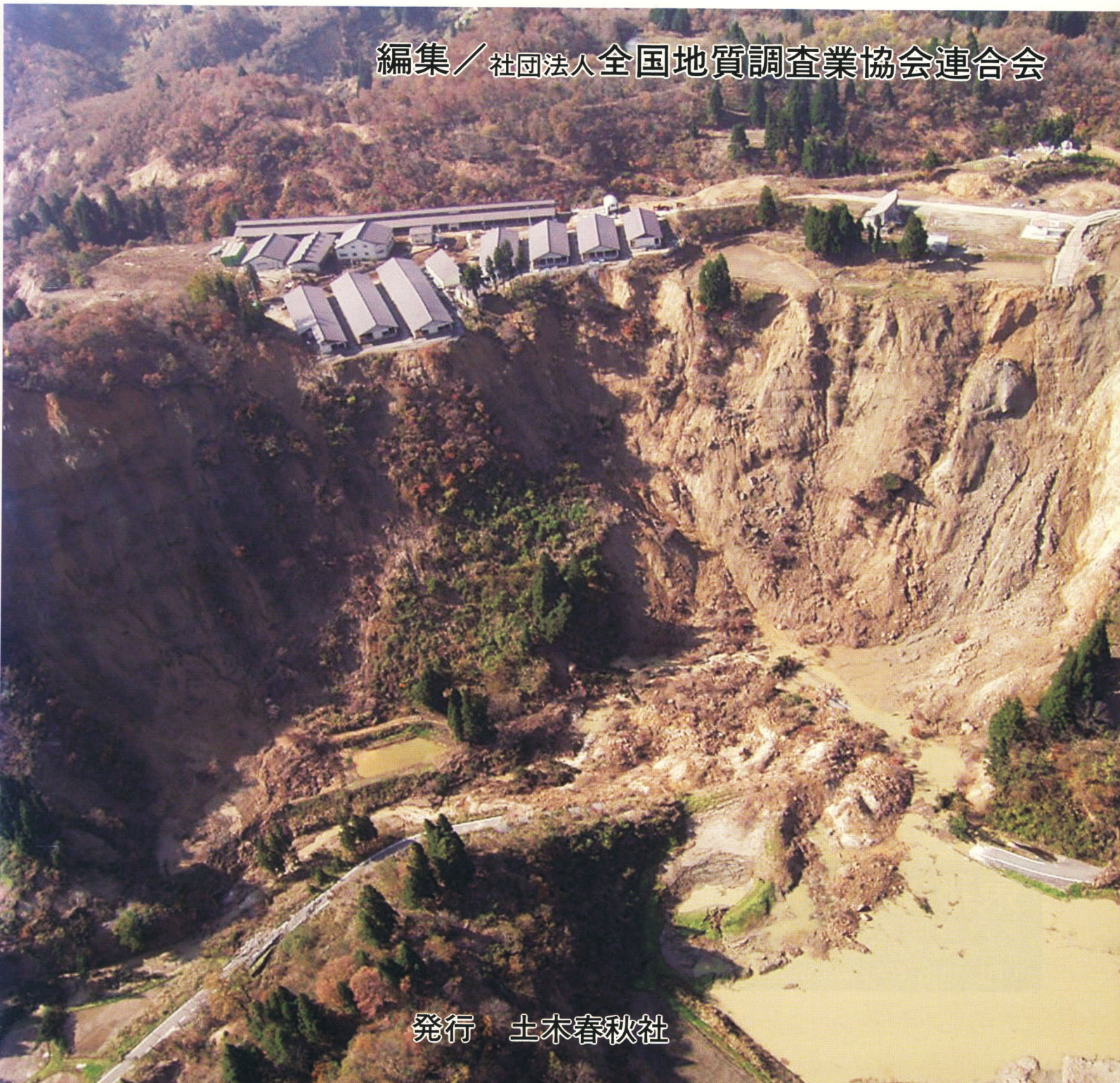


地質調査

'06 第4号

〔小特集〕地震に関する最近の話題

編集 / 社団法人全国地質調査業協会連合会



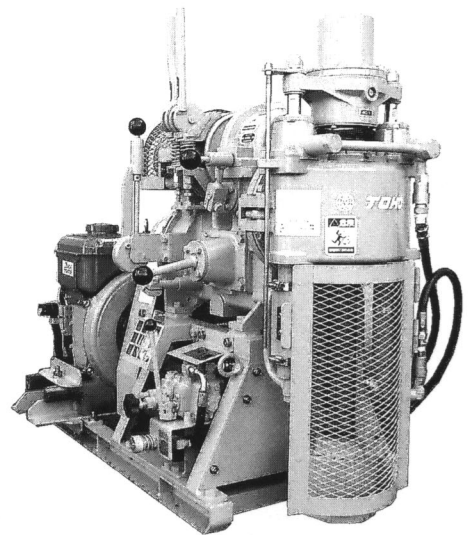
発行 土木春秋社



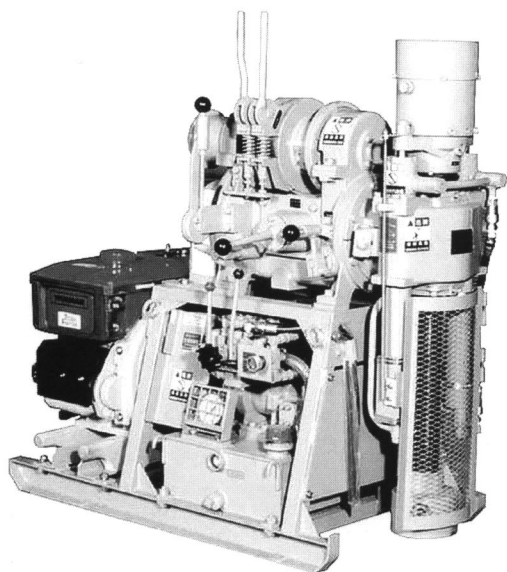
TOHO
DRILLING EQUIPMENT

小型ボーリングマシン

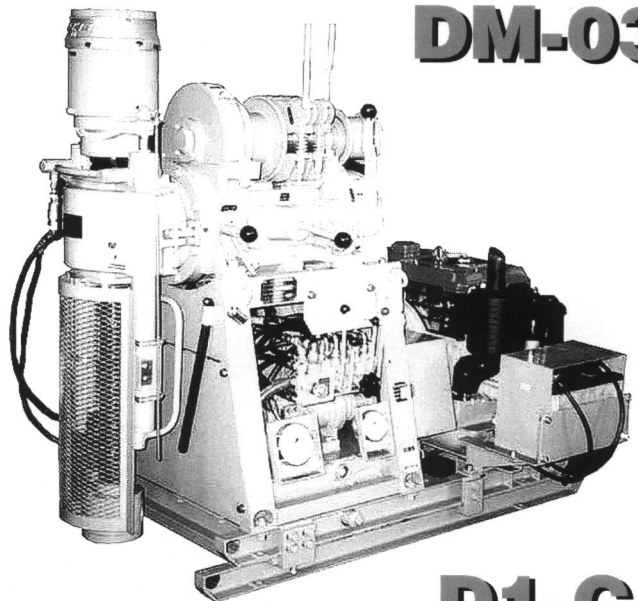
- ニーズに合わせて、ホイストドラムを取外し
コーンプリータイプに変更することができます。
- ブーリの交換で地質にあったスピンドル回転数
が選択できます。
- 試錐ポンプが内蔵でき、しかも原動機は1台で
すみます。



DM-03



D0-D



D1-C

仕 様 右操作・左操作をご用意致しております。

機 種 名		DM-03	D0-D	D1-C
穿孔能力	m	30	100	280
スピンドル回転数	rpm	65、125、370	(A) 60、170、330 (B) 110、320、625	(A) 65、130、250、370 ※2 (B) 90、170、320、490
スピンドル内径	mm	47	43	48 ※2 58
スピンドルストローク	mm	300	400	500
ホイスト巻揚げ能力	KN (kgf) 400	3.9 (400)	5.9 (600)	10.8 (1,100)
フレームスライド	mm		※1 油圧式 300	油圧式 300
動 力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質 量	kg	180 (本体)	315 (本体)	550 (本体)
寸 法 H×W×L	mm	960×500×1,115	1,200×660×1,180	1,390×735×1,580

※1 オプション

※2 スピンドル内径58の場合

東邦地下工機株式会社

東京都品川区東品川4-4-7 TEL 03 (3474) 4141
福岡市博多区西月隈5-19-53 TEL 092 (581) 3031
URL: <http://www.tohochikakoki.com>

福 岡 〆 092 (581) 3031
札 幌 〆 011 (785) 6651
仙 台 〆 022 (235) 0821
新 潟 〆 025 (284) 5164
名 古屋 〆 052 (798) 6667
大 阪 〆 0729 (24) 5022

松 山 〆 089 (953) 2301
広 島 〆 082 (291) 2777
山 口 〆 083 (973) 0161
北九州 〆 093 (331) 1461
熊 本 〆 096 (232) 4763

巻頭言	地震の怖さ	東京大学地震研究所教授 島崎邦彦	1
小特集	地震に関する最近の話題		
	地震予知に向けた最近の研究	安藤雅孝	2
	全国を概観した地震動予測地図	藤原広行	10
	地震に起因する土砂災害に対する危機管理の現状	綱木亮介	16
	緊急地震速報・地震観測情報の防災対策への活用	源栄正人	22
	GIS/CAD と大規模数値シミュレーションを用いた広域震災想定シミュレータ	市村 強 堀 宗朗 篠竹英介 佐茂隆洋	28
	自助・共助を支援する和歌山県地震防災対策	田畑博史	34
	新潟県中越地震による災害の復旧事例	五十嵐正巳	40
教養読本	フロンティア地震学の現状と展望	金尾政紀	46
車窓から見る地形・地質	支笏火山灰台地	池田晃一 伊藤慶司	50
大地の恵み	石見銀山遺跡	月森勝博	52
やさしい知識	長周期地震動	大塚康範	54
	全地連「技術 e-フォーラム 2006」について		57
私の経験した現場	泥炭地盤における真空圧密工法の試験盛土	高坂敏明	61
会告	平成 18 年度上半期の事業量は前年比 11.8%増		
	—全地連受注動向調査		65
	主な新事業の進捗状況について		66
	「建設コンサルタント賠償補償制度」説明会を開催		67
	全地連損害保険制度 新規募集および更新案内を実施中		67

小特集 斜面防災

斜面防災技術の現状

降雨と地質

雪崩の内部構造と流動機構の解明

火山活動

数値情報を利用した災害斜面抽出法

岩盤斜面の調査・計測・ハザード評価技術の調査

迅速で精密な最新空間情報計測技術

やさしい知識 斜面工学

車窓から見る地形・地質

大地の恵み

各地の博物館巡り

地震の怖さ

東京大学地震研究所教授 島崎 邦彦

地震・雷・火事・何とかという順番は、不意に襲われ、予知できない順であるという説がある。台風や集中豪雨のように、予報や警報によって早期に対応策を取ることが可能となっている現象と比べ、突然起る地震は、確かに怖い。そして予知、予測に対する期待も高い。地震学の研究の現状は、このような期待に答えるにはほど遠いが、少しずつ可能なことを進めて、防災技術の一つとしての予知・予測技術を高めようとしている。

今年8月から一部運用が始まった緊急地震速報も、広い意味ではその一つと言えよう。震源になるべく近い点でP波をとらえ、S波の到着前に、震度などを予測する技術である。揺れそのものを避けることはできないが、事前に効果的な対策をとることができる。危険物を扱う生産ラインの停止、列車の減速、手術の中断など、少しでも役立つことができれば幸いである。

また、昨年初めて公表された地震動予測地図は、日本列島内の相対的な危険度を示しており、時間のかかる防災対策を展開する場合や、限られた資源を割り当てる際には、どこから着手すべきかを知ることができる。地震ハザードステーション (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>) によれば、連合会事務所に近い、本郷三丁目駅付近で今後30年以内に震度5弱以上となる確率は99.4%、震度6弱以上では13.2%と示されている。予測地図では海溝型震源や活断層の震源などさまざまな震源を想定している。特定できない震源は考慮されているものの精度は低いが、過去に繰り返し活動し、特定できる震源に対しては、過去の活動から精度良く将来が予測されている。

唯一予知可能な地震とされる「東海地震」については、石橋説が発表されてから、今年で30年となる。「明日起きてもおかしくない」と言われる中で生まれた子どもが、ニュース記者となって「いつ起るのですか?」と問う時代となった。不十分ながらも前兆すべりのシミュレーションも行われて、東海観測網の監視体制も充実し、観測情報、注意情報、予知情報(警戒宣言)と三段階の情報発表体制となっている。気象庁が公言するように、予知できずに発生する可能性もあるが、陸域の直下で大きな前兆すべりが発生すれば現体制の効果が発揮できるであろう。

ややもすれば予知に大きすぎる期待が寄せられるが、こ

れらの予知、予測技術は、あくまでも地震防災技術の一つにすぎない。予知、予測にかかわらず、地震は必ず発生するのであるから、十分な対策がなければ大災害となる。「いつ起るのか?」とよく尋ねられるが、心配するよりかは、いつ起っても安心なように自分の家を耐震化して下さいとお願いしている。

地震保険の加入率が前年に比べて10%伸びたと報道された。2004年10月の中越地震以後、同年末のスマトラ沖地震とインド洋津波、2005年3月の福岡県西方沖の地震、7月の首都圏の鉄道を麻痺させた千葉県北西部の地震、8月の宮城県沖の地震などによって、地震防災への意識が高まった結果であろう。一時的な高まりではなく、持続して欲しいものだ。

耐震性は今や住宅産業の売り物の一つだし、引っ越し業者の家具固定サービス、携帯業者の災害伝言板サービス、飲料業者の非常時無料提供サービスなど、地震防災は日常に浸透しつつある。企業イメージを高めるためにも、また実際のビジネスチャンスとしても、地震防災はキーワードである。身の回りを見渡して見ても、まだ地震対策を考えていないものが多く、チャンスはどこにもありそうだ。例えば、食器棚のガラスに飛散防止フィルムを貼っているが、そのうちフィルム付きが普通に売られるようになるだろう。いつか起る地震に対する備えは、いわば保険のようなものであり、備えがなければ大きなツケをいつか支払わなければならない。

火山学の権威で1986年の伊豆大島噴火の避難を成功させた荒牧教授によれば、「風水害は超横綱級である。地震は関脇である。火山は幕下である」とのこと。これは、多くの人の認識をうまく言い表している。大地震は頻度が低いために、その怖さが十分に知られていない。実は、長期間の統計に基づくと、地震の被害は、風水害の十倍に近い。頻度は低くとも、際限ないような被害をもたらす地震があるためである。このため、全体としては地震の方が被害額、あるいは死者数で風水害をはるかに上回る。

火災保険より地震保険の方がずっと料率が高い。なぜなら地震のリスクの方が大きいからである。こんな簡単なことさえ、ほとんど知られていない。私たちは地震の怖さを知らない。その本当の怖さを。

地震予知に向けた最近の研究

あん どう まさ たか
安藤 雅 孝*

1. はじめに

一般には、「地震予知」とは、地震発生までの期間の短い予測を指すことが多い。長い期間の予知は、「長期予測」と呼ぶのが相応しい。ただし、短期予知はどれだけの長さを指すかは人により違う。いずれにしても、地震予知には、不確定さ（時間、場所、規模）を伴うことは間違いない。予測幅の狭い予知は、地震現象の性質から、将来といえども不可能と考えるべきだ。本稿では、「地震予知」は、大きな予測幅を伴うものとの前提で議論する。

近年、地震予知研究は、地震現象の基礎的な理解に重点が置かれている。断層面上のアスペリティ分布、地震現象のモニタリング、地震発生のシミュレーションなど、地震のメカニズムの解明が主な対象である。本稿では、地震現象の理解のために、過去10年間、陸と海で進められてきた観測体制の整備、今後発展が期待される海底地殻変動観測、および最近発見された“ゆっくりした現象”について紹介したい。観測体制の整備が、今日の地震現象の理解に貢献してきたのは間違いない。この中で発見された“ゆっくりとした現象”は、近い将来巨大地震の発生が懸念される南海トラフの巨大地震の予知に結びつく可能性もある。

2. 観測網の整備

日本では、大きな災害のたびに、防災と地震研究の面で大きな前進があった。関東地震後、耐震計算が義務化され、東大地震研究所が設立された。死者が5,000人に達した1959年伊勢湾台風では、災害全般にわたる基本的な法律として「災害対策基本法」が制定された。1968年の十勝沖地震や1978年の宮城県沖地震の災害の教訓を踏まえ、耐震設計基準が改正され、新耐震と呼ばれる建築基準法が施行された。兵庫県南部地震では、被災者は50万人に達し、34万人が避難所で生活を余儀なくされた。この地震以降、地震防災に対する関心は、それ以前に比べ飛躍的に高まった。また地震の調査研究に向け、観測体制の充実が見られたことも特徴である。地震観測網等に関する情報は、地震調査

推進本部のホームページ¹⁾を参照されたい。

2.1 陸の観測

兵庫県南部地震以降、新しく作られた地震観測網 Hi-Net (高感度地震観測網)、K-Net (強震動観測網)、F-Net (広帯域地震観測網)のデータは、インターネットで公開され、一般利用者が、地震波形をダウンロードできるようになった²⁾。高感度地震観測点はこの10年で、1,300点に増えた(図1)。社会の地震研究への期待が後押ししたためといえるだろう。現在、地震が発生すると直ちに地震のメカニズムや地震モーメントが公表されている。震度情報は、全国4,000点³⁾で捉えられ、リアルタイムで公表されるようになった。観測点数が増えただけでなく、観測の質も大幅に向上した。Hi-Net 観測点は、深さ100~200mの孔内に設置されたため(10カ所では、深さ1,000~2,000mに達する)、ノイズレベルは低く、海洋プレートの沈み込みに伴う低周波地震現象(後述)が発見された⁴⁾。

さらに、全国1,300点に、GPS受信機が設置され、地殻変動が連続的に監視されている⁵⁾。この観測網(GEONET)により、日本列島の大きな変動はもちろん、地下で進行する“ゆっくりすべり”⁶⁾、マグマの移動⁷⁾、歪集中帯⁸⁾など、多くの発見がされた。GPS観測網は、気象観測におけるアメダスや気象衛星のように、日本の地震や火山の監視にはなくてはならない観測データとなった。現在はミリメートル単位での変動も検出され、さらに地震波も検出できる地

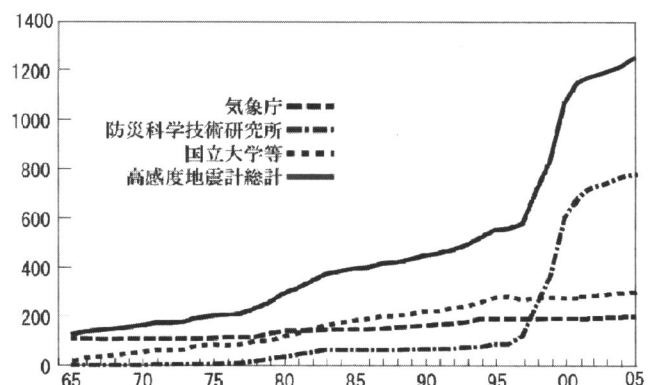


図1 高感度地震観測点の数の変化。1995年兵庫県南部地震以降に急速に増えた。

* 名古屋大学環境学研究所地震火山・防災研究センター

震計の役割も持つようになった⁹⁾。このように陸上での観測の進展はめざましい。

GPS 観測網のデータは、いち早く公開され、全国の研究者や技術者などに利用され、大きな成果が得られている。全国 50 カ所の潮位観測結果も、リアルタイムで公表され、津波の情報は、すべての国民が知ることができるようになった。さらに、活断層の調査も進められ、トレンチ調査やボーリング調査などに基づき地震発生確率予測がされるようになった。確率予測がしだいに市民の目に触れるようになったのは、兵庫県南部地震以降のことだ。この 10 年は、陸上における観測網の整備、調査研究は、データの共有化、観測点密度と観測の質の向上、リアルタイム化ないし迅速なデータ公開が実現された時期だった。

2.2 海の観測

陸上における観測が整備された一方、海底での連続観測は、気象庁等における海底ケーブルを用いた地震観測だけであり¹⁰⁾、地殻変動その他、陸上では備えられている定常観測はない。GPS の電波は水中を伝播しないため、海底下の地殻変動観測は手つかずのままであった。日本列島の主な変動は海底下で進行する。海底下の動きを捉えなければ、日本列島の変動の解明はできない。本稿では、東南海や南海地震の発生が予測される南海トラフ沿いの海底調査を中心に述べたい。

(1) 東南海・南海地震を対象とした海域調査

平成 15 年度より 5 カ年計画で海底の調査研究（文科省「東南海・南海地震に関する調査研究—予測精度向上のための観測研究—」¹¹⁾）が始められた。地震や津波の発生域の調査、強震動や津波の予測を行うため、微小地震活動やプレートの形状や強震動・津波発生領域を推定する研究が進められている。

地殻構造調査：想定震源域のアスペリティを対象として、海陸を統合した地震反射や屈折法調査を実施し、プレートの形状、地殻マントルの大構造、巨大地震の想定震源域と陸域間の地震波速度構造を明らかにする。この結果、室戸沖や東海沖で海山や海山列の沈み込みが発見され¹²⁾、これらが地震発生の際の断層破壊のバリアーとなるのではとの指摘もある。また、地震反射法調査を実施し、分岐断層の形状や¹³⁾、ポアソン比の高い構造の発見¹⁴⁾などがなされ、これらのプレート境界付近の不均質構造を基に、地震発生シミュレーションが行われている¹⁵⁾。

微小地震分布の把握：想定震源域の中で、地震活動度が相対的に高い領域などの注目すべき領域について、20 km 間隔で数年程度の観測を実施し、正確な地震活動の把握、詳細なプレート境界の形状や地殻構造と地震活動の関係を追う。これらの研究を通して、沖合の微小地震の震源が正確に推定されるようになった。この結果、紀伊半島南東沖地震の余震は、本震の断層面の周辺に分布するのではなく、水平の 2 層に分かれて分布することが判明した¹⁶⁾。つまり、余震分布から、本震の断層面を推定する方法は、少なくともこの地震では採用できないことがわかった。このように、海洋プレート内の地震が、陸域やプレート境界で発生する

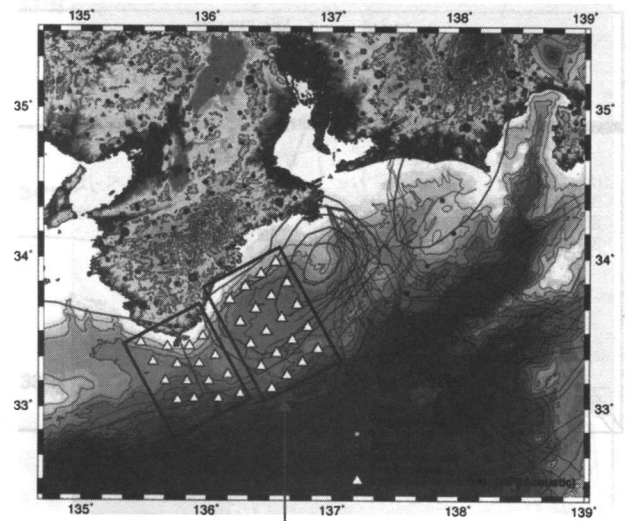


図2 平成 18 年より開始された、海洋研究開発機構による海底ケーブルによる、地震・津波観測監視システムの分布図（東側の長方形）。計 20 点の海底地震計と水圧計が設置され、リアルタイムでモニターされる。

地震と異なることが判明したことだけでも、大きな成果であった。

海底地殻変動観測のための技術開発：観測システムの安定性の向上と 2~3 cm の繰り返し観測精度を目指して行われている、これに関しては、次章で詳しく述べる。

(2) 海底リアルタイム観測

紀伊半島先端付近には、不均質な地殻・マントル構造が見つかっており、これらの構造が前兆的すべりや初期破壊域になる可能性が高いとして注目されている¹³⁾。平成 18 年度から 4 年計画で、海底観測技術開発や地震予測モデル、防災への貢献を目的として、1944 年の東南海地震の震源域の熊野灘を中心に、稠密なリアルタイム観測を行う“海底ネットワークシステム”を構築することになった（文部科学省受託研究「地震・津波観測監視システムの構築」海洋研究開発機構が中心となり実施¹⁷⁾。熊野灘に 20 カ所の観測点を設置、各観測点は高精度の地震計、水圧計（津波計）などで構成され、全ての観測点を海底ケーブルで面的につなぎ、平成 22 年度より、広域連続観測を開始する予定である（図 2）。平成 22 年度からは紀伊半島潮岬沖に、あらたな海底ネットワーク構築に着手することが計画されている。

3. 海底地殻変動観測

陸のプレートを引きずり込む源は、海と陸のプレートの境界面上の“固着域”である（図 3）。固着域は摩擦が大きく、その周囲の“安定すべり域”摩擦が小さい。安定すべり域では、緩やかなすべりが生じるため、その境界付近に応力が集中しやすく、地震の初期破壊域（震源）になる可能性も高い。一方、固着域は、地震時には強震動を発生させる源となる。したがって、固着域の分布や状態を知るとは、地震の準備過程や強震動の予測にとって不可欠である。本稿では、今後の海底地殻変動に焦点を当て、今後の測地観測について述べたい。

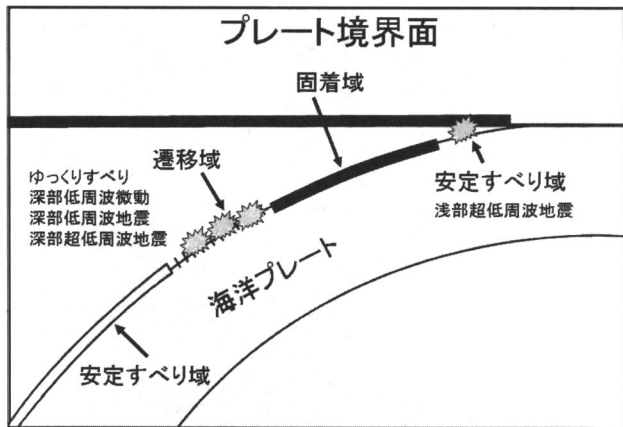


図3 プレート境界面の性質。

3.1 なぜ海底地殻変動観測が必要か？

プレート境界面上の性質を、陸上の観測から推定するのは難しい。地殻変動（静的変動）の振幅は、擾乱源からの距離とともに急速に小さくなる。擾乱源と観測点の距離を r とすると、地殻変動の振幅は $1/r^2$ に比例する。したがって、遠くの陸上から、海底下で進行する地殻変動を正確に推定することは難しい。

陸上の GPS 観測から、沖合のプレート面でのすべり（スリップ）分布の推定の信頼性について調べてみる。ここでは、西日本の GEONET の観測点（図4）を用いてチェッカーボードテストを行う¹⁸⁾。西日本下に沈み込むフィリピン海プレートの境界面を、36枚のサブ断層面に分割する（図4）。サブ断層上には、縦ずれ成分と横ずれ成分を与える。ここでは、隣同士のサブ断層面上（プレート境界面）に、プラス（逆断層または右横ずれ成分）とマイナス（正断層または左横ずれ成分）を交互に与える。このようなすべり分布から、図4のGPS観測点上の変位を求める。この変位を用いて、逆にサブ断層上のすべり分布を推定する。この結果が図5（上段）に示されている。図から明らかなように、陸ないし海岸付近直下のサブ断層面上のすべりは、与えたすべりに近い値が得られるが、沖合の2列のサブ断層上のすべりは推定できない。つまり沖合のサブ断層上に関して解像度はない。

次に、陸側から3列目（海溝側から2列目）のサブプレート上に海底地殻変動測定装置を設置し、高精度で測定できたとすると、設置したサブ断層上のすべりは推定可能となる（図5下段）。ただし、さらに沖合のサブ断層のすべりは、これだけでは推定できない。海溝側のサブ断層上に、海底地殻変動装置を新たに設置しなくては、すべり分布は推定できない。陸上の観測から海底下のすべりを推定するのは困難と考えるべきであろう。

3.2 海底の地殻変動測定の種類

海底の地殻変動を測定するために、海底に直接測定機器を設置し観測する手法は種々ある。

- 1) 海底ないし孔井内に測定機を設置、測定する単独観測方法、
- 2) 海底の複数点間での測定値の差を用いる方法、

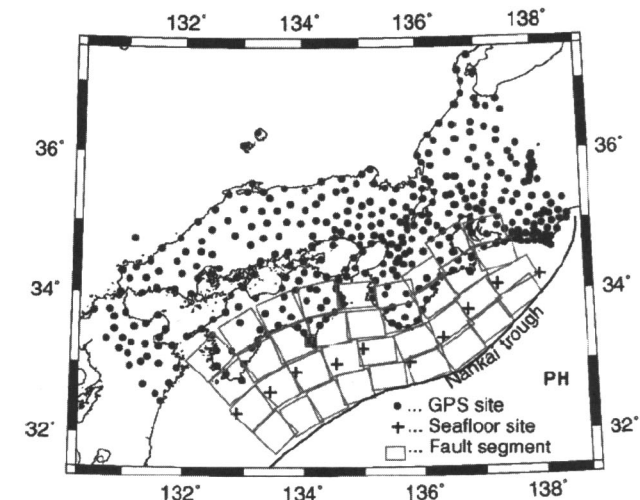


図4 陸上GPSデータから、海底下の断層面上のすべり分布がどの程度推定可能かのチェッカーボードテスト¹⁸⁾。プレート上の断層面は36枚に分けて、それぞれの断層面上に、縦ずれと横ずれを与える。+印は海底地殻変動の位置。

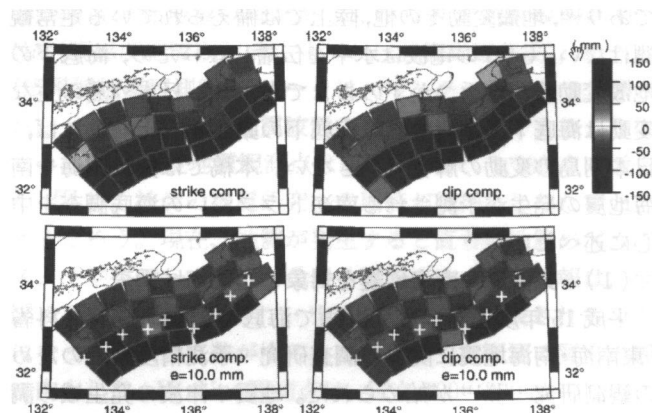


図5（上段）海底地殻変動観測点がない場合は、沖合の2列の断層面上のすべりは、陸上のGPS観測点の地殻変動データからは推定できない。ただし、（下段）のように、沖合の1列目に海底地殻変動装置を、各サブ断層の一つずつ設置するだけで解像度は大きく改善される。ただし、この場合でも、さらに沖合のサブ断層上のすべりは推定できていない。

3) 調査船を介在させて海底の変動を測定する方法、などに大別される。1) は、海底に孔井を掘削し、その中に測定器を設置し、傾斜や歪みを測定するもの。精度は高いが多額の経費が必要。したがって、多数の測定点を設置するのは難しい。一方、海底に測定機を置いて、傾斜を測定する試みもあるが、精度は低い。2) は海底の2点間の水圧の差から上下変動を求める試みや2つのトランスポンダー間で音波を送受信させ伝播時間の変化から距離の変化を求める試み²⁰⁾等が知られている。ただし、測定間距離を十分に取れないのが難点である。3) は、GPSと音響測距の手法を用い、船を介在させて測定する方法で、広域で海底の位置の変動が測定できる²¹⁾。これらの3つの手法にはそれぞれ一長一短あるが、広い海域の地殻変動を高精度で観測するには、3)の手法が最適と思われる。以下、この手法について説明をする。

3.3 音響測距・キネマティックGPS結合方式

図6に測定の概念図を示した。観測船の位置は、移動体

の位置を追跡するキネマティック GPS (KGPS) の手法を用いて決定する。位置が決まった船から、海底の固定局までの距離は、超音波を用いて求める。ここでの位置とは船の姿勢(ピッチング、ローリング、方向)も含まれている。船の位置と測距データを組み合わせ、陸上の固定局に対しての海底局の位置を決める。ここでの主要な誤差は、1) KGPS による位置決定誤差、2) 海水音速構造の時間的および空間的揺らぎにより生ずる。

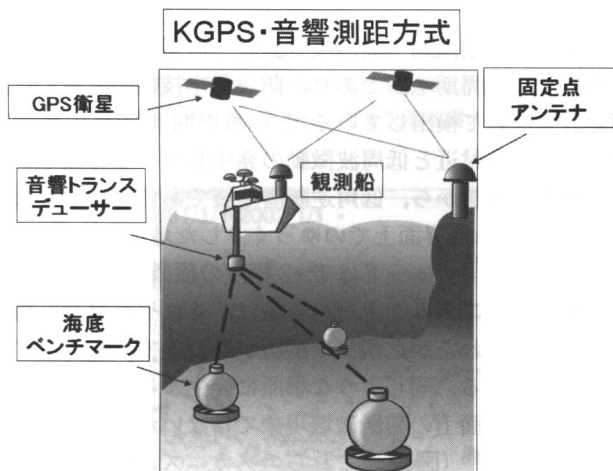


図6 音響測距とキネマティック GPS による、海底ベンチマークの位置を決定する手法。観測船を中継にして、陸上固定アンテナに対して、海底の位置が正確に決まる。

音響測距・KGPS 結合方式において、観測船を用いる際に二つの観測方法がある。

- 1) アレイ測定方式は海底の正多角形の頂点に海底局を設置し、その重心に船を浮かべ、各海底局間の走時を求める方法、
- 2) 単独点測定方式は海底局の周囲を十分に囲んで観測、海底局の位置を求めるもので、震源決定と同じ手法である。

現在、日本列島には、海上保安庁が太平洋側に 16 カ所、東北大学が三陸沖や熊野灘沖、名古屋大学が駿河湾と熊野海盆に海底地殻変動装置を設置し、繰り返し観測を行っている。

3.4 紀伊半島南東沖地震に伴う海底地殻変動

海底地殻変動観測により得られた例をここに示す。名古屋大学では、2003 年より、熊野灘沖の 3 カ所で海底地殻変動観測を実施している。それぞれの観測点には最低 3 台の海底局が設置されている。これらの 3 台の観測を組み合わせ、海底の位置と海水中の音速の変化を同時推定する。熊野灘沖で、2004 年 9 月 5 日に、 M_w 7.2 および M_w 7.4 の地震が発生した²²⁾。これらは、沈み込む海洋プレート内の浅い地震で、メカニズムは、横ずれ成分を伴う逆断層地震である。余震域の北西端から 20 km に、地震前に海底地殻変動観測点が設置されていた。地震の前後の観測から、この地点では 17 cm 南に移動したことが明らかになった(図 7)²³⁾。図には、GEONET による GPS 変位分布も示されている。これらの海底と陸上の地殻変動データと遠震のデータを併せて、より信頼性を増したモデルを推定することが

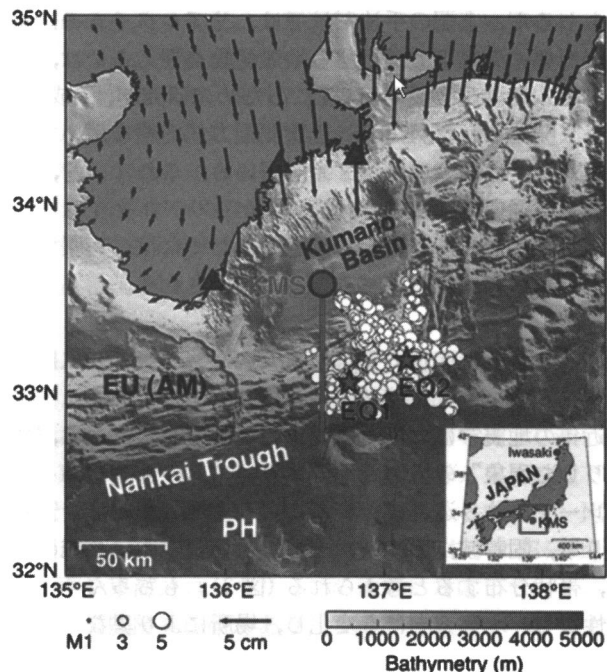


図7 2004 年紀伊半島南東沖地震による海底地殻変動装置(海底ベンチマーク)の変位。熊野灘の矢印は海底地殻変動観測により求められた変位。陸上の矢印は、GPS 観測による(GEONET)。☆印は本震 (M 7.4) と最大前震 (M 7.2) の震源の位置。

できた。

3.5 将来の計画

上記に示したように、海底に 30~60 km の間隔で地殻変動観測装置を設置すれば、海底下で進行する現象を的確に捉えることができる。たとえば、図 8 に示すように、観測点を設置すれば、南海トラフ全域を覆うことができる。ここでは、それぞれの観測点に 3 点の海底測定局を設置する。すべての観測点は、最低年 1 回測定を行い、重要な点はさらに回数を増やして測定するものとする。これだけの数の観測点を測定するには、地殻変動観測の専用船が必要である。ただし、建造費は専用船であればそれほどかからない。100 t 弱で 6 億円程度である。また、年間の維持費は 1.2 億円程度であるから、陸上観測や他の海底観測と比較すれば、対費用効果の高い観測といえるだろう。

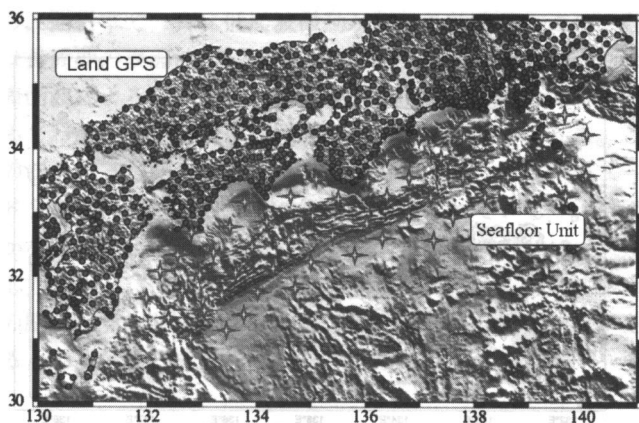


図8 海底地殻変動装置の将来計画案。このように観測点が増えれば、海底下で進行する地殻変動が捉えられる。陸上の点は、GEONET の観測点を示す。

もちろん、上記の手法だけでは、リアルタイムの観測はできない。海底下で進行する地殻変動を捉えるには、リアルタイム観測が必要である。このための研究が、平成18年度より開始された。KGPS・音響測距方式で船を用いているのに対し、代わりに係留ブイを用いる。これにより、海底の動きは通信衛星に送られ、陸上からリアルタイムで追跡できる。もちろん安定して測定するためには、克服すべき課題は多いが、新しい試みとして注目される。

4. ゆっくりした現象

近年の地震学における目覚ましい進展をしたのは、“ゆっくりした現象”の検出とそのメカニズムの解明であろう。プレート沈み込みに伴い、プレート境界面では、安定すべり域、固着域、遷移域、そして再び安定すべり域のような、帯状分布すると考えられる(図3)。もちろん、これらの性質も、水平方向にも変化し、場所により異なる。ゆっくりした現象は、主に、遷移域に発生することが知られている。ゆっくりした現象は、時間スケールでは、数日から数年間かかるものまで、規模では微小地震サイズから、100 km サイズのものまで多様である。以下、最近の話題について簡単に触れたい。

4.1 低周波地震現象

非火山性深部低周波微動：火山地帯では、低周波微動はしばしば観測されるが、非火山地域では珍しい。南海トラフに沿って、四国の西から東海地域まで帯状に分布することが、2001年に発見され、世界に大きな衝撃を与えた(図9)⁴⁾。振幅の小さな震動で、深さ30~40 km付近に発生すると考えられる。長い場合は、2カ月ほど継続されるとのことである。当初は、プレート上面より10~20 kmほど浅い、地殻内との推定もされたが、その後の研究を通して、沈み込むプレート上面にあることがわかってきた。しかも、ゆっくりすべり(後述)に伴い発生することも明らかになった。

深部低周波地震：低周波微動の中には、孤立した現象として読みとれる大きなイベントがある。震源は、このようなイベントを取り出すと、震源やマグニチュードが決める

れる¹⁹⁾。ただし、低周波微動との本質的な違いはないようだ。低周波微動の中の大きなイベントと思えばよいだろう。気象庁は、このようなイベントに印をつけて、通常の地震と一緒に公表している。マグニチュードは1~2程度の極微小地震であり、震央から数十kmの範囲でのみ捉えられることが多い。地震波の解析は、これらの地震の解析から、低角逆断層地震と判断できるようである²⁴⁾。深部低周波地震は、低周波微動の大きなイベントであると結論できるかもしれない。

深部超低周波微動：高感度地震計や広帯域地震計でも捉えられない長周期地震であり、防災科学技術研究所では、傾斜計を用いて検出している²⁶⁾。卓越周期は20~50秒程度であり、海溝付近と低周波微動の発生している帯の中にある。波形の解析から、低角逆断層地震であると推定されている。プレート境界面上でのゆっくりした地震と思われる。ただし、マグニチュードは1~2程度の極微小地震である。

発生のメカニズム：上記の現象は、それぞれ異なる種類の現象と思われたが、観測や解析が進む中で、規模やすべり速度の異なる、同じような場所に発生する、基本的にはプレート境界面上の剪断破壊現象ではないかと考えられるようになった²⁶⁾(図3)。これらのメカニズム解明には、大きな前進がであったと思われる。

4.2 ゆっくりすべり

東海ゆっくりすべり(slow slip)：東海地域では、2000年後半からゆっくりすべりが発生したと言われている。まずこれを理解するには、通常の本列島の変動場を知る必要がある。図10(a)は、GPSが捉えた2000年5月までの西日本の変動の様子である。海洋プレートの沈み込みにより、日本列島が北西に押されているのがわかる。この北東への動きは、太平洋海岸から離れるに従い、しだいに減少する。これを通常の変動と考え、その後、東海地方を中心に様相が変わった。2000年以降の変動の場から、通常の変動場を差し引いた成分、“通常と異なる動き”を異常変動として取り出す(図10(b))。

