

平成 3 1 年度
(令和元年度)

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
29-1	地上多点光学観測による電離圏・熱圏・中間圏ダイナミクスの研究	塩川 和夫	6
29-3	大型レーダー流星ヘッドエコーと超高感度高速カメラを用いた超微光流星の観測	阿部 新助	8
29-5	サブストーム・オーロラシーケンスの統一理論	田中 高史	11
29-6	北極域における人工衛星電波を用いた電離圏シンチレーション観測	大塚 雄一	14
29-7	オーロラ活動時におけるVLF、降下電子特性に関する研究	田所 裕康	17
29-8	惑星間空間磁場北向き時の特異な極域電離圏対流の起源	渡辺 正和	19
29-9	降下粒子によるオーロラ発光モデルの開発と粒子コードとの連携計算	加藤 雄人	21
29-10	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	23
29-11	磁気嵐時におけるグローバルなプラズマ圏・プラズマ圏界面の時間・空間変動特性	新堀 淳樹	26
29-14	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	28
29-15	極域の大気電場観測データを用いた全地球電気回路の研究	鴨川 仁	30
29-16	極域擾乱電場による低緯度電離圏の時間変動特性の研究	橋本 久美子	34
29-18	PBIの新解釈: 電離圏起源のAlfven波による爆発的オーロラ増光理論の構築	吉川 顕正	36
30-1	ULF波動はオーロラ励起出来るか?	櫻井 亨	38
30-6	南極大型大気レーダにおけるアダプティブアンテナ技術を用いた電離圏観測法の研究	齊藤 昭則	39
30-8	地形性重力波の大気光イメージ観測による研究	鈴木 秀彦	42

(2) 気水圏

29-19	ディストロメーターを用いた降雪量推定法の改善	小西 啓之	46
29-20	極地雪氷コアの金属成分分析	鈴木 利孝	48
29-21	アジアダスト長距離輸送の十年スケール変動の解明～カナダ雪氷コアを用いた解析より～	長島 佳菜	50
29-22	吹雪粒子からの昇華による大気への水蒸気供給の推定	杉浦 幸之助	52
29-23	有機物質によるエアロゾル粒子の光学特性変化の評価	古賀 聖治	55
29-24	アイスコア試料の高精度・大量測定に備えた水の同位体標準試料の作成	植村 立	57
29-25	両極の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	59
29-27	地中レーダー(GPR)を用いた南極氷床、山岳氷河、多年性雪溪の内部構造探査に関する研究	福井 幸太郎	61
31-14	北極海における大気-海洋相互作用と海水変動	島田 浩二	63

(3) 地圏

29-28	極域の地震活動・地震発生機構・地球内部構造に関する総合的研究	坪井 誠司	.....	67
29-29	南極及び環太平洋に分布する迷子巨礫の古地磁気学による年代推定	中村 教博	.....	69
29-30	重元素の局所同位体分析の開発と宇宙化学への応用	日高 洋	.....	72
29-31	合成開口レーダ(SAR)データの偏波特性に着目した南極域の観測手法の高度化	大村 誠	.....	75
29-32	南極での野外絶対重力測定方法に関する研究	福田 洋一	.....	77
29-34	古生代炭酸塩岩のストロンチウム安定同位体から探る表層環境変動	可児 智美	.....	79
29-36	日の出岬のアダカイト質トーンナル岩の成因論	廣井 美邦	.....	81
29-37	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	.....	86
30-17	FeAlO ₃ 相の安定領域と超高温変成岩類の酸素分圧の解析	川崎 智佑	.....	88
30-20	東南極リュツォ・ホルム岩体の地体構造論的構成・大構造と地殻進化の研究	豊島 剛志	.....	90

(4) 生物圏

29-38	極域地衣類に共生する微生物の種組成に関する研究	長沼 毅	.....	93
29-39	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	.....	95
29-40	動物化石資料や氷試料からの古代DNA解析	瀬川 高弘	.....	97
29-41	極域生態系にみられる菌多様性の空間パターンの分析	大園 享司	.....	100
29-44	極域に生息する植物プランクトン種からの揮発性有機化合物放出に関する研究	亀山 宗彦	.....	102
31-33	極域湖沼における炭素・窒素の特性と循環に関する研究	藤嶽 暢英	.....	105

II. 研究集会報告

研究集会

No.	研究課題名	ページ
31集1	第4回古典籍文理融合研究会	108
31集2	サブストリームトリガー機構のトポロジー研究会	109
31集4	PANSY研究集会	110
31集5	中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究集会	111
31集6	極域科学計算機システムを用いた極域科学研究の展開	112
31集7	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	113
31集8	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)	114
31集10	SuperDARAN研究集会	115
31集11	無人機の活用による極地観測の展開	117
31集12	南極氷床・海氷・海洋システムの研究に関する今後10年を見据えた将来構想	118
31集13	2019年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会	119
31集14	南極海洋-海氷-氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会	120
31集15	南極エアロゾル研究会	121
31集16	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	122
31集17	テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像	124
31集19	永久凍土の変動とそのモニタリングに関する研究集会	125
31集22	大気・雪氷・海洋間の物質循環と極域への輸送プロセスに関する研究集会	126
31集23	若手研究者・学生を対象とした南大洋・南極研究集会	127
31集24	極域のオープンデータ・オープンサイエンスに関する研究集会 - II	128
31集25	極域から探る多様な時空間スケールの地球表層変動と固体地球の応答	129
31集27	可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会-V	130
31集28	両極性分布を持つ冷水性翼足類の分類、分布および生理生態に関する研究集会	131
31集30	2019年 南極医学・医療ワークショップ	132
31集31	南極条約協議国会議(ATCM)をめぐる科学と法政策の相乗効果に関する研究	134
31集32	ニーオルスン新基地を中核とした北極ツンドラ生態系研究の新展開	136

III. 平成31年度共同研究課題一覧

1.	平成31年度共同研究実施件数	138
2.	一般共同研究	139
3.	研究集会	144

1. 記号の説明

◎・・・・研究代表者

2. 表記例

(研究課題) **微惑星表層に記録された衝突履歴の解明**

(研究代表者) ◎瀬川 高弘 山梨大学総合分析実験センター・特任助教
(共同研究者) 篠崎 陽一 山梨大学大学院総合研究部医学域基礎医学
系薬理学講座・講師

(担当教員) (国立極地研究所)
伊村 智 教授
本山 秀明 教授

(研究期間) 平成29年度 ～ 平成31年度 (3か年)

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（1）宙 空 圏

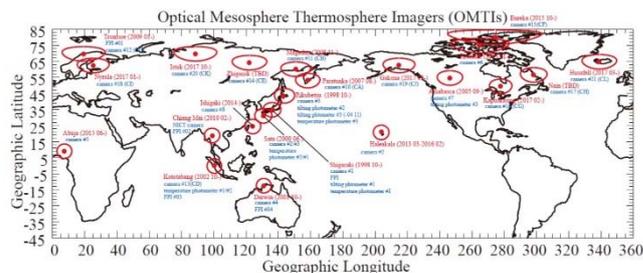
地上多点光学観測による電離圏・熱圏・中間圏ダイナミクスの研究

◎塩川 和夫 名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授
 大塚 雄一 名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授
 (国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 小川 泰信 准教授
 研究期間：平成 29 年～令和元年（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



これらの研究成果は、以下にリストした 24 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、平成 29 年度以降。)

1. Shiokawa, K. et al., Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network, *Earth, Planets and Space*, 69:160, doi: 10.1186/s40623-017-0745-9, 2017.
2. Nakamura, Y., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S.-I. Oyama, S. Nozawa, T. Komolmis, S. Komonjida, D. Neudegg, C. Yuile, J. Meriwether, H. Shinagawa, and H. Jin, Measurement of thermospheric temperatures using OMTI Fabry-Perot interferometers with 70mm etalon, *Earth, Planets and Space*, 69:57, doi: 10.1186/s40623-017-0643-1, 2017.
3. Dao, T., Y. Otsuka, K. Shiokawa, M. Nishioka, M. Yamamoto, S. M. Buhari, M. Abdullah, and A. Husin, Coordinated observations of post-midnight irregularities and thermospheric neutral winds and temperatures at low latitudes, *J. Geophys. Res.*, 122, doi: 10.1002/2017JA024048, 2017.
4. Takeo, D., K. Shiokawa, H. Fujinami, Y. Otsuka, T. S. Matsuda, M. K. Ejiri, T. Nakamura and M. Yamamoto, Sixteen-year variation of horizontal phase velocity and propagation direction of mesospheric and thermospheric waves in airglow images at Shigaraki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 122, doi: 10.1002/2017JA023919, 2017.
5. Fukushima, D., K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Kubota, T. Yokoyama, M. Nishioka, S. Komonjinda, and C. Yatini, Geomagnetically conjugate observations of ionospheric and thermospheric variations accompanied by a midnight brightness wave at low latitudes, *Earth Planets Space*, 69:112, doi:10.1186/s40623-017-0698-z, 2017.
6. Okoh, D., B. Rabi, K. Shiokawa, Y. Otsuka, B. Segun, E. Falayi, S. Onwuneme, and R. Kaka, First study on the occurrence frequency of equatorial plasma bubbles over West Africa using an all-sky airglow imager and GNSS receivers, *J. Geophys. Res.*, 122, doi: 10.1002/2017JA024602, 2017.
7. Ozaki, M., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, M. Connors, T. Inoue, S. Yagitani, Y. Ebihara, C.-W. Jun, R. Nomura, K. Sakaguchi, Y. Otsuka, H.A. Uchida, I. Schofield, and D.W. Danskin, Discovery of 1-Hz range modulation of isolated proton aurora at subauroral latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 45, doi:10.1002/2017GL076486, 2018.
8. Narayanan, V. L., K. Shiokawa, Y. Otsuka, D. Neudegg, On the role of thermospheric winds and sporadic E layers in the formation and evolution of Electrified Medium-Scale Traveling

- Ionospheric Disturbances (EMSTIDs) in geomagnetic conjugate regions, *J. Geophys. Res.*, 123, doi: 10.1029/2018JA025261, 2018.
9. Tsuchiya, S., K. Shiokawa, H. Fujinami, Y. Otsuka, T. Nakamura, and M. Yamamoto, Statistical analysis of the phase velocity distribution of mesospheric and ionospheric waves observed in airglow images over a 16-year period: comparison between Rikubetsu and Shigaraki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 123, doi:10.1029/2018JA025585, 2018.
 10. Takagi, Y., K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Connors, and I. Schofield, Statistical analysis of SAR arc detachment from the main oval based on 11-year, all-sky imaging observation at Athabasca, Canada, *Geophys. Res. Lett.*, 45, doi:10.1029/2018GL079615, 2018.
 11. Perwitasari, S., T. Nakamura, M. Kogure, Y. Tomikawa, M. K. Ejiri, K. Shiokawa, Comparison of gravity wave propagation direction observed by mesospheric airglow imaging at three different latitudes by using M-transform, *Ann. Geophys.*, 36, 1597–1605, 2018.
 12. Hirai A., F. Tsuchiya, T. Obara, Y. Kasaba, Y. Katoh, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, S. Matsuda, M. Connors, T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, Y. Kasahara, A. Kumamoto, A. Matsuoka, M. Shoji, I. Shinohara and J. M. Albert, Temporal and Spatial Correspondence of Pc1/EMIC Waves and Relativistic Electron Precipitations Observed with Ground-Based Multi-Instruments on 27 March 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 45, doi:10.1029/2018GL080126, 2018.
 13. Kurita, S., Y. Miyoshi, K. Shiokawa, N. Higashio, T. Mitani, T. Takashima, A. Matsuoka, I. Shinohara, C. A. Kletzing, J. B. Blake, S. G. Claudepierre, M. Connors, S. Oyama, T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, D. Baishev and Y. Otsuka, Rapid loss of relativistic electrons by EMIC waves in the outer radiation belt observed by Arase, Van Allen Probes, and the PWING ground stations, *Geophys. Res. Lett.*, 45, doi:10.1029/2018GL080262, 2018.
 14. Moral A. C., K. Shiokawa, S. Suzuki, H. Liu, Y. Otsuka, and C. Y. Yatini, Observations of low-latitude traveling ionospheric disturbances by a 630.0-nm airglow imager and the CHAMP satellite over Indonesia, *J. Geophys. Res.*, 124, doi: 10.1029/2018JA025634, 2019.
 15. Shiokawa, K., Y. Otsuka, and M. Connors, Statistical study of auroral/resonant-scattering 427.8-nm emission observed at subauroral latitudes over 14 years, *J. Geophys. Res.*, 124, doi: 10.1029/2019JA026704, 2019.
 16. Goodwin, L. V., Y. Nishimura, Y. Zou, K. Shiokawa, and P. T. Jayachandran., Mesoscale Convection Structures Associated with Airglow Patches Characterized using Cluster-Imager Conjunctions, *J. Geophys. Res.*, 124, doi: 10.1029/2019JA026611, 2019.
 17. Xu, H. K. Shiokawa, S. Oyama, and Y. Otsuka, Thermospheric wind variations observed by a Fabry-Perot interferometer at Tromsø, Norway, at substorm onsets, *Earth Planets, and Space*, 71:93, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1072-0>, 2019.
 18. Tsuchiya, S., K. Shiokawa, H. Fujinami, Y. Otsuka, T. Nakamura, M. Connors, I. Schofield, B. Shevtsov, and I. Poddelsky, Three-dimensional Fourier analysis of the phase velocity distributions of mesospheric and ionospheric waves based on airglow images collected over 10 years: Comparison of Magadan, Russia, and Athabasca, Canada, *J. Geophys. Res.*, 124, doi: 10.1029/2019JA026783, 2019.
 19. Balan N., Qing-He Zhang, K. Shiokawa, R. Skoug, Zanyang Xing, S. Tulasi Ram and Y. Otsuka, IpsDst of Dst storms applied to ionosphere-thermosphere storms and low latitude aurora, *J. Geophys. Res.*, 124, doi: 10.1029/2019JA027080, 2019.
 20. Xu H., K. Shiokawa, S. Oyama, and S. Nozawa, High-latitude thermospheric wind study using a Fabry-Perot interferometer at Tromsø in Norway: averages and variations during quiet times, *Earth Planets Space*, 71:110, [10.1186/s40623-019-1093-8](https://doi.org/10.1186/s40623-019-1093-8), 2019.
 21. Tsuchiya S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Nakamura, M. Yamamoto, M. Connors, I. Schofield, B. Schevtsov, and I. Poddelskiy, Wavenumber spectra of atmospheric gravity waves and medium-scale traveling ionospheric disturbances based on more than 10-year airglow images in Japan, Russia, and Canada, *J. Geophys. Res.*, 125, doi: 10.1029/2019JA026807, 2020.
 22. Yadav S., K. Shiokawa, S. Oyama, and Y. Otsuka, Multi-event analysis of oscillatory motion of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a 630-nm airglow imager over Tromsø, *Geophys. Res. Lett.*, 47, doi:10.1029/2019JA027598, 2020.
 23. Sarudin I., N. S. A. Hamid, M. Abdullah, S. M. Buhari, K. Shiokawa, Y. Otsuka, and C. Y. Yatini, Equatorial plasma bubble zonal drift velocity variations in response to season, local time, and solar activity across Southeast Asia, *J. Geophys. Res.*, 125, doi: 10.1029/2019JA027521, 2020.
 24. Nanjo S., Y. Hozumi, K. Hosokawa, R. Kataoka, Y. Miyoshi, S. Oyama, M. Ozaki, K. Shiokawa, and S. Kurita, Fine-scale visualization of aurora in a wide area using color digital camera images from the International Space Station, *J. Geophys. Res.*, 125, doi: 10.1029/2019JA027729, 2020.

