



神戸市海岸通周辺における伏在活断層の地中レーダ・地層分布不連続解析

野尻野, 真栄
宮田, 隆夫

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 16:275-284

(Issue Date)

2012-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/81011394>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011394>



神戸市海岸通周辺における伏在活断層の 地中レーダ・地層分布不連続解析

Analyses of GPR and bed-distribution discontinuity of concealed active faults along the Kaigan Road, Kobe City

野尻野真栄¹⁾

Mayo Nojirino

宮田隆夫²⁾

Takao Miyata

概要：三宮海岸通に沿って，データベース「神戸 JIBANKUN」のボーリング柱状図の地層分布不連続解析と地中レーダ探査を行った．その結果，Ma12(大阪層群の海成粘土層，約 135 kyr.)と Ma13(完新世の海成粘土層，約 9 kyr.)の出現深度が大きく変化する場所と，地中レーダ画像上にフラワー構造として現れた反射シグナルの不連続面の場所とはよく一致することがわかった．これらの場所を繋げると，北東-南西方向と南北方向の二つの線状分布になり，前者は和田岬断層に並走する断層 F1 として，また後者は断層 F1 に収れんする断層 F2 と考えた．

キーワード：地中レーダ解析，地層不連続解析，伏在断層，フラワー構造，海成粘土層 (Ma12, Ma13)，三宮海岸通（神戸）

1. はじめに

神戸港には和田岬断層が存在している．（例えば，藤田・佐野 [1]；横倉ほか [2]；岡田・東郷 [3]）．和田岬断層は南の神戸港沖で大阪湾断層に繋がり，北は新港第四突堤から新生田川河口付近を経て，さらに北東方向にのびている．一方，小長井 [4] は，三宮海岸通りを通る阪神高速 3 号線沿いの地質断面図（阪神高速道路公団 [5]）における海成粘土層の明瞭な段差（A, B の 2 箇所）の存在から，その地下に断層を推定している．その推定断層にほぼ沿って，兵庫県南部地震の地表変状が見られた（宮田・前田 [6]）．しかしながら，地質断面図の不連続地点 B と小長井が置いた推定断層が通過する不連続地点 B の位置はずれが生じている．そこで，小長井の置いた B 地点を B' 地点として海岸通り周辺の地中レーダ探査と「神戸 JIBANKUN」[7] のボーリング柱状図の地層分布不連続解析を行い，その推定断層の分布を検討した．なお，本報告の地中レーダ断面は宮田が再解析を行ったものを示した．

2. 地質概説

神戸市三宮南西部は，おもに現世扇状地や旧河道沿，自然堤防，河成低地，砂州，埋立地に地形区分される（国土庁土地局 [8]）．河成低地は明治 18 年測量地形図に見られる海岸線（旧海岸線）に平

行に分布している．この分布は岩見[9]の砂粘土地（Sc）に当たる．その南に埋立地が分布する．「神戸 JIBANKUN」のボーリング柱状図によると，海成粘土層 Ma12（～135 kyr．前）と Ma13（～9 kyr．前）の他に，砂礫層，砂層，腐植土層が発達する．

