

# 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

第 31 号

2025 年 12 月





# 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

第 31 号

2025 年 12 月



## 2025年度技術報告会開催に寄せて

第31回低温科学研究所技術部技術報告会を開催させていただきます。日頃より技術部にご支援をいただいている皆様方に、心より感謝申し上げます。

本年度は、7月に北大全体の技術部が技術連携統括本部（ITeCH）に統合される体制へと移行しました。なお、詳細に関しましては、報告会当日の講演にてご説明いたします。

本報告会は、技術部職員にとって、所内外の多くの教員や学生の皆様と議論を交わすことができる重要な機会です。技術部職員にとって、自らの技術が所内外の皆様の研究にどのように活用されているのかを知ることが、技術者としての大きなやりがいになります。また、今後さらにどのような技術が皆様に必要とされているのかを知ることが、技術研鑽を積むための大きな励みになります。さらに、所内外の皆様に技術部が提供できる様々な技術を知っていただき、皆様の研究のさらなる発展につなげていただければ幸いです。本報告会が実り多いものとなりますよう、活発にご議論していただけますようお願い申し上げます。

低温研では寒冷圏に関わる物理・化学・生物・地学・気象など極めて幅広い自然現象についての研究が行われています。そのため、技術部は金属工作のみならず、電気・電子工作、情報処理、情報発信、生化学分析、フィールドでの様々な調査など、さまざまな研究支援業務を行っています。これほど幅広い業務を高いレベルで遂行できる技術部は、国内外の大学や研究所を見渡しても希少です。このような技術部の研究支援により、低温研では独創的で優れた研究業績を出すことが可能となります。私ども技術部は、皆様のご要望に合わせてさらに技術を高度化するとともに、技術の幅をより広げるべく研鑽に努めて参ります。今後とも技術部に対してご指導やご支援をいただけますよう、何卒よろしくお願い申し上げます。

最後になりましたが、技術部報告会にご寄稿いただきました方々、ご発表いただきました方々、ご出席いただいた方々に厚くお礼申し上げます。

2025年12月5日  
技術部長 佐崎 元



# 目次

1. Genome-wide knockout screening を用いた シリアンハムスター培養細胞の低温耐性遺伝子の探索 山下 純平、曾根 正光、山口 良文 .....	1
2. 摂氏ゼロ度以下で生じる微惑星内部での水和鉱物反応機構の解明 中埜 夕希、橋元 明彦、森 章一、斎藤 史明 .....	2
3. 南極・ドームふじにおける試薬実験のための装置製作 松本 真依、斎藤 史明、森 章一、飯塚 芳徳 .....	6
4. 第三期南極ドームふじ深層掘削報告と掘削機の改良 的場 澄人、森 章一、平田 康史、斎藤 史明、佐藤 陽亮、古崎 睦、 川村 賢二 .....	10
5. ボアホールカメラの制御と画像データ伝送 森 章一、佐藤 陽亮、斎藤 史明、平田 康史、千貝 健、的場 澄人 .....	13
6. ボアホールカメラと氷片回収装置の製作 森 章一、佐藤 陽亮、斎藤 史明、平田 康史、的場 澄人、小林 一誠 .....	20
7. 海外の観測ロケットを用いた実験の報告： 4 回目の結果および 5 回目の実験に向けて 木村 勇気、平田 康史、高塚 徹、斎藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、 森 章一、稲富 裕光 .....	26



# Genome-wide knockout screening を用いた シリアンハムスター培養細胞の低温耐性遺伝子の探索

山下 純平<sup>1</sup>、曾根 正光<sup>2</sup>、山口 良文<sup>2</sup>

1. 技術部先端技術支援室
2. 冬眠代謝生理発達分野

## はじめに

冬眠は、餌不足になる冬の期間を乗り切るための生存戦略の一つである。クマやリスといった様々な種類の動物が冬眠を行うことが知られているが、そのメカニズムについてはまだわかっていないことが多い。シリアンハムスターも冬眠動物として知られており、冬にならないと冬眠できないリスなどとは違って、短日寒冷条件にすることで冬眠を誘導でき、飼育も比較的容易であることから、冬眠研究には欠かせない動物である。シリアンハムスターの冬眠は、体温が 5℃以下（外気温に依存）になる深冬眠と、37℃程度になる中途覚醒を繰り返すものである。冬眠をしないヒトやマウスの細胞は通常 5℃以下のような低温状態には耐えられない。このような低温耐性をもたらすメカニズムや遺伝子について研究している。

## Genome-wide knockout screening について

Genome-wide knockout screening とは、生物が持つすべての遺伝子を 1 つずつ止めて、その影響を観察し、特定の性質や反応に関わる遺伝子を探す実験である。CRISPR / Cas9 は、DNA の中の狙った場所を正確に切り、遺伝子を編集できるハサミのような技術である。sgRNA (single guide RNA) と呼ばれる短い RNA 分子が Cas9 タンパク質を標的の DNA 領域へ導くことで、特定の遺伝子の機能を選択的に失わせることができる。シリアンハムスターの培養細胞である HapT1 について、CRISPR / Cas9 を用いた Genome-wide knockout screening による、低温耐性に重要な遺伝子の特定を進めている。対象遺伝子は、NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene/>) に登録されている約 36,000 個の遺伝子のうち、chopchop (local 版) により sgRNA (最大 5 種類、最小 3 種類) を作成できた約 19,000 個のシリアンハムスターの遺伝子である。この sgRNA ライブラリーを元に Genome-wide knockout screening を応用した、revival screening (低温細胞死を起こす sgRNA を繰り返し選抜・再スクリーニングすることで、低温細胞死に関わる遺伝子を絞り込む方法) を行い、低温耐性をもたらしている遺伝子の候補を探している。今回は、この screening でわかってきたことについて途中経過を発表する。

# 摂氏ゼロ度以下で生じる微惑星内部での 水和鉱物反応機構の解明

中埜 夕希<sup>1,2</sup>、橋元 明彦<sup>3</sup>、森 章一<sup>4</sup>、斎藤 史明<sup>4</sup>

1. 低温科学研究所低温ナノ・宇宙物質科学分野
2. 株式会社燃焼合成
3. 理学院・宇宙理学専攻
4. 低温科学研究所技術部装置開発室

## はじめに

地球表面のおよそ 71 %を覆う地球の水。その総質量は地球全体のたった 0.03 – 0.6 %と予測される。僅かながらも存在するこの水により、地球は生命あふれる惑星になったと考えられている。この水はどのようにもたらされたのだろうか？

地球を含む惑星物質の起源をたどると、星間空間を漂っていたガスと氷、岩石、有機物から成るナノメータサイズの固体微粒子に遡る。比較的、物質の密度が高い星間領域では、それら物質が自己重力により収縮し、中心部には原始星、その周囲には取り残されたガスと微粒子が円盤を形成する。この円盤に漂う無数の微粒子が数万年以上の時間をかけて付着成長し、直径 1 – 100 km の微惑星と呼ばれる小天体を数十万から数十億個と作り出した。それら微惑星は互いに衝突・合体を繰り返すことで、最終的に地球などの大きな惑星へ成長したとされる (e.g. Williams and Cieza 2011)。その一方で、合体成長を免れた微惑星も存在する。太陽系の場合、それら微惑星は小惑星という名で今なお太陽を周回し、その破片が地球に降り注ぐと隕石と呼ばれる。岩石質から成るコンドライトと呼ばれる隕石は、微粒子から微惑星へ進化する間、そして微惑星内部や表層で受けた諸物理・化学過程により変質した星間微粒子を保存している。それら変質の記録を読解することが惑星物質の進化過程を解明する鍵のひとつとなる。

惑星の水の原点と考えられるコンドライト隕石の水は、“水和鉱物”と呼ばれる水を結合した鉱物として大部分が存在している。この水和鉱物は微惑星天体内部で融解した星間氷と岩石微粒子が反応したことで生じたとされ、従来、その反応に関与した氷成分は純水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) と暗に仮定されてきた。しかし、微惑星の内部温度が摂氏  $0^\circ\text{C}$  に到達しなかったと予測されるため (Wakita and Sekiya 2011)、純水氷の融解は難しい。一方、星間氷として、水氷と共存する  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$  氷などは、僅かな温度上昇や紫外線・宇宙線照射により、 $\text{NH}_4\text{SH}-\text{H}_2\text{O}$  系の氷や  $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$  系の氷などの、いわゆる“電解質氷”へ変質すると予測される (e.g. Vitorino et al., 2024)。これら電解質氷は、摂氏  $0^\circ\text{C}$  度よりはるかに低い融点を持つだけでなく、その融解した液体は組成に応じてアルカリから強酸性を示す。そこで我々は、 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  系から成る電解質氷に着目し、その融解液体が岩石微粒子の水和反応に対する役割を理論的に検証した (Hashimoto and



Nakano 2023)。本稿では、現在進める  $\text{NH}_4^+ - \text{HS}^- - \text{H}_2\text{O}$  系電解質溶液による低温環境下での鉱物水和反応実験とそれに関わる装置を紹介する（図 1 と 2）。

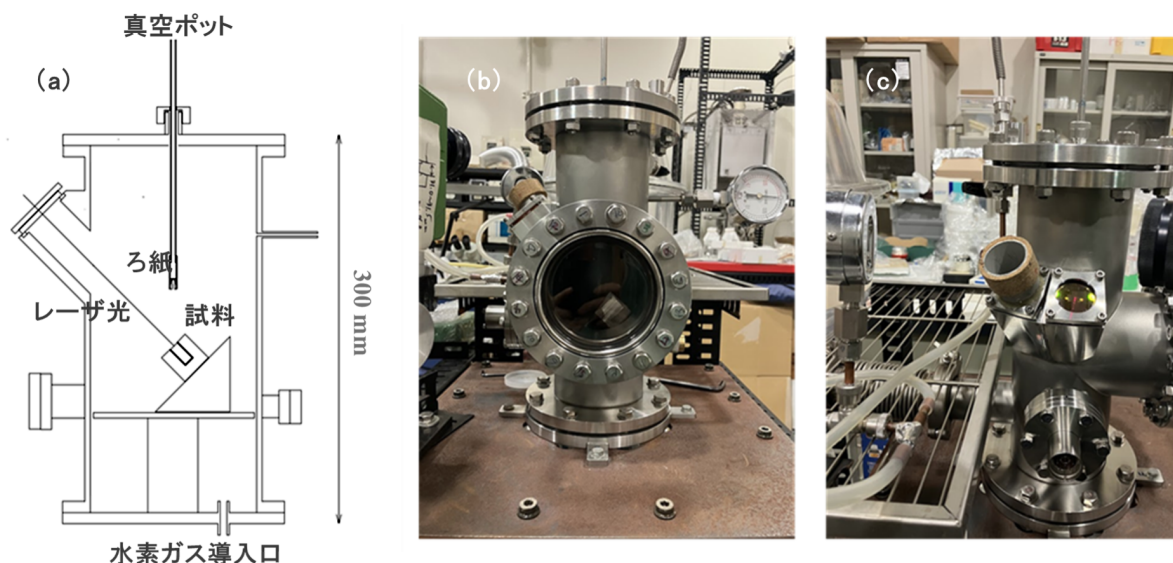


図 1 (a) 蒸発凝縮実験装置の概観図。(b) チャンバー正面中央からの外観写真。レーザー照射中の試料は正面窓から肉眼で観察することが出来る。(c) レーザ光導入側からのチャンバー外観。向かって右側ポートからレーザー光を導入し、左側ポート上部に設置するプリズムを介して試料加熱部の温度を放射温度計で測定できる。

## 電解質溶液による岩石水和反応実験の概要

星間空間に観測される  $\text{NH}_3$  氷と  $\text{H}_2\text{S}$  氷が反応すると  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  氷を生成する可能性がある。本研究では  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  氷と  $\text{H}_2\text{O}$  氷から成る氷系の融解液を反応媒体と想定し、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  と  $\text{H}_2\text{O}$  を任意の割合で混合した溶液を実験に用いる。星間岩石微粒子の模擬物質として、岩石凝縮粒子（後述）と金属鉄粉末を混合した試料を出発物質として用いる。 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  と  $\text{H}_2\text{O}$  の反応媒体による出発物質の水和反応においては、CM タイプと呼ばれるコンドライト隕石に一般的に含まれる水和鉱物、*tochilinite* – *cronstedtite* 鉱物体（ナノスケールで互層をなす包有物）の生成が予測される。それぞれの鉱物組成を下記に示す。

*Tochilinite* :  $2\text{Fe}_{1-x}\text{S} \cdot n(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Ca})(\text{OH})_2$ ,  $0.08 < x < 0.28$ ,  $1.58 < n < 1.75$

*Cronstedtite* :  $(\text{Fe}^{2+}_{3-x}\text{Fe}^{3+}_x)(\text{Si}_{2-x}\text{Fe}^{3+}_x)\text{O}_5(\text{OH})_4$ ,  $0 < x < 0.84$

これら鉱物が低温環境で形成されうるのか、またその生成条件を実験的に検証する。

実験は次の手順で行う。

1. 出発物質は、蒸発凝縮実験装置（図 1）を用いて合成する岩石凝縮粒子と金属鉄粉末試薬を混合して調製する。
2. 低温恒温槽（図 2）を用いて、出発物質とマイクロチューブに封入する  $(\text{NH}_4)_2\text{S} - \text{H}_2\text{O}$  混合溶液（1 ml）を一定温度（ $-20$  or  $-30$  °C）まで冷やす。

3.  $(\text{NH}_4)_2\text{S} - \text{H}_2\text{O}$  混合溶液に出発物質を投入し一定時間（1 日以上）反応させる（ $-20$  or  $-30$  °C 環境）。
4. マイクロチューブから水溶液を  $0.5\ \mu\text{l}$  回収し、透過型電子顕微鏡の観察用 Pt-grid 上に滴下する（ $-20$  or  $-30$  °C 環境）。
5. Pt-grid を真空引きし、揮発成分を取り除く（ $-20$  or  $-30$  °C 環境）。
6. Pt-grid を低温恒温槽から回収する（常温環境）。
7. Pt-grid 上の蒸発残差を透過型電子顕微鏡で観察する。
8. 蒸発残差の結晶構造および化学組成から析出鉱物を同定する。
9. 得られた鉱物を CM コンドライト隕石中の tochilinite – cronstedtite と比較し、生成条件を検証する。

## 出発物質

出発物質の岩石微粒子は、蒸発凝縮実験装置（図 1）を用いて次の手順で作製する。チャンパー内にかんらん石片を設置し、チャンパー内雰囲気は大気から水素 1 atm に置換する。 $\text{CO}_2$  レーザ光（波長  $10.6\ \mu\text{m}$ 、出力 200 W）をかんらん石片に照射して加熱（凡そ  $3000$  °C）すると、かんらん石表面から岩石蒸気が発生し、それが周囲の常温水素ガス（平均自由行程は凡そ  $100\ \text{nm}$ ）により急冷される。その結果、岩石蒸気が微粒子として凝縮される。レーザ照射後、チャンパー内を漂う凝縮かんらん石微粒子をチャンパー上部蓋に仕掛ける濾紙上に吸引して回収する。得られたかんらん石微粒子を透過型電子顕微鏡で観察すると直径は  $10\text{--}80\ \text{nm}$  であった。この微粒子と金属鉄粒子試薬（ $20\text{--}30\ \text{nm}$ ）の混合物を出発物質とする。

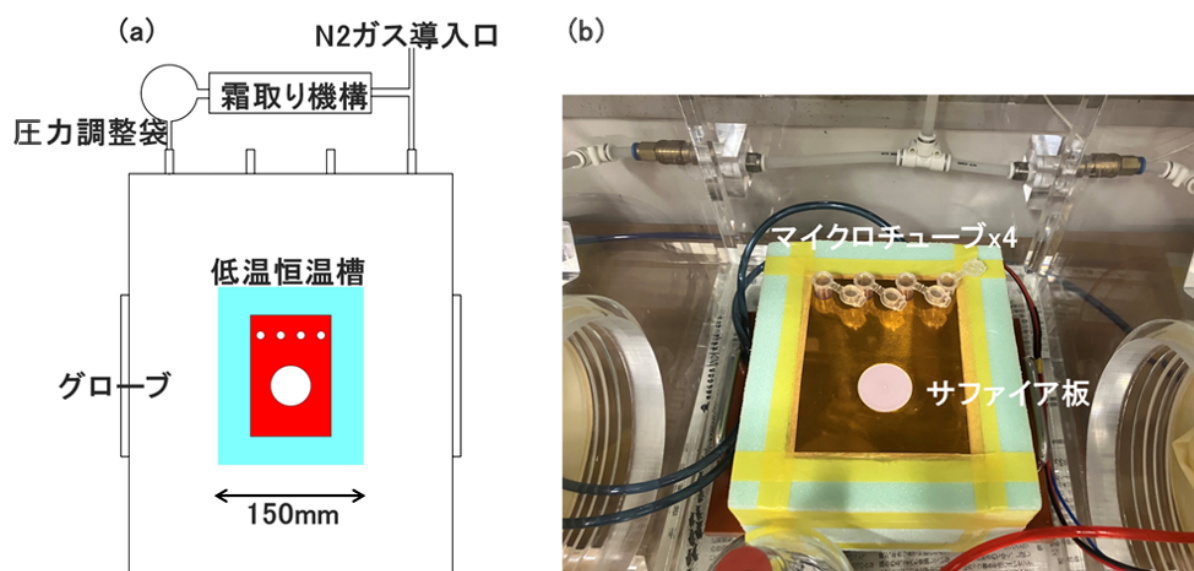


図 2 (a) 低温恒温槽装置の概観図。(b) 低温恒温槽の写真。本装置は上下 2 層構造の銅ブロックから成り、その間に配置した 5 つのペルチェ素子によって冷却を行う。銅ブロック温度はサファイア板直下の設置した熱電対によって測定され、その測定値が温度調節器の設定温度と一致するようにコントロールされる。

## 反応媒体

反応媒体は市販の  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  溶液と純水の混合溶液（混合比率は 1:1）を用いる。なお、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}-\text{H}_2\text{O}$  系の相図は既存の報告がないので、低温恒温槽（図 2）を用いて現在製作を進めている。

## おわりに

現在、 $-30^\circ\text{C}$  条件で出発物質の水和反応実験を進行中である。常温下で行った先行実験“微細オリビン粒子と金属鉄粒子からなる出発物質を  $(\text{NH}_4)_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$  混合溶液に暴露した実験”では、反応開始から 7 日程度で **Tochilinite** および **Cronstedtite** 鉱物がオリビン粒子と金属鉄粒子表面に晶出することを確認している。この先行実験条件と比較すると、今回の実験条件は、反応場の温度 ( $-20$  or  $-30^\circ\text{C}$ ) が著しく低いため水和反応速度が大幅に低下すると予測される。その一方、使用する出発物質の粒子径が  $1/100$  に縮小したことによる表面積増大 ( $10^6$  倍) の効果により水和反応を促進することが考えられる。今後、異なる実験条件で岩石微粒子の水和反応の検証を進め、その反応に関与する要素を定量的に評価していく予定である。

## 謝辞

水和反応実験装置の開発にあたり、北海道大学低温科学研究所技術部装置開発室の皆様から多くのご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- Hashimoto A., and Nakano Y., 2023, Sulfuric acid as a corrosive cryofluid and oxygen isotope reservoir in planetesimals. *Icarus*, 398, 115535.
- Vitorino J., Loison, J-C., Wakelam V., Congiu E., and Dulien F., 2024, Sulphur storage in cold molecular clouds: the case of the  $\text{NH}_4^+\text{SH}^-$  salt on interstellar dust grains. *MNRAS*, 533, 52.
- Wakita S., and Sekiya M., 2011, Thermal evolution of icy planetesimals in the solar nebula. *Earth Planet Sp.*, 63, 113–1206.
- Williams J. P., and Cieza L. A., 2011, Protoplanetary disks and their evolution. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 49, 67–117.

