

北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

第 26 号



2021年3月

表紙の写真

2019年10月4日（金）、米国ホワイトサンズミサイル実験場。すべての準備とリハーサルを終えて週明けに打ち上げを待つNASAの観測ロケットBlack Brant IX 343号機と長かった準備期間を終えてほっと一息ついている研究者と技術者達。この後はまた、打ち上げ、回収、撤収と作業が続き、休む間もなく解散となる(本文P.4)。

2020年度技術報告の発刊に寄せて

日頃より低温科学研究所技術部へのご支援を賜り、厚く御礼申し上げます。

今年度は、新型コロナウイルス感染症拡大の状況に鑑み、大変残念ながら、例年開催していました技術報告会とその後の参加者交流会は中止することと致しました。しかしながら、本報告集につきましては、技術部の一年間の活動を所内外の皆様にとって頂く機会として、また、読者の皆様が新技術の活用や新たな研究展開への緒を見出して頂く場になれることを祈念して、例年通り発刊致します。お忙しい中、貴重な原稿をご寄稿下さいました皆様にこの場をお借りして御礼申し上げますとともに、是非、多くの皆様に本報告をご覧頂き、忌憚のないご意見をお寄せ下さいますようお願い申し上げます。

さて、今年度中は、感染症拡大防止のため大きな制約が課せられる中で、皆様におかれましても大変なご苦勞をされたことと思いますが、技術部一同にとりましても、これまでになかった試練の一年となりました。年度の前半には、北海道における新型コロナウイルス感染症の早期拡大に伴い、技術部も出勤者数を1/3に減らした業務体制となり、職員は交代でリモートワークに従事することとなりました。とはいえ、機器設計等の一部の業務はリモート環境でもどうにか進めることはできたものの、各種の加工・開発、実験・観測補助、ネットワーク管理といった、技術部本来の中心業務は遅滞を余儀なくされます。存分に研究支援を行えない状況の中、職員一同は少なからぬフラストレーションを抱えながら過ごす日々となりました。

しかし、逆境の中でこそ真価が問われるという言葉の通り、こうした制約の下で、新技術の調査・検討や新知識の獲得等、各人がどれだけ技能向上に向けた研鑽に努めることができたか、それが今後問われることとなります。現在では、感染防止対策をとった上で、通常に近い業務をこなせる体制に戻りつつありますが、技術部一同は、引き続き気を緩めることなく、常に最先端の技術サポートを提供できるよう研鑽に努めます。そして、教員・事務職員と一丸となって、本学・本研究所や共同研究機関における先端研究を力強くサポートできるよう努力して参る所存です。

今後とも、低温研技術部に対する皆様のご支援とご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

2021年2月12日
技術部長 渡辺 力

目次

1. 輸送用木箱の製作 齋藤 史明、森 章一	1
2. 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 木村 勇氣、齋藤 史明、中坪 俊一、千貝 健、森 章一、稲富 裕光	4
3. 氷晶核能測定装置の開発 大塚 美侑、飯塚 芳徳、森 章一	20
4. コニカルホーンアンテナの製作 藤田 和之	25
5. 第 61 次南極地域観測隊での海水・海洋観測 小野 数也	29
6. L 字アームの製作 佐藤 陽亮、平田 康史	37
7. 氷結晶の表面構造相転移を直接光学観察するための低温観察チャンバーおよび温度 制御システムの製作 佐崎 元、齋藤 史明、森 章一、長嶋 剣、村田 健一郎	42
8. 令和 2 年技術部先端技術支援室の勤務体制 高塚 徹	47
9. 令和 2 年技術部装置開発室技術支援業務 平田 康史	49

輸送用木箱の製作

斎藤 史明、森 章一

技術部装置開発室

はじめに

昨年、木村勇氣准教授のロケット実験装置及びその周辺機器をアメリカの打ち上げ施設へ輸送する際、運送会社が用意した木箱で梱包して運んでいた。しかし、実験後低温研に戻ってきた木箱は所々破損しており、今年度の打ち上げに向けての輸送には耐えられそうになかった。そのため、我々は複数回の輸送にも耐えられる木箱を新たに製作した。これまで木工作业についての経験はあまりなかったため、この機に木材加工についてもある程度対応できるようになりたいという思いもあり、製作に携わった。

ロケット実験装置梱包木箱

実験装置本体を収納する木箱については設計だけ行い、箱の製作は外注した。図 1 に製作した木箱の写真を示す。形は昨年度使われていた木箱を参考に設計し、重量は 45 kg となった。蓋を固定するためのボルト穴加工や緩衝用のスポンジシートの貼り付け、防腐のための塗装などの追加加工を施した。箱上部の左右と蓋の左右に色をつけたのは蓋の固定できる向きが限定されているため、向きがわかるようにするためである。

実験装置の出し入れの作業性を考慮し、装置を支える左右の板と上側の押さえを取り外せるよう設計した（図 2）。左右のスペースを広くとることで実験装置を多少斜めに釣り上げても箱に引っかからずに出し入れができる。収納した後はスペース全てを押さえることで、輸送中に実験装置がずれて暴れるのを防ぐ。図 3 に押さえ部品を取り外した状態と実験装置を収めた状態を示す。

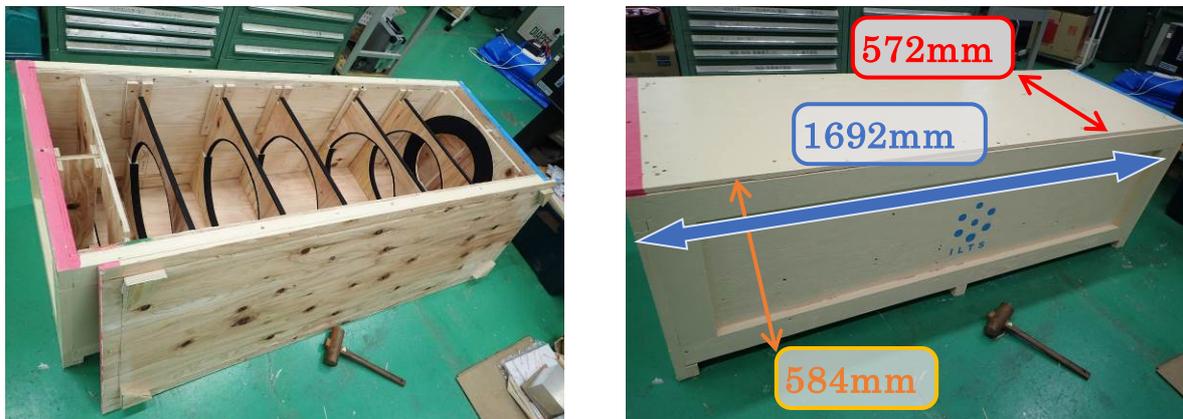


図 1 ロケット実験装置梱包木箱の写真。



図 2 押さえ部品を取り付ける様子。



図 3 (左)空の状態と(右)収納した状態。

ロケット実験周辺機器梱包木箱

実験に使われる周辺機器を収納したボックス 2 種類の木箱の設計・製作を行った (図 4 と 5)。木箱 A は重量 49.4 kg、木箱 B は重量 51.6 kg となった。ボックスは横から引き出す構造が望ましいため、上板と側面が外れるようになっている。外すことのできる側面板は上下の向きが限定されているため、底板と側面板の下部に色を付けてわかりやすくしている。収納するボックスの面は平らではなく凹凸があるため、出っ張っている部分に当たるように緩衝用シートを張り付けた。ボックス左右には取手がついており、ボックスの出し入れをしやすいように木箱内の左右は広めにスペースをとっている。しかしそのままと輸送中に箱の中で動いてしまうので底板と上板にブロックを取り付けて横滑りを防止している。また、これらの箱にも防腐用の塗装を施している。

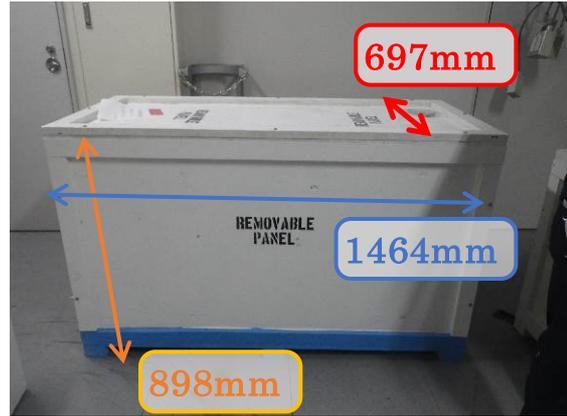


図 4 周辺機器梱包木箱 A。

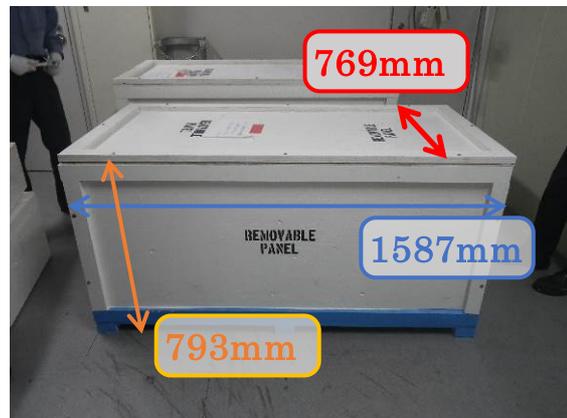
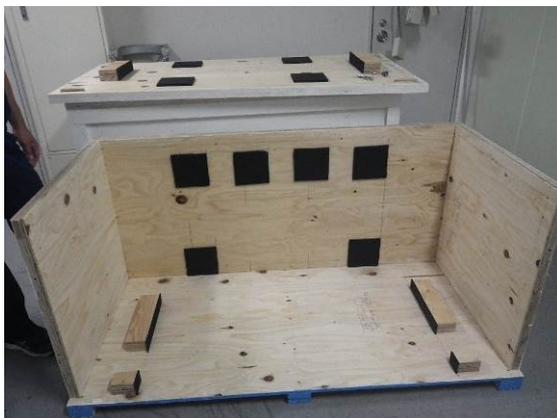


図 5 周辺機器梱包木箱 B。

おわりに

これまで経験のなかった木工作業を行ったが、金属加工との勝手の違いを感じた。金属材料よりもたわみやすいため誤差が大きくなってしまい、組み立て作業に苦戦した。材料を真っすぐ切り出すのが難しく、若干斜めになっていることもしばしばあった。こうした点は経験を積んで技術向上を目指していきたい。

今回、海外への輸送ということで材料についての制限があった。燻蒸材^{※1}と呼ばれる特殊な処理をした材料で作るよう輸送会社から要請されたが、合板^{※2}でもよいということで今回は 12 mm と 24 mm の合板を使って製作した。海外へ持ち出す際にはそうした規制についても気を付けなければならないと勉強になった。

※1 害虫駆除や殺菌等のために薬剤で燻した木材

※2 薄板を積層して接着してある板材

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

木村 勇氣^{1,2}、齋藤 史明³、中坪 俊一⁴、千貝 健⁵、森 章一³、稲富 裕光⁴

1. 共同研究推進部
2. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学グループ
3. 技術部装置開発室
4. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
5. 技術部先端技術支援室

はじめに

我々は、宇宙における物質進化を素過程から理解することを目的に、DUST (Determining Unknown yet Significant Traits) という国際プロジェクトをスタートさせた。本プロジェクトでは、物質形成の初期段階である気相から宇宙ダストが生成する核生成過程を微小重力環境を利用して実験的に再現することで、ナノ粒子としての表面自由エネルギー、付着確率、赤外特性を調べることを目指している。

微小重力環境下で宇宙ダストを模擬した実験を行うには、生成したダスト模擬物質を回収可能な海外の観測ロケットを使う必要がある。そのために、2016年12月に宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA ISAS) の宇宙理学委員会にダストの核生成ワーキンググループを立ち上げ、国際プロジェクトをスタートさせた。その後、2017年に同所の小規模計画に採択されると共に (7月)、アメリカの共同研究者である J. A. Nuth III 氏を代表とした提案がアメリカ航空宇宙局 (NASA) の “Astrophysics Research and Analysis” プログラムに採択された (10月)。2018年には、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の支援により、欧州でも観測ロケットを用いた微小重力実験が実施できることが内定した (6月)。その1年後の2019年6月24日にスウェーデン、キルナ市、エスレンジ宇宙センターから、スウェーデン宇宙公社 (SSC) の観測ロケット MASER 14 を打ち上げ、所定の実験データを得た。さらに、2019年10月7日 (日本時間8日) と2020年9月8日 (日本時間9日) にアメリカ合衆国、ニューメキシコ州、ホワイトサンズ・ミサイル実験場で観測ロケット Black Brant IX 343号機と365号機をそれぞれ用いて、二度の微小重力実験を実施し、いずれも予定通りの実験データを得た。

2018年の技術報告会では、低温科学研究所と宇宙科学研究所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た [1]。また、2019年の技術報告会では、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]。本年度は、アメリカ合衆国で行った2度目の観測ロケット実験に至るまでを報告する。

実験装置の概要

実験装置の詳細に関しては昨年度の技術報告を参照できるため [2]、ここでは概略と SSC と NASA の観測ロケット用実験装置の差分に関して述べる。本プロジェクトでは、表面自由エネルギーと付着確率を求めるための二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置（干渉計装置）と、赤外特性を調べるための浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置（赤外測定装置）の二つの実験装置を搭載した。両装置とも、2012年と2015年に日本で行った JAXA ISAS の観測ロケット S-520 28号機および30号機による微小重力実験用に開発した装置を踏襲した [3,4]。

SSC と NASA での実験装置の違いは、搭載数である。SSC の観測ロケット MASER と、NASA の観測ロケット Black Brant IX はどちらも同程度の大きさ（能力）であるが、SSC では4チームの相乗りであったのに対して、NASA では単独での使用であった。そのため、SSC では干渉計装置と赤外測定装置をそれぞれ1台ずつ搭載したのに対して、NASA の実験では、干渉計装置を4台と赤外測定装置を2台搭載した。各装置に宇宙ダストの生成過程を模擬できる核生成チェンバーが備わっている（図1）。

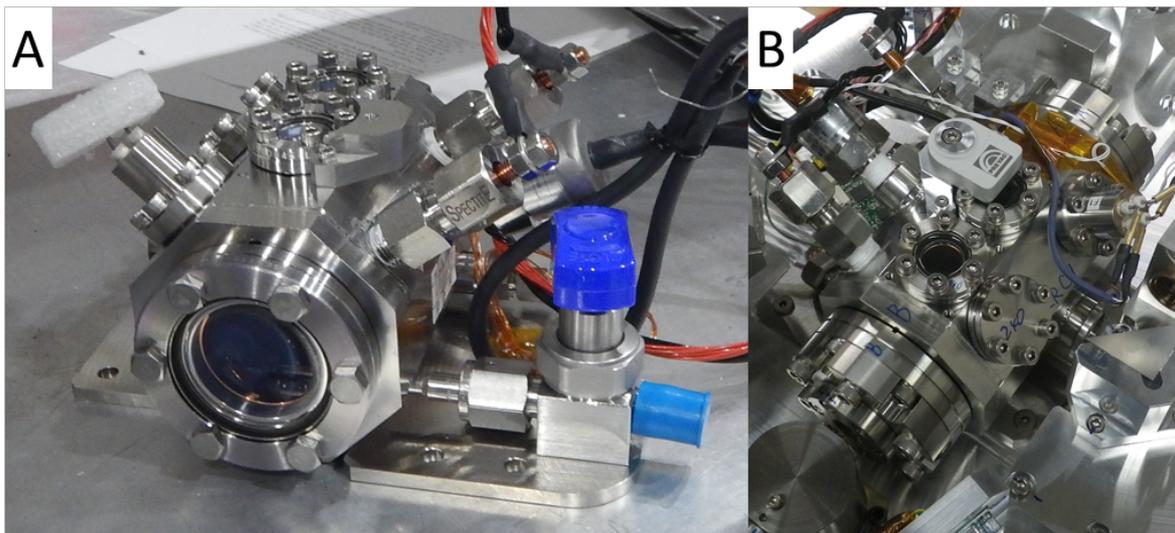


図1 観測ロケット実験用の核生成チェンバー。(A) 干渉計装置用。(B) 赤外測定装置用。

核生成チェンバーは、内側が面間距離 66mm、長さ 135mm（IR 用は 138mm）の六角柱形で、蒸発源加熱用の電流導入端子1対（テクサム PF フォードスルー PF-1/4PT-6.0-T）、蒸発源温度測定用のビューポート（NW16）、圧力計（Sensez HAV-60KP-V）に加え、ICF70 のポート2ケと ICF34 のポート4ケで構成されており、下方内壁に試料採取用の超音波リニアアクチュエータ駆動 X 軸ステージが配置されている。これらを含めて幅 150mm（IR 用は 180.4mm）、奥行き 200mm、高さ 100mm に収まっている。ICF70 のポートには、干渉計装置では核生成領域にレーザーを導入するため反射防止膜付きのビューポートを、赤外測定装置では、光源から赤外光をチェンバー内に取り入れて、内部で2回反射

させるために、KRS5 窓 (SSC 用には KBr 窓) とパラボラミラーからなる特注のフランジを用意した。ICF34 の 4 ケのポートの内、上面の 2 ケはビューポートで、内 1 ケは実像カメラで撮影する際の明るさを得るために照明を取り付けた。生成した煙粒子の実像は、干渉計装置の場合、ICF70 のビューポートから観察し、赤外測定装置では ICF34 のビューポートから観察した。ICF34 の残りのポートは、試料採取装置に用意した超音波リニアアクチュエータ駆動 X 軸ステージ (テクノハンズ XDT70-150、TD-102 型、TMCA1MJ 型、TAAC5V/TUSB1M 型 ; 図 2) を動作させるための 2 線と、その温度を記録するためのセラミックス型白金抵抗素子 (Netzsch MC-0805-100S-1-A) 用の 2 線の計 4 線を配したフランジと、チェンバー内部の空間温度を測定するためのクロメル-アルメル熱電対 4 組 (IFC4 のみ) に使用した。

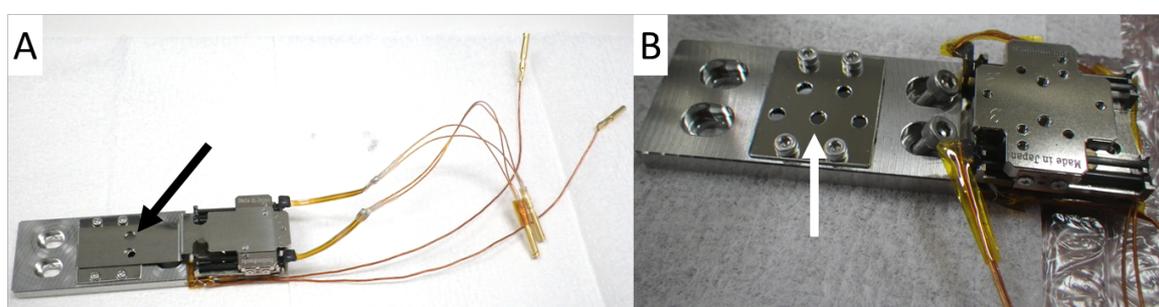


図 2 試料採取装置。(A) 全体像。矢印で示した箇所がシャッター上に設けられた開口部。
(B) シャッターを取り外した全体像。右端に見られる十字の部品が超音波リニアアクチュエータ駆動 X 軸ステージ。矢印で示した箇所に試料採取用の透過型電子顕微鏡観察用グリッドが 5 枚用意されている。

超音波リニアアクチュエータ駆動 X 軸ステージには開口部を有するシャッターが取り付けられており (ハイブリッジ 特型 ; 図 2A)、ある時刻にチェンバー壁面まで到達した粒子が透過型電子顕微鏡観察用のグリッドに貼り付けた非晶質カーボン膜上に堆積する。最初の穴は初めからオープンになっており、蒸発源の加熱終了後 5 秒でクローズし、次の穴がオープンとなる。その後、10 秒、20 秒、50 秒 (蒸発源終了から 15 秒、35 秒、85 秒) 後に順次採取し、最後の穴は実験終了後、回収するまでオープンのままとなる。この X 軸ステージはパルスを送ることで駆動する。ここで、1 パルスに対する移動量は、X 軸ステージの場所と温度に依存するため、予めそれぞれの移動に要するパルス数と温度の関係を調べた。また、白金抵抗素子の断線などで想定外のパルス数が送られることを防ぐために、0°C 以下の場合には 18°C に、0°C から 22°C では補正無しで、22°C から 50°C では 22°C、50°C 以上の時は 18°C のパルス数を送るよう設定した。打ち上げ時には、赤外測定装置のバックグラウンドとの兼ね合いで、ロケット本体の温度が $15 \pm 5^\circ\text{C}$ になるよう要求した。NASA における実験時のパルス数と温度の関係を以下に示す。16°C を下回ると駆動効率が著しく低下するため、その前後で異なる関係式を用いた。