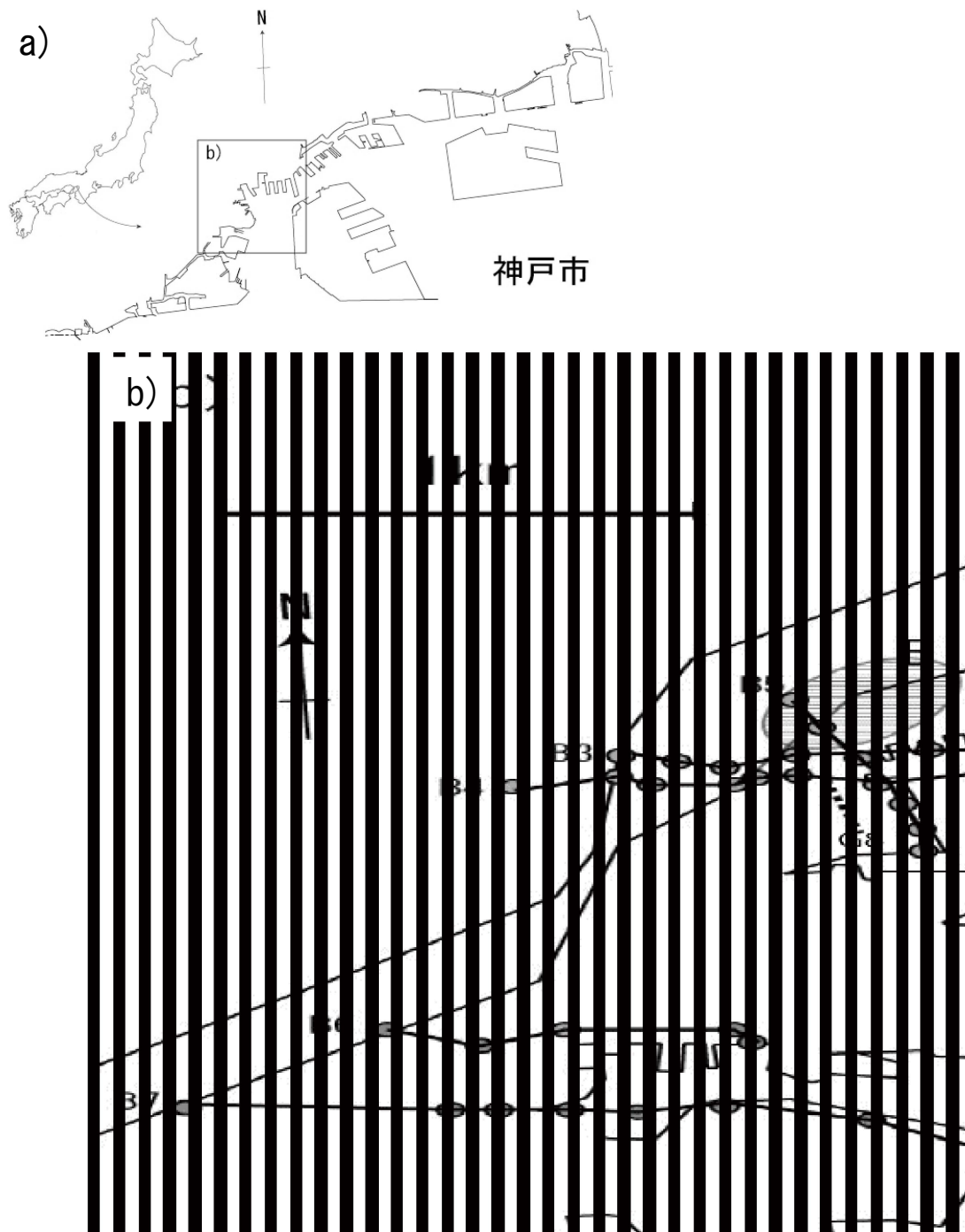


図-1 a) 位置図，b) 神戸港周辺のボーリング地点を結んだ地質断面線（B1～B7）と地中レーダ探査測線（G1～G7）．A，B は阪神高速道路公団[5]地質資料における海成粘土層の不連続場所，B' は小長井[4]がそれを不連続とした場所．

神戸港沖合約 4 km の地点で大阪湾断層から分岐する和田岬断層が和田岬からポートターミナル付近，生田川河口付近を通り，さらに北東方向へ延びている．和田岬断層は海成粘土層 Ma12（約 13.5

万年前)を垂直方向に 27 m 変位させ、Ma13 (約 9000 年前) を 6~6.5 m 変位させている (藤田・前田 [10] ; 宮田・前田[6] : 七山ほか[11]).

3. 地層分布不連続解析

(1) 解析方法

宮田・柳澤[12], 宮田・浅野[13]によると, 地層分布不連続解析は, ボーリング柱状図を任意のライン上に並べ, ボーリング柱状断面図を作成し, 特定の地層 (とくに海成層) の下面の出現深度が急に変化する場合を見つけ, 断層を推定する方法である. しかし, この解析法で求まる断層の位置はボーリングサイト間の距離 (間隔) に依存するので, 断層位置に分布幅 (誤差) があり, 一般に正確な断層を求めたことにはならない. そこで, 断層位置の精度を高めるために後述する地中レーダ法を合わせて用いた.

