

孔中固定式受震器による S 波の速度分布の測定

狐 崎 長 琅 ・ 後 藤 典 俊

VELOCITY MEASUREMENT OF SHEAR WAVE BY USING CLAMPED BOREHOLE GEOPHONE

By Chōrō KITSUNEZAKI and Noritoshi GOTŌ

Synopsis

The shear wave was observed by the clamped borehole geophone specially designed by one of the authors, C. Kitsunezaki, of which details have been reported in the same author's earlier paper.

Striking against wooden plate fixed on the ground surface near the top of the borehole by a hammer served as the wave source. By the above arrangements, the shear wave propagating in vertical direction was observed at every position where the geophone was clamped.

The wave feature on the records obtained by this method is very beautiful and its characteristics is rational in the following two factors; particle motion, and relation of the response between the usual velocity pick-up and the pressure pick-up.

The shear wave velocity shows distinct character in the relation to the kind of the materials, namely, sand and clay. The velocity is higher in sand than in clay, and the velocity in the respective media increases with the increase in depth.

序

地震工学的な見地においても、また一般の土木地質的（あるいは土質工学的）な見地においても、地表近くの S 波の速度や減衰を知ることがきわめて重要なことである。S 波の研究に近來関心が集中しつつあるのは、その物理的な性質からして当然なことである。

土木地質的な見地における筆者等のさし当てる研究目標は次の通りである。

- (1) 地中での速度と減衰定数の分布を正しく測定する。
- (2) さらに進んで、土質の状態とこれらを対比させ、速度や減衰に作用する物理的な要素を探り出す。

このような研究は正しい大量の資料の集積を必要とするものである。そのためにはまず何よりも確かな測定法の確立を急がなければならない。本論文では、この観点に重点を置いて試みられた測定の実例について述べる。内容的にはここで述べる実験は、(1)(2)の項の両者を攻究する目的の一環としてなされたものであるが、本論文では特にそのうちの一部、速度分布の測定に関する部分についてのみ記述する。あとの部分については再び他の機会に報告する。

いままでもこのような研究がなかったわけではなく、地表での屈折法によって、P 波、S 波の速度分布や、時には「みかけ上の」減衰を求めて、これらを地層の性質と対比させるようなことは、やはり行われて来たのである。しかし屈折法では、速度分布を求めるときですら、事態を単純化するための仮定をおいて、その当否とはほとんど無関係に処理しているのである。したがってたとえば、P 波、S 波による境界面が解折上の理由でずれたようなとき、とんでもない V_P/V_S をはじき出すような危険はつねにつきまとう。

低速度層や異方性の問題にいたっては、特に S 波でその例が多いと認められるにもかかわらず、すべて無

視されざるを得ない。減衰になると、もはや層構造的な要因による、みかけ上のものと、物理的な意味をもつ、媒質そのものの値との判別は、他に事態の単純化を妥当とする、きわめて幸運な傍証がない限り、ほとんど不可能である。

ここにおいて、使いものになる正しい測定値をうるためには、何よりも地中のその場で測定しなければならないことになる。

かかる見地のもとに、筆者等の一人、狐崎は先に、孔中固定式の受震器を開発した。今回の実験でも、前に発表したものをほとんどそのまま用いた。少くとも、特性上の基本的な点については何等変更は施されていない。機構上の具体的な細部の改良点については後で改めて説明する。

実験の方法もまた、おおむね、1966年夏の新潟県水原町で実験したやり方²⁾に同じである。要するに地表の孔口近くに震源をおき、ボーリング孔内に固定した受震器で、そこからのS波をとらえようというものである。その具体的な様子についても、本文で改めて述べる。

実験場所は北海道札幌市西部の手稲の原野である。本実験は1968年8月末、地震探鉱実験グループの協同実験の一環として行われたものである³⁾。

1. 方 法

実験要領を Fig. 1 に示す。BH 1, BH 2 と記してあるのは、ボーリング孔である。これら双方に孔中固定式の受震器を設置した。重要な受震点はこちら2点であるが、他に、地表のMの地点に普通の受震器(NEC VP 201) 3ヶを相互に直角に向くよう、いわゆる3成分に組合せてうめた。また震源板での発震時を知るために、M点におけると同型の受震器を3ヶ震源板の直下においた。これがSM 1, SM 2, SM 3 である。

ここでS波を出すために用いた方法は、ボーリング孔の孔口近くにおいた震源板を、木製のハンマーでたたく、例のいわゆる板たたき法である。ここでA, Bと記してあるのはたたき方の指定であって、それぞれに示す矢印の方向にたたいたことを意味する。震源板は、表土(泥炭)の表面を0.3m程掘り下げた上におかれた。この上にクッションの意味で、布団や菰を3cm程の厚さに敷き、これに板を敷いてさらにこの上に、キャタピラつきの作井車をのせた。おそらく全圧力3ton位はかかっているよう。

さて、BH 2, M, SM 1, SM 2, SM 3の受震器は終始固定されたままである。BH 1の孔中受震器の設置点を深さ60mから9mにわたって3mきざみの深さで移動し、各固定地点毎に、板たたき震源からの弾性波を記録した。BH 2の固定受震点は震源から出る波のくり返しの様子を監視するためのものである。このときの弾性波振動は後で改めて、詳しくのべるようにほとんど完全なS波である。

