

南極人工地震観測用ペネトレーターの開発

(1) 1989年度経過報告

渋谷和雄¹・神沼克伊¹・水谷 仁²・藤村彰夫²・塚本茂樹²・
山田功夫³・伊藤 潔⁴・金沢敏彦⁵・高崎政之⁶・伊賀 章⁷
(南極ペネトレーター開発グループ)

Status Report for the Development of the Antarctic Penetrator:
No. 1. 1989-year program

Kazuo SHIBUYA¹, Katsutada KAMINUMA¹, Hitoshi MIZUTANI², Akio FUJIMURA²,
Shigeki TSUKAMOTO², Isao YAMADA³, Kiyoshi ITO⁴, Toshihiko KANAZAWA⁵,
Masayuki TAKASAKI⁶ and Akira IGA⁷
(ANTARCTIC PENETRATOR RESEARCH GROUP)

Abstract: We started the development of the Antarctic penetrator which was applicable to the future seismic explosion experiments in the Sør Rondane Mountains region, Antarctica. The planned observation system consists of the expendable ground system segment (GSS: penetrator) and the data collection segment (DCS) on the helicopter. Using the Grant-in-Aid for Scientific Research, No. 01840012, from the Ministry of Education, Science and Culture of Japan, we made the following experiments as a 1989-year program.

(1) We made 6 vertical-component seismometers (type V241-M), and conducted shock tests (acceleration ranging from -5000 G to 5000 G) at the Noshiro Testing Center, Institute of Space and Astronautical Science. The sensors were proven to suffer no damage with negligible change of the frequency characteristics.

(2) An IFP (Instantaneous Floating Point) amplifier and the digital recording program were designed, and the laboratory experiments with the above seismometers were made.

(3) Shock tests of the electronics parts such as quartz oscillator circuit, chemical battery, CPU (Central Processing Unit), ROM (Read Only Memory), etc. were made to select appropriate units and to obtain know-how of potting.

(4) Dummy penetrators were deployed from the hovering helicopter (AS 350B) 600 m above the glazed snow surface around Asuka Station (71.5° S, 24.0° E, 1000 m asl). We obtained $s=8.3-11.1$ for the parameter value of snow hardness.

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² 宇宙科学研究所. Institute of Space and Astronautical Science, 1-1, Yoshinodai 3-chome, Sagami-hara 229.

³ 名古屋大学理学部. School of Science, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01.

⁴ 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokanoshō, Uji 611.

⁵ 東京大学理学部. Faculty of Science, The University of Tokyo, 11-16, Yayoi 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

⁶ 日産自動車宇宙事業部. Astronautical Technology Division, Nissan Co. Ltd., 5-1, Momoi 3-chome, Suginami-ku, Tokyo 167.

⁷ ソニー情報通信研究所. SONY Telecommunications Research Institute, 14-1, Asahimachi 4-chome, Atsugi 243.

(5) The telemetry method and the necessary commands for data acquisition and system diagnostics were examined. Direct transmitting VHF waves with 4-valued FM coded data may be applied as an aerial link.

要旨:「南極ペネトレーター開発グループ」は、到達困難域においてテレメーターを用いてセンサーを起動し、データを収録できる地震観測システムの開発を文部省科学研究費・試験研究により開始した。1989年度の研究経過は以下の通りである。

- (1) センサー (V241-M 型) および IFP アンプを製作し、地震観測を開始した。
- (2) センサー、水晶振動子、電池、CPU、ROM 等回路素子の衝撃試験を行った。
- (3) 南極あすか基地においてペネトレーター容器のヘリコプター投下試験を行い、雪の硬さのパラメーターとして 8.3-11.1 という値を得た。
- (4) テレメーターコマンド、データ伝送の基本概念設計を行い、VHF 帯域、4 値 FM 変調、自由空間波利用直上伝送モード方式で実現できる見通しを得た。必要なコマンド群について考察を行った。

1. はじめに

日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition; JARE) は、東南極プレートの研究において、人工地震実験による地殻・上部マントルの速度構造の解明を重視し、1980-1981年 (JARE-21~22) にかけて、エンダービーランド・みずほ高原において長距離爆破を実施した。この爆破実験は昭和基地周辺域での、重力・地磁気・氷床地形観測等、固体地球物理観測の仕上げ的な意味を持つものであった。この時用いた観測システムは、2 Hz の上下動地震計、DAR 方式の磁気テープ記録計、親時計を用いてシステム内蔵時計のクロノグラム較正を行う方式によるもので、地上オペレーションも大がかりであった (伊藤ら, 1983)。

1983年頃より南極観測における地学研究は、主たる調査地域を東クイーンモードランド・セールロンダーネ山地へ移し、地形・地質・測地・重力・地磁気・アイスレーダー観測を継続している。そして、セールロンダーネ山地地域でも長距離爆破地震実験による地殻・上部マントル速度構造を求めるために、第37次観測隊 (1996年度) での実施計画が位置づけられている。近年、観測オペレーションは多様化・高度化の一途をたどっているが、観測隊員輸送数が「しらせ」の能力限界に近づいた現状では、JARE-37 での実施計画は小人数、あるいはオペレーション的に少ない日数で完了するものが要求されている。また、同地域はクレバス帯が発達し、標高差も 4000 m に及び地上からのアクセスが極めて困難なので、航空機の利用が不可欠である。特に、10年余りの技術的進歩をふまえ、地上に降りることなく設置できる地震計と、各種応用のきくテレメーター方式による機上データ収録システムが望まれている。

図1の編集図は JARE 調査地域の地学的概観を示す。近年、東南極大陸の地質構造はプレカンブリア楕状地で総称されるよりも多くの構造区分を持つことが分かってきた。例えば大陸沿岸の 30°E-60°E 地域の地質構造は、異なった変成史を持つ4つの岩体に分類されている (HIROI *et al.*, 1986)。すなわち、(1) 新南岩以東マラジョージナヤ基地からモーソン基

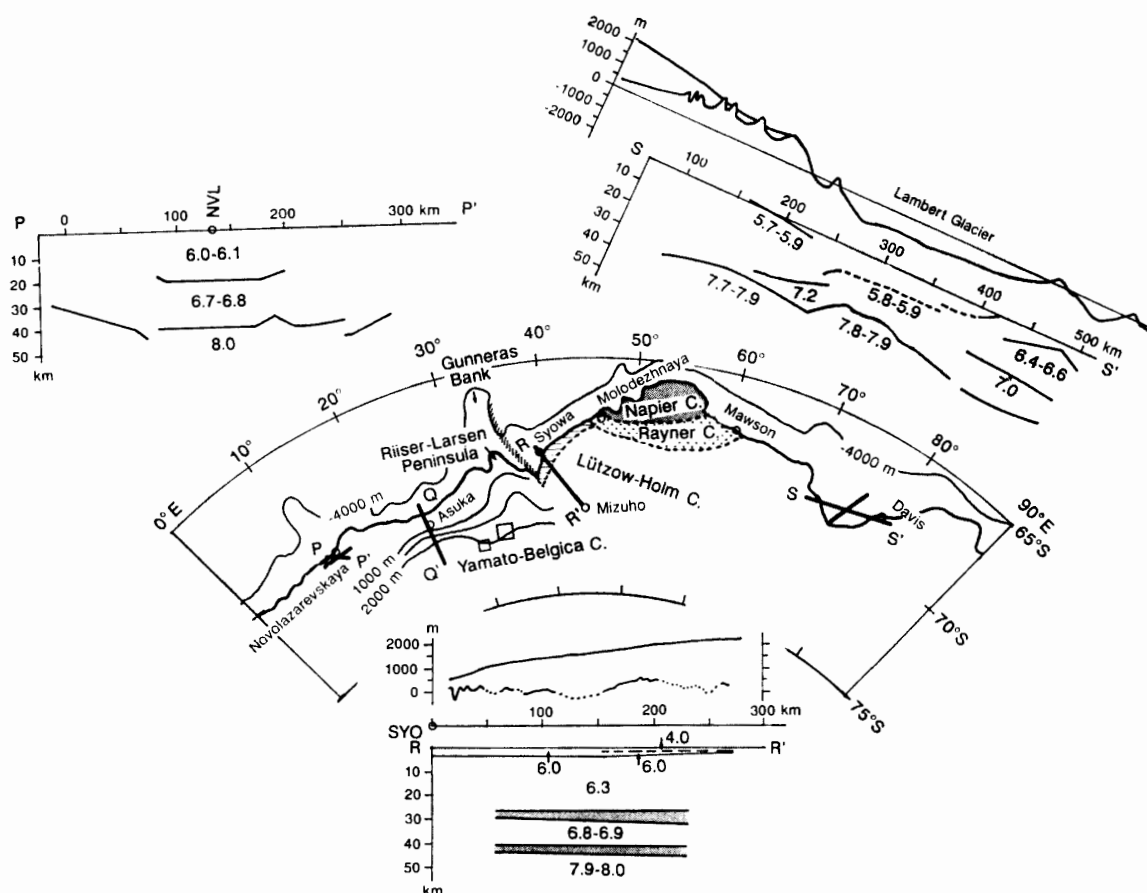


図 1 東南極 0° - 90° E の地質構造区分, 海底地形, 氷床地形, 人工地震実験による地殻の地震波速度構造モデル等の地学情報編集図. HIROI *et al.* (1986), MORIWAKI and YOSHIDA (1983), SHIBUYA *et al.* (1986), KURININ and GRIKUROV (1982), IKAMI *et al.* (1984) をもとに編集した. 詳細は本文参照.

Fig. 1. Compiled map of geological complexes, submarine topography, ice surface topography, crustal P-wave velocity structures in the region 0° - 90° E, East Antarctica. Edited from HIROI *et al.* (1986). MORIWAKI and YOSHIDA (1983), SHIBUYA *et al.* (1986), KURININ and GRIKUROV (1982), and IKAMI *et al.* (1984). For details, see text.

