

## 特集：都市部の地下構造探査

都市部の地下構造探査 その目的と重要性 / 都市部の地下構造探査の実例 /  
物理探査手法の紹介 / 用語解説：地震基盤と工学的基盤



反射法探査の際に用いられるバイブレーター (Y-2400)。大規模な探査においては複数台用いられることもあります (写真提供：(株)地球科学総合研究所)。

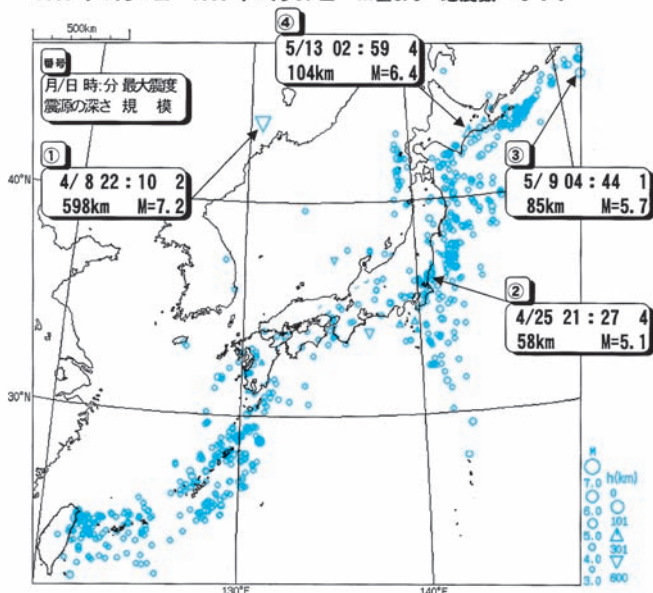
### 4月～5月のおもな地震活動

1999年4月～5月にかけて観測されたマグニチュード(M) 3.0以上の地震回数は817回でした。このうち、M5.0以上の地震回数は7回でした。

#### ウラジオストク付近

ウラジオストク付近の深さ598kmでM7.2の地震があり、北海道から中部地方の太平洋側を中心に震度1～2を観測しました。通常、震度分布は震央を中心としたほぼ同心円上になりますが、このように震央の近くより離れたところで揺れる領域を異常震域といいます。

1999年4月1日～1999年5月31日 M $\geq$ 3.0 地震数=817



この例のように震源の深い地震や、震源が浅くても日本海溝近くで発生した地震では南北に延びた異常震域が現れます。

#### 茨城県北部

茨城県の水戸市、金砂郷町、栃木県の益子町で震度4を観測しました。この地震の震源とほぼ同じところでは、3月26日にM4.9の地震(最大震度4)が発生しています。

#### 千島列島

#### 北海道釧路支庁中南部

足寄町、帯広市、十勝清水町、本別町、広尾町、弟子屈町、釧路市、音別町で震度4を観測し、軽傷者2名、非住家破損1棟の被害がありました(5月13日現在、自治省消防庁調べ)。この地震の震源とほぼ同じところでは、1993年に死者2名の被害を出した釧路沖地震(M7.8、深さ101km、最大震度6：当時の震度階級)が発生しています。

#### 世界の地震

M7.0以上あるいは死者50人以上の被害を伴った地震は以下のとおりです(発生日は日本時間、M、被害はUSGSによる：6月1日現在)。

4月5日 ニューブリテン島(M7.0)被害報告なし

5月16日 ニューブリテン島(M7.0)被害報告なし

(気象庁、文責：前川)

図の見方は「なみふる」No.2 p.8をご覧ください。

# 都市部の地下構造探査

## その目的と重要性

日本の都市の多くは沖積平野にあります。これは地層の中でも一番新しい沖積層でできていて、まだよく締め固まっています。もっと古い、例えば恐竜時代の地層等と比べると、その固さは土鍋とその中の豆腐くらい違います。私達はその豆腐の皮の上に街を作って住んでいるのです。この下には、第三紀層と呼ばれる、もう少し固い地層が潜んでいます。これも、さらにその下にある花崗岩に比べると、やはりずっと柔らかい地層です。

