

令和 4 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
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	6
2-4	SuperDARN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	8
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	11
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	14
2-9	低緯度電離圏電場の太陽風変動依存性	橋本 久美子	16
4-5	アークオーロラの一般理論	田中 高史	18
4-7	しらせ搭載全天カメラによるオーロラ・大気光観測データ解析と観測システム改良	坂野井 健	20

(2) 気水圏

2-11	極地アイスコアの金属成分分析	鈴木 利孝	23
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	25
2-14	氷床フィルムの物理解析	大野 浩	27
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	30
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	32
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	34
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	36

(3) 地圏

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	39
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	43
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	45
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	47
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	49
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	52
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	54
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	56

(4) 生物圏

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	59
------	------------------------------	-------	----

2-29	北極・南極試料を用いた菌株の確立とそれらの全ゲノム解析	辻 雅晴	.....	61
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	.....	63
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	.....	66
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	.....	69
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	.....	72

Ⅱ. 研究集会報告

研究集会

No.	研究課題名	ページ
4集1	中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究集会	75
4集2	SuperDARN研究集会	76
4集3	PANSY研究集会	77
4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	78
4集5	EISCAT研究集会	79
4集6	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）	80
4集7	氷床域における長期無人気象・雪氷観測および温暖化影響に関する研究集会	81
4集8	大気—雪氷—海洋間の物質交換・循環	82
4集9	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	83
4集10	南極エアロゾル研究会	84
4集11	地上・衛星受信データからみる氷床上の降雪と表面融解にかんする研究	86
4集12	南極領域スケール雪氷研究集会	88
4集13	2022年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会	89
4集14	無人機の利用による極地観測の展開	91
4集15	南大洋海水域における生物地球化学的研究のための鉄分観測技術の構築	92
4集16	冷水性翼足類クリオネ属の基礎的学術研究の現状および将来計画に関する研究集会	93
4集17	自然科学系アーカイブズ研究会	中止
4集18	2022年 南極医学・医療ワークショップ	94

Ⅲ. 令和4年度共同研究課題一覧

1.	令和4年度共同研究実施件数	97
2.	一般共同研究	98
3.	研究集会	100

1. 記号の説明

◎・・・・研究代表者

2. 表記例

(研究課題)	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
(研究代表者)	
(共同研究者)	◎白井 直樹 神奈川大学理学部化学科・准教授 海老原 充 東京都立大学総合科学学術院・名誉教授／ 客員教授
(担当教員)	(国立極地研究所) 山口 亮 準教授
(研究期間)	令和2年度 ～ 令和4年度 (3か年)

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（1）宙 空 圏

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

◎名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授 塩川和夫
 名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授 大塚雄一
 (国立極地研究所)
 門倉昭 教授、小川泰信 教授、江尻省 准教授
 令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

本研究グループは、大気光の撮像や、その発光高度での風速、温度を計測することができる超高層大気イメージングシステム (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers-OMTIs) を開発し、電離圏・熱圏・中間圏の大気・プラズマダイナミクスを研究している。全天カメラ 21 台、ファブリ・ペロー干渉計 5 台、掃天フォトメータ 3 台、分光温度フォトメータ 5 台で、ロシア、国内 4 か所、オーストラリア、タイ、インドネシア、カナダ、ノルウェー、米国 (アラスカ)、ナイジェリア、アイスランドでそれぞれ自動観測を行い、オーロラや超高層大気変動に関する新しい科学成果を得た。これらの機器はすべて、国立極地研究所の光学校正実験施設を用いて較正が行われてきた。これらの機器を使って、オーロラに伴う熱圏風のダイナミクス、大気重力波の伝搬特性、

プラズマの不規則構造の緯度・季節依存性、磁気嵐に伴う低緯度オーロラの出現特性などを調べた。これらの研究成果は、以下にリストした 19 編の論文として公表されている。

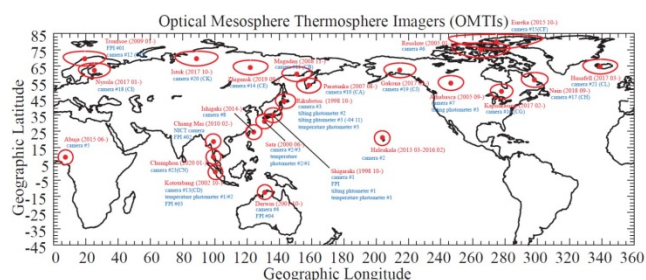


図1：OMTIsの光学観測機器の配置

[研究発表]

研究発表 (本共同研究に基づいて、国立極地研究所の光学校正システムを用いて較正された光学観測機器による研究成果。査読ありの論文、令和2年度以降。)

1. Hosokawa K., K. Takami, Su. Saito, Y. Ogawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C.-H. Chen and C.-H. Lin, Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 72:56, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01187-1>, 2020.
2. Inaba Y., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Otsuka, A. Oksanen, A. Shinbori, A. Yu. Gololobov, Y. Miyoshi, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T.-F. Chang, B.-J. Wang, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto, Y. Kasaba, M. Shoji, I. Shinohara, and C. Stolle, Plasma and field observations in the magnetospheric source region of a stable auroral red (SAR) arc by the Arase satellite on 28 March 2017, *J. Geophys. Res.*, 125, <https://doi.org/10.1029/2020JA028068>, 2020.
3. Oyama, S., 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 1 red arc appeared at 68-degree MLat at a pseudo breakup during geomagnetically quiet conditions, *J. Geophys. Res.*, 125, <https://doi.org/10.1029/2020JA028468>, 2020.
4. Hosokawa K., M. Nagata, K. Shiokawa, and Y. Otsuka, What controls the luminosity of polar cap airglow patches?: implication from airglow measurements in Eureka, Canada in comparison with SuperDARN convection pattern, *Polar Science*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100608>, 2020.
5. Yadav S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Connors, and J.-P. St. Maurice, Multi-wavelength imaging observations of STEVE at Athabasca, Canada, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028622>, 2021.
6. V. Lakshmi Narayanan, S. Nozawa, S. Oyama, I. Mann, K. Shiokawa, Y. Otsuka, N. Saito, S. Wada, T. D. Kawahara, and T. Takahashi, Formation of an additional density peak in the bottomside of sodium layer associated with the passage of multiple mesospheric frontal systems, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2343–2361, <https://doi.org/10.5194/acp-21-2343-2021>, 2021.
7. Inaba, Y., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Otsuka, M. Connors, I. Schofield, Y. Miyoshi, S. Imajo, A. Shinbori, A. Y. Gololobov, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, T. F. Chang, B.-J. Wang, K. Asamura, S. Yokota, S. Kasahara, K. Keika, T. Hori, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto,

- S. Matsuda, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, M. Shoji, M. Kitahara, S. Nakamura, I. Shinohara, H. E. Spence, G. D. Reeves, R. J. Macdowall, C. W. Smith, J. R. Wygant, J. W. Bonnell, Multi-event Analysis of Plasma and Field Variations in Source of Stable Auroral Red (SAR) Arcs in Inner Magnetosphere during Non-storm-time Substorms, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA029081>, 2021.
8. Okoh, D. I., A. B. Rabiou, K. Shiokawa, Y. Otsuka, Q. Wu, G. K. Seemala, and Z. T. Katamzi-Joseph, An experimental investigation into the possible connections between the zonal neutral wind speeds and equatorial plasma bubble drift velocities over the African equatorial region, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 220, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105663>, 2021.
 9. Nakamura, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka, A. Shinbori, Y. Miyoshi, M. Connors, H. Spence, G. Reeves, H. O. Funsten, R. MacDowall, C. Smith, J. Wygant, and J. Bonnell, Simultaneous observation of two isolated proton auroras at subauroral latitudes by a highly sensitive all-sky camera and Van Allen Probes, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA029078>, 2021.
 10. Kawai, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Oyama, Y. Kasaba, Y. Kasahara, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, S. Nakamura, A. Matsuoka, S. Imajo, Y. Kazama, Shiang-Yu, Wang, Sunny W. Y. Tam, T. F. Chang, B. J. Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, K. Keika, T. Hori, Y. Miyoshi, C. Jun, M. Shoji, and I. Shinohara, First simultaneous observation of a nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance from the ground and a magnetospheric satellite, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA029086>, 2021.
 11. Kim, H., K. Shiokawa, J. Park, Y. Miyoshi, Y. Miyashita, C. Stolle, H. Kim Connor, J. Hwang, S. Buchert, H.-J. Kwon, S. Nakamura, K. Nakamura, S. Oyama, Y. Otsuka, T. Nagatsuma, and K. Sakaguchi, Isolated Proton Aurora Driven by EMIC Pc1 Wave: PWING, Swarm, and NOAA POES Multi-Instrument Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 48, <https://doi.org/10.1029/2021GL095090>, 2021.
 12. Diaz Pena, J., J. Semeter, Y. Nishimura, R. Varney, A. Reimer, M. Hairston, M. Zettergren, M. Hirsch, O. Verkhoglyadova, K. Hosokawa, and K. Shiokawa, Auroral heating of plasma patches due to high-latitude reconnection, *J. Geophys. Res.*, 126, <https://doi.org/10.1029/2021JA029657>, 2021.
 13. Yadav, S., K. Shiokawa, S. Oyama, Y. Inaba, N. Takahashi, K. Seki, K. Keika, Tzu-Fang Chang, S. W. Y. Tam, B.-J. Wang, Y. Kazama, S.-Y. Wang, K. Asamura, S. Kasahara, S. Yokota, T. Hori, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, M. Shoji, Y. Kasahara, A. Matsuoka, S. Matsuda, C-W Jun, S. Imajo, Y. Miyoshi, and I. Shinohara, Study of an equatorward detachment of auroral arc from the oval using ground-space observations and the BATS-R-US - CIMI model, *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JA029080, <https://doi.org/10.1029/2020JA029080>, 2021.
 14. Nakamura, K., K. Shiokawa, M. Nose, T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, H. Spence, G. Reeves, H. O. Funsten, R. MacDowall, C. Smith, J. Wygant, J. Bonnell, and I. Mann, Multi-event study of simultaneous observations of isolated proton auroras at subauroral latitudes using ground all-sky imagers and the Van Allen Probes, *J. Geophys. Res.*, 127, e2022JA030455, <https://doi.org/10.1029/2022JA030455>, 2022.
 15. Yadav, S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Connors, Statistical study of subauroral arc detachment at Athabasca, Canada: new insights on STEVE, *J. Geophys. Res.*, 127, e2022JA029856, <https://doi.org/10.1029/2021JA029856>, 2022.
 16. Naito, H., K. Shiokawa, Y. Otsuka, H. Fujinami, T. Tsuboi, T. Sakanoi, A. Saito, and T. Nakamura, Three-dimensional Fourier analysis of atmospheric gravity waves and medium-scale traveling ionospheric disturbances observed in airglow images in Hawaii over three years, *J. Geophys. Res.*, 127, e2022JA030346, <https://doi.org/10.1029/2022JA030346>, 2022.
 17. Oyama, S., H. Vanhamäki, L. Cai, A. Aikio, M. Rietveld, Y. Ogawa, T. Raita, M. Kellinsalmi, K. Kauristie, B. Kozelov, A. Shinbori, K. Shiokawa, T. T. Tsuda, T. Sakanoi, Thermospheric wind response to a sudden ionospheric variation in the trough: Event at a pseudo breakup during geomagnetically quiet conditions, *Earth, Planets and Space*, 74:154, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01710-6>, 2022.
 18. Kawai, K., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Oyama, M. G. Connors, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Nakamura, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, A. Shinbori, A. Matsuoka, I. Shinohara, and Y. Miyoshi, Multi-event analysis of magnetosphere-ionosphere coupling of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from the ground and the Arase satellite, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA030542, <https://doi.org/10.1029/2022JA030542>, 2023.
 19. Lyons, L. R., Y. Nishimura, J. Liu, Y. Zou, W. A. Bristow, S. Yadav, E. Donovan, N. Nishitani, K. Shiokawa, and K. Hosokawa, Unsolved problems: Mesoscale Polar Cap Flow Channels' Structure, Propagation, and Effects on Space Weather Disturbances, *Frontiers Astronomy and Space Sciences*, in press, 2023.

SuperDARN による極域・中緯度における熱圏・電離圏・磁気圏広域ダイナミクスの比較研究

◎西谷 望 名古屋大学太陽地球環境研究所・准教授
 小川忠彦 名古屋大学・名誉教授
 (国立極地研究所)
 行松 彰・准教授
 令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

SuperDARN データを始めとする地上観測データや人工衛星 ERG のデータを活用することにより、熱圏・電離圏・磁気圏システムの中緯度・高緯度間相互作用、およびその特性の違いの解明を進めた。具体的には極域 SuperDARN データや北海道・陸別第一・第二 HF レーダー観測等中緯度 SuperDARN データ、ERG 衛星データを中心としてイベント解析、統計解析を実施した。これと同時に、他の地上・衛星観測データ、およびモデル計算結果との比較を行っていくことにより、極域・中緯度の熱圏・電離圏・磁気圏の比較研究を行い、また両者間のエネルギー輸送過程に関する解明を進めた。並行して、統計解析用 SuperDARN 北海道・陸別第一・第二レーダーのデータベースを整備した。具体的な成果は以下の通りである。

1. 夜間中緯度 MSTID の統計的特性の解明

SuperDARN や GNSS TEC 受信機網、大気光観測カメラをはじめとする各種観測装置により、夜間中緯度 MSTID の特性が調べられてきているが、その統計的的特性、特に上記の装置の中では SuperDARN のみで観測できる MSTID に伴う分極電場については、その特性が解明されていなかった。この主な理由として、2次元の波動の波数ベクトルや速度ベクトル名でのパラメータを同定する手法が確立されていないことが挙げられる。本テーマにおいては、大気光データの解析に近年活用されている 3D-FFT 手法を SuperDARN データに適用することにより、10 年以上にわたる SuperDARN 北海道・陸別レーダーで観測された MSTID に伴う分極電場の統計的的特性(日変化、季節変化、太陽活動度依存性)を調べることに成功した。特に、夜間中緯度 MSTID の発生率は太陽活動度と逆相関になることが見いだされた。これは、夜間中緯度 MSTID の生成メカニズムを解明するために極めて重要な手掛かりとなるものであり、また、高緯度の SuperDARN に同様の手法を適用することにより、高緯度・中緯

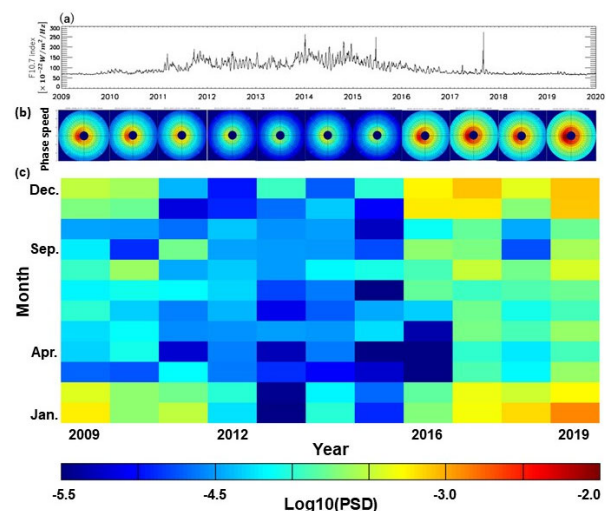


図 1： F10.7 指数でみた太陽活動の長期変動(上段)と、北海道・陸別第一 HF レーダーで見た平均的な夜側 MSTID の伝搬方向の確率密度分布(中段)及び、月ごとの夜側 MSTID の強度分布の関係(Hazeyama et al., 2022)。

度の夜間 MSTID の発生メカニズムの違いを議論することができる見通しを付けた。

2. SuperDARN 遠隔受信機データによる電離圏変動の研究

SuperDARN では通常レーダーより高緯度側の観測が可能であり、レーダー装置より低緯度側の電離圏変動については観測することができないと考えられてきた。一方、SuperDARN レーダーは一部の電波が backlobe beam としてレーダーの低緯度側漏れ出ており、これを遠隔地に設置した受信機で観測することにより、レーダーより低緯度側電離圏変動を観測することも可能である。本テーマにおいては、SuperDARN 北海道・陸別第一レーダーの backlobe beam 方向に位置する名古屋大学東山キャンパスの建物の屋上にダイポールアンテナを設置し、それを廉価な USRP 装置で構成した受信機に接

続してレーダーの電波を観測するという試みを実施した。初期結果として、電離圏反射高度(travel time)およびその変化率(Doppler shift)のパラメータの日変動および季節変動を導出することに成功し、これが従来の結果と一致していることを確認した。これは統計的性質を確認したに過ぎないが、磁気嵐や地震発生・火山噴火、また太陽フレア発生時における電離圏変動の物理量を導出する道筋をつけたことにもなる。さらには、遠隔受信機の運用に際して取得したノウハウは、現在準備を進めているイメージング受信機の開発にとって非常に有益な情報となっている。

3. トンガ火山噴火に伴う電離圏変動の研究

トンガ火山噴火によって引き起こされる電離圏擾乱を解析し、GNSS 全電子数と比較した結果、ダ

イナモ電場の反対半球側への投影により、気圧波の到達より早く北半球で擾乱が観測されていることを示した。また、気圧波の到達に伴う電離圏擾乱現象についても観測に成功している。これら一連の結果は、SuperDARN レーダーが地表面および下層大気を期限とする変動をモニターできるということを示したということで重要な意義を持つものである。

4. その他の研究

その他、SAPS 発生の地磁気活動度・地理経度依存性、SAPS と電離圏プラズマアウトフローとの関連性、MHD 波動の発生特性等について様々な興味深い事項が見出され、極域・中緯度現象の比較研究を進展させることができた。

[参考文献]

1. Atsuki Shinbori, Yuichi Otsuka, Takuya Sori, Michi Nishioka, Septi Perwitasari, Takuo Tsuda & Nozomu Nishitani, Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth Planets Space* 74, 106 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01665-8>.
2. W. Hazeyama, N. Nishitani, T. Hori, T. Nakamura, S. Perwitasari, Statistical Study of Seasonal and Solar Activity Dependence of Nighttime MSTIDs Occurrence Using the SuperDARN Hokkaido Pair of Radars, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 127, Issue 4, <https://doi.org/10.1029/2021JA029965>, 2022.
3. P. V. Ponomarenko, E. C. Bland, K. A. McWilliams, N. Nishitani, On the Noise Estimation in Super Dual Auroral Radar Network Data, *Radio Science*, Volume 57, Issue 6, <https://doi.org/10.1029/2022RS007449>, 2022.
4. W. Wang, J. J. Zhang, C. Wang, N. Nishitani, J. Y. Yan, A. L. Lan, X. Deng, H. B. Qiu, Statistical Characteristics of Mid-Latitude Ionospheric Irregularities at Geomagnetic Quiet Time: Observations From the Jiamusi and Hokkaido East SuperDARN HF Radars, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Volume 127, Issue 1, <https://doi.org/10.1029/2021JA029502>, 2022.
5. Jiaojiao Zhang, Jiyao Xu, Wei Wang, Guojun Wang, J. Michael Ruohoniemi, Atsuki Shinbori, Nozomu Nishitani, Chi Wang, Xiang Deng, Ailan Lan, Jingye Yan, Oscillations of the Ionosphere Caused by the 2022 Tonga Volcanic Eruption Observed With SuperDARN Radars, *Geophysical Research Letters*, Volume 49, Issue 20, <https://doi.org/10.1029/2022GL100555>, 2022.
6. A. A. Sinevich, A. A. Chernyshov, D. V. Chugunin, A. V. Oinats, L. B. N. Clausen, W. J. Miloch, N. Nishitani, M. M. Mogilevsky, Small-Scale Irregularities Within Polarization Jet/SAID During Geomagnetic Activity, *Geophysical Research Letters*, Volume 49, Issue 8, <https://doi.org/10.1029/2021GL097107>, 2022.
7. Xueling Shi, Dong Lin, Wenbin Wang, Joseph B. H. Baker, James M. Weygand, Michael D. Hartinger, Viacheslav G. Merkin, J. Michael Ruohoniemi, Kevin Pham, Haonan Wu, Vassilis Angelopoulos, Kathryn A. McWilliams, Nozomu Nishitani, Simon G. Shepherd, Geospace Concussion: Global Reversal of Ionospheric Vertical Plasma Drift in Response to a Sudden Commencement, *Geophysical Research Letters*, Volume 49, Issue 19, <https://doi.org/10.1029/2022GL100014>, 2022.
8. Nishitani, N., Y. Hamaguchi, and T. Hori, Development of remote HF wave receiver in the backlobe

- direction of the SuperDARN Hokkaido East radar: Initial observations, *Polar Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100669>, 2021.
9. Natsuo Sato, Tadahiko Ogawa, Hisao Yamagishi, Akira Sessai Yukimatu, Nozomu Nishitani, et al., History of Japanese SuperDARN: Initiation of SENSU Syowa radars and progress of Japanese radar project, *Polar Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100671>, 2021.
 10. S. Chakraborty, L. Qian, J. M. Ruohoniemi, J. B. H. Baker, J. M. McInerney, N. Nishitani, The Role of Flare-Driven Ionospheric Electron Density Changes on the Doppler Flash Observed by SuperDARN HF Radars, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 126, Issue 8, <https://doi.org/10.1029/2021JA029300>, 2021.
 11. Nakano, S., T. Hori, K. Seki, and N. Nishitani, A framework for estimating spherical vector fields using localized basis functions and its application to SuperDARN data processing, *Earth Planets Space*, 72:46, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01168-4>, 2020.
 12. Alexander V. Koustov, Sydney Ullrich, Pavlo V. Ponomarenko, Robert G. Gillies, David R. Themens & Nozomu Nishitani, Comparison of SuperDARN peak electron density estimates based on elevation angle measurements to ionosonde and incoherent scatter radar measurements. *Earth Planets Space* 72, 43 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01170-w>
 13. J.-P. St.-Maurice, N. Nishitani, On the Origin of Far-Aspect Angle Irregularity Regions Seen by HF Radars at 100-km Altitude, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 125, Issue 6, <https://doi.org/10.1029/2019JA027473>, 2020.
 14. L. V. Goodwin, Y. Nishimura, A. J. Coster, S. Zhang, N. Nishitani, J. M. Ruohoniemi, B. J. Anderson, Q.-H. Zhang, Dayside Polar Cap Density Enhancements Formed During Substorms, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 125, Issue 10, <https://doi.org/10.1029/2020JA028101>, 2020.
 15. Elvira Astafyeva, Mala S. Bagiya, Matthias Förster, and Nozomu Nishitani, Unprecedented hemispheric asymmetries during a surprise ionospheric storm: a game of drivers, *J. Geophys. Res.*, <https://doi.org/10.1029/2019JA027261>, 2020.

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
 櫻井 敬久 山形大学理学部・名誉教授
 武山 美麗 山形大学理学部・技術専門職員
 (国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

本研究は、高緯度と中緯度の大気中宇宙線生成核種 Be-7 の長期連続観測により、太陽活動と Be-7 の年変動の関係を調べることを目的としている。太陽活動の第23期下降開始期から第24期静全期、そして第25期立ち上がり期にあたる2003年秋から2022年末までの19年間の極域(アイスランド)での観測データが蓄積された。観測は、フッサフェルにハイボリューム大気サンプラーを設置して3日ごとに大気中浮遊塵をガラスろ紙に捕集し、山形大学にてガンマ線測定分析により Be-7 の濃度を測定している。図1に観測された Be-7 濃度と太陽黒点数の日変動を示す。 Be-7 濃度データの27日移動平均プロファイルは、明らかに季節変動があることを示している。2020年10月から2022年8月の Be-7 データの欠損は、現地サンプリングサイトの火災のため大気捕集の再開準備に時間を要したためである。

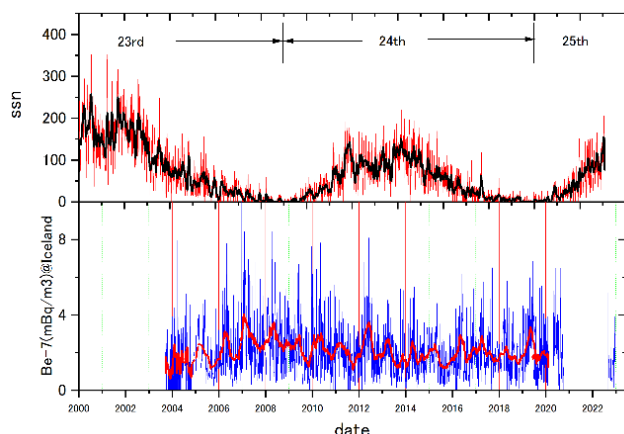


図1. アイスランドにおける大気中 Be-7 濃度の日変動(下段パネル)および太陽黒点数の日変動(上段パネル)

図2は、高緯度のアイスランド(北緯 64.7°)と中緯度の山形(北緯 38.25°)における大気中 Be-7 濃度および太陽黒点数(SSN)¹⁾、Oulu(北緯 65°)での地上中性子強度²⁾の年変動である。第23から

第24太陽活動期にあたる2004年から2019年の Be-7 濃度の平均値と標準偏差は、アイスランドと山形において各々、 $2.1 \pm 0.4 \text{ mBq/m}^3$ 、 $5.1 \pm 0.7 \text{ mBq/m}^3$ であり、中緯度山形の Be-7 濃度はアイスランドに比べ約2.5倍高い値を示している。相対標準偏差はアイスランドと山形の Be-7 濃度、地上中性子強度について各々、17%、13%、4%であり、 Be-7 濃度は宇宙線中性子強度に比べ変動が大きい。

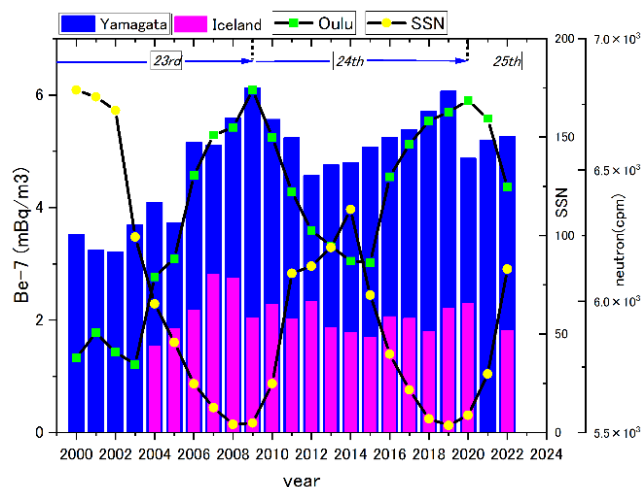


図2. 2000年から2022年までの高緯度、中緯度の大気中 Be-7 濃度、太陽黒点数(SSN)、Ouluでの中性子強度の年変動

図3は、アイスランドと山形における Be-7 濃度の季節変動を2004年から2019年間の平均値により示している。高緯度のアイスランドでは、春の4月と5月にピークがあり秋はフラットな一山の季節変動である。これに対して中緯度の山形では、春の3月、4月、5月のピークと秋の10月にピークがあり、夏の7月、8月に谷となる二山の季節変動を示しており、明らかにアイスランドの季節変動と異なっている。

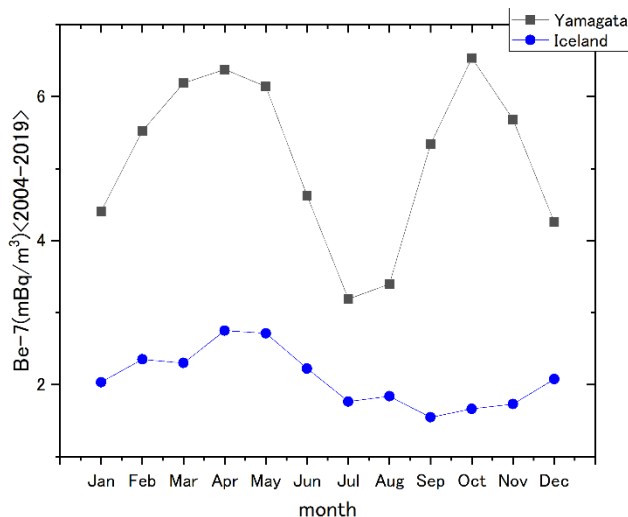


図3. アイスランドと山形における Be-7 濃度の季節変動

この要因として地球規模での大気の流れ拡散が考えられる。図4は、HYSPLITにより計算した2019年の山形とアイスランドに到達する各月の平均流跡線を示している。図4の山形に到達している6月、7月、8月の流跡線（赤色）は中緯度を通過しているのに対してその他の各月の流跡線は高緯度からの流入を示しており、春、秋に Be-7 濃度のピークを示す要因と考えられる。一方、アイスランドへの流

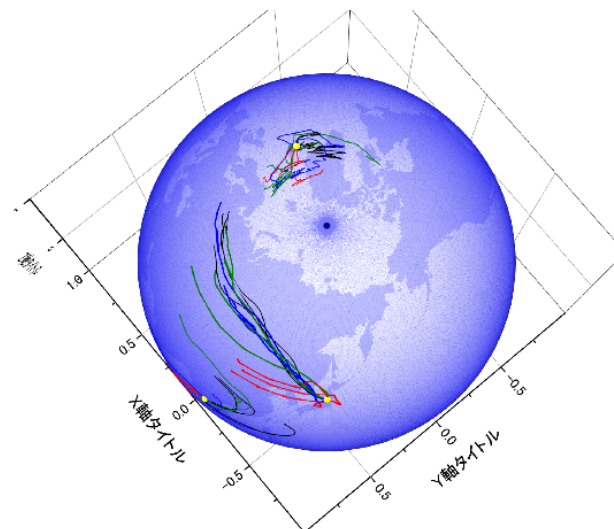


図4. HYSPLITにより計算された2019年におけるアイスランドおよび山形に到達する流跡線（月平均）。赤線は6、7、8月。

跡線は、かなり局所的であり春のピークに直接対応する流跡線は判別できない。しかし、高緯度帯の圏海面高度は3月、4月、5月に低くなることから成層圏成分の流入との関連の可能性を調べる必要があると第25期太陽活動での観測が重要である。

[参考文献]

- 1) Solar Influences Data Analysis Center – SIDC, <http://sidc.oma.be/>
- 2) <http://neutronm.bartol.udel.edu/>

[研究発表]

- 1) “2000年から23年間の大気中宇宙線生成核種 Be-7 濃度変動の観測”、櫻井敬久、門叶冬樹、武山美麗、門倉昭、B. Gunnlaugur 他、日本物理学会 2023 年春季大会 2023.3.23 (online)

(別紙)

研 究 協 力 者 参 加 者 一 覧

		一般共同研究(令和4年度報告)		課題番号	2-5
		研究課題名	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		
		氏名	所属	職	備考
所内 (極地研)					
小計	名				
所外 (極地研以外)	三宅 芙沙	名古屋大学宇宙地球環境研究所	准教授		
	B. Gunnlaugur	Science Institute, University of Iceland	Research Professor		
小計	2 名				
合計	2 名				

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地球惑星科学部門・准教授

(国立極地研究所)

行松彰 准教授

片岡龍峰 准教授

令和2年～令和4年（3か年）

[研究成果]

惑星間空間磁場（IMF）北向き時の極域現象は非常に複雑である。磁気圏で起こっていることが投影されていることは確かだが、直観的に理解できないことが多い。このため、グローバル磁気流体シミュレーションと組み合わせて現象を眺めることが鍵である。本研究では、IMF 北向き時に現れる逆向き電離圏対流の起源について、シミュレーションを基に考察した。逆向き対流は「交換サイクル」と呼ばれる磁束循環を見ていると思われる。この磁束循環は2種類の交換型リコネクションを組み合わせることで起こる。交換型リコネクションは、リコネクション前後で磁力線が属するトポロジー領域が入れ替わるものをいう。本研究により、交換型リコネクションの磁場トポロジーと実際の磁場形状が明らかになった。この知見は、磁気圏物理学だけでなく、広くプラズマ物理学にも有用であると思う。しかしまだ論文発表には至っておらず、この報告では代表的口頭発表1件のみを末尾に示す。以下に研究成果の概要を説明する。

図1はシミュレーションで再現された IMF 北向き時 ($B = 6\text{nT}$, 時計角 $= -30^\circ$) の逆向き電離圏対流である。極冠内に太陽方向の対流が現れるとともに、2つの対流セルの一方(図1北半球では朝方側)が完全に閉磁力線の領域に含まれることが特徴である。この対流パターンは交換サイクル (Watanabe et al., 2018) と呼ばれる磁束循環で説明される。

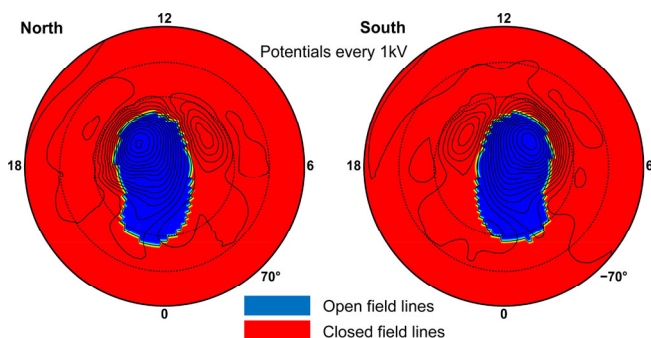


図1 再現された逆向き電離圏対流 (IMF $B_y < 0$)

図2は、磁気圏大規模構造を決める、2つの零点 (A と B) からセパレートリクス (Σ_A と Σ_B) を追跡したものである。 Σ_A と Σ_B の交線がセパレータになる。Dingey 型リコネクションはセパレータ上で起こり、閉磁束が開磁束になったり (昼側)、逆に開磁束が閉磁束になったりする (夜側)。交換型リコネクションはセパレートリクス上で起こり、トポロジー領域が前後で入れ替わるため、開磁束の増減、閉磁束の増減が共にないことが特徴である。交換型リコネクションのトポロジーと磁力線形状を探るため、代表として、零点 A 近傍の Σ_A 上で起こるリコネクションについて詳細に調べた。

