

令和 3 年度
共同研究報告書



国立極地研究所

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

目次

I. 共同研究報告(終了)

一般共同研究

(1) 宙空圏

No.	研究課題名	研究者名	ページ
31-1	新しいレーザー技術の南極観測への応用	桂川 眞幸	6
31-2	地上デジタル放送波の伝搬遅延を用いた水蒸気量推定の技術開発及び実証実験	花土 弘	9
31-3	光学リモートセンシングによる超高層領域の大気組成に関する研究	津田 卓雄	11
31-4	SuperDARNで観測されるFLRを用いた磁気圏領域の連続的同定	河野 英昭	13
31-5	VLF/LF帯電波の電波伝搬を用いた高エネルギー電子降下現象の実証的研究	土屋 史紀	15
31-6	大気微量成分の経年変化に及ぼす力学輸送効果の研究	村田 功	18
31-7	金属原子ライダー観測に応用するパルスレーザースペクトル計測のための光ヘテロダイン計測手法の確立	川原 琢也	20
31-8	南極昭和基地の宇宙線観測による宇宙天気現象の研究	加藤 千尋	23
31-9	EISCATレーダーとあらせ衛星の観測に基づく地球電離圏から磁気圏へのプラズマ供給機構に関する研究	関 華奈子	未
31-10	船舶搭載用のプラズマバブル・熱圏大気光観測システムの開発	坂野井 健	26
2-2	磁気圏ULF波動の電離圏オーロラ活動への効果	櫻井 亨	29
2-3	電離圏サブストームの磁気圏投影構造	田中 高史	32
2-8	LODEWAVE用スーパープレッシャー気球の開発	齋藤 芳隆	34
2-10	南極昭和基地大型大気レーダーを用いたFAIのイメージング手法の開発	齊藤 昭則	36

(2) 気水圏

31-13	衛星搭載合成開口レーダデータを用いた東南極の氷河と海水の変動解析	中村 和樹	40
31-15	南極域のエアロゾル長期変動の解析	原 圭一郎	42
31-16	北極広域に沈着した光吸収性粒子の測定手法の確立とその空間分布の観測的解明	森 樹大	44
31-17	雲ゾンデを用いた冬季の北極海で生じる雲特性変化の解明	佐藤 和敏	46
31-19	東南極氷床境界域における海洋物理過程の研究	大島 慶一郎	48
31-20	気球・UAV・地上in-situ観測データによる極域エアロゾル循環機構解析	林 政彦	50
31-21	北極海における海水の係留・衛星観測研究	深町 康	未
31-22	両極由来の寒気に伴う顕著大気現象発現にかかわる極域—熱帯域大気海洋結合システムの解明	本田 明治	53
2-12	カナダ雪氷コアに含まれるアジアダストの粒径別・供給源推定～バックグラウンドダストはいつどこからどれだけ輸送されるのか～	長島 佳菜	55

(3) 地圏

31-23	東南極セール・ロンダーネ山地における下部地殻流体活動の温度—圧力—時間条件の精密解析	河上 哲生	.....	58
31-24	リュツォ・ホルム岩体の精密な温度構造および物質移動の素過程の解明	池田 剛	.....	61
31-25	インパクトが引き起こす物質進化と天体進化の解明	宮原 正明	.....	64
31-26	UAVを利用した東オングル島積雪深分布変化解析の研究	荒川 逸人	.....	66
2-26	南極大陸で回収されたエンスタタイトコンドライト隕石の化学組成に関する研究	海老原 充	.....	68
2-27	東南極リュツォ・ホルム岩体における褶曲帯・延性断層岩帯・地震性断層岩帯の形成テクトニクスに関する研究	豊島 剛志	.....	71
(4)生物圏				
31-27	南極の短波長紫外線が生物に及ぼす影響に関する生化学的研究と気象データの統計解析	高橋 哲也	.....	75
31-28	南極クマムシの生活史戦略に関する研究	辻本 恵	.....	77
31-29	極域の光合成生物の生理応答機構の解析	菓子野 康浩	.....	79
31-30	南極沿岸における海産微小動物相とその特徴の解明	上野 大輔	.....	82
31-31	沿岸海跡湖能取湖におけるアイスアルジーの一次生産の動態と動物プランクトンの分布動態の関りについて	西野 康人	.....	85
31-32	南極湖沼生態系の数理モデル化に関する研究	佐々木 顕	.....	87
31-34	南極におけるレジオネラ属菌とその宿主となるアメーバーの解析	石井 良和	.....	89
31-35	極地土壌のCO ₂ 放出と土壌ガス拡散係数に関する研究	米村 正一郎	.....	93
31-36	極域に生息する植物寄生性糸状菌の多様性と生態の解明	東條 元昭	.....	95
31-40	南極をめぐる科学と国際動向に関する社理連携研究	柴田 明穂	.....	97
2-34	南極湖沼底マッピングROVの開発	後藤 慎平	.....	99
(5)極地工学				
31-37	南極昭和基地におけるエネルギー供給に関する極地工学研究	小原 伸哉	.....	102
31-38	南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究	香川 博之	.....	105
31-39	極地建築・土木に関する雪氷防災工学研究	金 高義	.....	107

II. 研究集会報告

研究集会

No.	研究課題名	ページ
3集1	中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究集会	112
3集2	STE研究連絡会現象報告会および現象解析ワークショップ(極域を軸とする宇宙天気現象の予測精度向上に向けて)	113
3集3	南極昭和基地における次世代ネットワークインフラを活用した研究計画	114
3集4	太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用	115
3集5	SuperDARN研究集会	116
3集6	PANSY研究集会	117
3集7	南極海洋・海氷・氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会	118
3集8	南極氷床・海氷・海洋システムの研究に関する今後10年を見据えた将来構想	中止
3集9	南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙(「南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討」より名称変更)	119
3集10	寒冷域における降雪観測や雪結晶の研究と教育の今後の展望	121
3集11	南極域における衛星観測データを用いた気候に関する研究集会	122
3集12	南極エアロゾル研究会	123
3集13	2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会	124
3集14	無人機の活用による極地観測の展開	126
3集15	2021年度南極メソスケール雪氷研究集会	127
3集16	極域データの保全・公開と利活用に関する研究集会-II	128
3集17	南極域地圏変動から探る南極氷床・南大洋変動が及ぼす全球システム変動へのインパクト	129
3集18	北極海における固体地球物理観測研究の挑戦	130
3集19	自然科学系アーカイブズ研究会	中止
3集20	冷水性翼足類クリオネ属における幼生期の形態的種同定手法の確立に関する研究集会	131
3集21	2021年 南極医学・医療ワークショップ	132

III. 令和3年度共同研究課題一覧

1.	令和3年度共同研究実施件数	134
2.	一般共同研究	135
3.	研究集会	140

1. 記号の説明

◎・・・・研究代表者

2. 表記例

(研究課題)

北極広域に沈着した光吸収性粒子の測定手法の確立とその空間分布の観測的解明

(研究代表者)

(共同研究者)

◎森 樹大 東京大学大学院理学系研究科・特任研究員
小池 真 東京大学大学院・准教授
茂木 信宏 東京大学大学院・助教
大畑 祥 名古屋大学宇宙地球環境研究所・助教

(担当教員)

(国立極地研究所)

東 久美子 教授

(研究期間)

平成31年度 ～ 令和3年度 (3か年)

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（1）宙 空 圏

新しいレーザー技術の南極観測への応用

- ◎桂川眞幸 電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授
 米田仁紀 電気通信大学レーザー新世代研究センター・教授
 大饗千彰 電気通信大学量子科学研究センター・助教

(国立極地研究所)

江尻省 助教

西山尚典 助教

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

1. 目的

中間圏・下部熱圏の大気ダイナミクスを統合的に理解することを大目標として、そのための鍵となる観測手法：“中間圏・下部熱圏に分布する金属原子およびイオンの密度・温度変動を同時に計測可能な共鳴散乱ライダー観測法”を確立することを具体的な目標として3年間のプロジェクト研究を進めた。プロジェクト研究の中核は広帯域に渡って多周波同時発振が可能な波長可変注入同期チタンサファイアレーザーの開発にあり、目標としたスペックが実現されれば、従来の観測能力を超える高機能な共鳴散乱ライダー観測技術が構築される。

2. 国立極地研究所に導入・設置した二波長発振注入同期ナノ秒パルス Ti:s レーザーシステム

チタンサファイアレーザー結晶は、近赤外域にとっても広い利得スペクトル帯域(700–1000 nm)を持ち、第二高調波も組み合わせると、高層大気中に存在する多種の原子・イオンをモニターするための共鳴線を広くカバーすることができる。しかしながら、注入同期レーザーの機能を持たせてそれを構成する場合は、利得スペクトルの中心から大きく離れた波長域(~50 nm 以上)での動作は難しいという問題があった。この共同研究プロジェクトでは、高層大気中に存在する一価のカルシウムイオンと中性カルシウムの共鳴線 (Ca⁺: 786.9540 nm÷2 ; Ca: 845.5936 nm÷2) を同時に計測するライダーシステムを構築するために、利得中心波長近傍の 786 nm (Ca⁺) とそこから 50 nm 以上離れた 845 nm (Ca) の二つの波長で安定な注入同期ナノ秒パルス出力を得ることができる二波長発振注入同期ナノ秒パ

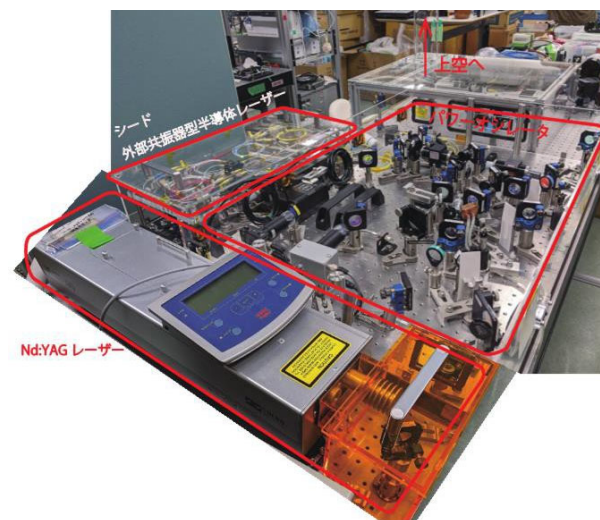


図 1. 国立極地研究所・宙空圏部門に導入・設置した二波長発振注入同期ナノ秒パルス Ti:s レーザーシステム。

ルス Ti:s レーザーシステムの開発を進めた。

図 1 にこの研究プロジェクトで構築したレーザーシステムの概要を示す。レーザーシステム単体としては、第一期の共同研究を通してほぼ完成の域まで到達していた。この第二期の共同研究では、電気通信大学で開発された二波長発振注入同期ナノ秒パルス Ti:s レーザーシステムを、実際に国立極地研究所に導入・設置し、宙空圏グループが所有する(望遠)観測系と組み合わせることで、中間圏・下部熱圏領域の金属原子・イオンの振る舞いとらえるライダー観測系全体としてレーザーシステムを安定に機能させる開発作業を進めた。

実際に(望遠)観測系と組み合わせたライダー観測系全体としても、二波長発振注入同期ナノ秒パ

ス Ti:s レーザーシステム単体として確認された動作を機能させられることを確認することができた。

3. 注入同期ナノ秒パルス Ti:s レーザーを用いた中間圏・下部熱圏領域のカルシウムおよびカルシウムイオンの共鳴散乱ライダー観測

新たに構築したライダー観測系全体を動作させ、実際に、中間圏・下部熱圏領域に分布する一価のCaイオンおよび中性Caの観測を試みた。図2(a)-(c)は得られた典型的な観測結果である。横軸が共鳴散乱光信号強度、縦軸が地上からの高度を示している。

図2(a)は注入同期ナノ秒パルスTi:sレーザーの発振波長を一価のCaイオンの共鳴中心波長(393.4770 nm)に同調させた時に観測された結果である。この観測は新しいライダーシステム構築後の最初の試みであったので、ナノ秒パルスTi:sレーザーの平均パワーは、比較的低い0.099W(パルスエネルギー9.9 mJ、繰返し10 Hz)、二倍波平均パワーで0.039 Wに設定された。また、積算時間は十分なS/Nが得られると期待される60秒(600ショット)とした。地上から高度50km付近に向かって直線状に減衰する信号は打上げたライダーレーザー光の大気による(非共鳴)レイリー後方散乱によるものである。図の黒色のプロットは観測された生データ(高度分解能:15m)で、そこから、高度200-250 kmの平均信号をバックグラウンドとして差し引いたものが茶色で表示したプロファイルである(11点のデータを平均化処理。高度分解能:165m)。高度100 kmのやや下部に一価のCaイオンに由来する強い共鳴散乱信号が明瞭に見て取れる(09:52:52 UT)。同様の観測を約1時間にわたっておこない(計42回)、信号の再現性と経時変化を確認した。

次に、注入同期ナノ秒パルスTi:sレーザーの発振波長を中性Caの共鳴中心波長(422.7918 nm)に同調させ、中間圏・下部熱圏領域に分布する中性Caを捉える観測を試みた。図2(b)に観測された典型的な結果を示す。この時のナノ秒パルスTi:sレーザーの平均パワーは0.094W(パルスエネルギー9.4 mJ、繰返し10 Hz)、二倍波平均パワーでは0.064 Wに設定された。Caイオンに比べると信号強度が弱いと想定されたので、十分なS/Nを得るために積算時間を長く(5分:3,000ショット)に設定した。高度80-90 kmに中性Caに由来すると考えられる、Caイオンに比べるとややブロードに分布する共鳴散乱信号を明瞭に捉えることができた(14:25:48 UT)。Ti:sレーザーの発振波長に、Caの共鳴中心から1.6 GHzの離調を与えた場合には信号が消失し、捉えた信号が確かに中性Caに由来することが確認された。2時間

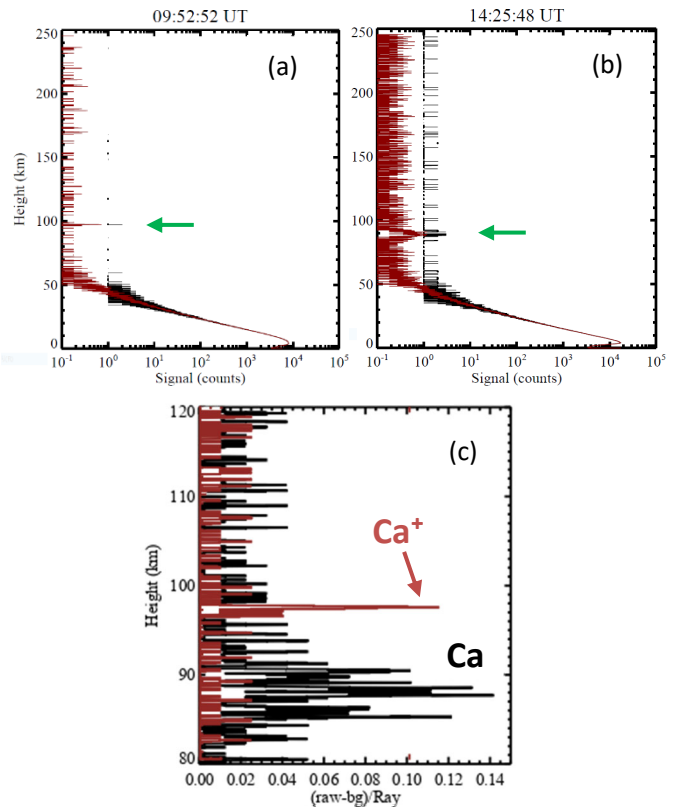


図 2. 新たに構築したライダー観測システムを用いた(a) 1 価の Ca イオンと(b)中性 Ca の典型的な観測結果. (c) 高度 80 - 120 km を抜き出し重ねた信号プロファイル.

弱にわたり同様の観測を計16回実施し、再現性と経時変化を確認した。

図2(c)は、図2(a)と(b)の高度80 kmから120 kmを拡大し重ねたものである。Caイオンのおよそ10 km下方に中性Caがややブロードに分布する想定された振舞いを実測で確かに捉えることができた。中性Ca由来の共鳴散乱ライダー信号は、今回の観測で初めて捉えたものであり、多様な目的の観測に必要なレーザーの性能を実験的に把握することができたのはとても大きな前進となった。

4. まとめ

中性カルシウム(Ca: 422.7918 nm)と一価のカルシウムイオン(Ca+: 393.4770 nm)の同時計測が可能な二波長同時発振可能な注入同期ナノ秒パルスTi:sレーザーを宇宙圏部門の観測系と組み合わせ、全体をライダー観測システムとして機能させられることを確認することができた。また、中性Caに由来する共鳴散乱信号を初めて捉え、多様な目的の観測に必要なレーザー性能を見積もるための実験的な基盤をつくることができた。第三期の共同研究プロジェクトでは、製作した注入同期ナノ秒パルスTi:sレーザーの出力を段階的に上げ、ライダー観測システムとしての性能を最大化することと、実際に長期にわたる連続観測をおこなうことを目指す。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	1月31日
研究課題名	(課題番号31-1) 新しいレーザー技術の南極観測への応用		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)	江尻省	立極地研究所・宙空圏部	助教
	西山尚典	立極地研究所・宙空圏部	助教
小計	2名		
所外 (極地研以外)	桂川真幸	電気通信大学	教授
	米田仁紀	電気通信大学	教授
	大饗千彰	電気通信大学	助教
	音瀬めぐみ	電気通信大学	大学院生
小計	4名		
合計	4名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

地上デジタル放送波の伝搬遅延を用いた水蒸気量推定の技術開発及び実証実験

◎花土弘 国立研究開発法人情報通信研究機構
電磁波研究所 リモートセンシング研究室 研究マネージャー
(国立極地研究所)
富川喜弘 准教授
江尻 省 助教
平成 31 年～令和 3 年 (3 年)

[研究成果]

地上付近の水蒸気量を広範に低コストで測定する新しい観測技術として、地上デジタル放送波の伝搬遅延量計測を利用した水蒸気量変動の推定手法の研究開発を実施した。この手法は、反射法と呼ばれ、地デジ放送波の遅延プロファイルを使い、送信局から直接伝搬した波（直達波）と周囲の反射体から反射して伝搬した波（反射波）を分離し、両者の位相差を用いることで、送信局と受信局それぞれで発生する位相雑音と送信局と受信局間の伝搬遅延量の影響を取り除き、高精度(ピコ秒程度)で反射体と受信局間の伝搬遅延量を測定し、反射体と受信局間の積算された水蒸気量を推定する。反射法では遅延プロファイルの遅延時刻を利用し、複数の反射体からの反射波を分離することが可能で、それらを利用し、送信局と受信局を結ぶ線分上の受信局から送信局の反対方向での水蒸気量分布の推定が可能になる^[1]。

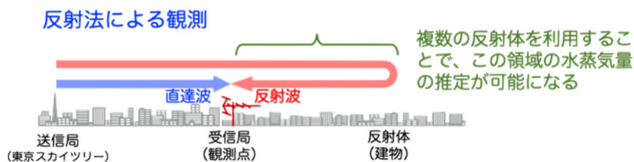


図 1 地デジ放送波の伝搬遅延量計測による水蒸気量変動の推定手法（反射法）の説明図

国立極地研究所の屋上に設置された測定装置の全体を図 2 に示す。写真中央のキャビネット内に地デジ放送波を受信する受信機(ソフトウェア無線用実験機器の USRP を利用)と受信信号を復号し、遅延プロファイルを算出する計算機が格納されており、計算機は携帯回線で制御及びデータ伝送が可能である。写真右側にあるのが家庭用の地デジ受信アンテナであり、反射法の場合、送信局と反対方向からの反射波を受信するために、通常を送信局方向を指向するアンテナと、その反対方向を指向するアンテナを組み合わせ利用していることが特徴的である(図 3 参照)。写真左上部に見られるのは比較検証用の気象測器で、測定された気温・湿度・気圧から、地デジ放送波(UHF 帯)での伝搬遅延量が計算可能であり、地デジ放送波の位相測定で推定される反

射体-受信点間の積算された伝搬遅延量との比較を行い、反射法のデータ処理手法の研究開発を実施し



た。

図 2 国立極地研究所屋上に設置された地デジ放送波の伝搬遅延量計測装置

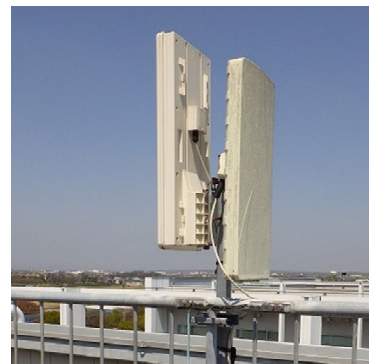


図 3 反射法で利用される地デジ放送受信アンテナ（直達波用と反射波用の 2 式から構成される）

遅延プロファイルは地デジ放送波に画像・音声信号とは別に埋め込まれているパイロット信号を復号処理し、最大 1 秒間に 100 サンプル程度算出可能である。水蒸気量変動推定に利用する場合には、このような高い時間分解能は必要はなく、反射法が必要とされる直達波との位相差算出が可能となるデータ集約手法を研究開発し、図 2 に示すキャビネット内の復号処理を行う計算機上でデータ集約と位相差算出を行い、位相差データのみを携帯回線でリアルタイムにデータ伝送を行っている。現在、この方法による水蒸気量変動計測を令和 1 年度に首都圏 10 地点、令和 2 年度九州北部の 5 地点、令和 3 年度に九州南部の 10 地点で開始した。首都圏に設

置された 10 地点の観測機材は国立極地研究所屋上に設置された機材と同じ構成であるが、九州地方に設置された 15 地点の観測装置では、低消費電力化と安定化を行うため、遅延プロファイルの復号・集約については FPGA、位相差算出についても産

業用のラズベリーパイを利用する(図 4 参照)。観測された位相差データについても、国立極地研究所屋上に設置された機材同様に携帯回線を利用し、クラウドへアップロードされ、利用者にはリアルタイムで利用可能な状況になっている。

[参考文献]

1) Kawamura et. al., “Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves”, Radio Science, Vol. 52, 367-377, 8 March 2017, DOI:10.1002/2016RS006191.2

[研究発表]

本研究期間中の研究発表は口頭発表のみであり省略する

光リモートセンシングによる超高層領域の大気組成に関する研究

◎津田卓雄 電気通信大学大学院情報理工学研究科・准教授

穂積裕太 情報通信研究機構・研究員

(国立極地研究所)

江尻省 助教

中村卓司 教授

西山尚典 助教

田中良昌 特任准教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

高エネルギー降下粒子が Na 層に与える影響
(Tsuda et al., EPS, 2021)

地球超高層領域には、流星起源の金属原子が存在している。金属原子の一種であるナトリウム (Na) の分布高度は 80-110 km 付近であり、この高度領域は中間圏・下部熱圏、並びに、電離圏 D, E 領域に位置する。極域におけるオーロラ現象の原因となる磁気圏からの高エネルギー降下粒子は、しばしば電離圏 E 領域 (高度 90-130 km)、さらには D 領域 (高度 60-90 km) まで侵入する。このとき、高エネルギー降下粒子が極域超高層 Na にどのような影響を与えるのかを明らかにする為、本研究では、南極昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) における地上総合観測により、高エネルギー降下粒子による超高層 Na の変動を統計的に調査した。

調査の結果、高エネルギー降下粒子が Na 層のトップサイド周辺における Na の減少を誘発していることが統計的に示された。この Na 減少は、高エネルギー降下粒子の磁気地方時 (MLT) 特性に対応するように、明け方の時間帯でより甚大となる傾向が見られている (図 1 参照)。

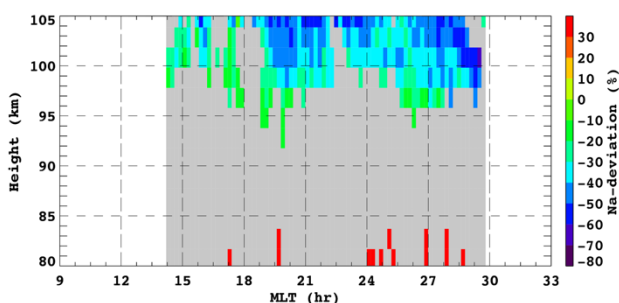
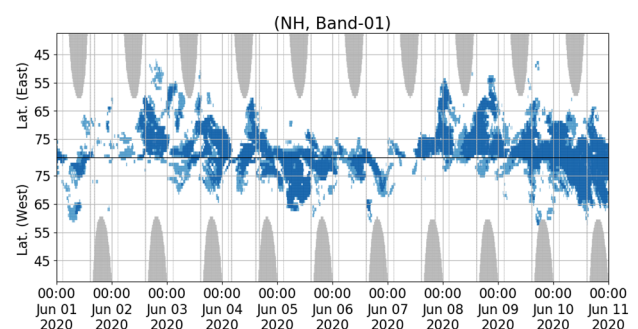


図 1. 地磁気静穏時に対する地磁気擾乱時の Na 密度の変動成分 (偏差) の高度-MLT 特性。

ひまわり夜光雲モニタリングシステムの開発
(Tsuda et al., ESS, 2022)

静止軌道衛星ひまわり 8 号の全球輝度画像データから夜光雲を自動で検出する手法の開発を行なった。手法開発の試行錯誤の中で、輝度値の小さい (暗い) 夜光雲も検出する為に、背景光成分に含まれる大気分子のレイリー散乱光成分を再現・除去した後に関値判定で夜光雲/極中間圏雲による散乱光を抽出する方法を考案し、検出感度を向上させた。

夜光雲検出結果の検証として、夜光雲観測で多数の実績を有する Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM) の観測結果と比較した。検証の結果、両者は非常に良い一致を示し、本研究で開発した夜光雲検出手法の十分な有効性が示された。その後、ひまわりデータをリアルタイムで定期的処理し、夜光雲の自動検出結果 (図 2 参照) を電気通信大学のウェブサイト



[<http://ttd01.cei.uec.ac.jp/himawari/>] で公開するシステムを構築した。

図 2. ひまわり全球輝度画像から自動検出した夜光雲の緯度分布の時間変化。

[研究発表]

- H. Suzuki, A. Matsumoto, P. Dalin, Y. Nakamura, S. Ishii, K. Sakanoi, K. Sakaguchi, T. Takada, T. T. Tsuda, and Y. Hozumi, Capability of airline jets as an observation platform for noctilucent clouds at middle latitudes, *Prog. Earth Planet Sci.*, 9, 11, doi:10.1186/s40645-022-00469-4, 2022.
- T. T. Tsuda, Y. Hozumi, K. Kawaura, K. Tatsuzawa, Y. Ando, K. Hosokawa, H. Suzuki, K. T. Murata, T. Nakamura, J. Yue, and K. Nielsen, Detection of polar mesospheric clouds utilizing Himawari-8/AHI full-disk images, *Earth and Space Science*, 9, e2021EA002076, doi:10.1029/2021EA002076, 2022.
- M. Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Ogawa, T. T. Tsuda, and K. Hosokawa, Statistical study of electron density enhancements in the ionospheric F region associated with pulsating auroras, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 126, e2021JA029601, doi:10.1029/2021JA029601, 2021.
- Y. Hozumi, T. T. Tsuda, K. Hosokawa, Y. Ando, H. Suzuki, K. T. Murata, and T. Nakamura, Horizontal movement of polar mesospheric clouds observed from the Himawari-8 geostationary meteorological satellite, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 126, e2021JD035081, doi:10.1029/2021JD035081, 2021.
- T. T. Tsuda, Y.-M. Tanaka, R. Tozu, K. Takizawa, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, T. D. Kawahara, and T. Nakamura, Relationship between Na layer and CNA variations observed at Syowa, Antarctic, *Earth Planets Space*, 73, 7, doi:10.1186/s40623-020-01335-7, 2021.
- T. T. Tsuda, C. Li, S. Hamada, K. Hosokawa, S.-i. Oyama, S. Nozawa, T. Kawabata, A. Mizuno, J. Kurihara, T. Nishiyama, and M. J. Kosch, OI 630.0 nm and N₂ 1PG emissions in pulsating aurora events observed by an optical spectrograph at Tromsø, Norway, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 125, e2020JA028250, doi:10.1029/2020JA028250, 2020.
- T. T. Tsuda, S. Nozawa, N. Saito, T. D. Kawahara, T. Kawabata, T. Takahashi, S. Wada, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Tsuno, and M. Abo, Observations of metallic layers in the Earth's upper atmosphere based on resonance-scattering lidars, *The review of laser engineering*, 48, 580-584, 2020. (in Japanese)
- S. Oyama, A. Shinbori, Y. Ogawa, M. Kellinsalmi, T. Raita, A. Aikio, H. Vanhamäki, K. Shiokawa, I. Virtanen, L. Cai, A. B. Workayehu, M. Pedersen, K. Kauristie, T. T. Tsuda, B. Kozelov, A. Demekhov, A. Yahnin, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, Y. Kasahara, A. Matsuoka, M. Shoji, M. Teramoto, and M. Lester, An ephemeral red arc appeared at 68° MLat at a pseudo breakup during geomagnetically quiet conditions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 125, e2020JA028468, doi:10.1029/2020JA028468, 2020.
- M. K. Ejiri, T. Nakamura, T. T. Tsuda, T. Nishiyama, M. Abo, C.-Y. She, M. Nishioka, A. Saito, T. Takahashi, K. Tsuno, T. D. Kawahara, T. Ogawa, and S. Wada, Observation of synchronization between instabilities of the sporadic E layer and geomagnetic field line connected F-region medium-scale traveling ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 124, 4627-4638, doi:10.1029/2018JA026242, 2019.

SuperDARN で観測される FLR を用いた磁気圏領域の連続的推定

◎河野英昭 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・准教授
 才田聡子 北九州工業高等専門学校・准教授
 西谷 望 名古屋大学宇宙地球環境研究所・国際連携研究センター・准教授
 堀 智昭 名古屋大学宇宙地球環境研究所・統合データサイエンスセンター・特任准教授
 (国立極地研究所)
 行松 彰 准教授
 田中良昌 特任准教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

磁力線共鳴 (Field Line Resonance; FLR) により励起される磁力線固有振動 (脈動現象の 1 つ) は、その周波数 (FLR 周波数) が磁力線沿いのプラズマ密度に依存する。特に、プラズマ圏境界面では密度が急変し、それに伴い FLR 周波数も急変する。磁力線固有振動は電離圏プラズマも振動させるので、電離圏プラズマの速度 (正確には Velocity along the line of sight; VLOS) を測定できる SuperDARN radar (以下 SD と記す) によってその振動数の 2 次元分布を観測しプラズマ圏境界面の位置を時間の関数としてモニター出来る可能性がある。本研究の目的はその為の方法論を確立し、イベント探索と解析を行う事である。より具体的には、複数の SD's の VLOS で同時観測された FLR events を同定し、各イベントについてその FLR 周波数から磁気圏密度を推定し、得られた密度の 2 次元分布を調べる事である。

磁力線固有振動は大別して toroidal mode と poloidal mode に分類される。toroidal mode では磁力線は東西方向に振動する。東西方向の電離層振動は電離層高度を変化させ難いので、ground/sea-scattered echoes 中では toroidal mode は見え難いと考えられる。

一方、poloidal mode では磁力線は地球近傍では南北方向に振動する。地上中低緯度では、磁力線は子午面内で傾いており電離層との角度は 90 度以下となっているため、磁力線の南北方向の振動に伴い、磁力線に frozen-in した電離層プラズマの振動方向は鉛直成分も持ち、よって、電離層を上下振動させる事が可能と考えられる。

2019 年度 (平成 31 年度、令和 1 年度) に行った研究は以下の通りである。

上述の FLR events 同定を自動的に行うプログラムの作成を開始した。その第 1 ステップとして以下のような関数プログラム (以下 find_FLR.m と記す) を作成した。find_FLR.m への入力データは、

同一の beam 上の近接した 2 つの range gates (以下 RG's と記す) からの VLOS データを別プログラムで FFT したデータ

である。find_FLR.m の FLR 自動同定アルゴリズムは以下のものである。

近接した 2 つの RG's のデータに位相差法・振幅比法と呼ばれる方法を適用して FLR を自動同定する。(以下、1 つ目の RG を RG1 と記し、RG1 より低緯度に位置する 2 つ目の RG を RG2 と記す。また、RG1 と RG2 の RG 番号の差を ΔRG と記す。)

位相差法とは、RG1 の位相 (FFT 結果データに含まれる) から RG2 の位相を引き、その位相差が有意な極小値を取る周波数を FLR 周波数と同定するものである。

振幅比法とは、RG1 の振幅を RG2 の振幅で割り、その振幅比に有意な極大値と有意な極小値があり、その 2 つの周波数が隣接していれば、その 2 つの周波数の中間の周波数を FLR 周波数と同定するものである。

上記の性質は FLR の理論から導出されるものであり、位相差法で同定される周波数と振幅比法で同定される周波数は理論上一致する筈のものなので、振幅比極大の周波数と振幅比極小の周波数の間に 位相極小の周波数 が位置すれば、FLR と同定する。

2019 年度中に find_FLR.m を一通り作成し、1つの SI (Sudden Impulse) の後に Hankasalmi (HAN)(Finland)と Pykkvibaer (PYK)(Iceland) の SD で同時に観測された脈動イベント 1 例(目視で発見された) について、find_FLR.m を各 SD につき 1 つの beam に適用した。そして、別途(独立に) 同じ期間の同じ beams について目視で同定した FLR events と比較し、目視 events が全て自動同定されるまで find_FLR.m を改良した。

その過程で、この 2 つの beams については、 $\Delta RG=2$ (距離にして約 80km) の場合のみイベントが自動同定される事が判った。 ΔRG は FLR の共鳴幅(FLR に伴う電磁エネルギーの拡散散逸の空間スケールを反映する重要な物理量)に相当していると考えられる事から、この自動同定プログラムによって FLR の共鳴幅についての情報も得られると判った。

2020 年度には、上記の脈動イベントについて HAN, PYK の他の幾つかの beams についても FLR events の目視同定と find_FLR.m による自動同定とを独立に行い、2 つの結果の比較を行った。その結果、プログラム中の種々のパラメータを適宜調整する事により、全ての目視 events が自動同定されるようになった。そして、これを以て、その時点での find_FLR.m が正確であるとした。

ただ、find_FLR.m は、引数指定して読み込んだ 2 つの FFT 結果データについて自動同定を行うという機能のみを持ち、生データファイルからの VLOS 時系列データの読み込みと FFT 適用、及び自動同定プログラムが出力する結果データの作図、は別の procedures で行っていた。かつそれらは全て別のプログラム言語で過去に作成したものであった。これでは大量のデータの解析

を一括して行う事は出来ないので、2020 年度後半から、全ての codes をを IDL 言語の functions/procedures に書きかえて統合する作業を開始した。しかし、技術的な問題から難航し、本共同研究期間中には完成に至らなかった。今後プログラミングを続行し完成させる計画である。

上述の統合プログラム作成と並行して、2020 年度には、複数の SD radars による同時観測例を発見しようとし、上述の脈動イベントについて HAN と PYK と同じ緯度帯に位置する他の SD's を調べた。しかし、同時 VLOS 観測データがある他の SD's は 2 つしかなく、又そのデータ分布は粗であり、FLR は同定されなかった。

また、同じく上述の統合プログラム作成と並行して、2021 年度には、上述の functions/procedures をそのまま使い、(その為) 時間はかかったが、上述の脈動イベントについて HAN と PYK の全ての beams 中の FLR events を全ての RG's について自動同定した。その結果、目視では同定できなかった events も複数同定され、その中には ionospheric backscattered events も sea-backscattered events も含まれていた ($|VLOS|>190\text{m/s}$ の events と $|VLOS|<35\text{m/s}$ の events に 2 分されていた) 事が判った。そして、sea-backscattered events については電離層での反射点を計算し、FLR の実際の発生位置はそこであるとして、同定された全ての FLR events について対応する磁気圏赤道面位置における密度を推定した(その推定には Schulz [1996] の近似式(dipole 磁場を想定し、磁力線に沿っては等密度と仮定した場合の式)を用いた)。その結果は、全体としては、低緯度ほど密度が高い、という傾向を示した。しかし、そのパターンからの数値的なずれが目立つ FLR events もあり、現在それについて調査中である。

[参考文献]

Schulz, M., Eigenfrequencies of geomagnetic field lines and implications for plasma-density modeling, *Journal of Geophysical Research*, p17385, 1996.

Kawano, H., A. S. Yukimatu, Y. Tanaka, S. Saita, N. Nishitani, and T. Hori, SC-triggered 1.6MHz waves including an interval with latitude-dependent phase shift, observed by the SuperDARN Hokkaido East Radar in mid latitudes: Possible global magnetospheric cavity-mode waves and their field-line resonance with poloidal Alfvén-mode waves, *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series D, Earth and Planetary Sciences*, Vol. 34 (No. 1), pp. 1-15, Nov. 21, 2016.

VLF/LF 帯電波の電波伝搬を用いた高エネルギー電子降下現象の実証的研究

◎土屋史紀 東北大学大学院理学研究科・准教授
 小原隆博 東北大学大学院理学研究科・教授
 大矢浩代 千葉大学大学院工学研究院・助教
 三好由純 名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授
 (国立極地研究所)
 小川泰信 准教授
 平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

ニーオルスン基地に VLF/LF 帯標準電波受信装置を設置し、2010 年より運用している。ニーオルスン基地を含め北極のオーロラ・サブオーロラ域に 5 か所の受信機が設置されている (カナダ・アサバスカ、カナダ・ピナワ、米国・アラスカ、及びロシア・マイマガ)。これらの受信機を用いて高エネルギー電子の降込みに伴う電離圏 D 領域での電離現象のネットワーク観測を実施している。VLF/LF 帯標準電波観測の特徴は、電波の送信局から受信機間の伝搬経路上で生じる電離現象を高時間分解能でモニタリングできる点である。この特徴を生かし、電磁イオンサイクロトロン波動やホイッスラモードコーラス波によりピッチ角散乱を受けて地球大気に降り込む高エネルギー電子や、Pi2 地磁気脈動で変調を受けた高エネルギー電子降下について解析を行った。研究期間中に得られた成果を報告する。

1. 電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動による高エネルギー電子降下の統計解析

EMIC 波動はサイクロトロン共鳴により相対論的電子のピッチ角散乱を起こすことが可能であるが、EMIC 波動が相対論的電子を散乱しやすい状況を統計的に調べた研究は少ない。2016 年 11 月 1 日から 2018 年 10 月 31 日の 2 年間に、地上の誘導磁力計

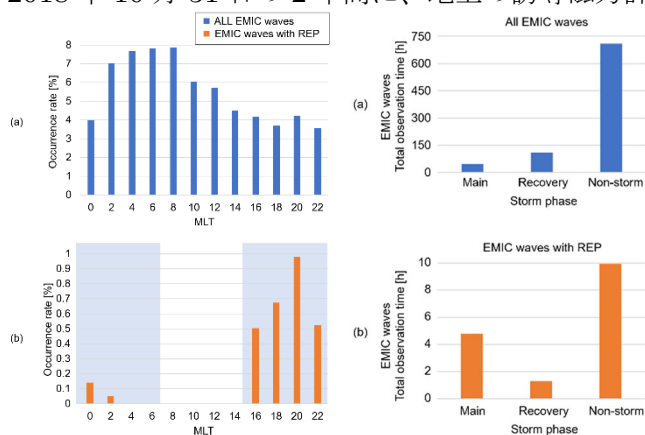


図 1: EMIC 波動発生頻度の MLT 依存性(左)と磁気嵐(右)依存性。(上)すべての EMIC 波動、(下)電子降下と伴う EMIC 波動。

により得られた EMIC 波動と VLF/LF 電波観測により得られた相対論的電子降下の統計解析を行った結果を図 1 に示す。EMIC 波動の発生頻度は、朝側で高くなる一方で、電子降下を伴う EMIC 波動は夕方側に局在している。それぞれの EMIC 波動の発生時間を磁気嵐の主相、回復相、静穏期で分類すると、電子降下を伴う EMIC は主相時に発生しやすいことが明らかになった。観測地点に近くを通過したあらせ衛星や RBSP によるプラズマ密度計測の結果から、EMIC 波動のほとんどがプラズマ圏内で発生していることも確認された。磁気嵐主相中のサブストーム発生時にリングカレントと高密度プラズマの重複領域で発生する EMIC 波動が、電子降下を引き起こしやすいことを示している。これらの EMIC 波動の統計的な特徴は、EMIC 波動が磁気嵐主相時の放射線帯外帯の消失の一因になり得ることを示唆する。

2. ホイッスラモードコーラス波動による高エネルギー電子降下の統計解析

ホイッスラモードコーラス波動は幅広いエネルギー範囲で高エネルギー電子と共鳴し、ピッチ角散乱を引き起こす波動である。大気への降込み電子の特徴は理論的研究により詳しく調べられており (Miyoshi et al. 2020)、その特徴の一部は低高度衛星と高速オーロラカメラによる観測で実証されている (Kawamura et al. 2021)。VLF/LF 帯標準電波観測では、電子降下の MLT 分布や磁気嵐依存性についての統計的な特徴を調査した。図 2 に 2016 年 10 月から 2017 年 12 月の 15 か月間に観測された電子降下の統計分布を示す。この解析では、コーラス波動やパルセーティングオーロラと VLF/LF 電波観測により得られる電子降下現象の直接比較は行わず、パルセーティングオーロラの典型的周期(4-20s)を VLF/LF 電波観測より抽出し、これをコーラス波動に伴う電子降下現象とみなした。図 2 より、4-20s の

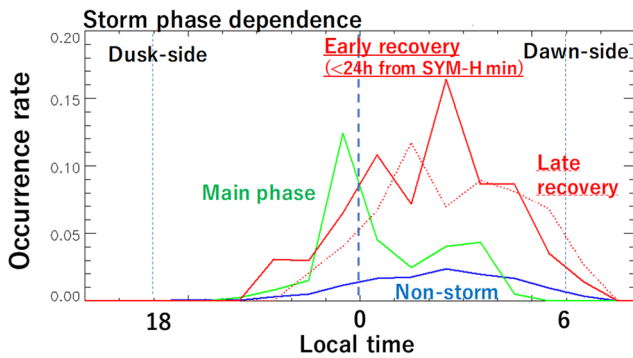


図 2: 4-20s の時間スケールの変動を持つ電子降下現象の MLT 及び磁気嵐依存性。

時間スケールの変動を持つ降下電子現象は、朝側の MLT に偏った発生分布を示しており、この降下電子現象の原因がホイッスラモードコーラス波であることが裏付けられる。磁気嵐依存性に着目すると、磁気静穏時の発生頻度が高い MLT でも 2%程度にとどまるのに対し、磁気嵐中は発生頻度が 10-20%に増大し、特に回復相の初期に発生頻度が高くなる傾向がある。

前節で示した EMIC 波動による高エネルギー電子降下の統計解析結果と比較すると、EMIC 波動とコーラス波に伴う高エネルギー電子降下の MLT 分布はそれぞれ夕方側、朝側に偏っており、これは電子のピッチ角散乱に寄与しているプラズマ波動の分布の違いを反映している。磁気嵐との対応に着目すると、EMIC 波動に伴う電子降下が磁気嵐主相に集中するのに対し、コーラス波に伴う電子降下は主に回復相に発生頻度が高く、磁気嵐の段階によって高エネルギー電子の降下の発生に寄与するプラズマ波動が異なっていることが分かる。

3. 高エネルギー電子降下の Pi2 変調

ULF 帯の地磁気脈動も高エネルギー電子の大気への降下に関与する波動の一つである。磁気圏に捕

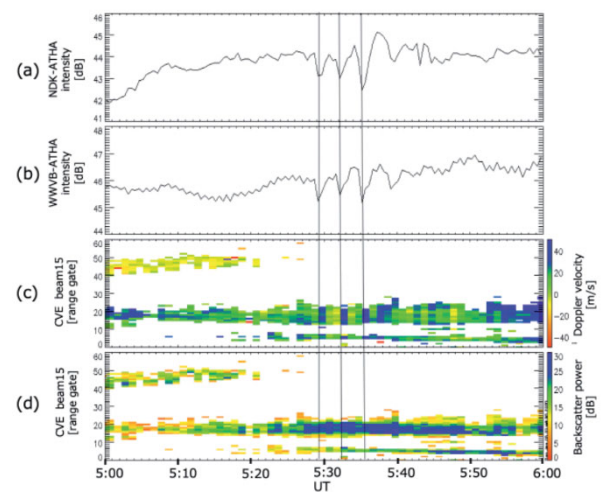


図 3: Pi2 脈動に変調を受ける VLF/LF 電波の受信強度変動(a,b)と HF レーダにより観測された電離圏プラズマ対流(c)とエコー強度(d) (Miyashita et al. 2020)。

捉された電子とのバウンス共鳴によるピッチ角散乱、磁力線の形状変化に伴う断熱効果による電子の降下、ホイッスラモード波の ULF 変調に伴う降下電子の変動などが、降下電子の ULF 変調のメカニズムとして提案されている。図 3 にサブオーロラ帯で観測された VLF/LF 帯標準電波の受信強度の変動と HF レーダ観測の比較を示す。この時小規模のサブストームが発生し、地上の磁力計網では Pi2 脈動が観測されていた。Pi2 脈動に同期したプラズマ対流速度と電波の受信強度変動が観測されており、地上の VLF 帯自然電波観測では地上に伝搬したホイッスラモードコーラス波が観測されていた。これらの観測結果から、Pi2 脈動によって磁気圏赤道面でのホイッスラモード波動の励起が変調を受け、その結果、ホイッスラモード波動により散乱された電子の大気への降下に Pi2 脈動による変調が現われたと解釈できる(Miyashita et al. 2020)。

[研究発表]

- Kawamura, M., T. Sakanoi, M. Fukizawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, F. Tsuchiya, Y. Katoh, Y. Ogawa, K. Asamura, S. Saito, H. Spence, A. Johnson, S. Oyama, U. Brändström (2021). Simultaneous Pulsating Aurora and Microburst Observations With Ground - Based Fast Auroral Imagers and CubeSat FIREBIRD - II. *Geophysical Research Letters*, 48(18). <https://doi.org/10.1029/2021gl094494>.
- Miyoshi, Y., S. Saito, S. Kurita, K. Asamura, K. Hosokawa, T. Sakanoi, T. Mitani, Y. Ogawa, S. Oyama, F. Tsuchiya, S. L. Jones, A. N. Jaynes, J. B. Blake (2020). Relativistic electron microbursts as high energy tail of pulsating aurora electrons. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090360. <https://doi.org/10.1029/2020GL090360>.
- Miyashita, T., H. Ohya, F. Tsuchiya, A. Hirai, M. Ozaki, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, N. Nishitani, M. Teramoto, M. Connors, S. G. Shepherd, Y. Kasahara, A. Kumamoto, M. Shoji, I. Shinohara, H. Nakata, T. Takano (2020). ULF Modulation of Energetic Electron Precipitations Observed by VLF/LF Radio Propagation, *Radio Science Bulletin*, Vol. 372.