地震は、地球表面を覆っている花崗岩や玄武岩の岩盤の中で急激に起こる破壊現象です。そこで生じた地震波は、まず岩盤を伝わって行きます。地震波は、固いものから柔らかいものに伝わった時には振幅が大きくなります。だから、花崗岩から第三紀層、沖積層と伝わっている間に、振幅がどんどん大きくなります。さらに、柔らかい地層と岩盤との間の境界は、鍋底のような形をしていることが多く、地震波は真下からだけでなく底のあちこちから柔らかい地層へ入ってきます。ところで、地震波は柔らかい地層から固い地層へは伝わりにくいので、一度柔らかい地層へ入ってしまうと地震波は外へ出られずに、底や地表で跳ね返されながら走り回ります。このため、沖積平野では揺れはなかなか収まりません。土鍋に豆腐を入れて激しく揺すってみましょう。たとえ鍋一杯に豆腐を敷き詰めた

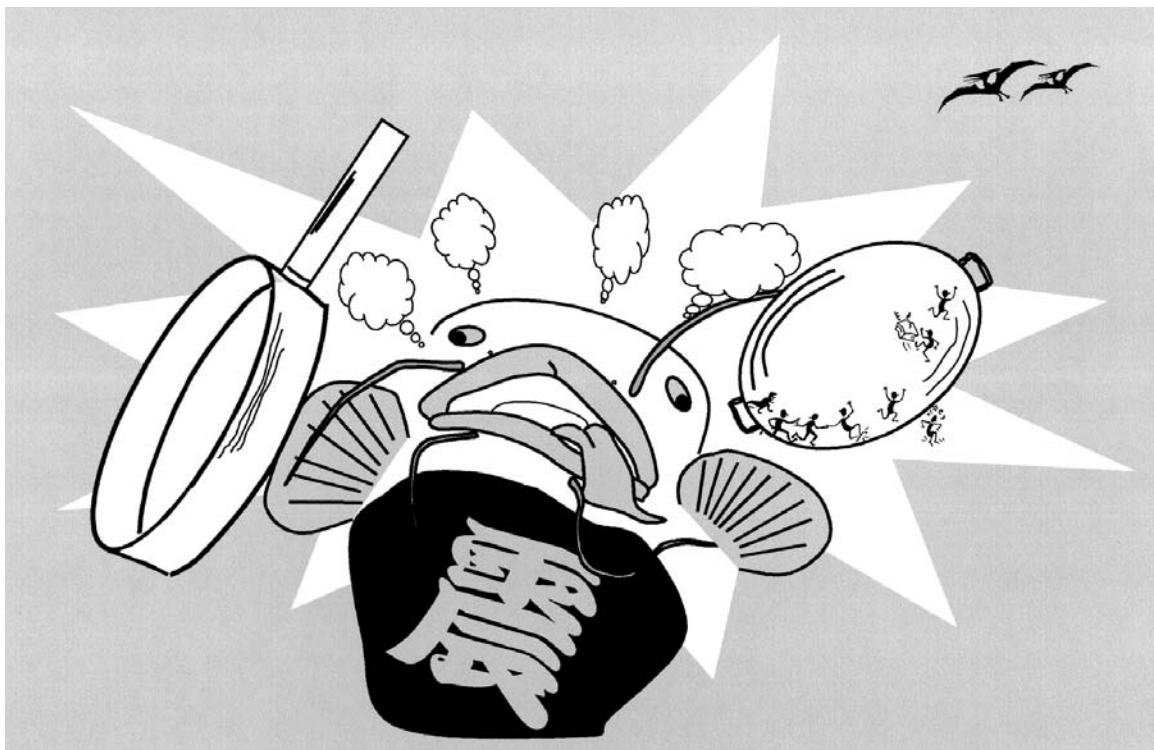
としても、土鍋を揺るのをやめても豆腐はしばらく止まらず、ふわふわと動いているでしょう。

