

東南極みずほ高原における屈折法および広角反射法地震探査 —観測概要(第43次夏隊報告)—

宮町宏樹¹・戸田 茂²・松島 健³・高田真秀⁴・
高橋康博⁵・神谷大輔⁶・渡邊篤志⁷・山下幹也⁸・柳澤盛雄⁹

A seismic refraction and wide-angle reflection exploration in 2002 on the Mizuho Plateau, East Antarctica —Outline of observations (JARE-43)—

Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Toda², Takeshi Matsushima³,
Masamitsu Takada⁴, Yasuhiro Takahashi⁵, Daisuke Kamiya⁶, Atsushi Watanabe⁷,
Mikiya Yamashita⁸ and Morio Yanagisawa⁹

Abstract: A seismic refraction and wide-angle reflection exploration was successfully conducted along a profile crossing the JARE-41 seismic profile on the Mizuho Plateau, in East Antarctica, in the austral summer season of 2001–2002 (JARE-43). One hundred sixty-one seismic stations were temporarily installed along a profile about 151 km long and seven large shots with about 700 kg of dynamite were fired. In addition, one shot with charge size of 20 kg was also arranged along the profile. The obtained seismic records show the clear onsets of the first arrivals at distances of less than 100 km from each large shot. In particular, seismic waves traveling through the ice sheet and dispersed surface waves were clearly observed. Some later reflection phases were also detected. The obtained first travel time data

¹鹿児島大学理学部地球環境科学科。Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kourimoto 1-21-35, Kagoshima 890-0065.

²愛知教育大学教育学部地学教室。Department of Earth Sciences, Faculty of Education, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542.

³九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター。Shimabara Observatory, Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, Shinyama 2, Shimabara 855-0843.

⁴北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター。Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita-10, Minami-8, Kita-ku, Sapporo 060-0810.

⁵北海道日本油脂株式会社技術開発部。Hokkaido NOF Corporation Technology & Development Department, Koshunai 549, Bibai, Hokkaido 079-0167.

⁶白山工業株式会社開発部。Hakusan Corporation R&D Dept., J Tower, 1-1, Nikkou-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183-0044.

⁷九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻。Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, Hakozaiki 6-10-1, Fukuoka 812-8581.

⁸総合研究大学院大学極域科学専攻。Department of Polar Science, The Graduate University for Advanced Studies, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

⁹国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

show that the ice sheet is a two-layered structure consisting of an upper layer with a P wave velocity of 2.7–2.9 km/s and a lower layer of 3.7–3.9 km/s. The thickness of the upper layer is estimated to be about 36–45 m. The apparent velocity in the basement rock just beneath the ice sheet is 6.1–6.2 km/s in the central and southern parts of the profile and almost 5.9 km/s in the northern part. This report describes basic outlines of the exploration and the obtained seismic data.

要旨: 第 43 次日本南極地域観測隊夏隊 (JARE-43) では、東南極みずほ高原において、JARE-41 に引き続き、みずほ高原下の地殻の速度構造を明らかにするため、屈折法および広角反射法地震探査を実施した。探査測線は、みずほルート上の H176 地点を起点に北北東方向に 101 km、南南西方向に 50 km の測線長約 151 km であり、JARE-41 の探査測線と斜交している。この測線上に 161 台の地震観測点を配置し、7 カ所で薬量 700 kg 程度の大発破、1 カ所で薬量 20 kg の小発破を行った。大発破点からの距離が 100 km 以下では、明瞭な初動が観測された。また、氷床中を伝播して来た波、分散波および地殻深部 (コンラッド面とモホ面) からの反射波と推定される後続波も観測された。発破点近傍の観測で得られた初動走時から、氷床が厚さ 36–45 m でみかけ速度 2.7–2.9 km/s の上部層とみかけ速度 3.7–3.9 km/s の下部層から成り立つことが推定された。測線全体の初動走時から、氷床直下の基盤層 (岩盤) のみかけ速度が、測線の北部では 5.9 km/s、中央部~南部では 6.1–6.2 km/s となり、基盤層の速度差が示唆された。本報告は、実験の概要と得られたデータについて述べる。

1. はじめに

昭和基地の位置するリュツォ・ホルム湾周辺は、これまで日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition, 以後、JARE と呼ぶ) を中心に地質学的調査研究が精力的になされてきた。最近、金尾 (1999) の東南極リソスフェアの構造と進化研究計画 (Structure and Evolution of East Antarctic Lithosphere; 以後、SEAL 計画と呼ぶ) に基づき、東南極の地殻進化過程と現在の構造を結びつける調査・研究が推し進められている。

1980–1982 年 (JARE-21, -22)、みずほルートを探査測線とした本格的な人工地震探査が、南極地域ではじめて実施された (伊神ら, 1980; 伊藤ら, 1983)。その後、1999–2000 年 (JARE-41) に、同じみずほルート沿いで、より詳細な地殻構造の解明を目的に、大規模な人工地震探査が実施され (宮町ら, 2001), Tsutsui *et al.* (2001a, b) によって、地殻浅部および深部の速度構造の詳細が明らかにされた。

JARE-43 では、SEAL 計画の一環として、JARE-41 に引き続き、リュツォ・ホルム岩体の大陸縁辺部における地殻構造を詳細に解明するため、みずほ高原のみずほルートに斜交する方向に 151 km の測線を設定し、ダイナマイト震源による屈折法および広角反射法地震探査を実施した。本論文では、この探査実験の概要と得られた観測データの報告に主眼を置き、詳細な解析結果については、別に報告する。

2. 観測概要

2.1. 測線と行動概要

図 1 に測線を、図 2 に観測点の標高分布を示す。探査測線はみずほルート上の H176 地点を起点に、北北東方向に 101 km、南南西方向に 50 km の総測線長約 151 km である。この測線上に 161 カ所の臨時地震観測点と 8 カ所の発破点 (SP1-SP8) を設けた。観測点は標高 1340-1550 m の範囲に分布している。観測グループは、測線上への臨時地震観測点の設置と

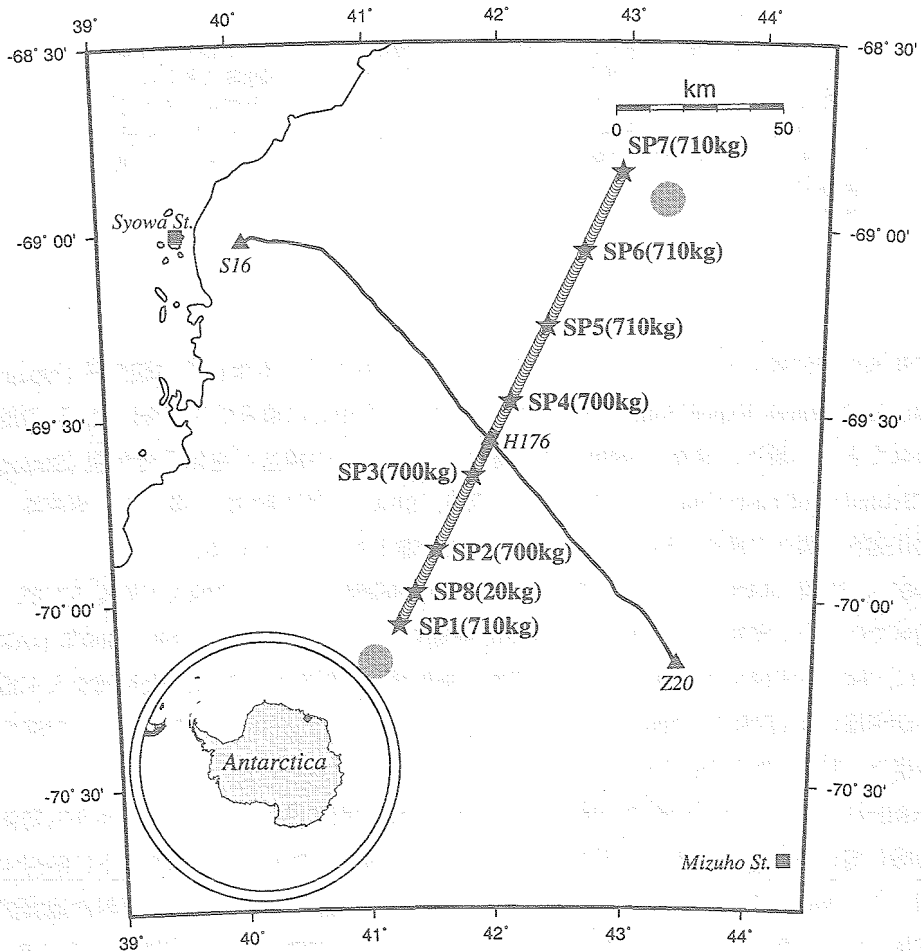


図 1 東南極みずほ高原上の探査測線 (HM ルート) 図。星印は発破点を、白丸は地震観測点を示す。実線は JARE-41 の探査測線 (みずほルート) である。灰色の円はクレバス帯を示す。

Fig. 1. A map showing the JARE-43 seismic profile (HM route) in 2002, the Mizuho Plateau, East Antarctica. Stars and open circles indicate the shot points and the temporary seismic stations, respectively. The solid line is a seismic profile in JARE-41. Shaded circles show crevasse areas.

その地点の位置測量および重力・アイスレーダー測定担当の測線班(雪上車 SM100 型 2 台, 橋 13 台と人員 4 名), 主に発破を実行する震源班(雪上車 SM100 型 2 台, 橋 11 台と人員 6 名), 昭和基地をベースに空中投下型地震計(ペネトレータ)を取り扱うヘリ班(アエロスパシアル社製小型双発ヘリコプター(AS355F2) 1 機, 観測要員 2 名, ヘリコプター要員 2 名)によって構成された(付録参照). なお, ヘリ班の小型ヘリコプターは, 第 43 次日本南極地域観測隊によってチャーターされた.

人員および物資は, 2001 年 12 月 21 日に砕氷艦「しらせ」から S16 へ空輸され, 2002 年 2 月 6 日に砕氷艦「しらせ」に帰還した. 全行動期間は 48 日間で, 図 3 に行動概要を示す. JARE-41 の探査時と異なる点は, 物資の空輸前日に, 人員の一部を S16 に送り込み, 翌日の物資 48 t(内訳: 燃料 30.8 t, ダイナマイト関連 6.4 t, 観測機材 5.7 t, 食糧 3.9 t, その他 1.2 t)の空輸の受け入れ準備(雪上車の立ち上げ, 橋の掘出し)をしたことである. この準備によって, 物資の受け入れがスムーズに行われた. また, ヘリ班の関連物資 37.5 t は昭和基地に空輸された. 測線班と震源班は SM100 型雪上車 4 台と橋 24 台で S16 を 2001 年 12 月 29 日に出発し, 31 日に探査測線展開の起点となるみずほルート上の H176 地点に到着した. 燃料節約のため, H176 地点には, 燃料橋 5 台, ダイナマイト橋 2 台をデポし, 探査期間中の H176 通過時に空橋等との橋交換を行い, 迅速な行動を心掛けた.

行動期間中の昭和基地との定時交信には原則として VHF および HF 無線を用いたが, 無線状況が悪い場合や小型ヘリコプターの内陸部現地管制(Air-VHF 使用)および緊急時には, インマルサット M(震源班保有)も活用した. 特に, 探査期間の前半は, 電波状況が悪く, HF 無線による交信が困難であったので, インマルサット M による通信は有用であった.

2.2. ルート工作

今回の探査測線は未踏破ルートであったため, ルート工作が必要であった. そのため, 国内において, 衛星画像(SAR 画像)により, 想定される探査測線上のクレバスの存在の有無を机上調査した. また, 越冬中の 42 次隊に航空機による偵察飛行を事前に実施してもらうよう依頼した. 現地到着後は, 観測点展開に先立ち, 震源班の 2 台の雪上車によってルート工作(2002 年 1 月 1 日~1 月 5 日の 5 日間)を実施した. ルート工作は, 予定探査測線上の 500 m ごとの座標(緯度・経度)を事前に求めておき, 携帯型 GPS(GARMIN 社製の携帯型 GPS レシーバー“GPS III+)”を用い, 先頭の雪上車はその座標に向け移動し, 500 m ごとに旗竿を設置した. この旗竿の先端部 30 cm 程にアルミホイールを巻き付けた. このアルミホイールによって, 雪上車搭載のレーダースコープ上に, 数キロ先までの旗竿のエコーが確認され, 悪天候下における移動の際, 大変有用であった. 後続の雪上車はレーダースコープで旗竿を確認するとともに, ハンドベアリングコンパスによって方位を測定した. また, この雪上車によるルート工作の直前に, ヘリ班の小型ヘリコプターによる低高度からの偵察飛行を行い,

ルート上の安全を目視により確認した。実際、SP1側の偵察飛行の際、測線予定の方向(白瀬氷河の源流に相当する地域)にクレバス帯が分布していることがわかり、探査測線の南端の位置を当初の予定より10 km程短くした。これに伴い、測線の北端を北方に10 km延長することを検討したが、日程と安全性を優先し、北端を予定通りの地点とした。このため、探査測線長は、当初の161 kmから151 kmに短縮された。また、小型ヘリコプターは探査期間中の緊急物資空輸・人員交代等にも使用され、非常に有用であった。なお、今回の探査で開拓されたルートを“HMルート”と呼ぶこととする。

2.3. 観測点展開

測線班による臨時観測点の展開は、震源班によるルート工作が終了した区間に対して随時行われた。観測点間隔を1 kmとし、2002年1月1日~1月7日の7日間で151カ所を設置した。また、測線が当初よりも10 km短くなったことにより余った10カ所分の観測機材を、発破期間中の1月14・15日に測線の中央部10 kmの区間に展開した。したがって、この区間のみ、観測点間隔は500 mである。

観測点で使用された観測機材はJARE-41とまったく同様である。使用した地震計は、米国Mark Products社製上下動地震計L-22D(固有周波数2 Hz, コイル抵抗2.2 k Ω , ダンピング定数0.7, 平均感度0.63 V/cm/s)である。また、観測波形の収録には、設定された観測スケジュールに従って自動観測することができる白山工業社製デジタル波形収録装置DataMark LS-8000SH(メモリ20 MB, 以下、ロガーと呼ぶ)を用いた。南極地域では、ブリザードなどによる天候の悪化や、それによる観測点展開および発破作業の遅れが想定されるため、事前に正確な発破日を確定することはできない。そこで、観測点設置日の翌日から随時自動観測が起動するようにロガーを設定した。発破は、自動観測期間中の毎日17時01分と19時01分のいずれかの時刻に実施することにした。したがって、この各々の発破予定時間に対応した観測時間帯を設け、各観測時間を約7分15秒(たとえば、17時01分の発破の場合、観測時間帯は17時00分00秒~17時07分15秒まで)として、観測スケジュールを作成した。ロガーのチャンネル数は高倍率(300倍)と低倍率(30倍)の2チャンネルに固定し、サンプリング周波数を200 Hz, カットオフ周波数30 Hzのローパスフィルターを設定した。また、ロガーの内蔵高精度時計は、毎日12時00分から19時10分の長時間にわたって動作させることにより、刻時(水晶発信子)を安定化させ、各観測時間帯の前後にGPSによって自動刻時校正された。ロガーの電源には、低温による電圧降下に強いサイクロン電池(6 V・16 Ah)を用いた。

実際の設置作業では、測線班の先頭雪上車(人員2名)が、ルート工作时に立てられた旗竿の付近に地震計および保温箱(収録機器収納)が埋設できる程度の穴を掘り、後続の雪上車(人員2名)が、約40 cmの金属スパイクを地震計の底面に装着した地震計をその穴に突き刺

表1 臨時地震観測点リスト。座標値はWGS84系に基づいている。観測点HM067はみずほルート上のH176地点である。

Table 1. Lists of the temporary seismic stations along the profile. The coordinates are based on the WGS84 system. The station code HM067 corresponds to the H176 site on the Mizuho route.

