



物理探査法(VLF-MT, 電気探査, 地中レーダ)による都市伏在活断層の浅部構造調査

山口, 覚
宮田, 隆夫

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 4:197-206

(Issue Date)

2000-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00231320>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00231320>



物理探査法 (VLF-MT, 電気探査, 地中レーダ) による 都市伏在活断層の浅部構造調査

Geophysical (GPR, VLF-MT and ER) surveys for subsurface structures of
urban concealed active fault

山 口 寛¹⁾

Satoru Yamaguchi

宮 田 隆 夫²⁾

Takao Miyata

概要: 反射法地震探査の石屋川測線の地下200~1000mには伏在活断層が存在する。その分布を明らかにするために、石屋川測線に沿ってVLF-MT探査、電気探査、地中レーダ探査を行った。その結果、VLF-MT探査と電気探査からは、それぞれ幅25m、10mの低比抵抗帯が見いだされた。これらは断層に伴う破碎帯と解釈される。また、地中レーダ探査では地表から5mないし10数mまでの地下に反射パターンの不連続部が2カ所見つかった。これらは地震断層の地中レーダイメージ上の反射強度の不連続と類似する。これはVLF-MT探査と電気探査で見つかった異常部と同一直線上に並び、さらに地表踏査から見つかった家屋基礎の変形や破損した石屋川の護岸がその延長上に並ぶ。よって、伏在断層の影響は地表付近まで達していると考えられる。

キーワード: 地震断層、都市伏在活断層、兵庫県南部地震、VLF-MT探査、電気探査、地中レーダ探査

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、大都市直下の伏在活断層の実態を精度よく把握することが地震防災上極めて重要であることが認識された。石屋川公園(神戸市灘区)は震度7地域に属する場所で、地震時に亀裂が著しく現れた。兵庫県南部地震後行われた石屋川測線の反射法地震探査で阪急神戸線南の地下200m以深に伏在活断層が見つかった(例えば、中川、1996)。また地震後、この地域はボーリング調査や繰り返し水準測量等が重点的に行われ、調査資料が豊富である。本研究では、新たに3種類の電磁気的物理探査法(VLF-MT法、電気探査法、地中レーダ探査法)を行ない、都市伏在断層の位置を地表付近まで精度良く決定できるか否かを検証した。

