

# 地震 ジャーナル

47

2009年 6月

エッセイ 地震予知の可能性を最初に唱えた人? ●水谷 仁

津波予報の半世紀(1)わが国の津波予報業務 ●浜田信生——1

(2)世界の津波警報体制の現状とその課題 ●山本雅博——13

2008年汶川地震による被害と復旧のための日中技術協力 ●濱田政則/呉 旭——27

汶川大地震と天然ダム ●池谷 浩/呉 旭/

比留間雅紀——38

2008年中国汶川地震による都江堰市内の学校建築の被害 ●壁谷澤寿海/李 康寧/

楠 浩一/壁谷澤寿一——50

諏訪湖の「御神渡り」成因論再考 ●浜口博之——58

地震予知連絡会の歴史小論 ●植田 勲——65

地震本部トピックス ●文部科学省——71

地震予知連トピックス ●野口伸一——77

●書評——82

●新刊紹介——83

●ADEP情報——84

囲み記事 震度で見た地震回数とMで見た地震回数/

大地震に伴う気圧変動

**地震予知総合研究振興会**

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

## 地震予知の可能性を最初に唱えた人？ 水谷 仁

東京の虎ノ門にある文部科学省の建物の脇で外堀通りに面したところに、少し古びた2mほどの高さの煉瓦の塔がある。文部科学省と霞ヶ関ビルとの位置で、数年前までは教育会館のあった場所といえば、その場所と分かる人もいるだろう。この塔は明治のはじめ、ここに工部大学校があったことを示す記念碑である。工部大学校は後に東大工学部に発展するので、この場所は東大工学部誕生の場所と言って良いかも知れない。この工部大学校の教師になったのは、イギリスのグラスゴー大学のウィリアム・ランキン、ウィリアム・トムソン（ケルヴィン卿）の教えを受けた若くて優秀な人々だった。この学校では理論と実験を両立させる教育方針がとられており、世界的に見ても当時もっとも優れた教育が行われていたと言える。

この学校の第1期生の中には、建築科（当時は造家科と言った）の辰野金吾、曽根達蔵、化学科の高峰讓吉などがいたが、電気科（当時は電信科と言った）に志田林三郎という人がいた。工部大学校を明治12年に首席で卒業した志田は、グラスゴー大学に留学し、ケルヴィン卿に教えをうけた。グラスゴー大学では1年後に最優秀論文に与えられる金メダルを与えられるほどの優れた研究をし、ケルヴィン卿は、のちに「私が出会った学生のなかで、もっとも優秀な学生だった」と述懐したという。

帰国後、志田は27歳の若さで工部大学校の教授に任命され、5年後の明治21年（1888年）に電気学会を創設する。この時の開会の演説で志田は将来の科学技術の発展の予測を行った。無線通信、テレビジョン、録音機、海外放送受信などがこの中で予見されている。さらにその中に、次のような言葉がある。「地電気、地磁気、空間電気の如きは、相互いに密接の関係を有するのみならず、地震、太陽の黒点、極光、及び地球上の気象等にも相関係するものなれば、地電気、空間電気の変動などを観測して、或は地震を前知し、或は穀作の豊凶を予知する方法の発明を希うも決して妄誕不稽の憶測にあらざるべし」と。

この時の志田の予測のなかで、120年以上たった現在でも実現されていないのが、この地電気、空間電気による地震予知、気象予報だけということになっている。志田の講演の中でも、これがもっとも理由が曖昧だっただけに、将来これが実現されるかどうか、大いに気になるところである。

天才、志田は残念なことにこの演説から3年後、36歳の若さで亡くなったこともあり、その名前を知る人も今では少なくなっている。しかし、このような偉い人がいたことを忘れないようにしたいものである。



水谷 仁

〔みずたに ひとし〕

**現職** ニュートンプレス「ニュートン」編集長、宇宙航空研究開発機構名誉教授、理学博士  
**略歴** 東京大学理学部卒、同大学院博士課程中退、東京大学理学部助手、名古屋大学理学部教授、宇宙科学研究所教授（宇宙航空研究開発機構惑星研究本部の前身）、同惑星研究系主幹を経て現職  
**研究分野** 地球物理学、惑星科学  
**著書** 「クレーター科学」（東大出版会）、「岩波講座、地球科学1、地球2」（岩波書店）、「岩波講座、地球科学2、地球の物質科学I」（岩波書店）など

# 津波予報の半世紀

## (1) わが国の津波予報業務

浜田信生

### 1. はじめに

我が国で津波予報が実施されるようになってから半世紀以上の歳月が経過した。筆者ら（浜田、山本）は、1970年代前半から最近まで、気象庁に在職し、主に地震火山業務に携わってきた。この間の津波予報の変遷や関連した話題について何か書くようにというのが、編集部からの御依頼である。そこで津波予報の歴史を正確に記述するというよりは、この間津波予報業務に携わった当事者として、また間接的に関わる立場に居た人間として、印象深い出来事やトピックをまとめることとした。第一部ではこれらのトピックを主として浜田がまとめ、第二部では、最近の2004年インド洋大津波以降の国際的な津波対策の取り組みを中心に山本がまとめた。すでに組織を離れた身ではあるが、長年身に付いた習性や物の見方は、すぐには変わらない。なるべく客観的な立場で書いたつもりではあるが、結果として気象庁の立場を代弁している部分も十分あると思われる。読者にはその辺の事情をお汲み取りの上、一読を願うものである。

### 2. 手作業による津波予報作業

大学の地震学の講義で、地震の震源の決め方やマグニチュードについて一通り勉強はするが、そこで津波予報作業が実際にどのようなものが紹介されたり、演習などで体験する機会はずないだろう。筆者らが気象庁で働き始めた1970年代初頭は、地震の震源決定、津波予報作業はほとんど手作業で行われていたが、勿論大学でそのよう

な作業については習うこともなく、就職して初めて体験をすることになった。

地震情報や津波警報の作業を行う観測室を、今も昔も気象庁では現業室と呼んでいる。現業作業の七つ道具は、S-P時間と深さ震央距離の関係を示すモノグラム、200万分の1あるいは500万分の1の縮尺の専用の震央決定地図、腕の長いコンパスと鉛筆、消しゴムが主なものである。現業室のテレタイプに打ち出される各気象台、測候所の電報から震度、P波の到達時間、S-P時間、機械式強震計の振幅などを地図に記入していき、地震の記録の特徴などから深さの見当をつけ、S-P時間に対応した円をコンパスで描いていき、震央と深さの見当をつけて震源を求めた。当時すでに関東地方の4カ所の観測点の地震計もテレメータされており、東京の地震計も含め5カ所の地震計の記録を読むのも現業作業の一部であった。深さが適当でないとと思われる場合には描いた円を消しゴムで消し、何度かこのような作業を繰り返しながら解を求めていく。地震の規模が大きいと思われる

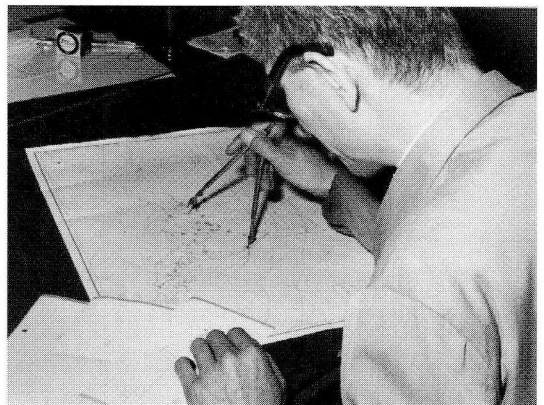


図1 1970年頃の地図とコンパスを用いた震源決定作業

場合には、津波予報作業図に各観測点の距離と振幅を記入していき津波のグレードを推定し、津波警報、津波注意報の発表と作業が進行していく。理想的にはコンパスで描く円は一点で交わるはずであるが、現実にはそのようなことはあり得ない。地震の規模が大きくなるほどS相の読み取りは困難になる。1970年代になると水晶時計が行き渡り、時刻の精度も向上してきたので、S-P時間だけでなく、等P時刻の円を描いて検討することが行われるようになった。

各観測点の読み取りには必ず誤差を伴うし、職員の熟練度もさまざまである。一般に地震活動の活発な東日本の太平洋沿岸の気象台、測候所や松代からのデータの入電が早かったし、内容の信頼度も高かった。読み取りの信頼度は、設置されている地震計の種類や感度にも影響される。さらに言えば津波予報作業を行う各管区の当番職員の技量も平均で見れば北高南低であった。津波予報作業の職人芸的な要素の大半がシステムに組み込まれた今日ではそのような地域差はほとんど無くなった。ともかく作業を行う現業当番者はこのような地方の事情や、日本列島の地震活動全般の特徴などの知識を、日頃から頭にたたき込んでおく必要がある。まさに経験と日頃の修練がものをいう手作業である。いったん津波警報の発表となれば、何十万あるいはそれ以上の人々の防災行動を強制することになるし、作業のミスは即、組織の命運を左右する責任問題にも発展する。よく考えれば考えるほど重大な責任を伴う作業である。行政官庁において最終的な責任は管理職が負うにせよ、一般職員が短時間の作業で実質これほどの責任を負う業務は、当時も今日も他にはほとんど例がないのではないかと思われる。

いったん大地震が発生すると、昼間なら当番以外の一般職員が続々応援のため現業室に集まり、一種独特の緊張状態と興奮状態がそこに生まれる。この状態は外部の方が見ると、大変興味をそそるものであるらしい。火山噴火予知連絡会の会長を務められた下鶴大輔先生が、気象庁に来られ、たまたま現業室でそのような作業を目撃されることがあった。大した地震ではなかったが、後

で「あの作業は大変面白いね」と言われたことがある。職員の中にもあの臨場感、独特な興奮状態がたまらないという人が居り、現業室には必要以上に大勢職員が集まる傾向がある。ややもすると作業分担が不明確になったり作業に齟齬を来す危険も大きくなるので、このような場合の職員の管理は、今も昔も注意が必要である。中には管理職にも舞い上がる人が居て、部下の立場とはいえ、ブレーキをかけるのに苦労したこともあった。神経の細い職員の中には、このような極度の緊張を伴う作業には耐えられないのではずして欲しいと申し出る職員も居たし、後に作業に電子計算機が導入され作業の一部をキーボードで行うようになってからも、緊張のあまり、キーボードの上で指がぶるぶると震えキーがなかなか打てなかった新米職員を目にしたこともある。電子計算機や通信技術の発達で作業が大幅に自動化された今日でも、緊張を伴う作業の本質は変わらない。如何に冷静で正確な判断が出来、ミスを犯しにくい環境を整えられるかは今後も重要な課題である。

### 3. 訓練での大失敗

手作業の時代には、津波予報作業に経験と修練が必要とされたため、毎月訓練の当番を割り当て、訓練当番が作成した模擬資料を基に、現業当番に入る職員を対象に、2名一組で10組くらいの班を組み、実際に即した津波予報作業の訓練を行っていた。模擬資料は、過去の大地震が例に選ばれることが多く、誤差、電報の入電時刻も実際そのまま訓練を行う場合が多かったが、当然ながら訓練に参加する職員には前もっては何も知らせない。ある時、1964年新潟地震を基にした模擬資料による訓練が行われた。熟練度の高い太平洋岸の観測点から先に電報が入り、仙台の震度5が入電するなど、当初震源は太平洋岸にあることが予想されたが、データの精度が低くコンパスを回してみると焦点が合わず、震源は日本海側、太平洋側のいずれとも判断できなかった。実際、新潟地方気象台では、木造の庁舎から危険を感じた職員が全員避難したため、電報の入電は他の官署よ

り大幅に遅れている。訓練ではどの班も震源を決めかねており、時間はどんどん経過する。筆者の班ではこのままでは警報が間に合わないと考え、その時点ではより可能性が高いと考えた福島県沖に津波警報を出してしまった。他の班はいずれも慎重で新たな電報の入電を待っていた。しかしながら、新たな電報が入電するにつれ震源が太平洋岸にある可能性が消え、新潟県沖であることが明確になった時点で、他の班は津波警報を出していった。失敗である。しかしながら失敗をしても、その時点で次善の手段を執るのが原則である。まず先に新潟県沖に津波警報を追加発表した上で、太平洋岸の津波警報を解除した。すべての観測データがリアルタイムで集められている今日、本番でこのような大失敗を犯す可能性はまずないが、訓練とはいえ「しまった」というあの時の思いは忘れようがない。「津波予報作業は一度失敗を経験すると、誰でも懲りて失敗することは無くなるが、当番全員にそれを当てはめると、全ての津波予報作業は失敗ということになる。それでは困るのだ」とある先輩が述懐されていたが、まさにその通りである。また情報の正確さを取るか発表時間の早さを重視するかというトレードオフは、緊急地震速報など今日でも重要な問題である。

#### 4. 仙台管区気象台による初めての津波予報体制

我が国の津波警報体制の構築は、1941年9月に三陸沿岸を対象にした三陸沿岸津波警報組織が初めてということになっている<sup>1),2)</sup>。この体制は森田稔仙台管区気象台長の指揮の下で構築されたことは明らかであるが、戦時中でもありどの程度の実効ある体制が構築されたのかはよく分らなかった。森田台長は戦後まもなく、出張中先で客死しており、当時の職員がどのような考えで業務にあたったかを示す資料も残っていない。

しかし、最近になって盛岡地方気象台に宮古測候所の津波予報関係の資料の一部が保管されており、内容を見る機会があった。

資料のタイトルは津波警報取扱便覧となってお

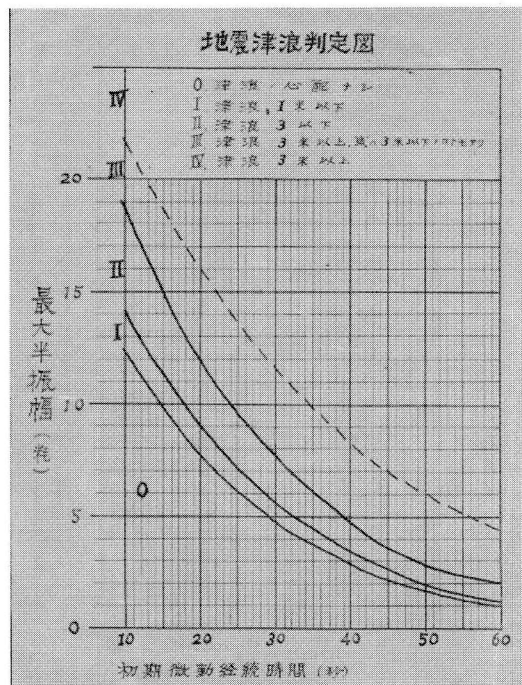


図 2 昭和 16 年の宮古測候所の地震津波判定図、裏に宮古測候所ノ地盤ヲ考慮ニ入レ福田技師作製セルモノとの記入有り。盛岡地方気象台保管

り、日付は昭和 16 年 10 月となっている。中味は文献 4) に紹介されているものとほぼ同じで、地震津波判定図、津波警報の種類と伝達先を定めた資料、宮古からの津波の逆伝搬図が含まれている。地震津波判定図を見ると、測候所一点の地震観測だけで津波予報作業が行えるようになっていることが分かる。地震津波判定図は、仙台の図よりは範囲が狭く、管区、測候所の守備範囲の違いを反映したものであろう。次に津波警報文なども、文献 4) と同じであるが、

- (1) 只今の地震は軽微な津波があるかもしれませんがから注意を要します。
- (2) 只今の地震は津波を伴う見込みですから警戒を要します。
- (3) 只今の地震は大津波を伴う見込みですから山の手へ避難を要します。

の 3 種類があり、解除については最早津波の心配はありません。

(以上原文はひらかなの代わりにカタカナ)

となっている。大津波では、具体的に「山の手へ

第6.5図 津波予報図

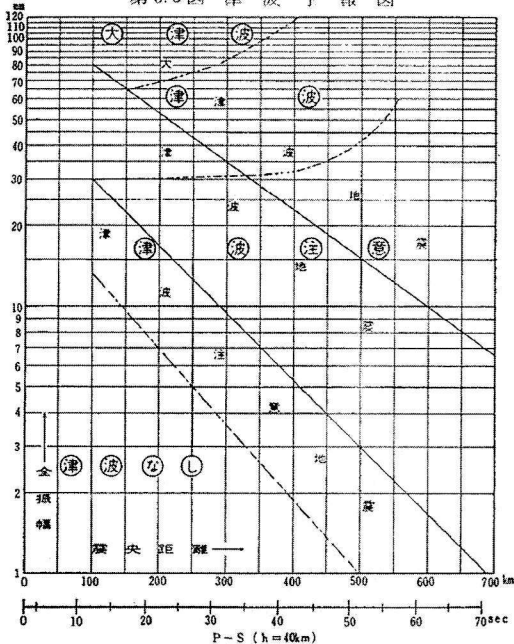


図3 1978年頃の地震予報図。文献3)による。

避難を要します」と明記してあるのが興味深い。このように、津波警報は有感地震が発生した場合を前提としていた。

次に関係官署へ通報の項目があり、「先ず宮古警察署に電話で通報」と書き込みがあり、電文として「ツナミケイー」ミヤコ、宛先官署として、青森、八戸、盛岡、仙台、石巻、福島、小名浜の太平洋岸の4県の測候所の名前が並んでいる。

その他に津波警報関係の資料として、昭和19年3月3日に初めて実施した津波警報退避訓練の報告(沿岸の警察・派出所等からの報告書など)などが残されている。昭和19年といえば、津波警報取扱便覧が定められて3年経過しており、どのような理由で訓練まで時間がかかったのか分からないが、実効ある体制をとるにはそれだけ時間がかかったのであろう。戦争の影響で気象業務自体の継続が困難な時期にさしかかっていたことが影響していると考えられる。しかし訓練が行われるようになって以降は、三陸地方に限っては、大きな地震がもし発生すれば、沿岸の各測候所が独自に警報を出す津波予報体制が機能したであろうことが分かる。

## 5. チリ津波のこと

1960年5月24日日本列島全域に押し寄せたチリ地震津波は、過去半世紀、1952年の津波予報体制発足後では、死者142名という我が国では1993年北海道南西沖地震に次ぐ津波被害をもたらし、遠地地震で予想もしなかった津波が来襲し、社会に大きな影響を与えたという点で、津波予報の歴史の中でも特に重要な出来事である。筆者はまだ中学生であったが、朝日新聞の夕刊の一面に大見出しのタイトルと写真が掲載されていたことを今でも記憶している。この地震に対する気象庁の対応は、津波の来襲後で完全に後手にまわったということで、各方面から多大の批判を浴びた。和達清夫気象庁長官も国会で気象庁の責任を追及された。これに対し気象庁の説明は、

「太平洋のかなたの中米、南米には相当地震がございしますが、それらの地震によって日本が被害を受けるような津波を受けたことは、今までにはございませんでした。ただしその方面に大地震がありますれば、弱い津波はしばしば観測いたしておりまして、その津波の性質、到達時間その他は、われわれよく存じておりました。今回警報が適切に出せなかった理由の第一番は、私どもの勉強の不足と知識の不十分からでございまして、過去に経験がございませんのと、こういうような遠いところの一万七千キロのかなたの大地震が、これほどの津波を出すということを前もってよく勉強しておかなかったことについては、申しわけないと存じております。」というものである。

この説明は、色々な資料を見ながら考えてみたが、役人の説明として、やはり正確的確と言わざるを得ないというのが、筆者の現在の判断である。

まず、地震の規模について当時はモーメントマグニチュードという概念はない。広帯域地震計も存在せず、気象庁の保有していた長周期地震計は、本庁と福岡にあった、マインカというフランス製の1トンの重さの振り子をもった地震計と松代にあった光学式のガリチン地震計と気象測器製

作所で設計制作された1トン地震計だけであった。松代の観測により、マグニチュードが8と3/4(8.75)と推定されているが、当時の観測体制で、よくこのような数字が出てきたものだと感心する。ちなみに2004年12月のインド洋の津波地震についても、松代の第一報のMは8.8であった。しかし当時の知識ではマグニチュード8クラスの地震の中でも最大級程度の認識しか持ち得なかったはずである。地震が海溝からのプレートのもぐり込みによって発生するという認識も勿論ない。そもそも地震が断層運動によって起きることに対し、熱心に反対を唱える研究者もまだいた時代である。チリ地震が、モーメントマグニチュード9クラスの特別な地震であるという認識がない状況では、この地震に対し特別な注意を払えというのは無理ではなからうか。

もう一つの批判は、大きな遠地地震で津波が日本に襲来することは事前に十分予想できたはずだというものである<sup>5)</sup>。南米で発生した津波は、ハワイ付近の海底地形の効果で、フォーカスされ日本に大きな振幅となって伝わると言われれば確かにそうであるが、チリ地震の津波伝搬図は地震後、初めて地図とコンパスを用いた手作業で制作されている。もし事前に伝搬図が作られたとしても、その精度についての評価は難しかったと思われる。一部の研究者の知識に、特別な関心と理解を持った職員が、たまたま当事者としていたら結果は違ったかもしれないが、一般的に期待できることではない。今となってはどこに書かれていたのか思い出せないが、津波研究の長老であった故山口生知地震学会名誉会員が、「気象庁だけの責任ではない、遠地地震で被害をもたらす津波があるということを、一般に、周知する努力を怠ったのは、研究者の側にも責任がある。」という趣旨のことを言われたのを読んだ記憶がある。知識、情報はある程度一般的にならない限り、役所の業務には取り入れられないものであるし、この点に関する批判も結果論ではないかと思う。

最後にハワイからせっかく津波の危険性を知らされたにもかかわらず、気象庁はそれを生かすことが出来なかったという批判がある。これについ

ては、気象庁技術報告<sup>6)</sup>にハワイから気象庁に送られた電報の内容が記載されている。以下は津波の前、最後に送られた電報の原文そのものである。

This is a sea wave warning. A severe earthquake in Chile has generated a sea wave which is spreading out over the Pacific Ocean. The estimated time of arrival of the first wave is 12 midnight HST for Island of Hawaii about 30 minutes later for the Island of Oahu. The danger may last for several hours.

The intensity of the wave cannot be predicted. The southern part of Hawaii will be affected first and may be the first indication of the damage which can be expected else where in the Hawaiian Islands. The following wave ETAS are furnished for other Pacific Islands these time are not exact but are based on the best information available :

Tahiti 0630Z Christmas 0800Z Samoa 0900Z Fiji and Canton 1000Z Johnston 1100Z Midway 1230Z.

この電報は、津波が日本に襲来する前日の1960年5月23日の日本時間13時47分に発信され、米軍横田基地経由で18時57分以降に気象庁に配信されている。この後ハワイでは予想外の大きさの津波が襲来し、ホノルル地磁気観測所は海岸に隣接した低地であったため、職員は業務を中断し家族とともに観測所から一時的に避難している。混乱して外国に向けて津波の情報を発信できるような状況ではなくなったようである。

技術報告の行間を読み、気になったのは、「次いで次の情報が入電した。」という記述である。気象庁にいつ到着したか明示されていない。当時の職員から話を聞くにつれ輪郭が分かってきたのであるが、この電報は、津波の可能性について検討していた地震課の幹部職員が帰宅した23日の20時以降の夜間に入電し、翌朝まで国際通信課に保管されており、地震課の職員が見たのは翌朝、津波の襲来後になってからであったらしい。つまり、この最後の電報は、日本に津波が襲来する可

能性を検討するための判断材料には使われなかったことになる。それにしても、横田基地の米軍電報局に16時45分に着信した電報が、なぜ20時過ぎまで気象庁に渡らなかったのかは、疑問が残るところではある。昼間は比較的短時間に気象庁に中継された電報が、夜間になって急に遅くなったのは、多分に推測であるが交代制勤務の中での事情が絡んでいたのであろう。少なくとも米軍の通信の関係者には上記の電報の内容の重要性についての認識はなかったに違いない。また気象庁でも当時は勤務時間外の夜間に到着した電報は、翌朝担当課に配られる慣例になっていたようであり、運良く内容に関心を持つ通信当番が居れば、地震の当番に通知することもあり得たと思われるが、通常期待できることではない。当時の関係者と話すと、あの電報がもっと早く到着していれば、もう少し何かできたのではという思いを強く感じる。

以上の状況から考えると、津波の前日に地震課の職員が検討し得た判断材料は、18時57分にハワイから到着した電報しかなかったということになる。津波警報を出すかどうか分からないハワイの対応が定まらないこの段階では、気象庁として何か手を打てたとは思えない。

次にハワイが13時47分に打った電報が23日中に、帰宅前の地震課の職員に届いていたとすれば、どのようなことが考えられるであろうか。

当時のホノルル地磁気観測所の通信は、全面的に米軍の通信回線に依存しており、気象庁に入電した電報のいずれも、太平洋各地の複数の宛先に同時に送られた電報であり、特に日本に宛てた電文ではない。津波の到達予想時刻もミッドウェー以南の観測点ばかりであり、宛先は南太平洋を念頭に置いていたことが伺われる。M8クラスの地震が太平洋のどこかで起これば、似たような内容の電文になると思われる。気象庁地震課で最後まで残っていた幹部職員がこれを読んでも、津波に関する注意報や情報を発表する決断が出来たかどうかは疑問である。結局ハワイに実際にどのくらいの津波が来るか情報を待とうとなったのではないかと思われる。その場合でも各管区に状況を知

らせるなどの措置はとられたであろうし、通常の宿直に加え夜間に職員を残す特別な体制をとることは十分あり得たと思われる。その場合には、翌朝押し寄せた津波に対する対応は、津波の到着後であったとしても、もっと迅速にとれた可能性はある。

一般論ではあるが、役所の仕事に規定外、例外はない、想定外の現象が起きたとき、お芝居のアドリブのようにウルトラCのような対応をやれというのは、できれば幸運、所詮無理というものである。30年以上気象庁に勤務した中で、これは規定外、アドリブだと思った出来事は、1989年7月の伊東沖の海底噴火の時の対応だけである。当時の津村建四朗地震火山業務課長は、群発地震がほぼ終息した段階で関東、中部地方から近畿地方に広範囲に微動が観測されたあと、下鶴大輔噴火予知連会長と緊急の記者会見を行った。誰も明確には言わなかったが、当然噴火の危険を念頭においてのことであったが、気象業務法やその他の業務規定のどこを探してもそのような場合にどう対応せよとは書かれていない。当時の関係者の見解は分かっていたし、何が最善の対応であったかは、今でも分からない。もし大きな災害が発生したならば、結果論も含めて色々な批判が集中したであろう。

チリ地震津波については、当時の気象庁に対する批判だけでなく、最近書かれた物やインターネットのホームページなどにも、結果論や間違った事実関係を基にした記事が見受けられる。事実関係をはっきりさせ、後世に正確な情報を残すことが重要と考え記す次第である。

## 6. 検潮データの国際交換

1989年の旧ソ連のノボシビルスクで開催された、ICG/ITSU（太平洋津波警報組織国際調整グループ、現在はICG/PTWSと改称）の定期会合に初めて参加した時のことである。会合に先だって津波のワークショップも開催され、日本からの研究者の参加も多くワークショップの後、上記会合にオブザーバーとして参加した研究者も居た。



その中で、参加したある研究者が「率直に言うと、この会合はあまり中味がない」という感想をもらした。会合の実態としてこの研究者の指摘はもっともに思えた。1960年のチリ津波を契機としてUNESCO傘下の政府間海洋学委員会（IOC）の下部組織として設けられたICG/ITSUであったが、実質的な運営は、アメリカの気象局（NWS）の太平洋津波警報センター（PTWC）と、NWSの職員が運営に当たっていた国際津波情報センター（ITIC）にほとんどの活動を依存していた。2年に一度の定期会合に代表を派遣するのは、先進国が中心で、インドネシアなどの発展途上国は、ほとんど出席はなかった。IOCの津波の担当者も組織内で、毎年、活動費、定期会合のための予算確保に苦労していたのが実態であった。気象庁はほぼ毎回会合に参加していたが、旅費の確保ができず欠席したこともあった。ITSUには、PTWCからの津波警報伝達を定めた通信プランという資料がある。当時のプランを見ると発展途上国の中には国内通信網が確立されていないため、PTWCからの津波警報は、アメリカ大使館にまず伝達され、大使館から使走便（courier）によって加盟国政府に伝えられるというルートが定められている国も少なくなかった。これでは組織はあるもの

の、機能させることは困難である。

定期会合には、色々な議題が提出されたが、決議を積み上げてそれを実施する展望がなければ、単なる絵に描いた餅に終わってしまう。議題の候補の一つに、インド洋、カリブ海などにも津波警報組織をという話題があった。関係者の間には他の地域についての津波の危険性についても、当然ある程度の共通認識はあった。しかしながら、限られた人的財政的資源を考えると、手を広げれば現在かろうじて機能している警報システムすら潰れかねないというのが、当時の率直な印象であった。この問題が議題として持ち出されれば時期早尚ということで反対するつもりであったが、そうするまでもなく、会議の議長、幹事役の間の根回しの段階で議題からはずされてしまった。2004年のインド洋大津波の後、1960年のチリ津波の時とまったく同じような言い訳、弁明があらちらこちらで繰り返された。しかし大きな被害を出した国のうち、スリランカはともかく、インドネシア、タイは太平洋津波警報組織に早くから参加していた国である。当事者同士の認識が深まらない限り、どんな体制を作ってもいざという時に役には立たない。例えばインド洋に警報体制が仮に作られたとしても、情報の伝達体制が整備されな

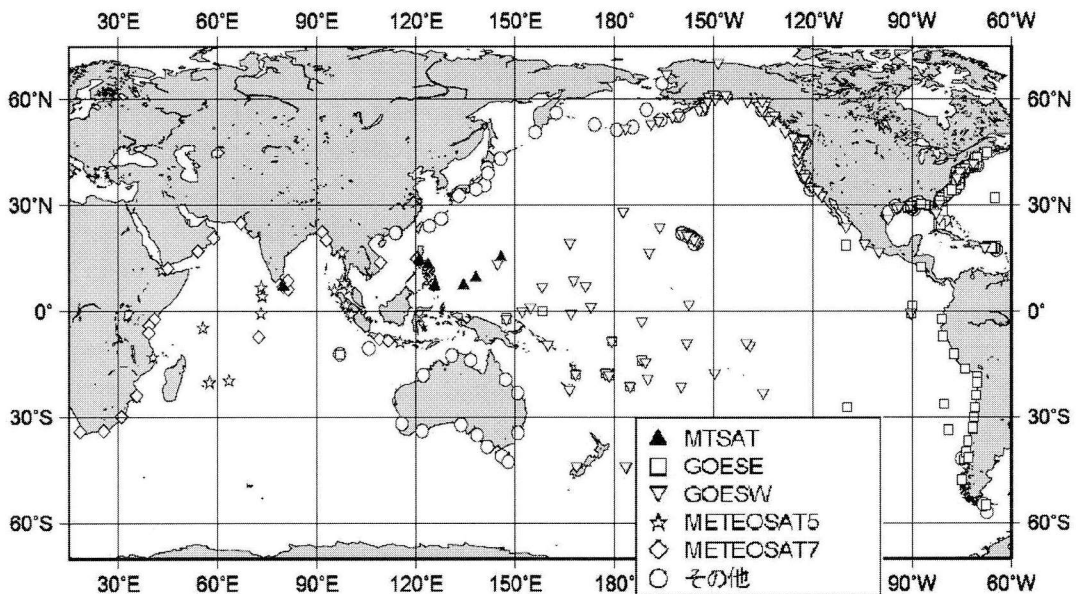


図4 静止気象衛星、国際気象通信回線（GTS）によりテレメータされている潮位観測点

いままでは、結果はあまり変わらなかったのではなからうか。

この会合の様子を見て、組織の活動を盛り上げ何か国際協力の実をあげる方策はないかと考えた時に思い当たったのが、検潮データのことであった。1980年代初めには、米国は津波の監視というばかりではなく、GLOSS（全球潮位観測計画）を推進するために検潮データのテレメータを進めていた。太平洋の多くの観測点に衛星テレメータ用のDCP（Data Collection Platform）を設置し、米国の静止気象衛星（GOES）を用いてデータは集信されていたが、西太平洋の観測点については、GOESには電波が届きにくいいため、日本の静止気象衛星ひまわり（GMS現在はMTSAT）の利用を希望し、国際会議のたびに働きかけがあった。これについては前例もないこともあり、気象庁では誰も関心を示さなかった。しかし考えて見ると、遠地津波については、どのように地震が津波を起こすかということ把握するよりも、実際にどのような津波が発生したかを把握する方が容易であり、対応も現実的である。太平洋中の潮位を監視し津波が伝わってくる様子が分かれば、的確な対応が可能である。せっかくの申し入れがある以上検討しない手はないと思い、米国側と調整を始めた。

実現のための大きな問題点は2つあった。一つは、国際協力は互恵が原則であり、一方的に相手国に施設を利用させるだけでは内部の関係者の理解を得ることは困難であり、ひまわりの利用を認める場合、何らかの見返りが必要となる。もう一点は外国の機関の設置する機器からの電波を直接ひまわりで受信することについての、気象衛星運用関係者の理解を得ることであった。初めの問題点については、米国側から見返りにPTWCにテレメータされている観測点のデータの幾つかを、国際気象通信回線（GTS）経由で提供してもよいという意向が示された。これについては、日本から太平洋を眺めた場合、南米からの津波は、現在の通信事情から考えるとハワイからの情報が十分期待できる。南西太平洋については、米国側がひまわり経由の検潮データの収集を提案しているカ

ロリン群島やフィリピンのデータが入るようになれば、有効に活用できる。残るのはカムチャッカ、アリューシャン、アラスカの北東太平洋であり、この方面のデータが入るようになれば、遠地津波は、3方向どこからでも早く状況を把握できるようになる。という訳でアラスカの観測点をGTS経由で提供して貰うことにした。

次の気象庁の気象衛星運用部門の理解を得ることは難航した。前例がないこと、外国の利用については潜在的な需要要求があり、いったん利用を認めると、その他についてもたとえ不適當なものであっても断ることが困難になる恐れがあること、外国製の衛星送信装置（DCP）の技術的な信頼性についての不信感などの理由からである。これらについては、ともかく前例とはせず実験的なものとして実施すること、DCPのメーカーから詳細な資料、回路図などを提出して貰い関係者に説明し、何とか内部の理解を取り付けた。1990年に入ってカロリン群島のマラカル（パラオ島）に最初のDCPが設置され、ひまわり経由で気象衛星センター（清瀬）で中継、GTS回線経由で米国への検潮データの送信が始まった。偶然ではあるが、パラオ島は第2次世界大戦までは、日本の信託統治が行われ、この方面では唯一地震観測が行われていた場所である。

設置後フィリピンやパプア方面の地震による津波監視にデータは有効活用され、実績をもとに正式運用が認められた。図4は現在の検潮データのテレメータの状況を示す。結局ひまわりによるテレメータは7点にとどまっているが、これは、ひまわりの回線が震度の通報のバックアップに使われるようになり、使えるチャンネルがふさがってしまったことなどの事情による。インド洋では、2004年のインド洋大津波のあと、ヨーロッパの気象衛星（METEOSAT）を使って検潮データのテレメータが実施されるようになった。このように、ひまわりを利用した外国の検潮データの交換は、現在では全体から見ればささやかなものに過ぎないが、実質的な国際共同で津波の監視を行うという体制を進めた点に意義がある。ICG/ITSUの活動も1990年以降は、インターネットなど通

信技術の進展により、通信コストの低下により地震波形についても国際的なデータの交換が行われるようになり、北西太平洋の津波警報センターの設立など活動が上向いていった。

## 7. 量的津波予報

気象庁に勤務している間に、津波予報に直接関与し責任ある立場に居た期間は、延べにしてもたかだか数年に過ぎない。しかし地震火山関係の業務に従事している以上、関わりはずっと続いた。その中で、強く感じた問題点は2つあった。

一つは予報区の広さの問題である。1952年に全国的な津波予報業務が開始されて以来、津波予報の対象とした予報区分は、当初は15地域、その後の一部の予報区の手直し、沖縄の返還などで18区体制となったが、実質的な変化は半世紀の間ほとんどなかった。例えば東北地方を例にとると、太平洋岸が予報区の第4区、日本海側が第5区となっていた。これでは、青森県沖で津波警報の基準をやっと満たすような地震が発生し津波警報を発表しても、福島県の沿岸では津波の痕跡すら観測されるかどうか分からない。また津軽海峡を挟んだ日本海側には、1段階下げた津波注意報を発

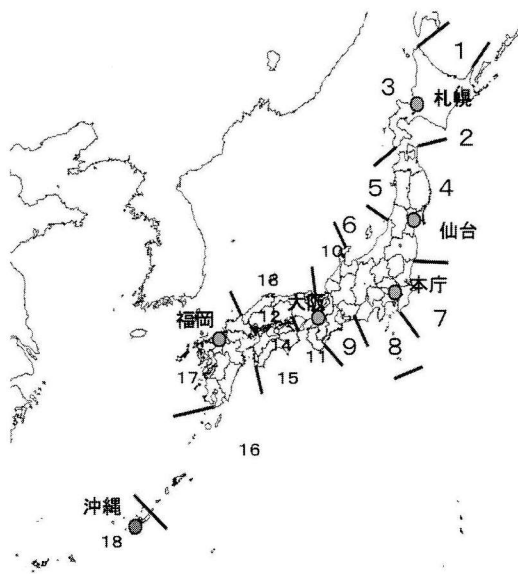


図5 1999年まで用いられた18津波予報区

表することが予め定められており、一連託生で、絶対津波が来るはずもない地域に警報や、注意報を出さざるを得ないという矛盾を抱えていた。

もう一つの問題は、どんな小さな津波が観測されても、津波注意報を出す仕組みになっていたことである(初期にはツナミオソレの津波警報)。遠地津波などで小規模な津波が観測された場合、後追いで津波注意報を出し、まったく被害がないにもかかわらず、そのプロセスがしばしばマスコミの批判の対象となった。例えば10cmの津波であっても注意報を出さなければマスコミにたたかれるというのは、担当者にとってはトラウマになる。津波予報発足当時の「ヨワイツナミ」の予報の解説には、「被害の恐れはないが、場所によっては津波の高さは、2, 3mに達するので一応注意してください」とあり、当初は大ざっぱであったのが、時代がたつにつれ、それでは済まなくなってきたことを示している。