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-5
研究課題名	VLF/LF帯電波の電波伝搬を用いた高エネルギー電子降下現象の実証的研究		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)			
小計	名		
所外 (極地研以外)	平井あすか	東北大学大学院理学研究科	大学院生
小計	1名		
合計	1名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

大気微量成分の経年変化に及ぼす力学輸送効果の研究

◎村田 功 東北大学大学院環境科学研究科・准教授
(国立極地研究所)

富川 喜弘 准教授

平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

東北大学と国立環境研究所ではつくばにおいてフーリエ変換型赤外分光計を用いた大気微量成分の観測を1998年から行っている。解析対象成分はオゾンを始めHCl, HF, N₂O, CO, CH₄, C₂H₆など多岐にわたるが、これらの時間変化には化学反応と力学的輸送の両方が影響する。そのため、この二つの変動要因を分離して評価する必要がある。そこで、本研究では力学的輸送の効果を評価するために極地研保有の気象再解析データを用いた物質輸送計算を行った。具体的には、質量流線関数による成層圏循環の強度変化とHCl, HFの変化との比較である。

HCl, HFは両者ともその主な発生源がフロン類であることからフロン規制の効果の指標となる。一方で成層圏での寿命が比較的に長いことため循環の加速・減速によって増減する。両者はフロン規制によって大気中への塩素、フッ素の放出量が減少したのに伴い2000年頃から減少傾向にあったが、2007-2011年頃に増加傾向が見られた。つくばを含むNetwork for the Detection of Atmospheric Composition Change/Infrared Working Group (NDACC/IRWG)の8カ所のHCl観測結果と3次元化学輸送モデルを用いた解析から、この増加は北半球の短期的な大気循環の変動によることが分かり、2014年にNatureに発表した(Mahieu et al.,

2014)。

本研究ではその後のHCl, HF変化が同じく大気循環の変動で説明できるかを調べた。図1に2001-2021年のつくばでのHClカラム量の経年変化を示す。2012年以降も数年毎に減少と増加を繰り返していることが分かる。なお、紙面の都合上ここでは図は省略するが、HFにも同様の傾向が見られ、また同様の観測を行っている名古屋大学宇宙地球環境研究所の陸別のHCl, HFにも同様の傾向が見られた。これに対し、European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)のERA-Interimを用いて計算した質量流線関数の変化をみると図2のようになった。(a)がHClが減少していた2006年より前の3年分の平均と増加した2007-2010年の平均との差、(b)が2007-2010年の平均と再び減少に転じた2011-2014年の平均との差、(c)が2011-2014年の平均と再び増加に転じた2015-2018年の平均との差である。赤枠で囲った北半球下部成層圏を比較すると負(青)、正(赤)、負(青)と変化しており、これは循環が減速、加速、減速と変わったことを示している。2007年を境に成層圏の循環が減速したことがHClの増加の原因であったが、2012年以降は加速、2015年以降は再び減速に転じており、観測されたHClの増減は基本的には大気循環の変化と矛盾しないことが分かった。

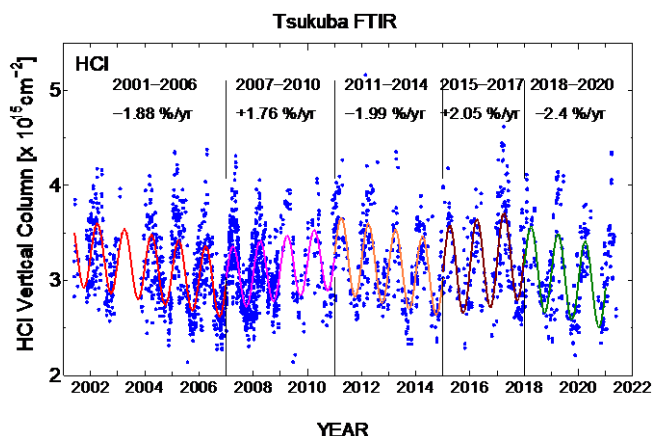


図1. つくばで観測されたHClカラム量の経年変化

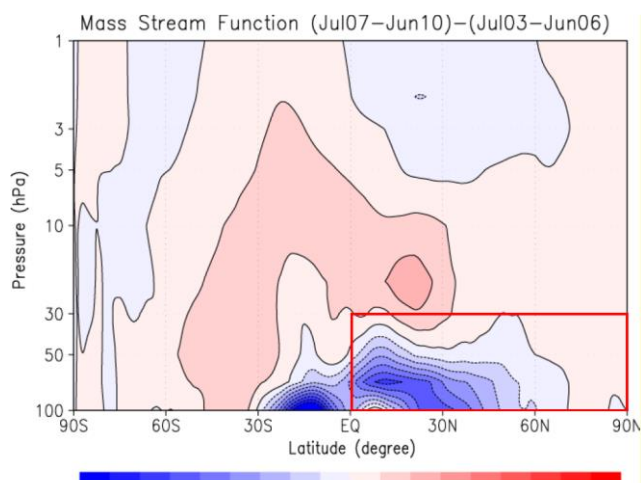


図2(a). 2007年前後の質量流線関数の変化

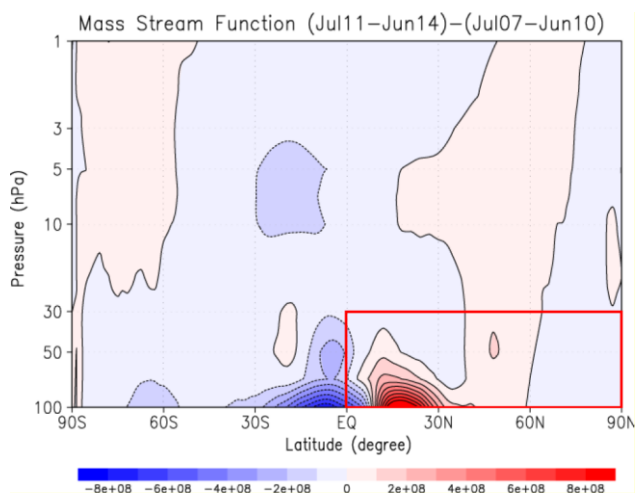


図 2 (b). 2011 年前後の質量流線関数の変化

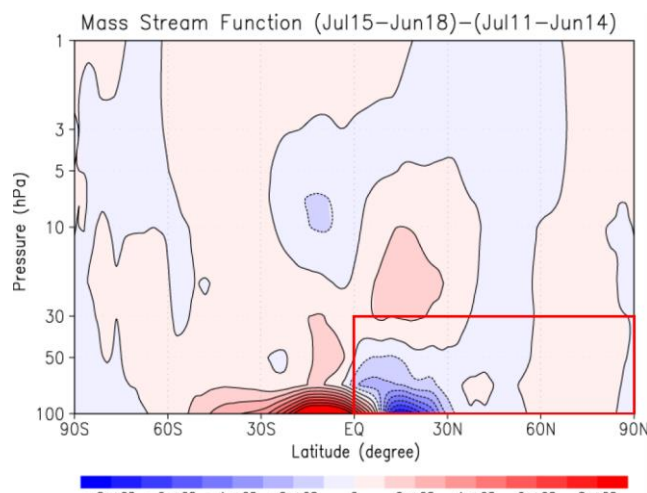


図 2 (c). 2015 年前後の質量流線関数の変化

ただし、2015 年以降の増加に関しては環境研秋吉英治氏らによる MIROC3.2 化学気候モデル (CCM) では 2015-2017 年頃の増加が再現されていない。この CCM でも気象場は質量流線関数の計算に用いたものと同じ ERA-Interim を使用しており、図 2(c) で見られた循環の減速のみでは 2015-2017 年の増加は説明しきれない可能性がある。このモデルでは

フロン規制に従ったフロン類のエミッションを仮定していることから、つくばや陸別で観測された 2015-2017 年の増加は話題となった違法なエミッションの影響 (Montzka et al., 2018) の可能性があり、研究期間終了後にはなるが CCM による CFC-11 違法放出を含めた再現実験との比較を行う予定である。

[参考文献]

- 1) Mahieu et al., Recent Northern Hemisphere stratospheric HCl increase due to atmospheric circulation changes, *Nature*, Vol. 515, 104-107, doi:10.1038/nature13857, November 2014.
- 2) Montzka et al., An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11, *Nature*, Vol. 557, 413-417, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2>, May 2018.

[研究発表]

- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and Y. Dai, Temporal variation of HCl and HF at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, 2019 Joint NDACC-IRWG and TCCON Meeting, Wanaka, New Zealand, May 20 - 24, 2019.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and H. Akiyoshi, Temporal variations of HCl and HF observed at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere, The 10th Symposium on Polar Science, Tokyo, Dec. 3-5, 2019.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, and H. Akiyoshi, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, online, Jul. 12-16, 2020.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and T. Nagahama, Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba and Rikubetsu, The 11th Symposium on Polar Science, online, Nov. 16 - Dec. 18, 2020.
- I. Murata, Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, and T. Nagahama, Short Term Variations of HCl and HF Trends Observed with FTIR at Tsukuba and Rikubetsu, Japan, QOS2021, online, October 3 - 9, 2021.

金属原子ライダー観測に応用するパルスレーザスペクトル計測のための光ヘテロダイン計測手法の確立

◎川原 琢也 信州大学学術研究院工学系・准教授
 和田 智之 理化学研究所光量子工学研究センター・チームリーダー
 小川 貴代 理化学研究所光量子工学研究センター・研究員
 津野 克彦 理化学研究所光量子工学研究センター・テクニカルスタッフ
 (国立極地研究所)
 江尻 省 助教
 西山 尚典 助教
 平成31年～令和3年 (3 年)

[研究成果]

1. 研究の目的

研究代表者らはノルウェーのトロンソ (69.6N, 19.2E) に設置したナトリウムライダーを用いて、2010年10月から鉛直風速を含めた中間圏・下部熱圏 (高度 80-115km) の定常観測を行っている [Nozawa et al., 2014; Kawahara et al., 2017]。中間圏・下部熱圏領域の鉛直風速は、1日平均では 0 m/s であると考えられているが、観測結果では約 12 m/s 程度の極めて大きなバイアスが導出されている。その原因として、解析手法で考慮されていない、パルスレーザのスペクトル形状(帯域が数 10MHz, 波長で 0.01pm 程度)が非対称であることが考えられる。一方、レーザのスペクトルを計測できるほど超高分解能性能を持つ分光計は存在しない。そこで申請者はその超高分解能計測手法として、光ヘテロダイン干渉法を応用したスペクトル計測法を確立する。本研究ではその有効性を計算機シミュレーションで検証を行った。

2. 研究手法

光ヘテロダイン干渉法とは、計測したい信号光 (未知の周波数 ν_{pulse}) と参照光 (既知の周波数 ν_{ref}) の合成波において、うなりの周波数 ν_{mes} を計測することで信号光の計測を行う手法である。ここで、 $\nu_{pulse} > \nu_{ref}$ の場合、うなりの周波数の式から次の式が成立する。

$$\nu_{mes} = \nu_{pulse} - \nu_{ref}$$

右辺はいずれも光の周波数で計測不可能であるが、適当な参照光を用いることで、左辺のようにうなりの周波数を計測可能な周波数帯域に落とすことが可能である。すなわち、最終的に未知の周波数 ν_{pulse} を求めることが可能となる。これをナトリウムライダーに応用すると、観測に用いるパルスレーザの帯

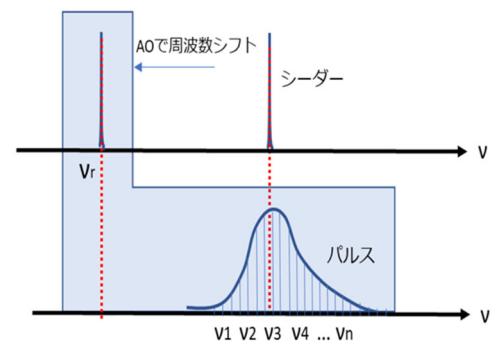


Figure 1. Seeding laser which is shifted from a pulse peak frequency, and pulse laser spectrum consisted of mass of line spectrums.

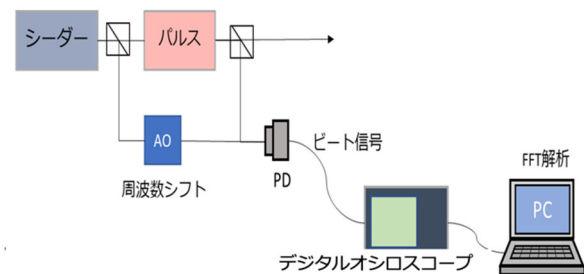


Figure 2. Experimental setup of measuring pulse laser shape using injection seeding system of a Na lidar.

域幅、約数 10MHz、のスペクトルを求めるために、インジェクションシード光から生成する参照光とのうなり周波数を計測する (Figure 1)。実験的には Figure 2 に示すような配置で行う。

本シミュレーションでは、以下の計算を行った。
 (1)パルススペクトルをデルタ関数の線スペクトルの集合体に置き換え、参照光を含めた全ての線スペクトルの合成波を考える。(2)それにより生成するうなりの合成周波数を FFT 解析し、うなりの周波数成分に対して線強度情報をグラフ化する。

3. 結果

Figure 3 に結果の一部を示す。Figure 3(a)は参照光であるシーダ光(0MHz)での赤線とパルスを構成する線スペクトルを示す。パルスは、全幅が 30MHz で、1MHz 間隔で強度差をつけた線スペクトルで構成した。参照光はパルスピークから 50MHz だけ低周波側にずらした周波数とした。それぞれの波動関数を合算し、FFT 解析を行った。Figure 3(b)は、FFT 解析した結果を示す。低周波数側の結果は、パルス内の近接する 2 線によるうなり成分を示す。一方、50MHz をピークとする結果は、参照光に対しパルス内の個々の線スペクトルとのうなりの結果を示す。この形状は合成前のスペクトルと一致し、光ヘテロダインの原理を確認することができた。

本研究ではさらに、実際に計測する場合の計測器

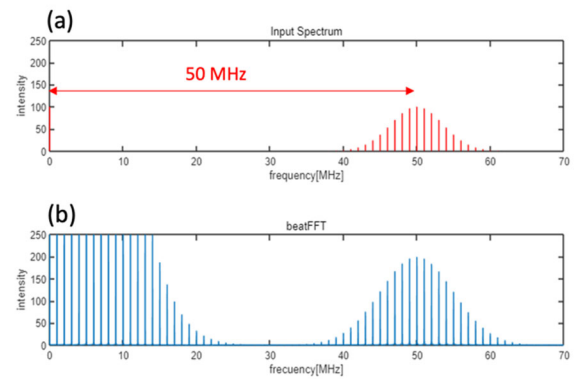


Figure 3. Simulation of the optical heterodyne method. (a) input laser lines, (b) results of FFT analysis.

のサンプリング周波数などのパラメータについても検討を行った。結論をまとめると、光ヘテロダインの原理確認を行い、既存の装置の性能で計測可能なことを確認した。

[参考文献]

- 1) Nozawa, S., T. D. Kawahara, N. Saito, C. M. Hall, T. T. Tsuda, T. Kawabata, S. Wada, A. Brekke, T. Takahashi, H. Fujiwara, Y. Ogawa, and R. Fujii, Variations of the neutral temperature and sodium density between 80 and 107 km above Tromsø during the winter of 2010-2011 by a new solid state sodium LIDAR, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JA019520, 441-451, 2014.
- 2) Kawahara, T.D., S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T.T. Tsuda, and S. Wada, Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°, 19.2°), *Optics Express*, 25, A491-A501, 2017.

[研究発表]

- Nishimura, M., T. D. Kawahara, K. Tsuno, M. K. Ejiri, T. Ogawa, S. Wada and S. Nozawa, Pulse spectrum simulation using optical heterodyne interferometry, *The 11th Symposium on Polar Science*, 2020.
 西村美紀, パルスレーザースペクトル計測に応用する光ヘテロダイン干渉法のシミュレーション(修士論文)

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-7	
研究課題名	金属原子ライダー観測に応用するパルスレーザー分光計測のための光ヘテロダイン計測手法の確立			
氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)				
小計	名			
所外 (極地研以外)	西村美紀	信州大学大学院総合理工学研究科・工学専攻	大学院生	
小計	1名			
合計	1名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

南極昭和基地の宇宙線観測による宇宙天気現象の研究

◎加藤千尋 信州大学理学部・教授
宗像一起 信州大学理学部・特任教授

(国立極地研究所)

片岡龍峰 准教授

門倉 昭 教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

2018 年 2 月, 南極地域観測第 IX 期計画一般研究観測「南極昭和基地での宇宙線観測による宇宙天気研究の新展開」(代表者:宗像一起)に従って昭和基地での宇宙線観測実験を開始し, その後も順調に観測を継続することができた。

観測開始からの稼働率は中性子計(NM), ミューオン計(MD)どちらも 90%以上で, データサーバーへ

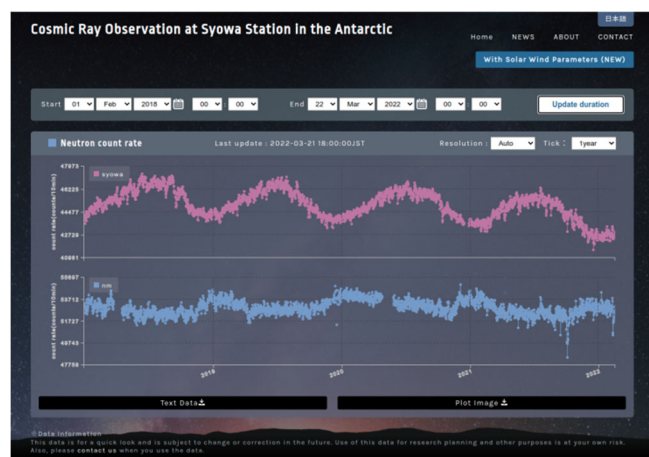


図 1 公開中のウェブページから

の自動転送も問題なく行われている。公開されているウェブページの整備も進み, 期間, 拡大・縮小など, 表示機能が充実し, 宇宙天気現象の発見に貢献できる形になっている。またデータのダウンロードも可能となっている。図は

<http://polaris.nipr.ac.jp/~cosmicrays>

で公開中のウェブページから。観測開始からのプロットで上段が MD, 下段が NM の変動率である。

2018 年 8 月には, 太陽活動が現在静穏期にあるにもかかわらず発生した CME イベントを観測し, 他の観測データとあわせて解析を行って当該イベントの特徴を明らかにした。また, 太陽活動が新た

な周期に入った後 2021 年 11 月にも CME イベントが観測されており, こちらについては現在解析が進行中である。

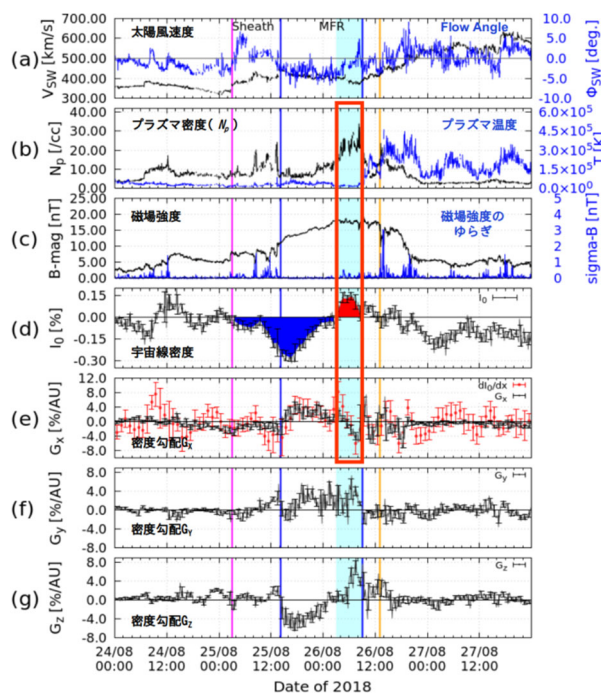


図 2 2018 年 8 月のイベント

(Kihara, et al(2021)プレスリリース資料から)

さらに, MD データに対する大気効果について, 機械学習を用いた大気効果補正を使った MD データの補正を試み, 利用可能であるとの感触を得るところまで来ている。今後, 昭和基地における観測の特徴である NM のと MD の同時観測から, NM データとの比較を行うことで地上宇宙線計数への大気効果に関する検証を行うことができるものと考えている。

[研究発表]

W. Kihara, et al.; A Peculiar ICME Event in August 2018 Observed With the Global Muon Detector Network., Space Weather, 19(3):e02531, March 2021.

C. Kato, et al.; New cosmic ray observations at Syowa Station in the Antarctic for space weather study., Journal of Space Weather and Space Climate, 11:31, January 2021.

1. 当該共同研究に関する研究発表について、可能な限りすべての学会誌名等を記入してください。（口頭発表については、原則として省略する。）
2. 参考文献、研究発表を行った学会誌名等を英文表記する場合は左右2列にする必要はありません。
3. 研究協力者（共同研究者ではない参加者。大学院生等）については、（別紙）参加者一覧に記載し、報告書に添付してください。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-8	
研究課題名		南極昭和基地の宇宙線観測による宇宙天気現象の研究		
氏名		所属	職	備考
所内 (極地研)				
小計	2名			
所外 (極地研以外)	浅野 駿太	信州大学	大学院生	2020-2021
	木原 渉	信州大学	大学院生	2019-2020
	高 柚季乃	信州大学	大学院生	2019-2020
	三宅 晶子	茨城高専	准教授	
小計	4名			
合計	4名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

船舶搭載用のプラズマバブル・熱圏大気光観測システムの開発

◎東北大学・理学研究科・准教授 坂野井健
 京都大学・理学研究科・准教授 齊藤昭則
 電気通信大学・情報理工学研究科・准教授・津田卓雄
 (国立極地研究所)
 江尻省 助教
 西山尚典 助教
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

1. 研究の目的と意義

本研究観測は、南極観測船しらせ搭載用の小型軽量の全天イメージャーを開発し、しらせ航路上の中緯度・低緯度域における熱圏大気光と南極周辺海洋上のオーロラの観測を実現することを目的とする。

中間圏・電離圏は人工衛星観測に限られるため、地上光学・電波リモートセンシングが主要な観測手段である。南極域の観測は、地上、とくに南極大陸沿岸部に限られ、南極海域は広大な観測空白域となっている。また、中低緯度においては、陸域と階乗とのネットワーク観測により、より広域な熱圏観測が可能となる。

そこで、本研究観測では船舶による揺れを打ち消す姿勢安定ジンバルに小型高感度冷却 CMOS カメラを搭載し、南極周辺海洋上でオーロラと大気光のイメージング観測を可能とする全天イメージャーシステムを開発する。これをしらせ甲板上に設置し、航海上で連続観測を実施する。本観測研究により、小型低コストの船舶搭載可能な観測システムの機能と性能を実証する。

2. 研究成果

本研究と関連して、2019年度公開利用研究(AAS6101, 61次隊)においてしらせ船上に設置する全天イメージャー1台の観測システムを開発し、630nm (F領域オーロラ・大気光)の連続観測を実施した。このイメージャーは、船の揺れを押さえるために、ジンバル(DJI/Ronin-S)に搭載した。また、赤道直下の高温と南極域の低温に対する温度維持や耐塩環境に耐えうる観測箱を開発した。経費は、主に外部資金(科研費・挑戦的萌芽(研究代表:京都大・齊藤昭則))を用いた。国内試験で、イメージャー単体動作試験、撮像および制御ソフトウェア開発、極地研積分球設備を利用した感度校正実験、恒温槽を用いた温度試験、ジンバル姿勢安定連続運用試験、観測箱耐候試験等を行い、9月のしらせ試験航海で動作を確認した。とくに、ジンバルによりしらせの揺れが1/14に減衰することが分かり、オーロラや大気光撮像に十分な長時間露出可能である



図1. 2020年3月3日15:25:40UTに観測されたしらせ船上630nm全天イメージャーデータの例。

ことが実証された。2019年11月出港以降、往路では一度も不具合は発生せず、完全自動運用を達成した。2019年11月には、赤道異常ならびにプラズマバブルと見られる観測データ得られた。復路の2020年2月末～3月3日には、オーロラ発光に成功した。この画像例を図1に示す。その後、3月13日にジンバル動作に不具合が発生した。さらに、3月21日に制御ノートPCがフリーズしたため、以降のデータが保存されていなかった。

2020年度は、萌芽研究(AH0909, 62次隊)により、2波長同時全天イメージャー観測システムを開発した。ここで、制御PCをサーバーPCに変更するなど、長期安定動作を目指した。11月のしらせ出港時以降は、62次隊の航海において630nm (F領域酸素オーロラ・大気光)と660nm (E領域N2オーロラおよび中間圏OH大気光)連続観測を達成した。加えて、2020年度は新たにGNSSレーダーを設置し、電離圏全電子数(TEC)の連続観測を行った。これらの全データは、翌年3月9日のしらせ作業により回収した。この62次観測において、機器・データ記録システムについて、しらせ出港から帰国までの約4ヶ月間にジンバル動作が停止する事象が4回発生したため、担当隊員による復旧が必要だった。また、カメラ制御PCが停止することが1回発生し、PC再起動

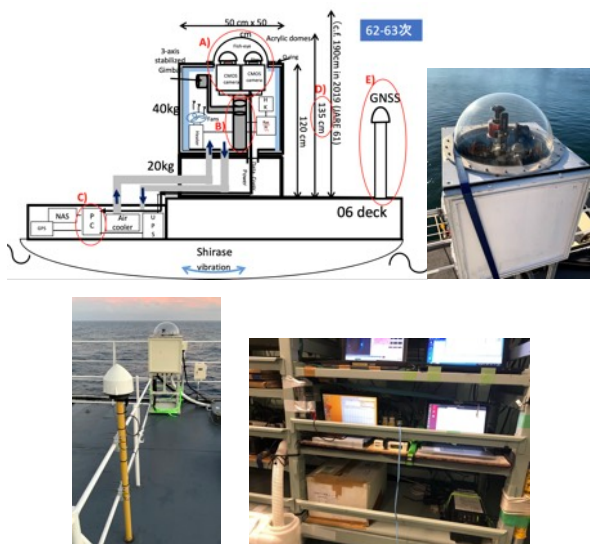


図2. (左上) 63 次におけるしらせ船上全天イメージャーの観測ブロック図。(A)～(E)は前年度からの改良点。(道上) 甲板上の全天イメージャー。(左下) GNSS と全天イメージャー観測箱。(右下) 観測室の制御 PC とデータ記録系。

の必要があった。なお、62 次行動では COVID-19 の影響でしらせが日本と昭和基地の間を直接往復する航路となり、極域のオーロラ帯で夜間がなかったため、本研究の目的である極域オーロラ観測ができなかった。しかしながら、中低緯度では 2 波長同時全天観測により、0H 大気光と 630nm 大気光の連続観測を達成した。

2021 年度は、前年度同様萌芽研究 (AH0909, 63 次隊) により、2 波長同時全天イメージャーをもちいたしらせ船上観測を実施した。この観測システムのブロック図と装置の外観を図 2 に示す。当年度はしらせ出港までの期間に、新たなジンバル (DJI/Ronin-RS2) を導入し、PC 制御ソフトウェアならびにジンバル角 6 軸 (姿勢角 3 軸と関節角 3 軸) 記録ソフトウェアを開発して、ジンバルの動作状況が日本から遠隔モニター可能とした。また、62 次観測で不具合の原因となっていた観測箱内のカメラ制御用ミニ PC を無くし、第一観測室のサーバー PC から USB3.0 延長ケーブルを介して直接カメラを制御することとした。さらに、カメラ B 系の観測波長を $670 \pm 20\text{nm}$ から近赤外 ($760 \pm 40\text{nm}$) へ変更し、より 0H 大気光で良好な S/N を確保しつつ N2 オーロラ観測を両立させた。また、前年度 COVID-19 の影響で実施できなかった極地研積分球を用いた感度校正を 7 月 29-30 日に実施した。さらに、9 月 6-11 日のしらせ国内巡航に同行し、試験観測を行った。2021

年 11 月のしらせ出港以降 2022 年 3 月中旬までの夜間に、2 波長同時全天イメージャーによる大気光とオーロラ観測、ならびに GNSS 受信機に電離圏全電子数 (TEC) の観測は、ほぼ順調に連続的に実施しており、期待通りの観測データ取得に成功した。このうち、往路 11 月 29 日晩と帰路の複数の晩でオーロラ画像取得に成功した。しかしながら、カメラが観測途中で停止したことがこれまでに 5 晩、カメラ A 系のクイックルックプロットが生成されなかったことが 1 晩発生した。これは全て翌朝には自動復旧し、大きな問題となっていない。また、昭和基地に停泊中の白夜期間の 2022 年 1 月 19 日に、ブリザードの影響によりジンバルのマウントの固定ネジが緩み、固定していた L 字金具とカメラが 2 台とも脱落していたことが発見された。このトラブルに対し、担当隊員が観測箱をあけて復旧させた。この問題発生と復旧は白夜期間であったため、オーロラと大気光観測に影響はなかった。

データ公開については、2019 年度 (AAS6101) ならびに 2020 年度 (AH0909) で取得されたしらせ船上全天イメージャーと GNSS 受信データの IUGONET を用いたデータ公開の準備を進めた。具体的には、極地研サーバー (CRUX) に本研究用のアカウントを作成し、京大サーバーに集約されているしらせ観測の全データを CRUX に転送した。また、CRUX 上に、WEB 閲覧可能なデータプロットの WEB ページを構築した。さらに、IUGONET 関係者と協議し、IUGONET Web 閲覧サービス上で公開可能なメタデータの案を作成した。現在メタデータの修正中であり、2022 年度初頭に IUGONET データ公開をする準備を進めている。2021 年度 63 次観測データについては、約 1 年間は研究分担者を軸とする研究チームが優先的に解析に利用し、その後 IUGONET データベースで公開する計画である。

本研究は、大学院生 1 名 (東北大) の 2019 年度修士論文のテーマとなった。また、大学院生 1 名 (京都大) の修士研究の主要な研究テーマとなっている (別紙の研究協力者参照)。

3. 今後の計画

しらせ船上観測のは本年度で終了となるが、今後の南極地域観測第 X 期重点研究における南極点ならびに南極大陸無人観測点におけるオーロラ全天観測や、北極観測船搭載の全天イメージャー観測など、本研究で開発された観測システムを応用・展開する計画が複数進行している。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-10
研究課題名	船舶搭載用のプラズマバブル・熱圏大気光観測システムの開発		
氏名	所属	職	備考
所内			
(極地研)			
小計	名		
所外	穂積裕太	情報通信研究機構(電気通信大学)	研究員
(極地研以外)	青木猛	電気通信大学	技術専門職員
	直井浩隆	情報通信研究機構	研究技術員
	永原政人	情報通信研究機構	研究技術員
	八木直志	東北大学・理学研究科・地球物理学専攻	大学院生 (令和元年度修了)
	山科左記	京都大学・理学研究科・地球惑星科学専攻	大学院生
小計	6名		
合計	6名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

磁気圏 ULF 波動の電離圏オーロラ活動への効果

◎櫻井 亨 東海大学名誉教授

(国立極地研究所)

宙空：門倉 昭 教授

宙空：田中良昌 准教授 (兼)

令和2年～令和3年 (2か年)

研究成果

本研究は磁気圏及び地上で観測された ULF 波動の内、周期 150-600 秒の Pc5 脈動がオーロラアークの発生にどの様に寄与するかを検討した。Pc5 ULF 波動がオーロラを発光させる事が出来るかを定量的に検討した研究である。この様な観点からの研究は未だ研究論文としての報告は無い。

研究内容を以下に箇条書きで纏める。

1. 極域方向に周期的に繰り返すオーロラアークと同時に Pc5 脈動が観測された。相互の周期は一致し、オーロラアークの輝度の ON OFF に伴って Pc5 脈動の南北成分 (H-成分) が南、及び北方向に変動する事例を見出した。これはオーロラアークを光らす電子が電離層に降下する位相 (アーク ON) では電離層に電流が流れ、その電流が地上で南向き磁場を作り、アーク輝度の OFF の位相では電子の降下が無いため逆向きの電流が流れ北向きの磁場となる事に対応している。
2. 即ち、アーク ON の位相では電離層への電子降下に伴う磁力線電流 (沿磁力線電流 FAC) が磁力線方向と逆向き方向 (upward FAC) に流れる事に対応し、アーク OFF の状態では電子降下が無く、沿磁力線電流は磁力線の方向 (downward

FAC) となる事に対応し、それらが周期的に交互に起こっている事に相当している。この事は、同時に FAC と同期しての磁力線に沿う電流に因る磁場変動がある事を示しており、この磁場変動が周期的振動を繰り返す事に因り Pc5 波動が起こると言う事になる。

3. 実際、この時人工衛星 (THEMIS) に依って赤道近く磁気緯度 10° 、地球半径の単位 (Re) で 1.1 倍の距離の磁力線上で Pc5 波動が振幅 ~ 4 nT で観測された。
4. この Pc5ULF 波動の変動磁場の電離層高度での値を数値モデルを用いて計算し、この磁力線束に蓄えられる ULF 波動の磁場エネルギーを次式の様求めた。

$$W_M = \int \frac{B_a^2}{2\mu_0} dV \text{ -----(1)}$$

ここで B_a は Pc5ULF 波動の変動磁場、 μ_0 は真空中の透磁率で被積分項は磁気密度であり、

$$dV = A_I [B_I/B_\lambda] r_{eq} \cos(\lambda) [1+3\sin^2(\lambda)]^{1/2} d\lambda \text{ -----(2)}$$

dV は磁力線束の体積要素で赤道 ($\lambda=0^\circ$) から電離層高度 (λ_I) まで積分する。電離層高度での単位面積 (1m^2) 当たりの磁気エネルギーは

$$W_M = 2.27 (\text{J}/\text{m}^2) \text{ となった。}$$

5. 一方、電離層高度での Pc5 波動の振幅から Pc5ULF 波動に伴う沿磁力線電流 ($J_{||}$) の値 ($2.2\mu\text{A}/\text{m}^2$) を求め、この電流値から沿電流保存則 ($J_{||}/B=\text{const.}$) を用いて電離層上空約 4000km 高度の (B/n_e) ピーク、即ち電子加速ピーク域での電流値 ($0.6\mu\text{A}/\text{m}^2$)、及び加速電子のエネルギーフラックス (F_p),

$$F_p = 1/2 * n_e * v_e^3 = 1/2 * n_e * (J_{||}/q n_e)^3 \quad (3)$$

$$= 20\mu\text{J}/\text{sm}^2$$

を求めた。更に、この電子エネルギーフラックスを用いて電離層高度での電子エネルギー (W_F) を電子密度 $1/\text{cm}^3$ 、 $1/4$ 周期を仮定し $W_F = 0.0046 (\text{J}/\text{m}^2)$ を得た。もし、仮定された電子密

度が $0.1/\text{cm}^3$ とするとフラックス (3) 式で密度の逆二乗になるのでエネルギー値は 100 倍となり、単位面積当たりの電子運動エネルギーは $W_F = 0.46 (\text{J}/\text{m}^2)$ が得られる。

6. 求めた加速電子のエネルギー密度 ($0.46\text{J}/\text{m}^2$) と磁場のエネルギー密度 ($2.27\text{J}/\text{m}^2$) とを比較すると加速電子のエネルギー密度は磁場エネルギー密度の約 20% 程度である事が分かる。即ち、Pc5 波動の磁場エネルギーでオーロラ電子を十分の加速出来る事を示す事が出来た。

7. 更に、観測したオーロラアークの輝度変動の磁気緯度に対する分布を調べ、アーク自体も磁力線共鳴振動の結果である事を証明した。

成果：上記の研究は現在、AGU Journal, Journal of Geophysical Research, Space Physics に投稿中。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	2-2
研究課題名	磁気圏ULF波動の電離圏オーロラ活動への効果		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)	佐藤 夏雄	宙空	名誉教授
小計	3 名		
所外 (極地研以外)	A. N. Wright	Mathematical Institute, University of St.	Professor(英国)
	K. Takahashi	The John Hopkins University, Applied Phy	Professor(米国)
	T. Elsdén	School of Mathematics and Statics, Univ	Professor(英国)
	海老原 祐輔	京都大学生存圏研究所	准教授
	堀 智明	名古屋大学宇宙地球環境研究所統合テ	特任准教授
小計	5 名		
合計	6 名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

電離圏サブストームの磁気圏投影構造

◎田中高史 九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター・名誉教授

鷺見治一 九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター・学術研究者

(国立極地研究所)

片岡龍峰 准教授

令和2年～令和3年(2か年)

研究成果

本研究では、グローバルシミュレーションでサブストームを再現し、電離圏で観測されるサブストーム擾乱に対応する磁気圏構造を明らかにすることが目的である。グローバルシミュレーションの解によって、磁場・電流のトレースを可能にしたこと、磁気圏対流を電離圏に移送する沿磁力線電流(FAC)の役割を重視したこと、従来の磁気圏では余り考慮されていなかった磁場のヌル構造を取り入れたことが特徴になっている。

計算に用いたのは、REPPU (REPOduce Plasma Universe)コードです。このコードは格子集積点が発生しないような12面体分割格子を用いるので、解像度を上げることができる。と言っても現実には分割を上げれば定式化に乗らない困難も発生する。本研究では、分割回数7(レベル7)を更に改良し、レベル7SuperFineモデルが開発された。これはレベル7の範囲で、解像度を極限まで上げたモデルです。レベル7SFでは、太陽風-磁気圏相互作用で、FTE、KH、ヌル構造などが、これまでに無い解像度で、再現できた。プラズマシートの数値散逸を減らすことができ、オンセット後もthinningが継続し、拡大相にならない解も作れる。当然これは現実ではないが、数値散逸が現実より小さいことを示す。このようなモデルによって、磁場構造、対流、電離圏電流を再現した。数値解を解析し、サブストーム構造を調べた。このコードは並列化されており、コア数は、500程度で計算した。

計算結果は検証が重要ですが、これはなかなか

難しいところです。磁気圏観測は直接的ではありませんが、全体は見えない。対流やFACの問題は、全体構造の問題であって、部分を取り出しても良く理解できない。そこで我々は、電離圏の全体観測を検証に用いた。それは、REPPUコードでは磁気圏だけでなく、電離圏も詳細に計算できるので、可能となる。磁気圏計算で見れば、他のコードもREPPUとそれほど変わらないが、電離圏の解では、REPPUコードが格段に優れている。[1]の論文では、電離圏の磁場変動がシミュレーションでも観測されるとおりに再現されることを示し、モデルの検証を行っている。

次に他の主要な発表論文について説明する。[3]の論文は、発見以来半世紀に亘って未解決であった、Harang不連続(HD)を解明するものです。シミュレーションでは、quiet arcの発達と共にHDが成長し、オンセットで解消される様相が再現されます。その成因は、ヌルを經由するローブ/プラズマシート境界のシア一流が、電離圏に投影されているためです。HDはプラズマシート中で、対流が偏向するのが原因とされてきましたが、この場合、HDは南北で対照になるはずですが、シミュレーションでは反対称になり、観測に一致する。

[5]の論文は、FACとシアーは一体で生成されることを示すもので、JGR誌の表紙になっています。成長相では、quiet arcに上向きFACが接続され、オンセットでは電離圏にオンセットFACが接続されますが、これらは磁気圏から電離圏へのシアーの接続と同期して発生することを示しています。すなわちサブストームでは、磁気圏の対流擾乱が

電離圏に投影されており、これは FAC が運動を伝達するという一般原則(飯島定理)に沿った変動です。CW の様に、電流系の変動として一面だけを捉えるのは、間違いという結果が得られている。

[6]の論文は、M-I 結合によって thinning が促進され、プラズマシート散逸が拡大相を進展させることを示している。両者が揃わないと、AU/AL は再現されない。オンセットはヌルーセパレーター構造中で起こる、2段階ガイド磁場リコネクションである。これを正確に見ないで、inside-out か outside-in かと言うような無意味な言い争いをしているのが、世界の権威の実態であろう。またオンセット FAC は地球近傍ダイナモで生成され、CW は誤りとなる。

これらの論文をとおして、成長相では、北向き IMF 下で出来たヌルがテイルに後退し、新たに南向き IMF に対応したヌルが昼側にでき、全体として4ヌル構造となるというモデルを検証した。これまで成長相でヌルを考えるモデルは無かったが、本研究ではこの様なモデルによって得られる変動

研究発表

[1]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2020), Reproduction of ground magnetic variations during the SC and the substorm from the global simulation and Biot-Savart's law, *J. G. R.*, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JA027172>

[2]田中高史、複合系磁気圏物理学、オーロラ物理学シリーズ①、極研電子ライブラリー、国立極地研究所、2020

[3]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2021), Formation and release of the Harang reversal relating the substorm onset process, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028170>.

[4]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, and R. Kataoka (2021), Global simulation of the Jovian magnetosphere: Transitional structure from the Io plasma disk to the plasma sheet and electromagnetism of auroral generation, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028897>.

[5]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2021), Development of the substorm as a manifestation of convection transient, *JGR*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028942>.

[6]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, N. Nishitani, and R. Kataoka (2021), Roles of the M-I coupling and plasma sheet dissipation on the growth-phase thinning and subsequent transition to the onset, *JGR*, 126, <https://doi.org/10.1029/2021JA029925>

が、観測と一致することを示した。成長相は磁気圏対流の進展として理解され、これに対して、電離圏結合も一体であり、thinning の進展も含めて、結合系の変動であることを明らかにした。

電離圏上で、成長相の現象として顕著な、quiet arc および Harang 不連続を理解することは、サブストーム解明に等価であろうという予想は、50年に亘って認識されて来た。本研究で、サブストームは促進された対流が FAC によって電離圏へ伝達される過程であると考え、これらの現象が良く理解できることを示した。サブストームは、成長相から拡大相まで、広く非 MHD 現象であると認識されることが多いが、これに対してこの研究のモデルでは、他の磁気圏現象と同じ様に、サブストームでも FAC による運動の伝達がダイナミクスの主要要素であることを示した。散逸は拡大相の進展など、一部で必要になるが、オンセットの主役ではないと結論される。このモデルでは CW は誤りと結論された。

LODEWAVE 用スーパープレッシャー気球の開発

◎斎藤芳隆 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・准教授
 松尾卓摩 明治大学理工学部・准教授
 (国立極地研究所)
 富川喜弘 准教授
 令和2年～令和3年(2か年)

[研究成果]

LODEWAVE (Long-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) は、南極上空の重力波による東西・南北風運動量の鉛直フラックスの三次元分布をスーパープレッシャー気球で観測により明らかにすることを目的としたミッションである。しかし、利用するスーパープレッシャー気球は依然開発段階にあり、低温での長時間飛行の影響の評価や気密性の確認は不十分であり、南極での放球方法も検討する必要がある。このため、本研究において、構成材料である天然ゴムの紫外線照射後の低温でのクリープ試験、放球手順の確認試験を実施した。

スーパープレッシャー気球の構成材料である天然ゴムは飛行中にポリエチレン皮膜を透過した紫外線に曝露され、その耐候性が気球の寿命を決定する要因となることが推定され、その影響の評価が必要である。飛行高度では、大気密度が小さくかつ低温となるため、低温での評価を極地研低温室にて実施させていただいた。

耐候性は、天然ゴムを JIS K 6251 規定のダンベル状 3 号形に切り抜いた試験片に、キセノンランプを用いた紫外線照射装置で紫外線を照射したものを用意し、低温環境下でのクリープ特性を調べることで評価した。その際、大気中/真空中、および、ポリエチレンフィルムの有無の条件を変えて紫外線曝露を行った試料を用意し、比較することでその影響も評価した。



図1 クリープ試験の様子

図1に低温環境実験室(-30℃)での低温クリープ試験の様子を示す。各試験片には 100g の錘を吊り下げ、使用時と同様のひずみを与えている。表1に紫外線曝露量と曝露試験条件を示した。

表1 試験片の紫外線曝露条件

試験片番号	曝露条件	曝露紫外線量, kJ/m ²
1	In Air with no film	8640
2	In Vacuum with film	8640
3	In Vacuum with film	6480
4	In Air with no film	6480

図2に経過時間とひずみの関係を示す。試験片3、即ちフィルムを被せて真空中で積算紫外線量 6480kJ/m² を曝露させた試験片は実験開始 12 時間後に破断したものの、それ以外の試験片は 1800 時間を超えても破断しなかった。

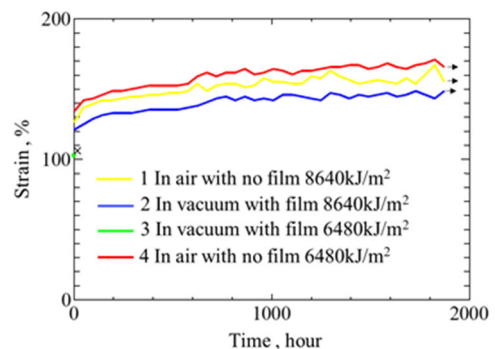


図2 低温環境下におけるクリープ試験結果

次に、常温で同様の試験を実施して、結果を比較した。図3に大気中でフィルムを被せて紫外線曝露した試験片の結果(上)及び真空中でフィルムを被せて曝露した結果(下)を示す。常温環境下では全ての試験片は破断したが、低温環境ではいずれも寿命が向上することが確認された。

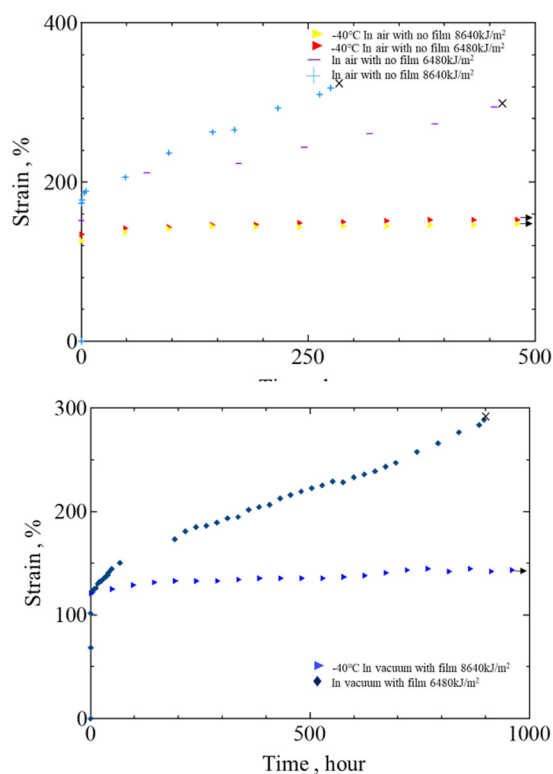


図3 大気中（上）、および、真空中（下）（いずれもフィルム有）で紫外線暴露を行った試験片のクリープ試験結果

2021年2月26日には、観測倉庫とその近くの屋外において、体積 100 m³ の NPB01-4 気球を用いて、気球打ち上げ手順の確認試験を実施した。この試験の実施にあたっては、実際に打ち上げ作業を実施する隊員の方々に作業していただいた。作業時の様子を撮影した動画が参考文献 2)にて公開されている。その後、手順の改良を行い、実際に飛行試験で使用する体積 200 m³ の気球を用いた確認試験を小野町町民体育館で実施し、最終確認とした。



図4 放球訓練の様子

[参考文献]

- 1) 富川喜弘、他、「南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画(LODEWAVE: LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)」宇宙航空研究開発機構研究開発報告大気球研究報告 JAXA-RR-20-006 pp.19-33, 2021
- 2) 「スーパープレッシャー気球 (SPB) ガス充填訓練」極地研 FACEBOOK、
<https://www.facebook.com/nipr.j/videos/%E3%82%B9%E3%83%BC%E3%83%91%E3%83%BC%E3%83%97%E3%83%AC%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%BC%E6%B0%97%E7%90%83spb%E3%82%AC%E3%82%B9%E5%85%85%E5%A1%AB%E8%A8%93%E7%B7%B4/1405646359777959/>

[研究発表]

富川 喜弘、他、「南極における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画(LODEWAVE)の現状」、2020 年度大気球シンポジウム集録、isas-sbs-017, 2020
 富川 喜弘、他、「南極における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画(LODEWAVE)の現状 2」、2021 年度大気球シンポジウム集録、isas-sbs-033, 2021

1. 当該共同研究に関する研究発表について、可能な限りすべての学会誌名等を記入してください。(口頭発表については、原則として省略する。)
2. 参考文献、研究発表を行った学会誌名等を英文表記する場合は左右 2 列にする必要はありません。
3. 研究協力者(共同研究者ではない参加者。大学院生等)については、(別紙)参加者一覧に記載し、報告書に添付してください。

南極昭和基地大型大気レーダーを用いた FAI のイメージング手法の開発

◎齊藤昭則 京都大学大学院理学研究科・准教授
西村耕司 京都大学生存圏研究所・准教授

(国立極地研究所)
橋本大志 助教

研究期間：令和2年～令和3年（2か年）

[研究成果]

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY レーダー）では電離圏における沿磁力線不規則構造（Field Aligned Irregularity : FAI）からの反射波が測定されており、この FAI の空間構造とその時間変化を調べるために PANSY レーダーデータを用いた FAI イメージング手法の開発をおこなった。

PANSY レーダーは南極昭和基地に設置されている周波数 47MHz の電波を用いた VHF 帯大気レーダーであり、電離圏 E 領域における空間波長 3 m スケールの FAI からの強い反射波を受けている。この FAI エコーは電離圏 Incoherent Scatter (IS) モード観測による電子密度やプラズマドリフトの測定の障害となるため FAI アレイと呼ばれる FAI エコー受信アンテナ群の受信データを用いて、IS 観測データからの除去が行われている [Hashimoto et al., 2019]。本研究では、除去されていた FAI エコーを利用して、FAI を引き起こす電離圏内不安定性形成の空間構造とその時間変化を解明するための手法開発を進めた。

PANSY レーダーによる FAI からの反射波データを Fourier 法と Capon 法を用いて FAI エコーの到来方向の推定を行いイメージング処理をしたところ、FAI アレイの受信ビームパターンの影響により偽像が現れ FAI の空間分布を正しく推定できないことが

わかった。そこで、CLEAN 法により観測で得られたイメージ上の最大強度の点を中心とする受信パターンを逐次的に差し引き、ビームパターンの影響を除去して FAI の空間分布の推定をおこなった。観測データとしては 2017 年 4 月と 12 月に実施された 8 回の観測を用いた。このうち、6 回において FAI エコーが検出され、その一部で周期約 7 分の周期性を持つ準周期 (QP) エコーが見られた。その QP エコーに対して CLEAN 法によるイメージング処理を行った結果、QP エコーとして観測された FAI はレンジ方向に移動していることが明らかになった。この FAI は、電離圏電子密度変動のデータとの比較から、電離圏 E 領域の電子密度増大に伴って起こる gradient-drift 不安定性によって引き起こされたものであると推定された。また Pc5 型地磁気脈動と関連した時間変動をもつ FAI も観測され、CLEAN 法によるイメージング処理から、この FAI は空間的に大きく移動するものではなかったことが明らかになった。

しかし、PANSY レーダーによる FAI 観測データとその処理についてはまだ不十分な点もあることから、新しいデータ取得も行き、データ処理方法の検討を継続している。

[参考文献]

Hashimoto T., Saito A., Nishimura K., Tsutsumi M., Sato K., and Sato T. First incoherent scatter measurements and adaptive suppression of field-aligned irregularities by the pansy radar at syowa station, antarctic. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 36, No. 9, pp. 1881–1888, 2019.

