

第 64 次日本南極地域観測隊におけるペネトレータ観測報告

西川泰弘^{1*}・山本耕大²・田中 智³

A report on “Penetrators for Antarctic on the 64th Japanese Antarctic Research Expedition”

Yasuhiro Nishikawa^{1*}, Kodai Yamamoto² and Satoshi Tanaka³

(2023 年 9 月 13 日受付; 2023 年 11 月 6 日受理)

Abstract: This report summarized the results of the tests and observations conducted by the “Development of Antarctic Observation Penetrators and Intensive Observation in the Shirase Glacier and Surrounding Area” team of the 64th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-64) at Syowa Station on the sea ice and ice sheet from 22nd December 2022 to 11th February 2023. The main purpose of the tests is to collect primary data for JARE 65 and 66th as the first year of the three-year project. We conducted five tests to evaluate the three elements, penetration, measurement, and communication, comprising the penetrator system.

Keywords: Penetrator, Glacier observation, Ice quake, Infrasound

要旨: この報告は、第 64 次南極地域観測隊 (JARE-64) において、萌芽研究観測課題の一つである「南極観測用ペネトレータの開発と白瀬氷河および周辺域での集中観測」(課題番号 AH1002) により、2022 年 12 月 22 日から 2023 年 2 月 11 日の夏期間に昭和基地とその周辺の海上と南極大陸氷床で行った試験をまとめたものである。三ヶ年計画の初年度として、第 65、66 次での観測に必要な基礎データの収集を主目的とし、ペネトレータ (投下型貫入装置) の運用に必要な計測、通信、貫入の 3 つの要素を 5 つの試験から評価した。

キーワード: ペネトレータ、氷河観測、氷震、インフラサウンド

1. はじめに

観測されたデータがどれだけ正確に自然現象を反映しているかということは、極域に限らず自然科学における重要な課題である。特に方角や時間差が重要となる空気、地震動のアレ

¹ 高知工科大学・システム工学群。Kochi University of Technology, School of System Engineering, 185, Miyakouchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502.

² 高知工科大学・航空宇宙コース。Kochi University of Technology, Aerospace Engineering, 185, Miyakouchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502.

³ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) 太陽系科学研究系。Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, Chuo-ku, Kanagawa 252-5210.

* Corresponding author. E-mail: nishikawa.yasuhiro@kochi-tech.ac.jp

イ観測では、観測ネットワークの構築は励起源の位置と規模を見積もるための強力な手段である。しかし、南極や宇宙のような人の手が入りづらい場所（Unmanned place）では観測機器の設置に大きな制限が課されており、膨大なコストやマンパワーが必要となる。そのような Unmanned place の中でも特に氷河のような活動的な場所ほど正確な観測データを必要としているが、活動的であるがゆえに機器の設置が困難であるというジレンマを抱えている。鉛筆型の金属筒の内部に観測機器を搭載した上で上空から投下し、地面に貫入させることで人が実際に現場に行かずに観測機器を設置することができるペネトレータという投下貫入型観測システムがある。ペネトレータは観測機器の設置を投下で行い、観測データをイリジウム通信で送ることで Unmanned place への機器設置の制限を緩和することができるため、今までの「観測できる場所での観測」から「観測したい場所での観測」を実現することで観測ネットワーク設置の自由度を上げ、今までより精度の高い自然現象のデータを得ることができる。ペネトレータを用いた雪氷圏での観測は、南極人工地震観測用のペネトレータ開発（渋谷ほか 1991, 1992）と、南極大陸氷床での容器の投下試験が行われたことがある（松島ほか 2003）が、観測は国際的にも例がない。本研究である「南極観測用ペネトレータの開発と白瀬氷河および周辺域での集中観測」は、南極地域観測第 X 期の萌芽研究観測として採択された。白瀬氷河内及びリュツォ・ホルム湾境界で発生する氷河水震のメカニズム解明を目的とし、第 64 次南極地域観測隊（the 64th Japanese Antarctic Research Expedition: JARE-64; 以下、第 64 次隊）では、計画の初年度として主に第 65, 66 次隊で行われる本格探査のための機器の性能確認が行われた。持ち込まれたペネトレータは、投下用のダミーペネトレータ、地震計とインフラサウンドセンサーを搭載した観測用ペネトレータ、GPS とイリジウム通信アンテナを搭載した通信用ペネトレータの 3 種で、実施した試験は以下の通りである。

- 1) リュツォ・ホルム湾沿岸の氷河視察
- 2) 昭和基地での UAV（Unmanned Aerial Vehicle）の起動・飛行試験
- 3) 昭和基地と北の浦海氷上での観測用ペネトレータによるインフラサウンドの観測
- 4) 南極大陸内陸と白瀬氷河上空を含む、昭和基地を中心とした半径約 120 km 内での通信用ペネトレータによる観測と通信確立
- 5) H128 と S16 でのダミーペネトレータ投下試験

本稿では、第 64 次南極地域観測隊活動期間に南極で行われた上記の試験に加えて、国内における準備についても報告する。

2. 南極観測用ペネトレータの概要

ペネトレータとは、英語の Penetrate（貫入，貫通）を由来とするもので、鉛筆型をした容器物である。内部は空洞になっており、電池と共に観測機器や通信系を入れて上空から投下することで、人が近づけない危険な場所に観測機器を設置・固定することができる。元々は

月や火星などの地球外での運用を目的として開発されたものであるが（田中ほか 2011; Lorenz, 2011）、地球上でも活火山の火口付近などの危険地帯でかつ地球物理的活動が高い場所での運用が行われている（石原ほか 2017; Shirai *et al.* 2017）。ペネトレータは、観測機器の設置の費用削減やリスク低減を実現することで、従来の「観測できる場所」から「観測したい場所」での観測ネットワークの形成を目的としている（田中ほか 2023）。