異常変動は、浜名湖付近から、海に向かって張りだしているように見える。このような動きは、プレート境界面の遷移域に、反対向きにずれを与えると作り出すことができる。このため、この動きは、“東海スロースリップ”と呼ばれるようになった。ゆっくりしたすべりがしだいに加速、ついには不安定すべり、つまり大地震が発生するとの指摘があった。このため関係者は緊張して見守っていた。しかし、その後、東海スロースリップは加速することもなく、2005年末には終息した²⁸⁾(図11)。

東海スロースリップが始まったのは、三宅島の噴火に始まり、神津島の沖合海底下でダイクが貫入した時期と一致する⁶⁾。ダイクの長さは30 km、深さは10 km程度で、貫入したマグマにより、ダイクは2 mほど広がったと推定される。このマグマ貫入により、100 km離れた東京でも、3 cmほど北東に移動した。このマグマ貫入と同じ時期に東海スロースリップが始まったようである²⁹⁾。

2000年以降の東海スロースリップと同じような現象は、

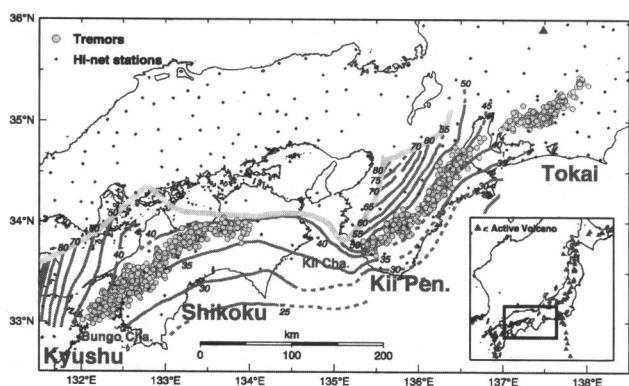


図9 南海トラフ沿いに発見された深部低周波微動の分布図。深さは、ほぼプレートの境界面上に分布すると最近では考えられている。深さは、プレートの深さ、30~40 km付近に集中する。

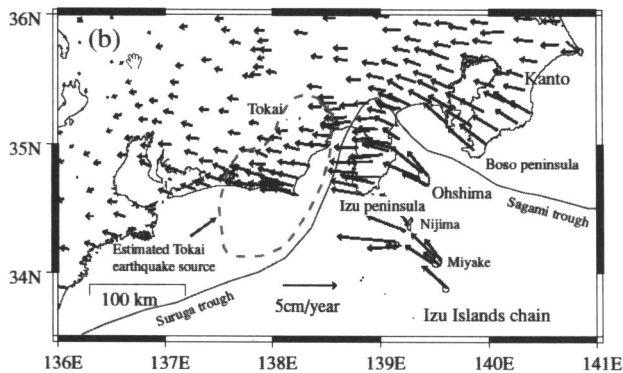


図 10(a) 1998 年～2000 年で観測された中部地方南部での水平地殻変動パターン。波線は、想定東海地震の推定震源域²⁸⁾。

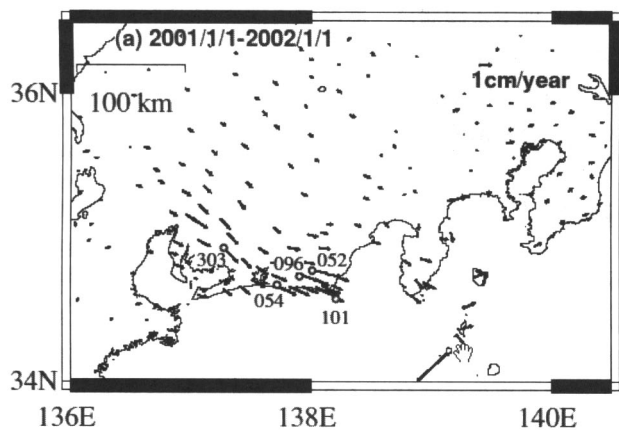


図 10(b) 上記のベクトルが、2000 年後半から食い違いを示してきた。図 10(a)からの食い違う成分を示したもの（2001 年から 2002 年にかけて大きな違いが生じた。）²⁸⁾

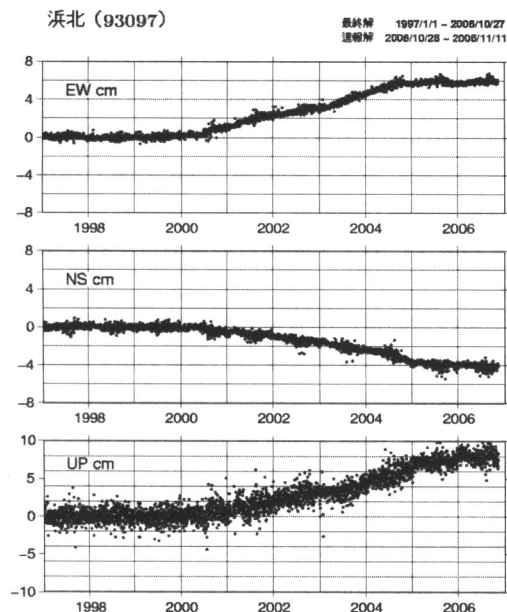


図 11 上記の「異常値」を、東西、南北、上下（上から順）の動きに分けて示したもの（観測点浜北）²⁸⁾。

過去にも起きていた可能性がある。GPS 観測は、1997 年以降であるので、それ以前は、他の観測を参考にする必要がある。名古屋大学では、三河湾と三ヶ日において半年に 1 回程度、レーザー測距儀による辺長測量を続けてきた³⁰⁾。その結果、これらの地域では、短縮と静止を繰り返してきたこ

とがわかった。つまり、太平洋プレートに常に押されているだけでなく、それが止まったり、進行したりを繰り返してきたと推定される。また、防災科学技術研究所によるポアホール型の傾斜計には、東海スロースリップが捉えられていた³²⁾。2000 年からの変動は 3 年間継続している。時間を遡ると 1987 年から 2 年ほど似たような変動が継続していた可能性が高い。このようにしてみると、スロースリップは、遷移域では、断続的に起こる現象である可能性が高い。

東海スロースリップのメカニズム：地震反射法および屈折法によるイメージングから、銭洲海嶺の前の古い海嶺の沈み込みの構造が明らかになった。さらにそれより深い部分に、東海スロースリップに関連すると考えられる地下構造が見つかった。P 波および S 波の観測からポアソン比の断面図が得られている¹⁴⁾。高いポアソン比を示す部分は、強い反射面や東海スロースリップの位置に対応している。ここには、高間隙水圧帯があり、このゾーンがすべりやすくなり、東海スロースリップを引き起こしたとも考えられる。

他の地域のゆっくりすべり：GPS で捉えられているスロースリップイベントは、東海地域に限らず、豊後水道³¹⁾や房総半島³²⁾などにも見つけられている。房総半島のスロースリップは、沈み込む太平洋プレート上深さ 30 km 程度に起きており、同じように遷移域に発生しているようである。ただし、スロースリップの継続時間（始まりから終わりまで）やすべり面の広がり、すべり量の大きさの幅は広い。これらのスロースリップを、モーメントマグニチュードに換算すると、一番大きな東海スロースリップが M_w 7.1、小規模なものは房総沖の M_w 5.0 以下のものまでさまざまある。

4.3 発生時期

低周波微動の活動には、繰り返し周期があるようである。最初にこの規則性が見つかったのは、アメリカ西海岸で進行している、カスケード沈み込み帯であった。それによると 14 カ月ごとに、スロースリップと同時に低周波微動が発生している³³⁾。これらの活動はほぼ 2 週間程度で終息するようである。日本でも同様な周期性や規則性が見つかってきている³⁴⁾。スマトラ・アングマン地震発生後の 12 時間後から、西日本で一斉に低周波微動が起り始めた。この活動は長周期の表面波が到達するたびに励起された。これらの表面波による体積歪み変化は 10^{-8} 程度に過ぎない³⁵⁾。さわめてわずかな応力変化で励起される現象と考えられる。このほか、三重県下で起きた深さ 30~40 km、マグニチュード 2.5 前後の地震で低周波微動が励起されている³⁵⁾。わずかな応力変化により励起されるものと思われるが、ただし、応力変化としては同程度の地球潮汐に対応する低周波微動の励起は見られないことから、周期により異なる特性があるものと思われる。

4.4 ゆっくり現象は西南日本だけに現れるのか？

低周波微動とスロースリップの両方が検出されたのは、南海トラフ、カスケード、メキシコの 3 カ所である。日本

列島付近でも、千島・日本海溝からの沈み込みでは検出されていない。低周波微動の見つかった沈み込み帯では、20 Ma より若く、暖かいスラブが沈み込んでいると考えられる³⁹⁾。南海トラフ沿いでは、深さ30~40 km 付近に、低周波微動が見つまっている。この深さに起こるとしたら、千島・日本海溝では、海岸から50~80 km 沖合に起きるはずである。西日本の低周波微動が、水平距離50 km 以内の観測点で捉えられているため、千島・日本海溝で捉えられない可能性もある。

一方、これらの低周波微動が、地下温度に関連した鉱物の脱水反応による間隙水圧の上昇によるものとし、沈み込み系の相変化ダイアグラム³⁹⁾を用いると、日本海溝に沿う冷たいスラブと南海トラフに沿う暖かいスラブの沈み込み帯では、脱水反応は、前者では40 km 以深、後者では120 km 以深で発生する可能性がある。したがって、三陸沖では深いゆえに捉えられないか、そもそも発生していない可能性もある。したがって、千島・日本海溝沿いで発生していない理由は、冷たいスラブの沈み込み帯のためかもしれない

4.5 ゆっくり現象と地震前兆現象との関連

東南海地震直前の変動：南海トラフの地震は、前兆現象の記録がいくつかある。1944年掛川付近での水準測量では、東南海地震発生後の12月7日午前中に水準測量していたところ、700 m の区間で4 mm の誤差を超えることが2回起きたこと、そして地震直前に水準儀を覗いたところ泡が定まらず、読めなかったなどの報告があり、ゆっくりした変動があったのではないかと考えられていた³⁸⁾。ところが、700 m の単位の測量区間で4 mm を超える誤差は、3週間の測量期間中に4回起きており、そのうち2回は再度計り直したところ、誤差であることが確認された³⁹⁾。残る2回は、地震発生直前に起きた。ただし、これらの測定区間は、地震により地殻変動を起こしているため、誤差か否か確認するための再測は行われていない。2回続けて地震直前に起きたのは偶然にしては珍しいが、ただし他の期間で発生した2回は改測により誤差と判明した。3 mm の誤差が20回起きていることを考えると、測量誤差であるか否か判断できないことである。

地下水の変化：1946年南海地震後行われた海上保安庁水路部による聞き込み調査の結果、四国から紀伊半島にかけて広域に井戸水の水位や濁りなどの変化が生じていたことが判明している^{40),41)}。また、地震1週間前ほどから水位が下がったとの報告もある。これらは、沿岸部の構造物の調査と一緒に行われたものであった。ただし、水位の変化や混濁物についての記述は短く、詳細が不明な部分も多い。

1946年南海地震時の地下水変位は、道後温泉で測定されていた⁴¹⁾。道後温泉で地震後水位の測定を行った4つの温泉井戸は、地震時にすべて下がった。その内の1つの観測井では15 m も降下し、地震前のレベルに回復している。これらの地震時および地震前の地下水の変化は、断層上のすべりにより生じた体積変化で説明できるとされている⁴¹⁾。推定される地震前のすべりは1 m に達するため、この程度

の大きさならば、リアルタイムGPSでも十分に捉えられる変化である。

似たような変化は、1854年安政南海地震前にも発生したとのことである。高知には、“長者の井戸”の言い伝えがあるそうである(川邊岩夫私信)。“もしも井戸が枯れたら糶をその井戸に投げ入れて保管しておく。そうすると津波がその内に、襲ってくるが、家屋や家財道具が流されても、糶は井戸の中に残り、その糶を春になって蒔けば、稲が実り、長者になる”とのことである。これは、地震が春の前に起こることを示唆しており、1707年10月28日宝永地震、1854年12月24日安政地震前の話とも考えられる。出典は不明であり、詳細はわからないが、事実とするならば、次の地震の前に再び起こる可能性があるかもしれない。

現在、地下水観測は、産業総合研究所が中心となり、伊豆半島、三宅島を含め西南日本の50カ所以上で測定が進められている。今後は、2 km におよぶ深井戸の観測を行う予定とのことである⁴²⁾

おわりに

ゆっくりしたすべりや低周波地震の観測例や解析手法が進んできた結果、それらがプレート上面でのすべり現象により説明できることがわかりつつある。これらの現象が、巨大地震の発生に結びつく今後の観測が待たれるところである。

地震予知や予測には、力学的手法による観測を深く追究するだけでは達成されまいだろう。地球深部の信号は、力学的、電磁気学、地球化学的なものとして現れる。最初からその内の一つに絞ってしまえば、可能性を自ら絶つようなものである。たとえば、広域の電磁気観測としては、すべてを合わせても全国で40数カ所の観測に過ぎない。地殻の電磁気物性の不均質性は力学物性の不均質性に比べた違いに大きい。少なくとも50年間、連続、精密、高密度の種々の観測を続けるべきである。このような長期にわたる観測を通して、必ずや意味のある信号が取り出せるはずである。

地震予知の目的は、地震防災軽減のためであるが、現在は、確かな予知情報は流せない状態である。現状では、あくまで研究段階であり、これを防災に直接適用することはできない。従来、地震予知計画の名目で幅広い研究を行ってきた。緊急地震速報などは、このような研究を通して可能となってきた副産物と言えよう。地震予知研究としてきた成果の貢献は少なくない。しかし、これからは、地震予知研究が、地震研究のすべてを担う必要がない。今後は、基礎研究を基に、地震防災の研究、即時対応の研究、地震予知の研究を並行して進めるべきであろう。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：地震観測施設一覧 http://www.jishin.go.jp/main/p_chousakansoku01.html
- 2) 独立法人防災科学技術研究所：研究分野の紹介「地震研究部」
<http://www.bosai.go.jp/>

- 3) 気象庁：震度観測点, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/intens_st/index.html
- 4) Obara : Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681, 2002.
- 5) 国土地理院：「日本列島の地殻変動」 <http://mekira.gsi.go.jp/index.html>
- 6) Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N. and Miyazaki, S.: A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3237-3240, 1999.
- 7) Yamaoka, K., Kawamura, M., Kimata, F., Fujii, N. and Kudo, T.: Dike intrusion associated with the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, *Bull. Volcanology*, 67, 231-242, 2005.
- 8) Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T.: Continuous GPS Array and present-day crustal deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322, 2000.
- 9) Miyazaki, S., Larson, K. M., Choi, K., Hikima, K., Koketsu, K., Bodin, P., Haase, J., Emore, G. and Yamagiwa, A.: Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Okii (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21603, doi: 10.1029, 2004.
- 10) 海洋研究開発機構：海底ケーブルデータセンター, http://www.jamstec.go.jp/scdc/top_j.html
- 11) 東京大学地震研究所：東南海・南海トラフ地震等海溝型地震に関する調査研究, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/nankai/index.html>
- 12) Kodaira, S., Nakanishi, A., Park, J.-O., Ito, A., Tsuru, T. and Kaneda, Y.: Cyclic ridge subduction at an inter-plate locked zone off central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 30: 1339, 2003.
- 13) Park, J.-O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P. R. and Kaneda, Y.: Splay Fault branching along the Nankai subduction zone, *Science*, 297, 1157-1160, 2002.
- 14) Kodaira, S., Iidaka, T., Kato, A., Park, J.-O., Iwasaki, T. and Kaneda, Y.: High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai Trough, *Science*, 304: 1295-1298, 2004. <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/maritec/donet/info0626/gairyaku.html>
- 15) Hori, T.: Mechanisms of separation of rupture area and variation in time interval and size of great earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, *J. Earth Simulator*, 5, 8-19, 2006.
- 16) Sakai, S. and Yamada, M.: Urgent aftershock observation of the 2004 off the Kii Peninsula earthquake using ocean bottom seismometers, *Earth Planets Space*, 57, 363-368, 2005.
- 17) 海洋研究開発機構：地震・津波観測監視システム, <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/maritec/donet/index.html>
- 18) Nishimura, S., Ando, M. and Tadokoro, K.: Numerical Simulation for the Improvement of the Resolution on the Offshore Faults by Using Ocean-Bottom Crustal Deformation Data, *Phys. Earth Planet Inter.*, 2005
- 19) 海洋開発研究機構：CHIKYU HAKKEN, <http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/jp/Expedition/NantroSEIZE/index.html>
- 20) 長屋好治：VENUS計画における地殻変動観測, *海洋*, 28, 4, 241-246, (海洋出版), 1999.
- 21) Spiess, F. N., Chadwell, C. D., Hildebrand, J. A., Young, L. E., Purcell Jr., G. H. and Dragert, H.: Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 108, 101-112, 1998.
- 22) Baba T., Cummins, P. R. and Hori, T.: Compound fault rupture during the 2004 off the Kii Peninsula earthquake (M 7.4) inferred from highly resolved coseismic sea-surface deformation *Earth Planets Space*, 57, 167-172, 2005.
- 23) Tadokoro, K., Ando, M., Ikuta, R., Okuda, T., Besana, G., Sugimoto, S. and Kuno, M.: Observation of coseismic deformation due to M7 class offshore earthquakes, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 2006 (in press).
- 24) 井出 哲・中村 祥・D. Shelly・G. Beroza：四国西部の深部低周波地震の震源メカニズム推定, 日本地震学会講演予稿集 2006年度秋季大会, p 6, 2006.
- 25) Obar, K. and Ito, Y.: Very low frequency earthquakes excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquakes: A dynamic deformation process in the large accretionary prism, *Earth Planets Space*, 57, 321-326, 2005.
- 26) 小原一成・伊藤喜宏・関根秀太郎：沈み込むプレート境界遷移領域で同時に発生する3種類のスロー地震, 日本地震学会講演予稿集 2006年度秋季大会, p. 9, 2006.
- 28) 国土地理院：東海地方の地殻変動, <http://cais.gsi.go.jp/tokai/>
- 29) Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yurai, H. and Nishimura, T.: Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, Central Japan, *Science*, 298, 1009-1012, 2002.
- 30) 木股文昭・山内常生：光波測距による東海地域における辺長変化(1978-1997年), *地震*, 51, 229-232, 1998.
- 31) Ozawa, S., Murakami, M. and Tada, T.: Time-dependent inversion study of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 787-802, 10.1029/2000 JB 900317, 2001.
- 32) Sagiya, T.: Interplate coupling in the Kanto district, central Japan and the Boso silent earthquake in May *PAGEOPH*, 161, 2601-2616, 2004.
- 33) Rogers, G. and Dragert, H.: Episodic tremor and slip on the Cascadia Subduction Zone: the chatter of silent slip, *Science*, 300, 1942-1943, 2003.
- 34) 小原一成：深部低周波微動の時系列的特徴—トリガー現象と周期性—, *地学雑誌*, 112, 6, 837-849, 2003.
- 35) Masatoshi Miyazawa and Jim Mori: Evidence suggesting fluid flow beneath Japan due to periodic seismic triggering from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L 05303, doi: 10.1029/2005GL025087, 2006.
- 36) Hyndman, R. D., Wang, K. and Yamano, M.: Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust, *J. Geophys. Res.*, 100, 15373-15392, 1995.
- 37) Peacock, S. M., and Wang, K.: Seismic consequences of warm versus cool subduction zone metamorphism: Examples from northeast and southwest Japan, *Science*, 286, 937-939, 1999.
- 38) 越山敏郎：東南海地震時の水準測量, *国土地理院時報*, 100, 7-8, 1976.
- 39) 鷲谷 威：1944年東・南海地震の前兆的地殻変動再考, *月刊地球*, 26, 11, 746-753, 2004.
- 40) 海上保安庁水路部：水路部要報「昭和21年南海大地震調査報告」, 1948.
- 41) 川辺岩夫：地震に伴う地下水・地球化学現象, *地震* 第2輯, 44: 341-364, 1991.
- 42) 産業総合研究所, 地下水総合観測ネットワーク, <http://www.aist.go.jp/RIODB/gxwell/GSJ/tmp2/gaiyou.html>

全国を概観した地震動予測地図

ふじ 原 藤 原 広 行*

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、わが国の地震防災対策に関して多くの課題を残した。特に地震に関する調査研究においては、その研究成果が国民や防災機関に十分伝達される体制になっていないとの指摘がなされた。この地震の教訓を踏まえ、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、議員立法により、平成7年7月に地震防災対策特別措置法が制定され、同法に基づき、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明確にし、これを政府として一元的に推進するため、政府の特別の機関として、地震調査研究推進本部が総理府に設置（現在：文部科学省に設置）された。

地震調査研究推進本部は、平成11年4月に、今後10年間程度にわたる地震調査研究の基本方針、活動の指針として、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」（以下では総合基本施策と呼ぶ）を策定した。総合基本施策では、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を基本的な目標に掲げ、当面推進すべき地震調査研究として以下の4つを主要な課題とし、このために必要な調査観測や研究を推進するとした。その4つの課題とは、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域およびその周辺における観測等の充実、および④地震予知のための観測研究の推進である。特に、地震動予測地図の作成は、推進すべき主要課題の筆頭に掲げられ、これに基づき地震調査研究推進本部地震調査委員会では、平成16年度末を目標として、「全国を概観した地震動予測地図」の作成が開始され、平成17年3月に完成し公表¹⁾された。独立行政法人防災科学技術研究所では、「全国を概観した地震動予測地図」の作成に資するため、平成13年4月より、特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」を立ち上げ、地震動予測地図の作成に資する技術的な検討および地図の作

成作業を行ってきた。

2. 地震動予測地図とは

地震調査委員会により公表された「全国を概観した地震動予測地図」は、地震発生の長期的な確率評価と、地震が発生した時に生じる強震動の評価を組み合わせ、わが国で発生する可能性のあるすべての地震を考慮して作成された「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な物理モデルに立脚した強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されている。

「全国を概観した地震動予測地図」は、兵庫県南部地震の教訓を踏まえ充足した地震調査研究推進本部のこの10年間の調査研究の成果の集大成として位置づけられるものであり、地図の作成に必要なデータまで含めると膨大な量の情報を含んでいる。

3. 確率論的地震動予測地図

地震の発生およびそれに伴う地震動の評価（地震ハザード評価）は、現状では数多くの不確定要素を含んでいる。現状の地震学・地震工学のレベルでは、将来発生する可能性のある地震について、地震発生の日時、場所、規模、発生する地震動等について、決定論的に一つの答えを準備することは困難である。こうした不確定性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的手法である。確率論的地震動予測地図を作成するために、以下に述べる手法に従った地震ハザード評価が採用されている。地震ハザード評価とは、ある地点において将来発生する「地震動の強さ」、「対象とする期間」、「対象とする確率」の三つの関係を評価するものである。確率論的地震動予測地図作成における地震ハザード評価の大まかな手順は、以下に示すとおりである。

- ① 地震調査委員会による地震の分類に従い、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ② モデル化したそれぞれの地震について、地震調査委員会の長期評価結果（図1）に基づき、地震の発生確

* 独立行政法人防災科学技術研究所 プロジェクトディレクター

率を評価する。

- ③ 地震の規模と位置が与えられた場合の強震動評価のための地震動強度に対する確率モデルを設定する。
- ④ モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さが、ある値を超える確率を評価する。
- ⑤ 上の操作をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせることで、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さが、ある値を少なくとも一度を超える確率を計算する。

このようにして、地点ごとに地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち二つを固定して残りの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である(図2, 3)。

「確率論的地震動予測地図」では、日本全国を約1 kmメッシュに分割し、工学的基盤(S波速度400 m/s)での最大速度を求め²⁾、別途モデル化した表層地盤増幅率³⁾を用いて地表での最大速度およびそれより変換した計測震度⁴⁾の計算を行っている。

「確率論的地震動予測地図」は、今後発生し得るすべての地震を考慮したもので、地域ごとの地震ハザードの相対評価を行うための基本的な情報として利用可能である。ただし、地表での震度の予測値は、約1 kmメッシュでの簡便な手法を用いたもので、ある地域内での詳細な情報が必要な場合には、別途検討を加えることが必要である。

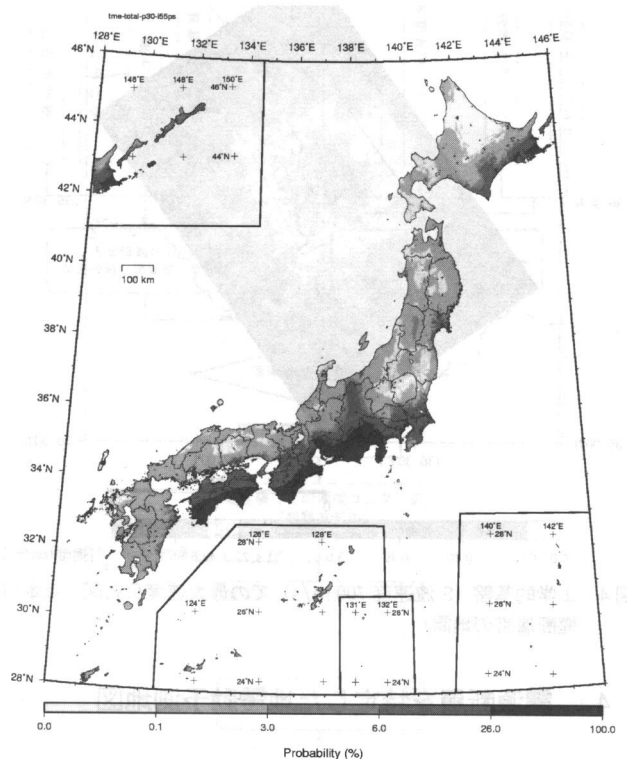


図2 今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図。基準日は2006年1月1日(地震調査委員会公表)

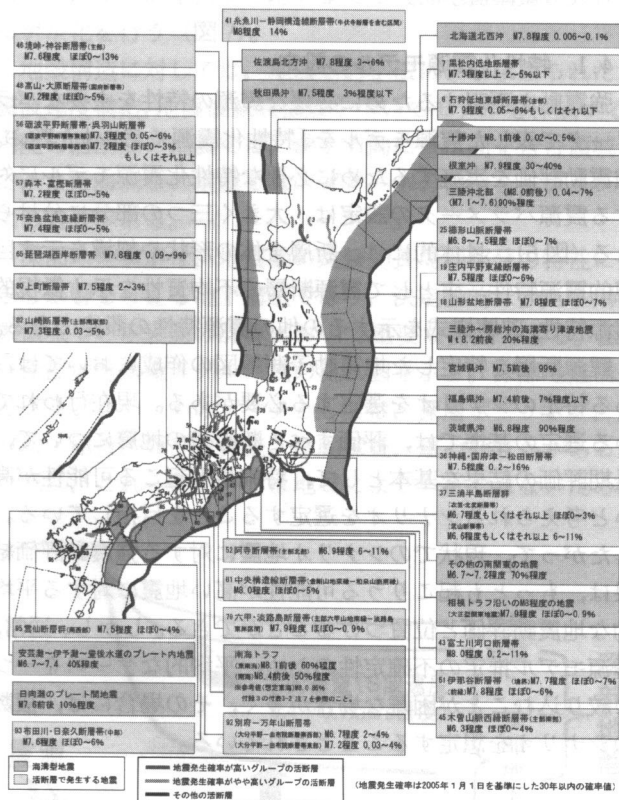


図1 主要98断層帯の位置および海溝型地震の発生領域と主な地震についての長期評価結果に基づく地震発生確率(地震調査委員会公表)

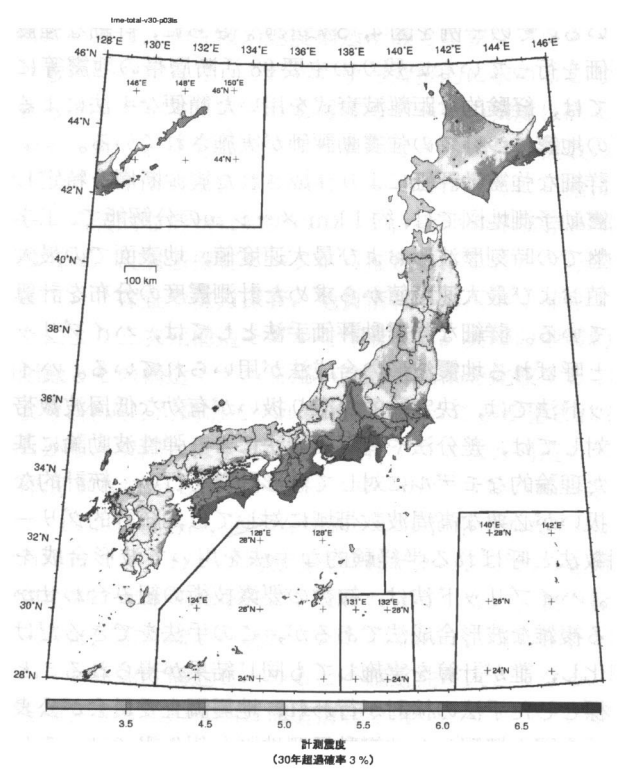


図3 今後30年以内に3%の確率で一定の震度以上に見舞われる領域図。基準日は2006年1月1日(地震調査委員会公表)

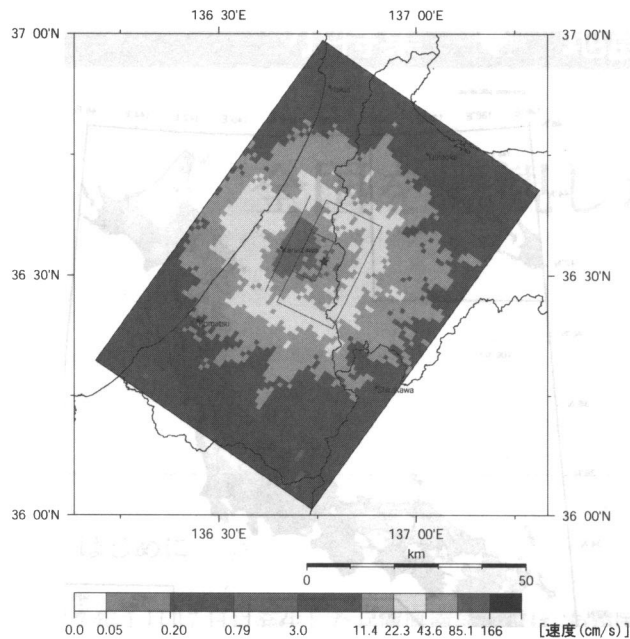


図4 工学的基盤 (S波速度 700 m/s) での最大速度分布図 (森本・富樫断層帯の地震)

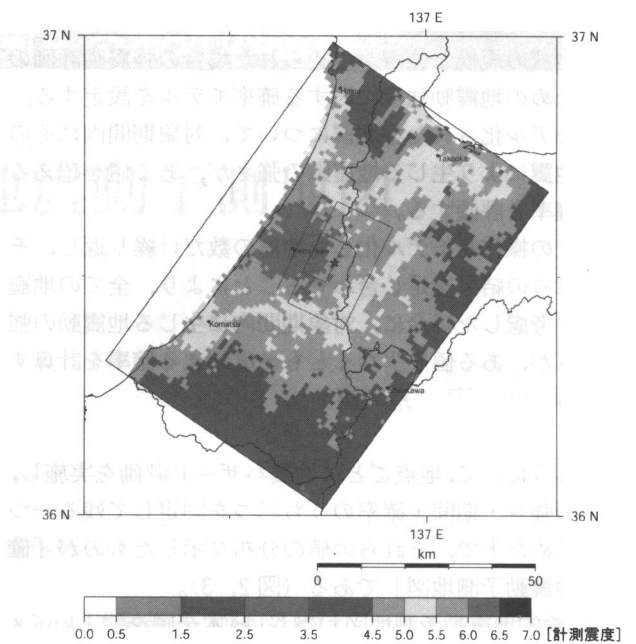


図5 地表での計測震度の分布図 (森本・富樫断層帯の地震)

4. 震源断層を特定した地震動予測地図

地震発生の長期評価により発生確率が高いと評価された地震の一部については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価手法を用いた震源断層を特定した地震動予測地図が作成されている。これまでに11の断層帯および四つの海溝型地震に対して強震動評価あるいは検証がなされ、その結果が公表されている。その一例を図4, 5に示す。さらに、詳細な強震動評価を行っていない残りの主要98活断層帯の地震等については、経験的な距離減衰式を用いた簡便な手法による個別の地震についての強震動評価が実施されている。

詳細な強震動評価により作成された震源断層を特定した地震動予測地図では、約1 kmメッシュの分解能で、工学的基盤での時刻歴波形および最大速度値、地表面での最大速度値および最大速度値から求めた計測震度の分布を計算されている。詳細な強震動評価手法としては、ハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、差分法や有限要素法による弾性波動論に基づいた理論的なモデルに対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を行う。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われ、地震調査委員会が公表した「全国を概観した地震動予測地図」報告書では、それら検討結果が、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(レシピ)」(以下「レシピ」と呼ぶ)としてまとめられている。

「レシピ」は、強震動予測手法の構成要素となる要素技術

について、その手法や考え方をとりまとめたものである。「レシピ」では、震源断層を特定した地震を想定した場合の強震動を高精度に予測する手法が述べられており、今後も新たに得られる知見を反映して、修正を加え改訂されていくことが前提とされている。「レシピ」による強震動予測の手順は、(1) 特性化震源モデルの設定、(2) 地下構造モデルの作成、(3) 強震動予測計算手法(ハイブリッド法)からなる。

4.1 特性化震源モデルの設定

強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータで表した震源モデルを「特性化震源モデル」と呼ぶ。強震動評価を実施するために必要な特性化震源モデルに対する震源パラメータの設定は、大きく三つの部分に分けられる(図6)。具体的には、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊様式を示すその他の震源特性の設定である。

震源断層を特定した地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、評価すべき断層帯の地震について、長期評価の結果を基本として、将来最も起こる可能性が高いと考えられるシナリオを選定することを目指している。したがって、現状でのシナリオ地震に対する強震動評価結果は、もっとも起こりうる可能性が高い地震に対する平均的な地震動評価と位置づけることができる。しかし、通常、震源モデル推定の不確定性のため、平均的なケースを一つに絞り込むことが困難な場合が多く、その場合には、複数のシナリオを想定することとされている。

4.2 地下構造モデルの作成

地下構造のモデル化では、上部マントルから地震基盤(S波速度 3 km/s 相当層)までの地殻構造、地震基盤から工学

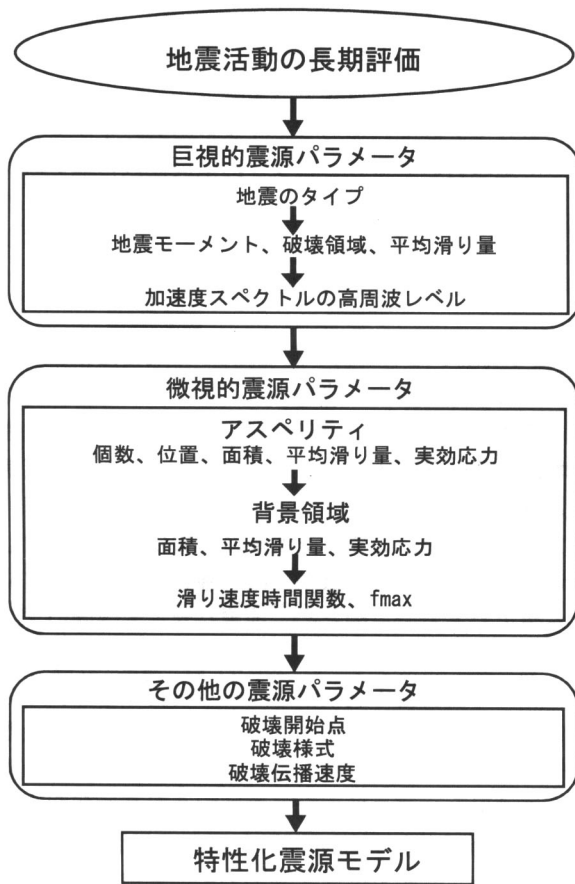


図6 震源パラメータの設定

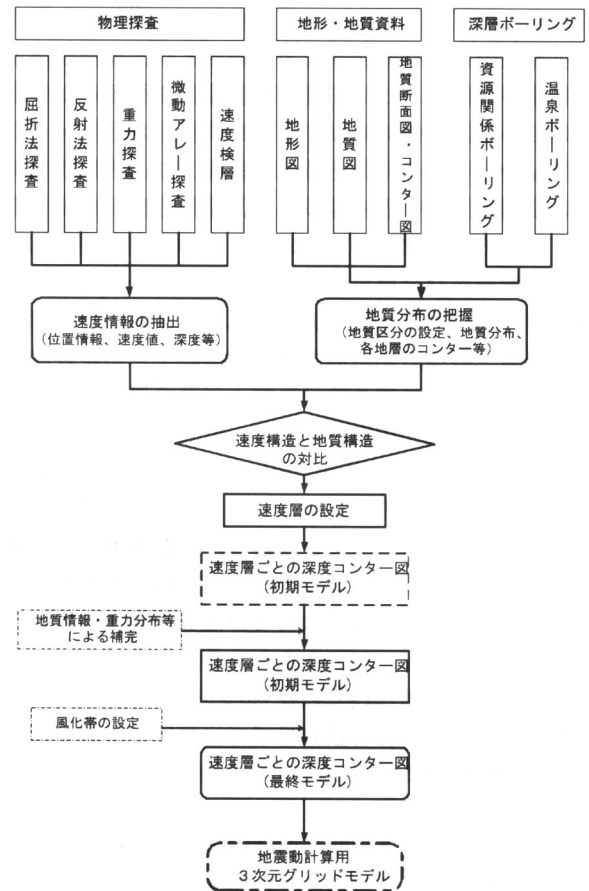


図8 深部地盤構造モデルの作成

的基盤 (S波速度 400 m/s~700 m/s 相当層) までの深部地盤構造, 工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けてモデル化を行う (図7)。

地殻構造に対しては, 地震学的手法により求められた地震波速度構造, 地震波減衰構造を用いてモデルを作成する。内陸の活断層の地震では, 深さ方向にモホ面を含む領域まで, また海溝型の地震では, プレート構造をモデリングする必要がある。

深部地盤構造は, 地震動の比較的長周期部分の特性に大きな影響を与える地下構造であり, 決定論的に扱える周波数領域での地震動の計算において重要な要因となる。図8に深部地盤構造モデル作成の流れ図を示す。深部地盤構造モデリングのためのデータとしては, 深層ボーリング, 反射法・屈折法弾性波探査, 微動探査, 重力探査等がある。ただし, これらのデータは地域により一様ではないため,

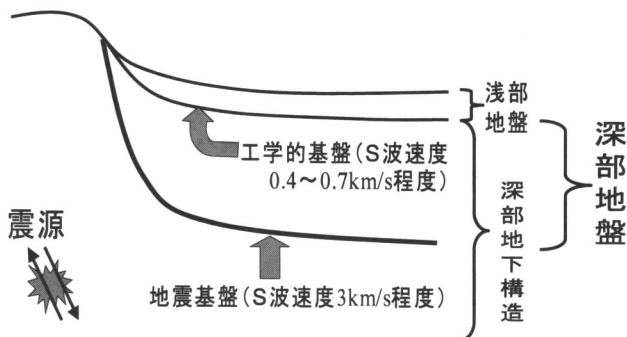


図7 地下構造モデルの概念図

地域ごとに, データの蓄積の状況に応じたモデル作成の考え方が必要となる。強震動評価のための地下構造モデリングにおいては, 弾性波の速度構造が最も重要なパラメータとなる。したがって, これらの値を直接的に求めることのできるデータが多く得られるほどモデル化の精度は高まると考えられる。十分なデータが利用できる場合, 複数の深層ボーリングデータにより速度構造を各点ごとに正確に把握し, 広域的な形状は屈折法データ, 山地境界部等の詳細な構造は, 反射法探査データから推定し, それらの隙間を微動アレイ探査や重力探査, 地質情報等を用いて補完することにより三次元構造モデルを作成する。実際の地震動観測記録とその構造モデルを用いた計算結果を比較することにより, 作成した構造モデルの検証を行うことが望まれる。

しかし, 実際には上述した手法により三次元構造モデルを作成するに足る情報が十分に得られていない場合が多い。このような場合, 面的な情報として利用可能なものは, 重力探査データおよび地質構造情報であり, これらを用いて間接的に速度構造を推定しなければならない。重力探査データは, 密度構造を反映したものであり, 重力探査データのみから速度構造を求めると不確定性が大きくなる。これを補完するために地質構造情報を用いたモデリングが行われている。

浅部地盤構造のモデル化では, 表層地質データやボーリングデータを用いて地盤構造モデルを作成することが基本となる。ただし, 浅部地盤構造は局所的な変化が大きく, 面的に精度良く広域を覆う浅部地盤モデルを作成するため

には、膨大なデータ収集が必要となる。そのため、現状では、広域での面的な評価が必要な場合には、簡便な表層地盤増幅率の評価法として、国土数値情報を利用した手法³⁾を用いている。具体的には、全国を網羅した3次メッシュ(約1 kmメッシュ)の国土数値情報のうち、地形区分データおよび標高データ等に基づいて、微地形区分データを作成し、それぞれの微地形区分に対して標高や主要河川からの距離を考慮した経験式を用いて、表層30 mの平均S波速度を計算し、次に、表層30 mの平均S波速度と工学的基盤から表層への地震動の最大速度の増幅率との経験的な関係式を用いて、それぞれのメッシュごとの浅部地盤による最大速度の増幅率を得る。