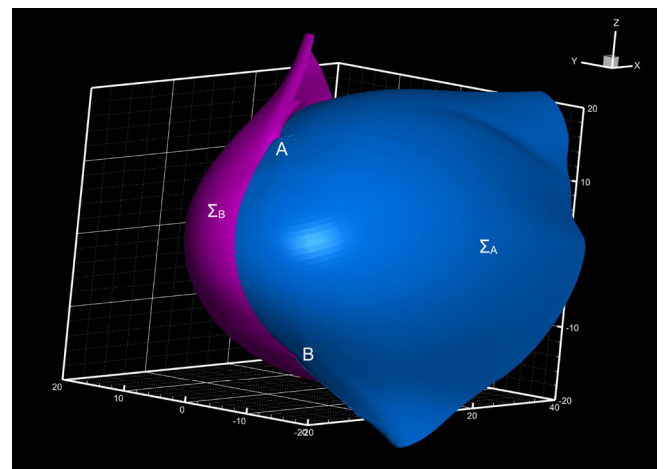


図2 磁気圏の大域トポロジー構造を作る Σ 面

図3左は、 Σ_A 面上における沿磁力線電場を色で表したものである。中央が零点 A で、A から $5R_E$ までの領域を示してある。橙色はセパレータで、白線は Σ_A 面上の磁力線である。 Σ_A 面上には夕方から朝方に向かう沿磁力線電場があり、いずれも交換型リコネクションに伴う X ラインを表している。図3右の模式図に示すように、もし電流を伴わないポテンシャル磁場であれば、 Σ_A 面上の磁力線はセパレータに接する形で点 A に集まるが、リコネクションに付随する電流のために X ラインに沿う形になっている。

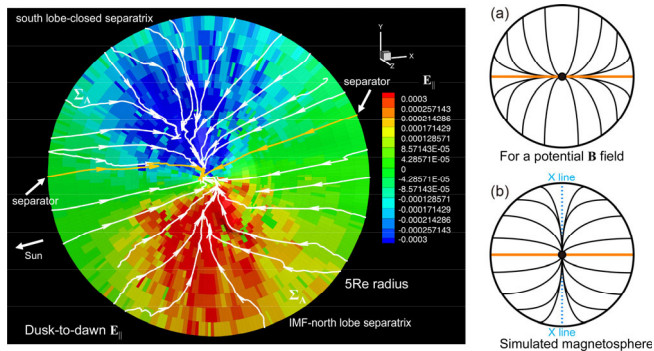


図3 Σ_A 上の沿磁力線電場と磁力線。右は解釈。

図4は図3と同じ面上に、 Σ 面を通過するプラズマの流れを示したものである。 X ラインより太陽側ではプラズマは Σ 面を北から南へ通過し、 X ラインより尾部側ではプラズマは Σ 面を南から北へ通過している。これらのプラズマの流れは交換型リコネクションのそれと一致している。

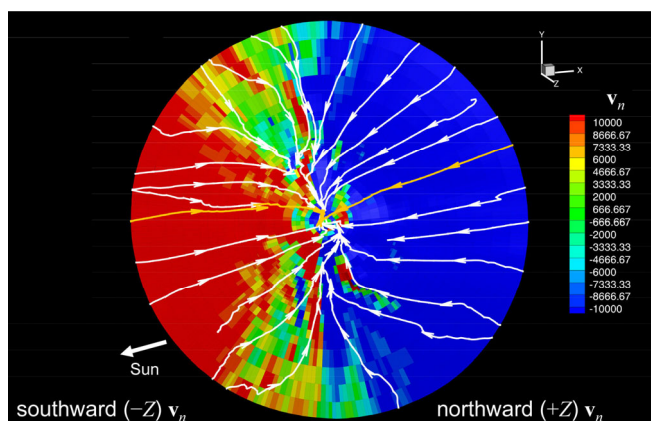


図4 Σ_A 面を通過するプラズマの流れ

図3および図4において、セパレータより上方（朝側）は、南ローブと閉磁力線のリコネクションを表している。以下このリコネクションに注目して、磁力線の形状を調べてみた。次に示す図5はリコネクション前後の磁力線を描いたものである。磁力線1と2がリコネクション前で、磁力線3と4がリコネクション後のものと考えられる。 γ_A に沿う1と4

は区別ができないほど近接している。図4のプラズマ流と合わせてみると、1→3、2→4と磁力線が Σ_A 面を通過したと解釈できる。

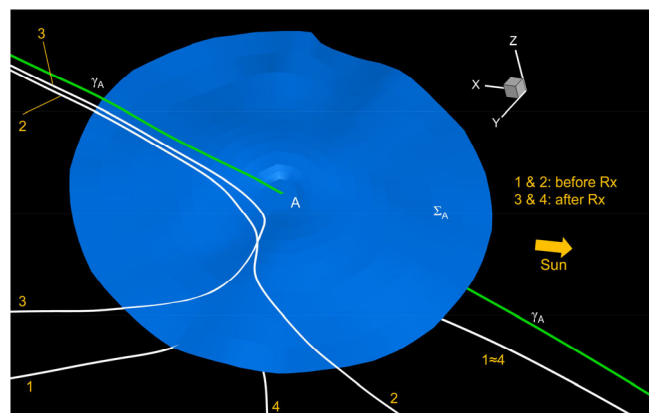


図5 リコネクション前後の磁力線

図6は以上の解釈を模式的に表したもので、図6左が交換型リコネクションのトポロジーを表す。これを X ラインの方向に手前から眺めると、図6右のように X 型の磁場形状が出来ていて、直観的な反平行磁場のつなぎ変わりに見える。しかし実態は「平行磁場の入れ替わり（図6左）」である。これは3次元リコネクションの全てに当てはまり、リコネクションを「反平行磁場のつなぎ変わり」と考えることは、世の中に敷衍している大きな誤りである。

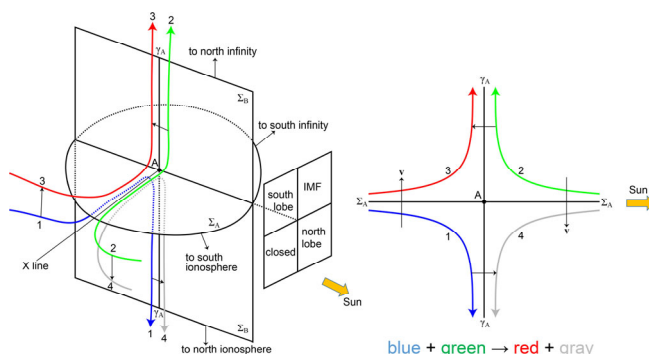


図6 交換型リコネクションのトポロジー

[引用文献]

Watanabe, M., et al. (2018). A magnetohydrodynamic modeling of the interchange cycle for oblique northward interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 272–286.

[研究発表] (口頭)

Watanabe, M., D. Cai, P. Xiong, S. Fujita, & T. Tanaka, Geometric and dynamic properties of interchange reconnection in the Earth's magnetosphere, Japan Geoscience Union Meeting 2022, PEM10-P07.

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
 菊池 崇 名古屋大学宇宙地球環境研究所・名誉教授
 野崎 憲朗 電気通信大学・協力研究員
 (国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 田中良昌 准教授
 令和2年～令和4年(3年間)

太陽風変動によって創られる磁気圏ダイナモは磁気嵐やサブストームを引き起こし、エネルギーの担い手である電場と電流が極域電離圏から中低緯度-赤道の電離圏へ伝搬する。今期3カ年の本研究課題では、HF Doppler サウンダーによる中低緯度電離圏電場の直接観測データと極から赤道に展開する磁力計網のデータを解析し、磁気嵐電場・電流、DP2 電流、磁気急始(SC)電場・電流について、その緯度・地方時特性を調べ、成果を4編の論文として発表した(Hashimoto et al., 2020; Kikuchi et al., 2021a,b, 2022)。以下に、磁気嵐とSCの電場に関する成果を報告する。

1. 磁気嵐時の電離圏電場特性

2015年6月22-23日に発生した磁気嵐は、22日1833 UTにSCが開始し、その後、IMF Bz が-30 nT 以下まで減少し1時間継続したためにSYM-Hが22日2017 UTに-139 nTに達する中規模磁気嵐であった。この磁気嵐中に、日本(飯館、恩納)、台湾(Zhongli)、チェコ(Prague)で同時に運用したHF Doppler サウンダーが、SCと磁気嵐主相および回復相の電離圏電場を観測した。また、電離圏電流は磁気赤道へ伝送され、ペルー(Huancayo)、西太平洋(Guam)およびインド(Tirunelveli)の磁気赤道に設置された磁力計によってEEJ(equatorial electrojet)が観測された。SCと磁気嵐主相時の電場の特性は、夜間(0330 MLT)で西向き、夕方(1930 MLT)で東向きであった。また、EEJはHuancayo (1330MLT)で東向き、Guam (0330MLT)とTirunelveli (00MLT)で西向きであった。これら中緯度電場と赤道電流の向きは、SCのMain impulse および主相のdawn-to-dusk 電場と一致し、かつ夕方昼間

と同じ向きを持つ evening anomaly とも整合した。この解析で特筆すべき結果は、回復相の初期に主相の電場と逆向きの過遮蔽電場が発生することを見いだしたことである。過遮蔽電場は、飯館とプラハで2005 UT から17分間という短時間に発生し、強度は飯館(0500 MLT)で7.6 mV/m、プラハ(2130 MLT)で12.4 mV/mに達する強度であった。高緯度でも、SuperDARNのBlackstone(1500MLT)レーダーが、午後側対流セルの低緯度側(50-60° GML)に反太陽方向のプラズマ流が強まるのを観測し、過遮蔽電場の発生を確認した。過遮蔽電場発生の原因として、IMFが北向きに変化し、磁気嵐が回復相に移行したときに発生したために、磁気圏対流電場減少により遮蔽電場が相対的に卓越することによる過遮蔽の可能性があった。しかし、過遮蔽電場の成長が急激であり、短時間で減衰した過程に注目して、静止軌道衛星ETS-VIIIに搭載された磁力計データを調べたところ、サブストーム開始の特徴である磁気圏尾部磁場の双極化が確認できた。過遮蔽が磁気嵐時のサブストームによるRegion-2沿磁力線電流の増強が原因であると結論した。磁気嵐回復相初期に過遮蔽が発生することは、磁気赤道 counterelectrojet(CEJ)の発生で示されていた(Kikuchi et al., JGR 2008)が、本課題で中緯度電離圏でも強い過遮蔽電場が発生することを示した(Hashimoto et al., EPS 2020)。

2. 磁気急始時の電離圏電場特性

太陽風動圧の急増に伴い発生するSCの電場はHF Doppler サウンダーによって観測され、Doppler 周波数(SCF: SC-associated HF Doppler frequency)は、互いに逆向きのPI電場とMI電場によりSCF (+-)またはSCF (-

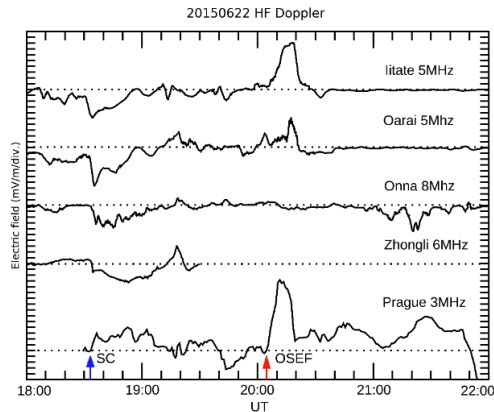


図 1. HF ドップラーサウンダーにより夜間(03-06 MLT)の飯館、大洗、恩納と Zhongli、夕方(19-22 MLT)の Prague で観測された磁気嵐電場。OSEF は overshielding 電場を表す。(Figure 4 of Hashimoto et al., EPS 2020)

+)タイプとなり、PI/MI 電場は昼間と夜間で逆向きになることが知られている。図 2 は、菅平 (SGD 5 MHz) と台湾の Zhongli (ZHL 6.57 MHz) の HF Doppler サウンダーが昼間 (1345 MLT, 1250 MLT) に観測した SCF (+-) と、チェコの Prague (PRG 3.59 MHz) とアルゼンチンの Tucuman (TCM 4.63 MHz) で、夜間 (0545 MLT, 0025 MLT) に観測された SCF (-+) を示す。PI は全ステーションで 04:45:20 UT に開始し、グローバル同時性を示している。HF Doppler サウンダーによる昼側と夜側での同時観測はこれまで例がなく、磁力計データを合わせて、極域から中緯度、さらに赤道での電場・電流の同時性が確認された。極域電離圏から地球上のどの地点へもほぼ瞬時に伝搬することを示している。(Kikuchi, Hashimoto et al., EPS 2021)。

論文リスト (2020, 2021, 2022)

1. Kikuchi, T., T. Araki, K. K. Hashimoto, Y. Ebihara, T. Tanaka, Y. Nishimura, G. Vichare, A. K. Sinha, J. Chum, K. Hosokawa, I. Tomizawa, Y. Tanaka, A. Kadokura (2022), Instantaneous achievement of the Hall and Pedersen-Cowling current circuits in northern and southern hemispheres during the geomagnetic sudden commencement on 12 May 2021, *Front. Astron. Space Sci.* 9:879314. doi: 10.3389/fspas.2022.879314. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2022.879314/full>
2. Kikuchi, T.; Hashimoto, K.K.; Tanaka, T.; Nishimura, Y.; Nagatsuma, T. (2022), Middle Latitude Geomagnetic Disturbances Caused by Hall and Pedersen Current Circuits Driven by Prompt Penetration Electric Fields. *Atmosphere* 2022, 13, 580. <https://doi.org/10.3390/atmos13040580> (INVITED)

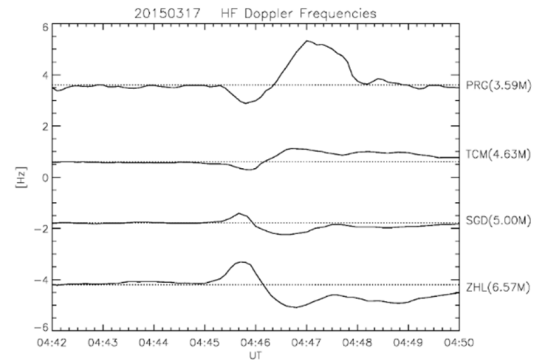


図 2. 夜側の Prague (PRG, 3.59 MHz) (0545 MLT) と Tucuman (TCM, 4.63 MHz) (0025 MLT) の HF Doppler サウンダーが観測した SCF (-+) と、昼側の菅平 (SGD 5 MHz) (1345 MLT) と Zhongli (ZHL 6.57 MHz) (1250 MLT) で観測された SCF (+-)。PI および MI の HF Doppler 周波数は互いに逆向きで、両者共に昼間と夜間で逆向きである。(Figure 2 of Kikuchi, EPS 2021)

3. Kikuchi, T.; Hashimoto, K.K.; Tanaka, T.; Nishimura, Y.; Nagatsuma, T. (2022), Middle Latitude Geomagnetic Disturbances Caused by Hall and Pedersen Current Circuits Driven by Prompt Penetration Electric Fields. *Atmosphere* 2022, 13, 580. <https://doi.org/10.3390/atmos13040580> (INVITED)
4. Hiroyuki Nakata, Kenro Nozaki, Yuhei Oki, Keisuke Hosokawa, Kumiko K. Hashimoto, Takashi Kikuchi, Jun Sakai, Ichiro Tomizawa and Satoko Saita (2021), Software-defined radio-based HF doppler receiving system, *Earth Planets and Space*, DOI: 10.1186/s40623-021-01547-5
5. Kikuchi, T., Ebihara, Y., Hashimoto, K.K., Kitamura, K., and Watari, S.-I. (2021), Reproducibility of the Geomagnetically Induced Currents at Middle Latitudes During Space Weather Disturbances. *Front. Astron. Space Sci.* 8:759431. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.759431>.
6. Kikuchi, Takashi, Jaroslav Chum, Ichiro Tomizawa, Kumiko K. Hashimoto, Keisuke Hosokawa, Yusuke Ebihara, Kornyanat Hozumi, Pornchai Supnithi (2021), Penetration of the electric fields of the geomagnetic sudden commencement over the globe as observed with the HF Doppler sounders and magnetometers, *Earth Planets and Space*, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01350-8>.
7. 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, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029925, doi:10.1029/2021JA029925.
8. Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, K. Hosokawa, J. Chum, D. Buresova, M. Nose and K. Koga (2020), Penetration electric fields observed at middle and low latitudes during the 22 June 2015 geomagnetic storm, *Earth, Planets and Space*,

アークオーロラの一般理論

◎田中高史・九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター・名誉教授・学術研究者

鷺見治一・九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター・学術研究者

(国立極地研究所)

片岡龍峰・准教授

令和4年

研究の背景

オーロラはアークとディフューズに分類されることは古来より知られている。サブストームに関与する quiet arc とオンセットアーク、北向き IMF で観察される、sun-aligned arc、fan arc、テーターオーロラは、全てアークである。アークはそれぞれの発生条件も、明るさにも大きな幅があるが、それなのになぜ同じアークなのか。

昭和基地で、サブストームを観察した時、最も不思議に思ったのは、quiet arc であった。それは、オンセットの前に、必ず定位置にある。一般に考えられているオンセットのシーケンスは、NENL (near-earth neutral line)、フロー、CW (Current wedge) であり、この場合必ず定位置にある quiet arc は無視しても、サブストームはほとんど成立する。Quiet arc の発生理論は、オンセットと別個に考えられている。quiet arc をオンセットに関連づけるには、“オンセット前でも、NENL は弱く進行している”と考えざるを得なかった。

サブストームの研究では、地上観測、衛星観測のデータを用いて解析を進めるのが一般的である。これに対して田中は、グローバルシミュレーションでサブストームを再現し、その解からサブストームを解明するという方法を考えた。昭和基地での観察から数えれば、この研究は40年に亘って続けたことになる。到達した結果では、サブストーム現象の原因は対流変動であり、この系で対流を電離圏に伝達するのが FAC であり、アークは quiet arc でも onset arc でも上向き FAC (field-

aligned current) の可視化として理解できるというものである。この点については飯島先生の慧眼に脱帽するところである。

オンセットは対流の遷移過程である。FAC について重要な点は、これを電離圏に接続するには、電離圏に到達するシアー、すなわち電磁流体運動が必要であることである。菊池理論によれば、シアーの伝達とは電荷の伝達と等価でもある。

グローバルシミュレーションでは、電離圏を再現することが不可欠である。私が研究した REPPU (REProduce Plasma Universe) コードでは、(オーロラに結びつくように) 初めから電離圏の再現を組み込んで開発が進められた。その解像度は、格子構造で決まることを実感し、REPPU コードで特徴的な12面体分割三角格子を開発した。つぎにこれらをハイブリッド並列化したのが、現在の REPPU コードである。

研究成果

アークは上向き FAC の可視化である。FAC とは磁気圏から電離圏への対流の伝達であり、アークの違いは、伝達する対流のトポロジーの違いの反映である。今年度には、テーターオーロラとオンセットアークについて、以下のような結果を得た。

若いころにテーターオーロラを始めて(ビデオで)見た時、世の中にこんな不思議なものがあるのかと驚愕した。これを発見した Frank という人を1回だけ見たことがあるが、世の中にこんな偉そうにした人物がいるのかと、これまた驚愕した。

その威張り方は永田先生も真っ青であろう。しかしテーターオーロラがヌルの入れ替え過程の投影とは、想像だにできなかった。テーターオーロラはその奇怪さ故、極めて多くのモデルが提唱され、まさに百花繚乱である。しかし誰一人として、ヌルに結び付けた人物はいなかった。考えられたのは、カスプリコネクションの投影、プラズマシート不安定、マグネトポーズ不安定、リターン磁場の停滞、などである。立ち止まって考察すると、これらは知られている要素の変形である。人間の思考は如何に枠内で留まるかを見ることが出来る。シミュレーションではヌルの分布が分かり、磁力線のトレースができる。今年度には、テーターオーロラはヌルの入れ替え過程であることを明確にした。なぜテーターバーが東西に移動するかも良く理解できた。シミュレーションは、既存の概念の具体化の範囲を超えることが出来るようだ。

磁気圏物理学でヌルを考察することの意義を最初に唱えたのは、Dorelli et al. (2007)であろう。私達はそれが実際に観測できることを示しただけである。エポック making は点から始まり、みんなの協力というような美しい世界は、その後の惰性である、というような良く言われる伝説を、実際に垣間見られた気がする。

JGR のレビューワーは当然百花繚乱の一人であるはずで、対話には難航も予想されたが、意外にも“私はこれまでのテーターオーロラの理論は明確でないと思っていた”とのことであった。さて百花繚乱は今後どうなるであろうか。決定的なモデルを無視して、今後も百花繚乱を続けることも

可能である。複合系の科学では、完全に間違いであることを証明するのもまた難しい。

アークは上向き FAC の可視化であることは、当たり前であろうか。一般に流通している論文を読んだ感想として、たいていはアークは粒子落下、粒子加速であるという通念にこだわり、すぐには FAC とは理解しないであろうと予想していた。しかし、JGR のレビューワーの一人は、当たり前であると断言した。世界（米国）も一枚岩ではなく、多種の人種が混在しており、中には達人もいると感じた。世界から日本に伝来する際に、多数意見が平凡性のフィルターを通し、主流として再流通する仕組みがあるのかもしれない。

サブストームオンセットを特別扱いし、これぞ MHD の破れであると主張するのは、古来よりの常道である。オンセットアークは確かに異常である。これだと、CW、粒子効果など、自然に湧き出てくる。オーロラは粒子落下であり、粒子加速の結果となるのは自然である。このような既存路線ができると、それに逆行するのは極めて難しいようである。複合系では決定的な証明は難しいという困難は、この場合も当てはまる。これらに対し、グローバルシミュレーションの解では、サブストームは MHD であり、トポロジーと対流の変動である。これにより HD (Harang discontinuity) の成長と崩壊も自然に理解できる。HD もまた古来より知られていたにも関わらず、理解できなかった問題である。MHD では、電離圏のグローバル変動、quiet arc から onset acc への移行、2段階オンセットなどを再現できるところが分かった。

(論文)

- [1] Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Interpretation of the theta aurora based on the null-separator structure, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030332.
- [2] Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Unified theory of the arc auroras: formation mechanism of the arc auroras conforming general principles of convection and FAC generation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030403.

しらせ搭載全天カメラによるオーロラ・大気光観測データ解析と観測システム改良

◎坂野井健 東北大学大学院理学研究科・准教授
 齊藤昭則 京都大学大学院理学研究科・准教授
 (国立極地研究所)
 江尻省 准教授
 西山尚典 助教
 令和4年～令和4年(1か年)

[研究成果]

これまで、電離層や中間層で発生する大気光やオーロラなどの光学現象は、地上や衛星搭載のイメージャーで観測されてきた(1)。近年整備された地上イメージャーの多点ネットワーク観測は、現象の広範囲な変動を遠隔観測可能である(2)。しかしながら、これらの地上イメージャーは、陸上にしか設置されていないため、海洋上の光学観測は欠如している。この観測ギャップを埋めて、オーロラの広域観測を実現するために、2019年度極地研公開利用研究(61次隊, AAS6101)および2020-21年度極地研萌芽研究観測(62-63次隊, AH0909)に基づき、船舶搭載型イメージャーを開発した。このイメージャーは、南極観測船「しらせ」に搭載され、その航路で撮像観測が実施された。期間は、第61次、第62次、第63次日本南極地域観測隊の2019年11月から2022年3月の「しらせ」航海時である。

開発された全天イメージャーは、DJI製3軸姿勢安定化ジンバルに搭載され、露光中の船体の振動を軽減して、長時間露光時においても高空間分解能を達成した。61次では、630nmの単波長全天イメージャー観測を19秒の露光時間で実施した。62次には、630nmと670nmの2台の全天イメージャーを1台のジンバルに設置し、2波長同時観測を9秒の露光時間で実施した。さらに63次では、OHの赤外発光を詳細に観測するために、630nmと760nmの2波長同時撮像とし、18秒の露光時間とした。630nm発光は、電離圏F領域の酸素原子の大気光および低エネルギー電子により引き起こされるオーロラ発光を、670nmと760nmの発光は中間圏のOH大気光および高エネルギー電子降下による窒素分子オーロラを検出する。

本研究の目的は、(1)船舶搭載型全天イメージャーの開発と自動観測システムの確立、(2)画像データの校正と画像解析手法の確立、(3)観測された大気光ならびにオーロラ現象のデータ解析、(4)船舶

搭載型イメージャーによる今後の観測の可能性を検討することである。

観測システムは、継続的な運用を実現するために不具合発生から自動的に回復するように設計された。しかしながら、61次と62次観測では、想定外の不具合により、観測隊員の手動操作が必要となる事象が複数回発生した。長期連続観測を実現するため、63次観測ではジンバルと撮像系を新型に交換し、改修を行った。この結果、63次では不具合は完全には抑止できなかったものの、発生率を低減させ、かつ自動復帰可能な軽微なものにすることができた。

データ解析について、まず画像データの校正を行った。ここでは、CMOS検出器で取得された画像のフラット補正とファン・ライン補正を行った。校正実験は、国立極地研究所積分球設備を用いて行われた。この校正実験の結果を用いて、画素のカウント値をレイリー値に変換した。

次に、船舶搭載型イメージャー取得画像は、撮影位置や撮影方向が撮影ごとに変わるという特徴がある。そこで、「しらせ」の位置・姿勢データと画像中に写り込んだ「しらせ」の艦橋などの構造を2次元検出し、この2つを組み合わせることで、画像ごとに視野方角を決定した。この方法で決定された方角の精度を、星の位置を利用して決定された視野方向と比較して検証した。この結果、2つの手法の最大のずれは約3°であった。これは、天頂角が45°の場合、高度250km(630nm発光層)において、13kmの水平スケールのずれに相当する。このずれは、大気光やオーロラの空間スケールと比較すれば十分小さく、良好な精度で画像方角が決定されていることが確認された。

さらに、詳細なデータ解析を実施するイベント日時を、「しらせ」がオーストラリアの港に停泊していた期間と白夜・薄明の期間を除外して、3年間の観測から選択した。ここで、観測された現象の水平構造を把握するため、各波長の発光高度が一定であると仮定し、画像を地理座標（地理緯度・経度）にマッピングした。さらに、地理座標画像から各日ごとに南北2方向のケオグラムを作成した。このケオグラムを用いて、オーロラと大気光発光観測イベントを特定した。この結果として、3年間の観測で、630nm 大気光の変動が8日間、OH 大気光の波動構造が6日間、オーロラ発光が8日間観測されたことが確認された。630nm 大気光発光観測の成果には、大規模移動電離層擾乱 (LSTID)、赤道プラズマバブル (EPB) が含まれる。

このような電離圏微弱発光の船舶上の観測報告は、本研究が初めてである。本研究により開発された船舶搭載型全天イメージャーと画像解析手法により、電離層と中間圏のイメージング研究が十分可能であることが実証された。一方で、船舶搭載イメージャー観測は、地上観測に比べて機会が限定され

ることが明らかになった。具体的には、「しらせ」観測において、悪天候や白夜・薄明の時間が長いこと、他国の EEZ を長時間通過することなどが課題となった。これらの課題は、他の船舶の航路では解決できる可能性がある。

また、本観測システムは、南極第X期に予定されているオーロラ全天観測に活用されている。具体的には、ジンバルを除いた本観測システムを応用し、2022年11月に北極ロングイヤーズビンに391.4nmと630nmの2波長同時撮像全天イメージャーを設置して、連続観測を開始した。さらに、第64次南極地域南極越冬隊において、南極昭和基地に391.4nm, 557.7nm, 630nm, 670nmの4波長同時観測全天イメージャーが設置され、2023年2月から連続撮像を開始した。

以上のとおり、本研究で確立された小型単色イメージャーの複数台連続観測システムは、今後のオーロラや大気光遠隔観測に広く利用可能なものである。

[参考文献]

- (1) Immel, T. J., Mende, S.B., Frey, H.U., Peticolas, L.M., & Sagawa, E. (2003), Determination of low latitude plasma drift speeds from FUV images. *Geophys Res Lett*, 30, p 1945. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003GL017573>
- (2) Shiokawa, K., et al. (1999). Development of Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTI). *Earth Planets Space*, 51, p 887–896. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03353247>

[研究発表]

- Yamashina, S., A. Saito, T. Sakanoi, Y. Hozumi, T. T. Tsuda, T. Aoki, T. Naoi, M. Nagahara, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, Aurora and airglow observations with the imaging system onboard Antarctic research vessel "Shirase", 13th Symposium on Polar Science, online meeting, NIPR, 15-18 Nov., 2022.
- Kondo, H., T. Sakanoi, M. Kagitani, R. Kataoka, Y. Tanaka, Y. Ogawa, T. Nishiyama, K. Murase, Y. Miyoshi, Y. Ebihara, S. Yamashina, Y. Hozumi, Development of new multi-wavelength all-sky imagers for observation of polar cap aurora, 13th Symposium on Polar Science, online meeting, NIPR, 15-18 Nov., 2022.
- 山科佐紀, 齊藤昭則, 坂野井健, 津田卓雄, 青木猛, 江尻省, 西山尚典, 穂積裕太, 直井隆浩, 永原政人, 南極観測船「しらせ」搭載全天イメージャーによる大気光とオーロラ観測, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.
- 近藤大泰, 坂野井健, 海老原祐輔, 片岡龍峰, 山科佐紀, 穂積裕太, 南極点アムンゼン・スコット基地ならびに南極冠域無人観測網における多波長同時オーロラ撮像計画にむけた新オーロライメージャー開発の現状, SGEPS第152回総会・講演会, 相模原市立産業会館, 相模原, Nov. 3-7, 2022.
- Yamashina, S., A. Saito, T. Sakanoi, T. T. Tsuda, T. Aoki, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, Y. Hozumi, T. Naoi, M. Nagahara, Observations of the ionosphere by the imager onboard the Antarctic research vessel "Shirase", JpGU Meeting 2022, Hybrid (Makuhari Messe - online), Chiba, Japan, 22-27 May 2022.

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（2）気 水 圏

極地アイスコアの金属成分分析

◎鈴木利孝 山形大学学術研究院・教授
飯塚芳徳 北海道大学低温科学研究所・准教授
(国立極地研究所)
川村賢二 教授
令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

エアロゾルは、それが持つ放射強制力や化学組成により、地表のエネルギーと物質の循環をコントロールし、地球の気候と環境の変動に深く関与している。過去の地球気候変動にエアロゾルが果たしてきた役割を解明するには、極地において採取された氷コア中の金属成分を測定することが有効な手法である。これまで、氷コアに含まれる溶存イオン分析(e.g. Bigler et al., 2006)、濾過粒子の PIXE 分析(e.g. Ghermandi et al., 2003)、酸可溶性部分の ICPMS 分析(e.g. Gaspari et al., 2006)等の研究が報告されてきた。南極氷床に供給、保存されている粒状物、特に鉱物粒子、に含まれる金属成分の多くは難溶性であり、コア中の難溶性金属成分の重要性が指摘されている(Gaspari et al., 2006)。最近の室内実験においても鉱物粒子中の金属成分は酸性条件下で速やかには溶出しないことが証明されている(Rhodes et al., 2011)。このような問題を解決するためには、コアの全分解分析が有効であるが、これまで鉄についてのわずかな測定例(Gaspari et al., 2006)が報告されているのみである。本研究では、氷コアを蒸発乾固させ、その残留物を酸で全分解することにより、氷コアに含まれる Al、Na 等金属成分の全濃度(溶存態+粒子態)を測定した。これにより、粒状物、溶存物を問わず、南極氷床に供給された鉱物および海塩エアロゾルの全量について解析を進めることが可能となる。研究期間をとおして、南極ドームふじアイスコアを中心に、鉱物および海塩エアロゾルのコア中濃度および金属成分組成の時間変動を解析してきた。ここではエアロゾルの指標である金属成分と気温の指標である酸素同位体比の比較解析結果について述べる。

図1にドームふじアイスコア中の Al 全濃度(t-Al)、Na 全濃度(t-Na) および酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の年代分布を示した。t-Al および t-Na は、どちらも氷期最寒期に極大値を示し、間氷期には低濃度を示すことがわかる。また、t-Al に比べて t-Na は極大値と低濃度値の差が小さく、時間変動のばらつきは大きい。これは、鉱物エアロゾルと海塩エアロゾルの

両方とも、気温の低い氷期に南極氷床への輸送力あるいは降下量が増大し、気温の高い間氷期には減少すること、また、海塩エアロゾルの輸送力あるいは降下量は鉱物エアロゾルに比べて氷期・間氷期間の差が小さく、ばらつきが大きいことを示している。

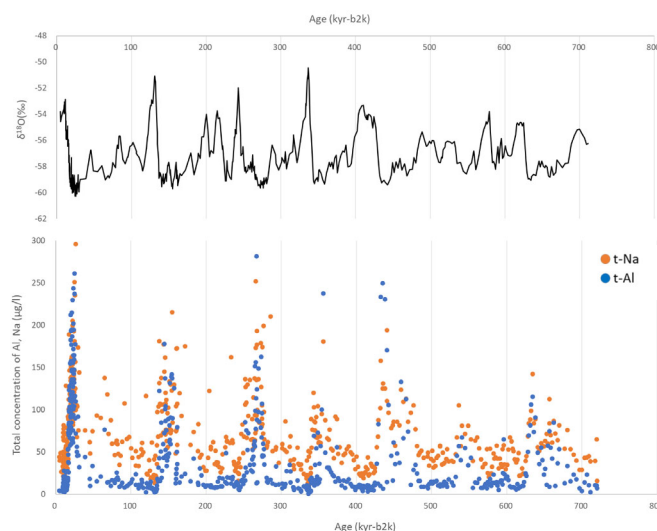


図1 ドームふじアイスコア中の Al 全濃度 (t-Al)、Na 全濃度 (t-Na) および酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の年代分布

エアロゾル輸送力と気温の関係を調べるため、t-Al および t-Na と $\delta^{18}\text{O}$ の関係をプロットした(図2)。t-Al および t-Na は、 $\delta^{18}\text{O}$ が小さいほど大きな値を示す傾向にあった。特に $\delta^{18}\text{O}$ が -58‰ を境として濃度が急変するという顕著な傾向が見られた。また、 $\delta^{18}\text{O}$ が -58‰ より大きい間氷期には、t-Na が t-Al よりも高い値を示す傾向が見られた。間氷期において t-Na が t-Al よりも高い値を示し、かつ、t-Na のばらつきが増加することの原因として、海塩エアロゾルと鉱物エアロゾルの発生源の違いと南極大陸までの輸送距離の違いが考えられる。

図2から、 $t\text{-Na}$ は濃度の絶対値、ばらつき、ともに、間氷期よりも氷期に大きいこともわかる。海塩エアロゾルは南大洋の海水面から供給されることだけを考えると、海水面積が拡大する氷期には氷床内陸部への海塩エアロゾルの供給源が遠ざかることになるため、大気循環の強度が変わらないとすると、氷期にドームふじアイスコア中の $t\text{-Na}$ が増加することと矛盾する。近年、極地内陸氷床への海塩供給経路として、海氷上で生成されるフロストフラワーが介在するメカニズムが提案されている (Rankin et al., 2002)。寒冷期に海氷上で発達するフロストフラワーに海塩成分が分別濃縮され、その霜が大気へ供給され海塩エアロゾルとして内陸氷床に輸送されているとする説である。本研究結果も、海塩エアロゾルは、海水からの大気への海塩飛沫に加え、氷期には海氷表面のフロストフラワーからの供給が増加しているであろうと考えても矛盾しない。しかしながら、フロストフラワーは海水面積の1%程度の面積に局所的にしか分布していないといわれ、氷期に増加する海塩性 Na の供給源としての有意性には議論が残されている (Petit et al., 1999)。 Na は海水だけでなく、地殻表面にも2~3%含まれているため、南極氷床から遠く離れた陸地から輸送

されてきたエアロゾルによってもたらされる量も有意であることが予想される。 $t\text{-Al}$ の結果からわかるように、氷期には南極氷床への鉱物エアロゾルの輸送量が増加するため、氷期の $t\text{-Na}$ の増加には、鉱物エアロゾルに含まれる Na も有意に寄与しているものとする。氷期に活発化する大気の子午面循環により、海洋表面と地殻表面の両方からのエアロゾル輸送量が増加するため、ドームふじアイスコア中の $t\text{-Al}$ および $t\text{-Na}$ は濃度の絶対値、ばらつきともに氷期の方が間氷期よりも大きくなったと考える。

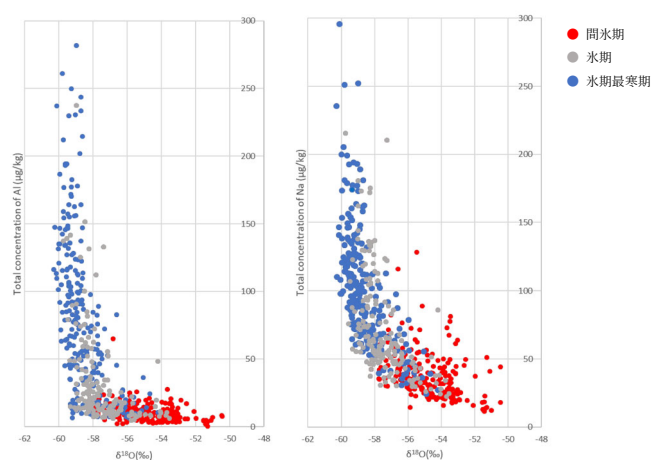


図2 $\delta^{18}\text{O}$ と $t\text{-Al}$ (左) および $t\text{-Na}$ (右) との関係

【参考文献】

- 1) Bigler et al. (2006) Aerosol deposited in East Antarctica over the last glacial cycle: Detailed apportionment of continental and sea-salt contributions, *Journal of Geophysical Research*, **111**, D08205.
- 2) Gaspari et al. (2006) Atmospheric iron fluxes over the last deglaciation: Climatic implications, *Geophysical Research Letters*, **33**, L3704.
- 3) Ghermandi et al. (2003) Elemental Composition Determined by PIXE Analysis of the Insoluble Aerosol Particles in EPICA-Dome C Ice Core Samples Representing the Last 27,000 Years, *Geophysical Research Letters*, **30**, 21-76.
- 4) Rhodes et al. (2011) Experimental investigation of the effects of mineral dust on the reproducibility and accuracy of ice core trace element analyses, *Chemical Geology*, **286**, 207-221.
- 5) Rankin et al. (2002) Frost flowers: Implications for tropospheric chemistry and ice core interpretation, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 4683.
- 6) Petit et al. (1999) Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica, *Nature*, **399**, 429-436.