同じ鍋でも、土鍋の代わりに中華鍋を使えば中の豆腐の揺れ方が違います。沖積平野の揺れ方も、その底の形によって様子が違います。私達の街がどう揺すられるかを知るためには、鍋底の形を知らなければなりません。

内陸部に起こる地震は、活断層と呼ばれる岩盤の弱面に沿って繰り返し起こる性質があります。過去に起こった地震により生じた岩盤のずれが長い間に重なり合って、場所によっては段差数キロメートルに及ぶ地中の崖ができています。このような凸凹の鍋底の形を、地表に見えている縁から推し量るのは大変に難しいのです。

1995年兵庫県南部地震により、神戸から芦屋にかけて狭い幅で長く伸びた被害激甚地区（震災の帯）が生じました。地震後数年をかけた調査研究により次に述べるように、神戸市の足元にある鍋底の形が重要な役割を果たしたことがわかりました。

詳しい地下構造探査の結果、神戸市は大阪湾という大きな鍋の縁にあり、神戸市街地と六甲山地の間には段差数キロメートルに及ぶ切り立った崖が埋もれています。神戸市は、いわば、すき焼鍋の縁にできた街だったのです。兵庫県南部地震を起こした断層はこの段



差の真下、15キロメートルの深さで動きました。そこから放出された地震波は、花崗岩の中を伝わり、ほぼ水平なすき焼鍋の底を通り抜けて、柔らかい地層に入ります。もちろん、そこで振幅が大きくなります。地表へ向かって上がってくるにつれて振幅はどんどん大きくなります。一番浅いところはブヨブヨの沖積層ですから、そこでまた一段と大きな振幅になります。こうして地表にあった街は強く揺られるわけですが、これだけでは「震災の帯」を説明できません。六甲山地は花崗岩の固まりで平野の下の岩盤とつながっていますから、地震波は当然そちらにも回り込み、埋もれた崖を通過して横方向から柔らかい地層に入ってきて地表に沿って伝わっていきます。そして、ある所で下から来た地震波と重なり合い、そこだけその周囲よりも振幅が大きくなります。カリフォルニアでも、同様の現象によって特定の場所で強烈に地震波の振幅が大きくなる例が知られています。確かに、震源のすぐ近くに神戸市があったというのが大きな被害が出た一番の原因ですが、震度7の範囲と重なる「震災の帯」は鍋の縁のために生じていたのです。

では、「神戸の鍋が悪かった」のでしょうか？日本列島は活断層に覆われていることがわかっています。これらは、地震を発生させるだけでなく地中に埋もれた崖を伴うことが多いという意味でも危険です。背後に山稜が見えるような平地では、神戸の様な現象が起こる可能性が高いのです。つまり、「我家の鍋」も要注意、なのです。

地震防災対策は、街のどこがよく揺れるかを考慮して作られています。しかし、ほとんどの場合は各町内の真下、しかもごく浅い所にある、一番柔らかい沖積層の有無や厚さ等を基にして評価しています。これまで述べた鍋の縁とか底の影響や底の形の影響は、考慮されてはいません。それは、ほとんどの街では鍋底の形がわからないからです。しかし、神戸の教訓は鍋底の形、そして鍋の中での地震波伝播速度の分布を知る必要があることを教えています。

兵庫県南部地震以後、日本の地震防災対策は地震予知計画に基づくものだけではなく、予知を前提としない対策も合わせた二本立てで進められています。後者の一環として、政府からの補助金により三つの県が、県内の平野で地下構造探査を進めています（次ページ記事参照）。目的は、活断層の確認だけではなく、鍋底（専門用語では地震基盤といいます。7ページ記事参照）の形とその中の地震波伝播速度分布を知ることにあります。それがわかれば、コンピューターシミュレーションによって、よく揺れる場所の分布がある程度予測でき、地震防災対策の大きな助けとなると期待されています。

