

地震波を用いた地下構造の推定に関する実験の実践例

谷口 慶祐¹⁾

Experiment on the Investigation of the Structure of Underground with Seismic Waves

Keisuke Taniguchi

抄 録：授業の一環として、地震波を用いた屈折法による地下構造探査を 2 ヶ所で行ったので報告する。人工震源から直線上に 1m おきに地震計をできるだけ多数設置し、震源で発生し伝播した P 波を捉え、それらを解析することにより、それぞれの場所での傾斜 2 層構造を求めた。

1 ヶ所目の測定地点は、京都大学総合人間学部キャンパス内の空き地で、過去にすでに同様の測定が行われ、基盤がほぼ水平ないし西に少し傾いていることが分かっていた（加藤，2002，私信）。今回の実験の結果、基盤は西下がり 2.9° の傾斜となったが、この結果は、従来の結果とほぼ調和的である。2 ヶ所目は宇治京大グラウンドの黄檗断層付近である。黄檗断層は東上がりの断層で、地質学的な調査や大規模な地下構造探査から、基盤は西側に傾斜していることが分かっていた。今回の実験でも、基盤が西下がり 4.4° の傾斜であることがわかり、調和的であるといえる。

日本語キーワード：地下構造，地震波，屈折法，断層

I. はじめに

われわれは、地中の構造、例えば基盤はどのように起伏しているのか、断層はどこにあるのか、その断層はどれくらいずれているのかなどを、地表付近を除いて、直接目で見て調べることはできない。そこでいろいろな地球物理学的手法を用いて構造の推定が試みられている。その中でも地震波を用いた地下構造探査は最も分解能がよいとされている。今回は授業の一環として、地震波を用いた屈折法によって 2 ヶ所で地下構造の探査を行ったので、簡単な原理とともにその結果を報告する。

1) 京都教育大学教育学部理学科

Ⅱ. 地震波による地下構造探査の原理 (屈折法)

1 水平2層構造

まず最も単純な水平2層構造を求める原理について簡単に紹介する。地表にある点(図1のE)を震源として人工的に地震を発生させ、発生したP波を地震計が設置してある観測点Sで捉える場合を考える。震源Eから射出されたP波は四方八方に伝わってゆくが、その中で観測点Sに到着するものだけを考えると、大きく分けて3種類ある。1つは地表付近を最短距離で伝わる直接波、2

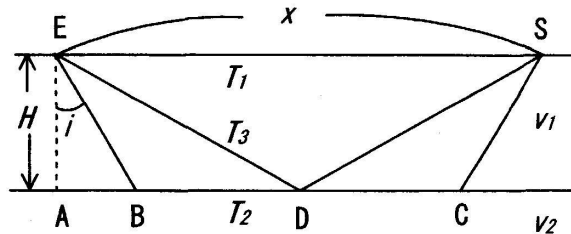


図1：水平2層構造のモデル

つめは境界面で屈折する屈折波(境界面での屈折角度の違いによって多数存在することになるが、観測点に到着するものに限ることを忘れてはいけない)、3つめは境界面で反射する反射波(これには、1回反射するもの、2回反射するものなど多数存在する)である。それでは直接波、屈折波、反射波について、最初に到着する波とそれぞれの波の関係を考えることにする。

まず直接波を考えると、震源Eと観測点Sを結ぶ直線上を伝わる波は1つしかないとわかる。図1のように、第1層、第2層のP波の速さをそれぞれ v_1 、 v_2 、ただし $v_1 < v_2$ 、第1層の厚さを H 、震源距離(今回の場合は震源が地表にあるので、震央距離でもある)を x とし、震源から観測点まで伝わるのにかかる時間(走時)と震源距離の関係を求めると、直接波の走時 T_1 は、

$$T_1 = \frac{x}{v_1}$$

となる。

次に屈折波の走時 T_2 を求めよう。ほとんどの屈折波は地中を下に向かって伝わって行くため、観測点に到着することはないが、例えば屈折波の中でも、臨界屈折すなわち屈折角 $\pi/2$ で境界面で屈折し、境界面上を伝わり、境界面でもう1度屈折し地表に向かった波は観測点に到着する。ただしこの波には屈折した後そのまま観測点に到着するものだけでなく、上に向かって屈折した波が、地表面で反射し、再び地中に向かいそこでもう1度屈折し、これを繰り返してやがて観測点に到着するものなどがあるため多数存在することになる。ここでは屈折波に関しても、観測点に最初に到着するものだけを考えるため、屈折波の中でも、境界面で臨界屈折し、境界面上を伝わり、境界面でもう1度屈折し地表に向かった波だけを考える。その他の伝播経路では明らかに余分に時間がかかることになるからである。この屈折波について、臨界屈折する場合の入射角を i とすると、図1に示したいくつかの2点間の距離は次の式で表される。

$$\overline{AB} = H \tan i, \quad \overline{BC} = x - 2\overline{AB}, \quad \overline{EB} = \frac{H}{\cos i}$$