[研究発表]

Kagawa, Daisuke, Taishi Hashimoto, Akinori Saito, Koji Nishimura, Masaki Tsutsumi, Toru Sato, Kaoru Sato, Imaging Observation of Ionospheric Field Aligned Irregularities by the PANSY Radar at Antarctic Syowa Station, The 11th Symposium on Polar Science, Dec. 3., 2020.

香川大輔, 橋本大志, 齊藤昭則, 西村耕司, 堤 雅基, 佐藤 亨, 佐藤 薫, 南極昭和基地大型大気レーダーによる電離圏沿磁力線不規則構造のイメージング観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 148 回総会・講演会, Nov. 3, 2020.

香川大輔, 橋本大志, 齊藤昭則, 西村耕司, 堤 雅基, 佐藤 亨, 佐藤 薫, 南極昭和基地大型大気レーダーによる電離圏沿磁力線不規則構造のイメージング観測, 中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究集会, Sep. 28, 2020.

香川大輔, 南極昭和基地大型大気レーダーによる電離圏沿磁力線不規則構造の観測, 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学分野修士論文, 2021

橋本大志, 香川大輔, 西村耕司, 齊藤昭則, 堤雅基, 佐藤亨, 佐藤薫, FAI 観測用アンテナアレイの再構成と FAI イメージング観測の初期解析, PANSY 研究集会, Mar. 9, 2022.

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	2-10
研究課題名	南極昭和基地大型大気レーダーを用いたFAIのイメージング手法の開発		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)			
小計	名		
所外 (極地研以外)	香川大輔	京都大学大学院理学研	大学院生
小計	1名		
合計	1名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（2）気 水 圏

衛星搭載合成開口レータデータを用いた東南極の氷河と海氷の変動解析

◎中村和樹 日本大学工学部・准教授

山之口勤 (一財) リモートセンシング技術センター・グループリーダー

(国立極地研究所)

牛尾収輝 准教授

田村岳史 准教授

平成 31 年～令和 4 年 (3 年)

[研究成果]

1. はじめに

白瀬氷河は南極の他の氷河と比較しても流動速度が速いことで知られており、南極氷床の質量収支の把握のために氷河の流動速度の監視は重要である。現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が打ち上げた陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) が運用されており、ALOS-2 に搭載されたフェイズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (SAR) 2 型 (PALSAR-2) により SAR データが取得されている。ALOS-2/PALSAR-2 の広域観測モードデータによる白瀬氷河の観測結果から、1998 年秋季に氷河浮氷舌と定着氷の大規模な崩壊¹⁾以降は顕著な変動は見られなかったが、2015 年以降は定着氷の大規模な崩壊が始まり氷河の流動速度にも変化が見られている²⁾。

本報告では ALOS-2/PALSAR-2 の高分解能モードデータを用いて、白瀬氷河と氷河末端の定着氷の流動速度の相互関係を調べた結果を示す。

2. データ取得

ALOS-2 は、2014 年 5 月に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が H-IIA ロケットによる打ち上げた衛星である。ALOS-2 衛星は回帰日数が 14 日であり (ALOS 衛星は 46 日)、L バンド SAR (1.27 GHz) である PALSAR-2 を搭載している。

PALSAR-2 データを用いることにより、白瀬氷河の同一場所の変動を最短で 14 日間隔で調べることが可能であり、本報告では高分解能モード (10 m 分解能) により 2016 年から 2018 年に取得された同一パスの HH 偏波データを使用した。氷河と定着氷の変動を調べることができた画像ペアは 7 ペアであった。表 1 に PALSAR-2 データ取得日と定着氷の有無を示す。

3. 解析方法

本報告では PALSAR-2 レベル 1.1 の SLC (single-look complex) データを使用し、はじめに画像ペア同

表 1 PALSAR-2 観測日と定着氷の状況

Master	Slave	Landfast ice	SAR obs. mode
2016/04/14	2016/04/28	Broken away	
2016/10/13	2016/10/27	Developed	Path 53
2017/03/30	2017/04/13	Broken away	Des. orbit
2017/09/14	2017/09/28	Developed	HH pol.
2017/10/26	2017/11/09	Developed	Inc. angle 32°
2018/03/29	2018/04/12	Broken away	at scene center
2018/09/27	2018/10/11	Developed	

士をサブピクセルでの位置合わせ (標準偏差 0.1 ピクセル以下) を実施した。つぎに、レンジに 1 ルックおよびアジマスに 2 ルックのマルチルック処理を行った後にグランドレンジ画像へ変換した 2 時期の画像を用いて、画像相関法³⁾により白瀬氷河および定着氷の流動ベクトルを求めた。

画像相関法とは、画像ペアにおける同一地点の検出を、両画像から取り出した小領域の一致を相互相関係数の高さで調べることにより行う方法である。処理後のアジマス、レンジ方向のピクセルスペーシングは 8 m にリサンプリングしたものである。実効上の推定誤差は、サブピクセルの位置合わせにより 0.1 pixel、流動速度にして 0.03 km a⁻¹ とみなせる。

4. 解析結果・まとめ

図 1 (a) に白瀬氷河の流動速度プロファイルを示す。この図から、Grounding line (GL) から 10 km 下流における流動速度は、ほぼ GL における流動速度²⁾と同様の 2.31±0.03 km a⁻¹ であり (7 ペアの平均±標準偏差)、氷河末端周辺の定着氷の安定/不

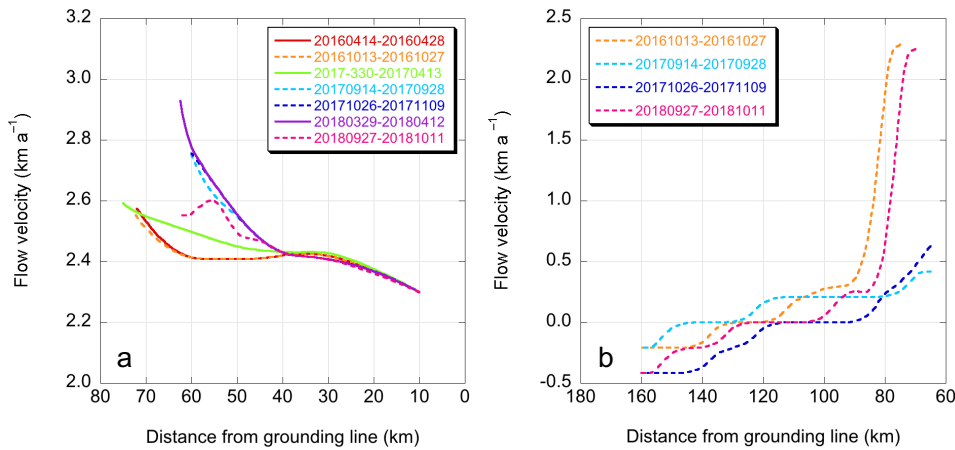


図1 流動速度プロファイル。(a) 白瀬氷河の中央流線、(b) 氷河の中央流線に沿ったリュツォ・ホルム湾の定着氷。図中において破線（実線）は定着氷が安定状態（不安定状態）を示す。

安定との関連性は低いと見られる。一方、2017年4月に定着氷が崩壊した後、氷河の末端は約15 km後退し、定着氷の防壁が無い状態では氷河の流動速度が北方へ0.20~0.38 km a⁻¹加速した。

図1(b)に示すように、氷河末端周囲の定着氷の流動速度は、浮氷舌の中央流線から北へ沿って調べた結果、浮氷舌末端からの距離に比例して減少した。一方、Grounding lineから120~140 km下流の定着氷縁辺部では、定着氷が南方へ移動しており、沖合から氷河に向かって徐々に速度が低下する傾向が見られた。なお、定着氷の中央部において、流動速

度に大きな変動は見られないことから、沖合の定着氷と氷河末端部の流動は収束していると考えられた。

以上から、白瀬氷河は定着氷を沖合に押し出していることが分かり、バットレス効果と氷河末端を囲む定着氷の存在は、白瀬氷河のカービングを抑制しているという仮説を支持するものである。本報告による白瀬氷河および氷河を取り囲む定着氷の流動速度の時空間的な変化は、バットレス効果の定量的な理解を深めるための基礎になるものと考えられる。

[参考文献]

- 1) K. Nakamura, K. Doi and K. Shibuya: Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase Glacier using JERS-1/SAR image correlation, Polar Sci, vol.1, pp.73–83, 2007.
- 2) 中村和樹, 山之口勤, 青木茂, 土井浩一郎, 澁谷和雄: 南極・白瀬氷河の20年間の流動速度変動, 雪氷, 79巻1号, pp.3-15, 2017年.
- 3) K. Nakamura, K. Doi and K. Shibuya: Fluctuations in Flow Velocity of the Antarctic Shirase Glacier over an 11-year Period, Polar Science, vol.4, no.3, pp.443–455, 2010.

[研究発表]

- 1) Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura, Shuki Ushio, and Koichiro Doi: Fluctuations of the ice flow velocity of Shirase Glacier and its surrounding landfast ice displacement in east Antarctica derived from ALOS-2/PALSAR-2 image correlation, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019 (IGARSS 2019), pp.4172-4174, August 2019.
- 2) Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura and Koichiro Doi: Validation for ice flow velocity of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 image correlation, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2021 (IGARSS 2021), pp.5603-5606, July 2021.

南極域のエアロゾル長期変動の解析

◎原 圭一郎 福岡大学 理学部・助教

(国立極地研究所)

平沢 尚彦 助教

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

南極域は低中緯度域の人間活動から隔離された環境であるため非常に清浄であり、地球環境、特にバックグラウンドの大気質監視をする上で、非常に重要な地域である。清浄な南極域においても、エアロゾルの季節変化は確認され、南極圏内での一次放出、新粒子生成過程や、南極圏外からの長距離輸送過程と密接に関係している¹⁾。南極大気中のエアロゾルシステムやその季節変化・長期トレンドの理解を目的として、モニタリング観測の 1 部として、エアロゾル観測を南極昭和基地において実施してきた。これまでは、イベント解析や季節変化の解析が中心に解析されてきたため、本研究では、観測データの再解析を行い、長期トレンドの解析を試みた。

(1) 凝結核 (CN) 数濃度の長期トレンド解析

長期トレンド解析のため、局所汚染データを取り除いた後、各隊次の測器運転状況を再調査し、観測データの質の再解析を進めた (図 1)。図 1 に示す様に CN 濃度は明瞭な季節変化を示している。この季節変化は、大気中で起こる新粒子生成とその後の粒子成長、海洋生物活動の強さ、海水面積の季節変化、

O₃ ホールによる対流圏紫外線量の増加に関係していた。現在では、統計的に有意な経年トレンドは確認されなかったが、各年の季節変化を細かく見ていくと、年ごとの差が明瞭であるため、上記の諸過程の寄与や空気塊の輸送経路も併せて議論していく必要がある。これらについては、現在も解析を継続している。また、図 1 に示した再解析データを公開用のデータとして整備し、公開に向けて準備を進めている。

(2) ブラックカーボン (BC) 濃度の長期トレンド解析

BC 濃度の連続観測は、主に Aethalometer を使用し、最近では、Multi-Angle Absorption Photometer (MAAP) も一並行運転をしている。いずれの計測方法もエアロゾル粒子をフィルターテープ状に捕集し、光学的に BC 濃度を求めている。MAAP では捕集粒子による光散乱効果の補正は行われているが、Aethalometer では補正されていないため、Weingartner 補正法²⁾を用いて BC 濃度を補正した (図 2)。図 2 に示す様に、BC 濃度も明瞭な季節変

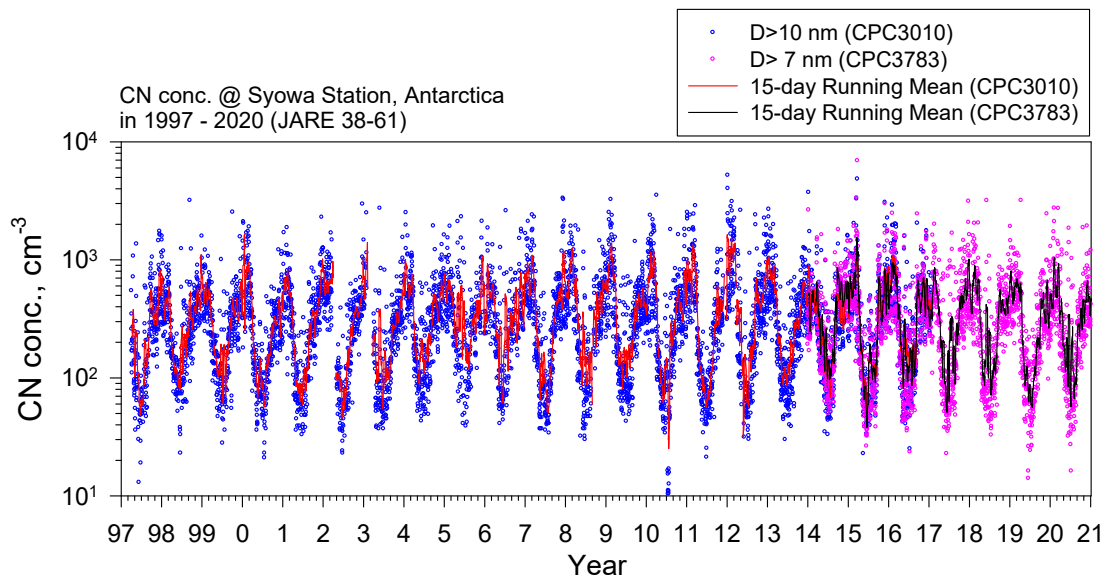


図 1 南極昭和基地で観測された CN 濃度 (日平均) の季節・経年変化

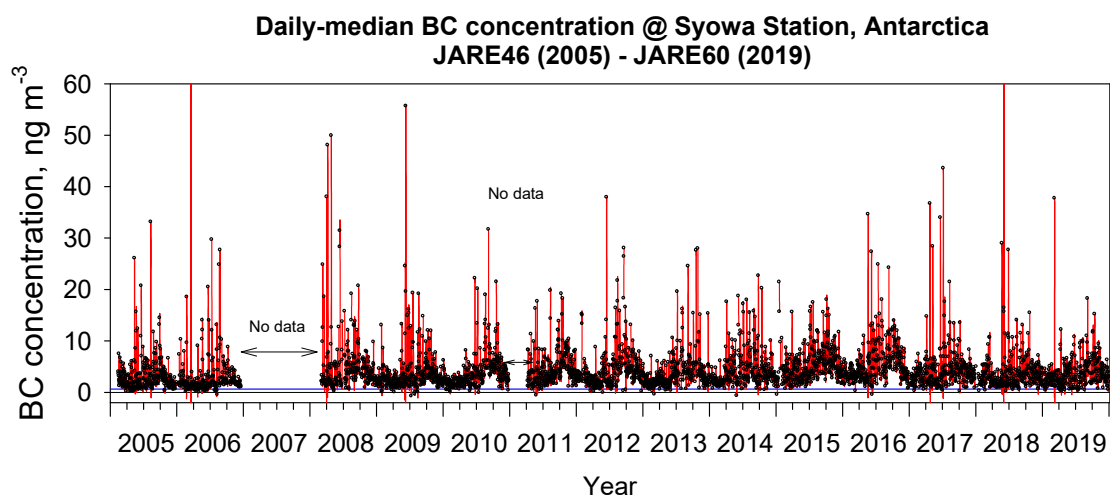


図2 南極昭和基地で観測されたBC濃度(日中央値)の季節・経年変化

化を示している。CN濃度と同様に、統計的に有意な経年トレンドは確認されなかった。化学輸送モデル(CHASERモデル)との比較から、昭和基地に輸送されるBCは、南米、アフリカ南部のバイオマス燃焼の寄与が非常に重要であり、人間活動による化石燃料使用も無視できない寄与があることが明らか

かとなった。さらに、後方流跡船解析による空気塊の輸送経路とBC濃度の比較から、昭和基地で観測されたBC濃度の季節変化は、南極圏外のBCソース強度の季節変化だけではなく、南極域への輸送強度の季節変化も重要であることが明らかとなった。また、Aethalometerの補正值とMAAP計測値との比較から、BC濃度の再補正も進めており、データ公開の準備を進め、間もなく公開の予定である。

[参考文献]

- 1) 原圭一郎, 南極対流圏大気中のエアロゾル: 空間分布と循環・輸送過程, *気象研究ノート*, 233, 77-111, 2017.
- 2) Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., and Baltensperger, U.: Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, *J. Aerosol Science*, 34, 1445-1463, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00359-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00359-8), 2003.

[研究発表]

- Keiichiro Hara, Kazuo Osada, Masanori Yabuki, Masahiko Hayashi, Masataka Shiobara, Naohiko Hirasawa, and Takashi Yamanouchi, Log-term monitoring of condensation nuclei concentrations at Syowa Station, Antarctic, *Submitted to Polar Data Journal*.
- Hara, K., Nishita-Hara, C., Osada, K., Yabuki, M., and Yamanouchi, T.: Characterization of aerosol number size distributions and their effect on cloud properties at Syowa Station, Antarctica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 12155-12172, <https://doi.org/10.5194/acp-21-12155-2021>, 2021.
- 原圭一郎, 対流圏における海塩粒子と大気化学過程の関係 -海塩・ハロゲンサイクルの影響-, *エアロゾル研究*, 35, 170-182, doi:10.11203/jar35.170, 2020.
- Keiichiro Hara, Kazuo Osada, Masanori Yabuki, Sumito Matoba, Motohiro Hirabayashi, Shuji Fujita, Fumio Nakazawa, and Takashi Yamanouchi, Atmospheric sea-salt and halogen cycles in the Antarctic, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22, 2003-2022, doi: 10.1039/D0EM00092B, 2020.
- 原圭一郎, 極域エアロゾルシステムの動態に関する観測的研究—2019年度日本気象学会賞受賞記念講演—, *天気*, 67, 579-594, 2020.
- Keiichiro Hara, Kengo Sudo, Takato Ohnishi, Kazuo Osada, Masanori Yabuki, Masataka Shiobara, Takashi Yamanouchi, Seasonal features and origins of carbonaceous aerosols at Syowa Station, Antarctica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 7817-7837, <https://doi.org/10.5194/acp-19-7817-2019>, 2019.

北極広域に沈着した光吸収性粒子の測定手法の確立とその空間分布の観測的解明

◎森樹大 東京大学大学院理学系研究科・特任助教
 小池真 東京大学大学院理学系研究科・准教授
 茂木信宏 東京大学大学院理学系研究科・助教
 大畑祥 名古屋大学宇宙地球環境研究所・助教

(国立極地研究所)

東久美子 教授

平成 31 年～令和 3 年度 (3 年)

【研究成果】

まず、ネブライザー（水中に分散した粒子を大気中に抽出する装置）とレーザー誘起白熱法を用いた分析装置（SP2）を組み合わせることで、積雪・降雪中のブラックカーボン粒子（BC）と黒色の酸化鉄粒子（ FeO_x ）の粒径別質量・数濃度を高精度に測定する手法を開発した。その手法を北極広域で採取した積雪試料に適用し、北極広域に沈着した FeO_x 質量濃度の特徴を調べた。本研究成果をここに報告する。

【はじめに】

光吸収性エアロゾル粒子は、太陽放射を効率よく吸収し大気を加熱することで、全球的に温暖化を促進する。さらに、北極圏では雪氷面に沈着した光吸収性粒子が雪面の反射率を下げ、雪面の融解を促進する影響がある。このような影響を定量的に理解するためには、北極圏の雪氷中の光吸収性粒子の広域分布やその除去メカニズムの解明が求められる。これらの研究を実現するための鍵となるのが、水中に含まれる光吸収性粒子の粒子種を選択的に区別し、粒子種ごとの濃度と粒径分布を計測する、新しい測定技術の開発である。本研究では、光吸収性粒子の中でも特に BC と FeO_x に着目する。

【 FeO_x 粒径別濃度の測定手法の開発】

水に分散させた FeO_x の標準試料であるウスタイトと BC の標準試料であるフラーレンスートをアトマイザーで発生させ、SP2 に導入した。光吸収性粒子がレーザー光を横断すると、その粒子の蒸発温度に比例した白熱光を放出する。異なる波長域の検出器から測定された白熱光強度を用いて色温度（Color ratio）を算出することで、光吸収性粒子の粒子種を区別することが可能である。図 1 a,b に SP2 で測定された Color ratio と白熱光強度との関係を示す。BC と FeO_x の蒸発温度はそれぞれ約 4000K, 3000K であり、両者の散布図の形は大きく異なった。Color ratio によって FeO_x と BC を分離できることがわかった。北極圏（Alaska, Finland, North Siberia, Greenland, Ny-Ålesund）の複数の場所で採取した

積雪・降雪試料についても同様の関係を調べたところ、北極広域に沈着した FeO_x と BC は Color ratio によって分離できることもわかった(図 1c-f)。レーザー光強度の違いによって Color ratio の値が変化するため、本解析では実験的に決定した境界線を用いて FeO_x と BC の分離を行った。

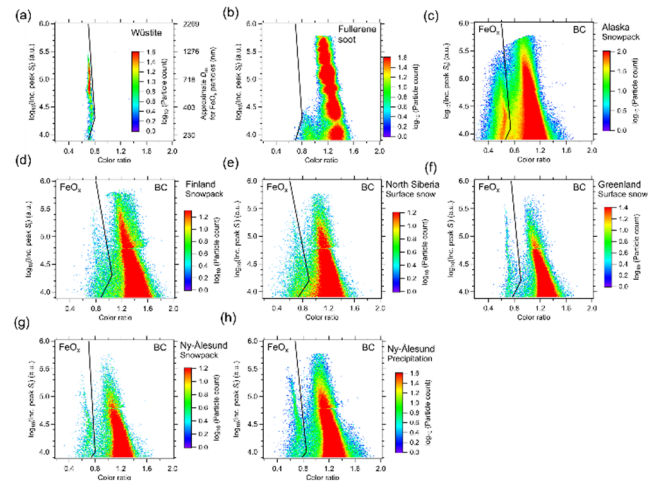


図 1. SP2 で測定した色温度（Color ratio）と白熱光強度との関係：(a)ウスタイト、(b)フラーレンスート、(c)アラスカの積雪試料、(d)フィンランドの積雪試料、(e)北シベリアの表層の雪試料、(f)グリーンランドの表層の雪試料、(g) ニーオルスンの積雪試料、(h) ニーオルスンの降雪試料

水試料中の FeO_x 濃度を推算するためには、 FeO_x におけるネブライザーの抽出効率を決定する必要がある。その抽出効率は、ネブライザー内の粒子の透過（50%）とネブライザーの出口から SP2 までの流路内の透過効率の積から算出した。70～650nm の範囲では、 FeO_x の抽出効率は約 50%であり、粒径にほとんど依存しなかった。一方、粒径が大きくなると粒子の重力沈降により粒子損失が大きくなる。そのため、650nm 以上では粒子の透過効率が大きく減少した。粒子損失の最も大きい場所は、ネブライザーから SP2 のインレットまでの経路であると推算された。

水試料中の FeO_x の粒径別質量濃度 $dC_{\text{FeO}_x}/d\log D$ [ng/L] は、ネブライザーの流速 F_{neb} [m^3/s]、ペリスタルティックポンプの流速 V_{pump} [L/s]、キャリアガス内の FeO_x 粒径別質量濃度 $dM_{\text{FeO}_x}/d\log D$ [ng/m^3]、ネブライザーの抽出効率 ε [%] から算出された¹⁾。

これまでの遠隔地における大気と降水の BC 粒径分布の同時観測から、大気中と降水中の BC 粒径分布の形がよく一致することが報告されている²⁾。これは遠隔地ほど BC 含有粒子の変質具合が進み、BC 含有粒子の雲粒活性能が高くなるためである。この結果を考慮すると、 FeO_x も同様に大気中と降水中の粒径分布の形が似ると考えられる。そこで、規格化した大気中と降水中の FeO_x 粒径別数濃度の比 RE を算出し、粒径ごとの比が 1 になるように $dC_{\text{FeO}_x}/d\log D$ を補正した (式 1)。

$$\frac{dC_{M\text{FeO}_x}}{d\log D_m} = \frac{dM_{\text{FeO}_x}}{d\log D_m} \times \frac{F_{\text{neb}}}{V_{\text{pump}}\varepsilon_{\text{FeO}_x}(D_m)} \times \frac{1}{RE(D_m)} \quad (1)$$

ただし RE は

$$RE(220 - 920\text{nm}) = 1,$$

$$RE(920 - 4000\text{ nm}) = 5.62 - 1.56 \times \log_{10}[D_m]$$

である。 F_{neb} , V_{pump} , $dM_{\text{FeO}_x}/d\log D$ ($dN_{\text{FeO}_x}/d\log D$), ε , RE の不確かさはそれぞれ, $\pm 5\%$, $\pm 5\%$, $\pm 7.0\%$ ($\pm 12\%$), $\pm 10\%$, $\pm 10\%$ と推算され、水試料中の FeO_x の質量・数濃度の不確かさはそれぞれ 17%, 20% と推算された。 RE を含まない粒径範囲 (220 - 920 nm) の不確かさは、それぞれ 14%, 17% であった。

[水試料中の FeO_x 粒径分布の安定性]

グリーンランドのアイスコアとアラスカの積雪試料、グリーンランドの表層の雪試料を用い、採取直後と長期間冷蔵庫に保管した後の粒径分布を比較

[参考文献]

- 1) Mori, T., et al. (2016). Improved technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. *Aerosol Science. & Technology*. 50(3), 242–254.
- 2) Mori, T., et al. (2021). Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(12), e2020JD034110.

[研究発表]

- 1) **Mori, T.**, Goto-Azuma, K., Kondo, Y., Ogawa-Tsukagawa, Y., Miura, K., Hirabayashi, M., et al. (2019). Black carbon and inorganic aerosols in Arctic snowpack. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 13325–13356. <https://doi.org/10.1029/2019JD030623>
- 2) **Mori, T.**, Kondo, Y., Ohata, S., Zhao, Y., Sinha, P. R., Oshima, N., et al. (2020). Seasonal variation of wet deposition of black carbon in Arctic Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032240. <https://doi.org/10.1029/2019JD032240>
- 3) **Mori, T.**, Kondo, Y., Ohata, S., Goto-Azuma, K., Fukuda, K., Ogawa-Tsukagawa, Y., Moteki, N., et al. (2021). Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(12), e2020JD034110. <https://doi.org/10.1029/2020JD034110>
- 4) **森樹大**, 積雪中のブラックカーボンの北極広域分布, 大気化学研究, 第 44 号, No.044A02, 1 月, 2021.

した。それぞれの試料の保管期間は、約 10 カ月、約 16 カ月、約 6 年である。16 カ月間、冷蔵庫に保管した試料では FeO_x 質量・数濃度ともに 10% 以内でよく一致し、粒径分布の再現性も高かった。一方、6 年間保管した試料はバラつきが大きい、220-600nm の範囲では質量・数濃度ともに 20% 以内で一致した。以上のことから、融解してから 16 か月以内の分析であれば、 FeO_x 濃度と粒径分布は高い再現性があることを示唆した。

[北極圏に沈着した FeO_x 濃度の北極広域分布]

BC と FeO_x 質量濃度の広域分布を図 2 に示す。本観測結果から、以下の 3 点を明らかにした。

- 1) アラスカと北シベリアで採取した試料では、 FeO_x と BC 質量濃度の間に良い相関関係が見られ、人為起源 FeO_x の沈着の可能性を示唆した。
- 2) グリーンランドやニーオルスンの試料では両者の間に相関関係が見られず、自然起源 FeO_x の沈着が支配的である可能性を示唆した。
- 3) FeO_x の質量濃度は BC に匹敵するほど高かった。数値モデルを用いて、雪面アルベドへの影響度合いを今後調べていく必要がある。

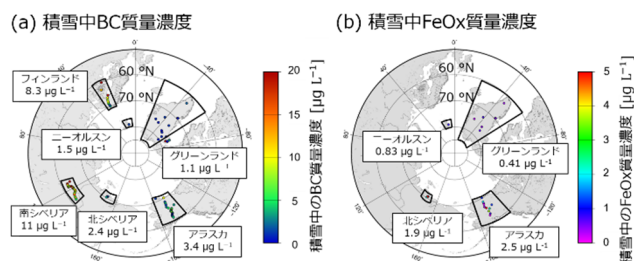


図 2. 北極圏広域に沈着した(a) BC, (b) FeO_x 質量濃度の広域分布

雲ゾンデを用いた冬季の北極海で生じる雲特性変化の解明

◎佐藤和敏 北見工業大学工学部・助教

(国立極地研究所)

猪上 淳 准教授

當房 豊 助教

平成31年～令和3年（3か年）

[研究成果]

北極温暖化に伴う気温上昇や海氷減少により変動する雲特性を把握するため、雲粒子センサー(CPS)ゾンデを使用した観測的研究を実施した。CPSゾンデは、雲中の雲粒子数や雲相(水雲か氷雲か)を計測するための国産の特殊ゾンデである(図1)。本研究では、このCPSゾンデを北極域で初めて観測に利用するとともに、これまで提案されてきた簡易的なデータ補正方法を、取得データと数値実験を駆使して、より高精度に雲微物理パラメータを抽出するための開発研究を行なった。また、海氷が消失した海域での雲素性の変化について、統合研究を行なった。各年度の活動内容は以下のようにまとめられる。

平成31年度

初年度においては、2019年10月の海洋地球研究船「みらい」による北極海航海において、北極海太平洋側のチュクチ海上で12回のCPSゾンデ観測を実施した。また、係留気球にCPSゾンデを搭載した観測を複数回実施し、約1時間の連続観測にも成功した。また、2020年3月には、スヴァールバル諸島のニーオルスン基地において、ドイツのAWIと共同でCPSゾンデ観測を11回実施した。この共同観測では、冬季の大西洋北極海で発生する雲の観測に成功した。

令和2年度

次年度目においては、取得データの解析を進めるとともに、それを補うための数値実験を実施し、より定量的な結果を得るための技術開発を行なった。具体的には、先行研究で算出された補正係数とは異なる係数を提唱し、この新たな補正係数を観測データに適応することで他の観測とも定量的に一致する結果を得ることができた。これらの成果を英語の論文としてまとめ、学術雑誌へ投稿した。

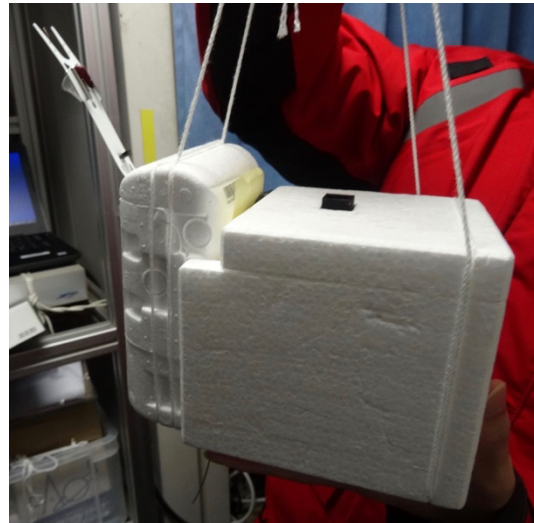


図1 ラジオゾンデ(左)とCPSゾンデ(右)

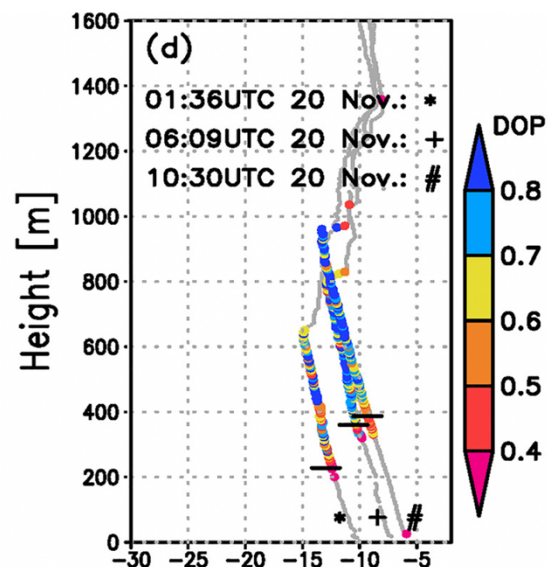


図2 みらい北極航海時に観測された気温と雲相の鉛直プロファイル。DOPは1(0)に近いほど水(氷)雲を示している(Inoue et al. 2021, GRL)。

令和3年度

最終年度においては、投稿済みの論文が公開されるとともに (Inoue et al. 2021, *Atm.Meas.Tech.*)、より発展的な科学成果として 2018 年「みらい」北極海航海で観測された事例に関して、海面からの氷晶核粒子の巻き上げが氷雲形成に寄与することを CPS ゾンデ観測から実証し (図 2)、それを論文に投

稿し、発表した (Inoue et al. 2021, *GRL*; 2021/11/16 プレスリリース)。さらに 2022 年 3 月には、この CPS ゾンデを、雲の相状態を判別できる新型のライダーシーロメーター (CL61、ヴァイサラ社) の評価に使用するため、北見工業大学にて同時観測を実施し、新しい測器の検証にも役立てている。

[参考文献]

2021 年 11 月 16 日プレスリリース (極地研、JAMSTEC、北見工大) 「北極海の海水減少で雲の性質が変化～強風による波しぶきにより氷雲の割合が増加～」 <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20211116.html>

[研究発表]

- 1) Inoue, J., Y. Tobo, K. Sato, F. Taketani, and M. Maturilli (2021), Application of cloud particle sensor sondes for estimating the number concentration of cloud water droplets and liquid water content: case studies in the Arctic region. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 4971-4987.
- 2) Inoue, J., Y. Tobo, F. Taketani, and K. Sato (2021), Oceanic supply of ice-nucleating particles and its effect on ice cloud formation: A case study in the Arctic Ocean during a cold-air outbreak in early winter. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094646.

東南極氷床境界域における海洋物理過程の研究

◎大島慶一郎 北海道大学低温科学研究所・教授
 青木茂 北海道大学低温科学研究所・准教授
 中山佳洋 北海道大学低温科学研究所・助教
 小野数也 北海道大学低温科学研究所・技術専門職員

(国立極地研究所)

田村岳史 准教授

牛尾収輝 教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

西南極の氷床では海洋による融解加速により氷床量が減じており、海水準上昇への寄与が大きな問題となっている。より氷床の涵養が大きい東南極においても、トッテン氷河域では氷床量が減じつつあることが最近明らかになっている。本研究では、東南極のトッテン氷河域を中心として、氷河融解に関わる海洋諸過程を観測と数値実験を合わせて明らかにしていくことをめざした。

近年の人工衛星や過去の海洋観測をコンパイルした研究により、トッテン氷河の沖合には、複数の巨大な（水平方向に 100-200km 程度）時計回りの海洋渦が常に存在していることが明らかになっている（図 1）。そこで、この巨大な海洋渦が大陸方向へ沖合の暖かい水を運ぶ重要な役割を担っているであろうという仮説のもとに、トッテン氷河沖での海洋観測を実施した。水産庁漁業調査船「開洋丸」の第 10 次南極海調査（2018 年 12 月～2019 年 2 月）、および、第 61 次南極地域観測隊（2019 年 11 月～2020 年 3 月）における南極観測船「しらせ」での航海において、トッテン氷河沖合の広域で海洋観測を実施し、水温・塩分・溶存酸素などの鉛直プロフィールデータを取得した。両航海での海洋観測地点のうち 91 地点で得られたデータと、衛星による観測データを統合して解析を行った。その結果、大陸斜面に沿った水温の分布を見ると、暖かい水は東西方向に一樣ではなく、むしろ点在して分布するという状況が観測された（図 2）。このような特に暖かい水は、定在渦の東側、つまり南下流域に分布して

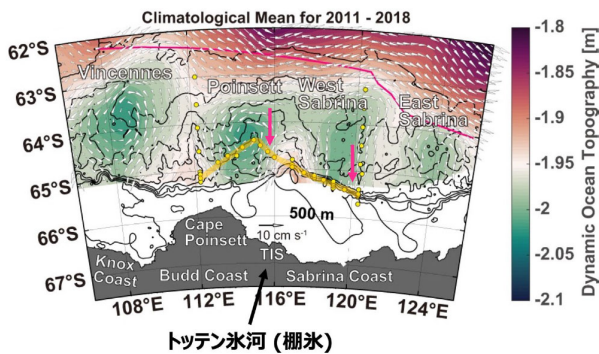


図 1 トッテン氷河沖に定在する巨大渦

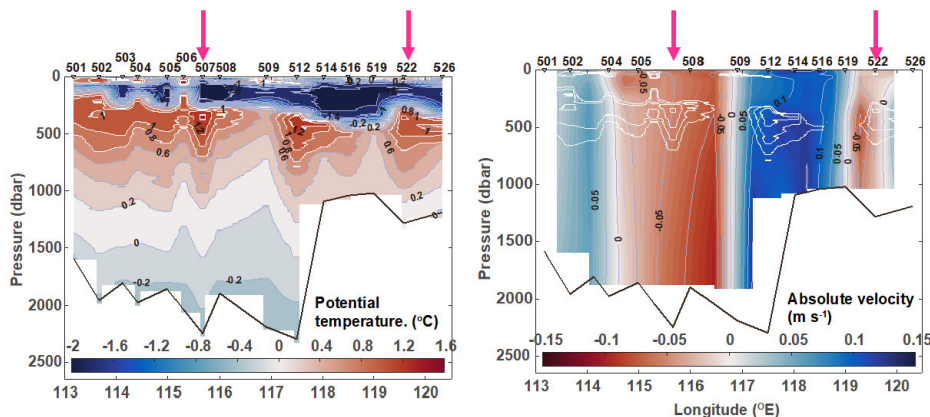


図 2 大陸斜面に沿ったトッテン氷河沖での東西方向の海水温の分布

いた。このことは、時計回りの定在渦によって沖合の暖かい水が効率的に大陸方向へ運ばれていることを示している。海洋は大小様々な渦で満ちあふれており、大半は出来ては消え、出来ては消えを繰り返すが、トッテン氷河沖の巨大渦は「定在」している。この特徴が本海域では重要であり、定在する渦の東側（南下流域）では「常に」暖かい水が沖から大陸方向へと効率的に輸送されているものと考えられる。また、定在渦によって大陸方向へ輸送されている海洋熱は、トッテン氷河の融解に十分なポテンシャルを有するものと評価された。

トッテン氷河近傍域において実施した数値実験では、経年変動スケールにおける斜面上の東向流変動の重要性が示された。ここでは、高解像度の海洋数値モデルを開発し、時間的に変化するトッテン棚氷の融解速度の衛星観測による推定と比較した。数値モデルにより評価された棚氷融解量の経年的な変化量は、衛星観測による評価とよく一致した（図3）。この融解シグナルの経年変動の背景には、南極斜面流（ASC）が強まると海洋の熱侵入を妨げ、ASCが弱まると棚上の侵入が強化されるというメカニズムが働いていることが明らかになった（図4）。今回の研究結果は、領域モデルの境界で与えられている海洋条件が、風応力カール等の局所的な要因よりもASCの経年変動を説明する上で、大きな役割を果たすことを示唆していた。さらに、トッテン棚氷への熱の侵入が沿岸の低塩分化によって強化されることを示し、西南極での氷の喪失による低塩分化に端を発するフィードバックにより、東南極での融解の増加、さらに沿岸の低塩分化につながる可能性があることも示唆している。

トッテン氷河沖の観測は、第59次日本南極地域観測隊より開始され、第61次隊ではトッテン氷河

フロント域における係留系設置回収・AXCTD・XCTD・CTD採水観測等、大規模な観測を実施した。第63次隊では係留系1系の回収と新規の設置、採水観測を実施した。着実に観測データを蓄積するとともに、ヘリコプターによる短期広域観測という南極ではこれまで用いられていない新たな観測手法の開拓にも成功した。また、マルチナロービームによる海底地形のデータも新たに蓄積されつつあり、棚氷近傍域での実験の信頼性も飛躍的に向上しつつある。今後の観測継続と数値実験の改良により、トッテン氷河近傍における海洋諸過程の寄与がさらに明らかになるものと期待される。

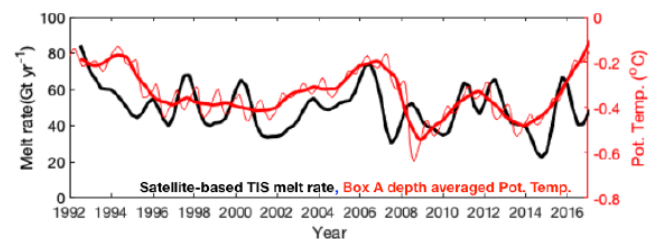


図3 衛星観測による棚氷融解量と数値モデルによる水温の経年変動

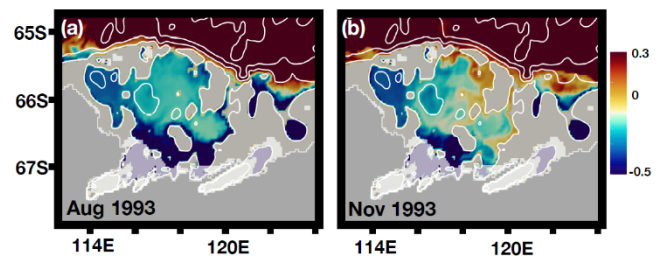


図4 南極斜面流の変化とトッテン氷河方向への暖水の侵入

[研究発表]

- 1) 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, (2020): Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nature Communications*, 11:4221, doi:10.1038/s41467-020-17527-4.
- 2) Hirano, D., K. Mizobata, H. Sasaki, H. Murase, T. Tamura, and S. Aoki, Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica. *Communications Earth & Environment* (2021) 2:153, doi:10.1038/s43247-021-00217-4.
- 3) Kashiwase, H., K. I. Ohshima, K. Nakata, and T. Tamura (2021): Improved SSM/I thin ice algorithm with ice type discrimination in coastal polynyas. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38, 823-835, doi:10.1175/JTECH-D-20-0145.1.
- 4) Nakayama, Y. C.A. Greene, F. S. Paolo, V. Mensah, H. Zhang, H. Kashiwase, D. Simizu, J.S. Greenbaum, D.D. Blankenship, A. Abe-Ouchi, and S. Aoki (2021): Antarctic Slope Current modulates ocean heat intrusions towards Totten Glacier. *Geophysical Research Letters*, 48 (17), e2021GL094149.