一方、浅部地盤に対する情報が十分に収集可能な場合は、より詳細なモデル化の手法として、多数のボーリングデータおよび地形・地質データを収集し、地形・地質から区分できる地域ごとに代表となるボーリング柱状図を抽出し、これをメッシュごとに当てはめる方法も検討されている。

4.3 強震動予測計算手法(ハイブリッド法)

地震動の特性は、低周波数帯域では弾性波動論に基づいた決定論的な物理モデルによる理論的考察によりある程度定量的に説明可能であることが、過去に起きた地震動の記録を解析することにより明らかにされてきている。一方で、高周波数帯域では、震源のモデル化および地下構造のモデル化の双方において、物理モデルに基づく理論的な予測に必要とされるパラメータ決定のための情報量が不足し、不確定性が急速に大きくなるため、事実上決定論的な予測が困難となり、統計的手法の導入が必要となる。詳細な手法による強震動評価では、周波数帯域が0.1 Hz~10 Hz程度の地震動を評価することを目指しており、この周波数帯域には、上述した低周波数帯域および高周波数帯域の両方、そしてそれらの中間の遷移周波数帯域が含まれている。

このように物理的性質の違う2つ周波数帯域を含んだ広周波数帯域に対して強震動の評価を行うためには、それぞれの周波数帯域の特徴を活かした計算手法を用いることが最も効率的である。ハイブリッド法は、このような背景の中で提案された手法である。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、差分法や有限要素法により弾性波動論に基づいた理論的なモデルに

対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法⁵⁾と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を行う。最後に遷移周波数領域においてそれぞれに対してマッチングフィルター処理を施して重ね合わせることで、全周波数帯域での計算を行う(図9)。

5. 地震動予測地図公開システム

「全国を概観した地震動予測地図」の作成のためには、活断層・地震活動に関する情報や地下構造に関する情報等の大量の情報が用いられていると同時に、それら情報に基づいた地震ハザード評価のために、各種の評価手法や判断が取り入れられている。

一方、現状では、こうした大量の情報に基づいたとしても、地震ハザード評価には多くの不確定性が残存していることも事実である。このため、地震ハザード評価のプロセスにおいては、さまざまなレベルにおいて客観的な科学的手法に加えて、各種の判断がなされる場合がある。このため、こうした不確定性評価のプロセスを経て作成された地震動予測地図は、利用目的・利用者によっては、その最終的な評価結果としての地震動予測地図のみの情報開示では不十分な場合があり、その評価プロセスで用いた手法や判断および用いた情報を併せて開示することが望ましいと考えられる。また、地震動予測地図のユーザは、一般市民、行政担当者、技術者、研究者など多岐にわたると考えられ、それぞれの立場で必要とする情報項目も異なることが予想される。このように、地震ハザード評価に関する情報開示に対しては、多様なニーズに応えられるような開示情報項目の多様性が要求されるとともに、最終的な評価結果だけでなく、不確定性の評価プロセスで用いた手法や判断、用いた情報など階層的な構造を持つ情報群について広く公開されることが望ましいと考えられる。このような観点から「全国を概観した地震動予測地図」は、単に最終成果物である「予測地図」そのものだけが強調されるのではなく、日本全国に対する地震ハザード評価に関わる各種情報をとりまとめ、多様なニーズに対応可能なように情報を整理・処理するプロセスを含めた地震ハザード評価に関する情報群としてとらえることが重要である。これは、言い換えれば、地震ハザードの共通情報基盤として「全国を概観した地震動予測地図」を位置づけることと解釈することができる。このためには、情報作成者側と利用者側を結びつけるためのインターフェースの整備が不可欠となる。このため、防災科学技術研究所では、「全国を概観した地震動予測地図」に関する情報を、インターネットを利用して公開するためのシステムの開発に取り組み⁶⁾、「地震ハザードステーションJ-SHIS」(図10)として、平成17年5月9日より運用を開始した(<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)。

6. 今後に向けて

「全国を概観する地震動予測地図」は、今後も継続的に改

強震動予測手法(詳細法:ハイブリッド法)

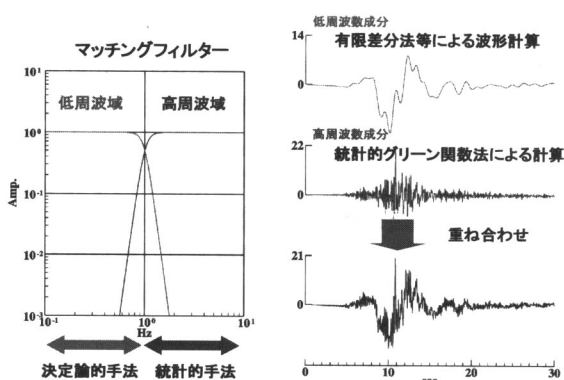


図9 ハイブリッド法概念図

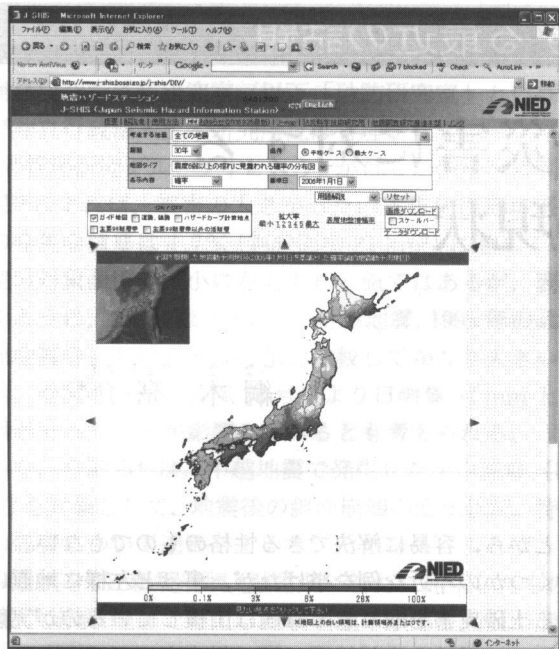


図 10 地震ハザードステーション J-SHIS の表示例

良され、よりよいものとなっていくことが望まれる。このため、今後の課題をまとめる。

98 主要断層帯の地震に対する地震活動の長期評価においては、BPT 分布を用いた評価が行われているが、評価に必要な情報量の不足のため、最新活動時期および平均発生間隔が幅を持って評価され、その結果として地震発生確率が幅を持って評価されている場合が多い。確率論的地震ハザード評価においては、幅を持って評価された発生確率の扱いが今後の課題である。

確率論的ハザード評価における強震動評価の課題として、発生確率が高い地震に対する低確率の強震動評価の信頼性の問題がある。現状の評価では、強震動の生起確率の計算に距離減衰式のバラツキが用いられている。この場合、強震動レベルが、経験的距離減衰式のバラツキの分布の裾野の形状で決まる場合があり、過大評価になる可能性が指摘されている。強震動評価のばらつきの要因についての整理およびばらつきの設定法についてのさらなる検討が必要である。さらに、距離減衰式のバラツキだけでなく、詳細法による各点ごとのバラツキ評価の検討も重要な課題である。

震源断層を特定した地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われて

いる選定の基準では、将来最も起こる可能性が大きなシナリオを選定することになっている。しかし、将来発生する地震について、これまでの調査で得られた情報は限られており、シナリオの選定においては多くの不確定要因を抱えた状況での判断が必要となる。このため、パラメータ設定の不確定性に伴う評価結果のバラツキの評価が重要な課題となっている。

また、ハイブリッド法の精度を上げるためには、前述した三つの要因について、計算技術の高度化、震源モデルの高度化および地下構造モデルの高精度化が不可欠である。

特に、震源および地下構造に関しては、地震観測網の充実および地下構造調査、地下構造情報のデータベース化が研究発展にとって不可欠である。地下構造は、我が国固有のものであり、それに関する情報は、国民共有の知的財産であるとも考えられる。しかしながら、過去我が国においては各種の目的で膨大な地下構造調査が実施されてきたが、それらに関するデータの中には十分活用されないまま死蔵の状態にあるものも少なくなく、データの一部は散逸の危機にある。現状では、我が国には地下構造・地質情報を網羅したデータベースが存在しない。データの散逸を防ぎ、誰でもが利用可能なデータベースを構築することは火急の国家的課題であるとも言える。特に、地下構造・地質情報は、さまざまな目的を持った調査の結果得られることが多いため、関連するデータが各省庁・自治体・関係機関等に散在して存在している。関係機関の連携のもとこれらデータを統合化した地下構造データベースを構築することが望まれる。

参考文献

- 1) 地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書，2005。
- 2) 司 宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，63-70，1999。
- 3) 藤本一雄・翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定，日本地震工学会論文集，第 3 巻，第 3 号，13-27。
- 4) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，第 1 巻，51-56。
- 5) 壇 一男・佐藤俊明：断層の非一様滑り破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測，日本建築学会構造系論文集，509，49-60，1998。
- 6) 防災科学技術研究所：「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—」：防災科学技術研究所研究資料 第 258 号，2004。

地震に起因する土砂災害に対する 危機管理の現状

つな き りょう すけ
綱 木 亮 介*

1. はじめに

一般的に土砂災害は降雨が直接的な誘因となって発生するケースが多い。一部の専門家を除いて、一般社会での受け止め方も、長い間おおむね同様の認識であったと思われる。しかし、新潟県中越地震（以下「中越地震」と記す）の発生以来、地震が誘因となって発生する土砂災害に対する関心が非常に高まっている。筆者の個人的な印象ではあるが、特に次の2点において、地震時の土砂災害への対処が切迫した課題であることが再認識されたものと考えられる。

第一に、中越地震においては、きわめて多数かつ多様な土砂災害が発生したこと自体が、最近では例がない現象として受けとめられたこと。したがって、二番目に、今後襲来すると考えられている東海・東南海・南海地震や、ある地域での直下型地震によって、どのようなタイプの土砂災害のリスクがどの程度想定されるのか、事前に把握したり対処したりすることが現実的に重要視されるようになったこと（言い換えれば、「当事者意識」がさらに高まったということ）。

ところで、地震に起因する土砂災害への対処としては、震前および震後に大別される。例えば、震前においては危険箇所を抽出しておくことが基本的な事項である。しかしながら、実務的なレベルにおける地震時の土砂災害危険箇所の判定・抽出手法に関する調査研究等は緒についたばかりで、満足できるだけの精度や汎用性を有する手法が開発されたとは言い難い状況にある。斜面や流域の特性が簡単には把握できないのと同時に、地震動が斜面に対してどのような影響を及ぼすのか定量的な評価がきわめて難しいことが、主たる原因であるものと考えられる。

また、震後の対応では、いかに短時間で初動体制を整えられるか、いかに短時間のうちに被災地に効率的に緊急対策を施すか、といった点がさしあたってのポイントになる。これらの課題も、土砂災害によって交通の途絶が危惧される箇所等を早期に考慮に入れなければならない、という点において、地震時の危険箇所の把握と深い関連を有してい

ることから、容易に解決できる性格のものでもない。

いくつかの卑近な例を挙げたが、事ほど左様に地震に起因する土砂災害を取り巻く課題は山積しているのが実態である。ここでは、中越地震の際の対応を一つのケーススタディとして、そのような課題に対する調査・研究の現況を述べてみることにする。

2. 地震に起因する土砂災害の発生実態

地震に伴って発生した土砂災害の記録を繙くと、実際にはそれらが相当数に上ることがわかる。そして、それらのほとんどが斜面上の土砂や岩の移動現象（落石、崩壊、地すべり等）であったことも認められる。主に渓流や谷地形に生じる土石流や泥流のような現象は水の介在がなければ発生しがたいため、地震時にこれらが惹き起こされることは一般的には珍しい（例外的に、「岩屑流」と呼ばれるような水をほとんど含まないような現象が稀に認められる）。

ところで、地震を誘因とする土砂移動現象を中村²⁾は図1のように示している。この図にも示されているとおり、大別すると、地震によって直接的に惹き起こされる土砂移動とその後の降雨が引き金になって生じる土砂移動がある。

次に、中越地震を例にとって、発生の特に顕著であった斜面崩壊および地すべりの全般的な状況を振り返ってみたい。

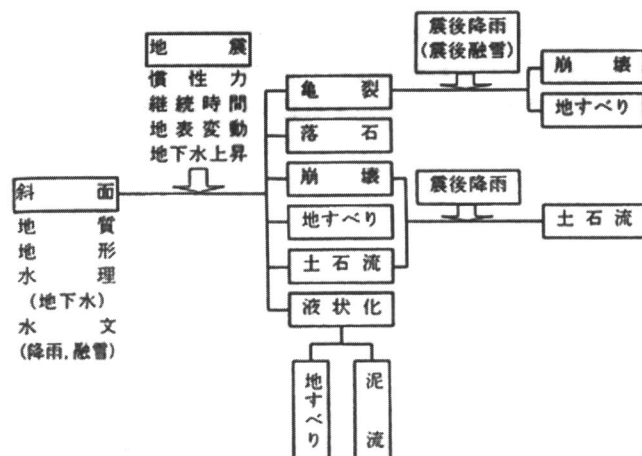


図1 地震による斜面での土砂移動²⁾

* 国土交通省国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター長

2.1 斜面崩壊

一つの指標として崩壊面積率を見てみると、国土技術政策総合研究所砂防研究室（以下「砂防研究室」という）および独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ（以下「土砂管理研究グループ」という）が行った衛星写真判読の結果³⁾によれば、被害の大きかった山古志村西部の斜面崩壊の発生面積率は4.7%（判読面積21 km²）に達している。判読の対象面積の大小に左右される値ではあるが、表1に示すように、この値は1964年の新潟地震、1995年の兵庫県南部地震等における同様の値と比較してかなり大きいといえる。地震の直前に台風23号により日雨量92 mmという降雨があったことが影響しているとも考えられる。

また、杉浦ら⁴⁾は、中越地震で発生した芋川流域（約38 km²）を対象として、地震後の斜面崩壊の変化状況、特に融雪の影響について追跡している。その結果によれば、融雪期の崩壊を1) 新規崩壊（融雪期に新たに発生したもの）、2) 拡大崩壊（地震で発生した崩壊地の頭部や側面が崩壊し拡大したもの）、3) 再崩壊（地震で発生した崩壊の内部（崩壊面）が崩壊したもの）、の3種に区分し、崩壊数、崩壊面積を示せば、表2のようになる。地震による崩壊箇所数は1,419カ所、河道閉塞は52カ所で確認されたが、融雪後には新規崩壊822カ所、拡大崩壊435カ所、再崩壊191カ所の計1,448カ所、さらに河道閉塞が5カ所で認められた。崩壊数は、地震、融雪時ともほぼ同数であったということ

表1 地震による崩壊発生面積率³⁾

地震被害	崩壊面積率 (%)	判読対象面積 (km ²)	文献	備考
新潟県中越地震 (2004)	4.7	21	—	崩壊地、流下堆積範囲を含む
台湾集集地震 (1995)	7.0 (13.3)	690	林ほか (2002)	(地震後の台風による崩壊含む)
兵庫県南部地震 (1995)	0.2	140	建設省資料	
新潟地震 (1964)	0.2	151	大村ほか (1980)	
関東大震災 (1924)	15.2	53	山口・川辺 (1982)	地震後の降雨による崩壊含む
	7.0	86	自然災害科学総合研究班 (1982)	
	4.5	100	安江・仲野 (1981)	

表2 芋川流域の地震と融雪による崩壊⁴⁾

	地震による崩壊	融雪による崩壊			
		新規崩壊	拡大崩壊	再崩壊	融雪計
崩壊数	1,419	822	435	191	1,448
崩壊面積 (m ²)	1,477,818	194,892	186,995	62,360	444,247
崩壊地1箇所あたりの面積 (m ²)	1,041	237	430	326	307

になる。一方、崩壊面積については、地震時の崩壊が融雪時のその約3.3倍に達していたことがわかる。

図1には、地震後の降雨の影響が示されているが、同様の意味で、これを融雪と読み替えることもできる。地震によって山体には弛みが生じるとされているが、表2はそれをある程度定量的に表した興味深い調査結果といえる。

2.2 地すべり

「地すべり」という用語の定義にもよるが、我が国で広く用いられているこの用語の定義に従えば、従来、地震時には地すべりの発生は少ないと考えられていた。しかしながら、中越地震においては、きわめて多数の地すべりが惹き起こされた。

日本応用地質学会と日本地すべり学会による報告⁵⁾によれば、この時の地すべりの特徴は次のように述べられている。

- ① 多くの地すべり災害は、過去の地すべり地形の範囲で発生している。
- ② とくに大規模な地すべり災害は半固結の砂岩と泥岩の互層部分で発生している。それらの部分では地層の向斜構造が地すべり運動の分布や方向を規制している。一方、泥岩地域では、砂岩地域と比較すると、地すべり地形が多いのに、今回の地震（筆者註：中越地震）による地すべりは少ない。

また、国土技術政策総合研究所および土木研究所の調査⁴⁾においても、崩壊は流れ盤構造よりも受け盤構造の地域に発生している割合が高いのに対し、地すべりは流れ盤構造の地域に発生している割合が高いことが報告されている（図2）。

中村²⁾は、「地震時に発生する地すべりは古い地すべりが復活して滑動することは少なく、新生地すべりが大部分であることが過去のデータからうかがえる」と述べている。これに関連して、国土技術政策総合研究所および土木研究所の調査結果⁴⁾から引用すると、中越地震に起因した最大級の規模で、地すべり地形を呈していた塩谷神沢川地すべりのすべり面は「斜面頭部付近では層理面を切るものの、

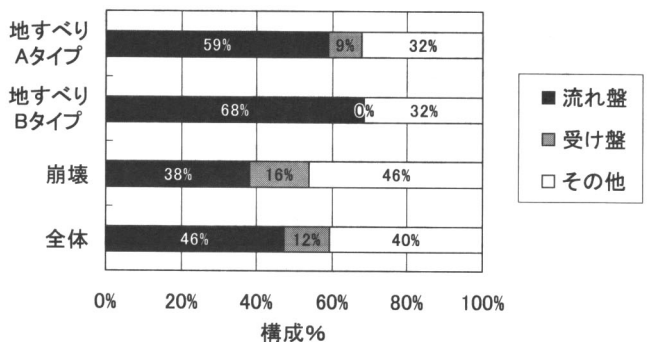


図2 新潟県中越地震に伴う地すべり・崩壊発生箇所の地質構造⁴⁾（筆者註：「地すべり Aタイプ」は、地震発生前の地形図上で地すべり地形が認められない、あるいは不明瞭である斜面で発生した地すべりと、地震前に地すべり地形と認められた斜面において滑落崖以外を頭部として発生したもので34カ所、「地すべり Bタイプ」は、地震発生前の地形図上で地すべり地形が判読され、この範囲が滑動したもので19カ所）

斜面中下部ではほぼ層理面沿いに存在し、新たに形成されたものと考えられた」としている。そして、「既存のすべり面での再滑動ではなく、既存地すべり斜面内に新たに発生したもの」であったと結論づけている。

地震時の地すべりの発生に関する問題については、さらに検討すべき点が多い。

3. 中越地震からの教訓

地震時の土砂災害という観点から見た場合、中越地震では次に示すような問題点が明らかとなっている。

3.1 地すべりおよび河道閉塞の多発

前述のような我が国での一般的な地すべりの認識にもかかわらず、中越地震では、地すべりが多数発生した。それらのうちのいくつかは河道を閉塞して上流に湛水池を形成したため、保全対象に直接的な被害を及ぼした地すべりと同様かそれ以上に深刻な問題として社会的な注視を集めた。中でも芋川本川では、特に5カ所の河道閉塞（上流から寺野、南平、榎木、東竹沢、十二平）に対して緊急に対応する必要があるものと判断された。図3にそれらの位置を示す。また、これらの河道閉塞の諸元を表3に示す。

表3に示された河道閉塞の中でも、保全対象、規模、湛

水量等から、特に東竹沢および寺野地区の河道閉塞が危険視された。この時の河道閉塞への対応は、① 越流による破壊時間とパイピングによる破壊時間を推定し、それらのうち短い時間で破壊に至る現象を対象とする、② 河道閉塞の諸元から、決壊の可能性の有無を推定する、③ 決壊すると仮定した場合のピーク流量を推定して下流での対応策を立案する、というような検討を中心に進められた。このような対応と併行して進められた現地での緊急対策が奏功して、結果的に河道閉塞の決壊という事態は避けることができた。

3.2 初動体制の整備と土砂災害の発生危険箇所の把握⁷⁾

地震直後にはまず、どのような箇所で地すべり等が発生したのか、さらにそれらによる被災の程度や被害の拡大の危険性の確認、把握を急ぐ必要がある。中越地震では発生直後に「現地連絡調整室」が設置されて初動体制が整備され始め、地震発生の翌日には専門家によるヘリからの調査が開始された。さらに、土砂災害全般の詳細な全容を把握するため、延べ500名がかりで10月27～31日にかけて約1,470カ所の危険箇所の現地調査を実施している。地震の規模、地形、地質等の条件によっては、このように被害の詳細な全容把握に長期間を要することも想定しておくべきである。

3.3 交通の途絶、集落の孤立化

次に、この時に発生した多数の地すべりや斜面崩壊は、交通を遮断し、数多くの集落の孤立化を招いた。さらに、一般加入電話や携帯電話の不通が続いたため、孤立化した集落の住民の安否の確認ができない、という状況に陥った。加えて、交通の途絶は被災箇所へのアクセス手段を奪い、安全な場所への住民の避難、救助活動、復旧活動等の大きな妨げとなった。中山間地における地震では、今後ともこのような形での集落の孤立化の発生が避けられないものと考えられる。

4. 地震に起因する土砂災害についてのいくつかの知見

前項で述べたような危機管理上の問題点に対して、ある領域では、いくつかの有用な知見も得られている。ここでは震後対応の代表的な例として、河道閉塞への判断や対応状況と、震前の対策のための例として、地震時の崩壊危険斜面の判定手法について詳述する。

4.1 河道閉塞への対応⁶⁾

中越地震後、新潟県からの要請を受け、10月28日、砂防研究室と土砂管理研究グループが現地調査を行い、河道閉塞の安定性を検討した。さらにその後、特に緊急性を要すると判断された寺野地区および東竹沢地区の河道閉塞に対する応急対策の技術的支援を北陸地方整備局湯沢砂防事務所に対して行った。

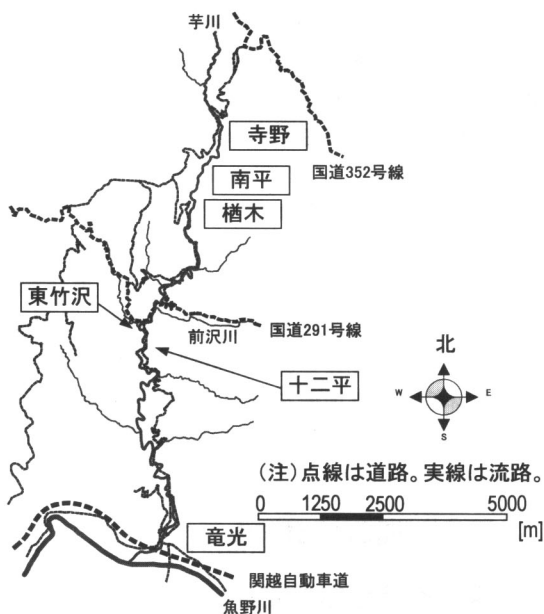


図3 河道閉塞の位置図⁶⁾

表3 河道閉塞の形状⁶⁾

地区名	河道閉塞の形状				
	長さ [m]	高さ [m]	幅 [m]	せき止め土量 [m ³]	貯水量 [m ³] (満水湛水量)
寺野	360	26	230	107,800	428,900
南平	220	8	345	11,700	20,200
榎木	190	9	240	44,500	9,100
東竹沢	350	28	295	1,272,300	3,273,100
十二平	125	9	95	23,300	25,200

表3に示した河道閉塞の諸元は国土地理院発行の50mメッシュデータ(地震発生前)と10月28日に実施したレーザー計測から得られた結果(地震発生後)を用いて推定されたものである。まず、これらのデータと「土砂災害復旧計画作成支援システム」⁸⁾で提案されている危険度概略判定手法に基づき、越流とパイピングが生じて河道閉塞の決壊に至るまでの時間を推定した。同時に、既存資料⁹⁾に示された過去の天然ダムの被災事例と比較して、これら5地区の河道閉塞の決壊の可能性を検討した。さらに、決壊した場合の段波のピーク流量を推定した。

(1) 決壊時間の推定

決壊時間の推定結果を表4に示す。この表のうち、河道閉塞の越流による決壊に至るまでの時間については、10月28日時点の湛水位と、河道閉塞の天端の最低点の標高差を水位の上昇割合で除して求めた値である。寺野と東竹沢以外の河道閉塞では、水位上昇の割合が入手できなかったため、その推定はできなかった。

一方、パイピングによって決壊に至るまでの時間を河道閉塞の下流端に浸潤線が到達するまでの時間とし、式(1)を用いて推定した。

$$T = \frac{L}{k(\sin \theta + H/L)} \quad (1)$$

ここに、 T :到達時間(s)、 L :河道閉塞の長さ(m)、 k :透水係数(m/s)、 H :河道閉塞の高さ(m)、 θ :元河床勾配、である。

これらのうち、 L および H は表3の値を用いた。また、 k の値は新潟県が過去に芋川流域で実施した土質調査の結果を参考に、 2.0×10^{-3} (cm/s)とした。この推定の結果も表4に示されているが、越流による決壊までの時間がパイ

ピングによるそれよりもきわめて短かったことから、河道閉塞の決壊の原因としては越流の方により注意を払うべきであることが明瞭となった。

(2) 決壊の可能性の推定

図4は過去の天然ダムの被災事例から河道閉塞の決壊の可能性を検討したもので、横軸はせき止め土量(m^3)、縦軸に湛水量(m^3)をとったものである。決壊しなかった事例あるいは 10^6 秒以上継続して存在した事例を対象に回帰分析して求めた結果からは、中央の線、すなわち「決壊せず & $T \geq 10^6$ 」よりも上部に位置する場合に「遅かれ早かれ決壊する」可能性が高いと判断される。今回のそれぞれの河道閉塞に対し、湛水量として、満水した場合の水量を与えると、図4に示したように、寺野地区と東竹沢地区の河道閉塞はいずれ決壊する可能性が高いことが明らかとなった。

(3) 決壊後のピーク流量の推定

次に、河道閉塞が決壊した場合に生じる段波のピーク流量を推定した。上述のように越流による決壊が想定されたため、ここでは推定のために式(2)⁸⁾を用い、安全側を考慮して $d=0.25$ mmとした。

$$q_{\max} = \begin{cases} 0.512 \left(\frac{S \times H}{10^4} \right)^{0.347} & (d_m = 0.25 \text{ mm}) \\ 0.290 \left(\frac{S \times H}{10^4} \right)^{0.384} & (d_m = 2.50 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 q_{\max} :単位幅あたりのピーク流量($m^3/s/m$)、 d_m :平均粒径(mm)、 S :単位幅あたりの貯水量(m^3/m)、 H :河道閉塞の高さ(m)で、一般に $(S \times H)$ は「ダム係数」と呼ばれている。

計算の結果、ピーク流量は寺野地区の河道閉塞が決壊した場合で $200 m^3/s$ 程度、東竹沢地区の場合には $500 m^3/s$ 程度と推定された。

ダムの決壊に伴う流れのピーク流量を算定する方法はいくつか提案されているが、それらのうちCosta¹⁰⁾は以下の推定法を示している。

$$Q_{\max} = 6.3H^{1.59} \quad (3)$$

ここに、 Q_{\max} :ピーク流量(m^3/s)、 H :河道閉塞の高さ(m)

この推定式を用いて東竹沢地区の河道閉塞のピーク流量を計算すると約 $1,260 m^3/s$ という値が得られる。

これらの検討結果から、寺野地区および東竹沢地区の河道閉塞は越流に対して決壊の可能性が高いこと、東竹沢が決壊した場合には竜光地区に最大で $1,200 m^3/s$ 以上の流れが流下する危険性のあること等が明らかとなった。

4.2 地震時の危険斜面の抽出手法

国土技術政策総合研究所砂防研究室では、兵庫県南部地震による六甲山の斜面崩壊の事例を基にして、地震時の斜面崩壊の危険度を評価する下記の評価式(基礎式)を提案してきた^{11),12)}。

$$F = 0.075I - 8.9c + 0.0056a - 3.2 \quad (4)$$

ここで F は判別得点で値が大きいかほど斜面崩壊の危険度が高いことを示す。また、 I は斜面勾配($^\circ$)、 c は斜面の平均曲率、 a は最大加速度(cm/s^2)である。この基礎式を1997

表4 河道閉塞の決壊までの推定時間⁶⁾

地点名	決壊までに要する時間 [h]	
	天然ダムの越流による破壊	天然ダムのパイピングによる破壊
寺野	29	50,367
南平	—	56,051
榎木	—	49,026
東竹沢	248	54,573
十二平	—	21,921

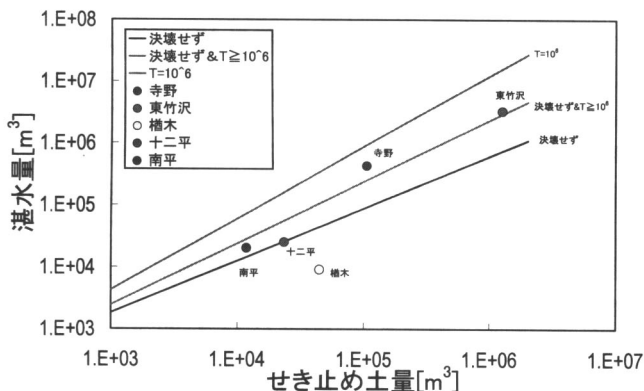


図4 せき止め土量と湛水量の関係⁶⁾

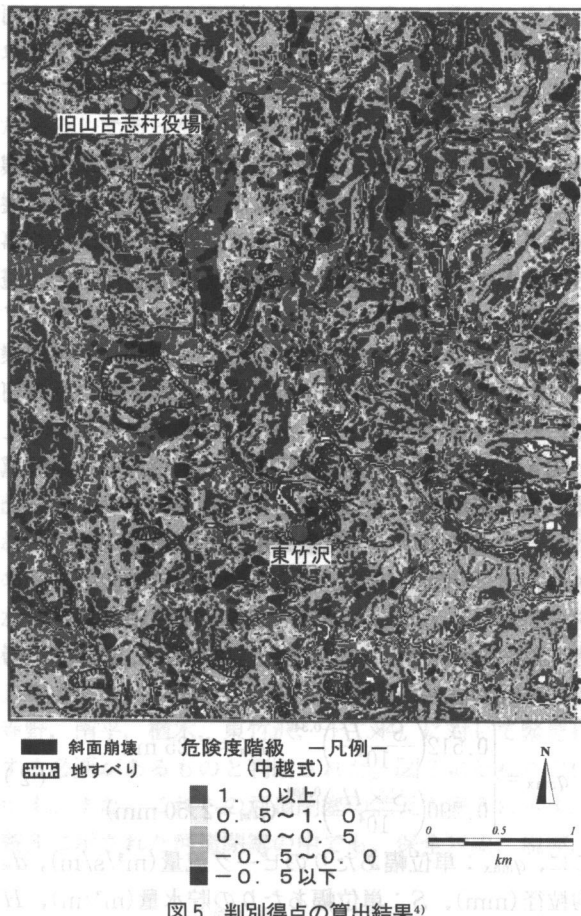


図5 判別得点の算出結果⁴⁾

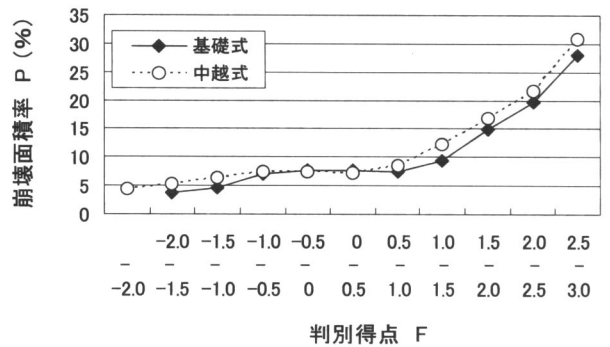


図6 判別得点と崩壊面積率の関係¹³⁾

ように、斜面崩壊の場合には、式(4)などを用いることによって相対的な危険箇所の抽出がある程度可能であるといえる。しかしながら、中越地震で多発した地すべりの場合には、同様の抽出は難しいとも報告されている⁴⁾。河道閉塞をもたらした原因のほとんどが地すべりであることを考慮すれば、地震に伴う地すべりの危険箇所の抽出手法の開発が急務である。きわめて限られた情報のみからそれを判断することは容易ではないが、中越地震を始めとし、地震で生じた比較的規模の大きな土砂移動現象の事例を子細に検討することによって、一定の精度のレベルをもった抽出技術が開発されることに期待したい。地震直後に土砂災害の分布や程度をどれだけ正確に把握できるかという点が、初動体制の構築やその後の救出・救援活動等にもきわめて重大な影響を及ぼす。あらかじめ危険箇所が抽出されていれば、初動時においてもそれらの箇所周辺に重点的に着目することによって、孤立化対策も含め、より円滑かつ柔軟な対処の仕方が可能になるものと考えられる。

また、危険斜面が明らかとなることによって、平時からそれらの斜面に対する構造物対策を重点的に施していくことも可能になる。東海、東南海、南海といった地震の発生が危惧される中、このような抽出技術に裏打ちされた効率的な事業の推進も急務である。

発生してしまった河道閉塞に対する緊急対応マニュアルの整備も必須の課題である。また、閉塞土塊決壊の可能性の有無の判断法、その上流に形成された湛水域からの緊急的な避難対策や排水対策等、多くの課題が残されている。

6. おわりに

地震に起因する土砂災害に対する危機管理の現状と課題について述べてきた。土砂災害の多発するような規模の地震は誰もが経験できることではないし、ましてやその時の対応に熟練者がいるわけでもない。少子高齢化の進行や災害時要援護者の増加等、今後の急速な社会的条件の変化の中で、地震に伴って発生する土砂災害への対応を効率的かつ円滑に担っていくためには、平時からの施設の整備・維持管理、マニュアル類やシステム類の整備とともに、人々の当事者意識の醸成やその維持にも取り組んでいく努力が必要である。

年の鹿児島県北西部の地震および2000年の神津島の地震に適用し、評価式の妥当性を確認している^{11),12)}。

そこで、この手法を、中越地震で甚大な被害が生じた旧山古志村役場、東竹沢地区など芋川の河道閉塞箇所を含む4×5 kmの区域に適用することを試みた。そして、崩壊地の分布データ等に基づく判別分析の結果、式(5)(中越式)が得られた¹¹⁾。

$$F = 0.079I - 35c + 0.018a - 7.3 \quad (5)$$

図5には、中越式から求めた判別得点の分布と斜面崩壊、地すべりの発生箇所を示した。斜面崩壊の発生箇所の多くは判別得点が1.0以上となっている。また、図6に基礎式と中越式から算出したFと、各F値に属する全メッシュに対する崩壊メッシュの割合(崩壊面積率(P))の関係を示した。いずれの場合においてもFの増大に伴ってPも急激に増加する傾向が認められると同時に、基礎式および中越式で算出されたF-P関係にはほとんど差が見られなかった。このことから、中越地震のデータが無くとも基礎式により斜面崩壊発生相対的な危険度を評価することができることが明らかとなった。

5. 今後の課題

一般に地震の発生自体を予測することは不可能に近い。そのような中で、人的被害を最小化することを目標とすれば、斜面崩壊や地すべり発生危険性を有する箇所を抽出して地震に備えておくことが最低限必要である。前述した

参考文献

- 1) 例えば建設省河川局砂防部：地震と土砂災害，1995.
- 2) 中村浩之：第2章 地震による崩壊発生，(社)砂防学会地震砂防研究会 中村浩之ほか編，地震砂防，古今書院，2000.
- 3) 国土技術政策総合研究所砂防研究室 HP
- 4) 杉浦信男ほか：第4編 土砂災害，平成16年(2004年)新潟県中越地震土木施設災害調査報告，国土技術政策総合研究所報告 No. 27・土木研究所報告 No. 203，国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所，2006.
- 5) 日本応用地質学会・日本地すべり学会合同調査団：2004年新潟県中越地震による斜面災害緊急報告，(社)日本地すべり学会 HP
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか：5.土砂災害，平成16(2004)年新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要，2005.
- 7) 小林幹男：地震と土砂災害対策，河川，2005-5，2005.
- 8) 建設省：第5編土砂災害復旧編，建設省総合技術開発プロジェクト 災害情報システムの開発報告書，第III巻 基幹施設編，1992.
- 9) 建設省河川局砂防部：地震と土砂災害，1995.
- 10) Costa, J.E.: Floods from Dam Failures, Flood Geomorphology, 1988.
- 11) 内田太郎ほか：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，204号，2004.
- 12) 内田太郎ほか：地震時の斜面崩壊危険度評価手法の検討，土木技術資料，47-4，2005.
- 13) 小山内信智ほか：地震に起因する土砂災害対策の現状と課題，土木技術資料，47-12，2005.

