北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

第30号

2024年12月

北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

第30号

2024年12月

2024年度技術報告会開催に寄せて

第 30 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。

本報告会は、技術部職員にとっては、所内外の多数の教員や学生の皆様と直接議論を させていただくことができる、大変重要な行事です。技術部職員にとっては、自らの技 術が所内外の皆様の研究にどのように活かされているのかを知ることは、技術者として の大きなやりがいになります。また、今後さらにどの様な技術が皆様に必要とされてい るのかを知ることは、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これほど嬉しいことはありません。本報告会が実り多いものとな ります様、活発にご議論していただけます様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稀有です。このような技術部の研究支援に支え られることで、低温研では大変ユニークで優れた研究業績を出すことが初めて可能とな 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て行く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様、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、ご発表いただけます 方、ご出席いただいた方に厚くお礼申し上げます。

> 2024年12月6日 技術部長 佐崎 元

目次

1. ダイオードツリーを用いた樹冠の光吸収様式の解析 一層間の鉛直距離および反射の効果について一 細井 新悟、森 章一、千貝 健、小野 清美、隅田 明洋 1 2. ビデオカメラを使った降雪粒子自動観測 勝山 祐太、稲津 將、川島 正行、平田 康史、藤田 和之、森 章一 4 3. 体験型実習テーマの開発 4. 大気エアロゾル採取のための風向風速制御装置の製作と エアロゾル中の鉄溶解率の研究 西岡 純、森 章一、村山 愛子、岩元 勇太 11 5. 南極海における鉄測定のための クリーンコンテナラボおよび CTD システムの構築:その2 西岡 純、小野 数也、村山 愛子、森 章一、佐藤 陽亮、藤田 和之、 斎藤 史明、平田 康史 14 6. 全反射照明可能な氷気相成長チャンバーの製作と応用 村田 憲一郎、斎藤 史明 18 7. 第三期南極氷床深層掘削機の電装システムの開発 森 章一、佐藤 陽亮、的場 澄人 23 8. 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 木村 勇気、斎藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、稲富 裕光 28

ダイオードツリーを用いた樹冠の光吸収様式の解析 一層間の鉛直距離および反射の効果について一

細井 新悟¹、森 章一²、千貝 健³、小野 清美⁴、隅田 明洋¹

1. 京都府立大学生命環境科学研究科

- 2. 技術部装置開発室
- 3. 技術部先端技術支援室
- 4. 生物環境部門生物適応分野

はじめに

葉群内の光の減衰を表す式として Beer-Lambert 則が知られている。このモデルでは 光の減衰は葉群上部からの積算葉面積密度の指数関数として表されるが、葉同士の鉛直 方向の距離や下側の葉から上方に向かう反射光の影響は陽に考慮されていない。そこで、 多数の小型のフォトダイオードを同一平面上に配置し葉層に模したダイオード盤を鉛直 方向に複数層設置した測定システム(ダイオードツリー)を製作し、これを樹冠に見立 てて樹冠の光吸収様式を調べた。このダイオードツリーシステムは十分に Beer-Lambert 則を成立させているが、層間の鉛直距離との関係や反射光の影響については確 認できていなかった。そこで、以前のシステムよりも層間の鉛直距離を近づけることが でき、層の下面にもダイオードを配置することで下面からの光(上方向に向かう光)を 測定できる新しいシステムを用いて実験を行った。

実験の概要

複数枚のダイオード盤を鉛直方向に配置したダイオードツリーを用いて実験を行った。 一枚のダイオード盤は、一辺3mm程度の小型フォトダイオード640個を直径20cmの 円内に配置したものである。ダイオード盤同士の光の反射による影響を測定するため、 上下両方向に向けてダイオードが配置された両面ダイオード盤と、下面を黒体塗料で塗 装した黒塗りダイオード盤の2種類用意した(図1)。ダイオードツリーは、高さ1mの 円筒で覆い、円筒上部からLEDの光源を照射し、各ダイオード盤で生じた電流量をPC に記録した。円筒は、内部を鏡面に加工した鏡面円筒と、黒体スプレーで塗装した黒塗 り円筒の2種類用意した(図2)。鏡面円筒は現実の植物群落がおかれる環境に近い水平 方向に均質な空間を模すために、黒体円筒は円筒内面からの光の反射を抑えるために製 作された。

ツリー各層の受光量を調べるため、5枚のダイオード盤と鏡面円筒を用いて実験を 行った。取り付けたダイオード盤を上から順にL1,L2,L3,…と名付けた。L1-L4を両 面ダイオード盤、L5を黒塗りダイオード盤とした両面ダイオード盤のツリーと、L1-L5全て黒塗りダイオード盤を用いたツリーの2種類を用いた。L1の深さを固定し、ダ イオード盤の層同士の間隔を2-7cmの範囲で1cmおきに変え、それぞれでの電流量を 記録した。各面の受光量は L1 の上面の発電量に対する相対値として算出した。円筒の 開口部面積に対する各ダイオード盤のシルエットの面積の円筒上部からの積算値を積算 被圧物面積と称する。

また、ダイオード盤各面の受光量に対する層間距離の違いの影響を調べるため、両面 ダイオード盤2枚と黒塗り円筒を用いた実験を行った。L1の位置を固定し、層間距離が 2-5 cm となるように L2 の深さを1 cm おきに変え、それぞれで受光量を測定した。

Beer-Lambert の法則では、光の吸収量は層間の距離に関係がないため、ツリーの受 光量は層間の距離によって変化しないはずである。



図 1 (a) 両面ダイオード盤と(b) 下面を黒塗りにしたダイオード盤。



図 2 (a) 内面を鏡面に加工した鏡面円筒と(b) 黒体スプレーで塗装した黒塗り円筒。

主な結果と今後の課題

両面ダイオード盤のツリーにおいて、ダイオード盤の下面が受ける光の量は、多いと ころで同じ層の上面の40%程度に達した(図3)。積算被圧物面積の増加に対するツリー 各層の相対受光量の変化は完全な指数関数とならなかった。一方、下面が黒塗りダイ オード盤のツリーにおいてはほぼ完全な指数関数関係が成立した(図4)。

また、2枚の両面ダイオード盤を用いてダイオード盤同士の光の反射と層間距離の関係を調べた実験の結果を図5に示した。層間距離が3cmから5cmまでは次第に受光量が有意に減少した(図5)。一方、層間距離が3cmの時に比べて2cmの時の方が有意に受光量が少ないことから、層間の距離がごく近い場合にはダイオード盤L2がダイオード盤L1の影の影響を受けて受光量が下がることが予想される。

今後は層間距離の違いによる各面の受光量の違いをより詳細に調べるため、層間の距離を 5 mm ごとなどに設定した実験や、ツリー全体の発電量と層間距離との関係を調べる予定である。



図3 鏡面円筒における両面ダイオード盤の ツリー各層の相対受光量。層間距離を 4 cmに設定した時の結果を示す。



図 4 鏡面円筒における黒塗りダイオード盤
 のツリー各層の相対受光量。層間距離
 を 4 cm に設定した時の結果を示す。



図 5 2 枚の両面ダイオード盤を用いた、層間の距離と下側のダイオード盤上面の受光量 との関係。エラーバーは標準偏差を示す。異なるアルファベットは差が有意である ことを示す(Tukey HSD Test)。

ビデオカメラを使った降雪粒子自動観測

勝山 祐太¹、稲津 將²、川島 正行³、平田 康史⁴、藤田 和之⁴、森 章一⁴

- 1. 森林総合研究所十日町試験地
- 2. 北海道大学大学院理学研究院
- 3. 水·物質循環部門大気陸面相互作用分野
- 4. 技術部装置開発室

はじめに

温帯低気圧に伴う雲粒の付着が少ない降雪により形成された低密度・低強度の積雪層 (弱層)に起因する雪崩が度々発生し、スキー場や道路、登山者等に被害を与えている。 このような弱層を考慮して雪崩災害を予測するためには、気象モデルが降雪粒子の情報 を正しく計算できることや降雪直後の新雪密度・強度を正確に把握することが必要であ る。降雪粒子の観測は、ディスドロメーターと呼ばれる気象観測装置を用いて行われ、降 雪粒子の粒径と落下速度のデータが得られる。しかし、降雪粒子観測は全国的に不足して いるほか、長期間の観測例も少なく、気象モデルにおける降雪粒子に関する計算結果の妥 当性はほとんど確かめられていない。そこで、長期間の運用が可能な降雪粒子を自動観測 する観測装置を製作し、日本の積雪地域に複数設置することで、広域・多地点観測を実施 した。本稿では、2016/2017年冬季に低温科学研究所で実施した事例を基にして、市販 品との比較検証結果(Katsuyama and Inatsu, 2021)を紹介する。

