

南極人工地震観測用ペネトレーターの開発
(2) 1990年度経過報告

渋谷和雄¹・神沼克伊¹・早川雅彦²・藤村彰夫²・塚本茂樹²・水谷 仁²・
山田功夫³・小山順二⁴・笠原 稔⁵・伊藤 潔⁶・金沢敏彦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. 2. 1990-Year Program

Kazuo SHIBUYA¹, Katsutada KAMINUMA¹, Masahiko HAYAKAWA²,
Akio FUJIMURA², Shigeki TSUKAMOTO², Hitoshi MIZUTANI²,
Isao YAMADA³, Junji KOYAMA⁴, Minoru KASAHARA⁵,
Kiyoshi ITO⁶ and Toshihiko KANAZAWA⁷
(ANTARCTIC PENETRATOR RESEARCH GROUP)

Abstract: GPS differential positioning test on the Antarctic penetrator was made at the Aoyama Pasture, Ishikari-Tobetsu-machi, Hokkaido. The reference GPS receiving site was chosen in Hakodate, 200 km southwest of the Aoyama Pasture, taking the planned operation on the Sør Rondane Mountains 400 km profile in Antarctica into consideration. Three dummy penetrators were dropped twice by changing the release height in the range 160-1000 m above the ground.

Six impact positions of the deployed penetrators were determined by a relative carrier phase measurement to an accuracy of 0.1 m, and the position results were compared with the post-processed GPS differential positions. When 10-20 s duration GPS position data could be acquired at an interval of 1 s before and after the release instance (1 s accuracy to UTC) of the penetrator, the estimated impact position by tracing the falling trajectory was found to be within 30 m offset from the actual impact location determined by the relative carrier phase measurement. When the GPS hovering data could be acquired for at least 1 minute duration just above the impact crater, the calculated impact location via the hovering-helicopter GPS position data was found to be within 10 m offset from the actual impact location.

The height accuracy of GPS differential positioning was ± 10 m (PDOP=

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 東北大学理学部. Faculty of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980.

⁵ 北海道大学理学部. Faculty of Science, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060.

⁶ 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokanoshō, Uji 611.

⁷ 東京大学理学部. Faculty of Science, The University of Tokyo, 11-16, Yayoi 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

5-20), which is considered to degrade to ± 20 m when the coordinates of the reference GPS receiving site were determined by the time-average of point-positioning results.

As for attitude of the dropped penetrator, the declination from vertical was found to be within $\pm 5^\circ$, when the penetrator was dropped from the slowly-moving (below 20 km/h) helicopter 200 m above the ground.

要旨: ヘリコプターの GPS differential positioning によるペネトレーターの位置決定実験を北海道石狩郡当別町の町営青山牧場で行った。Differential の固定点はセールロンダネ実験を想定して 200 km 南西の函館に設置した。160-1000 m の対地高度でホバリングしているヘリコプターから 6 回の自由落下による投下試験を行った。

投下ペネトレーターの着地位置を GPS 干渉測位法で 0.1 m 精度で定め、ヘリコプターのリアルタイム航法位置から推定される着地位置の精度を調べた。その結果、ペネトレーターを切り離す瞬間を含む前後について各々 10-20 秒程度 (1 秒間隔) のヘリコプター飛行軌跡が得られれば、ペネトレーターの落下飛跡による着地位置推定精度は 30 m、落下点直上で約 1 分間ホバリングできれば 10 m 精度が確保できることがわかった。一方、differential 法によるヘリコプターの高さ精度はほぼ ± 10 m だった。ただし、differential の基準点座標を単に基準点に設置した受信器の point positioning 結果の時間平均値で固定すると、その平均値が持つ ± 10 m の高さ誤差がさらに加算され、リアルタイム位置の高さ精度は ± 20 m に劣化した。

また、対地速度 20 km/h 以下、対地高度 200 m 以上のヘリコプターからペネトレーターを自由落下させれば、貫入姿勢が垂直から $\pm 5^\circ$ 以内の傾きで停止することも確かめられた。

1. はじめに

南極人工地震に使用する投下型地震計 (ペネトレーター) を完成させるためには (1) 衝撃で壊れない地震計及びエレクトロニクスの開発, (2) ペネトレーター投下・設置後のセンサー機能テストと内蔵メモリーに記録されたデジタル地震波形データを回収するためのテレメトリー技術, (3) GPS を利用した落下地点の位置決定とペネトレーター内蔵時計の UTC 同期の実現, が鍵となる。第一年次報告 (渋谷ら, 1991) では主として (1) V241-M 型センサーが南極ペネトレーター用センサーとして適用できる, (2) CPU, ROM, 水晶発振子等個別のエレクトロニクス部品の耐衝撃性能はポッティング技術と基板実装ノウハウに依存する, (3) あすか観測拠点での投下実験で、雪の硬さパラメーターが明らかになったので投下方法 (外形寸法・重量を考慮して対地高度, 速度を決める) が設定できるようになった, (4) センサー機能テスト, システム故障テストにどのようなテレメトリーコマンドが必要か, などを明らかにした。

今回の第二年次報告では投下センサーの GPS differential positioning による位置決定と落下・着地したペネトレーターの姿勢などについてまとめる。氷床上に投下されたペネトレーターをあとで発見したり回収したりすることは、オペレーション上期待できないので、事前テストにより位置決定精度に目途をつけることは重要である。特別の位置決定装置を投下されるペネトレーターに組み込む必要がなければ、1 台あたりの製作コストが下げられるの

で量産化にも対応できるだろう。

2. 投下実験

3 個の投下用ボディを用意し、3 高度 (180-1000 m) からの投下を 2 回行うことにした。実験手順を以下のように決めた。

- (1) ボディの準備。
- (2) ヘリコプターからの投下, 落下点上空でのホバリング GPS 観測。(実験 No. 1-3)。
- (3) ペネトレーター投下前後のレーボール観測。
- (4) 落下地点へのエスロンポール設置とボディの回収。
- (5) 翌日もう 1 回 (1)-(4) を繰り返す。(実験 No. 4-6)。
- (6) 6 落下地点に立てたエスロンポール位置の GPS 干渉測位。

表 1 石狩当別町青山町営牧場における南極ペネトレーター投下実験参加者
Table 1. Participants in the Aoyama fall test of the penetrators.

役 割	氏 名	所 属
(1) 投下機器グループ		
ボディ準備	早川雅彦	宇宙科学研究所
搭載機器テスト	藤村彰夫 (羊蹄山のみ参加)	宇宙科学研究所
	小山順二	東北大学理学部
(2) ヘリコプター運航グループ		
パイロット	望月洋介	朝日航洋(株)札幌運航所
整備士(フック準備)	高木圭司	"
ヘリポート整備	嫁兼敏和 斉藤和久	朝日航洋(株)エアボーン探査部 "
ヘリコプター Pathfinder 取り付け	中村 剛	"
ビデオ機器取り付け		
函館(北大水産学部屋上)基準点での Pathfinder 観測, 有川通三角点からの偏心測量	浜田 満 石栗正之	" "
Pathfinder 技術サポート	桑子 亮	トリンプル・ジャパン(株)
(3) レーボール観測・ペネトレーター回収グループ		
レーボール観測	佐竹正治(4/12, 13)	日本気象協会北海道本部
ペネトレーター回収	山崎道夫(4/12, 13)	"
エスロンポール設置	小林利章(4/12)	"
	新川尚文(4/12)	"
	長坂俊一(4/12, 13)	"
	宇山哲司(4/12, 13)	"
	三神多加志(4/13)	"
	宇治裕幸(4/13)	"
(4) GPS 測量グループ		
GPS 干渉測位	笠原 稔	北海道大学理学部
	佃西理子	"
	林 能成	"
マネージャー	渋谷和雄	国立極地研究所

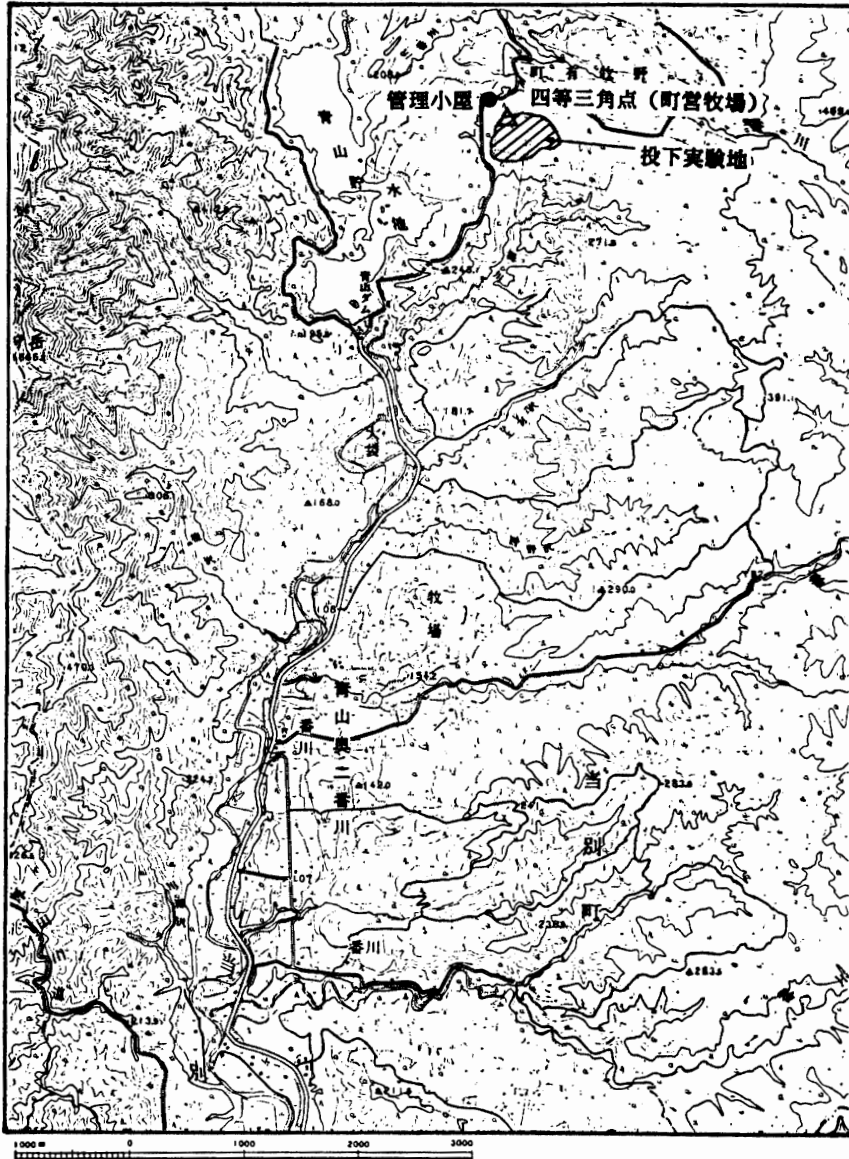


図 1 石狩郡当別町, 町営青山牧場実験地

Fig. 1. Location of experiment field at the Aoyama Pasture, Ishikari-Tobetsu-machi, Hokkaido.