氷河の融解崩落を含む南極の氷の挙動は地球の気候変動、特に気温変化の影響を大きく受けるため、近年の地球温暖化の影響を探る指標の一つとして挙げられている（Rignot *et al.* 2013; Clem *et al.* 2020; Naughten *et al.* 2021）。海に面した南極の縁に存在する氷河の挙動は、海流の影響を直接受けることもあり（Hellmer, 2004）、内陸の氷床以上に観測対象としての重要度が高い。特に氷河の流速や、氷河が崩落して海に流入する際の振動や音は、南極の氷床や氷河の増減の精度を高めることができる情報である（Ishihara *et al.* 2015; Marchette *et al.* 2021; Podolskiy and Walter 2016; Aster and Winberry 2017）。しかし、氷河は流動性をもった氷である性質上、その表面は不安定で人が立ち入るには危険でかつ費用もかかる場所である。そのため観測機器の設置に偏りが生じ、そのため震源位置の特定や規模推定にも偏りが生じている（Murayama *et al.* 2017）。以上のようなペネトレータの設置特性と氷河の観測重要性とを受けて、本研究の南極観測ペネトレータは白瀬氷河でのアレイ観測ネットワークを形成し、地震動、インフラサウンド（音波、微気圧）、GPS（Global Positioning System）の詳細な観測を行うことを目標としている。特に地震動とインフラサウンドを同地点で観測し、到達時間差や氷震規模の比較を行うことにより、氷河で発生する非テクトニック振動の震源位置や規模推定の精度向上を目指す。これは、将来的な氷河の変動や崩壊頻度の観測や予測に用いられることが期待される。JARE-64では貫入、観測、通信を行い、65次隊以降の観測実施のために観測用・通信用・ダミーペネトレータ（図1）の3種類に分類し、それぞれのペネトレータが動作するかを検証した。ペネトレータの諸元（表1）より、観測用ペネトレータは、インフラサウンドセンサ・地震計を搭載した（表2）。通信用ペネトレータはイリジウム通信によって、温湿度・ガス・GPSの情報の送信、遠隔からの送信プログラムの書き換えの検証を行った。ダミー用ペネトレータは落下中の姿勢遷移、貫入条件の検討のために3種類の機体を準備した。

3. リュツォ・ホルム湾沿岸の氷河視察

昭和基地から近いリュツォ・ホルム湾沿岸の氷河群を次年度以降のペネトレータ投下候補地として、ヘリコプターによる空からの視察を行った。視察は好天時に行われるのが望ましいため、昭和基地到着後の早い時期（12月26日）に行われ、昭和基地を出発して順にラングホブデ、ホノール、テーレン、スカーレン、白瀬氷河の上空を通過し空撮を行った（図2）。安全面を考慮し、物件の投下や氷河表面への着陸は見送られた。視察を行った5つの氷河の



図 1 観測, 通信, ダミーペネトレータ.

Fig. 1. From left to right: the observation penetrator, the communication penetrator, and the dummy penetrator.

表 1 ペネトレータ諸元.

Table 1. Specification sheet of penetrators.

	観測用	通信用	ダミー
全長 [mm]	615		
最大直径 [mm]	130		
全備重量 [kg]	6.5	7.1	7.6
搭載機器	インフラサウンドセンサ, 地震計, ロガー	温湿度, ガスセンサ, GPS, イリジウム通信 モジュール	おもり

表 2 観測機器諸元.

Table 2. Specification sheet of equipment.

	構造体	電池	地震計	ジンバル	搭載電子回路
長さ [mm]	630	165	50	150	110
最大直径 [mm]	100	92.5	50	90	90
重量 [g]	3500	1400	340	1000	700

うち、アクセスが容易であるラングホブデ氷河と本研究の対象である白瀬氷河の2箇所を次年度以降の投下候補地とした。本計画は、白瀬氷河での氷震観測及びメカニズムの解明を最終的な科学目的としているが、昭和基地からのアクセスが比較的容易なラングホブデ氷河へ

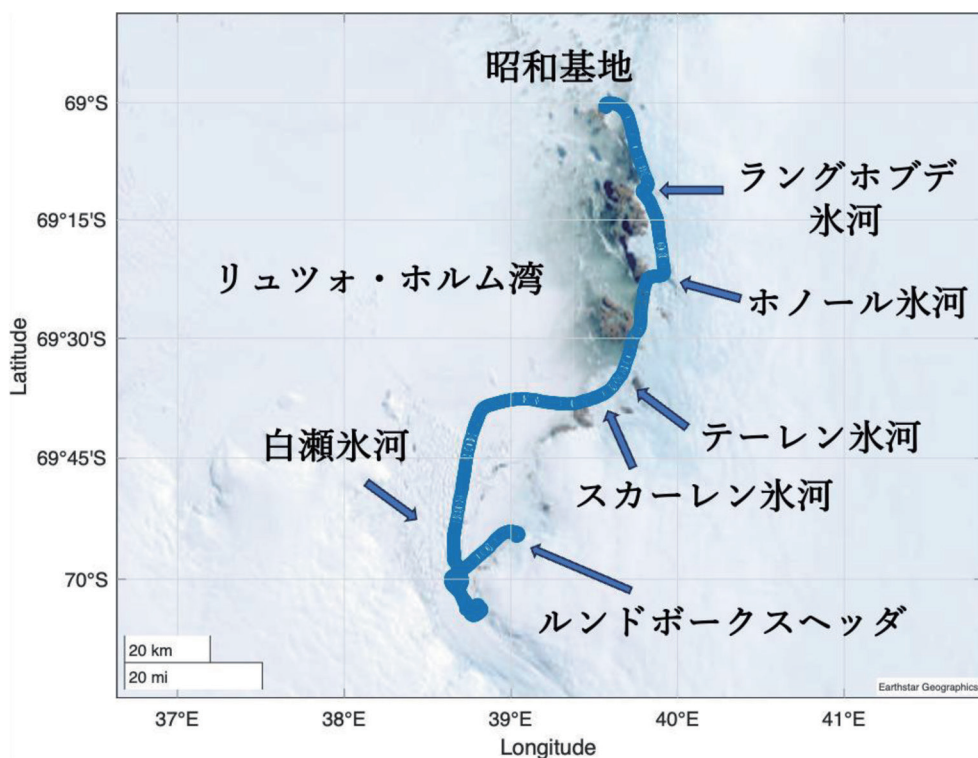


図 2 昭和基地から Rundvågshetta までのリュツォ・ホルム湾沿岸の氷河視察空路。

Fig. 2. Route of glacier survey along the coast of Lützow-Holm Bay from Syowa Station to Rundvågshetta.