孔中受震器で信頼できる、よい記録をとるためには、今迄の経験によると、操作用のロッドの如きかたい棒から、器体はきりはなされる必要がある。水原その他での実験では、ある程度のクッション機構を介しつつも、ロッドに連結して、記録をとったことがある。このようなやり方でも、水平動にはあまり乱れは現れないが、上下動の乱れは大きくなりがちである。そこで今回は、各観測毎に孔中受震器の方位調整用のロッドをはずし、器体よりも3m程、引き上げて、観測するようにした。したがって、観測状態で孔中受震器につながっているものは、電気的出力を伝達するためのケーブルと水圧伝送用のゴムホース、それに引き上げのための鋼のロープ(3mmφ)である。いずれも自由にたわむものであるから、受震器は、きわめて自由な状態で、孔壁に固定されていることになる。

方位の調整には今回も又、水原での実験のときと同様、ロッドを用いた。これを地表から操作して、受震器の器体の向きを動かすのである。しかし、観測の都度毎に、はずすとなると、いささか工夫が必要である。この問題は次のようにして解決された。スパナをはめこむときは、受震器から出ている、ケーブル、ゴムホース、鋼ロープといったものを引張ってピンと張り、これをひとまとめにしてレールとする。このレールにそうて動かせるようにスパナの構造を工夫してあるので、上からロッドを押し下げるとスパナは、正し

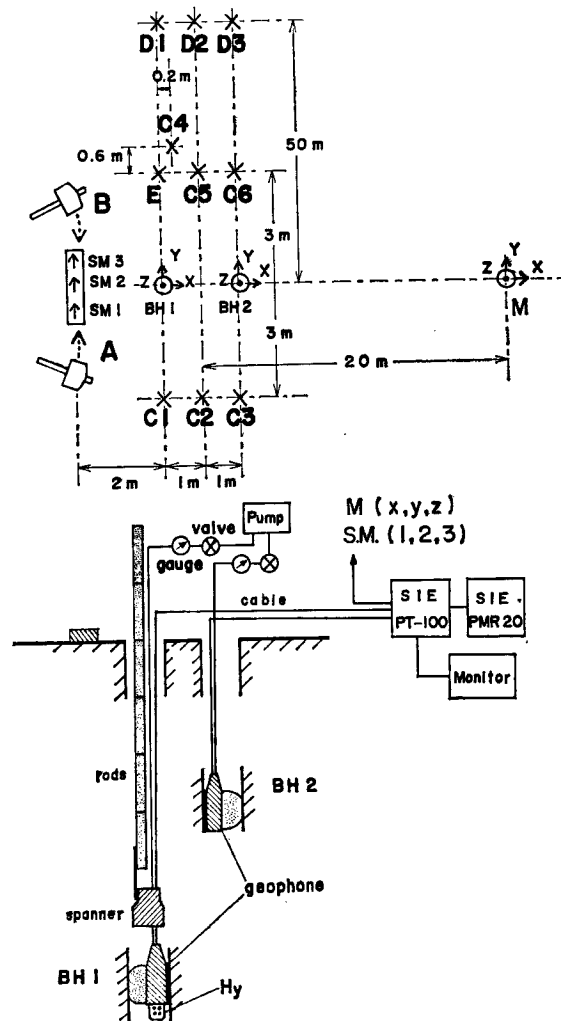


Fig. 1 The site and the system of the experiment. Depth (BH 2): 26.5 m.

く、受震器の器体頭部にとりつけたアダプターに自動的にはまりこむ。このときのはまり方は 90° きざみの4通りである。そこで、このままでは、4通りのうちのどれにはまりこむかは、わからない。しかし、実際の板たたき震源によるS波の初動の振動方向は、きれいに、たたいた方向に向くことが確かめられたので、これから逆に、どちらに地中の受震器が向いていたかは容易に確められる。 90° きざみの自由度をもつということは、ロッドの方位を地表で正しく調整したとき、水平動2成分のうち、いずれかの成分が、規定の方向に向くということの意味する。(しかし例えば、規定の方向を東としても、東西方向に向くということであって、東を向くか西を向くかは、わからない。)このようなわけで、地中での正しい方位を見つけ出すことには、何等問題がない。

さて、板たたき震源によるS波が正しく、たたいた方向に振動することを確めるために次のような配慮を施した。即ちたたき方向(A方向即ちY方向)に孔口より50mはなれた地表の点に、発破点D1~3を設けた。その深さは約1mである。地層に特別の異常がない限り、直接P波はY方向に振動する。これで

もってS波の振動方向を検定しようというのである。

又、地表の孔口近くに発破点 C1~6 を設けた。この深さも又、1 m 程である。これは、P波速度分布の測定のためである。この実験では、P波の測定に重点を置いていなかった。これはこの協同実験では、他のグループ員の分担になっていたからである。このため測定はさきの板たたき震源によるS波よりも、さらにあらい、とびとびの点でなされたにとどまる。大体、その間隔は 6 m である。P波速度はこの場所ではS波の10倍程も高く、約 1.5 km/s である。これに対しては、この際の紙送り速度 30 cm/s はあまりにもおそく、このため、決定的に精度が低い。