2. 観 測

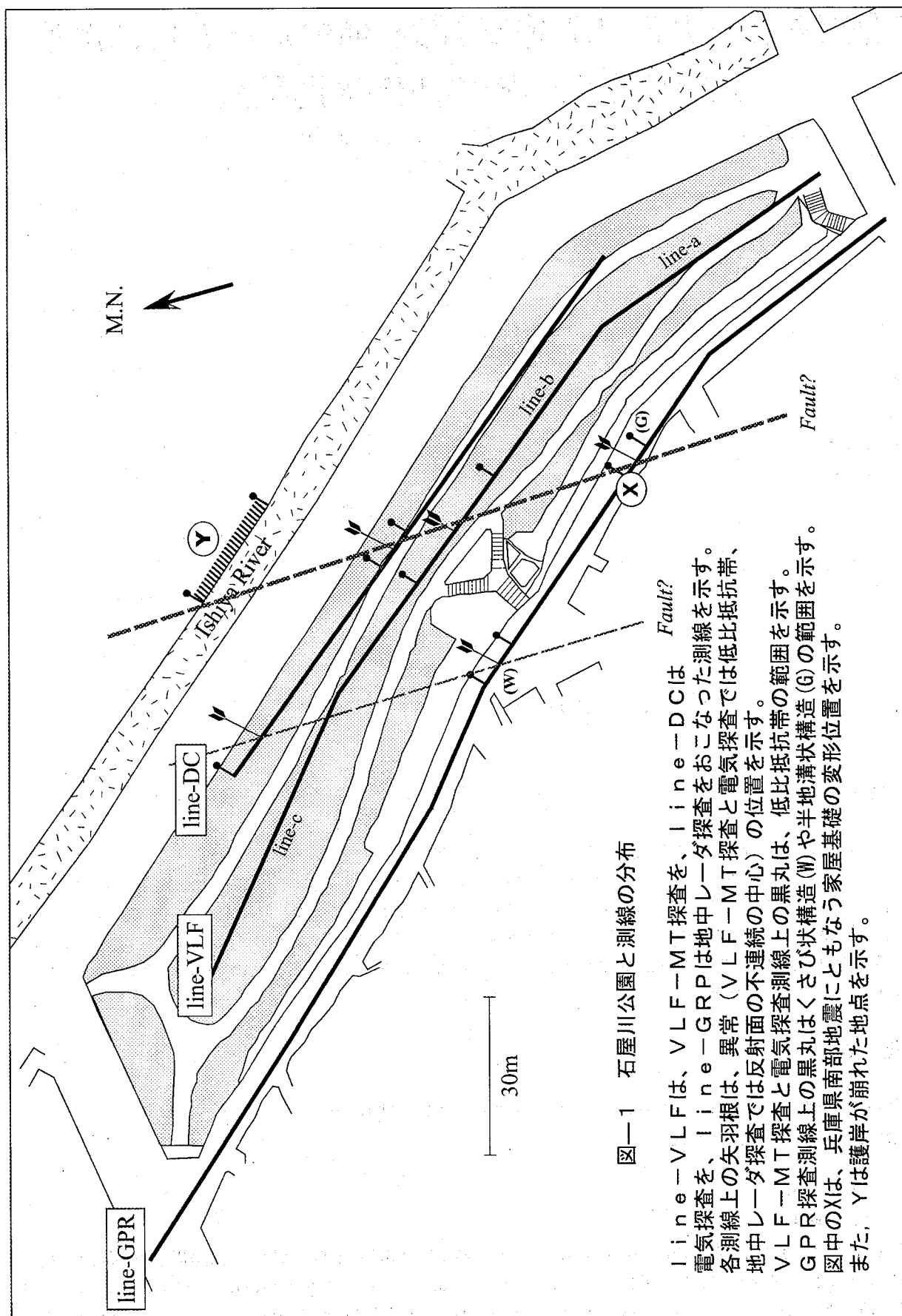
図-1に石屋川公園およびVLF-MT探査・電気探査・地中レーダ探査の測線を示す。

次に各測定の詳細と測定結果を示す。

(1) VLF-MT法

(a) 手法の概要

Magnetotelluric (MT) 法は磁場の時間変動とそれによって地球内部に誘導される電流の関係(各変動周期に対する強度比と位相差)から地下の電気伝導度構造を推定する方法である。MT法は、信号源として使用する電磁波の周波数によっていくつかの種類に分けられ、3~30kHzのVLF (Very Low Frequency) 帯の電磁波を用いるものを、VLF-MT法と呼んでいる。VLF帯の電磁波は伝搬特性がよく、ほかの通信手段に比べて海水での減衰も小さいので主として潜水艦通信に使用されている。このため世界各地にVLF発信局があり、常時大電力で電波を発信している。日本では、九州えびの高原から発



図一1 石屋川公園と測線の分布

line-VLFは、VLF-MT探査を、line-DCは電気探査を、line-GPRは地中レーダ探査をおこなった測線を示す。各測線上の矢羽根は、異常（VLF-MT探査と電気探査では低抵抗帯、地中レーダ探査では反射面の不連続の中心）の位置を示す。VLF-MT探査と電気探査測線上の黒丸は、低抵抗帯の範囲を示す。GPR探査測線上の黒丸はくさび状構造(W)や半地溝状構造(G)の範囲を示す。図中のXIは、兵庫県南部地震にともなう家屋基礎の変形位置を示す。また、Yは護岸が崩れた地点を示す。

信されている J J I 局 (22.2 kHz) が利用できる (物理探査学会編, 1998)。探査深度の目安は次式で定義される表皮深度 (δ [m]) である。

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

但し、 ρ は地下の比抵抗 [Ωm]、 f は周波数 [Hz] である。周波数 22.2 kHz の場合、 $\rho = 100 \Omega\text{m}$ で $\delta = 35\text{m}$ 、 $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ で $\delta = 107\text{m}$ となる。

(b) 観 測

神戸市灘区・石屋川公園内において、約 200 m の測線を設け、2.5 m ないし 5 m 毎に測定を行った。10 個の測定値の平均値を 1 観測値とし、各測定点において 10 個の観測値の平均と標準偏差を算出した。測定にはテラテクニカ社製 VL-101 を用いた。