(2) のホバリング GPS 観測では 1 組の L1 波 C/A コード受信器 (GPS Pathfinder) を使用し, 固定点での GPS 受信データを用いてヘリコプターのリアルタイム GPS 位置に含まれる電離層屈折誤差を補正する (GPS Differential 法). この方法によると時々刻々のヘリコプター位置精度は約 10 m と推定される. (6) の GPS 干渉測位では, 座標が既知の基準点と落下点での GPS 同時受信 (WM102 を使用) により, 搬送波 (L1, L2 波) の約 30 分の干渉測位を行うと, 0.1 m 精度で落下点座標を求めることができると期待される. (6) により求められた正確な座標に対する, (2) で求められた座標の偏差を調べることにより, 地上に降りることなく行うペネトレーター落下位置決定の精度を予め推定しておくことができ

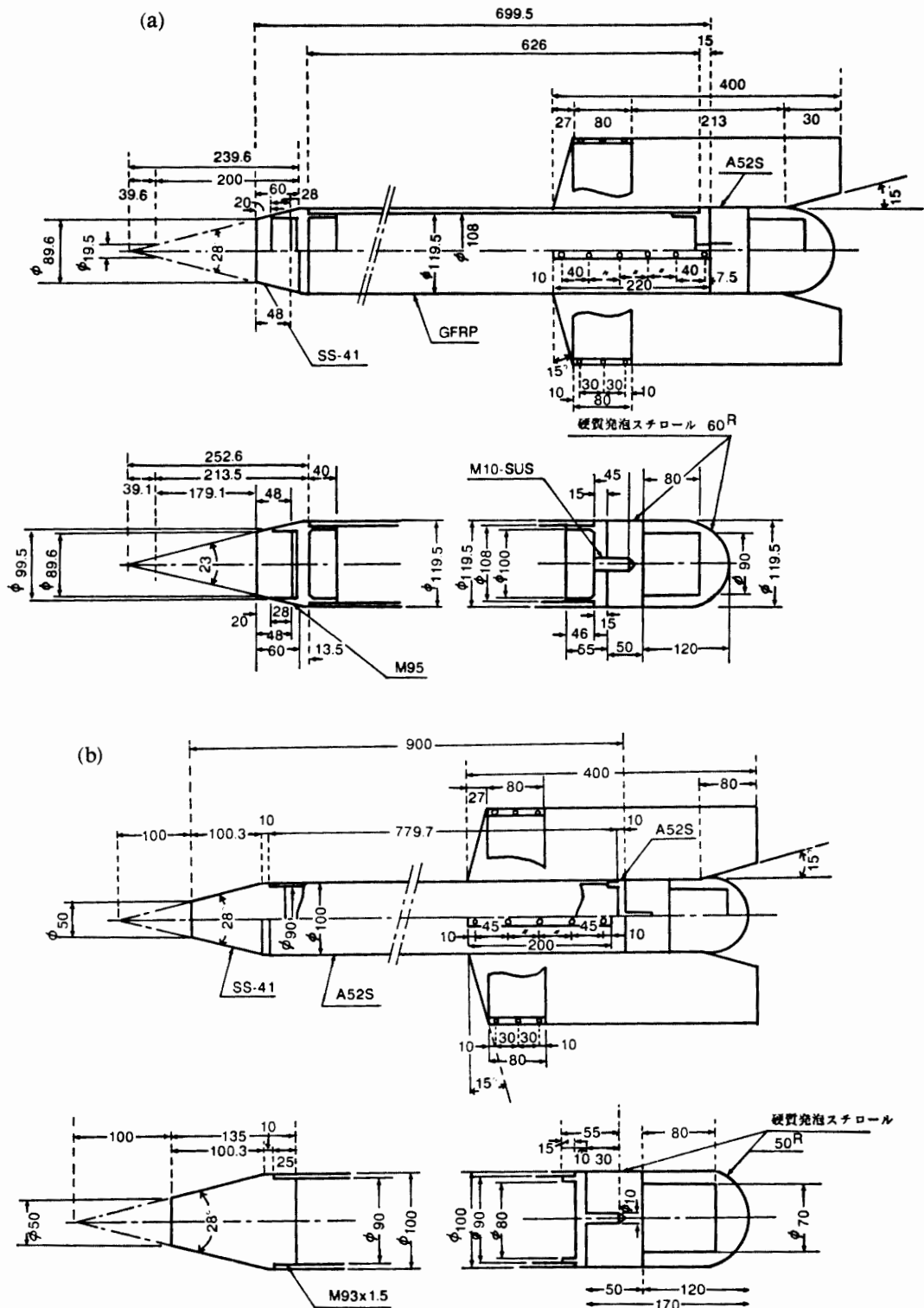


図 2 (a) ペネトレーターボディ A 及び B; 月ペネトレーターモデルを改造した。
 (b) ペネトレーターボディ C; 南極あすか実験に使用したモデルを改造した。
 フィンは 4 枚の側板でビス止めしてある。

Fig. 2. (a) Penetrator body A (and B) in Table 2. Modified from the prototype of the moon penetrator. (b) Penetrator body C in Table 2. Modified from the model used in the JARE-31 Asuka falling test in 30 December 1989.

る。

実験参加者を表 1 に示す。ボディの準備とセンサーテストは投下機器グループが、ヘリコプター運航と実験地の設営は朝日航洋グループが、レーボール観測とペネトレーターの回収は日本気象協会北海道本部グループが、GPS 測量には北海道大学グループがあたった。

2.1. 実験地

上空から物を投下するには、安全性を考え投下高度の 2 倍程度の広がりを持った空き地が必要である。また岩地に落ちるとセンサーが破壊されるかも知れず、畑地あるいは牧草地が望ましい。このような場所として当初北海道羊蹄山ろくを選び、1991 年 3 月中旬の実験をめざしたが天候不良のため実施できなかった。

そこで 1991 年 4 月中旬、北海道石狩郡当別町の町営青山牧場に実験場を移し投下実験を行った。図 1 に実験地を示す。同実験地は札幌・丘珠空港から 10-20 分の飛行距離にあり、空港と実験地の気象変化にあまり時間差がなく、電話連絡もとりやすい。また、宿泊地（当別町市街地）から車両を使って 1 時間半ほどで牧場の管理小屋に到着でき、道路に面した管理小屋から徒歩 5-10 分の林を抜けると 500 ha ほどの平坦な牧草地が広がる。牧草地内に四等三角点（町営牧場）もある。今回、管理小屋の電源と電話を使わせて頂いたので実験連絡、

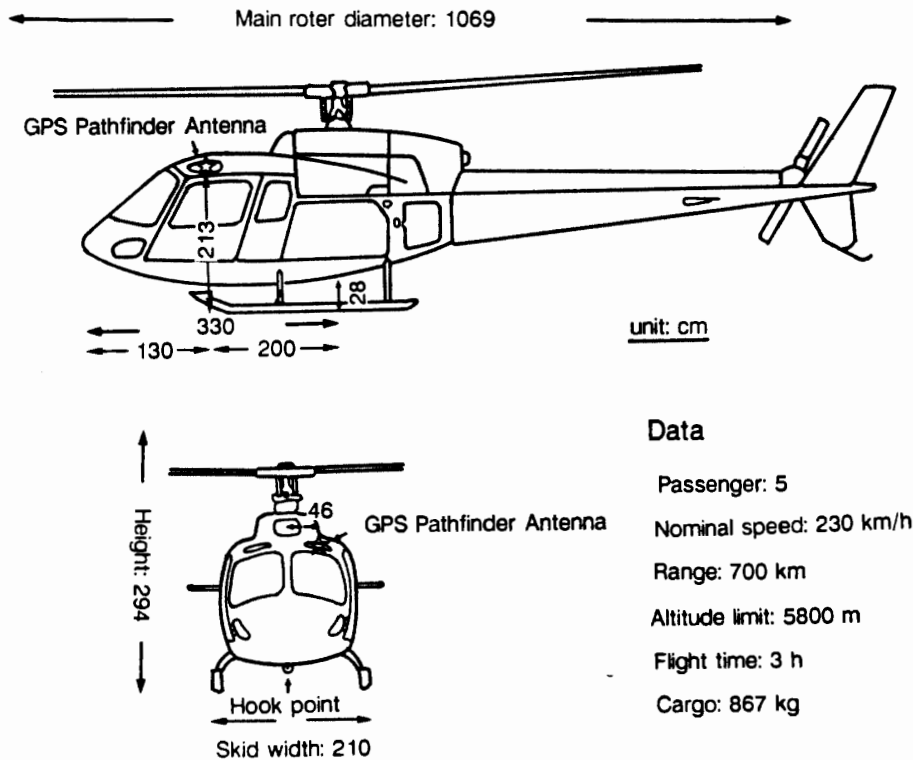
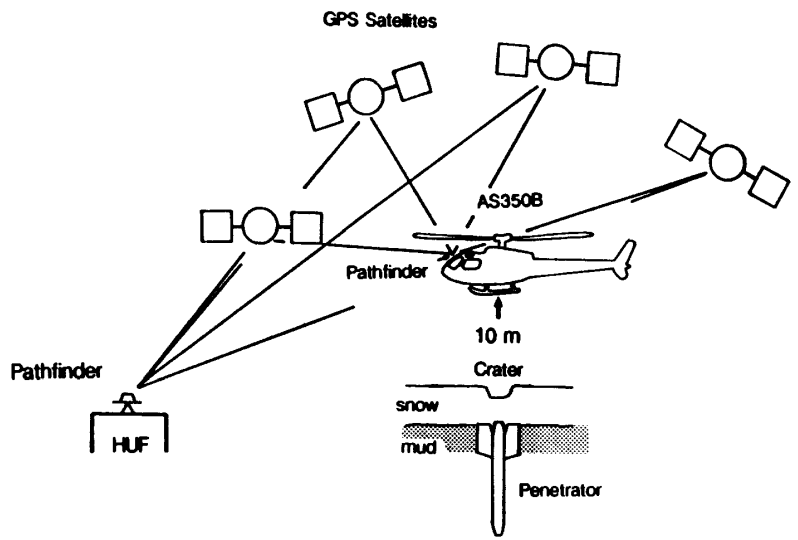


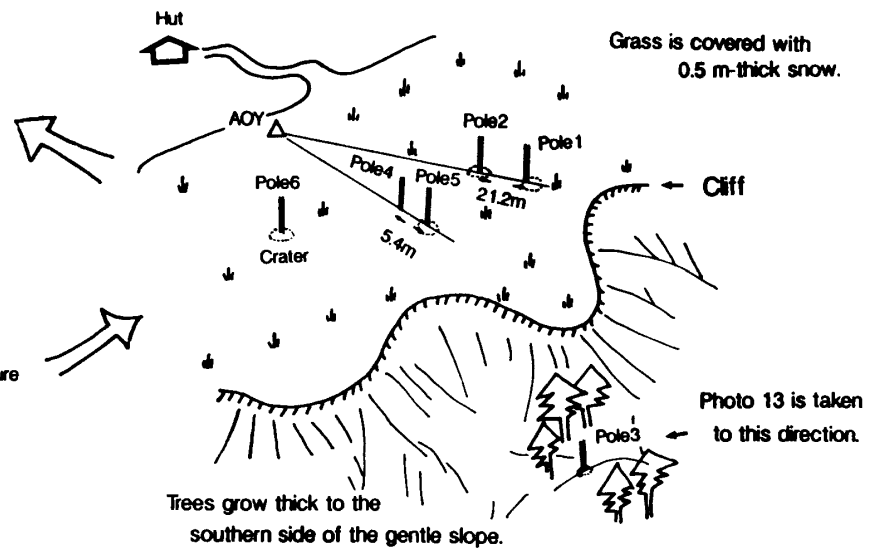
図 3 アエロスペース AS350 エキュレイユ (JA9306) の操縦席天窓に取り付けた GPS Pathfinder アンテナ。

Fig. 3. AS350 Ecureuil used in the falling test of the penetrators. GPS Pathfinder antenna was attached to the window at the main-pilot cockpit.