降雪粒子自動観測装置

降雪粒子の粒径と落下速度を観測・保存する降雪粒子自動観測装置を製作した(図1)。 製作した装置は、1000 mm×300 mm×300 mmの直方体の筐体の一方に安価な USB カ メラを備え、筐体中央を落下する雪粒子によって反射・散乱された LED 光をカメラが撮 影する(図2)。カメラのシャッター速度は1/45 秒とし、粒子を残像として捉える。得ら れた画像は、背景差分による動体検出、二値化処理、膨張・収縮によるノイズ除去を行っ たのちに、残像の大きさから粒径・落下速度を算出する。カメラの撮像領域は約80 mm× 120 mm×100 mmの直方体となっており、この空間内に存在する粒子を約1/30 秒のサ ンプリングレートで検出する。また、風の影響を抑えるため、筐体の周囲 1 m×1 m を防 風ネットで囲んだ(図1)。

方法

製作した降雪粒子自動観測装置(Volume Scanning Video Disdrometer; VSVD; Katsuyama and Inatsu, 2021)と市販品の降雪粒子自動観測装置(2–Dimensional Video Disdrometer; 2DVD; Kruger and Krajewski, 2002)を低温科学研究所に設置し、 2016/2017年冬季に観測を実施した。VSVDと 2DVD は、どちらも、各降雪粒子の粒径・



図1 低温科学研究所に設置した降雪粒子自動観測装置。



図 2 低温科学研究所技術部が製作した降雪粒子自動観測装置の内部の様子。中央部上面 には降雪粒子取込口があり、ここに入った降雪粒子は筐体内部を自由落下し、中央 部下面より外部に排出される。筐体の一方に備えられているカメラによって自由落 下中の降雪粒子を撮像する。

落下速度を計測・保存する。得られた観測データは5分毎に積算し、VSVDと2DVDの 双方で5分間の合計粒子数が500個以上となったときを対象にして比較検証を行った。

比較検証では、VSVD と 2DVD とで観測される粒径分布の単位が異なることを利用する。VSVD はある有限体積内に存在する降雪粒子を検出するのに対して、2DVD はある有限面積を通過する降雪粒子を検出する。そのため、時刻 t から $t + \Delta t$ の間に観測データから直接得られる降雪粒子の粒径分布は、VSVD では、

$$n_{\rm V}(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d+\Delta d]} \frac{z_i}{v} \tag{1}$$

となり、2DVDでは、

$$\rho_{\rm F}(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d + \Delta d]} \frac{z_i}{s} \tag{2}$$

となる。ここで、*d*, Δd , z_i , *S*, *V* は、それぞれ、粒径 (mm)、粒径分布のビンサイズ (mm)、 *i* 番目の粒子の個数、検出領域の面積 (m²)、測器にサンプリングされた合計体積 (m³) で ある。式(1)は単位体積あたりの粒径分布を表し、その単位は mm⁻¹ m⁻³ となる。一方で、 式(2)は単位面積あたりの粒径分布を表し、その単位は mm⁻¹ m⁻² となる。これら 2 つの 粒径分布は、同時に観測される各粒子の落下速度を用いることで互いに同等の単位に変 換することができ、式(1)は

$$\rho_{\rm V}(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d + \Delta d]} \frac{z_i v_i \Delta t}{V} \tag{3}$$

に、式(2)は

$$n_{\rm F}(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d+\Delta d]} \frac{z_i}{S v_i \Delta t} \tag{4}$$

にすることができる。ここで、 v_i は *i* 番目の粒子の落下速度 (m/s)である。よって、粒径・ 落下速度が VSVD と 2DVD の双方で正しく観測できていれば、 $n_V(d) = n_F(d)$ および $\rho_F(d) = \rho_V(d)$ となる。正しく観測ができていないにもかかわらず、これら等式が偶然成 立してしまう可能性を完全に排除はできないが、2DVD の観測結果が正しいと仮定する ことなく VSVD の精度検証をおこなうことができる。

結果

図3に5分間の合計粒子数が500個以上となった事例の平均粒径分布を示す。粒径5mm以下の範囲では、VSVDと2DVDの単位面積当たりの粒径分布が等しく(図3a)、 VSVDと2DVDの双方で正しく粒径を計測できていること、および、VSVDで正しく落下速度を計測できていることを表す。一方で、同粒径範囲において、2DVDの単位体積当たりの粒径分布はVSVDのそれよりも若干小さく(図3b)、式(4)より2DVDはこの粒 径範囲の粒子の落下速度を過大に計測していた。粒径5mmから13mmの範囲では、 VSVDと2DVDの単位体積当たりの粒径分布が等しく(図3b)、VSVDと2DVDの双方 で正しく粒径を計測できていること、および、2DVDで正しく落下速度を計測できてい ることを表す。一方で、同粒径範囲において、VSVDの単位面積当たりの粒径分布は2DVD のそれよりも若干小さく、式(3)よりVSVDはこの粒径範囲の粒子の落下速度を過少に 計測していた。粒径13mm以上の範囲では、2DVDの粒径分布のばらつきが大きく、 VSVDと比較することができなかった。



図 3 2016/2017 年冬季に 5 分間に粒子数が 500 個以上となった事例における (a) 単位面 積当たりの平均粒径分布と (b) 単位体積当たりの平均粒径分布。実線と破線は、それ ぞれ、VSVD と 2DVD による結果を示す。

まとめ

降雪粒子を自動観測する観測装置を製作し、2016/2017年冬季に低温科学研究所で市 販品との同時観測を行った。双方の粒径分布を比較した結果、粒径13mm以下の範囲に おいて、製作した降雪粒子自動観測装置は粒径を正しく計測できていることを確認でき た。また、粒径5mm以下の範囲において、製作した装置は降雪粒子の落下速度を正しく 計測できていることを確認できた。

謝辞

2DVD の観測データは藤吉康志氏よりご提供いただきました。この場を借りて感謝申 し上げます。降雪粒子自動観測装置の筐体は、平田と藤田が製作した。

参考文献

- Katsuyama, Y. and Inatsu, M., 2021. Advantage of Volume Scanning Video Disdrometer in Solid-Precipitation Observation. *SOLA* **17**, 35 40.
- Kruger, A. and Krajewski, W. F., 2002. Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. J. Atomos. Oceanic Technol. 19, 602 – 617.

体験型実習テーマの開発

佐藤 陽亮¹、斎藤 史明¹、森 章一¹、平田 康史¹、藤田 和之¹、佐﨑 元²

- 1. 技術部装置開発室
- 2. 雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野

はじめに

令和 6 年度、北海道大学は技術支援本部並びにコアファシリティ構築支援プログラム の一環として、北海道の工業高等専門学校生を対象としたインターンシップを行うこと になり、技術部装置開発室も協力している。技術部としても人員確保は重要な問題となる が、低温科学研究所にとどまらず、これは本学の技術職員採用を円滑に進めていく上でも 大変重要なプロジェクトである。今回、開発したテーマは、工作系の分野での受け入れを 想定したもので、学生が短期間で効率良く一つの製品を完成させるための設計・段取りを 行い、様々な工作機械を操作し、かつ制御に関する知識も習得できる。また、実習により 完成した装置は実際有効に活用できるようなものが望ましいため、低温科学研究所の一 般開放などで活用できる「人工雪製作装置」の製作をテーマとした。

開発の進捗状況

低温科学研究所には、中谷宇吉郎先生が世界で初めて人工雪の製作に成功した「人工 雪製作装置」のレプリカが展示してある。そのレプリカを参考にした装置を製作するこ とを目指す。装置の部品はアクリルパイプ、ベークライト、無酸素銅などの材料を使用 し、加工は汎用工作機械、NC工作機械を使用し、切断、切削、穴あけ、ねじ切りなど を行う。また、ペルチェ素子を使用した温度制御なども行うため、体験型の実習に最適 な教材である。

