

地震 ジャーナル

39

2005年6月

- エッセイ 所長室の窓から ●大久保修平
- パークフィールド地震から学ぶもの ●長谷川 昭——1
- 地震動予測地図の工学利用 ●亀田弘行——12
- 地震と火災…次の大地震に備えて ●室崎益輝/関沢 愛——27
- 地震による土砂災害の実態と防災対策 ●井口 隆——37
- 実大三次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス) ●小川信行——49
- 地震予知連絡会情報 (福岡県西方沖の地震/スマトラ地震津波) ●岡田義光——64
- 書評——73
- 新刊紹介——75
- 執筆者紹介——77
- ADEP情報——79

地震の基礎知識 アスペリティ/相似地震

- 囲み記事 安政江戸地震の震源は深いか浅いか/
確率による地震動予測の問題点/計測震度と被害
免震台の盲点/液状化は怖くない (2) /

地震予知総合研究振興会

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

所長室の窓から

大久保修平

このタイトルからあなたが、2号前の尾池先生の巻頭言「総長室の窓から」を思い起こされたとしたら、相当高いレベルの地震ジャーナルの読み手といわなければならない。しかし、今回取り上げるテーマは、尾池先生のそれとは直接の関係はないし、なによりも地震研究所の所長室よりは京都大学総長室の方がはるかに格上である。とはいえ、地震研究所の窓あるいは窓ガラスも、意外なところで地球科学の教育で貢献していることをご存知だろうか？ 故中村一明先生の遺稿となった教科書「火山とプレートテクトニクス」（東大出版会）の118頁で、放射岩脈の成因の解説に、地震研の窓が使われているのである。少し引用すると、「図4.13は地震研究所の僕の部屋の窓ガラスの割れ方を写真にとったものです。見ていただきたいのはガラスの窓の割れ方です。（中略）地震研究所の窓枠というのは実に安普請でして、窓をあける時は真正面にいって左右均等に押さないと難しいのですが…」がそれである。教科書の図をみると、中村研究室の窓ガラスに入ったヒビの伸びていく様子が、いわゆる放射岩脈の成長と酷似していることが一目でわかり、感動的ですからある。

というわけで、羽目殺しとよばれる密閉性の悪い地震研の窓枠であるが、教育的貢献はなかなかのものといえる。ところで、今、この窓には特殊な飛散防止フィルムが貼られていて、ガラスが割れても飛散しない仕組みになっている。これがマスコミの目にとまり、4月5日の東京新聞には「さすが、地震研究所」というコラム記事で、思いがけずおほめにあずかった。というのも、その2週間前の3月20日に起きた福岡県西方沖の地震では、繁華街のビルから444枚の窓ガラスが割れて歩道に降り注いでいたからである。1978年以降に建てられた建物では、基準によって窓枠に適切な遊びが設けられて窓ガラスが割れにくくなっている。しかし、地震研究所の建物は1960年代の建築なので、何の対策も採ってなければ、福岡の地震と同程度の揺れがあれば、必ずや窓ガラスが飛散するはずである。いったい誰が飛散防止フィルムを貼る事を提唱したのか、今となってはよくわからない。しかし、短期的には何の役にも立たないが、長期的な観点から投資に踏み切った危険予測の慧眼には驚くばかりである。

遊びのない窓枠に遊び心で地球科学の真理を見出した先人と、遊びのない窓に危険を予測してそっと対策を施しておいてくれた先人、この両者は二つの贈り物を私たちに残してくれた。前者は理学的で、後者は工学的な贈り物といってもよいだろうか。これらの贈り物に思いをはせると、「安普請」の窓にも特別な愛着が生じてくるのは私だけではないだろう。地震研究所も今年で創立80年を迎えるが、これまで以上に理学と工学双方で成果をあげるとともに、両者の一層の連携を図っていかなければならないと考えている。

パークフィールド地震から学ぶもの

長谷川 昭

1. はじめに

2004年9月28日に、M 6.0の地震がカリフォルニア州パークフィールド直下の地殻浅部で発生した。陸地直下の浅い地震であったものの、震源域およびその周辺は人口の疎らな地域であり大した被害は生じなかった。そのためマスコミ等でも殆んど報道されなかったが、実は地震学者の間では大きな関心を集めた地震であった。それは、事前にその発生が予測され集中的な観測体制が敷かれていた中で、この地震が起こったからである。

本稿では、これまでに明らかにされた2004年パークフィールド地震の特徴を、地震前の予測と比較して紹介することとする。

2. パークフィールド地震

パークフィールドは、カリフォルニア州のサンフランシスコとロスアンゼルスほぼ中間に位置する。カリフォルニア州には、トランスフォーム断層である有名なサンアンドレアス断層が北西-南東方向に走っている(図1)。パークフィールド地震は、このサンアンドレアス断層に沿って起こる地震である。サンアンドレアス断層は、パークフィールドのすぐ北西からサンファンバティスタまでの約120kmの区間で、クリープしていることが知られている。すなわちパークフィールドは、その南東側の固着している区間と北西側のクリープしている区間との遷移域に当たる。

1979年にBakun and McEvillyは、パークフィールドで発生した1922年、1934年、1966年の地震の波形が互いに良く似ており、それはサンアンドレアス断層の同一のセグメントの破壊によ



図1 カリフォルニア州中部におけるサンアンドレアス断層の位置(USGS homepage)。パークフィールド・セクションは、その北西側のクリープ区間と南東側の固着区間との遷移域となっている。

るからであると指摘した(Bakun and McEvilly, 1979)。さらに彼らは、1857年、1881年、1901年の地震を加え、計6回の地震が、サンアンドレアス断層に沿うほぼ同一のセグメントの破壊により同程度の規模の地震として、繰り返し発生したと指摘した(Bakun and McEvilly, 1984)。すなわち、パークフィールドではM 6程度の地震がおおよそ20年間隔で定期的に再来することを示した。これらの研究結果に基づいて、次のパークフィールド地震の発生時期が予測され、米国地質調査所(USGS)、カリフォルニア州地質調査所(CGS)、大学等による地震予知研究のための実験が始まった(Bakun and Lindh, 1985)。

この実験により、高感度地震計・広帯域地震計・強震計・歪み計・GPS・クリープメータ・

地下水観測計器等、多項目にわたる集中的な観測網が展開された。震源域は人口も疎らであり種々の観測計器を設置する上でも適した地域であることから、パークフィールド地震は、地震予知研究の成果を試す格好の研究フィールドを提供することになった。人口の稠密度でみればとても較べものにならないが、近い将来の地震発生が予測され集中的に観測が強化されているという点で、パークフィールド地震は日本の東海地震と対比されることも多かった。ただし、今回の地震でもそうだったように、一度び地震が発生しても大した被害を生じないという点で、東海地震とはまったく異なっている。

3. 2004年の地震：予測との比較

今回の地震は、時期については当初の予測(1988年±7年)から大分遅れて発生したものの、場所・規模についてはほぼ予測通りであった(CISN homepage)。予測通りに、これまでのパークフィールド地震とほぼ同じマグニチュードで、サンアンドレアス断層のほぼ同じセグメントを破壊した。ただし、詳細にみると予測と異なっている点もある。一つは破壊の伝播方向であり、北西から始まって南東に破壊が広がった1922年、1934年、1966年の地震と違って(予測と違って)、今回の地震では破壊は南東から始まり北西に伝播した。また、1934年、1966年の地震では、17分前に本震付近の同一のアスペリティパッチでM5の前震活動があったが、今回はM>0の前震活動はみられなかった。1966年の地震では直前に、断層面に沿うクリープ活動を示す水道管の破裂や地表のクラックが断層直上で見つかったが、今回はそのような現象は認められなかった。

今回の地震の本震および余震の震源分布を図2、3に示す。余震域は1966年の地震のそれとほぼ同じ範囲であるが、余震域の南東への広がりには、本震の位置(破壊開始点)からせいぜい5~6km程度である。これは、1966年の地震の場合の12~13kmより有意に短い。また、図2、3で見られるように、余震の震源は、普段の時期(バック

グラウンド)の地震活動のそれと同じ位置に分布する傾向がある。この点は、1966年の余震の場合も同じである。

地震波形データとGPSデータのインバージョンにより推定された地震時すべりの分布(図4B、C)によると、1)余震の分布とアスペリティの分布は相補的である、2)1966年の地震のアスペリティの分布と似た分布のようにも見える。一方、測地データのインバージョンによる推定結果(図4A)では、同様に測地データから推定された1966年の地震の結果とやや異なる。今回の地震ではゴールドヒル(図4のGH)より南東側へはすべりが及んでいない。ただし、この傾向は地震波形データのインバージョン結果でも同様である。また測地データに基づいて推定された1966年以降のすべり欠損は、今回の地震でその全ては解放されなかった(特に余震域の南東部及びその南東側延長で)。余効すべりによるものも含め、今後どのような経過をたどって解放されていくのか注目

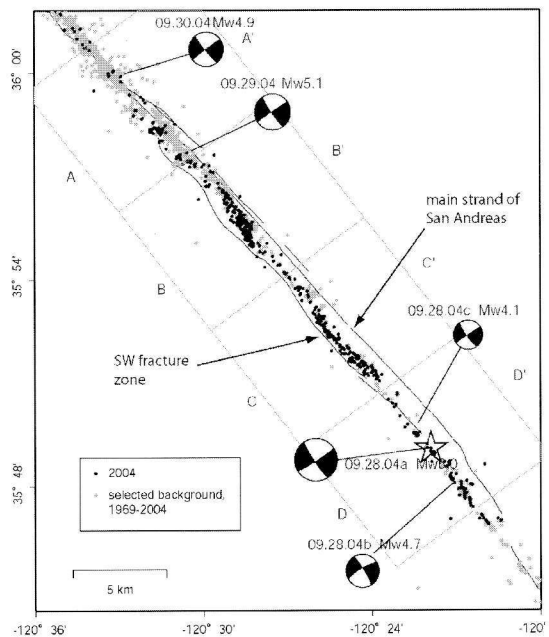


図2 2004年パークフィールド地震の本震(☆印)および余震(黒丸)の震央分布(Langbein et al., 2005)。1969年-2004年の期間のバックグラウンドの地震を灰色の丸で示す(Langbein et al., 2005)。

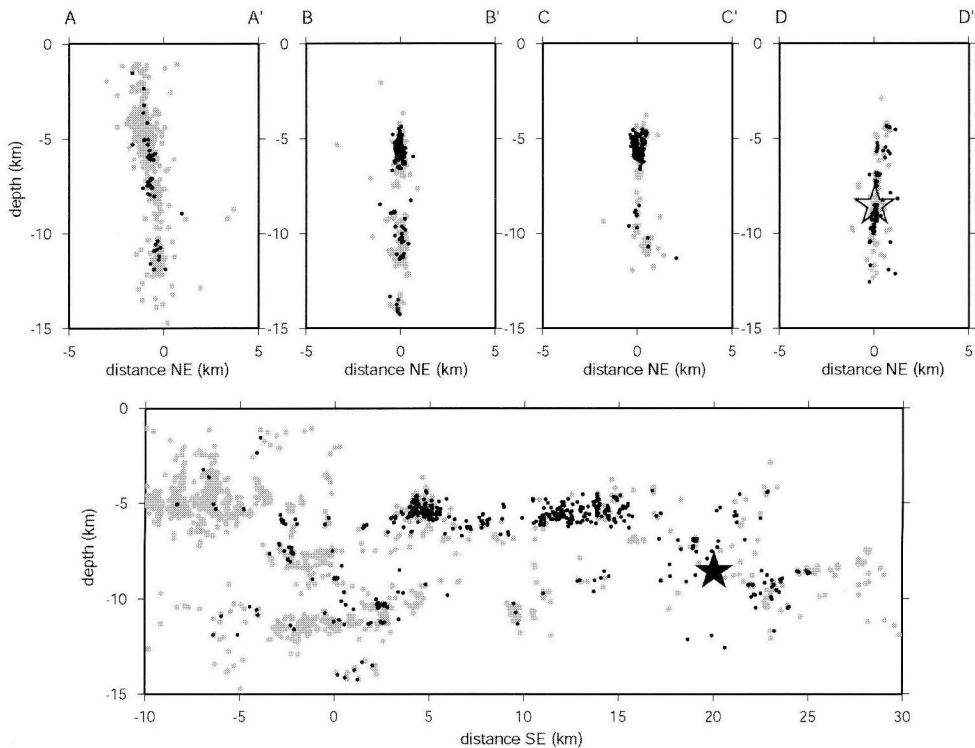


図 3 本震 (☆印), 余震 (黒丸) およびバックグラウンドの地震の震源の鉛直断面 (Langbein et al., 2005). 上図は図 2 に示す A-A', B-B', C-C', D-D' に沿う断層に直交する断面. 下図は断層に沿った断面.

されるところである.

4. 予測との相違: その原因

今回の地震の発生時期が当初の予測より遅れたことは, ある意味で当然のように筆者には思える.

パークフィールドで当初の予測時期を過ぎても地震が発生しなかったことから, 地震発生が遅れの原因を理解するための研究が行われた. 例えば, Toda and Stein (2002) は, 北北東に 30 km ほど離れた地点で 1983 年に発生したコーリング地震 (M 6.7) による応力変化が, パークフィールド地震の発生を遅らせる働きをしたと指摘した. ただし, 彼らも述べているように, 当初予測からの大きな遅れの原因を, これだけで説明することは難しい.

一方, Ben-Zion et al. (1993) はパークフィール

ドの南東に隣接する大きなアスペリティパッチの影響により, 発生が遅れたと指摘した. 既に述べたように, パークフィールドは北西側のクリープ区間と南東側の固着区間との遷移域に位置している. この南東側の固着区間は 1857 年に M 7.9 の地震 (フォートテホン地震) ですべて以降, 現在に至るまで固着している. このような大きなアスペリティ (固着区間) に隣接して, (それよりずっと小さな) パークフィールド地震を起こすアスペリティがあれば, パークフィールド地震の発生間隔はこの大きなアスペリティの影響をまともに受けることになる. すなわち, 隣接する大きなアスペリティがその破壊 (1857 年 M 7.9 フォートテホン地震) の後は現在まで, ずっと固着したままである. その場合, パークフィールド地震のアスペリティへの応力蓄積レートは一定ではなく, 1857 年フォートテホン地震後, 時間の経過とともに蓄積レートが小さくなってゆくはずである. つ

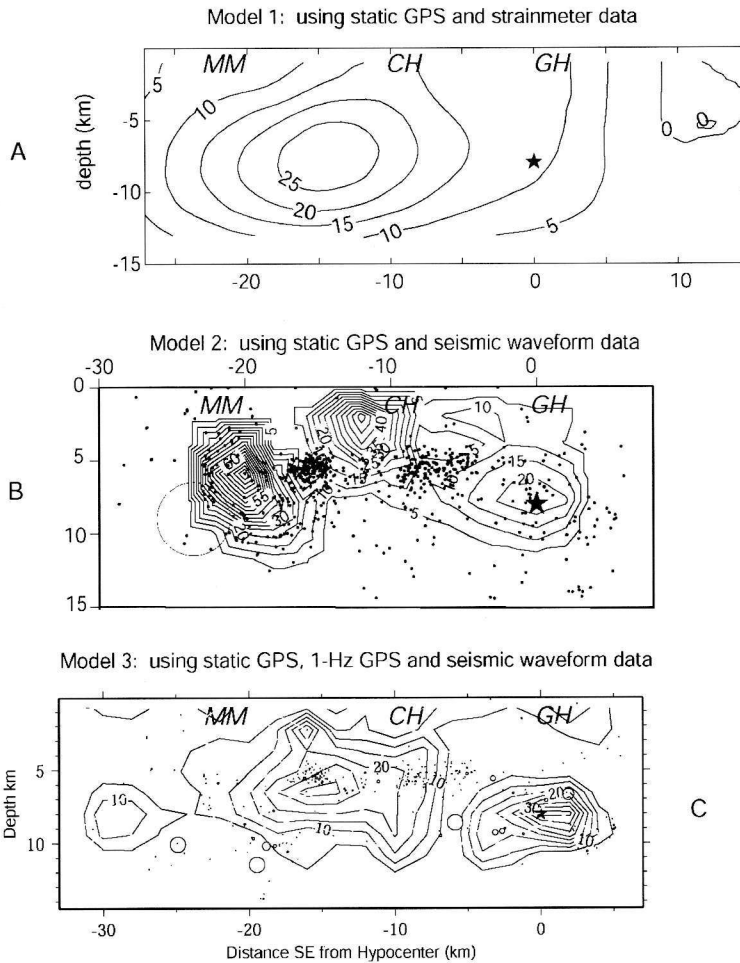


図4 本震のすべり量分布 (Langbein et al., 2005). A) J. Murray による測地データに基づく推定, B) D. Dregar による地震波データと GPS データに基づく推定, C) C. Ji による地震波データ, GPS および 1-Hz GPS データに基づく推定. MM, CH, GH はそれぞれ Middle Mountain, Carr Hill, Gold Hill の位置を示す.

まり、パークフィールド地震の発生間隔が長くなってゆくことが期待される。

Ben-Zion et al. (1993) は、簡単なモデルを用いてシミュレーション計算を行い、隣接する大きなアスペリティ (固着域) による影響の度合いを大雑把に見積もった (図5)。そして、次のパークフィールド地震の発生時期は、1992±9年 (粘弾性体である下部地殻の緩和時間が15年の場合) あるいは1995±11年 (同じく7.5年の場合) との予測結果を得た。図6に、今回の地震を含め、1857年以降のパークフィールド地震の発生時期を発生順にプロットして示す。発生間隔は一定で

はなく、むしろ最近になって有意に長くなっており、各地震をつなぐ線は図4のGHあるいはMMにおける曲線と似た曲線状を呈していることがわかる。

今回のパークフィールド地震の発生時期は当初の予測1988±7年より大幅に遅れたが、上記のように隣接するアスペリティの影響を考慮に入れば、2004年に発生したことはそれほど不思議ではないことになる。すなわち、当初の予測がはずれた原因は、1983年コーリング地震の発生による応力変化の影響もある程度はあろうが、主としてパークフィールド地震の震源域への応力蓄積レ

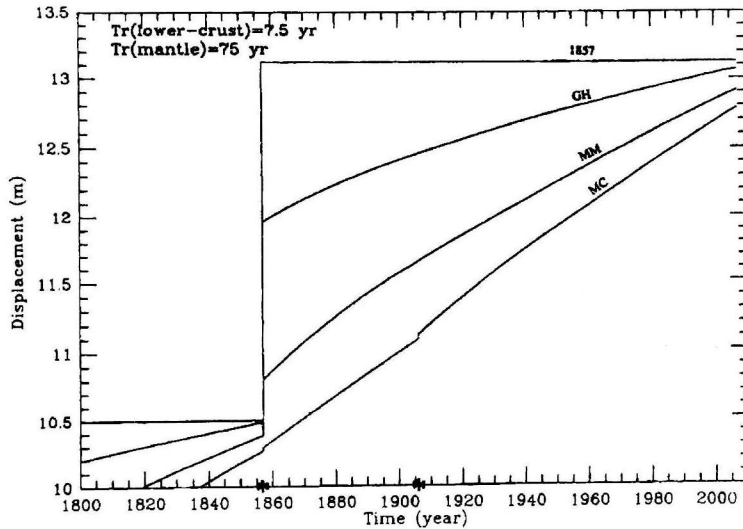


図 5 シミュレーションにより得られた各地点におけるすべり量 (Ben-Zion et al., 1993). 一番上の線は 1857 年フォートテホン地震の震源域. GH, MM, MC はそれぞれ Gold Hill, Middle Mountain, およびクリーブ区間の中央の位置におけるすべり履歴を示す.

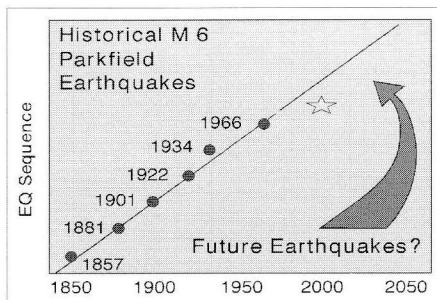


図 6 パークフィールド地震の発生履歴. 縦軸は地震の順番, 横軸は時間を示す. (CISN homepage)

トが時間的に一定であるとの誤った (単純過ぎる) 考え方に基づいて行われたことによる. 複数の大きなアスペリティが近接して分布している場合, それらの相互作用をきちんと評価してやらないと時期を大きく間違えてしまうことを示す好例である.

また, 既に記したように, 今回の地震は, 予測と違って北西側のクリーブ区間からではなく, 南東側からその破壊が始まった. フォートテホン地震のアスペリティとパークフィールド地震のアスペリティの間には安定すべり域があるはずだが

ら, そのような破壊様式があっても不思議というわけではない. ここでも, 1922 年, 1934 年, 1966 年と全て北西側から破壊が始まったので次の地震も同じであろうとの単純な考え方が, いつも成り立つわけではないことを示している.

5. 相似地震—繰り返し小地震

図 2, 図 3 をみると, 余震の多くがバックグラウンドの地震活動 (地震と地震の間の通常の間における地震活動) と同じ位置に発生していることがわかる. 既に述べたように, 1966 年の地震の余震の震源も, 同じ位置に分布する傾向がある. 一方, この地域では, バックグラウンドの地震活動の約 4 割が, 相似地震, すなわち同一の小さなアスペリティパッチの繰り返しすべりによる地震 (繰り返し小地震) であることがわかっている (Nadeau et al., 1995). このことから, 余震の中には繰り返し小地震の再活動が多数含まれていることが想像される.

なお, SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth) 計画では, パークフィールド地震の震源域に発生している, M 2 クラスの隣り合う

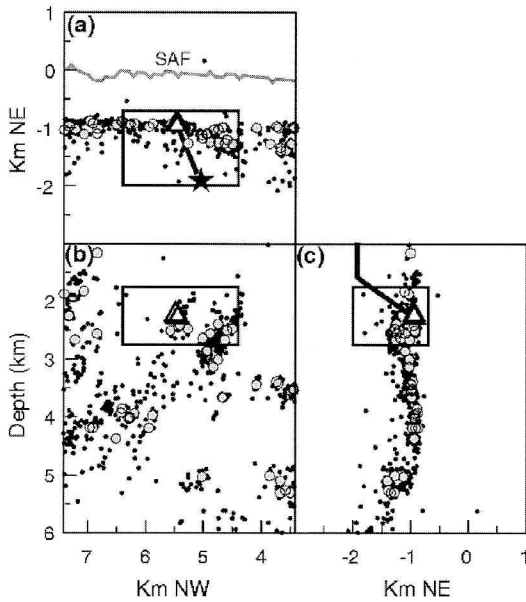


図7 SAFOD計画でその震源断層を掘り抜く予定のターゲット地震の位置図 (Nadeau et al., 2004). (a), (b), (c) はそれぞれ平面図, 北西-南東方向の鉛直断面図, 北東-南西方向の鉛直断面図. 白三角が2つのターゲット地震. 灰色の丸は繰り返し小地震, 黒点はその他の地震. 星印および太実線は掘削孔の位置を示す.

2つの繰り返し小地震(図7)の震源断層を掘り抜くことを計画している (Hickman et al., 2004). 約2.2 kmの深さにあるこの小さな(約100 m程度)アスぺリティパッチを掘り抜くことを目指して, 第1期工事で予定通り深さ1.8 kmの掘削が終了したところで, 9月28日の地震が発生した. 本年に予定されている第2期の工事では, いよいよ震源断層に到達することになる. 断層面沿いのアスぺリティと安定すべり域を形成している物質を, それぞれ直接手に取って見ることが可能となるのである. アスぺリティの成因を知る上で極めて重要な情報がもたらされるわけで, 今からその結果が待ち遠しい.

SAFODでターゲットとされた2つの繰り返し小地震は, 次回の活動が2006年のはずであったが, 今回のパークフィールド地震の大きなすべりにより, その2日後に時期を早めて発生した. このことはM6の地震の断層面の端部に位置する

100 mほどの小さなアスぺリティパッチが, M6の地震が発生しても保存されていることを示している. このことはアスぺリティの振舞いを理解する上で重要である. さらに言えば, 近年相似地震(繰り返し小地震)を用いてプレート境界面における準静的すべりの時間発展を推定する研究が行われるようになってきたが (Nadeau and McEvilly, 1999; Igarashi et al., 2003), そのような推定手法の妥当性を支持するものでもある.

6. 前駆すべり (プレスリップ)

近年の室内実験の研究成果に基づく地震発生モデルによれば, 地震発生前にすべり破壊核が形成されることが期待される (例えば, 大中・松浦, 2002). パークフィールドで地震発生が予測されたことから, このすべり破壊核形成過程を検出することを目的として, 震源域周辺には歪計の観測網が展開されていた. 当初の予測から発生時期が遅れたため, 観測網のうち一部の観測点は廃止されていたが, それでも震源域およびその極く近傍に5点の孔井式歪計が稼働していた. 高感度の地殻変動観測計器がこのように震源域の直上に設置してあったケースは稀であり, 前駆的なすべりが実際に検出されたか否かは, 地震の直前予測にとって極めて重大な問題である.

図8に, 5観測点における体積歪計のデータを示す. 今回の地震発生前の10日間のデータであり, 太線が潮汐成分を取り除いた後の体積歪である. 図から, 幾つかの観測点で24時間程度前から10ナノストレインあるいはそれ以下の変化がみられる. ただし, このような時間スケールで, この程度の振幅変化は, 他の時期にもみられることがあり必ずしも有意な変化とは言えない (Langbein et al., 2005).

図9には, 図8で示した5つの観測点のうち, VC観測点における地震前20秒間のデータを示す. 10^{-10} レベルで顕著な変化がないことがわかる. 図には示していないが, 他の観測点でも同様である. このことは, ストレスドロップを3MPaと仮定すると, 地震前20秒間に 7×10^{13} Nm (Mw

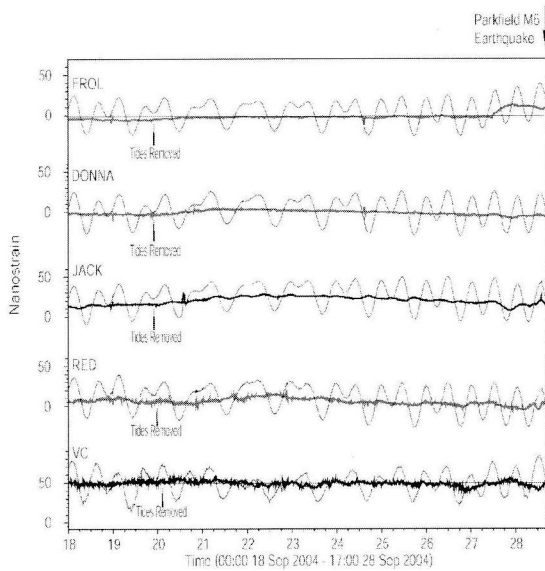


図 8 地震前 10 日間の体積歪計の記録 (Langbein et al., 2005). 上から順に震源域に設置された 5 つの観測点 FROL, DONNA, JACK, RED, VC のデータを示す. 薄い実線は気圧補正後のデータ, 太い実線はそれに潮汐補正を施したデータを示す.

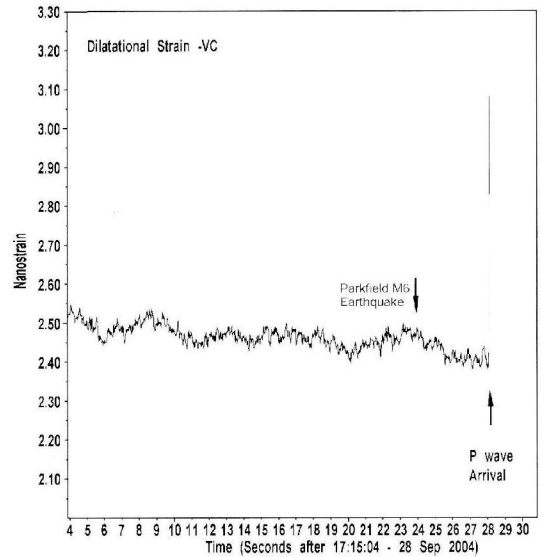


図 9 地震前 20 秒間の体積歪計の記録 (Langbein et al., 2005). 観測点 VC のデータを示す. パークフィールド地震の震源時刻, VC 観測点への P 波到達時刻をそれぞれ矢印で示す.

3.2) 以上のプレスリップがなかったことを意味する (Langbein et al., 2005). M 6 の地震で Mw 3.2 以上のプレスリップが発生しなかったことになる. 2003 年の十勝沖地震 (M 8.0) で Mw 6.5 以上のプレスリップは発生しなかったという報告 (西村, 2004) と合わせ, プレスリップの検出に依拠する短期予測の難しさを示す観測データである.

7. おわりに

過去の規則的な発生の仕方から次の地震の発生が予測されていたパークフィールドで, 2004 年 9 月 28 日に予測通り M 6 の地震が発生した. この地震が集中的な観測体制が敷かれていた中で起こったことから, 得られたデータは地震予知研究の上で極めて貴重である. これらの集中観測によるデータの解析は, 多くの研究者により現在鋭意進められているところであり, 今後多くの重要な研究成果が得られるものと期待される. それら

は, 今後順次発表されてゆくであろうが, 本稿では今回の地震直後にカリフォルニア州モンテレーで開催された UJNR 第 5 回地震調査部会とその後のフィールドトリップで見聞きしたこと, USGS や CISN の homepage で得た情報および Langbein et al. (2005) に基づいて, 今回の地震の特徴の概要を, 地震前の予測と比較しながら紹介した.

データ解析がまだ予備的な段階であっても, 本稿で紹介したようにそこから学ぶべきことは多い. 最も大きな教訓は, 現象をモデル化するためには単純化せざるを得ないが, 本質的に重要な要素を無視して単純化してはいけないということであろうか. 今後詳細な解析が進んでいけば, さらに学ぶべき多くの重要な情報が得られるものと期待される.

参考文献

Bakun, W.H., and T.V. McEvelly, Earthquakes near Parkfield (1979), California: Comparing the 1934

- and 1966 sequences, *Science*, 205, 1375-1377.
- Bakun, W.H., and T.V. McEvilly, Recurrence models and Parkfield (1984), California, earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 89, 3051-3058.
- Bakun, W.H., and A.G. Lindh, The Parkfield (1985), California earthquake prediction experiment, *Science*, 229, 619-624.
- Ben-Zion, Y., J.R. Rice, and R. Dmowska (1993), Interaction of the San Andreas Fault creeping segment with adjacent Great rupture zones and earthquake recurrence at Parkfield, *J. Geophys. Lett.*, 98, 2135-2144.
- CISN homepage : <http://www.cisn.org/>
- Hickman, S., M. Zoback, and W. Ellsworth (2004), Introduction to special section : Preparing for the San Andreas Fault Observatory at depth, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12501, doi : 10.1029/2004GL020688.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa (2003), Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 108, 10.1029/2002JB001920.
- Langbein, J., R. Borchardt, D. Dreger, J. Fletcher, J.L. Hardebeck, M. Hellweg, C. Ji, M. Johnston, J.R. Murray, R. Nadeau, M.J. Rymer, and J.A. Treiman (2005), Preliminary Report on the 28 September 2004, M 6.0 Parkfield, California Earthquake, *Seism. Res. Lett.*, 76, 10-26.
- Nadeau, R.M., and T.V. McEvilly (1999), Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes, *Science*, 285, 718-721.
- Nadeau, R.M., W. Foxall, and T.V. McEvilly (1995), Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield, California, *Science*, 267, 503-507.
- Nadeau, R.M., A. Michelini, R.A. Uhrhammer, D. Dolenc, and T.V. McEvilly (2004), Detailed kinematics, structure and recurrence of micro-seismicity in the SAFOD target region, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12508, doi : 10.1029/2003GL019409.
- 西村卓也 (2004), 2003年十勝沖地震直前の地殻変動・地下水とプレート境界すべりの検知能力, 日本地震学会 2004年秋季大会.
- 大中医譽・松浦充宏 (2002), 地震発生の物理学, 東京大学出版会, pp. 378.
- Toda, S., and R.S. Stein (2002), Response of the San Andreas Fault to the 1983 Coalinga-Nunez Earthquakes : An application of interactionbased probabilities for Parkfield, *J. Geophys. Res.*, 107.
- USGS homepage : <http://www.usgs.gov/>

安政江戸地震の震源は深いか浅いか

—地球シミュレータで再現した安政江戸地震の揺れと震度分布—

これまで関東に壊滅的な被害をもたらした地震には、1703年元禄関東地震(M 7.9~8.2)、1855年安政江戸地震(M 7)、1923年関東地震(M 7.9)の3つが挙げられる。このうち、元禄地震と関東地震は約240年の間隔で起きるフィリピン海プレート上面のプレート境界地震であるが安政江戸地震の発生メカニズムはよくわかっていない。

死者7,000人余、全壊家屋14,000棟の被害を引き起こした安政江戸地震は、その被害分布の特徴から、震央は東京湾北部の隅田川河口付近であったことはほぼ間違いない。しかし、この地震がどのプレートで起きたか、すなわち深いか浅いかは不明である。関東直下では安政江戸地震タイプのM7クラスの地震が過去に繰り返し起きており、地震調査研究推進本部の発表によれば今後30年内の発生確率は70%になるという。首都圏直下地震の防災対策を立てる上で、安政江戸地震の震源の深さを探ることは急務の課題である。

安政江戸地震は、フィリピン海プレート^{1),2)}ないし太平洋プレート³⁾で起きた、深い($h=30\sim 80$ km)地震であるという説が一般的である。これらの研究では、関東平野や江戸市中の詳細震度分布⁴⁾を良く説明するように震源の深さが推定されている。歌舞伎役者の中村仲蔵の手記「手前味噌」の中の揺れの詳細な描写から、初期微動継続(S-P)時間が長かった(数秒~10秒)ことが伺え、これも深い地震を支持する根拠となった⁵⁾。

ところが、近年の詳しい調査によると、他の古文書にはS-P時間が極めて短いような表現から、十秒程度と読み取れるものまで、さまざまな記述があることがわかった⁶⁾。また、軟弱

な堆積層に覆われた関東平野の中でも特に地盤の悪いところでは、地震によらずいつも震度が大きくなることも、古地震の被害調査⁷⁾や近年の高密度地震観測から明らかになった。このことは、関東平野の震度分布だけから安政江戸地震の深さを推定することの難しさを示している。

そこで視点を関東から離し、日本列島全体の「広域震度分布」を見てみよう。広域の震度分布は表層地盤の影響に加えて、さらに地殻、マントル、そしてプレートのような大きなスケールの速度と減衰の構造の影響をより強く受けるために、震源の位置と深さによって震度分布が大きく異なることが期待されるからである。

安政江戸地震の広域震度分布を見ると、震央の近傍で震度が6から5に急激に減じた後に、震度4のすそ野が、石巻、新潟、岐阜に至る広い範囲にわたって広がる「富士山型」の形状になっている(図1)。もし、太平洋プレートの深い地震であったならば、関東-東北-北海道にかけての太平洋沿岸に大きな震度の領域、すなわち「異常震域」が現れるはずである。また、関

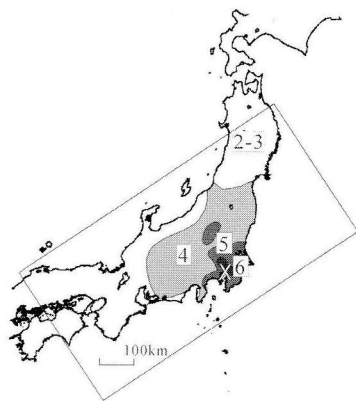


図1 1855年安政江戸地震の震央(×印)と震度分布

東地震のように、フィリピン海プレートの地震であった場合には、プレートの走行に沿って、やや東西方向の「扁平な同心円」の震度分布が期待される。しかし、安政江戸地震の震度分布はこのどちらのタイプにも当てはまらない。

ところで、図1に見られるような「富士山型」の震度分布は、浅い地殻内地震で良く見られる現象である。たとえば最近の内陸地震として1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、2003年宮城県北部の地震、そして2004年新潟県中越地震の震度がそうである。浅い地震では、震央から離れるとともに震源距離が直線的に増大し、震度は急激に小さくなる。一方、震央距離が150 kmを超えると、地殻内(地表とモホ面)でS波の全反射が起きようになり、地殻内を伝わるトラップS波(Lg波)によって、遠地まで大きな震度をもたらされる。このように考えると、安政江戸地震は浅い地殻内地震の可能性が出てくる。

このことを確認するために、地球シミュレータを用いて安政江戸地震の震度の再現を試みた⁸⁾。計算では、中国地方～中部日本～東北地方の地殻と上部マントル、プレート構造を水平400 m、鉛直200 mの分解能で31億格子にモデル化し、16次精度の高次差分法を用いて周波数3 Hzまでの高周波地震動を計算した。震源の深さが10 km(地殻内)、35 km(フィリピン海プレート内)、75 km(太平洋プレート内)の3つ

