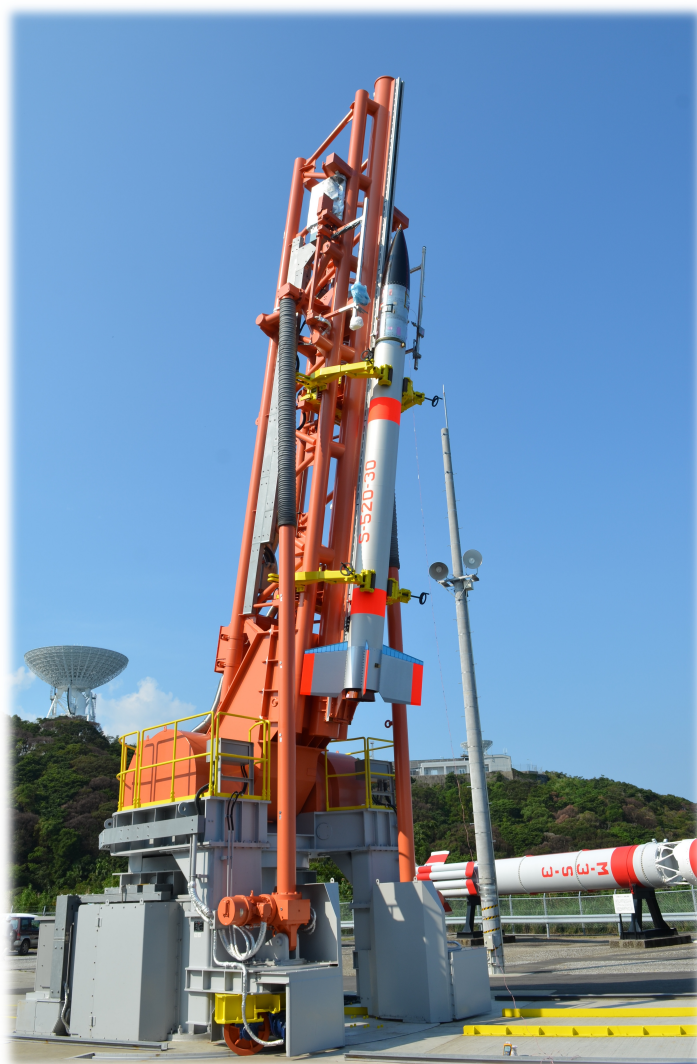


# 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告

## 第 21 号



2015年 12月

表紙の写真

2015年9月11日午後8時に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた観測ロケット S-520-30号機。機体頭部に本研究所木村勇氣准教授と当技術部が共同で開発した実験装置（本文 P. 13）が搭載されている。

北海道大学低温科学研究所  
技術部技術報告

第 21 号

2015年 12月



## 2015年度技術報告会開催に寄せて

本日、第21回低温科学研究所技術報告会（技術支援本部共催）の開催を迎えることができましたことを関係各位に感謝申し上げます。本報告会は技術部職員にとって一年の節目であり、多くの教員・研究員・大学院生と議論を交わすことのできる重要な行事です。自らの研究や技術課題を客観的にとらえる機会として、大いに議論を深めて頂ければ幸甚です。本日発表される成果は、技術部が行っている仕事のほんの一部に過ぎません。実際には、まだ成果に表れていない研究を含め技術部の貢献は大きく、低温研の研究・教育にとって技術部はなくてはならない存在になっています。

低温研技術部は本所が行う多様な研究に対応するため、機械加工、情報処理、電子・電気工作、分析、フィールド調査など多岐に渡る支援業務を行っています。これほどまで広い業務を、しかも高いレベルで行える技術集団は、国内外の大学・研究所を見渡しても極めて稀です。共同利用・共同研究拠点である本所には、他機関から多くの研究者が来訪します。低温研技術部の技術レベルの高さ、優れた支援態勢はこうした方々からも高く評価されています。

かつては大学、研究所を含めた多くの研究機関に優れた技術部門が存在していました。しかし、その数は技術支援組織の統合・廃止により激減しました。一流の研究には一流の研究支援が欠かせません。研究者と一体となった技術支援体制の消失は、日本が科学・技術大国として生きていく上で危機的状況につながると考えています。低温研には幸いにして優れた技術部が存在しており、低温研や関連分野の研究の大きな助力となっています。このすばらしい支援態勢を維持・発展させていくことは、共同利用・共同研究拠点である低温研の使命でもあります。

技術部の現在があるのはこれまでに低温研を支えてこられた先人達の努力の賜物です。私たちはそのことを忘れず、これからも慢心することなく日々研鑽を積み、教員、事務職員と協力して、より良い組織づくりを目指して改善に努めて参ります。日頃のみなさまの技術部に対するご理解ご協力に感謝するとともに、今後とも、低温研技術部に対する一層のご支援、ご鞭撻の程よろしくお願い申し上げます。

2015年12月11日

技術部長 渡部直樹



# 目次

1. 親潮航海観測における表層モニタリングシステムの開発 西岡 純・小野 数也 .....	1
2. オホーツク海知床沖における氷海モニタリングシステムの開発試験 青木 茂・小野 数也・深町 康・大島 慶一郎 .....	5
3. サーバの構築 ～船上観測での運用～ 小野 数也 .....	10
4. 観測ロケットを用いた微小重力実験用装置の開発 木村 勇気・中坪 俊一・齋藤 史明・石塚 紳之介・山崎 智也・稲富 裕光 .....	13
5. ICF70 キューブ型超高真空チャンバーの製作 中坪 俊一 .....	16
6. 超高真空低温原子間力顕微鏡の冷却系の改良 日高 宏・中坪 俊一・渡部 直樹・香内 晃 .....	20
7. 塩化水素ガスによって氷ベール面に生成する液体層 長嶋 剣・佐崎 元・羽馬 哲也・村田 憲一郎・中坪 俊一・古川 義純 .....	23
8. 濡れ現象から見た氷の表面融解 村田 憲一郎・麻川 明俊・長嶋 剣・古川 義純・佐崎 元 .....	27
9. Low-cost Laser Disdrometer の開発 –降雪粒子の立体形状と落下速度計測– 民田 晴也・久島 萌人・中坪 俊一・西川 将典・藤吉 康志 .....	28
10. 葉緑体タンパク質 LIL8 の機能 加藤 由佳子・千貝 健・森 章一・横野 牧生・高林 厚史・田中 歩・田中 亮一 .....	33
11. 母子里自動気象観測システム ～組込み Wi-Fi モジュールによるデータ伝送の試み～ 高塚 徹・千貝 健・森 章一・小野 数也・石井 吉之 .....	36
12. 氷床掘削孔検層器の製作 森 章一・新堀 邦夫・的場 澄人・本山 秀明 .....	39

13. グリーンランド氷床南東ドーム掘削 的場 澄人・飯塚 芳徳・新堀 邦夫 .....	43
14. 電荷計の開発と観測結果 大井 正行・新堀 邦夫・森 章一・藤吉 康志 .....	45
15. マイコンを使用した電子工作入門：ラズパイを使ってみた 千貝 健・森 章一 .....	50
16. 低温研ウェブサーバアクセス解析 2014/10–2015/09 千貝 健 .....	56



# 親潮航海観測における表層モニタリングシステムの開発

西岡 純<sup>1,2</sup>、小野 数也<sup>3</sup>

1. 環オホーツク観測研究センター
2. 共同研究推進部
3. 技術部先端技術支援室

## はじめに（研究背景）

西部北太平洋の北西に位置する親潮域は、豊かな水産資源を生み出す重要な海域である。また親潮域は、生物による表面海水中の二酸化炭素分圧を下げる効果が大きく、生物ポンプの効率が世界の海の中でも著しく高い海域である。この海域の高い生物生産や生物ポンプの能力は、植物プランクトン増殖に強く起因しており、中でも春季に起こる大增殖（ブルーム）が重要な役割を果たしている。この植物プランクトンブルームは、水塊構造や光環境に加えて、鉄や主要栄養塩（窒素、リン、ケイ素など）の供給量によって大きさが決まる。これまでに数多く親潮域の植物プランクトンブルームを対象にした研究が実施されており、親潮域本流における植物プランクトンの増殖過程に関しては多くの知見が集まっている。

冬季から春季にかけて、北海道の沿岸近くは水温の極めて低い水塊である沿岸親潮水が存在する。この沿岸親潮水では、春季の早い時期に極めて大きな植物プランクトンの増殖が観測されている。沿岸親潮水は、季節の進行とともに親潮域の広範囲に広がり、親潮域全体の植物プランクトンブルームに関与していると考えられるが、その役割は十分に理解されていない。

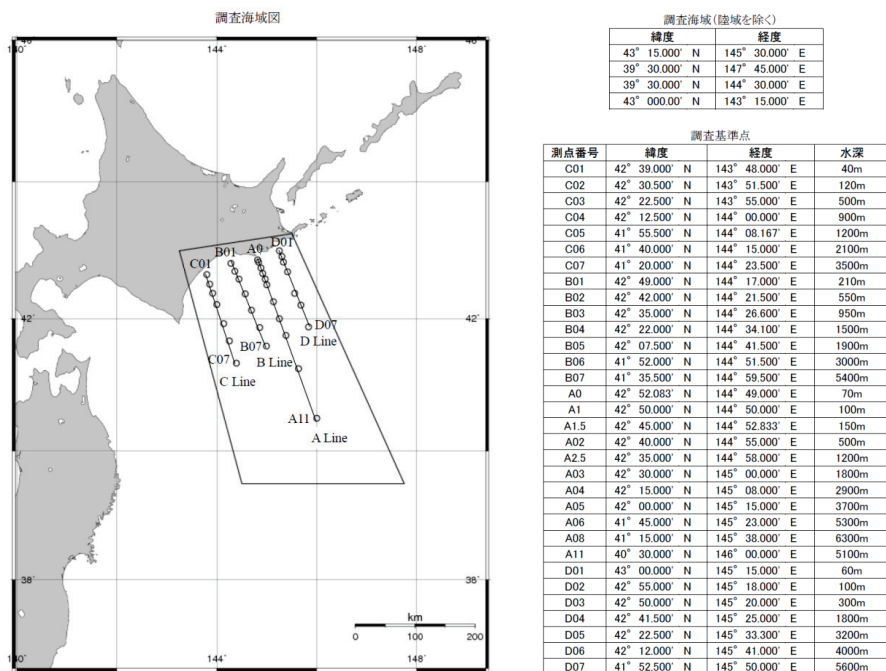


図1 観測の起点とする基準観測点。

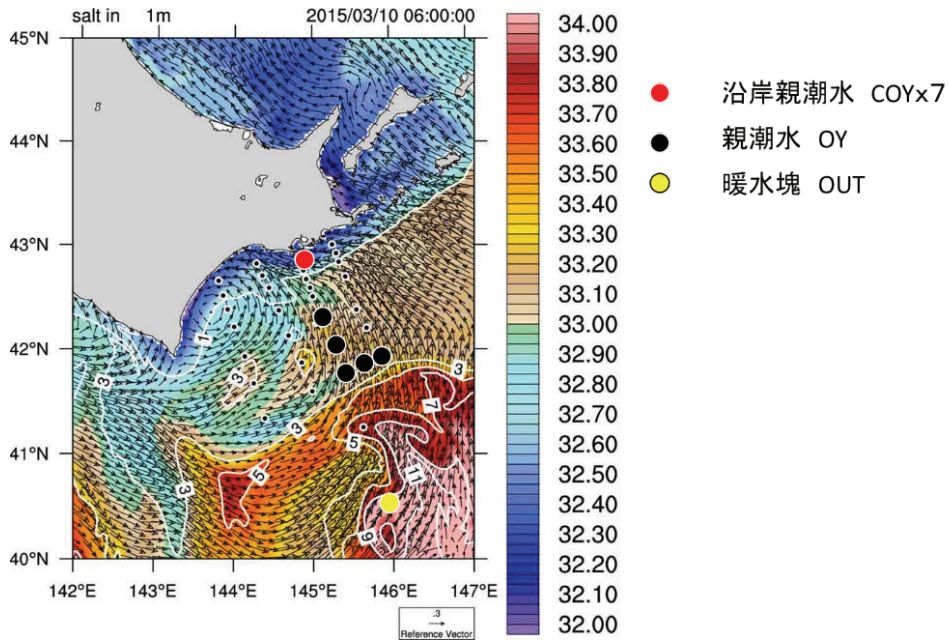


図2 JCOPE-Tによる観測エリアの3月10日の塩分分布予測（電力中央研究所・津旨氏、三角氏、坪野氏、JAMSTEC・宮澤氏提供）。

沿岸親潮水には、オホーツク海の海氷融解水の影響と見られる低温・低塩分水の特徴がみられる。春季の海氷の融解は、低温・低塩分水を海洋表層に供給し、密度成層を発達させ、春季の植物プランクトンの増殖に大きな影響を与えている可能性がある。さらに海氷は、冬季の間、大気降下物や陸棚堆積物を海表面にトラップし、植物プランクトンの増殖に必須な鉄分を広範囲に移送している。このため海氷融解水は、沿岸親潮水を介して鉄分の不足しがちな親潮域の栄養塩環境に大きな影響を与えていると推察される。さらに、沿岸親潮水は、渦や局所的な混合過程を経て沖合へと影響し、ブルーム期の植物プランクトンの分布に多大な影響を与えていることが水温やクロロフィル衛星画像から推察される。しかし、沿岸親潮水と親潮水間の様々なレベルでの海水交換が、化学物質や生物種組成と分布にどのように影響を与え、親潮域のブルームを形成しているのかについては良く分かっていない。

## 実施内容

沿岸親潮域－親潮域は、冷水帯海域で極めて大きな植物プランクトンブルームが見られる特徴を持つ高緯度海域のモデル海域として捉えることが出来る。「高緯度特有の冷水帯海域でなぜ早い季節に大規模な植物プランクトンブルームが起こるのか？」を明らかにする事により、極域－亜寒帯域周辺の生物地球化学の理解に貢献することも視野に入れて、2015年3月に海洋研究開発機構（JAMSTEC）所属の白鳳丸を用いた研究航海を実施した（図1）。本航海では水塊や、流れ、生物生産の発達状況を捉えて観測することが必須であった。そこで、観測海域の生物・化学パラメータの表層マッピングを実施する必要があった。

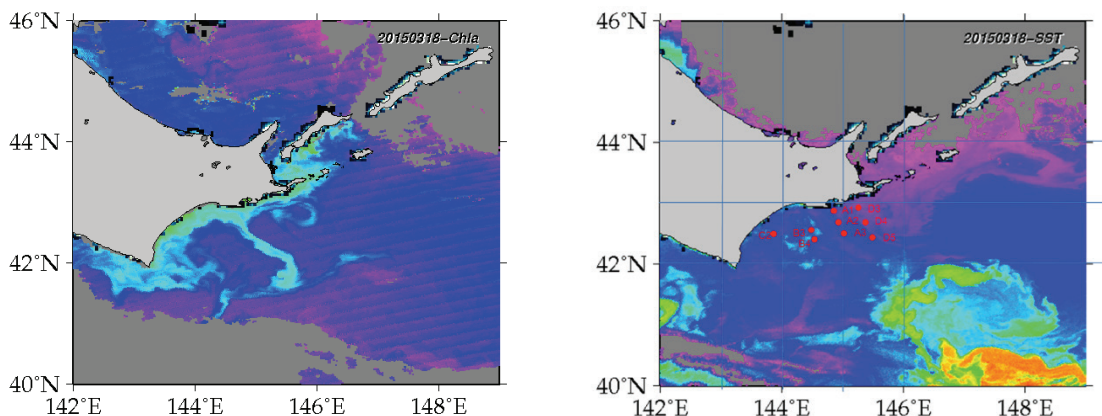


図 3 2015 年 3 月 18 日における衛星クロロフィル画像と水温画像。左) 北海道大学 藤原周氏、平譚享氏提供、右) 北海道大学 平田貴文氏提供。

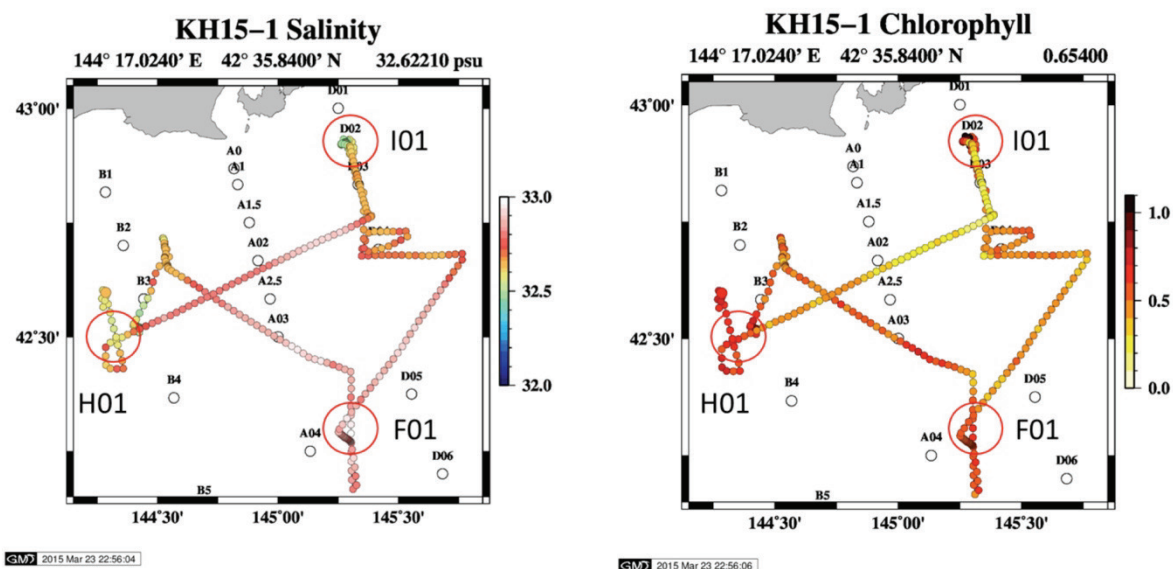


図 4 高クロロフィル海域、沿岸親潮海水の分布する海域、親潮水の分布する海域のサーベイを実施。3 月 22 日-23 日での OY (F01)、COY (I01) 海域、高クロロフィル (H01) 海域サーベイ。

このマッピングは、定期的に陸からメールで送られてくる衛星水温データ・クロロフィルデータ・高解像度モデル結果から沿岸親潮水と親潮本流の分布位置とクロロフィルの発達の様子を捉え、船上で得られる表層モニタリングのデータと比較することが重要である。本研究においては、連続的に船上にくみ上げている表層海水の水温、塩分、クロロフィルを、センサーによって測定し、船上の研究室に設置した PC にカラースケールとともにリアルタイムでプロットすることで、航跡上の分布データをモニターすることが出来るシステムを構築した。このモニタリングシステムは、SBE-45 (SeaBird 社製)

の水溫、塩分、クロロフィル蛍光を測定できるセンサーシステムに、連続的に表層から船上にくみ上げている研究用海水を通水し、各項目のデータを得て、さらに、GPS からデータを導入し、センサー測定値および測定位置の情報を約 10–20 秒間隔で取得した。取得したデータを自動で濃度マップにプロットするためのソフトウェアを開発し、GMT (The Generic Mapping Tools) で作成した研究対象海域のマップ上に、値のレベルを色で表し自動プロットすることで分布図をリアルタイムで作成した (小野 2015)。

## 結果

衛星による水溫とクロロフィルデータは天候により取得できなくなることがあるため、高解像度モデルの水塊分布変化の予測との組み合わせが大変有用であった (図 2)。現に 3 月 18 日に沿岸親潮の生物量が増大している様子が捉えられ、物理的な水塊の広がりとともに高クロロフィル水塊が南部に張り出している様子が捉えられた (図 3)。この南部に張り出した高クロロフィル濃度の水塊を船舶観測で捉えるために、高解像度モデルの数日先の予測結果から位置情報を特定し、表層モニタリングシステムによるマッピングを実施した。その結果、周囲の水塊に比べて明らかに低温、低塩分で高クロロフィルの水塊を捉えることができ (図 4)、集中観測を実施する測点を選択することができた。

## おわりに

春季の北海道南方海域では、親潮水の水塊の中に沿岸親潮水が渦やジェットによって水平的に貫入している複雑な水塊分布構造をもつ。当該海域の春季のブルームの発達過程の詳細を調べるためには、今回試みた表層モニタリングシステムと、衛星画像や、高解像度モデルによる予測を利用したマッピング観測は、海洋の情報を把握しながら狙ったプロセスを観測するのに大変有効な手段であった。

## 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技術報告、**21**、10–12、2015。

# オホーツク海知床沖における 氷海モニタリングシステムの開発試験

青木 茂<sup>1,2</sup>、小野 数也<sup>3</sup>、深町 康<sup>4</sup>、大島 慶一郎<sup>1,4</sup>

1. 共同研究推進部
2. 水・物質循環部門大気海洋相互作用分野
3. 技術部先端技術支援室
4. 水・物質循環部門海洋・海氷動態分野

## はじめに

全球的な中層フロート観測網 -Argo 計画- は 21 世紀の海洋学にブレークスルーをもたらした。背景には中層フロートの技術と衛星通信技術の発展がある。しかしながら、陸棚上のような起伏の激しい沿岸浅海域での観測や定点における観測は想定されていない。特に極域海洋のような厳しい環境では、海面における海氷の存在など、より困難な課題が突きつけられている。

こうした状況の下、IHI 社は技術的にこなれた中層フロートと衛星通信を利用して、沿岸浅海域における定点でのリアルタイム連続観測ブイシステムの開発を開始した。このシステムは、取得したデータを準リアルタイムで送信するため、最終的に本体を回収することができなくても観測ができる点が従来の係留システムと比較して大きな利点をもつ。低温研では、このブイのオペレーションを含めたシステム全体の開発や設計に協力すると同時に、極域での運用を可能とする仕様の実装を目指している。海氷域における運用では海氷などの障害物との衝突を回避するために障害物の直前で浮上を停止する「寸止めオペレーション」が特別に必要である。寸止めオペレーションの実現に向けてロジックの開発や停止動作の精度確認など多くのハードルがある。そのためこうした機器やシステムを実用化するためには、実海域での試験の積み重ねが欠かせない。ここでは 2014 年度に行った知床ウトロ沖でのシステム試験の結果を報告する。



図 1 係留システム設置回収に利用した船舶と現場海域でのブイ設置作業風景。

## オホーツク海知床沖における試験海域

試験海域は知床ウトロ沖オホーツク海の水深 400 m 程度の海域 (44° 11.7' N、145° 4.2' E) とした。稚内から網走沖までのオホーツク海沿岸海域は水深が 100 m 程度の浅い大陸棚域が広がっているが、ウトロ沖では急激に深度が下がり、20 マイルほど沖側では 2000 m を越える。極域海洋での使用を想定した寸止めオペレーションのテストを考慮すると、冬期に表面の密度成層が弱まる海域が理想的である。冬期に海氷に覆われ、南極海における大陸棚深度程度 (~500 m) の水深での試験が可能という点を条件とすると、日本ではほとんど唯一の場所であるといえる。

一方で、この海域での海洋場は、特に流氷の到来する冬期にはこれまであまり観測されてこなかった。宗谷暖流の影響を受けると考えられると同時に、オホーツク海北西部での高密度陸棚水の到来も予想され、海洋学的にも興味深い海域である。海底地形の勾配が急峻なため、詳細な流動場の数値実験なども十分ではない。試験海域としての条件がすべて整っているとは言い難い面もあるが、物理的な興味もあわせて本海域での実施を決定した。

