地　震　の　話

宇佐美 龍 夫
理博 東京大学教授 地震研究所



Tatuo Usami

はしがき

地震の話が電波や紙面に氾濫している．いたずらに恐怖をあおるものが目立つ．災害の防除や地震知識の普及に役立つとは考えられない．地震とその災害に関する正しい知識が，いざというときに，住民を救うことはいうまでもない．しかし，専門外のことを正しく理解することは難しい．生活や仕事に直接関係のある事項だけでも十分に理解したいものである．

この小論では，特に土木技術を念頭におきながら，地震に関する現象のうち，基本的ないくつかを取り上げて解説を試みた．地震の発生の問題，地震の呼び名を通じて，特に直下型地震[a]についての私見を述べた．また，筆者は，土木技術については関心はあるものの素人であるが，素人の意見も役に立つこともあろうかと考え，いろいろな過去の実例を引きながら，地震との関連において，土木専門家の方々の注意を促すこととした．とりわけ，**4.(3)** に示したことは，山国である日本としては十分な対策を考え，少なくとも，実例を使って図上作戦をねるなどの準備をする必要があるものと考えている．と同時に，土木関係の方々から，地震学者へのご意見やご注文をお待ちしている．

1. 発震の機構

地震は地殻あるいはマントル上部を構成する岩石の破壊現象で，その原因には直接的なものと間接的なものがある．棒に力を加えて破壊する場合と似ている．棒に加える外力は間接的な原因である．この外力によって棒の中ならどこにでも，また，いつでもクラック（地震に相当する）が生じうる場が形成される．こういう状況の下で，ある特定の場所に特定の時刻にクラックを発生させる原因が上に述べた直接的原因である．これはすでにクラック発生の準備ができている場に加えられるものなので，小さな力（状態の変化）でよい．地下水の移動，圧力の変化，体積・温度の変化などが考えられるだろう．われわれは，通常これを引き金作用と呼んでいる．つまり，弾丸は銃に装填されているのであるから，ちょっと小さな力で引き金を引けばよいのである．

個々の地震の直接的原因がなんであるかは，よくわかっていない．しかし，間接的原因については最近になってプレート・テクトニクスとショルツ理論[b]の２つの考

a) 宇佐美龍夫：直下型地震と巨大地震．日本の科学と技術，Vol.17, No. 181, pp. 28～35, 1976.

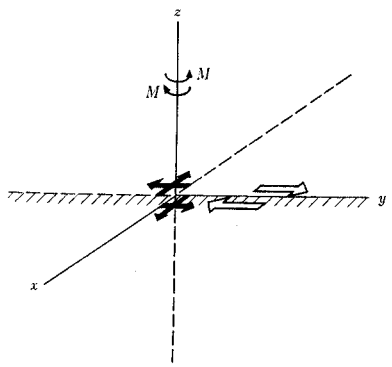
b) ショルツらは 1973 年に浅い地震の発生に関するダイラテーション・ディフュージョン理論を提出した．プレート・テクトニクスのもとになる海洋底拡大の考えは，1963 年ころ，バイン・マシューズらによって示された．

え方が生まれた．プレート・テクトニクスの考えによれば東北日本は太平洋方面から西に動いてくるプレートによって西方に押される．南西日本は南からのプレートによって北に押されている．プレートは日本列島にぶつかり，下方に向きを変え，日本列島の下にもぐり込む．この折れ曲がりの付近に大きな力が働き，巨大地震が発生する．この考え方は，日本の太平洋沖に発生する規模 8 クラスの巨大地震の地理的配列や，発震機構あるいは反復性をうまく説明する．

ショルツ理論では，地下水が重要な役割を演ずると考え，地震が同一地点に繰り返し発生することをうまく説明する．この理論によると，地震の前になると，地殻変動・電気抵抗・地下水中のラドン含有量・地震の P 波と S 波の速度比に変化が現われ，その異常が旧に復してから間もなく地震が発生する．さらに都合のよいことには，こういう異常現象の続いている継続期間が長ければ長いほど規模の大きい地震が発生する．したがって，地震予知にもってこいの理論ということで，いろいろな方面から研究されている．しかし，この理論は水が重要な要素となっていることから，内陸の浅い地震に適用されるものと考えられる．

