

Unmanned-Placeにおける地震・インフラサウンドの長期観測可能性

要旨

アポロ計画やInSightによる探査ミッションで行われた月震・火震観測では、観測ネットワークの範囲や観測点数の問題により観測範囲に限界があった。これらの原因の一つに、惑星・衛星のような人が立ち入ることが困難な領域(Unmanned-Place)での観測ネットワークの形成は容易ではないことがあげられる。

Unmanned-Placeにおける簡便なネットワーク形成には、ペネトレータという観測機器を用いることで解決が可能である。現在、日本でのペネトレータ開発は、LUNAR-A計画でのノウハウから、火山や南極をターゲットとしたペネトレータを開発してきた。しかし、火山・南極ペネトレータは、通信の安定性や観測期間が短いという問題点がある。

これらの問題点の解決には、機体分離を行うアフターボディ方式の実装が必要である。現在まで、ボルトを用いたパッシブ型の機構動作を日本-京都(月環境模擬フィールド)および南極-大陸氷床にて実施した。また、長期観測可能性についても検討を行い、太陽光発電を利用した発電装置の搭載を見込んでいる。

本講演では、貫入状態の安定化のためにアフターボディ方式によるペネトレータ開発の現状を紹介し、通信・発電による地震・インフラサウンドの長期観測可能性について議論する。

2025/3/3 惑星圏シンポジウム2025@東北大

Unmanned-Placeにおける地震・ インフラサウンドの長期観測可能性

山本耕大^{*1} 山本真行^{*1} 西川泰弘^{*1} 平塚丘将^{*1} 谷口亮太^{*2} 田中智^{*3}

*1 高知工科大学, *2 立命館大学, *3 JAXA



Email : 286004r@gs.kochi-tech.ac.jp

背景

Unmanned-Place:

火山の火口, 氷河, 惑星・衛星のような
人が立ち入るのが困難な場所・地帯

探査機-着陸機による観測機器設置
→観測範囲に限界がある

- 月震ネットワーク：1969~1977年の稼働
(アポロ計画)
- ヴァイキング1号, InSight による観測
- 震源位置の特定には限界がある

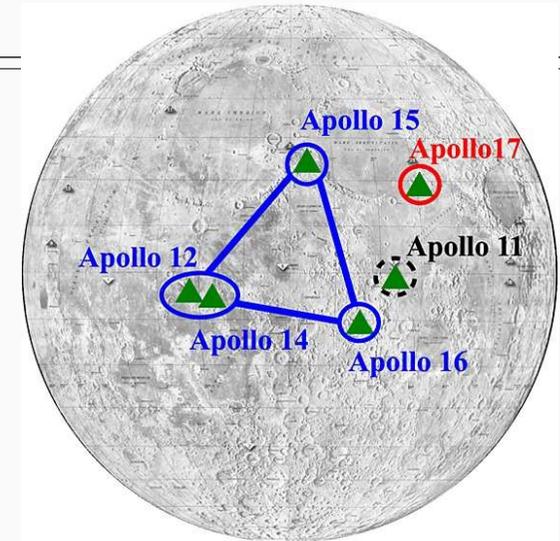
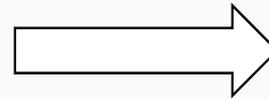


図1. アポロ計画における月地震計の配置[1]



図2. 地球利用ペネトレータ外観

- 簡便な観測網の形成
- 観測したい場所へのアクセス



ペネトレータによる観測の実施

[1]Kawamura, T *et al.*,(2015), Lunar Surface Gravimeter as a lunar seismometer: Investigation of a new source of seismic information on the Moon. *J. Geophys. Res. Planets*, 120, 343–358.

現在までのペネトレータ開発

- LUNAR-A計画→2007年に中止が決定
地球利用という形で開発が継続
ドローンを用いて貫入，設置
火山、氷河観測に向けた機器開発[2,3]

観測対象一

地震，インフラサウンド，火山ガス，氷河流動

インフラサウンド：

超低周波音(20 Hz以下の音波)

津波などの自然現象によって励起される

再突入カプセルの軌道特定や津波発生の特特定[4,5]

[2] Shirai, K *et al.*, "Development of penetrator probe for volcano monitoring deployed from unmanned aerial vehicle" *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*. Abstract(2017).

[3]第X期南極地域観測 萌芽研究部門課題番号AH1002「南極ペネトレータの開発および白瀬氷河域の集中観測」研究代表者：田中智

[4] Yasuhiro Nishikawa *et al.*, Modeling of 3D trajectory of Hayabusa2 re-entry based on acoustic observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 74, Issue 2, April 2022, Pages 308–317,

[5] Yamada, M *et al.*, "Tsunami triggered by the Lamb wave from the 2022 Tonga volcanic eruption and transition in the offshore Japan region". *Geophysical Research Letters*, 2022, 49, e2022GL098752.