（建設省建築研究所国際地震工学部 横井俊明）



日本地震学会会長  
入倉孝次郎  
（京都大学防災研究所）

## 地震とともに生きるにはどうすればよいのか？

地震は地表に大きな震動をもたらす災害を引き起こす悪者と思われていますが、地震が送り出す地震波は、望遠鏡などで見るのでできない地球の中を光のかわりに照らし出し、地球の内部構造を明らかにしてくれる貴重な情報源でもあります。学生時代、初めて地震観測に参加して、地震計を設置して記録装置につなぐなど慣れない作業の後、地震記録が取れたとき飛び上がるほどうれしかったことをいまでもよく覚えています。地震記録を見ていると、何となく地下の様子を想像することができて、いつまで見ても飽きないように思えたものです。実際に地震の研究をしている人は誰でも、多かれ少なかれ地震の記録を見るだけで震源メカニズムや地下構造を思い描くことができるものです。

このようなことからわかるように、地震や地殻変動の記録の量と質の向上は直接的に地震現象や地球内部構造の研究の原動力になるものです。最近の計測技術の発達には地震学・固体地球物理学を旨ましく発展させています。地球の研究を通して惑星の内部構造の解明も進んできました。地震学会を構成している研究者は、このような固体地球科学の発展に大きな貢献をしてきています。

一方、都市を直撃する大地震が起これば、阪神・淡路大震災をみるまでもなく、未だに大災害が発生しております。このことからすぐに、地球科学の発展に比べて地震災害軽減の研究が後れを取っていたとは思いません。災害軽減に効果を発揮するに十分な観測がなされていなかったことに問題はありますが、災害は人間の社会的活動に関係するため、単に観測の量と質だけでは研究が進むことにはなりません。まだまだ自然の力は人間の知恵を上回っているのだと私は思います。

地震というものは災害が起こらない限り、けっして忌み嫌うものではありません。地震とともに生きるにはどうすればよいか、この問題は21世紀における地震研究者の重要課題のひとつです。地震が起こることは避けられませんが、備えさえできておれば地震が来ても静かに通りすぎるのを待てばよいことになると思います。

美しき名会長であった石田瑞穂さんに代わって、私がこの4月から地震学会の会長を勤めさせていただくことになりました。前会長が地震学会に対する社会的期待にこたえるために創刊したこの「なみふる」を通じ、これからも学会の研究成果が市民からも見える工夫と学会活動の社会的使命を果たす努力をしていきたい、と私は考えております。

## 都市部の地下構造探査の実例

都市部での地下構造探査が重要であることがわかりただけだと思います。平野でのやや厚い堆積層の物理的特性が強震動（地震による強い揺れ）と大きくかかわっていることは、今から30年ほど前から注目されておりました。本格的に都市部での基盤構造探査が行われたのは、東京都と首都圏基盤構造研究グループ（代表：嶋悦三）による、昭和51年（1976年）のことです。当時造成中であった夢の島15号地に100mのボーリング孔を掘り、その底に500kgのダイナマイトを仕掛けて爆発させ、その震動を都内の各地で観測する屈折法探査でした（探査手法には屈折法・反射法・微動探査などがあります。6ページ記事参照）。その後10年ほどかけて色々な測線（観測点が並べられた線）で調査が行われ（図1）、関東平野のほぼ全域で地震基盤（7ページ記事参照）までの深さ分布が分かりました（図2）。この種の調査は大阪平野や濃尾平野などでも行われましたが、測線の数は僅かでした。

兵庫県南部地震の後で設置された地震調査研究推進本部では、数々の地震調査・研究の施策を打ち出してきましたが、その一つに強震動予測の精度・技術の向上を目指した平野部の地下構造調査があります。科学技術庁が都道府県・政令指定都市に調査の応募を募り、地方交付金により実施されるものです。

