

地中レーダによる神戸市街の埋もれた活断層の調査

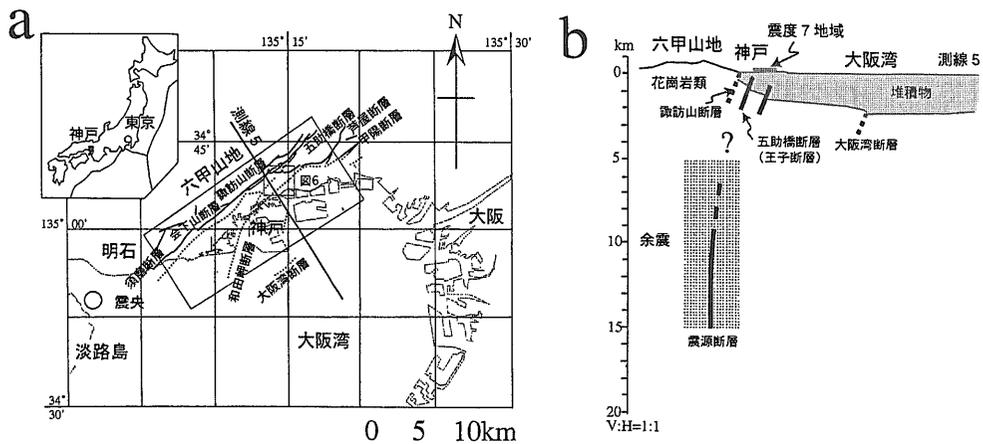
宮田 隆夫¹⁾

1. はじめに

1995年(平成7年)に兵庫県南部地震が神戸市街を襲った。が、神戸市街には明瞭な地震断層は現れなかった。この地震の前は1596年の慶長(伏見)地震が知られている。最近、寒川(1998)は、神戸市住吉神社南西方の遺跡調査地からこの時の液状化現象を報告している。慶長地震で五助橋断層が動き、神戸市住吉山手北方では約1.3 mの垂直変位量をもつことが指摘された(丸山ほか, 1997; Lin *et al.*, 1998)。一方、1967年(昭和42年)に大洪水がおこった。この時砂防ダムの効果で流出土砂は比較的少なかったが、その前の、谷崎潤一郎の「細雪」でよく知られている1938年(昭和13年)の大洪水では、多量の土砂が市街地を広く覆った(例えば、災害科学研究所, 1938; 六甲砂防工事事務局編, 1974; 町田・小島, 1986)。その

土砂の厚さが、場所によって変化するものの数mにも及ぶほどすさまじいものであった。このように古くから神戸の平野部は何度も大地震や大洪水に見舞われている。慶長(伏見)地震と兵庫県南部地震との約400年間に、豪雨による大洪水は10回以上起こっている。もちろん、1回ごとに洪水の規模は同じではない。その間に六甲山地から神戸の平野部に多量の土石流が押し出され、神戸の平野部に土砂が厚く堆積したと推定される。かりに慶長地震で神戸の平野部に低断層崖が現れていたとしても、その時の変位地形の大部分はその後の厚い土石流堆積物によってすでに埋もれてしまっている。

兵庫県南部地震後、反射法地震探査によって、神戸市街で埋もれた活断層(伏在活断層, 第1図)が複数見つかった(遠藤ほか, 1995; 中川, 1996; 横倉ほか, 1996; 藤田・佐野, 1997; 横田ほか,



第1図 a) 位置図(Miyata *et al.*, 1997による)。b) 六甲山地から大阪湾までの模式断面図(藤田・佐野, 1997に加筆)。太実線は兵庫県南部地震時に活動的な断層, 短破線は非活動的な断層。?; 断層はつながっていると推定されるが、データの欠如している部分。縦横比は自然スケール。

