拠はP波の振幅の自乗の全球での平均が4/15となることによる。こうして求めたモーメントマグニチュードを広帯域P波モーメントマグニチュード(Broadband P-wave Moment Magnitude)と呼び M_{wp} で表すことにする。次に、この方法を日本付近で起きた深さ100 km以浅の地震について適用し、 M_{wp} を求めてみた。地震は米国のハーバード大学が定期的に発行している地震のモーメントテンソル解(CMT)の1992年の表から、深さが100 kmより浅いものを選んだ。さらに、1993年の釧路沖と北海道南西沖、および1994年の北海道東方沖地震とその最大余震の4つの地震も加えた。解析した地震の総数は59、マグニチュードは4.9~8.1である。解析に用いた広帯域地震計記録は、東大地震研の筑波(TSK)および白木(SHK)の2点である。震央距離は200 kmから1700 km以内である。図2に示したのが、本方法で求めた M_{wp} とハーバード大学のCMT解による M_w を比較した結果である。点の大きさは地震の数に比例している。両者は、求めたマグニチュードの範囲で良く一致しており、この方法で求めたモーメントマグニチュードが正しい結果を与えることを示している。図2では日本付近の

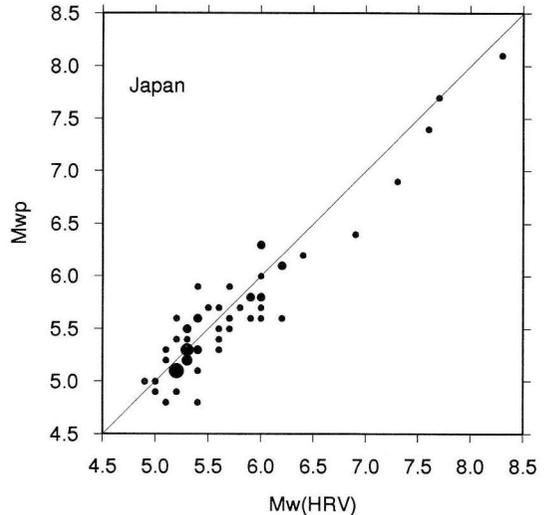


図2 M_{wp} と M_w (HRV) の比較(日本付近の地震)
丸印の大きさは地震の数に比例している。

地震について M_{wp} とハーバード大学の M_w との比較をしたが、他の地域の地震でもこの方法が有効かどうかを調べてみた。地域地震観測網で広帯域地震計が使われている例としては、日本同様、地震の多発するロサンゼルス域にカリフォルニア工科大学が設置した TERRAScope がある。そこで、TERRAScope の記録を用いてカリフォルニア南部の地震について M_{wp} を決めてみた。図3は、最近起きた4つの地震(1992年 Joshua Tree, Landers, Big Bear, 1994年 Northridge)について上に述べた方法により求めた M_{wp} とハーバード大学の M_w とを比較した結果である。TERRAScope の観測点はそれぞれの地震について震央距離が400 km以内で4点から5点の記録を用いることができた。それぞれの地震の深さは10~20 km程度の浅発地震である。図3より明らかなように M_{wp} と M_w はよく一致しており、この方法が日本以外の地域でも適応可能であることがわかる。この方法では、P波の到着時から震源が決定できれば、それとほぼ同時にモーメントマグニチュードを決定することができる。この M_{wp} と津波波高 H_t (阿部, 1989) を組み合わせることにより、津波波高の早期予測も可能である。防災上の観点からはあまり重要ではないが、深さが100 kmよりも深いような地震や遠地で起きた

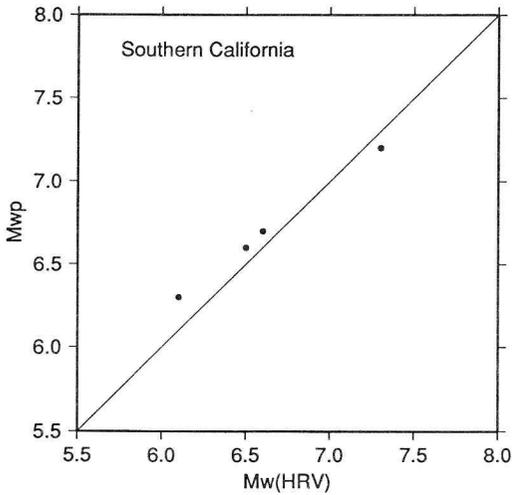


図3 M_{w_p} と M_w (HRV) の比較 (カリフォルニアの地震)

地震でも、震央距離の代わりに幾何学的な減衰を評価してやればマグニチュードを求めることが可能である。

気象庁による M_p

次に気象庁で現在運用されはじめた方法について解説する。気象庁では、北海道南西沖地震のように、地震発生後3分程度で海岸に津波が到達してしまうような場合の津波被害を未然に防ぐことを目的として、早期の津波警報を可能とするための、全国150地点の加速度型地震計からなる津波地震早期検知網を1994年に構築した。この観測網から得られる波形データを使ってP波初動部分からマグニチュードを求め、早期津波警報に役立てるように計画している(吉田・横田, 1994)。気象庁の方法は、地動の変位記録からP波の最大振幅を読み取り、マグニチュードと最大振幅の経験式からマグニチュードを推定するというものである。この最大振幅とマグニチュードの経験式には、広帯域地震計、および気象庁の87型電磁強震計の記録を、1989年以降に日本付近で起きた $M > 6$ の浅発地震について解析し、気象庁のマグニチュードと、変位記録のP波最大振幅との相関を最小二乗法により求めたものを使用している。

変位記録を使うのは、前節の考察でも述べたように、P波部分の変位記録の積分値がモーメントの近似値となっているからである。求めた経験式を、全国150地点の加速度型地震計の記録に対して用いる際には、加速度記録を2回積分して変位記録を求めるため長周期のノイズが増幅される。また、加速度計は広帯域地震計のように広い周波数領域の地震波を捉えるようにはなっていないため、変位記録のP波の最大値からマグニチュードを推定する際の仮定である、P波部分の変位記録の積分値がモーメントの近似値となっていない可能性がある。これらの影響を取り除くため、いくつかの周波数でバンドパスフィルターをかけ、その周波数ごとにマグニチュードを求めるようにしている。最終的なマグニチュードの値はあらかじめ設定したノイズレベルよりも大きいバンドパスフィルターの波形の出力を与える中で、もっとも低い周波数のマグニチュードを採用するようにしている。気象庁ではこのマグニチュードを M_p と呼んでいる。図4は、このようにして加速度型地震計の記録から求めた M_p と気象庁のマグニチュードを、最近起こった地震について比較した結果である。気象庁のマグニチュードと M_p は、結果の得られたマグニチュードの範囲でよい相関があり、 M_p が気象庁マグニチュードの推定値として十分なものであることを示している。

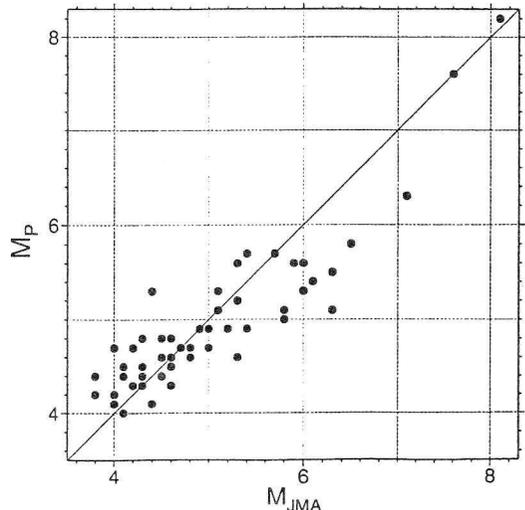


図4 M_p と M (JMA) の比較

津波地震への応用

このように広帯域地震計を使うことなどにより、P波の波形からマグニチュードの推定を十分な精度で行なうことができるようになった。これにより、津波警報をP波が到着した直後に出すことも可能になりつつある。しかしながら、ここで問題となるのは、いわゆる津波地震と呼ばれる地震についても、このような方法により地震の規模の推定が正しくでき、津波警報を出すことができるかということである。津波地震は、地震波から推定されるマグニチュードから期待される津波の規模よりも大きい津波が励起される地震であり、最近では、1992年9月2日のニカラグア地震が典型的な津波地震であった(阿部, 1993)。ニカラグア地震では、表面波マグニチュードが7.2(モーメントマグニチュードは7.6)であったが、9mを越す津波が海岸を襲った。津波地震の場合、陸地での震度は小さい(ニカラグア地震の場合、

推定で気象庁震度階ⅠまたはⅡ)ので、津波警報が正しく出されないと避難が遅れる恐れが大きい。日本付近でも、1896年の三陸地震津波のように津波地震と考えられる地震による被害が起きており、津波地震が起きる可能性は充分ある。1992年のニカラグア地震の場合、震源過程が100秒(Kikuchi and Kanamori, 1994)と異常に長かったため、津波を励起しやすかったと考えられている。このような長い震源過程をもつ地震の規模を正しく推定するには、広帯域地震計の記録が欠かせないと思われる。図5は、フランスが汎世界的に展開している広帯域地震計観測網であるGEOSCOPEのメキシコシティ(UNM)の観測点の記録とそれを積分した変位記録および、変位の積分を示したものである。UNMは震央距離が約1500kmのところであり、我々の方法が適用できる範囲にある。変位の積分値の最初のピークは、P波到着後十数秒にあり、その後、浅い地震のために海底などで反射波が表れ、100秒の震源過程がよく見えなくなってしまっている。

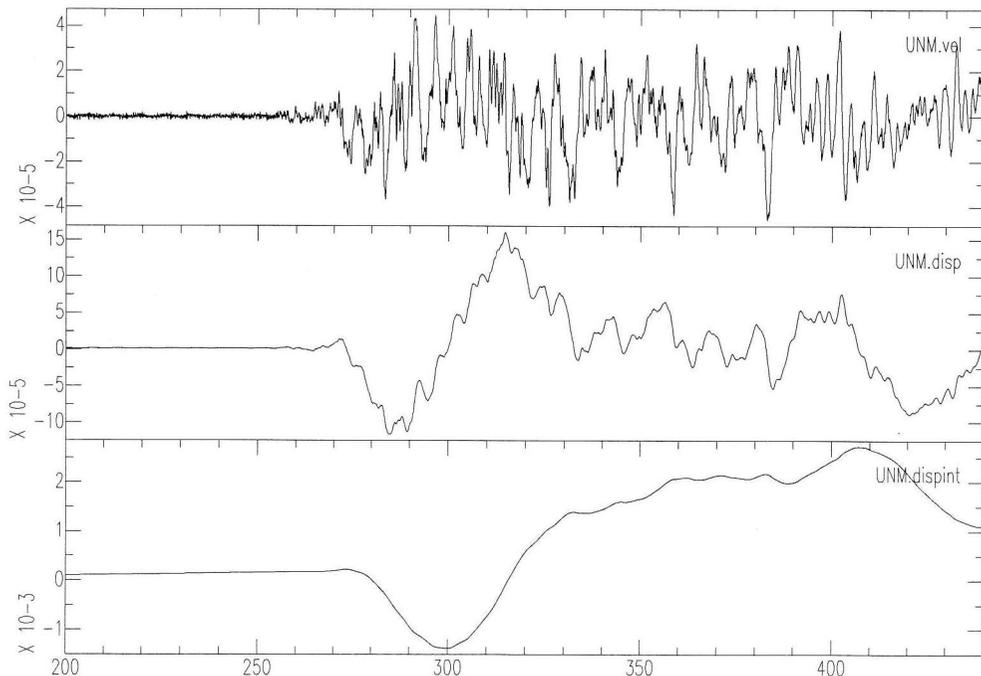


図5 ニカラグア地震(1992年9月2日)のGEOSCOPE観測点UNMにおける広帯域地震計記録(4分間)

上段:速度記録(m/sec),中段:変位記録(m),下段:変位の積分記録(m·sec).

しかしながら、このように震源過程が異常に長い場合でも、反射波による2番目のピークを読むように工夫してやれば、 M_{wp} は7.4と推定することができる。したがって、1992年ニカラグア地震で代表される津波地震でも広帯域地震計を使えば津波警報を出すことはできるのではないと思われる。

おわりに

1995年1月17日の兵庫県南部地震は、大都市の直下でマグニチュード7.2の地震が起きたために甚大な被害をもたらした。本稿で述べた M_{wp}

および M_p は、主に日本近海で起きる大地震による津波防災を念頭においたものであるが、この兵庫県南部地震のような大都市直下型地震の地震防災に役立つであろうか？ 直下型地震であった今回の兵庫県南部地震の場合、大きな被害を生じた地域では、P波の到着時から主要動が到着するまでは2~3秒ほどしかない。しかし、この2~3秒の間に震源を暫定的にでも決定することは困難ではあるが、不可能ではないであろう。また、広帯域地震計は主要動の大振幅の波では振り切れてしまうであろうが、P波の初動部分は、近地の観測点でも振り切れずに記録できると思われるので、 M_{wp} の決定も不可能ではないであろう。もし、この震源とマグニチュードの値を即座に伝達する防災システムができていれば、例えばガスの供給を即座に停止することなどにより、起こり得る災害を軽減することはできるのではないだろうか。災害を軽減できる可能性がわずかでも、確実にあるのなら、そのようなシステムを構築する意義は大きいと思うし、 M_{wp} はそのような目的にも適用することは十分可能であると思う。

参考文献

- 阿部勝征, 1989, 地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 地震研究所彙報, 64, 51-69.
- 阿部邦昭, 1993, ニカラグア地震津波の特徴, 地震ジャーナル, 16, 51-57.
- Kikuchi, M. and M. Ishida, 1993, Source Retrieval for Deep Local Earthquakes with Broadband Records, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1855-1870.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1995, Source Characteristics of the 1992 Nicaragua Tsunami Earthquake Inferred from Teleseismic Body Waves, PAGEOPH, in press.
- Tsuboi, S., K. Abe, K. Takano and Y. Yamana, 1995, Rapid Determination of M_w from Broadband P Waveforms, Bull. Seism. Soc. Am., in press.
- 吉田康宏・横田 崇, 1994, P波から決めたマグニチュード, 地震学会講演予稿集, No. 2, 11.

『資料・日本の地殻水平歪』 限定部数複製頒布のお知らせ

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

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

日本の地殻水平歪 国土地理院編

- 体裁 上製・紙判 本文133頁 2色刷
付録 カラー歪図 2編
- 頒布実費 [送料を含む] 20,000円
- 申込先
〒101 東京都千代田区神田美土代町3
（財）地震予知総合研究振興会
☎03-3295-1966 FAX03-3295-1996
- 郵便振替口座 東京00110-3-109120

なお、限定部数のため、在庫も少数となりましたので、お問い合わせ下さい。

財団法人 地震予知総合研究振興会
〒101 東京都千代田区神田美土代町3

[つばい せいじ 東京大学地震研究所助手]

地電流と地震

日本における地電流観測

長尾年恭

平成7年1月17日5時46分、関西地方でマグニチュード7.2の直下型地震が発生した。この地震は後に阪神・淡路大震災と命名され、最終的に5,500人余りの尊い人命が失われた。果たして、この地震の予知はできなかったのでしょうか？

本論文では電磁気学的な地震予知の手法、特に近年の地電流観測による地震予知に焦点を当ててみたい。

はじめに

地震予知とひとくちに言っても、その定義が人によって違い、まず“予知”という言葉の定義から始める必要がある。長期予知・中期予知、あるいは短期予知という言葉をよく聞くが、このような言葉の正確な定義というものがあるのでしょうか？ 皆漠然とは理解できても、例えば、どこまでを“短期予知”というかについては学者によって意見が違ふと筆者は考える。このことが地震予知を議論しようとするとき、問題になることは自明である。例えば、1994年6月に行なわれた地震予知シンポジウムでも、この点をまず明らかにする必要があったのではないだろうか。各個人が考える“予知”の定義が違い、そのため議論が混乱していた。ある人は予知の定義として“いつ”に関しては1日以内、どこでどれくらいというのも正確に予知しなければ社会的な混乱が大きく予知として成り立たないと述べている。そして、これが彼が考える予知の定義であった。また、ある人はそのように厳密でなくても予知として役に立つと考えている。これでは議論がかみ合わないのも無理はない。今後“予知”について議論するときは“あなたにとっての予知とは”ということ

を確認してから始める必要がある。また“科学的な予知成功”と“社会的な予知成功”の違いも常に念頭に置く必要がある。

筆者は、長期予知とは10年あるいはそれ以上のオーダーで、どこでどれくらいの地震が発生するかを予知（予測）するもの（典型的な例は東海沖地震である）、中期予知とは数年から数カ月のオーダー、短期（あるいは直前）予知とは1カ月以内で特定の地域を限定するものと考え、東海沖地震はまだ発生していないにもかかわらず、すでに名前がついている奇妙な地震である。この地震は科学的に長期予知されたため、政府が立法措置を講じたわけである。以上をふまえ、筆者は短期（あるいは直前）予知こそが予知の本命であると考え、

電磁気学的な地震前兆現象（黎明期）

電磁気学的な地震の前兆現象としてはピエゾ磁気起因する全磁力変化、土地比抵抗変化、地電流変化などが考えられている。古典的事例としては、Milne (1890) の論文の中に、東京で大気中の電荷変動を連続観測していると地震に伴った変化が何度も観測されたと報告している。これが日本で電磁気学的な観測が地震と関連づけて考えられた最初の例であろう。彼はその論文の中で外国の例ではあるが、様々な地電流の異常や電氣的な異常を報告している。また萩原 (1948) は、地電流が地震の前後に著しい異常を示したという観測例を数多く報告した。例えば Shiratori (1925) は、関東地震の際に仙台付近で地震に伴うとみられる地電流変化を電位差計によって測定した。福富 (1934) は、伊豆半島下田で、南伊豆地震 (1943年3月21日) に伴うとみられる異常を観

測した。同様な異常は数キロ離れた観測点でも捉えられていたが、柿岡地磁気観測所では変化がみられなかったと報告している。長年、気象庁柿岡地磁気観測所で研究に従事した吉松隆三郎は、観測所構内で行なわれている地電流観測記録の中に地震の前兆と考えられる変化があることを報告している。彼は東西・南北に展開された観測網にさらに長さの異なる測線を平行して設置し、これらの平行の2測線のそれぞれの電極に現れる地電位に一定の比例計数を乗じてその差をとった。これは近似的に地磁気の誘導成分を取り除いたものと考えられる。彼はこの手法（差電位差）を用いて異常の検出を試み、幾つかの前兆的变化を報告している（例えば、吉松、1937、1938、1943、1984）。永田（1944）は鳥取地震の後の余震観測で、地電位差変化を伴う余震のあることを報告している。仕方の無いことであるが、当時の報告の相当数は地球磁場の変化による誘導電流や電車などの人工電流の影響を十分に吟味していないので、その信頼性は高いとは言えない。しかし、これだけの報告がなされていること自体が意味を持つものであろう。

松代群発地震の際にも各種電磁気観測が行なわれ、Rikitake et al. (1966) はコサイスマックな地電流の変化を1例ではあるが報告している（図1）。柳原・横内（1967）は、吉松によって試みられた差電位差法による地電流の観測を柿岡で再び行ない、21回の大きな異常を観測した。しかし、そのうち15回は降雨による変化で、地震に伴うと考えられるのは6回のみであり、しかも、そのうちの2回は降雨の影響とも考えられると結論している。特筆すべきは、地震に伴って異常変化を生じる観測地点は相当に限定されており、どこで測定を行なっても観測できるのではなく、柿岡付近のある地域の東西方向

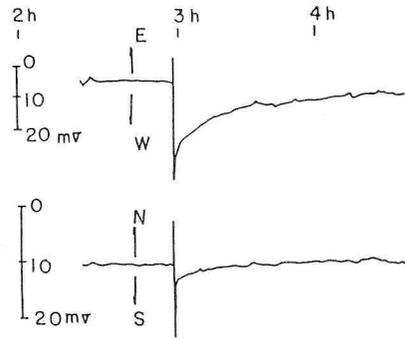


図1 Rikitake et. al. (1966) に示された松代群発地震の際のコサイスマックな地電流変化

に沿う100 m以内であると結論しており、ここには比抵抗構造の境界があることが判明している。これは後述のギリシャで報告されている現象を考え合わせると非常に興味深い結果である。小山・本蔵（1978）は、伊豆大島近海地震（ $M=7.0$ 、1978年1月14日）の際に3カ月間以上継続した長周期の地電流異常を観測している（図2）。

地震予知のテストフィールドとして、山崎断層では電磁気学的な観測も各種行なわれた（住友、1985）。この山崎断層では、宮腰（1985）は1984年5月30日に観測点のほぼ直下で発生した $M5.5$ の地震の際に明瞭な異常を観測した。この変化は現時点では最も確実な地電位の前兆的变化と考えられているものの一つであろう（図3）。これらの異常電位の原因として有力な仮説は界面動電現象による説明であろう。この分野は古くから理論的研究が進んでいる（例えば、Mizutani and Ishido 1976; Ishido and Mizutani, 1981; Murakami, 1989）。この時代までの日本におけ

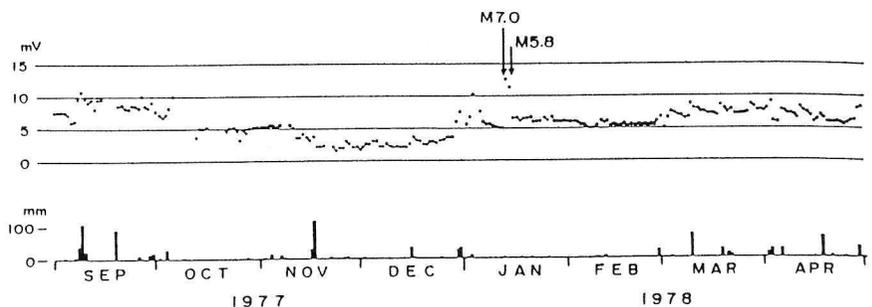


図2 小山・本蔵（1978）による伊豆大島近海地震（ $M=7.0$ 、1978年1月14日）前後の静岡県中伊豆における地電流（上）と降水量（下）との関係

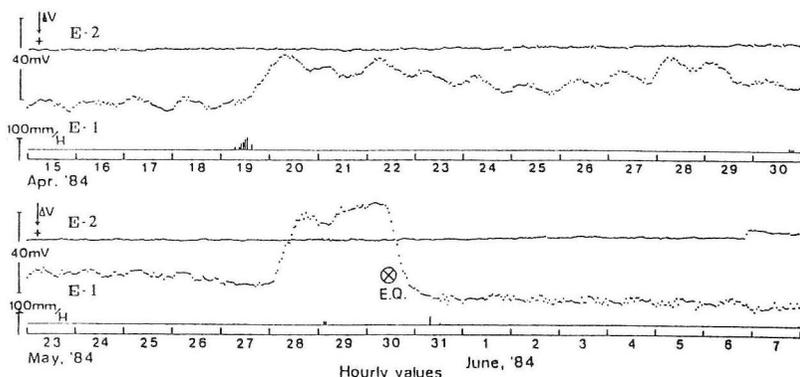


図3 宮腰 (1985) による山崎断層で観測された地電流変化
(1984年5月30日, M=5.5)

る地震前兆としての電磁気現象のまとめとしては Rikitake (1987) を参照されたい。

新世代の地電流観測

森 (1982, 1989), Mori (1987) らに紹介されている海底電位差観測 (実際には地震計回路のフィードバック電流の観測) や, NTT (日本電信電話会社) の通信用アースを用いた地電流観測は, データの長期安定性という観点で画期的なものであろう。特に, この NTT のアースを用いた観測の特徴は, (1) 長期間ドリフトの無い安定した記録が取れる, (2) 降雨の影響をほとんど受けない, という2点に集約できる。このことにより, 高山・森 (1987), 森 (1990), Ozima et al. (1989), 小嶋 (1992b) に報告されているように, ようやく地電流測定の世界に, それまで必要性はだれもが理解してはいたものの, 実際には行なうことの難しかった地磁気誘導成分の除去をシステムティックに処理できる可能性が示され, より“真の”異常変化を客観的に取り出すことができる道筋が示されたと考えられる (図4)。

1980年代に入り, ギリシャで地電流を用いた実用的地震予知が成功しているとの報告がある (例えば Varotsos and Alexopoulos, 1984, Varotsos and Lazaridou, 1991, Varotsos et al., 1993; 上田, 1985, 1991; 木下・上田,

1986)。これはアテネ大学の物理学部のグループが固体電子論を基礎に, 岩石破壊前に電流が流れるとの仮説をもとに彼らの理論を地震予知に応用したのである。ギリシャでは地電流観測による短期地震予知が日常的に行なわれており, すでに人

的被害の軽減に多大の功績をあげている (長尾, 1995; 長尾・上田, 1995)。彼らは一般的にマグニチュード5以上の地震について政府に対して予知情報を提供している。これは現在の地球科学の常識からすれば誠に驚異的なことと言わざるを得ない。この観測方法は観測を始めた3人の科学者の頭文字から通称「VAN法」と呼ばれている。VAN法の特徴は同一方向に長さの異なる地電流観測測線を設けることにより, 広域的な変化と考えられる地震前兆シグナルとそれ以外の (局所的と考えられる) 人工ノイズとの識別が極めて容易になったことである。彼らによると, 地電流に継続時間数分間の変化 (Seismic Electric Signal:

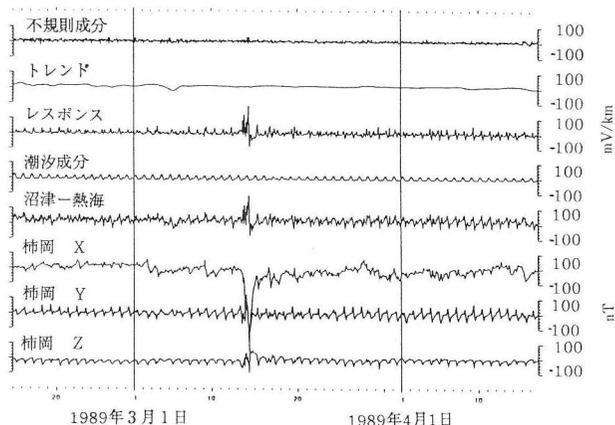


図4 小嶋 (1992) に示された NTT の交換局アースを用いた記録例 (1989年2月15日~4月16日)

沼津-熱海測線のデータ。上から残差, 長周期の傾向, 理論的に求められた地磁気誘導成分, 潮汐の影響, 生データ, 柿岡地磁気X成分, 同Y成分, 同Z成分。3月5日ごろに長周期の傾向に異常変化があることが, このような解析をすることにより始めて発見される。

SES) が現れた後、数日から1カ月程度で地震が発生するというものである。

彼らは岩石破壊直前に格子欠陥双極子が一斉に分極し、震源において一時的に起電力が生ずるといふ仮説を地震予知に応用したのである。VANのうちの2人は固体の電気的性質を専門とする物性物理学者であり、彼らの主著『点欠陥の熱力学とそのバルク物性の関係』に、「地殻には石英のような圧電物質と多くの荷電点欠陥(双極子)を含む物質が含まれている。圧電物質の結晶方向の分布は完全にはランダムではないとする。地震の前に応力が高まると、それに比例して圧電物質が分極し、地殻内にマクロな電場が生ずる。この素過程はポテンシャルの山を越える必要がある活性過程であり、その進行にはある時間(緩和時間)を要する。つまり地殻の応力が高まり、ある臨界状態を越えると、温度や圧力によって決まる緩和時間でマクロな双極子の分極が起こり電流として観測される」と述べている。

もちろん、ギリシャでの予知が地震予知関係者にすみやかに受け入れられたわけではない。特にギリシャの地震学者はVANの予知に真っ向から対立し、その状態は現在でも続いている(例えば、Drakopoulos et al., 1993)。統計的にはVANの予知は有意であると報告されているが(例えば、Hamada, 1993)、それに反論する意見もある(Mulargia and Gasperini, 1992)。しかし、Mulargia and Gasperiniの結論には問題があることも指摘されている(Takayama, 1993)。

日本の電磁気関係者にも、ギリシャの結果はほとんど受け入れられなかった。その理由は大きく分けて、(1)SESの物理的メカニズムが不明である、(2)SESの伝播メカニズムが不明である、という2点に集約されると筆者は考える。SESが震源付近で発生したとすると、観測点でVANの主張する程度の電場変化を観測するためには、均質大地ではとてつもなく大きな電流源を必要とす

る(例えば、歌田, 1990; Utada, 1993)。またVANの主張する選択規則性(Selectivity; 特定の震源域の地震は特定の観測点でしか観測されない)をどのように説明するかも問題である。また、SESに対しVANグループと他のすべての研究者との間に大きな考え方の上での違いがあったためと考えられる。つまり、VANグループは自分たちの基礎実験を通じ、“自分たちなりに”SESの存在を証明したと考えたため、どのSESとどの地震が対応するのかという点に力点を置いて論文を書いていた。それに対し、ほとんどすべての(VAN以外の)研究者は、まず“SESとは何か? SESは存在するのか?”といった、より基本的なことを知りたかったわけである。彼らは、1994年ようやく“一般の研究者”が最初に知りたかったことを論文として発表した(パロトウソスほか, 1994)。

ギリシャの地震予知にいち早く注目し、日本での適用を試みたのは東京大学地震研究所・上田誠也(当時)のグループであった。上田らはNTTの全面的な協力を得て、最盛期には全国に20カ所程度の観測網を設置して地電流観測を行なった(Kinoshita et al., 1989)。この間に北海道弟子屈(Uyeshima et al., 1989, 図5)、伊豆大島(Kawase et al., 1993)などで興味ある結果が得られたが、いずれも可能性の指摘に過ぎず確実な事実といえるものではなかった。小嶋(1991, 1992a)は、伊豆大島で観測されたKawaseらが

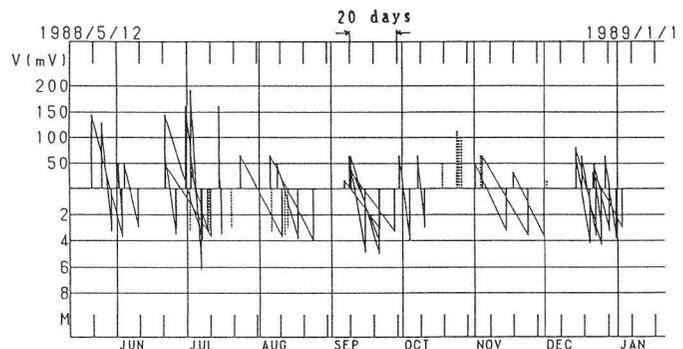


図5 Uyeshima et al. (1989)による北海道弟子屈で得られた地電流の異常と釧路沖の浅発地震との時間的相関
図の中央から上が観測された異常変化の振幅、下が地震活動。対応すると考えられる異常と地震を斜め線で結んである。