そこで屈折波の走時 T_2 を求めると,

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{2\overline{EB}}{v_1} + \frac{\overline{BC}}{v_2} \\ &= \frac{2H}{v_1 \cos i} + \frac{1}{v_2} (x - 2H \tan i) \end{aligned}$$

となる。ここで B 点における屈折にスネルの法則を適用すると以下の式が成り立つ。

$$\frac{\sin i}{\sin \pi/2} = \sin i = v_1/v_2, \quad \cos i = \sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}$$

これらを T_2 の式に代入すると,

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{2H}{v_1 \sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}} + \frac{1}{v_2} \left\{ x - 2H \frac{v_1/v_2}{\sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}} \right\} \\ &= \frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \end{aligned}$$

となる。

最後に反射波の走時 T_3 について考える。反射波に関しては、地表と境界面で何回も反射を繰り返せば繰り返すほど観測点に到着するまでに余分に時間がかかるので、反射波の中で観測点に最も早く到着するのは、境界面で 1 回反射したものである。 $\overline{ED}$ の長さが,

$$\overline{ED} = \sqrt{(x/2)^2 + H^2}$$

となるため、走時 T_3 は

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{2\overline{ED}}{v_1} \\ &= \frac{\sqrt{x^2 + 4H^2}}{v_1} \end{aligned}$$

となる。以上を整理すると,

$$\begin{aligned} \text{直接波} &: T_1 = \frac{x}{v_1} \\ \text{屈折波} &: T_2 = \frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \\ \text{反射波} &: T_3 = \frac{\sqrt{x^2 + 4H^2}}{v_1} \end{aligned}$$

となる。

次にこれらの大小関係を考えよう。まず直接波の走時 T_1 と反射波の走時 T_3 を比較すると、

$$T_3^2 - T_1^2 = \frac{x^2 + 4H^2}{v_1^2} - \frac{x^2}{v_1^2} = \frac{4H^2}{v_1^2} > 0$$

$$\therefore T_3 > T_1$$

つまり反射波は直接波よりも常に遅れて観測点に到着することがわかる。

次に屈折波の走時 T_2 と反射波の走時 T_3 の大小関係について考えると、

$$\begin{aligned} T_3^2 - T_2^2 &= \frac{x^2 + 4H^2}{v_1^2} - \left(\frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \right)^2 \\ &= \left(\frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} x - \frac{2H}{v_2} \right)^2 \geq 0 \end{aligned}$$

$x = 2Hv_1/\sqrt{v_2^2 - v_1^2}$ のとき $T_3 = T_2$ 、それ以外るとき $T_3 > T_2$ である。以上 2 つの結果から、最も早く到着する P 波を解析対象とする場合、反射波は考慮する必要がないことがわかる。

それでは、次に直接波の走時 T_1 と屈折波の走時 T_2 の大小を比べよう。

$$\begin{aligned} T_2^2 - T_1^2 &= \left(\frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \right)^2 - \left(\frac{x}{v_1} \right)^2 \\ &= \left(\frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \frac{x}{v_1} \right) \left(\frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} - \frac{x}{v_1} \right) \\ &= \frac{(v_2 - v_1)}{v_1 v_2} \left(\frac{x}{v_2} + 2H \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \frac{x}{v_1} \right) \left(2H \frac{\sqrt{v_2 + v_1}}{\sqrt{v_2 - v_1}} - x \right) \end{aligned}$$

従って $x \leq 2H\sqrt{v_2 + v_1}/\sqrt{v_2 - v_1}$ のとき $T_2 \geq T_1$ 、 $x > 2H\sqrt{v_2 + v_1}/\sqrt{v_2 - v_1}$ のとき $T_2 < T_1$ である。

このことから、直接波と屈折波は、ある距離を境として観測点が近い場合には直接波が、遠い場合には屈折波が早く到着することが分かる。

2 水平 3 層構造

今度は水平 3 層構造について考える。この場合観測点 S に到着する P 波の種類は、水平 2 層構造の場合よりさらに増えることになる。しかし最も早く観測点に到着する可能性があるものだけを考えて、結局直接波、第 1 層と第 2 層の境界で臨界屈折した屈折波、第 2 層と第

3層の境界で臨界屈折した屈折波の3つである。そこでそれらの走時をそれぞれ T_1 , T_2 , T_3 としよう。図2にモデルとP波の伝播の様子を示す。第1層, 第2層, 第3層のP波の速さをそれぞれ v_1 , v_2 , v_3 , ただし $v_1 < v_2 < v_3$, 第1層の厚さを H_1 , 第2層の厚さを H_2 , 震央距離を x とする。図2からわかるように直接波の走時 T_1 , 屈折波のうち第1層と第2層の境界で臨界屈折した屈折波の走時 T_2 は先に水平2層構造で求めた考え方と同じである。ここでは第1層と第2層の境界で屈折し, 第2層内部を伝播後第2層と第3層の境界で臨界屈折する波の走時 T_3 を求めよう。