南極海水サンプル中の物理・化学・生物特性の定量評価

◎北海道大学北方生物圏フィールド科学センター・准教授・野村大樹

(国立極地研究所)

牛尾収輝 教授

令和2年～令和4年（3か年）

[研究成果]

本研究では、南極海水および海水サンプルの処理および分析作業を通して、南極海水サンプル中の物理・化学・生物特性の定量評価、海水および棚氷融解が海洋表層の物理・化学・生物過程に与える影響評価を目的とした。研究期間内に以下3つの成果を発表した。

1) 海水上積雪と栄養塩再生プロセスが東南極の多年沿岸定着氷の主要栄養塩分布に与える影響

東南極リュツォ・ホルム湾の昭和基地周辺には、複数年にわたって成長を続けた定着氷（多年氷または多年定着氷）が豊富に存在している。この海域は比較的降雪量が多く、海水上での積雪量が多いため、snow ice や superimposed ice といった積雪由来の海水が形成される。リュツォ・ホルム湾の定着氷は、海水が凍って下方に成長する通常の海水とは異なり、雪起源ごおりの形成過程により上方に成長したり、海水上部に海水が供給されることで海水内の生物地球化学成分の分布が変化したりする。そのため、積雪は海水の生物地球化学成分の分布や循環に大きな影響を与える。本研究では、南極昭和基地付近の定着氷内の生物地球化学成分を解析し、海水中の栄養塩濃度の鉛直分布に及ぼす積雪と生物活動の影響を評価することで、長年成長を続ける海水内の栄養塩循環を明らかにすることを目的とした。2015–2019年の夏季に56–60次南極地域観測(JARE)によって定着氷（多年氷及び一年氷）コアサンプルを採取し、融解後、塩分、酸素安定同位体比、各種栄養塩濃度、クロロフィルa濃度を測定した。また、海水薄片を作成し偏光板を用いて写真撮影した。薄片写真、塩分、酸素安定同位体比の解析から、リュツォ・ホルム湾の定着氷は雪起源ごおりが定着氷上部で年々繰り返し形成されることで上方成長することが示された。積雪のフラクションと各種栄養塩濃度には負の相関がみられた。これは、南極大陸は人間活動が行われている地域から遠く離れた場所

であるため大気中に不純物が含まれていないことが要因であると考えられる。大気中に栄養塩が少ないため、定着氷上の積雪にも栄養塩が含まれておらず、清浄な積雪が雪起源ごおり形成により定着氷内に取り込まれていくことで、多年定着氷上部の栄養塩濃度が低くなったと考えられる。一方で、人間活動のある地域に近い北極の海水は積雪由来の栄養塩が大きな供給源になっていることが先行研究により明らかになっている。海水形成時に海水から海水内に保存された栄養塩は、最初の一年間はアイスアルジーの基礎生産による生物学的取り込みが優勢であった。しかし、さらに時間が経過した多年氷内では従属栄養生物とバクテリアによる分解有機物（及び珪藻殻の溶解）により栄養塩が再供給されていた。また、栄養塩ごとの分解速度の違いにより、一年氷・多年氷それぞれの時点での消費と供給のバランスが異なっていることが明らかとなった。同一海域の数年にわたる一年氷と多年氷のデータを解析することで、定着氷における栄養塩の長期的な循環を初めて明らかにすることができた。

2) 東南極白瀬氷河舌の底面融解がリュツォ・ホルム湾の炭酸系に与える影響

東南極リュツォ・ホルム湾（LHB）の炭酸系を変動させる要因を明らかにすることを目的とし、JARE58–59の一環として、2017年1月22日から2月15日、2018年1月24日から2月15日の夏季に、定着氷で覆われた東南極LHBの白瀬氷河浮氷舌（SGT）付近（68–70°S、37–40°E）において、観測船しらせによる海洋観測を実施した。

LHBの20 dbar以深において、炭酸系成分(DIC, TA)の濃度分布は、水塊の分布と非常に良く合致した。また、SGTの底面融解水の希釈効果によるDIC濃度、TAの変化を無視する(植物プランクトンの基礎生産による変化のみを考慮する)ために塩分(34.25)で

規格化した nDIC, nTA ($nDIC = 34.25 \cdot DIC / \text{Salinity}$, $nTA = 34.25 \cdot TA / \text{Salinity}$) は、20–400 dbar において一定であった ($nDIC: 2204 \pm 7 \mu\text{mol kg}^{-1}$, $nTA: 2318 \pm 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$)。このことから、LHB の 20 dbar 以深では、植物プランクトンの基礎生産が DIC, TA に与える影響は小さく、SGT の底面融解水による希釈効果、mCDW の流入といった物理学的プロセスによる影響を強く受けていることが示唆された。 $\delta^{18}\text{O}$ と塩分から算出された LHB の水塊に占める SGT の底面融解水の割合 (Fmw) は、SGT のアイスフロントに近い観測点ほど大きくなった。SGT に最も近い観測点における Fmw は、表層 20 dbar で約 2.0%、亜表層 300 dbar で約 1.0% であった。観測値から得られた DIC-Salinity, TA-Salinity の関係を用いて算出された、表層 20 dbar における SGT の底面融解水の希釈効果による DIC, TA の減少量は、それぞれ $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $51 \mu\text{mol kg}^{-1}$ であった。さらに、この DIC, TA の変化量は $49 \mu\text{atm}$ の pCO_2 の減少分に相当した。SGT の底面へ流入する mCDW の pCO_2 は約 $421 \mu\text{atm}$ 、大気中 pCO_2 は約 $390 \mu\text{atm}$ であることから、mCDW の pCO_2 は SGT の底面融解水の影響を受けて、大気中 pCO_2 よりも小さくなる。つまり、LHB において、SGT の底面融解は海洋を CO_2 の放出源から吸収源に変える重要な役割を担っていることが示唆された。

3) 東南極トッテン棚氷の底面融解や付近の海水の融解が海洋の炭酸系成分に与える影響

東南極トッテン棚氷の底面融解が海洋の炭酸系や栄養塩などの生物地球化学成分に与える影響を定量的に評価することを目的とし、JARE59 および 61

の 2018 年 3 月 6–7 日、2019 年 12 月 13–3 月 8 日に、東南極トッテン棚氷の沖合斜面 (氷縁域) からアイスフロント付近 (海水域) にかけて、観測船しらせによる海洋観測を実施した。また、南極海東インド洋区におけるナンキョクオキアミを中心とした生態系総合調査の一環として、2019 年 2 月 17–22 日に、トッテン棚氷付近の沖合斜面域 (氷縁域) において、海洋調査船開洋丸による第 10 次南極海調査で海洋観測を実施した。CTD 観測により、塩分、水温、溶存酸素濃度を測定した。また、採水したサンプルを分析し、溶存無機炭素 (DIC) 濃度、アルカリ度 (TA)、栄養塩濃度 (NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 Si(OH)_4)、酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)、クロロフィル a 濃度を測定した。

DIC 濃度、TA、栄養塩濃度の分布は、沖合斜面に存在する mCDW が、トラフに沿って棚氷下に流入し、棚氷の底面融解水と混合することで低密度となり、表層に浮上するという海洋循環に合致していた。アイスフロントの表層における DIC 濃度・TA は、トッテン棚氷の底面融解水による希釈効果、mCDW の流入といった物理学的プロセスの影響を強く受けていた。 $\delta^{18}\text{O}$ を用いて算出した棚氷の底面融解水の割合は約 1.2%、海水の融解水の割合は 3.1% であり、その希釈効果により、DIC 濃度が約 $108 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 減少した。この希釈効果は、二酸化炭素分圧 (pCO_2) に換算すると約 $90 \mu\text{atm}$ の減少に相当した。つまり、大気 (約 $390 \mu\text{atm}$) に対して二酸化炭素が過飽和 (放出源) だった mCDW (約 $437 \mu\text{atm}$) が、棚氷や海水の融解水による希釈効果により未飽和 (約 $347 \mu\text{atm}$) (吸収源) になったことを意味する。

[研究発表]

- 1) Sahashi, R., Nomura, D., Toyota, T., Tozawa, M., Ito, M., Wongpan, P., Ono, K., Simizu, D., Naoki, K., Nosaka, Y., Tamura, T., Aoki, S., Ushio, S. (2022). Effects of snow and remineralization processes on nutrient distributions in multi-year Antarctic landfast sea ice. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 127, e2021JC018371. <https://doi.org/10.1029/2021JC018371>.
- 2) Kiuchi, M., Nomura, D., Hirano, D., Tamura, T., Hashida, G., Ushio, S., Simizu, D., Ono, K., Aoki, S. (2021). The effect of basal melting of the Shirase Glacier Tongue on the CO_2 system in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 126, e2020JG005762. <http://doi.org/10.1029/2020JG005762>.
- 3) Tamura, T. P., Nomura, D., Hirano, D., Tamura, T., Kiuchi, M., Hashida, G., Makabe, R., Ono, K., Ushio, S., Yamazaki, K., Nakayama, Y., Takahashi, K. D., Sasaki, H., Murase, H., Aoki, S. (2022). Impacts of basal melting of the Totten Ice Shelf and biological productivity on marine biogeochemical components in Sabrina Coast, East Antarctica. *Global Biogeochemical Cycles*. <https://doi.org/10.1029/2022GB007510>.

氷床フィルンの物理解析

◎大野浩 北見工業大学地球環境工学科・准教授

(国立極地研究所)

藤田秀二 教授

令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

氷床には起源の異なる2種類の気泡が存在するとされている。1つ目は積雪の圧密・氷化過程で形成されるもので、気泡の大半を占める(ノーマルバブル)。2つ目は表面積雪の段階ですでに含まれる微小な気泡で、通称マイクロバブルと呼ばれている。

マイクロバブルはその小ささや少なさからトータルのガス含有量に対する寄与は小さいものの、ガス分別が卓越して起こることでガス組成(例えばアイスコアの年代軸決定に利用されている酸素窒素比)に大きな影響を与える可能性が理論的に示されている¹⁾。

しかしながら、これまで氷床浅部に含まれる気泡の個々のガス組成を分析した例は少なく、大気と大きく異なるガス組成を持つ微小気泡の存在は確かめられていない。

本研究では、南極内陸部の氷化深度付近における微小気泡の窒素酸素比(N_2/O_2)や分布を明らかにするとともに、これらの実測値を用いてマイクロバブルがガス組成全体に与える影響を定量的に評価すること(上記の理論の検証)を目的とする。

2. 方法

第51次南極地域観測隊がドームふじ周辺で掘削したDFS10アイスコアの深度121.47-121.50 mおよび99.96-99.99 mの箇所を試料とした。この地点においては深度約103mで氷化することが知られている。

厚さ約3mmに成型した氷厚片に含まれる気泡一つ一つの窒素酸素比(N_2/O_2)を、顕微ラマン分光器を用いて測定した。測定中のバックグラウンドシグナルを極力抑えるために、通常使われる低温窒素ガス(ラマン活性)のかわりに低温アルゴンガス(ラマン不活性)を試料に吹き付けて冷却した。各気泡に対して3回測定を行い、その平均値を測定結果とした。測定結果の誤差は標準誤差の2倍と定義した。1試料につき約100個の気泡を分析した。

顕微ラマン分光分析を行った深度に合わせて、DFS10アイスコアの深さ100.0 mおよび121.5 mの箇所に対して、マイクロX線CTによる3次元撮像を行った。取得したCTデータを画像処理ソフトウェアImageJのBoneJプラグインを用いて解析

することで、気泡の分布を調べた。

3. 結果と考察

深度99.96-99.99 mにおける気泡の N_2/O_2 とサイズの関係を図1に示す。気泡の半径が0.1 mm~1.6 mmの範囲においては、 N_2/O_2 は概ね大気組成(3.7)に近い値であった。興味深いことに、半径が0.1 mmよりも小さな気泡の中に、極めて高い N_2/O_2 (>10)を有するものが多数認められた。その一方で、同程度のサイズの気泡の中で大気組成に近い N_2/O_2 を示すものも複数観察された。深度121.47-121.50 mにおいても同様の結果が得られた。極端に N_2 リッチとなっている微小気泡についてはマイクロバブルに、その他の気泡についてはノーマルバブルに由来すると思われる。

気泡のガス分別は拡散速度のガス種依存性によって生じることが知られている。フィルンにおいて気泡から大気に繋がった空隙にガスが拡散する際に、窒素より酸素のほうが速く拡散するために気泡に残ったガスは N_2 リッチになる²⁾。イントロダクションで紹介した理論的研究によると、氷床表層部ですでに存在するマイクロバブルは氷化深度付近で取り込まれるノーマルバブルと比べて長い時間上記のガス拡散メカニズムが作用するので、ガス分別が顕著になる¹⁾。

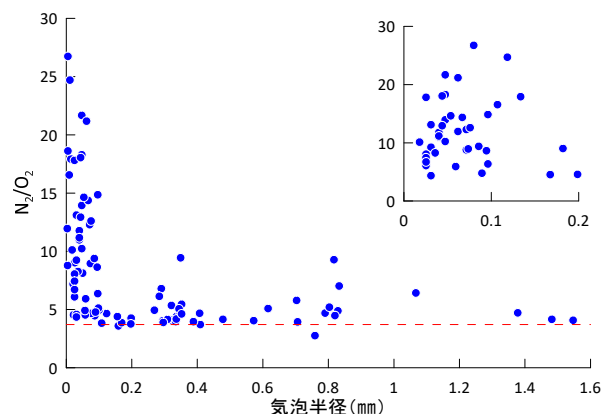


図1 気泡の半径と N_2/O_2 (99.96-99.99 m)。

気泡の圧縮は固体（氷）の塑性変形によるもので、静水圧と気泡の圧力の間にラグ（遅延）が生じる。その際に生成深度の違いから、同一深度においてマイクロバブルはノーマルバブルと比べて圧力が高くなることが知られている³⁾。そこで微小気泡の N_2/O_2 と散乱強度を比較したところ、両者に正の相関が認められた（図 2）。ラマン散乱強度は測定対象物質の密度（この場合気泡の圧力）に比例するため、 N_2/O_2 が高い気泡は圧力も高い傾向にあると考えられることから、この観測事実はガス分別が卓越した微小気泡の起源をマイクロバブルとする解釈を支持するものである。深度 121.47-121.50 m においても同様の結果が得られた。

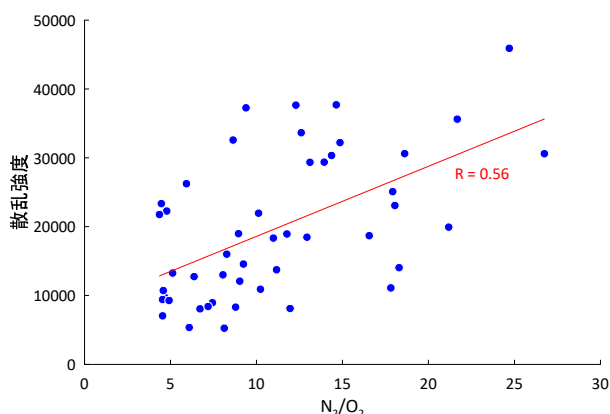
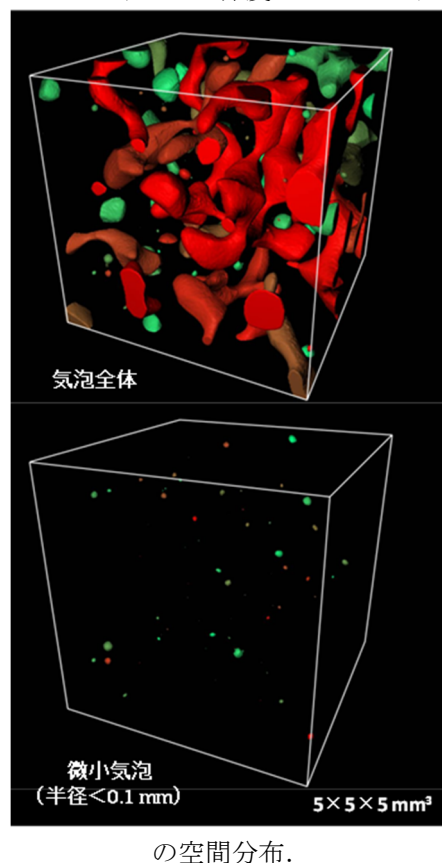


図 2 微小気泡（半径<0.1 mm）の N_2/O_2 と散乱強度（99.96-99.99 m）。

深度 100.0 m における気泡の空間分布を図 3 に示す。上の図が気泡全体の結果であるのに対して、下側の図は同一箇所を微小気泡を抽出した結果である。微小気泡の空間分布に顕著な偏りは認められず、分散して存在していた。顕微ラマン分光分析の結果（図 1）を踏まえて、微小気泡のうち 7~8 割をマイクロバブルと仮定すると、マイクロバブルの体積は気泡全体の体積の 0.1~0.2% を占め、先行研究⁴⁾で報告されている値と同程度であった。深度 121.5 m においても同様の結果が得られた。

最後に、今回明らかになったマイクロバブルの体積密度とマイクロバブルの N_2/O_2 の平均値（13.9~17.7）を用いて、マイクロバブルがアイスコアのガス組成に与える影響を評価したところ、マイクロバブルが存在することで N_2/O_2 が大気組成（約 3.7）から 13.9~25.5% 変化すると見積もられた。この変化量を $\delta O_2/N_2$ に換算すると -13.7~-24.9% となり、氷床深部で認められる酸素窒素比シグナルの変動幅⁵⁾と同程度であることから、マイクロバブルによるガス分別効果は無視できないレベルにあることが示唆される。

図 3 DFS10 アイスコア深度 100.0 m における気泡



[参考文献]

- 1) Kobashi, T. *et al.* (2015): Post-bubble close-off fractionation of gases in polar firn and ice cores: effects of accumulation rate on permeation through overloading pressure, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 13895–13914.
- 2) Ikeda, T. *et al.* (1999): Extreme fractionation of gases caused by formation of clathrate hydrates in Vostok Antarctic ice. *Geophys. Res. Lett.*, **26**(1), 91-94.
- 3) Lipenkov (2000): Air bubbles and air-hydrate crystals in the Vostok ice core, in *Physics of Ice Core Records*, edited by T. Hondoh, 327–358, Hokkaido Univ. Press, Sapporo, Japan.
- 4) Lipenkov (2018): How air bubbles form in polar ice, *EARTH'S CRYOSPHERE*, **XXII**, 14–25.
- 5) Kawamura, K. *et al.* (2007): Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years, *Nature*, **448**(7156), 912–916.

(別紙)

研 究 協 力 者 参 加 者 一 覧

	一般共同研究(令和4年度報告)			課題番号	2-14
	研究課題名	氷床フィルンの物理解析			
	氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)					
小計	名				
所外 (極地研以外)	橋本健吾	北見工業大学	大学院生		
	飯塚芳徳	北海道大学	准教授		
	安達聖	防災科学技術研究所	特別研究員		
小計	3 名				
合計	3 名				

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 富山大学都市デザイン学部・教授

(国立極地研究所)

平沢尚彦 助教

令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

高緯度積雪域からの昇華により変動する大気水蒸気はどれくらいの温室効果をもたらすのかを最終的に解明するため、本研究では東南極の氷床沿岸部から氷床頂部までを対象にして吹雪の発生頻度と規模はどれくらいなのかを推定することを目的としている。東南極の氷床沿岸部から氷床頂部までの観測データにもとづいて雪面の起伏状況を把握し、雪面での堆積量を検討して、吹雪の発生頻度と規模について調べた。

2. 観測および解析方法

雪面の起伏状況を把握するため、JARE59で得られた雪面画像を整理した。これは、雪上車の側面にウェアラブルカメラ(Gopro HERO3+)を設置し、移動する際に1分後に撮影した10Mピクセルの画像データである。1枚の画像には幾つかの雪面パターンが混在していたため、1枚の画像を8マス程度に分割した。雪面パターンは、リップル、デューン、サスツルギ(削剥により形成。一般的な大きさのサスツルギと大サスツルギの2種類。大サスツルギは高さ30cmを目安)の合計4種類とし、目視で分類をした。これにより、氷床沿岸部から氷床頂部まで、吹雪が起因して形成される雪面パターンの出現頻度を解析した。

また雪面での堆積量に関して、H128地点(標高1,380m)に設置されている自動気象観測装置(AWS)の積雪深計(SR50A)のデータを解析した。この積雪深計は超音波による距離センサーであり、超音波パルスを発信し、雪面で反射して受信するまでの経過時間を測定することで距離が算出される。南極では頻繁に発生する地吹雪によるかく乱が考えられることから、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雪氷防災実験棟にて低温風洞実験による超音波積雪深計の低温強風実験を試みた(杉浦ら, 2022)。風洞床に自然積雪を敷き詰め、超音波積雪深計と吹雪計を風洞装置風下端に設置した。雪面および大気条件を変化させて(気温-25℃~-10℃, 風洞中心風速0~15m/s, 雪供給:ありとなし, 雪面:固結ありと固結なし), 1秒ごとに出力される積雪深データを記録した。

吹雪の発生頻度と規模に関して、衛星観測により2018年10月から2022年7月までのICESat-2データ(ATL17のBlowing Snow Frequency)を使用した。またNDF地点(標高3,794m)にAWSが設置されていることから、ICESat-2データからNDF

地点を抽出して、AWSの風速データと比較し、またAWSデータを用いて2022年1月から12月までの吹雪量の推定も試みた。

3. 結果と考察

雪面の起伏状況の把握に関して、先行研究(古川, 1996)によると大サスツルギは標高約2,000m以上に存在し、標高約2,400mで出現頻度が最大に達すること、さらに標高が高くなると頻度が大きく変動しつつ次第に減少することが報告されている。本解析結果でも、標高が高いドームふじ基地(3,810m)付近で大サスツルギの出現頻度は低く、標高が低くなると出現頻度が増している。最大出現頻度は沿岸部ではなく、やや内陸に入った地域であり、先行研究よりもさらに標高が高い地域であった。本解析では目視で雪面パターンを分類したため、人為的な誤差が含まれる可能性がある。さらに考察を進めるためには、出現頻度の機械学習による画像分類といった他の解析との比較が必要である。

雪面での堆積量に関して、図1に示すようにAWSの積雪深計データから大規模擾乱による降雪の要因による変化(ステップ状の変化)と積雪再配分による地吹雪の要因と考えられる変化(パルス的な変化)が見られた。大サスツルギを形成するほどの変化に至っていないものの、堆積と削剥の繰り返しによって、次第に堆積量が増している様子がわかる。

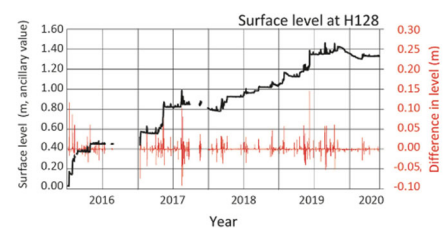


図1 H128のAWS超音波積雪深計で観測された雪面変化。黒線：日平均値，赤線：日平均値の前日からの変化。平沢ら(2021)より。

低温強風時におけるAWS積雪深計の性能評価のため、低温強風環境が再現可能な風洞実験を実施したところ、表1に示すような結果が得られた。風洞実験装置が再現できる最大級の吹雪環境下であっても、エラーが出力されなかった。南極では実際にはエラーが出力されるケースがあることから、さらに極端な吹雪環境下での野外実験が必要である。また、AWS気温計の変動特性(Morino et al., 2021)、雪面の起伏と表面質量収支との関係(Lieffering et

al., 2021) や基盤地形 (Tsutaki et al., 2022), 過去 5 千年にわたる堆積量の変動傾向 (Oyabu et al., 2022), ラジオゾンデによる高層気象観測 (Sato et al., 2020) に関する研究を進めた。

表 1 AWS 積雪深計の実験結果. 杉浦ら (2022) より.

年/月/日	実験番号	気温(℃)	風速(m/s)	下方雪供給(%)	上方雪供給(有無)	雪面固結(有無)	エラー出力(有無)
2022/1/18	1	-25	8	0	無	有	無
"	2	-25	8	0	無	有	無
"	3	-25	10	0	無	有	無
"	4	-25	6	2	無	有	無
"	5	-25	8	4	無	有	無
"	6	-25	10	10	無	有	無
2022/1/19	7	-10	8	0	無	有	無
"	8	-10	10	0	無	有	無
"	9	-10	10	0	無	有	無
"	10	-10	10	20	無	有	無
"	11	-10	10	40	無	有	無
"	12	-10	10	100	無	有	無
"	13	-10	15	100	無	有	無
2022/1/20	14	-10	15	100	無	有	無
"	15	-10	10	100	無	有	無

吹雪の発生頻度と規模に関して、ICESat-2 による吹雪の発生頻度の推定分布を図 2 に示す。南極氷床上での発生頻度の季節変化が明瞭である。また、氷床頂部のドームふじ周辺では発生頻度が年間を通じて少ない様子がわかる。さらに、沿岸に近づくにつれて頻度が増すものの、最大は沿岸からやや内陸に入った地域となっている。この ICESat-2 の発生頻度と氷床頂部に位置する NDF 地点の AWS 風速データを同一期間で比較したところ、発生頻度の

高低と風速の強弱がおおよそ対応する期間があるものの、異なる傾向を示す期間も見られた。今後は吹雪イベントごとに比較する必要がある。NDF 地点の AWS データを用いて年平均の吹雪量を推定したところ $2.2 \times 10^{-3} \text{ [kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$ と算出された。

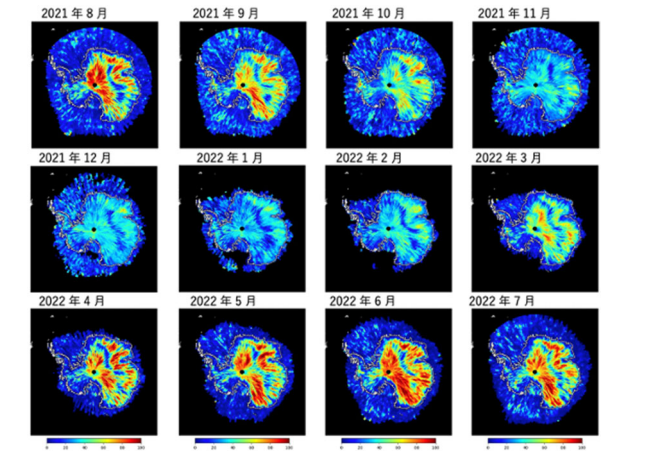


図 2 ICESat-2 による吹雪の発生頻度 (2021 年 8 月から 2022 年 7 月まで)。データ : <https://nsidc.org/data/data-access-tool/ATL17/versions/4>

[参考文献]

1) 杉浦幸之助, 佐藤研吾, 平沢尚彦, 2022: 低温風洞装置を用いた各種環境下における超音波積雪深計の性能評価. 2022 年度日本雪氷学会北信越支部総会および研究発表会・製品発表検討会. p13.

2) Furukawa, T., K. Kamiyama and H. Maeno, 1996: Snow surface features along the traverse route from the coast to Dome Fuji Station, Queen Maud Land, Antarctica. Pro. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 10, p13-p24.

[研究発表]

Oyabu, I., K. Kawamura, S. Fujita, R. Inoue, H. Motoyama, K. Fukui, M. Hirabayashi, Y. Hoshina, N. Kurita, F. Nakazawa, H. Ohno, K. Sugiura, T. Suzuki, S. Tsutaki, A. Abe-Ouchi, M. Niwano, F. Parrenin, F. Saito, M. Yoshimori, 2022: Temporal variations of surface mass balance over the last 5000 years around Dome Fuji, Dronning Maud Land, East Antarctica. Climate of the Past, 19, p293-p321.

Tsutaki, S., S. Fujita, K. Kawamura, A. Abe-Ouchi, K. Fukui, H. Motoyama, Y. Hoshina, F. Nakazawa, T. Obase, H. Ohno, I. Oyabu, F. Saito, K. Sugiura, T. Suzuki, 2022: High-resolution subglacial topography around Dome Fuji, Antarctica, based on ground-based radar surveys over 30 years. The Cryosphere, 16, p2967-p2983.

Liefferinge, B.V., D. Taylor, S. Tsutaki, S. Fujita, P. Gogineni, K. Kawamura, K. Matsuoka, G. M oholdt, I. Oyabu, A. Abe-Ouchi, A. Awasthi, C. Buizert, J.-C. Gallet, E. Isaksson, H. Moto yama, F. Nakazawa, H. Ohno, C. O'Neill, F. Pattyn, K. Sugiura, 2021: Surface mass balan ce controlled by local surface slope in inland Antarctica: implications for ice-sheet mass ba lance and Oldest Ice delineation in Dome Fuji. Geophysical Research Letters, 48 (24), <http s://doi.org/10.1029/2021GL094966>.

Morino, S., N. Kurita, N. Hirasawa, H. Motoyama, K. Sugiura, M. Lazzara,D. Mikolajczyk, L. Welhouse,L. Keller, G. Weidner, 2021: Comparison of ventilated and unventilated air temperature measurements in inland Dronning Maud Land on the East Antarctic Plateau. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 38 (12), p2061-p2070.

杉浦幸之助, 大井聖也, 根本征樹, 小杉健二, 2021: 低温風洞装置を用いた硬雪時の水平面風向直交方向への吹雪粒子の速度と角度. 雪氷, 83 (3), p285-p297.

平沢尚彦, 本山秀明, 山田恭平, 杉浦幸之助, 栗田直幸, 2021: AWS の積雪深計が観測する南極氷床表面堆積量の時間変化. 雪氷, 83 (1), p67-p77.

Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, N. Hirasawa, K. Sugiura, K. Yamada, 2020: Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the Southern Ocean: an extreme cyclone case. Advances in Atmospheric Sciences, 37, p431-p440.