図 1 に今回製作した装置の全体図を示す。断熱されたアクリルパイプの中で発生させた水蒸気を冷却することにより雪の結晶が生成される。アクリルパイプ内の冷却は、ペルチェ素子を張り付けた上下の無酸素銅製の冷却板を温度制御することにより行われる。 下側冷却板にある溝に水を溜めて、水蒸気を供給している。アクリルパイプ内のつるされた細い銅線に雪の結晶が生成される構造だが、中谷先生の研究ではウサギの毛が良いとされており、今後試してみたいと考えている。アクリルパイプは断熱のため 2 層構造になっており、上下にあるポリエチレン製の断熱板と、ベークライト製のプレートで固定されている。また、アクリルパイプには観察用の窓や温度センサー用のパイプが取り付けられている。

図 2 に改良後の装置内部の構造を示す。最初の実験では、想定していた温度までアク リルパイプ内の温度が下がらなかった。そこで、断熱効果を高めるため、アクリルパイプ を 2 層構造から 3 層構造へ変更し、上部冷却板を大型化し、冷却板を通した窒素を冷却 空間に送り込む形へと改良を施した。





図1 全体図。

図2 改良後の内部構造。



図3 実験の様子。

まとめ

今回は理論上の条件を基に目標の温度まで温度を下げるように装置を設計したが、目 標の温度までは到達しなかった。中谷先生は目標の温度まで下げるため低温室で実験を 行っていたが、今回は常温の部屋での実験だったためだと考えられる。改良を重ねて目標 に近い温度まで下げることには成功したが、結晶の生成条件を実現するため試行錯誤し ながらの開発となっている(図 3)。現段階で雪の結晶の観察までは達成できていないが、 今後も改良を重ね、装置の完成を目指していきたい。

なお、この装置の開発は令和 6 年度技術部奨励費により行われ、装置開発室全員で取り組んでいる。

大気エアロゾル採取のための風向風速制御装置の製作と エアロゾル中の鉄溶解率の研究

西岡 純¹、森 章一²、村山 愛子¹、岩元 勇太^{1,3}

- 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. 大学院環境科学院地球圈科学専攻

1. 海洋生物生産に関わる大気エアロゾル中に含まれる鉄の重要性

西部北太平洋は植物プランクトンなどによる二酸化炭素吸収能が大きな海域であり (Takahashi *et al.*, 2002)、地球規模の炭素循環において重要な海域となっている。この 海域では植物プランクトンに必須な鉄分が不足し、基礎生産が制限されている。よってこ の海域への鉄の供給を把握することは、将来の地球環境を予測する上で重要である。これ まで大気エアロゾルの一部である大気ダストを介した海洋への鉄供給の研究は多く行わ れてきた。しかし、西部北太平洋で起こる大気ダストイベントの時空間的な発生頻度、そ こからの鉄の沈着量や、海水中での鉄の溶解率など未解明な点は多く残されている。

環オホーツク観測研究センターでは、北太平洋やオホーツク海を対象とし、大気から供給された鉄がどのように輸送され、海洋に供給され、除去されるかについて研究を進めている(岩元ら2024)。本報告では、洋上大気経由の鉄供給過程の研究に必要な風向風速制御装置の製作と、それを用いて2024年度に実施した大気エアロゾルの鉄供給に関わる研究の結果について報告を行う。

注上大気エアロゾルサンプリングのための風向風速制御装置の製作と大気エアロゾルサンプラーによる観測の実施

洋上で大気中のエアロゾルサンプルを集めるためには、船の排気からの汚染を防ぎな がら大気試料を集める必要がある。本研究のサンプリングを遂行するために技術部装置 開発室で、洋上大気エアロゾルサンプリングのための風向風速制御装置を製作した。風向 風速制御装置は、Young 社製の風向風速計の電気信号を読み取り、希望の風速と風向の 時のみにエアロゾルサンプラーの電源を ON、そこから外れた時に OFF にする制御機能 を持つ。2024 年度の研究では、5 月に実施した水産教育研究機構「北光丸」親潮域 A ラ イン航海と 8 月に実施したオホーツク海を含めた北海道一周のうしお丸航海で、製作し た風向風速制御装置を船に搭載し、洋上大気エアロゾルの採取に使用した。風向風速計は 船のコンパスデッキの正面に取り付け、High Volume エアロゾルサンプラーを風向風速 制御装置を介して電源に繋ぎ使用した。低温研で製作した風向風速制御装置および大気 エアロゾルサンプラーの設置の様子を図1に示す。航海中の洋上では、風向風速制御装置 を、風速 3m/s 以上、船首から±80°方向の条件でエアロゾルサンプラーを作動させ、サ ンプリングを実施した。



図1 2024年5月A ライン航海で北光丸コンパスデッキに設置した(左上)風向風速制御装置、(右上)風向風速計、(左下)High Volume エアロゾルサンプラー、および(右下)風向風速制御装置の配線。

3. 洋上大気ダスト由来の鉄の溶解率の検討

High Volume エアロゾルサンプラーを用いて洋上で集めた大気中のエアロゾルサンプ ルは、2.5 µm 以上の粗大粒子と、それ以下の微小粒子に分けて採取された。集めた各粒 子は、混酸(過塩素酸、硝酸、フッ化水素酸)で全分解し、蒸発乾個した後、0.5 mol/Lの 硝酸溶液に溶解して、誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)で鉄(p-Fe)とア ルミニウム(p-Al)を測定した。また、粗大粒子、微小粒子中それぞれのエアロゾルがど れだけ Fe を溶解させるのかを調べるために、粒子を集めたフィルターを Fe 濃度が検出 限界以下の海水に浸し、24 時間以上室温で放置後 0.2 µm のフィルターで濾過した濾液 中の s-Fe 濃度を ICP-AES で測定し、以下の式から溶解率を求めた。

Fe の溶出率 [%]
粒子分解実験で測定した Fe を p-Fe、溶出実験で測定した Fe を s-Fe
として
$$Fe_{sol} = rac{s-Fe}{p-Fe} imes 100$$
 で算出

本研究で得られた北光丸(親潮域)やうしお丸(オホーツク海)航海で採取された洋上 大気中エアロゾルサンプル中に含まれる鉄の海水中での溶解率を図2に示す。洋上大気 中エアロゾルに含まれる粗大粒子の鉄の溶解率は、都市部(札幌、低温研屋上)で集めら れた大気ダストの溶解率よりも小さく、およそ30%であった。またオホーツク海の流氷 に含まれる粗大粒子の溶解率と有意な差はみられない。一方、洋上大気中エアロゾルの微 小粒子に含まれる鉄の溶解率は、同じく都市部で集められた大気ダストの溶解率と同等 で、海氷内の微小粒子と比べて大きな値であった。



図 2 海氷と大気(都市大気、洋上大気)に含まれる鉄の海水中への溶出率。左青グラフ 図は粗大粒子、右朱グラフ図は微小粒子。

おわりに

環オホーツク観測研究センターでは、2023年度はじめに大気エアロゾル観測の研究展 開を図り、その後、洋上の大気エアロゾルの採取に着手した。洋上の大気エアロゾルの採 取に必要不可欠な船舶で使える小型の風向風速制御装置が必要になり、技術部装置開発 室に製作を依頼した。保有していた旧式アナログの風向風速計から得られる信号によっ て制御する電子基板の製作は森が取り組み、申し分のない性能かつ小型化した風向風速 制御装置が完成した。実際に2度の航海で、洋上での使用にも耐え、耐久性、実用性、制 御装置としての性能などを確認でき、本報告にあるような洋上大気エアロゾルの研究の 展開に繋がった。今後、2月に実施される海上保安庁砕氷巡視船「そうや」の海氷観測で も洋上大気エアロゾル観測を実施するため、寒冷環境下での使用について性能等を確認 する予定である。

