



Title	3. SH波実験資料の整理
Author(s)	小柳, 敏郎; KOYANAGI, Toshiro
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 12, 29-41
Issue Date	1964-08-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.12.29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13872
Type	departmental bulletin paper
File Information	12_p29-41.pdf



3. SH 波 実 験 資 料 の 整 理

小 柳 敏 郎

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 39 年 4 月 受 理 —

I. ま え が き

毎年行なわれている地震探鉱実験グループでは、ここ数年間土中に板を埋めこみ、その端をカケヤで叩いて SH 波の実験を行なって来た。しかるに、少数の例^{1),2)}を除いては単に S 波の速度を知るのみであってそれ以上の詳しいことはあまり研究されていない。そこでこれらのうちから新潟県の脇野町 (1959) と三条市 (1961) で行なわれた 2 回の実験資料を詳しく調べた。現在の地震探査の屈折法においては、P 波の初動の走時のみを問題にしているが、もっと他にも利用できるものは利用すべきである。この観点に立って、今回の解析が応用できるか否かも一つの目標にした。実際の実験に対する詳しい資料はグループ会報^{3),4)}によった。

II. 脇野町での実験

1. 実験の概略

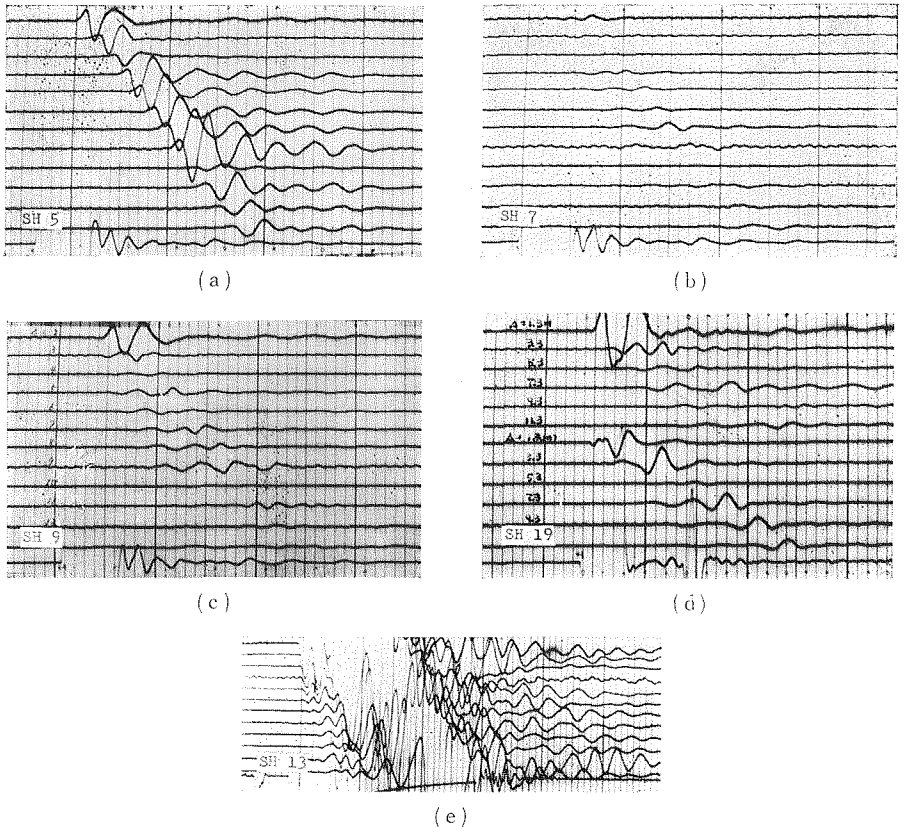
1959 年の脇野町におけるグループの実験の装置・観測器・実験場等についてはすでに報告³⁾であるから、詳しいことは省略して簡単に説明する。

この実験場は小学校のグラウンドで、地中に板 (4 m × 0.2 m × 0.1 m) を埋めこみ、その端を人間がカケヤで叩いて波を発生させた。そして板に加えた力に対して垂直方向及び加えた力の方向に測線をはり、geophone を 12 成分ならべて記録をとった。しかし、この実験では後者は成功していない。geophone の成分としては transversal, radial, vertical の三成分でとっているが、SH 波が出るらしいという理由から、記録のほとんどが transversal 成分でとられている。

得られた記録の一部を第 1 図に示す。図中、(a)・(b)・(c) が板を叩いた場合であって、(d) はカケヤで土を上から叩いた場合、(e) は cap 1 本を 0.4 m だけ地中に埋めこんで爆発させたもので、比較のためにあげた。geophone の成分は、(a) はすべて transversal, (b) は vertical, (c) は race 1 のみ transversal で、他はすべて radial である。(d) は上の 6 traces が radial で、残りが vertical であり、(e) はすべて vertical である。

第 1 図を見れば、板を叩いた際に発生する波は transversal 成分が、radial 及び vertical 成

- 1) 田治米鏡二・岡田広；地表附近の S 波速度の測定，物理探鉱，11 (1958)，65.
- 2) 小林直太；SH 波をつかって地下構造をきめる一方法，地震，第 2 集，12 (1959)，19. 等.
- 3) 地震探鉱実験グループ会報，18 (1959)，1.
- 4) 地震探鉱実験グループ会報，24 (1961)，1.

