

南極昭和基地近傍の氷山及び定着氷の弾性波探査

村内必典*・立石哲夫**・松本利松***

SEISMIC PROSPECTING OF THE ANTARCTIC ICEBERG
AND FAST ICE NEAR THE SYOWA BASE

Sadanori MURAUCHI*, Tetsuo TATEISHI** and Tosimatu MATUMOTO***

Abstract

An iceberg and fast ice were studied by the seismic method during the period from Feb. 8 to Feb. 11, 1957 in the neighbourhood of Syowa Base, the Japanese Antarctic base for IGY, the locality of which is $69^{\circ}00'S$ in latitude and $39^{\circ}36'E$ in longitude. This work was one of the preliminary studies for seismic investigation of the Antarctic continental ice sheet, which is scheduled to be carried out in the coming 1957/8 expedition.

Equipment Seismic equipment used was ETL M-3 24 trace seismic reflection apparatus, the frequency of the geophones being 20 cps. For seismic work, we prepared TNT explosives in 100g, 200 g, 300 g, 500 g and 1000 g sticks and three kinds of ice-drills, (one a hand auger and the other two ice-drills with 3 HP and 4.5 HP gasoline engine respectively).

For the purpose of the traverse seismic work in the 1957/8 expedition, two sledges with a cabin were prepared, in which we were able to continue seismic work even in blizzards. The sledge with a cabin was made of plastic and its cabin was 4 m long, 1.5 m wide.

Seismic prospecting of an iceberg There were many icebergs trapped in fast ice near our base but almost all icebergs were surrounded

by cliffs and therefore we could not mount seismic equipment on them. The iceberg which we could survey was situated at a distance of 17km from the west coast of West Ongul Island, and had two gentle slopes along the principal wind direction, one on the windward and the other on the lee. These slopes were formed by snow drift. The dimensions of the iceberg were about $300\text{ m} \times 150\text{ m}$ and 15 m high above the surface of the fast ice.

12 geophones were placed at intervals of 20 m along a straight line on the iceberg and four shot holes were bored on the same line. The charges were sticks of TNT weighing from 300 g to 2200 g, placed in 76 mm diameter holes in the ice four meters deep with ice tamped over them.

Travel time curve Several travel time curves such as shown in Fig. 3 were obtained. Main phases and some descriptions are shown as follows.

Interpretation of travel time curves

(1) V_1 is the velocity of the P-wave traveling in the shallow layer of the iceberg.

(2) V_2 is the velocity of the P-wave traveling in the iceberg. We can calculate the thickness of the upper layer, V_1 -layer, as follows;

* 国立科学博物館，第1次及び第2次南極地域観測隊員。The National Science Museum. Member of the Japanese Antarctic Research Expeditions, 1956-57 and 1957-1958.

** 石油資源開発株式会社，第1次南極地域観測隊員。Japan Petroleum Exploration Company. Member of the Japanese Antarctic Research Expedition, 1956-57.

*** 東京大学地震研究所，第1次南極地域観測隊員。Earthquake Research Institute, University of Tokyo. Member of the Japanese Antarctic Research Expedition, 1956-57.

Table 1.

Phases	Velocity	Description
V ₁	2800 m/s	<u>Intercept time</u> is about zero and this curve crosses V ₂ -curve at $\Delta=60-90$ m.
V ₂	3600 m/s	The most obvious phase in the first arrivals.
V ₃	2600 m/s	It is detected between V ₁ and V ₄ -phases, is composed of several waves and develops at far distance in comparison with the other phases.
V ₄	1550 m/s	The most obvious phase having two or three waves periods 0.015-0.018 sec.
R		It can be slightly detected by the geophones placed near the shot hole and can't be detected at a distance of more than 100 m, because it is disturbed by V ₂ and V ₄ -phases.

Critical distance Thickness of V₁-layer

60 m 10.6 m

90 m 15.9 m

(3) If we assume that the velocity of the P-wave travelling in the shallow layer increases gradually from 2800 m/s and approaches 3600 m/s asymptotically, we can get the velocity distribution as shown in Fig. 4.

As it is considered that the iceberg was separated from the continental ice sheet, the velocity distribution curve of this iceberg is compared with that of the continental ice sheet, as shown in Fig. 4. It is found that there is not such a low velocity layer as seen in the continental ice sheet in Greenland and Terre Adélie. This difference between the iceberg and the continental ice sheet must be worthwhile to be noted.

(4) It was not ascertained whether V₃-wave is S-wave corresponding to V₂-wave or not.

(5) V₃-WAVE This is considered to be Rayleigh wave.