■新刊紹介■

●「応用地形セミナー—空中写真判読演習」

空中写真判読の決定的教科書を学会が作成

地すべり，活断層などの地形を知ってその特性をつかみ防災対応に利用する技術を広める。読図，写真判読技術の実例とその解説などコンサルタント技術者のテクニックを収集。複雑な地形情報が最近では工学的に利用可能となっており，地形学を実務的に利用できる状況になったが，地形学自体が工学として大学教育で教えられていないので地形工学として確立されることが望ましい。

地形工学の発展に必要な重要なスキルが，空中写真判読であり，本書はその教科書。豊富な地形図と写真を掲載している。

本書の内容

1. 空中写真判読技術の基礎
2. 地すべり
3. 緩み
4. 土石流，崩壊，植生
5. 活断層
6. 地盤，微地形

発行：2006年11月25日，日本応用地質学会

編集：日本応用地質学会応用地形学研究小委員会

価格：4935円（消費税込み）

●英語で学ぶ構造力学

Let's Study the Strength of Structures in English

国際学会に出席する技術者，研究者はもとより，海外で仕事をする技術者などが構造力学とともに英語を学ぶことができる異色の書物。

発行：2006年11月6日，コロナ社

著者：勝山邦久，酒井俊典，Hans-Peter Rossmanith

価格：2520円（消費税込み）

環境・都市システム系 教科書シリーズ

●測量学II

発行：2006年12月8日，コロナ社

著者：勝山邦久，酒井俊典，Hans-Peter Rossmanith

価格：2940円（消費税込み）

緊急地震速報・地震観測情報の 防災対策への活用

もと さいか まさと
源 栄 正人*

1. はじめに

地震災害低減のためには、産官学の地震に対する情報の共有化が望まれ、常に最新の科学的知見を地域の防災活動に反映させることが重要である。

筆者らは文部科学省の公募事業である防災研究成果普及事業として、「迫り来る宮城県沖地震に備えた地域防災情報の共有化と防災力高度化戦略」を宮城県・仙台市と共同で提案し採択された¹⁾。この事業は平成16年度～18年度の3カ年の事業であり、内容的には3つの柱で構成されている。すなわち、① 地理情報システム (GIS) を用いた防災情報の共有プラットフォームの構築とその有効活用、② 地震リスクの地域内格差の明確化と防災力向上戦略の展開、③ 緊急地震速報・地震観測情報の防災対策への有効活用を掲げている²⁾。

ここでは、上述の防災研究成果普及事業の③に関する事業内容を中心に関連活動と合わせて紹介する。

2. 緊急地震速報の有効活用

2.1 緊急地震速報システムの地域展開

緊急地震速報は大揺れの前に警報を出し直前に対策を講じることを可能にするので地震被害の大幅低減に貢献するものと期待される。宮城県沖地震の際に100万都市仙台は主要動到達の約15秒前に警報を出すことができる。緊急地震速報の利用は避難体制の考え方に革新をもたらすものと思われる。

緊急地震速報導入による被害軽減効果の評価は興味深い³⁾。想定宮城県沖地震に対し、余裕時間を17秒と仮定した仙台市における人的被害軽減率は「死者94%、重傷者94%、中等傷者93%」となっており、社会的インパクトはきわめて高い。しかし、緊急地震速報はその特性上、一般利用者が行動できる時間的余裕がきわめて少ないため、情報の伝わり方によってはパニックや凍りつき症候群などの非適合行動による負の影響が現れる危険性があることも指摘されている⁴⁾。どのような状況でどのような内容を誰に

伝えるか、そのシナリオを周到に用意しておかないと、緊急地震速報がネガティブに働く危険性もある。したがって、緊急地震速報の普及にあたり、考えておかなければならないのは、緊急地震速報を活用した避難訓練と防災教育である。学校における緊急地震速報の利活用はきわめて重要であると思われる。

筆者らは、文部科学省のリーディングプロジェクト「高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト」(以下、LP)の一環として、緊急地震速報の利活用ができる社会基盤の実現と学校における教職員と児童・生徒の安全確保を図ることを目的に「緊急地震速報と連動した学童および教職員のための防災教育・訓練支援システム」を開発した⁵⁾。そして如何に有効にこのシステムを避難行動に生かすかを検証するため、平成16年2月に、この緊急地震速報システムを仙台市立長町小学校に導入し、これまで実証試験を行ってきた⁶⁾⁷⁾。また、文部科学省の防災研究成果普及事業では、緊急地震速報を用いた警報システムを文字どおり普及すべく、平成16年度に東北大学病院や流通団地の組合である仙台卸商センターに導入するとともに、仙台卸商センターでは緊急地震速報に対するニーズ調査としてアンケート調査とヒアリング調査を行っている。平成17年度に宮城県の地方都市や仙台市のモデル学校(小・中学校)に緊急地震速報システムの実証試験を行っており、「地域と学校の連携」をテーマとした展開・普及のモデルを検討している⁸⁾。さらに、平成18年度には、宮城県教育庁の学校群イントラネットを活用した県立高校への配信による実証試験の実施を予定しており、緊急地震速報の展開に関する最終成果をまとめることにしている。

また、筆者は、半導体工場(宮城沖電気)や一般家庭(仙台市の南中山エムスガーデン)における緊急地震速報システム開発プロジェクトの立ち上げ、実証試験の指導に携わっている。

2.2 学校における緊急地震速報システムの実証試験

(1) システムの概要

仙台市立長町小学校における実証試験において、「学校における地震時の情報伝達は校内放送設備に連動させて校内いたるところに音声で伝えることが一番効果的である」と

* 東北大学工学研究科・災害制御研究センター 教授

当時の校長である高橋秀行先生から貴重な助言を得た。また、当初、モデル学級に配置した PC へ専用 LAN により画像・音声情報を送るといったシステムに対し、仙台市教育委員会の学校施設課からは「学校の数、それに学級の数を見ると費用が相当かかる。既存設備を有効に活用できないか」など現場の声をいただき、後述のようないくつかの段階を経て図 1 のようなシステムを開発するに至った。

日本全国に設置された地震観測網からの観測情報に基づいて気象庁から発信される緊急地震速報（震源位置とマグニチュード）は地上回線または、衛星回線により（両回線を使った 2 重化も可能である）、長町小学校の職員室に設置した受信装置に伝達される。その情報からコンピュータで立地、地盤の条件等を考慮して予測震度・到達時間（カウントダウン）・主要動の継続時間等を予測する。これらの情報に基づき、音声と画像が校内に伝達される。音声は放送室の校内放送装置や事務室（学校によっては職員室）の非常放送装置により、各教室ばかりでなく、廊下・体育館・校庭のスピーカに警報・文言を伝達する。画像は放送室の画像送出装置に送られ、職員室の受信装置の画像が各教室にある TV 受像機に伝達される。既存設備を最大限活用したシステム構成となっている。システムのソフト面での特徴は、① 避難モード、② 訓練モード、③ 教育モードの 3 機能を有する点であり、地震の震度に応じ実際の地震発生時に避難訓練を行う「訓練モード」に追加して日常的に児童生徒の防災教育と安全確保に使用できるようになっている。

平成 16 年 2 月に緊急地震速報システム導入後、学校担当者との意見交換会によりシステムの改善を行ってきた。主な点は、1) 報知内容とモードの変更、2) 小学生を対象とした文言について、3) 報知音の改善、4) 校内放送との連動・無停電化、5) 放送内容のユーザ録音、などである（詳細は文献 6）。年 3 回（これまで 6 回実施）の定期避難訓練に、システムを用いた訓練を実施してきている。

次の宮城県沖地震を想定した避難訓練（余裕時間 15 秒）で、従来の訓練に比べ、教師は避難誘導面での効果（出入口の確保・カーテン閉めなど）、生徒（机の下に避難）は

避難行動の余裕、心理的余裕を指摘している。授業中の想定ばかりでなく休み時間想定での訓練も行っている。

仙台市立長町小学校における LP の実証試験中、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震(M 7.2)の際、東北大学では S 波到達の 14 秒前に緊急地震速報が届いたが、長町小学校のシステムに不具合が生じ、システムの安定稼働に対する貴重な教訓を得た。平成 17 年度導入の小中学校では、ソフトウェアの全面的作り直しによるシステムが安定化を図るとともに以下のような改善したシステムを設置している。

- ① ハードウェア、ソフトウェアに監視機能を組み込み、異常が発生した場合には自動的に再起動を行う。また、メール送信機能によりシステム管理者に異常の発生を速やかに通知する。
- ② 定時試験機能を組み込み、定時に放送装置を含むシステム全体の機能試験を行い、全教職員によるシステムの日常点検を可能とした。
- ③ 遠隔保守機能を可能とした。
- ④ 近距離の地震に対応できるよう、外部地震計(P 波検知器)を接続すれば、自動放送が起動できるようにした。

(2) 学校における実証試験の拡大

防災研究成果普及事業では、このシステムを宮城県の地方 3 都市の小中学校 3 校と仙台市の鶴谷小学校をモデル校に選定し実証試験を行っている。

学校での静止画や動画を使った防災教育は、避難訓練後に実施することで訓練の体験を印象づける効果があり、システムの教育モードのコンテンツは重要である。そのコンテンツは子供が身近に感じられるような地域の画像を含み、過去の被害や予想される被害モードを踏まえた地域版が有効だと考えられる。地域の防災活動の成果としての防災マップ（静止画）や過去の地震被害写真（静止画）、災害シミュレーション（動画）などをシステムの教育モードに取り込み、「地域との連携」、「ハード技術とソフト技術の融合」による防災力向上を目指している。

地方 3 都市の小中学校では学校区内の町内会との連携による防災活動の成果を静止画としてシステムの教育機能に反映させることにしている。釜小学校は上大街道町内会、

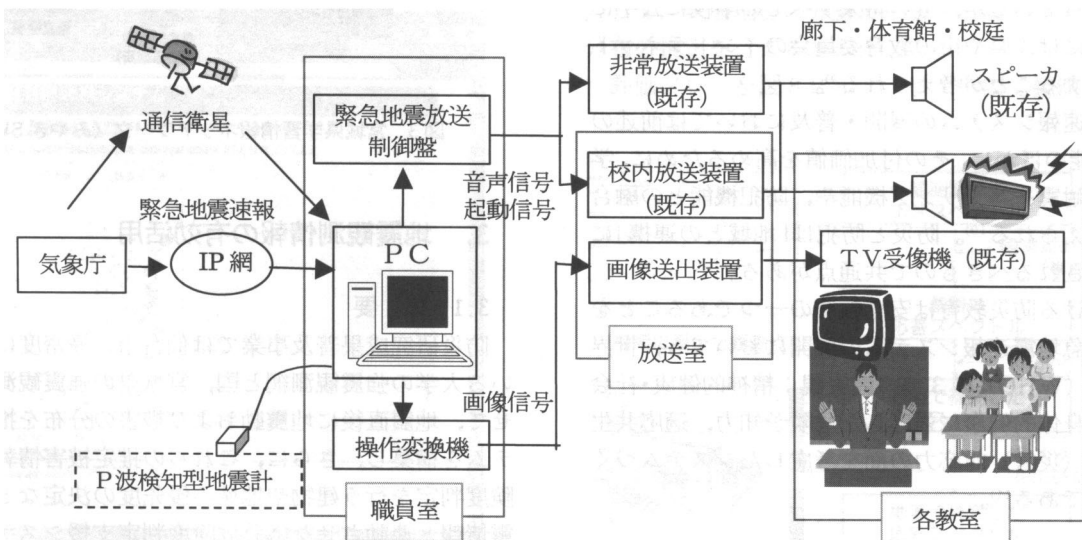


図 1 緊急地震速報と連動した防災教育・訓練支援システムの系統図

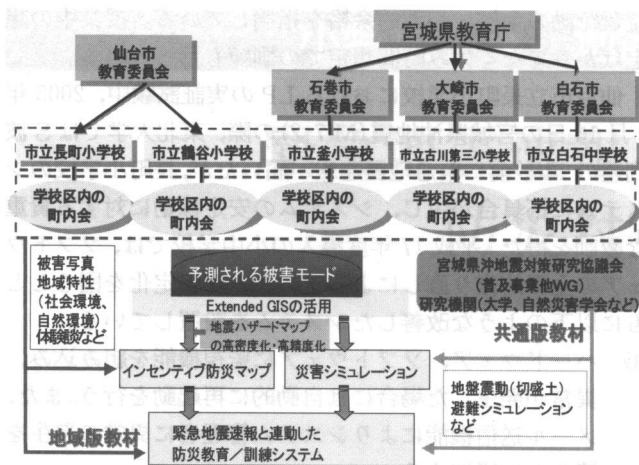


図2 防災研究成果普及事業における学校と地域の連携

古川第三小学校は中里4丁目町内会、白石中学校は南町町内会をモデル地区として取り上げ(図2参照)、インセンティブ防災マップ作りなどを行っている。子供たちの参画で作った防災マップをシステムに取り込むことで、学校と地域で情報を共有できる。また、町内会で収集した学校区内の地震被害写真も取り込む予定である。

動画は、地域の画像を取り入れるとともに、各地域で異なる過去の地震被害と地盤特性を考慮した災害シミュレーションを作成する予定である。

(3) 実証試験で得られた知見

学校における緊急地震速報の展開・普及に向けて、これまでの学校における実証試験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 時刻の特定ができない地震発生に対しては、学校の放送設備による緊急地震速報の音声による伝達が最も効果的であり、既存の放送設備(校内放送設備と非常放送設備)を有効に活用することが低コストの普及につながる。画像伝達についても既存設備として各教室にあるTV受像機を有効活用すべきである。
- 2) モデル学校からすべての学校への展開を考えることも重要である。これまで、モデル学校を対象とした実証試験を行っているが、近い将来すべての学校に公平に配信するには、県や市の教育委員会のイントラネットを利用することが考えられる⁹⁾。
- 3) 緊急地震速報システムの展開・普及においては前述の3つの機能のほかに、その付加価値を高めるために、学校施設の耐震モニタリング機能や、防犯機能との融合などが考えられる¹⁰⁾。防災と防犯は「地域との連携」により促進されるべきもので共通点がある。
- 4) 学校における防災教育は安全教育の一つであることを考え、緊急地震速報システムの展開においても、世界保健機関(WHO)の3つの健康観;精神的健康・社会的健康・身体的健康に対応した危険予知力、適応共生力、事故(災害)対応力の面を考慮したシステムづくりが必要である¹¹⁾。

(4) 今後の展開～モデル校から全校への普及展開

学校における普及は教育委員会単位で考え、展開に当たっては学校によって不公平が生じないようにする必要がある。この点を考えると、学校群イントラネットの活用を活用することが早期普及にあたっては重要である⁹⁾。早期普及に欠かせないのは、既存ネットワーク・既存設備の有効活用である。

筆者は、宮城県教育庁の学習情報ネットワーク・みやぎSWAN (School in Wide Area Network)¹²⁾ (図3参照)を利用した緊急地震速報の早期展開をすべく、宮城県教育庁への働きかけを行ってきた。みやぎSWAN開発業者を含めた関係者による会合を行ってきている。平成18年度に防災研究成果普及事業の一環としてサーバがある宮城県教育研修センターに緊急地震速報の受信装置を設置し、みやぎSWANを通じて配信する。仙台市内の一つの県立高校をモデル校に指定し、緊急地震速報専用の受信機を設置し、その出力を校内放送設備に接続する。みやぎSWANに接続されている全校(県立高校76校+加盟市町村の小中学校)ではみやぎSWANの端末パソコンに受信ソフトを提供し、各学校の教職員にシステムを体験してもらうことを実施する予定である。これが、まさに文字どおり「普及事業」として緊急地震速報を早期展開するための一番の施策であると思っている。宮城県のみやぎSWANと同様な学校群イントラネットは、各自治体や各市教育委員会で整備されている場合が多く、今回の接続でその有効性が確認できれば、早期普及に拍車がかかるものと期待している。

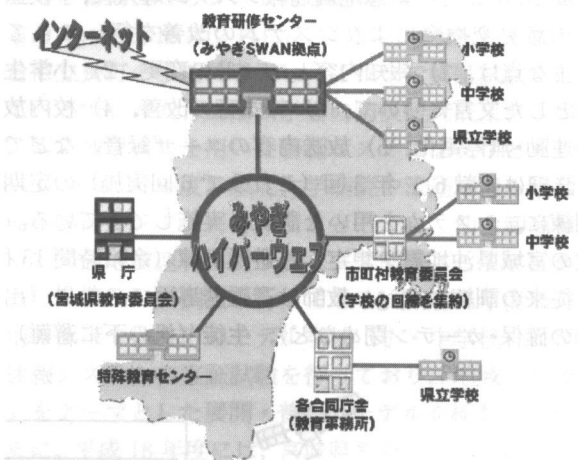


図3 宮城県学習情報ネットワーク(みやぎSWAN)⁹⁾

3. 地震観測情報の有効活用

3.1 概要

防災研究成果普及事業では仙台市に高密度に設置されている大学の強震観測網と国、宮城県の強震観測網を連携させて、地震直後に地震動および被害の分布を推定するシステムを構築し、さらに、これらの推定被害情報から応急危険度判定を行う建物や地域の優先度の決定などを行う「地震情報と連動させた応急危険度判定支援システム」の構築を行うことを目標としている(図4参照)。

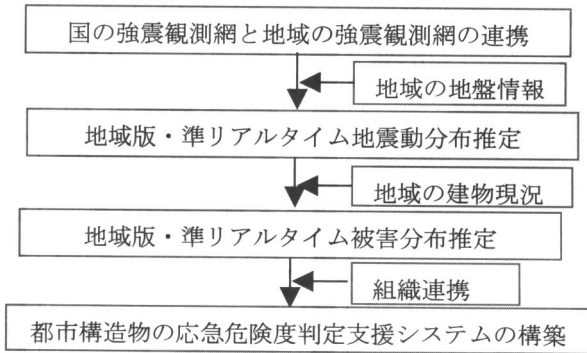


図4 地震観測情報を活用した構造物の応急危険度判定支援

3.2 地域地震観測網連携システム

100万都市仙台は、地域の地震観測網として、東北大学災害制御研究センターと国土交通省建築研究所が共同管理している仙台高密度アレー(11点)、東北工業大学が管理している東北工大アレー(Small-titan)(20点)、および平成15年度に東北大学災害制御研究センターが仙台市内の建物内に設置した強震観測網(21点)があり、通信回線でそれぞれ大学の観測室端末に結ばれており、比較的高密度である。

防災研究成果普及事業では、平成16年度に、東北大学、東北工業大学、宮城県、仙台市、応用地震計測、仙台管区気象台からの委員で構成される「地域地震観測網連携WG」を設置し、宮城県およびその周辺での強震観測点を対

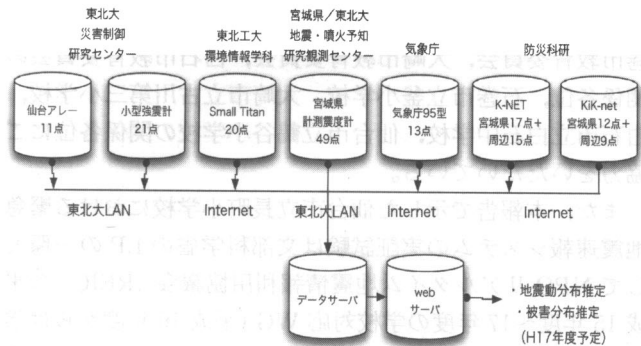


図5 連携システムのデータ収集システム構成

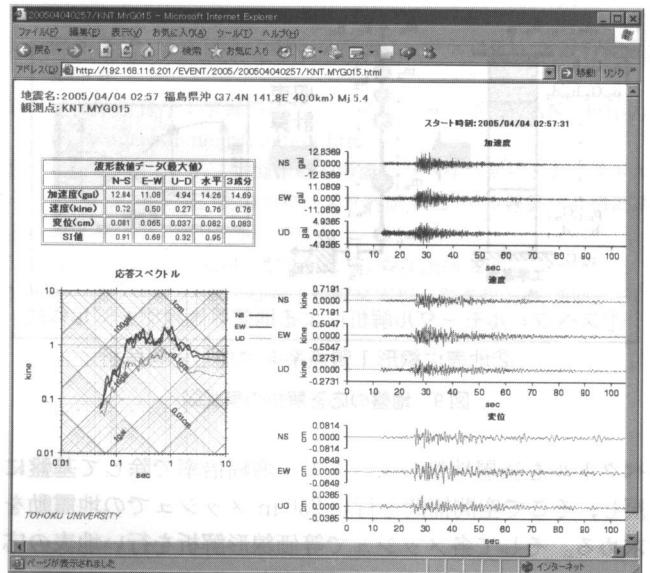


図7 連携システムの波形およびスペクトル表示画面

象として、地域(仙台市内・宮城県内)と国の強震観測網連携システムを構築した(図5参照)。

図6にはシステムのトップページの画面、図7には選択した観測点の波形およびスペクトル表示画面を示す。

3.3 地域版即時地震動分布推定システム

(1) 即時地震動分布推定手法

地震時に早期に被害を推定する場合、粗く配置された強震観測点から得られた地震動情報に基づき、広範囲な地震動分布推定を行うことになる。その際、空間的な分解能を上げた推定を行うためには、地盤の影響を精度よく見積もる必要があり、各メッシュの表層地盤構造を用いた評価、しかも表層地盤の非線形化の影響も考慮できる手法が望ましい。

また、入力卓越周期に依存して被害の様相も異なってくるため、被害推定の際には応答スペクトル等の周期情報を用いたほうが望ましいと考えられる。そのため、ここで開発するシステムとしては、前述の地震観測網連携システムにより強震記録の応答スペクトルが得られることを前提として、表層地盤の非線形応答を考慮した応答スペクトル分布の推定を行えるものとした。

評価フローを図8に示す。まず地表で観測された応答

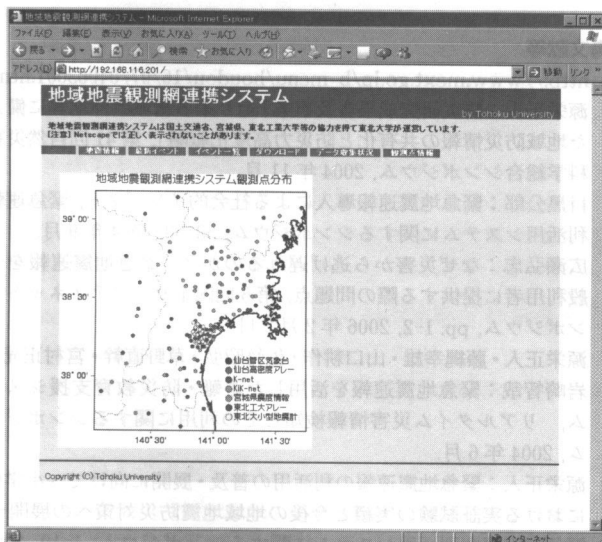
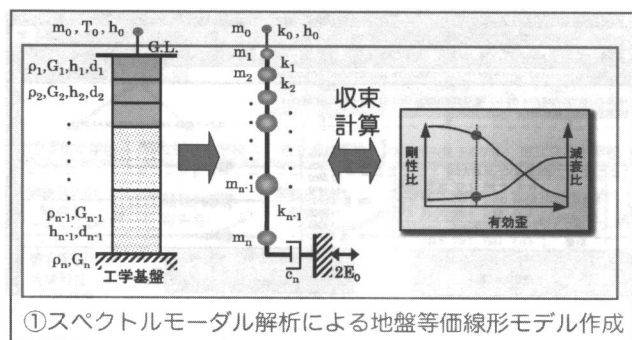


図6 連携システムのトップページ画面



図8 地震動分布評価フロー



①スペクトルモーダル解析による地盤等価線形モデル作成
②地表に線形1質点系を付加し応答解析

図9 地盤の応答解析の模式図

ペクトルを表層地盤のスペクトル増幅倍率で除して基盤に戻し、そこで空間補間を行い250 mメッシュでの地震動を求める。そして各メッシュで等価線形解析を行い地表の応答スペクトル分布を求める手順をとった。

地盤の応答計算には、応答スペクトルのみを利用し、かつ地盤の非線形性を等価線形化スペクトルモーダル解析で考慮できる手法として文献13)を用いた。具体的には、図9に示すように、まず表層地盤を質点系でモデル化し、スペクトルモーダル解析で等価線形モデルを求める。次に等価線形地盤モデルの地表に置かれた1質点系の応答をスペクトルモーダル解析により求めるという手順をとるものである。

基盤でのスペクトル分布の推定では、ordinary kriging(例えば文献14))により周期ごとに面的な補間を行い、250 mメッシュでの応答スペクトルを求めている。

(2) 仙台市域における即時地震動分布推定例

上述の地震動分布推定手法を用い、仙台市域における地震動分布推定を行った例として、2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2)の場合を示す。

表層地盤モデルとしては文献15)の250 mメッシュのモデルを用い、等価線形解析に用いる地盤の動的変形曲線も文献3)のモデルをそのまま用いた。モデルの精度確認のため、2005.8.16宮城県沖の地震(M7.2)について、仙台アレー折立の地表記録を工学的基盤および地震基盤相当にはぎとり、その応答スペクトルを入力として、各メッシュの表層地盤モデルを用いて地表の応答スペクトルを推定し、観測と応答解析結果の対応がよいことを確認している(図省略)。

図10には2005.8.16宮城県沖地震の際の仙台市域の地表における地震動分布の推定例を示す。周期成分により、地震動分布にかなりの差があることが分かる。

4. まとめ

最近の防災技術の防災対策への活用事例として、現在進められている文部科学省の防災研究成果普及事業の事業内容を中心に緊急地震速報の地域展開と地震観測情報の地域防災への活用のための連携システムについて紹介した。

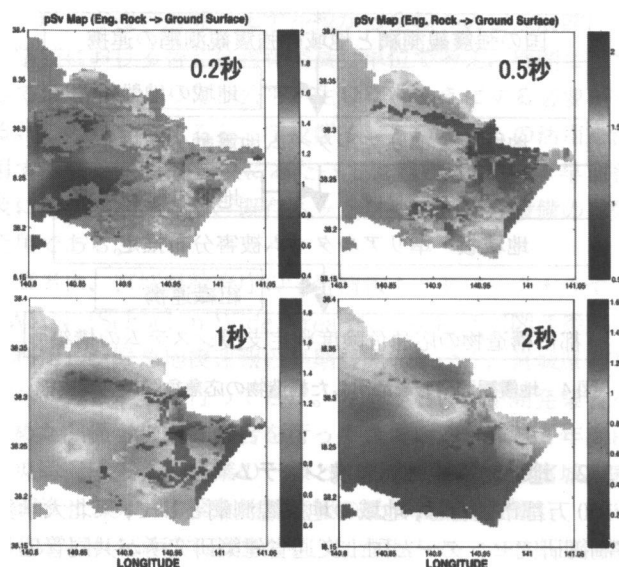


図10 仙台市域における周期成分ごとの地震動分布(250 mメッシュ)

謝辞

本報告で示した文部科学省の防災研究成果普及事業「迫り来る宮城県沖地震に備えた地域防災情報の共有化と防災力高度化戦略」(事業推進代表者:源栄正人,実施機関:応用地質株式会社)の事業推進は地域の産官学連携組織である宮城県沖地震対策研究協議会を母体を実施されている。関係各位に感謝いたします。この事業の緊急地震速報の地域展開においては、宮城県教育庁、仙台市教育委員会、石巻市教育委員会、大崎市教育委員会、白石市教育委員会の関係各位、石巻市立釜小学校、大崎市立古川第三小学校、白石市立白石中学校、仙台市立鶴谷小学校の関係各位にご協力をいただいている。

また、本報告で示した仙台市立長町小学校における緊急地震速報システムの実証試験は文部科学省のLPの一環としてNPOリアルタイム地震情報利用協議会(REIC)の平成15年度~17年度の学校対応WG(平成16年度からは学校教育WG)として行ったものである。REICおよび仙台市立長町小学校の関係各位の関係各位に感謝いたします。

参考文献等

- 1) http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/16/07/04063001.htm
- 2) 源栄正人:防災研究成果普及事業「迫り来る宮城県沖地震に備えた地域防災情報の共有化と防災力高度化戦略」,第41回自然災害科学総合シンポジウム,2004年11月。
- 3) 目黒公郎:緊急地震速報導入による社会的インパクト,緊急速報利活用システムに関するシンポジウム,53-59,2004年9月。
- 4) 広瀬弘忠:なぜ災害から逃げ遅れるのか?—緊急地震速報を一般利用者に提供する際の問題点,第5回国土セイフティネットシンポジウム,pp.1-2,2006年2月2日。
- 5) 源栄正人・藤縄幸雄・山口耕作・佐竹昭弘・草野直幹・宮村正光・岩崎智哉:緊急地震速報を活用した避難・防災教育支援システム,リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム,2004年6月。
- 6) 源栄正人:緊急地震速報の利活用の普及・展開に向けて~小学校における実証試験の実績と今後の地域地震防災対策への展開~,緊急地震速報利活用システムに関するシンポジウム,1-10,2004年9月。

- 7) Masato Motosaka et al.: Application of early warning system in schools using real-time earthquake information, 8th National Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM No. 719, 2006.
- 8) Masato Motosaka et al.: Strategy for earthquake disaster against the Miyagi-ken Oki earthquake, Japan, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 2006.
- 9) 源栄正人：緊急地震速報を連動した防災教育・訓練支援システム, 建築防災, 2006年7月号.
- 10) 源栄正人：パネルディスカッション：学校と地域の連携による防災と防犯の融合を考える～主題解説～, 定例宮城県沖地震シンポジウム（第4回）, 2006年3月.
- 11) 藤井真美：安全能力の概念を考える, 中京女子大学教育紀要, 2005年.
- 12) 宮城県教育庁：学習情報ネットワークみやぎSWAN: <http://www.myswan.ne.jp/content.html>
- 13) 石田寛・源栄正人：地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルに基づく建築構造物の地震リスク評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 583, pp. 23-30, 2004.
- 14) Hans Wackernagel：地球統計学, 森北出版, 2003.
- 15) 仙台市：平成14年度仙台市地震被害想定調査報告書, 2002.

GIS/CAD と大規模数値シミュレーション を用いた広域震災想定シミュレータ

いちむら つよし ぼり わね お
市村 強*・堀 宗 朗**
しの たけ えい すけ さ も たか ひろ
篠竹 英 介*・佐 茂 隆 洋*

1. はじめに

極低頻度災害ではあるものの、大地震が社会に及ぼす影響は甚大である。震災軽減のために多くの研究がなされてきており（例えば文献1）など、各種の被災想定なども行われている（例えば文献2）、3）など。一方で、IT化などにより大都市は飛躍的に複雑・高密度化し続けており、震災の諸過程の相互依存性はさらに強まってきている。その影響は時空間を波及的に伝播し、また、その波及的伝播は社会の状況に強く依存するため、有効な対策を立案するためには高い時空間分解能での現象の予測・想定が必須である。さらに、急激な都市の変容は未経験の震災をもたらしかねない。しかしながら、従来の震災対策では過去の知見に基づく統計的・経験的アプローチが主に用いられており、未経験の震災に対応するには限界があると予想される。もちろん、過去の知見の重要性を否定するものでは決していないが、過去の知見のみに頼らず、時空間を波及的に伝播する大震災諸過程の強い相互依存性を踏まえ、将来の地震や地震被害を数値シミュレーションの積み重ねによって予測・想定し対処するという新しい方法論も必要と考えられる。本稿では、今後更なる進歩が期待されるGIS（地理情報システム）と大規模数値シミュレーションを組み合わせた広域震災想定シミュレータのひとつである統合地震シミュレータについて紹介する。

2. 統合地震シミュレータ概要

地震学の進歩により、地震現象そのものの解明も進み、地震動予測も試みられるようになってきている。また、耐震設計の発達により、構造物の地震動応答解析も高い水準にある。このような要素技術を統合し、震災予測・想定に基づく地震防災・危機管理システムを開発することがひとつの理想的な方法として考えられる。上記を背景として、統合地震シミュレータ（Integrated Earthquake Simulator, IES, 図1参照）の開発が行われている^{4),5)}。IESは、

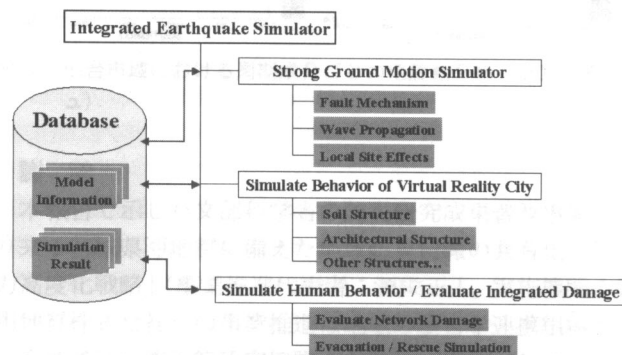


図1 IESシステム概要

GIS/CAD データ等の都市デジタルデータから構築した仮想現実都市と数値シミュレーションを組み合わせることにより、想定した地震シナリオについて震災の諸過程を予測・想定するシステムである。

IESは、1) GIS/CAD データから構築された仮想現実都市、2) 断層から地表までの地震動の生成過程を解析する高分解能地震動シミュレータ、3) 鋼構造・コンクリート構造・土構造・建築構造物などの構造物応答をシミュレーションするシミュレータ、4) 人の動きを解析するシミュレータからなる。これらを有機的に連携することにより震災を総合的に評価し、わかりやすく震災情報を提供する。図1に示すように、デジタルデータ群を管理する基幹システムと各事象・構造物の数値解析ツールをプラットフォーム・プラグイン仕様で結びつけている。震災の諸過程を数値シミュレーションの積み重ねによって評価し、震災情報をわかりやすく提供できることがIESの特徴である。現在までにIESのプロトタイプが完成しており、震災時の都市全域での構造物シミュレーション例などをいくつか示している。次節で具体的な適用例について述べる。

3. IESプロトタイプの適用例

3.1 IES適用例1

神戸市街地を対象とした例について概説する（詳細は文献6）を参照）。神戸近傍の500×700[m]を対象領域として、利用可能なCAD/GISデータを用いて計算機上に地

* 東京工業大学 大学院理工学研究所

** 東京大学 地震研究所

盤・橋梁・建築構造物からなる都市モデルを構築し、広域震災シミュレーションを行った。

〈モデル化〉

三次元地盤構造の推定には、対象領域近傍 10 [km] 四方の領域内のボーリングデータを使用した。境界面の深さおよびボーリングデータの水平位置を抽出し、境界面を推定している。阪神・淡路大震災の後に作成された建築物被災度数値化データ内の建築構造物の平面形状データと建物の種類・用途を用いて建築構造物群を作成した。高さに関するデータが得られなかったため、このプロトタイプでは、個々の構造物の種類により高さを決定している。同様にその種類によって建物の階数、階層の高さ、一次固有周期係数、減衰定数の推定をした。図 2 に建築構造物群と橋梁を含む都市モデルの全景を示す。

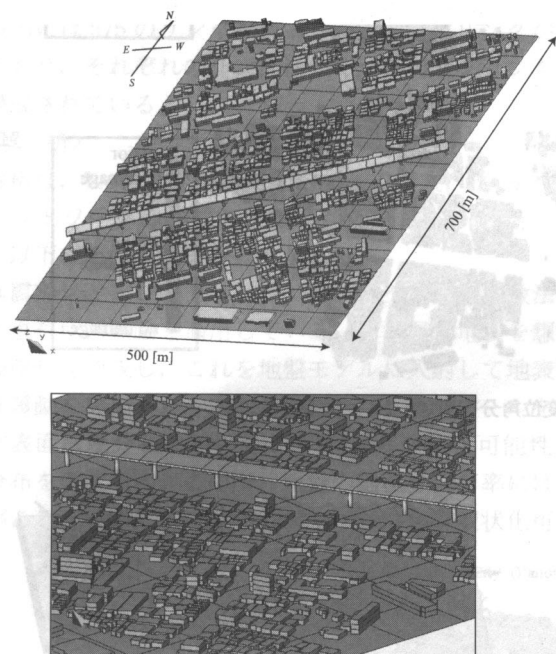


図 2 都市モデル (神戸)

〈解析〉

上記で構築した都市モデルを用いて、プロトタイプの IES により震災シミュレーションを行った。強震動シミュレータおよび橋梁の動的解析シミュレータとして微小変形線形弾性体を仮定した動的有限要素法を、建築構造物の動的解析シミュレータとして近似モード解析法を組み込んだ。IES のアプローチの有用性を示すため、以下の scenario 1~3 の 3 ケースについてケーススタディを行った。

- scenario 1: 推定した 3 次元地盤構造に地震動が鉛直下から入射する
- scenario 2: 推定した地盤構造を簡略化し水平成層構造と近似。地震動は鉛直下から入射する
- scenario 3: 推定した 3 次元地盤構造に地震動が x 軸周りに 5° 傾いて入射する

scenario 1 と scenario 2 の比較により地盤構造を簡略化した場合の影響がわかる。また、地震動は必ずしも真下から伝わってくるものではない。scenario 1 と scenario 3 の比較により、その影響がどの程度かがわかる。

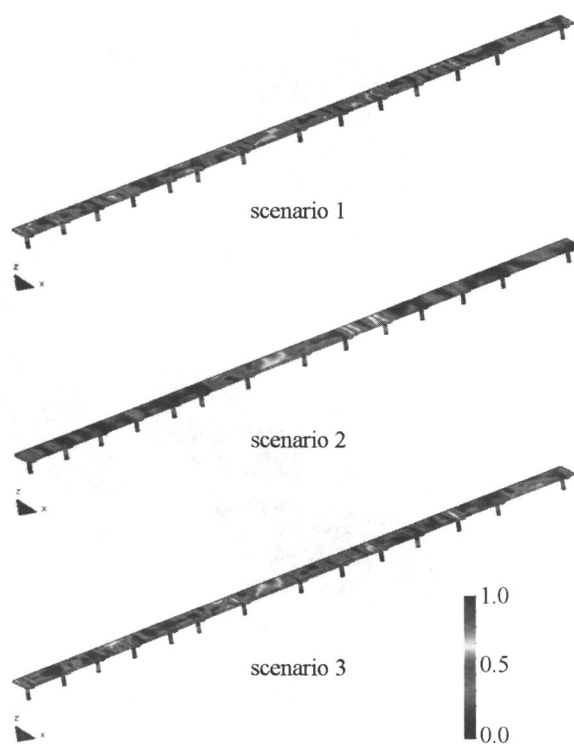


図 3 最大ミーゼス応力分布想定

まず、強震動シミュレーションを行う。地盤構造モデル下端から、兵庫県南部地震の地震動を模擬した地震動 (RickerWavelet を最大速度が神戸鷹取地震波の最大速度 (東西方向 70.8 [kine], 南北方向 70.4 [kine]) に等しくなるように振幅を補正したもの) を入力した。最大速度分布を図 4 (a) に示す。scenario 2 は水平成層構造としてモデル化されているため、様な地震動分布となっている。これに対し scenario 1 のように三次元地盤構造をもつケースでは、領域内において顕著な地震動分布の偏りがみられた。また、傾きを考慮した scenario 3 では scenario 1 と比較して地震動の分布が南北方向に伸びており、地震動分布に顕著な差が現れうることを示している。scenario 2 の最大速度が約 100 [kine] 程度であることを考えると、単純化した scenario 2 と比べ、±20~30% の差が生じており、被害分布にも十分影響を及ぼしうるオーダーの差であると考えられる。

上記の scenario 1~scenario 3 で得られた地表面での強震動データを用いて、橋梁の動的応答解析を行った。損傷度を表す尺度の一つである最大 von Mises 応力分布図を図 3 に示す。応力値は最大値が 1 となるように正規化している。各ケースで各橋脚や桁にかかる応力にばらつきが現れ、応力の分布が異なっていることがわかる。3 次元地盤構造および地震動の傾きの影響により、橋梁の動的応答が変化し、応力分布が各ケースで異なってくる事がわかる。

次に建築構造物の動的解析を行った。各建物への入力地震動として、各建物位置における先の強震動データをそれぞれ取り出し、各建物へ入力している。損傷を近似的に表す尺度の一つである最大層間変位角の分布を図 4 (b) に示す。scenario 2 では、地表面の地震動が領域内で等しくなっているため、同形式の構造物ではすべて同じ層間変位角に

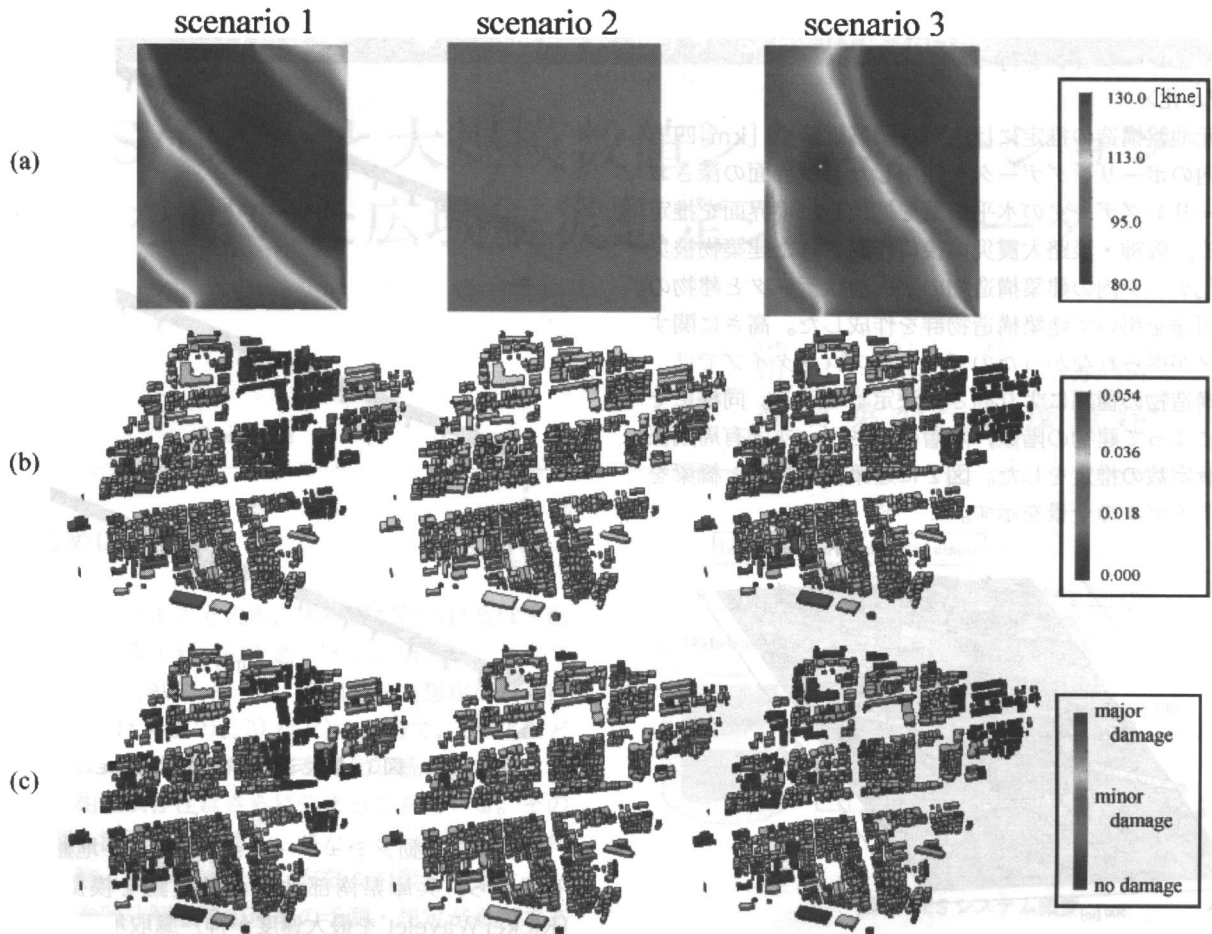


図4 (a) 最大速度分布想定 (kine), (b) 最大層間変位角分布想定, (c) 被害分布想定

なっている。それに対し, scenario 1 では三次元地盤構造による強震動分布に偏りがあるため, 同様の構造でも層間変位角に大きなばらつきが見られる。また, scenario 1 と scenario 3 との間でも大きな差がみられ, 位相差による影響も顕著であることがわかる。

層間変位角は被害を表す第一近似の指標としては有効であるが, そのままでは被災評価とならない。同じ層間変位角であっても構造仕様ごとに被災度の程度は変わってくるためである。そこで, 構造物の種類ごとに小破・大破の閾値を設定し, 層間変位角の最大値から損傷度を評価し, 被災評価を行った。図4(c)に各 scenario の被災分布を示す。scenario 2 では, 同形式の構造物では等しい被災判定となっている。それに対して scenario 1, scenario 3 では, 被災分布においても構造物の種類だけでなく地域的な偏りが現れていることがわかる。これは, 同じ構造形式の建築構造物であっても, その立地条件により入力される地震動が異なるためであり, 近傍の地盤構造が被災分布に影響を及ぼしていることを表しているものと考えられる。

3.2 IES 適用例 2

3.1 の適用例では地盤と構造物という都市構成要素のみを考慮している。3.2 では道路ネットワークといった面的な機能を持つ都市構成要素をもモデル化し, 広域震災シミュレーションを行った例を示す (詳細は文献 7) 参照)。

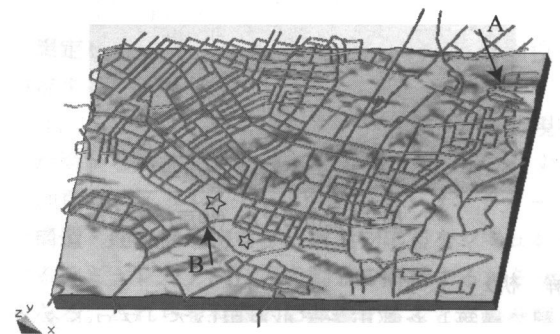


図5 都市モデル (仙台)

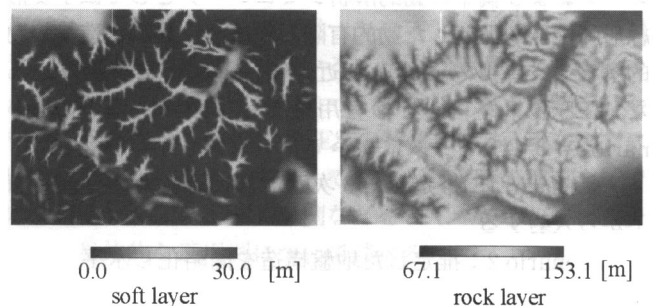


図6 推定された3次元地盤構造

<モデル化>

宮城県内のある領域東西 2500 [m] × 南北 2000 [m] を対象領域として, 地盤, 道路ネットワークからなる図5に示す都市モデルを構築した。工学的基盤面から地表面までの

