

黄 檗 断 層 の 地 震 探 査

小林 芳 正・入倉孝次郎・堀 家 正 則
天池 文 男・岸 本 清 行・春 日 茂

SEISMIC EXPLORATION OF THE OBAKU FAULT

By Yoshimasa KOBAYASHI, Kojiro IRIKURA, Masanori HORIKE,
Fumio AMAIKE, Kiyoyuki KISHIMOTO and Shigeru KASUGA

Synopsis

Seismic refraction exploration was carried out across a posturated fault near Obaku, Uji City, Kyoto Prefecture by a procedure employing a land-type air gun and signal-enhancement technique by stacking. An abrupt change in substratum P-wave velocity from 1.6 km/s in the plain side to 2.7 km/s in the mountain side was detected at the fault. The depth of the 2.7 km/s layer is about 20 to 30 m below the ground surface and is smaller than the depth 50 m determined in a former study which has been correlated with the paleozoic bedrock with velocity 4.4 km/s. The present substratum with velocity 2.7 km/s in the mountain side is supposed to be a high-velocity interbedded layer belonging to diluvium and to be cut by the Obaku fault.

1. は じ め に

黄檗断層は、京都府南部の巨椋池を含む低地の東縁を限る断層として、上治¹⁾による地質図に示されているが、最近とりまとめられた「日本の活断層²⁾」にも活断層として記載されている。この断層は、近畿三角帯内の断層は水平ずれ成分よりも垂直ずれ成分の方が大きく、南北方向に近い高角の逆断層が多いとの見解³⁾からすれば、逆断層と考えられるが、その配置は、大局的には、右ずれの大活断層、花折断層の南端部に杉型に雁行する位置にあるので正断層の可能性もないとはいえない。

この断層にかかわる地球物理学的研究はいくつかあるが、まず1971年に UMP の一環として行なわれた狐崎他⁴⁾による地震探査が挙げられる。この探査では、京都府南部の巨椋池を含む低地を横断する地下構造が調べられ、その基岩が低地の中央部で約 700 m の深さにあることが明らかにされたが、その際もう一つの注目すべき事実として、その東縁部において、落差約 150 m の段違い地下構造が見出された。この段違い構造を横切る測線上の震探の記録は、「教科書的に見事な⁵⁾」初動の遅れを示し、Fig. 1 を見れば、段違いは測定点 7 と 8 の間にあることは明らかである。

この地震探査結果の解釈は、探査の直後に行なわれたボーリング(黄檗病院 No. 1)および宇治市営ブルーの深井戸ボーリングの結果とも調和的である。なぜなら、断層推定線の東側(山側)にある前者では、地下 56.5 m で砂岩の基岩に到達したのに対し、西側(平地側)にある後者では、190 m までの穿孔でついに着岩しなかったからである。

この断層、またはそれに伴う基岩深度の段違いは、他の間接的資料によっても裏付けられる。入倉・春日⁶⁾、Irikura and Kawanaka⁶⁾ はかねてより京大宇治構内およびその東側山沿いにある京大グラウンド周辺で自然地震観測および常時微動観測を行なっているが、地震動のスペクトルのピークは地震波が東側(山側)から入射する場合には、西側(平地側)から入射する場合にくらべてより短周期であること、また常時微動の振巾は推定断層線を境に山側で小さく、平地側で大きく急変していることを指摘している (Fig. 2, Fig. 3)。