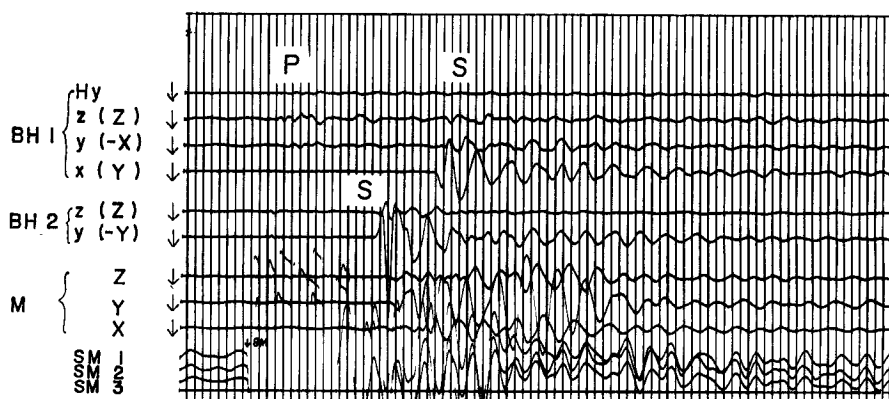
この実験における機器の系統は Fig. 1 に示す通りである。孔中固定式受震器は、地表のポンプから供給される圧力水 (1~2 気圧) により、器体にまきつけられたゴムチューブが押し広げられることによって、孔壁に圧着されるようになっている。一度圧着したあと、バルブを閉じておくと、実験時間中のすくなくとも 5 時間位は、ゆるまなかった (BH 2 について)。この監視のため、バルブのそばには圧力計がついている。

各受震器からの出力は、SIE 製 PT-100 の増巾器入力端に供給された。最終出力は、SIE 製 PMR-20 型テープレコーダーに磁気記録としておさめられた。又この際モニター記録として、電磁オシログラフによる記録もとった。この論文で解析の対象としたのは、このモニター記録の方である。テープ記録の方は周波数帯域も広いのでこの方は、後の減衰等の議論のため用いられる予定である。孔中受震器関係以外の記録器はすべて石油開発公団のものである。

2. 実験 結 果

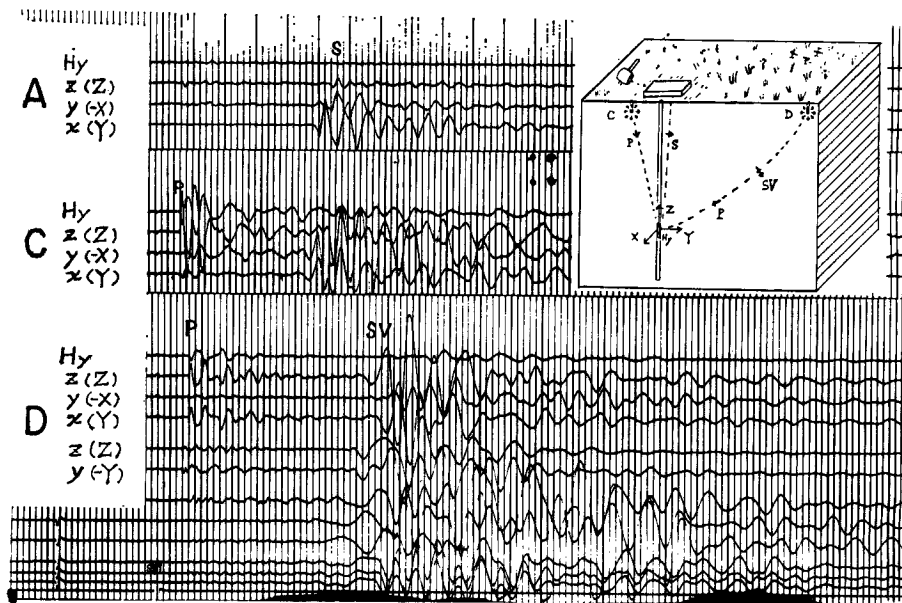
得られた記録の例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) は板たたきによる記録である。これは記録全体の様子を示したものである。この記録でS波は、(1) たたいた方向であるY方向に卓越すること、(2) Hy つまり hydrophone には、これに相当する phase は全く認められないこと等がまず注目される。これらはS波であることの認定の証拠になりうることである。

さて、Fig. 2 (b) は他の深さの同一地点でとった記録である。Aとあるのは source A つまり板たたきによる記録であって、その中の BH 1 中の孔中受震器の動きだけを示したものである。その様子はほとんど (a) の場合と同じである。Cとあるのは受震器のほぼ直上のC点での発破による記録、そしてDはD点での発破によるものである。この Fig. 2 (b) の各記録について、前の Fig. 2 (a) において注目した (1)



(a) Whole feature of the record from the S wave source (A). Depth (BH 1): 45 m.

Fig. 2



(b) Comparison of the waves from the different sources, A, C and D. Depth (BH 1): 51m.

Fig. 2 Examples of the records obtained.

(2) の二点をさらにくわしく検討してみよう。

今の場合地層の成層の仕方は十分水平であると考えられるから、D点発破によるP波の水平面内の振動方向と、板たたき(Y方向にたたく)によるS波の振動方向とは一致するはずである。このAではY方向に

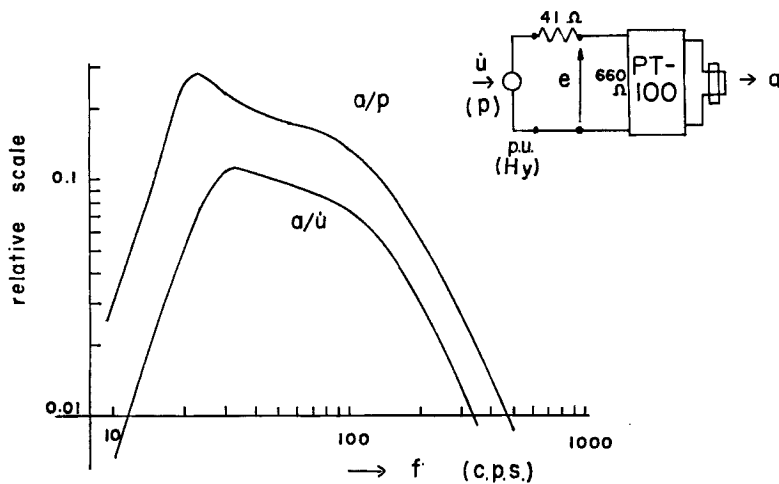


Fig. 3 Frequency characteristics of the velocity pick-up (PU) and the pressure pick-up (Hy). Relative relation between the two at the same amplifier gain is preserved in this figure.

a : trace amplitude on the record, $\dot{u}$: particle velocity of the ground (kine), p : pressure of the signal (bar).