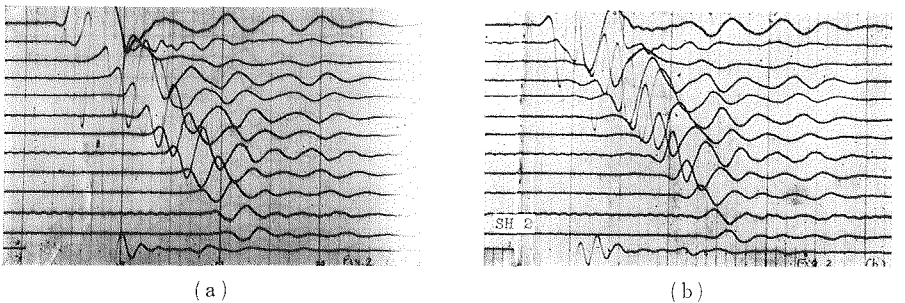


第1図 得られた記録の例

Fig. 1. Examples of records in the Wakino-machi experiment.

分より圧倒的に優勢であることがわかる。

また、記録には板の両端 (N, S とする) を叩いた2種類がある。すでに以前の実験報告⁵⁾でも、N側とS側では、ただ位相が 180° 逆転するのみで、振幅および山谷の走時には変りが



第2図 N叩きとS叩きの記録

Fig. 2. Records for N- and S- tap.

5) 小林直太・斎藤正徳; SH波の初動部分とS波の速度, 地震探鉱実験グループ会報, 21 (1960), 122.

ないことが確かめられている。

例えば、第2図は、(a)はN側を、(b)はS側を叩いて得られた記録である。その山谷の走時をプロットしたのが第3図であって、N側叩きの山を白丸、S側叩きの谷を×印で示してある。両者はほぼ同じであって食い違いは読みとりの誤差の範囲内に含まれてしまう。これは、位相が 180° 逆転したことを示している。

2. 記録及び波の性質

以上の理由により、得られた記録の中からN側叩きのSH-1, 22, 40, 42, 44の5枚の記録だけを選んで第4図に示す。geophoneは1m毎に並べてあるが、震源(板)から14~21mでは17mにおける記録しかない。しかし、今回の実験の目的が測線を長くして遠方における波の伝播を調べることにあつたのでやむを得ない。

波の分類と、その位相速度を読みとるため、記録の山の走時をプロットしたのが第5図である。第4図と第5図とを見くらべると、得られた主な波は、直接波と屈折波だけの様

である。これらの波はSH波と考えられるが、測線のうち2~13mは3成分で記録がとられているので、確認のためorbitを調べてみた。使用記録はSH-5, 7, 9, 11で、得られた結果は第6図である。これを見ると明らかにtransversal成分が卓越していて、SH-typeの動きを示している。各geophoneは特性が異なるので、第6図を示めずには、別に行なわれたテストの記録によって補正してある。

又、これを得るために用いた記録の中の山の走時を見ると、速度は第5図の値と変りがない。故に板を叩いた際に発生する波はSH波であることが確認された。

なお図示しなかったけれども、S側叩きの方のorbitを描いてみると第6図と全く反対のうごきをすることがわかったが、これは前に述べたことから当然である。

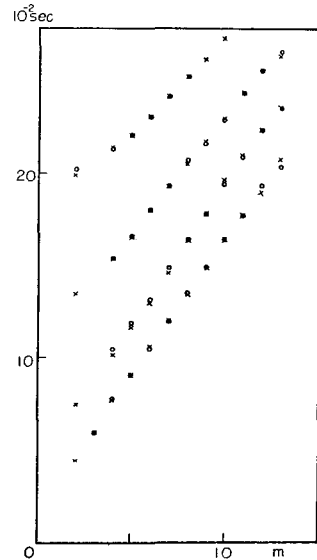
参考のために、第1図(d), (e)の山谷の走時を第7図に示す。これらの傾斜は、それぞれSV波及びP波の表層附近における速度をあらわしている。

3. 地下構造及び考察

第5図からSH波の位相速度を直接読みとると、

$$v_{S1} = 70 \text{ m/s}, \quad v_{S2} = 160 \text{ m/s}$$

である。 v_{S1} , v_{S2} は各々1層目と2層目のS波の速度を表わしている。SH波の立上りはわるく、初動が読みとり難いという難点がある。それで、初動の走時ではなく、山谷の走時から速度を



第3図 走時プロット(○:(a)の山, ×:(b)の谷)

Fig. 3. Time-distance plots of peaks for (a) and troughs for (b) in Fig. 2.