# 南極・ドームふじにおける試薬実験のための装置製作

松本 真依<sup>1,2</sup>、斎藤 史明<sup>3</sup>、森 章一<sup>3</sup>、飯塚 芳徳<sup>2</sup>

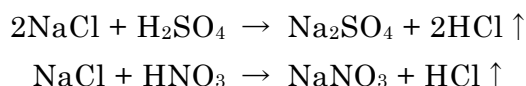
1. 環境科学院雪氷・寒冷圏科学コース
2. 雪氷新領域部門雪氷古環境分野
3. 技術部装置開発室

## 1. はじめに

大気中には、液体または固体の微粒子（エアロゾル）が浮遊している。寒冷域においてこれらのエアロゾルは、積雪へ取り込まれ保存される。寒冷域で氷河や氷床を掘削することで得られるアイスコア中の不純物の主成分は過去のエアロゾルであり、アイスコア中の不純物は過去のエアロゾルの輸送過程やそのときの環境を復元するプロキシとして用いられている。

エアロゾルの起源は、大きく分けて自然起源と人為起源の二つに分類される。特に、自然起源のエアロゾルには、NaCl（海塩）や CaSO<sub>4</sub>（大陸起源）、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>（海洋生物や火山噴出物起源）などがある。一方、氷期・間氷スケールで古環境復元が可能な南極・ドームふじアイスコア中の水溶性の不純物は、完新世（最終氷期終了～現在）で Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O、MgSO<sub>4</sub>·11H<sub>2</sub>O が多く見つかっており（Sakurai et al., 2011）、過去 25.0 – 11.0 千年前（最終氷期から間氷期への移行期）の主成分は CaSO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaCl である（Oyabu et al., 2014）。複数の氷期・間氷期の微粒子の化学組成は、氷期で Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> > CaSO<sub>4</sub> > NaNO<sub>3</sub>、間氷期で CaSO<sub>4</sub> > NaNO<sub>3</sub> > Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> の順で多い（長谷川 2020）。

このような化合物の中で、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> や NaNO<sub>3</sub> といったナトリウム塩は、海塩が海洋生物（プランクトンなど）の活動によって放出される硫化ジメチル由来の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> や、主に成層圏で生成される HNO<sub>3</sub> が反応することによって生成される。



南極・ドームふじ地域で検出される海洋または海氷表面から大気中へ放出された直後の海塩は、氷床表面上に堆積した後 1 年以内に約 90 % が輸送や沈着の過程により硫酸塩化していたと報告されている（Iizuka et al., 2012）。しかしながら、こういった氷の中での不純物の化学形態は知られているものの、海塩の硝酸塩・硫酸塩化がどの時期にどの程度生じているか明らかになっていない。そこで本研究では、南極・ドームふじ基地とドームふじ観測拠点Ⅱにおいて、夏季の海塩の変質（硝酸塩・硫酸塩化）を定量的に調べるため、ドームふじに滞在中に NaCl、NaNO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> の試薬を大気に暴露し、大気中の硝酸や硫酸による変質量を計測するための装置を開発した。

## 2. 手法

### 2.1. 架台の製作

本研究のために製作した金属製の架台は、縦 600 mm、横 800 mm、高さ 91 mm、重さ 10.2 kg である（図 1）。この架台は、縦 3 個、横 4 個の計 12 個のガラスシャーレを、金属板で挟み込むことで固定できる。ガラスシャーレの径と同等のサイズで凹みをつけた架台にガラスシャーレをはめ込み、その上から、ガラスシャーレの径より数 mm 小さい穴をあけた金属板を載せ、蝶ネジで固定する。金属板は、縦 3 個、横 2 個のガラスシャーレに対応する穴を持つため、一度に複数のガラスシャーレを固定できる。このような工夫により、限られた設置時間かつ手袋を付けた状態でもスムーズな作業が可能である。

さらに、すでにドームふじ基地の雪面上に設置してあるアングルの上に架台を設置する必要があった。しかしながら、アングルのサイズや形状など、不明確な点が多いという課題があった。そこで、アングルの上に現地で借りることができる合板を設置し（図 2 と 3）、その上に架台を固定することで、アングルのサイズの変化や傾きにも対応できるようにした。アングルと合板の結合には番線、合板と架台の結合にはボルトを使用した。



図 1 製作した架台。



図 2 現地での作業を想定した、アングルと合板の取り付け訓練の様子。



図 3 現地での作業を想定した、架台の組み上げ訓練の様子。

### 2.2. 試薬の作製

クリーン実験用ブースにおいて、超音波洗浄した硼珪酸ガラス製シャーレ（ $\Phi 100 \times 17(\text{mm})$ ; BOROSIL(R)）に、それぞれ濃度 1% (w) の水溶液（NaCl、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ）をピペットで 1000  $\mu\text{L}$  ずつ入れた。その後、シャーレを 90  $^{\circ}\text{C}$  の実験用ホットプレート（HOT PLATE HHP-250D）で温め（図 4）、水溶液の溶媒を蒸発させ、溶質がシャーレの大部分に付着した状態を作成した（図 5）。



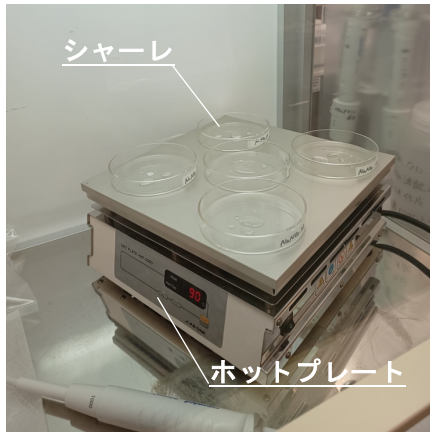


図 4 シャーレの加熱風景。



図 5 溶質を付着させたシャーレ。画像中央の白い部分が試薬 (NaCl)。

### 3. 結果

#### 3.1 ドームふじ基地での架台の運用

南極・ドームふじ基地において、2024 年 12 月 11 日 – 2025 年 1 月 7 日の期間、試薬を大気に接触させた (図 6 と 7)。シャーレは、それぞれの試薬でコンタミチェック用と実験用を作成した。さらに実験用は、対照実験を行うため、open (外気にさらす)、close (外気のみ遮る；シャーレに蓋をしたもの)、close & AF (外気と日射を遮る；シャーレに蓋をし、アルミ箔を巻いたもの) の 3 種を作成した。実験に使用したシャーレは、 $-18.7^{\circ}\text{C}$  以下を保った状態で低温科学研究所の低温室へ持ち帰った。その後、積雪に由来する余分な水分を昇華させたのち、試料の一部を剥離し、金属板上に載せた。試料を載せた金属板を、走査型電子顕微鏡 (Flex SEM 1000 II；HITACHI) およびエネルギー分散型 X 線分析装置 (Aztec live；OXFORD) を使用して、観察した。観察には、1 測定あたり 1 分間程度の電子ビーム (加速電圧 20 keV) を照射し、試料の元素の種類および重量比 (%) を分析した。

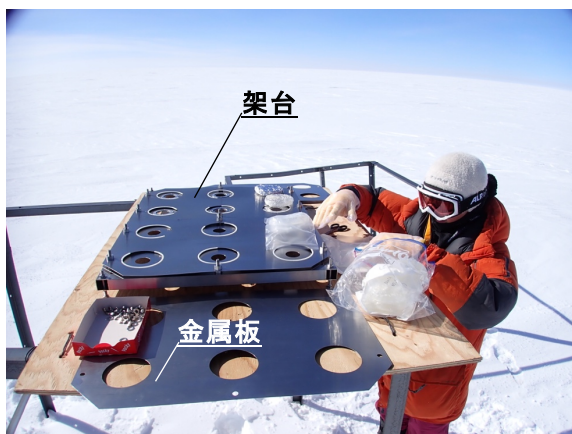


図 6 設置風景。



図 7 設置後のシャーレの様子。

### 3.2 電子顕微鏡による元素組成分析

コンタミチェック用シャーレの電子画像（図 8）、元素分布画像（図 9 と 10）を示す。すべての視野において Na や Cl が観察され、S や N が検出されなかった。南極・ドームふじ基地で実測定したシャーレは現在分析中であり、第 31 回低温科学研究所技術部技術報告会で分析結果を報告する予定である。

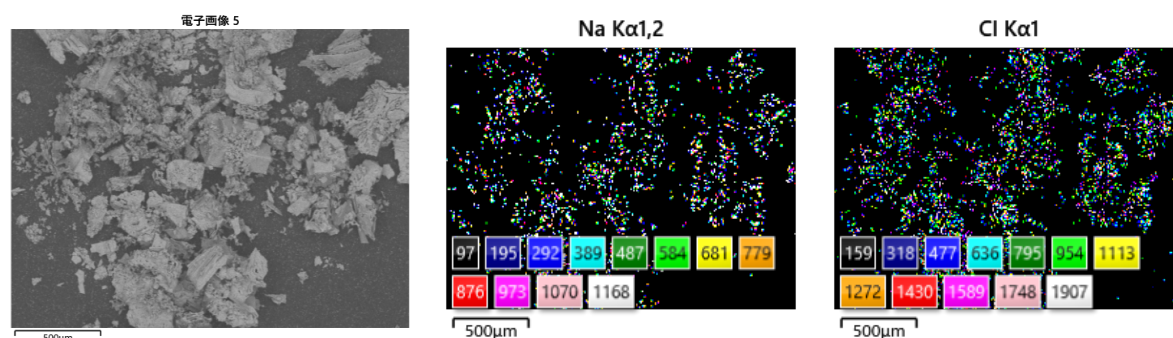


図 8 NaCl シャーレの電子顕微鏡画像。

図 9 図 8 の元素分布画像 (Na)。

図 10 図 8 の元素分布画像 (Cl)。

### 謝辞

This study is a part of the Science Program of Japanese Antarctic Research Expedition (JARE). It was supported by National Institute of Polar Research (NIPR) under MEXT.

### 参考文献

- Iizuka, Y., A. Tsuchimoto, Y. Hoshina, T. Sakurai, M. Hansson, T. Karlin, K. Fujita, F. Nakazawa, H. Motoyama, and S. Fujita (2012), The rates of sea salt sulfatization in the atmosphere and surface snow of inland Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 117, D04308, doi:10.1029/2011JD016378.
- Oyabu, I., Y. Iizuka, R. Uemura, T. Miyake, M. Hirabayashi, H. Motoyama, T. Sakurai, T. Suzuki, and T. Hondoh (2014), Chemical compositions of sulfate and chloride salts over the last termination reconstructed from the Dome Fuji ice core, inland Antarctica, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 14,045–14,058, doi:10.1002/2014JD022030.
- Sakurai T., H. Ohno, S. Horikawa, Y. Iizuka, T. Uchida, K. Hirakawa, and T. Hondoh (2011), The chemical forms of water-soluble microparticles preserved in the Antarctic ice sheet during Termination I. *Journal of Glaciology*, 57 (206), 1027–1032, doi:10.3189/002214311798843403.
- 長谷川大輔 (2020), 南極ドームふじアイスコアに含まれる過去 72 万年間の微粒子の化学形態分析, 2019 年度修士論文.

## 第三期南極ドームふじ深層掘削報告と掘削機の改良

的場 澄人<sup>1</sup>、森 章一<sup>2</sup>、平田 康史<sup>2</sup>、斎藤 史明<sup>2</sup>、佐藤 陽亮<sup>2</sup>、古崎 睦<sup>3</sup>、川村 賢二<sup>4</sup>

1. 環オホーツク観測研究センター
2. 技術部装置開発室
3. 旭川工業高等専門学校物質化学工学科
4. 国立極地研究所気水圏研究グループ

### 背景

アイスコア研究の国際的組織である IPICS (International Partnership in Ice Core Science) は、現在、国際的なプロジェクトにより優先的に取り組むべき 5 つの課題の 1 つとして、150 万年間の気候と温室効果ガスの変動を復元する「Oldest Ice」を提唱している。その目的は、氷期―間氷期の繰り返しの周期が 4 万年から 10 万年に変化した 100 万年前に着目し、その実態とメカニズムの解明することである。

日本の南極地域観測隊は、2003 – 2007 年に、第二期南極氷床ドームふじ計画において 3000 m のアイスコアを取得に成功し、約 72 万年間の環境変動が復元された。さらに、2022 年度からは、南極地域観測第 X 期 6 カ年計画において、第三期南極氷床ドームふじ計画がスタートした。100 万年を越える期間の復元が可能なアイスコアが採取される新たな掘削地点を決定し、2023 / 24 シーズンに深層掘削のための拠点建設とパイロット孔の掘削を行い、2024 / 25 年シーズンから深層掘削が本格的に開始した。

低温科学研究所は、アイスコア研究の黎明期である 1970 年代から掘削機の開発と製作、アイスコア掘削の実施とアイスコア解析を行い、日本および世界のアイスコア研究を牽引してきた。南極氷床ドームふじの深層掘削では、第一期 (1995 – 1998 年)、第二期 (2003 – 2007 年) 計画において、掘削機の開発と改良、基地建設、アイスコア掘削 / 解析のための隊員派遣、採取したアイスコアの解析などを通し、中心的な役割の一つを担ってきた。第三期計画においては、掘削システムの基幹部である電装システムの開発と改良を担っている。

### 2024 / 25 シーズンの深層掘削に向けた改良

アイスコア深層掘削機の特徴の一つは、3000 m を越える長いケーブルを使って掘削することである。掘削時には、3000 m ケーブルの先で稼働している掘削機の挙動を把握し、ケーブルの繰り出し速度、掘削機の刃の角度、切削速度、氷に対する刃の接地圧など最適な条件に調整する必要があるが、掘削機に取り付けた様々なセンサーを用いて掘削機の挙動を把握する。掘削機に取り付けられたセンサーで計測された信号は 3000 m 以上のケーブルを通して地上の PC に送る必要があるが、長距離を微弱な電力で送信することは難しくこれまでの掘削システムにおいても信号の電装システムに関わるトラブルが大きな問題となることが多かった。もう一つの特徴は液封掘削である。氷床の深部では氷の圧力



が高く、掘削孔が収縮する。それを防ぐため掘削孔を氷の密度と同程度の液体を満たし、その中で掘削を行う。日本の南極氷床掘削では液封液に有機溶剤でもある酢酸ブチルが用いられている。掘削機のモーターや制御する回路基板は 3000 m 深の液体の中で液封液に触れないよう耐圧密閉容器内に設置する必要があるが、耐圧性に加え酢酸ブチルに対する耐薬性が必要である。利用できる体積が限られている耐圧容器内に、いくつかの回路基板が結線されて置かれており、回路基板の出し入れなどの作業による断線や液封液の侵入のトラブルがこれまで報告されている。第三期深層掘削に向け低温科学研究所では、耐圧室に回路基板を固定する台のデザインと製作、掘削機のセンサー部とデジタル信号変換システムの製作、電装システムの改良を担当し（森ほか、2024）、改良を施した掘削機は 2024/25 年シーズンに使用された。