参考文献

- T. Takahashi, S.C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tillbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, Y. Nojiri (2002), Global sea-air CO_2 flux based on climatological surface ocean pCO_2 , and seasonal biological and temperature effects, Deep Sea Res. Part II, **49**, 1601 1622.
- 岩元 勇太、村山 愛子、西岡 純、南部オホーツク海における海氷中粒子鉄の地球化学的特性、2024 年度日本海洋学会秋季大会。

南極海における鉄測定のためのクリーンコンテナラボ および CTD システムの構築:その2

西岡 純¹、小野 数也²、村山 愛子¹、森 章一³、 佐藤 陽亮³、藤田 和之³、斎藤 史明³、平田 康史³

1. 環オホーツク観測研究センター

- 2. 技術部先端技術支援室
- 3. 技術部装置開発室

1. 南極海における鉄観測の重要性

南極海は栄養塩が豊富な海域であり、生物生産が微量栄養物質である鉄によって制限 されている海域である。そのため、生物生産の多寡を決める要因は、どこからどれだけ鉄 分が供給されるのかに左右されている。現在、日本の南極観測が実施されている東南極に 位置する氷床と海洋が接している海域では、氷床融解や海氷の消長にともなう海洋循環・ 物質循環に駆動される鉄供給過程が、生物生産を制御する重要な要因と考えられる。しか し、この海域は非常に氷が厚く、一般的な観測船だと海氷域にすらアクセスできない。特 に東南極の厳しい海氷域の中、氷河の手前まで侵入し観測するには、砕氷船「しらせ」以 外不可能である。そこで我々はこの海域での鉄の観測を実現させるため、砕氷船「しらせ」 で利用可能なクリーンコンテナラボの製作を 2022 年度から行なっている。

2. 2023 年訓練航海でのクリーンコンテナラボによる鉄観測の分析結果

砕氷船「しらせ」において鉄観測を実施するためには、「しらせ」船上に汚染なくクリ ーンにサンプルを採取するための環境を整えることが必須であり、専用のクリーンコン テナを構築することが重要であった。元々環オホーツク観測研究センターで保有してい たコンテナラボ(西岡と小野、2011)をクリーンコンテナラボに改造し、鉄観測を実施で きる環境を整えることを進めた。実際の南極での観測が行われるのは、2024 と 2025 年 度 2 月(第 66 次、第 67 次南極観測)だが、砕氷船「しらせ」での鉄観測を実現させるた め、昨年度から夏季に行われている「しらせ」訓練航海の機会を利用して、実際の船上で のテスト等を実施している。

小野ら (2023) での報告のとおり、2023 年夏、「しらせ」訓練航海用にクリーンコンテ ナ (図 1) を搭載し、実際にクリーン観測を実施した。昨年の技術部報告会では取得した データの分析が間に合っていなかったため、本年度はまず 2023 年度訓練航海で実施した テストの結果について報告を行う。クリーン CTD カルーセル採水用キャスト (以下 CTD キャスト)は SBE32c メモリー式カルーセルと SBE19 Plus CTD センサーからなり、低 温研技術部において 12L ニスキン採水器が装着できるようにフレームを改造したものを 使用した (図 2)。テスト観測は、2023 年 9 月 27 日に千葉沖 140.1°E、34.02°N の測点 で実施した。ここでは、CTD キャストによる採水がクリーンに実施できているかどうか を確認するために、CTD キャストおよびケプラーワイヤーによる直付け採水の両方を実施し、比較検討を行った。CTD キャストはワイヤー線長で 1000 m まで繰り出した。down キャストで採水し、08:00 頃開始、09:25 頃終了した。直付けキャストはキャプスタンを 利用してケプラーワイヤーを水中に投入・揚収し、ニスキン採水器を直にワイヤーへ装着 し、希望の深さまで設置後、テフロンメッセンジャーで採水器を閉じ、その後揚収した。 直付けキャストは 09:40 頃開始、10:01 頃終了した。CTD キャストによる採水は 10, 20, 30, 50, 80, 100, 125, 200, 300, 400 m 深度から採水し、比較用の直付け採水は 20, 50, 100 m から採水した。採水後、ニスキン採水器はクリーンコンテナに運び込み、架台に設 置し、クリーンエアー下で分析用のクリーン洗浄済みのポリエチレン瓶に採取した。その 際、未濾過海水のほか、0.2 µm 以下の画分を集めるためにカートリッジフィルター(アク ロパックフィルター、Pall 社製) を通した濾過水も採取した。



図1 2023年8月、「しらせ」に搭載 中のクリーンコンテナ。一つ下 のフロアで利用する。



図 2 2023 年 9 月 27 日に千葉沖測点で実施 した CTD キャストによるクリーン採 水を実施している様子。

採取したサンプルは低温科学研究所に持ち帰り、陸上実験室のクリーンルームで分析 を実施した。採取したサンプルは超高純度塩酸(Tamapure AA-10、多摩化学工業)をス パイクし、pH 2.0以下で2週間以上保存し、その後、分析直前に超高純度アンモニア水 (Tamapure AA-10、多摩化学工業)、過酸化水素水(原子吸光分析用、富士フィルム和光 純薬)、蟻酸-アンモニウム緩衝液にて pH 3.2 に調整した。分析には8キノリノール濃縮 -ルミノール化学発光原理を利用したフローインジェクション Fe 分析システム(紀本電 子社製 EN701)を用いた。 分析の結果を図3に示す。未濾過のトータル鉄(T-Fe)と0.2 μmの濾液中に含まれる 溶存態鉄(D-Fe)の鉛直プロファイルは、千葉沖で過去に信頼のおける方法で分析され た鉄濃度レベルと大きな違いはなく、妥当な鉛直プロファイルが得られた。また、CTD キャストで採水した値と直付け採水で得られた値はよく一致しており、両方の採水方法 は汚染なくサンプルが取得されていることが確認できた。またこれらのサンプルは北海 道大学低温科学研究所、東京大学大気海洋研究所(AORI)、海洋研究開発機構の三機関で 分析しており、正確な値が得られるかどうかのチェックも行われた。現時点では、低温研 で分析したサンプルは、AORI で分析された値とよく一致しており、両機関ともに正確な 分析ができていると考えられる結果となった。



図3 2023年9月27日に千葉沖140.1°E、34.02°Nの測点で実施した CTD キャストに よるクリーン採水と直付け採水による鉄濃度の比較。T-Fe:未濾過のトータル鉄、 D-Fe: 0.2µmの濾液中に含まれる溶存態鉄を示す。

3. クリーンコンテナラボ内の採水器架台の改造

2章で記したとおり、これまでに開発してきたクリーンコンテナシステムとクリーン採 水システムはテストを終了し、第66次、第67次南極観測で使用できる目処が立った。 しかし、一点、採水器の架台に問題が残っていた。第66次、第67次南極観測では鉄の 同位体の測定なども実施する予定となっており、大量の濾液サンプルを採取する必要が ある。現在のシステムでは、その濾液を採取する方法として比較的有効濾過面積の大きな カートリッジフィルターをニスキン採水器の採水口にシリコンチューブで繋ぎ、採水し た海水の自重で濾過を実施しており、大変時間のかかる作業を必要としていた。そこで、 本年度に新たな採水器架台を構築し、コンプレッサーによるクリーンエアーを採水器に 送り込み、加圧して濾過ができるシステムを組み上げた(図4上)。クリーンコンテナに は採水器6本分のこの新たな架台を装着した(図4下)。



図4 (上)新たに作成した加圧濾過採水システムを備えたニスキン採水器架台の 固定イメージ。(下)コンテナ内に6本分設置できるように装着した。

おわりに

本年度9月までに、2022年度から約2年間かけて環オホーツク観測研究センターと技術部で整備を進めてきた南極における鉄観測に使用するためのクリーンコンテナラボとクリーン CTD 採水システムをほぼ完成させ、実際に第66次、第67次南極観測で使用するためのテストと準備を完了した。先ずは、本番となる2025年2月に、第66次「しらせ」 航海で、これら構築したシステムを用いた観測を実施する予定である。その後、2026年2月の第67次に繋げて、南極海氷河周辺海域の鉄と生物生産の関係に関する研究を進める。