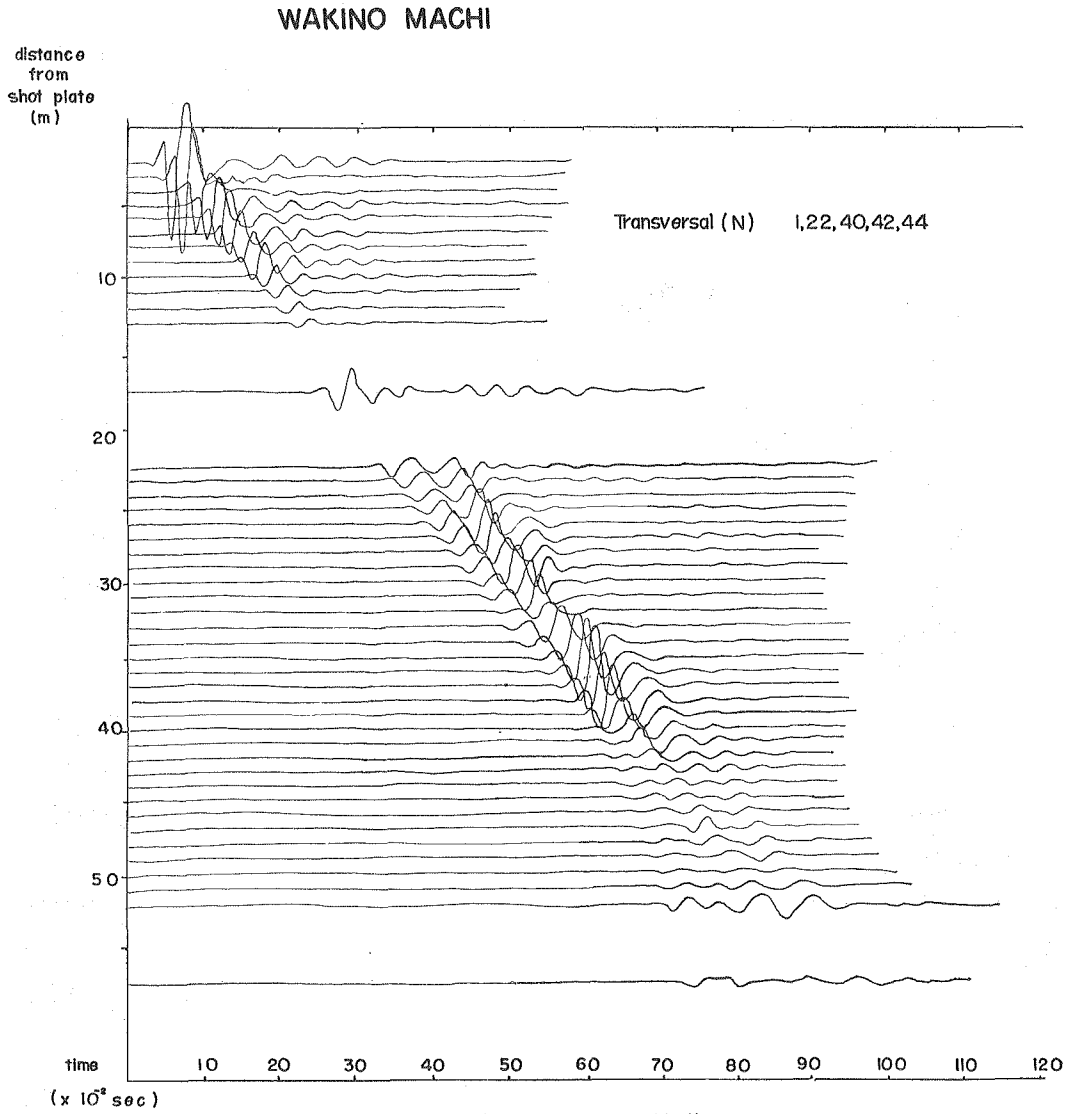
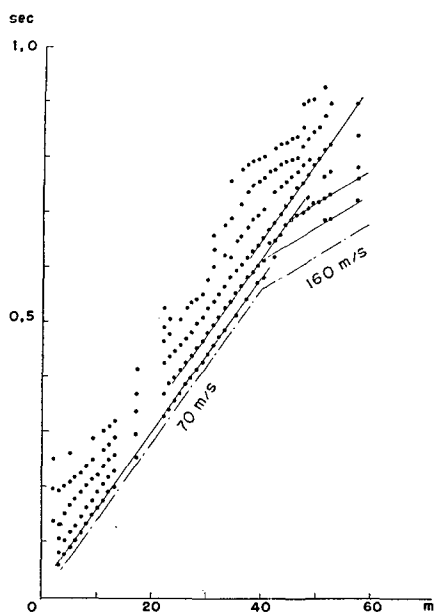
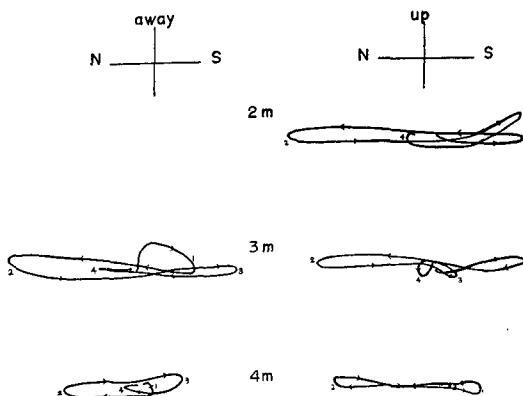


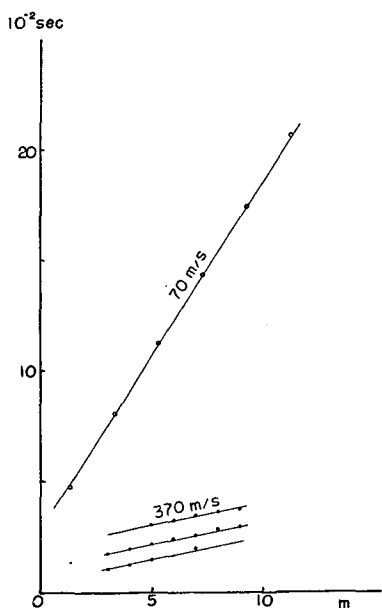
Fig. 4. Seismic records composed from five records at Wakino-machi.



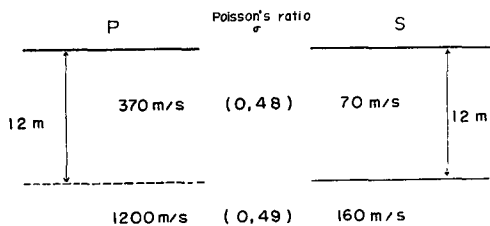
第5図 山の走時プロット
Fig. 5. Time-distance plots for peaks in Fig. 4.