16°C 以上の時 [T: 温度 (°C)]

IFC1	1→2: パルス数 = 1588 - 33 T	2→3: パルス数 = 2085 - 55 T
	3→4: パルス数 = 2525 - 74 T	4→5: パルス数 = 2598 - 68 T
IFC2	1→2: パルス数 = 2702 - 69 T	2→3: パルス数 = 1993 - 52 T
	3→4: パルス数 = 1584 - 32 T	4→5: パルス数 = 1704 - 33 T
IFC3	1→2: パルス数 = 2380 - 61 T	2→3: パルス数 = 2246 - 65 T
	3→4: パルス数 = 2075 - 58 T	4→5: パルス数 = 1928 - 48 T
IFC4	1→2: パルス数 = 3172 - 80 T	2→3: パルス数 = 2297 - 58 T
	3→4: パルス数 = 2063 - 49 T	4→5: パルス数 = 2259 - 54 T
IRC1	1→2: パルス数 = 3064 - 97 T	2→3: パルス数 = 2728 - 95 T
	3→4: パルス数 = 1966 - 58 T	4→5: パルス数 = 1812 - 53 T
IRC2	1→2: パルス数 = 2100 - 60 T	2→3: パルス数 = 1800 - 50 T
	3→4: パルス数 = 1500 - 37 T	4→5: パルス数 = 1300 - 24 T

16°C より低温の時

IFC1	1→2: パルス数 = 1964 - 57 T	2→3: パルス数 = 2659 - 90 T
	3→4: パルス数 = 3073 - 107 T	4→5: パルス数 = 3694 - 137 T
IFC2	1→2: パルス数 = 3690 - 130 T	2→3: パルス数 = 2570 - 88 T
	3→4: パルス数 = 2321 - 77 T	4→5: パルス数 = 2584 - 87 T
IFC3	1→2: パルス数 = 4395 - 186 T	2→3: パルス数 = 2880 - 106 T
	3→4: パルス数 = 2880 - 106 T	4→5: パルス数 = 2961 - 114 T
IFC4	1→2: パルス数 = 6671 - 297 T	2→3: パルス数 = 4457 - 193 T
	3→4: パルス数 = 3262 - 124 T	4→5: パルス数 = 2782 - 86 T
IRC1	1→2: パルス数 = 3715 - 137 T	2→3: パルス数 = 2079 - 55 T
	3→4: パルス数 = 1876 - 54 T	4→5: パルス数 = 1630 - 41 T
IRC2	1→2: パルス数 = 3200 - 130 T	2→3: パルス数 = 2433 - 89 T
	3→4: パルス数 = 2586 - 105 T	4→5: パルス数 = 2630 - 108 T

ただし、上記の計算式は地上で PC 制御により送られるパルス数であり、実際に X 軸アクチュエーターが受け取るパルス数とは異なる。PC 制御の場合、1 パルスの設定に対してドライバボードから出力されるのは 8 パルスである。対して、外部制御の場合、1 パルスに対するドライバボードからの出力は 5 パルスである。そのため、実際にインターフェース装置からドライバボードに送るパルス数は 8/5 を乗じた値になる。

スウェーデンにおける実験の追加情報

SSC の観測ロケット MASER 14 を用いて行った実験に関しては、昨年度の技術報告集にまとめたので [2]、ここではそれ以降に新たに得られた情報をまとめる。SSC の実験では、チャンバー内に用意した白金抵抗素子の示す温度が、実験中に約 10 °C から 13 °C 程度まで徐々に上昇する様子が見られた (図 3)。SSC の技術者に問い合わせたところ、空気の薄い領域では空冷が効かないために、温度が上昇するのは通常の振る舞いであることが分かった。SSC によって測定された内部温度も、打ち上げ後 50 秒から 350 秒の間、15 °C から 20 °C まで緩やかに上昇していた。また、我々の実験装置の下部で測定された観測ロケットの外壁内の温度は、打ち上げ後 50 - 70 秒で 130 °C 程度まで上昇し、その後 80 °C まで (打ち上げ後約 450 秒後) 徐々に低下した後に、再度 ~135 °C まで上昇 (打ち上げ後 480 - 490 秒後)、550 秒後には 80 °C まで低下し、測定を終了した。

2019 年 6 月 24 日 (月) 8 時 52 分にスウェーデン、キルナ市のエスレンジ宇宙センターで打ち上げられた MASER 14 は (図 4A)、382 秒間の微小重力状態を経て射場から 74.6 km 離れた地点に予定通り着地した (図 4B)。約 1 時間後にヘリコプターで着地地点に向かい、回収作業を行った後、まずはペイロード部のみをヘリコプターで吊り上げてエスレンジ宇宙センターに運んだ。その後、戻ってきたヘリコプターに搭乗して、13 時 20 分に射場に戻った。ペイロードは 4 テーマの相乗りであるため、それぞれの装置に分離して、我々の実験装置はクリーンブースに運んだ (図 5A と B)。次の米国での打ち上げ準備開始まで 1 か月程度しかないため、実験装置をその場で改修して米国へ輸送した。幸い、装置に損傷はなく、木村と斎藤の 2 名で作業を行い、予定通り 28 日 (金) に改修作業を終えることができた。改修を終えた装置 (図 5C) と真空排気システム (図 6A)、小物類の計 3 箱 (143 × 102 × 98 cm 180 kg、130 × 91 × 109 cm 155 kg、91 × 91 × 85 cm 80 kg ; 図 5D) は、7 月 3 日 (水) に集荷、ワロップス飛行施設に輸送した。

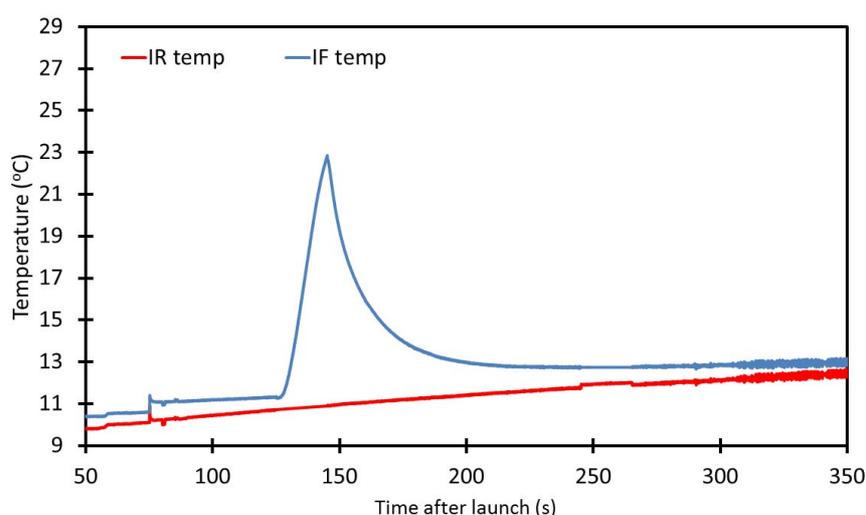


図 3 SSC の観測ロケット MASER 14 を用いて行った実験における、チャンバー内壁の温度。

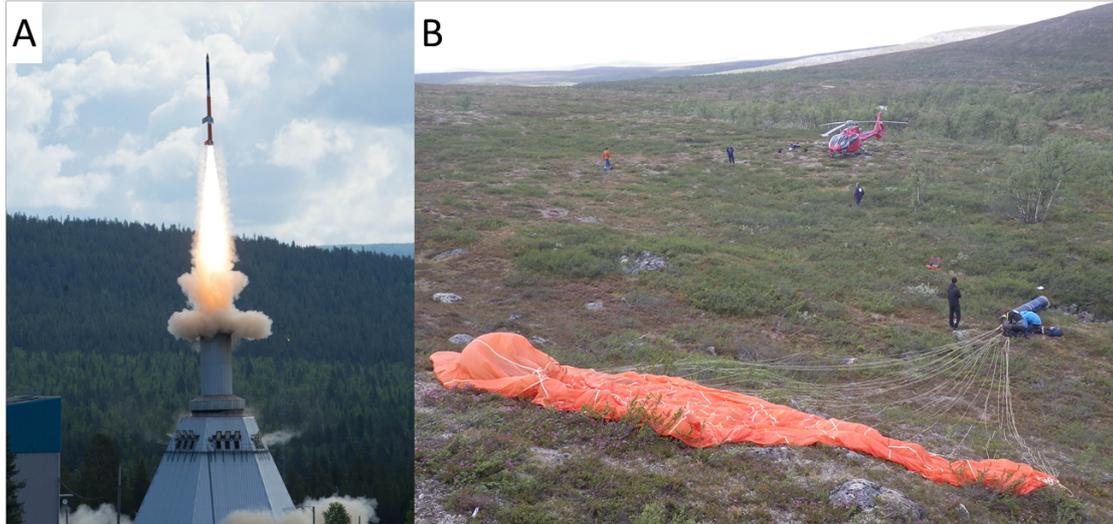


図 4 スウェーデン、キルナにあるエスレンジ宇宙センターからの打ち上げとリカバリーの様子。(A) 打ち上げた直後の SSC の観測ロケット MASER 14。(B) 奥に見えるヘリコプターで到着したペイロード部の回収地点における作業の様子。

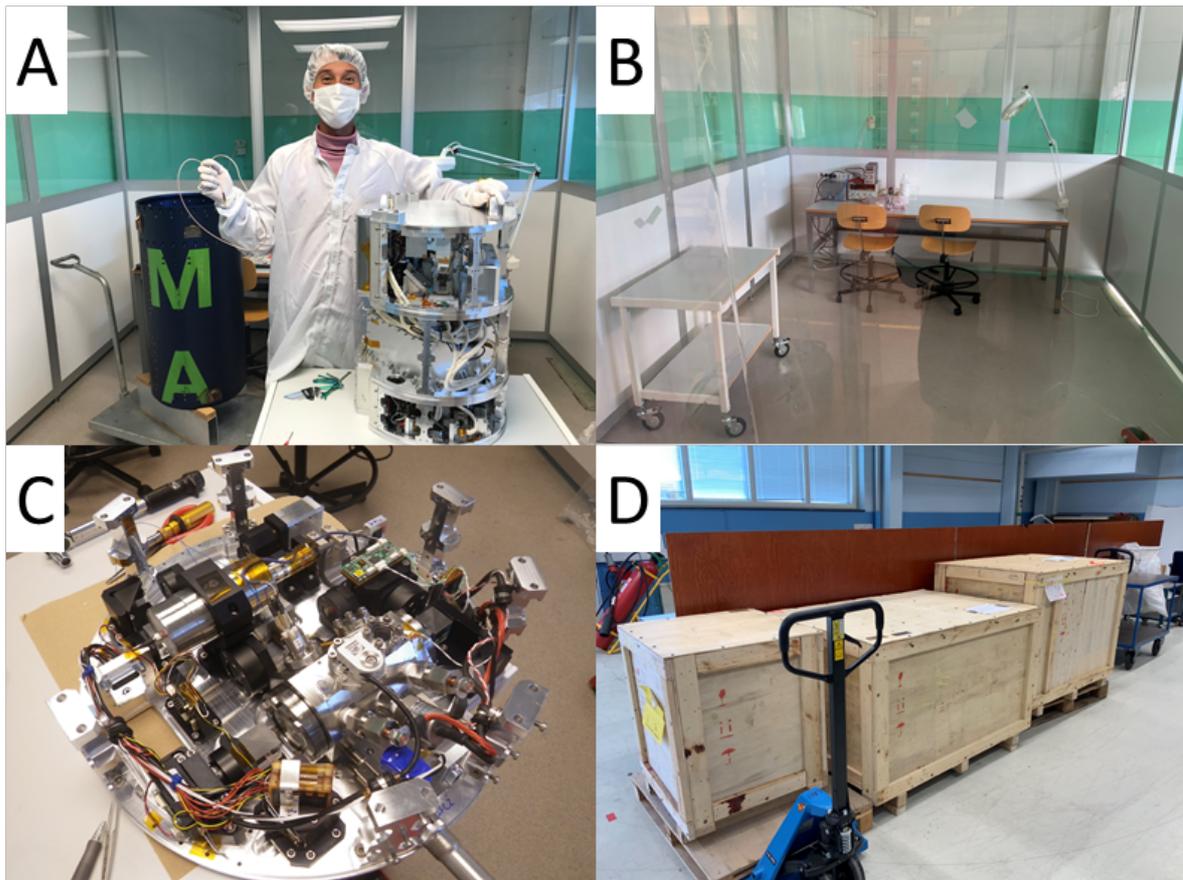


図 5 打ち上げ後のリハービッシュの様子。(A) エスレンジ宇宙センターの射場に直結する建物内に用意されたクリーンルーム内で、回収した実験装置を確認する著者の木村。(B) 作業終了後のクリーンルーム。(C) 改修後の実験装置。(D) 輸送用に梱包した木箱。この状態でアメリカに輸送した。

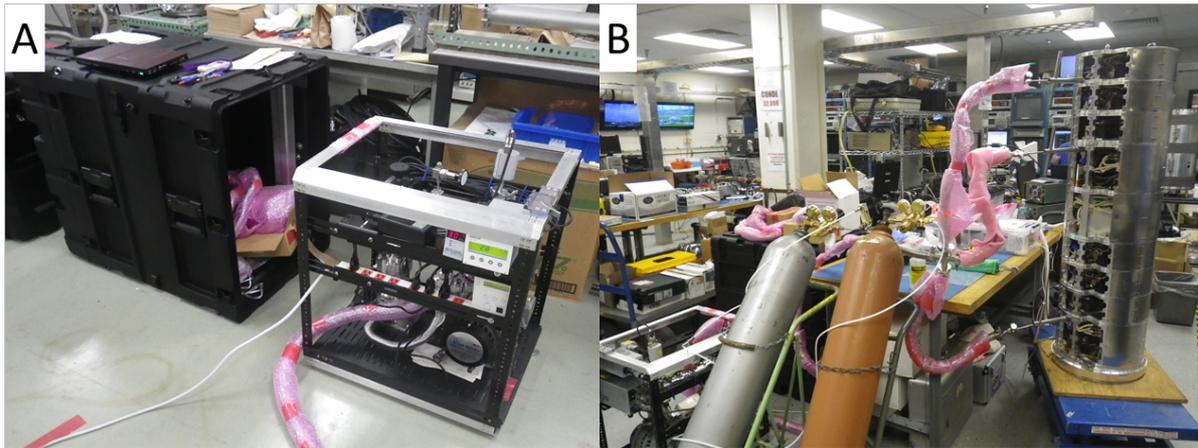


図 6 真空排気システム。(A) 輸送時には、左に見られる黒い箱にそのまま入れることで、固定した状態で安全に運べる。(B) ワロップス飛行施設で実際に真空引きを行っている。配管を途中で3つに分けることで、3つのチェンバーを同時に真空引きしている。

ワロップス飛行施設における噛み合わせ試験

NASA での実験にのみ使用される干渉計装置 2 台(IFC3、IFC4)と赤外測定装置 1 台(IRC2)は 1 箱にまとめ、7 月 3 日(水)に神奈川県相模原市の JAXA ISAS で集荷、業者により木箱に梱包され(140×98×95 cm³、195.0 kg)、13 日(土)に全日空の NH010 便で成田空港からジョン・F・ケネディ国際空港に発送された。米国に到着後は、陸路を経てワロップス飛行施設に無事に到着した。

ワロップス飛行施設における噛み合わせ試験は 8 月 12 日(月)から 29 日(木)の日程で行った。12-16 日の作業では、まず我々の実験装置を組み上げ(図 6B)、ロケット外筒と結合、データの送受信や電氣的な試験を行った。スウェーデンにおける打ち上げでは、SSC の技術者が日本まで装置の一部を持参し、事前に結合試験を行ったため、現地では大きな問題なく作業が進んだのに対して、アメリカの打ち上げでは、ワロップス飛行施設でお互いの装置をはじめて結合した。

データの送受信では、我々のインターフェース装置からは RS-422 でデータを送るのに対し、ロケット側では RS-232C に変換した後に、地上の受信機にデータを降ろし、RS-422 に変換してから我々のデータ記録用 PC に取り込むよう準備されていた。試験ではこの変換が上手くいかず、シークエンステストに進めないまま数日を要した。最終的には、別途用意した RS-232C ケーブルを用いて二度目の変換を避けることで受信が可能となり、我々の PC でデジタルデータを受信して、保存することで、所定のデータを得ることができた。一方で、ロケット側で記録したデータの構造は想定される内容と異なっており、我々が用意していたデータ処理ソフトでは開けなかった。これは、我々のインターフェース装置から RS-422 で送っているバイナリーデータが標準的な RS-232C のボーレートの

上限である 230.4kbps に近いために、ロケット側で取りこぼしのあることが原因として考えられる。実際、データの詳細な解析により、ロケット側で処理した後のデータに 1.2% の欠損があることが分かった。この問題の解決に相当の時間を費やしたが、最終的に解決されず、デジタルデータに関しては、我々が用意した PC で受信するデータを使用する他なかった。

実験で得られるアナログデータは、0-5 V に変換してロケット側に渡している。この時の出力インピーダンスは、NASA 側に事前に 100 Ω と 560 Ω (加速度計 3 チャンネル、蒸発源加熱用電源電圧 6 チャンネルの計 9 チャンネル)であることを伝え、大きな入力インピーダンスを用意してもらえるように依頼していた。しかし、実際には通常バッファアンプで受けるために少なくとも 10 k Ω 以上はあると期待される入力インピーダンスが、2 k Ω しかなかった (SSC の実験では、220 k Ω であった)。低インピーダンスは、電流を多く流すことに相当するため、外来ノイズによる影響を受けにくいというメリットが考えられる。一方で、電流が変化する場合には他へ影響を与えやすくなるというデメリットもある。NASA 側の電気技師に入力インピーダンスが低い理由を尋ねたところ、古い装置を使っているからという返答しか得られなかった。いずれにせよ、時間的に改修困難なことから、計算による補正を行うことにした。さらに、ペイロード側の問題で、インターフェース装置からの出力が 5V まで上がらず、実際には 4.8V 程度で頭打ちになることが、実験後に判明した。

電気的な試験では、電源を外部から内部に切り替えるときに瞬停が生じて画像記録装置 (DVR) と PC の電源が切れる事象が起こった。これは、大きなキャパシタを 4 ケバッテリーに取り付けることで解決した。但し、電源が OFF になるまでに徐々に電圧降下が起こると、IF の動作に不具合が生じる可能性がある。そこで、IF につなげて試験した所、1 秒以内に 10V まで下がった。IF は 16V 以上で駆動するように設計されているので、問題とはならないことを確認した。さらに、インターフェース装置に電源を入れた時点で、微小重力状態を示すシグナルが点灯した。インターフェース装置では、電源投入時の電圧の揺らぎによる誤動作を防ぐために、FPGA が立ち上がった後 4 秒間この信号をマスクし、その後の電圧の立ち上がりエッジを検出してシークエンスを開始するようにプログラムしている。今回は初めから ON になっていたため、立ち上がりエッジを検出していないので、シークエンスは始まらず、大きな問題にはならなかった。これは、ロケット側のコネクタを反転して極性を変えることで解決した。

19-26 日は、ペイロードの電源投入は行わず、ロケットとの結合やロケット側での試験が行われた。我々の実験装置をロケット外筒に組み込んだ様子を図 7 に示す。この組み込み具合を確認したところ、外筒の窓の位置が実験装置と合っていなかった。ペイロード外壁に用意したレートアクセス用窓のネジにアクセスできないため、実験装置とロケット外筒を分離し、アクセスできない 2 本のネジを外した (図 8)。ここで、ロケット外筒のレートアクセス窓を外しながら作業していたため、机上でロケット外筒を回転させたときにローラーが窓にはまって IF と IFC4 の壁が変形した (図 9)。