参考文献

- 西岡 純、小野 数也 「2011 年ゴルディエンコ号オホーツク海観測支援体制」北海道大学低温科 学研究所技術部技術報告、17、1-5、2011 年 12 月。
- 小野 数也、西岡 純、村山愛子、森 章一、佐藤 陽亮、藤田 和之、斎藤 史明、平田 康史「南極 海における鉄測定のためのクリーンコンテナラボおよび CTD システムの構築」北海道 大学低温科学研究所技術部技術報告、29、18-23、2023 年 12 月。

全反射照明可能な氷気相成長チャンバーの製作と応用

村田 憲一郎 1,2、斎藤 史明 3

- 1. 共同研究推進部
- 2. 雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野
- 3. 技術部装置開発室

はじめに

氷の表面は氷点下であっても非常に薄い水膜(擬似液体層と呼ばれる)で濡れている。
氷の表面融解として知られるこの現象の研究の歴史は古く、電磁気学の祖として名高いマイケルファラデーの着想に端を発するといわれている。以来、この現象自体への興味もさることながら、氷上の潤滑、凍上現象、着氷をはじめとする寒冷圏での様々な自然現象を理解する鍵としてこれまで精力的に研究が進められてきた。しかし、その多くが空気や窒素ガスなどの気相に接した裸の氷結晶を対象にしており、金属、無機・有機物(誘電体)などの気体以外の異種物質と接した界面での融解現象(界面融解と呼ばれる)の理解は進んでいなかった。とりわけ上述の自然現象とのつながりを検討するうえでは裸の氷表面だけではなく、様々な異種物質に接した氷界面を包括的に扱う必要がある。

しかし、研究対象となる氷と異種物質の界面(固体-固体界面)は、原子間力顕微鏡を はじめとするプローブ顕微鏡や表面増強ラマン分光や和周波発生分光などの先進的な表 面選択分光法の適用は困難である。そこで本研究では、マイクロ・ナノ微粒子と氷結晶の 界面に着目し、その微粒子の実空間ダイナミクスを介して氷の界面の動態を明らかにす る手法を選択した。

そのための実験的アプローチとして、従来の氷気相成長チャンバーに全反射照明シス テムを組み込み、氷結晶表面上の微粒子からのエバネッセント光の散乱の検出と高分解 光学顕微鏡によるその場観察を同時に実現する観察システムを考案し、装置開発室の協 力のもとで設計・開発した。本稿では、本観察システムで得られた実験状況についてその 概略を報告する。

氷気相成長チャンバーと全反射照明システムの両立

本システムの概略を図1 に示す。従来の気相成長チャンバーと同じく、観察する氷結 晶は基板上にヘテロエピタキシャル成長させるが、成長させた氷結晶表面にエバネッセ ント光を発生させるため、成長基板は直角プリズムの上に置かれている(チャンバー下 部)。サンプルとなる氷結晶の温度制御は、ペルチェ素子により直角プリズムを冷却・加 熱することで行われる。他方、サンプル氷を成長させる水蒸気圧は、チャンバー上部にあ らかじめ成長・付着させた氷を温度制御することで調整する。チャンバー下部と上部は断



T_{prism} :プリズム(基板)上のサンプル氷の温度

図1 今回製作した全反射照明用氷気相成長チャンバーの概略図。LCM-DIM はレー ザー 共 焦 点 微 分 干 渉 顕 微 鏡 (Laser Confocal Microscopy-Differential Interference contrast Microscopy)の略。SLD は LCM-DIM 観察用の光源とし て使用しているスーパールミネッセントダイオード (Super Luminescent Diode)の略。エバネッセント光発生のための全反射照明用光源の波長とSLD の 波長は異なるため、ダイクロイックミラーなどで LCM-DIM 観察と微粒子から の散乱光の検出を同時に行うことができる。

熱されており、また挟まされた空間は完全に密閉されているので、観察するサンプル氷の 温度と環境中の水蒸気圧を独立に制御することができる(上部の氷はサンプル氷よりも 多量に付着させており、上部の温度で決まる平衡蒸気圧が空間全体の蒸気圧となる)。以 上の基本コンセプトは従来の気相成長チャンバーと同じである。

当初、熱接触の観点から、直角プリズムの温度制御特性に懸念を抱いていたが(チャン バー外部からレーザー光を導入するため熱浴との接触部分は側面のみに限られる)、温度 校正のため氷の融点を測定したところ、実温度との差は概ね 0.5℃程度であり、また、温 度変化に対する応答性も、0.1℃未満の温度変化にも氷結晶上の単位ステップのダイナミ クスがすぐに追随するほど良好であった。

一方、基本コンセプトは従来型のチャンバーと共有しつつも、微弱である微粒子からの エバネッセント光の散乱を検出するための工夫を凝らしている。サンプルからの光を取 り込む効率は開口数の二乗に比例するため、観察面の距離をできだけ短くするようチャ ンバーを設計した。チャンバー内部のプリズム面からチャンバーの窓材表面までの距離 を4mmに抑え(従来型は10mm程度)、作動距離の短い高NA(開口数)の対物レンズ での観察にも対応している。また、-20℃程度にまで達する実験となるため、外部環境 に露出するプリズムの入射面(および全反射後の出射面)には霜が付きやすい。霜の付着 を防止するために両プリズム面に直接乾燥窒素を吹き付ける通気口も備えている。

全反射照明まわりの光学系

光学系の概略を図2に示す。エバネッセント光を誘起する光源は波長520nm、パワー 20mW(固定)のCWレーザーであり、全反射プリズムの手前にNDフィルターと半波長 板を置き、入射光の強度と偏光面を調整している。また、氷結晶を育成する透明基板には パラフィン蒸気を蒸着させたカバーガラスを使用している。実際には油浸オイルを介し て全反射用プリズムに置かれた透明基板上で氷結晶をヘテロエピタキシャル成長させる が、プリズム、油浸オイル、基板までは屈折率マッチングされた状態になっている。した がって、氷の屈折率のみを考えてレーザー光の入射角度(全反射角)を決めればよく、本 システムでは入射角度の可変域を70°±10°に設定している。

さて、氷結晶表面上にエバネッセント光を発生させるためには、面方位の定まった氷単 結晶を効率的にヘテロエピタキシャル成長させる透明な基板が必須である。本研究では 先述のとおり、カバーガラス基板上にパラフィン蒸気を蒸着することで、氷ベーサル面と プリズム面を効率よく成長させることに成功した(図3左)。従来、氷ベーサル面を成長 させる基板としてヨウ化銀がよく知られているが、透明ではないため本研究では使用で きない。加えてプリズム面を選択的に成長させる基板も知られていなかった。研究成果に 直接かかわるものではないが、氷ベーサル面およびプリズム面を効率的かつ選択的に成 長させるパラフィン蒸着基板の発見は、今後の研究を加速させるトリガーになると期待 される。



図 2 チャンバー内の全反射光学系の概略図。右は sCMOS カメラで撮影した微粒子による エバネッセント光の観察像。



図3 パラフィン蒸着基板上にエピタキシャル成長した氷単結晶。ベーサル面とプリズム面 の両方が成長している(左)。氷ベーサル面上に付着した微粒子(右下端)。ネブライ ザーによりチャンバー内に微粒子を含むエアロゾルを導入し付着させた(右)。

氷表面上へのマイクロ・ナノ微粒子の導入

本実験システムでは、成長した氷結晶の表面に微粒子を導入する方法として超音波噴 霧器(ネブライザー、nebulizer)を用いている(図 1)。具体的には微粒子が分散した懸 濁液をネブライザーでエアロゾル化してチャンバー内に噴霧している。なお、本チャン バーにはネブライザーから噴霧された液滴をチャンバー内部に導入する通気口も開けて ある。このような微粒子を内包した液滴と氷結晶との相互作用は、氷晶と過冷却雲滴が混 在する混相雲における氷晶の成長のモデルケースとして重要になると考えられる。図 3 右に実際に氷結晶表面に付着した微粒子の様子を示した。

当初はチャンバーの窓材内側面(チャンバー内部に接する面)に乾燥微粒子を予め塗 布しておき、氷結晶育成後に窓材に機械的振動を与えることで微粒子をランダムに自由 落下させ、育てた氷結晶表面に付着させることを想定していた。しかし、乾燥微粒子は粒 子同士が接着していて単一の微粒子になっていないこと、狙い通りに観察対象の単結晶 に落下・付着させることが難しいことから、この手法による微粒子の導入は断念した。