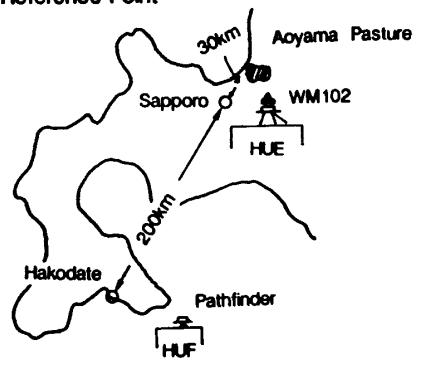
(c) GPS Differential Positioning



(b) Impact Craters in the Aoyama Pasture



(a) Location of Reference Point



レーボール観測等が円滑に行えた。またこの時期、牧草地一面に 100–150 cm の雪を覆っていたのでスノーモービルと雪上車によるペネトレーターの回収や測量機器の移動が効果的であった。

2.2. 実験機体

今回の投下実験に用いたペネレーターボディ A, B を図 2a に, C を図 2b に示す。A および B は月面用ペネレーター (水谷ら, 1990) と同じ大きさのボディ (直径 120 mm, 胴体部長さ 656 mm) を改造して用いた。C は第 31 次南極観測あすか隊による投下実験で用いられたボディ (直径 100 mm, 胴体部長さ 780 mm) を改造した。

A と B の主な改造部分は先端形状の変更, 尾翼の取り付け, 落下点表示マーカ一部などである。ボディの胴体部は板厚 5.5 mm の GFRP (ガラス繊維強化プラスチック), 後部キャップおよび尾翼はアルミ合金, 先端部は重心をできるだけ前に持つために鉄にした。先端を切り落としたのはペネレーターが深く潜り込み過ぎないようにするためである。A, B 2 体には内部に加速度計, データメモリー, 電源電池等を搭載しており, ペネレーター貫入時の衝撃加速度を計測することができる (例えば山田ら, 1991)。これらの搭載機器は, エポキシ樹脂とシリカのマイクロ・バルーンの混合物 (密度約 0.7 g/cm³) で充てんされており, 約 10000G (1G=9.8 m/s²) の衝撃加速度に耐えられることが確認されている。ただし, 実験 No. 2 で用いた A には後述の水晶発振器を搭載した。

C の主な改造点は先端部と尾翼の形状である。A, B と同様に先端部はとがらせず先端を切り落とした形を採用した。また全機とも従来のボディより縦長の尾翼を採用した。実験ボディの形状, 重量などのデータを表 2 に示す。

ペネレーターは目だつようにすべて蛍光オレンジ色に塗装した。さらに雪中に埋没しても落下地点がすぐに見つけられるように 2 種類のマーカーを取り付けた。1 つはペネレー

図 4 (左図) GPS Differential positioning 概念図及びエスロンポール設置見取図。(a) GPS 受信実験のための基準点配置。(b) クレーターそばに設置したエスロンポール。No. 1 から No. 6 実験に応じて Pole 1 から Pole 6 を立てたが, 干渉測位は Pole 1, 3, 5, 6, の 4 点で実施した。(c) GPS differential positioning によるリアルタイム位置をクレーター直上でヘリコプターホバリングにより集録する。約 1 分間データを取得し, その時間平均値による位置からヘリコプターの対地高度を補正してクレーターの三次元位置を求める。

Fig. 4 (opposite). Schematic planning of the GPS differential positioning. (a) Fixed Pathfinder receiving site at Hakodate (HUF), 200 km southwest of Sapporo (HUE). The Aoyama Pasture is located 10–20 min' flight (30 km) from the Okadama Airport in Sapporo. (b) The survey pole installed after each fall test. Precise GPS relative positioning was made at Poles 1, 3, 5 and 6. (c) Helicopter hovering GPS data were acquired just above (~10 m) the impact crater, and the time-averaged GPS position is to be compared with the precise location by the GPS relative carrier phase measurement.

表 2 ペネトレーター投下実験ボディー
Table 2. Penetrator bodies used in the fall test.

実験 No.	ボディー	重量 (kg)	本体直径 (mm)	本体長 (mm)	尾翼長 ⁺ (mm)	重心 [*] (mm)
1	C	10.4	100	901	1078	342
2	A	11.0	120	715	895	300
3	B	14.1	120	715	894	348
4	A	13.1	120	715	895	331
5	B	14.8	120	715	894	340
6	C	10.1	100	901	1078	338

⁺ 先端から尾翼後端までの長さ. ^{*} 重心は先端から測定した.

ター尾部に取り付けられた発泡スチロールの容器で内部に食紅が入っており、貫入時の衝撃で尾翼により破壊され雪上に食紅をばらまくと期待された。この発泡スチロールの容器形状はペネトレーターの空力特性も考慮して決めている。もう 1 つは蛍光色のリボン (約 3 m) で尾翼に結びつけられており、落下する際にペネトレーターの後方にたなびき、貫入後もクレーター外部に残って出ているという仕組みである。ただし、どちらのマーカーとも 1 日目の実験 (No. 1, 2, 3) であまり効果がなかったため、2 日目の実験 (No. 4, 5, 6) では取り付けなかった。

2.3. ヘリコプターと GPS

用いたヘリコプターは朝日航洋 (株) 所属の AS350B (JA9306) である。南極実験では機内格納できるホイストが必要だが、今回はペネトレーターの 4 枚のうち対向する 2 枚の尾翼端に穴をあけ結びつけた 2 本の切り離しロープ (20~30 cm) の交点にカラビナを取り付け、これをヘリコプターのフック (胴体下) にかけて下向きにつり下げた。ヘリコプター上昇後、パイロットがフックを油圧装置で開くと、ペネトレーターは自重ではずれる。切り離し時刻は後に述べる GPS 受信器の時刻と 1 秒で同定できるよう音声記録する。フックは 1 つなので 1 回投下するごとに着陸し、次のペネトレーターを取り付けた。ヘリコプターにつり下げられたペネトレーターの外観を写真 1 (離陸前)、写真 2 (離陸時) に示す。

使用した GPS 受信器は Trimble Navigation Co. Ltd の GPS Pathfinder (写真 3) で、アンテナをヘリコプター機体の図 3 の位置にとりつけた。主操縦席側の、この天窗はアクリル板で GPS 電波を通す。そこで Pathfinder のアンテナをアクリル板に押しあて、電波反射材として用いる銅紙を天窗全体に裏からあてがい、ガムテープで固定した。結果を見る限りマルチパスの影響はない。機体改造が不要なのでこのアンテナ取り付け方法は南極実験にも適用できる。Pathfinder の Polycorder (記録計) の収録設定は朝日航洋の技術者が事前に行い、飛行中は自動データ収録である。ヘリコプターのエンジン始動時は機体の電源電圧の変動が大きいため、初期設定はエンジン始動後に行うことが重要である。

図 4 に実験概要を模式的に示す。ヘリコプターの時々刻々の GPS 受信位置に対して固定

点での受信データを用いて電離層屈折補正する。ホバリング・ヘリコプターの GPS differential 位置の時間平均値を求め、その時の対地高度を補正して着地したペネトレーターの 3 次元位置が求められる (図 4c)。セールロンダーネ南極実験では 400 km 南北測線の midpoint にある、あすか観測拠点 (ヘリポート) がこのような固定点となる (渋谷ら, 1991)。そこで今回の模擬実験でも、実験地から 200 km 南方にある函館市の有川通三等三角点から偏心した基準点 (北海道大学水産学部の屋上: HUF) で同じ Pathfinder による固定点データを取得した (図 4a)。図 5 は実験を行った 4 月 12-13 日の衛星配置で各日とも矢印ではさまれた 2300 UT の時間帯 (PDOP~5) に投下実験を終了している。しかし、衛星に対するヘリコプターの向き、傾きに応じて天窓が瞬間的にシャ閉されるなどして、実際は PDOP>20 まで

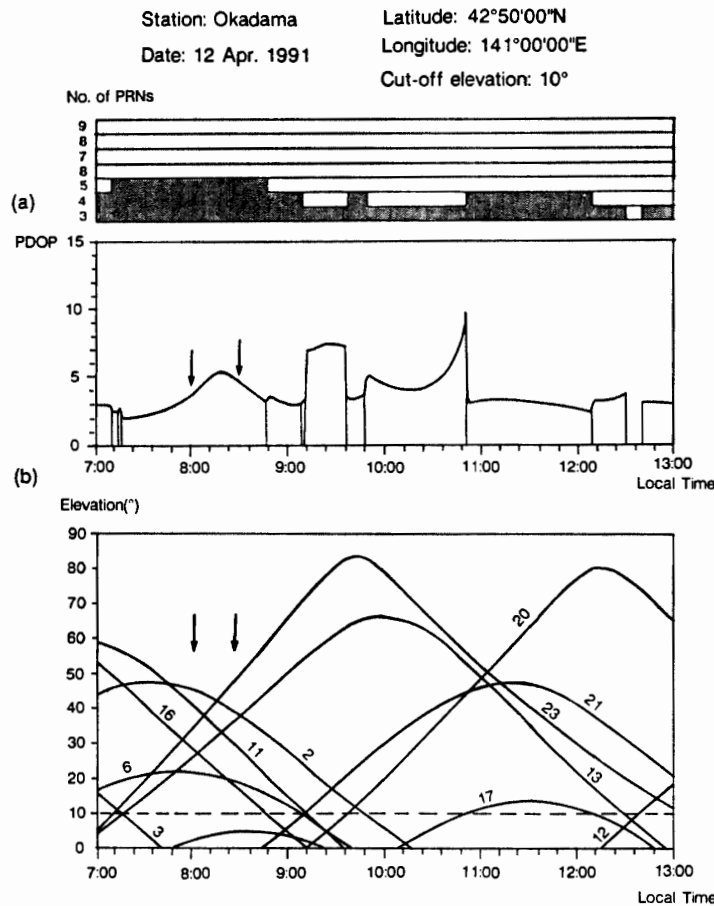


図 5 投下実験を行った 1991 年 4 月 12 日の GPS 衛星配置図。投下実験は 0800-0900 LT の矢印間で終了している。4 月 13 日もほぼ同様である。
 (a) PDOP (Position Dilution Of Precision) 変化。擬似距離を使って求められる位置精度は衛星仰角と方位の配置で決まる幾何学的パラメーター PDOP により目安をつけることができる。
 (b) 各衛星 (PRN) の時間による仰角変化。

Fig. 5. An example of GPS satellite constellation at the experiment. Fall tests were made during the time interval between two arrows. (a) PDOP (Position Dilution Of Precision) change versus time. (b) Elevation change of each satellite (PRN) versus time.