1) 神戸大学 理学部地球惑星科学科:
 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

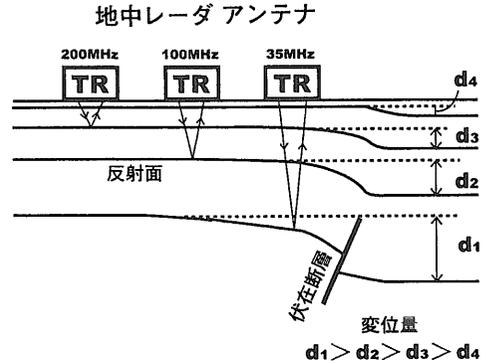
キーワード: 地中レーダイメージ, 都市伏在活断層, 五助橋断層, 御影撓曲, 兵庫県南部地震, 神戸市街地

1997). しかし、反射法の探査測線は、間隔が広い
ために伏在活断層(上部は活撓曲といわれている)
ののびている方向や、分解能の点から浅い地下の
様子についてはまだよく判っていない。そこで、測
線がとりやすく、かつ分解能が高い地中レーダ法を
もちいて伏在活断層を探査することを考えた(Miy-
ata *et al.*, 1998; 宮田・苦瓜, 1998; 宮田・横道,
1999; 苦瓜・宮田, 1998)。ここではその様子を述
べる。

2. 地中レーダ探査法

地中レーダ探査は、地表の送信アンテナから地
下に向けて電磁波のパルスを放射し、放射された
エネルギー(第2図)の一部が地下の電氣的性質の
不均一により反射し、地表の受信アンテナに戻っ
てくる性質を利用して地下構造を探査する方法で
ある(例えば, Beres and Haeni, 1991; 物理探査
学会編, 1998)。一般に電磁波の反射は電磁波伝
播速度の異なる2つの媒体の境界面でおこる。電
磁波伝播速度 V は $C/\sqrt{\epsilon_r}$ で表される。ここで、 C
は真空中の電磁波伝播速度(30cm/ns, ただしns
はナノ秒), ϵ_r は媒質の比誘電率である。 V は一般
に岩石で11~21 cm/ns, 乾燥した土壌で15
cm/nsと変化する。伝播速度は含水状態によって
決まり、一般に含水量が大きいと伝播速度は小さ
くなる傾向がある。したがって、地中で含水量の変
化する境界, 例えば, 地層境界, 地下水面, 盛り
土面などが反射面となり地中レーダにより記録さ
れる。

地中レーダはGSSI社のSIR-2を使用した。アン
テナ周波数は200 MHzと100 MHzを使用し、同
一測線を異なるレンジ(150ns, 100ns, 60ns)のうち
2つ以上のレンジで測定した。測定(プロファイル測
定)は送信・受信一体型のアンテナを地表面に密
着させ、低速度で牽引し、測線下の反射波の状況
を連続的に記録した。この測定で得られた記録は
それぞれ時間断面図(プロファイル)として示され、
横軸が水平距離、縦軸が電磁波の往復時間であ
る。水平距離は1mごとにマーカーが入れられ、往
復時間はns(ナノ秒)の単位で示されている。時間
断面を深度断面に直すために、ワイドアングル測定
を行った。それらの断面図に現れた地下構造を地



第2図 地中レーダ探査を示す概念図。異なる
周波数(200MHz, 100MHz, 35MHz)の
地中レーダアンテナを使用することによ
って、異なる深度の地中レーダイメージ
を得ることができる。地中レーダアンテナ
は発信機(T)と受信機(R)とが一体にな
っている。この小論では200MHzと
100MHzの地中レーダアンテナを使用。
 $d_1 \sim d_4$ は地層の撓曲から求まる垂直方
向の変位置量。