の場合についてシミュレーションを行い、求められた加速度波形から計測震度を計算した。なお、震源断層は点震源で近似し、震源メカニズムは関東地震と同様の低角逆断層型とした。なお、地球シミュレータの1920 CPUを用いた並列計算には40分を要した。

計算から求められた震度分布は図2のようになった。まず、太平洋プレートの地震では、東北-北海道の太平洋岸に異常震域が現れた(図2c)。これは1894年明治東京地震(M7)の余震と考えられている、同年10月7日の地震(M6.7; h=120 km)の震度分布に近い。次に、フィリピン海プレートの地震の計算では、関東地震と同様に同心円状の震度分布が得られた(図2b)。最後に、地殻内地震の計算結果には、(図2a)。震央の近傍で震度が急減した後に震度4のすそ野が広がるという安政江戸地震のものに近い「富士山型」の震度分布が再現された(図2a)。加速度波形を見ると、この大きな震度のすそ野はLg波の伝播によって生まれたこともわかった。

もし、安政江戸地震が地殻内地震であったとすると、そのとき関東平野の揺れはどのようなものであつたらうか。地球シミュレータを用いて首都圏直下地震の強震動を再現してみた⁹⁾。震源断層モデルには兵庫県南部地震のものを用い、東京湾北部を震源に、北西-南東方向に断層破壊が進行すると仮定した。深さ10 kmの浅い

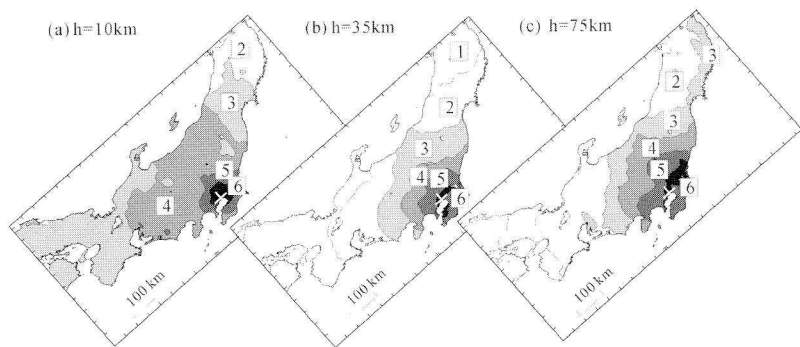


図2 シミュレーションから求められた震度分布、(a)深さ10 km、(b)35 km、(c)75 kmの地震の場合。

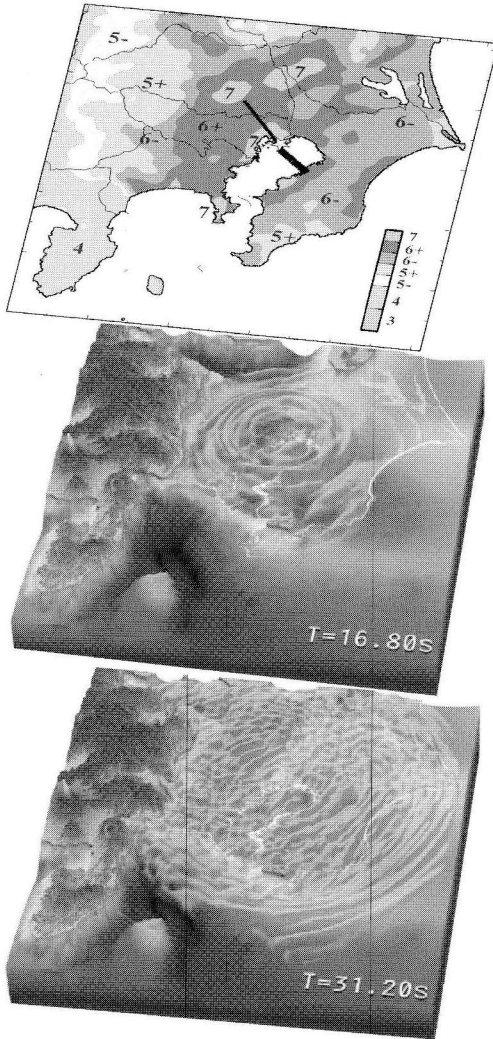


図3 関東直下の地震の波動伝播（地震発生後16.8秒，31.2秒）と震度分布（上）。

断層滑りから放射された地震動は、関東平野の厚い堆積層と軟弱地盤で強く増幅され、また揺れが平野の中に閉じこめられるために、大きな揺れが1分以上にわたって長く続くことがわ

かった（図3）。このとき関東平野の大部分が震度6強、また地盤の悪い場所では震度7となるほか、都心部では周期約7秒の長周期地震動が最大100 cm/sの大きさに現れた。

参考文献

- 1) 大竹政和, 1980, 関東・東海地域のテクトニクスの統一モデルと南関東直下の地震の発生メカニズム, 防災科学技術, No 41, 1-7頁.
- 2) 中村 操・茅野一郎・唐鎌郁夫・松浦律子・西山昭仁, 2003, 安政江戸地震(1855/11/11)の江戸市内の被害, 歴史地震, 18号, 77-96頁.
- 3) 引田智樹・工藤一嘉, 2001, 経験的グリーン関数法に基づく1855年安政江戸地震の震源パラメーターと地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 546号, 63-70頁.
- 4) 宇佐美龍夫, 1996, 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会.
- 5) 萩原尊禮, 1990, 江戸—東京の直下地震, 古地震から探る, 地震ジャーナル, 10号, 1-6頁.
- 6) 中央防災会議, 2004, 1855安政江戸地震報告書, 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会.
- 7) 都司嘉宣・中村 操・武村雅之・諸井孝文, 2003, 江戸・東京の地震, ドキュメント災害史1703-2003, 国立歴史民族博物館, 41-47頁.
- 8) Takashi Furumura and Li Chen, 2005, Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, Parallel Computing, vol. 31, 149-165.
- 9) Takashi Furumura, 2005, Large-scale parallel simulation of seismic wave propagation and strong ground motions for the past and future earthquakes in Japan, Journal of the Earth Simulator, vol. 3, 1-10.

(古村孝志)

地震動予測地図の工学利用

—地震ハザードの共通情報基盤を目指して—

亀田弘行

はじめに

政府の地震調査研究推進本部による「地震動予測地図の作成」プロジェクトが発足して6年が経過し、その成果が明確な姿を取ようになった。この新たな資源をどのように活用するかは、今後の我が国の地震防災力向上を目指すうえで重要な課題である。中でも、その工学利用は大変重要なテーマのひとつである。

本稿は、平成14年6月～平成16年12月に活動した防災科学技術研究所 地震動予測地図工学利用検討委員会（以下、差し支えない限り「工学利用委員会」と略称）の成果¹⁾に基づき、地震動予測地図の工学的利用の可能性と今後の展望を論ずる。その論点は、地震動予測地図を「地図」として見るだけではなく、多様なデータベース機能を兼ね備えた「地震ハザードの共通情報基盤」として活用しようとする視点に集約される。

1. 地震動予測地図の工学利用に関する検討の経緯

「地震動予測地図の作成」方針は、平成11年4月に地震調査研究推進本部により決定され、以来、同本部・地震調査委員会（同委員会の「長期評価部会」および「強震動予測部会」）により実施されてきた²⁾。その成果として、「全国を概観した地震動予測地図」が最近発表された^{3),4)}。一方、地震動予測地図作成の成果を社会に適切に普及する方策が、同本部・政策委員会の「成果を社会に活かす部会」において検討されてきた。その検討結果についても最近報告がとりまとめられた⁵⁾。

このように、地震動予測地図作成の事業では、社会の防災力向上に役立てるという政策的使命を強く認識した活動が展開されてきたが、その中で、工学利用については専門的色彩が強く成果を社会に活かす部会のみで議論を尽くすことが困難であること、かつ工学的利用はプロジェクトの成果を活用できる大きな可能性を持つ分野であることから別途入念な討議が必要との観点から、文部科学省地震調査研究課（当時）の要請により、地震動予測地図の工学利用を集中的に検討するために、工学利用委員会が防災科学技術研究所の理事長達により設置され、筆者は委員長としてこの活動に携わった。

工学利用委員会は防災科学技術研究所内に設置された委員会であるが、その結果は成果を社会に活かす部会に報告され、同部会の検討事項として討議されることが前提とされた。工学利用委員会は平成16年6月から平成17年12月の間に20回開催され、地震動予測地図の工学利用に関する提言をとりまとめて成果を社会に活かす部会に提出した。さらに、委員会の検討結果の詳細をとりまとめた報告書¹⁾を刊行して、その活動を完了した。

2. 地震動予測地図の工学利用討議の意義

「地震動予測地図の作成」においては、(1)地震発生の不確定性を反映した地震動分布（確率論的地震動予測地図）、および(2)特定の震源メカニズムを想定した場合の地震動分布（シナリオ地震による地震動予測地図）の2種類の表現形式を取ることとして作業が進められてきた。両者とも、従来工学分野で多数の試みがなされ、ノウハウが蓄

積されてきている。その中で今回の地震動予測地図の工学利用を討議することの意義をどこに置くべきであろうか。工学利用委員会では、以下のような認識のもとに検討を進めることとした。

工学目的の開発では、それぞれ目的別に手法が検討され、応用されることが多い。それは工学という実用的な目的行為においては当然のことであるが、個別に開発された手法の目的合理性を超えてそれらの相互関係が検討されることは少ないし、地震・地震動という共通の現象を対象にしながら、手法が持つ普遍性を追求する動きは活発とは言えなかった。

この状況のもとで、地震調査研究の一環として進められてきた地震動予測地図作成のプロジェクトは、地震学の最新成果に基づく知見を共通基盤として生かそうとする、理学分野からの働きかけの意味を持つもので、これが工学的活動とどう結びつくかを議論することは、地震ハザード評価の分野に新たな展開をもたらす可能性がある。工学分野からもこの議論を真剣に受け止めることが重要と考えられる。

3. 地震動予測地図の工学利用に関する討議の要点

地震動予測地図の工学利用を検討にあたり、討議のポイントを以下のように整理した。

(1) 工学利用に必要な地震動情報の多様性

地震防災対策における工学の役割は多様であり、必要とされる地震動情報もまた多様である。すなわち、リスク評価に必要な発生確率情報を含む地震動分布、特定の重要施設を対象とするサイトスペシフィックな問題に必要な詳細な地震動情報、地域の被害予測やライフラインのような広がりを持つシステムの防災課題に必要なシナリオ型地震動など、多岐にわたる。また、必要とされる地震動パラメータも、最大加速度/速度、震度、応答スペクトル、卓越周期、継続時間、非定常スペクトルなど多様である。

(2) 地震動と地震力の相違

自然現象としての地震動（地表面、工学的基盤、地震基盤などでの地震動）と、工学システムに作

用する地震力（地盤-構造物基礎の相互作用、表層地盤の変形、液状化、地震荷重など）は同一ではない。地震動から地震力への変換の過程が不可欠であり、それが上記(1)に述べたような目的に応じた工学的活動への入力として意味を持つ。理学的に生成される地震動情報（地震動予測地図）が、工学的実践における地震力の評価に必要な情報を提供するか否かが地震動予測地図の工学利用の決め手となる。

(3) 確率論と確定論の確執の克服

地震防災は将来発生する地震への対策である。特定の活断層を見ても、数千年～数万年の地球物理学的時間スケールの中では地震は定常的に発生するとされるのに対し、地震防災が対象とする数十年～100年という人間社会の時間スケールの中では、地震発生の頻度は非定常に変化し、また発生時期も地震動強度も大きな不確定性を持つ。従って、地震防災の工学的実践は、常に「不確定性のもとでの意思決定」となる。このことから、不確定性を評価する手法が必要となる。不確定性を組織的に評価する手法には、確率論、ロジックツリー、ファジー理論などがあるが、その中で確率論は最も基本的な道具である。この意味で、地震動予測地図作成プロジェクトにおいて確率的に不確定性評価が行われることの意味は大きい。

工学の世界でも理学の世界でも、我が国では確率論を用いることへの抵抗が必ずある。それは、確率論という理論体系と現実に利用可能なデータ量のギャップに起因することが多い。しかしながら、不確定性の評価を恣意的でなく組織的に行うことの必要性を考えると、その道具としての確率論を忌避する理由はないと考える。ただし、「確率～%」という結果のみを示すだけでは工学的意義は薄く、確率的評価のプロセスを明確に示すことがきわめて重要である。これにより、工学で避けて通れない不確定性のもとでの意思決定に組織的な評価方法を与えることになる。

(4) 多様な工学的実践をサポートするものであること

地震工学において、阪神・淡路大震災の教訓から、固定的に定められた地震荷重で工学システム

の耐震性評価を縛る時代から、自然をありのままに再現して地震動シミュレーションを行い、これと構造特性との関係を厳密に解析して、これに基づき建物や社会基盤施設に作用する地震力を推定する努力が行われている。その手法は多岐にわたり、それは「地震工学の自由化の時代」といってよい。地震動予測地図作成プロジェクトは、こうした動きをサポートする情報を提供することが強く望まれる。

4. 地震動予測地図工学利用検討委員会 における討議の方針

以上に述べた認識に基づき、工学利用委員会は、地震動予測地図が持ちうる工学的意義と活用の可能性を検討し、そこから導かれる提言をとりまとめることを目標に活動を行った。提言は、既製品として提供される地震動予測地図をそのままどう使うかということではなく、工学的活用の需要を満たすために地震動予測地図の作成法やそこから提供されるべき情報内容への要請、およびそれらが達成されたとき可能な工学利用の呼びかけ、という両面から討議を進めた。すなわち、地震動予測地図の作成者と工学利用のユーザーの間を繋ぐ双方向のインターフェースの役割を果たそうとしたものである。

一方、工学利用委員会の活動は地震動予測地図作成プロジェクトと同時進行で進めたものであることから、地震動予測地図を作成する立場の委員と工学利用の立場の委員が協力して討議することが極めて重要であった。そのため、委員会を地震動予測地図の作成側と工学利用側とから構成し、両者の建設的な討議が進むことを委員会運営の重要事項とした（委員会の構成については付録を参照されたい：委員・事務局・アドバイザーの区別なく、討議に参加する形態とした）。これにより、工学的ニーズに基づく要請で委員会で意義が確認された事項については、作成側の委員の努力によって、できる限り公開システムに反映する体制が取られた。その結果、委員会から提唱された提言内容の多くは地震動予測地図公開システムの中で実現される見込みである。

地震動予測地図の成果として発表された「全国を概観した地震動予測地図」の報告書は地震調査推進本部のホームページから入手できるが³⁾、工学的に活用できる情報基盤の機能については、別途構築が進められている「地震動予測地図公開システム」により実現される見通しである⁶⁾。この公開システムは、防災科学技術研究所の特定プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」の一環として進められてきたもので、平成17年5月からの利用が予定されている。公開システムの表示例を図1に示した。

5. 地震動予測地図の工学利用に関する提言

地震動予測地図工学利用検討委員会では、1年半にわたる討議の結果をふまえて、以下に示す提言をとりまとめた。その内容は、地震動予測地図作成者への提言、成果を社会に活かす部会での検討事項の提言、および地震動予測地図の工学的利用者への提言からなる3部構成となっている。同委員会の成果の核をなすものであるため、その全文を掲げる。

(提言)

1. 地震動予測地図の作成者への提言（作成の技術的観点/今後に対する政策的観点）
 - 1.1 地震ハザードの共通情報基盤としての意義—地震および基盤地震動について理学的に最高のものを。
 - (1) 地震動予測地図作成の事業は、生成された地図を表示するだけでなく、地震ハザードの共通情報基盤を形成するデータベースとしての機能を果たすべきであり、そこに工学利用の大きな可能性がある。特に、地震および基盤地震動について、理学的に最高水準のものを実現すべきである。
 - (2) 確率論的地震動予測地図は全国的な概観と相対的な地域間比較、シナリオ地震地図は特定の地震シナリオに対する詳細な地震動分布と、それぞれの目的に応じて作成されており、現段階では両者の間に方法論的なギャップがある。将来は、すべてを詳細法で計算し、これを加重平均することにより

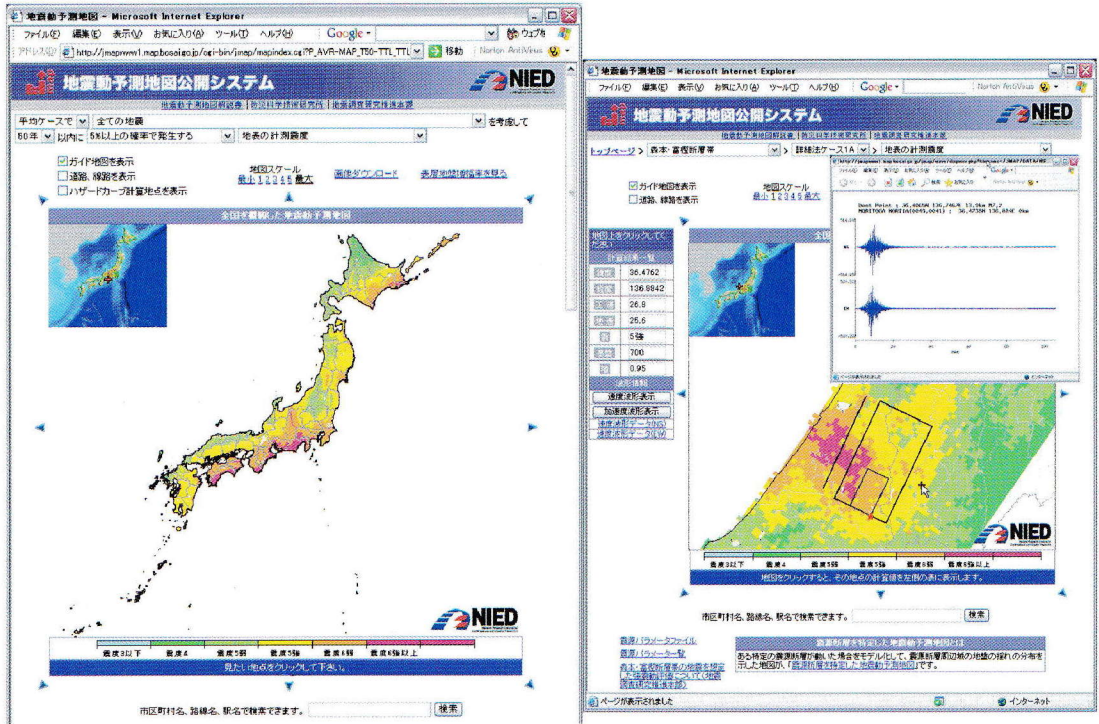


図 1 地震動予測地図公開システムの表示例⁶⁾

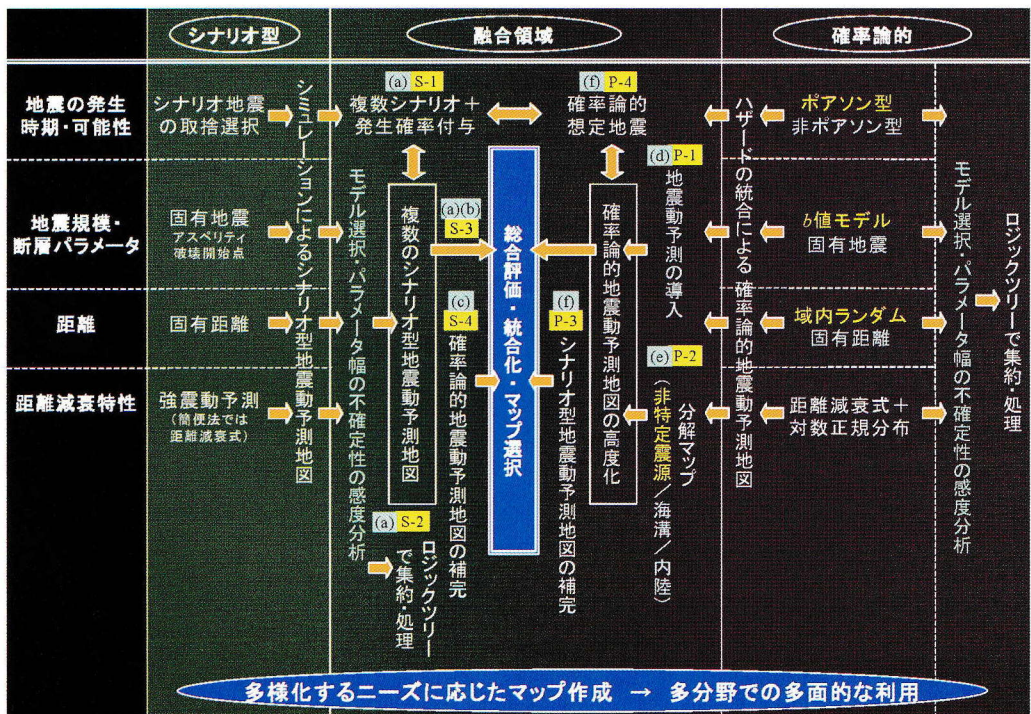


図 2 地震動予測図へのニーズの多様化とシナリオ型地図・確率論的地図の融合の枠組み (文献 1), p.450)

確率評価を行える状況、すなわち両者が方法論を共有するシームレスな関係となるよう高度化の努力が傾注されるべきである。

- (3) 距離減衰式に関し、北日本版において異常震域の効果を考慮する新たな開発が行われた。簡易的手法においても、このような改善が必要な他地域について、同様の改善が進むことが期待される。
 - (4) 地震動予測地図作成プロジェクトを通して形成されつつある理工学の協力の活動を将来にわたり育てて行くことが重要である。それは、評価手法に関する専門家間の合意形成と標準化の努力、学術や技術の進歩を適切に反映する更新の努力などが有効に機能する仕組みとすべきである。
- 1.2 表示項目の多様性—工学サイドで多様な技術的活動ができる（活動の自由度ある）インターフェースを、
- (1) 工学的利用において必要となる多様な地震動パラメータを発信すべきである。例えば、確率論的地震動予測地図については震度以外に最大加速度・最大速度・応答スペクトル・SI 値など、シナリオ地震地図ではこれらに加えて波形を含めること、などである。
 - (2) 地震動予測地図の工学利用に係わる発信の対象は多様であり、1) 詳細な解析担当者（高度システム—建物・ライフライン・プラント関係者 etc.）、2) 一般エンジニア（設計・診断）、3) 防災担当者（主として行政）、4) 非専門家（政策決定者・地域リーダー・市民）等多岐にわたる。それに応じて、発信内容は1) 詳細情報（設定条件、基本データ、プロセス、不確定性情報、多様な地震動パラメータ）、2) 簡潔な情報（たとえば、基盤における速度の分布地図）、3) 定性的表現（ランクづけ etc.）等、論理的整合性を保持しつつ多様な表現を用いることが重要である。
 - (3) 工学利用においては、ハザードマップからリスクマップへの変換が重要である。そのためには、最終的な確率論的地震動予測地図だけでなく、算出過程に現れるパラメータに工学利用上重要な情報があるので、そ

れらを発信情報に加えるべきである。例えば、特定サイトに対して、各地震ソースからの影響度（確率を固定する場合には地震動強度と個別ソースの影響度、地震動強度を固定する場合には全体確率と個別ソースの影響度）の数値を示すことなどである。

- (4) 確率論的地震動予測地図については、種類が異なる多様な震源の効果を集積するという長所を活かすとともに、個々の震源の影響が隠されるという欠点を補って、成果が誤解なく活用されるよう、きめ細かい情報提供が必要である。例えば海溝型地震と内陸活断層型地震では発生確率に大きな違いがあること、また両者では地震動の諸特性が異なることから、それらの影響を重ね合わせた確率論的地震動予測地図だけでなく、それぞれの分類毎の地図をあわせて提供し、またそれぞれの影響度を表す数値を示すべきである。特にこれら2つのタイプの地震の工学的影響は周期によって異なるので、周期別の影響度を示すことが工学利用の重要な基盤となる。
- 1.3 結果のみでなく、プロセスの開示—不確定性評価のプロセスが分かるように、
- (1) プロセス開示の必要性：地震動予測地図を生成する基本として与えられているデータを示すべきである。これにより、現代的要請である性能ベースの設計、ライフサイクルコスト、保険金額の算定、などの地震防災ニーズに対して、現状の技術体系のもとで地震動予測地図を活用できる。
 - (2) 確率論的地震動予測地図について：地震活動領域の諸元（M-N 関係のタイプとパラメータ、それぞれの変動係数など）地震動に関する諸元（距離減衰式に関する説明、係数に与えたばらつき、地震基盤から工学的基盤及び表層地盤へ至る動的基盤物性とそのばらつき、など）を開示する。
 - (3) シナリオ地震地図について：シナリオ地震のソースパラメータ（断層位置・形状、アスペリティーの分布、断層の動的パラメータ、発生確率、地下構造、それらのばらつき、など）、シナリオ地震地図におけるシナ

- リオ選定のルールを明示する。
- 1.4 公表システムの作成—有効なユーザーインターフェイス形成へ/条件設定に関する吟味が可能なように。
 - (1) 情報開示の手段は基本的にインターネットによるが、受け手の設備状況に応じてDVDなど適切な媒体を組み合わせるべきである。
 - (2) ハザード計算におけるプログラムをできる限り公開し、ユーザーが条件を変えて計算し直す環境を整備すべきである。具体的には、確率論的地震動予測地図の算出における地震ソース毎の条件を再設定した計算、詳細法によるシナリオ地震地図の対象になっていない活断層について簡便法（距離減衰式を用いる）によるシナリオ地震による地震動の概略推定地図の作成、といったサポートである。
 - (3) 丁寧な解説が重要である。利用に関する可能なメニュー（網羅的でなく現実的に）、確率論的地震動予測地図とシナリオ地震地図の主旨と両者の関連（融合）、利用に関する質問・回答のページ設定など。
 - 1.5 適切な更新の重要性—学術・技術の進歩を反映できるように。
 - (1) 学術的な進歩による発信情報の高度化、工学利用技術の進歩による発信内容の多様化等が実現するよう、地震ハザードの共通情報基盤としての地震動予測地図を定期的に更新する仕組みを確立すべきである。
 - (2) サイエンスに基づく地震動予測地図と工学利用における地震リスク地図の関係が継続的に機能するためには、それぞれの作成条件と利用条件を明示して理解し合う関係を推進することが必須である。作る側と使う側が連携できる仕組みを作り、両者がすれ違いにならぬよう図るべきである。例えば、本報告書に提案する「地震ハザードステーション構想」はその参考になろう。
 2. 成果を社会に活かす部会での検討事項の提言—地震動予測地図の理解において、低頻度巨大災害の視点/地震の特徴により変化する災害のクセへ正確な認識を育てる。

- (1) 内陸の活断層における地震の発生確率は地震動予測地図における超過確率に直接影響するから、地震動予測地図においても、一般国民向けの資料において、安心情報と受け取られる結果とならぬよう、その表現には細心の注意を払うことが必要である。すなわち、長期評価結果について、確率値とともに定性的表現を組み合わせるに至ったのと同主旨の検討を地震動予測地図についても行うべきである。
 - (2) 一方、地震防災の専門家（1.2(2)において1)~3)が該当）に対しては、例えば30年の超過確率3%は決して低い確率ではなく、「低頻度巨大災害」の観点から対策に取り組む対象であるとの認識の普及に努力すべきである。
 - (3) 発生頻度が高く広域的影響を持つ海溝型地震と低頻度で影響範囲が限られている内陸型（活断層）地震の影響を合成する結果後者の影響を消去してしまうことのないよう工夫が必要である。
3. 工学利用側への提言
 - 3.1 基本的方針—理工学の有効な接点/地震ハザードの共通情報基盤としての活用
 - (1) 地震動予測地図は、地震学の最新成果に基づく知見を共通基盤として生かそうとする、理学分野からの働きかけの意味を持つ。その成果を工学目的に活用することは、地震ハザード評価の分野に新たな展開をもたらす可能性が大きい。理工学の協力の場として、これまでの個別課題毎の協力とは異なる包括的な枠組みの可能性を現実的に推進すべきである。
 - (2) 工学的な地震危険度はハザードマップだけでなくリスク評価に結びつくことにより意義を持つが、異なる時代の間で共通性があるのは地震動であり、地震被害の内容は時代によっても構造物によっても変わる。従って、工学利用において、地震動をベースに考えることが地震リスクの正確な把握につながる。この意味で、地震動予測地図作成プロジェクトは工学的にも重要な意味を持つと考えるべきである。

- (3) 地震動予測地図の工学利用が可能な領域は、個別構造物や個別システムを対象とする設計・耐震性検証から、地域のマクロな被害想定や構造物・施設群の評価を伴う防災目標の設定や保険の評価など多岐にわたる。地震ハザードの共通情報基盤として地震動予測地図の積極的活用を図るべきである。

3.2 地震動予測地図の工学利用における評価の規範

- (1) 規範Ⅰ—個別構造物の耐震性能の絶対評価(安全性の明示)が求められる場合:個別構造物や個別システムの設計・耐震性能検証(サイトスペシフィックな課題)においては、一部に確率論的地震ハザード評価(確率論的地震動予測地図)を活用した事例が見られるようになりつつあるが、主としてシナリオ型地震動評価(シナリオ地震地図)が用いられてきた。特に、高度な動的解析等のシミュレーション技法を駆使して耐震検討を行う場合には地震動の波形が必須条件となる。現段階の地震動予測地図では、このような条件はシナリオ地震地図においてのみ実現可能である。また、個別構造物や個別システムの設計における耐震性能の評価は、オーナーとの関係において絶対評価(安全性の明示)が求められることが多い。この状況下においては、決定論的に示されるシナリオ地震地図の方が理解が容易である。ただしこの場合でも、不確実性が高い地震現象を扱っていることを忘れるべきではない。対象とするシナリオ地震の発生確率や、震源メカニズムと地震動の生成・伝播における不確実性に基づく総合的な地震動の発生確率を、リスク認識に係わる情報として併せて活用すべきである。
- (2) 規範Ⅱ—包括的な防災目標設定や優先順位づけのために相対評価が求められる場合:日本全体や特定の地域において防災・減災の目標を設定する場合、防災投資やストック管理のためのリスク評価など、構造物群・システム群の耐震性能評価が求められる場合には、将来にわたり発生しうるすべての地震シナリオを考慮した地震ハザード

評価とリスクの地域的分布の相対評価が求められる。また、マルチハザード評価の問題では、地震リスクと台風・水害・日常の事故などのリスクとの相対比較から重要なハザード要因を特定することが求められる。これらの状況の下では、確率論的地震動予測地図が必要なハザード情報を与えるものであり、その積極的活用を図るべきである。この場合でも、部分的な詳細検討が必要な場合にはシナリオ地震地図を併用することは有効である。

3.3 地震工学高度化の要請と地震動予測地図の活用

地震防災課題はすべて、地震ハザードに関する大きな不確実性のもとでの意思決定問題である。この問題に正面から取り組むことは地震リスク評価の問題であり、確率的評価が不可欠となる。それは工学システムの地震リスク評価においてすでに典型的に見られるものであり、個別構造物の設計の分野においても、性能設計の方向に時代が踏み出している以上避けて通れない問題である。この方針を追求していくうえで、地震動予測地図の活用は、これまで述べたように大きな可能性を持つと考えるべきである。

地震リスク評価の信頼性を向上させるために、地震ハザードについては1.1(2)に述べた理学的な面での高度化の努力が要請される。一方、構造物の損傷評価に関しては、いまだ経験工学的性格が強いこと、構造物の真の強度については未だ不明な点が多いことなどから、設計モデルと被災する構造物の現実の間には少なからずギャップが介在する。より洗練された地震リスク評価を目指すためには、構造物の損傷評価においてもこのギャップを無くし、確率論的评价に耐える場を形成するという、地震工学高度化の努力が強く要請される。地震工学の分野は、すでに性能設計の時代に歩み始めており、そこでは構造物の耐震性能はリスク規範により評価されることから、これは重要な課題である。

6. 地震動予測地図の工学利用に関する展望 —「地震ハザードの共通情報基盤」の成立に向けて

地震動予測地図工学利用検討委員会報告書¹⁾に

は、上記提言をとりまとめる基礎となった多くの検討結果が収録されている。特に、提言の「3. 工学利用側への提言」は、報告書の大部分を占める工学利用の具体的事例への討議の結果に基づいている。報告書の構成は、上記の提言を冒頭に掲げた後、1. 総説、2. 地震動予測地図作成の意義、3. 地震ハザード評価の現状と問題点、4. 地震動予測地図の工学的ニーズと利用例、5. 地震動予測地図の工学利用の今後、から成り、それぞれについて詳細な検討結果が記述されているので、関心ある方はぜひご一読頂きたい。

委員会では、できる限り多くの人々から意見を得る討議の場を持つことを目的として、公開の「地震動予測地図工学利用ワークショップ」(平成15年10月29日:防災科学技術研究所研究交流棟にて/参加者157名)を開催した。さらに、特定の重要課題について、その分野のリーダー的な専門家に委員会にご出席頂き、討議の機会を持った。これらの討議は、工学利用委員会の検討内容の幅を広げ、委員会が真に作成者と利用者の橋渡しの役割を果たすべき論調へと舵を切るうえで大きな力となった。これらの成果も報告書の内容に反映されている。

本章では、これらの結果を受けて、地震動予測地図の工学利用に関する今後の展望を述べることにしたい。

(1) 地震動予測地図の工学利用の意義

以上に述べてきた所論から、地震動予測地図を工学分野に有効利用することを通して、社会の地震防災技術力の向上に寄与することが期待される。ここでは、筆者も関わった成果を社会に活かす部会報告書⁵⁾の記述をもとに、地震動予測地図の工学利用の意義を確認したい。

地震動予測地図作成の取組は、地震学の最新成果に基づく知見を共通基盤として活かす可能性を追求するものともいえる。強い揺れに見舞われる可能性や地震発生時の揺れの強さという地震ハザードの評価に必要な基本パラメータ(変数)について、広く誰でも活用できる共通的な情報基盤が作成されたのはこれが初めてのことである。地震動予測地図に関する情報については、地震動予

測地図そのものだけでなく、地図の作製に至る過程での震源モデル、地震動特性(波形・最大地動・応答スペクトルなど)、およびそれらの不確定性に関する豊富なデータ等が公開されることとなっており、それらはいずれも工学的に有用と考えられる。

地震ハザード評価を必要とする工学分野は、個別構造物や個別システムを対象とする設計・耐震性検証から、地域のマクロな被害想定や構造物・施設群の評価を伴う防災目標の設定や保険の評価など多岐にわたる。これらの活動において、これまで個別目的別に行われてきたハザード評価から進んで、共通の情報基盤に基づくハザード評価の体系が成立すれば、社会の防災技術全体の向上に寄与するであろうことは明らかである。この意味で、地震動予測地図作成の取組の成果として公開される各種データは、工学分野における「地震ハザードの共通情報基盤」として大いに活用されることが望まれる。

(2) 地震動予測地図の工学利用領域の例

委員会報告書の4.において、個別工学分野ごとに、地震ハザード評価の状況を論じ、あわせて地震動予測地図の適用の可能性を示した。これらの項目について、今後さらに広く議論が興ることを期待したい。

- 1) 確率論的地震ハザード評価:利用目的に応じて、①震源情報(断層諸元、発生確率)の利用、②特定地点でのハザード結果の利用(ハザードカーブ、一様ハザードスペクトル、確率論的想定地震)の利用、③ハザードマップ(ハザードカーブの点情報の地域分布)の利用、④地震リスク評価への展開、等の多様なレベルがある。
- 2) シナリオ型地震動評価:断層の破壊メカニズムを考慮した詳細な地震動評価が可能/特定した地震によって「同時に」発生する地震動の地域分布を知ることができる/工学利用面からのニーズや期待大/対象地点の地震動に及ぼす不確定要因に対する考慮が必要(原子力施設等)。
- 3) 学校施設の耐震化推進の提言(文部科学

省)：耐震診断の優先順位を決める調査の段階での活用が検討されている。

- 4) 建築建物の耐震設計：日本建築学会では、荷重・耐力係数設計法において荷重の発生頻度やばらつきを直接的に反映した設計式を提案。
 - 5) 土木学会：震源の特定できる非常に強い地震動は、その発生確率の高低に拘わらずレベル2地震動の候補として評価（シナリオ型地震動）/地震動の発生確率を考慮した経済性照査の概念が具体化中（確率論的地震ハザード評価の利用が期待される）。
 - 6) 広域ネットワーク（ライフライン等）：「一度にどの程度の被害が生じるか」が防災上の視点＝シナリオ型地震ハザード評価）/ライフサイクルにわたって考慮すべき地震シナリオ＝シナリオ型地震と発生確率を重畳（シナリオ型地震ハザード評価と確率論的地震ハザード評価の融合利用）。
 - 7) 自治体による地域防災計画：庁内や住民への説明のしやすさから、シナリオ型の地震動予測が現状では基本/地域内の相対的な地震危険度の差を示したり、公共建物の耐震化の優先順位を付けたりする戦略的な検討の際に、確率論的地震動予測地図の地域による相対的な震度差が有用な情報。
 - 8) 地震リスクマネジメント：不動産運用や金融・保険の分野において重要性が増している。建物の予想損失（PML）は不動産投資上のリスク指標の代表であり、これを求めるためには確率論的地震ハザード評価が不可欠。
 - 9) 原子力発電所の地震 PSA：地球物理学的な知見をできるだけ生のまま活かした高度な評価手法の適用が検討されている。
- (3) 地震動予測地図高度化への要請—確率的評価とシナリオ型評価の融合
- 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の手法は、それぞれの特徴を踏まえて、目的に応じて使い分けられているが、これまで、両評価手法の対立構造が強調されるきらいがあった。