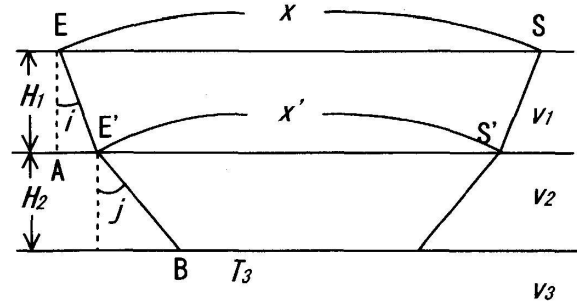


図2：水平3層構造のモデル

第1層と第2層の境界で上から下に向かって屈折する点を E' , 下から上に向かって屈折する点を S' とし, E' から S' まで伝わるのにかかる時間 (走時) を T' とすると, T' は E' を震源, S' を観測点とした場合の走時と同じ式の形で, $\overline{E'S'} = x'$ とすると, 先ほど求めた式を用いると,

$$T' = \frac{x'}{v_3} + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3}$$

となる。したがって走時 T_3 は

$$\begin{aligned} T_3 &= T' + 2 \frac{\overline{EE'}}{v_1} \\ &= \frac{x'}{v_3} + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3} + \frac{2H_1}{v_1 \cos i} \end{aligned}$$

となる。図2に示したいくつかの2点間の距離は下の式で表される。

$$\overline{AE'} = H_1 \tan i, \quad \overline{EE'} = \frac{H_1}{\cos i}, \quad x' = x - 2\overline{AE'} = x - 2H_1 \tan i$$

ここで E' 点および B 点における屈折にスネルの法則を適用すると以下の式が成り立つ。

$$\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin j}{v_2}, \quad \frac{\sin j}{v_2} = \frac{\sin \pi/2}{v_3} = \frac{1}{v_3}$$

$$\sin i = \frac{v_1}{v_2} \sin j = \frac{v_1}{v_2} \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_1}{v_3}$$

$$\therefore \sin i = v_1/v_3, \quad \cos i = \sqrt{1 - (v_1/v_3)^2}$$

これらを走時 T_3 の式に代入すると,

$$T_3 = \frac{x'}{v_3} + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3} + \frac{2H_1}{v_1 \cos i}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{v_3} (x - 2H_1 \tan i) + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3} + \frac{2H_1}{v_1 \cos i} \\
&= \frac{1}{v_3} \left(x - 2H_1 \frac{v_1}{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}} \right) + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3} + \frac{2H_1}{v_1 \sqrt{1 - (v_1/v_3)^2}} \\
&= \frac{x}{v_3} + 2H_1 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_1 v_3} + 2H_2 \frac{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 v_3} \\
&= \frac{x}{v_3} + 2 \sum_{i=1}^2 H_i \frac{\sqrt{v_3^2 - v_i^2}}{v_i v_3}
\end{aligned}$$

なお一般の水平 n 層構造では第 n 層と第 $n+1$ 層の境界を臨界屈折し観測点に到着する屈折波の走時 T は,

$$T = \frac{x}{v_{n+1}} + 2 \sum_{i=1}^n H_i \frac{\sqrt{v_{n+1}^2 - v_i^2}}{v_i v_{n+1}}$$

となる。

3 傾斜 2 層構造

基盤が傾斜した 2 層構造の場合を考える。図 3 に示すように、基盤の層が ω だけ、震源から徐々に浅くなるように傾いているとする。震源を E 、観測点を S とし、 E から基盤までの距離を H_E 、 S から基盤までの距離を H_S とする。基盤で臨界屈折し観測点 S に到着する屈折波の波線を延長し、 E を通り基盤に水平な面と交わった点を S' 、 S から基盤に立てた垂線が交わる点を A とし、 $\overline{ES} = x$ 、 $\overline{ES'} = x'$ とすると、いくつかの 2 点間の距離は下の式で表される。

$$\overline{EA} = x \cos \omega, \overline{AS} = x \sin \omega, \overline{AS'} = \overline{AS} \tan i, \overline{SS'} = \frac{\overline{AS'}}{\sin i} = \frac{x \sin \omega}{\cos i},$$

$$x' = \overline{EA} + \overline{AS'} = x \cos \omega + x \sin \omega \tan i$$

直接波の走時 T_1 は,

$$T_1 = \frac{x}{v_1}$$

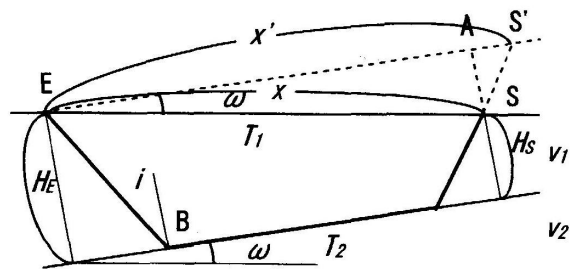


図 3：傾斜 2 層構造のモデル

となる。今度の場合も反射波に関しては考慮する必要はない。次に屈折波の走時 T_2 の式を求めるのであるが、震源を E、観測点を S' と見なした場合には、水平 2 層構造の場合の屈折波の式が適用できることが分かる。そこで $\overline{SS'}$ を伝播する時間を差し引けば、観測点を S とした場合の走時 T_2 となる。これらのことから以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{x'}{v_2} + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} - \frac{\overline{SS'}}{v_1} \\ &= \frac{x \cos \omega + x \sin \omega \tan i}{v_2} + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} - \frac{x \sin \omega}{v_1 \cos i} \end{aligned}$$