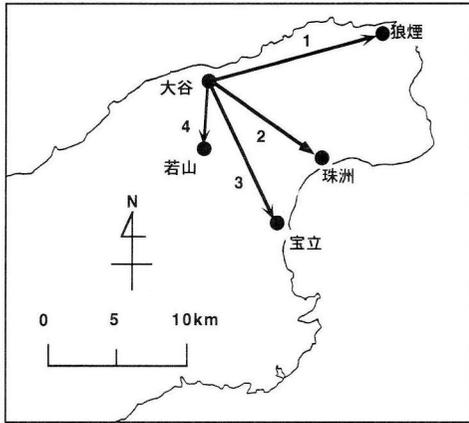


図6 NTT交換局アースを用いた金沢大学珠洲観測網の電極(交換局)配置

前兆ではないかと判断した変化は、その時間ごとの出現頻度などから、ノイズであると結論している。

筆者の所属する金沢大学でも、北陸地域でNTT交換局を用いた地電流観測を1991年から開始した。ここでは、能登半島・珠洲周辺に展開された観測網で得られた1993年2月7日に発生した能登半島沖地震(M=6.6)についての事例を紹介する。図6に珠洲観測網の測線配置を示す。

地電流観測期間中(1991年2月~1993年7月)における能登半島周辺の地震活動を図7に示す。図7には、図示したエリアで観測期間中(1991年3月1日から1993年7月31日まで)に発生した気象庁マグニチュード4以上のすべての地震がプロットされている。また観測期間中の1993年7月12日には日本海側では過去10年間で最大の北海道南西沖地震(M=7.8)が発生した。

図8に珠洲観測点で得られた記録を示す。この記録は20秒サンプリングのオリジナルデータから1時間平均値を作成し、地球潮汐解析用プログラム・BAYTAP-G(石黒ほか, 1984)を用い、気象庁・柿岡地磁気観測所の3成分地磁気データを参照して地磁気の誘導成分

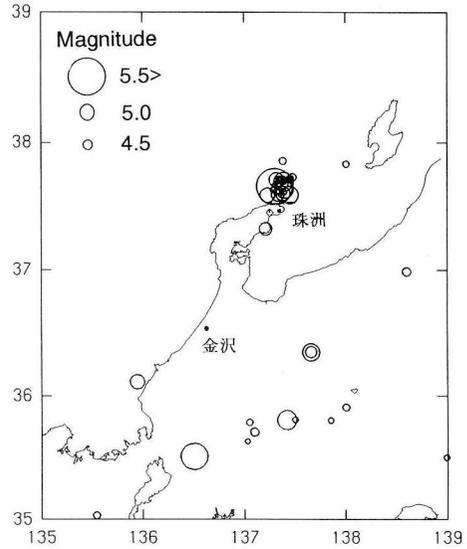


図7 中部日本の地震活動(1991年9月1日~1993年8月31日, M≥4の地震をすべて表示)

の除去を行なってある。図8には、明らかに通常と異なった記録の部分が見られる(1992年12月中旬~1993年2月上旬, 1993年6月中旬)。これらの異常変化と前出の地震について考察を行なう(上田・長尾, 1994)。

能登半島沖地震は中部・北陸地方では観測期間中の最大の地震であった。地震は2月7日の午後10時27分に発生した。気象庁によれば、震央は北緯37度39分、東経137度18分と報告されている。図8の珠洲観測網のチャンネル1に地震発生

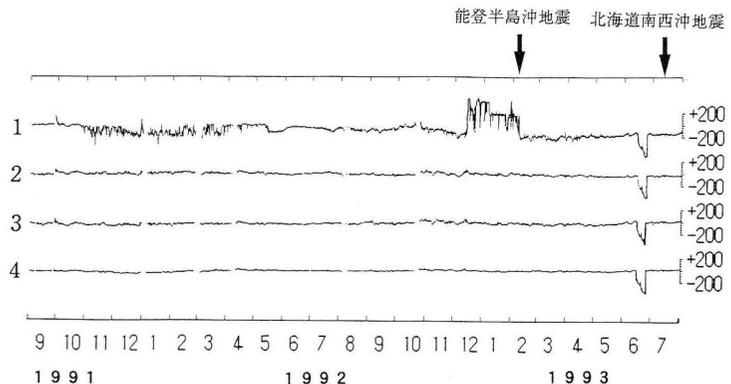


図8 珠洲観測網で得られた記録
柿岡の地磁気データを参照し、BAYTAP-Gを用いて地磁気誘導成分を除去してある。

が観測された。この異常電位は地震発生まで続き、地震発生後約2時間で通常のレベルに回復した。この珠洲観測網で観測された狼煙一大谷間での電位の変化は500 mVに達した。これに対して、その他の測線では顕著な異常は観測されなかった。図6の測線配置からもわかるように、この異常変化の原因は狼煙交換局（電極）にあると推測される。そして狼煙交換局は震央から最も近い（約15 km）電極である。図9にはチャンネル1の1992年12月から3月までの記録と地震活動を示す。余震はマグニチュード4以上のものをプロットした。また前震は地震発生後に地震予知連絡会で「前震であった」と認定された地震も同時にプロットした。狼煙交換局の異常電位の開始時期は、この前震活動の開始時期と極めて近い時期に開始している。自然電位異常の開始時期と前震活動、本震の発生時刻と自然電位異常の消失の時期の一致を考えると、我々はこの自然電位異常が能登半島沖地震の前兆であったと考えている。

6月13日、珠洲観測網の全チャンネルに異常電位が観測され始めた。この異常変化は全チャンネルに等しく現れているため、大谷交換局（電極）の電位の変化と推測できる。そして、この変化は6月25日に平常の状態に復帰した。異常電位が観測されていた間も地磁気の誘導成分は平常通り記録されており、電極の故障ではなかった。また電極周辺では、特に激しい雨や地滑りも報告

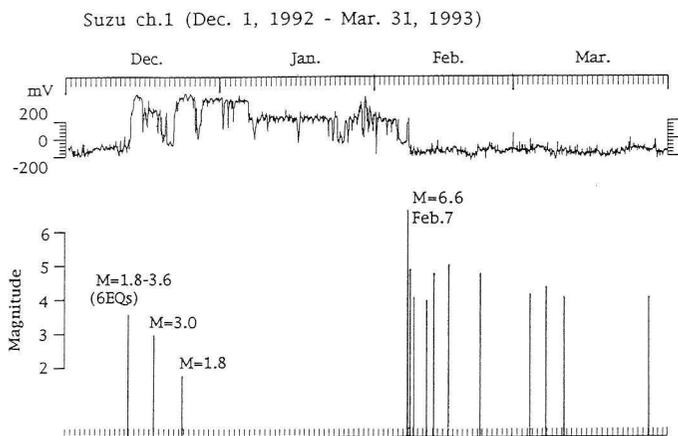


図9 珠洲観測網チャンネル1の拡大記録
余震はマグニチュード4以上のものをプロット。前震は地震発生後予知連にて認定されたもの。

されていない。

そして、7月12日に北海道南西沖地震（M7.8）が発生した。もちろん、この地震と珠洲観測網で観測された異常変化を（直接的に）結びつける証拠は存在しない。たしかに北海道南西沖地震の震源域と珠洲観測網は、直線距離にして約600 kmも離れている。またVAN法がギリシャで予知に成功したとされている地震は観測点から300 km程度が最大である。しかし、ギリシャではマグニチュード6クラスの地震までしか経験がなく、エネルギーレベルの違いを考えれば、あながち前兆を観測することが不可能な距離とも言えない。

さらに、珠洲観測網と北海道南西沖地震の震源域とは同じ日本海東縁の収束帯に位置している。ここではユーラシアプレートが北米プレート（本州）の下に沈み込みを開始しているのではないとも言われている（中村，1987）。一方、歌田（1987）によれば、沈み込み帯などの収束境界には低比抵抗帯が存在することが示されている。また、ギリシャでもヘレニック弧に沿って低比抵抗帯が存在しており、彼らが提唱する地震前兆シグナル（Seismic Electric Signal; SES）の伝播経路となっているのではないかの考察がなされている。同様に、北海道南西沖地震の震源域と珠洲観測網とが見かけ上、電気的に結合しており、これが前兆現象の伝播経路となった可能性がある。

今回、我々が観測した異常は、いずれもギリシャで観測されているSESより継続時間がはるかに長く、いわゆる典型的なSESではない。ギリシャで観測されているSESは、通常数分から数時間の継続時間である。一方、能登半島沖地震の際に観測された異常変化は、継続時間が約2カ月と非常に長く、この変化はVANグループがGradual Variation of Electric Field (Varotsos et al., 1993)と呼ぶタイプの前兆である可能性がある。そして、このように長時間続く異常を説明するモデルとして、石戸（1995）は沸騰に伴う界面

動電現象の可能性を示唆している。石戸はモデル計算を行ない、狼煙で観測された変化は十分説明できると結論している。

今回、我々が狼煙で観測した異常電位と能登半島沖地震との時間的・空間的関連は強く、地震の前兆を捉えていた可能性がある。しかし、異常が観測された交換局が1地点であり、このような変化は通常ノイズとして処理されてきた。今後は異常電位の空間的な広がりを調べるためにも、ギリシャで行なわれているのと同様な長基線と短基線の併用観測を同一地点で行なう必要がある。

ま と め

地電流観測は現在のデジタル技術・コンピュータ処理能力の向上により、全く新しい段階に入ったと筆者は考えている。小嶋(1992a)も述べているように、長期的に安定したデータをまず取得し、そのデータから地磁気誘導成分を除去して、電磁気学的な批判に耐えるデータとすることである。その後、異常変化を冷静に判別することが肝要である。

また通産省・機械技術研究所のグループも、測

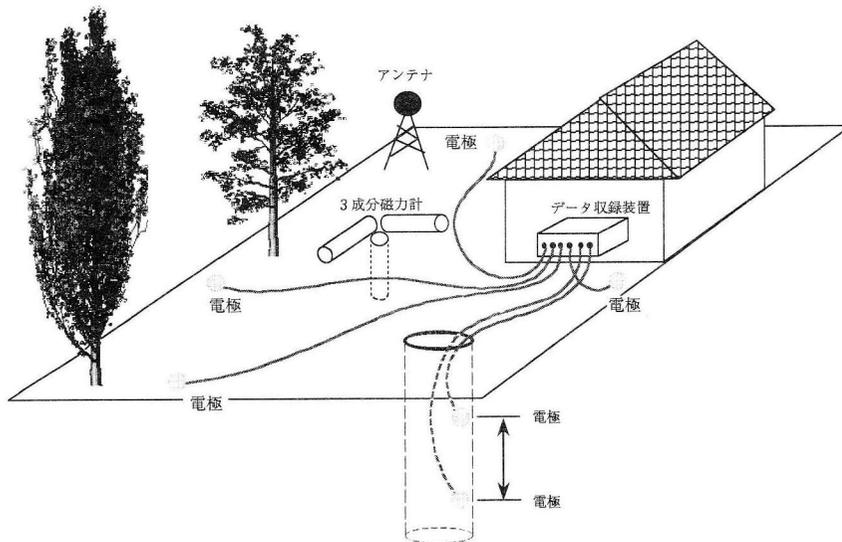


図10 理想的短基線観測点

東西および南北方向に複数の測線を配置する。可能ならば鉛直成分も測定。地磁気誘導成分の除去のため3成分磁力も同時に測定する。アンテナは空中電界の変動を捉えるため。

定周波数は違うものの、地電流を利用して顕著な前兆を捉えることに成功している(榎本・橋本, 1994)。さらに地電流(地中の電場)ではなく、地中の電界観測でも長波領域の観測が有効であることが科学技術庁・防災科学技術研究所などの研究で明らかとなっている(Fujinawa and Takahashi, 1990; 藤縄ほか, 1990)。

今後は“観測された異常はノイズである”という批判に対し、観測網の充実をもって答えることが肝要である。図10と11に理想的な観測の例を提案し、本報告のまとめとする。

引用文献

Drakopoulos, J., G. N. Stavrakakis and J. Lattoussakis, 1993, Evaluation and interpretation of thirteen official VAN-telegrams for the period September 10, 1986 to April 28, 1988, *Tectonophysics*, 224, 223-236.

榎本裕嗣・橋本 寛, 1994, 地震前兆電磁気異常と直前予知の可能性, 地震予知研究シンポジウム, 17-22.

Fujinawa, Y. and K. Takahashi, 0000, Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989, *Nature*, 347, 376-378.

藤縄幸雄・高橋耕三・熊谷貞治, 1990, 地震直前先行現象としての極低周波地中電界変動, *地震*, 43, 287-290.

福富孝治, 1934, 昭和9年3月21日南伊豆強震調査報告, *地震研究所彙報*, 12, 527-538.

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.

Hamada, K., 1993, Statistical evaluation of the SES predictions issued

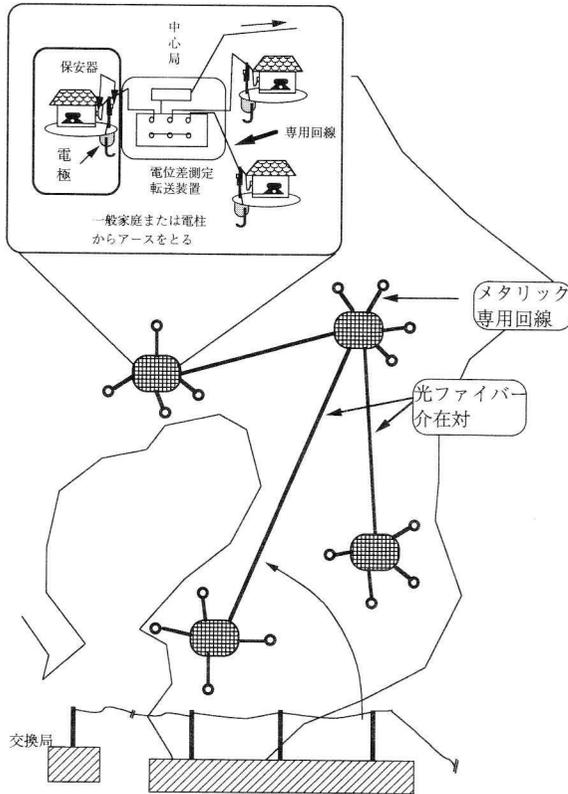


図 11 NTT 通信回線を併用した理想的観測計画概念図

実際の日本では野球場程度のスペースのいる短基線観測を行なうのは土地探しから始めなければならない、大変な労力を必要とする。そこで、筆者は本図に示したような観測を提案する。まず、長基線観測であるが、NTT 側の問題として交換局間のメタリックケーブルは急速に光ファイバーに置き換えられており、現在金沢大学で行なっているような長基線観測は原理的に不可能となる。金沢大学ではすでに光ファイバーに 1 組だけ内蔵されている（本来は切断監視用の）金属介在対を地電流観測に使用させて頂いている。一つの交換局管内では、既存のシステム（つまりメタリック回線）がまだしばらく主流であるので、専用回線を契約し（いわゆる短基線）、地電流観測を行なう。このような組み合わせで地電流を面的にモニターすることが“真の”異常発見のためには必要である。

in Greece: alarm and success rates, *Tectonophysics*, 224, 203-210.

Ishido, T. and H. Mizutani, 1981, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *Jour. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775.

石戸経士, 1995, 沸騰に伴う界面動電現象——地震の電磁気的前兆現象のメカニズム, *Conductivity Anomaly 研究会 1995 年論文集* (1995), 印刷中.

石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣, 1984, 地球潮汐データ解析プログラム BAY-TAP の紹介, *統計数理研究所彙報*, 32, 71-85.

Kawase, T., Uyeda, S., Uyeshima, M. and Kinoshita, M., 1993, Possible correlation between geoelectric potential change in Izu-Oshima Island and the earthquake swarm off the east Izu Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, 224, 83-94.

木下正高・上田誠也, 1986, 再びギリシャの地震予知について, *科学*, 56, 770-775.

Kinoshita, M., M. Uyeshima, and S. Uyeda, 1989, Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring, Progress report No. 1: Installation of monitoring network, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 64, 255-311.

小山 茂・本蔵義守, 1978, 中伊豆における自然電位観測 (1), *地震研究所彙報*, 53, 939-942.

森 俊雄, 1982, 東海沖の海底地電位差変化について, *地震*, 35, 213-221.

Mori, T., 1987, Variations in the geoelectric field with relation to crustal conditions of the earth, *Geophysical Magazine*, 42, 41-104.

森 俊雄, 1989, NTT 施設を利用した地電位観測, *地磁気観測所技術報告*, 28, 1-77.

森 俊雄, 1990, 地電位差異異常変化の検出方法, *Conductivity Anomaly 研究会 1990 年論文集*, 61-68.

Milne, J., 1890, Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena, *Trans. Seismol. Soc. Japan*, 15, 135-162.

宮腰潤一郎, 1985, 断層破砕帯における自然電位の時間的变化, *月刊地球*, 7, 39-42.

Mizutani, H. and T. Ishido, 1976, A new interpretation of magnetic field variation associated with the Matsushiro earthquakes, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 179-188.

Mulargia, F. and P. Gasperini, 1992, Evaluating the statistical validity beyond chance of VAN earthquake precursors, *Geophys. J. Inter.*, 111, 32-44.

- Murakami, H., 1989, Geomagnetic fields produced by electrokinetic sources, *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 221-247.
- 長尾年恭, 1995, ギリシャの地震予知その後, *岩波科学*, p 65, 282-284.
- 長尾年恭・上田誠也, 1995, 電磁気で地震の規模を予知——ギリシャの地震予知, *科学朝日(増刊)*, 24-25.
- 永田 武, 1944, 鹿野断層付近に於ける地電位差変化, *地震研究所彙報*, 22, 72-82.
- 中村一明, 1986, 日本海東縁新生海溝の可能性, *地震研究所彙報*, 58, 711-722.
- Ozima, M., T. Mori and H. Takayama, 1989, Observation of earth-potential using telegraphic facilities and analysis with BAYTAP-G, *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 945-962.
- 小嶋美都子, 1991, 伊豆大島で観測される地電位差異変動の原因についての一考察, *地震*, 44, 177-184.
- 小嶋美都子, 1992a, 地震予知——地電流による可能性, *地震ジャーナル*, 14, 20-28.
- 小嶋美都子, 1992b, 水戸・沼津における長基線地電位観測とBAYTAP-Gによる解析, *月刊地球*, 14, 9, 529-534.
- Rikitake, T., Y. Yamazaki, Y. Hagiwara, K. Kawada, M. Sawada, Y. Sasai, T. Watanabe, K. Momose, T. Yoshino, K. Otani, K. Ozawa and Y. Sanzai, 1966, Geomagnetic and Geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm (1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44, 363-408.
- Rikitake, T., 1987, Magnetic and electric signals precursory to earthquakes: An analysis of Japanese data, *J. Geomag. Geoelectr.*, 39, 47-61.
- Shiratori, K., 1925, Notes on the destructive earthquake in Sagami Bay on the first of September, 1923, *Jpn. J. Astr. Geophys.*, 2, 173-192.
- 住友則彦, 1985, 電磁気諸観測, *月刊地球*, 7, 32-37.
- 高山寛美・森 俊雄, 1987, 地磁気変化による誘導電位変化除去の試み, *気象研究所研究報告*, 38, 17-28.
- Takayama, H., 1993, Comment on "Evaluating the statistical validity beyond chance of VAN earthquake precursors" by Mulargia, F. and Gasperini, P., *Geophys. J. Inter.* 115, 1197-1198.
- 歌田久司, 1987, 東京大学博士論文.
- 歌田久司, 1990, ギリシャの地震予知の物理, *Conductivity Anomaly 研究会 1990年論文集*, 85-94.
- Utada, H., 1993, On the physical background of the VAN earthquake prediction method, *Tectonophysics*, 224, 153-160.
- 上田誠也, 1985, ギリシャの地震予知, *科学*, 55, 180-184.
- 上田誠也, 1991, 地震予知に成功した国——ギリシャ, *地震*, 44, 391-405.
- 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.
- Uyeshima, M., M. Kinoshita, H. Iino, and S. Uyeda, 1989, Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring, *Progress report No. 2: Preliminary study on Teshikaga channel 2 signals and the seismicity in the region off Kushiro*, *Bull. Earthq. Res. inst.*, 64, 487-515.
- Varotsos, P. and K. Alexopoulos, 1984, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 110, 73-98.
- Varotsos, P. and M. Lazaridou, 1991, Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, *Tectonophysics*, 188, 321-347.
- Varotsos, P., K. Alexopoulos, and M. Lazaridou, 1993, Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II, *Tectonophysics*, 224, 1-37.
- バロトウソス, P., 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, 1994, VAN地震予知法, *地震ジャーナル*, 17, 18-26.
- 柳原一夫, 横内恒雄, 1967, 地震に伴う地電流の異常, *地磁気観測所技術報告*, 7, 53-58.
- 吉松隆三郎, 1937, 昭和11年2月27日伊豆新島強震及び同年10月26日安房野島崎沖地震と地電流の変化に就いて, *気象集誌*, 15, 158-160.
- 吉松隆三郎, 1938, 昭和13年1月12日紀伊水道強震と地電位差の異常, *気象集誌*, 16, 295-297.
- 吉松隆三郎, 1943, 昭和18年9月10日鳥取地震と地電位差の変化, *地磁気観測所要報*, 5, 66-67.
- 吉松隆三郎, 1984, 昭和19年12月7日東南海地震と柿岡の地電位差の異常変化, *地磁気観測所要報*, 21, 61-64.

富士山の低周波地震

鵜川元雄

はじめに

富士山は日本で最大の成層火山で、しかも江戸時代には宝永大噴火（1707年）によって静岡県東部から神奈川県西部に甚大な被害を及ぼしたことは良く知られている。しかし、現在は表面的な火山活動が認められないことから、とすれば火山活動を「休止」していると考えられがちである。ところが、1980年代に整備された微小地震観測網による観測結果によると、富士山の直下には「低周波地震」と呼ばれる火山に特有の地震活動が発生していて、地下のマグマ活動は決して静穏ではないことがわかってきた。ここでは「低周波地震」を鍵として、富士山の地下の活動についての最近の研究成果を紹介したい。

世界中で発生しているほとんどの地震は断層運動により、すなわち、断層を挟んで相対する岩盤が相互にずれるために引き起こされている。このような断層運動で発生する地震は、断層上を破壊が広がる速度や、岩盤が相互にずれる速度がほぼ一定であるために、地震の規模に応じた周波数成分や継続時間の地震波が震源から放射される。すなわち、規模に応じた標準的な地震波形が観測されることになる。ここではこのような地震を「普通の地震」と呼ぶことにする。

一方、これから紹介する「低周波地震」は、観測される地震波から一見して普通の地震と区別できるものである。そして、しばしば火山地域で観測されるので、火山活動、特に地下のマグマの運動と関係があると考えられている。低周波地震は富士山の地下の火山活動を知るための重要な情報源なのである。

富士山の低周波地震活動

(1) 低周波地震の特徴 富士山は防災科学技術研究所が地震予知研究を目的として関東・東海地方に展開している地震観測網のほぼ中心に位置している。山頂周辺には観測点が無いものの、図1に示すように山頂から30 km以内には約10カ所の観測点が富士山を取り囲むように稼働している。富士山の深部活動を調べるには好都合の配置をしている。この観測網は1970年代後半から1980年代前半にかけて整備されてきたが、観測データが蓄積するに従い、富士山の直下で普通の地震に比べて低周波の地震波が目立つ地震の発生していることがわかってきた。ここではこの地震を「低周波地震」と呼ぶことにする。

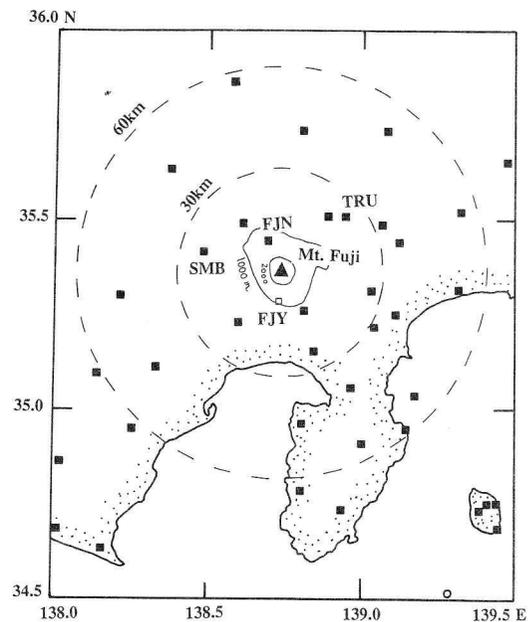


図1 富士山周辺の防災科学技術研究所の観測点配置
FJY は建設中の観測点。

富士山で観測された低周波地震の観測波形の例を普通の地震と比較して図2に示す。どちらの地震も観測された地震波の振幅の大きさは同程度で、これからマグニチュード (M) を計算すると M 2~2.5 で、微小地震に分類される規模である。ところが図2で明らかなように、富士山で観測される特異な地震の波形と普通の地震の波形は全く異なる。最大の相違点は振動の周期である。普通の地震が振動数 10~20 Hz の波動であるのに対し、低周波地震の地震波の周波数は 1~3 Hz であって、標準的な微小地震の振動数よりはるかに低周波である。

低周波地震の特徴は、その地震波の振動数だけではない。図2の例からもわかるように振動の継続時間が長い。通常、M 2~3 の微小地震の継続時間は 30 秒~1 分程度である。これに対し低周波地震では数分から十数分振動が続くことが多い。そして波形をよく見ると、この振動の期間中に連続的に低周波地震が発生していることがわかる。図2に示した低周波地震の例でも数分間に 10 回くらい振幅が大きくなる場所があり、それぞれが個々の地震に対応している。このように 1 回の低周波地震の活動は、続発する複数の低周波地震の集合により形成されている。

富士山で発生する低周波地震の基本的な特徴をまとめると、観測される地震波が微小地震としては異常に低周波であること、そして続発的に発生し、その結果振動の継続時間が長くなることである。

(2) 活動度 富士山の低周波地震の発生頻度を図3に示す。この図は山頂から約 25 km 離れたところにある都留 [TRU] 観測点 (1981 年 8 月までは下部 [SMB] 観測点のデータを使用) で検知された低周波地震活動を示したものである。ここでは連続的に発生する低周波地震群を 1 回の活動として、その最大振幅と振動の継続時間をそれぞれひし形の幅と高さで示している。最大振幅から推定されるマグニチュードは最大のもでも M 2.5 程度で、ほとんどのものは M 1 から M 2 の範囲の微小地震である。振動継続時間は 5~10 分程度のものが多い。なかには振幅は小さいが 30 分近く断続的に振動が記録された活動もある。

図示した期間の 1979 年 7 月から 1991 年 12 月に 160 回の低周波地震活動が検知されている。平均すると 1 年間に 13 回の活動が発生していることになるが、図3を見てわかるように頻発期と静穏期に分かれる傾向がある。例えば、1987 年や 1989 年は多数の低周波地震活動が発生した頻発期であったが、1984 年から 1986 年や 1990 年は静穏期である。

(3) 震源位置 富士山の低周波地震は、観測される範囲が富士山周辺に限られることから、富士山直下で発生していることは明かである。続発する低周波地震の個々の地震についてその P 波と S 波の到着時刻から震源を推定した。1986 年から 1992 年に発生した 35 個の低周波地震の震源を決めることができ、その結果を図4に示す。震源は山頂付近から山頂の北東方向にかけての狭い領域

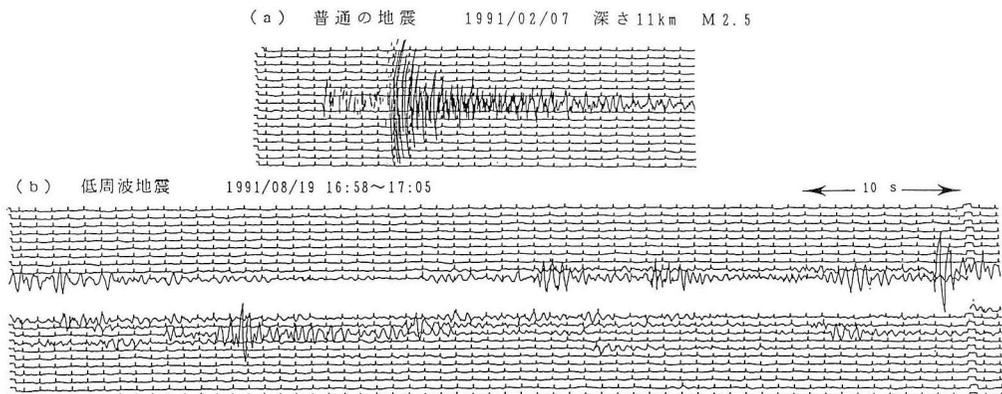


図2 普通の地震と低周波地震の波形の比較
TRU (図1) の上下動地震計で観測された地震波。

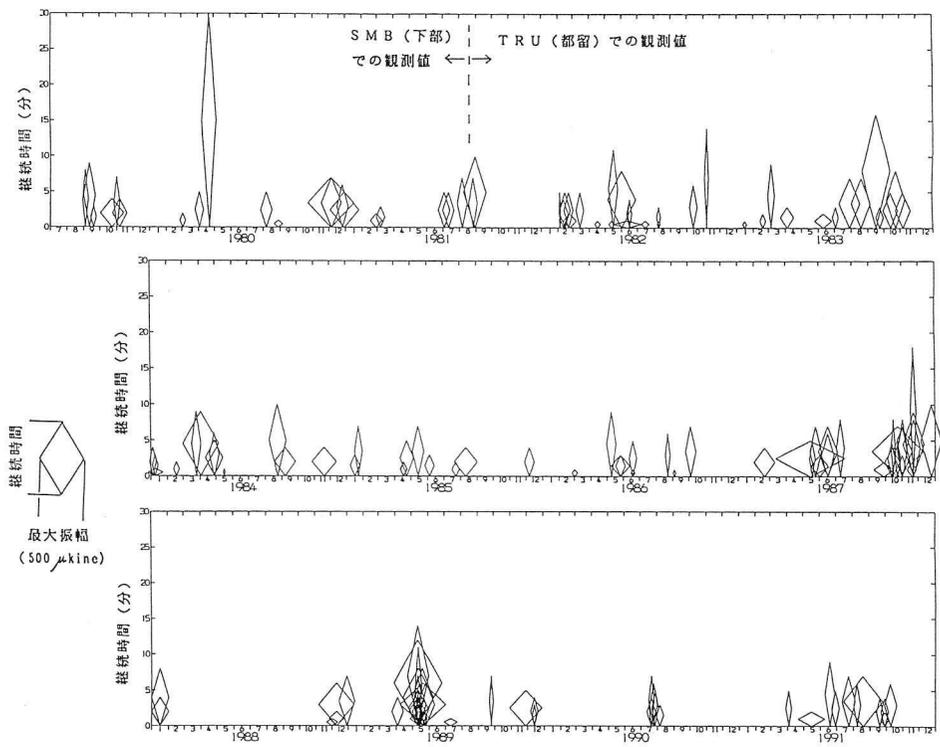


図3 低周波地震の活動度
ひし形の高さは振動の継続時間、
幅は振動の最大振幅を示す。

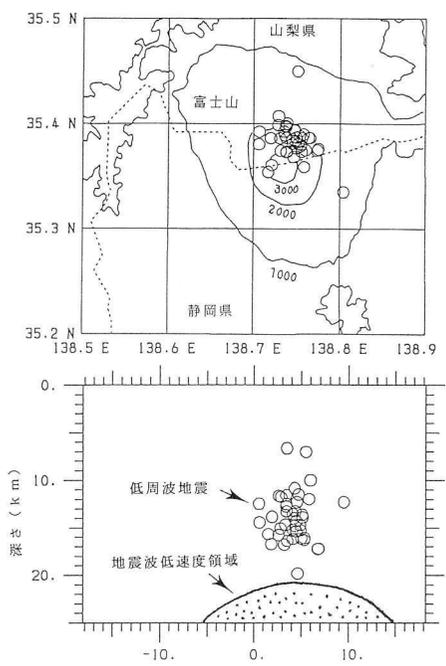


図4 低周波地震の震源分布と地震波低速度域

に集中し、その深さは10~20 kmである。

低周波地震は連続的に発生するため初動の検測が難しく、震源の精度は普通の地震ほど良くない。図4に示した震源の精度は、水平方向と深さ方向ともに概ね0.5~2 kmであるが、深さについては4 km程度の誤差を持つ地震も含まれている。この不確かさを考慮にいれても、低周波地震が富士山直下のやや深い場所である地殻中部で発生していることは間違いない。