Station Code	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)	Station Code	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)
HM001	70.06424	41.24296	1481.4	HM041	69.74295	41.71343	1517.0
HM002	70.05624	41.25485	1480.9	HM042	69.73488	41.72503	1522.0
HM003	70.04819	41.26679	1485.2	HM043	69.72682	41.73658	1525.2
HM004	70.04017	41.27867	1488.0	HM044	69.71880	41.74828	1530.0
HM005	70.03216	41.29065	1492.0	HM045	69.71073	41.75984	1531.5
HM006	70.02415	41.30254	1493.4	HM046	69.70273	41.77147	1534.1
HM007	70.01613	41.31427	1490.8	HM047	69.69465	41.78287	1537.5
HM008	70.00810	41.32626	1490.8	HM048	69.68655	41.79444	1541.3
HM009	70.00004	41.33802	1493.2	HM049	69.67852	41.80605	1545.4
HM010	69.99206	41.35005	1500.7	HM050	69.67044	41.81742	1547.3
HM011	69.98405	41.36184	1506.8	HM051	69.66239	41.82888	1548.0
HM012	69.97606	41.37359	1506.2	HM052	69.65435	41.84054	1549.1
HM013	69.96807	41.38577	1505.1	HM053	69.64624	41.85194	1547.0
HM014	69.96000	41.39752	1502.9	HM054	69.63822	41.86350	1545.3
HM015	69.95200	41.40938	1497.4	HM055	69.63017	41.87482	1544.7
HM016	69.94400	41.42110	1488.2	HM056	69.62209	41.88633	1547.8
HM017	69.93596	41.43300	1489.4	HM057	69.61399	41.89787	1547.5
HM018	69.92792	41.44459	1490.8	HM058	69.60996	41.90361	1547.2
HM019	69.91984	41.45641	1498.4	HM059	69.60595	41.90926	1547.1
HM020	69.91183	41.46813	1512.3	HM060	69.60192	41.91502	1547.7
HM021	69.90379	41.48002	1515.4	HM061	69.59789	41.92067	1548.0
HM022	69.89576	41.49171	1517.0	HM062	69.59386	41.92632	1550.1
HM023	69.88776	41.50354	1518.5	HM063	69.58987	41.93218	1550.2
HM024	69.87968	41.51532	1516.8	HM064	69.58579	41.93794	1551.8
HM025	69.87167	41.52703	1514.0	HM065	69.58174	41.94373	1551.0
HM026	69.86359	41.53872	1511.9	HM066	69.57775	41.94937	1552.6
HM027	69.85558	41.55048	1509.2	HM067*	69.57358	41.95444	1553.4
HM028	69.84754	41.56215	1509.9	HM068	69.56972	41.96070	1554.2
HM029	69.83953	41.57391	1509.5	HM069	69.56571	41.96640	1553.8
HM030	69.83144	41.58556	1511.6	HM070	69.56165	41.97216	1552.1
HM031	69.82341	41.59732	1514.7	HM071	69.55763	41.97784	1550.6
HM032	69.81540	41.60879	1516.8	HM072	69.55355	41.98351	1547.5
HM033	69.80736	41.62055	1518.0	HM073	69.54958	41.98928	1544.3
HM034	69.79929	41.63218	1516.1	HM074	69.54551	41.99489	1542.1
HM035	69.79126	41.64388	1514.5	HM075	69.54151	42.00057	1539.9
HM036	69.78324	41.65542	1516.5	HM076	69.53744	42.00636	1540.0
HM037	69.77515	41.66702	1519.6	HM077	69.53343	42.01194	1538.6
HM038	69.76716	41.67875	1517.8	HM078	69.52537	42.02333	1540.2
HM039	69.75908	41.69026	1519.0	HM079	69.51729	42.03466	1541.1
HM040	69.75101	41.70191	1517.0	HM080	69.50923	42.04600	1542.4

表1 続き
Table 1. (continued).

Station Code	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)	Station Code	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)
HM081	69.50114	42.05742	1543.0	HM121	69.17765	42.50368	1500.1
HM082	69.49304	42.06872	1543.2	HM122	69.16958	42.51462	1498.8
HM083	69.48498	42.08000	1543.0	HM123	69.16149	42.52566	1498.8
HM084	69.47691	42.09133	1543.0	HM124	69.15338	42.53667	1498.6
HM085	69.46885	42.10269	1541.0	HM125	69.14530	42.54758	1495.4
HM086	69.46075	42.11404	1541.5	HM126	69.13716	42.55850	1495.0
HM087	69.45268	42.12519	1539.3	HM127	69.12907	42.56943	1492.4
HM088	69.44464	42.13655	1538.0	HM128	69.12095	42.58036	1483.8
HM089	69.43654	42.14782	1535.8	HM129	69.11287	42.59131	1477.4
HM090	69.42848	42.15902	1534.8	HM130	69.10477	42.60227	1481.0
HM091	69.42037	42.17021	1534.0	HM131	69.09666	42.61315	1474.9
HM092	69.41233	42.18148	1535.5	HM132	69.08857	42.62410	1468.0
HM093	69.40426	42.19266	1539.7	HM133	69.08043	42.63499	1464.6
HM094	69.39616	42.20390	1543.2	HM134	69.07230	42.64583	1461.2
HM095	69.38806	42.21506	1542.3	HM135	69.06417	42.65673	1459.7
HM096	69.38000	42.22630	1542.5	HM136	69.05604	42.66761	1458.4
HM097	69.37192	42.23747	1547.1	HM137	69.04797	42.67846	1454.3
HM098	69.36382	42.24869	1549.0	HM138	69.03986	42.68933	1448.6
HM099	69.35577	42.25995	1545.2	HM139	69.03174	42.70014	1445.8
HM100	69.34768	42.27102	1545.0	HM140	69.02364	42.71106	1444.9
HM101	69.33950	42.28221	1544.1	HM141	69.01554	42.72189	1438.8
HM102	69.33141	42.29328	1544.7	HM142	69.00740	42.73273	1433.4
HM103	69.32335	42.30424	1542.0	HM143	68.99929	42.74351	1426.5
HM104	69.31523	42.31580	1542.6	HM144	68.99120	42.75425	1418.9
HM105	69.30716	42.32679	1541.9	HM145	68.98308	42.76513	1413.3
HM106	69.29907	42.33788	1540.9	HM146	68.97495	42.77594	1405.5
HM107	69.29097	42.34904	1537.3	HM147	68.96684	42.78676	1395.9
HM108	69.28289	42.36013	1531.4	HM148	68.95873	42.79752	1380.0
HM109	69.27480	42.37118	1527.8	HM149	68.95061	42.80841	1380.9
HM110	69.26670	42.38225	1527.8	HM150	68.94250	42.81912	1385.3
HM111	69.25861	42.39331	1526.9	HM151	68.93437	42.82978	1385.6
HM112	69.25054	42.40444	1526.7	HM152	68.92624	42.84056	1376.0
HM113	69.24243	42.41545	1524.7	HM153	68.91813	42.85127	1363.9
HM114	69.23439	42.42646	1522.4	HM154	68.91001	42.86206	1362.1
HM115	69.22628	42.43750	1521.3	HM155	68.90187	42.87271	1363.1
HM116	69.21819	42.44855	1521.1	HM156	68.89373	42.88339	1358.7
HM117	69.21003	42.45958	1519.1	HM157	68.88564	42.89411	1351.8
HM118	69.20196	42.47059	1511.4	HM158	68.87752	42.90485	1346.1
HM119	69.19386	42.48171	1507.7	HM159	68.86936	42.91555	1345.3
HM120	69.18572	42.49260	1505.6	HM160	68.86129	42.92616	1344.3
				HM161	68.85313	42.93695	1339.2

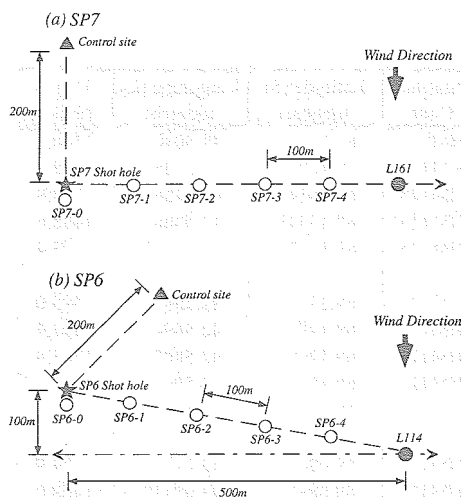


図4 ラインアップ観測の観測点配置例。(a) SP7, (b) SP6. ☆は発破点, ▲は発火器, ○はラインアップ観測点, ●は主測線の観測点を, それぞれ示している。

Fig. 4. Examples showing the shot points and line-up observation sites. (a) SP7 and (b) SP6. ☆, Shot borehole; ▲, Shot control site; ○, Line-up seismic stations; ●, Seismic stations on the main profile.

し, ロガーおよび電源が収納された保温箱とともに, 雪面下に埋設した. なお, ロガーの観測スケジュール等は, 設置前日に設定した. 表1に観測点の座標(WGS-84系)を示す. 観測点コードは, ルート名“HM”に3桁の番号(測線の南端から)を並べたものとした.

震源班では, 氷床の地震波速度情報を得るため, 各発破点近傍に5~6観測点から成るラインアップ観測(観測点間隔は約100m)を行った. 図4に, 発破点が探査測線の端の場合(SP7)と測線中の場合(SP6)のラインアップ観測の配置例を示す. 原則として, ラインアップ観測点は探査測線と同じ方向に展開した. この観測に用いられた機材は, 測線班による臨時観測点と同じロガーおよび地震計である. ただし, サンプル周波数は1kHz, アンプ倍率は30倍と2倍の2チャンネルとした. ラインアップ観測点の座標等を表2に示す. この観測点の設置には, 雪上車1台と人員2名によって, 発破の掘削と並行して行われた. また, 全観測点設置後に雪上車1台と人員1名によりGPS測量を行った. ただし, 発破孔のGPS測量は, ダイナマイト装薬直後の発破当日に実施した.

2.4. 発 破

測線班による全臨時観測点展開完了(2002年1月7日)後, 震源班は探査測線上を移動しながら発破作業を順次実施した. この作業は, 一カ所の発破に対して, 通常, 移動に1日, 発破孔の掘削に1日, ダイナマイトの装薬および発破に1日の合計3日間を要した. 発破点の発破時刻および座標等の情報を表3に示す. 薬量700kg級の大発破SP1-SP7は, 測線上にはほぼ均等間隔の25kmごとに配置した. 薬量20kgの小発破SP8は残薬処理の意味もあり, 大発破完了後, SP1とSP2のほぼ中間で実施した.

大発破孔は, スチーム噴出式氷床掘削ドリル(操作員2名)により氷床に掘削された. この

表2 ラインアップ観測点の座標(WGS84系), 水平距離, 方位角, 初動走時のリスト
 Table 2. Lists of the temporary seismic stations along the lineup profile near the shots. The coordinates are based on the WGS84 system. The horizontal distance between the shots and stations and the travel times are also listed.

Site Code	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)	Azimuth (degree)	Distance (meter)	Travel Time (msec)
SP1-0	70.06815	41.23694	1480.5	359.6	5	7
SP1-1	70.06785	41.23742	1480.6	25.3	42	20
SP1-2	70.06744	41.23802	1480.9	26.3	93	40
SP1-3	70.06665	41.23922	1480.4	26.8	192	70
SP1-4	70.06586	41.24041	1480.5	27.0	292	97
SP1-5	70.06506	41.24163	1480.2	27.1	392	124
SP2-0	69.86589	41.53218	1512.0	359.6	4	6
SP2-1	69.86550	41.53329	1511.8	-	-	-
SP2-2	69.86509	41.53445	1511.8	26.3	127	50
SP2-3	69.86472	41.53545	1513.1	-	-	-
SP2-4	69.86420	41.53698	1512.6	27.0	265	89
SP2-5	69.86288	41.54071	1511.7	27.1	471	144
SP3-0	69.66577	41.82258	1549.0	341.4	7	6
SP3-1	69.66507	41.82388	1549.0	29.6	97	39
SP3-2	69.66435	41.82524	1549.0	31.5	193	68
SP3-3	69.66370	41.82641	1548.6	31.7	279	91
SP3-4	69.66308	41.82757	1549.8	31.9	362	114
SP4-0	69.46512	42.11073	1542.5	261.4	10	8
SP4-1	69.46574	42.10936	1542.3	-	-	-
SP4-2	69.46651	42.10760	1543.1	220.2	205	74
SP4-3	69.46719	42.10615	1542.6	219.2	299	100
SP4-4	69.46797	42.10448	1541.6	218.6	408	130
SP5-0	69.26302	42.38984	1529.5	233.3	3	7
SP5-1	69.26376	42.38823	1528.6	217.7	108	44
SP5-2	69.26452	42.38667	1528.4	217.0	212	76
SP5-3	69.26530	42.38504	1527.7	216.8	321	107
SP5-4	69.26602	42.38352	1528.4	216.8	421	134
SP6-0	69.06048	42.66430	1461.3	274.4	11	8
SP6-1	69.06116	42.66282	1460.6	223.3	102	42
SP6-2	69.06189	42.66122	1460.5	220.6	206	74
SP6-3	69.06258	42.65970	1460.8	219.9	304	101
SP6-4	69.06331	42.65820	1460.6	218.9	405	128
SP7-0	68.84911	42.94207	1338.5	228.7	9	8
SP7-1	68.84981	42.94120	1339.6	206.4	94	38
SP7-2	68.85063	42.94016	1339.2	205.5	194	69
SP7-3	68.85143	42.93914	1339.4	205.2	292	97
SP7-4	68.85227	42.93810	1340.2	204.9	395	124

表3 発破点リスト. 座標値は WGS84 系である. また, 表中の Depth1 と Depth2 は, それぞれ, 地表面から発破孔中のダイナマイトの最下部と最上部までの深さを示している.

Table 3. Lists of the shot points. The coordinates are based on the WGS84 system. Depth1 and Depth2 indicate the depths of the bottom and top of the dynamites in the borehole, respectively.

Shot Code	Local Date & Time (UT+3hours)	Charge (kg)	Latitude (S) (degree)	Longitude (E) (degree)	Height (meter)	Depth1 (meter)	Depth2 (meter)
SP1	2002.1.26 19h01m11.127s	710	70.06819	41.23694	1480.7	24.5	14.4
SP2	2002.1.23 17h01m26.223s	700	69.86592	41.53221	1512.0	23.6	14.6
SP3	2002.1.20 17h01m11.783s	700	69.66583	41.82264	1548.2	24.3	13.0
SP4	2002.1.17 17h01m10.148s	700	69.46511	42.11098	1542.5	23.8	15.6
SP5	2002.1.14 17h01m11.570s	710	69.26300	42.38990	1528.2	24.4	14.5
SP6	2002.1.11 17h01m10.769s	710	69.06049	42.66458	1461.3	25.7	14.9
SP7	2002.1.08 17h01m11.396s	710	68.84906	42.94223	1338.5	28.7	17.0
SP8	2002.1.27 17h01m11.623s	20	69.97976	41.36661	1506.2	4.5	2.0

ドリルは, JARE-41において使用したものをベースに造蒸気能力を 25 kg/時から 40 kg/時に改良したものである. 発破孔のサイズは直径 35-40 cm, 孔長は平均 25 m である. 1 カ所の発破孔を掘削するのに要する時間は 8-9 時間であった(平均掘削速度は 3.3 m/時).