ペネトレータを投下することで、ペネトレータの回収と継続開発を行うことも視野にしている。

4. 昭和基地での UAV の起動・飛行試験

本研究の第 64 次南極地域観測で用いられた UAV は EAMS Robotics 社の型式 LAB6155 であり、全幅 2.2m、全長 2.2m、全高 0.98m、重量 12kg で、最大離陸重量は 23kg である。この UAV を高緯度、低温の極限環境下で飛行ができるかどうかの確認、更に重量 10kg のペネトレータを搭載し、上空から投下することで南極大陸氷床への貫入条件を確認することが目的である。

4.1. 国内での事前準備

本研究に参加した 2 名の隊員（西川・山本）は、高知県香美市の高知工科大学香美キャンパス及び静岡県静岡市の三保飛行場にて UAV の飛行操作及び飛行試験を行っている。飛行試験には物件（ペネトレータ）の投下が含まれるため、航空法（昭和 27 年法律第 231 号）

第132条の2第2項第2号の規定に則り、国土交通省へ無人航空機の飛行に関する許可・承認申請を行い、大阪航空局長の承認を得ている。飛行試験はのべ11日間で43時間行われ、そのうち5日間でペネトレータの投下試験を行った(表3)。三保飛行場で行った最終の飛行試験では、投下姿勢と落下速度の調整に用いるパラシュートの試験も行われた(図3)。これらの試験により、南極でのUAVからのペネトレータの投下試験の条件を決定した。

4.2. 昭和基地での試験

UAVは、隊員が昭和基地に到着した翌日の12月23日に搬入され、12月24、25、27日の3日間、Aヘリポート(S69°00'25.6", E39.34'11.7")で飛行試験を行った(表4)。Aヘリポート試験は、航空機が運用されない夜間に行われた。12月24、25日はジャイロキャリブレーションを含めた慣熟飛行を行い、約10kgのダミーペネトレータを搭載した状態で高度20mで3

表3 国内で行われたペネトレータ投下試験。
Table 3. List of penetrator drop tests conducted in Japan.

日付	場所 (*投下試験)	試験時間
2022/1/26	三保飛行場	8時間
2022/7/10	高知工科大学*	11時間
2022/8/9	高知工科大学	1時間
2022/8/12	高知工科大学	2時間
2022/8/15	高知工科大学	1時間
2022/8/16	高知工科大学	1時間
2022/8/17	高知工科大学	1時間
2022/8/29	高知工科大学*	6時間
2022/9/1	高知工科大学*	4時間
2022/9/5	高知工科大学*	5時間
2022/9/29	三保飛行場*	4時間



図 3 三保飛行場で行われたパラシュート付きペネトレータ投下試験.

Fig. 3. Drop test of the penetrator with a parachute at Miho Airfield.

表 4 昭和基地で行われた UAV 飛行試験.

Table 4. UAV flight tests at Syowa Station.

12/24	12/25	12/27
ジャイロキャリブレーション		
慣熟飛行		墜落
GPS と現在位置の整合性確認		
高度 20 m 飛行成功	3 分間の飛行成功 ペネトレータ付き飛行成功	Bad Logging エラー
操縦不具合発生 (充電残量低下が要因)	操縦不具合修正	

分間のホバリングに成功し、更に UAV の GPS が取得した位置と実際の現在地が一致していることを確認した。12 月 27 日の飛行試験で離陸直後の高度約 5 m 付近で、UAV が急激に機首に対して右方向に移動したため、操縦していた報告者が危険だと判断し、送信機で機体を操作して高度を下げて落下させた。UAV は水平方向 20 m ほどの雪面に足から落下した後、

転がりながら更に5mほど移動した先の土の上で止まった。周囲には試験従事者しかおらず、人的被害はなかった。物的被害はUAVのみで、外観から判断できた破損箇所はブレード(3枚)、バッテリーカバー(小破)、GPSアンテナの固定バー(折損)、ペネトレータの投下装置(逸脱)。その時点で実験の続行は不可能だと判断し、事故の記録を収録後速やかに撤収し、越冬隊長に口頭で事故の経緯とその後の処置の報告を行った。事故後、ブレードや投下装置の修理を行ったが、破損が機械部分だけではなく内部の回路にまで及んでおり現地での改修は不可能と判断し、修理とその後の実験を中止した。

4.3. 帰国後の事故検証と対策

帰国後に、墜落原因究明のため飛行ログデータの解析を行った。高度、各モーター出力には異常が見られず、動力系の故障でないと考えられるが、墜落時の飛行試験でコンパスのオフセット値に異常値が見られた。コンパスオフセット値は、コンパス学習値の健全性の参考として用いることができる値で、南極でのコンパスキャリブレーションの後に異常値が見られた。また、操作を行っていないにも関わらず機体が流され、目標座標に対して螺旋運動を行う通称トイレットボウル現象が起きていた。これらの情報と日本でのフライトには問題が見られないことから、不具合事象は南極の環境下におけるコンパスを用いたフライトシステムに起因していると判断できる。以上の報告から、第65次以降の計画では対策として方位の測定にコンパスを用いないシステムに変更することとなった。具体的にはGNSSアンテナを2個搭載し、GNSS測位から方位を算出するシステムをとる。

5. 昭和基地と北の浦海氷上での

観測用ペネトレータによるインフラサウンドの観測

インフラサウンドセンサー(SAYA INF03S)をペネトレータに搭載し、南極で氷河観測を行える性能があることを確認した。昭和基地到着後に、基本観測棟にて地震計とインフラサウンドセンサーの起動試験を行った後、北の浦の海氷上を設置箇所と設定した。北の浦の海氷上へはスノーモービルで移動を行い、東オングル島の海岸線より北の浦ヘルート上を約300m進んだルート脇(S69°00'08.6", E39.35°35.2")の多年氷上に設置した。設置に際してペネトレータの投下姿勢を再現するために、ドリルとチゼルで穴を掘り、海氷に貫入させた状態で固定した(図4)。観測に用いた地震計は、氷惑星の氷震を観測するために開発されたV241であり(小野寺ほか2022)、ペネトレータに搭載できる大きさでありながら世界中で広く使われている広帯域地震計CMG3と0.1Hzよりも高周波数で高い一致度を示しており(図5)、氷震観測が十分に行える性能を持っているが、ダンパーの係数を強く設定しすぎたため有意なデータは取得できず、海氷上での連続観測の確認のみ行った。海氷上で行ったインフラサウンドの観測では、風の弱い静かな時間帯(UTC 2/7 22:00-2/8 0:30)でも周期9秒



図4 北の浦海上に設置された観測用ペネトレータ。

Fig. 4. Observation penetrator on the Kitanoura ice sea.