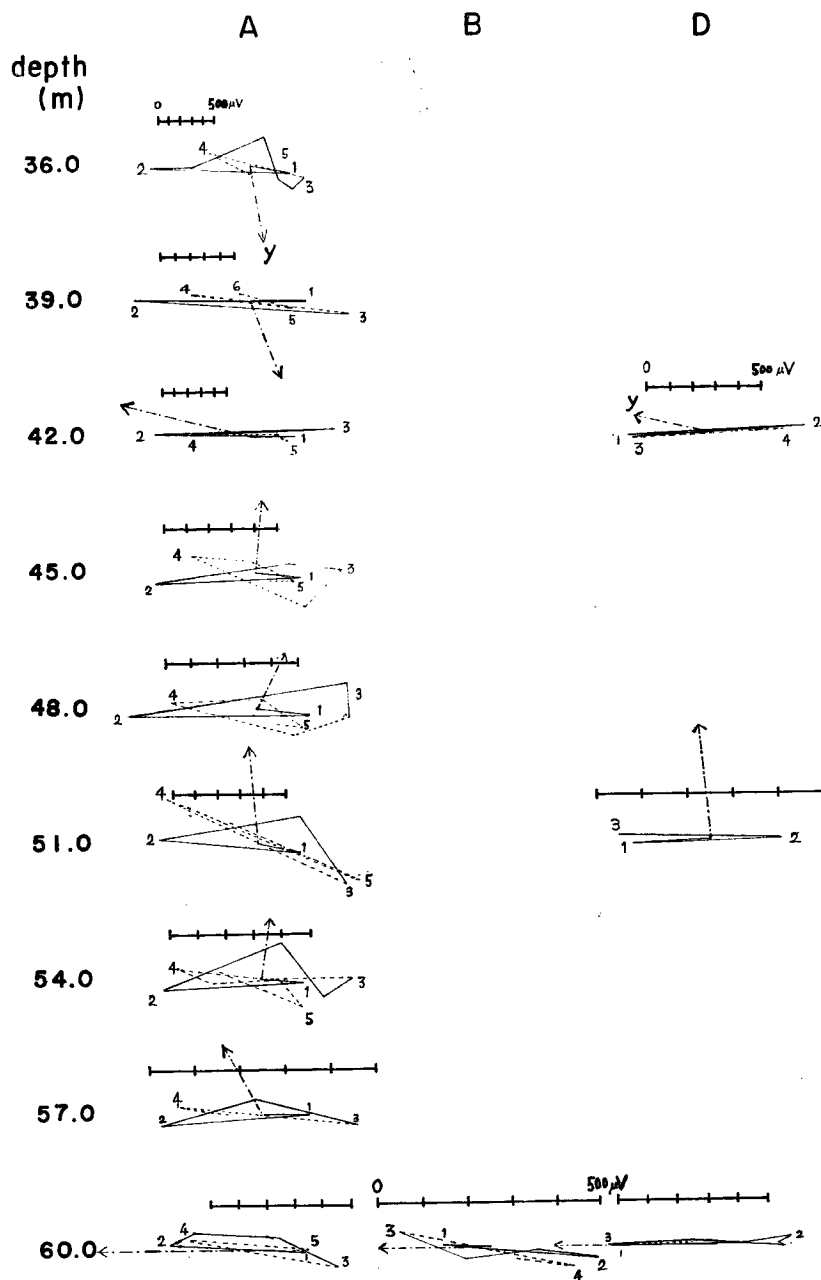
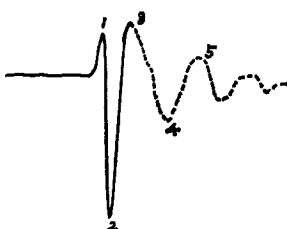


Fig. 4 (a)

Particle motion of the S wave plotted directly from the trace amplitude on the record. Output level of the geophone can be evaluated from the scale with each locus. This scale is decided from the gain of the system at 50 cps.

Fig. 4 (b) Illustration of phases of *S* wave plotted in Fig. 4(a).

S波は大きくゆれているが、 $-X$ 方向にも小さく出ている。 Z 方向にはほとんど出ていない。なお同一地点の各成分の trace 間の感度は10%程の誤差でそろっている。これらは、後のさらにくわしい解析のときには厳密に補正された。さて *D* を見よう。確かにP波は *Y* で大きくゆれている。 $-X$ にも幾分小さく出ている。 $-XY$, 相互の位相の関係は *A* のS波と *D* のP波において互いに等しい。つまり次のように結論される。*D* 点発破によるP波の振動方向を規準として考えると、S波は正しく震源力方向である *Y* 方向に振動している。しかし、受震器の *Y* 方向成分 (これを *y* とする。受震器自体の成分を *x, y, z* とする。) は *Y* 方向を向かずば $-X$ 方向を向いていた。*Y* 方向をほぼ向いていたのは *x* 成分である。つまり約 90° だけずれて設定されていたのである。しかし、完全に 90° だけずれていたわけでないので幾分 *y* ($-X$) 方向にも出力が現われることになった。