試験は夏期と冬期の 2 回実施した。夏期試験は 2014 年 7 月 7 日から 8 月 5 日まで、冬期試験は 2014 年 11 月 18 日から 2015 年 5 月 13 日までの約半年間行った。試験観測実施にはウトロ漁協・有限会社協和・斜里第一漁協の協力を得た。観測に利用した漁船は非常に取り回しが良く、舷高も低くて、ブイシステムの設置回収には最適であった (図 1)。

寸止めモードに関しては幾つかの実装方法が考えられる。今回は手始めとして、通信コマンド等で予め期間を定めておき、その期間については海面下 20 m の深度で停止するように内部浮力の調節を行うようプログラムした。

## ブイの基本的な動作とシステムの構成

本システムは、係留式の自動浮沈観測ブイである。本体ブイは、機体の浮力を調節することにより上下し、固定点での鉛直プロファイルを取得する。本体ブイには環境計測センサーに加えてイリジウム衛星通信装置が搭載されており、計測データを準リアルタイムで送信することができる。与えた時間間隔で海面まで浮上し、取得データの送信ならびに動作指示コマンドの受信を行う。プロファイル取得をしない待機時間には、中間ブイの深度に本体ブイの深度を調整し、通常の係留機材と同様にその深度での計測を実施する。このデータも浮上時に衛星経由で配信する。深度調整を厳密に行えば、固定深度での連続観測が実現できるが、厳密に行うためにはそれだけ調整に電力を消費する。

現行のブイ本体の形状は全長 260 cm、直径約 20 cm、空中重量 85 kg である。前方にあるブラッダーへのオイルの出し入れで体積を変えることで浮力を調整する。後方にあるアンテナ部分が突起状になっており、浮上時に海面上に突出して通信を行う。今回の観測では、本体センサーとして、水温・塩分は係留用の Seabird 社 SBE37、圧力は横河製 FP201A-E21-L20A\*B (0-500 m、±0.3%) を用いて計測した。IHI による事前の数

値シミュレーションの結果により、今回のブイは 300 m 深から 0.4 ノット（約 20 cm/s）の一樣流速に対抗して浮上が可能であると評価された。

本体ブイは、中間ブイをたちあげ、そこからダイニーマロープで係留する。中間ブイを係留する深度と本体ブイの待機深度はできるだけ同じになるように設定した。夏期試験では約 300 m の深度で、冬期試験では約 150 m の深度で待機するようにロープ長を決定した。冬期のシステムを図 2 に示す。冬期試験時には流速に対するブイの浮沈動作を確認するために、超音波ドップラー式流速計を同時に係留した。これらを 240 m のナイロンダブラーロープで立ち上げ、切り離し装置を配置して土俵 6 つでアンカーした。夏期のシステムは、冬期と基本的に同様の構成であるが、ナイロンダブラーロープの長さが 140 m、流速計の代わりに浮きが 4 つ、ダイニーマロープの長さが 600 m、アンカーは土俵 5 つとなっている。

## 夏期試験結果

約一ヶ月の試験期間中、中間ブイの深度はほぼ一定に保たれていた。中間ブイの倒れこみは 3 m 以内の範囲に収まった。

本体ブイについては 1 日ごとの浮上を設定したが、29 回の浮上予定回数のうち、浮上したのは計 3 回であった。浮上時にはイリジウム経由でのデータ伝送に成功した。ただし、データの送信が終わらないうちに海中に引きずりこまれたケースもあった。平均的な最浅浮上深度は 121 m であった。232 m までしか浮上しない場合もあった。浮上前にはいったん沈降し（沈降最深深度は 350 m に設定）、そこから海面までのフルプロファイルをとる設定としている。今回は、沈降がこの深度まで達してないケースは 3 回あったが、340 m まではすべてのケースで沈降していた。想定した浮上回数・深度範囲に対して実際にプロファイルが得られた深度範囲を積算した「データカバー率」は 66 %であった。

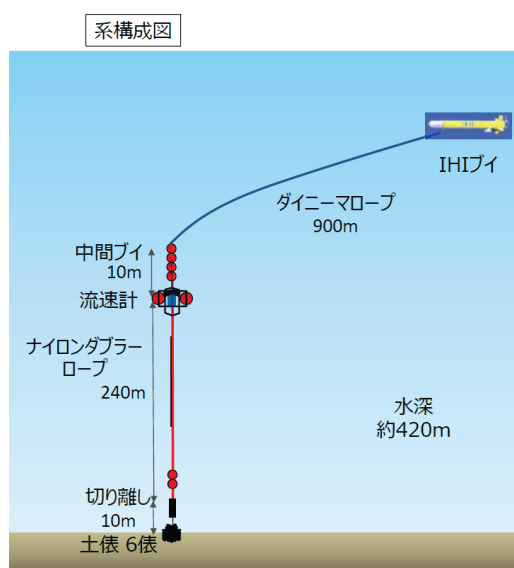


図 2 冬期係留システムの全体構成図。

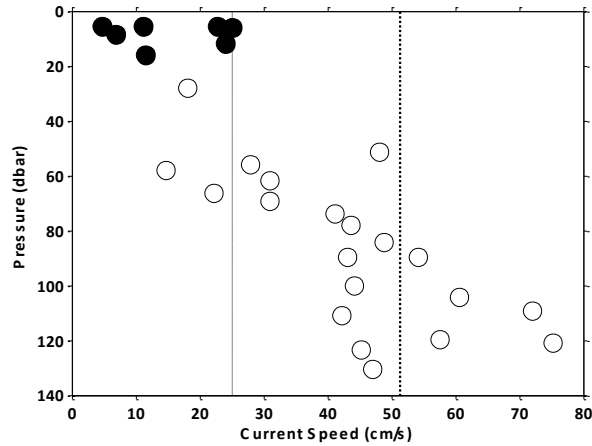


図 3 冬期試験における 150 m 深流速と浮上最小深度との関係。黒丸が“浮上”（寸止めを含む）した場合、白丸がそうでない場合をそれぞれ示す。

本体ブイに装着したセンサーは水塊鉛直分布の時間発展の様子を捉えることに成功した。7 月上旬には、垂表層 50 m 深程度に低温・低塩水（2℃、32.6 PSU）が存在する。14 日以降にはこの水が消え、高温・高塩水（12℃、33.8 PSU）に代わる様子が捉えられた。

### 冬期試験結果

冬期試験は漁期の終了にあわせて開始した。「寸止めモード」を実施する期間は平年的な海氷の分布を考慮し、1 月 20 日から 4 月 10 日までとした。観測開始から 1 月 20 日までには浮上頻度を 3 日に一回としたが、運用中にバッテリーの残量を考慮し、1 月 3 日以降の浮上間隔は 10 日とした。

冬期試験の約 6 ヶ月間、夏期と異なり、中間ブイの深度は大きく変化した。直立時で水深 120 m であるが、最大の 12 月 18 日には水深 262 m まで 142 m も沈み込んだ。直立した場合の最浅深度からの鉛直方向の倒れ込み長の期間平均値は 15 m であった。流速計データとの比較から、この倒れこみは流速の強弱に対応していることが確かめられた。

期間中は全体的に流れが強く、ブイ本体はなかなか浮上していない（図 3）。計 20 回の浮上機会のうち浮上したのは 3 回であった。流速計の結果から、中間ブイ深度での流速が概ね 25 cm/s 以上となると、浮上できていないことが分かる。なお、浮上速度が速過ぎると、センサー応答がデータ取得設定間隔に間に合わず、データ欠損が生じるという不具合もあったが、これはデータ取得間隔を延ばすことで対応した。

1 月 20 日から 4 月 10 日までの寸止め期間のなかでは 8 回の寸止め機会があったが、その期間中に海面に浮上したケースはなかった。このうち 30 m 以浅にあがったのが 4 回で、そのうち 3 回は 5–13 m 分オーバーシュートした。浮上の休止は概ね寸止めオペレーションの成功と考えられる。寸止め期間以前からの期間全体を通したデータカバー率は今回も 66% であった。



実際に取得した冬期の鉛直プロファイル観測の一例を図 4 に示す。表面付近は結氷温度に近く、塩分で成層しているプロファイルが得られているが、温度プロファイルには結氷温度に近いものの振幅の小さい擾乱がのっており、海水の複雑な流動の一端が伺える。

## おわりに

知床沖の流速は、概ね期間を通じてブイの設計時の仕様を上回る条件ではあったが、約半年の長期にわたり浮上動作や通信機能などの基本的な動作はすべて正常に作動することが確認できた。寸止めモードもほぼ正常に動作した。

現状では本体ブイは多様な海域に対応するためには浮力不足であり、今後はさらに高流速に対応するブイの開発を行う必要がある。同時に、低温室などの屋内設備を利用して、バッテリーの耐久試験を行うことにより、運用期間の上限値導出など、より詳細な解析を行うことを視野に入れている。また、今回の試験により、中間ブイの立ち上げ深度と浮力の関係など、今後の実用オペレーションを考える上でシステム全体としての問題点も明らかになった。これらの問題点を踏まえて筐体の再設計やシステム全体の改善を行うことで、今後の極域沿岸海洋域での運用の可能性を探っていきたい。

知床沖はオホーツク海を構成する特徴的な海域の一つとして重要であると同時に、機器開発のための試験海域としても極めて有益であり、こうした取り組みの継続が有効であると考えられる。

## 謝辞

試験実施に際して、ウトロ漁協および斜里第一漁協の皆様には多大なるご理解とご協力を頂いた。特にウトロ漁協・古坂彰彦理事には、直接係留系の設置と回収にご尽力いただき、古坂理事の操船技術と経験がなければこの試験は成功し得ませんでした。この場を借りて厚く感謝いたします。本試験は IHI、マリンワークジャパンと共同で実施しています。

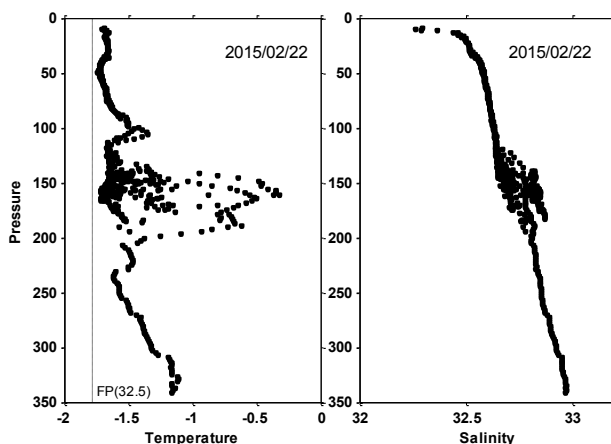


図 4 冬期の測定鉛直プロファイルの一例。2015年2月22日の(左)水温(°C)と(右)塩分(PSU)。縦軸は深さ(dbar)である。

# サーバの構築 ～船上観測での運用～

小野 数也

技術部先端技術支援室

## はじめに

我々先端技術支援室では、状況に応じた様々なサーバを構築している。過去、船上観測において、時刻同期サーバ（小野ら 2009）や衛星回線を利用したメールサーバ（小野 2011 と 2014）を構築した。船上で利用する 2 種類の新しいサーバを報告する。なお、これらのサーバ構築は平成 25 年度技術部技術奨励費の助成を受けて製作した。

## 表層モニタリングサーバ

船を航行させながら海水を汲み上げ、リアルタイムで水温・塩分・クロロフィル濃度値を取得する既存の装置がある（図 1）。海水表面のクロロフィル濃度の高い／低い場所を探しやすくするため、この装置を利用し、地図上に値を自動的にプロットするサーバ（図 2）を構築した。取得データを 5 分おきに表示サーバへコピーし、地図上に値（水温・塩分・クロロフィル濃度）をプロットする自動スクリプトを作成した。表示サーバに httpd をインストールしているため、作成した地図は船内のどこからでも状況をブラウザで確認できる（図 3）。作成したスクリプトや web ページは要望に合わせて、船上で調整した。

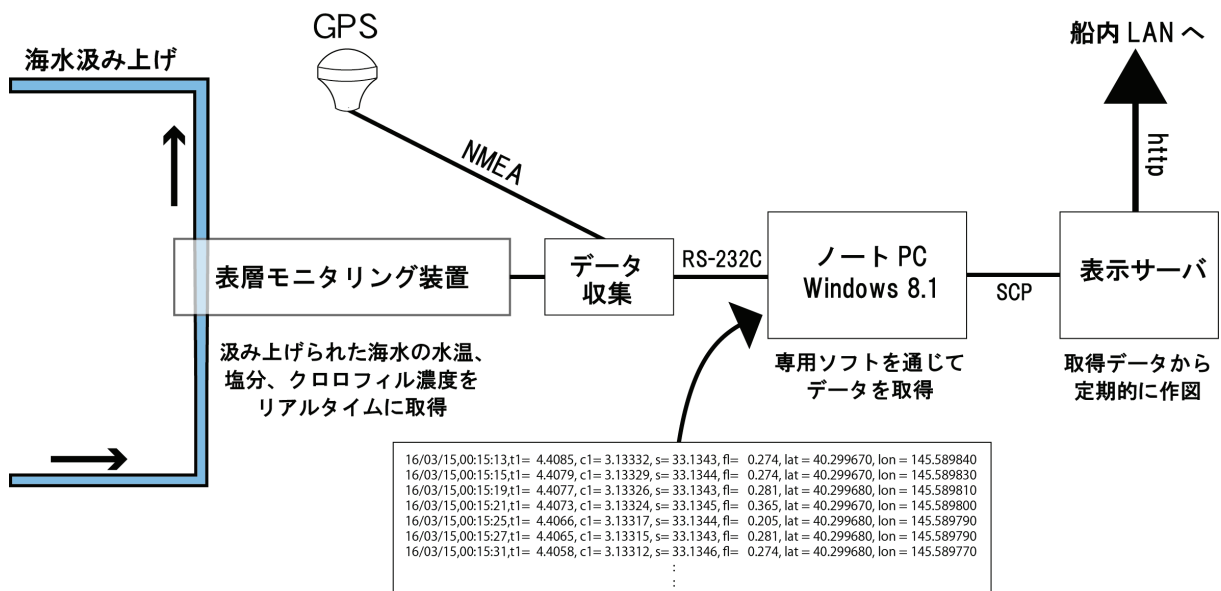


図 1 表層モニタリングサーバ構成図。装置からの取得データを表示サーバへ定期的にアップロードし、表示サーバでは The Generic Mapping Tools (GMT) を使い作図している。なおセキュリティを考え、外部からノート PC へは直接接続できない設定にした。



図 2 表示サーバ (左) とデータ取得用ノート PC (右)。

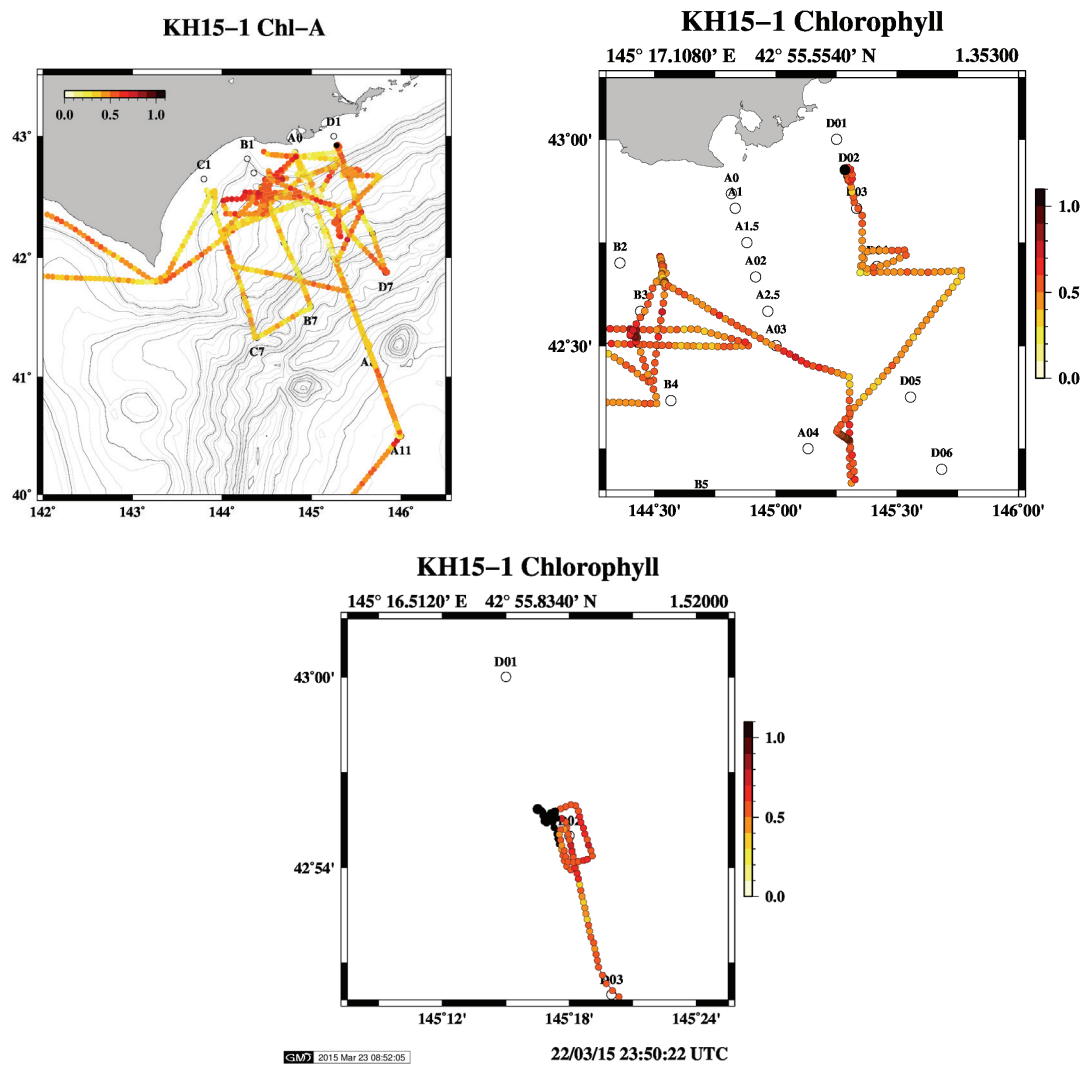


図 3 クロロフィル濃度の表示例。3 種類の範囲で表示できるようにした。下図は現在位置を中心プロットして作図するようにしてある。

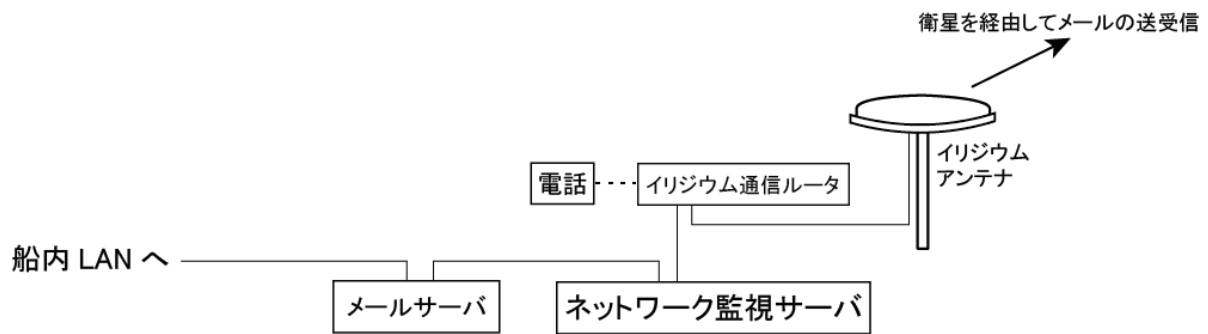


図 4 ネットワーク監視サーバ、設置例。

## ネットワーク監視サーバ

イリジウム衛星通信を利用したメールサーバを 2011 年、2014 年のロシア船観測で導入したが、2014 年の航海では原因不明の微小通信パケットが大量に発生した。陸上とメールプール受け渡しを、cron スケジューリングを使い、1 もしくは 2 時間おきに実行していたが、通信していないはずの時間帯でパケット料金が大量に発生していた。スケジュール以外の時間帯には、ルータも陸上と通信する LED は点滅していないのを確認していたが、しっかり料金は請求されてしまった。通信会社に問い合わせしてみたが、技術的な回答は何も得られず、泣き寝入りするしかなかった。そのため、自分たちで通信量・通信内容を即座にチェックする必要があると考え、ネットワーク監視サーバを構築した。構成例を図 4 に示す。この場合、すべての通信パケットは監視サーバを通過するため（ブリッジ接続）、監視は容易である。ただし、Wireshark などのパケットアナライザをあまり扱ったことがなかったため、現在勉強中である。

## おわりに

船上で利用したサーバを 2 例のみだが紹介した。構築したサーバは、2 つの LAN と 1 つの RS-232C ポートさえあれば、ほとんどの用途に対し十分対応可能と思われる。実際、これらのサーバは同じ筐体を使い、内部記憶領域（SSD）のみを交換し構築したため、開発コストを抑えることができた。ただし、観測機器の制御を伴う場合はこの限りではなく、Raspberry Pi（ラズパイ）などが必要かもしれない。今後も技術開発に伴い、様々なことに取り組んでいきたいと思う。

## 参考文献

- 小野 数也、千貝 健、福士 博樹 船上観測で使用する NTP サーバの構築：低温科学研究所技術部技術報告、**15**、31–36、2009。
- 小野 数也 2011 年ロシア船観測の PC ネットワーク：低温科学研究所技術部技術報告、**17**、11–14、2011。
- 小野 数也 2014 年ロシア船観測のサポート ～船内 LAN について～：低温科学研究所技術部技術報告、**20**、34–38、2014。

# 観測ロケットを用いた微小重力実験用装置の開発

木村 勇氣<sup>1,2</sup>、中坪 俊一<sup>3</sup>、齋藤 史明<sup>3</sup>、石塚 紳之介<sup>2</sup>、山崎 智也<sup>2</sup>、稲富 裕光<sup>4</sup>

1. 共同研究推進部
2. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学分野
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

## はじめに

宇宙で生成する微粒子の理解には、宇宙で実験をする必要があるとの考えで、宇宙ダストの生成過程の解明を目的に、観測ロケットを用いた微小重力実験を実施した。原子や分子が自ら集まって固体となる均質核生成は非常に難しく、下地があると、その上に優先的に生成する（不均質核生成）。その為、天体から放出されたガスから最初に核生成する物質は、その後のダストの進化を支配すると考えている。その最初の物質の最有力候補がアルミナであり、その実証と核生成効率を定量的に解明する事が最重要課題である。また、最も豊富に存在する無機ダストのケイ酸塩が核生成する際の鍵となるのはシリカである。我々は、ロケットの弾道飛行で得られる数分間の微小重力環境を利用して、酸化物ダストが均質核生成を経て作られる過程を“その場”で観察・計測することにより、超新星や晩期型巨星周で生成する酸化物ダストの初期状態を明らかにする実験を計画した。具体的には、二波長干渉計による核生成環境の計測により、最も重要な物理定数である分子の付着確率を求めて核生成理論に適用する。また、これまでの研究で開発してきた『浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置』を小型化して搭載することで、天体周辺に浮いているダストのスペクトルを再現することが目的である。そのために、これらの実験装置を技術部装置開発室の協力の下に製作したので、ここに報告する。