プレート・テクトニクスもショルツ理論も，すべての地震に適用できるものではない．例えば，昭和 39 年の新潟地震の間接的原因を説明する理論はまだ生まれていないといえよう．

どのような物理量の変化が引き金作用となって実際の地震を起こすかは，十分にはわかっていない．しかし，地震の波の解析から，地震発生時における震源での力の分布状況がわかっている．それは，断層をつくる力と同等な力系で，地震の間接的原因がなんであるかには無関係で，地震断層説の基礎になっている．しかし，断層が地震の原因であるというよりは，断層をつくる力系と地震波を発生する力系が同じであると考えるほうがより正しいだろう．図—1 の y-z 面が断層面で白抜きの矢印の方向に断層の両側が相対的に動くとすると，この動きは図中の黒い矢印で示した．2 組の偶力によって起こされる，2 組の偶力は大きさが等しく向きが反対であり，実際の地震の解析から，地震時における偶力のモーメントや方向が求められ，それから地中の引張軸・圧縮軸の大きさと方向がわかる．多くの地震に対してこの解析を行い，日本列島内に作用している平均的な力の場が求められている．



図—1　震源における力の加わり方（黒い矢印）と断層のすべり（白い矢印）

2．地震の名称と分類

地震の名称には定義されているもの，普通名詞として常識的な意味で使われているものなどがあり，中には同じ言葉でもあるときは定義に従って使われ，また，あるときには普通名詞として使われる言葉がある．ここではわが国における地震の名称の定義とそれに基づく分類について述べる．

（1）　大きさによる分類

十数年前，地震予知研究をはじめるにあたって，次のような分類が採用された．

大　地　震　$7 \leqq M$　　微小地震　$1 \leqq M < 3$
中　地　震　$5 \leqq M < 7$　　極微小地震　$M < 1$
小　地　震　$3 \leqq M < 5$

M は地震の規模である．しかし，一般には大地震という言葉は，被害のあった地震，あるいは大地震動の場合にも使われている．気象庁では，地震の最大有感距離による分類も使っている．有感とは人体に感ずるという意味である．

顕著地震　300 km ≦ 最大有感距離
やや顕著地震　200 km ≦ 最大有感距離 ＜ 300 km
小区域地震　100 km ≦ 最大有感距離 ＜ 200 km
局発地震　最大有感距離 ＜ 100 km

また，地震計にのみ感じ，人体に感じなかった地震を無感地震という．

（2）　深さ（h）による分類

浅い地震　$h < 50$ km
やや深発地震　50 km ≦ h ＜ 200 km
深発地震　200 km ≦ h ＜ 500 km
極深発地震　500 km ≦ h

（3）　震央距離（Δ）による分類

近距離地震　$\Delta < 600$ km
中距離地震　600 km ≦ Δ ＜ 1500 km
遠距離地震　1500 km ≦ Δ

近地地震：震央が本邦の沿岸から 600 km 未満の距離

内にある地震.

遠地地震：震央が本邦の沿岸から 600 km 以上の距離にある地震.

前の3つはある観測点を中心に考えたときの地震の震央距離による分類であり，後の2つは日本を中心に考えたときの地震の遠近による分類で津波警報を発令するときに使われる．つまり，近地地震の場合は全国6か所の津波中枢気象台から担当の海域に警報が発令されるし，遠地地震の場合には東京の警報中枢から全国の海岸に対して警報が発令される.

(4) その他

被害の有無によって，被害地震・無被害地震という言葉も使われる．また，古地震は通常江戸時代末までの地震に使われているが，これに関東大地震（大正 12 年）以前の地震を含めようという動きもある．いずれも，はっきり定義された言葉ではない.