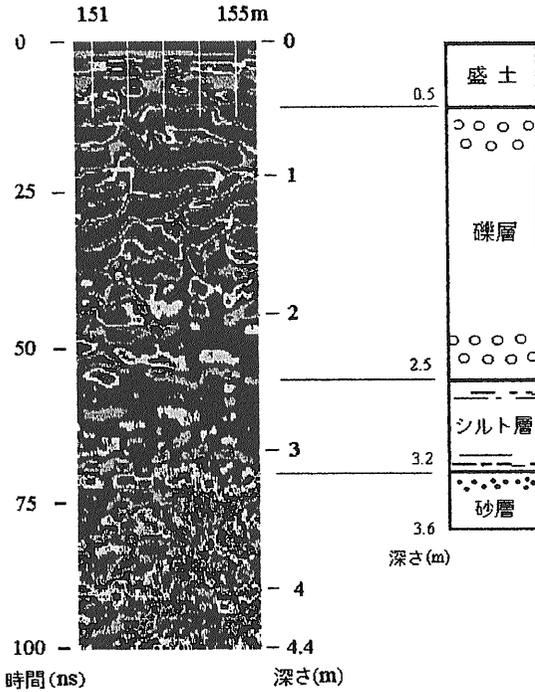
中レーダイメージと呼んでいる。データ解析はソフト
ウェア(RADAN3)をもちいて、まず得られた記録を
水平方向にスケール補正を行い、次いで高周波の
システムノイズおよび低周波のノイズ(例えば、エ
アーウエーブ, 直接波, 人工物による反射波等)を除
去するために、ハイパスフィルター処理とローパス
フィルター処理とを行った。

地中レーダの深度断面に現れた反射強度の異な
るパターンと地質との関係性を調べるために建設中
の側溝で地質を調べた。反射の強い部分は粗粒の
礫層・砂層に対応し、弱い部分はシルト層に対応
している(第3図)。

3. 地震断層の地中レーダイメージ

地中レーダの探査結果から、断層を認定するに
は、予め判っている断層の地中レーダイメージのデ
ータを知る必要がある。そこで、1995年兵庫県南
部地震で現れた野島断層と1891年濃尾地震で現
れた根尾谷断層、1596年慶長(伏見)地震で動い
たと推定される五助橋断層の地中レーダイメージを
検討した。

Line BW



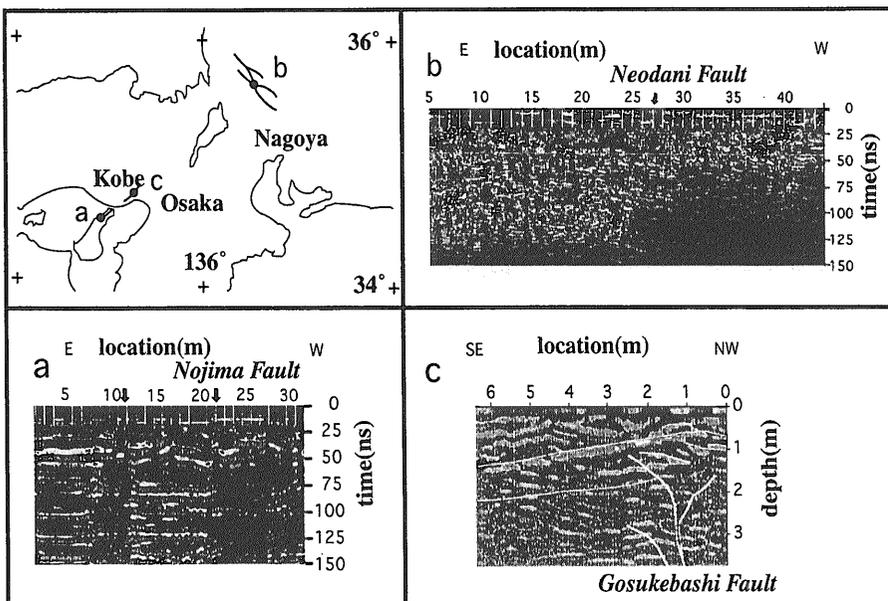
第3図 地中レーダの反射強度と地層との関係。右図は地質柱状図，左図は地中レーダの反射強度。反射の強い部分は粗粒な堆積物，反射の弱い部分は細粒な堆積物に対応する。

野島断層：

淡路島北淡町小倉川に沿って200MHzと100MHzの地中レーダアンテナで調査を行った。第4a図は100MHzの地中レーダアンテナで得られた野島断層の地中レーダ時間断面図である。野島断層の位置は測線距離の22m地点である。測線の22m地点より左側（東側）は一般に反射が強いが、右側（西側）では反射が弱い。断層は縦に走る黒い帯として現れている。小倉川に沿う探査測線の地質は砂層，シルト層を挟む水平な砂礫層である。時間断面図の断層地点は水平な反射パターンが乱れている。さらに11m付近にも別の断層が見られる。梨本の断層トレンチにおいても同様な反射パターンの乱れが報告されている(是石ほか，1996；高橋ほか，1996)。