地にかけての地球最古(31 億—35 億年)の地殻に相当するナピア岩体と、(2) その再変成作用(10 億年)によるレイナー岩体。(3) 約 7 億年の変成年代で東から西へゆくほど温度・圧力条件が高くなる、プリンスオラフ海岸—リュツォ・ホルム湾沿岸—リーセル・ラルセン半島にかけてのリュツォ・ホルム岩体。(4) 変成年代は(3) とほぼ同一だが、異なる変成温度・圧力条件、原始地殻組成を持つと考えられている、やまと—ベルジカ岩体である。セールロンダーネ山地の地質調査や人工地震実験を含む固体地球物理調査は、これら岩体と東クイーンモードランド地域の岩体との対比を明らかにするうえでも重要である。特に、グンネラス堆、リーセル・ラルセン半島、しらせ氷河、やまと山脈一帯はエンダービーランドとクイーンモードランドの地殻構造の大規模な境界に位置すると考えられており、総合的な地学調査の充実が望まれている。

東南極での従来の人工地震観測成果も図1に示されている。図1の太線で示される測線に沿ってソ連及び日本により、大規模人工地震実験が実施され、地殻・上部マントル地震波速度構造が得られている。ノボラザレフスカヤ基地付近に設定された測線での結果 (KURININ and GRIKUROV, 1982; 図1の P-P') と、みずほ高原測線での結果 (IKAMI *et al.*, 1984; 同 R-R') を比較すると、地殻の厚さはともに 40 km、モホ面での P 波速度も同じ 8.0 km/s である。一方、P-P' では海側へ向かってモホ面が傾斜する(地殻が薄くなる)が、R-R' では明らかではなくむしろコンラッド面の傾斜となって現れている。上部、下部地殻の P 波速度は両測線ともに 6.0 km/s, 6.8 km/s 前後で、全体としてみると典型的な大陸地殻構造を示している。しかし、P-P' の下部地殻の厚さ (~20 km) の方が R-R' の下部地殻の厚さ (~10-15 km) 比べ厚い可能性がある。

S-S' はランバート氷河からプリンスチャールズ山脈へかけて実施された爆破に基づく構造 (KURININ and GRIKUROV, 1982) で、地殻が全体に薄く (~30 km)、ランバート氷河下ではさらにモホ面が上昇 (~20 km 深さ) し、P 波速度も少し遅い (~7.8-7.9 km/s)。さらに地殻上層・下層の P 波速度が各々 5.8-5.9 km/s, 6.1-6.2 km/s であり、厚い堆積性の上層と上部地殻に対応した P 波速度を持つ下層からなる特異な構造をしている。この測線下でも大陸内部へ向かって地殻が厚くなる傾向が示唆されているが、モホ面の P 波速度は P-P', R-R' 測線下のモホ面 P 波速度より遅い。この地域は一般的には途中で活動が停止してしまったリフト構造と考えられている。

2. セールロンダーネ地域での人工地震実験

2.1. セールロンダーネ測線の設定

セールロンダーネ山地は棚氷縁から 100 km 内陸に位置し、20-30 km 幅で南に向かって標高が急激に 1500-2000 m 高くなる。山地下流域は、基盤地形高度が海面より低い広大な海洋性氷床 (Marine Ice Sheet) を形成していて (NISHIO *et al.*, 1984)、みずほ高原の凹凸の多い基盤地形分布とは対照的である。同地域では既に 24°E に沿って、JARE-27 のアイスレーダー観測、JARE-28 の地上重力、航空磁気測量をもとに図2のようなジオトラバースデータが得られている (SHIBUYA *et al.*, 1991)。

したがって、計画される人工地震実験は同一測線 (図1の Q-Q') のブライド湾からナンセン氷原に至る 3~400 km にかけて実施し、海洋性氷床域と山地域の地殻構造の相違が地震学的に検出できることが目標となる。あすか観測拠点(あすか)より測線北側では地殻が薄くなる(モホ面深度が上昇する)ことが予想されるが、測線上どの位置で地殻厚が 40 km に達するか、また山地直下での地殻厚が局所的に大きくなるか、そこでの P 波速度が 8.0 km/s より大きいか小さいかなどが興味の対象となる。そのため、初動部分だけでなくコンラッド、モホ不連続面からの反射波形を記録し、これらの波形解析から下部地殻・上部マントルの微

細構造を明かにする必要がある。

図2に実験の概念図を合わせて示す。航空機（ヘリコプター）を用いてブライド湾～ナンセン氷原にかけて、10 km ごとに投下型地震計（地上セグメントあるいはペネトレーターと呼ぶ）を設置する。セールロンダーネ山地地域では測点間隔を密にする。投下されたペネトレーターは基本的には使い捨てとする。「しらせ」停泊中（1月初旬まで）にブライド湾にて海中発破（3-4t）を、夏の野外シーズン中（～1月末まで）にナンセン氷原で100 mの雪氷ボーリングを行い1-2t 発破を実施する。オペレーション的に余裕があれば、測線中点のあすかにおいて1t 発破を行う。ペネトレーターに記録された爆破波形記録は、テレメーター

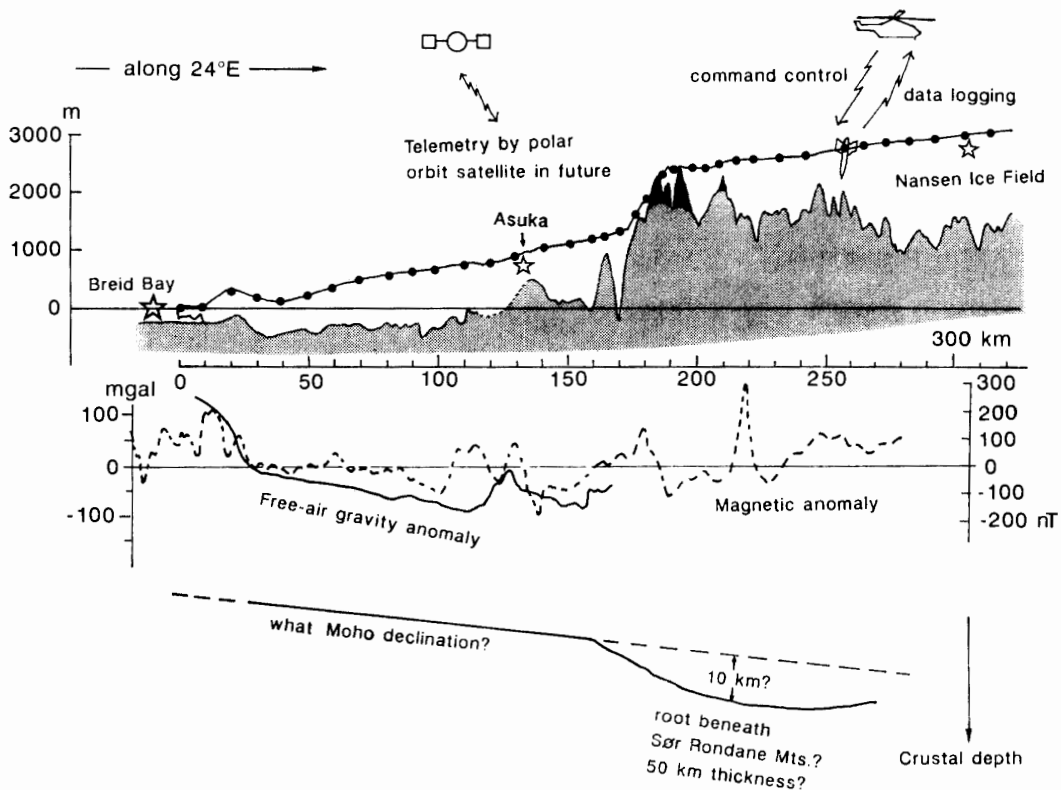


図2 ブライド湾からナンセン氷原へかけてのセールロンダーネ人工地震モデル測線。表面地形、氷厚、磁気異常、重力異常プロファイルは NISHIO *et al.* (1988), SHIBUYA *et al.* (1991) をもとに編集した。氷床地形プロファイル上の黒丸はペネトレーター投下予定地点で、山地ではほぼ 5 km 間隔、氷床上で約 10 km 間隔である。300 km 測線にわたって 40-50 台を設置する。ペネトレーターはヘリコプターから投下し、メモリーに記録された爆破地震記録を実験後、航空機テレメトリーで回収する。投下したペネトレーターは基本的には使い捨てとする。将来的には人工衛星テレメトリーへ発展させたい。

Fig. 2. Model profile along 24°E (from Breid Bay to the Nansen Ice Field) for future seismic explosion experiments in East Queen Maud Land. Surface topography, ice thickness, magnetic anomaly, and free-air anomaly profiles are compiled from NISHIO *et al.* (1988) and SHIBUYA *et al.* (1991). Solid circles on the ice surface indicate expendable penetrators deployed from the helicopter. Penetrator intervals are planned as 5 km in the Sør Rondane Mountains and 10 km on the ice sheet. 40 to 50 penetrators will be installed along the 300 km profile. Digital waveform data memorized in the penetrator will be recovered by the airborne telemetry. Penetrators must be designed as an expendable system. They must be developed by taking future satellite link into consideration.

によりデータ収録装置（機上セグメント）に回収する。すべての作業は1月末日までに終了しなければならない制約条件がある。

2.2. 観測システムの解決すべき問題点

図2に示す測線下の山地地形は起伏が激しく、特に南側は雲が発生しやすい。そのため、全測点上空へゆかずともデータ回収が確実にできるテレメーター方式で、ペネトレーターの記録波形がデータ受信できる機上収録システムを開発しなければならない。一般に高高度飛行（有酸素飛行）が必要だが、パイロット、観測者ともに判断力がにぶるので複雑な手順を伴うコマンド操作は適当でない。以上のことを考慮して、テレメトリー方式、搬送周波数・出力等を決定しなければならない。システム設計においては、周波数割り当て許可を受ける容易度も考慮する必要がある。さらに、機上装置の仕様は当然、ペネレーター側のデータ送受信インターフェイスの設計、電源容量の設定に深く関与する。

図3は、みずほ測線での地震記録を示す(IKAMI *et al.*, 1984)。測線長、火薬量等の条件は今回の計画とほぼ同じなので、この経験からすると各測点あたり90秒の地震記録があれば十分であろう。200 points per second の sampling, 16 bit A/D 変換, 1 data=2 byte=16 bits とすると1 shot あたり必要なデータ量は $200 \times 16 \times 90 = 288$ kbits に相当し、4 shots (予備1 shot 分を考慮して) では 1152 kbits になる。1秒ごとに時刻、位置、測点コード情報を挿入するとしても1.2 Mbits あれば十分であろう。測点総数を40点とすると機上の収録装置に必要な総データ容量は $1.2 \times 40 \sim 48$ Mbits である。

Shot onset の S/N 比が低いので event trigger start は不確実である。発破準備完了に合わせ測点を wake してタイマー収録するのが確実であろう。爆破時刻の計画変更に対しては、電力節約のため一度 wake した装置を sleep させられることが必要であろう。

各測点の位置決定精度は緯度、経度方向に対し各々 $\pm 10\text{--}15$ m 以内、高さ方向に対し ± 10 m 以内であることが望ましい。また、各測点の内蔵時計の時刻同期を10 ms 精度で簡単に行えることが望ましい。内蔵時計の初期設定を行った状態でペネレーターを落下させても、衝撃で狂う可能性が高いから、スタートと較正は落下後行わねばならない。また、ペネレーターどうしだけでなく、shot time (発破チームはヘリコプター・チームと別行動)とも同期がとれなければならないので、UTC 準拠の時刻系をペネレーターへ送りこむのが適当と思われる。投下されたペネレーターの位置決定・時刻同期は地上測量、地上での較正作業なしで行える方式を開発しなければならない。A/D 変換時の sample skew は1%以内のふらつきでおさまることが望ましい。

ペネレーター投下時に位置決定、時刻合わせをする時、上空での滞在時間が問題になる。1フライト（普通4時間以内）あたり何測点展開できるかで計画フライト数が決まるが、法律で義務付けられている50時間定期点検が全オペレーションの途中に入ると実行計画に日程の狂いが生じるので、ヘリコプター作業の全時間数が100時間以内（一機あたり50時間以