最近よく使われている言葉に巨大地震がある．これも定義された言葉ではない．大地震は，定義によれば規模7以上であるが，規模8クラスの地震は，規模7クラスの地震に比べると，単に影響する範囲が広いというだけではなく，地理的・時間的にも発生の法則性があり，プレート・テクトニクス理論とも深くかかわっているので区別する必要から生まれたが，その内容は人によって異なる．一応，規模8クラスという点では一致しているが実際には $M \geqq 7.9$ と考える人も，$M \geqq 7.7$ と考える人もいる．現在のところ，$M \leqq 7.6$ の地震を含めている人はいないようである．巨大地震は，環太平洋地域では海岸より海側に発生している．わが国では太平洋沖合にのみ発生している．唯一の例外は，明治 24 年 10 月 28 日の濃尾地震（$M \fallingdotseq 8.0$）である.

〈直下型地震〉という言葉はジャーナリズムの造語らしい．もちろん，定義はない．しかし，言葉のもつイメージと地震災害との関連で，受取側に及ぼす心理的効果が適切であったのか，いまや定着しつつある．しかも，主として都市直下型地震という意味に使われることが多いようである．しかし，どんな地震でも，震源の真上の人から見れば直下型なのであるから，誤解をさけるという意味では内陸地震と呼ぶほうがよいであろう．そういう意味では直下型地震という言葉は使わないほうがよく，そのかわりに直下型の震動および被害という表現が学問的にも意味があって適当であろう．よく知られているように震源に近い所では短周期の振動が卓越し，上下動も著しく，初期微動継続時間が短く，震度も大きい．また，こういう振動の特徴に応じて被害にも特徴が現われる．直下型地震は規模にして 7.5 以下で，半径 20 km くらいの比較的限られた範囲に大きな被害をもたらす.

昔よく使われた，断層地震・陥没地震という言葉は今日では使われない．火山性地震は意味がはっきりしているし，火山の近くに発生する．これに対する言葉として〈構造性地震〉がよく使われる．また，〈余震〉〈前震〉〈群発地震〉もよく使われる．空間的・時間的に群をなして起こる地震群を群発地震という．そのうちに際立って大きい地震がある場合，それ以前のものを前震，以後のものを余震という．余震についても，本震との関連で時間的・空間的にどの範囲をとるかという点についての定めはない.

3. 大地震と被害

最近の大地震の被害については，詳しい報告書がそれぞれの専門分野で出版されているので，ここでは被害の統計と古地震にみられる顕著な被害について述べる.

(1) 今村の被害等級[c]

［0］ 震央地域で普通の木造家屋は破損しても倒潰せず，石垣あるいは城壁がところどころ崩壊する程度，震央での加速度は重力加速度の 10% くらい.

［I］ 激震区域（普通の木造家屋の倒潰率 1～2% 以上の区域）の平均半径が 10 km 未満のもの．最大加速度は重力加速度の 20～30% くらい．著しい断層は見られない.

［II］ 激震区域の平均半径が 20 km 未満のもの．中心地域では重力加速度の 30% 以上に達し，著しい断層が見られる.

［III］ 激震区域の平均半径 40 km 未満のもの．著しい断層が表われる.

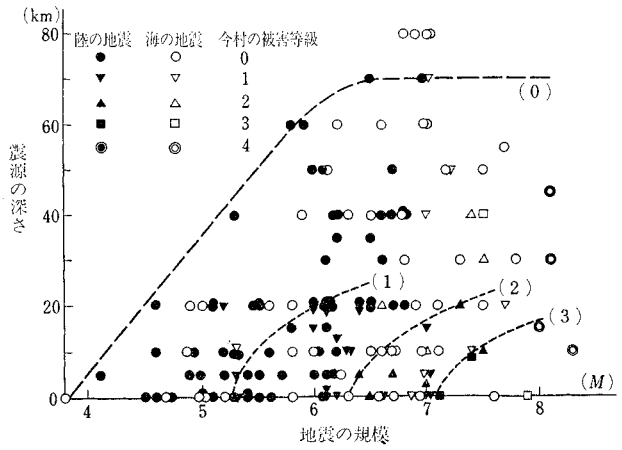
［IV］ 激震区域の平均半径が 50 km にも達するもの，著しい断層系が表われる．広区域の地盤の上下変動も気づかれる.