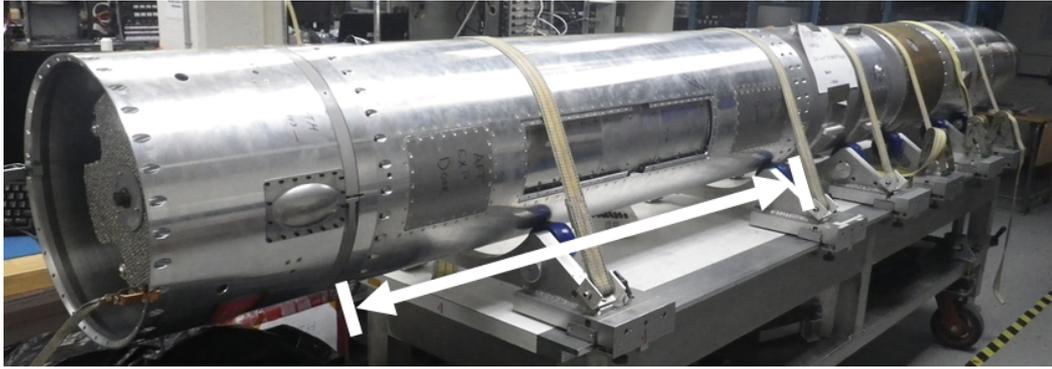


図7 NASA用のロケット外筒に組み込まれたペイロード部(矢印の領域)。

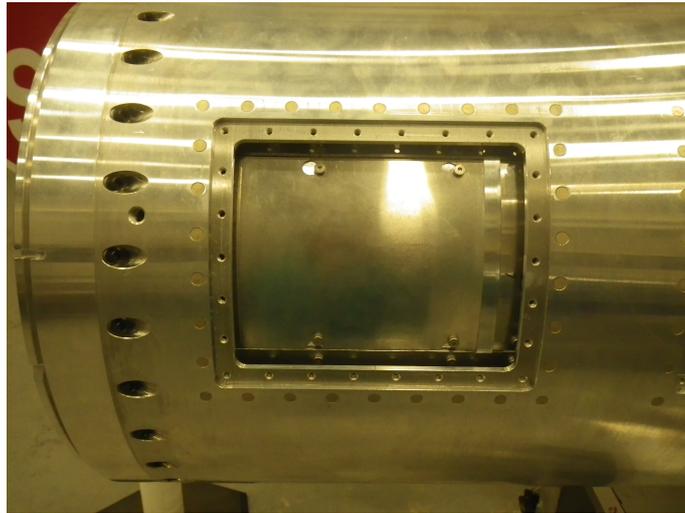


図8 NASA用のロケット外筒に組み込まれたペイロードの最下段。外筒の設計不備により、IRC2に用意したレートアクセス用の扉を外すためのネジ6本の内、一番下の2本(図中開口部の左側)にアクセスできなかった。

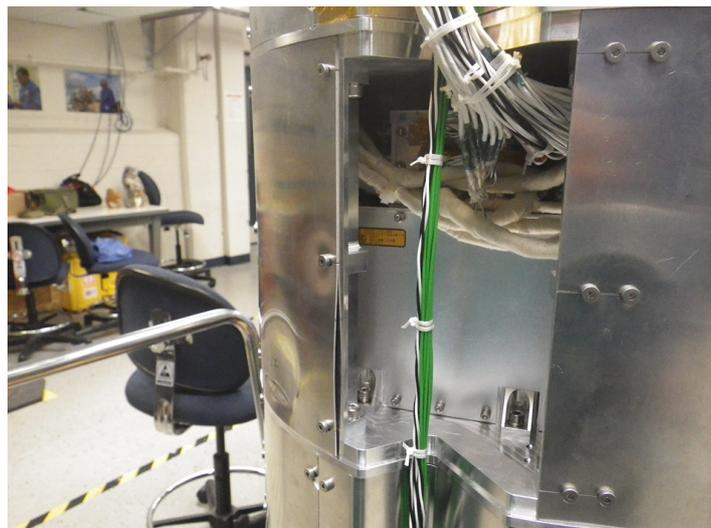


図9 ペイロードの外壁。作業台の上でロケット本体を回転させた際、不注意により固定用ローラー上に脱落したことで陥没した。

27 - 29 日は、主に振動試験やシークエンステストを行った。振動試験は、我々の過去の観測ロケット実験の実績により、実験装置が打ち上げに耐えることを示せたため、試験を簡略化することができた。例えば、ロケット打ち上げ時のスピンレートは、NASA では 4 Hz であるのに対して、JAXA ISAS の S-520 30 号機では 2.05 Hz、SSC の MASER-14 では 1188 degrees/sec (3.3Hz) で同程度である。それでも、振動試験ではまず X 軸ランダム、Y 軸ランダムを行い、ロケットを Z 軸用の振動試験装置に移動し、続けて Z 軸ランダム、Z 軸サインで振動させた。この試験の前後には、3 回のシークエンステストを行った。まず、予備チェンバーを準備し、蒸発源にフライト時と同様の電流を供給するテスト (TestMode2)、実際のフライト用核生成チェンバーに小さな電流を供給するテスト (TestMode)、そして、雷などで不意に打ち上がる事態を想定したテストを TestMode で行った。これは、ISAS や SSC にはない試験である。

ワロップス飛行施設では、我々の他に 4 つの観測ロケットプロジェクトが同時並行で進められていた。また、NASA 側の作業員はデータ管理、クレーン操作、ネジ締め、ガス供給、安全管理など、完全な分業制であった。さらに、振動試験装置はもとより、グランドステーションも並行して進められる他のプロジェクトと共通で使用する点が、一プロジェクトずつ実施する ISAS や SSC とは大きく異なっている。

ホワイトサンズ・ミサイル実験場における射場作業

9 月 17 日(火)に Mission Readiness Review (MRR) を行い、ホワイトサンズ・ミサイル実験場での射場作業に向けて全工程が終了した。

射場作業は 9 月 24 日(月)開始、10 月 7 日(月)10 時打ち上げ予定、同日中に実験装置をロケット外筒から出し、翌 8 日にペイロード部を解体、梱包作業を実施し、9 日(水)に帰国の予定で開始した。日々の作業では、朝 7 時前にホワイトサンズ・ミサイル実験場のゲート前で現地スタッフと待ち合わせ、エスコートされて入場、約 15 km 先の作業所まで車で移動した後、朝 7 時半頃に作業開始、16 時半頃には終了となり、再度ゲートまでエスコートされて場外に出た。場内の行動は厳しく制限され、単独行動は許されず、昼食を取りに出ることもできず、2 日目以降は持参した。

24 日(火)は開梱作業を行った。

25 日(水)はミーティングと安全トレーニングを 1 時間受講した。ミーティングにおいて、打ち上げ時刻が 10 月 7 日 10 時(日本時間 8 日 1 時)に設定されており、打ち上げ可能時刻は 11 時半まで、予備日が 8 日の同時刻であることが分かった。打ち上げ時にはホワイトサンズ国立記念物 (White Sands National Monument) と国道 70 号線を 50 分間通行止めにする必要があるため、事前調整が必要である。ロケット側とのデジタルデータの送受信において、予想通りバイナリーデータの構造が変わっているので、生データをリクエストした。25 日(火)は他グループの打ち上げ予定であったが、fire コマンドが通らずに打ち上がらなかった。翌週月曜日に打ち上げが再設定され、ここで打ち上がらないと、我々

の打ち上げに影響することが伝えられたが、無事に打ち上がり、我々の打ち上げに影響はなかった。

10月1日(火)はシークエンステストを行った。

2日(水)はペイロードを射場に移動した。真空排気システムも射場に持っていき、ロケットの外壁から無事に真空引きできることを確認した。真空計をカメラで撮影することで、外部から動作状況を確認できるようになった。これを使って夜間や週末は真空計に異常が無いかを、滞在先のホテルから適宜チェックした。その後、1日(火)に行ったシークエンステストのデータを再配信して、射場近くのブロックハウスや約 1.3 km 離れた我々のモニタールームなどで全データを健全に取得できることを確認した。

3日(木)は昼に打ち上げに関する確認会議があり、打ち上げ時刻が1時間繰り上がり、7日(月)朝9時に設定された。午後は手順の確認(リハーサル)を行った。

4日(金)はロケットの前で集合写真を撮影した。

7日(月)は2時に起床して3時前にゲートに待ち合わせ、3時半から作業を開始した。ロケット外壁に用意したレートアクセス用の窓から配管をつなげて、アルゴンガス 30,000 Pa と酸素ガス 10,000 Pa を入れて、モード切替用の D-Sub コネクタをフライトモード用に交換した。ロケットを寝かせた状態でテストを行ってから、ロケットを立てて再度テストを行い打ち上げに向かった。

予定通り7日9時(日本時間8日0時)に打ち上がった。実験装置はプログラム通りに動作し、予定のデータを取得することができた。その後、アメリカ側の研究者と現地スタッフが NAVY のヘリコプターでペイロードの回収に向かった。戻ってきたペイロードは下部が損傷していた(次章参照)。

ペイロードと周辺機器はすべて一旦ワロップス飛行施設に戻され、10月28日(月)に日本に発送した。11月5日(火)に千歳空港に到着し、8日(金)に低温研に戻った。11日(月)から開梱作業、試料回収を行い、健全性の確認および不具合箇所の修復作業を開始した。

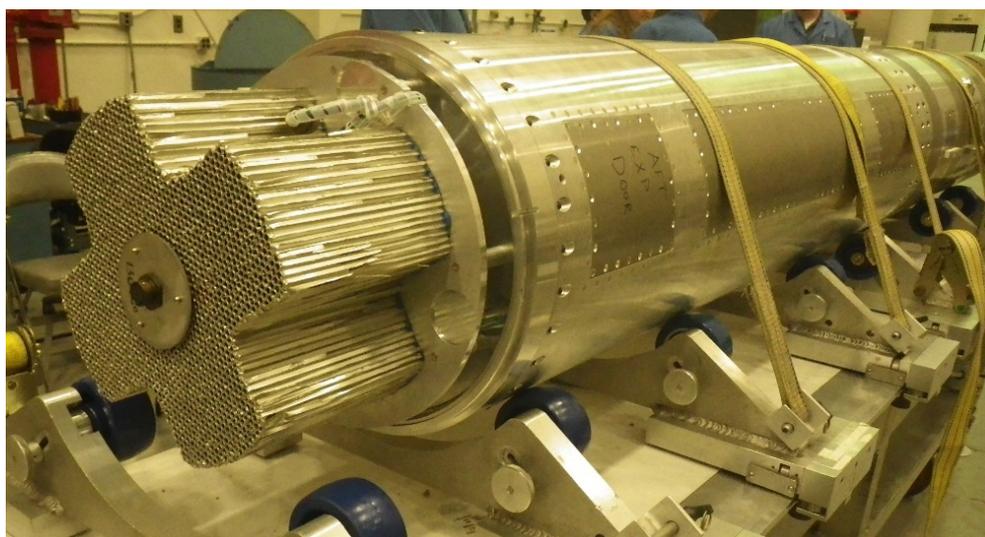


図 10 ペイロード部下方に準備された打ち上げ前のアルミ製ダンパー (左端)。

リカバリー失敗による装置の損傷

打ち上げ後にペイロードを回収したところ、その下部に存在しているはずのアルミ製ダンパーが消失していた。このアルミ製ダンパーは、大気圏に突入した後にパラシュートを展開し、 $\sim 8 \text{ m/s}$ で地表に到達した際に衝撃を和らげるために取り付けられている、NASA の観測ロケットに標準的なものである (図 10)。再突入時の大気との摩擦で、このダンパーが加熱、蒸発した結果、消失した (図 11)。この高温の蒸気がすぐ上のペイロード部に入り込み、実験装置が損傷を受けた (図 12)。また、再突入時には通常 15 G 程度の衝撃を受けるのに対して、今回は 52 G の大きな衝撃を受けた。回収したペイロード部の外筒は、図 13 に見られるような歪みのために、我々の実験装置との分離が容易に出来ない状況であった。実験装置と外筒を接続している 5 つのダンパーの内の 1 つは、2 本のネジの内の 1 本が折れて、もう 1 本はヘリサートごと抜ける形で破壊されていた (図 14)。その結果、実験装置は、中央付近で外筒と接触し、装置外壁に凹みが見られた (図 15)。現地では、外筒に取り付けられていたステンレス製の排気口カバーの色の变化から、高温プラズマガスが発生して排気口カバーは $\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ まで加熱されたと推定された (図 16)。そのすぐ内側にある我々の実験装置 (IRC2) の壁面はアルミ製であるため、高温ガスにより穴があき (図 12)、内部が激しく損傷した (図 17)。光学部品などを取り外した後のベースプレートの写真を図 18 に示す。装置全体に渡ってアルミが蒸着されていることが分かる。これは、全ての光学部品が汚染されていることを意味する。光学部品にカプトンテープを貼って剥がしてみると、蒸着されたアルミニウムの膜が綺麗に転写され、かなりの膜厚で蒸着されていることが分かる (図 19)。



図 11 打ち上げ後のペイロード下部。アルミダンパーが完全に消失している。



図 12 高温の蒸気外筒の排気口（写真上方）から入り込み、すぐ裏の実験装置のアルミ製の外壁を焼失した。高温の蒸気と、蒸発したアルミ製ダンパーは、そのまま装置内に入り込んだ。写真上方の排気口には、図 16 に示すカバーが取り付けられていた。

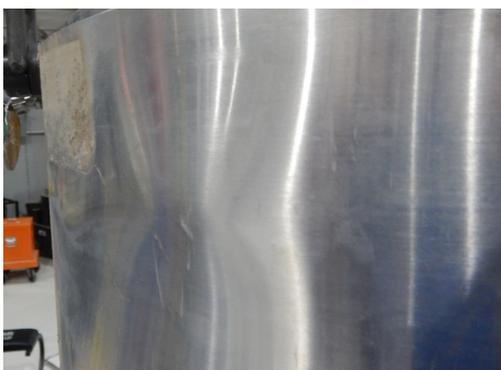


図 13 回収後のペイロード部の外筒の拡大写真。外壁が凹んでいる。



図 14 実験装置と外筒を接続している 5 つのダンパーの内の 1 つ。

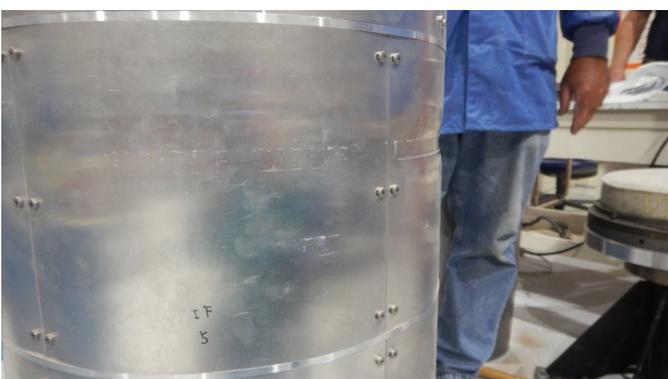


図 15 実験装置の中央付近の拡大写真。外筒と接触したことによる凹みが見られる。



図 16 外筒に取り付けられていたステンレス製の排気口カバー。

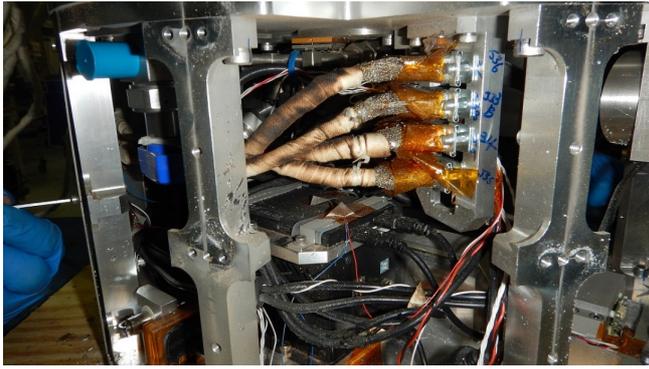


図 17 損傷した実験装置の例。

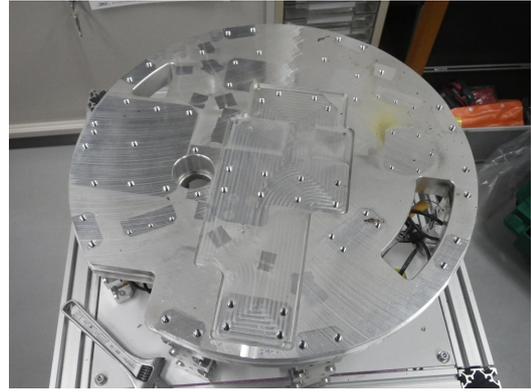


図 18 部品を取り外した後のベースプレート。部品があった箇所となかった箇所の色の違いは、アルミの蒸気による汚染の有無である。光学部品を含めて、実験装置内のすべてが汚染されたことが分かる。

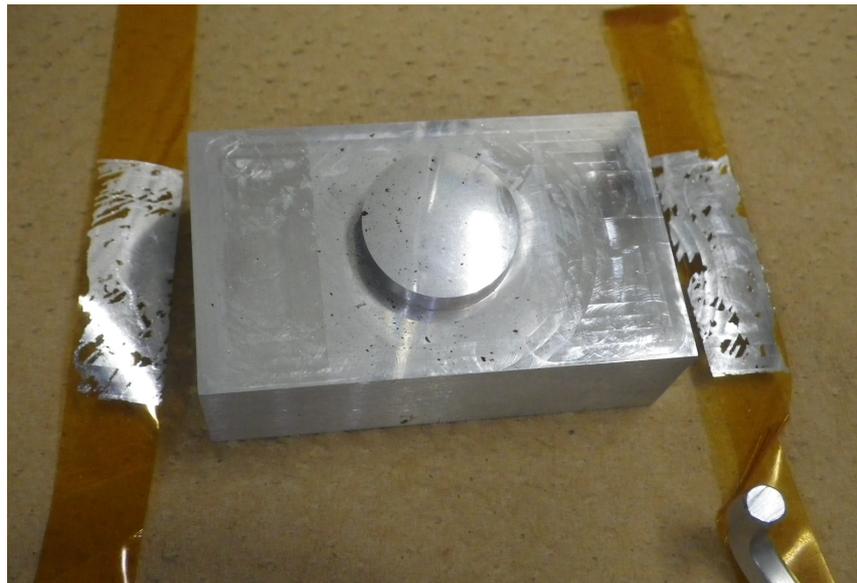


図 19 取り外した光学部品にカプトンテープを貼ると、アルミ膜が剥がれた。アルミ製ダンパー起源のアルミニウムが実験装置一面に蒸着されたことが分かる。

ミッションマネージャーより原因は以下の3点に集約されると2019年12月3日に報告を受けた。1) 飛行高度、2) 再突入時の姿勢、3) ベント用通気口とケーブルダクト用開口部。

- 1) 飛行高度：従来の観測ロケット Black Brant IX の搭載装置に比べ、DUST 実験装置は軽量であったために、飛行高度が高く、再突入速度が大きくなった。

- 2) 再突入時の姿勢：通常、大気圏突入時は、スピニングアップをしながら横向きの姿勢で熱を逃がす。今回は、ペイロード部の重心が下方にあったために、下部から再突入した結果、アルミ製ダンパーが加熱され続けた。
- 3) ベント用通気口およびケーブルダクト用開口部：今回の実験で用いた干渉計は、実験中に装置周囲の圧力環境が一定である必要がある。そのため、PI 側から NASA に対して、打ち上げ後は速やかにペイロード内外の気圧を一定にするように要望していた。この要望に応える形で、ロケット外筒に、直径 1 インチ程度の通気口が 3 つ用意された。さらに、ケーブルを通すためのダクトが 1 か所ペイロード部下面に設けられた。

本事案の再発防止のために、ミッションマネージャーから以下の 4 つの提案を受けた。

- Evaluate if the holes in the skin are needed.
- Evaluate a better approach to venting the section.
- Evaluate the use of a Thermal Protection System (heat shield) instead of a Crush Bumper.
- Evaluate the re-entry approach using the Attitude Control System.