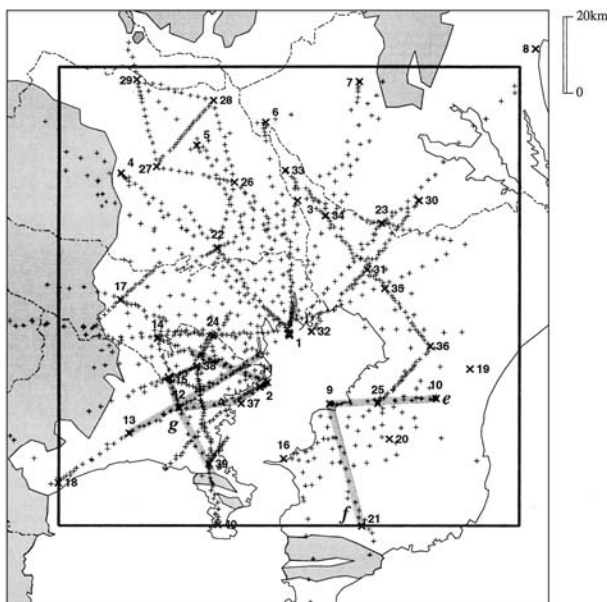


図1 関東平野で実施された屈折法探査。×印が人工震源（火薬爆発）の位置で+印が観測点の位置を示します。（嶋嶺、1995：「物理探査」より転載）

昨年度から開始された事業で、現在3年計画で、神奈川県・横浜市・川崎市の連合体、千葉県、京都市で実施されています。今年度から愛知県も加わる可能性が高くなっております。

関東平野の場合、観測のための深井戸があり、地震基盤の形状がわかっているのに、なぜさらに調査が必要なのかと疑問を持たれる方もおられることでしょう。もちろん、調査結果は今でも大変貴重な資料として生かされております。ただし、首都圏基盤構造研究グループが調査を開始したのは20年以上も前で、観測点の数に限りがあったため、詳細な地下形状を求めることはできていません。また、火薬を用いた人工震源の場所は、人家などに危険の及ばないところに限定されるため、必要な測線をすべて設けることは不可能でした。さらに屈折法では、震源から離れたところでは、基盤より上部の構造は推定に頼らざるを得ません。兵庫県南部地震の後で神戸・大阪湾で各種の地下構造調査が行われ、強震動予測には基盤の形状とその上にある堆積層の速度構造、特にS波速度の把握がもっとも重要であると認識されました。したがって、大都市としては世界（神戸を除く）でもっとも地下構造が把握されている首都圏でも、まだまだ資料が足りないのが現状です。ましてや、他の大都市を抱える平野では、さらに深刻です。この3年計画の目標の一つは、地下

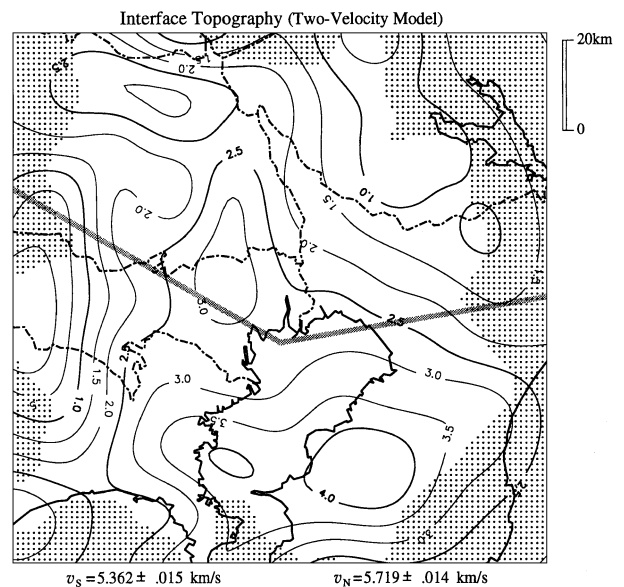


図2 関東平野での基盤までの堆積層の厚さ分布。単位はkmで、最も基盤が深いのは千葉県の中南部のようです。ここでは基盤のP波速度を、図の斜線より北では毎秒5.72kmを、南では毎秒5.36kmを用いています。（嶋嶺、1995：「物理探査」より転載）