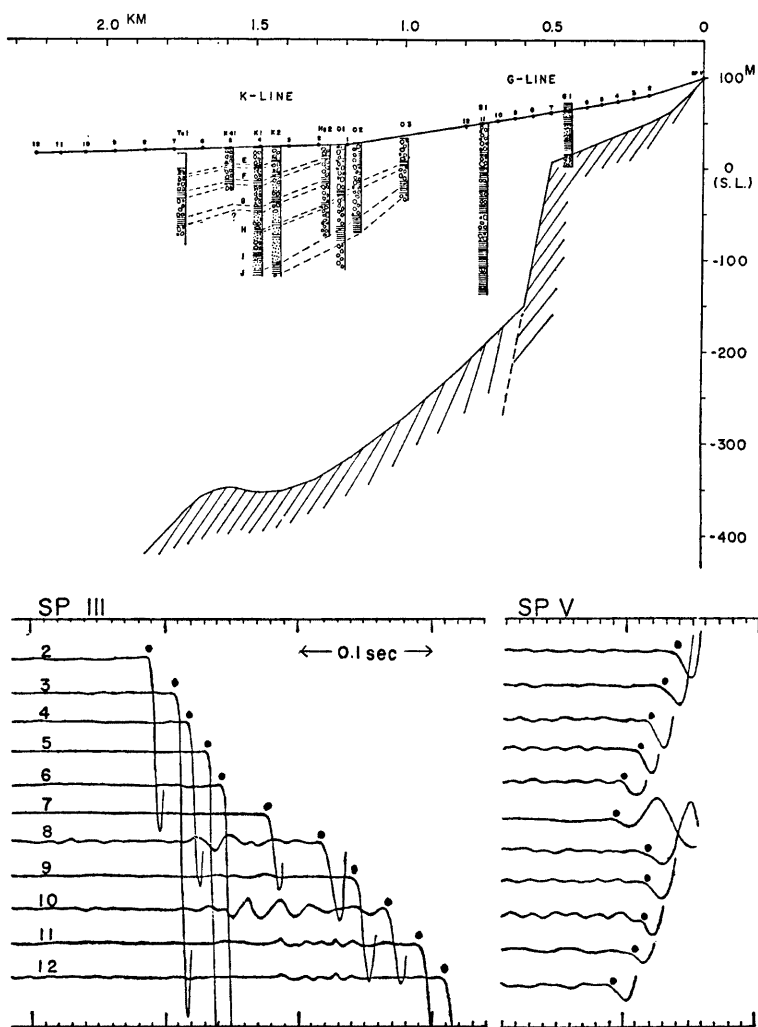


Fig. 1. Upper; Geological section estimated by Kitsunezaki et al. Lower; The refraction record acquired across the Obaku fault by Kitsunezaki et al.⁴⁾ The numbers of the measuring points correspond to those marked by triangle in Fig. 5.

見野・竹内⁷⁾は断層の推定位置を横切って、一連の γ 線測定を行ない、Fig. 5の破線に沿って γ 線強度のピークが認められるとした。この破線の走向は約N45°Wであり、従来考えられていた黄檗断層の走向とは違うが、京大グラウンドの付近ではたまたま従来の推定線と交わっている。この走向の違いをどう解釈する

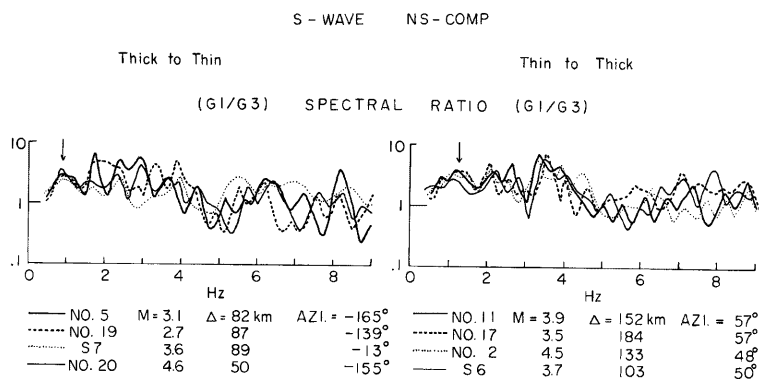


Fig. 2. Comparison of Fourier-spectral ratios of earthquake ground motions observed near the Obaku fault.⁹⁾ The left figure shows the cases that the origins are in the western side, i.e. the waves are incident from the plain side, while the right one the cases of the opposite situation, i.e. the waves from the mountain side. The measuring points G1 and G3 correspond to S4 and S10 in Fig. 5, respectively. M; magnitude, Δ ; epicentral distance, AZI; azimuth of the origins from the site measured clockwise from the north. The peak frequency marked by an arrow is lower in the left figure than that in the right.

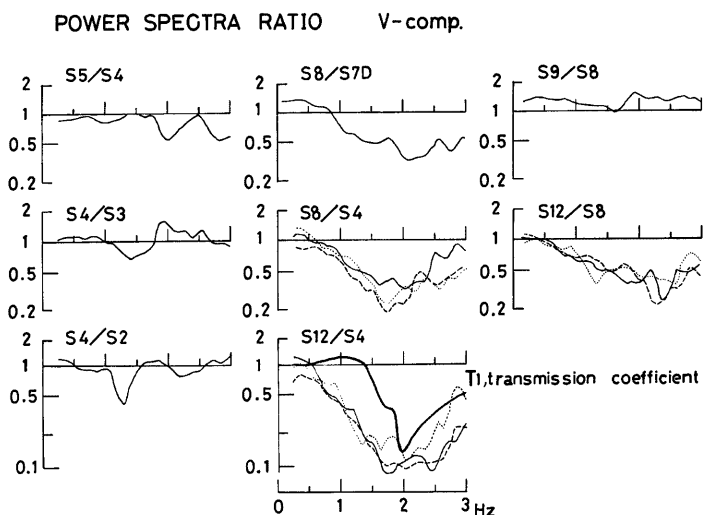


Fig. 3. Ratios of power spectra of microtremors between points near the Obaku fault.⁶⁾ The numbers correspond to measuring points illustrated in Fig. 5. The fault is inferred to exist between S8 and S7D by a sharp change in the ratio.