ここで我々が知りたいのは、富士山の低周波地震の発生メカニズムであるが、その前に他の火山で観測されている低周波地震を概括する。

火山地域の低周波地震

(1) 色々な火山での低周波地震 低周波地震は一般的には希な現象であるが、活動的な火山地域では低周波地震がしばしば観測される。特に噴火した際には、ほとんどの場合に低周波地震が観測される。低周波地震が連続的に発生すると、火山性連続微動と呼ばれる地震現象になることもあり、

時には1時間以上にわたって振動が継続する。低周波地震の震源は、火口周辺の深さ5 km以浅の極めて浅部で発生している場合が多いが、希には深さ30 kmより深い地殻深部からマントル最上部で発生した低周波地震が観測されることもある。この節では、いくつかの代表的な火山地域での低周波地震活動を紹介します。

(a) キラウエア火山(米国ハワイ)——ハワイ島のキラウエア火山は活発な噴火活動を続けている火山である。キラウエア・カルデラ直下を中心にして、マグマの貫入に伴い普通の地震が多数発生し、この普通の地震の震源の広がりから地下に貫入したマグマの位置や形状が推定されている。Koyanagi et al. (1987)によれば、キラウエアでは低周波地震も多数観測されている。それらは大きく3種類に分けられる。1つは山頂火口付近の深さ5 km以浅に発生する地震で、低周波地震の発生と山頂付近の地盤の収縮とに相関が見られ、浅部のマグマ活動によって発生していると考えられている。第2のものは深さ5~15 kmに発生するもので、山頂付近の地盤の膨張と相関をもって発生している。第3のものは深さ30~60 kmに発生する火山性微動で、ほぼ一定の発生率で起こっている。時間的に浅部での低周波地震活動が深部へ伝播していくので、低周波地震はマグマの輸送過程を直接反映していると考えられている。

(b) セントヘレンズ火山(米国ワシントン州)——1980年に大噴火したセントヘレンズ火山では、噴火に伴い普通の高周波が卓越する地震だけでなく、多数の低周波地震や火山性微動が観測された。Malone (1983)によれば、低周波型、中間型、高周波型地震および火山性微動が発生していて、低周波型と中間型は山頂のドーム周辺の3 km以浅で発生、高周波型はやや深い3~5 kmで発生している。火山性微動は低周波地震が連続的に発生した結果であると考えられている。低周波地震の原因としてMalone (1983)は波動の伝わる経路の影響が大きいことを指摘したが、Fehler (1983)は地震波のスペクトルに特定のピークが見られることから

原因は震源そのものであると考えた。

(c) 浅間山——浅間山では観測所が1911年に設立され以来、今日まで長期間の観測が続けられている。浅間山の地震活動は主にA型・B型・N型の3種類に分けられる(例えば、下鶴, 1985)。A型地震は火山のやや深部で発生し、高周波に富み、P波とS波が明瞭な地震で、これに対しB型地震は火口のごく近傍で発生し、やや低周波でS波が不明瞭な地震である。またN型地震は単一振動数の振動が最初に大きくなり徐々に減衰し、時には数分間も継続するという特異な地震で、周波数の範囲から低周波地震に分類することもできる。A型地震は噴火に関係なく発生し、B型地震は噴火の直前に増加し、N型地震は火山活動の活発な時期に多い(下鶴, 1985)。

このような活動は桜島などにも見られる。B型地震やN型地震のような低周波地震は、火口周辺で発生しているようである。

(d) 伊豆大島——1986年の噴火に際しては地震活動が活発化し、低周波地震や火山性微動も多数観測された。特に振動の卓越周期が3~5秒の低周波地震が噴火後約3カ月間に約50個観測されたが、震源が決められていない(静野ほか, 1987)。また卓越周波数が0.7 Hzの火山性微動が観測され、その震源は火口直下約350 mにあり、等方的な振動により地震波が発生したことがわかっている(Yamaoka et al., 1991)。噴火の約1年前には伊豆大島直下、深さ30 kmで周波数1 Hzの単一振動が卓越する地震(単色地震)が発生し、火山深部でのマグマの移動により引き起こされたと説明されている(Ukawa and Ohtake, 1987)。

(e) 火山前線下のモホ面付近——日本列島のような沈み込み帯では火山が帯状に配列し、火山前線と呼ばれている。この火山前線の下、深さ30~50 kmに低周波地震の発生していることが1980年代にわかってきた(例えば、長谷川ほか, 1991; 鶴川・小原, 1993)。この深さは地殻とマントルの境界であるモホ面付近かその直下に相当する。岩木山や榛名山などの特定の火

山の直下で発生するケースが多いが、活動度は低い。前述の伊豆大島で発生した深さ 30 km の単色地震はこの型の地震である。噴火や地表に現れる火山活動との関連のはっきりしている場合は少ないが、なかには噴火活動との関連を示唆する地震もある。1985 年の伊豆大島直下の単色地震は噴火の約 1 年前に発生し (Ukawa and Ohtake, 1987), 1988 年の十勝岳噴火では噴火直後に低周波地震が発生した (鈴木, 1992)。また 1991 年のピナツポ火山 (フィリピン) の噴火では大噴火の 10~20 日前に低周波地震が発生した。地震の発生機構はまだ解明されていないが、火山との位置関係と噴火と時間的相関のある場合も見られることから、火山深部のマグマ活動が原因と考えられている。

(2) 低周波地震の発生メカニズム 低周波地震は地震波の周波数が普通の地震に比べて低周波であるという共通点で「低周波地震」と総称されるが、その発生原因については多種多様と考えられている。低周波の地震波の観測される原因は、震源自身で低周波の波動が放射されているか、あるいは波動の伝わる経路に高周波成分の減衰が大きい媒質が存在するかの 2 つに大きく分けられる。

前者の場合は、震源そのものが普通の地震と違う場合であり、後者では震源は普通の地震でもかまわない。火山で発生する低周波地震は、多くの場合、震源自体が普通の断層と異なり低周波波動を大きく放射することにより発生していると考えられる。しかし、火山を形成している岩盤やマグマは波動の減衰が大きいので地震波の伝播経路の影響も無視できない。

低周波の地震波を放射する震源の確立したモデルはまだない。低周波の卓越する地震を発生させる可能性のある候補モデルは幾つもあり、また実際にも異なる型の震源により低周波地震が発生しているらしい。滑り速度の遅い特異な断層の可能性もあるが、マグマと関連した断層以外のモデルも多く提唱されている。代表的なものとしては、マグマ溜まりなどの流体の共振、マグマや火山ガスなどが火道中を流れる際に励起する振動、マグマが移動する際の岩盤の割れ目の開閉運動などである。

震源のモデル化のためには、モデルから期待される地震波のスペクトルや継続時間を計算し、観測値と比較し、モデルを修正する方法が多く用いられている。最近では、地震波形から直接震源に働いた力 (あるいは力の対) を計算し、その結果から震源の実体を推定することも行なわれ始めた。例えば、桜島の B 型地震では波形の解析から火道中での鉛直方向の膨張運動が原因であるという結果が得られている (Iguchi, 1994)。今後、波形解析技術の進歩と火山周辺での広帯域・広ダイナミックレンジの地震観測の普及により、震源過程の解析の進展が期待される。

富士山の低周波地震の発生メカニズム

(1) 地下構造との関連 富士山の低周波地震は深さ 10~20 km で発生している。国内の火山の低周波地震は、前述のようにモホ面付近に発生する地震を除いて、ほとんど火口付近の極浅部である。世界的に見ても地殻中部の低周波地震が定常的に観測されることが報告されている火山は、活動の活発なハワイのキラウエア火山のみである。火山下の地殻中部に低周波地震が定常的に発生するのは、極めて希と言える。

低周波地震の発生原因は、地下のマグマ供給システムと関連していることが考えられる。富士山の地下構造については、最近開発されたトモグラフィ技術により、高分解能のイメージが得られるようになった (Lees and Ukawa, 1992)。それによると富士山直下、深さ 20km 付近から深部に、地震波速度が小さい領域 (地震波低速度領域) が検出された。この地震波低速度領域は特に S 波に顕著である。この領域のおおよその位置を図 4 の低周波地震の震源分布に重ねて示す。

火山地域の地下深部で地震波速度が小さくなる可能性の一つに、マグマ溜まりなど溶融した物質の存在がある。特に物質の溶融は S 波に大きく影響するので、S 波に顕著な富士山直下の地震波低速度領域も、マグマ溜まりの存在を示している可能性がある。図 4 からわかるように、低周波地震はこの地震波低速度領域の直上で発生している。

この両者の位置関係から、低周波地震がマグマ溜まりからのマグマの上昇などにより発生していることは十分考えられる。

それでは低周波地震の地震波形からマグマの運動との関連を支持する証拠は得られているのであろうか、以下に低周波地震の地震波形から考えられる震源モデルについて説明する。

(2) 震源か経路か まず低周波の波動が観測される原因が、震源そのものにあるのか、それとも波動の伝播経路にあるのかを考える。富士山の低周波地震は震源で低周波の地震波が大きく放射されたと考える理由が3つある。

富士山では普通の地震も発生していて、その深さは低周波地震とほぼ同じ10~15 kmである。図2に示した普通の地震はこの例である。この普通の地震から周辺の観測点への地震波の経路は低周波地震の場合とほぼ等しい。しかし、普通の地震の波形が富士山の周辺の観測点で低周波になることはなく、地震波の経路には低周波になる原因はないと考えられる。これが第1の理由である。

第2の理由は、低周波地震には、そのP波の初動付近に10~20 Hz ぐらいの高周波が重なることがある。このことも、低周波地震の震源から観測点までの経路上には高周波を吸収する領域は存在しないことを示しており、震源そのものが低周波を放射したと考えなければならない。

第3の理由は、富士山の低周波地震では後述するようにS波が明瞭に観測される。そして、P波もS波も低周波が卓越するが、その周波数はP波もS波もほぼ同じ場合が多い。もし地震波の経路での波動の吸収が原因であったならば、S波のほうがP波より低周波になるはずなので、震源そのものが低周波であったと推論できる。

上記の3つの理由により、地震波の経路ではなく、震源そのものが特異であると考えなければならない。

(3) 可能性のある発生メカニズム 富士山の低周波地震がどのような原因で発生しているのかについては、実はまだその答は得られていない。ここでは考えられる発生メカニズムを紹介する。

富士山の低周波地震の発生メカニズムを考える

際に重要な特徴の1つにS波が明瞭なことがある。S波とP波の振幅の比は平均でほぼ4である。この大きなS波の励起は、S波よりP波を効率よく放射する震源では不都合なことを示している。例えば、等方的なマグマ溜まりの振動ではS波は励起されない。また岩脈の貫入などによる岩盤中の割れ目の開口運動で放射されるS波の理論振幅も平均でP波の2倍程度で、これも観測値を説明できない。

S波が効率よく放射される震源モデルで最も一般的なのは普通の断層モデルで、S波とP波の理論振幅比は平均で約6である。富士山の低周波地震の観測値は約4であるので、これより小さいがS波がP波より減衰しやすいこと、あるいは岩盤の開口などのS波を放出しにくい震源運動との複合型であることも考えられるので、震源での断層運動は重要な寄与をしている可能性がある。この場合、観測されるような低周波の地震波を放出するには、断層上を破壊が広がる速度を遅くするか、あるいは断層の食い違い運動の速度を遅くすれば可能である。

効率よくS波を放出する震源モデルのひとつに震源に1方向の力(シングル・フォースと呼ばれている)が働く場合がある。このときS波とP波の理論振幅比は平均で約4で、観測値にほぼ等しい。1985年8月に伊豆大島直下、深さ30 kmに発生した単色地震に対しては、観測された波形の特徴からマグマの動きによりシングル・フォースが震源に働いたというモデルがUkawa and Ohtake (1987)により提唱された。富士山の低周波地震にもこのような震源モデルが適用できるかどうかは、地震の規模が小さいために個々の地震の観測データが少なく、現状では判定が難しい。今後、地震波形から可能性のあるモデルを選択していかなければならない。

富士山のマグマ供給システム

富士山の低周波地震の解析結果とトモグラフィによる地下構造探査結果から、富士山直下の深さ20 km 付近から下にマグマ溜まりがあり、マグ

マ溜まりの直上でマグマの上昇によって低周波地震が発生している可能性のあることを示した。ではこれまでに噴出した溶岩などを基にした岩石学的、地質学的な研究からはマグマ供給システムについてどのような像が得られているのであろうか。

地質学的には富士山は中期更新世に活動した小御岳火山、8~1万年前に活動した古富士火山、1万年前から現在まで活動している新富士火山から形成されている（例えば、宮地、1988）。テフラから推定される大噴火は過去7~8万年間は100年から500年の間隔で発生し（町田、1977）、噴出物の総量と噴出率ともに日本の活火山の中では大きい（富樫ほか、1991）。富士山全体の平均噴出率は $5 \text{ km}^3/\text{千年}$ （Tsukui et al., 1986）であるが、新富士火山初期にはその倍以上の噴出率で 40 km^3 の大量のマグマが約3000年間に噴出している（宮地、1988）。富樫ほか（1991）は、 40 km^3 のマグマを短期間に噴出させるには、直径数kmのマグマ溜まりが必要としている。

岩石学的な見地から高橋ほか（1991）は、噴出物の化学組成の時間的な変化、特にインコンパチブル元素の変化から、マグマはダイナミックに変化する上部マントルの部分溶融層から供給され、さらに地殻中のマグマ溜まりで分化したと推定した。地殻中のマグマ溜まりが火口直下に1つあるのか、側火口に沿って複数存在するかについては、結論は出ていないが、岩石学的に見ても地殻中にマグマ溜まりの存在する必要がある。

これらから富士山直下の地殻中には直径数kmのマグマ溜まりが存在し、さらにその下の上部マントル中に部分溶融層が広がり、低周波地震は地殻中のマグマ溜まりからのマグマの上昇運動で発生しているという図5に示すような作業仮説が立てられる。

火山直下の地殻中部で低周波地震が定常的に発生しているのは、活動的な火山であるハワイのキラウエア火山のみで、この場合はマグマの移動と関連して発生している。富士山においても、地下深部のマグマ活動により低周波地震が発生している可能性は高く、地震学的に早急に検証しなければならない。

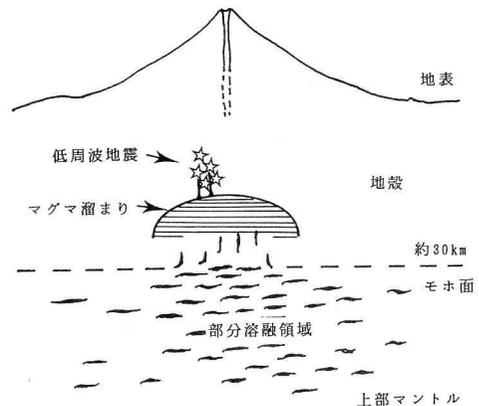


図5 作業仮説としての富士山直下の低周波地震とマグマ供給システムとの関係

富士山の低周波地震と噴火予知研究

テフラをはじめとした地質学的な研究から、富士山の大噴火は100年~500年の間隔で発生していることがわかっている。そして、富士山の最後の噴火である宝永噴火から既に290年近くが経過し、噴火のエネルギーの蓄積はかなり進んでいると考えるのが妥当である。このように富士山は地質学的に見れば噴火の可能性の高い火山であるが、低周波地震活動は噴火予知にとってどのような意味があるのであろうか。

富士山での微小地震観測期間はたかだか15年程度で、噴火の間隔に比べると非常に短い。この期間中、低周波地震は頻発期と静穏期を繰り返しながら、基本的には定常的に発生しているので、低周波地震は噴火の短期的な前兆現象ではなく、地下深部での定常的なマグマの活動によるものと考えたほうがよい。すなわち、富士山の表面での火山活動は休止しているが、地下ではマグマの活動が進行していることを示している。

防災科学技術研究所では、富士山の地下深部のマグマ活動を捉えるため、地盤の傾斜変動と地震活動を高精度で測定することができる観測網の整備を1990年より始めている。1993年には富士山北麓の山頂から約10kmの地点に第1観測施設（図1のFJN）が完成し、深さ200mの観測井に設置されたボアホール式の傾斜計・地震計によ

る観測データをテレメータにより「つくば」へ伝送している。現在、第2観測施設(図1のFJY)の整備を進めているところで、このような観測施設が富士山周辺に数カ所完成すれば、ノイズと信号の区別が容易になり、地下のマグマの動きを即時的に認識することができるようになる。

既に示したように低周波地震の震源やトモグラフィの結果から、マグマ溜まりがあるとすれば深さ20 km付近にその最上部がありそうであり、マグマはこの深さから上昇を始めると考えるのが自然である。地下深部のマグマ溜まり中の状態を検知して噴火の時期を予測をすることは、マグマ溜まりの検出そのものが困難な現在、極めて難しい。しかしマグマが動き出せば、それを検知することは現在の観測機器で可能である。観測網を整備し、安定したデータを得るまでには時間がかかるので、火山活動の静穏なこの時期に地下深部での活動を検知できる精度をもった地震・地殻変動の観測網整備を進めなければならない。

終わりに

富士山で発生している低周波地震は、地下のマグマ活動を示す数少ない信号であるが、活動度が低く震源で進行しているプロセスを解明することは容易ではない。今後、外国の火山も含めて深部低周波地震活動の観測される火山を対象に研究を進め、その発生機構を解明していきたい。

文 献

Fehler, M., 1983, Observation of volcanictremor at Mount St. Helens Volcano, *J. Geophys. Res.*, 88, 3476-3488.
長谷川 昭・趙 大鵬・山本 明・堀内茂木, 1991, 地震波からみた東北日本の火山の深部構造と内陸地震の発生機構, *火山*, 36, 197-210.
Iguchi, M., 1994, A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andestic volcano: Sakurajima, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 39, 49-67.
Koyanagi, R. Y., Chouet, B. and Aki, K., 1987,

Origin of volcanic tremor in Hawaii, U. S. Geological Survey Prof. Paper, 1350, 1221-1257.

Lees, J. M. and Ukawa, M., 1992, The south Fossa Magna, Japan, revealed by high-resolution P- and S-wave travel time tomography, *Tectonophysics*, 208, 377-396.

町田 洋, 1977, 火山灰は語る, 蒼樹書房, 342p.

Malone, S. D., 1983, Volcanic earthquakes: Examples from Mount St. Helens. In *Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation* (Kanamori, H. ed.), 436-455. Course LXXXV, Italian Phys.Soc., North-Holland-Pub. Co., Amsterdam.

宮地直道, 1988, 新富士火山の活動史, *地質雑*, 94, 433-452.

静野政明・山里 平・福井敬一・中禮正明, 1987, 伊豆大島噴火活動の推移と火山性微動について, *月刊地球*, 97, 419-423.

下鶴大輔, 1985, 火山活動を捉える, 東大出版会, 146p.

鈴木貞臣, 1992, 十勝岳直下のモホ面付近に発生した低周波微小地震——震源とスペクトル, *火山*, 37, 9-20.

高橋正樹・長谷川有希絵・津久井雅志・根本靖彦, 1991, 富士火山におけるマグマ供給系の進化: 全岩化学組成の視点から, *火山*, 36, 281-296.

富樫茂子・宮地直道・山崎雄雄, 1991, 新富士火山初期の大きなソレライトマグマだまり, *火山*, 36, 269-280.

Tsukui, M., Sakuyama, M., Koyaguchi, T., and Ozawa, K., 1986, Long-term eruption rates and dimensions of magma reservoirs beneath Quaternary polygenetic volcanoes in Japan, *J. Volcanol., Geotherm., Res.*, 29, 189-202.

Ukawa, M. and Ohtake, M., 1987, A monochromatic earthquakes suggesting deep-seated magmatic activity beneath Izu-Ooshima Volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 92, 12649-12663.

鶴川元雄・小原一成, 1993, 関東地方の火山フロント下のモホ面付近に発生する低周波地震, *火山*, 38, 187-197.

Yamaoka, K., Oikawa, J. and Ida, Y., 1991, An isotropic source of volcanic tremor observation with a dense net-work at Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47, 329-336.

[うかわ もとお 防災科学技術研究所地震予知研究センター主任研究官]

中国の地震予知

その新方法に学ぶ

丸山卓男

はじめに

中国は1975年以来、遼寧省海城地震(M 7.3; 1975. 02. 04)、雲南省竜陵地震(M 7. 4; 1976. 05. 29)など、いくつかのM 7級の地震の予知に成功し、当時来日した中国の地震学代表团はそれについて講演をしたし、日本から中国へもいくたびも調査団が派遣された。講演を聞いたり、調査団の報告書を読むと、中国では大きな地震の前には、疑うことのできない前兆が捕えられている。日本では前兆が現れるにしても、そういつも明瞭とはいえない。中国と日本は地下の構造が違うのか、それとも日本は自然に手を加えず、本来の自然は身近にはなくなってしまったためか、ともかく中国の経験は日本には当てはまらないのか——これが地震学に関わる多くの人びとの率直な感想であった。その後、中国の地震予知に対する日本の関心は、あまり高くない。

しかし最近中国は、データを解析して地震の切迫度を見積る新しい方法を開発しており、これは人為的な雑音の多い日本でも十分応用できるものである。

この方法は、中国国家地震局の『地震予知理論と方法主要課題研究』第8次5箇年計画の重点課題として取り上げられ、中国の自然科学基金その他の援助を受けている。地震局の5箇年計画推進の責任者は、これによって、山西省大同(M 5.8; 1993. 03. 26)の地震など、国内の4個の地震に対して中短期の予報を出して好成績を収めたばかりでなく、カリフォルニアのノースリッジ地震(M 6.7; 1994. 01. 17)に先立つこと約3箇月、1993年10月28日に、震央に近いSA-6区(長方形 $1^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)付近(図4参照)には1年以内

に中規模の地震が起きる危険性があると、正式に先方に知らせていたことを紹介している(李宜瑚, 1994)。それは、アメリカの地質調査局 ISOP (International Seismological Observing Period) より提供されたカリフォルニアの微小地震のデータ(1970年~1992年7月)を、この方法によって解析した結果であった。

まず、その基礎になっている考え、解析法と結果などを紹介し、そのあと従来の研究との関連について述べる。

どんな考えに基づいているのか

新しい方法を構想し発展させてきたのは、中国国家地震局地球物理研究所の尹祥礎教授(現在国家地震局分析予報中心に移動)で、この理論を、英文でLURR (Load-Unload Response Ratio) theory と名づけている。硬い訳語であるが、これを「増減負荷応答比理論」と呼ぶことにする。以下文献(Yin et al., 1991; 尹祥礎ほか, 1994など)に従って紹介してみよう。

地震が準備され発生に至る過程はきわめて複雑である。核形成・断裂・合併・摩擦・相互変位などの現象のつながりで、これらの現象は、微視的にも巨視的にも起こっていて、相互に関連し合い、さらに高温高压の環境と液体の作用が関係している。ひとことでいえば、この過程は強い非線形性をもったものである。

巨視的な連続体力学から見れば、地震の準備と発生の過程は震源の媒質の変形と破壊(安定性の喪失)にほかならない。岩石の高温高压下での状態を図1に示すことができる。この図で縦軸Pは広い意味の負荷、すなわちなんらかの力を示し、横軸RはPに対する応答(レスポンス)を示す。

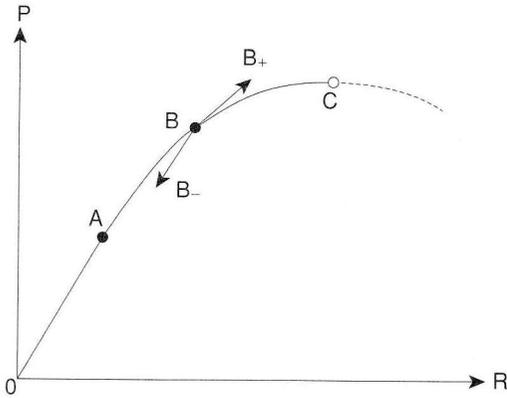


図1 岩石の高温高压下での負荷—応答関係

応答は変位や歪み、またはこれらと関係ある力学的または非力学的量でもよい。負荷 P を微小量だけ変化させるとして、この微小な変化分を ΔP と書き、対応する応答の変化分を ΔR と書くことにする。このとき応答比 X を、

$$X = \Delta R / \Delta P$$

と定義する。

よく知られているように、弾性限界内（図1のOA間）では、負荷を増加させても減少させても、そのときの状態は直線OAの上にあるので、負荷増加時（ $\Delta P > 0$ ）の応答比（これを $X+$ と表すことにする）と負荷減少時（ $\Delta P < 0$ ）の応答比（これを $X-$ と表すことにする）は等しい。しかし、媒質の受ける負荷が弾性限界を越えたとき、図1のAC間の例えばB点では、負荷を増加させると $BB+$ の方向に状態は変化するが、減少させると $BB-$ の方向に変化するから、 $X+ > X-$ となる。そこで、更に一步進めて増減負荷応答比（Load-Unload Response Ratio） Y を、

$$Y = X+ / X-$$

のように定義すると、弾性範囲内では $Y=1$ か、または $Y \approx 1$ であるが、A点を過ぎると $Y > 1$ となる。負荷が増大するにつれて Y 値も増大し、不安定状態のC点に近づくとき Y は非常に大きくなる。なぜなら、このとき $X-$ は有限な値であるが、 $X+$ は非常に大きくなるからである。こうして Y 値というパラメータを使えば、地震前の媒質の

安定の程度を定量的に表現することができる。

すなわち、もしある地域の Y 値を何らかの方法で測定することができれば、将来その地域に地震が発生する危険性の程度を予測するのに役立つ。

ここで2つの問題が生ずる。第1は、その地域にかかっている負荷 P をどのようにして増加させたり減少させたらよいか。第2は、応答 R としては実際にはどのような量を採用したらよいかということである。

1辺が数十kmから数百kmというような巨大な岩体に力を加えるということは人工的には不可能であるが、幸いにも大自然がそれを行なっている。すなわち、月と太陽の引力に由来する起潮力を考えると、これは間断なく周期的に負荷の増減を行なっている。では、どのようなときが負荷の増大に当たり、どのようなときが負荷の減少に当たるのか。

いま起ころうとしている地震がひとつの断層によって近似できるとしよう。そして、地球の固体部分の潮汐と海水の潮汐が、その断層面上に引き起こす力が計算できたとする。この力は断層面に平行な成分と断層面に垂直な成分に分解できる。この力の断層面の単位面積について、断層運動に平行な成分を τ 、断層面に垂直な成分を σ とすると断層を滑らせようとする有効な成分は、

$$\tau_0 = \tau + f \times \sigma \quad (*)$$

と表される。この式で f は摩擦係数に当たる。面に垂直に働く力が圧力（ $\sigma < 0$ ）であれば滑りは起きにくく、圧力が大きければ大きいほど起きにくく、このとき左辺の量は一層小さくなる。反対に面に垂直な力が張力（ $\sigma > 0$ ）であれば滑りは起き易く、張力が大きければ大きいほど起き易く、このとき左辺の量は一層大きくなる。こうして、確かに式(*)は断層を滑らせようとする成分を表すのに適当であることがわかる。したがって、 $\tau_0 > 0$ ならば負荷増大、 $\tau_0 < 0$ ならば負荷減少とする。このようにすれば第1の問題は解決される。

第2の問題は、どのような物理量を応答とするかということであった。これについては微小地震活動・地殻変動・傾斜変化・重力・体積歪・地下

水位、そのほか関連ある地磁気のデータなどがある。微小地震活動以外のものについても、興味ある結果が出ているというが（尹祥礎ほか、1994）、すでに注目すべき成果が上がっているのが微小地震活動である。

レスポンスとしての微小地震活動

尹祥礎は、来るべき地震の震源付近の情報を担っているデータとして、問題にする地域に発生し、問題にするマグニチュードMより小さいマグニチュードをもつ地震の集まりに注目した。この種のデータは入手が容易であるという利点がある。そして応答Rとしては、この微小地震のエネルギーのm乗の和をとった。指数mとしては1/2, 1/3, 2/3などが適当であるという。室内実験で岩石に力を加えるときに発生する局所的な微小破壊AEの場合の処理を参考にしている。

その方法を具体的に述べると、まず地域を選ぶ——例えば、1辺が緯度および経度で1°差、あるいは2°差というような長方形に近い地域をとる。この中に震央をもつ微小地震をある時点から発生順にN箇とり、各々の地震について、式(*)に従って τ を計算する。この値の正負を調べ、正であれば正の地震と呼んで、これがL個あれば順次1, 2, …, Lとし、負であれば負の地震と呼んで、M個あれば順次-1, -2, …, -Mとする(L+M≤N)。各々の地震のエネルギーを、Eのつぎに添字をつけてE₁, E₋₁などのように表すことにすれば、このN箇の地震群に対するY値を、

$$Y = (E_1^m + E_2^m + \dots + E_L^m) / (E_{-1}^m + E_{-2}^m + \dots + E_{-M}^m) \quad (**)$$