大勢の人々を巻き込んで無駄な騒動を繰り返すということのばからしさ、経済的な損失、さらに大部分の地域について意味のない警報、予報を繰り返していれば、誰も気象庁の情報を信用しなくなるという問題はずっと深刻である。「気象庁が津波警報を出すとみんな本当かな?と海岸の様子を見に行く」という冗談もある。しかしながら、半世紀近く続いた仕組みは簡単には変えられない。予報区一つとっても変えようとするれば、NHK、都道府県、警察、電話局などの法定伝達機関に限らない多くの伝達先、自治体の防災計画など、影響が及ぶ範囲は多く、いっせいに切り替えるのは生やさしい作業ではない。予報区を細分化するだけでも的中率は上がるので状況は劇的に改善されるし、技術的に十分可能と思われたが、それなりの大義名分が必要であり、膨大な事務量も発生する。津波予報に直接関与するポストに居た間には、改善の機会はなく課題は後の世代の職員に先送りされた。

量的津波予報は、計算機の性能の向上などの技術的な発展の上に成り立っているが、上記のような問題の解決策として登場した背景があり、1990年代の初めから準備作業が始まった。日本列島周

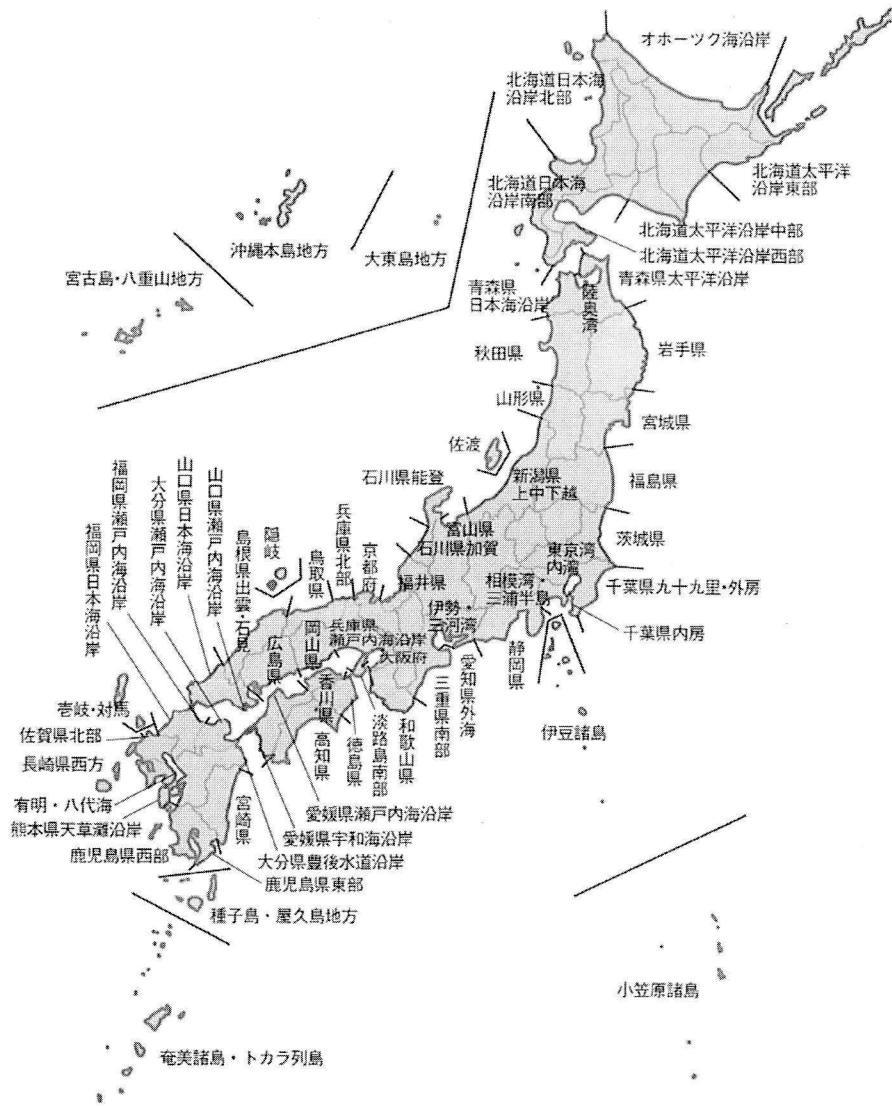


図 6 現行の 66 の津波予報区

辺を細かくメッシュに区切りそれぞれの地点に断層を置き、最も効率よく津波を励起する場合を仮定し、数値シミュレーションにより沿岸近くまでの津波の高さを求め、グリーンの法則を適用して沿岸での津波の高さを推測し、データベースに組み込んでいく。実際にやってみると、ソフトの不具合だけでなく色々な原因で不都合が見つかる。例えばある予報区の津波の高さが両側の予報区より小さいなどという不合理なことも出てきたりする。このような不具合を修正しながら、学識経験者からなる委員会を設けて意見を調整しながら、

1999 年 4 月から量的津波予報の正式運用が開始された。これにより予報区は 3 倍以上のほぼ都道府県単位の 66 区域に細分化され、また 20 cm 以下の津波については、注意報扱いを止め情報で扱うことにしたため、長年の懸案であった 2 つの問題は解決に向けて大きく前進した。

量的津波予報は運用を開始して 10 年近くが経過したが、その後も改良が進められ、浅海部での海底の摩擦を考慮したシミュレーション、津波の高さ予測に用いる格子の間隔の細分化や水深の浅い方への拡張、横ずれ断層など津波の励起が小さ

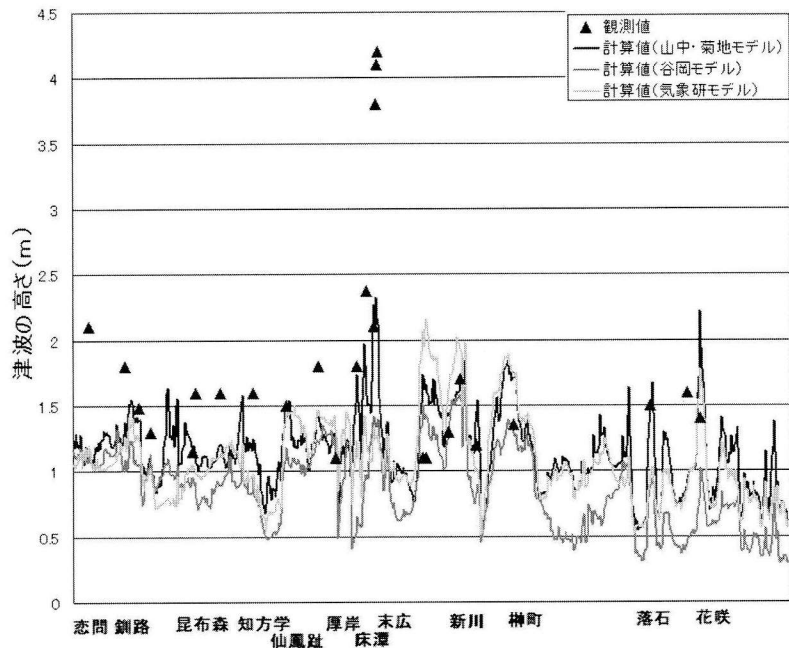


図 7 2003 年十勝沖地震による釧路から根室にかけての観測と、各断層モデルによる津波シミュレーション。末広地区で観測された高い津波がいずれのモデルでも再現できていない<sup>7)</sup>。

い場合のデータベースへの取り込みなどが行われている。データベースには 10 万通り近い波源に対するシミュレーションが含まれているが、テクニクスを考慮すれば、思い切って波源のモデルや数も絞り込むことも可能と思われる。しかし津波地震など、津波の波源に関する知見がまだ十分とは言いきれない以上、慎重にならざるを得ない。南米など津波発生から日本までの伝達時間に余裕がある場合には、データベースによらず、実時間で津波のシミュレーションを行うことも出来るようになってきた。途中の検潮観測点のデータと比較することにより、正確な津波の高さの評価が可能になりつつある。近地津波についても海底津波計や GPS 波浪計の記録とシミュレーションを突き合わせ、津波予報のグレードを修正することが今後の課題になるが、記録の分解能の限界もあり観測される頻度が少ないことから、現実に津波予報に反映するにはまだまだ時間がかかりそうである。

今後の課題として、現在 20 cm としている津波注意の下限の検討がある。現在のシミュレーショ

ン技術は、図 7 の 2003 年の十勝沖地震の事例が示すように、多少メッシュを細かくしても、局地的な津波の高さの変化を説明できるまでには達していない。岬や島など条件によっては、シミュレーションで予測される平均的な津波の高さの 2 倍、3 倍ということがあるとすれば、例えば平均で 20 cm と予想しても実際にはその 2、3 倍の高さの津波が来ることになり、それでも安全かと問われると苦しい。個人的には下限はもっと引き上げるべきと考えるが、実際の運用に取り入れるのは、容易ではなさそうである。

## 参考文献

- 1) 森田 稔 (1942), 三陸沿岸に対する津浪警報, 験震時報, 13 (2), 37-43.
- 2) 気象庁 (1975), 気象百年史, 740p, 気象庁.
- 3) 気象庁地震課 (1977), 津波予報図の改正—津波注意報「ツナミチュウイ」の下限について, 験震時報, 41, 83-93.
- 4) 気象庁地震課 (1977), 津波予報業務の変遷と現状について, 測候時報, 44, 123-170.

- 5) 三好 寿 (1960), チリ地震津波の実態, 自然, 8 月号, 11-19.
- 6) 気象庁 (1961), チリ地震津波調査報告, 気象庁技術報告第 8 号.
- 7) 長谷川洋平, 吉田康宏, 林 豊, 小林政樹, 上川明保, 蒲田喜代司, 松山輝雄 (2004), 津波遡上高の詳細解析に基づく津波発生機構の解明, 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書, 文部科学省.

浜田 信生

[はまだ のぶお]



**現職** なし

理学博士

**略歴** 昭和 47 年東京大学大学院理学研究科修士課程修了, 気象庁入庁観測部地震課火山係配属, 地震観測所 (松代), 気象研究所, 地震火山部, 仙台管区气象台, 札幌管区气象台等で勤務, 平成 20 年地震火山部長を最後に定年退職, 平成 20 年 5 月より平成 21 年 5 月まで国際協力機構長期派遣専門家としてインドネシア気象地球物理庁において, 津波早期警戒システム構築のための技術協力に従事

**研究分野** 日本列島の地震活動, 地震カタログの改良

**著書** 「地震の事典」(共著, 朝倉書店)

# 津波予報の半世紀

## (2) 世界の津波警報体制の現状とその課題

### 山本雅博

#### 1. はじめに

2004年12月26日、インドネシアのスマトラ島沖に発生した巨大地震は、歴史上初めてのインド洋全域にわたる巨大津波を引き起こし被害者の総数は25万人以上となる未曾有の大惨事となった。国連の関係機関は、直ちに対策について多方面から検討し、津波災害を軽減するための早期津波警報システムを世界の全ての海域を対象に整備することにした。筆者は、2005年10月にパリのユネスコ本部にある政府間海洋学委員会（UNESCO・IOC）に赴任して以降、世界の数多くの国々を訪問し、直接或いは間接的にこの整備作業に従事してきている。ここでは、まずインド洋の津波警報システムの整備の経過並びに現状について述べる。その後、太平洋、カリブ海、地中海・大西洋の整備状況について解説することとするともに、これまでの経験からいくつかの課題に触れてみたい。

#### 2. インド洋津波警報システム

2004年のインド洋津波で大きな津波災害を蒙ったインドネシア、マレーシア、タイ、インドのような国々には、以前からそれなりの地震観測網が展開され、運用されていたが、この巨大地震に対応するためにはあまりにも脆弱で、いずれの国も津波について何の情報も提供することが出来なかった。この未曾有の津波災害直後から、ハイレベルの国際会議が、ジャカルタ、神戸、プーケット等で相次いで開催され、ユネスコ政府間海洋学委員会が、津波警報システム構築に関する国連の

責任機関として指名された。気象庁も素早い対応策を実施した。2005年1月に神戸で開催された国連世界防災会議の中で、インド洋の津波警報システムが整備されるまでの間、暫定的な津波情報を提供することをいち早く表明し、同年3月末からハワイの太平洋津波警報センター（PTWC）と連携を図りつつ情報の提供を開始している。この提案のために気象庁が成しうる施策について津波直後の年末から年始にかけて当時の長坂長官の指揮の下、検討が行われた。筆者は、その後インド洋周辺国を訪問する機会が多かったが、いずれの国でもこの情報提供が高く評価されている。

UNESCOは、2005年3月にパリのユネスコ本部で第1回の調整会議を、4月にはモーリシャスで第2回の調整会議を開催した。日本もこれらの会議に内閣府、外務省、防災科学技術研究所、気象庁らが積極的に参加した。合意された基本原則は、

- ① 政府間調整会議（ICG）を設置する
- ② 各国は、独自の津波警報システムを整備し、自国の責任のもと津波警報を発表する
- ③ インド洋全体の津波警報システムは、これら各国の津波警報システムを組み合わせ、整備する（System of National systemsを構築する）

ことであった。

最初実施された施策は、インド洋周辺各国の津波警報システムの現状を調査、評価し、各国に最も効果的な方策を提言することであった。実効的な津波警報システムは、地震や津波の観測、警報システムの整備に併せて、警報を迅速に、かつ確実に避難すべき住民に伝えるシステム（いわゆる End-to-End システム）を作り上げることにあ

る。このため調査団は、それぞれの国の社会状況や、既存のインフラについて一体的に調査し、包括的な提言が行っている。調査団には、ユネスコが主体となって、津波警報システムの観点から気象庁〔筆者〕、PTWC、ITICの担当官が、また、防災施策の観点から国際防災戦略（ISDR）、国際赤十字社新赤月社（IFRC）、アジア防災センター（ADRC）や世界気象機関（WMO）らの専門家で構成された。これまでに当該国から要請のあった17国を対象に調査が行われている。

インド洋で想定される津波の発生地域は大きく2つある。一つは、よく知られているジャワ島南岸のインドネシアからミャンマーにかけての地域。二つ目は、あまり知られていないが、パキスタンからイラン沖のマクランと呼ばれる地域である。マクラン地域は、アラビアプレートが、ユーラシアプレートの下に潜り込んでいる地域で、最近では、1945年11月27日にM:8.3の地震が発生している。津波の高さは、所によっては、15mを超え、津波や地震による犠牲者は、少なくとも4千人となる大惨事であった。インド洋周辺の各国は、特にこの2つの震源域を対象とした各種の津波シナリオを想定して対応策を検討している。

以下、各国の津波警報発表のための観測、処理

システムの現状について簡単に紹介する。2004年津波以降、各国の反応や対応は様々である。ほとんどの国は、一からのスタートであったが、現在ではその完成度に差が生じはじめている。

### 1) インドネシア

インドネシア気象庁（最近、気候を含めてBMKGに改称）が津波警報発表の任務を担っている。筆者は、1997年以降、包括的核実験禁止条約機構（CTBTO）の職員としてインドネシア各地のBMKGの地震観測施設を訪問する機会が多かったが、当時の観測システムは、アナログ方式の前近代的なものであった。しかし、現在は、解決すべき課題は山積しているものの約160箇所の広帯域地震計と衛星通信による新リアルタイム地震観測処理システムに生まれ変わりつつある。観測点の構築には、独自の観測点に加え日本のJISNET（15点）、ドイツ（21点）、中国（10点）及びCTBTOの6点が含まれている。潮位とGPSの観測運営は、地理調査所（Bakosurtanal）が担いBMKGにデータの分岐が進められている。また、津波予報のための津波の数値シミュレーションデータベースはバンドン工科大学（ITB）と、ドイツのアルフレッドウェーゲナー海洋研究所（AWI）が分担して作成

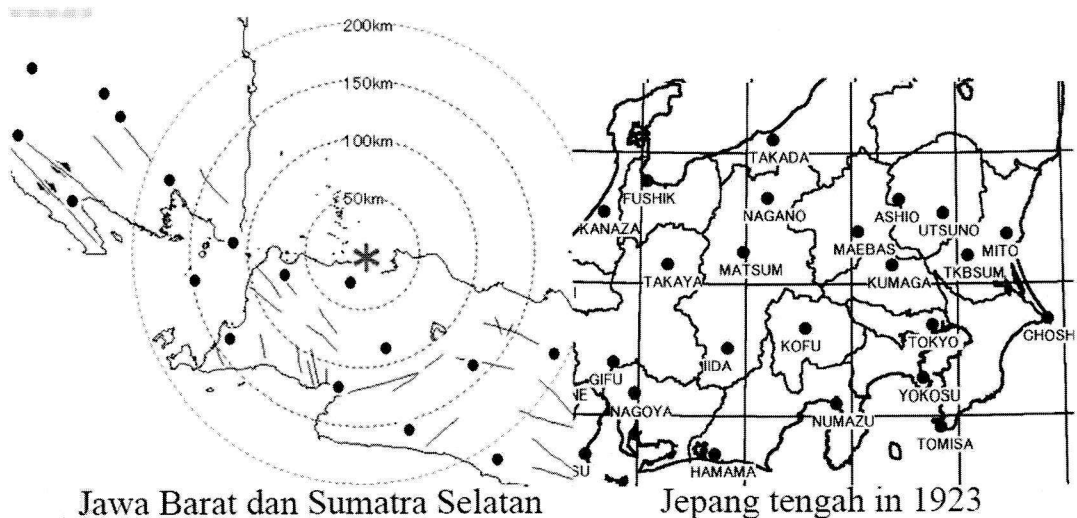


図1 インドネシア（スマトラ島南部からジャワ島西部にかけて）の最近の地震観測点整備の状況と、日本における1923年関東地震当時の地震観測点の状況、インドネシアは国土が広いだけに、整備されたとはいえまだまだ観測点の密度は低い。



を行い BMKG のシステムに組み込まれることになっている。

また、ドイツとの共同作業、及びインドネシア独自での整備により海底の水圧計や GPS を用いた 23 箇所のブイ方式の津波監視システムの構築が進められている。BMKG 内に新設されたインドネシア早期津波警報センターには、これらのデータが 24 時間体制で常時監視されることになる。大統領からの強い指示もあり、最近では、M 7 クラスの地震では、地震発生から 5 分以内に津波警報が発表されるようになってきた。

全体システムの整備には、多くの国の協力がある。ドイツはいち早くインドネシア政府と協力協定を結び、ポツダム地球科学センター (GFZ) が中心になり、同国の多数の研究機関が協力してインドネシアの津波警報システムを築き上げてきた。緊急の地震波形処理は、GFZ が開発し改良した SeisComp3 というソフトを使用している。中国も地震観測、地震波形データのリアルタイム処理に関して積極的な支援を行っている。日本も、防災科学技術研究所が 13 観測点、JAMSTEC が 2 点の観測面の支援に加え、気象庁は GFZ のソフト開発に対し、津波予報のより効率的な運用体制を構築するため、気象庁で運用している処理方法を具体的かつ詳細に解説するなど技術的支援を行っている。また、職員の Capacity を向上させるための研修を、現地或いは日本で繰り返し実施している。

しかし、整備作業は突貫工事で行われてきたため、安定した運用と、良質なデータをうるための最終的な調整作業にはさらに時間がかかるものと思われる。BMKG が設置した広帯域地震計の多くは、既存の観測所の庁舎内に設置され、地盤条件が悪く、ノイズの大きい観測点が多い。海底水圧計による津波観測システムは、技術的な課題に加えて、運用面では海底に設置された機器の定期的な保守作業に多くの経費が必要となる。さらに、バンダリズムなどによるブイの破損も発生しており、どのようにブイを維持、運営するかは多くの課題を抱えている。一部には、23 基の常時運用の実現については危惧する声がある。この大シ

ステムは、いろいろなシステムを統合して整備されたもので (別の見方をすれば、寄せ集めたシステム) ある。多くの国民が極めて津波に脆弱な地域に生活している現状を鑑みると、この大システムの今後とも継続的に安定した運用を実現し、適時、適切な津波警報を発表することが不可欠である。インドネシア政府にとっても、国を挙げての一大チャレンジと言える。

## 2) マレーシア

マレーシア気象局が、津波予報業務を担っている。現在は、7 点の広帯域地震計と 7 点の短周期地震計からなる 14 点による地震観測網を運用している。このうち 7 点の広帯域地震計のデータは IRIS にも提供され、公開されている。米国で開発された Antelope によるリアルタイム地震波形処理が行われ、周辺国など (CTBTO の観測点を含む) のリアルタイムの地震波形を用いて常時監視が行われている。最近、アラスカ津波警報センターが開発した Early Bird や GFZ の SeisComp3 も併用し、Mwp (広帯域 P 波を用いた Mw) の推定も出来るようになった。

なお、同国では過去の地震記録 (1976 年以降) も全て原記録及びマイクロフィルムが保存されている。(注: マレーシアだけでなく、周辺国でもこれまで国際地震センター (ISC) には、限定的な観測点のデータが送られていたようである。これら過去データを悉皆的に収集、解析すれば東南アジア地域の詳細なサイスミシィティーが得られるのではと期待される。)

## 3) タイ

タイでは大津波災害を機に、各種の災害を包括的に担当する国家災害警報センター (NDWC) が新たに設立された。このセンターは、関係機関の協力で運用され、国民に対する警報は、一元的にここから発表される。津波警報も、気象庁の情報を基にして NDWC が発表する。

地震観測の中心的機関は、タイ気象庁 (TMD) である。津波災害以降、4 年計画で地震観測網の大幅な改善が図られ、これまでに 26 箇所の広帯

域の地震計、25箇所の短周期地震計、61箇所の加速度計からなるリアルタイム地震観測処理システムが整備されている。周辺国を含めた IRIS の観測点のデータも監視業務に活用している。この整備により、従来 20 分以上要していた処理時間が、5-10 分に短縮されるようになってきている。潮位の観測は、これまで水路部が 9 箇所で実施してきたが、気象庁は新たに 9 箇所を整備し、併せた 18 箇所の潮位を監視している。

#### 4) オーストラリア

オーストラリアでは、2008 年 10 月に津波警報センター (JATWC) が正式に発足した。このセンターは、気象庁 (BOM)、地球科学庁 (GSA) 及び危機管理局が共同で運用するものである。キャンベラにある地球科学庁は、リアルタイムの地震観測を担い、津波発生の可能性がある場合は、直ちにメルボルンにある気象庁に通知する。気象庁では、これを基に、必要な地域に津波警報を発表すると共に、潮位計の監視を行う。危機管理局は、緊急体制に入ることになる。地球科学庁は、インド洋周辺国では、最も確実で信頼性の高い情報を提供出来る能力を持っている。ただし、このように場所の異なる複数の機関が連携して津波警報のような緊急作業を円滑に、かつ、確実に進めるためには、普段から十分な意思疎通を図るとともに、不測の事態が発生した場合に備えた訓練を実施する必要があると考えられる。なお、オーストラリアは、国内のみならず南西太平洋に地震計や潮位計の整備を進め、観測網の強化を図っている。

#### 5) インド

従来は、インド気象庁が国内の地震活動の監視を担ってきたが、2004 年の津波を機に、津波警報に関しては海洋の研究所である INCOIS が一元的な責任を持つこととなった。新たに 7 箇所の広帯域の地震観測点も加え、マレーシアと同様に SeisComp3 や Early Bird をインストールするとともに、IRIS や GFZ が運用する GEOFON に集まる世界中のリアルタイム地震波形データを利用した全球的な地震活動監視を開始している。

沿岸潮位計やブイ方式による海底水圧計による津波の監視も逐次進められている。しかしながら INCOIS は海洋研究所であるため、地震波形を処理した経験のあるスタッフは極めて少ない。そのためか現在でも、システムの自動処理結果を最終資料として取り扱っているのが気になる。また、国内的な事情により、このような良質なリアルタイムの地震や潮位のデータを関係国に提供できない状況が続いている。

ドイツの津波に関するプロジェクトは、インドネシアの津波早期警報システムの整備だけではなくインド洋周辺各国の地震観測、処理システムの整備も包括している。モルディブでは、2つの島に広帯域の地震計が整備され、マレの気象台では VSAT により地震波形をモニターできる。さらに、処理装置には、SeisComp3 がインストールされており、独自で周辺各国のリアルタイム地震波形データに加えてインド洋周辺の地震活動を常時監視できる。その他イエメン及びスリランカでも同様のシステム整備作業が進められている。さらにケニア、タンザニア等にも整備される予定である。

その他の国々を概観してみる。ミャンマーは最近まで日本企業が提供した短周期の地震計と、中国の提供した地震計でオフラインの地震観測網を展開してきたが、現在はさらに観測網が強化され、リアルタイムの監視システムが整備されつつある。バングラディッシュでは、最近になって4点の観測点からなるリアルタイム地震監視システムが整備された。筆者は CTBTO 在任時、地震計を設置する地点の選定作業のために何回か訪問している。全土はほぼ沖積層に覆われているため、地震計の設置場所の選定は極めて困難であった。この4点の地震観測網は当時から計画されていたが、ようやく実現されたものである。パキスタンでは 11 箇所の広帯域地震計を軸に、約 50 箇所の短周期地震計と加速度計からなる地震観測網を展開し、処理ソフトとして SeisComp3 をインストールして IRIS 等の外国の地震波形を利用したリア

リアルタイム津波監視システムの運用を既に開始している。パキスタンの大きな関心は、すぐ沖合いのマクラン地域で発生する大津波にある。イラン、オマーンも同様である。このためリアルタイム地震波形を相互に交換することが大きな課題となっている。イランでは、大学と国際地震工学及び地震研究所（IIEES）が国内に地震観測網を展開しているが、津波警報システムの中心的役割は、国内に均等で均質な観測網を運用している IIEES が担っている。オマーンでは、大学が地震観測網を展開しているが 24 時間監視体制は無い。このため津波監視業務を担う気象庁が、大学と協力してシステム作りを開始している。パキスタン、イラン、オマーンの 3 カ国はデータ交換に基本的に合意しており、実施のための調整作業が急がれている。イエメンは、従来から国内の地震観測網を展開してきたが、今般前述のようにドイツの支援を受け、リアルタイム処理機能が一段と更新される。モーリシャスでは、1 点の広帯域地震計の整備に加え、Early Bird をインストールしたのでリアルタイムでインド洋周辺の地震活動を監視する機能をもっている。南アフリカは、安定的な地震観測網を運用しているが、津波警報システムの観点からの整備は進められていない。アフリカ諸国は、残念ながら立ち遅れており、今後、重点を置くことが必要な地域である。

### 3. 太平洋の津波警報システム

インド洋津波の後、太平洋の国々或いはそれぞれの地域で津波警報体制の見直しが積極的に行われている。例えば、津波が地震発生後 10 分以内に襲うような近地津波に対しては、PTWC が発表する情報では間に合わず、各国が独自に対処すべきことが津波警報組織運用の当初からの原則であった。その原則が今、改めて再認識され、歴史の長い太平洋地域においても各国の津波に対する観測、評価機能の強化、充実が必要とのことが、共通認識となってきている。

ここでは、太平洋の津波警報システムの経緯や課題について述べてみたい。

米国は、ハワイで 165 人の死亡者を出した 1946 年のアリューシャン地震津波を契機に津波警報体制の整備が進められ、1949 年にホノルル郊外のエバビーチのホノルル地磁気観測所で運用を開始した。さらに 1964 年のアラスカ地震を契機に、アラスカ津波警報センター（West Coast/Alaska Tsunami Warning Center）WC/ATWC が 1967 年に運用を開始している。現在、WC/ATWC は、アラスカ及びカナダを含む米国本土全域に対する津波情報を、また PTWC は、ハワイを含む太平洋全域を対象として津波情報を提供している。また、両センターは相互に障害時に備えたバックアップ体制を確保している。

ロシアの津波警報システムは、1952 年のカムチャツカ地震津波を契機に整備が進められ、1958 年からその運用を開始している。ユジノサハリンスクにある水理気象局（ハイドロメット）の津波警報センターは、ロシア科学アカデミーが実施している地震観測システムとの連携を図りつつ、近地及び遠地津波の津波警報業務を実施しているが、近代化が必要な状況にある。

1960 年のチリ津波災害を機に、太平洋全域の津波警報システムのあり方が初めて検討された。1965 年 4 月には作業部会がホノルルで開催され、詳細かつ包括的な太平洋津波警報システムの在り方を提言している。会議には、カナダ、チリ、日本、米国、ソ連等 12 カ国が参加している。日本代表団は、広野卓三気象庁地震課長、高橋龍太郎東京大学地震研究所名誉教授、和達清夫防災センター（現：防災科学技術研究所）所長で構成された。この提言は、同年 11 月に開催されたユネスコの政府間海洋学委員会（IOC）総会に報告され、同総会において「国際調整会議（ICG）や国際津波情報センター（ITIC）の設置も含む太平洋津波警報システムのあり方」の決議が採択された。国際調整会議には、当初カナダ、チリ、日本、英国、米国およびソ連の 6 カ国が参加することとなった。太平洋津波警報システムの始まりである。

第 1 回の ICG（俗称は、ITSU）は 1968 年 3 月ハワイのホノルルで開催され、日本からは気象庁の末広重二が参加している。会議では、ITIC が米

国沿岸測地局 (USCGS) に設置され、その任務として津波警報の発表に加えて、リアルタイムでの津波に関する情報の収集、津波の研究の推進、情報やデータ交換、並びに人的交流の促進について議論された。また、衛星通信等による潮位データの収集、地震データの相互交換の促進等が決議されている。米国では、1971 年末から大幅な機構改革が行われ、USCGS の大部分は米国海洋気象庁 (NOAA) に統合された。ITIC の業務内容にも変更があり、津波警報発表の現業的業務は、1972 年頃から順次、同じ NOAA の組織である太平洋津波警報センター (PTWC) に引き継がれていった。

その後、ICG はほぼ 2 年毎に開催されている。加盟国も当初の 6 カ国から、現在 30 カ国となっている。今年 (2009 年) 2 月には、南太平洋のサモアのアピアで第 23 回会議が開催された。この会議では、南西太平洋の津波警報のあり方が大きなテーマの一つとなった。同地域は多くの島国からなり、相互の情報交換が迅速な津波情報の発表に繋がることから、作業部会を設置し、具体的な施策を検討することとなった。現在、フィジー、トンガでは、JICA の技術協力プロジェクトにより地震観測網の整備が防災科学技術研究所 (NIED) の支援を受けて実施されている。この新たな観測網が、南西太平洋の地域津波警報システムの中心的な核になるものと期待されている。

同様に、南東太平洋地域 (チリ、ペルー、エクアドル、コロンビア) の津波警報体制も多くの課題を抱えている。遠地津波に対する体制は一応作られているが、肝心の近地津波に対する対応が全くと言ってよいほどない。唯一あるのは、大きな地震動を感じたら直ちに避難することだけである。その後の対応についても具体的な対策がない。チリのケースでは、水路海洋局 (SHOA) が津波警報の責任機関となっている。地震計も SHOA が位置するバルパライソの郊外に広帯域地震計を設置し、フランスが現業的に開発した TREMORS と呼ぶ 1 点の 3 成分のデータから震源とマグニチュードを求める方法で津波警報を発表している。しかしこの TREMORS は遠地地震に対して

は有効な方法であるが、近地地震に対しては制約と課題が多い。他の 3 カ国も同様な課題を持っている。いずれの国も津波の観測、津波警報の実施責任機関は水路局 (海軍) が担い、地震の観測は、大学や国の研究機関が担っている。例えば、2007 年 9 月のペルー沖の地震津波では、各国とも共通して、地震観測、潮位観測、津波警報発表の判断方法、相互の情報交換等の課題が明確となった。これを契機に、各国とも自国の観測処理システム改善並びに両機関の連携の強化を図るとともに、4 カ国が共同して南東太平洋の地域津波警報の地域システムの整備に着手している。

現在の太平洋津波警報システムの最大の弱点は、津波の発生やその規模を把握する観測施設 (潮位計、津波計) の密度の低さにある。2007 年 4 月 1 日のソロモン地震津波では、現地調査によると最大 10 m 近い津波の遡上が報告されているが、遠く離れた常設の津波観測計では、30 cm の高さが記録されたにすぎない。また、観測されたデータも太平洋地域では、1 時間毎にしかデータを送って来ない観測点も多い。観測点の充実、伝送頻度の改善を併せて実施する必要がある。少し脱線するが、この地震が発生した時、筆者はマレーシアのホテルにいた。PTWC や ITIC の所長も同様である。数少ない情報しか入ってこない状況の中で、NHK の海外放送 TV は積極的に現地の JICA 職員等に取材し、津波の状況を詳細に放送しており、状況を把握するのに大いに役立った。JICA や国連関係の職員は多数海外で活躍されており、現地でなくては得られない彼らの貴重な情報を迅速に交換できる情報共有システムを作り上げることの重要性を感じた次第である。

インド洋の大津波後、世界中の人達が津波に対して多大の関心を向けるようになった。それとともに地震が発生していないのにデマの津波情報による避難が起こるなど過剰な反応を示すことも少なくない。2006 年 5 月にトンガ付近で M: 8.0 の地震が発生し小規模の津波が発生した。津波警報の発表は直ちに国際的な報道機関を経由し、インターネットで世界中を飛び交った。ニュージーランドでは、政府の機関ではなく外国報道機関の情

報により、多くの人達が必要のない避難を行った。この件は、マスメディアや一般住民への解説の必要性や、理解しやすい情報の提供の必要性を認識させた。

#### 4. カリブ海の津波警報システム

最近 500 年間を見ると、カリブ海では約 100 回近くの津波が観測されており、総計 5 千人近くの犠牲者を出している。4 千万人の住民の多くが海岸沿いに住居を構え、さらに、観光客の数も極めて多く、津波に対しては脆弱である。2005 年、津波及び他の沿岸災害に対処するため「津波及び沿岸災害警報システム (ICG/CARIBE)」が設立された。2006 年には最初の会議がバルバドスで開催された。ハリケーン対策を積極的に取り込んだマルチハザードシステムを目指している。以降、ベネズエラ、パナマと毎年開催され、全体システムが具体化してきている。

地震観測は各国で積極的に行われている。ベネズエラ地震研究所 (FUNVISIS) では、国内に 38 箇所に広帯域地震計を設置し、VSAT による地震波形データ伝送を行い、24 時間体制で地震活動の監視を行っている。ニカラグアの国土開発研究庁 (INETER) は、国内の 60 箇所の地震観測点に加え、メキシコ、米国南部、プエルトリコ、ベネズエラ、エクアドルの約 30 箇所の観測データをインターネットで収集している。データは、Earthworm を用いて 24 時間体制で処理、監視されている。その他、東カリブ地域の火山や地震の活動を監視し適時適切な火山情報を提供することを任務としている機関としてトリニダードトバゴに位置する西インド諸島大学地震研究センター (SRU) がある。この地域の 16 火山に設置された広帯域の地震計のデータはリアルタイムで監視されている。

残された課題は、これら既存の地震観測データを各国の津波警報センターにどのように効率的に取りまとめるかにかにある。システムの安全性を考えたバックアップ体制の在り方についても併せて検討されている。津波の有無を監視する潮位計

の整備にはまだ時間がかかる状況であるが、米国は既に 4 点に深海津波計 (DART) を設置、運用を開始し津波の早期発見に努めている。

#### 5. 北東大西洋及び地中海の津波警報システム (ICG/NEAMTWS)

北東大西洋地域の顕著な地震としては、1755 年 11 月 1 日にポルトガル沖の大西洋で発生したりスボン地震津波がある。津波による死者 1 万人を含む総計 6 万人程の死者を出す大惨事となった。津波の遡上高は数十メートルに達したところもある。また、津波はるか西インド諸島にも達している。もう一つ津波予報の技術的観点から見て厄介なものに、海底地すべりによる大規模な津波がある。北海やノルウェー海では地質年代にさかのぼる記録がある。地中海にもたくさんの歴史的津波が記録されている。紀元 365 年には、アレクサンドリアが津波によって壊滅している。イタリア周辺では、火山活動による津波も多数発生している。普段静穏な地中海を取り囲む海岸地域の開発は目覚ましいものがあり、一旦小規模な津波が発生すれば、その被害は極めて大きなものとなるのが容易に想像される。

ICG/NEAMTWS は、2005 年 6 月の IOC 総会で設立された。第 1 回会議がローマで開催された後、ニース、ボン、リスボン、アテネと毎年開催されている。ヨーロッパの地震観測機関の間では、従来から地震データの相互活用システムは実施されてきているので、比較的システム整備は容易なように見える。大きな課題は、地中海南岸のアフリカ北部の国々とのリアルタイム地震データ交換システムの整備にある。これらアフリカ北部の国々は、それぞれが近代的な地震観測システムを既に整備し、運用を開始している。例えば、リビアも最近 15 点の広帯域地震計と VSAT によるリアルタイム地震観測処理システムの整備をしたが、データの共有には至っていない。