これに対して、地震動予測地図工学利用検討委員会の討議を通して、「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」という技術的課題に取り組むことによって、「使用データ」「評価手法」および「評価結果」の共有化あるいは相互乗り入れを推進し、それぞれの弱点を克服できるよう努力することが必要という視点が明らかにされた。図2は、地震動予測地図へのニーズの多様化と関連付けて、両評価手法の融合の枠組みを説明したものである。

両評価手法の融合を目指す過程で考慮すべき事項は、以下のように、2分類、6項目に集約される。

- 1) シナリオ型地震動評価の立場からみた融合の方向
 - (a) シナリオ型地震動評価における確率論的要素の導入
 - ・シナリオ地震の選定方法の検証と発生確率評価の必要性（S-1）
 - ・シナリオ地震のパラメータ設定法の検証（S-2）
 - (b) シナリオ型地震動評価における評価結果の総合化・統合化
 - ・複数の評価結果の総合化・総合化の必要性（S-3）
 - (c) シナリオ型地震動評価による確率論的地震ハザード評価の補完
 - ・シナリオ型地震動予測地図による地震ハザードマップの補完（S-4）
- 2) 確率論的ハザード評価の立場からみた融合の方向
 - (d) 確率論的地震ハザード評価における決定論的要素の導入
 - ・強震動予測手法などの決定論的手法との組み合わせ（P-1）
 - (e) 確率論的地震ハザード評価における評価結果の再分解
 - ・確率論的地震ハザード評価の再分解の方向性（P-2）
 - (f) 確率論的地震ハザード評価によるシナリオ型地震動評価の補完
 - ・地震ハザードマップによるシナリオ型

- 地震動予測地図の補完 (P-3)
- ・確率論的想定地震の同定 (P-4)

ここに述べた事項は、現在すでに方法論を有する場合もあるが、多くは今後理工学の協力の下に方法論を開発すべき課題も多い。これらの課題を克服することにより、地震動予測地図作成のこれまでの取組みが一層価値を増すものと期待される。

7. 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型

地震動評価を統合した

「地震ハザードステーション (仮称)」の構想

地震動予測地図工学利用検討委員会では、検討の最後に、次の時代に向けて、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価のそれぞれ利点を生かしながら、対象地点 (地域) における将来の地震動をインタラクティブに評価、設定するための統合的な支援システム (ここでは「地震ハザードステーション」と称す) の構想を進めることを提唱した (報告書¹⁾ 5.3)。そこには、確率論的地震ハザード評価と代表的な想定地震に対するシナリオ型地震動評価の結果 (地図や諸データ) が格納されているのみでなく、6. (3) で論じたような両者の方法論上の融合を可能とする仕掛けと、それに基づき将来の地震動を客観的に設定、説明するための手続きが組込まれる必要がある。加えて、各地震の長期評価結果、過去の地震の情報、活断層などの地形・地質情報、深部・浅部の地下構造情報、地震観測記録、地震被害記録などの各種データベースとのリンクを構築することで、対象地点 (地域) 周辺における地震環境が容易に理解できる仕組みを目指す必要があるとしている。

このような「地震ハザードステーション」は、運用体制について、以下のような要件を備えることが求められる。

- 1) 膨大な基礎データを一元的に維持管理すること
- 2) 評価結果が客観的かつ公平なものであり説明責任を果たせること
- 3) ユーザー・フレンドリーな成果公表体制を長期にわたって持続できること

- 4) システムを統括する責任体制を明確化すること

このような認識のもとに、産官学の協調的体勢のもとに「地震ハザードステーション」のシステム開発を計画的・継続的に推進するのが適切と考えるものである。

む す び

地震動予測地図作成プロジェクトは、我が国の地震防災力向上のために、以下の点で画期的な意味を持つと考えられる。

- ・阪神・淡路大震災以来継続されてきた地震調査研究の成果を社会に還元する事業であること。
- ・これまで必ずしも「社会に役立つ」ことに積極的でなかった理学畑の専門家が、社会に向かって、地震学や地質学の最新の知見を動員して、その成果を「役に立つ」形で示そうとする働きかけであること。
- ・単に研究結果を出すだけでなく、政策委員会に「成果を社会に活かす部会」を設置して、社会との接点を積極的に討議する仕組みが作られ、それと作成側の長期評価部会・強震動評価部会との間で活発な意見交換が行われ、発信の方法に種々の工夫が行われてきたこと。

こうした状況のもとで、工学利用委員会は、地震動予測地図作成プロジェクトと同時進行という、時間との競争の中で集中的な検討を行い、その工学利用の方向付けと地震動予測地図作成側への要請事項を明らかにするという所期の目的を一応は達成することができた。これをひとつの出発点として、地震動予測地図作成の成果が、地図データのみでなく、工学的に有用な種々のパラメータを提供する「地震ハザードの共通情報基盤」として成長していくことを期待する。

そして、地震動予測地図の工学利用について、利用者側での活用の議論や、よりよい情報基盤に育てるための要請を明らかにする議論が活発に展開されることを期待したい。さらに、この資源を今後も有用なツールとして育てていくために、理

工学の協力関係が一層進展することを望むものである。

最後に、短い期間での工学利用の集中討議に献身的な努力を払われた委員・事務局の各位、外部からの意見を吸収するための活動として実施した地震動予測地図工学利用ワークショップへの参加者各位、ならびに委員会との討議に応じて頂いた東京大学・島崎邦彦教授、立命館大学・土岐憲三教授をはじめとする専門家各位に深謝の意を表する次第である。

(追記) : 本文脱稿後の平成 17 年 5 月 9 日に、地震動予測地図の公開システム⁶⁾が起動した (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)。ここではすでに、「地震ハザードステーション」なる表題が用いられている。その内容については、本文で目標として掲げた「地震ハザードステーション」の最終的な姿には未だ距離があると言わざるを得ないが、それは今後目指すべき理想へ向けて一步を踏み出した決意の表れと受け止めている。この公開システムが工学分野でも大いに活用され、それが推進力となって着実に育っていくことを念願するものである。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所, 2004, 地震動予測地図の工学利用—地震ハザードの共通情報基盤を目指して— <地震動予測地図工学利用検討委員会報告書>
- 2) 文部科学省研究開発局地震調査研究課 (地震・防災調査研究課), 2003, 2004, 地震調査研究推進本部の概要及び活動状況, 地震動予測地図ワークショップ, 文部科学省/防災科学技術研究所
- 3) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2005, 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 地震調査研究推進本部ホームページ (<http://www.jishin.go.jp/main/>).
- 4) 文部科学省研究開発局 地震・防災研究課, 2005, 全国を概観した地震動予測地図について, 地震動予測地図ワークショップ予稿集, 文部科学省/防災科学技術研究所, pp. 1-113.

- 5) 地震調査研究推進本部 政策委員会 成果を社会に活かす部会報告, 2005—地震動予測地図を防災対策等に活用していくために—, 地震調査研究推進本部ホームページ (<http://www.jishin.go.jp/main/>).
- 6) 藤原広行, 2005, 地震動予測地図の公開システムと今後の課題, 地震動予測地図ワークショップ予稿集, 文部科学省/防災科学技術研究所, pp. 115-132.

(付録) 地震動予測地図工学利用検討委員会名簿

(平成 16 年 9 月現在)

(委員長) 亀田弘行 (京都大学名誉教授/(独)防災科学技術研究所客員研究員)

(委員長代理) 当麻純一 (電力中央研究所地球工学研究所副所長)

(委員)

新井 洋 ((独)防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター副チームリーダー)

井合 進 (京都大学防災研究所教授)

石川 裕 (清水建設株式会社技術研究所施設基盤技術センター計画技術グループ長)

蛭沢勝三 ((独)原子力安全基盤機構解析評価部構造解析グループ長)

高田毅士 (東京大学大学院工学系研究科建築学専攻教授)

能島暢呂 (岐阜大学工学部社会基盤工学科助教授)

福和伸夫 (名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻教授)

藤田 聡 (東京電機大学工学部機械工学科教授)

藤原広行 ((独)防災科学技術研究所特定プロジェクトセンター・プロジェクトディレクター)

翠川三郎 (東京工業大学大学院総合理工学研究科教授)(事務局)

河合伸一 ((独)防災科学技術研究所主任研究員)

石井 透・早川 譲・奥村俊彦 ((独)防災科学技術研究所客員研究員)

奥村直子 ((独)防災科学技術研究所技術補助員)

(アドバイザー)

文部科学省研究開発局地震・防災研究課から出席

(オブザーバー)

内閣府原子力安全委員会事務局からオブザーバー参加

確率による地震動予測の問題点

政府の地震調査委員会から、全国を概観した地震動予測地図（以下、確率予測地図）が公表された。これは対象とすべき地震の発生確率とその地震によるハザードとから、将来の所定の期間における震度の期待値を算出して、1 km 四方のメッシュ上に示したものである。表現方法として、特定震度以上の揺れに見舞われる確率で表したものと、特定の確率で一定の震度になる地域を表示したものとがある。これらの結果は、いずれの表示にせよ、先に中央防災会議より公表された、東海地震や東南海・南海地震による震度予測地図（以下、シナリオ予測地図）と良く似ていることに気付く。換言すれば、今回の確率予測地図は南海トラフの地震の影響が強く出ており、糸魚川-静岡構造線以外には、内陸の活断層の寄与の小さいことを示唆している。これは、海溝の地震と内陸の地震の発生確率が大きく異なることに起因していることは明らかである。

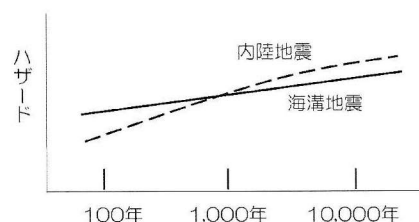
対象期間が、30年や50年でなく300年あるいは500年であれば両者の差は少なくなり、内陸部における確率や震度が大きくなることは容易に推察される。このような、対象期間とハザードとの概略の関係は図に示すとおりである。対象とする期間を1000年としても、海溝の地震はほぼ十回近く繰り返すだけであるから、その中で最大の値の変動幅だけしかハザードは大きくならない。一方、内陸の地震の場合には、対象期間が1000年、2000年となれば、その地域に内陸地震が発生する可能性が高くなることから、ハザードは大きくなるであろう。しかし、一万年、十万年としても発生回数が増えるだけであるから、期間に対する増分はそれほど大きくはならないであろう。

人が生存中に地震にあう可能性を考えるには、対象期間は30年や50年程度が適当である

うが、地域防災計画や重要施設の耐震解析に際しては、少なくとも100年程度は必要であろうし、場合によっては300年、500年くらいを念頭におく場合もあろう。今回の確率予測地図の公表に際して、マスメディアによって報じられたのは、ほとんどが30年確率であり、内陸地震の影響が極めて低いものになっている。したがって、内陸の地震をも地震防災対策の対象としている自治体にとっては、内陸地震を対策に取り入れる根拠を否定されたと受け取っているところもある。対策の必要性についての、府民や県民への説明に窮するのである。このような状況が地震防災の現場で起きることは、地震調査委員会の本意ではないであろうから、少なくとも自治体の防災担当者の仕事をしやすくするための説明は必要であろう。

数十年というような短い期間を対象とする確率予測地図に基づいて、地域防災計画の策定を行う限りは、内陸の活断層の影響は非常に小さなものになることは上述の通りである。ましてや、新潟県中越地震や鳥取県西部地震のように活断層があると認識されていなかったところで起きる地震は視野に入っていないことになる。災害対策という観点からは、どのような地震を対象とすべきかについては論の分かれるところもあろうが、結果として内陸の地震や伏在断層による地震動が考慮されないことには問題があろう。

確率に基づく地震動予測地図を設定すること



の意義は決して低くないが、提示の方法によっては、上述のように本来期待しているものとは反対の情報を与えることに留意すべきであろう。少なくとも海溝地震と内陸地震とは発生頻度が全く違うのであるから、別のものとして切り離し、かつ、両者で一つのセットとして取り扱うべきであろう。そうすれば、内陸地震については、確率予測地図は全国の相対的な危険度の評価としては大いに意味のあるものになるであろう。

このような混乱が起こるのは、あまりにも低い内陸の地震の発生を確率で評価して、これを海溝地震のそれと同列に論ずるところからきている。地震の発生を確率過程と考えることの是非についてはここでは論じないし、その内容における理論的な正当性においては問題ない。工学の分野では、各種の構造物や施設の耐震設計においては、数十年も前から地震危険度解析を行ってきたが、これは本質的には確率予測地図と同じ考えである。この場合にも海溝の地震と内陸の地震とを区別することをしてこなかったし、その結果として、内陸の地震の影響は低く見積もられていた。しかしながら、1995年兵庫県南部地震により、発生頻度は低くても内陸地震がひとたび起これば、甚大な災害を生むことを経験して以来、大規模な構造物や施設の耐震解析、あるいは地域防災計画の策定に際しては、内陸の活断層による地震の発生を想定して地震動を予測する、すなわち、重要な施設や高度な検討を要する場合には、シナリオ地震による検討の機会が増えつつある。

中央防災会議も同様な考えに則っており、首都圏直下地震による地震動予測においても、発生の可能性は論じていない。また、確率地震予測においての、50年以内の10%確率に対応する震度は、中央防災会議による首都圏直下地震

での想定震度より一段階低いものとなっており、与える情報が大きく異なる二種類の予測図が存在することになるが、これでよいのであろうか。

内陸の活断層の活動度は、活断層調査に基づいて発生確率として順次公表されてきたが、対象期間が再現期間に比べてあまりにも短いことから、確率は数パーセント程度に止まるものが大多数であり、皮肉なことに、ある種の安全情報として受け取られてきた。その数字が低いからと言って決して安全なのではないと地震学者がいくら言葉を添えても、ひとたび数値を聞いた後では、一般の人々はその言葉の意味するところに耳を傾けようとはしないのである。

内陸地震の活動度を確率で表現することが必要であれば、発生確率の常用対数を取り、その絶対値で評価してはどうであろうか。すなわち、確率が10%であれば対数をとって-1とし、その絶対値で1級、1%であれば2級、0.1%は3級というようにである。地震に関する物理量は、マグニチュードがそうであるように、対数表現するのは一般的なことなのだから、これもそれほど不自然ではないであろう。

活断層の活動度については、以前からもA級、B級というようにクラス表示されてきたが、これは地上の痕跡などの視認に基づくものである。これに反して、地震の発生確率は活断層調査におけるトレンチ調査などの直接的な活動度の確認を前提としており、信頼度は高い。したがって、ここに提案する、対数によるクラス表示は、地震の発生確率に基づいての活動度の表示であって、根拠は明確である。そして、あまりにも小さな確率の値を、大きい方に圧縮して表示する方法である。

(土岐憲三)

計測震度と被害

震度は1996年に、それまでの判定表に基づいた人による判断から、地震計によって記録された波形を元にコンピュータプログラムにより計算する「計測震度」になった。それにより、人の判断によるばらつきの排除、即時震度情報の発信、観測点の高密度化が可能になった。地震だ！と思ってテレビをつけると、ものの数分もしないうちに各地の震度情報が流れるシステムは、日本が世界に誇るべき防災システムと言える。

その一方で、計測震度になって以降、震度6以上の高震度が非常に多く観測されるようになった。1948年福井地震から震度改正前の1996年までの約50年間に震度6以上を記録した地震は、1952年十勝沖、1968年えびの、1993年釧路沖、1994年北海道東方沖、1994年三陸はるか、1995年兵庫県南部など8地震であるのに対して、1996年から現在（2005年3月）までの10年間では、震度計で観測されたものだけで1997年鹿児島県北西部、2000年新島・神津島、鳥取県西部、2001年芸予、2003年三陸南、2003年宮城県北部、2003年十勝沖、2004年新潟県中越、2005年福岡県西方沖など12回にものぼっていて、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netも含めればその数は更に増える。しかしながら、大きな震度を記録した割には被害がさほどでもないと感じておられる方が多いのではないだろうか？

計測震度になって高震度が多く観測されるようになった一因としては、観測点の高密度化により局所的な大きな揺れが観測されるように

なったことがあげられる。しかし、これは大きな震度の割に被害がさほどでもないことの説明にはなっていない。なぜなら、観測点の高密度化が原因であるのなら、大きな震度を記録した観測点周りには局所的に大きな被害が生じているはずであるが、実際には大きな被害は見られないケースが非常に多いからである。筆者が自ら調査を行った2001年芸予、2003年三陸南、宮城県北部、十勝沖、2004年新潟県中越、2005年福岡県西方沖地震で震度6弱以上を観測し、かつ、周辺に多くの建物が存在する43観測点について、震度ごとの周辺の被害状況の内訳を表1に示す。これを見ると震度6弱の大半は周辺に軽微な被害が見られる程度で被害が見られないケースも多く、6強でも大きな被害が見られる場合は少ないことがわかる。その一方で、6弱でも大きな被害が発生しているケースもあり、計測震度と被害との対応性はあまりよくない。

計測震度と被害が対応していない原因は、その対象としている周期帯にあると考えている。計測震度は、3成分の地震記録をフーリエ変換、フィルター処理、逆フーリエ変換を行ってベクトル合成し、その地動最大加速度を河角式に代入し、更に継続時間を考慮した修正を行うという複雑なものであるが、基本的には地震動の0.1~1秒という比較的短い周期帯のパワーを測っている。計測震度などの地震動の強さ指標が対応する地震動の周期帯と、対象となる建物の弾性周期などの関係を図1に示す。これを見ると世の中の多くの中低層建物の弾性周期(0.2

表1 震度6弱以上を記録した観測点周辺の被害状況

震度	特に被害無し	軽微な被害あり	軽微な被害多数	大きな被害あり	大きな被害多数	計
6弱	12	13	6	3		34
6強		4	2	1		7
7				1	1	2

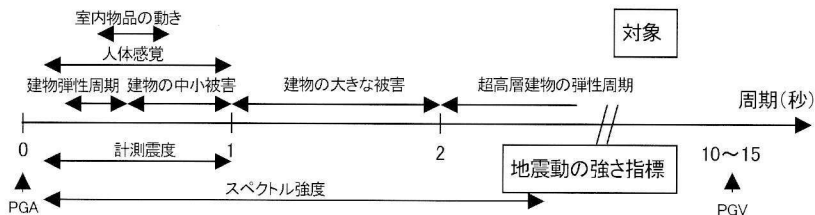


図 1 地震動の強さ指標、対象と対応する周期の関係 (PGA : 地動最大加速度, PGV : 地動最大速度)

～0.5 秒) は、計測震度が対象とする 0.1～1 秒に入っていて、一見すると計測震度が大きい 0.1～1 秒にパワーをもった地震動が発生すると、いわゆる「共振」が起こって、被害が出そうな気がする。しかし実際には「共振」は起こらない。なぜなら、建物の周期には「振幅依存性」があり、振幅が大きくなるに従って周期が伸びるからである。つまり、弾性周期で一旦共振が起こっても建物の周期が伸びて共振はすぐ収まるのである。それではどういった場合に被害が生じるかという、建物が被害を受けるレベルの振幅に対応した周期にパワーがある地震動が発生したときである。それは、大きな被害だと弾性周期のだいたい 3～4 倍で建築構造の分野では「等価周期」と呼ばれている。世の中の多くの建物の弾性周期 (0.2～0.5 秒) の 3～4 倍というのだいたい 1～2 秒となる。即ち、1～2 秒という周期帯にパワーをもった地震動が発生すると甚大な被害を引き起こすことになる。実際、1995 年兵庫県南部地震や 2004 年新潟県中越地震の川口町では、そのような地震動が発生

したために甚大な被害が生じてしまった。

つまり、気象庁も「気象庁震度階級関連解説表」の中でコメントしているように、計測震度は同じでも地震動の性質によっては、実際の被害状況は異なってくる、ということである。即ち、計測震度が対象としている 0.1～1 秒という比較的短周期にパワーのある地震動なら震度の割には被害は生じないし、逆に 0.1～1 秒にパワーがそれほどなくても 1～2 秒にパワーがあれば同じ震度でも大きな被害が生じる、ということである。

このように現在の震度である計測震度は、被害とは必ずしも対応しているものではないが、地震動の 0.1～1 秒という比較的短周期のパワーを測る指標としては非常に有効なものである。この周期帯は人体感覚とほぼ対応しており、室内物品の動き、建物の中小被害もこの周期帯に対応している。つまり、そういう計測震度の性質を正しく理解して利用することが重要であると考えている。

(境 有紀)

地震と火災…次の大地震に備えて

室崎益輝・関沢 愛

1. はじめに…問題の所在

1923年の関東大震災では、大規模な市街地大火や巨大な火災旋風が発生し、それによって約10万人もの命が奪われた。この苦い経験から、「地震対策といえば火災対策」ということで、10年前の阪神・淡路大震災までは、市民消火の体制づくりや広域避難地の整備などの火災対策が、積極的に進められてきた。ところで、この火災対策にやや傾斜した取り組みは、阪神・淡路大震災でその限界を露呈することとなった。というのは、大震災において大量の犠牲者をもたらしたのは、予期に反して市街地大火ではなく家屋倒壊だったからである。結果論ではあるが、木造家屋の耐震対策を疎かにしてきたことが、火災による死者の10倍にあたる、約5千人もの犠牲者をもたらしたのである。ということで、大震災以降は、地震後の救援対策とともに地震前の耐震対策を重視する方向に、地震対策フレームの転換がはかられている。

ところでその後、新潟中越地震では地盤崩壊が、スマトラ大地震では津波が甚大な被害をもたらしたこともあって、家屋倒壊に加えて地滑りや津波などに対しても、十分な警戒心をもって対応しようという状況が生まれている。視野が広がって地震対策が複眼的になったといえる。それはそれで喜ばしいことと歓迎したい。がしかし、視野が広がった分だけ焦点が甘くなるという弊害が、残念ながら生まれつつあるように思う。それは、相対的重点が家屋倒壊や津波に対する備えに置かれるようになった反動として、火災に対する備えが疎かになってきている、ということである。防災関連の研究予算をみても、防災白書などの書きぶりをみても、火災対策の占める比率は年々低下

してきている。首都直下地震対策の検討委員に火災の専門家が選ばれない、という状況さえ生まれている。こうした兆候に、「もはや火災ではない」とする武装解除的な風潮をみることができる。

確かに、阪神・淡路大震災の火災被害をみると、焼失面積などの被害が関東大震災に比較すると遥かに小さく、また福岡県西方沖地震などの最近の地震をみると、火災そのものの発生件数も極めて少ない。それだけに、これからは関東大震災のような深刻な事態は二度と起きないのではないか、と思いたくもなろう。といって、地震時に市街地が火災に包まれる危険性が無くなったのかというと、決してそうではない。後述する首都直下地震の被害想定の結果でも、火災による多大な被害が予測されており、火災の危険が無くなったといえる状況ではない。燃えやすい木造密集市街地がある限り、火災対策を疎かにしてはならないと思う。ということで改めて、地震時の火災の危険性を検証するとともに、その危険性を緩和するための方策について検討することにしたい。

2. 地震と火災…その動向と特質

そこでまず、「敵を知り己を知れば危うからず」ということで、地震火災の危険性について歴史のあるいは構造的に、検証するところから始めたい。

2.1 地震火災の歴史的検証

震度6強あるいは7といった「低頻度の巨大地震」の危険性については、直近の事例の個別的な結果に惑わされることなく、地震史の大きな流れの中でマクロ的に捉えて、その特殊性と普遍性を区別しつつ、正しく理解しようとする姿勢が大切である。阪神・淡路大震災で得られた「限定的な経験則」を金科玉条的に振り回す傾向が幅を効か

せつつあるが、要注意である。阪神・淡路大震災の教訓を引き出すにしても、その被害の特性を過去の地震との対比のうえで正しく位置づけて、一般化しなければならない。

そこでまずは、わが国の比較的大規模な地震における火災被害について、見ておきたい。表1は、明治以降の地震と火災の関係について整理したものである。ここから見えてくることをまとめると、以下ようになる。第1に、震度5以上（兵庫県南部地震以降は震度6弱以上）では、鳥取県西部地震のように火災がゼロという例外もあるが、火災が発生するのが常である。大規模な地震には出火はつきもの、ということができる。なお、この

出火の危険性については、被災世帯数あるいは倒壊棟数あたりの発生件数で、過去と比較することができる。そこで、1万世帯数あたりの出火件数をみると、1923年の関東大震災においても、最近の阪神・淡路大震災や新潟中越地震においても、2~3件というほぼ同じ比率で発生しており、出火の危険性が決して低減している訳ではない。

第2に、都市部で震度6以上（兵庫県南部地震以降は震度7以上）の地震が発生すると、規模に程度の差はあっても、広域的な市街地火災が発生する傾向のあることが確認できる。鳥取地震のように大雨のために大火が抑制された例もあるが、関東大震災、さらには南海地震における新宮市や

表1 明治以降の主な地震と火災

地震名	発生日	Mg 震度	出火件数	焼失軒数	主な特徴	●印：広域火災が発生
浜田地震	1872年03月14日	7.1 VI	?	230		
濃尾地震	1891年10月28日	8.4 VI	?	7,730	石油ランプの火災あいつぐ	●
庄内地震	1894年10月22日	7.3 V	?	2,148		●
陸羽地震	1896年08月31日	7.5 V~VI	?	32		
関東大地震	1923年09月01日	7.9 VI	620	447,128	東京都約3,830 ha, 横浜市約950 ha 焼失	●
北但馬地震	1925年05月23日	7.0 VI	22	2,328	城崎温泉を全焼, いろりからの出火目立つ	●
北丹後地震	1927年03月07日	7.5 VI	475	8,287	峰山町はほぼ全域を焼失	●
北伊豆地震	1930年06月26日	7.0 VI	10	75		
三陸地震津波	1933年03月03日	8.1 V	?	216	津波により火災発生	
鳥取地震	1943年09月10日	7.4 VI	17	251	地震直後の大雨で大火を免れる	
東南海地震	1944年07月07日	8.0 V~VI	14	11		
三河地震	1945年01月13日	6.8 V	?	5		
南海地震	1946年07月21日	8.1 V	?	2,598	新宮市は25%が焼失	●
福井地震	1948年06月28日	7.3 VI~VII	57	3,960	中心街は焼野原, RC百貨店全焼	●
十勝沖地震	1952年03月04日	8.1 VI	9	18		
大聖寺地震	1952年03月07日	6.8 V	?	10		
新潟地震	1964年06月16日	7.5 V~VI	13	434	タンク流出した油に着火, 隣接住宅が延焼	●
86 十勝沖地震	1968年05月16日	7.9 V	52	13	石油ストーブからの出火20件	
74 伊豆半島地震	1974年05月09日	6.9 V	2	5		
78 宮城県沖地震	1978年06月12日	7.4 V	15		ガスホルダー炎上, 大学での火災5件	
浦河沖地震	1982年03月21日	7.1 V	2		市民消火で消し止める	
83 日本海中部地震	1983年05月26日	7.7 V	4	1	石油タンク1基炎上	
千葉東方沖地震	1988年12月17日	6.6 V	3			
釧路沖地震	1993年01月15日	7.8 V~VI	9	5	ストーブ出火目立つ, 大学での火災1件	
北海道南西沖地震	1993年07月12日	7.8 V	9	190	奥尻島青苗地区5ha 焼失, 津波が関与	●
兵庫県南部地震	1995年01月17日	7.2 VI~VII	294	7,478	約63ha 焼失, 3.3ha 以上焼失火災が10件	●
鳥取県西部地震	2000年10月06日	7.3 VI強			出火なし	
十勝沖地震	2003年09月26日	8.0 VI弱	4		石油タンク火災2件	
新潟県中越地震	2004年10月23日	6.8 VII	9	10		
福岡県西方沖地震	2005年03月20日	7.0	1			

福井地震、そして新潟地震や阪神淡路大震災といったように、ほぼ30年間隔で地震による市街地火災が発生していることがわかる。都市部での大震災には市街地大火につきもの、ということができる。その一方で、関東大震災の200~300 m/hr から福井地震の100~200 m/hr、さらに北海道南西沖地震80~100 m/hrと、地震大火時の延焼速度が、次第に小さくなる傾向を読みとることができる。消防力の向上や都市の難燃化の効果によって、延焼危険の低減がはかられつつあるからである。とはいえ、後述の被害想定で詳しく考察するように、頻度が小さくなったとしても大火災が発生する可能性が残されていることを、見落としてならない。

2.2 地震火災の構造的検討

ところで、次の地震の危険性を知るには、過去の被災から帰納的に類推することに加えて、被災の構造メカニズムから演繹的に推測することが欠かせない。そこで、地震火災のメカニズムについて、日常時の火災との違いに留意しつつ整理しておく。

火災に地震が関わるパターンは、「火災要因の誘発」「火災要因の結合」「対応行動の阻害」「防災装備の破壊」「過大需要の発生」の5点に要約することができる。「火災要因の誘発」というのは、地震による振動や破壊によって、可燃性のガスや過熱性の物体などの火災の原因が生み出されることをいう。引き込み管の破損によるガスの漏洩などが、その代表例である。「火災要因の結合」というのは、地震による振動や破壊によって、火源や着火物といった要因相互が接触し結合する機会が生まれることをいう。棚の上の新聞紙の裸火上への落下などが、これに該当する。「対応行動の阻害」というのは、地震の振動や地震後の混乱によって、防火管理や初期消火といった減災のための行動が妨げられることをいう。日常時なら機能したはずの、使用中の火を消してその場を離れるという行動がとれなくなる。また、道路を使ってアクセスして消火活動を行なうという行動がとれなくなる。「防災装備の破壊」というのは、地震とそれによるライフラインの遮断などによって、消火栓

や防火水槽といった消火装備、防火区画や防火壁といった遮断構造などが、ダメージを受け機能しなくなることをいう。消火栓が使えなくなる、消防無線が使えなくなる、といったことがこれに該当する。最後の「過大需要の発生」は、地震とそれによる様々な破壊によって、消火や救助その他のニーズが同時に多発して対応能力を超えてしまうことをいう。

(1) 出火機会の創出

出火、延焼、避難の機構について、もう少し詳しく考察しておこう。表2に、地震時の出火の代表的なパターンを示す。「転倒落下型」は、ストーブやコンロなどの火源が転倒、落下して着火物に接触する、あるいは衣類や薬品などの着火物が転倒、落下して火源に接触する、ものである。「破損漏洩型」は、危険物を保管あるいは防護していた容器や配管などが破損、離脱して可燃物が漏洩する、ものである。「放置過熱型」は、電気遮断やガスの閉栓ができず、火源の過熱と放置を生み出して出火に到る、ものである。

なお、阪神・淡路大震災で明らかになったことであるが、この出火の過程に不用意な通電が関与することがある。ガスが漏洩しているところに通電により火花が飛んで着火する、伸びきった電線が露出しているところに通電により加熱されて着火する、スイッチの入った状態で転倒した電化製品に通電し過熱されて着火するといった事例が、阪神・淡路大震災では少なからず確認されている。これらを総称して「通電火災」と呼ぶことがある。

(2) 延焼拡大の助長

地震時には、日常時とは違った延焼拡大のメカニズムが、発生する。すなわち、第1に道路の閉塞によって消防自動車のアクセスが困難になる、第2に消火栓や防火水槽の破損によって消防水利が不足する、第3にモルタルの壁の脱落あるいは屋根瓦の落下などによって隣接火災や飛び火の可能性が増す、第4に可燃性のガスや油の漏洩や拡散により延焼が加速される、第5に情報の輻輳によって状況把握ができず消防車両等の配備が後手に回る、といったメカニズムにより延焼拡大が助

表 2 地震時の出火（着火）のパターン

	出火の誘因・出火の経過	火 源	着 火 物
転倒・落下型	炎の器具や表面が高い温度の器具の上に、燃えやすいものが転倒、落下	ストーブ、コンロ、かまど、炉、乾燥炉、ボイラー等	家具類、紙類、衣類、シンナー、アルコール、薬品、油類
	火のついたものや、炎の器具が転倒、落下、滑り移動によって、可燃物に接触	上記に加えて燃えている薪、炭、蚊取り線香等	カーテン、壁に吊り下げた衣類、畳、襖、商品その他
	油鍋、アスファルト炉などから油等が飛散し、可燃物に着火または火種により引火	火にかかっている油鍋、工業用炉、アスファルト溶解炉等	食用油、炉や鍋の内容物周りにある可燃物
	薬品が転倒、落下してこぼれ、空気や水にふれ、あるいは混触して	薬品	薬品周りにある可燃物
破損・漏洩型	亀裂、破損により、油漏れ、ガス漏れ、あるいは火粉が飛散	石油器具、ガス器具、裸火、電気火花、煙突等	設備や容器から漏れ出た油、ガス等周りにある可燃物
	電線が切れるなどして、漏電、ショート、あるいは高圧電流が流れて	電気器具全般、電球	周りにある可燃物
放置型	火を消さずに逃げたため、過熱、からだき、沸騰して	全ての火気、特にかまど、コンロ、炉、ストーブ、風呂釜等	炉や鍋の内容物周りにある可燃物
その他	揺れによって異常燃焼が誘発されて	石油ストーブ、重油バーナー等	周りにある可燃物

長されることになる。

なお、建物の破損や倒壊の状態が延焼状況を大きく左右するという点について、誤解をさけるために補足しておきたい。一般的には震度が大きく倒壊率が高いほど、道路閉塞やモルタル落下などで延焼が助長される傾向にある。ただ、阪神・淡路大震災のように震度7でガレキの山状態になってしまうと、空気の流通が悪くなってむしろ逆に燃えにくくなる。関東大震災のように、広範な被害が生じるけれども完全に破壊されない状況のもとで、損壊した家屋が立ったまま燃え上がる時に、延焼力はもっとも大きくなる。

(3) 避難困難性の増加

地震は、出火や延焼の危険性を高めるだけでなく、避難の危険性をも大きくする。地震が避難の困難性を生みだして、焼死という形での犠牲を大量に生み出すからである。その1つは「取り囲まれ型」で、空襲などの同時多発火災においても

見られる現象であるが、広域避難中に複数の火炎に周囲を取り囲まれ、死亡するケースである。もう1つは「閉じ込められ型」で、家屋の倒壊や玄関扉の開放障害で家屋の中に閉じ込められ、死亡するケースである。なお、前者のケースは関東大震災で、後者のケースは阪神・淡路大震災で、確認されている。

3. 阪神・淡路大震災の教訓

ところで、次の地震に備えるうえでは、阪神・淡路大震災に学ぶことが少なくない。阪神・淡路大震災は1つの特殊ケースであっても、直近で大震災を引き起こした震災ということで、現代の都市のもつ弱点に対する警告的な要素が少なからず含まれているからである。ところで、阪神・淡路大震災の火災による被害を、関東大震災と比較してみたのが表3である。阪神・淡路大震災では、

「7,000棟の焼失、500名の焼死」という数字にも示されるように、甚大な被害が記録された。ここでは、なぜこのような大被害がもたらされたのかという視点で、教訓や課題を引きだす必要がある。その一方で、関東大震災に比べると「焼失面積で1/50、延焼速度で1/10」で相対的には軽微な被害で止まった、ということもできる。ここでは、なぜ被害が少なかったのかという視点で、教訓や課題をひきださなければならない。

3.1 大火発生の要因

阪神・淡路大震災では、焼失面積1,000m²以上焼失した火災が43件（うち10,000m²以上焼失した火災12件）発生した。都市の難燃化がある程度進み、かつ消防力の向上が図られている現代において、なぜ市街地全体が炎上するような火災がもたらされたのであろうか。ここでは、もしその要因がなければ焼損被害がどれだけ軽減されたのかという視点から、延焼拡大への寄与が大きいと考えられる要因を、寄与率の高い順に取り出してみたことにした。

その第1は、燃えやすい木造密集市街地の存在である。図1に示されるように、木造率や密集率が高い市街地で手つかずの炎上火災が発生した時に、10,000m²以上の大火災が発生している。危険

な木造密集市街地が整備されないままに放置されていたことが、大火発生の最大の要因であった。第2に指摘できるのは、対応能力を超えた多数の火災が同時に発生したことである。図2は、市区別に火災1件あたりの消防ポンプ車台数を示したものであるが、消防ポンプ保有台数の2倍以上の火災が発生した長田区や灘区などで大火が発生しており、同時多発が大火の大きな要因であることがわかる。大火発生の第3の要因は、消火栓の破損等に起因する消防水利の不足である。消防隊の駆けつけが遅れた場合でも、水利が確保でき有効な注水をしておれば、延焼抑制がはかれたと推察されるケースは少なくない。以上の3つが大火