と定義する。ひと組の地震の個数Nとしては、100とか200とかの数をとる。こうして発生順に並んだ最初のN個からひとつのY値を計算すると、つぎのN箇の地震に進み、同様な手順によってつぎのY値を計算する。この際、第1組の尾部の何個かを第2組の頭部としても使うというように、N個のなかの一部分をつぎつぎに重複させてと

るほうがよいようである。ともかく、このようにして、ある地域のある期間についてY値の時系列が得られる。過去に起こった多くの地震に対して、その地震の前のY値を式(**)を使って調べた結果（尹祥礎、1994；尹祥礎ほか、1994）をつぎに示す。

地震前Y値は高い

(1) 中国大陸1970年代以来M≥7の地震 この地域で1970～1992年に発生した標記の規模の地震は全部で13回、そのうち青海省、雲南省通海およびチベットの3回の地震のデータが完全でないで除外し、その他の地震についてY値の変化を見ると、10回のうち9回について主震前Y値は明らかに高い期間があった。Y>1の期間は、2～5年。[別に1950年のチベット察隅地震前のY値を計算したところ、非常に長期間（10年以上）Y>1であることがわかった。]

(2) 華北地区1970年代以来6≤M<7の地震 この地域で1970～1992年に標記の規模の地震は11回起こっているが、そのうち10回についてY値は明らかに高い期間があった。Y>1の期間は、半年～2年。

(3) 北京地区1980年以来4≤M<6の地震 この地域で1980～1993年に起こった標記の規模の地震は全体で12個あり、そのうち11個について顕著なY値の高い期間があった。Y>1の期間は平均3箇月。

(4) 北京郊外房山の炭鉱の鉱震M≥2 大部分（80%）の鉱震の前にY値は顕著に高くなっていた。

(5) 地震活動の静穏な地域 中国大陸に7個の地震活動の低い地域（それぞれ2°×2°）の地域を選び、1970～1992年の23年間のY値の変化を見た。どの地域においても、Y=1から上下に変動はあるものの、その差は小さく、例外なしにY≅1であった。

(6) 中国以外の地震 中国国外の地震についても微小地震のデータが入手できれば、これを用いて地震前のY値の変化を調べた。旧ソ連のスピタ

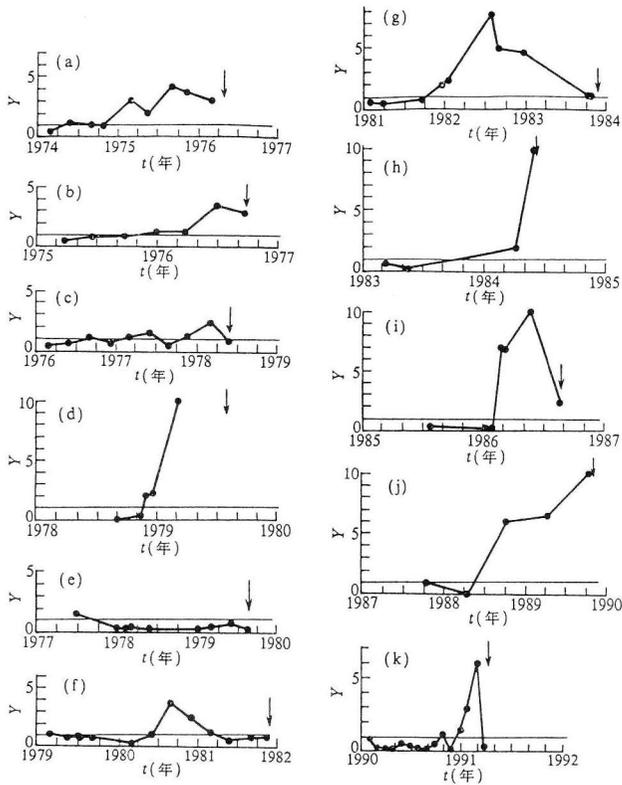


図2 中国華北 1970年代以来 $6 < M < 7$ の地震について地震前の増減荷応答比の時間的変化 (尹祥礎 [1994] による)

- (a) 和林格爾地震 [内 蒙 古] (M 6.5; 1976. 04. 06)
- (b) 巴音木仁地震 [内 蒙 古] (M 6.4; 1976. 09. 23)
- (c) 營口地震 [遼 寧] (M 6.3; 1978. 05. 18)
- (d) 栗陽地震 [江 蘇] (M 6.3; 1979. 07. 09)
- (e) 五原地震 [内 蒙 古] (M 6.3; 1979. 08. 25)
- (f) 刑台地震 [河 北] (M 6.1; 1981. 11. 09)
- (g) 河間地震 [山 東] (M 6.2; 1983. 11. 07)
- (h) 黄海地震 (M 6.2; 1984. 05. 21)
- (i) 徳都地震 [黒竜江] (M 6.1; 1986. 08. 16)
- (j) 大同地震 [山 西] (M 6.1; 1989. 10. 19)
- (k) 大同地震 [山 西] (M 6.1; 1991. 03. 26)

ク地震 (M 6.9; 1989. 12. 07), アメリカのロマ・プリエタ地震 (M 7.1; 1989. 10. 18), ランダース地震 (M 7.5; 1992. 06. 28), いずれも地震前に $Y > 1$ の期間が持続していることが明瞭で, 持続期間は3~5年であった。

アメリカのサン・アンドレアス断層上パークフィールド付近での1973~1992年の20年間のY値の変化を見ると1からあまり変わらず, ちょうど(5)の場合と

類似していた。このことは1993年1月までにM6程度の地震が起きると期待されながら, 結局, 起きなかった事実と一致している。一方, 冒頭で述べたノースリッジ地震の前には, Y値の高い期間があった。

Y値変化の実例

このように大きな地震が起こる前9割くらいについては, Yの値が1よりも大きくなることが確かめられた。その実例の一部をつぎに示す。

図2には, 前記(2)の11例すべてを示している。Y値が低い値のままで地震が起きた例外の場合は(e)である。Yが大きい値をとる期間の後, 地震が起きるといっても, Yの高い値からそのまま地震につながる場合(d, h, j)のほか, Yが最高点に達して下降し始めたとき地震になる場合(a, b, i), Yが最高点に達してから下降し, 短い期間をおいてから地震になる場合(c, f, g, k)もある。

図3(a)には, (6)で述べたパークフィールド地区の20年間のY値の変化, (b)には, ノースリッジ地震に対応するSA-6地区のY値の変化を示す。

図4は, 北米西海岸地域の区分を図示したものである。パークフィールド地区はSA-5である。

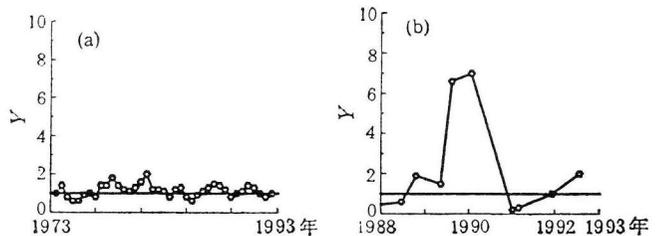


図3 中国国外の地域での増減荷応答比の時間的変化 (尹祥礎ほか [1994] による)

- (a) パークフィールド地区 (1973-1992年)
- (b) SA-6地区 (1988-1992年7月)

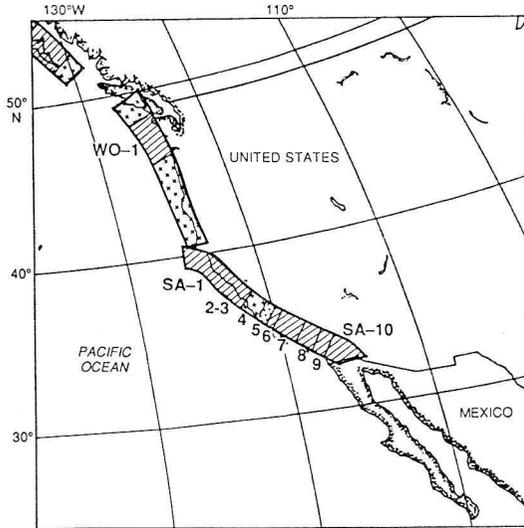


図4 北米西海岸地域の区分 (Nishenko [1991] を簡略)

筆者が尹祥礎教授から直接聞いたところでは、地震の危険性を ISOP に知らせた地域は、SA-3 と SA-6 とコアリング付近の3箇所であった。ノースリッジ地震 (M 6.7; 1994. 01. 17) の震源は SA-6 よりむしろ SA-7 にあったが、このように地震が準備されていると考えられる地区の隣が実際の震源となる場合はよくあるという。このことは、この地震が起こるよりも前に論文の中で述べている (尹祥礎, 1994)。

以上、尹祥礎らの方法とその結果の概要を紹介した。

潮汐のひきがね作用

月や太陽の引力は地球を変形させるので、この起潮力が地震の発生に影響を与えているのではないかという考えは古くからあり、これに関連した論文は少なくない。それらをまとめている総合報告 (田中, 1985) に従い、少し数値を挙げておく。

地球潮汐には、地球自体が弾性をもっているために、月と太陽から来る起潮力を受けて変形する部分と、海の潮汐で海水が周期的に移動して、海底にかかる圧力が変化するために変形する部分がある。起潮力によって地球が直接変形する部分を「直接項」、海の潮汐による影響で地球が変形する

部分を「間接項」と呼ぶ。

まず直接項について、地球潮汐による歪みは、 5×10^{-8} 程度であるから、地殻の弾性定数を 3×10^{10} Pa とすれば、地球潮汐によって生ずる地殻内部での応力変化は 10^3 Pa 程度である。一方、地震時の応力降下を $10^6 \sim 10^7$ Pa と見積るとすれば、地球潮汐による応力変化は地震時の応力降下の $10^{-3} \sim 10^{-4}$ となり非常に小さいものである。

つぎに変化の時間的な速さをみる。地震の再現周期を仮に 100 年とすれば、地震発生に係わる応力の時間変化は $1 \sim 10$ Pa/hour であるのに対して、地球潮汐の応力の時間変化は 10^3 Pa/(6 hours) $\approx 10^2$ Pa/hour であるから、このほうがずっと大きく 10~100 倍である。したがって、震源が応力的に不安定となっているときには、地球潮汐による応力が破壊開始のひきがね作用をしても不思議はない。

海の潮汐は大きいところでは、潮位が数mも変動するから、海底にかかる圧力の変化は 10^4 Pa 程度にもなる。このとき、海底では間接項は直接項よりも1桁大きいことになる。したがって、とくに海岸や海岸近くの浅い地震に対しては間接項のほうがひきがね作用として働く可能性がある。

いずれにしても起潮力は地震発生の主要原因ではないのだが、応力が臨界状態まで高まっているとき、起潮力が果して最後のひきがねのような作用をしているかどうかの問題であった。

最近大竹ほか (1995) は、長期間の世界的スケールの地震データセットを解析し、従来このようなデータからは、むしろ否定的な結果が得られていたとして、例えば、Heaton (1982) が世界の 328 個の地震データを解析して得た地震発生と潮汐は無相関とする結論は正しくないと言っている。それは海洋潮汐による間接項を正しく評価していないためで、この点を改めることによって、世界的なデータセットからも初めて有意性の高い相関関係を検出することができたという。

もっとも世界中の約 1 万個の浅発地震 (深さ 70 km 以浅) を用いて厳密に行なったその解析の結果を見ると、地震と地球潮汐の相関は、依然として世界のほとんどの地域で認められない。

大竹らが主張しているのは、非常に高い相関を示す地域が少数あったということである。アリューシャン列島地域はそのひとつであって、解析期間内（1986年5月）にアンドレアノフ諸島付近でモーメント・マグニチュード8.0の巨大地震が起きていた。詳しくみると、相関はこの地震の前、徐々に高くなり、直前に極大になり、地震後は再び下がって無相関の状態になる。すなわち、アリューシャン地域の顕著な相関は常に存在するのではなく、アンドレアノフ地震の直前1年程度の期間に集中していた。

空間的に高い相関を示す地域を調べると、アンドレアノフ地震の震源域付近に限られていた。

また、地震が多発したのは地球潮汐のどのような位相の時期だったかを調べると、断層面上の接線応力が最大のときであった。法線応力については顕著な相関関係は得られなかったが、接線応力と法線応力を組み合わせて解析すると式(*)で $f=0.1$ とすると、地球潮汐と地震発生の相関関係がもっともよく説明できた。アリューシャンのほか、スマトラとペルーにおいても地球潮汐と地震発生との間に強い相関が見られ、スマトラにおいては f が0.1、ペルーでは0.1~0.4のとき相関関係がもっともよく説明できた（鶴岡ほか、1995）。

この研究は、データを厳密に処理した精度の高い研究である。そして、尹祥礎らの研究とはまったく独立に行なわれながら、結果は相互に少しも矛盾がないことは驚くほどである。世界のほとんどの地域で地震と地球潮汐の相関が見られなかったことも、相関の高さは臨界状態への近さを表すという立場から見れば、まことに自然である。

群発地震や余震の場合、地震の起こり方と潮汐の間に関係があることが古くから見いだされ、その例は数多い。火山性の地震についても、潮汐との関係が知られている例は少なくない。

これらの報告で、引き続いて潮汐と明瞭な対応関係が見られる期間と、見られない期間を示しているなかに、この明瞭な対応関係を示す時期が、地震活動のなかのひとつの画期的な事件と関連があることを明らかにしているものがある。

1965年8月から始まった松代群発地震では、連続して5日間以上にわたって地震活動と地球潮汐の膨張との山が時間的に対応する時期が4回見いだされ、これらはそれぞれ新しい破壊の始まった時期に当たっている（尾池ほか、1985）。すなわち、群発地震の始まりである1965年8月10日前後、大きめの地震が起こり始める同年11月、最盛期直後震源域が拡大し始める1966年4月末、さらに広域に震源域が拡大し始めた同年7月末の4回である。

1983年10月31日の鳥取県中部の地震(M6.2)の余震および1943年の鳥取地震(M7.4)の余震では、本震発生の数時間後から5日間程度の間にかかる余震の活動が、地球潮汐による膨張の時期によく対応していた（尾池ほか、1985）。これらの場合の画期的な事件は、本震そのものと考えられる。

群発地震や余震のように限られた地域の地震でなく、日本全国に広範囲に起こる地震について、構造的な応力場との関係を見るため、三浪ほか(1990)は全国を緯度・経度 1° ごとの区域に分け、区域ごとに地震発生時における起潮力による歪みの主軸方向を調べた。対象は1926~1986年に発生した深さ30 km以内に震源をもつ地震である。その結果、各地域にはその地域に固有な、地震発生の割合が高くなる潮汐歪みの方向があることが多く、これは構造的な応力場と非常によく似ている。60年という長い期間で起潮力の関与を見ると、地震発生の割合が高くなる潮汐歪みの方向といっても、高くなり方は起潮力と無関係に地震が発生している場合に比べて、それほど高いというのではない(約20%)。

一般的にいて、従来の研究は潮汐のひきがね作用の有無を検出することに熱心であった。ある研究では検出され、ある研究では検出されなかった。

この現象を、尹祥礎のように臨界状態への近接の度合を示すものと考え、ことがらははっきりしてくる。なぜなら、臨界状態は部分的で不安定であるから、場所と期間を限定しなければ現象は明瞭には現れないにちがいない。一方、場所と

期間を限定し過ぎると標本の個数が少なくなり、有意性に疑いがもたれてしまう。

従来、地震と地球潮汐の相関の大小を表すのに、シュスターの検定法に基づいて p というパラメータが用いられることが多い (Klein, 1976)、これは、地震が潮汐の一定の位相の付近に集中して起こっている度合の確からしさを検定するためのものなので、地震の規模は無視するなど、不都合な面があった。

臨界状態への近接の度合を表すという目的のために、微小地震活動からその尺度が提案されたのは、式(*)の Y 値が最初である (Yin et al., 1991)。この式は、統計的有意性の問題は無視する代わりに、小地震の規模を自然な形で考慮している。

さて、地震は Y 値の上昇した後に起こるとしても、図2のいくつかの例でも、図3(b)でも、 Y 値上昇の直後ではない。これらの場合、その区域の一部に生じた臨界状態の影響が他の部分に及んで、 Y 値が下がった後に地震が起こる。したがって、地震の発生時と規模を正しく予測するには、過去の Y 値のデータを含む種々の情報と同時に、経験の積み重ねが必要とされよう。

Y値変化の常時監視を提案する

ノースリッジ地震の予測が好結果をおさめた後、尹祥礎教授は、地震の予測でもっとも興奮したのは1990年北京で第11回アジア競技大会が開かれたときだったと筆者に話してくれた。このとき予測の結果は、研究所の責任者に伝えられただけで、公にされなかったので、予測に成功したことにはなっていない。北京を中心とする北緯 $38.5^{\circ} \sim 41^{\circ}$ 、東経 $115.5^{\circ} \sim 117.5^{\circ}$ の区域の Y 値の変化とともに、この区域に1990年9月22日にM4.5の地震が起こったことが、論文 (Yin, 1993) にでているのだが (図の番号などに若干の誤りあり)、この日こそアジア競技大会の開会式の当日であった。この頃すでに Y 値の変化を日常的に監視していたわけである。

それもそのはず、起潮力に対する地殻のレスポ

ンスを監視することによって、地震予知に新しい突破口を開こうという考えが発表されたのは、それよりも3年以上も前のことであった (尹祥礎, 1987)。この論文の中で、直前予報に失敗した唐山地震 (1976.07.28) の苦い経験に基づき、前兆と地震の間には1対1の対応がない、すなわち、前兆がなくても地震になる場合もあれば、前兆があっても地震にならない場合もある、したがって、前兆を監視することはもちろん重要だけれども、それだけに頼ることはできないことに注意している。そのためには、地震が準備されている過程の物理を反映するような新しいパラメータを探す努力をしなければならない。新しいパラメータを考えるに当たっての指導原理としては、a) パラメータは地震が生じようとしている場所の不安定性と物理的に本質的な関係があること、b) 連続体力学の類似の問題で有用な無次元のパラメータ (例えばレイノルズ数) にならうこと、c) システム理論の中の基本的観点を運用すること、の3つを挙げている。

流体の運動では、レイノルズ数こそ層流から乱流へ転化する臨界状態への近接の度合を計るパラメータであるから、新しいパラメータに託した著者の高邁な志に感銘を覚える。システム理論というところでは、システムを理解するための重要な方法は、入力とそれに対するレスポンスを知ってその間の関係を研究することであることを述べている。そして、もしシステムが非常に複雑で内部の構造が不明である場合、このようなブラックボックスの方法以外には、他に方法がないことに注意している。ただしこの論文では、レスポンスとしては、精密な測量 (VLVI, GPS などによる) を念頭において、微小地震活動は取り上げていない。

アジア競技大会の頃の話に戻ると、初めての地震の発生予測を人に伝えたのは9月16日だったそうである。実際に9月22日に地震が起きると、本人自身、とてもそんなにうまくいくと期待していなかったのが、非常に興奮したという。図1に示したような関係は、実験室の岩石では見られても、現実の地球では、地下の岩石に境目がないの

だから、その通りにいくかどうかはわからない、理論的に考えの筋道をたどり、過去の地震で確かめはしていても、現実の成功は信じられない。そのとき、当事者の胸のうちに湧き上がる興奮が想像できる。おそらく、成功の喜びと同時に、自然の法則性の厳粛さというような感動だったに違いない。この発見は、地震の予測の上で劃期的なものと思われるのである。

この方法が実用化され、その後、中国のいくつかの地震の予報に成功していることは、冒頭に述べた。なお、海洋潮汐による間接項の影響は中国の内陸では問題にならないであろうが、海岸地域では当然考慮しなくてはならない。現在、この考慮も払われるようになっている（尹祥礎ほか、1993）。

日本は中国に比べると人為的な雑音が大きく地下の構造が細かく複雑で、地震の前兆は一般に現れにくい。日本で Y 値を求めるに当たっては、区域の取り方から始め、間接項が重要な場所は多く、直接項についても、水平方向の不均質を考慮しなくてはならないかもしれない。

しかし Y 値には、大きな地震の予測を目標にする限り S/N 比の問題はないので、データの処理方法の経験さえ積んでいけば、将来は非常に有望なのではないか。それに、例えすぐに成功しないにしても、地震の起こる場が非常に複雑だとすると、その場を知るためには、いまのところ、ブラックボックスの方法以外には根拠のしっかりした方法はない。また、そのとき力学的な入力としては、起潮力以外、適当なものは考えられないではないか。

地震の発生予測のために従来から行なわれている種々の方法に加えて、Y 値変化の常時監視は、今後、日本の各地では是非とも行なっていくべきことのように思われるのである。

謝辞 筆者は北京にある中国国家地震局地球物理研究所に、1993年9月から1年間滞在させていただいた。宿舎その他、外国の客人のため種々便宜を計って下さった研究所長の陳運泰教授に深く感謝する。

引用文献

- 尹 祥礎, 1987, 地震予測新途徑の探索, 中国地震, 3, No 1.
- 尹 祥礎, 1994, 加卸載響應比理論研究進展綜述, 國際地震動態, No. 3, 1-5.
- 尹 祥礎・陳 学忠・宋 治平・尹 燦, 1993, 加卸載響應比理論の新進展及其在地震趨勢研究中的应用, 中国地震趨勢研究(1994), 地震出版社.
- 尹 祥礎・陳 学忠・宋 治平・尹 燦, 1994, 加卸載響應比——一種新的地震預報方法, 地球物理學報, 37, 767-775.
- Yin Xiang-chu, 1993, A new approach to earthquake prediction, Природа, No. 1, 21-27 (in Russian).
- Yin Xiang-chu and Yin Can, 1991, The precursor of instability for nonlinear systems and its application to earthquake prediction, Science in China (Ser. B), 34, 997-986.
- Yin Xiang-chu, Chen Xue-zhong, Song Zhi-ping, and Yin Can, 1994, The load-unload response ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction, Journ. Earthq. Predict. Res., 3, 325-333.
- 尾池和夫・村松一男, 1985, 地震發生のトリガー, 月刊地球, 7, 15-19.
- 大竹政和・鶴岡 弘, 1995, 地震の發生と地球潮汐, 科学, 65, No. 4.
- Klein, F. W., 1976, Earthquake swarms and semidiurnal solid earth tide, Geophys. J. R. astr. Soc., 45, 245-295.
- 田中寅夫, 1985, 地球潮汐と地震, 地震予知 II, 学会誌刊行センター, 287-307.
- 鶴岡 弘・大竹政和・佐藤春夫, 1995, 沈み込み帯における地球潮汐の地震トリガー作用, 地球惑星科学関連学会合同大会講演予稿集, 364.
- Nishenko, S. P., 1991, Circum-Pacific seismic potential: 1989-1999, PAGEOPH, 135, p 214.
- Heaton, T. H., 1982, Tidal triggering of earthquakes, Bull. Seis. Soc. Amer., 72, 2181-2200.
- 三浪俊夫・山崎義典, 1990, 潮汐力による地殻歪と地震の發生, 月刊地球, 12, 369-378.
- 李 宣瑚, 1994, “八五”地震預報理論及方法攻關新進展之一——加卸載響應比理論預測洛杉磯地震獲得成功, 國際地震動態, No. 4, 24-25.
- [まるやま たくお 東京大学名誉教授]

鉄道と地震被害

阪神大震災をめぐって

中村 豊

はじめに

日本の鉄道の歴史は、明治5年(1873年)に開通して以来120年を超える。鉄道の使命は安全で信頼性の高い輸送サービスの提供にある。その阻害要因はさまざまなものがあるが、日本では自然災害対策が最重要課題になっている。特に地震災害については突発的で、その影響が広範囲・長期間に及ぶため、さまざまな対策が施されてきている。

しかし、人知を尽くした対策でも漏れがある。大きな地震が情け容赦なくその弱点を攻撃し、それまでの地震対策の弱点・問題点が明らかになる。それに対抗すべく、より高度な地震対策が開発され、実用化される。つまり、地震対策は大きな地震被害が発生するたびにステップ的に進化してきたのである。

現在の地震対策や耐震基準はかなりのレベルに達していることは疑いないが、古い時代の構造物はその時代の耐震基準を満たすようにつくられており、すべての構造物の耐震強度があるレベルに達している訳ではない。こうした取り残された構造物の補強対策が、今後ますます重要になる。しかし、近年では地震によって壊滅に近い被害を受けることがなかったという経験が、これまでの地震対策への過信につながり、補強対策がおろそかになったのは否めない。

過日の兵庫県南部地震は、こうしたさまざまな問題点を暴露して、阪神・淡路大震災と呼ばれる大災害を巻き起こしてしまった。この大震災を徹底的に究明して多くの知見・教訓をくみとり、今後の地震対策に反映させていきたい。

ここでは、鉄道と地震の係わりについて概説するとともに、今回の地震に関する鉄道の状況を簡単に説明し、今回の鉄道被害を特徴づけるラーメン構造物の簡単な被害分析を試みる。

鉄道の地震対策

地震対策には、地震発生時を中心にして地震前のものと、地震後のものが考えられる。それぞれの具体的な実践項目と対応する内外の研究開発課題とを示す。

(1) 地震前の対策—弱点箇所の抽出と補強対策の実施 課題 [地震活動度や中長期的地震予知/健全度評価手法の確立]

(2) 地震時の対策—地震警報と緊急停止/災害対応のための情報収集 課題 [リアルタイム地震防災情報システムの構築]

(3) 地震後の対策—被災箇所の特定と補修/補強対策・建て替えの実施 課題 [被災程度評価手法の確立—被災要因の究明/対策手法の開発]

地震の活動度や中長期的な地震予知情報は、弱点箇所を抽出したり、補強対策を考える際に考慮すべき地震力を規定するのに役立つ。

健全度評価や被災程度評価の手法は、弱点箇所を抽出したり、被災箇所を特定したりすることに使われる。鉄道では、常時微動を用いた調査手法の開発が進んでおり、現場で簡単に判定結果を得ることができるオンサイト調査システム(PICシリーズ)が活躍中である。首都圏や東海道・山陽新幹線などでは100m間隔で線路沿線の地盤と構造物の地震動特性が把握されている。この測定結果から、兵庫県南部地震では、東海道新幹線は地震動に地盤と構造物が共振したと思われる地点で被災し、山陽新幹線は地震動に構造物が大きく応答したために被災したものと推測される。

リアルタイム地震防災情報システムについては、鉄道では早くから緊急停止システムとして研究が進められ、リアルタイム地震防災の概念を世界に先駆けて提案し、実際に構築してきた。具体的には、在来型の加速度警報地震計「NEWS: ニューズ」の開発・普及、「UrE-DAS: ユレダス、早期地震検知警報システム」の開発・普及、「HERAS: ヘラス、災害予測・復旧支援システム」の開発・普及などである。

災害は外力が耐力を上回ったときに発生する。外力は時と場所により変動するし、表層地盤や構造物の応答で増幅される。耐力は経年劣化するが、補強・補修により強化もされる。耐力は定期的に計測して合理的な補強・補修に反映させる。構造物および地盤の耐力が的確に把握され、発生した外力の大きさが的確にモニターできれば、的確に警報を出すことができるだけでなく、被災程度や被災状況を把握することが可能になる。これを実現したのがユレダスでありヘラスである。

鉄道と地震

日本の鉄道が受けた最初の比較的大きな地震は、おそらく1880年2月22日の横浜地震（推定M 5.9、宇佐美）と思われるが、具体的な被害記録はない。鉄道被害の記録があるのは、1891年10月28日の濃尾地震（M 8.4）からである。濃尾地震では、東海道線の長良川鉄橋5スパンのうち、3スパンが落下したほか、多数の橋梁や盛土が被害を受けた。これ以後、鉄道は最近の兵庫県南部地震まで約100年の間に50回以上の被害地震に見舞われている。2年に1度以上の割合である。中でも関東地震の被害は甚大で、かなり広い範囲でトンネル・橋梁・盛土など、多くの鉄道構造物が大きな被害を受けた。

鉄道における地震対策研究は、昭和30年頃から昭和48年頃まで、建設工事が盛んであったことを反映して耐震設計手法の確立に力が注がれている。しかし、昭和48年以降、耐震設計法に関わるハード面の研究のほか、地震時の走行安全性の問題や新しい警報システムの開発など、ソフト面からの地震対策研究が開始され、鉄道の地震対策研究を特徴づけるものとなっている。

多くの被害地震を経験することによって、鉄道構造物の耐震性は着実に向上してきた。

たとえば、1968年十勝沖地震（M 7.9）の際、東北本線の盛土が多数崩壊するという事態に直面して、鉄道構造物の80%を占める盛土の崩壊現象に工学的なメスが入った。崩壊形態の分類整理・発生要因、振動台を用いた崩壊強度の確認、耐震強化法の開発など、系統的な研究が精力的に実施された。この結果、既存盛土の耐震強化工法がいくつか開発され、これに基づいて東海道新幹線の盛土は強化されている。

1952年の十勝沖地震（M 8.2）で被災した盛土は地震前と同様に復旧されたが、1993年の釧路沖地震（M 7.8）でも同一箇所が同じように被災した。また、1968年の十勝沖地震で被災した盛土も地震前と同じように復旧されたが、1994年の三陸はるか沖地震（M 7.5）でも同一箇所が崩壊した。このように、耐震強化されていない盛土は繰り返し同じような被害を受ける。しかし、1993年の釧路沖地震で被災して耐震強化された盛土は、約2年後に発生した1994年の北海道東方沖地震（M 8.1）ではそれほど被害を受けず、釧路沖地震で被災せず補強されなかった盛土が、北海道東方沖地震で大きな被害を被るということがあった。これは、盛土を的確に補強すれば災害を軽減する効果があることを示すもので、事前に弱点箇所を抽出して補強することの重要性を示すものである。

最近の鉄道構造物としてラーメン高架橋が盛んにつく

られている。ラーメン高架橋は、戦後急増した鉄道構造物である。ラーメン構造物の地震被害が記録に残っているのは、1968年の十勝沖地震が最初であろう。このとき、東北地方初のラーメン高架鉄道が敷設され、いよいよ1968年10月からのダイヤ改正時から供用開始することになっていた矢先の被害であった。このときの被害は主として杭など下部構造に集中し、構造物本体は大きく損傷しなかった。この地震は、部外ではコンクリート構造物に大きな被害を与えた地震であったが、鉄道では盛土など、地盤や土構造物の被害がきわめて大きく、ラーメン構造物の被害はそれほど注目を集めなかった。