この地域の中心となる機関は、イタリアの地球物理火山研究所 (INGV)、英国の地質調査所 (BGS)、ドイツの GFZ、フランスの国立原子力エ

エネルギー庁 (CEA/DASE), トルコのボガジッチ大学の地震研究所 (KOERI) である。さらに、ギリシャの国立アテネ観測所 (NOA), ポルトガルの気象庁 (IM) も中心的な役割を果たしている。これらの機関の多くは既に 24 時間、国内の被害地震の監視体制を整備している。

地震データについては、ドイツの GFZ が独自に開発した SeisComp3 を各国共通のソフトとして提供しており、各国の地震センターは順次、地震データの収集及び処理の試験運用を始めている。同時に、地域センターの任務やその選定作業も進められている。しかし作業が具体化するに連れ、国策や外交的な課題が前面に出てくる。これはこの地域に限ったことではなく各 ICG の課題でもある。1 個のメインセンターと一つのバックアップセンターとなるのか、マルチのセンターとなるのか方向は依然見えない状況である。またこの会議には行政機関からの参加がほとんど無く、研究者が主体なので、議論の中心が津波警報システムの整備よりも、研究テーマに集中するのが難点とも言える。

津波が発生したかどうか、或いは発生した津波の規模を監視するためには津波計 (潮位計) のリアルタイムデータ交換システムの整備が不可欠である。課題は、地震と同様アフリカ北部の観測網の整備にある。

## 6. 地震の規模の推定について

近地震の津波予報をいかに迅速に、かつ適切に出せるかは地震の規模、マグニチュードの推定方法にあるといっても過言ではない。日本では中周期の地震波を利用した気象庁マグニチュードをまず用い簡便かつ迅速に算出している。しかし、多くの津波警報センターでは、従来からの短周期地震計によるローカルマグニチュード ML や遠地地震波を用いる mb を依然使用しているところも多い。これでは津波を発生するような近地の大地震のマグニチュード評価には使えない。Ms を使っているところもあるが、近地震の迅速で的確なマグニチュードの推定はとても出来ない。

ところによっては、依然として地震波の振動継続時間 (F-P) を使っているところもある。これは論外であるが現実でもある。これらの問題に対応するため、最近では多くの機関が広帯域の P 波を用いる Mwp の導入を始めている。

## 7. CTBTO データの津波予報のための活用について

国際的学術的な地震観測網としては、米国の IRIS, ドイツの GEOFON, フランスの Geoscope 等の地震観測網がある。1997 年に発足した包括的核実験禁止条約機構 (CTBTO) は、これらの既存の観測システムと協力しながら国連機関としては初めてのグローバル地震観測網を構築した。観測網は、常時ウィーンの CTBTO のデータセンターにデータを伝送する 50 箇所の Primary 観測点と、震源決定精度を向上させるためデータセンターのコマンドを受けてデータを自動伝送する 120 箇所の Auxiliary 観測点から構成される。日本では、気象庁の松代の群列地震観測システムが Primary に、上川朝日など気象庁の 5 箇所の STS2 の観測点が Auxiliary に指定されている。学術的な観測点は、時として諸般の事情 (特に経費) により長期間の観測停止が発生 (強いられる) することがままある。しかし、条約により運用される CTBTO の観測点は、高い運用稼働率が要求され、津波業務にとっては、願ってもない信頼できる地震観測網であると言える。2004 年のスマトラ地震が発生する半年前にベルリンで日本、ドイツ、CTBTO が共催して CTBTO データの多目的利用に関するワークショップが開催された。この中で筆者は、CTBTO 地震観測網のデータを津波警報機関に提供することを提案した。この提案は、ウィーンで開催される CTBT の次回の技術作業部会で検討されることとなったが、前途は容易ではなかった。しかし 12 月のインド洋津波は、状況を一変させた。2005 年 2 月にウィーンで開催された技術作業部会では、気象庁 (筆者) に加え内閣府からも津波警報作業における CTBTO 地震データの必要性、重要性を強く訴えた。技術作業部会の

議長のダールマン氏は、筆者が、30数年前にスウェーデンの研究所に滞在したときの所長でもあり、積極的に我が方の提案をサポートしていただいた。技術作業部会での議論では、データの津波警報機関への提供は、CTBTの任務の範囲を逸脱するとの法的観点からの異論はあったが、最終的には、ユネスコが認知する津波警報センターにデータを提供することが合意された。このことは、かつてCTBTOの観測網を構築する業務に従事し、さらに現在は各国の津波警報システムの構築を支援している立場の筆者にとっては望外の喜びである。すこし脱線するが、CTBTO在任時に、インドネシアのティモール島でCTBTOの観測点の選定に苦慮したことがあった。現地で色々情報を収集していると、現地の人から戦時中に日本軍により掘削されたトンネルがあることが知らされ山中の現地を訪れた。ノイズ調査の作業を終えてトンネルを出ると、見たこともないような満天の星空であった。60年後にこのトンネルが平和目的に利用されるとは、当時の誰もが想定しなかったことであろう。インドネシアには防空壕を利用した地震観測点は他にもある。

## 8. 持続的運用と人材の育成確保

インド洋津波以降、多くの地震観測システムが整備されてきており迅速な津波警報発表に大きく貢献することは間違いない。現在の津波予報の手法については、技術にも多くの課題、限界がある。このデータを有効に活用し、津波予報技術の向上につなげることも重要な一つの課題である。しかし、最大の課題は、このシステムを如何に継続的に運用して行くかにある。大津波の頻度は極めて少ない。関係機関、国民の関心を如何に確保し長期的に維持、運用して行くことは極めて大きな課題といえる。インド洋津波の1年後には、マスコミ関係者からたくさんの取材を受けた。同じ局の複数の番組からの問い合わせもあった。しかし、2年経ち、3年経つと何の記事にもならなくなる。関係機関や国民の関心も同様なものであろう。現状は創業の難きに多くの関心が向いているが、観



図2 インドネシア気象庁の現業室における職員に対するドイツシステムのリ修の様子

測体制は構築するより維持（守成）する方がよほど難しい。同じような大災害を再び繰り返さない努力が求められる。

もう一つの課題は、システムを運用する人材の育成にある。各津波警報センターが何時でも同じ良質の警報を同じタイミングで出せるようにするためには、技量を持ったスタッフの育成以外に無い。津波警報センターの24時間運用を実施するため、多くの国では大量の職員を採用している。インドネシアでは数百人規模での採用となっている。これらの新人職員を同じ能力を持ったスタッフに育て上げるのは容易でない。日本の気象庁では、マニュアルの整備や訓練の実施に加え、センターの先輩から学ぶことが新人教育、育成の重要なポイントになっているが、多くの国では、先輩となる人材がいない。津波警報センターに整備されるシステムは、大幅に近代化されている。かつてある国では、コンピューターのスクリーンに映し出された地震波形をハードコピーで印刷し、物差しで地震波形を検測してから震源計算しているところもあった。しかし、最近の変化は、あまりに急激過ぎるのではと心配される。多くの国の津波警報センターを訪問した時には、現地スタッフの間にシステムの自動処理結果を、過度なまでに信頼する傾向が強く感じられる。

発展途上国の多くに共通する一つの問題は、科学技術の分野における、長年の先進国からの援助を受け続ける間に浸透した、受動的な姿勢、主体

性の欠如であろう。援助する側は、高度な観測、データ処理システムを供与し、その操作方法は教えるが、システムの背景にある考え方、思想のようなものの周知理解までは、多くの場合、手がまわらないままに終わっている。いわば高級な自動販売機の操作方法のみが教えられているようなものである。援助する側は自動販売機を提供し、操作方法を教え、援助を受ける側は自動販売機を受け取り、操作することで出力が得られることで満足しているという構図である。これでは津波警報システムを生きたシステムとして運用することは難しい。UNESCO・IOCでは、これまで関係する色々な機関と協力して研修を繰り返してきた。しかし、実効あるものとするには、更なる工

夫と努力が必要であると感じている。

山本雅博

[やまもと まさひろ]

**現職** ユネスコ政府間海洋学委員会 (UNESCO・IOC) 津波ユニット Senior Advisor

**略歴** 1969年3月気象大学校卒、秋田地方気象台配属、1971年4月観測部地震課勤務。以降、科学技術庁防災科学技術推進室、福岡管区気象台などの勤務を経て主に地震火山部各課勤務。1997年から5年間、ウィーンに新設された包括的核実験禁止条約機構 (CTBTO) に派遣、2002年4月火山課長、地震津波監視課長をへて、2005年9月、UNESCO・IOC 派遣、現職





## 震度で見た地震回数と M で見た地震回数

地震の回数を震度で見るとマグニチュード (M) で見る場合とでは、大きな違いがある。

図 1 は、気象庁の震源カタログおよび震度データベースに基づいて、1926 年から 2008 年までの 83 年間に日本周辺で発生した M 6 以上の地震の積算回数と、最大震度 6 以上 (1996 年 10 月以降は震度 6 弱以上) を記録した地震の積算回数とを比較したものである。

M 6 以上の地震回数はほぼ一定の割合で増えている、大きな地震の発生状況にほとんど変化は見られないのに対し、最大震度 6 以上を記録した地震の数は 1995 年頃から急激に増大しており、不自然である。

この原因として考えられるのは、阪神・淡路大震災以降にわが国の震度観測体制が大きく変化したことであろう。

もともと震度は「人体感覚、身の周りの物体の動き、構造物の揺れおよび被害程度、地変の

程度などから総合的に推定された地震動の強さの階級」と定義され、長い間、全国の約 180 地点に配置された気象官署の職員が、言わば主観的に決めて中央へ報告する体制であった。

しかし、このような震度の決め方には、

- ① 人間の主観が入る
- ② 震度の決定に時間がかかる
- ③ 震度報告の地点数が限定される

という問題があった。とくに②については、阪神・淡路大震災時に震度 7 の発表が 3 日後であったことが社会問題にまで発展した。震度 7 は全壊家屋 30% 以上という定義だったため、被害調査を経ないと認定できなかった事情があるにせよ、緊急時の防災対策には間に合わないと批判されたのである。

また、③については、基本的に測候所職員の手によって震度報告がなされていたため、たとえば東京の隣りは横浜、千葉、網代、熊谷、鉾

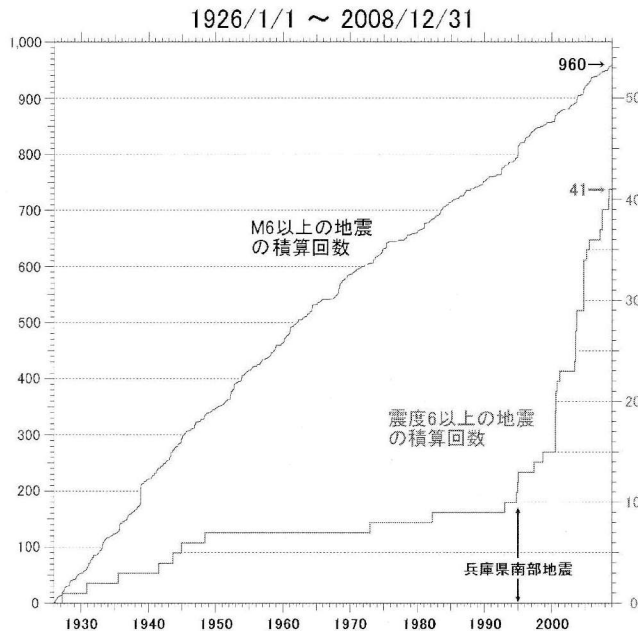


図 1 1926~2008 年の 83 年間に日本周辺で発生した M6 以上の地震と震度 6 以上の地震の積算回数 (気象庁データによる)

子、館山といった場所では公式な震度は観測されておらず、きわめてまばらな状況であった。震度は地盤による影響が大きく、わずかな距離を隔てても揺れ方が大きく異なることがある。また、ごく浅い小地震が発生した場合などは、その直上付近でごく局所的に大きな揺れがあっても、ある程度離れた測候所では揺れを感じず、無感地震とされる場合も多くあった。いずれにせよ、測候所の分布に頼っている限り、きめの細かい震度分布を直ちに知ることは不可能であった。

このような問題を解決し、迅速性の確保と観測密度の増大を図るため、気象庁はそれまで人間が震度を決めていた方式（体感震度）から、器械が決める方式（計測震度）へと大転換し、1996年4月からは全国の約300地点に設置した計測震度計による震度観測を開始した。

その後、消防庁の指導により全国の地方自治体で震度計の設置が進み、また防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET の一部も震度速報の対象に加えられるようになり、2007年10月現在では、気象庁 619、自治体 2,836、防災科研 781 の合計 4,236 地点における震度が気象庁から発

表される体制となっている。

このように、全国の震度観測点の数が200足らずから数千点へと爆発的に増大したため、それまで見逃されていた大きな震度が拾われるようになったことが、図1で震度6以上の地震数を急増させた原因である。すなわち、1995年以降の積算回数の方が真実であり、それ以前は大幅な取りこぼしがあったものと考えられる。

実例として、図2に2004年新潟県中越地震における震度分布を示す。この地震では、1995年兵庫県南部地震以降初めて震度7が川口町で記録されたほか、震度6強が3地点、震度6弱が12地点で観測された。ただ、これらの震度観測点はいずれも1995年以降に新設されたものであり、ひと昔前であれば、震度観測は最寄りの高田と新潟の気象官署でしか行われていなかった。従って、もし新潟県中越地震が10年前に発生していたら、この地震の公式最大震度は5または4にとどまっていたはずである。

この一例でわかるとおり、震度で見た地震回数の急増を見て「最近地震が多くなった」と言うことは誤りであり、震度観測体制の急変こそがその原因である。（岡田義光）

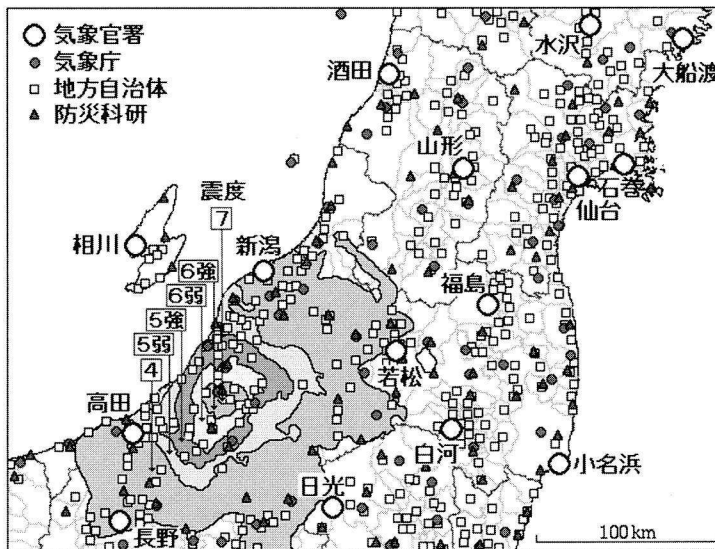


図2 2004年新潟県中越地震の震度分布と震度観測点。地名のあるのは気象官署。

## 大地震に伴う気圧変動

地震は地面や海水を揺すり地震動や津波が発生する。と同時に、地面や海水に接している大気も揺らしている。地動や海面変動は地震計や津波計で計測するが、大気圧は変動するのだろうか。

空気の振動は、周波数が可聴帯域であれば通常のマイクロフォンで記録する。火山噴火時には0.1 Hzから20 Hz程度の低周波で耳に聞こえないが、麓の家屋の窓ガラスが割れるような数百パスカルもの圧力変動が捕らえられることがある。さらに低周波の圧力変化の計測には、微気圧計とよばれる精密な大気圧測定装置が使われる。大気圧変化は長周期地震計や地殻変動測器に地盤変動として記録され、また測器に直接影響をあたえる。その影響を検証・補正するため広帯域地震計と同じ横穴または近傍の観測点に微気圧計を設置して同時観測をおこなっている(綿田・功刀2000, 綿田・大湊2006)。

2003年十勝沖地震M 8.3発生直後に日本各地で大振幅の地動(地震表面波)が到達すると同時に、大気圧が1~3パスカル程度振動しながら変動した(図1)。この十勝沖地震時の気圧変動は周期15秒で変動量は絶対大気圧の十万分の3程度、高度差による気圧増減に換算すると高度差約30センチメートルに相当し、高層ビルのエレベータ昇降中に耳奥で感じるような圧力変化を感じることは無い。大気圧変動は地震波とともにおよそ日本列島を3.7 km/sで通過している。この速度は地表大気中の音速よりも1桁速い。

地震とともに聞こえる地鳴りは、可聴域の地震波が地表で音波に変換されたもので、我々の耳で聞こえている。しばしば地震を感じる前に地鳴りが聞こえるのは、地震の主要動であるS波の到着前に、観測者付近の地表でP波から変換された音波が耳に届いているためである。2003十勝沖地震の地面の長周期の上下の揺れがその直上の大気圧変動となっていることがわかっている(綿田2005, Watada et al. 2006)。

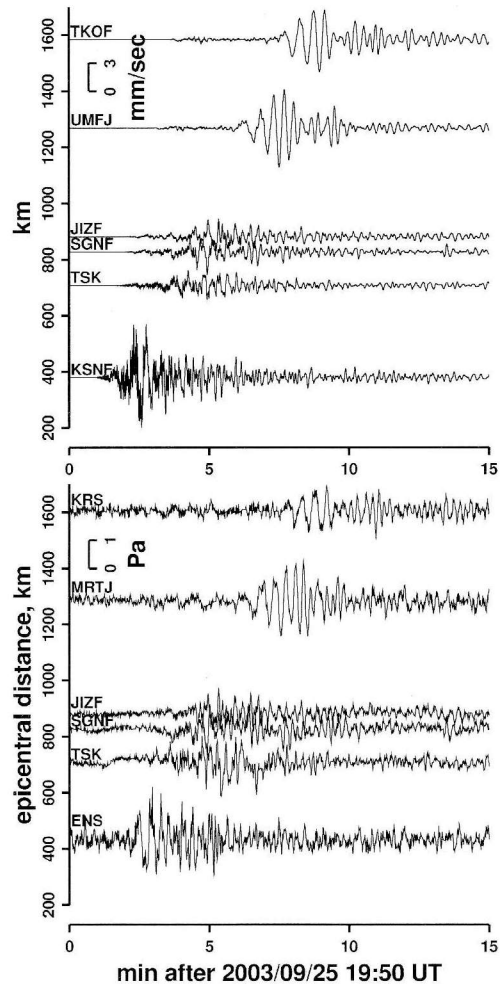


図1 地震計と微気圧計により計測された2003十勝沖地震発生直後に日本列島を通過した地震波と気圧波。(上)上下動速度記録。(下)50秒のハイパスフィルタをかけた微気圧記録(Watada et al. 2006より引用)。

振動する地面がちょうどスピーカーの振動板の役割を果たし、その表面で長周期の音波を生成されたことに相当している。

また、2004年スマトラ巨大地震M 9.3では震源域の地殻上下変動により大規模な津波が発生し、周辺地域に甚大な被害を及ぼした。同じ地殻変動により大気側に大気圧力波が発生し、約

310 m/s で伝播した結果、周囲の日本を含む太平洋、インド洋、アフリカなどで周期約 700 秒の変動量 1~12 パスカルの微弱な大気圧変化として観測された (Mikumo et al. 2008). 同様の大気圧力波は 1964 年アラスカ地震時にも観測されている (Mikumo 1968). これら観測された大気圧力波の主成分は、震源域から大気中を大気の下層の地面に沿ってほぼ音速で伝播してきた境界波の一種であるラム波であり、音波や重力波の影響は少ない. 2003 年十勝沖地震では震源域から大気中を音速で伝播した大気圧波を微気圧計で明瞭に検出できなかったが (Watada et al. 2006), 震源域から長周期音波が大気下層から高層へと伝播し、日本全土に設置された GPS 観測網 (GEONET) により電離層を伝わる波として検出された (Heki and Ping 2005).

インドネシアのスマトラ島とジャワ島間のスンダ海峡に位置するクラカトア火山が 1883 年に山容を激変させる大噴火を起こした (Symons 1888). その報告によれば、スマトラ島には 30 メートルを越える津波が到達し、インド洋や太平洋周囲以外にも大西洋に面した南ジョージア島、パナマやイギリスなどの世界各地で津波が観測された. 大西洋沿岸での津波到達時刻は、クラカトア火山から津波がインド洋から喜望峯を回って大西洋に伝わったとする時刻よりも 10 時間程度明らかに早く、津波が太平洋から大西洋へと大陸を飛び越えたとされるなど、長い間謎であった. その後研究 (たとえば, Harkrider and Press 1967) によると、大気波が陸地を越えて太平洋から大西洋へ伝播し、海洋の津波と同じ位相速度をもつ大気波が、大西洋で新たに津波を引き起こしたと考えられている.

大気と接する海面に津波やうねりなどの海洋波が存在し、固体地球側に表面波や実体波などの地震波が存在する. これらの波が大気中の音波や重力波、境界波 (ラム波) と周期と波長が一致するとき、共鳴現象により大気側の波動エネルギーが海洋波や地震波に、逆に海洋波や地震波が大気側の波動エネルギーに、効率良く変換される (Watada 2009). 互いに孤立した枠組

みと考えられてきた地震波や海洋波や大気波動は、相互にカップルして時には思いもよらぬところで互いに影響を及ぼしあっている. 大気圧や地動の精密連続観測はそのような意外な地球の振る舞いの理解に貢献している.

## 参考文献

- Harkrider, D., and F. Press, 1967, The Krakatoa air-sea waves : an example of pulse propagation in coupled systems, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 13, 149-159.
- Heki, K., and J. Ping, 2005, Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845-855.
- Mikumo, T., 1968, Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *J. Geophys. Res.*, 73, 2009-2025.
- Mikumo, T., T. Shibusaki, A.L. Pichon, M. Garces, D. Fee, T. Tsuyuki, S. Watada, W. Morii, 2008, Low-frequency acoustic-gravity waves from tectonic deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw=9.2), *J. Geophys. Res.*, 113, B12402, doi : 10.102-2008JB0057.
- Symons, G. (ed.), 1888, The eruption of Krakatoa and subsequent phenomena, Trubner, London.
- 綿田辰吾, 功刀 卓, 2000, Free-UNIX を用いた安価な自動微気圧データ計測・転送システムの開発, 東京大学地震研究所技術報告, 6, 32-36.
- 綿田辰吾, 2005, 2003 年十勝沖地震に伴う微気圧変動, 月刊地球, 号外 No. 49, 214-218.
- 綿田辰吾, 大湊隆雄, 2006, 振動台を用いた気圧測定装置の加速度応答, 地震研究所技術研究報告, 12, 19-23.
- Watada S., T. Kunugi, K. Hirata, H. Sugioka, K. Nishida, S. Sekiguchi, J. Oikawa, Y. Tsuji, H. Kanamori, 2006, Atmospheric Pressure Change Associated with the 2003 Tokachi-Oki Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24306, doi : 10.102-2006GL0279.
- Watada S., 2009, Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time-varying bottom boundary, *J. Fluid Mech.*, 627, 361-377.

(東京大学地震研究所 綿田辰吾)

# 2008年汶川地震による被害と復旧のための日中技術協力

濱田政則・呉 旭

## 1. はじめに

2008年5月12日午後2時28分(日本時間午後3時28分)に中国内陸部の四川盆地とチベット高原の境界に位置する龍門山断層帯中央部においてマグニチュード(Ms)8.0の地震が発生した。中国地震局によると、震源は四川省汶川映秀鎮付近(北緯31°東経103.4°)、深さ14kmに位置している。この汶川地震は、龍門山断層帯中央部に属する2本の断層が連続的に破壊したことによって引き起こされたものであり、破壊した断層の総延長は300km以上と推定され、内陸地震としては世界最大級の地震となった。

2009年3月26日現在、記録された余震の総数は50,469回に達し、そのうちマグニチュード6.0以上の余震が8回、4.0以上の余震が296回発生している。最大余震は5月25日のマグニチュード6.4の地震である。これらの余震は、映秀鎮の南端から龍門山断層帯に沿って南西から北東にかけて延長330kmの地域に発生している(図1参照)。

震源近傍域では、兵庫県南部地震による地震動を上回る強烈な地震動が発生し、膨大な数の建築物、土木構造物が被害を受けた。また、急峻な地形と地表面が風化した山岳地域であったため、大規模な斜面崩壊や地すべりが生じ、多くの堰止め湖が形成された。中国当局の公式発表によれば、死者69,227名、行方不明者17,923名、負傷者373,643名、倒壊家屋530万棟以上、直接経済損失額は8,451億人民元(約12兆6,765億円、15円/元として)となっている。

筆者らは地震発生後、日本の8つの学協会(土木学会、日本建築学会、地震学会、地盤工学会、日本地震工学会、日本都市計画学会、地理情報シ

ステム学会、地域安全学会)による四川大地震復旧技術支援連絡会議のメンバーとして4度にわたって、被災地の調査と復旧のための技術協力を行って来た。本文では、この連絡会議が行った現地調査および中国側より公開された資料をもとに、汶川地震の震源メカニズム、地震動、被害の概要および8学協会連絡会議による技術協力について報告する。

## 2. 地震断層と地震動

### (1) 震源メカニズムと地質構造

図1に龍門山断層帯中央部の断層分布および汶川地震の震央と余震分布を示す。また、図2に龍門山断層帯中央部の構造と地質分布を示す。これらより、汶川地震の震源メカニズムと震源域の地質構造に関して以下のことが示される<sup>1)~3)</sup>。

龍門山断層帯中央部は北西から、南東に汶川-茂汶断層、北川-映秀断層、灌県-江油断層の傾斜NW、走向SEの3本の主要な逆断層から構成されている。これらの断層は、垂直断面上で瓦状(インブリーケート)を呈し、NWからSEへと推覆しながら四川盆地内へナッペ状に乗り上げている。断層の傾斜角度は、地表に近いほど大きい。深度が深まるほど次第に緩やかになり、地下約20kmの深度で、3本の断層が1本の剪断帯へと収斂している。

北川-映秀断層は、この剪断帯から滑り出し、約33°の傾斜角度で上向きに破壊が進行し、75°~80°傾斜角度で地表面に到達している。破壊の途中で断層の一部分がSE方向へ進展し、深さ10km付近で灌県-江油断層に達して、二つ断層が同時に破壊することになった。

龍門山断層帯付近の地質は長期的な地殻運動により複雑な構造を有しており、古い地質が新しい

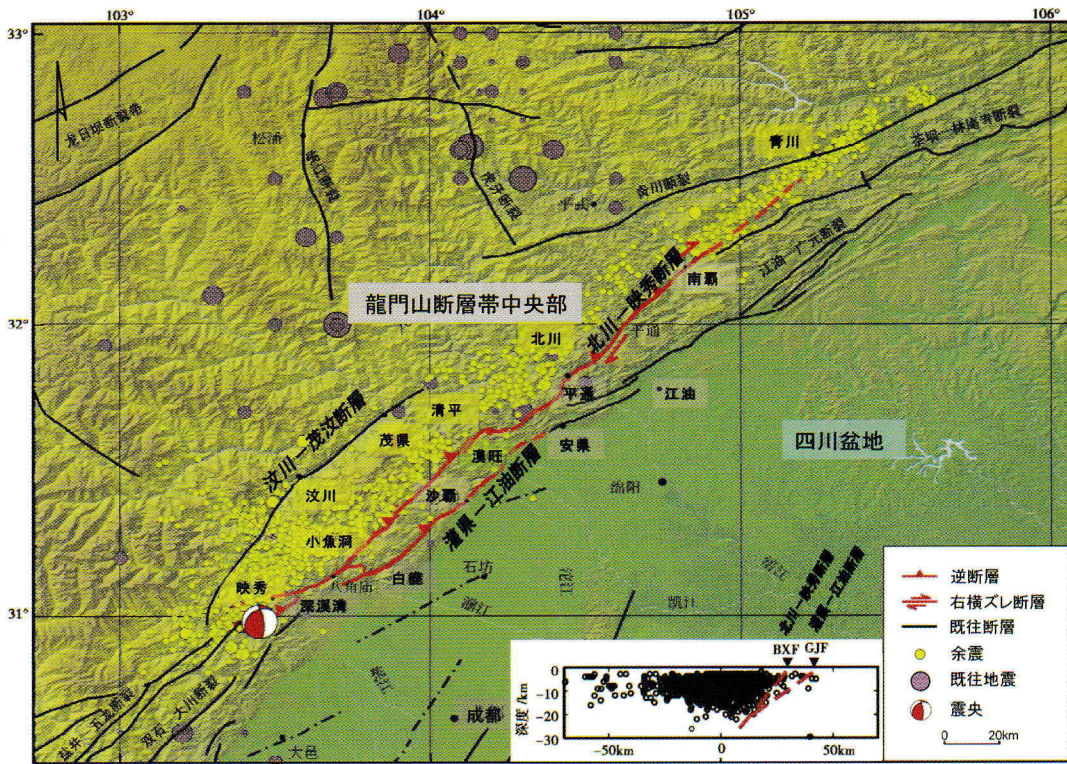


図1 龍門山断層帯中央部の断層と汶川地震の震央・余震分布（徐ら<sup>2)</sup>原図に加筆）

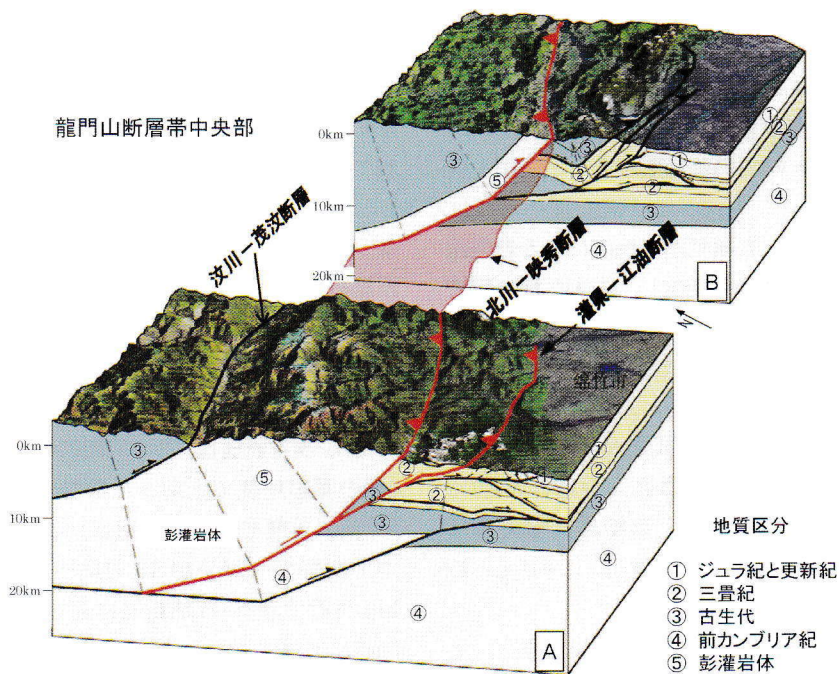
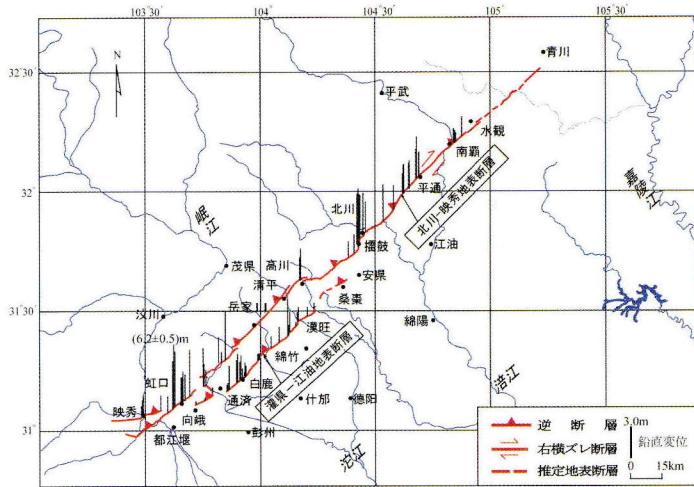
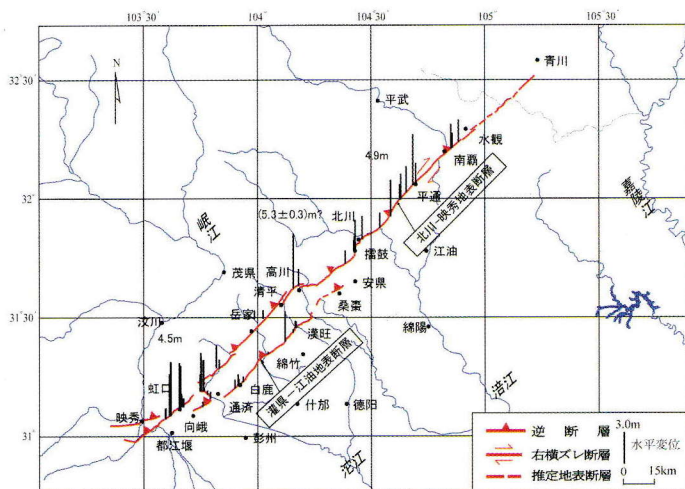


図2 龍門山断層帯中央部の構造と地質分布（徐ら<sup>2)</sup>原図に加筆）



a) 鉛直方向の変位量



a) 水平方向の変位量

図 3 地表地震断層の変位量 (徐ら<sup>2)</sup> 原図に加筆)



図 4 虹口深溪溝に出現した北川-映秀地表地震断層 (徐ら<sup>2)</sup> による)

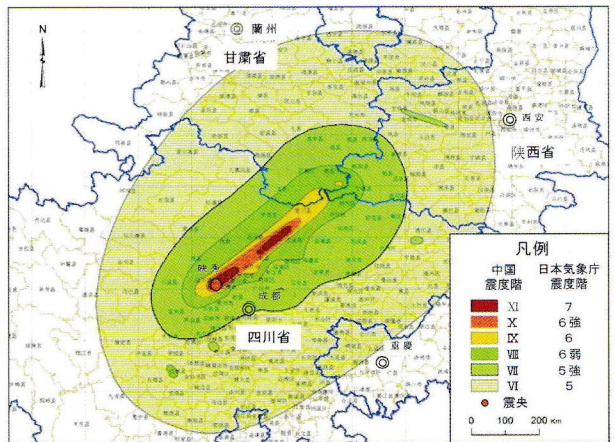


図 5 汶川地震の震度分布 (中国地震局より)

地質の上に被っている逆沖推覆構造が見られる。図3に示すように、震源に近い南西部分(Aブロック)の地質構造は、震源から離れた北東部分(Bブロック)とは異なっている。北川-映秀断層の南西部分では上盤側には彭灌岩体⑤(原生代の花崗岩と変成岩の複合岩体)、下盤側には三疊紀の地質②が分布している。これに対し、北川-映秀断層の北東部分では上盤側、下盤側とも古生代の地質③が分布している。さらに、北東部分の下盤側には古生代の地質③が三疊紀②の上に被っている。このような複雑な地質構造や地質分布は、斜面崩壊や地すべりの要因の一つとなっていると考えることができる。

## (2) 地表地震断層

図3に中国地震局が公表した地表地震断層の鉛直および水平方向の変位量を示す<sup>2)</sup>。地表地震断層は、現時点までに、北川-映秀断層に沿って240 km、灌県-江油断層に沿って72 km およびこの二つ断層を連結する延長6 km(小魚洞地表地震断層)で確認されている。

北川-映秀断層に沿った地表地震断層は、二つの部分に分けられる。虹口から清平の間では、右横ズレを含んだ逆断層変位が卓越しており、延長は約105 kmである。北川から南覇の間では、右横ズレ断層が卓越し、延長は約135 kmである。このことは、地表地震断層変位の特徴、特に断層面の傾斜角度からも確認されている。虹口から清平の間では、断層面の傾斜角度が約80°で、最大の鉛直変位量は約6.2 m(平均3~4 m)に達した。水平変位量は約2 mで北東に進むほど大きくなる傾向がある。これに対して、北川から南覇の間では、断層面の傾斜角度が約25°と減少し、最大の鉛直変位量約4.5 mで、最大水平変位約4.9 mである。

灌県-江油断層に沿って確認された地表地震断層では逆断層変位が卓越している。漢旺から白鹿の間では、単純な逆断層タイプの地表地震断層が確認され、最大の鉛直変位は約3.5 mである。

走向NWでの延長約6 kmの小魚洞地表地震断層は、北川-映秀断層と灌県-江油断層を連結するように出現し、左横ズレによる変位と垂直変位

の最大値はともに3.5 mである。

中国地震局は、地表地震断層の調査結果および観測地震動をもとに、北川-映秀断層の2つ独立した断層破壊(南西部分では主として逆断層、北東部分では主として右横ズレ断層)と灌県-江油断層の逆断層によって汶川地震が引き起こされたと推定している。

北川-映秀断層に沿った2つ独立な断層破壊は、余震分布の特徴からも説明されている。図1に示すように、南西部分では主に北川-映秀断層の上盤側に余震が分布し、その範囲が比較的に広いのに対し、南覇から青川の間では狭い帯に余震が集中している。また、この2つの領域の間、すなわち北川から南覇の間では余震が少ない。この余震分布の特徴も南西部分は主に逆断層、北西部分は主に右横ズレ断層が卓越したことに対応している。