根尾谷断層：

第4b図は岐阜県本巣町上金原付近の根尾谷断層の地中レーダ時間断面図を示す。根尾谷断層の位置が測線距離の27mの位置になるようにして、200MHzの地中レーダアンテナで探査を行った。27m付近で反射の強い部分が断層に沿うようにくさび状に巻き込まれている。図の右側（西側）では、50nsより大きい部分で反射強度が著しく変化する境界面が存在する。一方、図の左側（東側）で



第4図
a) 1995年兵庫県南部地震で現れた地震断層(野島断層)の地中レーダ時間断面図。
b) 1891年濃尾地震で現れた根尾谷断層の地中レーダ時間断面図。
c) 1596年慶長(伏見)地震で活動した五助橋断層の地中レーダ深度断面図。断層(白線)はLin et al. (1998)による。

は、同様の境界面が140nsより大きい部分に現れている。断層トレンチの断面図(岡田, 1987; 宮腰ほか, 1993)と比較をすると、それは基盤岩類(破碎帯)と旧河床堆積物(砂礫層)との境界面であることが分かる。すると、測線22 m地点の両側で反射強度が著しく変化する境界面の出現レベルが異なるのは根尾谷断層の変位(2.2 m)によるとみさせる。これは基盤岩と新期の堆積物とが断層で接する場合の地中レーダイメージといえる。このような地中レーダイメージは根尾村中地区の茶の木(畑の境界)と小道の左横ずれ屈曲部(根尾谷断層)でも同様であった。

五助橋断層:

神戸市東灘区住吉山手9丁目焼ヶ原堰堤において五助橋断層を200MHzの地中レーダアンテナで探査した結果を第4c図に示す。断層トレンチの断面図(Lin *et al.*, 1998)と比較すると、表土と砂礫層との地層境界が地下1m付近によく現れている。地中レーダイメージには断層の南東側で地下2mまでの地層が南東に傾き、その北西側で腐植土層が北西に傾く様子がよくでている。地下3m以深は大礫を含む礫層であるが、その部分は反射が強い。トレンチの断面図に書かれた断層は、200 MHzのアンテナによる地中レーダ探査で識別できる大きさが20 cm程度の分解能であるので、地中レーダイメージからは読み取ることがむずかしい。