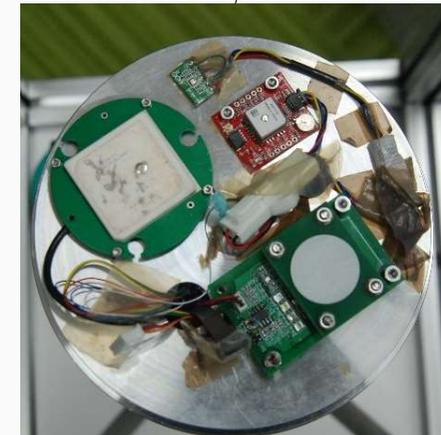
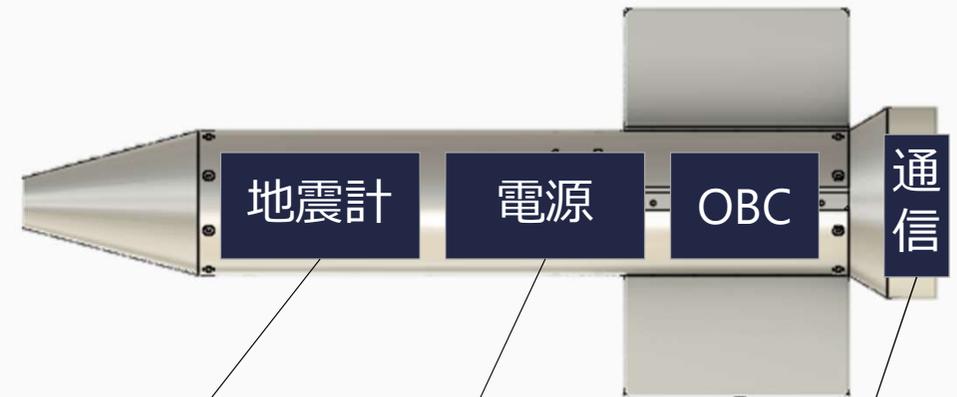