(c) 測定結果

図-2 に見かけ比抵抗値および位相差の変化を示す。測線全体にわたり見かけ比抵抗値は 100 ~ 300 Ωm 、位相差は 30 ~ 40 度と変化は少ない。しかし、測線中央部付近は約 25 m の幅で見かけ比抵抗値が低くなっている。測線全体にわたって位相差が 45 度以下であることは、可探深度 (30 ~ 40 m) のすぐ深いところの比抵抗値が 100 ~ 300 Ωm 以上であることを示している。

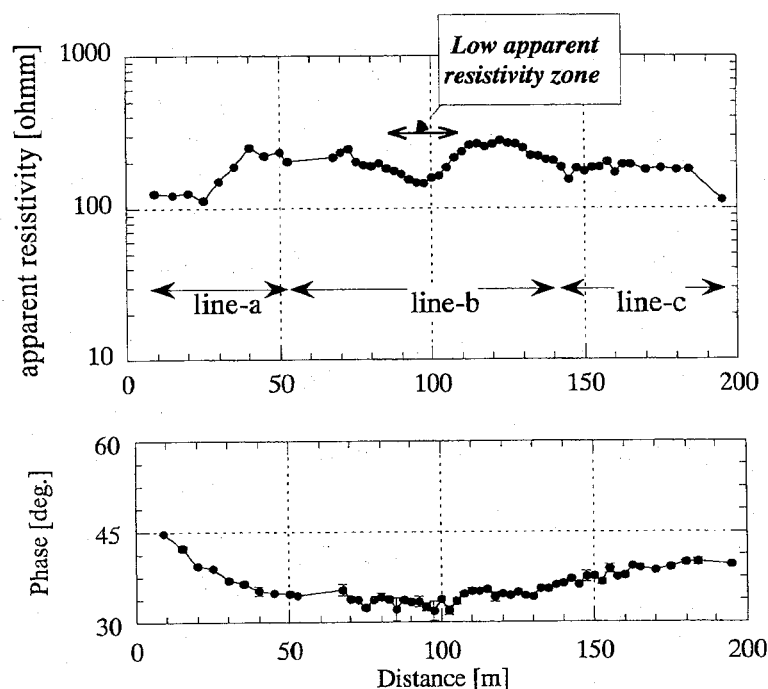


図-2 VLF-MT法による見かけ比抵抗値の変化 (上図) と位相差の変化 (下図)

(2) 電気探査

(a) 手法の概要

電気探査は、岩石の電氣的性質がそれぞれ異なること、あるいは異なるために自然に生じている現象を利用して、地質構造を明らかにしようとするものである (物理探査学会編, 1998)。地表面に電極を配置して大地の比抵抗を測定する方法は、Wenner (1916a, b) によって考案された。一般に、図-3のように、地表に配置された2つの電流電極 C_1 、 C_2 と、2つの電位電極 P_1 、 P_2 からなる地表4電極配置において、 P_1 における電位 ϕ_1 は

$$\phi_1 = \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right)$$

となり、 P_2 における電位 ϕ_2 を加味すれば最終的に電位電極 $P_1 - P_2$ 間での電位差 V は、

$$V = \phi_1 - \phi_2 = \left(\frac{1}{C_1 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_1 P_2} \right)$$

で与えられる。

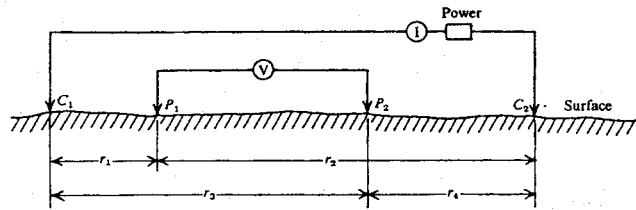


図-3 C_1 , P_1 , P_2 および C_2 による地表4電極配置の例
(物理探査学会編, 1998より引用)

4本の電極間隔が等間隔 a の場合(ウェンナー配置法, 図-4)とした場合の電位差は、

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

と簡単になる。但し、 I は電流電極 C_1 、 C_2 より流し込んだ電流の大きさを示す。この式から、

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

という、ウェンナーの式が求められる。

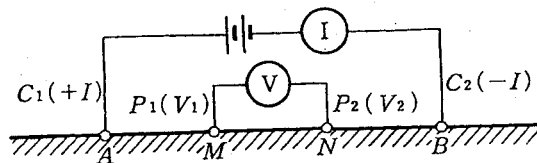


図-4 ウェンナー法電極配置
(物理探査学会編, 1998より引用)