東海道新幹線・山陽新幹線とラーメン高架橋建設の実績をあげてきた鉄道構造物の設計陣は、いよいよ巨大地震の巣を東にみて疾走する東北新幹線に着手した。これまで東海道新幹線で60cm角、山陽新幹線で80cm角と太くしてきたラーメン高架橋の柱を、さらに大きな地震荷重を想定して、90cm角と一層太くして丈夫なものにしている。

1978年のふたつの宮城県沖地震（2月：M 6.7、6月：M 7.4）は、東北新幹線のラーメン構造物がほぼ完成した時点で発生した。その被害は中層梁にクラックが入る程度で大したものではなかったが、柱を太くすることによってかなり大きな地震にも耐えられると考えていた技術陣は、この程度の規模の地震で構造本体が損傷する被害を受けたことにショックを受けた。この地震被害に鑑み、耐震設計法の見直しが進められた。その中では既存のラーメン高架橋の耐震性能のチェックが実施され、必要な対策工法の検討も行なわれた。このときの成果は、ほかのラーメン高架橋の補強に直ちに結びつくことはなかったが、阪神大震災の復旧に大いに役立った。なお、宮城県沖地震の際、電柱の倒壊や橋梁支承部の損壊も多数発生し、耐震的な電柱の支持方法や支承の構造/材料が検討されている。

その後、1987年には千葉県東方沖地震（M 6.7）で京浜急行の三浦海岸駅付近の高架橋（震央距離約70km）が、柱の上下端がかなりひどく損壊するという被害を受けた。しかし、ラーメン構造物一般の耐震性能の見直しが実施されることもなく、被災したラーメン高架橋の特殊事情ということで終わった。なお、被災高架橋近くの警報地震計の記録によると、地表面での最大加速度は300ガルを超えていた。

さらに、1993年には北海道南西沖地震（M 7.8）が発生した。地震発生直後、時をおかずに津波が奥尻島を襲ったため、200人以上の方が亡くなるという悲劇が生じている。この地震では津軽海峡線のラーメン高架橋も大きな被害を受けた。このときの被害は、やはり柱の上下端が曲げにより損壊するというものであった。付近の警

報地震計によれば、地表面での最大加速度（水平合成）は200ガルを超えている。地震後の調査によれば、柱の剛性は当初の1/3程度に低下し、倒壊には至らなかったものの大きな損傷であったことが確認されている。M7.8と規模の大きい地震とはいえ、震央から170kmも離れた新幹線仕様の高架橋が、たかだか最大加速度200ガル程度で大きな被害を受けた事態は深刻である。

最近の地震被害は、ラーメン高架橋の耐震性に疑念を抱かせるものであった。この疑念を解明する前に兵庫県南部地震（1995年1月17日未明）が発生し、ラーメン構造物が壊滅的な被害を受けてしまった。

兵庫県南部地震

●被害と復旧 1995年1月17日の兵庫県南部地震の被害は戦後最大の規模となり、阪神・淡路大震災と命名された。犠牲者は5500名を越えている。この地震は淡路島北部および神戸市街の直下で発生したもので、M7程度としては想像を絶する被害をもたらした。

鉄道構造物も尋常でない被害を受けている（図1）。特に、ラーメン高架橋など、耐震性を考慮してつくられた土木構造物の被害は信じられないほど甚大であった。

山陽新幹線の構造物は、ラーメン橋台やラーメン柱の損壊により橋桁やラーメン高架橋が8箇所で落下/崩壊

した。崩壊に至らなかったものの被害も大きく、かなりの数のラーメン柱の上下端が損壊している。震央から比較的遠かった東海道新幹線のラーメン高架橋も柱の上下端が損壊した。

在来線も東海道線六甲道駅周辺でラーメン高架橋等が崩壊するなど、住吉・灘間で大きな被害を受け、長期不通を余儀なくされた。また、停車中・走行中にかかわらず、脱線転覆した列車も数多かった。

このような状況で鉄道旅客に犠牲者がなかったのは奇跡に近く、不幸中の幸いであった。

山陽新幹線の復旧は順調に進み、地震後81日目の4月8日に予定より一月近く早く運転再開された。なお、山陽新幹線へのユレダス導入は地震前にはほぼ決定されていたが、この地震に鑑み、JR東海のユレダス警報を姫路までの山陽新幹線で暫定的に利用することになった。暫定使用は4月28日から開始されているが、山陽新幹線のユレダス・ネットワークは、来年秋からの使用開始に向けて構築と調整が進められる予定である。

東海道新幹線も大阪・京都間で被害を受けたが、応急復旧により地震後3日で運転を再開した。その後、本格復旧に取り組み、4月7日からは「のぞみ」の270km/h走行も含めてほぼ完全に復旧している。

東海道本線など、在来線も復旧工事を迅速に進めた結果、当初の予定よりかなり早く、地震後74日目の4月

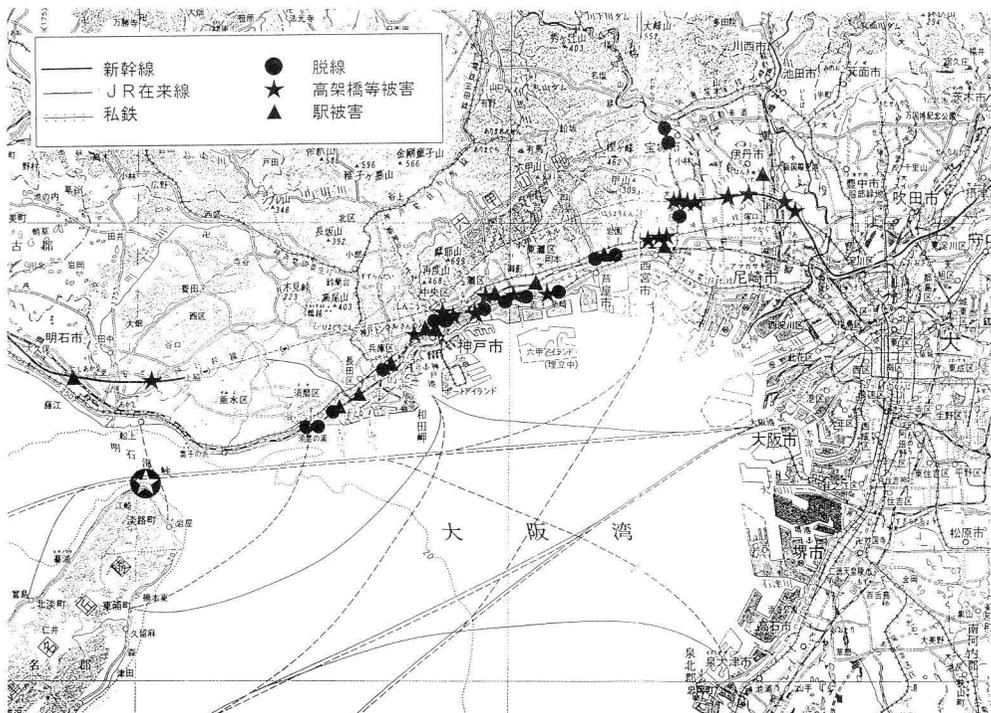


図1 兵庫県南部地震による被害分布

1日には全線が開通した。

今回の地震被害は、地域住民に交通機関の重要性を改めて認識させた。特に鉄道は定時性・速達性などの点で自動車よりはるかに優れており、災害復興の観点からも早期の復旧が望まれたのである。

●地震警報システムの動作状況 この地震では新幹線が走り出す前であったため、新幹線の地震警報システムは警報を発したものの、実際に走行している列車を停止させることはなかった。しかし、大きな地震であることを認識させ、直ちに沿線の点検作業が行われた結果、甚大な被害が発見されたのである。新幹線の地震警報システムは、直下地震に対応するための沿線20 km間隔で設置された警報地震計と、大地震の震源域近傍に設置されたユレダス（東海道新幹線の場合）とで構成されている。今回の地震に対しては、西明石駅・新神戸駅・高槻変電所・新大阪変電所などに置かれた警報地震計がいち早く警報を発令している。地震後1分半で、東京のCTCに置かれたユレダス・センタは当該地震の諸元を基に運転再開のための巡回指示書（案）を出力する。しかし、今回の地震では、大阪地区で発生した停電のため、震央に近い検地点のユレダス情報が伝わらず、指示書（案）が出力されなかった。ユレダス本体に残されていた情報などを元に復元した結果、もし停電がなければ、ユレダス・センタは、この地震を神戸沖のM6.4の地震（深さ20 km）と判断していたことがわかった。これは野島断層地震を無視した形になっている。これまでの鉄道構造物の地震被害経験に基づくと、M6.4では被害半径は約22 kmとなる。震央を中心に半径22 kmの円内に主要な鉄道被害は含まれており、被害把握の観点からは概ね妥当といえるが、より高度な被害推定が行なえるように震源推定精度や警報機能の向上に努力している。

阪神地区に設置された在来線の警報地震計は、ほとんどすべて警報を発令している。この地震で記録された鉄道沿線の地盤上の最大加速度は、616ガル（鷹取駅の警報地震計）であった。鷹取駅は、今回の地震断層のひとつである須磨断層の2 km程度南に離れたところに位置する。その他の地点では、これより大きい最大加速度も観測されているが、最近の地震で記録されたものにくらべて格段に大きいというわけではない。しかし、例えば、鷹取駅の加速度記録を積分して速度・変位を算出すると、それぞれ最大176 cm/s、50 cm（いずれも水平ベクトル合成）と国内でこれまでに観測されたことのない非常に大きな値となる。つまり、変位や速度の観点からは、これまでにない異常に大きな地震動であったといえる。ただし、大きな震動が継続する時間はせいぜい10秒程度で長くはない。この駅の周辺では多くのビルや家屋が倒壊し、火災も発生するなど、きわめて大きな災害が発生

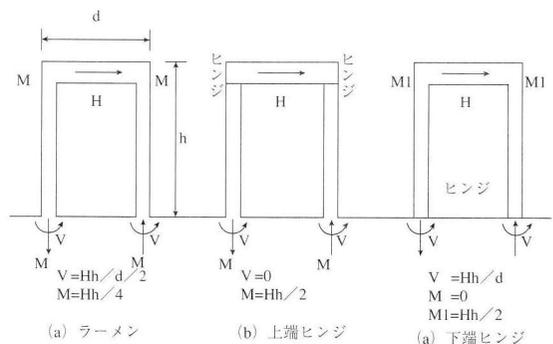
している。鷹取駅は気象庁の調査で震度7とされる地域に含まれている。宝塚駅も震度7の地域に含まれているが、この水平最大加速度は601ガルであった。この駅は須磨断層の破壊が進んだ方向にあるため、波動が次々に重なりあって振幅が大きくなったものと推測される。

しかし、地震動継続時間は5秒足らずと短くなっている。山陽新幹線の崩壊地点の多くは、ここから南に4～5 kmの位置にある。

●ラーメン高架橋の崩壊原因 崩壊したラーメン高架橋の柱と桁のうち、桁はほぼ健全のまま残った。これは崩壊が急激でなかったことと、上下動の影響が少なかったことを示している。上下動の影響が小さかったことは、橋梁の桁もまた健全であったことから窺える。

ラーメン柱は上下端が曲げて損壊したり、中央部でせん断破壊している。柱の上端が損傷したものは数多く認められるが、崩壊せず当初の形状を保っている。下端部の損傷は基礎地盤に隠れていることもあり、それほど目立ってはいない。崩壊したものの中には、柱中央部でせん断破壊したと思われるようなものがある。以下、ラーメン構造物の被害要因について定性的に考察する。

ラーメン高架橋は水平地震動で柱に軸力が発生する（図2 a）。つまり、ラーメン橋脚には水平せん断力と軸力（一方は圧縮、他方は引張）が同時に作用する。また、もちろん柱の上下端には曲げモーメントが作用し、柱上下端の縁辺部には引張応力と圧縮応力が生じる。これらの応力が交互に作用し、コンクリートが引張破壊したり、鉄筋が引張降伏して伸びてしまったものが次の圧縮応力で座屈して周囲のコンクリートをはねとばしたりして、次第に曲げに対する抵抗力を失う。つまりヒンジが形成される。このとき、十分細かな間隔で帯筋が巻かれていれば、破壊されたコンクリート塊が外に飛び出すことな



$$H = w \cdot \alpha s / g$$

ここで、H: 水平地震力、w: 上部工重量、 αs : 高架橋の応答加速度、g: 重力加速度。

なお、柱と梁の剛比は簡単のため無限大とした。

図2 ラーメン高架橋に作用する水平地震力によって生じる応力

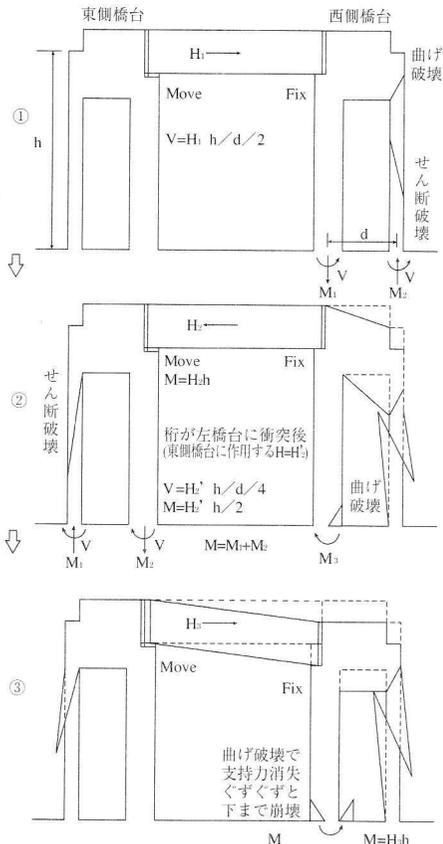


図3(a) ラーメン橋台の崩壊メカニズム（固定支承が西側にある場合）

く保持され、少なくとも圧縮力に対する抵抗力（上部工を支える力）はそれほど低下しない。

最初に柱上端が曲げで損壊しヒンジが形成されれば、柱には軸力が発生せず、柱のせん断耐力と柱下端の曲げ耐力が十分であれば、これ以上破壊が進まない（図2b）。しかし、柱下端が最初に破壊すれば、柱が支える上部工の質量に作用する大きな水平慣性力に起因して、柱上端に曲げモーメントが作用すると同時に、柱に大きな軸力が発生する（図2c）。この軸力は水平慣性力と同時に作用することになるから、圧縮が発生する側の柱はコンクリートにとってはきびしいものとなり、場合によっては柱が圧壊して一挙に崩壊する。一挙に崩壊しないまでも、曲げにより損壊した柱下部は大きな軸力を支えられなくなっており、この部分から徐々に剝落して座り込むように崩壊することが予想される。実際、ラーメン高架橋は地震の後、徐々に崩壊したという目撃談がある。一方、柱が桁スラブに突き刺さって急激な崩壊を示唆するものもある。

重量のあるコンクリート桁を支えるラーメン橋台の崩壊は、図3に示すように進行したものと推測される。被

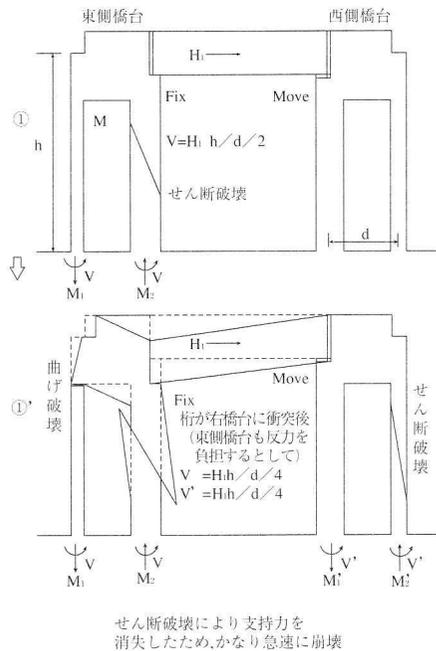


図3(b) ラーメン橋台の崩壊メカニズム（固定支承が東側にある場合）

害は、桁と橋台を連結する支承部の特性（固定支承か、可動支承か）に大きく左右され、崩壊は固定支承側の橋台で生じている。もし固定支承が構造物本体より小さな耐力しか有していなければ、崩壊には至らなかった可能性がある。宮城県沖地震の場合、支承が損壊したために構造物本体が大きく損壊しなかったのではないだろうか。

塑性ヒンジの発生箇所をコントロールし、構造物と構造物の連結部分の強度を工夫する（積極的に破壊するヒューズ部分をつくる）ことで被害を少なくできると期待される。もちろん、大きな相対変位が生じないように地震エネルギーをうまく消散させる工夫をしておく必要がある。

おわりに

今回の地震は、構造物はどんなに丈夫につくっても、想定地震力を上回る地震力が襲来すれば破壊されるといふ、当然の事実をあらためて思い起こさせた。従来の構造物の強度の向上に着目した地震対策を推進するのは当然である。しかし、それだけでなく、稀な大地震では崩壊も有り得るという前提にたって、破壊や崩壊を制御する研究開発を推進し、仮に崩壊しても最低限の安全性は確保できるようにする必要があるのではなかろうか。

[なかむら ゆたか ㈱鉄道総合技術研究所ユレダス推進部 部長]

地震・津波碑探訪

力武常次

安政江戸地震

東京を襲った典型的直下地震として、安政江戸地震(M=6.9: 1855年11月11日)を忘れることはできない。当時、徳川幕府の権威はだんだんと衰えをみせ、いわゆる黒船騒ぎなど、諸外国が開国を迫るという情勢下において、安政元年の安政東海および南海地震に引きつづいて、首都を壊滅させるほどの地震が発生したのである。真に国難の時期であったに違いない、『日本地震資料』によると、

「安政二年十月二日(西曆一八五五年十一月一日)二十二時頃、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。江戸町奉行配下ノ死者ハ三千八百九十五人。武家ニ関スル分ヲ合スルモ市内ノ震死者ノ総数ハ約七千人乃至一万人ナラン。潰家ハ一万四千三百四十六戸ヲ算セリ。江戸市中ノ被害ハ深川、本所、下谷、浅草ヲ最トス。山ノ手ハ震害軽ク、下町ニテモ日本橋、京橋、新橋付近ハ比較的輕微ナリ。地震ト同時ニ三十余ヶ所ヨリ火ヲ発シ、約十四町四方ニ相当スル面積焼失セリ。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。津波ハナカリシモ、東京湾内ノ海水ヲ動揺シテ、深川蛤町木更津等ノ海岸ニハ海水ヲ少シク打上ゲタリ。」とあり、直下型地震に直撃された江戸の悲惨な様子が想像できる。

ここでは、江戸地震関係のモニュメントに重点を置いて調べよう。

護母致命の碑

JR 水道橋駅から白山通りを北に2~3分歩くと、後樂園遊園地前の歩道に通りを背にして、図1のような「藤田東湖護母致命の処」と題する東京都指定旧跡の告知板がある。その位置は図2の地図に示してあるが、告知板のまわりにはやたら自転車が放置されている状況で、現状はいささか雑然としている。

『広辞苑』によると、藤田東湖については、

「【藤田東湖】幕末の儒学者。名は彪。幽谷の子。水戸藩士。藩主徳川斉昭を補佐して、天保の改革を推進し、側用人となる。安政の江戸大地震に母を助けて自分は圧死。著

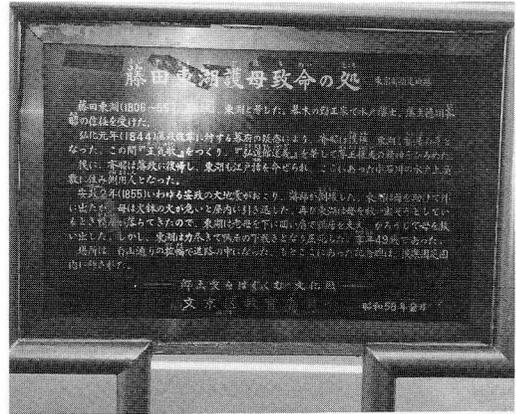


図1 東京都指定旧跡「藤田東湖護母致命の処」

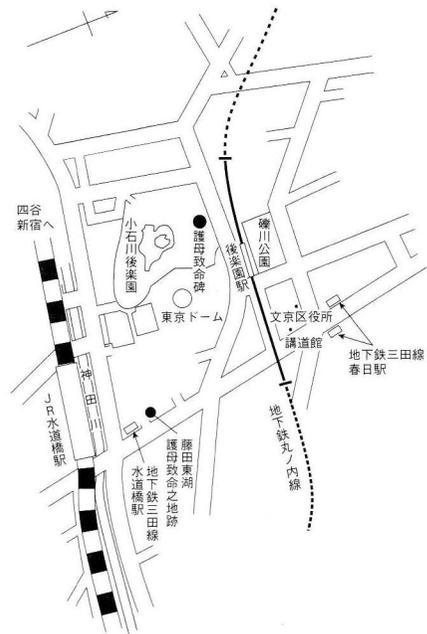


図2 藤田東湖モニュメント周辺図

『回天詩史』『弘道館記述義』など。(1806~1855)とあり、嘉永・安政の頃の著名な儒学者であったらしい。このことは告知板にも記されている通りである。

「藤田東湖(1806~55)、名は彪、東湖と号した。幕末の勤皇家で水戸藩士。藩主徳川斉昭の信任を受けた。」



図3 藤田東湖像

弘化元年(1844)藩政改革に対する幕府の疑惑により、斉昭は謹慎、東湖も蟄居の身となった。この間『正気歌』をつくり、『弘道館述義』を著して尊皇攘夷の精神をひろめた。

後に、斉昭は藩政に復権し、東湖も江戸詰を命ぜられ、ここにあった小石川の水戸上屋敷に住み側用人となった。安政2年(1855)いわゆる安政の大地震がおこり、藩邸が倒壊した。東湖は母を助けて外に出たが、母は火鉢の火が危いと屋内に引き返した。再び東湖は母を救い出そうとしているとき鴨居が落ちてきたので、東湖は老母を下に囲い肩で鴨居を支え、かろうじて母を救い出した。しかし、東湖は力尽きて鴨居の下敷きとなり圧死した。享年49歳であった。

場所は、白山通りの拡幅で道路の中になった。もここにあった記念碑は、後樂園庭園内に移された。

——郷土愛をはぐむ文化財——

文京区教育委員会 昭和58年2月

中村孝也著『藤田東湖』(地人書館, 1943)によれば、東湖のより詳しい生立ちはつぎのようになっている。

「藤田東湖は諱を彪、字を斌卿、幼名を武次郎、虎之介といつた。水戸藩士であり、藩主徳川慶篤より誠之進といふ名を賜はつた。父は藤田幽谷、母は丹梅子である。文化三年三月十六日生れ、文政二年、父に従つて江戸に遊び、龜田鵬齋・太田錦城等の鴻儒に知られ、また岡田十松に就いて剣を學んだが、歸國の後、同七年、英艦が常陸大津濱に來た事件が起つたとき、東湖は英人を斬つて攘夷を天下に呼號しようとしたが果さず、それより再三江戸に出でて武術を修め、また經學、詩文を學んだ。東湖の學識は、この青年時代における刻苦精勵に負ふ所が大きい。その英才は

藩主齊脩の弟敬三郎に認められた。同九年十二月、父幽谷が歿して後、家督を相續し、祿三百石を受け、進物番となり、彰考館編修を命ぜられ、同十二年二十四歳のとき、その總裁代理となつた。」

東湖は尊皇攘夷を説いたが、血氣の勇に逸る人物ではなく、弾力性に富む思想の持主であり、結局は開国すべきことを知っていたが、泰平に溺れて武備を怠っている世の中に警告するため、攘夷開戦を提唱したとされている。

東湖の著作として、特に有名なのは『正氣の歌』である。これは宋の忠臣文天祥の“正氣歌”に感動して作ったとされ、正確には『和文天祥正氣歌』(文天祥の正氣の歌に和す)と題している。

「	天地正大氣	粹然鍾神州
	秀為不二嶽	巍々聳千秋
	注為大瀛水	洋洋環八州
	發為萬朶櫻	衆芳難興儔
	凝為百鍊鐵	銳利可斷鑿
	蒸臣皆熊羆	武夫盡好仇
	神州孰君臨	萬古仰天皇
	皇風洽六合	明德侔太陽
天地正大の氣		粹然として神州に鍾まる
秀でては不二の嶽となり		巍巍として千秋に聳ゆ
注いでは大瀛の水となり		洋洋として八州を環る
發しては萬朶の櫻と為り		衆芳興に儔ひ難し
凝ては百鍊の鐵と為り		銳利鑿を斷つべし
蒸臣皆熊羆		武夫盡く好仇。
神州孰れか君臨する		萬古天皇を仰ぐ。
皇風六合に洽く		明德太陽に侔し。

(後略) 」

『正氣の歌』は希代の名文で、日本精神の発露であるとされてきた。現代ではいささか時代がかり過ぎてピンとこない人も多いと思われるけれども、このような詩がもてはやされる時代を経過して、現在の日本があることを認識しなければならない。

さて、安政地震に際して、母を救うために自分は圧死した東湖の話は、孝子の鑑として知られているが、真相はどうだったのだろうか、まず、古文書を引用しよう。

『水戸藩資料上篇乾』には、

「十月二日江戸地大に震ふ此の災や夜四鼓に起り(今の午後十時頃)轟然震動一瞬の間に府下大半を顛覆し凡そ城郭邸第大厦高堂と雖も傾頽翻倒せざるはなし既にして火五十余所に起り熾々たる火勢延いて全部を蔽ひ圧死焼死重軽傷万を以て数ふるに至れり是の夜斉昭慶篤は難を後園に避けしが邸内の官舎は傾倒破壊殊に甚しく執政戸川忠大夫忠敏側用人藤田誠之進彪此の災に罹れり其の他邸内の死傷は即死四十六人負傷八十四人に及べり……」

とある。また、「東部地震の記」(『麗齋叢書』二十所収)

には、

「水戸の御家にてハ前の中納言の君のふかくたのみ覚されし藤田虎之輔・戸田銀次郎も死失ぬ、虎之輔ハはしめ難なくのがれ出しかと老たる母刀自のあとに残りしをおもひいて引かへし救出さんとして、棟の下に失果つと其国の人より聞ぬ、此国の儒者なる会津恒三の教子にて長門の人に赤川淡水といへるものありしが其物かたりに虎之輔の母ハいと雄々しき老女にて、我子ながら日頃ハ物の用にも立へきものよなどたのもしくおもひつるに、其甲斐もあらで、深くたのまれ牽りし君をおき、翌をもしらぬ老の身のため、あたら命を棟のもとに捨たりし不覚さよとむづかりしより、この母ありて此子とやかゝる事をやなと、諸ともに語り入りたりし」

となっている。

前出中村著『藤田東湖』には、よりわかり易い口語体（いささか古いが）で、つぎのように描写されている。

「安政の頃は近世封建制が内部の脆弱性を暴露して、將に崩壊しようとする一步手前であり、この大地震を契機として幕府政治は後退の一步を踏むべく餘儀なくされた。それは自然界における大地震たるにとゞまらずして、實に人界における大地震であつた。江戸八百八町では、家屋が壊れ、橋梁が落ち、財物が焼け、人畜が死んだ。それは間も無く復興し得る。獨り再生し得ざるものは國家有用の大才の喪失である。藤田東湖の歴死は、その最も大なるものであつた。

それは夜であつた。東湖の家には來客があつた。その辭して去るのを玄関まで見送つた東湖が、立ち戻つて、まだ脇差をも脱せざる時に、突如として大地が震動し、家財道具がばたばたと倒れた。東湖は老母を扶けて急いで庭前に出た。そのまゝでゐたならば或は禍を免れたかも知れないと想はれぬでもない。突嗟の場合である。老母は火鉢に土瓶をかけ忘れたから、火の用心が危いと言って家の中に駆け込んだ。尤もな注意ではあるけれど、老母の方が却つて危い。東湖は驚いて直ぐ老母に追い縋つて抱き出さうとする瞬間に瓦落々と屋根が崩れかかり、鴨居の下敷にされたしまつた。東湖は渾身の力を籠めて老母を下に圍ひ、兩手を突き、肩で鴨居を支へ、辛うじて老母を庭に脱け出させたけれど、隙もあらせずまた一搖り、東湖はつひに歴死したのであつた。國歩艱難の時に當つてこの偉材を失ふ。昊天情無し、痛恨いづれの處にか訴へむ。享年五十歳。崎嶇羊腸たる人生の行路を踏破して、思慮圓熟、渾然たる風格を大成するに及んで、今や忽然として亡し。それは實に惜しみても尚ほ餘りあるものであつた。」

図4に示す「護母致命の碑」（昭和34年3月吉日茨城県人連合会建設）そのものは、図1の告知板に述べられているように、もともとは告知板の位置にあつたが、白山通りの拡幅に伴って、小石川後楽園内の梅林の奥に移された。



図4 「藤田東湖護母致命之処」碑

後楽園は水戸徳川邸のあとで、江戸時代の初め徳川頼房や光圀によって築園され、中国の明より亡命した朱舜水の意見による中国色豊かな庭園である。東湖遭難の水戸藩上屋敷はこの庭園に隣接していた。

- ◇ 喧騒の 東京ドーム よそにして
孝子を偲ぶ 護母致命の碑
- ◇ 藩侯の 嘆きひとしお 安政の
地震に死せる 忠臣あわれ
- ◇ 天地の ^{あめつち} 大変防ぐ すべもなし
天下動乱 幕末のころ

回向院

〔墨田区両国2-8-10〕

明暦3年（1657）1月18日・19日に江戸に「明暦の大火」といわれる大火災があつた。俗に「振袖火事」とも呼ばれ、大名屋敷500、旗本屋敷770、寺社300、蔵9,000余、橋60を焼き、死者107,046と報じられた大惨事であつた。時の幕府はこの大火の焼死者を集めて埋葬したが、これが回向院（浄土宗）の由来である。その後、回向院には地震、津波、水害などの無縁仏や刑死者、さらには犬猫なども葬るようになって、現在の境内には犬猫供養塔や小鳥塚などがある。

JR 総武線両国駅の南、徒歩数分、京葉道路両国橋の東約100メートルに回向院の山門が（図5）ある。回向院の概略の位置は図6の地図に示してある。院の周囲にはモダンなオフィス・ビルが林立し、山門に並んでデニーズなど、ファミリー・レストランがあるのは、江戸情緒を求めて訪れた人びとは、いささか違和感を覚えるか



図5 回向院山門



図6 回向院周辺図

もしれない。しかし、両国国技館が近いせいか、周辺には「ちゃんこ鍋」の料亭などもあり、結構、江戸下町の雰囲気も残っているようである。

山門わきの告知板(図7)には、回向院の由来が紹介されている。あまり広いとはいえない境内の一隅に、地震などの横死者の供養塔や墓碑が集中的に立ちならんでいる。そのいくつかを以下で紹介しよう。