B 点における屈折にスネルの法則を適用すると以下の式が成り立つ。

$$\sin i = v_1/v_2, \quad \cos i = \sqrt{1 - (v_1/v_2)^2}$$

これらを T_2 の式に代入し変形すると、

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{(x \cos \omega + x \sin \omega \tan i) \sin i}{v_1} + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} - \frac{x \sin \omega}{v_1 \cos i} \\ &= \frac{x}{v_1} \left(\cos \omega \sin i + \sin \omega \frac{\sin^2 i}{\cos i} - \frac{\sin \omega}{\cos i} \right) + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \\ &= \frac{x}{v_1} (\cos \omega \sin i - \sin \omega \cos i) + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \\ &= \frac{\sin(i - \omega)}{v_1} x + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \end{aligned}$$

となる。次に S を震源とし E を観測点とする走時 T_2' を求めると、同様に、

$$T_2' = \frac{\sin(i + \omega)}{v_1} x + 2H_S \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2}$$

が得られる。

Ⅲ. 観測と解析結果

まず振動源について考える。人工的に地震波を発生させ震源とするのであるが、陸上での測定では大規模な構造を調査対象とする場合、ダイナマイトの爆破が用いられる。まれに核実験などが用いられることもある。一方人口密集地では火薬を用いた爆発を震源として用いることはできないので、振動車による振動がよく用いられる。さらに小規模な実験では、かけやと呼

ばれる大きな木槌で地面をたたき振動を発生させた。今回はかけやによる振動を振動源とし、そこから直線上に 1m おきに地震計を 20 台以上設置し、傾斜 2 層構造を仮定した場合の様々なパラメータを求めた。地震計の設置状態を示す写真を図 4 として示す。



図 4：地震計の設置状況

今回報告するのは 2 ケ所の実験結果である。いずれも傾斜 2 層構造を仮定して観測および解析を行った。1 ケ所目は、京都大学総合人間学部キャンパス内の空き地である。選んだ理由は、過去にすでに同様に測定が行われており、基盤がほぼ水平ないし西に少し傾いていることが分かっている（加藤，2002，私信）からで、今回の実験が正しく行われているかどうかを検証できるからである。2 ケ所目は宇治京大グラウンドの黄檗断層付近である。黄檗断層は東上がりの断層で、基盤は西側に傾斜していると見られているため、今回のような小規模な測定でそのことが確かめられるかどうかを調べることは興味深い。それでは具体的に実験結果を述べる。

1 京都大学総合人間学部キャンパス内の E 号館南テニスコート前

2002 年 12 月、京都大学総合人間学部キャンパス内の E 号館南テニスコート前の空き地で測定を行った。この地点は、地表面は水平で、基盤はほぼ水平ないしは西に少し傾いていることが知られている。まず東を震源とし、測線を西に伸ばし、震源から 1m おきに地震計を並べ記録をとり、次に西を震源とし測線を東に伸ばした測線でも記録をとり、傾斜 2 層構造を仮定して解析した。こうすることにより、東西方向の基盤の傾斜角が求められることになるからである。

(1) まず東を震源とした場合の P 波の記録を図 5 に示す。縦軸は震源距離、横軸は基準となる時刻からの経過時間である。ただし基準となる時刻は震源時ではない。実際の走時は伝播するのにかかった時間のことであるが、ここではこの経過時間を便宜上走時と呼ぶことにする。ここでいう走時は実際の走時にある定数を加えたものになるが後の解析には影響しない。図 5 から P 波の到着時刻を読み取り、震源（震央）距離と走時の関係を図にした（図 6）。震源距離 3m 以内では、震源でのかけやによる作業の際のかく乱で P 波の形が不鮮明と