一般的には、

$$\rho = G \left(\frac{V}{I} \right)$$

$$G = 2\pi \left(\frac{1}{C_1 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_1 P_2} \right)$$

と表され、 G は電極配置係数と呼ばれる。

最適の電極配置は探査対象の形状や比抵抗値のコントラストによって異なる。本研究の様に探査対象（断層）が垂直方向の広がり期待される場合には、地表から送り込まれる電流が垂直方向に集中する度合いが大きいダイポール・ダイポール法が望ましい（物理探査学会編，1982）。

(b) 観測および解析

VLF-MT探査で見いだされた低比抵抗帯を中心として、VLF-MT探査のline-bと同じ走向を持つ120mの測線を設けた（図-1，line-DC）。電極間隔はすべて2mで総電極数は61本である。測定にはMcOHM21（応用地質（株）製）を用いた。この結果を基に、ABICを用いた平滑化拘束付き比抵抗法2次元インバージョン（内田，1993）を行った。なお、送信電極と受信電極の距離が遠い場合には、測定誤差が極端に大きくなったので、解析には測定誤差が10%以下の結果のみを用いた。そのために、比抵抗断面で信頼できる範囲は深度約8mまでである。

(c) 結果

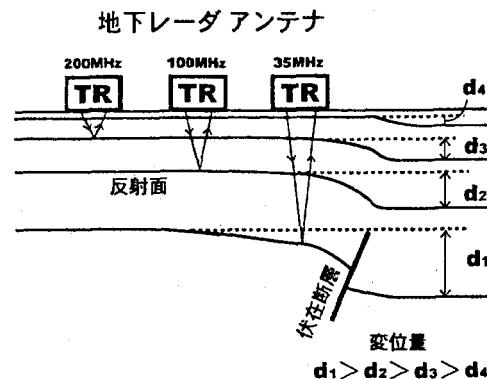
比抵抗断面（図-5）をみると、測線全体にわたり、深さ約8m付近まではおおむね1000～2000Ωmである。しかし、測線中央部付近に幅約10mの低比抵抗帯（＜1000Ωm）が存在していることが顕著な特徴である。また、測線の北端110～120mにも、低比抵抗帯が認められている。

(3) 地中レーダ探査

(a) 手法の概要

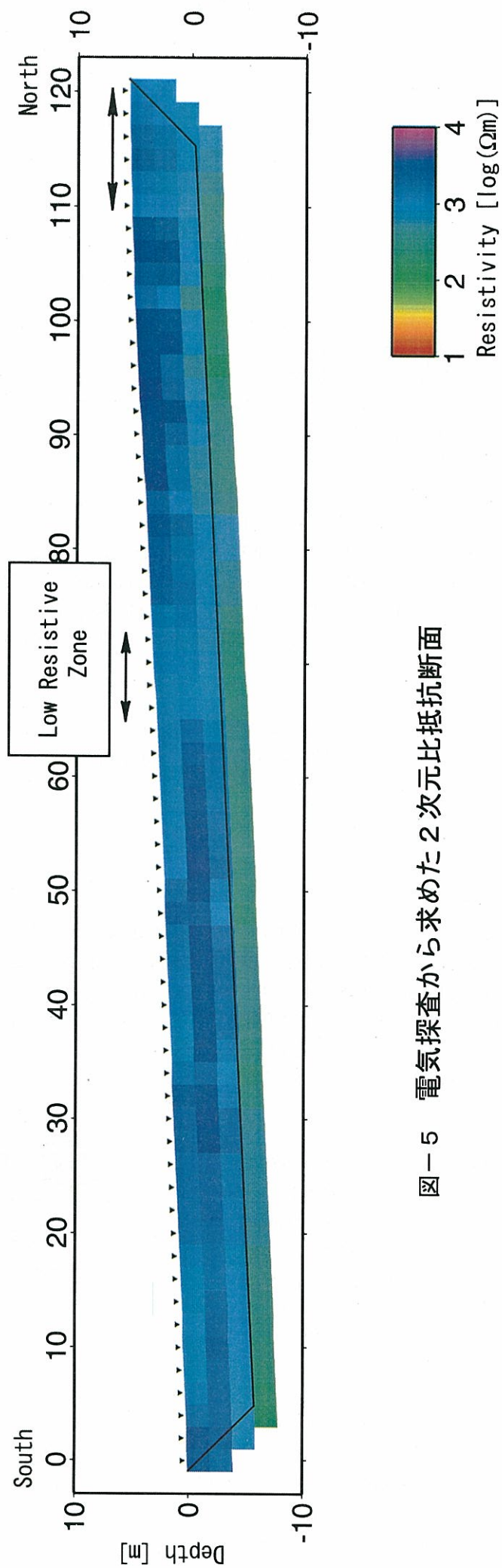
物理探査学会編（1998）によると、地中レーダは、地中に送信された反射を捉え、反射物体の形状を直接計測する方法である。一般に電磁波の反射は電磁波伝播速度の異なる2つの媒体の境界面でおこる。電磁波伝播速度 V は $c/\sqrt{\epsilon_r}$ で表される。ここで、 c は真空中の電磁波伝播速度（30 cm/ns、nsはナノ秒）、 ϵ_r は媒質の比誘電率である。100 MHzにおける ϵ_r は乾燥した砂層で4～6、湿潤な粘土質土壌で10～15である。比誘電率は周波数のほかに含水状態によって変わるので、一般に含水量が大きいと伝播速度は小さくなる傾向がある。したがって、地中で含水量の変化する境界、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。同じ媒質の場合には、周波数が低いほど可探深度が大きくなる（図-6）。