図3. 地球利用ペネトレータ搭載概要

現在までのペネトレータ開発

• 課題の整理

地球利用のペネトレータは観測まで行える。しかし、貫入後の通信まで含めた成功率は30 %前後

原因：貫入状態に通信が左右されている

解決：貫入の成功には、地面の状態を事前に把握

問題：Unmanned-Placeであるため把握が難しい

• 目的

地面の状態によらず全貫入一半貫入を達成できる
アフターボディ方式ペネトレータの開発

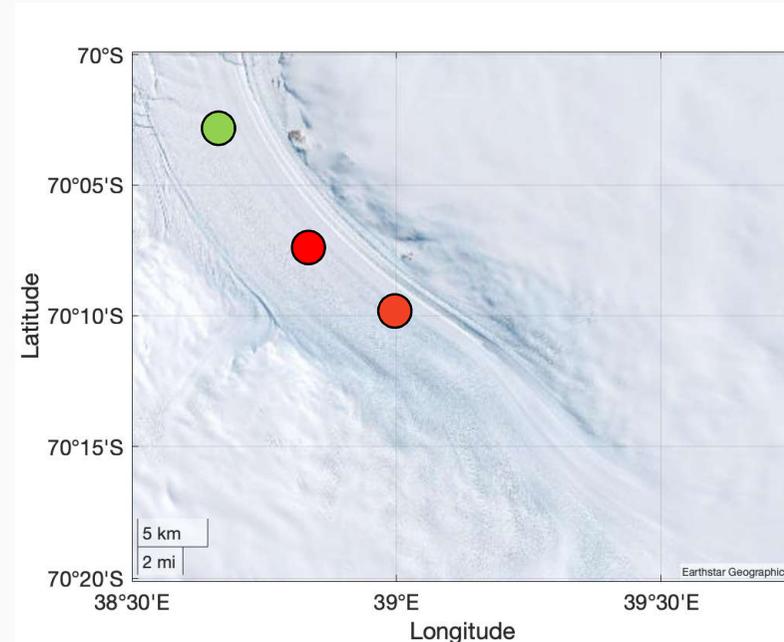


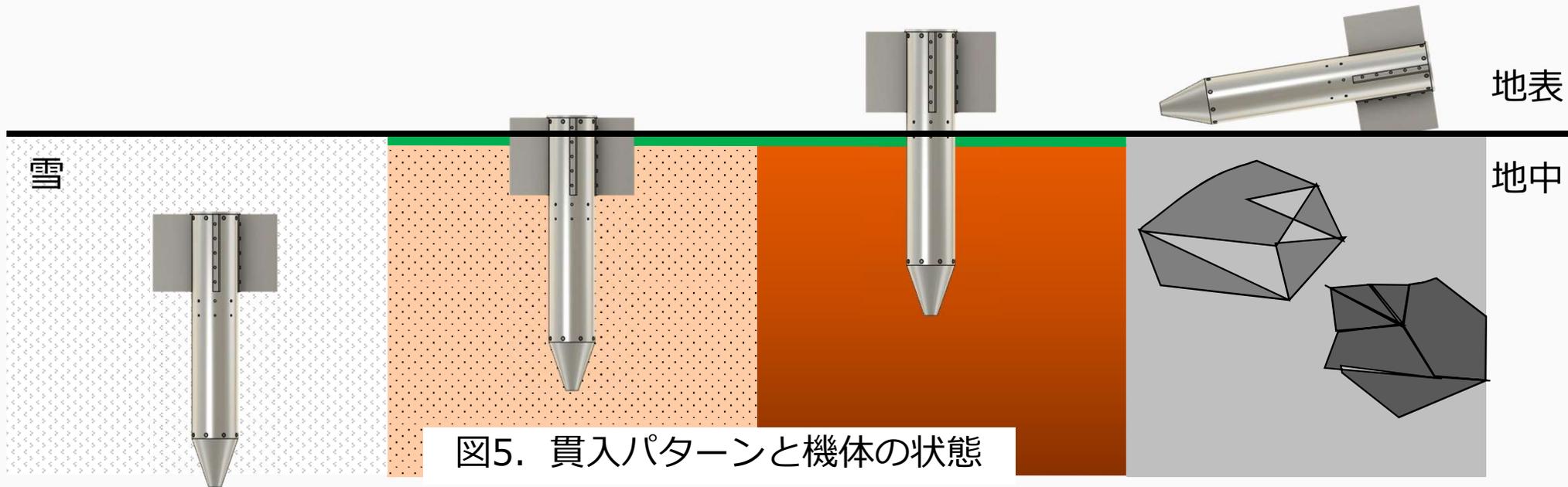
図4. 白瀬氷河における
南極ペネトレータ投下地点

3機うち1機のみが観測データの送信に成功している状態

貫入パターンについて

表1. 貫入パターンと通信の有無

パターン	過貫入	全貫入	半貫入	不貫入
機体	機体・テールが地表に露出していない	アンテナ搭載部が露出	アンテナ搭載部と一部ボディが露出	貫入していない状態
地面	雪, 地面が柔らかい・空隙がある状態	砂, 地面が柔らかい・水分を含んでいる状態	地面が固く締まっている状態	地面が岩石・構造物であるような状態
通信	△~×	△~○	○~◎	△



全貫入～半貫入を達成するには？

- 達成するために必要な要素分析

分離機構を備えた機体構造(アフターボディ方式)の実装

- アフターボディ方式とは？

機体構造を2つに分離

通信部：地表に露出し，通信・発電

観測部：地中に貫入し，観測・電池の保護

- 既存形状：アルミボディによる一本化構造

→分離機構の搭載のみで実装が見込める

- 分離構造の検討

パッシブ型：貫入の衝撃を利用

アクティブ型：モータやコイルを利用



- パッシブ型のメリット

投下中に動作しない/構造がアクティブ型に比べて単純という点がある。

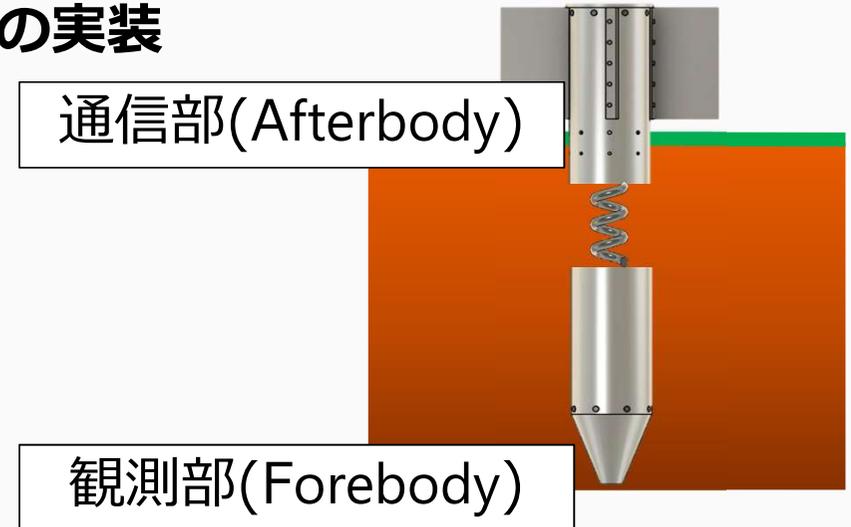


図6. アフターボディ方式の機体展開

ボルト破断

- 構造分割

ボディを半分程度の長さ分割し、接合部品(カップラー)をボルトで締結した構造

- 分離動作

貫入時の衝撃でボルトが破断することで分離を行う。

- 投下試験

半貫入・過貫入パターンでの投下試験を実施した。
京都-宮津、南極-S16(大陸氷床)