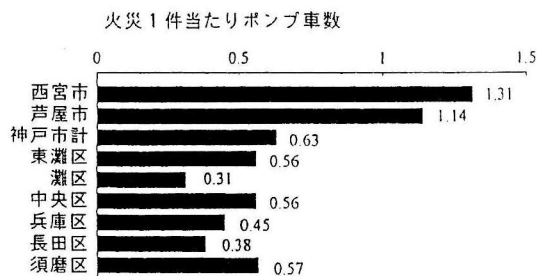


図2 阪神・淡路大震災での地震直後（午前7時まで）の火災1件あたりのポンプ車数（関沢 愛）

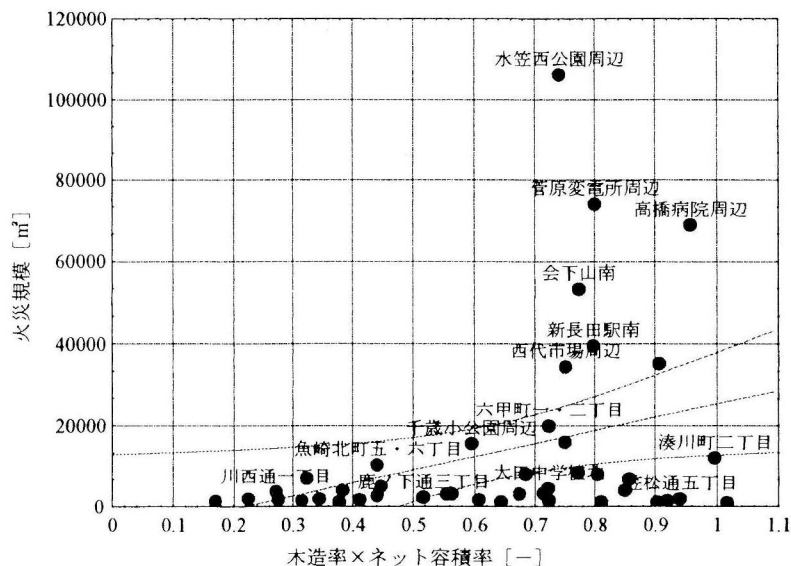


図1 阪神・淡路大震災での木造密集度と火災規模の関係（糸井川栄一）
木造密集度は木造率に容積率を乗じて求めている

の3大要因である。この要因の克服と解消をはかることなくして地震時大火の克服はあり得ない、といえよう。

以上の3つの要因に加えて、第4に常備消防の駆けつけと市民の初期消火の遅れを要因として指摘することができる。この常備および市民の到着や消火が遅れたことについては、広範な家屋の倒壊によるところが大きい。道路の閉塞や住宅の倒壊によって、駆けつけや火掛かりが遅れることになった。また、生き埋めになった人の救助を優先するあまりに、消火活動が後手になったという問題点もある。震度が7クラスになって建物の倒壊率が著しく大きくなると、市民消火も含めて初期消火の活動が極めて困難になることを、ここでは確認しておきたい。消防駆けつけ時間や市民消火率を震度の関数として捉える必要性を教えている。

ところで、この駆けつけの遅れに関して忘れてならないのは、消防隊運用のオペレーションの問題点である。阪神・淡路大震災では、最寄りの火点あるいは真っ先に情報の入ってきた火点に、消防ポンプ車1~2台で駆けつけるというオペレーションが行われた。その結果、大火の危険性の高い火点でポンプ車両が不足する事態を生んで、延焼拡大を容易に許してしまっている。ここでは、時間差をおいて火災が多発する場合における、警戒あるいは部隊運用のあり方が、結果論ではあるが厳しく問われていることを、確認しておきたい。

3.2 被害低減の要因

火災の被害が関東大震災に比べ極めて軽微であったことから、この80年間の間に防火対策が強化され都市構造が改善されて、日本の都市は地震火災に強くなったのではとと思っている人が少なくない。60年代まで猛威を振るった「強風時の大火」が消防力の強化などによって今や発生しなくなっているだけに、「地震時の大火」についてもその克服が図られつつあると、思い込みがちである。この思い込みを断ち切るためにも、なぜ阪神・淡路大震災で火災の被害が関東大震災に比べ少なかったのかを、確認しておかなければならない。

延焼とそれによる被害は、大きく市街地条件、消防条件、気象条件、地震動条件に左右される。

表3 関東大震災(東京市)と阪神・淡路大震災との比較

	東京市(1923)	阪神7都市(1995)
面積	約600km ²	約600km ²
人口	約250万人	約280万人
全半壊数	約3万棟	約20万棟
出火件数	約100件	約200件
焼失面積	約3,800ha	約70ha
延焼速度	約200~300m/hr	約20~40m/hr

そこでまず、市街地条件と消防条件について考えてみよう。阪神・淡路大震災における延焼動態をミクロにみると、建築物の耐火比率が4~5割と高い街区においては、そうでない街区に比べ延焼速度が遅くなる傾向を確認することができる。都市の不燃化や難燃化が延焼速度の低減に貢献した、ということができる。ところで、都市難燃化や消防力整備がもたらす抑制効果は、延焼がくい止められた「焼け止まり線」の分析によっても確認できる。その分析によると、広幅員道路や耐火建築物群が存在する場所、消防隊などの消火活動が展開された場所で、焼け止まり線が形成されている。なお、「駆けつけが遅くなる、水利の確保が難しい」という悪条件にもかかわらず、消防隊によって延焼の抑制がはかられたという事実は、今後の消防力整備のあり方を考えるうえで大いに参考になる。

がしかし、阪神・淡路大震災で被害が少なかったことは、不燃化や常備化だけで説明しきれものではない。そこで次に、気象条件についてみよう。延焼動態は、風速や湿度あるいは雨量などの気象条件によって左右される。ところで、阪神・淡路大震災では、風速が限りなくゼロに近かったことが幸いしている。過去の大火における風速と延焼速度の関係をプロットした図3をみても明らかかなように、風速が3m/sec未満と弱かったために、延焼速度は20~40m/hrと遅くなっている。そのため、火勢の制御と拡大の抑制が比較的容易であった、また避難の際に火炎に取り囲まれることもなかった、といえる。もし、関東大震災の時

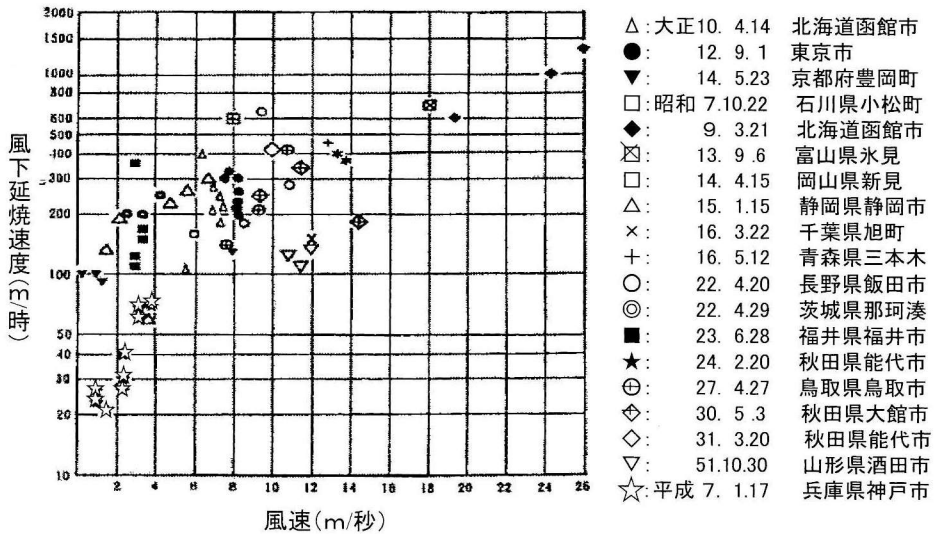


図 3 過去の市街地大火と阪神・淡路大震災での延焼速度 (熊谷良雄)

のように 10 m/sec の風が吹いていると、延焼速度は少なくとも 100~150 m/hr となって、避難の最中に火炎に取り囲まれて死亡した人がでた、連続する密集市街地全体が火炎に包まれていた、といえよう。次に、地震動の条件をみてみよう。既に述べたように、震度 7 という激しい地震であったがために、市街地は一瞬のうちにガレキの山(いわゆる破壊消防状態)と化した。そのため、空気の流通が悪くなってブスブスとゆっくり燃える状況が生まれた。もし、関東大震災の時のように、震度 6 程度で木造住宅が傾いたような形のまま炎上すると、周囲の空気の流通が確保されるので、延焼速度も早くなり火炎も大きくなったに違いない。直下型で地震動があまりに強烈すぎたことが、延焼の強さに関しては幸いしたとみることができる。ということから、関東大震災当時と比較して燃えにくくなっていること確かであるが、風速が弱かったとかガレキの山化したという「偶発的な好条件」に助けられたことを、見逃してはならない。

4. 地震火災被害の予測

以上の考察を踏まえて、来るべき大地震でどのような火災被害が起きるのかを、考えてみる。

4.1 量的な被害予測

昨年の暮れに中央防災会議の首都直下地震の専門委員会は、マグニチュード 7 前後クラスの直下型地震が発生した場合における被害想定の結果を発表した。こうした被害想定の結果については、前提条件や想定手法の違いによって、得られる結果も大きく違ってくるので、大きな誤差や幅が含まれるものとして受け止める必要がある。概ね、震度や建物被害については「倍半分」の誤差、火災被害や人的被害については「1 桁違い」の誤差が含まれると、考えたほうがよい。ところで、中央防災会議の想定では、想定する地震のタイプによって多少結果が異なるのであるが、冬の夕食時、風速 15 m/sec の条件で、約 60 万棟が焼失、約 6~8 千人が焼死するという内容が示されている。私流に「誤差」を考慮してこの結果を読み替えると、死者は「6 百人で済む場合もあるし、6 万人に及ぶ場合もある」ということになる。ここで注目すべきは、「全壊全焼棟数の約 8 割、死者数の約 6 割が火災によってもたらされる」という結果である。無論、火災については想定結果の幅が非常に大きいため、いつも火災被害のウェイトが高くなると言い切れないが、火災被害の軽減を最優先してはかる必要性を、この結果は示している。「もはや火災ではない」ではなく「いまだに火災である」

ということを再認識させる結果として受けとめる必要がある。

4.2 質的な被害予測

ところで、こうした量的な被害想定も大切であるが、それ以上に新しい災害を予見するという「質的な被害想定」が大切である。

(1) 通電火災と危険物火災

まず、出火について考えよう。コンロやストーブなどの裸火からの火災が減少し、薬品の散乱やガスの漏洩による危険物火災が増大する、と考えられる。さらにそれに加えて、阪神・淡路大震災で問題になった通電火災も、引き続き発生するものと考えられる。裸火からの火災が減少するというのは、マイコンメーターはもとより自動消火装置や過熱防止装置などの普及により、コンロやストーブなどの地震時出火の危険性は著しく低減したと考えられるからである。それに対して、通電火災については対策が不十分なため、地震直後の自動回復時の出火などが、今後とも多発するものと考えられる。ただ、次の地震についていうと、通電火災もさることながらそれ以上に、薬品火災を含めた危険物火災に備えることが欠かせない、と考えている。というのは、生産の場だけではなく生活の場においても、出火につながる危険性物質が広範囲に普及する傾向にあるからである。その結果として、すでに日常時において危険物火災が急増しているが、その延長線上で地震時においても危険物火災が多発するのではないかと危惧されるのである。なお、この出火動向で留意すべきことは、これからは季節や時間に左右されない火災が増えるということである。配管の破断や機器の転倒さらには家屋の損壊などに起因する危険物火災や通電火災は、火気取り扱い中だけでなくも発生するため、季節や時間に規定されない。それゆえ、夏の早朝であっても相当数の出火がある、と覚悟する必要がある。

(2) 密集地火災と高層ビル火災

次に、延焼について考えてみる。まずなによりも、市街地大火の様相について検討しておきたい。地震時の大火の克服は、わが国の都市防火の悲願であるだけに、その対象としての地震時大火

の危険性を見極めておくことは、地震防火の基本だからである。これについて結論からいうと、密集市街地で手つかずの火災が発生すると市街地大火は避けられない、しかも強風という条件が重なると市街地の大半を焦土と化す事態にも発展しかねない、ということになる。確かに、耐火建築や防火造の増大により、燃えにくくなっている。その結果、延焼速度は関東大震災と比べ遅くなるものと予測される。この延焼速度の低減により、火流に巻き込まれて死亡する人は減少するに違いない。しかし、それは火災による焼損面積の減少を意味しない。また確かに、消防力の整備や増強がはかられて、大火を抑制する可能性は大きくなっている。その結果、市街地大火が発生する確率は関東大震災と比べ遥かに小さくなった、といつてよい。しかし、それは頻度の低減であっても強度の低減を意味しない。確率が低くとも一度大火の発生を許してしまうと、密集市街地のエリアが広がった分だけ、より大きな火災がもたらされてしまう。

市街地大火は古くからの問題といえるが、これからの新しい問題もある。それは、高層ビルの炎上火災である。耐火造であっても、火源が存在する限り火災は発生する。阪神・淡路大震災では、棟数あたりの出火率でみると、木造に比べ8倍もの火災が耐火造で発生している。ところで問題は、耐火造や高層ビルで火災が発生するとどうなるかということである。阪神・淡路大震災では、耐火造のマンションで火災が発生し、逃げられた居住者が焼死をするという事例が、複数例発生している。芦屋のマンション火災では、玄関の扉が開かずに、3人の女性が死亡している。こうした事例をもちだすまでもなく、地震時には、消火栓などの消防設備、防火扉などの防火設備が機能しなくなって、ビル全体が容易に火に包まれることになる。現状の建築基準法などにおいては、防火設備等に対して特段の耐震対策を義務づけていないだけに、地震時の高層ビル等の炎上は避けられないといえよう。

(3) その他

その他の問題としては、津波との複合の問題を

見落としてはならない。この複合の危険性は、すでに1993年の北海道南西沖地震で確認されている。それは、津波の来襲が予測されると、避難行動を優先するあまり消火活動を放棄することになって、火災の拡大を容易に許すという問題である。この津波と火災との複合の問題は、臨海部の石油コンビナートでも、別の形であらわれる。それは、防潮堤を乗り越えた津波が危険物施設を破壊し、それにより流出した油やガスが大規模な火災を引き起こす恐れがある。高層ビルや石油コンビナートもそうであるが、この数十年の間に大都市は大きく変貌した。地下街や大規模トンネルなどの特殊空間も増加している。こうした新しい空間あるいは特殊な空間が、津波を伴う地震あるいは長周期の地震に際して如何なる挙動を示すのか、次なる地震に備えて検討すべき課題は少なくない。

5. 火災被害の軽減戦略

最後に、次の地震における火災被害の軽減をはかる上で、何をなすべきかについて言及しておこう。内閣府は、この3月に東海地震および東南海地震・南海地震について、その被害軽減をはかるための「地震防災戦略」を発表した。それによると、火災による死者を軽減する方策としては、住宅の耐震化を掲げている。確かに、耐震補強をすれば、倒壊による接触を原因とする出火が抑制できる、あるいは家屋の路上への倒れ込みを原因とする延焼拡大が抑制できる。それゆえ一定の効果を期待することはできるが、それで火災被害が大幅に軽減できるとはとても思えない。この地震防災戦略において、出火防止から延焼防止さらには避難確保に関わる「真に有効な火災対策」が、具体的に示されていないのはとても残念である。

5.1 同時多発火災の克服

阪神・淡路大震災の原因分析でも明らかにしたように、市街地大火の危険性を克服するうえで、密集市街地の整備と解消は欠かせない。それだけに、都市計画関係者の努力を大いに期待したいところであるが、その遅々とした取組みの現状をみると、残念ながら多くを期待できない。そこ

でどうしても、地震直後の炎上火災の件数を減らすことに努力を傾注せざるをえない。首都直下地震の被害想定にみられるような、火災による死者が数千人という悲惨な事態を避けるには、地震直後の火災件数の大幅な減少をはかるしか、今のところ手だてがない、といえよう。

この多発火災の減少の取組みにおいては、自動消火装置付きの石油ストーブの普及やガス遮断用のマイコンメーターの普及が出火件数の低減に大いに役立ったという、大震災の教訓を確認しておきたい。つまり、出火防止のための技術導入を積極的にはかることによって、出火件数の大幅な削減が期待されるということである。それだけに、通電火災に対しての技術的な対策の進展を大いに期待したい。この通電火災対策では、第1に供給側における緊急遮断のシステムの開発、第2に需要側における再通電防止のシステムの開発が欠かせない。需要側では、避難時におけるブレーカー遮断の励行、通電防止装置付きの電気機器の普及が進んでいるものの、供給側における地震直後の「自動回復に伴う火花着火」を防止する目途はいまだに立っていない。優れた科学技術を活用して、なんとか次の大地震までに、この地震直後の通電火災を防ぐ展望を見いだしたいものである。ところで出火件数の低減は、火源側の通電対策だけでは不十分である。着火物側の対策をも同時に講じる必要がある。その第1はガス漏洩防止の対策である。ガス配管の耐震化やフレキシブル化をはかってその破断漏洩をふせぐことが、欠かせない。第2は火気周辺整備の対策である。火気周辺の整理整頓や家具の転倒防止をはかって、火災につながる接触機会の低減をはかることも、忘れてならない。

5.2 消防水利の確保と長距離送水

水利がなければ消火ができない。大震災では、水道管路網の寸断によって消火栓が使えなくなった。そのうえ、その不測の事態をバックアップするはずの耐震貯水槽や自然水利が欠落していたために、延焼拡大を容易に許す結果となった。この反省から、耐震貯水槽や自然水利の整備が積極的にはかれることになった。がしかし、こうした

局地的な水利あるいは限定的な水利の整備だけで果たして十分かという、疑問が残る。というのも大規模な火災に対しては、無制限とは言わないまでも、長時間にわたって放水可能なシステムが欠かせないからである。そこで、長時間放水のための水利システムの開発をはからねばならない、と私は考えている。これについては、第1に少量の水で消火や延焼防止をはかれるようにすること、第2に遠隔地から送水して持続的な放水を可能とすること、第3に管網の耐震化をはかって消火栓を震災時にも利用できるようにすること、などが考えられよう。このなかでは、サンフランシスコなどで活用されている、応急仮設型の長距離送水システムの開発に期待がかけられている。これは、中継ポンプを介してホースをつないで、地上に応急的な消火栓網を構築するものである。既に、林野火災などで活用されているシステムを市街地火災にも活用しようとするものである。予め交差点などに、中継ポンプを格納しておく、ホースを埋め込む溝をつくっておくなどすれば、震災対応型の長距離送水システムの構築も不可能ではない。

5.3 初動と緊急援助の態勢構築

効果的な火掛かりが遅れたという初動態勢の問題点は、さらに消防資源の問題、部隊運用の問題、活動障害の問題の3つに分けられる。資源の問題というのは、必要なポンプ、水利、人員さらには情報が不足していたという問題である。運用の問題というのは、部隊等の資源を効果的に活用するオペレーションが混乱したという問題である。障害の問題というのは通信の輻輳や道路の閉塞によ

り消防活動が阻害されたという問題である。このなかで最初の2つの問題について課題を提示しておきたい。資源の問題では、常備の消防の限界を消防団や市民との連携によっていかにカバーするかが、鍵となる。大地震時は、日常とは比較にならないほどの膨大なニーズが発生すると考えられ、それに対応できる非常時の態勢を予め準備しておかなければならない。となると、臨時的な戦力動員のシステムが必要で、震災時対応を専門とする臨時的な消防団、あるいは震災時消火ボランティアなどの一定の消防能力をもった市民力の育成が欠かせない。と同時に、それに必要な装備の開発と普及が求められよう。市民の消火装備としてパケツしかないといった原始的な状況では、とても大震火災には対抗できない。市民消化装備のハイテク化をはかり、市民だけの力でも火災を鎮圧できる態勢が構築できれば、と思う。

ところで最大の問題は、ニーズに比べてシーズが限定された場合の部隊運用の戦略の問題である。どこにどれだけの部隊を配備するのがもっとも効果的なのか。救助活動と同じように消火活動にもトリアージが必要で、その部隊配備の優先順位とタイミングを間違いなく決定するための情報支援のシステムの構築が急がれている。これについては、震度や火点の情報を受けてリアルタイムシミュレーションで即時に延焼動態と部隊運用の効果を予測するシステムが、私たちの消防研究所でも開発されている。こうした情報支援システムを活用しての、部隊運用の図上訓練や震災時の警防計画の充実と強化が欠かせない。

地震による土砂災害の実態と防災対策

井口 隆

1. はじめに

地震ジャーナルへの執筆依頼を受けたのは2004年の夏頃であったが、その時点では地震に伴って生じる土砂災害の実態と斜面変動の特徴を歴史地震を含めて幅広く紹介し、今後の地震時の土砂災害に対する留意点などを中心に記述しようと考えていた。それは一般市民だけでなく地震の研究者の間でも地震による土砂災害に対する認識が乏しいのではないかという危惧の念からであった。しかし10月23日の新潟県中越地震によって数千箇所にもおよぶ斜面変動が発生し、地震による土砂災害に対する認識はかなり改まったように感じる。その一方で土砂災害の専門家でも想像していなかったほど多様かつ多数の斜面変動が生じた。中越地震で起きた斜面変動についてはまだ研究の途中段階であるが、新たに生じた土砂災害に関する知見も含めて地震によって生じる斜面変動と土砂災害の概要と特徴について述べて見たい。当初は地震によって生じる斜面変動のメカニズムや最近の研究動向についても記述しようと考えていたが、スペースの関係で充分に取り上げることが出来なかった。機会があれば改めて取り上げてみたい。

2. 地震による土砂災害の発生実態

最初に土砂災害の一般的性格について述べておくと、多くの方は土砂災害というと梅雨や台風による豪雨によって発生する現象を真っ先に思い浮かべると思う。実際の発生件数でも豪雨時に発生している割合がもっとも多い。しかし土砂災害は降雨以外にも地震や融雪、火山活動さらには土木工事など人為的作用など様々な誘因によって発生

している。場合によっては積丹半島で起きた豊浜トンネル岩盤崩落のように明白な原因がないにも関わらずある日突然発生することもある。誘因は他の災害に比べて多様性に富んでいる。これは土砂災害をもたらす斜面変動の最大の原動力が重力に起因しているからである。きっかけは何であれ斜面の力学的なバランスが崩れることによって斜面変動は発生する。重力と抵抗力がほとんど拮抗している斜面ではわずかな外力によって変動が起きる。そういう意味で地震動は斜面の力学的安定を崩す大きな要因のひとつである。そして高い地下水状態など他の要因と複合した場合には相乗効果によってより多くの斜面で変動が生じる。

日本は国土の約7割は山地であるため地震による土砂災害はしばしば発生して来た。どのような地震によってどういった土砂災害が発生しているかを概観するために、最近400年間に起こった土砂災害を伴う主な地震を表1にまとめてみたが、土砂災害を伴う地震はかなりの数が発生している。古くは天正飛騨地震による帰雲山の崩壊や4万箇所を超える山崩れが起きたとされる善光寺地震など主として内陸地震によって多大な被害を生じている。プレート境界の地震でも安倍川上流の大谷崩れや七面山の崩れなど赤石山地や四国山地などにおいて大規模な崩壊が発生している。近年になると関東地震によって根府川山津波、根府川駅裏の地すべりをはじめ丹沢山地において無数の斜面変動が起きている。1974年と1978年の伊豆半島での一連の地震でも土砂災害が顕著に発生し、そして御嶽山の直下で起きた長野県西部地震による火山堆積層での大規模な斜面変動が起きている。

地震によって発生する土砂災害の発生傾向としては1) 地域的には中部地方に最も多く発生し、次いで東北および関東、九州においてやや多く発

表 1 土砂災害を伴った主な地震（1500 年以降）

地震名	発生年月日	M	斜面変動の特徴・代表的土砂災害および死者数
天正飛騨地震	1586/ 1 / 18	7.9	帰雲山岩なだれ→城下埋没. その他山崩れ多発
別府湾地震	1596/ 5 / 8	7.0	水口山北斜面崩壊→津江岩屑なだれ, 1 村埋没
会津地震	1611/ 9 / 27	6.9	山崩れ・地すべり多数発生. 会津川下流 4 万石崩れ
近江地震	1662/ 6 / 16	7.6	山崩れ多発. 朽木谷の崩壊 2 村 260 人を埋める
日光北部	1683/10/20	6.8	五十里村山崩れで三依川に堰止め湖, 40 年後に決壊
羽後北部	1704/ 5 / 27	6.9	山崩れ多発, 死者 58 名. 津軽十二湖地すべり発生
宝永地震	1707/10/28	8.4	安倍川上流で大谷崩れが起きる約 1 億 2,000 万 m ³
越後高田地震	1751/ 5 / 21	6.6	名立崩れ（死者 428 名）ほか海岸沿いに崩壊多数
善光寺地震	1847/ 5 / 8	7.4	地すべり・崩れ 4 万か所以上, 犀川を堰止め, 決壊
安政東海地震	1854/12/23	8.4	山崩れ多数, 七面山崩れ発生
安政飛騨地震	1858/ 6 / 9	6.9	立山麓崩れ→決壊. その他山崩れ多数
浜田地震	1872/ 3 / 14	7.1	山崩れ 6567 か所. 中場の斜面に亀裂
濃尾地震	1891/10/28	8.4	山崩れ 1 万か所以上
秋田仙北地震	1914/ 3 / 15	7.1	仙北部の第三紀層山地に山崩れ多発. 層すべり型
関東地震	1923/ 9 / 1	7.9	根府川山津波. 丹沢～箱根の山地崩壊多発
北伊豆地震	1930/11/26	7.3	伊豆・相模で山崩れ多数. 孫助山山津波で立木移動
福井地震	1948/ 6 / 28	7.1	砂丘崩壊（死者 17 名）
今市地震	1949/12/26	6.4	テフラ層をすべり面とする地すべり多発
新潟地震	1964/ 6 / 16	7.5	山・崖崩れ多発. 砂丘すべり
えびの地震	1968/ 2 / 21	6.1	シラス地帯の山崩れ
十勝沖地震	1968/ 5 / 16	7.9	青森で 200 mm を超える大雨直後の流動的な地すべり
伊豆半島沖	1974/ 5 / 9	6.9	火山岩の急斜面の崩壊. テフラ層の長距離流下
大分県中部	1975/ 4 / 21	6.4	道路盛土すべり, 落石多発
伊豆大島近海	1978/ 1 / 14	7.0	火山岩の急斜面の落石・崩壊, テフラ層のすべり
宮城県沖地震	1978/ 6 / 12	7.4	丘陵地に造成した盛土地盤の地すべり変動
日本海中部	1983/ 5 / 26	7.7	砂丘地すべり, 盛土のすべり, 溜池→土石流
長野県西部	1984/ 9 / 14	6.8	御嶽火山の軽石層を滑り面とする大規模すべり
千葉県東方沖	1987/12/17	6.7	海成段丘崖の崩落, 前倒れ, 長南中学の盛土すべり
釧路沖地震	1993/ 1 / 15	7.8	釧路周辺の丘陵地の盛土地盤の地すべり・崩壊
北海道南西沖	1993/ 7 / 12	7.8	奥尻島で大規模地すべり・崩壊. 奥尻港洋々荘（29 名）
北海道東方沖	1994/10/ 4	8.1	中標津町の住宅盛土地すべり
兵庫県南部	1995/ 1 / 17	7.2	仁川住宅裏の盛土斜面のすべり（34 名）. 六甲山の崩壊
新潟県中越地震	2004/10/23	7.2	魚沼丘陵を中心に地すべり・斜面崩壊 3 千か所以上発生

生が見られ, その他の地域は比較的少ない, 2) 地震の型についてはプレート境界型の地震より内陸地震の方が発生する土砂災害の数が多く, それによって発生する被害も大きいようである, 3) 地質

的には火山岩や堆積岩地域において発生が多く, 深成岩や変成岩および古い地層からなる地域での発生はやや少ないようである, 4) 1968 年の十勝沖地震以降, 谷埋め盛土など人工的に造成された

斜面で生じる土砂災害が顕著になってきている。

このように地震による土砂災害はかなり発生してきたが、土砂災害が起きる山間地はさほど人口が多くないことや各所に分散して起きるために、地震直後は注目されるがその後の災害記憶の風化はかなり早いようである。わずか20年前の長野県西部地震の記憶も薄れて、中越地震が起きるまでは土砂災害に対する警戒心は低下してきたように感じられた。

3. 新潟県中越地震で生じた斜面変動の特徴

2004年10月23日に起きた新潟県中越地震では山古志村をはじめとして魚沼丘陵においては1,600か所とも3,000か所を超えるとされるほどの地すべり、山崩れ、斜面崩壊が発生し大きな被害を出した。特に、河川を堰止めた地すべりダムによる住宅の水没や地すべりによる道路やトンネルの寸断など住民の生活基盤に多大の被害をもたらした。そのため山間部の集落の中には集団移転を余儀なくさせられた例も出ている。中越地震は第三紀層の堆積岩で構成される魚沼丘陵の直下で起きたが、ここは日本でも有数の地すべり地形といわれるように数多くの地すべり・地すべり地形が分布している地域である。もともと山古志

村など山間部に形成された集落は過去の地すべり変動によって形成された緩斜面に手を加え、棚田や住宅として利用することによって生活を営んできたのである。これまでに融雪や長雨によって個別の地すべりが変動したことは幾度かあったが、今回のように一度に何千もの斜面が変動するのは有史以来初めての出来事であったと思われる。

中越地震で生じた土砂災害の特徴を簡単にまとめると、1) ある地層に沿ってすべりが生じて起きる「層すべり」型の地すべりが多発した。2) 従来、地震ではあまり起こらないと言われていた「再滑動型」の地すべりが数多く発生し大きな被害を出した。3) 地すべり土塊が川を堰き止めてダムを作る地すべりダムが多数形成され被害を大きくした。4) 地すべり変動は泥岩を主体とする地層より砂岩や砂泥互層といった砂がちの地層からなる地域で数多く発生した。5) これまでの地震において恒常的に発生してきた急斜面の表層崩壊・浅層崩壊はやはり多く発生した。などをあげることができる。以下、1)~3)の諸点について少し詳しく述べてみたい。

(1) 層すべりが卓越した中越地震の斜面変動

写真1は母子3人が乗った車が埋まった長岡市妙見町の崩壊地から500mほど南にある浦柄で起きた層滑りである。傾斜20度程度の層理面を

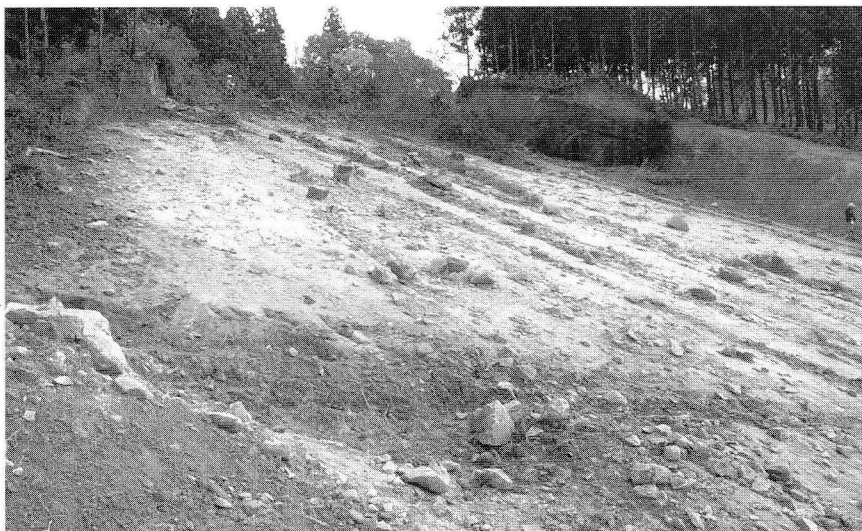


写真1 中越地震で初生的な層すべりを起こした浦柄の地すべり地

すべり面として、その上にあった厚さ数 m のシルト質の岩盤のほとんど全てが一気に滑り落ちた状況を物語っている。すべったあとには見事な平板状の斜面が形成されている。こういった状況の変動はほかにも数か所で発生しており、中越地震によって生じた斜面変動のひとつの典型例である。同様の地すべりは約 70 年前の秋田仙北地震でも生じていた。仙北地震による布又地すべりの跡も写真 1 とほとんど同じ状況を呈している (写真 2)。はじめにこの写真が掲載された震災予防調査会の報告書を見た時には、こんな地すべりが本当に存在するのかと信じられない思いであったが、中越地震で似たような変動の現場を目の当たりにして「やはり層すべりは地震による地すべりの典型例のひとつであるのか」と興奮を覚えた。中越地震においては完全に抜け落ちたすべり以外

にも層すべりと推定できる変動が確認できただけで少なくとも数十か所で生じている。

振り返って見れば 1984 年の長野県西部地震による御嶽山の大规模崩壊 (幅 600 m, 奥行き 1,300 m) は埋積谷に堆積した軽石層がすべり面となって生じたものである。また山麓部で起きたその他の斜面崩壊もそれぞれ御嶽火山起源の軽石層がすべり面として起きたものであった。まだ記憶に新しい 1999 年の台湾集集地震による草嶺と九分二山の 2 か所の巨大地すべりも層滑りであることが明らかにされている (図 1)。

さらに極端な例として被害を出すほど大きなすべりは生じていないが、1949 年に起きた今市地震の際には大谷川の扇状地において幅約 1 km, 長さ 4.5 km のくさび形の広い範囲の地盤が 7 cm ほど下流方向にずれ動いたことが井戸孔での変形調



写真 2 秋田仙北地震による布又地すべりの発生状況 (震災予防調査会)

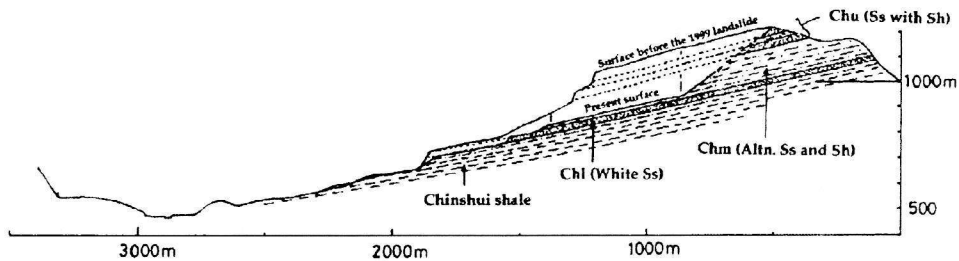


図 1 台湾集集地震ですべった草嶺の地質断面 (Chigira et al., 2003)

査から明らかにされている (Honda, 1950). これは地下数 m に堆積していた白岩火山灰層を境にその上位の地盤が地震動でわずかにすべりを生じたもので、この付近での扇状地の勾配が 0.9 度とわずかであったために大きな変動には至らなかったと考えられる。

中越地震で生じた層すべりの発生場所の地質を調べると、泥岩層の分布地域より砂岩ないし砂泥互層などが分布する地域において層すべりが多く発生している。地震動によってすべりを起こしやすい地質について過去の地震の発生事例から考えると、軽石層、火山灰層などの火山性の堆積物のほか砂岩層など固結度が悪く空隙が多く比較的粗粒の地層が多いようである。

次に地震によって層すべりが起きやすい原因について考えてみると、地層中の個々の単層は構成物、粒度組成や固結度などがひろい範囲ではほぼ一様であり、地震動に対する物理的強度や地震動に対する挙動はほぼ近い性質を持つことから、地層中に地震で破碎されやすい条件を持つ層があれば同じ地震動がおよぶ広い範囲においてすべりを生じる可能性がある。それに対し豪雨を要因とする地すべりの場合は地下水による間隙水圧の上昇が不安定化をもたらすため、同じ地層面上でも標高の高い部分と低い部分では圧力が異なるために同一地層面が同時に不安定化する可能性は小さいと考えられる。地震によって規模の大きな斜面変動が生じるのはこのようなことが一因になっていると考えられる。今後もこういった堆積岩地域では同様の斜面変動を想定しておく必要がある。

(2) 従来、地震では起きにくいとされてきた再活動型地すべりが多く発生した。

地震によって生じる土砂災害の研究が本格的に行われるようになったのは比較的最近であるが、近年の地震によって生じた土砂災害はどちらかというと急斜面の崩壊や盛土斜面の変形や崩壊などが多く発生しており、比較的緩斜面で多く発生している再活動型の地すべりはほとんど起きてこなかった。そのため地すべり地形を呈する斜面で生じる再活動型地すべりは地震によってはあまり起きないと考えられてきた。