排気口は小さなものを一つ設けるだけで充分であるため、次回の打ち上げでは今回用意された外壁の 3 つの排気口はすべて無くした。合わせて、実験装置最下段の IRC2 の壁面をステンレス製に変更して、蒸気が直接吹き込んでも溶けて穴が開くことはないようにした。アルミ製ダンパーの代わりに、熱シールドを設置することを提案されたが、上述の対策で高温蒸気の浸入は防げると考え、また、回収時の衝撃を和らげるために次回もアルミ製ダンパーを用いることにした。NASA 側では、重心位置を上方に持つことで狙った姿勢で再突入できるように、各コンポーネントの再配置が行われた。SSC の実験ではこのような事象は起こらなかったため、再突入時の姿勢制御について問い合わせたところ、重心位置を基準値以内に置いて、スピンさせているとの回答であった。

NASA の観測ロケットを用いた 3 度目の微小重力実験

想定外の損傷を受けた実験装置を改修し、2020 年 9 月の打ち上げに臨んだ。コロナ禍の影響で現地作業に立ち会うことができず、詳細な指示書を作成して日本からサポートを行った。幸い、予定通りに 9 月 8 日（火）正午（日本時間 9 日 3 時）に打ち上がり、2019 年 6 月のキルナ、同 10 月のホワイトサンズの打ち上げに続き、3 度目の実験も成功した。しかし、リカバリーでは、再度同様の事象が発生して実験装置の最下部の赤外測定装置が全焼した。ロケットのフライト情報や原因については現在まとめている所であり、詳細は次の機会に譲る。

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)を元に推進している。MASER 14 観測ロケットは、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、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年12月、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年12月、1-12。
- [3] Ishizuka, S., Kimura, Y., Sakon, I., Kimura, H., Yamazaki, T., Takeuchi, S., Inatomi, Y., 2018. Sounding-rocket microgravity experiments on alumina dust. *Nature Communications*, **9** 3820 (6pp).
- [4] Kimura, Y., Tanaka, K. K., Nozawa, T., Takeuchi, S., Inatomi, Y., 2017. Pure iron grains are rare in the universe. *Science Advances*, **3**, e1601992.

氷晶核能測定装置の開発

大塚 美侑¹、飯塚 芳徳²、森 章一³

1. 北海道大学大学院環境科学院
2. 雪氷新領域部門氷河・氷床分野
3. 技術部装置開発室

1. 背景と目的

大気中に存在する雲は液体と固体の雲粒によって構成される。どちらも、エアロゾルが雲核となるが、海塩粒子や硫酸塩粒子などの水溶性エアロゾル粒子は液体雲粒を形成する雲凝結核 (CCN; Cloud Condensation Nuclei) となりやすく、鉱物性粒子や生物起源粒子などの疎水性エアロゾルは固体の雲粒(氷晶)を形成する氷晶核 (INPs; Ice Nuclei Particles) となりやすい。氷晶の形成機構を明らかにするためには、どのようなエアロゾル粒子がどのくらい INPs として働く能力(氷晶核能)を持っているかを明らかにする必要がある。北極圏では大気温が低い傾向にあり、下層大気中でも氷晶が頻繁に発生している。北極圏の現地で採取したエアロゾル試料を用いた氷晶核能についての理解は進みつつあるが、過去のエアロゾルの氷晶核能についてはよくわかっていない。そこで本研究では、北極圏における過去の氷晶核エアロゾルの実態解明に向け、グリーンランドのアイスコアに含まれる過去のエアロゾルの氷晶核能を復元する装置を開発している。

2. 装置の概略および予備実験

2.1 装置の概略と制御系

氷晶核能は w/o エマルジョン化した過去の降水微液滴を -40°C 程度まで冷却させることで計測される。微液滴中のエアロゾルの氷晶核能が高い場合は比較的高い液温で凍結(氷晶化)するが、氷晶核能となるエアロゾルが含まれない液滴(例えば超純水)は -38°C まで凍結しない。試料液滴の凍結温度を調べることで、試料中に含まれるエアロゾルの氷晶核能を調べることができる。そのため、w/o エマルジョンを -40°C 程度まで冷却させる装置を作成した。

装置の概略図を図 1 に示す。本装置は、顕微鏡 (NIKON : SMZ 1500) のステージに設置した w/o エマルジョンをペルチェ素子の熱電変換作用を用いた冷却によって、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の冷却速度で -40°C まで冷却できる。顕微鏡の鏡筒に USB 顕微鏡カメラ (SWIFT : SC2003) を接続し、上部から光を落とす落射法を用いて、任意の速度のタイムラプス画像から w/o エマルジョン中の微液滴の凍結の有無を判別する。また、冷却速度の制御を行うために、DC 電源装置 (RS PRO : IPS 606D) を接続し任意の温度勾配プログラムを組むことができるデジタルプログラム調節計 (株式会社チノー : KP1000) を用いた。試料内温度の測定には調節計に接続した白金測温抵抗体を用いた。白金抵抗体の実測値とプログラム設定値はソフト TRAMS IV (株式会社チノー) によって常時監視

することができる。低温恒温水槽（東京理化器械株式会社：NCB-3100 型）を用いて $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の不凍液を 6.7 L/min の速度でペルチェ素子の放熱面に輸送し、ペルチェ素子の冷却効率を高めた。

制御系に関して、図 2 に製作したコントローラーの回路図を示す。PC 接続の利便性を考え、データ通信は RS232C 接続と USB 接続の 2 系統を用意した。また、ペルチェ素子の駆動は外部直流電源とし、コントローラー内で SSR によるスイッチとした。使用するデジタルプログラム調節計の制御出力は、PID 方式によってパルス幅変調された信号による ON/OFF 制御であり、直流数アンペアを頻繁にスイッチするため、無接点スイッチである SSR をメインスイッチとした。なお、異常高温を感知した場合、SSR 制御信号ラインおよびペルチェ素子給電ラインを電磁リレーによって物理的に開閉する遮断回路を組み込み、安全性を高めている。

2.2 ペルチェ素子

ペルチェ素子は構成する半導体内部抵抗の温度依存性や、温度差で生じる起電力の変化などにより、熱輸送量を一定化しようとした場合には印加電圧の変化が大きい。そのため安定した冷却能力を実現するには定電流制御が向いている。また、素子の発熱面には吸熱面からの熱量に、自己発熱する熱量が加算されて現れるため、多段化して大きな温度差を得ようとする場合、熱的に余裕を持った設計が必要となる。

本実験では室温環境にて比較的短時間に $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで冷却する必要があり、ペルチェ素子群を 2 段重ね、上下段の素子数比は $1:4$ とした。結線は全素子直列として定電流電源による駆動を試みた。その結果、発熱面を水冷する事で試料台は $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下まで下がるものの、冷却に時間がかかり過ぎるため、ペルチェ素子 3 段階による冷却装置を構築中である。3 段階の設計にあたっては、予備実験の結果から冷却面から順に $1:3:9$ の素子数比とし、使用素子の最適な電流値を割り出して駆動させることにより、試作段階で温度差 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ を実現している。

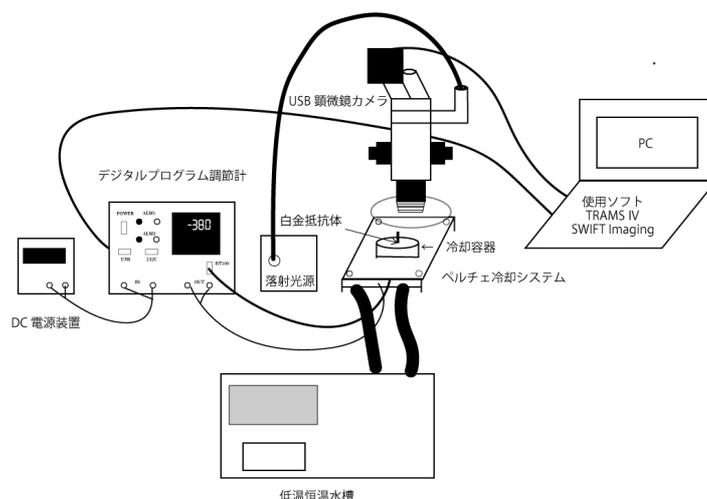


図 1 装置の概略。

2.3 温度センサー

温度センサーには白金測温抵抗体である PT100 を使用した。PT100 の感度は $0.39 \Omega / ^\circ\text{C}$ (0°C 付近) ほどであり、温度差 0.1°C では 0.039Ω の変化に過ぎない。この微小な抵抗値変化を測定しなければならないため、3 線式結線ではセンサーまでの結線に関してコネクタ等の接続部位を極力減らす配慮が必要である。

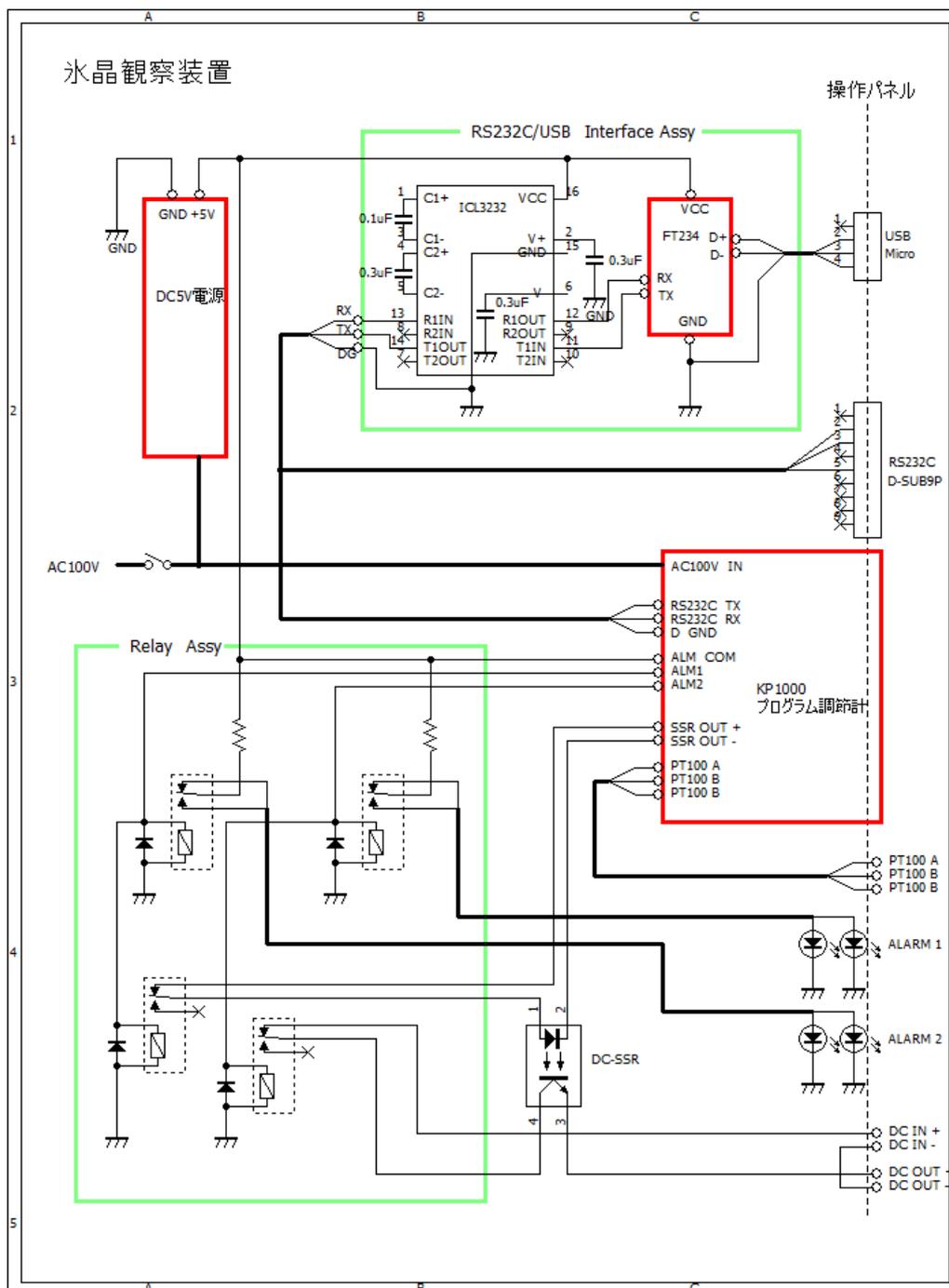


図 2 本装置コントローラ部の回路図。

2.4 照明

当初、試料台側面からの LED による光源を構築したが、存外に光源の発熱が大きく、試料の冷却能力が著しく不足したため、顕微鏡鏡筒からの落射光源による観察とした。観察には視野の広い側面直近からの光源の方が適しているため、冷却能力を上げる事で改良を図る。

3. 超純水液滴を用いた予備実験

エアロゾル粒子を含まない超純水水滴が氷晶を形成する温度の理論値が -38°C であることから、ペルチェ素子冷却システム上に設置したシャーレ内試料を -40°C まで約 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の冷却速度で冷却し、超純水水滴が理論値近くで凍結するか調べた。

2020年10月22日に行った予備実験の結果例を図3に示す。設定値はプログラムで設定した冷却速度を示しており、 $-1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の冷却速度を設定した。冷却を試みたところ、 -40°C まで冷却できることが確認できた。またプログラムで設定した冷却速度と実測された冷却速度の相関を見ると10月22日の例では $R^2=0.997$ とかなり高い相関が見られた。以上のことから、概ね $-1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で 0°C から -40°C まで冷却できていることを確認することができた。しかしながら、 -35°C 近くなると、設定温度に対して冷却能力が不足することが見られており、今後のペルチェ冷却素子の改良を予定している。

USB 顕微鏡カメラを用い、実験中のシャーレ内の微液滴を、 $20\text{ min}/\text{shot}$ でタイムラプス撮影した(図4)。その結果、ほとんどの超純水液滴が約 -37°C から -39°C の範囲で凍結していることが観察され、概ね理論値に近い環境を構築できていることがわかった。

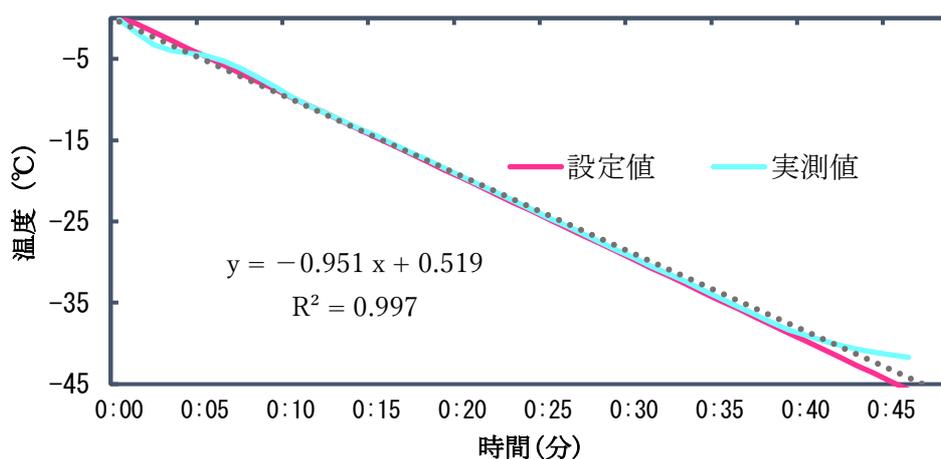


図3 プログラム設定冷却速度と実測値 (2020年10月22日の例)。

まとめ

氷晶核能を評価するために、w/o エマルジョンを $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷却させる装置を開発した。いくつかの予備実験の結果、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで冷却できていること、概ね理論値に近い w/o エマルジョンの凍結環境を構築できていることがわかった。今後は予備実験を続け、装置および実験の再現性を確認していく。

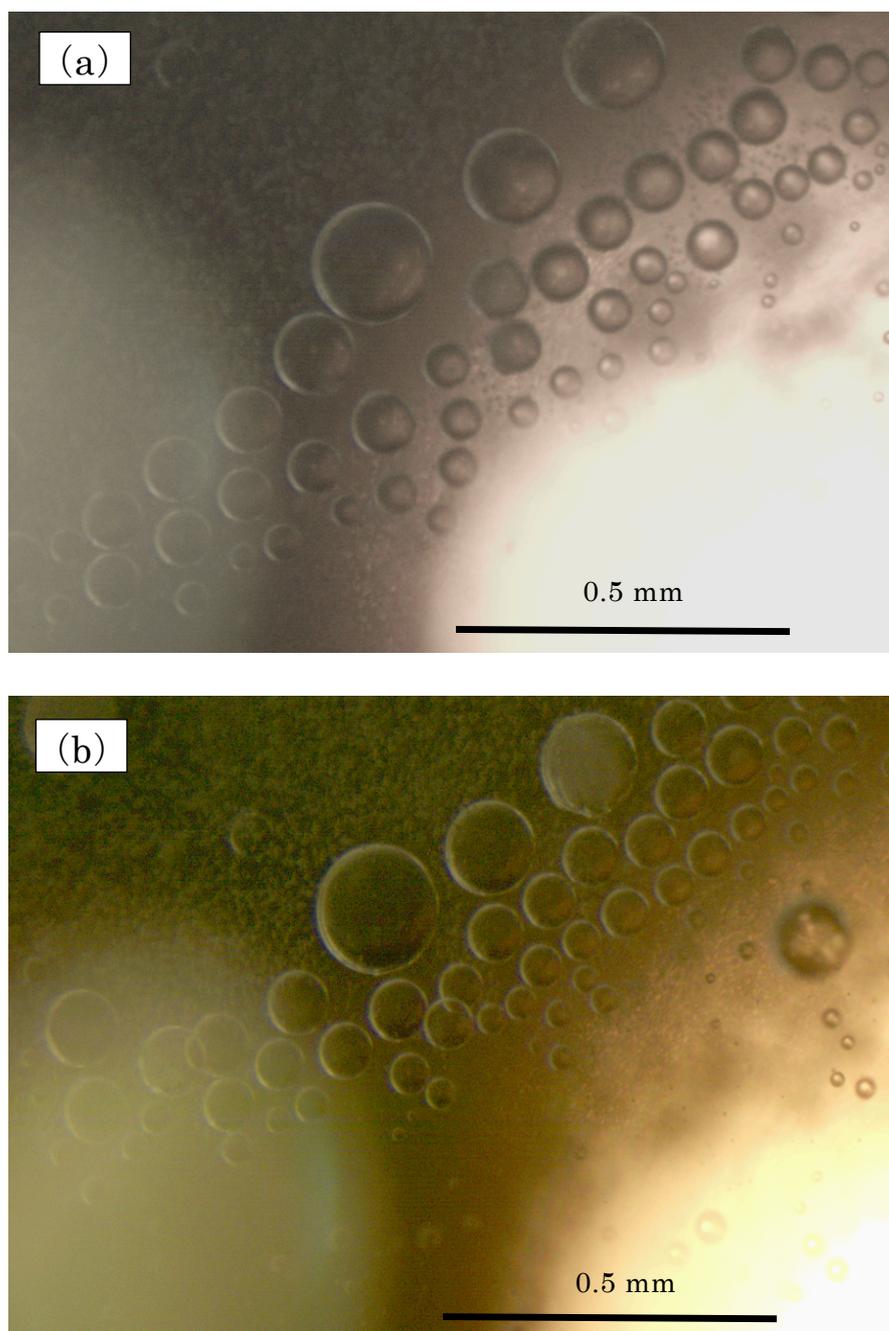


図 4 タイムラプス写真(2020年10月22日の実験例)。(a) 約 $-33.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到達時と (b) $-38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到達時。図中の球形体が水滴である。凍結が起こると (b) のように落射光が透過せず球形体は白濁する。輝度の変化により凍結の有無を判別する。

コニカルホーンアンテナの製作

藤田 和之

技術部装置開発室

はじめに

国立天文台・東京大学・北見工業大学との共同研究により、宇宙における構造形成・星形成史の解明を目指して、グリーンランドに設置されているサブミリ波望遠鏡用の多色撮像型サブミリ波カメラシステムの開発を推進している。コニカルホーンアンテナは望遠鏡光学系で集光された電磁波を、シリコンウェハー上の検出器と結合させるための重要なコンポーネントであるが、高い表面精度・形状精度に加え、100素子を超える多素子化が製作上の課題となっている。そこで、コニカルホーンアンテナアレイの製作に向けて、アルミ（A6061）製の測定用ホーンアレイを製作し、技術検証を行った。設計図面を図1に示す。測定用ホーンアレイは、コニカルホーンアンテナをカメラ用に5素子アレイ化したものである。

コニカルホーンアンテナの製作にはいくつかの方法が考えられるが、今回は切削加工とワイヤー放電加工の二つの方法で製作した。二つの異なる加工による、表面の粗さの違いについて報告する。