## 二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置

本装置は、赤（635 nm）と緑（532 nm）の二つのレーザーから成り、核生成環境の温度と濃度を同時に決定できる点に特徴がある。装置の基本構成は、2012年に実施したS-520-28号機を用いた微小重力実験と同様である。今回は図1に示すベースプレートとその上に配置する光学部品を保持して光軸を出すために必要なすべての部品を技術部装置開発室で製作した（図2）。ここで、核生成の瞬間の実像を捉えるために搭載したカメラの設置方法を、操作性の向上のために改善するなどした。この干渉計は数10 nm程度の光路長変化を捉えられるために、光学部品を適切な位置に精度よく配置する必要がある。そのために、強度が高く残留応力が低いために加工歪が発生しにくい材質である、アルミ合金のYH75（A7000番系）を使用した。

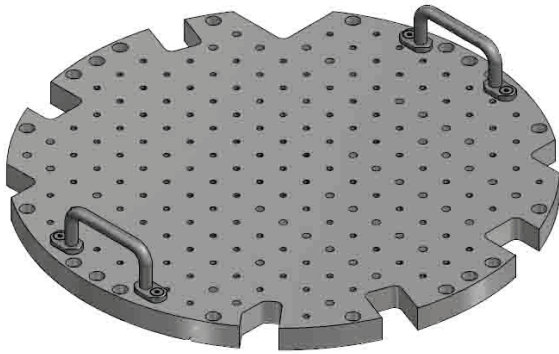


図 1 ロケットに実験装置を搭載する為の直径 420 mm、厚さ 20 mm のベースプレート。切り込みは、配線を通すために入れている。

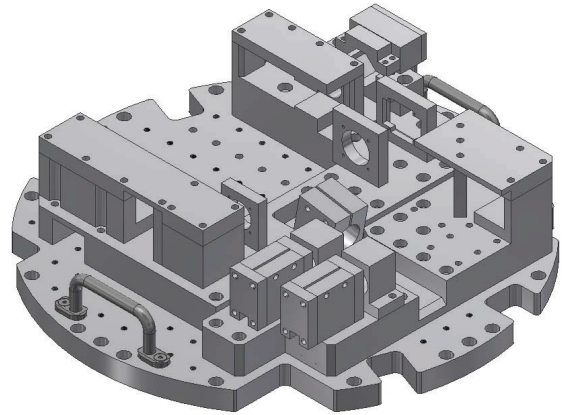


図 2 技術部装置開発室で製作したロケット搭載用の二波長マッハツェンダー型干渉計装置。ここに、光学部品、真空チェンバー、カメラ、レーザーなどを配置した。

## 浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置

本装置はガスから核生成を経てナノ粒子へと成長する過程の赤外スペクトルを直接測定するために、観測ロケット実験用に今回新しく設計した。この装置の特徴は、天文観測で得ている天体周辺での宇宙ダストの生成過程のスペクトルと直接比較できる点にある。従来は、このような直接の観測装置がなく、ダストの候補物質を媒質（臭化カリウム）に埋め込んで赤外線を照射し、試料固有の赤外吸収スペクトルを測定していたために、埋め込むことによる凝集や表面構造の変化などの影響を受けたスペクトルでの解析に甘んじていた。図 3 に実験装置の外観を示す。今回は、 $13\ \mu\text{m}$  に特徴的なピークを持つ物質の起源がアルミナであるのかを明らかにすることが目的であり、中間赤外領域の波長  $9 - 17\ \mu\text{m}$  の光を回折格子で分光して、赤外線カメラの素子で強度を測定する。光学系は、光が核生成領域を 2 回通るオフナー式を採用した。光学系の設計においては、ベクトル場を考慮した厳密な計算を行い、検出感度を考慮して、光源のスリット間隔を  $94\ \mu\text{m}$ 、得られる赤外スペクトルの波長分解能を  $0.05\ \mu\text{m}$  とした。また、最初のミラーに軸対称非球面ミラーを用いると、端で波長分解能が若干低下するため、トロイダルミラーを用いた。これにより、スリット端までほとんど同じ波長分解能が得られる構成となった。ミラーには膜厚  $150\ \text{nm}$  の Al コーティングを施し、反射率は  $\sim 98\%$  以上を確保した。

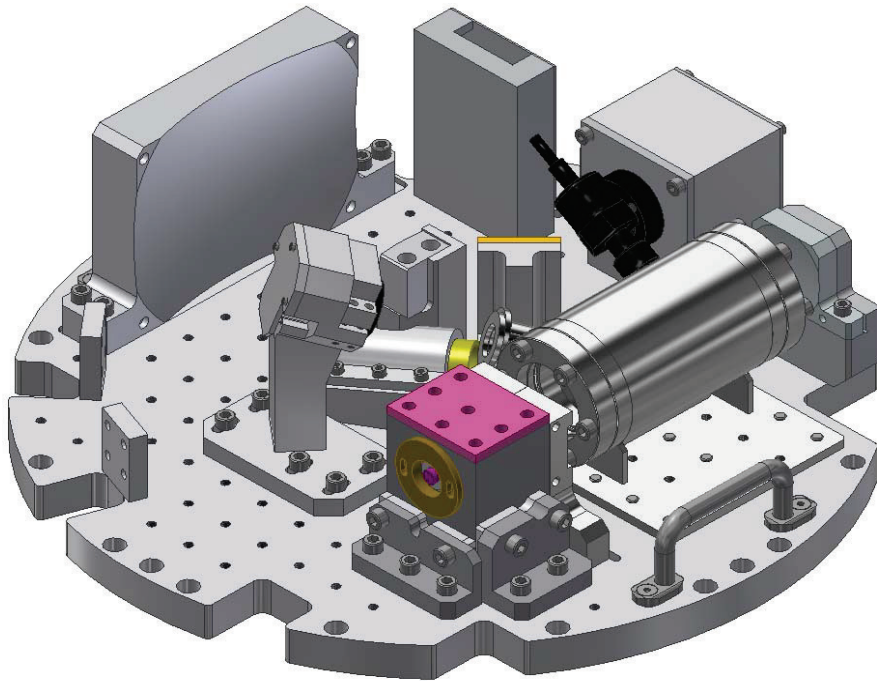


図 3 技術部装置開発室で製作したロケット搭載用の浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置。

## 環境試験

製作した実験装置に対して、振動試験、衝撃試験、真空試験を行った。振動試験は機軸方向に 10.7 Grms、30 秒間、横方向 2 軸に 11.9 Grms、30 秒間の計 3 軸。衝撃試験は 3 軸とも 40 G/10 ms の正弦半波で行った。真空試験は、ロケットが高度 300 km 程度まで 3 分ほどで到達するので、同等の時間スケールで  $10^{-5}$  Pa までの真空引きが望ましい。特に、ロケットに搭載実績のない赤外線カメラの回路内で用いられている固体電解コンデンサーと発熱、真空放電の有無に注目し、動作に問題が無い事を確認した。どの試験も、実際のフライトを模擬する必要があるため、通電状態で行った。一連の試験の中で、赤外スペクトル測定装置の光源に使用しているシリコニット発熱体が振動に著しく弱いことが分かり、その対策に苦心したが、最終的には問題なく実験を実施できた。

## 謝辞

数か月に渡る準備期間と打上げに際し、多くの方にご尽力頂いた。ここに感謝申し上げます。

# ICF70 キューブ型超高真空チャンバーの製作

中坪 俊一

技術部装置開発室

## はじめに

技術部装置開発室は、本研究所の支援のもとで工作機械を更新している。更新された工作機械の中には、NC 旋盤、U 軸加工機能付き特殊仕様 NC フライス盤や高精度回転テーブル付きワイヤー放電加工機がある。これらの工作機械導入により、これまで不可能だった超高真空マルチポートフランジの製作や切削加工のみで溶接部のない超高真空チャンバーの製作などの複合的な特殊加工が行えるようになった。平成 26、27 年度技術部技術奨励費に採択された「キューブ型超高真空チャンバーの試作」により、切削加工のみで溶接部のない『ICF70 キューブ型超高真空チャンバー』を製作した。なお、チャンバーの内径は一般的な円柱状ではなく、球状になっている。

## キューブ型チャンバーとは

超高真空チャンバーは、各種パイプとフランジを溶接で組み合わせた物が一般的である。フランジは、使用目的に応じた箇所に観察窓や計器導入口として溶接され、各種機器とアクセスする窓口になっている。しかし、溶接部からの真空漏れやチャンバーの内径に対して各種フランジ接合後の外径サイズが大きくなるなど、利用者に不便な点がある。

近年、真空機器の加工技術の発展により、様々な真空チャンバーや部品が安価に入手できるようになり、その中にはキューブ型のチャンバーもある。販売（受注生産品）されているキューブ型チャンバーは、6 面体の各々の面に ICF のナイフエッジ加工が直接施されているため、溶接部が無く一般的なチャンバーに比べ内径に対し外径のサイズが小さい。ただし、塊の材料から削り出し加工するため、内・外径に性能と関係のない余分な部分が残っており、チャンバーを軽くできない。外径は 6 面体の頂点 8 か所の角を落とし軽量化している面取り加工品もあるが、内径は工具の形状制約などの問題から一般的に円柱状になっている（図 1）。今回加工した『ICF70 キューブ型超高真空チャンバー』は、内径が球状になっており、重量および実験・観察の面で優位であり最大の特徴でもある（図 2）。

## キューブ型チャンバーの加工

本キューブ型チャンバーは、SUS304 外径約 75 mm の角棒材料から加工した。はじめに、NC フライス盤によって 6 面すべて仕上げ代を 0.4 mm 残し、70.4 mm に精度良く直角に切削加工した。その後、ワイヤー放電加工機で材料の中心から仕上げ代 1 mm 残



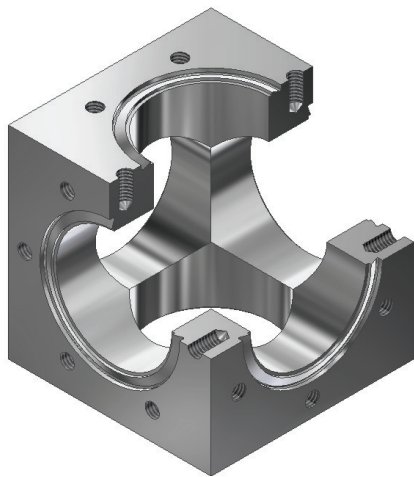


図1 内径が円柱状のチャンバー（断面図）。

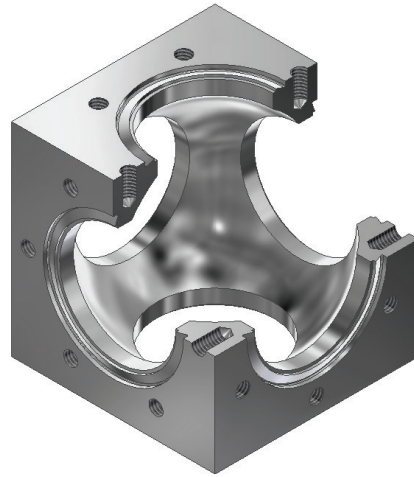


図2 内径が球状のチャンバー（断面図）。

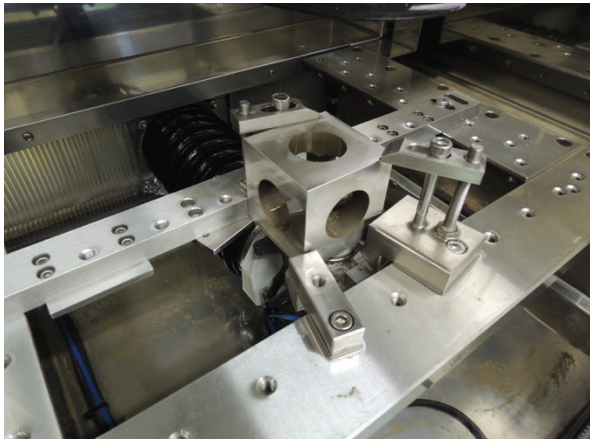


図3 ワイヤ放電加工機での穴加工。

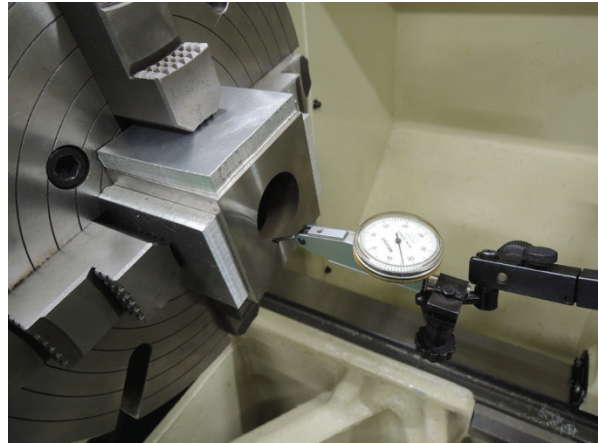


図4 回転軸と穴の中心軸の位置合わせ。



図5 市販の切削工具（上）と改造した切削工具（下）。

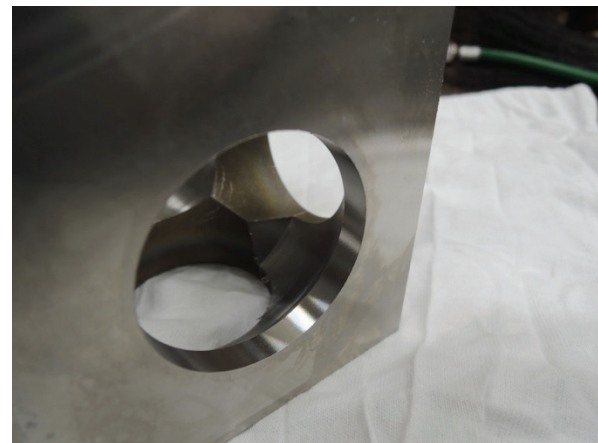


図6 半分ずつした半球状加工。



図 7 治具で固定した外径切削。



図 8 U 軸加工機による平面切削・ナイフエッジ加工。

し、直径 38 mm の円柱状に不要部分を抜いた（図 3）。次に NC 旋盤を角棒材料が固定できるように通常仕様の 3 ツ爪スクロールチャックから、4 ツ爪インデペンデントチャックに交換し、材料を仮固定した。その後、材料の中心に抜いた円柱状の穴の芯振れを計測し、円柱の中心軸と NC 旋盤の回転軸が一致するようにチャックを調整し、固定した（図 4）。

一般的に旋盤を使って内径切削加工する場合、市販の内径加工用切削工具を使う。しかし、外径加工と違い工具形状に制約があることから、内径に大きな段差や内径差を作る加工は非常に難しい。そこで、今回は市販の内径切削用工具を改造し、大きい内径差・内径差のある球状加工が可能な切削工具を製作した（図 5）。

製作した工具を使って固定した材料に球状切削加工したが、切削抵抗により工具が振動し、材料内面を仕上げ加工するのに十分な強度が得られないことが分かった。そこで、工具の振動を少なくするため工具の突き出しを短くし、材料を半分ずつ半球状に加工することにした（図 6）。しかし、この方法でも完全な振動の除去はできなかったため、工具の固定台座に制振合金を敷き防振を図った。これらの方法および切削条件の変更により、切削工具の振動を極力小さくし片面ずつ球状加工した。

次に材料を NC フライス盤に固定し、ICF70 真空フランジ固定用のねじ穴加工を行った。材料の軽量化を図るため、あらかじめ製作した専用治具を用いて材料を NC 旋盤に固定し外径切削加工した（図 7）。

最後に、真空機器の最重要部分であるナイフエッジ加工および削り残しておいた外径および内径部の仕上げ加工を、特殊仕様 NC フライス盤の U 軸加工機能（図 8）で慎重に行い完成した（図 9）。

## 加工の問題点

本キューブ型チャンバーの加工を行う課程でいくつかの問題が発生したが、それらの問題をこれまでの加工経験などから克服し完成に至った。しかし、内径切削時における

切削抵抗による工具の振動・破損の問題は残った。また、工具の振動防止の点から制振合金の使用と内径球状加工を半分ずつに分割し加工を行ったが、継ぎ目の段差が残ってしまった（図 10）。

工具の欠損（チッピング）の問題に関しては、前加工に問題があったかもしれない。具体的にはワイヤー放電加工機であらかじめ 3 面から貫通穴を開けたが、球状加工する穴（前・後面）を回転軸として切削加工するため、残りの 2 方向 4 面の穴が開いている部分は工具の切削抵抗がなく、それ以外の部分は切削抵抗が発生する。この状態を回転中に幾度も繰り返すため工具の欠損に繋がったのかもしれない。しかし、加工時間・切粉の排出・工具の摩耗など、今後の検証によっては、工具寿命が短くなるがこれが最善の策となることも考えられる。

## おわりに

平成 26、27 年度「技術部技術奨励費」の支援より、キューブ型超高真空チャンバーの製作を行った。技術奨励費申請にあたって、これまで導入されてきた特殊仕様の工作機械の優位性を示す加工物の思案の結果、キューブ型超高真空チャンバーの製作に至った。今後、様々な加工依頼を通して特殊仕様工作機械の優位性を紹介し、さらなる加工技術の獲得とその技術を所内に還元できるようにして行きたい。

最後に、長年にわたり技術部ならびに著者に対して多大なる御支援御協力をいただき、本年度で研究所を去られる前研究所長の古川義純先生、元技術部長の藤吉康志先生、技術部の新堀邦夫氏に心からお礼を申し上げます。

## 参考文献

中坪 俊一 「ナイフエッジ型マルチポートフランジの製作」 北海道大学技術研究会 2013、2013.  
中坪 俊一、森 章一 「特殊仕様 NC フライス盤の導入とその加工例」 北海道大学低温科学研究  
所技術部技術報告、19、30 - 34、2014.



図 9 完成したキューブ型チャンバー。

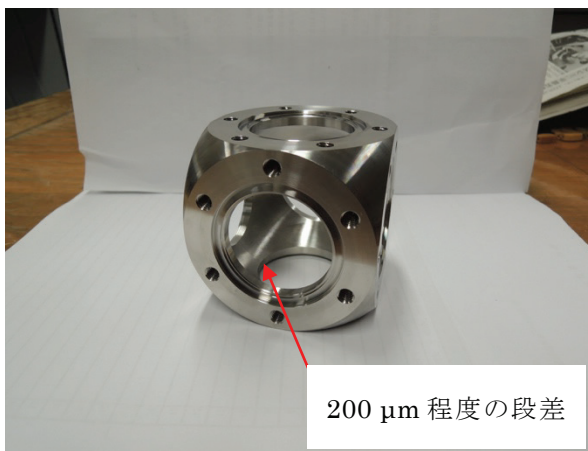


図 10 球状加工時に残った継ぎ目。

# 超高真空低温原子間力顕微鏡の冷却系の改良

日高 宏<sup>1</sup>、中坪 俊一<sup>2</sup>、渡部 直樹<sup>3</sup>、香内 晃<sup>1</sup>

1. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学分野
2. 技術部装置開発室
3. 雪氷新領域部門宇宙物質科学分野

## はじめに

宇宙には分子雲と呼ばれるガス天体が存在している。分子雲は水素分子を主成分とし、水素、炭素、窒素、酸素原子や、その他始原的な分子ガスおよび氷星間塵と呼ばれるサブミクロンサイズの微粒子からなり、その内部では長い年月をかけて化学進化<sup>\*1</sup> や物質進化<sup>\*2</sup> が生じていることが解っている。これらの進化過程を理解する上で、氷星間塵表面の幾何構造を考慮することが重要と理解はされているが、明らかになっていない。

氷星間塵はH<sub>2</sub>Oを主成分とするアモルファス状態の固体で覆われた鉱物微粒子であると考えられているため、氷星間塵表面の幾何構造を理解するためにはアモルファス氷の表面幾何構造を知る必要がある。しかしながら、アモルファス氷は結晶氷とは異なり規則的な構造をとらないため、これまで固体の構造解析で用いられてきたX線や電子線回折等の方法ではその構造を理解することができない。そこで我々は、原子分解能を有し固体表面の構造を実空間測定できる超高真空低温原子間力顕微鏡の開発を行ってきた。

今回、超高真空低温原子間力顕微鏡の最低到達温度を改善するために、基板の冷却系に使用する部品の改良を行なったので報告する。

## 冷却部品の改良

図1に現状の原子間力顕微鏡の観察部の拡大図を示す。観察ステージおよび試料走査用のチューブスキャナーの冷却は、寒剤貯め下部と接続されたヒートコンダクターによる熱伝導により行なわれる。冷却効率を上げることは、単純にはヒートコンダクターの本数を増やす事で実現できる。しかし、原子間力顕微鏡は外部からの振動ノイズの影響を強く受けるため、ノイズ源の増加につながるコンダクター数の増加は現実的な冷却効率改善方法にはならない。そこで、本数を増やすのではなくヒートコンダクターの熱伝導率を向上させ冷却効率をあげるという方針をとることにした。

ヒートコンダクター性能の向上のため、「材料」と「接触面積」という二つの側面から検討を行なった。ヒートコンダクターは振動ノイズをできる限り押さえるため、非常に柔らかい銀薄膜を50枚重ねたものを銅の留め具に取り付けた構造になっている(図1)。

\*1 始原的な原子・分子間で生じた化学反応生成物がさらに反応物となり、化学反応がくりかえされることによって構造が複雑な分子が形成されていくこと。

\*2 微粒子の衝突合体成長によって、cm、m、kmサイズと質量の大きな物質が形成されていくこと。これにより、星・惑星ができると考えられている。

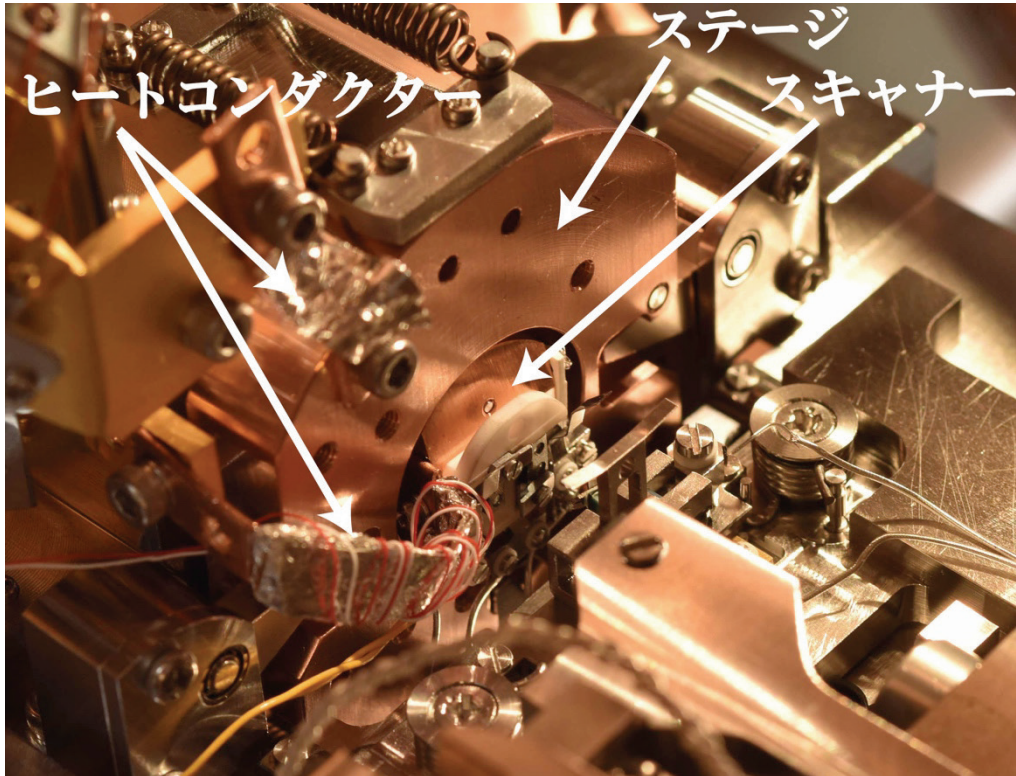


図 1 原子間力顕微鏡の観察部の拡大写真。ステージおよびスキャナーに接続されている、冷却用のヒートコンダクター（従来品）を改良する。

銀の熱伝導率は 20–30 K の温度領域で  $2000\text{--}4500\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  と大きな値であるのに対し、無酸素銅の場合、 $700\text{--}850\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  であり銀よりかなり小さい。そこで、銅の留め具材料を熱伝導率が  $4500\text{--}13000\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  である 6 N グレードの超高純度銅を用いることにした。また、金属は加工硬化により熱伝導率が悪くなるため、改良型ヒートストラップ製作後には、真空内でアニールを行ない熱伝導率の回復を行なう。