斜面における地すべりの一般的な発達史を考えてみると、最初に急斜面が重力によってクリープ変形が徐々に進み、そこに地震動が加わることによって初生的な地すべりが起きる。初生すべりを起こした斜面は、その後の降雨や融雪水が斜面深くまで浸透しやすくなり風化作用も助長されてゼい弱化が進むため、地すべり変動を繰り返し起こす。そういった過程を経て次第に緩斜面化していくという道筋が一般的な斜面の開析過程であると考えられてきた。しかし今回の中越地震では過去の地すべりの跡地である地すべり地形を呈する斜面が滑动を起こす再活動型地すべりが数多く発生し大きな被害を生じている。今回地すべりダムを形成して多数の住宅が水没した山古志村の東竹沢と寺野の地すべりは典型的な再活動型地すべりの事例であった。また、中越地震において最大規模の地すべり変動を起こした塩谷集落の北にある地すべりも同じく再活動型の地すべりである。初生すべりもいくつか起きているが大きなものは数か所程度であり、大部分が再活動型地すべりであった。このように第三紀のような地質条件の地域では緩斜面における再活動型の地すべりが地震動によっても発生することが実証された。後述するように地震に伴って生じる地すべり発生場所の予測の手がかりになると思われる。

山古志村を含む魚沼丘陵はその西に広がる頸城丘陵とともに日本でも有数の地すべり地帯とされ、地すべりの多発地帯である。防災科学技術研究所は中越地域の地すべり地形分布図を 2004 年 3 月に刊行していたが、図 2 に示すように地すべり地形でない斜面の方が少ないくらいである。中越地震で変動を起こした上述の地すべりはいずれも過去の地すべり移動体がほぼそのままの範囲ですべりを起こしたものである。そのため規模も大きく谷を堰き止めた高さも大きかったために深刻な被害をもたらした。それ以外の地すべり変動もその多くが地すべり移動体の一部、特に下部が変動を起こしたものである。そのほかにも変動域が斜面上部へ拡大したものや滑落崖の急崖部が大きく崩れた事例など既存の地すべり地形に関連した変動も多数確認できる。



図 2 芋川周辺の地すべり地形分布図 (H: 東竹沢地すべり, S: 塩谷地すべり)

このように今回の中越地震においては地すべり地形分布図が事前に発行されていたことから地すべり地形判読の災害予測への有効性が実証された。中越地震のように第三紀層地域で起きた地震としては1847年善光寺地震や1911年の秋田仙北地震などがあるが、いずれもかなり古い地震であったために発生前の地形状況は良くわかっていなかったが、やはり地すべり地形の斜面においても多くの変動が発生した可能性が考えられる。地すべり地形を呈する斜面において地震による地すべりが発生することが明らかにされたことで、これまで予測が難しいとされてきた地震時地すべりの発生場所の予測に対するひとつの手がかりをもたらしたといえる。

(3) 地震時の斜面変動でしばしば生じる地すべりダム

テレビ報道にて2階建の住宅の屋根がかくれるほど水没した様子が写し出されたように、新潟中越地震の土砂災害で最も深刻な被害は東竹沢、寺野で起きた地すべり土塊の堰止めによって生じた地すべりダムの形成とその決壊の危険性である。中越地震では芋川本川の8か所をはじめ、50か所以上で地すべりダムが形成された。地震で生じた地すべりによってできた堰止めダムの例は過去に

も多く知られている。日光北部の地震では三依川を堰き止め40年後に破堤した。善光寺地震による岩倉山の崩壊は犀川を堰き止め、20日後に決壊し長野盆地一帯に大洪水をもたらした。また、安政飛越地震では立山カルデラ内で起きた鳶崩れによって常願寺川上流の湯川が堰き止められた。このように地震によって生じた地すべり土砂が河川を堰き止めてダム湖を形成した事例はかなり多い。これは地震によって生じる斜面変動の規模が大きいことや崩れた地すべり土塊があまり破碎されずに川をせき止めたことなどによると思われる。豪雨の場合は地すべりが起きた時点で河川の水量は既に多いため堆積した土砂がすぐに流されてしまう。ダム湖の決壊は善光寺地震の犀川の氾濫や鳶崩れで起きた常願寺川の洪水のようにかつては避けることが難しかったが、土木機械力が飛躍的に向上し、情報伝達が発達した今日においては決壊する前に対策工事をとることができる。中越地震の場合でも重機をヘリで輸送するなどして被害を食い止めることができた。今後はむしろ既設のダム湖に地震によって生じた地すべり土塊が流入することによって越流する事態の方が大きな被害をもたらすのではないかと想像される。起きる確率は低いが対応する時間的余裕がほとんどないこと

から対応を考えておく必要は大きい。

4. 地震動で生じる土砂災害の種類と特徴

日本列島は地形地質的に変化に富み、様々な岩質から構成されている上に活発な地殻変動によって変形が進んでいる。そのため地震によっても様々なタイプの斜面変動が発生してきた。その中で急斜面における表層崩壊～浅層の斜面崩壊と落石などは地質を問わず多くの地震によって起きてきたが、より深刻な災害につながるようなタイプの変動も多く発生している。そういった各種の斜面変動のうち今後留意しておくべき変動の発生状況とそれに関わる災害について述べてみたい。

(1) 長距離流下する火山地域における土砂災害

1984年9月に起きた長野県西部地震では御嶽山の8合目付近の尾根に生じた大規模崩壊で生じた土砂が12kmも流下して途中で15名の人を飲み込んだ。1923年の関東地震では根府川上流の崩壊によって生じた「山津波」が根府川に沿って4km以上流下して400名以上の死者を出すなど大きな被害を生じている。また伊豆大島近海地震でも伊豆半島の各所で流動性の高い斜面崩壊が生じ

て多数の死者を出した。降下火山灰層は風下にも広く堆積するため火山から離れた地域においても流動性の高いすべりを生じることがある。1968年の十勝沖地震の際は八戸近郊の丘陵地において十和田火山灰を挟在する斜面で多数の表層崩壊を生じたが、流動性が高いことから斜面下にあった家屋を直撃して大きな被害を出している。一般的に火山堆積物のすべりによって生じた斜面変動は流動性が高いことが特徴で、被災範囲はかなり広がる。火山性の堆積物が地震によってすべりを起こしやすくしかも流動性が高い要因に関しては粘土鉱物であるハロイサイトが高い割合で存在するためと考える研究者も多い(Tanaka, 1985)。

(2) 急斜面の岩盤クリープ斜面の崩壊

安倍川源流部に生じた大谷崩れや七面山の崩壊は江戸期に起きたプレート境界地震で生じたと伝えられている。同様の崩壊地は南アルプスの各所に残されている(写真3)。こういった崩壊が生じた斜面はそのほとんどが斜面の岩盤がクリープ変形を起こしていた斜面であることが明らかにされている(千木良, 1995)。このような斜面の下にダム湖が作られている場所もあって対策が求められる。こういった斜面は地形的・地質的な調査に

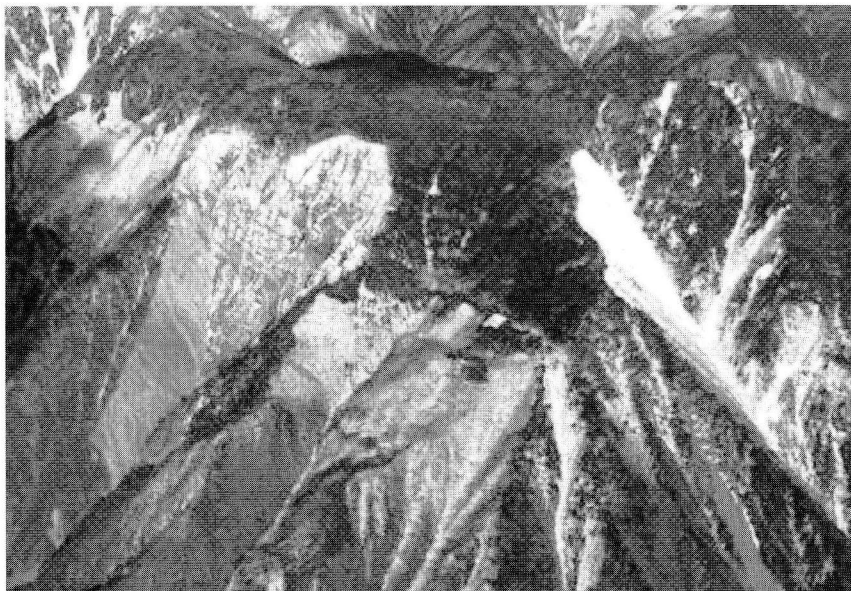


写真3 南アルプスの赤崩れ全景 崩壊の背後はクリープ斜面

よって抽出することが可能であり、今後 GPS 観測などで変位の計測が可能になれば危険斜面を予測手法の開発が進む可能性がある。

(3) 今後発生が増加が危惧される盛土斜面での斜面変動

これまで地震時における土砂災害は、善光寺地震や長野県西部地震のように主に山間部において出してきた。地震も内陸で起きる内陸地震が中心で、人口が集中する海岸近くの都市近郊においてはさほど大きな土砂災害は起きてこなかった。しかし高度経済成長期以後に起きたいくつかの地震災害をみると都市域の人口改変地、とりわけ谷埋め盛土と言われる谷地形を埋めて造成した地盤における土砂災害が問題になる可能性が高まっている。

1993 年の釧路沖地震では住宅が丸ごと斜面下に落ち込んだ被害写真が新聞紙面をかざったが、これは谷を埋めて造成された地盤の斜面端に建てられていた住宅の地盤が地すべりを起こしたものであることが明らかにされた(井口, 1999)。それを機会に過去の事例を調べて見ると 1968 年の十勝沖地震以降同様の盛土地盤で少なからず被害を生じてきたことが明らかになってきた(井口, 1995)。1978 年の宮城県沖地震ではかなりの住宅地に被害を生じ、兵庫県南部地震で 34 名の死者を出した仁川地すべりも盛土地盤を主体とする斜面の変動であった。2003 年 5 月に起きた宮城県北部地震では築館町において極めて流動性の高い地すべりが起きている。中越地震においても、長岡市の東山団地など各所で盛土によって造成された住宅地に被害がでている。首都圏から東海地域にかけてはまだ大きな地震の洗礼を受けていない盛土斜面がかなりあると推定されるが、実際のどの程度の規模と範囲で変動が起きるのかといった想定は十分にされていないように思う。

これまでの災害事例から見て、谷埋め盛土の大半の変動は地盤に亀裂が入るか数 m 程度のすべりにとどまることが多いようである。その場合、人的被害はほとんど起きないが、被災した住宅に住み続けることは困難で、個々人にとっての被害は深刻である。1994 年に起きた北海道東方沖地震

を調査した時も、住宅の本体にはクラックひとつ入っていないにもかかわらず盛土地盤の上に建てられていたため地すべりによって数度傾いたため住めなくなったことを嘆かれていた方を見かけた。耐震性の高い住宅を建てたととしても住宅の基礎となる地盤がすべってしまえば手のほどこしようなない。

さらに盛土地盤のすべりでも地下水がかなり高く締め固めが不十分な場合は 2003 年の宮城県北部地震の築館町の崩壊のようにわずかに傾斜 10 度の斜面でも液状化を起こして高速で流動化する事例があり、そういった場合は人的被害の危険度が高くなる。

地震による災害では道路などライフラインの確保がその後の早い復旧への鍵になる。全村避難を余儀なくされた山古志村は道路の寸断などがかなり影響したと言われているが、その中には盛土部分が崩落した箇所もかなりあった。1993 年釧路沖地震の災害調査の際にも感じたことだが、車が走行しやすいようになめらかに作られた道路では路盤の陥没や側方へのすべりなどによって大きく破壊されているのに比して、調査の行き帰りに通った古くから使われていた細い曲がりくねった道路ではほとんど被害がなかったのが印象に残った。そういった道路は自然の地形に沿っていることから人が通りやすいルートが次第に拡張されて出来たと思われる。昨年の中越地震における山間部を通る道路の被害でも、谷をまたぐ部分において大きく迂回し湾曲していた旧道はあまり大きな変動を受けていなが、谷を埋めて直線状に作った新しい部分は大きく崩れていた。今後への教訓としては地震を想定して災害の際には旧道が再利用できるように何らかの形で残すように配慮することも災害時の素早い対応をとりやすくする一手段ではないかと思われる。

5. これから求められる研究課題

(1) 地震による土砂災害の発生場所の予測

気象官署による豪雨の短時間予測や警報の発令と違い、「地震予知」は未だ実用的な段階に達して

いないため、地震によって生じる土砂災害については事前に避難することが難しい。地震の直後に発生する地すべりに対しては逃げる余裕がなく不意に襲われ一瞬のうちに大きな人的被害を出す。そのため地震による斜面変動の発生場所の予測とその危険度評価は土砂災害研究の中でも重要度の高い研究課題である。しかし無数にある斜面の中でどこが地震の時に危険であるかを評価することは手法の面でも経費の面からもかなり難しい。しかしこれまで述べてきた変動タイプのうち再滑動型の地すべりとクリープ変形を起こしている斜面については高精度の地形調査によって抽出できるので、今後の研究の進展によって高精度の予測への可能性がある。次いで人工盛土の斜面については旧版の地形図など現在の地形を比較することによって盛土された地盤の抽出による危険度地図を作成することができる。それに加えて急斜面に起きる表層崩壊については岩石の力学的強度の推定法が確立できれば、斜面勾配と組み合わせてハザードマップの作成の展望がひらける。しかし火山地域における斜面崩壊などその他多くの斜面変動の発生場所の予測は難しいのが実情である。

(2) 地震による地すべり発生のメカニズムの解明

地震によって発生する地すべりのメカニズムに関しては紙面の関係で深く述べることができなかった。豪雨や融雪による斜面変動の場合は地下水の上昇に伴う間隙水圧の上昇という静的に進行するが、地震による斜面変動は地震加速度による外力や震動で生じた慣性力による機械的破壊など動的な様々な要因で変動する。しかし地震による土砂災害の発生頻度は雨によるものと比べて少ないことから調査解析された事例は少なく、地震の瞬間における観測事例は皆無に近い。また震動実験についても盛土を想定した実験以外は現象の再現は難しい。そういったことから発生メカニズムについては多くの未解明の問題が残されている。

中越地震においても様々なタイプの斜面変動が生じたが、中越地震の場合直前に日本列島に上陸した台風もたらした豪雨による地下水の影響を考慮する必要がある。斜面における実際の地震動の実態や地下水の関与の有無など明らかではな

い。地下水があまり関与しないと考えられる急傾斜面の崩壊現象については斜面勾配と岩石の強度、地震加速度(ないし震央からの距離)を考慮した発生予測が行われている。このタイプの崩壊は実際の地震での発生数も多いことから研究対象として取り上げられることも多く、ハザードマップの試作の試みもある。しかし、大きな災害をもたらす斜面崩壊では岩石の平均的な強度より特定の弱層で破壊が生じたことが事後の調査で明らかになるなどまだまだ解釈の段階にとどまっている。

8. さいごに

本稿を執筆中の2005年3月19日に福岡県西方地震が発生し、建築物の被害や液化化などかなり大きな被害を出した。特に玄海島では多数の全半壊家屋がでて、全島避難という事態を生じた。ニュース映像でしか確認していないが玄海島の集落は地すべり変動によって形成された斜面の上に立地しているように見える。また島の頂上付近に亀裂が見つかったとの報道もあることから、集落が地すべり移動体の上に立地していたことが住宅被害を大きくした可能性も考えられる。地すべり地形をマッピングしておくことは斜面変動の発生場の予測だけでなく他の災害の変動を増幅させる要素でもあることから有益である。

地震災害は起きる場所によって被害の様相が大きく異なる。同じ土砂災害でも地形、地質、地域ごとの住み方などによって災害の受け方が違ってくる。今後の地震による土砂災害を軽減するためには歴史地震を含めてその実態と諸条件の関係を正確に把握するとともに、想像力を働かせているような事態を想定しておく必要があると思う。

原稿を依頼されてからの半年間は国内外で地震災害が発生し対応に追われた期間であった。原稿依頼を受けた当初に想定した内容とはかなり異なったものになってしまったため一部チグハグな箇所もあるがご容赦頂きたい。

参考文献

- 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊. 近未来社, 204 p.
- Chigira, M., Wang Wen-Neng, Furuya, T., and Kamai, T. (2003) : Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Engineering Geology*, 68, 259-273.
- 井口 隆 (1995) : 谷埋め盛土地盤における地震時地すべりの事例と若干の考察, 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書, 日本地すべり学会, 101-117.
- 井口 隆 (1999) : 1993年1月の釧路沖地震によって生じた地盤災害とその特徴, 防災科学技術研究所研究報告, No. 59, 31-56.
- Honda, T. (1950) : Land Slip in the Imaichi District Revealed from the Breaks in the Well-Tubes. *Bull. Earthq. Res. Inst.* Vol. 28, pp. 449-455.
- Tanaka, T. (1985) : Some Earthquake Induced Landslide in Japan. IVth International Conference and Field Workshop on Landslide, Tokyo, Japan.
- 清水文健・大八木規夫・宮城豊彦・井口 隆 (2004) : 地すべり地形分布図(第17集)「長岡・高田」. 防災科学技術研究所研究資料, 5万分の1ないし2万5千分の1図葉30面.

アスペリティ

地震は断層面を境として両側の岩盤がずれ動いて起こる。簡単のため、このずれの量や方向は断層面上で一様であり、どこも同じようにすべるとする単純な断層モデルが、初期の頃は用いられていた。しかし現実には、場所により断層面の性質は異なり、すべりの大きさや方向は不均質に分布すると考えるほうが自然である。

近年、地震観測データの質と量が向上し、地震波の解析技術が発展するにつれて、大地震の詳細な震源過程がわかるようになってきた。それによると、断層面上のすべり分布は場所による不均質性が高く、地震時にとくに大きくすべる領域として「アスペリティ」の存在がクローズアップされるようになった。アスペリティとは突起といった意味を持つ言葉であるが、地震学で用いるときは次のような性質を持った断層面上の領域のことを言う(図1)。

- ① 通常は強く固着しており、すべらない。
- ② 地震時は急激にずれて強い地震波を出す。
- ③ 周囲に比べて地震時のすべり量が大きい。

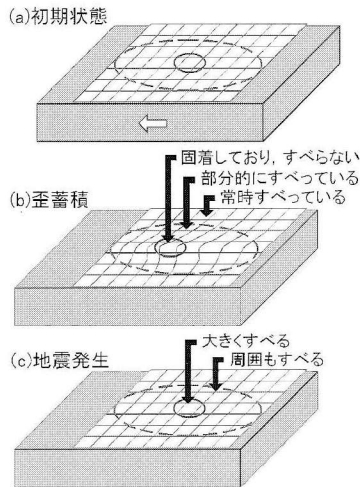


図1 アスペリティの概念図

これまで多くの地震について断層面上のすべり分布を求める解析が行われ、色々な地域でアスペリティの場所や大きさが同定されてきた。このような蓄積の結果、アスペリティに関しては次のような性質があることがわかってきた。

- ④ 震源(破壊の開始点)は、アスペリティの縁辺部または離れた場所にあることが多い。
- ⑤ 余震はアスペリティの周辺で多く発生し、アスペリティの内部では少ない。
- ⑥ アスペリティの位置はほぼ固定しており、

地震は同じアスペリティで繰り返し起きる。

⑦ アスペリティの大きさや分布の仕方には地域的な特徴がある。

上記④⑤の実例として、図2に2003年十勝沖地震の場合を示した。えりも岬南東沖にあるアスペリティの端に震源があり、余震はアスペリティの周囲に分布している。

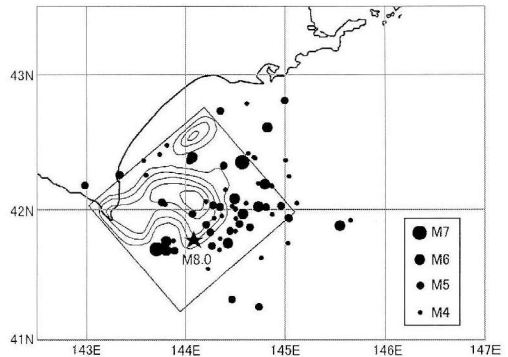


図2 2003年十勝沖地震の滑り量分布(コンターは1mごと:山中・菊地による)と余震分布(浜田・鈴木による)。矩形は地震時に滑った震源断層、星印は震源(破壊開始点)を示す。

また⑦については、菊地・山中により図3のような概念が示されている。三陸沖では中規模のアスペリティが隣接しており、個々のアスペリティが単独で動くときM7級、複数が連動するとM8級の地震を起こす。東南海や南海の領域では大規模なアスペリティが単独で存在し、常にM8級の地震を発生させる。日向灘では小規模なアスペリティが分散しており、M7級の地震しか起こさない。このようなアスペリティの分布がわかると、多様な地震発生の理解が深まると同時に、強震動の予測精度の向上にも役立つものと期待されている。(岡田義光)

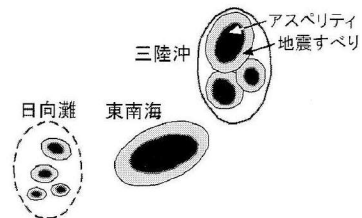


図3 アスペリティ分布の地域性(菊地・山中による)

相似地震

ある地点で地震観測をしていると、細部に至るまでそっくりの地震波形をもった一群が観測されることがあり、このようなグループを「相似地震」と呼ぶ(図1)。その震源は空間的に集中しており、いわゆる地震の巣を形成している場合が多い。

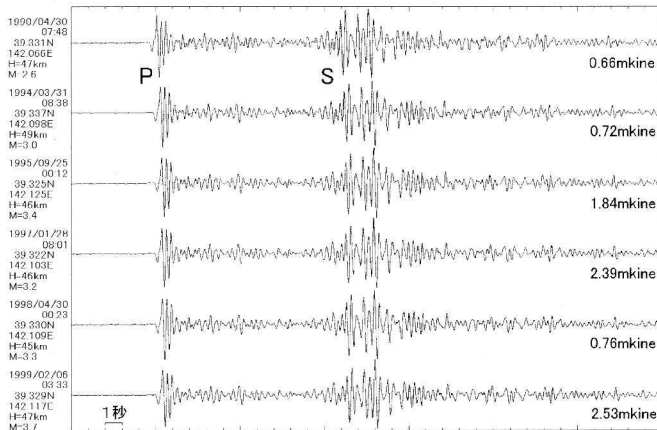


図1 姫神観測点で記録された相似地震の波形例(上下動成分 1-4Hz: 東北大学による)

相似地震に関しては古くから研究があるが、最近、東北大学のグループによって精力的かつ詳細な解析がなされ、その物理像が明らかとなってきた。まず、相似地震のほとんどはプレート境界において発生していることがつきとめられ、これらの地震はプレート境界にある小さなアスペリティが繰り返すことにより

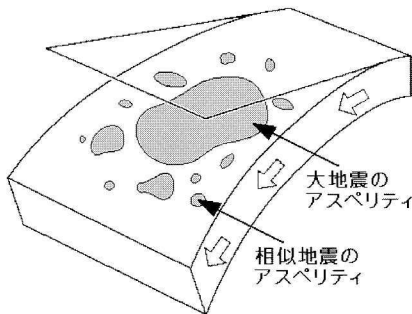


図2 プレート境界におけるアスペリティ分布の概念図(松澤・五十嵐・長谷川による)

生じているとの推定がなされた(図2)。

相似地震を起こすアスペリティは小さく、かつ孤立的に存在していると考えられる。アスペリティのまわりは固着が弱く、そこでは非地震性のすべりが進行していて、それが小さなアスペリティに応力集中を起こすことにより地震の発生を促す。すなわち、アスペリティのすべり量は周辺領域の非地震性すべりの時間変化を示すバロメータとなっており、相似地震はプレート境界に埋め込まれた「歪み計」と見ることができる。

GPSデータを用いて推測された三陸沖のプレートすべり速度分布と比較してみると、プレート間の固着が強いと推定される領域には相似地震の巣がほとんどなく、固着が弱いと思われる領域に数多くの相似地震が分布することから、上記のような考え方は正しいことが裏付けられた。

このような相似地震で最も有名になったものは、本誌33号でも紹介された岩手県釜石沖の繰り返し地震である。ここではM4.8±

0.1の地震が5~6年の間隔で規則的に繰り返され、非常に良く似た波形の地震記録が得られてきた。1957年から1995年の間に発生した8回の地震履歴に基づき、次の地震は2001年11月末までに99%の確率で発生すると予測していたところ、まさしく2001年11月13日にM4.7の地震が発生した。

最近では、東北地方に次いで関東地方の下でもフィリピン海プレートの境界、および太平洋プレートの境界で数多くの相似地震を生み出している場所が見つかり、各々のプレートの運動速度に見合った頻度で地震が発生していることが明らかとなっている。

また、2003年十勝沖地震の震源域周辺でも一連の相似地震が見つかり、震源となったえりも岬南東沖では、それまで発生していなかった相似地震が本震発生後に活動を始めたのに対し、えりも岬南西沖の領域では地震の前後を通じてほぼ一定の頻度で相似地震の活動があったことが見出されている。(岡田義光)

実大三次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス)

小川信行

1. はじめに

本施設は、1995年の阪神淡路大震災の教訓を受け、地震防災研究の基盤施設の一つとして計画され推進してきたものである。1998年までの4年間をかけて装置の開発試験を実施し、1998年に本社工場製作、2000年3月に三木市において現地工事に着工し、阪神淡路大震災から10年目となる2005年3月末に完成を迎えることとなった。阪神淡路大震災以降、建造物の地震による破壊のメカニズムの解明及び破壊から守るための免震、制震関連技術の開発の必要性が改めて強く認識され、官学民の研究所等でも新たな施設、技術を用いた地震工学研究が活発に行われるようになったが、科学技術庁(当時)防災科学技術研究所においても大震災直後から、そのような施設の一つとして大型三次元震動実験施設(その後「実大三次元震動破壊実験施設」が正式名称となった)の開発に取り組んできた。一方、科学技術庁では、大震災を契機とした様々な取り組みが行われる中、特に「地震防災研究基盤の効果的な整備」のあり方について、航空電子等審議会(地球科学技術部会地震防災研究基盤分科会(主査岡田恒男芝浦工業大学教授、当時)が担当)への諮問、答申(平成9年9月3日)が行われ、この中で上記施設についてもその必要性、持つべき性能についての審議が行われた結果、新たな地震防災研究基盤における中核的施設の一つとしての位置づけがなされた。この答申を受けて、本格整備のための予算化が具体的に始まり、また建設地も兵庫県の協力を得て三木市の震災記念公園内(現在「三木総合防災公園」)に建設されることが決まった。なお、施設全体の愛称も公募によりE-ディフェンス(英語名E-Defense)

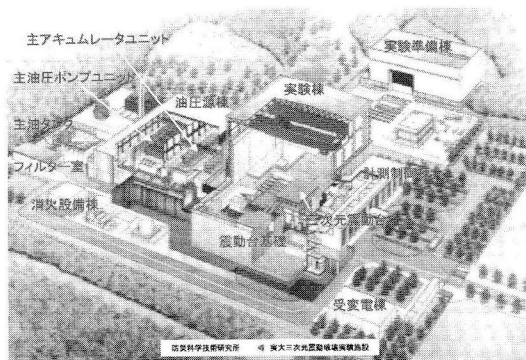


図1 施設の全体レイアウト

と決定された。実体は大型三次元振動台であるが、付帯施設を含め大地震の震動に起因するさまざまな被害全般に対し有効に活用される施設となることを期待したネーミングとして採用された。なお、EはEarthのEである。

図1に施設の全体レイアウトを、また図2に実験のイメージを示した。本稿では、この施設の目的と性能、設備の構成、機能および建設経緯を中心に施設の概要を紹介する。

2. 本施設の役割

本施設の目的とするところを、大枠でくくると、地震時の

- ① 破壊の再現
- ② 破壊の予測、予知(そのための技術の検証)
- ③ 破壊の防止(そのための技術の検証)

となる。①の破壊の再現は、阪神淡路大震災で広汎に発生した振動による建造物の種々の破壊を再現し、そのメカニズムを解明することが、破壊の予測や防止技術の開発の出発点となるという意味で、本施設の最も基本的な目的となっている。

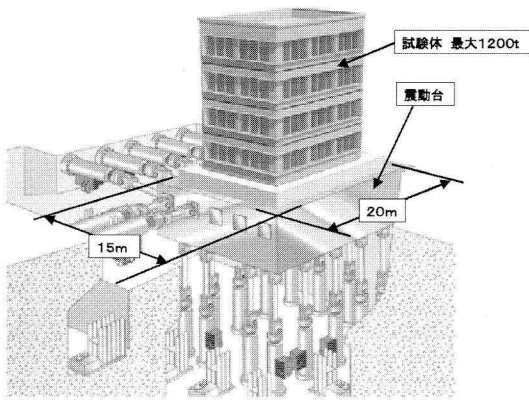


図 2 E-ディフェンスを用いた実験イメージ (例示)

この場合、「破壊した状態」という結果よりも、そこに至る「破壊過程」に関するデータを得ることが重要であり、地震被害の事後調査とは違う意味がある。なお、構造体の破壊を伴わない振動による地震被害、たとえば家具の転倒やテレビの落下などによる負傷などもあり、また振動による電気機器の誤動作などもある。これらについても E-ディフェンスによる現象の再現、防止技術の開発が行えるので、本施設名にある「破壊」は機能障害も含め、広く地震の震動による被害を表すものと考えている。②の破壊の予測、予知技術の検証は、破壊を考慮した設計技術の開発検証といった広い意味合いと、個々の構造物のモデルに基づく破壊の数値シミュレーション技術の検証に有効なデータを提供するという二つの面を目的としている。さらに、今後は既存構造物の耐震診断やモニタリングがますます重要となってくるが、そのような診断や検査の結果が正しいかどうかは実際の地震が来るまでは本当の意味ではわからない。しかし、E-ディフェンスを使った実験により、限られたケースではあるがそのような検証を行えることが期待できる。③の破壊防止技術については既に様々な補強技術や免震、制震技術が開発され実用化されてきているが、要素としての性能確認は行われていても構造体に組み込まれたシステムとしての検証はまだほとんど行われていないのが実情と思われる。また、今後はより普及しやすい合理的かつ経済的な手法の開発がますます進む

表 1 E-ディフェンスの基本仕様

事項	加振方向	
	水平 (X, Y)	垂直
最大搭載重量	1,200 tonf	
震動台面積	20 m × 15 m	
振動方向	X, Y, Z 並進及び回転 (6 自由度)	
駆動方式	アキュムレータ蓄圧/ 電気油圧サーボ制御	
最大変位	100 cm	50 cm
最大速度	200 cm/s	70 cm/s
最大加速度 (1200 tonf 搭載時)	0.9 G 以上	1.5 G 以上
許容 モーメント	転倒 15,000 tonf・m 以上 (垂直 1G 時)	
	偏揺 4,000 tonf・m 以上 (水平最大時)	
回転変位	2.5° 以上 (X, Y, Z 軸周り)	
加振振動数	0-15 Hz (性能保証), 15-30 Hz (加振可能)	
波形ひずみ	15% 以下 (主要範囲で)	

と思われる。このような技術の「システムとしての性能」を大地震を再現した環境で検証するためには E-ディフェンスが非常に有効な手段を提供できると考えられる。

3. 施設の概要

3.1 施設の特徴と性能

装置の基本仕様は表 1 に示すとおりである。基本性能を策定するに当たっては、前述の航電審での審議等において、特に構造物の破壊で多くの被害を生じた阪神淡路大震災の教訓をふまえ、また今後起こりうる地震動の規模なども考慮して基本スペックが決定された。すなわち前記の地震防災研究基盤分科会に「対象地震ワーキンググループ」(主査小谷俊介東京大学教授、当時) が設けられ、既往の地震動、予測しうる地震動などについての審議に基づいて、震動台で再現すべき加速度、速度、変位のレベルが提示され、またこれらを全

て満たすことが困難な場合は、破壊の進行、終局状態を主な目的とする本施設の場合は加速度よりも速度、変位を優先することが望ましいとの提言が示された。表1の最大性能はこのような提言に基づいて最終的に定められたものである。図3は正弦波加振の場合の限界性能であり、搭載負荷が0, 600 ton, 1,200 tonの3ケースについて示している。

施設の特徴の一つは、震動台テーブルが正方形でなく長方形という点である。この点は、多度津の振動台やつくばの防災科研、土木研究所等の振動台と異なっている。試験体には円筒タンクのように軸対称あるいは正方形のものもあるが、通常の建築物、橋梁、地盤モデル、配管系など1方向が他より長い試験体が圧倒的に多く、同じ搭載重量であれば長方形の方が有効であるために採用したものである。一方、水平2方向の性能は、特に差異を設けず同一としている。大型の試験体では90度方向転換が容易でないこと、建築物と地盤など構造物ごとに長手、短手で最大性能を要求する方向が異なる可能性があることなどを考慮したものである。また、最大搭載重量は、2×3スパンのRC造4階建て、地盤上の2階建て木造住宅、液状化と側方流動現象を生じる地盤モデル、LNGサテライトタンク、橋脚など重要な実験対象構造物について最小限であっても実物規模の実験が可能になることを念頭に置いて定めている。

振動方向は近年6自由度が当然ようになってきているが、本装置でも高層階でのフロアの回転を伴

う震動再現や今後の強震観測の進展を考え、6自由度としている。震動台の駆動方式は、大型では経済的で信頼性も高い油圧サーボ方式とし、多度津と同様のアキュムレータ蓄圧方式を採用している。

速度、変位の最大値は前記の経緯に基づき装置としてのバランスやコストも考慮して定めている。一般に剛性の高い構造物では加速度が破壊の起因となるが、その後の破壊の進行には速度などの影響も大きいとされている。また、比較的柔性の構造物では、変形が十分に出ることが破壊の条件となり加速度のピーク値が大きいだけでは被害の再現が難しい。本施設では、地上にある通常の、剛性が低くまた経年劣化などもある構造物などの被害の再現と補強手法の開発などを考慮して、加速度仕様をやや控えめに設定し、一方免震技術などそもそも破壊を起こさせないための新技術の検証、開発などを考慮して大きい速度、変位性能を持たせている。なお、最近では台湾地震のように、大きな断層変位とこれに伴うと思われる大速度が得られているが、このような局地的な断層至近での地盤変動は通常の震動台の対象とするところではないと思われる。

水平最大加速度は1,200 tonf搭載時で0.9Gとしているが、これは通常の地盤上にある1,200 tonfの構造物が受ける地震加速度を想定しているものである。図3の限界性能図に示されているように建屋の上階フロアの振動再現、あるいは木造や通常の機器類など軽量構造物の試験では1.7Gが可能となっている。一方上下動は、大型振動台としてはかなり大きな値であり、600 tonf搭載でも1.7Gが可能である。これは、上下動自体を目的とするよりは、大きな許容転倒モーメントを得るために垂直加振機の加振力、数量を十分大きくしたためである。許容転倒モーメントは代表的な構造物モデルの破壊レベルに至る応答を試算した結果、必要と思われる値を採用しており、定格では多度津振動台の2.5倍程度となっている。

水平軸周りの回転変位は垂直加振機間距離と垂直最大変位で決まる限界があるが、それよりやや小さい2.5°以上を各軸周りの仕様としている。こ

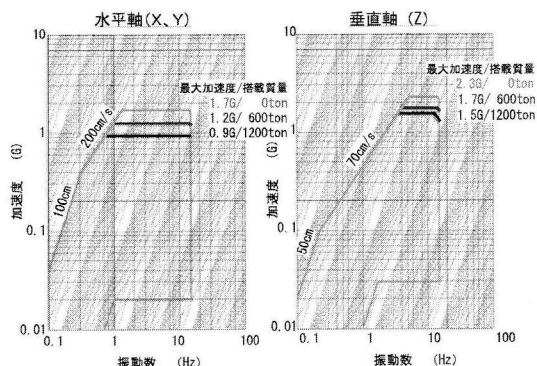


図3 震動台の加振限界性能図(正弦波加振)

の角度の場合、水平軸周りの回転では高さ 10 m の試験体の頂部で約 44 cm の変位を発生し、建物のロッキング振動などの模擬が可能であるが、他方このような自由度をもつため、純粋な水平加振を行うにはピッチングなどの制御が重要となる。

加振振動数範囲は、制御が有効に働き、同期、波形再現などの性能を要求する範囲 (0-15 Hz) と調整その他のための加振範囲 (15-30 Hz) の二つに分けて指定している。実物規模の試験 (実大構造物もしくは実大部分構造) に重点を置くため、縮小モデルに対する高振動数加振については他の実験手段を用いるか、実験者の工夫に依存することとしている。後述する総合性能試験では 15 Hz 以上の加振性能も確認しており、精度の要求が厳しくなければ実際の実験に使用することも可能である。