気球・UAV・地上 in-situ 観測データによる極域エアロゾル循環機構解析

◎林 政彦 福岡大学理学部・教授
 木津暢彦 東京管区気象台気象防災部・次長
 白石浩一 福岡大学理学部・助教
 原圭一郎 福岡大学理学部・助教
 (国立極地研究所)
 平沢尚彦 助教

平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

夏季南極地域の主要なエアロゾルは、海洋生物活動に伴う DMS(硫化ジメチル)の光化学反応生成物である硫酸(gas)がエアロゾルの核生成と成長を合わせた事象の新粒子生成することで生じる硫酸粒子であることが知られている。Osada et al.¹⁾は昭和基地の地上観測に基づき、地表面近くで観測されるほとんどの CNC (凝結核数濃度、Condensation Nuclei Concentration) の増大は、その場での核生成(1~ nm)によるものではなく、日射による鉛直混合により、上空で既に 10 nm 程度に成長した核形成モードのエアロゾルが地表付近へ輸送されたことが原因である可能性が高いと指摘している。

2. 観測とモデリング

本研究では、詳細な空間分布を観測できる UAV (無人航空機) カイトプレーンを用いて、2017 年 1 月と 2019 年 1 月に実施された、南極大陸縁辺 S17 航空拠点(69.02° S, 40.09° E, 600 m a.s.l.)周辺の CNC と粒径分布($D > 0.3 \mu\text{m}$)のエアロゾル濃度の空間分布観測を行い、高 CNC の発生頻度について検討した。また、同じ期間に、基地観測を行い、海拔高度 600m の氷床面におけるの時間分解能 1 分程度の地上の直径 10 nm 以上の CNC、直径 0.08~1 μm 以上のエアロゾル濃度などの連続観測データが得られている。

これらの観測結果に基づき、境界層内の新粒子生成に関係した CNC が観測される条件についての検討を行うために、Modal Aerosol Dynamics model for multiple Modes and fractal Shapes (MADMS)¹⁵⁾ 法による数値シミュレーションを行い観測結果との比較を行った。

3. 観測結果

3.1 地上観測—超微小粒子の日周変化—

図 1 に示すように、2017 年、2019 年 1 月の地上観測による CNC および、 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度が 18 時ころに高濃度となる日周変化を示した。高温、高水蒸気混合比、北(海洋)からの風の頻度が高くなるなど海洋の影響が強くなっているときに CN を含むエアロゾル濃度が高くなっていることが示唆されている。

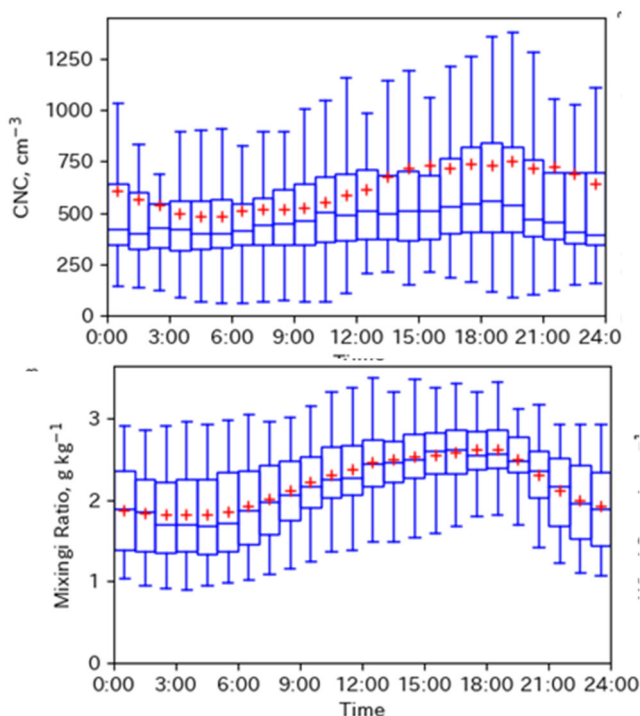


図 1 S17 の大陸氷床面における CNC (上) および水蒸気混合比 (下) の日周変化 (赤+ : 1 時間平均値、Box : 10,25,50,75,90 パーセントイル値)

3.2 UAV 観測

無人航空機を用いた南極大陸沿岸域のエアロゾル空間分布観測は境界層内の CNC の変動を 20 フライト捉えた。地表面よりも上空で高 CNC が 20 フライト中 5 フライトで観測され、地表面付近で CNC が高くなるケースは観測されなかった。高 CNC の気塊の粒径分布が高濃度、低濃度のケースがあり既存粒子に関して統一的な結果は示すことが出来なかったが、空間分布内の低 CNC の気塊はバックグラウンド的な粒径分布をしていた。高 CNC が観測された空間分布には CNC と水蒸気混合比に負の相関があることが分かった (図 2、黒丸)。

この結果は高 CNC が観測された空間分布にはバックグラウンド的な粒径分布と高 CNC 気塊の粒径分布が不均質に混ざっていることを示している。また、高 CNC は地表面よりも上空に存在しており、相対的に周囲よりも乾燥していることが多い。これらのことは観測領域で明瞭にわかるスケール(水平: 数十 km、鉛直: 数百 m)の高 CNC の大気が沿岸域のバックグラウンド的な状態の大気に輸送され不均質な CNC の空間分布を作っている可能性があることがわかった。

4. モデリング結果

観測との比較のため MADMS を用いた 0 次元ボックスモデルを用いて新粒子生成に関する数値計算を行った。粒径分布には地上 S17 観測で得られた粒子数濃度を使用しており、南極大陸沿岸域の特徴を反映しているものと考えられる。数値計算では、低温の方が直径 10 nm の粒子数濃度が大きくなる傾向が得られた。これは一定相対湿度下では核生成率が直径 10 nm の粒子数濃度に非常に強い影響を与えることを示唆している。一方で、相対湿度約 80% で CNC が高くなる傾向が見られた。高相対湿度ほど核生成率が大きくなる一方、既存粒子の吸湿成長による凝縮速度と凝集速度の増大による併合消失の競合関係の結果、相対湿度 80% 程度において

[参考文献]

- 1) Osada, K., Nishita-Hara, C., Hara, K., Yabuki, M., Shiobara, M., Wada, M., Yamanouchi, T. and Hayashi, M.: Seasonal variation of size distribution of submicrometer aerosol particles at Syowa Station, Antarctica, *Antarct. Rec.*, 54(SPEC. ISSUE), 530–540, 2010.
- 2) Kajino, M.: MADMS: Modal Aerosol Dynamics model for multiple Modes and fractal Shapes in the free-molecular and near-continuum regimes, *J. Aerosol Sci.*, doi:10.1016/j.jaerosci.2011.01.005, 2011.

[研究発表]

東野伸一郎, 林政彦, 梅本紫衣奈, 長崎秀司, 西村大貴, 尾塚馨一, 白石浩一, 長沼歩 (2021) 新しい気球分離型無人航空機大気観測システム開発と昭和基地上空夏季自由対流圏のエアロゾル時空間変動, 南極資料, 第 65 巻, p21-p44.

CNC の濃度が高い状態が作られると考えられる。

5. 観測とモデリングの比較

図 2 にモデルによって得られた特定の水蒸気混合比の下で粒子生成開始時 (モデル計算開始時) からの経過時間別の CNC が示されている。12~24 時間で達した最高濃度は、水蒸気混合比と逆相関関係 (紫、赤) にあり、観測で得られた結果結果と整合的である。水蒸気混合比が低いほど同じ相対湿度になるためには、低温となり、粒子生成率が高くなる。このため、水蒸気混合比が低いほど CNC が高くなると考えられる。

この結果は、既存粒子数濃度が南極のように低いところでは、鉛直混合等の機械の上下運動に伴って、境界層上部で高 CNC 気塊 (CN 雲) が形成され、安定的に移流してゆく可能性を示唆するものである

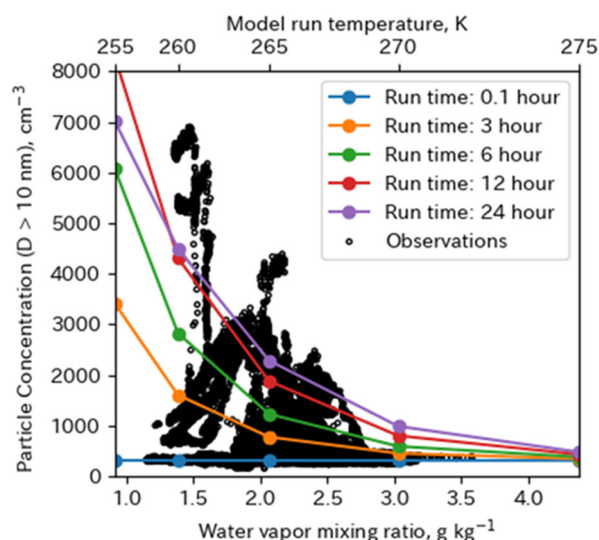


図 2 水蒸気混合比と CNC (直径 10nm) の数濃度の関係

カラー: モデル計算開始時から経過時間別の CNC、黒丸: 観測結果

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-20	
研究課題名	気球・UAV・地上in-situ観測データによる極域エアロゾル循環機構解析			
氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)				
小計	0名			
所外 (極地研以外)	原口 諒平	福岡大学大学院	大学院生(修士)	令和元, 2年
	堤 雅貴	九州大学大学院	大学院生(博士)	令和元~3年
小計	2名			
合計	2名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

両極由来の寒気に伴う顕著大気現象発現にかかわる極域－熱帯域大気海洋結合システムの解明

- ◎本田明治 新潟大学理学部・教授
 浮田甚郎 新潟大学理学部・教授)
 立花義裕 三重大学生物資源学研究科・教授
 川瀬宏明 気象庁気象研究所・主任研究官
 山根省三 同志社大学理工学部・准教授
 高谷康太郎 京都産業大学・教授
 田口文明 富山大学都市デザイン学部・教授
 小守信正 海洋研究開発機構・主任技術研究員
 山崎 哲 海洋研究開発機構・研究員

(国立極地研究所)

平沢尚彦 助教

平成31年～令和3年（3か年）

[研究成果]

近年世界各地で災害をもたらすような、豪雨・豪雪、竜巻・突風、暴風雨などの顕著な大気現象が頻発している。このような極端気象は一般に局所的（ローカル）な現象であるが、半球（グローバル）スケールの偏西風の蛇行によって発現する極由来の寒気を伴った低気圧である「寒冷渦」をしばしば介在することが分かってきた。また近年「台風」の進路に「寒冷渦」が作用するなど、極域－熱帯域大気海洋結合システムの観点から顕著大気現象を捉える必要性が出てきている。寒冷渦は力学的には渦位（Potential vorticity: PV）を指標として追跡することが可能で、新潟大学では大気再解析データから自動的に渦位を計算して表示する「顕著大気現象追跡監視表示システム（PV マップ）」の運用を2017年より開始しており、顕著大気現象発現に伴う極由来の寒気の役割を準リアルタイムで監視・解析するシステムを構築してきた。PV マップは上空寒気挙動の微細構造を詳細に捉えることはできるが、寒冷渦の時空間的な追跡は困難である。またPVは等温位座標系を用いることから、計算～解析の一連の過程は複雑なスキームに頼らざるを得ない。そこで新たな指標の構築を目指すこととなった。

寒冷渦は対流圏上空の等圧面高度場における高度極小として判別できるが、寒冷渦の強度や大きさを示す統一的な客観的指標はこれまでなかった。そこで等圧面高度場から寒冷渦の中心位置、強度、影響範囲（水平規模）の3つの要素から捉える新指標の開発を目指した。

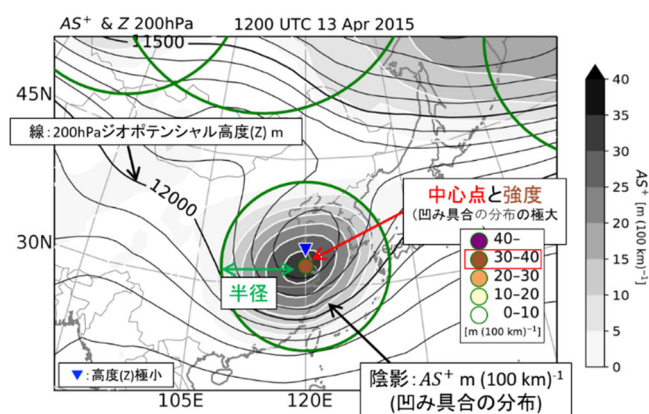


図1. 寒冷渦指標の一例。実線は200 hPa面の等圧面高度(m)。寒冷渦の中心は丸、強度は丸の色、影響範囲は緑色の円。青色の三角は等圧面高度の極小点。陰影は、等圧面高度の凹み具合で東西南北方向の傾きの平均値。

まず寒冷渦を等圧面の一定の半径を持つ円形の凹みと捉え、等圧面高度場を2次元格子化したデータセットを用いて、各点の凹みの具合を数学的に評価する手法の開発に取り組んだ。凹みの深さの最大の場所を中心位置、凹みの深さを強度、円型に凹んでいる半径を影響範囲として、この3つの要素を客観的に抽出することに成功し、これを寒冷渦指標と名付けた(図1)。また、寒冷渦に成長する前の上空の気圧の谷(トラフ)の段階においても3つの要素の抽出が可能で、数日～1週間程度の時間スケールで寒冷渦の検出や追跡が可能となった。また、ある時刻のスナップショットの等圧面高度場から直接計算することができるため、一般に気象解析で実施

されるデータの前処理（時間的・空間的平滑化や平均場など基本場の設定）が不要であることも利点の一つである。

新潟大学では寒冷渦指標の分布図を COL (Cutoff Low) マップと名付け、大気再解析データから自動的に計算し「顕著大気現象追跡監視表示システム」に準リアルタイムで表示するシステムの運用を2021年9月より開始した(図2)。また1958年以降の再解析データに適用し、両極由来の寒気に伴う顕著大気現象の事例解析を通じて発現過程に関わる発現にかかわる極域-熱帯域大気海洋結合システムの解析・検証も可能となっている。また、指標を用いた客観的なトラッキングシステムの構築を通じて、顕著大気現象の発現予測指標化を進めている。

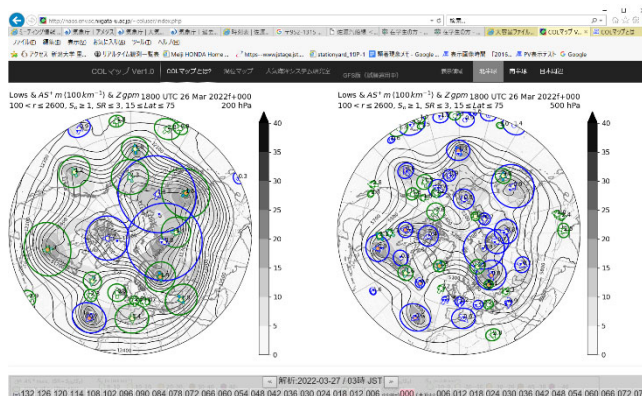


図2. 新潟大学で運用中の北半球版の寒冷渦指標 (COL マップ) の一例 (左: 200 hPa, 右: 500 hPa. この他に南半球版、日本域版がある。以下の URL にて閲覧可。
<http://naos.env.sc.niigata-u.ac.jp/~coluser/>

[研究発表]

1. Hoshi, K., J. Ukita, M. Honda, T. Nakamura, K. Yamazaki, Y. Miyoshi, and R. Jaiser, Weak stratospheric polar vortex events modulated by the Arctic sea ice loss. *J. Geophys. Res.*, 124, 858-869, 2019.
2. Yamazaki, A., M. Honda, and H. Kawase, Regional snowfall distributions in a Japan-Sea side area of Japan associated with Eurasian jet variability and Siberian blocking. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 97, 205-226, 2019.
3. Tachibana, Y., K. K. Komatsu, V. A. Alexeev, L. Cai, and Y. Ando, Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017-18. *Scientific Reports*, 9, 5567, 2019.
4. Gorodetskaya, I. V., T. Silva, H. Schmithüsen, N. Hirasawa, Atmospheric river signatures in radiosonde profiles at the Dronning Maud Land coast, East Antarctica. *Ad. Atmos. Sci.*, 37, 455-476, 2020.
5. Shiozaki, M., T. Enomoto, and K. Takaya, Disparate mid-latitude responses to the Eastern Pacific El Nino. *J. Climate*, 34, 773-786, 2020.
6. Sasaki, H., S. Kida, R. Furue, H. Aiki, N. Komori, Y. Masumoto, T. Miyama, M. Nonaka, Y. Sasai and B. Taguchi, A global eddy hindcast ocean simulation with OFES2. *Geoscientific Model Development*, 13, 3319-3336, 2020.
7. K. Sato, J. Inoue, and A. Yamazaki, Performance of Forecasts of Hurricanes with and without Upper-Level Troughs over the Mid-Latitudes. *Atmosphere. Sci. Online Lett. Atmos.*, 17, 1-7, 2021.
8. Kasuga, S., M. Honda, J. Ukita, S. Yamane, H. Kawase, and A. Yamazaki, Seamless detection of cutoff lows and preexisting troughs. *Mon. Wea. Rev.*, 149, 3119-3134, 2021.
9. Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori, EFSO at different geographical locations verified with observing-system experiments. *Weather Forecast.*, 36, 1219-1236, 2021
10. Kawase, H., A. Murata, K. Yamada, T. Nakaegawa, R. Ito, R. Mizuta, M. Nosaka, S. Watanabe, H. Sasaki, Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, *SOLA*, 17, 1-7, 2021.
11. Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Taguchi, B., Nakamura, H., Kimoto, M., Reply to: Eurasian cooling in response to Arctic sea-ice loss is not proved by maximum covariance analysis. *Nat. Clim. Chang.* 11, 109-111, 2021,

カナダ雪氷コアに含まれるアジアダストの粒径別・供給源推定 ～バックグラウンドダストはいつどこからどれだけ輸送されるのか～

◎長島 佳菜 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門・副主任研究員

(国立極地研究所)

東 久美子 教授

令和2年～令和3年(2か年)

[研究成果]

1. はじめに

東アジアの砂漠域で発生し、風下の国々に運ばれる黄砂は、大気環境への影響から長らく注目を浴びてきた。中でも、主に春先に起こる大規模黄砂イベントは、これまでその発生・輸送メカニズムに関する研究が広く行われてきた。一方、春以外の季節にも低濃度の黄砂が高い高度を輸送される、いわゆる“バックグラウンド黄砂”は、観測手法が少なく、一年を通じて輸送されているのか？輸送量は春に起こる黄砂イベントと比較してどの程度であるのか？その実態解明が遅れている。そこで本研究では、カナダ・Mt. Logan の標高約 4100m 付近(King Col)で採取された雪氷コアに注目した。Mt. Logan のコアは、1) 採取された標高が比較的高く、高い高度の黄砂輸送のモニターに適している点、2) これまでに行われた氷の酸素同位体比測定や Ca、Na イオン濃度を基に、1 年のサイクルを正確に推定することが出来る点、などから、バックグラウンド黄砂の動態の検証に有効な極めて貴重な試料と言える。そこで本研究では、Mt. Logan で採取された雪氷コアに含まれる粒子について、精密粒度分布測定装置を用いた粒径・粒子数(粒子量)分析を行い、また黄砂の主要構成鉱物である石英粒子に関して、電子顕微鏡-カソードルミネッセンス(SEM-CL)分析を用いて、供給源の検証を試みた。

2. 試料および分析方法

本課題では、先行研究で推定されたコア年代を基に、1984～1990 年をカバーする Mt. Logan コアのサブサンプリングを行った。

サンプリングした試料は融解させ、その一部を用いて精密粒度分布測定装置測定(Multisizer, ベックマンコールター; 国立極地研究所)を行った。残りはポリカーボネートフィルター(ミリポアアイソポ

ア HTTP01300)を用いた濾過を行い、粒子をフィルター上に集めた。集めた粒子は、フィルターごと SEM 測定用のディスクに載せ、カーボン蒸着を行った。蒸着を行った試料は、SEM (Quanta 450 FEG, FEI)-EDS (Octane Elite30, EDAX; 海洋研究開発機構)分析によって石英粒子を識別した後、石英粒子の SEM-CL (Mono CL4 Swift, Gatan; 海洋研究開発機構)分析を行った。また、SEM による石英粒子画像を基に粒径の測定を行い、直径 4 μ m 以下、4 μ m 以上に分けて、粒径毎の CL スペクトル特性の検出を行った(詳しくは Nagashima et al., 2017 参照)。

3. 雪氷コア中の粒子量、粒径分布、供給源

ここでは黄砂量を捉えるのに適した指標とされている Ca イオン濃度と比較しつつ、1986-1988 年付近の結果を議論する。図 1 に示す Ca イオン濃度は、季節性を示す酸素同位体比変動との対比から明らかのように、周期的なピークを持ち、それらは春の大規模黄砂イベントに対応している可能性が高い。そうした Ca ピークの多くは、酸素同位体比の極小ピークに重なっている。一方 Ca イオン濃度のピークはその後も下がりきらず、年によっては小さなピークが見られる。そこで様々な Ca イオン濃度を示す試料(A～D: 図 1 下部)について、粒度分布測定結果を基に、Ca と黄砂輸送との関係を検証した。A, D は Ca イオン濃度が高く、かつ酸素同位体比の極小時間に対応する試料、B は Ca イオン濃度が高く、かつ酸素同位体比の極小時間に対応しない試料、C は Ca イオン濃度が最も低い試料となっている。

図 2 に示すように A, D はこれまで Mt. Logan など報告されている黄砂の粒度分布(Zdanowicz et al., 2006)と類似した、2-3 μ m にピークを持つ分布

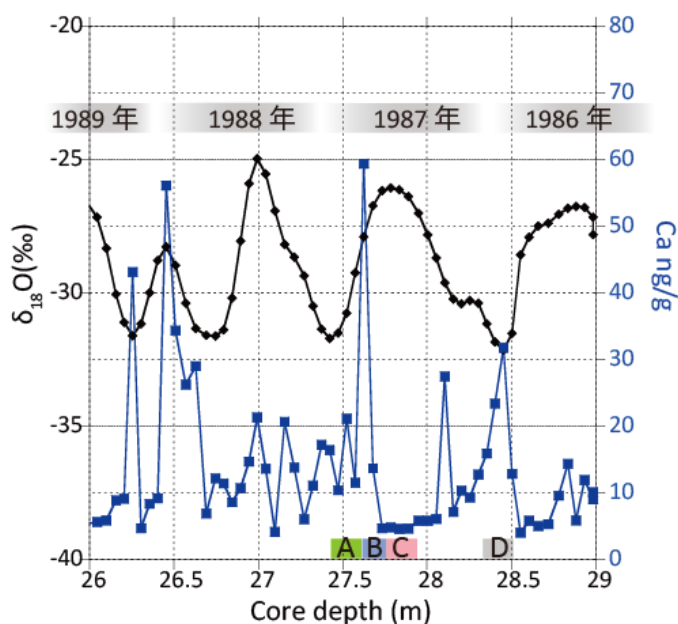


図1. Mt.Loganコアの酸素同位体比およびCaイオン濃度

を示すことが分かった。一方、同じ Ca ピークを持つ試料でも B は 4–10 μm の粗い粒子が多くなり、ローカルな粒子の寄与が推測される。しかしながら、4 μm 以下の細粒側にも多くの粒子が検出され、ローカルな粒子の寄与に加え、黄砂の寄与が示唆される。また Ca イオン濃度が最も低い C は 3 μm 付近に低いピークを持つ分布を示し、少量の黄砂輸送を示唆している。従って、Ca イオン濃度が最も低い試料 C を含め、全ての試料について、黄砂の粒径に対応する粒子の存在が確認された。

そこで、A–D に対応する様々な季節に観測された 2–3 μm 付近をピークとする細粒粒子が、黄砂であるのか否かを、細粒 (4 μm 以下) 石英粒子の CL スペクトル特性から検証した。各試料の細粒石英粒子において、赤色の発光が卓越する粒子 (Nagashima et al., 2017 の cluster 分類 1) の割合は、70%以上を占める結果が得られた。こうした CL スペクトル特性は、黄砂の主な供給源である、ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠に特有のものであることから (Nagashima et al., 2017)、2–3 μm 付近にピークを持ち、通年観測される粒子が黄砂であることが裏

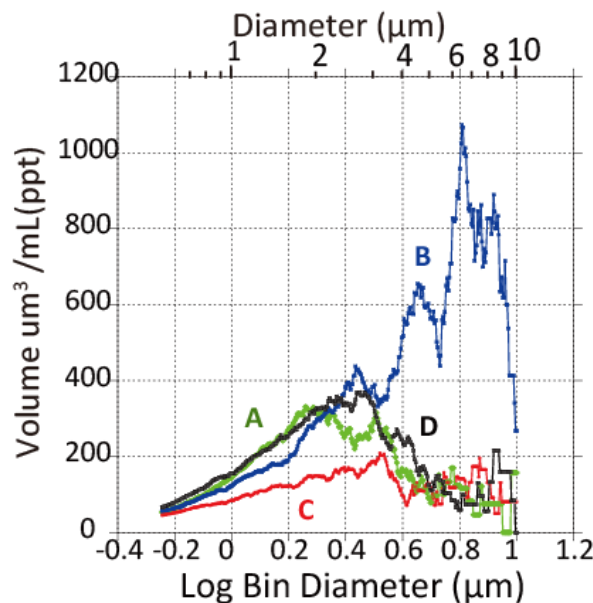


図2. Mt.Loganコア試料 (A-D) の粒子数・粒度分布付けられた。一方、4 μm よりも大きい粒子は、赤色の発光が卓越する粒子の割合が大きく下がり、黄砂以外の寄与が明らかになった。この結果から、特に粗粒側にピークを持つ試料 B のようなケースにおいて、Mt. Logan 周辺のローカルな粒子の寄与が増加していることが明らかになった。こうした粗粒粒子の混入は、試料 B のように Ca イオン濃度の高いピークを引き起こすことから、Ca イオン濃度を用いて黄砂輸送の変遷を議論する際には、ローカルな粒子が引き起こすピークと黄砂由来のピークの判別が必要と言える。

以上のことから、春以外の季節に黄砂は長距離輸送されているのか? という問いに対し、本研究では春以外の季節にも輸送されている証拠を示した。また、バックグラウンド黄砂の輸送量は春に起こるイベントと比較してどの程度であるのか? という点は、図2縦軸に示される粒子量から、1/3~1/2程度であることが予測される。今後分析数を増やして様々な年度におけるケースを検証していく。

[参考文献]

Nagashima, K., H. Nishido, M. Kayama, Y. Kurosaki, S. Ohgo, and H. Hasegawa (2017), Composition of Asian dust from cathodoluminescence spectral analysis of single quartz grains, *Geology*, Vol. 45(10), p. 879–882.
 Zdanowicz, C., G. Hall, J. Vaive, Y. Amelin, J. Percival, I. Girard, P. Biscaye, and A. Bory (2006), Asian dustfall in the St. Elias Mountains, Yukon, Canada, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 70, p. 3493–3507.

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（3）地 圏

東南極セール・ロンダーネ山地における下部地殻流体活動の温度—圧力—時間条件の精密解析

◎河上哲生 京都大学大学院理学研究科・准教授
 足立達朗 九州大学大学院比較社会文化研究院・助教
 宇野正起 東北大学大学院環境科学研究科・助教
 東野文子 京都大学大学院理学研究科・助教
 (国立極地研究所)
 外田智千 教授
 堀江憲路 助教
 平成 31 年～令和 3 年 (3 年間)

[研究成果]

JARE61 夏隊で約 2 ヶ月にわたり、セール・ロンダーネ山地地質調査計画を実施し、JARE49・51・61 で採取した同山地の岩石試料を用いて、変成岩類の温度圧力時間履歴解析や流体活動の温度圧力条件決定を行った。

ブラットニーパネ地域では従来、距離が離れた複数の露頭や転石の情報を総合して、反時計回りの温度圧力履歴が構築・提案されていた[1][2]。そこで 1 露頭の岩石のみを用いて同じ結果が得られるかを検証するため、中指尾根の試料(TK2009120403D2)を詳細に解析した。この結果、1 試料中から時計回りと反時計回りを示唆する温度圧力履歴を得ることに成功した[3]。これらの一見矛盾する温度圧力履歴は年代差がある可能性があるが、ジルコンが細粒すぎるため、現状年代測定が実施できない。年代測定技術の進歩を待って年代測定の観点から検証する。また、時計回りの温度圧力履歴の過程で、含硫黄流体の流入があったことがわかった。

ブラットニーパネではさらに、親指尾根の構造的上位に位置するザクロ石—黒雲母—珪線石片麻岩(TA19120703B)からも、時計回りを示唆する岩石組織が得られた。同じく構造的上位に位置するザクロ石—珪線石—黒雲母片麻岩(TA19120703C)のジルコンの変成リムは 600-540 Ma を示した。一方、構造的低位に位置する角閃石—黒雲母片麻岩(TA19120703A)やザクロ石—単斜輝石片麻岩(TA19120701B)は、火成作用起源の振動累帯構造を示すコアが約 600 Ma、変成リムが約 550 Ma を示した[4]。これらのことから、SW テレーン中に、泥質片麻岩類と珪長質～中間質片麻岩類を境する低角延性剪断帯が存在すると考えられる[5]。

また、メーニパに産する剪断帯の上盤側に産する珪線石—ザクロ石—黒雲母片麻岩(TA19121302B)中のジルコンリムは約 618 Ma を示した一方、下盤側の珪長質～中間質片麻岩(TA19121902A、

TA19121903A)は 560-550 Ma を示した[6]。これはブラットニーパネ親指尾根での関係と同じである。メーニパ北部の螢石含有花崗岩(TA19121901H)は、約 504 Ma を示した[6]。

さらに、メーニパ南部の珪線石—黒雲母—ザクロ石片麻岩(TK2009121302A)について、ザクロ石の内側リムに Ky+Sil が包有され、外側リムとマトリクスに Sil が存在し、ザクロ石のリムが 2 次的な細粒 Ky+Bt に部分的に置換されることに注目し、それぞれの組織に地質温度圧力計を適用して温度圧力経路を決定した。その結果、800°C/1 GPa から 600°C/0.4 GPa を経て Al₂SiO₅ 鉱物の三重点付近へと減圧・冷却する時計回りの履歴を得た。この試料について *in situ* のジルコン年代測定を行ったところ、ザクロ石リムに包有されるジルコンの変成リムは約 560 Ma を示した。このリムは珪線石を包有する。また、マトリクスも含めたジルコンの変成リムは約 602 Ma と約 560 Ma の 2 つの年代を示した。いずれの年代の変成リムも、Yb_n/Gd_n が 1 に近い値を示すことから、ザクロ石と平衡共存したと考えられる[7]。加えて、メーニパ産の V 含有緑色ザクロ石の U-Pb 年代測定を行ったところ、約 593-586 Ma を得た。さらに、緑色ザクロ石のリムに発達するケリファイト中のチタン石と燐灰石の U-Pb 年代測定を行ったところ、約 550-500 Ma と約 496 Ma の年代をそれぞれ得た[8]。以上により、約 602 Ma の昇温変成期にザクロ石が成長をはじめ、約 560 Ma 頃まで続き、約 560 Ma を境に減圧減温を開始したことがわかった。減温減圧に従って緑色ザクロ石の分解とケリファイトの成長が進み、約 500 Ma には燐灰石の U-Pb 系の閉鎖温度である 400-460°C 程度まで冷却していたと考えることができる[7][8]。緑色ザクロ石の周囲には流体包有物を含む石英が見られ、流体包有物からは CO₂ と CH₄ のラマンピークが得られた。

タンガーレンのザクロ石-珪線石-黒雲母片麻岩(TK2020010101H)からも、800°C/0.7 GPa から750°C/0.3 GPa にほぼ等温減圧する履歴が得られた[9]。同地点に産する直径約 10 cm の巨大ザクロ石は、Y 濃度が中心から減少する昇温履歴を記録する。今後このザクロ石の解析を進めることで昇温変成期履歴を制約する。

パーレバンデ南島のザクロ石-珪線石-黒雲母片麻岩中には堇青石が産出し、珪線石を包有する。この堇青石は730°C/0.4 GPa で形成されたと推定され、CO₂ と H₂O のラマンピークが検出された。共存する黒雲母には 0.2 wt%程度の塩素が含まれるこ

とから、CO₂ を含む塩水流体の存在下で堇青石の形成が進んだことがわかった[10]。

メーフィエルでは、変成岩類の面構造に斜交して貫入する花崗岩体の周辺で 600-670°C/0.40-0.55 GPa の条件下で起きた花崗岩質マグマの貫入および H₂O 流体流入が観察された[11]。これらの活動は同時であり、個々の脈の形成は数時間のオーダーで起きていたことがわかった[12]。さらに、上述の深度への花崗岩質マグマの貫入に伴う水圧破碎時に、局所的な応力場が繰り返し変化していたことがわかった[11]。

[参考文献]

- 1) Adachi, T., Hokada, T., Osanai, Y., Nakano, N., Baba, S., Toyoshima, T. Contrasting metamorphic records and their implications for tectonic process in the central Sør Rondane Mountains, eastern Dronning Maud Land, East Antarctica. Geological Society Special Publication, Vol 383, p113-133. 2013.
- 2) Baba, S., Osanai, Y., Nakano, N., Owada, M., Hokada, T., Horie, K., Adachi, T., Toyoshima, T. Counterclockwise P-T path and isobaric cooling of metapelites from Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica: Implications for a tectonothermal event at the proto-Gondwana margin. Precambrian Research, 234, 210-228. 2013.
- 3) Ikeda, H., Kawakami, T., Higashino, F. Counterclockwise and clockwise P-T histories recorded in a single sample? (Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica). The 12th Symposium on Polar Science abstract, 2021.
- 4) Adachi, T., Kawakami, T., Uno, M., Higashino, F. Geochronology of the metamorphic rocks at the Oyayubi ridge of Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. JpGU 2021 abstract, 2021.
- 5) Adachi, T., Kawakami, T., Uno, M., Higashino, F. and Tsuchiya, N. Contrasting P-T records of the metamorphic rocks at the Oyayubi ridge of Brattnipene, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. The 11th Symposium on Polar Science abstract, 2020.
- 6) Adachi, T., Kawakami, T., Uno, M., Higashino, F. Two distinct timings of metamorphism detected from Menipa, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. JpGU 2022 abstract, 2022.
- 7) Kawakami, T., Niki, S., Suzuki, M., Sakata, S., Adachi, T., Higashino, F., Uno, M., Hirata, T. Long-lived high-temperature metamorphism followed by clockwise P-T path from Menipa, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. JpGU 2022 abstract, 2022.
- 8) Niki, S., Kawakami, T., Adachi, T., Uno, M., Higashino, F., Hirata, T. Triple dating of a metapelite from Menipa, Sør Rondane Mountains, East Antarctica based on U-Pb isotopic systems of garnet, titanite, and apatite. JpGU 2022 abstract, 2022.
- 9) Kawakami, T., Higashino, F., Adachi, T., Uno, M. Decompression P-T evolution recorded in a pelitic gneiss from Tangarden, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. JpGU 2021 abstract, 2021.
- 10) Higashino, F., Kawakami, T., Adachi, T., Uno, M. Post-peak Cl- and CO₂-bearing fluids in a Grt-Sil-Bt gneiss from southern Perlebandet, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. JpGU 2021 abstract, 2021.
- 11) Uno, M., Kawakami, T., Adachi, T., Higashino, F., Tsuchiya, N. Repeated stress state overturns during magmatic/hydrothermal fracturing in deep crust (Sør Rondane Mountains, East Antarctica). JpGU 2022 abstract, 2022.
- 12) Uno, M., Kawakami, T., Adachi, T., Higashino, F., Tsuchiya, N. Contrasting chemical reactions and fluid transport by melt and aqueous fluids during middle crustal fracturing (Sør Rondane Mountains,

East Antarctica). JpGU 2021 abstract, 2021.

[研究発表]

Mindaleva, D., Uno, M., Higashino, F., Nagaya, T., Okamoto, A., Tsuchiya, N.; Rapid fluid infiltration and permeability enhancement during middle–lower crustal fracturing: Evidence from amphibolite–granulite-facies fluid–rock reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. *Lithos*, Vol.372–373, 105521. 2020.

河上哲生, 足立達朗, 宇野正起, 東野文子, 土屋範芳, 赤田幸久; 東ドロンイングモードランド, セール・ロンダーネ山地地学調査隊報告 2019-2020 (JARE-61), 南極資料, Vol. 64, p351-398, 2020.

リュツォ・ホルム岩体の精密な温度構造および物質移動の素過程の解明

◎池田 剛 九州大学理学部・准教授

(国立極地研究所)

外田 智千 准教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

本研究はリュツォ・ホルム岩体の変成作用時の温度構造を明らかにするとともに、物質移動の素過程を明らかにすることを目的とした。研究協力者として指導学生とともに研究を進めた。以下に、温度構造の解明と物質移動の素過程の解明に分けて記述する。

リュツォ・ホルム岩体の温度構造の解明には、露岩ごとの温度圧力条件の決定が必須である。ところが、公表されている変成条件が論文ごとに大きく異なる。そこで、変成条件を同一露岩を同一手法で求め、その変動の原因を明らかにすることを試みた。

本研究では明るい岬の泥質片麻岩を対象とした。対象試料は共通の鉱物、即ち、ザクロ石、黒雲母、斜長石、石英を含むため、同一の地質温度圧力計で温度圧力条件を求めることができる。通常の基準、即ち、ザクロ石の均質な内部、ザクロ石から離れた黒雲母、Ca に富む斜長石を用いると、760 °C、7.0 kbar から 1000 °C、10.5 kbar の広い範囲の“値”が得られた。この“値”が温度、圧力かどうかが問題である。

微細構造をみると、ザクロ石の形態は細粒包有物を伴う半自形と、粗粒包有物を伴う不定形に大別される。前者には P (リン) の累帯構造がみられルチルが包有されるのに対し、後者にはそれらはみられない。マトリクスにはルチルがなく、構成鉱物も粗粒であることから、ザクロ石の核形成時期および周囲を包有しながら成長する時期が異なっていることが推測される。ところが、この違いは上記の“値”の変動と相関を持たない。

ザクロ石の近隣かどうかを問わず、1 枚の薄片から万遍なく選んだ 100 点以上の黒雲母の分析値が示す組成幅を考慮しても“値”の幅は説明できない。

以上の情報から、現段階では以下の 2 つの可能性が考えられる。1) 構成鉱物中には共存時の化学組

成が保存されていない (ので地質温度圧力計は適用できない)。2) 明るい岬の温度圧力の不均一性をあらわしている。後者の場合、採集地点間の距離をそのまま深さの差に換算した静岩圧の差は、推定圧力の差よりも小さい。温度圧力を凍結した時刻が等しいと仮定すると、凍結後に両者の距離が短縮するような変形があったことを意味する。

物質移動の素過程の解明には、物質移動の途中が凍結保存されているコロナ構造を用いた。この課題は前回の共同研究からの継続課題であり、前回はコランダム周囲のコロナ構造について一定の成果を得た (Mori and Ikeda, 2021)。今回はザクロ石周囲のコロナ構造に限定した。

対象のコロナ構造は苦鉄質片麻岩中のザクロ石周囲に広く確認されるが、すべての苦鉄質片麻岩中のザクロ石に産するわけではない。既存論文の情報も加味し、コロナを伴うザクロ石がリュツォ・ホルム岩体の中～高温域に限られることを明らかにした。さらに、コロナの有無を境する温度圧力条件を明らかにするため、コロナ無しの最高温地域とコロナありの最低温地域の温度を、地質温度圧力計や熱力学計算、微量成分を用いた温度計など複数の手法によって決定した。その結果、境界温度が圧力によらずほぼ 700°C であることが明らかになった。

しかし一方で、コロナありの地域にもコロナを伴う岩石と伴わない岩石が産することを明らかにした。つまり、温度だけではコロナ形成条件を満たさないということである。走査電子顕微鏡を用いた組織の詳細な観察から、Felsite-Nanogranite Inclusion (FNI) と呼ばれる包有物がコロナの発達するザクロ石には存在し、コロナのないザクロ石には見つからないことを明らかにした。この FNI はメルトの状態で包有され、後に固化して鉱物の集合体となったことがわかっている。このことから、コロ

ナ形成には温度だけでなくメルトの存在が必要であることが明らかになった。700°Cという境界温度は、苦鉄質岩のソリダス温度とほぼ一致することもこのことを支持する。

構成鉱物の化学組成の詳細な記載より、コロナ共通の性質として、FNI中に塩素に富む鉱物が含まれることと、コロナ周辺の含水鉱物（角閃石）の塩素濃度がコロナから離れるに従って減少すること、ザクロ石の組成累帯構造がコロナによって中断されていることを明らかにした。これらの詳細な化学不均質の記載によって、コロナ形成に中央部のザクロ石のみならず、角閃石とメルトが必要であることが

明らかになった。

以上の結果は、ザクロ石の周囲に別の鉱物集合体が形成されるコロナという非平衡組織が、岩石の融解温度より高温で、メルトと角閃石の存在下で形成されたことを意味し、コロナ形成の必要条件に制約を与えることに成功した。コロナ形成の温度範囲を限定できたことと、メルトや流体の移動の解明に塩素がトレーサーとして有用であることを明らかにしたことは、リュツォ・ホルム岩体のコロナ構造に限らず、様々な地域の非平衡組織の定量的解析に活用されると期待される。

[参考文献]

Mori Y, Ikeda T (2018) Formation of triple-layer coronas between corundum and hornblende from the Luzow-Holm Complex at Akarui Point, East Antarctica, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, Vol.,113, p68-p81,

[研究発表]

Mori Y, Miyazaki K, Ikeda T, Miyamoto T, Iwano H, Danhara T, Hirata T (2021) Early Cretaceous partial melting recorded by pelitic gneiss from the Nagasaki Metamorphic Complex, western Kyushu, Japan: Initiation of Cretaceous high-T metamorphism at eastern margin of Eurasia. *International Geology Review*, <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1961104>,

研究協力者

1) 森 祐紀 九州大学大学院生（令和元年度博士取得，令和2年度より九州大学特別研究員）

期間中，博士論文のテーマとしてリュツォ・ホルム岩体のコロナの成因を研究

2) 淀屋勇斗 九州大学大学院生（令和2年度修士課程修了）

期間中，修士論文のテーマとしてリュツォ・ホルム岩体の温度圧力推定を研究

インパクトが引き起こす物質進化と天体進化の解明

◎宮原正明 広島大学理学研究科・准教授
 大谷栄治 東北大学理学研究科・名誉教授
 小澤 信 東北大学理学研究科・助教
 (国立極地研究所)
 山口 亮 准教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

天体衝突や破壊は数値シミュレーションと衝撃実験を基に研究されているが、破壊された天体の破片(隕石)を用いた検証はされていない。隕石に残る天体衝突による衝撃変成作用の痕跡として衝撃溶融脈、高圧鉱物やコンドリュールの塑性変形などがある。岩石に衝撃波が伝播する際、弾性限界を超えると面破壊が起きる。破壊面は摩擦熱により溶融することがある。破壊面内は衝撃波による高圧に加え、高温状態が達成される。このような溶融した破壊面は“衝撃溶融脈”と呼ばれる。

鉱物が高温・高圧条件化におかれると、より高密度な“高圧鉱物”に相転移する。“衝撃溶融脈”の内部とその周囲では様々な高圧鉱物が生成している。高圧鉱物の生成と粒成長は温度・圧力条件に依存し、その種類、組み合わせや粒径から隕石に記録された衝撃圧、温度、衝突速度、衝突物体の大きさなどを定量化することができる(Ohtani et al. 2004; Ozawa et al., 2009; Miyahara et al., 2010)。また、衝撃実験の結果から、衝撃圧とコンドリュールのアスペクト比に比例関係があることが指摘されている。

本研究課題では1) 普通コンドライト、2) 火星起源隕石、3) ユークライトに残された様々な衝撃変成組織を精査し、それぞれの母天体で起きた衝突イベントを解き明かす試みを行った。以下に隕石種ごとの研究成果の概要を述べる。

1) 普通コンドライト

天体の破壊は衝突時に発生する衝撃波の伝播により起きる。衝撃波の強度の指標の1つとして“衝撃圧”がある。衝撃波の伝播様式は天体の内部構造に依存し、その破壊プロセスが異なる。しかし、隕石を用いて天体内部の衝撃圧力分布を系統的に研究した例はない。

普通コンドライトは化学組成に基づき H, L, LL タイプに分類され、それぞれが固有の母天体に帰属する。さらに母天体での熱変成温度の違いにより、岩石学タイプ 3, 4, 5, 6 に細分され、母天体の最外殻が低変成温度のタイプ 3, 中心領域は高熱変成温度のタイプ 6 となる。

本研究課題では極地研究所に保管されている南極隕石 (H3-H6, L3-L6, LL3-LL6 に分類された普通コンドライト試料) の衝撃溶融脈に存在する高圧鉱物を系統的に明らかにし、それらを圧力スケールとし母天体内部の衝撃圧力分布から天体破壊プロセスを明らかにすることを試みた。

調査の結果、全ての化学グループ (H, L, LL) 及び岩石学タイプ (タイプ 3~6) の試料で衝撃溶融脈と高圧鉱物が見出された。L グループ普通コンドライトで最も高い頻度で高圧鉱物が存在し、LL は L よりやや低いに似ている。一方、H グループ普通コンドライトでの高圧鉱物の存在頻度は L や LL に比べて極端に低い。高圧鉱物を用いた衝撃圧の見積もりによると、L と LL では母天体表層に近づくにつれて衝撃圧が小さくなっていった。これは母天体表層がスパレーションによって放出されていることを示唆する。

衝撃変成作用時の衝撃溶融脈の温度-圧力パスを明らかにするため、高圧鉱物の逆転移メカニズムの解明も行った。具体的には普通コンドライトで確認されたリングウツダイトとメージャラトの逆転移メカニズムを SEM と TEM を用いて明らかにした。

タイプ 3 の普通コンドライトを用いた衝撃回収実験も 10~40 GPa の範囲で行った。実験後の試料を分析すると、衝撃圧が高くなるほどコンドリュールのアスペクト比が大きくなり、長軸が一定方向に配向する傾向があることが判明した。また、10 GPa の衝撃圧でもコンドリュールとマトリックス境界で衝撃誘起溶融が起きることが判明した。

2) 火星起源隕石

新たに発見されたシャーゴッタイトの衝撃変成組織を TEM や XANES を用いてナノスケールで調査した。このシャーゴッタイトには衝撃変成作用だけでなく、水質変成作用も記録されていることが明らかになった。両者の前後関係を明確に決めることが出来なかったが、火星表層に水が存在する環境下での衝突の痕跡が隕石に存在する可能性が示された。

3) ユークライト

ユークライトの中でも特に強い衝撃変成作用が記録されているとされた試料を調査した。このユークライトには幅広い衝撃溶融脈が存在し、そこに含まれる高压鉱物を詳しく調べた。その結果、高压鉱物の一部は一度生成した後、再び低压鉱物に戻る逆転移を起こしていた。これは、このユークライトに

複数回の衝撃変成作用、或いは巨大な衝撃変成作用が記録されていることを示す。ユークライトを含めて隕石にはただ一度の衝撃変成作用だけでなく複数回の衝撃変成作用を記録しているものもあることが示された。

[参考文献]

1. Ohtani E., Kimura Y., Kimura M., Takata T., Kondo T. and Kubo T. Formation of high-pressure minerals in shocked L6 chondrite Yamato 791384: constraints on shock conditions and parent body size. *Earth and Planetary Science Letters* 227, 505–515, 2004.
2. Miyahara M., Ohtani E., Kimura M., El Goresy A. Ozawa S., Nagase T., Nishijima M. and Hiraga K. Coherent and subsequent incoherent ringwoodite growth in olivine of shocked L6 chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 321–327, 2010.
3. Ozawa S., Ohtani E., Miyahara M., Suzuki A., Kimura M. and Ito Y. Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and pressure-temperature conditions of the shock events. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 1771–1786, 2009.