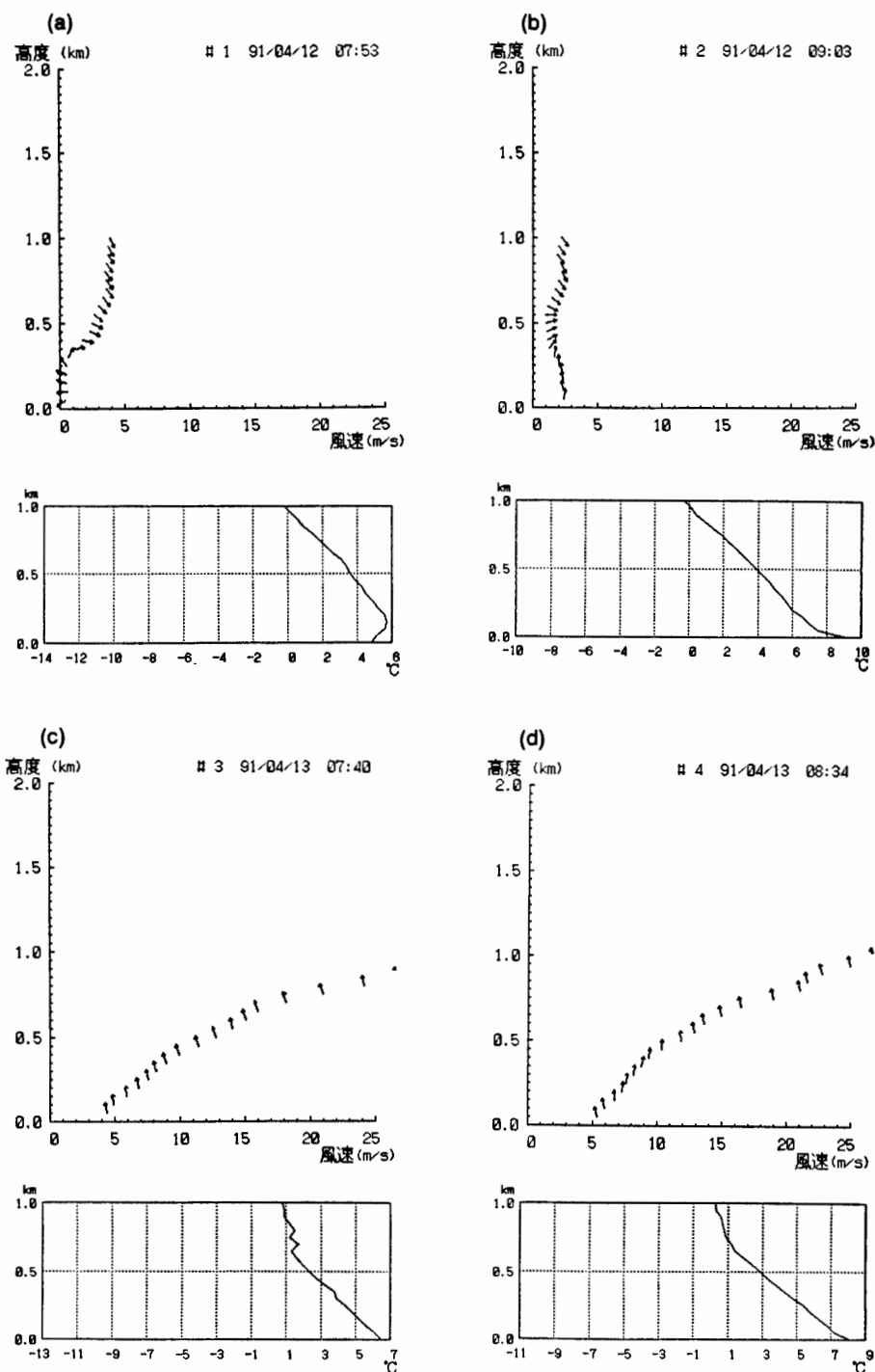


図6 レーボール観測により得られた風向・風速 (上段) と気温 (下段) の高さ分布図。

(a) 4月12日 0753 放球・投下実験前. (b) 4月12日 0903 放球・投下実験後. (c) 4月13日 0740 放球・投下実験前. (d) 4月13日 0834 放球・投下実験後.

Fig. 6. Wind speed, direction and temperature profiles by the balloon tracing method at an interval of 50 m to a 1000 m height above the ground. (a) Release at 0753LT April 12 before fall tests. (b) Release at 0903LT April 12 after fall tests. (c) Release at 0740LT April 13 before fall tests. (d) Release at 0834LT April 13 after fall tests.



写真 1, 2 青山牧場臨時ヘリポートでフックにかけられたペネレーター

写真 1 離陸前

写真 2 離陸時

Photo 1. Penetrator hooked beneath the helicopter, before take off.

Photo 2. Penetrator hooked beneath the helicopter, after take off.

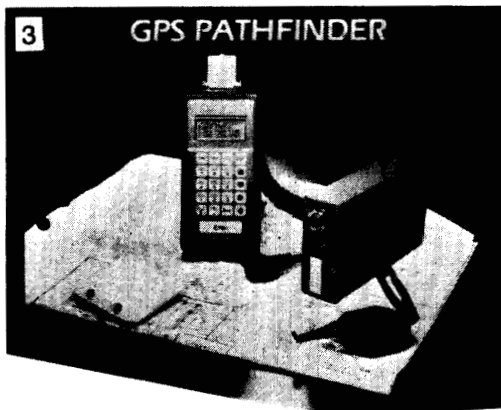


写真 3 AS350B の天窓に取り付けられた GPS Pathfinder アンテナ (手前白い角型ユニット) と受信器, ポリコーダー

Photo 3. Pathfinder antenna (white box), receiver (black box, right) and the polycorder (box with key buttons).



写真 4-7 レーボール観測により風向・風速・気温の高さ分布を 1000 m まで 50 m おきに求めた。

写真 4 低層ゾンデ放球前

Photo 4. Balloon was ready to fly for profiling wind speed and direction.

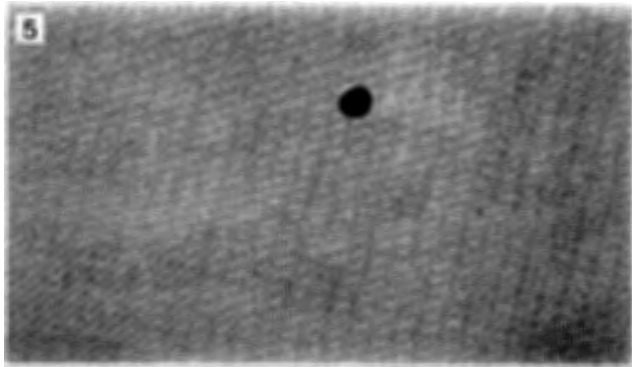


写真 5 放球後

写真 6 セオドライト観測

写真 7 低層ゾンデ受信器

Photo 5. Similar photo, after release.

Photo 6. Theodolite tracing of the balloon.

Photo 7. Receiver of the radio sonde for profiling air temperature.



写真 8-11 エスロンポール設置とペネトレーター回収作業

写真 8 落下貫入したペネトレーターのそばにエスロンポールを設置した。

Photo 8. Survey pole was stuck beside the impact crater.

写真 9 エスロンポールを倒さないように雪、土を除き貫入姿勢を計測する。

写真 10 フィンにロープをかけ雪上車で土中から引き抜く。

写真 11 回収後のペネレーター外観

Photo 9. In order to measure attitudes of the penetrator, snow and mud were removed.

Photo 10. The penetrator was ready to be pulled out by the oversnow vehicle.

Photo 11. The penetrator body A after recovery.



写真 12-14 エスロンポール位置に WM-102 の GPS アンテナ・受信器をおいて北大理学部屋上 GPS 基準点と相対測位する。

写真 12 Pole 1 に設置されたアンテナ (牧草地)。

写真 13 Pole 2 に設置されたアンテナ (林の中)。

Photo 12. GPS receiving by WM102 at Pole 1.

Photo 13. GPS receiving by WM102 at Pole 2. The trees had no interference for GPS receiving.





写真 14 四等三角点 (町営牧場) でも受信した。

Photo 14. GPS relative positioning was also made between HUE and AOY.

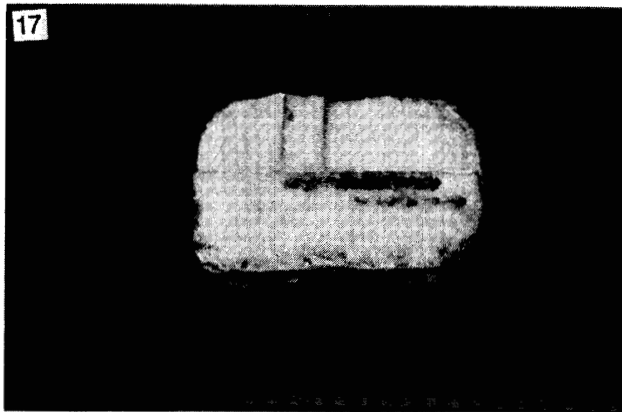
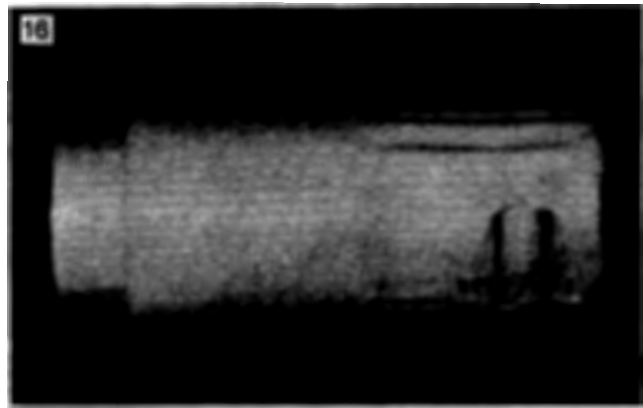
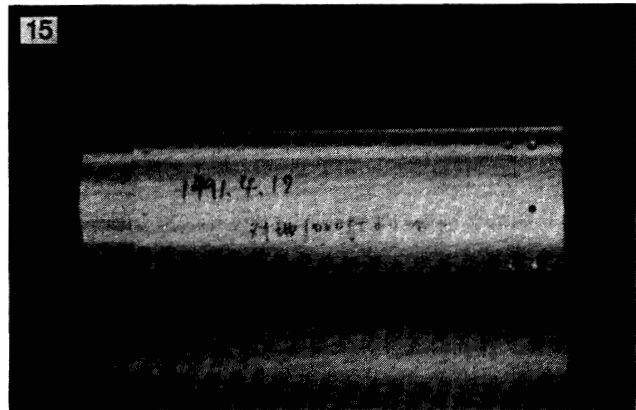


写真 15-17 水晶発振子 (2.5-24 MHz) の衝撃試験

写真 15 No. 2 実験でペネトレーターに組み込んだアルミ容器

写真 16 実装基板を発泡ポリウレタンで充てんし、アルミ容器に密着させた

写真 17 横挿入基板

Photo 15. Aluminum container used in the shock test of the crystal oscillators.

Photo 16. The aluminum container was filled up by polyurethane for fixing PCB boards. Pictured after removal of the container.

Photo 17. PCB boards.



写真 18 北大水産学部屋上 (函館) に設置された GPS differential 固定点。

Photo 18. Fixed GPS Pathfinder site (HUF) on the roof of the Fisheries Department of Hokkaido University, Hakodate.

劣化している場合がある。

2.4. レーボール観測

JWA-76T 型低層ゾンデを経緯儀で追尾するレーボール観測を行った。ヘリウムガスを充てんしたダイダイ色 100 g 気球を使い、200 m/分の上昇速度で放球した。15 秒ごとに高度角・方位角を読み取り、50 m ごと 1000 m 高度までの風向・風速を求めた。気温分布も求めた。アスマン通風乾湿度計で温度の較正を行い、誤差は 0.5°C 以内である。観測は日本気象協会北海道本部 (表 1) の技術者によって行われた。写真 4~7 に観測風景を示す。

各日のペネレーター投下前後に放球し、1 日 2 回、合計 4 回のデータを取得した。放球時刻は次のとおりである。

4 月 12 日 投下前: 0753 (JST) 投下後: 0903 (JST)

4 月 13 日 投下前: 0740 (JST) 投下後: 0834 (JST)

図 6a~d に得られた風向・風速・気温分布を示す。

2.5. ペネレーターの回収と GPS 測量

投下実験 (4 月 12 日) は 3 本続けて行うが、落下ボディを回収し、内蔵機器の点検と再設定を行って翌日 (4 月 13 日) もう 1 回投下する。したがってすみやかなボディの回収と後の GPS 測量の段どりが重要である。4 月 13 日は曇天で風も強かった (図 6d: 800 m 上空で 20 m/s) が、パイロットの話では落下してゆくペネレーターを目で追い、容易に落下点上空へ降りてきてホバリングすることができた。4 月 12 日の No. 3 (1000 m 切り離し) は、牧草地をはずれ林の中に落ちたがこれも発見は容易であった。落下位置にはスノーモービルで駆けつけ、すぐエスロンポールを立て GPS 測量に備えた。図 4b に落下位置概略見取り図が示してある。

積雪深はどの落下地点でも 100-120 cm で、ペネレーターは土の層まで到達している。エスロンポール設置と回収作業を写真 8~11 に示す。No. 3 はやぶの中に落ちたので回収に手間取り約 3-4 時間を要したが、その他の点は 30 分-1 時間で姿勢計測の時間を含め回収できた。

GPS 測量は北海道大学理学部の WM102 によって行われた。VLBI 位置に準拠した国土地理院 No. 5 GPS 受信点 (村上亮, 私信) と同時受信により決定された GPS 基準点が、北海道大学理学部地震予知センター屋上 (北大基準点: HUE) に設置されている (笠原稔, 私信)。そこで、北大基準点と 4 カ所のエスロンポール位置、及び青山牧場 4 等三角点間で GPS 相対測位した。写真 12~14 に受信器設置風景を示す。

同時受信は 4 月 13-14 日の 2 日間にわたり 2 セッション行った。図 7 に位相データ取得状況を示す。(1) 北大基準点局の AC 電源瞬停、(2) WM102 が週の変り目 (GPS 時刻の 00:00:00) でスタンバイモードにならなかったこと、(3) 降雨による融雪の影響で No.