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

(国立極地研究所)

平沢尚彦 助教

令和 2 年～令和 4 年 (3 か年)

[研究成果]

1. 要旨

汚染・清浄空気でのエアロゾル粒子の複素屈折率を推定した。汚染空気における屈折率は波長 550 nm で 1.55 であり、波長が短いほど大きい正常分散であると推定した。清浄空気では、直径 1 μm 付近を境に、微小粒子で 1.47、粗大粒子で 1.62 を得た。粗大粒子の高屈折率は、粗大粒子に有機炭素化合物が凝集し、オリゴマーを形成していることを示唆している。

2. 観測手法

北西太平洋と南大洋における砕氷艦「しらせ」の JARE52 航海中に、外気を第一観測室に引き込み、大気境界層内のエアロゾル粒子の散乱係数(σ_{ts}^λ)をネフェロメーター(波長 450, 550, 700 nm)、吸収係数(σ_a)を PSAP(565 nm)、個数粒径分布を光散乱式粒子計数器(OPC、780 nm)により計測した。

清浄空気では推定した複素屈折率($m = n - ik$)の解釈では、小笠原諸島父島での TSI 社製 Model3330 を用いた個数粒径分布の計測の結果も参照した。

3. 観測データ

本研究では、排気の影響を避けるため、相対風向が 90° から 270° の場合のデータを解析から除外した。

ネフェロメーターと PSAP では、測定原理に起因する不可避な誤差が生じる。そこで、文献に基づき、計測値の補正を行った。また、PSAP では、フィルターを 300°C に加熱し、 σ_a の過大見積りの原因となる散乱成分を蒸発させた。粒子計数器の校正は、polystyrene latex (PSL) 粒子を用いて行われる。環境中のエアロゾル粒子の複素屈折率は PSL のそれと異なるため、粒子の複素

屈折率を仮定して光散乱強度を求め、粒径境界を再構築して個数粒径分布を求めた。

4. 観測結果

北西太平洋における JARE52 航海での観測結果は、Ångström 指数(A)と σ_a が汚染大気(35.5° N–28.1° N)と清浄空気(25.3° N–12.2° N)で顕著に異なっていることを示した。汚染空気の A は 1.5–1.6 であり、清浄空気のそれは -0.04–0.08 であった。この違いは、直径 1 μm よりも小さい微小粒子の個数濃度が清浄空気よりも汚染空気が高いためである。一般に、人為的な吸収物質は微小粒子に含まれる。汚染空気では σ_a は高い値を示した。汚染空気の σ_a は、清浄空気のおよそ 10 倍であった。

北西太平洋における JARE52 航海での汚染空気と清浄空気および JARE51 航海での南大洋の清浄空気において、 σ_{ts}^λ に顕著な違いは無く、およそ $2\text{--}4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ であった。ただし、両航海の往路では、海氷域での σ_{ts}^λ は、開水域のおよそ 10 分の 1 に減少した。これは、エアロゾル粒子の前駆体や海塩粒子の大気への放出が海氷によって抑制されたことが原因であろう。この傾向は他の JARE 航海でも観測している。

また、南大洋では、往路での海氷域を除いて、全散乱係数 σ_{ts}^λ に対する後方散乱係数 σ_{bs}^λ の比は、波長に関係無く一様で平均 0.14 であった。

5. 複素屈折率の推定

エアロゾル粒子の散乱係数は

$$\sigma_{ts}^\lambda = \int \frac{\pi D^2}{4} Q_{ts}^\lambda(m, x) n(\log D) d \log D \quad (1)$$

から求めることができる。ここで D は粒子の直径、 $Q_{ts}^\lambda(m,$

x)は散乱効率で m と粒径パラメーター $x = \pi D/\lambda$ の関数、 $n(\log D)$ は個数粒径分布である。複素屈折率 m と λ を仮定すれば、実測した $n(\log D)$ を用いて σ_s^λ を推定することができる。また、式(1)で吸収効率 $Q_a(m, x)$ を用いると σ_a を得ることができる。

観測した σ_s^λ の A を 450 と 550 nm で oA_1 、450 と 700 nm で oA_2 、550 と 700 nm で oA_3 とし、推定した σ_s^λ の A を 450 と 550 nm で eA_1 、450 と 700 nm で eA_2 、550 と 700 nm で eA_3 とした。

ここで、複素屈折率の n と k を仮定して oAi と eAi を求め、 $i=1-3$ のそれぞれの差を2乗して合計した。この値が最小値のとき、適切な複素屈折率を得ることができる。なお、 n を 0.01 刻みで計算し、吸収係数の推定値が観測値と一致するように虚数部 k を決定した。

表1に n と k の推定値を示す。汚染空気では、推定した σ_s^λ が観測値と一致するためには、 n が粒径とは無関係に一樣で、正常分散でなければならなかった。

清浄空気では、常に $oA1 < oA2 < oA3$ の関係であった。エアロゾル粒子の化学組成の粒径分布から、およそ直径 1 μm を境に、微小・粗大粒子で n が異なっていると推測できる。粗大粒子の n が微小粒子のそれよりも大きいと仮定すると、 $eA1 < eA2 < eA3$ を得る。

6. 粗大粒子に有機炭素化合物が凝結している可能性
汚染空気において、波長 550 nm で推定した屈折率 1.55 は、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ や NaCl の屈折率に近かった。清浄空気では、微小粒子の屈折率は 1.47 で、これは NH_4HSO_4 のそれとほぼ同じであった。一方、粗大粒子の屈折率は相対的に高い 1.62 と推定された。

父島におけるエアロゾル粒子の個数粒径分布の観測では、試料空気から揮発性炭素化合物を除去するため、活性炭繊維を挿入したステンレス管を計測装置の空気取り込み口に接続した。接続の有無で、汚染空気では個数濃度に変化はなかった。

清浄空気では、接続した場合、接続なしと比較して粗大粒子の個数濃度が減少した。これは、粗大粒子に有機炭素化合物が存在していることを示唆している。

他機関での室内実験の結果を参考にすると、高い屈折率は、粗大粒子に有機炭素化合物が凝集し、オリゴマー化したためと考えられる。父島での観測結果も有機炭素化合物の粗大粒子への凝集を示唆している。

粗大粒子は有機炭素化合物の反応の場として機能していると考えられる。これを確認するために、清浄空気中のエアロゾル粒子の光学特性について、実態の把握がさらに必要である。

表1 汚染・清浄空気におけるエアロゾル粒子の複素屈折率の推定値

Wavelength nm	Polluted air 30.5°N - 29.5°N			Pristine air			
	n		k	n		k	
	Fine, Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse
						17.5°N - 16.0°N	14.5°N - 13.5°N
450	1.56						
550	1.55	0.0168 - 0.0188	0	1.47	1.62	0.0006 - 0.003	0.0015 - 0.0055
700	1.54						0

[研究発表]

Koga, S., 2021: Optical properties of aerosol particles in the atmospheric boundary layer in regions with and without sea ice. *Polar Sci.*, **29**, 100704, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100704>.

Koga, S., 2023: Complex Refractive Indices of Aerosol Particles in the Atmospheric Boundary Layer Over the Northwestern Pacific: High Refractive Index for Coarse Particles in Pristine Air. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.

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 三重大学大学院生物資源学研究科・教授
 本田明治 新潟大学理学部・教授
 西井和晃 三重大学大学院生物資源学研究科・准教授
 万田敦昌 三重大学大学院生物資源学研究科・准教授
 飯島慈裕 三重大学大学院生物資源学研究科・准教授
 小松謙介 東京大学大気海洋研究所・特任研究員
 (国立極地研究所)
 平沢尚彦 助教
 山内 恭 名誉教授
 猪上 淳 准教授
 令和2年度～令和4年度(3か年)

[研究成果]

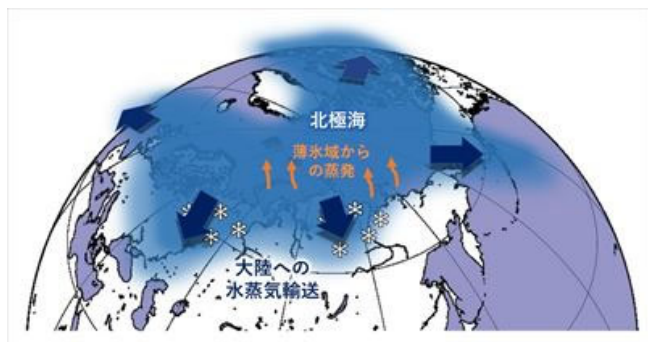
北極振動は日本の異常気象に、南極振動はオゾンホールに影響するため、両者を予測することは重要であり、これらは海洋とも双方向に影響を及ぼしている。さらに北極では河川を媒体として、海水・海洋過程はつながり、海水は大気水循環に影響を及ぼすことから、陸と海洋も双方向に作用している。このような大気・陸・海洋三位一体の変動と日本を始めとした中緯度現象との関連を理解するために、大気・海洋・陸を専門とする研究者と北極大気研究のパイオニア研究者にて極地研所蔵の観測データや測器を用いることで共同研究を立ち上げた。以下に代表的な研究成果の例を数点挙げる。

【豪雪をもたらす線状の降雪帯, JPCZ の構造とメカニズムを日本海洋上観測により明らかにした】日本に豪雪をもたらす JPCZ(日本海寒帯気団収束帯)を横断し、1 時間毎の洋上気球観測によってその実態を捉えることに成功した。JPCZ は、「大気の川」のような構造を持つ。気流が JPCZ に収束することに伴い、周囲の海面から蒸発した水蒸気が JPCZ に集中する。この JPCZ が河川の本流に相当する。日本海の広い範囲の暖かい海面から蒸発した水蒸気が JPCZ へ集まりそれが風下へ移動するさまは、たくさんの支流(branch)の水が本流に集まり、下流へと流れる「川」と同等である。また JPCZ は带状に伸びることから、いわば「線状の降雪帯」と言える。「支流」から「本流」に相当する JPCZ に水蒸気が集中し、強い雪雲となり豪雪となる。集中量を降雪に換算すると 7 時間で 1 メートルの降雪に相当し、この降雪量の約 9 割は支流からの水蒸気の集中がもたらす。「支流域」に相当する海域は、暖かい対馬暖流である。暖流の上に強風が吹き、大量の水蒸気が海から大気へ供給され、暖かい対馬暖流の影響で JPCZ が維持される。JPCZ は、一旦発生すると持続する機構(self-sustaining mechanism)を持つ(図 1)。気象庁気象研究所の数値シミュレーションでも、観測事例を概ね再現出来た。ただし気象衛星ひまわりから推定された日本海の海面水温は、我々が観測した水温よりも約 2℃低いことから JPCZ を過小評価していた可能性がある(Tachibana et al. 2022)。



図 1 観測で示された JPCZ の構造と海洋の役割

【温暖化する北極海から大陸に向かう水蒸気量の増加を発見】海氷面積の縮小や海水温の上昇など、近年急速に温暖化が進行する北極海周辺における大気中の水蒸気の流れを解析し、北極海から蒸発した水蒸気がユーラシア大陸や北米大陸に向かって近年多く輸送されていることを解明した(図 2)。北極域では地球全体の平均に比べて早いペースでの温暖化が進行しており、この傾向は今後も継続することが予測されている。このような北極の温暖化は様々な環境変化を誘発することが懸念されている。本研究では特定の地域から蒸発した水蒸気の、大気中における動きを追跡できる数値計算法を用いて、北極海から蒸発した水蒸気の輸送経路や輸送量を明らかにした。1981 年から 2019 年までの期間について解析したところ、北極海を起源とする水蒸気の輸送が 9 月から 12 月にシベリア地域で増加していることが分かった。このことはシベリアにおける地域的な積雪増加傾向とも整合的であり、北極海の海水減少や水温上昇が、ユーラシア大陸や北米大陸の水循環や生態系にも影響を与えることを示唆する結果と言える(Sato et al. 2022)。



【バルンツ・カラ海海氷へのユーラシア大陸上の気温応答に関する季節予報モデル予測の評価】バルンツ・カラ海(BKS)の海氷の変動が Warm Arctic, Cold Eurasia (WACE)パターンの励起を通じてユーラシア大陸の気温変動をもたらすと主張されている。この関係を複数の季節予報モデルによって検証した。

WACE 指数は BKS 上の気温に強く依存しており、秋の BKS の海氷状態と冬のユーラシア大陸上の気温の関係を必ずしも反映していないことがわかった。むしろ大気循環変動と冬の BKS の海氷とユーラシア大陸の気温の両方の変動を引き起こしている可能性を示した (Komatsu et al., 2022)。

【2020-2021 冬季のユーラシア大陸の低温と北極海海氷の減少】2020 年 12 月にはユーラシア中緯度で、2021 年 1 月にはユーラシア大陸亜寒帯域で低温が観測された。前者は WACE パターン、後者は負の北極振動(AO)を伴っていた。大気大循環モデルによる大規模アンサンブル実験により、前者の低温には北極海の家氷減少が WACE パターンの励起を通じて寄与していた可能性を示した。一方で、後者の低温は海氷も海面水温の変動も寄与しておらず、大気の内部分動によることが示唆された (Nishii et al. 2022)。

【研究発表】

1. Kawasaki, K., Tachibana, Y., T. Nakamura, and K. Yamazaki, Role of the cold Okhotsk Sea on the climate of the North Pacific subtropical high and Baiu precipitation, *Journal of Climate*, **34**, 495-507, DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0432.1, 2020
2. Suzuki, K., T. Hiyama, K. Matsuo, K. Ichii, Y. Iijima, D. Yamazaki, Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming, *Hydrological Processes*, **34**, 3867-3881. DOI: 10.1002/hyp.13844, 2020
3. Munkhjargal, E., M. Shinoda, Y. Iijima, B. Nandintsetseg, Recently increased cold air outbreaks over Mongolia and their specific synoptic pattern, *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.6531, 2020
4. Takahashi, N., T. Hayasaka, A. Manda, and N. Schneider, Impact of the Oyashio Extension SST front on synoptic variability of oceanic low-level cloud in summertime based on WRF numerical simulation, *Journal of Geophysical Research*, **125**, e2020JD032518, DOI: 10.1029/2020JD032518.
5. Manda, A., T. Mitsui, J. Inoue, M. E. Hori, K. Kawamoto, and Kensuke K. Komatsu, Storm-mediated ocean-atmosphere heat exchange over the Arctic Ocean: A case study of a Barents Sea cyclone observed in January 2011, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, **4**, 1-9, 2020
6. Overland, J. E., Baek-Min Kim, and Tachibana, Y.: Communicating Arctic-Midlatitude Weather and Ecosystem Connections: Direct Observations and Sources of Intermittency. *Environmental Research Letters*, **16**, 105006, DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac25bc>, 2021
7. Yasunari JTH, Nakamura KMK, Choi N, Lee MI, Tachibana Y, Silva AMD, Relationship between circum-Arctic atmospheric wave patterns and large-scale wildfires in boreal summer, *Environmental Research Letters*, **16**, 064009, DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf7ef>, 2021.
8. Nakanishi, T., Tachibana, Y., and Y. Ando, Possible semi-circumglobal teleconnection across Eurasia driven by deep convection over the Sahel, *Climate Dynamics*, **57**, 2287-2299, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05804-x>, 2021.
9. Kasuga, S., M. Honda, J. Ukita, S. Yamane, H. Kawase, A. Yamazaki, Seamless Detection of Cutoff Lows and Preexisting Troughs, *Monthly Weather Review*, **149**, 3119-3134, DOI:10.1175/mwr-d-20-0255.1, 2021
10. Komatsu, K. K., Y. Iijima, Y. Kaneko, D. Oyunbaatar, Validation of GSMaP Products for a Heavy Rainfall Event over Complex Terrain in Mongolia Captured by the GPM Core Observatory, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1003-1022, 2021.
11. Manda, A., Impact of sea-ice cover on storm-mediated atmospheric warming over the Barents Sea: A regional modelling study, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2021.
12. Manda, A., Atmospheric warming over the Barents Sea during moisture intrusion events in January 2006. Part I: Heating mechanism, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2022.
13. Manda, A., Atmospheric warming over the Barents Sea during moisture intrusion events in January 2006. Part II: Impact of sea ice decline, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2022.
14. Tachibana, Y., M. Honda, H. Nishikawa, H. Kawase, H. Yamanaka, D. Hata, Y. Kashino, High moisture confluence in Japan Sea polar air mass convergence zone captured by hourly radiosonde launches from a ship, *Scientific Reports*, **12**, DOI:10.1038/s41598-022-23371-x, 2022.
15. Nishii, K., T. Bunmei, M. Masato, K. Yu, N. Hisashi, Arctic Sea Ice Loss and Eurasian Cooling in Winter 2020-21, *SOLA*, **18**, 199-204, DOI:10.2151/sola.2022-032, 2022.
16. Komatsu, K. K., Y. Takaya, T. Toyoda, H. Hasumi, Response of Eurasian Temperature to Barents-Kara Sea Ice: Evaluation by Multi-Model Seasonal Predictions, *Geophysical Research Letters*, **49**, 2022.
17. Sato, T., T. Nakamura, Y. Iijima, T. Hiyama, Enhanced Arctic moisture transport toward Siberia in autumn revealed by tagged moisture transport model experiment, *npj Climate and Atmospheric Science*, **5**, 2022.
18. Konstantinov, P., N. Basharin, A. Fedorov, Y. Iijima, V. Andreeva, V. Semenov, N. Vasiliev, Impact of Climate Change on the Ground Thermal Regime in the Lower Lena Region, Arctic Central Siberia, *Land*, **12**, 19-19, 2022.

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・准教授
 本間智之 長岡技術科学大学工学部機械系・准教授
 (国立極地研究所)
 東 久美子 教授
 令和3年～令和4年(2か年)

【研究成果】

極地研究所では、グリーンランド氷床氷コア中の不純物分析のため、電子顕微鏡 (SEM) 観察とエネルギー分散型X線分析 (EDS) 測定が行われている。その深部氷コア中には気泡から相変化したエア・ハイドレート結晶と固体微粒子が共存することが多く、エア・ハイドレート結晶からの情報も同時に取得することができる。そこで本研究は、エア・ハイドレート結晶から得られた EDS データを用い、エア・ハイドレート結晶中に濃縮されていると期待される大気微量成分である希ガスを検出することを目的とした。

エア・ハイドレート結晶が生成する際、その成分の解離圧差によって組成が変化する分別現象が起こる。これまでラマン分光法を用いて、大気の主成分である窒素と酸素の比率が変化していることが計測されているが、アルゴンのようなラマン不活性な大気微量成分がエア・ハイドレート結晶中に貯蔵されているか実験的証拠は得られていない。氷コア中に含まれる希ガス成分がどのように存在しているかを知ることは、過去の大気組成変動の解析には重要であり、そのためには EDS 法による検出が有望である。

本研究の1年目は、エア・ハイドレート結晶中に濃縮されていると期待されているがラマン不活性なため直接検出されたことの無いアルゴンの存在を確かめることを目的とし、グリーンランド氷床氷コア中エア・ハイドレート結晶の EDS データを解析した。試料としては、北グリーンランド氷床深層掘削計画*6で掘削された氷コアのうち、約2万年前の氷河期の氷 (1,548m 深) と約12万5千年前の間氷期の氷 (2,406m 深) 中に存在していたエア・ハイドレート結晶を用いた。

光学顕微鏡で観察した結果、氷試料中には多数のエア・ハイドレート結晶が観測された (図 1a)。これは、使用した氷試料が掘削後も品質が保たれていることを示す。

この氷試料を -20°C の低温室内で観測用に整形し、SEM 試料室中の -140°C まで冷却できるステージ上に設置した。試料室は窒素ガス 120Pa の低真空状態にして、安定した電子顕微鏡観察ができるように工夫した。その結果、氷表面上に露出したエア・ハイドレート結晶を SEM 観察することができた (図 1b, c)。そこでエア・ハイドレート結晶内部と周辺の氷において EDS 分析を行った。

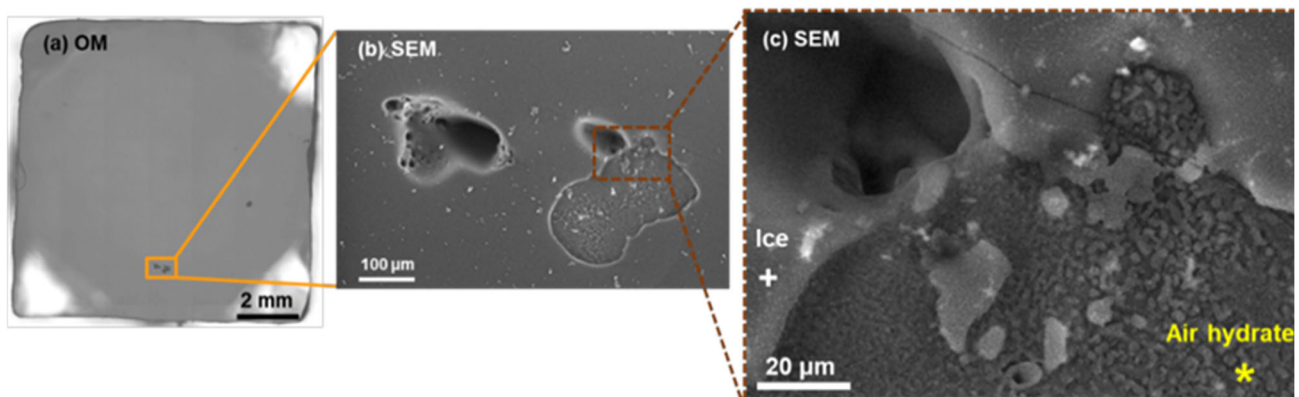


図 1. (a)観測した氷試料の光学顕微鏡 (OM) 写真。(b)氷試料中のエア・ハイドレート結晶の SEM 写真：光学顕微鏡では見えにくかった直径 0.3mm ほどのエア・ハイドレート結晶が観察できる。(c)その一部をさらに拡大し、EDS 分析を行った場所 (+：氷、*：エア・ハイドレート結晶) を示した。

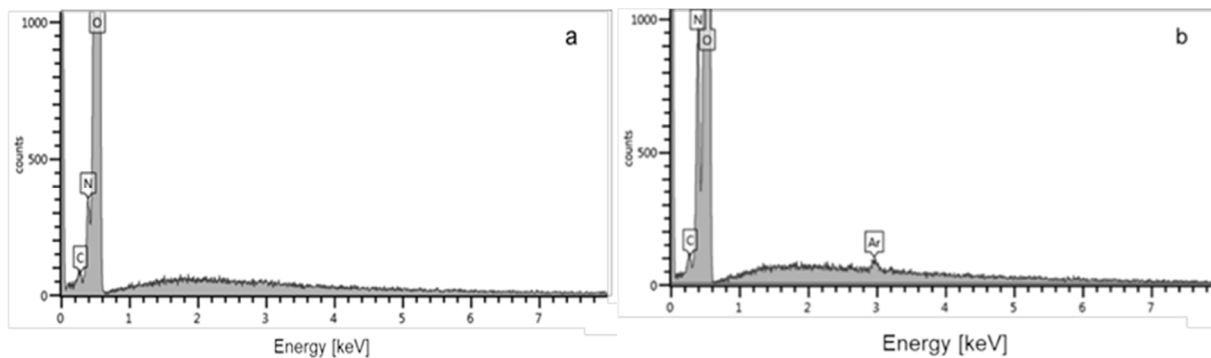


図 2. 図 1(c)で示した場所で測定した、EDS スペクトル (a: 氷中 (図 1+印), b: エア・ハイドレート結晶中 (図 1*印))。計測された元素は記号で示している。

図 2 に示すように、アルゴンがエア・ハイドレート結晶中に貯蔵されている実験的証拠を見出し、EDS 法の有効性を確認した。その結果を J. Glaciol. 誌に論文発表し、雪氷研究大会で口頭発表を行った。また論文発表後和文と英文でプレスリリースを行い、国内では 2 誌の新聞に掲載され、海外では 9 つ

のウェブニュースに取り上げられた。2 年目には、1 年目に得られた知見をもとに、エア・ハイドレート結晶の生成に伴う気泡内ガスの濃縮効果や、結晶成長に伴う氷中のガス拡散機構等について考察を行った。

[研究発表]

- T. Uchida, W. Shigeyama, I. Oyabu, K.G. Azuma, F. Nakazawa, T. Homma, K. Kawamura, D. D. Jensen; Discovery of argon in air-hydrate crystals in a deep ice core using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy, Journal of Glaciology, Vol. 68, No. 269, p547–p 556, 2022.
- プレスリリース (北海道大学、国立極地研究所、長岡技術科学大学)；氷に閉じ込められた太古の大気からアルゴンの検出に成功, 2021. 11.24.
 - 日刊工業新聞、2021.12.2：氷床氷中 太古の大気解析 アルゴンの検出成功 北大など
 - 新潟日報、2022.1.8：太古のアルゴン世界で初検出 グリーンランド深部の氷掘削 大気の歴史解明に期待 長岡技科大・本間准教授のチーム
- プレスリリース (北海道大学、国立極地研究所、長岡技術科学大学)；Argon found in air of ancient atmosphere, 2022. 3.30.
 - Science Daily, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - EurekAlert!, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - Innovation News Network, 30 Mar 2022：Earth's atmosphere revealed by temperature changes and climate shifts
 - SCIENMAG: Latest Science And Health News, ScienMag, 30 Mar 2022：Argon Found In Air Of Ancient Atmosphere
 - Mirage News, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - Phys.org, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - Newswise, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - The Archaeology News Network, 30 Mar 2022：Argon found in air of ancient atmosphere
 - Technology Networks, 31 Mar 2022：News Ancient Atmosphere Found To Contain Argon Researchers have discovered argon trapped in air-hydrate crystals in ice cores, which can be used to reconstruct past temperature changes and climate shifts.

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（3）地 圏

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 京都大学理学部・教授

(国立極地研究所)

山口 亮 准教授

令和3年～令和4年(2か年)

[研究成果]

1. はじめに

南極ドームふじ基地の風上数 km の表層雪(表面より約 10cm の深さまでの雪)を日本に冷凍したまま持ち帰り、その雪をクリーンルーム内で融解ろ過し、ミリポアフィルタ上の微細な残留物から南極宇宙塵(正確には, Antarctic micrometeorites: AMMs)を回収して、研究を行ってきた[例1から4]。現在も成果論文を作成しているところではある。しかしながら、アメリカの惑星間塵(Interplanetary dust particles: IDPs)の研究者の一部からは、ろ過時に南極宇宙塵が冷水に最長で数時間触れることで、水との反応性の高い非晶質珪酸塩や有機物の化学組成や構造が変化しているのではないかという懸念が述べられることがしばしばあった。そこで、本研究では、この表層雪を凍結乾燥し、テフロンシート上に残留した微粒子から南極宇宙塵を探して分析を行い、雪を融解ろ過して回収したものとの間に違いがあるかどうかを検討した。

2. 雪の凍結乾燥法の開発

使用した表層雪は、59 次および 60 次南極観測隊が冷凍したまま極地研究所に持ち帰り、 -30°C の冷凍庫に保存したものを使用した。この雪を、極地研内のクリーンルーム中に設置した冷凍庫に1箱ずつ持ち込んだ。凍結乾燥を行うため、クリーンルーム内のクリーンベンチに設置したフリーズドライ装置 EYELA 製 FDU-1200 本体に1回のバッチ量約 1 kg を直径 20 cm に切ったテフロンシート上で凍結乾燥を繰り返した。後の分析で影響が出ないように、オイルの逆拡散を防ぐため、樫山製 NeoDry 7E-S 100V ドライポンプを真空ポンプとして用いた。初期には約 1 kg 雪を凍結乾燥したところで、研究代表者が当時勤務していた九州大学に嚴重に包装の後発送していたが、宇宙塵の発見効率を上げるためにより多くの雪を1枚のテフロンシート上で凍結乾燥するようにした。今後、テフロンシートを置く板をあらかじめ冷却して置いた状態でシートを設置してから凍結乾燥を行うことで、室温の台とシートに雪を置き始めたときにわずかに雪が融解する影響を減せるように準備中である。

3. 南極微隕石の凍結乾燥残渣からの発見

前回の報告で述べたように、雪 17 kg を凍結乾燥した後の6枚のテフロンシート上の残渣微粒子から、1529 個の微粒子を実体顕微鏡に設置したマイクロマンipュレータを使って取り出した。そして、10 個の chondritic porous (CP) AMMs, 6 個の hydrated fine-grained (H-fg) AMMs, および 5 spherules を発見することができた。それらの平均径は 10 から 54 μm であった。CP AMMs, H-fg AMMs と Spherules の平均径と標準偏差は、それぞれ、 $20 \pm 10 \mu\text{m}$, $34 \pm 20 \mu\text{m}$, and $17 \pm 10 \mu\text{m}$ であった。うち、2 試料については(走査)透過電子顕微鏡(S)TEM 観察・分析を行うことができた。雪を融解・ろ過して回収した南極宇宙塵と宇宙塵の組織・鉱物・鉱物の化学組成とも顕著な違いは見いだせなかった。しかし、わずか2試料であることから、今後更に多くの試料の解析と(S)TEMをつかった観察と分析が必要である。

大部分の微粒子は炭素質の粒子であり、雪上車から放出されている煤と考えられる。また、鉄酸化物微粒子が次に多い。これは炭素質物質と共存することが多いことから、雪上車の排気管から排ガスと共に放出されているものと考えられる。テフロンシート上には、透明からわずかに色の付いた塩化物と硫化物結晶が多量に存在する。これらは容易に潮解することもあり、マンipュレータで触れてもシートから剥がすことはできなかった。内陸 1000 km の雪であるにもかかわらずこのような海塩と思われる微粒子が多い。

2年間と膨大な作業時間を使って21 個の南極宇宙塵しか回収することができなかった。雪を融解ろ過した場合は、多い場合1年間で百数十個の南極宇宙塵を回収することができることを考えると、1/6 から 1/7 の発見効率にしかならず、これを改善することが必要である。ただし、アメリカはスコット・アムンゼン基地近くに大気を吸引する専用の施設を作って宇宙塵の回収を試み、その結果を報告している[5]ではほぼ回収できていない。我々の結果は現状でも、問題なく CP AMM と H-fg AMM の(S)TEM 観察・分析に成功しており、また、宇宙塵の発見数

も [5] の研究をはるかに凌駕している。昨年度と今年度は「はやぶさ 2」の分析と論文執筆に多くの時間を取られたが、これから凍結乾燥法での南極宇宙塵の発見について論文作成する予定である。

4. 南極微隕石の発見効率向上の試み

直径 20 cm のテフロンシートを切らずに取り扱っていたが、シートのたわみも顕著で作業に支障があったことを考慮し、テフロンシート切断専用のクリーンブースを設置して、シートを 4 等分し周囲 3 mm を押さえるシート固定治具を作成した。これにより、フォーカスの変化も少なくなり、粒子検出も容易になった。また、このホルダーは蛍光 X 線顕微鏡によりテフロンシート上から直接宇宙塵を探せるように、この装置の試料ホルダーに合うサイズに設計した。このホルダーに 1/4 に切ったテフロンシートを載せて、ピクセルシフト機能の付いたデジカメでシート全体を撮影した。そして実体顕微鏡でシート上の粒子と画像の照合を行い、画像の XY 座標データをピクセル数で読み込み、ピクセル数値を現実の XY 座標値に変換した。この座標データを使って、京都市の堀場テクノサービスにて最新型の蛍光 X 線顕微鏡 XGT9000Expert を使って南極宇宙塵の同定を試みた。この機器は京大にある機器の 10 倍の感度がある。しかし、スフェルールらしき球状粒子の破片から Mg, Si, と少量の Fe の特性 X 線ピークを得られたが、不定形粒子からは Mg, Si, Fe の特性 X 線を示すものは見いだせなかった。なお、Si, Al にとみ Na, K, Ca, Fe を少量含む 2 八面体層状珪酸塩と思われる微粒子は数個見いだされた。地球起源の粘土粒子と思われる。宇宙塵の数が少ないだけでなく、やはり蛍光 X 線顕微鏡の Mg 等の軽元素の感度が足りないため、多孔質の宇宙塵中の Mg のような軽元素に対する蛍光 X 線顕微鏡の感度は、走査電子顕微鏡 SEM に取り付けられたエネルギー分散型 X 線分光器 EDS には及ばないことが明らかになった。今後、1/4 シート全面が観察できるステージを持ち、かつ、低加速電圧と低電流で EDS 分析ができる SEM を使った試料同定テストを行う必要があると考えられる。

5. 鏡面光沢のある金薄板を使った試料台を使った南極宇宙塵の探索

2 年かけて発見した 21 個の南極宇宙塵のうち 2 個は(走査)透過電子顕微鏡(S)TEM で観察と分析ができたが、さらに 2 個はハンドリング中に紛失してしまった。それら以外は SEM では存在が確認できるが実体鏡下では粒子が確認できない。これは圧延加工をした白金薄板を試料台に使っているため、ヘアライン状条線が板に無数に入っており、乱反射するためだと考えた。

そこで、新たに金の薄板を光学グレードのアルミナ板 2 枚で挟み油圧プレスし、肉眼的には光沢のある金の薄板を作成し、その上に凍結乾燥残渣微粒子を載せて SEM-EDS を行った。そうして見出した南極宇宙塵の二次電子像を図 1 に示す。これは約 $15 \times 10 \mu\text{m}$ と惑星間塵と同じようなサイズではあるが、光学顕微鏡下で存在は確認することができた。しかし、SEM スケールでは圧延加工時のヘアライン状条線が多数残っている。SEM 試料載台に使う白金あるいは金板の研磨によらない鏡面加工法の検討は、微小な南極微隕石を Lost せずに研究するために必要な今後クリアすべき課題のひとつである。

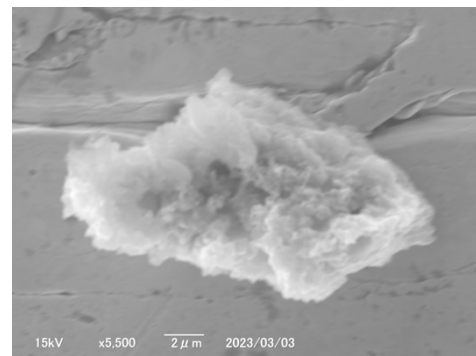


図 1 金板上の南極宇宙塵の二次電子像

6. まとめ

以上より、低加速・低電流で SEM-EDS 観察分析しテフロンシートから直接宇宙塵を探すテストをすること、金又は白金試料台の研磨しない鏡面加工方法を検討することが次の課題となるであろう。これらがクリアできれば、試料探索速度を律速するのは凍結乾燥の処理速度になるかも知れないが、そこまで速い必要はないかも知れない。これら課題をクリアし、本来の目的である処理方法の違いの影響を論じられるだけの分析試料数を得たいと考えている。

[参考文献] 1) Noguchi et al. 2015. Earth Planet. Sci. Lett. 410, 1–11. 2) Noguchi et al. 2017. Geochim. Cosmochim. Acta 208, 119–144. 3) Yabuta et al. 2017. Geochim. Cosmochim. Acta 214, 172–190. 4) Noguchi et al. 2022. Meteorit. Planet. Sci. 57, 2042–2062. 5) Taylor, S. et al. 2020. Meteorit. Planet. Sci. 55, 1128–1145.