大型レーダ流星ヘッドエコーと超高感度高速カメラを用いた超微光流星の観測

◎阿部 新助 日本大学理工学部・准教授
 渡部 潤一 国立天文台・教授
 酒向 重行 東京大学理学研究科・准教授
 大澤 亮 東京大学理学研究科・特任助教
 (国立極地研究所)
 西村 耕司 特任准教授
 平成 29 年～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

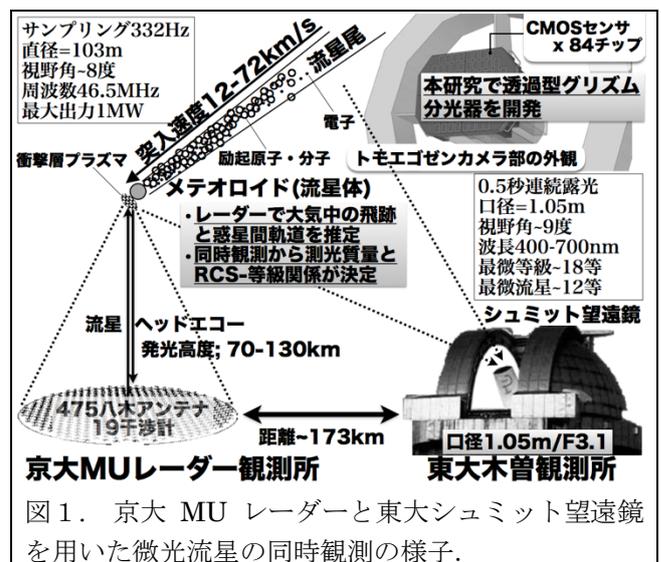
1. 概要

地球は、彗星や小惑星からのメテオロイド (meteoroids) の衝突に常に晒されている。国際天文学連合 (IAU) の定義では、直径が $30\mu\text{m}\sim 1\text{m}$ の固体物質がメテオロイドであり、それ以上を小惑星 (asteroid)、それ以下をダスト (dust) と区別する。地球に衝突・流入する地球外物質の殆どが直径 $10\sim 500\mu\text{m}$ の惑星間空間起源のメテオロイドである。これらの惑星間物質は、1日に約 $5\sim 300$ トン地球に降り注いでいることが、黄道光ダスト観測、LDEF (Long Duration Exposure Facility: 長期宇宙暴露装置)、流星レーダー、成層圏ダスト、南極氷床ダスト、海底沈殿物などから示唆されてきた (Plane, 2012)。特に流星レーダーで観測される $10^{-9}\sim 10^{-2}\text{g}$ の質量領域は、流入フラックスの大半を占め、ダストの密度を $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定すると、地球流入ダストのピーク直径は約 $200\mu\text{m}$ である。 10^{-6}g 以下 (直径数 $10\mu\text{m}$ 以下) のダストは、探査機による直接検出により調査が行われてきたが、ダストとメテオロイドを繋ぐ質量領域 ($10^{-5}\text{g}\sim$) については、十分な調査が行われていない。特に、メテオロイドの質量 (サイズ) 毎の個数分布すなわち質量分布 (サイズ分布) を決定することは、合体集積と衝突破壊を繰り返して現在の姿になった小惑星や彗星と、それらを起源とするメテオロイドとダストの進化史を反映しているといえる。本研究では、大出力大型レーダーの流星ヘッドエコー観測で得られる RCS (Radar Cross Section; レーダー反射断面積) に対応する微光流星の発光等級を光学同時観測から導出し、RCS-等級関係を明らかにすることで、測光質量の個数分布が明らかにする。

2. 観測結果

「大口径・大出力レーダー (京大大学生存圏研究所・MU レーダー; 103m , 1MW , $46, 5\text{MHz}$, 332Hz)」を使

った流星ヘッドエコー観測による軌道決定と、世界最高感度の「超広視野・高速望遠鏡 (東京大学木曾シュミット望遠鏡 + Tomo-e Gozen カメラ; 105cm , $400\sim 900\text{nm}$, 2Hz)」を使った微光流星の 2 点同時観測を行い (距離約 170km)、流星発光等級約 12 等までのメテオロイド・ダストの RCS-等級関係を導出し、質量分布関数を調査した。観測は、平成 30 年 (2018 年) 4 月 18-22 日に Tomo-e Gozen プロトタイプ (84 個のセンサー全体の $1/4$) と MU レーダーを用いて 500 個の流星の同時観測を成功させ、可視等級 ($-1.5\sim +9.5$ 等級) と RCS (レーダー・クロス・セクション) の関係を導出することができた。図 1 に同時観測の様式図を示す。



同時流星は、GPS 時刻とレーダーと望遠鏡観測の各々の天空に投影した流星飛跡のなす角度が 2.5° 以下かつ離角が 0.25° 以内を同時流星と判定した。4 夜の観測から約 500 個の同時刻の流星が観測され、群流星を覗いた約 230 個の流星が解析に使われた。

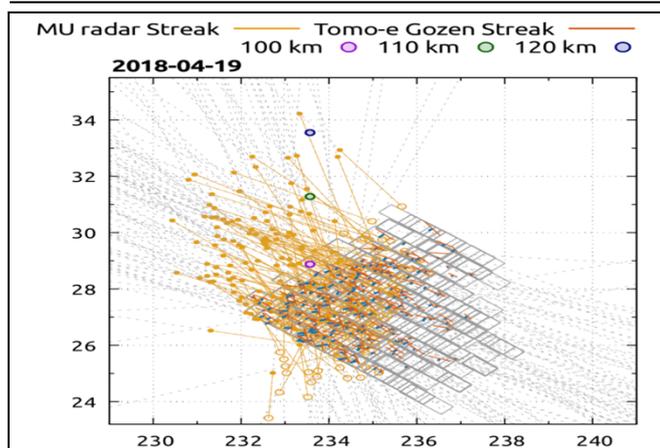


図2. レーダーと光学の同時観測流星を天空に投影。□がシュミット望遠鏡 Tomo-e Gozen カメラの個々のセンサーを示し、光学とレーダー各々で決定された流星飛跡が示されている。

図2に、MU レーダーとシュミット望遠鏡で同時観測された流星飛跡の一例を示す。図3に、RCSと天頂距離100kmに換算した流星のV-band等級の関係を示す。本研究では、2009-2010年にMUレーダーと超高感度CCDカメラで撮影された約150個の同時流星の再解析も行った。図3に導出されたRCSと等級の関係を表す。異なる光学システム(200mm望遠レンズ+ICCDカメラ, 105cmシュミット望遠鏡+Tomo-Gozen CMOSカメラ)で取得されたデータ群が、1本の線形な直線に乗ることが確認され、本観測が有効であることが示された。等級-質量換算には、Hill et al. (2005)の発光効率と(1)を用いて導出している。

$$\log_{10} m = 2.76 - 0.38 M_V - 2.31 \log_{10} V_{\infty} - 1.07 \log_{10} \cos Z \quad (1)$$

$$\log_{10} N(<M) = \log_{10} N_0 + M \log_{10} r \quad (2)$$

$$\log_{10} N(>m) = \log_{10} N_1 - (s-1) \log_{10} m \quad (3)$$

最終的、等級分布関数の傾き「 $r=3.52 \pm 0.12$ 」、と質量分布関数の傾き「 $s=2.46 \pm 0.09$ 」が得られた。

3. 今後の展望

今回開発した微光流星の同時観測の有効性が示されたので、引き続き同様の観測を継続すると共に、RCSと流星の発光物質の関連を調べるために、Tomo-e Gozenのセンサーの一部に分光器を装着して、微光流星の組成に関する情報を得ていくことも計画 [参考文献]

1) Plane, J. M. C., 2012. "Cosmic dust in the earth's atmosphere.", Chemical Society Reviews, Vol. 41, p6507-p6518.

2) Hill, K. A., Rogers, L. A., Hawkes, R. L., Dec. 2005. "High geocentric velocity meteor ablation.", Astronomy and Astrophysics, Vol. 444, p615-p624.

[研究発表]

Ohsawa, R., Hirota, A., Morita, K. Abe, S. et al., 2020. "Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of Faint Meteors", Planetary and Space Science, in press.

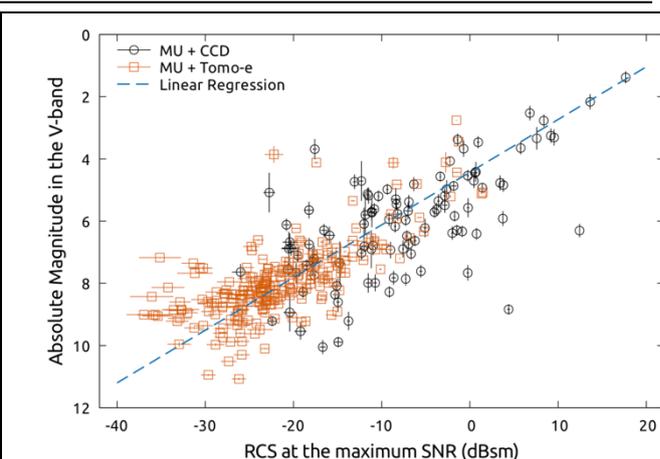


図3. レーダーと光学の同時流星から得られたRCSとV-band等級の関係; $M_V = -(0.169 \pm 0.006) \times \text{RCS} + (4.43 \pm 0.13)$.

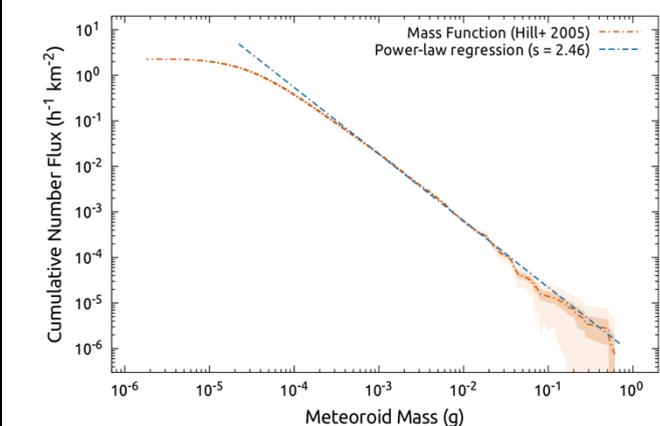


図4. 質量分布関数 (質量[g] vs 単位面積当たりの1時間の流入量[h/km²]).

している。また、非重力効果(光圧や相対論的效果)を考慮した軌道進化計算も進め、太陽系小天体の起源と進化の理解に新展開をもたらすことを目指している。

謝辞

国立極地研究所の中村卓司氏、堤雅基氏、西村耕司氏および宙空圏研究グループのメンバーには、MUレーダー流星ヘッド・エコー・データベース等の研究サポートをして頂いた。本研究の一部は、JSPS 科研費 26287106 の助成を受けたものである。

(別紙) 参加者一覧 (研究協力者)

京都大学生存圏研究所・MU レーダー観測所参加・研究協力者

[2017 年度]

弘田 旭 日本大学理工学研究科航空宇宙工学専攻・大学院生
Johan Kero スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者
Daniel Kastinen スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者

[2018 年度]

弘田 旭 日本大学理工学研究科航空宇宙工学専攻・大学院生
森田 晃平 日本大学理工学部航空宇宙工学科・大学生
Johan Kero スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者
Daniel Kastinen スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者

[2019 年度]

森田 晃平 日本大学理工学研究科・大学院生
Johan Kero スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者
Daniel Kastinen スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)・研究者

サブストーム・オーロラシーケンスの統一理論

◎田中 高史 九州大学・名誉教授

鷲見 治一 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター・学術研究者
(国立極地研究所)

片岡 龍峰 准教授

平成 29 年～令和元年 (3 年間)

[研究成果]

静かなオーロラアークが昭和基地の上に出現し、それが徐々に赤道方向に移動して行く。ある時静かなアークが突然輝きを増し(サブストームオンセット)、渦を巻いて極方向に拡大、壮大なスペクタクルとなる。南極観測の隊員なら誰もが体験する現象である。この一連のオーロラ活動をサブストームと呼び、赤祖父先生による定義がなされて以来、オーロラ研究、磁気圏物理学の分野における難問として君臨し続けてきた。その解明のため、世界的な観測網が整備され、何十機もの衛星が打ち上げられてきたが、その謎は難航不落である。

まず、サブストームのどこが謎かという点を理解しなければならない。極域観測から、サブストームの形態は明確である。問題はその形態が、磁気圏のどのような構造に対応しているかである。太陽風—磁気圏—電離圏結合系が、オーロラの座である。この系では、太陽風のエネルギーが磁気圏に侵入し、それが電離圏に伝達され、オーロラとなる。その大筋は疑いようがない。サブストームオンセットの瞬間に、磁気圏はどのような形状であり、電離圏のオンセット点を通る磁力線と電流線がどこに繋がっており、その繋がった領域でどのようなエネルギー変換が起こるかが、謎の中核である。

衛星観測では、磁力線、電流線がトレースできない、磁場の全体構造が描けない、エネルギー変換が描けないという制約が、問題の解明を困難にしている。

我々はサブストームをグローバルシミュレーションで再現しようと、研究を進めてきた。このため、広大な磁気圏を計算し、同時に狭い電離圏領域を高分解能で計算することが必要である。我々の開発した REPPU (REProduce Plasma Universe) コードは、これらの要請をクリアし、サブストームオンセットを再現した。再現されたオンセットは、オーロラ、レーダ、磁場変動の観測と一致する。この数値解により、電離圏オンセット点と磁気圏のどこに繋がるか、そこでの磁場構造、エネルギー変換がどうなっているか、全て明確に描ける。

エネルギー変換の結果である最重用構造は、沿磁力線電流 (FAC) である。FAC は飯島先生による大発見であることは良く知られている。我々は飯島先生から、FAC とは磁気圏から電離圏へのストレスの伝達であると何度聞いたことか。グローバルシミュレーションの解は、サブストームの全期間に亘り、FAC が飯島先生の教えのとおり作動していることを示している。FAC へのエネルギー供給は、熱エネルギーを電

磁エネルギーに変換し、スローモードの運動で、 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ 領域（ダイナモ）が発生することによる。オンセット FAC の原因は、カレントウェッジ（CW）でなく地球近傍ダイナモである。それは、近地球中性線（NENL）に伴うプラズマダイナミクスにより、瞬間的に発生する $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ 領域である。オンセット FAC はそこに繋がる。

NENL 形成の解析で、我々が全く予見していなかったサブストーム関連機構として、ヌルーセパレーター構造が登場してきた。これは数学的なモデルとしては知られていたが、まさかサブストームオンセットの磁気圏構造を作り出しているとは思わなかった。NENL 発生に至る磁気圏構造はヌル（磁場がゼロの特異点）によって決定されている。われわれの発見は、成長相における 4 ヌル構造である。これはトポロジー

[研究発表]

Tanaka, T., T. Obara, M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, and R. Kataoka (2017),

Formation of the sun-aligned arc region and the void (polar slot) under the null-separator structure, *J. Geophys. Res.*, 122, <https://doi.org/10.1002/2016JA023584>.

Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2017), Global simulation study for the time sequence of events leading to the subsorm onset, *J. Geophys. Res.*, 122, <http://doi.org/10.1002/2017JA024102>.

Tanaka, T., Obara, T., Watanabe, M., Fujita, S., Ebihara, Y., Kataoka, R., & Den, M. (2018), Cooperatives roles of dynamics and topology in generating the magnetosphere-ionosphere disturbances: Case of the theta aurora, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JA025514>.

Tanaka, T., Ebihara, Y., et al. (2019a), Development of magnetic topology during the growth phase of the substorm inducing the onset of near earth neutral line, *J. Geophys. Res.*, 124, <https://doi.org/10.1002/2018JA026386>.