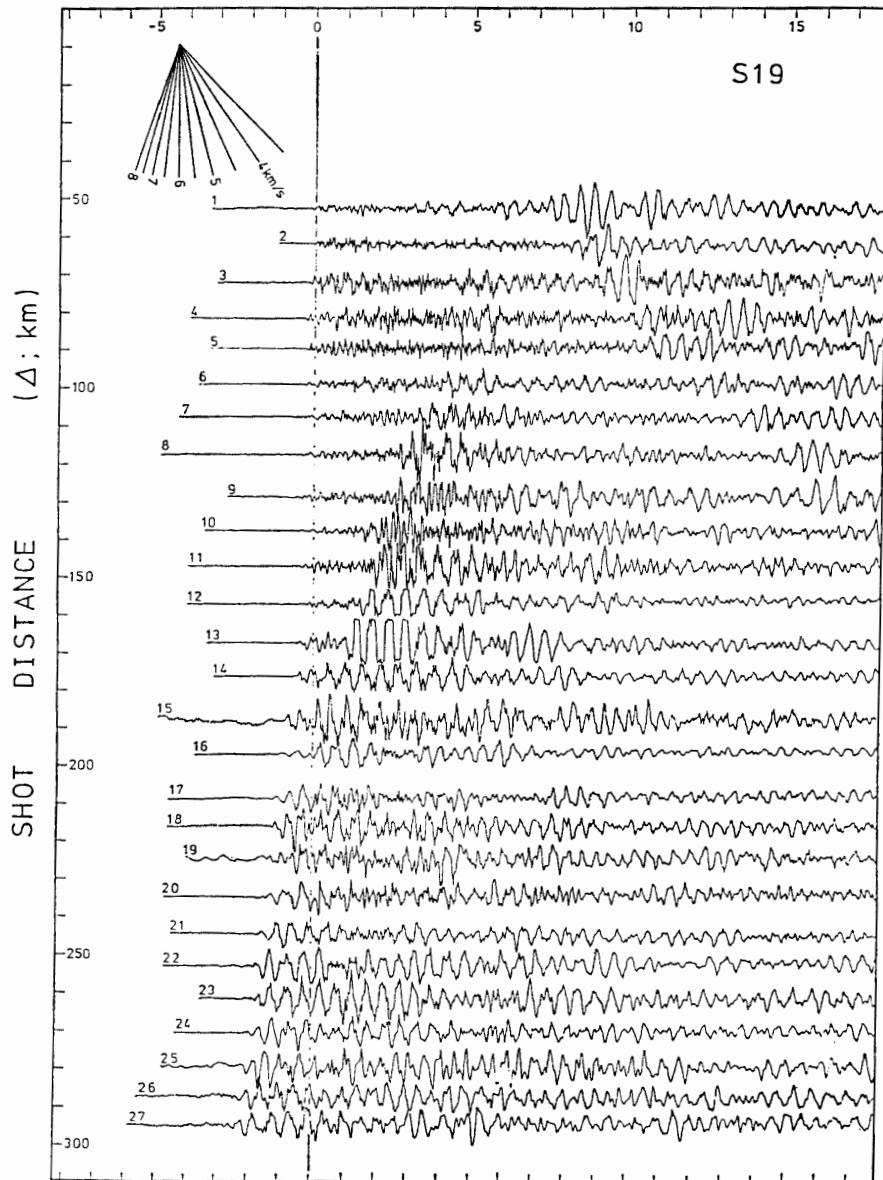


図3 JARE-21による、みずほ高原人工地震実験 (Shot 19, 3t 発破) の合成波形記録. IKAMI *et al.* (1984) から転載.

Fig. 3. Composite seismograms from 3-t shot (shot 19) in the Mizuho Plateau seismic explosion experiments by JARE-21. Redrawn from IKAMI *et al.* (1984).

内) であることが重要になる.

2.3. 航空機運用上の制約

ヘリコプターの運航拠点は“あすか” (あるいはプラットニーパネ近く) が想定される. 機種はまだ確定できないが, 運航にはいくつかの制約条件がある.

2.3.1. 気象条件

自動気象観測装置を用いた1987年2月-1988年1月の観測データによると, あすかの年平均気温は -18.5°C , 年平均風速は 12.8 m/s である (YAMANOUCHI *et al.*, 1988). このデータ

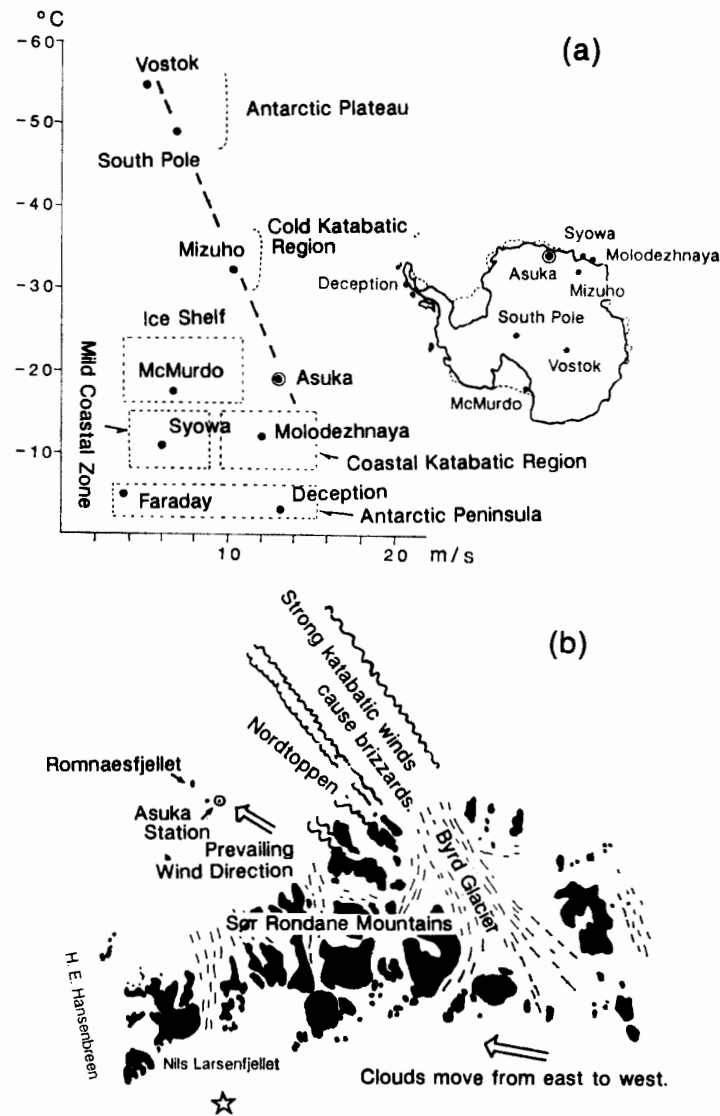


図 4 (a) あすかの年平均気温～年平均風速ダイアグラム。棚氷帯として区分される範囲より、平均風速が約 4 m/s 大きい。図中の点線は、ほぼ南極基地の自然立地条件の限界を示している。あすかはその限界に近く、セールロンダーネ山地一帯での航空機オペレーション条件は厳しい。(b) あすか周辺の気象変化の様式。雲は東から西へ移動する。山地西部のニルスラルセンの西側にある氷河(H. E. Hansenbreen)には雲が停滞しやすい。山地東部のバード氷河の斜面下降風(カタバ風)が激しいブリザードをもたらす。30分で天候が急変することがある。鮎川(1989)、渋谷(1988)をもとに編集。

Fig. 4. (a) Yearly mean air temperature versus yearly mean wind speed diagram. Asuka Station is located at the place with 4 m/s larger wind speed than the stations in the region characterized as ice shelf. Dotted line gives extremity of the natural conditions for human activity in Antarctica. Difficult airborne operations around Asuka Station put many requirements for the system design. (b) Schematic change of weather around Asuka Station. Clouds move from east to west, and stay in the H. E. Hansenbreen. Katabatic winds from the Byrd Glacier bring strong brizzards. Weather is likely to change drastically in 30 min. Edited from AYUKAWA (1989) and SHIBUYA (1988).

を気温～風速ダイアグラム上にプロットすると (図 4a), あすかは従来の棚氷帯で分類される区分にくらべ, 年平均風速が 4 m/s も大きく, 南極にある基地のうちで最も生活条件の厳しい(図中の破線)ところに位置していることが分かる. このことは, セールロンダーネ山地を境に南に向かって急激に 2000 m 比高が高くなるため, バード氷河からの斜面下降風が山地を下るにつれ加速され, 地吹雪を伴った強風をもたらすことで説明できる (図 4b). あすかから見て, ノルトッペンの方向に雪煙がのぼるのが天候悪化のきざしである. 一般に雲は北東から南西へ流れ, 山地南部西側のニルスラルセンの西側にある氷河 (H. E. Hansenbreen) に停滞し, 2 週間以上晴れ間が見えない時もある.

図 5 は, あすかにおける 1987 年 2 月-1990 年 1 月の月平均気圧, 気温, 風速, ブリザード日数などの推移を示している. 3 年間のデータを見る限り, ヘリコプター運航を予定している夏 2 カ月のうち 12 月は曇天・ブリザード日数が少なく比較的静穏な日が続く. しかし, 1 月に入ると天候悪化のきざしが見え, 2-3 時間内での天候急変に絶えず注意する必要がある. 年により若干違いはあるが, あすか周辺の夏は 11 月下旬から突然始まり 12 月中旬に気候が安定し, 1 月中旬になると冬のきざしが見えるというのが概況であろう. ただし, あすか周辺 (海拔 1000 m) や山地が高気圧で覆われていても, 沿岸低気圧の通過のためブライド湾側 (海拔 0 m) には厚い雲が垂れこめることもあり, 南北 400 km の測線全体にわたって

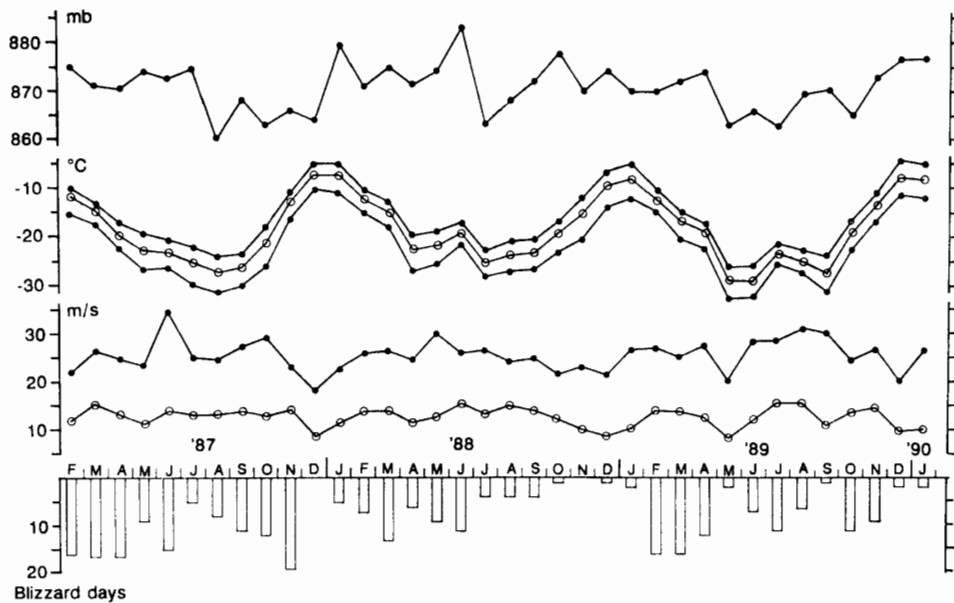


図 5 あすかにおける 3 年間 (1987 年 2 月-1990 年 1 月) の地上気象統計. 上の折れ線から順に月平均気圧, 日最高気温の月平均, 月平均気温, 日最低気温の月平均, 月瞬間最大風速, 月平均風速を示す. 白抜き棒グラフはブリザード日数.