(6) R-WAVE This is considered to be a reflection wave from the sea bottom. If we calculate several travel time curves corresponding to some reasonable model structures of the iceberg's thickness and sea depth, that most suitable figure will be that the iceberg was about 100 m thick and the distance between the bottom of the iceberg and sea bottom was about 20 m. In this calculation, we assumed

that the velocity of the longitudinal wave travelling in the iceberg and sea water was 3600 m/s and 1440 m/s, respectively.

Seismic work on the fast ice The line of survey on the fast ice was set in such a way as shown in Fig. 2 since the thickness of the fast ice was 240 cm, and the explosives, 100-1000 g TNT sticks were used in the sea water at depths of 1-12 m. During the period of this study, the highest and lowest temperatures were +0.6°C. and -9.0°C., respectively.

Travel time curve and its interpretation

As the first arrivals, we can find two clear phases having a velocity of 2150 m/s and 4300 m/s respectively. And there was a later phase having a velocity of 1440 m/s. Many reflected waves were observed but it was rather difficult to analyse them, because they were disturbed by multi-reflections and bubble-effect. The velocity of the P-wave travelling in the fast ice is 2150 m/s and its velocity travelling in the sea bottom layer is 4300 m/s.

The longitudinal velocity travelling in the fast ice is generally from 2400 to 2910 m/s in the Arctic Ocean. Here in the Antarctic, the longitudinal velocity is 2150 m/s, which value is considerably slower than the Arctic ones. However, J. Oliver and others³⁾ reported that they obtained the same value, 2150 m/s, in Arctic pack ice in the summer. According to their opinion, this slow velocity is attributed to the condition of the ice in the summer

when it seems likely that melt water permeates a considerable fraction of the total thickness. . . From the reflection wave we could estimate that the sea depth was about 110 m, or so.

1. 緒 言

1957年2月8日から11日までの4日間、第1次南極観測隊の基地設営中に昭和基地付近の氷山及び定着氷の弾性波探査を行う機会にめぐまれた。この観測は、1958年の本観測の際行う予定の人工地震による大陸氷の調査についての基礎資料を得ることを主目的とするものであった。

2. 使用器材

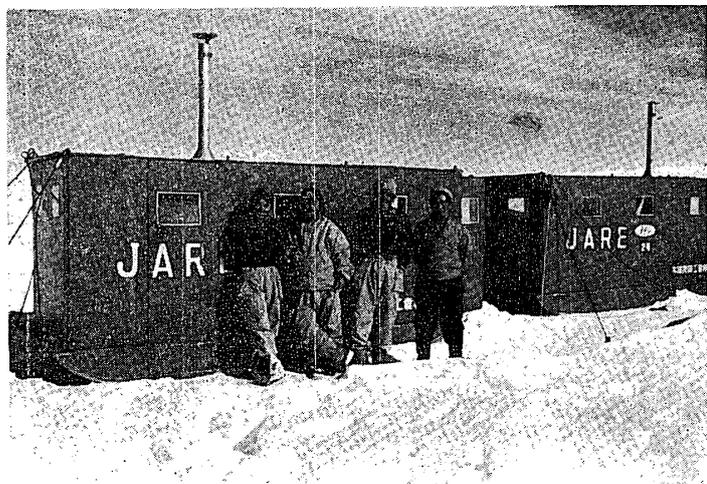
使用した器材は、南極観測のため特に購入あるいは製作したものである。

地震探鉱器は、E. T. L. 社製の M-3 型 24 成分のものである。換震器は、同じく E. T. L. 社製の 7 サイクル、20 サイクル、85 サイクルの 3 種類のものを用意し、今回は 20 サイクルのものだけを使用した。

火薬は東洋化工 K. K. 製の T. N. T. 火薬で、薬量は 100 gr, 200 gr, 300 gr, 500 gr, 1 kg の 5 種類よりなり、その形は円筒状で、100 gr のものの直径は 25 mm, その他は 45 mm とし、アイス・ドリルのビットの直径 76 mm に適合するようにした。尚火薬には、いずれも釣り下げのように釣紐が附してあり、火薬を発破孔に挿入するのを容易ならしめる工夫がほどこされてある。雷管は 8 号電気雷管を使用した。

水中に火薬を挿填するための発破孔を掘るアイス・ドリルは、いずれも利根ボーリング製で標準出力 4.5 馬力のガソリンエンジン付の 100 m 作孔可能なもの 1 台、3 馬力のガソリンエンジン付 10 m 作孔可能なもの 1 台、手廻し式 (6 m 作孔可能) 1 台、計 3 台を用意した。一番大きなアイス・ドリルは今回は使用せず、小型 2 台を使用し、作孔を行つた。エンジン付小型ドリルも、手廻し式も共に、coring の方法で作孔したが、深さ 4 m の作孔に、約 1 時間を要した。ドリルの径は前述の如く、76 mm である。