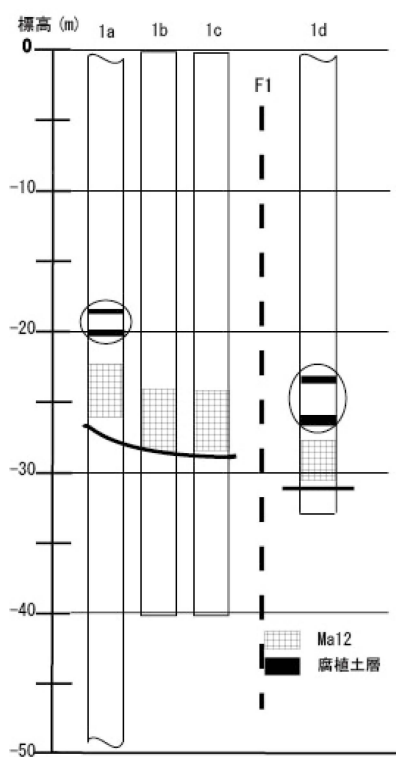


図-2 東西方向にとった断面 B1 のボーリング柱状図にみられる Ma12 層下面の深度分布. 出現深度に約 3m の差が生じている. また, 腐植土層 (薄いシルト層と砂層を挟む) も深度に差が生じている. 破線; 推定断層 (F1).

本研究では, 「神戸 JIBANKUN」のボーリング柱状図をほぼ東西方向と南北方向のライン上に配列し, 大阪層群の海成粘土層 Ma12 と完新世の海成粘土層 Ma13 の両方あるいはその片方の出現深度を調べた.