震源として用いたダイナマイトは, 低温による凝固を抑えた南極専用に開発されたものである. 薬長 62 cm, 直径 8 cm (重量 5 kg/本) と薬長 21 cm, 直径 20 cm (重量 10 kg/本) の 2 種類の円筒型ダイナマイトを用意し, それぞれ, 1000 kg, 4000 kg の合計 5000 kg を使用した. また, 雷管には, JARE-41 で使用した電気雷管の代わりに, より安全性と信頼性のある非電気式雷管 (NONEL 雷管) を用いた.

橇からのダイナマイトの積み出しは, 発破孔の掘削と並行して人員 2-3 名によって行われ, 翌日に予定されている装薬の準備を済ませた. 発破当日の早朝, 火薬取り扱い責任者が, キャンプ地から 200 m 程離れた地点で, いわゆる“親ダイ”の火薬加工作業を行った. 発破孔へのダイナマイトの装薬作業は, 震源班全員 (6 名) により行った. また, 装薬後, 発破効率を上げると同時に, 環境への影響を最小限に押さえるため, 発破孔内に大量の雪を詰めた (雪封と呼ぶ). この雪封により, 発破孔からの噴出物は皆無であり, 発破孔周辺の雪面の変形もほとんどなかった. 発破は, ロガーの自動観測スケジュールに合わせ, 現地時間の 17 時 01 分 (あるいは, 19 時 01 分) に実施した.

一方, SP8 の発破孔は, 薬量が 20 kg と小さいことから, 雪氷のコアを採集するとき用いられる電動アイスオーガーによって掘削された. この掘削深度は 4.5 m, 孔径は 12 cm である. この発破でも雪封を試みたが, 掘削深度が浅いため, 発破時には, 発破孔を中心に直径 5 m 程の小規模なクレーターが発生した.

発火作業は, 発破孔から風上側に約 200 m 以上離れた地点に発火器を設置し, 発火器と発破孔中の親ダイの非電気雷管間に導火管が張られた. また, 発破時刻を決めるため, 親ダイ

に導線を取り付けた。この導線が、親ダイの発火によって切断される時刻を発破時刻とした。この測定には、臨時観測点と同じロガー2台(ただし、1台は予備。サンプリング周波数は1 kHz)を用いた。

2.5. 位置測量

臨時観測点、ラインアップ観測点および発破点の空間座標を求めるため、全地点においてGPS測量を実施した。JARE-41では、昭和基地内の国土地理院のGPS観測点(SYOG)との干渉測位を行ったが、今回は、独自に昭和基地内にGPS基準点(SYW8)を設置し、5秒サンプリングデータによる干渉測位を行った。使用レシーバーは、Ashtech Z12CGRSである。このSYW8の観測期間は2001年12月29日~2002年1月29日の毎日0700-2000 LTであり、測定データはパソコンに自動収録された。SYW8の座標はSYOGを基準点としたStatic法で座標を決定した。求められた座標は、南緯 $69^{\circ}00'17.1507''$ 、東経 $39^{\circ}34'43.2534''$ 、標高41.444 mであった。なお、観測期間中のSYW8の変動は、水平1 cm以内、上下方向5 mm以内に収まっている。

探査測線上の全観測点の測量は、観測点展開後、測線班が行った。測量ではAshtech Z-FXレシーバーを用い、サンプリング間隔5秒、衛星数5以上、Cut-off角 15° の条件下で20分以上の測定時間とした。また、震源班により、ラインアップ観測点では、同じ条件下で測定時間を30分以上、発破点では60分以上の測定を行った。測定中のPDOPは2.1-4.0、衛星数は6以上を確保することができた。各測定点で記録されたデータは、後日、SYW8との干渉測位に用いられ、全観測点の座標が決定された。表1~表3に示されている緯度・経度・高度の値(WGS84系)は、これらの解析結果の値である。なお、座標決定の平均誤差は、発破点に関しては、水平方向に3 cm、鉛直方向に5 cm、ラインアップ観測点に関しては、水平方向に6 cm、鉛直方向に5 cm程度であった。一方、測線上のほとんどの観測点では、水平および鉛直方向とも30 cm以下の誤差だった。

2.6. 観測点およびデータの回収

観測点の回収は、測線班が2002年1月27日より、震源班は2002年1月28日より開始し、1月29日に完了した。低温による電圧降下が原因と考えられるロガーの動作停止が3カ所で発生した。ロガーに記録・保存されたデータは、内陸拠点S16から砕氷艦「しらせ」に帰還後、船上でパーソナルコンピューターに転送され、波形データ・時刻較正情報等のチェックを行った。その結果、上記の3カ所以外に2カ所の不良データが確認されたが、これ以外はすべて正常に動作していた。また、GPSによる時刻較正も正常に動作し、波形サンプリング間隔(5 ms)の刻時精度は確保されている。

2.7. その他の観測

人工地震の観測以外に、測線班では、全観測点において重力測定を行い、また、測線の北側 110 km の区間のアイスレーダーによる氷床厚の連続測定を実施した。ヘリ班では、当初、ペネトレータを探索測線上に投入する予定であったが、機材の動作不良のため、試験観測に変更した。なお、これらの観測については、別に報告する予定である。

3. 観測結果

3.1. ラインアップ観測

各発破点のラインアップ観測点で得られた観測波形から初動の読み取りを行った。得られた走時を表 2 に示す。また、これらの走時と測線上の発破点近傍の観測点の走時図を図 5 に示す。各発破点のごく近傍では、みかけ速度 2.7-2.9 km/s、距離 300 m 以遠では 3.7-3.9 km/s のみかけ速度が得られた。これらの値は、氷床の浅部域が少なくとも 2 層から成り立っていることを示唆し、JARE-41 と同様な観測結果である。水平な層構造を仮定し、これらの速度値とインターセプトタイムから計算される氷床の第 1 層の厚さは、36-45 m の範囲であった。おそらく、この第 1 層は、氷床浅部のフィルン層に対応しているものと考えられる。また、氷床は、それ自体の圧密効果による深さ方向への速度の増加、すなわち、ミラー層である可能性が考えられる。

3.2. 探索測線上の観測波形と初動走時

各発破の臨時観測点で得られた波形のペーストアップを図 6 に示す。今回の観測点のロガーの増幅倍率は 300 倍であったが、観測された波形の振幅を見る限り、ロガーの最大倍率 900 倍がより適当であったと思われる。初動の後に、氷床中を伝播してきたと考え得られる直達波が発破点から距離 40 km 程まで明瞭に現れ、正分散を鮮明に示している表面波も距離 30 km 程まで記録された。また、地殻深部 (コンラッド面とモホ面) からの反射波も多くの記録から確認できた。さらに、S 波と思われる相も見られる。SP5 では、初動の 0.9 秒後に氷床直下の基盤層上面との多重反射波と推定される顕著な相がみられる。適当なフィルターや AGC 等の波形処理によって、より明瞭に後続波が検出できるであろう。

観測波形から初動およびその極性を読み取った。その結果を表 4 (SP1・SP2・SP3)、表 5 (SP4・SP5・SP6)、表 6 (SP7・SP8) に、走時図を図 7 (reduction velocity 6.2 km/s) に示す。この走時データは、ノイズレベル、刻時精度、初動の相の立ち上がりの明瞭度を考慮し、以下のようなランク分けがなされている (読み取り誤差を Δt 秒とする):

- A ランク $|\Delta t| \leq 0.02$ s
- B ランク $0.02 \text{ s} < |\Delta t| \leq 0.05$ s
- C ランク $0.05 \text{ s} < |\Delta t| \leq 0.10$ s (極性の判別可)

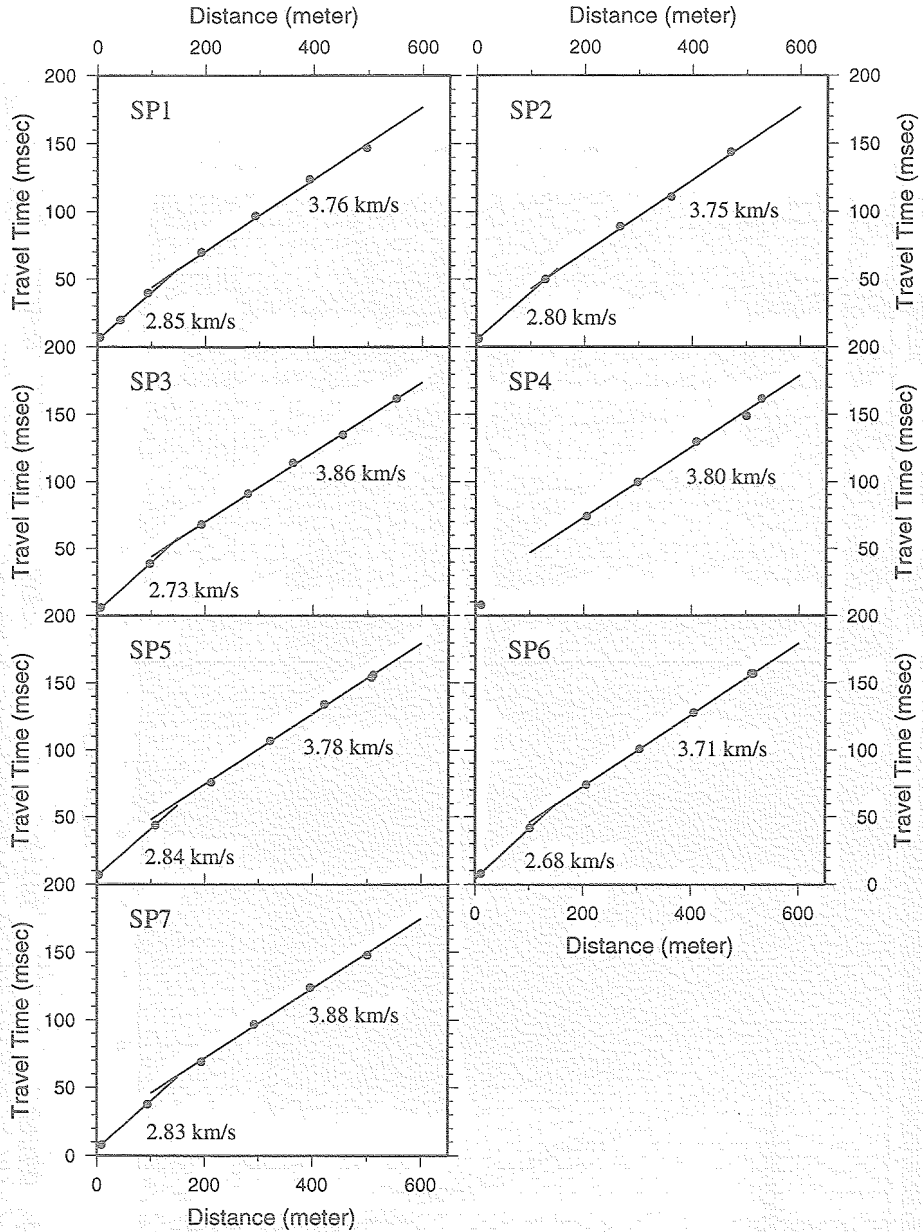


図 5 各ショットのラインアップ観測と近傍の観測点で得られた走時図。図中の数値はみかけ速度 (km/s) を示す。横軸は発破点からの水平距離、縦軸は走時
 Fig. 5. Travel time diagrams for the line-up observation for each shot point and the temporary stations located near the shot point. Values in the figure indicate the apparent velocities in km/s.

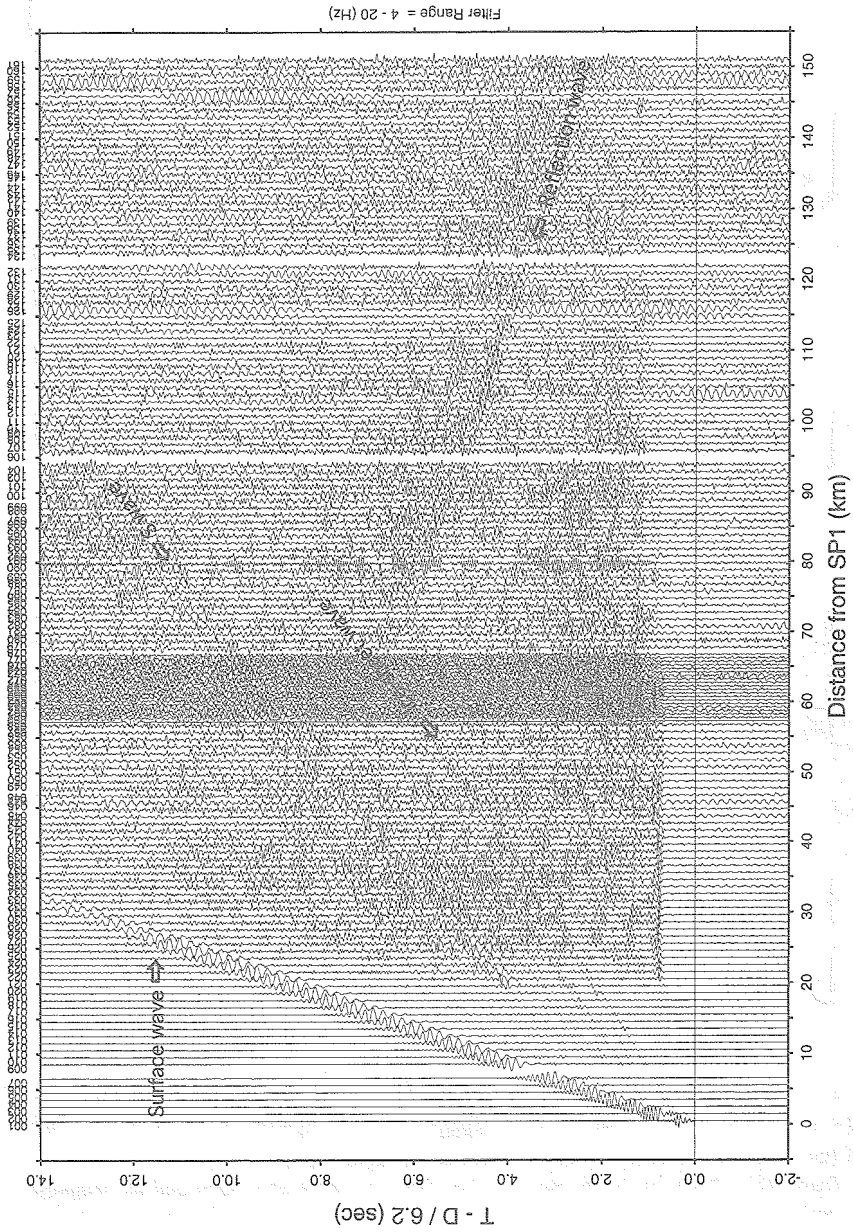


図 6-1 SP1 の観測波形。横軸は発破点からの距離，縦軸は 6.2 km/s でレデュースした走時。振幅は個々の波形の最大振幅で規格化されている。
 Fig. 6-1. Record section for SP1. The horizontal axis is the offset distance between the shot point and the seismic stations. Each record is normalized by its maximum amplitude. The reduction velocity is 6.2 km/s.