第6図 地表のうごき
Fig. 6. Particle orbits.



第7図 第1図(d), (e)の山谷の走時
○: (d)の山
●: (e)の初動附近の山谷
Fig. 7. Time-distance plots of peaks and troughs in Figs. 1 (d) and (e).
○: peaks in (d).
●: peaks and troughs in (e)



第8図 推定地下構造
Fig. 8. Subsurface structure deduced from S- and P-waves refraction at Wakino-machi.

算出して推定される地下構造を求めた⁵⁾。あいにく逆測線では記録をとっていないので、平行層を仮定し、かつ、第5図から屈折波の出現距離を40 mとすれば、層の厚さは、

$$H = 12 \text{ m}$$

となる。第7図から1層目のP波の速度は、 $v_{P1} = 370 \text{ m/s}$ である。又、この近くで行なわれたP波の実験資料を解析してH. OKADA⁶⁾が求めた結果によれば、1層目の厚さは12 m、2層目のP波の速度 $v_{P2} = 12 \times 10^2 \text{ m/s}$ である。

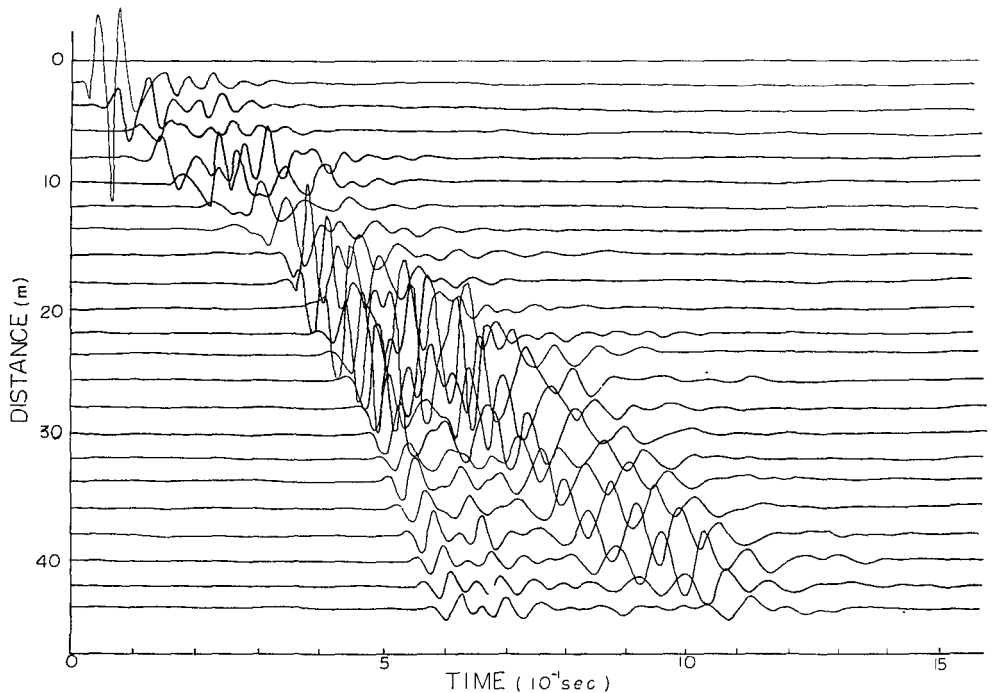
以上の結果から、各層のPOISSON比を求め、まとめたのが第8図である。これをみると、S波から求めた境界面とP波から求めた境界面は同じであるが、実は全く同一の測線ではないので詳しい議論は出来ない。

第8図に示した様な層構造においては、表面波が誘起されるはずである。しかし、今回の実験においては、第4図、第5図を見ても、表面波らしいものは何も観測されていない。

III. 三条市での実験

4. 実験の概略

1961年夏に三条市郊外で行なわれた実験の観測方法等は、例年とほぼ同じであって、今回



第9図 三条市での記録

Fig. 9. Seismic record at Sanjyo.

5) 前出。

6) H. OKADA; Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions—Experiment at Wakino-machi in Niigata Prefecture—, Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VII, 1 (1963), 459.

は geophone の間かくを 2 m 毎にして、44 m の測線を展開した⁴⁾。逆測線をはって地下構造を詳しく知ることも目的の1つであったが、実際には行なわれなかった。今回は、geophone はすべて横にねかせて transversal 成分のみで記録がとられている。前章で、板を叩いた場合の波の性質は大体調べてあるので、この章では他の面にも目をむけてみた。

5. 記録及び走時

まず、記録紙 SH-2, 4 の 2 枚を合わせて作った記録及び走時プロットを第 9 図及び第 10 図に示す。

第 9 図を見て明らかな様に、前章の脇野町での記録(第 4 図)とは大分趣を異にしている。振幅が大きく、波の到着から振幅が小さくなる迄の時間が長い。測器の感度等は前の場合とほとんどかわりなかったし、又、人間が板を叩く強さがこれほど異なるということもあり得ない。とすれば、これは脇野町と三条市では実験場の地下の状態が大分異なっており、その影響が記録にあらわれているものと思われる。