光学顕微鏡その場観察

以下に今回のチャンバーを用いた光学顕微鏡その場観察の結果を1つ紹介する。図4 は、マイクロ粒子(直径2µmのポリスチレン粒子)により誘起された氷の表面融解の様 子である。興味深いことに、マイクロ粒子により誘起される擬似液体層は何もないクリー ンな結晶表面の擬似液体層と比べてより低温域(-15℃近傍)まで存在し、高い準安定性 を示す。今回の結果は-15℃という融点近傍からかなり離れた温度領域でも擬似液体層 が存在することを示しており、本研究グループで明らかにしてきたこれまでの熱力学的 起源とは異なるメカニズムが働いている可能性がある。微粒子が結晶内部に取り込まれ る際に生じるらせん転位などの結晶欠陥の関与が考えられるが、詳細は不明である。今後 のメカニズムの解明が待たれる。



図 4 -13℃(過飽和条件)におけるらせん転位上の擬似液体層の様子。

雪の結晶が成長する上空の環境は比較的均質であり、雪の結晶は欠陥が少ないと考え られているが、エアロゾルなどの微小不純物が氷核形成を促すことが知られている。今回 得られた結果はこれらの不純物が核生成だけでなく、擬似液体層の生成に関与すること を示唆している。

おわりに

今回報告した全反射プリズムを組み込んだ気相成長チャンバーの成功を受けて、同じ コンセプトのもと全反射照明用の調湿チャンバーや融液成長チャンバー(温度勾配型) も既に開発している。前者は塩化ナトリウムの吸湿・潮解現象の研究に、後者はマイク ロ・ナノ粒子による氷融液成長の抑制効果を研究するために使用している。このように着 想した研究を実現するための実験装置の開発の多くを技術部の方々、とりわけ斎藤が 担っている。実験や研究のアイディアを相談し、実験装置の設計に落とし込む過程は実験 研究の醍醐味の一つである。技術部の方々の日頃の多大なご支援に対し、この場を借りて 心から感謝申し上げます。

第三期南極氷床深層掘削機の電装システムの開発

森 章一¹、佐藤 陽亮¹、的場 澄人²

1. 技術部装置開発室

2. 環オホーツク観測研究センター

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10万年に変化した時期が 100万年前にあたり、その実態とメカニズムの解明することである。これまで、日本の南 極地域観測隊は、第一期、第二期掘削において3000mのアイスコアを取得し、日本のア イスコア研究コミュニティーによって約72万年間の環境変動が復元された。第三期計画 では、復元できる期間が100万年を越えるアイスコアの取得を目的に、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年シーズンより、深層掘削が本格的に開始される。

低温科学研究所は、第一期掘削から、掘削機の開発、基地建設、アイスコア掘削と現場 解析のための隊員派遣などの現場観測や、採取したアイスコアの解析、保管などを通し、 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。

アイスコア深層掘削機

アイスコア深層掘削機と浅層掘削機の違いの一つは、3000mを越える長いケーブルを 使うことである。掘削時には、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。掘削深が 200m程度の浅層掘削では、ケーブルから伝わる振 動や切削モーターにかかる抵抗などから掘削機の挙動を推定して掘削を進めていく。し かし、深層掘削では、繰り出されたケーブル長いため、地上から掘削機までの距離が長く、 ケーブルの重量も大きくなり、ケーブルの振動などでは掘削機の挙動が把握できなくな ることから、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 3000m以上のケーブルを通して地上 のPCに送られるが、長距離を微弱な電力で送信される信号波形は平滑化される。さらに 掘削中は地上から掘削機の切削モーターにケーブルを通して電圧 200V程度の駆動電力 を送りながら、センサーの信号を地上に送信するため、信号がノイズを含んだり乱れたり する。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。 深層掘削機の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 れが収縮する。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 をする。日本の南極氷床掘削では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置かれ る必要がある。利用できる体積が限られている容器内に、いくつかの回路基板が結線され て置かれており、基板回路の出し入れなどの作業で断線するトラブルがこれまで報告さ れている(藤井ほか 1999;本山ほか 2020)。

電装部の構成と必要とされる仕様と製作における低温科学研究所の貢献

電装部は、掘削機周辺に設置されるセンサー類、掘削機内のPC、外径7.72mmのアー マードケーブル内の信号線、地上 PC で構成される。 掘削機の挙動を把握するために掘削 機周辺に設置されるセンサーで常時モニターされる要素は、刃先の接地圧、液封液の圧 力、液封液の温度、掘削機の傾斜(X成分、Y成分)、掘削機の向き(方位)、ドリル回転 数、モーター電圧、内蔵バッテリー電圧、減速機・モーター・PC・耐圧容器内の温度で ある。これらの情報は、掘削機内の PC において処理してデジタル変換され、3500 mの ケーブルを通して地上 PC に送られ、掘削機のコントローラーモニターに表示される。 アーマードケーブル内には、7本の信号線があり、そのうち5本をまとめた信号線と高速 度鋼のケーブル外装をドリルモーターの駆動に必要な電力を供給するために使われ、残 りの2本を信号の送信に使う。掘削機内のPC、回路基板、モーター、減速機は全て耐圧 容器内に設置される。耐圧容器は長さ 1412 mm、外径 122 mm、厚さ 11 mm のクロムモ リブデン鋼パイプで作られている。今回、低温科学研究所は、センサーからの信号をデジ タル変換するシステムの製作と耐圧容器内に基板回路を設置する固定台のデザインと製 作、ケーブルを通して信号を送るシステムの製作においての助言、電装システムのテスト への参加、テストのための回路の製作などを担当した。本報告書では、中心的な役割を担 当した部分について報告する。

耐圧容器内の基板固定台のデザインと製作

図1に耐圧容器内に回路基板を固定、設置するために製作した金属製の固定台を示す。 以前の掘削機では、掘削機製作メーカーが所有する工作機の都合で、薄いナイロン樹脂製 の板を2枚貼り合わせた固定台を使用していたが、低温科学研究所の技術部では、その 制限がなく、全てアルミ製で製作した。そのため、固定台の剛性が高くなり、耐圧容器へ の固定台の出し入れがスムーズになった。これまで、固定台の出し入れ時に断線やコネク ターの接触不良によるトラブルが多かったが、この改良により、これらのトラブルが減少 することが期待できる。また、回路基板の固定とコネクター部の接続が改良され、極低温 下で金属製の容器内に手を入れて行う作業が軽減される。



図1 耐圧容器内の基板固定台。

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

図2 に製作した回路基板の写真を示す。低温科学研究所が作成を担当した部分は写真 の右側の基板である。Pt100 センサーで計測される液封液、モーター、減速機、PC の温 度、液封液の圧力、掘削機上部に取り付けられているバネの伸び縮みを差動トランスで測 定して求められる刃先の接地圧、モーターにかかる電圧、内蔵されているバッテリーの電 圧、ドリルの回転数の計測値を A/D 変換器によってデジタル変換し、左の基板に設置さ れている PC へ入力する基板をデザインし、製作した。刃先の接地圧は、第一期、第二期 の掘削機ではポテンシオメーターで計測していたが、今回差動トランスによる計測シス テムに変更し、応答性と精度が向上した。



図2 耐圧容器内の回路基板。

電装システムの改良

掘削機から地上の PC に信号を送る電装システムは、これまでの掘削システムでも安 定して稼働しない部分の一つだった。当初検討されていたシステムは、掘削機の昇降中 に、掘削モータへ供給する 200V の電源をリレーで切り換え、減圧して耐圧室の内蔵バッ テリーを充電する仕組みであった。この場合、掘削機の昇降中の通信は、ケーブルに200V の電圧がかかっている状態で行なわれ、電流変化の影響を受けて通信信号が乱れること があった。これを避けるため、内蔵バッテリーの充電は、これまで使用していた通信ケー ブルを用いて 100 V 程度の直流電源から行い、その状態で通信信号を送る仕組みに変更 した。高電圧と低電圧を完全に分離した回路にしたことにより、通信の安定に加え、リ レーの不具合による過電流が流れるトラブルの危険性がなくなった。掘削モーターが稼 働する掘削中は、モーター駆動のための電流が流れている状態での通信となる。実際の装 置を用いたテストでは、モーターが劣化してくると通信にノイズが含まれるトラブルが 生じることが分かった。そのノイズを除去するためのノイズフィルター回路を製作し組 み込んだところ、そのトラブルが回避できた。低温科学研究所では、電装システムの検討、 回路のデザインと製作、ノイズフィルターのデザインと製作を行った。これらの改良に よって、以前の通信速度(9600bps)よりも遅くなったが、1200bps 程度の速度で安定し た通信ができるようになった。また、通信テストにおいて用いた発信器、受信器など様々 な機器の試作を行った(図3)。