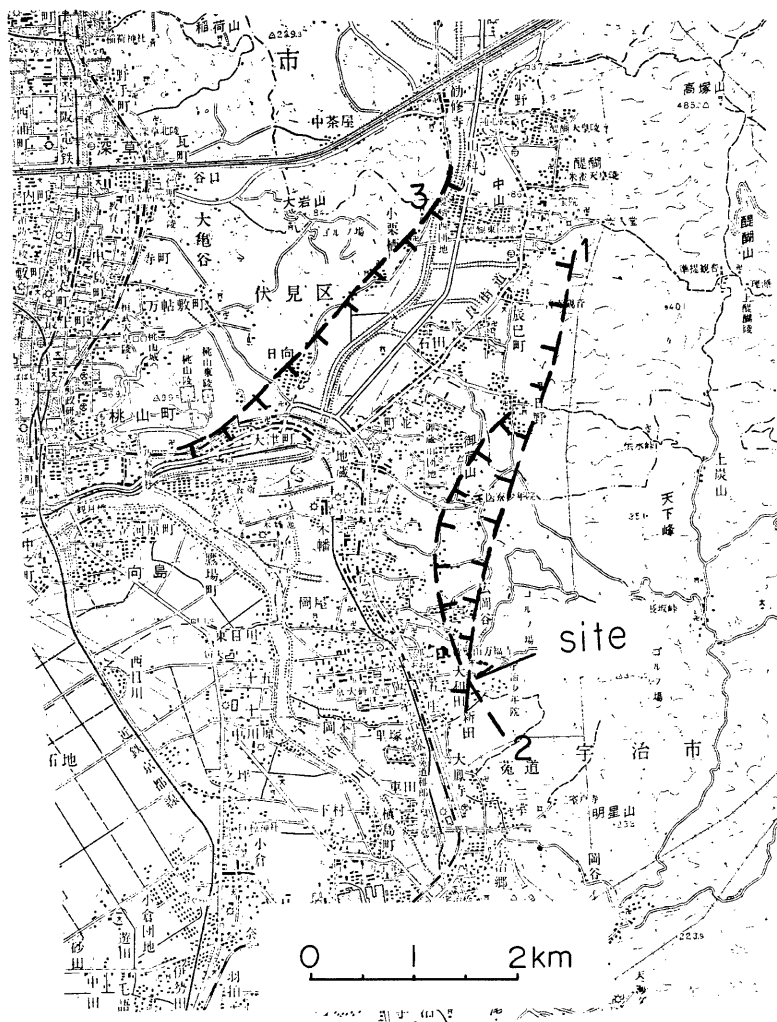


Fig. 4. Topographical setting of the site under study. 1; the Obaku fault, 2; a lineament as an assumed secondary fault, 3; another lineament.

かは今後の課題であるが、空中写真を観察すると御蔵山、木幡南山などの東側急斜面に沿ってリニアメントが認められ、見野・竹内の推定断層線はこれと大体一致しているので、黄栗断層の副断層であるかもしれない。(Fig. 4 のリニアメント 2)。

以上の背景のもとに、筆者等は1979年7～8月に、宇治市黄栗の市児童公園および京大グラウンドを中心

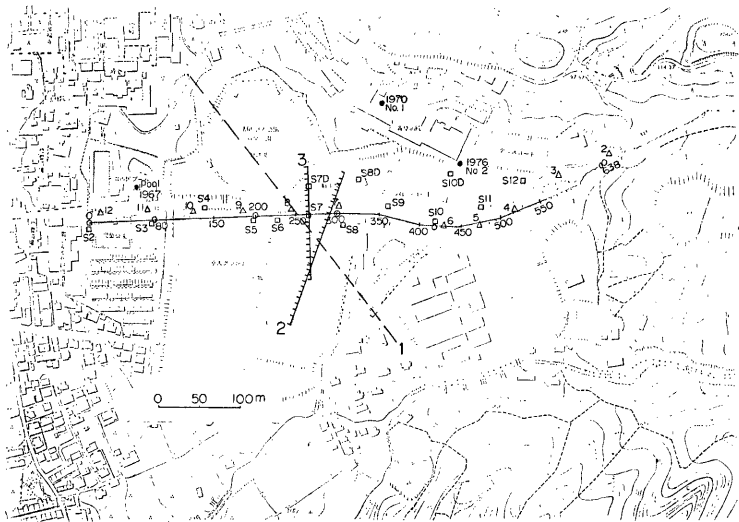


Fig. 5. Measuring line in the present exploration and the positions of the Obaku fault presented by various authors; 1; Mino and Takeuchi²⁾, 2; Irikura and Kawana after Kitsunezaki et al.⁴⁾, 3; the present study. No. 1 and 2 denote boreholes in the Obaku Hospital and Pool that in the Uji-City Pool.