Tanaka, T., Obara, T., et al. (2019), Magnetosphere-ionosphere convection under the due northward IMF, *J. Geophys. Res.*, <http://doi.org/10.1002/2018JA026386>.

Tanaka, T., Ebihara, Y., et al. (2019b), Why the initial brightening starts from the equatorward-most growth phase arc, *J. Geophys. Res.*, submitted.

の数学から見れば当たり前であるが、実際にその姿を描くまでは気が付かなかった。IMF 南になると、昼側に新たな 2 ヌルが発生し、北向き IMF 下の 2 ヌルは後退する。この構造内で、後退ヌル (60Re) に繋がる異なる磁力線同士のガイド磁場リコネクション (18Re) が、NENL である。NENL に繋がる磁場はオンセット前に収縮し、地上から見れば、内部磁気圏 (8 Re) でオンセットが始まるように見える。

研究の過程で、ヌルーセパレーター構造はサブストームだけでなく、sun-aligned アーク、テーターオーロラ、fan arc といったオーロラを生成することも分かった（主に IMF 北の時）。これらのオーロラは古くから知られているユニークな構造である。ローカルな構造を考察しても、それらが理解できないのは、当然であろう。

(別紙)

研究協力者参加者一覧

一般共同研究(令和元年度報告)		課題番号	29-5	
研究課題名		サブストーム・オーロラシーケンスの統一理論		
氏名		所属	職	備考
所内 (極地研)	片岡龍峰	宙空圏	准教授	
小計	1名			
所外 (極地研以外)	田中高史	九州大学	名誉教授	
	鷲見治一	九州大学	学術研究者	
小計	2名			
合計	3名			

※外国人研究者の場合、備考欄に所属先の国名を記入してください。

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

※総研大生は「所外」として記入してください。

※行が不足する場合、適宜追加してください。

北極域における人工衛星電波を用いた電離圏シンチレーション観測

◎大塚 雄一 名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授
 細川 敬祐 電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授
 (国立極地研究所)
 小川 泰信 准教授
 平成 29 年～令和元年 (3 年)

[研究成果]

1. はじめに

電離圏シンチレーションとは、電離圏に電子密度の不規則構造が存在する時、衛星電波の受信信号強度や位相が変動する現象で、衛星の測位誤差や衛星放送・通信の障害などの悪影響を生じさせることがある。人類の本格的な宇宙利用が進められている現在において、電離圏シンチレーションの研究は、宇宙からの衛星電波の伝搬経路となる電離圏環境を知るために重要である。一方、シンチレーションの観測により、電離圏に発生する電子密度の不規則構造の情報を得ることができる。

2. シンチレーション指数と ROTI の比較

ノルウェーのトロムソ EISCAT レーダーサイトにアンテナ間隔約 200m で近接して設置している 3 台の Global Navigation Satellite System(GNSS)受信機を用い、約 1.2GHz と 1.5GHz の 2 周波の受信信号強度と位相、疑似距離をサンプリング周波数 50Hz で取得し、シンチレーションと全電子数を観測することにより、極域に発生する電離圏不規則構造の特性について調べた。

2013-2015 年の 3 年間に GNSS 受信機で得られたデータから振幅シンチレーション指数である S_4 と、電子数(Total Electron Content; TEC)の変動率である ROTI(Rate of TEC change Index)を求め、その季節・時間変化を調べた。図 1 に振幅シンチレーションの指数 S_4 、図 2 に ROTI の 2014 年における時間・季節変化を示す。振幅シンチレーション及び ROTI の増大で表される電離圏不規則構造は、春・秋及び冬季の夜間に発生頻度が高いことが明らかになった。これは、主にオーロラ活動に起因する電離圏不規則構造を観測しているためと考えられる。また、振幅シンチレーション指数 S_4 は、2014 年に大きく、2015 年に小さい傾向があり、太陽活動と相

関があることが明らかになった。これは、オーロラ活動及び背景の電子密度が太陽活動と正の相関をもつためと考えられる。

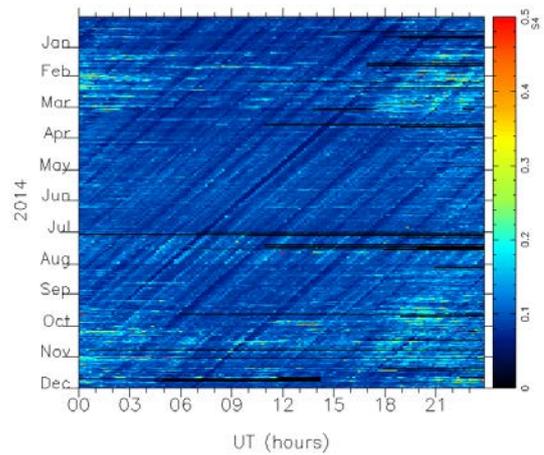


図 1: 2014 年 1 月-12 月にノルウェー・トロムソの GNSS 受信機で観測された S_4 の季節・時間変化。縦軸は月、横軸は世界時を示す。

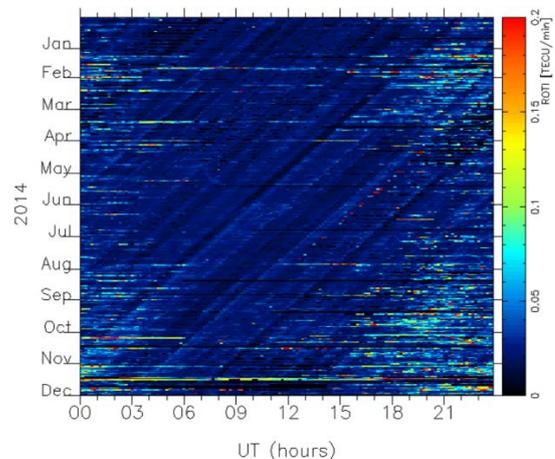


図 2: 2014 年 1 月-12 月にノルウェー・トロムソの GNSS 受信機で観測された ROTI の季節・時間変化。縦軸は月、横軸は世界時を示す。

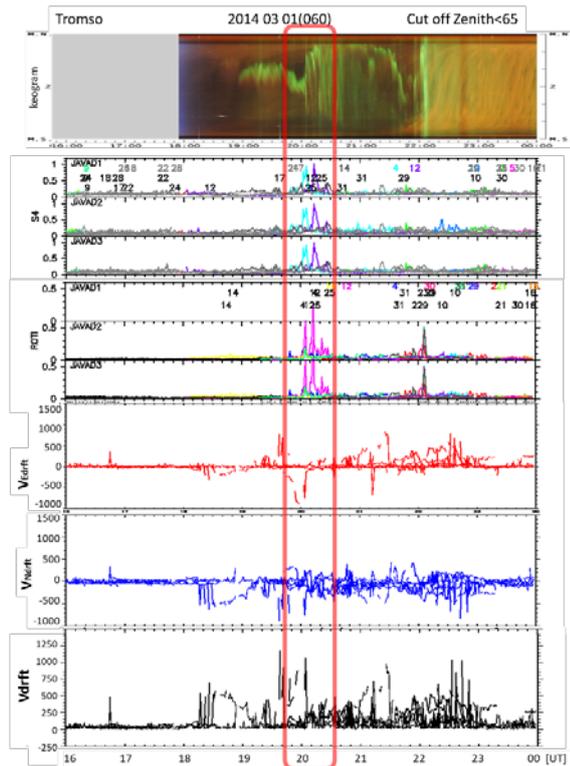


図 3: (上から順に) 2014 年 3 月 1 日に、ノルウェー・トロムソで撮影された全天画像のケオグラムと GNSS 受信機で観測された S_4 および ROTI、ドリフト速度の南北・東西成分とドリフト速度の絶対値の時間変化。

続いて S_4 と ROTI の増大に関し、両者の対応関係を調べた。その結果、必ずしも常に両者の増大が一致しているわけではないことが分かった。 S_4 は比較的長時間増大が続き、昼間でもしばしば大きな値を示すことがあるが、ROTI の増大は短時間であり、ほとんどが夜間だけに起こった。 S_4 が増大した事例について、ROTI の増大が同時に起こる場合と、ROTI の増大を伴わない場合の違いを調べるため、それぞれの場において、2 点間の受信信号強度の相互相関係数の値を調べた。その結果、ROTI の増大が見られた場合には、ROTI の増大が観測されなかった場合に比べて相互相関係数の値が低いことが明らかになった。この結果より、ROTI 及び S_4 の増大を起こす電子密度不規則構造は、オーロラを生成する粒子の降込みによって生成されているものと考えられる。

[研究発表]

- S. Sakamoto, Y. Otsuka, Y. Ogawa, K. Hosokawa, Ionospheric Scintillation Measurements Using Closely-Spaced GNSS Receivers at Tromsø, Norway, 15th Annual Meeting AOGS, Honolulu, 2018.6.3-8
- T. Sugiyama, Y. Otsuka, A. Shinbori, T. Tsugawa, and M. Nishioka, Temporal and Spatial Variations of Ionospheric Irregularities Around Storm-Enhanced Density on the Basis of GPS Total Electron Content Data Analysis, 15th Annual Meeting AOGS, Honolulu, 2018.6.3-8

3. 電子密度不規則構造とドリフト速度との比較

近接する三地点に設置された GNSS 受信機で得られた信号強度の相互相関係数から電離圏電子密度不規則構造の水平面内ドリフト速度を求め、 S_4 及び ROTI と比較した。図 3 に、2014 年 3 月 1 日に、国立極地研究所の全天デジタルカメラで撮影された画像の南北断面図の時間変化(ケオグラム)と、 S_4 、ROTI、ドリフト速度の東西、南北成分、及び速度の大きさを示す。それぞれの値は 1 分毎に得られている。20UT ごろに S_4 と ROTI とともに同時に増大しており、ドリフト速度の増大およびドリフト速度の東西・南北成分の変動がみられた。それとほぼ同時刻にケオグラムにおいてオーロラ爆発が観測されている。

2014 年の 3-12 月に観測された ROTI 及びドリフト速度データを解析したところ、ROTI の増大が見られた時間帯の平均ドリフト速度は、増大のない時間帯の速度よりおよそ 10m/s から 30m/s 大きく、ROTI とドリフト速度の大きさと相関があることが分かった。これは、ROTI の増大は、衛星-受信機間の電波の経路上における全電子数の変動の大きさに対応するが、電子密度の不規則構造は空間スケールが大きいほど粗密の振幅が大きく、ドリフト速度が大きい場合には、空間スケールが大きい不規則構造が電波の経路上を移動し、大きな TEC 変動をもたらしたためと考えられる。また、大きなドリフト速度の存在は、強い電場が存在したことを示しており、プラズマ不安定によって電子密度の不規則構造が生成された可能性も考えられる。

4. おわりに

極域において GNSS 受信機を用いたシンチレーション及び全電子数観測を行い、シンチレーションを起こす電離圏不規則構造発生の季節・地方時依存性を明らかにした。また、受信信号強度の相互相関を計算することで電子密度不規則構造のドリフト速度を求め、シンチレーション発生とドリフト速度との関係を調べた。今後、解析事例を増やし、極域における電離圏不規則構造の生成機構の解明を目指す。

研究協力者(共同研究者以外)

坂本 明香 名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士課程(前期)大学院生 平成 29 年度卒業

杉山 俊樹 名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士課程(前期)大学院生 平成 29 年度卒業

オーロラ活動時における VLF、降下電子特性に関する研究

◎田所 裕康 武蔵野大学工学部環境システム学科・講師
 加藤 雄人 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻・教授
 三好 由純 名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授
 (国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 田中 良昌 特任准教授
 山岸 久雄 名誉教授

平成 29 年～令和 元年 (3 年間)

[はじめに]

南極昭和基地で観測されるパルセーティングオーロラ(PsA)をはじめとするオーロラの生成機構解明を目指す。コーラス波動との波動粒子相互作用に着目し、オーロラ発生時の VLF 強度、降下電子との相関解析を実施することにより、生成機構の解釈に迫ることを目的とする。

[観測データ]

主に使用するデータはオーロラ光学観測データ、VLF、イメージングリオメータである。イメージングリオメータは数十 keV 降下電子の指標となるデータであり、波動粒子相互作用に着目する上で重要なデータの一つである。

本研究では、2007 年 5 月 17 日に南極昭和基地において観測されたオーロライベントに着目し解析を実施した。

[結果]

図 1 は、2007 年 5 月 17 日 UT02:30:00 に南極昭和基地で観測された ATV 画像データである。図 1(右)は、AACGM 座標に変換したものである。

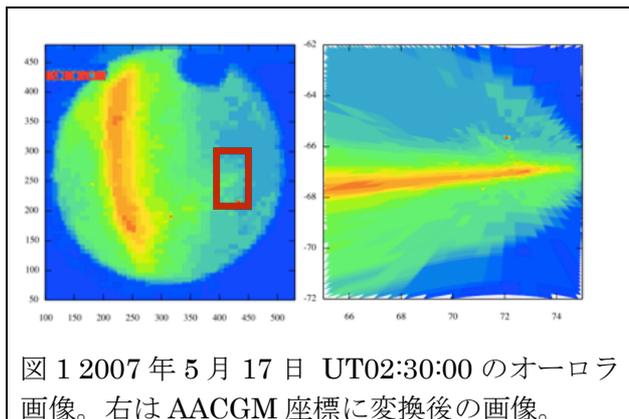


図 1 2007 年 5 月 17 日 UT02:30:00 のオーロラ画像。右は AACGM 座標に変換後の画像。

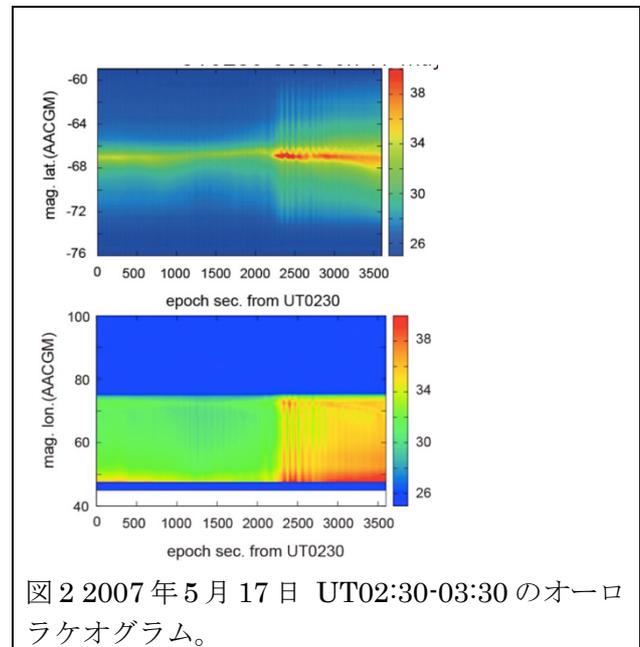


図 2 2007 年 5 月 17 日 UT02:30-03:30 のオーロラケオグラム。

図 2 はオーロラケオグラムであり、横軸は UT02:30 からの経過時間[sec]を示している。縦軸は AACGM 座標における緯度(上)、経度(下)を示している。UT03 を過ぎたあたりからオーロラが活動的になっているのがわかる。

図 3 はオーロラ発光強度(図 3 上)とイメージングリオメータ(図 3 下)の時系列プロットである。横軸は 2007 年 5 月 17 日 UT02:30 からの経過時間 [min] (UT02:30-03:30)を示している。オーロラ発光強度は図 1 の赤枠部分の積分値である。イメージングリオメータは、それら近傍のデータを使用している。領域においてオーロラ発光強度が増加しはじ