図3 通信テストのために製作された試作機。

今後の予定

2024/25 シーズンには、本格的な深層掘削が開始される。岩盤に到達する約 2500 m の アイスコアを 3-4 シーズンかけて採取する予定であり、電装システムに加え、掘削機の 改良等をサポートする予定である。

参考文献

- 藤井 理行、東 信彦、田中 洋一、高橋 昭好、新堀 邦夫、中山 芳樹、本山 秀明、片桐 一夫、藤田 秀二、宮原 盛厚、亀田 貴雄、斎藤 隆志、斎藤 健、庄子 仁、白 岩 孝行、成田 英器、神山 孝吉、古川 晶雄、前野 秀生、榎本 浩之、成瀬 廉 二、横山 宏太郎、本堂 武夫、上田 豊、川田 邦夫、渡辺 興亜、1999、「南極 ドームふじ観測拠点における氷床深層コア掘削」、南極資料、43(1)、162-210.
- 本山 秀明、高橋 昭好、田中 洋一、新堀 邦夫、宮原 盛厚、吉本 隆安、藤井 理行、鈴 木 利孝、古川 晶雄、東 久美子、鈴木 啓助、武藤 淳公、五十嵐 誠、山崎 哲 秀、藤田 秀二、斎藤 健、渡辺 原太、古崎 睦、李 院生、鄭 址雄、福井 幸太 郎、中澤 文男、亀田 貴雄、藤田 耕史、大日方 一夫、齊藤 隆志、神山 孝吉、 木下 淳、東 信彦、中山 芳樹、渡辺 興亜、高田 守昌、小澤 行雄、小林 明雄、 吉瀬 也寸志、2020、「南極ドームふじ基地における第2期氷床コア掘削」、南 極資料、64、284-329.

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

木村 勇気 1、斎藤 史明 2、中坪 俊一 3、千貝 健 4、森 章一 2、稲富 裕光 3

- 1. 雪氷新領域部門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、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所(ISAS)と、ドイツ航空宇宙 センター(DLR)、およびアメリカ航空宇宙局(NASA)との国際協力による DUST プロ ジェクトを 2016 年から推進してきた。DUST プロジェクトの目的は、試料と実験装置を 回収可能な海外の観測ロケットを用いて微小重力実験を複数回実施し、その結果を元に 宇宙におけるダストの生成過程を理解することにある。プロジェクトの詳細な目的や実 験装置については、2018 年から 2020 年の 3 年に渡って技術報告会で報告してきた。 2018 年は、低温科学研究所と ISAS の技術室の協力の元に作製した実験装置について紹 介し[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 について報告した[2]。また、2020 年度は、2019 年にスウェーデンとアメリカで行った 2 度の観測ロケット実験と、2020 年にアメリカで行った 2 度目の観測ロケット実験に至 るまでを報告した[3]。その後、アメリカでのプロジェクトが終了し、エスレンジの火災 もあるなどして実験の機会に恵まれなかったが、2024 年 11 月に DUST プロジェクトと しては 4 回目の微小重力実験を行う機会が得られた。ここでは、2020 年に行った 3 回目 の実験から、4 回目の実施までのプロジェクトの進捗を報告する。

2020年のアメリカにおける観測ロケット実験の準備

2019 年 10 月 7 日にアメリカで実施した 2 回目の観測ロケット実験を終えた後、すぐ に 3 回目の実験機会について交渉を開始した。実験装置の改修を行い、アメリカに再度 装置を輸送するのは、翌 6 月には可能であると見込んだ。そこで、11 月 8 日にペイロー ドが低温研に戻る前の 10 月 23 日には、アメリカ側 PI の J. A. Nuth III 氏から NASA Sounding Rockets Program Office に次のロケット実験の日程調整に関する打診を行っ た。そして、2020 年 1 月 23 日にペイロードの搭載や射場作業などの運用を行う Northrop Grumman の Eric B. Roper 氏から、「2019 年に引き続き、2020 年の実験においても Misson Manager を担当することになった」と連絡を受け、再実験の実施が決まった。

まず、2020年2月25日に Misson Initiation Conference がワロップス飛行施設で開催され、日本側メンバーはオンラインで参加した。2回目の実験という事もあり、会議は滞りなく終わった。

その後、コロナウイルスの影響が深刻になり、3月20日にNuth氏から、NASAのゴ ダード宇宙飛行センターもワロップス飛行施設も完全にテレワークになったので、すべ ての観測ロケットプログラムが止まり、我々の実験もどうなるか分からないと連絡が来 た。しかし、28日には Mission Manager から「世界が止まってしまったように見えるか らといって、私たちが止まってしまったわけではない。オンラインで準備を進めている」 と力強いメッセージが届き、打ち上げは9月1日9時の予定で進めると連絡があった。

その後、ほぼ当初の予定通りの日程(4月21日)で我々の要求をロケットの打ち上げ 側でどのように実現するかを議論する会議である、Requirements Definition Meeting が 完全オンラインで行われた。また、同日4月21日から、低温研ではコロナ禍の影響で所 外者の立ち入りが禁止になり、木村が一人で準備を進めることになった。また、5月21日 には、日本側から打ち上げに参加する者はワロップス飛行施設の近くで14日間の隔離が 必要で、その後にアメリカ側の参加者と合流し、全員でNASAのC130輸送機に乗って ホワイトサンズミサイル実験場に向かうという予定が告げられた。その後、6月4日に図 面などを元に実現可能性を確認する会議であるDesign Review を行った。

6月23日には、机上噛み合わせを低温研で実施し、実験装置の動作に問題がないこと を確認した。2019年10月にアメリカで実験した際には、スウェーデンでの6月の打ち 上げの後に時間がなかったため、装置の一部を直接NASAのワロップス飛行施設に輸送 し、現地で組立作業を行った。これに対して、2020年はアメリカでの実験だけだったの と、コロナ禍で渡航できなかったため、ペイロード部はすべて日本で組立てた(図1)。 そのため、図2に見られる輸送用の木製の通い箱を低温研の技術部で作製し、工作室に クレーンを設置して、ペイロードを通い箱に梱包した(図3)。また、ペイロード部に搭 載される6台の核生成チェンバーの真空引きとガス導入のための真空装置1式を輸送す るために、同様に木製の通い箱を作製した(図4)。これらの木箱には、海外へ輸送する ために合板材を使用した。



図1 2020年にアメリカで実施 された観測ロケット実験 用のペイロード。



図2 2020年にアメリカで実施された観測ロケット 実験用のペイロードを輸送するための木製の 通い箱。



図3 2020 年にアメリカで実施された観測ロケット実験用のペイロードを収めた後の通い箱の様子。向きが分かるように左右を色分けした。



図 4 核生成チェンバーの真空引きとガス導入を行うための真空装置一式(図中の黒い箱) を輸送するために作製した木製の通い箱。

コロナ禍では、日本の各種機関のほとんどは外務省の要請に基づき 100 以上の国々へ 海外渡航を許可していなかったため、今夏のアメリカでの実験について、現地参加の可能 性を大学本部に問い合わせた。その結果、海外渡航は新型コロナウイルスに関する研究の 場合のみ許可が下りることが分かった。また、木村が打ち上げに現地参加しなくても、オ ンラインで作業することで、予定通りに実験を進めることになった。アメリカ側でもコロ ナ禍の影響で観測ロケットプログラムは止まっていたが、7月27日に我々の実験をコロ ナ禍後の最初の実験として実施することが決まった。そして、C130 輸送機は Holloman Air Force Base という軍の飛行場に到着するので、レンタカーをどのように手配したら よいかなど、通常とは異なる現地での動きについても様々な調整がなされた。ちなみに、 レンタカーについては、海軍がバンを用意して、レンタカー会社まで送迎してくれること になった。加えて、関係機関や共同研究者の協力の下、これらの準備と並行してミッショ ンのロゴを作成した(図 5)。