構造調査を全国に展開するとき、最も有効な手法を把握することにもあります。ある程度データが蓄積されている地域での調査は、この目的の近道です。このような事情から、大都市での地下構造調査が始まっております。昨年度に実施された調査はそれぞれの調査委員会で詳細計画が立案されましたが、現存するデータを踏まえて、それぞれの地域特性を生かすことに力が注がれています。実施された調査の概要を東の地域から順に紹介します。

**千葉県：** P波反射法による調査が中心で、船橋市の北から我孫子市の間約15kmの測線で行われました。あわせて屈折波の確認と基盤P波速度の決定、試験的ですがS波の反射法探査と微動のアレイ観測が2ヶ所で行われました。この測線のほぼ中間地点に防災科学研究所の深井戸の観測点があり、構造調査も既に行なわれています。今回の調査は、深井戸の調査結果と比較できたため、今後の調査方法・精度の検討に有意義なデータが得られました。

**川崎市：** 市の北西部での測線長約18kmの反射法探査が中心でした。この測線は活断層調査で実施された反射法探査測線にほぼ直交しており、また、測線上3ヶ所でパワーアップした震源車（バイブレーター；表紙写真参照）を用いて屈折法探査も行なわれ、基盤のP波速度が確認されました。S波の反射法による試験的探査も行われています。以前の屈折法による地下構造モデルと反射法による解析結果の違いが注目されています。

**横浜市：** 市全域にわたる25ヶ所での微動のアレイ観測に基づき、S波速度構造の決定に力が注がれています。人工震源を用いた探査は、調査地域に大きな制限を伴いますが、微動アレイ観測は人工震源を必要としないことから大都市での有力な探査手法として認識されつつあります。他の手法による探査結果ともおおむね整合する結果が得られており、今後の詳細な検討が期待されています。また、既存の人工地震データの再解析および市内に展開されている高密度強震計記録の解析から地下構造が把握されています（「なみふる」No. 6（1998年3月）4～5ページ記事参照）。地下構造と強震動の関係を明らかにするための重要な作業です。

**京都市：** 京都市を南北に切る約20kmの測線で反射法探査と屈折法探査が同時に行われ、複雑な基盤形状の



写真 市街地での調査風景（(株)地球科学総合研究所提供）

把握とともに、南部に伏在断層（地下に隠れた断層）の存在が示唆されました。また、既存のデータ、特にボーリング資料や重力データの収集・整理も行なわれました。今後の探査方針や地下構造モデル作成のために活用されます。

写真は市街地で実施された調査での人工震源の車両です。車両の通過するときはゆれを感じますが、すぐに移動していきます。わずかな時間ですが我慢していただくことになります。これらの調査結果は、科学技術庁に組織された連絡会で披露され、将来の総合化に向けた議論が行われています。

例えば関東平野全域でこの種の調査を実施するには多大な費用を必要としますが、地震への安全対策にもっとも基礎となる資料であり、少しずつでも蓄積されることによって、より精密な強震動予測モデルの作成が可能になります。焦らずに、しかし着実に地下構造資料が蓄積されることを望みます。

（東京大学地震研究所 工藤一嘉）

## 物理探査手法の紹介

ここまでの話で、地下構造を知ることの重要性はわかりただけだと思います。では具体的にはどのようにして地下構造を知ることが出来るのでしょうか。

実際に掘ればよいと考える人もいるでしょう。現実には、建物を建築する場合にはごく浅い部分（深さ数十メートル程度）の地下構造をボーリングによって求めることが多くあります。しかし、深さ1000mよりも深い井戸を掘るには膨大な費用がかかるため、面的に構造を知りたい場合には、別の方法を考えなければなりません。