## 2024 / 25 シーズンの深層掘削の報告とトラブル

2024/25 年シーズンの深層掘削は、2024 年 12 月 13 日から 2025 年 1 月 5 日までドームふじ観測拠点 II にて行われた。実働日数 21 日間で、167 回の掘削ラン、8 回のチップ回収ラン、異物回収ランを行い、415.56 m のアイスコアを採取し、最終掘削深度は 541.76 m だった。日平均掘削長は 19.79 m/day であり、第 2 期深層掘削時 (12.68 m/day) と比較して、速く掘削が進んでいることが分かる。低温科学研究所が担当した電装システムは、耐圧容器内の回路の入れ替えも断線するなどなく、大きなトラブルなくスムーズに行われた。

今シーズンに生じた掘削のトラブルの一つは、掘削孔内でドリルを回転させても刃が氷の上で滑って切削しない現象だった。この現象が解消された後に採取されたアイスコアの様子を図 1 に示す。小さい氷のかげらが採取されているのがわかる。切削が終了したときに、なんらかの原因でアイスコアの一部が砕け掘削孔に落ちてしまうと、次のラン時に小片がドリルと孔底の間で回転し、切削を妨げてしまうことがある。今回、このようなトラブルが多発した。多発した原因は、キャッチャーの摩耗やバネの調整不足によってコアブレイクが充分でなく、アイスコアがドリルから飛び出した状態で回収され、引き上げる途中でアイスコアが破損したことが可能性の一つとして考えられる。

このトラブルが生じたときの課題は、掘削機の挙動だけでこのトラブルが生じているか否かの判断がつかないことと、解消のためには掘削機を回転させ続けて氷片が小さく削られ、偶然バレルの中央におさまるしか方法がないことである。そこで、これらのトラブルに対処するため、低温科学研究所は (1) 掘削孔内で生じていることを把握するため掘削孔底を撮影する装置（ボアホールカメラ）と (2) アイスコアの小片を回収する装置の開発を担った。



図1 アイスコアの小片が回収された様子

## ボアホールカメラと氷片回収装置の概要

ボアホールカメラに求められた仕様は、リアルタイムで孔底の映像が地上で見られること、現有のウィンチシステムに搭載が可能であること、3000 m の水圧に耐えられること、酢酸ブチル溶液に対する耐性があること、 $-50^{\circ}\text{C}$  で作動することである。これらの仕様を充たす、カメラを内蔵できる耐圧容器と現有のウィンチで利用できる画像電装システムの設計と製作を行った。氷片回収装置に求められた仕様は、現有の掘削機に搭載が可能であること、孔底撮影装置と併用して使用出来ること、 $-50^{\circ}\text{C}$  で使用出来ることである。これらの製作の詳細は森ほか(2025a と 2025b) を参照していただきたい。

今回開発した電装システムでは、伝送速度 38,400 bps を達成した。このシステムを発展させれば双方向通信も可能となり、地上から掘削機を制御することが可能となる。現在、掘削孔を途中から枝分かれさせて 2 本目のアイスコアを掘削するシステムの開発が日本を含めて各国によって取り組まれているが、今回の掘削機に関わる開発の取り組みは、今後の開発に向けた重要な成果といえる。

## 参考文献

- 森 章一、佐藤 陽亮、的場 澄人「第三期南極氷床深層掘削機の電装システムの開発」、2024、北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**30**、23–28。
- 森 章一、佐藤 陽亮、斎藤 史明、平田 康史、千貝 健、的場 澄人「ボアホールカメラの制御と画像データ伝送」、2025a、北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**31**、13–19。
- 森 章一、佐藤 陽亮、斎藤 史明、平田 康史、的場 澄人、小林 一誠「ボアホールカメラと氷片回収装置の製作」、2025b、北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**31**、20–25。

# ボアホールカメラの制御と画像データ伝送

森 章一<sup>1</sup>、佐藤 陽亮<sup>1</sup>、斎藤 史明<sup>1</sup>、平田 康史<sup>1</sup>、千貝 健<sup>2</sup>、的場 澄人<sup>3</sup>

1. 技術部装置開発室
2. 技術部先端技術支援室
3. 環オホーツク観測研究センター

## はじめに

現在南極ドーム富士基地にて進められている南極氷床深層掘削プロジェクトでは、全長 12.2m の掘削ドリルをウインチに巻かれた 3,500m のアーマードケーブルで吊り下しながら氷床を掘進する。掘削現場では掘削員がモーター回転数や接地荷重などを注視しながらウインチとモーター電圧を手動コントロールしている。掘削作業を進めるには、氷床深く掘進するドリルの状態をリアルタイムで地上に伝送するシステムが欠かせない。使用している通信システムは、通信速度 1,200 bps の単方向（ドリル → 地上コントロール PC）でドリルの計測データを伝送している。以前よりこの計測・通信システムに加え、掘削孔内を撮影するカメラシステムが求められてきた。そこで、今年度当技術部でドリル先端部に取り付けて自動撮影するボアホールカメラおよび撮影画像をリアルタイムモニタできる通信システムの開発を行った。

## 装置概要

図 1 に概略図を示す。ボアホールカメラはカメラ用耐圧室に入れ、掘削ドリル先端部に取り付けられる。カメラはナイロンコネクタを介してドリル PC と接続され、画像データを送る。ドリル PC 内に変調送信基板を追加し、画像データのシリアル信号を長距離通信用に変調する。変調送信基板は、スリップリングを介してアーマードケーブル内の通信線に接続される。地上でウインチに巻かれたアーマードケーブル末端から引き出された通信線は、受信復調基板に接続され、復調回路でシリアル信号が復元される。受信復調基板は USB で掘削コントロール PC と接続される。掘削孔の計測データを送るモデム通信と、画像データ用の高速通信は同時に使用できないため、モード切替回路をドリル PC に追加した。製作したシステムは、カメラや照明 LEDなどを合わせると約 200 mA の消費電流があり、電力不足を補うため、ドリル PC 内に増設バッテリー基板を追加した。

## 動作概要

動作は以下の順に行われる。

1. モード切替回路によって画像データを送信する準備が整うと、ボアホールカメラで撮影された画像データは TTL レベルのシリアル信号でドリル PC に送られる。

# <画像通信システム>

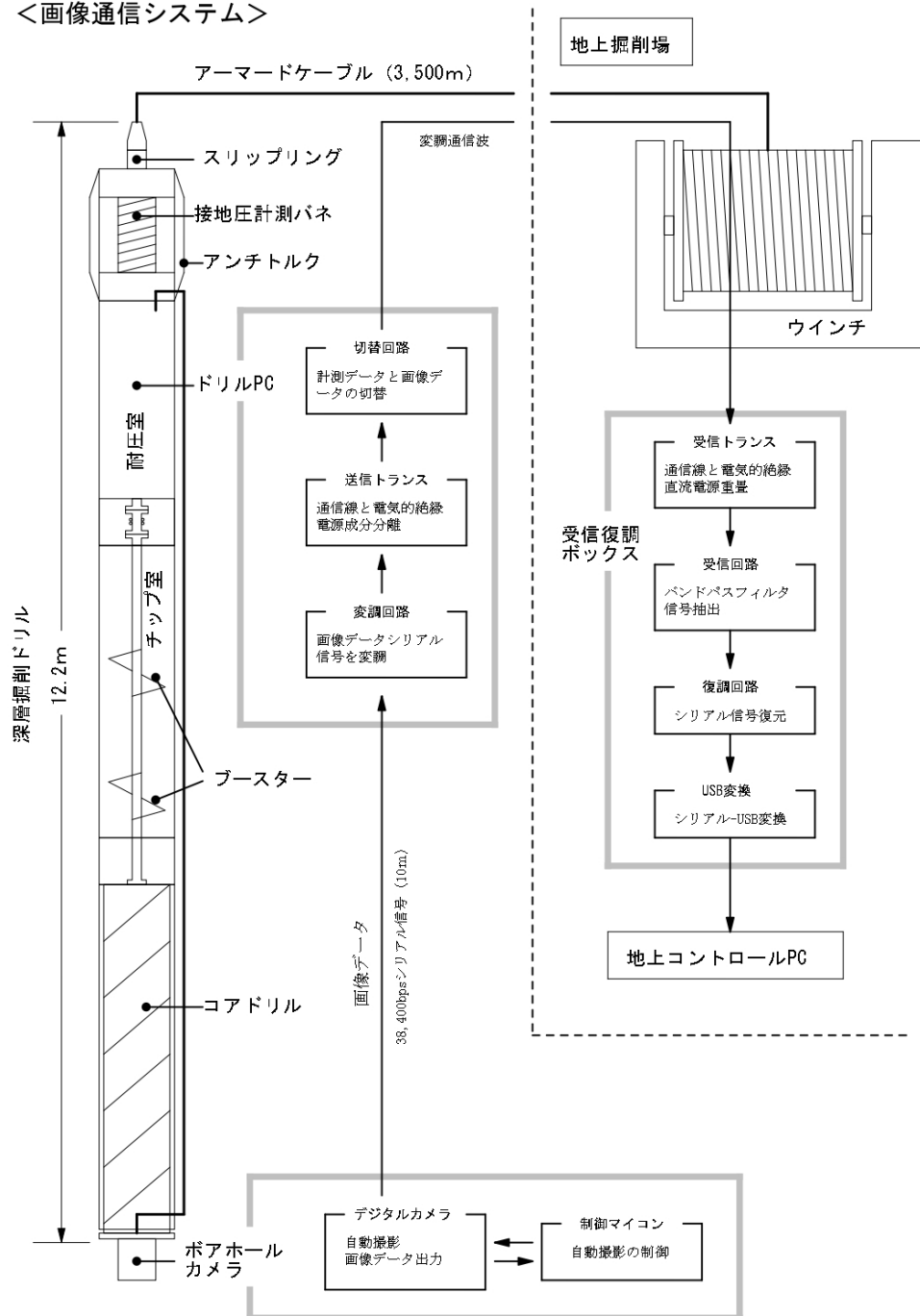


図 1 装置概略図。

- ドリル PC の変調送信基板が画像データのシリアル信号を変調・増幅させ、絶縁トランスを介して通信線に乗せる。
- 地上でアーマードケーブルの通信線から絶縁トランスを介して変調信号を受信し、バンドパスフィルタをかけて変調信号を抽出する。
- 変調信号を増幅、復調してシリアルデータとして正規化し、シリアル－USB 変換器を経て掘削コントロール PC で処理され、画像として表示する。

## モード切替回路

掘削ドリルの計測システムは、2本の通信線に重畳させた直流電圧を電源として稼働している。電圧は通常 100V 前後で運用しているが、80–160V でも問題ない。この直流電源電圧を変化させることで伝送データを通常計測データからカメラの画像データへの切り替え、およびマイコンリセットを行う回路を製作した。回路は基準電圧、分圧抵抗、コンパレータ、および論理回路で構成した。回路図を図 2、基板外観を図 3 に示す。

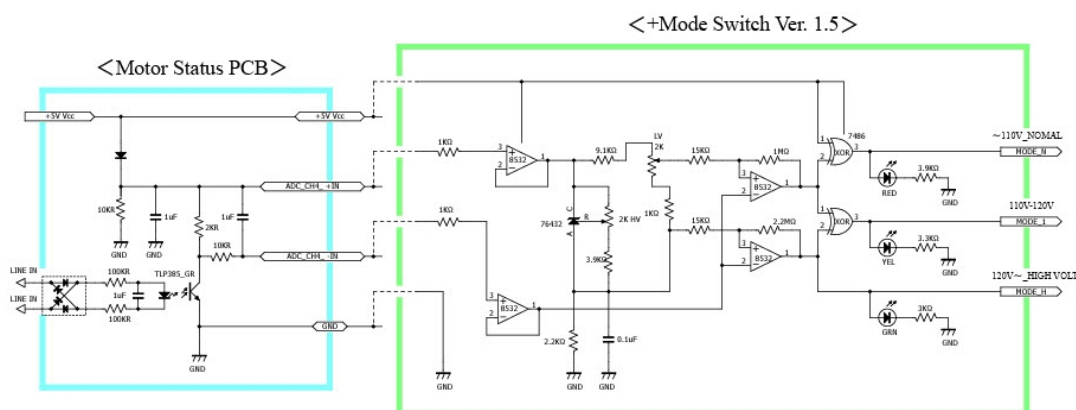


図2 モード切替回路回路図。

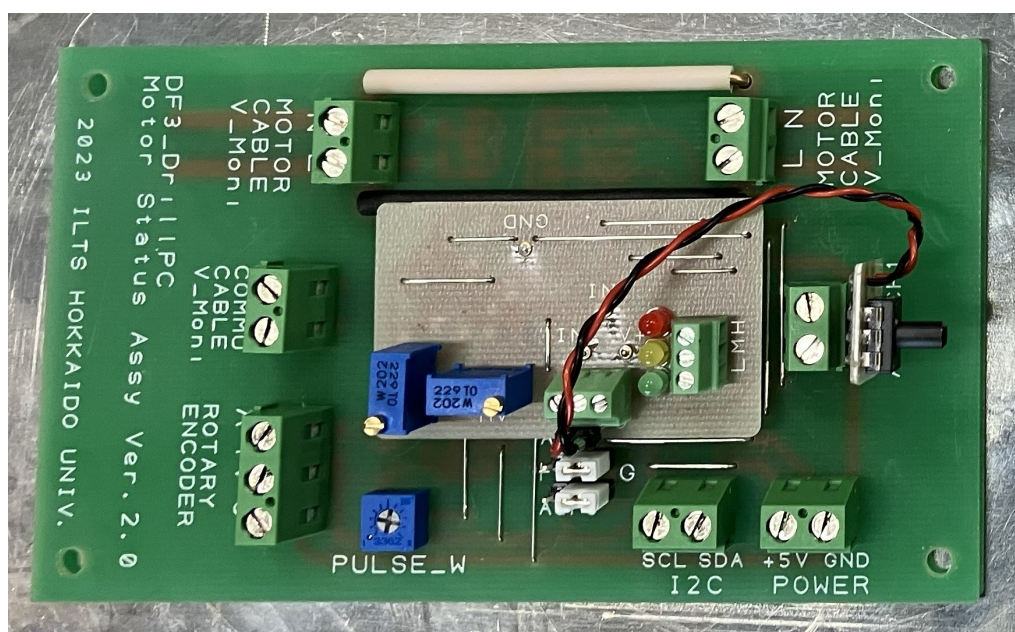


図3 モード切替基板外観。

## 自動撮影カメラ

今回採用した PTC08 カメラは、JPEG 画像データを 5V シリアル信号で出力するデジタルカメラである。ホスト側から指定コマンドを送ることで撮影するほか、画像サイズや通信速度、JPG 画像の圧縮率なども指定できる。カメラ制御マイコンの動作は以下のようなアルゴリズムを考案し、マイコンにプログラムした。



1. 電源投入またはマイコンリセット後、画像サイズ、通信速度などを指定するセットアップコマンドをカメラに送る。
2. 撮影、データ保存などのコマンドを送り、続いて画像を指定してデータ呼び出しコマンドを送ると、カメラ内メモリに保存された指定画像データが出力される。画像データはドリル PC 内の変調送信基板を通して送られる。
3. 画像データはマイコンの内部メモリに流れ込むが、画像のデータサイズは大きく、マイコン内メモリに納まらないため、マイコンは内部メモリのオーバーフローを検知する。
4. 10 秒ほどでカメラ内メモリの指定画像データが全て出力され、マイコンへのデータ流れ込みが止まると、メモリのオーバーフローは検知されなくなり、これをトリガに次の撮影が始まる。
5. 電源消失またはマイコンリセットされるまで 2-4 までの動作を繰り返す。

カメラ制御マイコンとカメラ間のコマンド送受信や、出力画像データのシリアル信号は全てボーレート 38,400 bps である。また、動作テスト時に撮影画像を確認できるように、PC に出力データを取り込み、JPEG 画像データ部分を切り出してファイル保存するテスト用プログラムも構築した。

今回は耐圧カメラケース内にカメラ本体とカメラ制御用マイコン基板を組み込み、カメラレンズ周囲に照明用として白色チップ LED を 8 個取り付けた (図 4)。カメラからの出力データは 2 分岐させ、一方を制御マイコンに、もう一方を変調送信基板に送る。

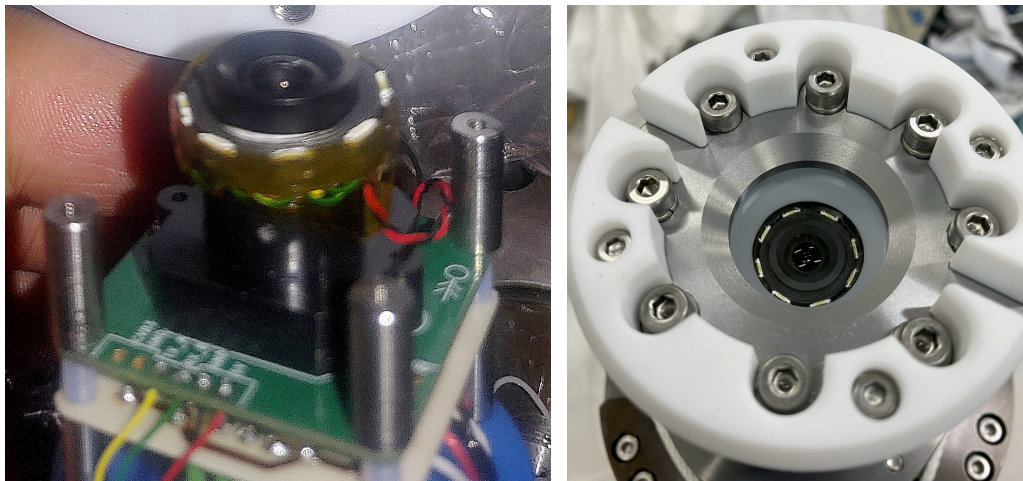


図 4 カメラとカメラ制御マイコン。

製作したボアホールカメラの撮影実験を行った結果、照明用 LED の光が耐圧室のガラス窓で反射して画像に写り込む (図 5)。これは耐圧ガラス窓 (ホウ珪酸ガラス) と掘削孔内の液封液 (酢酸ブチル) との屈折率の差による反射光であった。この反射光については掘削隊メンバーとも検討し、掘削孔の状態は十分に確認できるので問題ないとの見解を得た。