又、震源から 30 m 位はなれると、顕著な波群が見え始める。これも脇野町の場合と非常に異なる点である。

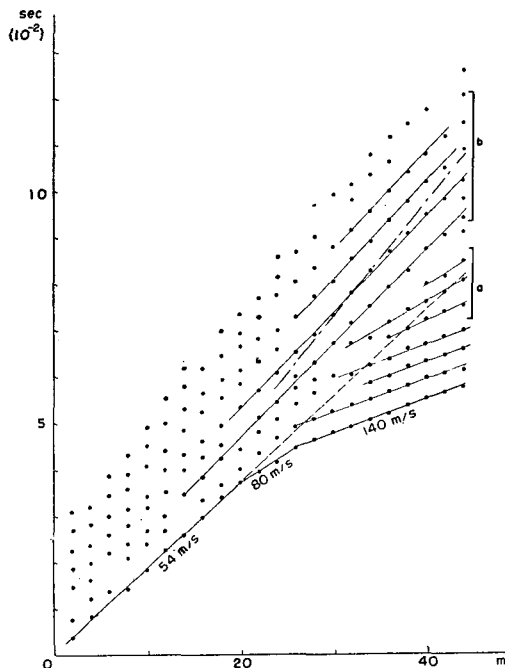
6. 地下構造

第 10 図から直接位相速度を読みとると、 $v_{S1}=54$ m/s, $v_{S2}=80$ m/s, $v_{S3}=14 \times 10$ m/s である。第 10 図の破線は、直接波が later phase として観測される場合の走時である。

逆測線で記録をとっていないので、再び平行層を仮定して地下構造を求めると、1 層目の厚さは 4 m, 2 層目の厚さは 1 m となる。

波の伝播及び表面波の発生等を論じるには、地下構造が出来るだけ詳しく知られていなければならない。幸いなことに、この実験場で行なわれた表面波実験の測線の一部が、SH 波実験の測線と重複している。詳しくいえば、SH 波の震源から 30 m の間が重複しているので、表面波実験記録 2, 5, 7, 9, 12, 13 の 6 枚の記録を参照した⁴⁾。

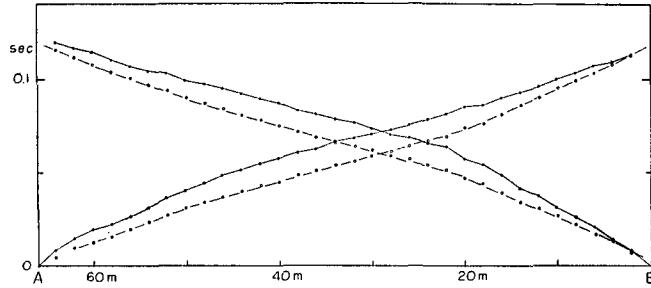
表面波実験の際の geophone の間かくは 2 m, 測線の長さは 66 m で、発破点の深さは約 1 m である。そして、ダイナマイト約 10 g を爆発させて記録をとってある。これには逆測線もあ



第 10 図 走時プロット

Fig. 10. Time-distance plots for every peak in Fig. 9.

4) 前出.



第11図 初動の走時(●)及び T' (○)

Fig. 11. Time-distance plots (●) and T' (○).

るので、構造をしらべるのには都合がよい。

表面波の実験用なので、あまり測器の感度をあげていず、初動の立ち上りが良くないが、それを読みとって作ったのが、第11図である。

spread の継ぎ目で $1/1,000 \sim 2/1,000$ 秒ほどのずれがあったが、それは補正してある。正確を期すために later phase も読みとったけれども、傾斜にあまり変りがなかったので、第11図を用いることにした。

第11図を見ると、速度の違いが大きくなり、折れ曲りの点の位置もはっきりしない。しかし、発破点を A, B とすると、A からの走時と B からの走時とは勾配が多少異なるので、一見して A から B に行くにしたがって、上の層が厚くなっている傾向があることがわかる。AB 間には発破点がないので、屈折波の組み合わせを数多く作することは出来ない。それでまず、ナマの走時から速度層の分類を試みた。

SH 波の解析によれば、3層構造であるとの結果が出ているので、P 波の方も3層であると仮定すると

$$v_{P1} = 3.4 \sim 3.6 \times 10^2 \text{ m/s}, \quad v_{P2} = 4.5 \sim 4.7 \times 10^2 \text{ m/s}$$

$$v_{P3} = 7.6 \times 10^2 \text{ m/s}$$

である。もっとも、発破点の近傍では、よく見ると $1.6 \sim 3.6 \times 10^2 \text{ m/s}$ くらいの速度が見られる。もし、最表層にこの速度層をのせると、P 波の方では4層になり、SH 波による構造とは一致しないが、最表層を無視する訳にはいかない。

得られた速度の値に幅があるのは、層が傾斜しているための影響と思われる。

次に、点の速度を知るために、 T' 直線を求めて、第11図に白丸で記入した。 T' 直線の傾斜は、

$$(7.6 \times 10^2 \text{ m/s})^{-1}, (5.6 \times 10^2 \text{ m/s})^{-1} \text{ 及び } (4.6 \times 10^2 \text{ m/s})^{-1} \text{ の 3 種類である。}$$

3層構造における method of differences は公式化されているので⁷⁾、これを利用すること

7) 田治米鏡二・岡田 広・浜田和郎・窪田 将；静内ダム及び下静内ダム予定地での弾性波探査，北海道大学地球物理学研究報告，8 (1961)，11.