「 諸宗山 回向院
明暦三年(一六五七年)江戸大火

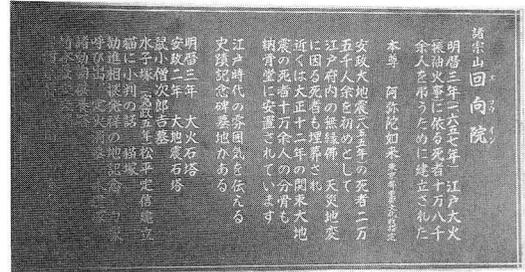


図7 回向院案内板

(振袖火事)に依る死者十万八千
余人を弔うために建立された

本尊 阿弥陀如来 東京都重要文化財指定

安政大地震(一八五五年)の死者二万

五千人余を初めとして

江戸府内の無縁佛 天災地変

に因る死者も埋葬され

近くは大正十二年の関東大地

震の死者十万余人の分骨も

納骨堂に安置されています

江戸時代の雰囲気伝える

史跡記念碑墓地がある

明暦三年 大火石塔

安政二年 大地震石塔

鼠小僧次郎吉墓

水子塚(寛政五年)松平定信建立

猫に小判の話 猫塚

勸進相撲発祥の地記念 力塚

呼び出 定火消墓 木遣塚

諸動物供養塔

竹本義太夫墓

岩瀬京傳 京山 加藤千陰墓

●六地藏(安政地震横死者供養) 図8のような供養塔の台石の側面には、

「 安政二乙卯歳十月 数十箇所燃上歴死
二日夜四時大地震 焼亡幾千萬人量
人家倉庫動潰出火

とある。また他の側面には、

「 又翌三丙辰歳八月 廿五日 ……(後略)」

とあり、地震の翌年の大風水害の横死者をも悼んでいる。安政4年(1857年)建立とのことである。

●地震焼亡横死諸群霊塔など 境内の参道に面して、「南無阿弥陀仏」と大きく刻んだ2つのモニュメント「地震焼亡横死諸群霊塔」[安政地震13回忌にあたる慶応3年(1868)建立]および圧死者供養塔[安政3年(1856)建立]や「信州・上州地變横死者諸霊等」[「時



図8 六地藏（安政地震横死者供養）

維天明三年癸卯七月八日」と刻まれている。天明五年（1785）建立]などが立ち並んでいる（図9）。

●大震災横死者之墓 前述の供養塔群の最左端には、図10に示すような関東大震災の犠牲者の碑がある。これは相生理髪業組合が大正12年（1923）に建立した。

●鼠小僧次郎吉の墓 なお、余談だが災害関係の石塔に囲まれて義賊「鼠小僧」の墓がひときわ目立っている（図11）。墓石には俗名「中村次郎吉」、戒名「教學速善居士」と刻んである。墓石のかけらは強運のお守りとなるとかで、欠くための専用の墓石と「やすり」が置いて



図9 立ち並ぶ地震碑群

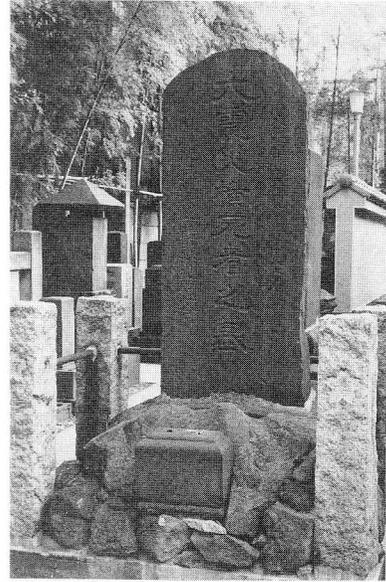


図10 大震災横死者之墓

ある。詳しくは、小島惟孝著『墨田区史跡ガイド—東京史跡ガイド⑦』（学生社、1993）より引用させていただいた、つぎの記事をご覧ください。

「 鼠小僧次郎吉の墓」

この墓は、市川団升が狂言大あたりのお礼に、明治九年（1876）供養墓として建てたものである。鼠小僧は天保三年（1832）に処刑された大名屋敷専門の盗賊で、盗んだ金を貧しい人々に与えたので、義賊として庶民の人気を博し、死後まもなく講談となり、黙阿弥は、『鼠小紋東君新形』という狂言に仕立て、さらにその人気をおった。鼠小僧



図11 鼠小僧次郎吉の墓

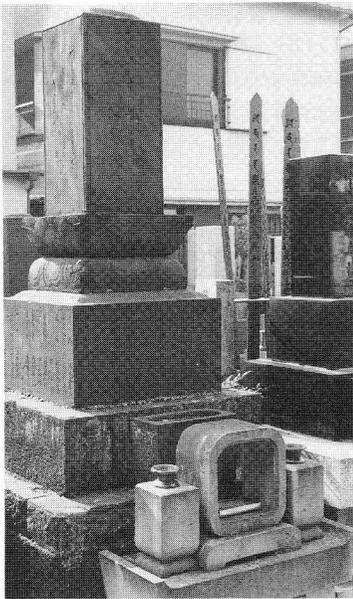


図14 安政地震十三忌塔（多門寺）

築土下 山崎金平
 …… …… (後略)

慶応三卯年五月下旬建之
 石工 竹次郎」

などと刻んであり、安政2年(1855)の安政江戸地震の犠牲者の「追善菩提」と「信者二世安穩」を願って、慶応3年(1867)に建てられたモニュメントであることがわかる。

なお、この石塔の由来については『墨田区文化財調査報告書Ⅳ』(1983年3月発行)に詳しく述べられている。

◇ 風化せる 碑文に残る 安政の
 菩提申う 多聞寺の塚

● 木母寺「大正震災火災横死者追悼之碑」[墨田区堤通 2-29-58] 多聞寺から隅田川沿いに数百メートル南へ行くと、いわゆる東京都防災拠点白鬚東地区に達する。隅田川は堤防のために、全く川面を見ることはできず、文人墨客が杖をひいたとされる墨堤には、昔の面影は残っていない。現在は防災拠点の重要要素となっている高層アパート群が墨堤通り沿いに立ち並んでいて、アパート群と隅田川との間は東白鬚公園(図12)として、災害時の避難空間となっている。

延焼防止のための高層アパート群や広い公園の防災樹など、この防災拠点は真に立派なもので、東京都の他の地区にも、このような拠点を多数建設して欲しいものである。公園内には「東白鬚公園防災樹」と題する告知板があり、つぎのように記されている。

東白鬚公園防災樹

「この公園は、江東再開発基本構想に基づき災害時における避難広場の確保と生活環境の整備を目的としてつくられたものです。

樹木には、火災による火の粉や熱風から人を守る働きがあります。このため公園の樹木も防火力の大きい、常緑広葉樹を中心に枝葉の密なシイノキ、シラカシ、タブノキ、マテバシイ、ツバキ類などを用いました。この公園は避難した人々を火から守り、火災の延焼を防ぐようつくられたものです。また、ふだんは緑とレクリエーションの広場として広く利用されています。

都立水元公園緑の相談所 でんわ 03(600)6417

東京都」

この公園内に木母寺および関東地震記念碑がある。木母寺は水神大橋から200メートルくらい南に位置しているが、防災拠点設立前はずっと西よりの墨堤通り沿いにあった。

貞永元年(976)、吉田少将惟房の一子梅若丸が人買いにさらわれ、この地で身まかったことを悼んで建てられた梅若塚が木母寺の発祥であるとされ、慶長年間に梅の字を分けて木母寺としたといわれていて、非常に由緒ある寺院であるといえよう。

梅若丸の言伝えは謡曲『隅田川』などで知られている。防災拠点のアパート群を貫くゲートには「梅若門」などの名称が付されている。木母寺の「梅若塚」には、つぎに記すような「謡曲『隅田川』と木母寺」と題する告知板がある。

謡曲「隅田川」と木母寺

謡曲『隅田川』は、我が子の行方を尋ねさまよう母の悲劇をテーマにした狂女物の代表曲で、探し求めた我が子は既に亡く、その墓前で亡き子の霊の声のみ聞く哀れさは、本曲の圧巻である。

梅若権現縁起に『梅若丸は吉田少将惟房卿の子、美濃国野上宿に生まる。母の名は花子五才で父を失い、七才の時比叡山に登り修学中、人買いに嵌かれ、ここ隅田川原まで来たが病を得、貞永元年三月十五日此の地にみまかる。時に十二才、いまわの際の『尋ね来て問わば応えよ都鳥隅田川原の露と消えぬと』との詠歌を哀れんだ天台の僧忠円が里人と計り、一堆の塚を築き柳一株を植えて標とし跡を申う、これが梅若寺の起源となる。慶長十二年(一六〇七)梅の字を分けて木母寺と改名されたと書かれている。

謡曲史跡保存会」

木母寺の通用門わきに、図15のような「大正震災火災横死者追悼之碑」があり、高さ3メートル、幅85センチという大きなものである。大僧正栄海(浅草寺貫主)の銘があり、大正13年(1924)の大震災一周忌に建立された。碑の裏側にある碑文は細かくて判読が困難で、この碑の詳しい由来はよくわからない。毎年9月1日、この碑の前で震災忌法要が行なわれるとのことである。な



図15 木母寺わきの震災横死者追悼碑

お、この碑に並んで海軍大将東郷平八郎書の「日露戦役従軍記念碑」（明治39年建立）などがある。

◇ 梅若の 伝えも悲し 隅田川
木母寺わきの 震災の碑

本所界隈の地震モニュメント

安政江戸地震（M=6.9, 1855）に際して、火災などによる犠牲者が江戸の本所・深川方面に多かったことは、正確な数はともかく、いろいろな文献によって明らかにされている。

関東地震（M=7.9, 1923）の場合には、これらの地区

表1 各警察署で検死した焼死者数

番號	場 所	焼死者数	所 轄 警察署
1	本所區被服廠跡	44,030	相生署
2	浅草區田中小學校敷地内	1,081	日本堤署
3	本所區大平町1丁目46番地先横川掛北詰	773	太平署
4	本所區錦糸町驛	630	太平署
5	浅草區吉原公園	490	日本堤署
6	深川區東森下町109番地先	237	西平野署
7	深川區伊豫橋際	209	扇橋署
8	本所區枕橋際	157	向嶋署
9	本所區緑町3丁目1番地豎川河岸	125	相生署
10	深川區東大工町566番地丈六原	113	扇橋署
11	神田區神田驛	108	錦町署

における惨状は、より顕著に報告されている。『震災予防調査会報告第百号火災篇』の中村清二博士の報告によるならば、各警察署で検死した焼死者の100名以上あった場所は表1の通りである。

「此表で見ルト人ノ焼死シタ場所ハ廣場カ橋ガ多イ。コレハツマリ火に追ハレ追ハレテ遂ニ多數ノ人ガ密集シテ身動キノナラヌ様ニナツタ所ヲ包圍攻撃セラレタノデアラウ。」

同博士は、
とコメントしている。

同じく前記報告より引用すると、当時の東京市の震災火災による死者数は、表2のようになり、人口42人につき1人の死者を出したことになる。

この表を見て明らかのように、被服廠跡（地震・津波碑探訪：その1、本誌18号、39頁、1994参照）の大量死を含む本所や深川・浅草に被害が集中している。中村清二博士によると、このような被害の地域性的原因として、

「尚本所、深川兩區内ニ最多數ノ死者ヲ出シタ重ナル原因トシテハ、西方ハ隅田川ヲ控ヘ、東方郡部ニ至ル交通路ハ頗ル狹隘不便デアリ、区内ノ道路モ至ルトコロ他區ニ比シ特ニ狹隘デアツタコトデアリ、ノミナラズ附近ニ適當ナ避難場所ヲ缺キ、區民ハ逃場ニ迷ヒ轉々シタノハ事實デアリ、唯避難ノ廣場トシテハ本所デハ被服廠跡、深川デハ洲崎埋立地、岩崎公園等モアツタガ、被服廠跡ハ到底安全ノ地デナク死ヌベク人ヲ集メタ、洲崎埋立地ハ津浪襲來ノ噂アリテ之ヲ利用シナカツタ、岩崎公園ハ規模小ニシテ多數ノ避難者を容ル、ニ足ラナカツタノデアリ。」

となっている。

このように多くの犠牲を出した本所地区には、死者を悼む記念碑・供養塔が数多く残されている。「震災記念堂・東京都慰霊堂」関係のモニュメントについては、すでに、本「探訪記：その1」（本誌18号）に記載してあるので、ここにはそれ以外、本所界隈にあるモニュメントを紹介しよう。大部分が東京震災関係であるが、安政江戸地震に関する碑もいくつかあり、貴重な史料であろう。

●如意輪寺（太子堂）の石額[墨田区吾妻橋1-22-14]

都営浅草線本所吾妻橋駅からほど近いところに如意輪寺がある（図16）。小島惟孝著『墨田区史跡散歩—東京史跡ガイド⑦』（学生社、1993）によると、この寺は嘉祥2年（849）に創建され、かつては聖徳太子像が安置

表2 各區別死者数

區	死者数
麴 町	104
神 田	843
日本橋	309
京 橋	296
芝	270
麻 布	35
赤 坂	76
四 谷	4
牛 込	53
小石川	216
本 郷	55
下 谷	208
浅 草	2,244
本 所	48,493
深 川	2,831
水上警察署取扱	2,383
計	58,420

されていたと伝えられる。神仏分離以前には牛島太子堂として知られていたという。

すぐ隣にリバーピア吾妻橋ライフタワーのモダン・ビルがそそり立ち、民家風の当寺院とは極端なコントラストを示している。

関東地震の際に、神仏混淆時代の鳥居が倒れ、その、「牛島聖徳太子」と題した石額が本堂の前、図17のように安置されている。現在の本堂には、図18のような額が掲げている。

住職のお話では、鳥居が倒れたのは関東地震で、前出『墨田区史跡散歩』では安政地震の際と伝えられているようだが、これは間違いである。なお、先代の住職は聖徳太子像（等身大）を背負って避難の途中、隅田川に入り住職は助かったが、太子像は身代わりとなったためか流されてしまったとのことである。

昭和30年頃、ある篤志家が石額の拓本をもととして作った木の額が、現在、本堂に掲げられており、石額を書いた人物は近くの水戸藩下屋敷の雪齋（姓不詳）とのことである。

- ◇ 太子像 流失せしは 身代わりか
古い歴史の 如意輪寺
- ◇ そそり立つ モダンビル下の 太子堂
今も残るは 震災のあと

●NTT 旧墨田局「慰霊」の碑 [墨田区石原 4-36-1]

都営浅草線本所吾妻橋駅から、三つ目通りを数百メートル南下すると、左側にNTT 旧墨田局があり（図16）、通りに面して「慰霊」と題したモニュメント（高さ231センチ、幅34センチ）が図19のように建っている。

告知板には下記のような由来が記されていて、震災および戦災の殉職者が弔われている。

「 由来

この慰霊碑は、昭和二十年三月十日未明の大空襲により当地一帯が焼野原と化した際、電話局も全焼し前夜から勤



図16 如意輪寺・旧NTT墨田局・妙見堂・報恩寺周辺図



図17 如意輪寺の「聖徳太子」石額

務していた十五歳を最年少とする電話交換手二十八名及び男子職員三名が最後まで職場を守り殉職された。職員の霊と関東大震災において殉職された男子職員二名の霊を慰めるとともに、二度とこのような悲劇の起こらないことを祈願して昭和三十三年三月十日に建立されました。

慰霊碑右手前には吉川英治氏の自筆による碑文があります。

昭和五十九年三月十日

墨田区電話局」

また慰霊碑わきには、下記のような吉川英治選の追悼文と殉職者氏名を刻んだ碑がある。

碑文

春秋の歩み文化の進展はその早さその恩恵に馴る倦つ
い吾人をして過去の尊いものをも忘れしむる
ここ百尺の浄地ハ大正十二年九月一日の関東大震災



図18 如意輪寺本堂の掲額

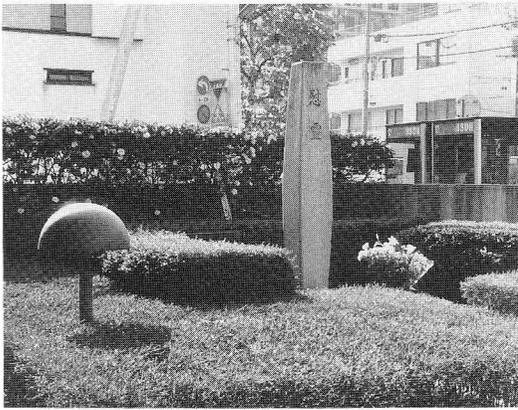


図19 旧NTT 墨田局の慰霊碑

殉職者二名と また過ぐる昭和二十年三月九日夜半
における大戦の上空襲下に 國を愛する清純と自
らの使命の為 プレストも身に離たず 劫火のうち
に相擁して仆れた主事以下の男職員三名 ならびに
女子交換手二十八名が その崇高な殉職の死を永遠と
なした跡である

当時の墨田分局 いま復興を一新して その竣工の慶を茲
に見る日 想いをまた春草の下に垂れて かつての
可憐なる處女らや ほか諸霊にたいし 痛惜の
悼みを新にそゝがずにいられない
人々よ 日常機縁の間 ふとここに佇む折もあ
らば また何とぞ 一顧の歴史と寸時の祈念
とを惜ませ給うな

吉川英治 謹選

「地震・津波碑探訪(その1)」(本誌18号, 39頁)
の「震災記念堂・東京慰霊堂」の項に述べたように、震
災のために約8,000人の町民のうち、約7,000人の焼死
者が出た石原町としては、横網町公園内の「石原町遭難
者碑」とともに重要なモニュメントであろう。また、先
の大戦の空襲により多くの犠牲者を出したことも痛恨事
である。

◇ 追悼の 碑文も悲し 電話局
職場死守せる 殉職の人

● 能勢妙見堂「大震火災遭難者追悼之碑」[墨田区本所
4-6-10] 石原町の碑から徒歩数分の能勢妙見堂(撰
州能勢妙見堂別院)には、図20のような追悼碑がある
(図16)。これは東京市長「永田秀次郎」の書で、昭和
6年3月1日と記してある。隣には「戦災殉難諸精霊供
養之碑」がある。本所地区のモニュメントにしばしば共
通であるが、ここでも震災と戦災の犠牲者をあわせまっ
ている。

◇ 震災の 犠牲にまさる 大戦の
罹災者まつる 殉難の碑



図20 能瀬妙見堂の追悼碑

● 法恩寺「地震圧死火難水難剣難横死精霊供養塔」[墨
田区太平1-26-16] 能勢妙見堂からほど近いところ
に、法恩寺という立派な寺院がある(図16)。蔵前橋通
りに面して山門があり、その参道の突当りに、当寺があ
る(図21)。ここには、室町時代中期に江戸城を築いた
太田道灌の墓碑が建立されている。

境内の片隅に、他の無縁塔などと並んで、図22のよ
うなあまり大きくない(高さ96センチ、幅27センチ)
「地震歴死火難水難剣難横死精霊供養塔」がある。正面
に「南無妙法蓮華經」の鬚題目が刻まれ、その下に3行
書きで、「地震歴死、火難水難、剣難横死」とあり、さら
にその下に「精霊」とある。右端の「地震歴死」の字
の配置から判断して追刻であろうとされている。

文政12年(1829)3月、本所堅川の講中8人によっ
て建立されたもので、塔の側面に、

「世話人

岡寄屋安兵衛	平野屋清右エ門
信濃屋興兵衛	伊勢屋權六
下駄屋治郎兵衛	西ノ宮惣八
八百屋市五良	桶屋佐兵衛



図21 報恩寺正面



図22 地震死火難水難剣難横死者精霊供養塔(報恩寺)

と刻んである。また他の2側面には、

「安政二乙卯歳十月二日
地震歴死焼死之
靈魂爲菩提再建

および

「文政十二年巳丑三月廿一日
大火之砌 人多死爲菩提建立

とある。

安政地震に関する碑文は追刻らしいとされているが、この碑は文政12年(1829)の建立で、本所地区はもちろん東京における地震関係の最古の供養塔のようである。

◇ 文政の 名残とどめる 供養塔
あわせまつは 安政の死者

●横川橋畔「大震災遭難者追悼碑」[墨田区横川1-15-1]
法恩寺から北へ数百メートル、春日通り横川橋ぎわに、「大震災遭難者追悼碑」がある(図16)。高さ260センチ、幅110センチという立派なもので、約360人の人びとの寄付により、昭和9年(1934)9月1日建立された(図23)。

碑銘は元総理大臣斎藤實(正二位勲一等子爵)の書による。斎藤實は、1936年2月26日の陸軍青年将校による「2・26事件」と呼ばれるクーデターの際殺害された。当時、内大臣であった。

碑の正面下段には、つぎのような建碑趣旨が刻まれている。



図23 横川橋畔「大震災遭難者追悼碑」

建碑趣旨 碑 文

顧レバ大正十二年九月一日午前十一時五十八分突如トシテ関東一體ニ互ル未曾有ノ激震ハ我が帝都五百年ノ文化ヲ一朝ニシテ烏有ニ歸セシメ三拾六萬六千戸ノ家屋ヲ焼失シ五萬八千餘人ノ市民ヲ犠牲トシ損害實ニ三拾七億圓ヲ算セリ以テ其ノ惨害ノ激甚ナルヲ知ルベシ當横川橋畔ハ本區ニ於ケル第二ノ被服廠トシテ橋脚隧道ニ橋下ノ船中ニ老幼相扶ケ父子相擁シテ歿死セルモノ實ニ三千六百有餘人ニ及ヒ其ノ惨状言語に絶ス爾來星霜ヲ閱スルコト拾餘年官民一致復興ニ努カヲ傾ケ今ヤ帝都ハ全世界第二ノ都市トシテ中外ニ誇稱スルニ至ル是レ全ク災害犠牲者ノ賜ト謂フ可キナリ爰ニ於テ當地附近有志相謀リ特ニ總理大臣斎藤閣下ノ題字ヲ乞ヒ先ノ事蹟ヲ記念シ永ク歿死者ノ追憶ト市民ノ警醒ニ資センコトヲ希ヒ石ニ刻シ以テ後昆ニ傳フ矣

昭和九年九月一日

法恩精舎 日肇識

この建碑趣旨によると、震災の際3,600人あまりの人びとが、横川橋トンネルや橋の下の船中で遭難死して、第二の被服廠ともいべき惨状を呈したとのことである。

◇ 大正の 惨劇語る 横川橋

碑文に刻む 震災のあと

[りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授]

■ 地震予知連絡会情報 ■

笠原 稔 ■ 田中寅夫 ■ 安藤雅孝

1994年、10月4日の北海道東方沖地震 (M 8.2) に続いて、12月28日に三陸はるか沖地震 (M 7.5) が発生し、揺れ続け、暮れて行った。そして、1995年1月17日、最も恐れていた都市直下型地震、兵庫県南部地震 (M 7.2) が発生し、死者5500人を越し、被害額約10兆円に及ぶ阪神・淡路大震災を引き起こした。さらに、4月1日には新潟県北部、笹神村を中心に、M 6.0の直下型地震が発生、ここ数十年続いた静穏期から活動期へ移行してきたことを物語るかのようなのである。これらの活動を受けて地震予知連絡会も2月の定例会までの間に、3回の会がもたれた。1994年12月29日には、三陸はるか沖地震についての特定部会が開かれ、1995年1月18日と1月27日には、兵庫県南部地震に関連して、第111回、第112回地震予知連絡会が開かれた。地震直後であったが多くの機関から、地震状況と臨時緊急観測についての報告がなされた。2月20日に、第113回が開催され、99件の報告事項に達し、資料の厚さも7cmを越えた。4月6日に新潟県北部の地震を受けて第114回が、5月22日には定例の第115回が開催された。

介込島大の調査結果)。即日のうちに、これらの結果が出る体制になっていることも示されたわけである。しかし、地震観測網は都市部を見事に避けて展開されていたし、地理院のGPS観測網も、この規模の直下型地震の監視が可能な密度ではないことを再認識させた(第111

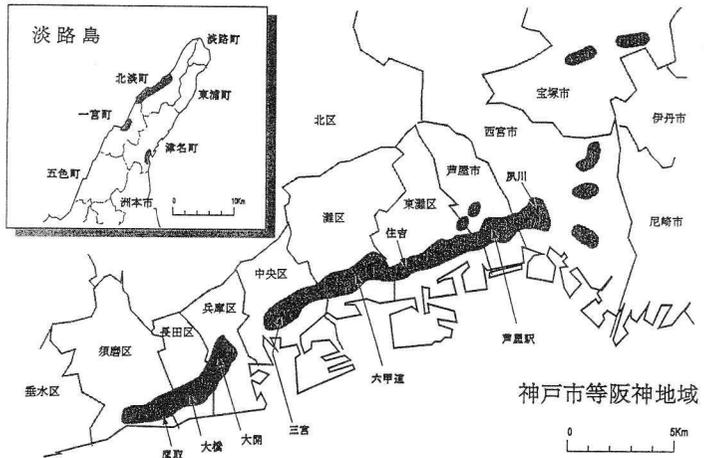


図1 現地調査に基づく震度7地域分布図(第113回:気象庁資料) 平成7年[1995年]兵庫県南部地震。

兵庫県南部地震(速報)

本震震央は淡路島の北、明石海峡付近、M 7.2、典型的な右横ずれ断層であった(第111回:気象庁資料)。余震は、淡路島北部から神戸・西宮・芦屋・宝塚まで伸びる約50kmに線上に分布している(第111回:京大防災研資料)。これは、この地域に見られる活断層分布とほぼ一致するものであった。淡路島では野島断層に沿って、地震断層が出現していることが報告され、あらためて活断層が地震発生ポテンシャルを持っていることを示すものとなった(第111回:地質調査所資料、地震研究所紹

Hyogo 1995/01/17

$M_0 = 2.5 \times 10^{26}$ dyne-cm $M_w = 6.9$ Depth = 8 km var.=0.3450

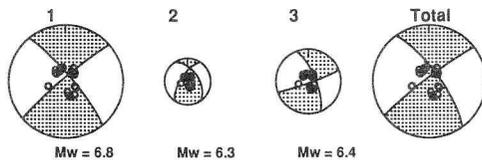
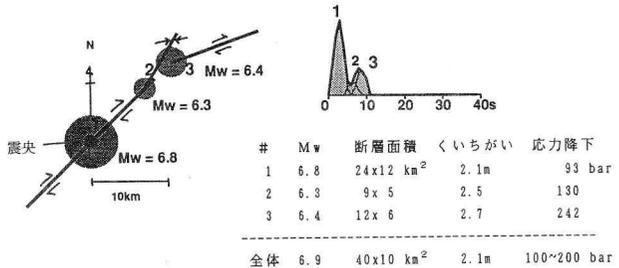
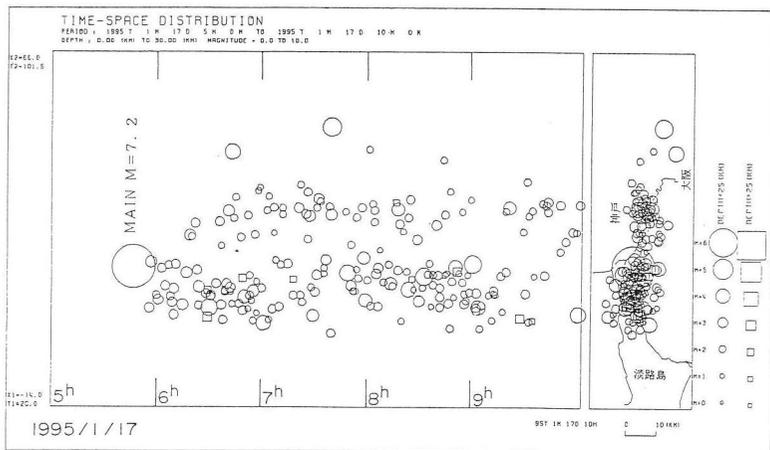


図2 遠地実体波による兵庫県南部地震の震源過程[解析:横浜市立大学・菊地正幸](第112回:京大防災研資料)

回：地理院資料)。

地震予知観測研究の側面から、都市部での諸観測の必

要性、直下型のM7クラスの地震を想定した観測網密度の必要性、を強く意識させられた地震であった。が、直



ちに、各機関総力をあげてのこれまでに見られない稠密な、多種類の観測・調査が展開された。

112回、113回の報告から少し紹介する。まず、本震の震源であるが、震源に近い地震観測点の利用できるすべてを使い、特に、阪神地域に展開されていた強震観測データも用いて、再決定したものが、発震時1月17日5時46分51.63秒、震源位置 34.601°N, 135.033°E, 17.73 km (第113回：京大防災研資料)。同じく、気象庁による詳細震源は、発震時1月17日5時46分52.0秒、震源位置 34.60°N, 135.05°E, 14 km (第113回：気象庁資

図3 和歌山地震観測所が決めた兵庫県南部地震後の余震活動の時空間分布図 [1月17日5時~10時] (第113回：東大地震研資料)

本震の南西側、淡路島の余震は本震直後から発生しているが北東側、神戸側では遅れて始まり、時間とともに北東へ広がっているのがわかる。

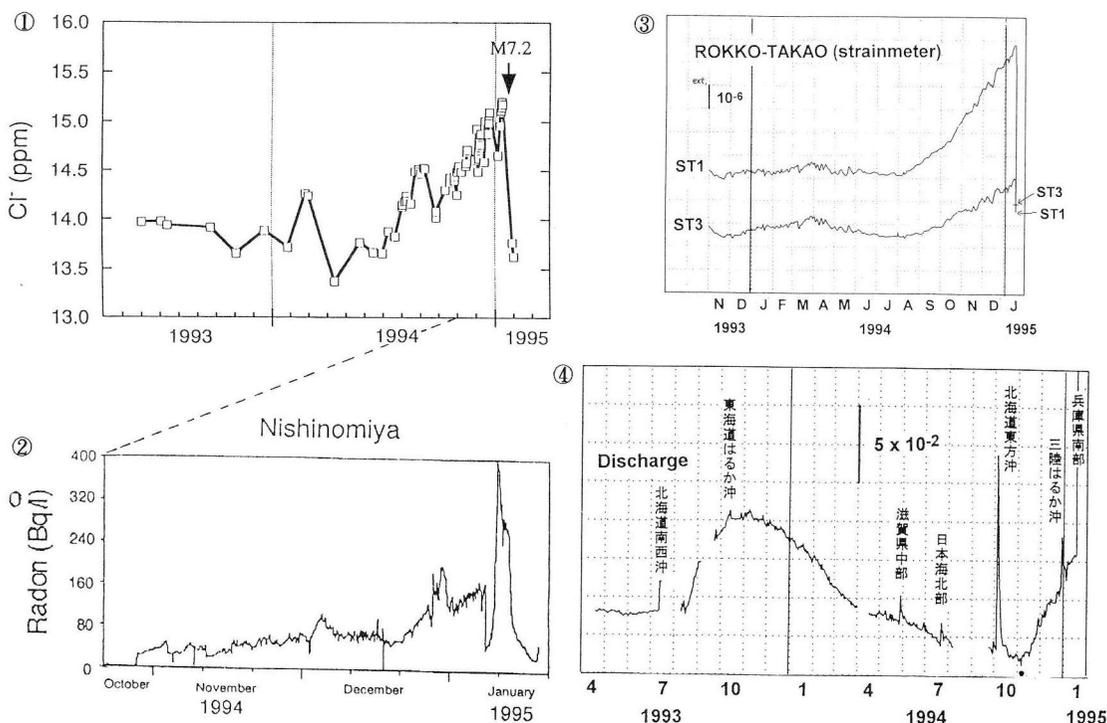


図4 兵庫県南部地震の前兆変動のまとめ

- ① 神戸市井戸水の成分変化 (第113回：東大理学部資料)
- ② 西宮市の地下水ラドン濃度変化 (第112回：東大理学部資料)
- ③ 六甲高尾の歪み変化 [リニアートレンドは除去した] (第112回：京大理学部資料)
- ④ 六甲高尾の湧水量変化 (第113回：京大理学部資料)