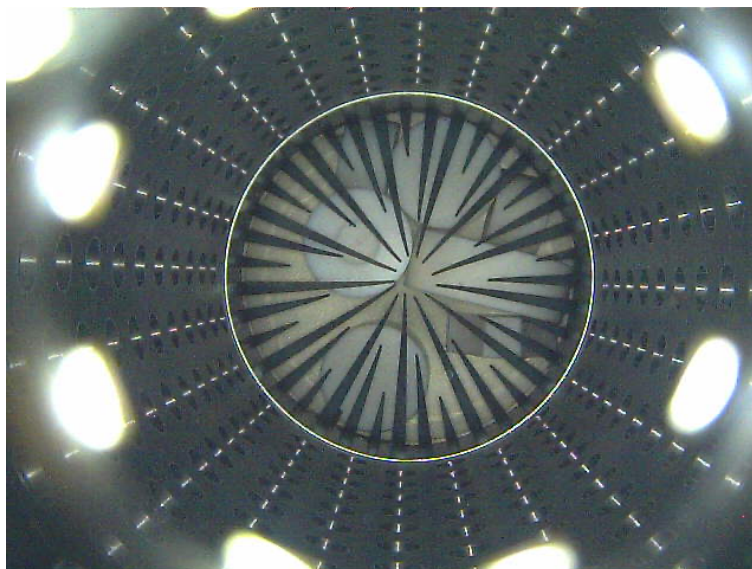


図 5 酢酸ブチル内での撮影画像。

### 38,400 bps 送受信回路

シリアル信号をそのまま長距離伝送させると、信号矩形波が大きく歪むために通信速度や距離が伸ばせない。長距離通信規格である RS485 を使用しても 1,200 m が規格上の最長通信距離である。このため、長距離通信が必要な場合はデータを搬送波に乗せて（変調して）伝送する。変調には多くの方式があるが、周波数の高い搬送波は伝送距離によって大きく減衰するため、やはり通信距離と通信速度はトレードオフの関係にある。

図 6 にアーマードケーブルの構造を示す。深層掘削ドリルを吊り下げるアーマードケーブルは AWG22 相当（導体直径 0.76 mm）のテフロン被覆電線が 7 本内包されており、このうち 2 本を通信線に使用する。このアーマードケーブルの周波数特性を測定した結果を図 7 に示す。伝送できる周波数の上限は 50 KHz 程度であり、それ以上の周波数では減衰が大きく、殆ど途中で消失してしまう。

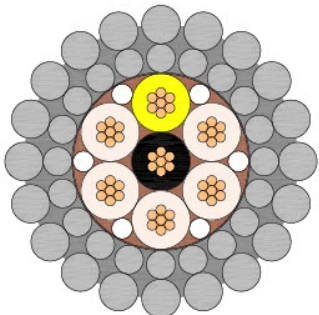
Description	Controlled Customer Copy	Part No.	Revision	Issue	Date
Wireline Cable	Rochester Cable	A276313	E		11 Jan 2022
<b>DESCRIPTION</b>	<b>INCH</b>	<b>MM</b>			
<b>CONDUCTORS (7)</b> #22 AWG, 7/0.010" (0.25 mm) Blocked Cu	0.030	0.76			
<b>INSULATION</b> 0.0135" (0.34 mm) Wall PFA Colors: Black, Yellow, 5x Natural	0.057	1.45			
<b>CORE</b> 6 insulated cdrs around 1 with fillers as necessary. Voids filled with free-stripping semi-conductive material. Semi-conductive tape over core.	0.171	4.34			
<b>ARMOR: Special GIPS</b> Inner: 20/0.0285" (0.72 mm) Outer: 20/0.038" (0.97 mm)	0.228 0.304 ± 0.003	5.79 7.72 ± 0.08			

図 6 アーマードケーブルの構造。

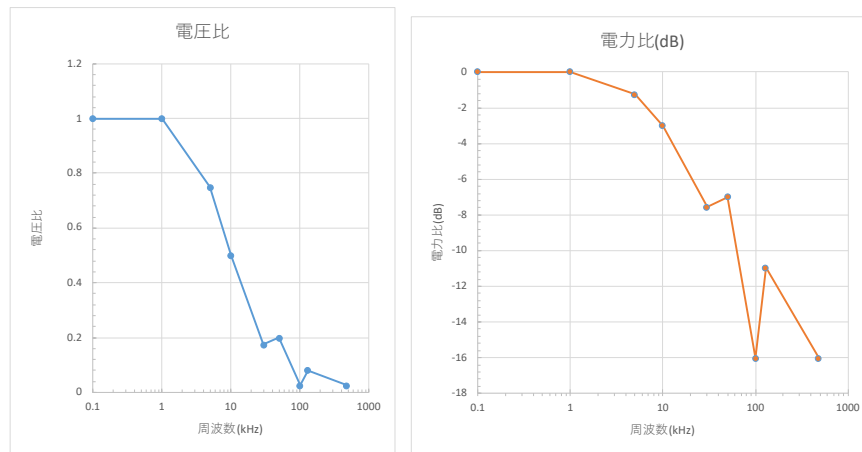


図 7 アーマードケーブルの周波数特性。

氷床深くからのデータ通信に無線通信は使えない。また、大きな荷重でウインチに巻かれ、変形を繰り返すアーマードケーブル内の通信線は、絶えず電気的特性が変動する不安定な通信線と言える。このため電気的特性が変化しても復調できるシンプルな変調方式が適している。現在深層掘削ドリルの計測データはモデム IC で周波数偏移変調 (FSK) し、2 KHz の搬送波に乗せてボーレート 1,200 bps で伝送している。通常のデジタル変調回路では搬送波の周波数は信号ボーレートより十分高い周波数としないと、復調時にジッタ (デジタル信号のタイミングの揺らぎ) が強く出てシリアル信号として読み取れなくなる。しかし、シリアル信号のビットタイミングと搬送波のゼロクロスタイミングを一致させればジッタをほぼ無くすことができ、単純な振幅偏移変調 (ASK) であっても搬送波周波数と同じボーレートのデータ伝送が可能になると考えた。この方法を試験するため、デジタル矩形波のエッジでトリガをかけ、ビット長毎に 1 サイクルの搬送波を発生させて通信線に乗せる回路を試作した。また、受信復調回路はバンドパスフィルタによる変調信号抽出後、変調波のピークをパルス化し、そのパルスから再度正規ビット長のシリアル信号を生成する復調回路としてジッタとタイミングエラーを軽減した。

図 8 に送信回路回路図、図 9 に受信回路回路図を示す。送信回路、受信回路の絶縁トランスは、コモンモードノイズの除去と回路のインピーダンス整合を担い、通信線に重畳させている計測システム稼働用電源成分の分離も容易にする。試作した送信回路、受信回路を国立極地研究所にて掘削用の 3,500 m のアーマードケーブルで試験したところ、38,400 bps の通信速度を得た。各電子回路基板は改良と試験を重ね、図 10 の基板を掘削ドリルに搭載した。製作した画像通信システムは、本年 12 月からドームふじ基地において氷床深層掘削に使用される予定である。

## 今後の展望

今回製作した 38,400 bps の送信・受信回路は、今後必要になると予想される双方向通信回路に応用できる。送信・受信回路を 1 つにまとめ、送受信の切替回路を施した回路基板を試作し、良好な結果を得た。今後改良を加え、安定した双方向通信ができる回路にしたい。



<DF3\_Transmitter\_38.4Kbps\_555\_485\_Ver.1.2>

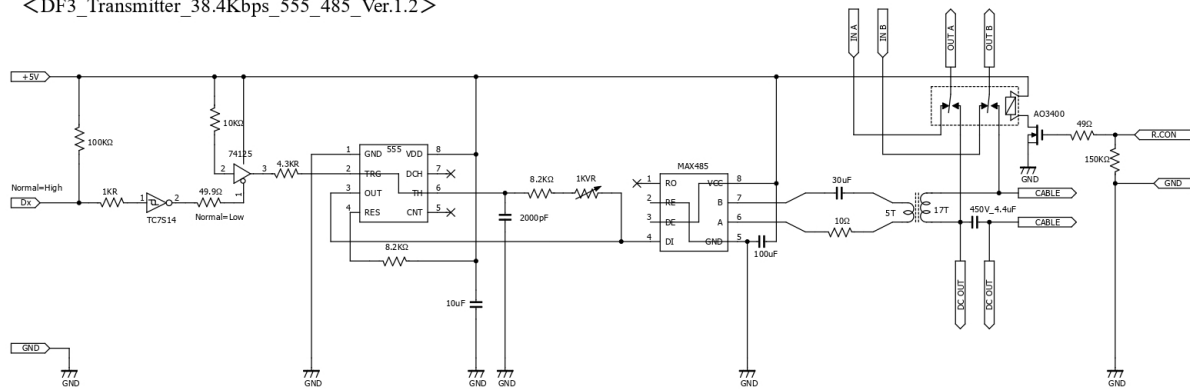


図 8 送信回路回路図。

<DF3\_Receiver\_38.4KHz\_Ver.3.2>

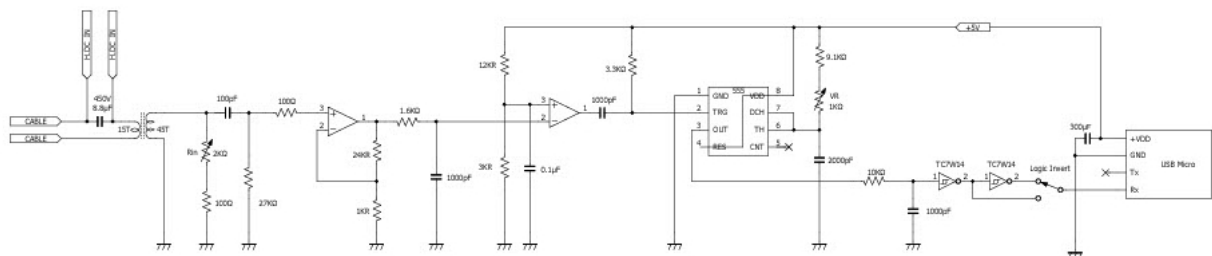


図 9 受信回路回路図。

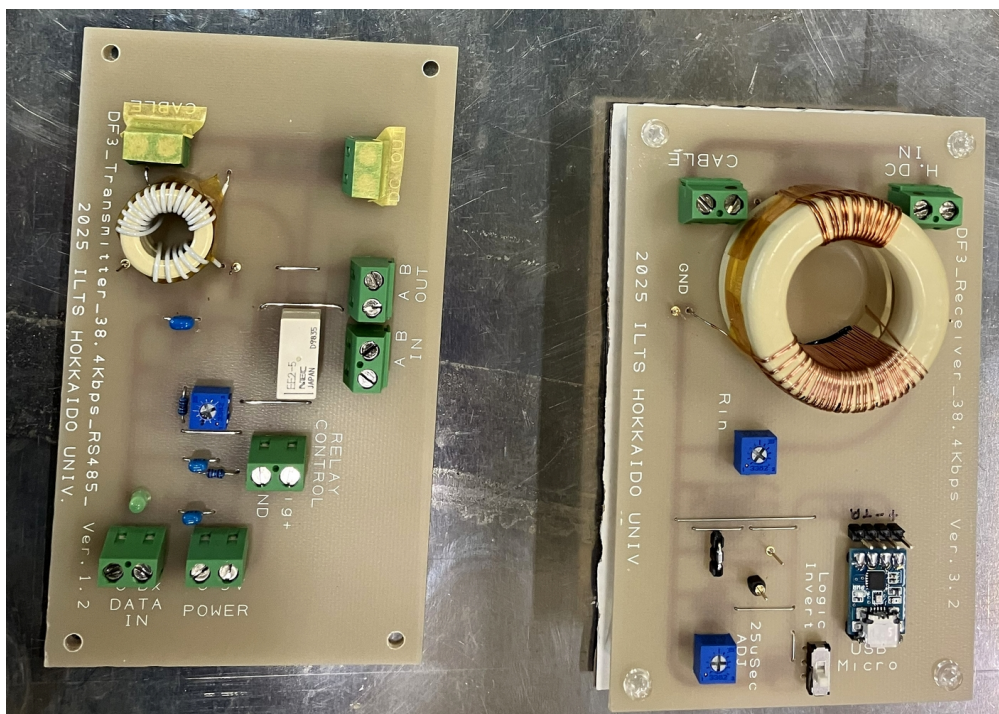


図 10 搭載した送信基板と受信基板。

# ボアホールカメラと氷片回収装置の製作

森 章一<sup>1</sup>、佐藤 陽亮<sup>1</sup>、斎藤 史明<sup>1</sup>、平田 康史<sup>1</sup>、的場 澄人<sup>2</sup>、小林 一誠<sup>3</sup>

1. 技術部装置開発室
2. 環オホーツク観測研究センター
3. 旭川工業高等専門学校技術創造部

## はじめに

第三期南極ドームふじ深層掘削において使用する、ボアホールカメラ（掘削孔底撮影装置）と、掘削孔底の氷片回収装置の製作を行ったので報告する。

## ボアホールカメラケースの設計

今回設計したボアホールカメラケースの全体図を図 1 に示す。カメラケースは全体をクロムモリブデン鋼（SCM440）で作っており、先端部には衝突対策としてフッ素樹脂のダンパーを備えている。今回の掘削深さは 3000 m を想定されている。液圧が最大で 30 MPa かかることになるため、設計上 40 MPa に耐えられるようにケース筐体の肉厚などを決めていった。その結果、カメラケースの肉厚は 8 mm とした。

カメラで撮影するために設けられた窓ガラスは板厚 10 mm で円錐形状をしており、外側  $\phi=34$  mm、内側  $\phi=20$  mm のテーパ形状になっている。この形状は視野角 80° を想定していることと、外側からの圧をテーパ面で支える意図がある。ガラス窓とカメラケースの間にはフッ素樹脂を挟んで密閉している。

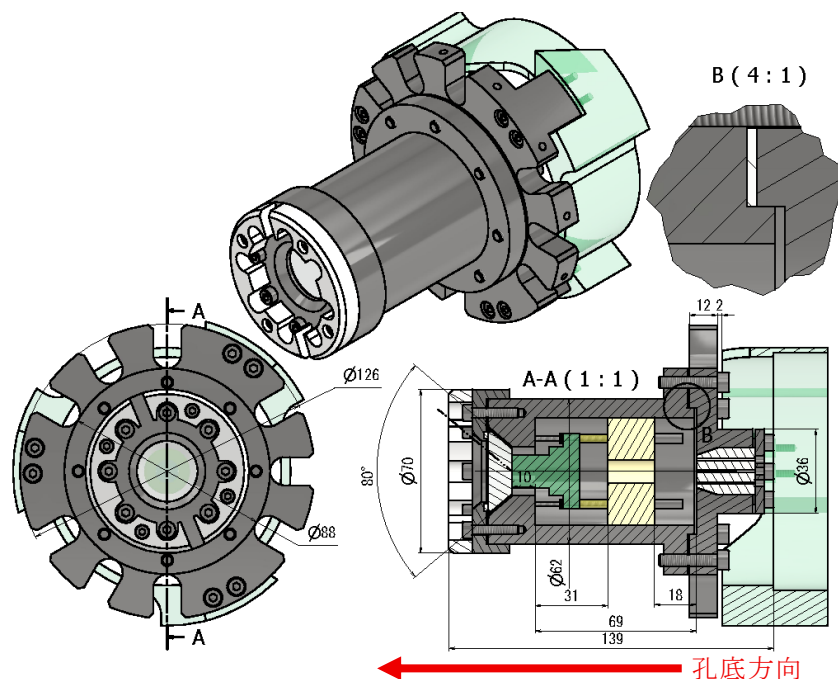


図 1 カメラケースの全体図。

掘削ドリルに固定する蓋にはカメラの電源や通信用の電線を通す必要がある。電線を接続しつつ密閉を維持するため、蓋にテーパ形状の穴を加工し、信号線が通る貫通穴を開けたフッ素樹脂の丸棒を押し込む構造を作った。フッ素樹脂をテーパ面に押し付けて変形させることで密閉する構造にした。また、蓋に同心円状に切欠きを作った。これは掘削孔に降ろす際、孔に充填されている酢酸ブチルがスムーズに流れることで降下中の抵抗を減らすための加工である。製作したカメラケースの写真を図 2 に示す。