また、正弦波加振時の波形ひずみは、試験に用いる主要な振動数、レベルの範囲 (0.5-10 Hz, 100-800 Gal) でひずみ率 (RMS において基本波以外の占める割合) を 15% 以下としている。現在までのシミュレーション及び後述する総合性能試験ではこのひずみ率はほぼ達成されているが、本装置の場合加振機自体に内在するひずみ要因 (摩擦, サーボ弁流量特性) の他に、油柱共振、試験体との連成、基礎の振動特性など波形の乱れに影響する要因があり、これらを考慮して今後とも波形再現特性の向上を図っていくこととしている。

3.2 施設の構成および各部の機能

施設は震動実験装置本体の機械系設備とこれらを収納する建屋関連施設からなる。建屋関連施設の全体配置は図 1 に示すとおりであるが、それぞれの概要は以下の通りである。

□基礎・建家設備

○基礎

性能上重要な基礎は、震動台テーブルなど可動部総重量の 100 倍程度に相当する重量約 20 万トンの鉄筋コンクリート基礎を掘削後の神戸層岩盤に岩着するように約 1 年かけて構築した。

○実験棟

60 mW (幅) × 87 mL (長さ) × 43 mH (高さ) の

鉄骨造建屋である。スパン約 50 m, 吊り荷重 400 tonf のクレーン 2 基を収納しており、試験体の吊り上げ、搬送のほか、震動テーブルの吊り上げ、移動にも用いる。試験体の高さは 25 m 程度のもので可能である。試験体搬送は、実験棟両サイドに設けられている 20 mW × 20 mH の電動大扉から行う。また、テーブル格納ピット周囲 3 面の基礎床は、反力床となっており、鉄骨製の反力壁を設置しアクチュエータを用意すれば部材や部分構造の静的、動の実験が可能になっている。またこの反力床と震動テーブルとの相対変位を利用した静的、動的強制変位入力による破壊試験なども可能である。

○計測制御棟

実験棟に隣接する屋上付き 2 階建て RC 造であり、計測制御室を中心に、施設運営のための各種管理室および研究室が設けられている。計測制御室には、震動台制御装置、データ計測収録システムのほか三次元映像変位解析システムなどが納められている。

○油圧源棟

57 mW × 77 mL × 21 mH の鉄骨造建屋であり、4 基の油圧ポンプユニットの収納エリアと 20 基の主アキュムレータユニット収納エリアに分かれており、これらの据付、分解点検などに必要な各種クレーンが設置されている。また、騒音公害防止のために、壁全体は防音構造となっている。

○屋外機器エリア及びフィルター室

油圧作動油タンク (205 kL), 熱交換器, 作動油冷却装置, 冷却用水タンク (500 ton), 作動油フィルターなど油圧供給装置関連の補機類が設置されている。

○実験準備棟

30 mW × 58 mL × 29 mH の鉄骨造建屋であり、24 台の加振機組立場として使用するために他の建屋に先行して建設された。150 tonf のクレーンが設置されており完成後は実験に必要な各種治具の収納場所および試験体製作場所として活用される。

○屋外重舗装エリア

2 カ所設けられており、実験準備棟では製作し

にくい大型試験体構造物の建造，移動，解体，保管エリアとして利用される。

○受変電棟

本施設で必要とする電力は約5,200 kWであり，これに対応できる受変電設備を収納する建屋を設けている。なお，建設地域は雷の多発が予想されるためこれに対する対策も行っている。

□加振系機器設備（図4参照）

次に実験装置を構成する主な機械系設備の概要を簡単に説明すると以下の通りである。

○震動台テーブル

試験体を搭載しその破壊に至るまでの挙動を再現する震動台テーブルはE-ディフェンスの表舞台として重要な役割を果たすものである。構造は20 m×15 m×高さ5.5 m，重量770 tonfの溶接構造物であり，内陸部の三木に設置するために32個のブロックに分割して工場製作を行い，現地に搬入後組立，溶接，機械加工を行った。試験体を固定するための合計1,200カ所のボルト穴（M48）部分や加振機がとりつく部分は特別の補強構造となっている。ボルト1箇所あたりの許容荷重は25 tonfとしている。テーブル自体の振動発生を小さくするため，スペック上は1,200 tonf搭載時の固有振動数を25 Hz以上とした。実測はテーブルのみで実施したが，このスペックをクリアできる値（対角線を中立軸とするねじれ1次モードで36.6 Hz）が得られている。テーブル上板の厚さは中央

及びセンター軸周辺で64 mm，その他は25 mmである。台上面は通常時はGLレベルにあり，全体の上下荷重は垂直加振機下端で支持，水平ズレは着座装置で支持する構造である。加振時は，中立位置（GL+54 cm）まで上昇する。なお，本テーブルは単に試験体搭載の台にとどまらず，内部にA/D変換器付きの計測用アンプ群を内蔵し，計測されたデータをデジタル化して光ケーブルで計測制御室の収録装置に送り出すというインテリジェント設備としての役割も担っている。

○水平加振機

X方向およびY方向加振用に各5台，計10台設置されている。構造は復動型油圧シリンダであり，1台あたりの出力は450 tonf，ピストンストロークは定格で±1 mである。この大ストロークのためにピストン全長が長くなりそのたわみが無視できない。そのため，シリンダ両端部に球面静圧軸受けを組み込みピストン両端でのしゅう動と回転を支持できる構造になっている。中立状態でシリンダ後端からピストン先端までの全長は8.7 mである。三次元継手と併せた全長は約15 mの長さになる。このためシリンダの自重を支える支持架台を設置している。各加振機は，電気油圧サーボ弁によって駆動されるが，大速度（2 m/s）を実現するために15,000 L/minの高速サーボ弁を各3台ずつ装備している。また，制御の基本となるピストン変位計は高精度の磁歪型デジタル変位計を加振機外面に装備している。さらに最終的な安全装置として電気信号を用いない純機械的なスイッチにより高圧作動油を遮断する緊急遮断装置も設けている。

○垂直加振機

Z方向は，計14台の加振機をテーブル下部周辺部に沿って配置している。出力は水平加振機と同じ450 tonfであるが，定格ストロークは±50 cm，また速度70 cm/sを出すために水平と同じサーボ弁を各1台ずつ装備している。構造上の特徴は，内部に震動台と試験体の全自重を支えるバランスシリンダを内蔵している点である。これは，ピストン下部の油室でピストンを支持しピストン変位にとまらぬ油圧の変動をアキュムレータ

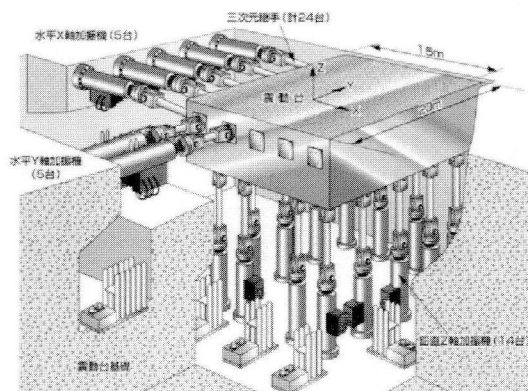


図4 加振機構の主要部

で抑えるものである。これにより、加振用に供給する油圧は、垂直加振に必要な駆動力のみを供給すればよい。但し、垂直加振機には水平加振によって高さのある試験体などに生ずる大きな回転力（転倒モーメント）に抵抗する力が必要であり、本来の上下並進加振に加えて十分な余力が必要である。自重支持を別にしても14台もの加振機をテーブル周辺に沿って配置しているのはそのためである。また±500mmの磁歪線型デジタル変位計や緊急遮断装置も水平と同様に装備している。

○三次元継手

テーブルと加振機を機械的につなぐ場合、加振機は1方向運動しかできないので、テーブルを三次元に動かすためには、いわゆるユニバーサルジョイントが必要となる。このため、リンク両端に球面軸受けを持つ全長7.1mの三次元継手を開発した。軸受け部の摩擦、ガタなどは震動台の性能に大きな影響を与えるので長期的安定性が確保できるよう作動油を常時流し込む強制潤滑方式としている。

□油圧系機器

油圧系機器の配置は図5の通りである。主なものは以下の通りである。

○主油圧ポンプユニット

同一性能のユニットを4式設置しており、作り

出した高圧の作動油を主アキュムレータに蓄圧したり、また直接加振機に送ることができる。各ユニットは1台のガスエンジンとこれによって駆動される12台の油圧ポンプから構成され、210 kg/cm²、7,080 L/minの作動油を送り出すことができる（4ユニットで約28,000L/minとなる）。

○主アキュムレータユニット

ポンプユニットのみの作動油量では、加振機内部漏れ油量と低速度の加振にしか対応できないため、20台のアキュムレータユニットを設け、計20,000Lの作動油を蓄圧し、加振指令にあわせてポンプユニットからの油量と同時に加振機に必要な流量を高速で供給する。これにより兵庫県南部地震での観測記録など大きな速度をもつ地震動を三次元で再現することができる。構造は多度津振動台と同様の球形窒素ガスタンクでバックアップするピストン型である。

○作動油供給装置

主タンクの作動油を主ポンプユニットに送り込むブーストポンプ、タンク内作動油を熱交換機で冷却する系統、清浄化のためのフィルタ循環系統などが油圧源棟に隣接する屋外機器エリアに設置されている。循環油量が多いため、加振機で仕事をした作動油は、いったん震動台ピット内のスカベンジタンク内に溜められ、ここから主油タンクに送り戻される。なお、タンク、配管などの作動油の全量は約750kLである。

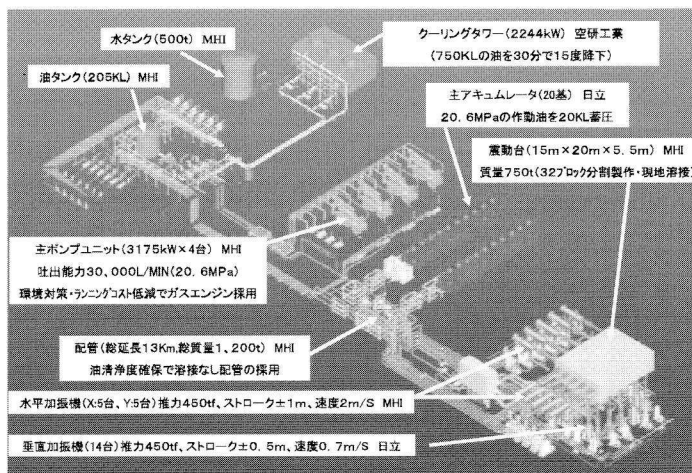


図5 油圧機器系統図

□計測制御システム

○加振制御装置

3変数(加速度, 速度, 変位)のフィードバック及びフィードフォワード制御(TVC制御)をベースとする基本制御部分と, 試験目的と対象に応じた加振精度を確保するための応用制御部分から構成されている. 応用制御としては既往の入力補償制御の他, 正弦波歪みのオンライン補償, ランダム波対応の逐次入力補償などを搭載している. また最も重要な試験体破壊時の震動台制御については, 高速適応型入力補償制御などを導入しているが, 今後の実験の積み重ねと併せて評価, 改良あるいは開発を継続していく必要がある.

○データ計測システム(図6)

試験体については計896CH, 24bit, 2kHzのデジタル収録をベースとし, これをブロック分割により複数試験体同時実験にも対応できるように考えている. また震動台加振データ64CHを加えて計960CHの収録ができるシステムとしている. これらの内, 32CHについては1MHzの高速収録を可能とし, 音速の測定などにも対応できるようにしている. アンプ類は前述のように震動テーブル内に収納されており, 調整などはリモートのコンピュータ制御で行う. また震動テーブル本体周辺部にコネクタボックスが配置されており, 実験者の作業としては試験体センサからのケーブルをこのコネクタに接続するだけであり, それ以降は固定配線となっている.

4. 建設の経緯と現況

4.1 要素技術開発

前述のように本装置は面積, 搭載重量ともに最大の振動台となるが, これを既存の振動台の中でも最大レベルの速度, 変位で加振する点が製作上の大きな課題であった. このため大流量のサーボ弁を開発する他, 特に加振機, 三次元継手が大規模になるとともにこれらの可動部を支持する軸受けがピストンのたわみ, 横荷重に対応できるようにする必要がある. このような大型化に伴う種々の技術的課題を解決するために, 平成7-10年度の4年間にわたって要素技術開発を実施した. 図7はそれらの成果を集約した確証試験装置であり, 実

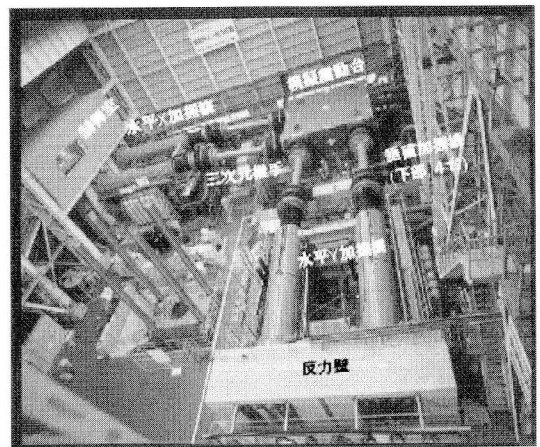


図7 確証試験装置(要素技術開発)

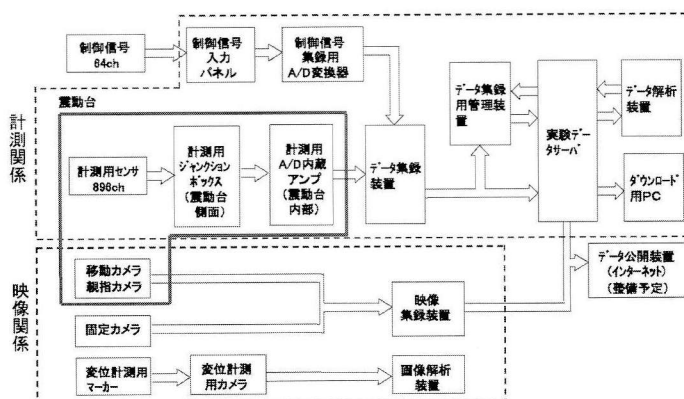


図6 実験データ計測収録システム

機に利用する加振機を用いて各種加振性能の検証を行ったものである。実施場所は三菱重工(株)下関造船所構内であった。この要素技術開発の成果に基づき、平成10年度から順調に機器の製作を進めてきた。

4.2 現地工事

建設のスケジュール及び関連する事項を表2に示す。また図8は全景写真である。表2にも示したように、土木建築関連工事は平成14年度に終了し、油圧配管のフラッシングなど機器の据え付け調整を経て、平成16年3月には24台の加振機の単体加振性能試験を終了した。図9に実験棟内基礎に加振機が据え付けられている状況を示す。また震動台テーブルは32個のブロックに分割して製作した後、実験棟内に順次搬入され、図10のような現地組立、溶接、天板の機械仕上げ加工を経

て、図11のように所定の位置に据え付けられた。このテーブルの現地組立調整には約1年近い期間を要している。その後、テーブルとリンク継手、

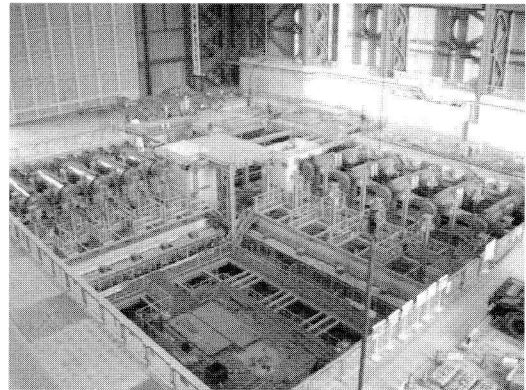


図9 加振機の据付完了状況(平成15年1月)

表2 建設経緯(平成10年以後の主な経緯)

平成	10	11	12	13	14	15	16	17	18
基礎・建家・加振油圧系機器									
震動台基礎工事									
実験棟他建設工事									
装置・機器の工場製作									
加振機、配管等の据付・調整									
テーブル組立・溶接・加工									
テーブル・継手の据付									
計測制御装置									
制御装置据付調整									
実験計測装置据付									
調整運転・性能試験									
加振機単体加振性能試験									
総合性能試験(無負荷)									
総合性能試験(負荷搭載)									
実験実施									

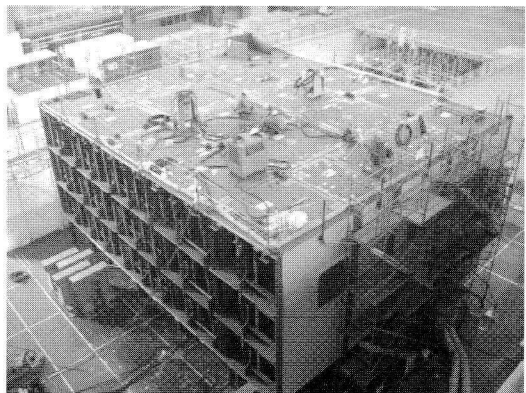


図10 震動テーブル(一部)の現地溶接状況

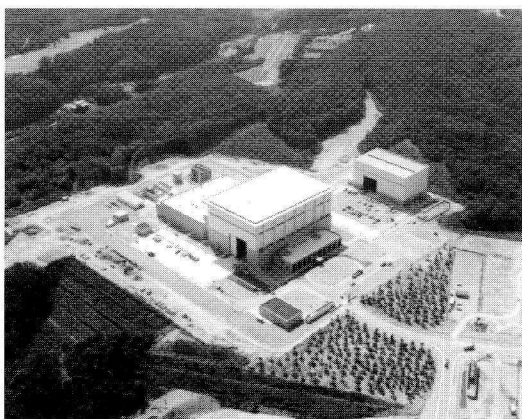


図8 建家施設の建設状況(平成15年9月、兵庫県ご提供)、中央高い建物が実験棟、その右側が計測制御棟、また右上部が実験準備棟

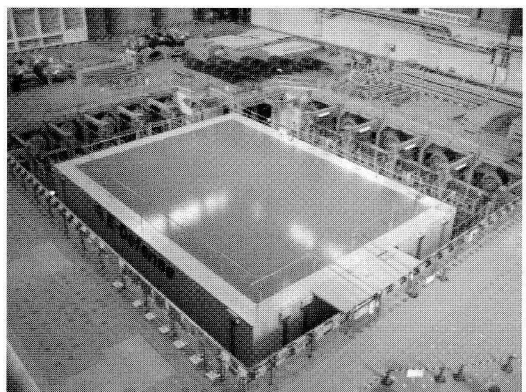


図11 所定位置に設置を完了した震動台テーブル(平成16年5月)

加振機との結合，調整を経て，総合性能試験に至った。この間，機器類などにいくつかのトラブルも発生したが，幸いに長期の停滞を生ずることなく現在に至っている。

4.3 総合性能試験

システム全体の総合性能試験の計画を表3に示す。このうち，総合性能試験（テーブルのみ）は試験体の無い状態での性能試験であり，平成16年11月から開始し，平成17年3月中旬に完了している。前述のように計24台の大型加振機を770tonfのテーブルに結合し，これを三次元同時に最大振幅±1m，最大速度200cm/sの各種の波形で駆動する試験は，これまでの振動台では全く経験していないものであり，運転及びモニタリング技術の蓄積を図りながら慎重に進めてきた。試験の内容は表3に示すように，最大仕様などの基本的なスペックを確認する基本性能試験，地震波形の再現性などを評価確認する制御性能試験としており，またこれらの試験にあわせて，周辺地盤での環境振動と騒音，基礎及び建家の振動，テーブルに生ずる応力など関連事項の計測も実施してきた。図12，13に無負荷総合性能試験の結果の一例

を示す。図12では基本制御のみでの加振であり，波形のピーク付近で目標波と実測波に若干の差が見られる。ピーク部が大きい波が実測である。一方，応用制御の一つ，入力補償法を適用した場合，目標と実測はほとんど一致していることがわかる（図13で実測と目標がほぼ完全に重なっている）。

5. 今後の計画

5.1 振動台総合性能試験（負荷試験）

無負荷の試験で基本的な性能を評価確認することはできるが，実際の使用状態では最大1,200tonf，高さ20mに達する試験体を搭載して加振を行うため，試験体の振動が震動台の動きに影響し，必ずしも期待通りの振動を再現できるとは限らない。特に重心の高い重量構造物の場合，水平加振により試験体に生ずる転倒モーメントがテーブルのピッチングやローリングなどの回転を誘起し，試験体に作用すべき水平力が台と試験体の剛体的な回転に消費され試験体の変形が緩和されてしまうことが大きな問題とされている。この現象を回避するためには，回転を抑止する垂直加振機に十分な余力を持たせるとともに，制御によりそ

表3 総合性能試験実施内容

試験の種類	2004	2005	2006	主な試験内容
総合性能試験 (テーブルのみ)				<ul style="list-style-type: none"> ■基本的な仕様を確認する試験 <ul style="list-style-type: none"> ○最大仕様確認試験 最大変位，最大速度，最大加速度および回転加振性能 ○最大速度振幅の継続時間確認 ○台の回転抵抗能力確認試験 ○各振動数での限界振幅確認試験 等 ■制御システムの性能を確認する試験 <ul style="list-style-type: none"> ○静的変位の追従性確認試験 ○全体システムの周波数特性および安定性確認試験 ○軸間クロストークの低減性能試験 ○正弦波加振の波形ひずみ試験 ○地震波加振の再現性能試験 等 ■関連事項の計測 <ul style="list-style-type: none"> ○振動台基礎の振動確認計測 ○テーブル主要部の応力ひずみ計測 等
総合性能試験 (テーブル+模擬試験体)				<ul style="list-style-type: none"> ■試験体の振動が震動台テーブルに及ぼす各種影響を確認し，制御性能を向上させる試験 ■試験体に作用する力，エネルギーの計測手法を確認する試験 等

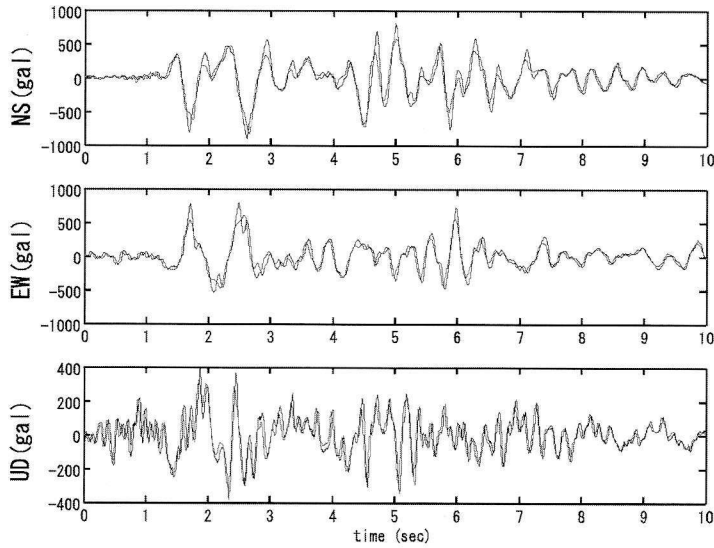


図 12 JMA 神戸波による加振の震動台実測波と目標波の比較（応用制御無し）

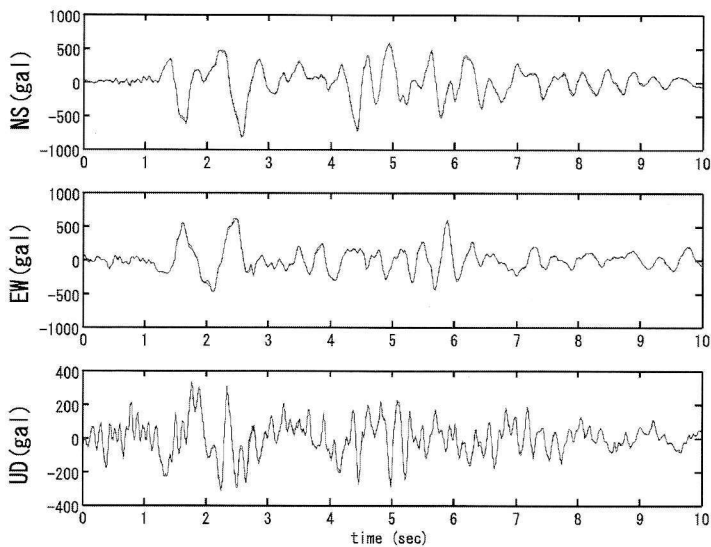


図 13 JMA 神戸波による加振の震動台実測波と目標波の比較（応用制御あり）

の余力を効果的に用いる必要がある。本装置では垂直加振機の数量、能力及び制御手法において、この転倒モーメント対策に最も主眼をおいて開発を進めてきている。負荷試験では、この性能を確認するために、高さ 20 m 程度の鋼構造試験体を用いて各種制御性能試験を実施する予定である（図 14）。

5.2 運営と利用

E-ディフェンスの運営と利用については、他機関、学識経験者の協力を得つつさまざまな検討作業が実施されてきている。運営については、基本的に図 15 のような体制をとることが決められ、運営協議会、利用委員会などの支援の元に防災科学技術研究所が運営を実施することとしている。

利用研究課題については、これまでもいくつか

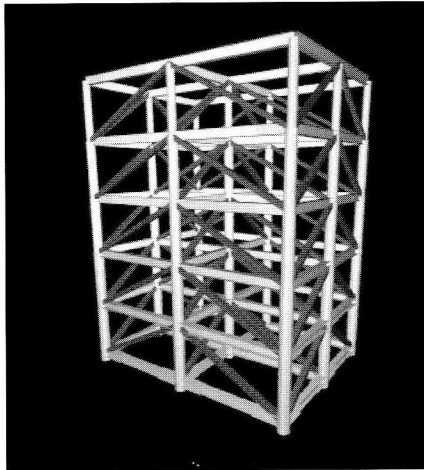


図 14 負荷試験体イメージ図

の委員会、検討会が設けられ各種の提案が審議されてきている。

まず、本施設の計画当初では、平成 8 年 5 月、科学技術庁研究開発局(当時)に「利用に関する検討会」(座長：石丸辰治日本大学教授)が設けられ、耐震工学分野の専門家による検討が行われた。本検討では、阪神淡路大震災の経験をふまえ各委員が自らの提案や所属機関としての必要課題などを抽出し、全体で 100 余の実験課題が集められた。これらは、最近の大地震被害をふまえた地盤・基礎、構造物等に関する課題として、①地盤の破壊現象の解明と土木構造物の耐震性の強化、②建築物の破壊機構の解明と耐震性の強化、③橋梁等大スパン、長大構造物の耐震性の確保、また今後の社会のあり方と耐震性の高度化の観点からの課題として、④産業設備・機器の耐震性の高度化、⑤免震・制震構造の開発と適用性の検討、⑥新しい建築構造、高付加価値建築構造の設計技術の開発、という六つの大課題にまとめられ、さらに耐震以外の分野への応用も考え七つの利用分野としてとりまとめられた。この時点では施設自体の基本仕様は案の段階であったが、前述のようにその後、科学技術庁長官の諮問第 24 号「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」を受け、航空・電子等技術審議会に地震防災研究基盤分科会と三つのワーキンググループ(研究拠点 WG、

実大三次元震動破壊実験施設の運営方針

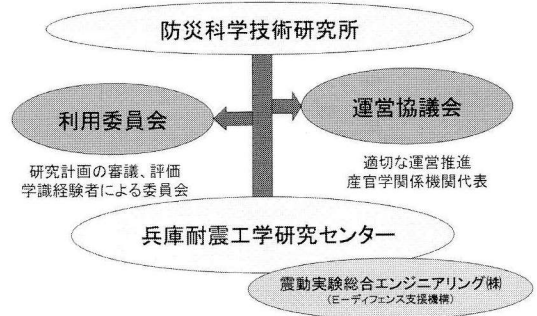


図 15 E-ディフェンス運営体制概要

対象地震 WG、大型三次元震動実験施設 WG) が設けられ、新たな地震防災研究基盤の中核施設の一つとしての位置づけが行われると共に、仕様及び利用課題についての基本方針が策定された。この仕様決定を受けて、科学技術庁の委託により地震予知総合研究振興会に「構造物破壊実験による地震動の破壊力検討委員会」(主査：岡田恒男芝浦工業大学教授)及びその下に「入力地震動小委員会」(主査：入倉孝次郎京都大学教授)と「運用利用小委員会」(主査：澤田義博名古屋大学教授)が設けられ種々の検討が行われた。運用利用小委員会では、先の利用検討会の審議をふまえつつ主要な課題を選定し、やや具体的に内容を検討すると共に必要な付帯設備、期間、経費等についても概略の検討を行い、平成 11 年度末に報告書としてのとりまとめが行われている。この報告では建築関連で 8 課題、土木構造物関連で 8 課題、また機械・機器関連で 8 課題を選定して、内容の審議のほか緊急性、重要性などについても一定の評価が行われた。これらの審議は、阪神淡路大震災の経験を受けて、技術的あるいは学問的にみて実施が望まれる課題についての検討であり、その後の具体化に向けてのベースとなった。

現在は、「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(通称「大大特」、文部科学省)において、RC 建築、地盤、木造の 3 課題が具体的に計画され、各種の準備研究が進められている。これに関連して三次元震動破壊実験シミュレーションシステム

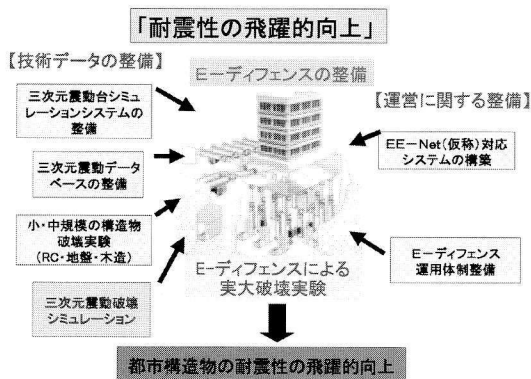


図 16 「大大特」での E-ディフェンス関連課題

の開発が防災科学技術研究所において実施されている。またこれらに先立つ準備研究として科学技術振興調整費（文部科学省）による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」が実施され平成 15 年度に完了している。図 16 に大大特における取り組みの概要を示す。また、大大特で取り上げなかった鋼構造物、免震・制震システム、その他の重要構造物などについても日米共同研究や産学民連携の枠組みを構築する中で実施していく計画が検討されている。このようないわば国主導型の研究に加え、試験課題の公募や受託研究、また国際協力による実験の実施など幅広い利用をはかる必要があり、そのために必要な体制や使用条件などが利用委員会を中心に審議されている。なお、この利用委員会の審議に基づき、平成 17 年度の実験とし

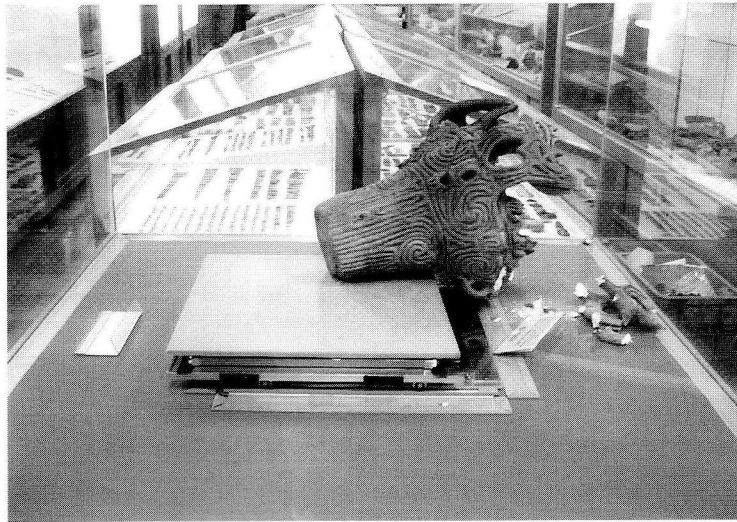
ては前述の負荷搭載性能試験、大大特の 3 課題のほか受託研究 1 課題を加え、計 5 課題の実験実施が決められ、そのための準備が進んでいるところである。

6. 結 語

本施設の役割は三次元強震動による破壊の解明に力点を置きつつも、基本的にはこれまでつくば等の大型振動台が果たしてきた役割を発展的に受け継ぐものである。一方、大型振動台が誕生しても、特にモデルの構築、応用では、試行錯誤の容易な種々の特徴ある実験手法が今後とも必要であり、またコンピュータシミュレーション技術は日々進展している状況にある。このような、破壊解明のための各種基礎試験による要素モデルの構築や汎用性の高い計算技術の開発との連携をより強化し、そのための環境を構築することが、本施設の活用にとって特に重要と思われる。

末筆になるが、本施設の計画、建設においては地震工学ならびに関連分野の多くの専門家のご指導、ご支援を頂いてきた。この場を借りて、深謝申し上げる次第である。また、本稿執筆に際しては、(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター各位のご助言を頂くとともに、資料などを利用させていただいた。記して謝意を申し上げる次第である。

免震台の盲点



写真は2004年10月23日、新潟県中越地震において長岡市立科学博物館内に展示してあった縄文式火焰型土器など貴重な文化財が、免震台の上にあったにもかかわらず倒れ壊れた様子を示している。

最近マンションなど大型建造物で各種免震装置を設置したものが売れ行きがよいということで徐々に増加しているようであるが、この新潟県中越地震の被災地域内でも、この装置を設置したものが一棟あった。それは小千谷総合病院であるが、その高齢者介護施設がこの免震装置のおかげで、建物自体が無被害であっただけでなく、介護を受けておられる高齢者の方々は勿論いろいろな医療機器などにも何の被害もなかった。その他の病棟は免震装置がなかったため非構造部材や設備に多少の被害を生じた。

このように同一の地震で、一般建築物には有効であった免震装置が、何故文化財にはそれ程有効ではなかったのでしょうか。

この原因を探るため、文化財と同様な土器を免震台の上に乗せ、三次元振動台により実際の地震で振動させた結果、やはり土器は倒壊してしまった。その倒壊の挙動を観察することによって、土器の形状（上部が鉢状で大きく重い）と、

上下動が影響しているように思われたのである。

免震台にしても、免震装置にしても、水平方向のバネを弱くしたり、キャスターを使ったりして自由に動けるようにし、水平方向地震動が上下方向に余り伝わらないようにしている。しかし水平動も全くゼロにはできないし、上下動はそのまま伝わるのである。

頭でっかちの土器は台上にただ置いてあったためか、震動が始まると片側が浮き上がり次には反対側という風に交互に浮き上がり傾斜し、その傾斜が増えて一方向に倒れていった。一方構造物は免震装置上にただ載せてあるだけではなく、上下方向にも何らかの拘束がなされている。この違いが有効性の差となって現れたのではなからうか。

何れにせよ、文化財の免震台の利用に当たっては、形状のバランス（重心がなるべく下であり、支持部の幅が大きい方が倒れない）、台にただ載せるだけでなく接着するなどの、追加的補強も必要なのではなからうか。

なお、この記事を書くために、長岡市立科学博物館には写真の提供その他お世話になりました。お礼申し上げます。（伯野元彦）

液状化は怖くない (2)

地震被害予測では、液状化による死者はゼロ

近い将来、南関東あるいは東海地方に大地震が予想され、その被害予測が行なわれている。その場合、地盤の液状化による構造物被害は多大なものが予想されているが、これによる死者はゼロと予想されている。何故だろうか。

過去の地震時液状化による死者数

この60年ほどを考えてみると、液状化を主要原因とする死者は、1948年福井地震1人(全死者数3,895人)、1964年新潟地震2人(全死者数26人)、1995年兵庫県南部地震3人(全死者数5,500人以上)となっている。カッコ内は地震による倒壊建物の下敷き、地震後火災なども含めた全部の死者数である。

ただ、過去の地震被害を調べると、1974年伊豆半島沖地震とか1984年長野県西部地震などのように、数多くの崖崩れなど液状化が引き金になったのではないかと思われる被害も多い。そしてこれらでは数多くの死者を出している。しかし液状化が引き金になったかもしれないが詳細は不明であるし、その被害に対してこれまでも液状化対策は施していなかったし、これからも施すことは不可能であろう。したがって、この問題は考えないことにする。

何故液状化による死者数は少ないのか？

(1) 地震動S波は液体中を通過できない

通常の構造物は自重を含め鉛直方向に対しては荷重の種類が多いため余裕も大きい。しかし水平方向に対しては、地震荷重、風荷重くらいしか考慮されないため余裕が少ない。したがって、構造物を水平方向に揺らすS波は、地震動の中でも構造物を破壊させる波である。液状化地盤は一種の液体であるから、この中はS波は通過できない。1995年兵庫県南部地震においても、ポートアイランドにおいて神戸市が観測していた地中のアレイ観測地震計は、深さ79m

から地表に向かって、水平動、上下動とも増幅していたが、地表付近の液状化が起こったと思われる深さで水平動だけが振幅が半分程度に減少していた。このように液状化によって、地表の水平動が顕著に減少するため、構造物の振動による急激な破壊は殆ど生じなくなる。