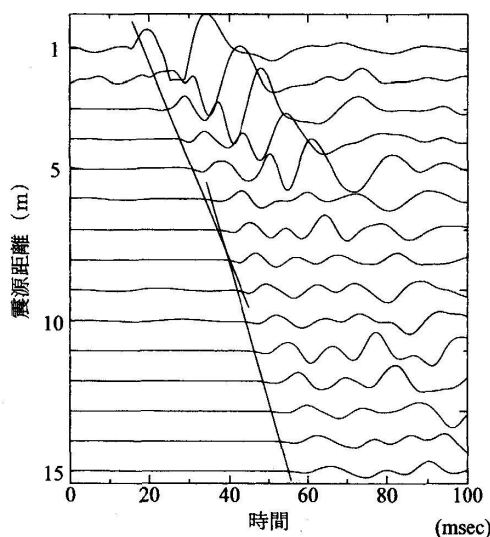


図 5：観測地点 1 での P 波の記録。東を震源とし、測線を西に伸ばしたもの。

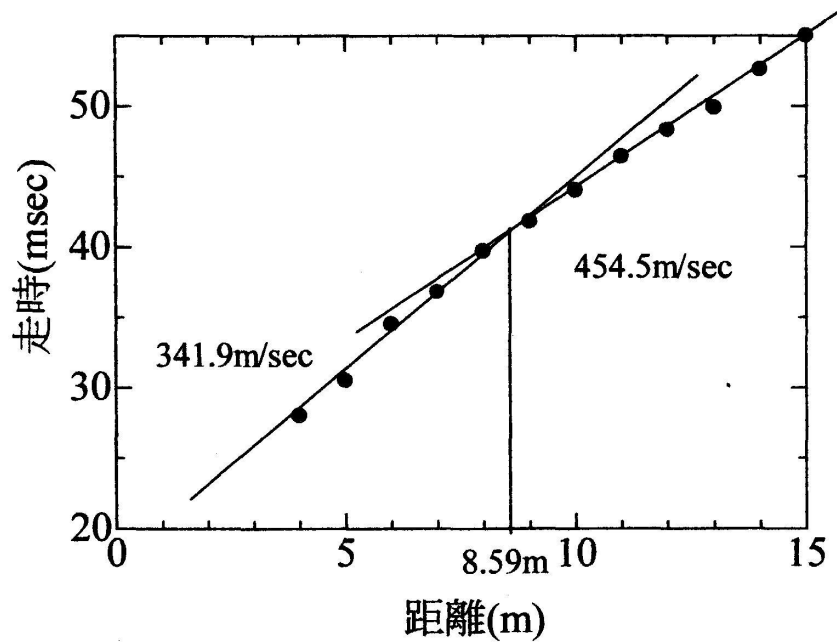


図6：観測地点1で、東を震源とし、測線を西に伸ばした場合の、震源距離とP波が到着した時刻の基準時刻からの経過時間の関係。2本の直線はそれぞれ直接波、屈折波に対するものである。

なり到着時刻が分からなくなっているのでここでは用いていない。図6に2本の直線を当てはめ、それぞれ直接波、屈折波の走時曲線に対応させた。直接波の走時 T_1 および屈折波の走時 T_2 はそれぞれ、

$$T_1 = \frac{x}{v_1} + \alpha$$

$$T_2 = \frac{\sin(i + \omega)}{v_1} x + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

である。直線を当てはめたときの傾き、すなわち、 x の係数から、

$$v_1 = 341.9 \text{ m/sec}, \quad \frac{v_1}{\sin(i + \omega)} = 454.5 \text{ m/sec}, \quad \sin(i + \omega) = \frac{341.9}{454.5} = 0.7523$$

である。そこでこれらから、 $i + \omega = 48.8^\circ$ が求まる。

- (2) 次に西を震源とした場合のP波の記録を図7に示す。図7から震源（震央）距離と走時の関係を図にしたものが図8である。先ほどと同様震源距離3m以内では、震源でのかけやによる殴打の際のかく乱でP波が分からなくなっているため解析には用いない。直接波の走時 T_1 および屈折波の走時 T_2 はそれぞれ、

$$T_1 = \frac{x}{v_1} + \alpha$$

$$T_2 = \frac{\sin(i - \omega)}{v_1} x + 2H_s \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

となる。傾斜2層構造を仮定しているため、先ほどとは式の形が少し異なる。

直線を当てはめたときの傾き、すなわち、 x の係数から、

$$v_1 = 370.4 \text{ m/sec}, \quad \frac{v_1}{\sin(i - \omega)} = 541.9 \text{ m/sec},$$