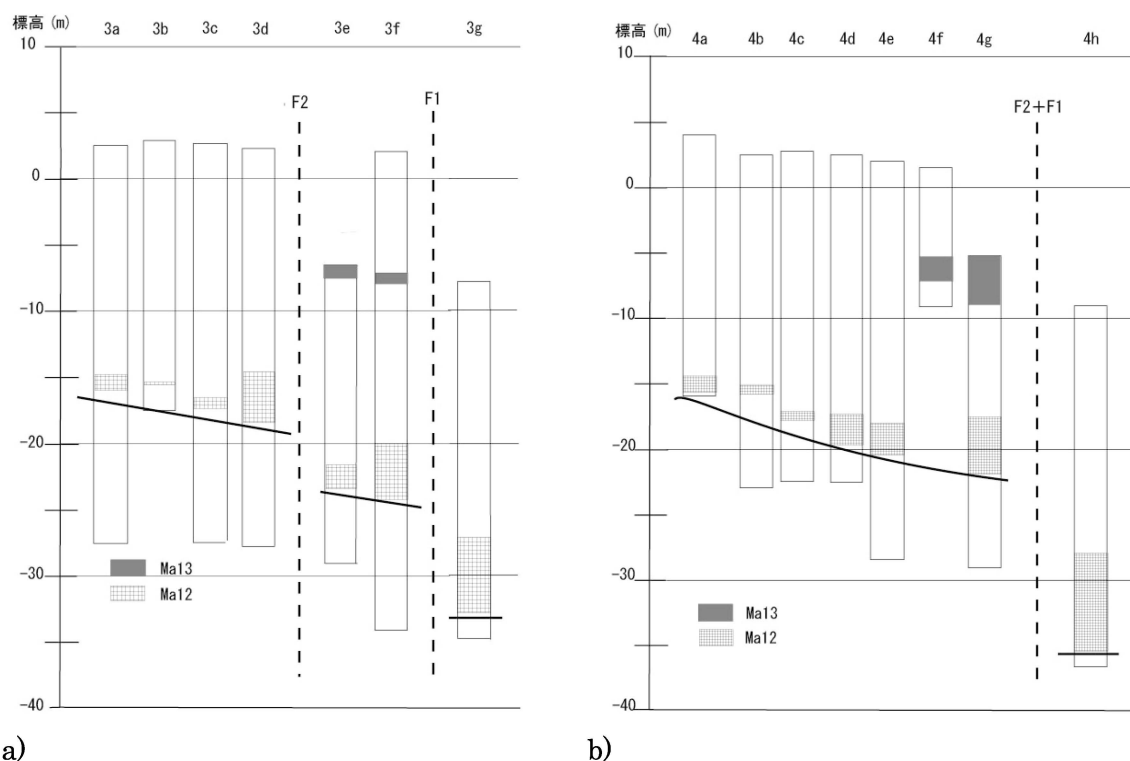


図-3 東西方向にとったボーリング柱状断面 B3 (a) と B4 (b) にみられる Ma12 層下面の深度分布. B3 では約 5m と約 8m, B4 では約 13m 出現深度に差が生じている. 破線; 推定断層 (F1 と F2).

(2) 解析結果

以下に, B1~B7 の解析結果を述べる. 海成粘土層 Ma13 は海側 (南) に厚く, 山側 (北) には薄くなる傾向にある. また, Ma13 は西側に比べ東側が一般に厚くなる傾向がある.

地質断面 B1: ほぼ東西方向にとられた断面 (図-2) なので, 海成層 Ma12 の分布に大きな標高差はないと予想していたが, 図-2 の 1c から 1d にかけての区間で Ma12 層の出現深度が約 3m 食い違うことがわかった. また, ボーリング柱状図には Ma12 層より上位でシルト層, 砂層を挟んだ二枚の腐植土層が 1a と 1d に出現し, 腐植土層そのものの対比は困難であるが, それらを組み合わせた層の出現深度も同様に食い違っている.

地質断面 B2: 紙面の関係で断面を載せていないが, この断面もほぼ東西方向にとったもので, 海成層 Ma12 の分布に大きな標高差はないと予想していた. しかし, 2a から 2c にかけて緩やかに出現深度が下がり, 2e から 2f にかけての区間において Ma12 層の出現深度が約 2m 食い違うことがわかった. この断面はボーリングデータが比較的多いため, 近距離での対比ができた,

地質断面 B3, B4: 東西方向の 2 つの断面 (図-3) でみると, Ma13 は一部しか記載がないため連続性は不明である. 一方, Ma12 は地質断面 B3 と B4 の両方において連続的に分布している. 西から東にかけて, すなわち陸地から海側に向かって, Ma12 の出現深度は徐々に深くなっている. また, この東側には和田岬断層が存在するためその影響で地層が全体として東へ傾斜をしている可能性がある. 以下, 地質断面 B3 と B4 における Ma12 の分布について述べる. 図の 3a~3d にかけては連続的に出現深度が徐々に深くなっているが, 3d と 3e 間で約 5m, 3f と 3g 間で約 8m それぞれ急に深くなっている. 二つの深度差を合わせると 13m も変化している. 同様に図の 4a から 4g にかけては徐々に出現深度が変化するが, 4g と 4h 間で約 13m と大きく深度を変える.

以下の地質断面 B5～B7 は紙面の関係で図を省略する。

地質断面 B5：北北東 - 南南西方向にとられた断面である。Ma13 は一部でしか出現しないため連続性をみることは困難である。これに対し、Ma12 は連続して分布しており、5a から 5g にかけて、Ma12 の下面は南側に向かって漸移的に深くなる傾向を示す。

地質断面 B6：東西方向にとられた断面である。ここでは Ma13 は連続して分布するため対比が可能である。むしろ Ma12 はボーリングの深さの関係で一部でしか出現しない。断面にとったボーリング柱状図 6a から 6c までと 6d から 6e までの区間は、それぞれ Ma13 の分布深度がそろっている。しかし、6c と 6d 間で約 4m 急に深度が変化している。

地質断面 B7：地質断面 B6 と同様に東西方向にとった断面で、Ma13 が連続的に分布する。一方、Ma12 も 5 本のボーリング点で出現するが、そのうち 4 本は下面が分からないため対比することが困難である。Ma13 の下面をみると、ボーリング柱状図 7a から 7d までの区間はほぼ水平に分布している。一方、7e から 7h の区間は東へ徐々にその出現深度が大きくなる傾向を示す。この地層の東傾斜は、東側の神戸港に和田岬断層が存在し、その影響による変形（撓曲構造の一部）と考えられる。しかし、7d と 7e 間の Ma13 下面の出現深度はその差が約 3.5m ある、