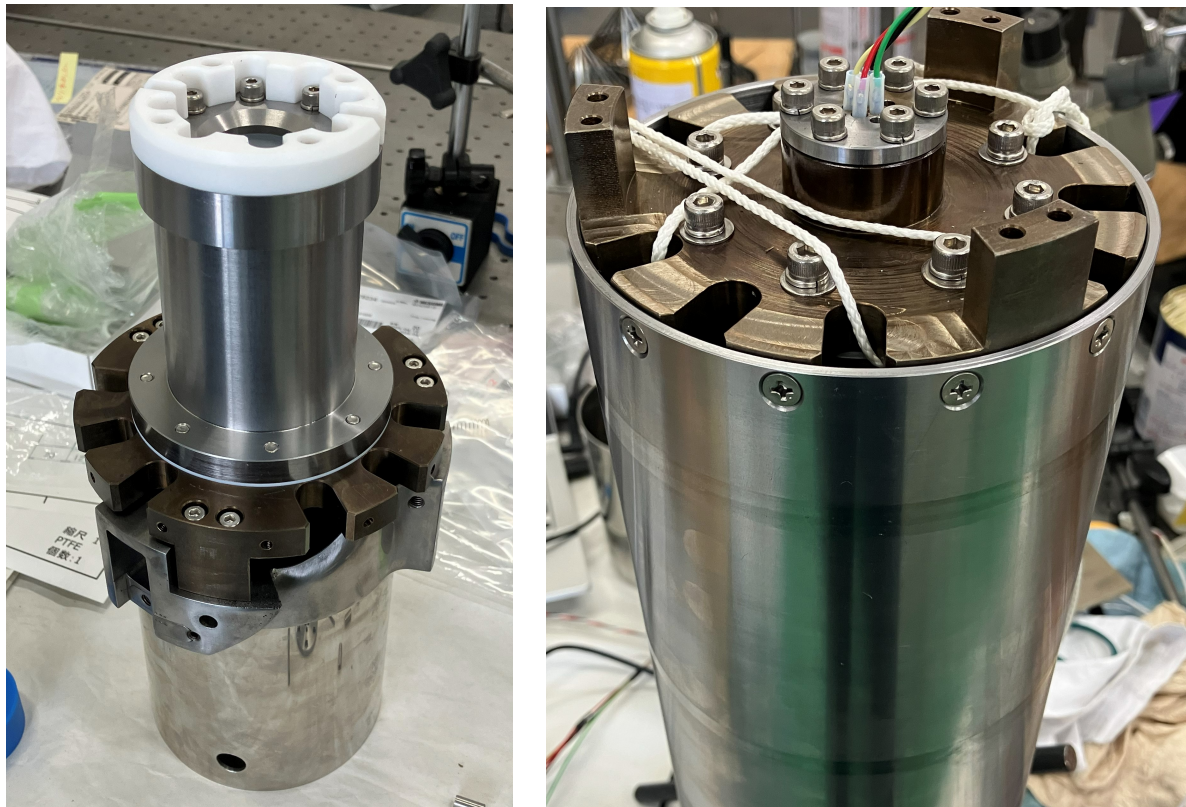


図 2 左) カメラ側を上にした様子。下側にドリルカッターマウントが固定されている。  
右) ドリル側を上にした様子。アイスコアキャッチャーを取り付けた様子。

## 九州オリンピアでの加圧試験

カメラケースが出来た後、宮崎県にある九州オリンピア工業株式会社にて加圧試験を行った。カメラケースを入れて加圧していくと 10 MPa 付近でスコンと何かが抜ける音がした。圧力も一気に下がっていて密閉が破れたことが分かった。取り出してみると電線を通すフッ素樹脂が内側に抜けてしまっていた。圧力による変形が想定よりも大きく、テーパ面を抜けてしまった。そこで、掘削ドリルの制御部などが入っている耐圧ケースにも使われている耐圧コネクタを取り付けられるよう急遽改造し、再度実験したところ、30 MPa まで加圧しても漏れることはなくカメラケースの耐圧性能は十分であると確認できた。



## 加圧試験機の製作及び低温下での耐压試験

30MPaの圧力に耐えられることは確認できたが、実際に使用されるのは $-50^{\circ}\text{C}$ にまでなる低温環境である。カメラケース自体は冷却されることで各部品が収縮する。熱膨張率の観点から、同じ材質であれば同じように収縮するので問題は起こらないが、異種材料だと寸法に差異が生じてしまう。今回であればガラスとクロムモリブデン鋼、フッ素樹脂を使っているが、フッ素樹脂>クロムモリブデン鋼>ガラスの順に熱膨張率が大きい。そのため、フッ素樹脂とクロムモリブデン鋼の間で密閉が維持できなくなったり、ガラスがクロムモリブデン鋼の収縮で割れたりすることが懸念された。そこで低温環境下での耐压試験を行うため、低温科学研究所にある極低温室を利用し、 $-50^{\circ}\text{C}$ 環境で30MPaの加圧ができる加圧試験機を製作した。加圧試験機の全体図を図3に示す。また、システム全体を図4に示す。

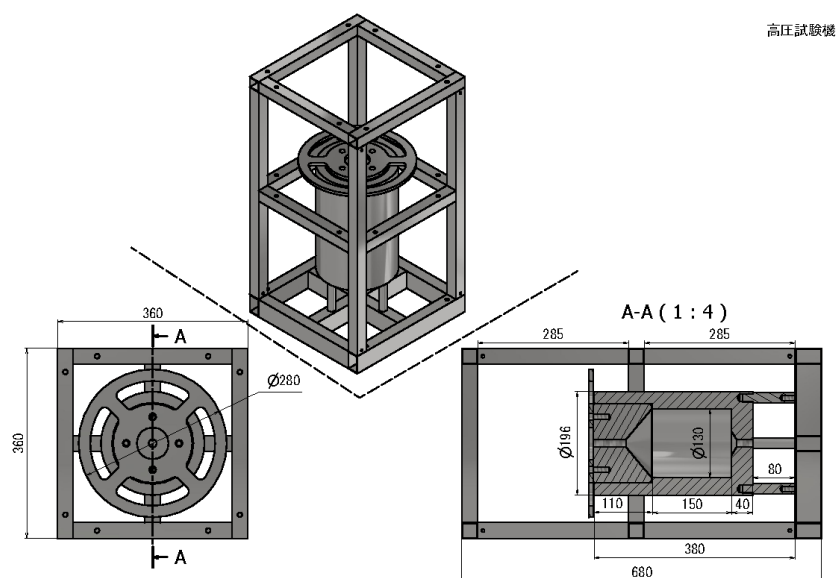


図3 加圧試験機の全体図。

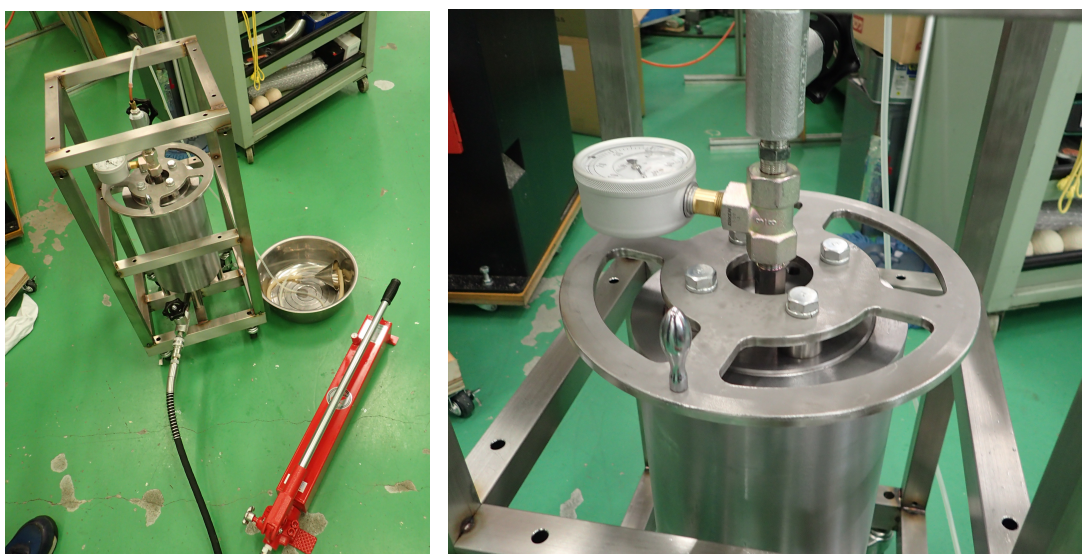
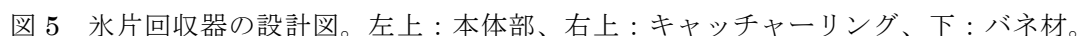


図4 加圧試験機。

まず、加圧できることを確認するため常温環境で加圧を行って加圧試験機の性能を確かめた後、低温室に運び込んだ。その結果、今回開発したカメラケースは低温下で高圧に耐えられることが確認できた。注意点として、密閉状態を保つためのシールとして使っているフッ素樹脂部品は温度変化と圧力により変形する。そのためカメラを投入する前には各ねじの増し締めをする必要がある。

掘削孔の底に氷片が溜まり、掘削ドリルが進まなくなった時に使用する氷片回収装置の製作を行った。本装置は、回収した氷片を収納するための本体部、一方向にだけ氷片を通し閉じ込めるために高炭素鋼（バネ材）を加工し、キャッチャーリングに取り付けたキャッチ部から構成される。キャッチ部を交換できるように本体部とキャッチャーリングをネジ加工してある。設計図を図 5 に示す。



## 氷片回収器の概要

本体部には直径 10 mm の穴が 492 個開けられている。図 6 に完成した氷片回収装置の本体部を示す。掘削孔は収縮を防ぐために液封液で満たされており、管内の液体がこの穴から抜けることで本体の上げ下ろしがスムーズになる。通常は径の小さいセンタドリルで下穴をあけてから直径 10 mm のドリルで穴開け作業を行うが、今回は作業効率を考え直径 10 mm のセンタドリルによる一発加工を行った。キャッチ部は 2 mm の厚さの高炭素鋼（以下バネ材）を図 5 下の形にレーザー加工機で切り出した。レーザー加工機はレーザー光を用いて、非接触かつ高速、高精度で穴あけや金属切断を行う工作機械で本研究所の設備には無いため、今回は旭川工業高等専門学校技術創造部で作業を行った。その時の様子を図 7 に、切り出したバネ材を図 8 に示す。切り出したバネ材はキャッチャーリングに取り付けた。取り付けの様子を図 9 に示す。一方向のみに入りやすくなっている一度入ったら出て行きにくい魚取りかごのような仕組みになっている。また、キャッチ部を交換できるようにキャッチャーリング（図 9）と本体部（図 10）にネジ加工を施した。本体部とキャッチ部を接続したものを図 11 に示す。

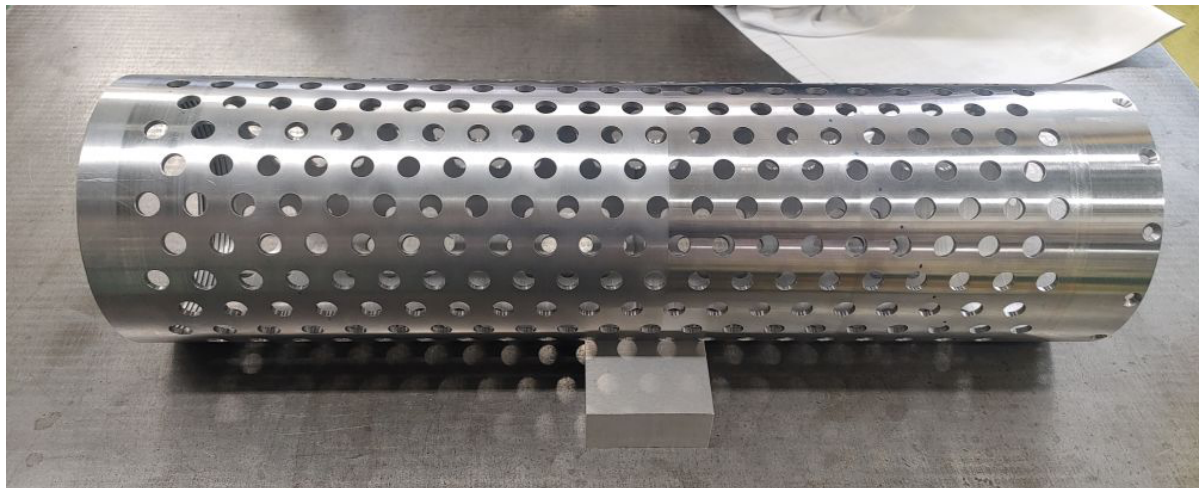


図 6 製作した本体部。



図 7 レーザー加工の様子。



図 8 切り出したバネ材。





図 9 キャッチャーリングにバネ材を取り付けた様子。本体部取り付けのためのネジ加工もされている。



図 10 本体部のネジ加工。



図 11 本体部とキャッチ部の接続した様子。

## おわりに

2025 / 26 シーズンに今回製作した装置が使用される予定になっている。今後フィードバックを受け必要な改良を行う。

# 海外の観測ロケットを用いた実験の報告： 4 回目の実験結果および 5 回目の実験に向けて

木村 勇気<sup>1</sup>、平田 康史<sup>2</sup>、高塚 徹<sup>2</sup>、斎藤 史明<sup>2</sup>、中坪 俊一<sup>3</sup>、  
千貝 健<sup>4</sup>、森 章一<sup>2</sup>、稲富 裕光<sup>3</sup>

1. 低温ナノ物質科学分野
2. 技術部装置開発室
3. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
4. 技術部先端技術支援室

## はじめに

我々は、宇宙におけるダストの生成過程を理解することを目的に、ドイツ航空宇宙センター（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR）とアメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration; NASA）との国際協力を、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA）宇宙科学研究所（Institute of Space and Astronautical Science; ISAS）の協力の下に進めてきた。プロジェクト名は、DUST であり、Determine Unknown yet Significant Traits の略とした。目的を達成するためには、試料と実験装置を回収し、かつ複数回実験する必要があるため、スウェーデンとアメリカの観測ロケットを用いることとし、微小重力実験を複数回実施した。この DUST プロジェクトの詳細な目的や実験装置については、次に列挙するように過去四回の技術報告会で報告してきた。2018 年は低温科学研究所と ISAS の技術室の協力の下に製作した実験装置について [1]、2019 年は実験装置とロケットへの組み込み準備や、SSC における実験状況について [2]、2020 年の技術報告会では、2019 年にスウェーデンとアメリカで行った 2 回の観測ロケット実験と、2020 年にアメリカで行った 3 回目（アメリカでは 2 度目）の観測ロケット実験に至るまで [3]、そして、2024 年にはこの 3 回目の実験の詳細に加えて、DUST プロジェクトとして 4 回目の微小重力実験となるスウェーデンでの打ち上げ（2024 年 11 月）の準備開始までを報告した [4]。ここでは、2024 年に行った 4 回目の実験準備と打ち上げ結果に加え、5 回目の実験に向けた状況を報告する。

スウェーデンで 2019 年に利用した観測ロケットは MASER-14 という名称であった。順番からいくと、今回 2024 年の観測ロケットは MASER-16 となるが、呼び名が MASER から Suborbital Express へと変更されていた。これは、従来の「MASER (Materials Science Experiment Rocket)」という材料科学が押し出された名称を、新しい打ち上げサービスの枠組みである「SubOrbital Express (サブオービタル・エクスプレス)」へ統合したことが理由のようである。すなわち、分野横断・商用も含む「サブオービタル実験の共同相乗りサービス」というより広い対象へリブランディングしたという位置づけで



ある。今回の観測ロケットでは、Suborbital Express 4-M16 との記載を目にした。最後の M16 に MASER-16 の名残がある。

## 2024 年のスウェーデンにおける観測ロケット実験の準備

我々が 2023 年 11 月に実験装置をストックホルム郊外の Solna にあるスウェーデン宇宙公社 (Swedish Space Corporation; SSC) に向けて輸出した時点における計画では、ペイロードをロケットの外筒に入れる結合試験を 2024 年 2 月 5-9 日に、キルナの郊外にあるエスレンジ宇宙センターで行う観測ロケット実験は同 4 月 11 日に行う計画であった。昨年の報告書 [4] では、輸送後に打ち上げの延期が決まり、再度準備をやり直すことになったことまでを記載した。ここでは、実験装置の輸送から射場作業に入るまでの詳細をまとめる。

2023 年 11 月 22 日に低温研で集荷された実験装置は、11 月 30 日にタイ国際航空 TG643 便でバンコクへ、12 月 3 日に TG960 便でストックホルムに送られ、12 月 5 日に SSC に到着した (図 1)。



図 1 2023 年 12 月 5 日にストックホルム郊外の Solna にある SSC に到着した実験装置。二つの木箱に入っている。左の木箱に真空装置、右の木箱にペイロードが入っている (©SSC, J. Li)。

予定通り、12 月 11 日 (月) からスウェーデンに渡航して Solna にある SSC で作業を開始した。現地では、SSC のベテランから若手までの技術者 6 名ほどからなるバランスの取れたチームが我々の DUST 実験を担当した (リーダーは Jianning Li 氏、データ取得などを行うソフトウェアは若手の Magnus Valtersson 氏が担当)。初日は開梱作業を行い、我々の実験装置 (PI 装置) をクリーンルーム内に移動して、保護壁と柱を外して重量測定を実施した。また、真空排気装置を立ち上げて、Ar ガスのボンベとつないで真空引きを開始した。SSC 側が用意するケーブルや冷却機構などの製作が進められていたが、全体的には遅れているという雰囲気であった。二日目以降は、SSC 側の制御装置と接続して確認作業を進め、15 日 (金) にはダミーチェンバーを用いて打ち上げを想定した模擬