［−］ 等級［0］より小さいもの.

実例としては次のようである．明治 34 年・八戸地震［0］，昭和6年・西埼玉地震［I］，昭和5年・北伊豆地震［II］，弘化4年・善光寺地震［III］，大正 12 年・関東地震［IV］などがある．今村は明治5年の浜田地震以前の地震にこの等級を与えた．それによると，［0］が 31 回，［I］が 51 回，［II］が 48 回，［III］が 22 回，［IV］が 17 回となっている．明治6年以後の地震については，等級は与えられていない．筆者は，昭和元年～48 年までの地震について暫定的にこの等級を決め，図—2 にまとめた．図の横軸は地震の規模[d]，縦軸は震源

c) 武者金吉：日本及び隣接地域大地震年表，1950～1953，震災予防協会.

d) 規模とマグニチュード（M）は同意味に用いられる．つまり地震では規模は一般名詞ではなく，定義された言葉である.



図—2　地震の規模・深さと被害等級の関係

の深さである．点線に付した数字は，今村の被害等級で例えば等級 (2) の線は，その線の左上方には等級 (2) の地震は存在しないという意味である．黒塗りは内陸の地震，白抜きは海の地震で，点線は内陸の地震に注目して引いた．海の地震では被害等級の決めにくいものがあるからである．この図は，地震の深さや，規模の変化に応じて地上への影響にどんな変化があるか，特に深さの影響に注目してつくったものである．震源の深さは大正時代末までの地震では求められないので，昭和時代の地震を使った．この図によると，震源の深さが 20 km, 浅くなると被害等級は 1 つ高くなるし，規模が約 3/4～1 大きくなっても等級が 1 つ高くなる．また，被害［0］の線が非常にはっきりしていることが注目される．この図から古地震の深さについて，その下限を決めることもできる．しかし，なんといっても，災害対策に関連して，推定地震を考えるときに役に立つであろう．通常は，過去に発生した地震をもとにして，地震推定を行う．そのときに，その地震がもし 10 km 浅い所におきたら，あるいは規模が 0.5 大きかったら，被害はどのくらい大きくなるかという予測が問題になることがよくある．この問題に答える基礎資料になるであろう．

（2）　古地震の被害の例

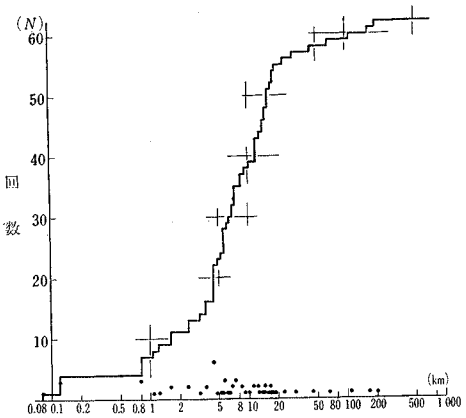
文政 11 (1828) 年 12 月 18 日に新潟県長岡市付近に規模 6.9 の地震があった．全潰 9 808 戸，半潰 7 276 戸，焼失 1 204 戸，死者 1 443 人，負傷者 1 749 人という大被害となった．この辺は信濃川の低湿地で，著しい液状化現象がみられた．付近の数十箇村で，地割れ，割口から腐材木や青泥を吹き出した．激震地から 20 km 離れた柏崎では土蔵の壁が落ちた程度であるが，井戸は底からねば土や砂を吹き上げて埋まったものがあり，所々で飲み水に困った．そのほか，各地で土砂や泥水を噴出し，池や沼ではその結果，平地より高くなった所もあったという．見付新田という所では，家数 30 軒ほどが地中へ 3 尺ばかり埋まったという．古記録に液状化現象を示す例は多いが，この地震ほど大規模なものは少ない．