尚、大陸氷上の調査旅行を目的と



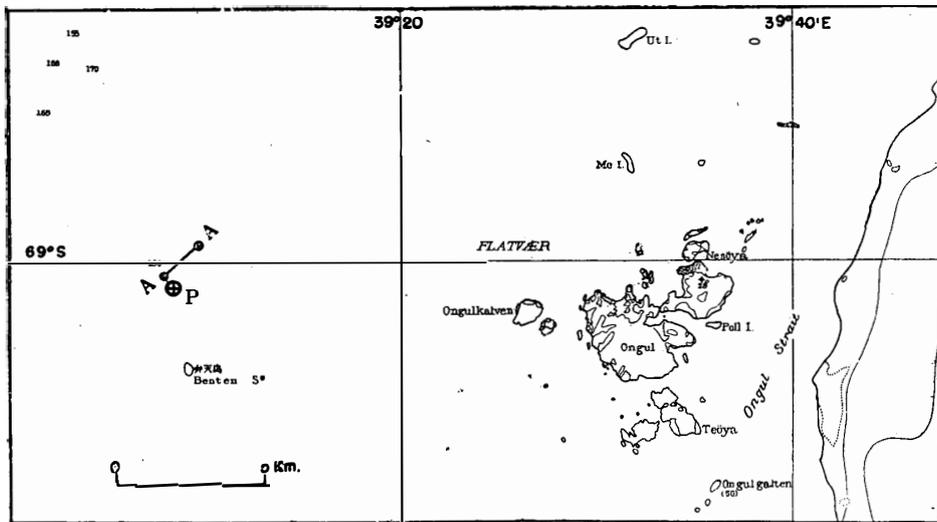
第1図 定着氷上の観測用カブース (1957年2月9日)
Fig. 1. Caboosees for seismic work, on the fast ice (Feb. 9, 1957).

して、第1図に示す如き、小屋付櫓（通称カブース）を2台用意した。1台は作孔用、他は地震波観測用で、本調査においても接岸後氷上で組立てて、テストをかねて使用した。調査期間中ブリザードもあつたが、何ら支障なくカブースの中で観測を行うことができた。カブースの大きさは長さ4 m、高さ（床上）1.5 m、巾1.5 mで、本田技研 K. K. 寄贈になる合成樹脂製のものである。

3. 氷山における調査

実験を行つた氷山は昭和基地西方15 kmに位置し、大きさは長さ約300 m、巾150 m、海氷上の高さ（海氷面上に殆んど同じ）約15 mで、定着氷にとじこめられているが、海水中に浮いているものであつた。

観測測線は氷山の長軸に沿い一直線上にとり、換震器は20 m 間隔に12 箇ならべた。氷山の厚さも、速度分布も、水平方向には測線上どこも同様と考えてよさそうなので、地震探査に当つて、換震器は一度設置してから移動せず、爆破点を移動する方法をとつて作業時間の節約をはかつた。換震器に対し爆破点が北東寄りの場合を順測線、その逆の場合を逆測線と以下呼ぶことにする。



AA: 定着氷上の測線 P: 氷山の位置

第2図 観測地点

Fig. 2. AA shows seismometer spread on the pack ice.

P shows the position of the surveyed iceberg.