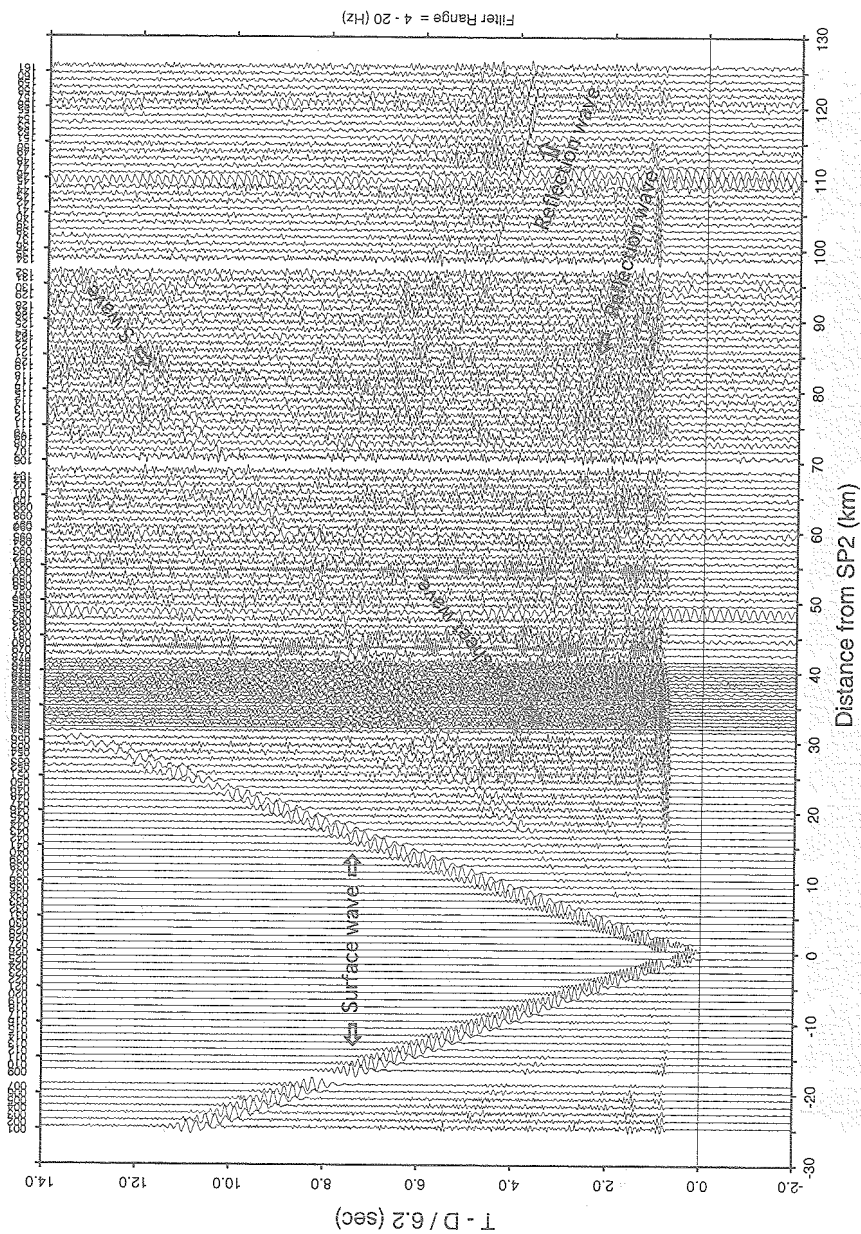


図 6-2. SP2 の観測波形
Fig. 6-2. Record section for SP2.

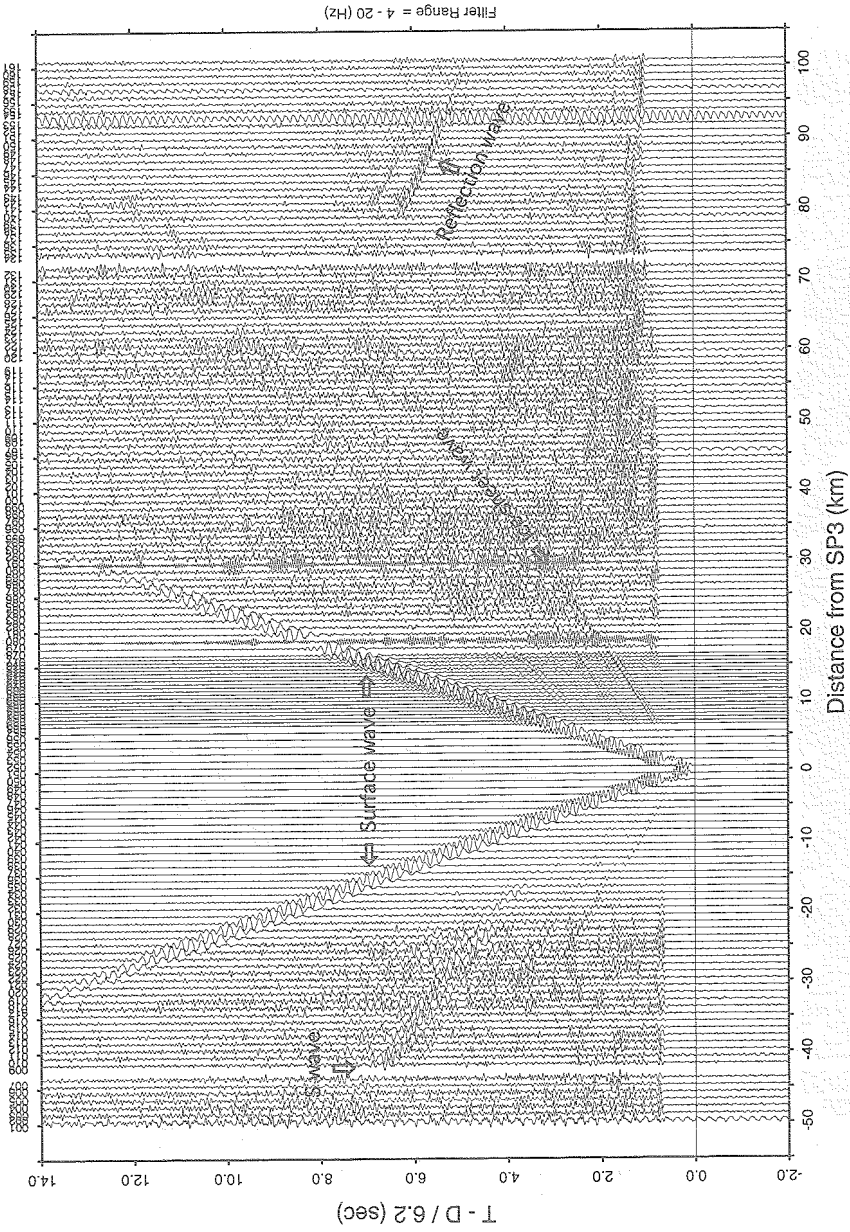


図 6-3 SP3 の観測波形
Fig. 6-3. Record section for SP3.

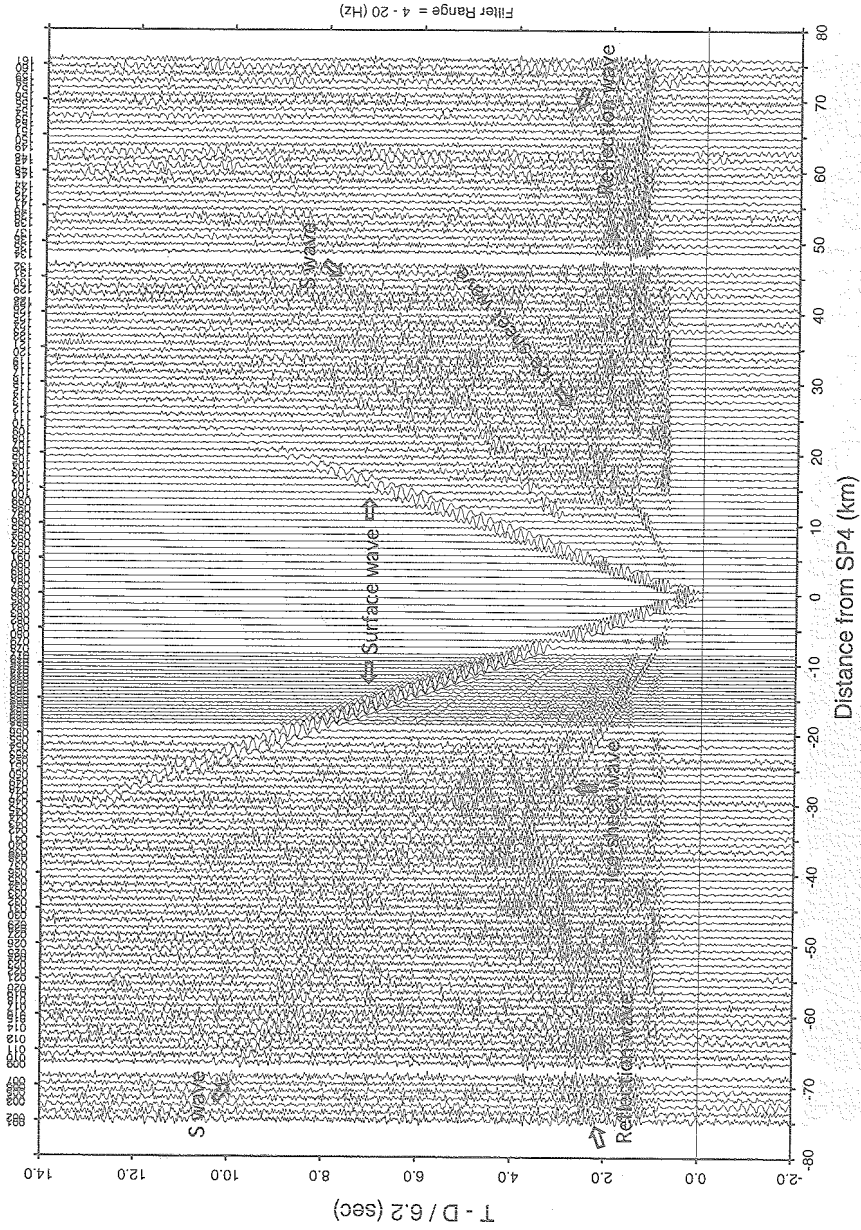


図 6-4 SP4 の観測波形
Fig. 6-4. Record section for SP4.

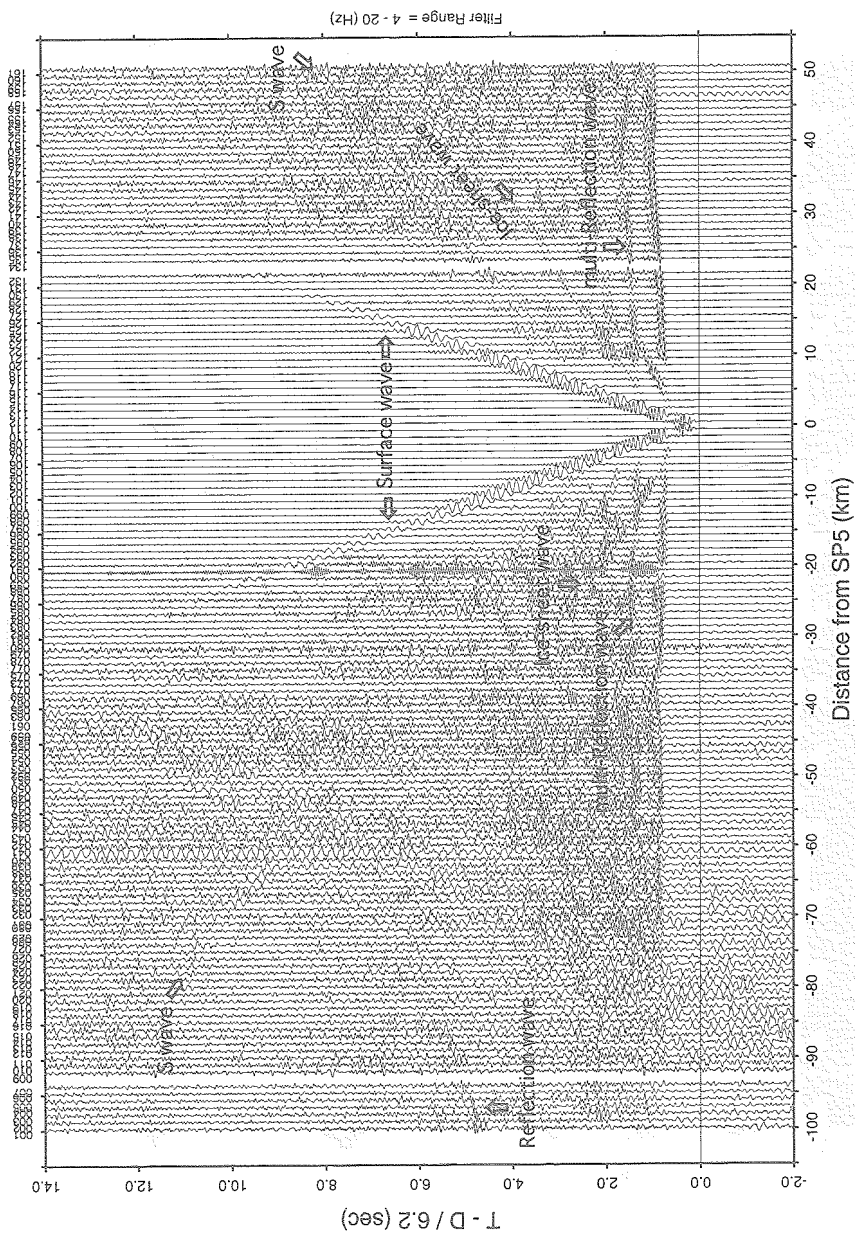


図 6-5 SP5 の観測波形
Fig. 6-5. Record section for SP5.

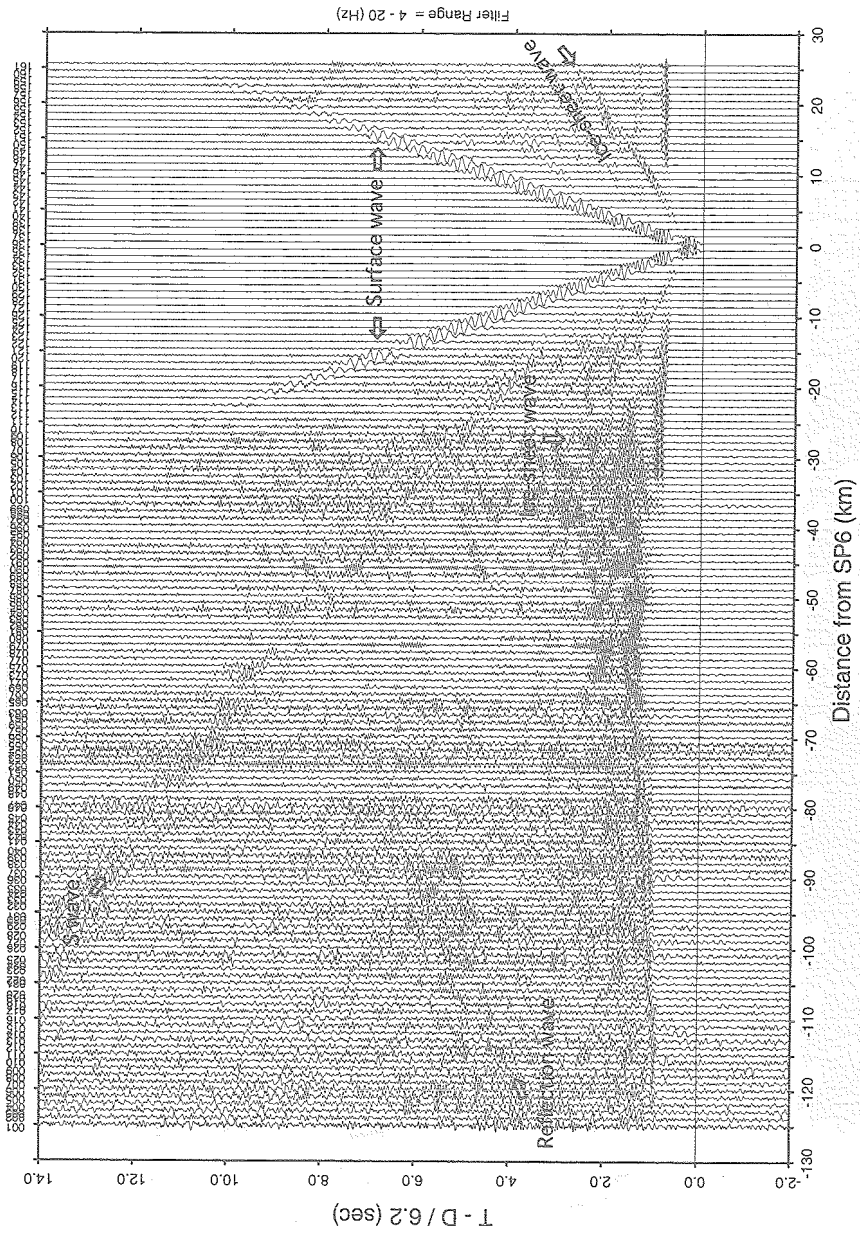


図 6-6 SP6 の観測波形
Fig. 6-6. Record section for SP6.