にした。

3層目の速度は、 T 及び T' の傾斜を比較して、 7.6×10^2 m/s であることがわかる。

T' における 5.6×10^2 m/s の速度は、2層目と3層目との速度の組み合わせによって出来た見かけの値と考え、次の関係式を利用することが出来る。

$$2v_{2,3} = 5.6 \times 10^2$$

但し、 $1/v_{2,3} = (1/v_2 + 1/v_3)$

上の第2式に、すでにわかった $v_{P3} = 7.6 \times 10^2$ m/s を代入すると、

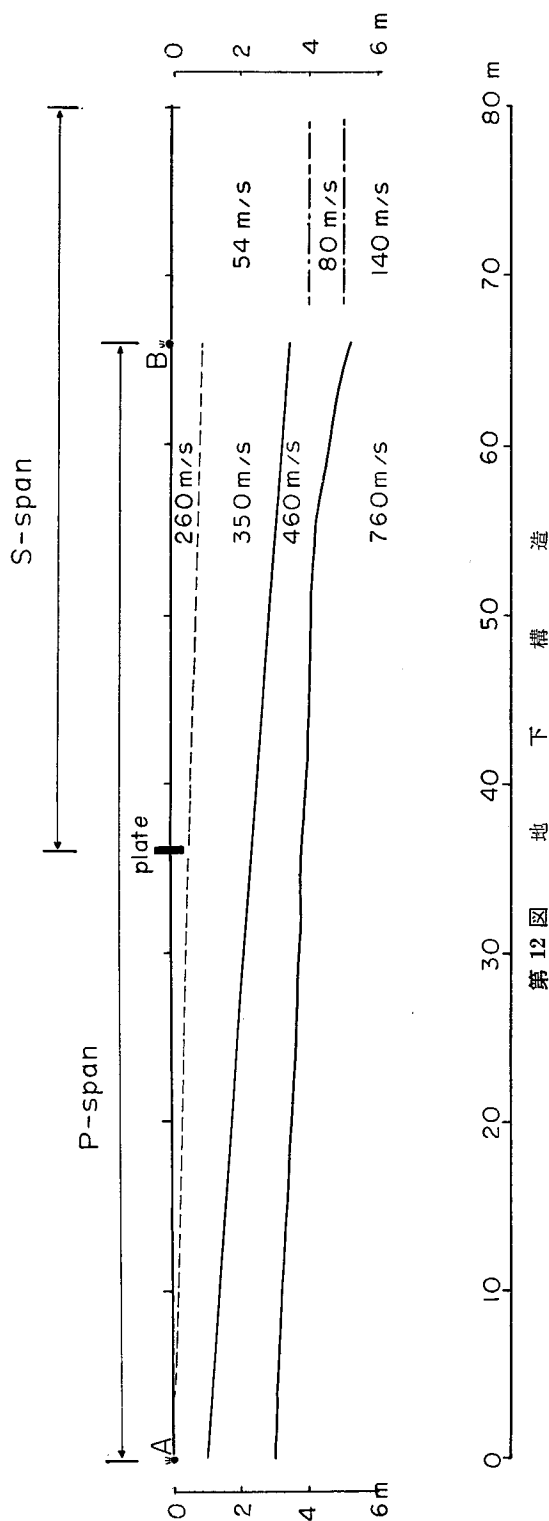
$$v_{P2} = 4.6 \times 10^2 \text{ m/s}$$

となる。この v_{P2} の値は、先に T 図で直接見当をつけた v_{P2} とも矛盾しない。

最後にあげた T' の傾斜値は、更に上方の層の速度が確定しにくいので、説明されにくい。

発破点近傍の走時をこまかく調べて、最表層の速度を 2.6×10^2 m/s と仮定し、発破点附近の不連続面の深さを求めてみることにした。最表層はミラージュ層と考え、震源の深さ1mを考慮に入れて計算すると⁸⁾、最表層の厚さは、A点附近では0m、B点附近では1mになる。この層は、先に指摘されたごとく、S波の方ではあらわれていない。それ故、ここでは仮りに第1'層と名付けておく。これに対して、第1層目の速度としては、先にあげた

$$v_{P1} = 3.5 \times 10^2 \text{ m/s}$$



第12図 地下構造 第12図 Subsurface structure deduced from P- and S-wave refraction at Sanjyo.

8) 田治米鏡二；初動の走時に現れる震源の深さの影響(2), 物理探鉱, 10 (1957), 176.

第 1 表 三条市実験場における各層の速度
Table 1. Velocity of P-wave of each layer
at the experimental site of Sanjo.

Model 1 (3層)		Model 2 (4層)	
第 1 層	3.5×10 ² m/s	第 1' 層	2.6×10 ² m/s
第 2 層	4.6 "	第 1 層	3.5 "
第 3 層	7.6 "	第 2 層	4.6 "
		第 3 層	7.6 "

を採用することにした。

以上の結果を整理すると、第 1 表のごとくなる。1' 層を入れない時、入れる時をそれぞれ model 1, model 2 と名づけた。

平行層を仮定し、第 11 図の折れ曲り点の位置から第 1 層の厚さを計算すると、発破点附近の 3.5×10² m/s の層の厚さは次のごとくなる。A 点附近では 1 m, B 点附近では 3.5 m。

これで、3 層構造モデルの第 1 層の (4 層では第 1' 層と第 1 層の) 速度と厚さが決った。もちろん、AB 間の詳しい構造は一切不明である。

こうなれば、第 2 層目の厚さを求めることは容易である。第 1 層の速度及び厚さが知れたので、この厚さに相当する各点の時間を、第 11 図に示した時間から引きされば、2 層構造の走時プロットが出来る。そこで、T' 直線の作図を応用して第 2 層の厚さが計算出来る。以上の計算では第 1' 層を無視したが、その影響は大したことはない。