8月7日に低温研から実験装置を搬出し、空路でホワイトサンズミサイル実験場に送っ た。税関でトラブルがあったものの、8月24日15時半頃に無事に到着した。日本から の参加は、北海道大学の事務局から、参加する場合は職を辞してから行くようにとの返答 があり、8月16日に断念した。当時、北海道大学ではコロナに関わる研究でのみ海外渡 航が許されているとのことであった。8月17日からアメリカ側の人員だけで実験に向け ての射場準備が始まった。現地に行けない我々のために、実験準備を行う作業場に特別に web カメラが用意された。事前に詳細な指示書を用意してアメリカ側に送ったため、実 際に web カメラを使って遠隔で指示を出すような事態にはならなかった。



図5 本 DUST プロジェクトのロゴ。

2020年のアメリカにおける観測ロケット実験の結果

現地のホワイトサンズミサイル実験場では、コロナ禍で初めての観測ロケット実験と なったため、手探りの状況であったが、予定通り9月8日午後12時(日本時間9日午前 3時)に Black Brant IX 36.365 号機を打ち上げて実験を実施した。打ち上げ後すぐに、 ロケットの推進剤の燃焼に何らかの不安定さがあり、上昇時にペイロードには25-45 G の衝撃が何度も加わっていたと報告を受けた。 2019 年度との実験の違いは蒸発源と核生成チェンバー内のガスにある。アメリカでの 実験の目的はケイ酸塩ダストの核生成過程の理解にあり、その類似物を合成するために、 蒸発源にはケイ酸塩を準備した。2019 年の時は、Ta 棒上にケイ酸塩を塗布した蒸発源を 用いたのに対して、2020 年の実験では、炭素棒の上にケイ酸塩を塗布した蒸発源を使用 した。また、宇宙空間に多量に存在する水素の影響を調べるため、核生成チェンバーには アルゴンに加えて水素を充填した。

実験後のペイロードは 9 月 15 日の搬出をお願いしていたが、21 日に搬出され、どう いう訳か台北の桃園国際空港に留め置かれた後、10 月 21 日に低温研に戻ってきた(図 6)。 実験データは 9 月 18 日に受け取った。以下に述べるように、想定外のトラブルはあった ものの、479.6 秒の微小重力環境が得られ、所定の実験をすべて実施することが出来た。 また、回収したペイロードから、生成したダスト類似物が載った透過電子顕微鏡観察用グ リッドも取り出して、分析を行うことが出来た。

今回も 2019年と同様にリカバリーに失敗し、ペイロード下部から高温のプラズマガス が入り込み、実験装置が損傷した。また、ペイロードが地面に着地する際には 50G 以上 の衝撃が加わったと推定された。2019年の時にはアルミ製だった外壁を、ステンレス製 に変更したにもかかわらず変形している様子が図 6 の右下の写真に見られる。最下段の 赤外線スペクトル測定装置の損傷は特に大きく(図 7)すべての部品を交換する必要が あった。また、煙がペイロードの中を充満しており、すべての光学部品が煤だらけであっ た(図 8)。インターフェース装置は、フライト中もケーブルを介して各実験装置と通信 を行っているため、ケーブルを通す切り欠き部分がオープンな構造になっている。ちょう どその場所でケーブルが焦げ付いていた。インターフェース装置の温度も上がったので、 内部の健全性が不明であった。この装置は、再度ロケット実験に用いる可能性があったた め、ケーブルの再作成と健全性の確認を業者に依頼した。

前回に続いて、2度目の同じ失敗である。そこで、不具合の要因について尋ねたところ、 リエントリーの不具合が生じた原因は以下の通りであると、Mission Manager から回答 を得た。『実験装置への損傷は主に 3 つの原因による。1 つ目は軌道の高さ、2 つ目は 2019 年の実験(36.343 DUST)とは異なるペイロード再突入構成の重力特性、3 つ目は ペイロード後端のワイヤー経路である。ペイロードは、他のミッションと比較して軽量で あったため、334.8 km まで上がる所を、予定より 13 km 高い 347.8 km まで上昇した。

その結果、ロケットは大気圏に想定以上に高速で再突入した。機体の重心により、後部 (実験装置が搭載されている部分)から機体が速度ベクトルと同じ方向に向いた。これを 防ぐために、今回のミッションでは重心を意図的に変更したが、それでも、機体は後部か ら大気圏に突入し、著しい加熱を受けてプラズマも発生した。その結果、機体後部のク ラッシュバンパーとクラッシュデッキが溶融し、外筒の通気口を通ってペイロード内部 に高温のガスとプラズマが流れ込み、装置に損傷を与えた』

32



図 6 2020 年のアメリカでの実験後に戻ってきた際の通い箱(上)とペイロード部(下) の外観。右下の写真には熱によるカバーの変形が見られる。



図 7 2020 年の観測ロケット実験の実施後にアメリカから戻ってきた実験装置の一部で、 最下段の赤外線スペクトル測定装置。



図 8 2020 年の観測ロケット実験後の焼けたミニ PC (左上) と煤を被ったミラー(右上) やフィルター(左下)。右下は部品を取り外した後のペースプレートで、部品の跡が、 一面煤を被ったことをはっきりと示している。

2024年のスウェーデンにおける観測ロケット実験の準備

2019 年に DLR との共同研究においてスウェーデンで実施した観測ロケットの成果が 論文として公表され [4]、その結果に対して DLR からは高い評価を頂くことができ、再 実験の機会が得られた。打ち上げは、2019 年の MASER 14 観測ロケットと同じシリーズ で MASER 16 観測ロケットを用いて実施することになった。MASER シリーズのロケッ トの名称は、近年 SubOrbital Express と呼ばれるようになり、今回からは公式には MASER 16 ではなく、SubOrbital Express 4 に統一された。

2022年の実施を目指して、光学部品などをクリーニングして、再実験の準備を進めて いる中で、射場であるエスレンジ宇宙センターにおいて 2021年8月24日に火災が発生 し、インフラの一部が損傷した。そのため、暫くの間観測ロケット実験を実施できなく なった。火災後1年4カ月を経て、MASER14の次の号機となる MASER15が打ち上が り、欧州でのフライトが動き出した。そして、2022年2月27日にDLRとSSCと会合 を持ち、MASER 16を用いた実験を進めることで合意した。打ち上げは、2023年11月 と2024年4月の可能性を残しつつ、2024年3月に行うことを軸に進めることになった。 また、ペイロード質量を減らすことが DLR にとって好ましく、SSC としてもインター フェース装置を内製した方が試験や管理がしやすいとのことで、DUST 装置内で閉じて いた実験機器の制御を SSC 側に任せることが決まった。

実験装置は順調に準備が進み、2023年11月にストックホルム郊外の Solna にある SSC に発送した。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 現地で行い(図9)、4月11日にキルナの郊外にあるエスレンジ宇宙センターから打ち上

げるという計画で一連の準備を終えた。その後、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が、本原稿執筆時点(2024年10月17日)において、一か月後の 11月22日の打ち上げ予定で進められている。この準備においても様々なトラブルが生じたが、その内容は来年以降の技術報告会に譲る。



図 9 2024 年 11 月にスウェーデンで実施予定の観測ロケット実験用のペイロードを外筒 に入れて、SSC の制御部と結合させた後の様子。

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 Black Brant IX 36.365 号機は NASA の協力で打ち上げられました。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 ち上げられます。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 部技術報告、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 技術報告、25 (2019) 1-12。
- [3] 木村 勇気、斎藤 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] Y. Kimura, K. K. Tanaka, Y. Inatomi, C. Aktas, J. Blum, Nucleation experiments on a titanium-carbon system imply nonclassical formation of presolar grain, Science Advances, 9 (2023) eadd8295.

2024 年 12 月発行 編集者:藤田 和之、千貝 健 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