個別に報告されたものを時間軸をできるだけ合わせて示したもの。ラドン濃度観測の開始は1994年10月中旬のために時間軸が広がっている。いずれにも、1994年8~10月頃から変化が見られ、地震まで同じ傾向の変化を続けたことがわかる。

料)で、両者はほとんど一致している。

気象官署での震度の発表はVIまでであるが、現地調査を行ない、それに基づく震度VIIの分布が報告された(図1, 第113回: 気象庁資料)。余震分布と地表の活断層位置とは非常によく一致するが、震度VII, すなわち被害の集中域とは一致しない。これが断層が地表に出なかったこともあり、地震工学的な議論を呼んでいる。

図2に、今回の地震の震源過程の解析結果を示す(第112回: 横浜市立大学資料)。断層運動は3つのセグメントに別れるが、大きく分けると、本震の南東部淡路島側で先に動き、北東部の神戸側の2つのセグメントは5秒ほど遅れて動いている。直後の余震活動は、まず、淡路側に集中して発生し、神戸側は、遅れて6時ころから活動し、さらに北東側では、6時40分ころから活動が始まり、その後に見られる全体の余震活動域が形成された(図3, 第113回: 東京大学地震研究所資料)。これは、本震直後の余震活動の空間分布を示す稀少な例で、興味深い。

地震前兆現象としては、六甲・高雄観測点の歪み変化と湧水量の変化に、1994年10月頃から異常変動が見られる(第112回: 京大防災研資料)。また、1994年10月から始められた、西宮でのラドン濃度観測によると、地震まで急激に濃度上昇を示していた(第112回: 東大理学部資料、広島大・スミカワ研・岐阜大観測データ)。さらに、神戸市灘区の井戸で生産されているボトル詰め飲料地下水を分析した結果、やはり、1994年秋から塩素濃度が上昇していたことが発見された(第113回: 東大理学部資料)。個々に発表された以上のデータを、時間軸をあわせて並べたものを図4に示す。単独の記録からは、個々に見られた変

動を直ちに地震前兆現象とは判断しにくいかも知れないが、並べて見ることであれば、神戸の地下の「異常」の判断ができるものと思われる。

この他の前兆現象としては、岐阜県白狐温泉で、ガス流出量が7時間前から異常減少を示し3時間前に減少のピークをむかえ、地震後7時間にわたり漸増傾向が続いた(第113回: 名古屋大学資料)。電磁放射現象の異常が、北海道東方沖地震前同様に、京都で観測されている(第113回: 京大理学部資料)。

東海地方の地殻変動・地震活動

御前崎の地殻変動については、1992年以降の沈降速度の鈍化・季節変動の減少と過去の動きと異なる変化が見られていたが、今回は図5に示すように大きな沈降を示した(第113回: 地理院資料)。これについては、従来の季節変動の振幅が復活したこと、沈降のリズムの一時的な乱れ現象であったかは、直には理解できない

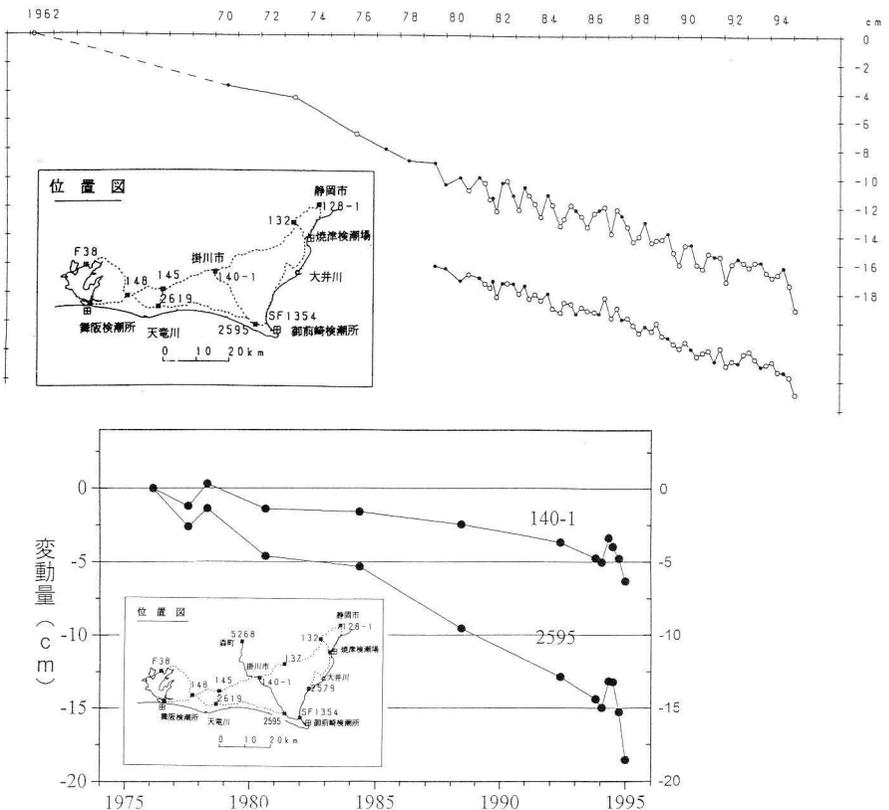


図5 上図: 水準点140-1 [掛川]を基準とした水準点2595 [浜岡]の経年変化 [上の変動曲線が観測値, 下が年周変化を補正した値].

下図: 水準点5268 [森町]を基準にした場合の水準点140-1 [掛川]と水準点2595 [浜岡]の経年変化 (第113回: 地理院資料)

93年ころからの沈降の停滞と年周変化の振幅の減少は、今回見られる大きな沈降で元に戻ったように見ることもできるし、今まで以上の沈降速度を示すことになるか、注目される。

が、気になる点である。これは静岡市上板における地殻傾斜の変動パターンの変化とも時期的には対応する。しかし、後者については、センサー交換によるドリフトの影響の可能性があるとされている（静岡大学・静岡県地震対策課資料）。1994年7月下旬からスタートした、東海・南関東地域のGPS約100点の連続観測により、水平変動の監視もリアルタイムに近く行なわれるようになった。これにより、御前崎の水準による上下変動とこの地域の水平変動とを同時に議論できるようになり、異常変化の判断がより確かなるものと期待される。その2月中旬までの変化によると、駿河湾をはさむ、伊豆半島戸田・南伊豆と、焼津・御前崎間の変化は、東西圧縮傾向が、すでに見られる。データの長さからは、変動傾向の変化を議論できる段階ではないが、3次元的变化を1cmの精度で監視できるもので、非常に期待が持てる（第113回：地理院資料）。駿河湾および遠州灘の地震活動は非常に低調であった。12月に伊勢湾での20～40km深さの地震活動が目立った程度である（第113回：名古屋大学資料）。

三陸はるか沖地震

12月28日、21時19分頃、三陸はるか沖地震（ $40^{\circ}27'$ 、 $143^{\circ}43'$ ）のごく浅いところを震源とするM7.5の地震が発生し、宮古で最大55cmの津波を記録した（第113回：気象庁資料）。これにより八戸で震度VIを記録、死者3名、全半壊家屋6229棟に達する被害が生じた。本震の位置が沖合にあるにもかかわらず、被害は八戸に集中した。図6の上図に余震震央分布を示したが、余震域は西に広がり、かなり八戸に近いところまで及んでいる（第113回：気象庁資料）。メカニズムはプレート境界に典型的な低角逆断層であり、1968年十勝沖地震と同じである。しかし、初期破壊から20秒後に主破壊が発生しており、その間に顕著なモーメントの解放がみられないこの遅れは注目される（特定部会：会長資料、横浜市大解析）。津波の波源域は、北・西・南は余震域と一致するが、東（花咲・釧路からの逆伝播）は、余震域の中央部にきている（特定部会：気象庁資料）。余震分布も中央でくびれており、かつ傾斜角が東西に大きく異なっている（図6中図、下図；第113回：東北大資料）。これらのデータは、単調な1枚の断層運動ではなか

ったことを示している。海溝よりの余震活動は、1992年7月と、1994年4月の海溝よりの群発地震活動域の間に位置する。江刺（天文台水沢）と宮古（東北大）観測点の歪み計記録には、地震後に時定数が数時間の変動が見られた。これは、1992年の三陸沖の地震で見られた記録と良く似た記録であり、スローアースクウェイク

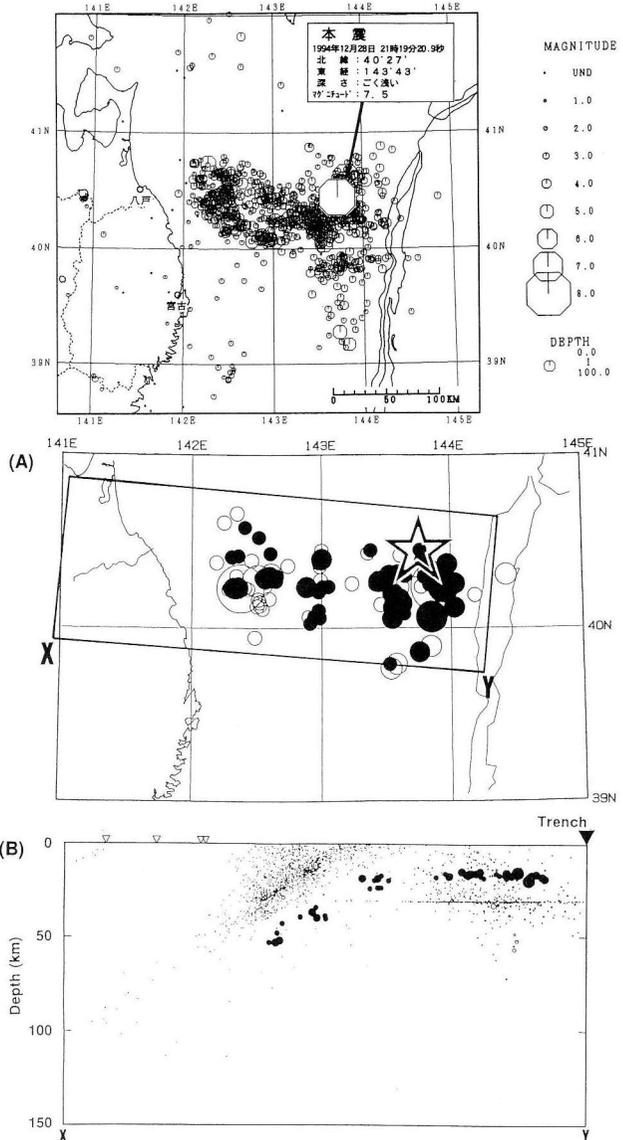


図6 上図：仙台管区気象台による三陸はるか沖地震の震央分布 [12月28日21:00～1月16日15:00] (第113回：気象庁資料)
 中図：M3以上の地震の震央分布と、深さ決定のためにsP変換波の観測された地震 [●] と判別できなかった地震 [○]
 下図：それらの震源断面投影図 [中図のX-Y方向] (第113回：東北大資料)
 海溝寄りの地震はほぼ水平であるが、陸側の余震は潜り込むプレートの傾きに沿うように分布する。

も発生した可能性を示唆している。1月7日に最大余震 M 6.9 が、余震域の西端で発生し、八戸では軽微な被害が生じた(第113回:気象庁資料)。

その他の最近の地震活動

伊豆諸島:1994年11月に、箱根から御蔵島西域にかけて4カ所の地震活動が連動して発生した中で、新島近海・神津島近海の地震活動が引き続き、1月13日にはM5を含む群発地震活動が発生している(第113回:気象庁資料)。伊豆半島内の地震活動は1994年2月27日以降、1年ほど非常に低調になっている。

東京付近:1994年12月19日、東京・埼玉県境でM4.2の浅発地震が発生し、付近では軽微な被害が生じた。震央は、立川活断層と五日市活断層の間である。図7上図に東京付近で発生している浅い地震のMT図を示したが、最近、大粒の地震が発生し始めていることがわかる。下図に示した、過去200年の地震活動と比較してみると、今後、より大きな地震の発生が予想される活動期に入ったと言えよう(113回:防災科技研資料)。

関東地方:1995年1月10日、茨城県沖でM6.2の地震が発生している。

東北地方:1994年12月18日、福島県南部(下郷町)でM5.5、東西圧縮の逆断層タイプの浅い地震が発生している。近くには、大内-倉村活断層帯が南北に走っている。1時間半後にM4.4の最大余震が発生している。この位置は、1943年8月12日の「田島地震」M6.2とはほぼ同じ地域である(第113回:気象庁資料)。日本海東縁部の地震空白域として注目されている酒田北西沖で、1995年1月22日、M4の地震が発生し、余震が引き続いた。同時に、設置後間もないが飛島の500m観測井の体積歪み計に異常変化が現れており、今後の推移が注目される(第113回:東北大資料)。

中部地方:1984年長野県西部地震の震源域付近では、12月比較的大きな地震が頻発し、1月には群発地震活動があった(第113回:名大資料)。

九州地方:1995年2月9日、福岡市付近でM2.0の微小地震があり、続いて2個の震源が決められている。福岡市の中央を警固断層という活断層が走っており、過去10年の地震活動でも、この断層に沿う分布が明瞭に見られ、要注意である(第113回:九大資料)。1994年2月13日の鹿児島県北部地震(M5.7)の余震活動は、群発地震活動的に1年後も続いており、1995年1月にもM3.7の余震が発生している。沖縄近海では、1995年1月15日M5.3の地震が発生し、沖永良部島で震度IVであった。南西諸島および台湾付近での最近の地震活動は活発で今後の推移を注意したい(第113回:気象庁

資料)。

北海道地方:1994年北海道東方沖地震の余震活動は、依然として活発で、1995年1月12日M6.0、1月21日M6.2の余震が発生している。また1995年1月28

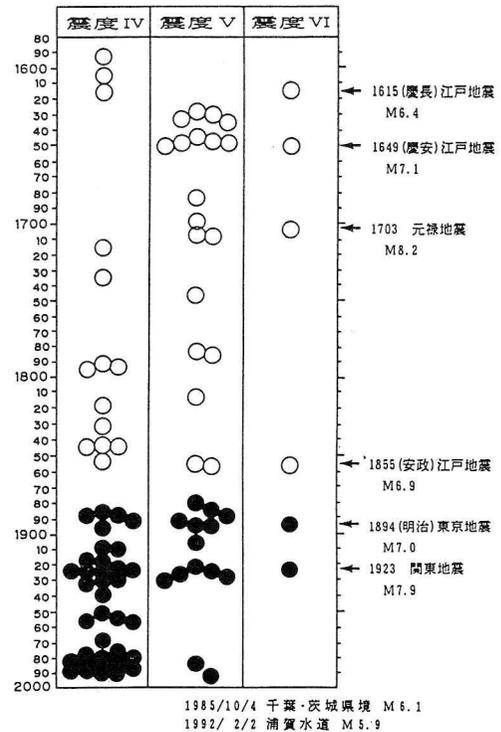
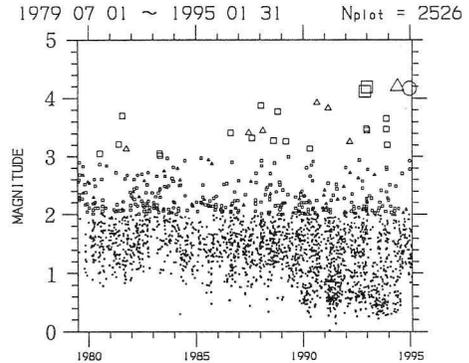


図7 東京付近の地震活動
 上図:最近15年間の東京付近の浅発地震活動[深さ35km未満]の推移
 下図:江戸時代から今日まで400年間における東京[江戸]での有感地震の推移
 黒丸は、明治以降を示している(第113回:防災科技研資料)。
 最近、大きめの地震が発生してきていることと、過去にも時間とともに規模が大きくなっていることを示しており、東京地域での今後の震度5程度の地震は十分に考えられる時期に入ってきたことを示すものであろう。

日、然別湖北方に M 3.6 の浅い地震が発生し、多くの余震を伴っている。これは、1989 年 1 月 15 日に発生した、M 4.4 を最大とする十勝支庁北部の群発地震域の南端に位置し、この活動域を拡大した形である（第 113 回：北大資料）。

1994 年 1 年間の日本付近の地震活動

気象庁が示した 1994 年 1 年間の日本付近の主な地震 49 個を紹介する。その基準は、(1)M 6 以上、(2)被害有り、(3)津波予報を行なった、(4)気象官署で震度 4 以上を観測した地震、となっている。

このうち、M 6 以上は 32 個である。大きい順に、10 月 4 日の北海道東方沖地震 M 8.1 とその余震 8 個、12 月 28 日の三陸はるか沖地震 M 7.5 とその余震 4 個が含まれる。残りの 18 個のうち、特記したいものとしては、7 月 22 日の日本海北部の深発地震 M 7.6 (551 km) と M 6.5 (563 km) がある。以下、大きいものを時間順に示すと、4 月 8 日：三陸はるか沖 M 6.6、小津波有り、4 月 30 日：日向灘 M 6.4、余震が非常に少なかった。5 月 24 日：台湾付近 M 6.6、これは石垣島近海の 5 月 23 日：M 6.1 と 5 月 24 日：M 6.2 との群発とみなせる。6 月 5 日：台湾付近 M 6.7、前記と少し離れている。続いて、東方沖地震の前に発生した 8 月の択捉島沖の群発地震があって、8 月 14 日：M 6.2、8 月 18 日：M 6.3、8 月 20

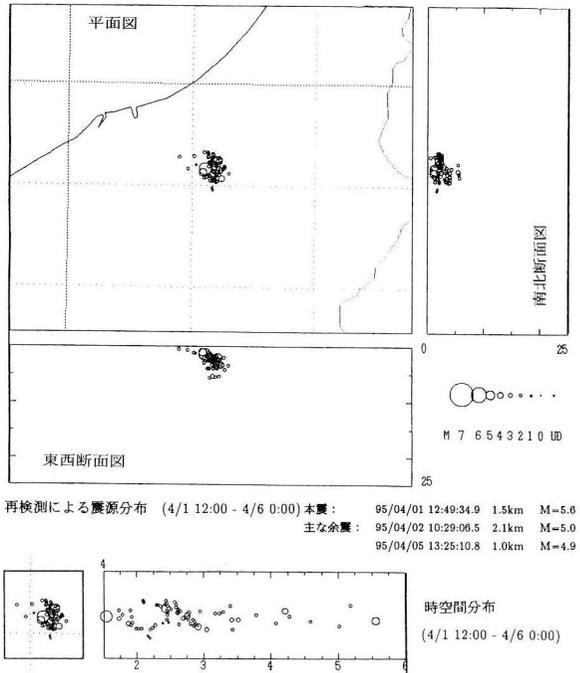


図 9 新潟県北部の地震の余震分布（第 114 回：東京大学地震研究所資料）

狭い地域に浅い場所で起こっている。したがって、本震も非常に浅いものであって、このために被害も限られた地域で見られたと考えられる。

日：M 6.1、8 月 29 日：M 6.3 の地震、8 月 31 日の国後島付近 M 6.5 がある。

残りは、4 月 11 日：沖縄島はるか南方沖 M 6.0、7 月 26 日：黄海の浅い地震 M 6.0、8 月 14 日：宮城県沖 M 6.0、8 月 16 日：福島県沖 M 6.0、9 月 13 日：奄美大島近海 M 6.0 であり、内陸の地震は一つもない。

上記以外で、被害を伴った地震は、いずれも浅い地震で、2 月 13 日：鹿児島県北部 M 5.7、3 月 11 日：伊豆大島近海（神津島で被害）M 5.3、5 月 28 日：滋賀県中部 M 5.2、12 月 18 日：福島県中部 M 5.5 であった。〈笠原 稔〉

1995 年 4 月 1 日に新潟県北部に M 6.0 の地震が発生して、60 名を越える負傷者、200 棟近い住家の全半壊といった被害がでたことから、4 月 6 日に第 114 回の地震予知連絡会が開催された。4 月 1 日から就任された第 14 期委員による初めての委員会であり、会長に茂木日本大学教授が選出され、副会長に宇津東京大学名誉教授と青木名古屋大学名誉教授が指名された。なお、高木元副会長は名誉会員に推された。ま

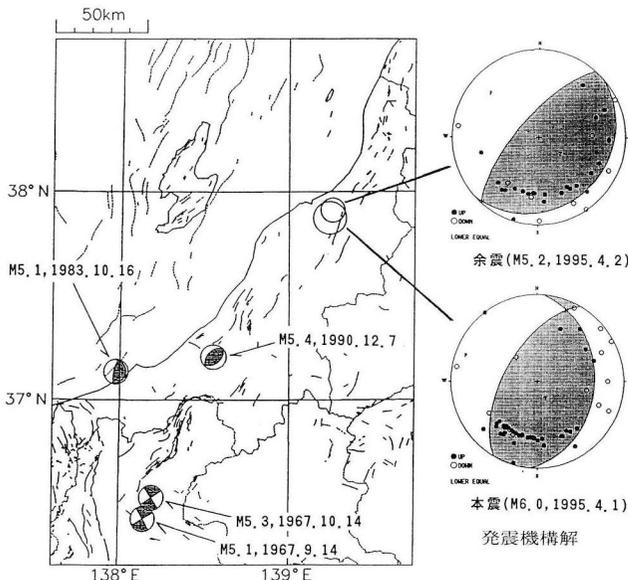


図 8 1995 年 4 月 1 日の新潟県北部に起こった地震の本震と 2 日の最大余震の発震機構（第 114 回：気象庁資料）

図に見られるように、これらの地震はこの地域の地震に共通した起り方をしていると考えてよい。

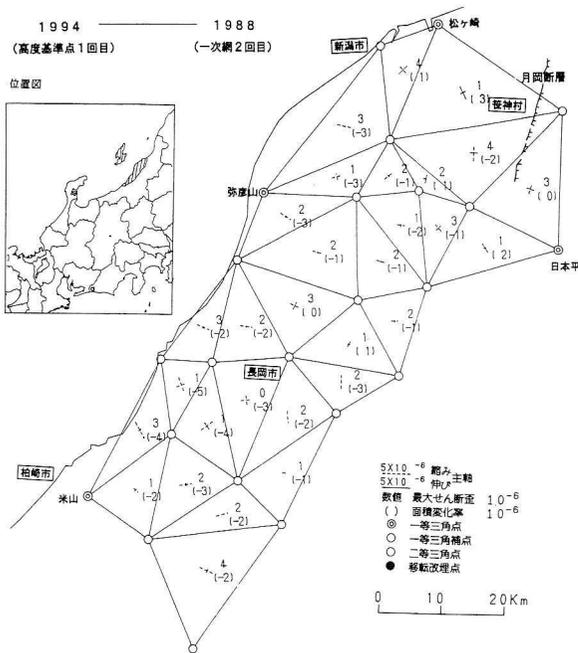


図10 1988年から1994年までの新潟地方の水平歪み
(第114回：地理院資料)

た、宇津副会長は強化地域部会長に、青木副会長は特定部会長に指名されて、両部会長によってそれぞれの部会の委員が指名された。第15期における活動に関しては、情報交換や提供のありかたなどについて検討がなされた。

新潟県北部の地震について

4月1日12時49分に新潟県北部にM6.0の地震が起こり、新潟市・笹神村などでは震度Ⅳの揺れが観測された。本震と、2日に起こった最大余震M5.2の発震機構は西北西-東南東圧縮の逆断層型であり、この地域の地震にみられる共通な起こり方を示している(図8)。東京大学地震研究所による臨時観測から、余震ははかなり浅い狭い範囲に起こっていることが明らかになり、このことから本震も非常に浅く、したがって、被害に限られた場所に集中したと考えられる(図9)。

図10には1988年から1994年までの6年間の水平歪みが示されているが、笹神村の周辺にとくに目立った歪みの集積は認められない。図10には、この地方の顕著な、活断層である月岡断層(逆断層)が示されているが、余震分布は月岡断層と一致せず西に位置している。なお、国土地理院によるGPSの連続観測には地震による有意な変動は検出されな

かった。また、震源から約40km離れた東京大学地震研究所の弥彦地殻変動観測所においても、地震前にとくに異常な変動は観測されていない。

1964年の新潟地震以後の地震活動を見ると、その余震域の南では活動が低くなっている。これが空白域であるとの指摘もあり、今回の地震はこの活動の低い地域の北東縁で起こっていることから、今後の推移を見守っていく必要がある。

近畿地方の地震・地殻活動

兵庫県南部地震の余震は順調に減少している。余震域を北東に伸ばすと有馬-高槻構造線の北側の地震活動の活発な地域につながるが、この付近一帯の地震活動は、山崎断層地域も含め、兵庫県南部地震以後活発化している(図11)。また、この図をみると1994年12月まで猪名川群発地震活動、京都府中部の地震活動がみられたが、これらの活動は兵庫県南部地震前の破壊限界に近い応力蓄積に関連する現象であると解釈できる。

淡路島で国土地理院によって行なわれた水準測量の結果は北部の東浦町で地震時に15cm程度の隆起があったことを示している。

東海地方の地震・地殻活動

4月18日に駿河湾北部で発生したM5.1の地震は、

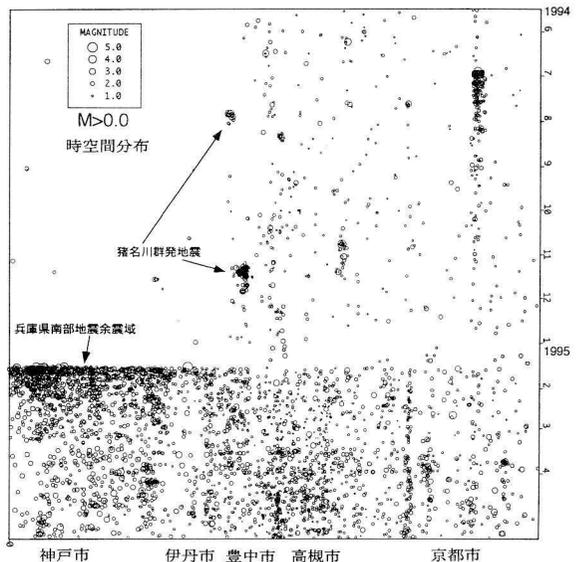


図11 1994年5月以降の神戸市から有馬-高槻構造線を横切り京都に至る地域の地震活動(第115回：京大防災研・理資料)
M>1.5の地震だけについても同様の傾向が見える。

予想される東海地震との関連から注目すべき地震であった。発震機構は南北に近い圧縮軸を示しており、余震分布は急角度の南下がりの面を示している（図12）。この地震はフィリピン海プレートの内部、おそらくプレート内の構造線といった場所で起こったものと考えられる。

御前崎および周辺は順調な経年的沈降を示しており、とくに異常は認められない。なお、図5では最新の値が大きい沈降を示しているが、これは水準測量の誤差であったと考えられる。

伊豆・関東・中部地方の地震・地殻活動

地震研究所の調査によれば、4月1日の新潟県北部の地震の前日ないし前々日から笹神村の出湯温泉で浅井戸の水位が約1m上昇したとされる。

東北大学理学部の観測結果では、今回の新潟県北部の地震が起こった地域、東頸城および会津若松の南にみられる狭い群発地域、の三地域の地震活動に、一つが活発

化すれば他は静かになるといった相互関連性が見られる。

長野県西部の地震活動としては、1984年の長野県西部地震の余震域の南側が1994年以降活発化してきて、1995年3月17日の地震M5.1に至ったと考えられる。なお、これに対して北側は今年に入って比較的静かであった。

伊豆地方には目だった活動は見られなかった。

北海道・東北地方の地震・地殻活動

1994年10月の北海道東方沖地震M8.1の余震活動は依然として活発であり、4月29日にはM6.4の地震が起こった。また、平成6年（1994年）三陸はるか沖地震の余震も順調に減少を示している。北海道大学理学部・東北大学理学部・東京大学理学部・東京大学地震研究所・東京大学海洋研究所および気象庁によって、この余震域に20台の海底地震計が設置されて観測が行なわれた。その結果によると多くの余震が20kmかそれより浅い場所に発生しており、これは以前に東北大学によってsP変換波を使って決められていた深さ分布とよく一致している。

東北大学理学部の仁別および男鹿観測室の歪みおよび傾斜には1994年暮れ近くから共通して経年的変化に転換が見られる。1994年12月から今年4月にかけて男鹿半島の約50km沖合いに地震活動があり、飛鳥観測点に設置したボアホール歪み計の異常変動とも関連して、その成りゆきが注目される。

その他

有明海に1995年1月からM2.9を最大とする群発地震活動がみられた。九州大学理学部の観測によれば南北引っ張りの力による発震機構が求められている。また、気象庁によれば、この地震群は1984年から94年までには地震の起こっていなかった空白域を埋めるように起こっている。

地震研究所では、台湾東部において光波観測による地震予知の試行の共同研究を大漢工商専科学校と進めているが、1995年2月の地震M5.8の予知の成功が続報として紹介された。

次回は定例通り8月21日に開催される予定である。

〈田中寅夫・安藤雅孝〉

[かさはら みのる 北海道大学理学部助教授]
[たなか とらお 京都大学防災研究所教授]
[あんど う まさたか 京都大学防災研究所教授]