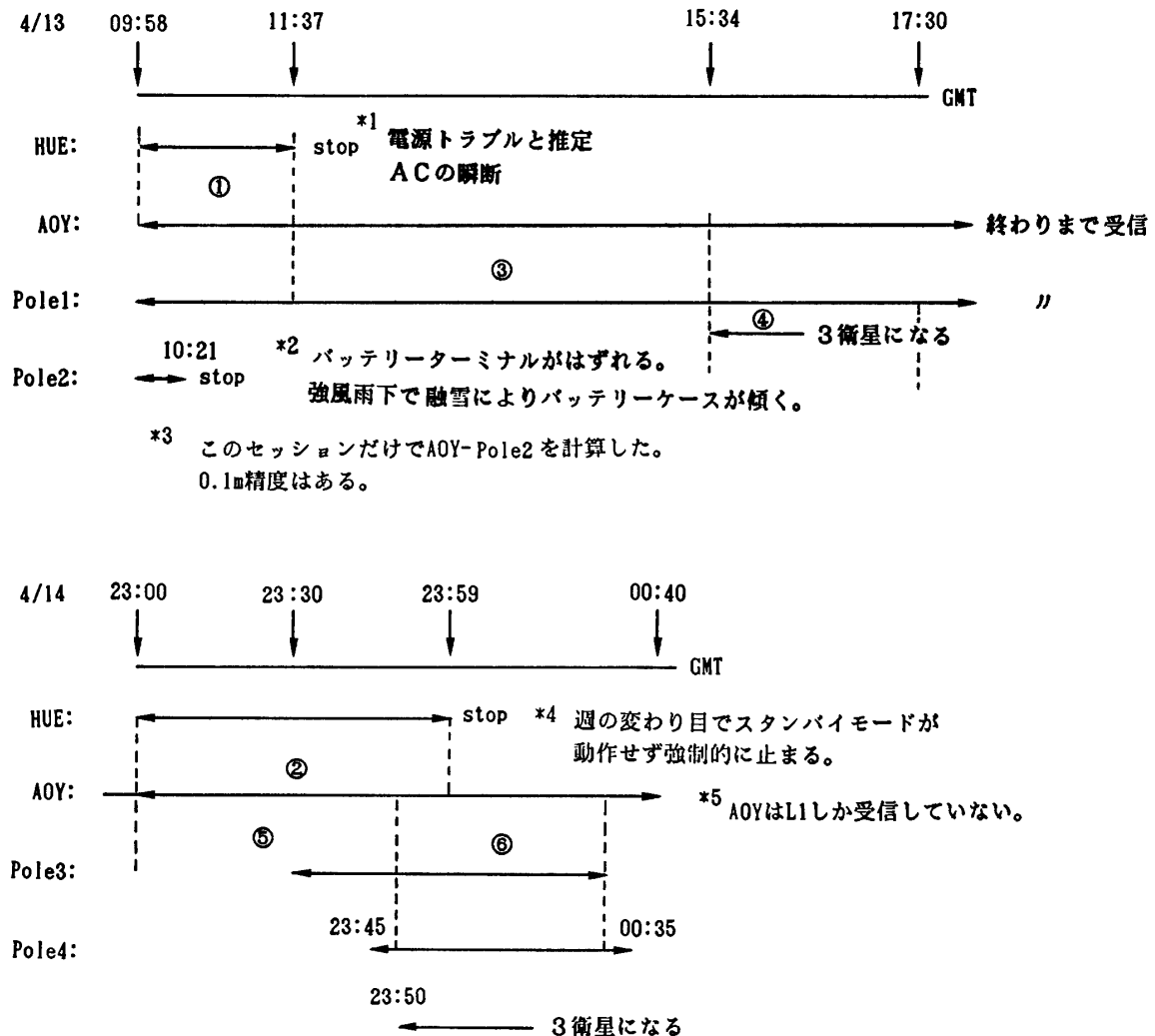


図 7 WM102 によるエスロンポール位置の GPS relative positioning データログノート。受信時の障害で解析は若干複雑になったが 0.1m 精度の WGS84 地心座標位置が求められた。

Fig. 7. Data log note in the GPS relative carrier phase measurements for locating impact crater positions. The obtained geocentric coordinates are accurate to 0.1 m for all Poles 1, 3, 5 and 6.

2 地点のバッテリーが傾き電源ケーブルがターミナルからはずれて収録が停止してしまったことなどの事情により、解析は複雑になったが 3.4 節に示すようにリアルタイム GPS positioning の精度を論じるための基準位置を ~10 cm 精度 (GPS 測量 ~2 cm, 簡易測量 ~10 cm) で得ることができた。

3. 結 果

3.1. 落下姿勢及び貫入姿勢

ペネレーターをつり下げた状態でヘリコプターが旋回しながら離陸する場合がある。このときペネレーターは軸回りの周期的 (周期 2~3 秒) なローリングを起こす。これは尾翼による抵抗で減衰はするが、上空に行ってもふつう停止しない。ペネレーターはヘリコプターのフックから滑り落ちる際に、ピッチングを起こす。尾翼はこのピッチングも減衰させる (姿勢をまっすぐに保つ) 働きを持つ。高高度から投下したペネレーターほど雪面投入時にはピッチングが小さくなっていた (地上による目視観測)。

1 日目の実験ではローリングが大きかったので 2 日目の実験では取り付けロープを短くした (10-20 cm)。表 3 に実験条件および貫入姿勢を示す。投下高度はヘリコプターの計器の読み取り値 (着陸地で対地高度 0 m に較正してある)、貫入速度は理論的に推定した値である。貫入経路長とは「停止後のペネレーターの先端と突入点の直線距離」で定義される。また停止角は鉛直からの角度で示した。

表 3 実験条件および貫入姿勢
Table 3. Fall conditions and the attitudes of the dropped penetrators.

実験 No.	投下高度 (m)	貫入速度* (m/s)	雪層の厚さ (cm)	貫入経路長 (cm)	土層への貫入経路長 (cm)	停止角 (°)
1	160	52.9	80	141.2	61.2	0
2	330	73.9	70	117.8	47.8	5
3	1000	121.5	113	201.8	88.8	5
4	160	52.9	68	127.5	59.5	6
5	330	73.9	72	146.5	74.5	5
6	680	101.7	85	210.8	125.8	3

* 貫入速度は実測されていない。目安として質量 15 kg, 直径 120 mmφ, 初期水平速度 100 m/s で空中に投下された場合の数値計算値を示した。

図 8, No. 1~6 に各々のペネレーターの貫入姿勢を模式的に示す。2 日目の実験 No. 4, 5, 6 の貫入姿勢を比べると高高度から投下したもののほど停止角が鉛直に近いことがわかる。1 日目の実験はつり下げロープが長かったこともあり、切り離し時のピッチングの大きさにばらつきがあった。実験 No. 2 の機体は特に大きなピッチング (地上による目視観測) で落下したため停止角は大きい。また No. 3 は一番高い位置から投下したが、落下地点がつかぬや笹の生い茂る傾斜面だったので着地条件によって大きな停止角を示したと考えられる。いずれにせよ、V241-M センサーの許容傾斜角は $\pm 15^\circ$ なので 160 m 以上の対地高度から投下すれば雪と良い固着性を持ってセンサーが機能させられるはずである。

回収したペネレーターの尾翼は変形したり、破壊したものもあった。しかし、本体は塗料がはがれた程度の損傷であった。尾翼の損傷は土層に貫入した部分に限られ、雪層に残っ

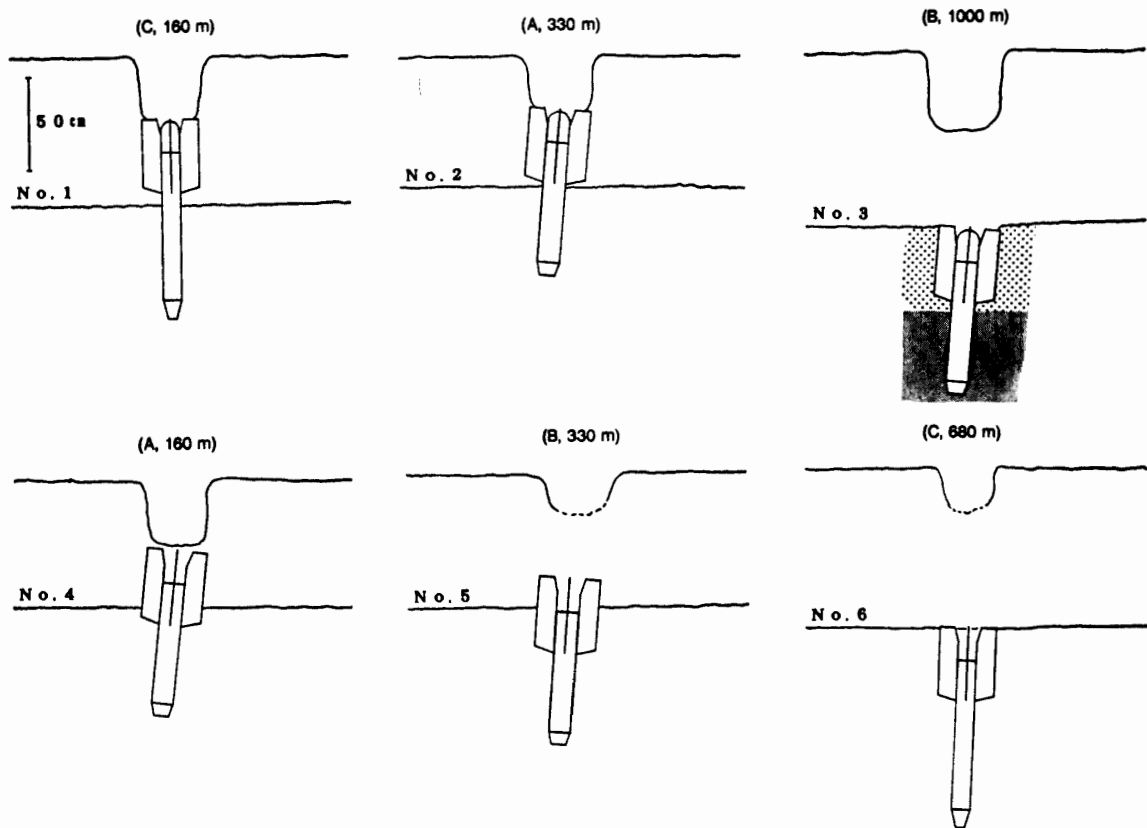


図 8 落下ペネトレーターの停止見取図。

図において上層はいずれも雪，下層は土である。No. 3 実験の下層は上部約 0.5 m 部分に土中の根，つた，茎，下層下部に砂礫を多数含む。() 内の記号は用いたボディ，数字はペネトレーター切り離し高度である。

Fig. 8. Attitude of the dropped penetrator. Numbers 1 to 6 correspond to the fall numbers in Tables 2 and 3, respectively. The surface layer is snow, while the lower layer is basically composed of mud. As to No. 3, the upper part of the lower layer (dotted) is composed of mud and roots of bushes, while the lower part (shaded) consists of sands and stones. The symbol and the numerals in the parentheses correspond to the body-type and the release height, respectively.