善光寺地震は弘化 4 (1847) 年 3 月 24 日午後 9 時ころに起きた．規模は 7.4，死者は約 1 万人，家屋のつぶれは 2～3 万戸といわれている．地震後ただちに火災が発生した．長野の町は善光寺の御開帳で全国から参詣人が集っていた．よくはわからないが，善光寺の町だけで数千人の方が亡くなった．そのうえ，各地で山崩れが発生した．松代領だけで 4 万 1 051 か所の山崩れがあったという．その中で一番大きいものが犀川の中流，虚空蔵山の山崩れで，犀川を 2 か所でせき止めた．上流のものは高さ 30 丈 (約 100 m) の土堤となった．水は一滴も流れなくなり，現在の明科町まで長さ約 30 km の湖水が出現した．その後 4 月 2 日と 9 日に大雨となったために，翌日の 10 日ころから，土堤あるいは岩の間から水が落ちはじめた．注意をしていると，4 月 13 日の昼すぎに，土堤がいっきに決壊し，犀川を流れ落ち，善光寺平は洪水になった．流出家屋 810 戸，土砂の入った家 2 135 戸，死者約 100 人の被害が出た．被害が少なかったのは，かねてこのことあるを予期した松代藩が対策を練っていたからである．この地震では，裾花川，土尻川も土砂によってせき止められ，それぞれ 7 月 20 日，4 月 10 日に決壊した．

上記 2 例でみるように，江戸時代以前には土木構築物は少なく，その基礎である土に関する被害がみられる．特に地震に伴う大規模な土砂崩れや震生湖の出現，地形の変貌などの例は最近はほとんどないので，忘れられようとしているのではないだろうか．果たしてこの例のような大きな地変の出現の可能性を考えたうえで，構築物の位置の決定や強度設計がなされているのであろうか．多少の不安の念を持たざるを得ないのである．

（3）　震度 VI の区域の広さ

古来の被害地震から震度 VI の範囲を推定し，その累積頻度をとったものが図—3 である．この図には海洋性地震は除いてある．震度 VI というと，家屋の倒壊が出はじめる強さである．この図は次の点で注目できる．まず，わが国は地震が多いというが，震度 VI 以上の地域がはっきりしているのは 60 回余と以外に少ないことである．次に，全体の半数は面積が 7 km² 以下である．つまり，以外に小面積の例が多いということである．このことは裏を返せば小地震といえどもその中心地では震度が大きいことを示し，油断は禁物であることを教えている．こ



図—3 震度 VI 以上の地域の面積と累積頻度（実線）との関係

の図は海洋性の地震を除いているので注意してみなければならないが，われわれの感じるほど大地震は多くはないといえるだろう．

4. 地震と土木技術

会誌編集委員会のご依頼によると，ここで耐震工法へのアドバイスや土木技術者への注文と今後の展望を書くことになる．しかし，筆者は土木技術にはまったくの門外漢である．当を得た意見を持っているわけでもない．一市民として，地震との関連において，思いつきを述べさせていただきたい．岡目八目ということもある．何かのお役に立てば幸いである．

（1） 耐 震 性

日常みかける新幹線・ダム・橋梁などの建設現場で感じることは，仕事（施工）を入念にやっているということで，土木施設の公共性という点からみても，安心感が湧いてくる．設計の段階においても念入りな検討がなされていることであろう．問題は，われわれの目に写る構築物ではなくて，土と密接に関連する部分にあるように感じられる．盛土部分が地震に弱いことは多くの実例が示している．盛土の耐震性を増加する経済的工法は開発されているのだろうか？ 砂の流動化現象も新潟地震以来，地震災害の重要な要因として浮び上がってきた．例えば，前述の文化 11 年の長岡付近の地震が再び同地域に起きると想定した場合，流動化現象はどういう範囲にまで及ぶのだろうか？ 筆者には想像もできないが，被害推定が行われているのだろうか？ それに基づく対策は，経済的な手法は開発されているのだろうか？ 少なくとも，今後流動化現象が著しいと思われる地域に新設される構築物についての設計基準は確立しているのであろうか？