表-1 ボーリング柱状断面図における Ma12・Ma13 の出現深度差。

断面	推定断層	鍵層	出現深度差(m)	垂直平均変位速度(m/kr)
B1	F1	Ma12	3	0.2
B2	F1	Ma12	2	0.2
B3	F1	Ma12	8	0.6
	F2	Ma12	5	0.4
B4	F1+F2	Ma12	13	-
B6	F1	Ma13	4	0.4
B7	F1	Ma13	3.5	0.4
堆積年：Ma13・・・9000年，Ma12・・・13万5000年				

4. 地中レーダ解析

(1) 地中レーダ法

GPR 探査は、地中の送信アンテナによって地中に向かって放出された電磁波のパルスが地下の電気的性質の不均一によりその境界面で部分的に反射し、地表の受信アンテナがそれを受信することによって地下構造を探査する方法である（物理探査学会[14]）。電気的性質とは媒質の比誘電率のことであり、この値が異なる媒質の境界面では電磁波伝播速度が違いため反射が起きる。また、電磁波伝播速度は、 $V = C / \sqrt{\epsilon}$ で表される。ここで、 C は真空中の電磁波伝播速度、 ϵ は比誘電率である。

調査は、次の二つの測定方法を実施した。①プロファイル測定：送信アンテナと受信アンテナを一定間隔のまま固定し、ほぼ一定の速度で移動させながら電磁波を送受信する方法である。この測定方法では反射を連続的に記録できるため、得られるデータは縦軸に電磁波の往復時間をとった地表に平行な方向の連続した反射断面図が得られる。②ワイドアングル測定：送信アンテナの位置を固定し、受信アンテナのみを移動させる。この測定方法では一つの反射面を異なる走時（電磁波の往復時間）で測定できる。このデータをもとに電磁波の往復時間と測定された深度の関係を求めることができる。

地中レーダ探査は、SIR-3000 システム (GSSI 社) と 100MHz のアンテナ 2 台 (図-4)、解析には RADAN6.0 を使用した。本研究では、三宮海岸通周辺の 7 測線で得た地中レーダデータの解析を行った。以下に

地中レーダ探査測線 G1～G7 の結果と解釈を示す。

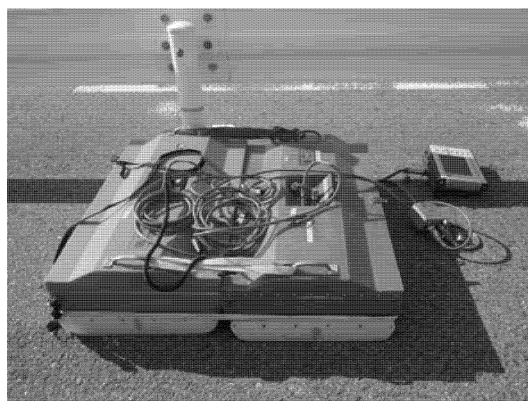


図-4 100MHz の地中レーダアンテナ。機械ノイズを押さえるために2台を連結して使用。

表-2 地中レーダ探査測線。

測線番号	測定エリア	測線長さ (m)	移動方向	レンジ (ns)	始点	終点
G1	浪花町	258	北→南	150	N34°41'22.0"	N34°41'11.3"
			北→南	300	E135°11'34.3"	E135°11'34.0"
G2	江戸町	315	北→南	300	N34°41'20.9"	N34°41'10.2"
			北→南	150	E135°11'39.3"	E135°11'39.7"
G3	公園横(西)	126	北→南	300	N34°41'16.6"	N34°41'12.3"
		126	北→南	150	E135°11'44.5"	E135°11'43.5"
G4	G2 の北の道	200	東→西	300	N34°41'14.1"	N34°41'12.9"
		200	東→西	150	E135°11'44.5"	E135°11'36.6"
G5	NTT～水上警察前	400	東→西	300	N34°41'16.6"	N34°41'10.3"
			東→西	150	E135°11'44.5"	E135°11'27.2"
G6	ポートタワー横(東)	200	北→南	300	N34°41'1.8"	N34°40'55.6"
		200	北→南	150	E135°11'11.5"	E135°11'14.2"
G7	モザイク西道路	200	北→南	150	N34°41'50.7"	N34°40'44.2"
		200	北→南	300	E135°11'0"	E135°11'3.1"