4. 地中レーダで変形個所を読む

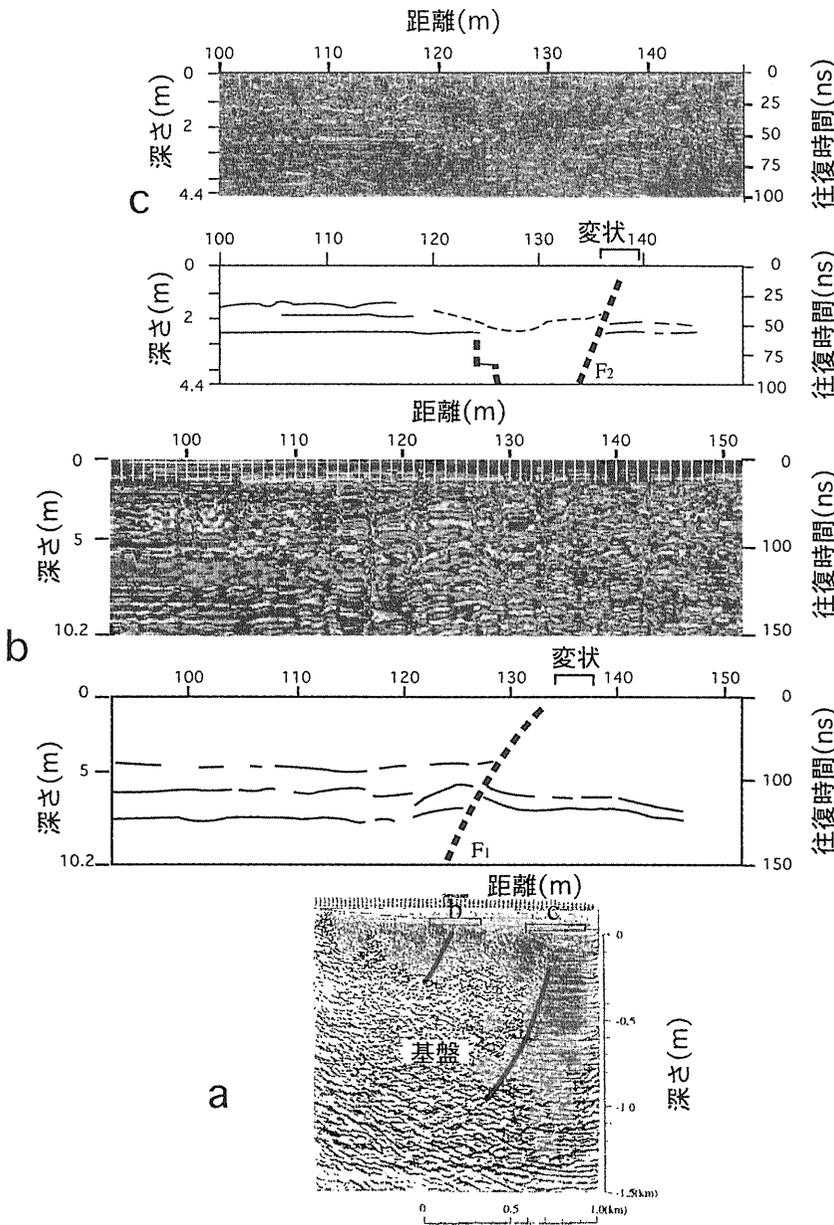
兵庫県南部地震によって地盤変状がはげしかったために、神戸市石屋川およびその周辺の地下構造について、重点的に研究がなされた。例えば、関西地震観測研究協議会が行った石屋川測線の反射法地震探査(第5a図)を始め、地質調査所が行った石屋川沿いの南北2本のボーリング調査(GS-K2, GS-K3)、重力探査、水準測量などがあげられる(中川, 1996; 衣笠・水野, 1996; 渡辺ほか, 1996)。この地域は、田中・沖村(1996)、国土地理院(1996)によると、扇状地(1~5)、自然堤防、旧河道、天井川などが見られる。その中で、扇状地-1は最終氷期(7~8万年前ごろ)に形成された扇状地で、おもに砂礫層からなり、段丘化してい

る。一方、扇状地-5は後氷期(6,000年前ごろ以降)に形成された砂礫層・シルト層・砂層からなっている。扇状地-1・-2と-3~-5は藤田・笠間(1983)の中位段丘面と低位段丘面に相当する。

第5a図の反射断面で、少なくとも2つの伏在断層が見つかっており、その1つ(左側)は五助橋断層(ここでは本体あるいは“渦ヶ森断層”という。宮田・前田, 1998参照)と考えられ、他の1つ(右側)は石屋川公園地下の伏在断層(上部は御影撓曲、関西地盤情報活用協議会, 1998)とよばれている。ボーリングGS-2(掘進長354m)とGS-3(掘進長680m)は、その伏在断層の上盤とその下盤にそれぞれ位置している。2つのボーリングコアによると、地表付近の堆積物は扇状地-5の厚い礫層と薄いシルト層・砂層から構成されている。さらに、深部ではおもに未固結~半固結のシルト、砂、礫が主体で、火山灰層と海成砂層を含む。両ボーリングコアの対比が試みられているが、伏在断層上部の撓曲構造を形成する地層のつながりは判っていない。

第5b図は第5a図に示す五助橋断層(本体)直上の地中レーダ深度断面である。探査測線IGは180 mであるが、紙面の関係で、93~152 mまでを示している。探査地域は扇状地-1の分布域であり、おもに砂礫層からなる。測線の123 m地点より左側(北側)は深度7.5 mまでの反射の強い層とそれ以深の反射の弱い層とが水平な層構造をなしている。一方、その右側(南側)は全体として反射が強い傾向を示し、123 m地点を境として、層構造が途切れ、不連続になる。今回の地震で134~138mにかけてアスファルト路面が変状し、家屋や石垣が破損した。