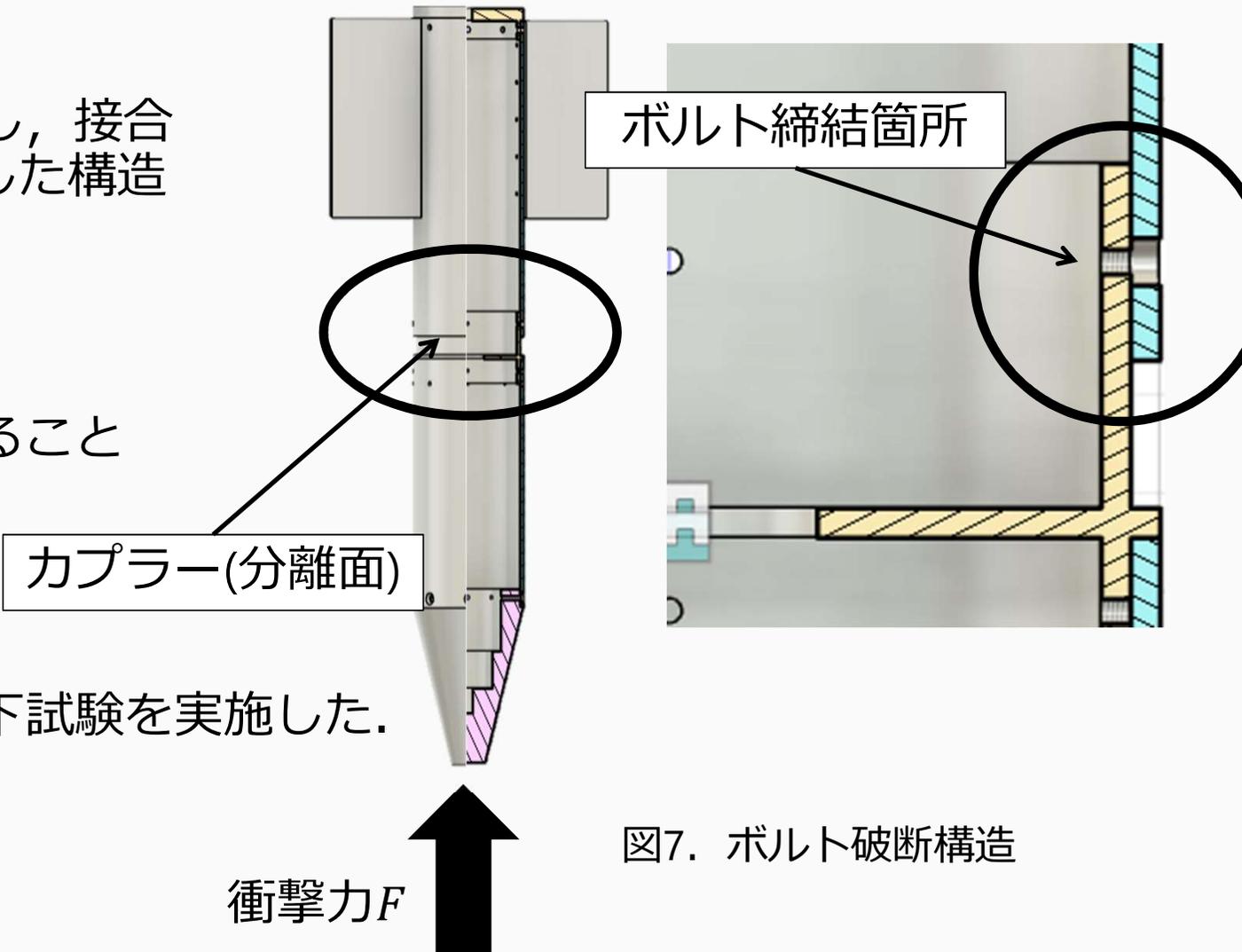


図7. ボルト破断構造

ボルト破断投下試験

- 京都-宮津で行った投下試験



図8. ドローンからの投下視点

通常の投下試験：高度 150 mから投下を行う。
貫入時のペネトレータ速度は40~60 m/sに達する。



図9. 投下地点からの視点

1000 fpsで貫入時の様子を撮像した。解像度の関係でボルト破断のようすは確認できなかった。

ボルト破断



図10. 京都一宮津における実験結果

ボディが露出する半貫入であった。しかし、本来の位置(○)よりも下部のボルト(○)も破断



図11. 南極-S16における実験結果

- 下部ボルト穴を4つ→8つに増設
- 半貫入のときとは異なり、上下ボディの貫入深度差を確認した。

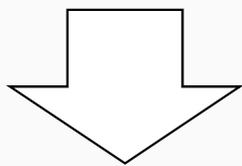
結果：過貫入、半貫入での動作を確認

実験のフィードバック

パッシブ型の動作としてはまずまずの結果が得られた。