材料以外に熱伝導率を決めるもう一つの要素として、接触面積がある。従来型ヒートストラップでは、銅管内に銀箔の束を入れてそれをかしめることで、銀箔と銅製留め具を接続していた。この方法では、銀箔と銅管内部の当たり面を原子スケールで見ると、接触面積が少ないことが予想される。そこで、銅製の留め具部は NC フライス盤により滑らかな平面を出すよう削り出し、銀箔束と留め具は超音波溶接という方法で接続することにした。この方法は接触面で生じる原子の拡散による接合であるため、かしめ接合とは比べものにならない接触度合いが期待できる。また、留め具を NC フライス盤により削り出し、その後ラップ盤により研磨加工したため、ヒートコンダクターと冷媒貯めやステージ、スキャナーとの接続部の平面度も改善され、より良い熱伝導が期待される。

上記の方針に従い、改良型ヒートストラップの作成を行なった。完成品を図 2 に示す。実験の都合上、改良型ヒートストラップへの交換作業はまだ行なっていないため、性能の評価はできていない。交換後、速やかに性能チェックを行う予定である。



図 2 改良型ヒートコンダクター。銅製の留め具には 6N グレードの超高純度銅を使用。  
銀箔束と銅製の留め具は超音波溶接によって接続した。

## おわりに

今回の改良において重要なポイントである超音波接合作業は、ソノマックジャパン株式会社の田村様にご協力頂くことで実現しました。この場を借りて御礼申し上げます。

# 塩化水素ガスによって氷ベーサル面に生成する液体層

長嶋 剣<sup>1</sup>、佐崎 元<sup>1</sup>、羽馬 哲也<sup>2</sup>、村田 憲一郎<sup>1</sup>、中坪 俊一<sup>3</sup>、古川 義純<sup>1</sup>

1. 雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野
2. 雪氷新領域部門宇宙物質科学分野
3. 技術部装置開発室

## はじめに

大気汚染問題において大気組成が変化する原因を突き止める事は最重要課題である。大気組成はガス同士の化学反応や光反応によって変化するが、加えて問題を複雑にしているのが雲や極域で多量に存在する氷結晶である。大気中でのガス分子同士の化学反応(図 1a) で氷が存在すると、氷表面へのガス分子の吸着や氷内部への拡散によって大気中とは異なる反応が起こりえることとなる(図 1b)。例をあげると、南極上空の極成層圏雲で起こる塩化水素ガスの化学反応がオゾンホール生成に関わっており (McNeill et al., 2006)、硝酸イオンは極域の氷表面で反応することにより有害な対流圏オゾン生成の要因となることが報告されている (Domine et al., 2002)。ところが、これまでの研究の多くはガス側を分析していたため何が生成したかはわかるが、氷表面で何が起きているのかはまだ不明点が多い。

相転移ダイナミクス分野では氷の成長過程のその場観察をメインテーマとして掲げており、氷の表面観察に関しても多くのノウハウを持っている。近年、佐崎によって開発されたレーザー共焦点微分干渉顕微鏡 (LCM-DIM) は高さ 1 nm 以下の分解能を有し、氷単位ステップ (高さ 0.4 nm の氷分子の階段; Sazaki et al., 2010) や擬似液体層の可視化 (Sazaki et al., 2012) など氷表面のマイクロ観察に成功してきた。最近、我々はこの LCM-DIM を用いて塩化水素ガス存在下での氷表面のその場観察を行ってきたので報告する。

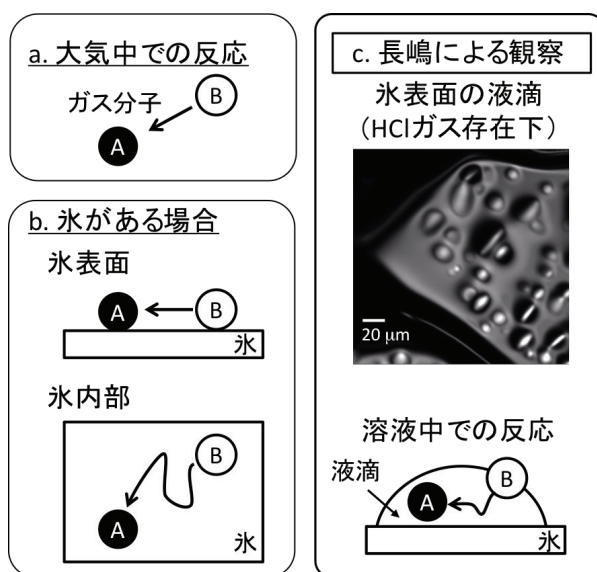


図 1 大気中でのガス分子の化学反応と氷があった場合に起こりえる化学反応。

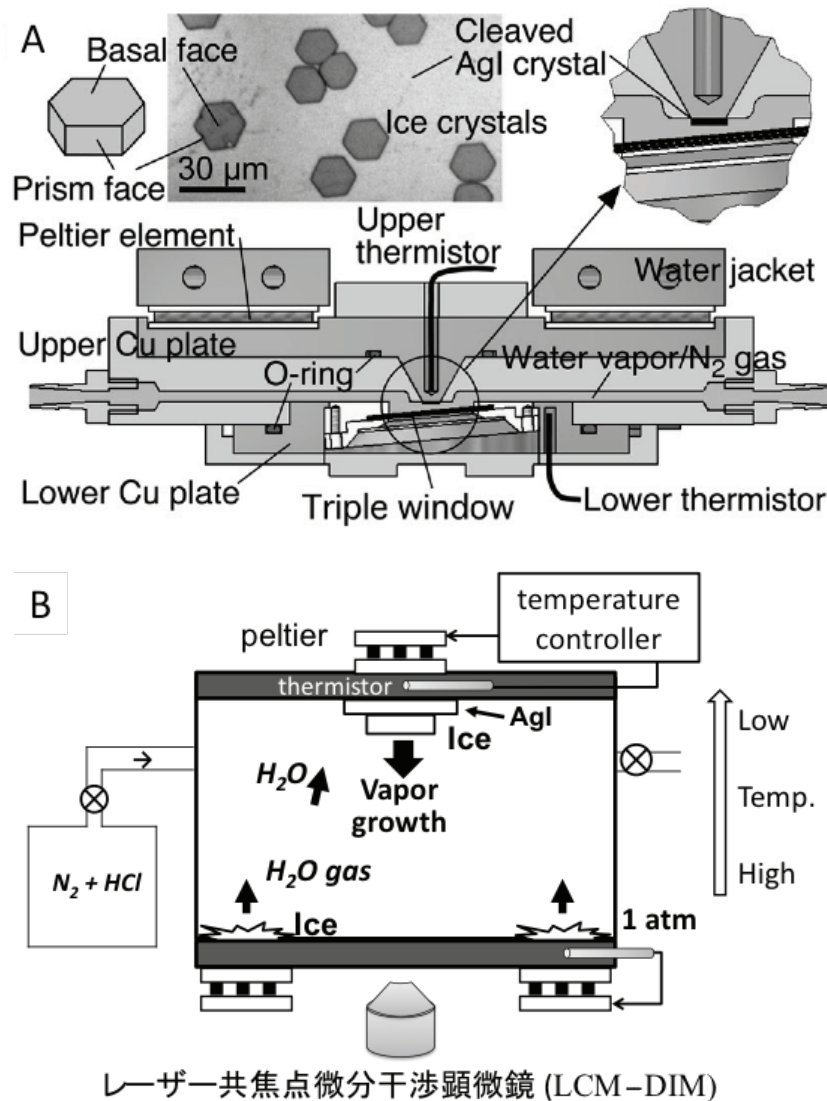


図 2 氷表面観察用の観察セル。(A) 全体図 (Sazaki et al., 2010)。(B) 模式図。セル下部にあるのが水蒸気供給用の水で、上部にあるのが観察用の単結晶氷。

## 実験

LCM-DIM で氷表面を観察するためのセルは低温研技術部装置開発室によって製作された。これまで幾度も要望を出しながらいくつものバージョンが作られることで洗練されてきたものであり、このようなセルは市販品で存在しないことはもちろん、外注で製作することも大変に難しい。

観察セルの特徴としては、密閉セル内部に観察用の単結晶氷、水蒸気供給用の氷とを用意し、各々の温度を変えることで様々な温度・水蒸気量での氷表面の観察を可能としていることがあげられる (図 2)。さらに、LCM-DIM では氷ステップ観察が可能のため、ステップ速度が 0 となる水蒸気量が平衡蒸気圧であるという性質を用いて水蒸気量を正確に校正することが可能である (Asakawa et al., 2014)。



実験では、水蒸気供給用の氷を作成した後、塩化水素ガスを 0.1% 混合した窒素をセル内に導入し、水蒸気供給用の氷を蒸発させながら観察用単結晶氷を育成した。この時の雰囲気ガス組成は条件によって多少変化するが、ほぼ  $N_2$  99%、 $H_2O < 1\%$ 、 $HCl < 0.1\%$  という量比の混合ガスで全圧は 1 気圧である。このようにして育成した単結晶氷のベール面を LCM-DIM で観察した。

## 結果と考察

塩化水素ガス存在下では氷の単位ステップの移動速度が遅くなり、単位ステップの間隔が広くなることがわかった。これは塩化水素ガスの存在が氷の成長を阻害する方向に働くということである。

また、塩化水素ガス存在下では氷の表面に液滴を生成することもわかった (図 1c)。液滴は今回の実験温度条件内 ( $-15\text{ }^\circ\text{C}$  から  $-0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ) では常に存在し続け、液滴である証拠にこれらの突起同士がぶつかると合体して 1 つになる様子も観察された。水蒸気量を変えて氷が蒸発する条件にすると、この液滴は氷表面を動き始めた (図 3)。その理由として、この液滴には塩化水素が溶け込み塩酸となっている事が考えられる。

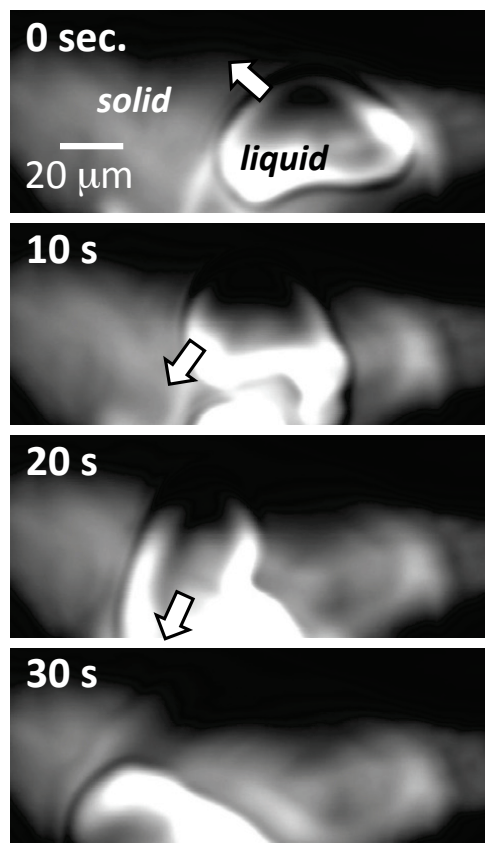


図 3 塩化水素ガス存在下で蒸発する氷ベール面の LCM-DIM 像。氷の温度は  $-0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。不定形の液体層は変形しながら激しく動きまわり他の液体層との合体も起こる。LCM-DIM によって高さが強調されているが、液体層の接触角は数度程度であり厚みは 300 nm 以下である。

塩酸の融点は 0 °C よりも低く、例えば 10% 塩酸の融点は -15 °C となる。仮に -15 °C、水蒸気量が少ない環境で氷を観察した場合、液滴の水が蒸発するにつれ塩酸濃度が高まり、液滴の融点が -15 °C よりさらに下がって下地の氷を溶かし始めることとなる。結局は蒸発体積と同じ体積分下地の氷を溶かすことになるわけである。この推測を支持するように、水蒸気量を少なくすればするほど液滴の移動はより激しくなった。

塩酸液滴であれば融点が下がるため、氷点下の環境であっても下地の氷と熱力学的に安定な平衡状態を保つことができる。これは融点近傍でしか観察されない疑似液体層と大きく異なる点である。

温度・塩化水素濃度は天然環境と大きく異なるが、仮に天然においても氷表面に塩酸液滴が存在するならば、その液滴内部で様々な化学反応が起こりえる (図 1c)。よって、液滴生成の起こる条件か否かが雲中での化学反応に大きく影響を与えている可能性が示唆される。

## 今後の問題点

塩化水素ガスは観察用の単結晶氷だけではなく水蒸気供給用氷にも影響を与えてしまう。また、この観察セルでは -20 °C までの低温条件でしか観察できず、例えば雲の環境である -40 °C 以下の温度で実験はできない。それらを解決するための装置を準備しており、さらに新たな観察セルの開発を低温研技術部装置開発室に依頼することで問題点の解決を目指したい。

## 参考文献

- Asakawa, H. et al., *Crystal Growth & Design* 14, 3210 – 3220 (2014).
- Domine, F. and Shepson, P. B., *Science* 297, 1506 – 1510 (2002).
- McNeill, V. Faye et al., *PNAS* 103, 9422 – 9427 (2006).
- Sazaki, G. et al., *PNAS* 107, 19702 – 19707 (2010).
- Sazaki, G. et al., *PNAS* 109, 1052 – 1055 (2012).

# 濡れ現象から見た氷の表面融解

村田 憲一郎、麻川 明俊、長嶋 剣、古川 義純、佐崎 元

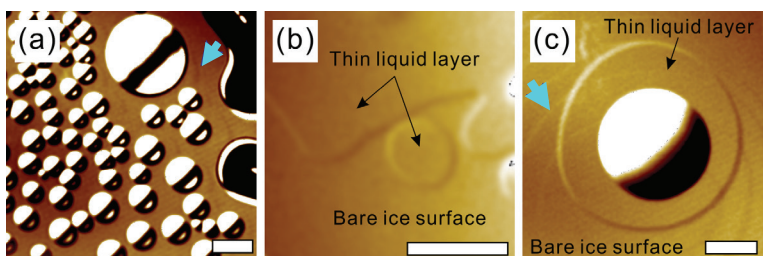
雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野

## はじめに

「融点以下の温度条件であっても氷の表面には非常に薄い水膜（擬似液体層）が存在する」、いわゆ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、電磁気学の祖であるマイケル=ファラデーにまで遡る。以来、現象自体の学術的重要性もさることながら、雪玉作りから氷上の潤滑、凍上現象、雪の形態変化、雷雲での電気の発生など、我々に身近な様々な自然現象を理解する鍵として多くの研究者を魅了してきた。しかし、擬似液体層を直接捉えることはその薄さ故に非常に難しく、確固とした実験結果に立脚した理論モデルは今なお不足している。本研究ではレーザー共焦点微分干渉顕微鏡による「その場観察」に基づいた、氷の表面融解の現象論的理論モデルを構築する。

## 表面融解と濡れ

図に顕微鏡その場観察により得られた氷表面上の擬似液体層の様子を示した。ドロップレット状、層状の擬似液体層、及びその共存状態が観測されることから、従来我々は2種類の液体「相」を仮定して相の安定性、及びその生成の起源を議論してきた。しかし濡れの観点からは、これらの状態は、部分濡れ、完全濡れ、準不完全濡れに対応する。本研究では、各々の濡れ形態における力の釣り合いから、これらの濡れ形状間の転移の熱力学条件を導き出す。その理論的帰結として、擬似液体層の多様な濡れ挙動が、擬似液体層の膜厚に依存した界面自由エネルギーに極小が存在することに由来し、また固・気共存曲線近傍では、濡れ性を支配する拡張係数が本質的に負であることを明らかにした。これは、固（氷）・気（空気）界面が水で濡れると界面自由エネルギーが上昇する、つまり平衡状態では界面に水（擬似液体層）が存在できないことを意味する。これまで研究で得た実験結果は、擬似液体層が非平衡状態に特徴的な現象であることを示唆しており、今回の帰結はその結果を強く支持するものである。以上から、擬似液体層の正体は、氷の気相成長におけるオストワルド段階則の結果として生じる過渡的な準安定相と考えるのが自然である。



図：擬似液体層の3つの濡れ形態。(a)部分濡れ、(b)完全濡れ、(c)準不完全濡れ。青矢印は氷の単位ステップの前進を表す。スケールバーは20 μm。

# Low-cost Laser Disdrometerの開発 – 降雪粒子の立体形状と落下速度計測 –

民田 晴也<sup>1,2</sup>、久島 萌人<sup>1,2</sup>、中坪 俊一<sup>3</sup>、西川 将典<sup>4</sup>、藤吉 康志<sup>4</sup>

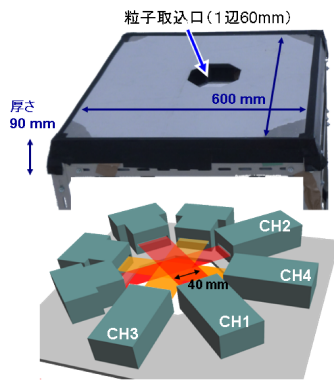
1. 名古屋大学全学技術センター
2. 名古屋大学宇宙地球環境研究所
3. 技術部装置開発室
4. 水・物質循環部門雲科学分野

## はじめに

マイクロ波降水リモートセンシングは、降水粒子が放射・散乱するマイクロ波を受信して観測空間の降水量を推定する。その推定精度は粒子種別判別（適切な粒子形状と誘電率設定）とそのマイクロ波散乱モデルの完成度、および粒径分布の推定技術により左右される。液相で楕円体の雨滴粒子の散乱理論はほぼ確立しているが、多種多様な形状と密度で特徴付けられる雪など固体降水粒子の散乱特性は理論・観測の両面で知見が乏しく、レーダ降雪強度観測技術の実用化には未だ課題が山積する [1,2]。多くの研究者により地上・上空で降雪粒子観測は実施されている [3–5]。市販 disdrometer に粒子形状を取得できる 2-Dimensional Video Disdrometer (2DVD) [6] があるが、非常に高価で、機器改良も困難であり、現在、粒子形状を取得できる Low-cost Laser Disdrometer (LLD) の独自開発に取り組み、機能向上を進めている [7]。部品コストは、LLD 制御に PIC32MX マイコンを利用する場合、雨滴観測用（計測幅 14 mm）LLD は約 2 万円、降雪観測用（計測幅 35 mm）は約 4 万円で製作できる。これまで、降雨に対し雨滴衝突検出型 disdrometer と、降雪に対し Parsivel laser disdrometer との比較観測による LLD 性能評価を実施している [8,9]。2014 年度は、降雪粒子の立体形状と落下速度を計測するため LLD を 4 台組み合わせさせた LLD4 を試作、2015 年 1 月 27 日から 3 月 24 日の間、北海道大学低温科学研究所において試験観測を実施した。本報告では観測結果を交え、LLD4 の概要を紹介する。

## 機器概要

LLD4 の外観および内部ラインスキャナ配置を図 1 に示す。スキャナを 45 度毎に配置、4 方向から粒子影を取得することで立体形状を計測する。シート光には高さオフセットがあり、シート光間の粒子検出時間差から落下速度を見積もる。均一性能を有すスキャナを 4 台作成するため光学モジュールの製作に 3D プリンタを使用している。図 2 に LLD4 のブロック図を示す。スキャナ光源は、半導体レーザー（波長 785 nm、25 mW）と球面レンズ（60 mm 径）を用いて幅 40 mm のシート光を生成する。受光部の Linear Photo-Diode array (LPD) には TAOS TSL210（640 素子 = 128 素子 × 5 ブロック；素子分解能 125  $\mu\text{m}$ ）を採用、うち 384 素子（3 ブロック）を利用しシート光を通過する物体の影画（モノクロ画像）を取得する。レンズ収差によりシート光は中心部は拡散傾向、端部で平行に近づく特徴を有し、平均計測分解能は



major specifications

LD power	20 mW
Light-sheet width	40 mm
Num. Photo-diode array	384
Horizontal resolution	105 $\mu$ m
Slice Rate	17.5 kHz

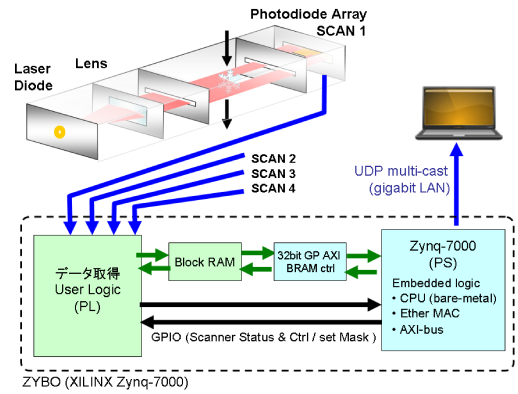
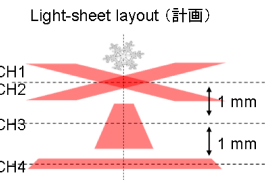