Fig. 5. Monthly statistics of the surface synoptic data at Asuka Station from February 1987 to January 1990. From upper to lower solid segments show mean air pressure (mb), mean of the maximum daily air temperature ($^{\circ}\text{C}$), mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), mean of the minimum daily air temperature ($^{\circ}\text{C}$), maximum instantaneous wind speed (m/s), and mean wind speed (m/s). White bars indicate blizzard days.

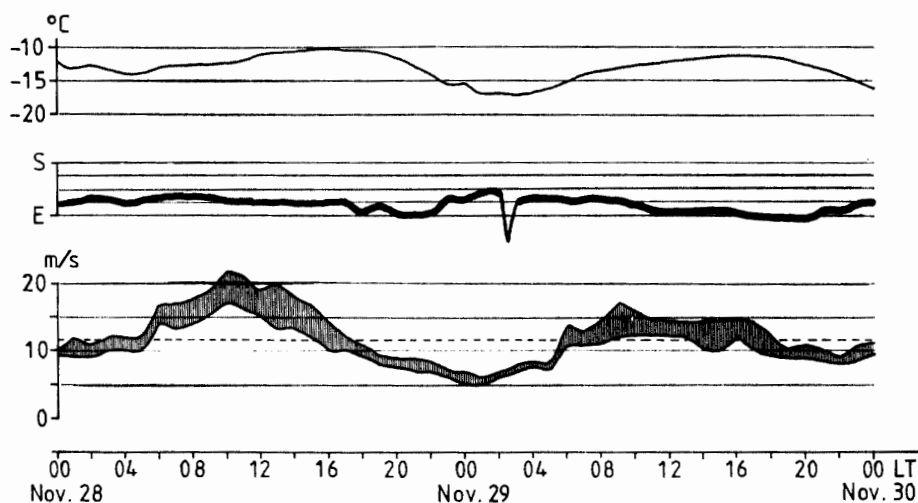


図6 あすかの夏期間に見られる顕著な気温、風向・風速の日変化パターン。ヘリコプター運航に適した時間帯（風速 11 m/s 以下）は 20-04 LT の約 8 時間以内であることが多い。渋谷 (1988) より転載。

Fig. 6. Characteristic pattern in the daily change of air temperature, wind-direction and wind-speed in the summer season at Asuka Station. Flight times are usually limited to 20-04 LT (within 8 hours) when wind speed is below 11 m/s. Redrawn from SHIBUYA (1988).

晴天が広がる日数は数えるほどしかないと考えたほうが良い。

夏の安定期には風速日変化にも顕著なパターンが現れる。図6に見られるように、太陽が北中する正午を中心とした前後4時間は風速が 15-20 m/s に達し、低いあるいは高い地吹雪が続く。航空機運航が可能な 11 m/s 以下の時間帯は一般的には、地方時で0時をはさんだ前後4時間である。したがって、円滑なオペレーションのためには生活時間帯を変更する必要もあろう。

風速は地上ノイズの目安を知るうえでも重要である。一般に風速が 20 m/s 以上では 3×10^{-6} m/s (=30 mkine), 15 m/s 以上で 3×10^{-9} m/s の地上雑微動（周期：数～数 10 Hz）が生じ、実験が可能な $10-20 \times 10^{-9}$ m/s 以下になるのは風速が 10 m/s 以下の場合である。測線全長にわたって上記条件を満たす“時間の窓”は狭く、爆破時刻の設定には注意を要する。

2.3.2. オペレーション条件

ブライド湾への「しらせ」到着は海氷状態の良し悪しで年により若干変動はあるが、12月18-20日と考えられる。ヘリコプターの搬入、慣熟・偵察飛行訓練に7-10日要するとして観測に使用できる期間は12月末より1月末日までの約30日である。この間にまず爆破作業関連でやらねばならぬことは (a) 定着氷の確保, (b) 4t の火薬の海氷上への搬出, (c) 爆薬の海中設置である。一方、観測点設置関連でやらねばならぬことは、(d) ペネトレーターの投下と位置決定, (e) センサー機能等のテレメーター試験, (f) 時刻同期試験であり、これらの作業を3-5日間で全点(40-50点)に渡って終了しなければならない。海中発破の準備には発破隊員以外に、輸送に携わらない「しらせ」残留隊員の助力をあてにせざるを得ない。もし、

あてにできない場合は後述のボーリング隊員6名を充てることになるが、この場合は後のナンセン氷原でのボーリング作業準備に影響がでるほか、総隊員枠数内で必要人員を確保できるかどうか不確定要素がある。

1月7-8日に「しらせ」が昭和基地に回航されたあとセールロンダーネ域に必要な人員はヘリポート中心に最低8名、ナンセン氷原へのボーリング隊として最低6名である。ボーリング隊はヘリコプター誘導を得てクレバス帯を回避し、雪上車輸送で1-2tの火薬と100m掘削ボーリング・マシンを図4b中の星印地点まで運搬し、掘削・爆薬設置を行う。この間ヘリコプター隊は海中爆破データの回収やペネトレーター機能試験等を実施する。ヘリコプター運航には最低パイロット2名、整備士2名、オペレーション・リーダー1名、気象・通信士1名が必要で、純粋な観測要員は2名が限度だろう。この2名でペネトレーター設置・データ回収に係わる全作業をやらなければならない。

全実験終了後、2月10日の撤収をめどとする。

3. 南極ペネトレーター開発グループ

地上無人観測システムを用いた人工地震計画が南極地学研究に及ぼすインパクトは大きい。この計画の成功は即、南極大陸での無人地震観測点の全面的な展開を実現するだろう。また、同システムは火山・砂漠地域・湿地帯へも転用可能だろう。“地上測点に人が行かずに”投下センサーの起動が行え、航空機さらには人工衛星テレメトリーによりデータ伝送及び収録出来るシステムが確立すれば、過酷な自然条件下で行う地磁気全磁力、地電流、地温など各種地球物理観測へも応用が広がる。

南極ペネトレーターの開発研究のために、国立極地研究所（極地研）グループ、宇宙科学研究所（宇宙研）グループ、南極地学研究者（JARE 経験者）、計器開発専門家、製作工程へ乗せるための助言者グループが集まり、開発グループを結成して年次計画に従って各種実験を行うことにした。1989年度の参加者を表1に示す。

開発研究はまず、3年計画で考えることにする。第一年次では基本概念設計を行い、投下される地上セグメントと機上セグメントの機能の分担、調整を行う。第二年次は第一年次で決定された基本仕様をもとに伝送方式等の詳細設計を行い、記録フォーマット等を確定して若干の試作、実機開発テストを実施する。最終年次（第三年次）には機上セグメントのコアになる構成要素についてプロトタイプを作成し、実機テストを行って地上セグメントと合わせた仕様性能等の総合評価を行い、実用化のめどをつける必要がある。平成4年度以降は実際の製作工程においてシステムの見直しを行うことになる。

平成初年度の主な実験及び検討項目は (a) 地震計センサーの試作、(b) IFP アンプの製作、(c) 低温熱解析モデルの検討、(d) 雪面でのペネトレーター投下試験、(e) CPU, ROM, 電池、水晶発振子等各モジュールの地上衝撃試験、(f) テレメトリー方式の基本概念設計である。

表 1 南極ペネトレーター開発グループの構成
Table 1. Constitution of the Antarctic Penetrator Research group.

氏名	所属	役割分担
渋谷和雄	国立極地研究所研究系	プロジェクトマネージャー, データ集録機器詳細設計
神沼克伊	国立極地研究所研究系	基本概念設計総括, 電波申請総括
水谷 仁	宇宙科学研究所惑星研究系	投下センサーシステム詳細設計総括, 投下実験責任者
藤村彰夫	宇宙科学研究所惑星研究系	投下センサーシステム詳細設計 (特に力学特性と航空機上機器とのインターフェイス仕様)
塚本茂樹	宇宙科学研究所システム研究系	投下センサーシステム詳細設計 (特に空力特性・形状仕様)
山田功夫	名古屋大学理学部	投下センサーシステム詳細設計 (特に地震計仕様と航空機上機器とのインターフェイス仕様)
伊藤 潔	京都大学理学部	基本概念設計, データ集録機器詳細設計
金沢敏彦	東京大学理学部	投下センサーシステム詳細設計 (特にセンサー姿勢制御)
高崎政之	日産自動車宇宙事業部	試作助言 (特にペネトレーター容器関係)
伊賀 章	ソニー総合研究所	試作助言 (特にテレメーターモジュール関係)

4. 研究経過

4.1. 地震計センサーの試作

1t の海中発破, 560 kg の雪孔中発破から得られた速度振幅～周波数特性 (IKAMI *et al.*, 1981; 図 7) からすると, 1 Hz～30 Hz で平坦な振幅特性を持つセンサーが望ましい。みずほ

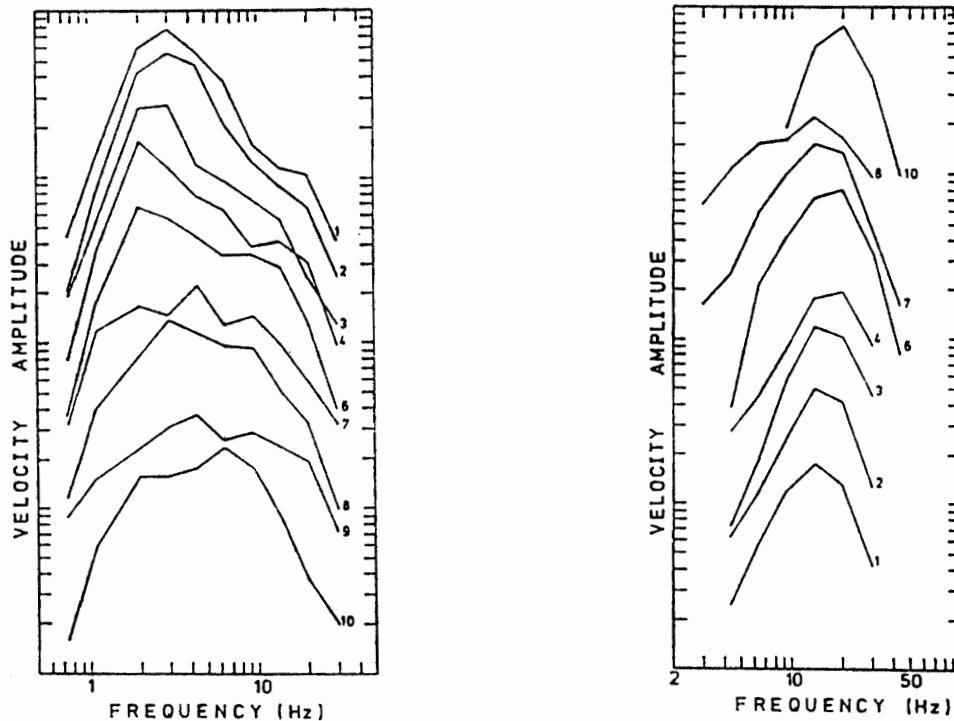


図 7 1t の海中発破, 560 kg の雪孔中発破から得られた地震波速度振幅の周波数特性. IKAMI *et al.* (1981) より転載.