試験 (Sequence Test) を実施し、予定通りに作業を終えた。本番では、微小重力環境中に蒸発源に電流を流して出発物質を蒸発させる。この蒸発源は一度しか使用できないため、各種試験用にダミーの核生成チェンバーを用意した。準備においては、蒸発源に僅かに電流を流す試験と、ダミーチェンバーを接続して最大電流を流す試験を分けて行った。

今回、SSC が用意するロケットの外筒には O-ring が用意され、DUST の実験装置が収められた区画内の雰囲気制御をすることができる。打ち上げ前は窒素でパージし、打ち上げ 90 秒前に外と繋がるバルブを開放、打ち上げ中はこのバルブから窒素ガスは排気されて真空状態になり、打ち上げ後 600 秒でバルブを閉めて密閉状態とし、着地する予定である。干渉計はレーザーの光路の気体密度の変化に敏感に反応する。そのため、実験中は装置周囲を真空にするように設計した。

この滞在中にプロジェクトマネージャーの Stefan Krämer 氏と今後の予定を打ち合わせた。そこで、当初は 2024 年 1 月 22-26 日に PI 装置と SSC が用意するモジュールを外筒に組み込んで結合する試験 (結合試験) を予定していたが、ロケットの外筒の納品が 1 月末まで遅れることが分かったため、我々の結合試験は 2 月 5-9 日に延期になったことが伝えられた。それに伴い、全実験チームのペイロードと SSC のサービスモジュールを結合してロケット全体で行うスピンや振動試験の予定がずれ込むことになり、他のプロジェクトの試験との絡みで 3 月 12 日にフライトキャンペーン入り、3 月 21 日打ち上げの当初の計画で進めるのは難しいという報告を受けた。一旦延期を決めると、元には戻せないの正式決定はしないが、現状では 4 月 3 日にキャンペーン入り 4 月 11 日打ち上げというスケジュールが濃厚とのことであった。

我々の実験装置が収まる外筒 (図 2) が 2024 年 1 月 29 日に SSC に納品された。これを受けて、2 月 5 日に再度 Solna の SSC を訪れ、結合試験を開始した。初日は各コンポーネントの電源 ON/OFF とデータ取得の確認、SSC との通信用ケーブルの PI 装置側からの固定作業を実施した。6 日は PI 装置を外筒に入れて、その間に衝撃吸収用のダンパーを挟んで取り付けた。SSC 側では私が固定したケーブル類の確認をすることはなく、すべて PI 側の責任として任されている点が印象に残った。7 日は SSC 側のケーブル製作作業と、SSC の制御系を PI 装置の上部に取り付ける作業を行った。また、射場作業参加者のリストの提出と、ミッションパッチの図柄に使用する DUST プロジェクトの特徴的なモチーフについて相談を受けた。8 日はプロジェクトマネージャーや SSC の技術チームと我々の実験装置の環境試験と、射場作業に至るまでの活動について議論し、SSC の制御系と PI 装置とのインターフェースの確認作業を続けた。また、赤外線カメラと mini PC 間の通信に不安があり、外部モニターを接続した確認作業を 9 日まで継続して続け、帰国した。

ロケットモーター (固体推進剤) は、製造元のブラジルからキルナに民間の航空機が輸送する予定であったが、ロシアのウクライナ侵攻のためにキャンセルされた。これにより、他の観測ロケット実験キャンペーンも含めて大幅な遅れが懸念された。これに対応するため、ドイツ連邦軍のヴンストルフ第 62 航空輸送航空団が 2 月 10 日にブラジルから、我々の使用する分を含めて計 7 つのロケットモーターを代替輸送した。

2月13日に、4月の射場作業時の宿泊に関して、4月3日に現地入りすることで調整を行った。打ち上げ予定日は4月11日である。2月16日には、モジュール試験準備状況のレビュー（Module Test Readiness Review; MTRR）を実施し、進捗状況、未完了事項、および延期された作業について協議した。19–20日には、SolnaのSSCにおいて振動試験と熱試験が実施され、無事に終了したこと、また、射場作業中はエスレンジの宿泊施設が他のキャンペーンで埋まっているので、我々は15 km離れたアイスホテルに滞在することになることなどの報告を受けた。

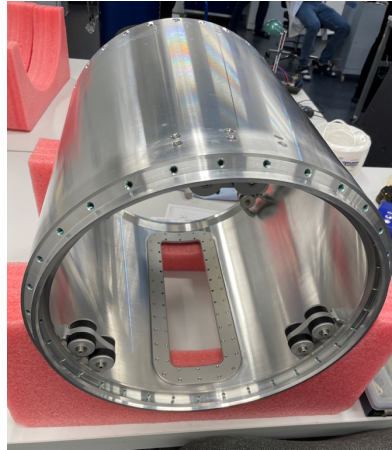


図2 2024年1月29日にSSCに納品された、我々の実験装置用の観測ロケットの外筒（©SSC, J. Li）。



図3 2024年に実施した観測ロケット実験 Suborbital Express 4–M16のミッションパッチ。本観測ロケットは、4つの実験チームの相乗りであり、各研究テーマを代表するモチーフとして、上から LiFiCo（液体コーティング中の相分離を表現）、micACTin（T細胞の細胞骨格（アクチンフィラメント網）を表現）、DUST（宇宙ダストの日本語である「塵」）、そして JACKS（六脚）の各モチーフが順に表現されている。

3月1日に、アビオニクスシステムを実験システムと統合して試験を実施し、問題がないことを確認したので、正式に我々に引き渡すための会議である、**Module Acceptance Review (MAR)** が行われた。アビオニクスシステムとは、ロケットに搭載されるあらゆる電子機器やシステムの総称である。また、3月6日にはミッションパッチが完成した(図3)。

ここまで準備を進めてきたところで、以下の理由により打ち上げが延期されることになったと、3月15日に連絡を受けた：『ペイロードのシステムテスト中に、他の研究チーム(JACS)の実験装置とSSCのアビオニクス間の通信に影響を及ぼす重大な異常が発見された。この状態でのペイロードの飛行は、JACKSだけでなく全てのペイロードとの通信に影響を及ぼす可能性があり、SSC、DLR、エアバス、欧州宇宙機関(European Space Agency；ESA)と協議した結果、このまま打ち上げるのはリスクが高すぎると判断された。全てのペイロードの円滑かつ安全な飛行を確保するため、システムに必要な修正を加えることを決めた。この問題を解決する作業には数週間を要するため、計画されたキャンペーン開始までの期間では不十分である。』さらに、以下の追加情報を得た：『宇宙ダストの冷却に関する実験を計画しているJACKSチームは、ESAとの契約のもと、下請け業者であるエアバス社によって装置が作られている。DUSTのネットワークはJACKSと共通なので、この通信問題は特にDUST実験に影響を及ぼす可能性がある。この問題が解決されない限り、通信の完全な保証はできない。さらに、JACKS実験は許容範囲を超える深刻な振動障害を引き起こしている。この問題に対しても再作業と再認定が必要である。打ち上げキャンペーンは2024年10月または11月に再開するべく調整中である。』

打ち上げの延期を受けて、SSCからこの期間内にDUSTの実験装置の冷却効率を上げるための作業を行うという提案がなされ、5月13日の週に外筒内壁に厚さ約4mmの断熱材(コルク)が追加された。DUST実験で取得する生成粒子の赤外線スペクトルの検出器は、低温にするとノイズを減らすことが出来る。そのため、本プロジェクトでは5℃程度の温度に設定するようにSSCに依頼していた。冬のエスレンジは氷点下になるが、観測ロケットが打ち上げられるランチャーの中央付近の温度は15℃くらいに設定することになっている。そのため、DUST実験では、チラーを使って冷却水を流し、ファンを用いてDUSTの実験区画全体を冷却する機構がSSC側で用意された(図4)。

ここで、実験装置の輸出入に際して生じる税金を免除してもらうために取得したカルネの有効期限が11月7日なのに対して、打ち上げを終えられるか微妙な情勢となり、対策を検討した。まず、カルネ協会に有効期限の延長の可能性を尋ねたところ、コロナ禍には特例として延長制度が設けられたものの、現在はそのような仕組みはないことが分かった。また、同様の実験を行っている他機関の研究者に実情を聞いた所、税金を払っているというケースもあった。そこで、輸送業者に確認した所、もし現在の状況のままスウェーデンに貨物を置いておき、有効期限が切れてしまうと、スウェーデンにて輸入関税・消費税と調整金というものが発生することが分かった。スウェーデンの税関から日本のカルネ協会(正式には一般社団法人 日本商事仲裁協会 東京本部 カルネ事業部)を通して北大へ請求があがることになり、正確な金額は分からないものの、推定では500万

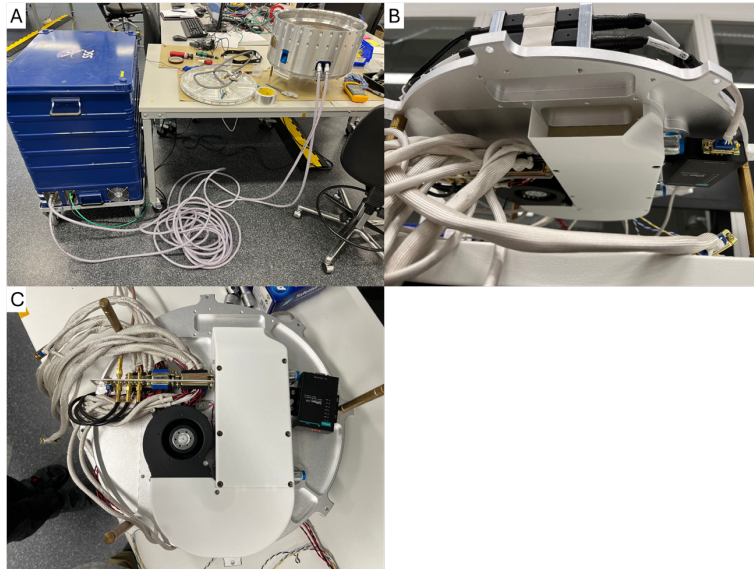


図4 SSC側にリクエストして用意してもらった冷却機構。A. 左の青いBOXにチラーが収納されており、DUSTのペイロードへ冷媒を循環する。BとC. 冷媒によって冷やされた窒素ガスはファンを用いてDUSTの実験区画全体に循環する。Bは冷却された窒素ガスの排出口、Cは冷却機構をDUST装置側から見た写真。中央の黒い円形部分がファン。

円はくだらないのではないかとのことであった。そこで、一度実験装置をロケットから降ろして、日本に戻すことを4月5日に決断した。

5月15日に以下の新たな打ち上げ日程が提案された。これは、3月21日、4月11日に続いて、3度目の打上日の提示であった。ロケット実験では打ち上げの延期はよくあることで、各研究チームで臨機応変な対応が求められている。

2024年10月28–31日：スピンバランス調整

2024年11月6–8日：フライトキャンペーン前作業

2024年11月11日–12月1日：フライトキャンペーン

2024年11月20日：最初の打ち上げ可能日

実験装置をすべて輸送時の状態に戻して日本に送り返すために、5月27–29日の日程でスウェーデンに行き、以下の作業を行った。

5月27日(月)午後：DUSTの実験区画内を窒素で満たして冷却を開始

5月28日(火)：フライト模擬試験

5月29日(水)：実験装置を日本へ発送するための梱包作業

5月30日に Hibernation Readiness Review (実験装置を打ち上げまでの期間保管しておく環境などについての打ち合わせ) が行われ、Solna の SSC から Kiruna のエスレンジ宇宙センターへのロケット本体や実験に必要なすべての機器の梱包、発送は10月21日の週に行い、10月28日の週にロケットのスピンテスト、Solna の SSC チームは11月



10日に現地入り、11月20(or 21)日に打ち上げ(打ち上げ可能期間は12月1日まで)の予定で進めることに決まった。

実験装置は、6月15日発のトルコ航空TK1796便で台湾へ、予定よりフライトが1日遅れて17日発の同TK50便でなぜか木箱1箱だけが成田に到着した。残り1箱は行方不明の後、20日に日本に到着し、21日に輸入許可となった。輸入業者の倉庫で木箱の一つにひび割れが発生していることが確認された為、26日に開梱・再梱包が実施された後、28日にタイ国際航空TG643便(NRT 12:00–BKK 16:30)でバンコクへ、7月4日のタイ国際航空TG960便(BKK 00:05–ARN 07:00)でスウェーデンへ運ばれた。この時、日本での輸入通関後、そのまますぐに輸出用の飛行機に搭載することは出来ないとのことで、一度保税蔵置場に搬入し、爆発物検査と輸出通関等が行われた。また、並行して6月17日にカルネの再申請を行った。そして、7月8日にSSCから、木箱2ケを受け取ったとの連絡を受けた。

7月18日に他の観測ロケット実験のために、フライトキャンペーンの日程が以下のようになり少し変更になった旨の連絡を受けた。

2024年11月13日：フライトキャンペーン開始

2024年11月20日：テストカウントダウン

2024年11月22日：第1回打ち上げ実施可能日

予備打ち上げ日は12月6日頃まで延期可能

8月21日にキルナの現地スタッフがキャンペーン中の研究チームの作業や実験内容全般を理解するための書類である Campaign Requirements Plan(CRP)をSSCの技術チームから受け取り、確認作業を行った。

再度実験装置を組み立てるために、8月26–31日の日程でスウェーデンに飛んで、木箱2個の開梱(27日)、DUST実験装置の再組み立て(28日)、電気試験(29日)を実施した。最後にシークエンステストを行った際にデジタルビデオレコーダー(DVR)の電源が落ちて画像が真っ暗になった。調査の結果、DVRが寿命だったと結論付けられ、外筒から実験装置を取り外してDVRを交換、外筒とSSC制御部とを再度結合して試験を行い、なんとかその日のうちに準備を終えることができ、当初の予定通りに帰国した。

射場作業を以下の予定で行うことが9月20日に確認された。

11月13日：13:30 キルナ空港到着(可能であれば真空装置の開梱)

11月14日：真空引き開始

11月15–16日：真空引き継続

11月17日：核生成チャンバーへアルゴンガス導入

11月18–21日：各種試験

11月20日：低温研から技術者2名到着

11月22日：初回打ち上げ実施日

11月23–26日：飛行後作業：ペイロード分解・梱包

- 11 月 26 日 : 低温研メンバー3 名全員でキルナ出発  
11 月 27 日 : 低温研技術者 2 名はソルナの SSC を訪問  
11 月 28 日 : 低温研技術者 2 名ストックホルム出発

9 月 27 日にエスレンジ宇宙センターの実験部屋や SSC の方々の自己紹介がメインの情報共有会議が開催された。

10 月 14 日の週には Solna の SSC において、SSC とエアバスの技術チーム立ち合いの元、組立結合試験 (Assembly Integration Testing; AIT) を進めていると連絡を受けた。16 日はパイロード全体でのカウントダウンから飛行までの全段階を模擬した試験 (Flight Simulation Test; FST) が行われた。試験結果は極めて良好で、軽微な問題は即時解決されたとのことであった。飛行前手順の検証・更新が完了し、これらの結果を踏まえて、パイロードは 21 日 (月) 朝に予定されている飛行受入審査 (Flight Acceptance Review; FAR) を実施する技術的要件を満たしていると判断された。

10 月 21 日にキャンペーン前に公式に行う最後のマイルストーンとなる FAR に参加した。FAR は満場一致で承認され、パイロードや実験機器は梱包されてエスレンジ宇宙センターへ輸送された。

10 月 28 日の週にはエスレンジ宇宙センターにおいてフライトシステム事前キャンペーンが実施され、テレメトリ (TM) 及びインフラとの通信リンク・ネットワークの検証作業が完了し、11 月 4 日の週にはスピンバランス調整及び機械的特性測定が実施された。これにより、エスレンジ宇宙センターで行う組立結合試験 (Solna で行った AIT に対して、こちらは AIT-2 と呼ばれていた) は終了で、無事に完了したとの報告を受けた。

フライトキャンペーンに参加するにあたり、エスレンジ宇宙センター (ESC) 主催の安全・保安規則についての説明会に参加する必要がある、PI の木村に加えて射場作業に加わる予定の技術部 2 名 (平田、高塚) がそれぞれ 11 月 7 日と 11 日にオンライン講習を受けた。

## エスレンジ宇宙センターにおける射場作業

11 月 12 日 (火) の夕方に低温研の技術部で打ち合わせを行った後に、木村は先にキルナに向けて出発した。スウェーデンのキルナ郊外にあるエスレンジ宇宙センターに到着した日からの射場作業を以下にまとめる。

### Day 1 13 日 (水)

14 時 45 分に SSC のエスレンジ宇宙センターに到着。本プロジェクトの射場責任者である Maximilian Speier 氏に挨拶し、早速ロケットの組み立て準備を行っている多目的施設 (Multi Purpose Facility; MPF) に行き、作業を開始した。MPF は学校の体育館のような広さで、二階の PI センターから一望できるようになっている (図 5A)。SSC の作業も本日開始であり、ロケットの結合が始まっている所であった (図 5B)。そこで、SSC の技術チームのサポートを受けて日本から輸送した木箱を開梱した (図 5C)。

当初 DUST チームで使用する予定だった実験室のコンセントは電源が取れなかったため、ひとまず倉庫で真空排気装置を単独で動かし始めた (17:00) (図 6)。起動直後の真空度は  $3.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  (17:05) で、想定通りであった。