[研究発表] なし

(別紙) 参加者一覧

研究代表者 野口高明

担当教員 山口 亮

研究協力者 富永崇仁（九州大学理学研究院修士課程）

研究協力者 北村悠樹（京都大学理学部 3 年生）

謝辞 堀場テクノサービス

(別紙)

研 究 協 力 者 参 加 者 一 覧

	一般共同研究(令和4年度報告)			課題番号	2-19
	研究課題名	雪の処理方法の違いが微隕石に与える影響の評価			
	氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)					
小計	名				
所外 (極地研以外)	富永崇仁	九州大学理学研究院	大学院生		
小計	1 名				
合計	1 名				

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

(国立極地研究所)

外田 智千 教授

令和2年～令和4年（3か年）

[研究成果]

第58次日本南極地域観測隊(JARE58)で採取したリュツォ・ホルム岩体(LHC)の岩石試料について岩石学的研究を行い、変成温度圧力条件、年代、原岩の相違について詳細を把握し、変成作用と地体構造区分の関係を広域的に再検討することを目的としている。研究期間中は、あけぼの岩、天文台岩、ボツンヌーテンについて主に研究を遂行した。

【1】あけぼの岩：LHC 東部、プリンスオラフ海岸のあけぼの岩に認められる剪断帯について、変形変成史を明らかにした。あけぼの岩では3つの変形ステージが認識された。D1ステージは、開いた褶曲(F1)、ブーディネージ、局所的な延性片理の形成で特徴づけられ、ザクロ石が安定に存在することによって定義される。D2ステージは、主にあけぼの岩の西部に発達した isoclinal~tight な非対称褶曲 (F2)

で特徴づけられ、黒雲母安定条件下で後退変成作用を伴う剪断面(S2)が発達する。D3ステージでは、マイロナイトおよびLテクトナイトを伴う剪断帯が約 610 ~ 660 °C および 4~5 kbar の条件で形成したことが明らかになった(図1)。

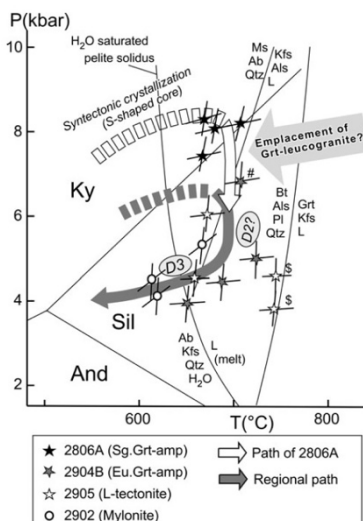


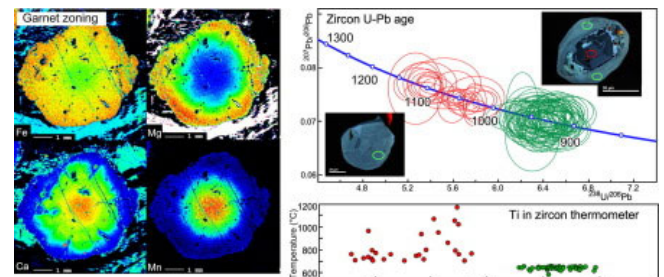
図1. あけぼの岩の温度圧力変形履歴(Baba et al., 2021)

スノーボール状のザクロ石には、S字型のインクルージョントレイルがあり、D2剪断面の形成前に成

長したことが示唆され、その温度圧力条件は、スノーボール状のザクロ石を含む角閃岩がより深い地殻レベルで再結晶し、剪断帯の形成中に上昇したことを示していた。

あけぼの岩から見出した含藍晶石-ザクロ石-黒雲母片麻岩の温度圧力シュードセクション法から推定された変成作用の温度圧力経路、およびザクロ石の組成ゾーニングから実験的に較正された温度圧力条件は、片麻岩が時計回りの角閃岩相の履歴を経たことを示唆していた。この岩石について国立極地研究所の SHRIMP-II を用いて U-Pb ジルコン年代測定を実施したところ、1121-1014 Ma および 972-904 Ma の年代クラスターが特定され、後者の加重平均年齢は 937 ± 6 Ma であった。この若い年代クラスターは、ジルコン粒子の過成長した縁辺部と単一のジルコン粒子から得られ、その Ti-in-zircon 温度測定結果は、約 642 °C を示すことから、変成

図2. 昇温変成作用を示すザクロ石の組成累帯構造とU-Pb ジルコン年代測定結果(Baba et al., 2022)



ルコン年代測定結果(Baba et al., 2022)

ピークに近い年代であることが明確になった(図2)。加えて、4つのサンプルから得られたモナザイト EMP 年代も、977 ~ 917 Ma を示していた。これらの証拠は、あけぼの岩片麻岩の角閃岩相変成作用がトニアン期、つまり新原生代後期からカンブリア紀とされる LHC の変成年代よりも、早い時期に発生したことを示している。この結果は、プリンスオラフ海岸周辺露岩における LHC の変成作用について根本的な修正および再検討が必要であること

を示唆している。

【2】天文台岩：天文台岩から採取された藍晶石を含む泥質片麻岩について、変成組織、鉱物化学組成、地質温度圧力計、温度圧力シュードセクション法を使用して、変成温度圧力経路を再検討した。これらの片麻岩は、グラニュライト相の変成作用を受けており、反時計回りの変成温度圧力経路を示すことが明らかになった。推定された経路は、LHC 基盤岩から広く報告されている時計回りの温度圧力経路とは対照的で、天文台岩の塩基性グラニュライトから推定された温度圧力経路と矛盾する結果である。反時計回りの温度圧力経路は、この地域の地質学的特徴に基づくと、後期圧縮を伴うマグマ活動に由来すると想起される。異なる2つの温度圧力経路を示すために、その地質学的背景と要因を今後明らかにする必要がある。

【3】ボツンヌーテン：リュツオホルム湾の南端から約 60 km に位置する孤立した岩峰であるボツンヌーテンから堇青石巨晶を見出した。堇青石およびスピネルを含む片麻岩 2 試料に観察される鉱物組織に基づき、温度圧力シュードセクション法を使用して、変成温度圧力経路を推定した (図 3)。その結果、これらの片麻岩は、反時計回りの温度圧力経路を示しめすことが明らかになり、この経路は、LHC の基盤岩の広く認識されている時計回りの温度圧力経路とは一致しない。ボツンヌーテンの岩石は、その岩石学的特徴と温度圧力条件に基づいて、LHC の一部と長い間考えられてきたが、利用可能な過去のデータを再評価したところ、ボツンヌーテンの変成作用は西に位置するヤマト山脈の変成作用に類似する可能性を指摘した。

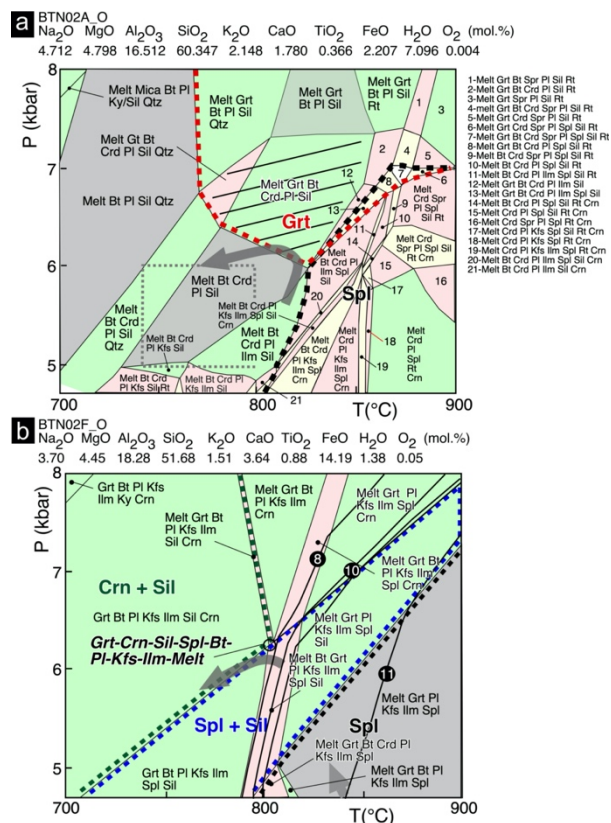


図 3. ボツンヌーテンでの温度圧力シュードセクション法 (Baba et al., in submitted)

【1】～【3】の結果は、いずれも LHC でこれまで明らかになっていない新発見であり、これらに基づく地帯構造区分ならびに地殻進化発達史を構築する必要がある。

[参考文献] および[研究発表]

- 1) Sotaro Baba, Tomokazu Hokada, Atsushi Kamei, Ippei Kitano, Yoichi Motoyoshi, Prayath Nantasinsin, Nugroho Imam Setiawan, Davaa-Ochir Dashbaatar (2021) Tectono-metamorphic evolution and significance of shear-zone lithologies in Akebono Rock, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Antarctic Science, Vol. 33, 52-72.
- 2) Sotaro Baba, Kenji Horie, Tomokazu Hokada, Mami Takehara, Atsushi Kamei, Ippei Kitano, Yoichi Motoyoshi, Prayath Nantasinsin, Nugroho I. Setiawan, Davaa-ochir Dashbaatar (2022) Newly found Tonian metamorphism in Akebono Rock, eastern Dronning Maud Land, East Antarctica. Gondwana Research, Vol., 105, 243-261.

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理学系・助教

(国立極地研究所)

三澤啓司 准教授

令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

海洋炭酸塩は地球表層におけるカルシウムと炭素の最大規模のシンクであることから、海洋炭酸塩生成／分解程度の指標の確立が、カルシウム循環と炭素循環の定量的理解の鍵である。海洋炭酸塩生成／分解指標として確立が期待されるのは、海洋炭酸塩に記録された海水カルシウム安定同位体である。

カルシウム同位体の5つの核種 (^{40}Ca , 96.941%; ^{42}Ca , 0.647%; ^{43}Ca , 0.135%; ^{44}Ca , 2.086%; ^{46}Ca , 0.004%; ^{48}Ca , 0.187%) のうち、存在度の高い2つの安定核種の比 ($\delta^{44/40}\text{Ca}$) が利用され、千分率偏差で以下の式で表記される。

$$\delta^{44/40}\text{Ca}[\text{‰}] = ((^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca})_{\text{sample}} / (^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca})_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

高精度カルシウム安定同位体組成は、ダブルスパイク(DS)法で表面電離型質量分析計を用いて測定される。DS法は2種類の同位体を加え、3つの同位体について同位体希釈法を適用することにより、質量分析計をもちいた測定中に起こる同位体分別効果を補正して同位体組成を求める方法である。

海水カルシウム同位体組成は、水深・海域によらず全海洋で一様であるためグローバルな表層変動の指標として利用できる(Zhu and MacDougall, 1998; De La Rocha and DePaolo, 2000)。海洋炭酸塩は、二次的な同位体系擾乱をうけていない場合、堆積時の古海水カルシウム同位体組成を反映する。炭酸塩生成時に軽い同位体が炭酸塩に選択的に移動する同位体分別がおきることで、海洋炭酸塩は海水より0.56-1.45%低い値となる(Zhu and MacDougall, 1998)が、同位体分別の程度も幅があり、種あるいは生成環境、続成作用の影響など、時間軸の精度も含め、詳細な検証が指標としての確立に必要である。

海水カルシウム同位体組成は、供給源から海洋へ

のカルシウム供給変化と炭酸生成過程でおきる同位体分別が影響する。つまり、海洋への主なカルシウム供給源である大陸フラックス、マントルフラックスの変動のほか、炭酸塩生成時に同位体分別がおきることから、海洋炭酸塩生成／分解の程度も海水カルシウム同位体組成へ影響し、それが海洋炭酸塩に記録される(e.g., Farkas et al., 2007)。供給源からのカルシウム流入や海洋炭酸塩生成／分解バランスの変化要因は、グローバルテクトニクスや気候変動に伴う海水の化学状態(温度, pH, 二酸化炭素濃度など)、陸域の風化侵食率、氷床増減、海水準(陸棚露出)の変化が示唆されている(e.g., DePaolo, 2004)。

本研究では高精度カルシウム同位体分析法の確立のため、岩石標準試料からのカルシウム単離抽出法構築、標準試料の繰り返し測定、DS調整を実施した。

2. 分析方法

カルシウム同位体は、同位体間の質量差と存在度差が大きい(^{40}Ca の存在度がその他の核種と比較して高い)ため、カルシウム同位体分析に適した広いダイナミックレンジと広い範囲で検出器の物理的な稼働が可能な熊本大学の表面電離型質量分析計(Thermo Fisher Scientific, Triton-Plus)を用いた。Ca同位体の分析条件を表1に検出器構成を表2に示す。

標準試料はNIST SRM915a(CaCO_3)を用いた。岩石標準試料からのカルシウム単離抽出は、Antonelli et al., (2021)にならいEichrom® DGA resinを用いて行った。また、DGA resinからの溶離する有機物をMitsubishi MCI GEL CHP-20P, particle size: 37-74 μm によって除去した(図1)。また、カルシウム標準試料(999 $\mu\text{g/g}$ 溶液, Ca存在量として500 μg , 200 μg 相当を想定)について単離抽出操作を行った。

表 1. Ca 同位体分析装置セッティング及び分析条件

分析装置セッティング

加速電圧	10 kV
アンプ抵抗値	10 ¹¹ Ω (9 Faraday cups)
イオンソース真空度	8-10×10 ⁻⁸ mbar
検出部真空度	3×10 ⁻⁹ mbar

分析条件

イオン化フィラメント温度	1570℃
積分時間 (表 2. Line 1-3)	2.097 秒×8 回
/サイクル (表 2. Line 4)	1.049 秒×1 回

10 サイクル×10 ブロック (100 ratios/sample)

表 2. 検出器構成

Cup#	L3	L2	L1	C	H1	H2	H3
Line 1	³⁹ K	⁴⁰ Ca		⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca	
Line 2	⁴⁰ Ca		⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca		⁴⁶ Ca
Line 3	⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca	(45.015)*	⁴⁶ Ca	⁴⁷ Ti	⁴⁸ Ca
Line 4				⁴⁷ Ti (SEM)			

*dummy mass

3. 分析結果

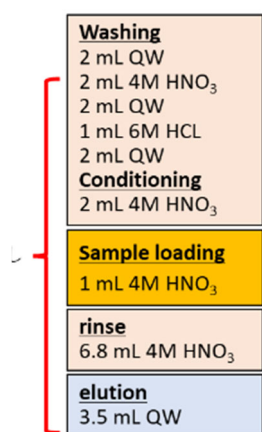


図 1. Ca 単離抽出手順

本単離手法によるカルシウムの回収率は、Ca 存在度 500 µg の場合は 47.8%，200 µg の場合は 98.9%であることが確認された(図 2)。

NIST SRM915a の 7 回の繰り返し測定の結果、 $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca} = 47.1647 \pm 0.0059$ (2SD [Standard Deviation], n=7)を得た。一方、1 回の分析 (100 ratios)の内部精度は 34-49 ppm 程度であった。

NIST SRM915a の分析結果を表 3 に示す。表 3 に示した $\epsilon^{40}\text{Ca}$ 値は、7 回の繰り返し分析の $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$ 比

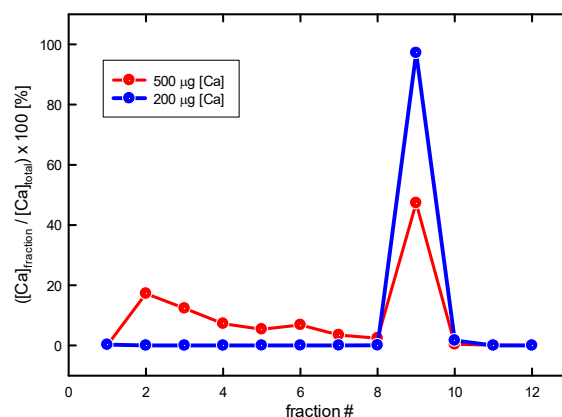


図 2. 単離抽出操作における elution curve

図 1. に示す sample loading から 1 mL 毎に回収した溶液 (rinse の最終溶液は 0.8 mL, elution の最終溶液は 0.5 mL を回収し、12 のフラクションに取り分けたもの) について定量し、カルシウムの総量に占める各フラクションの割合を示した。

の平均値と測定毎に得られた $^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$ 比を比較した時のずれ値を表す (1式)。

$$\epsilon^{40}\text{Ca} = [(^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca})_{\text{each value}}/47.1647 - 1] \times 10^4 \quad \dots(1)$$

2 種のシングルスパイク ORNL ^{42}Ca : 12.1 [µmol/g] と Isoflex ^{43}Ca : 9.54 [µmol/g]を調製した。誤差拡大が最小になるように両者を混合し ^{42}Ca - ^{43}Ca ダブルスパイクとする。今後は、既知量の NIST SRM915a と DS を混合し、逆定量により DS の同位体組成を高精度で求める。

表 3. NIST SRM915a の分析結果

run#	Date	$^{40}\text{Ca}/^{44}\text{Ca}$	error (2SE)	%error (%)	$\epsilon^{40}\text{Ca}$
1	Nov. 22nd, 2022	47.1637	0.0022	0.0046	-0.22
2	Nov. 22nd, 2022	47.1660	0.0018	0.0039	0.28
3	Nov. 23rd, 2022	47.1680	0.0016	0.0034	0.70
4	Nov. 23rd, 2022	47.1638	0.0021	0.0044	-0.19
5	Nov. 25th, 2022	47.1677	0.0022	0.0046	0.63
6	Nov. 25th, 2022	47.1593	0.0023	0.0049	-1.15
7	Nov. 25th, 2022	47.1645	0.0023	0.0049	-0.06
Mean		47.1647	0.0059	0.0126	

[参考文献]

- 1) Zhu and MacDougall, 1998; Calcium isotopes in the marine environment and the oceanic calcium cycle. *Geochem. Cosmochem. Acta*, Vol.,62, p1691–p1698.
- 2) De La Rocha and DePaolo, 2000 ; Isotopic evidence for variations in the marine calcium cycle over the Cenozoic. *Science*, Vol.,289, p1176–p1178.
- 3) Farkas et al., 2007; Calcium isotope record of Phanerozoic oceans : Implications for chemical evolution of seawater and its causative mechanisms. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol.,71, p5117–p5134.
- 4) DePeolo, 2004; Calcium isotopic variations produced by biological, kinetic, radiogenic and nucleosynthetic processes. In : *Geochemistry of nontraditional stable isotopes* (eds. C. M. Johnson, B. B. L. and Albarede, F.), Mineralogical Society of America, Geochemical Society, p255–p288.
- 5) Antonelli et al., 2021 Calcium isotope evidence for early Archaean carbonates and subduction of oceanic crust, *nature communications*, 12, Article number: 2534.

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 神奈川大学理学部・准教授
海老原充 東京都立大学理学部・客員教授

(国立極地研究所)
山口亮 准教授
令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

鉄隕石は、主に鉄ニッケル合金からなる隕石であり、ほとんどの鉄隕石は分化した小惑星の核由来と考えられている。全岩の Au 濃度と Ga, Ge や Ir 濃度をプロットすると、元素の揮発性や液体金属と固体金属間での分配係数の違いが反映され、鉄隕石母天体に集積した材料物質の特徴やその母天体での核形成を反映したグループに分けることができる。そして、13 個のグループに分けることができる。13 個のグループとは異なる化学組成を持つ鉄隕石は **ungrouped** と分類されている。鉄隕石の化学組成は、主に機器中性子放射化分析法 (INAA) を用いて求められてきた。一方、溶液化を伴う誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) による鉄隕石の分析例の報告はあるが、溶液化で一部元素 (例えば、Ge) の揮発の恐れなどであまり用いられていない。近年では、固体試料表面にレーザーを照射し、蒸発・微粒子化した試料をキャリアガスにより ICP-MS 装置に導入するレーザーアブレーション(LA)ICP-MS により鉄隕石の元素組成が求められている。LA-ICPMS では、表面分析であり、得られた値が全岩化学組成を反映しているとは限らない。そこで、本研究課題では、LA-ICPMS の値を INAA の値と比較することにより、LA-ICPMS でも全岩化学組成を得ることが可能であるのか検証した。また、INAA と LA-ICPMS を用いて南極大陸で発見された鉄隕石の化学的分類を行った。

INAA と LA-ICPMS 分析に用いた鉄隕石は、A 09179, A 12016, Y 000311, Y 000378, Y 000479, Y 000537, Y 000547, Y 000587, Y 000703, Y 000846, Y 003205, Y 003569 の 12 個である。INAA 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行った。実験手法は、Shirai et al. (2015)と同じである。

LA-ICPMS は、国立極地研究所に設置されている二重収束磁場セクター型 ICP-MS (ElementXR) と

レーザーアブレーションシステム (LAS-213)を用いた。32 個の同位体 (^{31}P , ^{34}S , ^{53}Cr , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{61}Ni , ^{62}Ni , ^{63}Cu , ^{65}Cu , ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{75}As , ^{95}Mo , ^{101}Ru , ^{102}Ru , ^{103}Rh , ^{105}Pd , ^{106}Pd , ^{182}W , ^{183}W , ^{185}Re , ^{187}Re , ^{188}Os , ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{193}Ir , ^{194}Pt , ^{195}Pt と ^{197}Au) の測定を行った。分析に用いたスポットサイズは $100\mu\text{m}$ であり、照射パターンはラインモードである。1 つの試料につき、3 本のラインを異なる場所から選んで分析を行った。 ^{101}Ru と ^{102}Ru は NiAr と CuAr のスペクトル干渉があるため、NIST SRM 1158 を用いて、それらのスペクトル干渉の補正を行った。定量には、2 つの鉄隕石 (Hoba, North Chile) と黄鉄鉱を用いた。

以下に得られた結果について述べる。

(1) LA-ICPMS の分析結果の確度と精度

INAA と LA-ICPMS のどちらの分析手法でも定量できた元素は、Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Ru, Rh, W, Re, Os, Ir, Pt, Au であった。一部の鉄隕石試料を除き、ほとんどの元素で LA-ICPMS の値は、10% 以内で INAA の値と一致していた。LA-ICPMS の値の再現性を、Hoba, North Chile と NIST SRM 1158 を用いて評価した。ほとんどの元素で、再現性は 5%以内であった。Hoba の Cu, Ge, As と Au や NIST SRM 1158 の P, Ge と As の再現性は 10%程度であり、その理由はそれらの元素の含有量が低く、十分な強度が得られなかったと考えられる。本研究課題で得られた LA-ICPMS の値の確度や精度から、LA-ICPMS の値は全岩組成を表しており、LA-ICPMS を用いて鉄隕石の化学的分類が可能であることがわかった。

(2) IID

Au 濃度と Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, W, Re, Ir と Pt 濃度のプロットから、A 09179 は IID に分類される

ことがわかった。IID 鉄隕石には、シュライバーサイトを多く含むため、P の濃度が他の鉄隕石よりも高い。一方、A 09179 鉄隕石の分析では、シュライバーサイトを避けるように分析を行ったため、IID 鉄隕石に比べて、A 09179 の P の濃度は低い結果となった。A 09179 の Au 濃度は、他の IID 鉄隕石に比べて低く、A 09179 は IID 鉄隕石の中でも初期に形成されたと考えられる。

(2) IIIAB

A 12016, Y 000311 と Y 000703 の元素組成は、IIIAB 鉄隕石で見られる結晶分別作用の傾向にプロットされるため、これら 2 つの鉄隕石は IIIAB と分類されることがわかった。他の IIIAB に比べて、これら 2 つの鉄隕石の Au 濃度は低く、IIIAB 鉄隕石の中でも比較的初期に形成されたと考えられる。Y 000703 と Y 000311 の元素組成と発見場所は一致している。したがって、これら 2 つの鉄隕石は地球に落下する前は同一メテオロイドであり、お互いにペアであると考えられる。

(3) IAB

Y 000378, Y 000479, Y 000537, Y 000547, Y 000587, Y 000846, Y 003205 と Y 003569 は、Au 濃度と Ga, Ge と Ir 濃度プロットより IAB に分類されることがわかった。IAB は Ni と Au 濃度より、さらに 6 個 (MG, sLL, sLM, sLH, sHH, sHL) のサブグループに分類される。Y 003569 は、Au 濃度が低く、Ni 濃度が高いことより、IAB の sLH に分類

されることがわかった。しかし、Y 0003569 の Ge, As と Ir 濃度は、他の sLH に分類される鉄隕石に比べて低いため、sLH-an に分類されることがわかった。

Y 000378, Y 000479, Y 000547, Y 000587 と Y 000846 の元素組成は、互いに一致しており、ペアであると考えられる。これら 6 個の鉄隕石の Au 濃度は、sLL, sLM, sLH と sHL, sHH の中間の値を示しており、また Au 濃度と他の元素濃度のプロットから、これら 6 個の鉄隕石は、どのサブグループに属さないことがわかり、IAB-ungrouped と分類されることがわかった。これら 6 個の鉄隕石の白金族元素存在度パターンは、sHL と sHH と一致しており、sHL や sHH と同じような形成過程を経てきたと考えられる。

Y 003205 の Au と Ni 濃度は、Y 000378 とよく一致している。しかし、Y 0003205 の Co, Cu, Ga, Ge, Ir 濃度は、Y 000378 とは異なっているため、互いにペアではないと考えられる。Y 000378 のように、Y 0003205 の元素組成は、どの IAB のサブグループとは異なっており、IAB-ungrouped に分類されることがわかった。

Y 000537 の Au と Ni 濃度から sLM に分類されることが考えられる。しかし、この鉄隕石の Co, Ge, As, W 濃度は、他の sLM に分類される鉄隕石とは一致していなかった。また、Y 000537 の白金族元素存在度パターンは、sLL, sLM, sLH よりも sHL や sHH のパターンと一致していた。以上より、Y 000537 は IAB-ungrouped に分類されることがわかった。

[参考文献]

Shirai N., Hidaka Y., Yamaguchi A., Sekimoto S., Ebihara M., Kojima H. (2015) Neutron activation analysis of iron meteorites. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 303, 1367-1374.

[研究発表]

N. Shirai, A. Yamaguchi, M. Haba, S. Sekimoto, (2020) Chemical classifications of nine new iron meteorites from Yamato Mountains, Balchen and Nansen Ice field, The 12th Symposium on Polar Science.

A. Yamaguchi, M. Kimura, N. Imae, N. Shirai, M. Haba, V. Debaille, S. Goderis, P. Claeys. (2020) Meteorite Newsletter, Vol.,27

N. Shirai, A. Yamaguchi (2021) Chemical characteristics of ungrouped iron meteorites from Yamato Mountains, The 13th Symposium on Polar Science.

A. Yamaguchi, N. Shirai, M. Kimura, N. Imae, M. Haba, V. Debaille, R. Maeda, S. Goderis, P. Claeys (2021) Meteorite Newsletter, Vol.,28

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

(国立極地研究所)

菅沼 悠介 教授

令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

地球温暖化による気候変動は地球規模で影響を及ぼし、南極大陸もその例外ではない。温暖化に伴い、氷河が減退していく過程で巨礫(通称”迷子石”)が取り残される。この迷子石の表面がうけた宇宙線照射量を測定することで定置後の年代推定が行われ、氷河の減退時期を決定されている。また、気候変動と海水準変動により、砂丘が形成される。さらに同様な迷子石は津波時にも移動する。しかし、氷河の減退後に巨礫が風雨等で回転したり、津波により移動したりすると、移動した年代はわかるものの、元々移動した時の年代はわからない。一方、巨礫がもつ2次的に着磁した粘性残留磁気を測定すると、回転の有無を確認できることで移動履歴を解明することができる。そこで、本研究では南極の迷子石の試料を利用して、定置機構を決定することに貢献したかったが、コロナ禍により困難であった。また、環太平洋地域には、津波によって沿岸に打ち上げられた巨礫が分布している。これらの巨礫の粘性磁気を測定することで、いつどのように定置したかを知ることができる。そこで、極地研究所所有の超電導量子干渉型岩石磁力計、交番型磁力計、段階熱消磁炉を用いて測定し、南極産迷子石と津波性巨礫の定置機構を解明することを目的とする。一方、オフィオライトの古地磁気から白亜紀のプレート運動を復元することにも取り組んだ。

1) 津波や波浪に伴う巨礫の定置年代推定

東北日本の三陸海岸、大分県別府湾と沖縄県石垣島に分布する津波起源の巨礫の定置年代を求めるために、粘性残留磁気を用いた年代推定を実施した(図1)。また、研究試料の採集方法から粘性残留磁気の測定原理や年代推定の結果に至るまで包括的にまとめた論文である。三陸海岸の285トンもの巨大な津波石は、上下が逆さまの状態而定置していることが判明し、その定置年代が869年の貞観津波で

ある可能性を示唆していた。石垣島の津波石では、いずれの津波石も上下逆さまになって打ち上げられ、その年代は放射性炭素年代と一致する1771年の明和津波であることを示唆していた。

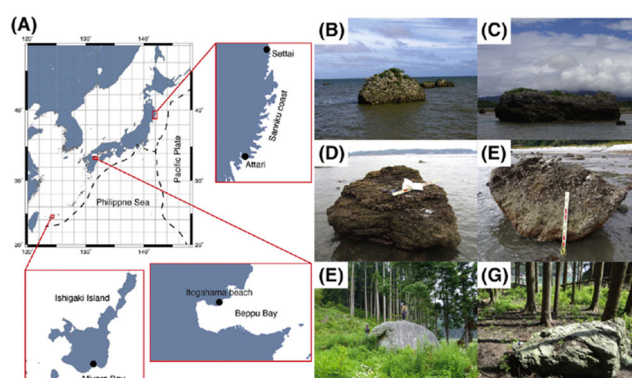


図1: 津波性巨礫の位置図, (B)と(C)は石垣島, (D)と(E)は別府湾, (F)は岩手県奥羽地区, (G)は岩手県合志地区

2) 下北半島砂丘の形成に関する海水準変動, 気候変動とテクトニック変動の影響

東北日本最北端の下北半島には、南北に10kmにも伸びる砂丘が発達している(図2)。このような砂丘が形成され、その形が維持され続けていることは未解決の問題であった。また、このような砂丘形成による砂の堆積物と津波による砂質堆積物との見分け方が判明すれば、防災上も貴重な関連性が見出せる。そこで、同位体元素分析による海水準変動, 気候変動の復元に加えて、テクトニックな隆起・沈降の歴史を加味することで、過去にモンスーンが強まった7200~6300年前, 4700~3600年前, 3050~2500年前, 1850~1100年前, 550~200前に地表の風化・侵食が増すことで、侵食された砂が下北半島西岸に流れつき、砂丘を形成したとする砂丘の形成史を解明した。

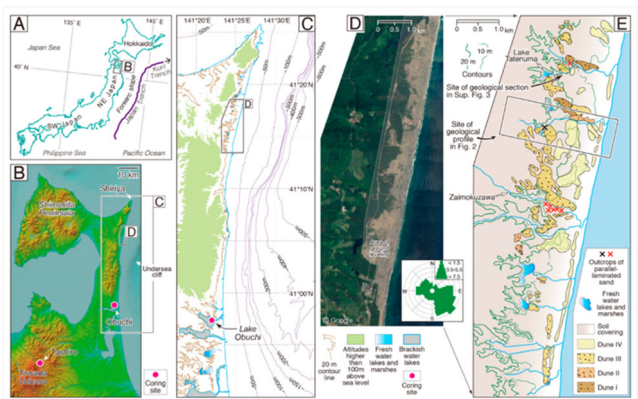


図 2 東日本最北端の下北半島西岸に分布する南北10kmにも及ぶ砂丘

3) 嶺岡オフィオライトからみた中生代の太平洋プレート運動像

千葉県房総半島には、超塩基性岩や玄武岩岩脈を含有する嶺岡オフィオライトが分布している。このオフィオライトの成因は議論があり、完全に沈み込んだプレートの一部か太平洋プレートの一部が剥ぎ取られ、房総半島に付加されたものとされている。これを解明するためには、嶺岡オフィオライトの相対的な位置関係（古緯度）を決める必要がある。そこで、オフィオライト中の玄武岩岩脈の古地磁気とアルゴン年代から古緯度を決定した。その結果、8500 万年まえにオフィオライトが形成され、その後、1500 万年前ごろに太平洋プレートとフィリピン海プレートとの相対的な運動により、嶺岡オフィオライトが日本列島南側に付加されたことが解明された。

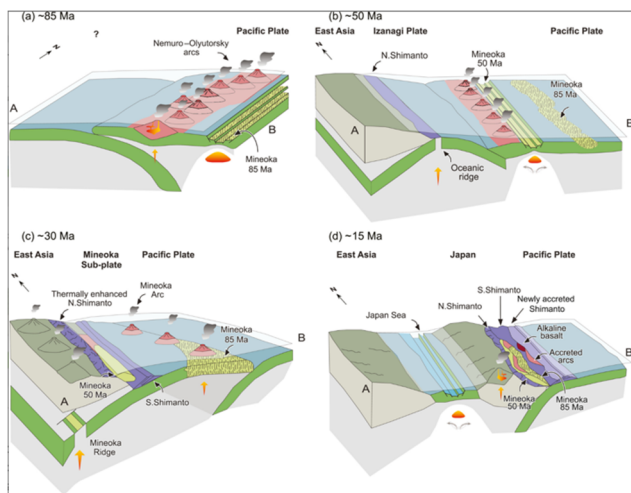


図 3 嶺岡オフィオライトの形成史

4) 放射性炭素年代と粘性残留磁気から明らかになった津波性巨礫の2度にわたる移動履歴

石垣島に分布する多数の津波起源の巨礫は、過去に幾度となく津波の影響を受けている。これら巨礫は津波によりサンゴ礁が破壊され、浜辺に打ち上げられたため、サンゴの放射性炭素を測定することで、打ち上げられた年代を決定することができる。そのため、多くの巨礫の年代は今から 250 年前の 1771 年の明和津波であったり、1200 年前の津波によって運ばれていることが判明している。しかし、1200 年前の津波で移動した巨礫が再度、250 年前の津波で移動したかどうかは不明であった。そこで、今回粘性残留磁気年代と放射性炭素年代とを全く同じ試料で測定し、さらに粘性残留磁気年代をストレッチ緩和関数により補正した。その結果、補正する前の粘性残留磁気年代は放射性炭素年代と一致しなかったが、補正した後の年代は一致していた。一方、いくつかの巨礫では放射性炭素年代は 1200 年前を示すにもかかわらず、ストレッチ緩和関数で補正した年代がより若い年代(250 年前)を示した。これは 1200 年前にサンゴ礁から剥ぎ取られて巨礫になったものが、明和津波で再度移動したことが判明した。1200 年前の津波から明和津波までの間、巨礫を移動させるだけの津波は発生していないことを示唆している。これは沖縄県における現実的な津波防災策に知見を与える研究成果である。

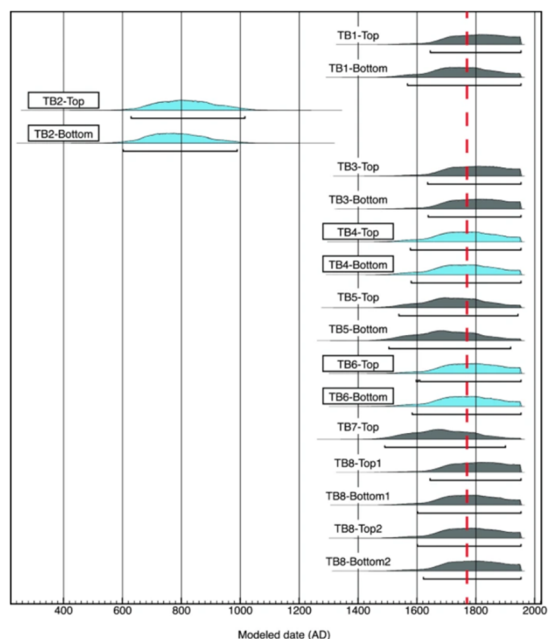


図 4 石垣島の津波性巨礫の放射性炭素年代

[参考文献]

- 1) Sato, T., Nakamura, N., Goto, K., Yamada, M., Kumagai, Y., Nagahama, H. and Minoura, K. (2020); Paleomagnetic dating of wave-emplaced boulders, *in*: Geological Records of Tsunamis and Other Extreme Waves, p. 777-p. 793.
- 2) Minoura, K. and Nakamura, N. (2020); Eustatic, Climatic and Tectonic Controls on the Evolution of a Middle to Late Holocene Coastal Dune System in Shimokita, Northeast Japan, *Geosciences*, vol. 10 (10), 410, p.1-p.33.
- 3) Ganbat, A., Pastor-Galan, D., Hirano, N., Nakamura, N., Sumino, H., Yamaguchi, Y. and Tsujimori, T. (2021); Cretaceous to Miocene NW Pacific Plate Kinematic Constraints: Paleomagnetism and Ar–Ar Geochronology in the Mineoka Ophiolite Mélange (Japan) , *Jour. Geophys. Res. (Solid Earth)*, v. 126(5), p.1-p.27.
- 4) Sato, T., Sato, M., Yamada, M., Saito, H., Satake, K., Nakamura, N., Goto, K., Miyairi, Y. and Yokoyama, Y. (2022); Two-step movement of tsunami boulders unveiled by modified viscous remanent magnetization and radiocarbon dating, *Scientific Reports*, v. 12(13011).