Fig. 7. Velocity amplitude spectrum of seismogram from 560 kg shot in the snow drill hole (right) and 1t shot in the seawater (left). Numerals in the figure indicate observation sites. Redrawn from IKAMI *et al.* (1981).

高原実験では Mark Products L-22D（固有周波数 2 Hz）が使用されたが、南極ペネトレーター用センサーもこれに近いものが必要であろう。

現在、宇宙科学研究所が月探査用のペネトレーターを開発中であるが、その貫入・衝撃試験での実績のあるセンサーをもとに 5 箇のセンサーを試作した。このセンサーは明石製作所製 V241-M（図 8）で固有周波数は 3.1-3.7 Hz，出力感度は $\sim 1.8 \times 10^2$ Vpp/m/s である。センサー形状は直径 48 mm，長さ 58 mm の円筒状で投下容器への収納性もよい。能代ロケット実験場において 1989 年 11 月 23 日～29 日実施された第 5 回ペネトレーター実験によると（宇宙科学研究所 SES データセンター，1990），このセンサーは衝突（砂の硬さ $20 \sim 100 \times 10^6$

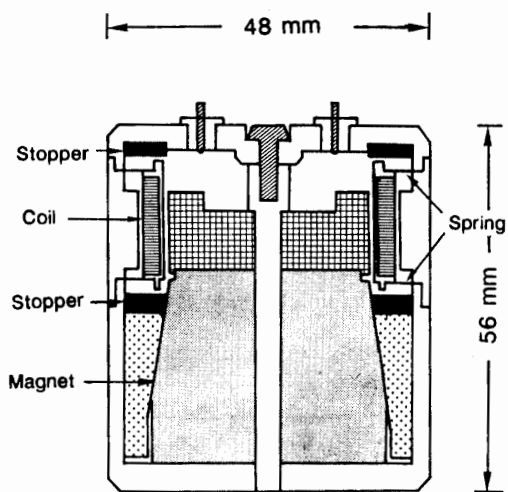


図 8 能代ロケット実験場でのペネトレーター貫入・衝撃実験に用いられた V241-M 型上下動センサー。宇宙科学研究所 SES データセンター（1990）より転載。

Fig. 8. V241-M type vertical-component seismometer used in the shock experiments at the Noshiro Testing Center, Institute of Space and Astronautical Science.

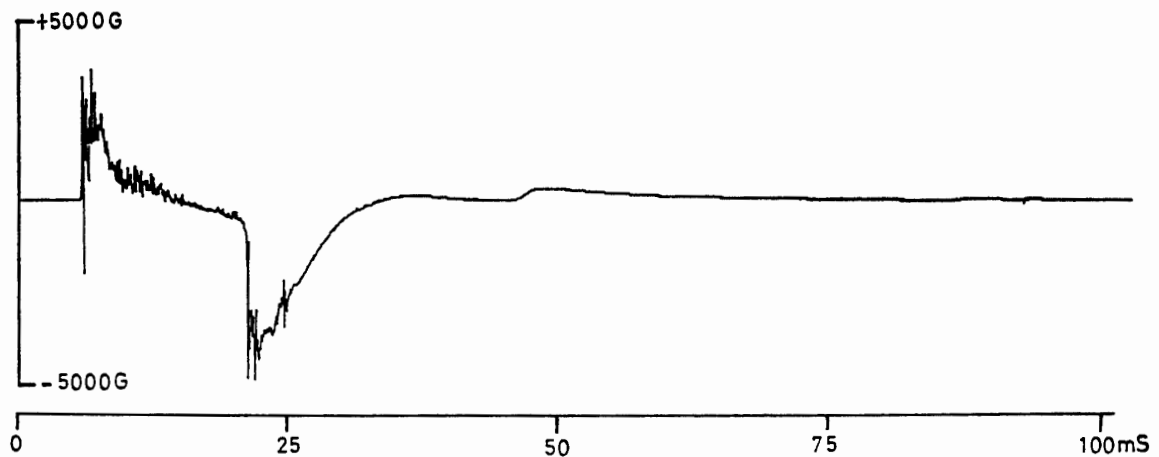


図 9 V241-M 型上下動センサーの衝突（砂の硬さ $20 \sim 100 \times 10^6$ N/m²；衝突速度 ~ 220 m/s）のもたらす加速度は ± 5000 G に達するが、センサーは破損しない。衝突前後の周波数特性の違いも少ない。宇宙科学研究所 SES データセンター（1990）より転載。

Fig. 9. V241-M type vertical-component seismometer can endure accelerations ranging from -5000 G to 5000 G, which resulted from the collision of the penetrator into sands (hardness $20 \sim 100 \times 10^6$ N/m²; collision velocity ~ 220 m/s). Change of the frequency characteristics of the sensor was negligibly small. Redrawn from ISAS SES DATA CENTER (1990).

N/m²; 衝突速度 ~220 m/s) のもたらず ±5000 G (1 G=9.8 m/s²) の加速度 (図 9) にも破損しないことがわかった。実験終了後、同じ型の別のセンサーと並べて振動試験を行い、波形記録を比較したが、実験前後でコイルの共振周波数特性に大きな“ずれ”は生じていない。

センサーの固有周期をさらに下げるか、2 Hz 前後の感度をさらに上げるにはコイルの形状変更・巻き線数の増加が必要なため簡単ではない。ただし、必要帯域での周波数特性が平滑でないことを、十分な精度でのデジタル・フィルター補正で対処すれば、現状のものでも十分目的に合致する。そのためには、投下・設置後のセンサーのインパルス応答波形を回収しなければならない。

4.2. 増幅器の製作

図 10 は、みずほ高原実験における海中・雪孔中発破の最大振幅と距離の関係 (Ito and

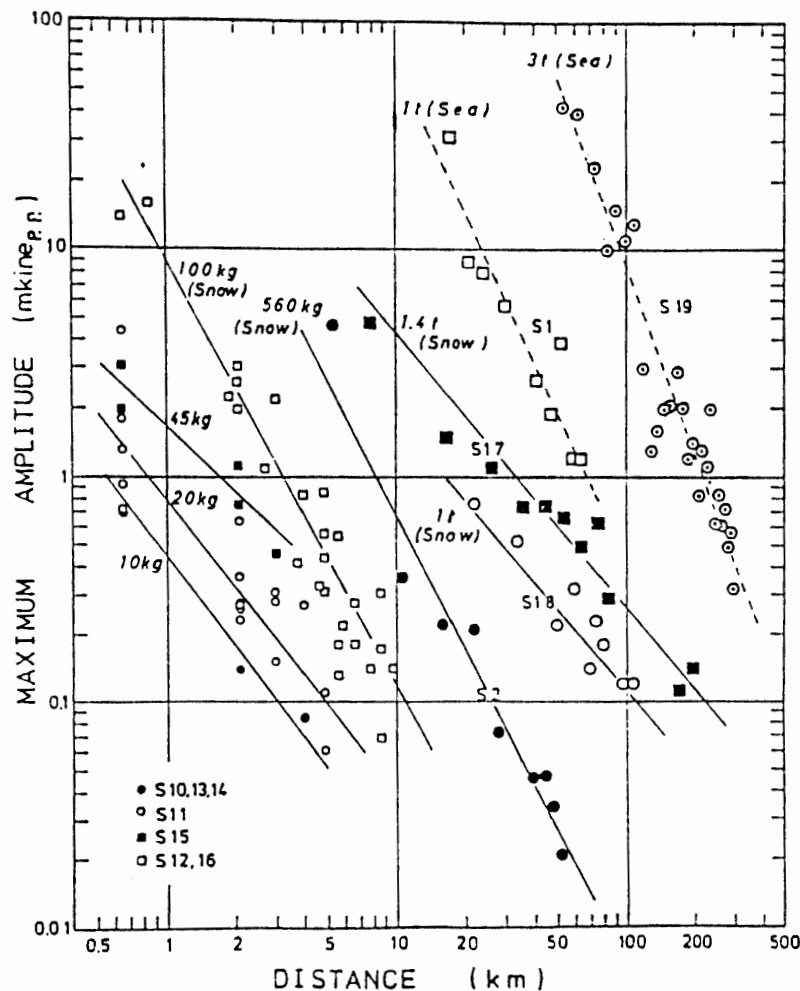


図 10 みずほ高原実験における海中・雪孔中発破の最大振幅 (mkine: 1 mkine=10⁻⁹m/s) と距離 (km) の関係。火薬量は 10 kg から 3t の範囲にわたる。ITO and IKAMI (1984) より転載。

Fig. 10. Maximum amplitude of P-wave (mkine) versus shot-detector distance (km) for shots fired in the ice sheet and in the seawater. The amount of explosives ranges from 10 kg to 3t. Redrawn from ITO and IKAMI (1984).