もう一つ，素人目にはトンネルが問題であると感じられる．トンネル工事は街を歩いていても，みることができない．設計も施工も十分念入りに行われているものと思う．そういう点では，地中のトンネル部分は震度VIの大地震動にも耐えるであろう．心配なのは地上との連絡部分である．地震動は地表面で大きく，地中に入ると急速に減少する．したがって，地表面付近では地動によるひずみが大きいと考えられる．つまり，大きな力が働くことになる．こう考えると，地上との連絡部分はトンネル工事の生命ともなる所なのだが，素人目にも，トンネル部分に比して強度はかなり落ちているように見受けられる．土木技術者の方はお怒りになるかも知れないが，筆者は地下街や地下鉄は地震に対して安全かと聞かれる場合，わからないと答えている．理由は，わが国では地下街や地下鉄は大地震を経験していない．一方，最近は地震のたびに，本来ならば破壊するはずのない構造物が破壊した例が多い．そのうえ，構築物の強度も，ときとともに低下するだろう．地下水の汲上げなどで，トンネル周囲の条件も建設時とは変わったものになるだろう．そういう悪い条件のときに地震があったらどうなるだろうか．建設時の耐震性だけから，何十年後にあるかも知れない地震時の安全性を云々することは難しいのではないだろうか？

（2） 耐震性の診断

前節との関連で，土木関係の方々にお願いしたいことは，既設構築物の耐震性の診断方法と，補強・改修手法の開発である．こういう問題は，技術的には難しいことではないと思う．しかし，土木行政という面にも深く関係してくる問題なので，行政面からみた考え方の確立ということも含めて，緊急に取り上げられるべき問題であると考えられる．

例えば，東京の江東デルタ地帯には 88 の橋があり，その 77% はCクラス，つまり老朽して耐震性がないものとされている．隅田川にかかる橋はすべてCクラスに属している．

耐震性の診断の方法は，すでに確立されているだろうし，新しい方法も生まれるだろう．その結果，あるものは補強し，あるものは使用禁止として新しいものをつくることになるであろう．短期間に，経済的に，しかも十分な耐震性を付加するような補強工法の開発が必要だと思われる．そのうえ補強なり，使用禁止なりを実現させるための，土木行政の権限・強制力をどう考えるかという問題がある．

欠陥を指摘するだけでは意味がない．その間に危険は日一日と増大していくのである．

（3） 地形の変貌

地震の際構築物に被害が生ずるばかりでなく，地形の変貌による損害が発生する．かかる損害を軽減させるために，地震直後の土木的復旧作業能力に期待するところが大きい．前述の善光寺地震を考えてみよう．犀川上流に長さ 30 km にわたる大きな湖が出現し水没した村々も多かった．また，決壊による二次災害も大きかった．

かりに，この地震が土木技術の発達した現代に起きたとして，弘化のころと比べてどのくらい二次的損害を減らすことができるだろうか？ 問題は水を除々に流して湖水位をできるだけ低く押えることにある．地形的には谷合の狭い土地である．しかも，そこに至る道路は寸断されているだろう．なんとかして，ブルドーザーやダンプカーを現場まで運んだとしても，地形のため活動は思うにまかせないであろう．崩壊土量は数十万 m^3 と考えられる．発破も使うことになる．崩壊土であるから発破の効き方はよくないであろう．しかも，地震後 20 日で決壊したのであるから，作業はすばやく行われなければならない．一体，地震後，下流に災害を起こさない程度の水を流しながら幾日で湖水位の上昇を喰い止めることができるであろうか．善光寺地震のときには，さらに具合の悪いことに，犀川が善光寺平にそそぐ出口，小市付近に山崩れがあり，川に土砂を押し出し，犀川の出口をふさぐような恰好になったのである．こちらのほうは，平地でもあり，現在の機械力で十分迅速に処理できると思われる．こういう地震はめったにないかも知れない．しかし，忘れられてよい事例ではない．現代に時代を設定して机上作戦を練ることは，修士論文のテーマとしても恰好なものではないだろうか？