[研究発表]

1. **Miyahara M.**, Tomioka N., & Bindi L. (2021) Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials. *Progress in Earth and Planetary Science* 8, 59.
2. Yoshida M., **Miyahara M.**, Suga H., **Yamaguchi A.**, Tomioka N., Sakai T., Ohfuji H., Maeda F., Ohira I., **Ohtani E.**, Kamada S., Ohigashi T., Inagaki Y., Kodama Y., Hirao N. (2021) Elucidation of impact event recorded in the Iherzolitic shergottite NWA 7397. *Meteoritics and Planetary Science*, doi.org/10.1111/maps.13735.
3. **Miyahara M.**, **Yamaguchi A.**, **Ohtani E.**, Tomioka N., Kodama Y. (2021) Complicated pressure–temperature path recorded in the eucrite Padvarninkai. *Meteoritics and Planetary Science* 56, 1443–1458.
4. **Miyahara M.**, Edanaga J., **Yamaguchi A.**, Kobayashi T., Sekine T., Nakamura A. (2021) Chondrule flattening by shock recovery experiments on unequilibrated chondrites. *JGR Planets*, doi.org/10.1029/2021JE006864.
5. Tomioka N., Bindi L., Okuchi T., **Miyahara M.**, Itaka T., Li Z., Kawatsu T., Xie X., Purevjav N., Tani R., Kodama Y. (2021) Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites. *Communications Earth & Environment* 2, 16.
6. **Miyahara M.**, **Yamaguchi A.**, Saitoh M., Fukimoto K., Sakai T., Ohfuji H., Tomioka N., Kodama Y., and **Ohtani E.** (2020) Systematic investigations of high-pressure polymorphs in shocked ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science* 55, 2619–2651.
7. Fukimoto K., **Miyahara M.**, Sakai T., Ohfuji H., Tomioka N., Kodama Y., **Ohtani E.**, and **Yamaguchi A.** (2020) Back-transformation mechanisms of ringwoodite and majorite in an ordinary chondrite. *Meteoritics and Planetary Science* 55, 1749–1763.
8. **Miyahara M.**, **Ohtani E.**, Nishijima M., and El Goresy A. Olivine melting at high pressure condition in the chassignite Northwest Africa 2737. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 291, 1–11, 2019.

UAV を利用した東オングル島積雪深分布変化解析の研究

◎荒川逸人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 主幹研究員

(国立極地研究所)

土井浩一郎 准教授

青山雄一 准教授

平成31年～令和3年（3か年）

[研究成果]

1. はじめに

南極昭和基地で1992年から2001年にかけて整備された管理棟建物群周囲に発生するスノードリフトは、建物出入口遮断、避難路の遮断、構造物の変形、過大な除雪作業などのように基地運営上の大きな問題となっている。建物周辺のスノードリフトの低減は、建物群の生活使用環境の改善、建物耐用年数の延長、除雪等の建物維持管理エネルギーの低減などのメリットがある。高橋ら¹⁾は昭和基地建物周囲の吹きだまり対策に関する基礎資料を得る目的で、第43次日本南極地域観測隊において吹きだまり観測を実施し、人工雪を用いた吹雪風洞実験と比較・検討を行っている。しかしながら、観測測定領域が限定的であり、その後昭和基地においてスノードリフトの観測は行われていない。第57次日本南極地域観測隊（JARE57）では、昭和基地周辺の海水状態が不安定であり、UAVによる空撮が頻繁に行なわれた。その際、主要部の積雪深分布を解析することを目的に空撮が行なわれ、昭和基地周辺における積雪分布を求めることを試みられた²⁾。本共同研究では、第59次日本南極地域観測隊（JARE59）で撮影されたUAV空撮データも加え、2カ年の積雪深分布の変化を解析することを試みた。

2. 方法

使用したUAVはJARE57ではDJI製Phantom3、JARE59ではDJI製Inspireである。JARE57では対地高度50mに対し、JARE59では150mであり、撮影範囲はJARE57では主要部の500m×500mの範囲であったが、JARE59では1200m×800mと広い範囲であった（図1）。

点群データ作成およびDEMデータ作成には、SfM (Structure from Motion) ソフトであるAgisoft Metashape (旧 PhotoScan) Professional を使用

し、DEMの解析にはQGISを使用した。

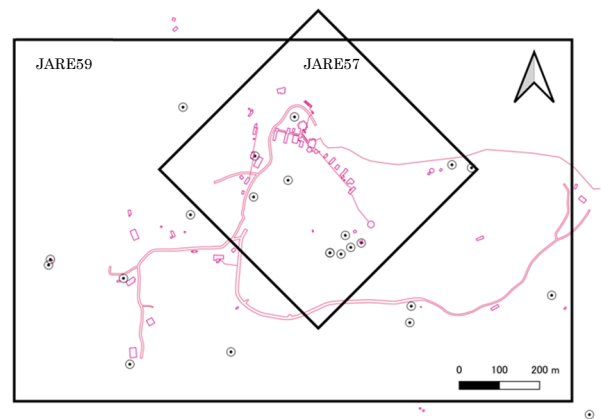


図1 JARE57とJARE59の空撮範囲（黒枠）。
●印はGCP、ピンクは建物と道路を示す。

3. 結果と考察

JARE57では撮影範囲が狭かったため、使用できる国土院の基準点(GCP)の数が4点と少なく、3点で囲まれた範囲（うち1点は範囲内）の領域外は水平位置のズレが顕著であった。ただし、JARE57のデータだけで積雪深分布の解析をおこなうのであれば、差分を取る計算であるために、その誤差を無視することが可能であった。その後、ソフトウェアのバージョンアップや解析手法の見直しにより水平誤差は減少した。

最終年度（R3年度）にJARE59のデータを入手した。撮影範囲が広域で使用できるGCPが多く、東オングル島の海岸付近などのGCPも含まれているため、島内の水平誤差はほぼなく、高さ方向の誤差は使用したGCPで数cm以内、検証点で十数cm以内程度であった。JARE57に比べると水平方向および鉛直方向での誤差が少なかった。

地表が顕著に現れる夏期について、JARE57での12月DEM(J57-20161222)を基準にJARE59の1月DEM(J59-20180128)の差分をとって比較をした(図2)。図2は標高差±1mについて表示し、範囲外は着色していない。着色していない部分は雪が残っている部分に相当する。標高差がなければ黒を示すが、GCPのある地学棟、天測点、重量計室付近は2時期の地盤に差が少ないことがわかる。GCPのない、観測棟付近は橙色となっており、2時期に標高差が現れている。精度を上げるために、GCPの設置が必要である。

4. 今後の課題

JARE59ではGCPの設置をした地点があるため、今後はそれらを利用して地盤高の精度を高め、基準となるDEMを作成し、積雪深分布を推定する予定である。また、積雪によって全てのGCPが見えないこともあったので、これについても積雪深分布の解析を行う予定である。

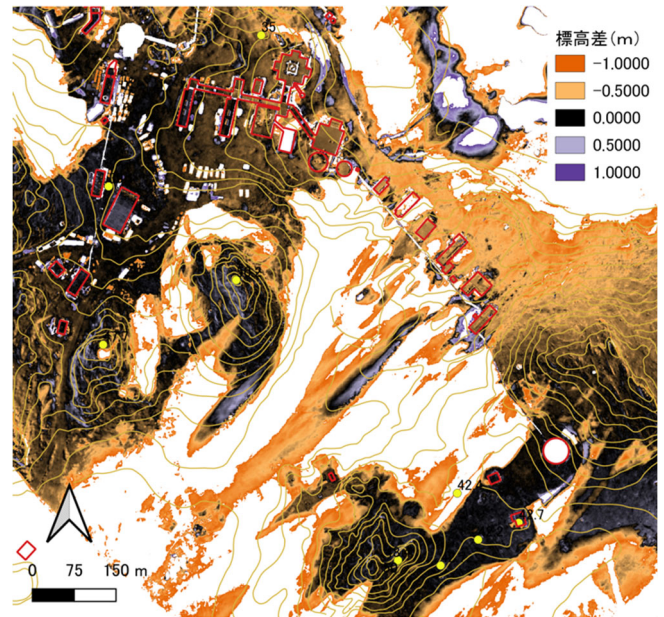


図2 JARE57とJARE59の地盤の比較。黒色は2時期に差がないことを示す。

[参考文献]

- 1)高橋弘樹・半貫敏夫(2005);南極昭和基地管理棟後流域建物周辺の吹きだまり,日本建築学会構造系論文集,70巻,598号,p35-p42.
- 2)荒川逸人ほか(2017);UAV撮影画像を用いた昭和基地の積雪深分布,雪氷研究大会(2017・十日町)講演要旨集,p68.

[研究発表]

なし

南極大陸で回収されたエンスタタイトコンドライト隕石の化学組成に関する研究

◎海老原充 早稲田大学教育学部・教授
 日高義浩 早稲田大学教育学部・助教
 白井直樹 東京都立大学理学部・助教
 (国立極地研究所)
 山口亮 准教授
 令和2年～令和3年(2か年)

[研究成果]

エンスタタイトコンドライト(以下、ECと略記する)は、その組織や鉱物組成から600~870°C以上での熱変成をうけたと考えられている。以前は再結晶度の違いからタイプIとII、およびその中間の3種類に分類されていたが、現在はEHとELに大きく分類され、Fe濃度が高くケイ酸塩鉱物に富んでいるEH、Fe濃度が低くケイ酸塩鉱物に比較的乏しいELに分類された(Sears et al., 1984)。現在、鉱物学的分類と組み合わせ、EL6、EH3などの表記で分類されるのが慣例となっている。

ECの酸素同位体比は地球上の物質と同じ同位体分別直線上に乗るという特徴を示し、そのことから地球を構成する物質と同一起源である可能性が示唆されている。従って、ECの組成やその母天体、特に希土類元素の存在度を用いて各隕石間の微妙な存在度の違いについて議論することは地球の成因を考える上で重要である。

ECの母天体については複数の母天体由来であるか、あるいは単一の母天体由来であるかも未だはっきりとした結論が出ていない。長らく母天体は1つであると考えられてきたが、上記の通りSears et al. (1984)がEL5コンドライトA80259を発見し、その揮発性元素の存在度を根拠にしてEHとELが独立の変成連続性をもつと主張した。以降、現在までにEH、ELともに岩石学的タイプ3から6までの全ての隕石が発見されており、この2グループが独立した形成史をもっているとする意見が主流である一方で、Kong et al. (1995)のように、変成作用を受けていないEH3の存在を根拠に、ECが1つの母天体由来であり、EH5、EH3、EL3、EL6の順に形成されたとする意見も存在する。本研究では、ECのもつ希土類元素存在度の多様性をもとに、熱変成の詳細な履歴を考え、ECの形成史を考察することを目的とした。

今回分析に用いた試料は、ALHA 81021、EET 87746、

LEW 88180、PCA 91020、PCA 91238の5つで、過去の実験結果と比較するため、CV3コンドライトAllende隕石試料を使用した。ECの隕石試料はNASAから借用した。EET 87746、ALHA 81021、PCA 91238の3試料についてはめのう乳鉢を用いて細粒になるまで粉碎したものを用いた。これらの隕石について、次の3つの実験を行った：(1)機器中性子放射化分析INAAを用いた全岩分析、(2)誘導結合プラズマ原子発光分光分析ICP-AESおよびICP質量分析ICP-MSを用いた主要元素および希土類元素の全岩分析(図1)、(3)溶出実験と組み合わせたICP-AESおよびICP-MSによる主要元素および希土類元素の分析。

INAA実験は京都大学複合原子力科学研究所に設置されている研究用原子炉を用いて実施した。定量は比較法で行い、Allende隕石と、産業技術総合研究所のJB-1を比較標準試料として用いた。EC隕石試料は四分法でできるだけ均質になるよう分取した。中性子照射は10秒の短時間照射と4時間の長時間照射で計2回行った。短時間照射では照射後5分程度で複合原子力科学研究所のゲルマニウム半導体検出器を用いて γ 線を測定、長時間放射では照射から1週間ほど、および2ヶ月ほど後の2回にわたって首都大学東京(現・東京都立大学)所有の2つのゲルマニウム半導体検出器を用いて γ 線を測定した。ICP-MSについてはEbihara et al. (2020)にて示されている実験手法を参考にした。ICP-MS装置については国立極地研究所に設置されているThermo Scientific社のElement XRを利用した。ICP-AESはセイコーインスツルのSPS 7800 Plasma Spectrometerを利用した。

本研究で溶出実験は重要なステップと位置づけられ、以下の通り行った。試料約100mgをそれぞれ10 mlの酢酸緩衝溶液(pH 4.7)、0.5mol/L HNO₃、

5mol/L HNO₃ で順次溶出した。溶出は室温(約 20℃)で1時間行い、遠心分離して上澄み液を分離し、残渣を次の溶液による溶出に用いた。EET87746 については酢酸緩衝溶液による溶出に先立って、超純水 milliQ 10mL を用いて1時間、室温で溶出させた。

得られた分析結果に基づき、以下のような考察をおこなった。

(1) EL6 コンドライトの示す特異な元素分別

ALHA 81021 の溶出実験による主要元素および希土類元素の定量値は EL6 コンドライトが既存 EC の衝撃溶融による変成によって形成されたとする説を概ね支持する結果となった。しかし詳細に考察した結果、EL6 の形成過程ではオルダマイトが失われただけでなく、補助的な希土類元素の担体鉱物が付加された可能性が考えられた。この担体鉱物は重希土類元素に富んでいるほか、残渣での希土類元素存在度パターンから考え、酸残渣鉱物、すなわちケイ酸塩鉱物の可能性が高いことがわかった。

(2) 硫化物の元素存在度への関与

EC における希土類元素の主要な担体としてオルダマイト CaS の存在が報告されてきた。しかし、本

実験の溶出実験での Ca と希土類元素の溶出挙動は、酢酸緩衝液の利用によって pH の変化にともなう希土類元素の水酸化物への再沈殿を抑制しているにもかかわらず、必ずしも一致しないことがわかった。この不一致は主に隕石中のオルダマイトの南極における風化に起因するものと考えられた。

(3) ケイ酸塩鉱物-硫化物間の希土類元素の分配

本実験の結果から、EC の希土類元素はその全量が一度オルダマイトに取り込まれ、そこから二次的な変成作用によってケイ酸塩鉱物に転移していったものと考えられ、オルダマイトは星雲凝縮を起源とするとする考えを支持する結果となった。

希土類元素が硫化物とケイ酸塩鉱物間でどのように分配されるかは、主に元素のもつ揮発性と隕石のもつ鉱物割合に依ると考えられる。今後、分類上での多様な隕石に対して、希土類元素が構成鉱物間にどのように分配されているかを詳細に解明することにより、EC の形成過程や母天体形成について考察をより深めることができるものと考えている。

[参考文献]

- Ebihara M., Hayano K. and Shirai N. (2020) Determination of trace rare earth elements in rock samples including meteorites by ICP-MS coupled with isotope dilution and comparison methods. *Analytica Chimica Acta* 1101, 81-89.
- Kong P., Mori T. and Ebihara M. (1997) Compositional continuity of enstatite chondrites and implications for heterogeneous accretion of the enstatite chondrite parent body. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4895-4914.
- Sears D. W., Weeks K. S. and Rubin A. E. (1984) First known EL5 chondrite- evidence for dual genetic sequence for enstatite chondrites. *Nature* 308, 257-259.

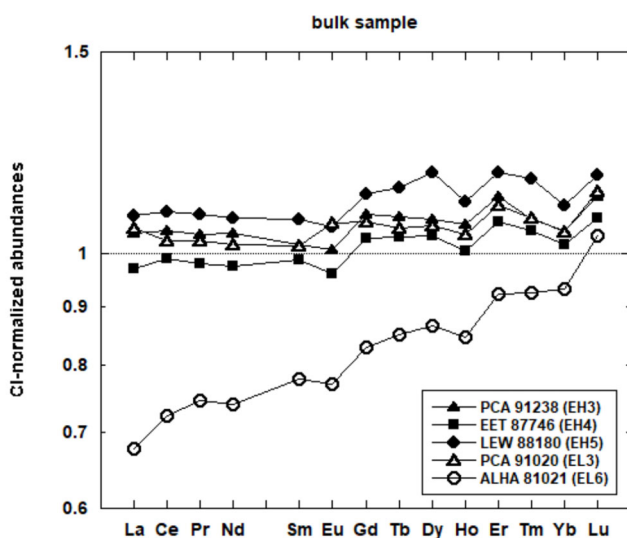


図1 CI コンドライトで規格化した希土類元素存在度

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	2-26
研究課題名	南極大陸で回収されたエンスタタイトコンドライト隕石の化学組成に関する研究		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)			
小計	0名		
所外 (極地研以外)	杉原 寛紀	早稲田大学	大学院生
	藤村 泰成	早稲田大学	大学院生
小計	2名		
合計	2名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

東南極リュツォ・ホルム岩体における褶曲帯・延性断層岩帯・地震性断層岩帯の形成テクトニクスに関する研究

◎豊島剛志 新潟大学理学部・教授
 (国立極地研究所)
 外田智千 教授
 令和2年～令和3年(2か年)

[研究成果]

研究代表者が参加した第60次南極地域観測隊の調査によって、東南極リュツォ・ホルム岩体において複数の変形集中帯(褶曲帯・延性断層岩帯(マイロナイト帯)・地震性断層岩(シュードタキライト・カタクレーサイト)帯)が見出された。特に、大きな露岩であるラングホブデとスカルブスネス、スカーレン等において発達している。これら変形集中帯は、リュツォ・ホルム岩体におけるプレート・大陸の衝突・集積・分裂の過程の運動学的・力学的特性を記録していると予想される。本研究では、これらの中で、特にラングホブデ北部とスカルブスネス南部に発達する断層・褶曲を解析した。解析には、主に第60次南極地域観測隊の調査によって得られたデータ・試料を用いた。解析の結果、地質図の修正の必要性和、次のような成果を得た。

(1) ラングホブデ北部

リュツォ・ホルム湾東岸地域のラングホブデ北部の二子山北側でシュードタキライト(PST)を発見し、二子山シュードタキライト(二子山PST)と呼ぶ。二子山PSTは、NNE-SSW走向で中程度東傾斜の長さ660mを超える二子山断層に沿って分布し、その断層運動によって形成された。二子山断層は周辺の片麻岩の片理面と平行である。二子山断層とPSTは、NNE-SSW走向の花崗岩マイロナイト帯(二子山マイロナイト帯)の東縁を縁取っている。

二子山マイロナイト帯は、NNE-SSWトレンド花崗岩シートを原岩とし、逆断層センス(西側が上昇するセンス)の断層運動によって形成された。花崗岩シートの進入と花崗岩マイロナイト帯の形成は、NNE-SSWトレンドの褶曲帯の発達とともに、WNW-ESE圧縮の場に置かれたリュツォ・ホルム湾地域のリュツォ・ホルム岩体の地殻短縮テクトニクスに関係した変形作用であると考えられる(図1)。

二子山断層は、PST、カタクレーサイト(CAT)、小スケールの雁行断層からなり、正断層運動(西側が落ちるセンスの断層運動)により形成された。二子山マイロナイト帯とは、同じ断層沿いであるが、

逆センスの断層運動の産物である。二子山PSTはかつての地震を記録しており、地震後の変形を受けていない。したがって、二子山PSTは地震時の断層形成前～直前の変形過程を記録している予想される。また、地震前(PST形成前)の変形は、二子山断層のカタクレーサイト(二子山CAT)に記録されている。

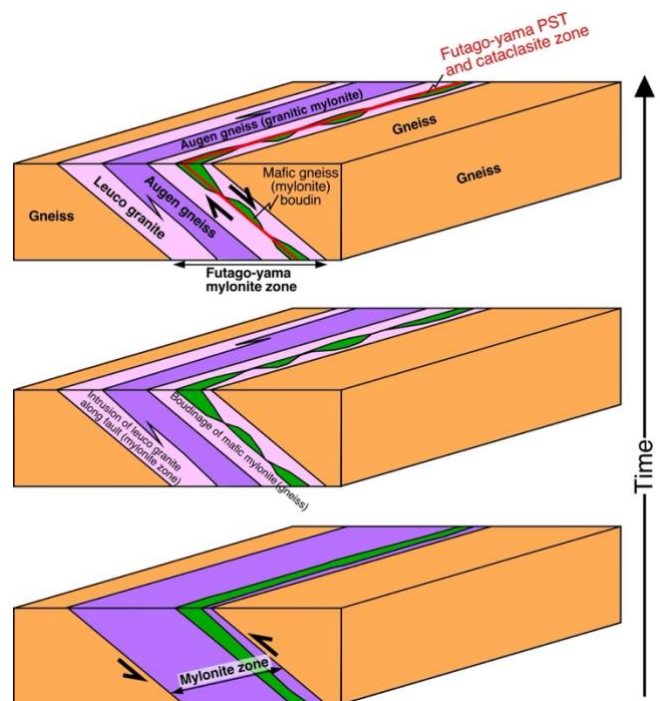


図1 花崗岩シート、二子山マイロナイト帯、優白質花崗岩シート、二子山断層・PSTの形成過程

二子山CATには、面構造を持つタイプと持たないタイプ(ランダムファブリック)の2種類がある。面構造を持つCATでは、破碎した石英、斜長石、黒雲母、角閃石の単相鉱物片からなる薄層が互層し、面構造を作っている。面構造を持つCAT中の黒雲母片には、キンクバンド、(001)沿いの劈開すべり、劈開ステップ、雲母フィッシュなどの微細変形構造が発達し、強い伸長が認められる。しかし、ランダムファブリックCATの黒雲母片は、面

構造を持つ CAT のものよりも、伸長しない。また、ランダムファブリック CAT の黒雲母片にはキンクバンドが発達せず、(001) 劈開ステップや雲母フィッシュが見られない。また、面構造を持つ CAT の壁岩には単相鉱物破砕片からなるレンズがしばしば観察されるが、ランダムファブリック CAT とその壁岩には観察されない。ランダムファブリック CAT には、特に、その中心部のランダムファブリックウルトラカタクレーサイトからなる断層コアには、方解石の沈殿がしばしば認められるが、面構造を持つ CAT にはほとんど存在しない。二子山 PST は、面構造を持つ CAT 帯の断層コアであるウルトラカタクレーサイト帯に沿って生じているが、ランダムファブリック CAT 帯に沿っては観察されない。二子山 PST は、面構造を持つ CAT 帯のウルトラカタクレーサイトと CAT の強い面構造を切断している。これらの事実から、面構造を持つ CAT の発達過程、特に黒雲母片のキンクから劈開すべりへの変形過程は、地震の準備・加速の過程を示している可能性がある。また、ランダムファブリック CAT 帯の断層コアに広く分布する方解石沈殿は、水圧破砕と地震発生との関係を示唆している可能性がある。

(2) スカルプスネス南西部

リュツオ・ホルム湾東岸地域のスカルプスネス南西部の長池と菊の池の北側で PST が発見された。これらをそれぞれ長池シュードタキライト（長池 PST）、菊の池シュードタキライト（菊の池 PST）と呼ぶ。長池 PST は、北に急傾斜する ENE-WSW トレンドの長さ 300 m 以上の断層（長池断層）に伴う。菊の池 PST は、中程度に東傾斜する NNW-SSE トレンドの長さ 100 m 以上の断層（菊の池断層）に伴う。長池断層と菊の池断層はともに、周辺の片麻状構造を切断し、PST・CAT・脆性破断・雁行断層・スプレー構造などから構成される。両断層とも右横ずれ断層である。どちらの断層においても、PST と CAT の一部は赤色を呈している。このことから、両断層の PST の少なくとも一部は地下浅部の酸化条件下で形成されたことが示唆される。菊の池断層は長池断層に比べ、より多くの CAT を伴う。菊の池断層よりも、長池断層において、引張割れ目を埋める PST 脈（T 脈）が多く認められる。菊の池断層の PST 脈の多くは Y 脈である。

菊の池断層とその PST は長池断層によって切断

[参考文献]

- Ishikawa, T., 1976, Superimposed folding of the Precambrian metamorphic rocks of the Lutzow-Holm Bay region, East Antarctica. *Memoirs of National Institute of Polar Research, Series C, No. 9.*
- Yoshida, M., 1978, Tectonics and petrology of charnockites around Lützow-Holmbukta, East Antarctica. *Journal of Geosciences, Osaka City University, Vol. 21, Art. 6, 65-152.*

され、変位しているように見える。菊の池断層・PST と長池断層・PST は、それぞれの卓越方向と断層岩の構成・特徴、剪断センスから見て、異なるテクトニクスによって生じたと考えられる。長池断層は、その卓越方位・剪断センスから見て、Yoshida (1978) の D4 断層に属する断層であるとみなされる。D4 断層は宗谷海岸地域に広く分布し、変成作用や火成作用を伴わない E-W 圧縮応力場で形成された (Yoshida, 1978)。したがって、長池断層・PST は広域な E-W 圧縮応力によって生じたとみなされる。

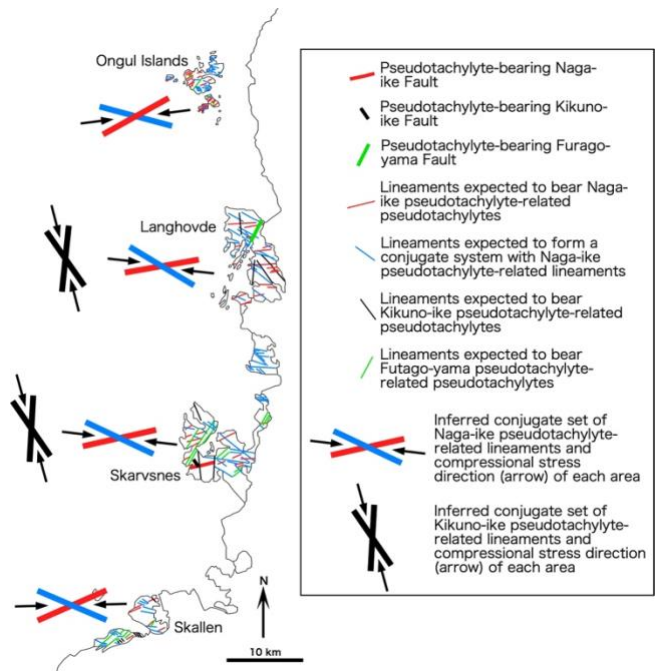


図2 リュツオ・ホルム湾東岸地域における脆性断層形成史と応力場変遷の再解釈
Ishikawa (1976)とYoshida (1978)を改変

Ishikawa (1976)とYoshida(1978)を本研究の成果から再解釈すると(図2)、次のような地質構造・脆性断層形成史と応力場変遷を編むことができる。

地質構造等の形成(上が古い)	応力場と断層運動(下が新しい)
二子山花崗岩シートの侵入	E-W 圧縮応力場における逆断層運動
二子山マイロナイト帯・NNE-SSW~N-S トレンド褶曲の形成	E-W 圧縮応力場における逆断層運動
優白質花崗岩シートの侵入	
二子山断層・PSTの形成	NW-SE 引張応力場における正断層運動と地震
菊の池断層・PSTの形成	NNW-SSE 圧縮応力場における右横ずれ断層運動と地震
D4断層・長池断層・PSTの形成	E-W 圧縮応力場における右横ずれ断層運動と地震

これらの運動・変形作用により、宗谷海岸地域の地質構造が改変されたと結論される。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	2-27
研究課題名	東南極リュツオ・ホルム岩体における褶曲帯・延性断層岩帯・地震性断層岩帯の形成テクトニクスに関する研究		
氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)			
小計	0名		
所外 (極地研以外)	石川正弘	横浜国立大学大学院環境情報研究院	教授
	北野一平	北海道大学総合博物館	助教
	香取拓馬	糸魚川市産業部 商工観光課 ジオパーク推進室	主事
	村松さやか	新潟大学理学部理学科	学部4年生
小計	4名		
合計	4名		

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（4）生 物 圏

南極の短波長紫外線が生物に及ぼす影響に関する生化学的研究と気象データの統計解析

◎高橋哲也 島根大学人間科学部・教授

麻生祐司 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科・准教授

(国立極地研究所)

伊村智 教授

工藤栄 准教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

1. 緒言

1980年代以降、南極上空では春季にあたる10月頃になるとオゾン層の破壊が生じている。このようなオゾン層の破壊に伴って、地上には短波長紫外線が届きやすくなることが懸念されている。短波長紫外線は、ヒト皮膚に大きなダメージを及ぼし、しわ、たるみ、シミ、さらには皮膚がんへと影響を及ぼす。

本研究室では、国立極地研究所の協力を得て長きにおいて南極昭和基地での屋外曝露の研究を行った。今回は、気象庁及び国立環境研究所によって観測された20年間のデータを用い、南極の気象データと地上に届く短波長の紫外線量との関係についての解析を行った¹⁾。そして、これら気象データ因子に基づいた統計的な解析結果を基に、今まで行なった南極でのカラーゲンシートの曝露結果²⁾との関係について、改めて検討を行ったので報告する。

2. 結果と考察

2.1 気象データの統計解析

上空のオゾン層が破壊されると、短波長紫外線が地上に届きやすくなると考えられている。図1に、オゾンホールが発生した典型的な年(2014年)のオゾン全量日代表値の最小値と地上に届く短波長の紫外線強度(290~295nm)の変化を表わした結果を示す¹⁾。後述する本研究の春季の曝露期間である9月~10月頃には、総オゾン量はオゾンホールの定義である220 m atm-cmを下回っていることがわかった。また、11月になると、総オゾン量は230~330 m atm-cm程度にまで大きく回復していることもわかった。

一方、地上に届いた紫外線量は、春季には短波長紫外線(290~295nm)が地上に到達していることがわかる。これは、オゾンホールの発生によって短波長紫外線が地上に届くようになったためと考えられる。また、オゾン濃度が回復する春季曝露の後半の期間(10月6日~30日を含む)の方が、短波長紫外線量はオゾンホール発生期間よりも大きい。同じ太陽高度であっても、秋季である2月~4月頃には290~295nmの短波長紫外線は地上には全く届いて

いないことも確認できる。

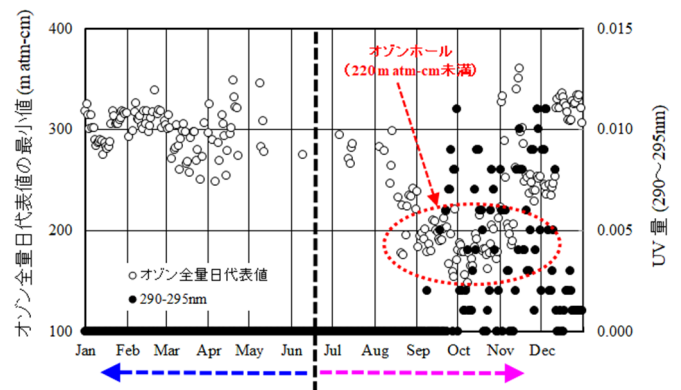


図1 昭和基地に到達した短波長の紫外線量とオゾン全量日代表値最小値の1年間の変化(2014年の例)

オゾン層の破壊を進める因子として、極域成層圏雲の存在が知られている。成層圏の気温が低下するのに伴って、微細な粒子からなる極域成層圏雲が形成されやすくなる。そこで、昭和基地上空の気温とオゾン濃度の関係について、20年間の気象データを基にその関係を調べた(図2)。その年毎に、1年間で最もオゾン全量日代表値が低くなった日の値とその日の上空の気温との関係について示す。その結果、その年における最も低いオゾン全量日代表値と上空の気温との間には、明確な相関が見られている。すなわち、上空の気温の低下に伴って、オゾン全量日代表値の最小値は低下することがわかった。これらの気象データの関係は多項式近似(次数2)でき

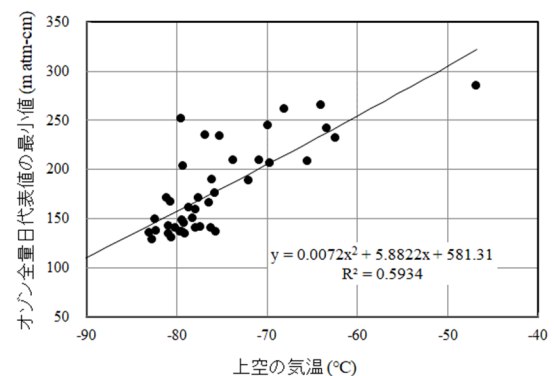


図2 年毎のオゾン全量日代表値の最小値と昭和基地上空(70 hPa)の気温との関係(1974年~2014年の値)

ることもわかった¹⁾。

次に、年毎に最も低い日のオゾン全量日代表値とその年の波長 290~295nm の紫外線強度の最も高い日の値との関係についても調べた¹⁾。図3に1993年~2014年の結果を示す。その結果、オゾン全量日代表値が低い値を示した年ほど、短波長の紫外線強度が高くなることがわかった。つまり、上空のオゾン濃度が低い年ほど、短波長紫外線が太陽からの紫外線が成層圏で吸収されずに、地上に届いたものと考えられる。また、これらの関係には指数近似曲線で示されることもわかった¹⁾。

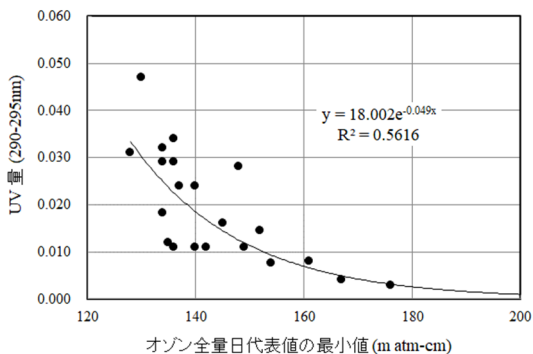


図3 年毎の短波長紫外線量の最大値とオゾン全量日代表値の最小値との関係 (1993年~2014年の値)

以上のように、春季と秋季では地上に届く紫外線量には大きな差が見られた。そこで冬至(6月21日)からの日数に対する紫外線量の違いを調べることにした。紫外線量の多い冬至以降(早春~初夏)の紫外線量の値から冬至以前(晩夏~晩秋)の紫外線量の値を引いて、その値の差を求めた。図4に、冬至からの日数に対する冬至の以前と以降の紫外線量の値の差を調べた結果を示す。

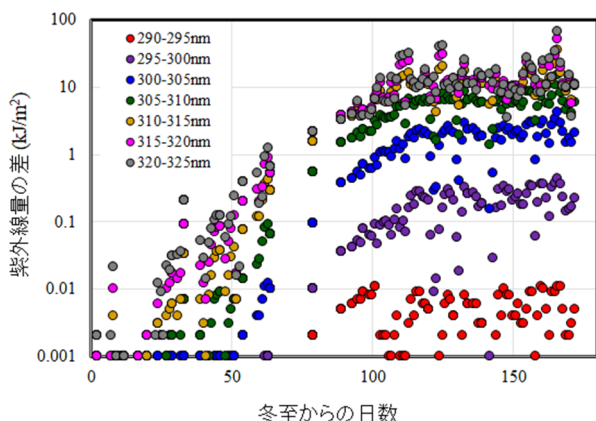


図4 冬至からの日数に対する冬至の以前と以降の紫外線量の差の関係

その結果、冬至からの日数に対する紫外線量の値の差は、いずれの波長の紫外線においても日数とともに大きくなることがわかる。ここで注目されることは、いずれの波長の紫外線においても、冬至の以降と以前の値の差はかなり大きな値を示して

いることである。

2.2 南極での短波長紫外線のコラーゲンに及ぼす影響

具体的な紫外線の影響を調べるべく、以前に行った実験結果²⁾との関係について改めて検討を行った。オゾンホール発生時に、ヒト皮膚をモデルとしたコラーゲン人工皮膚の屋外曝露実験を行っていた(曝露期間:春季の9月11日~10月5日の25日間と9月11日~10月30日の50日間, 秋季の3月9日~4月2日の25日間と2月12日~4月2日の50日間)。垂直方向(頭上)において曝露したコラーゲンシートから抽出液を採取し、抽出液中の末端アミノ基濃度を調べた。

この末端アミノ基濃度は、紫外線によって切断されたコラーゲン分子鎖の量に比例する。コラーゲン抽出液中の末端アミノ基濃度は、最外層である1層目が25日間、50日間の曝露とも最も高かった。さらに、2層目から5層目へと奥の層に進むのに従って、その値が小さくなることが確認できた。

また、春季の50日間の曝露は、春季の25日間曝露や秋季での25日間や50日間曝露の場合に比べて、紫外線による劣化が特に大きいことがわかる。ここで注目されることは、秋季と春季の結果を50日間の曝露同士で比較すると、末端アミノ基濃度の値が5倍程度も大きいことである。このことは、春季曝露では短波長紫外線によってコラーゲン分子鎖がより細かく切断されていたことを示している。つまり、オゾンホールの影響が明確に現われている。

比較として、アルミ箔で遮光したコラーゲンシートについても秋季と春季に曝露架台に各々50日間セットしていた。その結果、遮光したコラーゲンシートの末端アミノ基濃度の値は、曝露前のコラーゲンシートとほぼ同じ値であった。

3. 結言

気象データの統計解析の結果と実際の南極でのコラーゲンシートの曝露結果には良い相関が認められた。つまり、オゾンホール発生時期である春季とオゾンホール発生時期ではない秋季では、紫外線によるコラーゲンの劣化度合いが大きく異なっていた。また、同じオゾンホール発生時の春季の50日間曝露であっても、前半の期間と後半の期間の曝露では紫外線による影響が非常に大きく異なることも、気象データの統計解析の結果と一致していた。

[参考文献]

- 1) Tetsuya Takahashi et al., *J. Sci. Electr. Mater. Eng.*, Vol.27, No.1, pp.27-37 (2018).
- 2) Tetsuya Takahashi et al, *Photochem. Photobiol. Sci.* Vol.11, pp. 1193-1200 (2012).

南極クマムシの生活史戦略に関する研究

◎辻本 恵 慶應義塾大学環境情報学部・専任講師
 一ノ瀬 友博 慶應義塾大学環境情報学部・教授
 黒田 裕樹 慶應義塾大学環境情報学部・教授
 (国立極地研究所)
 伊村 智 教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

南極陸上生態系の中でも微小動物相は種構成が単純で生活環が短いことから、それらの個体数や分布には気候変動の影響が最も顕著に表れると考えられている。しかしながら、南極において微小動物相に関する生態研究は未だ限られている。本研究においては、南極の陸上生態系を代表する微小動物の一つであるクマムシを対象とする。南極の固有クマムシ種である *Acutuncus antarcticus* (図1) の生態に着目し、南極の陸上環境に特有の生態特性の解明を目指す。

南極大陸ではこれまでに40種以上のクマムシ種が報告されている (Velasco-Castrillón *et al.* 2014, 他)。本研究で対象としている *A. antarcticus* は南極固有のクマムシ種であり、昭和基地周辺を含む南極大陸沿岸に広く分布することが分かっている。本種はこれまでに、繁殖能力が非常に高く、繁殖老化がほとんど起きないことが明らかにされており (Tsujiimoto *et al.* 2015, 2016a)、それらが南極大陸に広く分布する生態特性の一つと考えられた。一方で、30年以上凍結していたコケ試料から蘇生し繁殖するなどの凍結耐性能力や長期生存能力についても報告されていた (Tsujiimoto *et al.* 2016b; 図1)。

そのような生態的特徴が報告されてきた *A. antarcticus* であったが、本課題において、驚異的な長期生存能力を示した本種 (SB 系統) と、それ以前に代表らが同様の飼育条件下で生態調査をしていた本種 (LSW 系統) では、生態的特徴と遺伝

型が異なることが分かった (Tsujiimoto *et al.* 2020)。



図1. 30年以上の凍結から蘇生した南極固有のクマムシ種 *Acutuncus antarcticus* の子孫 (SB-3 系統)。スケールバーは $100\mu\text{m}$ を示す。(出典: Tsujiimoto *et al.* 2016b)

LSW 系統は産卵した卵の孵化率が平均で97.5%と100%に近く、繁殖能力が非常に高いことが分かっていたが (Tsujiimoto *et al.* 2015)、30年以上凍結した後に蘇生したSB-1、SB-3は共に繁殖能力がそこまで高くなかった (Tsujiimoto *et al.* 2016b)。そのため、SB 系統の第一子孫まで繁殖状況を追い、SB-1 系統、SB-3 系統、LSW 系統での繁殖生態の特徴を調べてみた。その結果、SB 系統の卵の孵化率は LSW 系統のものに比べて低く、またSB 系統の産卵間隔は LSW 系統のものに比べて短いことが分かった。

同時に 3 系統の塩基配列を調べたところ、蘇生した SB 系統と、もともと飼育していた LSW 系統では、核遺伝子の 18Sr 領域では完全に一致するものの、ミトコンドリアの遺伝子領域では SB と LSW では配列が一部異なることが分かった。南極大陸に広く分布することが知られている本種だが、そのほとんどは LSW 系統に近いものであり土壌や湖沼、陸上のコケなど様々な環境で報告されていた (Velasco-Castrillón *et al.* 2015)。一方で、SB 系統に近いものはこれまでには土壌にしか報告がなく、分布もかなり限られていることも分かった。

SB 系統のなかに長期凍結保存による遺伝的損傷が残っている可能性は否定できないが、これらのことから、本種の遺伝子型と生活史に関係性がある可能性が考えられた。さらに、これら 2 系統

の生態的特徴の違いによる生活史戦略の違いが、異なる分布特性に反映されている可能性も検討された。

尚、本課題の中心となる培養実験は、国立極地研究所の生物実験室で行う必要があり、新型コロナウイルス蔓延による極地研入構制限の影響を大きく受けることとなった。令和 2 年度においては、*A. antarcticus* の飼育系統を維持するためのメンテナンスのみに留まった。令和 3 年度には活動を再開し、凍結耐性能力と生態特性の関係性を調査する実験を計画したものの、当該年度も緊急事態宣言が発令されるなどで再び入構制限がかかり、実験条件を吟味する予備実験の実施に留まり、申請当初予定していた成果まで遂げることができなかった。

[参考文献]

- 1) Velasco-Castrillón A, Gibson JAE, Stevens MI (2014). A review of current Antarctic limno-terrestrial microfauna. *Polar Biol* 37:1517–1531. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1544-4>
- 2) Tsujimoto M, Suzuki AC, and Imura S (2015). Life history of the Antarctic tardigrade, *Acutuncus antarcticus*, under a constant laboratory environment. *Polar Biology* 38: 1575–1581. doi: 10.1007/s00300-015-1718-8.
- 3) Tsujimoto M, Komori O, and Imura S (2016a). Effect of lifespan and age on reproductive performance of the tardigrade *Acutuncus antarcticus*: minimal reproductive senescence. *Hydrobiologia* 772: 93-102. doi: 10.1007/s10750-016-2643-8.
- 4) Tsujimoto M, Imura S, and Kanda H (2016b). Recovery and reproduction of an Antarctic tardigrade retrieved from a moss sample frozen for over 30 years. *Cryobiology* 72: 78-81. doi: 10.1016/j.cryobiol.2015.12.003.
- 5) Velasco-Castrillón A, McInnes SJ, Schultz MB, Arróniz-Crespo M, D’Haese CA, Gibson JAE, Adams BJ, Page TJ, Austin AD, Cooper SJB, Stevens MI (2015). Mitochondrial DNA analyses reveal a widespread tardigrade diversity in Antarctica. *Invertebr Syst* 29: 578–590.

[研究発表]

- 1) Tsujimoto M, Kagoshima H, Kanda H, Watanabe K, and Imura S (2020). Reproductive performance of the Antarctic tardigrades *Acutuncus antarcticus* (Eutardigrada: Hypsibiidae) revived after being frozen for over 30 years and of their offspring. *Zool J of Linn Soc* 188(3): 839-847. doi: 10.1093/zoolinnean/zlz137

極域の光合成生物の生理応答機構の解析

◎菓子野康浩 兵庫県立大学理学部・准教授
小杉真貴子 アストロバイオロジーセンター・特任研究員

(国立極地研究所)

工藤栄 教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 年間)

[研究成果]

現在の地球で藻類や植物が行っている酸素発生型光合成は、光エネルギーを使って水を分解し、得られた還元力で二酸化炭素から有機物を作り出す反応である。水の分解過程では酸素が放出される。この酸素発生型光合成は、27 億年ほど前に原核生物のシアノバクテリア(ラン藻)によって開始され、酸素がほとんど存在しない嫌気的な地球環境を好気的な環境へと変貌させた。大気中の酸素濃度の上昇は好気呼吸をする生物の繁栄をもたらし、地球の生物進化に大きな影響を与えたと考えられている。

酸素発生型光合成反応には可視光レベルのエネルギーが必要であると考えられてきた。しかし 1990 年代以降、可視光よりもエネルギーレベルが低い赤外線のみで酸素発生型光合成を行う生物の発見が相次いでいる。一部のシアノバクテリアは赤外線を吸収する光合成色素(クロロフィル *d, f*)を合成し、電荷分離反応を行う反応中心に利用(直接的な赤外線利用)していることが報告された^{1,2)}。一方で、一部のシアノバクテリアや真核の光合成生物において、赤外線吸収型のクロロフィルから可視光吸収型のクロロフィルへの効率的なエネルギー移動(間接的な赤外線利用)が示唆されており、それを可能にするアップヒル型のエネルギー伝達メカニズムが注目されている^{3,4)}。

私達は、南極で採集された緑藻ナンキョクカワノリ(*Prasiola crispa*)が、一般的な光合成生物が利用してい

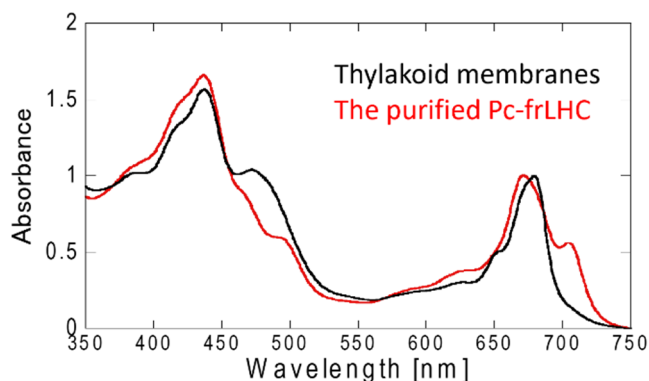


図1. チラコイド膜とそこから精製したPc-frLHCの吸収スペクトル

る可視光に加え、光環境に応じて 700~750 nm の赤外線でも一連の光合成反応を行っていることを初めて明らかにした^{5,6)}。真核藻類の光化学反応中心は可視光と同等のエネルギーで励起されるため、吸収された赤外線エネルギーは大きなアップヒル型のエネルギー移動を起こしていると考えられた。そこで本研究課題においては、赤外線の吸収とアップヒル型励起エネルギー移動の詳細を明らかにするため、赤外線を吸収する長波長クロロフィルが結合した光捕集タンパク質の精製と同定を行った。精製した標的タンパク質(Pc-frLHCと命名)は、クロロフィル *a* の一般的な吸収帯である 680 nm の他に 708 nm に大きな吸収帯を有していた(図1)。色素分析の結果から長波長のピークはクロロフィル *a* の多量体構造によるものと考えられた。また、光の集光と散逸に関わるカロテノイドはロロキササンチンとピオラキササンチンの 2 種が1対1の割合で結合していることが分かった。Pc-frLHC の 3 箇所のアミノ酸シーケンス解析とナンキョクカワノリのトランスクリプトーム解析データから全アミノ酸配列を推定し、Blast 検索を行った。その結果、この長波長クロロフィル結合タンパク質は真核光合成生物が一般的に持つクロロフィル結合型光捕集タンパク質(LHC)の一種で、緑藻の光化学系 I のアンテナである LHCI に近縁である新規のタンパク質であることが分かった。このことから、Pc-frLHC は、真核藻類からクロロフィル *a/b* を持つ green の系統(緑藻と植物を含む)が進化した後に緑藻が持つ LHCI から光化学系 II のアンテナへと派生したものであることが示唆された。ナンキョクカワノリでは、Pc-frLHC が光化学系 II の赤外線励起を可能にしたことで、可視光が少なく赤外線が卓越する環境下での生育を助けられていると考えられる。

[参考文献]

- 1) Chen, M. et al.; 2012, FEBS Lett. Vol. 586, p3249–p3254.
- 2) Li, Y. et al.; 2014, Front. Plant Sci. Vol. 5, 67.
- 3) Mielke, S.P. et al.; 2013, Biochim. Biophys. Acta Bioenerg. Vol. 1827, p255–p265.
- 4) Kotabová, E. et al.; 2014, Plant Cell Physiol. Vol. 45, p392–p397.