掘らずに地下構造を探査する最も一般的な方法は、「地震波」（人工的なものも含む広い意味での地震波）を用いた物理探査です。そのほかには、地震波の代わりに電磁波を用いたり、重力の強さが場所ごとにわずかながら異なる現象（重力異常）を利用して地下構造を知ることが出来ます。

ここでは、異なるタイプの地震波の持つ性質を巧みに利用した3つの手法、すなわち、反射法探査、屈折法探査、微動探査を紹介します。上から順番に分解能も値段も高い手法といえます。

### 反射法探査：

数十台～数百台の地震計を直線状に配置（地震計群のことをアレーと呼びます）し、パイプレーター（地面を揺らす機械）やインパクト（地面を叩いて衝撃を与える機械）などの人工震源を用いて、地下で構造が不連続になっている面からの反射波で地下構造を推定する手法です。海域における観測では、ハイドロフォン（水中マイクの種類）とエアガン（圧縮空気を水

中で解放することにより衝撃を与える機械）の組み合わせで探査が行われることもあります。

非常に微弱な反射波を巧妙に重ね合わせることで強調し、「地下の断面図」を作成することが出来ます（図を参照）。比較的小規模な震源ですむこと、探査深度と同程度の短めのアレー（アレーの長さを測線長といいます）ですむため、都市部でも探査が可能です。

### 屈折法探査：

屈折波と呼ばれる波の到来時間を用いて地下構造を求める手法で、直線上に観測点を配置する点、人工震源を用いる点は反射法と同様です。同じ深さまで地下構造を知るためには、屈折法は反射法に比べ長い測線長を必要とする反面、数回の観測で地下構造を決定できるという性質を持っています。測線長が長いため、威力のある発破による人工震源を用いた調査が行われています。

### 微動探査：

我々には感じる事が出来ないくらいわずかではありますが、交通や工場などの人間の生活ノイズや海の波浪の影響により地面は絶えず動いています。これらの微小な揺れを、「脈動」とか「微動」など呼びます。観測された微動の増幅特性や他の観測点で得られた微動との比較から、地下構造を推定することが出来ます。また、微動の上下動成分を複数の観測点で観測し、レーリー波（地表面に沿って伝わる地震波の一種）の挙動から地下構造を比較的精度よく推定するアレー式微動法もあります。

（科学技術庁防災科学技術研究所 青井 真）

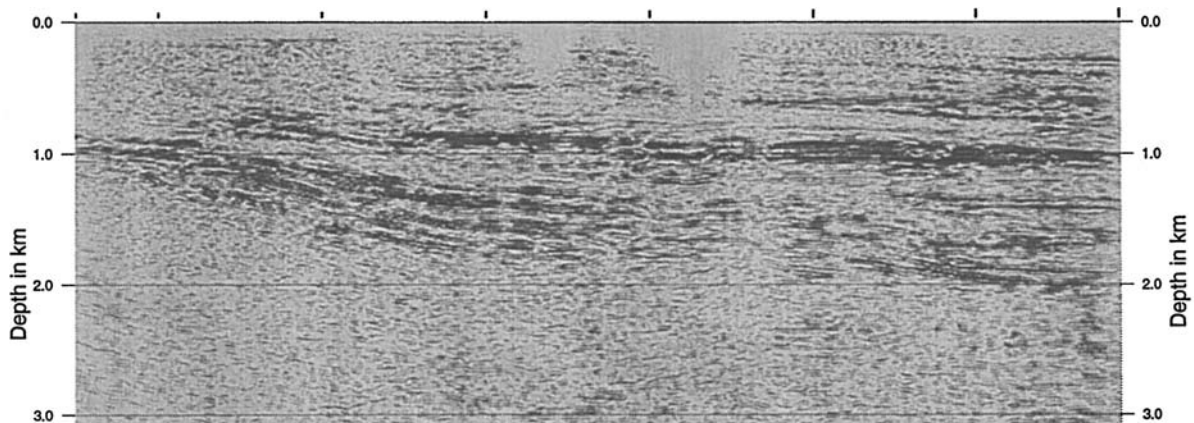
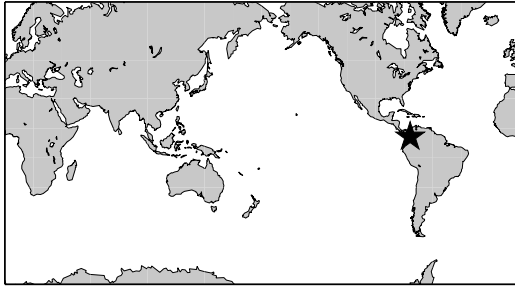