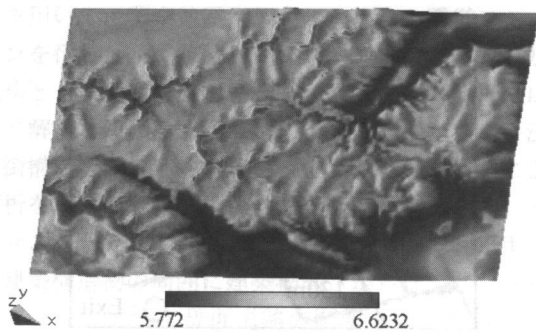


図7 計測震度分布想定

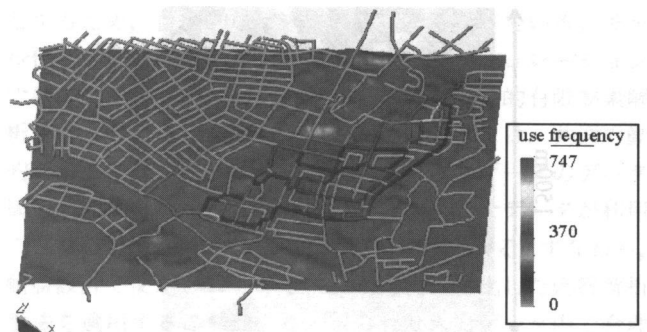


図8 各リンクの使用頻度

地盤を構成する地層は宅地造成盛土と軟岩の二層である。各層の層厚分布を図6に示す。道路ネットワークデータには、国土地理院発行の25000分の1数値地図を使用した。領域内には575のリンク節点と、807の道路リンクが存在しており、それぞれのリンクはいくつかのサブリンクにより構成されている。

〈解析〉

解析は、1. 液状化可能性指数分布の作成、2. 道路の被害ネットワークの作成と最短経路の算出の二段階で行った。以下にその手法を記述する。

強震動シミュレータとして、統計的グリーン関数法と一次元重複反射理論を適用している。宮城県沖地震を想定した強震動を作成し、これを地盤モデルに入射して地表面での強震動を算出した。次に、地盤液状化解析ツールを用いて地表面震度分布と地盤層の N 値から液状化可能性指数の分布を作成する。この際、地盤の細粒分含有率にばらつきがあると仮定して、地盤情報のばらつきが液状化可能性

指数に与える影響について考察を行った。さらに、液状化可能性指数と地表面震度から、道路被害解析ツールによって各道路リンクの被害箇所数を算出し、1000ケースの被害ネットワークを作成した。ネットワーク解析としてDijkstra法を組み込み、図5のA点を始点に、地域避難場所に近いB点を終点にする最短経路を算出した。

以下に解析結果を概説する。領域内の地表面計測震度分布図を図7に示す。地盤の層厚分布と比較すると、盛土層の厚い部分で震度が高くなっていることが見て取れる。検討対象領域は狭いが、地盤構造の影響によって地表面での地震動や震度に大きな差異が生じることがわかる。

液状化可能性指数の分布1000ケースにはかなりのばらつきがみられる。最短経路解析の結果として、各リンクの通過頻度を図8に示す。到達最短距離：2448.5 m，到達最長距離：3216.1 m，平均到達距離：2513.4 m，到達可能数：863 ケース，到達不可能数：137 ケースという結果になった。到達最長距離は最短距離に比べて1.3倍にもなるこ

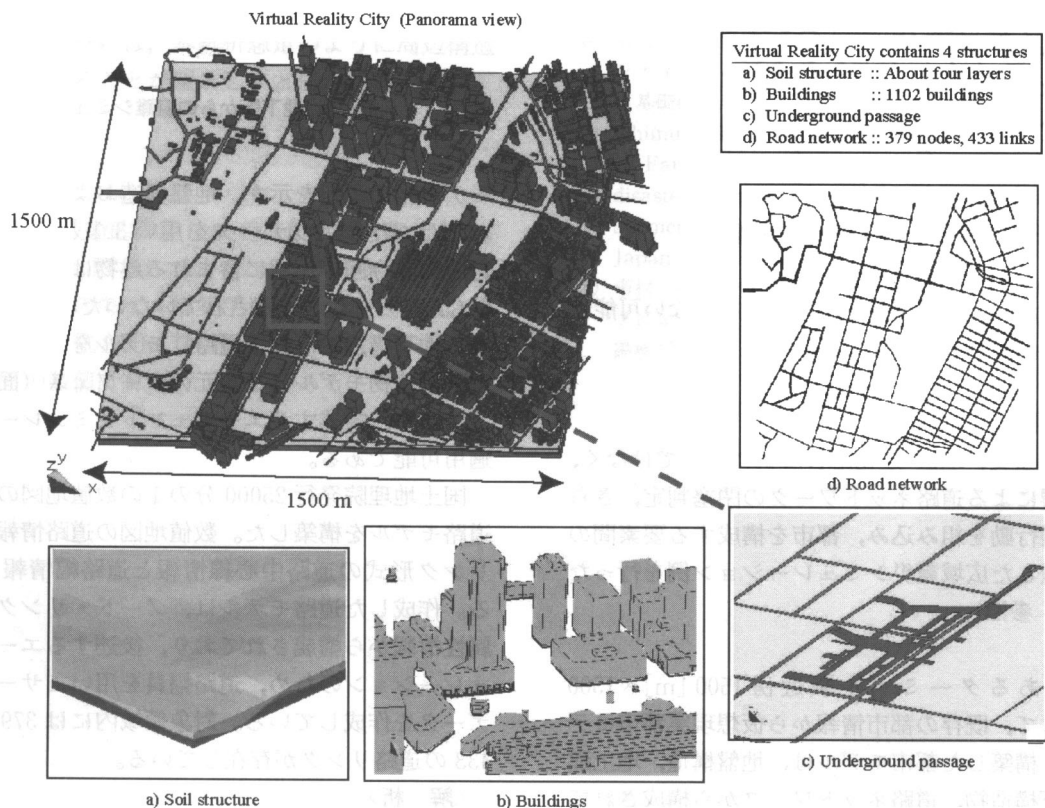


図9 都市モデル (東京)

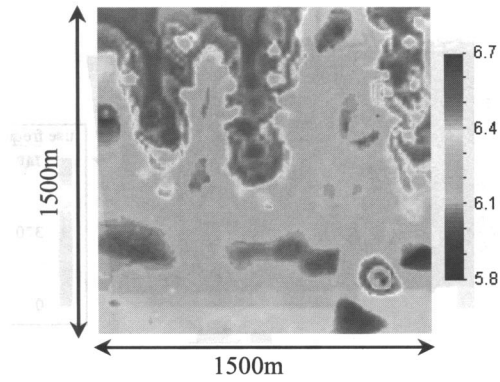


図10 計測震度分布想定

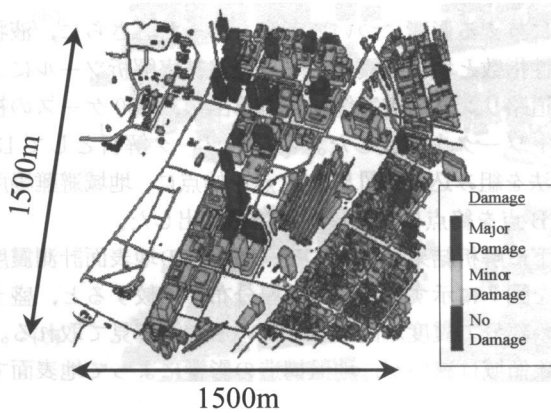


図11 被害分布想定

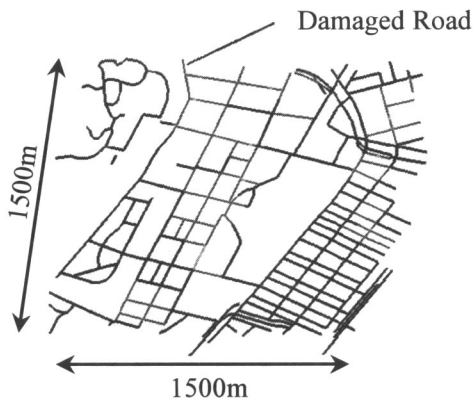


図12 道路ネットワークにおける被害想定

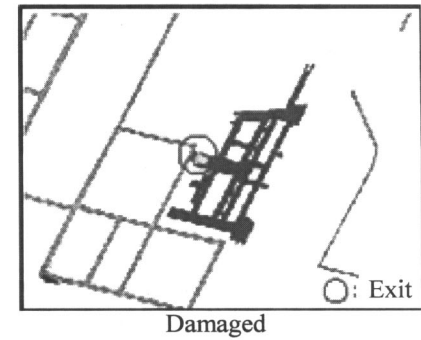
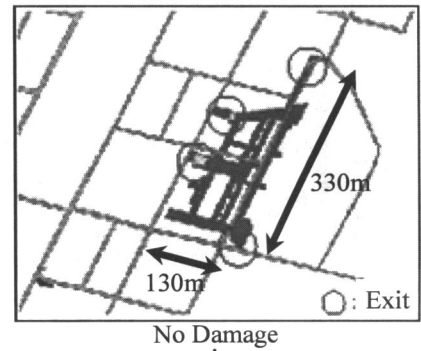


図13 地下街周辺における被害想定

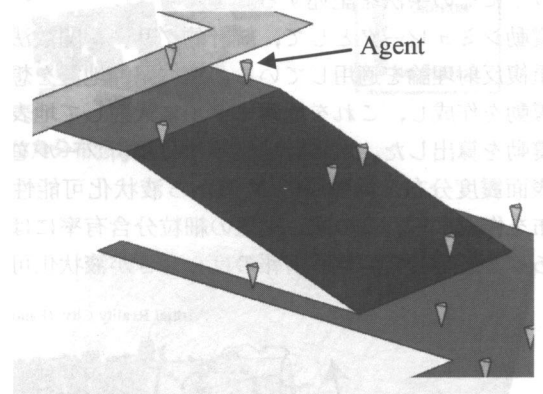


図14 地下街からの避難シミュレーション

ともさることながら、地域避難場所に到達できない可能性が低くないことがわかる。

3.3 IES 適用例 3

3.1, 3.2 を踏まえ、地盤・建物応答解析にだけでなく、建物被害の影響による道路ネットワークの閉塞判定、さらには人間の避難行動を組み込み、都市を構成する要素間の相互作用を考慮した広域震災シミュレーション例を行った(詳細は文献 8) 参照)。

〈モデル化〉

東京都内のあるターミナル駅近傍 1500 [m]×1500 [m] を対象として、既存の都市情報から仮想現実都市モデルを構築した。構築した都市モデルは、地盤構造、地上建築構造物、地下構造物、道路ネットワークから構成されている(それぞれ図 9(a), (b), (c), (d))。以下にその

モデル化の概要を示す。地盤構造および地上構造物のモデル化は GIS/CAD データを用い 3.1 とほぼ同様の手法で行った。今回の領域に含まれる建物は 1102 棟であった。3D CAD データが整備されていないため、2D CAD データから地下構造物(地下通路)モデルを作成した。作成した地下構造物モデルは 3次元のサーフェス(面)データを持っており、後述するエージェントシミュレーションに直接適用可能である。

国土地理院発行 25000 分の 1 の数値地図のデータにより道路モデルを構築した。数値地図の道路情報にはノード・リンク形式の道路中心線情報と道路幅情報が含まれている。作成した道路モデルは、ノード・リンクデータと道路属性情報から構成されており、後述するエージェントシミュレーションのため、道路幅員を用いてサーフェス(面)データを作成している。対象領域内には 379 の道路節点と 433 の道路リンクが存在している。

〈解析〉

構築した仮想現実都市モデルおよび IES のフレームワ

ークを用いて、関東地震を想定した都市の震災シミュレーションを行った。強震動シミュレータには統計的グリーン関数法と一次元重複反射理論を、構造物応答解析には近似モード解析と建築構造物被害による道路閉塞判定手法を、地下街構造躯体の応答解析には3次元有限要素法による詳細解析を、人の避難解析にはマルチエージェントシミュレーションを、それぞれ組み込んだ。道路閉塞判定手法は、大破建築構造物の周囲に建築物高さから推定した瓦礫流出バッファを作成して周囲道路の閉塞を判定する手法である。

地表面震度分布を図10に示す。不整形地盤の影響で地震動に偏りが見られる。建築構造物の被害分布を図11に示す。今回の解析では、免震・制震構造に関するデータを加味していないため、ほとんどの建物が被災しており、大破している建物もみられる。大破したこれらの建築構造物によって、図12に緑色で示すように道路閉塞が起ることが想定される。大破した建築構造物は数える程しかないが、対象領域中心部分のほとんどの道路が閉塞していることがわかる。地下構造物周辺の震災前後の状況を図13に示す。周囲構造物および地下街躯体の解析の結果、地下街の出入り口は、4カ所中3カ所が閉塞している。

最後に、上記の道路ネットワークおよび地下街の構造被害評価を元に、マルチエージェントを用いて震災時の避難シミュレーションを行った(図14)。都市全領域で解析を行ったが、簡単のため、地下街からの避難のみに絞って説明するが、震災無しの場合と震災有りの場合で比較するとある時間内に地下街から避難可能な人数は半数程度になると想定された。これは、周囲の構造物および地下街の被害により、地下街の出入り口が閉塞したことが主因と考えられる。地下街のような閉塞性の高い構造物において出入り口等の設置を計画する際には、本解析想定のように周辺構造物被害までを考慮することが望ましいと思われる。

4. まとめ

IES 開発に際し、技術的課題はモデル化と統合化である。GIS/CAD のデータは限られているため、データの質・量に応じた適切なレベルのモデル構築手法を開発している。また、都市域の震災を統合的に数値計算するには、非常に多くの構造物応答の数値計算を行う必要がある。それを可能

とするため、合理的なデータの構造を考案している。モデル化とデータ構造の点から、構造物応答シミュレーションでは、二つのアプローチを採用している。動的有限要素解析を行うのに十分なデータが得られる場合には、共通の動的有限要素法を用いる。この場合、入出力データのデータ構造が同様となる利点がある。一方、十分なデータが利用できない場合、耐震設計の知見を有効活用する。すなわち、耐震設計で使用されている各種構造物に特化した応答解析手法を適用することにより、限られた入力データ内で合理的な想定を行う。それぞれの場合に対応した IES のプロトタイプを開発している。

現在、IES の精度・信頼性を高めるとともに、事業継続計画の被害シナリオや復旧過程のシナリオへの応用を検討している。また、地震を含む自然災害一般の防災に、IES の応用も検討している。地震シミュレーションの代わりに、洪水や火山噴火のシミュレーションを組み込むことで、水害や火山噴火災害への応用も可能である。IES のような次世代統合ハザードマップが提供される日も近いかもしれない。

参考文献

- 1) 例えば、大都市大震災軽減化特別プロジェクトなど
- 2) 文部科学省地震調査研究推進本部、<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 3) 内閣府、<http://www.bousai.go.jp/jishin/>
- 4) 土木学会地震工学委員会統合地震シミュレータ研究小委員会、<http://e-society.cv.titech.ac.jp/IES>
- 5) Ichimura, T., Hori, M., Terada, K. and Yamakawa, T.: On Integrated Earthquake Simulator Prototype: Combination of Numerical Simulation and Geographical Information System, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 22, No. 2, pp. 233 s-243 s, 2005 October, DOI: 10.2208/jsceseee.22.233 s.
- 6) 市村 強・伊丹洋人・佐茂隆洋・堀 宗朗・山口直也: デジタルシティ神戸の構築とその震災シミュレーションへの応用に関する基礎検討, 構造工学論文集, JSCE, Vol. 51 A, pp. 513-520, 2005.
- 7) Ichimura, T., Samo, T., Hori, M. and Itami, H.: On Integrated Earthquake Simulator to generate advanced earthquake disaster information, The International Symposium on Management System for Disaster Prevention (ISMD 2006), Kochi, Japan, March 9-11, No. 21, 2006.
- 8) 市村 強・篠竹英介・佐茂隆洋・堀 宗朗: 既存 GIS/CAD データによる都市モデルの構築とその震災想定への適用に関する基礎検討, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 2006.

自助・共助を支援する和歌山県地震防災対策

たばた ひろふみ
田畑 博史*

1. はじめに

本県は有史以来約100年から150年周期で繰り返し発生している東南海・南海地震により過去、大きな被害を受けてきた。今後30年以内に東南海・南海地震が50～60%の確率で発生すると言われており、今世紀前半に発生することが確実視されている。

また、地震の専門家によれば、東南海・南海地震（海溝型地震）が起こる前後に、活断層などが原因で起こる内陸型地震が集中して起こる時期（活動期）があり、阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震以降、西日本は地震の活動期に入ったと言われている。県北部紀ノ川流域沿いには中央構造線断層帯という活断層が走っており、内陸型地震の対策も併せて考えておく必要がある。

このような状況の中、本県では、平成15年度に今後県が取り組むべき地震防災対策の具体的な施策を体系化した行動計画である「地震防災対策アクションプログラム」を作成した。

この計画では大地震に備え、「自助・共助・公助」が相互に連携して活動する防災協働社会の構築をめざしている。

自助…県民一人ひとりが自分自身を災害から守ること
共助…地域社会がお互いを災害から守ること
公助…国・県・市町村など行政が住民を災害から守ること

この「自助・共助・公助」のうち、「自助」「共助」の果たす役割が全体の9割を占めると言われている。

そのため、自助・共助を支援する県民への啓発活動を中心に紹介する。

和歌山県地震防災対策アクションプログラム体系図は以下のとおりである。

1 大地震に着実に備える

- 1 津波対策の推進
- 2 耐震化と災害に強いまちづくりの推進
- 3 防災意識の普及推進

4 地域の防災体制づくりの推進

5 行政の防災体制の強化推進

2 災害発生時に迅速適切な対策を実施する

6 災害応急対策の整備推進

7 被災後の生活支援体制の充実

3 復興を進め安全で安定した生活を構築する

8 迅速確実な県民生活の再建復興の推進

2. 地震による災害をイメージする

地震防災対策を考えるうえで、東南海・南海地震などが起こればどのような被害が生じるのか、またその被害により県民生活にどのような影響を及ぼすのかをイメージすることが大切である。そのため、本県では平成15・16年度に津波浸水予測調査を、平成16・17年度に地震被害想定調査を実施した。これらの調査結果は県ホームページ (<http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/index.html>) に掲載するとともに、さまざまな啓発素材も作成した。

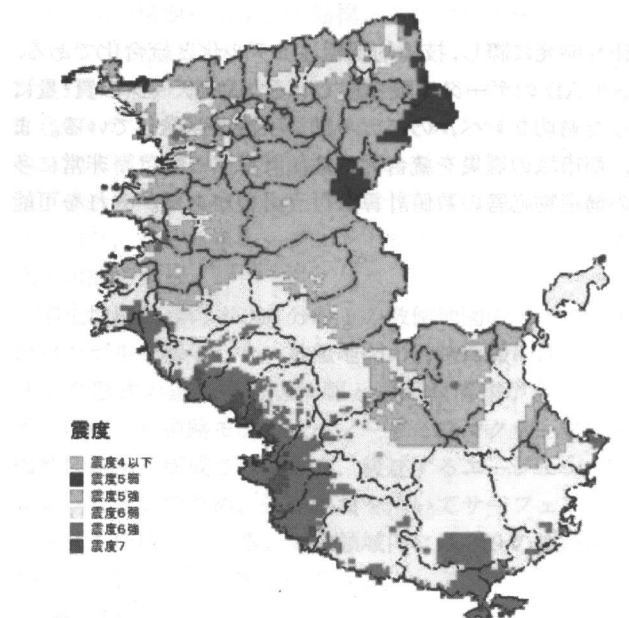


図1 震度分布図 (東海・東南海・南海地震同時発生の場合)

* 和歌山県危機管理局総合防災課主任

表1 想定地震による被害予測

	項目	季節 時間	東海・東南海・南海地震
建物被害 〔棟〕	全壊・焼失	冬 5時	84,771
		冬 18時	104,595
		夏 12時	85,012
人的被害 〔人〕	死者数	冬 5時	5,008
		冬 18時	4,700
		夏 12時	4,847
	負傷者数	冬 5時	8,348
		冬 18時	8,225
		夏 12時	6,889
ライフライン 供給支障 〔人〕	断水人口	共通	549,177
	停電人口	冬 5時	915,864
		冬 18時	920,527
夏 12時		915,864	
避難者 〔人〕	ピーク時	冬 5時	233,048
	避難所	冬 18時	243,230
	生活者数	夏 12時	233,170

(1) シミュレーション動画、啓発ビデオの作成

津波による災害をイメージするため、東海・東南海・南海地震の想定波源域（中央防災会議モデル）に基づく県津波浸水予測調査結果を再現したリアルなイメージを図（3次元CG動画）や時間経過に伴い、浸水区域の変化を示した2Dシミュレーション映像を作成した。

住民ワークショップにおける住民説明資料や津波防災教育の場における防災啓発教材として活用している。

また、この3D映像やインド洋大津波の映像を使い、小学校・中学校での授業や自治会・職場等での学習教材としての活用を目的に、地震・津波啓発ビデオ「東南海・南海地震に襲われたら」（30分）を作成した。後で説明する「出張！県政おはなし講座」でも、これらの素材を活用して啓発をしている。

(2) 市町村津波ハザードマップ作成

地震が発生した場合、迅速かつ的確な避難行動を取ることが必要である。そのため、県は沿岸市町村に、県が作成した津波浸水予測図に基づき、浸水区域や避難場所、避難経路等が入った津波ハザードマップを作成するようお願いしている。今年度中に、すべての沿岸市町村で完成する予

表2 津波シミュレーション一覧

詳細、リアルな津波シミュレーション	
●浸水区域図（12.5mメッシュ）	田辺市 和歌山市北部 和歌山市南部
●動画関係	
→2次元簡易動画	串本町 田辺市 和歌山市北部 和歌山市中部
→3次元CG（広域伝搬）	
→3次元CG	串本町 田辺市 海南市
→3次元CG（津波来襲イメージ）	串本町 田辺市
→津波啓発ビデオ	広川町 和歌山市

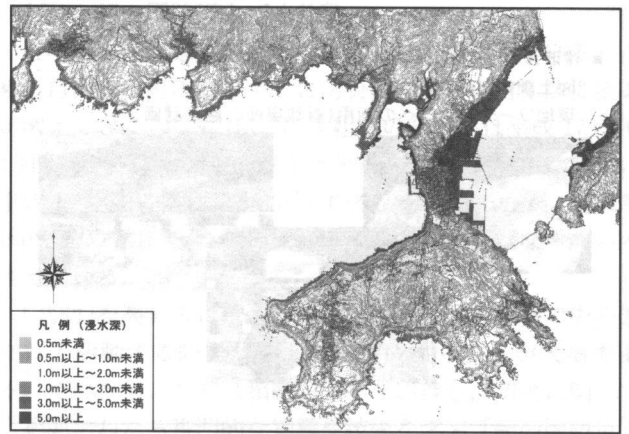


図2 津波浸水予測図（串本町）



図3 2次元簡易動画（旧海南市）

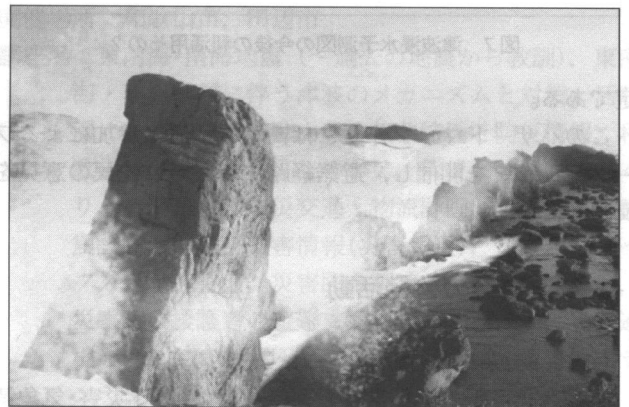


図4 3次元CG動画（津波襲来イメージ：串本町橋杭岩）



図5 地震津波啓発ビデオ



図6 津波浸水予測図の今後の利活用その1



図7 津波浸水予測図の今後の利活用その2

定である。

このハザードマップ作りには、地域住民の参加によるワークショップを開催し、避難経路など設定に住民の意見を反映している。

3. 県民への啓発活動

(1) 防災に関する県ホームページの充実

県総合防災課のトップホームページには、「災害・気象情報」、「災害から自分・地域を守る(自助・共助)」、「和歌山県の防災対策」、「調査・報告書」、「県発行のパンフレット等」に分類して掲載している。



図8 県総合防災課 HP のトップページ

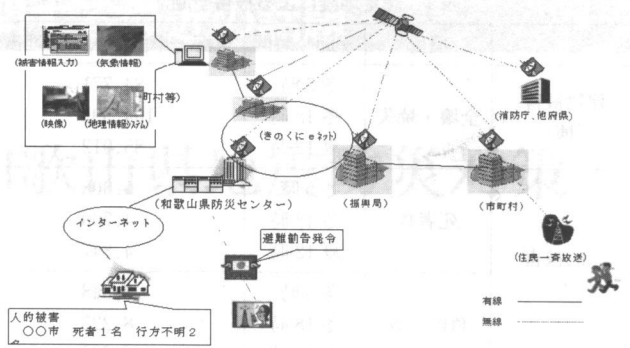


図9 和歌山県総合防災情報システムイメージ

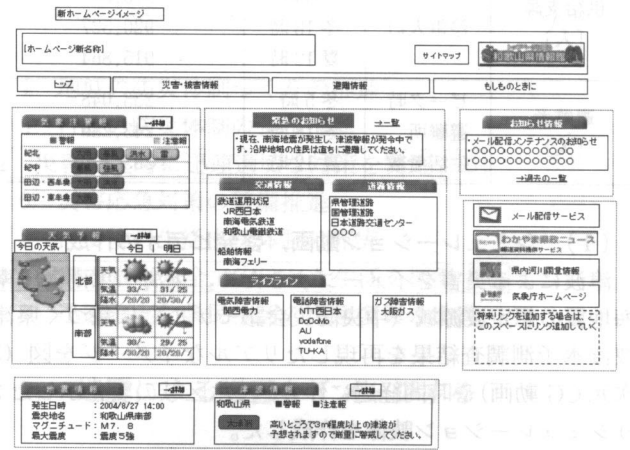


図10 防災ポータルサイト「防災わかやま」案(防災情報を一元的に集約し、住民に情報を発信)

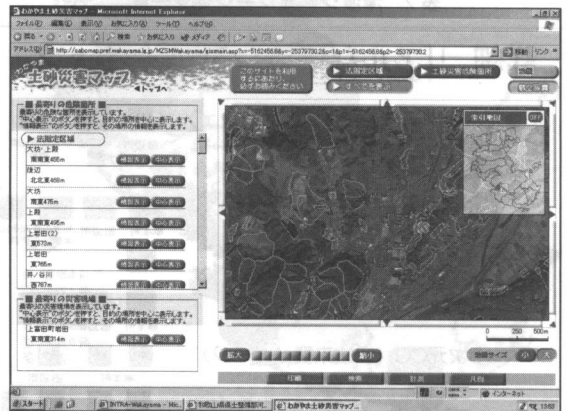
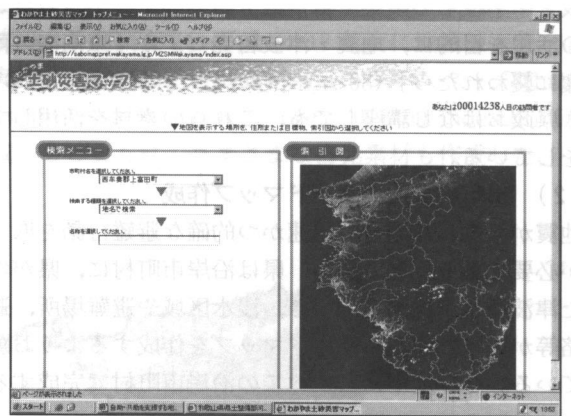


図11 県砂防課ホームページ (<http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/080600/>)

現在、県では総合防災情報システムを構築中であるが、このシステムでは県・市町村・消防本部・防災関係機関が災害時にも途切れずに情報連絡・情報共有を図り、迅速な災害対策を実施できるように、各機関を専用回線と衛星無線で結んで強固な通信体制を築くとともに、住民に対しても、携帯電話メール、ホームページ、さらに津波注警報を県から市町村無線を通じて直接県民に放送する「住民一斉」などで情報を提供することにしている。

県砂防課のホームページに土砂災害マップを今年8月から公開した。

県内には、18,487カ所の土砂災害危険箇所(全国第6位)がある。県民一人ひとりが大雨等、土砂災害発生の際の恐れのある場合に備えるためには、自分の身のまわりでどのような危険な場所があるのか、日頃から知っておくことが大切である。

県ホームページに公開中の土砂災害マップでは、土砂災害危険箇所を航空写真(拡大・縮小可能)に重ね合わせて見ることが可能である。また、近くにある危険箇所の方向や距離が自動的に表示されるので、自分の家のまわりや通勤・通学路などの危険な箇所を容易に確認することができる。

(2) 出張！ 県政おはなし講座

「自助」を高めるには、県民一人ひとりの防災意識を高め、「自分の命は自分で守る」ということを理解し、各家庭で防災対策を進めることが重要である。

本県では県職員が県民のみなさんのもとに直接出向き、県が重点的に取り組む施策や県民の関心の高い事項などを説明する「出張！ 県政おはなし講座」を実施している。

そのなかでも、「東南海・南海地震防災講座」が最も人気があり、平成15年1月から平成18年3月までに455回を数え、受講者数は39,371人にもなる。平均すると、1カ月につき10回、受講者805人になる。人数も一回に十数人から数百人までさまざまである。休日や夜間などに公民館の畳の間に集まっていただき、住民の方とひざをつきあわせ、ノートパソコン、液晶プロジェクターを使って、過去の地震の教訓、津波シミュレーション映像や地震・津波に対する備えなどのお話をしている。熱心な住民の方からは説明に窮するような質問や要望などが寄せられる場合もあるが、それも県職員への熱い期待であると受けとめている。

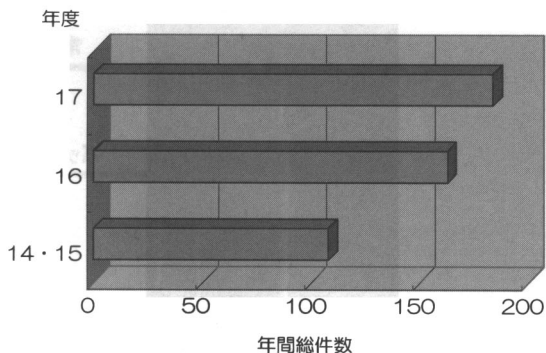


図12 「出張！ 県政おはなし講座」年度別実績

(3) 紀の国防災人づくり塾

近年、県内には「自分たちのまちは自分たちで守る」ため、自治会や町内会を中心に防災活動を行う自主防災組織が増えてきた。県内の自主防災組織の組織率は平成17年度4月1日現在で、68.5%(全国平均64.5%)となっている。平成17年度に初めて、全国平均を少し上回ったが、組織率100%をめざして、さらに支援していかなければならないと考えている。

「共助」を高めるには、このような自主防災組織で中心となって活動する防災リーダーを育成することが重要である。そのため、県では和歌山大学と連携し、防災に関して広範囲にわたる専門的な知識や技術を学ぶ「紀の国防災人づくり塾」(7日間)を平成17年度から実施している。本県は南北に長いという地理的な事情があるため、和歌山市と田辺市の2カ所をテレビ会議システムで結ぶ遠隔地授業を行っている。平成17年度に111名が修了し、今年度は152名が参加している。今年度から修了者は「防災士」の試験を受験する予定である。この塾を修了された方が各地域で、新たに自主防災組織を設立したり、活発な自主防災活動をすることを期待している。

平成18年度講座概要

開催時期 8月～11月の日曜日に開催

(月2回程度、1日につき90分の講座を3回実施)

開催場所 和歌山市、田辺市

講座名 東南海・南海地震(～過去の地震から教訓)、東南海・南海地震に伴う津波のメカニズムと対策、活断層による地震、和歌山県の気象特性と防災情報、和歌山県の災害対策、心のケア、震災に強いまちづくり、わがまちの防災交通・物流計画、災害医療、耐震診断と補強、災害情報(災害報道)、孤立化とライフスポット整備、災害図上訓練(1日)、災害心理、災害時要援護者の避難支援について考える、災害過程を通しての避難所運営、被災者支援、災害とボランティア、土砂災害のしくみ・被害とその対策

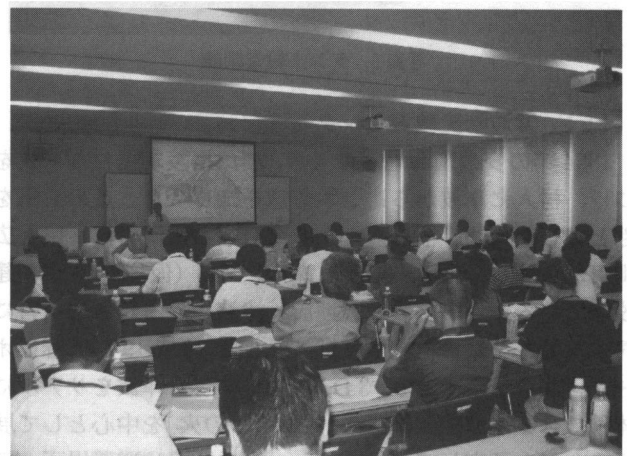


写真1 受講風景

(4) 高校生ボランティアスクール

東海・東南海・南海地震が同時に発生すれば、関東から九州まで、広域にわたり被害を受けると想定されている。

県外からのボランティアがすぐに関わることができることは期待できない。

そのため、高校生が地域防災の担い手として救援活動に貢献できるように準備しておくことが必要である。

今年も8月25日に「高校生ボランティアスクール」が県内5つの高校で開催され、県内の高校生、中学生および教員等約1,800名が参加した。消防本部の指導による救急訓練、自衛隊の協力による炊き出し訓練・テント設営訓練、阪神・淡路大震災の語り部による講話など実践的な研修を実施している。

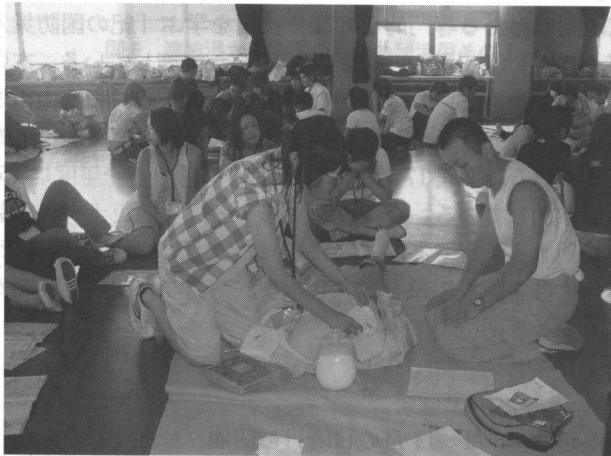


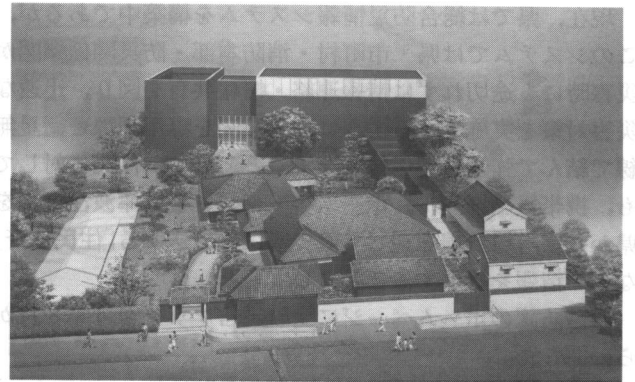
写真2 救急訓練



写真3 テント設営訓練

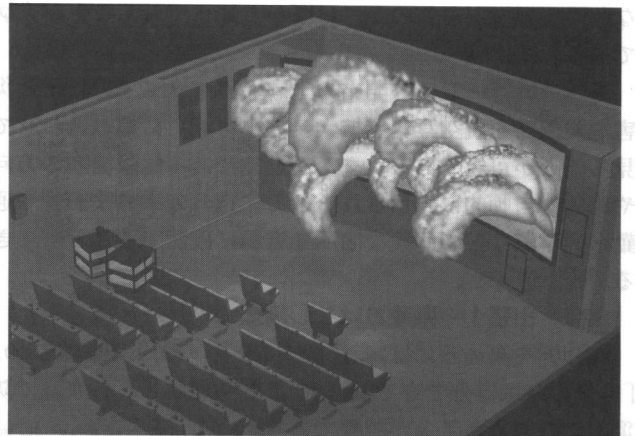
(5) 津波防災教育センター

1854年の安政南海地震のとき、濱口梧陵が稲むらに火をつけ、村人に津波から避難する道を知らせた。この故事をもとにした物語「稲むらの火」で有名な広川町に、県と広川町が共同して「津波防災教育センター（仮称）」を現在建設中である。この施設は、地震・津波の恐ろしさや災害に対する備えを教育啓発する拠点として、平成19年度春にオープンする予定である。3D、振動等により津波をリアルに体験できる津波映像施設や、「稲むらの火」を中心として展示物などを予定している。また、この施設は避難場所・備蓄倉庫としての機能も持っている。なお、隣には濱口梧陵記念館が併設している。



※ 手前の建物が濱口梧陵記念館。後ろの建物が津波防災教育センター（仮称）（鉄筋コンクリート一部3階建て、約1,200m²）

図13 津波防災教育センター（仮称）の外観イメージ図



迫力のある3D映像や音響により、津波の脅威を疑似体験。（映像室の広さ145m²、座席数50席）

図14 津波映像室のイメージ図

(6) 現代版「稲むらの火」モデル事業

東南海・南海地震が夜間に発生し、停電等により照明がダウンした場合、津波から住民を避難場所に円滑に誘導するための安価で有効な誘導灯システムの製品およびアイデアを平成17年度に広く一般から募集し、有識者からなる審査委員会にて審査や実証実験を行った。その結果、最優秀となった製品を今年度において和歌山県太地町小長井地区

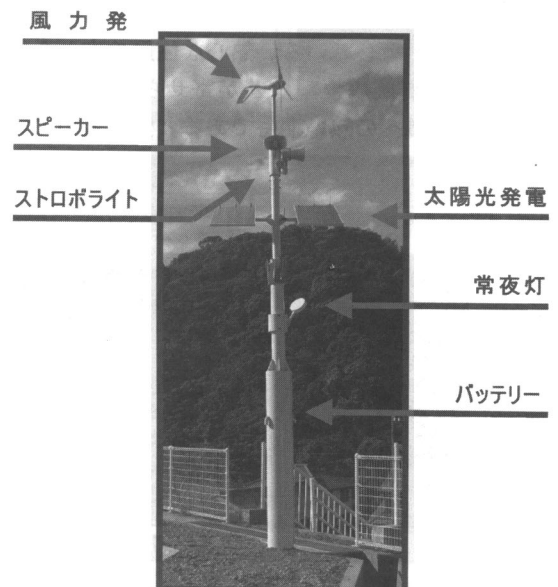


写真4 既製品設計

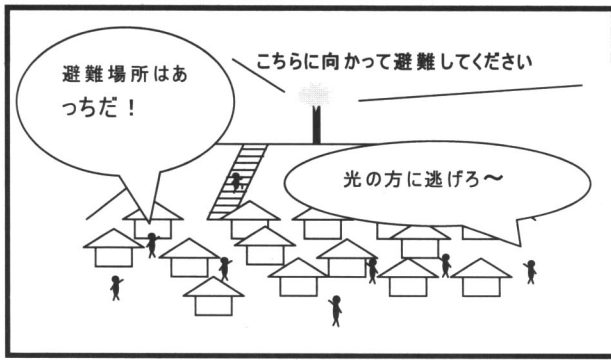


図 15 誘導灯があれば…

にモデル的に設置した。

この最優秀製品は、風力と太陽光の自然エネルギーにより発電および蓄電を行い、平常時は常夜灯として光り、地震発生時には、照明（強力な LED ストロボライト）が点滅する。また、付属のスピーカーからは、サイレン音や音声で避難指示などが可能となっている。

4. おわりに（今後の展望）

「自助」・「共助」の支援対策を中心に説明してきたが、「公

助」についても、国・県・市町村でやっていかなければならないことがたくさんある。平成 17 年 3 月に中央防災会議で「東南海・南海地震の地震防災戦略」が決定された。県ではこの地震防災戦略を受けて、今年度中に県の地域目標を策定し、地震防災アクションプログラムの中に位置づけ、防災対策を推進していきたいと考えている。地震による被害を最小限に抑えるため、今後 10 年間で大地震に着実に備えることが肝要である。

また、次世代を担う子供たちにきちんとした防災教育を行うことも重要である。津波防災教育センターを活用して、防災教育を充実していきたいと考えている。

東南海・南海地震は、私たちの子どもや孫の時代に必ずやってくる。そのため、私たちが今できることを子どもや孫のためにやっておかなければならない。

各家庭では、家具の転倒防止や自宅の耐震化、ブロック塀の転倒防止、地震保険の加入など地震に備え、事前に備えておかなければならないことがたくさんある。

県民一人ひとりが事前に地震による備えを実践していただけるよう努めていきたいと考えている。

新潟県中越地震による災害の復旧事例

いがらし まさみ*
五十嵐 正巳*

1. はじめに

平成16年(2004年)10月23日17時56分、新潟県中越地方において、震源の深さ13km、M6.8の地震が発生した。図1に示すとおり、川口町で震度7、小千谷市、山古志村、小国町で震度6強、長岡市、十日町市、栃尾市、越路町、三島町、堀之内町、広神村、守門村、入広瀬村、川西町、中里村、刈羽村で震度6弱を観測した。また同日18時11分頃にM6.0の余震が発生し、小千谷市で震度6強を、18時34分頃にM6.5の最大余震が発生し、十日町市、川口町、小国町で震度6強を観測した(市町村名は地震時のものである)。