しかし、過貫入動作でテール部が露出しないことが判明。

ボルト破断をベースとした機構
設計 + 補助機構を追加

1. テール大径化
2. ばね開放
3. ケブラー連結



テール大径化によって得られるメリット
として過貫入の防止・**発電装置の搭載**が
挙げられる。

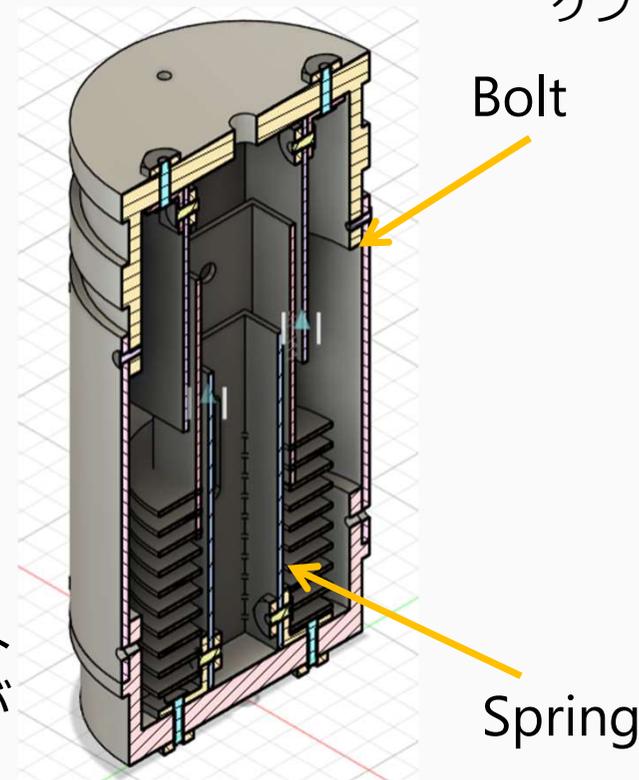


図12. ばね開放

ケブラーは二重テグス結びで結束

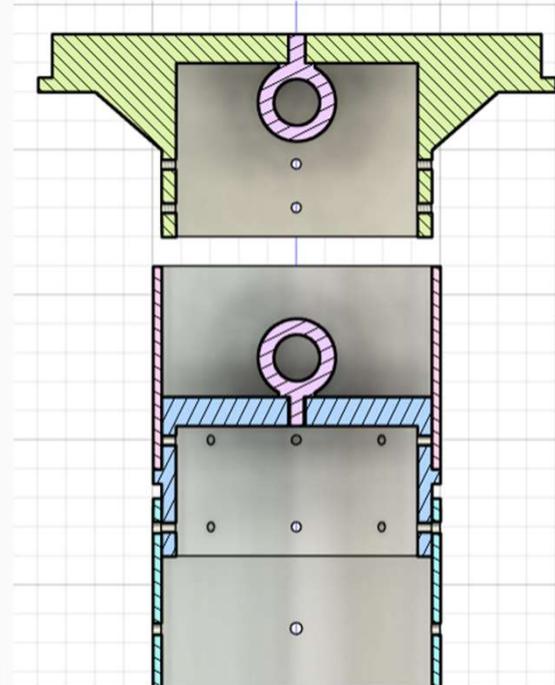


図13. ケブラー連結

長期観測の可能性

表2. 貫入パターンと通信・発電の可能性

パターン	過貫入	全貫入	半貫入	不貫入
機体	機体・テールが地表に露出していない	アンテナ搭載部が露出	アンテナ搭載部と一部ボディが露出	貫入していない状態
地面	雪, 地面が柔らかい・空隙がある状態	砂, 地面が柔らかい・水分を含んでいる状態	地面が固く締まっている状態	地面が岩石・構造物であるような状態
通信	△~×	△~○	○~◎	△
発電	×	○	○	△