めるとともにイメージングリオメータ(数十 keV 降下電子)も増加しているのがわかる。立ち上がりに着目するとイメージングリオメータの増加に対してオーロラ発光強度の増加はゆっくりである(その後急激な増加を始めている)。この時、VLF 強度も弱いながらも増加し始めている(図中には表示せず)。

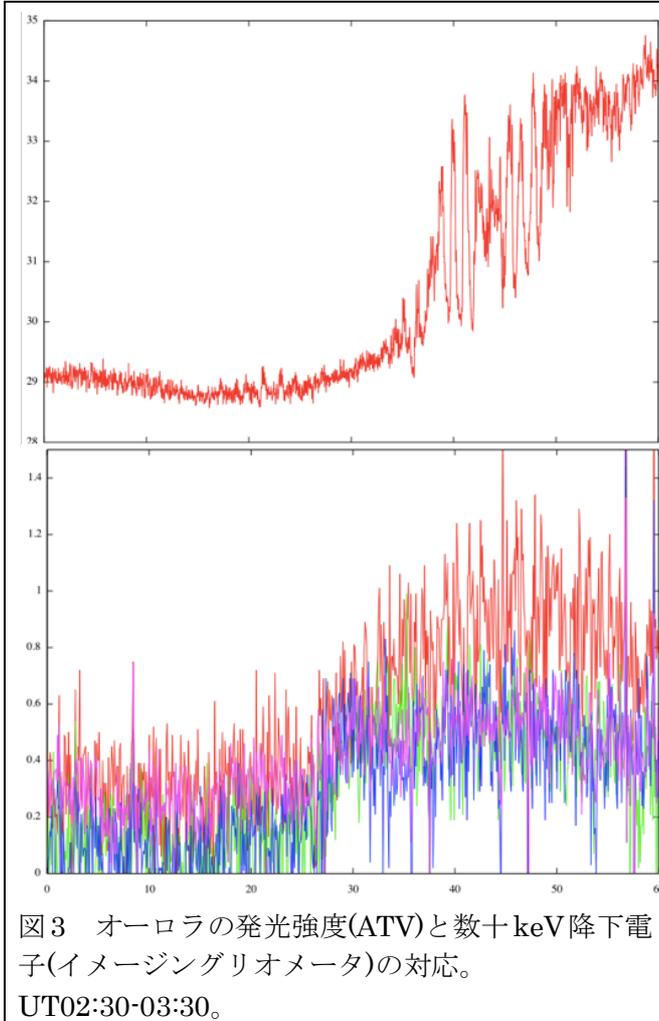
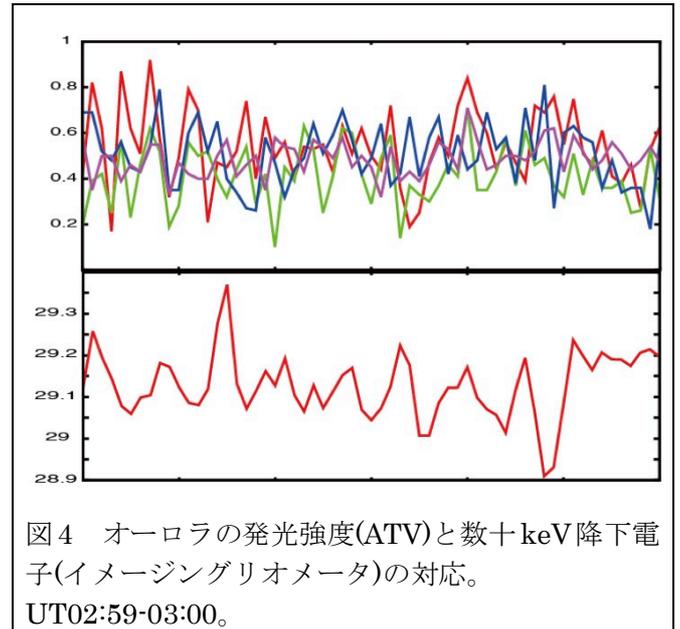


図4は図3と同様であるが、2007年5月17日 UT02:59からの経過時間[sec] (UT02:59-03:00)を示している。短期変動で見ると対応がはっきりしていないことがわかる。VLF 強度も同様にはっきりしなかった(図中には表示せず)。



[まとめ]

オーロラ発生機構の解明を目指し、波動粒子相互作用に着目した解析を実施した。使用したデータは南極昭和基地で観測されたオーロラ画像データ(ATV)、イメージングリオメータ(数十 keV 降下電子の指標)、VLFであった。着目したイベントは2007年5月17日 UT02:30-03:30に観測されたオーロライベントであった。

オーロラ画像、イメージングリオメータのAACGM座標系への変換を実施した。ATVと降下電子、VLFの対応は分スケールではみられたが、秒スケールでははっきりとしなかった。

惑星間空間磁場北向き時の特異な極域電離圏対流の起源

◎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

平成29年～令和元年（3か年）

[研究成果]

1. 惑星間空間磁場（IMF）斜め北向き時に現れる交換サイクルの磁気流体モデリング [研究発表 2]

北向き IMF 時には、図 1a のようにまず IMF 1 が一半球（図 1a の場合は南半球）のローブ磁場 4' とリコネクションし、続いて図 1b のように新たに出来たローブ磁場 2 が反対半球（図 1b の場合は北半球）で閉磁力線 3' とリコネクションを起こす。新たな開磁力線 4 は再び図 1a のリコネクションに参加する。この一連のリコネクションを繰り返すことによる磁束の循環を交換サイクルと呼んでいる。交換サイクルは理論予想されたものだが、これを磁気流体シミュレーションで再現することに成功した。

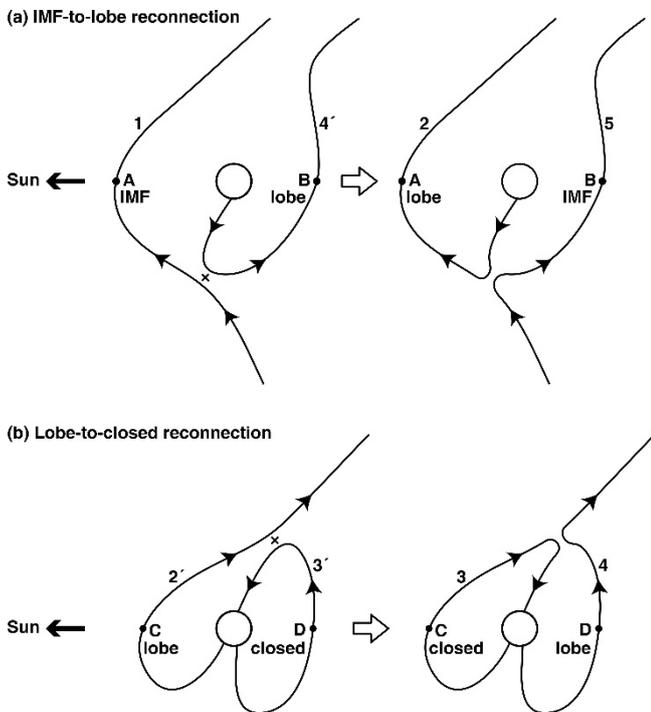


図 1 交換サイクルを形成するリコネクション

交換サイクルでは、電離圏において閉磁力線領域で循環する逆向きマーキングセルが形成されるのが特徴である。図 2 の対流セル R はこれをシミュレ

ーションで再現したものである。図 2 は北半球における 1kV 毎の等ポテンシャル線と磁力線の開閉境界（太点線）を示している。このように多くの面でシミュレーションは理論予想を再現しているのだが、背景にある力学過程は理論予想とかなり異なることが分かった。詳細は研究発表 2 に記述してある。

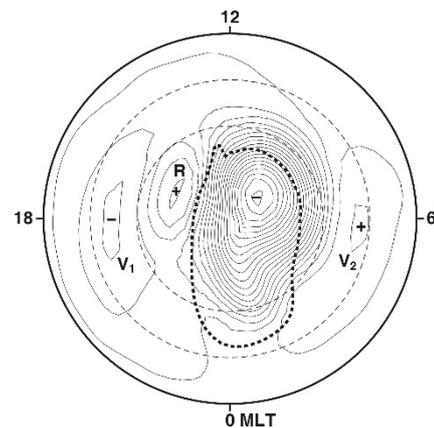


図 2 シミュレーションで再現された電離圏対流

2. 沿磁力線電流を駆動する磁気圏ダイナモの理論解析 [研究発表 1]

磁気流体シミュレーションで再現される region 1 や region 2 のような大規模沿磁力線電流系には、その駆動機構にいくつかの共通性がある。重要な共通点は、熱エネルギーを電磁エネルギーに変換する「ダイナモ」過程により沿磁力線電流系を維持していることである。この力学過程を理想 MHD の方程式系を用いて理論解析を行った。ダイナモには 2 種類ある。その様子を磁束管のラグランジェ的運動として表現したものが図 3 である。図 3a は膨張するスローモード擾乱によるダイナモで、磁場が増加すると同時にプラズマ圧力は減少する。一方図 3b は収縮するスローモード擾乱によるダイナモで、磁場は減少すると同時にプラズマ圧力は増加する。

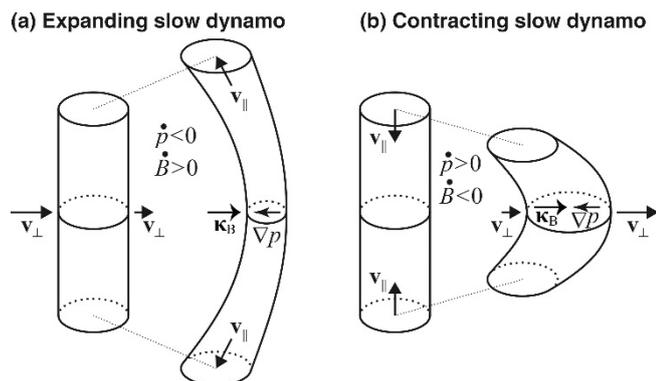


図3 スローモードダイナモのラグランジェ的描像

表1は2つのダイナモの性質を比較対照したものである。膨張するスローモードダイナモは磁場勾配が磁場曲率より卓越し、準定常なダイナモである。完全な定常解も存在する。代表例はカスプからマントルにかけて現れる region 1 のダイナモである。一方、収縮するスローモードダイナモは有限の磁場曲率と時間変化が必要であり、定常解は存在しない。

[研究発表]

1. Watanabe, M., T. Tanaka, and S. Fujita (2019), Magnetospheric Dynamo Driving Large-scale Birkeland Currents, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(6), 4249–4265, doi.org/10.1029/2018JA026025.
2. Watanabe, M., S. Fujita, T. Tanaka, Y. Kubota, H. Shinagawa, and K. T. Murata (2018), A magnetohydrodynamic modeling of the interchange cycle for oblique northward interplanetary magnetic field, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(1), 272–286, doi:10.1002/2017JA024468.
3. Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2020), Reproduction of ground magnetic variations during the SC and the substorm from the global simulation and Biot-Savart's law, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(2), e2019JA027172, doi.org/10.1029/2019JA027172.
4. Tanaka, T., T. Obara, M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, R. Kataoka, and M. Den (2019), Magnetosphere-ionosphere convection under the due northward IMF, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(8), 6812–6832, doi.org/10.1029/2019JA026547.
5. Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2019), Development of magnetic topology during the growth phase of the substorm inducing the onset of the near-Earth neutral line, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7), 5158–5183, doi.org/10.1029/2018JA026386.
6. Tanaka, T., T. Obara, M. Watanabe, S. Fujita, Y. Ebihara, R. Kataoka, and M. Den (2018), Cooperatives roles of dynamics and topology in generating the magnetosphere-ionosphere disturbances: Case of the theta aurora, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(12), 9991–10,008, doi.org/10.1029/2018JA025514.
7. Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, M. Den, S. Fujita, T. Kikuchi, K. K. Hashimoto, and R. Kataoka (2017), Global simulation study for the time sequence of events leading to the substorm onset, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(6), 6210–6239, doi:10.1002/2017JA024102.

具体例は夜側プラズマシートの内縁に現れる region 2 である。

ダイナモと沿磁力線源（垂直電流を平行電流に変える過程）は、理論上独立である。しかしシミュレーションによると、両者は常に共存している。沿磁力線源はアルフベンモードを励起する過程と解釈できるので、両者の共存はスローモードとアルフベンモードの結合を意味する。シミュレーションで得られる磁気圏には、スロー・アルフベン結合を許す共通の空間構造が存在する。この空間構造の数学的解析も行った。詳細は研究発表1に述べてある。

表1 スローモードダイナモ2種の対比

	膨張するスローモード	収縮するスローモード
時間変化	準定常	非定常
磁場空間変化	磁場勾配卓越	有限磁場曲率
垂直流	収束	発散
平行流	発散	収束
代表例	Region 1	夜側 region 2

降下粒子によるオーロラ発光モデルの開発と粒子コードとの連携計算

◎加藤雄人 東北大学大学院理学研究科・教授

平木康隆 電気通信大学大学院情報工学研究科 研究員 (平成 29 年度まで)

(国立極地研究所)

小川泰信 准教授

平成 29 年～令和元年 (3 年間)

[研究成果]

パルセーティングオーロラに代表されるオーロラの微細構造や発光強度の変調は、磁気圏で発生するプラズマ波動の発生周期や励起領域の空間スケールに深く関連すると考えられている。本研究課題はオーロラ微細構造の時間・空間発展を定量的に明らかにすることを目的として、プラズマ粒子コードとオーロラ発光モデルとの連携計算を実施した。コーラス放射の励起過程を解くシミュレーションで再現される、降込み電子のエネルギースペクトルとその時間変化を用いることで、オーロラ微細構造の周期的変化や空間構造を定量的に議論した。

シミュレーションでは、代表者らが共同で開発したオーロラ発光モデルの基盤となるモンテカルロ法を用いた衝突判定モジュールと、ミラー力によるピッチ角変化を考慮した粒子軌道追跡モジュールをそれぞれ用いた。衝突判定モジュールは Hiraki and Tao (Ann. Geophys. 2008) により提案された、木星極域大気に降り込む高エネルギー電子によるイオン化率計算手法を参考に開発された。粒子軌道追跡モジュールは、Katoh and Omura (JGR 2006) により提案された、双極子磁場の中でミラー運動する荷電粒子の軌道を解く手法を参考に開発された。二つのモジュールを組み合わせることにより構築したシミュレーションコードを用いた連携計算を実施するとともに、平成 28 年 12 月 20 日に打ち上げられた衛星「あらせ」や地上観測結果との比較研究をねらった。

平成 29 年度の共同研究では、連携計算のためのシミュレーションコードの最適化を進めると共に、観測結果との比較を行う上で最適な計算条件の選定を進めた。EISCAT による観測結果との比較を念頭に、衝突判定モジュールで参照する中性大気の高高度分布に関してはノルウェー・トロムソの地理緯度・経度を参照して MSIS モデルにより求めた。粒子起動追跡モジュールについては、トロムソの磁気緯度 66.2 度に対応する磁力線に沿って運動する高エネルギー電子を対象に、そのミラー点の高高度分布ならびに各高度でのピッチ角変化の妥当性を確認した。