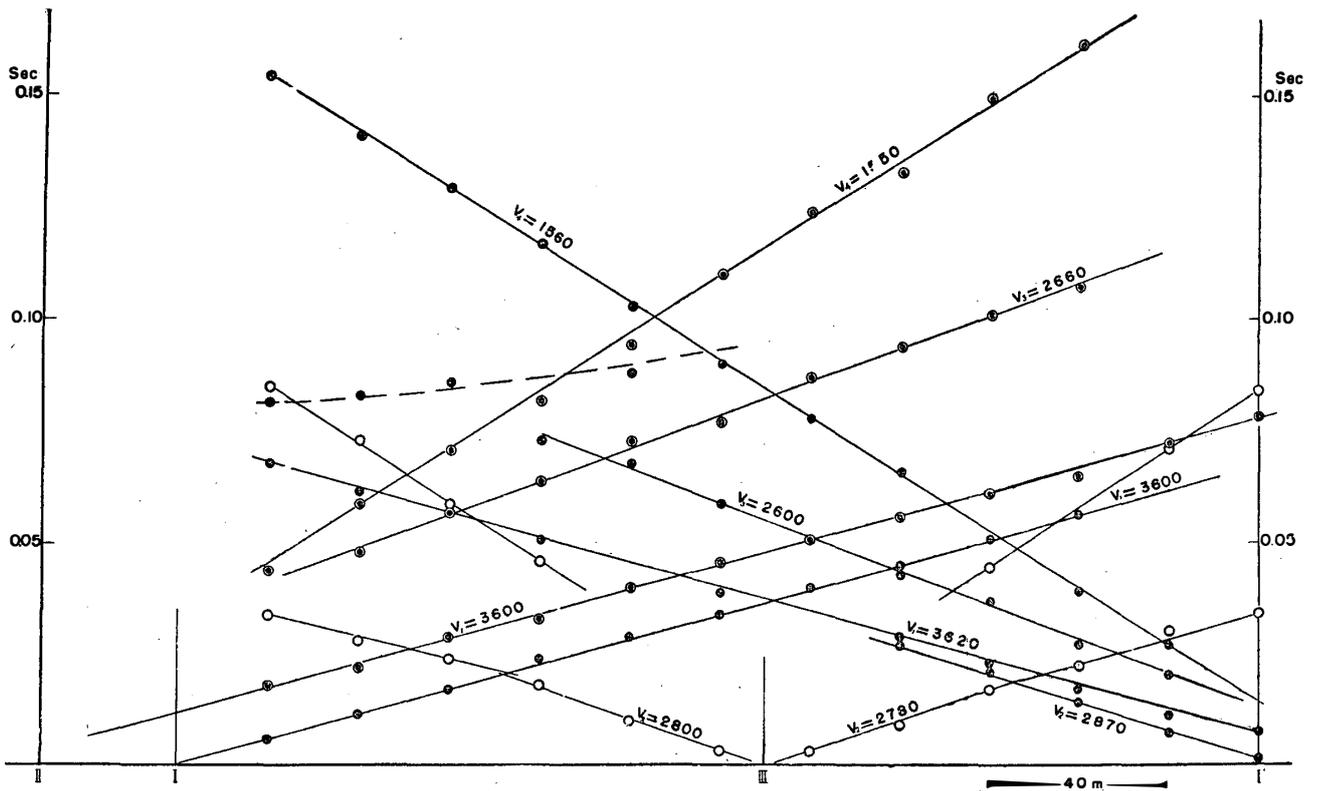
1956年2月8日は、機械の調整等に時間を費し、よい観測記録を得ることはできなかつた。その主たる原因は、観測室内の温度が外気温の近くまで下ると、記録器のガルバノメーターの鏡がひずむこと、及び記録紙の送りが不整になる等の故障を生じたためであつた。カブース内部を石油ストーブをたいて+5度以上に温めると、これ等の故障は消失した。第1表に翌9日の観測経過を示す。

第 1 表

観測時刻	天気	最も近い換震器と爆破点の距離	薬量	火薬深度	
11 h 15m	晴	20m	300gr.	4m	順
14 30	//	20	1200	//	//
15 40	//	50	1200	//	//
17 00	//	1	2200	//	逆
18 20	//	50	2200	//	順
19 10	//	50	1000	//	逆
20 00	//	50	1000	//	順
20 35	//	10	1000	3	中点爆波

4. 走時曲線

第 3 図に示すいくつかの走時曲線が得られた。主な相とその説明を第 2 表に示す。



第 3 図 氷山の地震探査で得られた走時曲線

Fig. 3. Travel-time curves for the iceberg.

第 2 表

相	速 度	説 明
V ₁	2800 m/s	逆測線及び中央爆破の順逆両測線によくあらわれている. Intercept time は殆んど 0. $\Delta=60\sim90$ m で V ₂ と交る.
V ₂	3600 "	初動部分の最も著しい相として現れる.
V ₃	2600 "	V ₂ , V ₄ の中間でよく発達し, 数波よりなる. 一定週期 (約 0.02 秒) の波群となる場合が多く, 遠方の測点で比較的よくあらわれる.
V ₄	1550 "	最も顕著. V ₃ と同様に 2~3 波続き, 週期は 0.015~0.018 秒
R		順測線の爆破点近傍で見られる. Δ が 100 m を越えると, V ₄ 及び V ₂ に擾乱されて見出せない.

5. 走時曲線の説明

(1) V₁ は氷山の表面付近の P 波速度.

(2) V₂ は氷山の内部の P 波速度. 測点の間隔がひろいために, V₂ の速度の層が V₁ の上に実在するのか, あるいは, 表面速度が V₂ で, 深くなるにつれ漸的に V₁ の速度に変化して行くのか, 確定することはできない. しかし, ここで二層構造を仮定すると,