以上の計算結果を図示すれば第 12 図になる。第 12 図右方には、SH 波による構造も合わせ図示してある。

SH 波から求めた地下構造と、P 波から求めた地下構造との食い違いについては、まだ詳しく論じられない。大ざっぱに両者を対応させると、第 2 表のようになる。第 2 表には POISSON 比 (σ) も合わせて示してある。

この測線で行なった表面波面波実験の解析の際に島⁹⁾が求めた地下構造は、第 12 図に示したものと著るしく異なっている。しかしながら、その原因は今のところ不明である。

第 2 表 各層の S 波、P 波の速度及び POISSON 比
Table 2. Velocities of S- and P-wave, POISSON'S ratio for each layer.

	v_s (m/s)	v_p (m/s)	σ
第 1 層	54	3.5 × 10 ²	0.49
第 2 層	80	4.6 × 10 ²	0.48
第 3 層	14 × 10	7.6 × 10 ²	0.48

7. 表面波群

次に、脇野町における実験では現われなかった第 10 図の (a), (b) と名付けた波群を調べてみた。(a), (b) 波群は位相速度はともに直接波及び反射波の速度とはことなる。しかも、周期も位相速度と共に次第に変化しているし、又、振幅も目立って大きい。故に、これらは分散性の表面波群であり、この場合 LOVE 波であると考えられる。

9) 島 坦; 1961 年三条市郊外で行った表面波についての実験, 地震探鉱実験グループ会報, 25 (1962), 9.

第9図の記録をにらみ合わせた上で、(a)に関しては $\lambda=36$ m, (b)に関しては $\lambda=30$ m あたりからの波形の比較的整った phase を選んで、周期と位相速度を第10図から直接求めてみると第3表の様になる。

第3表 波群(a), (b)の周期と位相速度
Table 3. Periods and phase velocities of wave group (a) and (b) in Fig. 10

wave group	period (10^{-2} sec)	phase velocity (m/s)
(a)	5 ~ 6	82 ~ 104
(b)	6 ~ 8	48 ~ 53

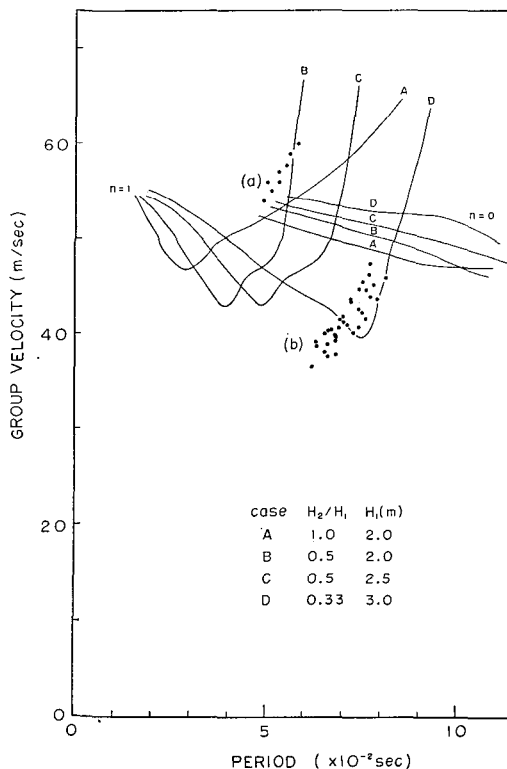
又、各波群の周期と群速度との関係も調べてみた。各波形の山々あるいは谷々の間を波群の周期とみなし、群速度をプロットしたのが、第13図、第14図の黒丸である。しかし、観測された波群の周期にはほとんど変化が見られないので、不完全な分散曲線しか得られない。このことは位相速度についても同様であった。

参考のために、第12図に示した地下構造モデルに対して、3層構造モデルの値を用いて理論的な分散曲線を計算した。各層の厚さの比を数種類変えて計算した結果が第13図に実線で描き入れてある。

3層の LOVE 波に関しては、詳しい研究¹⁰⁾があるのでそれを利用した。

第13図には第0次と第1次の理論的分散曲線が描かれている。さて、第13図の実測値と理論曲線とを比較すると、両者は全然合っていない。無理にも合わせようとするれば、今迄に求めた測定結果を全く無視しなければならない。

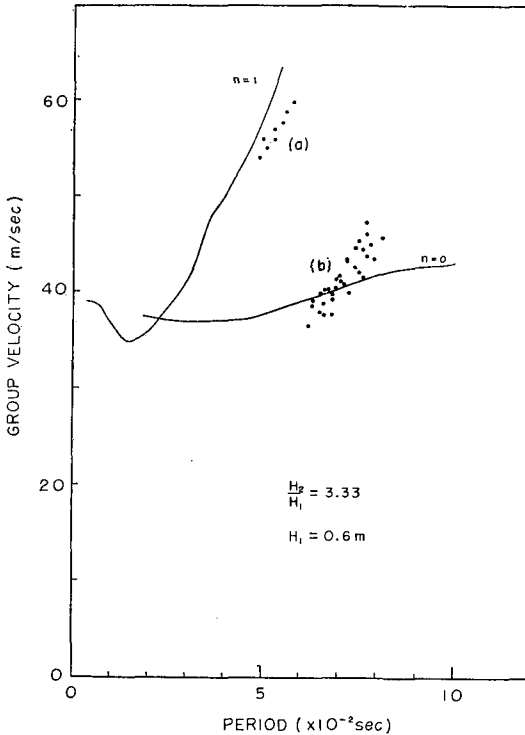
前にも述べた様に、問題にしている波群の振幅は極めて大きいので、AIRY phase が観測されていると考えて、実測値になるべく合う理論曲線を作りなおすことにした。そのためには、表層内の速度をもっと小さくしなければならない。それで、P波の方では4層であったのであるから、S波の方も実は4層あったが、たまたま最表層が観測されなかったというふうに考えた。即ち、S波を主とした3層構層の model 1 から、P波を主とし



第13図 実測値と3層 LOVE 波の理論的分散曲線—モデル1

Fig. 13. Comparison of calculated dispersion and observed one—Model 1.