に、断層線を横切る測線について屈折法による地震探査（P 波）を実施した。この地震探査は、以前に行なわれたものよりも、より微細な地下構造を推定することを意図したので、換振器の間隔を、以前の 50 m に対し、10 m としたこと、市街地での新しい探査法の開発も兼ねて、陸上用エアガンを利用し、震源強さの不足を補うために、stacking による signal enhancement を試みたのが特徴である。

2. 調査方法

測線は Fig. 5 のように、ほぼ EW 方向に、市児童公園、京大グラウンド（下段ラグビー場、上段陸上競技場）、および道路上に設けられた。その長さは遠隔震源も含めて 638 m である。換振器間隔は 10 m を原則としたが、表層探査のため一部 5 m としたところもある。エアガン用の震源孔は 0, 80, 200, 300, 420, 638 m に設けられた。このうち 638 m 以外のものは、電柱根掘り用オーガーで、直径約 50 cm、深さ約 1.2 m の孔を掘り、これに水を湛えてエアガンを水中で発射できるようにした。638 m 地点だけは、ちょうどそこにあった砂防ダムに泥と水が溜っていたので、ダム上からこの中にエアガンを吊り下げて震源用に利用した。

エアガンとして、Bolt Model 5500 DHS に容積 82 cc の chamber を装着したものを使用した。圧力は大体 150～80 kg/cm² の範囲で使用したが、一部 50 kg/cm² 位で行なった場合もある。ガスには窒素を用い、150 kg/cm², 47 l ボンベで搬入した。換振器には Geospace Type HS-J Model K (28 cps) を用い、増巾器には Oyo-Nimbus McSeis Model 1200 signal enhancement 型増巾器 (12成分) を、記録器には応用地質 OAPS-55 地震探査装置の記録器部分 (12成分) を使用した。

エアガンは威力において 10 gr 程度のダイナマイトの爆発にも及ばないので、信号を何回も重ね合わせる

signal enhancement 技術を採用したのだが、30回位 stack しても初動がよみとれたのは震源距離 300 m 程度までであった。Stacking の効果の例は Fig. 6 に見ることができる。

3. 測定結果と解析

測定結果を走時曲線で示す (Fig. 7)。この図には初動のよみとり走時のほかに、萩原⁸⁾の方法による T' 値も示されている ($T'_{AD} = T_{AD} - (T_{AD} + T_{BD} - T_{AB})/2$)。この図を一見してわかることは、0.8~0.9 km/s の第1層の下に、より速度の大きい1~2層があること、かつ T' 曲線の勾配は 260~270 m 辺を境に明らかに変わっており、右方でより速度の大きい下層があるらしいことである。

まず、260~270 m より左方の区間についてみると、第1層の速度は 0.9 km/s である。 T' 曲線の勾配からわかるように、Shot 80 (以下 80 m 地点の震源をこのように呼ぶことにする) と Shot 300 間のはざとりでは、その区間の両端で 1.1 km/s、中央部で 1.6 km/s が見られる。次に、Shot 80 と Shot 420 間のはざとりでは、全域で 1.6 km/s が認められる。以上のことから、1.1 km/s は 1.6 km/s と

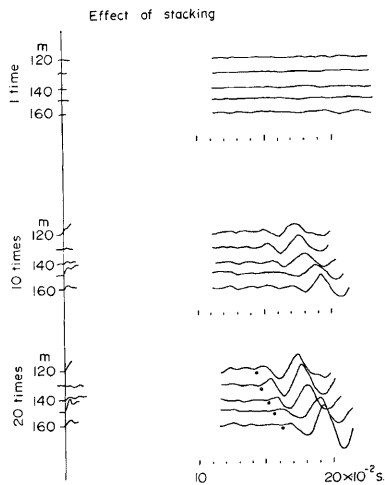


Fig. 6. Example showing the effect of stacking for shot-geophone distances 120 to 160 meters. Numbers of stacking are 1, 10 or 20 times from the top to the bottom group of traces.

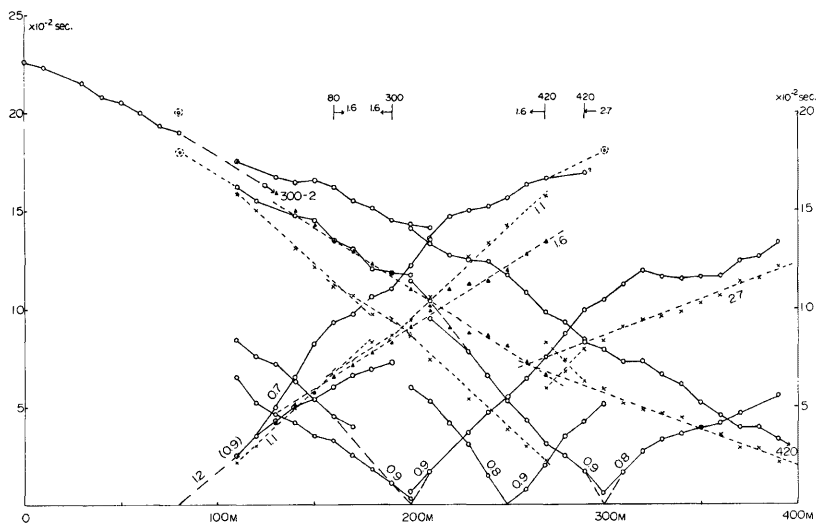


Fig. 7. Traveltime-distance diagram for the Obaku site.