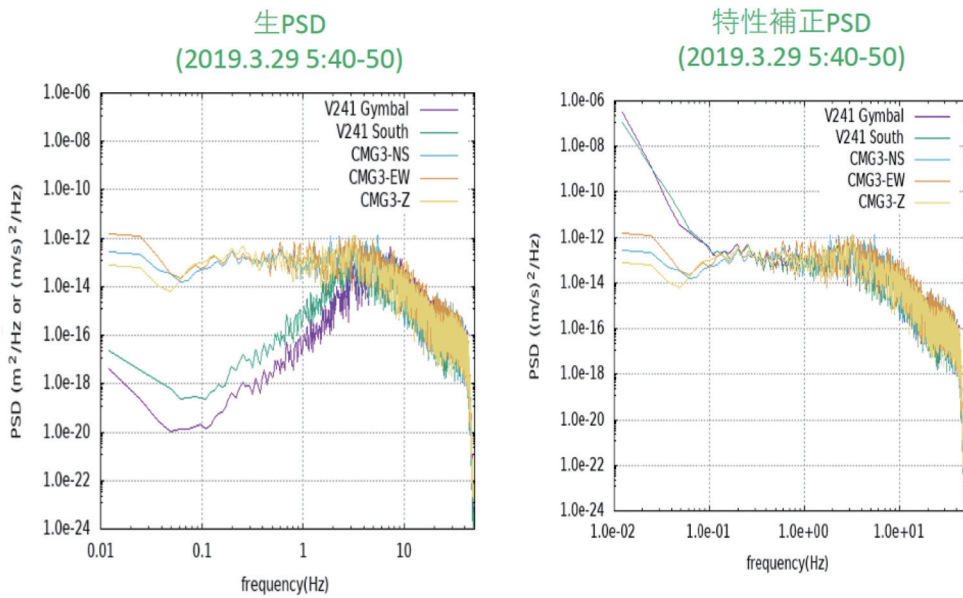


図5 地震発生時のV241とCMG3のPower Spectrum Density比較。

Fig. 5. Comparison of Power Spectrum Density between V241 and CMG 3 during an earthquake.

の振動が観測された (図 6)。この振動は、大気と海洋 (海水) 波浪とのカップリングにより励起されるマイクロバロムスである (Ishihara *et al.* 2015)。また、全体のノイズが強くなるとマイクロバロムスの信号は見えなくなるが、これは気象庁による昭和基地の風速のデータと整合性がとれている (図 7)。人的ノイズが発生しない夜間に発生した氷震と思われる信号も観測されており、投下用ペネトレータに収納できる大きさの SAYA INF03S が南極でのインフラサウンドの観測に耐えうる性能であることが十分に示された。

6. 南極大陸内陸と白瀬氷河上空を含む、

昭和基地から約半径 120 km 以内での通信ペネトレータの試験

ペネトレータに格納できる大きさ、重量の通信機で、十分なデータを長期間かつ南極環境下で運用ができるかどうかの確認が目的である。

昭和基地に到着後、基本観測棟にて起動試験を行った後 2022 年 12 月 24 日から 2023 年 2 月 11 日までの 50 日間の運用を行い、461 回の通信と 3 回のコマンド変更に成功した。運用中は 3 時間に 1 回の頻度で加速度、湿度、気圧、気温、二酸化炭素濃度、緯度経度のデータ

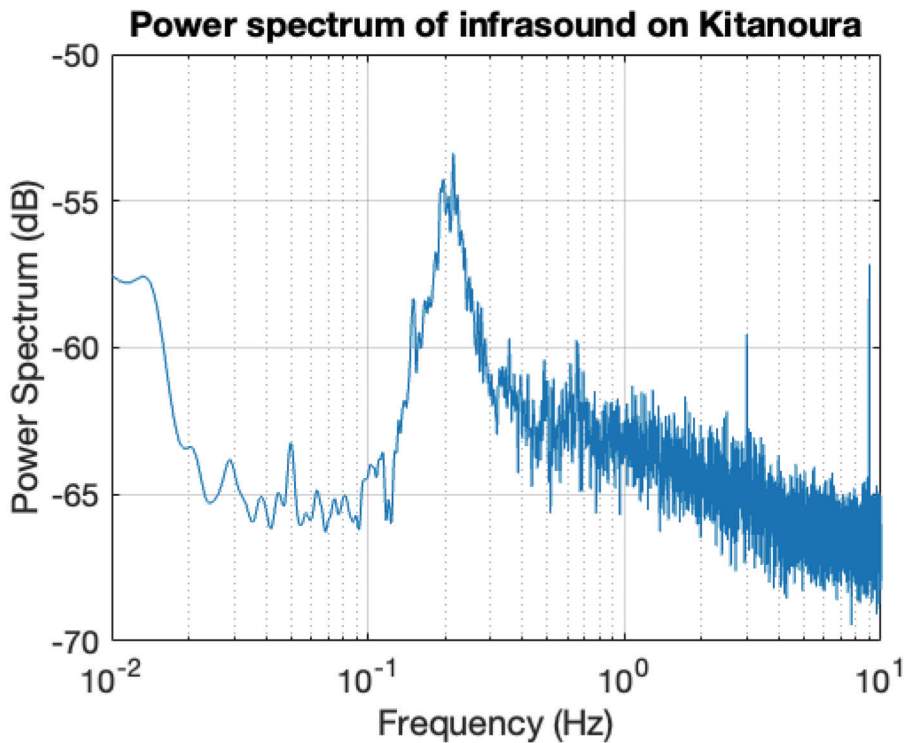


図 6 無風時の北の浦海氷上のインフラサウンドスペクトル。

Fig. 6. Power spectrum of infrasound on Kitanoura ice sea during calm period.