[研究発表]

5) Kosugi, M. et al.; 2020, *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.* Vol. 1861, 148139,

6) 小杉真貴子 他; 2020, *光合成研究* Vol. 30, p19-p25,

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	31-29	
研究課題名		極域の光合成生物の生理応答機構の解明		
氏名		所属	職	備考
所内 (極地研)				
小計	名			
所外 (極地研以外)	小澤 真一郎	岡山大学	助教	P700酸化還元測定
	高橋 裕一郎	岡山大学	教授	研究への助言
	原 光二郎	秋田県立大学	准教授	ゲノム解析
	高市 真一	東京農業大学	教授	色素分析
	小池 裕幸	中央大学	教授	研究への助言
	亀井 保博	基礎生物学研究所	特任准教授	アミノ酸シーケンス
小計	6名			
合計	6名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

南極沿岸における海産微小動物相とその特徴の解明

- ◎上野大輔 鹿児島大学大学院理工学研究科・准教授
 角井敬知 北海道大学大学院理学研究院・講師
 嶋田大輔 北海道大学大学院理学研究院・研究院研究員
 辻本 恵 慶應義塾大学環境情報学部・専任講師
 藤本心太 東北大学大学院生命科学研究科・助教

(国立極地研究所)

伊村 智 教授

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

実施内容

南極沿岸海域は厚い定着氷に覆われ、観測船での調査が困難である。生物多様性や種の分布、生態についての情報は極めて限定的である。日本の南極観測拠点である昭和基地沿岸における海洋生物多様性は、大型生物や魚類を除きほぼ未知である。本研究では、南極沿岸の生態系を支える基盤である微小動物相と、それらが持つ特徴について明らかにすることを目的とした。国立極地研究所や国内外の他の研究機関が南極沿岸域で採集した泥や砂などの底質サンプルから、試薬類を用いて微小動物の抽出を計画した。研究初年度には、JARE 59 で採取された 2 地点の堆積物からの小型底生動物抽出を、研究代表者と共同研究者ら合同で実施した。続く 2 年目と 3 年目は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響から合同での抽出作業を行うことは出来なかった。そこで、初年度に抽出された動物等を主な材料として用い、共同研究者と分担して各々が専門とする動物（小型甲殻類、線虫類、クマムシ類、その他）の分類研究を推進した。また、その他の基質標本から得られた動物についても本研究で用いた。

具体的な成果

本プロジェクトでは、様々な動物類について扱ってきた。特に成果が上がった分類群はクマムシ類と線虫類である。クマムシ類に関しては、JARE59 リュツォ・ホルム湾サンプルから抽出を行った海産クマムシ類 3 種について、電子顕微鏡観察と分子系統解析を行い、学会発表 1 件および学術論文 1 報として公表した (Fujimoto et al., 2020)。本論文では、1 新種ナンキョクネコクマムシ *Styraconyx takeshii* を含む 3 種を報告した。南極海においては、海産クマムシ類に関する

先行研究は僅かしか行われていないが、それらの記録と併せて、南極海の海産クマムシ相について取り纏めることが出来た。また、ナンキョクネコクマムシの種同定に有用と考えられる分子データについても報告した。このデータも含めた分子系統解析では、*Styraconyx* 属の多系統性が示唆された。この結果も踏まえて、海産クマムシ類の生物地理について論じることが出来た。以上のように、南極海だけでなく海産クマムシ類全体の多様性研究に大きく貢献する成果を挙げた。

線虫類について、多くの研究成果が得られた。JARE46 にて採集され、国立極地研究所に保存されていた基質をソーティングし、そこから得られた線虫類のうち 1 新種 *Graphonema antarcticum* Shimada, Tsujimoto & Watanabe, 2019 (図 1) を記載、公表済みである (Shimada et al., 2019)。続いて、JARE56 で採集された基質から得られた線虫類のうち 2 新種

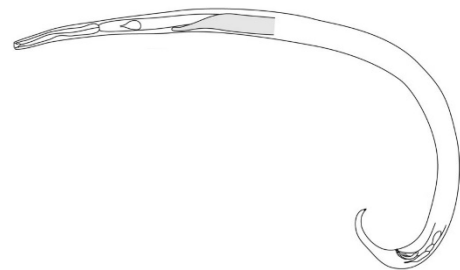


図 1. 新種として記載された *Graphonema antarcticum* Shimada, Tsujimoto & Watanabe, 2019.

Parabathylaimus jare Shimada, 2021, *Odontophora odontophoroides* Shimada, 2021 を記載した (図 2) (Shimada, 2021)。

これらに加え、JARE59 および 61 で採集された標本群から、これまでに合計 9 目 25 科 91 属 150 種 (4,091

個体) の線虫が得られており、現在分類学的研究を推進中である。また、これらについて更に DNA 解析、形態観察に基づいての系統解析や新種の記載を行う予定である。このように、海域に分布する自由生活性の線虫類相の解明に繋がる成果も挙がっている。

その他の動物についても研究が進められており、ヒモムシ類に関しては学術論文が公表された (Hookabe et al., 2020)。これらの結果は、南極海域における小型海洋生物の多様性が現在把握され、それに基づき推定されるものよりも更に高いものであることと、それらを研究することで極域における生物の一般的な進化の傾向や、多様化を明らかとする上で極めて重要性が高いことを示唆するものであると考えられる。様々な動物群の種相に跨って見られる特性を明らかにするため、今後もこれまでに抽出された標本に基づく系統分類学的研究と、生態に関する研究を継続して行う予定である。また、これらの成果は今後数年を掛け学術論文等へ取り纏められ、順次公表される予定である。

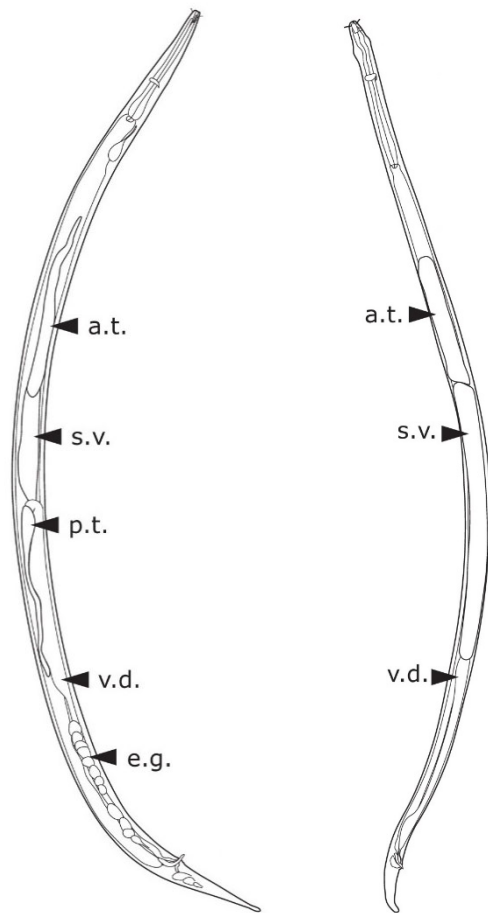


図 2. 新種として記載された *Odontophora odontophoroides* Shimada, 2021 (左), および *Parabathylaimus jare* Shimada, 2021 (右).

[参考文献]

- 1) Fujimoto S, Suzuki AC, Ito M, Tamura T, Tsujimoto M. 2020. Marine tardigrades from Lützow-Holm Bay, East Antarctica with the description of a new species. *Polar Biology*, 43: 679–693.
- 2) Shimada D, Tsujimoto M, Watanabe K. 2019. A new free-living marine nematode species of the genus *Graphonema* (Nematoda: Chromadorida: Chromadoridae) from Antarctica. *Species Diversity* 24: 61–67.
- 3) Shimada D, Suzuki AC, Tsujimoto M, Imura S., Kakui K. 2021. Two new species of free living marine nematodes (Nematoda: Axonolaimidae and Tripyloididae) from the coast of Antarctica. *Species Diversity* 26: 49–63.
- 4) Hookabe N, Watanabe K, Tsujimoto M, Kajihara H. 2020. Molecular identity of the Antarctic heteronemertean *Parborlasia corrugate*. *Polar Science*. 25: 100535.

1. 当該共同研究に関する研究発表について、可能な限りすべての学会誌名等を記入してください。(口頭発表については、原則として省略する。)
2. 参考文献、研究発表を行った学会誌名等を英文表記する場合は左右 2 列にする必要はありません。
3. 研究協力者(共同研究者ではない参加者。大学院生等)については、(別紙)参加者一覧に記載し、報告書に添付してください。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	30 - 31	
研究課題名	南極沿岸における海産微小動物相とその特徴の解明			
氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)	渡邊 研太郎	国際北極環境研究センター	特任教授	
小計	1 名			
所外 (極地研以外)	柁原 宏	北海道大学大学院理学研究院	准教授	
	鈴木 忠	慶応義塾大学医学部	准教授	
	波々伯部 夏美	東京大学大学院 理学系研究科	大学院生	
小計	3 名			
合計	4 名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

沿岸海跡湖能取湖におけるアイスアルジーの一次生産の動態と動物プランクトンの分布動態の関わりについて

◎西野康人 東京農業大学生物産業学部・教授

(国立極地研究所)

高橋邦夫 助教

平成 31 年～令和 3 年 (3 か年)

[研究成果]

能取湖は北海道東部に位置するオホーツク海に面する海跡湖である。その湖口部はオホーツク海に開口し、潮汐の動態により湖内の海水交換が行われる。また、大きな流入河川もなく陸水の影響もきわめて限定的で、湖水は塩分はオホーツク海沿岸水塊からなると言える。この能取湖の結氷期、沿岸部において、R1-R3 年度に調査・観測を実施した。

R1 年度では、能取湖湖口で、2020 年 2 月から 3 月にかけて、流水接岸時、離岸時に水柱の一次生産力の測定を実施した。R2 年度では、能取湖湖口に加え、能取湖沿岸部の能取漁港(二見漁港)の港内、港外に観測点を設け、定着氷の生成過程(結氷初期、海氷成長期、海氷融解期)に合わせ海氷下の水柱の一次生産力の測定を実施した。また、海氷中の一次生産力評価に向けた試行実験を実施した。R3 年度では、R2 年度とは異なる方法による海氷下の水柱中の一次生産力測定そして海氷中のアイスアルジーによる一次生産力の測定を実施した。R1 年度と R2 年度に実施した水柱の一次生産力測定は、メモリー式溶存酸素計を用い、現場海洋にポリカーボネート製タンクを設置する現場法により測定した。

R1 年度の結果を Table 1 に示す。3/19-22 の期間の 1 日の純炭素生成量で比較すると、19 日と 21 日では 3 倍近い差がみられた。光環境として 1

日の積算光量を比較すると、水中、陸上とも 3 月 21 日がもっとも高い値を示し、20 日がもっとも低い値をしてしており、これら一次生産力の違いは光量に依存していたことが推察される。

3/29-31 の期間の 1 日の純炭素生成量で比較すると、日にちが進むごとに増加する傾向がみられた。光環境として 1 日の積算光量を比較すると、陸上光量は 3 日とも大きな違いが見られないが、水中光量は 31 日がもっとも低い値を示し、30 日の約半分の積算光量であった。

Table 1 溶存酸素濃度の動態より算出した、能取湖湖口における 2020 年 3 月の一次生産力(酸素生成量、炭素生成量)と採水時のクロロフィル a 濃度、積算光量

水深4m	2020							
	3/19	3/20	3/21	3/22	3/29	3/30	3/31	
純光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.287	0.335	0.854	0.669	0.325	0.416	0.579
	炭素生成量 mgC/L/day	0.108	0.126	0.320	0.251	0.122	0.156	0.217
総光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.413	0.491	1.027	0.833	0.437	0.515	0.677
	炭素生成量 mgC/L/day	0.155	0.184	0.385	0.312	0.164	0.194	0.254
採水時のクロロフィルa濃度	μg/L	2.28				2.71		
水中積算光量	μmol/m ² /day	11276.5	5341.4	21312.6	16304.2	6997.4	9359.2	4415.9
陸上積算光量	μmol/m ² /day	72255.6	25467.2	103286.6	85297.4	102763.1	115380.7	112858.6
透過率(水中積算光量/陸上積算光量)		15.6%	21.0%	20.6%	19.1%	6.8%	8.1%	3.9%

海氷がオホーツク沿岸、能取湖湖口付近で確認された 2021 年 2 月 3-15 日に実施した一次生産力測定の結果を Table2 と Table3 に示す。

純光合成速度としての純酸素生成速度は、前半の 2 月 3 日から 2 月 8 日にかけては、0.14 mgO₂/L/day 以下を示し、特に 2 月 5 日はプラスの生産は行われなかった。また、2 月 5 日を除いた酸素生成速度は、2 月 3 日は 0.025 mgO₂/L/day であったが、日を追うごとに増加傾向を示し、2 月 8 日には 0.140 mgO₂/L/day となった。一次生産力測定水深(4m)における光透過率は、2 月 5

日は 0.4%で、有効光量が到達していなかったといえる。2月5日の日中は、海氷に覆われていたことが推察される。この期間の他の日にちの光透過率は 4.7-9.7 %の値を示しており、有効光量が到達していたことが推察される。

後半の2月9日から2月14日にかけての純酸

Table 2 溶存酸素濃度の動態より算出した、能取湖湖口における2021年2月3-8日の一次生産力（酸素生成量、炭素生成量）と採水時のクロロフィル a 濃度、積算光量

水深4m		2021					
		2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8
純光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.025	0.031	—	0.081	0.106	0.140
	炭素生成量 mgC/L/day	0.009	0.012	—	0.026	0.152	0.211
総光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.070	0.059	—	0.129	0.147	0.184
	炭素生成量 mgC/L/day	0.026	0.022	—	0.009	0.175	0.243
採水時のクロロフィルa濃度 μg/L		6.054					
水中積算光量 μmol/m ² /day		1725.8	3422.2	140.2	1989.1	1448.0	2405.0
陸上積算光量 μmol/m ² /day		19253.6	35434.5	34419.4	32172.9	31057.6	41287.2
透過率（水中積算光量/陸上積算光量）		9.0%	9.7%	0.4%	6.2%	4.7%	5.8%

素生成速度は、9日は0.176 mgO₂/L/day、以降、増加傾向を示し、2月14日は0.562 mgO₂/L/dayとなった。この間の一次生産力測定水深の光透過率は 4.5-10.9%で、有効光量が到達していた。

Table 3 溶存酸素濃度の動態より算出した、能取湖湖口における2021年2月9-14日の一次生産力（酸素生成量、炭素生成量）と採水時のクロロフィル a 濃度、積算光量

水深4m		2021					
		2/9	2/10	2/11	2/12	2/13	2/14
純光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.176	0.191	0.223	0.224	0.405	0.562
	炭素生成量 mgC/L/day	0.066	0.071	0.084	0.084	0.152	0.211
総光合成量	酸素生成量 mgO ₂ /L/day	0.218	0.238	0.283	0.272	0.468	0.648
	炭素生成量 mgC/L/day	0.082	0.089	0.106	0.102	0.175	0.243
採水時のクロロフィルa濃度 μg/L		6.054					
水中積算光量 μmol/m ² /day		3429.9	2602.7	2349.6	2256.7	3214.6	3978.5
陸上積算光量 μmol/m ² /day		45983.2	30935.8	39879.9	50424.6	29488.6	37853.4

2020年3月と2021年2月の純酸素生成速度を比較すると、前者は0.025-0.562 mgO₂/L/day（平均0.495 mgO₂/L/day）であったのに対し、後者では0.287-0.854 mgO₂/L/day（平均0.197 mgO₂/L/day）であった。このときのそれぞれの光透過率は、前者では3.9-21.0%（平均13.6%）、後者では0.4-10.9%（平均6.9%）と2020年3月が高い透過率を示した。また、一次生産力測定水深（4m）における日積算光量は、前者では4415.9-21312.6 μmol/m²/day（平均10715.3 μmol/m²/day）、後者では140.2-3978.5 μmol/m²/day（平均2413.5 μmol/m²/day）と到達した日積算光量の絶対値も2020年3月が高い値を示した。一方、単位光量当たりの酸素生成量（平均純酸素生産速度/平均日積算光量）は、2021年2月は2020年3月の約2倍高い値を示し、2

月の植物プランクトンは低光量に適應していることが示唆される。

一方、能取湖沿岸部における一次生産力の結果をTable 4に示す。純酸素生成速度は、港内で高くなる傾向を示した。港内は水塊の動態が港外に比較して、ゆるやかであること、アマモ場が存在することが影響していることが推察される。

同時期の能取湖湖口と能取湖沿岸部の純酸素生成速度を比較すると、湖口で高い傾向がみられる。定着氷より光環境が制限される湖内に対して、湖口は流水が光環境の主たる制限要因となっているため、その流動性のため、光環境のばらつきはあるものの、積算光量では顕著に高い値を示しており、このことが影響したものと推察される。ただし、定着氷に覆われる港内、港外では、潮汐の動態が止まる潮止まりのときは、タンク内の海水が十分に攪拌されず、溶存酸素濃度にばらつきがみられており、そのため、酸素生成速度が過小評価された可能性が示唆される。

Table 4 溶存酸素濃度の動態より算出した、能取湖沿岸部における2021年2月、3月の一次生産力（酸素生成量）と採水時のクロロフィル a 濃度、積算光量。上段が港外、下段が港内を示す。

港外	2/8-2/15	2/22-3/1	3/8-3/15	3/15-3/22	3/22-3/26
呼吸量 (mgO ₂ /L/h)	0.010	0.019	0.014	0.010	0.009
純酸素生成量 (mgO ₂ /L/day)	0.016	0.123	0.055	0.065	0.104
総酸素生成量 (mgO ₂ /L/day)	0.028	0.203	0.088	0.134	0.113
水中積算光量 (μmol/(m ² /s))	—	127.0	155.9	279.9	1184.8
クロロフィルa濃度 (μg/L)	1.7	8.9	1.4	2.2	4.1

港内	2/8-2/15	2/22-3/1	3/8-3/15	3/15-3/22	3/22-3/26
呼吸量 (mgO ₂ /L/h)	0.010	0.015	0.015	0.016	0.12
純酸素生成量 (mgO ₂ /L/day)	0.086	0.119	0.108	0.145	0.696
総酸素生成量 (mgO ₂ /L/day)	0.096	0.175	0.148	0.228	1.216
水中積算光量 (μmol/(m ² /s))	465.4	205.3	292.0	392.1	1659.2
クロロフィルa濃度 (μg/L)	1.3	5.9	2.2	3	5.9

R3年度では、R2年度の結果を踏まえ、潮汐動態の影響を排除するため明暗瓶法を用いた現場法による一次生産力測定を行った。また、海氷中のアイスアルジーの一次生産力をクロロフィル a 濃度の変化より算出した。調査はR2年度に実施した能取湖沿岸の能取漁港（二見）において、2022年2月14日より3月26日まで行った。結果については、現在、解析中である。

南極湖沼生態系の数理モデル化に関する研究

◎佐々木 顕 総合研究大学院大学・教授

水野 晃子 名古屋大学 宇宙地球環境研究センター・研究員

(国立極地研究所)

工藤 栄 教授

平成31年～令和3年（3か年）

[研究成果]

概要

窒素、炭素、リン酸などの必須生物元素の物質循環は、生態系の一次遷移、特に南極の超貧栄養淡水湖における群集形成の初期段階において、重要なプロセスである。本研究では、生態系形成初期における無生物状態からバクテリア（分解者）群集、シアノバクテリア（生産者）群集への一次遷移の生態過程を数学的にモデル化し、南極の淡水湖における必須制限資源である窒素の物質循環と結合させることを試みた。その結果、分解者と有機態窒素、生産者と分解者の間の窒素循環を介した2つの正のフィードバックが、無生物状態から生物群集への飛躍的な不連続相転移と異なる生態系群集の多重安定性につながる重要な役割を担っていることが明らかとなった。さらに、デトリタスの初期投入量（例えば、動物の死体や落下物）の大きさによって、異なる生態系群集が形成されることを示した。これらの知見は、南極の淡水湖の間で環境異質性が少ないにもかかわらず、多様な生物群集が構築されていることに理論的な洞察を与えるものである。

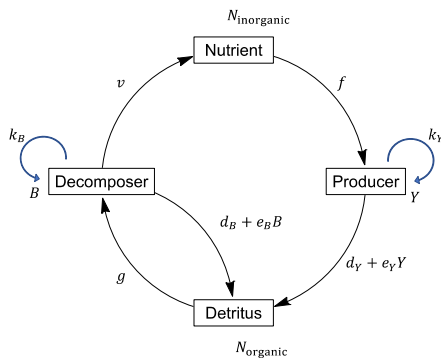


図1 物質循環を伴う分解者(バクテリア)―生産者(シアノバクテリア)の動態を示す模式図。2つの正のフィードバックループが、貧栄養環境の無生物状態から生物群集への不連続な一次遷移を駆動する。(i) 分解者とデトリタス間のループ：分解者はデトリタスを利用して成長し、分解者の死はデトリタスを提供する。(ii) 生産者と分解者の物質循環による相互作用：生産者はその死によって分解者にデトリタスを提供し、分解者は鉱物化によって生産者に栄養(無機窒素)を提供する。

数理モデル

孤立した貧栄養湖沼における初期遷移をモデル化する。南極淡水湖では窒素が制限要因なので、窒素

の物質循環（有機窒素と無機窒素の濃度変化のダイナミクス）を、バクテリア（分解者）とシアノバクテリア（生産者）の個体群動態と結合させ、窒素が枯渇した無生物状態から分解者のみの群集へ、あるいは無生物状態から分解者と生産者が構成する生物群集への初期遷移が起こる条件や、遷移の特徴を理論的に明らかにした。バクテリアの密度 B 、シアノバクテリアの密度 Y 、無機窒素の濃度 N_i 、有機窒素の濃度 N_o の時間変化は以下に従うとした（図1参照）

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= k_B B - (d_B + e_B B)B + gY N_o B - vB, \\ \frac{dY}{dt} &= k_Y Y - (d_Y + e_Y Y)Y + fY' N_i Y, \\ \frac{dN_i}{dt} &= vB - fN_i Y - u_i N_i, \\ \frac{dN_o}{dt} &= \sigma[(d_B + e_B B)B + (d_Y + e_Y Y)Y] - gN_o B - u_o N_o. \end{aligned}$$

モデルの変数とパラメータは表1に示した。

表1 モデルの変数とパラメータ

N_o	有機窒素の濃度
N_i	無機窒素の濃度
B	バクテリアの密度
Y	シアノバクテリアの密度
k_B, k_Y	バクテリア、シアノバクテリアによる窒素固定率
f	シアノバクテリアによる無機窒素消費率
g	バクテリアによる有機窒素の分解率
γ, γ'	有機窒素・無機窒素からバクテリア・シアノバクテリアへの転換率
v	バクテリアからの無機窒素溶出率
d_B, d_Y	バクテリア・シアノバクテリアの死亡率
e_B, e_Y	バクテリア・シアノバクテリアの密度依存死亡率の係数
u_i, u_o	無機窒素、有機窒素の希釈率
σ	死体から有機窒素への転換率($0 < \sigma < 1$)

結果

無生物状態からバクテリアのみの群集への滑らかな一次遷移と不連続な一次遷移（図2）

バクテリアによる有機窒素の分解効率 $\rho = \gamma \sigma g d_B / u_o e_B$ が閾値1より大きい時($\rho > 1$)、窒素固定による

バクテリアの純増加率が負($\mu = (k_B - d_B - v)/d_B < 0$)の場合、無生物状態から安定なバクテリア群集への不連続な一次遷移が起こる(図2)。つまり、高濃度の有機窒素の外部からの一時的投入により、バクテリア群集が確立し、その後は外部からの流入がなくても安定なバクテリア群集が自律的に維持される(高密度に達したバクテリアの死骸が有機窒素供給源となるため)。一方 ρ が閾値より小さいとき($\rho < 1$)、窒素固定によるバクテリアの純増加率の増加に伴う滑らかな一次遷移が起こる。

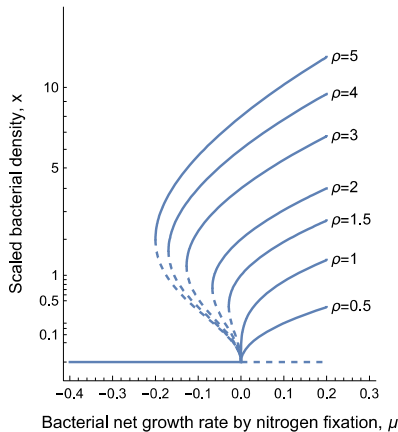


図2 窒素固定によるバクテリア純増加率 μ とバクテリア平衡密度との関係。 $\rho > 1$ のとき、 $\mu < 0$ の領域で、バクテリア存続と絶滅の2状態が双安定になる。破線は不安定平衡点。

有機窒素の一時的流入による無生物環境からの不連続的な一次遷移：三重安定性(図3)

バクテリア(分解者)とデトリタス、およびバクテリアとシアノバクテリア(生産者)の間の物質循環を介した正のフィードバック(図1)は、一時的に投入する有機窒素の濃度に応じて、複数の異なる群集への一次遷移をもたらす。図3には、初期有機窒素濃度の違い(異なる色で表す)に応じて、無生物環境から1) 一時的なバクテリア増加の末に無生物環境に戻るか、2) バクテリアのみの群集へ一次遷移するか、3) バクテリアとシアノバクテリアの共存する、よりバイオマスの高い群集へ一次遷移するかという、三重安定性の系の時間発展を表している。

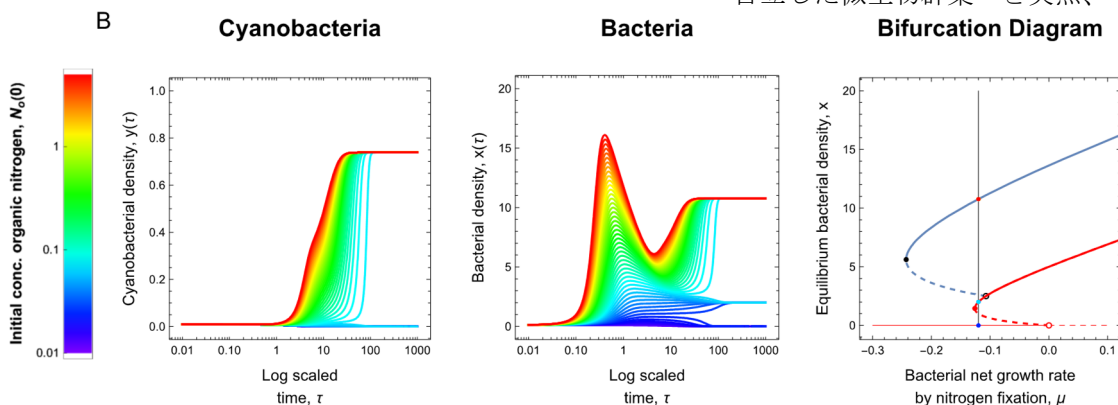


図3 初期投入有機窒素濃度の違い(異なる色で表す)による、シアノバクテリア、バクテリア密度の時間変化。初期有機窒素濃度に応じて、無生物状態、バクテリアのみの状態、シアノバクテリアとバクテリアの共存状態の3通りの異なる平衡状態に達する。分岐ダイアグラムの灰色の線に対応する μ を用いたシミュレーション結果。

【参考文献】

1. J. H. Connell, R. O. Slatyer, Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization. *The American Naturalist* **111**, 1119–1144 (1977).

【研究発表】 Sasaki, S. Kudoh, Y. Tanabe, A. Mizuno. Quantum-jump primary succession from an ultra-oligotrophic abiotic environment to a microbial community. To be submitted.

議論

無生物の裸地にどのようにして生態系が構築されるかという問題(一次遷移)は、生態学において大きな注目を集めてきた(1)。植生変化の記録パターンに基づく従来の常識では、植生と動物群の遷移のメカニズムについて以下の3つの仮説が提案されている(1):「促進仮説」(先の入植者が後の入植者のための環境を準備する)、「耐性仮説」(先行入植者より低いレベルの資源に耐えられるものが後の入植者となる)。一次遷移に関しては「抑制仮説」が最も適合するとされてきた(1)。

本研究による超貧栄養環境における一次遷移の理論解析は、「促進(反応)仮説」と「抑制仮説」の両方を支持した。我々の数理モデルでは、無生物環境、分解者だけの群集、分解者-生産者群集の三つの状態が、初期値に応じてどれも局所的に安定になり得ることを示した(多重安定性)。これは「抑制仮説」または「先住者効果」(先入者が勝ち、後入者が負ける)を支持すると言える。一方、我々の数理モデルは同時に、入植に一定の順序があることを示し(有機窒素の導入により分解者だけの群集が形成され、分解者だけの群集に無機窒素が蓄積することにより光合成生物の入植が可能になる)、この結果は「促進仮説」を支持するといえる。

まとめ

南極の淡水湖のような超貧栄養環境において、生物が無生物状態に侵入し、定着する条件と順序を理論的に検討した。氷河後退後に新たに形成された南極の淡水湖における群集形成の第一段階、すなわち一次遷移では、環境中の窒素資源は、リン酸塩等と異なり母岩からの溶出が期待できないため、著しく枯渇するはずである。そのため、バクテリアやシアノバクテリアの窒素固定能力は、一次遷移において重要な役割を果たす。バクテリアとシアノバクテリアの個体群動態と、制限栄養塩である有機・無機窒素の物質循環動態を組み合わせた数理モデルにより、このような貧栄養環境における一次遷移は、無生物環境から平衡密度の高い自立した微生物群集へと突然、不連続的に起こり得る

こと、それは動物死体等の一時的な有機窒素の投入がきっかけとなり得ること、そして、一旦確立された群集は、物質循環を巡る正のフィードバックにより安定に維持されることが明らかになった。

南極におけるレジオネラ属菌とその宿主となるアメーバーの解析

◎石井良和 東邦大学医学部・教授
 青木弘太郎 東邦大学医学部・助教
 島田翔 東京医科歯科大学医学部・特任助教
 (国立極地研究所)
 伊村智 教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

緒言

Legionella 属菌は環境に広く分布する細菌だが、特に人工環境水などの環境を介して重症肺炎を起こすことがある点が問題だ。昭和基地の施設内や周囲砂礫からも過去に収集された試料から、*Legionella* 属菌に由来する遺伝子が、PCR法で繰り返し検出されることがわかり、この細菌が基地に定着していると考えられた。一方、南極環境において *Legionella* 属が検出された報告は2例のみと限定されており、南極における分布はよく分かっていなかった。このような背景から本研究では、昭和基地に定着する *Legionella* 属菌がどこから、どのように流入したのか、その流入源に迫るために昭和基地設備および周辺地域の淡水環境に生息する *Legionella* 属菌の分布や多様性を明らかにすることを試みた。また、南極の低温環境に生息する *Legionella* 属菌の分離培養の報告例はなく、その生態は未解明であった。ヒトへの病原性や環境適応機序を明らかにするために分離培養も試みた。

方法

本研究は、第60次南極地域観測隊(2018年12月～2019年2月)で収集された昭和基地および周辺の環境試料を用いて行った。対象試料は周辺露岩域の20の湖や昭和基地の貯水ダムなど上水設備から収集した水やぬめり、および湖底堆積物とした。水試料は各試料につき1Lずつの水を0.22 μ mメンブレンフィルターに通すことで水中の微生物をフィルターに捕捉し、フィルター試料を持ち帰った。ぬめり試料はスワブで収集し、湖底堆積物はコニカルチューブに保管した。

国内で行ったDNA実験は、試料からDNAを抽出後、16S-rRNAアンプリコン解析を通じて細菌叢の把握を試みた。この際、細菌叢全体をターゲットにしたプライマーの他に、より詳細な *Legionella* 菌種の組成を明らかにするため *Legionella* 属菌由来の遺伝子のみをターゲットにしたプライマーを用いた解析も並行して行った。

Legionella 属菌の分離培養実験は、試料を3か月間4℃で培養後に *Legionella* 選択培地に塗布し、

15℃、25℃条件下で培養した。疑わしいコロニーに対しては *Legionella* 属菌特異的な領域を標的としたプライマーを用いて、PCRにより同定を行った。*Legionella* 属菌と同定された菌株に対しては、さらに遺伝子解析、生理・生化学性状の分析を進めた。

結果・考察

・*Legionella* 属の16S-rRNAアンプリコン解析

細菌叢全体をターゲットにした解析では、全ての湖水試料から *Legionella* 属菌に由来する遺伝子が検出され、その割合は細菌叢全体の1.3%以下だった。さらに、*Legionella* 属菌のみを標的にしたアンプリコン解析では、各湖水試料で多くの Sequence variant(SV)^{注1)}(中央値102SV)が検出され、南極の各湖においても多様な *Legionella* 属菌が生息していることが判明した。一方、基地内の試料から検出された *Legionella* 属の種類は湖に比べて少なく中央値は11.5SVであった。

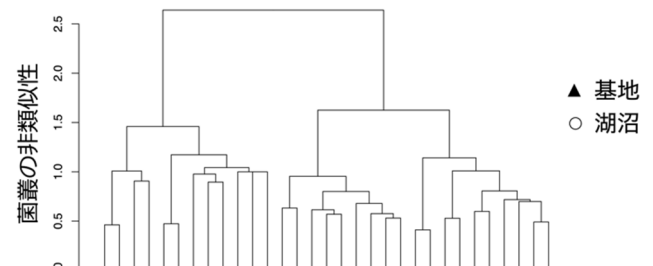


図1 階層的クラスター分析で示した *Legionella* 属菌の菌叢構造に関する試料間の類似性と相違

基地および湖水のそれぞれの試料から検出された *Legionella* 属菌の細菌叢組成を比較すると、基地の試料と湖の試料では、その組成が大きく異なっていることも明らかになった(図1)。それぞれの試料から検出された *Legionella* 属由来のSVを *Legionella* 属菌種の基準株の塩基配列と照合すると、湖水試料から検出された *Legionella* 属菌のSVの大半は、基準株の *Legionella* 属菌種の配列とは類似性が低く(99%未満)、新しい菌種に由来する可能性が考えられた。それに対して、基地内から検出されたSVは病原性をもつ既知の菌種に類似性が高い(99-100%)SVが多くを占めていた。基地内の主要なSVは南極の湖からは検出されず、基地に定着している

Legionella 属の多くは周囲の環境からの混入ではなく、例えば人間活動により大陸外から持ち込まれた可能性を考慮する必要がある結果であった。

・単離した新種の *Legionella* 属菌の解析

収集した試料から *Legionella* 属菌の分離培養も試みた。約3か月間の集積培養ののち、スカルプスネスの長池から収集した湖底堆積物から、*Legionella* 属菌を分離培養した。この菌株(以下、南極株)は、他の *Legionella* 属菌が増殖する温度よりも低温の 4°C~25°C で生育する耐冷性の性質を持っていた(図2)。一方で、南極株を *Legionella* 属菌の宿主である *Acanthamoeba* sp. と共培養すると、南極株の宿主細胞内での生存も確認でき、*Legionella* 属菌で共通する細胞内寄生菌としての特徴も持っていると考えられた。さらに次世代シーケンサーを用いた全ゲノム解析や生理・生化学分析の結果から、この南極株は新種の *Legionella* 属菌であることが判明し、さらに分析していくと興味深い特徴が明らかになった。

この株は低温(10°C)と常温(25°C)で培養すると、菌体脂肪酸組成が変化し、低温で培養すると不飽和脂肪酸の割合が増加する性質を認めた。不飽和脂肪酸は、低温下でも細胞膜の流動性を保つ働きがある。この種の脂肪酸を産生し増加させる特徴は、低温環境に生きる細菌でよくみられる特徴のひとつである。南極株においても、この性質が低温適応のメカニズムの一つになっていると考えられた。

また、南極株のゲノム情報を他の *Legionella* 属菌種のものと比較した結果、ゲノムの編集や改変に関与する可動性遺伝子の数が他の菌種より3-5倍多く、600以上保有していた。これらの遺伝子はゲノム上を転移し、他の遺伝子の発現に影響を与えることを通じて、菌の性質を変えることがある。その結果として、菌の環境適応を含む進化を急速に促

す可能性がある。この可動性遺伝子が南極株にどのような影響を及ぼしているのかは未解明であるが、今後この株のさらなる分析を通して、細菌の低温環境への適応に関与する責任遺伝子の一端が明

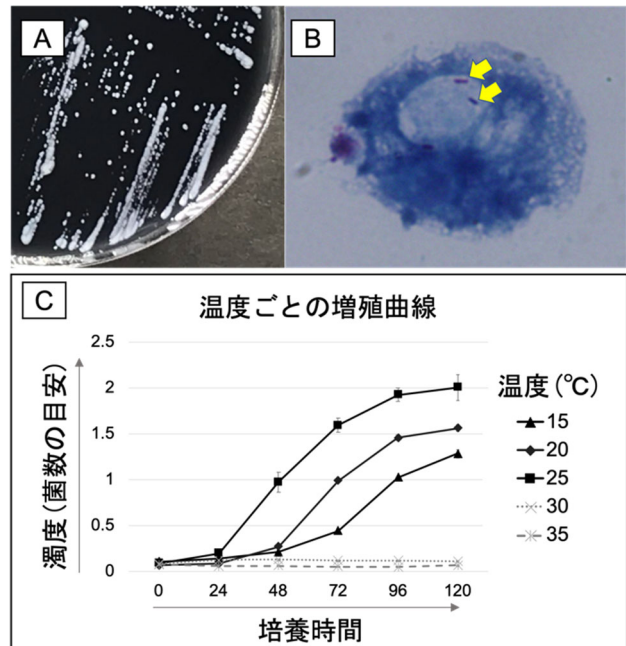


図2 南極環境から分離した *Legionella* 属菌株
(A)寒天培地で灰白色のコロニーを形成
(B)アメーバ内に寄生する南極株 (矢印)
(C)南極株の温度ごとの増殖曲線

らかにできるかもしれない。

この菌株は南極大陸から分離されたことから、*Legionella antarctica* と命名した。これを機に今後、低温環境に適応した *Legionella* 属菌の低温環境における宿主との相互作用やヒトへの病原性に対する理解が進むことを期待したい。

注1) Sequence variant: 細菌叢解析においてDNA配列をもとに細菌の種類を識別するために用いられる指標。

[研究発表]

Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Yasunari Miyazaki, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Complete Genome Sequence of Novel Psychrotolerant *Legionella* Strain TUM19329, Isolated from Antarctic Lake Sediment. *Microbiology Resource Announcement*. 2020, vol. 9: p. e00253-20.

Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Chasing Waterborne Pathogens in Antarctic Human-Made and Natural Environments, with Special Reference to *Legionella* spp. *Applied and environmental microbiology*. 2021, vol. 87, no. 2, p. e02247-20.

Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Characterization of the first cultured psychrotolerant representative of *Legionella* from Antarctica reveals its unique genome structure. *Microbiology spectrum*. 2021, vol. 9, no.2, p. e00424-21.

論文

1. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Yasunari Miyazaki, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Complete Genome Sequence of Novel Psychrotolerant *Legionella* Strain TUM19329 Isolated from Antarctic Lake Sediment. *Microbiology Resource Announcement*. 2020, vol. 9: p. e00253-20. (査読あり)
2. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Chasing Waterborne Pathogens in Antarctic Human-Made and Natural Environments, with Special Reference to *Legionella* spp. *Applied and environmental microbiology*. 2021, vol. 87, no. 2, p. e02247-20. (査読あり)
3. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Characterization of the first cultured psychrotolerant representative of *Legionella* from Antarctica reveals its unique genome structure. *Microbiology spectrum*. 2021, vol. 9, no.2, p. e00424-21. (査読あり)
4. 島田 翔。南極の低温環境に棲む *Legionella* 属菌。ビルと環境。2021、178号、p. 35-39。 (査読なし)

学会発表

1. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Physiological and Genomic characterization of a novel psychrotolerant *Legionella* strain isolated from Antarctic lake sediment. *ASM Microbe 2020*. 2020.6(Online) (poster presentation)
2. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Occurrence and diversity of *Legionella* spp. in and around the Japanese Antarctic research base. *ASM Microbe 2020*. 2020.6 (Online) (poster presentation)
3. 島田翔、青木弘太郎、石井良和、館田一博。南極環境に生息する *Legionella* 属菌。第94回日本感染症学会総会 シンポジウム 22「レジオネラ・シンポジウム- 第10回国際レジオネラ学会(2021)に向けて-」。2020.8(東京)(oral presentation)
4. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Unexpected high diversity of *Legionella* spp. in Antarctic environment and their colonization in Japanese Antarctic research station. *SCAR 2020 Online*. 2020.8

(Online)(poster presentation)

5. 島田翔、青木弘太郎、石井良和、館田一博。南極低温環境における *Legionella* 属の多様性。第 69 回日本感染症学会東日本地方会学術集会/第 67 回日本化学療法学会東日本支部総会シンポジウム 14 「極限環境に生息する病原体」。2020.10(東京) (oral presentation)
6. Sho Shimada, Ryosuke Nakai, Kotaro Aoki, Norifumi Shimoeda, Giichiro Ohno, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Kentaro Watanabe, Yasunari Miyazaki, Yoshikazu Ishii, Kazuhiro Tateda. Chasing *Legionella* spp. in Antarctic human-made and natural environments. The 11th Symposium on Polar Science. 2020.12.2 (Online)(poster presentation)
7. 石井良和、島田翔。南極環境に生息するレジオネラ属菌。第 36 回日本環境感染学会総会・学術集会シンポジウム 6 「One Health」。2021.9 (名古屋) (oral presentation)

極地土壤の CO₂ 放出と土壤ガス拡散係数に関する研究

◎米村正一郎 県立広島大学生物資源科学部・教授
(国立極地研究所)

内田雅己 准教授

平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

代表者らは、基盤 B(海外)「北極陸上生態系における年間を通じた土壤 CO₂ フラックスの高精度推定に関する研究」(内田代表、平成28～令和3年度)でスバルバル・ニーオルスンのツンドラ生態系観測サイトで土壤内の CO₂ 濃度を連続的に測定している。そこでわかってきたのは深層(50cm 深)で土壤が凍結している条件であっても CO₂ 濃度上昇する現象である。これは、表層付近の有機物分解によって発生した CO₂ が凍土中を深層まで移動した可能性を示唆している。すなわち、土壤が凍結する温度であっても土壤中のガス拡散係数はゼロとはならないことを意味する。しかしながら、土壤ガス拡散係数は、正温度でのみ研究され、土壤凍結温度域において研究されておらず、凍結土壤のガス拡散係数研究は学術的に空白領域であることが判明した。

以上を受けて、本研究の目的は凍結土壤のガス拡散係数がどのような値になっているかを実験的に測定することを目的とした。

2. 推定式を用いた凍結時のガス拡散係数

実験的に凍結時のガス拡散係数を求める前に既存の推定式を用いて凍結土壤のガス拡散係数の評価を行った。土壤のガス拡散係数を評価するのに一般的に用いられる推定式 (Sallam et al., 1984)を用いて凍結土壤のガス拡散係数を評価可能か調査した。この推定式は、土壤の3相(気相率、固相率、液相率(水))を用いて土壤ガス拡散係数を評価するものである。凍結時の水は体積は増大する。凍った体積分の固体率が増える(その分、気相率が低下するとする)と仮定して計算した場合には、拡散係数は大きくなり、現実とそぐわなかった。一方、水が凍った場合の氷の体積を液体とみなして計算した場合には、拡散係数が半分程度以下に下がることがわかった。以上から、凍結土壤で本推定式を用いると、矛盾が生じることがわかった。

3. 土壤ガス拡散係数の推定方法

土壤ガス拡散係数の測定には、多孔質体ガス拡散測定装置(藤原製作所 kk-320-100)を用いた(遅澤ら, 1987)(写真1)。この装置では、100ml 円筒コア土壤中の酸素の拡散程度より土壤ガス拡散係数を推定する。多孔質体ガス拡散係数測定装置は、閉鎖空間を作成し、この内部空間と実験空間内空気を土壤コア(円筒形で高さ5cm(容量100cc)の容器)でつなげる。最初に多孔質体ガス拡散測定装置の内部領域を窒素ガスを導くことで低酸素にし、その後土壤コアを通して実験空間内空気の酸素が内部空間にはいつてくる度合いによって、土壤コアのガス拡散係数を算出するものである。

凍結土壤では、ごく小さな土壤ガス拡散係数を測

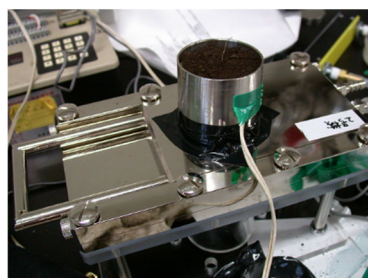


写真1 土壤ガス
拡散係数の測定

定することが予想されるため以下の工夫を行った：

- ・多孔質体ガス拡散測定装置のシリコン部分(シリコンはガス透過率が非常に大きい)をガス透過率が小さいバイトンに変更した。
- ・多孔質体ガス拡散測定装置の部品の継ぎ目からの酸素混入を防ぐために各所をガス透過率が小さいブチルゴムテープで覆うように改良した。
- ・窒素ガス導入時と土壤ガス拡散測定時のモードを変える部分にもブチルゴムを挟み込んだ。
- ・土壤以外の装置の継ぎ目を通しての室内空気中の酸素の拡散を防ぐために多孔質体ガス拡散測定装置をビニール袋で多い、ビニール袋内部に窒素ガスを塞ぐと、逆に多孔質体ガス拡散測定装置内部の領域の酸素濃度が低くなっていった。通常とは逆の

漏れ率を考えつつも、ごく小さな土壌ガス拡散係数を測定する手法としては有効であると考えられた。

4. 凍結土壌の土壌ガス拡散係数測定改良と知見

供試土壌において、正温度の場合は通常の方法に従ってガス拡散係数の推定を行えた。

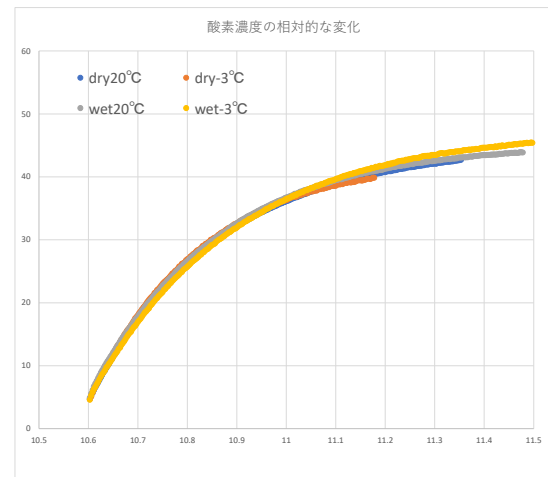
負温度（凍結温度以下）のガス拡散係数を測定するために、多孔質体ガス拡散測定装置を低温インキュベータ（ヤマト、IN804）に入れた。

インキュベータ内の温度を -5°C に設定した。その場合、土壌の温度は -4°C 程度になった。測定を始めると、酸素濃度測定値に異常が認められた。この原因としては、電気化学法を採用した酸素濃度センサー（新コスモス電機、OS-3M-D）の電解液が凍結してしまったものと考えられる。これに対処するためには、配管を通して外部に酸素濃度センサーを配置することも1つの方法として考えられるが、外界と多孔質体ガス拡散測定装置が通じてしまうので、熱的な関係から難しいものと考えられる。なお、インキュベータ温度を -2°C ～ -3°C に設定した場合、土壌温度が -1°C ～ -2°C の範囲となり、この条件では酸素濃度センサーの指示値に異常は認められなかった。負温度での土壌ガス拡散係数推定はこの温度の範囲でしか現状の技術では推定できない。また、インキュベータ内の操作を行う場合は、どうしても室内温度の影響を受けて、インキュベータ内および多孔質体ガス拡散測定装置周辺の温度が上昇してしまうために、時間を要することが新たな問題点として生じた。これについては、極地研の低温実験室を利用することも考えられる。

5. 凍結土壌の土壌ガス拡散係数

極域土壌への適用前にまず県立広島大学フィールド科学研究教育センサーの草地土壌での土壌ガ

ス拡散係数の測定を行った。予想に反して、温度を低下させても、また、水分を加えても、酸素濃度上昇は変化しなかった（図1）。水分については、水分の添加量が5g程度で少なかったのと、凍結しても水分が少ない条件のために十分な拡散係数があったためと考えられる。さらに、様々な水分条件とともに様々な土壌において実験を行い、凍結土壌の



土壌ガス拡散係数についての研究を継続する必要がある。

図1 相対的な時間（hour）に伴う酸素濃度の相対的な変化。カーブが同様であることは、同様な土壌ガス拡散係数（=空気中のガス拡散係数との比率、0.5程度）を持つことを意味する。

6. まとめ

負温度の土壌ガス拡散係数を測定するにあたり、新たな測定技術のノウハウが得られた。今後、多くの極域土壌の条件で測定を行い、基礎データである土壌ガス拡散係数を取得することが出来、極域土壌のガス放出に関する総合的な評価を行う必要がある。

[参考文献]

- 1) 遅澤（吉川）省子・久保田徹, 1987 ; 土壌のガス拡散係数の測定法. 日土肥誌 58(5), 528-535.
- 2) Sallam A, Jury WA, Letey J, 1984 ; Measurement of gas diffusion coefficient under relatively low air-filled porosity. Soil Science Society of America Journal , <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010001x>.