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 地質情報研究部門・上級主任研究員

(国立極地研究所)

山口 亮 准教授

今栄 直也 助教

令和 2 年～令和 4 年 (3 か年)

【研究成果】

セールロンダーネ山地南方のナンセン氷原の 2 地点 (JARE54-Ash1, Ash3; 図 1) で採取された火山灰を含む氷試料 (Oda et al., 2016) について、粒度分析および岩石磁気分析を行った。本氷試料は火山灰以外にも、大陸起源の風成塵および極微細の宇宙塵 (Meteoric Smoke) を含む可能性がある。

粒度分析は産総研地質調査総合センター共同利用実験施設 (GSJ-Lab) の Horiba 製レーザ回折/散乱式粒子径分布測定装置 LA-960 を用いて、Ash1 と Ash3 の 2 つの氷試料について行った。本装置では 2 種類の波長 (650nm, 405nm) をもつ光源により、10nm～3000 μm の粒子径分布を計測可能である。分析は湿式で行い、各氷試料数 g～十数 g を約 180mL の脱イオン水に溶かし、超音波で気泡の除去と凝集粒子の分散をし、フローセルで循環・攪拌しながら各 5 回測定した。分析では 10nm～1 μm および 200～3000 μm の粒子は検出されなかった。

得られた 2 試料のそれぞれ 5 回分の粒子分布データ (図 2a) について、AnalySize ソフトウェア (Paterson & Heslop, 2015) を用いて端成分分解を行った。通常、AnalySize による端成分分解は 10 試料以上のデータについて行うが、フローセルを流れる同一試料の粒子径分布測定装置による複数回分析を各試料中粒子の sub-population を resampling しているととらえて計 10 回分の分析を異なる 10 試料のデータと見立てて解析した。端成分分解は対数正規分布を仮定して 5 成分まで解析を行ったが、データとモデルの相関係数が最大の 4 成分を採用した。

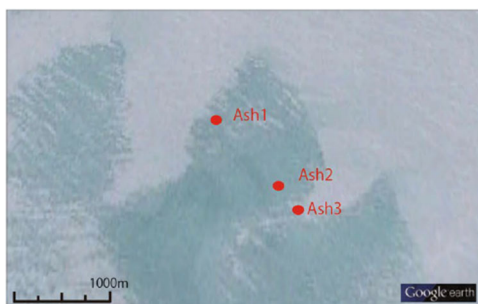


図 1. ナンセン氷原の火山灰を含む氷試料採取地点. Oda et al. (2016)を一部改変.

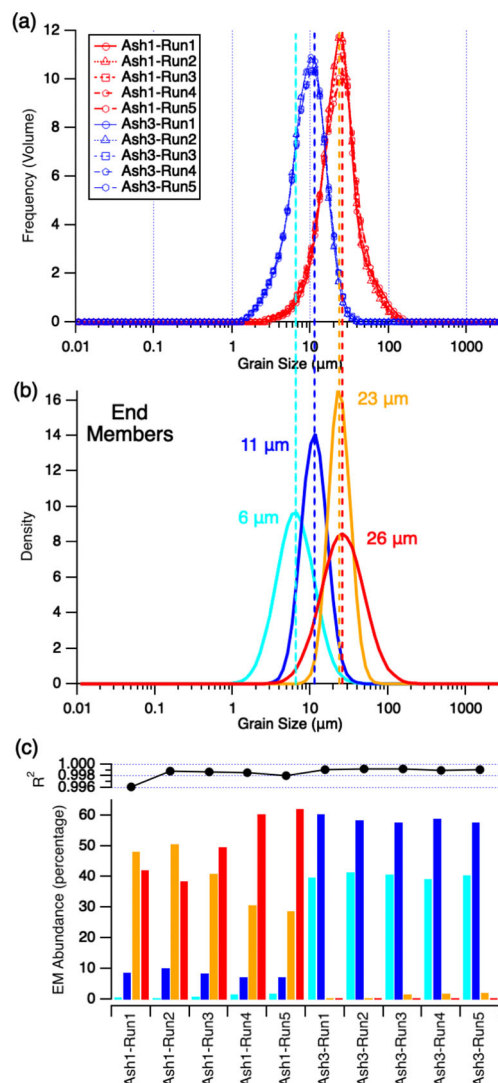


図 2. (a)粒度分析結果. (b) 4 つの端成分. (c)各試料-Run 中の 4 端成分 (左から右へ成分 1,2,3,4) の含有パーセント (下) およびデータとモデルの相関係数 (上).

粒子径分布データでは Ash1, Ash3 それぞれ 25 μm と 10 μm に分布のピークが確認できるが、端成分分析により 6 μm (成分 1), 11 μm (成分 2), 23 μm (成分 3), 26 μm (成分 4) にピークをもつ対数正規分布が識別された。Ash1 には成分 2,3,4 と微量の成分 1 が、Ash3 は成分 1,2 と微量の成分 3 を含むが成分 4 は含まない。

また, Ash1 と Ash3 の等温残留磁化獲得実験の微分曲線を MaxUnmix ソフトウェア (Maxbauer et al., 2016) で成分分解を行い, $\sim 7\text{mT}$ (成分 A), $\sim 23\text{mT}$ (成分 B), $\sim 66\text{mT}$ (成分 C), $\sim 1400\text{mT}$ (成分 D) の4つの保磁力成分が確認できた(図3). 成分 A は多磁区粒子(MD), 成分 B は Vortex (渦状磁化) 粒子, 成分 C は単磁区粒子(SD)のチタン磁鉄鉱, 成分 D は大陸からの風成塵起源の高保磁力磁性鉱物 (赤鉄鉱/針鉄鉱) SD 粒子と考えられる.

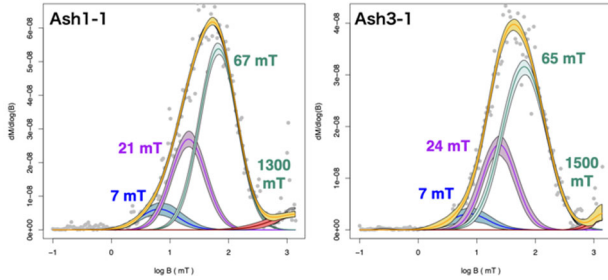


図3. Ash1, Ash3 試料の等温残留磁化獲得実験の微分曲線を4つの対数正規分布母集団に成分分解.

さらに, Ash1 と Ash3 それぞれ2試料の FORC (First Order Reversal Curve) 図について FORC-PCA 解析 (Harrison et al., 2018)の結果, Ash1-1, Ash1-2, Ash3-2 に近い3つの端成分 (EM1, EM2, EM3) で代表できることがわかった(図4). EM1 (\sim Ash1-1) は MD (成分 A) と Vortex (成分 B) が, EM2 (\sim Ash1-2) は Vortex と SD (成分 C) が, EM3 (\sim Ash3-2) は Vortex と SD と SP が卓越する. 粒度分析で $23\mu\text{m}$, $26\mu\text{m}$ の大粒径粒子が Ash1 で卓越するのは, Ash1 が大粒径の MD 磁性鉱物を含むことと整合的である. ただし, チタン磁鉄鉱粒子が火山灰岩片に含まれるため (Oda et al., 2016 の Fig. 4), 磁気分析粒径は粒度分析粒径よりも小さい. Ash1 と Ash3 で粒径が異なるのは, 2地点で降下し

[参考文献]

- 1) Harrison, R.J., et al. (2018) An improved algorithm for unmixing first-order reversal curve diagrams using principal component analysis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 19, 1595–1610.
- 2) Lanci L., et al. (2012) Magnetization of polar ice: a measurement of terrestrial dust and extraterrestrial fallout, *Quat. Sci. Rev.*, Vol. 33, 20–31.
- 3) Maxbauer, D. P., et al. (2016) MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions, *Computers & Geosciences*, Vol. 95, 140–145.
- 4) Oda, H., et al. (2016) Volcanic ash in bare ice south of Sør Rondane Mountains, Antarctica: geochemistry, rock magnetism and nondestructive magnetic detection with SQUID gradiometer, *Earth Planets Space*, Vol. 68, 39.
- 5) Paterson, G. A., and D. Heslop (2015) New methods for unmixing sediment grain size data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 16, 4494–4506.
- 6) Hu, P. et al. (2013) Characterizing and quantifying iron oxides in Chinese loess/paleosols: Implications for pedogenesis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 369–370, 271–283

た火山灰の差異の可能性もあるが, 火山灰が氷に堆積・固定されるプロセスで, 風や地形の局所的影響で分別が起こった可能性もある.

SD 粒子の赤鉄鉱の保磁力は粒径依存が大きく内部ストレスにより 1800mT にも達するが, SD/Vortex 境界付近 (粒径数百 μm) で最大値を示す (Hu et al., 2013). 針鉄鉱は多くの場合 3T 以上の保磁力を示す. したがって, 図3の成分 D はおそらく赤鉄鉱であり, 粒径から図2の成分4に対応するか, 成分3/成分4の一部であると考えられる.

Lanci et al. (2012)は南極から粒径 $7\sim 20\text{nm}$ の Meteoric Smoke 起源の磁性粒子を報告しているが, 粒度分析で粒径 $10\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 粒子が確認されないため, ナンセン氷原では粒径 10nm 以上の Meteoric Smoke は存在しないか, 検出限界以下と考えられる.

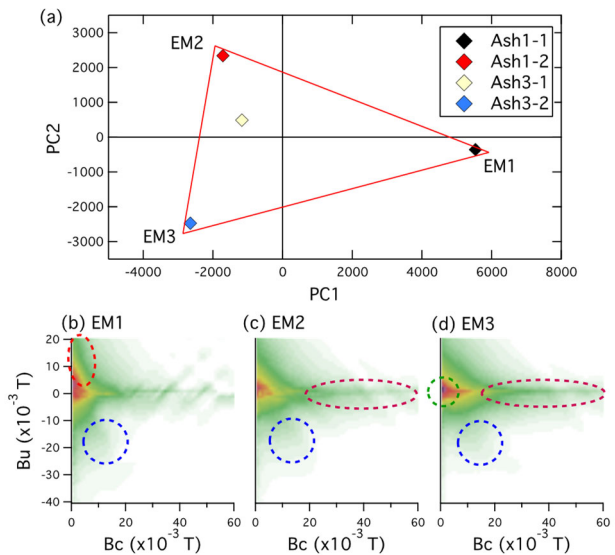


図4. (a) FORC-PCA により3つの端成分に分解.

(b) EM1, (c) EM2, (d) EM3 の FORC 図. 赤, 青, 紫, 緑の破線で囲んだ部分は多磁区粒子, Vortex 粒子, 単磁区粒子, 超常磁性粒子 (SP) の特徴を示す.

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

小池 克明 京都大学大学院工学研究科・教授

山之口 勤 (一財)リモート・センシング技術センター・ALOS 系解析研究グループ グループリーダー

中村 和樹 日本大学工学部・准教授

(国立極地研究所)

土井浩一郎 准教授

令和2年～令和4年（3か年）

1. はじめに

地球環境変動を反映する南極氷床・氷河などの変化の観測に、悪天や極夜でも観測が可能な、衛星搭載合成開口レーダ(SAR)データが活用されてきた。1990年代には我が国の JERS-1 衛星およびヨーロッパ宇宙機関の ERS-1 と ERS-2 衛星搭載の SAR による観測が実施され、とくに JERS-1、ERS-1、ERS-2 からのデータは南極昭和基地でも受信された。極地研究所にはそれ以後に運用された我が国の ALOS-1 衛星、現在運用中の ALOS-2 衛星からのデータも含めて多くの SAR データが蓄積されている。

本研究では、我が国の南極地域観測隊が、詳細な地形図・地質図を作成するなど、調査を進めてきた南極エンダービーランドのアムンゼン湾周辺を研究対象とした。アムンゼン湾の周辺の地形の概略(図1)を第31次夏隊(JARE-31)の報告(小山内ほか,1991) [1]から引用する。

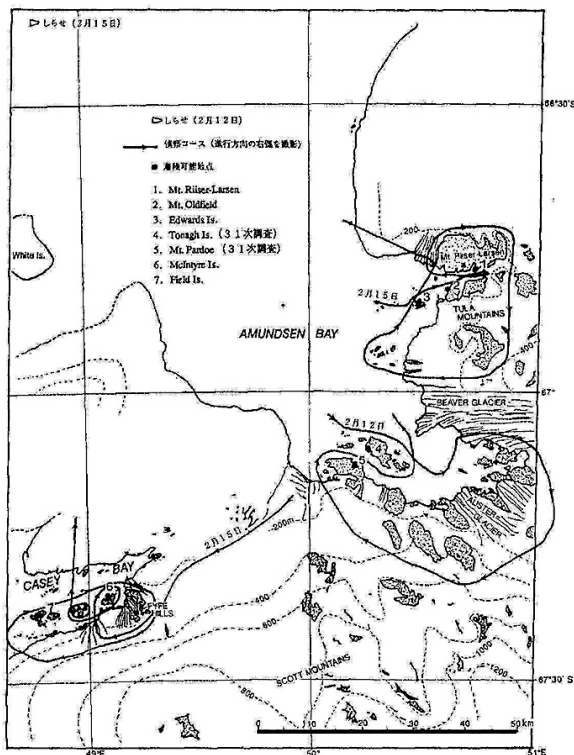


図1 アムンゼン湾周辺概略図および飛行コース

図1 アムンゼン湾周辺概略図

右下スケールは 50km (小山内ほか,1991) [1]

2. データと手法

我が国の歴代の SAR 搭載衛星、JERS-1、ALOS-1、ALOS-2 からのデータを処理して、SAR 強度画像を作成し、1996 年、2006 年、2016 年におけるアムンゼン湾沿岸の顕著な氷河舌端部の 20 年間の長期比較を試みた。

SAR データの解析には、主に Gamma 社製ソフト群を用いた。また、生成された SAR 強度画像の処理には、Windows 上で動作する一般的な画像処理ソフトを用いて手動で行った。

使用した SAR データについて、衛星と観測日は次の通りで、ほぼ同季節である。

JERS-1 1996 年 11 月 26 日

ALOS-1 2006 年 11 月 28 日

ALOS-2 2016 年 12 月 5 日

それぞれの衛星に搭載された SAR からのデータを処理して、強度画像を作成した。もっとも古い 1996 年 11 月の画像を図2に示す。

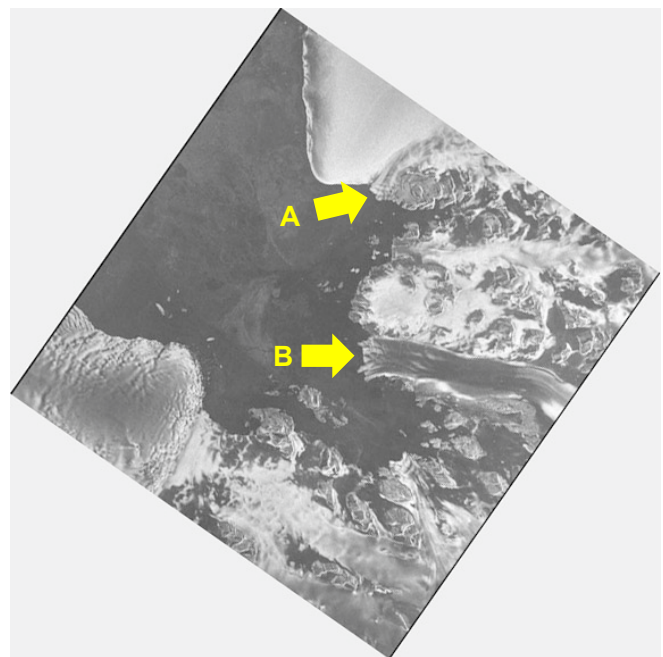


図2 エンダービーランド アムンゼン湾

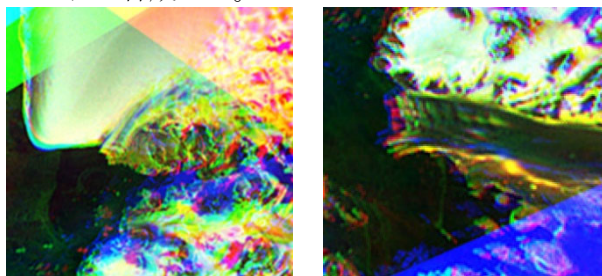
JERS-1 SAR 強度画像 1996 年 11 月 26 日

矢印 A : 小氷河 (仮称) B : ビーバー氷河

3. 氷河舌端部の変化

この地域の氷河流動の干渉 SAR による観測が、Doi et al. (2011) [2] によって 2007 年、2008 年の時期について行われており、図 2 の矢印 A 小氷河（仮称）の上流部で 1 年あたりに換算すると 15m/yr 程度の流動速度が観測されている。

アムンゼン湾には、A：小氷河のほか、顕著な氷河としてビーバー氷河（Beaver glacier：図 2 の矢印 B）が流れ込んでいる。これら 2 つの氷河舌端について、3 時期の SAR 強度画像をそれぞれ、**赤：1996 年、緑：2006 年、青：2016 年**に割り当ててカラー合成した。



A:小氷河 B:ビーバー氷河
図 3 氷河舌端部 3 時期カラー合成図

データを取得した SAR 衛星・センサが 3 時期で異なっており、レーダー画像特有の画像のひずみが生じていたり、重ね合わせ処理が不十分なために、画像の詳細がわかりにくい。それでも、図 3 の B：ビーバー氷河舌端で大きな変化が起こっていることがわかる。そこで、ビーバー氷河舌端部の各時期の強度画像を比較した（図 4）。1996 年からの 20 年間では、氷河舌端部の形状は氷河の北部 2/3 が 1996 年から 2006 年の間に欠損したようにみえるが、観測が 10 年間隔のため、氷河が前進したのかどうかは不明である。しかし、舌端南部の特徴的形状が残

っており、この 20 年間については、氷河全体としての動きは、比較的穏やかで、1996 年から 2006 年の間に、舌端から 1.5km 程度の一部分が欠損して流れ出したように思われる。

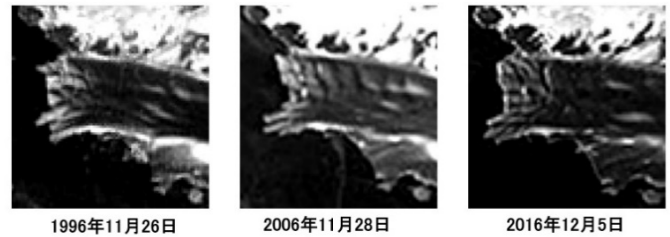


図 4 ビーバー氷河舌端部の各時期の強度画像

4. おわりに

今回の SAR 強度画像の比較では、氷河舌端部の詳細な動きは不明であったが、長期間にわたる南極観測に、衛星搭載 SAR が有効であることは確認された。近年では、干渉 SAR のほか、動きが速い氷河の動きは画像相関法で明らかにされており、とくに白瀬氷河の研究では動きの時間的・空間的变化も含めて成果があがっている（たとえば、[3]、[4]、[5]）。

今後は、より多くの SAR 衛星の観測と他の諸観測が組み合わせられて、南極環境の変化とその全球的な影響が研究されると思われる。その成果が、社会にも浸透して、人類と地球が安定的に付き合う助けになることを期待する。

本研究で使用した JERS-1 SAR、ALOS/PALSAR データの所有権は経済産業省(METI)および宇宙航空研究開発機構(JAXA)にあり、JAXA と国立極地研究所との協定に基づき提供され、(一財)宇宙システム開発利用推進機構 から配布されたデータも使用しました。

また、ALOS-2/PALSAR-2 データの所有権は JAXA にあり、使用したデータは JAXA' s ALOS-2 RA-4 の枠組で提供されました。

[参考文献]

- 1) 小山内康人, 高橋裕平, 田結庄良昭, 土屋範芳, 蛭田眞一, 林保, 今野敏徳, 佐野雅史, 寺井啓: アムンゼン湾野外調査隊報告 1990 (JARE-31), 南極資料, Vol.35, No.1, pp.118-128, 1991.
- 2) Koichiro Doi, Michael Bäessler, Reinhard Dietrich, Kazuo Shibuya, Tsutomu Yamanokuchi, Kazuki Nakamura, Makoto Omura and Katsuaki Koike: Application of ASTER GDEM to Estimating Flow Rate over the Antarctic Ice Sheet, Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 57, No. 2, (2011), pp. 61-70.
- 3) Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura and Koichiro Doi: Validation for ice flow velocity variations of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 offset tracking, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol.15, pp. 3269-3281, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3165581, April 2022.
- 4) Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura: Interactive movements of outlet glacier tongue and landfast sea ice in Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, detected by ALOS-2/PALSAR-2 imagery, Science of Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.srs.2022.100064, August 2022.
- 5) 大川翔太郎, 土井浩一郎, 青山雄一: 東南極白瀬氷河で 2020 年および 2021 年に発生した流動減速イベント, 2022, 日本測地学会第 138 回講演会 (鹿児島), 学生優秀発表賞, 2022 年 10 月.

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 金沢大学理工学域・教授
板野敬太 秋田大学理工学部・助教

(国立極地研究所)

堀江憲路

令和3年～令和4年(2か年)

[研究成果]

1. はじめに

西グリーンランド南部には初期～後期太古代の地質帯が広がっており、初期地球に関わる研究において非常に重要な地域である。中でもアキア地域は中太古代の地質帯に当たり、ウラメルトーク岩体には片麻岩や花崗岩類の他に超苦鉄質から苦鉄質な岩体が産する。超苦鉄質岩体の岩相の多様性は二次的な交代作用によってもたらされることが、鉱物の化学組成などから示唆されてきた (Nishio et al., 2022, *J. Petrol.*)。しかし、この岩体の岩石形成の詳細な年代決定は行われてきておらず、岩石の形成史並びに化学的な改変プロセスの更なる理解には正確な年代制約が必要であった。

2. 研究試料と研究手法

本共同研究は、同地域の花崗岩(565414)と交代作用を被ったカンラン岩(565440)に含まれるジルコンの U-Pb 年代を2次イオン質量分析計により高精度で決定した(図1a)。カソードルミネッセンスを用いた観察では、火成起源を示す累帯構造を一部残す粒子も見られたが、多くの粒子は擾乱を被った複雑な構造が観察された(図1b)。上記のカソードルミネッセンス像に基づき、局所年代測定の分析点を決定した。

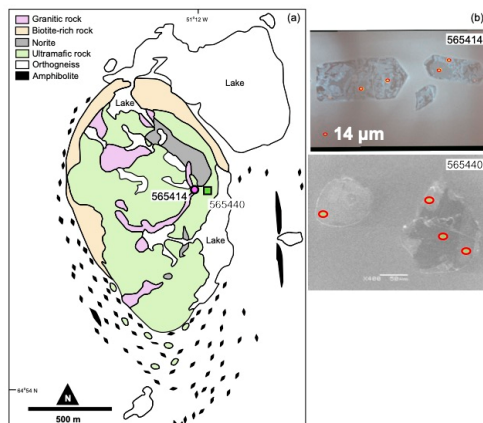


図1(a) ウラメルトーク岩体の岩相分布と研究試料採取地点。(b) 分析対象ジルコンのカソードルミネッセンス像と年代測定分析点。

3. 結果と考察

花崗岩(565414)中ジルコンの年代測定では、CL像から示唆された二次的な鉛の損失または非放射性鉛が影響した測定点も見られるが、初生的な年代が保存されていることが確認された(図2)。一方、カンラン岩(565440)中のジルコンは低U濃度に起因して1測定点の分析精度は花崗岩試料に比べて大きいものの、全てコンコダントな結果であった。コンコダントなデータの重み付き平均はそれぞれ、 2936.6 ± 2.2 Ma (95% conf.; MSWD=1.5) と 3007.2 ± 8.7 Ma (95% conf.; MSWD=0.14) となった。

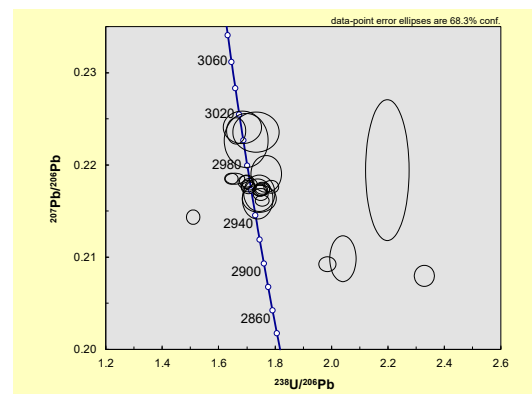


図2 Tera-Wasserburg U-Pb コンコルディア図。花崗岩は緑、カンラン岩試料は青色でプロットされる。

得られた結果から、ウラメルトーク岩体周辺では花崗岩の形成時期はカンラン岩体中にジルコンを形成したメルト/流体活動時期よりも優位に若いことが明らかになった。

すなわち、ウラメルトークの超苦鉄岩体の交代作用をもたらした媒体は周囲の花崗岩マグマとは無関係であったことが結論づけられた。

アキア地域の超苦鉄質岩体の成因は長らく議論されてきたが、近年はマントル起源ではなく集積岩起源であることが支持され始めている (Szilas et al. 2018, *Geosci. Front.*). カンラン岩(565440)に発見されたジルコンは集積岩の形成最終段階の間隙に残される分化したメルトから結晶化した可能性もあるが、角閃石などの化学組成から広域で交代作用が起きていたこと(Nishio et al., 2022, *J. Petrol.*)を考慮すると交代作用の媒体であったメルトまたは流体からの結晶化年代である可能性が高いと言

える。

4. 今後の課題

今後の火成・変成史の解明には同地域の直方輝石を主とする斑糲岩の年代が鍵となる。研究期間終了後にはなるが、斑糲岩中のジルコンの年代測定と形成環境の情報をもつ微量元素情報を組み合わせることで、ウラメルトークの超苦鉄岩体が経験してきた交代作用の原因や媒体などの未解決問題が解決されることが期待される。申請当初予定していた成果まで遂げることはできなかったが、引き続き上記の内容の研究を進めることで学術論文等において公表する予定である。

[参考文献]

- 1) Metasomatic Modification of the Mesoarchaeon Ulamertoq Ultramafic Body, Southern West Greenland; Ikuya Nishio, Tomoaki Morishita, Keita Itano, Juan Miguel Guotana, Akihiro Tamura, Kristoffer Szilas, Yumiko Harigane, Kenichiro Tani, and D. Graham Pearson, 2022, *Journal of Petrology*, Vol. 63(3), p1–p24.
 - 2) Highly refractory Archaean peridotite cumulates: Petrology and geochemistry of the Seqi Ultramafic Complex, SW Greenland; Kristoffer Szilas, Vincent van Hinsberg, Iain McDonald, Tomas Næraa, Hugh Rollinson, Jacob Adetunji, and Dennis Bird, 2018, *Geoscience Frontiers*, Vol. 9(3), p689–p714.
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。

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（4）生 物 圏

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
 (国立極地研究所)
 内田雅己 准教授
 令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

北極の陸上生態系における生物多様性とその機能は、急速に変動しつつある環境条件に敏感に反応することが予想される。本研究では、カナダ亜北極の陸上生態系を対象として、菌類をはじめとする陸上生物の多様性を比較評価し、環境条件との関連を明らかにすることを目的とした。平成28(2016)年度に開始した北極域研究推進プロジェクト(ArCS)によりカナダ亜北極(図1; ケベック州 Kuujuarapik/Whapmagoostui、北緯55.31度、西経77.75度)の森林—ツンドラ移行帯で同年に採取した試料を用いた。これまでの共同研究で確立した、分子生物学的アプローチを用いた菌類多様性の解析手法(Osono, 2014; Matsuoka et al., 2019)、ならびに生物多様性と環境要因との関連の解析手法(Osono, 2019)を適用した。植物遺体の分解菌類、土壌菌類、植物の多様性を明らかにし、それら生物の多様性と土壌化学性をはじめとする環境条件との関連性、ならびに生態系プロセスに及ぼす影響について評価した。

(1) 菌類の分類学的、機能的、系統的多様性

亜北極域の森林—ツンドラ移行帯において、枯死したシモフリゴケ組織とトウヒ針葉落葉に生息する菌類の分類学的、機能的、系統的多様性を定量的に評価した。核内リボソームDNAの内部転写スペーサー1(ITS1)領域をメタバーコーディングし、配列類似度97%に基づいて84科に属する615の操作的分類群を検出した。機能ギルドでは腐生菌が優占していた。これら菌類の多様性には、宿主植物種と局所的な環境の不均質性が影響していることが示唆された。すなわち、菌類群集の分類学的・系統的多様性の指標は、トウヒ針葉よりもシモフリゴケ組織の方が有意に大きかった。コケの菌類の系統的多様性にはケカビ亜門の存在が大きく影響した一方、針葉ではディカリアに属する比較的近縁な科からなった。また、分類学的多様性は植生や土壌特性の局所的な変化とも関連しており、植生の局所的な定着とそれに伴う土壌の発達が、菌類の分類学的多様性に寄与していることが示唆された。一方、機能的多様性は、宿主、植生、土壌特性の影響を受け



図1 調査地であるカナダ・ケベック州の森林—ツンドラ移行帯の様子

ておらず、今回評価した機能形質に関して、菌類群集の構成分類群は比較的冗長であることが示唆された。本研究で集約した菌類の科レベルでの生態・機能データは *Ecological Research* 誌においてデータペーパーとして公表し、広く学術コミュニティに提供した。

(2) 土壌菌類の群集集合に果たす植物の役割

土壌中に存在する菌類DNAプールのメタバーコーディング技術により、その群集の多様性や植物のβ多様性との関連性を評価できるようになったが、そのような地上部と地下部の生物多様性にみられる関連性の背景についてはまだ不明点が多い。本研究ではβ多様性の分散分割法を用いて、気候温暖化に伴い植生が急激に変化するツンドラ生態系における地上部—地下部の関連性の駆動プロセスを調べた。その結果、菌類β多様性と植物β多様性の構成要素との相関が認められ、菌類の空間的な入れ替わりが植物種の入替わり、特に機能交換を伴う入れ替わりによって促進されることが示された。また、イネ科型草本や広葉草本の種の空間的多様性は、低木の種よりも菌類β多様性を高めることが示された。これらの結果は、植物と菌類の相互作用や植物

によって改変された局所的な環境などの要因が、菌類群集の形成に重要であることを示唆している。また、植物と菌類の群集動態をプロセスに基づいて理解することで、北極圏で進行する低木の侵入が地上部と地下部の関連性を弱める可能性があることが予測された。

(3) 低木の被覆が土壌呼吸に及ぼす影響

ツンドラ生態系では、気候温暖化にともなう低木の侵入と土壌呼吸の増加が予測されているが、局所的な低木の侵入と土壌呼吸の増加との因果関係については不明点が多い。この 2 つの現象の間には、複数の複雑な土壌プロセスが存在するため、それらを統合することは論理的に困難である。本研究では

構造方程式モデリングを用いて、低木の被覆が土壌呼吸に与える影響を明らかにするために、複数の土壌プロセスを特定・統合することを目的とした。その結果、低木の被覆は、根のバイオマス、土壌の炭素率、土壌温度、菌類群集組成など、地下部の複数の要因を通じて土壌呼吸を促進することが示された。また、構造方程式モデリングにより、これらの土壌特性間の相互作用を介した間接的な効果の可能性も示された。さらに、低木の侵入による土壌呼吸の増加は、土壌有機物の減少に起因するとは考えにくいことが示唆された。本研究で解析に用いた機能形質データは *Polar Data Journal* 誌においてデータペーパーとして公表し、広く学術コミュニティに提供した。

[参考文献]

- 1) Osono T. (2014) Metagenomic approach yields insights into fungal diversity and functioning. In: Species Diversity and Community Structure: Novel Patterns and Processes in Plants, Insects, and Fungi. SpringerBriefs in Biology (eds. by T. Sota, H. Kagata, Y. Ando, S. Utsumi & T. Osono), Springer, Berlin, pp.1-23.
- 2) Osono T., Matsuoka S., Hobara S., Hirose D. & Uchida M. (2019) Diversity and ecology of fungi in polar region: comparisons between arctic and Antarctic plant remains. In: Fungi in Polar Regions (eds. by M. Tsuji & T. Hoshino), CRC Press, pp. 17-29.
- 3) Matsuoka, S., Sugiyama, Y., Doi, H. (2019) DNA Metabarcoding for fungal diversity investigation in polar regions, in: Tsuji, M., Hoshino, T. (Eds.), Fungi in Polar Regions, CRC Press, Boca Raton, pp. 67-82.