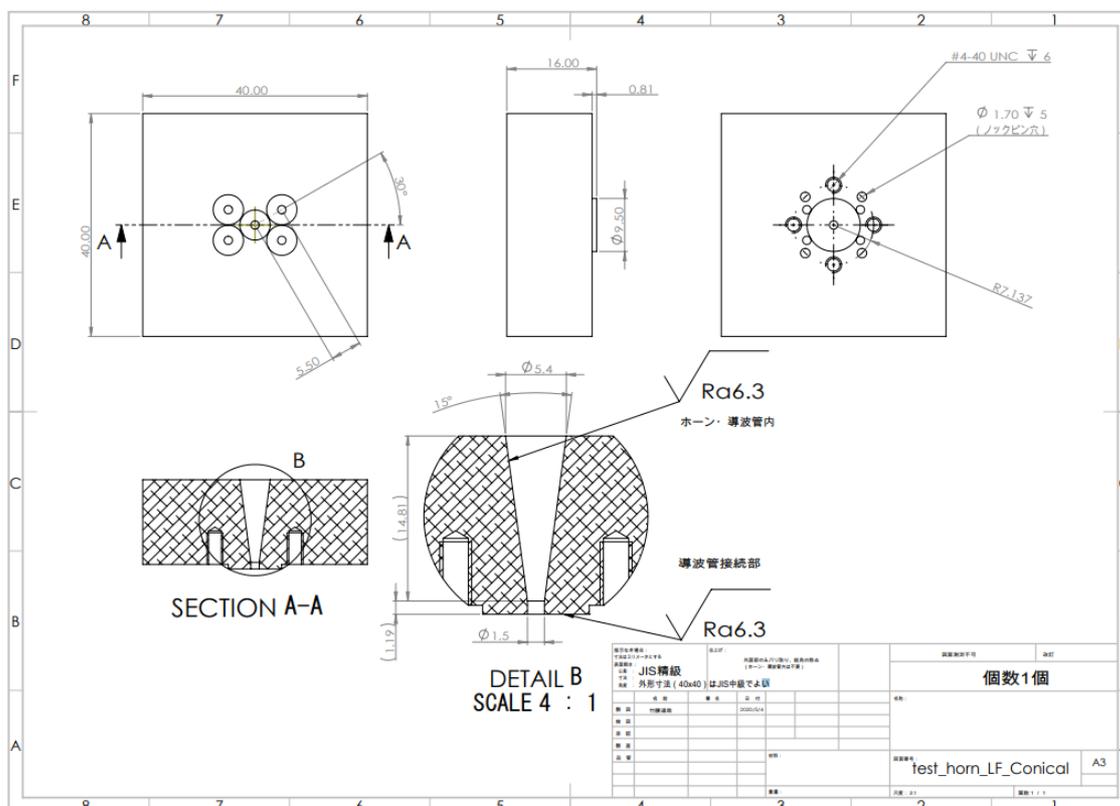


図1 測定用ホーンアレイ設計図面。

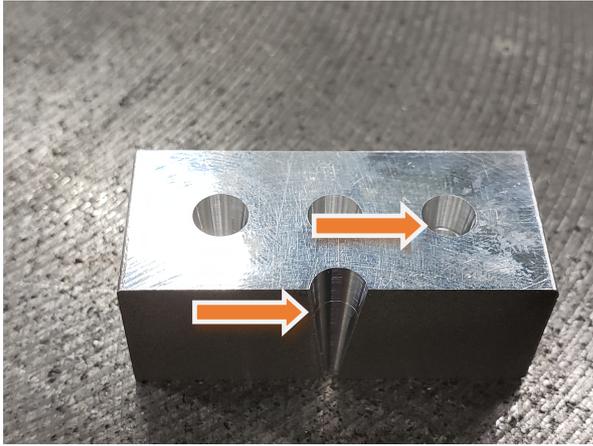


図 2 切削加工の傷が入った表面（矢印部分が傷）。



図 3 切削加工での完成品

切削加工での製作

ロボドリル（小型マシニングセンタ）でテーパ角度 15 度のサブマリンゲートドリルを使用して加工した。サブマリンゲートドリル加工の切削抵抗を減らすため、あらかじめドリルで貫通穴加工し、ステップドリル形状に未貫通穴加工を施した。未貫通穴はドリル $\phi 2.0$ (mm) から 1.0 mm 刻みで $\phi 5.0$ まで加工した。初めに製作したものは、表面に傷が入ってしまった（図 2）。傷が入ったのは、切削抵抗が大きく切り粉がかんでしまったためだと考えられる。そのため、切削抵抗を減らすため、未貫通穴加工を 0.7 mm 刻みで加工した。切削抵抗を減らすことで、製品の表面をきれいに仕上げることができた（図 3）。サブマリンゲートドリルの加工条件は回転数 500rpm、送り速度 25 mm/min で、一度加工を始めると、引き上げることなく最後まで一気に加工した。計算上は角度 15 度のサブマリンゲートドリルで加工深さを 17.498 mm にすれば上部が $\phi 5.4$ になるはずだが、実体顕微鏡を用いて測定した実際の寸法と異なったため、プログラム上の加工深さは 17.437 mm にした。

ワイヤー放電加工での製作

ホーンの中心にワイヤーを通すための貫通穴をドリル加工で開けた後、ワイヤー放電加工を行った。面精度を高くする必要があったため、加工回数 3 回のセカンドカット*1を施した。寸法や角度の調整を確認するため数度テストカットした。設定テーパ角度を 7.5 度にすると実体顕微鏡での測定値は 7.44 度であった。そこで設定テーパ角度を 7.54 度にすると実際の値 7.5 度に近づけることができた。

*1 仕上げ代を残してファーストカットを行い、残された仕上げ代の加工は電気条件を仕上げ条件に切り替え、オフセット量と電気条件を徐々に小さくして、2 回以上表面を加工する方法。

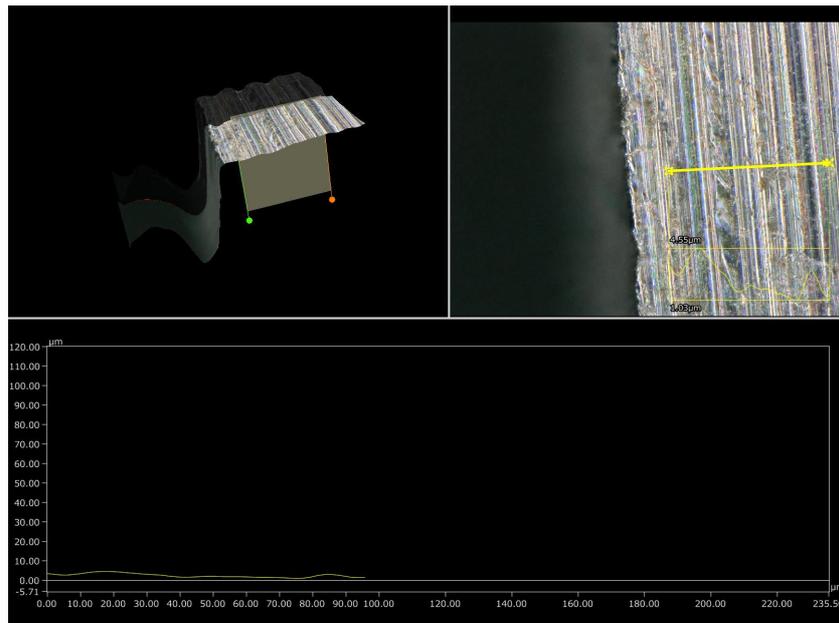


図 4 切削加工の加工表面。

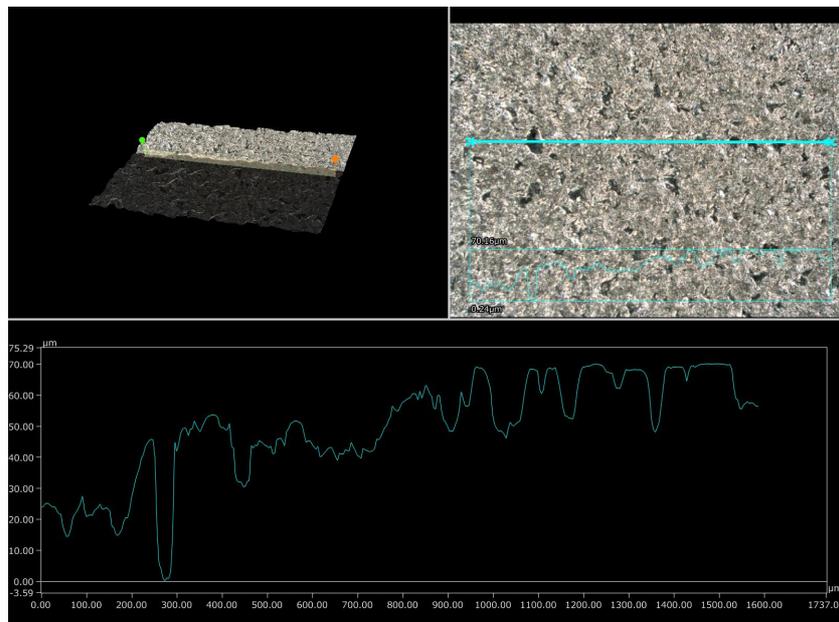


図 5 ワイヤ放電加工の加工表面。

JAXA での三次元測定

穴径や角度を本研究所の実体顕微鏡で観察した後、再度 JAXA の三次元測定機で、加工表面とともに測定した。切削加工では穴径誤差 0.02 mm で、加工表面の高低差は最大 $10 \mu\text{m}$ であった(図 4)。一方、ワイヤ放電加工では穴径誤差 0.02 mm で、加工表面の高低差は最大 $70 \mu\text{m}$ であった(図 5)。切削加工とワイヤ放電加工の加工表面比較を図 6 と 7 に示す。テーパ角度は両者とも寸法通りだったが、切削加工した加工表面はワイヤ放電加工のものよりも滑らかだった。

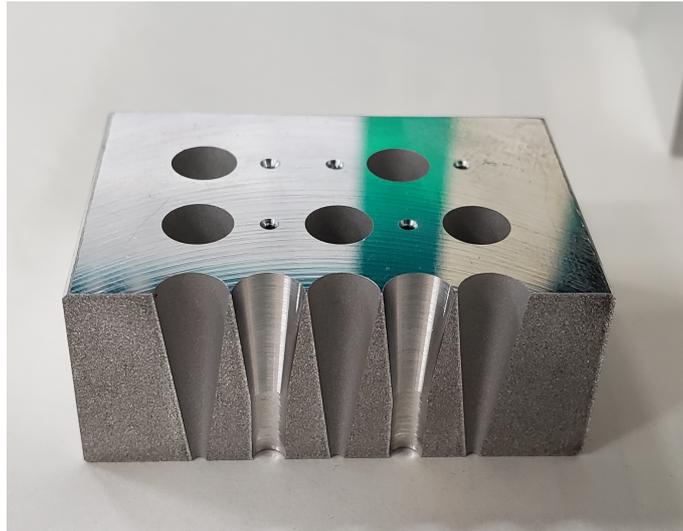


図 6 断面左から 2 番目、4 番目が切削加工。左端、真中、右端がワイヤー放電加工。

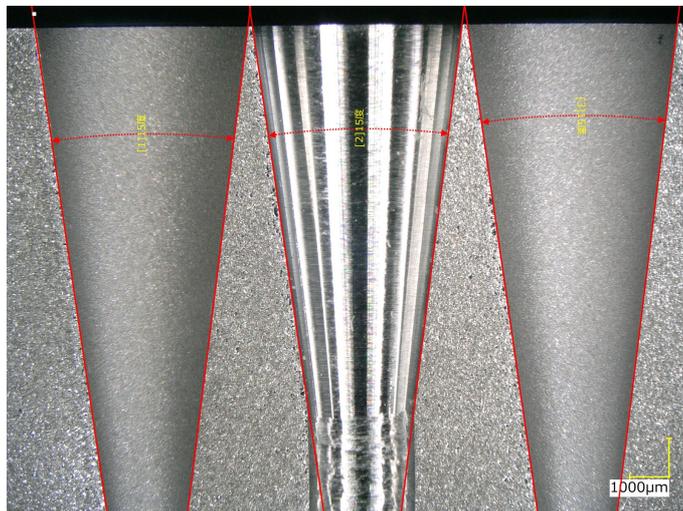


図 7 真中が切削加工の加工表面。左右がワイヤー放電加工の加工表面。

おわりに

切削加工の方がワイヤー放電加工よりも加工表面が滑らかであり、加工時間もかからなかった。測定用ホーンアレイのホーン加工は 5 素子だが、実際に使用するコニカルホーンアンテナは一枚のアルミ板に 100 素子程度のホーン加工を施す。そのため、加工時間や表面粗さを考慮すると、サブマリングートドリルでの切削加工になるだろう。本切削加工では一度に 9 本の工具を使用したため、ロボドリルの持ち味が発揮された。今回は加工性の面からアルミ製にしているが、最終的には検出器のあるシリコンウェハにより近い熱収縮率を持ち、ウェハとのアライメント精度や熱収縮率の違いによる応力がアルミと比べて改善されるシリコンアルミ合金で製作できたらと考えている。

測定用ホーンアレイの製作に当たり、測定や技術協力をしていただいた、JAXA 中坪氏と本研究所山崎氏に深く謝意を表します。

第 61 次南極地域観測隊での海水・海洋観測

小野 数也

技術部先端技術支援室

はじめに

低温科学研究所と国立極地研究所が中心となって立ち上げたプロジェクトが、南極地域観測の第 IX 期（2016 – 2022 年度）6 カ年計画の中心に当たる重点研究として採択された。このプロジェクトは日本の極地研究観測の 3 本柱のうちの 1 つの大きなプロジェクトである。私はこのプロジェクトの初年度から技術開発および観測実行の中心として、計画の立案・準備段階から関わり、観測隊員としても 2 度南極地域観測に参加した。初年度となる第 58 次南極地域観測隊（JARE58；小野 2017）では、南極観測船「しらせ」を使い、観測隊初のリュツォ・ホルム湾海水下の大規模な海洋観測を実施した。その結果、湾内での広範囲に渡った海洋構造を明らかにするデータを取得でき、海洋が融かした白瀬氷河の融解水の広がりを見事に捉えることに成功した（Hirano et al., 2020）。

今回、第 61 次日本南極地域観測隊（JARE61：2019 年 12 月 5 日から 2020 年 3 月 19 日まで南極観測船「しらせ」（図 1）に乗船）においても、係留機材の設置、海水のサンプリング、海水の分析などを行った。本稿では JARE61 で私が実際に関わった観測について紹介する。



図 1 昭和基地沖に接岸直後の「しらせ」。左下から延びている線は、「しらせ」から昭和基地の燃料タンクまで繋げる燃料パイプ。この「しらせ」が停留している短期間一度の燃料補給で、昭和基地の発電機などを一年間動かし続けられる十分量を送る。

トッテン氷河沖海洋観測

この観測は東南極沿岸を特徴付ける三海域の一つであるトッテン氷河近傍に着目し、トッテン氷河を中心とする氷河・海氷・海洋システムの実態把握に加え、十年規模スケールのシステム変動の把握を目的としたものである。今回、トッテン氷河沖の広い領域において、「しらせ」を利用した CTD/LADCP 観測^{*1} (図 2 左)・CTD 採水 (図 2 右)・採泥観測・AXCTD/AXB T 観測・表層漂流ブイの設置と回収・XCTD/XBT 観測・ROV 観測・係留系の設置と回収や海底地形測量など様々な観測が行われた。観測期間は 2019 年 12 月 9 日 - 20 日と 2020 年 2 月 16 日 - 3 月 8 日の 2 期間に分けて行われた。

図 3 に往路と復路における「しらせ」の航路図を示す。黄点において、CTD 採水を行い、パラメータごとにサンプリングボトルへ採水し、いくつかは船上で測定し、残りは日本に持ち帰って測定する。私は船上で、溶存酸素と塩分の測定を行った。

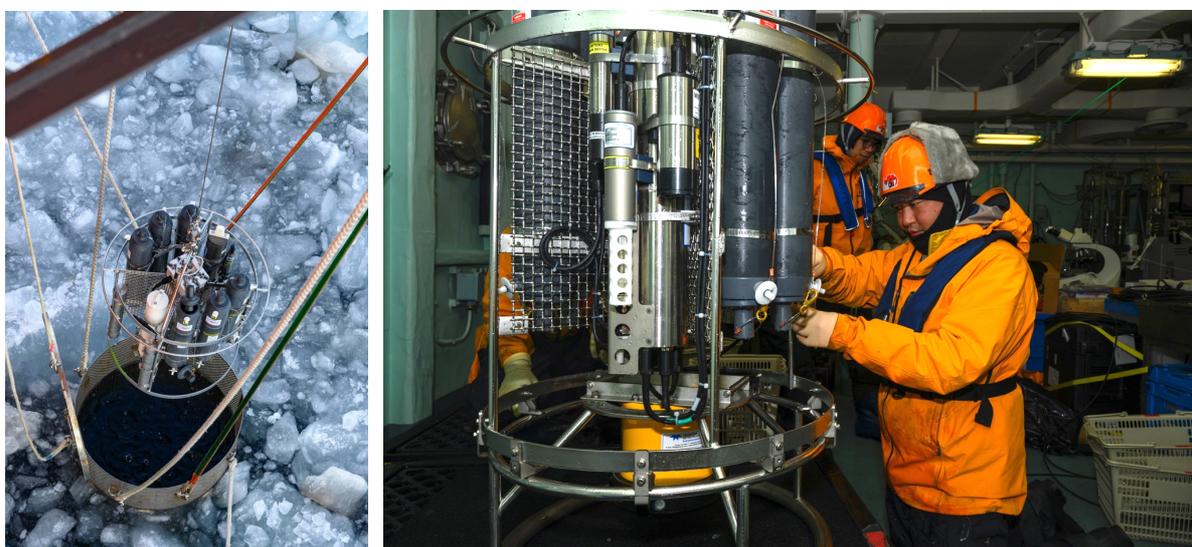


図 2 CTD (Conductivity Temperature Depth profile : 水温・塩分・深度センサー) 装置。ケーブルワイヤーに取り付け、ウィンチで海底近くまで上げ下ろしすることで海洋の鉛直的な構造を明らかにする。水温や塩分以外にも溶存酸素や pH センサーなどを取り付けてある。左：海氷状況が厳しい場合、アイスフェンスを設置して氷で装置が潰されたり、装置が氷に引っかかって抜けなくなったりすることを防ぐ。右：採水器から採水している様子。この CTD には 6 本の採水器が取り付けられており、指定した深度でふたが閉まり、そこでの水をサンプリングすることができる。採水時、外気温が極端に低いときには、採水器中の水がすぐに凍りついてしまい、水が出なくなってしまうため、一式を屋内に運んで作業した。

^{*1} 水温や塩分などのセンサーをいくつか搭載した採水器付きの観測機器。1000 m のワイヤーケーブルに吊り下げて海洋中の鉛直構造を測定する。

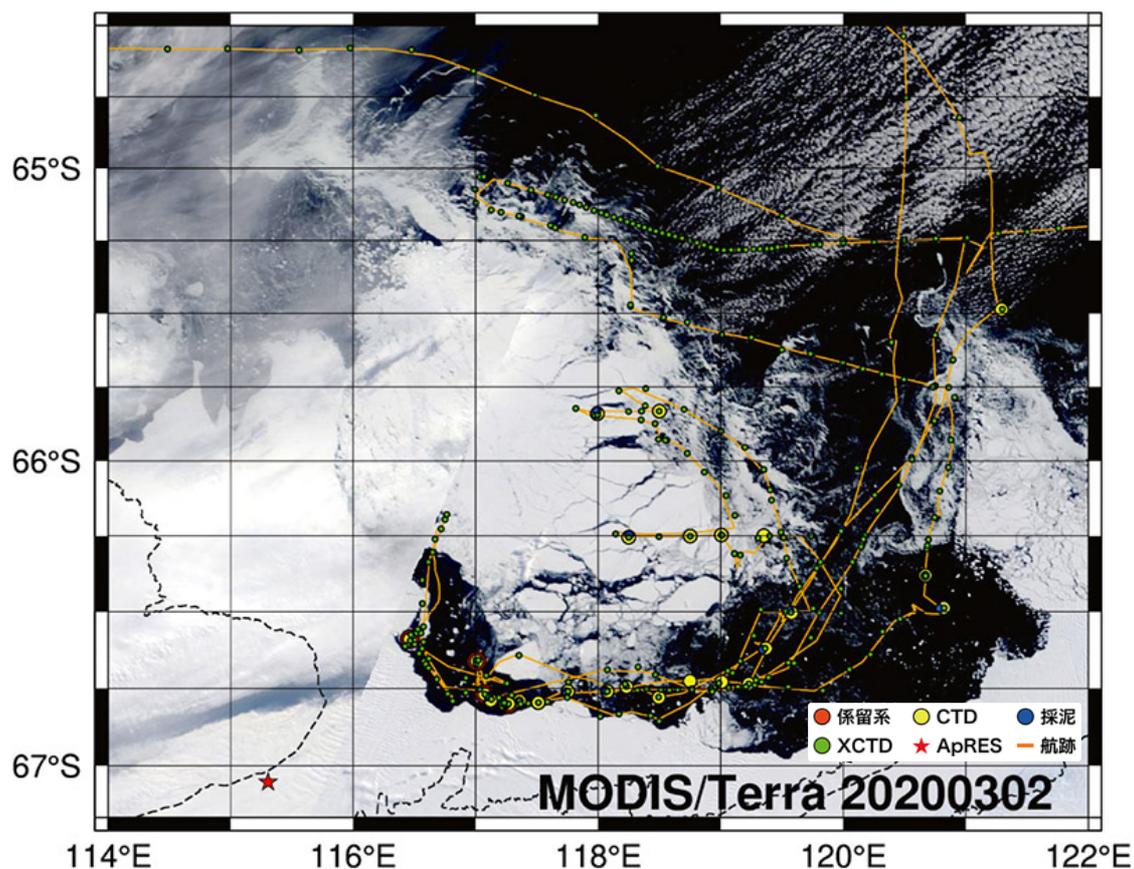


図3 2020年3月2日におけるトッテン氷河沖の衛星可視画像に JARE61「しらせ」の航路図（オレンジ線）を重ねたもの。なお、トッテン氷河は図の左下辺りに位置する。国立極地研究所南極観測センター清水大輔氏作成。