又 (2) の点については、*C* の *Z* 成分と *Hy*, *D* の *Z* および *Y* 成分と *Hy* との関係が参考になる。つまり入力地動にくらべて感度が低いというような理由でいつでも *Hy* には出力が出ないのではなく、P波なら確かに出力があらわれているのである。これはS波とした波を真のS波とする上での有力な証拠となる。これについては、後で改めてさらにくわしく述べることにする。

受震器の固着状態については、次のようなことも注目される。*C*, *D* で *Hy* と *PU* の波形は相互に反転しているものの、きわめてよく似ている。これは、既に筆者等の一人狐崎が他の論文で述べたごとく、受震器の固着状態の正常さを物語るものである。しかしこれもくわしくみると完全に両者の波形が相似なわけではない。このことは Fig. 3 にみるごとく、*PU*, *Hy* の周波数特性が完全に同じではないためである。*Hy* の方が低い周波数での、のびはよい。くわしくは、*Hy*, *PU* の出力波形を周波数解析した上で、器械の特性の補正を加えて論すべきことである。この上でのつっこんだ議論については、別の機会にのべる予定である。

さて、受震器はいつも Fig. 2 の例のような向きを向いているとは限らない。スパナの入り方に 90° 毎の自由度があるからである。もっとも、実験の際には、常に同じ成分が同一規定方向に向くように実験手順に工夫をこらしたのであるが、実際には、これがくずれてしまっていたので、そうしなかったのと大して差のない結果になった。

ともかく、実際には、受震器は大体 90° きざみにいずれの向きに向くかわからない。しかも、調整には必ずある程度の誤差がある。ロッドの向きを地表で正しく調整したとしても、圧力水を注入して、ゴムをふくらす過程で、孔壁の凹凸に応じて、多少のずれが起きる。このようなわけで、正確に 90° の整数倍にずれするというわけにもいかない。しかし、*D* 点発破によるP波の振動と板たたきによるS波の振動の方向とは、Fig. 4 にみるごとく、相互に実によく合っている。

D 点発破はすべての深度の受震器位置について、なされたわけではない。Fig. 4 に記載されている点においてのみ行われた。これがなされたところでは、上に述べたことが実によく出ている。そこで他の地点の測定については逆にS波の振動する方向をもって、*Y* 方向とすることにした。なお、S波がきれいに規定の方向を向いているのは、Fig. 4 の実線部つまり第1より第3の peak までであってこれ以後はやや乱れる。この原因についてはよくわかっていない。

前述の如く Fig. 4 のうち *D* 点発破のないものの *Y* の方向は、実は、S波の振動方向をもって定められ

たものである。その際に実際に受震器の Y 成分が向いていた方向を逆に、これを規準として割出してみると、図に y と示した方向のごとくなる。 y の向きから実際の孔内の受震器の向きがどの程度の乱れ方をしているかがわかる。これをみると確かに、 y の向き方はほぼ 90° 毎である。そこで受震器の x, y 成分のうち、 Y 方向により多く向いている成分をならべてトレースしたものが **Fig. 5** である。もしその成分が $-Y$ 方向を向いているときは位相を反転させてトレースし、結果として、すべて $+Y$ 方向の近くを向くようにしてある。又、shot mark はすべて時間軸の 0 に合わせてある。一見して明らかなごとく、上から下方へ、きれいにS波が伝播している。これは直接波である。このあとにもいくつか、反射波の phase が認められる。