汶川地震による地表地震断層の幅は最大で100 mに達したが、平均的には10 m~30 mと報告されている。虹口深溪溝水湾発電所で出現した北川-映秀地表地震断層を図4に示す。これが現時点で確認された汶川地震の地表地震断層による最大鉛直変位である<sup>2)</sup>。

## (3) 震度と地震動

図5に2008年8月29日に中国地震局によって公表された震度分布を示す。最大震度は中国の震度階でXI(日本気象庁震度階の7に相当)であり、中国での観測史上で最大震度となった。震度VI(気象庁震度5)以上の地域は、四川省のみならず、北東に隣接する甘粛省と陝西省まで広がり、44万km<sup>2</sup>もの地域に及んでいる。

震度分布と被害との関連について、以下のことがあげられる。

- ① 最大震度XIは、映秀から南覇の間の地表地震断層に沿って2つ領域で観測されており、この中に震央の汶川県映秀鎮と北川県の県庁所在地が含まれている(図6参照)。これら地域では図7に示すように町全体の壊滅的な被害が発生した。
- ② 震度X(気象庁震度階6強に相当)の領域は、地表地震断層に沿って長さ約224



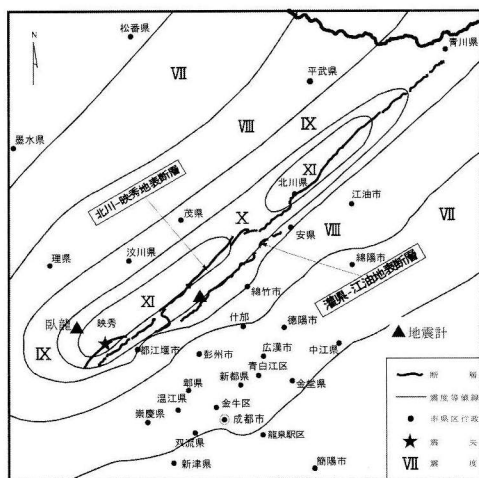


図6 震源域の震度分布と断層（李ら<sup>5)</sup>原図に加筆）

kmの細長い区域に分布しており、南西の汶川県と北東の青川県にわたっている。大規模な斜面崩壊や地すべりおよび堰止め湖等の土砂災害はこの地域に集中した。

- ③ 震度IX（気象庁震度階6）の領域は、断層方向の北東に伸びて甘肃省と陝西省に達している。震度Xと震度IXの境界は、灌県-江油断層の影響を受けて綿竹市と什坊市付近で南東方向にはらみ出している。建築物、土木構造物、斜面崩壊など被害のほとんどは震度IX以上の地域に集中している。

震源地域において、建築物、橋梁などの設計ではほとんど震度VIIに相当する地震外力を想定しており、汶川地震による地震動が設計地震動を大幅に上回ったことが被害拡大の原因のひとつと考えられる。

図8に震源域の汶川県臥龍鎮および什坊市八角鎮で観測された地震動記録を示す。汶川地震によって観測された地震動加速度的最大値は臥龍でEW成分の $958 \text{ cm/s}^2$ である。臥龍での記録は上下・水平とも明瞭な2つの部分に分かれており、前述したように北川-映秀断層が2つ連続的に破壊したことが分かる。八角での地震動記録にはこのような明確な波形の分離は見られない。観測点



図7 壊滅的な被害を受けた映秀鎮の町（新華社より）

と断層の位置関係により、2つの断層破壊による波動が重なったものと考えられる。

図9に汶川地震2つの観測点での東西方向の加速度応答スペクトルを、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台での加速度スペクトルと比較して示す。神戸での記録は0.6~1.0秒付近に卓越周期を有しているのに対して、臥龍での記録には0.2~0.5秒付近の振動が卓越していることが分かる。

臥龍での地震動は2つの主要動部分を有し、振幅も大きい。このことは、最初の主要動部分で構造物や斜面の破壊が始まり、次の主要動部分で被害が拡大した可能性を示唆している。このような地震動に対しては単に弾性応答加速度スペクトルによる設計では不十分で、累積損傷度等を考慮した設計法の適用が必要であることを示している。

### 3. 土木構造物、建築構造物、斜面崩壊等の被害

#### (1) 被害の概要

現時点までに公表されている資料と報告によれば、汶川地震による建物と土木構造物の被害概要は表1のとおりである。震源域とその近傍の10県（市）（汶川、北川、綿竹、什坊、青川、茂県、安県、都江堰、平武、彭州）に被害が集中した。以下、建物、土木構造物、斜面崩壊等の代表的事例について前述の8学協会連絡会議による調査結果および中国側からの公表資料<sup>4)~7)</sup>をもとに紹介

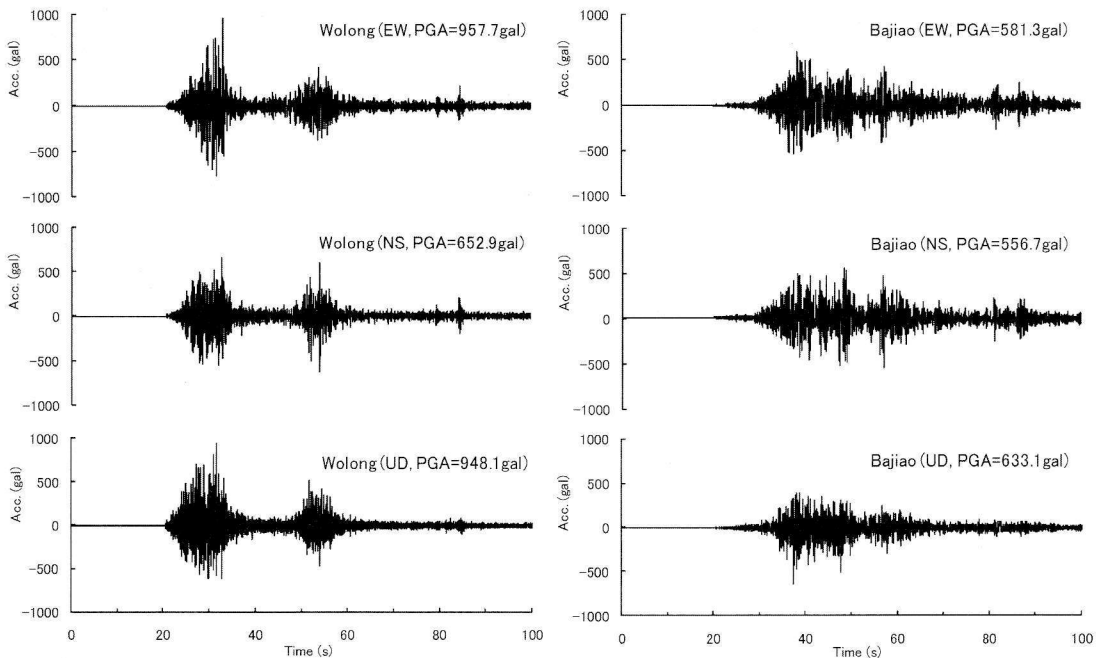


図 8 臥龍鎮 (Wolong) と八角鎮 (Bajiao) で観測された地震動加速度波形

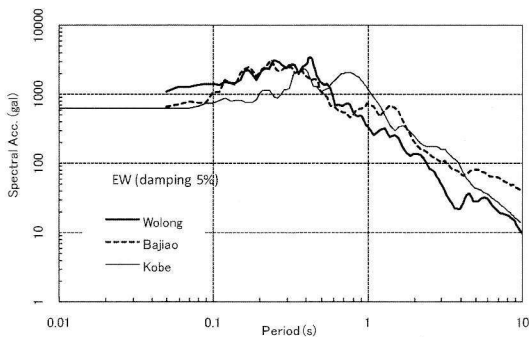


図 9 加速度応答スペクトルの比較

する。

## (2) 建物の被害

8学協会による連絡会議のメンバーが、震源域とその近傍の都江堰市、綿竹市漢旺のRC建物の損傷状況について調査した結果から、建物被害の主要因として、①柱のせん断破壊、②柱・梁接合部の破壊、③柱間のレンガ壁の崩壊、④地盤変状に伴う被害、を挙げている。②③による建物の破壊の例を図10に示す。震源域で崩壊した建物の多数がこのような構造を有していた。

## (3) 道路構造物 (橋梁、トンネルおよび斜面) の被害

四川省内では、高速道路7路線、国道5路線および省道10路線、総延長3,391 kmの道路に被害が発生した。被災を受けた道路のほとんどは、山岳地域に位置し多くの橋梁、トンネルが建設され、路線に沿って不安定な斜面が多数存在していた。

震源域での強烈な地震動および地表地震断層による地盤変位によって、橋梁、トンネルが甚大な被害を受け、路線に沿った広い領域で斜面崩壊が発生した。特に、建設中であった都汶道路 (都江堰-映秀-汶川を結ぶ延長83 km) は橋梁、トンネル、斜面に大きな被害を受けた。映秀～汶川区間では43橋梁の内22橋梁で被害が発生し、斜面崩壊により9,000万 $m^3$ もの土砂が道路上に堆積し、かつ数mの寸法の巨岩が含まれていたことから、復旧作業が困難を極めた。トンネルの被害として、坑口部での斜面崩壊、覆工コンクリートの天端での圧縮破壊、側壁部のせん断破壊およびインバート隆起破壊が多数報告されている。

図11は廟子坪大橋の落橋の状況を示している。この橋梁は後述する紫坪鋪ダムのダム湖を横断す

表 1 建物と土木構造物の被害概要<sup>7)</sup>

建物 (F: フレーム、M: レンガ)		被害率 (%)		崩壊率 (%)		
IX以上 (気象庁震度6以上)	F	86.9		28.2		
	M	99.5		29.3		
震度VIII (気象庁震度6弱)	F	68.6		3.8		
	M	75.7		10.8		
震度VII (気象庁震度5強)	F	17.7		0.3		
	M	45.3		3.0		
震度VI (気象庁震度5)	F	7.7		0.0		
	M	17.5		0.9		
土木構造物		総数 <sup>*注</sup>	被害件数	被害率 (%)	崩壊・大破 件数	崩壊・大破率 (%)
橋梁	高速	607	576	94.9	69	11.4
	国道	1,163	1,081	92.9	191	16.4
	(計)	1,770	1,657	93.6	260	14.7
トンネル	高速	23	14	60.9	8	34.8
	国道	28	17	60.7	3	10.7
	(計)	51	31	60.8	11	21.6
ダム	四川省	6,678	1,996	29.9	69	1.0
	陝西省	1,036	126	12.2	0	0.0
	甘肅省	297	81	27.3	0	0.0
	その他	27,590	463	1.7	0	0.0
	(計)	35,601	2,666	7.5	69	0.2

\*注：橋梁・トンネルの総数は被災地域で調査した総数である。



図 10 接合部破壊による建物の破壊 (綿竹市漢旺)

る橋梁で高さ 103 m の高橋脚上に架設されていた。地震発生時は RC の単純桁の架設が終了した時点で、桁を一体化する上床版が打設されていない状況にあった。隣接する橋脚のスパンは約 50 m で、地震後の測量によればこれが約 70 cm 拡大したとのことである。橋脚に塑性変形が生じたことになるが、この原因については未だ明らかにされていない。

図 12 は龍溪トンネルの被害状況を示す。本ト

ンネルは映秀の南東より約 3.6 km に位置する茶坪山を通る 2 車線道路トンネルである。地質は三疊紀の須家河石炭層を挟んだ地層でガスを含んだ強度の低い泥質地山である。延長 130 m の区間で覆工コンクリートの崩落が発生した。トンネルの側壁は内空側へ押し出され、天端が圧壊し、インバートは隆起した。地震後の測量によれば、トンネル中心線の水平、鉛直方向の変位はそれぞれ 2.0 m、1.5 m である。本トンネルは北川-映秀断層の下盤に位置しているが、付近で地表地震断層は確認されていない。

#### (4) ダム

四川省内には総数 6,678 のダムがあり、汶川地震により約 3 割の 1,996 のダムに何らかの被害が発生した。貯水容量 1 億 m<sup>3</sup> 以上の大型ダムで被害があったのは 4 基とされている。崩壊を含めて大被害を受けたダムが 69 基、崩壊危険性の高いものが 310 基と報告されている。多数のダムの被害により 500 万人以上の人口への水供給に支障が生じた。

図 13 は紫坪鋪ダムの地震後の状況を示している。紫坪鋪ダムは、都江堰市麻溪郷の岷江上流に

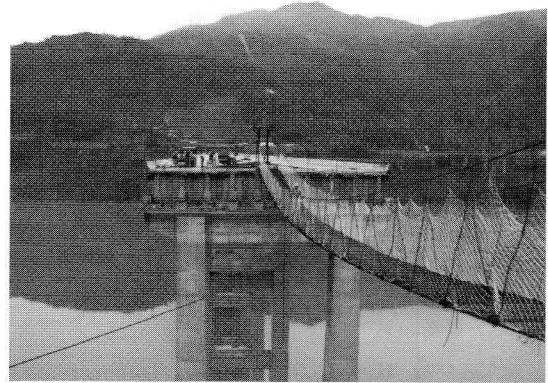
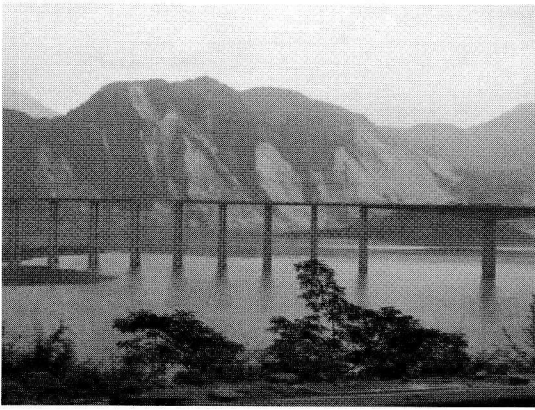


図 11 廟子坪大橋の落橋

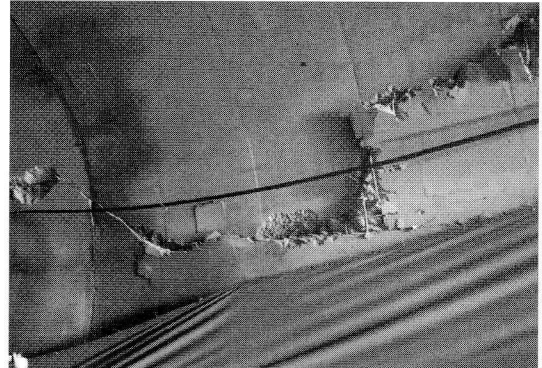
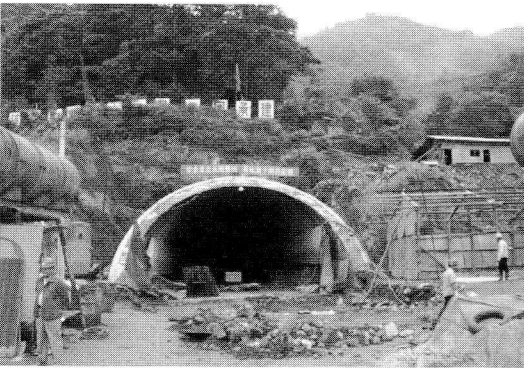


図 12 龍溪トンネルの被害（左：坑口底面隆起，右：覆工せん断破壊）

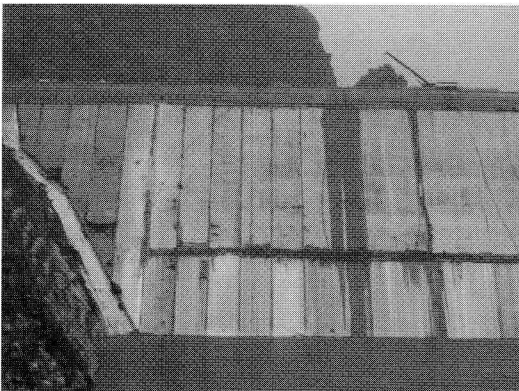


図 13 紫坪舖ダム（左：上流側遮水版に亀裂が発生，右：下流側堤頂フェンスが倒壊）

位置し、高さ 156 m、長さ 664 m、貯水容量 11 億  $m^3$ 、発電容量 76 万 kW を有する多目的のコンクリートフェーシング・ロックフィルダムである。

2005 年から貯水が始まり発電が行われていた。ダムの建設地点は、北川-映秀断層の下盤側と灌県-江油断層の上盤側の間に位置し、堤軸方向はほぼ

EWである。

地震による被害は主に堤体の変形、施工ジョイントのズレおよび遮水コンクリート版の亀裂である。堤頂での最大沈下量は100cm、最大水平変位量（下流方向）20cm、ダム軸方向の変位22cmと報告されている。

#### (5) 斜面崩壊、地すべり

汶川地震による斜面崩壊、地すべりなどの土砂災害は深刻であった。公表資料によると、確認された土砂災害の箇所は12,536にのぼり、そのうち、崩壊3,619箇所、地すべり5,899箇所、土石流1,054箇所となっている。大規模な堰止め（湖堤体高さが10m以上、湛水容量が10万 $m^3$ 以上、集水面積が20 $km^2$ 以上）は、四川省内で34箇所が確認された。30名以上死者を出した地すべりは

23箇所があり、土砂災害による死者は2万人に達し、本地震による死者数の約30%を占めている。

図14は、震央から約250km離れた青川県に発生した大規模な東河口での地すべりを示す。550m高さの山頂部から数百万 $m^3$ の石灰岩が一気にすべり出し、数キロにわたって移動しながら四つの村を埋没させた。高速度の土石流は対岸を乗り越えて二つの堰止め湖を形成した。

東河口の地すべり地点は、北川-映秀断層の延長線にあり、確認された地表地震断層に近接している。この付近の地質は、古生代の石灰岩が三畳紀の粘板岩の上に被っている逆沖推覆構造であり、このことが大規模な地すべりの要因の一つになったと考えられる。



図14 東河口地すべり（左：高さ550mの崩壊面、右：移動土塊による堰き止め）

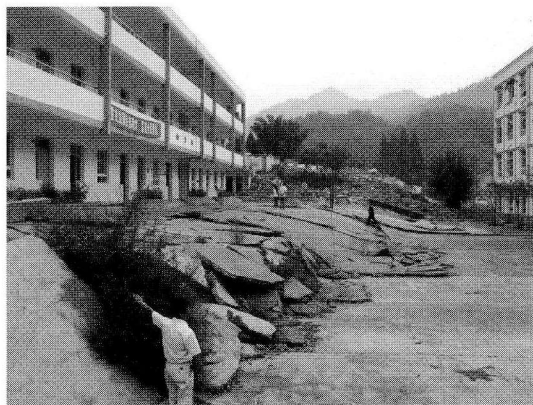


図15 白鹿学校の校庭に出現した灌県-江油地表地震断層

## (6) 断層変位による被害

図 15 は、彭州市白鹿鎮白鹿学校の校庭を横断して出現した地表地震断層を示す。逆断層の縦ズレ変位は約 2m で、断層幅は約 13m である。上盤側にある 3 階校舎は、2001 年の耐震設計基準により建設されたもので、断層近傍に位置するにもかかわらず、ほとんど被害を受けていない。一方、断層の通る箇所に建てられた建物は倒壊した。

## 4. 復旧・復興のための日中技術協力

汶川地震発生後、地震災害の軽減に係るわが国の 8 学協会は、四川大地震復旧技術支援連絡会議を組織して、中国側関係機関と共同で被害調査にあたり、被害構造物の診断と復旧および被災地の復興に関し、以下のような技術協力を行っている。

### (1) 復旧・復興技術ワークショップの開催

被災構造物の復旧および地域の復興に従事している四川省、成都市等の技術者、西南交通大学、四川大学等の研究者を対象として、被災構造物の診断と復旧技術および地域の復興に関するセミナーが、2 回にわたって成都市で開催された（図 16 第 1 次：2008 年 5 月 28 日～6 月 1 日、第 2 次：6 月 20 日～24 日）。日本側からは、建築物、橋梁、斜面、トンネル、都市計画分野の研究者と技術者、および兵庫県南部地震や 2003 年新潟県中越地震の復旧に当たった専門家が参加した。本ワークショップでは構造物毎にグループを組織し、被害実体の把握、被害原因の解明、被災構造物の診断と復旧方法および地域の復興の方針等について具体的な意見交換が行われた。

### (2) 地震学・地震工学に関する特別講座の開催

地震災害の軽減に貢献し得る人材育成を目的として、前述の支援連絡会議は四川省の技術者・若手教員・大学院生を対象に、地震学・地震工学特別講座を国際協力銀行（JBIC）の支援により開催した（図 17 第 1 回：2008 年 9 月、第 2 回：2008 年 10 月）。講座のテーマは、①断層・地震・地震動、②建築物の耐震設計と補強、③土木構造物の耐震設計と補強、④鉄道構造物の耐震設計と補強、



図 16 復旧に関する日中技術セミナー



図 17 地震学・地震工学に関する特別講座

⑤道路構造物の耐震設計と補強、⑥地盤・斜面の耐震設計と補強、⑦地震災害軽減のための社会システム、⑧地震に強いまちづくり、⑨地震災害軽減のための地理情報の活用、の 9 項目である。

この特別講座は今後年 2 回定期的に開催する予定である。また、支援連絡会議が中心となって地震学・地震工学の講義をインターネットで配信する e-learning のためのシステム作りを進めている。この e-learning は中国のみならず、インドネシア、パキスタンなどアジア諸国を対象としており、アジア地域における地震災害の軽減に貢献し得る人材の育成を目標としている。

### (3) 地震災害軽減のための共同研究の推進

地震後、四川省政府は成都の西南交通大学に「耐震工学四川省重点实验室」を開設した。中国西域山岳地方の地理・地形・地質を考慮した土木・建築構造物の耐震性向上技術、震災復旧技術を研

究し、かつ地震工学分野の人材育成と国際交流を図ることが設立の目的である。日本の学協会による支援連携会議はこの重点実験室の研究活動を継続的に支援する計画である。当面下記のような課題で共同研究を行うことを予定している。

- ・山岳地域における低耐震性建築物の診断・補強技術
- ・山岳地域における道路交通施設の機能評価および補強技術
- ・斜面および地盤災害の抑制技術
- ・リモートセンシングによる斜面等の観測技術、マッピング技術

## 5. ま と め

龍門山断層帯中央部では、汶川地震が発生する以前にはマグニチュード 6.5 以上の地震を発生させておらず、静穏期に入ったと考えられていた。また、複数の地震断層が同時に破壊し、主要動部分を複数有する特徴のある地震動を発生させた。さらに山岳地域において大規模な斜面災害を発生させ、道路構造物などに深刻な被害を与えた。わが国においても汶川地震の発生から約 1 ヶ月後に岩手・宮城内陸地震が発生し、斜面崩壊による橋梁等の被害が発生している。

汶川地震は、地震学と地震工学分野に新たな課題を提起した。汶川地震については未だ調査中であり、その全容は明らかにされていない。今後日中の研究者、技術者が協力して調査と分析を進める必要がある。

本文を作成するにあたって、貴重な資料を提供し、議論をしていただいた中国地震局の関係者および地震後の日中間の技術協力に尽力された西南交通大学等の関係者に謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 張培震 (2008), 中国の地震災害と防震減災, 地震地質, Vol. 30, No. 3, p. 577-583. (中国語)
- 2) 徐錫偉・聞学澤・周栄軍・何宏林, 他 16 名 (2008), 汶川 Ms8.0 地震の地表断層および震源モデル, 地震

地質, Vol. 30, No. 3, p. 597-629. (中国語, 英文要旨付)

- 3) 鄧起東 (2008), 汶川 Ms8.0 地震に関する思考, 地震地質, Vol. 30, No. 4, p. 811-826. (中国語, 英文要旨付)
- 4) 趙伯明・徐錫偉 (2008), 汶川 Ms8.0 地震断層と地震被害に関する予備検討, 地震地質, Vol. 30, No. 4, pp. 839-854. (中国語, 英文要旨付)
- 5) 李志強・袁一凡, 他 6 名 (2008), 汶川 Ms8.0 大地震の災害特徴に関する予備検討, 地震地質, Vol. 30, No. 4, pp. 855-876. (中国語, 英文要旨付)
- 6) 日中地震防災学術シンポジウム (2008.10.8-12・成都) 会議報告資料, pp. 1-220.
- 7) General Introduction to Engineering Damage during Wenchuan Earthquake, Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 28, Supplement, 2008, pp. 1-114.
- 8) 中埜良昭ら (2008), 2008 年 5 月 12 日 中国四川大地震復旧技術支援連絡会議 第 2 次復旧技術支援建築チームの訪中報告, 震災予防, No. 222, Sept., pp. 8-14.

濱田政則

[はまだ まさのり]

**現職** 早稲田大学理工学術院教授  
工学博士

**略歴** 東京大学大学院工学研究科修士課程修了, 大成建設株式会社, 東海大学海洋学部海洋土木工学科助教授・教授を経て現職  
2005 年 10 月日本学術会議会員, 2006 年 5 月~2007 年 5 月土木学会会長

**研究分野** 地震防災工学

**著書** 「地盤・基礎構造物の耐震設計」((社)地盤工学会), 「海洋構造物入門」(技報堂出版), 「新体系土木工学 1 数値計算法」(技報堂出版)



吳 旭

[うー しゅう]

**現職** 応用地質(株) 技術センター地盤解析部グループリーダー  
工学博士

**略歴** 名古屋大学大学院地圏環境工学博士課程修了, 同大学工学部機械情報システム工学科助手を経て現職

**研究分野** 地盤工学, 地盤防災



# 汶川大地震と天然ダム

## —唐家山天然ダムの形成と防災対応—

池谷 浩・呉 旭・比留間雅紀

### 1. はじめに

2008年5月12日午後2時28分(日本時間午後3時28分)、中国四川省アバ・チベット族チャン族自治州汶川県映秀付近を震源とするマグニチュード7.9の地震が発生した。この汶川大地震は、四川盆地とチベット高原との境界部に沿って南西から北東方向に走る龍門山断層帯に属する複数の断層運動によって引き起こされたものである。震源の深さは14km、動いた断層の総延長は約300kmと推定され、内陸部の直下型地震としては世界最大級の地震となった。中国地震局が2009年2月16日に発表した「2008年度中国被害地震状況」などの資料によると、この地震による死者は69,227名、行方不明者17,923名、負傷者373,643名、家屋被害は倒壊家屋530万棟以上にのぼり、地震による直接経済損失額は8,451億人民元(約12兆6,765億円、15円/元として)という甚大な被害が生じた。

汶川大地震の震源地域は、これまでの地質構造運動によって形成された脆弱な地質に加え、地形的には幅約50kmの間に標高が500mから3,500mへと急激に変化するなど、急峻な地形となっている。山岳地帯では水系が発達しており、長江(揚子江)上流の四つの支流(岷江、沱江、涪江、嘉陵江)が今回の地震断層帯を横断して流下している。

このように汶川大地震は、脆弱な地質条件にある山岳地域で発生した震源の浅い巨大地震であり、大規模な斜面崩壊や地すべり、およびそれらによって形成された天然ダムなど深刻な土砂災害をもたらしたことに大きな特徴がある。これまで

の報道によると、2008年6月末までの時点で確認された土砂災害の箇所は12,536にのぼり、そのうち、崩壊3,619箇所、地すべり5,899箇所、土石流1,054箇所となっている。

特に懸念されているのは、天然ダムによる二次災害の発生である。四川省水利庁の発表によると、地震による天然ダム(堤体高さが10m以上、湛水容量が10万 $m^3$ 以上、集水面積が20 $km^2$ 以上)は、6月15日時点で四川省内に34箇所が確認された(図1参照)。その後、新たに70箇所が確認され、合計で四川省内に104箇所の天然ダムが確認されている。

これらの危険度評価としては、極めて危険1箇所、危険度高6箇所、危険度中程度25箇所、危険度低72箇所となっている。8月時点の処置状況としては、唐家山、肖家橋など75箇所の危険が解除され、石板溝、老鹰岩など18箇所の危険も基本的に回避されたほか、3箇所は施工中で、残りの8箇所については対策検討が行われているところである。

本文では形成された104箇所の天然ダムのうち、極めて危険とされ、最も注目の集まった唐家山の天然ダムを主に、その形成と防災対応について述べることとする。

### 2. 唐家山天然ダムの形成と決壊の危険性

#### 2.1 概説

汶川大地震で四川省内に形成された104箇所の天然ダムのうち、最大の湛水容量をもち最も危険度が高いとされたのが唐家山の天然ダムである(図2)。綿陽市・北川チャン族自治県の曲山鎮から上流3.2km(直線距離)に形成された唐家山の



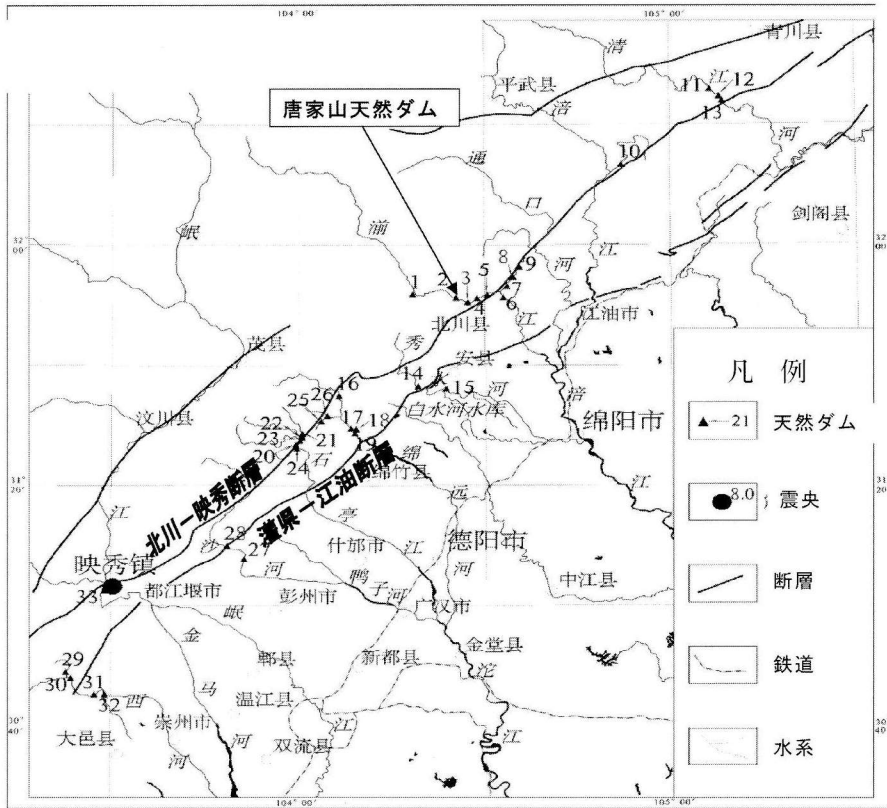


図 1 天然ダム分布図（中国地質調査局：殷躍平博士の資料に断層名等を加筆）

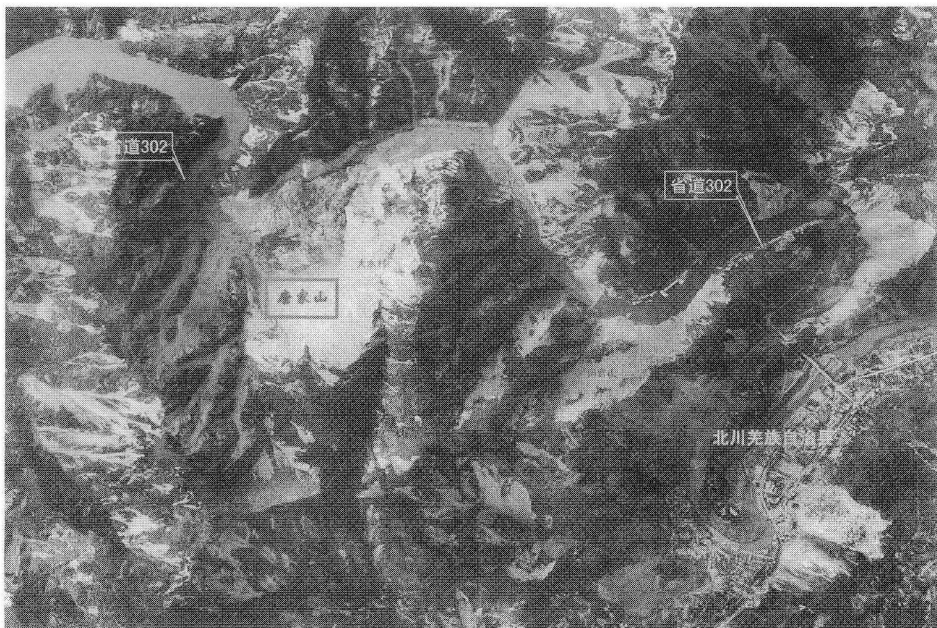


図 2 唐家山天然ダム形成直後の状況（中国新聞網 HP）

天然ダムは、涪江支流湔江を長さ約 800 m にわたって閉塞した。天然ダム上流域の流域面積は約 3,550 km<sup>2</sup> で少量の雨でも水位上昇が生ずることになる。天然ダムを形成した崩壊土砂量は約 2,000 万 m<sup>3</sup>、堤体の高さは 82~124 m におよんでいる (図 3 参照)。

河道閉塞に伴ってできたダム湖の容量は、満水状態になると約 3 億 m<sup>3</sup> になると予想されており、2008 年 5 月 31 日には貯水容量が 1 億 m<sup>3</sup> を超え、水没している河川の長さは 23 km におよんだ。その後も毎日約 500~720 万 m<sup>3</sup> の水量が増加した (中国科学院成都山地災害与环境研究所) との報告がなされた。

5 月下旬から、決壊防止のための対策として排水路の工事が始まるが、6 月 10 日時点でダム湖の水量は約 2 億 5 千万 m<sup>3</sup> (朝日新聞 6 月 11 日付) になった。排水路が完成してからは排水が実施されたため、6 月 10 日の水量が今回の災害時におけるダム湖の水量としては最大量となった。

河道を閉塞した土砂は地震による山体崩壊によりもたらされたものであるが、その崩壊は地震後の地形 (砂防学会誌 No. 277 の口絵写真) からみると、明らかに尾根部の崩壊によるものであり、地震による応力集中が原因と考えられるものであ

る。

今回の地震で形成された天然ダムの多くが北川-映秀断層と灌県-江油断層に沿った地域に分布している (図 1 参照)、地質的には古生代シルル系の地層に多い<sup>1)</sup>とされている。しかし、唐家山の崩壊地の地質を調べてみると、同じ古生代ではあるが、より古い時代のカンブリア紀の海洋性堆積岩 (『Geological Map of East Asia』, 地質調査所 2003) となっている。

## 2.2 天然ダムの湛水位上昇

唐家山天然ダム上流域の流域面積は 3,550 km<sup>2</sup> と広く、日本で言えば吉野川 (流域面積 3,750 km<sup>2</sup>) クラスの流域をもつ場所だけに、上流で 2 mm の降雨があるとダム湖の湛水位は 1 m 上昇する (Record China, 2008 年 6 月 5 日) と言われている。

そこで、5 月末から最高水位を記録した 6 月 10 日までの間の水位上昇を調べたのが図 4 である。天然ダム地点では河道閉塞により水位が上昇し、上流域では住家の水没などの被害が発生した (図 5)。