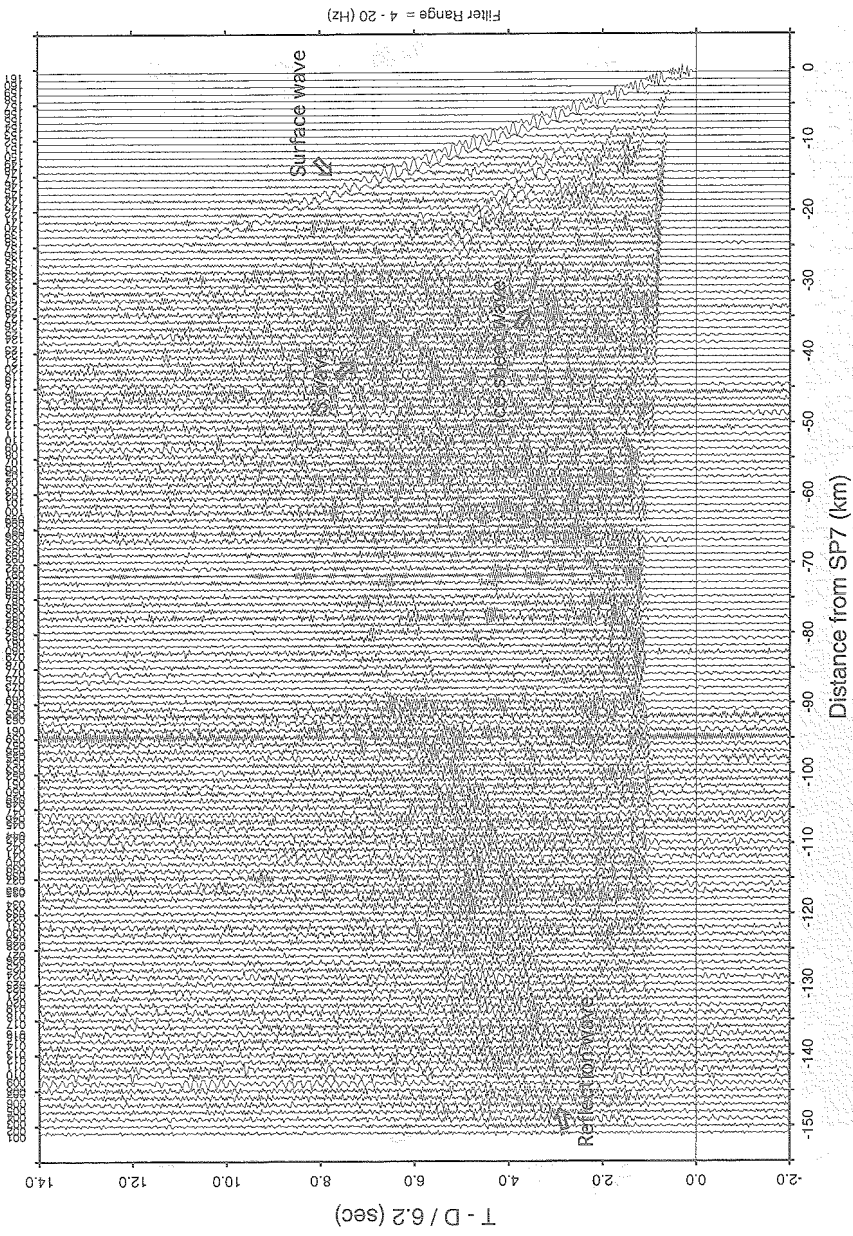


図 6-7 SP7 の観測波形
 Fig. 6-7. Record section for SP7.

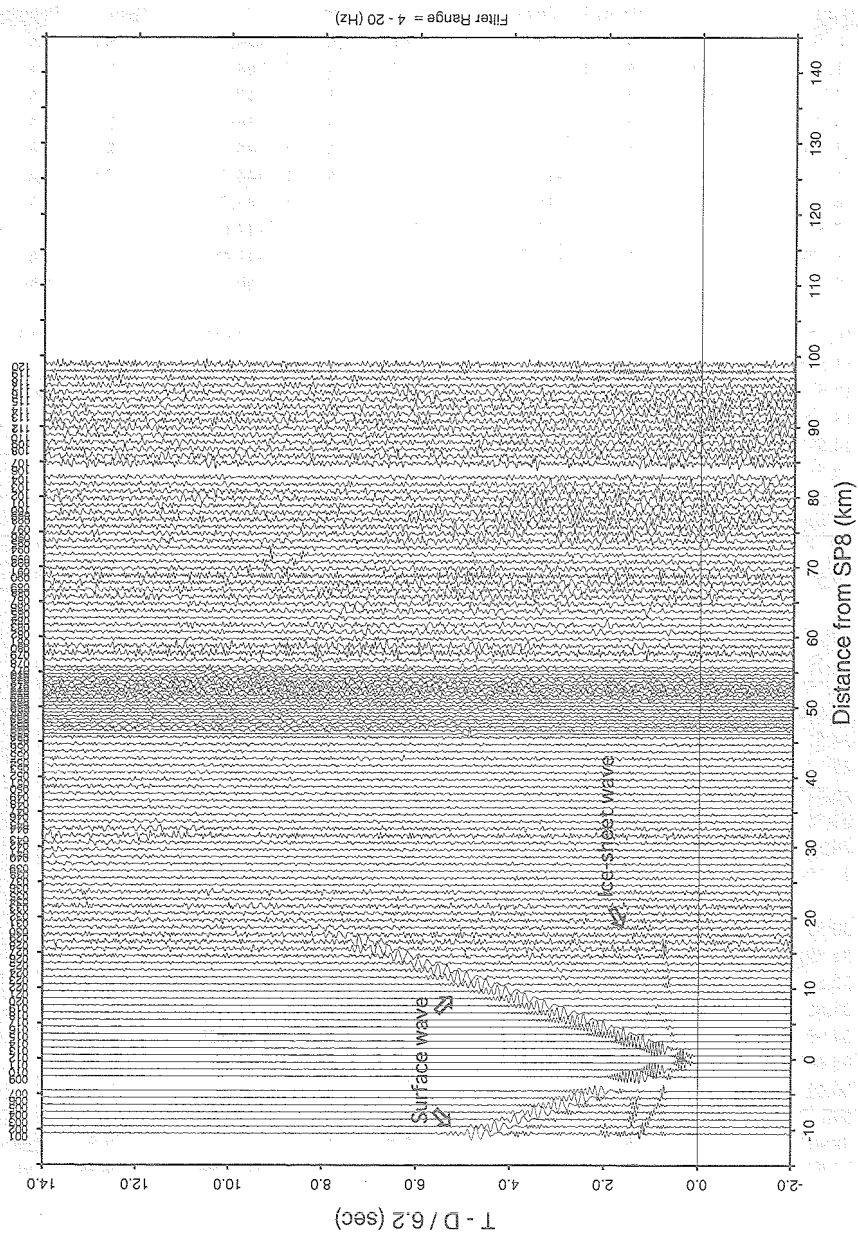


図 6-8 SP8 の観測波形
Fig. 6-8. Record section for SP8.

表4 SP1, SP2, SP3 の初動走時表
 Table 4. Travel times from SP1, SP2 and SP3.

Station Code	SP1			SP2			SP3		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM001	0.497	0.15	A+	-24.737	4.67	A+	-49.717	8.69	A+
HM002	1.498	0.42	A+	-23.736	4.52	A+	-48.716	8.54	A+
HM003	2.504	0.68	A+	-22.730	4.36	A+	-47.710	8.39	A+
HM004	3.507	0.94	A+	-21.727	4.21	A+	-46.707	8.22	A+
HM005	4.510	1.20	A+	-20.724	4.06	A+	-45.704	8.10	A+
HM006	5.512	1.47	A+	-19.722	3.90	A+	-44.702	7.92	A+
HM007	6.513	1.68	A+	-18.721	3.72	A+	-43.701	7.74	A+
HM008	7.518			-17.715			-42.696		
HM009	8.524	2.03	A+	-16.710	3.37	A+	-41.691	7.41	A+
HM010	9.525	2.21	A+	-15.708	3.18	A+	-40.689	7.22	A+
HM011	10.526	2.37	A+	-14.707	3.00	A+	-39.688	7.04	A+
HM012	11.524	2.49	A+	-13.709	2.83	A+	-38.690	6.86	A+
HM013	12.530	2.65	A+	-12.704	2.67	A+	-37.684	6.71	A+
HM014	13.536	2.80	A+	-11.698	2.51	A+	-36.678	6.57	A+
HM015	14.537	2.96	A+	-10.697	2.34	A+	-35.677	6.40	A+
HM016	15.537	3.13	A+	-9.697	2.17	A+	-34.677	6.22	A+
HM017	16.542	3.28	A+	-8.692	1.98	A+	-33.672	6.04	A+
HM018	17.543	3.41	A+	-7.691	1.82	A+	-32.671	5.89	A+
HM019	18.552	3.61	A+	-6.682	1.68	A+	-31.662	5.76	A+
HM020	19.553	3.79	A+	-5.682	1.50	A+	-30.662	5.60	A+
HM021	20.559	3.94	A+	-4.676	1.24	A+	-29.655	5.44	A+
HM022	21.561	4.11	A+	-3.674	0.98	A+	-28.654	5.29	A+
HM023	22.562	4.29	A+	-2.673	0.72	A+	-27.652	5.15	A+
HM024	23.570	4.47	A+	-1.667	0.46	A+	-26.644	4.97	A+
HM025	24.571	4.64	A+	-0.671	0.20	A+	-25.643	4.80	A+
HM026	25.578	4.81	A+	0.360	0.11	A+	-24.636	4.65	A+
HM027	26.579	4.96	A+	1.350	0.38	A+	-23.635	4.49	A+
HM028	27.582	5.14	A+	2.351	0.64	A+	-22.632	4.32	A+
HM029	28.584	5.29	A+	3.353	0.90	A+	-21.630	4.13	A+
HM030	29.592	5.46	A+	4.359	1.16	A+	-20.623	3.99	A+
HM031	30.596	5.62	A+	5.363	1.43	A+	-19.618	3.82	A+
HM032	31.592	5.78	A+	6.360	1.65	A+	-18.622	3.66	A+
HM033	32.598	5.96	A+	7.365	1.82	A+	-17.617	3.50	A+
HM034	33.603	6.11	A+	8.371	1.99	A+	-16.611	3.33	A+
HM035	34.606	6.29	A+	9.373	2.17	A+	-15.608	3.17	A+
HM036	35.605	6.43	A+	10.372	2.33	A+	-14.609	3.00	A+
HM037	36.613	6.60	A+	11.380	2.49	A+	-13.602	2.84	A+
HM038	37.613	6.75	A+	12.380	2.65	A+	-12.601	2.67	A+
HM039	38.617	6.92	A+	13.384	2.82	A+	-11.597	2.50	A+
HM040	39.624	7.10	A+	14.391	2.99	A+	-10.590	2.33	A+

表4 続き
Table 4. (continued).

Station Code	SP1			SP2			SP3		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM041	40.627	7.25	A+	15.394	3.16	A+	-9.587	2.16	A+
HM042	41.633	7.39	A+	16.400	3.30	A+	-8.581	2.01	A+
HM043	42.637	7.56	A+	17.404	3.47	A+	-7.577	1.85	A+
HM044	43.640	7.74	A+	18.406	3.64	A+	-6.575	1.68	A+
HM045	44.645	7.89	A+	19.412	3.80	A+	-5.569	1.48	A+
HM046	45.645	8.06	A+	20.412	3.98	A+	-4.569	1.22	A+
HM047	46.649	8.23	A+	21.415	4.15	A+	-3.566	0.95	A+
HM048	47.657	8.40	A+	22.424	4.31	A+	-2.557	0.69	A+
HM049	48.660	8.57	A+	23.426	4.48	A+	-1.555	0.43	A+
HM050	49.663	8.70	A+	24.430	4.62	A+	-0.553	0.16	A+
HM051	50.666	8.85	A+	25.433	4.78	A+	0.454	0.14	A+
HM052	51.670	9.01	A+	26.437	4.95	A+	1.457	0.40	A+
HM053	52.677	9.19	A+	27.444	5.11	A+	2.463	0.67	A+
HM054	53.678	9.35	A+	28.445	5.28	A+	3.465	0.93	A+
HM055	54.679	9.50	A+	29.445	5.44	A+	4.465	1.19	A+
HM056	55.684	9.68	A+	30.451	5.61	A+	5.470	1.45	A+
HM057	56.693	9.82	A+	31.460	5.77	A+	6.479	1.68	A+
HM058	57.195	9.90	C+	31.962	5.84	A+	6.981	1.76	A+
HM059	57.694	9.96	C+	32.461	5.93	A+	7.480	1.84	A+
HM060	58.196	10.06	C+	32.963	6.00	A+	7.982	1.93	A+
HM061	58.697	10.11	C+	33.463	6.07	A+	8.483	2.02	A+
HM062	59.197	10.22	C+	33.964	6.16	A+	8.983	2.09	A+
HM063	59.697	10.32	C+	34.464	6.24	A+	9.483	2.18	A+
HM064	60.204	10.43	C+	34.971	6.32	A+	9.990	2.26	A+
HM065	60.710	10.49	C+	35.477	6.41	A+	10.496	2.36	A+
HM066	61.205	10.55	C+	35.972	6.49	A+	10.992	2.44	A+
HM067	61.710	10.64	C+	36.477	6.58	A+	11.496	2.53	A+
HM068	62.204	10.71	C+	36.971	6.67	A+	11.990	2.61	A+
HM069	62.705	10.83	C+	37.471	6.75	A+	12.491	2.69	A+
HM070	63.210	10.88	C+	37.977	6.85	A+	12.996	2.78	A+
HM071	63.709	10.96	C+	38.476	6.90	A+	13.495	2.88	A+
HM072	64.215	11.08	C+	38.982	7.01	A+	14.001	2.97	A+
HM073	64.713	11.16	C+	39.479	7.11	A+	14.499	3.06	A+
HM074	65.216	11.24	C+	39.983	7.20	A+	15.002	3.14	A+
HM075	65.714	11.33	C+	40.481	7.30	A+	15.501	3.25	A+
HM076	66.222	11.41	C+	40.989	7.39	A+	16.008	3.34	A+
HM077	66.719	11.50	C+	41.486	7.48	A+	16.505	3.45	A+
HM078	67.723	11.68	C+	42.489	7.67	A+	17.509	3.63	A+
HM079	68.727			43.493	7.81	A+	18.513	3.75	A+
HM080	69.730	12.05	C+	44.496	7.93	A+	19.516	3.89	A+

表4 続き
Table 4. (continued).