IKAMI, 1984) である。10-300 km で観測される振幅 (2×10^{-7} m/s \sim 1×10^{-2} m/s) に十分対応できるためには、アンプの初段入力換算ノイズが $\sim 3 \times 10^{-7}$ V 以下、ダイナミック・レンジが $\sim 10^6$ - 10^8 とれる必要がある。このため A/D 変換機能としては 16 ビットあるいは 12 ビットの複数チャンネルが要求される。

V241-M センサーとローノイズ オペアンプ (OP-07) を組み合わせたシステムの検出限界は ~ 1 Hz で 2×10^{-7} V なので 1×10^{-8} m/s 程度までの地動は検出可能である。また、12 ビット 4 チャンネルで各チャンネル間のゲインの比を 1/8 とすれば 126 dB のダイナミック・レンジが取れる。このようなシステム出力をマイコン制御プログラムで収録試験している。

一方、この回路部分についてはレンジング・アンプも並行試作した。16 ビットの A/D 変換器 +6 ビット ($\times 64$) ゲインで入力 1 チャンネルに対し 2.3×10^{-8} \sim 5×10^{-2} m/s の速度振幅を取り扱うことができる (サンプリング周波数は 200 pps)。現在、1 data = 32 bits バイナリー形式でのデータ集録を行うプログラムを作成、PC9801 パソコン上でトリガー収録する試験を行っている。

4.3. 電子モジュールの地上衝撃試験

電池、水晶発振子、CPU、ROM などの各電子素子が ± 5000 G の衝撃に耐えて正常な機能を果たすかどうかは、耐せん断応力を考慮した実装技術、部品内部空隙へのポッティング技術に依存する。民生用素子で ± 5000 G の耐加速度性能を保障するものは存在しない。軍用、衛星搭載用特注素子に頼らず製造単価を抑えるためには、どうしても容易に入手できるものの改造以外に方法はない。前述の第 5 回ペネトレーター貫入試験報告書に各素子の試験結果の詳細が報告されているので、ここでは結果を簡単に再録することにする。

4.3.1. 塩化チオニール・リチウム電池

エレクトロケム・インダストリー社製 BCX-3B70 型を使用した。電池の実装向きによる耐衝撃性を調べるために貫入方向に対し両極が平行になる“縦置き”と、加速度の向きに対して垂直になる“横置き”で違いが出るか調べた。衝突瞬間 (衝突速度 ~ 220 m/s) の電圧変動値 (短周期的な 0.3 Vpp の変化と最終的な 0.1V の電圧降下)、衝撃後行った 75Ω 負荷での放電テストは、ともに“縦置き”のほうが成績が良い。+極の向きによる相違はほとんどない。

この型の電池は容量が ~ 450 Wh/kg と大きく BCX72 DD サイズ (直径 33.5 mm, 高さ 111.25 mm) は 30 Ah のカタログ値を持つ。使用温度範囲も $-40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ とフッ化黒鉛リチウム電池 ($-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$) より広いので南極ペネトレーターに適している。

4.3.2. マイクロコンピューター、クロック等

試験した LSI および回路は次の通りである。

CPU	LH5800L	SHARP,	PIO	LH5081	SHARP
EP-ROM	MB8516	FUJITSU,	Clock circuit	SN74HCO4N	TI

ダイヤモンド・カッター（ビューラー社製）を使用して IC の上蓋を切断した後，周波数分周プログラムを書き込み EP-ROM 内の空隙にエポキシ樹脂を流し込んで ROM 部を固定し，さらに耐圧容器内にポッティング固定した．衝突実験（220-230 m/s）後，プログラム内容をチェックしたが，すべてのデータバスで正常出力を得た．

AD7574, TC5564, 14520 を主体に構成したデジタルレコーダーやサーミスター，ダイオード（単体）も問題なく使用できる．

4.3.3. 水晶発振器

日本電気製の表面波形水晶発振器を使用した．コントロール電圧に対する発振周波数の変化を図 11 に示す．一点鎖線（三角）はポッティング前，破線（白丸）はポッティング後，実線（黒丸）は衝撃試験後のデータである．ポッティングにより発振周波数が約 30 kHz 低周

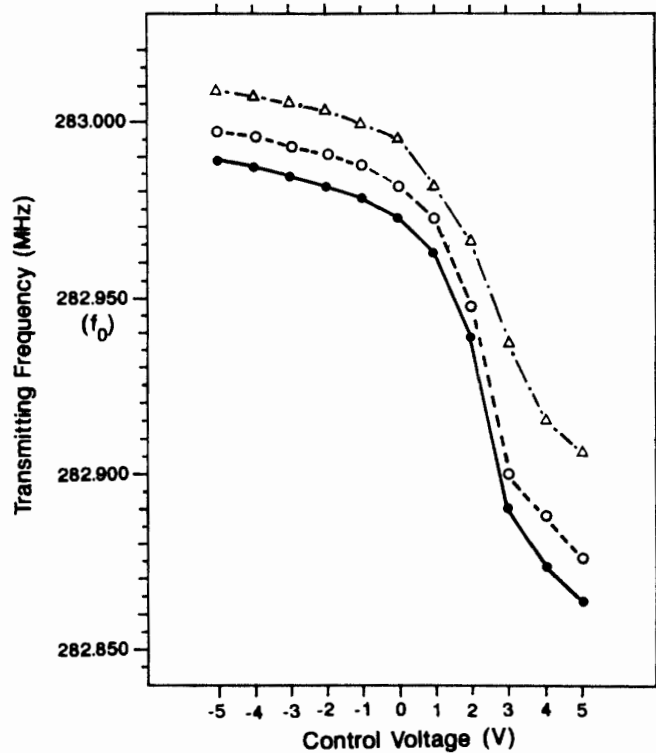


図 11 衝突実験前後での表面波形水晶発振器（日本電気製）の発振周波数変化．一点鎖線（三角）はポッティング前，破線（白丸）はポッティング後，実線（黒丸）は衝突実験（衝突速度：220-230 m/s）後のデータ．元振（282.950 MHz）に対し，変化量は 0.0004% 以内である．宇宙科学研究所 SES データセンター（1990）の 72-74 頁を改変・編集した．

Fig. 11. Change of the oscillating frequency of the quartz oscillator before and after the collision test. Chain curve (triangle) indicates before-potting, broken curve (open circle) indicates after-potting, and solid curve (solid circle) indicates data after the collision test. The amount of change is within 0.0004% as compared with the initial frequency (282.950 MHz). Edited from pages 72-74 in ISAS SES DATA CENTER (1990).

波数側にずれ、衝撃試験後はこれがさらに 7 kHz 低周波数側へずれたことがわかる。しかし元振 (282.950 MHz) に対して 0.0004% の変化なので許容範囲と言える。

4.4. あすかにおけるヘリコプターによる投下実験

図 12a, b に示す 2 機 (No. 1 および No. 2) を第 31 次南極観測あすか隊に依頼し、投下実験を行った。白石和行第 31 次あすか越冬隊長より下記のような報告 (ファクシミリ AK-5, 発信日平成 2 年 1 月 8 日) を得た。

ペネトレーター投下試験報告

- a. オペレーション日時: 1989年12月30日 1800-2200LT
- b. 気象状況: あすか地上気象 (1900LT)

天気 晴れ, 気温 -3.1°C , 露点温度 -6.0°C , 湿度 81%,
 風向 ESE, 風速 11.7 m/s, 気圧 877.9 mb
- c. 投下予定地点: シール岩より磁方位で約 165 度, 約 500 m (図 12c).
 スノーマーカーで直径 5 m の円を描き, 目標とした。
- d. 投下状況
 - 1) 小型ペネトレーター (No. 1)

使用航空機: AS-350B, (機体番号: JA9429), 機長: 池上 宏
 投下者: 辻 敏明 (整備士), 投下時刻: 12月30日 1857LT
 投下方法: 対地 600 m, ホバリング状態の機中より, 下向きに自由落下させた。
 - 2) 大型ペネトレーター (No. 2)

使用航空機: AS-350B, (機体番号: JA9468), 機長: 宇野 哲
 投下者: 浦谷 芳 (整備士), 投下時刻: 12月30日 1901LT
 投下方法: 1) に同じ。

* 対地高度は一旦, 投下予定地点に着陸して高度計の補正をした後に測定しているの
 で, 相当に正確である。
- e. 地上観察結果
 - 1) 人員: 白石和行, 土屋範芳, 賀川 潤, 小山内康人
 - 2) 落下状況: 地上観察者は, 投下目標地点より 400 m あすか寄りの地点で観察していたが, No. 1 の落下は視認できず, No. 2 は途中まで目で追うことができた。投下後, 約 1 時間捜索したが, No. 1 は発見できず, No. 2 のみ辛うじて発見。場所は, 目標投下地点より約 300 m 風下であった。
 - 3) No. 2 の回収状況

着地点の雪は締まっており, 「glazed surface」に近い。容器は雪面に完全に没し, 雪面には容器のフィンの断面と同じサイズの四角の穴が開いているのみであった。

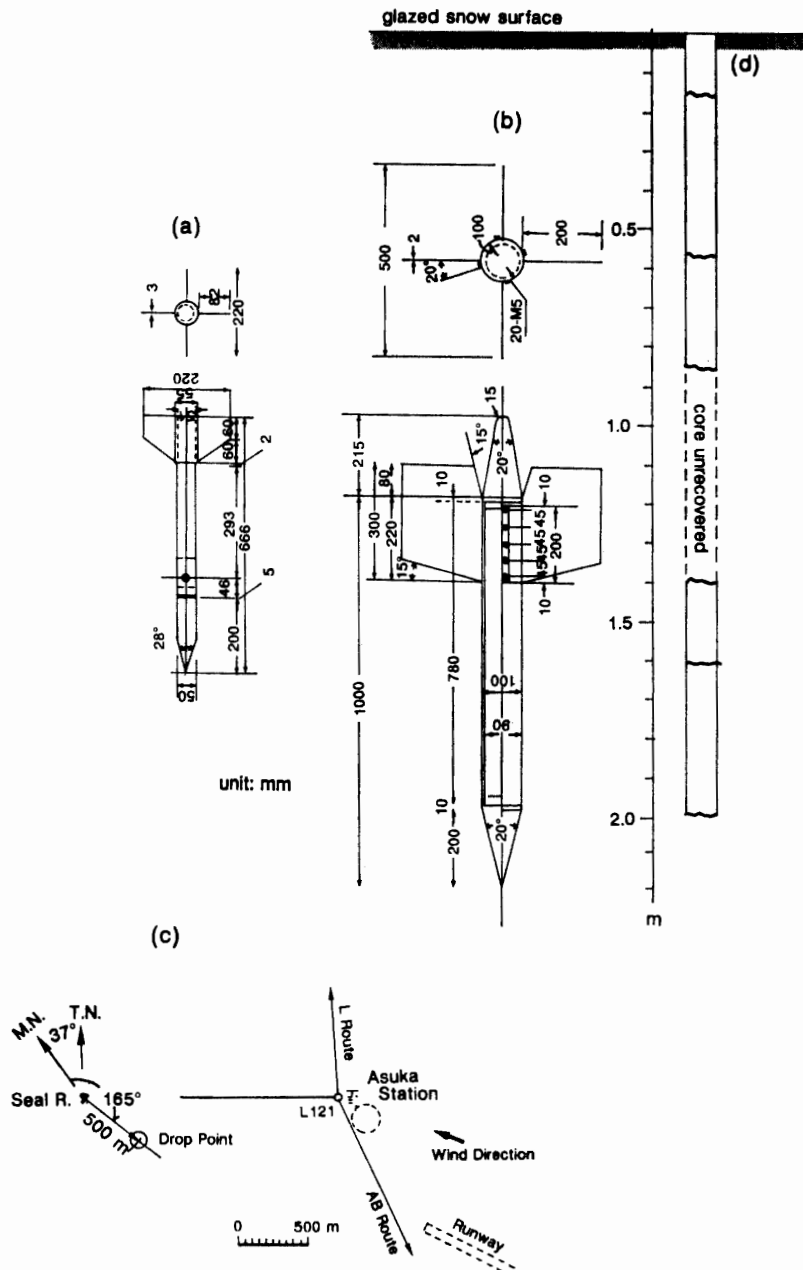


図 12 あすかにおけるヘリコプターによるペネレーター・ダミーロードの投下実験。(a) No. 1 ペネレーターは見つからなかった。(b) No. 2 ペネレーターの先端は雪面下 2.2m 地点で止まった。雪面にほぼ垂直につきささった。(c) 投下地点は、あすかとシール岩の間の glazed snow surface の地域である。(d) No. 2 ペネレーター落下点わきのコアをアイスオーガーにより回収した。0.8m-1.4m 深度のコアはザラメ雪状のため回収できなかった。

Fig. 12. Deploy test of the dummy penetrators from the helicopter AS 350B at Asuka Station. The penetrator was released from 600 m above the glazed snow surface (1000 m asl). (a) No. 1 penetrator was not found. (b) The tip of the No. 2. penetrator stopped at 2.2 m depth from the snow surface. (c) Location map of the test site. (d) Snow core was sampled near the drop point.