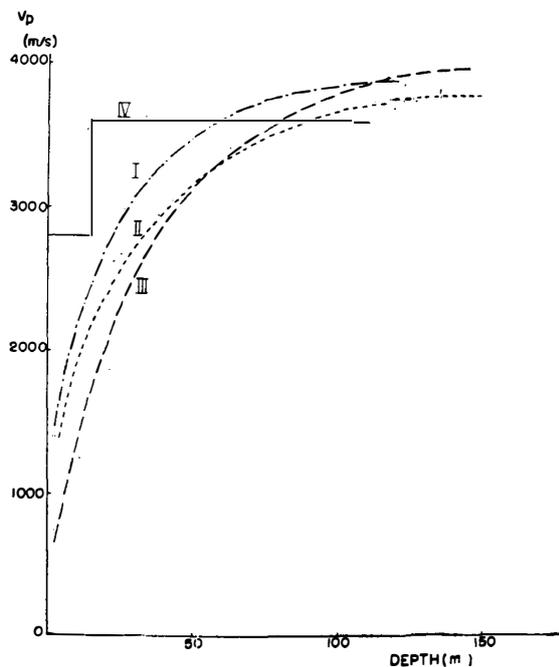
V₁ 層の厚さ Z は,

L(臨界屈折): 60 m の場合は Z = 10.6 m
 " 90 m の場合は Z = 15.9 m

(3) V₁, V₂ の速度のちがう二層構造を考えないで, 表面速度 2800m/s より 3600m/s に速度が漸的に増加するものとする, 第 4 図に示すような速度分布となる. この氷山は元来は大陸で成長したものであるから, 文献によつて他の大陸氷の表面付近の速度分布の観測結果と比較してみるに, 同図に示されてある如く, Greenland¹⁾, Terre Adélie²⁾ の大陸氷と比較して, この氷山の場合は表面付近の低速層が非常にうすいことがわかる. 氷山の地震探査の例は他にないが, このような著しい相違は注目に値しよう.

(4) V₃ この相については未だ不明であり, 今後の調査により確定したい.

(5) V₄ Rayleigh 型の表面波と考えら



第 4 図 大陸氷の表面付近の速度分布

Fig 4. Graph showing velocity increasing with depth for the continental ice sheet.

- I : Terre Adélie S II (A. Joset and others)
- II : " S IV (")
- III : Greenland (B. Imbert)
- IV : Iceberg at Syowa Base.

れる。すなわち $\lambda = \mu$ の場合、Rayleigh 波の速度 v_R は、

$$v_R = 0.9194 v_S = 0.9194 \times \frac{v_p}{\sqrt{3}}$$

(v_p, v_s は弾性体内を伝わる縦波及び横波の速度)

$v_p = V_1 = 3600 \text{ m/s}$ とすれば、

$$v_R = 1520 \text{ m/s.}$$

V_1 層中の Rayleigh 波として行つた計算に V_1 の速度は殆んど一致する。

(6) R 恐らく海底面からの反射波であろう。冰山内の P 波速度、海水中の音波速度をそれぞれ 3600 m/s , 1440 m/s とし、氷山の厚さ及び氷山底面から海底までの距離を種々変えて反射波の走時曲線を求めてみると、氷山の厚さを 100 m , 氷山底面から海底までの距離を 20 m とした場合が、観測された走時曲線に最も近いものを得ることができる。

6. 定着氷上における調査

第 2 図に示す宗谷錨地付近の定着氷 (厚さ $2 \text{ m } 40 \text{ cm}$) 上において地震探査を行つた。この場合も換震器を 20 m 間隔に 12 個設置し、移動を行わず、爆破点を 200 m 間隔で測線上両方向に移動した。