Station Code	SP1			SP2			SP3		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM081	70.736	12.24	C+	45.503	8.06	A+	20.522	4.06	A+
HM082	71.742	12.40	C+	46.508	8.23	A+	21.528	4.23	A+
HM083	72.743	12.56	C+	47.510	8.42	A+	22.529	4.40	A+
HM084	73.747	12.70	C+	48.514	8.53	C+	23.533	4.56	A+
HM085	74.750	12.87	C+	49.517	8.71	C+	24.536	4.70	A+
HM086	75.757	13.01	C+	50.524	8.88	B+	25.543	4.85	A+
HM087	76.758	13.17	C+	51.525	9.00	C+	26.544	5.02	A+
HM088	77.759	13.33	C+	52.526	9.21	C+	27.545	5.19	A+
HM089	78.765	13.49	C+	53.532	9.36	C+	28.551	5.35	A+
HM090	79.765	13.68	L	54.532	9.51	C+	29.551	5.51	A+
HM091	80.771	13.76	L	55.538	9.70	C+	30.557	5.68	A+
HM092	81.771	13.97	L	56.538	9.87	C+	31.557	5.85	A+
HM093	82.773	14.12	L	57.540	10.02	C+	32.559	6.01	A+
HM094	83.778			58.545	10.24	C+	33.564	6.17	A+
HM095	84.783			59.550	10.40	C+	34.569	6.31	A+
HM096	85.785	14.65	L	60.551	10.54	C+	35.571	6.47	A+
HM097	86.788			61.554	10.68	C+	36.574	6.66	A+
HM098	87.793			62.559	10.86	C+	37.579	6.84	A+
HM099	88.795			63.561	10.95	C+	38.581	7.01	A+
HM100	89.796	15.25	L	64.563	11.16	C+	39.582	7.17	A+
HM101	90.810	15.45	L	65.577	11.30	C+	40.596	7.34	A+
HM102	91.812			66.579	11.51	C+	41.598	7.51	A+
HM103	92.810	15.77	L	67.577	11.65	C+	42.596	7.65	A+
HM104	93.824			68.590	11.80	C+	43.610	7.80	A+
HM105	94.823			69.590			44.609	7.96	A+
HM106	95.826			70.592	12.12	C+	45.612	8.12	A+
HM107	96.831	16.43	L	71.598	12.30	C+	46.617	8.30	A+
HM108	97.833	16.63	L	72.600	12.45	C+	47.619	8.45	A+
HM109	98.835			73.602	12.62	C+	48.621	8.62	A+
HM110	99.840	16.89	L	74.606	12.79	C+	49.626	8.79	A+
HM111	100.843	17.04	L	75.609	12.96	C+	50.629	8.95	A+
HM112	101.845	17.15	L	76.612	13.13	C+	51.631	9.11	A+
HM113	102.848			77.615	13.26	C+	52.634	9.26	A+
HM114	103.846			78.612	13.41	C+	53.632	9.44	A+
HM115	104.850	17.64	L	79.617	13.74	L	54.636	9.60	A+
HM116	105.853	17.82	L	80.620	13.76	C+	55.639	9.75	A+
HM117	106.864	17.98	L	81.630	13.93	C+	56.650	9.89	A+
HM118	107.864	18.14	L	82.631	14.19	C+	57.650	10.06	A+
HM119	108.869	18.30	L	83.636	14.33	C+	58.655	10.23	A+
HM120	109.875	18.48	L	84.641	14.44	C+	59.661	10.38	A+

表4 続き
Table 4. (continued).

Station Code	SP1			SP2			SP3		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM121	110.876			85.643	14.57	C+	60.662	10.54	A+
HM122	111.876			86.642	14.97	L	61.662	10.72	A+
HM123	112.879			87.646	15.09	L	62.665	10.89	A+
HM124	113.884			88.650	15.07	C+	63.670	11.06	A+
HM125	114.884			89.650	15.20	C+	64.670	11.21	A+
HM126	115.891			90.657	15.36	C+	65.677	11.39	A+
HM127	116.892			91.659	15.54	C+	66.678	11.55	A+
HM128	117.897			92.664	15.88	C+	67.683	11.67	B+
HM129	118.898			93.665	16.07	C+	68.684	11.82	B+
HM130	119.902			94.668	16.24	C+	69.688	12.07	C+
HM131	120.905			95.671	16.38	C+	70.691	12.35	B+
HM132	121.907			96.673	16.54	C+	71.693	12.51	B+
HM133	122.913			97.680			72.699		
HM134	123.918			98.684	16.74	L	73.704	12.84	B+
HM135	124.924			99.690	16.91	L	74.710	13.06	B+
HM136	125.929			100.696	17.07	L	75.715	13.20	B+
HM137	126.928			101.695	17.28	L	76.714	13.36	B+
HM138	127.931			102.698	17.48	L	77.717	13.53	B+
HM139	128.936			103.702	17.58	L	78.722	13.71	B+
HM140	129.939			104.705	17.85	L	79.725	13.84	B+
HM141	130.940			105.707	17.97	L	80.726	14.05	B+
HM142	131.947			106.714	18.12	L	81.733	14.21	B+
HM143	132.949			107.716	18.29	L	82.735	14.35	B+
HM144	133.949			108.715	18.42	L	83.735	14.54	B+
HM145	134.953			109.720			84.739	14.71	B+
HM146	135.958			110.725			85.744	14.89	B+
HM147	136.961			111.728	19.00	L	86.747	15.05	B+
HM148	137.964			112.730	19.16	L	87.749	15.20	B+
HM149	138.969			113.736	19.32	L	88.755	15.35	B+
HM150	139.970			114.737	19.48	L	89.756	15.53	B+
HM151	140.973			115.740	19.68	L	90.759	15.68	B+
HM152	141.978			116.745	19.78	L	91.764	15.83	B+
HM153	142.980			117.746			92.766		
HM154	143.984			118.750	20.09	L	93.770	16.12	B+
HM155	144.987			119.754	20.25	L	94.773	16.27	B+
HM156	145.992			120.758	20.39	L	95.778	16.43	B+
HM157	146.992			121.758	20.55	L	96.778	16.59	B+
HM158	147.995			122.762	20.78	L	97.781	16.75	B+
HM159	149.003			123.770			98.789	16.88	B+
HM160	149.999			124.765	21.02	L	99.785	17.00	B+
HM161	151.008			125.774			100.794	17.20	B+

表5 SP4, SP5, SP6 の初動走時表
 Table 5. Travel times from SP4, SP5 and SP6.

Station Code	SP4			SP5			SP6		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM001	-74.771			-99.846	17.21	L	-124.933		
HM002	-73.770	12.85	L	-98.845	17.01	L	-123.932		
HM003	-72.764	12.58	L	-97.839	16.88	L	-122.925	20.64	C+
HM004	-71.761	12.46	L	-96.836	16.52	L	-121.922	20.51	C+
HM005	-70.758			-95.833	16.45	L	-120.919	20.35	C+
HM006	-69.756	12.12	L	-94.831	16.15	L	-119.917	20.18	C+
HM007	-68.755			-93.830	16.12	L	-118.917	20.03	C+
HM008	-67.749			-92.825			-117.911	19.91	C+
HM009	-66.744			-91.820	15.71	L	-116.906	19.76	C+
HM010	-65.742			-90.818			-115.904	19.59	C+
HM011	-64.741	11.30	C+	-89.817	15.27	C+	-114.903	19.38	C+
HM012	-63.743	11.10	C+	-88.819	15.11	C+	-113.905	19.21	C+
HM013	-62.737	10.89	C+	-87.813	14.99	C+	-112.899	19.05	C+
HM014	-61.731	10.76	C+	-86.807	14.88	C+	-111.893	18.96	C+
HM015	-60.730	10.63	C+	-85.806	14.69	C+	-110.892	18.80	C+
HM016	-59.731	10.48	C+	-84.806	14.53	C+	-109.893	18.64	C+
HM017	-58.725	10.29	C+	-83.801	14.35	C+	-108.887	18.44	C+
HM018	-57.724	10.07	C+	-82.800	14.20	C+	-107.886	18.31	C+
HM019	-56.716	9.95	C+	-81.791	14.05	C+	-106.877	18.16	C+
HM020	-55.715	9.75	C+	-80.791	13.86	C+	-105.877	18.03	C+
HM021	-54.709	9.62	C+	-79.784	13.68	C+	-104.870	17.86	C+
HM022	-53.707	9.46	C+	-78.782	13.52	C+	-103.869	17.72	C+
HM023	-52.705	9.24	B+	-77.781	13.40	C+	-102.867	17.59	C+
HM024	-51.698	9.08	B+	-76.773	13.23	C+	-101.859	17.42	C+
HM025	-50.697	8.92	B+	-75.772	13.04	C+	-100.858	17.20	C+
HM026	-49.690	8.75	B+	-74.765	12.89	C+	-99.852	17.03	C+
HM027	-48.689	8.58	B+	-73.764	12.72	C+	-98.850	16.89	C+
HM028	-47.686	8.43	B+	-72.761	12.52	B+	-97.847	16.72	B+
HM029	-46.684			-71.759	12.35	B+	-96.845	16.53	B+
HM030	-45.676	8.08	B+	-70.751	12.17	B+	-95.838	16.38	B+
HM031	-44.672	7.92	B+	-69.747	12.00	B+	-94.834	16.21	B+
HM032	-43.676	7.76	B+	-68.751	11.86	B+	-93.837	16.07	B+
HM033	-42.670	7.62	B+	-67.746	11.68	B+	-92.832	15.88	B+
HM034	-41.665	7.45	B+	-66.740	11.52	B+	-91.826	15.73	B+
HM035	-40.662	7.31	B+	-65.737	11.36	B+	-90.823	15.56	B+
HM036	-39.662	7.16	B+	-64.738	11.27	B+	-89.824	15.39	B+
HM037	-38.655	6.98	B+	-63.730	11.13	B+	-88.817	15.25	B+
HM038	-37.655	6.84	B+	-62.730	10.96	B+	-87.816	15.07	B+
HM039	-36.651	6.71	B+	-61.726	10.81	B+	-86.812	14.93	B+
HM040	-35.644	6.55	B+	-60.719	10.63	B+	-85.805	14.76	B+

表5 続き
Table 5. (continued).

Station Code	SP4			SP5			SP6		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM041	-34.641	6.35	B+	-59.716	10.44	B+	-84.802	14.63	B+
HM042	-33.635	6.18	B+	-58.710	10.27	B+	-83.796	14.45	B+
HM043	-32.631	6.03	B+	-57.706	10.08	A+	-82.793	14.30	B+
HM044	-31.628	5.90	B+	-56.704	9.93	A+	-81.790	14.14	B+
HM045	-30.623	5.71	B+	-55.698	9.75	A+	-80.784	13.95	B+
HM046	-29.622	5.57	B+	-54.698	9.60	A+	-79.784	13.85	B+
HM047	-28.619	5.44	B+	-53.694	9.44	A+	-78.781	13.66	B+
HM048	-27.611	5.23	B+	-52.686	9.26	A+	-77.772	13.53	B+
HM049	-26.608	5.04	B+	-51.684	9.12	A+	-76.770	13.36	B+
HM050	-25.605	4.86	B+	-50.680	8.94	A+	-75.766	13.23	B+
HM051	-24.602	4.72	B+	-49.677	8.81	A+	-74.764		
HM052	-23.598	4.57	B+	-48.673	8.65	A+	-73.759	12.90	B+
HM053	-22.591	4.41	B+	-47.666	8.48	A+	-72.753	12.76	B+
HM054	-21.590	4.26	B+	-46.665	8.32	A+	-71.751	12.57	B+
HM055	-20.589	4.11	B+	-45.664	8.14	A+	-70.751	12.46	B+
HM056	-19.584	3.92	B+	-44.659	7.99	A+	-69.745	12.26	B+
HM057	-18.575	3.79	B+	-43.650	7.83	A+	-68.736	12.16	B+
HM058	-18.073	3.68	B+	-43.148			-68.235		
HM059	-17.574	3.58	A+	-42.649	7.67	A+	-67.736	12.01	B+
HM060	-17.072	3.51	A+	-42.147			-67.233		
HM061	-16.572	3.44	A+	-41.647	7.53	A+	-66.733	11.83	B+
HM062	-16.071	3.37	A+	-41.146			-66.233		
HM063	-15.571	3.28	A+	-40.646	7.37	A+	-65.733	11.68	B+
HM064	-15.064	3.19	A+	-40.139			-65.225		
HM065	-14.558	3.12	A+	-39.633	7.22	A+	-64.719	11.50	B+
HM066	-14.063	3.05	A+	-39.138			-64.224		
HM067	-13.558	2.97	A+	-38.633	7.08	A+	-63.719	11.38	B+
HM068	-13.064	2.90	A+	-38.139			-63.225		
HM069	-12.564	2.84	A+	-37.639	6.95	A+	-62.725	11.23	B+
HM070	-12.058	2.77	A+	-37.133			-62.220		
HM071	-11.559	2.70	A+	-36.634	6.82	A+	-61.720	11.06	B+
HM072	-11.053	2.60	A+	-36.128			-61.214		
HM073	-10.556	2.50	A+	-35.631	6.62	A+	-60.717	10.87	B+
HM074	-10.052	2.39	A+	-35.127			-60.213		
HM075	-9.554	2.28	A+	-34.629	6.40	A+	-59.715	10.64	B+
HM076	-9.046	2.18	A+	-34.121			-59.208		
HM077	-8.549	2.09	A+	-33.624	6.21	A+	-58.710	10.45	B+
HM078	-7.546	1.91	A+	-32.620	6.03	A+	-57.707	10.29	B+
HM079	-6.542	1.73	A+	-31.617			-56.703	10.08	B+
HM080	-5.539	1.47	A+	-30.613	5.68	A+	-55.700	9.97	B+

表5 続き
Table 5. (continued).

Station Code	SP4			SP5			SP6		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM081	-4.533	1.21	A+	-29.607	5.53	A+	-54.693	9.80	B+
HM082	-3.528	0.94	A+	-28.601	5.36	A+	-53.688	9.56	B+
HM083	-2.527	0.68	A+	-27.600	5.20	A+	-52.686	9.42	B+
HM084	-1.524	0.42	A+	-26.596	5.04	A+	-51.682	9.24	B+
HM085	-0.529	0.16	A+	-25.593	4.88	A+	-50.679	8.99	B+
HM086	0.501	0.15	A+	-24.586	4.70	A+	-49.673	8.87	B+
HM087	1.494	0.42	A+	-23.585	4.55	A+	-48.672	8.73	B+
HM088	2.494	0.68	A+	-22.584	4.38	A+	-47.671	8.62	B+
HM089	3.499	0.94	A+	-21.578	4.21	A+	-46.664	8.40	B+
HM090	4.499	1.20	A+	-20.578	4.03	A+	-45.664	8.23	B+
HM091	5.504	1.46	A+	-19.572	3.85	A+	-44.659	8.07	B+
HM092	6.505	1.69	A+	-18.572	3.69	A+	-43.658	7.86	B+
HM093	7.506	1.86	A+	-17.570	3.52	A+	-42.656	7.72	B+
HM094	8.511	2.03	A+	-16.565	3.35	A+	-41.651	7.53	B+
HM095	9.516	2.18	A+	-15.560	3.21	A+	-40.647	7.38	B+
HM096	10.518	2.34	A+	-14.558	3.05	A+	-39.645	7.17	A+
HM097	11.521	2.53	A+	-13.556	2.88	A+	-38.642	7.00	A+
HM098	12.526	2.72	A+	-12.551	2.73	A+	-37.637	6.85	A+
HM099	13.527	2.88	A+	-11.549	2.58	A+	-36.635	6.70	A+
HM100	14.529	3.05	A+	-10.547	2.42	A+	-35.633	6.56	A+
HM101	15.543	3.25	A+	-9.533	2.24	A+	-34.619	6.39	A+
HM102	16.545	3.41	A+	-8.531	2.08	A+	-33.617	6.22	A+
HM103	17.543	3.56	A+	-7.533	1.91	A+	-32.619	6.07	A+
HM104	18.556	3.71	A+	-6.520	1.73	A+	-31.606	5.91	A+
HM105	19.556	3.87	A+	-5.521	1.47	A+	-30.606	5.77	A+
HM106	20.558	4.03	A+	-4.518	1.21	A+	-29.604	5.60	A+
HM107	21.564	4.22	A+	-3.513	0.95	A+	-28.599	5.44	A+
HM108	22.566	4.37	A+	-2.512	0.68	A+	-27.597	5.28	A+
HM109	23.568	4.54	A+	-1.510	0.42	A+	-26.594	5.12	A+
HM110	24.572	4.71	A+	-0.511	0.16	A+	-25.590	4.96	A+
HM111	25.575	4.87	A+	0.508	0.16	A+	-24.587	4.80	A+
HM112	26.577	5.03	A+	1.505	0.42	A+	-23.585	4.64	A+
HM113	27.581	5.20	A+	2.507	0.68	A+	-22.581	4.48	A+
HM114	28.578	5.34	A+	3.504	0.94	A+	-21.584	4.32	A+
HM115	29.583	5.54	A+	4.508	1.21	A+	-20.580	4.12	A+
HM116	30.586	5.68	A+	5.511	1.47	A+	-19.576	3.94	A+
HM117	31.596	5.84	A+	6.521	1.73	A+	-18.566	3.76	A+
HM118	32.596	6.00	A+	7.522	1.89	A+	-17.566	3.59	A+
HM119	33.602	6.15	A+	8.526	2.05	A+	-16.561	3.41	A+
HM120	34.607	6.32	A+	9.532	2.23	A+	-15.555	3.25	A+

表5 続き
Table 5. (continued).