図 防災科学技術研究所が東京都府中市でおこなった反射法探査の地下構造断面図。





## 最近話題になった地震

ここが重要、ここに注目!!

### 1999年コロンビア・キンディオ地震の現地調査

1999年1月25日現地時間午後1時20分ごろ南米コロンビア中西部に発生した地震は、キンディオ県の県都アルメニア市を始め、周辺の町で多くの建物倒壊を生じ、1,171名の死者をもたらしました。現地では被災地の県名からキンディオ（Quindio）地震と呼んでいます。突発災害調査として文部省科学研究費が認められ、地震発生から1ヶ月ほどたった3月3日から現地調査にでかけました。筆者ら8名のメンバーのほか大学院生3名、土木学会の調査団2名が加わり、また現地ではコロンビア地質・鉱山調査所のスタッフの協力のもと調査をしました。調査は地質学・地震学などの理学の立場、土木・建築などの工学の立場、さらに地震情報・災害対応などの社会学的立場から、幅広く現地調査を行いました。

今回の地震はマグニチュード6.2と決して大きくありませんでしたが、震源の深さが10km程度と浅く、人口28万人の地方中心都市を襲ったことから大きな災害となりました。建物は大きく分けると、鉄筋コンクリート造り、レンガ造り、そして現地で多産される竹を用いた住宅があります。コロンビアは地震国で、しばしば被害地震に見舞われており、耐震規定も1984年に制定されて耐震設計が進められています。今回の地震で被害を受けた建物は古いものに集中しましたが、アルメニア市中心部では市庁舎、病院、消防本部、警察本部など災害時に拠点となる施設に大きな被害がでました。被災地一帯はコーヒーの産地であり、集積地のアルメニア市では市街地が近年急速に拡大し、沢地などに造成した住宅地での被害が著しかった

のも一つの特徴です。1ヶ月以上経過していましたが、現地ではガレキの処理が進行中で、仮設の住宅での生活が続いていました。

（北海道大学大学院工学研究科 鏡味洋史）



（上）ペレイラ市の被害（外壁・小屋組みに竹が用いられている）



（下）アルメニア市の被害集中地区（崖の上の被害が目立つ）

### 広報紙「なみふる」配布のご案内

現在、広報紙「なみふる」は省庁・地方自治体・マスコミ・博物館・学校等に進呈しています。個人配布をご希望の方は、氏名、住所、電話番号を明記の上、郵送料600円（1年6回分）を郵便振替で振替口座 00120-0-11918 「日本地震学会」にお振り込み下さい（通信欄に「広報紙希望」とご記入下さい）。なお、広報紙「なみふる」は日本地震学会ホームページ（<http://www.soc.nacsis.ac.jp/ssj/>）でもご覧になれます。

日本地震学会広報紙「なみふる」 第14号 1999年7月1日発行  
発行者 日本地震学会/東京都文京区本郷6-26-12 東京RSビル8F（〒113-0033）  
電話 03-5803-9570 FAX 03-5803-9577（執務日：月、水、木、金）

編集者 広報委員会/

小泉尚嗣（委員長）、河原 純（編集長）、飯高 隆、井出 哲、片尾 浩、桑原央治、芝 良昭、武村雅之、中川和之、橋本徹夫

E-mail zisin-koho@eri.u-tokyo.ac.jp

印刷 創文印刷工業（株）

本紙に掲載された記事等の著作権は日本地震学会に帰属します。