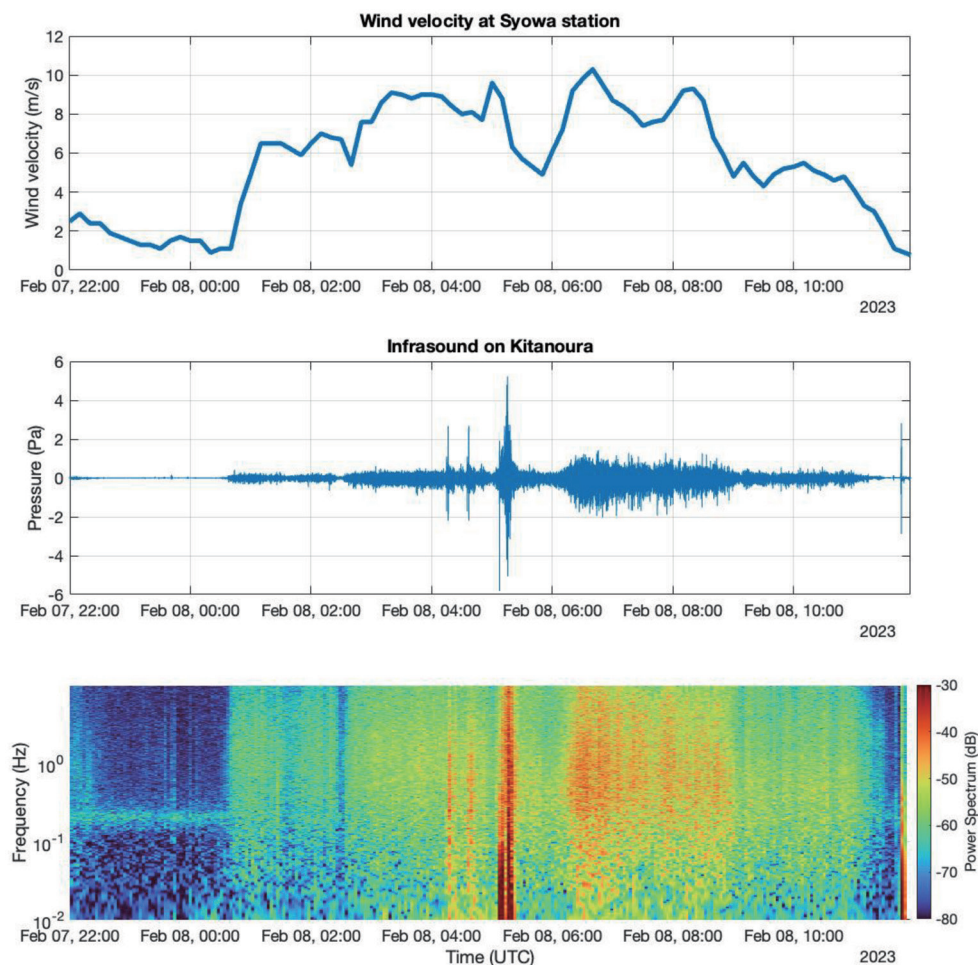


図7 昭和基地の風速データと北の浦海上上のインフラサウンドの時系列スペクトル。
Fig. 7. Time series of wind speed at Syowa Station and infrasound spectrum on Kitanoura.

のイリジウム通信を用いて送信を行い、昭和基地だけでなく日本への送信も成功した(図8)。また、ペネトレータからのデータ送信だけでなく、日本からの仕様変更のコマンドの受信も行われた。これにより現在の仕様のペネトレータが、現地で取得したデータを南極から日本に送ることができ、かつ日本からの仕様変更も可能であることを確認した。以上で第64次隊での成功目標を達成したが、追加試験としてペネトレータの設置条件を変えての通信を試みた。理想の設置条件は、通信部分が雪面よりも上に出ていることと、ペネトレータが垂直に貫入していることの2点である。しかし、この2つの条件はペネトレータが空中からの投下により設置する仕様上、必ずしも満たすことができない(章7.2)。そのため、昭和基地内の積雪が残っている場所を利用して、ペネトレータを雪面下に埋める、傾けるなどを行い、

理想ではない設置条件での通信を試みた(図9). その結果, ペネトレータは雪面に埋めたり角度をつけると通信の成功率は下がるが, 雪面下 1.5 m に 45 度傾けた状態で設置しても通信が成功した. 特に雪面下 0.5 m に垂直に設置した場合の通信成功率は 88.5 % (26 回中

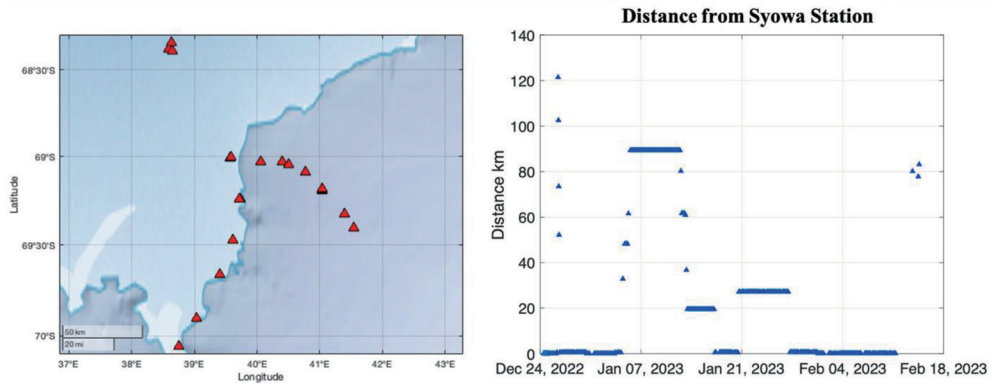


図 8 日本で受信された 50 日間の通信ペネトレータの位置情報と昭和基地からの距離.