Station Code	SP4			SP5			SP6		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM121	35.609	6.47	A+	10.534	2.38	A+	-14.554	3.10	A+
HM122	36.608	6.62	A+	11.533	2.56	A+	-13.554	2.92	A+
HM123	37.611	6.84	A+	12.536	2.76	A+	-12.551	2.76	A+
HM124	38.616	6.97	A+	13.541	2.91	A+	-11.546	2.60	A+
HM125	39.616	7.13	A+	14.541	3.10	A+	-10.546	2.42	A+
HM126	40.623	7.28	A+	15.548	3.27	A+	-9.539	2.23	A+
HM127	41.625	7.47	A+	16.550	3.42	A+	-8.538	2.06	A+
HM128	42.630	7.60	A+	17.555	3.58	A+	-7.533	1.89	A+
HM129	43.630	7.75	A+	18.555	3.74	A+	-6.532	1.72	A+
HM130	44.634	7.98	C+	19.559	3.93	A+	-5.529	1.47	A+
HM131	45.637	8.23	C+	20.562	4.10	A+	-4.526	1.21	A+
HM132	46.639	8.43	C+	21.564	4.27	A+	-3.524	0.94	A+
HM133	47.646			22.570			-2.518	0.68	A+
HM134	48.650	8.70	C+	23.575	4.62	A+	-1.515	0.42	A+
HM135	49.656	8.95	C+	24.581	4.80	A+	-0.516	0.16	A+
HM136	50.662	9.14	C+	25.587	4.97	A+	0.511	0.16	A+
HM137	51.661	9.26	C+	26.585	5.15	A+	1.502	0.42	A+
HM138	52.664	9.49	C+	27.588	5.31	A+	2.504	0.68	A+
HM139	53.668	0.00		28.593	5.48	A+	3.508	0.94	A+
HM140	54.671	9.86	B+	29.596	5.64	A+	4.511	1.21	A+
HM141	55.673	10.00	B+	30.597	5.82	A+	-4.526	1.21	A+
HM142	56.680	10.11	B+	31.604	5.99	A+	-3.524	0.94	A+
HM143	57.681	10.28	B+	32.606	6.16	A+	-2.518	0.68	A+
HM144	58.681	10.49	B+	33.606	6.32	A+	-1.515	0.42	A+
HM145	59.686	10.61	B+	34.610	6.49	A+	-0.516	0.16	A+
HM146	60.691	10.75	B+	35.616	6.67	A+	0.511	0.16	A+
HM147	61.694	10.90	B+	36.618	6.84	A+	1.502	0.42	A+
HM148	62.696	11.14	B+	37.621	7.00	A+	2.504	0.68	A+
HM149	63.702	11.31	B+	38.626	7.16	A+	3.508	0.94	A+
HM150	64.703	11.43	B+	39.627	7.34	A+	4.511	1.21	A+
HM151	65.705	11.57	B+	40.630	7.50	A+	15.544	3.30	A+
HM152	66.710	11.72	B+	41.635	7.65	A+	16.549	3.45	A+
HM153	67.712	11.86	B+	42.637	7.80	A+	17.551	3.59	A+
HM154	68.716	12.07	B+	43.641	7.96	A+	18.555	3.76	A+
HM155	69.720	12.22	B+	44.644	8.12	A+	19.558	3.93	A+
HM156	70.724	12.39	B+	45.649	8.27	A+	20.563	4.09	A+
HM157	71.724	12.64	L	46.649	8.44	A+	21.563	4.25	A+
HM158	72.727	12.81	L	47.652	8.60	A+	22.566	4.41	A+
HM159	73.735	12.98	L	48.660	8.76	A+	23.574	4.59	A+
HM160	74.731	13.16	L	49.656	8.92	A+	24.570	4.75	A+
HM161	75.740	13.23	L	50.665	9.09	A+	25.579	4.92	A+

表6 SP7, SP8 の初動走時表
 Table 6. Travel times from SP7 and SP8.

Station Code	SP7			SP8		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM001	-151.012			-10.539	2.37	A+
HM002	-150.011			-9.538	2.22	A+
HM003	-149.005			-8.532	2.05	A+
HM004	-148.002			-7.529	1.89	A+
HM005	-146.999			-6.526	1.73	A+
HM006	-145.997			-5.524	1.46	A+
HM007	-144.996			-4.523	1.20	A+
HM008	-143.991			-3.518		
HM009	-142.985			-2.513	0.68	A+
HM010	-141.984			-1.511	0.42	A+
HM011	-140.982			-0.512	0.15	A+
HM012	-139.984			0.491	0.15	A+
HM013	-138.979	23.42	L	1.496	0.41	A+
HM014	-137.973	23.18	L	2.501	0.67	A+
HM015	-136.971	22.99	L	3.502	0.93	A+
HM016	-135.972	22.94	L	4.501	1.19	A+
HM017	-134.966	22.67	L	5.507	1.41	A+
HM018	-133.965	22.71	L	6.508	1.55	A+
HM019	-132.957			7.517	1.72	A+
HM020	-131.956	22.37	L	8.517	1.90	B+
HM021	-130.950	22.20	L	9.523	2.08	B+
HM022	-129.948	21.96	L	10.525	2.29	B+
HM023	-128.947	21.85	L	11.527	2.44	B+
HM024	-127.939	21.61	L	12.535	2.63	B+
HM025	-126.938	21.39	C+	13.535	2.82	B+
HM026	-125.931	21.24	C+	14.542	2.99	B+
HM027	-124.930	21.08	C+	15.543	3.14	B+
HM028	-123.927	20.97	C+	16.546	3.33	B+
HM029	-122.925	20.80	C+	17.548	3.48	B+
HM030	-121.917	20.65	C+	18.556		
HM031	-120.913	20.51	C+	19.560		
HM032	-119.917	20.36	C+	20.556		
HM033	-118.911	20.19	C+	21.562		
HM034	-117.906	20.04	C+	22.568		
HM035	-116.903	19.81	C+	23.571		
HM036	-115.904			24.570		
HM037	-114.896	19.52	C+	25.577		
HM038	-113.896			26.577		
HM039	-112.892	19.20	C+	27.582		
HM040	-111.885			28.588		

表6 続き
Table 6. (continued).

Station Code	SP7			SP8		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM041	-110.882	18.89	C+	29.591		
HM042	-109.876	18.73	C+	30.597		
HM043	-108.872	18.59	C+	31.601		
HM044	-107.869	18.45	C+	32.604		
HM045	-106.864	18.21	B+	33.610		
HM046	-105.863	18.03	B+	34.610		
HM047	-104.860	17.89	B+	35.613		
HM048	-103.852	17.72	B+	36.621		
HM049	-102.849	17.60	B+	37.624		
HM050	-101.846	17.41	B+	38.627		
HM051	-100.843	17.27	B+	39.630		
HM052	-99.838	17.10	B+	40.635		
HM053	-98.832	16.94	B+	41.641		
HM054	-97.831	16.77	B+	42.643		
HM055	-96.830	16.60	B+	43.643		
HM056	-95.825	16.46	B+	44.648		
HM057	-94.816	16.27	B+	45.658		
HM058	-94.314			46.159		
HM059	-93.815	16.13	B+	46.658		
HM060	-93.313			47.161		
HM061	-92.812	15.99	B+	47.661		
HM062	-92.312			48.161		
HM063	-91.812	15.87	B+	48.661		
HM064	-91.305			49.169		
HM065	-90.799	15.71	B+	49.674		
HM066	-90.303			50.170		
HM067	-89.799	15.55	B+	50.675		
HM068	-89.304			51.169		
HM069	-88.804	15.41	B+	51.669		
HM070	-88.299			52.174		
HM071	-87.800	15.27	B+	52.674		
HM072	-87.293			53.180		
HM073	-86.796	15.06	B+	53.677		
HM074	-86.293			54.181		
HM075	-85.794	14.91	B+	54.679		
HM076	-85.287			55.186		
HM077	-84.789	14.71	B+	55.684		
HM078	-83.786	14.59	B+	56.687		
HM079	-82.782			57.691		
HM080	-81.779	14.26	B+	58.694		

表 6 続き

Table 6. (continued).

Station Code	SP7			SP8		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM081	-80.773	14.04	B+	59.700		
HM082	-79.767	13.87	B+	60.706		
HM083	-78.766	13.75	B+	61.708		
HM084	-77.761	13.55	B+	62.712		
HM085	-76.759	13.36	B+	63.715		
HM086	-75.752	13.19	B+	64.721		
HM087	-74.751	13.06	B+	65.722		
HM088	-73.750	12.87	B+	66.723		
HM089	-72.744	12.75	B+	67.729		
HM090	-71.743	12.57	B+	68.730		
HM091	-70.738	12.39	C+	69.735		
HM092	-69.737	12.21	C+	70.736		
HM093	-68.736	12.05	C+	71.738		
HM094	-67.731	11.86	C+	72.742		
HM095	-66.726	11.76	C+	73.747		
HM096	-65.724	11.56	C+	74.749		
HM097	-64.721	11.39	A+	75.752		
HM098	-63.716	11.20	A+	76.757		
HM099	-62.714	11.00	A+	77.759		
HM100	-61.712	10.88	A+	78.761		
HM101	-60.699	10.71	A+	79.775		
HM102	-59.697	10.54	A+	80.776		
HM103	-58.699	10.38	A+	81.774		
HM104	-57.685	10.19	A+	82.788		
HM105	-56.686	10.04	A+	83.787		
HM106	-55.683	9.89	A+	84.790		
HM107	-54.678	9.72	A+	85.795		
HM108	-53.676	9.57	A+	86.797		
HM109	-52.673	9.41	A+	87.800		
HM110	-51.669	9.24	A+	88.804		
HM111	-50.666	9.09	A+	89.807		
HM112	-49.664	8.92	A+	90.809		
HM113	-48.660	8.76	A+	91.813		
HM114	-47.663	8.59	A+	92.810		
HM115	-46.659	8.49	L	93.814		
HM116	-45.656	8.25	A+	94.818		
HM117	-44.645	8.06	A+	95.828		
HM118	-43.645	7.89	A+	96.828		
HM119	-42.640	7.72	A+	97.833		
HM120	-41.634	7.56	A+	98.839		

表 6 続き

Table 6. (continued).

Station Code	SP7			SP8		
	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity	Distance (km)	Travel Time (sec)	Rank & Polarity
HM121	-40.633	7.41	A+	99.841		
HM122	-39.633	7.25	A+	100.840		
HM123	-38.630	7.08	A+	101.843		
HM124	-37.625	6.92	A+	102.848		
HM125	-36.625	6.75	A+	103.848		
HM126	-35.618	6.58	A+	104.855		
HM127	-34.616	6.41	A+	105.857		
HM128	-33.612	6.25	A+	106.862		
HM129	-32.611	6.09	A+	107.862		
HM130	-31.607	5.91	A+	108.866		
HM131	-30.604	5.75	A+	109.869		
HM132	-29.602	5.58	A+	110.871		
HM133	-28.596	5.42	A+	111.878		
HM134	-27.591	5.25	A+	112.882		
HM135	-26.585	5.08	A+	113.888		
HM136	-25.579	4.90	A+	114.894		
HM137	-24.581	4.74	A+	115.892		
HM138	-23.578	4.57	A+	116.895		
HM139	-22.573	4.40	A+	117.900		
HM140	-21.570	4.22	A+	118.903		
HM141	-20.569	4.07	A+	119.905		
HM142	-19.562	3.90	A+	120.911		
HM143	-18.560	3.73	A+	121.913		
HM144	-17.560	3.56	A+	122.913		
HM145	-16.556	3.40	A+	123.918		
HM146	-15.550	3.23	A+	124.923		
HM147	-14.548	3.05	A+	125.925		
HM148	-13.545	2.87	A+	126.928		
HM149	-12.540	2.69	A+	127.933		
HM150	-11.539	2.52	A+	128.934		
HM151	-10.536	2.34	A+	129.937		
HM152	-9.531	2.18	A+	130.942		
HM153	-8.529	1.99	A+	131.944		
HM154	-7.525	1.82	A+	132.948		
HM155	-6.522	1.64	A+	133.952		
HM156	-5.517	1.46	A+	134.956		
HM157	-4.517	1.20	A+	135.956		
HM158	-3.514	0.94	A+	136.959		
HM159	-2.506	0.68	A+	137.967		
HM160	-1.510	0.42	A+	138.963		
HM161	-0.501	0.15	A+	139.972		

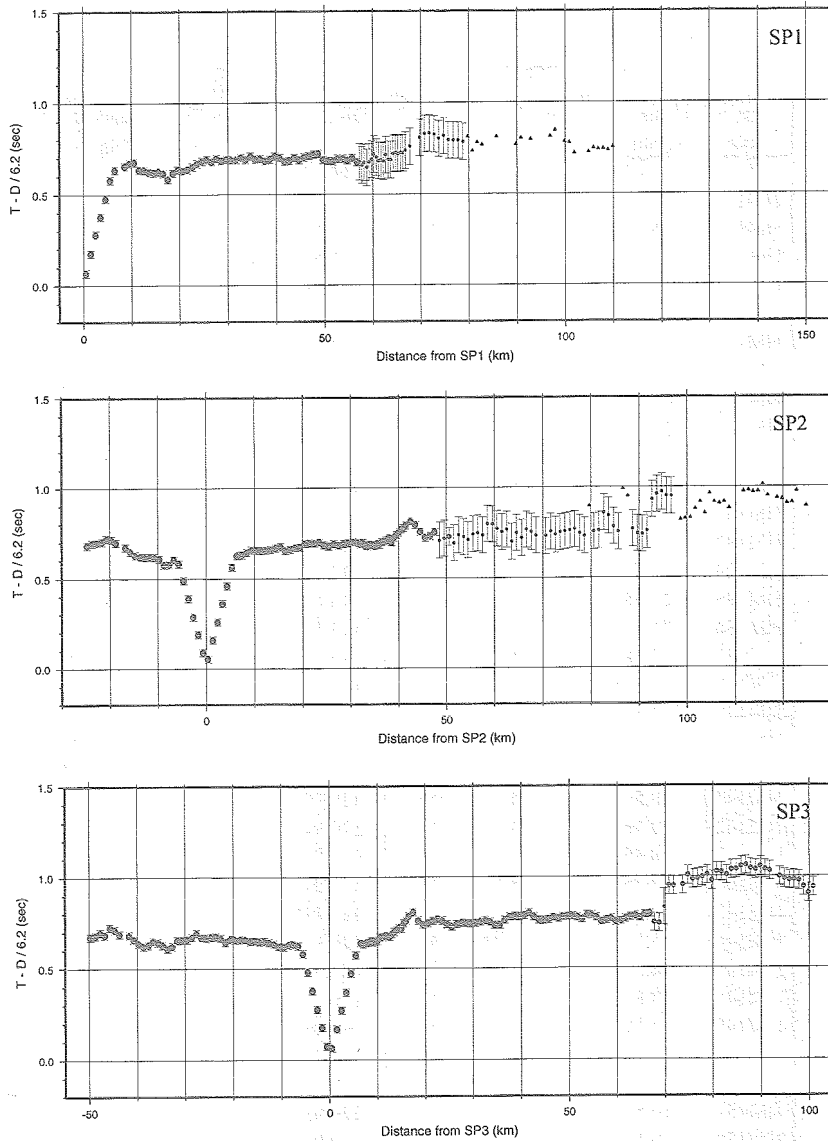


図 7-1 SP1, SP2, SP3 の走時図。横軸は発破点からの距離、縦軸は 6.2 km/s でレデュースした走時。誤差バーは初動の明瞭度 (ランク A, B, C) を示している (本文参照)。図中の三角はランク L を示している。

Fig. 7-1. Reduced travel time plots for SP1, SP2 and SP3. The reduction velocity is 6.2 km/s. The horizontal axis is the offset distance between the shot point and seismic stations. The quality of the travel time data is shown with an error bar. Solid triangles indicate the rank "L".