図-6 地中レーダ探査を示す概念図。異なる周波数（200, 100, 35 MHz）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。 $d_1 \sim d_4$ は地層の撓曲から求まる垂直方向の変位量。



(b) 観測

地中レーダ探査は石屋川公園西側の北西-南東方向の公道上の244mの測線で行った。これは昨年度、宮田・横道（1999）が測定を行った測線（365m）の一部である。また、本測線は反射法地震探査の石屋川測線（関西地震観測研究協議会）にほぼ沿っている。地中レーダ探査はSIR-2システム（GSSI社）を使用した。使用したアンテナの周波数は35 MHz



図一5 電気探査から求めた2次元比抵抗断面

で、レンジは250ns(ナノ秒)と500nsで測定した。測定は送信・受信一体型のアンテナを路面に沿って低速度で牽引して、測線下の反射波の状況を連続的に記録した。本論では予察的に測線 (Line-GPR) の100～200m区間のオリジナルな時間断面を図-7に示す(この測線に限り北から南に距離を測定している)。これは解析ソフト (RADAN3) を用いて、水平方向のスケール補正や、低周波・高周波成分を除去するハイパスフィルター、ロパスフィルター処理を行っていないので、水平方向のノイズが残ったままである。

(c) 結果

図-7の時間断面図をみると、全体として反射パターンは白い傾向を示す。その中で、とくに測線 (Line-GPR) に沿う122～136mと157～182m(この測線に限り北から南に距離を測定している)の2箇所反射パターンの黒い層がみられる。反射パターンの黒い層は連続性が悪く、また測線に沿う122mと180m付近で急に変化する。

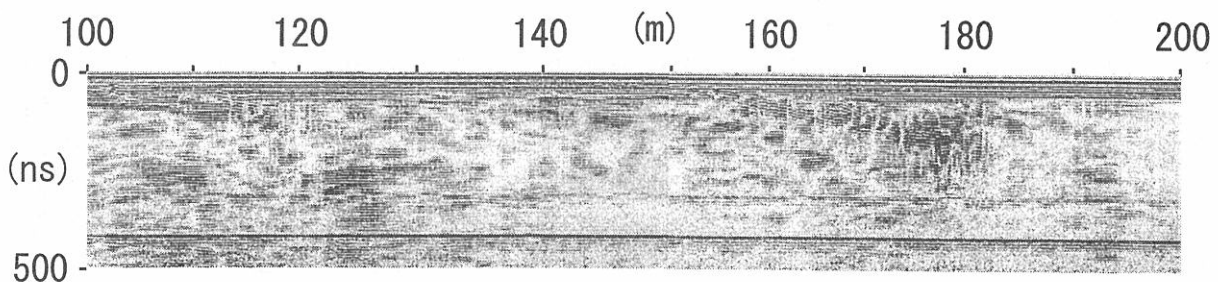


図-7 35MHzの周波数をもちいた地中レーダ探査から得られた時間断面図
図は測線100～200m区間を示す。オリジナルデータであるので、水平方向のノイズが目立つ。