10) K. TAZIME and H. OKADA; LOVE-waves in Stratified Three Layers, Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VII, 1 (1958), 111.



第14図 実測値と3層 LOVE 波の理論的分散曲線—モデル2

Fig. 14. Comparison of calculated dispersion and observed one—Model 2.

然として気になるが、実は実測値の精度にも問題があるし、この種の理論計算の仮定にも問題があるので、この程度の不一致は止むを得ないであろう。

SH 波の測定には認められなかった最表層を仮定した方が、表面波群の説明に具合がよいということは、表面波がごく浅い表層の影響を受けやすいことを意味している。

無論、まだ (a), (b) 波群の正体ははっきりしたとはいえない。とくに (a) 波群は leaking mode かも知れないし、震源の reaction による振動波形かも知れない。実験的にも理論的にも、多くの問題が残されている。

IV. 結 語

以上の主な結果をまとめると、次の様になる：

- 1) 板叩きによって生じる波は SH 波であり、それに伴って発生する表面波は LOVE 波である。
- 2) LOVE 波の分散においては、最表層の影響が大きい。これは他の表面波についても云えるであろう。

た4層構造の model 2 に目をむけた。

最表層の Poisson 比を 0.49 であると仮定すれば、P 波の速度は 260 m/s であるから、S 波の最表層における速度は

$$v_{S1'} = 39 \text{ m/s}$$

となる。

それ故、今度は次の様な数値を採用して理論的な分散曲線を計算した。

$$v_{S1'} = 39 \text{ m/s}, \quad v_{S1} = 54 \text{ m/s},$$

$$v_{S2} = 80 \text{ m/s}$$

$$H_{1'} = 0.6 \text{ m}, \quad H_1 = 2.0 \text{ m}$$

但し、 H は suffix のついた層の厚さを示す。その結果は第 14 図に実線で示してある。(図中、 $H_1 \rightarrow H_{1'}$, $H_2 \rightarrow H_1$)

今度の計算で $v_{S3} = 140 \text{ m/s}$ なる速度層を無視したのは、分散曲線にはこの影響はほとんどないと予想されるからである。第 14 図の方が第 13 図よりは実測値と理論値とが良く合っているといえる。

もっとも、傾斜が合っていないのは、依

3) S波で地下構造をきめる場合に、初動のたち上りがわるく、最表層が薄い場合には見おとしやすい。

三条市での観測結果と比較して、脇野町において表面波が観測されなかった原因を考えてみると次の様になる：

- 1) 震源に与えたエネルギーに対して一層目の厚さが大きくて表面波がでなかった。
- 2) 表面波を観測するには span が短かすぎた。

この研究に、多くの実験資料を利用させて頂いたので、地震探鉱実験グループの各位及び石油資源開発会社の実験担当者に感謝します。又、この研究は田治米鏡二教授の指導で行なわれ、岡田広氏からは多くの助言を得ました。

3. Investigation on the Experimental Data of SH-waves

By Toshiro KOYANAGI

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

In the present paper, the nature of waves generated by striking a plate, being buried in the earth, is studied.

The present data were obtained by the Seismic Exploration Group of Japan in 1959 at Wakino-machi and in 1961 at Sanjyo in Niigata Prefecture.

The transversal component of wave motions has been most remarkably observed as shown in Fig. 1 (a). The body waves may be identified as SH-waves whose particle orbits are shown in Fig. 6. Several waves following the first break would be identified with LOVE-waves.

LOVE-waves could not be observed in Figs. 4 and 5 obtained at Wakino-machi, but they appeared in Figs. 9 and 10 at Sanjyo.

The subsurface structures obtained by refraction SH-waves are compared with those by refraction P-waves in the two experiments, as shown in Figs. 8 and 12. The velocities of SH- and P-waves in each layer are shown in these figures.

The author thinks that surface waves could not be observed at Wakino-machi by the following reasons: (i) the most superficial layer was too thick for the energy delivered to generate surface waves, (ii) the spread in that experiment was too short to catch surface waves.

Wave groups (a) and (b) named in Figs. 13 and 14 seem to be the first and the zeroth order of LOVE-waves.

Numerical calculations have been made to see the dispersion curves for several subsurface structures deduced from the experiment. They are shown by full lines in Fig. 13 which contains the values calculated directly from Fig. 9. First, in Fig. 13 $v_{S1}=54$ m/s, $v_{S2}=80$ m/s and $v_{S3}=140$ m/s were assumed for the numerical calculation. Next, in Fig. 14, $v_{S1'}=39$ m/s, $v_{S1}=54$ m/s and $v_{S2}=80$ m/s were assumed.

The observed values seem to fit better with the theoretical curves in Fig. 14 than with those in Fig. 13. Therefore the most superficial layer might be most effective for the generation of surface waves, though its thickness was very thin.