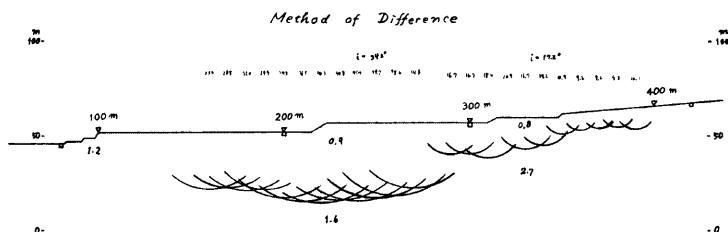


Fig. 8. Result of analysis according to Hagiwara's method.

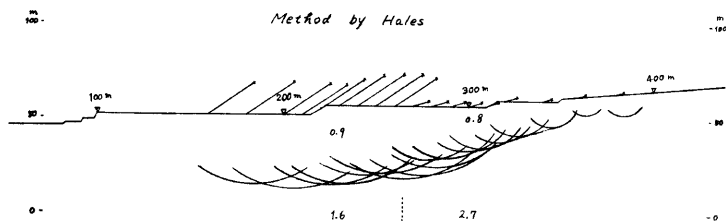


Fig. 9. Result of analysis according to Hales' method.

0.9 km/s とによる見掛け速度⁹⁾ ($1/v_{1,2} = 1/2(1/v_1 + 1/v_2)$) であって、第1層、第2層の真の速度は0.9, 1.6 km/s であると考えられる。

次に 260~270 m より右方の区間については、第1層速度は 0.8 km/s である。Shot 200 と Shot 420 間のはぎとりから 2.5~2.7 km/s の下層速度が見られる。この速度は T' 値のばらつきのために直線近似のやり方によってこの程度の範囲の値となりうるのであるが、後述する図式計算の結果、2.7 km/s とするのが最もよいようである。

以上の検討で、この地点の地下構造の概要は把めたので、そのような作業モデルで解析することにし、まず萩原のはぎとり法で解析してみた結果は Fig. 8 のようである。第1層の厚さの決定に大きく影響するのは第1層速度であって、第2層速度の多少の誤差はそれほど効かない。ただ、第2層速度がどこで 1.6 km/s から 2.7 km/s に推移するかは走時曲線の折れ曲がり点だけでは決定しがたいので、いまはそれをあいまいのままにしておき、左方からは 0.9/1.6 (第1層 0.9 km/s, 第2層 1.6 km/s をこのように表現することにする) の構造で、右方からは 0.8/2.7 の構造で第1層の厚さを求めてみた結果である。Fig. 8 から、280 m 辺で第2層深さが急変しているらしいことがわかる。

萩原の方法の適用条件は第2層上面の傾斜が大きくないことであるから、このように第2層深さが急変している構造に適用するのは好ましくない。そこで次に、下層の傾斜が大きくても適用できる Hales¹⁰⁾ の方法で解析してみることにする。

Hales の方法による結果は Fig. 9 のようである。この方法による場合にも、第2層速度が 1.6 km/s から 2.7 km/s に推移する点をどこにとるかは結果に影響するので、ここでも、はぎとり法の場合と同様、左からは 0.9/1.6 の構造で、右からは 0.8/2.7 の構造で解析してみた。Fig. 9 から明らかなように、この場合にも 260~270 m 辺で第2層上面の深度に段差が認められる。ただし、段差の大きさははぎとり法のときよりも小さい。

両法による解析結果は大局的には一致しているが、Hales 法による方がやや深めの結果を与える (Fig. 10)

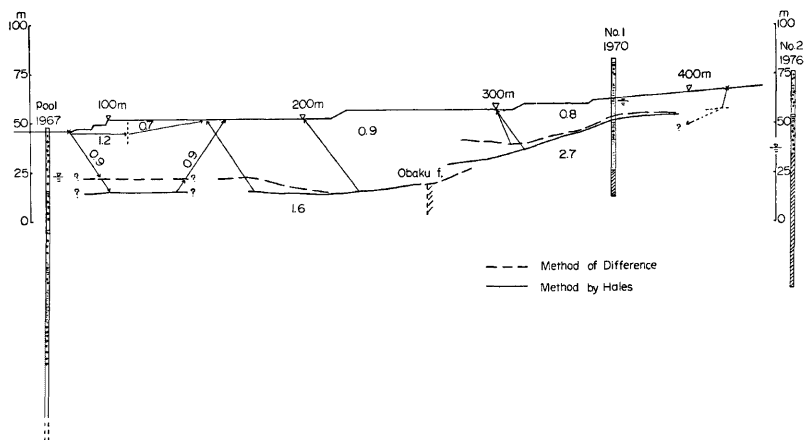


Fig. 10. Graphical analysis for determining the dividing point between 1.6 km/s- and 2.7 km/s substrata. The time term at the shot point at 420 m is assumed as 1.2×10^{-2} sec.

Table 1. Observed and calculated travel times in 10^{-2} seconds.