[研究発表]

Yonemura S, Uchida M , Kishimoto-Mo AW, Oura N ; CO₂ emission resulting from rain-on-snow events amounts to 10% of yearly soil CO₂ emission in Ny-Ålesund. The 12th Symposium on Polar Science, NIPR(on network), 2021年11月

極域に生息する植物寄生性糸状菌の多様性と生態の解明

◎東條 元昭 大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科・教授

(国立極地研究所)

伊村 智 教授

平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

地球温暖化が進行し生物多様性の低下が危惧される中で、温暖化の進展が最も顕著に現れている極域において、植物寄生菌の分類的位置や生態を明らかにして保護や保蔵の必要性を検討することは重要である。本課題の目的は、極域の野生植物に寄生する糸状菌の多様性と生態を温帯産の植物病原菌と比較しながら明らかにすることである。本課題の実施前までに、凍結耐性や低温生育性を示す新種の卵菌や真菌が極域のコケやヤナギに寄生し、極域の環境に適応する性質を示すことを明らかにしている(例: Tojo et al. 2012; Masumoto et al. 2018)。今回の研究では、スピッツベルゲン島での2014年から2019年にかけての調査によりコケや維管束植物に寄生する糸状菌について、さらに2016年にカナダ・クジュアラピックのコケから分離した糸状菌について、それぞれ多様性を解析するとともに、極域での菌密度の変化などの生態解析を行った(Tojo et al. 2021; Moriana-Armendariz et al. 2021; Hoshino et al. 2021)。また、極域の野生植物の寄生菌の生態等についてのこれまでの知見を、温帯産の植物病原菌と比較しながら総説、書籍およびプロジェクト報告に分担執筆を含めて取りまとめた(Tojo 2019; 東條 2019, 2020; Hoshino et al. 2019; 増本ら 2020; Hirawake et al. 2021)。

＜カギハイゴケ感染性 *Globisporangium* 属菌の北極域の一地点における2006～2018年の種構成と分離頻度の変動＞ 植物病原性卵菌として知られる *Globisporangium* 属(*Pythium* 属から近年分かれた属)は北極圏のコケ類から高頻度で分離される。本研究では本属の自然条件での動態の基礎知見を得るために、人間活動の影響が少ない北極域で本属種の構成と分離頻度を調べた。調査は2006～2018年の12年間の2年毎の8月に、北極域のスピッツベルゲン島のカギハイゴケ群落の1か所で選択培地等を用いた分離と分離株の同定により行った。その結果、この間に分離された計434菌株のほとんどがrDNA-ITS領域の塩基配列による解析と培養形態に

より6種に同定された。6種の内5種が未知種、残り1種が既知のいずれも極域の固有種であった。6種のすべてで0℃での菌糸伸長と4～10℃でのカギハイゴケへの感染が確認された。本属全体の分離頻度は12年間の間に徐々に有意に低下し、2018年の分離頻度は12年間で最低となった。これらの結果から北極圏の調査地には、地域的に固有のカギハイゴケ感染性 *Globisporangium* 属菌が生息していることがわかった。また近年、菌密度を低下させている可能性が示唆された(Tojo et al. 2021)。

＜カナダ・ケベック州北部の野生植物から分離される土壌糸状菌の同定＞ カナダ・ケベック州北部クジュアラピックに自生するハマエンドウおよびツヤゴケの一種のいずれも地下部から雪腐病を起こす可能性がある糸状菌2種を分離し、それぞれ *Typhula* sp.および *Globisporangium* sp.として同定した。今回分離された未知種は、rDNA-ITS領域の塩基配列による解析と培養形態の観察から、農作物に雪腐病を起こすことが知られる既知種と近縁であるとが明らかになり、これらの地域で農業生産活動を行う際のリスクになり得ると考えられた(Hoshino et al. 2021)。

＜積雪量の違いが北極域の植物とその寄生菌との関係に及ぼす影響＞ 北極域において菌類は主として寒冷な季節から植物が成長する温暖な季節の初めにかけて最も活性化される。そのため、気候変動によって引き起こされる寒冷な季節の気温の上昇は菌類の成長に有利に働き、それらの存在量を増加させる可能性がある。この現象の実態を明らかにすることは北極域の植生構成を形作っていると考えられる植物寄生菌において特に重要である。そこで北極域に分布する2つの分類的に全く異なる植物寄生菌、すなわち維管束植物の *Cassiope tetragona* に絶対寄生して「もち病」を起こす *Exobasidium hypogenum* と、カギハイゴケに寄生して壊死を起

こす従属栄養性の *Globisporangium polare* を選んだ。調査は 2014, 2015 および 2019 年に実施し、スノーフェンスを使って調査前の 7~13 年間にわたって積雪量を操作した。その結果、雪の深さが増すにつれて *E. hypogenum* と *G. polare* の両者の発生の増加が見られた。このことは宿主植物への菌類の感染の増加が、多積雪下で宿主植物が減少する原因の一つになっていることを示している。一般的にコ

ケ植物の成長は土壤水分の増加と維管束植物との競争によって影響を受けるが、特に *G. polare* は冬の気温上昇と多雪によってもたらされる湿った環境の形成によって活性化される可能性がある。またこの結果は、宿主植物とその寄生菌との関係が、年々変化する北極域の気候に適応する過程の途中にあることも示唆している (Morianan-Armendariz et al. 2021)。

[参考文献]

- Tojo M, Van West P, Hoshino T, Kida K, Fujii H, Hakoda H, Kawaguchi Y, Mühlhauser HA, Van den Berg AH, Küpper FC, Herrero ML, Klemsdal SS, Tronsmo AM, Kanda H (2012) *Pythium polare*, a new heterothallic Oomycete causing brown discoloration of *Sanionia uncinata* in the Arctic and Antarctic. *Fungal Biology* 116: 756-768. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2012.04.005>
- Masumoto S, Tojo M, Imura S, Herrero M-L, Uchida M (2018) Occurrence pattern of the parasitic fungus *Rhytisma polare* (Ascomycota) on the polar willow (*Salix polaris*) under limited water conditions in a high-Arctic semi-desert. *Polar Biology* 41: 1105-1110, <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2269-6>

[研究発表]

- Tojo M, Fujii N, Yagi H, Yamashita Y, Tokura K, Kida K, Hakoda A, Herrero M-L, Hoshino T, Uchida M (2021) Identification and isolation pattern of *Globisporangium* spp. from a *Sanionia* moss colony in Ny-Ålesund, Spitsbergen Is., Norway from 2006 to 2018. *Microorganisms* 9: 1912, <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091912>
- Morianan-Armendariz M, Abbandonato H, Yamaguchi T, Mörsdorf MA, Aares K, Semenchuk P, Tojo M, Cooper E (2021) Increased snow and cold season temperatures alter High Arctic parasitic fungus-host plant interactions. *Arctic Science*, <http://dx.doi.org/10.1139/AS-2020-0027>
- Hirawake T, Uchida M, Abe H, Alabia ID, Hoshino T, Masumoto S, Mori AS, Nishioka J, Nishizawa B, Ooki A, Takahashi A, Tanabe Y, Tojo M, Tsuji M, Ueno H, Waga H, Watanabe YY, Yamaguchi A, Yamashita Y (2021) Response of Arctic biodiversity and ecosystem to environmental changes: Findings from the ArCS project. *Polar Science* 27: 100533, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100533>
- Hoshino T, Nakagawa T, Yajima Y, Uchida M, Tojo M (2021) Note on a snow mold and a fungus-like microbe from Kuujjuarapik-Whapmagoostui, Quebec, subarctic Canada. *Polar Science* 27: 100559, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100559>
- 東條元昭 (2020) 温暖化が進行する北極域での土壤糸状菌の種類と動態. *土と微生物* 74: 60-65, https://doi.org/10.18946/jssm.74.2_60
- 増本翔太, 辻 雅晴, 星野 保, 東條元昭, 内田雅己 (2020) 北極圏陸域における生態系機能・生物多様性の関係の実態把握. 北極域研究推進プロジェクト 2015-2020 研究成果報告書: 115-116.
- Hoshino T, Morita H, Yajima Y, Tsuji M, Tojo M, Tkacehko OB (2019) Snow mold and their antagonistic microbes in polar regions. In: *Fungi in Polar Regions* (Tsuji M and Hoshino T eds.) CRC press. Boca Raton, USA.
- Tojo M (2019) Oomycetes in Polar Regions. In: *Fungi in Polar Regions* (Tsuji M and Hoshino T eds.) CRC press. Boca Raton, USA.
- 東條元昭 (2019) 植物防疫講座 病害編-19 ピシウム菌による病害の発生生態と防除. *植物防疫* 73: 448-452.

南極をめぐる科学と国際動向に関する社理連携研究

◎柴田明穂 神戸大学国際協力研究科・教授/極域協力研究センター・センター長
 青木 茂 北海道大学低温科学研究所・准教授
 大久保彩子 東海大学海洋学部・准教授
 稲垣 治 神戸大学国際協力研究科/極域協力研究センター 研究員
 (国立極地研究所)
 伊村 智 教授
 橋田 元 准教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

南極をめぐる科学的・法政策的な諸課題が山積する中で、これらに効果的に対処するためには社会科学と自然科学の研究者の緊密な連携が必要となる。例えば、SCAR の Horizon Scan で特定された研究課題の中には、(a) 南極海の海洋保護区 (61, 66)、(b) 南極特別保護地区(ASPA)及び特別管理地区(ASMAs) (68, 74); (c) 南極における外来種 (55); (d) 南極におけるバイオプロスペクティング(43, 44); (e) 南極における大規模科学施設及びロジ施設(75); (f) 南極海における海洋科学調査(12-23)など、社理連携研究を要するものが多い(括弧内は Horizon Scan の課題番号)。

本共同研究は、これら諸課題に関して社会学者と自然科学者の知見を持ち寄りつつ共通理解を促し、その対応策について制度と現場の両面から包括的に検討し報告書にまとめる。さらに、その研究成果が我が国の南極科学政策決定過程において参考にされるべく、南極政策関係省庁(文科・外務・環境省)への情報発信を行うため、南極政策関係者と社理両方の研究者で構成される「南極における科学と国際動向を考える研究会(南極国際動向研究会)」を定期的に開催し、上記諸課題につき意見交換した。また、その成果の一部を研究論文で発表することができた他、公開オンライン講演会及び SCAR-SC-HASS 学術研究大会において口頭発表し、社会還元することができた。さらに南極国際動向研究会のメンバーを中心に外部資金獲得にも成功した。

(1) 南極国際動向研究会

本研究期間中、スピンオフ公開研究会も含め、11回の研究会を開催した。その中には、外務省地球環境課上席専門官による「最近の南極条約協議国会議の諸課題について」や、文部科学省研究開発局海洋地球課課長補佐による「日本の南極地域観測事業：

現状と課題」など、関係省庁からの報告もあり、学術的研究報告のみならず、我々の研究調査の政策的インプリケーションを考える機会を多く設けることができた。青木茂を含む2人の南極観測隊長による「2人の隊長が語る日本の南極地域観測事業の現状と課題」もユニークな研究発表会であった。これら研究会の報告資料は、報告者の了解が得られたものは全て研究代表者所属センターのウェブサイトで公開閲覧可能となっている(下記参考 URL)。

本研究会での若手研究者による研究報告が、国際学会での発表、そして査読付き学術誌に掲載されたことは大きな成果である。稲垣治による「DROMLAN と南極条約体制」、幡谷咲子による「南極ドーム A の中国 Kunlun 基地及び周辺 ASMA ないし行動綱領提案の法的意義」と題する本研究会での報告が、その後第 12 回極域法国際シンポジウム(ホバート開催)での口頭報告を経て、査読付き年鑑 *Yearbook of Polar Law* に掲載された。

(2) 公開オンライン講演会「南極条約 60 年と日本、そして未来へ」

2021 年 6 月、南極条約発効 60 周年を記念した公開オンライン講演会を開催し、岡野正敬・外務省国際法局長による基調講演「南極における法の支配」を得て、この録画を公開して一般市民にも視聴可能にできた成果は大きい。この講演会では、元 NHK 解説主幹の室山哲也氏の司会の下、岡野局長に加えて、中村卓司・国立極地研究所長、本研究代表者の柴田明穂(国際法学)、都留康子(国際関係論)、中山由美(朝日新聞記者)、高橋晃周(動物生態学)によるコメントとディスカッションが行われ、南極をめぐる科学と国際動向について、将に多角的視点か

ら考察する機会となった。一部を除き、この講演会のすべての録画が公開されている。(下記参考 URL)

(3) SCAR 人文社会科学常設委員会学術会合と公開講演会「南極と北極が神戸にやってくる?!」

2021年11月、アジアで初めて SCAR 下部機関である人文社会科学常設委員会(SC-HASS)の隔年学術大会が、研究代表者が所属するセンターが主催して、神戸大学を会場としてハイブリッド形式で開催された。この会合においても、本共同研究のメンバーである大久保彩子による研究報告「南極環境保護と資源開発に関する日本の外交政策」が行われた。

さらに、この機会に日本の南極人文社会科学の現状を世界の研究コミュニティに知ってもらうために、Japan Session を立ち上げ、そこに南極観測隊同行者4人を集め、「日本の南極観測事業は文系研究にも貢献できる」というセッションタイトルで講演・パネルディスカッションを実施できた成果は大きい。このセッションは、日本語で行われたが、英語への同時通訳付けて、日英両言語での動画を公開している。(下記参考 URL) このセッションの意義については、『極地』最新号でも報告されている他、英語でも *Polar Journal* 誌に会議レポートが掲載される予定である。

[参考 URL]

- 1) 南極をめぐる科学と国際動向を考える研究会(報告資料含む) <https://www.research.kobe-u.ac.jp/gsics-pcrcr/ja/antarctic.html>
- 2) 公開講演会「南極条約60年と日本、そして未来へ(録画視聴を含む) <https://60antarctic treaty.org>
- 3) 公開講演会「南極と北極が神戸にやってくる!?(動画視聴を含む) https://www.2021polarlawssymposium.org/japan_lectures/

[研究発表]

Zia Madani and Akiho Shibata, “The Global Antarctic through Humanities and Social Sciences Perspective: Observation from Japan”, *The Polar Journal*, Vol.12 (2022, forthcoming)

柴田明穂他「日本の南極地域観測事業は人文社会科学の発展にも貢献できる! SCAR 研究大会からのメッセージ」『極地』114号(2022年4月掲載予定)

柴田明穂「南極条約体制における管轄権」『岡山大学法学会雑誌』70巻3-4号(2021年3月)433-462頁

Osamu Inagaki, “DROMLAN and International Law”, *The Yearbook of Polar Law*, Vol.12 (Nov. 2020), 61-74.

Sakiko Hataya, “Legal Implication of China’s Proposal for an Antarctic Specially Managed Area (ASMA) at Kunlun Station at Dome A”, *The Yearbook of Polar Law*, Vol.12 (Nov. 2020), 75-86.

柴田明穂「南極環境の保護と日本」『現代国際法の潮流 I』(浅田正彦他編、東信堂、2020年11月)476-489頁

(4) 外部資金獲得

本共同研究の中心的研究の場である上記「南極国際動向研究会」は、その後の外部資金獲得に向けた研究プロジェクト立ち上げにも大きな成果を上げた。具体的には、三菱財団人文社会系大型助成「南極のあるべき将来像:2025年日本開催会議に向けた総合的提案」(令和2年10月~令和5年3月、直接経費総額750万円)は、同研究会メンバーのほとんどが参加するプロジェクトであり、ここから上記講演会等の開催経費を捻出するなど、本共同研究を格段に発展させる資金源となった。また、JSPS 科学研究費挑戦的研究(開拓)「人新世における南極条約体制のレジリエンス研究」(令和3年7月~令和8年3月、総額2561万円)も、本共同研究メンバーが主要研究分担者として参画している。

本共同研究は、コロナ禍のため旅費等の支出が予定より少なく、また申請していた電子書籍の購入が極地研内部のルールのためにできなかったなど、配分いただいた研究費を十分に活用できなかったが、それに替わる外部資金獲得の契機となり、結果的に、当初予定していた以上の成果を達成することができた。

南極湖沼底マッピング用 ROV の開発

◎後藤慎平 東京海洋大学学術研究員海洋工学部・助教

(国立極地研究所)

工藤栄 教授

令和 2 年～令和 3 年 (2 か年)

1. はじめに

本研究では、南極湖沼底の植生分布や構造を捉えるべく、小型(可搬型)の水中探査機 (ROV) を新たに設計・構築し、湖沼底の凹凸や植生構造をステレオ視映像として記録し、地図情報として可視化 (ハビタットマップ化) することを目指したものである。本研究においては、将来の南極湖沼等での実用を念頭に、水深 0～50m で稼働する小型 ROV となるように新たに設計を行った。まずは ROV に使用する各要素技術の検証を行い、南極湖沼において取り扱いが容易なユーザーフレンドリーなシステムを目指した。

実環境試験は国内湖沼(本栖湖)において操作性、運動性能、ケーブル健全性、堅牢性などの実用性確認を行うものとした。本栖湖は富士五湖中、通年きわめて透明度が高いため映像による地形の凹凸識別には適しており、湖岸から急峻に 100m ほどまで落ち込む湖盆地形・比較的なだらかな湖盆など、ROV の操作試験と耐圧試験などにとって好適である。しかしながら、2020 年に発生した新型コロナウイルス感染症の蔓延により、フィールドでの実験を断念せざるを得なかった。さらに、2021 年度においても終息の見通しが立たず、今後の南極観測計画の縮小も考慮し、実用機の開発を断念し試作機での要素技術検証のみを実施した。

2. 要素技術試験

試作機は代表研究者が所有する既存 ROV を使用し、主にケーブルの健全性、通信品質、電源の安定性の確認を実施した。これらは、東京海洋大学の大学改革・機能強化等推進事業 (研究テーマ名: 南極大陸の陸水・海洋域における生態系構造解明のための水中調査システムの開発) において開発したもので、ケーブルは以前の南極観測¹⁾で得たノウハウを元に新たに開発した。ROV の外観を Fig.1 に示す。

実験は、まず 2022 年 1 月に東京海洋大学の船舶運航性能実験水槽で実施した。この際は、主にケーブルでの電圧降下、および通信の確認を行った。次

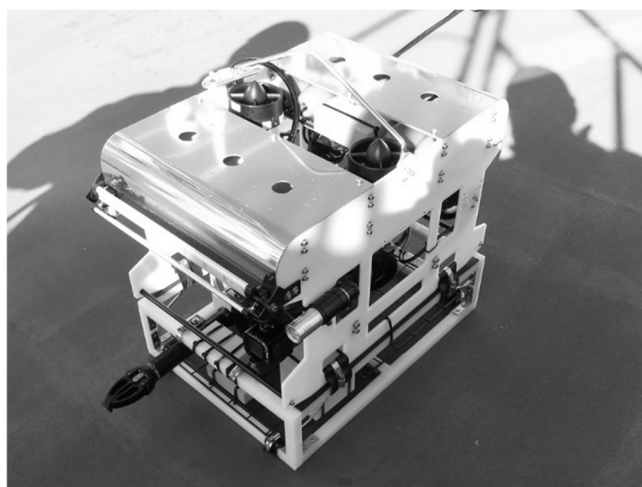


Fig.1 要素技術の検証に使用した試作 ROV



Fig.2 実海域試験に使用した練習船「汐路丸」

に実環境での実用性確認は、東京都に「まん延防止措置」が発令中であったことから、本栖湖での実験を断念し、海での実験とした。主の観測対象である湖沼とは環境が異なるが、試作 ROV は南極海での使用も念頭に置いていたことから、同年 2 月に東京海洋大学の練習船・汐路丸 (775 トン) を用いた実験を実施した。汐路丸の外観を Fig.2 に示す。ROV

を右舷側より着水させ、ケーブルによる電圧降下、および制御・映像系の通信に関する性能確認を実施した。当日は海象状況から海底までは到達できなかったものの、概ね、予定していた実験は完了した。

3. まとめ・今後の展望

2017年～2018年に実施した南極でのROV調査の知見を元に、新たな水中探査機の開発を目指し要素技術研究、および新たなROVの開発を目指した。しかし、新型コロナウイルスの蔓延や半導体材料の不足など先般の社会情勢により、研究規模を縮小せざるを得ず本研究では要素技術研究に留まった。一

方で、新たに開発した技術を用いた試作ROVの実験では、概ね良好な結果が得られたことから、今後の南極観測においてROVが有効な観測手法になることが見えてきた。特に、陸水域での観測には持ち運び可能な小型ROVが有効であることが代表研究者らによって既に示されているため¹⁾、2023年度以降の南極観測において使用可能なROVの開発を引き続き行っていく予定である。

[参考文献]

- 1) 後藤慎平, 山崎晋, 大村竜義, 牛山和人, 脇嶋智晴, 井手一充, 田邊優貴子; 南極湖沼調査に資する小型水中無人探査機 (ROV) の開発, 南極資料, Vol.64, p21-p37, 2020.03.

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（5）極 地 工 学

南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究

◎小原伸哉 北見工業大学工学部・教授
 西川省吾 日本大学理工学部・教授
 中島岳人 株式会社関電工技術開発部・チームリーダー
 (国立極地研究所)
 本山秀明 教授
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

1. 背景と目的

(1) 背景

寒地・寒冷地では季節の違いで気象条件が異なり、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーで得られるエネルギーの季節間格差が大きい。この結果、季節によってエネルギー需給の差も異なり、このギャップを埋めるためのエネルギーの時間シフトによる供給技術は非常に重要である。季節による気象条件の違いは再生可能エネルギー機器の稼働率に差を生じさせて、エネルギー機器の稼働率の低下につながる。したがって、エネルギーの時間シフト技術は経済的にも強く要望される。そこで本研究では、水素サプライチェーンによる季節間エネルギーシフトを伴う、自立タイプの小規模電力網の設計方法を開発した。

(2) 目的

本研究の目的は、昭和基地のような独立したマイクログリッド(小規模電力網)で生じる季節間のエネルギー変動を、水素エネルギーキャリアによって解消するためのデザイン方法を開発することである。これにより得られる、化石燃料消費量の削減量を明らかにする。

2. 調査結果

図1は提案マイクログリッドの基本構成で、台数制御を伴うエンジン発電機と再生可能エネルギー(太陽光発電、風力発電)、ヒートポンプ、電気蓄熱ヒータ、蓄熱槽で構成される。エンジン発電機、再生可能エネルギー、ヒートポンプ、電気蓄熱ヒータは分散配置されており、蓄熱槽はエンジン発電機の近くに設置されている。さらに、水素エネルギーキャリアの解離水素を燃料とする燃料電池(SOFC: Solid-Oxide Fuel Cell)が設置されている。燃料電池については分散配置が可能である。

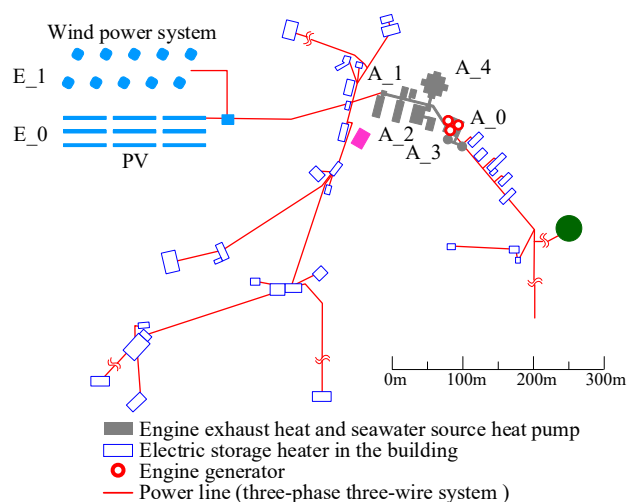
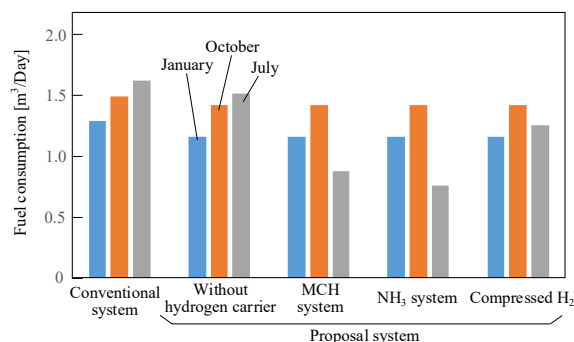
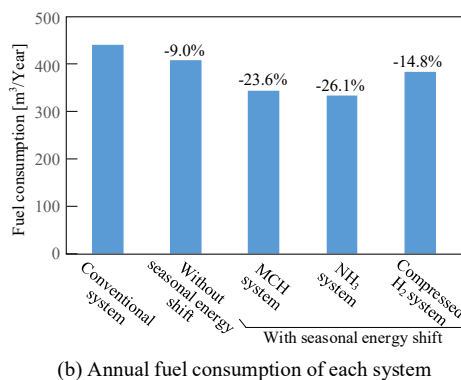


図1 昭和基地マイクログリッドのモデル



(a) Fuel consumption of representative day in each system



(b) Annual fuel consumption of each system

図2 システム構成と化石燃料消費の解析結果

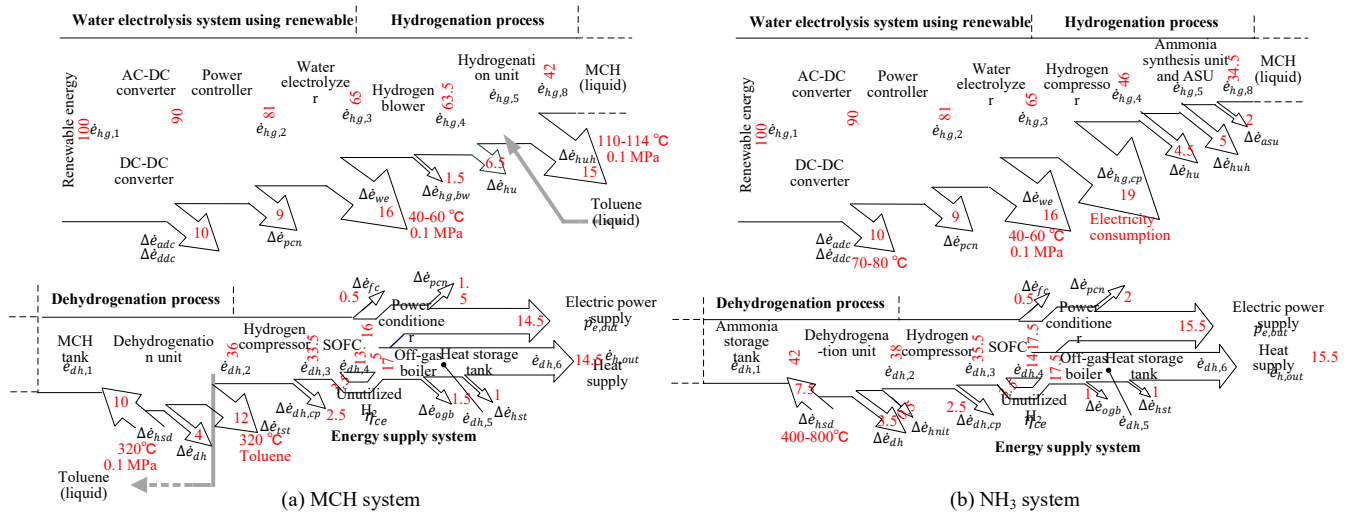


図3 MCH及びNH₃による水素キャリアを用いた際のエネルギーフローの結果

図 2(a)は従来システムと、季節間のエネルギーシフトを伴わない提案システム、季節間のエネルギーシフトを伴う各提案システムでの、各月代表日での化石燃料消費量の解析結果である。また、図 2(b)は各システムの1年間での化石燃料消費量の解析結果である。

図 3(a)と(b)は、それぞれ MCH (メチルシクロヘキサン) システムと NH₃ システムによる水素エネルギーキャリアのエネルギーフローの解析結果である。図 3(a)と(b)では、再生可能エネルギーの入力 (=100) により水を電気分解することで水素を製造し、この水素から MCH の生成またはアンモニアを合成して貯蔵する。さらに日射量のほとんどない冬期には、水素キャリアから水素を生成して燃料電池で発電する。

3. 結論

南極昭和基地に季節間エネルギーシフトを適用した際の、エンジン発電機で消費する化石燃料消費量を明らかにした。3 セットのエンジン発電機によ

る台数制御、再生可能エネルギーの設備容量の増加 (現在の昭和基地の 1.8 倍の太陽光発電と 2.5 倍の風力発電の設備容量)、灯油暖房の廃止と電動ヒートポンプの導入、電気蓄熱ヒータによる余剰電力の活用を、南極昭和基地のマイクログリッドに導入すると、従来システムに対して化石燃料の削減効果は最大で 20.1% (11 月)、各月で 5%から 20%、年間を通じた燃料消費量の削減割合は 9.0%となった。

また、夏期の再生可能エネルギーで水素エネルギーキャリアを製造し、冬期にこの水素キャリアから水素を生成して燃料電池を運転することで、季節間でのエネルギーシフトを試みた。解析結果から MCH システムと NH₃ システムのそれぞれについてエネルギーフローを明らかにした。この結果、100 の再生可能エネルギーから得られる MCH システムの電力および熱の総合出力は 29.0 (14.5 の発電量と 14.5 の熱出力) で、NH₃ システムの総合出力は 31.0 (15.5 の発電量と 15.5 の熱出力) であった。

[研究発表]

Planning renewable energy introduction for a microgrid without battery storage, Shin'ya Obara, Shoki Fujimoto, Katsuaki Sato, Yuta Utsugi, Energy, vol. 215, Part B, 119176, 2021.

Design methods for microgrids to address seasonal energy availability –A case study of proposed Showa Antarctic Station retrofits, Shin'ya Obara, Ryo Hamanaka, Abeer Galal El-Sayed, Applied Energy, vol. 236, pp. 711-727, 2019.

水素エネルギーキャリアによる送電網の設備利用率の改善と再生可能エネルギー導入量の増加に関する研究 一道北・稚内地域のモデル事例、日本機械学会論文集、小原伸哉、vol. 85, No.873, pp.1-20、2019.

Energy and exergy flows of a hydrogen supply chain with truck transportation of ammonia or methyl cyclohexane Energy, Shin'ya Obara, Energy, vol. 174, pp. 848-860, 2019.

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和3年度報告)		課題番号	-	
研究課題名	南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究			
氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)				
小計	0名			
所外 (極地研以外)	石沢 賢二	元国立極地研究所極地工学グループ		
小計	1名			
合計	1名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

※大学院生も含めてください。その場合、「職」の欄に「大学院生」と記入してください。

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究

◎香川博之 公立小松大学生産システム科学部・教授
 渡邊啓二 防衛大学校・名誉教授
 椿 哲也 (株)大原鉄工所技術部車両設計課・係長
 太田義弘 (株)竹中工務店・技術研究所・構造部長
 石沢賢二 元国立極地研究所極地工学グループ
 (国立極地研究所)
 本山秀明 教授
 古川晶雄 助教
 平成31年～令和3年(3か年)

[研究成果]

本研究の目的は、南極の内陸基地運営に関わる輸送および建築等に関する課題を解決するため、室内および野外実験を含めた研究を行うことである。また各課題間で現状の問題や解決方針などの情報共有することであった。具体的なテーマとして、①沿岸からドームふじ基地までの様々な雪氷路面に対応できる雪上車および橇の研究、②重量建築物の基礎地盤としての雪氷改良の研究、③地吹雪による建造物周囲のスノードリフト軽減の研究、④輸送および経済効率を考慮した基地の建物とエネルギーに関する研究を取り扱うこととした。

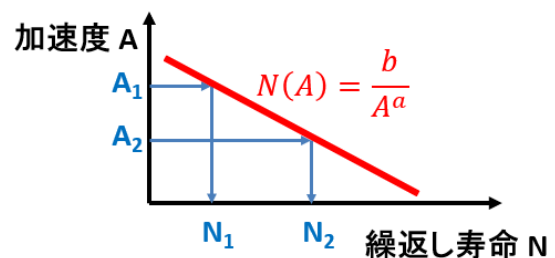
初年度には、3回の研究会を計画し、輸送用に開発したシート橇、掘削拠点用のCFRPポール屋根架構、スノードリフト形成シミュレーションなどについて検討を行った。また、輸送時の橇牽引力測定装置を作成し、第61次隊の装備に加えた。

令和2年度および3年度の2年間は、新型コロナウイルス蔓延の影響で、研究会を実施することができず、共同研究者は個別にそれぞれのテーマについて検討せざるを得なかった。雪上車や橇、CFRPポールを実際に見学することも検討したが、研究期間内に実現できなかった。以下では輸送に関して得られた主な成果をまとめる。

雪上車で橇を牽引して物資の雪上輸送を行う場合、橇に様々な振動や衝撃が作用し、積載した荷物が損傷することがある。これまでの研究で、昭和基地周辺やドームふじ基地までの橇牽引実験を行い、振動加速度について詳細に調べている。また、みずほ基地までは牽引力も測定している。これにより、S16からドームふじ基地までの通過点ごとの振動特定を明らかにし、最大衝撃加速度や振動加速度ピークの発生頻度の予測を行えるようになっている。

輸送物資の損傷には、1度でも限界値を超えると生じる衝撃損傷と、疲労破壊のように振動加速度は小さくても繰返すことで生じる累積損傷が考えられる。前者については既に予測可能になっているため、まず後者の累積損傷について検討した。

輸送物資に、ある加速度振幅 A で繰返し振動を加えると N 回(繰返し寿命)で損傷すると仮定する。応力振幅をいろいろ変えて実験すると、図1のような寿命曲線が得られることがある。



大きさの異なる m 種類の振幅 A_i が n_i 回 ($i=1,2,\dots,m$) 作用する場合に、次式の累積損傷率 D_R が 1 になると破損すると考える。 k は安全を考えたときの係数で通常は 1 とすればよい。

$$D_R = k \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N(A_i)} \quad (1)$$

内陸輸送では、単発的で稀に発生する特別な衝撃振動を除き、通常輸送時の振動加速度のピーク大きさは形状母数 α と尺度母数 β をもつ 2 母数ワイブル分布に従う。また、振動波形のパワースペクト

ルからピーク数頻度に相当する値 f を算出できる。ある走行区間 j ($j=1,2,\dots,p$) における振動特性すなわち形状母数 α_j と尺度母数 β_j , およびピーク数の頻度 f_j とし、区間走行時間が t_j のとき、累積損傷率 D_R を次式で近似することができる。

$$D_R \cong k \sum_{j=1}^p \frac{\beta_j^{\alpha_j}}{b} f_j t_j \quad (2)$$

ここで、次式の H_j を振揺度と定義すると、輸送物資の繰返し寿命特性を含めた損傷しやすさを表すパラメータになる。

$$H_j = \frac{\beta_j^{\alpha_j}}{b} \quad (3)$$

また、次式の A_{Hj} を基準振揺加速度と定義すれば、振動特性のみを考慮した損傷しやすさを表すパラメータになる。

$$A_{Hj} = \beta_j^{\alpha_j} \quad (4)$$

輸送物資の繰返し寿命特性は現段階では決められないので、S16 からドームふじ基地までの振動特性データを使って、 A_{Hj} を図 2 のように算出した。

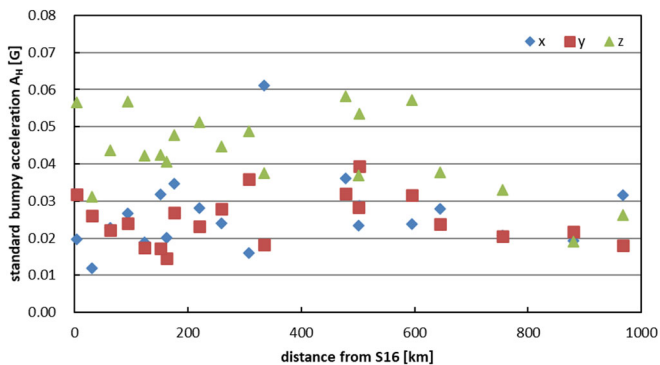


図 2 累積損傷のしやすさ

櫓の前後方向を x 、左右方向を y 、上下方向を z とし、各方向の振動成分についてしており、 A_H 値が大きいほど累積損傷しやすいことになる。

S16 から 600km 程度までと、そこから 1000km 先のドームふじ基地までの区間で大きく異なる。特に、上下方向 z の後半の A_H が小さいが、これは軟雪地帯に一致し、振動が小さいために累積損傷も小さくなっている。以上のように本研究では振動による累積損傷目安を定量化できた。

[研究発表]

現在のところ南極設営シンポジウム以外になし

櫓の振動データ取得には 3 次元加速度センサを使用しており、測定装置がやや複雑になる。これに対して、牽引力は装置も簡単で測定しやすい。輸送時に牽引負荷を把握することも重要であり、将来的に雪上車へ牽引力測定センサが取付けられる可能性もある。そこで、次に牽引力データから振動データを把握する方法について検討した。

内陸輸送時の振動データから走行区間ごとにパワースペクトルを求め、それぞれを走行区間の分散で除すと、走行区間によらずほぼ同じ値になる。したがって、振動データの分散さえ得られれば、走行区間ごとのパワースペクトルを推定できることになる。

牽引力データは、12ft コンテナ櫓で S16 からみずほ基地まで走行したものしかないのので、それを使って検討した。走行区間ごとの牽引力の変動係数を求めると図 3 が得られる。

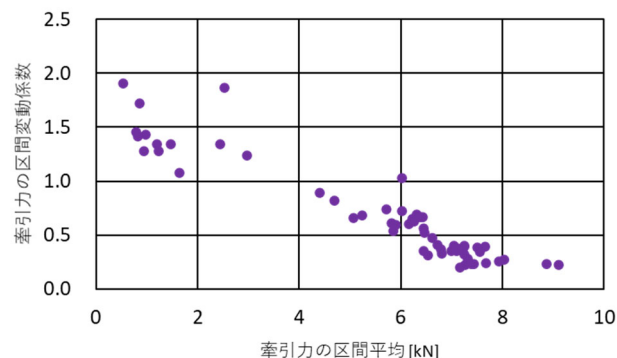


図 3 牽引力の区間平均と変動係数の関係

データ数が少なく偶然の可能性も否定できないが、現在のところ牽引力の区間平均と変動係数には相関がある。この性質を利用すれば、内陸輸送における各区間の平均牽引力を測定しながら走行すれば、その変動係数、すなわち牽引力の分散を推定することができるはずである。

牽引力の振動と櫓の振動の間には相関があると考えられるため、牽引力の分散から櫓振動の分散を推定できる可能性がある。今後さらに検証を進めれば、簡便に輸送時の振動状態を把握できる可能性がある。

その他、シート櫓の開発など、櫓自体の走行抵抗を小さくし輸送力を強化する試みも行った。

極地建築・土木に関する雪氷防災工学研究

◎金高義 福島工業高等専門学校・助教

菊池雅行 国立極地研究所 助教

平成 31 年～平成 33 年 (3 年)

[研究成果]

1. はじめに

南極地域観測隊の活動において、昭和基地建物群のスノードリフトは大きな問題である。具体的にどの建物周辺にどれだけのスノードリフトが発達するかについての定量的な評価は、現段階では模型風洞実験のみが現実的である。本研究では、雪と建物の相似則を向上させた模型風洞実験中の建物周辺の吹き溜まり性状を確認することを行った。

2.2 風洞実験概要

実験は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の回流型低温風洞装置 (測定領域断面 $1\text{m} \times 1\text{m}$:長さ 14m) で実施した (図 1)。

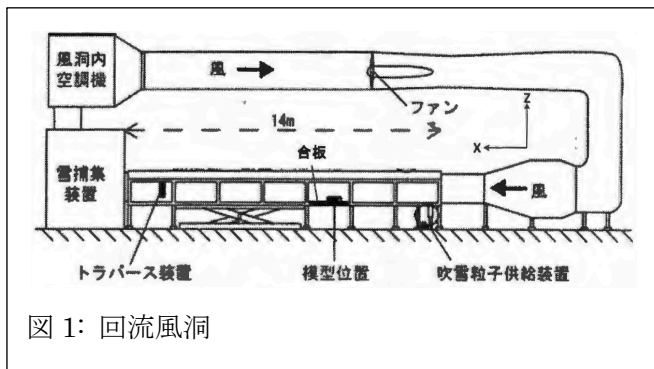


図 1: 回流風洞

風洞の床板には幅 0.8m 、深さ 0.02m の溝が付けられている。風上から 3 番目の窓位置に長さ 1800mm 幅 800mm 厚さ 9mm の合板を設置し、合板表面には吹雪流中の雪粒子の捕捉率を高めるためにメッシュ布地を張った。3 番目の窓以外の風洞床には同施設に保存してある人工雪を敷き詰め、 0°C の水を吹き付けて凍らせ、十分に固い雪面を形成した。地吹雪状態を再現するために、吹雪粒子供給装置の貯雪ボックスに、篩にかけて均等化した人工雪を投入し、定常風に乗せて風洞内に拡散させた。実験条件は、風洞内気温 -15°C ・風洞内湿度 60% ・風洞中心風速 6m/s ・人工雪供給装置上昇率 30% ・すりきり 5% ・回転ブラシ 1600rpm で設定した。

建物前方流域と後方流域の吹きだまり性状 (吹きだまり領域と発生量)に着目して、基本観測棟(12 角形平面)と従来の高床式直方体(4 角形平面)の建物模型を $1/250$ 縮尺で作製した(図 2)。

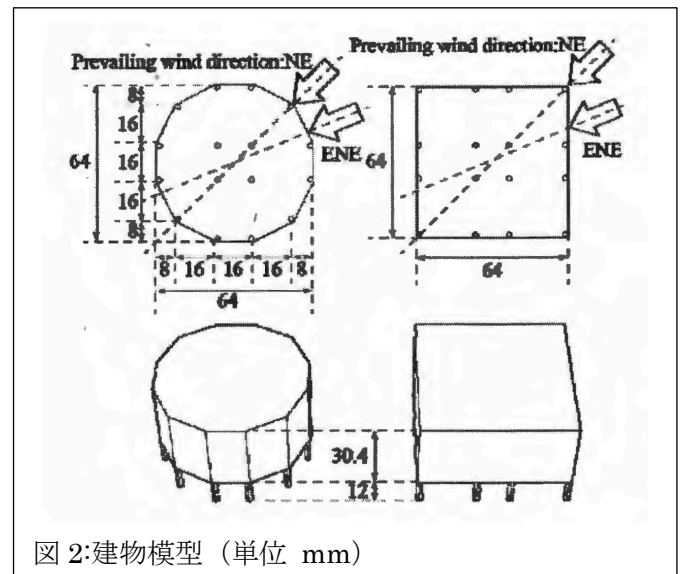


図 2: 建物模型 (単位 mm)

南極・昭和基地におけるブリザードの頻発風向である北東と東北東を再現して、合計 4 つの実験ケースを設定した(表 1)。

表 1: 計測ケース

Case	Model shape	Prevailing wind direction	Number of Measuring points	Remarks
1	Dodecagon	NE	216	x-axis symmetry
2	Dodecagon	ENE	396	
3	Quadrangle	NE	186	x-axis symmetry
4	Quadrangle	ENE	341	

1 回の実験時間は 30 分間とした 5, 10, 20, 30 分で吹雪流を止め、レーザー距離計により建物周囲の積雪深さを測定した。実験には平均粒径約 0.05mm の低温室内にある人工降雪装置で生成した球形状結晶構造の新雪を使用した回転ブラシによって、粉碎・拡散することでブリザードを再現した。

2.3 実験結果

図 3 に計測領域全域でのスノードリフト堆積量の時系列変化をそれぞれ示す。北東を卓越風向とした Case1 と Case3 では、Case1 の堆積量は 5 分以

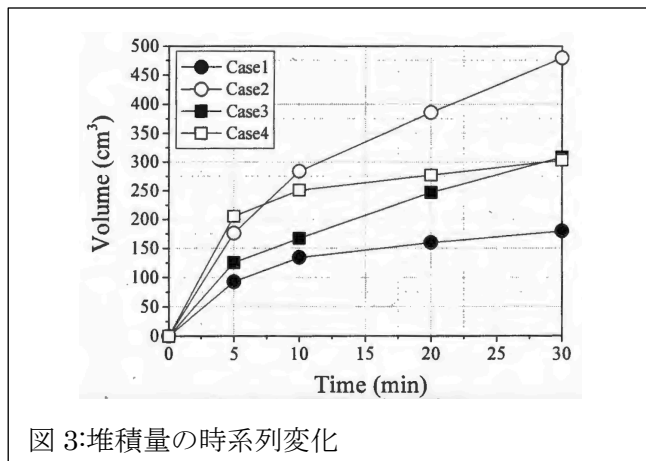


図 3: 堆積量の時系列変化

降の増加率は緩やかに収束に向かったが、Case3は5分後の増加率の減少は小さかった。一方、東北東が風向の場合12角系形状は時系列堆積量が収束する傾向が見られなかったが、4角形状のケースでは、初期5分間での堆積量が大きく発生し、その後収束に向かった

2.4 幾何学的相似比に関する一考察

球形状結晶構造の人工雪（降雪 B）を使用した本研究と、樹枝状結晶構造の人工雪（降雪 A）を用いた先行研究とを比較して、幾何学的相似比について一考察を行った。図 4 にそれぞれの回転ブラシによって碎かれ飛翔後の雪を示す。

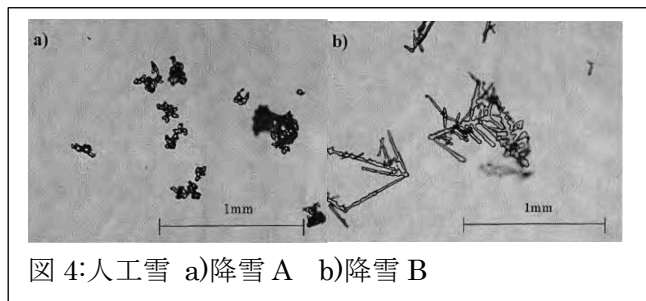


図 4: 人工雪 a)降雪 A b)降雪 B

代表的な粒形はそれぞれ 0.05mm, 1mm とした。また、図 5 に Case 1 の 30 分後におけるスノウドリフト分布を示す。X, Y は模型の高床高さ $h=12\text{mm}$ によって無次元化した高床構造による吹き払い効果が卓越し、建物から離れて吹き溜まりが発生したまた、建物後流域においては、スノウドリフトは二手に分かれながら堆積した降雪 B の前流域の最高地点は 0.74, 後流域の最高地点は 1.47 で

[参考文献]

[1]金 et.al. (2014)."南極昭和基地における基本観測棟設計のためのスノウドリフト性状評価" 寒地技術論文・報告集 Vol. 30 140-143.