次に、第5c図は測線KSA(長さ234m)の地中レーダ時間断面の一部である。探査には100 MHzと200 MHzの地中レーダアンテナを使用した。100MHzの地中レーダアンテナで得られた時間断面で反射の強い層と弱い層との境界面は一般に50ns付近にあり、この境界面をほぼ水平に追跡すると、距離140~132mで突然80ns付近まで変化する。この地下構造は200 MHzの地中レーダアンテナで得られた時間断面図でもみられ、前述の地震断層の地中レーダイメージと比較すると、断層に沿って堆積物がくさび状に挟まれていると考えられる。この変形は反射法石屋川測線で判明した伏在



第5図

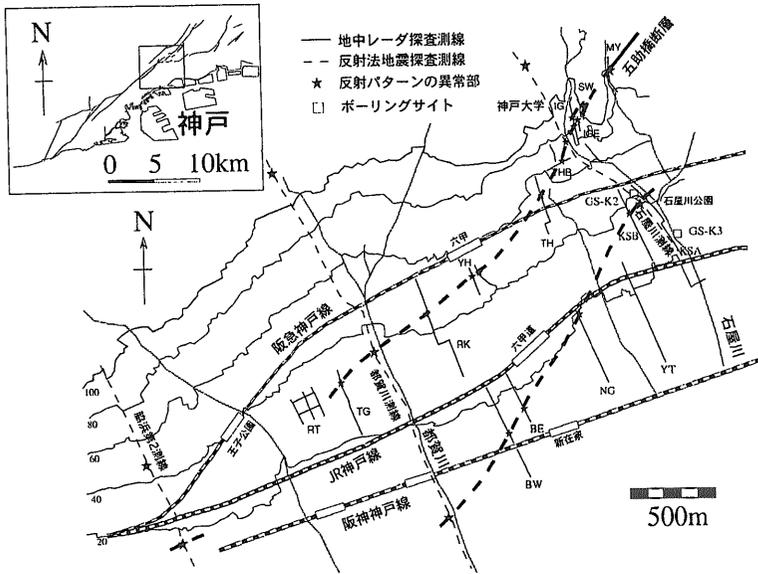
a) 石屋川測線の反射断面図に見られる伏在断層(中川, 1996に加筆), 関西地震観測研究協議会が行った探査, 測線の位置は第6図に示す。太実線は伏在断層を示す[左; 五助橋断層(本体), 右; 関西地盤情報活用協議会(1998)の御影撓曲]。
 b) 石屋川に沿う地中レーダ探査の時間-深度断面図とその解釈。測線は第6図のIG。
 c) 石屋川公園西の地中レーダ探査の時間断面図とその解釈。測線は第6図のKSA。
 F₁, F₂; 不連続面。

断層直上に出現する。また、この変形個所に沿って、今回の地震に伴い家屋の基礎が変位し、石屋川の護岸(墓地側)も破損した。この場所は従来の地質図に断層線がひかれていない場所で、そこに断層が推定されるので、さらに35 MHzの地中レーダアンテナや他の可視化技術をもちいて確認していきたい。

不連続以外の変形として、反射法都賀川測線に沿う地中レーダ探査測線RK, BWにおける地層の

撓曲がある(宮田・横道, 1999; 苦瓜・宮田, 1998)。これらの撓曲は反射法都賀川測線で判明した伏在活断層直上の撓曲とほぼ同じ場所であるので、関連する撓曲構造の上部であると考えられる。このような撓曲は都賀川・石屋川測線間の他の地中レーダ探査測線でも見られる。

第6図は地中レーダ探査の各測線で得られた反射パターンの不連続あるいは撓曲の個所(あわせて反射パターンの異常部という)を示したものであ



第6図

神戸市灘区で行われた地中レーダ探査および反射法地震探査の測線の位置図。反射法地震探査の測線は地質調査所、兵庫県、関西地震観測研究協会による。星印は地中レーダや反射法地震探査で反射パターンの異常部(不連続面あるいは撓曲)が見つかった地点を示す。