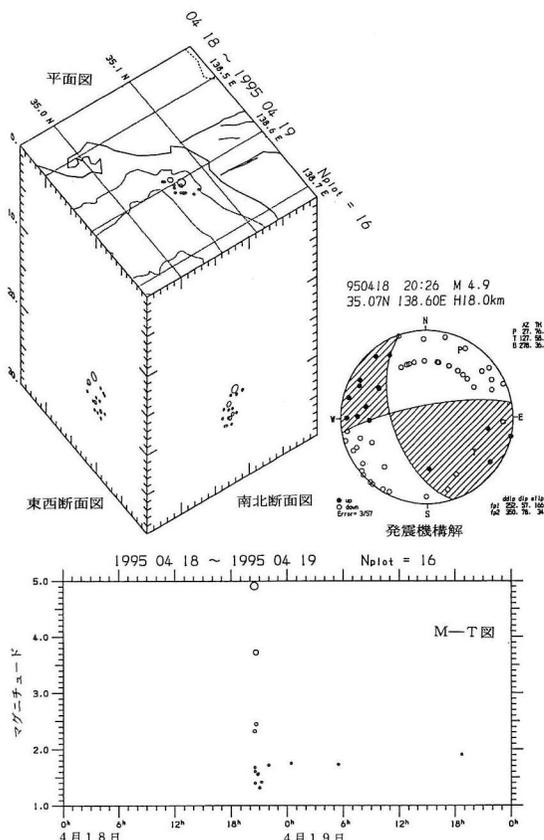


図12 1995年4月18日の駿河湾北部の地震の発震機構、余震分布およびマグニチュードで表わした余震の時系列（第115回：防災科研資料）

■ 書 評 ■

●地震の各分野を多岐にわたり解説した教科書

島崎邦彦・松田時彦 編
地震と断層

評者 安藤雅孝

この本の内容は地震の分野の多岐にわたっている。序章から10章まで活断層、震源過程、断層のレオロジー、岩石破壊実験、地球化学、津波、地震工学の第一線の11名の研究者が執筆しているものである。評者のこの分類は従来良く用いられているものであるが、もちろん各章ともそれぞれ工夫されて名前が付けられている。したがって章立を紹介するだけでもほぼ内容は示せる。教科書の内容は、東大の学生の言わば教養課程の授業の内容をまとめたもの、とのことであるが、ずいぶん高度な内容である。これを飽きさせずに一般教養の学生に講義をすることができたら、それだけで名教師に違いない。専門家が読んでも十分に楽しめる本である。

以下、各章について簡単に紹介したい。

序章の「地震の震源を追って」は、地震が断層運動の結果であることを明らかにする過程を、志田や中野の仕事を紹介しながら説明している。黎明期の日本の地震学を垣間見せるところがなかなかおもしろい。

第1, 2, 3章は活断層について解説している。第1章の「活断層を見る」は松田時彦氏の筆による。日本の活断層研究の第一人者である。松田氏は独自の考えで活断層の研究を行ない、その解釈を加えてきた。当初奇説と思えるものが次第に定着していくのも、松田氏の活断層に対するカンの鋭さを表しているのだろう。

第2章は活断層の地形をニュージーランド、伊那谷、アナトリアの例をあげて説明している。アナトリア断層を横切る橋桁が26mもずれている写真が載せてあるが、これは強烈な印象を与える。評者の不勉強のせいか、今まで知らなかったが何故この地が有名にならなかったのか不思議である。この写真だけでも一見に値する。

第3章は海の活断層、特に沿岸部の活断層について、時間予測モデルの検証に行なった数々の調査をエピソードを交えて紹介している。研究の醍醐味を教える良い教

材ではないだろうか。

第4章は「地震波からみた断層運動」の基礎的な問題の解説である。世界の大地震の例をとりあげながら説明を行なっている。

第5章は「震源の数理モデル」である。グリフィスの破壊理論から出発して、破壊同志の相互作用としての破壊過程の見方が重要であることを論じている。

第6章は「断層の深部を探る」。地震学者が断層とか破砕帯と言う場合に、その実態を見たことがあるわけではない。かつて深部にあった断層が地表にまで上がってきた断層や破砕帯を見ている地質学者は、現実に物質を観察し、その物性や化学的物質を調べており、話に重みがある。

第7章「実験室でみる断層運動」。実際の地震の発生様式の記述から始まり、破壊核の形成から本震への発展を構成法則を立てて推論している。ただし内容や記述の仕方が専門書のように、この章は難解な感じを与える。

第8章「地中ガスが伝える活断層の動き」。地震の前兆現象としての地球化学的变化を追ってきた学者の多くの試みが示されていて興味深い。

第9章は「津波と断層運動」。津波の測定から津波の波源域の推定まで比較的オーソドックスな問題の解説がされている。この1章を読めば津波の基礎は理解できる。その意味では教科書としての役割を十分果たしている。

第10章は「断層と地震災害」である。地震の災害をトルコの地震災害の例をあげて説明している。しかし、断層と震度の関係についてはもう少し立ち入った議論が欲しかった。地盤の影響が大きい兵庫県南部地震の被害も説明できると良かったが。

総じて良く書かれている本であるが、各章で難易度に大きな差がある。入門書のような章もある一方で、ほとんど専門的論文の紹介のような章もある。これ一冊では地震の教科書としては無理がある。もう少し専門書か普及書かに徹底したほうが良いように思える。この本を教科書として読んで地震像が把めていくとしたら、これはかなり地震を理解している人に違いない。それだけにこの本を書いた目的を改めて問い直した次第である。著者の多くは東大地震研究所所属である。同研究所が多彩な研究者を集めているがよくわかる。

〈東京大学出版会、1994年10月、A5版240頁、3502円〉

●プレートテクトニクスの原点に立ち返るための道標

瀬野徹三 著

プレートテクトニクスの基礎

評者 橋本 学

これまで私たちは、1960年代後半に成立したプレートテクトニクスに基づいて、グローバルからローカルまであらゆる地学現象を理解しようとしてきた。しかし、兵庫県南部地震は、私たちが内陸地震の発生についてのテクトニックな枠組みを持ち合わせていないことを痛感させ、約30年経ち成熟期から爛熟期を迎えた感のあるこの理論を、無批判に受け入れて地学現象を理解しようとしてきたことに対して反省を迫っている。私たちは、今一度プレートテクトニクスの原点に立ち返り、プレートテクトニクスの限界を見極め、必要となればこれに変わる新しいパラダイムを構築していかなければならないのではないか。「プレートテクトニクスの基礎」は、若い人がこれから地球科学に挑もうとするときはもちろん、今反省を求められている私たちがプレートテクトニクスの原点に立ち返ろうとするときにも、貴重な道標となる書である。

本書では、「なぜプレートテクトニクスなのか」と題された第1章で、基礎概念として「地球内部が表面の固いリソスフェアとその下の軟らかいアセノスフェアに分かれる」「リソスフェアは水平方向にひろがりを持ち、何枚かに分かれる」「プレートは互いに運動している」および「プレート境界で造構運動が起きる」の4つの要素を提示し、地球にはこれらの要素が備わっていることが最新の観測事実や理論的考察の成果に基づき説明される。中でも、プレート内部・境界付近・境界での歪速度と粘性率の見積もりは、プレートが固いことが定量的に理解され、説得力がある。第2章「地震のメカニズム」では、断層パラメータ・発震機構などについて、かみくだいた説明がなされている。特に、断層面と主応力軸とが必ずしも45°にはならないことが丁寧に説明されている。私たちは往々にしてこの事実(運動学的解釈≠ダイナミクス)を無視して議論することがあり、その危険性を私たちに再認識させる。第3章「プレート境界過程」と第4章「プレートの運動学」で、境界における物理過程やプレート運動決定について解説があり、これらに基づいた日本周辺のテクトニクス研究の成果が、第5章「日本付近のプレート運動と地震」に述べられ、現在最

先端のプレート運動学や境界過程について知識を得ることができる。とりわけ、オホーツク・プレートやフィリピン海プレートの剛体プレートとしての運動決定は、島弧・海溝系での剛体プレートの仮定は議論すべき問題であるが、日本列島のテクトニクスの議論に拘束条件を与え、意義が大きい。

本書は、大学生を対象に書かれているので、適切なタイミングで演習問題が挿入されている。これらの問題は基礎的な数学・物理学の知識と電卓があれば解けるものであるが、地学現象をできる限り定量的に理解しようとする著者の意志がそこには感じられる。本文中でも速度や歪・応力などを定量的に評価する場面が随所に見られ、ともすれば定性的な議論に終始しがちなテクトニクス研究に警鐘を鳴らす狙いがこめられている、と見るのは読み過ぎであろうか。昨今、運動学とダイナミクスが混乱して議論されているきらいもあり、これらを峻別することが次のパラダイム構築への第一歩と考えられる。ダイナミクスを中心テーマにした続巻が準備されているとのこと。期待したい。

〈朝倉書店、1995年2月、A5版、190頁、3914円〉

[はしもと まなぶ 国土地理院地殻調査部地殻変動解析室長]

ご 案 内

地殻変動観測施設要覧

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

財団法人 地震予知総合研究振興会

●地震予知が不可能ではないことを教える

力武常次 監修
力武常次・相田 勇・井野盛夫 著
地震予知のわかる本

評者 萩原幸男

1月17日早朝、阪神地域を襲った兵庫県南部地震。その災害のすさまじさに日本中の人びとはTVの前に釘付けになった。時間を追うごとに犠牲者の数は増える一方、ついに5500人を超える大災害に発展した。地震に大丈夫と言われた高速道路は無惨にも倒壊し、機能しない消防活動の前に火災は猛威をふるった。「地震予知と防災」——この重要性が、これ程にまで実感されたことがあったろうか。

「自分は前から関西に地震があると考えていた」と、したり顔で地震学者が言うのは不愉快だと新聞や週刊誌の記事にあったそうである。「知っていたのなら何故もっと一般市民、マスコミ、それに行政にアピールしなかったのか」と非難する声が出るのは当然であろう。しかし学者の側からすると、著作や講演でさんざん話してきたのに、反応しない社会にも問題があると反論したくなる。実は、地震に関する啓蒙書が数多く出版されているにも拘わらず、それでいてよく理解されていないのが実状である。

折角わかりやすく話をしたのに、後でトンチンカンな質問が出てガッカリすることがある。なにが理解を妨げているのであろうか。まず用語に原因の一端があると思う。適切な解説なしに不意に専門用語が飛び出したのでは理解できない。専門家が専門用語と思ってもない常識的な用語が、実は読者・聴衆にとっては専門用語だったりする。

本書はズブの素人に対する啓蒙書と違う。ある程度の理科学的な常識は持ち合わせているが、「地震学は素人」という人を対象にしている。プレートテクトニクスの講義を聞いたことのある学生でも、地震のことをもっと知りたいという人に適切な本と言える。それでいて不親切な本ではない。ページをパラパラとめくってみると、欄外に専門その他の用語の解説が出ている。文中に解説が入るとわずらわしいが、欄外だとスッキリした感じで理解を大いに助ける。図版も多いし、囲み記事で「東京都被害シミュレーション」が出ていて役立つ。出版されたら講義の副読本として学生に買わせようと思っている。

1章から9章までは、力武常次先生が執筆。地震の発生確率がわからないと完全には理解できないが、本書は

所詮数学の教科書ではない。「確率」と聞くと虫々が走るといふ数学嫌いの人でも容易に理解できるように書かれているので心配はない。今回の兵庫県南部地震で初めて「活断層」を知ったという読者でも、その地震発生確率としての危険度の理解を深める。ここまで読んだ人は「地震予知は不可能なことではない」と悟ることであろう。

10章と11章は、津波の専門家として名高い相田勇氏が担当。津波の発生から防災までが解説される。日本海中部地震や北海道南西沖地震津波の被害の記憶も新しい。12章から14章までは、静岡県防災局長の井野盛夫氏が担当。氏は行政の立場から「東海地震」を手がけてきた人である。地震の被害想定、発生後の対策、そしてサバイバルマニュアルと、防災関係から一般市民まで、最も関心のある事項が要領よくまとめられている。

〈オーム社、1995年5月、A5判、270頁、1400円〉
[はぎわら ゆきお 日本大学教授・東京大学名誉教授]

●阪神大震災の前兆を探る

佃 為成 著
大地震の前兆と予知

評者 力武常次

1995年1月17日の阪神大震災直後には、「地震書ブーム」が起こった。既出版の地震解説書のほとんどが重版となり、東大出版会刊行の「活断層」に関する本などは異常な売れ行きを示したらしい。引き続いて、いわば泥縄式の地震に関する緊急出版が相いつているようだ。

特に大地震時のサバイバルに関するものが目立ち、あまり聞いたことのない名前の著者（多くはジャーナリストか？）が、いわば一夜漬け的に書いたらしいハウトゥー物が多いようである。出版社の金もうけ主義が感じられ、地震問題はもっと根本的に論じてほしいものである。

それはそれとして本書も緊急出版の一つには違いないようだが、中堅地震学者が大震災に際して、如何に地震現象の解明に取り組んだかを赤裸々に描いている点で注目される。地震発生後、著者は直ちに現地入りして、地震に伴った各種現象の調査を行なった。アカデミックな研究の多くは器械観測の結果をコンピュータなどを用いて解析するのが常道で、一般住民と直接接触することはあまりないが、著者の今回のアプローチは異なっている。

地震に先行した、あるいは伴った現象の調査でも、従来はいわゆる通信調査と称するアンケート調査が主流であった。しかし、本書の著者は現地に飛び込んでみれば

ら聞き込み調査を試みている。その結果、地震に先行する動物異常行動、発光現象、地下水異常などのデータが得られ、その多くが本書に報告されている。

しかしながら、研究者自らの聞き込みに頼るデータ収集には限度があるように見える。つまり、データを一般化するほど多数例を得るには、直接の聞き込み調査だけでは困難があるのではなからうか。

地震に際して、あるいは先行して、人体感覚でもわかる異常現象があるらしく、宏観異常と呼ばれている。これらの事例には荒唐無稽と思われるものも多く、従来はあまりプロの地震学者の研究対象とされていなかった。著者は、このような問題をも真面目に取り上げようとしているわけで、その研究態度は評価されるべきであろう。

しかし直接の聞き込み調査を主体にしていることもあって、もっと多数のデータによる結論を書いて貰いたいとの念を禁じ得ない。もちろん本書はいわば中間報告に過ぎないとも言えるので、今後とも、より完璧なデータ・セットに基づいて研究を展開して欲しいものである。

〈朝日新聞社、1995年4月、新書刊、190頁、680円〉

〔りきたけ つねじ 東京大学・東京工業大学名誉教授〕

●地震と地震防災のための本

ブルース・A・ボルト 著
松田時彦・渡邊トキエ 訳
地震

評者 長宗留男

この本は、1993年出版のアメリカ・カリフォルニア大学ブルース・A・ボルト教授の著書、Earthquakes: Newly Revised and Expanded を、活断層研究の権威である松田時彦・現熊本大学教授（東京大学名誉教授）と東京大学地震研究所の渡邊トキエさんが翻訳したものであるが、どちらかと言えば、一般向け解説書である。

原書の初版は、1978年 Earthquakes: A Primer として出版された。その後、1988年に増補改訂版が出ている。この改訂版（原書）については、以前、宇津徳治・東京大学名誉教授（当時、地震研究所教授）による書評が、本誌上でも紹介されている（1988年12月、地震ジャーナル、6号）。これによると、“地震学者によるこの種の英文の解説書は多々あるが、総合点では本書が一番”ということである。

今回翻訳された1993年版では、1988年版が更に大幅に増補改訂され、最近の目ぼしい地震のことや、地球科学についての新しい知識なども取り入れられている。

本書は、次の12章から成っている。

1章：地震のときに感じる事、2章：地震はどこで起こるか、3章：地震を測ること、4章：地球の内部を探ること、5章：大地の中の断層、6章：地震の原因、7章：地震の大きさ、8章：火山と津波と地震、9章：地震と水、10章：地震に先行する現象、11章：地震から身を守ること、12章：耐震的な建築物。

また付録として、世界のおもな地震の表、アメリカ合衆国およびカナダの重要な地震の表、地震観測の結果から断層面を求める方法、などがある。その他、地震クイズ（演習問題のようなもの）、用語解説、参考書などが掲げられている。

この本では、1906年のサンフランシスコ地震、1989年のいわゆるロマプリータ地震など、大きな被害を生じた地震について、地震のゆれ、被害の有様などについての記述から始まり、地震の原因、地震断層、地震と水との関係、地震予知など、上の項目でわかるように地震に関係したいろいろの事柄について、一般の人にも容易に理解されるように、簡単にしかも最新の知識も取り入れて解説してある。そして最後の二章では、地震のとき、いかに身を守るか、いかに建造物を地震に対して強くするか、について具体例をあげて述べてある。この部分にかなり力を入れて書いてある。わが国では、「平成7年兵庫県南部地震」で大被害を蒙った直後だけに、最後の二章は特に印象が強かった。

地震から生命を守り、被害を最小限に食い止めるためには、「地震」という現象を知り、「地震災害」の実体を知ることが第一である。こういった点で、必ずやっつく

鹿島出版会・出版物ご案内

日本列島の地震 地震工学と地震地体構造

萩原尊禮編 A5判 220頁 定価4944円

地震予測の研究分野における最新の知見に基づいた情報と、その成果の地震工学への応用。

序章	地震地体構造とは	垣見俊弘
第1章	地震と地体構造	島崎邦彦
第2章	現在の地震活動からみた地震地体構造	石田瑞穂
第3章	重力からみた地震地体構造	萩原幸男
第4章	地磁気・比抵抗からみた地震地体構造	本蔵義守
第5章	地形・地質学からみた地震地体構造	垣見俊弘
第6章	地震地体構造マップ作成への課題	相田 勇／吉川宗治

鹿島出版会・東京都港区赤坂 6-5-13 〔☎107〕

振替：東京 6-180883 ☎ 03-5561-2551

る大地震に備えて、「地震に強くなる」ために、これは
恰好な書である。文章も読みやすい。

〈古今書院, 1995年3月, A5判, 340頁, 3605円〉

[ながむね とめお 地震予知総合研究振興会主任研究員]

●原理から応用まで釣合いが取れた解説書

B.Hofmann-Wellnehof, H.Lichtenegger,
and J.Collins 著

GPS THEORY and PRACTICE

[英文 第3版]

評者 村田一郎

本書は、最高精度の測位システムとして、目下、急速に普及しつつある衛星測位システム、GPS全般の解説書である。すでに、前版の第2版がある程度出回っており、それを持っている読者も多いと思うが、今回、新たに第3版が出版されたのを機会に紹介する。

まず、英書であるが全355頁であり分量も手頃、内容もそれほど理解に難しいものではないので、いわゆる読破できる本の部類に入るといってよい。

緒言に続いて、略語表・定数表があり、その後から13章で構成される本文が始まる。章を追って内容をざっとみてみる。

第1章 はじめに [12頁] 第1章では、測量技術の歴史的発展をその起源からGPS自体の発展までざっとたどっていて、本書がGPSの測量技術への応用を主眼としていることをうかがわせている。

第2章 GPSの概観 [16頁] この章では、GPSの概要が解説されているが、とくに衛星の形式別の説明が詳しく与えられていて参考になる。

第3章 基準系 [14頁] この章では、衛星・測点の

位置を表現するために必要な各種座標系の軸の解説、座標系間の変換、それに時系の解説が行なわれている。ただし、記述的解説にとどまり、内容を理解するには、別の参考書が必要である。

第4章 衛星軌道 [22頁] ケプラー要素と衛星の位置との関係、逆に衛星の位置情報からケプラー要素を決定する方法の原理が要領よくまとめられている。さらに、摂動に関する解説がある。ついで、数値積分による衛星位置の追跡の解説がある。GPSでは、これを使用して、衛星の時々刻々の位置を直交3次元座標として記述することで精密暦を構成しているが、その点の解説はない。衛星から送信される放送暦を使用して行なう（天文学における一般方式とはやや異なる）GPSにおける衛星位置の計算式の解説がその後につづく。

運動方程式の積分計算の都合上、数値積分の解説があり、簡単な（ということはGPSとは何の関係もない）、数値例がある。またラグランジュの補間法の解説がある。

第5章 衛星信号 [14頁] 搬送波、C/A・Pの両コード信号、メッセージ信号などの解説が行なわれている。複雑な信号を説明するには、解説図が少なく、必ずしも理解しやすいとはいえない。章末に受信機の信号処理の各種新方式がまとめられている。位相測定とは、エレクトロニクス技術として、具体的にどのように行なうのかといった技術的な記述は、一切ない。

第6章 観測量 [40頁] この章の主題は、何種かのデータを組み合わせて、平均操作を施し、ノイズの影響を軽減する手法である。同じく、データの組み合わせが観測初期の波数不確定性の除去に利用されるが、その点の解説は、別に後章で扱われる。伝播遅延・多重経路その他データに含まれる各種の悪影響についての解説もこの章にみられる。

第7章 GPSを利用した測量 [50頁] 本書最長の章。実務面に関心のある読者のために他の章との重複を厭わず、この章を読むだけで作業計画の立案から基線計算の実務・作業報告の作成まで、また作業に使用すべき受信機の種類といった極めて現実的な側面まで含んで、GPS測量の一応の全体像が理解できるように配慮されている。解説は数式を排し、文章による記述に終始する。

第8章 位置決めの数学モデル [20頁] この章では、単独測位・相対測位計算の定式化が行なわれているが、主題は、相対測位であり、観測量である搬送波位相データと2観測点間の基線ベクトルとの数学的關係が単純差・二重差・三重差などの組み合わせについて、解析学的に、また、代数的に詳細に解説されており、GPSにおける基線解析の基礎となる章である。

第9章 データ処理 [44頁] 若干、異物的な感じがするが、この章のはじめに、受信機間の共通データ形式

『地震ジャーナル』のご購読について

本誌は、小会に関わりのある方々や機関に無料配布しておりますが、一般の方々でご購読を希望される方々のために、下記のような実費頒布を致します

記

- ◇購読料 [実費頒布・郵送料共] 1500円
- ◇申込先 東京都千代田区神田美土代町3
助地震予知総合研究振興会
電話：03-3292-1966, 2217
FAX：03-3292-1996
- ◇申込方法 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

である RINEX フォーマットの解説がある。しかし、すぐに、解説は、サイクルスリップと初期不確定波数の決定法に入る。そのあと、基本計算で得られた結果の改良法、具体的に最小二乗法・カルマンフィルタの解説がある。ただし、多分に一般的であり、これらの手法の GPS への応用という観点はみられない。そのあと、多点同時観測で得られる多基線ベクトルの一括取り扱ひ法が網平均の名のもとにある。最後に GDOP（幾何学的精度低下率）の解説がある。RDOP についての解説はない。

第 10 章 GPS の結果の変換 [24 頁] 座標変換の話してごく一般的な解説である。

第 11 章 ソフトウェア [10 頁] GPS で使用される計算ソフトウェアに含まれる、作業計画立案から、成果データベース管理にいたるまでの各種ユティリティの解説である。

第 12 章 GPS の応用 [20 頁] 空中写真測量航空機などの運動体の位置決めや一般的な基線測定のほか、時刻同期・航空機などの姿勢検出等々、各種応用手法の解説がある。さらに、慣性航法システムやロシアの GLONASS など、ほかのシステムとの共用性といった題目の解説もある。

第 13 章 GPS の将来 [8 頁] 地上における交通管制や土木建設作業への利用から、海上船舶の入出港制御や航空機の衝突防止への利用など、現在では、研究段階であるが、将来には現実のものとなり得るさまざまな利用法があげられている。また、システムそのものについても、衛星が地上の監視局によってではなく、自分で自己の位置を測定して放送暦を作成する次世代の衛星の構想についての言及がある。

参考文献 [25 頁] **索引** [13 頁]

以上が本書の概要である。一覧してまず感ずるのは、図が非常に少ないことである。そして、ときどきみられる図も極めて簡単なものばかりで、ほとんど理解の助けにならない。

また、簡単な数量評価がなくはないが、現実のデータを取り扱ったような数値計算例は、まったくない。したがって（英文であることも考慮すると）、実務の参考に好適とはいえない。しかし、本文中に参考文献の引用元が頻りに記されており、巻末に 25 頁に及ぶ詳細な文献表がついているので、この本を出発点として、指摘された文献を入手できる読者には、GPS の勉強のために格好の道案内となる書物である。反面、この書籍だけを頼りに GPS をきちんと理解するには、若干の努力を要する。したがって、この本は、独習書、あるいは、実務の参考書としてより、大学のゼミなどのテキストに向いている。

索引について、本書第 2 版では、語の重要掲出頁が太字で印刷されていて、効率よく、索引を使用できたが、どういうわけか、この第 3 版では、各語について何ヶ所かある掲出頁がすべて同じ書体で掲出されているので、非常に使いにくくなってしまっている。

以上、本書を、主としてその欠点をあげつらった形で紹介したが、それは、だから本書が推薦に値しないというわけではなく、逆に良書として大いに推薦したい。良書であるだけに、その中の少しの傷も目立つということである。本書を入手して GPS の勉強を始めようとする読者に、問題となりそうな点を予め指摘しておき、参考に供した次第である。

和書でも GPS の解説書は、すでに何冊か出版されているが、それらは、ハードウェアの解説が無闇に詳しかったり、あるいは、測量技術の観点から、GPS で得られた結果の整理の仕方に重点が置かれていたりして、GPS そのものを原理から応用まで釣り合いよく取り上げている解説書は少なかった。この点でも本書は釣り合いのよくとれた良書といってよいであろう。

<Springer-Verlag, 1994 年, 242 × 165 mm, 355 頁, ISBN 3-211-82591-6>

[むらた いちろう 東京大学地震研究所教授]

ご 案 内

地震ジャーナル 10号 特集：追りくる東京圏直下地震

エッセイ 10周年記念号の発刊に際して	萩原尊禮
カラー口絵 版画と文 地震と瓢箪と鯨	井野盛夫
江戸-東京の直下地震	萩原尊禮
首都直下のプレート構造	石田瑞穂
どうやって予知する?	萩原幸男
直下地震の危険度は?	武常次
川崎市と直下型地震	杉山孝志
直下型地震に備える	荒 孝一
液状化対策は?	浜田政則
ライフラインの安全性	片山恒雄
そのとき社会は?	廣井 脩
金融・経済へのインパクト	織田 薫
損害保険はどうなる?	長島秀隆
災害は進化する	柳川喜郎

記

- ご講読料 1500円 [実費頒布：郵送料共]
- お申込先 東京都千代田区神田美土代町3番地
財団法人 地震予知総合研究振興会
☎ 03-3292-1966, 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

ADEP情報

南関東地域直下の地震が 静岡県東部に及ぼす影響調査

今回、兵庫県南部地震が発生したことにより、内陸の都市直下の地震が注目をあつめた。しかし、すでに中央防災会議の専門委員会は、1988年8月発表の見解で、M7級の南関東地域直下の地震発生の切迫性を指摘している。静岡県でも平成5年度に、神奈川県西部に発生する地震が伊豆半島東岸に及ぼす津波の影響についての調査を当振興会に委託された。これは本誌17号(1994年6月)のADEP情報に紹介した。平成6年度では地震動の影響についての調査が委託されたので、ここにその概要を記す。

建築研究所の石橋氏は、神奈川県

西部の地震像を、西相模湾断裂の繰り返し活動で説明している。寛永10年、天明2年、嘉永6年の小田原地震に、元禄地震と関東地震を加えると、 73 ± 0.9 年とほぼ一定の発生間隔が得られる。またつぎに起こる地震は、天明地震型とも予測している。しかし、根拠となる西相模湾断裂の实在を証明する観測の結果は、海底地形探査、地震震源分布、湘南海岸沿いの水準測量などからも未だ得られていないようである。

最近の地震活動を検討してみると、小田原から真鶴付近を中心として、震源分布が希薄な地域がある。1900年に、この空白域の下端付近にM5.1の応力降下量が異常に高い地震が発生した。また1994年には、空白域の西部でやや浅いM4.3の地震が発生した。これらの地震と将来発生する地震との関わりが注目される。この4年間程度の三角点の辺長測量結果による圧縮・伸張歪は、もし横ずれを生じるとすれば、その方向が西相模湾断裂の向きになることを示唆している。最近、衛星を利用したGPS連続観測が実施されるようになった。すでに伊東沖では成果をあげており、今後この地域の歪の蓄積の監視などに威力を発揮するものと

期待される。

過去の地震の繰り返し間隔から求めたつぎの地震の発生確率は、1995年現在集積確率で約30%、1年確率で約10%であるが、1996~1997年頃から急速に高くなる。一方、地殻歪のデータを用いた確率計算によると、集積確率で約20%、10年確率で約10%となっており、確率の上昇はずっとゆるやかであるという結果が得られている。データの異なる二つの結果が一致しないのは、現在の学問の限界を示すものであろう。

さて報告書は、静岡県地震対策課が別途計算された想定地震による県内各地の加速度分布、震度分布、液化危険度分布を示している。ここでは想定地震としては、寛永地震と、その断層を北側に延長したモデルを取り上げ、手法は断層距離による加速度減衰の経験式を用いた。

神奈川県西部の地震で、静岡県東部では震度V~VIに達することがわかった。この結果を、去る1月の兵庫県南部地震における加速度分布と比較してみると、マグニチュードの違いがあるが、ほぼ調和的な分布が得られているようである。今回の調査の結果をふまえて、万全の地震対策が望まれる。 [A]

編集後記

1月17日に発生した兵庫県南部地震は、想像を絶する大震災となり、地震や耐震工学の研究者にも大きな衝撃を与えた。本号の企画は地震前のものであり、全く予想もしない事態であったが、急きょ「阪神大震災を語る」という座談会を催すことができ、お忙しいなかをお集まり頂いた先生方の貴重なお話を収録することができた。また、予定の原稿にこの地震の特徴を含めて説明を加えて頂いたものもある。

本号には地震発生の本質に迫る論説が多く掲載されているが、中には

100年前に発見された余震数の減衰を表す公式が、今なお新しい問題として、詳細な検討を加えられているものもあり、また理論や科学技術の進歩により、100年前には想像もつかなかっただろう、斬新な議論も展開されている。地震防災とともに、このような研究の一層の進展に期待したい気持ちで一杯である。

阪神大震災のため、地震予知連絡会も臨時会が開かれ、定例会を含め回数が倍増した。本誌でも、予知情報を、北大笠原先生と京都大田中・安藤先生に分担してお願いするという、特別編成となった。 [A]

地震ジャーナル 第19号

平成7年6月20日 発行

発行所 101 東京都千代田区神田美土代町3

03-3295-1966

財団法人

地震予知総合研究振興会

発行人 萩原尊禮

編集人 力武常次

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

●印刷・製本/理想社 ●装丁/鈴木 堯