$$\sin(i - \omega) = \frac{370.4}{541.9} = 0.6835$$

である。そこでこれらから、 $i - \omega = 43.1^\circ$ が求まる。

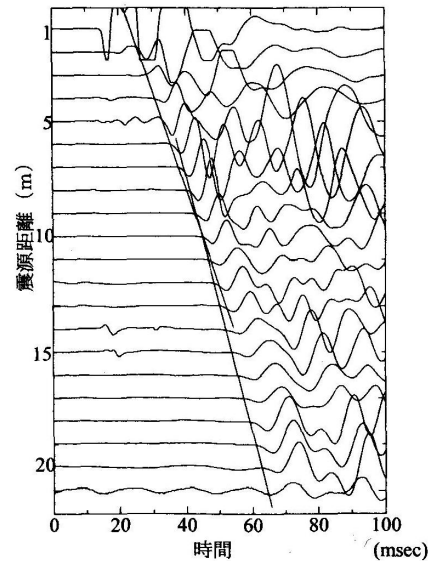


図7：観測地点1でのP波の記録。西を震源とし、測線を東に伸ばした。

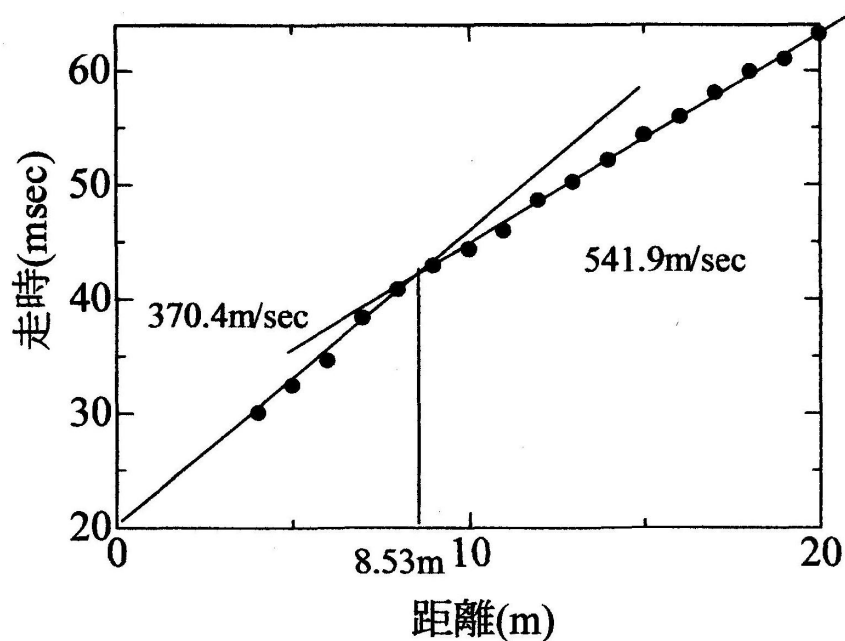


図8：観測地点1で、西を震源とし、測線を東に伸ばした場合の、震源距離とP波が到着した時刻の基準時刻からの経過時間の関係。2本の直線はそれぞれ直接波、屈折波に対するものである。

(3) 結果

それぞれの測定から, $i - \omega = 48.8^\circ$, $i - \omega = 43.1^\circ$ という結果が得られた。この式を解くと, $i = 46.0^\circ$, $\omega = 2.9^\circ$ となる。これは西下がり 2.9° を示している。この結果は, 従来から得られているほとんど水平または少し西下がりというものと調和的であることを意味しているだろう。よって今回の観測および解析結果は, 正しいと見なすことができる。

次に v_1 , v_2 および震源 E から基盤までの距離 H_E , 震源 S から基盤までの距離 H_S を求めよう。 v_1 は 2 回の測定の平均から, また v_2 はスネルの法則から以下のように導かれる。

$$v_1 = (341.9 + 370.4) / 2 = 356.2 \text{ m/sec}$$

$$v_2 = v_1 / \sin i = (341.9 + 370.4) / 2 \cdot \sin 46.0^\circ = 495.1 \text{ m/sec}$$

さらに図 6 から, T_1 と T_2 が等しいとき, $x = 8.59 \text{ m}$ であることを考えると,

$$\frac{x}{v_1} + \alpha = \frac{\sin(i + \omega)}{v_1} x + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

$$H_E = \left\{ -\sin(i + \omega) \right\} \frac{v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} x$$

の式から H_E が求まる。さらに図 8 から, T_1 と T_2 が等しいとき, $x = 8.53 \text{ m}$ であることを考えると,

$$\frac{x}{v_1} + \alpha = \frac{\sin(i - \omega)}{v_1} x + 2H_S \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

$$H_S = \left\{ -\sin(i - \omega) \right\} \frac{v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} x$$

の式から H_S が求まる。以上から, $H_E = 1.70 \text{ m}$, $H_S = 1.85 \text{ m}$ である。

2 宇治京大グラウンドの黄礫断層付近

(1) まず東を震源とした場合の P 波の記録を図 9 に示す。図 9 から震源 (震央) 距離と走時の関係を図にすると, 図 10 のようになる。

直接波の走時 T_1 および屈折波の走時 T_2 はそれぞれ,

$$T_1 = \frac{x}{v_1} + \alpha$$

$$T_2 = \frac{\sin(i + \omega)}{v_1} x + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