唐家山の天然ダムが自然状態のままであれば、もう何日かはダム湖の水位上昇が続いたと考えられるが、中国政府による応急排水路工事でほぼ標

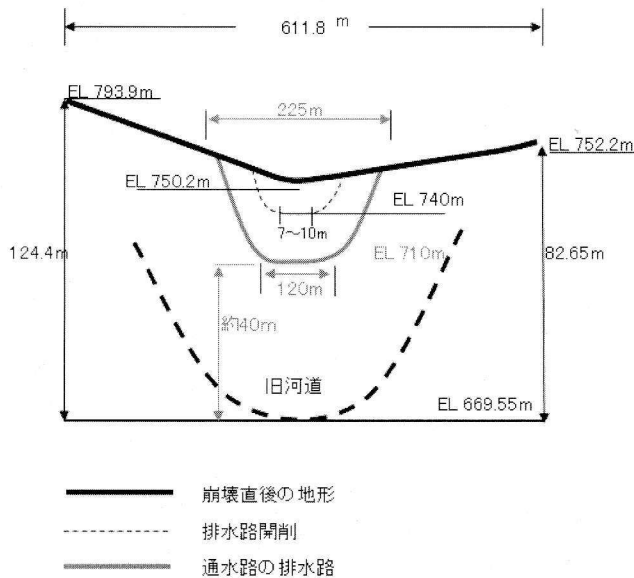


図 3 天然ダム地点の横断面図

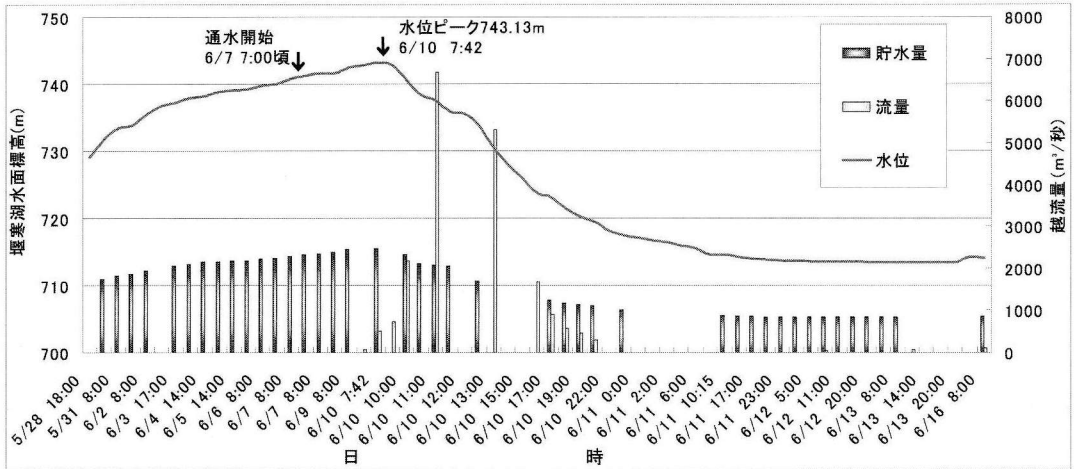


図 4 唐家山天然ダムの湛水・排水状況の時系列的推移

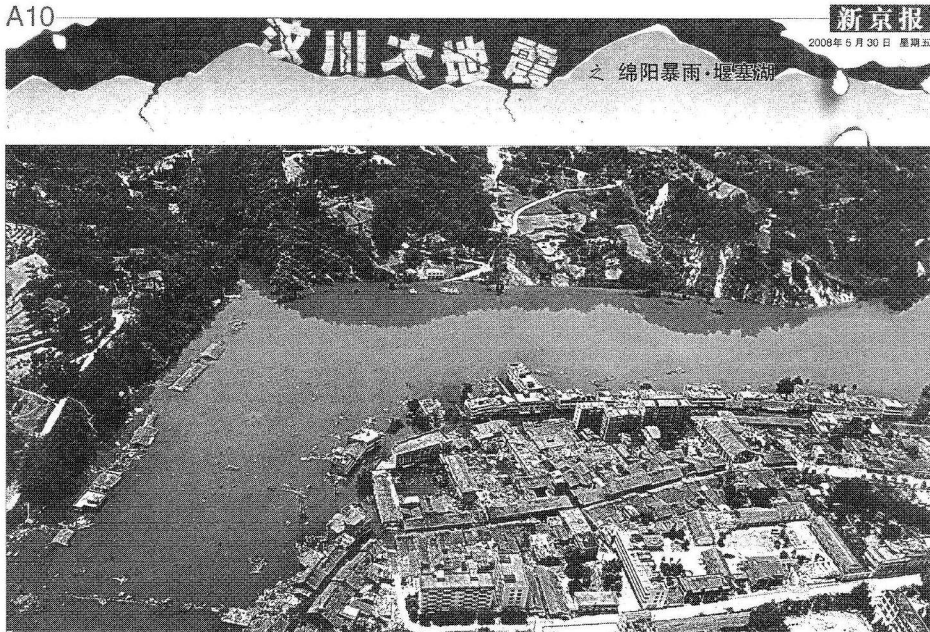


図 5 唐家山上流の湛水状況 (2008年5月30日新京報, 写真: 郭威 (新華社))

高 740 m の位置に水路底が形成され、6 月 7 日午前 7 時頃から越水が始まっている。

地震による崩壊と河道閉塞の開始が 5 月 12 日であることから、唐家山の天然ダムの決壊 (人工的な要素があるが) は、地震発生から 29 日後に生じたことになる。

ちなみに我が国の地震災害による天然ダムの決壊事例としては、善光寺地震 (1847 年) や飛越地

震 (1858 年) があげられるが、善光寺地震による岩倉山の天然ダムの決壊は地震発生後 19 日で、また常願寺川の大鷲崩れによる天然ダムは、地震発生から 14 日後と 59 日後に決壊している。

### 2.3 決壊の危険度と避難

5 月 22 日に綿陽市内で四川省の省長を本部長とする「唐家山天然ダム現地対策本部」が設立さ

れ、「武装警察水利部隊による排水路工事」と「綿陽市による避難準備」を同時に行う対策方針が決まった。避難計画は、唐家山天然ダムの決壊危険性として堤体の1/3決壊、半分決壊および全部決壊の三つのシナリオを想定して進められた。2,000万 $m^3$ にのぼる崩壊土塊で形成された巨大な堤体は、砂岩や千枚岩などにより構成され、表層の1/3は強風化岩であるが下部の2/3は風化の程度の低い岩であり、特に高速で移動距離が短いことから崩壊土塊の構造がしっかり保っており、全壊あるいは半壊となる可能性がそれほど高くないと考え<sup>2)</sup>、1/3決壊に応じた避難地域や保全対象などを決めることになった。

唐家山天然ダムが決壊する場合、最も深刻な被害を受ける地域は綿陽市の涪城区と遊仙区の2区である。この地区は、唐家山天然ダムから50~60kmほど下流に位置し、航空や原子力など先端的な産業が集中している地域である。1/3決壊の場合では、涪城区において決壊後約6時間で3mを超える洪水が発生すると想定された。そこで、5月29日の正午から31日の8時までの20時間の間に、軍の誘導で約21万の住民の避難が実行された（天然ダムが全壊した場合の影響人口は綿陽市での約113万人を含む123万人となっている）。避難場所は、事前に54箇所に指定され（避難距離<2km）、テント、飲料水、インスタント食品などが用意された。また市内には、1/3決壊の場合の水没による危険状況が水位のマークで示され、その危険度が住民に周知されている（図6）。

なお、重要保全施設としては、通口水力発電所（下流30km）、蘭州-成都-重慶石油パイプライン（下流60km）および宝鶏-成都鉄道の涪江大橋（下流68km）などが存在している。

### 3. 唐家山天然ダム決壊による下流被害の想定

#### 3.1 概説

唐家山天然ダムの防災対応が中国政府の手によって本格的に開始される前に、同じ天然ダムによる二次災害を未然に防止することを調査・研究している（財）砂防・地すべり技術センターでは、



図6 綿陽市内の予想洪水水位表示（新京報）

その危険度分析を実施した。

具体的には、二次元の氾濫シミュレーションを用いて検討を開始したが、DEMのモデルの精度が計算レベルにならず、結果的には、一次元の数値シミュレーションによる手法をとった。この手法による解析結果は、下流保全対象域での危険状況を知る一つの目安とするもので、天然ダム決壊からどの位の時間で危険が生ずるか（避難に活用するための資料）、氾濫水位やその区域はどの位か等を調べたものである。

#### 3.2 計算に用いた条件と基礎式

数値シミュレーションに用いた条件は以下のようである。

天然ダムの高さ：40m

ダム湖の湛水量：4,000万 $m^3$

（以上、2008年5月18日付新華社通信報道）

河道幅：100~125m

河床勾配：1/300

（以上、2007年3月31日撮影データより推定）

曲山鎮周辺でのピーク流量：24,000 $m^3/s$

（数値シミュレーションより算出）

数値シミュレーションは図7に示したように、唐家山の崩壊による天然ダム形成地点から北川県曲山鎮の集落のある場所までの河道延長約6,200mの区間で実施した。そして、集落地点での氾濫の

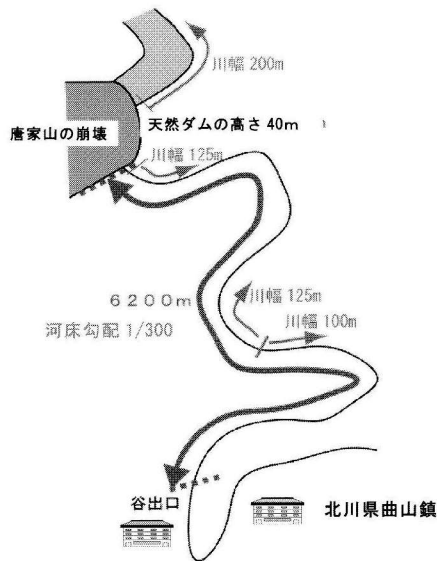


図7 数値シミュレーション実施範囲

状況を想定したものである。なお、曲山镇の集落のある土地の地盤高と河床高との高低差は2007年3月31日に撮影されたデータから約15mと推定している。

また計算に用いた基礎式としては、水の連続式と水の運動方程式を用いている。

一般に天然ダムが決壊する場合には天然ダムを構成している土砂を一緒に巻き込んだ流れとなるため、土石流又は土砂流の状態で流下するため、ここでは計算を簡易にするため水のみ計算として実施したものである。

### 3.3 計算結果と想定される被害

高さ40mの天然ダムが非常に短い時間に決壊すると仮定して、ダムブレイク型の数値シミュレーションを実施した。この想定は最も危険側を考慮した計算条件であり、この他に、天然ダムの決壊パターンとしては、パイピングによる下流端からの洗掘が進行して決壊する場合や、越水して少しずつ天然ダム本体を浸食して決壊する場合などが考えられる。

すなわち本計算は最悪どのようなことが発生するかという数値シミュレーションとして実施したものである。図8に計算による天然ダム決壊後

の水位の変化を時系列として示した。

天然ダム直下ではほぼ20mの水深となった洪水流は、約400秒(約6.6分)で曲山镇の集落附近(谷出口)に到達する。平均流速は、15.5m/sという流れになっている。なお、曲山镇周辺の河床と集落地盤の高低差は約15mであるから波高が15m以上にならないと氾濫は生じない。

そこで数値計算により天然ダム直下流に位置する曲山镇における被害を想定してみた。

天然ダムの決壊による洪水流のシミュレーションから、曲山镇の集落に洪水が到達して且つ集落に氾濫するのは、天然ダム決壊から約500秒後(約8.3分後)である。集落のある地盤上の最高波高は、図9のように6mに達し家々を襲うことになる。氾濫範囲は図10のように曲山镇の集落のほぼ全域となった。

洪水が集落を襲っている継続期間は約1200秒(20分)と計算された。

曲山镇附近での最大流速は約12m/sと計算されることから、氾濫範囲を流下する段波の流体力は17.6kN/m<sup>2</sup>となり、日本における災害事例からすると、日本でみられるような木造家屋であれば充分破壊される力が発生することになる。

いくつかの想定を加えて、唐家山の天然ダムが万一決壊したらどうなるかという数値シミュレーションを実施した。実際には、本文に記述したように唐家山天然ダムの防災対応が実施され、天然ダムからの排水が人工的に実施された。現地の写真等の情報から、越流水が天然ダム堤体を洗掘しながら流下したことにより決壊深は約40mと我々が実施した数値シミュレーションの条件と同じ高さとなったが、ピーク流量は我々の想定したものより小さくなっている。しかし、現実には、曲山镇の集落は土砂流により破壊されており、その流速は相当のものであったと推測されるところである。

## 4. 天然ダムの防災対策

決壊の危険が高まる天然ダムに対し、中国政府が行った応急対策について、主に水利部発表の工

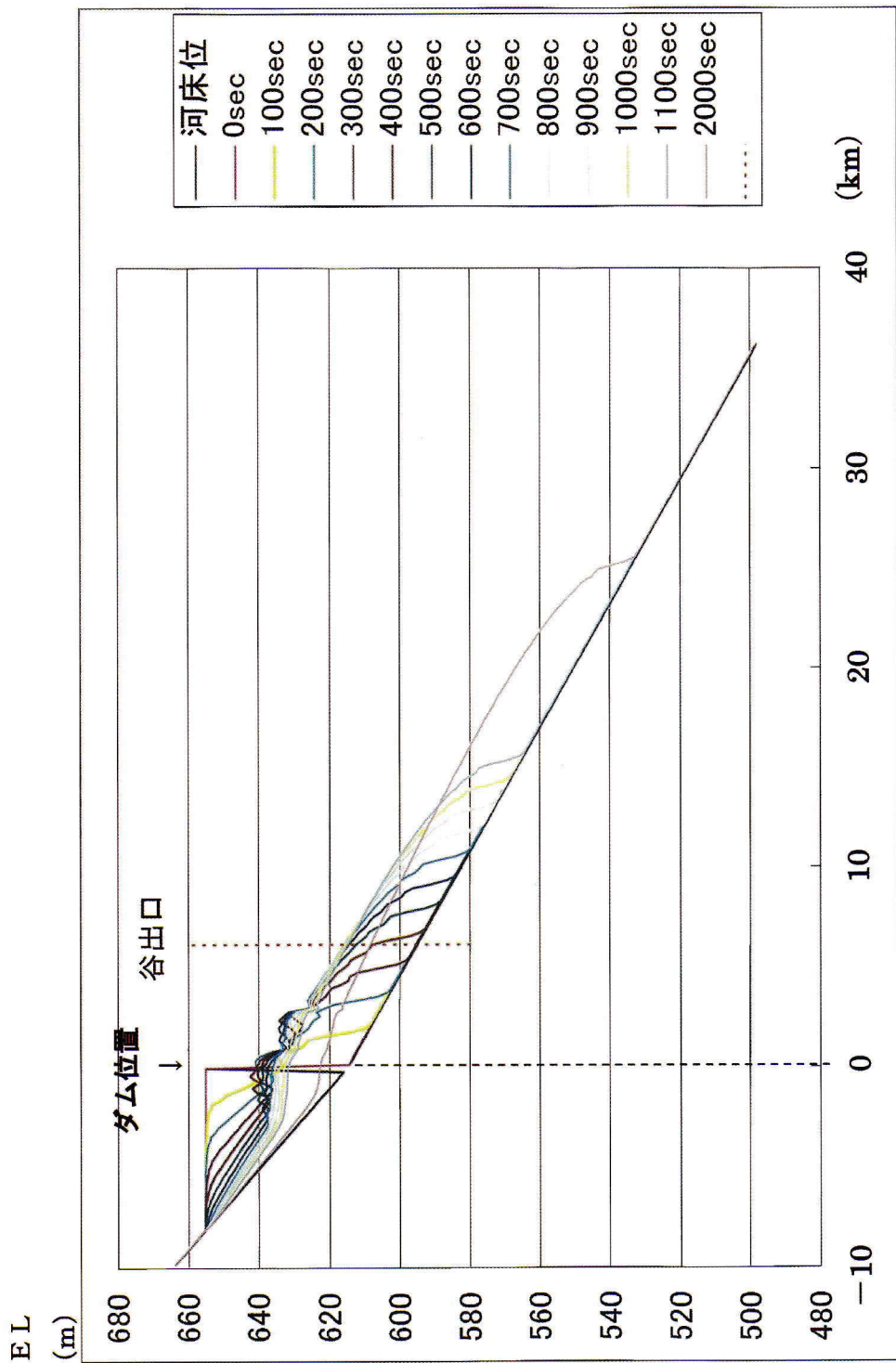


图 8 时系列的水位变化

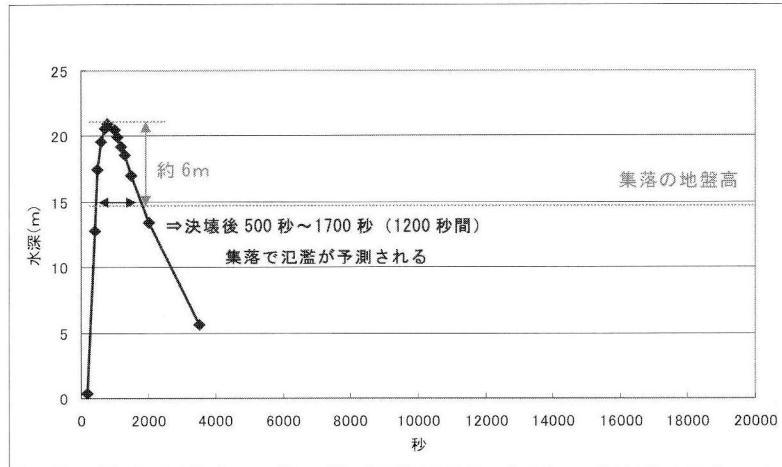


図 9 北川県曲山鎮集落における想定洪水の水深



図 10 天然ダム決壊による想定氾濫範囲

事日誌<sup>3)</sup>から概観する。

まず、政府は、5月19日に国家洪水・干ばつ対策総指揮部、水利部、四川省抗震救済指揮部、四川省水利庁、綿陽市水利・水門・地質部門からなる専門家グループを現地に派遣し、測量・調査を行った。20日には、「天然ダムに排水路を掘削し越流させ、越流水の浸食による段階的な河床低下

(標高=720 m 程度まで；標高差 30 m) と排水を目指す」という応急対策方針を決定し、武装警察部隊の招集と資機材の調達に入っている。また並行して、成都の本部でも映像を見られるよう、現場に衛星通信を利用したブロードバンド画像送信システムの導入を決定した。さらに唐家山が決壊した場合の、下流の綿陽市における洪水氾濫範囲

想定を行い、警戒避難準備に入っている。

5月26日から武装警察部隊と水利部の技術者部隊の約600名が徒歩で現地に入ったほか、大型ヘリコプター(Mi-26;最大積載量20t)でブルドーザーとバックホウ15台を搬入し、掘削を開始した。水利部の計画は、元河床(標高約670m)を80m以上の深さで閉塞させている崩壊土塊のうち、最も低い部分を約10m掘り下げ(EL=750.2m→740m)、通水させようとするものである。掘削水路の横断形状は底幅約10m、河道方向の延長は450mで、護岸や護床工などのない逆台形の素掘り水路である。6月6日の通水開始を目指し、24時間体制で工事が行われた。

通水は6月7日7時8分に始まったが、越流量は $1\text{m}^3/\text{s}$ 程度で(図11)、ダム湛水位はさらに上昇を続けた。この理由としては、ゴミや水没した家屋の材料が堆積して呑み口を塞いでしまったとの報道があった。そこで支障となるゴミや岩塊をブルドーザーで取り除くとともに、水路底の爆破を行って水路を拡大させた。これらにより6月9日午後から、流量は数十～数百 $\text{m}^3/\text{s}$ へと等比級数的に増加した。

6月10日7時42分には最大湛水位743.13mを記録したが、流量の増大とともに水路底が下刻作用を受けて流量が増し、湛水位は減少へと転じた。6月10日11時には流量が最大の $6,680\text{m}^3/\text{s}$

となり、湛水位も1時間あたり3～4m低下した(図12)。そしてわずか9時間後の6月10日20時には当初の目標湛水位である720mを下回り、11日以降は713m付近で落ち着いた。

元河床レベルが670m前後であるので、依然として高さ40m強の湛水湖が残っているが、残った部分は、少なくとも多量の越流水の流下を経験したことから容易に決壊する可能性はなくなったと言えよう。

前述のように地質や天然ダム形成プロセスから

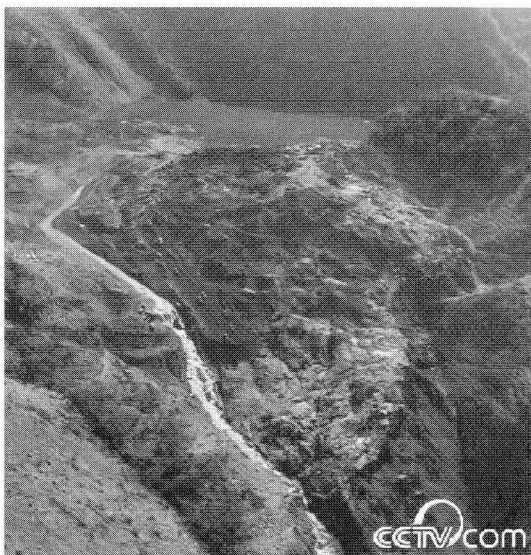


図11 6月8日頃の越流状況(中国中央テレビ)



図12 6月10日午後の越流状況(新華社・李剛氏)



1/3程度決壊することが最も可能性が高いと考えていたようであるが、筆者はこれらとは別に、越流開始後に、越流水による下刻作用で、残った崩壊土塊の再移動が生じるか否かということを技術的に懸念していた。これは越流呑口の標高が下がり相対的に流量が増大し始めてからは、事実上、流量制御は行えないため、最悪の状況を考えると土塊の大部分が流出し下流で大氾濫が起こることもあり得ると考えたからである。

実際には天然ダムは1/2程度の決壊でとどまった。そして、この天然ダムの決壊による下流域での被害はこれまでの報道によると、北川県の3つの鎮(曲山、通口、香泉)と江油市の3つの鎮(香水、青蓮、九嶺)での浸水及び完成したばかりの道路の洗掘という被害はあったが、下流域において死傷者はなく、前述の重要保全施設も含めて、大きな被害は生じていない。

そして6月10日20時過ぎには、国务院は『「安全に、科学的に、迅速に』という方針は達成された』と発表している。翌11日には洪水警報が解除され、安全宣言のもと、住民の避難は終了した。

## 5. 唐家山天然ダムの最新情報

唐家山の天然ダムはその後どうなったのであろうか。その後の情報を調べてみた。

唐家山天然ダムは、一時最高貯水位743.13m、最大貯水量2.46億 $m^3$ に達し、非常に危険な状態にあったが、6月10日からの仮排水路による本格的な排水と、その後の排水路の下刻により排水量が増大した。そして最終的には水位713m(貯水量0.86億 $m^3$ )で安定状態となった。しかし、2008年9月24日の大雨(日最大降雨量221.3mm、三日間累積総雨量439mm)により右岸山体が崩落し土石流が発生、約30万 $m^3$ の土砂が排水路を埋めた。これにより水位が再び上昇し、11月27日現在、水位は718mとなっている。

この土石流が発生する前に天然ダムの安定について四川在線-華西都市報(2008年6月25日付)が次のように述べていた。

「残された天然ダムが完全に破壊する可能性はな

い。ただし、ダムの右岸にクラックがあらわれているので、今後の雨で崩壊が生ずることが考えられる。しかし、今のところ天然ダムの安定性には問題がない。また、すでにできた排水路の断面では6,064 $m^3/s$ の水量が流れ出ることが可能である。一方、流入量は1/200確率で6,970 $m^3/s$ であるのでほぼ天然ダムは安定と言える。ダムの構造上の問題や上記右岸の崩壊問題およびダム湖周辺の問題については、今後の調査による。」

そして、「これらの結果を待って、9月30日より対策が実行されるだろう」と結んでいる。これらが実際のこととして起こったものと考えられる。

9月の土石流発生後、成都水利勘测設計研究院(以下では成勘院と呼ぶ)は唐家山天然ダム対策本部の依頼を受け、天然ダム本体および上下流の斜面安定性などの調査を行い、10月に「調査評価報告書」を提出した。また、成勘院は綿陽市の依頼を受けて調査評価報告書をもとに、「唐家山天然ダム本体の整備案」を取りまとめた。

その後、「唐家山天然ダム本体の整備案」について、2008年11月24日～26日に成都市で、四川省水利庁主催の会議が開催されている。会議の責任者は水利部の劉総工師で、水力企画総院、長江水利委員会、水力顧問公司、水力西北院、水利科学院、四川省水利庁、国土資源部、地質環境監察機構、綿陽市、北川県の関係者が会議に出席した。

そしてこの会議の結果が、以下のようにとりまとめられている。

- ① 天然ダム本体は基本的に安定状態にある
- ② ダム湖右岸では斜面安定や土石流などの危険性があり、早急な対応が必要
- ③ 右岸山体には亀裂があり、変形も大きいことから、動態観測を強化
- ④ 排水路の再工事は多くの問題があり、できれば左岸で導水トンネルの新設により全体の排水量を増やす
- ⑤ 早急に、排水路の排水能力を9月24日以前のレベルにする
- ⑥ ダム湖の土砂堆積や水質の変化などの観測を実施
- ⑦ 安全性を確保する前提で天然ダムの現状保持

について基本的に同意する

- ⑧ 天然ダムの開発利用，上下流の河道変動，斜面安定性評価などの課題については，別途検討する

今後はこの「整備案」に基づいて，対策が実行されるものと思われる。

## 6. おわりに

今回の中国における土砂災害防止対策のうち，唐家山天然ダムの人工的破壊については日本と少し違う中国の事情がうかがわれた。

それは下流域の保全対象地区における家屋の事情である。我が国では公共施設以外の家屋は，個人所有であることから，仮に天然ダムの対応により家屋被害が生ずると，状況にもよるが，対応した者の責任になる可能性がある。また，家屋の被害だけでなく，地域そのものの安全性にも風評被害など課題が生ずる。

一方，中国では家屋の大部分は，国や省が建設し，抽選により入居が認められる方式をとっているとのことで，いざという時の補償は国や省がするものとのことであった。加えて，天然ダムから河道距離で約6km下流の都市，北川県曲山鎮は，汶川大地震によりすでに建物の倒壊率が80%以上の状態（中国国家減災センターの資料による）となっていることもあって，大規模な人工的洪水の発生が可能となったと思われる。

天然ダムに関しては約80mのダム高に対し，約40mの土砂が流水により掘削された。しかし，未だ高さ40mの堆積土砂が，天然ダムを形成しているのである。

この理由の一つとして地質が関係していると考えられる。天然ダムは古生代カンブリア紀の海洋性堆積岩という形成年代の古い岩の崩壊が堆積土砂の下部を構成していると考えられることから，かなりしっかりした土塊あるいは岩塊のうまいかみ合わせとなっていることが想定される。

この唐家山の天然ダムについては，2008年8月20日中国中央テレビのHPに以下のような唐家山の天然ダム活用策が発表されている。

綿陽市水務局河川管理局長何国慶氏によると，綿陽市の復旧計画には唐家山天然ダムの復旧計画が含まれており，唐家山天然ダム対策本部の専門家グループからは，次の三つの恒久復旧案が提示された。

- ① 原状回復（筆者注……震災前の河流の回復）
- ② 現状維持（筆者注……周辺遺跡の現状維持）
- ③ 水力発電（筆者注……水力発電ダムの建設）

そして①は，非現実的で，選択肢から外された（残った堤体および大量な堆積土砂を処理することが不可能）。②は，周辺の不安定斜面を含めて安定化させてから，観光地として利用される。③は，下流にある三つの水力発電所を考慮して総合的に水力発電の施設に利用するとの見解が示された。

2008年11月末の情報<sup>1)</sup>によると，最終的には，唐家山の天然ダムは現状の形で固定化され周辺も含め地震災害の遺跡として残す可能性が高まっている。

そして，決壊の可能性93%とも言われた唐家山の天然ダムは，全壊されずに一部が破壊されて，結果としてダム湖が残る対策がなされたことになる。このような対策は我が国ではこれまでに事例がなく，一つの天然ダム対策のあり方として，今後の貴重な事例となることであろう。

いずれにしても今後も唐家山の天然ダムとその対策について，注目していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 2008年5月12日 中国四川大地震被害調査速報 応用地質株式会社，2008・6
- 2) 張 楚漢（清華大学教授）：「汶川地震の被災から思うこと」（中国語，中国水利学会HP：<http://www.chinawater.net.cn/zt/08nianhui/>）
- 3) 中国水利部HP：<http://www.mwr.gov.cn/xwpd/zxrd/2008053011492020a0aa.aspx>
- 4) 中国四川省政府HP：[http://www.sc.gov.cn/lysc/lyyw/200811/t20081124\\_441505.shtml](http://www.sc.gov.cn/lysc/lyyw/200811/t20081124_441505.shtml)

池谷 浩

[いけや ひろし]

**現職** (財)砂防・地すべり技術センター  
理事長  
農学博士, 中央防災会議専門委員, (社)  
砂防学会副会長



**略歴** 1968年京都大学農学部卒業, 建設省入省. 1998年7月建設省砂防部長, 2000年6月(財)砂防・地すべり技術センター顧問, 専務理事を経て, 2005年8月より現職

**研究分野** 砂防学, 火山防災学

**著書** 砂防入門(山海堂), 土石流災害調査法(山海堂), 土石流災害(岩波新書), 火山災害(中公新書), 「マツ」の話(五月書房)

呉 旭

[うー しゅう]

**現職** 応用地質(株) 技術センター地盤  
解析部グループリーダー  
工学博士



**略歴** 1994年3月名古屋大学大学院地  
圏環境工学博士課程修了, 1994年4月名古屋大学工学  
部機械情報システム工学科助手, 1998年4月応用地質  
株式会社入社, 2006年4月より現職

**研究分野** 地盤工学, 地盤防災

比留間雅紀

[ひるま まさき]

**現職** (財)砂防・地すべり技術センター  
企画部国際課長  
技術士(建設)



**略歴** 1984年東京農工大学大学院修士  
課程修了, 1990年6月(財)砂防・地すべり技術セン  
ター, 2002~2004年ネパール JICA 専門家(砂防),  
2005年6月より現職

**研究分野** 国際協力(土砂災害対策)

# 2008年中国汶川地震による都江堰市内の 学校建築の被害

壁谷澤寿海・李 康寧・楠 浩一・壁谷澤寿一

## 1. はじめに

2008年5月12日14時28分に発生した汶川大地震(M 8.0)によって中国四川省の主要な都市において多くの構造物が被災した。死者69225人、行方不明者19739人(2008.8.11)に達し、350万戸ともいわれる建築物被害の詳細や背景はいまだに不明の点も多い。学校関係ではおよそ教室数6900相当の校舎が倒壊し、地震発生が昼間開校時間であったことから、校舎の倒壊により数千人規模の学生および教師が死亡したと報告されている。

著者らは地震発生から1ヵ月後の2008年6月11日と12日に四川省都江堰市における学校建築物を対象に限定して被災度の調査を行った。正式な許可にもとづいて組織的に行われたものではないため調査の内容には限界があったが、日本の研究者として可能な範囲で学校建築の現状を把握して、学術的な見地から被害状況を正確に記録することを目的として行った。

本報告では、2008年6月に著者らが行った都江堰市中心部の合計約80棟の学校建築における被害調査結果を報告するとともに、関連する中国側から公表された代表的な調査結果も合わせて参照して紹介している。さらに、2008年10月に成都で開催された日中科学セミナーに出席した際にも、都江堰市内の学校について復旧状況の調査を行ったので、それらの概要についても報告する。

## 2. 都江堰市と耐震設計基準の概要

都江堰市は四川省北西の龍門山山岳地帯の麓、岷江が平野に達する扇状地の扇頂部にある。龍門

山断層は震源から北東の方向に伸びており、市内は断層直上には位置してはいないが、震源からは東側に約20km程度に離れた位置にある。

都江堰市は総面積1208(km<sup>2</sup>)、総人口60万人の歴史の古い中規模都市で、歴史的建造物も多く、観光地としても有名である。今回の地震では市街中心地の建物は壊れたものから無被害のものまで様々な被害がみられた。都江堰市では建築物の耐震設計用の設計震度は中国の基準で震度Ⅶであるが、今回の地震による地表の地震動最大加速度は概ね500~700(gal)程度であったと推定され、短周期成分が卓越した地震動であったこともあり、調査報告などでは震度Ⅷから一部震度Ⅸ程度に相当するものであったと推定されている。なお、中国の基準では、耐震設計震度7は最大加速度レベル220(gal)、最大応答加速度が500(gal)であり、日本の極稀地震(レベル2)の半分程度に相当する。なお、汶川、北川、英秀などさらに地震動レベルも被害率も明らかに大きい地域があったが、いずれも詳細な調査は事実上不可能であった。

建築基準は1974年、1979年(1976年唐山地震(M 7.8)発生後)、1989年、2001年に改定されており、1989年以降の建物は耐震設計の規定を満足して建設されている。たとえば、多くの学校建築で採用されているレンガ造構造では壁が直交する位置には一定の断面寸法をもつRC柱部材を取り付けることなどが義務づけられている。都江堰北部では表層がやや軟弱な地盤も見られるが、都江堰市街の地盤は軟弱層の層厚も小さく基本的に地盤条件は良好であると推定される。

### 3. 調査方法

#### 3.1 被災度判定

著者らは6月中旬に2日間にわたって都江堰市内において以下のような現地調査を行った。市内中心部の全ての学校建築物を対象として応急の被災度判定を行うことを目的とした。構造物の被害観察結果は、我が国で地震被害時に一般的に行われている被災度判定区分、すなわち構造物の被災度は無被害（被災度0）、軽微（被災度Ⅰ）、小破（被災度Ⅱ）、中破（被災度Ⅲ）、大破（被災度Ⅳ）、倒壊（被災度Ⅴ）に分類した。構造物の被災度は張間・桁行方向でそれぞれ評価している。構造物の建設位置、方位、階数は全棟で調査し、建設年代は現地の学校関係者から情報の得られた建築物でのみ特定した。構造形式は被災状況や架構形式から著者らによって可能なかぎり推定または判断しているが、特定できない場合は不明にしている。

構造物の被災度は著者らによって建物外部・内部から全体の損傷状況を観察し、判定している。本来は構造物の被災度判定では個々の部材の損傷度を判定して、その割合から建物の損傷割合にもとづいて判定されるが、限られた調査時間および行程のため、本調査では判定基準には沿っているが、応急的な判定方法に留まっている。RC造のせん断破壊型の復元力特性をイメージして、極力主体構造の被災レベルにより判定した。また、一部の構造物においては構造形式、立平面、個別の部材断面を計測して、1次耐震診断のための詳細調査も行った。次節以降では調査結果をこれらの構造特性および建設年代との関連性について統計的に分析した結果について報告する。

#### 3.2 調査対象構造物

被害調査は都江堰市内中心部に所在する全ての学校建築物を対象として行われたが、2棟の建物（新建小学校、十局小学校：後述）については地区一帯が封鎖されていたため調査不能であり、また、調査していない建物もわずかに存在している。また、同市内郊外にある学校については調査を行っていない。倒壊して報道等で有名になった

表1 調査対象の学校数、棟数と用途

幼稚園	3	教室棟	65
小学校	10	図書館	2
中学校	2	学生食堂	3
外国語実験学校	2	寄宿舎	7
専門学校	2	渡り廊下 (ピロティ)	1
大学	2		
学校数合計	27	建物棟数合計	78

聚源中学も調査対象地域からは離れた郊外地域に位置するため、以下の統計には含まれていない。

表1に示すように27ヵ所の学校施設、78の学校建築物を対象として調査を行った。幼稚園3校、小学校18校、中学校10校、外国語実験学校2校、単科大学2校となっている。うち数校では立入り調査を規制されたため、外観からのみの評価となっている。さらに2校では地区が周辺地区への立ち入りもできず、対象外になっている。また、大学に関しては全棟数が多かったため、ごく一部の校舎群のみの評価となった。

各学校の多くは一般教室を含む校舎棟を保有しており、調査対象構造物の5/6を占めている。その他、敷地内に先生・生徒用の寄宿舎や食堂などが併設されており、これらの被災度も統計量に含まれているが、これらの建物では平面や構造計画などがかなり異なることに注意する必要がある。校舎はいずれの建物も片廊下形式の長方形平面が多く（桁行：間柱、張間：壁）、RC枠組み+レンガ壁建物の構造規定から7階建て以下の中低層建物である。

構造形式等はほとんどが外観による推定であるが、明確でない場合は特定していない。また、基礎の情報はほとんど得られていないが、地盤が比較的良好であるため直接基礎であると考えられる。

## 4. 調査結果

### 4.1 RC、組積造 構造形式の判定法と損傷評価

各建物の構造形式は、部材や損傷状態などから推定すら不可能な校舎を除き、著者らが特定し

た. 非構造レンガ壁が直交する部分にRC柱が入っている形跡があるかなど, 縦ひび割れなどから推定した. その結果, 40棟の校舎が階段室など特定の場所などを除いた一般校舎平面内において, 鉛直支持部材に非構造RC柱が使用されていない組積造構造物と判断された. 梁スラブは概ね鉄筋コンクリート造であり, これらの構造物ではプレキャストコンクリートを使用していると推定される. その他, 23棟の構造物がコンクリート枠組み構造に無筋ブロック壁, もしくは組積造レンガ壁を有していた. 残りの15棟に関しては平面計画・被災状況などからは構造形式を推定することはできなかった. これらの推定から1/2~2/3程度の調査構造物がRC柱部材を有しない組積造構造物であったと推定された.

また, 非構造RC柱部材とレンガ壁を有する建物の損傷については構造物の自重を支えていると思われる部材の損傷程度で判断した. すなわち, 平面内でレンガ壁の部材断面が相対的に大きい構造物ではレンガ壁の損傷で, RC柱部材に2次的に取り付いている非構造レンガ壁についてはRC部材の損傷のみから構造物の被災度を判定している.

#### 4.2 全体被害率

構造物の被災度を張間・桁行における被災の大きい方向と判定した時の調査全数の被災度統計結果を図1に示す. 各被災度建物の割合はそれぞれ(0)無被害10% (1)軽微27% (3)小破26% (4)中破18% (4)大破13% (4)倒壊6%であった. 概ね20%の学校建造物が大きく被災(大破・倒壊)し, 20%が中程度(中破), その他の60%程度の建物は軽微な被災(小破・軽微・無被害)に留まっている. また, 調査できなかった学校施設2校を含めると, 大破・倒壊の割合はやや大きくなる可能性がある.