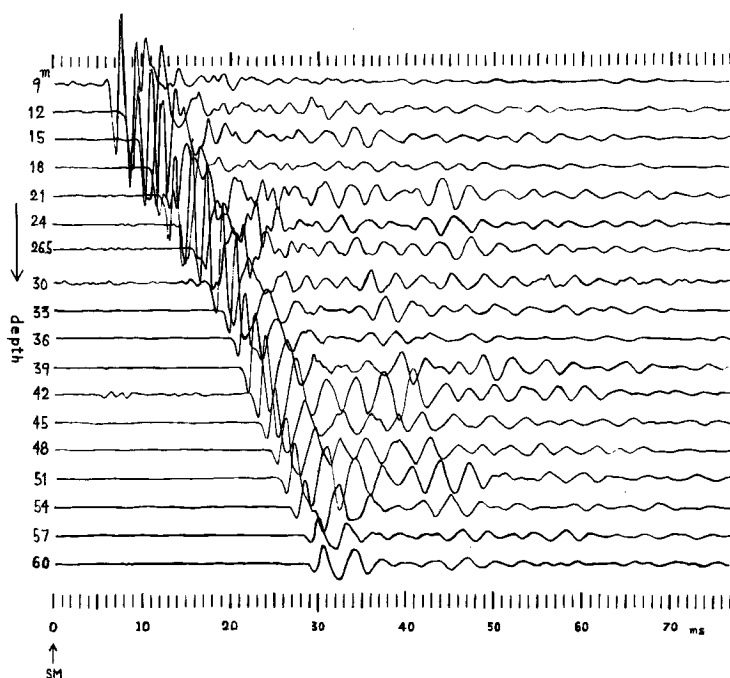


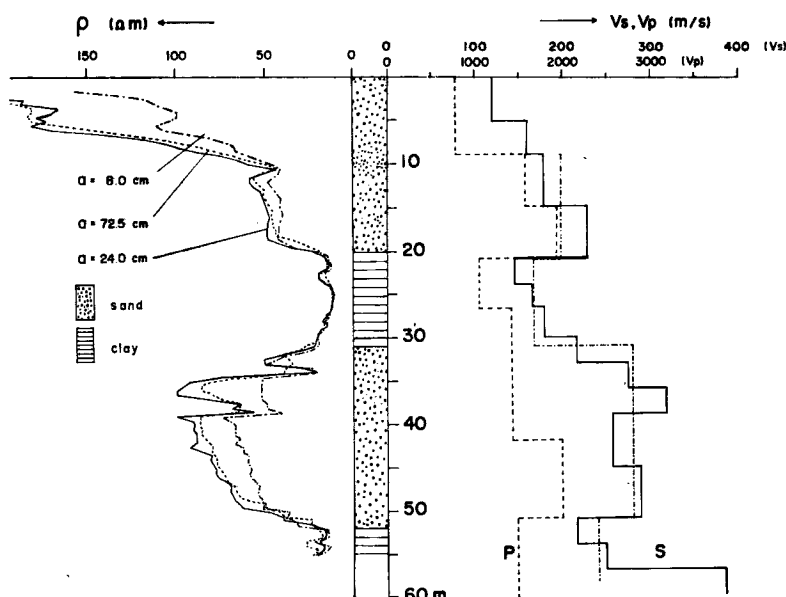
Fig. 5 Feature of the S wave propagation.

This is compiled by tracing the original individual records.

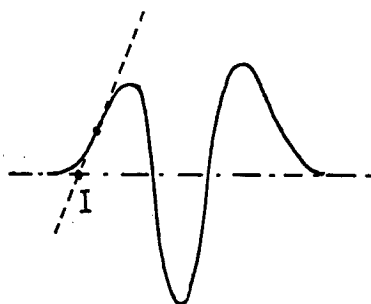
この記録の感度は下から上に向って低くなり、60 m 地点を規準に 60 ~ 39 m は 0 db, 36 ~ 21 m は -5 db, 18 ~ 12 m は -10 db, 9 m は -15 db となっている。

さて、各測定点についてS波の初動の走時をよみとり、これでもってその測点間の距離を除いたものを区間速度とよぶことにする。**Fig. 6** ではこのようにして求められたS波区間速度を実線で示す。破線は同様にして求められたP波区間速度である。42 ~ 26.5 m の区間は区間間隔が広いように思われるが、実際は 42 ~ 36 m, 36 ~ 26.5 m の2区間にわかれている。たまたま、速度が同一値を示したまでである。P波の他の部分については折線の間隔がそのまま測点間隔を意味する。S波については、間隔の広がっているようにみえるところもすべて、実際の値は 3 m の区間きざみではかられている。

このときの走時のよみとりには、幾分人工的な操作を施した。人によっては、幾分でもゆれ出したと認められるその最初の点をもって初動としている人もある。これらは一見合理的であるが、ゆれはじめというものは実は頼りないものでこまかな時間精度を気にしてみると、感度を上げるにつれ、どんどん早い方に初動



(a) Distribution of the S wave velocity, which is illustrated in comparison with that of P wave velocity and the result of specific resistivity logging.



(b) Definition of the "initial motion (I)" of the wave.

Fig. 6

走時をよみとりがちである。このため一般の営業的地震探査では、できるだけ大きくゆらして、立ち上がりの鋭い記録をとるのが良いことで、そうした記録こそ良い記録であると思われる。このため一般の屈折法地震探査では地震波が本来含んでいる有益な情報をひきだすことも、単に初動走時だけに限るわけで、あとはすべて見落してしまうのである。このような態度は営業的効率を上げるにはある程度益するが、地震波に対する物理的な攻究の努力をにぶらせ、地震探査の技術的内容に関する発展をさまたげている。かかる態度では、根本的に S 波の研究はできない。これは念のため付言したまでである。さて、筆者等はいわゆる「ゆれはじめ」とらわれることをやめ、第一の peak がえがく波形のはじめの変曲点の位置に接線をひき、この接線と 0 線とのきる点でもって初動と定義することにした(Fig. 6 (b))。これは Ricker が提唱した方法であって⁴⁾、筆者等はこれがさし当って、統一的に初動をよめて合理的であると思う。これは必ずしも例の Ricker 的粘弾性モデルが地層の実状によく合っているというわけではない。彼のごとく減衰定数

が周波数の2乗に比例する立場をとらず、Whiteのごとく¹⁾、1乗に比例するモデルがこの場合に妥当であるとみたとしても、初動部の立ち上がりを一義的に定義できるものでないということにはわかりはないからである。実際にはこのような地層の物理的な性質による因子の外に、器械が理想的に粒子速度や変位を描くのではなく、これが周波数特性をもつことによる影響もふくまれているのであり、初動のかかる定義の仕方に関する意味づけを複雑にしている。しかし接線方式で定めた初動が、通常の器械の特性の範囲内では、これによって乱される程度はごく小さいものと筆者等は考える。特に小区間で、ふり切れていない記録から、走時差をよみとって、速度を求めるときは、よみ方が統一的で安心できる。但し、noise levelが高いときは、0線のきめ方に問題があり、機械的な操作で初動をきめることは危険である。このときは、0線の定め方に多少の配慮を施さなければならない。

さて、このようにして求めた走時のよみとり誤差は1ms程である。従って $V_S=150\text{ m/s}$ の場合は区間 $4x=3\text{ m}$ より走時差 $dt=4x/V_S=20\text{ ms}$ であるから、逆に V_S の決定誤差は5%程である。 $V_S=300\text{ m/s}$ では10%程の誤差となる。一方 V_P についても、やはりよみとり誤差は1ms程であるから、 $V_P=2000\text{ m/s}$ 、 $4x=9\text{ m}$ の42~51m区間の例についてみると $dt=4.5\text{ ms}$ 、従って約20%の誤差を覚悟しなければならないことになる。