である。直線を当てはめたときの傾き, すなわち, x の係数から,

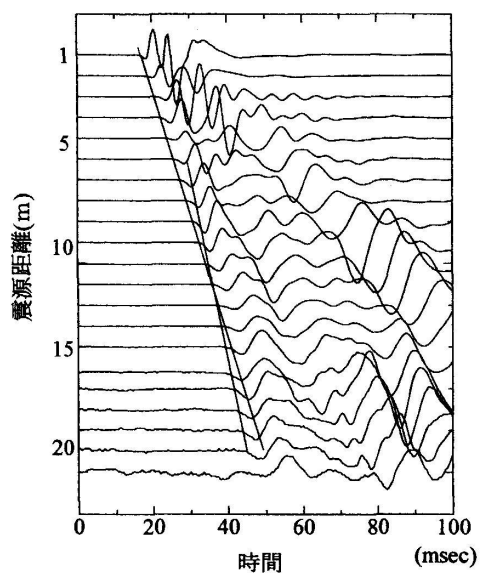


図9：観測地点2でのP波の記録。東を震源とし、測線を西に伸ばしたものの。

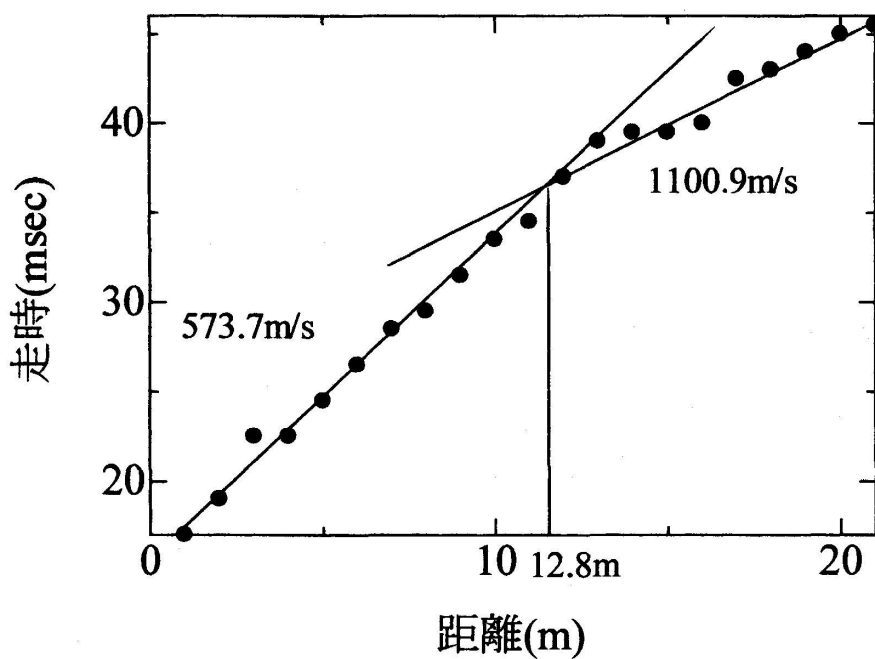


図10：観測地点2で、東を震源とし、測線を西に伸ばした場合の、震源距離とP波が到着した時刻の基準時刻からの経過時間の関係。2本の直線はそれぞれ直接波、屈折波に対するものである。

$$v_1 = 573.7 \text{ m/sec} , \frac{v_1}{\sin(i + \omega)} = 1100.9 \text{ m/sec} , \sin(i + \omega) = \frac{573.7}{1100.9} = 0.5211$$

である。そこでこれから、 $i + \omega = 31.4^\circ$ が求まる。

(2) 次に西を震源とした場合の P 波の記録を図 11 に示す。図 11 から震源（震央）距離と走時の関係を図にしたものが図 12 である。直接波の走時 T_1 および屈折波の走時 T_2 はそれぞれ、

$$T_1 = \frac{x}{v_1} + \alpha$$

$$T_2 = \frac{\sin(i - \omega)}{v_1} x + 2H_E \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} + \alpha$$

となる。傾斜 2 層構造を仮定しているため、先ほどとは式の形は異なる。

直線を当てはめたときの傾き、すなわち、 x の係数から、

$$v_1 = 556.9 \text{ m/sec} , \frac{v_1}{\sin(i - \omega)} = 1458.3 \text{ m/sec} , \sin(i - \omega) = \frac{556.9}{1458.3} = 0.3819$$

である。そこでこれから、 $i - \omega = 22.5^\circ$ が求まる。

(3) 結果

それぞれの測定から $i + \omega = 31.4^\circ$ 、 $i - \omega = 22.5^\circ$ という結果が得られた。この式を解くと、 $i = 27.0^\circ$ 、 $\omega = 4.4^\circ$ となる。これは西下がり 4.4° を示している。この結果は、基盤は西側に傾斜していると見られていることと調和的である。

次に v_1 、 v_2 、 H_E 、 H_S を求めよう。先ほどと同様に、 v_1 は 2 回の測定の平均から、また v_2 はスネルの法則から以下のように導かれる。

$$v_1 = (573.7 + 556.9) / 2 = 565.3 \text{ m/sec}$$

$$v_2 = v_1 / \sin i = (573.7 + 556.9) / 2 \cdot$$

$$\sin 27.0^\circ = 1245 \text{ m/sec}$$

さらに図 10 から、 T_1 と T_2 が等しいとき、 $x = 12.8 \text{ m}$ であることを考えると、

$$H_E = \left\{ 1 - \sin(i + \omega) \right\} \frac{v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} x$$