た部分は変形する程度であった。尾翼はペネトレーターを鉛直に落下させる役目の外に，貫入時に曲げられて後端部のマーカ容器を破壊する役目も持っていたが，土層に完全に潜り込んだ実験 No. 3 以外は，容器を破壊するに至らなかった。尾翼は前回の南極あすか観測拠点投下実験（渋谷ら，1991）での雪面硬度を参考にして設計したが，今回の標的雪の方が柔らかかったため破壊しなかったと考えられる。1 日目の実験では損傷せず再使用可能な尾翼もあったが，2 日目の実験ではすべて新しい尾翼に取り替えた。

3.2. 貫入時の衝撃加速度

実験 No. 3, 4, 5 の機体には衝撃加速度計を搭載した。実験 No. 3 のペネトレーターは 1000 m の対地高度から投下され，雪層下のつたや木の根を断ち切り，直径が 20 cm ほどの

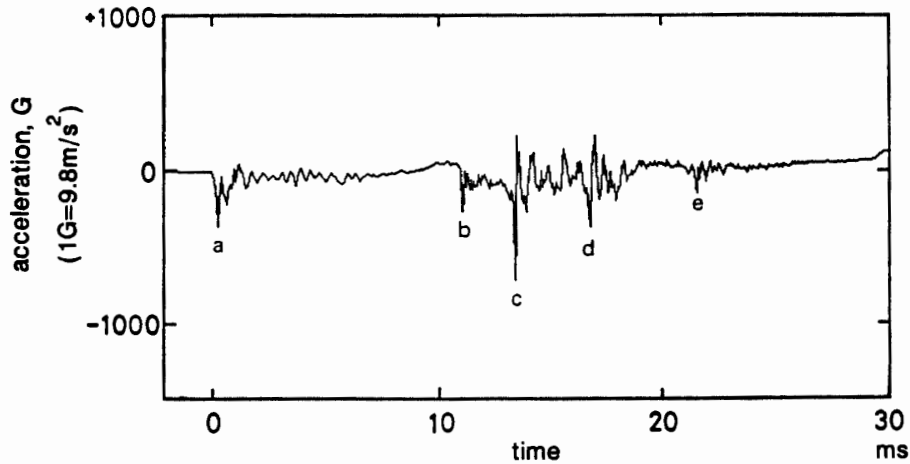


図 9 No. 3 の投下実験で得られた衝撃加速度波形記録。a は雪層突入，b は土層への貫入に対応する。c～e は土層中の礫にあたった時の衝撃に対応する。
 Fig. 9. Acceleration record of the No. 3 experiment. For explanation of peaks a to e, see text.

大きな礫を含む砂礫層に貫入していた。図 9 に計測された衝撃加速度記録を示す。雪層に突入したとき (約 360G; a), 土層に貫入したとき (約 280G; b) の衝撃加速度のほか礫に衝突したときの衝撃と考えられるピーク (c, d, e) が見られる。最大加速度はおおよそ 670G である。雪層の硬度や木の根や礫を含んだ土層の硬度などは計測していないので詳細な検討は行わないが、雪層に突入したときの加速度波形は土層に貫入したときの波形に比べて低周波成分が多いように見える。雪層の厚さは 1.13 m, (a-b) 間の時間は約 11.4 ms である。従ってペネトレーター先端が雪層を通過する時の平均速度は $1.13 \text{ m}/11.4 \text{ ms}$ より約 99 m/s である。

第 31 次観測隊での投下実験の貫入経路長 (2.2 m) と同じボディによる今回の実験 No. 6 の貫入経路長を先端形状の違いも考慮して比較すると、南極の雪面に投下した場合には約 500~1000G の衝撃を受けると思われる。V241-M 型地震計はこの程度の衝撃ならば問題なく耐えることができる。

実験 No. 4, No. 5 の衝撃加速度データは、データレコーダーに記録されていなかった。ただし、データ取り込みのトリガーはかかっていることから、雪面貫入前に何らかの静電的なノイズによってトリガーがかかってしまったものと考えられる。帯電したヘリコプターに機器を搭載するとき、静電ノイズの影響を受けやすいので乾燥した野外における南極実験においては、室内とは違った静電気ノイズ対策が必要だろう。

3.3. 水晶発振子衝撃試験

実験 No. 2 のボディには水晶発振器 6 個 (2.5~24 MHz) ほかに 6 枚のプリント基板に実装し、発泡ポリウレタンを充てんしてアルミ製容器に固定したものをフランジにビス止め

して組み込んだ。発泡ポリウレタンは密度 0.04 g/cm^3 で軽く、誘電率 $\epsilon=1.05$ で空気に近いので充てん剤として有望である。3枚のプリント板は貫入方向に対して平行, 3枚は垂直に置いてせん断効果を調べた。写真 15~17 に実装の様子を示す。

このペネトレーターは対地高度 330 m から投下され、牧草地の土層まで達して止まった(図 8, No. 2)。表 4 に衝撃前後に測定された発振周波数を示す。実験に用いた水晶発振器の温度安定度は約 $3 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ で、実験前後の周波数変化には、温度変化に伴う周波数変化も含まれているので必ずしも衝撃だけが原因ではない。いずれにしても $-3.2 \sim 2.0 \times 10^{-4}\%$ 以内の周波数変動におさまっている。ただし南極実験では 500~800 m 対地高度から今回の実験より硬い雪面へ落とすことが考えられ、実機に使用できるかどうかさらに実験が必要である。

表 4 水晶発振器衝撃試験データ

Table 4. Shock test of the crystal oscillators. PCB boards are contained in an aluminum cylinder and filled up by the polyurethane inside. The container was held inside the penetrator and dropped from 330 m above the ground.

Parts Number	測定周波数 (MHz)		備 考
	衝撃試験実施前	衝撃試験実施後	
TC0-711JT-2.500	2.500095	2.500087	
TC0-711JT-9.000	8.999916	8.999930	No. 1 P板縦挿入*
TC0-711JT-16.000	16.000324	16.000324	
TC0-711JT-20.000	20.000989	20.000963	No. 4 P板横挿入*
TC0-711JT-24.000	24.000514	24.000563	

* 縦は重力の方向に対して平行, 横は垂直に挿入したことを表す。

3.4. 落下位置決定

ヘリコプターの GPS 位置は WGS84 系 (DEFENSE MAPPING AGENCY, 1987) で表現されるので, differential 固定点位置, 落下位置等も WGS84 系で表現する必要がある。そのために基準点実用成果 (表 5: ベッセル楕円体上) の WGS84 系への変換が必要になる。

表 5 ペネトレーターの落下点位置を決定するために用いられた実用成果一覧
Table 5. Geodetic control points used to determine WGS84 geocentric coordinates of the impact crater.

種 別	基準点名	緯 度 (N)	経 度 (E)	標 高 (m)	座標系
三等三角点	有川通 (ARK)	41°48'22.657"	140°43'21.865"	2.62	Bessell
三等三角点	停車場西 (TBN)	41°50'37.989"	140°43'03.941"	25.817	Bessell
四等三角点	町営牧場 (AOY)	43°29'25.839"	141°36'45.976"	233.70	Bessell
偏心点	北大水産学部 (HUF)	41°48'23.015"	140°43'20.508"	24.35	Bessell
GPS 基準点*	北大理学部 (HUE)	43°04'24.269"	141°20'27.547"	63.644	WGS 84

* 国土地理院 VLBI 基準点から GPS 干渉測位により直接取り付けられた。

北海道大学理学部地震予知センター屋上にある。

3.4.1. GPS 干渉測位による WGS84 座標

北大理学部基準点 (HUE) を固定点として, WM102 を用いて相対測位決定されたポール位置座標のベクトル解 X を表 6a に示す. 図 4 において pole 1 と pole 2, 及び pole 4 と pole 5 は簡易測量で相対位置が出せるので GPS 受信は pole 1, pole 3, pole 5, pole 6 及び AOY の 5 カ所で行っている.

表 6a GPS 干渉測位により求められた落下点ポール位置 (WGS84 地心座標系)
Table 6a. Pole position of the impact craters and the triangulation point (AOY) determined by the relative carrier phase measurements in the WGS84 geocentric coordinates.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
HUE	-3643913.263	2915047.854	4333505.972
AOY	-3632579.846	2878214.065	4367574.790
Pole 1	-3632896.376	2878240.183	4367267.310
Pole 3	-3632692.883	2878214.123	4367483.669
Pole 5	-3632783.752	2878067.063	4367507.461
Pole 6	-3632724.251	2878143.205	4367506.467

始点となった HUE の VLBI 準拠座標 (A_0) は

$$\begin{aligned} X_0 &= -3643913.263, \\ Y_0 &= 2915047.854, \\ Z_0 &= 4333505.972, \end{aligned} \quad (1)$$

と求められているので, GPS 測位で求められる偏差ベクトル d を用いて, $X=A_0+d$ によって各ポール位置の WGS84 地心座標解は求められ, Bowring の式 (MEADE, 1982) によって表 6b のように WGS84 楕円体 ($a=6378137$ m, $f=1/298.257223563$) 上の位置に変換される. 例えば AOY の地心座標は

$$\begin{aligned} X_w &= X_0 + dx = -3632579.85, \\ Y_w &= Y_0 + dy = 2878214.07, \\ Z_w &= Z_0 + dz = 4367554.79, \end{aligned} \quad (2)$$

で, 対応する WGS84 楕円体上の測地座標は

$$\begin{aligned} \phi_w &= 43^\circ 29' 34.555'' \text{N}, \\ \lambda_w &= 141^\circ 36' 32.550'' \text{E}, \\ H_w &= 265.42 \text{ m}, \end{aligned} \quad (3)$$

である. ところで表 5 に示すように AOY の標高は $H=233.70$ m なのでジオイド高 N は $N=H_w-H=31.72$ m となり FUKUDA (1990) の結果と調和的である.

各 pole 1, 3, 5, 6 の測地座標 (表 6b) は緯度, 経度, 高さ各方向に 10 cm の測位精度を

表 6b GPS 干渉測位により求められた落下点ポール位置 (WGS84 測地座標)
 Table 6b. Geodetic coordinates on the WGS84 Ellipsoid.