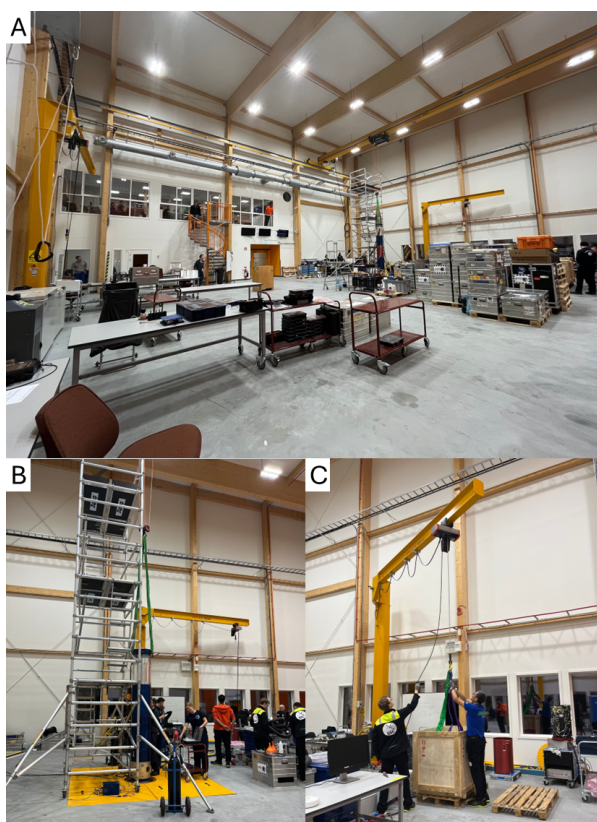


図 5 多目的施設 (Multi Purpose Facility; MPF)。A. MPF の奥から PI センター方向を写した写真。PI センターは奥の壁の二階、ガラス窓の向こう。右奥でロケットの準備作業を行っている。B. ロケットの準備の様子。作業用の骨組みの右下にペイロードの最下段が設置されたところ。C. クレーンを使って木箱から DUST の実験装置を取り出すところ。



図 6 倉庫内で立ち上げた真空排気装置。





図 7 観測ロケットの横に設置した真空排気装置（手前下）。ロケットと装置間は NW16 のフレキシブルチューブでつながっており、電気的には絶縁されている。我々 DUST のペイロードは、ノーズコーンの下のシルバーの場所である。

## Day 2 14 日（木）

毎朝 7 時から朝食。8 時 15 分からメインビル二階のオペレーションセンターで **Daily meeting** を行った。このミーティングには、Solna の SSC から参加している技術チーム、エスレンジ所属の作業チーム、打ち上げを担うドイツチーム（Moraba）などの各班の代表、キルナ在住の医師などが参加しており、研究チームの代表として木村も参加した。続いて、8 時半から Solna SSC team meeting に参加した。これは、Solna にある SSC で勤務しているチーム全員と実験チームの主要メンバーで行うミーティングである。以上の朝の活動は、打ち上げまでほぼ毎日行われた。

真空排気装置の真空度が問題ないことを確認した： $1.7 \times 10^{-4}$  Pa (8:47)。実験室のコンセントの不具合が解消されたので、真空排気装置を実験室に移動させた。また、アルゴンガスポンペを真空装置につなげて、改めて真空引きを開始した (10:00)。真空度は  $3.9 \times 10^{-4}$  Pa (11:17) であった。

昼食は毎日メインビルにあるカフェテリアで SSC の方々と取った。午後は、THEMIS プロジェクトでロケットの組み立て場になる建屋とランチパッドの見学会に参加した (15:30–17:00)。18 時からのラップアップミーティング（本日まとめの会議）に参加し、本日午後に行ったロケット側でのスピンテストなどの作業は順調に完了したとの報告を受けた。

夕食を昼食と同じメインビルのカフェテリアで取った後、19 時から真空排気装置一式をロケットに搭載されているペイロードの下まで移動させ、核生成チェンバーの真空引きを開始した（図 7）。ロケットの外筒に設けられたペイロードの Late access 扉を外しているため、DUST の実験区画内部をクリーンでドライな環境に保つために窒素ガスを流し続けた（翌朝空になっていた）。核生成チェンバー内の圧力を確認した。干渉計実験用の核生成チェンバー（IF チェンバー）： $40,703$  Pa at  $22.5$  °C。赤外線実験用の核生成チェンバー（IR チェンバー）： $48,458$  Pa at  $22.8$  °C。真空排気装置の真

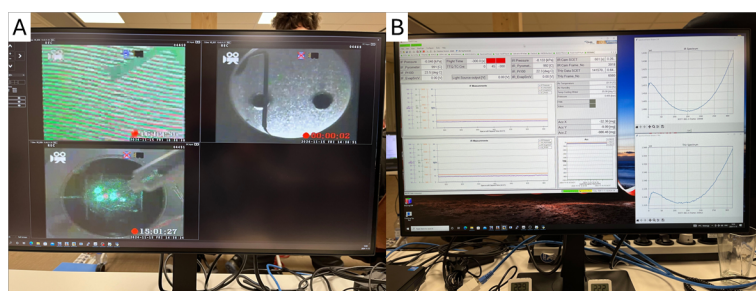


図 8 DUST の計測データが表示されている PI センターに設置されたモニター画面。

A. 干渉計装置の干渉縞（左上）と実像（左下）、および IR 装置の実像（右上）。B. 圧力や温度などの計測データ。右の上下二段は赤外線スペクトル。

空度： $2.5 \times 10^{-3}$  Pa (20:03)。ペイロードは PI センターに設置した PC を用いて制御でき、これら計測値は、干渉計と IR 装置の実像と合わせてモニターで確認できる（図 8）。

#### Day 3 15 日（金）

真空排気装置の真空度が問題ないことを確認した： $5.2 \times 10^{-4}$  Pa (5:30)。Daily meeting では、主にランチャー見学の打ち合わせ（ヘルメットや安全靴の個数不足など）、Solna SSC team meeting では、本日の作業予定が話し合われた。Communication check 試験が予定されていたが、LiFiCo チームの準備が間に合わず、13 時からとなり、午前中は待機した。Communication check 試験は、結合した各研究チームのペイロードと SSC のモジュールを一度ばらしてから再度組み立てを行ったために実施するものである。午後に試験を実施し、予定通り蒸発源を除く項目をすべて確認し、問題なく終了した。その後、15 時から電磁干渉 (Electromagnetic Interference; EMI) 試験を行い、他の研究チームを含め、問題なく試験を終了した。

夕食は SSC の技術者らに招待されて、宿泊施設に併設されているキッチンで手作りのウクライナ料理を堪能し、その後はドイツから参加している TEXAS チーム主催のビールパーティに参加して親交を深めた。

#### Day 4 16 日（土）

週末ということで、Daily meeting と Solna SSC team meeting は行われなかった。10 時に Skylark Launcher に集合し、安全講習を受けて、まだロケットが設置される前のランチャーを見学した。

真空排気装置の真空度が問題ないことを確認した： $5 \times 10^{-4}$  Pa (16:30)。アルゴンガス 40,000 Pa を核生成チェンバーに導入した。その結果、IF チェンバーの圧力は 39632 Pa at 21.0 °C、IR チェンバーの圧力は 39517 Pa at 21.1 °C であった。窒素ガスを流しながら、ロケットの外筒に設けられた Late access hatch を閉めた。SSC が用意していた圧力計を用いて、DUST の実験区画内の圧力の上昇を確認してから、バルブを開いて窒素ガスをフローさせた。そのまま外部冷却システムを稼働して、ペイロードの冷却を開始した。真空排気装置は実験室に移動し、今後は使用する予定はないことから、電源は入れずに静置した。

ペイロードの各コンポーネントに一つずつ電源を入れて健全性を確認するテストである、Payload Check out を行った (17:55 終了)。

夕食は SSC に招待されて、パプリカ、ズッキーニ、ソーセージなどが入ったスープ作りを手伝い、皆で食した。

#### Day 5 17 日 (日)

Daily meeting では本日行う飛行模擬試験 (Flight Simulation) の打ち合わせ、Solna SSC team meeting ではその開始時間などと、明日行う Ground Supporting Equipment (GSE) をロケットの準備を行っている多目的施設 (Multi Purpose Facility; MPF) から射場へと移動する方法に関して打ち合わせを行った。GSE は、SSC 側で用意した冷却システムである (図 4)。

9 時半から飛行模擬試験を開始した。まず、核生成チェンバーの圧力を確認した [IF チェンバー : 37,968 Pa at 8.3 °C、IR チェンバー : 37,801 Pa at 8.6 °C (9:30)]。T-1 h (T=0 が打ち上げ時刻であり、T-1 h は打ち上げ 1 時間前を示す) でホールドして昼食を取り、13 時から再開した。Flight P/L checkout completed (P/L はペイロードの略)、T-20 min でホールド、13 時 50 分に T-20 min から再開。T-5 min に手動でシークエンスを開始した。Lift off signal を受けた後に T=0 が補正されてタイムスタンプが押される。T-5 min を切って自動シークエンスが始まったところで、DUST チームの電源が落ちたために一時停止 (Hold) を要求した。T-20 min 以降に Hold された際には、T-20 min まで戻して再開することになる。放射温度計の消費電流が普段 0.25 A のところ、0.1 A 程度にまで下がっていたため、立ち上げなおして実験シークエンスを再開して、試験を完了した。もう一点、画像が映らない問題が起こっていたが、そのまま終了し、全体会議終了後に対策することにした。

15 時半からブリーフミーティングを行い、ペイロードは明朝までアクセス可能であり、GSE の移動を始めることを決定した。DUST チームは冷却システムだけ移動させて、不具合の確認を行うことになった。16 時から DUST チームだけでチェックアウトを実施した。ビデオレコーダーの確認を行った。この試験の度に mini-PC と THz イメージャーを動かすと、記録メディアに保存されるデータ量が増えすぎるので、チェックアウト項目からはずしてもらった。

映像は、アンビリカルケーブルを通して配信している際には映るが、トランスミッターを使ってデータを送受信すると映らないことが分かった。昨日、PI センター (図 9) に設置しているモニター後部の LAN ケーブルを挿し替えていたことが原因と考えられ、LAN ケーブルを挿しなおすなどの対策を行った結果、無事に映った。

20 時から Moraba 主催の Grew wine パーティに顔を出した。

#### Day 6 18 日 (月)

MPF で行うすべての試験が終了したため、ロケット本体を射場に移動させる前に、Daily meeting で記念撮影を行った (図 10)。また、13 時からの Recovery meeting の案内があり、今日から帯同する医者との紹介があった。医師は我々と同様にエスレンジ

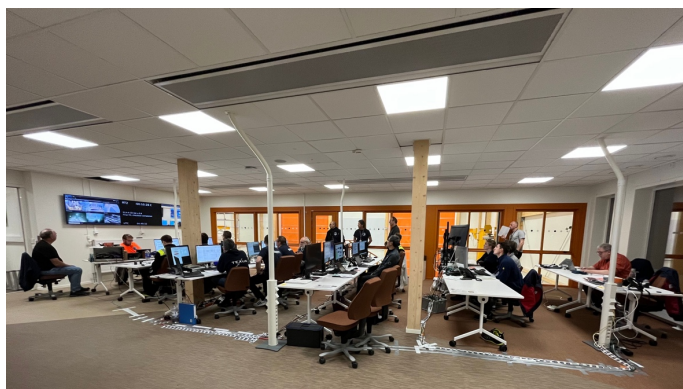


図 9 MPF 二階の PI センター。各チームに長机が与えられており、実験装置のモニターや計測器が並べられている。DUST は右から 3 列目。さらに必要なものがある場合には、リクエストできる。



図 10 準備を終えた観測ロケット。我々のペイロードはノーズコーンの下の最初の小さな青色のモジュールの下から、SIX4 と書かれた青色のモジュールの上までのシルバーの領域。

に泊まり込み、1 週間ごとに交代する。Solna SSC team meeting では、Daily meeting と同じ内容が共有された。DUST の技術チームが Flight Simulation test の際に電源が落ちた原因を小一時間探したが、現象は再現されず、分からなかったことが報告された。他の三つのサイエンスチームがエスレンジ宇宙センターに来てキャンペーンに加わったので、本日より Science team meeting が始まった (9:00-)。

ペイロードを射場に移動開始 (13:00)、GSE を射場のベースに設置した (18:10)。観測ロケットを発射台に設置する作業が行われている最中であつたので、この作業は SSC 側で実施された。

18時半に **Communication test** を実施し、ペイロードが冷却システムと接続できていないことが分かった。18時50分に **SSC** の技術者1名 (**Magnus** 氏) が射場に行って対応した。コンセントを他の口に差し替えたら起動した。19時半に電源を投入、冷却システムの接続を確認した。結露を防ぐために、冷却は明日窒素ガスを流してから行うことにした。核生成チェンバーの圧力は、**IF** チェンバーが **39,505 Pa at 19.3℃**、**IR** チェンバーが **39,326 Pa at 19.5℃**であった。19時50分にロケット側のグランドステーション (サービスモジュール) を再起動し、**PI** 装置とロケット側とで通信できていることなどが確認された。**DUST** はすべて問題なく終了した。20時に通信速度が遅い問題が全体に発生していることが通知された。その後、この問題はコマンドを送り続けている機器によって引き起こされていることが分かり、解決した。

#### Day 7 19日 (火)

**Daily meeting** では、**Rigging** (アンビリカルケーブルが適切な方向に引き抜かれることを確認するテスト)、通信、無停電電源装置 (**UPS**) の各試験が行われること、エスレンジのスタッフは法律により打ち上げ前の出勤停止期間が決められており、36時間休む必要があることから、これを踏まえて明日の **Hot Countdown test** の時間を決めることが報告された。**Daily Solna SSC meeting** では、**Daily meeting** の報告がなされ、**Rigging** の後、すぐに **DUST** 装置に窒素を流し、冷却を開始するという順序で行うことを決定した。

11時から、**SSC** やロケットの打ち上げ責任者の間で、**Internal Meteorological Meeting** (打ち上げ時刻と、実施の可否を判断する気象に関する打合せ) が行われ、11時半から **External Meteorological Meeting** でその打ち上げ判断の結果がチーム全体で共有された。著者はこちらの会議に参加した。気象チームでは、上空の風の予報から打ち上げ可能角度内で打ち上げたペイロードが回収地点に戻ってくることができるのかを、アメリカやヨーロッパなど、三つの異なるモデルで検討している。その結果、どのモデルにおいても **22 (金)** は風と雪で打ち上げは難しく、**23 (土)** であれば晴れて実施の可能性があることが報告された。

12:50に **Rigging** 試験終了。**DUST** チームの技術者が射場に行って窒素ガスを短時間フローした。その結果、**DUST** の実験区画内の湿度は2%程度 (露点  $-30^{\circ}\text{C}$  程度) ままで下がった。冷却システムも起動し、現在  $+5^{\circ}\text{C}$  を保っている。

**JACKS** チームの試験が終わらないので (16:50)、先に **Payload checkout** を行い、17時過ぎに終了した。**IF** チェンバーの圧力は **38,649 Pa at  $12.6^{\circ}\text{C}$** 、**IR** チェンバーの圧力は **38,359 Pa at  $12.3^{\circ}\text{C}$** であった。

19時から **DUST** 装置に窒素ガスを再度短時間フローし、湿度を下げた (湿度 5.94%)。19時50分に **Payload checkout** を行った (湿度 11.3%、露点  $-22.5^{\circ}\text{C}$ 、温度  $5.19^{\circ}\text{C}$ )。 **IF** チェンバーの圧力は **37,839 Pa at  $6.5^{\circ}\text{C}$** 、**IR** チェンバーの圧力は **37,648 Pa at  $6.5^{\circ}\text{C}$** であった。



## Day 8 20 日 (水)

本日の Daily meeting は、MPF (多目的施設) に集合してドレスリハーサルの打ち合わせを行った。その後、8 時半からドレスリハーサルのカウントダウンを開始 (T-5h40min)。この時、チェンバー内の温度はおよそ 4℃であった。

10:24 (T-3 h 46 min) に Payload checkout を行った。DUST の実験区画の温度 8.38℃、湿度 15.63%、露点温度-16℃、IF チェンバー圧力 37,849 Pa at 6.5℃、IR チェンバー圧力 37,677 Pa at 7.3℃であった。

14:25 (T-55 min) に Payload checkout を行った。DUST の実験区画の温度 5.88℃、湿度 18.00%、露点温度-16.7℃、IF チェンバー圧力 37,784 Pa at 5.8℃、IR チェンバー圧力 37,514 Pa at 6.1℃であった。T-42 min に DUST payload checkout 完了。

15:07 (T-20 min) からカウントダウンスタート。T-5 min 10 s で Hold。T-20 min に戻った。

15:33 (T-20 min) からカウントダウン再開。

15:48 (T-5 min) の時、IF チェンバー圧力 37,770 Pa at 5.2℃、IR チェンバー圧力 37,486 Pa at 5.4℃であった。

15:53 (T=0) Lift off シグナル。この時、IF チェンバー圧力 37,831 Pa at 5.6℃、IR チェンバー圧力 37,528 Pa at 5.8℃であった。

このドレスリハーサル時の DUST のダウンリンク容量は 6,000 kbit/s くらいであった。我々の映像のダウンリンクが終わった後に、パラシュートを撮影しているカメラのデータをダウンリンクすることが分かった。また、リハーサルの間に、技術部から平田氏、高塚氏の 2 名がエスレンジに到着し、作業に加わった。