平成 30 年度は、衝突判定モジュールについて大

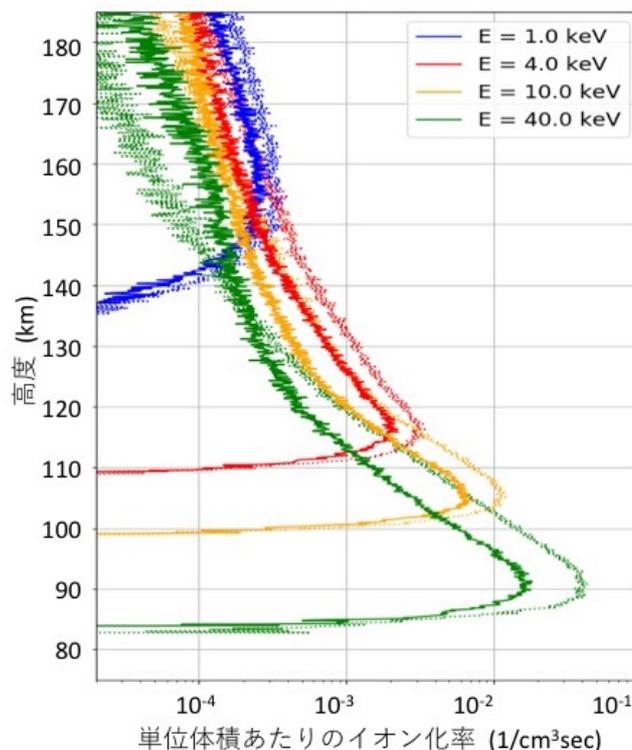


図 1 連携計算により得られたイオン化率の高高度分布。1 keV、4 keV、10 keV および 40 keV の高エネルギー電子を、高度 400 km からピッチ角 70 度で降下させた条件で計算した。実線がミラー力を考慮した場合、点線がミラー力を考慮しなかった場合の計算結果を示す。

気組成ごとに異なる衝突判定条件を用いるなどの改良を進めた。改良した衝突判定モジュールと粒子軌道追跡モジュールとの連携計算を実施して、計算結果の妥当性について検討した。連携計算結果の一例を図 1 に示す。

令和元年度は、継続して連携計算を実施するとともに、あらせ衛星により観測された内部磁気圏でのプラズマ波動ならびに高エネルギー電子のエネルギースペクトルを確認して、計算で用いる初期条件について検討した。また、EISCAT をはじめとする地上観測結果、脈動オーロラを対象として実施されたロケット実験 Rocksats-XN による高エネルギー粒子結果との比較を試みた。

本共同研究により、高エネルギー電子が大気に降り込むことによって生じる高層・中層大気のイオン化率を計算する手法の基礎を確立することができた。本成果の学術論文としての公表に向けて、投稿

論文を準備中である。また、本共同研究の成果に基づいた科研費課題の申請もなされている。今後本連携計算コードのさらなる開発および観測結果との比較を通じた検証を進めることを計画している。

[研究発表]

加藤雄人、平木康隆、小川泰信、“ホイッスラーモード・コーラス放射による高エネルギー電子のピッチ角散乱に関するプラズマ流体・粒子連携計算コードの開発”、第8回極域科学シンポジウム、2017年12月

Katoh, Y. and Y. Ogawa, “Plasma fluid and electron-hybrid cross-reference simulations for the study of the resonant scattering of auroral electrons by whistler-mode chorus emissions”, 第9回極域科学シンポジウム, 2018年12月

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
 平成 29 年～令和元年 (3 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のデータを活用し、極域・中緯度の熱圏・電離圏・磁気圏ダイナミクスの比較研究を行うことにより、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(1)中緯度 SuperDARN 研究に関するレビュー、(2)高緯度電離圏エコーの発生特性の研究、(3)太陽フレア発生に伴い電離圏変動の研究等のテーマについて、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、統計解析および研究成果のまとめを進めた。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き、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. 中緯度 SuperDARN 研究に関するレビュー

1995 年の正式な運用開始以降の 10 年間においては、SuperDARN レーダーは高緯度だけに設置されており、これに従い研究成果はオーロラ発光域を中心とする高緯度領域に限定されていた。一方、オーロラ帯より十分低緯度側、磁気緯度にして約 50 度より低緯度側にレーダーを設置すれば今まで観測できなかった領域をカバーできるようになり、新しい研究テーマの開拓につながる可能性が高いことが、早くから複数の研究グループにより指摘されていた。この指摘に基づき、2005 年から順次北アメリカや日本を中心とする中緯度域に SuperDARN レーダーが設置され始め、現在では南北両半球合わせて 10 数基の中緯度 SuperDARN レーダーが継続的に観測を実施している。研究代表者のグループでは、2006 年 11 月に SuperDARN 北海道・陸別第一レー

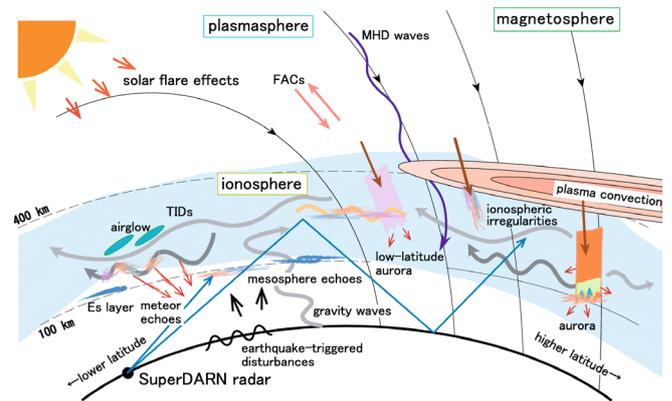


図 1: SuperDARN レーダーの観測対象となる自然現象の模式図。

ダーを、2014 年 10 月に SuperDARN 北海道・陸別第二レーダーを設置して継続して観測を行っており、中緯度 SuperDARN レーダー研究の推進において主導的な役割を果たしてきている。

本テーマにおいては、2017 年 1 月に名古屋大学で開催した国際ワークショップにおける議論の結果に基づき、中緯度 SuperDARN レーダーを活用した最近十数年の研究成果を次の 5 つの大テーマに分類し、レビュー論文としてまとめた。1. 電離圏プラズマ対流。2. 電離圏プラズマ不規則構造。3. 短波帯電波の伝搬過程の解析。4. 電離圏プラズマ・超高層大気の相互作用。5. 磁気流体波動。加えて本論文では、今後の研究の方向についても議論を行っている。さらには、SuperDARN の基本的観測原理や中緯度 SuperDARN レーダーの経緯を中心とする過去の歴史に関する記述もあり、SuperDARN グループ外の研究者やこれからデータを使用しようとする初心者にとって教科書的な存在になりうる論文を 2019 年 3 月に出版した。実際に、2020 年 3 月 31 日現在の論文の download 数は 3200 回を超え、また google scholar の引用数は 16 回で、1 年間のアクセス・品用数としては群を抜いている。

2. 高緯度電離圏エコーの発生特性

SuperDARN の発足当初から高緯度域の観測が行われていたが、干渉性散乱レーダーにより観測データを得るために必要不可欠な高緯度電離圏不規則構造の発生特性については研究代表者のグループによる Fukumoto et al. (2000, AUAR)等の成果はあるものの、長期的な傾向については不明な点はまだ数多く残されている。本テーマにおいては、南北両半球における高緯度 SuperDARN のデータを活用し、高緯度域の電離圏エコーの発生率について、電場ドリフト速度、緯度、地方時、季節、太陽活動度を始めとする各パラメータ依存性について詳細な解析を行い、夜側において太陽活動度と電離圏エコー発生率の間の正の相関が強いことなどの性質を見出した。この結果は高緯度電離圏エコー発生の特性について新たな知見を与えるものである。

3. 太陽フレア発生に伴う電離圏変動特性の研究

太陽フレア発生に伴い X 線・紫外線を始めとする太陽放射強度が変動し、それに伴い電離圏プラズマ密度変動が発生する。この変動が SuperDARN レーダーで地上散乱エコーのドップラー速度の増加としてとらえられることが Watanabe and Nishitani (2013, *Advances in Polar Science*)により指摘され、ドップラー速度のレンジ分布からこのドップラー速度変動を起こす原因が F 層のレーダー電波反射高度変動よりもむしろ、D 層・下部 E 層における屈折率変化による見かけの経路長変化によるものであることが示されたが、この後の研究はあまり進展し

ていなかった。本研究テーマでは、北アメリカ大陸の SuperDARN レーダーを活用し、SuperDARN で観測されたドップラー速度変動の大きさと、太陽フレア強度や太陽天頂角等の各パラメータとの相関についてイベント解析および統計解析を行い、ドップラー速度はレーダー周波数と一番相関が良い等の結果が得られた。これら一連の結果は、SuperDARN レーダーが宇宙天気変動の初期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

a. SuperDARN 遠隔受信機データによる電離圏変動の研究

陸別から送信された SuperDARN のバックローブビーム信号を約 1000 km 離れた名古屋大学東山キャンパスで受信し、その信号を解析することにより、反射点における電離圏高度変動の日変化や季節変動を調べた。現在 *Polar Science* の特集号へ論文を投稿すべく準備中である。

b. その他

その他、SAPS 発生の太陽天頂角依存性、Sudden Impulse に伴う電離圏変動、MSTID 発生の長期変動特性、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]

- Alexander V. Koustov, Sydney Ullrich, Pavlo V. Ponomarenko, Nozomu Nishitani, Federica M. Marcucci & William A. Bristow, Occurrence of F region echoes for the polar cap SuperDARN radars, *Earth Planets Space* 71, 112 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1092-9>
- Alexander V Koustov, Sydney Ullrich, Pavlo V. Ponomarenko, Robert G. Gillies, David R. Themens, and Nozomu Nishitani, Comparison of SuperDARN peak electron density estimates based on elevation angle measurements to ionosonde and incoherent scatter radar measurements, *Earth Planets Space*, in press (2020).
- Nishitani, N. J.M. Ruohoniemi, M. Lester, J.B.H. Baker, A.V. Koustov, S.G. Shepherd, G. Chisham, T. Hori, E.G. Thomas, R.A. Makarevich, A. Marchaudon, P. Ponomarenko, J.A. Wild, S.E. Milan, W.A. Bristow, J. Devlin, E. Miller, R.A. Greenwald, T. Ogawa, and T. Kikuchi, Review of the accomplishments of Mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF Radars, *Progress in Earth and Planetary Science*, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0270-5>, 6:27, 2019.
- Chakraborty, S., Ruohoniemi, J. M., Baker, J. B. H., & Nishitani, N., Characterization of short-wave fadeout seen in daytime SuperDARN ground scatter observations, *Radio Science*, 53, 472-484, <https://doi.org/10.1002/2017RS006488>, 2018.
- Chakraborty, S., J.B.H. Baker, J.M. Ruohoniemi, B. Kunduri, N. Nishitani, and S.G. Shepherd, A Study of SuperDARN Response to Co-occurring Space Weather Phenomena, *Space Weather*, 17, 9, <https://doi.org/10.1029/2019SW002179>, 2019.

(別紙) 参加者一覧

研究協力者(共同研究者以外)

名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士課程(前期)大学院生(令和元年-) 大矢健斗
名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士課程(前期)大学院生(平成30年卒業) 飯田剛平
名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士課程(前期)大学院生(令和元年卒業) 張玉テイ
名古屋大学宇宙地球環境研究所 外国人共同研究員(平成30年10月) Sasha Koustov
名古屋大学宇宙地球環境研究所 外国人客員准教授(平成28年4-6月) Jo Baker
名古屋大学宇宙地球環境研究所-米国バージニア工科大学宇宙空間科学工学研究センター間学術
交流協定に基づく共同研究者 Shibaji Chakraborty

磁気嵐時におけるグローバルなプラズマ圏・プラズマ圏界面の時間・空間変動特性

◎新堀 淳樹 名古屋大学宇宙地球環境研究所・特任助教

(国立極地研究所)

門倉 昭 教授

田中 良昌 特任准教授

平成 29 年～令和元年 (3 年間)

[研究成果]

1. 研究背景と本研究の目的

地球プラズマ圏は、内部磁気圏において地球半径 4-6 倍の距離にある高密度・低温の電離圏起源のプラズマで満たされた領域である。その領域の外部境界がプラズマ圏界面と呼ばれ、その境界領域付近でプラズマ密度が急激に減少する [e.g., Carpenter, 1966; Ratcliffe, 1972]。また、プラズマ圏界面の位置は、地磁気活動度に依存し、磁気嵐などの大規模な磁気圏擾乱時には地球近傍の領域まで近づく。プラズマ圏のプラズマ密度構造は高エネルギー粒子変動と密接に関わる波動粒子相互作用の効率を決めるため、磁気嵐時の全球的なプラズマ圏界面の位置やその内部のプラズマ密度分布の時間・空間変動を知ることは粒子加速の観点から重要である。

一方、中緯度トラフは電離圏の中でわかりやすい現象の一つであり、そこでは水平方向に電子密度が急激に減少し、その内部において電子温度が上昇する [e.g., Ratcliffe, 1972]。これまでの非干渉大型レーダー、GPS-TEC 観測を用いた研究から中緯度トラフの出現領域について季節、太陽活動、及び地磁気活動依存性が分かってきた [e.g., Chen et al., 2016]。また、中緯度トラフとプラズマ圏界面の位置はお互いにより相関を持つことが全球 GPS-TEC とプラズマ圏イメージング観測によって示され、中緯度トラフを調べることで内部磁気圏におけるプラズマ圏界面の位置を推定できることが示唆されている [e.g., Yizengaw et al., 2005]。しかしながら、衛星観測によるその場のプラズマ圏界面の位置と GPS-TEC 等の地上観測による中緯度トラフの位置の比較が十分に行われておらず、地磁気静穏時、磁気嵐主相、回復相時におけるお互いの相関などは未解明の事項として残されている。本研究では、GPS-TEC 観測を中心とした地上観測とあらせ衛星観測との比較解析から磁気嵐時におけるグローバルなプラズマ圏・プラズマ圏界面の時間・空間変動特性を解明することを目的としている。

2. 観測データと解析手法

本研究では、太陽風、惑星間磁場(IMF)、地磁気指数、GPS-TEC、SuperDARN レーダー、地磁気、あらせ衛星搭載のプラズマ波動観測機器から得られた電子密度データを解析し、中緯度トラフやプラズマ圏界面の位置の同定を行った。中緯度トラフの同定に際し、ひと月ごとの 10 日地磁気静穏日の GPS-TEC 平均値を求め、その値からの差分をその値で規格化した rTEC 値を用いた。ここでは、中緯度において rTEC の値が最小となる部分を中緯度トラフとして同定した。

3. 主な研究成果

3-1. 磁気嵐時の中緯度トラフの経度変化の特徴

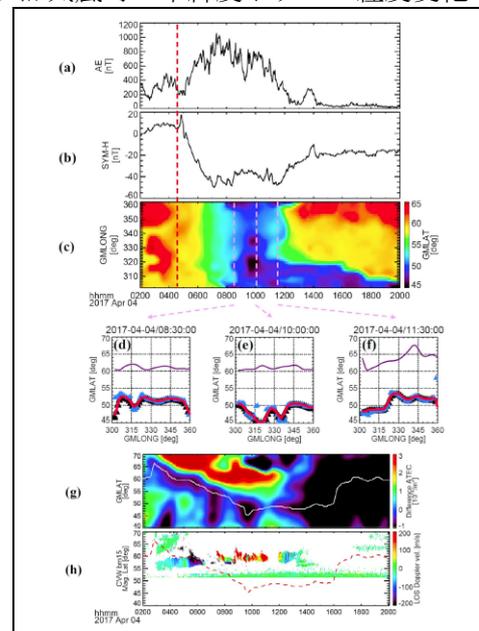


図 1. 2017 年 4 月 4 日に発生した磁気嵐時の地磁気指数、中緯度トラフの経度方向の分布、SuperDARN レーダー観測との比較 [Shinbori et al., 2018]