[研究発表]

- Kitagawa R., Masumoto S., Nishizawa K., Kaneko R., Osono T., Hasegawa M., Uchida M. & Mori A.S. (2020) Positive interaction facilitates landscape homogenization by shrub expansion in the forest-tundra ecotone. *Journal of Vegetation Science* **31**: 234-244.
- Masumoto M., Kitagawa R., Nishizawa K., Kaneko R., Osono T., Hasegawa M., Matsuoka S., Uchida M. & Mori A.S. (2021) Functionally explicit partitioning of β -diversity reveals plant contribution to soil fungal assembly in the Arctic tundra. *FEMS Microbiology Ecology* **97**: fiab129.
- Masumoto S., Kitagawa R., Nishizawa K., Kaneko R., Osono T., Hasegawa M., Iimura Y., Mori A.S. & Uchida M. (2021) Plant species and biomass, soil respiration, soil environment data on Whapmagoostui-Kuujuarapik, Quebec, Canada. *Polar Data Journal* **5**: 80-88.
- Matsuoka S., Doi H., Masumoto S., Kitagawa R., Nishizawa K., Tanaka K., Hasegawa M., Hobara S., Osono T., Mori A.S. & Uchida M. (2021) Taxonomic, functional, and phylogenetic diversity of fungi in a forest-tundra ecotone in Quebec. *Polar Science* **27**: 100594.
- Masumoto S., Kitagawa R., Nishizawa K., Osono T., Hasegawa M., Iimura Y., Matsuoka, S., Kaneko, R., Uchida M. & Mori A.S. (2021) Integrative assessment of the effects of shrub coverage on soil respiration in a tundra ecosystem. *Polar Science* **27**: 100562.
- Matsuoka S., Hatano Y., Osono T. (2022) Distribution and functional data of fungal families. *Ecological Research* **37**: 670-675.

北極・南極試料を用いた菌株の確立とそれらの全ゲノム解析

◎辻雅晴 旭川工業高等専門学校 物質化学工学科・准教授

(国立極地研究所)

内田 雅己 准教授

工藤 栄 教授

令和2年～令和4年（3か年）

[研究成果]

＜カナダ高緯度北極・氷河後退域における菌類の多様性調査＞

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書によると2100年までに地球の平均気温は1986年～2005年の平均気温に対して最大で4.8℃上昇すると報告している。特に北極の陸域は気候変動の影響を受けやすく、世界平均の2倍以上の速さで温暖化が進むと予想されており、このままのペースで気温が上昇すると今後20年で北極の氷河の大部分が消滅するとも予想されている（北極モニタリング評価プログラム評価報告書より）。北極や南極、アルプス山脈のような高山帯にある氷河は地球全体の表面積の10%を占めており、氷に覆われた環境であることから無生物に近い環境に思われるかもしれない。しかし氷河が溶け出した水は、氷河上に生息している生物に水分や微量な栄養素を供給する役割を果たしており、氷河上では陸上生態系とは全く異なった独特の生態系を構築している¹⁾。このような独特な生態系に生息している菌類は0℃以下の低温の環境でも炭素や窒素の循環に重要な役割を果たしており、低温性菌類の多様性のわずかな変化は、氷河上生態系の物質生産に多大な影響を及ぼしている²⁾。世界最北端の有人島として知られているカナダ・エルズミア島のWalker氷河は1959年から2013年までの54年間に平均1.3m/年の速度で氷河が後退していた。しかし2013年から2016年までの3年間には10m/年まで後退速度が加速していた。この氷河の後退速度の加速は、氷河上や氷河後退域に生息している菌類にどのような影響を及ぼしているのかを調べるため、我々はWalker氷河域に氷河上、2015年の氷河末端地点、1959年の氷河末端地点、さらにこの氷河を発見したP. Walkerが1959年に設置したポール付近の4つのサンプリング地点から試料を採集し、菌類の多様性を調べることとした。

その結果、氷河上では分離された菌類のうち約70%

を子菌類が、残りの約30%を担子菌類が占めており、2015年の氷河末端地点では約60%を子菌類が、残りの約40%を担子菌類が占めていた。1959年の氷河末端地点では、約5%を子菌類が、約85%を担子菌類が、残りの約5%を接合菌類が占めており、ポール付近では子菌類は分離されず、約75%を担子菌類が、残りの約25%を接合菌類が占めていることが分かった（図1）。

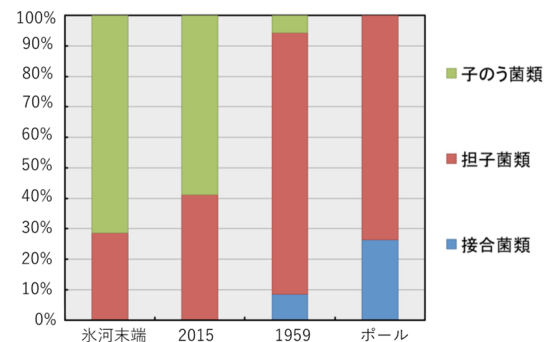


図 1 Walker 氷河域における菌類の多様性

これらの結果から

- ①氷河上と氷河が後退して間もない地点では子菌類が優占している
- ②子菌類は氷河が後退した後、時間経過と共に分離される割合が低くなった
- ③担子菌類は氷河が後退して時間が経過するにつれ、菌類の優占種となった
- ④接合菌類は氷河が後退して57年後の地点から出現してきた

＜まとめ＞

接合菌類は岩石を分解し風化を促進する能力を持つことが知られている。Walker氷河では、氷河が後退して57年後の地点から接合菌類が出現している。このことから、Walker氷河域では氷河が後

退してから 57 年後から土壌の形成が急激に促進され、植物などの一次遷移が始まったと考えられる。

また、エルズミア島の Walker 氷河は近年急激な氷河の後退が起こっている場所である。今回の研究で、我々は氷河上に生息している子の菌は、氷河が後退して約 57 年後の間に生息数を大幅に減らし、最後には生息しなくなることを明らかにした。このことは地球温暖化が進むことで、将来的に氷河上に生息している菌類の一部が絶滅してしまう可能性があることを示すものである。

本研究で分離・培養した菌株は、国立極地研究所の超低温冷凍庫に保存した。

<極地産菌類の全ゲノム解析>

南極産・高緯度北極産菌類の全ゲノム情報は、氷点下でも成長できる機構や氷点下でも活性のある酵素の遺伝子情報、さらに新規二次代謝産物の遺伝子情報などが含まれており、極地産菌類の全ゲノム情報は遺伝子資源としても貴重である。そこで本研究では、カナダ高緯度北極の Walker 氷河域から新種の菌類として報告した *Mrakia hoshinonis* JCM 32575 株について全ゲノム配列の取得と解析、さらに全ゲノム配列から遺伝子配列の予測を行うこととした。抽出した 2 検体の *M. hoshinonis* JCM 32575 株の DNA 濃度を測定した結果、それぞれ 1855ng/ μ l と 3895ng/ μ l であることがわかった。また、電気泳動で抽出したゲノム DNA が断片化されておらず、不純物も混ざっていないことが確認できた。*M. hoshinonis* のゲノム解析結果を表 1 に示す。ゲノムサイズは 23.98 Mb、GC 含量は 59.9%、予測された

タンパク質コード遺伝子の数は 8756 であった。BUSCO スコアは 94.1%であったことから、高度な遺伝子予測が行われたことが確認された。

M. hoshinonis は氷点下での生育が可能であることに加えてアミノ酸やビタミンがない栄養素が限られた環境でも生育できる。このことから、この *M. hoshinonis* がどのようにして北極圏の厳しい環境に適応しているかを本研究で得られたゲノム情報で説明するのに役立つと考えている。またエルズミア島のような低温環境に生息している菌類のゲノム配列には、低温でも高い活性を持つ新規酵素など遺伝子資源としての活用も期待できる。

表 1 *Mrakia hoshinonis* のゲノム解析の結果

品種	<i>Mrakia hoshinonis</i>
菌株	JCM 32575
試料採取場所	エルズミア島
総リード数 (bp)	7,409,436,300
全長 (Mb)	23.98
カバレッジ (×)	303
GC 含有率 (%)	59.9
タンパク質数	8,756
BUSCO スコア (%)	94.1

[参考文献]

- 1) M Tsuji, J Uetake, Y Tanabe.; Changes in the fungal community of Austre Brøggerbreen deglaciation area, Ny-Ålesund, Svalbard, High Arctic Mycoscience, Vol.,57, p448 –p 451, 2016
- 2) J. C. Ellis-Evans.; Microbial diversity and function in Antarctic freshwater ecosystems. Biodiversity and Conservation, Vol. 5, p1395 – p1431,1996

[研究発表]

1. M Tsuji, S Kudoh; Soil Yeasts in the Vicinity of Syowa Station, East Antarctica: Their Diversity and Extracellular Enzymes, Cold Adaptation Strategies, and Secondary Metabolites, Sustainability, Vol.12, 4518, 2020.
2. 辻雅晴, 工藤栄, 内田雅己, 星野保; 北極と南極に生息する菌類の産業利用を目指して, Journal of Japanese Society for Extremophiles, Vol. 19, p 6–p15, 2021.
3. M Tsuji, W. F. Vincent, Y Tanabe, M Uchida.; Glacier Retreat Results in Loss of Fungal Diversity, Sustainability, Vol.14, 1617, 2022.
4. M Tsuji, J Ishihara, Y Gotoh, T Hayashi, H Takahashi.; Draft Genome Sequences of Five *Cystobasidium ongulense* Strains Isolated from Areas near Syowa Station, East Antarctica, Microbiology Resource Announcements, Vol. 11(7) e00224-22 2022

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 広島大学大学院生物圏統合生命科学研究科・教授
(国立極地研究所)
伊村 智 教授
令和2年～令和4年(3か年)

[研究成果]

本研究は、先行共同研究「極域生物に共生する微生物の生物地理に関する研究」(平成26～28年度)および「極域地衣類に共生する微生物の種組成に関する研究」(平成29年度～令和元年度)を発展させたもので、極域地衣類を構成する菌類種および藻類種の分子系統的同定ならびに極域地衣類に共生する微生物の網羅的系統解析を行い、極域地衣類とその共生微生物に関する生物地理的な知見を得たものである。

本研究では南北両極の荒原性風衝地に分布する地衣類としてイワタケ類(*Umbilicaria*属)を対象とし、南極域では昭和基地周辺(採集者 長沼)およびシグニー島(採集者は研究協力参加者の辻本・Convey)において、北極域ではカナダ北極域(神田)、カナダ亜北極域(長沼・Faluaburu)および北欧北極域(Hahn)において採集したイワタケ類を研究試料として用いた。以下に本研究の背景・方法・結果について述べる。

1. イワタケ類地衣類を対象とする背景

地衣類は菌類と光合成生物(藻類あるいはシアノバクテリアあるいは両方)の共生体であるが、先行共同研究などにより、地衣類に共生する微生物、特に細菌(バクテリア)の役割が注目されるようになってきた(参考文献1)。その地衣類の中でも、本研究では特にイワタケ類(*Umbilicaria*属)に着目した。その理由は、イワタケ類は岩石表面に着生するので見つけやすく、また、個体の一点でのみ岩石表面に付着しているので採集しやすいことから、その系統分類や生物地理に関する研究が多く、DNAデータも充実していることである。

その一方で、南北両極のイワタケ類の菌類種・藻類種のDNAに基づく系統分類はまだ多くなく(参考文献2)、その共生細菌相の多様性や種組成に関する知見はさらに乏しい。そこで本研究では、上述のように南北両極域から採集したイワタケ類の共生微生物について、下述のような非培養法を用いて網

羅的解析を行うこととした。なお、本研究では地衣類と細菌の関係を共生ではなく「共生」と呼んでいる点に留意されたい。現時点では地衣類と細菌の間にいわゆる共生関係があるかどうか不明だからである。

2. 地衣類の菌類種と藻類種のDNA同定

採集したイワタケ試料を粉砕しDNAを抽出した。このDNAは菌類と光合成生物(藻類あるいはシアノバクテリア)と微生物(おもに細菌)に由来する混合DNAである。この混合DNAに対して、真核生物の菌類と藻類については18S rRNA遺伝子(18S rDNA)のほぼ全長をターゲットとした遺伝子増幅(PCR)を行い、PCR産物の塩基配列(シーケンス)をサンガーシーケンシングで取得した。

得られた18S rDNAのシーケンスをDNAデータベースに照合したところ、菌類はすべてイワタケ属(*Umbilicaria*属)の菌種であることがわかった。また、光合成生物はすべて*Trebouxia*属の緑藻であった。シアノバクテリアについては後述するバクテリア16S rRNA遺伝子(16S rDNA)をターゲットとしたPCRで検出できなかった。

3. 共生細菌相の網羅的解析

共生細菌についてはバクテリア16S rDNAをターゲットとしたPCRを行い、その一部(V3-V4領域)についてIllumina社のMiSeqを用いて大量シーケンスデータを取得した。得られたV3-V4シーケンスは97%の類似度でグループ分けし、おおむね「種」に相当する分類単位として扱った。

イワタケ類の各試料について共生細菌相を種レベルから門レベルまでプロファイリングするとともに、採集地域ごとの特徴を抽出することができた。その結果、南極域の昭和基地周辺で採集したイワタケ類の共生細菌相が門レベルで南極域シグニー島および北極域と顕著に異なることが分かった(図1)。

南極・昭和基地周辺のイワタケ類共生細菌相では *Bacteroidota* 門(旧 *Bacteroidetes* 門)が優占する一方、南極域シグニー島および北極域のイワタケ類共生細菌相では *Pseudomonadota* 門(旧 *Proteobacteria* 門)が優占し、昭和基地周辺域と他地域を分ける要因となっていた。このことは、昭和基地周辺域とシグニー島の間に生物地理学的な境界線が存在することを示唆するものである。動物の生物地理学で有名な分布境界線(ウォレス線)になぞらえて「微生物界

のウォレス線」と呼べるかもしれない。これは、門レベル以下の分類単位(綱・目・科・属・種レベル)でも同様であった(図2)。また、従来は系統分類を目的とした V3-V4 領域のシーケンスデータから機能推定もできるようになった今日において、微生物相が有する(地衣類に提供できる)生理生態学的な機能を推定することも、今後は視野に入れてよいだろう。

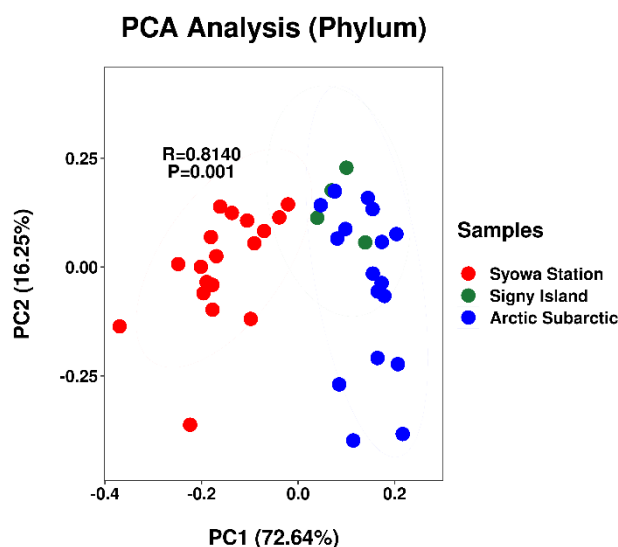


図 1. 昭和基地、シグニー島、北極・亜北極域のイワタケ類地衣類の微生物相について門レベルでの主成分分析 (PCA) 結果

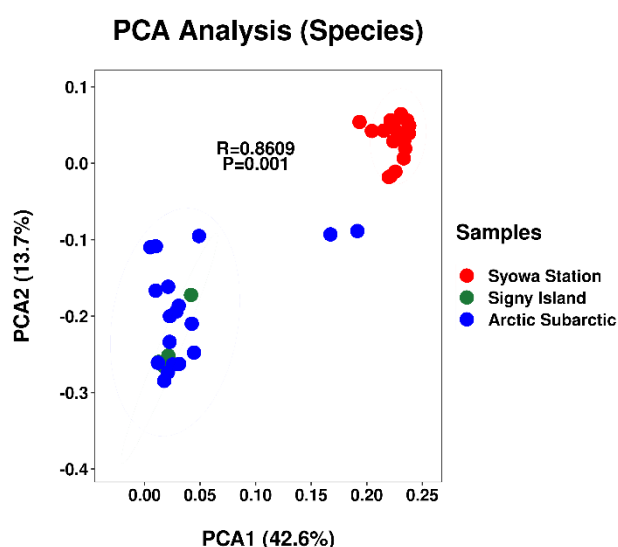


図 2. 昭和基地、シグニー島、北極・亜北極域のイワタケ類地衣類の微生物相について種レベルでの主成分分析 (PCA) 結果

[参考文献]

- 1) Zichen He, Takeshi Naganuma (2022-10-26) Chronicle of research into lichen-associated bacteria. *Microorganisms*, 10, 2111. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112111>
- 2) Merry S. Faluaburu, Ryosuke Nakai, Satoshi Imura, Takeshi Naganuma (2019-07-18) Phylotypic characterization of mycobionts and photobionts of rock tripe lichen in East Antarctica. *Microorganisms*, 7, 203. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7070203>

[研究発表]

Zichen He, Takeshi Naganuma, Ryosuke Nakai, Satoshi Imura, Megumu Tsujimoto, Peter Convey (2022-08-03) Microbiomic analysis of bacteria associated with rock tripe lichens in continental and maritime Antarctic regions. *Journal of Fungi*, 8, 817. <https://doi.org/10.3390/jof8080817>

(別紙)

研究協力者参加者一覧

	一般共同研究(令和4年度報告)			課題番号	2-30
	研究課題名	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			
	氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)	内田 雅己	生物圏	准教授		
	神田 啓史	生物圏	名誉教授		
小計	2名				
所外 (極地研以外)	何 子琛	広島大学 大学院 統合生命科学研究科	大学院生	令和4年3月 博士(学術)取得見込	
	中井 亮佑	産業技術総合研究所 生命工学領域 生物プロセス研究部門 微生物生態工学研究グループ	主任研究員	北海道大学 大学院 国際食資源学院 客員准教授	
	辻本 恵	慶應義塾大学 環境情報学部	講師		
	Peter Convey	British Antarctic Survey	Individual Merit Scientist	UK	
	Martin Hahn	Research Department for Limnology University of Innsbruck	Associate Professor	Austria	
	Merry Faluaburu	Solomon Islands National University	Lecturer	Solomon Islands	
小計	6名				
合計	8名				

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・講師
(国立極地研究所)

伊村 智 教授

本山秀明 教授

令和2年～令和4年（3か年）

[研究成果]

1. はじめに

化石やアイスコアなどの年代の古い試料から得られる古代DNAは、過去の環境を推定するうえで非常に重要な情報を提供する。南極大陸は最も寒冷な地域であるため、年代の古い試料から過去の生物種の多様性や遺伝的多様性を直接的に推定することが出来ると期待される。本研究では、南極のミイラ化したアザラシ遺体やアイスコア試料などから古代DNA解析をおこなった。古代試料からのゲノム増幅に最適化した手法を用いてゲノム解読をおこない、過去に生息していた生物の集団動態の解明を目指した大規模シーケンスからの生命情報解析を実施した。研究成果を以下に報告する。

2. 研究方法

ミイラ化したアザラシ遺体のゲノム解析については、第60次南極地域観測隊の国立極地研究所・高橋晃周准教授が南極の昭和基地周辺のSkarvsnessとLang Hovdeで採取したミイラ化したアザラシ遺体（合計7個体）、および国立極地研究所の標本室に保管されていた南極マクマード基地周辺で採取されたミイラ化したアザラシ遺体（1個体）からの古代DNA解析をおこなった。遺体表面は様々な微生物などが付着してコンタミネーションにさらされているため、無菌的に試料内部のサンプリングをおこなった。これらのミイラアザラシ標本内部から無菌的にDNAを抽出し、年代の古いDNAに特化した手法でショットガンメタゲノムライブラリーを作成し、次世代シーケンサーによる大規模解読をおこなった。文科省科研費「先進ゲノム支援」の支援を受けて、AD344-1647年までの8個体の南極アザラシサンプルについて、Illumina HiSeqおよびNovaSeqシーケンサーを用いてDNAシーケンシングを行った。ゲノム全体のヘテロ接合度の頻度分布による解析から過去の集団サイズの変動や地域間での遺伝的交流を推定し、氷期・間氷期サイクルと集団構造の変遷の関連性を調べ、南極生

態進化史の解明をおこなった。

南極氷床アイスコアのDNA分析は、国立極地研究所のクリーンルームにておこなった。試料の表面に付着したコンタミネーションの微生物を排除するために、本研究で開発したアイスコア融解装置を用いて、アイスコアの試料内部のみを無菌的に採取した。また、最新の微量・短鎖DNA分析の先端的手法を用いて無菌的にDNA抽出をおこない、古代試料由来のDNAライブラリー構築に最適化された手法でゲノムライブラリーを作成し、Illumina HiSeqシーケンサーを用いて、6試料のアイスコア試料から約10億リード解読した。シーケンスした古代メタゲノム配列データを、高速に配列類似性を検索し、古代DNA配列に近縁な系統及び遺伝子機能の推定を行い、当時の生物群集の系統組成と遺伝子機能組成を推定した。さらに、研究協力者が開発した、約160万サンプルの様々な環境由来のメタゲノムデータと環境情報を統合したデータベースMicrobeDB.jpとそれら大量のメタゲノムデータを探索可能なWebアプリケーションLEAを用いて、類似した特徴を持つ現生の微生物群集を特定し、その環境情報を基に当時の環境推定をおこなった。

3. 研究成果

ミイラ化したアザラシ遺体からバイオインフォマティクス解析をおこなった。サンプルごとに平均3.3億リードの配列データが得られ、現生のアザラシゲノム配列への配列類似性検索ツールBWAを用いた配列類似性検索により、全個体*Leptonychotes weddellii*と推定され、各個体ほぼ完全長のミトコンドリアゲノム配列と多数の核SNPデータを得ることができた。サンプルにはバクテリアや菌類などの微生物が大量に含まれており、全リードに占めるアザラシミトコンドリアゲノム由来リードの割合は平均0.01%と少なかったが、DNAの断片化の進行が緩やかでありミトコンドリア由来のリード長の

中央値が 100 bp と長く DNA の死後の塩基置換の割合も少なかったため、アザラシミトコンドリアゲノムのリード coverage は 24x-400x と高く、高精度なミトコンドリアゲノム配列を得ることができた。ミトコンドリア DNA に基づく解析の結果、昭和基地周辺の集団(大陸東部集団)とマクマード基地周辺の集団(ロス海集団)は、地理的に非常に離れているにもかかわらず明確な系統地理的構造を持たずウェッデルアザラシは南極大陸を広範囲に移動していることが示唆された。

その一方で、両地域間で集団サイズの変動史に差異が見られたため、ロス海と大陸東部とで独自に異なる集団が進化し、それがごく最近交雑しあった可能性が示唆された。この仮説を検証するため大陸東部集団とロス海集団の計 8 個体の核ゲノムデータ(6,758,086 SNP)を得た。これらの SNP の情報に基づき Probabilistic PCA(pPCA)法により個体間の関係を推定したところ地理的に離れた位置から採取されたロス海集団の個体は大陸東部集団に内包された。このことは、ミトコンドリア DNA の結果と同様にウェッデルアザラシは南極大陸沿岸部全域に分布しているが、その遺伝的構造は非常に弱く地理的な分化は見られないことを示唆している。Adimixture を用いた集団構造推定の結果からも、西南極と東南極間を含め、地域間での明瞭な集団構造は確認されず、ウェッデルアザラシが地域間で遺伝的な交流が起きていることが示唆された。また炭素 14 の測定結果は、現生ウェッデルアザラシ集団が過去約 2000 年に亘って南極大陸全体で連続的な集団を維持していることを示唆している。また、ゲノム全域で 10 万塩基対ごとに集団動態や淘汰の指標となる Tajima's D を推定したところ、正の値に大きく傾いていることが明らかとなった。これはウ

ェッデルアザラシが、かつては強い分集団構造を維持していたことを示唆している。これらの結果は、ウェッデルアザラシは遺伝的分化と集団間の交雑という複雑な集団動態史を持つことが示唆された。

アイスコアに含まれる微生物量は極めて少ないことに加えて、試料年代が古いために DNA は断片化している。そのため断片化した微量 DNA を解読する技術の開発を進めながらゲノム配列取得をおこなった。とりわけ断片化された損傷 DNA に対して、コンタミネーションを抑えながら高収率で DNA ライブラリー構築を行う先端のプロトコルの確立を重点的におこなった。アイスコア融解装置を用いて、クリーンルーム内にて氷試料内部のみを無菌的に採取した。無菌的な DNA 抽出、次世代シーケンサーによるゲノム配列の取得、およびゲノム情報解析による微生物解析をおこなった。さらに、ネガコンサンプルの系統組成情報を用いて試薬等由来のコンタミネーションの系統組成への影響を可能な限り取り除く情報学的手法を開発して適用した結果、氷期と間氷期では検出されるバクテリアの種類や起源に大きな違いがあることや、間氷期のサンプルからは寒冷環境から記載のある多様な好冷性細菌が多く検出され、アイスコア中のバクテリアを古環境指標として利用できる事を示した。また、アイスコアから得られた配列が現生コンタミネーションではなく古代試料由来であるかを確認するための分子進化学的検定法を考案し、検証をおこなった。さらに、アイスコア中の過去の微生物情報に応用するために、現在の南極の微生物地理的分布を解析し、特定の藻類種が北極と南極の両極から共通で検出されること、またそれらは現在も分散、交流している可能性があることを明らかにした。これは今後の研究の展開に重要な示唆を与える情報である。

[研究発表]

- Takahiro Segawa, Takahiro Yonezawa, Ryo Matsuzaki, Hiroshi Mori, Ayumi Akiyoshi, Francisco Navarro, Koji Fujita, Vladimir B. Aizen, Zhongqin Li, Shuhei Mano, Nozomu Takeuchi (2023) Evolution of snow algae, from cosmopolitans to endemics, revealed by DNA analysis of ancient ice. *The ISME Journal* 17, 491–501.
- Takahiro Segawa, Takahiro Yonezawa, Hiroshi Mori, Ayako Kohno, Yuichiro Kudo, Ayumi Akiyoshi, Jiaqi Wu, Fuyuki Tokanai, Minoru Sakamoto, Naoki Kohno, Hidenori Nishihara (2022) Paleogenomics reveals independent and hybrid origins of two morphologically distinct wolf lineages endemic to Japan. *Current Biology*, 32, 2494-2504.
- Takumi Murakami, Nozomu Takeuchi, Hiroshi Mori, Yuu Hirose, Arwyn Edwards, Tristram Irvine-Fynn, Zhongqin Li, Satoshi Ishii, Takahiro Segawa (2022) Metagenomics reveals global-scale contrasts in nitrogen cycling and cyanobacterial light harvesting mechanisms in glacier cryoconite. *Microbiome* 10:50.
- Takahiro Segawa, Takahiro Yonezawa, Hiroshi Mori, Ayumi Akiyoshi, Morten E. Allentoft, Ayako Kohno, Fuyuki Tokanai, Eske Willerslev, Naoki Kohno, Hidenori Nishihara (2021) Ancient DNA reveals multiple origins and migration waves of extinct Japanese brown bear lineages. *Royal Society Open Science* 8, 210518.

(別紙)

研 究 協 力 者 参 加 者 一 覧

	一般共同研究(令和4年度報告)			課題番号	2-31
	研究課題名	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			
	氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)	高橋 晃周	生物圏	准教授		
	秋好 歩美	生物圏	技術専門員		
小計	2名				
所外 (極地研以外)	米澤 隆弘	東京農業大学 農学部動物科学科	准教授		
	森 宙史	国立遺伝学研究所	准教授		
小計	2名				
合計	4名				

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

(国立極地研究所)

内田 雅己 准教授

令和 2 年～令和 4 年 (3 か年)

[研究成果]

地球温暖化が高緯度北極陸域生態系にどのような影響を及ぼす可能性があるのかについて、急速な温暖化が進行しているノルウェー・スバルバル諸島を対象に、1) 湿地の炭素循環、2) 植物の発芽タイミングの 2 点について研究を進めた。

1) 湿地の炭素循環

高緯度北極においても、湿地には多量の有機炭素が蓄積されていることが先行研究により明らかとなっている。そこで、湿地における生態系純生産量（生態系に正味で固定される炭素量）の推定を試みた。調査地はスバルバル諸島、スピッツベルゲン島の北西に位置するニーオルスン（北緯 79 度）付近にある湿地（スチュファレット）とした。生態系純生産量を推定するために、湿地からコケ 2 種（*Calliergon richardsonii*, *Tomenthypnum nitens*）の緑色部と褐色物を採取し、ニーオルスン基地内の実験室で光合成と呼吸特性を調査した。その後、上記 2 種の光合成及び呼吸特性から純一次生産量と生態系純生産量のモデルを構築した。モデルによる推定値と現場で測定した二酸化炭素のフラックスとの間には有意な関係が認められ、このモデルで生産量の推定が可能であると判断した。そこで、スチュファレットで測定した 2012 年から 2014 年のコケ緑色部と褐色部の温度およびニーオルスン基地屋上で得られた PPFD のデータをもとに、この期間のコケの純一次生産量と生態系純生産量を推定した(図 1.)。その結果、2012 年、2013 年、2014 年の純一次生産量は 205、207、143 gC m^{-2} 、生態系純生産量は、88、86、67 gC m^{-2} と見積もられた。純一次生産量、生態系純生産量ともに 2014 年の値が他の年よりも 3 割程度小さな値となったが、これは、2014 年の雪解け時期が、他の年と比較すると 3 週間以上遅かったことが影響していると考えられた。

Nakatsubo et al. (2015)は、活動層に蓄積している有機炭素の ^{14}C 年代決定から、スチュファレットにおける見かけの炭素蓄積量は $9.0\text{--}19.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であ

ると報告している。本研究における生態系純生産量の推定値は $67\text{--}88 \text{ gC m}^{-2}$ であることから、生態系純生産量の値は、炭素蓄積量よりもかなり高いことが明らかとなった。この理由としては、1) ピートや枯死したコケの層から溶存態の炭素の流失が起きていること、2) 近年の温暖化により有機物生産が可能な期間が延長していることが考えられた。

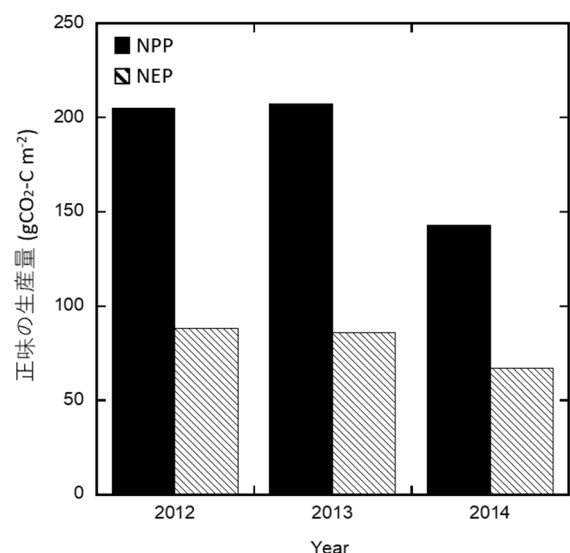


図 1. 2012 年–2014 年の純一次生産量 (NPP) と生態系純生産量 (NEP) (推定値)。

2) 植物の発芽タイミング

温暖化は植物の発芽タイミングを変化させることにより、植物の個体群動態、生態系の構造に影響を与える可能性がある。本研究では、スピッツベルゲン島に多く見られる 3 種の植物 *Dryas octopetala*、*Oxyria digyna*、*Salix polaris* を対象に、種子発芽に対する温度の影響を実験的に調べた。実験に用いた種子はロングイヤービンとニーオルスンの 2 カ所で採取し、風乾状態と湿らせた状態の 2 つ保存条件で日本に持ち帰った。発芽の温度特性は、段階温度法 (Washitani, 1987) により調査した。この方法は、同

一種子を順次異なる温度で発芽の有無を確認する方法で、その発芽パターンから休眠・発芽温度反応の概要を知ることができる。本研究では、4℃から20℃まで段階的に温度を上げていく上昇系と、20℃から4℃まで段階的に温度を下げていく下降系を用いて発芽実験を行い、発芽率を記録した。

D. octopetala は、風乾状態で持ち帰った種子のみが発芽し、上昇系では実験開始後24日(8℃)、下降系では実験開始5日後(12℃)で初めて発芽が観察された。*O. digina* では、上昇系で18日後(6℃)、下降系では5日後(12℃)に発芽が観察された。本種については、風乾保存種子、湿潤保存種子のいずれも発芽したが、下降系では前者の方が最終的な発芽率は高い値を示した。*S. polaris* についても、風乾保存種子、湿潤保存種子のいずれも発芽が認められ、上昇系においては湿潤保存種子で5日後(4℃)、乾燥保存種子で24日後(8℃)に最初に発芽が確認された。一方、下降系では、湿潤保存種子で2日後(15℃)、乾燥保存種子で5日後(12℃)に最初の発芽が確認された。これら3種の植物については、春化处理等を行わなくても速やかに発芽したことから、明確な休眠性をもたないものと考えられる。

以上の結果と現地で測定された地温のデータから、これらの植物の発芽タイミングに与える温暖化の影響について推定を行った。その結果、地温が2℃上昇した場合には1-2週間、4℃上昇した場合には2-3週間発芽可能時期が前倒しになると推定された。このように発芽可能時期が早くなることは、実生の生育可能期間が延びるというプラスの効果と、遅霜などのリスクを受けやすくなるというマイナスの効果が考えられる。

秋における温暖化は、積雪開始時期を遅らせることに繋がるが、仮に発芽の時期が現在よりも前倒しとなり、種子成熟までの期間が現在と同じと仮定すると、種子を散布してから積雪が始まるまでの期間は、現在よりも長期化すると予想される。本研究で対象にした3種の植物では、種子の休眠特性は認められなかったため、秋に発芽する機会が増える可能性が考えられる。秋に発芽した実生は十分に生育しないまま冬を迎えることになるため、死亡率が高くなる可能性もある。温暖化による秋発芽については、高山では報告があるが、高緯度北極では、まだ知られていないため、今後、フィールドベースでの調査が必要と思われる。

[参考文献]

- Nakatsubo T., Uchida M., Sasaki A., Kondo M., Yoshitake S., Kanda H. 2015. Carbon accumulation rate of peatland in the High Arctic, Svalbard: Implications for carbon sequestration. *Polar Science* 9, 267–275, doi: 10.1016/j.polar.2014.12.002.
- Washitani I., 1987. A convenient screening test system and a model for thermal germination responses of wild plant seeds: behaviour of model and real seeds in the system. *Plant Cell Environ.* 10, 587–598, <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11604111>.