第 3 表

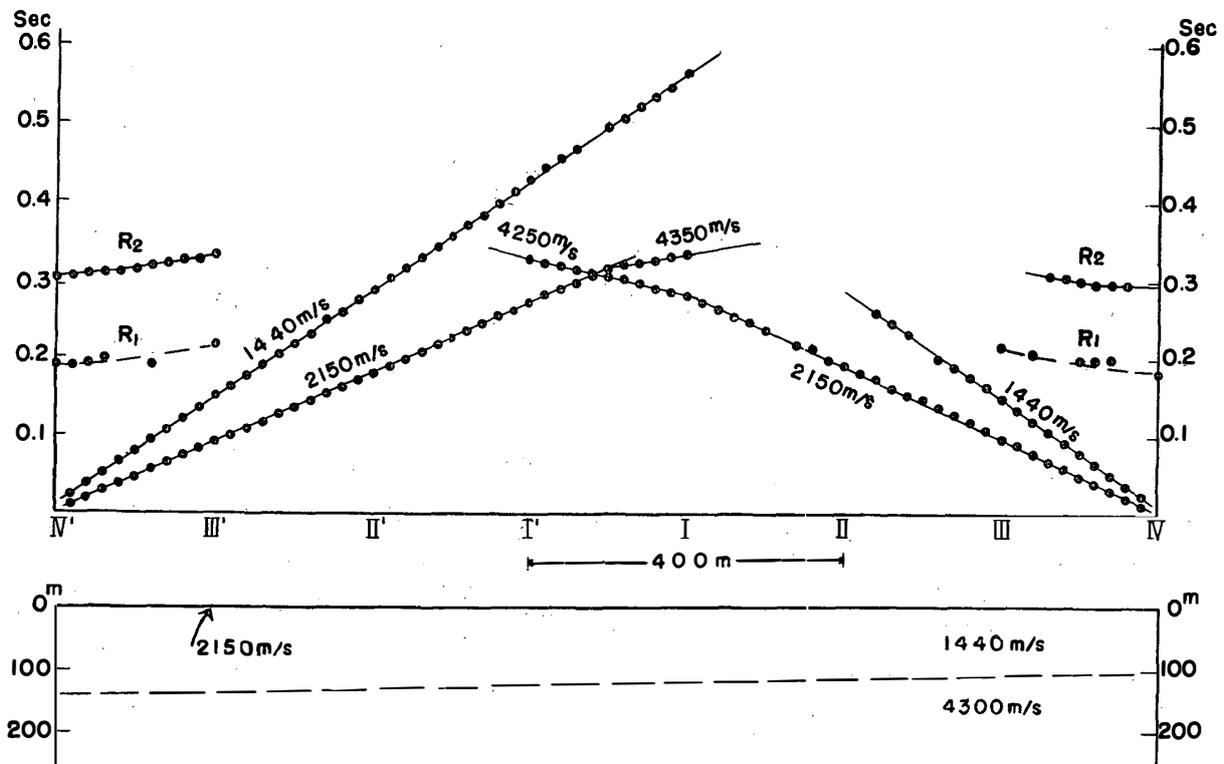
日	時	天 気	最も近い換震器から 爆破点までの距離	薬 量	火薬深度
10日	16h15m	曇	順 1m	100gr.	6m
	17 00	"	" 200	500	"
	17 20	"	" 200	500	"
	17 50	"	" 400	"	"
	18 00	"	" "	"	"
	18 25	"	" 600	1000	12
	18 40	"	" "	1000	"
	19 40	"	" 1	100	1
	20 00	"	" "	"	"
11	10 35	吹 雪	逆 1	"	"
	10 50	"	" "	"	"
	14 00	曇	" 200	400	6
	14 20	"	" "	"	"
	15 00	"	" 400	600	"
	15 15	"	" "	"	"
	23 10	"	" 600	1100	"
	23 30	"	" "	"	"

この場合、爆破点が南西寄りの場合を順測線、その逆を逆測線とよぶ。尚、2月10日の最高気温は -3.5°C , 最低気温は -9.0°C , 最大風速 11 m/s , 11日は最高気温 $+0.6^\circ\text{C}$, 最低気温 -2.0°C , 最大風速 27 m/s であつた。

7. 走時曲線及びその説明

第5図に走時曲線を示す。前述の如く、換震器は測線の中央部 200 米の線上に 11 個において移動は行わなかつたのであるが、この図には見易いために走時曲線が連続するように示した。

初動として 2150 m/s と順測線では 4250 m/s, 逆測線では 4350 m/s の 2つの相が明瞭によみとれる。また 2150 m/s の相に僅かおこれて 1440 m/s の速度を示す相があり、更に反射波とみられる相がみられる。この反射波は多重反射と気泡効果が重なつて、いく度も現れている。