(2) 結果と解釈

南北方向の GPR 断面 G5 (図-5) と G6, G7 (図-6) において、水平な反射パターンがそれぞれ測線の距離 70 ～100 m と 70～90 m, 100～110 m の区間で途切れて、変形している、また反射強度も相対的に弱い。図-5 と図-6 に示すように、反射パターンの不連続面は地下で収れんし、フラワー構造を形成しているように見える、フラワー構造は、一般に横ずれ断層の走向と直交する断面において観察されることが多い。このような反射パターンの異常箇所は、ボーリング柱状断面図で海成層 Ma12 の出現深度が食い違う場所ともよく調和している。

GPR 断面 G2 (北→南) は、0～80 m の部分で水平な反射シグナルを示すが、128～230 m の部分で北斜の反射シグナルのパターンを示す。この北斜パターンは砂州 (岩見[9]) の一部を見ていると解釈される。

GPR 断面 G3 と G4 でも、同様に水平な反射パターンの中に、一部反射パターンの乱れた部分 (異常箇所) が認められる。

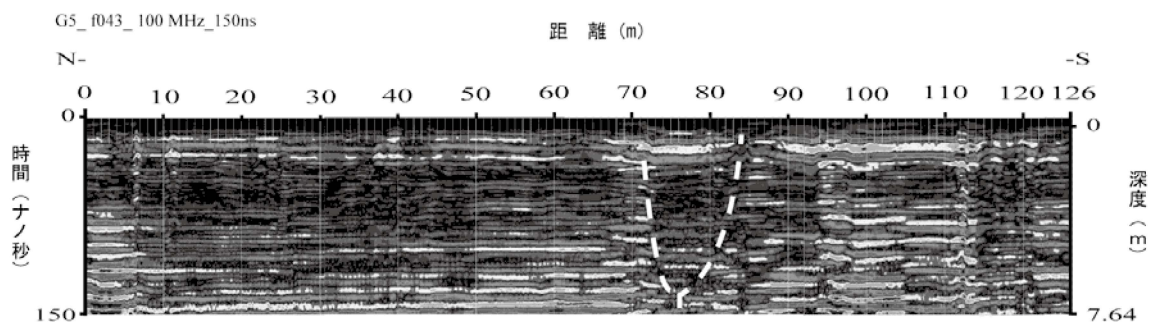


図-5 測線 G5 (北→南) の地中レーダ画像とその解釈. 白線; 反射パターンの不連続面. 不連続面の幾何学的な特徴はフラワー構造を示す.

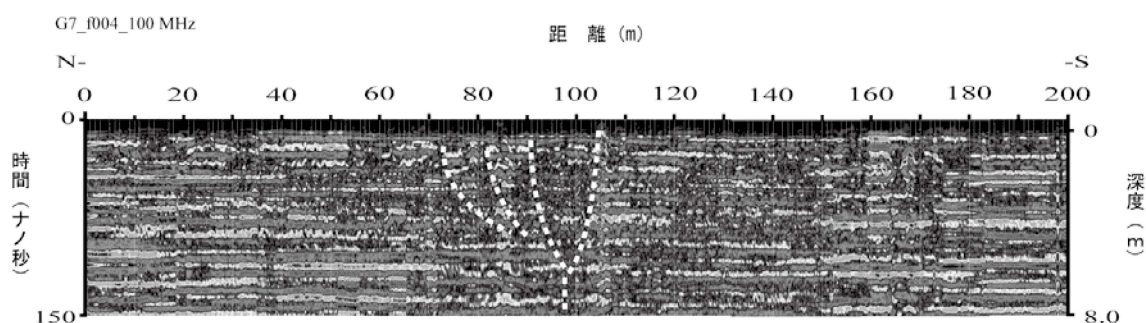


図-6 測線 G7 (北→南) の地中レーダ画像とその解釈. 白線; 反射パターンの不連続面. 図 5 と同様に不連続面の形態はフラワー構造を示す.