目指している貫入の程度と太陽光発電の相性が良く、長期観測の要素が付加できる

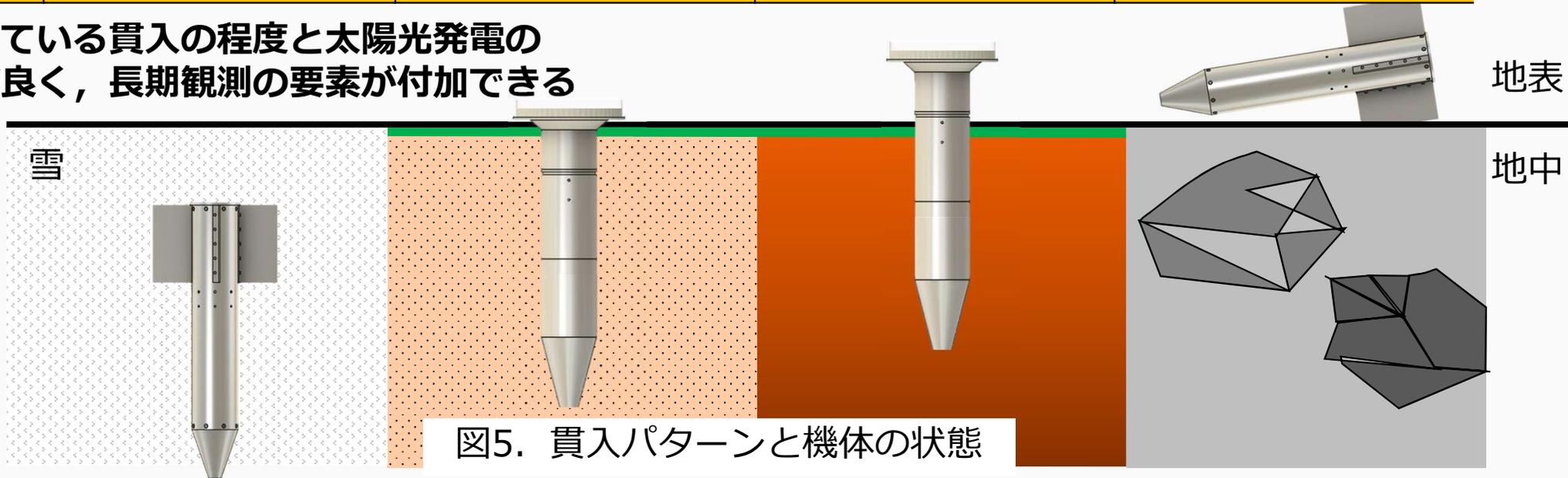


図5. 貫入パターンと機体の状態

現状の観測期間

発電量 P

$$P = J_0 P^m C K \cos \Theta_t(\phi, \theta) S \quad (1)$$

1日の残電源容量 $BT(t)$

$$BT(t) = BT(0) - P_{LOSS} + P \quad (2)$$

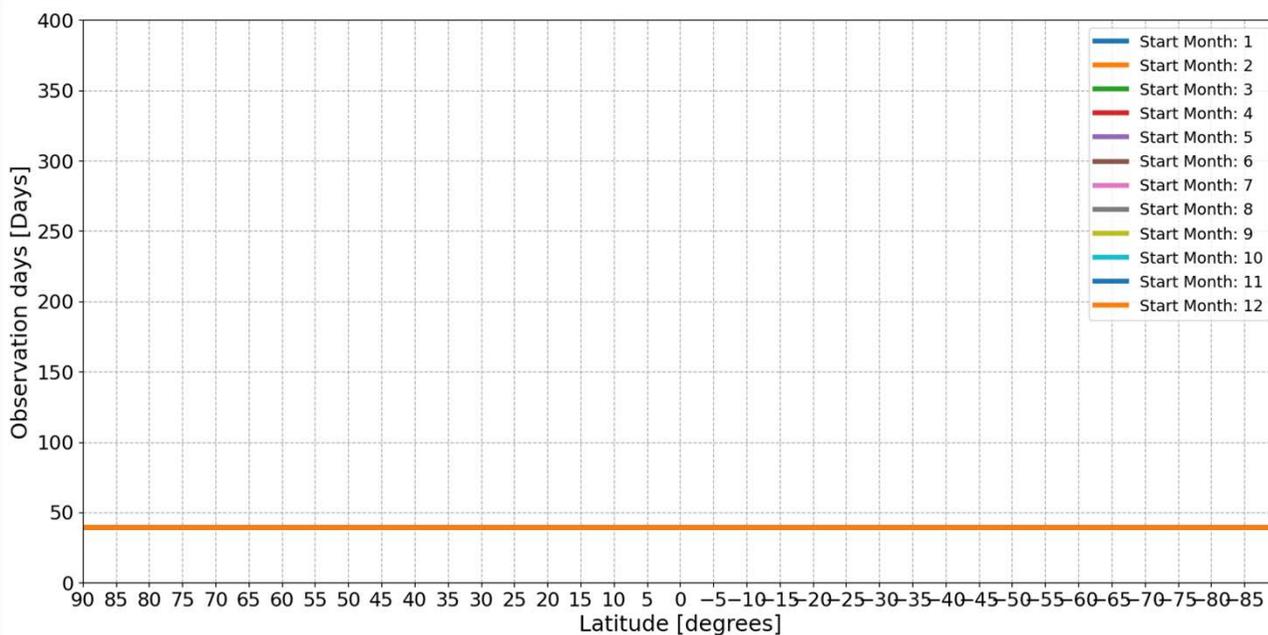


図15. 1次電池使用時の緯度毎の観測日数変化

- 現状の観測システムは、1次電池で駆動。
つまり、電源容量は減少していく一方である。
- 1日1回の観測・通信を行ったとして計算。
- 1次電池では観測日数の上限が**47日**。現状の最大日数は工夫を行って**90日程度**。