図1 LLD4 外観、スキヤナ配置、主要諸元。

図2 LLD4 ブロック図。

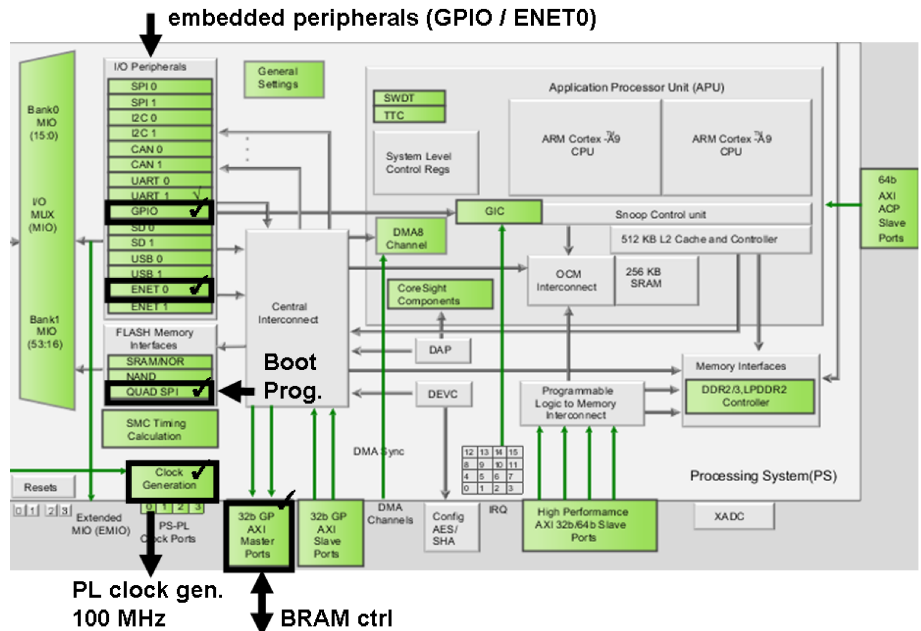


図3 Vivado Design Suite: ZYNQ IP コア組み込みロジック選択画面。

105  $\mu$ m である。LPD は高速駆動するほど感度が低下する。感度低下を補うためレーザ出力を上げると粒子が消えるため、LLD4 では 17.5 kHz の画像取得スライスレートを設定した。LPD は 128 素子のシリアル制御であり、1 スライス画像取得するために 129 クロック（素子切替 128 および計測終了 1 クロック）が必要であり、スライスレート 17.5 kHz を実現する LPD クロック速度は 2.5 MHz（感光時間 400 ns 未満）である。廉価に高速データ取得するため、LPD 出力アナログ電圧をコンパレータ比較した H/L 信号を FPGA にデジタル入力、データ I/O に 2 クロックで read/write できる Block RAM (BRAM) を利用している。

### FPGA プログラミング

LLD4 は XILINX FPGA Zynq-7000 を搭載した DIGILENT 製システムボード ZYBO を利用している。ZYBO は dual-core Cortex-A9 processor (650 MHz)、1 Gbit Etherなどを組込んだ廉価

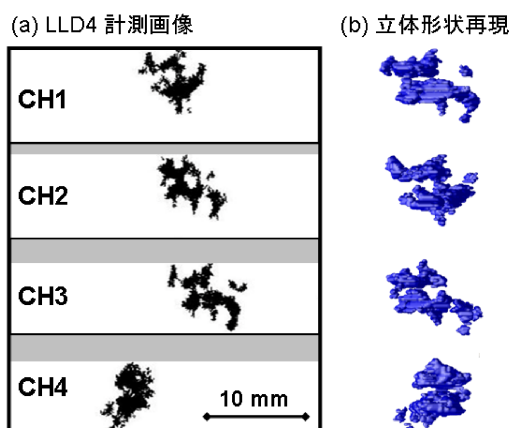


図4 LLD4 計測画像と立体形状再現の例。

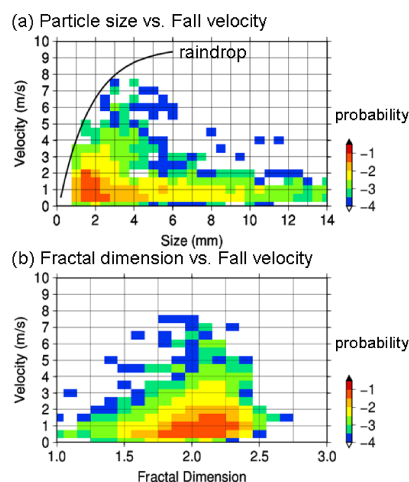


図5 (a) 粒子サイズと落下速度（サイズ：検出スキャナの平均幅； 実線：雨滴落下速度； Color：log-scale 出現頻度）。 (b) フラクタル次元と落下速度の関係。

なシステムボードであり、LAN や DDR メモリなどの利用が容易でコストパフォーマンスに優れる [10]。Zynq ファミリの開発には Vivado Design Suite [11] を無償利用でき、Embedded Processor (Cortex-A9) や Peripherals (Ether など) の利用に便利な Block Design 機能が強化されている。IP コアを Graphical User Interface で電子ブロックのように配置、IP コア間の自動結線も可能である。Processor ブロックをダブルクリックすれば利用する Peripherals が選択できる (図3)。LLD4 では GPIO、1 G Ether、user Programmable Logic (PL) と embedded Processor System (PS) で BRAM を共有するための 32 bit AXI port、PL を動かすための Clock generator、PS boot データを書き込む QUAD SPI Flash Memory の利用を選択している。Peripherals 利用の device driver (bare-metal で使用) は、回路論理合成後 (bitstream 生成後)、Vivado Design Suite からソフトウェア開発 SDK を起動時 (SDK に bitstream を export) に自動生成、サンプルコードも提供される。

## 計測能力

LLD4 計測粒子画像と立体形状再現例を図4に示す。計測画像中のグレイ部分は落下速度見積に使用する粒子検出時間差を表す。落下速度 ( $\text{m s}^{-1}$ ) は CH 毎のシート光間隔 (mm)、検出時間差に相当する空スライス (画像中グレイ部分) およびスライスレート ( $\text{s}^{-1}$ ) で定義できる。CH1 と CH2 のスキャナは同じ高さで直交計測する設計であったが、実際には 0.8 mm の間隔が存在、CH1 と CH4 の間隔は 2.5 mm であった。図5 (a) に落下速度計測結果の例を示す。

$$(\text{落下速度}) = \frac{(\text{スキャナ間のシート光間隔}) \times (\text{スライスレート})}{(\text{空スライス数})} \quad (1)$$

図4から計測画像と同方向から見た立体形状の側面図は良い一致を示し、LLD4 の立体形状再現性が確認できる。但し、影画計測では窪みを表現できないため、上下方向から見ると粒子外接多角形を積み重ねた立体再現であり、より実在形状に近づけるための計測機能増設と

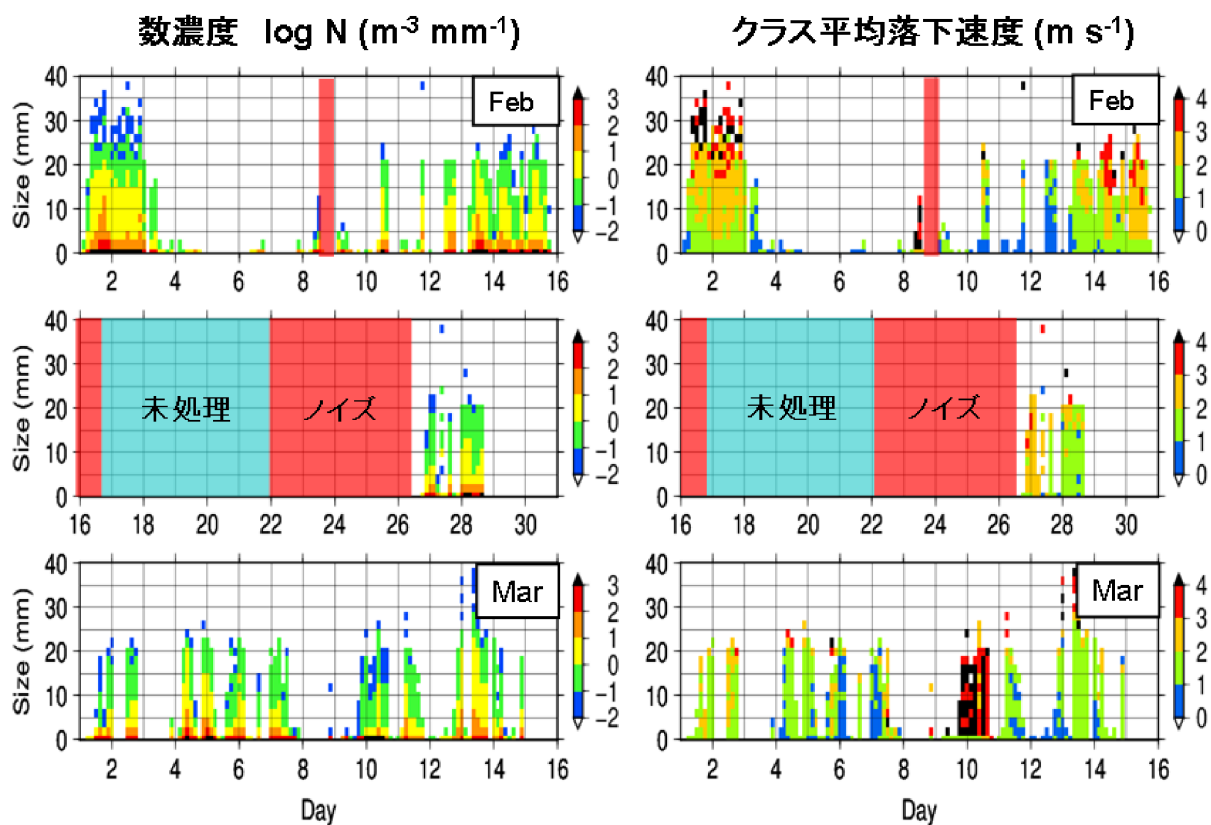


図6 粒径分布とサイズクラス平均落下速度の時系列（サイズ分類は2 mm 毎、時間分類は3 時間毎）。

アルゴリズム開発が今後の課題である。図5 (b) に、2015年3月13日の12:00–23:59に観測した再現立体形状から box-counting 法で算出したフラクタル次元  $D_f$  と落下速度の関係を示す。Color は出現割合を logscale で表す。雪片の  $D_f$  は 1.5–2.4 を示し、 $D_f$  が小さい板状粒子ほど落下速度が遅い相関があり立体形状再現性の妥当性を示唆している。立体体積の  $D_f$  は 3 までの値を取り、直線は  $D_f = 1$ 、正方形は  $D_f = 2$ 、立方体は  $D_f = 3$  を示す。評価は今後の課題であるが、図6に2015年2月1日から3月15日までの粒子粒径分布と落下速度の時間変化を、サイズ2 mm 毎、3 時間毎のクラス平均値で示す。レーザ出力低下でノイズが支配的および降水が少なかった期間は未処理となっているが、良好な結果が得られていると考える。

## おわりに

降雪粒子の立体形状と落下速度を計測する LLD4 を開発、低温科学研究所において2ヶ月間の試験運用を行い、多くの降雪事例でデータ取得することができた。本報告で結果を示していないが、立体形状計測が可能な粒子は全体の5–8%、落下速度が求まる粒子は約40%であり、全ての検出粒子に対して立体形状と落下速度を得ることはできない。全検出粒子に対して立体形状や落下速度を推定・適応する手法開発は今後の課題である。また、現在の粒子立体形状は外接多角形を鉛直方向に積み重ねた形状再現であり、実際の雪片形状からの乖離が存在する。実在形状に近づける上方からのカメラ撮影機能の増設や雪片成長の物理過程を組込んだ立体形状再現アルゴリズムの開発も今後の課題である。形状再現アルゴリズム開発

では低温科学研究所における先行研究 [12] の組込みに期待している。また、低温科学研究所の含水率計との同期観測から立体形状に誘電率を加えたデータベースを開発し、固体降水粒子のマイクロ波散乱計算技術の向上を目指している。

## 謝辞

Low-cost Laser Disdrometer (LLD) 設営および運用にあたり、多くのご支援を頂きました低温科学研究所技術部の皆様に感謝します。LLD 開発は科研費 (26400464) および北海道大学低温科学研究所共同研究 (15-43) の助成を受けている。

## 参考文献

- [1] Ishimoto, H., Radar Backscattering Computations for Fractal-Shaped Snowflakes, *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 459–469 (2008)
- [2] Nishikawa, M., K. Nakamura, Y. Fujiyoshi, K. Nakagawa, H. Hanado, H. Minda, S. Nakai, T. Kumakura, and R. Oki, Radar Attenuation and Reflectivity Measurement of Snow With Dual Ka-Band Radar, *IEEE TGRS*, doi:10.1109/TGRS.2015.2464099 (in press)
- [3] Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shina, T. Kumakura, and K. Muramoto, A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size fall speed relationship, *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 747–762 (2013)
- [4] Garrett, T.J., C. Fallgatter, K. Shkurko, and D. Howlett, Fallspeed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in freefall, *Atmos. Meas. Tech. Discuss*, **5**, 4827–4850 (2012)
- [5] Waugh, S., C. Ziegler, D. MacGorman, S. Fredrickson, D. Kennedy, and W. Rust, A Balloonborne Particle Size, Imaging, and Velocity Probe for in Situ Microphysical Measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, doi:10.1175/JTECH-D-14-00216.1 (in press)
- [6] Kruger, A., and W. F. Krajewski, Two-dimensional video disdrometer: A description, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **19**, 602–617 (2002)
- [7] Minda, H., and N. Tsuda, Low-cost laser disdrometer with capability of hydrometeor imaging, *IEEJ TEEE*, **7**, 132–138 (2012)
- [8] Minda, H., T. Makino, and N. Tsuda, Performance of a new low-cost laser disdrometer with rainfall intensity correction in heavy rainfall, *IEEJ TEEE*, **9**, 542–547 (2014)
- [9] Minda, H., T. Makino, N. Tsuda, and Y. Kaneko, Performance of a laser disdrometer with hydrometeor imaging capabilities and fall velocity estimates for snowfall, *IEEJ TEEE*, (in press)
- [10] ZYBO reference manual, DIGILENT, <http://digilentinc.com/>
- [11] Vivado Design Suite ユーザーガイド, XILINX, <http://www.xilinx.com/>
- [12] Maruyama, K., and Y. Fujiyohsi, Monte Carlo Simulation of the Formation of Snowflakes, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1529–1543 (2005)



# 葉緑体タンパク質 LIL8 の機能

加藤 由佳子<sup>1</sup>、千貝 健<sup>1</sup>、森 章一<sup>1</sup>、  
横野 牧生<sup>2</sup>、高林 厚史<sup>2</sup>、田中 歩<sup>2</sup>、田中 亮一<sup>2</sup>

1. 技術部先端技術支援室
2. 生物環境部門生物適応分野

## はじめに

植物は光合成によって光エネルギーから生命を維持するのに必要なエネルギーを得ている。光合成は大きく分けて、光を受けて化学エネルギーに変換する光化学反応と、生じた化学エネルギーを用いて二酸化炭素と水から糖を作るカルビン回路からなる。光合成には多くのタンパク質が関与する。複合体の組み立て、集光、反応の触媒など、様々なタンパク質が働く複雑な機構によって光合成は成り立っている。光化学反応では光化学系 II と光化学系 I の主に 2 つのタンパク質が中心となって働く。

光合成は光が当たらなければ反応が始まらないが、使い切れない光は、タンパク質を壊し、活性酸素を発生させ、植物の生命に打撃を与えることが知られている。光化学系タンパク質が障害を受けた場合、光化学系 II は修復機構を持っているが、光化学系 I は修復することができず、破壊されたタンパク質は新たに作ることになり、時間的にもコスト的にも損害が大きい。そこで、植物は、光化学系の上流に位置する光化学系 II が、周辺のアンテナの働きをするタンパク質を調整するなどの方法で、過剰な光エネルギーから自身を守っている。特に、低温条件下では、光エネルギーを使い切れないので、強光障害を受けやすく、それらの働きは重要である。

前回の技術報告では、植物が光障害を避けるために持つ機構の一つであるステート遷移に関する実験を紹介した。その実験で 15 分間ごとの光の変化による植物の反応を見たが、今回はそれよりもさらに短い間隔で変化する光条件（間欠照明条件）での実験を行った。ごく短時間の弱光条件を挟んで繰り返し強光が当たると、植物は光化学系 II のアンテナの働きの調節が間に合わず、光化学系 I が大きなダメージを受けることになると予想される。しかし、実際には、植物はそのダメージを避けるための機構も持っており、光化学系 I は光化学系 II に比べて壊れにくくなっている。さらに、例えば PGR5 と呼ばれるタンパク質のように光化学系 I を守るタンパク質も存在する。

これまで研究に用いてきた変異株が、間欠照明条件にどのように応答するのか。技術部で製作した装置の紹介も含めて報告する。

## 実験に使用した植物と研究の背景

実験には LIL8 と呼ばれるタンパク質をコードする遺伝子に変異をもつシロイヌナズナの変異体を用いた。アメリカの種子ストックセンター（ABRC）から取り寄せた 2 つの変異体をそれぞれ *lil8-1* と *lil8-2* と呼ぶ。また、イギリスの種子ストックセンター（NASC）から取り寄せた変異体を *psb33-3* と呼ぶ。実験にはこれら 3 種類の変異体と野

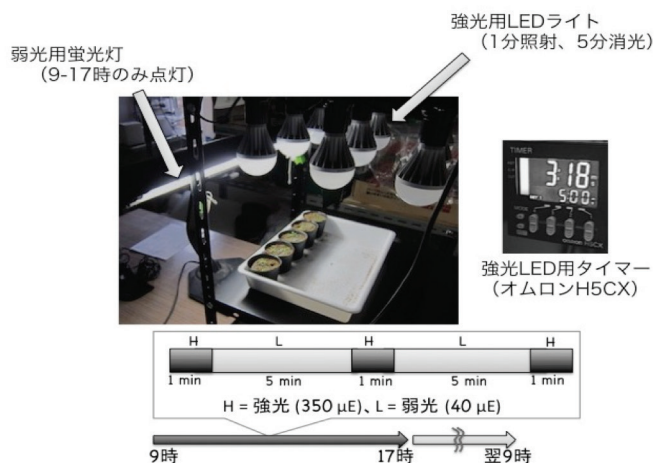


図 1 間欠照明装置。

生型 (WT) を用いた。また、光合成でのプロトン勾配を制御する PGR5 というタンパク質が欠損した *pgr5* をコントロールとして用いた。LIL8 の 3 つの変異株と野生型で成長過程における外見上の違いは見られない。

LIL8 に関する実験については 2012 年度以降の技術報告 (加藤ら 2012、2013、2014) でも報告している。これまで LIL8 欠損株では野生株に比べて強光条件に弱いことがわかっている。一方で、昨年度の報告にあるように、15 分毎の環境変化への応答については野生株と比べて著しく劣ることはなかったが、その応答の様子については野生株と異なっていた。

## 間欠照明装置

間欠照明装置は技術部で製作した。研究者と技術職員とで様々なアイデアを出し合ったが、最終的には以前に技術部で製作した LED 照明装置 (9.4 W の LED15 個取り付け型) にツインタイマー (オムロン H5CX) を付け、別に弱光用の蛍光灯を 24 時間タイマーで制御するというシンプルなものとなった (図 1)。これらの照明装置を購入すると、数万円の費用がかかることから考えて、かなり予算を縮減できた。

今回の実験の間欠照明条件は Marjaana S. *et al.* (2012) を参考にした。9 時から 17 時までの間、弱光 ( $40 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) を 5 分照射した後にそれに加えて LED 照明 ( $310 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) を 1 分照射することを繰り返した。白熱電球を利用する場合は 5 分後消灯しても電球は熱を帯びたまま再び点灯することになり、電球に負荷がかかるが、LED 電球を利用すれば、発熱による影響が少ないので、LED 照明を用いることにした。弱光用の蛍光灯は 24 時間タイマーで 9 時から 17 時まで点灯を維持し、強光用の LED 照明をツインタイマーで ON/OFF を設定した。17 時から翌朝 9 時までは 24 時間タイマーで消灯した。

## 間欠照明装置を用いた栽培結果

播種後約 4 週間通常光 (約  $50 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 14 時間明期 / 10 時間暗期) で栽培した野生型、*lil8-1*、*lil8-2*、*psb33-3*、間欠照明感受型の *pgr5* の 5 種の植物を、

間欠照明装置の下で栽培した。2週間ほどの栽培で、感受型の *pgr5* では、植物が枯れてしまったが、野生型は変化がなかった (図 2)。LIL8 欠損の 3 つの変異体では、*pgr5* ほどの障害は見られなかったが、*lil8-1* ではわずかだが野生型に比べて障害を受けているようだった。また、その葉のクロロフィル蛍光を測定したところ、野生型に比べて、*lil8-1* では、光合成活性の指標となる Fv/Fm の低下が見られた。

今回の実験結果より、感受性株である *pgr5* が強く障害を受け、野生型では影響がなかったことから、実験装置は有効に使用できることがわかった。一方で LIL8 の欠損株で受ける障害はそれほど大きくなく、前回の技術報告で報告した 15 分間隔での環境変化に対する応答と合わせて、LIL8 欠損株では環境応答に関する致命的な影響は受けないようであった。

これまでの実験結果から、LIL8 の持つ機能は、植物において必須ではなく、補助的な役割を担う、もしくは同じ機能を担う代替タンパク質が存在することが示唆される。しかしながら、光化学系のアンテナサイズの制御への関与も示唆され、LIL8 の機能の解明は、光合成反応の理解を深めるために有用であると考えられる。他の実験結果とも合わせて、まだ解明されていない LIL8 の機能について、明らかにしていきたい。

## 参考文献

Marjaana S. *et al.*, 2012. PROTON GRADIENT REGULATION 5 Is Essential for Proper Acclimation of *Arabidopsis* Photosystem I to Naturally and Artificially Fluctuating Light Conditions. *The Plant Cell* 24, 2934–3948.