掘ってみると、0.4 m 深で、もげたテールコーン（発泡スチロール製）と分断されたフィンの「はちまき」が発見された。さらに、0.7 m 深（表面より 1.1 m）において、ようやく容器本体のフィンの末端が見つかった。

容器はほとんど垂直に貫入しており、フィンが多少変形しているものの、フィンと胴体の接合部や胴体本体に破損はみられない。

胴体の約半分が現われるまで（表面より約 1.6 m）掘ったが、人力で胴体を抜き出すことはできなかった。これは、胴体表面が凍りついたためであろう。やむをえず、フィンにロープを掛け、雪上車で引っ張り出してようやく回収した（回収容器の変形はこの時のもの）。

着地点の脇、0.5 m で、アイスオーガーにより 2 m 掘削し、雪氷コアを採集した。表面から約 0.85–1.4 m の間はシモザラメ化した積雪のため、コアの回収ができなかった（図 12d）。

f. 回収持ち帰り物品

状況説明写真フィルム：1 本；梱包 1：本体，フィン付き；梱包 2（冷凍品）：フィンの「はちまき」（4 分裂している），落下時に分断したテールコーン，雪氷コア 5 個。

あすかでの投下実験から雪の硬さがわかる。一般に、ペネトレーターの貫入深さは、

$$d = 10^{-3} s N A^{-1/2} \sqrt{m V}, \quad (1)$$

とあらわされ（藤村彰夫，私信，1988），

- s = ターゲットの硬さをあらわすパラメーター
- N = ペネトレーターの先端形状パラメーター
- A = ペネトレーターの進行方向に垂直な断面積 (m^2)
- m = 質量 (kg)
- V = 衝突速度 (m/s)

である。No. 2 ペネトレーターの場合、 $N = 1.08$ 、 $m = 8.75 \text{ kg}$ 、 $A = 2.78 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 、600 m から自由落下した時の衝突速度は $V \sim 105 \text{ m/s}$ である。シモザラメ層は硬さ的には透明と見なせるので先端貫入深さは $d = 1.63 \text{ m}$ とおける。よって式 (1) に上記パラメーターを代入すれば $s = 8.3$ が得られる。シモザラメ層が雪面下一様に存在するかどうかはわからないが、この層にも硬さをもたせた場合は $d = 2.18 \text{ m}$ とおいて $s = 11.1$ という値を得る。

4.5. テレメーター概念設計

4.5.1. データ伝送・収録方式

一般に、無線によるデータ伝送・収録方式としては次の 3 つが考えられる。

- a. 投下されたペネトレーターはリアルタイムでデータを収録装置に無線伝送する。
- b. ペネトレーターはメモリーを持ち、地震波記録をいったんここに記録する。データ収録装置からの指令で順次 1 個または数個のペネトレーターがメモリー内容を無線伝送

する。

- c. コマンド信号の通信にのみ無線を用い、地震波記録はペネトレーター内蔵の媒体に記録し、ペネトレーター本体を回収する。

我々の場合、下記2点の理由から b. の方式が現実的と考えられる。すなわち、

- a. 測線のスパン (~400 km) と地形 (~3000 m の高低差があり見通しがとれないこと) から考えて、確実なリアルタイム伝送が保証されない。
 b. 目標物がないことと、雪の硬さの多様性を考えるとペネトレーターは雪面下までもぐってしまい、回収には非常に時間がかかるか、あるいはできないと考えた方がよい。

4.5.2. 伝送モード

データ収録装置 (DCS; Data Collection Segment) によりペネトレーター (GSS; Ground System Segment) のデータを回収する方法には、(a) DCS を地上ヘリサイトに設置して (Ground DCS: GDSCS), 固定点で任意の時刻にデータ収録する方法と、(b) ヘリコプターに搭載し (Air DCS: ADCS), 移動して GSS データを収録する方法とが考えられる。さらに、同じ GDSCS でも (a. 1) 地表波を利用する場合と (a. 2) 空間波を利用する場合、同じ ADCS でも (b. 1) 基地上空付近を旋回するヘリコプターによりデータ収録または GDSCS へ中継する方法 (地上波利用) と、(b. 2) 各 GSS 付近へ接近してデータ収録する方法 (自由空間波利用) が考えられる。各方式の特徴は表2のようにまとめられる。

長い区間にわたって展開している多数の GSS のデータを、人が測点に行かず回収する無線テレメーターとしては、可能ならば GDSCS, または ADCS でも (b. 1) の中継法が望まし

表2 DCSによりGSSのデータを回収するテレメトリー各方式の特徴比較

Table 2. Comparison of the telemetry methods for data acquisition from GSS to DCS. For details, see text.

DCSの種類	伝播モード	周波数帯	伝送速度	所要電界 (dB μ /m)	記 事
① 地上 (GDSCS)	地表波	中短波 (1.5-5 MHz)	—	—	減衰が大きく電界不足 限度 50 km
② 地上 (GDSCS)	空間波	短波 (1.5-30 MHz)	200 b/s	10~20	電離層伝播のため通信が不安定 低速のため、1GSS 当たりデータ送 信時間 30 分 GSS, DCS 共にアンテナが大きい アンテナ利得が低い
③ 機上 (ADCS)	地上波	VHF/UHF	8 kb/s	45	通達距離 10-20 km フェーディングが大きい BER=0.5~1 \times 10 ⁻³ 高速伝送可能
④ 機上 (ADCS)	自由空間波	VHF/UHF	8 kb/s	45	GSS 直上受信のため近距離通信 フェーディングはほとんど考慮不要 低伝播損失で低電力化可 BER=1 \times 10 ⁻⁴ 可能

注) 伝送方式: 短波は FSK VHF/UHF は4値デジタル FM 変調
 所要電界: VHF/UHF は 400 MHz での値

い、特に GDCS は天候、ヘリコプターの運航条件に左右されないから、任意の時刻に直接データ収録可能という利点がある。しかし、地表波モードは到達距離～50 km という限界のため本目的には合致しない。さらに電離層じょう乱の大きい極域での実験ということ、4.5.1 で述べたようにナンセン氷原の展開測点がセールロンダーネ山地で遮られるという地形的な問題点から通信回線品質が保証しがたい。また、ペネトレーターサイズ（～1 m）が GSS の持たなければならないアンテナ波長（～100 m）に比べ極端に小さく、効率が 1% に満たないという難点もある。

ADCS 方式のうち地上波伝播はヘリコプターの対地高度が～3000 m（この場合でも海拔高度は～5000 m に達し有酸素飛行となる）にすぎないから最大所要通信距離（～150 km）に対して低すぎ、伝播損失が大きい。しかも大地反射によるフェーディングが発生し、回線所要マージンを大きく取らねばならない。実用的には 10-20 km までヘリを接近させる必要があり、全点の中継動作は実現しないだろう。同じ ADCS 方式でも各 GSS 近くでデータを受信する方法は、自由空間波利用なので電波伝播損失が低く、小送信電力で大きな電界強度を確保できる可能性がある。そのかわり、上空での滞在時間を極力切り詰めるための設計工夫が必要になる。

GSS と DCS を結ぶシステム系統図は図 13 のようになろう。また、データ回収の作業手順は以下のようになろう。(a) DCS を搭載したヘリを各 GSS 上空～1 km 以内まで接近させ、高度 1000-3000 m で低速ホバリングさせる（ペネトレーター投下地点の GPS 位置を知れば容易にアクセスできる）。(b) 制御コマンドによりデータ回収を実行する。(c) 伝送完了表示を確認後、次の GSS へ移動する。(d) 回収したデータは IC カード等の取り外し可能な媒体（データログメモリー）に記録することとし、モニター機能を持つ DCS（あるいはヘリサイトのパソコンシステム）で点検する。

8 kbits/s の伝送速度に対し 1 GSS あたりのデータ回収時間は 1 shot あたり

$$200 \text{ data/s} \times 90 \text{ s} \times 16 \text{ bits/data} \div 8000 \text{ bits/s} = 36 \text{ s}, \quad (2)$$

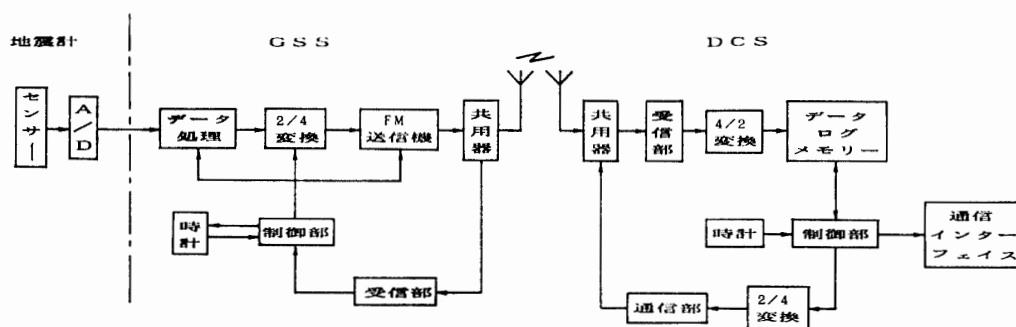


図 13 地上セグメント (GSS; ペネトレーター) と機上セグメント (DCS; データ収録装置) のシステム系統図。詳細は本文参照。

Fig. 13. System design of the Ground System Segment (GSS; penetrator) and the Data Collection Segment (DCS).