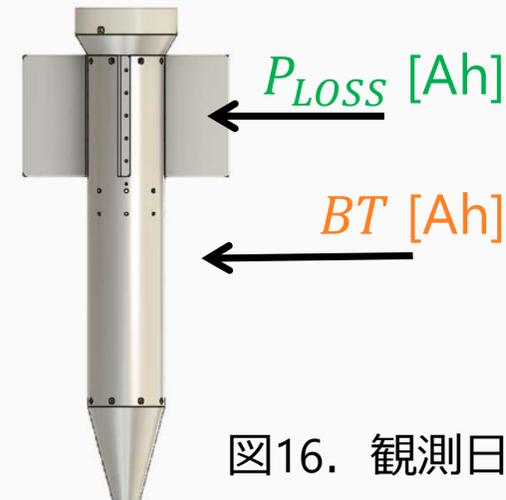


図16. 観測日数計算パラメータ

表3. 1次電池による電源容量・消費電力

Battery $BT(0)$ [mAh]	27500
Power loss P_{LOSS} [mAh]	30

観測日数を伸ばすには

発電量 P

$$P = J_0 P^m C K \cos \Theta_t(\phi, \theta) S \quad (1)$$

1日の残電源容量 $BT(t)$

$$BT(t) = BT(0) - P_{Loss} + P \quad (2)$$

- ペネトレータの観測システム上、**発電量・電源容量**はハードウェア上の問題から上限が設定される。
 - ただし、消費電力についてはハード/ソフトの面でも改善の余地がある。
 - 消費電力の改善方法
 - 観測/スリープモードの実装
 - STA/LTAによるイベント検出
- 消費電力は現在のシステムから $\frac{1}{10}$ の削減を見込む

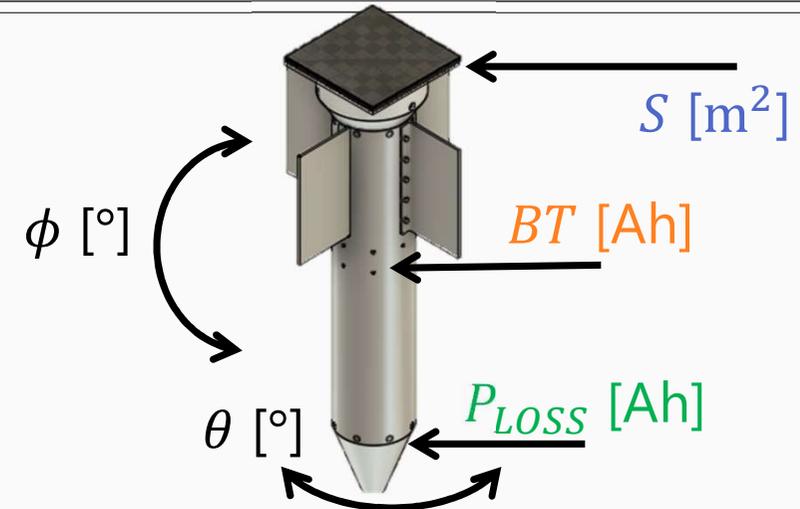


図17. 太陽光パネルを含めた観測日数計算パラメータ

表4. 2次電池による観測日数計算パラメータ

Panel area $S[m^2]$	0.019
Battery $BT(0)[mAh]$	24000
Power loss $P_{Loss}[mAh]$	30→3
Inclination of panel $\phi[^\circ]$	0
Azimuth of panel $\theta[^\circ]$	0

2次電池+太陽光発電による観測日数

発電量 P

$$P = J_0 P^m C K \cos \Theta_t(\phi, \theta) S \quad (1)$$

1日の残電源容量 $BT(t)$

$$BT(t) = BT(0) - P_{Loss} + P \quad (2)$$

- 1次電池では観測日数の上限が50日.
- 発電を行った場合も同様に、1日1回の通信・観測を行うと仮定。(パネルは天頂軸方向に指向させる)
- 2次電池では、緯度 $\pm 70^\circ$ でどの時期に観測を開始しても**1年間の観測可能性が示唆された。**