図 1 に示す通り、これまでの研究結果と同様に中緯度トラフの位置は磁気嵐の主相時に低緯度側へ

移動し、回復相では急速に高緯度側へ移動することが基本的に一致する。しかし、本研究では中緯度トラフの位置は経度方向に 2000-2500 km のスケールをもって変化することを発見した。この構造が磁力線に沿ってプラズマ圏界面にも反映するなら、プラズマ圏界面もこのような経度方向の依存性を持つことが予想され、本研究において内部磁気圏におけるプラズマ波動の励起や波動粒子相互作用の研究にこのような経度変化の考慮が必要であることを提案した。(研究発表 1)

3-2. 巨大磁気嵐に対する電離圏—プラズマ圏結合の応答

2017 年 9 月 7-8 日に発生した巨大磁気嵐時におけるプラズマ圏と電離圏変動特性について地上とあらせ衛星観測データの解析を行った。その結果、磁気嵐主相時においてプラズマ圏界面の位置が地球半径の 2 倍以内の領域まで地球に近づき、同様に電離圏トラフも通常規模の磁気嵐では見られない磁気緯度 50 度以下の低緯度域へ形成されていた。このような地球に近い領域に磁気嵐時に形成されるプラズマ圏界面は、極冠域で発達した電離圏対流

電場が低緯度へ拡大し、その一部が内部磁気圏や赤道電離圏に侵入することが重要であることをモデル計算から判明した。(研究発表 2)

3-3. 巨大磁気嵐時における中緯度 TEC 増加の特徴

全球 GNSS-TEC 観測データ解析から IMF の南転時に呼応して磁気嵐初相ならびに主相時において、昼間側中緯度にあたる北米域で TEC 増加が始まり、瞬時に経度方向に拡大することが分かった。その後、低緯度方向に TEC 増加域が拡大することが GNSS-TEC の 2 次元マップ解析から判明した。この低緯度域へ拡大する特徴は、これまでの研究から提唱されている赤道異常の高緯度側への拡大では説明できず、今後、高緯度から開始するメカニズムの解明が今後の課題として残った。さらに、その TEC 増加域が北米域のみならず、日本や中央アジア域まで観測されていた。この観測事実から Storm-Enhanced Density (SED)に関連した TEC 増加域が約 100 度にまで及ぶ経度方向の広がりを持って出現していることを初めて実証した。(研究発表 3)

[参考文献]

- 1) Carpenter, D. L. (1966), Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere: 1, Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee, *J. Geophys. Res.*, **71**(3), 693-709, doi: 10.1029/JZ071i003p00693.
- 2) Ratcliffe, J. A. (1972), An instruction to the ionosphere and magnetosphere, Vol. 256, New York: Cambridge University Press.
- 3) Chen, C. Y., Tiger J. Y. Liu, I. T. Lee, H. Rothkaehl, D. Przepiorka, Loren C. Chang, B. Matyjasiak, K. Ryu, and K.-I. Oyama (2018), The midlatitude trough and the plasmopause in the nighttime ionosphere simultaneously observed DEMETER during 2006-2009, *J. Geophys. Res.*, **123**, 5917-5932, doi:10.1029/2017JA024840.
- 4) Yizengaw, E., H. Wei, M. B. Moldwin, D. Galvan, L. Mandrake, and A. Mannucci (2005), The correlation between midlatitude trough and the plasmopause, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10102, doi:10.1029/2005GL022954.

[研究発表]

- 1) Shinbori, A., Y. Otsuka, T. Tsugawa, M. Nishioka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, et al. (2018), Temporal and spatial variations of storm time midlatitude ionospheric trough based on global GNSS-TEC and Arase satellite observations, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 7362–7370, doi:10.1029/2018GL078723.
- 2) Obana, Y., N. Maruyama, A. Shinbori, K. K. Hashimoto, M. Fedrizzi, M. Nosé, et al. (2019), Response of the ionosphere - plasmasphere coupling to the September 2017 storm: What erodes the plasmasphere so severely?, *Space Weather*, **17**, doi:10.1029/2019SW002168.
- 3) Sori, T., A. Shinbori, Y. Otsuka, T. Tsugawa, and M. Nishioka (2019), Characteristics of GNSS total electron content enhancements over the midlatitudes during a geomagnetic storm on 7 and 8 November 2004. *J. Geophys. Res.*, **124**, doi:10.1029/2019JA026713.

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
 乾恵美子 山形大学理学部・教務職員
 武山美麗 山形大学理学部・技術職員

(国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 佐藤夏雄 特任教授

平成 29 年～令和 元年 (3 か年)

[研究成果]

本研究は、高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 期静穏期にあたる 2003 年から 2019 年までの 17 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。

図 2 はアイスランドにおける 15 年間の平均 Be-7 濃度月変動と圏界面高度のプロファイルである。

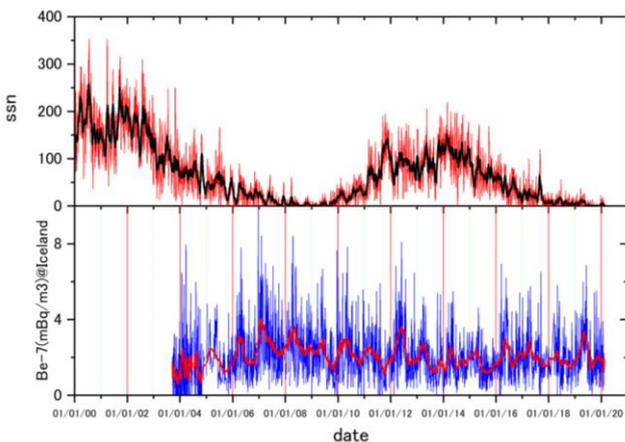


図 1. アイスランドにおける大気中 Be-7 濃度の日変動 (下段パネル) および太陽黒点数の日変動 (上段パネル)

Be-7 濃度変動は、1 月から上昇し 4 月から 5 月にかけてピークを持ち 7 月まで下降している。圏界面高度も同様な変動プロファイルを示している。これは、高緯度での Be-7 濃度の季節変動が圏界面高度に関係していることを表しており、4 月から 5 月は成層圏で生成された Be-7 が積極的に対流圏に流入するモデルが考えられる。

図 3 は、アイスランド (北緯 64.7°) 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 24 太陽活動期は、黒点数の推移から、2009 年から始まり 2020 年までと考えられる。

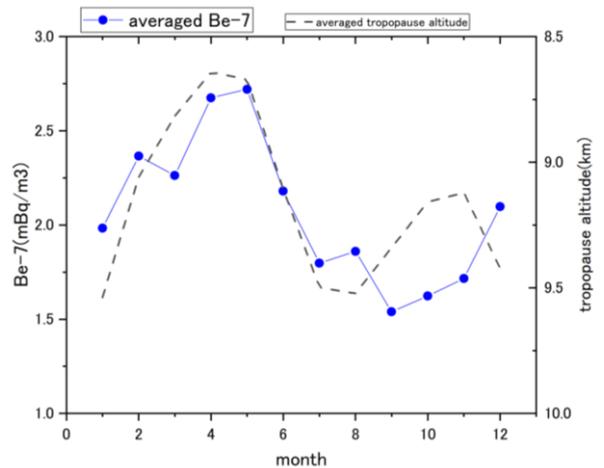


図 2. アイスランドにおける大気中 Be-7 濃度と圏界面高度の月変動プロファイル

この期間の Be-7 濃度観測結果は、2011 年と 2018 年の変動が大きい、2015 年に極小であった。太陽黒点数は 2014 年に極大、そして中性子数は 2015 年に極大を示している。表 1 に太陽黒点数の極大期の 3 年間とその前後の各約 3 年間について Be-7 濃度、中性子強度、太陽黒点数の平均値を示す。〈2013-2015〉に対する変動率は、黒点極大期の前(〈2009-2012〉)では各々約 21%、約 6%、約 -47%であり、黒点

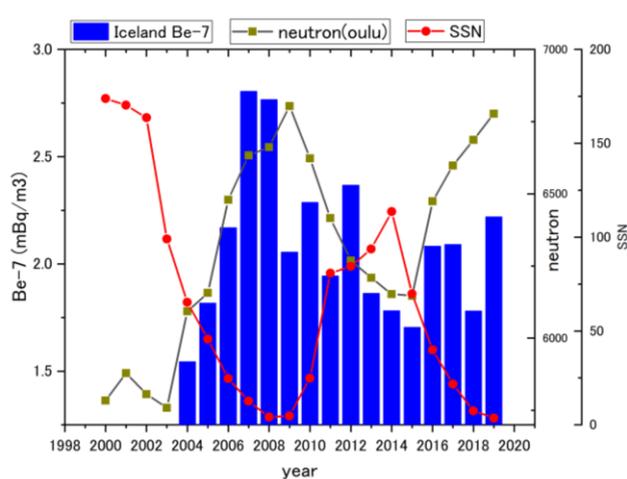


図 3. アイスランドにおける大気中 Be-7 濃度、太陽黒点数、中性子強度の年変動

極大期の後(〈2009-2012〉)では各々約 16%、約 7.5%、約 -80%であった。どちらも Be-7 濃度の変動率は中性子強度の変動率の 2 倍から 3 倍である。

これは、宇宙線生成核種 Be-7 の大気上層での生成が地表で観測される中性子よりも低エネルギー宇宙線により生成されていることを示唆している。

一方、第 23 太陽活動期と第 24 太陽活動期に対しての Be-7 濃度と中性子強度および太陽黒点数との関係は、太陽黒点数の下降期である〈2004-2006〉と〈2016-2018〉の期間で比較した。第 24 期の Be-7 濃度、中性子強度、太陽黒点数の第 23 期に対する変動率は、各々約 7.7%、約 5.4%、約 -49%であった。Be-7 濃度の変動率は中性子強度の変動率は少し大きい。

表 1. Be-7 濃度、中性子強度、太陽黒点数

期間 (年)	Be-7 (mBq/m ³)	neutron (cps/min)	SSN
〈2009-2012〉	2.16	6528	48.7
〈2013-2015〉	1.78	6170	92.4
〈2016-2019〉	2.04	6634	18.2

[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]

“Observation of cosmogenic nuclide Be-7 concentrations in the air at Bangkok and trajectory analysis of global air-mass motion”, S. Suzuki, H. Sakurai, F. Tokanai et al., 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017): Bexco, Busan, Korea, July 12-20, 2017, Proceedings of Science (ICRC2017) 070 (2017) 1-8.

“Prolonged production of ¹⁴C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings”, H. Sakurai, F. Tokanai, et al., Scientific Reports (2020) 10:660.

極域の大気電場観測データを用いた全地球電気回路の研究

◎鴨川 仁 静岡県立大学グローバル地域センター・特任准教授

佐藤 光輝 北海道大学大学院理学研究院・講師

源 泰拓 東京学芸大学教育学部・個人研究員
(国立極地研究所)

門倉 昭 宙空圏 教授

(研究期間) 平成29年～令和元年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

地上における大気電気の観測値には気象や測器の設置環境に起因する局所的な擾乱が混入しやすい。Global electrical circuitにおける大気電場の役割を解析するためには、気象や測器の設置環境に起因する局所的な擾乱を含まず、かつFair-weather時間帯を抽出する必要がある。

極域では生物に由来する変動がなく、大気の電気伝導度を変化させる排ガスなどの人為的な汚染が極めて少なく、汚染源があったとしても要因の特定が容易であるというメリットがある。こうした理由により、南極のいくつかの基地で大気電場の観測が実施され、カーネギーカーブの評価が行われている。Minamoto and Kadokura (2011) は2007年2月から2008年1月の12ヶ月の、昭和基地の地上気象観測値と大気電場観測値から、風速6 m/sec以下、前後の雲量がともに0または0+であることをfair-weather時間帯を抽出する条件として提示した(1)。本条件のもとで1月のFair-weather期間におけるデータをマージした日変化では、世界時19時にピークは見えているが、現地の夏季以外のFair-weatherデータは少なく、日変動を示すには至らなかった。さらに、3時間毎の観測でえられる雲量を判定条件とすることはかならずしも時間分解能的に十分ではないと考えられる。

本共同研究では、2015年2月から2016年12月までに昭和基地において取得された大気電場観測値と、同期間の気象観測値から、Fair-weather時間帯を抽出する条件を再検討した。

2. 観測

図1に、昭和基地における大気電場および風速の測定点を示す。今回、使用する大気電場の観測点は

2つで、高さ約10mのポール上に設置されているSensor Aと、その近くにあつて、高さ約1.4メートルのSensor B(図2)の観測値を用いる。Sensor Aは地表に近い高さの飛雪の効果を調べるため、2015年2月に設置されたものである。Sensor BはMinamoto and Kadokura (2011) で使用した大気電場観測点と同じ場所で観測を継続している。Sensor AおよびSensor Bによる大気電場測定値には、2015年3月に実施した平面較正観測によって求められた較正係数を乗じてあるため、晴天静穏時には、Sensor AおよびSensor Bによる大気電場測定値は一致することが期待される。なお、風速データは気象庁から提供を受けた毎分値を使用した。



図1. 昭和基地における大気電場および気象(風速を含む)の測定点の配置

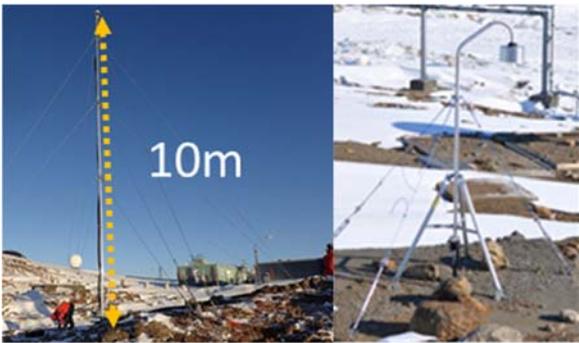


図 2. 昭和基地における大気電場観測点。Sensor A (左) と Sensor B (右)。

風速と Sensor A (高さ 10m) と Sensor B (高さ 1.4m) の観測値を比較すると、風が強くなると大気電場観測値が乖離する例が見られる。図 3 に、2015 年 9 月 23 日の 24 時間の大気電場と風速の推移を示す。

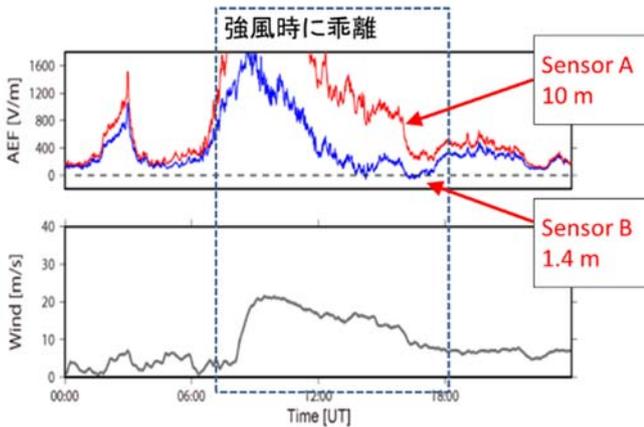


図 3 2015 年 9 月 23 日の Sensor A (高さ 10m) と Sensor B (高さ 1.4m) で観測された大気電場と風速の推移 時刻は Universal time (UT)。0700 UT ごろから 1730 UT ごろにかけて、Sensor A による観測値が Sensor B による観測値より 200 V/m 以上大きくなっている。一方、風速は 0810 UT ごろから 2150 UT ごろにかけて 6 m/sec を超えていた。

図 4 に、Sensor A (高さ 10m) の観測値と Sensor B (高さ 1.4m) の差の度数分布を示す。風速 8 m/sec を超えると、差が 200 V/m 以上となるケースが増加する。