Shot point	Measuring point	Tobs	Tcal Hagiwara	Tcal Hales
420 m	150 m	16.5	16.6	17.3
	200	14.3	14.1	14.1
	300	7.9	7.7	8.2
80	160	9.3	9.9	11.1

距離 90~130 m 辺に記入してある第2層は、この地点で解析されたものではなく、170 m 辺での両法の結果を平行移動して記入されているに過ぎない。ただし、100 m 辺の浅層部分はやや速度の大きい領域を仮定しないと、実測走時が説明できないので Fig. 10 中に記入されているような速度を推定値として入れてある。

さて、以上の2通りの解析によっても、1.6 km/s から 2.7 km/s へ移行する地点を正確に決定することができない。そこで、これまでの解析結果を参考にしながら、この推移点をどこにし、また 260~270 m より右方の第2層速度を 2.5~2.7 km/s のうちどれ位の値とするのが最もよく観測走時を説明できるかを図式により計算してみた。その結果、推移点は Fig. 10 に記入されているように 265 m とし、右半の第2層速度は 2.7 km/s とするのが最もよいことがわかった。この仮定で走時を計算した場合、観測値と計算値は Table 1 のようになる。ただし、走時計算において Shot 420 における time term (または delay time) は $h=10.05$ m に対応する値として $\Delta T=1.2 \times 10^{-2}$ sec と仮定した。

もし右半の基岩速度としてもっと低い値をとると、計算された走時 Tcal がもっと大きくならざるを得ないか、または観測走時に合わせるためには第2層の深度を全体にもっと浅くせざるを得なくなり、この場合には前述の解析結果と合わなくなる。

ここで Shot 80 の記録に見られる特異な波形について述べておこう。Fig. 7 の走時曲線に見られるように、Shot 80 からは解析に採用された初動よりも実はもっと早く到着する弱い初動が見えるのである (Fig.

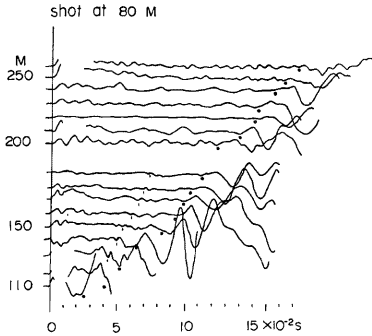


Fig. 11. Example of weak arrivals(') preceding the employed first onsets("). The phases probably correspond to waves propagated along a high-velocity interbedded layer which thins out in the midway of the spread.

11の'印)。この速度は約 1.8 km/s で $110 \sim 190 \text{ m}$ あたりまではこれが本来の初動であるが、Fig. 11 でわかるように、それ以遠ではこれに対応する位相が見出せない。そこで、 $110 \sim 190 \text{ m}$ 区間に対しても、それ以遠での初動に対応する「第2の初動」(Fig. 11 の・印)を改めてよみとり、これを解析に用いた。ここで無視された「第1の初動」の意味を考えると、これは限られた区間だけに存在する速度の大きい中間層を伝わる波ではないかと推測される。このような中間層があるらしいことは、京大宇治構内でも速度が必ずしも深さと共に単調増加していない例が示されていることから想像される。また、この地のような扇状地では地層は変化に富み、ときに尖滅するのはむしろ一般的であると考えられる。したがって、上述の解析結果はそのような状況も考慮して解釈すべきであろう。

最後に、Shot 300 と Shot 420 間のはぎとりでは 2.0 km/s 程度の下層速度が得られ、もしこれが真

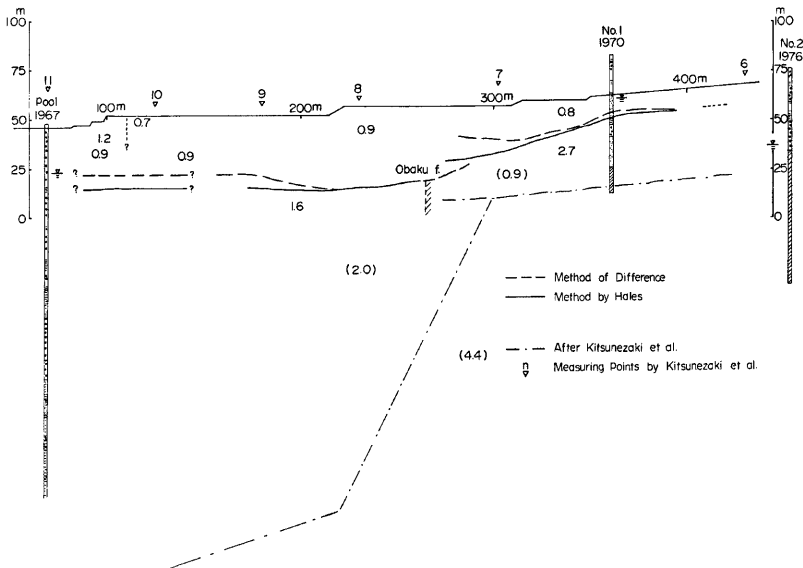


Fig. 12 Comparison between underground structures determined by Kitsunezaki et al.⁴⁾ and in the present study.