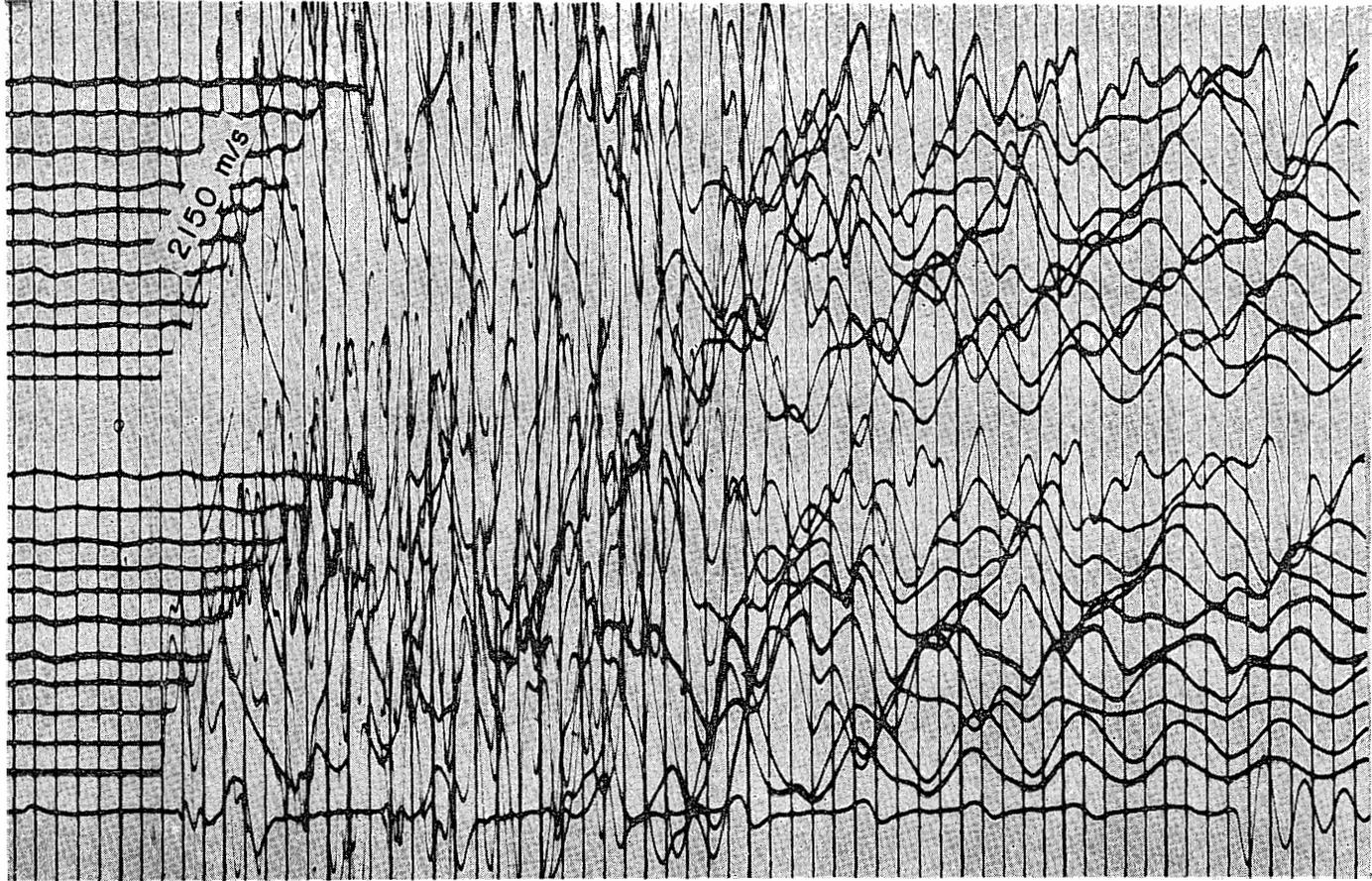


第5図 定着氷上で得られた走時曲線及び断面構造

Fig. 5. Travel-time curves for the fast ice and geophysically estimated profile.

2150 m/s の波は定着氷中を伝わる P 波, 4000 m/s 以上の波は海底の基盤を伝わるものと考えられるが、後者は逆測線において、震央距離が不足して僅かの点しか観測できず、その真の速度を精度よく決定することはできない。順逆両測線から、一応基盤の速度は 4300 m/s, 基盤の上面を平面と考えると、約 15' の傾斜で南西の方が浅くなつている。測線の中央において、海面から基盤までの深さは約 125 m と解析される。1440 m/s の相は、海水中を伝わる音波の速度である。

尚、反射波のうち、1 回反射の R₁ は初動部分の雑音が大きいため、発震時を精度よくきめることはむずかしい。2 回反射の R₂ は、割合に発震時が明瞭に読みとれた。この値より測線の中央部付近では、海底の深さは約 110 m と求まる。反射から求めた海の深さと屈折法で