Fig. 8. Locations of communication penetrator received in Japan for 50 days and distance from Syowa Station.



図 9 通信ペネトレータを雪面下に設置する様子.

Fig. 9. Installation of communication penetrator below the snow surface.

23回成功)であり、十分な信頼性が確保できると期待される(図10)。これらの結果は設計時点での、ペネトレータの設置は理想状態(垂直かつテイル部分が雪面上に出ている状態)でなければならないという設置の制限を緩和する結果となった。

7. H128 と S16 でのダミーペネトレータ投下試験

観測機器の多くは、設置条件によって観測性能が大きく変化する。ペネトレータは上空から雪面への貫入をもって設置を行うため、通常の観測機器以上に貫入時の深度や角度などの設置条件に留意しなければならない。そのため、設置目標の氷河に近い南極大陸氷床上でのペネトレータ投下試験は重要な課題の一つである。先述(章4.2.)の通り昭和基地でのUAVが墜落し、修理とその後の飛行試験の継続を断念した。そのため、大陸氷床上でのダミーペネトレータの投下試験を雪上車からと有人ヘリコプターから行い、貫入特性の観測を行った。

7.1. H128 でのダミーペネトレータ投下試験

大陸氷床上のH128において、雪上車の上からの投下試験を行った。雪面から雪上車のルーフまでの高さは3.7mであり、ペネトレータの先端から雪面までの投下高さは4.2mであっ

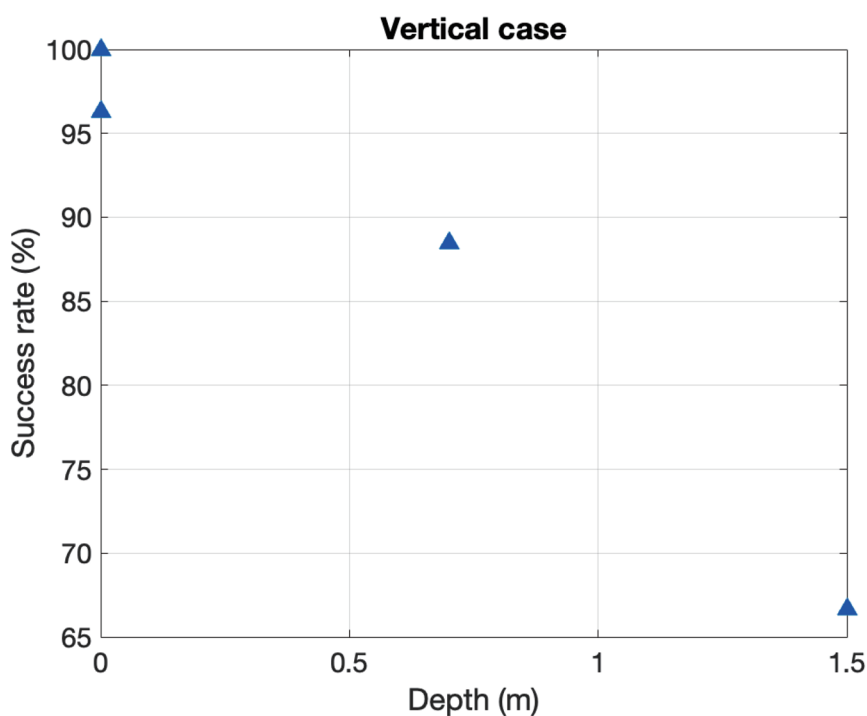


図10 垂直に設置したペネトレータを雪面に埋めた深さと通信成功率の関係。

Fig. 10. Relationship between buried depth and communication success rate.

た。ルーフ上での作業は転落の危険を伴うため、ハーネスによる安全確保をした上で行われた(図 11)。観測した値はスローモーション動画による雪面突入時の角度と速度、貫入後の貫入深度及び角度である。また、ペネトレータ自体の貫入以外にも投下雪面の条件把握のため、深さ 30 cm までの積雪密度と地震計による弾性波探査を行った(図 12)。

7.2. S16 でのダミーペネトレータ投下試験

ペネトレータの貫入特性を調べるため、また有人ヘリコプターからのペネトレータ投下シーケンスを確立するため、海岸近くの大陸氷床上の S16 において、有人ヘリコプターからの投下試験を行った。投下作業はヘリコプターの内部から、投下地点の様子は近くの地表から行われ、投下試験計画の詳細は往路でのしらせ船内で行われた。有人ヘリコプターからのペネトレータの投下は、安全基準の面からしらせ飛行科の自衛隊員によって行われることとなり、観測隊員は有人ヘリコプター内部からと投下地点付近からの観測を行った。観測隊員の待機場所は安全面を考慮し、投下地点から風上側に 50 m とした。投下地点は S16 雪上車列から東に 200 m 程度 (S69°01'48.0", E40.04'12.0") の平らな雪面を選び、試験前日のうちに 20 m 四方を赤旗で囲い、上空からの視認性を上げた。ダミーペネトレータは高度 75, 90, 120 m から 1 回ずつの合計 3 回投下され、貫入深度と貫入角度(雪面からの角度)の観測が行われた(表 5)。高度 75 m から投下したペネトレータは貫入深度 20 cm、貫入角度 31 度であり、ペネトレータのテイル部分(通信部分)が雪面から露出していたが(図 13)、高



図 11 H128 の大陸氷床上で行った雪上車の屋根上からのペネトレータ投下試験。

Fig. 11. Dummy penetrator drop test from the snow vehicle conducted at site H128 on the ice sheet.