[研究発表]

幾何学的相似比に注目した模型風洞実験のスノウドリフト性状評価, 第 36 回寒地技術シンポジウム, p211~ p 215,

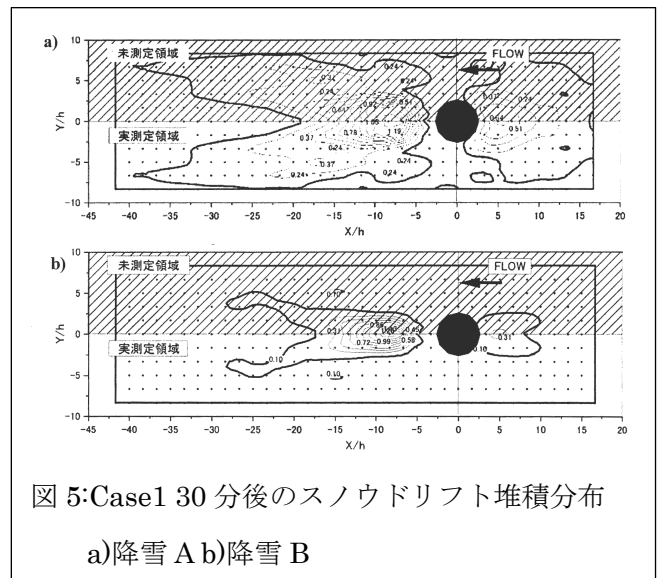


図 5: Case1 30 分後のスノウドリフト堆積分布

a)降雪 A b)降雪 B

あったまた、降雪 A では、それぞれ、0.372, 1.43 であった後方流域の最大堆積高さの一致に対して、前方流域ではおおよそ 2 倍の差が生じた。先行研究の降雪 A を使用した模型風洞実験では特に前方流域の吹き溜まり性状の再現に限界があった本実験において降雪 B を用いることにより、幾何学的相似条件が改善され、飛雪に過剰に発生していた慣性力を抑えることでスノウドリフト性状の再現性が向上したと考察する。

3. 適用限界について

模型風洞実験に関して、地吹雪の状態及びドリフトの形成・成長に関わる雪粒子の運動形態は実物を再現できているものと考えているまた、飛雪粒子径に関する幾何学的相似性は降雪 B（模型縮尺 1/250 に対して、人工雪の平均粒形 0.05mm）を使用することで降雪 A（模型縮尺 1/250 に対して、人工雪の平均粒形 1mm）使用時よりも現地条件（雪の平均粒形 1mm）に近づいている。しかし、模型風洞実験中の接地境界層はまだ明らかではない今後、風速分布と飛雪流量を実測するなどの更なる検討が必要であるまた、南極昭和基地現地における吹き溜まり性状との比較・検証作業が重要である。

深層コア掘削孔の検層機電装部の基本設計の検討

◎ 高田守昌 長岡技術科学大学・助教

(国立極地研究所)

本山秀明・教授

令和3年(1か年)

[研究成果]

現在、第3期ドームふじ氷床深層コア掘削計画が進行中である。氷床深層コアを採取した後の掘削孔を用いて、温度や孔径の測定が行われる。温度は、氷の変形と関係し地殻熱流量の推定に用いられる。この精密な測定から、過去の地表面温度の推定が試みられている。また、孔径の経年変化は、氷床流動を理解する上で重要な役割をもつ。このため、日本南極観測隊もこれらの測定が可能な検層機を用いて掘削孔の計測が行われていた。しかし、従来の検層機は25年以上も経過しており、電装部は温度データのデータ処理に問題を抱えているため、新規設計・製作が必要な状況である。そこで、従来の検層機の課題点を洗い出し、検層機電装部の基本設計について検討することを目的とし、共同研究を進めることとした。

検層機電装部については、深層掘削機電装部と共通するところが多いので、最初に掘削機の電装部について基本設計と開発・試作を進めた。

掘削機は、氷床氷を掘り進めコア試料を採取するための機械部だけでなく、地上より氷の切削状態をモニタする電装部が必要である。この電装部は1990年代の第1期に設計された古いものであり、データ処理の一部に問題が見つかっている。電装部のコンピュータとして、市販の小型PCを利用することが可能であれば、研究者ベースでの開発が可能であることから基本設計を行い、開発を進めている。実用化へ向けた課題は、(1)3500mウインチケーブルを介した掘削機・検層機への電源供給とデータ通信、(2)耐圧室に入るサイズのプロトタイプ機の設計と製作、(3)プロトタイプ機を掘削機・検層機に実装したテストである。(1)については、問題なく稼働することをすでに確かめている。(2)について検討した。

電装部の製作について、機能面は基本設計に沿って行うが、深層掘削機や検層機に実装するプロトタイプ機として使用可能な状態とするためには、サイズの制約を大きく受ける。これは深層掘削では、掘削孔の収縮を防ぐため、氷の密度に近い液を掘削孔に充填した液封掘削が行われるため、掘削機には静水圧から機器を守るための耐圧室が設けられ、電装部はこの耐圧室に入れる必要があるためである。こ

の耐圧室は、従来のサイズを踏襲するため、挿入口の内径が85mmであり、電装部の外径はこの寸法未満とする必要がある。また、電装部として利用可能な有効長は、耐圧室に収納する機器が、掘削用モーター、減速機、計器類であることを考慮すると700mmであり、配線の接続と収納の都合からより短いほうが好ましい。

設計・製作面、剛性および、現地で故障が発生した場合のメンテナンス性の観点から、電装部はユニット構造を採用することとした。一つのユニットの骨格は、外径84mmのアルミリング板と幅80mmまたは54mmの樹脂プレートで固定した構造である。樹脂プレート両表面に電装部の機器類を固定するが、それぞれの機器の役割およびサイズを考慮しながら各ユニットに取り付ける機器類を決めた。電装部全体としては、5つのユニットで構成されることとなった。各ユニットに取付けた機器は、以下の通りである。

- 1：端子台、USB-Hub、電流電圧測定回路、アナログ・デジタル入出力器、センサー類、発信回路
- 2：温度計測ロガー
- 3：スティックPC、二次電池
- 4：リレーコントローラー、電源電圧計測用回路
- 5：電源供給切替えリレー

これらの5つのユニットを長ボルトとナットで固定し、ユニット間の配線を行うことで、電装部として機能する。スペース節約の観点から、ユニット1では多層に機器を組付けた。なお、主要部を完成と動作確認を優先する観点から、センサー類および温度計測ロガーは、設置のみとした。

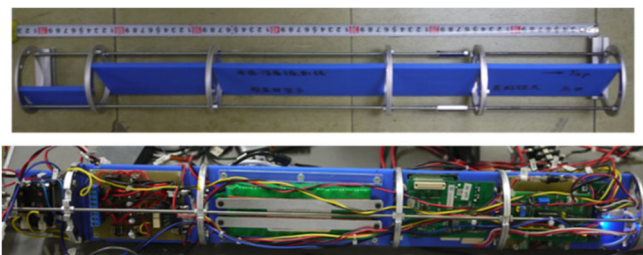


図 1 ユニット構造の掘削機電装部。骨格（上）。電装機器類を組付け配線した状態のプロトタイプ（下）

電装部のみでなく深層掘削孔の形状変化や温度分布を測定する深層型検層システムの基本システムについて検討を進めた。この基本システムには、掘削孔の物理的・化学的情報や映像記録が可能な拡張ユニットが追加可能とする。

基本システムとしては、トップユニット、耐圧ユニット、2つの姿勢制御ユニットの基本ユニットで構成される。基本ユニットでは液温、液圧、傾斜、

方位、接地圧、孔径を測定する。基本ユニットと拡張ユニットは、それぞれ共通の方式で接続する。拡張ユニットの例としては、孔径測定 3D 新方式、近赤外カメラ、可視カメラ+ライト、ECM、微粒子濃度+粒径分布などが考えられる。

観測方法については、深層ドリルシステムのウインチケーブルに接続した深層型検層機を掘削孔内で上げ下げすることで検層観測を行う。各種センサーからの検層情報は、耐圧ユニットの電装部にてデータ処理し、ウインチケーブルの内芯を信号線として地上へ送信する。電装部のさらなる検討が必要である。

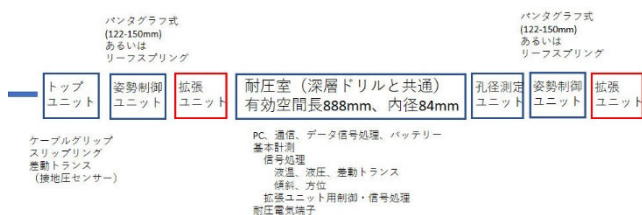


図 2 深層型検層システムのポンチ絵

[研究発表]

高田守昌・本山秀明・大谷昌央、氷床コア深層掘削機の電装部の開発ープロトタイプ機の作成と掘削実験での動作確認ー. 雪氷研究大会 (2021・千葉・オンライン) 2021.9.13-9.16

Ⅱ. 研究集会報告

研究集会

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 研究集会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ 研究会 <input type="checkbox"/> ワークショップ その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究会					
開催日時	2021年9月28-30日	開催場所	オンライン (zoom)			
概要	2021年9月28日から30日にかけて表記の研究集会を含む4研究集会を合同で開催した。中間圏・熱圏・電離圏研究会では、招待講演を中心とした口頭発表セッションと若手や学生を中心としたポスター発表セッションを開催した。研究会全体を通じて活発な議論が行われ、今後の発展につながる研究会となった。					
報告者 (担当者)	津田 卓雄(富川 喜弘)					
所内参加者数	8名	合計	95名			
所外参加者数	87名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内訳				備考
		内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	
総研大(極域科学専攻)	1	0	0	0	1	
極地研	7	0	0	1	0	
名古屋大	12	0	5	0	5	
京都大	12	1	4	1	4	
NICT	9	2	3	6	0	
千葉大	8	0	6	1	6	
電通大	8	1	6	2	6	
九州大	7	1	5	3	3	
九工大	2	0	0	1	0	
国立天文台	2	0	0	0	0	
明治大	2	0	2	0	2	
島根大	1	0	0	0	0	
駒澤大	1	0	0	1	0	
ENRI	1	0	1	0	0	
東大	1	0	0	0	0	
コロラド大	1	0	0	1	0	
カルフォルニア大	1	0	0	1	0	
GFZ Potsdam	1	0	0	0	0	
熊本大	1	0	0	0	0	
JAXA	1	0	0	0	0	
その他	16	0	0	0	0	

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

					※係記入欄	
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ ワークショップ その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	STE研究連絡会現象報告会および現象解析ワークショップ(極域を軸とする宇宙天気現象の予測精度向上に向けて)					
開催日時	2021.9.28		開催場所	オンライン		
概要	当該期間(2021.3-2021.9)における極域を中心とした太陽地球環境の概況を報告し、その推移や注目現象を概観した。次に当該期間の現象に関する観測データやシミュレーション結果などについて多方面から報告を行い、詳細な状況について議論した。昨年度と同様に当研究集会はMT研究集会他と合同開催された。					
報告者 (担当者)	西谷 望(片岡龍峰・行松彰・小川泰信)					
所内参加者数	4 名		合計 43 名			
所外参加者数	39 名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	4					
名古屋大学	6		2		1	
情報通信研究機構	10		2	3		
京都大学	4		2		1	
九州大学	4		2		1	
九州工業大学	1		1	1		
鹿児島工業高等専門学校	2		1			
千葉大学	4		2	1		
地磁気観測所	1					
埼玉大学	1		1			
国立天文台	1		1			
電気通信大学	2		1			
JAXA	1					
三菱電機	1					
日本流星研究会	1					

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 研究会 ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	南極昭和基地における次世代ネットワークインフラを活用した研究計画					
開催日時	令和4年3月22日	開催場所	ZOOM			
概要	NECネットエスアイ社との産学共同研究の一環として実施中の、「昭和基地ローカル5G実証実験」および「超高解像度人工衛星画像の直接受信の可能性の研究」の進捗状況について連携を確認するとともに、来年度に向けた準備について意見交換を行った					
報告者 (担当者)	岡 田 雅 樹					
所内参加者数	1 名	合計	6 名			
所外参加者数	5 名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
NECネットエスアイ	5					

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> ワークショップ		<input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他				
いずれかを■にしてください。						
集会名	SuperDARN研究集会					
開催日時	2022年2月22日 10:00～20:00	開催場所	オンライン			
概要	1995年創設当初から極地研が参加している国際短波レーダー観測網プロジェクト「SuperDARN」についての研究集会を、極地研、名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)の共催により今回は名古屋大学ISEE主担当で感染症拡大状況を鑑みオンラインにて開催した。極域・中緯度に跨る幅広いテーマで発表があり、第X期南極地域観測計画における極冠域の光学観測網や宇宙線観測との国際共同研究を含むSENSUレーダー計画、Open磁場のMHDシミュレーション解析的研究、磁気嵐の全体像やサブ極光帯の現象、極域～中緯度の領域間結合やTIDや熱圏風を含む大気上下結合等の研究、電離圏からの磁気圏投影と磁気圏物理量の推定、オーロラ・地磁気脈動・磁気圏波動研究を含む内部磁気圏観測衛星「あらせ」(ERG)等との共同研究の成果、欧州における最近のSuperDARNの進展や研究成果の紹介等、13件の発表と、最近の動向や観測計画・共同研究の将来計画を含む総合討論を行い、また講演会終了後に懇親会も実施し情報交換を深めた。					
報告者(担当者)	行松 彰					
所内参加者数	5名	合計	25名			
所外参加者数	20名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内訳				備考
		内、外国人	内、若手	内、女性	内、大学院生	
ROIS/極地研/総研大	5		2	1	1	
名古屋大学/ISEE	8		4		4	(学部学生1)
九州大学	2					
東北大学	3		1		1	
JAXA/宇宙科学研究所	1					
NICT(情報通信研究機構)	1					
九州工業大学	1			1		
東海大学	1					
山東大学(中国)	1	1				
Univ. of Umea (Sweden)	1	1				
三菱電機	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

				※係記入欄		
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 研究会 ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	南極海洋-海氷-氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会					
開催日時	令和3年10月25日	開催場所	オンライン			
概要	南極氷床－海氷－海洋システムにおいて、東南極における独自の相互作用の存在が明らかになりつつある。本課題では、東南極におけるサブシステム間相互作用特性の海盆間差異の解明と十年規模変動の実態把握を目指した研究加速を目指している。近年明らかになりつつあるトッテン氷河沖海洋循環や堆積物コア研究の現状、エンダービーランド沖におけるバイオリギング観測の結果と物理的な解釈、ケーブダンレー沖での海氷と生物など、最新の情報交換や共同研究の方向性についての検討・議論を行なった。					
報告者 (担当者)	青木茂(田村岳史)					
所内参加者数	9名	合計 29 名				
所外参加者数	20名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
極地研究所	9		3			
総研大	1				1	
産業技術総合研究所	1					
東京海洋大学	1					
島根大学	1		1		1	
苫小牧高専	1		1			
法政大学	1					
海洋開発機構	1					
慶応大学	1			1		
リモートセンシング技術センター	1					
鳥取環境大学	1					
北海道大学	10		4		2	

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

※係記入欄						
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> 研究集会 研究会 ワークショップ </div> <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> 研究談話会 </div> <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他 </div> </div>						
いずれかを■にしてください。						
集会名	研究会「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」					
開催日時	令和4年3月14日	開催場所	国立極地研究所 オンライン			
概要	遠赤外線衛星SPICAグループと協力して南極からのテラヘルツ観測によるサイエンスの検討を行った。					
報告者 (担当者)	久野成夫					
所内参加者数	3名	合計 48 名				
所外参加者数	45名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)						
筑波大学	3		2			
ISAS/JAXA	4					
Kavli IPMU	1	1				
国立天文台	10	1			1	
日本大学	1					
理化学研究所	1		1			
上越教育大学	1					
大阪府立大学	1			1	1	
放送大学	1					
関西学院大学	2					
東京大学	6		2			
台湾中央研究院天文及天文物 理研究所	2					
北海道大学	3	1			1	
名古屋大学	4				1	
慶応義塾大学	1					
早稲田大学	2		1		1	
徳島大学	1					
日本天文学会	1					

所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、	内、	内、	内、	備考
		外国人	若手	女性	大学院生	

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 ワークショップ		<input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他				
いずれかを■にしてください。						
集会名	寒冷域における降雪観測や雪結晶の研究と教育の今後の展望					
開催日時	令和4年1月27日	開催場所	Web開催			
概要	<p>南極での表面水収支、みずほ基地での降雪観測と表面質量収支、北東アジアでの降雪観測と衛星データとの比較、南極でのAWS積雪深計の観測データ、南極での降水レーダーなどを用いた降水観測、地上降水粒子観測と雲解像気象モデルにおける降水形態、北海道で観察された鷗状結晶などの報告があった。これに対し、南極昭和基地に設置中のXバンドレーダーの観測やその測定方法・解析方法などの議論を行った。</p> <ol style="list-style-type: none"> 南極の表面水収支と降雪・地吹雪 杉浦幸之助(富山大) みずほ基地の降雪観測と南極表面質量収支 高橋修平(オホーツク流氷科学センター) モンゴル・シベリアでの降雪観測と衛星降水プロダクトとの比較 飯島慈裕(三重大学) 南極AWS積雪深計の観測データの特徴 斎藤圭佑(総研大・M1) 南極の降水観測—求められることと、近年の研究成果 平沢尚彦(極地研) 地上降水粒子観測および雲解像気象モデルにおける降水形態について 田邊章洋(防災科研新庄) 北海道で観測された鷗状結晶 島田 互、伊東慎司、大島 基(富山大・理) 					
報告者 (担当者)	島田 互					
所内参加者数	3名	合計	14名			
所外参加者数	11名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	1		1		1	
富山大学	2					
防災科学技術研究所	3					
オホーツク流氷科学センター	1					
三重大学	1					
北海道大学	1					
叡啓大学	1					
法政大学	1		1	1		

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> ワークショップ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	南極域における衛星観測データを用いた気候に関する研究集会 (申請時の「昭和基地衛星受信データを用いた気候研究」より変更)					
開催日時	2021年08月17日(火) 10:10-16:30	開催場所	Zoom開催			
概要	昭和基地で受信される衛星データは、氷床表面温度・積雪粒径・放射特性、雲分布、海氷分布などの地表面の情報、大気温度・風の3次元分布、エアロゾル、オゾンなどの大気微量成分の分布など極域の地球科学的基本的物理量を含んでいる。これらは極地研のデータアーカイブシステム(Arctic and Antarctic Data archive System: AADS)に保存され、一般の研究者に広く提供されている。ここで構築される衛星データアーカイブは、日本国内の研究者が南極域の広域の研究や、長期気候変動の研究に取り組むことを可能にする。温暖化の影響が南極にどのように現れてきているのかを知るためにも重要なデータである。本研究会では、このデータを用いた研究結果の議論とともに、データを更に効果的に活用していくための体制の維持や発展などについての意見交換を目的として実施された。衛星観測データを用いた最新の研究成果報告や、今後の共同研究への発展性を含めた質疑応答が取り交わされ、参加者にとって有意義な議論が行われたといえる。来年度以降も、各々の研究成果や観測計画などの議論、またデータ利活用の推進を踏まえ、引き続き研究集会を実施することで意見が一致した。					
報告者 (担当者)	鈴木 香寿恵 (平沢 尚彦)					
所内参加者数	12名	合計	18名			
所外参加者数	6名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	1		1		1	
法政大学	1			1		
富山大学	2					
JAXA	1					
北見工業大学	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> ワークショップ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	第23回南極エアロゾル研究会					
開催日時	2021年7月29日, 8月5日	開催場所	オンライン(Zoom)			
概要	JARE61越冬観測報告、JARE62夏観測報告、JARE62越冬観測状況確認を行った。JARE63観測計画の変更・調整について議論も行った。さらに、これまでの観測経過、データ解析、データ管理、今後の解析方針について関係者で確認・議論を行った。また、今後の研究計画についての調整・議論を進めた。					
報告者 (担当者)	原圭一郎(平沢尚彦)					
所内参加者数	6名	合計	49名			
所外参加者数	43名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
福岡大学	3					
JARE63	12			1	2	
JARE62	2					
気象庁	6					
北海道大学	4					
名古屋大学	3				1	
京都大学	2					
東京工業大学	2		1			
山梨大学	3					
九州大学	3				2	
大阪府立大学	1					
富山大	1			1		
JAMSTEC	1		1			
極地研究所	6					

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

						※係記入欄	
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 研究会 ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他 </div>							
いずれかを■にしてください。							
集会名	2021年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会						
開催日時	2022年2月21日～2022年2月22日			開催場所	オンライン(Zoom)		
概要	<p>エアロゾル・雲・降水とそれらの相互作用に関して、観測・室内実験・数値モデルなどの最新の研究結果や動向を共有し、意見交換を行った。今回の研究集会では、「エアロゾル気候モデルを用いた気候変動シミュレーション」に関する総説講演1件をプログラムに組み込み、当該分野外の人にもわかりやすいように解説を行った。今回は昨年引き続きオンラインでの開催となったこともあり、対面で行った一昨年度よりも多くの参加者が参加して実施することができた。また研究発表は、総説以外に21件の発表があり、それぞれの発表に対して初参加となるシニア・若手研究者や学生を交えた活発な議論が行われた。</p>						
報告者 (担当者)	佐藤陽祐						
所内参加者数	9 名			合計	65 名		
所外参加者数	56 名						
所外参加者の内訳							
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考	
極地研究所	9			2			
気象庁	1	0					
気象研究所	5	1					
東京大学	7	2	4		3		
北海道大学	5		4		4		
名古屋大学	5		2		1		
酪農学園大学	1						
防災科学技術研究所	2						
兵庫県立大学	2		2	1	1		
武蔵野美術大学	1			1			
富山大学	1						
東京理科大学	1		1	1	1		
筑波大学	3		3		3		
東海大学	1						
情報・システム研究機構	1						
産業技術総合研究所	1						
山口大学	1						

所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、	内、	内、	内、	備考
		外国人	若手	女性	大学院生	
三重大学	2					
環境研究所	2		1			
広島大学	1			1		
鉄道総合研究所	1					
慶應義塾大学	1		1	1	1	
九州大学	3		2		1	
金沢大学	1					
京都大学	2		1		1	
Texas A&M大学	1		1			
海洋研究開発機構	1					
eロボティクス	1		0			
岡山大学	2		2	1	2	

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	無人航空機の活用による極地観測の展開(第11回)					
開催日時	令和4年3月4日	開催場所	Zoom			
概要	第62次南極地域観測sの躯体におけるカイトプレーンオペレーションの状況、第63次タイの観測準備状況の報告をそれぞれの隊員(62次隊柴田氏は観測航海中のため不参加、代読)行った。併せて、国内における長距離フライトの実施経験、新しいタイプの無人航空機の開発状況、無人航空機による観測の実現を期待している観測アイデアの紹介などを行った。					
報告者(担当者)	林政彦(福岡大学)					
所内参加者数	2名	合計	19名			
所外参加者数	17名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、外国人	内、若手	内、女性	内、大学院生	備考
福岡大学	2					
九州大学	3				2	
東海大学	1					
首都大TMIT	1					
金沢工業大学	1					
JAMSTEC	1					
国際航業	1					
BECネッツエスアイ	1					
日本タングステン	1					
COBALT	1					
ジオスポーツ	1					
株式会社 四門	2					
前田建設	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	2021年度南極メソスケール雪氷研究集会					
開催日時	2022年2月18日13:00-16:30	開催場所	Zoom			
概要	<p>最近数十年にわたる温暖化に加え、温暖化に伴う広範囲な雪氷圏の縮退が報告されているものの、東南極では西南極にも見られる顕著な昇温傾向には至っていない。本研究集会では、東南極の氷床頂部から氷床沿岸部にかけて生じる大気と雪氷の相互作用を対象とし、今後に予想される気候システムの変動に対する大気と雪氷の相互の応答について議論する場を設けた。各分野の研究者にこれまでの関係する研究を紹介していただき、2021年の現状でどのような観測・解析・モデリング活動があるのか、またどのような問題点があるのかについて、現状を共有した。</p>					
報告者 (担当者)	杉浦 幸之助					
所内参加者数	2名	合計	10名			
所外参加者数	8名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
富山大学	2					
法政大学	1			1		
宇宙航空研究開発機構	1					
北海道大学名誉教授	1					
総研大(極域科学専攻)	1				1	
富山大学(地球科学専攻)	1				1	
富山大学(都市デザイン学部地球システム科学科)	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> 研究会 ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ その他 </div>						
いずれかを■にしてください。						
集会名	南極域地圏変動から探る南極氷床・南大洋変動が及ぼす全球システム変動へのインパクト					
開催日時	令和3年11月1日	開催場所	オンライン			
概要	新学術領域研究やJAREで進められている極域地圏の研究課題について、近年得られている成果の詳細を、広く固体地球分野の研究者や雪氷分野の研究者らも含めて共有した。さらに、氷床変動と固体地球の相互作用に関する諸現象のメカニズムについて議論した。					
報告者 (担当者)	奥野淳一					
所内参加者数	10	名	合計 23 名			
所外参加者数	13	名				
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	3				3	
東大地震研	1					
産総研	2					
島根大	1					
九州大	1					
法政大	1					
国立天文台	1			1		
国土地理院	1					
道総研	1					
日大	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	冷水性翼足類クリオネ属における幼生期の形態的種同定手法の確立に関する研究集会					
開催日時	令和3年7月10－13日	開催場所	北海道立流水科学センター			
概要	地球規模での環境問題の一つである海洋酸性化により、炭酸カルシウム外骨格を持つ海洋生物、中でも浮遊性の巻貝である冷水性翼足類に及ぼす影響を評価する研究が注目されている。裸殻翼足類であるクリオネ属は幼生期に貝殻を持つことが知られているが、その同定手法をはじめ、分布特性といった基本的情報も乏しいのが現状である。オホーツク海に分布するクリオネ属は、紋別港近辺で夏場に個体数のピークが見られることが明らかとなっており、また近年の研究から3種類が共存する可能性が指摘されている。そこで本研究集会では現場採集と合わせてクリオネ属幼生期の形態的種同定手法を検討した。					
報告者 (担当者)	高橋邦夫					
所内参加者数	3名	合計	5名			
所外参加者数	2名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
北海道立オホーツク流水科学センター	1					
蘭越町貝の館	1					

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

						※係記入欄	
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他							
いずれかを■にしてください。							
集会名	2021年 南極医学医療ワークショップ						
開催日時	令和3年7月10日			開催場所	オンライン		
概要	南極医学医療研究の成果報告および63次観測隊での医学研究へのアドバイスを行うことを目的として本ワークショップをオンラインで開催した。南極観測における感染対策を主たるテーマとし、海外からの参加者も含めて活発な意見交換が行われ有意義な集会となった。						
報告者 (担当者)	大谷 眞二						
所内参加者数	9 名			合計	50 名		
所外参加者数	41 名						
所外参加者の内訳							
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考	
KOPRI	4	4					
JAXA	5			1			
京都大学	2			1			
東葛病院	1						
鳥取大学	1						
筑波大学附属病院	1						
京都光華女子大学	1						
大阪府立大学	1						
東京医科歯科大学	1						
アルジェリア大使館	1						
金町駅前クリニック	1			1			
福島県立医科大学	1						
その他	21			8			

- 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。
- 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。
外国人は外国籍または海外機関に所属する者、若手は35歳以下(大学院生含む)とします。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

Ⅲ. 令和 3 年度共同研究課題一覽

1.令和3年度共同研究実施件数

区分	研究分野	一般共同研究			令和3年度 終了件数	令和3年度 継続件数
		継続	新規	計		
		件数	件数	件数		
一般共同研究	宙空圏	19	5	24	14	10
	気水圏	15	7	22	9	13
	地圏	13	6	19	6	13
	生物圏	17	6	23	11	12
	極地工学	3	2	5	4	1
	計	67	26	93	44	49
研究集会		21			19	-

※研究集会の2件は開催せず

2. 一般共同研究

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
宙空圏	31-1	新しいレーザー技術の南極観測への応用	桂川 眞幸	電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授	H31～R3	3年
	31-2	地上デジタル放送波の伝搬遅延を用いた水蒸気量推定の技術開発及び実証実験	花土 弘	情報通信研究機構 電磁波研究所リモートセンシング研究室・研究マネージャー	H31～R3	3年
	31-3	光学リモートセンシングによる超高層領域の大気組成に関する研究	津田 卓雄	電気通信大学大学院情報理工学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-4	SuperDARNで観測されるFLRを用いた磁気圏領域の連続的同定	河野 英昭	九州大学大学院理学研究印地球惑星科学専攻/九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・准教授	H31～R3	3年
	31-5	VLF/LF帯電波の電波伝搬を用いた高エネルギー電子降下現象の実証的研究	土屋 史紀	東北大学大学院理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-6	大気微量成分の経年変化に及ぼす力学輸送効果の研究	村田 功	東北大学大学院環境科学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-7	金属原子ライダー観測に応用するパルスレーザースペクトル計測のための光ヘテロダイン計測手法の確立	川原 琢也	信州大学学術研究院工学系・准教授	H31～R3	3年
	31-8	南極昭和基地の宇宙線観測による宇宙天気現象の研究	加藤 千尋	信州大学学術研究院理学系・教授	H31～R3	3年
	31-9	EISCATレーダーとあらせ衛星の観測に基づく地球電離圏から磁気圏へのプラズマ供給機構に関する研究	関 華奈子	東京大学大学院理学系研究科・教授	H31～R3	3年
	31-10	船舶搭載用のプラズマバブル・熱圏大気光観測システムの開発	坂野井 健	東北大学大学院理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	2-1	地上多点光学・電磁場観測による電離圏・熱圏・中間圏ダイナミクスの研究	塩川 和夫	名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授	R2～R4	3年
	2-2	磁気圏ULF波動の電離圏オーロラ活動への効果	櫻井 亨	東海大学・名誉教授	R2～R3	2年
	2-3	電離圏サブストームの磁気圏投影構造	田中 高史	九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・学術研究者/名誉教授	R2～R3	2年
	2-4	SuperDARNIによる極域・中緯度における熱圏・電離圏・磁気圏ダイナミクスの比較研究	西谷 望	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授	R2～R4	3年
	2-5	アイスランドにおける宇宙線生成核種強度の時間変動と太陽活動の関係についての研究	門叶 冬樹	山形大学理学部・教授	R2～R4	3年
	2-7	大域的磁場位相構造から見た地球磁気圏プラズマ過程とその歪んだ投影としての極域電離圏現象	渡辺 正和	九州大学大学院理学研究院・准教授	R2～R4	3年
	2-8	LODEWAVE用スーパープレッシャー気球の開発	齋藤 芳隆	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・准教授	R2～R3	2年
	2-9	低緯度電離圏電場の太陽風変動依存性	橋本 久美子	吉備国際大学農学部・教授	R2～R4	3年
	2-10	南極昭和基地大型大気レーダーを用いたFAIのイメージング手法の開発	齊藤 昭則	京都大学大学院理学研究科・准教授	R2～R3	2年
	3-1	レーダー・光学総合観測、数値シミュレーションによる極域熱圏・電離圏変動の研究	藤原 均	成蹊大学サステナビリティ教育研究センター/理工学部・教授	R3～R5	3年

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	3-2	磁気急始と地磁気脈動電場・電流の発生・伝搬メカニズム	菊池 崇	名古屋大学宇宙地球環境研究所・名誉教授	R3～R5	3年
	3-3	太陽圏環境と銀河宇宙線、2次宇宙線の研究	三宅 晶子	茨城工業高等専門学校国際創造工学科・准教授	R3～R5	3年
	3-4	飛翔体観測・地上観測に基づく電離圏・磁気圏結合系・プラズマダイナミクスの研究	熊本 篤志	東北大学大学院理学研究科・准教授	R3～R5	3年
	3-5	極域の大気電場観測データを用いた全地球電気回路の研究	鴨川 仁	静岡県立大学グローバル地域センター・特任准教授	R3～R5	3年
気水圏	31-13	衛星搭載合成開口レーダデータを用いた東南極の氷河と海水の変動解析	中村 和樹	日本大学工学部情報工学科・准教授	H31～R3	3年
	31-15	南極域のエアロゾル長期変動の解析	原 圭一郎	福岡大学理学部・助教	H31～R3	3年
	31-16	北極広域に沈着した光吸収性粒子の測定手法の確立とその空間分布の観測的解明	森 樹大	東京大学大学院理学系研究科・特任研究員	H31～R3	3年
	31-17	雲ゾンデを用いた冬季の北極海で生じる雲特性変化の解明	佐藤 和敏	北見工業大学工学部・助教	H31～R3	3年
	31-19	東南極氷床境界域における海洋物理過程の研究	大島 慶一郎	北海道大学低温科学研究所・教授	H31～R3	3年
	31-20	気球・UAV・地上in-situ観測データによる極域エアロゾル循環機構解析	林 政彦	福岡大学理学部地球圏科学科・教授	H31～R3	3年
	31-21	北極海における海水の係留・衛星観測研究	深町 康	北海道大学北極域研究センター・教授	H31～R3	3年
	31-22	両極由来の寒気に伴う顕著大気現象発現にかかわる極域—熱帯域大気海洋結合システムの解明	本田 明治	新潟大学理学部・教授	H31～R3	3年
	2-11	極地アイスコアの金属成分分析	鈴木 利孝	山形大学理学部・教授	R2～R4	3年
	2-12	カナダ雪氷コアに含まれるアジアダストの粒径別・供給源推定～バックグラウンドダストはいつどこからどれだけ輸送されるのか～	長島 佳菜	海洋研究開発機構 地球環境部門・技術研究員	R2～R3	2年
	2-13	南極海氷サンプル中の物理・化学・生物特性の定量評価	野村 大樹	北海道大学北方生物圏フィールド科学センター・准教授	R2～R4	3年
	2-14	氷床フィルムの物理解析	大野 浩	北見工業大学地球環境工学科・准教授	R2～R4	3年
	2-15	東南極の氷床頂部から氷床沿岸部で発生する吹雪の変動特性	杉浦 幸之助	富山大学学術研究部都市デザイン学系・教授	R2～R4	3年
	2-16	南大洋上のエアロゾル粒子光学特性の観測およびデータ解析	古賀 聖治	産業技術総合研究所環境創生研究部門・主任研究員	R2～R4	3年
	2-17	両極の気象・気候と双方向作用する大気・陸・海洋三位一体変動の研究	立花 義裕	三重大学生物資源学研究科・教授	R2～R4	3年
	3-6	グリーンランド氷床コア中に存在するエア・ハイドレート結晶中の希ガス濃縮	内田 努	北海道大学大学院工学研究院 応用物理学部門・准教授	R3～R4	2年
	3-7	マルチ周波数電磁探査センサーによる非掘削海氷厚分布調査技術に関する研究	横田 俊之	産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門物理探査研究グループ・研究グループ長	R3～R5	3年
3-8	山岳氷河及びグリーンランド高涵養域で採取されたアイスコアを用いた環境変動復元	的場 澄人	北海道大学低温科学研究所・助教	R3～R5	3年	

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	3-9	X線回折法を用いた不純物を含む氷のクリープ変形に伴う転位密度の評価	本間 智之	長岡技術科学大学工学研究科機械創造工学専攻・准教授	R3~R5	3年
	3-10	外洋域における海塩粒子放出量の渦相関法による直接評価のための観測手法の確立	近藤 文義	海上保安大学校・准教授	R3~R5	3年
	3-11	極域における衛星雲画像を用いた水蒸気輸送パターンの自動検出	鈴木 香寿恵	法政大学理工学部応用情報工学科・教務助手	R3~R5	3年
	3-12	波浪緩衝帯としての南極氷縁域の研究	早稲田 卓爾	東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授	R3~R5	3年
地圏	31-23	東南極セール・ロンダーネ山地における下部地殻流体活動の温度—圧力—時間条件の精密解析	河上 哲生	京都大学大学院理学研究科・准教授	H31~R3	3年
	31-24	リュツォ・ホルム岩体の精密な温度構造および物質移動の素過程の解明	池田 剛	九州大学理学研究院・准教授	H31~R3	3年
	31-25	インパクトが引き起こす物質進化と天体進化の解明	宮原 正明	広島大学大学院先進理工系科学研究科・准教授	H31~R3	3年
	31-26	UAVを利用した東オングル島積雪深分布変化解析の研究	荒川 逸人	防災科学技術研究所雪氷防災研究センター・主幹研究員	H31~R3	3年
	2-19	雪の処理方法の違いが微隕石に与える影響の評価	野口 高明	京都大学大学院理学研究科・教授	R2~R4	3年
	2-20	リュツォ・ホルム岩体東部および南部の変成作用と地体構造区分	馬場 壮太郎	琉球大学教育学部・教授	R2~R4	3年
	2-21	古生代炭酸塩岩のカルシウム安定同位体から探る表層環境変動	可児 智美	熊本大学大学院先端科学研究部基礎科学部門・助教	R2~R4	3年
	2-22	誘導結合プラズマ質量分析法を用いた南極隕石分類法の確立	白井 直樹	東京都立大学大学院理学研究科化学専攻・助教	R2~R4	3年
	2-23	南極の氷河性迷子石と環太平洋地域の津波性巨礫の粘性残留磁気による定置機構の解明	中村 教博	東北大学高度教養教育・学生支援機構・教授	R2~R4	3年
	2-24	南極氷試料中の火山灰・風成塵・宇宙塵に関する岩石磁気学的研究	小田 啓邦	産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門	R2~R4	3年
	2-25	衛星搭載合成開口レーダ(SAR)データの総合的な解析による南極・アムンゼン湾周辺の長期モニタリング	大村 誠	高知県立大学文化学部・教授	R2~R4	3年
	2-26	南極大陸で回収されたエンスタタイトコンドライト隕石の化学組成に関する研究	海老原 充	早稲田大学教育・総合科学学術院・教授	R2~R3	2年
	2-27	東南極リュツォ・ホルム岩体における褶曲帯・延性断層岩帯・地震性断層岩帯の形成テクトニクスに関する研究	豊島 剛志	新潟大学自然科学系(理学部)・教授	R2~R3	2年
	3-13	炭素質コンドライトの分類学的研究	木村 眞	茨城大学理学部・名誉教授	R3~R5	3年
	3-14	炭素質コンドライト炭酸塩の同位体比研究	牛久保 孝行	海洋研究開発機構高知コア研究所・副主任研究員	R3~R5	3年
	3-15	原始惑星マントル起源隕石のカンラン石方位解析から探る母天体内部進化	三河内 岳	東京大学総合研究博物館・教授	R3~R5	3年
	3-16	ジルコンU-Pb年代によるグリーンランド中太古代地質帯における火成史の解明	森下 知晃	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系・教授	R3~R4	2年
3-17	南極プレート内の各構造区の特徴と変遷過程の解明	松本 剛	琉球大学理学部・教授	R3~R5	3年	

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	3-18	南極における野外長期絶対重力測定手法に関する研究	新谷 昌人	東京大学地震研究所・教授	R3～R5	3年
生物圏	31-27	南極の短波長紫外線が生物に及ぼす影響に関する生化学的研究と気象データの統計解析	高橋 哲也	島根大学人間科学部・教授	H31～R3	3年
	31-28	南極クマムシの生活史戦略に関する研究	辻本 恵	慶應義塾大学環境情報学部・専任講師	H31～R3	3年
	31-29	極域の光合成生物の生理応答機構の解析	菓子野 康浩	兵庫県立大学大学院生命理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-30	南極沿岸における海産微小動物相とその特徴の解明	上野 大輔	鹿児島大学大学院理工学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-31	沿岸海跡湖能取湖におけるアイスアルジーの一次生産の動態と動物プランクトンの分布動態の関りについて	西野 康人	東京農業大学生物産業学部・教授	H31～R3	3年
	31-32	南極湖沼生態系の数理モデル化に関する研究	佐々木 顕	総合研究大学院大学・教授	H31～R3	3年
	31-34	南極におけるレジオネラ属菌とその宿主となるアメーバの解析	石井 良和	東邦大学医学部微生物感染症学講座・教授	H31～R3	3年
	31-35	極地土壌のCO2放出と土壌ガス拡散係数に関する研究	米村 正一郎	県立広島大学生物資源科学部・教授	H31～R3	3年
	31-36	極域に生息する植物寄生性糸状菌の多様性と生態の解明	東條 元昭	大阪府立大学大学院生命環境科学研究科・教授	H31～R3	3年
	31-40	南極をめぐる科学と国際動向に関する社理連携研究	柴田 明穂	神戸大学大学院国際協力研究科・教授、極域協力研究センター長	H31～R3	3年
	2-28	亜北極生態系における菌類を中心とした生物多様性の比較評価	大園 享司	同志社大学理工学部・教授	R2～R4	3年
	2-29	極地に生息している菌類の多様性の変化の解明	辻 雅晴	旭川工業高等専門学校 物質化学工学科・准教授	R2～R4	3年
	2-30	極域地衣類の菌類・藻類・共生微生物の種組成に関する研究	長沼 毅	広島大学大学院統合生命科学研究科・教授	R2～R4	3年
	2-31	南極のアイスコア試料や動物化石資料のゲノム解析による生物相変遷解明	瀬川 高弘	山梨大学総合分析実験センター・特任助教	R2～R4	3年
	2-32	高緯度北極陸域生態系に対する温暖化の影響	中坪 孝之	広島大学大学院統合生命科学研究科・教授	R2～R4	3年
	2-33	海洋酸性化がハダカカメガイ(通称クリオネ)に与える影響評価	山崎 友資	蘭越町貝の館・学芸員	R2～R4	3年
	2-34	南極湖沼底マッピングROVの開発	後藤 慎平	東京海洋大学学術研究院・助教	R2～R4	3年
	3-19	南極越冬隊の食生活に関する研究 ～災害食への応用～	野口 律奈	帝京平成大学健康メディカル学部健康栄養学科・准教授	R3～R5	3年
	3-20	情報通信超音波テレメリーシステムを用いたアデリーペンギンの群れ行動解析	三田村 啓理	京都大学フィールド科学教育研究センター・教授	R3～R5	3年
	3-21	寒冷環境下における植物プランクトンの増殖特性の解明	高澤 伸江	京都先端科学大学バイオ環境学部・准教授	R3～R5	3年
3-22	季節海氷域におけるアイス・アルジーの糖類生産に関する研究	野坂 裕一	東海大学生物学部・助教	R3～R5	3年	
3-23	寒冷地生態系におけるTBI法多地点比較によるリター分解プロセスの解明	和田 直也	富山大学学術研究部理学系・教授	R3～R5	3年	

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	3-24	蛍光分光装置を用いた溶存有機物の組成解析	木田 森丸	神戸大学農学研究科・助教	R3～R5	3年
極地工学	31-37	南極昭和基地におけるエネルギー供給に関する極地工学研究	小原 伸哉	北見工業大学工学部地球環境工学科・教授	H31～R3	3年
	31-38	南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究	香川 博之	公立小松大学生産システム科学部・教授	H31～R3	3年
	31-39	極地建築・土木に関する雪氷防災工学研究	金 高義	福島工業高等専門学校・助教	H31～R3	3年
	3-25	深層掘削機の次世代コンピュータの実用化	高田 守昌	長岡技術科学大学工学研究科・助教	R3～R4	2年
	3-26	第Ⅲ期ドーム計画における氷床深層掘削への対応および新たな掘削・検層技術の検討	古崎 睦	旭川工業高等専門学校物質化学工学科・教授	R3～R5	3年

3. 研究集会

No.	研究課題名	研究代表者	所属・職
3集1	中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究集会	津田 卓雄	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授
3集2	STE研究連絡会現象報告会および現象解析ワークショップ(極域を軸とする宇宙天気現象の予測精度向上に向けて)	西谷 望	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授
3集3	南極昭和基地における次世代ネットワークインフラを活用した研究計画	岡田 雅樹	国立極地研究所宙空圏研究グループ・准教授
3集4	太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用	阿部 修司	九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター・学術研究員
3集5	SuperDARN研究集会	行松 彰	国立極地研究所 研究教育系・准教授
3集6	PANSY研究集会	佐藤 薫	東京大学大学院理学系研究科・教授
3集7	南極海洋-海水-氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会	青木 茂	北海道大学低温科学研究所・准教授
3集8	南極氷床・海水・海洋システムの研究に関する今後10年を見据えた将来構想	溝端 浩平	東京海洋大学学術研究院・助教
3集9	南極テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討	久野 成夫	筑波大学数理物質系・教授
3集10	寒冷域における降雪観測や雪結晶の研究と教育の今後の展望	島田 互	富山大学理学部・准教授
3集11	南極域における衛星観測データを用いた気候に関する研究集会	鈴木 香寿恵	法政大学・教務助手
3集12	南極エアロゾル研究会	原 圭一郎	福岡大学理学部・助教
3集13	2021年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会	佐藤 陽祐	北海道大学大学院理学研究院北海道気象予測技術分野北海道気象技術センター・特任准教授
3集14	無人機の活用による極地観測の展開	林 政彦	福岡大学理学部・教授
3集15	2021年度南極メソスケール雪氷研究集会	杉浦 幸之助	富山大学学術研究部都市デザイン学系・教授
3集16	極域データの保全・公開と利活用に関する研究集会-II	金尾 政紀	データサイエンス共同利用基盤施設/国立極地研究所・准教授
3集17	南極域地圏変動から探る南極氷床・南大洋変動が及ぼす全球システム変動へのインパクト	奥野 淳一	国立極地研究所・助教
3集18	北極海における固体地球物理観測研究の挑戦	藤井 昌和	情報・システム研究機構 国立極地研究所・助教

本報告書は、令和 3 年度で終了した共同研究の各研究代表者から提出された報告をとりまとめたものである。