#### 4.3 被害率と階数の関係

建物被災度と階数の関係を図2に示す. 1, 2階の低層構造物は比較的軽微な損傷に留まっているものの, 建物13棟のうち鉄筋コンクリート造ピロティ構造物(外国語実験学校 渡り廊下 大破)には柱頭コンクリートに圧壊が見られた. 3,

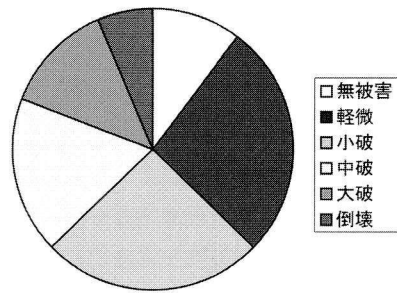


図1 学校校舎の全体被害率

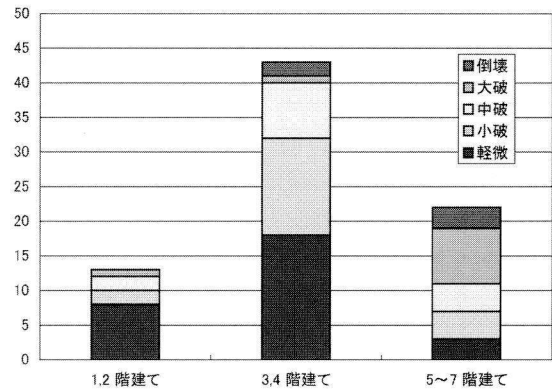


図2 階数と被害率の関係

4階の中低層建物では43棟のうち3棟のみが大破または倒壊と判定された(1棟は地盤基礎沈下(中興成人学校), 残り2棟は倒壊後すでに更地(李泳中学)) 5~7階の中層建物では22棟のうち半分の11棟が大破または倒壊と判定されている. 構造物被災度と階数には高い相関があり, 高い建物での被害が大きかった. これはRC枠組み+レンガ壁構造物の耐震設計要求として, 桁行方向の最小壁間距離(現場打ちコンクリート床18(m), プレキャスト床スラブ15(m)), 最小壁厚(BW240(mm), HBW190(mm))が規定されているが, 層数に関係していないようであり, 低層の建物では標準平面計画で比較的高い水平耐力を有していたと理解される.

#### 4.4 被害率と建設年代の関係

各建物の建設時期に対する被害率の推移を図3に示す. 建設年代別の建物被害率は5年ごとに分割して表示している. 1980~85年に建設された建物の半分以上は大破または倒壊であったのに対し

て、建設年代が後期になるほど被害率は小さい値に留まっている。サンプル数は少ないが、本調査では近年建設された建物被害は明らかに小さく、建物倒壊のような大きな被害は古い建物に集中する結果となった。

また、1989年規準改正前後に設計された建物間には明確な被災度の差異が見られなかったが、現行の規準、すなわち2001年以降に建設された建物では大破または倒壊の建物が存在せず、2/3の建物が軽微または無被害に留まっていた。倒壊し封鎖された新建小学校校舎が1992年、1994年建設であったことを考慮すると、被害分布の印象はやや異なる傾向になる。

#### 4.5 被害率と構造形式の関係

構造形式（組積レンガ造、鉄筋コンクリート枠組レンガ壁構造）と建物被害率の関係を図4に比較して示す。図に示すように本調査では2つの構造形式の違いによる建物被害率の明確な差異は見られなかった。ほかの調査結果<sup>5)</sup>などでは一般にレンガ造の被害率が大きい結果になっているが、

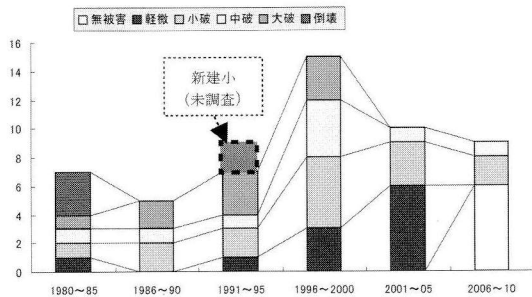


図3 建設年代と被害率の関係

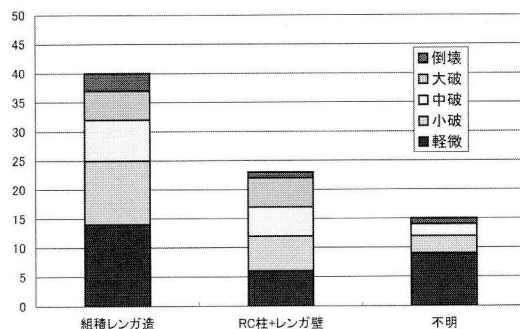


図4 構造形式と被害率の関係

後述するようにレンガ造の学校建築では桁行き張間方向とも一般に比較的大きな壁断面が用いられており、レンガ造でも比較的高い耐力が推定されること、学校は比較的低層の建物が多いこと、によると思われる。また、ほかの調査では組積造構造物の被災度判定では水平力の大部分を負担しているレンガ壁の損傷が大きいため、構造物の被災度を本調査よりもやや高めに評価している可能性がある。

#### 5. 一般建物の被害率<sup>5)</sup>

中国地震局工程力学研究所では一般の建物を含む都江堰市内の1005棟の被害調査を行い、その結果について2008年10月の第14回世界地震工学会議特別セッションおよび文献<sup>5)</sup>などで公表している。対象の1005棟は、市内すべての地域、建設年代、構造形式、用途、階数などを対象にしてランダムに抽出されたものであり、これらのパラメータに対して被害率が分析されている。被害は倒壊（崩壊）、大破、中破、小破（軽微）、無被害の5段階に分類されているが、被災度の定義は著者らの定義とはやや異なる可能性もある。例えば、倒壊は完全に崩壊したものとしているようであるが、著者らの定義では損傷Vの部材が主体で水平耐力を失ったと推定された崩壊に近い場合も含んでいる。

これらの1005棟を建設年代により、以下のA, B, Cの3グループに分類し、耐震設計がされているCグループの被害についてとくに詳細に分析している。

Group A: 1970年代以前、主に組積または木造  
Group B: 1980年代、耐震設計はしないか地震力は小さい

Group C: 1990年代、耐震規定にしたがって設計されている

以上の調査結果により、1) Group C, B, Aの順で、新しい建物ほど被害率がより小さくなること、2) 1990年代以降の耐震設計された建物（Group C）の多くは震度VIII-IXの地震動に対しても倒壊を免れたことから、震度VIIの設計レベルは最低の設

計用地震動としては妥当であること、3) Group C では、RC 純フレーム構造、1階 RC+組積造、組積造の構造形式の順に被害率が小さくなること、4) 組積造または RC 枠組み+組積造の被害率は公共建築（学校、病院）の方が住宅よりもやや高いこと、などを指摘している。

1005 棟全体の被害率を図 5 に、Group C の被害率を図 6 に、さらに Group C の構造形式別の被害率を図 7 に示す。構造種別は組積レンガ造、

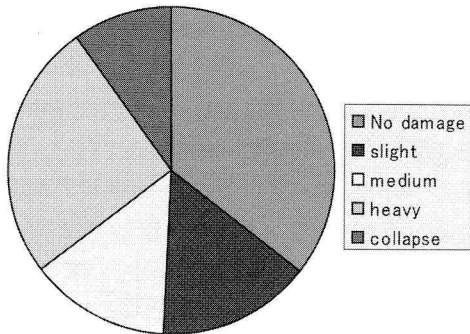


図 5 都江堰市内 1005 棟の被害率

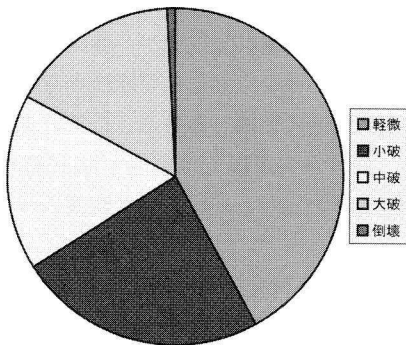


図 6 都江堰市内 1005 棟のうち、1990 年代以降の建物（Group C）の被害率

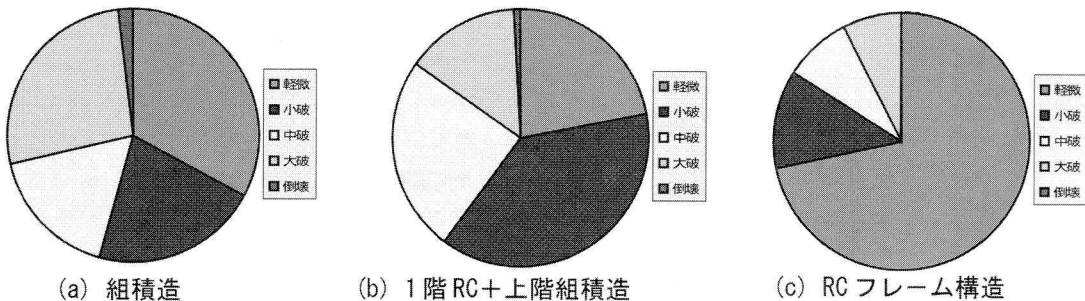


図 7 都江堰市内 1005 棟のうち、1990 年代以降の建物（Group C）の構造別被害率

1階 RC 造+上階組積造、RC フレーム構造に分類している。

これらを図 1 の学校建築の被害率と比較すると、Group C の RC フレーム構造は明らかに学校の被害率より小さいが、そのほか全数の被害率は大きく、Group C の被害率や Group C の組積造の被害率は、本調査結果と概ね整合している。倒壊率は学校が大きいがこれは定義による可能性もある。すなわち、学校校舎の被害率がほかの一般建物の被害率と比較して突出して高いということではないと思われる。

一方、これらの図からは読みとれないが、文献では上記結論 4) にあるように、組積造に限定して比較すると学校や病院の公共建物の被害率は住宅よりもやや大きい、としている。それを示す図をみると定量的な解釈は微妙なところもあり、この点についてはそのほかの要因も含めてさらに詳細な分析にもとづく比較検討が必要であろう。

## 6. 詳細調査

### 6.1 四川省学校の標準設計

本調査ではいくつかの標準的な平面計画を有する校舎については被害調査時に鉛直支持部材の寸法を記録した。日程的制約のため 2 つの建物についてのみ 1 階平面の全鉛直部材を調査している。ただし、ほとんどの調査対象建物にはこれらと類似した平面および構造計画が見られたので、水平耐力の推定とともに標準的な結果が推定されるものと考えられる。



## 6.2 柱壁量から推定した水平耐力

これら2つの建物の重量および水平せん断耐力を過去に実施された組積造壁の載荷実験結果に基づいて推定した。水平せん断耐力は1階柱および壁部材の終局時平均せん断応力を累加することで計算している。組積造レンガ壁の終局平均せん断応力度は、枠組RC架構を有するレンガ壁の静的水平載荷実験(真田ら(2006), 隈澤ら(1998))および欧州標準化委員会における組積構造物の設計指針(2005)に基づき $0.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ と仮定した。また耐震診断基準に基づきRC柱の終局時平均せん断応力度は $1.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ とし、構造物の重量は単位床面積あたりの重量を $12 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ と仮定して計算を行っている。これらの層せん断力係数として表した建物の水平せん断耐力は、桁行方向で $0.39\text{--}0.55$ 、張間方向で $0.58\text{--}0.66$ 程度で比較的高いものであった。

一方、これら2棟において観測された被害は、3階RC造建物(1992年)では、主な建物被害としてRC柱部材および非構造レンガ間柱の一部にわずかなカバーコンクリートの剥落が見られた。非構造RC柱に関しては隅端部においてコンクリートが剥落しており、主筋および帯筋の存在を確認している。また、桁行方向の間柱、梁間方向の組積造耐震壁にはせん断ひびわれが見られた。入口付近に配置された大断面連層レンガ壁には壁頭および壁脚に水平ひびわれが観察された。しかしながら、その他部材の残留ひびわれ幅は小さく、各柱部材の水平最大耐力に達していると思われなかったため小破と判定した。

4階建ての建物(1998年)では、梁間方向の連層耐震壁、桁行方向の間柱はかぶりコンクリートが剥落し、概ね全ての部材でレンガおよび大きなひび割れが露呈している。特に桁行・梁間方向の組積壁が交差している部分での損傷が大きかった。一方、袖壁の有する桁行き方向のRC柱にはレンガ壁端部で損傷が見られるものの、柱自体には目立ったひび割れが見られなかった。廊下側の独立柱はレンガ積み部材にモルタルを被せただけであることを確認している。これらの観察結果から建物の被災度は中破と判断された。また、これ

らの学校建築物における中間階梁はRC梁上にレンガを組積した壁梁となっており、レンガ部の変形に追従できず、モルタルが剥落する被害が非常に多く目立った。

## 7. 復旧状況の調査

筆者らの2名(壁谷澤寿海, 壁谷澤寿一)は2008年10月10日、すなわち地震発生から5ヵ月後に、調査建物を中心として、復旧状況を再度調査した。6月の調査の時点で明らかに継続使用あるいは取壊しが明らかになっていた校舎については時間の制約から調査を省略している。

図8に10月時点での建物状態、跡地や移設の状況などについてまとめた。約60%の建物を取り壊されて更地になっており、約20%では建物があっても不使用のまま存在していた。これはほとんどが手つかず放置されている周りの民間建築物と比較すると迅速な対応であるともいえるが、軽微あるいは小破程度の被害にもかかわらず、補強や復旧の可能性がほとんど検討されないままに取り壊されたと推定される例も見られた。まだ存在していた建物でも使用していない場合は、同様に取り壊し建替えになる可能性がある。補修して継続使用されている建物はわずか3棟で、これらはいずれも大学関係の建物であり、小中学校の校舎ではほとんどみられなかった。多くの学校が新設校舎への移設を予定していると思われ、すでに敷地を変更して建設中あるいは仮設のプレハブに移転している学校もいくつか見られた。

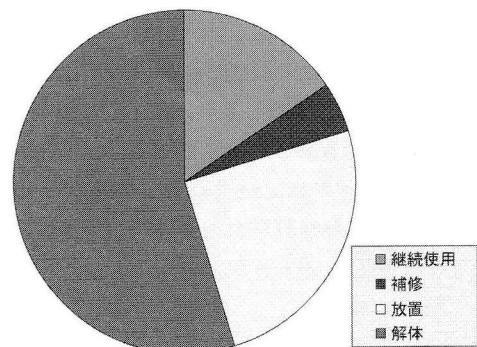


図8 2008年10月の復旧状況調査結果

道路が完全に封鎖されていたため、6月には立ち入ることができず、概観調査もできなかった2校（新建小学校、十局小学校）は、10月の調査時には建物がすべて撤去されていた。文献調査によると新建小学校は4階建てと3階建ての校舎が1992年、1994年に建設され、いずれも部分的に倒壊し、現地警察によって封鎖された。また、十局小学校は4階建て校舎であり、概観からは損傷が見られなかったが、内部に重大な損傷を受けていたとのことであった。

## 8. 調査結果のまとめ

四川大地震後に都江堰市内の学校建物について全数被害調査を行い、以下の結論が得られた。

- 1) 20%の学校建築物は大破もしくは倒壊し、20%が中破であり、60%が軽微または無被害に留まっていた。
- 2) 1/2から2/3の建物の構造形式は鉄筋コンクリート柱を含まない組積造レンガ壁構造物であった。
- 3) 高い建物では明らかに被災度が大きかった。
- 4) 近年建設された建物は無被害または軽微に留まり、古い建物で大破または倒壊などが多く見られた。
- 5) 組積造レンガ壁構造物の被害率はブロック・レンガ壁内蔵鉄筋コンクリート枠組構造と比較して大きくはなかった。
- 6) 学校や病院の被害率はほかの組積造建物と比較してやや大きいとする別の調査結果もあるが、同地域の一般建物の被害率より突出して大きいわけではない。
- 7) 5ヵ月後の時点で無被害軽微以外の建物では60%の建物で取壊し工事は終了しており、また、20%が放置された状態であり、地震直後に継続使用されていた建物（約20%）以外で、補修補強が行われた建物や使用を再開している例はほとんどなかった。

## 9. おわりに

本調査は文科省と中国地震局との共同研究に関する交渉が進行中の段階で、筆者らのグループにより独自に行われた。現地調査では四川省建築科学研究院副所長 Luo Linglong 博士に多大なご支援をいただいた。本稿では中国側の調査や追加調査などを加筆したが、一部の調査結果のみ要約紹介したものであり、写真やさらに詳細な結果については既報<sup>2)~4)</sup>などを参照していただきたい。

蛇足ながら、日本では1945年-2008年までに全国各地の学校で約20回の大きな地震を受けているが、生徒が在校中に発生した地震がほとんどない。これは極めて幸運な偶然であって、これまでの地震被害で学校関係で死者がなかったのは、日本の学校建築の耐震性能が十分に高いものであったことによるわけではないことに注意する必要がある。いうまでもなく、現状でも地震被害軽減には、先端の研究や開発だけでなく、耐震改修などの地道な作業が必須である。日本の学校校舎の耐震診断、耐震改修、耐震補強は、ほかの建物に比べれば、また、外国に比べれば、兵庫県南部地震以降の国の施策（耐震改修促進法、文科省の施設助成金の誘導等）によって、比較的計画的に進められつつある。しかし、本来耐震補強が必要であるレベルであるにもかかわらず未了である学校校舎、体育館は全国にいまだに多数残されている。とくに建替待ちという理由で、最も耐震性のない古い校舎が放置されているケースがみられる。さらに公共建物以外は所有者任せであって、診断も改修も遅々として進んでいない。そのほか、電柱、水道・ガス管、密集地の狭い道路など明らかに耐震性に問題があるインフラ施設が多く残されている。その意味で日本はまだ多くの建設投資を必要としており、不況のいまこそ、災害に強い町づくりを目指した大規模な公共投資がなされるべきであるとも考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会 (2001) : 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 日本建築防災協会, 360pp.
- 2) Kabeyasawa, Toshimi, et al. (2008) : An outline of damages to school buildings in Dujiangyan by the Wenchuan Earthquake on May 12, 2008. Paper submitted to Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008, No. S31-002, 10pp.
- 3) 壁谷澤寿海ほか (2008) : 中国四川大地震による都江堰市における学校建築の被害の調査, 日本地震工学会年次大会論文集, 日本地震工学会.
- 4) 壁谷澤寿海ほか (2008) : 都江堰市における学校建築の被害, 建築防災, 特集: 中国四川大地震, 日本建築防災協会, pp. 28-45.
- 5) Zhang Minzheng, Jin Yingjie (2008) : Building damage in Dujiangyan during Wenchuan Earthquake, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 7, No. 3, pp. 263-269.

壁谷澤寿海

[かべやさわ としみ]

**現職** 東京大学地震研究所地震火山災害部門教授  
工学博士

**略歴** 東京大学工学部卒, 同工学系研究科建築学専門課程修士課程修了, 大成建設株式会社, 東京大学工学部助手, 横浜国立大学工学部助手, 同助教授を経て現職

**研究分野** 耐震工学, 建築構造, 鉄筋コンクリート構造  
**著書** 「Design of Modern Highrise Reinforced Con-



crete Structures (Editor: Hiroyuki Aoyama), Chapter 7 Earthquake Response Analysis」(分担執筆, Imperial College Press), 「建築と工学 (4. 耐震工学)」(分担執筆, 彰国社) ほか.

李 康寧

[LI Kangning]

**現職** 北京工業大学客員教授  
博士 (工学)

**略歴** 中国清華大学土木工学科卒, 東京大学工学部大学院博士課程修了, 横浜大学工学部研究助手, シンガポール国立大学リサーチサイエンティスト, 独立行政法人防災研究所地震防災フロンティア研究センター研究員を経て, 現職

**研究分野** 建築耐震免震構造, 構造非線形解析



楠 浩一

[くすのき こういち]

**現職** 横浜国立大学大学院准教授  
博士 (工学)

**略歴** 東京大学工学部卒, 同大学院博士課程修了, 東京大学生産技術研究所助手, 独立行政法人建築研究所主任研究員を経て, 現職  
**研究分野** 建築耐震構造学, 鉄筋コンクリート構造  
**著書** 「防災の辞典」(朝倉書店)



壁谷澤寿一

[かべやさわ としかず]

**現職** 東京大学工学系研究科都市持続再生研究センター特任助教, 東京大学地震研究所外来研究員  
工学博士

**略歴** 東京大学工学部卒, 同大学院修士課程修了, 同大学院博士課程修了, 東京工業大学 PD 研究員を経て現職  
**研究分野** 構造工学・耐震工学



# 諏訪湖の「御神渡り」成因論再考

浜口博之

## はじめに

長野県の諏訪湖では冬期に全面結氷し氷厚が10 cm を超えるようになると寒冷な夜間に突然氷板に大規模な割れ目（鞍状隆起）が発生する。これが「御神渡り」と呼ばれる現象である（図1）。其の昔の湖畔住人にとって大音響を伴い発生するこの突発現象は人知を遥かに越えた超自然的な出来事であったに違いない。氷板上の割れ目を神が渡った形象として捉え「御神渡り」という名称で呼んだのもうなずける。この特異な自然現象の発現に関しては5世紀にわたってほぼ連続して史料が残されている（荒川，1954）。

「御神渡り」現象には湖沼学、気象学、地震学、雪氷学の研究者がそれぞれの分野から関心を寄せた。最初に科学的なメスを入れたのは湖沼学者の田中阿歌麿（1917、大正7年）である。彼はその

大著「湖沼学上より見たる諏訪湖の研究」（上巻）の中で「御神渡り」を湖沼に起きる諸現象の中で、否、自然界に於ける最も奇異な現象の1つであると捉え、現地調査や海外の文献をもとに初めて「御神渡り」の成因に関して言及した。この著書が出版された直後に、藤原（1920）は500年以上にわたる「御神渡り」の記録が古気候の研究史料としての第一級の価値を有することを認め、気候学的見地から詳しい分析を行った。その後、岸上（1943）やOmote et al.（1955）らの地震学者は「御神渡り」を地震波や地震発生モデル実験という視点で捉え、氷板の変動や震動の観測研究を行った。やや時間を置いて、筆者等（Hamaguchi et al., 1977, Hamaguchi and Goto, 1978, Goto et al., 1980, 浜口・後藤, 1982）や杉本・他（1981）は地震・地殻変動の諸観測技術を応用して「御神渡り」を多面的に調査した。雪氷学者の東海林（1980, 1995）は北海道の屈斜路湖でも諏訪湖と同様に大規模な



図1 1975年の「御神渡り」の写真。1月14日に出現し約1ヶ月後に、一方の氷板が他方に約2m 乗り上げている様子を示す。（2月15日筆者撮影）

「御神渡り」現象がみられたことを報告しその成因を論じた。

以上に見られるように「御神渡り」は湖沼学、地震学、雪氷学など多方面の分野の研究者が関心を示してきたが、「御神渡り」の成因については田中（1917）が大正時代に提出した説が今日も通説として踏襲されている（例えば、東海林，1995，2005）。このため「御神渡り」の出現記事が新聞やテレビで報道されるたびに上記の成因論に基づき解説されているのが現状である。

科学は自然現象の「観察」と「観測」を基礎に、理論的考察を加味して発展してきた歴史を有する。この視点からこれまでの文献を読みかえして見ると「御神渡り」成因論は主に氷上「観察」をもとに構築され、「観測」に基づくものが少ないことが明らかになった。「観察」からは物理現象としての「御神渡り」はそれほど正確に理解されていないのではないかとの思いから「観測」データに基づいて通説として流布している成因論の再検討を試みた。

### 従来の「御神渡り」成因論

フォン・コルノフスキー説（Cholnosky, 1909）をもとに田中（1917）が提案した「御神渡り」成因論を要約すると；

- (1) 湖が全面結氷した状態で、氷が増厚している期間の夜間に厳しい冷却に伴う氷板の収縮によって割れ目が生ずる。その割れ目に浸入した湖水が結氷し新しい氷脈を生じる。
- (2) 日中の温度上昇に伴い氷板は膨張する。その結果、新しく作られた氷脈に妨げられ氷板中には側圧（圧縮力）が発生し、氷板に鞍状隆起（Ice-rampart），すなわち「御神渡り」が発現する。

これは平たく言うと「氷は冷やされれば収縮し、暖められると膨張する」とい物理法則を適用した成因論ということができる。この解釈は、その後の吉村（1942）、Omote et al.（1955）、中沢（1968）、杉本・他（1981）、東海林（1995，2005）の論文や解説文でも基本的に踏襲され今日に至り通説となっている。少年・少女向けの科学本の中で「御神渡り」を取り上げた東海林（1995）は、その成因は気温による氷の収縮と膨張であるとする立場をイラストで分かり易く紹介している（図2）。

しかし、気温の氷板に及ぼす影響はこれほど単純ではない。温度と膨張係数に比例する項のほかには氷板中の温度勾配の積分項の寄与もあり、これらの寄与の大小によって氷板中の応力状態は変化する（詳しくはGoto et al. 1980を参照）。従って気温の変化から氷板に作用する応力を単純にイメージするのは危険である。

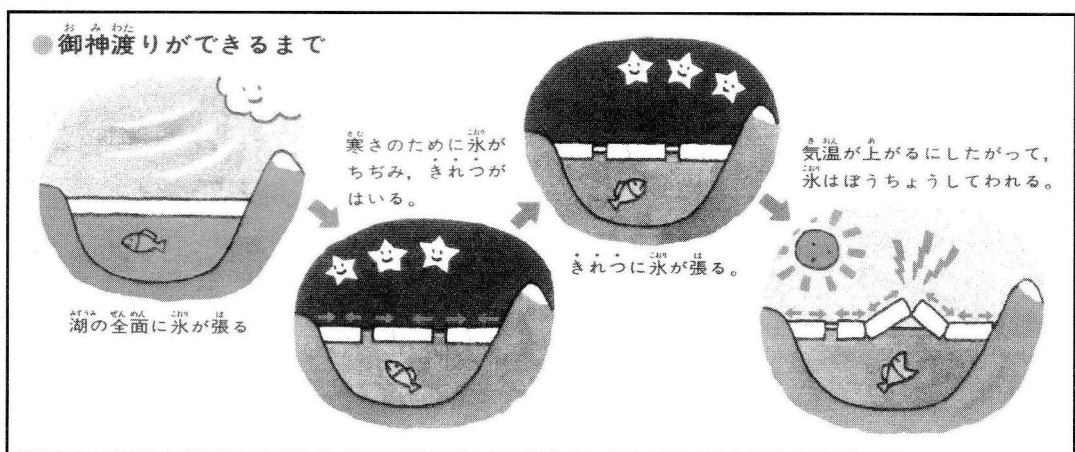


図2 通説となっている成因論に基づき「御神渡り」が発生するまでの過程を描いたイラスト（東海林，1995）。夜間と昼間の気温変化による氷板の収縮と膨張が「御神渡り」の主因であることを示している。

1950～60年代に地震発生の場合を熱力学的に考察した Matuzawa (1964) は著書「Study of Earthquakes」の中 (P. 201) で水の膨張によるとする成因論に疑問を投げかけている。少し長くなるがその部分を引用しよう。「If magma is intruded in cracks in the crust, increase of volume, especially in the horizontal direction, of the crustal part and exertion of lateral pressure are probably expected. We can see good miniature models of similar phenomena in faulting of lake ice such in Balaton lake in Hungary, Dalai-nor near Manchuri, Suwa lake in Japan, etc. Here the ice-sheet plays the role of the crust and water that of the magma. The overthrust of ice-sheet in Dalai-nor often attains some 15 m or more. Gradual development of such a large thrust cannot be explained by the thermal expansion only.」

中沢 (1968) によれば古文書に記載された「御神渡り」の発現時間帯は極寒の日の夜間から明け方である。田中 (1917) も「半宵湖畔住民の夢を破る事あり」と述べ夜中に大音響を伴って発生する突発現象であることを示唆している。日出の後の日中に発生するものと想定した成因論は、夜間の発生時間に関する事項を十分に説明できていない。

### 観測データの示す意外な事実

厳冬の氷上で起きている現象を「観察」することはさほど困難はないが、氷厚が数 10 cm 内外の薄氷の内部で起きている現象を連続して「観測」することは想像以上に困難が付きまとう。我々が諏訪湖でフィールドワークを実施した 1975～1978 年の観測データは今日の計測技術に照らせば不十分な所が少なくない。しかし、現存する観測データが多くはない現状のもとではやや古いデータを再吟味することも止むを得ない。当時の観測データに基づいて 3 つの事例を取り上げ通説となっている成因論を再検討する出発点としたい。

### (1) 夜間に氷板は収縮しているか

前述の成因論の中に「夜間の厳しい冷却に伴う氷板の収縮」という表現がある。夜間にマイナス 10℃ 以下に気温が低下することはまれではない。水の体熱膨張率 ( $0.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ) を考慮すれば氷板中の温度が 10℃ 低下すれば湖面全体で 1 m ほどの収縮が起きるはずである。そしてこの収縮に伴って氷板に割れ目ができることが通説では期待される。しかし観測データはこれらの期待に反した挙動を示す。図 3 に示すように氷板上に設置したベンチマークの変位測定の結果からは夜間の冷却時に場所による差異はあるが湖の中心から陸側に向けて数 cm から 40 cm ほどの膨張傾向を読み取ることが出来る (Hamaguchi et al., 1977)。これは気温変化から予測される傾向とは全く逆センスの動きである。

一方、日中の気温上昇に伴う基準点の変位は湖面中心から湖岸に向けた 50 cm 程の膨張を示し成因論の予測内容と調和したものである。日中の午後の気温低下時には収縮過程が認められるのも予測と違わない。

夜間に氷板全体が収縮しているとの通説に述べられている事柄は日中の気温変化に伴う変動を単純に外挿した「観察」結果ではないだろうか。「観測」データはこの結果を支持しない。

### (2) 夜間に氷板は冷却されているか

日中の午後か翌日の最低気温の出現する明け方までの気温低下に伴って氷板は表面から徐々に冷却される。しかし現実の氷板では熱伝導から予想される応答をしない場所があることが「観測」で明らかになった。氷厚が 27 cm に達した 1977 年 2 月 7～9 日の気温、氷温、水温の観測データを図 4 に示す (浜口・後藤, 1981)。氷板上面から 6, 11 cm の深さ (B, C 点) の氷温は気温変化 (D 点) に忠実に応答し冷却されている。しかし、上面から 22 cm の下面に近い C 点の氷温は冷却されずゆっくりとプラス側に僅かに加熱されている。これは気温変化から予測されることは逆位相の変化であり、熱伝導から予想されることと異なった事象が氷板の下部付近で起きていることを示唆する。また、C 点の日中の変化は気温上昇時にもかかわら

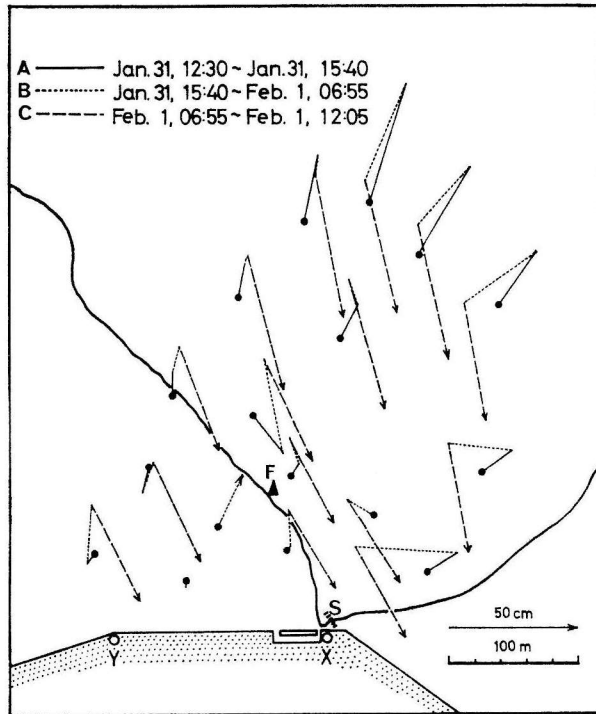


図 3 諏訪湖の南東側に出現した「御神渡り」の近傍の  $350 \times 300 \text{ m}^2$  の氷板上に設置した 17 個のベンチマークの変位ベクトル。黒点がベクトルの開始点。(A) の実線は「午後」の時間帯、(B) の点線は夕方から翌日の明け方にかけての夜間の時間帯、(C) の破線は日の出から正午の朝方の時間帯の変位を示す。X と Y 点は陸上の測量基準点、S 点は地震計設置点、F 点は食い違い量の測量点を示す。夜間のベクトルは場所により大きさと方向はばらついているが全体としては湖の中心から陸に向かって変位している。諏訪湖の中心は地図の左上角の方角にある。

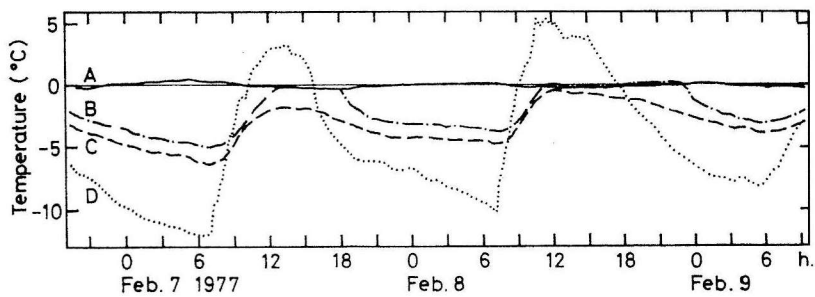


図 4. 気温と氷厚 27 cm の氷板中の温度変化 (1977 年 2 月 7~9 日)。A, B, C は氷板上面からそれぞれ 22 cm, 11 cm, 6 cm の深さの氷温。D は上面から 3 cm 上方の気温。下面に近い深さ 22 cm (A) の日変化は氷板が冷却時に昇温, 加熱時に降温を示し, いずれも気温変化と負の相関を持つ。上面に近い C 点の変化熱伝導による応答しているが, 下面近傍の A 点の応答は熱伝導以外のメカニズムに支配されている。

ずゆっくりした冷却傾向を示している。これも予想と異なる動きである。

氷板の下層部の温度を上昇させる要因は 2 つ考

えられる。1 つは、下面境界の水と接する場所では水から氷への相転移が起き、それに伴う潜熱は伝導で上方の水を暖める効果がある。もう 1 つ

は、氷板の周囲が湖岸に固定された場合には夜間冷却されると深さにより異なる熱応力場（圧縮と伸張）が氷板中誘引される。温度データをもとに計算すると夜間の冷却時に下面近傍には4~8 bar程の伸張場が出現することが推定される（Goto, et al., 1980）。この張力によって下面近傍に微小な開口割れ目が発生し、そこに微量の湖水が浸入すれば氷板下部の温度場を乱すことが十分期待される。この割れ目の中の水が凍る時に発生する潜熱は割れ目の先端部直上の氷を融解する熱源となる。このようにして夜間に氷板下部では水と熱の流れは上方に進む。これは地質学でストーピング（Stoping）と呼ばれている一種の貫入機構に似た現象が氷板中で起きていることを示唆している。下部近傍の開口割れ目に向けて境界面下方から効率的に水と熱を氷板中に取り込み夜間に氷板を暖めるプロセスは「観察」に欠落している。

### (3) 氷板下層部の横方向への成長

気温の低下に伴う冷却により湖水は表面から水へと相転移する。そして時間の経過とともに徐々に層厚を増しつつ全面結氷にいたる。計算では0℃の水がマイナス10℃の外気に10日間晒されれば33cmの氷板が形成される。この時に何事もなければ氷板の変化はもっぱら深さ方向に限ら

れていると考えるのが常識である。しかし、この常識に反することが実際の氷板の中で起きているデータが得られている（浜口・後藤, 1981）。図5はリッジ型開口割れ目の走行に直交して氷を切り出した断面のスケッチである。図中の丸印は大小の気泡を、小さな縦線は水で満たされた微小クラックを、そして層の境界を横線と縦線で模式的に示す。この図で注目すべき点は2つある。(1)微小クラックを含む層は上面より約10cm下の下部層に限られている点。(2)リッジの中軸谷の下方に見られる割れ目群を中心にして氷板の上面から10cmほどの所までは左右対称なパターンをしているが、それより下部の微小なクラックを多く含む下部2層には対称性が欠け（A-A'）面に沿って下層部分が左側から右方向に張り出している姿が明瞭に認められる。これらはリッジ型割れ目発生後に下層部分の増厚が進行するとともに水平方向にも変位しつつ成長していることを物語っている。

荒川（1954）は「御神渡り」の起こる必要条件として「氷厚が10cm前後となり、その後2~3日目に最低気温がマイナス10℃以下の快晴で冷却の大きい日に、空気に接する上面と水に接する下面の間の温度勾配の大きい時」と述べている。これは氷板中に誘引される熱応力場の出現

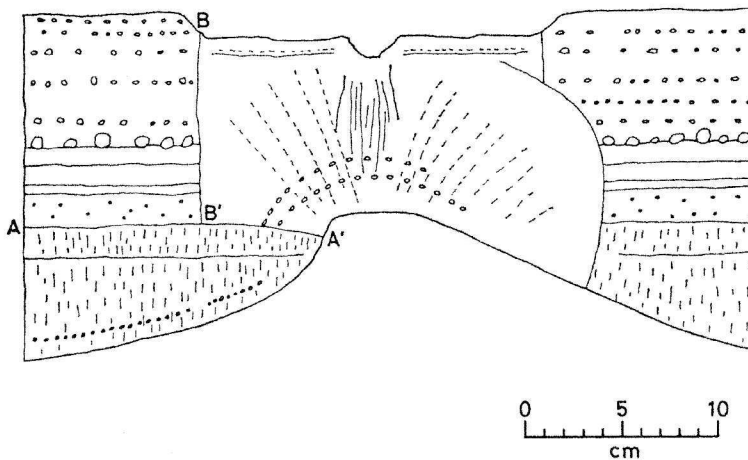


図5 リッジ型割れ目の走行に直交して切り出した氷板の断面図のスケッチ（1975年2月15日）上層部の丸印は気泡、下層の小さな縦線は微小クラック中で凍結した氷、リッジ直下の長い縦線は大きなテンサイル・クラックを示す。下部の微小クラックを多数含む2層はリッジ型割れ目の後に形成されA-A'面に沿って図中左から右へスリップしている。これは下層部分が横方向に成長したものであることを示唆する。