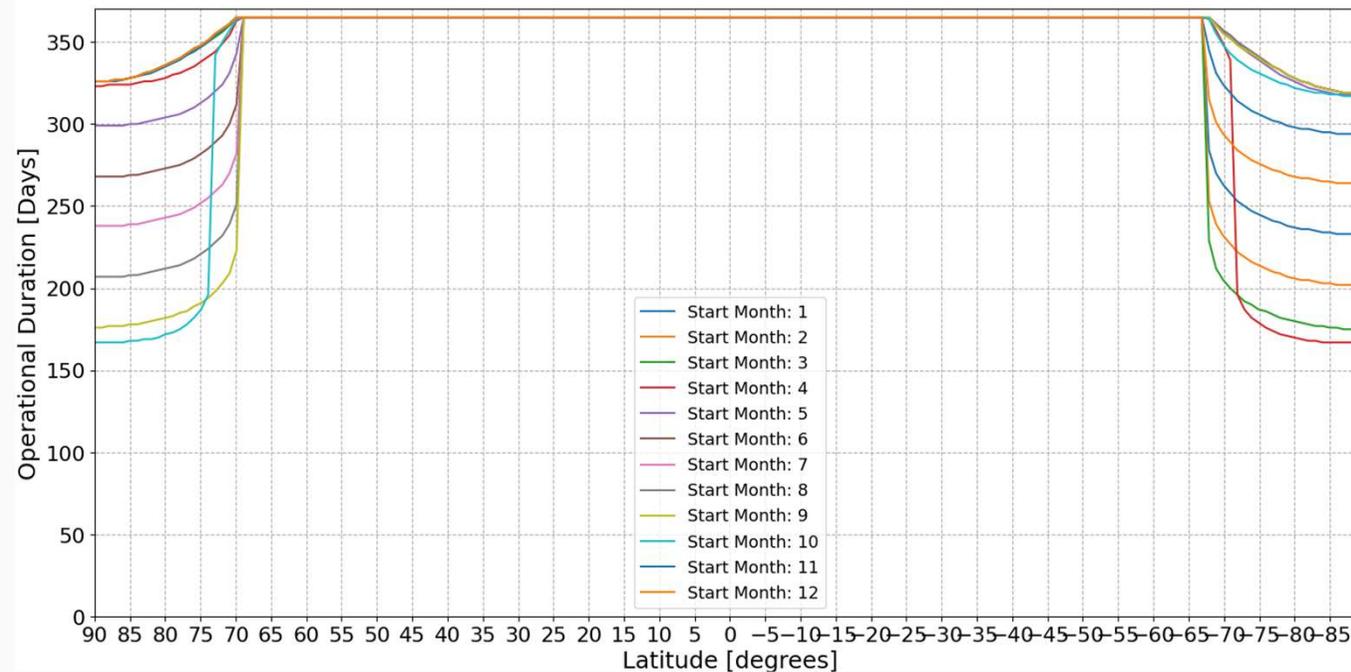


図18. 2次電池使用時の緯度毎の観測日数変化

まとめ・今後の計画

・分離構造

ボルト破断方式の投下試験を行った。

半貫入，過貫入状態での動作を確認したが，テール部の露出には至らなかった。

・長期観測可能性：

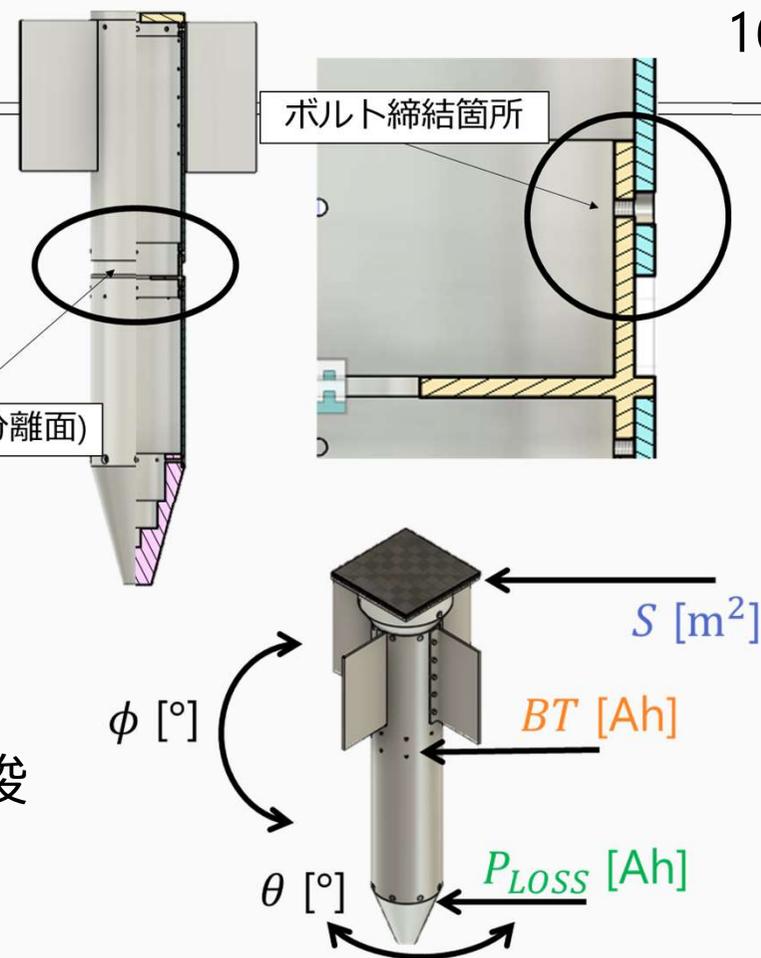
長期観測成立の可能性について数値計算を実施

1次電池では電源容量を消費するのみであったが，2次電池+太陽光発電の搭載で1年間の観測可能性が示唆

・今後の計画

分離機構： 補助機構の開発
バネ開放、ケブラー連結

太陽光パネル・2次電池： 電池-パネルの選定、
環境試験



観測・通信の
成功率向上へ

観測実績

- 南極(昭和基地、ラングホブデ氷河、白瀬氷河)
- 諏訪之瀬島、大涌谷

[4]第X期南極地域観測 萌芽研究部門課題番号AH1002「南極ペネトレータの開発および白瀬氷河域の集中観測」研究代表者：田中智

[5] Shirai, K.et.al., "Development of penetrator probe for volcano monitoring deployed from unmanned aerial vehicle" *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*. Abstract(2017).