(2) 傾斜、沈下、浮上などはゆっくり起こる

地盤が液状化した場合は、地表にS波が到達しないため、激しい水平振動による構造物の破壊は起こらず、上下動は普通に増幅するが短時間であるし構造物は一般に鉛直方向の設計荷重は多いので余裕があり、なかなか急激な破壊にまでは至らない。そうすると、残る構造物の破壊は傾斜、沈下、浮上などであるが、これらは次の理由によってゆっくり起こる。

つまり、砂地盤は液状化したといっても砂粒自体が無くなってしまいうわけではなく、水の中に砂粒が浮いている状態なのである。それも液状化直前には砂粒と砂粒は接触して骨格を成していたのが、瞬間、接触点が微小な回転か何かをして砂粒間に水が入ったというわけなのである。であるから構造物が少し変位すれば、構造物に接する付近の砂粒は圧縮され砂粒間の接触が復活し抵抗力は増加する。したがって、構造物が少し変位すれば抵抗力が増加し、傾斜、沈下、浮上などの変位は、それらの抵抗力によって、急激には進まない、つまりゆっくり進むということである。

地震時死者は構造物の急激な破壊によって生じる

日本の地震時の死者は建物の下敷き、火災などによって起こるものが大部分であるが、これらは急激な破壊現象によってもたらされるものである。ゆっくりした傾斜、沈下などの破壊現象では、人は避難する余裕があるから死なないのである。

以上の理由によって、普通は地盤の液状化によって人が死ぬことは無いと思ってよい。

液状化した地盤は天然の免震装置である

1964年新潟地震では広範囲に起こった液状化によって人々は救われたと思うことも出来る。この地震はマグニチュードは7.5と相当大きく震源域も海岸から数10kmの粟島を中心として新潟県の一部の陸域をも含むようなものだった。新潟市のほぼ全域が主として液状化によって被害を受けた。しかし、その割に死者数は新潟県内13人と意外なほど少ない。先に述べたように液状化した地盤は構造物を急激に破壊する元凶であるところのS波をカットする。つまり一種の免震装置として働くのである。新潟地震でも新潟市全域が液状化したということでは市全域の下に免震装置が出来たということである。ただし、この免震装置は構造物の傾斜、沈下、浮上などのゆっくりした破壊まで防ぐことは出来ない。ただこれらゆっくりした破壊は死者を生じさせないので、死者が少ないのであろう。

死者は出ないかもしれないが、経済的損失は生じる

構造物の傾斜、沈下、浮上などは起こるから経済的損失は生じる。死者は出ないが経済的損失だけとなると液状化対策はしないでもよいということになる。我々は死ぬかもしれないからその対策をするのであって、経済的損失だけな

ら運が悪いと諦めることも出来る。しかもその経済的損失の生じる可能性も実に少ないのである。日本で地震による液状化被害が起こるのは数年に一回であるし、それも場所的にはごく小さな領域である。例えば東京湾の埋立地は80年前の関東地震の際には液状化が起こったであろうが、次の大地震までは起こらないであろう。そのうちもう50年経てば構造物の寿命が来て建て替えなければならないので折角の対策も無意味となる。

その構造物が壊れたら多くの死者が予想される場合には十二分の対策を施すべきである

例えば東京ゼロメートル地帯を海から防ぐ隅田川などの護岸は、それが壊れたら海水がとめどなく流入し、この水が地下鉄に入ったら東京中の地下鉄網は水没するので多くの死者が生じる恐れがある。石油コンビナートなども埋め立て地盤上に建設されていることが多いので、この液状化被害も注意しなければならない。下流に大都市が存在するような貯水土ダムなども全く同様な対策が必要であらう。

また、先日の新潟県中越地震での新幹線脱線現場では、鉄筋コンクリート高架橋が、橋脚基礎地盤の不完全液状化によって大揺れし、高架上を走行していた新幹線が脱線したと思われるので、このような場合の液状化対策は十分行われなければならない。

(伯野元彦)

■ 地震予知連絡会情報 ■ 岡田義光 ■

定例の地震予知連絡会は、第162回が2005/2/21、第163回が2005/4/7、第164回が2005/5/16に開催され、2004年11月～2005年4月における全国の地震活動・地殻変動を中心として報告と検討がなされた。この間に起きた国内の大きなイベントとしては、2004/11/29 釧路沖の地震(M7.1)と2005/3/20 福岡県西方沖の地震(M7.0)がある。また、海外では2004/12/26にスマトラ島沖の地震(M9.0)があった。

釧路から根室地方にかけては、2003年十勝沖地震以来、さまざまな地殻活動が進行しているため、現状認識の共有を図り、今後の観測監視体制を話し合うことを目的として、北海道を中心とする関係機関による特定部会打合せ会が2005/3/17に札幌で開催された。また、第163回連絡会は、予知連委員の任期満了に伴い、新しく充足した第19期地震予知連絡会の構成を行うことが当初の目的であったが、福岡県西方沖の地震が発生したため、急遽この地震に関する検討が議題として加わった。

第19期は、前期に引き続いて、会長に大竹政和氏、副会長に島崎邦彦・岡田義光の両名が就任した。なお、これまでの強化地域部会と特定部会は、今期より中日本部会、東日本部会、西日本部会の3部会に再編成されることとなった。中日本部会は従来の強化地域部会を引き継ぐものであり、島崎氏が部会長を兼務する。東日本部会と西日本部会は従来の特定部会を東西の2地域に分割したものであり、両部会の部会長は岡田が勤める。またトピックス部会には橋本学委員が部会長に就任した。

集中的な議論を行うトピックスとしては、第162回に「東南海・南海地震の前兆的变化」(世話人:山田功夫委員)、また第164回には「スマトラ地震・津波」(世話人:谷岡勇一郎委員)が取り上げられた。

1. 北海道地方

2004年11月29日、釧路沖の深さ48kmでM7.1の地震が発生し、12月6日にM6.9の最大余震を伴った。いずれの地震でも最大震度5強が記録された。また翌年1月18日には余震域の西端でM6.4、3月12日には余震域の最深部でM5.1の余震が発生した(図1:気象庁)。これらの地震の発震機構は、いずれも北西-南東方向に圧力軸を有する低角逆断層型であり、太平洋プレートの

上面境界で起きた地震と考えられる。本震の周囲では余震が発生しておらず、震源過程の解析結果からも、地震時の滑りの大きかった領域と余震発生領域は棲み分けていること、また本震と最大余震で主に滑った領域は棲み分けていることが確認された(気象庁)。なお、今回の地震の活動推移は約40年前に発生した1961年8月12日の釧路沖地震とよく似ており、地震波形も酷似しているとの指摘があった。

この地震に伴って、北海道東部ではGPSにより最大2～3cmの水平変動が確認され、これらを説明する断層モデルが提出された(図2:地理院)。また、震源の周辺では2004年後半頃から5～10cm程度のゆっくりとしたプレート間滑りが発生していた可能性が指摘され、さらに地震後も根室半島付近とえりも岬付近で5cmほどのゆっくり滑りが継続しているらしいとの報告があった

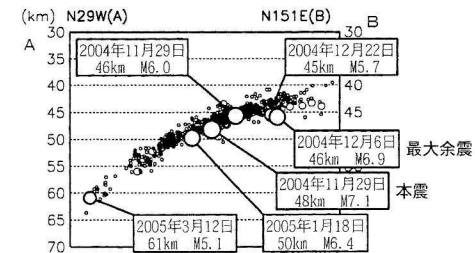
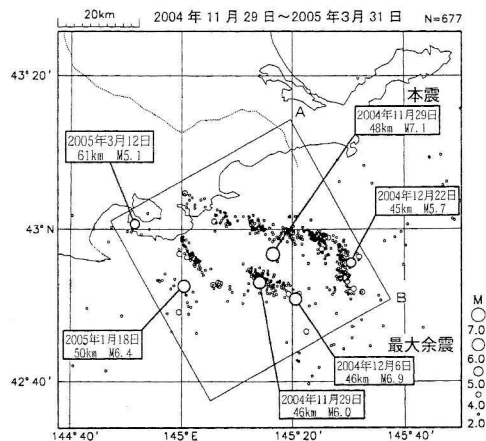


図1 2004年11月29日釧路沖地震(M7.1)とその余震(M2以上、深さ30～70km)。上段は震央分布、下段は上段の矩形領域内の断面図を示す。[第164回:気象庁資料に加筆]

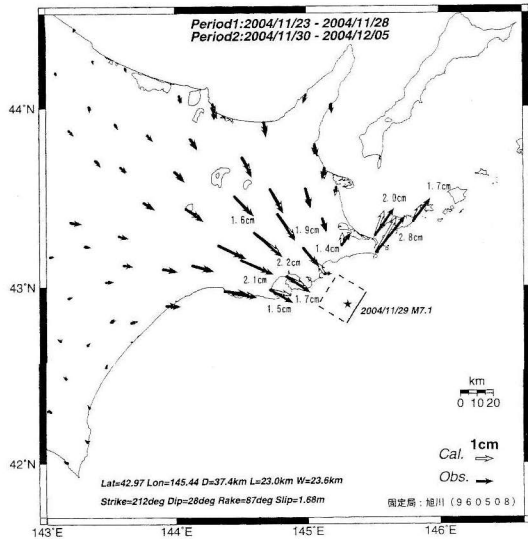


図2 2004年11月29日釧路沖地震(M7.1)に伴った地殻変動と震源断層モデル [第162回:地理院資料から合成]

(地理院)。一方、東北大学からは北海道沖から三陸沖にかけての領域で発生する相似地震の解析結果が報告され、2003年十勝沖地震の前は十勝沖及び釧路沖におけるプレート間の準静的な滑りが小さかったこと、十勝沖地震の発生後は震源域の周囲とくに東側で余効滑りが発生したこと、2004/11/29 釧路沖地震後には釧路周辺の深部でプレート間滑りが起きていると推定されること、などが示された。なお、北海道東部に設置された傾斜計記録には、短期的にも長期的にも、この地震に伴う前駆的信号は記録されていなかった(防災科研)。

2004年12月14日、北海道留萌支庁南部の深さ9kmでM6.1の浅発地震が発生し、最大震度5強を記録した。発震機構は東西方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。今回の地震があった場所では1910年と1918年にM5クラスの地震が発生しており、また留萌西方沖では1947年にM6.7の地震が発生している(図3:防災科研)。現地での臨時観測結果を含めた精密余震分布によれば、震源は深さ5km前後で東に傾斜する面上に整理している(北大)。

2. 関東・甲信越地方

2005年1月19日、房総半島南東沖のプレート三重会合点付近でM6.8の低角逆断層型地震が発生し、三宅島、大島、八丈島等で10~30cmの津波が観測された。この付近では、2004年5月30日にもM6.7の地震があり10cm未満の津波を観測しているが、今回の方が余震活動は活発であった。なお、この海域では1984年9月

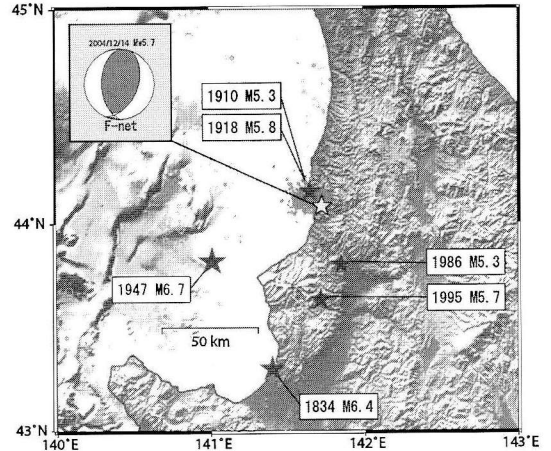


図3 2004年12月14日留萌支庁南部の地震(M6.1:白星印)とその余震。黒星印は過去に周辺で発生したM6前後の地震を示す。[第162回:防災科研資料]

19日にも同規模の地震が発生しているが、その発震機構は北東-南西方向に張力軸を持つ正断層型であったこと、最大震度4が観測され、今回および2004年の地震よりも短周期成分が卓越していたことが今回と大きく異なっている(図4:気象庁)。三重会合点付近では2001年後半頃より地震活動が高まってきており、また2005年3月中旬から4月上旬にかけては、三重会合点からさらに沖合側でM4.6を最大とする活発な地震活動が見られた(図5:気象庁)。これに呼応するように、関東地方南部から伊豆半島にかけての地域に設置されたGPS観測点では、最近1年間で数mm程度、南東方向への水平変位を生じていることが見出された。これを説明するため、地理院からは、2005/1/19のM6.8の地震と同じメカニズムを持つ高角逆断層、または太平洋プレートの沈み込みに伴う低角逆断層を、それぞれ三重会合点付近に置くモデルが提出された。

2005年2月16日、茨城県南部の深さ45kmでM5.4の地震が発生し、最大震度5弱を記録した。発震機構は北北西-南南東方向に圧力軸を有する逆断層型であり、フィリピン海プレート上面で発生した地震である。この地震の発生場所は、茨城県南西部鬼怒川側と呼ばれる地震の巣に相当している。なお、2004年10月6日には、このすぐ東にあたる茨城県南西部筑波側の深さ66kmでM5.7の地震が発生している(気象庁、防災科研)。

2005年4月11日、銚子付近の深さ52kmでM6.1の地震が発生し、最大震度5強を記録した。発震機構は東西方向に圧力軸を有する逆断層型であり、太平洋プレート上面で発生した地震である。この震源の付近は明瞭な地震の巣となっており、2000年6月3日にもM6.1の地

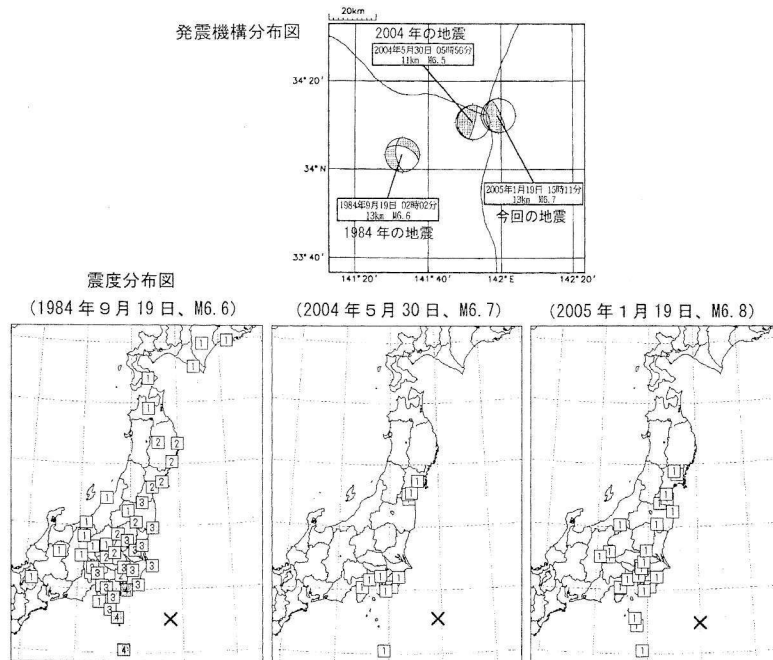


図4 1984年 (M6.6), 2004年 (M6.7), および2005年 (M6.8) 房総半島南東沖地震の発震機構解と震度分布の比較 [第164回: 気象庁資料]

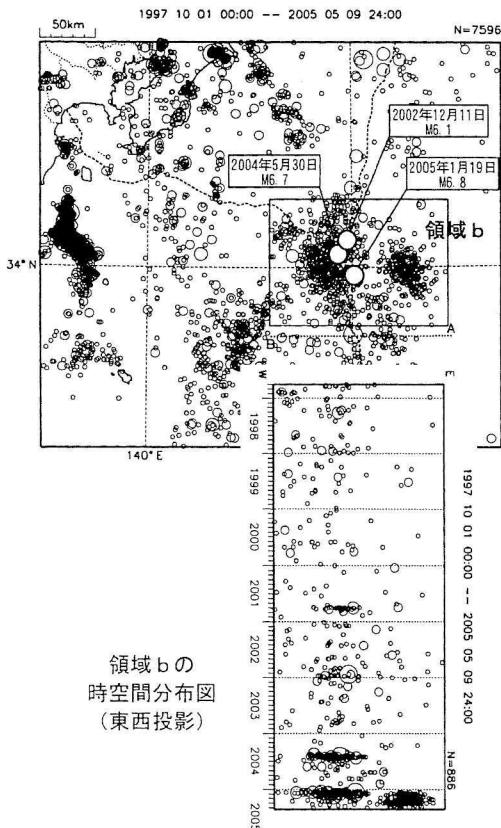


図5 三重会合点付近の地震活動 (M3以上, 深さ100km未満) [第164回: 気象庁資料]

震が発生している (気象庁)。

2004年新潟県中越地震に関しては、その後も各種の調査観測が続けられている。国土地理院からは、長岡市～小千谷市・十日町市～南魚沼市の路線に沿った水準測量成果が報告され、震源付近では約71cmもの隆起が検出された。観測された上下変動は断層モデルによる計算値とほぼ調和している (図6: 地理院)。東大地震研や東北大学からは、緊急余震観測結果を用いた精密震源分布と、震源地周辺の三次元地震波速度構造モデルが提出され、本震や余震の発生は不均質な地殻構造の影響を強く受けているとの考えが示された。また、中越地震に伴う地表地震断層を調べる浅層反射法地震探査が実施され、その解釈を踏まえて、地質構造と地震発生との関連についての推定結果が報告された (図7: 東大震研)。それによると、震源域の魚沼丘陵は地質構造から見て走向方向に北部・中央部・南部の3つに分けられる。六日町断層はこのうち南部と中央部の東縁にほぼ連続したトレースを有するが、断層深部の形状には大きな違いがあり、異なる震源断層に連続している可能性が高い。余震分布から判断して、今回の地震は中央部の断層 (a) の破壊によって発生し、北部の断層の一部にも及んだと推定される。また、最大余震は南部の断層に連続する断層面 (b) で発生したものと考えられる。

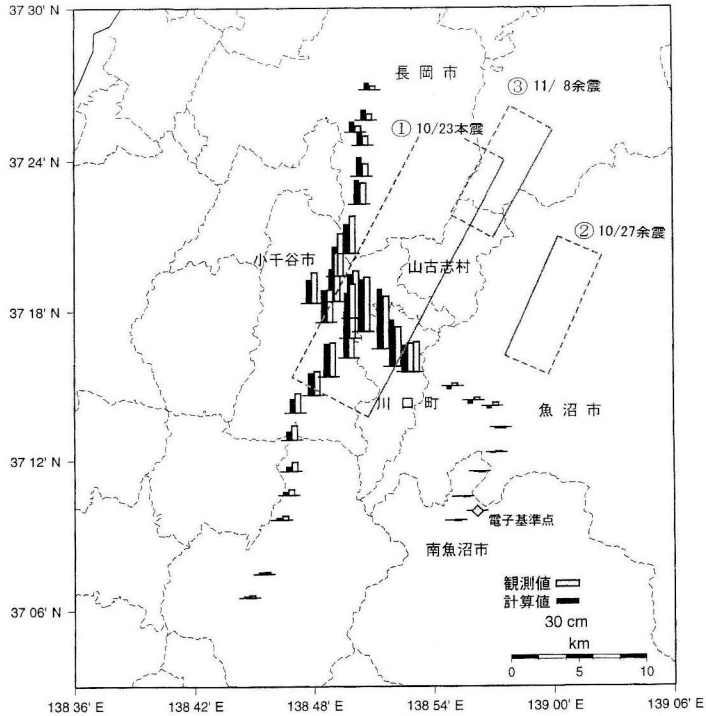


図 6 2004 年新潟県中越地震 (M 6.8) の震源域における水準測量結果と、断層モデルから推定される上下変動量の比較。矩形の実線部が地表に近い辺を表わす。[第 162 回：地理院資料]

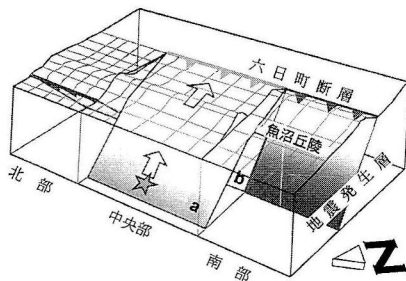


図 7 2004 年新潟県中越地震 (M 6.8) の震源域の地質構造と地震発生 [第 162 回：東大震研資料に加筆]

3. 東海地方

東海地域の水準測量結果によると、御前崎の沈下はここ数年加速しているようにも見えるが、これは基準となる森町がスロースリップにより隆起したことによる見かけのものであり、上下変動の基本的な傾向は今までと変わっていないとの説明がなされた (地理院)。

東海地域浜名湖周辺のスロースリップは依然として継続しており、推定されるプレート境界の累積滑りは Mw 7.1 の地震に相当する量に達した。なお、2004 年以降、南

北成分は従来通りの変動速度を保っているものの、東西成分には若干停滞の傾向が見られ、この原因として、2004 年 9 月の紀伊半島南東沖地震 (M 7.4) の震源域で余効すべりが起きている可能性が指摘された (地理院)。一方、東海地震想定震源域付近の微小地震活動の静穏化も依然として継続している。推定固着域の上盤側と下盤側、および浜名湖直下の領域に加え、非固着域でありこれまでは静穏化が認められなかった浜名湖の北西延長部でも 2003 年半ばより地震活動の低下が始まっている。固着域内部では、全体としての静穏化が始まる前に比べて地震発生率が増加した地域と減少した地域とがマダラ模様で存在している。アスぺリティと目される顕著な活性化域は 3 カ所あり、そのうち最大の面積を有する活性化域の形状は、スロースリップにより変容してきているように見られるとの報告があった (防災科研)。

2004 年 11 月 9 日、東海道沖の駿河トラフと南海トラフの接続点付近で M 5.7 の地震が発生した。発震機構は南北方向に圧力軸を有する逆断層型であり、フィリピン海プレート内部で発生したものと考えられる。この地震の 3 分前にはほぼ同じ場所で M 4.5 の前震があった。この付近では 10 数年間隔で M 5 クラスの地震活動があり、1945 年 8 月 29 日には M 6.4 の地震が発生している

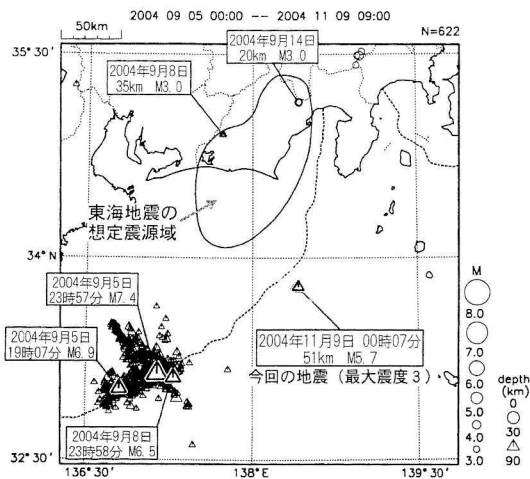


図8 2004年11月9日東海道沖の地震 (M 5.7) [第162回: 気象庁資料に加筆]

(図8: 気象庁)

2004年紀伊半島南東沖の地震 (M 7.4) の震源域で実施された25台の海底地震計による余震観測結果の中間報告がなされた。海溝軸付近の震源は浅部と深部の2群に分かれてほぼ水平に分布しており、本震や主な余震の発震機構解から推定される節面のうち、どちらが断層面であるかを弁別できる結果とはならなかった(東大震研)。一方、名古屋大学からは、熊野海盆に設置した基準点による海底地殻変動観測結果が報告された。観測点は海溝に直交して延びる余震分布の北西端近くに位置しており、ほぼ南方向に約15cm (±5cm程度)の水平変動が観測された。海溝にほぼ直交する断層面のモデルとしては、南西傾斜ではなく、北東傾斜とする方が測定結果とよく調和するとのことであった。

東海地方(愛知県及び長野県南部)で深部低周波微動が発生していることは以前より知られていたが、これに伴って短期的スロースリップも生じていることが発見された(防災科研)。2004年には1月、6月、および11~12月と約6カ月周期で低周波微動が活発化し、東海地方と紀伊半島北部(三重県)とが連動する形で活動が見られた。これに同期して、周辺の傾斜計では3~4日の時定数を持つゆっくりとした地殻変動が捉えられ、いずれの地域でも、Mw 5.8、スリップ量約1cmの逆断層としてモデル化がなされている。

4. 近畿地方

2004年12月1日、京都府南部の深さ13kmでM 4.0の地震が発生し、最大震度3を記録した。発震機構は東

西方向に圧力軸を有する逆断層型であり、この付近では2000年5月21日にもM 3.9の地震があった。なお、この地震の発生位置は花折断層帯の南部付近にあっており、同断層帯のずれの向きとは調和的である(気象庁)。

2005年2月14日、兵庫県南東部の深さ13kmでM 4.1の地震が発生し、最大震度3を記録した。この地震は1995年兵庫県南部地震の余震域内で発生しており、これとほぼ同じ場所では2003年10月8日にM 4.2、2004年10月18日にM 3.9と、M 4前後の地震が続発している(気象庁)。

丹波山地の微小地震活動は、1995年兵庫県南部地震の前に活発化し、同地震の後は活動度が急増したことが知られている。同地域で、M 4以上の中規模地震については活動度にどのような変化があったかについて調査した結果が報告された(防災科研)。それによると、(1)兵庫県南部地震を境とする急激な活動度変化は認められない。(2)1923年から1995年にかけて、神戸側では大きな地震が徐々に減っていったのに対し、丹波側では大きな地震が徐々に増えてきた。(3)神戸側では1960年代半ばに地震発生率がステップ的に減少し、丹波側では1980年代初めに地震発生率がステップ的に増加している。(4)以上の現象は、1970年代前後を境として、神戸側と丹波側への応力蓄積率の分配が2:1から1:3に変化したとして説明できる。変化の原因としては神戸側での非常に緩慢なスロースリップの発生を挙げている。

5. 九州地方

2004年12月12日から、鹿児島県西方沖(甌島列島の西方)でM 5.3を最大とする一連の地震活動が生じ、約1カ月間活発な状態が続いた。主な地震の発震機構は北西-南東方向に張力軸を有する正断層型のものであった(気象庁、防災科研)。

2005年3月20日、福岡県西方沖の深さ9kmでM 7.0の地震が発生し、最大震度6弱が記録された。また、1カ月後の4月20日には志賀島付近の深さ14kmでM 5.8の最大余震が発生し、最大震度5強を記録した。本震の余震分布は北西-南東走向におよそ20kmにわたって分布しており、北側では走向が東に折れ曲がっている。また南側では、最大余震とその二次余震が本震の断層面の走向より西に折れ曲がって分布しているが、本震の余震分布とはギャップがあるように見られる(図9: 九大・東大震研)。

本震および余震の発震機構は東西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型であり、震源分布から北西-南東方向のほぼ垂直な断層面に沿う左横ずれ断層運動を生じたものと考えられる。波形インバージョンの結果によれば、本震

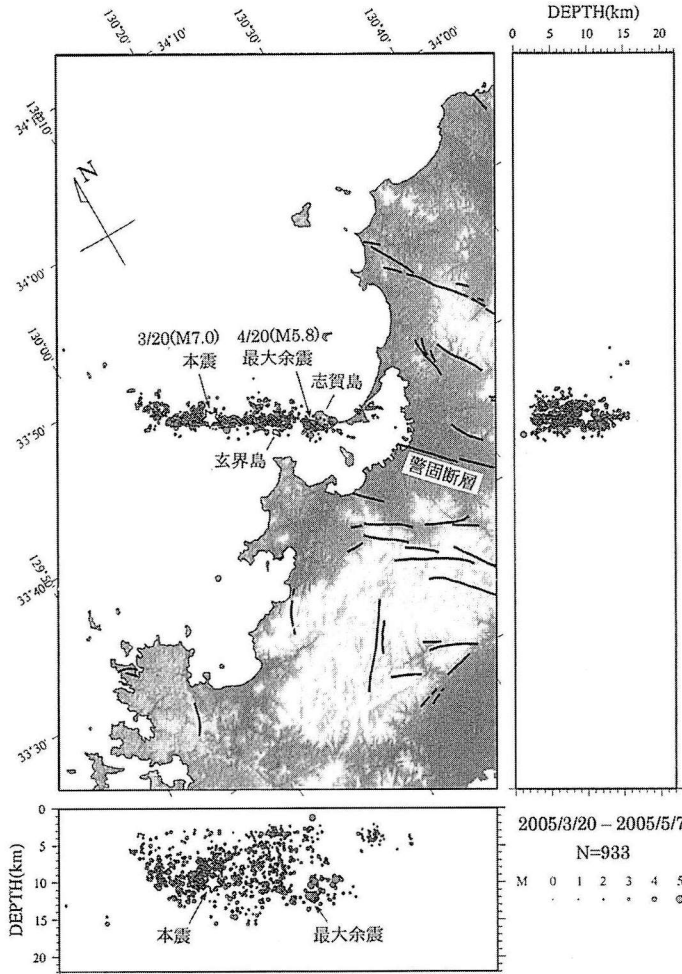


図9 2005年3月20日福岡県西方沖の地震(M7.0)の震央分布および垂直断面図。海底地震観測結果を用いて各観測点の走時補正値を求め、3/20~5/7の期間の震源を精密再決定したもの。[第164回:九大・東大資料に加筆]

から南東方向の浅い部分(ほぼ玄界島の直下付近)で大きく滑った領域が推定されている(気象庁, 防災科研)。

この地震に伴って、志賀島の北部に設置されたGPS観測点は南西方向に約15cmの水平変動を示し、数cmの沈降が観測された。また周辺の観測点でも数cmの地殻変動が確認された(図10: 地理院)。これらを説明する断層モデルとして、長さ25km、幅15km、平均食い違い量75cmの断層モデルが提出された。なお、一部のGPS観測点では地震後の余効変動が捉えられた。

博多湾の音波探査結果によると、警固断層の北方延長部には沖積層を変位させた活断層の痕跡が点々と見られ、最大余震とその二次余震は、この断層線上に分布している(東大震研)。一方、本震付近の海域で実施された海底地形調査や反射法探査の結果からは、明瞭な断層構造は見出されていない(海洋情報部)。

本震の断層面に平行する形で、余震域の東側に離れた博多湾東部では3月21日からまとまった地震活動が始まり、一部は陸域にかかったまま、4月上旬まで高いレベルの活動が継続した。本震の断層面に南に延長すると福岡市内を横切る警固断層につながるが、この博多湾東部で生じた地震活動は、警固断層から2.5km離れた石堂-海の中道断層の屈曲部で生じているように見られるとの報告があった(産総研)。本震による静的応力変化は、警固断層および石堂-海の中道断層に対して、潮汐の10~100倍程度の大きさで地震発生を促す影響を及ぼすとの計算結果が各機関より提出された。

福岡県西方沖の地震が発生した地域は地殻の歪みが小さく、通常地震活動も低調な場所であった。過去の大きな地震としては、1700年に今回の地震のさらに北西方で老岐対馬の地震M7のあったことが知られているが、

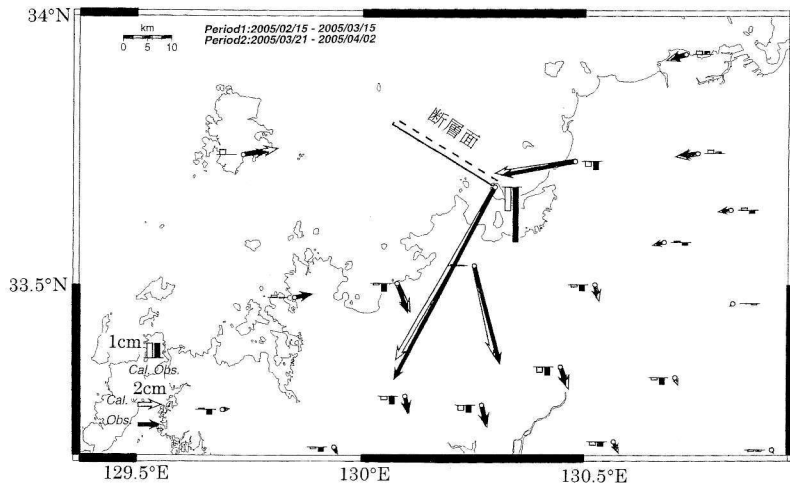


図 10 2005年3月20日福岡県西方沖の地震 (M 7.0) に伴った地殻変動と断層モデル [第 163 回: 地理院資料に加筆]

福岡市付近では、1898年に糸島半島で発生した M 6.0 の地震が最大のものであった。

6. トピックス

6-1. 東南海・南海地震の前兆的变化

第 162 回連絡会では、トピックスとして「東南海・南海地震の前兆的变化」(世話人: 山田功夫委員) が上げられ、議論がなされた。東南海・南海地震は今後 30 年以内の発生確率が 50~60% と見積もられており、その予知に関しては前兆的变化についての検討が不可欠である。また、1944 年東南海地震時の掛川での異常変動は、きたるべき東海地震の予知を行う上での重要な根拠とされており、その評価も避けて通ることはできない。

「潮位記録から推定される 1946 年南海地震直前の地殻上下変動」(気象研: 小林昭夫) では、紀伊半島南端の浦神で発掘された潮位記録に基づき、1946 年南海地震の前に前兆的な地殻変動が見られるかどうかを検討した結果が報告された。考えられるノイズ要因などを取り去った結果で見ると、地震発生の数日前から潮位が 10cm ほど上昇していることが確認された。ただし、地震直前 1 日弱の記録は欠測となっているため、この変化が地震前まで継続したのか、加速したのか、あるいは一時的な変化だったのかはわからないが、南海地震前のプレスリップが原因であった可能性は残されている。

「南海地震の前の井戸水の減少について」(京大: 梅田康弘) では、昭和南海地震の際に紀伊半島から四国の太平洋沿岸で報告された地下水位異常の実態調査結果、考えられるメカニズム、そして安政南海地震の際の状況の 3 点について報告がなされた。井戸水の異常が認められ

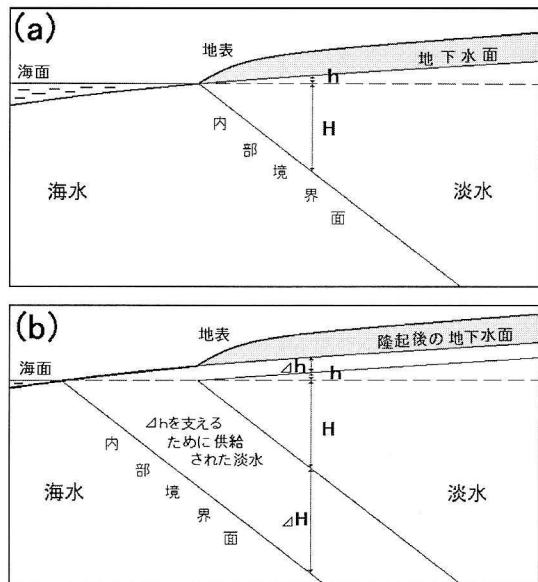


図 11 土地の隆起に伴って地下水位が変化するメカニズム。(a) 海岸付近の地下水構造、 $h:H$ はほぼ 1:40 となっている。(b) 土地が Δh だけ隆起した場合、これを支えるために ΔH だけの淡水供給が必要となり、上流側の井戸水位が低下または枯渇する。 $\Delta h:H$ も 1:40 程度になる。[第 162 回: 京大防災研資料に加筆]

た 15 カ所の集落は、いずれも三方が山に囲まれた小さな三角州という特殊な地形条件にあり、中でも上流側の特定の井戸で現象が出やすいことがわかった。水の供給が少なく、海水と淡水がバランスしている状態で土地が隆起すると、隆起上昇分の 40 倍の高さの淡水が必要となり、上流側で井戸水の枯渇などの現象が生じ得る(図 11: 京大防災研)。したがって、報告された水位の減少は地震前の隆起を示している可能性がある。古文書の

調査によると、同様の現象は安政南海地震の際にも生じていたらしく、次の南海地震についても、地下水位の異常については注目する必要がある。

「水準測量データの再検討による1944年東南海地震ブレスリップ」(名大:木股文昭・鷺谷威)では、有名な掛川付近の前兆的地殻変動について、測量原簿に遡った詳細な検討結果が報告された。地震発生前の水準測量で捉えられた異常変動は、あったとしても地震前10分程度で発生したと思われる、それ以前の水準測量の変化は誤差の範囲内ではなかったかと考えられる。したがって、地震の3日くらい前から異常変化が加速したと考える根拠は乏しいように思われるとの結論であった。なお、1944年東南海地震前後の水準測量で検出された天竜川東岸の20cmの隆起と名古屋周辺の20cmの沈降は、現在進行している東海スロースリップ域での1mの滑りで説明でき、また、掛川での変化もこの断層上で地震の発生10分前から前駆的スリップが進行したとすれば説明可能である。これに対して、茂木名誉委員からは、指摘された区間に隣接する区間の変化も大切であり、さらに地形の効果等も考慮した誤差の検討が必要であるとの意見が提出された。