の式から H_E が求まる。さらに図 8 から、 T_1 と T_2 が等しいとき、 $x = 14.92 \text{ m}$ であることを考えると、

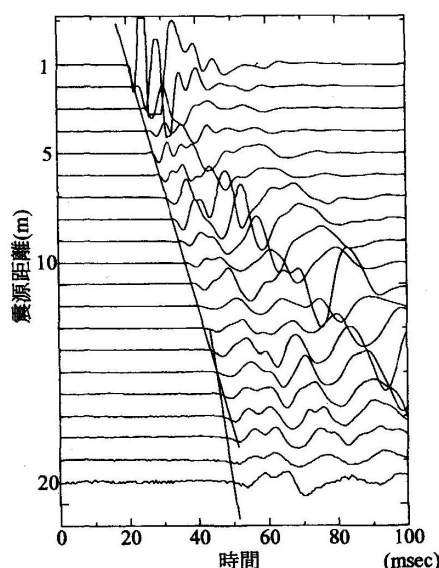


図 11：観測地点 2 での P 波の記録。西を震源とし、測線を東に伸ばした。

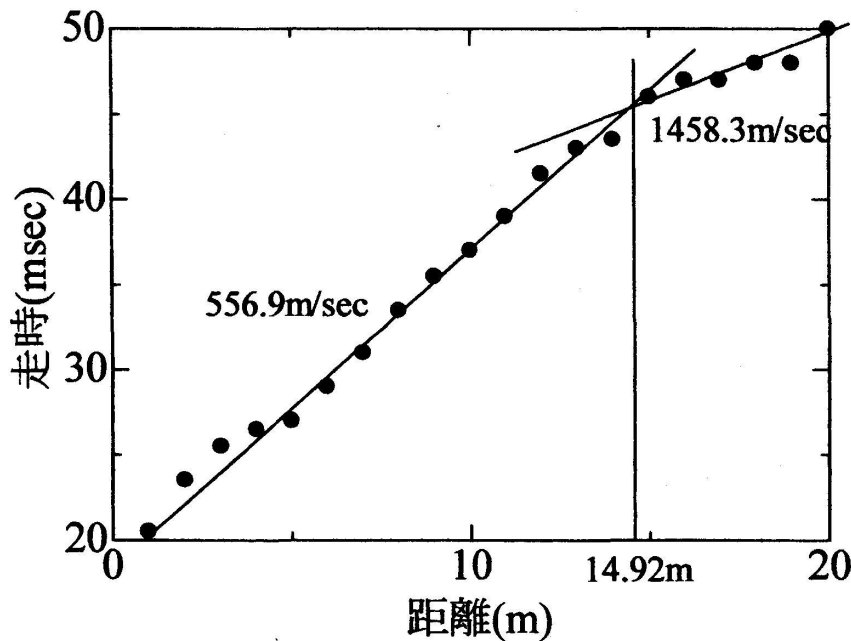


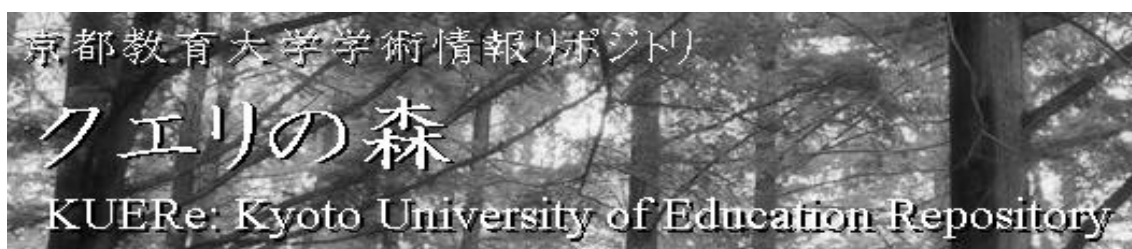
図 12：観測地点 2 で、西を震源とし、測線を東に伸ばした場合の、震源距離と P 波が到着した時刻の基準時刻からの経過時間の関係。2 本の直線はそれぞれ直接波、屈折波に対するものである。

$$H_s = \left\{ 1 - \sin(i - \omega) \right\} \frac{v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} x$$

の式から H_s が求まる。以上から、 $H_e = 3.59\text{m}$ 、 $H_s = 4.99\text{m}$ である。

IV. 考察

今回簡単な測定を 2 ヶ所で行ったが、いずれもこれまでに推定されている結果と調和的となった。特に黄檗断層付近では、断層が原因と思われる基盤（下の層をこう呼ぶことにする）の傾斜をとられることができた。観測自体は手軽にできるので、別の方向に伸ばした測線での測定を行うことによって、より詳しい地下の状態が明らかになると思われる。また測定に用いたフィルターや増幅回路などは自作のものを利用し、収録もノート型のパーソナルコンピュータと A/D 変換ユニットを利用したため、授業の一環として行うには手ごろな題材でもある。今後さらに測定を続け、より詳細な結果を報告したいと考えている。



この文献は、国立情報学研究所において電子化されたものを、本学でテキスト加工したものです。