であり、4 shot まとめたの伝送だと約 2.5 分かかる。ヘリの巡航速度を 180 km/h (100 kt) とすると 300 km 距離の往復に約 3 時間 20 分、アプローチを含めたデータ回収に 1 分/GSS 必要だとすると全 40 点でのフライト時間は 4 時間で 1 フライトで全点回収可能かもしれない。4 shots を一度に回収するために約 3 分/GSS 必要とすると、全受信時間は約 2 時間なので全所要時間は 5 時間 20 分にのぼり、ヘリサイトより南側と北側の計 2 フライト(各フライト時間は約 2 時間 40 分)に分ける必要がある。天候の関係で全 shot データを一度に回収しなければならないとしても、2 フライトで完了するめどをつけることは、極めて重要である。

一般に移動体通信において発生するマルチパスフェーディングの変動分布は短区間ではレイリー分布で近似され、その変動周期(フェーディングピッチ: f_D)は

$$f_D = 0.93fV \times 10^{-3} \text{ Hz}, \quad (3)$$

であらわされる。ここで f は周波数 (MHz), V は移動速度 (km/h) である。したがって、 $f=400$ MHz, $V=6$ km/h ならば $f_D \sim 2$ Hz ではほぼ無視しうる値となる。データ変調方式として 4 値 FM 変調を採用すれば、 $\sim 10^{-4}$ のビットエラーレートは確保できそうである。

4.5.3. 実験手順とテレメーター仕様

ペネトレーターの設置からデータ回収までのシーケンスをコマンドの仕様策定の観点からまとめると以下のようになる。

- a. ヘリコプターからペネトレーター (GSS) を投下する。投下後、機器をスタンバイ状態 (sleep) にする。
 - (1) 測点識別コードをどうやって与えるか？ 内蔵メモリーにあらかじめ付与か、投下後設定か？ ポーリングのかけかたは？
 - (2) 機器のどのモジュールまでを power on の状態にしておくのか？ 全体のバッテリー寿命とどう折り合いをつけるか？
- b. 位置決定方法は別途考えるとして、投下時に位置決定を行う。

決定データをペネトレーターのメモリーに書き込むか？ DCS か？ それとも両方か？ 実験中、ポーリングをかけて読みだし、参照する必要があるか？ あるいは単に人がノートするだけで良いか？
- c. 爆破準備完了に合わせてヘリコプターで GSS を wake-up する。
 - (1) GSS 時計の校正及びその確認方法は？
 - (2) 収録開始時刻の設定とその確認は？
 - (3) 4 バンク設定可能として、開始時刻の与え方は？ リセットの仕方は？
- d. 動作状態の確認 (センサー機能のチェック) をする。
 - (1) インパルス応答をペネトレーターから呼び出し DCS で異常を判断するための方法と、そのための所要時間の見積もり。
 - (2) 異常に対する措置をどうするか？ すぐ別のペネトレーターに切り換えるか？

(3) 時刻データのチェック方法とそのための所要時間の見積もり。

e. 爆破データをメモリーに記録する。

一定時間 (90秒) 収録後どのモジュールまで **sleep** させるか？

f. ヘリコプターで **wake-up**, データを **DCS** へ回収する。

データ回収終了後どの状態へもどすか？ その時、一連のチェック動作がサイクリックになるか？

4.5.4. GSS, DCS の基本機能

いくつかペンディングの項目もあるが、**GSS, DCS** が満たすべき基本機能として以下が含まねばならない。

(I) 主に **GSS** 側

- a. 内蔵時計兼タイマーとして **Elapsed Time Counter (ETC)** を持つ。
- b. **ETC** は **DCS** からのコマンドにより **UTC** 同期クロック起動信号を受け、設定した **UTC** 時刻からカウントアップして「時・分」情報を持つクロック信号を生成する。
- c. データ収録開始時刻 (10秒刻みで与える) は数値で **DCS** に入力され、コマンドにより **GSS** へ受け渡される。
- d. **GSS** は **ETC** により現在時刻を計測し、**DCS** から受信記憶した上記時刻にデータの取り込みを開始する。
- e. 観測部 **A/D** コンバーター出力のバイナリーデータは、設定したデータ収録開始時刻から90秒間のデータがメモリーに記憶される。
- f. 1 回分の爆破に対し必要なデータ容量は $200 \text{ pps} \times 90 \text{ s} \times 16 \text{ bits} = 288 \text{ kbits}$ である。データメモリーは4バンクとし、4回分の観測データを記憶できる。メモリー総容量は $288 \text{ kbits} \times 4 \sim 1.2 \text{ Mbits}$ である。
- g. 記憶したデータを **DCS** のコマンドにより記憶番号を指定して読み出せる。
- h. **DCS** のコマンドに応じ、**GSS** のクロック信号を送信する。
- i. 機上の **DCS** は h の現在時刻を **GSS** より受信し、機上の **UTC** 時刻と比較し **ETC** が正常に動作しているか否かを表示する。
- j. 「日」情報は参照しないので、**ETC** 起動からデータ収録開始までの遅延時間は最大12時間である。
- k. **ETC** の現在時刻データは送信データの一部として付加できる。
- l. **DCS** からのコマンドに従い、指定データを送信する。
- m. 送信起動後6分以内に送信終了コマンドがないとき、強制断とする。
- n. 識別コード (**ID** コード) を持つ。番号容量は2けた (**99**) とする。

(II) 主に **DCS** 側

- o. データ送信コマンドを **GSS** に送り観測データを回収し、機上のデータログメモリー

に格納する。

- p. データ送信コマンド中の記憶番号により 4 バンクのデータメモリー中の任意のバンク (複数可) を指定できる。
- q. データログメモリー容量は GSS 40 台 4 バンク, 計 160 event 分とする。したがって, DCS の容量は $1.2 \text{ Mbits} \times 40 \sim 48 \text{ Mbits}$ である。
- r. 各 GSS のセンサー動作テスト, 時刻校正等の制御コマンドを有する。
- s. センサーの動作確認は, センサーのインパルス応答を DCS モニターに出力し, 機上でチェックできる。そのために,
 - (1) GSS は DCS からのコマンドを受けて ON/OFF 信号をセンサーに送出する。
 - (2) GSS は ON/OFF 信号によるセンサーの応答波形の A/D 出力を送信する。
 - (3) DCS は受信した応答波形をモニター上へ出力する。
- t. データメモリーは DCS パネル面より容易に脱着でき, 他の読みだし装置により読みだし可能な構造である。
- u. ID コード (観測点番号) は DCS のパネル面から入力付与できる。
- v. GSS 内の ETC 設定に必要な時刻データを入力できる。

4.5.5. 制御コマンド

テレメーター基本機能に掲げた a~v を実施するためのコマンド群として以下を用意する必要がある。

- a. GSS 送信部の起動と停止
- b. GSS 選択信号 (ID コード) 送出
- c. GSS のセンサー動作確認
 - (1) ON/OFF 信号の送出
 - (2) データメモリーバンク切り替え
 - (3) データメモリー内テストパターン (インパルス応答) 読み出し・送出
- d. GSS タイマー設定
 - (1) ETC の起動
 - (2) 遅延タイマー (データ収録開始時刻) の設定
 - (3) 設定データの読み出し・送出
 - (4) ETC 現在時刻の読み出し・送出
- e. データ回収
 - (1) 記録番号 (メモリーバンク番号) 指定
 - (2) メモリー内データ読み出し・送出

DCS から GSS を制御するシーケンスの概要は図 14 のように示されよう。

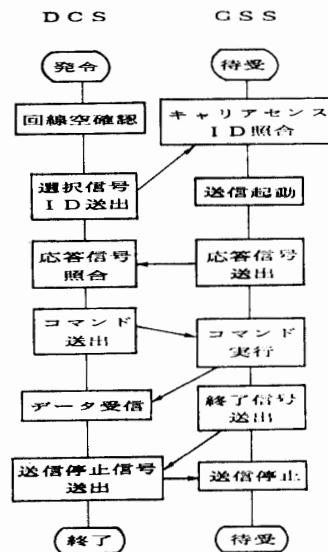


図 14 DCS による GSS の制御シーケンスの概要.
詳細は本文参照.

Fig. 14. Control sequence of GSS by the commands
from DCS.

5. 1990 年度の計画について

ヘリコプターから投下後、着地したペネトレーターの位置決定を簡便に行えるかどうかは、安価な GSS が作れるかどうかを決定する点で、システム開発の重要な要素である。あすか観測拠点での投下実験から、雪の硬さのパラメーター、衝突速度（必要な落下高度）について見通しを得たので、国内において differential GPS positioning を利用した位置決定実験を企画・実施する。

謝 辞

本研究は科研費・試験研究（課題番号 01840012）の一環として行った。

あすか観測拠点でのペネトレーター投下実験に際し、貴重なヘリコプター時間をさいて協力して下さった白石和行第 31 次あすか越冬副隊長、寺井啓オペレーション・リーダーほかヘリコプター野外行動関係者の方々に深く感謝する。

文 献

- 鮎川 勝 (1989): 第 28 次南極地域観測隊あすか観測拠点越冬報告 1987. 南極資料, **33**, 234-268.
- HIROI, Y., SHIRAIISHI, K., MOTOYOSHI, Y., KANISAWA, S., YANAI, K. and KIZAKI, K. (1986): Mode of occurrence, bulk chemical compositions, and mineral textures of ultramafic rocks in the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **43**, 62-84.
- IKAMI, A., KAMINUMA, K. and ICHINOSE, Y. (1981): Upper crustal structure of Sôya Coast, Antarctica, revealed by explosion seismology. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), **71**, 58-63.
- IKAMI, A., ITO, K., SHIBUYA, K. and KAMINUMA, K. (1984): Deep crustal structure along the profile between Syowa and Mizuho Stations, East Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. C, **15**, 19-28.

- ITO, K. and IKAMI, A. (1984): Amplitudes of seismic waves on ice sheet in East Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. C, **15**, 36-42.
- 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.
- KURININ, R. G. and GRIKUROV, G. E. (1982): Crustal structure of part of East Antarctica from geophysical data. Antarctic Geoscience, ed. by C. CRADDOCK. Madison, Univ. Wisconsin Press, 895-901.
- MORIWAKI, K. and YOSHIDA, Y. (1983): Submarine topography of Lützow-Holm Bay, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **28**, 247-258.
- NISHIO, F., ISHIKAWA, M., OHMAE, H., TAKAHASHI, S. and KATSUSHIMA, T. (1984): A preliminary study of glacial geomorphology in area between Breid Bay and the Sør Rondane Mountains in Queen Maud Land, East Antarctica. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **83**, 11-28.
- NISHIO, F., OHMAE, H. and OSADA, K. (1988): Glaciological research program in East Queen Maud Land, East Antarctica, Part 7, 1986. JARE Data Rep., **137** (Glaciology 16), 49 p.
- 渋谷和雄 (1988): 「あすか観測拠点」を中心とした28次越冬による航空機観測を終えて. 極地, **47**, 67-72.
- SHIBUYA, K., KAJIKAWA, Y. and SEGAWA, J. (1986): Surface configuration of the Antarctic ice sheet in the sector 30°E-80°E using SEASAT altimetry data. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **43**, 1-12.
- SHIBUYA, K., FUKUDA, Y. and MICHIDA, Y. (1991): Determination of geoid height at Breid Bay, East Antarctica. to be published in J. Geophys. Res.
- 宇宙科学研究所 SES データセンター (1990): ペネトレーター貫入試験報告書(第5回), SES-TD-90-011, 宇宙科学研究所, 相模原, 167 p.
- YAMANOUCHI, T., SHIBUYA, K. and SAKAI, R. (1988): Meteorological data at Asuka Camp, Antarctica. JARE Data Rep., **140** (Meteorology 21) 104 p.

(1990年12月3日受付; 1991年1月8日改訂稿受理)