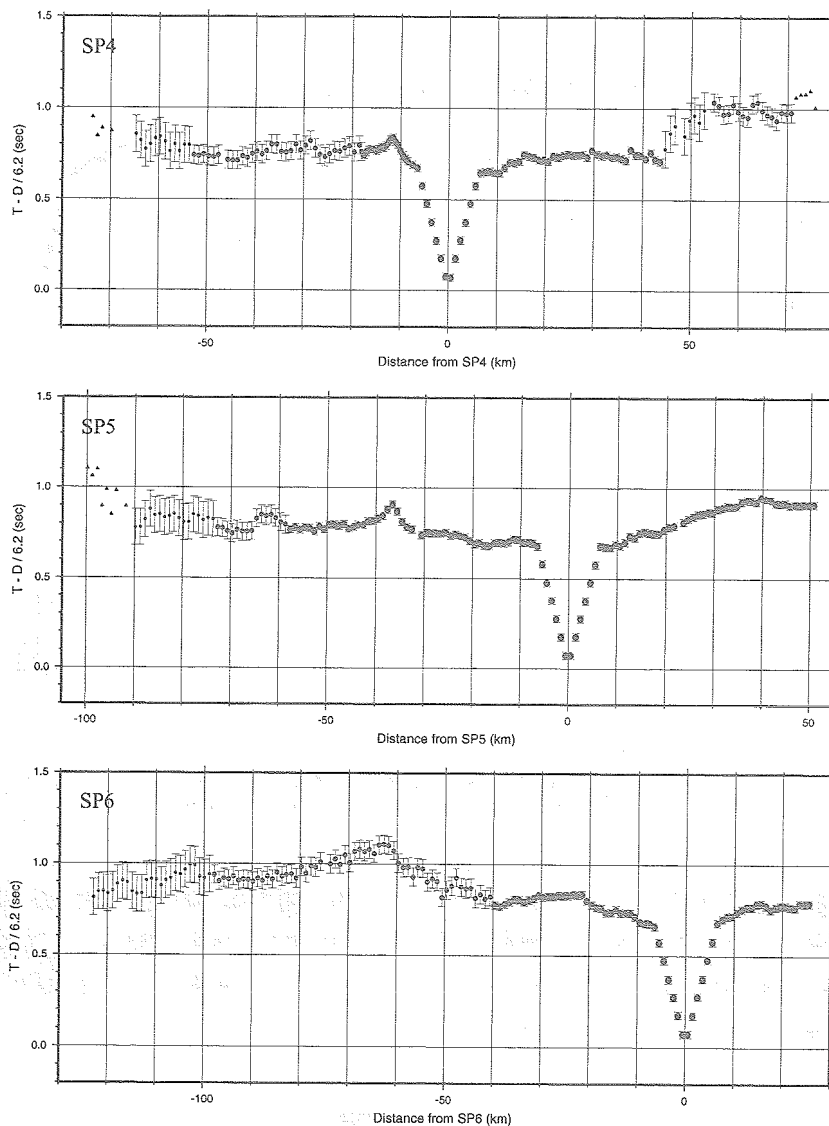


図 7-2 SP4, SP5, SP6 の走時図
 Fig. 7-2. Reduced travel time plots for SP4, SP5 and SP6.

L ランク $0.10 \text{ s} < |\Delta t|$ (極性の判別不可).

また、極性は、+が地動の上向き、-が下向きを示している。明瞭に初動が判別できた範囲は、大発破 (SP3-SP7) では発破点から 100 km 程度までであった。SP1 と SP2 では距離 50 km 以上で、急激に明瞭度が悪化した。小発破の SP8 (薬量 20 kg) は、距離 20 km 以下で初動が確認できた。

走時図より、氷床直下には、測線の南側 (SP1-SP5) にわたって、みかけ速度が 6.1-6.2

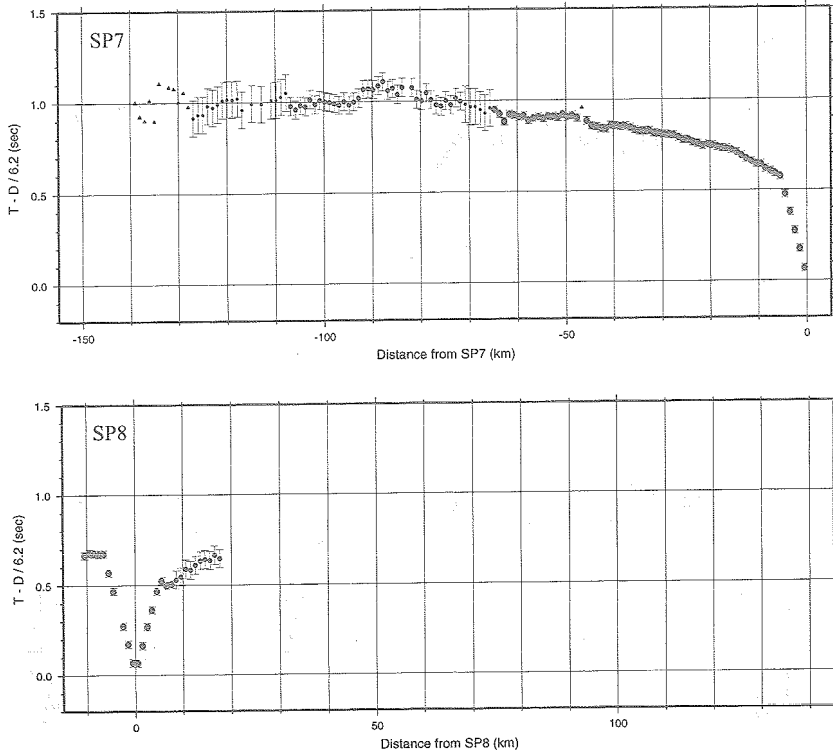


図 7-3 SP7, SP8 の走時図

Fig. 7-3. Reduced travel time plots for SP7 and SP8.

km/s の層 (基盤層) が存在していることがわかる。一方、測線の北側 (SP5-SP7) の区間では、みかけ速度 5.9 km/s 程度であり、測線の北側と南側で基盤層の速度が異なることが推測される。また、走時の凹凸から、SP4 の南側と SP5 の北側では、基盤層までの深さ (氷床の厚さ) が急激に変化している区域が示唆される。

4. 今後の課題

今回の探査では、大発破の薬量を JARE-41 の 600 kg (宮町ら, 2001) から 100 kg 増量し 700 kg とした。しかしながら、結果として、その効用はほとんど無かった。経験的に、薬量を 2 倍にしても、その $\sqrt{2}$ 倍の効果しかないため、今回の場合、100 kg 程度の増量をして 1.08 倍になる程度である。また、掘削深度 25 m 程度の発破孔では、雪封長 10 m を考慮すると、700 kg 程度の薬量が地表変形を発生させずに装薬できる限界であろうと考えられる。

発破孔の掘削深度を深くするため、スチームドリルを改良したが、1 時間当たり 3 m 程度の平均掘削速度であった。氷床のより深い場所では、雪氷がち密になり、掘削速度の鈍化が予想される。夏期間中という限られた日程の中で、掘削に 1 日以上時間を費やすことはなか

なか困難であり、氷床浅部のフィルン層を超える深度(40-50 m)に達するのは容易ではない。地殻浅部の構造の分解能から言えば、深度50 mを超えるような掘削による薬量1 tクラスの大発破よりも、薬量600-700 kgの多数の発破点を有した方が得策である。

JARE-41 および今回の探査で明らかになったように、深さ25 m程度の発破孔と薬量600-700 kgの発破では、屈折波初動が明瞭に観測されるのは、距離100 km程度までである。したがって、初動屈折波による走時解析で明らかにできるのは、原則として、氷床直下の基盤層の上部境界面だけということになる。しかしながら、今回の探査記録から、測線の北側と南側では、基盤層の地震波速度が異なることが期待され、おそらく、測線中に物質境界が存在するものと考えられる。初動が明瞭に観測される区間は限定されるが、地震波速度を求めるには、屈折法探査が有効である。一方、地殻のより深部の構造を明らかにするためには、反射波を有効に利用する必要がある。幸い、日本国内の地殻構造と比較し、みずほ高原下の地殻構造は相対的に単純であると予想されるため、地殻の主要な境界面からの反射波の観測が期待できる。実際、JARE-41 および今回の探査でも、コンラッド面とモホ面からの反射波と推定される後続波が各発破で明瞭に観測されている。これらの反射波を有効に生かすためには、探査測線上の観測点間隔を密にする必要がある。今回の基本的な観測点間隔は1 kmであるが、測線の中央部の約10 kmの区間のみ500 m間隔であった。これら両区間で観測された地殻の主要な境界面からの反射波を比較した場合、1 kmの観測点間隔があれば、主要な反射波の検出は可能である。ただし、より詳細な反射法的解析を行うためには、より密な観測点間隔が望ましい。

JARE-41 および今回のように行動期間が夏期に限定される人工地震探査の場合、日程、輸送、移動の面からの制約から、実験地域とその規模が限定される。将来、例えば、やまと山脈地域のようなより内陸地域で同様の実験を実施することは、現在の輸送体制と行動期間の下では、大変困難であると思われる。したがって、前次隊との共同観測体制を検討する必要がある。また、JARE-43では、幸いにも天候に恵まれ、行動開始日が当初のスケジュールよりも遅れたにもかかわらず、最終的に予定よりも早く実験を完了することができた。しかしながら、一般に、野外行動は天候に大きく左右されるため、より内陸部での行動では、実験規模の設定に注意を要する。

今回の内陸行動中、震源班使用の雪上車1台の燃料タンクに大きなひび割れが発生し、人工地震探査そのものの遂行が困難になる状況に陥った。幸い、昭和基地の42次隊および43次隊の迅速な対応により、内陸部に交換用の燃料タンクを小型ヘリコプターによって空輸して頂き、現地で交換することができた。内陸部でのこのような雪上車の故障は、探査には致命的になる可能性がある。したがって、天候を含め種々の状況に対する対応策を事前に隊全体で準備することが肝要である。

5. ま と め

JARE-43 (夏隊) の人工地震観測グループにより, JARE-41 に引き続き, 東南極・みずほ高原で地殻構造探査が実施された. 得られた走時データによって, 地殻上部の詳細な速度構造が得られるであろう. また, 後続波も多く観測され, これらのデータから, 地殻深部の構造に関する多くの情報が得られることが期待される.

謝 辞

今回のみずほ高原での人工地震探査の実現に向けて, 多くの方々からの支援を頂いた. 国内での実験準備等においては, 金尾政紀博士・渋谷和雄教授 (国立極地研究所), 現地においては, JARE-43 (西尾文彦隊長・神山孝吉越冬隊長) および JARE-42 (本吉洋一越冬隊長) の隊員の方々の協力に心からお礼申し上げます. また, この探査関連の物資約 48 t の輸送を全面的に支援して下さった砕氷艦「しらせ」(石角義成艦長) の乗員の方々に厚く感謝します. 最後に, この探査計画を当初から支援していただいた国立極地研究所 (渡邊興亞所長) の教職員の方々に謝意を表します.

文 献

- 伊神 輝・一ノ瀬洋一郎・原田道昭・神沼克伊 (1980): 南極における人工地震観測の概要. 南極資料, 70, 158-182.
- 伊藤 潔・伊神 輝・渋谷和雄・神沼克伊・片岡信一 (1983): 南極における人工地震観測の概要 (続). 南極資料, 79, 107-133.
- 金尾政紀 (1999): 「エンダービーランドの地学調査の展望」に関する研究小集会報告. 南極資料, 43, 211-220.
- 宮町宏樹・村上寛史・筒井智樹・戸田 茂・民田利明・柳澤盛雄 (2001): 東南極みずほ高原における屈折地震探査実験—第41次夏期観測概要—. 南極資料, 45, 101-147.
- Tsutsui, T., Murakami, H., Miyamachi, H., Toda, S. and Kanao, M. (2001a): *P*-wave velocity structure of the ice sheet and the shallow crust beneath the Mizuho traverse route, East Antarctica, from seismic refraction analysis. *Polar Geosci.*, 14, 195-211.
- Tutsui, T., Yamashita, M., Murakami, H., Miyamachi, H., Toda, S. and Kanao, M. (2001b): Reflection profiling and velocity structure beneath Mizuho traverse route, East Antarctica. *Polar Geosci.*, 14, 212-225.

(2002年12月10日受付; 2003年1月8日改訂稿受理)

付録 JARE-43 人工地震観測グループの構成と主な分担
(所属は、2001年11月28日時点).

Appendix. A member list with the main works of the exploration group in JARE-43.

統括責任者	宮町宏樹(鹿児島大学)
観測責任者	戸田 茂(愛知教育大学)・松島 健(九州大学)
火薬・発破責任者	高橋康博(国立極地研究所: 日本油脂(株))
発破孔掘削	石崎教夫(国立極地研究所: (財) 地球・人間環境フォーラム) 渡邊篤志(九州大学)
地震観測	戸田 茂・神谷大輔((株) 白山工業)・宮町宏樹
ペネトレータ操作	松島 健・山下幹也(総合研究大学院大学)
GPS 測定	松島 健・戸田 茂・宮町宏樹
重力測定	戸田 茂
アイスレーダー観測	高田真秀(北海道大学)
野外支援・映像記録	柳澤盛雄(国立極地研究所: JARE-42)
雪上車整備	中野浩司(国立極地研究所: (株) 大原鉄工所) 中村俊弘(国立極地研究所: 滋賀医科大学)
	吉田 望(国立極地研究所: (株) いすゞ自動車)
ヘリコプターパイロット	安原達二(国立極地研究所: 朝日航洋(株))
ヘリコプター整備	堀口 浩(国立極地研究所: 朝日航洋(株))
震源班メンバー	宮町・高橋・中野・石崎・渡邊・柳澤
測線班メンバー	戸田・高田・神谷・中村・吉田(中村と途中交代)
ヘリ班メンバー	松島・山下・安原・堀口