加藤 由佳子、田中 亮一、高林 厚史、田中 歩 「葉緑体新規タンパク質 LIL8 の解析」北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**18**、1–4、2012 年 12 月。

加藤 由佳子、岸本 純子、横野 牧生、高林 厚史、田中 歩、田中 亮一 「葉緑体タンパク質 LIL8 欠損株の光合成」北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**19**、1–4、2013 年 12 月。

加藤 由佳子、千貝 健、森 章一、横野 牧生、高林 厚史、田中 歩、田中 亮一 「葉緑体タンパク質 LIL8 欠損株の光合成と機能」北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**20**、9–12、2014 年 12 月。

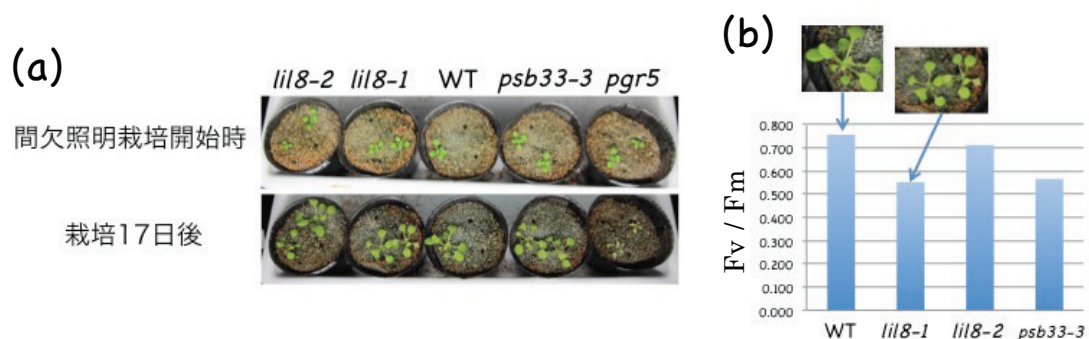


図 2 間欠照明による栽培の結果。(a) 間欠照明条件で 17 日栽培したシロイヌナズナ。(b) クロロフィル蛍光 (Fv/Fm) の測定結果。

# 母子里自動気象観測システム ～組み込み Wi-Fi モジュールによるデータ伝送の試み～

高塚 徹<sup>1</sup>、千貝 健<sup>1</sup>、森 章一<sup>1</sup>、小野 数也<sup>1</sup>、石井 吉之<sup>2</sup>

1. 技術部先端技術支援室
2. 水・物質循環部門水文気象分野

## はじめに

先端技術支援室では幌加内町母子里融雪観測室に設置されている自動気象観測システム（図 1、図 2）を保守・管理している。2014 年 4 月、老朽化した放射収支計とデータロガーの更新依頼を受け、4 成分放射収支計（図 3：Kipp & Zonen CNR1）とデータロガー（CAMPBELL CR10X）に取り替えた。この CR10X はデータ保存容量をオーバーすると上書きしてしまうため、定期的に現地まで行ってデータ回収を行わなければならない。そのため、CR10X から観測室内の PC に観測データを無線で送ることを提案した。この提案により、インターネット回線を経由して、観測データを所内に持ってくることを可能にした。本稿では、この観測データの無線伝送の概要について報告する。

## 経緯

実際に母子里の露場でテストをする前に、2014 年春から所内で通信テストを行い、問題はないことを確認した。2014 年 11 月露場にて、テスト用の風向風速計・温湿度計（図 4）を設置し、観測室内への無線伝送の現場テストを開始した。2015 年 10 月現在、観測室の PC の故障があったが、それ以外で大きな伝送テストのトラブルはなかった。そこで、同無線伝送システムを 4 成分放射収支計のデータ収集に導入した。



図 1 母子里露場。



図 2 観測室内。



図 3 4成分放射收支計。



図 4 風向風速計・温湿度計。

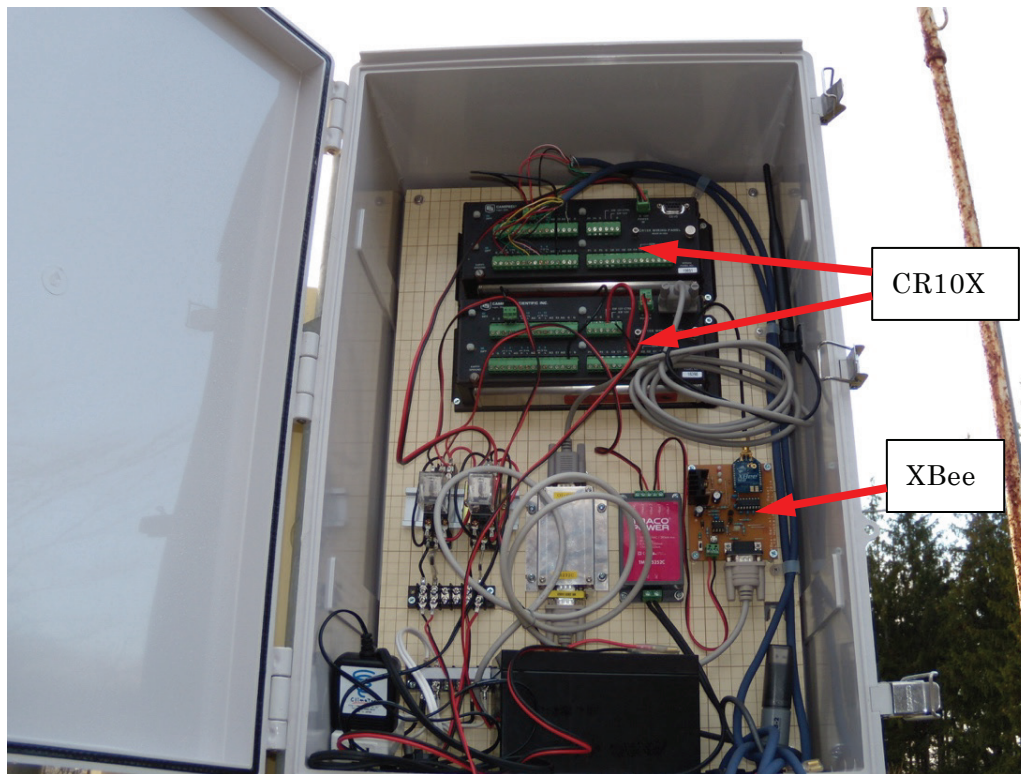


図 5 計測ボックス内に収められている XBee と CR10X と動作電源。

## 無線伝送システム

無線伝送システムは、4成分放射收支計（図 3）と風向風速計・温湿度計（図 4）、計測ボックス内に収められている組込み Wi-Fi モジュール（Digi XBee Wi-Fi S6B、以後 XBee）、CR10X と動作電源（図 5）および観測室内の無線 LAN ブリッジ（アクセスポイント）と PC（図 2）から構成されている。図 6 に無線伝送システムの概略を示す。

風向風速計・温湿度計と4成分放射収支計のデータはそれぞれのCR10Xに10分毎に記録される。観測室内のPC上のデータ回収アプリケーションが、スケジュールに従ってCR10Xからデータを回収し保存する。保存されたデータは自動的に所内へ送られ、いつでも確認できる。CR10XとXBeeの動作電源は観測室から送られてくるAC100VをACアダプターでそれぞれに必要なDC電圧に変換される。CR10Xは外部電源(DC12V)に依存しているため停電があると動作が止まりデータの記録が出来ない。その対策としてリレーを使い停電時には電源は12V7.2Ahバッテリーに切り替わり、復電すると電源はAC100V/DC12Vに切り替わる仕組みにした。XBee自体はPCに設置してある無電電源装置のような停電対策まではしていないが、復電すると自動復旧する。

## おわりに

今回使用したXBeeは送信出力が約40mW、見通しが良ければ電波は100m程度先まで届く。アクセスポイントを中心に半径100mの範囲で無線による伝送が可能であると思われる。今後は、AC100Vが確保できない場所で無電伝送を行うことを想定し、ソーラーパネルなどを導入したシステムを検討していきたい。

また露場には、今回設置した風向風速計・温湿度計以外に、既設の風向風速計と温湿度計も設置されている。これにも古いデータロガーをCR10Xに取り換える依頼もあるが、この伝送システムを導入するかも含め、現在準備中である。

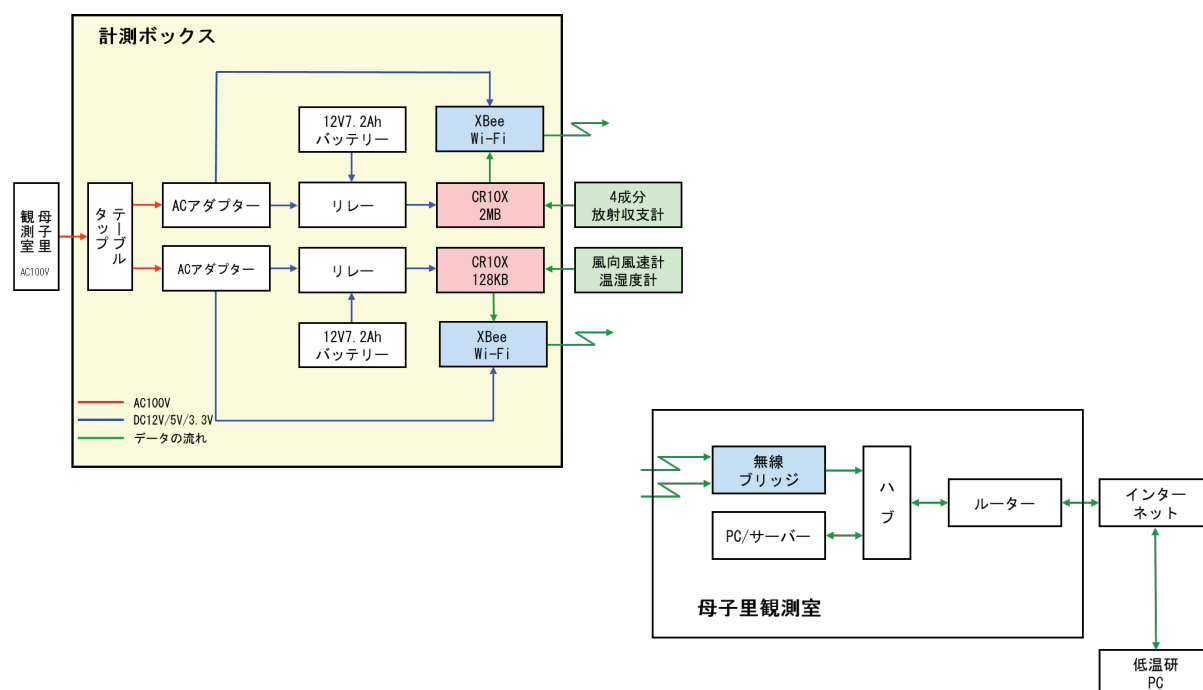


図6 無線伝送システムを含んだ観測データの通信経路。赤線はAC100V、青線はDC12V/5V/3.3V、緑線はデータの流れを示す。

# 氷床掘削孔検層器の製作

森 章一<sup>1</sup>、新堀 邦夫<sup>2</sup>、的場 澄人<sup>3</sup>、本山 秀明<sup>4</sup>

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

## 1. はじめに

数万年から数百年間の気温や環境の変化を復元するために、南極やグリーンランドの氷床からアイスコアが採取されている。また、アイスコアを採取した後の掘削孔を利用して氷床内の様々な要素を測定すれば、アイスコア解析から得られない環境情報を得ることができる。この掘削孔を用いた観測は検層と呼ばれ、そのための測器を検層器と呼ばれている。南極では、これまでいくつかの検層器によって検層が行われてきたが、様々な不良が生じ、十分なデータが得られなかった。本稿では、新たな製作した検層器の詳細について報告する。

## 2. 検層器の製作

### 2.1. 検層器デザインのコンセプト

今回製作した検層器は、今年12月に出発した第57次南極地域観測隊にて氷床沿岸部（H128地点）で行われる中層（300mから500m深まで）アイスコア掘削後の検層観測に用いられる。検層項目は、掘削孔気温、掘削孔径、傾斜である。ドームふじコア深層掘削では掘削孔が収縮するのを防ぐために掘削孔に液封液が注入されるが、今回の掘削では液封液を使わないため、検層器に防水、耐水圧の機能は必要ない。また、これまでの検層器では測定データをケーブルで電送し地上でモニターと記録をしていたが、電送に伴う不良を避けるため、検層器内でデータロガーにデータを記録する方式を採用した。

### 2.2. 掘削孔気温測定

氷床の氷体温度の分布は過去の気温変化を反映しており、掘削孔の温度分布から過去の気温の変化を復元することができる。そのためには $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ の測定精度が求められる。また、検層器を上昇下降させながら測定するため、短時間での温度計測応答も求められる。このような条件を満たすため、センサー形状、センサー取り付け方法の改良を行った。

本温度測定回路の大きな特徴として、温度センサーはもとより温度測定回路そのものの温度が大きく変化する。このことは精密測定を行う上で大変過酷な条件であり、測定回路を設計する際に最も留意した点である。

回路上重要な箇所は徹底的に温度依存性を排除した部品を選定し、回路構造も原理的に温度依存が小さくなるように設計した。基本的な測定原理は定電流を PT100 に流し、かかる電圧の変化を温度変化として測定する単純な方式である。よって回路構成は①定電流回路、②信号増幅回路および出力バッファとなる（図 1）。

### ① 定電流回路

基準となるリファレンス電圧には $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温環境下でも誤差の少ない基準電圧 IC である REF192 を使用した。今回の回路では PT100 の発熱による誤差と出力電圧のバランスから  $50\text{ }\mu\text{A}$  の定電流回路とした。この定電流回路により PT100 の消費電力は  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  で  $0.25\text{ }\mu\text{W}$  となり発熱による誤差はほぼ無視できる。そしてセンサーからは約  $19.5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  の電圧変化が得られる。

### ② 信号増幅回路

PT100 に繋がる定電流回路と並行して、同じ構成の定電流回路を温度係数  $1\text{ ppm}$  以下の  $100\text{ }\Omega$  基準抵抗に接続する。PT100 と基準抵抗から得られる 2 つの電圧を低ノイズ低ドリフトのデュアルオペアンプ ADA8245-2 の各回路で受け、差動信号とする。

次にこの差動信号を受ける電圧増幅段、それに続く最終段の出力バッファについても ADA8245-2 を使用し、基本的な回路構造を 2 入力 2 出力型の差動増幅回路とした。この回路構造によってオペアンプの温度ドリフトによる測定値変化を最小限に抑えられる。

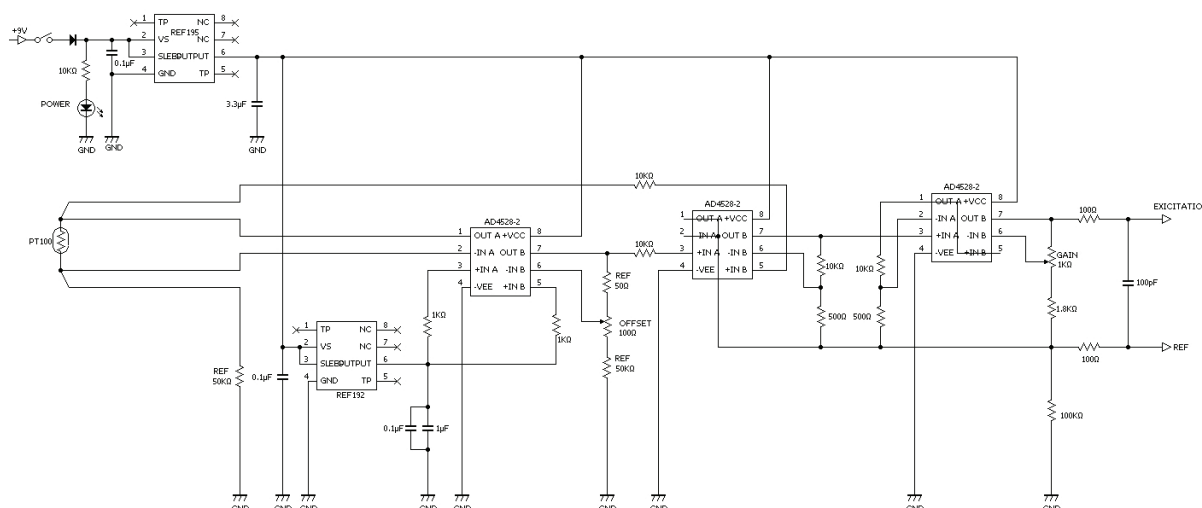


図 1 PT100 温度測定回路。



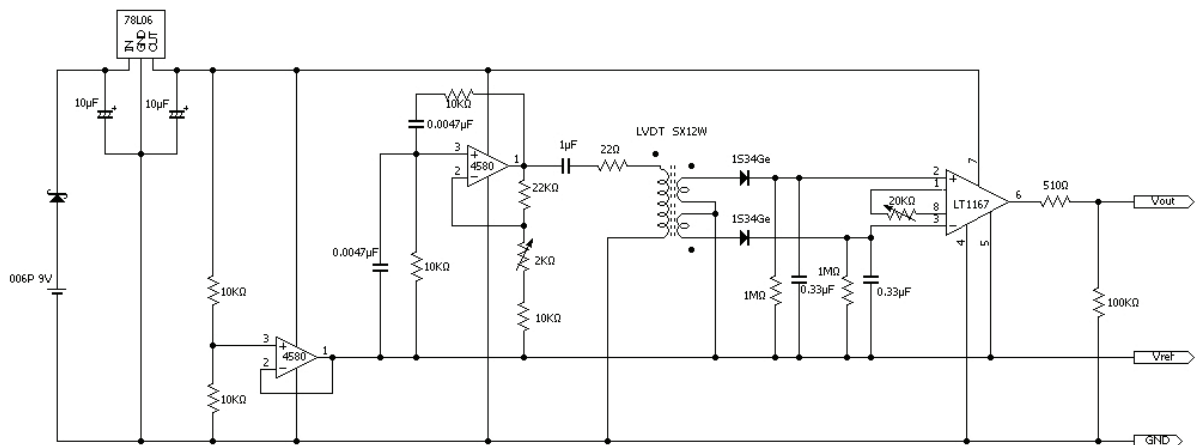


図 2 差動トランス孔径計測回路。

### 2.3. 孔径センサー

掘削後の掘削孔の変形、収縮から、掘削地点周辺の氷床の流動場に関する情報を得ることができる。掘削孔径は、掘削機から外側に張り出した 3 本の L 字アームの伸縮距離を差動トランスで計測し、孔径を算出する。孔径センサーには耐食性と物理的な強度を考慮して差動トランスを採用した。そのため計測に当たってはインバーター型の計測回路が必要となる。差動トランスによる計測原理は、トランスにおいてトランスコアの位置が変化すると、1 次コイルと 2 次コイルの電磁的な結合度合いが変化し、2 次コイルに発生する起電力が変化する性質を利用したものである。

この原理を利用するための回路構成は、信号源となる 1 次コイル側の①発振回路と、起電力変化を直流電圧変化として取り出す 2 次コイル側の②検波整流回路および増幅回路となる (図 2)。

#### ① 発振回路

計測原理から、トランス結合の自然な出力を得るためには正弦波が最適である。正弦波発振回路は古典的な RC 発振回路、周波数は差動トランスの特性データより約 2 kHz とした。

#### ② 検波整流回路

検波に用いるダイオードは不感帯を小さくするために、しきい電圧が低い方がよい。基板の大きさに制約があるため理想ダイオード回路を入れる事はできず、各種ダイオードで試験した。検波出力はブリッジアンプで受けるため入力電流が非常に小さい。当初ショットキーバリアダイオードを試したが、漏れ電流の影響で微小電流では整流特性が良くない。最終的には古くから検波に使われてきたゲルマニウムダイオードの整流特性が最も良かった。微小電流ではゲルマニウムダイオードの不感帯が問題になることがなく、ほぼリニアな整流特性が得られる。検波信号は平滑回路とバッファを通して外部に出力される。

## 2.4. 掘削孔傾斜

掘削孔の傾斜からは、氷体の物理的な性質や掘削地点周辺の氷床の流動場に関する情報を得ることができる。掘削孔の傾斜は、市販の傾斜計（Turck Inc., USA）を検層器に固定して測定する。計測データは、傾斜計内部のデータロガーに記録される。

## 2.5. データロガー

データの記録は、データロガー（T&D社製電圧データロガー MCR-4V、4チャンネル）にて行った。温度計2センサー、掘削孔径にそれぞれ1台ずつ使用した。ロガーは検層器内部に固定し、それぞれのセンサーから発信される電圧の変化を1Hzで記録した。

## 3. 問題点と改良点

カタログ上で保証されたデータロガー自体の使用温度は0℃から50℃であり、実際に南極で使用する場合は、これを大きく下回る。このことはロガーに記録された電圧データ自体の信用に関わる可能性がある。この問題点の改良するためには、ロガー内部にあるAD変換部で参照される基準電圧の温度依存性を無くす必要があり、ロガーの回路の大幅な変更が必要となる。

また、検層器によって掘削孔温度を測定するときは、検層器の筐体自体の温度が影響を与える。特に掘削孔壁にセンサーを接触させて測定する場合は、センサーを固定する部分から温度がセンサーに伝わってしまう。現在、筐体からの影響を完全に排除くアイデアが見つかっていない。

今回、製作した検層器での計測は2015年12月から2016年1月に南極氷床で行われる。今後は、その結果を踏まえた改良と新型深層掘削孔用の検層器の設計を行う予定である。

# グリーンランド氷床南東ドーム掘削

的場 澄人<sup>1</sup>、飯塚 芳徳<sup>2</sup>、新堀 邦夫<sup>3</sup>

1. 環オホーツク観測研究センター
2. 雪氷新領域部門氷河・氷床分野
3. 技術部装置開発室

## 1 観測の目的

人間活動に伴って放出される硝酸や硫酸などの大気汚染物質の濃度と組成の変化を産業革命初期まで遡って復元することと、グリーンランド氷床高涵養域のドーム地形における雪から氷への変態過程とそのときの氷物性の特徴を明らかにすることを目的に2015年5-6月に、グリーンランド氷床南東部の氷床ドーム標高3100m地点において約90m長の浅層コアを採取した(図1)。グリーンランド氷床南東部は、アイスランド低気圧の強い影響下にあり、グリーンランド氷床全体の平均の年間涵養量(約 $30 \text{ g cm}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )に比べて高涵養( $90 \text{ g cm}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 程度)で、一年間の季節配分では冬の涵養が大きいことが特徴である。この地域で採取されるアイスコアからは、北大西洋振動(NAO)の影響、ヨーロッパ起源の人為起源物質の変化が高時間分解能で復元されることが期待できる。

## 2 掘削機

本観測で使用した掘削機は、アラスカ州ランゲル山山頂氷河での掘削のために2003年に技術部装置開発室で作製されたDokodemo Drill IIである(図2)。山岳地域で掘削する場合、観測資材の輸送手段がヘリコプター、ヤク、人などであるため、資材の大きさ、重量、個数などをなるべく小さくする必要がある。この掘削機は、従来の掘削機が採用しているダブルジャケットタイプではなくシングルバレル方式を採用して軽量化し、バレルをチップ室とコア収納室とに分割させ、また輸送のためのケースを掘削マストに利用して輸送時の梱包形態がコンパクトにデザインされている。

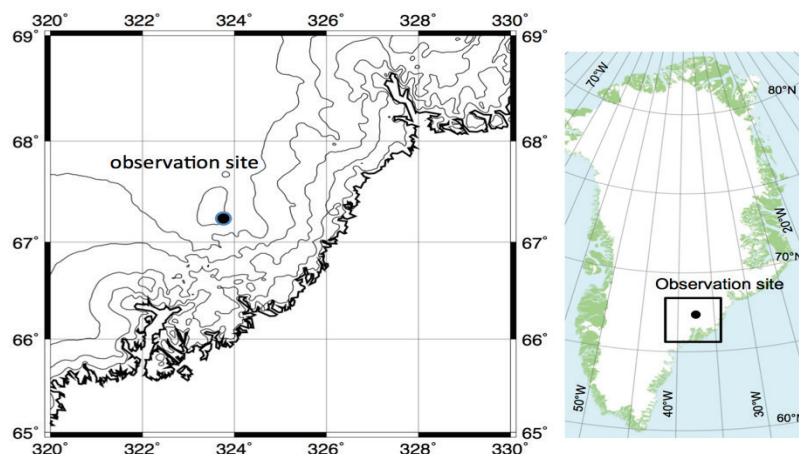


図1 観測場所。



図 2 使用した掘削機。

### 3 観測オペレーション

観測は、2015年5月から6月に行った。5月6日に日本からアイスランドを經由して観測の拠点となるグリーンランド南東部の町、タシーラクに到着した。タシーラクで食料や資材の調達などの準備を行い、天候の回復を待って18日と21日の二日に分けて、ヘリコプター2便で観測地点に人と資材を輸送した。掘削を含む観測を5月27日まで行い、その後、天候の回復を待ち、6月2日にタシーラクに戻った。6月4日に資材の回収のためのフライトを1便行った。採取したアイスコア、資材はタシーラクから船便で送り、8月24日に低温研に到着した。

### 4 掘削オペレーションとトラブル

掘削は5月22日から27日に行った。一日あたりの掘削深度は、16.8m(22日)、24.7m(23日)、20.1m(24日)、12.9m(25日)、15.5m(26日)、0.5m(27日)だった。27日は、その日の夕方まで掘削してこの観測の掘削を終了させる予定だったが、最初の掘削中にウィンチがキンクするトラブルが生じ、キンクを何度か繰り返している間にケーブル内の電線が断線してしまい、0.5mしか掘削できずに終了した。キンクは掘削機をつり下げる部分の中でネジが外れ、よりもどしのベアリングが回らなくなったことが原因だと後に分かった。掘削機の刃のピッチ(1回転の切削で進む距離)は7mmで開始し、切削中に刃が滑るのを感じた時に、5mm(65.6m以深)、4mm(70.3m以深)と少なくしていった。ピッチを少なくしていくに従い、掘削されたアイスコアの直径が91mmから89mmへと短くなっていった。ほぼすべての掘削作業において、コンスタントに50cm長で割ることがない品質の高いアイスコアが採取できた。発電機は、燃料噴出ノズルの孔径が小さい高所用に調整したものをを用いた。強い吹雪の時に細かな雪粒が発電機の内部に吹き込んだため不調になることがあった。