## Day 9 21 日 (木)

休み (作業休止)。Daily meeting もなし。11 時半に打ち上げ判断会議の結果を共有する External Meteorological Meeting にオンラインで参加した。また、14 時頃に Day 6 (18 日) 頃から体調を悪そうにしていた、DUST チームのメイン技術者である Jianning 氏がコロナ検査で陽性の判定を受けたため、ストックホルムの自宅に戻った。この時点で、木村が把握しているだけでも数名のコロナ患者が発生していた。

夕食は SSC 主催のハンバーガーバーベキューパーティに招待され、技術部からの参加者が持参した餅を振る舞った。

## Day 10 22 日 (金)

Daily meeting はなし。9 時半から無停電電源装置 (UPS)、地上支援装置、実験装置の順に立ち上げた。この時、DUST の実験区画の温度 18.4℃、湿度 18.81%、露点 -5.7℃、IF チェンバー圧力 39,514 Pa at 17.6℃、IR チェンバー圧力 39,284 Pa at 18.6℃であった。

10 時 20 分から一旦電源を落として 5 分間で UPS テストを行った。

11 時半から External Meteorological Meeting で気象条件の説明があり、23 日 (土) の打ち上げは見送られた。また、24 日 (日) は強風が予想されるが、晴天の予報なので

打ち上げの可能性を残すことになった。さらに、25 日（月）は悪天候が予想され、次に打ち上げの可能性があるのは 26 日（火）であることが報告された。毎日 10 時と 18 時に天気予報がでるので、その時のデータを用いて計算している。

13 時から、Flight Readiness Review (FRR) が行われた。これは、全担当チームのリーダーが出席し、打ち上げに向けてすべての準備が整っていることを確認する会議である。各チームのトップが書面にサインして、打ち上げが GO となった。

#### Day 11 23 日（土）

休み。Daily meeting もなし。11 時半に External Meteorological Meeting にオンライン参加。現状の予定に変更がないことを確認した。

今夜、日本チーム主催のパーティを開催することを決め、3 名で Kiruna 唯一の酒屋などに買い出しに出かけた（小さなカップとアサヒビールを全 20 本購入）。昼食は旧市街地の西側にあるハンバーガー屋 STEJK でトナカイの肉とポテトを食べた。そこで、ヨーテボリ大学に留学中の北大経済学部が率いるグループに出会った。19 時半から、日本酒 5 本を飲み比べるテイスティングパーティを開催した。好みの日本酒にシールを貼ってもらったところ、図 11 の結果になった。

#### Day 12 24 日（日）

休み。久しぶりに晴天であった。朝のミーティングもなし。11 時半に External Meteorological Meeting を行った。アメリカモデルでは 26 日（火）に打ち上げ可能との判断が得られたが、ヨーロッパモデルでは打ち上げ可能範囲外の結果が得られていることが報告された。LiFiCo チームは事前に準備が必要なため、18 時にカウントダウンに入るかどうかを判断することになった。



図 11 日本チーム主催のテイスティングパーティ（Japan パーティ）。上段は、その際に振る舞った日本酒 5 本。下段は人気投票の結果。

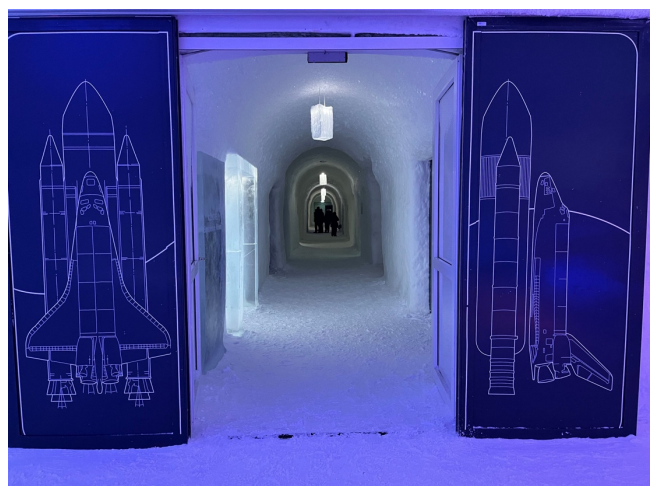


図 12 Ice Hotel の敷地内で冬季だけ開業する低温室。各部屋は、それぞれ異なるアーティストによって設計されており、宿泊可能な氷のベッドも置かれている。



14 時半に日本チームで Ice Hotel へ行き、低温室を見学した (図 12)。トマムのアイスビレッジを参考に行っているとのことであった。

18 時発表の天気予報データを元に再度検討が進められ、天候に変化がないことから、26 日 (火) の打ち上げに向けてひとまず進めることになった。

#### Day 13 25 日 (月)

Daily meeting はなし。9 時から Science Meeting を行い、打ち上げまでの作業の確認をした。9 時 10 分にペイロードに電源を入れて、実験装置のデータを確認した。IF チェンバー圧力 39,447 Pa at 17.2℃、IR チェンバー圧力 39,255 Pa at 18.0℃、DUST 実験区画の温度 18.2℃、湿度 19.9%、露点温度 -5℃であった。

11 時半からペイロードに窒素ガスを流し始めた。Jianning 氏がコロナに罹患して離脱中なので、ミッションマネージャーの Stefan 氏が PC 操作でバルブの開閉を行った。この時、湿度 2.1%、温度 20.4℃、露点温度 -30℃であった。

External Meteorological Meeting で、明日ロケットを打ち上げられる時間帯は 6-12 時であり、4-6 時に風が弱い予報なので、6 時ちょうどの打ち上げを狙うことになった。研究チームの micaTin は生物試料を取り扱っており、バッテリーでペルチェ素子を駆動させて 4 時間の間 4℃ に保つことが出来る。そのため、実験後は 4 時間以内にエスレンジの実験室まで試料を戻す必要がある。霧が晴れてヘリを飛ばせるようになるのが 9 時の予報であり、この制約から 6 時よりも早く打ち上げることは出来ないとの説明を受けた。

打ち上げが当初よりも遅れたために、レンタカーとレンタル Wi-fi の延長手続きを行い、早朝の打ち上げに備えるため 16 時に就寝した。

#### Day 14 25 日 (月)

19 時半に起床して、23 時に集合し、軽食を取った。23 時半に (T-6h) 予定通りカウントダウンが開始された。Jianning 氏がコロナ罹患による隔離から戻ってきた。

26 日 (火) 1:16 (T-4 h 14 m) に Payload Checkout を行った。DUST の実験区画の温度 6.94℃、湿度 17.8%、露点温度 -15.9℃、IF チェンバー圧力 37,973 Pa at 6.2℃、IR チェンバー圧力 37,701 Pa at 6.8℃であった。

4:40 (T-50 m) に Final Payload Checkout を行った。DUST の実験区画の温度 7.2℃、湿度 18.2%、露点温度 -15.5℃、IF チェンバー圧力 37,977 Pa at 6.1℃、IR チェンバー圧力 37,662 Pa at 6.4℃であり、規定内だった。4:53 (T-37 m) Checkout 完了。ここまで一度も作業の遅れや不具合等によるカウントダウンの停止 (Hold) に陥ることなく進んだ。

5:10 (T-20 m) 6 時に打ち上げるために 30 分間 Hold した。技術部の 2 名は、打ち上げを見るために Lader Hill に移動した。

5:40 (T-20 m) カウントダウンを再開。横殴りの雪と強風の気象状況にあったので (図 13)、T-15 min にバルーンを放出して打ち上げの最終判断を行った。

5:52 (T-8 m) SSC 側データの保存開始。



図 13 SSC がリアルタイムで打ち上げの様子を配信した際の YouTube 画面。横殴りの雪が降っていることが分かる。左上は現在のステータス。右下はランチャー。

5:55 (T-5m) IF チェンバー圧力 37,972 Pa at 5.7℃、IR チェンバー圧力 37.638 Pa at 5.8℃。その後、打ち上げまでに圧力計と加速度センサーの電源が 2 回落ちた。打ち上げの可否を迫られたが、これまでに一度も見られなかった不具合であり、打ち上げを止めたとしても短時間で原因究明に至らない可能性が高いと見込まれたこと、次の打ち上げ機会は数日後であること、打ち上げ後に電源が落ちても、コマンドを送って電源を投入可能であることなどを総合的に判断して、そのままカウントダウンを続ける判断をした。

6:00 (T=0) 打ち上げ。T+750 s で打ち上げ時に開けた DUST 装置と外気を繋ぐバルブを閉めてすべての工程を終了し、実験を完遂した (図 14)。打ち上げの様子は、45 分前から SSC の Youtube チャンネルで配信され、日本からも多くの方に見て頂いた (図 13)。

9 時から帰宅用の飛行機の予約を取りながら真空装置を片付けた。

10 時半にペイロードはヘリコプターに吊るされてエスレンジに戻ってきた (図 15)。回収クルーからの報告と写真によると、ペイロードは膝ぐらいまである雪に覆われた湖の端で発見された。湖は凍っているだろうとの予想の元に作業を開始し、実際に凍っていた。ペイロードは厚さ 10 cm くらいの氷の層にぶつかって底部を損傷した (図 16)。その底部に取り付けられていたサブペイロードは、本体との間にかろうじて細いケーブルが 1 本つながっていたため、見失わずに回収することが出来た。11 時には全チームメンバーが実験の成功を祝い、スパークリングワインで乾杯した。

早速に真空装置を木箱にしまって (図 17)、11 時半に技術部 2 名をキルナ空港へ送り、SNS への発信、プレスリリースの準備などを行った。15 時頃には DUST のペイロード部は他の実験装置から分離され、机の上に置かれた (図 18)。16 時過ぎに Jianning 氏と得られた実験データと翌日の片づけについての打ち合わせを行った。また、輸送業者に対して実験装置を日本へ発送する手配を開始した。

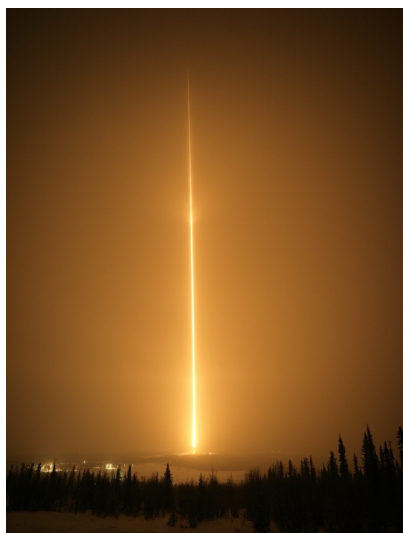


図 14 打ち上げ時に撮影された観測ロケット (© O. Jansson, S. Krämer, SSC)。



図 15 MPF に戻ってきたペイロード。着雪したために外筒にこびりついた雪を落としている。



図 16 帰還時に湖の氷に衝突して損傷したペイロードの下部。



図 17 低温研の二名の技術職員により真空排気装置が木箱に収納される様子。

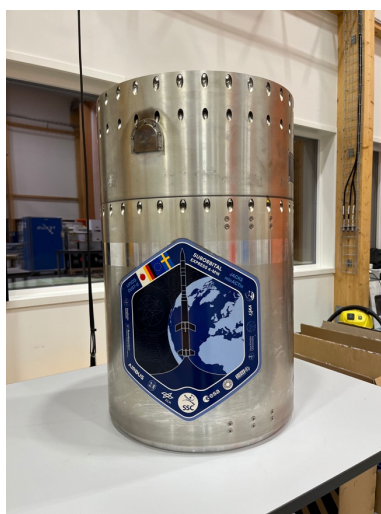


図 18 机上に置かれた実験後の DUST のペイロード部。



#### Day 15 27日(水)

9時から作業開始。ペイロードの外筒がエタノールで洗浄され、クリーンルームへと運ばれた。30分の昼食をはさんで、作業は13時20分に終了した。14時から2時間程度 Post Flight Meeting が行われ、打ち上げ結果について各班から報告があった。特にインパクトがあったのは、 $T+47.7s$  で GPS データが届かなくなった点である(上空 0.8km が最後のデータ点)。他には、 $T+15.0$  で第二段エンジン点火、 $T+50.00$  で Yo-yo release などの報告があり、DUST の結果も述べた。その後、実験装置の最後の片づけを行い、輸送用木箱 2 ケを輸送できる状態にした。

18時から Campaign Dinner パーティが開催され、20時から観測ロケットの準備を行っていた多目的施設(MPF)で二次会が開催された(図 19)。

#### Day 16 28日(木)

得られた DUST 実験のデータを確認し、SSC 側で取得したデータを受け取った。その後、10時半頃にエスレンジを後にした。

#### Day 17 29日(金)

機内で実験データおよび写真の整理。

#### Day18 30日(土)

帰国。

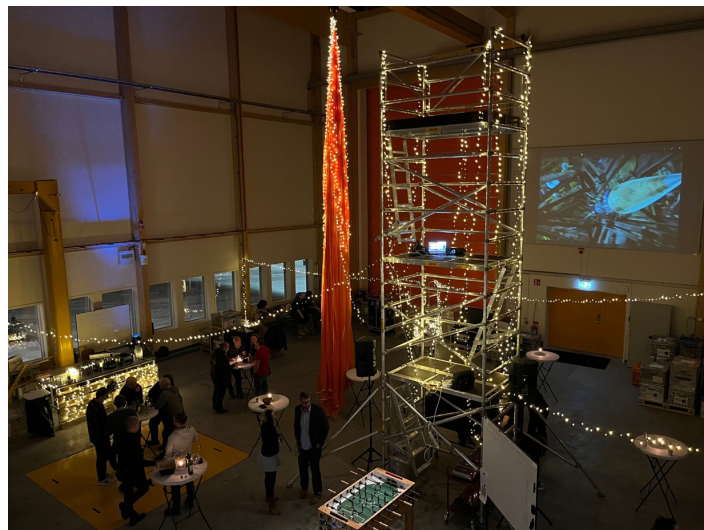


図 19 ロケットの準備を行っていた多目的施設(MPF)で開かれた二次会の様子。中央に吊るされているのは、ロケットが帰還した際に使用したパラシュート。

実験装置と真空排気装置が収められた木箱 2 ケは 12 月 5 日(木)にエスレンジから発送され、1 月 10 日(金)に低温研に到着した。その後は、取得データの解析、核生成チェンバーを開封して粒子の載った透過電子顕微鏡観察用グリッドの回収と分析、予備用に準備していた干渉計装置を使った地上対照実験の実施などを進めている。これまでのところ、予定通りのデータが取得できていることを確認しており、成果をまとめる作業を行っている。

## 次の観測ロケット実験

アメリカ側で提案していた次の観測ロケット実験のテーマが採択され、当初は 2025 年秋から 2026 年 1 月頃の打ち上げが予定された。その後、アメリカの政権が変わったことで NASA の予算が大幅に削減となり、ロケットの打ち上げ回数が激減した影響で、我々の実験は 2026 年の秋頃に延期となった。この実験に関しては、次の技術報告会で紹介する。

## 謝辞

本プロジェクトは宇宙科学研究所小規模計画、同戦略的基礎開発予算、基盤研究 (S)、北大コアファシリティ事業「R&T コラボプロジェクト」を元に推進しています。観測ロケット SubOrbital Express 4 は、ドイツ航空宇宙センターとスウェーデン宇宙公社により打ち上げられました。本プロジェクトの準備では、宇宙科学研究所宇宙環境利用専門委員会、同観測ロケット専門委員会、北海道大学低温科学研究所をはじめ、業者の方々、相談に乗って頂いた関係者の皆さまなど多大なご協力を得ました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 木村 勇気、齋藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、左近 樹、稲富 裕光、海外の観測ロケットを用いた微小重力実験用ダスト再現装置の作製、北海道大学低温科学研究所技術部技術報、**24** (2018) 40 – 45.
- [2] 木村 勇気、齋藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、稲富 裕光、微小重力実験用ダスト再現装置の動作結果：海外の観測ロケット実験を終えて、北海道大学低温科学研究所技術部技術報、**25** (2019) 1 – 12.
- [3] 木村 勇気、齋藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、稲富 裕光、同一実験装置を用いた観測ロケットによる複数回の微小重力実験の実施、北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**26** (2021) 4 – 19.
- [4] 木村 勇気、齋藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、稲富 裕光、海外の観測ロケットを用いた実験の報告：3 回目の実験から 4 回目の実験に至るまで、北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**30** (2024) 28 – 36.



## 編集後記

今年で 31 回目を数える低温科学研究所技術部技術報告会が開催されます。令和 7 年 7 月 1 日より北海道大学の技術職員組織が「技術連携統括本部 (ITeCH)」となり、大学内での教育研究を支援していく上でより良い組織となるべく新しい一歩を踏み出したところです。

低温科学研究所の技術部は大学内でも噂になるほど、教員と技術職員との素晴らしい信頼関係のもと日常業務が行われています。これもひとえに教員や事務部をはじめ所内のすべての皆様に支えられてのことと技術部一同、感謝申し上げる次第です。

今後も皆様のご期待に応えられるよう技術を磨き、人間性を磨き、技術部全員で切磋琢磨しながら成長していきたいと考えております。

最後に皆様のご健勝とご多幸お祈り申し上げ巻末の挨拶とさせていただきます。

2025 年 12 月発行

編集者：佐藤 陽亮、山下 純平

北海道大学 低温科学研究所 技術部

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目