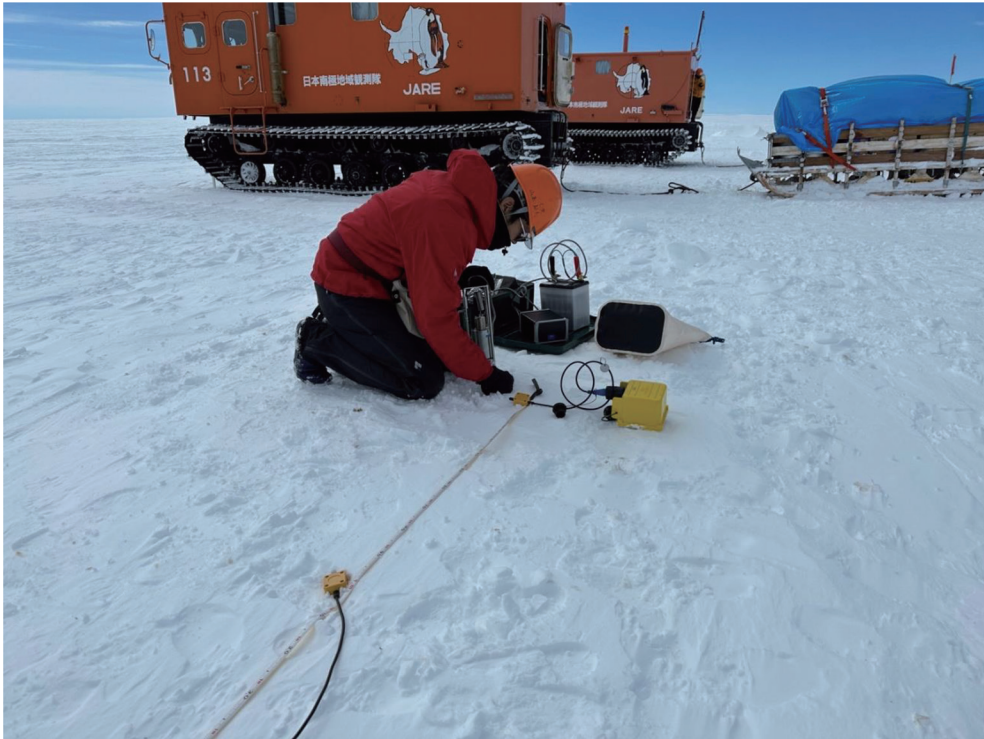


図 12 大陸氷床上で行ったジオフォンを用いての弾性波探査.
 Fig. 12. Seismic observation using geophones on the ice sheet.

表 5 S16 で行われた有人ヘリコプターからのダミーペネトレータ投下試験結果.
 Table 5. Result of dummy penetrator drop tests from a helicopter at site S16.

高度 H [m]	貫入深度[cm]	貫入角度[deg]	風向風速[m/s]
75	20	31	ENE 9
90	76	58	ENE 9
120	84	86	ENE 9

度 90, 120 m から投下したペネトレータはそれぞれ貫入深度 76, 84 cm, 貫入角度が 58, 86 度であり, ペネトレータのテイル部分が雪面に埋まっていた. テイル部分からの通信は, 貫入深度は浅く, 貫入角度は大きい (90 度に近い) 方が安定する. これらの結果は, ペネトレータ投下後の通信確保難度が貫入深度と貫入角度のトレードオフであることを示しており, 今後のペネトレータの形状や通信機器の開発, 投下姿勢や投下高度の運用の目安となる.



図 13 高度 75 m から投下したダミーペネトレータ。
Fig. 13. The dummy penetrator dropped from 75 m height at site S16.

8. おわりに

ペネトレータは Unmanned place で観測データを取得し、自然現象の解析を行うことを目標としている。本計画はそのモデルケースとして極域という極限環境下で、更に到達が困難であり科学的にも観測価値の高い白瀬氷河での、氷震観測及びメカニズムの解明を目的としている。第 64 次隊では、計画の初年度として次年度以降の基礎データの収集を主目的とし、ペネトレータ運用に必要な設置、観測、通信の項目の動作確認を行ってきた。実施された試験項目は多岐に渡るため解析待ちのデータも多いが、インフラサウンド観測による海氷上での自然現象の観測、大陸氷床上でのペネトレータ投下による貫入深度と角度の関係、極域での通信ペネトレータの設置条件と通信成功率の関係など、得られた成果は多い。また、コンパスオフセットの異常により落下した UAV についても、帰国後の解析により原因の解明、対策をとることができ、次年度以降の観測に必要なデータを収集できたと思われる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、計画全体への助言及び援助をいただきました第 64 次南極地域観測隊の伊村智観測隊長、樋口和生越冬隊長ほか第 64 次観測隊員各位、国立極地研究所南極観測センター、南極観測船砕氷艦しらせ乗員に感謝します。特に氷河視察においてヘリコプターの操縦、解説を行ってくださった佐藤睦隊員、Robert Morgan Fletcher 氏、北の浦海氷上

への観測ペネトレータの設置に協力して下さった海水下における魚類の行動・生態の解明 (AP1003) チームの隊員各位, 通信ペネトレータ試験と H128 でのダミーペネトレータ投下試験に協力して下さった第 63 次岩本勉之隊員, 氷床中の宇宙線生成核種を使った太陽粒子嵐の定量評価 (AP1002) とテレビ朝日チーム各位, S16 でのダミーペネトレータ投下試験にご助言と協力して下さったしらせ飛行科, 応急工作科, 第 64 次久保木学隊員, フジテレビチーム各位に御礼を申し上げます。また, 本報告をまとめるにあたり, 国立極地研究所の金尾政紀准教授にご助言をいただきましたこと, 御礼申し上げます。最後に, 本計画の同行者派遣にあたり助力・援助をいただきました, 高知工科大学の磯部雅彦前学長と山本真行教授に心より感謝申し上げます。