気象庁は10月23日17時56分に発生した地震を「平成16年(2004年)新潟県中越地震」(英語名:The Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004)と命名した。

地震による土砂災害や建物倒壊、ショック死、避難車両でのエコノミークラス症候群などが原因で、新潟県内では67人が死亡し、4,795人がけがをした。また、住家3,175棟が全壊するなど、およそ10万棟の住家が損壊した(表1)。公共土木施設についても表2のような被害を受けた。避難者は一時10万人以上にのぼり、約600カ所の施設で避難生活を余儀なくされた。しかし、地震発生から約2カ月後に

は、学校体育館などで避難生活を続けていた被災者全員が退去し、避難所は全て閉鎖された。

地震発生直後、写真1に示すような道路の寸断などにより、長岡市・小千谷市・山古志村など4市2町1村で最大

表1 中越地震による被害状況

人的被害(人)			住家被害(棟)				非住家被害(棟)
死者	行方不明	重傷	軽傷	全壊	大規模半壊	半壊	一部破損 公共施設・その他
67	0	635	4,160	3,175	2,166	11,628	103,777 40,346

平成18年9月22日現在

表2 中越地震による公共土木施設の被害状況

工種	県全体		県工事		市町村工事	
	箇所数	金額	箇所数	金額	箇所数	金額
河川	445	113.7	417	110.2	28	3.5
道路	2,604	753.8	926	498.1	1,678	255.7
橋梁	89	34.6	44	27.0	45	7.6
砂防施設	74	31.0	74	31.0	—	—
下水道	290	182.9	21	16.0	269	166.9
公園	37	6.8	3	0.5	34	6.3
合計	3,539	1,122.8	1,485	682.8	2,054	440.0

(決定額, 単位: 億円)

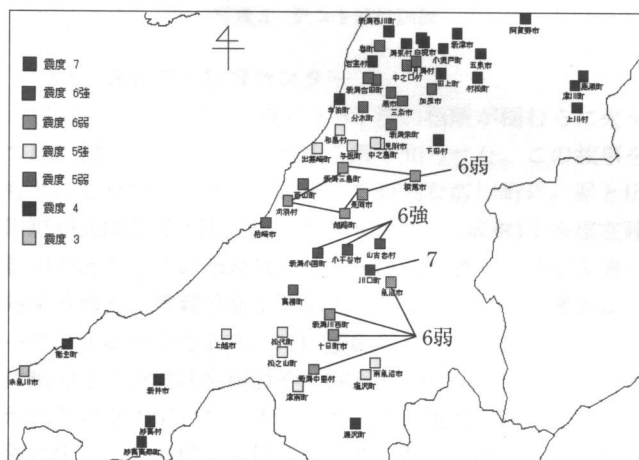


図1 新潟県中越地震の震度分布(新潟地方気象台提供をもとに編集)



写真1 国道117号 小千谷市細島地内の道路被災状況

* 新潟県土木部砂防課地すべり係主査

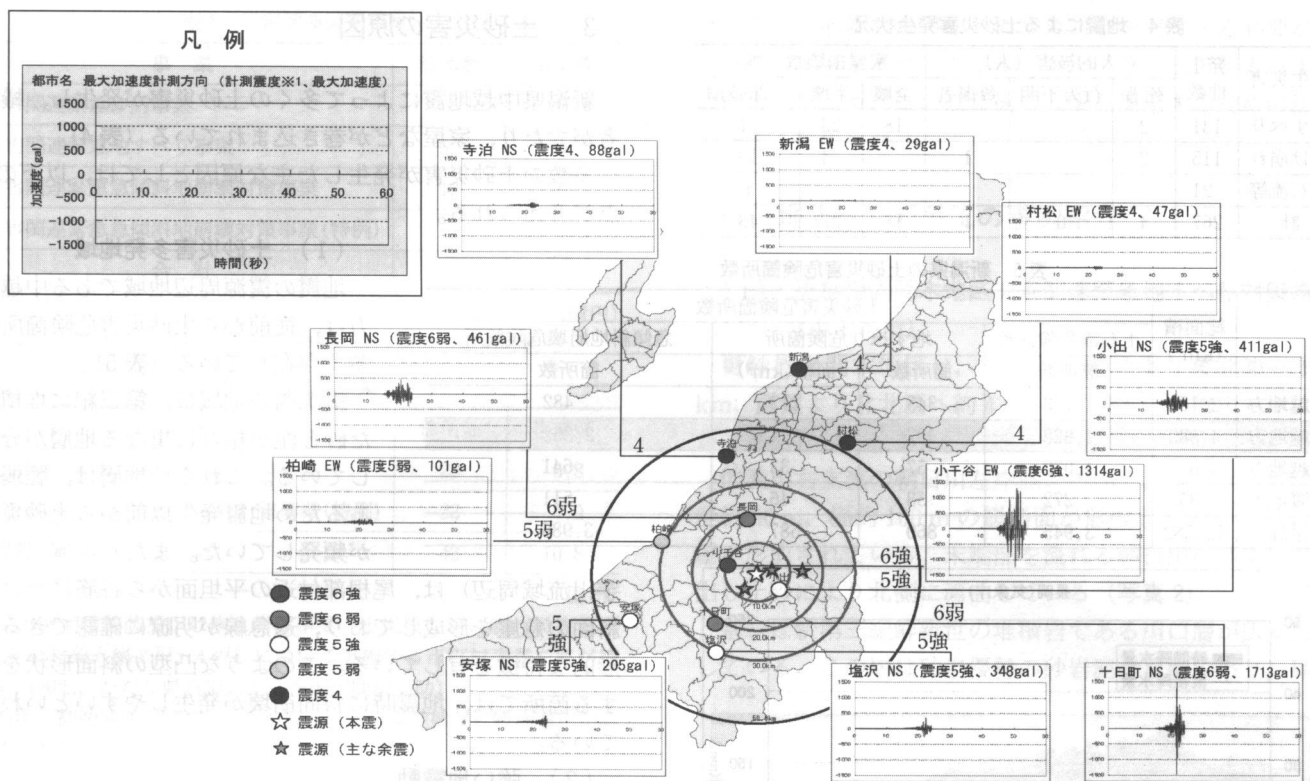


図2 新潟県中越地震の観測所の分布と本震地震波形 (地震波形は防災科学技術研究所 K-NET データ使用)

※1 計測震度は観測地点と同市内の最大計測震度

表3 新潟県中越地震本震と主な余震(最大震度が5弱以上を観測した地震)

地震発生日	時間	M	深さ(km)	最大震度
10月 23日	17:56	6.8	13	7
	17:59	5.3	16	5強
	18:03	6.3	9	5強
	18:07	5.7	15	5強
	18:11	6.0	12	6強
	18:34	6.5	14	6強
	18:36	5.1	7	5弱
	18:57	5.3	8	5強
	19:36	5.3	11	5弱
	19:45	5.7	12	6弱
	19:48	4.4	14	5弱
	24日 14:21	5.0	11	5強
	25日 00:28	5.3	10	5弱
	06:04	5.8	15	5強
	27日 10:40	6.1	12	6弱
11月 04日	08:57	5.2	18	5強
	08日 11:15	5.9	ごく浅い	5強
	10日 03:34	5.3	5	5弱
12月 28日	18:30	5.0	8	5弱

M 6.0以上の地震

61の集落が孤立した。道路の被災は、救援物資の搬入を困難にただけでなく、生活に密接する電気・ガス・上下水道等のライフラインの収容空間にも多大な被害を及ぼし、復旧を大きく遅らせる要因となった。

2. 地震の概要

新潟県中越地震は2つの大きな特徴がある。一つは非常に大きな加速度を生じさせたことである。地震の本震は防災科学技術研究所「K-NET」の小千谷観測点において最大水平加速度約1,314 gal(東西成分)を観測した(図2)。

加速度は、震央から距離に比例して減衰していくが、地盤条件によって減衰の程度が異なり、一様ではない。今回の地震で観測された最大加速度は、小千谷市よりも震源位置から離れた十日町市(1,713 gal)で観測された。

もう一つの特徴は、比較的大きな余震が長期間にわたり多数発生したことである。兵庫県南部地震(1995)の最大余震はM5.4(本震2時間後)であった。一方、新潟県中越地震ではM6.0以上の余震が4回も発生しており、余震の規模は兵庫県南部地震より大きなものであった。また余震発生の期間も、兵庫県南部地震ではM5.0クラスの余震が地震発生8日目以降(M5.1, H7.1.25)発生していないが、新潟県中越地震は、本震の2カ月後にもM5.0クラスの余震が発生しており、長期にわたり余震が発生した(表3, 図3)。

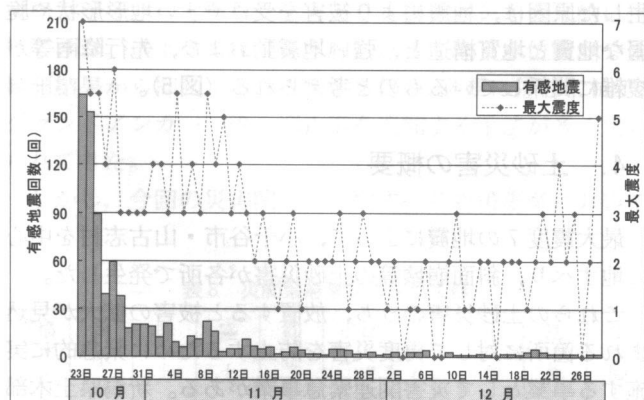


図3 震度1以上を観測した地震の回数と最大震度 (気象庁公開データをもとに作成)

表4 地震による土砂災害発生状況

発生災害	発生件数	人的被害(人)			家屋損壊数(棟)		
		死者	行方不明	負傷者	全壊	半壊	一部破損
地すべり	131	2			18	23	31
かけ崩れ	115	2		1		4	16
土石流等	21						1
計	267	4	0	1	18	27	48

表5 新潟県の土砂災害危険箇所数

	総面積(km ²)	土砂災害危険箇所数			
		土石流危険渓流	地すべり危険箇所		急傾斜地崩壊危険箇所
		箇所数	箇所数	面積(km ²)	箇所数
上越地方	2,164	773	343	212	482
中越地方	4,883	1,828	407	294	2,352
下越地方	4,679	1,072	57	33	641
佐渡地方	855	272	53	46	511
県計	12,582	3,945	860	587	3,986

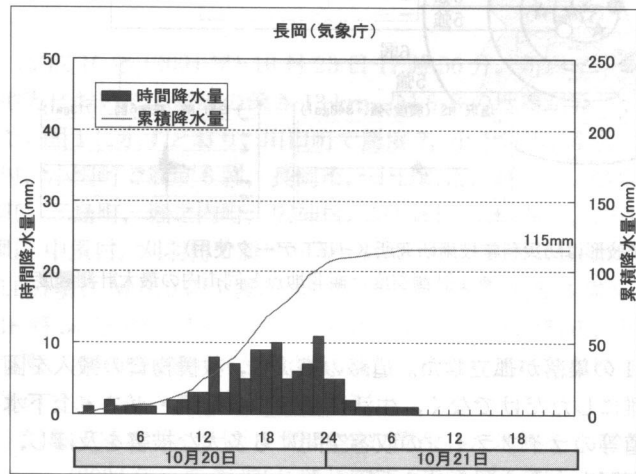


図4 2004年台風23号による長岡の連続雨量

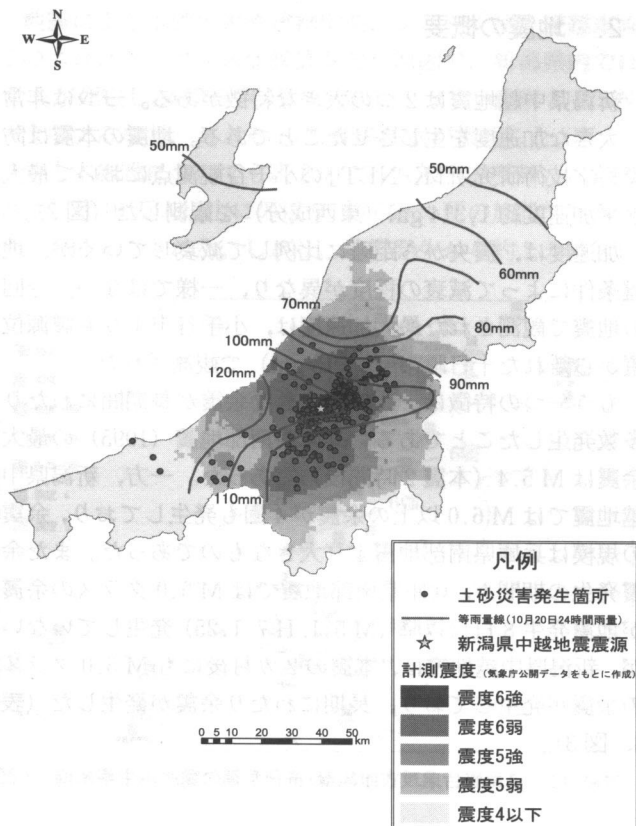


図5 台風23号の24時間雨量と地震による土砂災害発生箇所の分布

3. 土砂災害の原因

新潟県中越地震によって多くの土砂災害が発生し、犠牲者がでたり、家屋などが巻き込まれている(表4)。

多数の土砂災害が発生した主な原因としては、以下の3点が考えられる。

(1) 土砂災害多発地域

地震の震源周辺地域である中越地方は、従前から土砂災害危険箇所が多く存在している(表5)。

震源周辺地域は、第三紀に堆積した砂と泥が相互に重なる地層が分布している。これらの地層は、脆弱であるため地震発生以前から土砂災害が頻発していた。また本地域(特に

芋川流域周辺)は、尾根部付近の平坦面から谷筋にかけて斜面の急崖を形成しており、遷急線が明瞭に確認できる地形的な特徴を有している。このような凸型の斜面形状を有する箇所では、地震時に斜面崩壊が発生しやすいといわれている。

(2) 強い地震動

地震に起因して生じる斜面崩壊の機構は、豪雨によって引き起こされる斜面崩壊の機構と異なる。地震動により斜面に強い水平方向の力や鉛直方向の力が加わり斜面内の土層が乱され、斜面の安定性が損なわれたために斜面崩壊が発生したと考えられる。

(3) 先行降雨

土砂災害が頻発した原因として先行降雨が多かったことが考えられる。中越地方は、図4に示すように地震発生直前に台風23号(10月20日)による降雨(連続雨量115mm, 長岡, 気象庁)によって、地下水位が高い状態にあったことが考えられる。土層内の含水比が高かった状態で地震動が加わったため、土層の強度低下が大きかったのではないかと考えられる。

また、中越地方は地震発生の3カ月前にも梅雨前線豪雨(7.13水害)によって土砂災害の被害を被った地域である。この豪雨では、栃尾(気象庁)で24時間雨量422mm(最大時間雨量58mm)を記録した。

以上のことから、今回の地震により多くの土砂災害が発生した原因は、地震により被害を受けやすい地形形状や脆弱な地質と地質構造と、強い地震動および、先行降雨等が複雑に関係しているものと考えられる(図5)。

4. 土砂災害の概要

最大震度7の地震によって、小千谷市・山古志村を中心に地すべり、斜面崩壊等の土砂災害が各所で発生した。

これらの土砂災害のうち、放置すると被害の拡大が見込まれる箇所に対して再度災害を防止するために緊急的に実施する事業として災害関連緊急事業がある。新潟県土木部では、災害関連緊急砂防事業、災害関連緊急地すべり対策事業、災害関連緊急急傾斜地崩壊対策事業をあわせて78カ

表6 災害関連緊急事業

事業	箇所数	事業費
災害関連緊急砂防事業	6	20.2
災害関連緊急地すべり事業	52	174.4
災害関連緊急傾斜地崩壊対策事業	13	26.7
災害関連緊急傾斜地崩壊対策事業(特例)	7	6.5
合計	78	227.8

(億円)

※特例：補助要件を緩和し、宅地擁壁に特例適用が認められた。

表7 市町村事業

事業	箇所数	事業費
災害関連地域防災がけ崩れ対策事業	20	6.8
災害関連地域防災がけ崩れ対策事業(特例)	22	4.0
合計	42	10.8

(億円)

※災害関連地域防災がけ崩れ対策事業〔小規模ながけ崩れ災害箇所(保全対象人家2戸～4戸)について実施する市町村事業を県が補助(90%、ただし県負担の1/2を国が間接補助)〕

※特例：補助要件を緩和し、高さ3m以上の宅地擁壁に特例適用が認められた。

所で実施した(表6)。

また、小千谷市を中心に住宅宅地の擁壁が転倒・倒壊したり、クラックが発生する被害が多数発生した。放置することにより擁壁所有者以外の第三者に被害が及ぶおそれがあることや、道路、水道、ガス等の公共施設に被害が生ずるおそれがあることから、災害関連緊急傾斜地崩壊対策事業(特例)として宅地擁壁等の人工がけも復旧対象として採択された。

さらに、新潟県が補助する市町村事業として災害関連地域防災がけ崩れ対策事業がある(表7)。これは、激甚災害の指定を受けた災害によるがけ崩れ被害のうち、保全人家戸数が2戸以上、事業費600万以上の採択基準に該当する箇所に補助する事業であるが、これについても特例として3m以上の人工がけに適用された。

5. 中越地震における地すべり対策工概要

新潟県の地すべり対策工は、被圧地下水が原因となる地すべりが多いことから、従来より水抜き対策を優先的に行ってきた。地下水排除工を実施した後、地下水位観測や歪観測結果から抑制工の効果判定を行い、必要に応じて杭工、グラウンドアンカー工等の抑止工を追加する手法が多く用いられてきた。

しかし、今回の災害関連緊急地すべり対策事業において

表8 災関緊急事業の採用工種

グ横工ボーリン	集水井工	排水工	盛土工	抑止杭工	ボロルク工	アグラウンド工	土留工	法工	床固工
41	20	20	24	11	8	11	28	28	8

は、地震で崩壊した斜面への緊急対策を実施する必要があったため、杭工、ロックボルト工、グラウンドアンカー工等の抑止工や、滑落崖の直背後の人家を保全するための法枠工を多く採用した。

6. 地すべり対策工の事例紹介

(1) 更紗橋岩間木地区災害関連緊急地すべり対策事業(小千谷市)

更紗橋岩間木地区は、小千谷市街地より東北東へ約6km、震源より北北西へ約4kmに位置し、信濃川右岸に広がる東山丘陵地にある。

信濃川右支流の朝日川左岸側の斜面で、河川からの比高差約50m、幅約100mの緩斜面が形成されその上部は急崖が形成されている。末端部を流れる朝日川の河道は押し出し土砂により北側に湾曲している(写真2)。

基岩は新第三紀鮮新世の堆積岩である川口層が広く分布している。この層は砂岩優勢の砂岩泥互層であり、砂岩



写真2 更紗橋岩間木地区全景

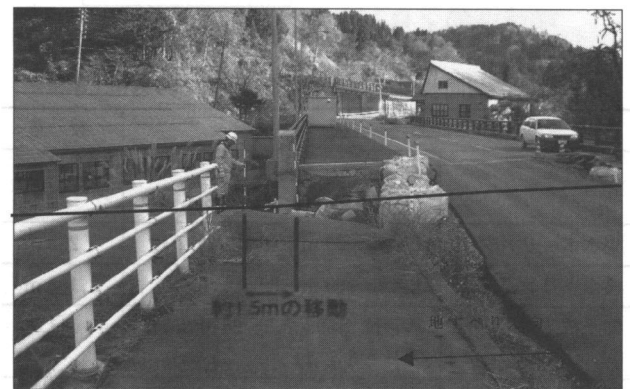


写真3 地震直後の被害状況



写真4 地震直後の被害状況2

は細粒なものを主体としている。この基岩を地すべり移動層が分布している。

もともと地すべり地形を有していた当該区域において、部分的な小ブロックが再滑動したことがわかった(写真3, 写真4)。

対策工法については、地下水位が非常に高かったため、横ボーリング工による地下水低下を図った。また融雪期や降雨期に地表水が多量に地下浸透することを防止するため水路工により地表水をブロック外に排出した。さらに末端部の緩傾斜地に押え盛土工を実施し、安全率の向上を図ったが、これらの対策による安全率は1.13までしか見込まれなかったため、主要道路である国道291号の交通支障とな

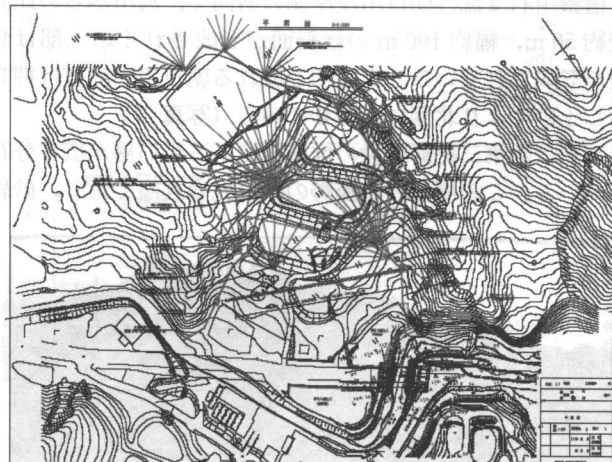


図6 更紗橋岩間木地区平面図

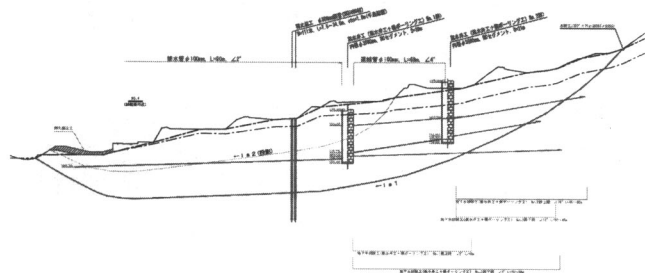


図7 更紗橋岩間木地区断面図

表9 更紗橋岩間木地区 災害関連緊急地すべり対策工事概要

工 種		数 量
集水井工	φ3.5 m H=18.50 および 22.25 m	2 基
集水ボーリング工	L=30~90 m 49 孔 上下段	255 m
横ボーリング工	L=20~60 m 69 孔 10 群	2,105 m
抑止杭工	鋼管杭 φ508 7.5~34.0 m ΣW=661.4 t	111 本
土留工	大型ふとんかご 3段積み H=4.0 m	32 m
押え盛土工	盛土	1,600 m ³
水路工	開暗渠	107 m
	開渠	287 m
	暗渠	26 m
	円形落差工 φ2.5 m H=2.0~2.5 m	4 基

らないよう抑止杭を実施して目標安全率1.20を確保した。抑止杭の採用にあたっては、グランドアンカー工による抑止工と比較検討したが、すべり面勾配が緩く、アンカー長が長くなることや、地表面が軟弱な崩積土であるため受圧板構造も経済的に不利になることから抑止杭の採用を決定した(図6, 図7, 表9)。

(2) 半蔵金諏訪地区災害関連緊急地すべり対策事業 (栃尾市, 市町村合併 H 18.1.1 により現長岡市)

半蔵金諏訪地区は、栃尾市街地から南南西約11 km, 震源から東北約14 km, 西谷川左岸側斜面に位置する。西谷川から左岸側比高差100 mまでは、平坦面と急傾斜面が混在し、それより高標高部は勾配40°程度の急斜面が形成されている。

当該崩落箇所はこの平坦部から急斜面にかけての尾根地形で等高線が膨らんだ箇所が崩落した(図8, 写真5)。

基岩は荒谷層と呼ばれる泥岩および凝灰角礫岩で構成され、その上部を洪積段丘堆積物や地すべり堆積物等の被覆層が分布している。当該地区の荒谷層の凝灰岩は風化作用により著しく軟質化し、地震動により風化した弱部が破碎され、その破碎面をすべり面として地すべりが生じたものと考えられる。

対策工法の検討にあたり、地下水排除工から検討を始めたが地下水は比較的少なかったために、安全率は1.05程度しか見込めなかった。このため、目標安全率1.20を確保す

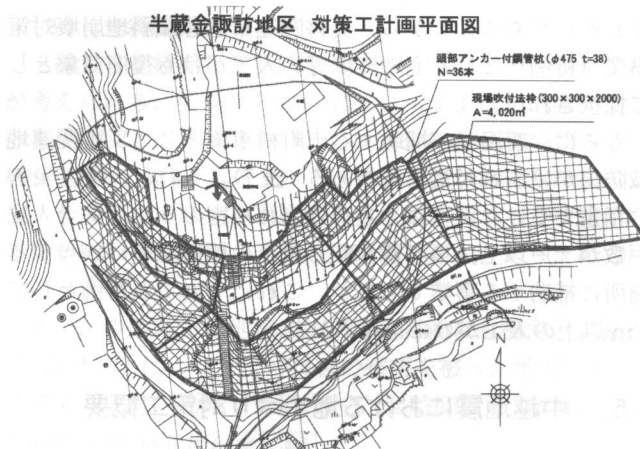


図8 半蔵金諏訪地区平面図



写真5 半蔵金諏訪地区被災状況

尾根状凸地形を呈する地すべりブロック

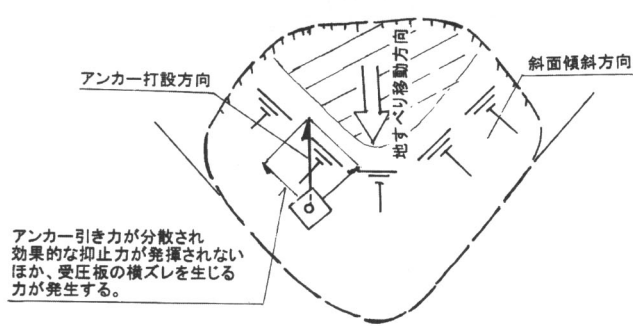


図9 地すべり方向とアンカー方向

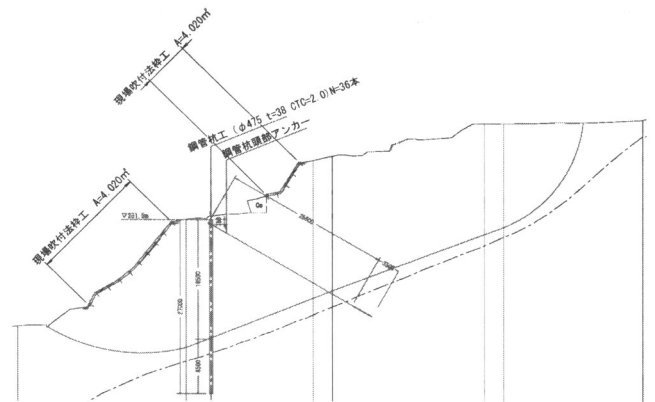


図10 半蔵金諏訪地区断面図

るために、排土や押え盛土を考慮したが、家屋（神社）や道路の制約で採用できなかった（図8）。次にアンカー工を検討したが、尾根状凸地形を呈する地すべりブロックに対して、地すべり移動を抑止する方向に対してアンカーが打設できないという問題が発生した（図9）。

さらに抑止杭工を検討したが、今度は、必要抑止力が1078.8 kN/m とかなり大きく、曲げくさび杭では非常に大きな杭断面となり、現地での施工が不可能なことがわかった。大口径ボーリングによる施工等、現地施工条件から考慮すると削孔径500~550 mm、1列施工が限界であることから、頭部アンカー付鋼管杭工を採用した。杭頭部をアンカーの引っ張り力で拘束するこの工法により、杭に発生する最大曲げモーメントと最大せん断力を低減することができた（図10、表10）。

7. おわりに

中越地震の特徴と、災害関連緊急地すべり対策事業の事例紹介をさせていただいた。被災地においては、まだ復旧

表10 半蔵金諏訪地区 災害関連緊急地すべり対策工事概要

工 種		数 量
法柁工	現場吹付法柁 F 300	4,020 m ²
法面保護工	植生マット	600 m ²
グラウンドアンカー工	L=18.5~30.0 m	36本
地すべり抑止杭	L=13.5~27.0 m $\phi 475 \ t=38$	36本
横ボーリング工	L=30.0~45.0 m	345 m
水路工	開渠工 300型	160 m

工事を実施中であり、平成18年9月現在においても1,877世帯が仮設住宅での生活を余儀なくされている。

1日も早い帰郷ができるよう、新潟県として今後も全力で取り組んでまいります。また、中越地震の復興に向けてご尽力・ご指導をいただいている国土交通省や関係機関の皆様方、また地震発生直後から職員派遣の応援をいただいている各県の皆様に対して深い感謝を申し上げます。

フロンティア地震学の現状と展望

かな お まさ き
金尾 政紀*

1. はじめに

固体地球およびその周辺域の人類に残された遠隔地（フロンティア）は、同時に地球科学研究の最前線（別の意味でのフロンティア）でもある。高緯度帯や海洋域を含むグローバル地震観測網の拡充や、深海底掘削船の開発、ヒマラヤ等の高山域での地上利便性の向上、また各種衛星・ロケット・無人探査機の利用により、「フロンティア地震学の最前線」はこの四半世紀で大きく前進した。しかも、科学技術の日進月歩とともに、地球中心核や太陽系惑星など、人類の生存圏からみた鉛直方向へも急速に拡大している。

ここでは、グローバル地震学におけるフロンティア領域での第一線（最前線）を領域別に分類し、最近の成果と今後の展望を概観する。具体的には、南北両極や大陸内部の高山域・深海底を含む地球の表層部から、地球深部の中心核（内核）に至るさまざまな空間・時間スケールの研究を紹介する。また、太陽系惑星の探査機器開発とその成果について触れ、人類の未到・極限地域での今後の地震学研究の限界への挑戦の一助としたい。

2. 地球深部フロンティア

地球深部で最近大きな進展がもたらされた領域は、核-マントル境界であるD''層（外核境界から上部数100 km）と内核（中心核）の構造であろう。

D''層の成因には、これまでさまざまな議論があったが、2004年にMgSiO₃がそこでの温度圧力条件でポストペロフスカイト相となることが実験的に発見¹⁾され、S波速度異方性との関連等、詳細な議論がなされてきた。D''層を含めて、マントルブルームの発生場所と考えられる核-マントル境界の構造(図1)を調べるためには、Sdiff波や、ScS波等の後続相を高精度で記録する必要がある。我が国には、HiNet観測網があり、660 km深の地震波不連続面の形状など、地球深部構造の研究に主に用いられてきたが、今後は核-マントル境界の構造についてもそのデータ利用が考えられる。また、HiNetよりは観測点密度が低い、北米大陸に展開されるEarthScopeも、本格的に稼働すれば有

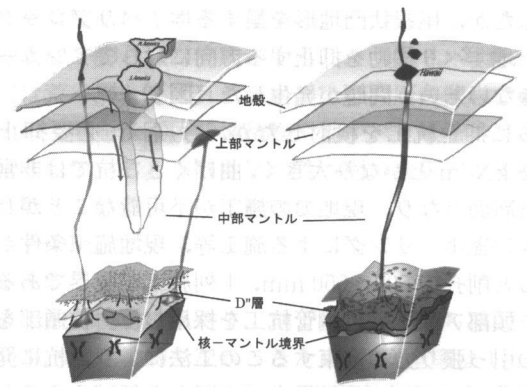


図1 マントルブルームと地球深部の不均質構造 (<http://garnero.asu.edu/>)

効利用ができるであろう。

また内核の構造については、1980年代から自転軸の方向を向いた地震波速度異方性が議論され、この異方性を仮定した内核の差分回転の研究²⁾は大きな反響を呼んだ。その後、内核上層部に存在する水平方向の地震波速度不均質が異方性の原因と考えるのが一般的となり、差分回転量についても当初推測されていた値より小さく、最近の研究³⁾では、内核はマントルに比べて0.3°~0.5°速く自転している。

これらの研究で注目すべきは、南サンドイッチ諸島で最大35年間隔でほぼ同じ場所で起きるdoublet地震を、アラスカの観測点記録を用いたことである。doublet地震では、震央の差は数kmの距離とされ、震源決定の精度が走時残差にもたらす影響を最小にできる。数十年にわたる地震波形記録からdoublet地震を探すことは困難であるが、今後他の地域でも見つければ、同様な解析により内核の差分回転に対する拘束条件を与えることが可能である。

3. 大陸フロンティア

地球上の大陸およびその縁辺では、1970年代以降さまざまなテクトニクス帯（地質帯）で、受動的・能動的震源による高空間分解能な構造探査、自然地震を用いた3次元トモグラフィー等、詳細な不均質構造のイメージングが他の地球物理学的手法と連携して行われてきた。

地球進化史を振り返り将来の予測をする上で、かつて地

* 情報・システム研究機構 国立極地研究所

表に存在した大陸の離散集合過程を知ることは重要である。それ以外にも、地球表層部で現在進行中の環境変動や、固体地球のダイナミクスを理解するために、人類の主な生存圏である大陸地域の縁辺部（フロンティア）のアクティブな情報は大変貴重である。

地球史における大陸形成の核である先カンブリア地塊（クラトン）およびその周辺の構造バリエーションは、文献4)に詳しい。クラトン下のリソスフェアは海洋性リソスフェアと比較しても、地球史を通じて複数回の成長機構により複雑な歴史を持つ。例えば、太古代末期の大陸成長機構の急激な変化に関連して、原生代以降の大陸リソスフェアは主にマントル・プルームの名残りを一部にとどめる。つまり、プルームが大陸の底に上昇し、溶融した一部が洪水玄武岩を形成し、残りはリソスフェアにアンダープレートをしたという解釈である⁵⁾。

最近の地震探査からは、かつての大陸ブロック同士の衝突（造山運動）により、相手方のブロック下に沈み込んだ下部地殻の名残りが残されている（図2：北米の例⁶⁾）。クラトン底部でのプルームの付加過程は、厚いリソスフェアを形成する上で重要ではあるが、特に太古代ではスラブの浮力的な沈み込みもあり、海洋性プレートが大陸の下に塗られてリソスフェアを厚くしたと考えられる。

最近では、多くの国々の協力で南半球を中心に存在した Gondwana 超大陸を形成する、アフリカ・インド・東南極を含めた大規模な地震探査トランセクトが提唱されている⁷⁾。しかしながら、地球史における大陸リソスフェア全域の形成過程を説明するための統一モデルの構築はまだである。今後は、さまざまな調査研究により大陸不均質構造が詳細に検討され、地球表層のダイナミクスとの関係が明らかになることが期待される。

一方、現在世界最大の面積を占める北半球のユーラシア大陸は、アジア・インド・ヨーロッパ等、いくつかのクラトンを核に、縁辺部の沈み込み帯や大陸衝突帯、リフト帯などさまざまなテクトニクス帯が複雑に絡み合い形成された。ユーラシア北部の北極域～シベリアをはじめ、チベット～ヒマラヤ等の高山地域、中国・インド・中東等の亞大陸地塊ならびにその縫合部、さらに環太平洋の新生代造山帯、等の特徴的な地質帯を含み、現在の変動テクトニクス

に関連した地球科学テーマの宝庫である。また、超大陸の形成・分裂様式に関連して、地球深部でのスーパープルーム形成メカニズムと、上部マントル・地球表層部との相互作用も重要である。ユーラシアの形成過程と深部構造に関する最近の研究は、文献8)に概説がある。また、島弧以外の大陸域の各テクトニクス帯における最近の研究紹介として、文献9)も参照されたい。

4. 海洋フロンティア

海域での広帯域地震計観測は、1980年代から重要性が指摘され、これまでに多くの努力が成されてきた。科学研究費補助金「海半球ネットワーク」(平成8年～13年度)では、北西太平洋の ODP 掘削坑内に地震計を設置し恒久的な固定観測を行うとともに、自己浮上型の海底地震計による準定点観測や長期観測用海底地震計によるフィリピン海でのアレイ観測が行われてきた。

しかし、常設の海底地震観測点はごくわずかであり、データ取得の容易さ等から日本近海ではケーブル式観測システムが利用されてきた。現在は、釧路沖や室戸沖の海洋研究開発機構の運用システム、相模湾や房総沖の気象庁システム、伊豆半島沖と三陸沖の東大地震研システムなどがある。これらは、いずれも将来海域の大地震の発生が予想されている地域の地震活動監視のために設置された。

また文部科学省は、平成18年から21年度に紀伊半島沖に20点程度の海底地震・津波観測網を整備する。この計画では、はじめて海底にアレイ的観測網を設置し、東南海地震の震源域における地震活動をモニターする。将来的には、この地域で IODP の掘削計画もあり、掘削坑内に海底地震計の設置も検討されている。ケーブル式の海底地震計観測網ではデータ取得や電源の問題が回避できるが、太平洋の陸から離れた場所で観測する場合には、電源取得など解決すべき課題は多く、海底地震観測網の設置は、今後しばらくは地震観測研究のフロンティアであろう。

世界中の海洋底で最近行われている観測では、海中音波測定器（ハイドロフォン）等を用いて海洋性プレートの境界である海嶺軸やトランスフォーム断層で、既存のグローバル地震観測網では検知できない微小地震を捉えつつある。T波（海中を伝わる地震動）が到着する時間や波形を正確に捉えて連続観測を行うことで、その活動度のモニタリングが可能になりつつある。将来的には、このような機器を深海底や南大洋・北極海をはじめ、海洋フロンティアで大規模に用いることで、これまで未解明な海洋底での地震活動や地殻構造が明らかにされるとともに、津波等のリアルタイム監視に関しても積極的な貢献が期待される。

5. 極域フロンティア

極域という高緯度の地理的条件を生かして、近年固体地球深部から表層部に至るまで種々な研究が行われてきた。極域のデータを利用した2003年までの成果は、文献10)を参照されたい。ここでは、その後の成果を概観する。

南極からみた地球深部の研究例として、SKS波の解析か

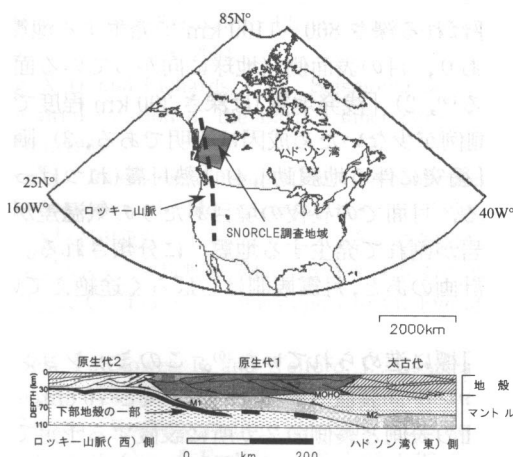


図2 北米大陸の地殻成長過程を示す地震反射断面（カナダ SNORCLE トランセクト）。

ら南極プレート下のD'層の不均質構造が調べられ¹¹⁾、最大2.0%のS波速度異方性が見つかった。地震波の合成から推定された構造は、D'層上端の速度不連続面の深さがアラスカやカリブ海と比べて50~100 km 浅い。また、上部マントルを通過する実体波解析から、東南極の直下約200 km 深に顕著な低速度領域が確認された¹²⁾。観測・理論波形を比較して得られた速度構造を説明するためには、東南極下に太古代マントルに特徴的な「枯渇したマントル (depleted mantle)」の化学組成・温度勾配モデルが適当である。また、表面波による南極周辺の3次元速度構造では、エレバス山直下のホットスポットによる低速度異常が顕著にみられ、東南極リソスフェアに対応する高速度領域が深さ150 km まで確認されている¹³⁾。

2004年12月26日には、スマトラ島沖でMw=9.0という過去40年間で最大規模の地震が発生した。これに関連して南極プレート-インド洋区における地震活動の時空間分布が調べられた¹⁴⁾。この四半世紀の地震計の精度向上や観測網の整備により、大陸域を中心に微小地震の検知能力が向上したが、南極も含めたグローバル網で常時モニタリングをすることで、南大洋の地震活動が明らかにされ、津波等の監視にも貢献が期待される。また、地球自由振動による潮位補正や弾性定数の決定を目的とした、津波・海中を伝わるT波・短周期潮位変動(セイシュ)に関する研究が行われた¹⁵⁾。スマトラ沖地震による潮位変動は、昭和基地の超伝導重力計や広帯域地震計にも記録され、長期的な海洋変動の周波数・時間変化や非正常イベントの検出、また地球深部シグナル検出の基礎情報となる。

また最近極域では、固体地球と氷床・海水・大気との相互作用に関連すると思われる、未解明な振動現象が多数存在することが分かってきた。たとえば、南極大陸縁辺で観測される特徴的な現象として「氷震(ひょうしん)」の活動があるが、その起源としては、波浪・海洋潮汐による海水変動、海水や氷山の動きに伴う振動、棚氷・氷河の流出、氷爆・氷崖、大陸氷床内部での雪震、大陸氷床の底面滑りに伴う基盤岩との摩擦振動、さらに氷床後退に伴う地殻変動のテクトニック起源、等多岐にわたると考えられる。また日本の南極観測では、2000、2002年度に昭和基地周辺のみずほ高原で人工地震探査が行われたが、その際に遠地震や局所的な氷震とは明らかに異なる振動継続時間の長い波群(X-phase)が観測された。これら南極氷床上で記録さ

れた遠地震やX-phaseは、探査測線下の基盤構造の不均質特性を大きく反映している¹⁴⁾。これら極域での未解明なイベントの励起源の解明は、地球温暖化に関連した南極氷床の消長過程と地殻変動との関係を探る上でも重要である。今後も、観測点網を増強し(Antarctic Array計画; 図3) 諸々の振動現象の発生原因を同定・分類し、スペクトル・活動度・震源過程などの解析が必要である。

6. 惑星探査フロンティア

ここでは、地球以外の太陽系天体に関する研究を概説する。固体表面をもつ天体には、他の天体による潮汐力や天体内部からの熱活動により地震活動の存在が予想される。また木星や土星等のガス惑星でも、通常地震より周期の長い自由振動が存在すると考えられる。人類が実際に地震観測を行った天体は月と火星のみである。月では1969年に初めて人類が月面に着陸したアポロ11号をはじめ、計6台の地震計が人手で設置され、1977年まで「月震(月の地震)」の観測を行っている。火星では1976年に着陸したバイキング探査機に地震計が搭載された。しかし、大気がある火星では強風がノイズ源となり、明瞭な地震記録を得られていない。

月やその他の惑星の地震探査を行う目的の一つに、惑星の内部構造、特に中心核の大きさを知ることにある。アポロ計画により月表面で採集された岩石では、始源的な隕石と比べ難揮発性元素に富み、親鉄性元素に欠けている。しかし、この性質が月全体の物質の特徴であるかは明らかではなく、親鉄性元素の有無は、月の内部に鉄に富む中心核があるかに依存する。したがって、月の中心核の存在と大きさを同定することは、月の起源の解明に大きな役割を果たすであろう。また、浅部構造を地震観測から知ることは、将来的な月の平和利用にも重要である。

アポロ計画で設置された地震計により、12,558個の月震が記録された¹⁷⁾。これらの特徴として、1) 最大振幅に達するまでの時間が数十分もかかる、2) 地震の継続時間が数時間に達する、3) 波形周期のピークが約1秒で、長い周期の波が強い、等が分かっている。これらは月の岩盤はQ値が高く、散乱が非常に強いことを示している¹⁸⁾。これまでの成果から、月震には4つの種類がある。すなわち、1) 「深発月震」と呼ばれる深さ800~1100 kmで発生する地震。潮汐と相関があり、月の表面側(地球に向かって面)で発生している¹⁹⁾、2) 「浅発地震」は深さ300 km程度で発生するが、観測例が少ないため成因は不明である、3) 隕石や人工物体の「衝突に伴う地震動」、4) 「熱月震(ねつけっしん)」と呼ばれる、月面での昼夜の境目あたりの気温差が激しいときに、岩が割れて発生する地震、に分類される。

アポロ計画のあと、月震観測はしばらく途絶えていたが、我が国ではLUNAR-Aというミッションが1990年代後半を稼働目標に進められていた²⁰⁾。このミッションでは槍型のペネトレータ装置(質量13 kg、長さ70 cm、直径14 cm)を月面の表側と裏側の2カ所に設置する予定である。このペネトレータ装置の内部には、科学観測機器として月震計、熱流量計が搭載されている。月面の裏側に地震計を

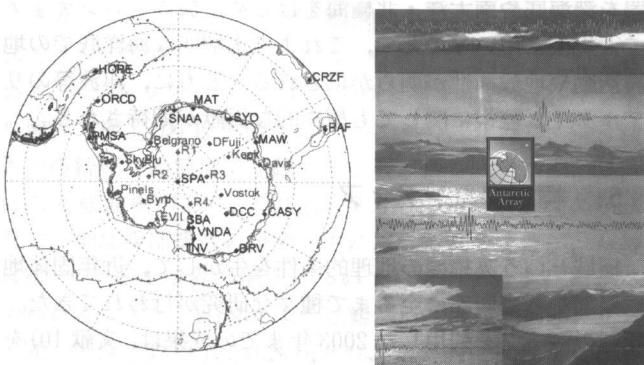


図3 南極での広帯域地震計アレイ計画 (Antarctic Array; <http://www.antarcticarray.org>)

設置して、月面の表側で発生する深発地震を観測し、月中心部を透過してくる地震波を使って中心核の大きさを知ることができる。ペネトレータ装置による地震観測は、これまでの着陸船による設置に比べて小型で低コストであり、1回のミッションで複数の地点に観測装置を月面に設置できることが利点である。技術的には、月表面の熱伝導率の低い砂層中に潜り込むことで、昼夜の激しい温度変化を受けずに済むが、月面への衝突の際に約5000 Gに達する衝撃に耐える必要があり、また電力源として太陽電池が使用できない点が不利である。そのため、スーパーリチウム電池等を搭載し、通年での連続稼働を予定している。

なお、月震観測用に開発された衝撃に強い動コイル型地震計の技術は、火山地域や南極でのペネトレータ装置でも使われており(図4)²⁰⁾、さらに強震計用として日本各地でも利用されている。

7. おわりに

人類による固体地球科学研究のフロンティアは、両極や大陸高山域・深海底等の表層部から地球深部の中心核、さらには太陽系の諸惑星へと、20世紀後半以降大きく拡大した。そして現在もなお拡張しつつある研究対象を包括的かつ深遠に理解するために、地震学のみならず他のさまざまな地球科学的研究手法を含めた総合的な解明が必要である。すなわち、地質学的・地球物理学的な野外での調査・観測をはじめ、最新の衛星技術に基づく地球表層部の変形過程や大地震の震源過程、トモグラフィー、マントル対流シミュレーション、リソスフェアのレオロジー、遠隔地での観測機器の開発等、多様な学問の連携が不可欠であろう。

極域に関しては、南極観測開始の契機となった「国際地球観測年(1957~1958)」から半世紀を経過したことを受け、「国際極年(International Polar Year; IPY 2007~2008)」という大々的な観測キャンペーンが世界中で計画されている。このIPYを契機に、地球表層の環境変動をリアルタイムで検知しつつ、隕石・地質学的研究と協力して地球進化史をも解明するために、さまざまな形態の国際共同研究の推進が望まれる。

参考文献

- 1) Murakami: Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO₃, *Science*, 304, 855-858, 2004.
- 2) Song, X. D. and Richards, P. G.: Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core, *Nature*, 382, 221-224, 1986.
- 3) Zhang, J.: Inner core differential motion confirmed by earthquake waveform doublets, *Science*, 309, 1357-1360, 2005.
- 4) 金尾政紀・石川正弘: 先カンブリアクラトンの深部構造—グローバルレビュー—, 月刊地球, 2003年6月号, 475-479, 2003.
- 5) Condie, K. C.: Plate Tectonics and Crustal Evolution, 2, 39, 1997.
- 6) Gabriela, F., Clowes, R. and Welford, J.: Constraints on the composition of the crust and uppermost mantle in northwestern Canada: Vp/Vs variations along the Lithoprobe's SNORCLE transect, *Can. J. Earth Sci.*, 42, 1205-1222, 2005.