が「御神渡り」発生に不可欠の要素であるとともに、有効な温度勾配を生じるためには臨界氷厚（例えば 10 cm）が存在することを示唆している。

### 観測データから推論される新しい成因論

上記の 3 つのデータは観測した時期や場所は異なる。それらを恰も同期して起きている現象と看做すことはやや飛躍があるかも知れないが、関連付けて解釈すると氷と水の接触する氷板の下面近傍で水-氷の相転移を媒介したダイナミックな変動現象作用が進行している姿が浮かび上がってくる。その過程を簡潔に述べると次のようにまとめられる。

全面結氷し厚さが 10 cm 程度に成長した臨界氷厚の氷板が夜間に表面から冷却されると氷板中の温度勾配が増大し下面近くに伸張場が出現する。それに伴って微小なテンサイル・クラックが下面近傍に形成され、下方から 0°C 近くの水がクラックに浸透して氷板をわずかに暖める。しかし、やがて上方からの冷却効果が優勢となり浸透した水は氷へと相転移を起こす。この時クラックの体積は約 10% 増加する。下面近傍に多数のクラックが存在すれば相転移に伴う体積増は選択的に下層部分を横方向に拡大させ夜間の氷板膨張に寄与する。相転移は P-T 条件を満たせば瞬時に起きる現象であるから放射冷却の厳しい夜間には氷板は急激に膨張し、その側圧は巨視的な破壊を突発的に引き起こす要因となり得る。すなわち「御神渡り」の発生である。

ここで述べた新しい成因論は「水が凍って氷になれば膨張する」との H<sub>2</sub>O の相転移が基本にある。通説となっている成因論は「氷は暖められると膨張する」という熱膨張の物理を根拠にしている。氷板の膨張という過程はどちらも同じであるがその背景の物理過程はまったく異なっている。そしてこの時重要な条件は夜間の冷却時の下面近傍の伸張場の出現である。その大きさは気温の低下に比例し最低気温の出る明け方に最高になる。下面の伸張場の重要性については Weertman (1971) に詳しく論じられている。

新しい成因論では、「小さな破壊は漸次冷却傾向にある午後から夜間に、大きな破壊は夜間の冷却が厳しい深夜に大音響を伴って発生する」との田中 (1917) や中沢 (1968) の観察結果と調和する。また氷の塑性変形による応力緩和は夜間の冷却時に相対的に小さくなることから音響を伴う脆性破壊の発生に好都合である。

日中の気温上昇の効果は氷板を膨張させ、夜間に形成された「御神渡り」のエッジ部分の変形の増幅、すなわち鞍状隆起量や氷板の食い違い量を増大させることに寄与している。図 3 に示した 1976 年 2 月 1 日午前中の実測では食い違い量は 43 cm であった。また、食い違い量の速度は微小氷震の発生頻度と正の相関を示す (Hamaguchi and Goto, 1978)。気温上昇は塑性変形の促進に寄与するが、「御神渡り」のような脆性破壊の真の発生要因にはならない。

### 終わりに

直感的にわかり易く通説となっている気温の上昇に伴う熱膨張説に代わり、いくつかの「観測」事実をもとに「御神渡り」発生は氷板下部の微小割れ目に浸透した水が氷へと相転移しそれに伴う体積増が主な要因であるとの成因論を提案した。氷は透明であるが夜間に氷板下面近傍で起きている相転移は「観察」からは確認ができない現象である。

地震の前兆現象のメカニズムとして「ダイレタンシー・水拡散モデル」(Scholz et al., 1973) が多くの地震学者の間で一時的に囃された時期があった。今回提案した「御神渡り」の新しい成因論はこのダイレタンシーモデルと類似したところがあり、「ダイレタンシー・水拡散・相転移」モデルと呼ぶことが出来るかも知れない。

Matuzawa (1964) はその著書の第 10 章「地震の熱力学」で地震発生の場を定量的に議論している。地震発生の理論には歪みエネルギーの蓄積をどう想定するかによって大きく 2 つの考え方、すなわち、「Magma cratic theory」と「Elastic rebound theory」があるとした上で、前者の立場に

立って議論を展開している。前述の引用文の冒頭に「If magna is intruded in cracks...」という表現が使われているのはこのためである。

地殻底でのマグマ貫入を想定した議論の中で展開されている「周囲をクランプしたプレートを一方から加熱した時の歪み場の問題」や「固体と液体の相変化」等の検討内容は驚くほど「御神渡り」のケースと類似点が多い。「御神渡り」の起きる水-氷の媒質は一成分2相の単純な媒質である。しかし地震の起きる地殻は多成分系の複雑な媒質であり固体-液体の相転移は単純でない。Matuzawa (1953) が「地震の熱力学」の理論を構築する際にはいつも「地震」と「御神渡り」のアナロジーが背景的に存在したのではないかと筆者には思えてならない。

短期間しか存在しない水プレート破壊現象である「御神渡り」は、学問の細分化によりその実体が必ずしも明らかにされないまま今日に至った。その機構は水-氷の相転移というミクロの世界の相互作用とそれに随伴する体積変化が引き起こしたマクロな世界の破壊現象であり地震学という「松澤過程」に他ならない。

## 参考文献

荒川秀俊, 1954, 5世紀に渡る諏訪湖御神渡の研究, 地学雑誌, 63, 193-200.  
Cholnosky, E.V., 1909, Das eides Balatonsees, Resultate D. Wiss. Erforsch Plattensees, 1, IV, 1908.  
藤原咲平, 1920, 諏訪湖結水日調査 (第2報), 気象集誌, 39, 131-134.  
Goto, K., H. Hamaguchi and Y. Wada, 1980, A study on ice faulting and icequake activity in the Lake Suwa, (3) Icequake activity and thermal stress in the plate, Sci. Rep. Tohoku Univ., Geophys., 27, 27-37.  
Hamaguchi, H., Z. Suzuki, J. Koyama and K. Goto, 1977, A study on ice faulting and icequake activity in the Lake Suwa, (1) Preliminary field observations, Sci. Rep. Tohoku Univ., Geophys., 24, 43-54.  
Hamaguchi, H. and K. Goto, 1978, A study on ice faulting and icequake activity in the Lake Suwa, (2) Temporal variation of m-value, Sci. Rep. Tohoku

Univ., Geophys., 25, 25-38.  
浜口博之, 後藤和彦, 1981, プレートの成長に関する氷板とリソスフェアの類似性, 地震, II, 34, 145-147.  
岸上冬彦, 1943, 湖の水に関する測定, 震研彙報, 21, 298-306.  
Matuzawa, T., 1953, Feldtheorie der erdbeben, Bull. Earthq. Res. Inst., 31, 179-201.  
Matuzawa, T., 1964, Study of Earthquakes, Uno Shoten, Tokyo, 213pp.  
中沢初三, 1968, 御神渡り発現考, 測候時報, 35, 322-330.  
Omote, S., Y. Yamazaki, N. Kobayashi, and S. Murauchi, 1955, Ice tremors generated in the floating lake ice (part 1), Bull. Earthq. Res. Inst., 33, 663-679.  
Scholz, C., L.R. Sykes, and Y.P. Aggarwal, 1973, Earthquake prediction: a physical basis, Science, 181, 803-810.  
杉本芳博, 藤井智史, 森谷武男, 笹谷 努, 1981, 屈斜路湖における鞍状隆起現象と氷震活動の観測, 北海道大学地球物理学研究報告, 40, 79-91.  
東海林明雄, 1980, 日本最大の御神渡り, サイエンス, 10, 46-48.  
東海林明雄, 1995, 「氷の世界」, あかね書房, 54pp.  
東海林明雄, 2005, 御神渡り, 「雪と氷の事典」, 朝倉書店, 652-653.  
田中阿歌麿, 1917, 「湖沼学上より見たる諏訪湖の研究」(上), 岩波書店, 936pp.  
吉村信吉, 1942, 「湖沼学」(第3版), 三省堂, 495pp.  
Weertman, J., 1971, Theory of water-filled crevasses in glaciers applied to vertical magma transport beneath oceanic ridges, J. Geophys. Res., 76, 1171-1183.

浜口博之

[はまぐち ひろゆき]

現職 東北大学名誉教授  
理学博士

略歴 東北大学理学部天文及び地球物理学科第2卒業, 東北大学理学部助手・助教授・教授を経て現職

研究分野 火山物理学, 地震学

著書 「火山の事典」(分担, 朝倉書店), 「自然災害科学事典」(分担, 築地書館), Geophysical Monograph, volume 72 (分担, Amer. Geophys. Union)



# 地震予知連絡会の歴史小論

植田 勲

## 1. はじめに

地震予知連絡会は、2008年度をもって設立40周年を迎えた。この40年の間に、それぞれの時代を代表する地震学をはじめとする多様な学問の専門家が委員として参加し、180回以上に及ぶ全体会議と、特定地域部会等数々の部会が開催され、膨大な時間をかけて地震現象の理解と予知の実現を目指して、様々な検討と熱い議論が行われてきた。これらの議論の結果は、地震に関する専門的な立場からの情報として発信され、社会に大きく貢献してきた。毎回の議論の結果は、地震予知連絡会会報としてまとめられ、公開されている (<http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/index.html>)。他方、地震予知連絡会は10年ごとに「地震予知連絡会のあゆみ」を刊行し、その歴史を記録してきた。40年を迎えた現在、「地震予知連絡会40年のあゆみ」の作成が行われている。40年のあゆみは、昨年8月ごろから第20期(2007~2008年度)の委員を中心として関係者が執筆し、現在は最終稿の編集を行っている。刊行は2009年8月ごろとなる予定で、地震予知連絡会のホームページにも掲載されることとなっている。

筆者は、この3月まで地震予知連絡会の事務局員の一人として地震予知連絡会の会議に参加し、「40年のあゆみ」の編集作業にも携わってきた。この間、編集作業を行う以外にも地震予知連絡会の歴史についても調べる機会を持ったので、ここで改めて地震予知連絡会の歴史を簡単に振り返ってみたい。なお、本稿に記す以下の内容は、筆者の私見であることをお断りしておく。

## 2. ブループリントから地震予知連絡会発足まで

地震予知を目的とした観測の種類や方法を具体的に検討し、実際的な計画を立てることにより、その第一歩を踏み出すことを目的として、昭和37年1月に地震学会の有志により「地震予知 現状とその推進計画」(ブループリント)が作成された。ブループリントの完成により、地震予知にむけての第一歩が踏み出された。次にこれを実施の段階に移行するため、文部省測地学審議会に地震予知部会が設置され、計画が具体化された。そして、昭和39年7月18日に「地震予知研究計画の実施について」(第1次計画)が関係大臣に建議された(図1)。

その後、昭和40年8月頃から昭和42年9月頃にかけて発生した松代群発地震や昭和43年5月16日に発生した十勝沖地震を契機に地震予知への社会的要請が高まり、10年間を目処とした「地震予知研究計画の実施について」を追加改訂する形で、昭和43年7月16日に「地震予知の推進に関する計画の実施について」(第2次計画)が建議された。この計画は、地震予知に役立てる基礎データの収集という第1次計画の立場を変えて、予知の実用化を志向したものとなっており、前述の松代群発地震の際に関係機関や大学が集まり検討会を設置し、情報の一元化を図った経験をもとに、第6条(計画の総合的な推進体制)において以下のように述べている。「以上の諸計画の円滑かつ効率的な実施をはかり、総合的かつすみやかな成果を期するためには、各分担機関の密接な協力および各種観測資料の能率的な解析と総合判断が不可欠である。このため、とりあえず次の措置により、計画の総合的推進体制を確立する必要がある。(1)各分担機関の情報交換を常時行うとともに

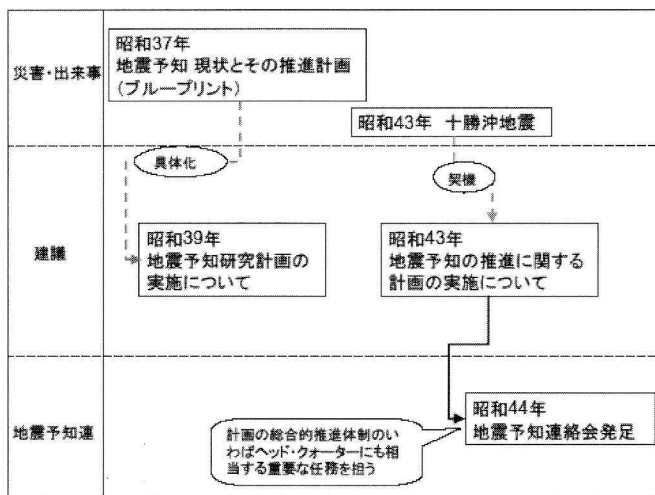


図 1 地震予知連絡会発足までの流れ

に、それらの情報の総合判断を行うため、地震予知に関する連絡会を設ける。(以下省略)。この考え方に基づき、昭和44年4月地震予知連絡会が発足した。このようにして設置された地震予知連絡会は、計画の総合的推進体制のいわばヘッド・クォーターにも相当する重要な任務を担うことになった。

### 3. 地域指定

第2次計画は、限りのある観測機器や人的資源を有効に活用するために、地殻変動等の異常な現象の起こった地域や科学的知見から地域を指定し、集中的に観測研究を行うという、いわゆる「3段階エスカレート方式」の地震予知戦略が採用された。この戦略に基づき、地震予知連絡会は、4つの基準(①歴史時代に大地震が起こった記録のある地域、②活構造地域、③地震多発地域、④東京など重要地域)を設定した上で、測地測量データを参考に、昭和45年2月20日に観測強化地域と特定観測地域を指定した(図2左図)。

その後、昭和49年2月28日には、測地測量データから駿河湾内で大きな歪みエネルギーが蓄積されていることが明らかになったことから、東海地域は特定観測地域から観測強化地域に格上げされた。

#### ※ 3段階エスカレート方式

- 第0段 全国にわたる基本的測地、驗潮および大、中、小地震観測
- 第1段 4つの基準→特定観測地域(平時から研究観測を強化)
- 第2段 (第0段、第1段の観測により)異常な現象が発見された地域  
→観測強化地域((地震予知連絡会の協議に基づき)移動観測班等による観測強化)
- 第3段 (第2段の観測資料を地震予知連絡会において検討の結果)異常な現象が地震に関連するものと認められた地域→観測集中地域(移動観測班等を必要数集中と高密度での従来の研究観測実施)  
→地震予知の実用化に努める

また、昭和53年8月21日には、地域の選定方針を明文化するとともに、地域指定の見直しが行われた(図2右図)。

### 4. 東海地震への対応(図3)

昭和40年代半ばになると、測地測量から得られた日本全国の水平変動ベクトルから、地震エネルギーの未解放地区として東海地方が着目されるようになった。さらに、昭和51年には、駿河湾で1854年安政東海地震以来の巨大地震が差し迫っ

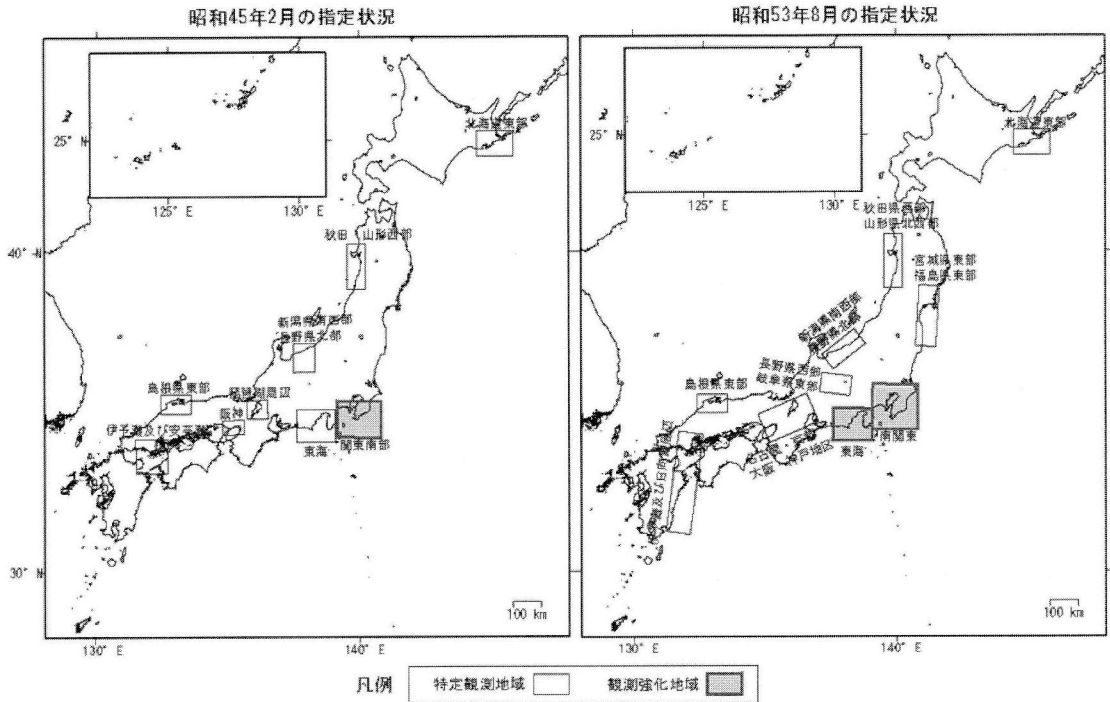


図 2 地震予知連絡会指定地域の変遷

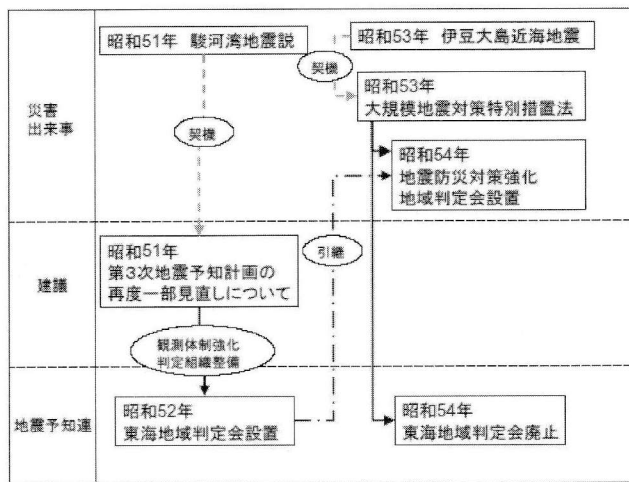


図 3 東海地震への対応に関する流れ

ているという「駿河湾地震説」が発表された。  
 これに対して地震予知連絡会は、「現在までの観測結果によれば、発生時期を推測できる前兆現象と思われるものは見いだされていない」との総合判断を行う一方で、東海地域においてはさらに観測を強化する必要があるとした。

このような背景もあって地震予知への社会的要望は次第に大きくなり、昭和51年12月17日に第3次地震予知計画が再度見直され、東海地域の観測強化、監視体制の充実、判定組織の整備等について建議された。

この建議に基づき、地震予知推進本部は「東海

地域の地震予知体制の整備について」を決定し、地震予知連絡会の内部組織として東海地域判定会が設置され、その庶務は気象庁の担当となった。各機関による観測データは、気象庁にテレメータされ、データに異常が発見された場合は、これが大地震に結びつくものかどうかを判断する体制が整った。

観測体制の強化や東海地域判定会の設置により、東海地域での大規模地震において予知情報が出される可能性がでてきた。このような予知情報を防災対応に結びつけるための措置が求められるようになり、また、昭和53年1月14日に伊豆大島近海地震が発生し、この地震で多くの被害が出たことが契機になって、昭和53年6月15日大規模地震対策特別措置法が制定された。

大規模地震対策特別措置法に基づき、東海地域は地震防災対策強化地域に指定された。また、判定体制も、気象庁に地震防災対策強化地域判定会が設置され再編された。これに伴い、地震予知連絡会東海地域判定会は廃止された。

### 5. 地震防災対策特別措置法制定と地震予知連絡会の役割 (図4)

平成7年1月17日兵庫県南部地震が発生し、

神戸市や淡路島北部を中心とする地域に壊滅的な被害をもたらした。この地震は、これまでの地震予知の体制を大きく変えるきっかけとなった。

測地学審議会は、平成7年4月20日に「第7次地震予知計画の見直しについて」を建議し、これまで地震予知観測研究の蓄積によって得られた情報の社会への適切な提供や利用の一層の推進、地震発生のパテンシャル評価のための観測研究の強化の必要性を提示した。その後、平成9年の「地震予知計画の実施状況等のレビューについて(報告)」や研究者有志による平成10年の「新地震予知研究計画—21世紀に向けたサイエンスプラン—」に示されている活発な議論がなされた。そして、平成10年8月5日には「地震予知のための新たな観測研究計画の推進について」を建議し、それまでの地震予知計画の方針が大きく変更されることとなった。つまり、それまでは、地震の発生を予知するために、前兆現象を捉えることに重きが置かれてきたが、「地震も含めて地震にいたる過程そのものを予測することが地震予知である。」と考えられるようになった。

また、この地震を契機に、地震防災施設および設備の整備を図るとともに、地震に関する調査研究の推進のための体制整備を図ることを目的として、平成7年6月16日に地震防災対策特別措置

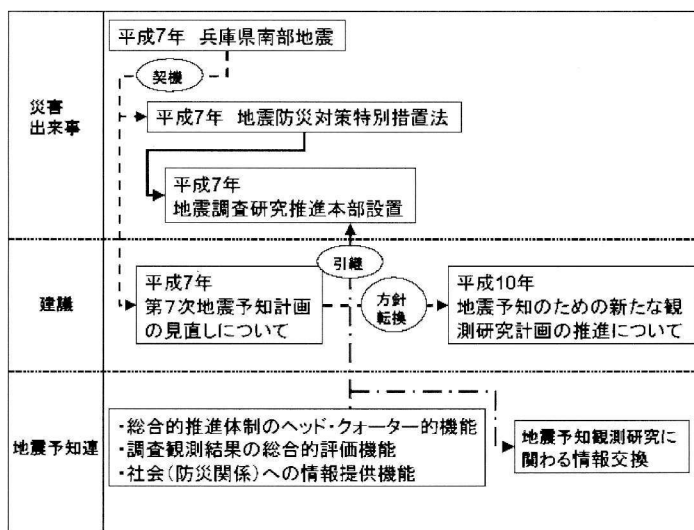


図4 兵庫県南部地震後の流れ

法が制定された。この法律に基づき、政府の特別の機関として地震調査研究推進本部（以下「地震本部」という。）が設置された。地震本部はその役割として、1) 総合的かつ基本的な施策の立案、2) 関係行政機関の予算等の調整、3) 総合的な調査観測計画の策定、4) 関係行政機関、大学等の調査観測結果等の収集、整理、分析および総合的な評価、5) 上記の評価に基づく広報を行うこととなった。4) の役割については、その下部組織である地震調査委員会が担うこととなった。

地震予知連絡会は、発足以来それまで一貫して地震予知計画の総合的推進体制のいわばヘッド・クォーター的な役割や調査観測結果の総合評価を行ってきた。兵庫県南部地震を契機とした「第7次地震予知計画の見直しについて」においても、地震予知連絡会は、観測データ流通の高度化や日常的な情報交換の推進、調査観測結果の総合的評

価機能の強化、社会（防災関係）への情報提供機能の強化を図るべきであるとされた。しかし、その後制定された地震防災対策特別措置法により新たに設置された地震本部において地震に関する評価が行われることとなり、地震予知連絡会の機能が一部が引き継がれることとなった。

## 6. 地域指定の解消と「重点検討課題」の導入

3. で述べたとおり、限られた資源を最大限に活用するために地域を指定し、集中的に観測研究を行うという地震予知戦略がとられてきたが、平成15年7月24日に建議された「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）の推進について」において「これまでの特定観測地域等の在り方を抜本的に見直す必要がある」との指摘がなされた。その後、平成17年の地震本部による「全国を

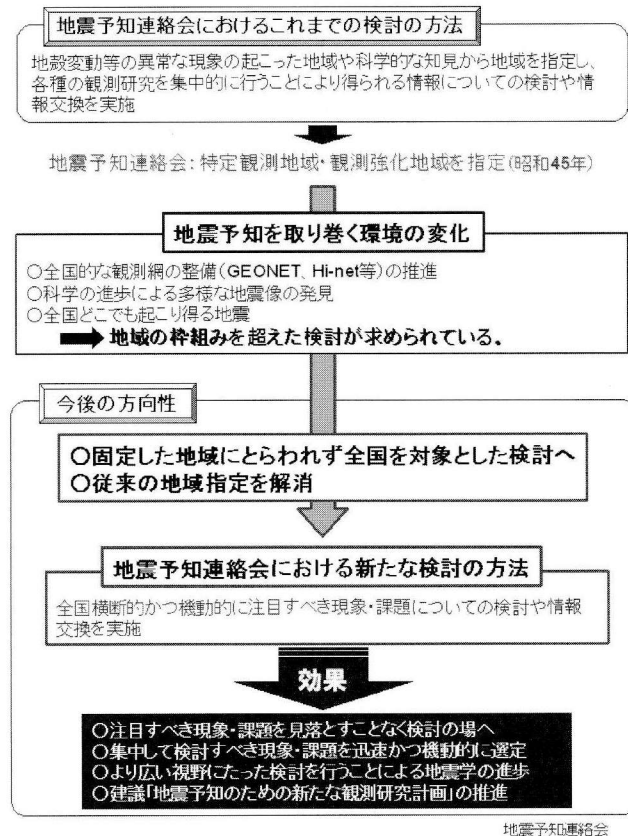


図 5 地震予知連絡会における今後の検討

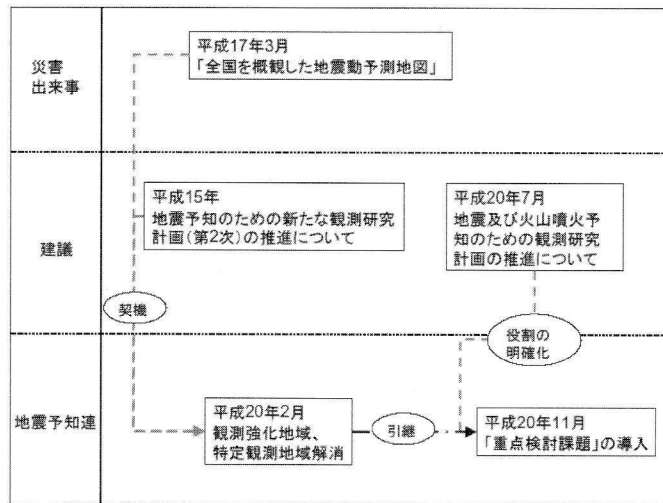


図 6 会議運営方法の変更に関する流れ

概観した地震動予測地図」の作成を契機として、地震予知連絡会は、平成19年度に地震予知連絡会の地域指定を抜本的に見直すための検討を行った。その結果、全国的な観測網の整備、新たな地震像の発見等の背景から従来の地域指定を解消し、全国横断的かつ機動的に注目すべき現象・課題についての検討や情報交換を実施することとなった(図5, 図6)。

さらに、平成20年11月17日には、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画(建議)」（平成20年7月17日）に示された地震予知連絡会の役割、「地震・火山現象予知のための観測研究の推進を図るために、地震活動・地殻変動等に関するモニタリング結果を中心とした情報交換を行い、モニタリング手法の高度化を検討する」を達成するため、地震予知研究にとって興味深い現象や問題等を「重点検討課題」として選定し、これについて集中的に検討する会議運営方式に移行した(図6)。

## 7. おわりに

これまでの地震予知連絡会を振り返ってみると、建議に基づいた自由な発想で新たな仕組みや

体制を生み出すことで地震予知に貢献してきたといえる。また、これらはその後の法令に基づく新たな機関へと引き継がれていき、それぞれ発展していったことも忘れてはならない。

今後は、「重点検討課題」を中心とした新しい会議運営方式で充実した内容の活発な討議を行うことにより、地震コミュニティにおける共通理解を深めること、地震予知の実現に向けてのさらなる貢献が期待される。

最後に、筆者にとって、地震予知連絡会の事務局の一員として会議の議論や40年のあゆみの編集作業に携わることで、地震観測および予知研究の最前線の状況に触れ、またわが国の地震予知の歴史について学ぶことができたことは、非常に貴重な体験であった。現在では事務局として直接関わることはないが、事務局を担当する機関の一員として今後も地震予知連絡会の発展に少しでも貢献していければと考えている。

## 参考文献

- 地震予知連絡会(1979):地震予知連絡会10年のあゆみ、
- 地震予知連絡会(1990):地震予知連絡会20年のあゆみ、
- 地震予知連絡会(2000):地震予知連絡会30年のあゆみ、



# ■ 地震本部トピックス ■ 地震調査研究推進本部事務局 (文部科学省研究開発局地震・防災研究課)

## 新たな地震調査研究の推進について —地震に関する観測，測量，調査及び研究の推進についての 総合的かつ基本的な施策— (概要)

—4月21日開催の中央防災会議の議を経て地震調査研究推進本部決定—

### はじめに

平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災を契機に，地震に関する調査研究を一元的に推進する地震本部が設立されました。平成11年4月には「地震調査研究の推進について—地震に関する観測，測量，調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策—(以下，「総合基本施策」)」が策定され，その下で，我が国の地震調査研究は一定の成果を上げてきました。

一方，それから10年程度が経過し，地震調査研究を取り巻く状況は変化しつつあります。例えば，東海・東南海・南海地震や首都直下地震等の甚大な被害を生じさせる地震が今後30年程度の間に高い確率で発生すると予想されるようになりました。こうした地震災害から国民の生命・財産を守り，豊かで安全・安心な社会を実現するという国の基本的な責務を果たすため，この10年間の環境の変化や地震調査研究の進展を踏まえつつ，将来を展望した新たな地震調査研究の方針を示す「新たな地震調査研究の推進について—地震に関する観測，測量，調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策—(以下，「新総合基本施策」)」を地震本部において策定することとしました。本施策は，今後の地震調査研究の基本となるとともに，地震本部の活動等の指針となるものであります。

### 第1章 我が国の地震調査研究をめぐる諸情勢

#### 1. これまでの主な成果

平成11年4月に策定した総合基本施策におい

て，当面推進すべき地震調査研究等として示した課題は，この10年間，国，関係研究機関，国立大学法人等が連携・協力した体制の中で，いずれも一定の成果が上げられたと言えます。

#### (基盤観測網の整備)

高感度地震観測網やGPS観測網等，世界的にも類を見ない全国稠密かつ均質な基盤観測網が整備されるとともに，その観測データの幅広い流通・公開が実現しました。

#### (基礎研究の推進による知見の獲得)

科学技術・学術審議会の建議等の下，基盤観測網等で得られる観測データを基に，低周波微動やスロースリップ現象の発見，アスペリティモデルの構築等，地震発生メカニズムの解明に繋がる新たな知見の獲得が進みました。

#### (全国を概観した地震動予測地図の作成)

全国110の主要活断層帯及び主要な海溝型地震を対象とした調査観測・研究をもとに，地震の発生場所，規模，将来的な発生確率についての評価を行い，順次公表しています。さらに，平成17年3月に長期評価や強震動評価等の結果を統合した「全国を概観した地震動予測地図」を作成・公表するとともに，最新の成果に基づいて毎年更新を行っています。

#### (緊急地震速報の開始)

地震発生直後に震源に近い観測点で観測された地震波を解析して，震源や地震規模を即時推定する技術が開発され，強い揺れが発生する直前にその予測結果を知らせる緊急地震速報について，気象庁が平成19年10月より一般への提

供を開始しています。

## 2. 地震調査研究を取り巻く環境の変化

総合基本施策の策定から約10年間の経過し、我が国の地震調査研究を取り巻く環境は変化してきました。例えば、この10年間でも大きな被害を伴った地震が幾つか発生し、長周期地震動による構造物等への影響や、ひずみ集中帯や海底活断層で発生する地震の存在が強く国民に認知されるようになりました。また、インドネシアのスマトラ島沖で発生した地震・津波災害や中国四川省で発生した地震災害によって、地震多発国である我が国においても甚大な被害が発生する危険性があることを改めて認識させられました。

## 3. 今後に向けた課題

これまでに地震本部が実施してきた長期評価や現状評価は、例えば、東南海地震のみが発生した後に南海地震がどのように発生するかというような、地震の詳細な切迫度についての情報を提供できる水準に至っていません。我が国の将来を見通したとき、国難となり得る東海・東南海・南海地震やそれらと前後して発生する可能性の高い地震を対象とした調査観測研究を強力に推進することは、最も重要な課題であります。

また、活断層のごく近傍では、強震動のほかに断層のずれによる被害が生じることが考えられるため、活断層の位置形状の把握が重要ですが、現行の評価で用いられている活断層図の精度は必ずしも十分ではありません。

地震による被害を軽減するためには、理学、工学、社会科学分野の連携の下、具体的な調査観測研究、防災・減災対策に向けた取組を推進する必要があります。

## 第2章 基本理念と「新たな地震調査研究の推進について」の位置づけ

### 1. 地震調査研究の基本理念

地震災害から国民の生命・財産を守り、安全・安心な社会を実現するため、将来発生し得る大規模な地震に関して、過去及び現在の地殻活動等を

把握し、より精度の高い地震発生予測及び地震動・津波予測を実現します。

当面は、今後30年間の発生確率が高いだけでなく、発生した場合に我が国の社会・経済活動に深刻な影響を及ぼす東海・東南海・南海地震や、それらと前後して発生する可能性の高い地震、さらに首都直下地震等に関する調査研究を総合的かつ戦略的に推進します。

こうした調査研究の成果を確実かつ迅速に国民に発信することにより、国難というべき地震災害を生じさせるこれらの地震に対して、被害を最小限に抑えることの出来る社会の構築に積極的に寄与します。

## 2. 「新たな地震調査研究の推進について」の位置づけ

### (1) 本施策の位置づけ

新総合基本施策は、これからの30年間程度の長期を見通しつつ、当面10年間に取り組むべき地震調査研究に関する基本目標を示すとともに、その達成に向けた具体的手法、さらに研究推進のために横断的に取り組むべき重要事項等を提示する計画として位置づけます。

### (2) 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」(建議)との関係

新総合基本施策は、地震防災・減災の実現に資するため、政府として推進すべき地震調査研究の基本を定めた戦略的な計画であり、ここで示す基本目標の達成に向けては、科学技術・学術審議会の建議に基づく基礎的研究の成果を取り入れて推進していくことが必要であります。

## 第3章 今後推進すべき地震調査研究

### 1. 当面10年間に取り組むべき地震調査研究に関する基本目標

#### (1) 海溝型地震を対象とした調査観測研究による地震発生予測及び地震動・津波予測の高精度化

##### ① 総合的な調査観測研究

現在の長期評価は、過去の地震発生履歴のみに

基づいているため、地震の時空間的な連動発生の可能性等を評価できるものではありません。この状況を打破するためには、基盤観測網で得られた観測データ等を用いて、プレート境界の応力やすべり速度等の現状評価を高度化し、それらの成果を数値シミュレーションに取り込むこと等によって、地震発生の予測精度を向上させる必要があります。

このため、基本目標として、

#### ○海溝型地震の連動発生の可能性評価を含めた地震発生予測の精度向上

を設定し、その達成に向けて、「海域における重点的なリアルタイム地震観測網の整備」、「プレート境界の応力等の把握のための地震・地殻変動観測」、「海陸統合の地殻構造調査」、「海溝型地震の物理モデル構築のための調査研究」、「海溝型地震の発生予測手法の開発」等を、科学技術・学術審議会の建議による基礎的観測研究の成果も活用しつつ、総合的に推進します。

### ② 戦略的な防災・減災対策に資する取組

#### (a) 地震動予測技術の高度化

緊急地震速報は、大規模な海溝型地震が発生した場合の震源域近傍における大きな予測誤差が技術的問題として残されており、これを解決する一つの方法として、海域での地震観測網の強化が挙げられます。

また、直接被害に結びつく地震動の諸特性の解明については、全国を概観した地震動予測地図の作成等を通じて、ある程度の成果があったと言えますが、詳細については未解明の課題も多く、長周期地震動に関する調査研究や、軟弱地盤の挙動把握、人口稠密地域における強震動予測の高精度・高解像度化等を実施していく必要があります。

このため、基本目標として、

○震源破壊過程の即時推定技術及び各地域の特性に応じた強震動予測の高精度・高解像度化、並びにそれらの適用による緊急地震速報の高度化を設定し、その達成に向けて、「海域を中心とした地震観測網の強化」、「各地域の特性に応じた地盤

データの収集」、「海溝型地震により発生する強震動に関する調査研究」、「地震動の即時予測技術の高度化」、「海溝型地震を対象とした強震動シミュレーションの高度化」等を総合的に推進します。

なお、緊急地震速報の高度化については、沿岸部や内陸の活断層で発生する地震に対する減災効果も図るべく、現行システムの技術的困難の克服を目指した研究開発等を推進します。

#### (b) 津波予測技術の高度化

津波災害軽減のために必要な津波予測には、地震発生直後に与えられる津波即時予測（津波予報警報）と、地震が発生する前に提供する津波予測があります。前者については、現在は地震発生後数分程度で津波予報警報が気象庁から発表されますが、その精度は必ずしも良いとは言えません。発生直後に震源に近い海域で観測された津波データを即時に利用することが出来れば、津波即時予測の精度は格段に向上します。また、後者については、将来発生するであろう津波を、津波波源モデルの精緻化や浅海域の詳細な地形データの取得により高度化することで、地域住民や地方公共団体の防災・減災対策や実際に津波が発生した場合の避難行動や安全な土地利用を促す効果があります。

このため、基本目標として、

#### ○海域で観測された津波データの即時利用や津波波源モデルの精緻化による津波予測技術の高度化

を設定し、その達成に向けて、「海域における津波観測網の整備」、「海底地形・沿岸地質調査」、「海溝型地震により発生する津波に関する調査研究」、「津波の即時予測技術の高度化」等を総合的に推進します。