1858（安政5）年4月9日（旧2月 26 日）に，富山・岐阜県境付近に規模 6.9 の地震があった．山中で被害が多かったが，常願寺川の上流の大鳶山・小鳶山が崩れ湯川をせき止めて，大きな池をつくった．また，支流真川谷も山崩れのため，8 km にわたって水をたたえた．旧暦3月 10 日に湯川の堰が決壊し，泥水・大木を押し出し下流は洪水となった．ついで旧4月 26 日に真川が決壊したらしく再び下流は洪水となり，変地高2万 5798 石，流・潰家 1612 戸，溺死 140 名の被害が出た．常願寺川の上流は立山に通ずる狭い谷である．この地震が現在発生したら，損害軽減の作業は，善光寺地震の場合より難航するだろう．狭い谷という地形の影響を受け，実質的には有効な作業をすることができないかも知れない．しかも，このような地変を出現させるような地震は日本中のどこに，いつ起きるかも知れないのである．

もう一つ実例をあげよう．1611（慶長 16）年9月 27 日の会津に規模 6.9 の地震が発生した．被害は全体で死亡 3700 余人，民家の潰・大破2万余戸，その他，神社・仏寺・城に被害があった．山崩れが多く，会津川の下流で川がせき止められ，家々に水が付きだしたので，この水を流すために数千人の人足を集め工事をしたので，3日目に水は引いたが，なお余水をたたえ約1里四方の山崎湖が生まれた．その後，湖水面を下げる努力も払われた．おそらく，自然の条件と相まって，寛永の末年にはこの湖は消失した．また，この地震では，北は熱塩・加納から南は大芦・楢原に至る 60 km の間に多くの沼をつくったし，熱塩温泉湖が没したり，只見川が山崩れでせき止められ3日間水が流れなかったという．

こういう事例の示すとおり，地震によって土木構築物の被害ばかりではなく，自然の地形の変貌――震生湖をつくったり，河川の流路を変えたり，小山をつくったりということなど――に伴って，さまざまな二次的な損害をひき起こす．こういう損害を軽減させるために迅速な処理が望まれる．土木技術に期待するところは大きいと思う．

しかも，最近は，上記の例のように，大規模な地形の変貌を伴う地震は少ないし，忘れられている．準備のない所に地震がきたら大変である．少なくとも前述の例について専門家の検討をお願いしたいし，その結果をお聞かせいただきたい．

むすび ― 予知と対策

地震対策は万全とはいえない．地震がくる日時がわかっていれば，いろいろな対策を実施するだろう．対策には短時日でできるものもあれば，数年もかかるものもある．一方，地震の予知は，地震が近づけば確度は高くなるが，地震の 10 年前では，その確度は 10～20% であろう．そういう低い確度のときから手をつけなければ，いざというときに間に合わない問題もある．各種建築・土木構造物の補強，コンビナートにおける危険物対策，エネルギー輸送手段の整備などが，そういうものに属する．予知の確度が低いときに始めなければならない仕事であるので，身が入らないということもあろう．しかしそれは，時間の経過とともに変化する予知の確度に応じて，加速することも，減速することも可能である．たとえ，途中で地震発生の可能性が0になっても，対策は無駄ではない．否，無駄にならないように，場あたり的な対策でなく，長期にわたって有効な対策こそを，長期的な地震の予知――たとえ，その確度は低くても――に合せて実施すべきである．そういう対策が十分に行われていれば，中・短期の予知に応じて行う直前の対策も十分の効果を発揮することができるのである．

（1976.9.20・受付）