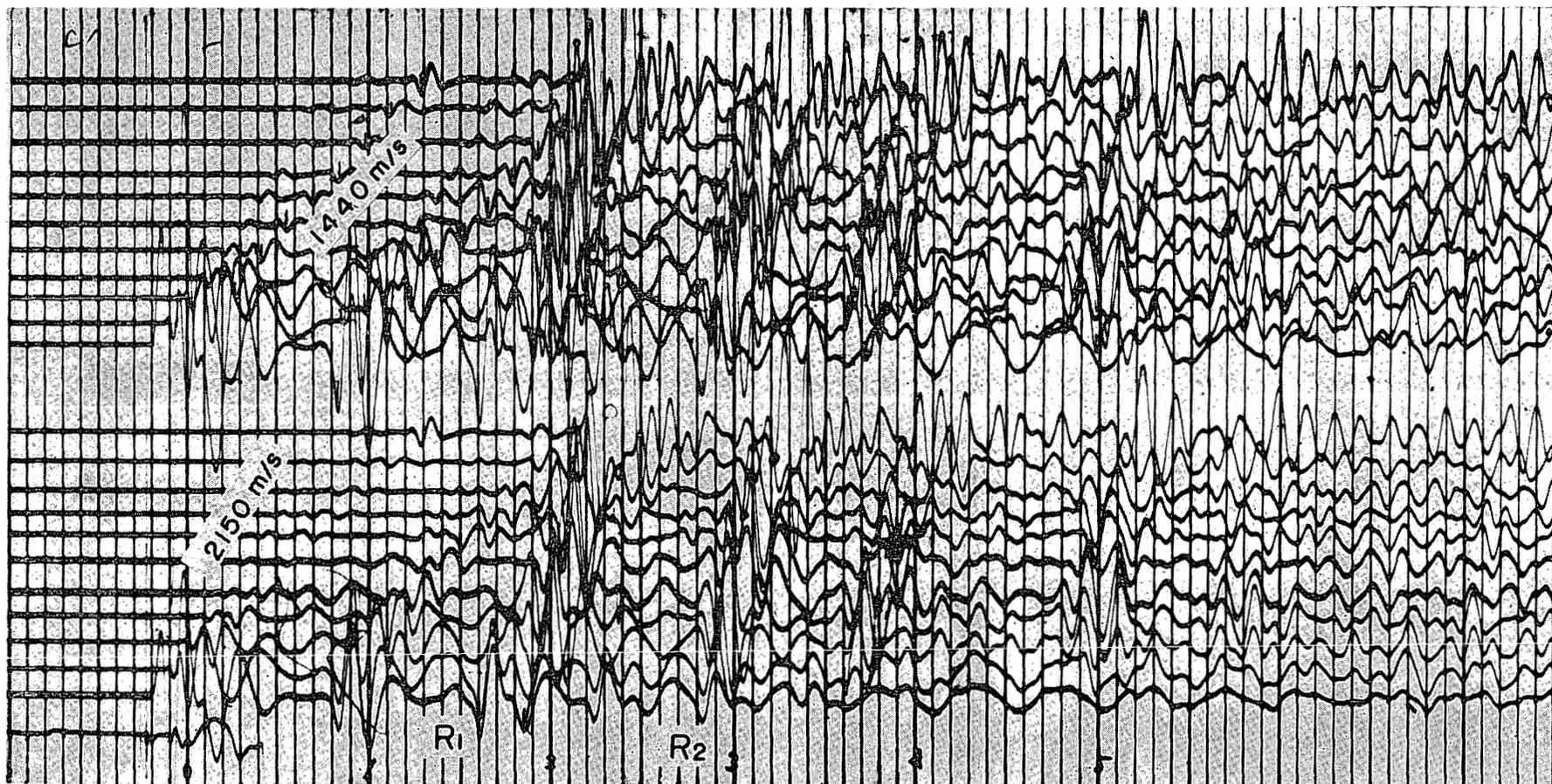


第6図 (A) 定着氷上での観測記録の例 (Suppression なし).

下段は mixing.

Fig. 6 (A). Seismic records on the fast ice, with no suppression.

Lower record : with mixing.



第6図(B) 第6図(A)と同じ条件で得られた記録であるが、この場合は増巾器に suppression をかけてある。

下段は mixing.

Fig. 6 (B). Record with suppression, at the same shot-point using the same amount of explosive and depth of charge with the record in Fig. 6 (A).

Lower record : with mixing.

求めた基盤までの深さに約 15 m の差が現れているが、今回の調査ではその差が有意であるかどうかを決定する程、観測結果の精度はよくはない。定着氷中を伝わる P 波の速度は、北極洋の観測例によると、2400 m/s から 2900 m/s の範囲に普通入っている。しかし、J. Oliver³⁾等が北極洋において夏季に、われわれと同じく、2150 m/s というおそい P 波速度の観測値を流氷で得ている。氷の中に水が相当量しみこんでいると、J. Oliver 達は解釈しているが、昭和基地付近の氷が、如何に水っぽいものであつたかをこの観測値は示している。

8. 結 語

基地建設作業の間に、建設の手を 1 時休めて行われた短期間の調査であつたので、全くテスト程度で観測結果として得る所のは少なかつた。しかし極地における作業の経験は、期間は短いとはいえ貴重な収穫であつた。

終りに、作業に協力いただいた楠宏隊員及び宗谷乗組員の諸兄に厚く御礼申し上げます。

なお、常に筆者等に激励と鞭撻をかたじけなくした南極地域観測隊長永田武教授に深く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) A. Jose et J. J. Holtzscherer: Rapports Scientifiques des Expéditions Polaires Françaises, N III 2, Annales de Géophysique (1953).
- 2) B. Imbert: Rapports Scientifiques des Expéditions Polaires Françaises, S III 2, Annales de Géophysique (1953).
- 3) J. Oliver, A. P. Crary and R. Cotell: Elastic Waves in Arctic Pack Ice. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 35, No. 2.