の速度だとすると、 2.7 km/s は 2.0 km/s と狐崎他による古生層の速度 4.4 km/s の見掛け速度である可能性もでてくるのだが、このような解釈をとると、 2.0 km/s 層が京大グラウンド上の合宿所敷地から路肩に移行する $360\sim 370 \text{ m}$ 辺で地表から 2 m 程度の浅所に存在することになり、やや不自然なのでこの立場はとらないこととした。このことは、Shot 300 から右方への観測値は信頼度が低いものとして無視することを意味する。

4. 考 察

今回の探査でも従来から黄礫断層があると考えられていた地点付近で、第2層速度が 1.6 km/s から 2.7 km/s に急変しており、かつその上面の深度が 1.6 km/s の側で 10 m 以上深くなっていることが明らかとなった。 2.7 km/s 層の上面は推定断層位置の山側で、深さ $20\sim 30 \text{ m}$ 程度である。この深さは、狐崎他による、古生層上面までの深さ約 50 m に比し大部浅い (Fig. 12)。図にはボーリング柱状図 (狐崎他以降に黄礫病院で行われた No. 2 も含む) も併せて記入されている。この図を一見する限り、深さ 50 m に 4.4 km/s が存在するのに対し、深さ $20\sim 30 \text{ m}$ に 2.7 km/s が検出されるというのは自然な印象を与える。しかし、やや立入ってみると、これには問題があることがわかる。すなわち、狐崎他はよりマクロな地下構造の解明を目指していたとはいえ、 4.4 km/s より上部層の速度を平均 0.9 km/s としており、 2.7 km/s に相当する地層は想定していないからである。もっとも、そこには次のような断りがしてある。「ここでの基盤の上層では 0.9 km/s の速度が仮定されているが、これは礫質の水で飽和されていない地層に対する値であるのに、実際は6割方粘土質で (この粘土のP波速度はおそらく 1.3 km/s 程度)、未飽和での上層全体としての平均は 1.1 km/s 程度となろう」と。

したがって、狐崎他による 0.9 km/s はもう少し大きい値にしてもよさそうではあるが、彼らの結果はボーリングの結果に大体合っているのであるから、それ程大巾な変更はできないであろう。この矛盾を解決するためには、 2.7 km/s 層を速度の大きい中間層と考えるのがよいと思われる。狐崎他の 0.9 km/s は、 4.4 km/s より上部層を鉛直に近い角度で貫いて伝わる平均速度であるのに対し、今回の調査で得られた 2.7 km/s は測線沿いに、すなわち地層がほぼ地表に平行な場合には地層に沿って伝わる速度と考えられるから、このように仮定することはそれ程不都合ではない。ただし、 2.7 km/s 層の厚さは、狐崎他の time term を余り小さくしすぎない程度でなければならない。このような中間層がありそうなことは前節にも述べたところである。

ただし、ここで想定される速度の大きい中間層は、初動がはっきりよめることから、 $110\sim 190 \text{ m}$ で推定されたものに比し、相対的にしっかりしたものであろう。このことから、この層が 265 m 以西で急になくなるのは、この地層が尖滅するのでなく、断層によって裁られている可能性の方をより強く暗示するのである。さらに付言すれば、その場合には下盤側 (西側) にもこの地層の延長部がある筈であるが、今回の探査ではたぶんその存在深度が大きすぎるために検出されなかったと考えることができる。そのためには、落差は少くとも $20\sim 30 \text{ m}$ 以上でなければならない。

次に、今回の探査で検出された $0.8\sim 0.9 \text{ km/s}$ 、 1.6 km/s 、 2.7 km/s などがどのような層準に対応するかは関心が持たれよう。とくに 2.7 km/s 層は断層で裁られていると考えられるところからその層準には興味がある。ただし、ここに $0.8\sim 0.9 \text{ km/s}$ は第1層を鉛直近く横切って伝わる速度、その他は第2層に沿って伝わる速度である。

地層と速度値については狐崎¹⁾、狐崎他⁴⁾のデータが参考になる (Table 2)。それによれば

$0.8\sim 0.9 \text{ km/s}$ は不飽和冲積層または洪積層上部の $v_{1\perp}$

1.6 km/s は (1) 不飽和冲積層または洪積層上部のうち礫層 (G_2) の $v_{//}$ 、または (2) 飽和洪積層下部のうち砂・粘土の $v_{//}$ のいずれかに近いが、市営プールの井戸の水位から判断して (2) の公算の方が大

Table 2 P-wave velocities of various strata near the Obaku site.

Time	Stratum	V // *	V ⊥ *	Depth (m)	Site
Alluvium or Upper Diluvium	Fill	—	—	0~ 0.5	Uji Campus Kitsunezaki ¹¹⁾
	{ Clay Layer C1	1.2	1.1	~ 2.3	
	{ Gravel G1	1.3	0.8	~ 4.5	
	{ Gravel G2	1.7		~ 8	
	{ Gravel G3	2.1	2.0	~14	
Lower Diluvium (Osaka Group)	{ Sand and Clay Scl	—	1.7	14~	
Diluvium	{ Clayey	—	1.3	mean 1.1	Oguraike to Obaku Kitsunezaki et. al. ⁴⁾
	{ Unsaturated Clay	—	0.9		
	{ Saturated Clay	—	2.0		
Paleozoicum	{ Weathered Layer	3.0	—		
	{ Unweathered	4.4~5.2	—		

* V // and V ⊥ denote velocities along and across strata, respectively.