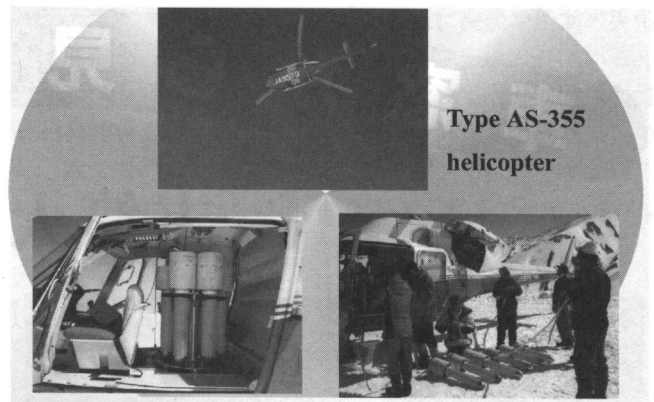


図4 投下式地震計(ペネトレータ)の投下実験(2001年4月立山)。

- 7) Brown, L. D., Kroner, A., Powell, C., Windley, B. and Kanao, M.: Deep Seismic Exploration of East Gondwana: the LEG-ENDS Initiative, *Gondwana Research*, 4, 846-850, 2001.
- 8) 金尾政紀・小山内康人: ユーラシア大陸の進化過程と深部構造の研究—最近の動向—, 月刊地球, 2005年10月号, 723-728, 2005.
- 9) 金尾政紀: 第11回大陸及びその縁辺部における深部地震探査国際シンポジウム(Seismix 2004)報告, 地震学会ニュースレターシンポジウム報告, 16-5, 59-63, 2005.
- 10) 澁谷和雄・金尾政紀: デジタル時代の南極域における地震学研究的進展, 月刊地球, 2003年6月号, 409-412, 2003.
- 11) Usui, U., Hiramatsu, Y., Furumoto, M. and Kanao, M.: Thick and anisotropic D'' layer beneath Antarctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13311, doi: 10.1029/2005 GL 022622, 2005.
- 12) Kuge, K. and Fukao, Y.: High-velocity lid of East Antarctica: Evidence of a depleted continental lithosphere, *J. Geophys. Res.*, 110, B06309, doi: 10.1029/2004 JB 003382, 2005.
- 13) Kobayashi, R. and Zhao, D.: Rayleigh-wave group velocity distribution in the Antarctic region, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 141, 167-181, 2004.
- 14) Kanao, M., Nogi, Y. and Tsuboi, S.: Spatial distribution and time variation in seismicity around Antarctic Plate-Indian Ocean region, *Polar Geosci.*, 19, 202-223, 2006.
- 15) Nawa, K., Suda, N., Satake, K., Sato, T., Doi, K., Kanao, M. and Shibuya, K.: Loading and gravitational effects of the 2004 Indian Ocean tsunami at Syowa Station, Antarctica, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, (in press).
- 16) Yamada, A., Kanao, M. and Yamashita, M.: Features of seismic waves recorded by seismic exploration in 2002: Responses from valley structure of the bedrock beneath Mizuho Plateau, *Polar Geosci.*, 17, 139-155, 2004.
- 17) Nakamura, Y., Latham, G. V. and Dorman, H. J.: Apollo lunar seismic experiment-Final Summary, *J. Geophys. Res.*, 87, A117-123, 1982.
- 18) Dainty, A. M. and Toksoz, M. N.: Seismic codas on the earth and the moon-A comparison, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 26, 250-260, 1981.
- 19) 小山順二: 新しいアポロ月震カタログから明らかになった深発月震の周期性, 北海道大学地球物理学研究報告, 67, 359-373, 2003.
- 20) ルナー A サイエンスチーム: ルナー A 計画: ペネトレータ月探査の概要, 北海道大学地球物理学研究報告, 61, 141-166, 1998.
- 21) 松島 健: 南極ペネトレータの開発と実施結果, 月刊地球, 288, 461-464, 2003.

車窓から見る地形・地質

支笏火山灰台地

北海道 千歳市

JR 千歳線

はじめに

北海道の空の玄関，新千歳空港に着陸するとき一帯に広大な台地と太平洋岸から連なる大小の沼地が発達する低湿地が眼下に見られる。台地は支笏湖を北西-南東方向に一直線に横切る樽前山，風不死岳，恵庭岳の支笏火山群の山麓から緩い傾斜をもって太平洋岸に向かい，低湿地とは急崖で接している（写真1）。

この台地は約3万年前（最近では約4万年前の説もある）の支笏火山噴火に伴う膨大な量（約100 km³）の火山砕屑物（火砕流堆積物）によって形成された火山灰台地で，この噴出跡が支笏カルデラ（現在の支笏湖）であり，北海道観光の目玉の一つとなっている。この台地にはU字状の沢地が発達し，台地から低地への移行部では湿地に大小の沼が形成されている。図1に支笏降下軽石堆積物（Spfa-1）と支笏軽石流堆積物（Spfl）の分布を示す。

千歳空港に降り立ち，JR 千歳線の南千歳駅で上りに乗り換え，登別に向かうと最初の駅が美々駅である。この駅のすぐ手前に美々貝塚（車窓から直接は見られない）があり，これを過ぎると低湿地が広がり，大規模な火山灰採取地（盛土や園芸材料として採取）が右側に遠望できる。さらに南下すると右側に野鳥の楽園として，ラムサール条約に登録されたサウナチャリーであるウトナイ湖が自然のままの姿で見られる。

火山灰台地

火山灰台地は，第四期更新世から完新世にかけての支笏火山群の火山砕屑物で形成されている。この台地の主たる構成層は支笏火山噴出物で，最初に約12 km³の降下火山堆積物（Spfa-1~10）が，ついで約100 km³の火砕流堆積物（Spfl）を噴出した。この大噴火の結果によって広大な火砕流台地が形成され，噴出中心部に支笏カルデラ（現在の支笏湖）を生じた。

台地表層部は支笏火山群の恵庭岳，樽前山由来の降下軽石堆積物（En-a, b）（Ta-a~d）が数mの厚さで覆い，これを含めた軽石・火山灰の層厚は最大で100m以上にもよんでいる。

千歳空港近くの千歳市御前水では苫小牧~早来~千歳地域を代表する火山灰の層序が（写真2）のように見られる。層序は下位より支笏火砕流堆積物（Spfl），恵庭降下軽石堆積物（En），樽前降下軽石堆積物（Ta）で，約10mの厚さのSpflの下に支笏降下軽石堆積物（Spfa）が分布している。なお，歴史時代に噴出した樽前山の火山砕屑物の分布状態を図2に示す。

なお，これら火山灰土のうち，火砕流堆積物は九州のシラスと同様な土性を示し，土粒子密度が2.3前後と軽く，細粒分が少ないため盛土や再堆積地盤などで地震時の液状化や降雨による浸食などが問題となっている。



写真1 恵庭岳・支笏湖・風不死岳・樽前山を望む（白老駅付近）

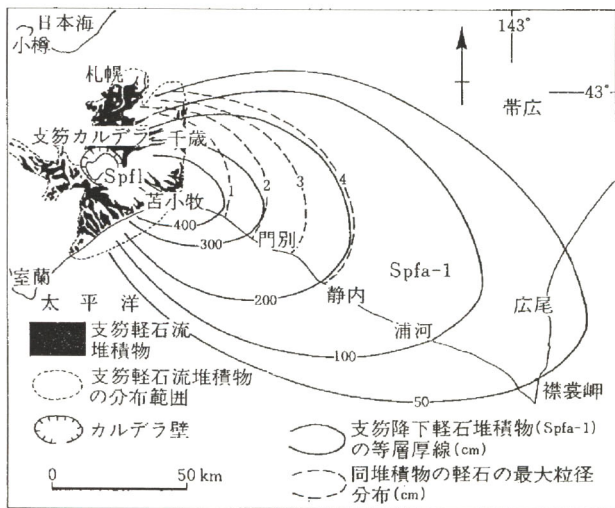


図1 支笏降下軽石堆積物 (Spfa-1) と支笏軽石流堆積物 (Spfl) の分布 (勝井, 1963)



写真2 御前水の火山灰露頭

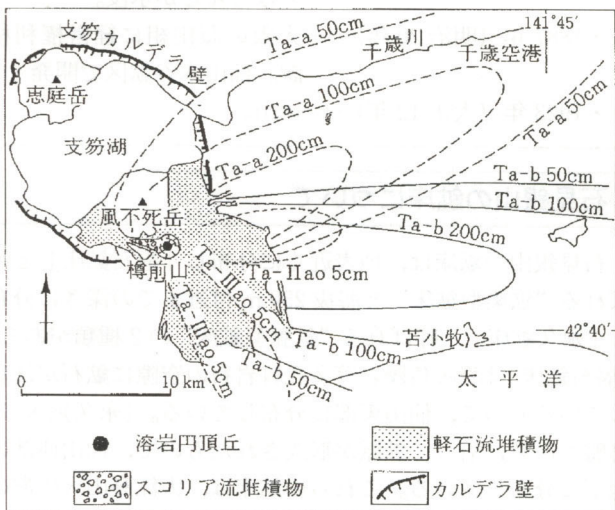


図2 樽前山の歴史時代の降下軽石堆積物と火砕流堆積物の分布 (勝井ほか, 1981)

美々貝塚

今から 6000 年前の縄文海進以降、寒かった気候はしだいに温暖となり、海水が増え海岸線が現在の苫小牧の海岸から内陸側 17 km 付近の平野の奥まで入りこんだ。内陸部は

しだいに淡水化するのと同時に、低地に泥炭や新期の火山灰が堆積して、現在の海岸線になったと考えられている。

美々貝塚は縄文時代のなごりで、火山灰台地の表層約 1 m の樽前火山噴出物 (Ta-d) の上にシジミ貝、動物や魚の骨、縄文遺跡の土器が残り、当時の生活や自然を教えられる。貝塚は大きなもので、直径 15 m、厚さ 1.2 m もある。



写真3 美々貝塚

ウトナイ湖

ウトナイ湖は約 3000 年前頃から始まった勇払原野の陸化に際し、砂州や砂丘によって海岸線が閉塞されてできた面積約 510 ha、周囲 17 km、平均水深 0.6 m (最大水深 1.5 m) 海跡湖である。渡り鳥の重要飛来地として国設鳥獣保護区特別保護地区に指定され、また 1991 年にラムサール条約 (特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約) に登録されている。

火山灰台地と海岸線との間の低湿地にはこのような湖沼が分布し、湖沼から台地側では湿地の発達が顕著で、泥炭性軟弱地盤が分布している。北海道の泥炭は分解度の低い植物遺骸で構成されるため、含水比や間隙比・圧縮比が大きく、せん断強度が小さいため地盤沈下を始め、土木工学的にさまざまな障害が発生している。

おわりに

以上、JR 北海道千歳線の車窓から見える火山灰台地周辺の地形・地質について概略を述べました、世界自然遺産に指定された知床など、まだまだ雄大な自然が残る北海道です。

また、来年平成 19 年 9 月には全地連「技術 e-フォーラム 2007」が札幌で開催されます。全国各地からたくさんのお越しをお待ちしております。

[池田晃一、伊藤慶司 (北海道土質コンサルタント(株))]

石見銀山遺跡

—世界遺産登録を間近にして—

はじめに

石見銀山遺跡は、東西に細長い島根県のほぼ中程、旧温泉津町旧仁摩町を含めた大田市の広い範囲に分布しており、その中心となる大田市大森町は、JR山陰本線大田市駅から約11kmの南西部に位置する。(図1参照)



図1

石見銀山遺跡とは、①銀鉱山跡と鉱山町(銀鉱山, 代官所, 城跡, 銀精錬工房跡, 重要文化財住宅, 五百羅漢), ②街道(石見銀山街道: 港湾につながる銀, 銀鉱石と諸物質の輸送路), ③港と港町(港湾と港町集落)などを含めた総称であり、範囲が広いことをご承知ください。

石見銀山史について

石見銀山史は、年代ごとに区分すれば下記ようになる。

- 1309年(延慶2年)……鎌倉時代の末期, 大内氏によって発見。
- 1526年(大永6年)……博多の豪商神屋寿貞氏, 出雲鷲銅山の三島清右衛門氏が入山して本格的開発。九州に銀塊持ち帰り。
- 1533年(天文2年)……神屋寿貞氏, 博多から慶寿と宗丹という二人の精錬技術者を連れてきて, 朝鮮半島で行われていた「灰吹法」という精錬技術を導入し, 産銀量

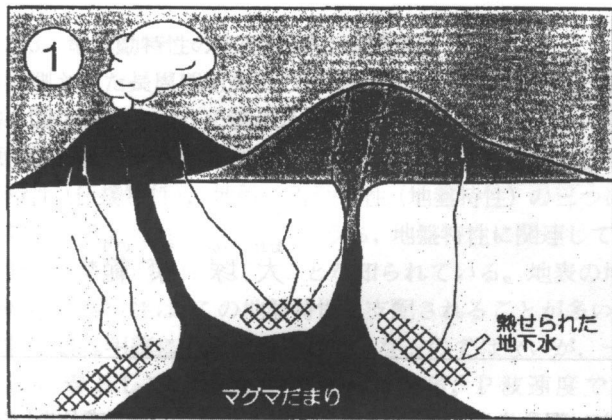
を増加する。

- 1521~1600年間……大内氏, 尼子氏, 毛利氏等の戦国武将による経営権の争奪戦激化する。
- 1600年以降……徳川氏の経営権となる。
- 1596~1615年慶長期
- 1624~1644年寛永期……年間約1万貫(約38トン)の産銀量を記録する。
- 1673~1680年延宝年間……年間約4百貫(約1.5トン)の産銀量に激減する。
- 1859年(幕末: 安政6年)……年間約30貫(0.1トン)の産銀量とわずかになる。
- 1867年(明治元年)……大政官布告により地元に経営権が移行する。
- 1872年(明治5年)……浜田地震により, 間歩(坑道)のほとんどが水没。
- 1887年(明治20年)……大阪の藤田組に経営権利移譲。仙山本谷鉱区で開発
- 1923年(大正12年)……休山。

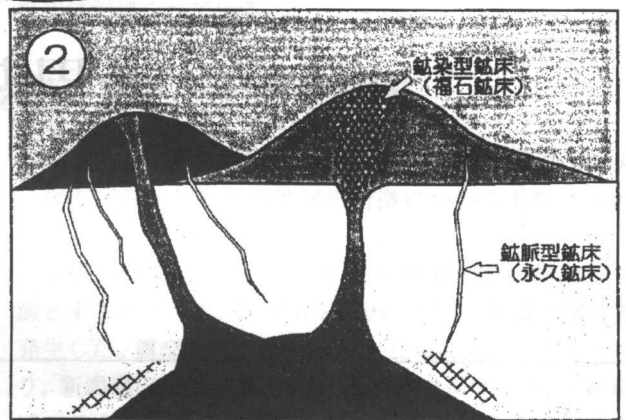
石見銀山の鉱床について

石見銀山の鉱床は、地表近くに分布し「福石鉱床」と呼ばれる“鉱染型鉱床”と海拔250m付近までの深さに分布し「永久鉱床」と呼ばれる“鉱脈型鉱床”の2種類がある。「福石鉱床」は凝灰角礫岩等多孔質岩石の空隙に鉱石が沈着しているもので、仙山東部に分布している。{永久鉱床}は岩盤の亀裂に沿って鉱脈が形成されたもので、仙山西部の地下に分布している。これらの鉱床は、大江高山火山群の噴出に伴う浅い深度での熱水の活動によって形成されたものと考えられている。地下深くに浸透した地下水が、マグマの熱によって加熱され、そこにマグマに由来する水蒸気が混合して熱水が作られる。熱水には、地層中の金属分などが溶け込み、これが岩盤の亀裂を伝って上昇し、温度の低下とともに結晶が生じて鉱脈が形成されたものである。図2にその鉱床ができた様子を概念的に示す。

鉱床ができた様子



マグマに熱せられた地下水や、マグマ中の水分が岩盤の割れ目を伝わって上昇しました。



熱水に溶けていた銀や銅などの金属が、岩盤のすき間へ沈着して、鉱床が作られました。

図2

石見銀山の今後の課題

石見銀山遺跡は、来年7月の世界遺産登録に向けて環境整備が急ピッチで進められている。鉱山遺跡だけでなくその経営権の争奪のための城跡、町並、街道、港湾などその遺跡は多岐にわたっている。鉱山遺跡も現在は間歩(坑道)1箇所だけであり、代官所跡地でその採掘状況をうかがい

知るだけである。産銀最盛期の坑内を復元するとともに、坑内搬出ルート of 整備がのぞまれている。約800mのトロツコによる搬出ルート of 坑壁の地盤状況は地質関係者にとって圧巻である。(事前見学会での感想)

そのほかにもまだまだ整備すべき課題は多く、世界遺産登録はその第一歩と捉えている。

((株)大田技術コンサルタント 月森 勝博)

長周期地震動

おおつか やすのり
大塚 康範*

1. はじめに

2003年9月26日4時50分に発生した十勝沖地震は、M8.0の典型的なプレート境界型の大地震であった。この地震の震央から200~300km離れた苫小牧港周辺と石狩湾新港周辺の地域で、石油タンクに火災や浮き屋根の沈没といった甚大な被害が発生した。石油タンクの被害や原因について、その後、いろいろと報告されたが、タンク内容物の地震動との共振（スロッシング現象）に起因したものであると考えられている。この地震では、1995年の阪神・淡路大震災以降に整備された強震観測網が強震記録を捉えており、その観測波形から海溝型地震による数秒から10秒の長周期地震動が被害と密接に関係していることが明らかとなった。その後、土木、建築をはじめ多くの機関で長周期地震の影響に関する研究がなされ、石油タンク以外に固有周期の長い超高層建物などが長周期地震動でダメージを受ける可能性が指摘され、長周期構造物の耐震安全性について再評価する動きもある。

今回のやさしい知識では、長周期地震動について、地震動の特性の基礎知識をやさしく概説し、次に身近なところで2004年10月に発生した新潟県中越地震における強震計記録から長周期地震動と地下の地盤特性との関係を考えてみたい。

2. 長周期地震動の特性と強震観測網

2.1 用語の説明

最初に長周期地震動という言葉の定義について、説明する。本来、地震学の分野で長周期地震動は、遠地地震の表面波に観測されるような周期20秒以上の成分をさすものとされていた。1970年代に高層ビルの建設に伴い、周期1~2秒以上の成分を長周期と呼ぶ例が出てきたため

に、混乱を避ける意味で2秒以上から20秒の成分を「やや長周期地震動」と呼ぶようになった。今回のやさしい知識でも本来であれば、「やや長周期地震動」という用語を使うのが、その内容からして適切と思うが、一般読者の便宜を考慮して、ここでは一般的に流布している「長周期地震動」という言葉を使うこととする。

2.2 地震動の特性

長周期地震動が構造物に対してどのような影響を与えるかについて考える前に、地震動の特性について、基本となる指標を概説しておく。

地震動強さの指標としては、地震の震度階、最大震幅、継続時間などが知られている。これらについては周知のこととして、長周期地震動の特性を考える上で重要な地震動の周期特性について触れておく。

地震動の周期特性を知るために工学的に「応答スペクトル」が用いられる。図1に応答スペクトルの説明図を示す。同一の振動台の上で、ある減衰定数(h)をもった固有周期が異なる振り子は地震動が入力すると時系列的に(b)に示

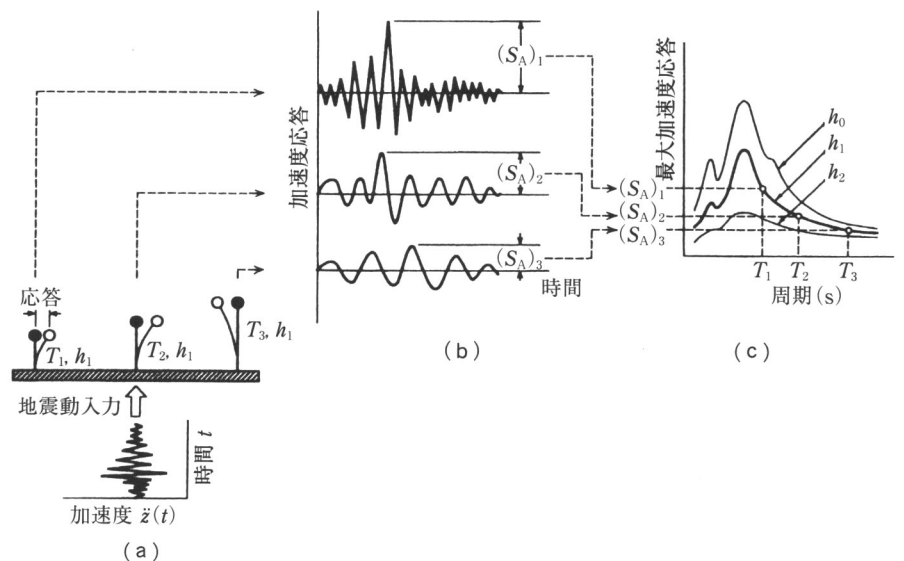


図1 応答スペクトルの説明図¹⁾

* 応用地質(株)技術本部技術研究所 所長

す応答波形を示す。応答波形の最大加速度値（もしくは最大速度値）を(c)に示すように周期に対してプロットして得られた曲線が応答スペクトルである。

2.3 地震動特性の支配要因と地震観測

観測された長周期地震動の特性を支配する要因は、一般的に図2に示すように震源から発生する地震波の特性（震源特性）、震源から地震基盤まで地震波が伝播する間に生じる特性（伝播特性）、地盤の震動特性（地盤特性）の三つに分類して考えられている。このうち、地盤特性に関連して、地盤は強い周期特性を持つことが知られている。地表の地震動の周期特性は、この地盤特性に支配されることが多い。地震基盤は明確に境界を引けるようなものではないが、一応の目安としてS波速度で3 km/s程度、P波速度で5 km/s程度を考えており、これを東京、名古屋、大阪等の地盤構造に当てはめれば、2~3 km前後の深部構造が対象となる。

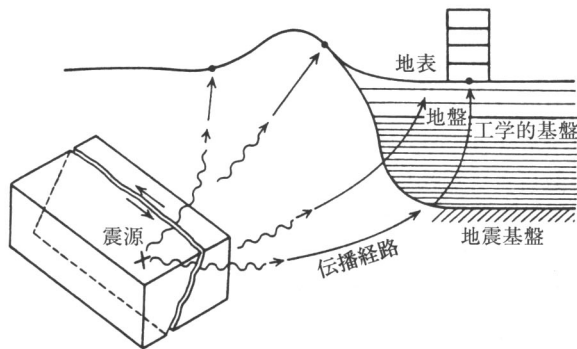


図2 震源から地表までの地震波の伝播²⁾

震源特性に関連しては、岩盤での速度応答スペクトルのデータから、マグニチュード (M) によるスペクトル振幅が長周期領域で大きく変化することが知られている。この理由として、Mが大きくなるにつれ、破壊エネルギーも破壊領域も大きくなり、長周期成分の卓越した地震が発生しやすくなることなどが考えられている。

伝播特性に関連しては、地震波が地震基盤まで達する間に、地震波の伝播の広がりに関係する幾何減衰や伝播経路の地殻のもつ物性としての粘性や散乱による減衰が知られている。

2.4 強震観測網

阪神・淡路大震災を契機として、我が国の強震観測網は飛躍的に整備された。防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) は、全国に約 25 km の間隔で約 1,000 カ所に設置された広ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計の強震記録を、強震観測センターを介してインターネット配信するシステムである (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/k-net/>)。また、地表における強震波形と比較することで地盤の強震動に対する応答を調べる目的で地上と地下がセットになった基盤強震観測網 (KiK-net) もある (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>)。

このほか、気象庁、消防庁や国交省でも震度情報を得る

目的で独自の観測網を展開しており、山岳部を除いて全国的にかなりの密度で強震記録が取得できるようになっている。これらの観測データから長周期地震動についても新たな知見が得られている。

3. 実例に見る長周期地震動

これまでに述べてきた長周期地震動の知識を基に、実際の強震記録から長周期地震の特徴について考察してみよう。

平成 16 年 10 月 23 日 17 時 56 分に新潟県中越地方を震源とするマグニチュード 6.8 (気象庁発表) の直下型地震が発生した。震源の深さが 13 km と比較的浅かったこともあり、新潟県川口町で震度 7、小千谷市で震度 6 強、十日町市ほかの 8 市町村では震度 6 弱の大きな地震動が観測された。また、震源地から離れた福島県、群馬県、埼玉県、長野県の一部の市町村でも震度 5 弱の地震が観測された。この地震は、気象庁により「平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震」と命名された。この地震とそれに続く余震により、震源に近い小千谷市、山古志村、長岡市、十日町市などを中心に、大きな被害が生じた。

この地震では、震源から約 200 km 離れた東京の超高層ビルにおいて、エレベーターの非常停止が発生し、一部のエレベーターでは運行を制御するロープが長周期地震動に合わせて大きく共振したことにより、運行停止状態となった。

この地震により、十日町で最大加速度 1,715 cm/s²、最大速度 54 cm/s、小千谷では最大加速度 1,313 cm/s²、最大速度 125 cm/s の地震動を観測した。小千谷では、十日町に比べると加速度は小さいが、速度は十日町のほぼ倍の大きさであった。大きい揺れの継続時間をみると、小千谷では 15 秒程度と長かったが、十日町ではわずか 3 秒程度であった。図3に速度応答スペクトルを示したが、十日町では 0.22 秒付近に卓越周期を持つが、小千谷では 0.7 秒付近となっており、1995 年の兵庫県南部地震と比べると短周期が卓越している。

K-NET および KiK-net による観測波形の表面波に相当すると考えられる部分を取り出して減衰定数 5% の速度

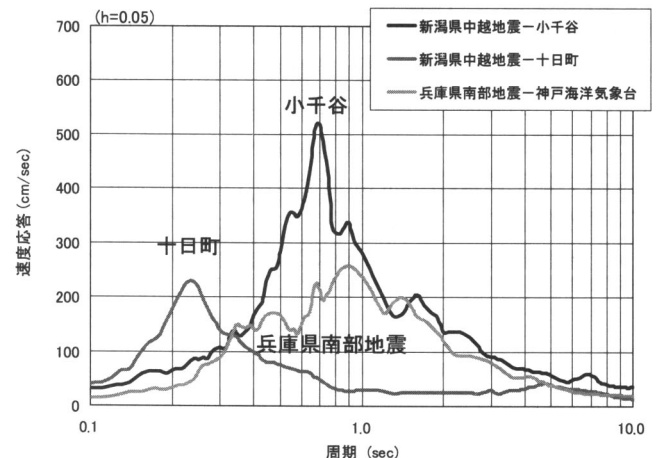


図3 K-NET による小千谷と十日町 velocity response spectrum³⁾

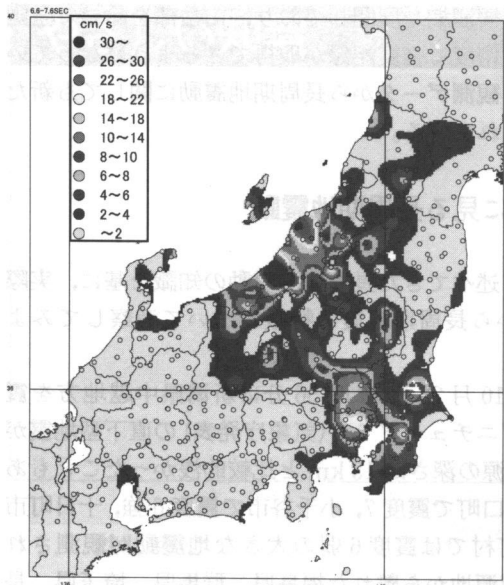


図4 新潟県中越地震の本震における周期7秒付近の速度応答スペクトル S_v ($h=5\%$) の空間分布
周期7秒³⁾

応答スペクトルを求め、広域における表面波の揺れについて検討されている³⁾。その中で、周期1秒付近から2秒ごとに11秒付近までの周期ごとの平均応答速度が求められているが、図4に代表として周期7秒近傍の速度応答スペクトルを示した。震源周辺では広い周期帯にわたって、30 cm/sを超える大きな揺れであったことがわかる。越後平野においても30 cm/sを超えるところがあり、震源付近と同様な大きな揺れがあったものと考えられる。関東平野においても東京都や埼玉県の東部、千葉県中央部、霞ヶ浦南部でもよく揺れた。特に東京都区内では周期7秒付近で20 cm/s程度の揺れとなっている。その他、越後平野から関東平野における利根川沿いの低地、越後平野から猪苗代湖までの阿賀野川沿いの低地、栃木県中央部を流れる鬼怒川沿いの低地、さらには山形盆地や庄内平野、富山平野や濃尾平野の西縁などの堆積層が厚い地域では長周期成分の揺れが相対的に大きかった。

図5に、工藤⁴⁾による関東平野で励起される長周期地震動の周波数帯域の目安を示したが、東京湾東部沿岸（房総半島北部）が8～10秒以上、東京湾北部沿岸が6～8秒、東京湾西部沿岸が6～7秒程度となっている。この6～7秒の周期の地域は、図4に示した周期7秒付近の速度応答スペクトルの20 m/s程度の揺れの範囲と調和的な結果となっている。この要因としては、関東平野の地下深部の基盤構造が深く関係していることが知られている。すなわち、関東平野の地下には、3,000 m以上の厚い堆積層があり、その下にすり鉢状の硬い基盤岩が存在するとされている。このため、基盤深度に対応する周期帯の揺れが大きくなる。

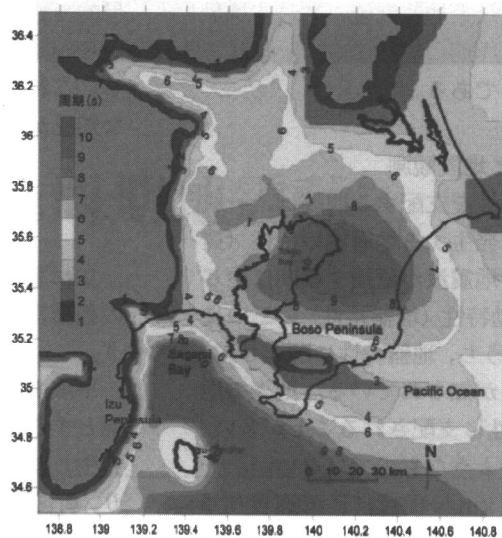


図5 関東平野で励起される長周期地震動の周波数帯域の目安（工藤，2006）⁴⁾

関東平野の基盤は、これまで起伏の少ないならかな形状と推定されてきたが、関東平野の西部に位置する朝霞—鴻巣間で実施された反射法地震波探査の結果⁵⁾などから、基盤にかなりの凹凸があることが指摘⁶⁾されており、固有周期の長い超高層建造物や石油タンクなどの耐震安全性を検討するため、地下深部の基盤構造のより詳細な把握が課題となっている。

4. おわりに

長周期地震動は、2003年の十勝沖地震に代表される

プレート境界型の地震だけでなく、2004年の新潟県中越地震のような内陸型の地震であっても、震源が浅く、マグニチュードが6～7以上の大きな地震（震源特性）では、震源から数百キロ離れた遠方であっても地表面から基盤まで数キロも続く深い盆地構造を持つような地域（地盤特性）において、大振幅で継続時間の長い地震動が発生する可能性がある。関東平野、濃尾平野、大阪平野などもこのような条件の地盤特性を有している上、背後に東京、名古屋、大阪といった大都市を控えている。固有周期の長い超高層ビルなどの巨大建築物も存在するため、こうした長周期地震動に共振して大きな被害を招く恐れがある。

近い将来、発生が予測される東海地震での東京の震度は4～5程度と予想され、震源に近い静岡や愛知の県民に比べると危機感は薄いですが、超高層ビルでは新潟県中越地震のときよりも、大きな揺れになることが予想される。深い地盤構造（地盤特性）が東京、名古屋、大阪で異なることから、今後、長周期地震が問題となる構造物を震源特性、地盤特性との関係で明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp. 138-141，鹿島出版会，1994.
- 2) (社)地盤工学会：ジオテクノート 地震動，pp. 38-64，1999.
- 3) 応用地質株式会社：平成16年（2004年）新潟県中越地震被害調査速報，pp. 1-7，2004.
- 4) 工藤一嘉：退職記念講演会資料，やや長周期地震動に関する研究の歩み，2006.
- 5) 笠原敬司：月刊地球，No. 34，pp. 165-179，2001.
- 6) 高橋雅紀ら：防災科研研報，No. 67，pp. 13-27，2005.