[研究発表]

- Nakatsubo T., Hirota M., Kishimoto-Mo A.W., Oura N., Uchida M. (2023) Carbon exchange and primary production of a High Arctic peatland in Svalbard. *Polar Research*, in press.
- Pedersen ÅØ, Convey P, Newsham KK, Mosbacher JB, Fuglei E, Ravolainen V, Hansen BB, Jensen TC, Augusti A, Biersma EM, Cooper EJ, Coulson SJ, Gabrielsen GW, Gallet JC, Karsten U, Kristiansen SM, Svenning MM, Tveit AT, Uchida M, Banerjee I, Calizza E, Cannone N, de Goede EM, Doveri M, Elster J, Giamberini MS, Hayashi K, Lang SI, Lee YK, Nakatsubo T, Pasquali V, Paulsen, IGM, Pedersen C, Peng F, Provenza A, Pushkareva E, Sandström CAM, Sklet V, Stach A, Tojo M, Tytgat B, Tømmervik H, Velazquez D, Verleyen E, Welker JM, Yao Y-F, Loonen MJJE (2023) Five decades of terrestrial and freshwater research at Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Research* 41, 6310, <http://dx.doi.org/10.33265/polar.v41.6310>.

(別紙)

研 究 協 力 者 参 加 者 一 覧

	一般共同研究(令和4年度報告)			課題番号	2-32
	研究課題名	高緯度北極陸域生態系に対する温暖化の影響			
	氏名	所属	職	備考	
所内 (極地研)					
小計	名				
所外 (極地研以外)	大崎壮巳	広島大学大学院 統合生命科学研究科	大学院生		
小計	1 名				
合計	1 名				

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

（国立極地研究所）

高橋 邦夫 准教授

令和2年～令和4年（3か年）

【研究成果】

研究背景

近年の地球温暖化は、産業革命以降に排出された二酸化炭素が関係していることについて、疑う余地が無いとされています。大気中に排出された二酸化炭素は、大気を温めると同時に海洋も温め、海洋に溶け込むことが知られています。海洋に二酸化炭素が溶け込むことで、海水中の水素イオンが増加して酸性化することを海洋酸性化と呼びます。海洋酸性化は、プラネタリー・バウンダリーによれば、安全なバウンダリーの圏内ですが、局所的に海洋酸性化が進行し、その海水を一時的に浴びた生物には、物理的・生態的な影響があることが知られています。これらのことから、国連が定めたSDGsのアジェンダのうち14「海の豊かさを守ろう」のターゲットに「海洋酸性化の影響の最小限化」といった目標が掲げられています。これらのことから、海洋酸性化は、人類共通の大きな課題であることが解ります。

本研究では、海洋酸性化がハダカカメガイ（通称クリオネ）に与える影響評価を目的とし、北海道北東部に位置するオホーツク海沿岸に出現するハダカカメガイと、南半球で唯一生息が確認されているナンキョクハダカカメガイについて、実験のために試料を集めることから始めました。

ハダカカメガイ類の採集と飼育

本研究では、オホーツク海と南極海、それぞれの地域に生息するクリオネ類を採集した。オホーツク海で採集されるクリオネ類については、ハダカカメガイ、ダルマハダカカメガイの2種を確認し、採集を行った。採集後は、室内で飼育実験を行い、飼育可能である環境について検討を行った。南極海においては、ナンキョクハダカカメガイを採集し（図1）、現地から日本まで持ち帰ったところ、2個体のみ生きたまま日本に持ち帰ることが出来た。ナンキョクハダカカメガイの飼育について、オホーツク海の海水を使用した従来通りの飼育環境でも飼育が可能

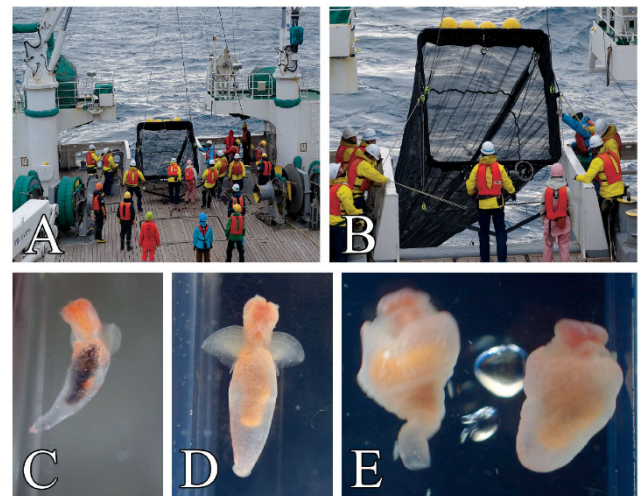


図1 東京海洋大学練習船「海鷹丸」におけるMOHTによるナンキョクハダカカメガイ *Clione antarctica* の採取と（A-B）、採集されたナンキョクハダカカメガイ（C-E）。A-B：海鷹丸によるMOHTによる観測様子、C：採取直後のナンキョクハダカカメガイ、D：日本に到着したナンキョクハダカカメガイ、E：収縮行動するナンキョクハダカカメガイ、体長：C-D、35 mm；E左個体、約35 mm、右個体約33 mm。

であることが解った。ナンキョクハダカカメガイについては、生きたまま日本へ運んで長期間飼育した例は無いため、その詳細については、山崎・他（2020）にて記述した。

オホーツク海沿岸と沖合におけるクリオネ類の出現パターン

オホーツク海南部沿岸と沖合に出現するハダカカメガイのパターンについて調査した。結果、冬季だけではなく（山崎・他，2021）、夏季にもクリオネ類が出現し（山崎・他，2022）、これらのクリオネは日本海中層水を起源とする冷水帯とともに運ばれ、分散したものと考えられた。オホーツク海で出現するハダカカメガイ類は、水塊と大きく関係することが初めて分かった（山崎・他，2021；2022）。

オホーツク海沿岸における長期モニタリングによるクリオネ類の出現とクリオネの餌であるミジンウキマイマイの出現について

2004年から2012年の9年間、紋別市にあるオホ

ーツクタワーでプランクトンネットを用いてサンプリングした試料からクリオネ類の出現と、CTD から得られたクロロフィルと水温のデータを用いて、それらの関連性について検討した。結果、ハダカカメガイの出現と餌生物であるミジンウキマイマイについて、タイミングが異なることが解った。ミジンウキマイマイは、海明け後に、クロロフィルの増加にとともに出現密度も高くなった。夏季に見られたクリオネ類のピークは、オホーツク海起源のクリオネ類ではなく、冷水帯とともにオホーツク海へやってきた、日本海起源のクリオネと考えられた。オホーツク海に出現するクリオネ類と餌であるミジンウキマイマイの消長は、海流と海明けによる植物プランクトンのブルームが大きく関係していることが解った (Takahashi et al., 2022)。

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

本研究の事業期間に、海洋酸性化がハダカカメガイ類に与える影響について、評価することは出来なかった。海洋酸性化の評価をするために、海水中の二酸化炭素濃度をコントロール可能な実験水槽の構築について準備を進めている段階にある。これらの実験装置が完成すれば、クリオネ類を始めとした翼足類全般の海洋生物に対する影響評価が可能となる。本事業によって、オホーツク海のクリオネ類だけではなく、南極海に生息するナンキョクハダカカメガイについても評価する準備が進み、引き続き研究を進め、明らかにしたいと考えています。

[研究発表]

- 山崎友資・桑原尚司・高橋邦夫. 2020. 南極海から採集されたナンキョクハダカカメガイ *Clione antarctica* の飼育と形態学的特徴. ちりばたん (日本貝類学会研究連絡誌) 50 巻 2 号, p213–220,
- 山崎友資・桑原尚司・高橋邦夫. 2021. 冬季オホーツク海における冷水性翼足類の沿岸と沖合における分布. ちりばたん (日本貝類学会研究連絡誌) 52 巻 1 号, p47–p54,
- 山崎友資・桑原尚司・高橋邦夫. 2022. 夏季オホーツク海における冷水性翼足類の沿岸と沖合における分布. ちりばたん (日本貝類学会研究連絡誌) 53 巻 1 号, p61–p69,
- Kunio T. T., Seiji K., Soshi H., Takashi K., Tomoyasu Y. 2022. Occurrence and abundance of the gymnosome pteropod genus *Clione* in the coastal waters of Mombetsu, southern Okhotsk Sea, from 2004 to 2012. *Polar Science*, Vol., 33, 100872.

Ⅱ．研究集会報告

研究集会

集 会 等 实 施 報 告 書

						番号	4集1
<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		中間圏・熱圏・電離圏（MTI）研究集会					
開催日時		2022 年 9 月 27-30 日			開催場所		名古屋大学 オンライン ハイブリッド
概要		2022 年 9 月 27-30 日に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・電離圏研究集会では、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。研究集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集会となった。					
報告者 (担当者)		津田 卓雄(富川 喜弘)					
所内参加者数		7 名			合計 70 名		
所外参加者数		63 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		
千葉大学	10		8	1	7		
名古屋大学	9	2	5	1	3		
京都大学	8	1	4	1	4		
電気通信大学	5		3		3		
九州大学	4		3		1		
情報通信研究機構	4			1			
東北大学	3		1				
九州工業大学	2		1	1			
明治大学	1		1		1		
京都産業大学	1						
宇宙航空研究開発機構	1						
富山県立大学	1		1	1	1		
東京大学	1		1	1	1		
北海道情報大学	1						
気象庁	1		1				
駒澤大学	1			1			
フリーランス（一般）	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

				番号	4集2	
<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	SuperDARN研究集会					
開催日時	2023年3月9日 10:00～17:45		開催場所	国立極地研究所+オンライン(ハイブリッド)		
概要	名古屋大学ISEEとの共同主催で標記集会を3年ぶりの現地開催を含むhybrid形式で開催した。海外からの参加者3名や、普段SuperDARNデータを使っていなかった参加者の発表もあり、宇宙天気、あらせ衛星共同、極域・中緯度結合、磁気圏領域推定、熱圏風、トンガ火山噴火による電離圏擾乱観測、データ同化による宇宙天気再解析データ構築の試み、低太陽活動度時の磁気圏電離圏結合とSuperDARN観測への期待等、広範な研究テーマの発表があり、活発な議論が展開され、今後の共同研究発展に資する大変意義深いものとなった。					
報告者 (担当者)	行松 彰					
所内参加者数	4 名		合計	26 名		
所外参加者数	22 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
ROIS/極地研/総研大	4			1		
名古屋大学/ISEE	8		3		3	
ROIS/統数研	1					
九州大学	3		1	2	1	
電気通信大学	1					
NICT(情報通信研究機構)	2					
九州工業大学	1			1		
東京大学	1					
駒澤大学	1			1		
Univ. of Umea (Sweden)	1	1				
Univ. of Saskatchewan (Canada)	1	1				
山東大学(中国)	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。

集 会 等 実 施 報 告 書

				番号	4集3	
<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;"> <div>研究会 ワークショップ</div> <div><input type="checkbox"/> 研究談話会</div> <div><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	PANSY研究集会					
開催日時	2023年3月14日(火) 10:00-15:00		開催場所	東大理1号館710号室&オンライン		
概要	<p>第Ⅸ期南極重点研究観測サブテーマ1「南極大気精密観測から探る全球大気システム」の2022年度の観測・研究の成果や関連するモデル研究等の紹介と、第Ⅹ期の観測・研究計画の議論と情報共有のため、本研究集会を開催した。新型コロナウイルス感染状況の改善に伴い、東京大学での現地開催とオンラインのハイブリッド方式での開催とした。計13件の講演のうち、大学院生からの講演が7件を占め、その新規性や議論の深さには目を見張るものがあった。第Ⅸ期は今年度で終了となることから、今後は第Ⅹ期の計画推進と第Ⅸ期の成果取りまとめに取り組むことを確認し、研究集会を終了した。</p>					
報告者 (担当者)	佐藤 薫 (堤 雅基)					
所内参加者数	7 名		合計 27 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
総研大(極域科学専攻)	1		1		1	
Univ. Colorado	1	1				米国
京大	4	1	1		1	フランス
東大	7		5	3	5	
明治大	1		1		1	
名大ISEE	2					
九大	1			1		
気象研	2			2		
所属無し	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 实 施 報 告 書

						番号	4集4
<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="margin-left: 30px;">ワークショップ</div> <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		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					
開催日時		2022年9月29-30日			開催場所		ハイブリッド(名古屋大学、Zoom)
概要		地球の超高層大気研究は、多岐にわたる領域にまたがる多様なデータを利用する分野横断型研究・融合研究であるため、成果を上げるためには、使い易いデータベースや効率的にデータを検索、描画、解析できるツールを素早く開発し、そして積極的に活用することが重要である。本研究会では、太陽地球系物理学分野の最新研究テーマ、解析手法、データベースや解析ツール等について講演・議論・情報共有を行うことを目的し、学生・若手研究者が最新の研究成果を発表する「講演セッション」、他の合同研究会の参加者と共にポスターを掲示し、参加者と自由に議論する「ポスターセッション」、学生や若手研究者が主体的にデータ解析手法を学べるように、Pythonで記述された最新の解析ツール'PyUDAS'を用いた「データ解析講習セッション」を開催した。					
報告者(担当者)		阿部修司(門倉昭、田中良昌)					
所内参加者数		2 名			合計 52 名		
所外参加者数		50 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		
NICT	4			1			
RISH	4				2		
九工大	2			1	1		
九大	4		1	1	1		
京大理	2				1		
千葉大	6				5		
電通大	4				3		
名古屋大	10			1	3		
東北大	2				1		
富山県立大	2			1	1		
駒沢大	1			1			
太陽物理学研究所	1						
西南学院大	1						
東大	1			1	1		
フリーランス	1						
北海道情報大	1						
三菱電機	1						
明治大	1				1		
立教大	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 实 施 報 告 書

	番号	4集5				
<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	EISCAT研究集会					
開催日時	2023年3月17,23日		開催場所	オンライン開催		
概要	3月17日の1日目には、2023年度から第1期運用開始予定のEISCAT_3Dレーダーに関する情報共有や議論を行うと共に、2022年度に実施された欧州非干渉散乱(EISCAT)レーダー特別実験に関する結果報告や議論、現行EISCATレーダーを中心に用いた研究成果発表を基に、議論を行った。3月23日の2日目には、2022年度EISCATレーダー特別実験の結果報告及び研究成果発表の続きを実施した。2日目の最後には、EISCAT_3Dデータの解析に向けて、国内ユーザーが必要とするデータベース及びソフトウェア環境などについて総合討論を行った。					
報告者(担当者)	小川泰信					
所内参加者数	7 名		合計 22 名			
所外参加者数	15 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	
名古屋大学	6				1	
電気通信大学	4			1	2	
成蹊大学	1					
日本文理大学	1					
九州大学	1			1	1	
情報・システム研究機構本部	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

		番号		4集6		
<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;"> 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 </div>						
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		2022.9.27		開催場所	名古屋大学宇宙地球環境研究所・オンラインのハイブリッド	
概要		当該期間(2022.3-2022.9)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。当研究集会はMT研究集会他と合同開催の形で、対面及びオンラインのハイブリッド形式で実施された。				
報告者 (担当者)		西谷 望(片岡龍峰・行松彰・小川康信)				
所内参加者数		0 名		合計 37 名		
所外参加者数		37 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
名古屋大学ISEE	8	1	3	0	2	
京都大学RISH	2	1	1	0	1	
九州大学九州大学国際宇宙惑星環境研究センター	4	0	2	0	1	
九州工業大学	4	0	2	1	1	
気象庁地磁気観測所	2	0	0	1	0	
情報通信研究機構	4	0	0	1	0	
千葉大学大学院工学研究院	2	0	0	1	0	
電気通信大学	2	0	1	0	1	
国立天文台	1	0	0	0	0	
三菱電機株式会社 先端技術総合研究所	1	0	0	0	0	
駒澤大学 総合教育研究部	1	0	0	1	0	
鹿児島工業高等専門学校	1	0	0	0	0	
富山県立大学工学研究科	1	0	0	1	0	
京都大学大学院理学研究科	1	0	0	0	0	
フリーランス	1	0	0	0	0	
太陽物理学研究所	1	0	0	0	0	
無所属	1	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 实 施 報 告 書

[illegible]

- 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 实 施 報 告 書

						番号	4集8
<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	大気—雪氷—海洋間の物質交換・循環						
開催日時	2023/1/17-18				開催場所	情報・システム研究機構会議室とオンライン（Zoom）の併用	
概要	「南極エアロゾル研究会（原代表）」と合同で研究集会を行った。南極、グリーンランドなど極域における水物質循環と低温下における物質の挙動に関する研究成果を報告し、議論を行った。研究会を合同開催することで、これまで行われてきた南極での観測結果についても合わせて議論でき、非常に有意義な討論を行うことができた。						
報告者（担当者）	的場澄人（青木輝夫）						
所内参加者数	3 名				合計	24	名
所外参加者数	21 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						
北海道大学	4		3	1	2		
京都大学	1						
大阪公立大	2		1				
東京工業大学	1		1		1		
山梨大学	2						
奈良女子大	1						
九州大学	2		1		1		
金沢大	1			1			
名古屋大	1						
法政大	1			1			
南京大	1	1					
富山大	1						
産総研	1						
極地研究所	3						

- 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

						番号	4集9
<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	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	2023年3月1日～2日			開催場所	極地研 + Web併用		
概要	<p>南極昭和基地に設置中のXバンドレーダーや、マイクロパルスレーダーによる観測結果の報告や、それらの解析結果から明らかになった南極の降水メカニズムなどについて議論を行なった。このほか、国内での寒冷地観測の例として、北海道陸別での降雪・積雪観測の結果の検討、オホーツク地域の大雪時の積雪特性、陸別など寒冷地の冷却の仕組み、降雪結晶の十二花の構造解析などの議論を行った。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 昭和基地のレーダー観測の事例解析 平沢尚彦(極地研) 2. 昭和基地のレーダーデータの解析方針と進捗状況 小西啓之(大阪教育大) 3. 陸別の降雪・積雪観測のこれまでと今後」 平沢尚彦(極地研) 4. オホーツク地域における大雪時の積雪特性とその要因 -2014/15年冬期の事例解析- 石井日菜、白川龍生(北見工大) 5. 陸別はなぜ冷える? -盆地冷却とそのしくみ- 高橋修平(オホーツク流水科学センター) Zoom 6. 降雪十二花結晶と人工十二花結晶の解析 島田 亙、伊藤柊哉(富山大) 7. 昭和基地の降水イベントにおけるPMPLによる水滴・氷晶の鉛直分布の特徴 矢吹正教(京都大学) Zoom 						
報告者 (担当者)	島田 亙(平沢 尚彦)						
所内参加者数	3 名			合計 9 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)	0						
富山大学	1						
大阪教育大学	1						
北見工業大学	1			1	1		
北海道立オホーツク流水科学センター	1						
京大生存圏研	1						
北大低温研	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

						番号	4集10-1
<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		第23回南極エアロゾル研究会					
開催日時		令和4年7月26日			開催場所		オンライン（Zoom）
概要		JARE62越冬観測報告、JARE63夏観測報告、JARE63越冬観測状況確認を行った。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。					
報告者 （担当者）		原圭一郎（平沢尚彦）					
所内参加者数		4 名			合計 19 名		
所外参加者数		15 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						
合同会社 X-TREME COMPOSITE JAPAN	1						
北海道大学	1						
名古屋大学	1						
京都大学	2						
東京工業大学	1						
山梨大学	2						
九州大学	1						
金沢大	2		1	2			
大阪公立大	1						
奈良女子大	1			1			
極地研究所	4			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

				番号	4集10-2	
<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	第23回南極エアロゾル研究会					
開催日時	2023/1/17-18		開催場所	情報・システム研究機構会 議室とオンライン		
概要	大気雪氷海洋の物質交換に関する研究会(時場代表)と合同で研究会を行った。これまでの南極昭和基地・しらせで行ってきたこれまでの観測結果の解析結果について議論を行った。また、研究会を合同開催することで、南極の観測結果と関連する大気雪氷との物質交換も合わせて議論することが可能であり、非常に有意義な討論を行うことができた。					
報告者 (担当者)	原圭一郎(平沢尚彦)					
所内参加者数	3 名		合計	24 名		
所外参加者数	21 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					
北海道大学	4		3	1	2	
京都大学	1					
大阪公立大	2		1			
東京工業大学	1		1		1	
山梨大学	2					
奈良女子大	1					
九州大学	2		1		1	
金沢大	1			1		
名古屋大	1					
法政大	1			1		
南京大	1	1				
富山大	1					
産総研	1					
極地研究所	3					

- 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 实 施 報 告 書

			番号	4集11-1		
<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		地上・衛星受信データからみる氷床上の降雪と表面融解に関する研究集会				
開催日時		2022年08月26日（金）10:00-17:30		開催場所		Zoom開催
概要		<p>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、海水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特に南極における今後の衛星観測システムの動向についても提案がなされた。今後の共同研究の開始となる議論もあり、参加者にとって有意義な議論や情報共有が行われたといえる。オンライン実施だったため、予算を使用しなかった。より研究を促進するために冬～春先に対面実施を再度計画している。</p>				
報告者 （担当者）		鈴木 香寿恵（平沢 尚彦）				
所内参加者数		7 名		合計 13 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
法政大学	1			1		
大阪教育大学	1					
富山大学	2					
京都大学	1					
JAXA	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

		番号	4集11-2			
<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	地上・衛星受信データからみる氷床上の降雪と表面融解に関する研究					
開催日時	2023年03月09日(木) 13:00 - 16:30 2023年03月10日(金) 10:00 - 16:00		開催場所	データサイエンス棟 大会議室, zoom併用		
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、海水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。これらは極地研が運営する北極・南極データアーカイブシステム(Arctic and Antarctic Data archive System: AADS)や学術データベース(Science Database)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、衛星観測データを用いた南極氷床上における降雪と表面融解の現状把握に関する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意見交換を行い、特に初日ではX期における観測データの利活用や観測計画自体の議論も含め、実施した。二日目は降水をもたらすAtmospheric Riverやエアロゾル輸送に関する観測や研究についての紹介をはじめとする物質輸送に関する話題提供が多く行われた。また、深層学習の活用についても最新の研究手法の提案を受け、今後の共同研究も開始となり、参加者にとって有意義な議論や情報共有が行われたといえる。					
報告者 (担当者)	鈴木 香寿恵 (平沢 尚彦)					
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
法政大学	1			1		
明治大学	1					
富山大学	1					
京都大学	2				1	
JAXA	1		1			
総合研究大学院大学	1				1	
九州工業大学	1					
気象研究所	1					
山梨大学	1					
JAMSTEC	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 实 施 報 告 書

[illegible]

- 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

						番号	4集13
<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		2022年度 エアロゾル・雲・降水に関する研究集会					
開催日時		2023年3月16～17日			開催場所		オンライン（Zoom）
概要		雲凝結核や氷晶核として働くエアロゾルの増減によって雲の構造が変化することにより、降雨や降雪に至る降水機構にも変化が生じる。そのプロセスの理解には、極域を含むエアロゾル・雲・降水に関する知見が必要であり、これまで多くの研究がなされているが、定量的な理解には至っていない。本研究集会では、エアロゾル、雲物理、気象、気候や隣接分野などを専門とする研究者が一堂に集まり、室内実験・観測・数値実験など様々な手法による、エアロゾル・雲・降水に関する最新の研究成果や動向の共有を行った。今回もオンラインでの開催となったが、学生の参加者の割合が非常に高く（参加者88名のうち35名が学生）、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。					
報告者 （担当者）		荒木 健太郎 （當房 豊）					
所内参加者数		5 名			合計 88 名		
所外参加者数		83 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	
国立極地研究所	5			2			
気象研究所	8		1				
気象庁	2						
東京大学	7		4		3		
東海大学	2		1		1		
東京都立大学	1		1				
東京理科大学	1						
筑波大学	3		3		3		
東北大学	1		1	1	1		
日本大学	7		6	2	6		
名古屋大学	9		7	3	5		
名古屋工業大学	1						
北海道大学	4		3	1	3		
防災科学技術研究所	3						

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
兵庫県立大学	4	1	3	1	3	
京都大学	4		4	1	4	
京都工芸繊維大学	1		1		1	
ウェザーニューズ	2			1		
コロラド大学	1		1		1	
テキサスA&M大学	1		1			
電力中央研究所	1					
JAXA	1					
金沢大学	1					
九州大学	1		1		1	
慶応義塾大学	1		1	1	1	
広島大学	1			1		
大阪教育大学	1		1		1	
国立環境研究所	1					
長崎大学	1					
北海道立総合研究機構	1					
鉄道総合技術研究所	1					
放送大学	1		1		1	
防衛大学校	1					
武蔵野美術大学	1			1		
富士山環境研究センター	1		1			
古野電気	1					
日本山岳ガイド協会	1					
日本航空機操縦士協会	1					
読売新聞西部本社	1					
eロボティクス	1					
無所属	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

		番号	4集14			
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー ■ 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	無人航空機の活用による極地観測の展開(第12回)					
開催日時	令和5年3月18日		開催場所	Zoom		
概要	本研究会については、来年度の申請をしていないため、今回をもっていったん休止することとしていたため、総括的な話題、今後を展望する話題でプログラムを構成した。第63次南極地域観測隊における気球浮揚無人滑空機オペレーションの状況、第Ⅸ期のカイトプレーンオペレーションの状況、Ⅷ・Ⅹ期の無人航空機オペレーションの概要の取りまとめ等を越冬隊参加者を中心とする5件の発表に基づいて行った。併せて、無人航空機に関係する技術的な3件の話題、友人ヘリ、カイトプレーン観測に関する2件の話題の提供をいただいた。					
報告者 (担当者)	林 政彦(平沢 尚彦)					
所内参加者数	2 名		合計	20 名		
所外参加者数	18 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					
金沢大学	2		1	1	1	
ロボティスタ	1					
株式会社TMIT	1					
金沢工業大学	1					
富山県立大学	2	1	1	1		
国際航業株式会社	1					
合同会社 X-Treme Composit Japan	1					
日本タングステン株式会社	1					
株式会社ゼノクロス 航空宇宙システム	1					
ジオスポーツ株式会社	1					
株式会社 四門	2		1			
前田建設株式会社	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 实 施 報 告 書

[illegible]

- 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

				番号	4集16	
<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	冷水性翼足類クリオネ属の基礎的学術研究の現状 および将来計画に関する研究集会					
開催日時	令和4年12月12日		開催場所	国立極地研究所		
概要	地球規模環境問題の一つである海洋酸性化は、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の生残に影響を与えることが懸念されている。裸殻翼足類であるクリオネ属も幼生期に貝殻を持つが、基本的学術研究が乏しく情報集積が喫緊の課題である。本研究チームはこれまで南極海産およびオホーツク海産のクリオネ属を対象に同定手法や分布特性といった研究を継続してきた。本研究集会ではこれまでの学術研究の総括を行うとともに、試料観察と合わせて今後の研究課題について検討する。					
報告者 (担当者)	高橋邦夫					
所内参加者数	2 名		合計 5 名			
所外参加者数	3 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					
ウェザーマップ(株)	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

						番号	4集18
<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		2022年 南極医学・医療ワークショップ					
開催日時		令和4年7月9日			開催場所		オンライン
概要		南極観測隊で実施してきた医学研究成果や医療に関する問題及び現状を発表し、 本年出発する第64次隊で実施する医学研究計画を検討する場として開催し、活発な 議論が行われた。またアジア圏から中国、韓国の南極医療関係者が参加し、コロナ 禍のもとでの各国の南極観測に関わる対応について、情報交換を行った。					
報告者 (担当者)		伊村 智					
所内参加者数		12 名			合計 49 名		
所外参加者数		37 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	
鳥取大学	2				1	若手は医学部5年生	
獨協医科大学呼吸器外科	1						
筑波大学付属病院	1						
大阪警察病院臨床検査センター	1						
東京勤労者医療会 東葛病院	1						
JHCO埼玉メディカルセンター	1						
蕨市立病院 外科	1						
大阪府立大学人間社会学部	1						
三重大学医学部	1						
東邦大学医療センター大森病院 感染管理部	1						
東邦大学/東京医科歯科大学	1						
福島県立医科大学	1						
なごやかクリニック	1						
京都光華女子大学人間科学部	1						
金町駅前クリニック	1						
明石市立市民病院	1						
沖縄赤十字病院	1						
帝京科学大学	1						
TMGあさか医療センター 外科	1						
在アルジェリア日本大使館	1						
有人宇宙システム(株)	3						
JAXA	1						
海上自衛隊「しらせ」	4						
Yonsei Univ. College of Medicine, Korea	1	1					

大学・機関名	参加者数					備考
		内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	
Severance Hospital, Yonsei Univ. College of Medicine, Korea	1	1				
Ajou Univ. Hospital Trauma Center, Korea	1	1				
Shanghai East International Medical Centre (SEIMC), China	1	1				
Zhong Shan Station, China	1	1				
KOPRI, Korea	3	3				

- 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。

Ⅲ. 令和 4 年度共同研究課題一覧

1.令和4年度共同研究実施件数

区分	研究分野	一般共同研究			令和4年度 終了件数	令和4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	10	8	18	7	10
	気水圏	13	5	18	7	13
	地圏	13	4	17	8	13
	生物圏	12	7	19	6	12
	極地工学	1	0	1	0	1
	計	49	24	73	28	49
研究集会		18			17	－

※研究集会1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	職名	研究期間	
宙空圏	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
	2-4	SuperDARN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
	2-9	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
	4-5	アークオーロラの一般理論	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	R4～R4	1年
	4-7	しらせ搭載全天カメラによるオーロラ・大気光観測データ解析と観測システム改良	坂野井 健	東北大学大学院理学研究科	准教授	R4～R4	1年
気水圏	2-11	極地アイスコアの金属成分分析	鈴木 利孝	山形大学学術研究院	教授	R2～R4	3年
	2-13	南極海水サンプル中の物理・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
地圏	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	神奈川大学理学部化学科	准教授	R2～R4	3年
	2-23	南極の水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	上級主任研究員	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
	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	R2～R4	3年
生物圏	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

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属	職名	研究期間	
	2-29	北極・南極試料を用いた菌株の確立とそれらの全ゲノム解析	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	講師	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

3. 研究集会

No.	研究課題名	研究代表者	所属
4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
4集2	SuperDARN研究集会	行松 彰	国立極地研究所研究教育系
4集3	PANSY研究集会	佐藤 薫	東京大学大学院理学系研究科
4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
4集5	EISCAT研究集会	小川 泰信	国立極地研究所国際北極環境研究センター
4集6	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
4集7	氷床域における長期無人気象・雪氷観測および温暖化影響に関する研究集会	栗田 直幸	名古屋大学宇宙地球環境研究所
4集8	大気―雪氷―海洋間の物質交換・循環	的場 澄人	北海道大学低温科学研究所
4集9	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 亙	富山大学理学部
4集10	南極エアロゾル研究会	原 圭一郎	福岡大学理学部
4集11	地上・衛星受信データからみる氷床上の降雪と表面融解にかんする研究	鈴木 香寿恵	法政大学
4集12	南極領域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
4集13	2022年度エアロゾル・雲・降水に関する研究集会	荒木 健太郎	気象庁気象研究所台風・災害気象研究部第二研究室
4集14	無人機の利用による極地観測の展開	林 政彦	福岡大学理学部
4集15	南大洋海氷域における生物地球化学的研究のための鉄分観測技術の構築	西岡 純	北海道大学低温科学研究所
4集16	冷水性翼足類クリオネ属の基礎的学術研究の現状および将来計画に関する研究集会	高橋 邦夫	国立極地研究所
4集17	自然科学系アーカイブズ研究会	工藤 栄	国立極地研究所アーカイブ室
4集18	2022年 南極医学・医療ワークショップ	大谷 眞二	鳥取大学国際乾燥地研究教育機構

本報告書は、令和 4 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。