# 電荷計の開発と観測結果

大井 正行<sup>1,4</sup>、新堀 邦夫<sup>2</sup>、森 章一<sup>3</sup>、藤吉 康志<sup>4</sup>

1. (株)ジェイ・ツー
2. 技術部装置開発室
3. 技術部先端技術支援室
4. 水・物質循環部門雲科学分野

## 1 はじめに

近年、豪雨・豪雪の規模が顕著に大きくなっている傾向があり、それに伴い気象災害も大きくなっている。これら災害の原因となる気象現象の一部をより詳細に知るために、高性能かつランニングコストが低廉な気象観測用の測器の開発が必要である。

このたび開発したのは地上観測用の電荷計であり、雨滴や雪片の帯電機構を調べるためのものである。雨滴や雪片は雨滴の分裂、雪片の融解、摩擦などにより帯電する。もとより地上観測だけに頼って雲の中の電荷分布を定量的に扱うことは難しい。しかし、地上では低コストで常時観測が可能であり、またゾンデによる観測に比べて重量の制限がないため優位な検出装置の導入ができる。したがって微弱な電荷から高電圧に帯電した電荷までの測定を可能とした。本装置による観測によって、これまでに 1,000 ボルトを超えて帯電した雨滴や雪片が観測されている。

## 2 電荷計（誘導電荷検出器）の基本原理

図 1 の中心にある正電荷が  $+Q$  の電荷量を持つとすると、これを打ち消すために、導体の内側の表面には  $-Q$  の電荷が誘導されたことになる。この導体が接地されていない場合、電荷量保存の法則から、導体の外側面には  $+Q$  の電荷が分布する。実際に使用した検出用の電極は、図 2 に示すように円筒状に加工した銅製の電極（以後 Ring と呼ぶ）を使用しており、内側とそれを保持する外側の Ring から構成され、内側の Ring は外側と 4 本のテフロン棒によって保持され宙に浮いた状態にある。その中で電荷を持ったイオンが通過する時に誘導される電荷量（電荷密度）を検出する。

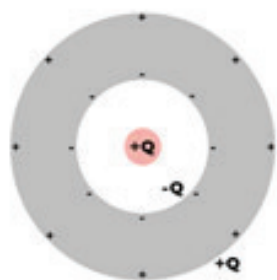


図 1 導体球に誘導される電荷の分布（接地なし）。

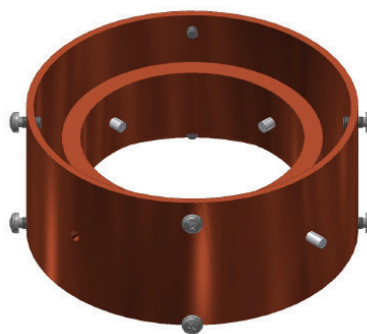


図 2 検出電極（Ring）内側の Ring。  
内径：60 mm、長さ：20 mm。

### 3 電荷計の主な仕様および構成

本電荷計の主な仕様を以下に示す。また、構成図を図 3 に示す。

- ・ 雨滴・雪片に帯電した印加電圧の測定範囲：±10 から±1500 V
- ・ 電圧記録の分解能：12 bit (±10 V の範囲)
- ・ サンプルング時間：1/100 秒 (100 Hz)
- ・ 記録時間：PC が有する HDD の残容量 (1 週間以上可能)

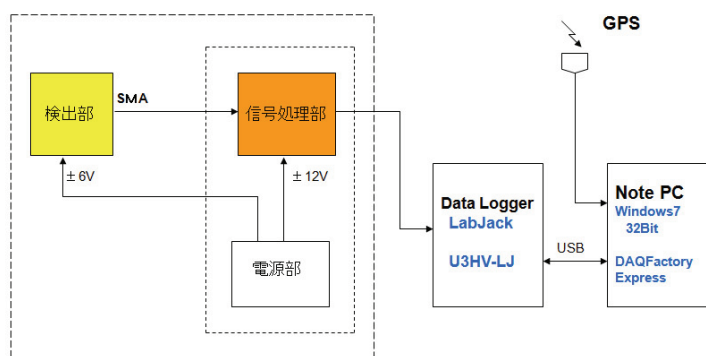


図 3 構成図。

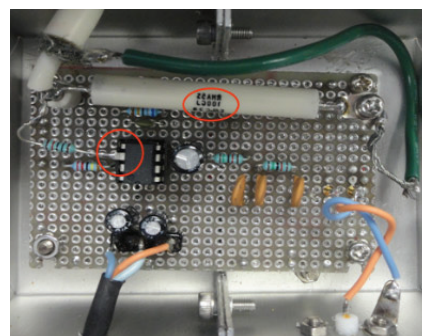


図 4 プリアンプの実体写真。写真中央が特殊高抵抗器。

図 3 から検出部は、Ring とプリアンプから成っており、ここでは Ring を通過するイオンの電荷によって引き起こされる誘導電荷を、図 4 の超高入力インピーダンスのプリアンプによって電圧に変換して出力される。採用したプリアンプは、実験結果から山口大学農学部、資源環境科学科、鈴木研究室から提供された回路図と特殊な高抵抗器 ( $10^{13} \Omega$ ) を採用した。

検出部は、本電荷計の性能を決める上で重要な部分である。このため、Ring 周辺の機械的な構造を十分検討し、Ring の上下 2 箇所には長さ 80 mm の静電シールド用の円筒を配置して微弱な電荷の検出を可能とした。

次の信号処理部では、入力された電圧信号を正または負に分離した後、微弱な電圧から高電圧までを受け入れるため対数アンプを採用して微弱信号の測定精度を向上させた。データの記録は、データ値と同時にその時刻も記録する必要があるため、データロガー Lab Jack U3HV-LJ と簡易型の GPS を採用した。

本ロガーは PC とペアーで利用するものであり、そのソフトウェア DAQ Factory Express はデータ毎の時刻記録およびリアルタイム・モニターの機能が特に優れているので、常時観測時刻に対応したデータを容易にモニターできる。

### 4 信号処理部

信号処理部は全てプロトタイプのアナログ回路で構成した。

#### 4 - 1 構成図

図 5 は信号処理部の構成図であり、その特色を以下に示す。

- (a) 反転型の半波整流回路によってプラス、マイナス信号経路に振り分ける  
 検出部からの電圧信号は、プラスまたはマイナスの何れかが入力されるので、  
 プラス信号経路側は反転型の、一方マイナス信号経路側は非反転型の増幅器に  
 より極性を整えた後、双方の経路共に入力にはマイナス信号だけがプラス信号  
 で出力される反転型の半波整流回路によって上下 2 つの経路に振り分けられる。
- (b) 対数アンプ  
 反転型の半波整流回路からの出力信号は、双方の経路共に + 電圧信号で対数ア  
 ンプへ入力される。水滴に帯電される印加電圧が  $\pm 10\text{ V}$  から  $\pm 1500\text{ V}$  までダイ  
 ナミックレンジが広い対数アンプモジュール（(株)日本オーディオ社の  
 LGA-2）を利用して測定範囲を広げた。

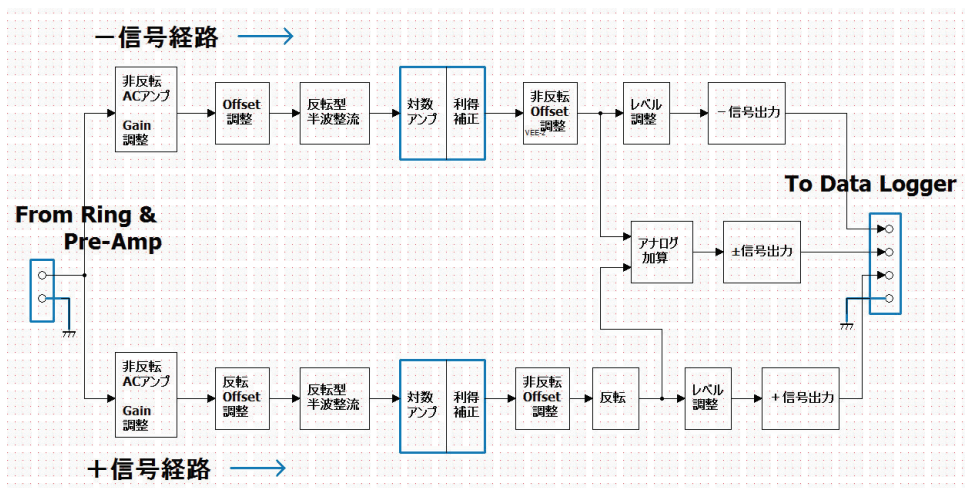


図 5 信号処理部の構成図。

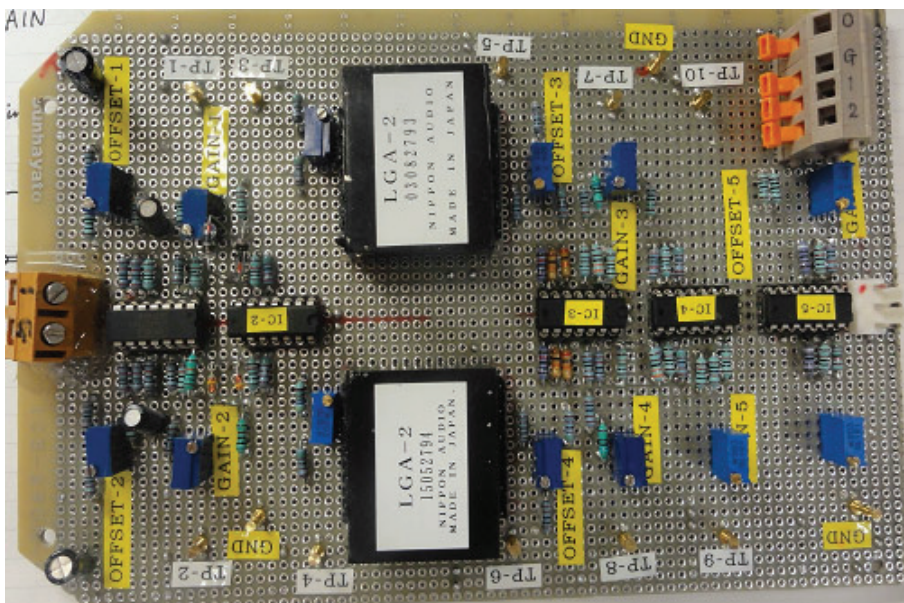


図 6 信号処理部の基板。

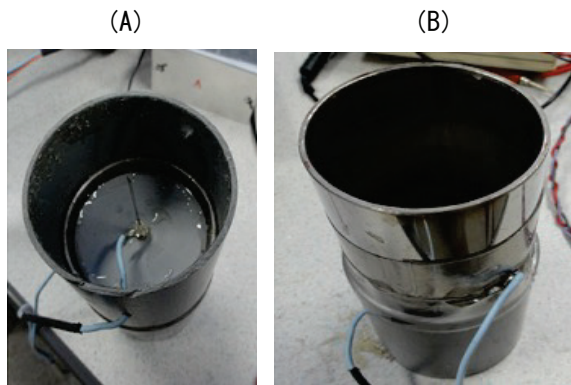


図7 校正用の水滴発生器。

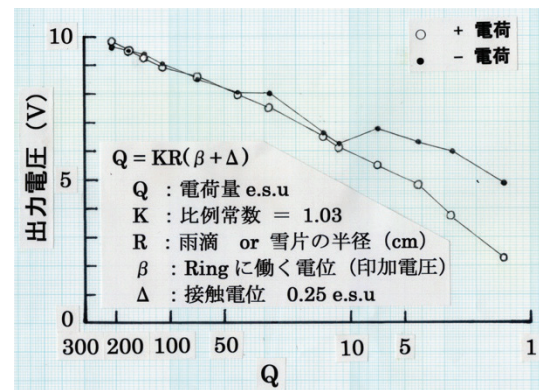


図8 校正図(水滴の直径:2.74 mm による)。

#### 4 - 2 信号処理部の基板 (プロトタイプ)

図6はユニバーサル基板を利用したプロトタイプの信号処理部であり、アクティブな素子としてOPアンプOPA4277を1個、TL074を4個、対数アンプLGA-2を2個使用した。なお実際の回路図は、紙面の都合で省略した。

#### 5 電荷計の校正

本装置の校正は、校正用の水滴発生器を製作して行った。図7の写真(A)が注射針を利用した水滴発生器であり、これを逆さにして同図写真(B)のようにここに蒸留水を貯め、注射針からはその径が既知の水滴を1秒以下の間隔で落下させる。ここで使用した注射針からは直径2.74 mmの水滴が発生した。注射針と水を貯める金属製の器は絶縁されており、双方の間にプラスとマイナスのDC10-1500Vの電圧を印加することにより、それに応じて帯電した水滴がRing内を落下する。この方法によって、帯電量に対応した出力電圧(V)が得られる。なお、水滴の径は後述する2DVD(2 Dimensional Video Distro-meter)装置で測定した。

#### 6 観測データの出力電圧から電荷量Qを求める

電荷量 $Q$ は、 $Q = KR(\beta + \Delta)$ で計算できる。ここで、 $K$ 、 $\Delta$ は定数、校正時の雨滴の半径 $R$ は $2.74(\text{mm}) \div 2$ で一定、残る印加電圧 $\beta$ (V)は、上述の校正值を利用する。この結果、図8の校正図から、観測によって出力電圧(V)がわかればその時の雨滴・雪片の径に関係なく $Q$ を求めることができる。ここで $K$ および $\Delta$ は、それぞれ比例定数1.03および接触電位0.25である。

#### 7 電荷計の設置および観測例

図9は本装置を2DVD装置の光学センサー部の下に設置した例である。2DVDとはX、Y方向から照射された光ビームを2台のCCDカメラによって落下する雨滴・雪片が光ビームを通過する際の画像信号をシルエットとして取り込む。データは降水強度、粒径分布、大きさ/落下速度、扁平率が測定できる。

両測器による同時観測によって、電荷計の検出部を通過する雨滴・雪片のデータがより詳しくわかるため、解析に役立てられるものと考えられる。



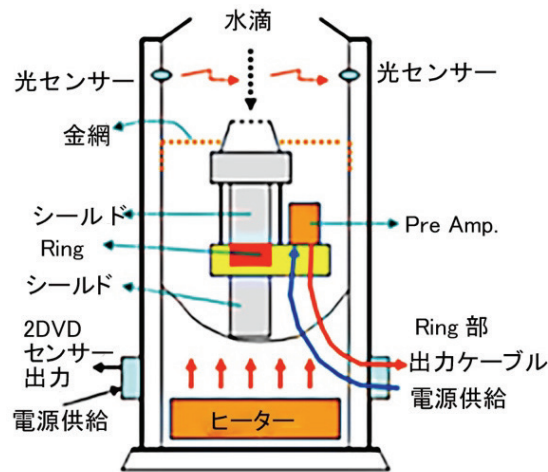


図9 2DVD 装置センサー部の下に接地した電荷計の検出部。

## 8 観測されたデータの一部

図10(A)は、本電荷計によって観測された降雨のデータのうち、2015年10月13日14時53分から15時21分までの記録である。15時15分44秒に $-10\text{V}$ 近くに達している箇所がある。この時間帯14秒間を拡大して見ると(図10(B))、出力信号が $-9.8\text{V}$ に達していることがわかる。図8の校正図から、雨滴の径が比較的大きかったとしても、 $-1000\text{V}$ を越えて帯電した雨滴があり、さらにマイナス電荷の降雨が多いことを示している。

## 9 おわりに

本電荷計による記録から、 $1000\text{V}$ 以上に帯電した雨滴が観測されている。今後の課題は、上下に設置した2種類の測定器のセンサー部をほぼ同時刻に通過した同一の雨滴・雪片の記録からこれを特定し、この解析結果から本電荷計の有効性を見出して行きたい。

本装置の開発に当たり、以前からラジオゾンデに電荷計を搭載して降雨観測および測器の製作を行っている山口大学の鈴木准教授、山口計測器サービスの松村周造氏のご指導を得た。ここに謹んでお礼を申し上げます。

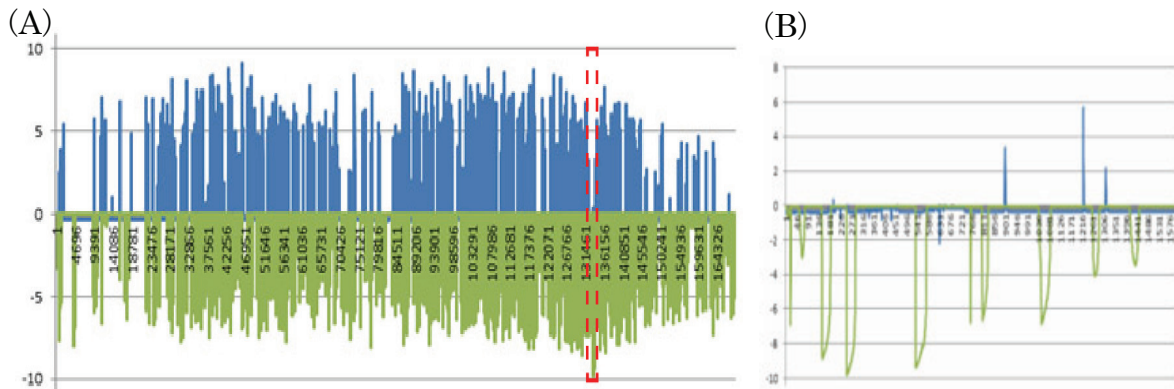


図10 観測された降雨。(A)は2015年10月13日14時53分から15時21分の期間、(B)は(A)の破線箇所を拡大した期間。(A)、(B)共に縦軸は電圧(V)を示す。

# マイコンを使用した電子工作入門：ラズパイを使ってみた

千貝 健、森 章一

技術部先端技術支援室

## はじめに

Raspberry PI（以下、ラズパイと言う）とは、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータであり、英国で教育向けの安価なコンピュータとして開発された。いろいろな種類があり、アールエスコンポーネンツ<sup>\*1</sup>等で 3,000–6,000 円以内で購入可能である。USB や LAN、HDMI などのインターフェースを搭載していて、パソコンとして使用できる（体感的に、十数年前の PC よりも速い気がする）ほか、基板上にある GPIO<sup>\*2</sup>端子に電子回路をつないでコントロールできる。電子工作や自作サーバ構築と言った分野で人気となっているので、我々も手を出してみた。

## 小型の Linux マシンとして動作させる

OS のインストールはとても簡単であった。ラズパイ公式サイトダウンロードページ<sup>\*3</sup>から Raspbian<sup>\*4</sup> イメージファイルをダウンロードし、いつも使っている Linux マシンでマイクロ SD カードに dd コマンドで書き込む。キーボードとモニタを接続したラズパイにマイクロ SD カードを差し込んで電源ケーブルを接続すると Raspbian が起動。初期設定ツール（再起動後でも、`raspi-config` とすると、いつでも実行できる）が自動的に立ち上がるので、パスワード設定、キーボードの設定、Expand filesystem（SD カード全体までファイルシステムを拡張）、SSH の有効化等を行い再起動すると、普通の Linux マシンと同様に使用出来るようになった。

有線 LAN は接続するだけで使用可能（DHCP サーバから IP アドレスが取得できる環境にあることが必要）である。無線 LAN の設定も簡単であった。無線 LAN 子機（Buffalo WLI-UC-GNM）を USB 端子に差し込み、コマンド

```
# wpa_passphrase ESSID pass >> /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

を実行。`wpa_supplicant.conf` を編集し暗号化方式の設定等を行い<sup>\*5</sup>、再起動したところネット接続ができた。数時間放置したところ、外部からアクセスできなくなったが、`/etc/network/interfaces` に `wireless-power off` の一行を追加し無線 LAN 子機をスリー

<sup>\*1</sup> <http://jp.rs-online.com>

<sup>\*2</sup> General Purpose Input/Output（汎用入出力）

<sup>\*3</sup> <http://www.raspberrypi.org/downloads/>

<sup>\*4</sup> Linux ディストリビューションの一つである Debian GNU/Linux をベースにしたラズパイ用の OS。所内で管理しているサーバのいくつかで Debian を使用しているので、取っ付きやすかった。

<sup>\*5</sup> 「\$ `man wpa_supplicant.conf`」が参考になる。編集しなくてもデフォルト設定で動くこともある。

プしないようにすることにより回避できた。/etc/network/interfaces を編集すれば、有線・無線にかかわらず、固定 IP アドレスにできることも確認した。ネットに接続できたので、以下のコマンドでアップデートした。

```
# apt-get update
# apt-get upgrade
# rpi-update
```

最後の rpi-update は、ラズパイのファームウェアのアップデートである。このように、ラズパイには通常の Linux にはない独特なコマンドがあるので注意が必要である。

## 電子回路をつないでみる

基板上にある GPIO 端子に何かをつないで制御するのがラズパイの醍醐味であろう。接続は、図 1 のようになる。テスト基板上に電子部品が乗ることになる。今回は、手元にあった 1-wire 温度センサ DS18B20（地温測定装置 [1] の製作時にテストとして使ったものの再利用）を使ってみた。外観および回路図は、それぞれ図 2、図 3 である。はじめは、回路図上側の DS18B20 の部分のみであった。後から、下側（RTC 部）を追加した（後述）。

1-wire 温度センサをラズパイで使用するには

```
# modprobe w1-gpio
# modprobe w1-therm
```

としてモジュールを読み込めばよい。再起同時に自動的にモジュールを読み込むためには、/etc/modules に以下の 2 行を追加する（注：次章も参照のこと）。

```
w1-gpio
w1-therm
```

上記設定は、DS18B20 の 1 ピンを GND に、3 ピンを 3.0–5.5 V に接続している場合である。図 3 のように 3 ピンを GND に接続している場合（パラサイトパワーモード）では動作しない。その場合は、次のようにしてモジュールを読み込む。

```
# modprobe w1-gpio pullup=1
# modprobe w1-therm strong_pullup=1
```

1-wire デバイスは自動的に認識され、以下のように確認できる。