文 献

- Aster, R. C. and Winberry, J. P. (2017): Glacial seismology. *Reports on Progress in Physics*. **80** (12), 126801, doi: 10.1088/1361-6633/aa8473.
- Clem, K. R., Fogt, R. L., Turner, J., Lintner, B. R., Marshall, G. J., Miller, J. R., and Renwick, J. A. (2020): Record warming at the South Pole during the past three decades. *Nature Climate Change*. **10** (8), 762-770, doi: 10.1038/s41558-020-0815-z.
- Hellmer, H. H. (2004). Impact of Antarctic ice shelf basal melting on sea ice and deep ocean properties. *Geophysical Research Letters*. **31** (10), L10307, doi: 10.1029/2004GL019506.
- Ishihara, Y., Kanao, M., Yamamoto, M., Toda, S., Matsushima, T. and Murayama, T. (2015): Infrasound observations at Syowa Station, East Antarctica: Implications for detecting the surface environmental variations in the polar regions. *Geoscience Frontiers*. **6** (2), 285-296, doi: 10.1016/j.gsf.2013.12.012.
- 石原吉明・白石浩章・白井 慶・早川雅彦・水野貴秀・後藤 健・尾崎正伸・山田和彦・田中 智・山田竜平・及川 純・村上英紀 (2017): 無人航空機から投下させる貫入プローブ (ペネトレータ) を用いた火山島観測実験. 日本地震学会秋季大会講演予稿集 (CD-ROM). S02-08.
- Lorenz, R. D. (2011): Planetary penetrators: Their origins, history and future. *Advances in Space Research*. **48** (3), 403-431, doi: 10.1016/j.asr.2011.03.033.
- Marchetti, E., Walter, F. and Meier, L. (2021): Broadband Infrasound Signal of a Collapsing Hanging Glacier. *Geophysical Research Letters*. **48** (16), e2021GL093579, doi: 10.1029/2021GL093579.
- 松島 健・山下幹也・安原達二・堀口 浩・宮町宏樹・戸田 茂・高田真秀・渡邊篤志・渋谷和雄 (2003): 投下型地震計 (ペネトレータ) の南極・みずほ高原での試験観測—第 43 次夏隊報告—. 南極資料. **47** (3), 395-408, doi: 10.15094/00009275.
- Murayama, T., Kanao, M., Yamamoto, M. and Ishihara, Y. (2017): Infrasound Signals and Their Source Location Inferred from Array Deployment in the Lützow-Holm Bay Region, East Antarctica: January-June 2015. *International Journal of Geosciences*. **8** (2), 181-188, doi: 10.4236/ijg.2017.82007.
- Naughten, K. A., De Rydt, J., Rosier, S. H. R., Jenkins, A., Holland, P. R. and Ridley, J. K. (2021): Two-timescale response of a large Antarctic ice shelf to climate change. *Nature communications*. **12**, 1991, doi: 10.1038/s41467-021-22259-0.
- 小野寺圭祐・白石浩章・田中 智・川村太一・三谷烈史・村上英記・山田竜平・鎌田俊一・木村 淳・黒川宏之・西田 究・関根康人・辻 健・ロレーンツ ラルフ (2022): NASA 土星衛星タイタン探査ミッション DragonFly の紹介～氷衛星における地震観測の実現に向けて～. 日本地震学会秋季大会. S19-03.
- Podolskiy, E. A. and Walter, F. (2016): Cryoseismology. *Reviews of Geophysics*. **54** (4), 708-758, doi: 10.1002/2016RG000526.
- Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J. and Scheuchl, B. (2013): Ice-Shelf Melting Around Antarctica. *Science*, **341** (6143), 266-270, doi: 10.1126/science.1235798.
- 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 (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**(1),

- 92-117, doi: 10.15094/00008714.
- 渋谷和雄・神沼克伊・早川雅彦・藤村彰夫・塚本茂樹・水谷 仁・山田功夫・小山順二・笠原 稔・伊藤 潔・金沢敏彦 (1992): 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. 南極資料. **36** (2), 310-340, doi: 10.15094/00008773.
- Shirai, K., Shiraiishi, H., Tanaka, S., Murakami, H., Oikawa, J., Ishihara, Y., Hayakawa, M., Mizuno, T., Goto, K., Ozaki, M., Yamada, K., Yamada, R. (2017): Development of penetrator probe for volcano monitoring deployed from unmanned aerial vehicle. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior. Abstract.
- 田中 智・白石浩章・早川 基・藤村彰夫・月内部構造探査ワーキンググループ (2011): LUNAR-A 中止後のペネトレータ. 日本惑星科学会誌. **20** (3), 208-210, doi: 10.14909/yuseijin.20.3_208.
- 田中 智・西川泰弘・山本耕大・阿久津岳生 (2023): 南極ペネトレータの開発. 月刊地球. **45** (4), 222-227.

附表 南極での活動記録.

Appendix. The record of experiments in the Antarctic.

12/22	昭和基地入り 観測物資/野外物資搬入
12/23	作業場確保 通信用ペネトレータ立ち上げ
12/24	通信用ペネトレータ立ち上げ ドローン初フライト
12/25	ドローン 2 回目フライト (ペネトレータ搭載でのフライトに成功)
12/26	リュッツォ・ホルム湾の氷河視察
12/27	ドローンフライト
12/28	弾性波探査準備 観測用ペネトレータ立ち上げ
12/29	ブリザード休暇
12/30	北の浦での弾性波探査 観測用ペネトレータ立ち上げ
12/31	北の浦海氷観測 昭和基地からしらせへ移動
1/1	しらせから昭和基地へ移動 弾性波データ解析
1/2	北の浦への観測用ペネトレータ設置 内陸旅行準備
1/3 ~ 1/17	内陸旅行 雪上車屋根上からのペネトレータ投下実験 弾性波探査 積雪密度観測 有人ヘリからのペネトレータ投下実験

附表 南極での活動記録.
Appendix. The record of experiments in the Antarctic.

1/18	休養
1/19	観測機材荷繰り 野外活動準備
1/20	野外活動 (ラングホブデ雪鳥沢)
1/21 ~ 1/24	データ解析
1/25	観測ペネトレータ北の浦海氷設置
1/26 ~ 1/27	野外活動 (ラングホブデ雪鳥沢)
1/28 ~ 1/30	データ解析
1/31 ~ 2/4	北の浦海氷観測
2/5	北の浦海氷観測 観測機材修理
2/6 ~ 2/7	北の浦海氷観測
2/8	北の浦海氷観測 観測用ペネトレータ設定変更
2/9	北の浦海氷観測
2/10	観測荷物最終まとめ
2/11	昭和基地からしらせへ移動