3. 考察

(1) VLF-MT探査と電気探査で見いだされた低比抵抗帯

本研究で見いだされた、10～30mといった狭い低比抵抗帯の原因としては、断層沿いの破碎帯が考えられる。一般に、岩石のバルクの電気抵抗は、地表付近の岩石のように多くの割れ目や空隙がある場合には、空隙中の液体の抵抗値と空隙率に支配されていることが知られており、両者の関係は経験的なArchieの法則 (Archie, 1942) で記述される。

$$\rho_0 = \rho_w \cdot a \cdot \Phi^{-m} \cdot S_w^{-n}$$

ここで、 ρ_w は空隙に含まれる液体の比抵抗値、 Φ は空隙率そして S_w は岩石中の空隙が比抵抗 ρ_w の液体で満たされている割合(飽和度)を示す。また、 a 、 m 、 n は、経験的に決まる定数である。石屋川公園程度の狭い領域の、それも表層に近い範囲で、液体の空隙率や飽和度が大きく異なることは考えにくい。しかし、断層が存在した場合には、断層沿いの運動によって岩石の破碎が進み、その部分の空隙率が高くなる。その空隙を雨水・地下水が満たすことによって、岩石のバルクの電気抵抗を下げることになる。特に、断層の運動が横ずれ方向の場合には破碎帯の幅が狭く顕著になる。

VLF-MT探査で見いだされた低比抵抗帯の幅は約25mであるのに対して、電気探査では約10mの低比抵抗帯を検出している。この幅の違いは、両方法の分解能の違いを反映している。VLF-MT法では測定点直下の影響がもっとも大きいことは言うまでもないが、同時に表皮深度を半径とする球の下半分程度の範囲の影響も受けている。従って分解能は30～40mである。一方、電気探査法では電極間隔を2mとしたので、表層近くの比抵抗構造の分解能は2m平方程度と考えられる。

(2) 地中レーダで検出された異常

宮田・横道(1999)は、100MHzと200MHzの信号を用いた探査から、石屋川公園の西側道路上の測線 (Line-GPR)

の120~138mで地表から深さ4.4mまでつづく反射パターンの不連続を見だし、その反射パターンの不連続部は断層に伴う堆積物のくさび状構造と解釈した。また、100MHzの信号を用いた探査で166~180mに強い反射強度の層が南に傾く半地溝状の構造が見つかった。35MHzの信号を用いた探査でも、測線上の122mと180m付近に反射パターンの不連続部が見つかった。前者の不連続部は200MHzの時間断面図にみられる“くさび状構造”の箇所とよく一致している。一方、後者は100MHz時間断面図にみられる“半地溝状構造”の箇所と一致している。

(3) 自然現象か？人工的な異常か？

都市域で地下物理探査を行うときに、みいだされた異常が断層の様に自然の現象であるのかそれとも、人工的な埋設物であるかを注意して判断しなくてはならない。測線 (line-GPR) 沿いの時間断面、特に地表から数mの範囲の解像度が高い200MHzの結果を見ても反射パターンは地表から連続しており、人工物による擾乱の可能性はないといえる。電気探査の比抵抗断面でも、低比抵抗帯は地表から連続している点、および比抵抗値の下がり方が小さい点から考えて、人工的な埋設物の可能性は少ないといえよう。

(4) 物理探査法で見いだされた異常と断層

VLF-MT探査、電気探査で検出された低比抵抗帯は断層運動に伴う破碎帯と解釈された。また、地中レーダ探査で発見された2カ所の地層の不連続は断層にともなうくさび状構造または半地溝状構造と解釈された。VLF-MT探査・電気探査測線中央部付近の低比抵抗帯および地中レーダ探査測線の南側の地層不連続地点はほぼ一つの直線上に並ぶ。この直線の北への延長は、石屋川左岸の護岸が破損した箇所 (図-1中のY地点) に当たる。この直線の南端 (図-1のX地点) では、地震にともなう家屋基礎の変形が認められている。物理的探査から断層の存在が予想される3地点と地表踏査から発見された断層の存在を強く示唆する2地点が、同一直線上に並んでいる。さらに、地中レーダ探査で認められた地層不連続地点のうち北側のものと電気探査で見いだされた北側の低比抵抗帯を結ぶ直線もほぼ同じ走向を持つ。以上のことから判断すると、伏在断層の影響は地表付近まで達していると考えられる。これはボーリングや水準測量の結果とも矛盾しない。