「しらせ」を使った CTD 観測からは、船の行動範囲での海洋の鉛直構造を調べることができる。しかし、この1点1点の CTD 観測はいわばスナップショットを撮影しているようなもので、潮汐のような短期的な変動や季節変化/経年変化などの長期的な変動を知ることが難しい。一方、係留系は、ある場所に留まって、海底から観測測器が立ち上がった状態で観測をするものである（図4）。場所や深さは限定されるが、長期的な変動を調べることができる。水温などを測定するセンサー（図4bとc）をロープや専用器具に取り付け、そこに留まっている間、データを取り続ける。測定中は外部との通信は行われなため、センサーを回収しない限り、データは取得できない。回収は切離装置（図4aとd）より下のレール（図4e）を切離し、フロートの浮力で浮上させて、回収する（図5）。

低温研から用意した係留系は4系である（そのうち復路で2系回収）。当初の予定では往路で4系全て設置する予定だったが、氷が予想以上に厚く、予定していた観測点に到着できなかった。そのため、往路では復路で回収する2系だけを設置し、残り2系を復路で設置する方針に変更した。なお、今年度の JARE63 観測では新型コロナウイルスの影響により、観測全体の規模が大幅に削減され、トッテン氷河沖の観測が全て見送られた。そのため、回収は来年度以降を予定している。

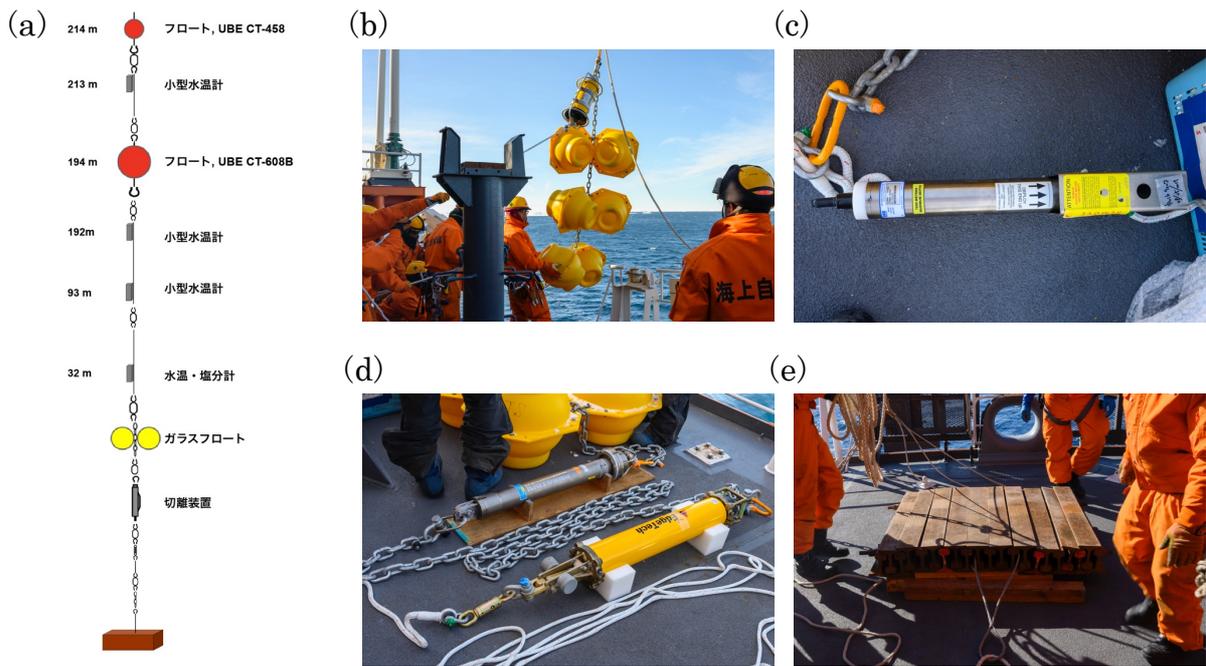


図4 (a) 係留系の水中でのイメージ図。海底に重り(レール)を置き、途中にフロートを付けることにより、水中で垂直に立つような状態にする。左側の数字が海底からの距離を表している。(b) 係留系を投入している様子。6つのガラスフロートの上に流速計が繋がれている。(c) 水温・塩分計。(d) 切離装置。これが動作しないと全てのデータが回収できなくなってしまうため、長期間係留させるものには2台使用した。左上のチタンボディのものは2年間、右下の黄色いボディのものは9年間バッテリーが保持される。(e) 重り。1本50kgの中古レールを組み合わせており、この重さは1050kgある。



図5 左：係留系が浮上してきた時の様子。浮いているフロート間のロープに四爪(スマル)を投げ入れ引っ掛けて回収する。右：回収時の切離装置とガラスフロート。クレーンで吊り上げて回収する(たまに人力で回収する時もある)。切離装置より下にある重りが切り離されて浮上してくる。

リュツオ・ホルム湾での海氷観測

JARE61 では重点研究観測のプロジェクトとは別に昭和基地沖の「しらせ」航路上を中心とした海氷観測データ（氷厚、海氷密接度、積雪深など）の取得の依頼も受けた。「しらせ」船上では、氷厚センサー観測（図 6）・氷況と氷厚のビデオ観測・目視による観測を行った。昭和基地の北側にある北の浦（図 7）では、ソリによる氷厚センサー観測（図 8）・Lアームによる海氷直下の光量子計観測（佐藤 2020）・スチームドリルを用いた氷厚と積雪深などの実測・アイスオーガーを用いた海氷コアの採取（図 9）などを行った。

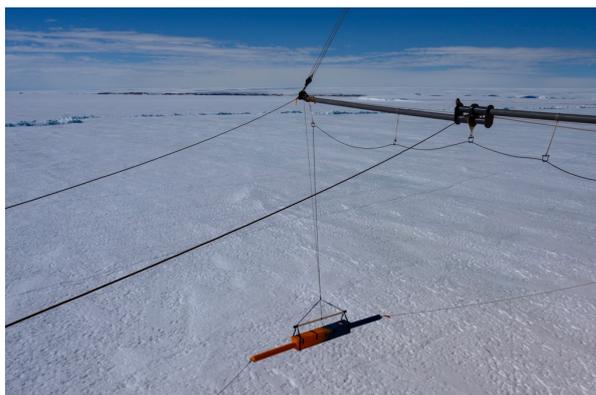


図 6 「しらせ」船上で使用する、電磁誘導式氷厚計。レーザー距離計で雪面までの距離、電磁誘導法を使って氷底面と海水の境界までの距離を測定し、積雪と氷を合わせた厚さを計測することができる。



図 7 昭和基地北側にある北の浦の入り口（海氷で安全に行動するための海氷講習会の様子）。左奥が北の浦。海の上だが、夏場においても全て氷に覆われている。ところどころにタイドクラックと言う裂け目があり、非常に危険。



図 8 北の浦で観測中のソリ搭載型の氷厚センサー（左）。スノーモービルに括り付けて、けん引する。昭和基地と接岸中の「しらせ」間の移動にもスノーモービルを利用した。



図 9 アイスオーガーを用いた、海水コア採取の風景。採取したコアは温度を測定し、「しらせ」の冷凍庫に運び、最終的には日本まで輸送し、分析する。

これら海水観測に加えて、ヘリコプター吊り下げ型の氷厚センサー（EM-bird）観測も行った（図 10）。この観測はリュツオ・ホルム湾内の海水の空間分布データを取得し、海水状況の年々変動の特徴を把握するだけでなく、「しらせ」の航路を決定する支援の基礎となるデータの取得も可能となる。今までヘリの離発着は昭和基地からのみで観測を行っていた。今回は、それに加えて、初めて「しらせ」から離発着を行うことにも成功した（図 11）*2。また、合計 3 フライトのデータも全て良好に取得できた。



図 10 EM-bird 本体。奥のヘリコプターでスリング（吊り下げ）して、広範囲に渡る氷厚データ（積雪と氷の厚さを合わせた値）を取得することができる。離発着時、下で測器を支える人は、ヘリコプターの風を直接受けるため、非常に大変。

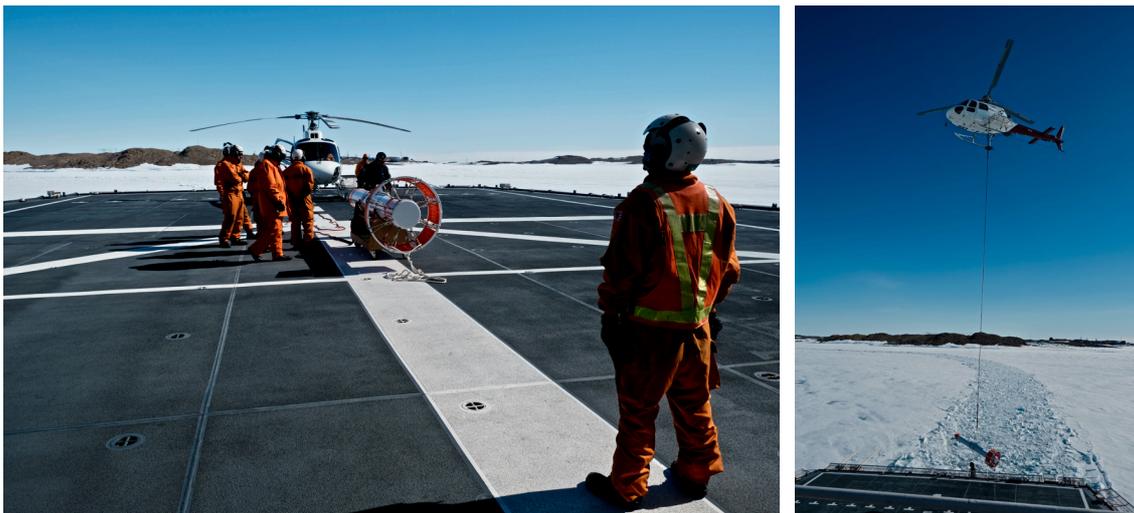


図 11 「しらせ」離発着を行った時の様子（ウォンバーン パット氏撮影）。

* 2 <https://nipr-blog.nipr.ac.jp/jare/20200124em-bird-1.html>

ケープダンレー沖海洋観測

ケープダンレー沖も東南極沿岸を特徴付ける非常に重要な海域で、多くの海氷が生産され、冷たくて重い水（高密度陸棚水）が形成される場所である。JARE60 では上流に位置する棚氷・冰山群を含めた淡水・物質循環過程を捉えるため、2つの係留系が設置された。我々は復路で、それら2系の回収を試みた。四角印の位置に設置されたものは回収することができた（図12と13）。しかし、星印の位置に設置された係留系は、応答がなく発見できなかった。そこで、範囲を広げて（緑枠の中）捜索を行ったが、結局見つけることはできなかった。巨大な冰山に引っかかって、違う場所に運ばれてしまったかもしれない。実際、衛星画像を確認すると、回収前11月末に巨大な冰山が現場を通過していた。

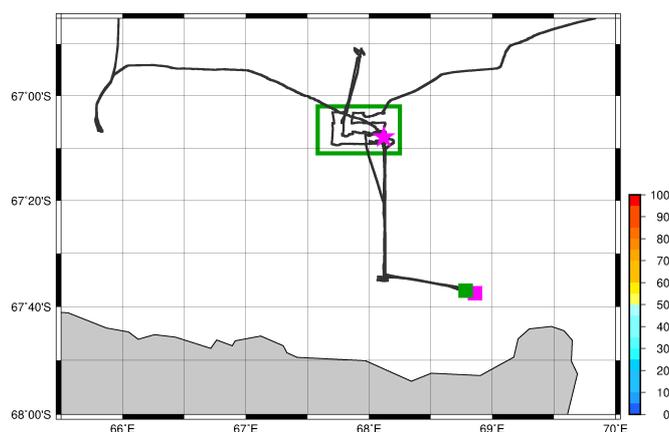


図12 ケープダンレー沖における「しらせ」の航跡図。ピンクの星印と四角印に係留系が設置された点を示した。



図13 ケープダンレー沖における係留系の回収（図11の緑四角地点）。左：昇降式水温塩分計（SeaSAW）。右：切離装置。

おわりに

通算3回目の南極地域観測隊への参加だったが、今回は依頼された仕事が非常に多く、余裕がなく、困難を極めた。周りの隊員の協力がなければ、ほとんどの観測で成功をおさめることはできなかったと思う。トッテン氷河沖の観測は、係留系を中心に今後も続けるため、低温科学研究所技術部としては技術協力を継続していきたい。



図 14 南極大陸の S17 を拠点とした、GPS による氷床変動の 24 時間観測。風が非常に強く、視界が悪かったため、雪上車を風除けになるよう移動させて作業を行った。拠点に戻った後、天候が急激に悪化し、猛吹雪を経験することができた。



図 15 地震計のメンテナンスのために明るい岬に行った。拠点からすぐの場所、山の上にペンギンのルッカリ(営巣地)がある。

今回もしらせが昭和基地近くを停留中に、色々なチームに帯同させていただき、勉強させていただいた（例えば図 14 と 15）。もし、今後の仕事に活かせる部分があれば、参考にしていきたい。最後に、この場を借りて南極観測に関わった全ての方に感謝したい。

参考文献

- 小野 数也 第 58 次南極地域観測隊での海水・海洋観測：低温科学研究所技術部技術報告、**23**、2017 年、26 - 30。
- 佐藤 陽亮 L 字アームの製作：低温科学研究所技術部技術報告、**26**、2021 年、37 - 41。
- Hirano, D., T. Tamura, K. Kusahara, K. I. Ohshima, K. W. Nicholls, S. Ushio, D. Simizu, K. Ono, M. Fujii, Y. Nogi, and S. Aoki. Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nat. Commun.*, doi : 10.1038/s41467-020-17527-4 (2020).

L字アームの製作

佐藤 陽亮、平田 康史

技術部装置開発室

はじめに

海氷を透過する光量を測定するための L 字アームの製作の依頼が大気海洋相互作用分野からあった。この L 字アームは、海氷に開けた直径 $\phi = 110 \text{ mm}$ の内径の穴から光センサーを入れて、穴の影響を受けないように海氷底面部（上向き）の光量を測定するためのステンレス製アームである。投入するまでは直線形状だが、いくつかの関節を持ち、レバーアームを約 90° 曲げると連動している全ての関節が L 字に折れ曲がってセンサーが上向きになり、海氷底面直下を測定できる機構となっている（図 1）。水平アームにより開けた穴から距離ができ、穴から入ってくる光の影響を受けずに測定が可能となる。

今回、長さの異なる 2 種類の L 字アーム製作の依頼を受けた。海氷の薄いサロマ湖と厚い南極海でそれぞれ観測するため、垂直アーム全長が $1,500 \text{ mm}$ と $3,000 \text{ mm}$ となっているものである。

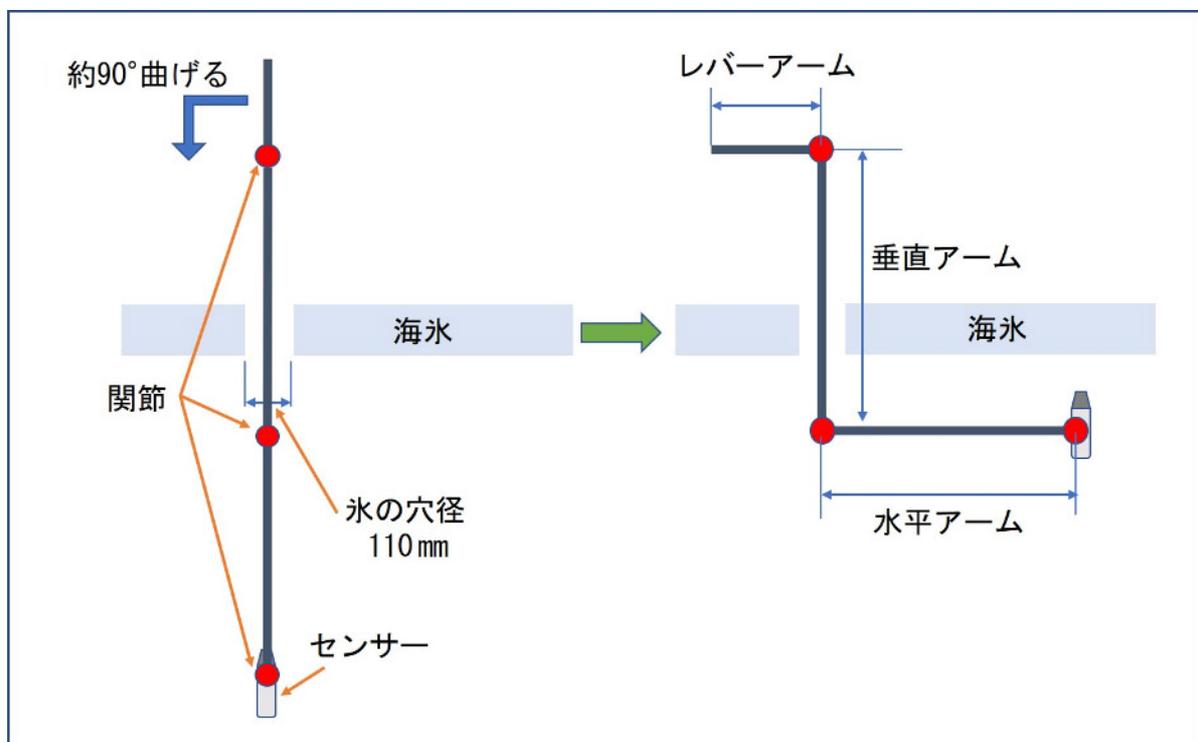


図 1 L 字アームの概要。

L字アームの機構

L字アームを垂直に海氷に開けた $\phi = 110 \text{ mm}$ の穴から投入した後、L字に曲げるため操作するレバーアーム、海氷の厚さに応じて長さが決定される垂直アーム、センサーが穴に影響されないように海氷の下に潜り込ませるための水平アーム、センサー部を海氷に対して垂直に上を向かせるためのセンサーアームがある（図 2）。センサーアームにセンサーホルダー取り付けセンサーを固定する。それぞれのアームはリンク機構を用いており、L字に可動させるため垂直ガイドアーム、水平ガイドアームが関節軸により連結されている。