地点名	記号	緯度 (N)	経度 (E)	楕円体高 (H)
町営牧場	AOY	43°29'34.555"	141°36'32.550"	265.42 m
4/12 (160 m)	Pole 1	43°29'30.437"	141°36'35.672"	267.00 m
4/12 (1000 m)	Pole 3	43°29'21.433"	141°36'40.387"	245.54 m
4/13 (330 m)	Pole 5	43°29'31.406"	141°36'39.013"	268.58 m
4/13 (680 m)	Pole 6	43°29'31.444"	141°36'43.313"	268.80 m

持っていると考えられ、3.4.2 章に示すヘリコプターのリアルタイム GPS 位置評価の基準として用いることにする。

AOY のベッセル楕円体上での測位位置を地心座標系表示すると

$$\begin{aligned} X_B &= -3632455.71, \\ Y_B &= 2877730.63, \\ Z_B &= 4366918.51, \end{aligned} \quad (4)$$

である。一般に異なる 2 つの座標系で表された位置は Bursa モデルの 7 パラメーターにより相互変換されるが、今原点偏位のみを考慮すると、この地域のベッセル座標系原点が WGS84 地心座標系原点に対して持つオフセットは

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_B - X_W = 124.14, \\ \Delta Y &= Y_B - Y_W = -483.43, \\ \Delta Z &= Z_B - Z_W = -656.29, \end{aligned} \quad (5)$$

となり、函館のベッセル座標に対する変換パラメーターとして採用できる。

函館地域の三等三角点 ARK, TBN (表 4) は GPS 受信には不適當なので ARK 近傍の北大水産学部屋上の HUF に偏心点を設けた。写真 18 と図 10 に位置と偏心測量結果を記載する。この偏心座標 (表 5 の HUF) のベッセル座標系での地心座標位置は

$$\begin{aligned} X_B &= -3685279.64, \\ Y_B &= 3013964.93, \\ Z_B &= 4229190.85, \end{aligned} \quad (6)$$

なので、式 (5) を用いて WGS84 系での地心座標位置は

$$\begin{aligned} X_W &= X_B - \Delta X = -3685403.78, \\ Y_W &= Y_B - \Delta Y = 3014448.36, \\ Z_W &= Z_B - \Delta Z = 4229847.13, \end{aligned} \quad (7)$$

と表わされ、Bowring 変換によって

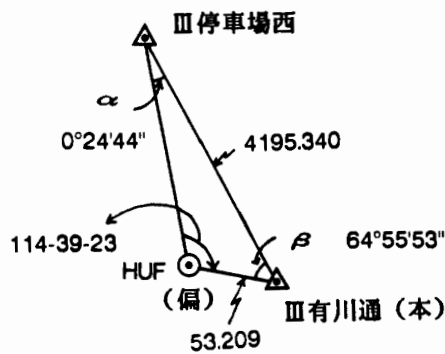
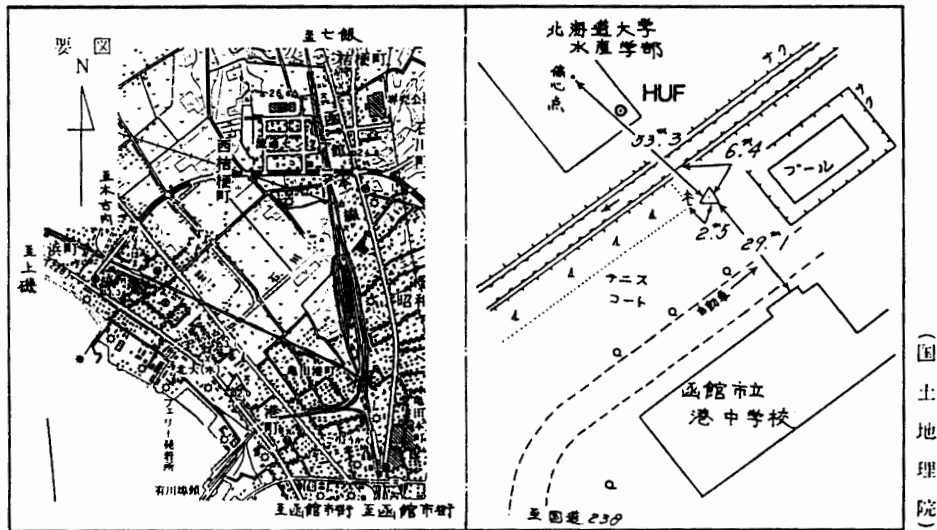


図 10 有川通三等三角点から偏心測量を行い，北大水産学部屋上に GPS 基準点 (HUF) を設置した。HUF の左側に記載されている偏心点は国土地理院の測量によるものでマーカーがわからず今回は使用していない。

Fig. 10. Geodetic control point HUF installed on the roof of the Fisheries Department of Hokkaido University by conventional surveys from neighboring triangulation points.

$$\begin{aligned}
 \phi_w &= 41^\circ 48' 32.323'' \text{N}, \\
 \lambda_w &= 140^\circ 43' 07.710'' \text{E}, \\
 H_w &= 51.30 \text{ m},
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

と求められる。

3.4.2. ヘリコプターのリアルタイム GPS 位置

HUF を固定点として differential positioning を行うことにより AS350B の飛行中の時々刻々の GPS 位置を求めることができる (リアルタイム GPS 位置と呼ぶ)。固定点の Pathfinder アンテナはマーカー上 1.83 m に取り付けただので

$$\begin{aligned}\phi_w &= 41^\circ 48' 32.323'' \text{N}, \\ \lambda_w &= 140^\circ 43' 07.710'' \text{E}, \\ H_w &= 53.13 \text{ m},\end{aligned}\tag{9}$$

表 6c GPS 基準点位置の採用座標値とその時得られるヘリコプターリアルタイム航跡記録のデータ名称

Table 6c. Data sets which contain GPS differential positioning coordinates as a function of flight time (UTC).

データセット名	基準点緯度 (N)	基準点経度 (E)	基準点高度 (m) (楕円体高)	備考
pene1.raw				Point positioning
pene1.asc	41°48'32.20"	140°43'07.49"	45.76	4月11日 2300-2350 平均
pene1a.asc	41°48'32.32"	140°43'07.71"	53.13	式 (9)
pene2.raw				Point positioning
pene2.asc	41°48'32.10"	140°43'07.82"	62.01	4月12日 2300-2330 平均
pene2a.asc	41°48'32.32"	140°43'07.71"	53.13	式 (9)

As to pene1.raw, no differential method is applied to the helicopter GPS position data. pene1.asc is obtained by the differential method with the reference Pathfinder coordinates determined by time-averaging of GPS position data. As to pene1a.asc, reference Pathfinder coordinates are given by eq. (9) determined from the relative carrier phase measurement. The last 3 data sets can similarly be obtained from the experiments on 13 April.

表 7a ペネトレーター落下実験タイムチャート (1991年4月12日)

Table 7a. Time chart of the helicopter operation during the fall tests in April 12.

ラップ	UTC	行 動
m s	h m s	
0627	231427	160 m 高度到達
0648	1448	160 m ホバリング
0725	1525	リリース
1000	1800	落下ポイント ホバリング
1108	1908	ホバリング終了
1154	1954	着陸
1326	2126	離陸
1723	2523	330 m 高度到達・ホバリング
1745	2524	リリース
1904	2704	落下ポイント ホバリング
2123	2923	着陸
2250	3050	離陸
2756	3556	1000 m 高度到達・ホバリング
2902	3702	リリース不可
2915	3715	リリース不可
2928	3728	リリース不可 ヘリポートへ
3915	4715	1000 m 高度へ再度到達・ホバリング
3935	4735	リリース
4157	4957	落下ポイント ホバリング
4433	5233	ホバリング終了
4723	5523	着陸

を基準固定点座標として採用することにする。ただし南極実験では VLBI 位置に準拠した GPS 固定点が必ず設置できるわけではないので Pathfinder の平均受信位置を基準座標として採用する解析も合わせ行い、結果を比較する。表 6c に point positioning のみ、及び 2 種の固定点採用位置に対応して得られるリアルタイム GPS 位置の解析データセット名称を示す。

表 7a は 4 月 12 日 (1 日目) 実験におけるペネレーター落下時刻表を示す。フックの切り離し (リリース) は、パイロットが自分の時計を見ながら秒読みして行すが、その時刻は Pathfinder 画面に出力される UTC 時刻にあらかじめ 1 秒以内で同期させておく。また、ヘリコプターの各行動に伴うパイロットの音声をビデオに記録し、再生時のラップタイムと比較してヘリコプターの動きを再現する。

再現されたヘリコプターの行動記録によると、ヘリコプターは 2312 (以下時刻は UTC) 頃離陸、231448 に対地 160 m のホバリング体勢に入った。そして機体姿勢を保ちながら 231525 にフックがリリースされた。その後、ヘリコプターは落下点直上約 10 m まで降下してきて、231800~231908 ホバリングでの GPS データ取得を行い、231954 ヘリポートにもどった (No. 1 実験の終了)。

330 m 高度からのリリースは 232524 である。1000 m 高度からの投下実験では、つり下げロープがフックにからみ、切り離し操作しても落下しなかったのでやり直しを行っている。そして、234715 に無事リリースされ、234957~235233 落下点上空でのホバリングを終えて 235523 ヘリポートに着陸し、1 日目の投下実験を終了した。

4 月 13 日 (2 日目) は 160 m, 330 m, 680 m 高度の順に投下したが 12 日同様各落下点上空で 1~2 分間ホバリングを行った。ただし 680 m 高度からの切り離しにおいて、音声で

表 7b ペネレーター落下実験タイムチャート (1991 年 4 月 13 日)
Table 7b. Time chart of the helicopter operation during the fall tests in April 13.

ラップ	UTC	行 動
m s	h m s	
0235	230835	離陸
0457	1057	160 m 高度到達・ホバリング
0559	1159	リリース
0700	1300	落下ポイント ホバリング
0925	1525	ホバリング終了
1254	1854	330 m 高度到達・ホバリング
1304	1904	リリース
1400	2000	落下ポイント ホバリング
1555	2155	ホバリング終了
2003	2603	680 m 高度到達・ホバリング
2056	2656	リリース
2254	2854	落下ポイント ホバリング
2430	3030	ホバリング終了
2547	3147	着陸

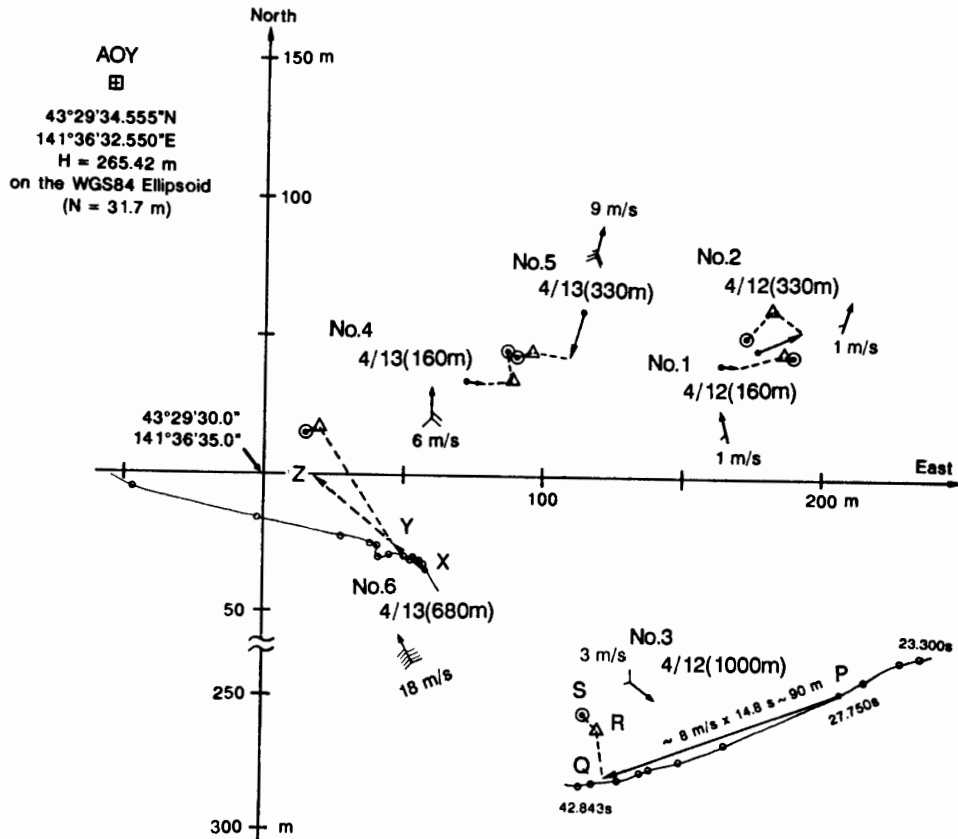


図 11 落下点位置決定の精度評価。◎は WM102 を使用した GPS 干渉測位により求められた (0.1 m 精度) クレーター位置。△はクレーター直上でホバリング (約 1 分間) したヘリコプターの GPS Pathfinder による differential データから推定されたクレーター位置。矢印ベクトルの始点黒丸はペネトレーター切り離し瞬間時刻に対応するヘリコプターの水平位置で、切り離し瞬間にペネトレーターが持つ対地速度と着地までに要する時間から計算できる移動量 (矢印の大きさ) できまるベクトル終点で地上に衝突すると予測される。P~S, X~Z については本文参照。

Fig. 11. Summary of the estimate of GPS differential positioning of the hovering helicopter over the impact crater. As to the example of No. 3 experiment from 1000 m height drop, S indicates the precise location by the GPS relative carrier phase measurement by WM102, R indicates the time-average position of navigational data via the GPS hovering differential method by GPS Pathfinder, P indicates the helicopter location at the release instance of the penetrator, and Q indicates the predicted impact position by calculating the trajectory of the falling penetrator. As to No. 6 experiment, the wind speed is rather large, and the release instance of the penetrator is not clear; penetrator rope may get twisted round the hook. X indicates the presumed release point and Y indicates the calculated fall position of the penetrator with a horizontal speed of 1 m/s acquired from the hovering helicopter. When the penetrator gets 4 m/s horizontal speed in the direction of wind in proportion to the 16~18 m/s wind speed, the predicted fall point will be Z, which is close to the precise impact location.