5. まとめ

地層分布不連続解析及び地中レーダで不連続 (異常箇所) が見られた地点を以下にまとめる.

ボーリング柱状断面図の Ma12・Ma13 の出現深度が大きく異なる場所と, 地中レーダ画像に反射パターンを切るフラワー構造で特徴づけられる異常箇所とがよく一致している. それらの異常箇所を結ぶと北東-南西方向になり, これは三宮海岸通りを北東方向に横切る分布をし, 和田岬断層と並走する伏在断層 (F1) と考えられる (図-7). この結果は, 小長井[4]が示した推定断層の存在を支持している. A 地点方向に延びていくかについては, A 地点が旧生田川の河口付近に存在し, 比較的荒い堆積物が堆積しているため地層分布不連続解析の検討を今回は行っていない.

一方, 阪神高速 3 号線沿いの海成粘土層の不連続地域 B については別の断層 (F2) を推定した. その理由は, ボーリング柱状断面 B3 のもう一方の不連続部と, ボーリング柱状断面 B4 の 13 m 垂直落差をもつ不連続部は南北方向に分布する点, およびその垂直落差を一つの断層 (F1) による不連続と考えるには他と比べて大きく, 二つの断層による垂直落差として捉えた方が説明しやすい点である. この断層 F2 は, 上述の断層 F1 に収めんと考えられる.

以上のように, 地中レーダと地層分布不連続解析の組合せ調査は都市の伏在断層研究に有効な方法であることがわかった.

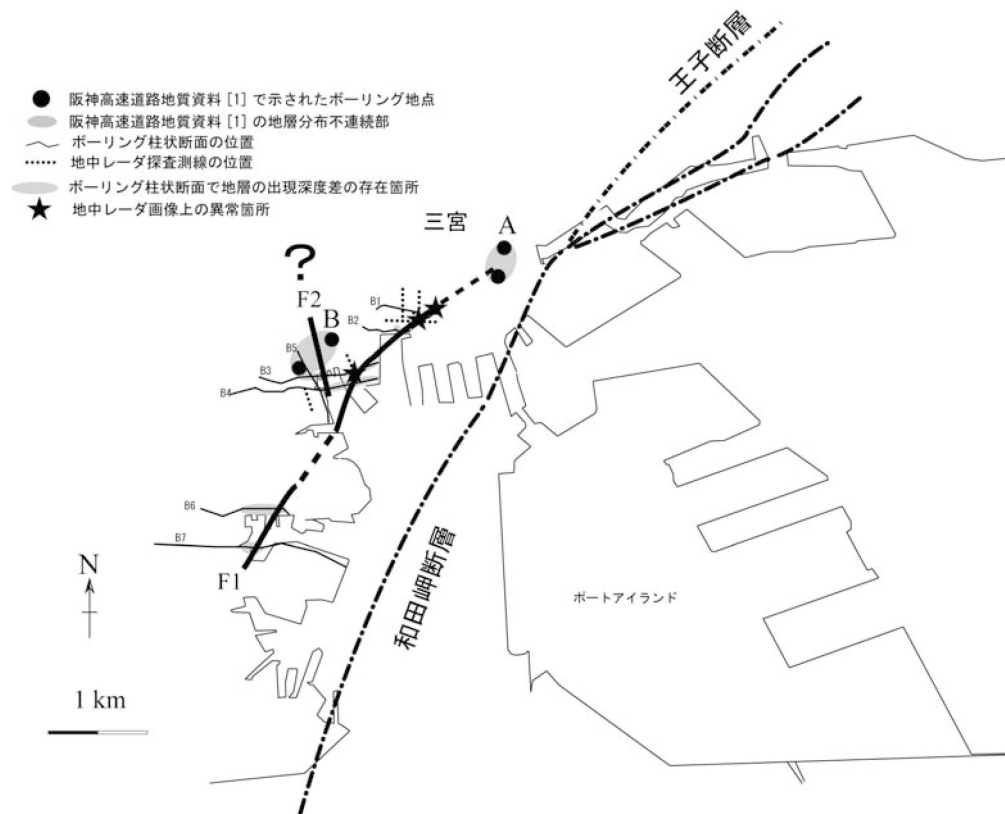


図-7 神戸港周辺の和田岬断層と並走する伏在断層 (F1), 南北性の伏在断層 (F2). B1~B7: ボーリング柱状断面の位置, 点楕円形; ボーリング柱状断面における不連続部, 星印; 地中レーダ画像に見られる異常箇所 (フラワー構造).