L字アームの動作

L字アームの動作の様子を図 3 に示す。レバーアームを倒していくと徐々にL字に変

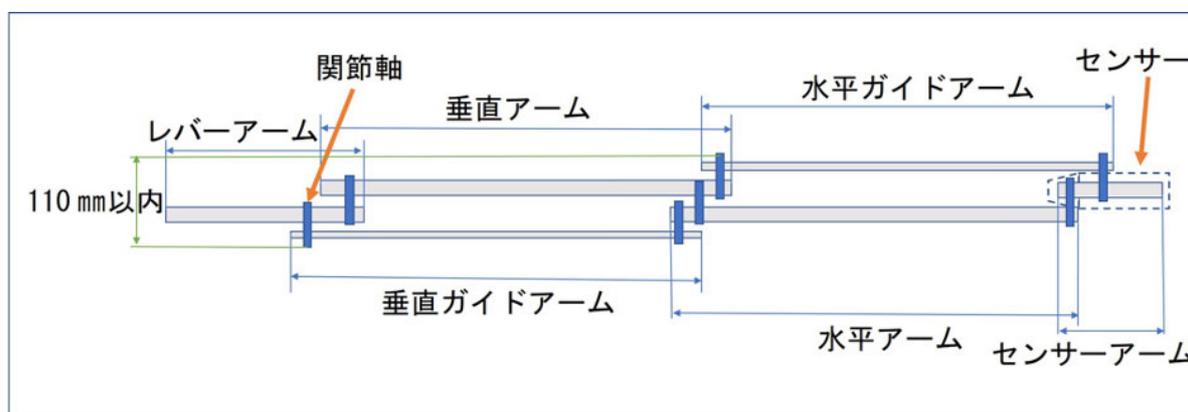


図 2 L字アーム各部の名称。

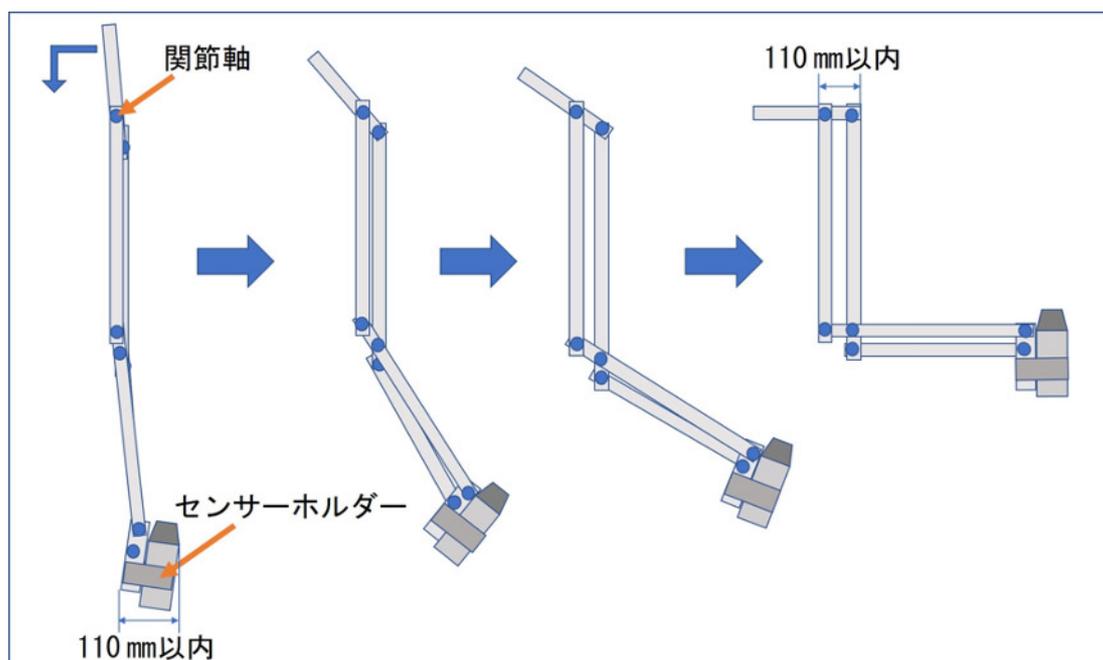


図 3 L字アームの動作の様子。

化し、レバーアームを約 90° 倒したとき水平アームが約 90° 動き水平に、センサーアームが垂直になりセンサーが上を向くように変化する。適切な角度で変化するように各関節軸の位置を微調整しながら配置した。設計時の注意点として、海氷の穴に直線状になった L 字アームを投入するとき穴を通過できるようにセンサー部、すべてのアーム部の幅が 110 mm に収まるようにした。また、L 字になったとき穴に干渉しないように垂直アームと垂直ガイドアームとの間隔が 110 mm 以内に収まるようにした。

各アームと関節軸について

サロマ湖用に製作した L 字アーム（垂直アーム全長 1,500 mm）のレバーアーム、垂直アーム、水平アーム（この 3 つのアームを以下メインアーム）には外径 $D=21.7\text{ mm}$ 、肉厚 $t=1.0\text{ mm}$ 、垂直ガイドアーム、水平ガイドアームには $D=12.0\text{ mm}$ 、 $t=1.0\text{ mm}$ のステンレスパイプを使用した。一方、南極用（垂直アーム全長 3,000 mm）にはメインアームに $D=21.7\text{ mm}$ 、 $t=1.2\text{ mm}$ 、ガイドアームに $D=17.3\text{ mm}$ 、 $t=2.0\text{ mm}$ のステンレスパイプを採用した。

センサーアームには樹脂製のアームを採用し、ステンレス製のセンサーホルダーを製作し、センサーを挟み込む形で取り付けられるようにした（図 4）。南極用の垂直アームと垂直ガイドアームに関しては 3,000 mm のステンレスパイプが既製品には無いため 1,500 mm のステンレスパイプ 2 本を、製作したジョイントを用いて片側は溶接し、もう一方はボルトで連結した（図 5 と 6）。



図 4 センサーアームとセンサーホルダー。

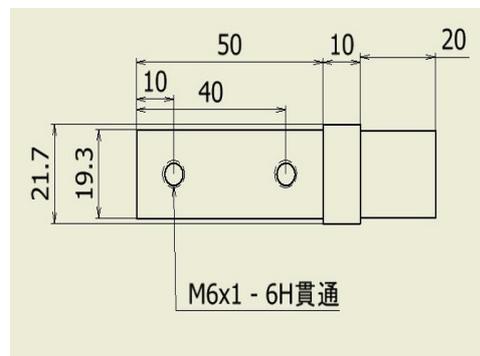


図 5 ジョイント部品設計図。



図 6 ジョイント部。



図 7 サロマ湖用関節軸。

関節軸についてはサロマ湖用のものはステンレスパイプに穴をあけて $\phi=6\text{mm}$ のボルトナットとナイロンワッシャーで締める形状にした(図7)。サロマ湖では、使用中に関節軸に無理な力がかかりシャフトに使用したボルトが曲がる、動きのスムーズさなどの問題があった。そのため、南極用の関節軸にはシャフトを通すためのベアリング受けを2種類製作した(図8)。アーム終端には角型のベアリング受けを製作しアームと溶接して取り付け、アーム途中にはアームに開けた穴に差し込む形のベアリング受けを製作しこちらもアームに溶接し取り付けた。

その他の機構

アームの逆関節を防ぎ、1方向にしか稼働しないようにするためのストッパーと、L字の状態を保持したままにするため、ピンを通してレバーアームを固定するためのストッパーも製作した(図9)。またアームをL字に変形させた時、光量子計の高さを固定するため、垂直アームに水平の固定バーを取り付けられるようにした(図10)。垂直アームに単管用直行型クランプ(図11)を取り付け任意の高さで調節できるようにし、ドリルの穴の径より長いステンレスパイプを海氷上面に引っ掛けるようにして取り付ける。図12にサロマ湖で使用されたL字アームの全体像を示す。



図8 ベアリング受け。



図9 南極用関節軸。



図10 固定バー。



図11 固定バーを取り付けるクランプ。

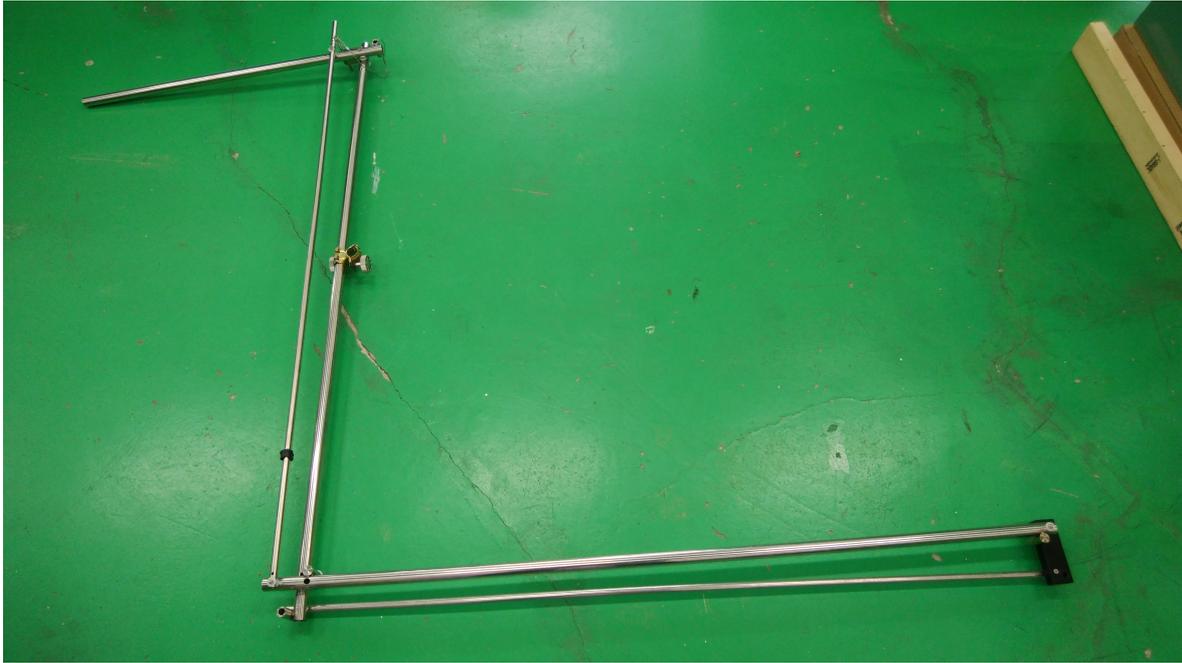


図 12 サロマ湖用 L 字アーム。

まとめ

サロマ湖で行った観測では L 字アームの逆関節を防止するための機構が思ったように機能しなかったため、シャフト部分に無理な力がかかりシャフトが曲ってしまうなどの不具合が出たが、データは良好に取得できた。この装置を使用した観測結果は Wongpan et al. (2020)にて公表された。

サロマ湖用の問題点を考慮し南極用に製作した L 字アームでは、関節軸やシャフト部分の改良に加えアームに使用するパイプの外径を太くするなどの対策を施した。実際、改良後の L 字アームは南極昭和基地北側の北の浦で使用され、装置に大きな不具合が出ることはなかった。

この L 字アームの製作に当たり設計、機械加工、溶接など様々な作業経験ができ、組み立てに関する様々な微調整などを通して、たくさんの経験を積むことができた。最後に豊田助教、Wongpan 氏には様々なアドバイスをいただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

Pat Wongpan, Daiki Nomura, Takenobu Toyota, Tomonori Tanikawa, Klaus M. Meiners, Tomomi Ishino, Tetsuya P. Tamura, Manami Tozawa, Yuichi Nosaka, Toru Hirawake, Atsushi Ooki, Shigeru Aoki (2020). Using under-ice hyperspectral transmittance to determine land-fast sea-ice algal biomass in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *Annals of Glaciology*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.69>.

氷結晶の表面構造相転移を直接光学観察するための低温観察チャンバーおよび温度制御システムの製作

佐崎 元¹、斎藤 史明²、森 章一²、長嶋 剣¹、村田 健一郎¹

1. 雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野
2. 技術部装置開発室

1. はじめに

氷は地球表面上で最も多量に存在する材料の一つであるため、氷の相転移（成長、融解、昇華等）は気象や環境問題をはじめとした様々な現象を支配する。そのため、氷結晶表面で進行する様々な相転移現象を分子レベルで理解することは極めて重要である。

これまで我々は、氷結晶表面上の水1分子高さの単位ステップ（図1：結晶表面に普遍的に存在する分子層の成長端）を直接光学観察できる高分解光学顕微鏡を開発し [1]、氷結晶の成長カイネティクスの分子レベル計測 [2] や、氷結晶の表面融解に伴い生成する擬似液体層の直接観察 [3] を行ってきた。しかし、技術部にこれまで製作していただいた観察チャンバーでは $-20 - 0$ °C の温度領域での観察しかできず、さらに低温の温度領域 ($-170 - -20$ °C) ではどのように氷結晶の成長や表面融解が進行するかは不明なままであった。そこで現在、 $-170 - -20$ °C の温度領域で光学顕微鏡観察が可能な低温観察チャンバーおよび温度制御システムの製作を技術部に依頼し、未到温度領域での分子レベル光学観察を計画している。本稿では、 $-170 - -20$ °C の温度領域の氷結晶表面にはどのような未知の現象が眠っていると期待されるか、その概要を紹介する。

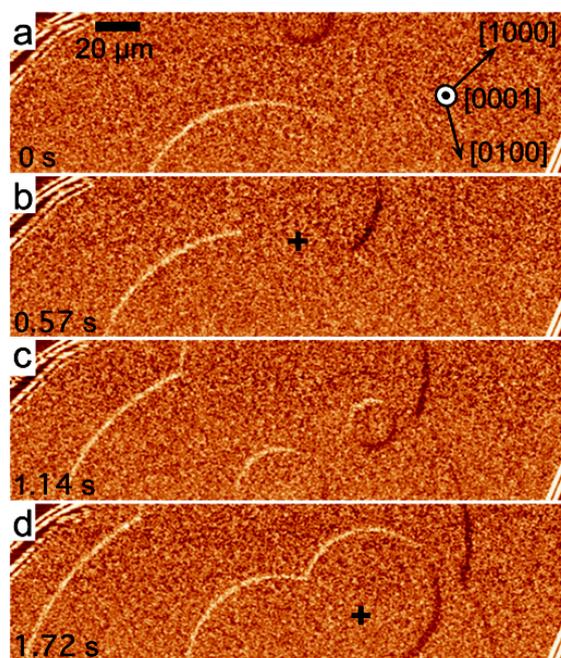


図1 結晶の六角底面上で、2次元島状の分子層 (0.37 nm 厚み) が出現し、横方向に広がることで氷結晶が成長する様子 [1]。温度は -10.0 °C。

2. 氷結晶の表面モルフォロジー

100 K (-170 °C) 程度の低温条件下では、氷の平衡蒸気圧が極めて低くなる。そのため、超高真空チャンバー中で金属基板上に氷結晶を作成し、氷結晶の表面モルフォロジー（形状）を走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡を用いて観察する研究がこれまでいくつか報告されている。図2は、氷 Ih 結晶の六角底面（ベーサル面）の表面を、走査型トン

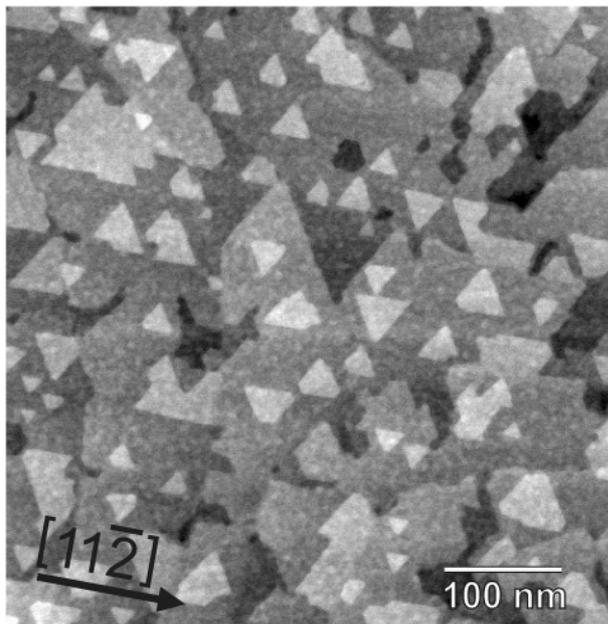


図 2 氷 Ih 結晶六角底面上の分子層の走査型トンネル顕微鏡像 (115 K) [4]。

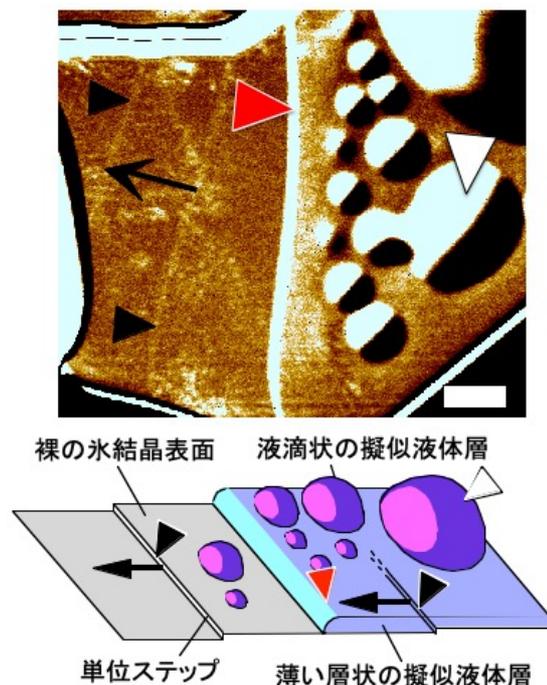


図 3 -2°C 以上の温度で氷結晶表面に生成する2種類の擬似液体層。

ネル顕微鏡を用いて 115 K (-158°C) で観察した一例を示す [4]。六角底面上での分子層は三角形の形状を示すことがわかる。これは、氷 Ih 結晶底面表面が結晶学的に3回対称の構造を持つこととよく一致する。一方、同じ底面上でも、 -10°C の温度下では、分子層は図1に示したように丸い形状を示す。図1、2に示した結果は、 $-158 - -10^{\circ}\text{C}$ の間の温度領域で、氷 Ih 結晶の表面は顕著な構造相転移を示す(表面の構造が著しく変化する)ことを意味する。さらに、この氷結晶表面の構造相転移は、以下に説明する擬似液体層の生成とも密接に関連している。

3. 氷結晶表面での擬似液体層の生成

我々はこれまでに、高分解光学顕微鏡を用いて、 -2°C 以上の温度領域では、氷結晶表面上にはマクロな流動性を示す液滴状と薄液層状の擬似液体層(0°C 以下の温度で氷結晶の表面に生成する薄い水膜を擬似液体層と呼ぶ)が、非平衡条件下で速度論的に生成することを明らかにしている(図3) [3]。一方、試料の表面構造に極めて敏感な和周波分光法を用いて、氷結晶表面上の水素結合の解離状態を計測する研究が近年盛んに行われている [5]。これら両者の結果を総合すると、氷結晶表面上での表面融解現象は、以下のようによまとめられる(図4) [6]。

温度が -90°C 以下の場合には、氷 Ih 結晶の最外表面の水分子は互いに強固な水素結合を取り合い、固体状の構造を示す。一方、温度が -90°C 以上になると、最表面の1分子層中では、水分子同士の水素結合が部分的に断裂し、水分子が動き回ることができる無秩

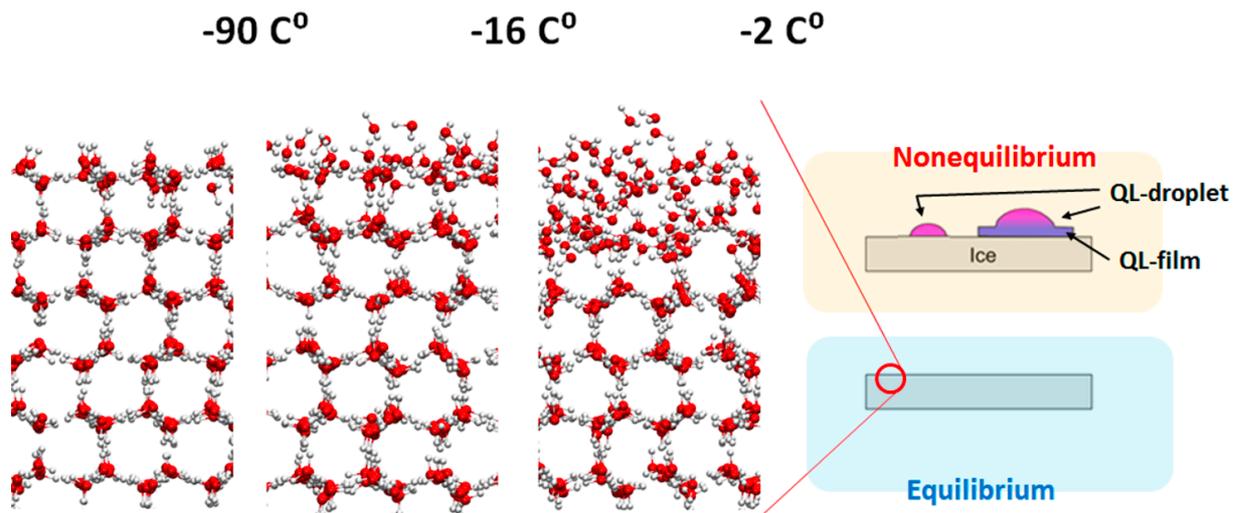


図 4 氷結晶 Ih の六角底面上での構造変化 [6]。-90 °C 以上の温度で生成する無秩序化層と、-2 °C 以上の温度で生成するマクロな流動性を示す擬似液体層。