本調査で検出された断層の走向方向はほぼ南北である。これは六甲断層系の神戸市東南部域での大局的な走向 (北東~南西) と一致しない。これは断層の局所的な走向を見ている為と考えている。この点を明らかにするためにはより広く探査を行う必要がある。

(5) 最後に

本研究結果から、人工的電磁気雑音が多い都市域においても、VLF-MT探査法、電気探査法や地中レーダ探査法が、地下伏在断層の検出に有効であることが示された。

謝辞：本研究は神戸大学都市安全研究センターの研究助成による。多電極電気探査装置Mc OHM21と地中レーダ探査装置SIR-2は、神戸大学都市安全研究センターより借用した。また、これらの機器の使用に当たっては同センター技官の市成準一氏に大変お世話になった。VLF-MT探査、および電気探査の野外作業に当たっては、神戸大学自然科学研究科の小濱裕士君、神戸大学理学部 首藤史郎、多田訓子、武本和広、高橋啓介および三好崇之君らの協力を得た。また、地中レーダ探査の野外作業では (株) エイトコンサルタント神戸支店 苦瓜泰秀氏、長野県南箕輪村役場 横道 崇氏、自然科学研究科訪問研究者 周 建波博士および理学部 田部貴史君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- Archie, G. E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. Am. Inst. Min. Metal. Eng., 146, 54-67, 1942
- 物理探査学会編: 土地地質調査における比抵抗法電気探査の調査計画に関する要項, Vol. 35, No. 1, pp. 50-64, 1982.
- 物理探査学会編: 物理探査ハンドブック, 手法編, 5-7章, 物理探査学会, pp. 239-429, 1998.
- 宮田隆夫・横道 崇: 神戸市石屋川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, n. 3, 269-278, 1999.
- 中川康一: 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・淡路大震災一都市直下型地震と地質環境特性,

東海大学出版会, pp. 257-269, 1996.

内田利弘: A B I C 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2 次元インバージョン, 物理探査, vol. 46, No. 2, pp. 105-109, 1993.

Wenner, F., A method of measuring earth resistivity, Bulletin of the Bureau of Standards, 12, 469-478, 1916a.

Wenner, F., A method of measuring earth resistivity, Scientific Papers of the Bureau of Standards, No. 258, 1916b.

筆者: 1) 山口覚、理学部地球惑星科学科、講師 2) 宮田隆夫、理学部地球惑星科学科、教授

Geophysical (GPR, VLF-MT and ER) surveys for subsurface structures of urban concealed active faults.

Satoru Yamaguchi and Takao Miyata

Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

Key Words: seismic fault, urban concealed active fault, Hyogoken-Nanbu Earthquake, VLF-MT survey, Electrical Resistivity Survey, Ground-Penetrating Radar survey

Abstract

Active faults were found at 200-1000m deep by a seismic reflection survey along the Ishiyagawa River, Kobe City. In order to clarify near-surface distribution of the faults, we made three types of surveys (VLF-MT, Electrical Resistivity, and Ground-Penetrating Radar) in the Ishiyagawa River Park, which is adjacent to the seismic reflection survey line. The following results were obtained: (1) Discontinuity (wedge structure and half graben structure) of the Holocene horizontal strata was found on the GPR record. (2) Low apparent resistivity zone ($<200 \Omega\text{m}$ and 30m in width) was detected at the middle part of the VLF-MT survey line. (3) Low resistive zone ($\sim 10\text{m}$) of less than $1000 \Omega \text{ m}$ was found in the 2D geoelectric section inferred from the ER Survey. These anomalies are located just on a line. Deformation of a house-basement and a break of the bank along the Ishiyagawa River at the time of the Hyogoken-Nanbu Earthquake, were furthermore appeared on the line.