全地連「技術e-フォーラム2006」について

第17回技術e-フォーラムが、9月21日(木)～22日(金)の2日間、名古屋市の“メルパルク NAGOYA”で開催された。(行事の具体的な内容は、表1参照)

今回のフォーラムでは、「減災への取り組み!! 地質調査業の意義」をメインテーマに、地元「中部地質調査業協会」の全面的な協力と「国土交通省中部地方整備局」の後援および「日本応用地質学会」「日本情報地質学会」「NPO 地質情報整備・活用機構」「地盤工学会 中部支部」の4団体に協賛いただいた。

初日の特別講演会は、前名古屋大学総長の松尾 稔氏に

基調講演として「減災への取り組み!!」というテーマでご講演いただいた。また、シンポジウム・フォーラムシアターや一般公開したオープン技術発表会等にも、多数の方が聴講され、2日間の総入場者数は、約520名となった。

技術発表会には、若手技術者を中心に全国から115編(表2参照)の応募があり、活発な質疑が行われた。

なお、今回の優秀技術発表者賞には、各セッションから選ばれた21名が受賞された。(表3参照)

平成19年度の技術e-フォーラムは、北海道地区(札幌市)で開催する予定である。

表1 行事内容

第1日目 9月21日 (木)		第2日目 9月22日 (金)	
(エリア1) 入場無料		(エリア1) 入場無料	
会場2F：コンベンションホール		会場2F：白鳥	
開会式 10:00～10:05	開会挨拶 全地連 会長 森 研二	オープン技術発表会*3 13:30～17:35	発表テーマ：「A-1防災(1)」 「A-2防災(2)」 「A-3情報化」 発表編数：16編(予定)
10:05～10:15	来賓挨拶 国土交通省 中部地方整備局長 金井 道夫 氏	*1シンポジウム：中部地質調査業協会の独自企画で実施します。 *2フォーラムシアター：業界に関連したテーマで行うミニ講演会です。 *3オープン技術発表会：従来エリア2(有料)のプログラムだった技術発表会の一部をオープン(来場自由)としました。	
特別講演会 10:15～12:00	「再び防災水準を考える」 元名古屋大学総長 松尾 稔 氏	会場2F：瑞雲(東)	
会場2F：瑞雲(東)		会場2F：羽衣	
シンポジウム*1 13:00～16:00	中部地質調査業協会 企画 「減災への取り組み」 コーディネータ：大橋 正(中部地質調査業協会 技術委員長) ①基調講演「建築系の取り組み」 福和 伸夫 氏(名古屋大学大学院教授) ②基調講演「国の取り組み」 細見 寛 氏(国土交通省 中部地方整備局 河川部長) ③基調講演「住民の代表の取り組み」 栗田 暢之 氏(NPOレスキューストックヤード代表理事) ④基調講演「土木系(公共事業から)の取り組み」 八嶋 厚 氏(岐阜大学教授)	フォーラムシアター*2 9:30～10:30	全地連活動報告(3) 「地質リスクに関するWG活動報告」 佐橋 義仁(全地連技術委員会委員)
会場2F：羽衣		10:30～11:10	全地連活動報告(4) 「Web-GISの普及活動報告」 中田 文雄(全地連情報化委員会委員長)
フォーラムシアター*2 16:10～16:40	全地連活動報告(1) 「地質事象百選の選考状況について」 藤城 泰行(全地連専務理事)	11:10～11:50	全地連活動報告(5) 「土地地質図のJIS化、地質情報管理士資格について」 坂森 計則(全地連情報化委員会委員)
16:40～17:10	全地連活動報告(2) 「防災・維持管理分野における物理探査の適用WG活動報告」 大場 恒彦(全地連技術委員会委員)	13:00～14:00	特別企画(1) 「公共工事事品質確保法」 岡田 昌之 氏(国土交通省 中部地方整備局 技術管理課長)
		14:00～15:30	特別企画(2) 「司法制度改革 裁判員制度について」 佐藤 崇 氏(名古屋高等検察庁 総務部長 検事)
		会場2F：白鳥	
		研究発表会 10:00～15:00	日本応用地質学会 主催 「社会に貢献する応用地質学」 入場自由

エリア2 (事前登録制・有料)

第1日目 9月21日(木)

2F コンベンションホール
18:00～ 技術者交流懇親会

第1日目 9月21日(木)・第2日目 9月22日(金)

3F 会議室
技術発表会

技術発表会セッション区分

時間 \ 会場	B会場3F(シラス) 定員60名	C会場3F(カトレア) 定員90名	D会場3F(サルビア) 定員60名
9月21日(木) 1日目 13:30-14:50			
9月21日(木) 1日目 15:05-16:25	B-1 物理探査(1) 15 16 17 18 19	C-1 環境(1) 49 50 51 52 53 54	D-1 海岸河川(1) 83 84 85 86 87 88
9月21日(木) 1日目 16:40-17:35	B-2 物理探査(2) 20 21 22 23	C-2 環境(2) 55 56 57 58	D-2 海岸河川(2) 89 90 91 92
9月22日(金) 2日目 9:00-10:20	B-3 メンテナンス 24 25 26 27 28 29	C-3 地すべり 59 60 61 62 64	D-3 サンプリング・サンディン 93 94 95 96 97
9月22日(金) 2日目 10:35-12:00	B-4 ケーススタディ(1) 30 31 32 33 34 35	C-4 斜面(1) 65 66 67 68 69 70	D-4 トンネル 98 99 100 101 102 103
9月22日(金) 2日目 13:00-14:20	B-5 ケーススタディ(2) 36 37 38 39 40 41	C-5 斜面(2) 71 72 73 74 75	D-5 ボーリング 104 105 106 107 108 109
9月22日(金) 2日目 14:35-16:20	B-6 地下水 42 43 44 45 46 47 48	C-6 室内試験 76 77 78 79 80 81 82	D-6 原位置試験 110 111 112 113 114 115 116

表3 優秀技術発表者賞 受賞者一覧

セッション区分	論文No	発表者	所属	地区
A-1	3	酒井 信介	(株)阪神コンサルタンツ	関西
A-2	10	鏡原 聖史	(株)ダイヤコンサルタン	関西
A-3	12	安達 和也	(株)東建ジオテック	関西
B-1	18	下山 みを	応用地質(株)	中部
B-2	23	三石 晋	応用地質(株)	九州
B-3	27	千田 崇男	興亜開発(株)	中部
B-4	31	近藤 桂二	(株)ダイヤコンサルタン	北海道
B-5	39	笹島 卓也	興亜開発(株)	関東
B-6	46	宇野 嘉伯	応用地質(株)	九州
C-1	50	白松 久幸	応用地質(株)	中部
C-2	57	赤嶺辰之介	サンコーコンサルタン(株)	中部
C-3	59	山下 雅之	日本エルダルト(株)	関東
C-4	67	岡 淳一	(株)藤井基礎設計事務所	中国
C-5	75	鳥海 貴裕	(株)エイトコンサルタン	関西
C-6	79	八島 隆志	北海道土質試験協同組合	北海道
D-1	85	西尾 俊彦	玉野総合コンサルタン(株)	中部
D-2	90	今泉 亘	応用地質(株)	関東
D-3	94	野中 寿信	(株)田中地質コンサルタン	関西
D-4	100	高梨 俊行	川崎地質(株)中部支社	中部
D-5	108	小西 弘将	(株)レアックス	北海道
D-6	110	吉岡 正光	サンコーコンサルタン(株)	関東

表2 技術発表内容一覧

◎オープン技術発表会 (論文No.1~No.14)

全地連「技術e-フォーラム2006」名古屋

セッション区分	論文No	発表者	所属	題目	地区
A-1 防災(1) 21日13:30~14:50 2F「白鳥」	1	今井 千鶴	中央復建コンサルタンツ(株)	土石流ハザードマップの作成方法に関する研究(その1)	関西
	2	熊谷 恵	協同組合関西地盤環境研究センター	土石流ハザードマップの作成方法に関する研究(その2)	関西
	3	酒井 信介	(株)阪神コンサルタンツ	急傾斜地の崩壊ハザードマップ作成手順に関する一考察	関西
	4	高橋 広人	応用地質(株)	ハザードマップから住民啓発を促すための地盤応答シミュレータの開発	中部
	5	馬場 俊行	国際航業(株)	洪水ハザードマップ作成における課題と検討事例	中部
A-2 防災(2) 21日15:05~16:25 2F「白鳥」	6	田中館宏橋	川崎地質(株)	斜面災害に対する現況安全率の評価・設定手法-中越地震に伴う斜面災害を例として-	北陸
	7	二階堂 学	(株)ダイヤコンサルタンツ	活断層を調べる~トレンチ調査の紹介~	関東
	8	武部 努	応用地質(株)	2003年十勝沖地震における樋門の被害調査事例	北海道
	9	木下 博久	復建調査設計(株)	定方位地層採取法を用いた伏在活断層の調査事例	関東
A-3 情報化 21日16:40~17:35 2F「白鳥」	10	鏡原 聖史	(株)ダイヤコンサルタンツ	大規模地震に対応した治山工法について	関西
	11	河原 弘明	中央開発(株)	GISを用いた地盤モデル作成事例	関東
	12	安達 和也	(株)東建ジオテック	3Dによる地下情報の表現化	関西
	13	水野 直弥	(株)建設技術研究所	ダム堆砂量推計精度向上のための一方策 -土砂生産量強度マップの作成-	東北
	14	桃井 信也	大成基礎設計(株)	GISソフトと地形図読取りで作成した水系図の比較(花崗岩地域を例として)	九州

*オープン技術発表会: 従来エリア2(有料)のプログラムだった技術発表会の一部をオープン(来場自由)といたしました。

◎エリア2 (有料) 技術発表会 (論文No.15~No.116)

セッション区分	論文No	発表者	所属	題目	地区
B-1 物理探査(1) 21日15:05~16:25 3F「シリウス」	15	川島 久佳	川崎地質(株)	EM探査を利用した地層境界の検出事例	中部
	16	片岡 基晃	朝日土質(株)	表面波探査を用いた地盤改良に対する事後調査事例	中部
	17	結城 洋一	応用地質(株)	新しい空中物理探査技術の紹介	関東
	18	下山 みよ	応用地質(株)	表面波探査を用いた「埋設廃棄物」調査事例	中部
	19	山崎 淳	(株)ドーコン	地下レーダーを利用したダム基礎岩盤の調査	北海道
B-2 物理探査(2) 21日16:40~17:35 3F「シリウス」	20	吉村 辰朗	復建調査設計(株)	物性計測(γ 線、帯磁率)による破断面(断層、すべり面)調査- γ 線強度異常と帯磁率異方性-	関西
	21	森 伸一郎	(株)ジオファイブ	3Dレーザースキャナー「CALS」の概要と地下空洞調査への適用	関東
	22	掛川 崇史	日本物理探査(株)	速度検層による松杭の根入れ深度の調査	中部
	23	三石 晋	応用地質(株)	マイクログラビティ探査を応用した防波堤空洞調査例	九州
B-3 メンテナンス 22日9:00~10:20 3F「シリウス」	24	高津 智広	大成基礎設計(株)	館山市赤山地下壕の安全点検	関東
	25	栗本 修史	大成基礎設計(株)	擁壁変状の進行予測事例	関東
	26	花田晋一郎	(株)藤井基礎設計事務所	浚渫泥土の中性固化材による処理と再利用	中国
	27	千田 崇男	興亜開発(株)	コンクリートのアルカリ骨材反応(ASR)判定について	中部
	28	大田 裕生	(株)宇部建設コンサルタント	橋梁基礎における地質調査ボーリングの他目的利用	中国
	29	中川 裕二	(株)東建ジオテック	老朽化変状吹付法面の調査事例	四国
B-4 ケーススタディ(1) 22日10:35~12:00 3F「シリウス」	30	藤澤 大悟	(株)ウエスコ	既設構造物に近接する家屋の変状原因調査の事例	中国
	31	近藤 桂二	(株)ダイヤコンサルタンツ	泥炭性軟弱地盤における盛土工事例	北海道
	32	津坂 喜彦	(株)アオイテック	開削に伴う周辺地盤への影響	中部
	33	新実 夏美	(株)応用地学研究所	岡崎平野の動的特性調査事例	中部
	34	徳原 裕輝	(株)宇部建設コンサルタント	空洞を有する地盤を支持層とする橋梁基礎の検討	中国
	35	齋藤 耕志	(株)富士和	「支谷閉塞低地」におけるボーリング調査事例(静岡県西部域を例として)	関東
B-5 ケーススタディ(2) 22日13:00~14:20 3F「シリウス」	36	小島 一宏	北海道土質コンサルタント(株)	支笏軽石流堆積物の調査事例	北海道
	37	世良 賢司	中央開発(株)	軟弱地盤上に施工する道路盛土の影響評価と対策工の検討事例	中部
	38	青木龍一郎	応用地質(株)	沖積低地に伏在する入戸火砕流堆積物	九州
	39	笹島 卓也	興亜開発(株)	炭酸カルシウム含有量の変化からみた地盤の形成	関東
	40	西川 寧	(株)東建ジオテック	孔内傾斜計の異常変位の検証	関東
	41	佐藤 春夫	(株)ダイヤコンサルタンツ	泥炭地盤における真空圧密工法と長期沈下量	東北
B-6 地下水 22日14:35~16:20 3F「シリウス」	42	乾 一幸	(株)東京ソイルリサーチ	砂礫地盤における透水係数の評価	関東
	43	小森 潤二	(株)エイトコンサルタント	人為変動の大きな井戸水位データの利用に関する一考察	中国
	44	眞柄 耕治	中央開発(株)	水質分析を用いた水理解析の事例	中部
	45	新田 邦弘	地質基礎工業(株)	古いデータを再利用した三次元地質データベース構築例	東北
	46	宇野 嘉伯	応用地質(株)	大規模掘削現場における地下水対策のための揚水試験事例	九州
	47	本山 晋士	中央復建コンサルタンツ(株)	深層地下水源開発におけるCSAMT探査の適用例(その5)	関西
C-1 環境(1) 21日15:05~16:25 3F「カトリア」	48	國清 智之	(株)ワールド測量設計	近接施工に伴うため池水位への影響評価	中国
	49	高宮 晃一	復建調査設計(株)	土地履歴(資料等)調査の手法およびその考え方	中国
	50	白松 久幸	応用地質(株)	工場跡地活用の際に確認された油を含む土壌の対応についての一考察	中部
	51	小林 淳一	(株)日さく	給油所跡地における土壌・地下水汚染の調査と対策事例	中部
	52	高橋 幸伸	東海ジオテック(株)	ボーリング調査に伴う土壌汚染拡散防止の一事例	中部
C-2 環境(2) 21日16:40~17:35 3F「カトリア」	53	広瀬 義純	大成基礎設計(株)	自然由来による環境汚染調査	中部
	54	辻 圭介	(株)応用地学研究所	土壌調査における有害物質の自然由来判定について	関西
	55	土屋 忍	(株)応用地学研究所	最終処分場の維持管理について -廃止に向けた安定化度の評価-	中部
	56	田中 保孝	地盤環境エンジニアリング(株)	油汚染調査の方法とその留意点について -給油所の場合-	関東
C-3 地すべり 22日9:00~10:20 3F「カトリア」	57	赤嶺辰之介	サンコーコンサルタント(株)	簡易pH試験による酸性水発生地山の事前予測・評価事例	中部
	58	中條 那英	応用地質(株)	鉛の原位置迅速分析の検討	関東
	59	山下 雅之	日本エルダルト(株)	地すべり地における水位観測孔の有効性について	関東
	60	内藤 真弘	基礎地盤コンサルタンツ(株)	切土のり面における地すべり発生機構と対策工	中部
	61	小西 義夫	(株)宇部建設コンサルタント	網状鉄筋補強土工法を用いた地すべり対策工事の設計	中国
	62	森山 豊	応用地質(株)	三波川結晶片岩類分布域における大規模岩盤すべりの地形地質的特徴	四国
	64	石井 順一	(株)ダイヤコンサルタンツ	濃飛流紋岩分布域で繰り返し発生する崩壊性地すべりの機構解析	中部

表2 技術発表内容一覧(つづき)

セッション区分	論文No	発表者	所属	題目	地区
C-4 斜面(1) 22日10:35~12:00 3F「カトリア」	65	堀中 敏弘	(株)アオイテック	急崖斜面の安定性評価のための調査事例	中部
	66	山田 司	(株)ドーコン	貯水池における大規模土砂斜面に対する長大橋梁建設のための斜面評価	北海道
	67	岡 淳一	(株)藤井基礎設計事務所	トッピングによる変状箇所の特徴と機構について	中国
	68	五十嵐慎久	キタイ設計(株)	道路切土のり面に露出する軟弱地盤への対応について	関西
	69	宗村 知明	(株)宇部建設コンサルタント	斜面崩壊に伴う災害復旧対策の一事例	中国
	70	田中 敏行	(株)ダイヤコンサルタント	平成17年台風14号による豪雨災害の調査事例	中国
C-5 斜面(2) 22日13:00~14:20 3F「カトリア」	71	日高 隆之	日本地研(株)	05.03.20福岡西方沖地震による斜面被害	九州
	72	石本 裕己	(株)宇部建設コンサルタント	風化凝灰岩法面崩壊に関する崩壊要因の一考察	中国
	73	松下 純子	(株)宇部建設コンサルタント	山口県の盛土一斉点検事例	中国
	74	榊原 信夫	川崎地質(株)	海岸浸食を受けた急崖部における岩盤斜面の調査事例	東北
	75	鳥海 貴裕	(株)エイコンサルタント	急傾斜地における基礎地盤調査手法の提言	関西
C-6 室内試験 22日14:35~16:20 3F「カトリア」	76	越山 賢一	東邦地水(株)	砂質土の標準貫入試験試料の含水比に対する検討	中部
	77	鳥屋尾晃一	(株)東邦地水(株)	浸透性保水型土質改良材の性能試験について	中部
	78	梅田 幸成	(株)田中地質コンサルタント	ソイルセメント対応型大型一面せん断試験機の開発と実施例	北陸
	79	八島 隆志	北海道土質試験協同組合	粉末X線回折による軟岩中のスメクタイト定量方法について	北海道
	80	宮原 慶	復建調査設計(株)	廃棄物の地盤特性に関する一事例	中部
	81	久保 裕一	中部土質試験協同組合	伊勢湾岸地域における動的変形特性について	中部
D-1 海岸河川(1) 21日15:05~16:25 3F「サルビア」	82	小倉 教弘	中部土質試験協同組合	袋井地域の沖積粘土層の過圧密特性に関する一考察	中部
	83	杉野 康博	(株)ダイヤコンサルタント	漏水被災箇所における対策工法の検討例	中部
	84	宮田 善都	応用地質(株)	飽和・不飽和浸透流解析の実務への適用に関する考察	中部
	85	西尾 俊彦	玉野総合コンサルタント(株)	海岸狹窄部における堤防の耐震対策検討	中部
	86	浅川 真也	(株)ダイヤコンサルタント	河川堤体における非破壊探査手法適用事例	関東
	87	萩原 協仁	基礎地盤コンサルタント(株)	高密度電気探査と1m深地温探査を利用した堤防漏水調査事例	中部
D-2 海岸河川(2) 21日16:40~17:35 3F「サルビア」	88	池田 智子	(株)宇部建設コンサルタント	ダムが下流河川へ及ぼす影響について ~微量分析を用いた事例報告~	中国
	89	大垣 泰宏	日本物理探査(株)	海岸護岸部での観測調査	関西
	90	今泉 亘	応用地質(株)	特定期間に発生する漏水現象と公共地盤データベースの活用	関東
	91	磯村 隆文	東邦地水(株)	濁度希釈法による流量測定の適性度	中部
D-3 サンプリング・ サウンディング 22日9:00~10:20 3F「サルビア」	92	高木 俊男	復建調査設計(株)	阿武隈河口域の土砂移動様式	関東
	93	鈴木 規利	(株)ジーベック	N値推定に代わる小口径サンプリングを用いた土質強度の取得について	中部
	94	野中 寿信	(株)田中地質コンサルタント	未固結粘性土地盤を対象とした定方位試料サンプリングの開発	関西
	95	小暮 充範	(株)グランドリサーチ	砂地盤における標準貫入試験結果事例	関西
D-4 トンネル 22日10:35~12:00 3F「サルビア」	96	五十嵐厚夫	復建調査設計(株)	ピストンコアリングの地質コンサルティング業務での適用事例—技術紹介と課題	関東
	97	高田 徹	(株)設計室ソイル	小型三成分コーン貫入試験機の開発と適用性について	関東
	98	北川 博也	(株)ダイヤコンサルタント	付加体中に計画されたトンネル地山の地質工学的評価	九州
	99	熊野 浩雅	(株)宇部建設コンサルタント	トンネル掘削補助工法の施工事例	中国
	100	高梨 俊行	川崎地質(株)中部支社	トンネル掘削による植生への影響事前調査について	中部
D-5 ボーリング 22日13:00~14:20 3F「サルビア」	101	松本 敏行	復建調査設計(株)	山岳トンネルにおける水文解析事例	中国
	102	萩野 晃平	国際航業(株)	高密度電気探査と高密度弾性波探査を組み合わせたトンネル地山評価の例	関西
	103	藤井 俊逸	(株)藤井基礎設計事務所	計測結果のインターネット配信によるトンネル安全管理事例	中国
	104	斎藤慶一郎	(株)興和	ロータリー式パーカッションドリルの地盤調査への適用	北陸
	105	尾関 浩	(株)東京ソイルリサーチ	被圧条件下における既存建物直下の地盤調査事例	中部
	106	大隅 勝	(株)宇部建設コンサルタント	被圧地下水下における砂礫地盤の孔壁保持とコア採取の事例	中国
D-6 原位置試験 22日14:35~16:20 3F「サルビア」	107	秦 政志	(株)宇部建設コンサルタント	脆弱な炭質頁岩が挟在する砂防えん堤の基礎地盤	中国
	108	小西 弘将	(株)レアックス	礫質土の優良コア採取による砂礫層の詳細な地質情報	北海道
	109	齋藤 範夫	中央開発(株)	礫分が多い堤体土からの不攪乱試料の採取	中部
	110	吉岡 正光	サンコーコンサルタント(株)	堆積軟岩を対象とした孔底変形法による原位置初期応力測定事例	関東
	111	中村 和範	(株)ダイヤコンサルタント	有明海沿岸地域(有明粘土)における地盤の強度・変形特性の合理的評価	九州
	112	庄司 光宏	(株)マスダ技建	5セル型プレッシャメータより得られる土質パラメータ	関東
	113	鎌原 良彰	(株)ダイヤコンサルタント	ポアホールテレビカメラを用いた地質調査法の事例紹介	中部
	114	寺見 博敏	(株)東京ソイルリサーチ	繁華街における杭の急速載荷試験事例	関西
	115	岩澤 昇	(株)ジオファイブ	GFD4型地下水流向流速計の開発とその適用例	関東
	116	小林 幸夫	(株)東京ソイルリサーチ	エコーチップによるボーリングコアの定量化評価例	中部

泥炭地盤における真空圧密工法の試験盛土

こう さか とし あき
高坂 敏明*

1. まえがき

真空圧密工法は、近年、軟弱地盤上の急速盛土施工等の安定対策や沈下対策工として施工事例が増えている工法である。特に、本工法の安定対策工としての効果は著しく、今後も超軟弱地盤での実績が増えていく工法と考えている。

ただし、数年前までは、本工法の効果に不明な点があり試験施工などを行うことによって対象地盤への適用性を検証し、採用に踏み切ったケースもあり、今回紹介するのも、試験施工によって採用を決定した業務のひとつである。

2. 試験施工の目的

試験施工の対象とした真空圧密工法は、地盤内を真空駆動装置により減圧し、強制的に圧密脱水を進行させる工法である(図1)。これまでの施工実績によると^{1)~4)}、本工法を採用した場合には、従来では考えられないほどの盛土速度での盛り立てが可能であり、かつ急速に盛土施工を行っても周辺地盤への変形(側方流動)が極めて少ないことが確認されている。

ただし、工法の特長に関する以下の課題が残されていた。

- ・二次圧密を含めた長期的な沈下に対する効果がまだ明

らかとなっていない。

- ・泥炭性地盤の特殊性を考慮した設計法(強度増加、沈下予測)が確立していない
 - ・ポンプ停止時期、施工管理基準などが明確でない。
- さらに、地盤特性を考えると次の問題も懸念された。
- ・軟弱層の深度が非常に深く(26~27 m)、さらに、中間に砂層が存在することから、負圧が深部まで作用しない可能性がある。

以上の背景を踏まえ、当該地盤に対する真空圧密工法の適用性を検討する目的で、無対策、バーチカルドレーン工法、真空圧密工法の試験施工を実施した。

3. 試験盛土の概要

(1) 地盤構成

当該地は、図2に示すように、表層から深度7 m程度まで自然含水比 $w_n=300\sim 800\%$ 、湿潤密度 $\rho_t=1.00\sim 1.05\text{ g/cm}^3$ の泥炭および粘性土(上部層)が堆積し、この下位に層厚5~6 m程度の砂層が分布する。さらに、この砂層の下位には、層厚14~15 m程度、自然含水比 $w_n=70\sim 100\%$ の海成粘土(下部層)が堆積する。

(2) 施工状況

各ヤードの形状は、縦断幅45 m、横断幅30 m程度とし、施工盛土厚は6.6 mとした。盛土速度の実績は真空圧密ヤード $v=14.1\text{ cm/d}$ 、その他のヤードは $v=7\text{ cm/d}$ となっ

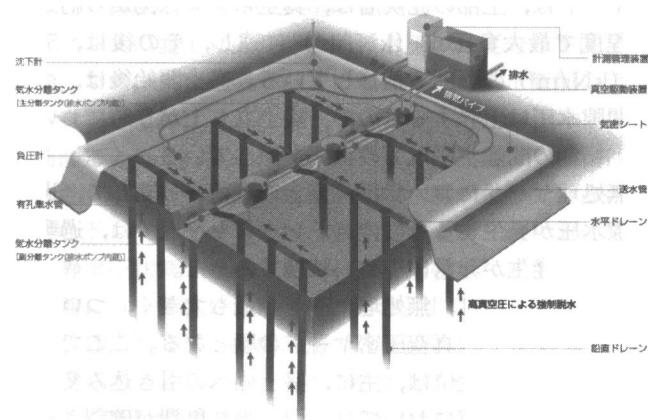


図1 真空圧密工法概念図⁵⁾

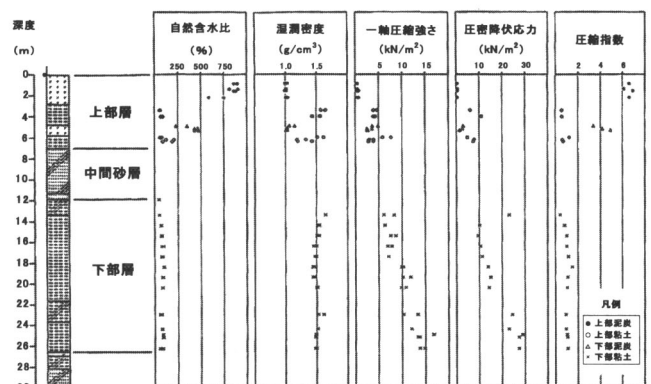


図2 土性図

* ダイヤコンサルタント(株)東北支社

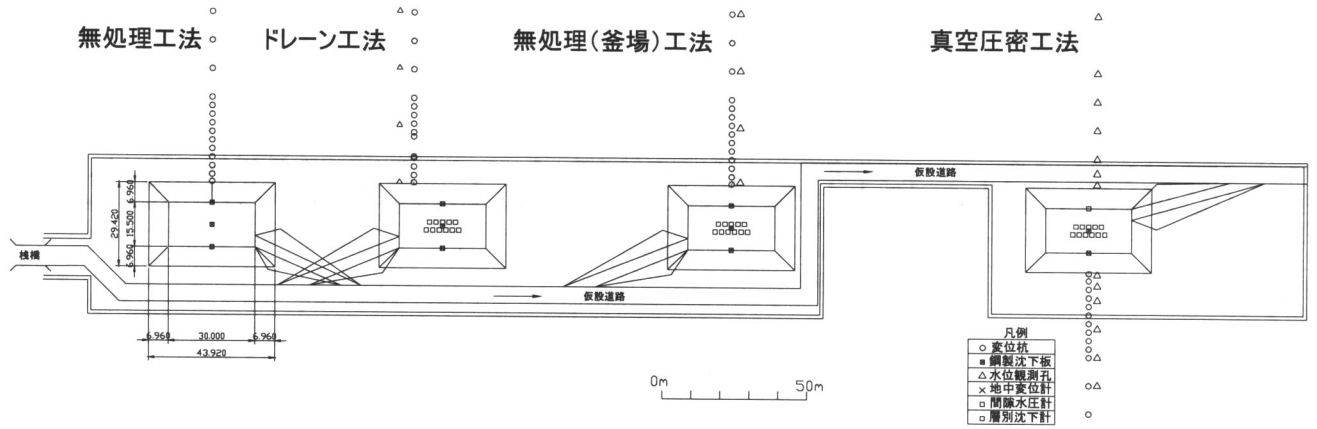


図3 動態観測計器配置平面図

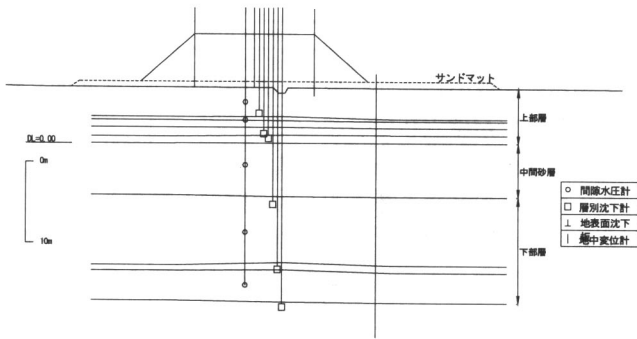


図4 動態観測計器配置図横断面

ている。

なお、真空圧密ヤードは、以下の仕様とした。

- ・カードボードドレーン：正方形配置，間隔0.8m×0.8m，長さ26m，ドレーンヤードも同様
 - ・気密シート：面積853m²・真空ポンプ：1台
- また，動態観測計器は，図3，4のように配置した。

4. 動態観測結果

(1) 経時の変化

盛土開始から盛土立ち上げ後6カ月間の計測データを図5に示す。同図より，沈下は，真空圧密ヤードの上部層で，他のヤードと比較して沈下が急速に進み，真空圧密による沈下促進効果の大きいことが確認された。

中間砂層以深に分布する下部層に関しては，他のヤードより若干沈下速度が大きくなる程度で，上部層ほど明確な沈下促進効果が表れなかった。ただし，設計 c_v を用いて理論沈下量と実測沈下量のフィッティングを行うと，ドレーンヤードではウェルレジスタンスを考慮しなければ良好な相関が得られないのに対し，真空圧密ヤードではウェルレジスタンスを考慮しなくとも理論沈下量と実測沈下量が比較的一致するとわかった。これは，真空圧密ヤードでは，ドレーン内部に負圧が作用することにより，ドレーンが理想的な井戸（透水係数が無限大）として機能したためと考えられる。したがって，今回のように長尺の小径ドレーンを用いた場合においても，真空圧密工法であれば，負圧が作用する深度までは，ウェルレジスタンスの影響が非常に

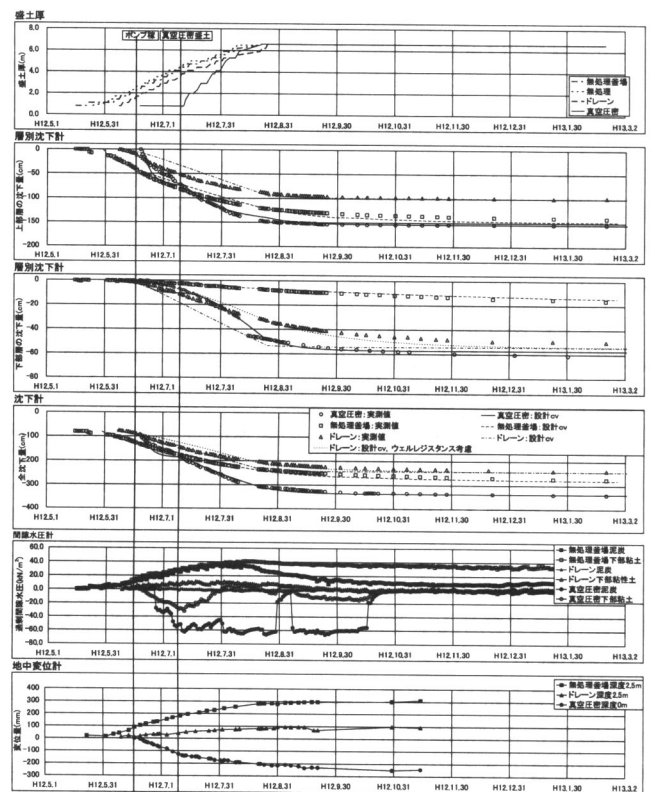


図5 経時変化図

小さいものと考えられる。間隙水圧の経時変化は，真空圧密ヤードは，上部の泥炭層は，真空ポンプ稼働から約2週間程度で最大負圧60(kN/m²)に達し，その後は，50~60(kN/m²)の範囲で推移している。盛土開始後は，徐々に間隙水圧は上昇するものの，盛土立ち上がり時においても，初期の間隙水圧以下の状態を保っている。

無処理ヤードにおいては，盛土の载荷に追従して，過剰間隙水圧が発生するものの，ドレーンヤードでは，過剰間隙水圧の発生が非常に小さい状態であった。

地中最大変位は，無処理ヤードが最も大きく，ついで，ドレーンヤード，真空圧密ヤードの順となる。ここで，真空圧密ヤードの変位は，主に，盛土側への引き込み変位であり，盛土周辺部においては，引っ張り亀裂が確認されている。

この変位を深度分布で見ると，図6に示すように，無処理ヤード，ドレーンヤードでは，上部泥炭層の下部付近に

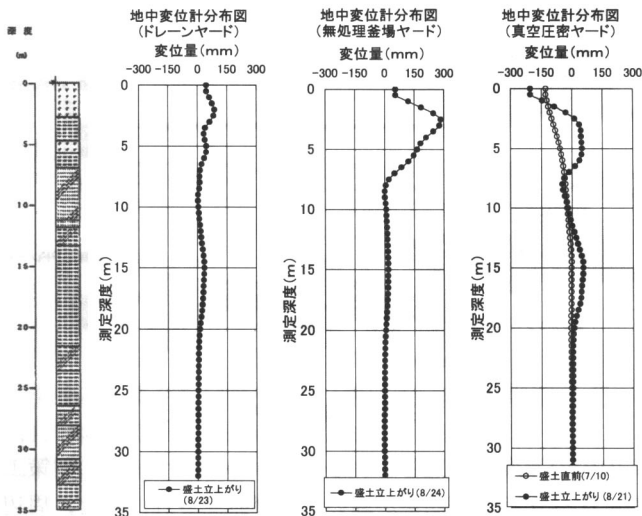


図6 地中変位深度分布図

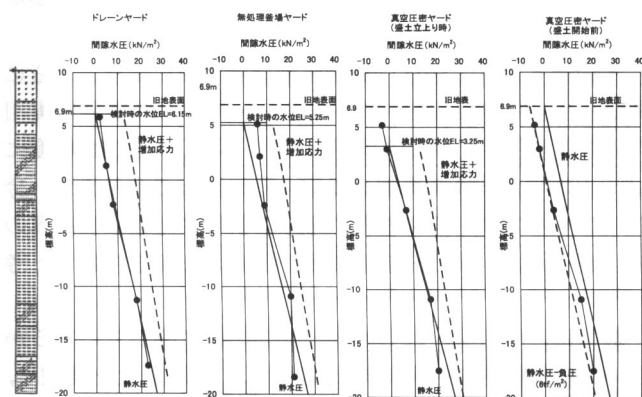


図7 間隙水圧深度分布

最大変位が発生している。また、真空圧密ヤードにおいては、盛土開始前に中央方向へ最大 13 cm 程度の引き込みが発生している。盛土立ち上がり時には、部分的に、側方へ変位しているデータがあるものの、これは、地中変位計設置個所において、引き込み沈下量が 57 cm も生じており、これに伴って、計測管に変位が生じた可能性が強く、全体としては、側方への押し出し変形は小さいものと考えられる。

(2) 負圧の深部への到達について

各ヤードの盛土立ち上がり時の間隙水圧の深度分布を図7に示す。なお、真空圧密ヤードについては、盛土直前のデータも表記した。

同図によると、無処理ヤードでは、泥炭層と下部粘性土層、さらに、中間砂層でも過剰間隙水圧が生じているのに対し、ドレーンヤードでは、盛土立ち上がり時においてもほぼ静水圧状態となっている。真空圧密ヤードでは、盛土載荷前には全深度にわたって、静水圧以下になっている。その値は、泥炭層、中間砂層では計画の負圧 60 (kN/m²) が作用しているものの、下部の粘性土においては、30 (kN/m²) 程度であり、計画と比べ、小さな値にとどまっている。

(3) 盛土の安定性に関する改良効果

盛土施工中の安定管理図を図8に示す。同図によると、

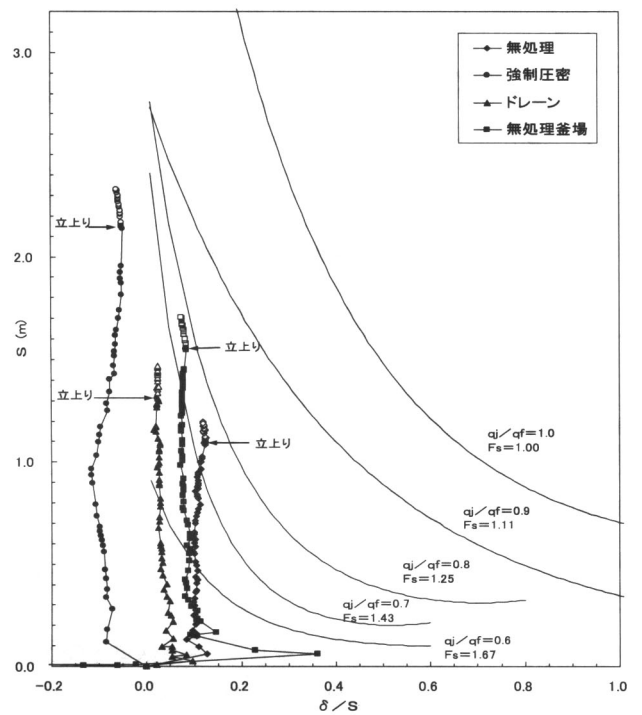


図8 松尾・川村の安定管理図

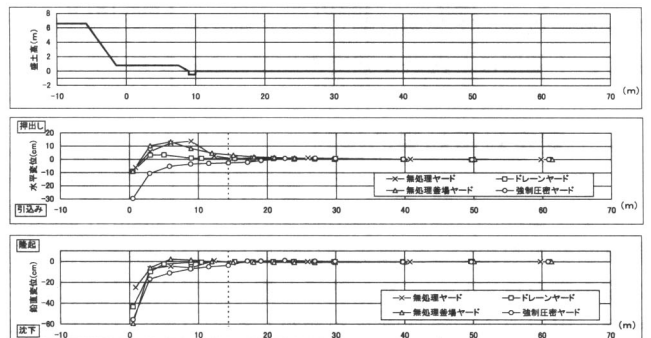


図9 周辺地盤の変位発生状況

各工法とも、おおむね、軌跡が真上に向かっており、安定した状態を示している。 δ/S の範囲を見れば、

- 無処理ヤード $\delta/S=0.10\sim0.12$
- 無処理釜場ヤード $\delta/S=0.07\sim0.09$
- ドレーンヤード $\delta/S=0.02\sim0.03$
- 真空圧密ヤード $\delta/S=-0.11\sim-0.05$

となっており、安定度が高いのは真空圧密ヤード、次いで、ドレーンヤードとなっている。また他の安定管理図においても同様に、真空圧密ヤードの安定度が高い傾向となっている。

(4) 変形対策効果

各ヤードの盛土立ち上がり時の地表面変位を図9に示す。この図から、真空圧密ヤードにおける水平変位は、盛土側への引き込み変位主体であり、鉛直変位に関しても、全体に引き込み沈下傾向となっている。

5. 強度確認試験結果

盛土前、盛土立ち上がり時、3カ月放置後に、強度確認試験と

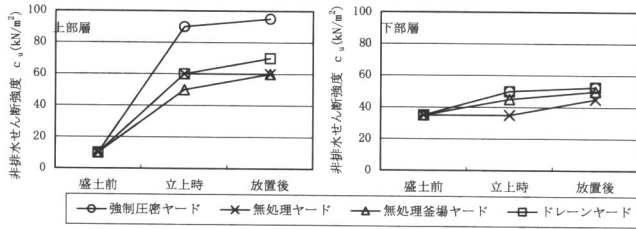


図10 強度確認試験結果

表1 各ヤードの安全率

安全率の算定方法		真空 圧密	無処理	無処理 釜場	ドレ ー ン
強度確認試験 結果	実測値から の推定値	1.82	1.36	1.38	1.54
管理図から逆算	実測値から の推定値	1.67 以上	1.35	1.35	1.55
強度増加率 $c_u/p=0.5$	設計値	1.62	1.38	1.41	1.53

して三成分コーン貫入試験を実施した。その結果を図10に示す。この図から、真空圧密ヤードの上部層は、強制脱水の影響により、他のヤードよりも立上り時、放置後ともに大きな非排水せん断強度を示すことがわかった。ただし、中間砂層以深の下部層に関しては、他のヤードと同程度であり、上部層ほど顕著な強度増加がみられなかった。

6. 安定対策効果の検討

真空圧密工法の安定対策効果を検討するために、強度確認試験結果を用いて円弧すべり計算を行い、盛土立上り時の安全率を算定した。その結果を表1に示す。表1には、松尾・川村の安定管理図から逆算した安全率、上部層の強度増加率を $c_u/p=0.5$ とした場合（設計値）の計算安全率もあわせて示す。この表から、無処理ヤード、無処理釜場ヤード、ドレーンヤードは、設計値（強度増加率を $c_u/p=0.5$ とした場合）と実測値からの推定値がおおむね一致するが、真空圧密ヤードに関しては、強度確認試験による安全率が、設計安全率より更に大きく、強度増加率を逆算すると、 $c_u/p=0.7$ 程度に算定される。

これは、無処理ヤード、無処理釜場ヤード、ドレーンヤードの地盤が、側方流動を伴った圧密状態だったのに対し、真空圧密ヤードの地盤は、水平変位がきわめて小さい状態であったためと考えられる。このことから、真空圧密工法は、現在設計で見込んでいる以上の安定対策効果を期待できる可能性が強い。

7. あとがき

試験施工の結果、真空圧密工法は、盛土速度が他のヤード

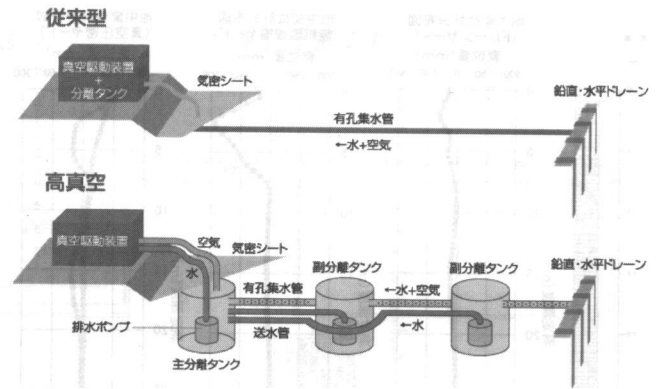


図11 従来型と高真空システムの比較

の倍の速度で施工しているにもかかわらず、他の対策工法に比べ安定対策効果が高いことが確認され、また、周辺地盤への影響もきわめて小さいことが確認された。特に、安全率から見れば、計算で得られる安全率以上の効果が期待できる可能性が確認された。

その後も、本工法は、真空圧密技術協会により、さらに安定した高真空が確保できる施工システムの開発・実用化⁵⁾や真空圧密の理論的解明が進められ、平成17年度には、土木学会技術開発賞を受賞するに至っております。今後もさらなるデータの蓄積、現象の解明や地盤改良品質の向上が行われ、より一層の普及が行われる工法であると考えています。

最後に、私自身、はじめは、この工法に関してどちらかといえば消極的な考えであったが、この試験盛土を経験し、従来の対策工では考えられないほどの効果を体感させられた業務でありました。

参考文献

- 1) 二ノ宮秀彦・赤石浩司・鈴木武彦：軟弱地盤における急速盛土工法の試験施工（第1報）—強制圧密脱水工法の試験・調査結果について—、第41回北海道開発局技術研究発表会発表概要集（共通）、pp. 125-130, 1998.2.
- 2) 川村雅洋・有田良治・鈴木武彦：軟弱地盤における急速盛土工法の試験施工（第2報）—強制圧密脱水工法の試験・調査結果について—、第42回北海道開発局技術研究発表会発表概要集（共通）、pp. 63-70, 1999.2.
- 3) 中尾玲紀・有田良治・石塚達也：軟弱地盤における急速盛土工法の試験施工（第3報）—強制圧密脱水工法の試験・調査結果について—、第43回北海道開発局技術研究発表会発表概要集（共通）、pp. 13-20, 2000.2.
- 4) 秋元清寿・蛭澤敦・林宏親：釧路新道における軟弱地盤処理工法について—強制圧密脱水工法の適用と有効性—、第44回北海道開発局技術研究発表会発表概要集（共通）、pp. 13-20, 2001.2.
- 5) 真空圧密技術協会：高真空 N & H 工法—改良型 真空圧密工法—技術資料 2004 年版。