#### (2) 活断層等に関連する調査研究による情報の体系的収集・整備及び評価の高度化

活断層等に関連する基礎的情報は未だ十分に整備されておらず、そこで発生する地震については未知な部分も多く、一層の調査研究が必要とされています。

例えば、首都圏では、地下構造が複雑で、多種の震源断層の存在が想定されているにもかかわらず、十分な情報が得られていません。今後はこうした地域に分布する活断層の詳細位置や地下の震源断層の形状を把握し、当該地域で発生し得る地震動の特性を明らかにする必要があります。このため、平成17年8月に策定された「今後の重点的調査観測について」において調査観測の対象とした活断層に加え、現行の評価結果において大規模地震の将来発生確率が高いとされた地域や大規模地震が発生した場合の社会的影響が大きいと予想される地域等を対象とした更なる調査及び評価を実施し、その結果を広く社会に提供することが重要となります。また、この10年間に被害地震が多く発生した沿岸海域及びひずみ集中帯を対象とした調査を実施し、発生し得る地震の規模と地震発生の可能性を評価していく必要があります。さらに、「地震に関する基盤的調査観測計画」において、調査対象に位置付けられていない短い活断層で発生する地震については、主に既存のデータを活用し、必要に応じ調査を行い、評価を高度化する必要があります。地表面に現れていない断層については、活断層が途切れる場所や活褶曲が分布する地域を中心に調査し、評価を実施する必要があります。

このため、基本目標として、

- 発生確率が高いあるいは発生した際に社会的影響が大きい活断層等が分布する地域を対象とした評価の高度化
- 沿岸海域の活断層及びひずみ集中帯を中心とした未調査活断層の評価の高度化
- 短い活断層や地表面に現れていない断層で発生する地震の評価の高度化
- 上記の3つの基本目標の実現による「全国を概観した地震動予測地区」の高度化及び活断層の詳細位置図に各種調査・評価結果を記した「活断層基本図（仮称）」の作成

を設定し、その達成に向けて、「活断層の詳細位置把握のための調査」、「地下の断層面の詳細かつ三次元的な位置形状の調査」、「断層活動履歴に関する調査」、「地震発生の危険度評価の高度化」、「地

域特性を反映した強震動予測評価に関する研究」等を総合的かつ効率的に推進します。

### (3) 防災・減災に向けた工学及び社会科学研究を促進するための橋渡し機能の強化

防災・減災対策を進めていく上で、地震調査研究と地震防災研究は車の両輪であり、その一方が欠けては社会に還元できる成果とは成り得ません。したがって、地震調査研究の成果を地震防災・減災対策に役立てるため、地震ハザード研究をリスク評価に効果的・戦略的に結びつける等、その成果を工学的・社会科学的な研究へ強力に橋渡しすることが必要となります。

これら両者の研究を繋ぐためには、地震調査研究の成果をただ公表するだけでなく、成果を工学・社会科学研究の側が有効に活用できなければなりません。

このため、基本目標として、

- 工学・社会科学研究の観点での地震調査研究の成果情報の整理・提供
- 地震被害軽減に繋げるために必要となるデータの体系的収集・公開及びこれらを活用した工学・社会科学研究の促進

を設定し、その達成に向けて、「工学・社会科学的な研究のニーズの把握」、「工学・社会科学的な研究に活用可能な各種ハザード情報の整理」を推進します。

また、地震調査研究の成果を地震被害の軽減に繋げるために必要となる、「強震観測による地表及び構造物等の地震動波形データの取得」、「実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）等を用いた地震動による構造物等の応答に関する研究」、「構造物等の被害を高精度で推定するための研究」、「リスク情報を提供するシステムの構築」等を地震本部として促進します。

## 2. 横断的に取り組むべき重要事項

### (1) 基盤観測等の維持・整備

これまで整備された基盤観測網は、世界的にも類を見ない稠密かつ高精度な観測ネットワークであり、地震調査研究を推進する上で、最も基盤的

かつ重要な観測設備であります。他方、強震観測網のリアルタイム化や広帯域地震観測網の展開等、残された課題も存在します。このため、

#### ○海域のリアルタイム地震・津波観測網の整備

#### ○陸域の稠密基盤観測網の維持管理・強化

を横断的に取り組むべき重要事項として位置づけます。

これまで、基盤観測網の整備は、国立大学が既に保有していた観測設備を除き、地震本部の方針等の下で国が計画的に実施してきましたが、国立大学の観測設備については法人化に伴う経費節減により、その維持管理が困難になっているので、大学等の観測網が全体として維持できるように努めます。

一方、機動的観測は、今後、運用時における研究機関の連携を一層強化するとともに、特定の研究機関の支援等により、観測機器の維持管理・更新がより合理的に実施できるような体制の整備を推進します。

衛星観測技術や海底地殻変動観測技術は、今後の地震調査研究の進展に大きく貢献すると期待されるため、解析技術の普及と向上のための取組を推進します。

なお、これらの基盤観測等から得られる観測データについては、地震調査研究をより一層発展させるために、円滑なデータの流通・公開を一層促進します。

また、地震活動と火山活動は同じ海洋プレートの沈み込みに起因する自然現象であり、地震現象を総合的に理解するために、火山に関する研究を考慮した効率的な観測点配置とすることにも留意します。

## (2) 人材の育成・確保

地震は社会生活と関連した自然現象であり、地震調査研究を実施する上では、単に地震現象の理学的な理解のみならず、工学、社会科学的な理解も必要となります。このため、「大学における理学・工学・社会科学の複合的教育の実施」、「若手研究者向けの研究資金制度の活用」等の推進により、地震調査研究を軸に他の分野にも造詣のある

新しいタイプの研究者を、関連する学協会等と連携しながら、育成・確保します。

また、地震調査研究に携わる優秀な人材確保のためには、地震調査研究が知的好奇心を刺激する研究であるとともに、その研究成果は地震による被害の軽減に役立つということを、関係機関が協力して確実に社会に広めていく必要があります。このため、「研究者による積極的なアウトリーチ活動」等を促進します。さらに、児童・生徒の理科離れが進んでいることも懸念されていることから、理数教育の充実に努めます。

国民が地震調査研究の成果を十分に理解し、防災・減災対策の具体的な取組に結び付けていくには、研究成果を分かり易く伝えられる人材が必要となります。このため、学校や地域の防災教育の担い手として、「橋渡しの役割を担う専門家の育成」、「大学の学部学生や大学院生、若手研究者等が活躍できるような環境を確保・整備」等を推進します。

## (3) 国民への研究成果の普及発信

地震調査研究の成果を着実に国民や地方公共団体等の防災・減災対策に繋げていくためには、地震調査研究の目標や成果を分かり易く国民に示し、地震に関する正しい理解を得られるようにするとともに、地震の発生に伴う被害の認識や、それに備えるための防災・減災対策の必要性等に関する意識向上に繋げ、具体的な取組に結びつけていくことが重要であります。このため、「国や地方公共団体等の防災関係者、民間企業、NPO等に対する研究成果の説明会やその利活用に関する研修の実施」等により、地震調査研究の成果の情報提供・成果発信の多様化・充実に努めるとともに、「地震調査研究の成果の利活用や社会への普及啓発を効果的に行う手法の研究」、「研究者による成果普及啓発活動やサイエンスコミュニケーション等の多様な活動の強化」等を推進します。

さらに、普及発信と並行して、研究成果の国民や防災機関への浸透度及び防災対策促進への寄与度に関する調査や、国民や地方公共団体等のニーズの把握を行い、今後の地震調査研究計画に反映

させていくことが重要であります。

#### (4) 国際的な発信力の強化

我が国はこれまでに地震災害に関する様々な知見を蓄積しており、世界各国で発生する地震災害に対して、地震発生予測や緊急地震速報等に関する知見や技術を積極的に提供し、地震防災・減災分野での国際貢献に努めていくことにより、国際的な発信力を高めることが極めて重要であります。その一環として地震本部も地震・津波に関する研究成果を、人的交流等を通して広く発信していきます。このため、「二国間及び多国間での新たな枠組みによる地震・津波に関する共同の調査観測・研究」、「地震・津波観測データ等の相互の流通・提供」等を推進します。

#### (5) 予算の確保及び評価の実施

新総合基本施策で設定した基本目標を確実に達成するため、国、関係研究機関、国立大学法人等は、本施策に基づく地震調査研究の推進に必要な予算の確保に向けて、最大限努力します。地震本部は、関係機関の地震調査研究関係予算の事務の調整を適切に行うとともに、新総合基本施策に基づき、地震調査研究の着実な推進が図られるよう、我が国全体の地震調査研究関係予算の確保に

努めます。

## 第4章 地震調査研究推進本部の役割

### 1. 地震調査研究推進本部の役割の強化

地震本部は、関係機関の協力の下、新総合基本施策に掲げられた基本目標等が確実に達成されるよう、「新総合基本施策に基づき各省庁で実施される事業の定期的なフォローアップ及び評価の実施」、「評価と予算との連動を意識した地震調査研究関係予算の事務の調整」等により、その役割を強化することを検討します。

### 2. 地震調査研究推進本部と関係機関との連携・協力体制の強化

地震調査研究で得られた成果については、中央防災会議が策定する防災基本計画や各種地震に関する被害想定、さらには地方公共団体が策定する防災計画に適切に反映されるよう、これまで以上に関係機関等で成果が活用される体制の構築が必要であるため、「中央防災会議や地方公共団体等と密接に連携・協力を図ることができる連携体制の整備」、「地震調査研究の成果を活用する側からの要請を、地震調査研究に積極的に反映し、確実に成果が活用されるようにするための仕組みの構築」等を行います。

# ■地震予知連トピックス■野口伸一■

## 重点検討課題

### 「プレート境界深部すべりに係る諸現象」

第182回予知連絡会が2009/5/15に開催され、大竹前会長の後任に選出された島崎新会長の基、「重点検討課題」が議題に取り上げられた。重点検討課題は、測地学分科会の建議「地震および火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」（平成20年7月17日）に基づいて、連絡会の今後の活動展開の検討の中で、従来の「トピックス」を統合し地震予知研究に興味深い現象や問題等を集中的に討議する場として打ち出された。今回の重点検討課題のコンビナ小原委員（防災科研）から、プレート境界地震の予測精度の向上に貢献することを目的に「プレート境界深部すべりに係る諸現象」のモニタリングの現状、検知能力の向上、諸現象の相互関係、トリガリングに関する検討を行うとの趣旨説明があった。その後、関係機関（防災科研、気象庁、産総研、地理院、名大・東濃地科研）の資料説明と、海洋機構の中田氏と

東大地震研の宮澤氏の深部低周波微動のトリガリングに関する研究が紹介され、予定の時間枠を超えて討議された。

## 1. 関係機関の報告

### 1-1. すべり現象の分類

四国西部～東海地域のプレート沈み込み境界の巨大地震発生域の深部側領域（遷移領域）では種々のすべり現象が進行中で、現象の継続期間、発生間隔、空間的広がり、変動の速さ等から5種類に分類される（表1、図1：防災科研）。深部低周波微動（Tremor）は、1.5～5 Hzの連続的微弱震動として最も多く観測され、震源決定はエンベロープ相関法（ECM）で行われる。深部低周波地震（LFE）は、微動の中で位相が比較的明瞭な孤立的波形について通常の震源決定法で震源が決められ、気象庁一元化カタログに記載されている。空間分布は比較的明瞭であるが、数の上から深部低周波微動より一桁程少ない。超低周波地震（VLF）は、周期約20秒の長周期微弱振動として

表1 すべりに関わる5種類の現象の特徴。[182回：防災科研記者レク資料]

### 「プレート境界深部すべりに係る諸現象」 各現象の特徴

現象	特徴	観測計器
深部低周波微動 (Tremor)	1.5-5Hz に卓越し、長期間継続する微弱振動	速度地震計の他、高感度加速度計（傾斜計）、広帯域地震計でも観測可能
深部低周波地震 (LFE)	微動波形に含まれるやや孤立的な振動	同上
深部超低周波地震 (VLF)	20 秒に卓越する長周期微弱振動	高感度加速度計（傾斜計）、広帯域地震計にて検出可能
短期的スロースリップイベント (S-SSE)	数日間かけて変化する地殻変動（ $\sim 0.1 \mu\text{radian}$ ）	傾斜計、ひずみ計で検出可能（Cascadia では GPS で検出可能）
長期的スロースリップイベント (L-SSE)	数ヶ月～数年間かけて変化する地殻変動	GPS で検出可能（傾斜計、ひずみ計では一部を除いて検出不可）

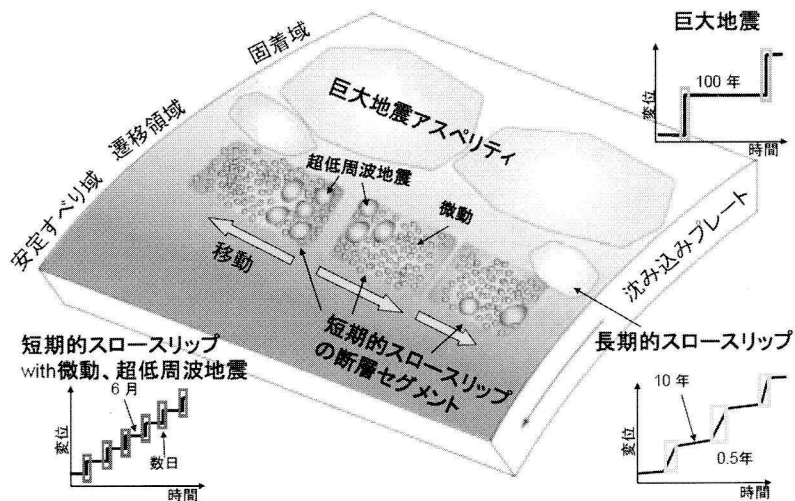


図1 プレート境界における様々なすべり現象のまとめ。[182回：防災科研記者レク資料]

観測され、グリッドMT法の解析から深部低周波微動の活動域に発生する逆断層型スロー地震である。一方、短期的スロースリップ(S-SSE)は、深部低周波微動と同期して数日間～1週間にわたり傾斜計や歪計で観測される地殻変動で、インバージョンによる断層運動パラメータの推定から、移動を伴うプレート境界深部の逆断層型スリップイベントである。なお短期的スロースリップは、房総半島ではGEONETのGPS観測点で検出されるが、西南日本では推定変動量が房総半島より一桁小さく、GEONETデータから変動を識別することは現時点で難しい(地理院)。

これらのプレート境界深部で発生する低周波地震群・短期的スロースリップは、プレート境界を震源として、沈み込みと調和する低角逆断層型のメカニズムを示すことから、時定数の異なるプレート境界深部のすべり現象と考えられる(防災科研)。一方、長期的スロースリップイベント(L-SSE)は、数カ月～数年間に渡って継続する地殻変動で、主にGEONETのGPS連続観測データで検出される。発生域は上記低周波地震群・短期的スロースリップより浅部に隣接している(図1)。最近では2000年後半～2005年に東海地方の浜名湖を中心とした顕著な長期的スローイベント、2003年後半から数カ月間継続した豊後水道の

長期的スローイベントが発生した。

## 1-2. 空間分布

深部低周波微動と低周波地震は、全体にプレート形状走向方向に帯状分布するが、セグメント毎にクラスター域への集中とその間のギャップ構造がみられる(図2：気象庁)。エンベロップ相関法と振幅の距離減衰情報を取り入れたハイブリッド法で震源決定した深部低周波微動は、四国西部～豊後水道や三重県～愛知県にかけて、前弧側と背弧側に2条に幅広く分布する特徴が報告され注目された(防災科研)。この幅広い分布域で深部超低周波地震(VLF)と短期的スロースリップイベント(S-SSE)が集中的に数多く発生している。

## 1-3. 発生間隔, 移動性, 連動性

一連の顕著な深部低周波微動と低周波地震の活動(エピソード)には、地域毎に固有の周期性がみられる。その発生間隔が長期的スロースリップイベントや顕著な地震によって揺らいだり変化することが報告された。四国西部では、豊後水道の2002～2003年の長期的スロースリップイベントに起因してこの間の発生間隔に揺らぎがみられ(防災科研)、紀伊半島南部では、2004年9月紀伊半島南東沖地震の影響で2004年半ば～2005年半ば低周波地震活動が低下したと推定される(気象庁)。



各地域の深部低周波地震の震央分布図  
(1999年9月以降、Mすべて、深さ100km以浅)

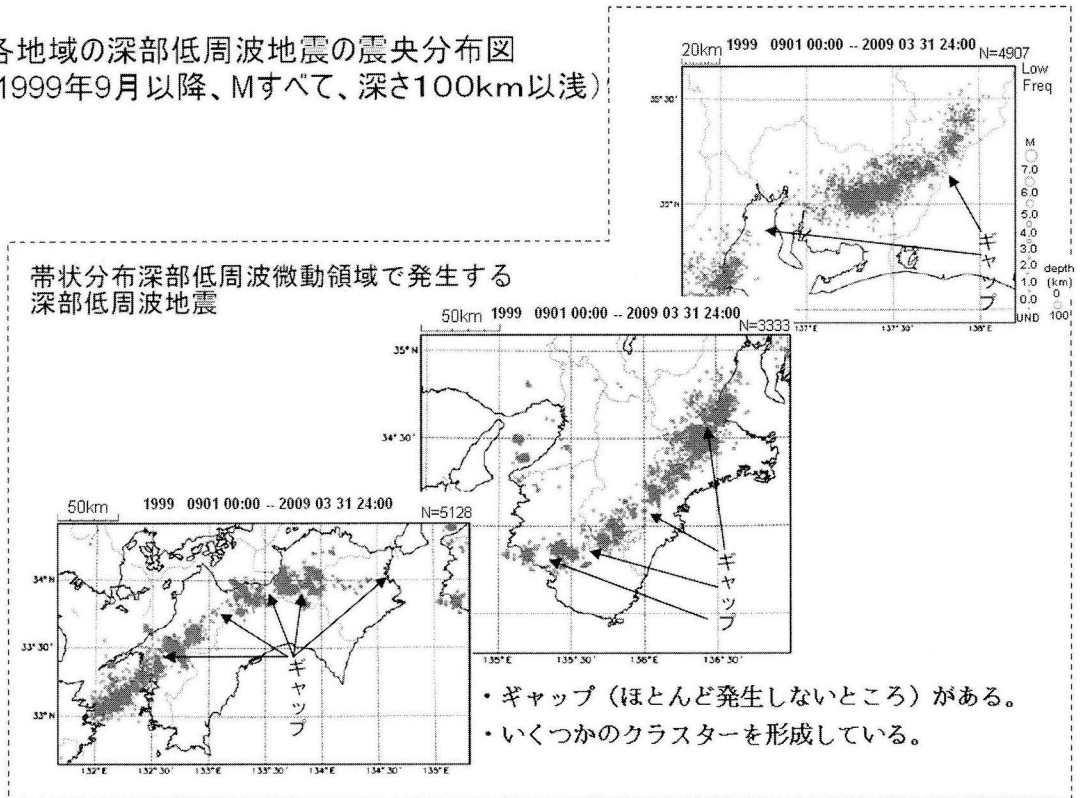


図 2 深部低周波地震 (LFE) の震央分布. [182 回: 気象庁資料]

これらのエピソードは、各セグメント内で時間的にある方向に移動性を持つこと、深部低周波微動は連続的に移動し、移動速度は平均的に1日約10kmであるが、深部低周波地震はその中の特定場所に位置すること、微動の移動に伴って深部超低周波地震や短周期スロースリップが発生することが報告された(防災科研, 気象庁)。さらに、微動分布のギャップに隣接する地域からバイラテラルに移動する傾向、セグメントを超えて移動が継続する連動型の例(2006年1月の紀伊半島→伊勢湾→東海地域)等、移動パターンの地域の特徴がまとめられた(図3: 防災科研)。これら深部低周波微動の移動のフロントはシャープで、短期スロースリップによる破壊のすべりフロントの伝播を反映したものと考えられる(防災科研)。

1-4. 総合観測およびポアホール観測点におけるモニタリング

産総研から、2006年度から観測点整備を開始し

た地下水等総合観測による成果が報告された。深さ別の3つの井戸の地震計の鉛直アレイによるセンサンス解析で、ノイズを識別して観測点付近下の深部低周波微動の信号が検知される。また2009年2月の愛知県での地殻歪み変化の検出と短期的スロースリップのモデル推定、2009年3月の紀伊半島南部のすべり残り領域での短期的スロースリップの検出例等、総合観測の重要性が紹介された。

名大・東濃地科研は、和歌山県新宮市の深度500mのポアホール観測点で、深部低周波微動の活動を伴う歪み変化と微動の活動を伴わない歪み変化の2種類を検出、前者は微動のクラスター域に対応する領域の短期的スロースリップイベント、後者はそれに隣接する微動空白域に発生した短期的スロースリップイベントと推定された。また微動活動の静穏期に、歪み変化が最も顕著なスロースリップイベントが観測された。これはスロースリップが

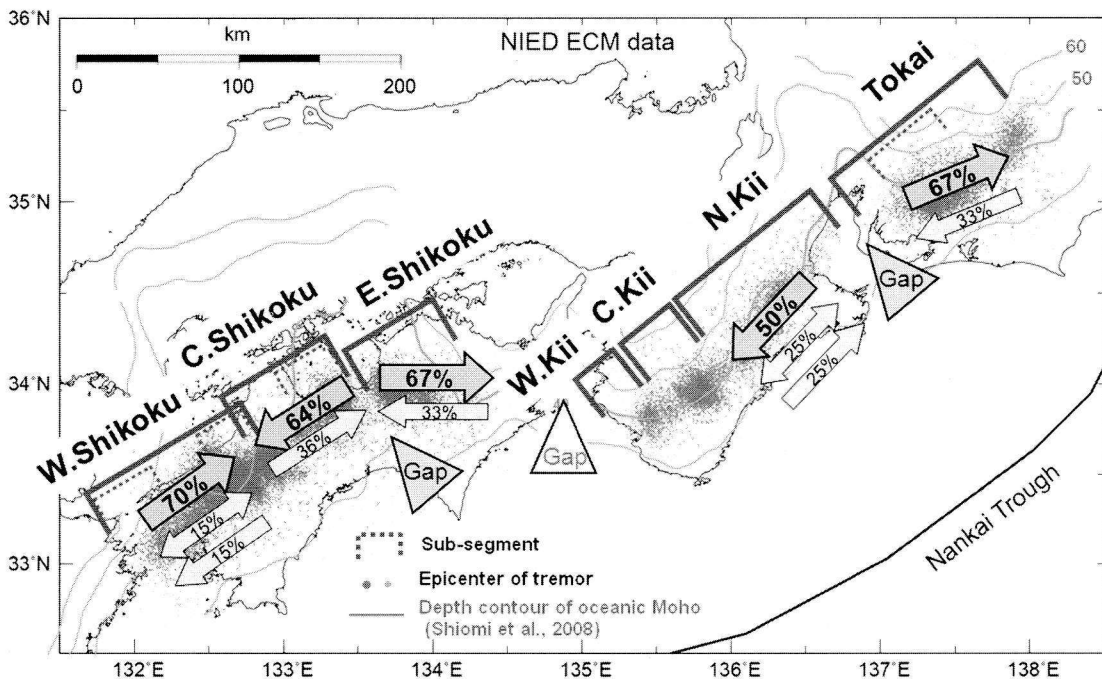


図3 深部低周波微動の移動方向パターンまとめ. [182回: 防災科研資料]

主体となって連続的に伝播する過程で微動が特定の場所で誘発されることを示すものとしている。

### 1-5. 微動の検出数と地震モーメントおよびすべり量

低周波微動がスロースリップによって誘発されるとの仮定の基に、両者が共通して出現するエピソードを調査すると、微動検出数の対数と短期的スロースリップイベントのモーメントの対数は比例関係にある(防災科研)。すべての微動エピソードが短期的スロースリップイベントによるとして、微動エピソードの検出数から地震モーメントに換算し、さらに微動発生域の面積と換算モーメントからすべり量に換算した。これにより換算すべり量の空間分布が得られ、地域毎のすべり量の時間変化はプレート相対速度にほぼ等しいことが示された(防災科研)。

東海地域では、最近約9年間の低周波地震回数積算と、短期的スロースリップのモーメント積算、および長期的スロースリップの推定モーメントが比較検討された(気象庁)。短期的スロースリップによるモーメント解放は長期的スロース

リップ停止後に減少傾向を示すが、長野県南部では2003年以降短期的スロースリップによるモーメント解放が増加傾向にある。

## 2. 発生メカニズムに関する研究の現状の紹介

### 2-1. 地球潮汐トリガリング

中田氏(海洋開発機構)は、四国における深部低周波微動の活動期における顕著な12時間と24時間の周期性を、地球潮汐によるトリガリングから解析、深部低周波微動が応力変化を敏感に反映することを示した。地球潮汐によるクーロン破壊応力と、速度・状態依存摩擦構成則に基づく地震発生率の理論を応用して、観測データ(1時間毎の微動継続時間)を説明するシミュレーションを行った。短期的スロースリップイベントに伴って剪断破壊する微動源のモデルの応力変化要因を設定し、観測データと計算された地震発生率との相互相関係数が最大になるように諸パラメータを求めた。その結果スロースリップイベントによる過渡的応力変化は、地球潮汐による応力変化と同程度の値となった。また摩擦構成則の重要なパラ

メータ  $A\sigma$  (構成パラメータ×実効法線応力) は、通常の地震活動より1~2桁小さい値が見積もられた。このことから、遷移領域の応力解放過程を反映するセンサーとして低周波微動のモニタリングが重要であること、今後より詳細な解析が必要であることが述べられた。

## 2-2. 深部低周波微動の遠地地震トリガリング

宮澤氏(東大地震研)は、遠地地震による西南日本の深部低周波微動の誘発事例を示し、微動源を伝播する表面波による微動の動的トリガリングのメカニズムを解析、プレート境界に沿う流体の分布状態の重要性を述べられた。2004年スマトラ沖地震、2003年十勝沖地震等、最近のMw 7~9クラスの遠地地震による深部低周波微動の誘発事例は、表面波のうちレイリー波の通過時に微動が誘発されることを示している。ラディアル方向と鉛直方向のレイリー波エンベロープの振幅と周期に深部低周波微動のピークと発生間隔が対応する。このことから、レイリー波動から微動源の歪みを計算、さらに剪断応力と鉛直応力を推定した。震動源では法線応力が減少して、鉛直伸長・水平圧縮を伴う体積膨張でプレート境界の地震と同じ剪断破壊の微動が発生する。さらにスラブからプレート境界に供給される流体の量が低周波微動の活動の要因となる。カスケードの沈み込み帯では、主としてラブ波による剪断応力変化で微動が誘発されることから、カスケードのプレート境

界では摩擦係数が小さく流体が広く均一に分布、一方、西南日本のプレート境界では摩擦係数が大きく流体は不均一小規模に分布して、体積歪み変化の影響が大きいと解釈される。したがって深部低周波微動の活動度と動的トリガリングのメカニズム解明に、プレート境界の流体の挙動、分布状態を知ることが重要である。

今回報告された調査資料と最新の成果について、総合討論では活発な興味深い議論が展開された。その中で今後検討調査すべき課題等も浮かび上がってきた。「プレート境界深部すべりに係る諸現象」について、さらに的を絞って情報交換を行い共通の理解を深めモニタリングに反映されることが望まれる。

野口伸一

[のぐち しんいち]

**現職** (独)防災科学技術研究所総括主任研究員  
理学博士

**略歴** 北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了、科学技術庁国立防災科学技術センター研究員、(独)防災科学技術研究所海溝型地震研究室長を経て現職。

**研究分野** サイモテクトニクス、地震活動のフラクタル性など



# ■ 書 評 ■

## ● 研究人生 60 年を回顧して 次世代に伝える

茂木清夫 著

### とらわれずに考えよう 地震・火山・岩石破壊

評者 津村建四朗

本書は「まえがき」にあるように、(財)震災予防協会の会誌「震災予防」に「私の研究人生」として連載されたものに、新しい項目や多くの写真、図面を加えて、一般の読者にも理解できるように書き直されたものである。前稿になかった著者の生い立ちから大学入学までの思い出からはじまり、「とらわれないで考えよう」を基本に、地震・火山・岩石破壊の多分野で世界的に高く評価される研究成果を次々に挙げ、また、地震予知連絡会や判定会の委員・会長として、社会との接点をもつ役割などでも長年活躍してこられた著者の「研究人生」が、平易な言葉で語られる。それぞれの時期の写真を眺めながら読み進むうちに、著者が交わり、その長い研究人生の成長に直接、間接に関わった多くの人々の人物像や訪れた国々の研究環境や国情までもが自然に浮かんでくるように書かれている。

評者は、著者とは共に地震研究所に勤めていた 1970 年代以来の長いお付き合いであるが、これまで同ったことのない興味深い話も多い。まず、小学生時代から 54 歳の若さで亡くなるまで、著者を研究者に導き、成長させた兄昭夫氏の思い出が語られている。このような兄弟間の一種の英才教育の機会は、少子化によって激減しているのではないと思われる。学徒動員で空襲下九死に一生を得られたことも、たった 1 年間の会社勤めがその後の研究人生に大きく影響しているわけも初めて知った。

地震研究所に入り、プロの研究者としての最初の論文で提唱された「茂木モデル」は、現在でもよく利用されている。山川宜男氏が導かれた理論式を、桜島大正大噴火の水準測量データなどに適用して、マグマだまりの位置、深さ、圧力変化の推定が行なえることを立証し、国内よりもまず国際的に評価され、「茂木モデル」と称され

るようになった経緯が記されている。手作りの簡単な装置を用いた岩石破壊実験から、基本的な地震活動タイプ(本震・余震型、前震・本震・余震型、群発型)は地殻の不均質性の程度によるものと推定し、実際の震源カタログから、わが国の地震活動タイプの地域性を明らかにした初期の一連の研究は、地震予知の可能性を論ずる場合に、現在でもよく引用される。三軸岩石破壊実験装置を工夫して、中間主応力の効果を立証し、指導教授の結論を覆すに至った、渡米留学中の研究の流れも興味深い。その後、著者が、日本を代表する研究者として実に多くの国際学会・会議に参加し、招かれて中国の研究者の育成、インドへの専門家派遣などに携わった様子もよく分かる。

これらの回顧の中で、研究成果は英文で書いて国際的に発信し、英会話が不得手でも国際交流に積極的に参加することの大切さ、査読制度の問題点など、研究者を志す者への著者の体験からのアドバイスも伝えられている。

地震活動の時空間分布に関する研究は、著者が長年追いつけてきたテーマである。大地震発生の移動性、活動期と静穏期、大地震相互の関連性、地震空白域、大地震に先行する静穏化など、独特の着眼点で「規則性」を浮かび上がらせてきた。本書ではいくつかの章に分かれてその結果が、分かりやすい図として示されている。ただし、著者が提唱する「規則性」が本当かどうかを検証するには、長期間の観測データの蓄積に待たなければならないことに注意する必要がある。本書には、最近の地震で自ら追証された例がいくつか示されている。

阪神・淡路大震災を契機に、従来の地震予知計画や地震予知連絡会の活動に対して、理解を欠いた批判が寄せられた時期があった。これらの推進に努力して来られた著者がそれに対する反論を「地震予知を考える」(岩波新書)で世に問うたのは 10 年前であった。その後、地震や地殻変動の観測網が画期的に整備され、さらに、いろいろなタイプの大地震が相次いで発生したと相まって、地震研究に新たな展望が開けつつあるが、短期・直前予知に直接つながるような確実な前兆現象は依然検出されていない。しかし、本書に引用されている 1930 年の北伊豆地震直後の新聞記事は、80 年近く前に直前予知成功にあと一步という事例があったことを伝えている。この実例などからも、著者も評者も予知できる地震もある

と確信して、研究を進めるべきだとの考えで一致している。

東海地震予知の「注意報」の問題や、「地震と原子力発電所」の問題は、著者が地震学者の社会的責任として、長年主張してこられたものである。読者一人ひとりが認識を深め、「とらわれずに考えてほしい」というのが、著者の希望であろう。

本書からは、学生、若手の研究者、それらを指導する立場の研究者・教育者など、それぞれにとって多くの示唆が得られると思われるが、「とらわれずに考えよう」という書名だけからこれだけの内容を思い浮かべる者は少ないのではなかろうか。本書が、できるだけ多くの人々の目に触れて読まれ、次世代の研究者が育つことを願うものである。

なお、本書は、著者が長年かかわってきた地震研究の一面目の回顧が主体であって、最近10年あまりの地震研究の革新的な進展にはほとんど触れられていない。本書で地震研究に関心をもった学生などには、そのような現状を紹介した最近の本も併せて読むことをすすめたい。

<古今書院, 2009年1月, A5判, 204頁, 3,150円(税込み)>

## ●新刊紹介 .....

タイム編集部・鈴木南日子 著

### 自然災害の恐怖〈第1巻〉—地球温暖化・地震・火山

ゆまに書房, 2008年11月, A4判, 34頁, 2,625円(税込み)

鳥山英雄 著

### 樹木・大地・地震—植物生理学と地球物理学の学際序説

丸善プラネット(丸善), 2008年11月, A5判, 226頁, 3,150円(税込み)

吉友嘉久子 著

### 地震・地すべり・大崩落—立山カルデラ物語

ダイナミックセラーズ出版, 2008年12月, B6判, 302頁, 1,470円(税込み)

早川正士 著

### 地球環境とノイズの意外な関係

技術評論社, 2009年1月, B6判, 199頁, 1,659円(税込み)

江戸遺跡研究会 編

### 災害と江戸時代

吉川弘文館, 2009年1月, A5判, 232頁, 5,880円(税込み)

都司嘉宣 著

### 図解・なぜ起こる?いつ起こる?地震のメカニズム

永岡書店, 2009年2月, A6判, 255頁, 630円(税込み)

新潟日報社特別取材班 著

### 原発と地震—柏崎刈羽「震度7」の警告

講談社, 2009年1月, B6判, 278頁, 1,575円(税込み)

中村孝明・宇賀田健 著

### 地震リスクマネジメント

技報堂出版, 2009年1月, A5判, 290頁, 3,360円(税込み)

飯尾能久 著

### 内陸地震はなぜ起こるのか?

近未来社, 2009年2月, A5判, 174頁, 2,800円(税込み)

星谷勝・山本欣弥 著

### 演習で学ぶリスクマネジメント

鹿島出版会, 2009年3月, A5判, 143頁, 2,835円(税込み)

大木聖子・瀨嶺一起 著

### 地震の大研究—恐ろしい自然現象

PHP研究所, 2009年5月, A4判, 79頁, 2,940円(税込み)

# ADEP情報

財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について			
専務理事委嘱	(新)	(旧)	
仲嶺 信英	専務理事	常務理事	21. 4. 1
採用			
吉水 正義	地震調査研究センター参事・企画部長		21. 1. 1
佐々木俊二	本部 地震防災調査研究部主任研究員		21. 4. 1
岩楯 敏広	本部 地震防災調査研究部		
	副首席主任研究員 (非常勤)		21. 4. 1
大保 直人	本部 地震防災調査研究部		
	副首席主任研究員		21. 4. 1
退職			
中村 誠	地震調査研究センター企画部長		20.12.26
池田 潤一	本部 地震防災調査研究部参事		21. 3.31
吉田 敏雄	地震調査研究センター次長		21. 3.31

## 地震調査研究センターの組織変更

平成 21 年 4 月 1 日から地震調査研究センターの組織が「事業推進管理部」と「解析部」の 2 部体制となりました。

地震調査研究センター (平成 21 年 4 月 1 日現在、主任研究員以上)

所長	阿部 勝征		
次長 (兼)	仲嶺 信英	解析部	
副首席主任研究員	松田 時彦	部長	松浦 律子
事業推進管理部		主任研究員	鈴木 保典
部長	佐藤 勇	主任研究員	古村美津子
参事	吉水 正義	主任研究員	関根 真弓
課長代理	山口日出男	主任研究員	岩佐 幸治

## 編集後記

地震ジャーナル 50 号は来年末出版が予定される。年 2 号の出版であるから、25 年間事業が継続したことになる。目次を拾ってみると、創刊当時は主に地震予知に焦点を当てていたことが判る。時の経過とともに工学サイドや社会・心理学サイドの論文も散見され始め、現在では理学・工学およそ半々の比率を目標に編集するようになった。

本誌出版の重要な目標の一つは「地震に関する知識の普及」である。しかし実際には一般向け知識普及の成果は上がっていない。内容が専門的で理解できないとの声を聞く。こ

れに対して多くの研究者からは「面白い、役に立つ」との評価を受けている。隣接する研究分野の成果や問題点を垣間見る機会を研究者に提供するためとも考えられる。

つまり「知識の普及」という目標に関して本誌は、これ迄一般向け縦の流れではなく、研究者間の横の流れに貢献して来たことになる。51 号から継続出版が可能となれば、本誌は横の流れに止まることなく、縦の流れの実現にも尽力する必要があるだろう。そこではインターネットの活用等、従来にない新しい編集方式が浮上するかも知れない。(Y.H.)

## 地震ジャーナル 第 47 号

平成 21 年 6 月 20 日 発行

発行所 ☎101-0064  
東京都千代田区猿樂町 1-5-18  
☎ 03-3295-1966  
財団法人  
**地震予知総合研究振興会**

発行人 高木章雄

編集人 萩原幸男

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。

●製作/ (財)学会誌刊行センター