と考えられる。2.7 km/s は値としては古生層上部風化帯 3.0 km/s が最も近いが、柱状図から判断してこの可能性は低く、むしろ洪積層のうち飽和礫層の $v_{//}$ とみるべきであろう。2.7 km/s はこれまでに知られている洪積層の値としてはやや高すぎるのであるが、これは今回の探査でよりマイクロな速度の変動が検出されたものか、または測定・解析の誤差に影響されたか、または両方の故であろう。

結局、2.7 km/s が洪積礫層であるとなると、これが黄檗断層で裁られている可能性が大であるということとは、従来から知られていた古生層の段違い構造で浅い地層にもくい違いが生じていることになる。これは黄檗病院裏の切取工事現場で観察された大阪層群の砂層が西に強く傾斜していることとも矛盾しない。

最後に、推定断層線の位置については、今回の調査では従来よりもやや西寄りの結果が得られた(Fig. 5)。これには前述の 1.6 km/s ~ 2.7 km/s 推移点の位置決定に関わるので、若干の誤差が含まれている可能性は否定できないが、それ程大きな変更ではない。なお、Fig. 5 において断層は測線に直交して記入されているが、特に積極的な根拠があってそうしたわけではない。

5. 結 論

(1) 宇治市黄檗の京大グラウンド付近で、陸上用エアガンと Stacking による Signal Enhancement を行なう屈折法地震探査を実施した結果、従来黄檗断層があると推定されていた付近で第 2 層速度が水平方向に 1.6 km/s から 2.7 km/s に急変することを見出した。

(2) 推定断層線の山側に見出された 2.7 km/s 層は、従来の段違いを示す古生層基岩 (4.4 km/s) の深さ 50 m よりも浅い地中 20~30 m にあり、その速度から考えて洪積層のうち速度の高い中間層であると推定される。

謝 辞

本調査に理解を示され、宇治市黄檗児童公園および京大グラウンドの使用を許可された宇治市 都 市 計 画課、京都大学体育指導センターの各位に感謝します。

エアガンは鉄道技術研究所地質研究室所有のもので、その使用については同室長石崎昭義氏、主任研究員

大島洋志氏に種々ご配慮をいただき、その操作については同室熊谷兼雄氏、西森紳一氏に指導していただいた。観測では、京都大学理学部学生岩田知孝、小泉尚嗣、長 秋雄君の補助を得た。

ボーリング資料入手については、医療法人宇治黄葉病院施設部長滋岡賢次氏および株式会社日さく大阪支店および京都出張所のお世話になった。

解析については、一部、大阪工業大学川本 整教授の教示を受け、また以前の探査結果および今回の結果について秋田大学狐崎長琅助教授に議論していただいた。

ほとんどの図面のトレースは倉内洋子さんをお願いした。

本調査費用の一部に科学研究費補助金（自然災害特別研究（1）302016 代表：岐阜大学村松郁栄教授）を使用した。

参 考 文 献

- 1) 上治寅次郎：京都近傍地質図，地下資源研究所，1961.
- 2) 活断層研究会：日本の活断層，東大出版会，1980.
- 3) 藤田和夫：近畿の第四紀地殻変動と地震活動，地質調査所編「地質ニュース」，1976，pp. 10—20.
- 4) 狐崎長琅，後藤典俊，岩崎好規：地震探査からみた京都盆地南部の地下構造とこれに関連した地震工学上の若干の問題，京大防災研年報，第14号A，1971，pp. 203—215.
- 5) 入倉孝次郎，春日 茂：水平に急変する地盤構造地域における地震波の震動特性，地震学会講演予稿集，1980，No. 1，p. 202.
- 6) Irikura, K. and T. Kawanaka: Characteristics of Microtremors in a Ground with Steeply Varying Structure, Proc. 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1978, pp. 297—304.
- 7) 見野和夫，竹内文朗：黄葉断層付近の γ 線測定，京大防災研年報，第20号B，1977，pp. 29—33.
- 8) 萩原尊礼：基盤面の傾斜が一樣でない場合の走時曲線解析法，地震，第1輯，Vol. 10，No. 11，1938，pp. 463—468.
- 9) 例えば田治米鏡二：弾性波による地盤調査法，楳書店，1977，p. 70.
- 10) Hales, E.W.: An Accurate Graphical Method for Interpreting Seismic Refraction Lines, Geophysical Prospecting, Vol. 6, 1958, pp. 285—294.
- 11) 狐崎長琅：京大・宇治構内の地下構造と地震波速度の分布，京大防災研年報，第13号，1970，pp. 175—194.