の切り離し操作時刻と地上目視によるフックからの離脱時刻には 3~4 秒のずれがあり、この実験 (No. 6) のリリース時刻の誤差は大きい (表 7b).

3.4.3. リアルタイム GPS 測位の精度評価

図 11 に落下位置測定 of 誤差評価を示す. 6 個の ◎ 印は町営牧場四等三角点 (AOY) を基準に GPS 干渉測位を通じて定められた 6 回の投下実験の落下位置である. 例えば S は 4 月 12 日 1000 m 高度から投下したペネトレーターの落下位置 (No. 3 実験) を示している.

各投下においてヘリコプターは風に正対するように機体姿勢を保ちながらホバリングし、ペネトレーターを切り離す. 各投下に対応する風向・風速のデータが天気図の矢ばねで示してある. No. 3 実験での 1000 m 高度の風向は北西, 風速は~3 m/s である. 表 7a, 7b から読み取った切り離し時間 (1 秒精度) に対応するヘリコプター位置を表 6c に示す各データファイルから読み出し図示すると, その位置はベクトルの始点 (小黑丸) に対応する. No. 3 実験では P で示されている. 切り離し瞬間前後の時刻に応じたヘリコプター水平位置を図 11 にプロットしヘリコプターの航跡を再現し, 切り離し時刻瞬間にヘリコプターが地面に対して持っていた水平速度を推定して割り当てると No. 3 実験の場合~6 m/s (方向は西南西へ) となる. 1000 m 高度からの投下の場合, 着地までに要する時間は約 14.8 秒なので, 予測落下位置はベクトル終点 Q である. Q の推定には風で流される影響は考慮されていない.

ペネトレーターの着地後, ヘリコプターは落下点直上でホバリングを行い約 1-2 分間の GPS データを取得した. その differential positioning 解の平均位置から落下位置を推定すると △ 印 (No. 3 実験の場合 R) が得られる. 基準位置 S に対する R のオフセットは約 10 m, S に対する Q のオフセットは約 30 m である.

No. 3 同様, そのほかの投下実験においても基準位置 (◎ 印), GPS ホバリング位置 (△ 印), ペネトレーター切り離し位置 (ベクトル始点), 飛跡によるペネトレーター落下予測位置 (ベクトル終点) のデータセットが得られる. 図 11 からわかるとおり切り離し時刻が不明瞭な No. 6 実験のベクトル終点位置を除き, 結論として以下のことが言える. すなわち, 切り離す瞬間を含む前後 10 秒付近の GPS differential 位置によるリアルタイム航跡データがあれば, 落下飛跡を用いて 30 m 精度で落下点が予測できる. 落下点が視認でき, 直上で約 1 分間ホバリングできれば 10 m 精度で水平位置が決定できる.

図 11 には着地高度についての結果は示していないが, GPS differential positioning 平均位置の高さ精度は約 10 m であった. 約 10 m のホバリング対地高度, GPS アンテナ取り付け高さ (スキッドから 2.13 m) を補正して求められる上記平均高度は, GPS 干渉測位から求められる正しい着地高度にくらべて, No. 1, 3, 6 実験は正, No. 2, 4, 5 実験は負という両方のオフセットを持つのでバイアス誤差はないようである.

Differential positioning の固定点位置を GPS 干渉測位で定めて解析した上述の △ 印, ペ

クトル終点位置 (表 6c の pene 1a.asc, pene 2.asc から得られる) と同様, 固定点を長時間受信で定めて differential positioning 平均位置を求め解析することができる (表 6c の pene 1.asc, pene 2.asc から得られる). 50 分間の平均位置から求められる pene 1.asc の固定点位置, 30 分間の平均位置から求められる pene 2.asc の固定点位置は式 (9) で求められる GPS 固定点位置にくらべ約 6 m のずれがある. 高さについては ± 10 m の誤差を持つ. この誤差はバイアスとして GPS ホバリング平均位置に反映される.

南極実験の場合, 測点間隔を 5-10 km に設定しているので水平位置誤差の 30 m は見かけ速度の決定に大きな影響を与えないが, ペネトレーター着地高度の ± 20 m 誤差は表層雪の P 波速度を 3.0 km/s (ISHIZAWA and MAE, 1985) とした時 ± 7 ms の到達時刻補正誤差となるため無視できない. そのため電波高度計を併用してホバリング対地高度を精度良くモニターし, 落下点の楕円体高さの精度を上げることが望ましい.

Differential 解を用いず point positioning モードで決定される落下点位置 (表 6c の pene 1.raw, pene 2.raw から得られる) の精度は, 飛跡追跡による場合で水平位置について 30-40 m, 高さについて $\pm 20 \sim \pm 30$ m, GPS ホバリング平均による場合で水平位置について ~ 20 m, 高さについて $\pm 10 \sim \pm 20$ m 誤差を持つ. 長時間平均位置を固定点とした GPS differential 解と point positioning モードにおける解の精度はほぼ同程度である. 逆に言うと VLBI, GPS で取り付けた精度の良い固定点座標が得られない限り, ヘリコプターの point positioning 解をそのまま用いた方が, 系統誤差を持ち込まない点で望ましいと言える.

3.5. 投下実験における風の影響

ヘリコプターの離着陸時には風速が 10 m/s 以下であることが運航上望ましい. 南極実験においても地上気象を監視し基本的には上記条件で運航するが, 一旦離陸すれば 2-3 時間のペネトレーター投下作業中に風速が 20 m/s を越えることも十分予想される.

今回の投下実験におけるペネトレーター切り離し高度での風向・風速は表 8 にまとめられる. 例えば No. 3 実験の高度 1000 m における風速は 2-4 m/s であったが, 地上目標が視認しづらくヘリコプターは約 6 m/s で移動しながらフックをリリースしている. しかし,

表 8 ペネトレーター投下高度での風向・風速値
Table 8. Wind direction and speed at the release height of the penetrator.

番号	投下高度 (m)	実験前		実験後	
		風向	風速 (m/s)	風向	風速 (m/s)
No. 1	160	ESE	0.5	S	2.3
No. 2	330	W	1.1	SW	1.3
No. 3	1000	NNW	3.9	NW	2.2
No. 4	160	S	5.9	S	6.7
No. 5	330	SSE	8.9	S	8.8
No. 6	680	SSE	18.2	S	16.4

この時でも図 11 に示されるように着地予測位置 Q は、干渉測位位置 S に対して南に約 25 m という良い一致度を示している。一方 No. 6 実験においては 680 m 高度で 16–18 m/s, 1000 m 高度で 27 m/s という強い風が吹き、ペネレーターつり下げロープが回転してフックにからんだ (巻き付いた) ためか、リリース時刻が判然としていない。リリース時刻と思われる時の位置 X (図 11; 以下 Y, Z も同様) に対して、各々 10 秒前後のリアルタイム位置から推定されるペネレーター水平初速 (~ 1 m/s) を用いて、風の影響を無視して計算される着地推定位置 Y は、実際の落下位置に対して南東約 70 m である。ヘリコプターはホバリングにより機首をほぼ南東に向け大気に対し、18 m/s の速度を出すことによって対地についてはほぼ静止していた。もし切り離しの瞬間、風速 18 m/s に対し、比例係数 0.25 で 4.5 m/s の初速をペネレーターが獲得したとすると約 12 秒の落下時間の間に Z まで移動する。そして終端下向き速度 105 m/s に対し、ペネレーターの水平速度 (3–5 m/s) が小さいので貫入姿勢も垂直に近かったのであろう。しかし、風速の関数としてペネレーターが獲得する水平初速度、あるいは上記比例係数を予め予測することは極めてむづかしい。風速 10 m/s 以上ではクレーター直上でのホバリングによる位置決定が望ましい。

4. 1991 年度計画について

今回の投下実験により、ペネレーターに位置決定装置を搭載しなくとも GPS differential 法により 10–30 m 精度のペネレーター落下位置決定が可能なが確かめられた。ホバリング中のヘリコプターから ~ 200 m の対地高度をとって自由落下させれば貫入姿勢がほぼ垂直となり、爆破地震のための上下動地震計の姿勢制御に特別の配慮が不要なこともわかった。南極実験での衝撃加速度が 500–1000G であるという予測も得られた。

人工地震実験に使用するという制約からくる仕様の一つに、落下後のペネレーター内蔵時計の UTC 同期がある。平成 3 年度は IFP アンプ通過後の A/D 波形の転送を含め、テレメーター回路までを含んだペネレータープロトモデルを製作し、ヘリコプター投下実験を企画・実施する。

謝 辞

本研究は科研費・試験研究 (課題番号 01840012) の一貫として行った。実験地を快く貸して下さった石狩当別町役場の皆さんに感謝する。

文 献

- DEFENSE MAPPING AGENCY (1987): Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and relationship with local geodetic systems. DMA Tech. Rep., 8350.2, 110 p.
- FUKUDA, Y. (1990): Precise determination of local gravity field using both the satellite altimeter data and the surface gravity data. Bull. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, 28, 133 p.

ISHIZAWA, K. and MAE, S. (1985): The measurement of velocities of *P* and *S* waves in boreholes at Mizuho Station and Minami-Yamato Nunataks, East Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 39, 165-172.

MEADE, B. K. (1982): NWL-10F *versus* WGS-72 Doppler results and broadcast *versus* precise ephemeris coordinates. Paper Presented at the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Def. Mapp. Agency, Las Cruces, N.M., Feb. 8-12.

水谷 仁・藤村彰夫・河島宜之・田中 智・山田功夫 (1990): ペネトレーターによる月探査計画の科学的意義. 第 11 回太陽系シンポジウムプロシーディングス. 相模原, 宇宙科学研究所, 18-23.

渋谷和雄・神沼克伊・水谷 仁・藤村彰夫・塚本茂樹・山田功夫・伊藤 潔・金沢敏彦・高崎政之・伊賀 章 (南極ペネトレーター開発グループ) (1991): 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. 南極資料, 35, 92-117.

山田功夫・藤村彰夫・高木靖彦・塚本茂樹・平山 啓・田中 智・草場匡彦・荒木博志・本田理恵・水谷 仁 (1991): ペネトレーター搭載機器. 第 5 回ペネトレーター研究試験報告, SES データセンター. 相模原, 宇宙科学研究所, 34-74.

(1992 年 4 月 28 日受付; 1992 年 5 月 20 日改訂稿受理)