る。これらの反射パターンの異常部は反射法地震探査の石屋川測線と都賀川測線で見つかった伏在断層を結ぶ線上に分布する。その反射パターンの異常部をつなげた線の1つは五助橋断層(本体)の南西延長部に当たる(第6図の破線)。他の1つは、関西地盤情報活用協議会(1998)が示した伏在断層上の変形帯ののびる方向ともよく一致する。これらの断層線に沿って、繰り返し水準測量(路線6-2、渡辺ほか、1996)の結果が急変している。以上のことから、伏在断層の断層運動の影響は地表まで及んでいると考えられる。

5. おわりに

地中レーダをもちいて伏在活断層の位置を明らかにするために、野島断層ほか2つの地震断層の地中レーダイメージと、神戸市街の地中レーダイメージとを比較した。その結果をまとめると次の(1)～(3)になる。

- (1) 地震断層の地中レーダイメージでは、断層を境に地質が違う場合はコントラストの違いから断層の位置を読み取ることができ、堆積物の中に断層がある場合は反射パターンの乱れから断層の位置を知ることができる。
- (2) 神戸市街の地下(-5 m ないし-10 m まで)に反射パターンの撓曲や不連続(乱れ、くさび状構造)が見つかった。その撓曲・不連続の場所

は反射法地震探査で見つかった伏在断層の直上(断層の傾斜を考慮して地表へのばした点)の場所とよく一致する。

- (3) 地中レーダで見つかった反射パターンの撓曲あるいは不連続(第6図の星印)の地点を結び、1つは五助橋断層(本体)の南西方向につながり、他は関西地盤情報活用協議会が示した変形帯に沿ってつながる。

よって、今回の地中レーダ探査で五助橋断層(本体)が神戸市街にのびることが判明した。

以上のように、地中レーダ法は探査測線が選びやすく、高密度にかつ連続的に調査できるので、都市の伏在活断層図を作成するうえで有力な方法の1つであると考えられる。今後は、比較研究のためにさらに地震断層の地中レーダイメージのデータ収集を行うことと、低周波数のアンテナを使用してさらに深い地下20～30mまでの地中レーダイメージのデータを収集することを考えている。

謝辞：地質調査所海洋地質部 倉本真一博士に本稿を書く機会を与えていただいた。地中レーダ探査は(株)エイトコンサルタント神戸支店 苦瓜泰秀氏、神戸大学自然科学研究科訪問研究者 周建波博士、院生 山本芳幸氏、および理学部学生 横道崇氏(現在、南箕輪村役場)、川端宏生氏にご協力をいただいた。また、大水害の資料は建設省近畿地方建設局六甲砂防工事事務所からいただいた。