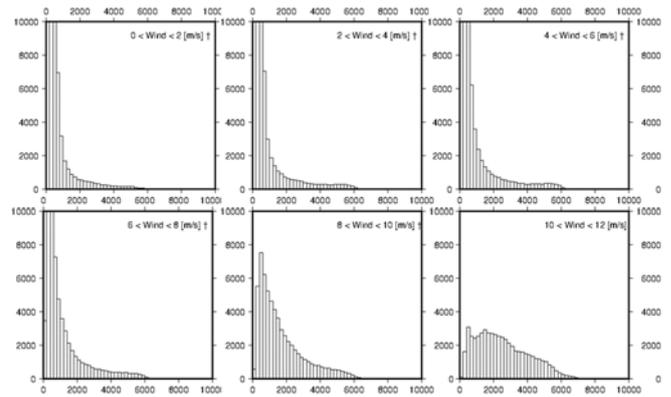


図 4 風速階級ごとの大気電場観測値の差のヒストグラム。左上から右へ順に、風速 2 m/sec 未満、風速 2 m/sec 以上 4 m/sec 未満、風速 4 m/sec 以上 6 m/sec 未満、左下から右へ順に、風速 6 m/sec 以上 8 m/sec 未満、風速 8 m/sec 以上 10 m/sec 未満、風速 10 m/sec 以上 12 m/sec 未満。母集団は 2015 年 2 月から 2016 年 12 月の毎分値。横軸は Sensor A (高さ 10m) の観測値と Sensor B (高さ 1.4m) の差。階級の幅は 200 V/m。

3. 高さの異なる点における大気電場観測値の差を用いた晴天静穏時判別の可能性

昭和基地においては、降水はほとんど乾いた粉雪によるものであり、雪粒は地上にある雪氷面と衝突すると負に帯電することが知られている(2)。飛雪の分布に鉛直勾配が存在する(3)ので、高さの異なるセンサーによる大気電場観測値には帯電した飛雪による影響が混入する。このことから、高さの異なるセンサーによる大気電場観測値の差が小さい時は、飛雪による影響が少なく、Fair-weather の必要条件を充たしていると考えられる。

図 5 に、大気電場観測値の差から導いた Fair-weather と、風速と雲量から導いた Fair-weather の日変化を示す。前者のほうがカーネギーカーブと整合的である。といえる。後者、風速と雲量から導いた Fair-weather の日変化は、現地の夏季、12,1,2 月を除いてカーネギーカーブとの乖離が著しい。

一方、表 1 に示すとおり、抽出されたデータ数は観測値の差を条件としたもののほうが多い。このことから、今回提示した新しい判別条件は、Minamoto and Kadokura (2011) よりも精度良く、かつ数多くのデータを抽出できる可能性がある。

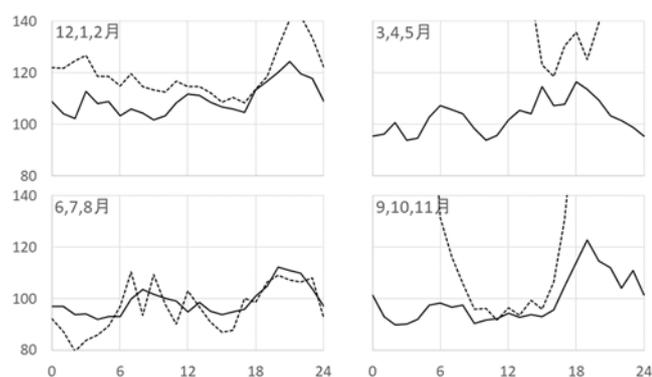


図5 大気電場観測値の差から導いた Fair-weather (実線)と、風速と雲量から導いた Fair-weather (点線)の一時間ごとの日変動。実線は Sensor A (高さ 10m) の観測値と Sensor B (高さ 1.4m) の大気電場観測値の差が 100 V/m 未満、かつ風速 10 m/sec 未満の期間を抽出して作成。点線は Minamoto and Kadokura (2011) に従い風速 6 m/sec 以下、当該時

間の前後の雲量観測値がともに 0 または 0+であることを条件とした。ともに中央値を代表値としている。対象期間は 2015 年 2 月から 2016 年 12 月。

表 1. 抽出された期間が全観測期間(2015 年 2 月から 2016 年 12 月) に占める割合

抽出条件	電場観測値の差	風速と雲量
12,1,2月	54.3 %	29.1 %
3,4,5月	51.3	7.8
6,7,8月	52.8	8.9
9,10,11月	65.6	14.1

[参考文献]

- 1) Y. Minamoto and A. Kadokura; Extracting fair-weather data from atmospheric electric-field observations at Syowa Station, Antarctica, *Polar Science*, 5, 3, 313-318 (2011)
- 2) D. S. Schmidt, J. D. Dent, and R. A. Schmidt; Charge-to-mass ratio of individual blowing-snow particles, *Annals of Glaciology*, 26, 207-211 (1998)
- 3) G. W. Mann, P. S. Anderson, and S. D. Mobbs; Profile measurements of blowing snow at Halley, Antarctica, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105 (D19), 24491-24508 (2000).

[研究発表]

源泰拓, 鴨川仁, 門倉昭, 佐藤光輝, 南極域における大気電場—オーロラ活動の相互作用の研究, 日本大気電気学会第 98 回研究発表会, 2020 年 1 月 10 日 静岡県総合研修所もくせい会館

Yasuhiro Minamoto, Masahi Kamogawa, Akira Kadokura, The Variations of the Fair-weather Atmospheric Electric Field at Syowa station, 第 10 回極域科学シンポジウム, 2019 年 12 月 4 日, 国立極地研究所

源泰拓, 鴨川仁, 門倉昭, 佐藤光輝, 南極・昭和基地の大気電場観測における晴天静穏時判別条件の再検討, 日本大気電気学会第 97 回研究発表会, 2019 年 1 月 12 日 岐阜大学

源泰拓, 鴨川仁, 門倉昭, 佐藤光輝, Atmospheric electric field due to snow blizzard electrification at Syowa station, Antarctica, 第 9 回極域科学シンポジウム, 2018 年 12 月 6 日 国立極地研究所

源泰拓, 鴨川仁, 門倉昭, 佐藤光輝, 全地球電気回路研究のための地上大気電場観測データのデータベース化 極域のオープンデータ・オープンサイエンスに関する研究集会, 2018 年 10 月 5 日 国立極地研究所

Masashi Kamogawa, Yasuhiro Minamoto, Akira Kadokura, Mitsuteru Sato, Intense positive atmospheric electric field due to snow blizzard electrification at Antarctica, The 16th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE2018), 2018 年 6 月 18 日 奈良春日野国際フォーラム

鴨川仁, 源泰拓, 門倉昭, 平沢尚彦, 佐藤光輝, 地吹雪発生時の大気電場と雪粒子分布の時系列変化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月 20 日 幕張メッセ

源 泰拓, 鴨川 仁, 門倉 昭, 平沢尚彦, 佐藤光輝, 地吹雪発生時において大気電場観測値が負になる時間帯の雪粒子分布, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月 20 日 幕張メッセ

鴨川 仁, 門倉 昭, 佐藤 光輝, 極域で観測された大気電場・ELF 波動データの複合解析による全地球電気回路の研究, 日本大気電気学会第 96 回 研究発表会 2018 年 1 月 6 日, 源 泰拓, 日本大気電気学会第 96 回 研究発表会, 2018 年 1 月 6 日 東京理科大学

源 泰拓, 鴨川 仁, 門倉 昭, 佐藤 光輝, A study of the global electrical circuit by analyzing atmospheric electric field and ELF waves data in the polar region, 第 8 回極域科学シンポジウム 2017 年 12 月 5 日 国立極地研究所

源 泰拓, 鴨川 仁, 門倉 昭, 佐藤 光輝, 極域で観測された大気電場・ELF 波動データの複合解析による全地球電気回路の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 142 回講演会, 2017 年 10 月 16 日 京都大学宇治キャンパス

極域擾乱電場による低緯度電離圏の時間変動特性の研究

◎橋本 久美子 吉備国際大学農学部・教授
 菊池 崇 名古屋大学・名誉教授
 野崎 憲朗 情報通信研究機構電磁波研究所・研究員
 (国立極地研究所)
 門倉 昭 教授
 平成 29 年～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

HF Doppler (HFD) サウンダーは、短波の反射高度が大気波動や電場によって上下動することにより生じる周波数ドップラー効果を計測する。受信した HFD のドップラー周波数から、電離圏の東西方向の電場を見積もることができる。従来、短時間(数分)の磁気急始(SC)などの現象の電場測定に用いられた手法である (Davies 他,1962; Kikuchi 他,1985,JGR)。我々は HFD データを活用し、中低緯度の SC 電場の詳細 (Kikuchi 他, 2016, JGR) を明らかにしてきたが、一方で、HFD サウンダーでは、数十分以上継続する現象の電場を定量的に計測することは難しいと指摘されてきた (Tsutsui, 1988)。サブストームや磁気嵐等の長時間変動に対しては、電離圏電子の生成消滅過程の効果により、電場が過少に見積もられるという問題点である。しかし、検出が難しいとされるサブストーム電場を夜側低緯度で検出することに成功した(Hashimoto 他, 2017, JGR)。サブストームオンセットと同時に夜側低緯度で過遮蔽電場が約 20 分間発達し、夜側の赤道ジェット電流と高い相関を示すことを明らかにした。

そこで、継続時間の異なる地磁気擾乱現象に対して、HFD サウンダーから推定した電離圏電場と、赤道ジェット電流、さらに衛星により観測された電場の相関解析を行った。それにより、HFD サウンダーから、宇宙天気事象の電場変動を精度よく再現できるか、その継続時間依存があるかを調べた。

周期が 3～6 分程度の Pc5 地磁気脈動に伴う電場変動は、昼夜の赤道ジェット電流と常に相関係数が 0.9 以上と高い結果が得られた。2003 年 10 月の大地磁気嵐中の地磁気脈動では、ROCSAT 衛星の電場観測でも、朝夕の時間帯に電場の周期変動が観測され、HFD の変動と相関が高いことが確認された。

次に我々は、周期が約 1 時間の準周期 DP2 変動に着目した解析をおこなった。図 1 は、上から太陽風動圧、太陽風電場 IEF、HFD サウンダーで観測された夜側の電場、そして昼間赤道の

Huancayo(HUA)と昼夜低緯度の Kakioka(KAK), Kourou(KOU)の磁場を示す。太陽風動圧がほぼ一定である時間帯で、IEF が周期的に正負の変化をしている。これに対応して、HUA 磁場が正負の変動をすると同時に、夜側に位置する Oarai(ORI)の HFD 電場は昼間と逆センスの変動をした。この結果は、1 時間周期の太陽風電場が昼間赤道と同時に夜間中緯度へ伝搬し、HFD サウンダーで観測されたことを示している。

さらに継続時間の長い宇宙天気事象として、数時間から十数時間継続する磁気嵐を解析した。2015 年 6 月に発生した磁気嵐の主相について、日本、チェコ、台湾の HFD サウンダー多点観測データと極域および赤道の磁場、そして、静止軌道上の ETS-VIII の磁場データを解析した。解析から磁気嵐主相の間、昼夜の赤道ジェット電流の発達と中緯度電離圏の電場発達の高相関があることを示し、磁気圏対流電場が赤道電離圏に侵入したことを示した。しかし一方、HFD サウンダーは主相開始と同時に中緯度電離圏で強い対流電場を観測した後、昼夜ともに 20～30 分程度で減衰することが

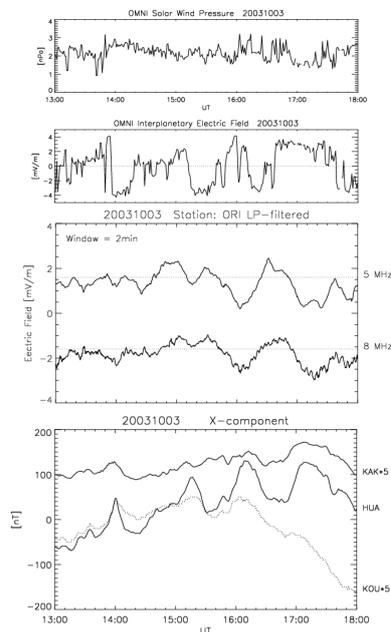


図 1 上から太陽風動圧、太陽風電場、Oarai HF Doppler sounder(5, 8 MHz)で観測された中緯度夜側の電離圏電場、昼間赤道 Huancayo (HUA)と昼間低緯度 Kourou (KOU)と夜間低緯度の Kakioka (KAK)の磁場を示す。KOU は見やすくするために、5 倍に拡大してある。

確認れた (Hashimoto 他, EPS 投稿中)。

本研究ではこれまで、数分から1時間程度の宇宙天気事象 (SC, Pc5, Substorm, DP2) の電場が中緯度の HFD で観測されることを示してきたが、数時間以上継続する地磁気嵐の強い電場については、時間経過とともに HFD サウンダーの電場が過少に見

積もられる傾向が確認された。さらにこれらの電場強度が、定量的に正しい値を示しているかどうかを今後、検証する必要がある。各事象について EEJ との定量関係式を確立し、これらを比較することで、現象の時間スケール依存性を明らかにする必要がある。これが次の課題である。

[参考文献]

- 1) Davies, K., J. M. Watts, and D. H. Zacharisen (1962), A study of F2-layer effects as observed with a Doppler technique, *J. Geophys. Res.*, *67*, 601-609.
- 2) Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, and T. Nagatsuma (2017), Substorm overshielding electric field at low latitude on the nightside as observed by the HF Doppler sounder and magnetometers, *J. Geophys. Res. Space Physics*, *122*, doi: 10.1002/2017JA024329.
- 3) Kikuchi, T., T. Ishimine, and H. Sugiuchi (1985), Local time distribution of HF Doppler frequency deviations associated with storm sudden commencements, *J. Geophys. Res.*, *90*, pp.4389-4393.
- 4) Kikuchi, T. and K. K. Hashimoto (2016), Transmission of the Electric Fields to the Low Latitude Ionosphere in the Magnetosphere-Ionosphere Current Circuit, *Geoscience Letters*, DOI: 10.1186/s40562-016-0035-6.

[研究発表]

- 1) Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, K. Hosokawa, J. Chum, D. Buresova, M. Nose and K. Koga, Penetration electric fields observed at middle and low latitudes during the 22 June 2015 geomagnetic storm, EPS under review.