参考文献

- [1] 藤田和夫・佐野正人: 阪神・淡路第震災と六甲変動震災の帯をもたらした埋没大地形, 科学, v. 66, p. 793-803, 1997.
- [2] 横倉隆伸・山口和雄・加野直巳・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進: 神戸・芦屋周辺における反射法深部構造探査. 地質調査所月報, v. 50, p. 245-267, 1999.
- [3] 岡田篤正・東郷正美編: 近畿の活断層. 東京大学出版会, 395p., 2000.
- [4] 小長井一男: 地盤と構造物の地震工学. 東京大学出版会. 193p., 2002.
- [5] 阪神高速道路公団: 阪神高速道路地質資料, 3号神戸線復旧編. 224p., 1997.
- [6] 宮田隆夫・前田保夫: 地盤変状からの潜在活断層. 阪神淡路大震災 (地質環境と地球環境シリーズ) 3, 日本地質学会環境地質研究委員会編, p. 135-1456, 東海大学出版会, 1996.
- [7] 神戸市: データベース「神戸 JIBANKUN」. CD-Rom, 神戸市, 2009.
- [8] 国土庁土地局: 阪神地区微地形区分図. 国土庁, 1999.
- [9] 岩見義男: 神戸のまちと地盤. 神戸新聞, 192p., 1987.
- [10] 藤田和夫・前田保夫: 須磨地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, p. 1-101, 1984.
- [11] 七山 太・杉山雄一・北田奈緒子・竹村恵二・岩淵 洋: 大阪湾断層及び和田岬断層の完新世活動性調査. 地質調査所速報, no. EQ/00/2. 平成 11 年度活断層・古地震研究調査概要報告書, p. 179-194, 2000.

- [12] 宮田隆夫・柳澤達彦：神戸市東部，甲陽断層南西延長部の地中レーダ・地層分布不連続解析．神戸大学都市安全研究センター研究報告，n. 14，p. 213-220，2010.
- [13] 宮田隆夫・浅野由利：神戸市都賀川河口域，和田岬断層の地中レーダ・地層分布不連続解析．神戸大学都市安全研究センター研究報告，n. 15，p. 277-286，2011.
- [14] 物理探査学会編：物理探査ハンドブック，手法編，第 5-7，物理探査学会，p. 239-429，1998.

著者：1) 野尻野真栄，神戸大学理学部，学生（現在：神戸市役所）；2) 宮田隆夫，神戸大学大学院理学研究科，教授（現在：大阪市立大学大学院理学研究科，客員教授）.

Analyses of GPR and bed-distribution discontinuity of concealed active faults along the Kaigan Road, Kobe City

Nojirino, Mayo¹⁾

Miyata, Takao²⁾

Abstract

Two active fault zones are well developed in the Rokko Mountains and in northern Osaka Bay. However, a direct connection with the two active fault zones is not yet known in a city area of Kobe. Hitherto, we analyzed the bed-distribution discontinuity for the marine beds, Ma 12 (~135 kyr.) and Ma13 (~9 kyr.), using the database, Kobe JIBANKUN (Kobe City), and researched the underground structure using GPR (Ground Penetrating Rader) in order to grasp a hidden fault in the southwestern part of Sannomiya, Kobe.

On GPR sections, although the pattern of reflector signals has generally a horizontal line, its pattern partly is cut by faults. The faults are joined like a negative flower structure. This place is supported with the vertical drop obtained from a discontinuity analysis of the distribution of the Ma12 and Ma13 beds. These anomalous parts distribute along two lines; one corresponds to a NE-directional hidden fault (sub-parallel to the Wadamisaki fault), and the other can be interpreted as a north-directional hidden fault. Therefore a combined use of the GPR and discontinuity analysis of bed distribution is very useful for grasping a hidden fault in an urban area.