本研究の一部は文部省科学研究費(課題番号: 09640543)および神戸大学都市安全研究センターの研究助成による。記して謝意を表します。

文 献

- Beres, M. Jr. and Haeni, F. P. (1991): Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies, *Ground Water*, 29, 375-386.
- 物理探査学会編(1998):物理探査ハンドブック, 手法編, 5-7章, 物理探査学会, 239-429.
- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・渡辺和明・卜部厚志(1995):兵庫県神戸市及び芦屋市における伏在断層と基盤構造, *物理探査*, 48, 439-450.
- 藤田和夫・笠間太郎(1983):神戸地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 115p.
- 藤田和夫・佐野正人(1997):阪神・淡路大震災と六甲変動震災の帯をもたらした埋没大地形, *科学*, 66, 793-805.
- 関西地盤情報活用協議会(1998):新関西地盤-神戸および阪神間-, 関西地盤情報活用協議会, 270p.
- 衣笠善博・水野清秀(1996):神戸地域の地下地質, 兵庫県南部地震の地質学的背景, 第11回地質調査所研究講演資料, (財)日本産業技術振興協会, 77-80.
- 国土地理院(1996):1:10,000地震防災土地条件図(微地形) 芦屋, 国土地理院.
- 是石康則・藤田 淳・中東秀樹・浅川真也・先名重樹・石垣孝一(1996):活断層調査への物理探査の適用性, *物理探査*, 49, 487-497.
- Lin, A., Maruyama, T. and Miyata, T. (1998). Paleoseismic events and the 1596 Keicho-Fushimi large earthquake in the Gosukebashi fault in the eastern Rokko Mountains. *The Island Arc*, 7, 621-636.
- 町田 洋・小島圭二編(1986). *日本の自然8, 自然の猛威*. 岩波書店, 218p.
- 丸山 正・林 愛明・宮田隆夫(1997):六甲山地東部五助橋断層帯の変位地形と第四紀後期の活動性, *活断層研究*, no.16, 59-72.
- 宮腰勝義・猪原芳樹・角田隆彦・金折祐司・佐竹義典(1993):1985年濃尾地震活断層系・根尾谷断層(金原地区)トレンチ調査, *活断層研究*, no.11, 8-15.
- Miyata, T., Hong, J.P., Nigauri, Y. and Maeda, Y. (1997): 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake and urban active faults, *Proc. 30th Int'l Geol. Congr.*, 5, 133-139.
- 宮田隆夫・前田保夫(1998):1995年兵庫県南部地震による神戸市街地の地盤変状, *地質学論集*, no.51, 86-98.
- 宮田隆夫・苦瓜泰秀(1998):都市の埋もれた活断層を地下レーダで探る, *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, no.2, 263-272.
- 宮田隆夫・横道 崇(1999):神戸市石屋側公園の伏在活断層を地下レーダで探る(予報), *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, no.3, 印刷中.
- Miyata, T., Yokomichi, T. and Nigauri, Y. (1998): Ground-penetrating Radar Survey for Urban Active Fault in Kobe. *Proc. 8th Symp. on Geo-Environments and Geo-Technics*, 119-124.
- 中川康一(1996):深部地下構造と被害, *地質環境と地球環境シリーズ3, 阪神・淡路大震災-都市直下型地震と地質環境特性*, 東海大学出版会, 257-269.
- 苦瓜泰秀・宮田隆夫(1998):地下レーダでイメージされた神戸市街地の伏在活断層, *日本地質学会関西支部報*, no.123, 16-17.
- 岡田篤正(1987):濃尾地震断層系根尾谷断層, *活断層研究*, no. 4, 71-90.
- 六甲砂防工事事務所編(1974):六甲三十年史, VII.災害編, 建設省近畿地方建設局六甲砂防工事事務所, 605-655.
- 災害科学研究所(1938):昭和13年7月5日阪神大水害調査報告, 昭和13年災害資料(その3), 災害科学研究所報告, no.1, p39.
- 寒川 旭(1998):考古遺跡にみる地震と液状化の歴史, 「科学」編集部編, 大震災以後, 岩波書店, 178-190.
- 高橋 亭・野崎京三・島 裕雅・山根 誠・五十嵐亭(1996):野島断層における各種物理探査法の適用実験, *物理探査*, 49, 498-510.
- 田中眞吾・沖村 孝(1996):建築物被害の状況と地形-とくに神戸市東部から阪神間について-, *日本地形学連合編, 兵庫県南部地震と地形災害*, 古今書院, 82-94.
- 渡辺和明・遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・卜部厚志(1996):平成7年兵庫県南部地震による被害集中地帯とその周辺における短い測点間隔の繰り返し水準測量, *地質調査所月報*, 47, 165-173.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓(1996):1995年兵庫県南部地震震源域周辺の断層・基盤構造について(概報), *物理探査*, 49, 435-451.
- 横田 裕・井川 猛・佐野正人・竹村恵二(1997):第2章 大阪湾から六甲にかけての反射法地震探査, *兵庫県立人と自然の博物館編集, 阪神・淡路大震災と六甲変動-兵庫県南部地震域の活構造調査報告-*, 兵庫県, 57-89.

Miyata Takao (1999): GPR Survey for Buried Active Faults in the Urban Area of Kobe.

< 受付: 1999年4月1日 >