速度分布について測定したところは、これまでである。一方、ここでは電気比抵抗検層も行なわれた。場所はBH1より6.5mはなれた別の孔(BH3)である。距離が近いから、これはS波検層地点での測定とみてよい。この結果も又、Fig. 8にならべて比較してある。電気検層の方法は2極法である。図中にaと示したのはその電極間隔のことである。深度は電流電極を基準として測られている。普通は電流電極と電圧電極の midpoint で測るのであるが、ここではそうしていない。しかし、問題とする地層区分の厚さにくらべ、電極間隔は十分小さいので、いずれにしたところで、ほとんど違いは生じない。

さて、比抵抗 ρ と V_S の変化の傾向は、かなりこまかな浮き沈みまでよく合っている。もっとも、 V_S のきめ方は3m間隔でなされたのに対し、 ρ ははるかにこまかく測られているので、あまりこまかに対応させすぎると意味がなくなる。又、前述の誤差の問題もある。 V_S の一々の浮き沈みの程度は誤差の程度と同程度であるから、これを今のところあまり強調もできない。52m以深では比抵抗が低くなるが、ここでは V_S も又低下している。57m以深で V_S は再び高くなっているが ρ の方は55mまでしか測られていないので、これについては対応させえない。

全体としてみるとこのように、明らかに粘土層で V_S は低く、砂層で高い。しかし砂層でも粘土層でもそれぞれについては、深い程速度が高くなる。これも又地圧による圧密を示すものとして当然のことながら興味深い。このような、地層の大部分について、平均的な V_S を示すと、これは、一点鎖線のごとくなる。 V_P についても、ほぼ V_S と対応するような変化が認められ、これも又興味あるところであるが、なんとしても精度が低いので、特にとり上げることはできない。

3. hydrophone 出力の検討

既に2で、本論文においてS波とした波が、その振動方向に関し、確かにS波の性質をもつものであることをみた。ここでは更に別の見地から、これがS波であることを確かめてみよう。

液体をその内部に満たしているボーリング孔に、ある弾性波が入射したとする。この波の入射によって孔の断面積が変化する場合には、その波の入射にともなって、液体中に圧力変化(音圧)が発生する。White¹⁾は、この見地に立って、解析を進めた結果、P波の入射によっては常に音圧が発生することを確認めた。しかしS波については、そのS波が孔軸と直交する方向に振動する、いわゆるSH波の場合は如何なる方向から入射しても、音圧は発生し得ないが、SV波(孔軸をふくむ面内で振動)が入射するときは、入射角に依存した音圧の発生を見るのである。

SV波の場合でも、これが孔に直交する方向や、平行する方向に入射したときは音圧は発生しない。ここ

でP波とかS波とか言っているのは理論的には平面波であることを前提としている。しかしその波長に比べ、震源から十分はなれてしまえば一般の点震源のときでも小区間では近似的に平面波とみなしてさしつかえない。

hydrophone 出力をしらべることで、固体側媒質の体積変化の具合について調べ、音圧がないことをもって、体積変化を生じないという、S波のもっとも基本的な性質を立証したいところであるが、これは既述の如く、そっくりそのまま通用することではない。ある場合のSV波については確かに音圧が発生するのである。しかしSH波やある場合のSV波については音圧が発生しないので、これでもってS波の検証とすることができる。このことは既に筆者等の一人、狐崎の野外実験²⁾によって確かめられている。

ところで、現在の場合、もともと振動方向がSH的である上に、孔軸と殆ど平行に伝わる。したがって音圧は発生しないはずである。

このことは、Fig. 3 の記録をみても明らかなことで、S波に対しては、 x, y 成分の受震器は大きく反応しているのであるが、そこでは hydrophone は殆どゆれていない、一見これで検証になっているようであるが、これだけでは実験的な立証という上で意味をもたない。もともと、hydrophone 記録の感度が低かったのかもしれないのである。そこで、音圧が単に発生しないというのではなく、その生じなさの程度を量的に表現して、十分出ているかどうかを確かめなければならない。記録には常に識別可能な限界、つまり一種の noise level がある。出てはおるかもしれないが、少なくともこれ以下であるという形の量にしないと意味をもたない。しかしまだ、これだけでも十分とはいえない。それでもって十分出ているといえる為の判断の基準がなければならない。それに対する比較として十分小さいと言うべきである。

前者については、S波に相当する時刻での hydrophone の、何かの原因によるであろう、記録上のゆれの、peak to peak の振巾を読んだ。波形が複雑なときは大きい方を読んだ。これは一種の noise level である。実際に音圧が発生した場合、どうせ地動の大きさに比例するに違いないから、受震器についての、その対応する時刻でのS波の peak to peak の振巾をよみ、これらに、感度の補正をした上で音圧(p)と地動の粒子速度($\dot{u}$)の比という形で音圧レベルを表現した。

さて、これが十分小さいかを判断するための基準としては、P波をえらんだ。Fig. 2 から明らかな如く、P波では音圧が発生している。しかも hydrophone 波形は受震器波形とよく以ている。hydrophone 波形はほぼ音圧波形であり、受震器波形はほぼ地動の粒子速度波形と一致するとみてよいから、この両者の波形が対応するということは、理論^{1),2)}とよく調和している。そこで感度の補正をした上で、P波についても音圧(p)と地動粒子速度($\dot{u}$)の比をとることにする。P波におけるこの $p/\dot{u}$ は先のS波における、それと共に、Fig. 7 に示されている。

なお、ここで、P波については、C点とD点の発破によるもの双方についてプロットしている。よみとった振巾は全振巾で、最初の peak と第2の peak 内について、又第2 peak と第3の peak についてである。それぞれについて、 $p/\dot{u}$ を求めて両者を平均した。前者は平均値より約10%程度小さく後者は10%程度大きい。感度としては卓越周波数約 50 cps における値を用いた。D点発破のうち(×)としてプロットしたものは、水平成分と上下成分の波形に違いがあり、両者を合成して、 $\dot{u}$ とするのに問題があるが機械的に第1 peak と第2 peak 間の振巾をよみとって、これから $\dot{u}$ を求めたものという意味である。他は波形のそろいはよい。