序構造をとる（無秩序化層）。さらに、温度が -16 °C 以上になると、最外表面の 2 分子層が乱れた無秩序構造をとる（無秩序化層）。和周波分光学の分野では、この無秩序化層こそが擬似液体層の正体であると考えている人が多い。しかし、未だ誰も -90 °C 以上の温度で生成する無秩序化層を直接可視化することには成功していない。また、分光学的な計測では、照射ビーム径内部の空間的に平均化された情報しか得ることができない。そのため、無秩序化層は気固平衡条件下で氷結晶表面上に一樣に生成するものと信じられている。つまり、無秩序化層が氷結晶表面上のどのような部位でどのように相転移するのかについては、これまで全くわかっていない。

温度がさらに増大し、融点直下の -2 °C 以上になると、液滴状および薄液層状の擬似液体層が生成する。これら 2 種類の擬似液体層については、我々の詳細な直接光学観察の結果、マクロな流動性を示すことや、気固平衡条件下ではなく過飽和および未飽和な条件下でのみ準安定相として速度論的に生成することなどがわかっている。

氷 Ih 結晶表面上に生成する擬似液体層についての理解の大枠は、図 4 に示したように、この 10 年間で大きな進展を示した。しかし、無秩序化層については、未だ多くの謎が残る。例えば、1) 無秩序化層は -90 °C でどのように相転移し生成するのか、2) 相転移のダイナミクスはどのようなものであるのか、など興味は尽きない。また、図 1 に示したように、氷結晶表面では、単位ステップ（分子層の成長端）が一分子層ずつ層状に横方向に成長する。すなわち、図 1 に示した氷結晶の最外層は既に無秩序化層に相転移していると考えられるが、あたかも結晶性固体表面であるかのような振る舞いを示す。そのため、3) 半固体状の性質を示す無秩序化層の物性も大変興味深い。

4. 低温観察チャンバーおよび温度制御システムの製作

3 節で示したような無秩序化層の相転移や物性を調べるためには、-150 – -20 °C の幅広い低温度下で氷結晶表面を光学その場観察する必要がある。そのための観察チャン

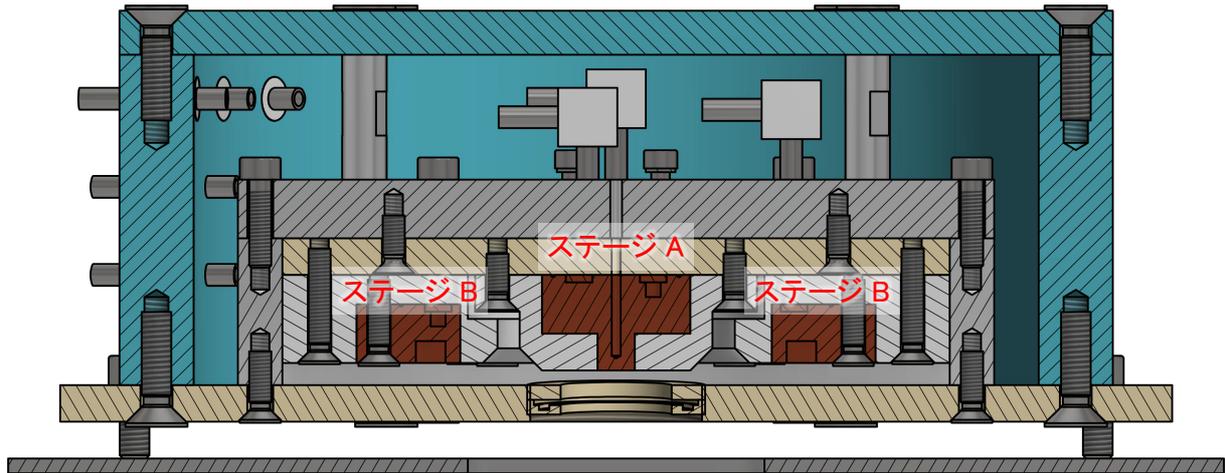


図5 -150 – -20℃の温度領域で、所定の蒸気圧下で、氷結晶表面を光学観察するための観察チャンバー。

バーを齋藤氏に、そして温度制御システムを森氏に製作していただいている。-20℃以上の室温に近い環境下で氷結晶表面を観察するためのチャンバーおよび温度制御機構については、これまで当研究室と技術部で豊富なノウハウを有する。しかし、-150 – -20℃という低温かつ比較的広い温度領域での観察については経験がなく、色々と検討を行ってきた。

観察チャンバーの断面の模式図を図5に示す。観察するための氷結晶を担持・温調するためのステージA、および観察する氷結晶に水蒸気を供給するための氷を担持・温調するためのステージB（ステージAの周囲に同心円状に配置）が密閉空間中に配置された構造を持つ。両ステージには液体窒素を供給し、ヒーター加熱によって所定温度に温調する。ヒーターからの発熱量をできるだけ低減させるため、液体窒素の流量を電磁バルブで制御する予定である。

低温観察チャンバーおよびその温度制御システムを技術部に製作していただくことで、これまで誰も直接観察することができなかった氷結晶表面上の無秩序化層についての研究が飛躍的に進み、氷の表面融解についての統一的な理解が得られることを期待している。

5. おわりに

本稿よりおわかりのように、当研究グループが行いたい研究を実現するための実験装置は、一切市販されていない。そのため、これまで全ての実験装置を技術部で製作していただいていた。そのため、当グループの研究には技術部のご支援が必要不可欠である。技術部よりこれまでいただいていた多大なご支援に心より感謝申し上げる。

参考文献

- [1] G. Sazaki, S. Zepeda, S. Nakatsubo, E. Yokoyama, Y. Furukawa, "Elementary steps at the surface of ice crystals visualized by advanced optical microscopy", *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, **107**, 19702 – 19707 (2010).
- [2] M. Inomata, K. Murata, H. Asakawa, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, G. Sazaki, "Temperature dependence of the growth kinetics of elementary spiral steps on ice basal faces grown from water vapor", *Crystal Growth & Desing*, **18**, 786 – 793 (2018).
- [3] K. Murata, H. Asakawa, K. Nagashima, Y. Furukawa, G. Sazaki, "A new thermodynamic origin of surface melting on ice crystals", *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, **113**, E6741 – E6748 (2016).
- [4] S. Nie, N. C. Bartelt, K. Thürmer, "Evolution of proton order during ice-film growth: An analysis of island shapes", *Phys. Rev. B*, **84**, 035420 (2011).
- [5] M.A. Sánchez, T. Kling, T. Ishiyama, M.J. van Zadel, P.J. Bisson, M. Mezger, M.N. Jochum, J.D. Cyran, W.J. Smit, H.J. Bakker, M.J. Shultz, A. Morita, D. Donadio, Y. Nagata, M. Bonn, E.H.G. Backus, "Experimental and Theoretical Evidence for Bilayer – by – Bilayer Surface Melting of Crystalline Ice", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **114**, 227 – 232 (2017).
- [6] Y. Nagata, T. Hama, E.H.G. Backus, M. Mezger, D. Bonn, M. Bonn, G. Sazaki, "The surface of ice under equilibrium and non – equilibrium conditions", *Accounts Chem. Res.*, **52** (4), 1006 – 1015 (20190416).

令和 2 年技術部先端技術支援室の勤務体制

高塚 徹

技術部先端技術支援室

はじめに

令和 2 年 2 月下旬ぐらいから新型コロナウイルス感染症拡大の影響で、開催中止を決定する学会や研究会などが増え始めた。3 月に私が参加する予定であった「技術研究会 2020 千葉大学」もその一つである。令和 2 年 4 月 16 日、内閣総理大臣より、緊急事態措置を実施すべき区域が全国に拡大され、北海道は感染拡大防止の特定警戒地域に位置づけられた。それに伴い 4 月 17 日、新型コロナウイルス感染拡大における低温科学研究所行動規範レベル（以後行動規範レベル）が 3 に上がったため*1、先端技術支援室 3 名を 1/2 程度の在宅勤務にするような勤務体制へ変更した。また、7 月 10 日には行動規範レベルが 1 に引き下げられたことから、在宅勤務の体制を以下のように変更した。

令和 2 年 4 月 20 日から 7 月 9 日まで：2 名

令和 2 年 7 月 10 日から 12 月末日まで：1 名

なお、6 月 1 日や 11 月 18 日にも行動規範レベルの変化があったが、勤務体制の変更はなかった。基本はこの勤務体制で業務を行ったが、進行中の業務に支障がでないよう個人間でも勤務調整をした。研究所での業務ではマスクの着用、ソーシャルディスタンスの確保など、新北海道スタイル*2 に準じた感染防止に努めている。

出張の実施

緊急事態宣言が発出された当初は、支援業務に支障を来たすことが懸念されたが、例年より依頼件数が少なく、なんとか業務を行うことが出来た。しかし、感染拡大防止の観点から不要不急の外出の自粛が叫ばれている中、実施しなければ研究活動などに支障が生じる可能性のある出張があり、最低限ながら行った。以下に北海道内の出張（高塚・千貝が参加）を示す。

- ・ 6 月 9 日：母子里融雪観測室露場の自動気象観測システムの保守・点検・データ回収。データはそのまま放置すると、データが上書きされてしまい、冬場の観測データが無駄になってしまうため。
- ・ 8 月 31 日 - 9 月 2 日：海洋レーダ 5 局（ノシャップ局、宗谷局、猿払局、雄武局、紋別局）の保守・点検・データ回収、局舎修繕。例年は春秋 2 回実施してい

*1 北海道大学には新型コロナウイルス感染拡大防止のための行動指針（BCP）が決められている。本研究所にはその行動指針に従った、新型コロナウイルス感染症拡大に対しての行動規範が定められており、その行動レベルは 0 から 5 まで設定されている。

*2 <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kks/newhokkaidostyle.htm>

る。HDD を交換しデータの回収、局舎のサビ取り・コーティング、アンテナに防腐剤の塗布など行い、定期的に局舎内外の状況を目視で確認することにより、腐食・塩害・内部不具合など様々な事態に備えているが、今年はこの1回に留めた。

- ・10月19 - 21日：母子里融雪観測室露場における自動気象観測システムのデータ回収・撤収作業。今年中に融雪観測室における観測を全て終了し、小屋自体を完全に取り壊すため、速やかに撤収する必要があるため実施した。

これら道内の出張には公用車を利用したが、車内ではマスク着用、定期的な車内換気をし、1日の使用後には車内全体をアルコール消毒した。次に北海道外への出張(小野が参加)を示す。

- ・9月13日 - 19日：南極観測船「しらせ」訓練航海(佐世保市から舞鶴市：国立極地研究所からの依頼)。低温研が所有する観測機材を、学外の南極観測に参加する隊員に向けて、使い方指導などを行った。実際、今年には国立極地研究所への出張は一度もなく(例年2、3回以上ある)、この訓練航海以外で低温研からの観測機材の説明・講習をする機会はなかった。
- ・12月4 - 5日：白鳳丸積み込み作業(横須賀市：観測は知床沖)。技術部で開発した観測機材(表層モニタリングサーバ：小野 2015)などを設置した。今回センサーを1つ追加したため、現地で設置後のプログラム修正が必要だった。出港後研究者からメール連絡があり、再修正の必要があったが、自分自身でセットアップしたおかげで、状況判断ができ、観測開始までにはなんとか間に合った。

実際、現場で作業や指導を最低限にするため、定期的にリモート会議などを行ったが、非常に不便を感じた。観測に慣れている方が相手だったため、何とか乗り切れた(ような気がする)が、あまり観測に慣れていない人に対して、リモート会議中心に準備をするのは、かなり難しいのかもしれない。

おわりに

このコロナ禍は我々技術職員が研究支援活動するにあたって、非常に厳しい状況が続いている。いつ終息するか先が見えないが、今後も感染拡大予防対策に努め、行動規範に基づいて業務を行っていききたい。

参考文献

小野 数也 サーバの構築 ～船上観測での運用～：低温科学研究所技術部報告、**21**、2015年、10 - 12。

令和 2 年技術部装置開発室技術支援業務

平田 康史

技術部装置開発室

はじめに

装置開発室は 5 名の技術職員で構成し業務している。未だかつて経験したことのない社会情勢（新型コロナウイルス感染症拡大）のため、大学本部より定められた「新型コロナウイルス感染拡大防止のための北海道大学の行動指針（BCP）」の行動指針に従った体制で業務している。この BCP には 0（通常）から 5（活動の原則停止）までのレベルが定義されており、令和 2 年 4 月からレベルに応じて以下の人数で在宅業務するようにシフトを組んでいる。

令和 2 年 4 月 20 日から 5 月 31 日まで（レベル 3）：3 名

令和 2 年 6 月 1 日から 7 月 10 日まで（レベル 2）：2 名

令和 2 年 7 月 11 日から 11 月 17 日まで（レベル 1）：1 名

令和 2 年 11 月 18 日から 12 月末日（レベル 2）：1 名

この厳しい勤務体制の中、装置開発室として活動できた業務支援（装置製作や野外観測など）と平田が行なった北海道大学技術支援本部での活動について報告する。

コロナ禍における装置開発室の勤務

装置開発室の工作作業面積は以下の通りである。

実験棟（旋盤、TiG 溶接、精密組立て、電気回路装置製作）：約 230 m²

新棟（NC フライス加工）：約 56 m²

木工加工室（屋外に設置）：約 48 m²

通常業務は、以上の各部屋で感染防止対策を講じた上で業務にあたっている。主に製作した装置を図 1 から 3 に示す。在宅勤務の業務は、工作機械を使用した業務はできないため、設計や加工準備作業（CAD や CAM）、オンラインでの打ち合わせやメールなどでの連絡などに限定される。そのため、在宅勤務時には、過去の工作技術の見直しを含めて、新しい加工法の技術習得にも努めた。

工作業務に加えて、主に先端技術支援室のメンバーと共に現地出張し、野外観測支援を行なった。2 月には雪の成長観察室の設営（図 4：大雪山旭岳）、8 月にはオホーツク海短波海洋レーダー局のメンテナンス（図 5：ノシャップ、宗谷、猿払、雄武、紋別の各局）、6 月と 10 月には融雪観測室の運用維持管理・設置した実験機器の撤去（図 6 と 7：幌加内町母子里）を行なった。今年の活動は新型コロナウイルス感染拡大の影響のため、行動が制限され、例年より出張回数は少なくなった。

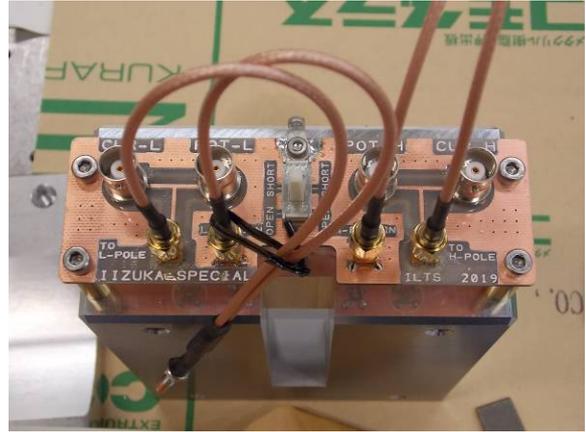
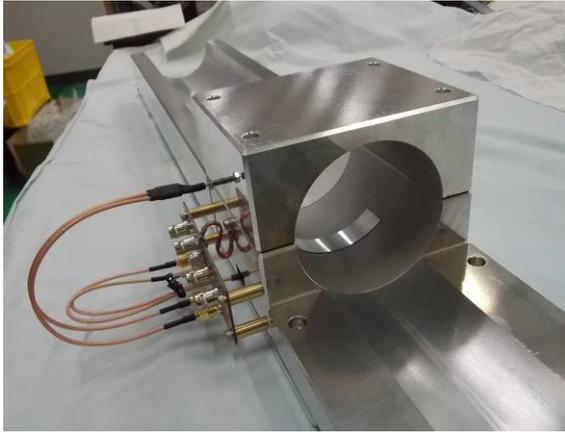


図1 DEP用氷床コア固定ベース及びコア成分観察回路（依頼主：飯塚准教授）。



図2 小動物行動観察用アクリルゲージ（依頼主：大館助教）。

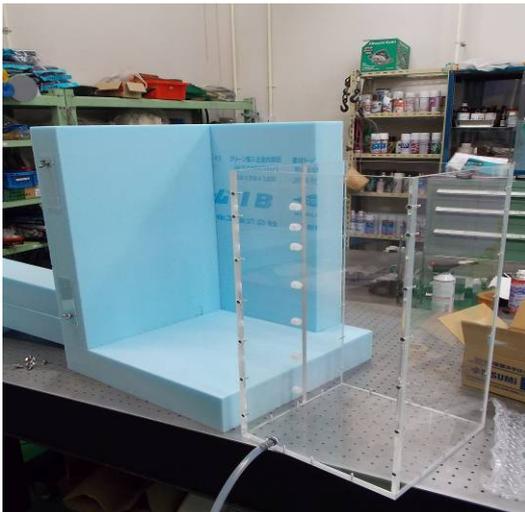


図3 海水生成実験用タンク（依頼主：豊田助教）。



図4 左：雪の結晶成長観察所(大雪山旭岳)、中央：雪の結晶成長観察室内の機器の様子、
右：偏光顕微鏡で撮影した雪の結晶。



図5 オホーツク海短波海洋レーダー局。左：宗谷局、右：土台の腐食防止作業。



図6 融雪観測室（幌加内町母子里）。



図 7 融雪観測室でのメンテナンス作業。

北海道大学技術支援本部での活動

平成 31 年 4 月 1 日から令和 2 年 9 月 30 日まで北海道大学技術支援本部工作・観測グループ長の任に就き、大学全体の技術支援業務に関する業務調整会議などに出席した。これは北海道大学の技術部一元化のための組織であり、技術職員の配置されていない部局にも技術支援各種が受けられるシステムとなった。その調整と技術職員のスキルアップを図るための研修など、北海道大学に在籍する技術職員全体の組織化に向けた事案調整、または研究支援に関わる人材の育成を行うためのものである。この業務調整会議は通常、対面形式で行われてきたが、今年度はオンラインでの会議の開催やメールでのやり取りが中心となった。

また、北海道大学技術研究会 2020(令和 2 年 9 月開催予定、先端技術支援室小野に特別公演を依頼していた)や千葉大学や鹿児島大学で行われる予定だった全国技術研究会の各分科会(令和 2 年 3 月開催予定)も軒並み中止となってしまった。

おわりに

低温研へ異動してきてから 4 年目となる。前職(研究所工作室)では製作業務での業務がほとんどであり、出張は全国技術研究会、他の研究施設への訪問、機械加工などの技術調査など限定された。一方、本研究所技術部では、製作業務だけでなく製作した装置・改良した装置を設置するフィールドワークなどの依頼がある。製作したものが実際にどのように使用されているか知ることができるのは、私自身にとっては非常に新鮮に感じ、この業務に対して、高いモチベーションを維持している。今回は開催が見送られたが、毎年技術報告などで支援依頼者(研究者)からのフィードバックもあり、仕事のやりがいを実感している。

今年はコロナ禍で社会活動が停滞してしまい、我々へも影響は少なくなかったが、早く日常の毎日に戻れるよう願っている。なお、今回は技術的なレポートは紹介していないが、次回には報告したい。

編集後記

コロナ禍に見舞われて1年が経ったこの2021年初めに無事、技術部技術報告第26号を発刊することができました。発刊に際したくさんの皆様にご協力いただきましたこと心より感謝申し上げます。

今後は新型コロナウイルスの影響と付き合いながら生活や仕事を行っていく必要があるかもしれませんが、低温科学研究所技術部一丸となってより良い技術支援体制を整え技術を磨き、さらに皆様のお手伝い出来るように励んでいきたいと考えています。

そして技術部がお手伝いさせていただいた研究や観測その他の成果を今後も皆様に知っていただける機会をこれからも作っていけるように努力していく所存です。

最後に皆様のご多幸とご健康を心より祈念し巻末のご挨拶にさせていただきます。

佐藤 陽亮

2021年3月発行

編集者：森 章一、佐藤 陽亮

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