6-2. スマトラ地震・津波

第164回連絡会では、未曾有の津波被害を引き起こした「スマトラ地震・津波」(世話人:谷岡勇一郎委員)がトピックスとして取り上げられた。

2004年12月26日、スマトラ島西方沖でMw 9.0の地震が発生し、地震と津波で約31万人もの犠牲者を生じた。発震機構は北東-南西方向に圧力軸を有する低角逆断層型であり、インド-オーストラリア・プレートがユーラシア・プレート下に沈み込みことにより発生した地震であると考えられる。また、この地震に誘発される形で、翌年3月28日には南東隣りでMw 8.6の地震が発生した。各々の地震の余震域の長さは1,200kmおよび400kmに及んでいる(図12:気象庁)。

「スマトラ地震の地震波形解析」(海洋研究開発機構:坪井誠司)では、地球シミュレータを用いて三次元地球モデルでの理論地震波形を求め、スマトラ地震の地震波伝播を再現する試みが紹介された。観測記録との比較により、12/26の地震は震源時間が500~600秒、浅いところで大きなすべりを生じ、破壊は北西方向に2km/s程度と非常に低速度で伝播したが、地震波を励起するようなすべりはアンダマン諸島には及んでおらず、北方では地震波を出さずにゆっくりすべったものと推察される。一方、3/28の地震の破壊継続時間は約150秒で、南西に伝播したと推定されている。

「スマトラ地震による津波」(電力中央研:松山昌史)

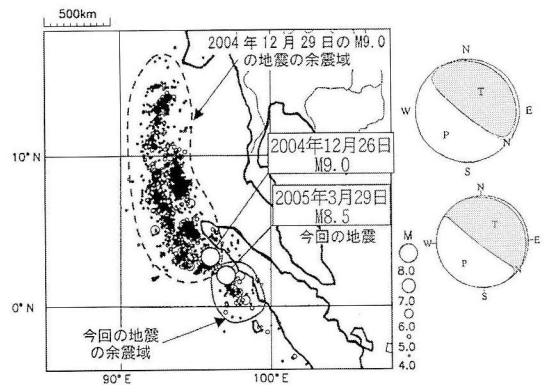


図12 2004年12月26日スマトラ島西方沖の地震(M 9.0)および2005年3月28日スマトラ島付近の地震(M 8.5)の余震域および発震機構解(ハーバードCMT解)[第164回:気象庁資料より合成]

では、今回の地震で観測された津波の高さの分布、被害、津波計算結果との比較が紹介された。スマトラ島の西海岸では20mを超える浸水高、30mを超える遡上高があり、最大波高の地点では48.9mに達した。これに対して北海岸では5m程度の浸水高であった。波源から500km離れたタイ南部のブーケット西岸では最大6m、カオラックで最大約10mの津波が観測されたが、50kmの距離差で津波高が約1.7倍異なるのは、地形によるレンズ効果があったと思われる。スリランカは波源から1,000km離れているが、タイとほぼ同じく地震後約2時間で津波が到着し、東海岸での津波高は6~10mに及んだ。一般に、断層域形状の長軸の垂直方向で津波が高く、被害も大きかった。単純なモデルによる津波計算結果は、タイでは合うがスマトラではあまり合わない。これはスマトラ北西沖で震源が不均一性を有しているためであると考えられる。

「衛星軌道で捕らえた津波」(海洋研究開発機構:平田賢治)では、たまたま地震発生約2時間後にインド洋上を通過した人工衛星からの海面高度観測により、津波波高の分布が捉えられ、これをインバージョン解析することにより得られた最適断層モデルが紹介された。衛星は約10日間で同一軌道を通しており、10日前の海面高度との比較から最大70~80cmの津波が検出された。解析結果によれば、(1)津波は全長1,200~1,300kmのスマトラ-ニコバル-アンダマン海溝沿いで発生し、(2)スマトラ島北西沖で最大のすべり量、約30m。アンダマン諸島付近でも20~30mのすべり。(3)平均的な破壊伝播速度は1km/s以下と推定され、これが本当であれば、スマトラ地震は「津波地震」であった可能性が高い。

「人工衛星画像を用いた海岸線変化抽出によるスマトラ沖地震に伴う隆起・沈降域の把握」(地理院:飛田幹

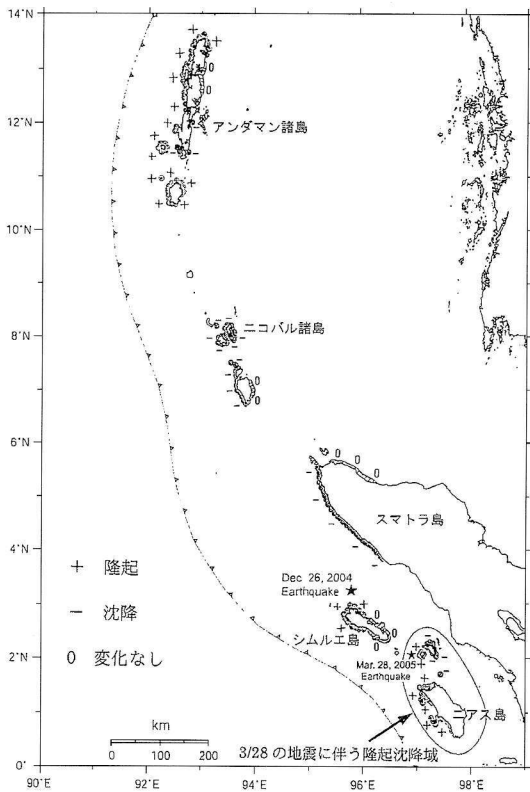


図 13 人工衛星画像を用いた海岸線変化抽出による 2004 年スマトラ沖地震に伴う隆起・沈降域の分布 [第 164 回: 地理院資料に加筆]

男)では、人工衛星から撮影されたレーダ画像を地震の前と後とで比較し、大きな海岸線変化を検出することによって、地震による隆起・沈降のパターンを同定した結果が報告された。12/26 の地震では、アンダマン諸島が

西側で数 m の隆起、ニコバル諸島とスマトラ島北西部は沈降、シムエル島は北西側で隆起しており、これらの上下変動データから断層モデルの推定がなされた。3/28 の地震でも震源域周辺の隆起・沈降が捉えられ、ニアス島北西岸には最大約 1 km の離水海岸、および長さ約 1.5 km の島が出現した。

「スマトラ地震に伴うアンダマン諸島の地殻変動と古地震学的証拠」(東大理: 池田安隆)では、サンゴ礁の状況等から地殻変動の空間分布を推定する手法が紹介され、アンダマン諸島で調査を行った結果が報告された。離水した牡蠣やマイクロアトール(低潮位レベルで成長が頭打ちになったハマサンゴの群体)を用いることで、±10 cm の精度で隆起・沈降の推定ができる。島の南部および東海岸では最大約 1 m の沈降、北部および西海岸では最大約 1.5 m の隆起が確認された。ある地点では、地震時に 1.9 m 隆起し、その後数カ月間の余効変動により 1.2 m 沈降した可能性が見出された。古いマイクロアトール群の高度分布から、何回かの離水・沈降はほとんど同じレベルで繰り返されてきたようであり、マイクロアトールの大きさとその成長速度から判断すると、このような離水イベントは数百年程度で繰り返されてきたと推定できるという。

なお、茂木名誉委員からは東南アジアからトルコに連なる長大なプレート境界部で、20 年弱のサイクルで大地震の活動期と静穏期が交互に繰り返されているとする資料の紹介があった。一方、四国西部では、このスマトラ島沖地震の翌日から深部低周波微動が活発化し、短期的スロースリップイベントも検出されている(防災科研)。また、日本各地に設置された歪計や傾斜計、地下水観測井などで、この地震に伴う雄大な歪地震動の記録が得られた(名大, 気象庁, 産総研ほか)。

■ 書 評 ■

● フィリピン海プレートの沈み込み と西南日本弧の大地形の謎を解く

太田陽子・成瀬敏郎・田中眞吾・

岡田篤正 編

日本の地形 6 近畿・中国・四国

評者 佃 栄吉

本書は、21世紀の地球環境と人類の将来の問題解決のために、20世紀に進展した日本の地形の調査・研究を総括することを意図して出版されている。東大出版会の創立50周年記念事業との一環として刊行されているシリーズ（全7巻）の第6巻である。2000年から順次刊行されてきた本シリーズは、現在までのところ、第5巻（関東・伊豆小笠原）を残すのみとなっている。地震や火山活動が活発な変動地帯の地形に関して、多くの発見を自ら体験されてきた著者らによる集大成であるので、それぞれに多くの思いが込められている。本シリーズは、日本、いや世界をリードしてきた著者たちがその総力を挙げた壮大なプロジェクトである。1991年の企画からすでに多くの時間が経過し、残念ながら、全巻編集委員（貝塚爽平、太田陽子、小崎 尚、小池一之、鎮西清高、野上道男、町田 洋、松田時彦、米倉伸之）のうち、貝塚爽平先生や米倉伸之先生はすでに他界されている。「まえがき」にふれられているとおり、両氏は本書に関わる地域に関して長年の研究実績があり、深い知識と見識のもとでの執筆が期待されていただけに誠に残念なことである。

本書に含まれる地域には、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みに深く関係する帯状の地形や地質構造が発達しており、この帯状の地域に沿っての地形解説は非常に興味深い。編者を含み21名の地形学者が分担して執筆にあっている。

本書の内容について概観する。

構成は、巻頭グラビア（8p）、1—総説（38p）、2—近畿三角帯（70p）、3—内帯山地とその周辺（62p）、4—日本海沿岸（36p）、5—瀬戸内地域（35p）、6—中央構造線とその周辺（31p）、7—外帯山地とその周辺（19p）、8—外帯の海岸（33p）、9—近畿・中国・四国の地形発達史

（23p）となっている。巻頭のグラビアではカラーを使い、8枚の写真による特徴的な地形の紹介がある。また、この地域を概観できる接峰面図、地質図、地形区分図、地形形成編年図があり、読者の理解を助けている。1章の総説には本地域の大地形、地質、地形形成環境、地形区分、研究史が総括的かつ記載的にまとめられ、概要を知りたい読者は、これと、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みを基軸としたテクトニクス的理解や成因論が記述されている9章の地形発達史を読むことである程度は目的を達成できよう。豊富な資料が蓄積されている2章の近畿三角帯地域と3章の内帯山地地域には多くの紙面を割かれている。2章では、近畿三角帯縁部や内部の山地、盆地、平野、山麓などの地形的特徴それに密接な活断層が記述されている。3章の内帯山地地域については、丹波山地、中国山地などの地形的特徴や吉備高原地域の地形面、カルスト地形の記述が充実している。4章の日本海沿岸部については、若狭湾や丹後半島、山陰海岸平野の特性について多く記述がなされている。5章では内帯山地と中央構造線・外帯山地に挟まれた低地帯である瀬戸内地域沿岸部の平野や河川の発達に関する紹介が充実している。6章ではこの地域最大の活断層である中央構造線に関して、単独で取り上げ、最近の知見をふんだんに取り入れた記載が試みられている。7章の外帯の沿岸地域については、四国・紀伊山地の特徴が述べられている。8章ではフィリピン海プレートの沈み込みと地震活動に密接な完新世隆起海岸地形について詳述されている。

この地域の特徴でもあるが、火山は大山や三瓶山などと数えるほどしかなく、全体として火山に関する記述は限られる。要所に国土地理院などのデジタルデータを用いた3次元の陰影地形図が掲載されており、読者の大地形把握を助けている。それぞれの章の最後には、活断層や特徴的な地形を取り上げたコラムが配置され、読み物として楽しませてくれる。できればもう少し数を増やす工夫があってもよかったかと思うが、紙数の制限などからこれも仕方ないかと推察される。巻末には引用された大量の文献が全体としてひとまとめに掲載されており、読者の今後の研究や知識の追求を助けてくれる。また、多数の地名やキーワードを「あいうえお順」にまとめた索引が巻末に用意されており、関連する用語の検索などを容易にさせている。

ある程度は知識を持っていると自負していたが、不勉強の評者にとっては多くの新たな発見があり、数多くの新知識を獲得することができた。本シリーズはすべてをそろえて座右の書とし、いつでも確認できる場所においておきたいと考えている。

<東京大学出版会、2004年6月、B5判、383頁、6,800円+税>

● 地下構造を知る基本情報

山本明彦・志知龍一 編

日本列島重力アトラス

西南日本および中央日本 [CD-ROM 付]

評者 松田時彦

日本列島の重力異常分布図というと、幾重にも折りたたんだ大きな版の地図を思うかもしれない。しかし、今回新たに刊行された重力異常図は、20万分の1図幅ごとに区切られたB4判のカラーの地図帳（アトラス）である。範囲は新潟-北関東以西の中部日本と西南日本である。付されているCD-ROMにはさらに、重力・地形・地質・観測点分布など関連情報を組み合わせた各種地図が収められている。

本書の主体をなすアトラスの図版集は九州から新潟-関東までの58図幅である。各図幅は上下見開きの2ページからなる。上段のページには彩色された地形の陰影図の上に活断層と重力異常の等値線図（1mgal間隔）が重ねて示されている。下段のページはその図幅内の重力異常が一目でわかるように異常の相対的な大きさによってカラーで区別した段彩図である。重力の観測点も多数の小さな点で示されているので、重力等値線の精度もほぼ判る。各20万分の1図幅にはその内部に2.5万分の1地形図幅の境界の経線と緯線が入っているので読者の手元の地形図との対応も容易である。CD-ROMには、上記の図のほか0.5mgal等値線重力異常図、重力分布と地質図を重ね合わせた図、重力異常水平勾配図など計10種類ものフルカラーの図が図幅ごとに入っている。いずれの図幅でも即座に呼び出すことが出来る。活断層との比較のため断層位置の表示非表示も選べる。

このような利用者への配慮によって図幅内での重力異常の分布だけでなく、それと地形の高低や地質の種類や活断層との位置関係が一目瞭然である。重力分布の変化具合を知ったり、地形・地質を参照しながらその重力異常の成因を考えたり、あるいは活断層の存否やその延長部に関する情報を知ろうとする際に本書は誠に好都合で

ある。地震の分布や火山との対応も容易であろう。確かにこのような図幅別の重力と地形・活断層・地質とを重ね合わせた分布図はこれまでに例のないものである。「コンパクトで使いやすく、自分の住んでいる地域近傍の情報が容易に読みとれるようなものを」という編者の当初のねらいは十分達成されている。

本書の基礎になった重力データは、長年測定に携わってきた名古屋大学・地質調査所（現産総研）の両機関をはじめ40を超える機関の調査で得られたものである。観測地点は20万地点以上に達するという。それらは西南日本重力研究グループ（2001）や地質調査所（2000）などによって整理されて取り込まれ、地形・地質資料と重ね合わせて山本・志知両編者を含む全国49名の編著者の協力によってできあがったものである。地形データは国土地理院発行の50mメッシュデジタル地形データ（国土地理院、2002、海底地形については岸本1999）が用いられ、活断層データは中田高・今泉俊文[編]（2002）の活断層詳細デジタルマップによっている。地質データは地質調査所（1995）による100万分の1デジタル地質分布が用いられている。これらの諸要素が配色よく組み合わせられ、わかりやすく描かれている。

本書は重力異常の分布そのものに関心のある方はもちろん、郷土の地質・活断層・地形やそれらの相互関係に関心あるものにとって、貴重で便利な書である。本書によって重力分布が身近な地形・地質・活断層と結びついて急に具体的な地学的なものになったという思いである。特に縮尺20万分の1程度のスケールの地図の上で地形・地質・重力・活断層の相関の具合を見て、考えようとするものにとって、本書は見飽きることのない宝の山である。このように本書は単なる重力分布図ではなく、郷土の地学の書である。身近な重力・地形・地質・活断層の地学アトラスとして、是非参照されるようおすすめする。

なお、日本列島のより広域的な重力異常の分布を知りたい場合には、本書編者らによる70万分の1西南日本重力分布図（名古屋大学博物館特別報告9号、2001）あるいは河野芳輝・古瀬慶博、100万分の1日本列島重力異常図（東京大学出版会、1989）がある。併せて参照されるとよい。

<東京大学出版会、2004年、本文13頁、図版集58葉、CD-ROM1枚、本体9,200円>

● 地震対策モデルの構築

大竹政和 監修

防災力！宮城県沖地震に備える

評者 岡田義光

国の地震調査研究推進本部は、この10年、日本周辺の海域で発生する地震および活断層で発生する地震について、長期的な地震発生確率を見積もる作業を進めてきた。平成16年度末にひととりの評価作業は終了したが、この結果、周辺海域を含めたわが国とその周辺でもっとも高い地震発生の危険性を指摘されたのが、宮城県沖である。今後30年以内の地震発生確率は実に99%とされ、近いうちに確実にやってくるものと覚悟せねばならない。このような危機感に裏打ちされて、宮城県に關係する地震研究者や防災関係機関の総力を挙げて、きたるべき宮城県沖地震への備えを説いたのが本書である。

全体はA4判よりやや小さいサイズで214ページと、この種の書物としてはボリュームたっぷりの感がある。目次に続き、約10ページにわたって宮城県沖地震の被害想定結果がカラーの地図と表を用いてわかり易く示されている。これに続く本文は、知識編、備え編、対応編に大別され、そのページ数配分はおよそ3:7:2となっている。知識編には「地震研究の最前線から」との副題が添えられ、地震のメカニズム(大竹)、津波の被害と避難(今村)、地震予知研究の新展開(長谷川)、地震の揺れと被害の關係(源榮)、災害の軽減に向けて(大竹)の5章が設けられている。各章は独立して読めるものの、通して読むとプレート理論の解説の重複などがやや気になる。なお、各章の扉には執筆者の大きなグラビア写真が載せられており印象的である。

備え編はさらに3つに分けられている。まず「1.暮らし：ライフラインの防災対策」では、電気・水道・ガス・道路・河川・港湾・地下鉄・高速道路・固定電話・携帯電話・テレビ・ラジオ・銀行・郵政公社・消防の各担当事業者が地震に備えてどのような対策を進めているかが詳しく説明される。次いで「2.住まい：地震に強い住まいづくり」では、震災に強い住まいと地盤、免震・制震技術の現状、地震保険の問題が取り上げられ、大震災でいつも問題となる住居の耐震化が詳しく解説される。さらに「3.地域：地域と産学官の取り組み」では、緊急地震速報の利活用、次世代型津波監視システムといった近未来の防災対策や、地域と連携した企業防災の取り組みなどが紹介される。関係機関によって実に様々

な取り組みが進められていることを知り、読者は意を強くするであろう。

最後の対応編では、「身近な備え、総チェック」という副題が添えられ、チェックシートを用いて地震に対する各自の備えや、我が家の耐震診断が行えるようになっている。また巻末には、宮城県各市町村が実施している防災支援対策、地震に遭遇した際の心構え、災害時のボランティア活動、過去の地震災害からの教訓などが収められている。

盛り沢山の内容ではあるが、このように、1冊の本で地震の基礎から防災対策、そして個人の備えまでを組織的に網羅している書物は少ない。対象は宮城県沖地震となっているが、防災への備えは全国に共通する部分が多く、宮城県民に限らず全国の一般市民にとって地震対策を考える上で格好の書となろう。また、自分の研究分野に閉じこもりがちな地震研究者には、社会との係わりを確認するために有益な書物であり、地方自治体や公共機関の關係者には、防災対策を概観する良い参考書として、さらに、このような書物を作ること自体の意義を確かめる見本として、是非一読をお勧めしたい。

<創童舎、2005年、214頁、2,400円>

● 新刊紹介

日本建築学会 著

2003年5月26日宮城県沖の地震災害調査報告

2003年7月26日宮城県北部の地震

日本建築学会/丸善、2004年3月、A4判、343頁、4,410円(税込み)

吉村 昭 著

三陸海岸大津波

文芸春秋、2004年3月、文庫判、191頁、460円(税込み)

地震防災研究会 著

大地震から生き残れ！プロが教える新常識

住宅金融普及協会、2004年8月、A5判、135頁、1,300円(税込み)

加藤碩一 著

アナトリア地震紀行

愛智出版、2004年10月、A5判、144頁、2,940円(税込み)

土木学会コンクリート委員会 著

2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析

土木学会/丸善、2004年11月、A4判、276頁、3,570円(税込み)

新潟県中越地震特別報道写真
新潟日報社, 2004年11月, A4判, 88頁, 1,000円(税込み)

主婦と生活社 著

**自分でできる!家中の修理と手入れマニュアル
地震・セキュリティ・バリアフリー**
主婦と生活社, 2004年12月, B5判, 123頁, 1,365円
(税込み)

野口武彦 著

安政江戸地震
筑摩書房, 2004年12月, 文庫判, 283頁, 945円(税込み)

木村政昭 著

緊急警告 これから注意すべき地震・噴火
青春出版社, 2004年12月, 新書判, 217頁, 924円(税込み)

村山 茂 著

**阪神・淡路大震災から100学んだ 防災・復興
に生かす知恵と心がまえ**
海文堂出版, 2004年12月, B6判, 238頁, 1,575円(税込み)

浅場ケイ子 著

疎開児童が調べた「東南海地震被災の記録」
新風書房, 2004年12月, B5判, 130頁, 1,260円(税込み)

大宮信光 著

面白いほどよくわかる 世界を動かす科学の最先端理論
地震予知から生命の創造まで, 「知の探求」最前線
日本文芸社, 2005年1月, B6判, 287頁, 1,470円(税込み)

地学団体研究会 編

地震と火山の探検隊
大月書店, 2005年1月, A5判, 123頁, 1,890円(税込み)

貝原俊民 著

大地からの警告
ぎょうせい, 2005年1月, 四六判, 183頁, 1,500円(税込み)

森田 武 著

阪神・淡路大震災から10年 震災の教訓を生かそう
近代消防社, 2005年1月, A5判, 260頁, 2,500円(税込み)

塩崎賢明, 西川榮一, 出口俊一, 兵庫県震災復興研究センター 編

震災10年と災害列島
クリエイツかもかわ, 2005年1月, A5判, 302頁, 2,310円(税込み)

山村武彦 著

人は皆「自分だけは死なない」と思っている
宝島社, 2005年1月, B5判, 221頁, 1,260円(税込み)

Jレスキュー編集部 編著

ドキュメント新潟県中越地震10・27奇跡の救出
イカロス出版, 2005年2月, B6判, 215頁, 1,600円(税込み)

中条均紀 写真 長野 真文

山古志村ふたたび 中越地震復興応援写真集
小学館, 2005年2月, B5変横判, 84頁, 2,100円(税込み)

完全シミュレーション東京直下大地震

ネコパブリッシング, 2005年2月, B5判, 107頁, 781円(税込み)

地震防災ハンドブック(あおば新書)携帯版
あおば出版, 2005年2月, B6判, 118頁, 800円(税込み)

土木学会 著

地震動のローカルサイトエフェクト
土木学会(丸善), 2005年3月, A4判, 315頁, 4,830円(税込み)

日経アーキテクチュア編集部 著

地震に強い家
日経BP出版センター, 2005年4月, A4変判, 142頁, 1,470円(税込み)

土 隆一・榛村純一 著

家族を守りぬく東海地震講座
清文社, 2005年4月, A5判, 238頁, 1,890円(税込み)

松尾達英 著

震度7新潟県中越地震を忘れない
ポプラ社, 2005年4月, B5判, 70頁, 1,260円(税込み)

大泉光一 著

学校の地震災害危機対応マニュアル(教職研修総合特集)
児童・生徒の生命と学校施設を守るための全ノウハウ
教育開発研究所, 2005年4月, A5判, 158頁, 1,890円(税込み)

大崎順彦 著

地震と建築(岩波新書アンコール復刊)
岩波書店, 2005年4月, 新書判, 208頁, 735円(税込み)

執筆者紹介

<掲載順>

氏名 大久保修平

[おおくぼ しゅうへい]

現職 東京大学地震
研究所教授
理学博士



略歴 東京大学理学
部地球物理学卒業，同大学院理学
系研究科地球物理学専攻修士課程修
了，同博士課程単位取得退学，東京
大学地震研究所助手，同助教授を経
て現職

研究分野 測地学，固体地球物理学
著書 『EARTH REVEALED—地球を探る』(共著，丸善)，『大地の躍
動を見る—新しい地震・火山像』
(共著，岩波書店)，『地球が丸いって
ほんとうですか？』(編著，朝日新聞
社)

氏名 長谷川 昭

[はせがわ あきら]

現職 東北大学大学
院理学研究科教授
理学博士



略歴 東北大学理学
部天文及び地球物理学第二学科卒
業，東北大学大学院理学研究科博士
課程中退，東北大学理学部助手，助
教授を経て現職

研究分野 地震学

著書 *Magmatic Systems* (M. P.
Ryan 編，Academic Press) (分担
執筆)

氏名 古村孝志

[ふるむら たかし]

現職 東京大学地震
研究所地震火山災害
部門助教授
理学博士



略歴 北海道大学大学院理学研究科
博士課程修了，北海道教育大学助
手，講師，助教授を経て現職

研究分野 地震学(地震波動論と強
震動)

氏名 亀田弘行

[かめだ ひろゆき]

現職 京都大学名誉
教授，(独)防災科学
技術研究所客員研究
員



略歴 京都大学大学院工学研究科博
士課程土木工学専攻単位修得退学，
京都大学工学部助教授，京都大学防
災研究所教授，理化学研究所地震防
災フロンティア研究センター長，防
災科学技術研究所地震防災フロン
ティア研究センター長を経て現職

研究分野 耐震工学，ライフライン
地震工学，都市地震防災，防災 GIS
著書 『新体系土木工学—確率・統
計解析』(共著，技法堂出版)，『新鉄
道システム工学』(編著，山海堂)，
『動的解析と耐震設計』(分担執筆，
技法堂出版)，『土木構造物の診断』
(編著，山海堂) 他

氏名 土岐憲三

[とき けんぞう]

現職 立命館大学理
工学部教授，歴史都
市防災研究センター
長
工学博士



略歴 京都大学工学部土木工学科卒
業，同大学院工学研究科博士課程修
了，京都大学工学部助教授，防災研
究所助教授，教授，工学部教授，東
京大学工学系研究科客員教授，京
都大学工学部長・工学研究科長，京
都大学総長補佐を経て現職

研究分野 地震工学，文化財防災
著書 『構造物の耐震解析』(技報堂
出版) など

氏名 境 有紀

[さかい ゆうき]

現職 筑波大学大学
院システム情報工学
研究科助教授
工学博士



略歴 東京大学工学部建築学科卒
業，同大学院工学系研究科博士課程
修了(建築学専攻)，東京大学地震研
究所助手を経て現職

研究分野 地震防災工学，構造動力
学

著書 『鉄筋コンクリート造建物の
耐震性能評価指針(案)・同解説』
(共著，日本建築学会)，『多次元入力
地震動と構造物の応答』(共著，日本
建築学会)，『地震荷重—地震動の予
測と建築物の応答』(共著，日本建築
学会)，『鉄筋コンクリート建物の終
局強度型耐震設計法』(共著，技報堂
出版)

氏名 室崎益輝

[むろさき よしてる]

現職 独立行政法人
消防研究所理事長，
神戸大学名誉教授
工学博士



略歴 京都大学工学部建築学科卒
業，同大学院工学研究科博士課程中
退，京都大学工学部助手，神戸大学
工学部助教授，教授，神戸大学都市
安全研究センター教授を経て現職

研究分野 都市防災，防火避難

著書 『地域計画と防災』(勁草書
房)，『危険都市の証言』(共著，関西
市民書房)，『新版・建築防火』(共
著，朝倉書店)，『建築防災・安全』
(鹿島出版会)，『大震災以後』(共著，
岩波書店) など

氏名 関沢 愛

[せきざわ あい]

現職 (独)消防研究所
所首席研究官
工学博士



略歴 京都大学工学部建築学科卒業，同大学院工学研究科修士課程修了(建築学専攻)，自治省消防庁消防研究所研究員，同研究所地震防災研究室長，(独)消防研究所研究統括官を経て現職，東京大学大学院工学系研究科客員教授(併任)

研究分野 建築・都市防災

著書『新版・建築防火』(共著，朝倉書店)，『住まいと暮らしの安全』(共著，理工図書)，『地震防災の事典』(共著，朝倉書店，2000)，『火災と建築』(共著，共立出版)

氏名 井口 隆

[いのくち たかし]

現職 独立行政法人
防災科学技術研究所
総合防災研究部門部
門長



理学博士

略歴 北海道大学理学部地質学鉱物学科卒業，同大学院理学研究科中退，科学技術庁国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)研究員，同主任研究官，総括主任研究員を経て現職

研究分野 応用地質学，地すべり学

氏名 岡田義光

[おかだ よしみつ]

現職 独立行政法人
防災科学技術研究所
企画部長
理学博士



略歴 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程中退，東京大学地震研究所助手(富士川地殻変動観測所勤務)，科学技術庁国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)地殻力学研究室長，

地震前兆解析研究室長，地震活動研究室長，地震・噴火予知研究調整官，地震予知研究センター長，地震調査研究センター長を経て現職

研究分野 地震学，地殻変動論

著書『日本の地震断層パラメター・ハンドブック』(共著，鹿島出版会)，『現代測地学』(共著，日本測地学会)他

氏名 小川信行

[おがわ のぶゆき]

現職 (独)防災科学
技術研究所兵庫耐震
工学研究センター業
務専門員(E-ディフェ
ンス整備プロジェクトチームリーダ)



略歴 東京大学工学部精密機械工学科卒業，島津製作所を経て国立防災科学技術センター(現防災科学技術研究所)入所，耐震工学研究室長などを経て現職

研究分野 地震工学

氏名 伯野元彦

[はくの もとひこ]

現職 攻玉社工科院
期大学学長
工学博士



略歴 東京大学工学部土木工学科卒業，同大学院博士課程修了，東京大学生産技術研究所助手，東京工業大学理工学部助教授，東京大学地震研究所助教授，同教授，同所長，東洋大学工学部教授を経て現職

研究分野 地震工学

著書『被害から学ぶ地震工学』(鹿島出版会)，『破壊のシミュレーション』(森北出版)等

氏名 佃 栄吉

[つくだ えいきち]

現職 独立行政法人
産業技術総合研究所
研究コーディネー
タ，地質調査情報セ
ンター長，地質調査総合センター
(GSJ) 代表



理学博士

略歴 広島大学大学院理学研究科博士課程前期修了，通商産業省地質調査所(現産業技術総合研究所)企画室長，産総研活断層研究センター長を経て現職

研究分野 構造地質学，地震地質学
著書『産総研シリーズ 地震と活断層』(共著，丸善)

氏名 松田時彦

[まつだ とときひこ]

現職 (財)地震予知
総合研究振興会副首
席主任研究員，東京
大学名誉教授
理学博士



略歴 東京大学理学部地学科卒業，東京大学地震研究所教授，九州大学理学部教授，熊本大学理学部教授，西南学院大学文学部教授を経て現職

研究分野 地震地質学，ネオテクトニクス
著書『活断層』(岩波書店)，『地震』(共訳，古今書院)，『動く大地を読む』(岩波書店)，『火山と地震の国』(共著，岩波書店)，『新編 日本の活断層』(共著，東京大学出版会)

ADEP情報

(財)地震予知総合研究振興会は、業務の拡充を図るため組織の一部を平成17年5月16日付で改組しました。

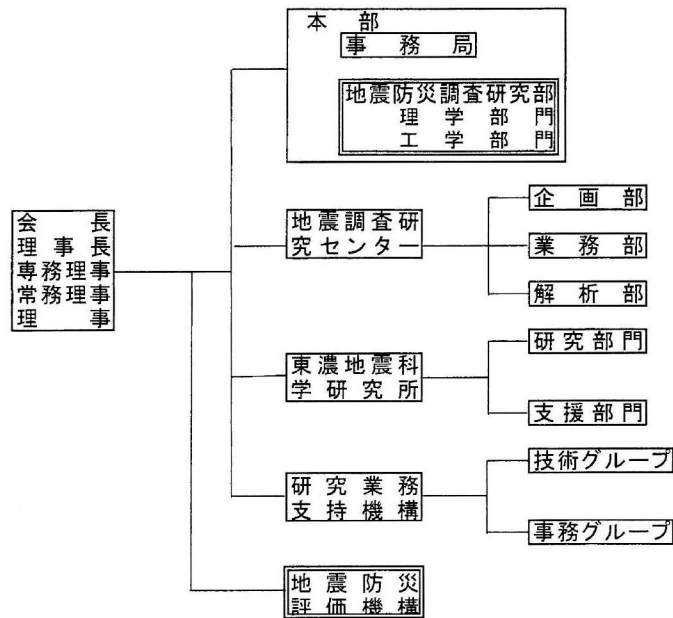
新組織：地震防災評価機構

地震防災に関する学術的あるいは技術的な委託諸課題について、客観的かつ公正な総合評価を行い、最新の学術的・技術的成果の実用化を図り社会に還元することを目的としています。

改組識：地震防災調査研究部

本部理学調査研究部門と工学調査研究部門を統合し、効率的・効果的に業務を推進するために地震防災調査研究部に改組しました。

財団法人 地震予知総合研究振興会の組織



(財)地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

採用

職員

地震調査研究センター	業務部長	中村 誠	17. 4. 1
	業務部長代理	岡田 常夫	17. 4. 1
研究業務支持機構	部長代理相当	田代 光男	17. 4. 1
	主任研究員	野村 幸司	17. 4. 1

契約職員

本部	副首席主任研究員	南雲 秀樹	17. 4. 1
----	----------	-------	----------

嘱託

本部	参事	香山 郁郎	17. 4. 1
	副首席主任研究員(非常勤)	植原 茂次	17. 4. 1
東濃地震科学研究所	副首席主任研究員	鈴木 貞臣	17. 4. 1
	主任研究員(非常勤)	藤井 巖	17. 4. 1
研究業務支持機構	事務職員	原田隆太郎	17. 4. 1
	主任研究員(非常勤)	植木 保吉	17. 4. 1

退職

職員

地震調査研究センター	次長	染谷 武	17. 3.31
	業務部長代理	奥 敏昭	17. 3.31

嘱託

本部	参事	鈴木 憲	16.12.31
	地震調査研究センター	技術職員	松多 信尚
東濃地震科学研究所	技術職員	藤本 大介	17. 3.31
	主任研究員	大井田 徹	17. 3.31
研究業務支持機構	主任研究員	Anshu Jin	17. 3.31
	主任研究員	久保 信吾	17. 3.31
	参事	末兼 卓	17. 3.31
	参事	伊藤 謙光	17. 3.31
	技術職員(非常勤)	加藤 剛一	17. 3.31

編集後記

大地震は時として宗教的行事と重なって起こることがある。昨年12月のスマトラ沖大地震M9.3はクリスマスの翌日、今年3月28日のM8.7は復活祭の翌日に当たった。スマトラはイスラム圏で、キリスト教の行事と無関係と思われがちであるが、スンダ海溝に沿った小さな島々、とくにニアス島はカトリック教徒の比率が高い地域でもある。ローマ教皇の逝去と重なったために、情報が遅れてしまったが、日本の各教会も修道会を通して、遅れさせながら救援の募金に立ち上がった。

宗教行事と重なった名高い歴史的大地震は1755年11月1日のリスボン大地震である。この日は諸聖人の祝日(万聖節)に当たり、前夜はハロウィーン、翌日は死者の日として、キリスト教圏では墓参りの日でもある。つまり日本のお盆に相当する。地震発生は現地時間の9時40分、ちょうど朝のミサの最中であった。当日は「守るべき祝日」としてミサ出席が義務づけられていたから、多くの参列者は石造りの教会の下敷きとなって圧死した。圧死を免

れた人も直後に襲った大津波の犠牲になった。当時リスボンは世界貿易の中心地、全人口27万5千人のうち6万人が亡くなったという。

教会は旧約聖書のソドムとゴモラ壊滅を例にとり、リスボンの背徳を糾弾したが、娼婦街が無傷のまま残ったこともあって、その矛盾を怒った一部の市民は逆に司祭達を牢に押し込めるという事件が発生した。本誌24号「災害解釈の精神史」(種村季弘著)には、ヴォルテール、ルソー、ライブニッツ、カント等、当時ヨーロッパの一流思想家がリスボン地震をどう解釈したか、興味ある史実が語られている。1789年フランス大革命の底流を作った合理主義精神が地震災害から始まったとすれば興味深い。

日本においても、宗教行事と重なった例は1847年5月8日の善光寺地震である。何十年に一度という本尊のご開帳にあたり、全国から7~8千人の参詣者が宿坊にお籠もりをした。地震発生は午後10時頃、その9割が亡くなったという。「神も仏も無いものか」という不信心者が輩出してもおかしくはない。「地は震ひ 山は崩るる 世の中に 何とて

弥陀は つれなかるらん」の落首は当時の精神状態をよく表している。

地震災害を神仏の思し召しととるか、崇りとするか、神仏と無関係な自然現象ととるか、21世紀の今日でも人々の考え方は中世と変わりない。恐らく地震災害を完全に克服できる日まで続くであろう。(Y.H.)

地震ジャーナル 第39号

平成17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