```
$ ls /sys/bus/w1/devices/
28-XXXXXXXXXXXX 28-YYYYYYYYYYYY 28-ZZZZZZZZZZZZ w1_bus_master1
```

ここで XXXXXXXXXXXX 等が、個々の DS18B20 が持つシリアル番号（レーザー ROM コード）である。温度センサの値を取得するには、以下のようにする。

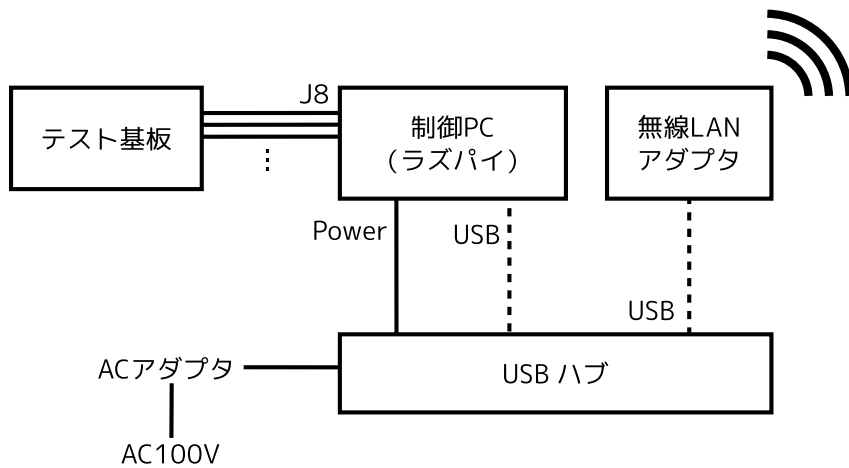


図1 接続模式図。

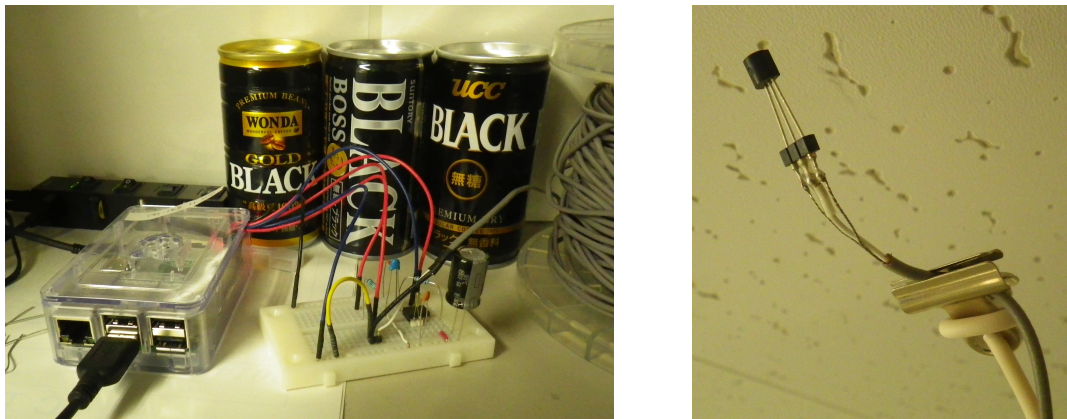


図2 外観。左：ラズパイとテスト基板。右：天井付近に設置した温度センサ。

```
$ cat /sys/bus/w1/devices/28-XXXXXXXXXXXX/w1_slave
8f 01 4b 46 7f ff 01 10 14 : crc=14 YES
8f 01 4b 46 7f ff 01 10 14 t=24937
```

この場合、シリアル番号が **XXXXXXXXXXXX** の DS18B20 の温度は 24.937 °C である。ラズパイと DS18B20 の間の距離を非常に長くすると温度が取得できなくなったが、プルアップ抵抗を 4.7 K $\Omega$  から 1 K $\Omega$  に変更することにより正常動作するようになった。DS18B20 から温度を読み出すプログラムを以下のように作成し、**crontab** で定期的に行えば温度ロガーとして使用出来る。

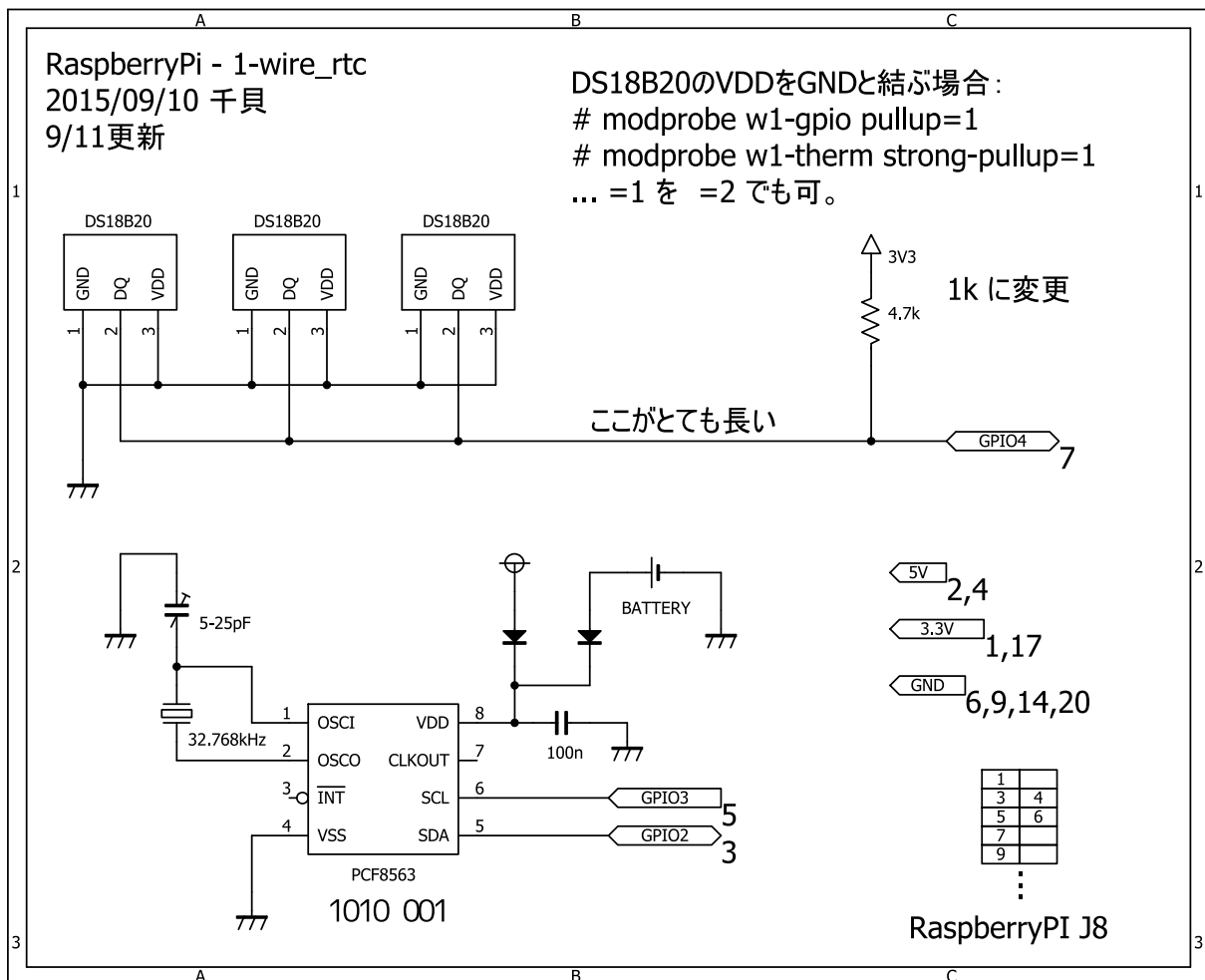


図3 回路図。一部を省略している。

```

1  #!/bin/sh
2  DEVID1="28-XXXXXXXXXXXX"
3  TEMP1TMP="t=85000"
4  while [ "$TEMP1TMP" = "t=85000" ];
5  do
6  TEMP1='cat /sys/bus/w1/devices/$DEVID1/w1_slave'
7  TEMP1TMP='echo $TEMP1 | awk '{ print $22 }''
8  done
9  echo `date +"%Y/%m/%d %H:%M"`, $TEMP1TMP
10 #出力は以下ようになる
11 #2015/10/15 14:11,t=21937

```

Raspbian には DS18B20 温度センサのデータを読み込むライブラリが用意されているため、前回 [2] のように自分で通信タイミングを調べながらプログラムを作らなくてもよく、このようなデータの並びを整形するだけのプログラムになった。ラズパイは Linux でもあるので、Linux の知識があれば図 4 のようなグラフを自動的に作成し、自身でウェブサーバとなって公開することができるし、作成したファイルを定期的にウェブサーバにアップロードしたりメールで送ったりも簡単にできる。

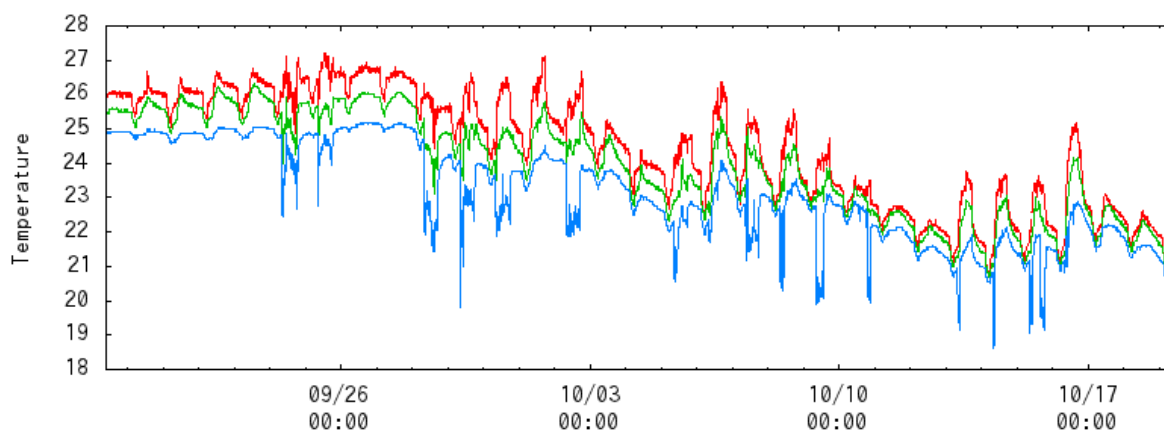


図4 測定例：一ヶ月の室内の温度変化。10分毎に測定。

## その他

### • UPDATE

ある日、ラズパイをアップデートしたところ温度が取得できなくなった。1-wire 機器すべてがラズパイから認識されていない。実は、2015-01-31 のリリースから、より汎用的な Device Tree という仕組みが導入され、1-wire 機能の有効化方法が変わっていたのである。有効化のためには、`/boot/config.txt` に

```
dtoverlay=w1-gpio,gpiopin=4
dtoverlay=w1-gpio-pullup
```

を追加し、再起動する必要があった。今後も、このような仕様変更があるかもしれないことを心に留めておかななくてはならない。

### • RTC

ラズパイにはリアルタイムクロック (RTC)<sup>\*6</sup>が搭載されていないため、起動時には前回シャットダウン時の時刻になる。インターネットに接続されている場合は NTP サーバと同期して時刻を補正する。図3下側のように RTC PCF8563 を接続 (I<sup>2</sup>C 接続) し、起動時に RTC の時刻を参照するようにした。接続するための設定や時刻を参照するコマンドの詳細等は、今回は割愛する。

<sup>\*6</sup> コンピュータの電源が切られていても時刻を刻み続ける機能。システム本体の電源とは別にバッテリーを持ち、本体の電源が切れてもバッテリーで動作し続ける。

## おわりに

一日一回再起動するように設定し、10分毎に3台のDS18B20で温度を測定しファイルに保存する、保存したファイルを別のPCから定期的に取り込む、という動作を半年以上連続動作させたが、一度無線LANアダプタを故障のために交換しただけで、大きなトラブルはなかった。うまくやれば高価な測器+データロガー以上のことができるだろう。

今年度ラズパイを使用した他の制作物としては、カメラシステムがある。過去に紋別に設置したものの[3]は、デジタルカメラのそばに、カメラの電源を操作するWatch Bootという装置と、カメラ操作と画像転送用のノートパソコンを置いていた。ノートパソコンの代わりにラズパイを、電源の操作はラズパイと接続した電子回路を使用することにより、従来と比較して非常にコンパクトなシステムになった。

安価でコンパクト、電子回路にも応用できるPCということで、ラズパイは使用者次第で無限の可能性を秘めている。今後、技術部で行われる機器開発の手段の一つとして、ラズパイを選択することが増えるかもしれない。

本製作の一部は、平成27年度低温科学研究所技術部技術奨励費により実施された。

## 参考文献

- [1] 森章一, 曾根敏雄, 多深度地温測定装置の製作, 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **20**, 13-17, 2014
- [2] 千貝健, 森章一, マイコンを使用した電子工作入門: 温湿度計の製作, 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **20**, 1-6, 2014
- [3] 千貝健, 大井正行, 中坪俊一, 池田正幸, 藤吉康志, 紋別市オホーツクスカイトワーから見るオホーツク海: カメラ設置からウェブサイト公開まで, 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **19**, 17-22, 2013

# 低温研ウェブサーバアクセス解析 2014/10–2015/09

千貝 健

技術部先端技術支援室、所内広報委員会ホームページ担当

前回まで [1] と同様に、2014 年 10 月 1 日から 2015 年 9 月 30 日まで 12 ヶ月間のアクセス統計（表 1–9）とこれまでのアクセス推移（図 1）を示した。統計には、所内向け情報および各研究グループウェブサイトへのアクセス、低温研内部からのアクセスを含めていない（ただし、図 1 の「所内含む」を除く）。12 ヶ月間の全リクエスト件数（以下、リクエストと略す）は **3,010,161** 件、全ページリクエスト件数（以下、ページ数と略す）は **467,133** 件であった。

スマートフォン（iPhone/iPad/Android）からのアクセス数を以下の簡易な方法で調べてみた。所内からのアクセスも含めている。522154/4415188 = 0.118 であり、1 割を超えているようだ。スマートフォン用ウェブサイトを作成する等の対応が必要だろう。

```
$ grep " 200 " * | wc -l
4415188
$ egrep -i "(iPhone|iPad|Android)" * | grep " 200 " | wc -l
522154
```

## 参考文献

- [1] 千貝 健, 低温研ウェブサーバアクセス解析 2013/10–2014/09, 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告, **20**, 39–42, 2014

表 1 月別レポート

年	月	リクエスト	ページ数
2014	10	236039	44871
	11	249156	40013
	12	283776	44519
2015	1	272698	36453
	2	227625	39512
	3	196880	34932
	4	289630	34293
	5	233415	35971
	6	286115	43754
	7	270180	40293
	8	267272	39746
	9	197375	32776

表 2 曜日別集計

曜日	リクエスト	ページ数
日	18974	4518
月	42009	8333
火	42741	4999
水	41829	5545
木	40628	5045
金	43852	5544
土	20812	4942

リクエスト件数、ページ数は  
1 ヶ月あたりの値で示した。



表3 時間別集計

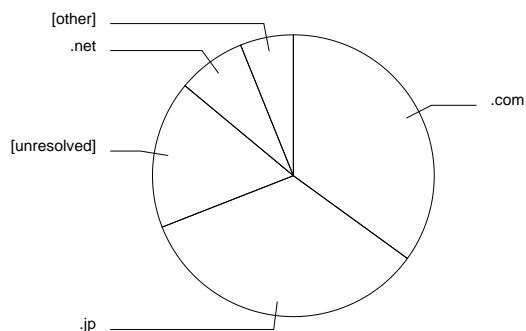
時間	リクエスト	ページ数	時間	リクエスト	ページ数
0時	6095	1555	12時	12677	1491
1時	5001	1330	13時	17536	1558
2時	3653	1303	14時	16892	1655
3時	2965	1284	15時	17327	1670
4時	2837	1181	16時	16163	1523
5時	4368	1355	17時	16893	1524
6時	3925	1113	18時	13945	1605
7時	4171	1248	19時	9828	1426
8時	8002	1450	20時	10100	1565
9時	13476	1861	21時	10868	1687
10時	18592	2994	22時	9663	1727
11時	18666	3408	23時	7194	1403

リクエスト件数、ページ数は1ヶ月あたりの値で示した。

表4 ドメインレポート

リクエスト	ページ数	ドメイン
24283	13619	.com (商業組織)
151830	13264	.jp (日本)
52929	6606	[未解決 IP アドレス]
14895	3060	.net (ネットワーク)
1624	1197	.de (ドイツ)
529	194	.cn (中華人民共和国)
356	180	.fr (フランス)
256	139	[未知ドメイン名]
406	112	.ru (ロシア連邦)
172	108	.br (ブラジル)
152	104	.io (英領インド洋地域)
85	50	[ドメイン名未付与]
254	44	.it (イタリア)
561	38	.edu (米国高等教育機関)
48	13	.be (ベルギー)
2460	193	[その他: 111 ドメイン]

リクエスト件数、ページ数は  
1ヶ月あたりの値で示した。

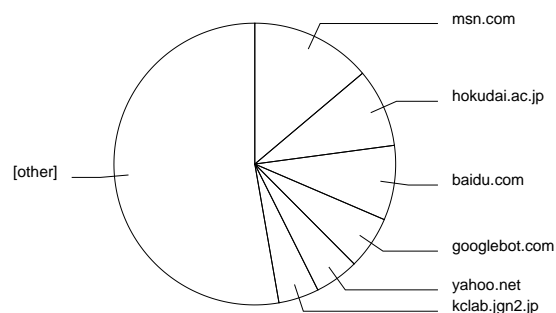


扇型の角度：ページ数

表5 組織別レポート

リクエスト	ページ数	組織
9194	5393	msn.com
9700	3511	hokudai.ac.jp
3824	3338	baidu.com
4828	2371	googlebot.com
2729	1973	yahoo.net
2031	1806	kclab.jgn2.jp
2155	1701	1
1471	1320	180.76
1207	1162	your-server.de
1520	994	em-net.ne.jp
3241	754	u-tokyo.ac.jp
870	609	yandex.com
612	608	hatena.ne.jp
1356	526	114
15564	488	ocn.ne.jp
190537	12366	[その他: 6,800 組織]

リクエスト件数、ページ数は  
1ヶ月あたりの値で示した。



扇型の角度：ページ数

表6 参照元サイトレポート

リクエスト	ページ数	サイト
85438	4578	http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/
4419	802	http://www.google.co.jp/
1869	785	https://www.google.co.jp/
1565	662	http://search.yahoo.co.jp/
294	238	http://www.hokudai.ac.jp/
475	106	http://shiro.lowtem.hokudai.ac.jp/
209	72	http://www.bing.com/
271	63	http://www.google.com/
178	41	https://www.google.com/
35	35	http://www.oia.hokudai.ac.jp/
12	12	http://cms.kxk.red/
12	12	http://202.243.234.23/
18	11	http://search.smt.docomo.ne.jp/
9	9	http://www.cris.hokudai.ac.jp/
9	8	http://okh-radar.lowtem.hokudai.ac.jp/
1627	446	[その他: 804 サイト]

リクエスト件数、ページ数は  
1ヶ月あたりの値で示した。

表7 リクエストレポート

リクエスト	html ファイル
7940	/
772	/soshiki.html
683	/en/
461	/meibo.html
436	/symposium.html
338	/kyoudou.html
327	/access.html
312	/press.html
290	/syochou.html
281	/lts.html
257	/topics/
245	/en/groups.html
235	/koubo.html
228	/link.html
219	/topics.html
25897	[その他: 1,465 ファイル]

リクエスト件数は  
1ヶ月あたりの値で示した。

表8 ブラウザ集計

リクエスト	ページ数	ブラウザ
24249	17625	Netscape (compatible)
49922	4680	Safari
51878	4079	MSIE
3774	3164	HyperEstraier
88582	2775	Mozilla
22706	1907	Firefox
2031	1806	ICC-Crawler
611	608	Hatena Antenna
369	367	Wotbox
229	175	DoCoMo
6227	1573	[その他: 398 ブラウザ]

リクエスト件数、ページ数は  
1ヶ月あたりの値で示した。

表9 OS レポート

リクエスト	ページ数	OS
29167	20568	ロボット
177633	8334	Windows
11696	6602	未知 OS
25689	2482	Macintosh
6397	776	Unix

リクエスト件数、ページ数は  
1ヶ月あたりの値で示した。

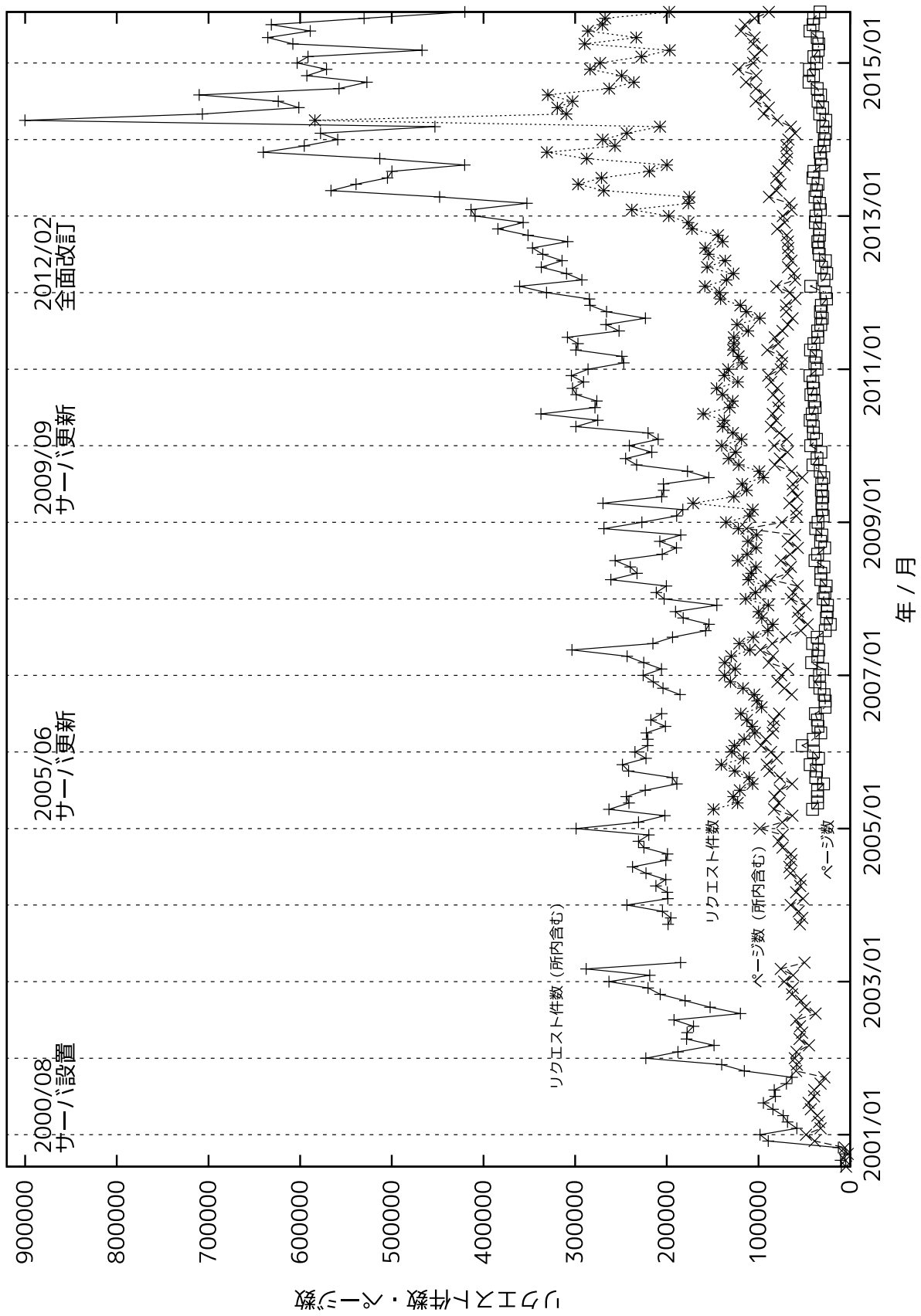


図1 これまでのリクエスト件数、ページ数。

2015年12月11日発行  
編集者：中坪 俊一・森 章一  
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