さて Fig. 7 をみると、結論は明らかである。まずP波についてはC点発破でもD点発破でも、つまり波の入射角の如何にかかわらず、 $p/\dot{u}$ には殆ど変化がない。これは $V_P/V_S \gg 1$ である今のような場合、理論から期待されるところと一致する。S波については、仮に音圧が発生していたところで、P波における場合の $1/20 \sim 1/30$ 以下である。筆者等はこのような精度でもって、ここでS波とした波は音圧を生じない波であり、従ってこれはS波であると断定する。

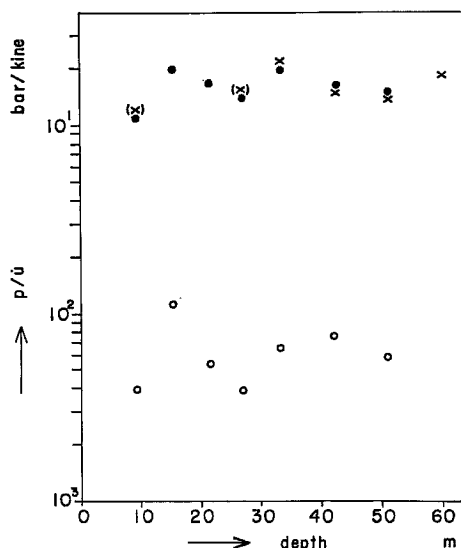


Fig. 7 Level of the pressure signals which is demonstrated as its ratio to the particle velocity amplitude of the same waves. Regarding the *S* wave, this level shows the upper limit, below which pressure level may exist.

- *P* wave (source *C*)
- × *P* wave (source *D*)
- *S* wave (source *A* or *B*)
- p : pressure of the signal (bar)
- $\dot{u}$: particle velocity of the signal (kine)

4. 論議および結論

筆者等が、ここで述べる実験事実はこれまでである。ここでは、孔中固定式受震器を用いて、S波の地中速度をはかるための、実験技術と、得られた結果のみについて記した。10年程前はS波というものは発生させることも、観測することも至難のわざとされていた。今では、その点だけはどうかやら変り、S波は実用の対象になりうるものというように一般の関心が変わってきている。しかし地中での直接測定となると、国内ではやられ出されてから3年程のことであり、筆者等の今回の試みの外他に2、3あるだけである。その方法もまた、一度毎に孔底に突きさし、又掘り下げでは深度をかえるとか、あるいは機械力に物を言わせて、一度に多数の深度の違う孔を掘り、これらそれぞれに受震器をうめるとするような具合であって、あらゆるところで効率よく測れるというようなものではない。

筆者等のかかる観測方法は、これ自身実用的であると共に、本格的な検層法を生み出すための、確実な一道程としての意味をもつものと信じる。S波の意味づけのためにまず何よりも良い確かな記録をとることが必要である。かかる土台の上にも、S波利用の道は開拓されうる。

筆者等がここで述べた実測例はただ一例だけである。しかしこのデータ自体も、粘土、砂、圧密といった要素と V_s との関連において興味ある関係を暗示している。又、電極間隔 a の違いによる ρ の変化を解析することで泥水浸透の割合を推定でき、これから又、孔隙率も算出できる。これと V_s についても興味ある結果がえられている。これについては別の機会に述べることにする。

だが、本実験を通じてもっとも重要なことはS波測定の実験技術の確立ということである。ここで試みた

方法は基本的には、筆者等の一人狐崎によって、1966年にすでに開発されたものである。しかしその後の実験をも通じ、このような密な間隔では、今回程の美事な記録をえたことはない。これは、その後の器械や方法の改良と、仕事に対する慣れが効を奏してきたためである。筆者等は今回の実験によってS波測定の道が開かれたということを、えられた記録によってまざまざと感じる。

今回の実験でやりよかったのは、地層のしまりがよく、ボーリング孔がくずれなかったことである。きわめて軟弱で、たとえば $V_s < 100 \text{ m/s}$ となるとまだ問題のある場合もあるかもしれない。しかしこれについても、よい工夫はうまれよう。

謝 辞

本実験は、文部省の科学研究費の一部を用いて運営された、地震探鉱実験グループの協同研究の一環として、筆者等の担当でなされたものである。

ボーリング孔に関する仕事は、泥仕事である。グループの人達はこれをいわず、よく協力して下さった。又わずか一日の実働において、ここで述べた弾性波関係の現場測定をすべて、さしたるとどこおりもなくなしとげたのは、支援して下さいった石油開発公団の機械力と、作業員の手なれた作業によるものである。特に、記録機を操作して下さいった、同公団のオペレーター寺村清氏の腕に負うところが大きい。

これらグループの諸氏、石油開発公団の幹部および現場の人々の支援に感謝します。

参 考 文 献

- 1) White, J.E.: "Seismic Waves", Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1965.
- 2) 狐崎長琅：孔中固定式受震器によるS波の観測 (I), 物理探鉱, 第20巻, 第1号, pp. 1—15, 1967.
- 3) 狐崎長琅, 後藤典俊：S波速度と減衰の測定, 地震探鉱実験研究グループ会報, 第49号, pp. 58—65, 1965.
- 4) Ricker, N.: The Form and Laws of Propagation of Seismic Wavelets, Geophysics, Vol. 18, pp. 10—40, 1953.