PBIの新解釈：電離圏起源の Alfvén 波による爆発的オーロラ増光理論の構築

◎吉川 顕正 九州大学理学研究院・准教授

Heikki Vanhamki 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・准教授

(国立極地研究所)

小川泰信 准教授

行松彰 准教授

田中良昌 特任准教授

平成 29 年～令和元年 (3 年間)

[研究成果]

太陽地球系科学の学理構築過程において、磁気圏・電離圏で生じるプラズマ諸現象は本質的に M-I 結合を強く反映しているであろうことは十分に認識されてきた。一方で、M-I 結合の結果電離圏が磁気圏に及ぼす効果は、定量的にも定性的にも殆ど理解されていない。これに対し我々は「電離圏 E 領域という強磁場弱電離気体系において普遍的に顕れる Hall 効果」により、磁気圏で駆動された FAC によって持ち込まれる電磁エネルギーにより励起される 0 次の電離圏プラズマ対流場を源として、電離圏伝導度非一様領域において分極場が励起、それが作り出す「回転・捻れ・加減速といった電離圏対流の変調、付随して励起される分極性 FAC の磁気圏への流出といった電離圏自身の効果が、磁気圏ダイナミクスに寄与する可能性」の基本理論を示した[Yoshikawa+, JGR, 2013a, b]。

この理論に基づき、オーロラ帯側境界域での爆発的オーロラ増光現象「Poleward Boundary Intensification (PBI)」について、強い伝導度勾配が生む分極効果によって電離圏から湧き上がる Alfvén 波が誘発するという「電離圏起源モデル」を世界で初めて提唱[Ohtani & Yoshikawa, JGR 2016]、従来の磁気圏投影の考え方では説明不

可能であった PBI の空間時間発展を初めて矛盾なく説明したこと、アメリカ地球物理連合 JGR 誌 Editor's Highlight、総合誌 EOS Research Spotlight に選出され、世界的注目を浴びている。

上記研究のベースにした理論研究により、電離圏分極性 FAC は PBI に伴う爆発的なオーロラ増光を説明するだけの十分な電流量をもっていることを明らかにしてきた。

本研究では、この電流を支える電子の加速メカニズムについての考察を行った。このオーロラ加速を説明する基本メカニズムとして、「十分な電流量をもつ電離圏起源の上向き電流を説明する磁気シアを持った Alfvén 波が磁力線に沿って密度空洞領域に侵入、その波頭で生じる電流キャリアの不足を補うために、平行変位電流を伴うラングミュア波が成長し、周囲の電子を加速、その非線形発展により Alfvén 波の崩壊と効率の良い電子加速が PBI を生じさせる。」を提案した。現在、上記シナリオを検証するため Shi.R et al., [2018] で開発したシミュレーションコードを用いた数値実験を鋭意実行している。

[参考文献]

- 1) Ohtani, S., and A. Yoshikawa (2016), The initiation of the poleward boundary intensification of auroral emission by fast polar cap flows: A new interpretation based on ionospheric polarization, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA023143. (*Selected as Editor's Highlight*)
- 2) Yoshikawa, A., O. Amm, H. Vanhamäki, A. Nakamizo, and R. Fujii (2013), Theory of Cowling channel formation by reflection of shear Alfvén waves from the auroral ionosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, doi:10.1002/jgra.50514.
- 3) Yoshikawa, A., O. Amm, H. Vanhamäki, and R. Fujii (2013), Illustration of Cowling channel coupling to the shear Alfvén wave, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, doi:10.1002/jgra.50513.
- 4) Shi, R., H. Liu, A. Yoshikawa, B. Zhang, and B. Ni (2013), Coupling of electrons and inertial Alfvén waves in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 2903–2910, doi:10.1002/jgra.50355.

[研究発表]

1. Uozumi, T., Yoshikawa, A., & Ohtani, S. (2020). Formation of a 3-D Oscillatory Current System Associated With Global High-Correlation Pi 2 Event: A Case Study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2019JA026988. <https://doi.org/10.1029/2019JA026988>.
2. Nakamizo, A., & Yoshikawa, A. (2019). Deformation of ionospheric potential pattern by ionospheric Hall polarization. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JA026013>
3. Ohtani, S., Motoba, T., Gjerloev, J. W., Ruohoniemi, J. M., Donovan, E. F., & Yoshikawa, A. (2018). Longitudinal development of poleward boundary intensifications (PBIs) of auroral emission. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 9005–9021. <https://doi.org/10.1029/2017JA024375>
4. Shi, R., Ni, B., Summers, D., Liu, H., Yoshikawa, A., & Zhang, B. (2018). Generation of electron acoustic waves in the topside ionosphere from coupling with kinetic Alfvén waves: A new electron energization mechanism. *Geophysical Research Letters*, 45, 5299–5304. <https://doi.org/10.1029/2018GL077898>
5. Yoshikawa, A., and R. Fujii (2018), Earth's Ionosphere: Theory and Phenomenology of Cowling Channels, in *Electric Currents in Geospace and Beyond* (eds A. Keiling, O. Marghitu, and M. Wheatland), John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, N.J., doi: 10.1002/9781119324522.ch25

ULF 波動はオーロラ励起出来るか？

◎研究代表者：櫻井 亨 東海大学 名誉教授
 (国立研究所)
 門倉 昭 教授
 田中 良昌 准教授
 平成 29 年～令和元 年 (3 年)

[研究成果]

オーロラアーク中ではしばしば磁気流体波の振動周期に似た周期で輝度変調するオーロラが観測される。この研究は磁気流体波動 Pc5 の周期で輝度変調したオーロラアークが観測された事象について、双方の関連性を調べた。オーロラ電子の加速機構についての一つ仮説として Pc5 波動に伴う磁力線沿いに電場が生成され、これに伴い電子の加速が起こりその加速された電子が電離層に振り込み、これに伴ってオーロラが励起されるとする仮説を立てた。この仮説を証明する為に、Pc 5 磁気波動がどの程度のエネルギーを生成出来るか？ またそのエネルギーはオーロラを励起するのに十分であるか？を検討した。取り扱ったデータは地上観測点カナダの Gillam (磁気緯度：66.00 度, 磁気経度：333,19 度) で観測されたオーロラ全天画像 (All Sky Image (ASI)) で得られたオーロラアークの輝度変調データとこのオーロラと同時時刻の朝側磁気圏プラ

ズマシート (L 値=11Re) で、THEMIS-A, -D, -E の 3 衛星によって観測された Pc5 波動の磁場および電場のデータを用い、ポインティングエネルギーを計算し、更にこのエネルギーが電離層にどの程度のエネルギーを供給出来るかを検討した。まず、衛星観測の磁場および電場データからこの Pc 5 波動が磁力線共鳴振動の基本波であることを明らかにし、且つこの振動の磁力線方向のポインティングエネルギー S_z が $S_z=5-10\mu\text{W}/\text{m}^2$ である事を得た。更に、このエネルギー値が電離層高度でどの位の値になるかを推定した。この結果、電離層高度での波動磁場強度が $100\sim150\text{ nT}$ の大きさとなり、これに伴う Poynting Flux が $1.3\sim3.0\text{ mW}/\text{m}^2$ となり、オーロラを励起するのに十分なエネルギーを供給出来る事が明らかにした。現在、この研究結果を論文としてまとめている。

[研究論文発表予定]

Sakurai, T., N. Sato, A. Kadokura and Y. Tanaka, A comparative study of Poynting flux of ULF waves and auroral emissions based on in situ observations of Pc 5 resonant oscillations by THEMIS satellites in the dawn-side outer magnetosphere and poleward moving auroral arc at a THEMIS

GBO station, Gillam, (出版準備中)。

南極大型大気レーダーにおけるアダプティブアンテナ技術を用いた電離圏観測法の研究

◎齊藤 昭則 京都大学大学院理学研究科・准教授

佐藤 享 京都大学国際高等教育院・特任教授

(国立極地研究所)

橋本 大志 助教

平成 30 年～令和元年 (2 か年)

[研究成果]

南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY) は、2015 年及び 2017 年に電離圏大気の試験観測を複数回行い、電離圏の自由電子による微弱なインコヒーレント散乱 (IS) エコーとともに、地磁気の磁力線に沿って流入する電子の密度における不均一構造 (Field Aligned Irregularity; FAI) により生じるコヒーレント散乱エコー (以下、FAI エコー) を観測することに成功した。図 1 に 2015 年 5 月に PANSY レーダーにより南極域で初めて取得された電子密度の高度プロファイルを示す。PANSY レーダーが

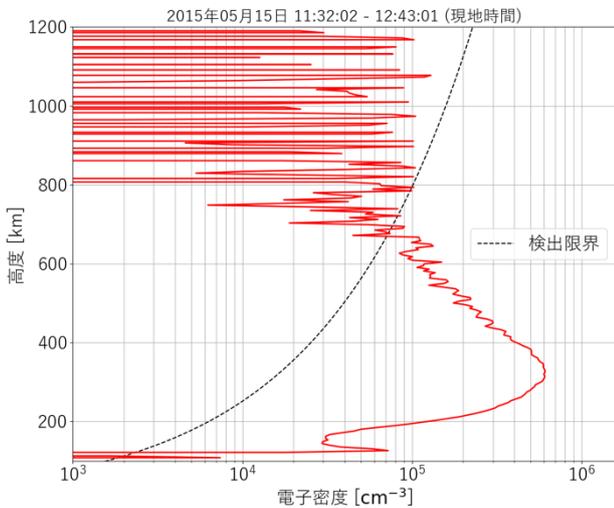


図 1 2015 年 5 月に PANSY レーダーにより取得された南極域初の電子密度の高度プロファイル

用いる VHF 帯の電波では主に E 層 (100 km 付近) の FAI エコーが観測されるが、その出現仰角は約 20 度～30 度である。したがって図 2 に示すようにその距離は F 層の電子密度のピークが現れる約 250 km と重なり、電子密度観測において強い干渉波源となる。

そこで申請者らは PANSY レーダーの持つ多チャンネル観測機能を用いたアダプティブ信号処理に

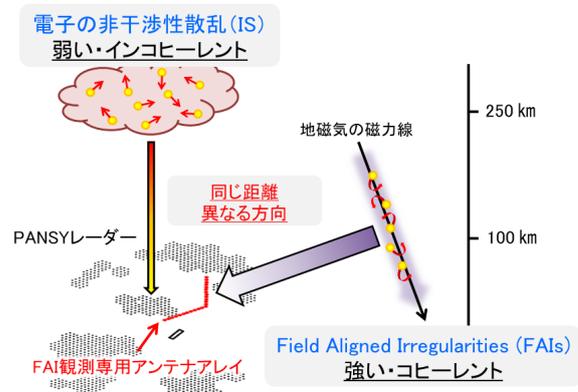


図 2 PANSY レーダーの IS 観測に対する FAI エコーの混入

より IS と FAI のエコーを分離受信する手法を開発し、2017 年に行った試験観測結果に適用することでこの有用性を示した¹⁾。図 2 に示す通り、PANSY レーダーは FAI エコーの到来が想定される方向に良好な感度を持つ 24 素子の 3 素子八木アンテナからなる FAI 観測専用アレイ (以下 FAI アレイ) を持ち、主アレイに 8 チャンネルのサブアレイを加えた多チャンネル信号処理が可能である。ただし、主アレイと FAI アレイは構成素子やアンテナ本数が異なるため、各サブアレイのゲインを考慮した信号処理を行う必要がある²⁾。図 3 に本手法の適用結果を示す。上段はアダプティブ信号処理適用前の電子密度の高度プロファイルの時系列、中段が提案する信号処理手法の適用後、下段が FAI アレイにより検出された FAI を表している。同図は FAI アレイを用いた多チャンネル信号処理によって FAI が抑圧され、IS エコーによる電子密度推定が可能となった領域が拡大していることを示しており、本研究が提案した手法の有効性を確認するものである。なお、本成果は国立極地研究所のウェブサイト、日本経済新聞、

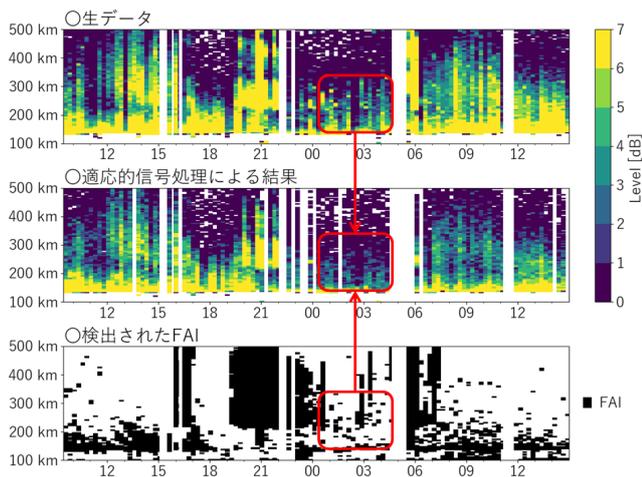


図 3 提案手法の適用により得られた FAI エコー抑
圧後の電子密度の高度プロファイルの時系列

科学新聞でプレスリリースを行った。

また、上述の手法は信号の到来方向を用いて分離受信を行うことから、FAI エコーに着目して適用することで FAI エコーのみを取り出し、その運動や構造を研究対象としたイメージング観測にも適用が可能である。図 4 はカポン法によって得られた FAI のイメージング観測例であり、エコー強度が特定の方位または高度に集中していることが確認できた。

しかしながら同手法では時間・角度分解能の不足や不確実性による偽像が問題となることが明らかとなった。今後はさらに高解像度で偽像の問題を回避可能と考えられる CLEAN 法やスパースモデリングを用いて高解像度な FAI イメージング解析を行い、PANSY レーダーにを用いて極域へ流入する電子と背景電子の同時観測を実現する。また、本研究期間中では観測装置の不具合により実施できなかったイオンドリフト速度及び温度の観測を実施し、提案手法の有効性の検証を行う。

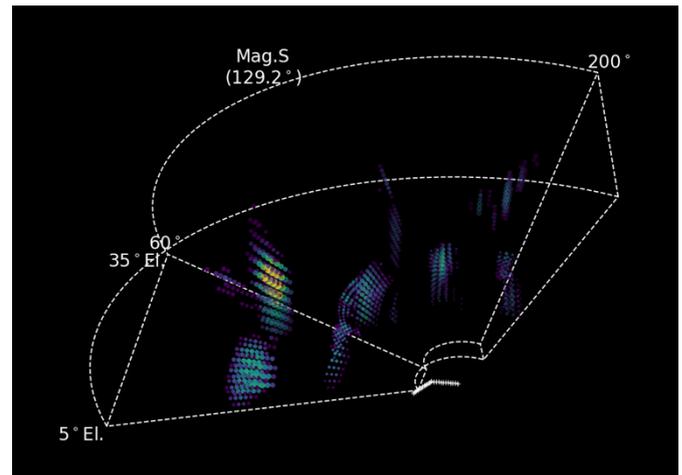


図 4 FAI イメージング観測の一例

[参考文献]

- 1) Hashimoto, T., A. Saito, K. Nishimura, M. Tsutsumi, K. Sato and T. Sato, First Incoherent Scatter Measurements and Adaptive Suppression of Field-Aligned Irregularities by the PANSY Radar at Syowa Station, Antarctic, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 36 (9), pp.1881-1888, doi: 10.1175/JTECH-D-18-0175.1, 2019.
- 2) Hashimoto, T., K. Nishimura, and T. Sato, Adaptive sidelobe cancellation technique for atmospheric radars containing arrays with nonuniform gain, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E99B (12), pp.2583-2591, doi: 10.1587/transcom.2016EBP3047, 2016.

[研究発表]

Hashimoto, T., A. Saito, K. Nishimura, M. Tsutsumi, K. Sato and T. Sato, First Incoherent Scatter Measurements and Adaptive Suppression of Field-Aligned Irregularities by the PANSY Radar at Syowa Station, Antarctic, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 36 (9), pp.1881-1888, doi: 10.1175/JTECH-D-18-0175.1, 2019.

(別紙) 共同研究参加者一覧

香川 大輔 京都大学大学院理学研究科・修士一回生

西村 耕司 国立極地研究所・特任准教授

地形性重力波の大気光イメージング観測による研究

◎鈴木 秀彦 明治大学理工学部・准教授

(国立極地研究所)

富川 喜弘 准教授

平成 30 年～令和元年 (2 年間)

[研究成果]

本研究では関東地方の西側に位置する富士山やその周辺の山岳地帯から励起されると考えられる山岳波の励起伝搬特性の解明を目指し、2018 年 5 月から 2019 年 12 月まで神奈川県川崎市にある明治大学生田キャンパス (35.613° N, 139.549° E) を観測拠点とした大気光イメージング観測を実施した (図 1)。波長 890 nm 付近に発光強度のピークを持つ OH Minel バンドの回転振動帯である(7-3)バンド由来の大気光を観測した。

これまでの観測結果から山岳波の特徴である対地水平位相速度を持たない大気重力波の検出数は 6 例に留まっている。また、イメージャーの視野と同程度のスケールの波動構造を検出する解析手法を用いて、大気光画像から長波長構造 ($\sim 100\text{km}$) の検出も試みたが、観測される多くの波動はそれよりも小さいスケールのもの (10-30km) が多いことが

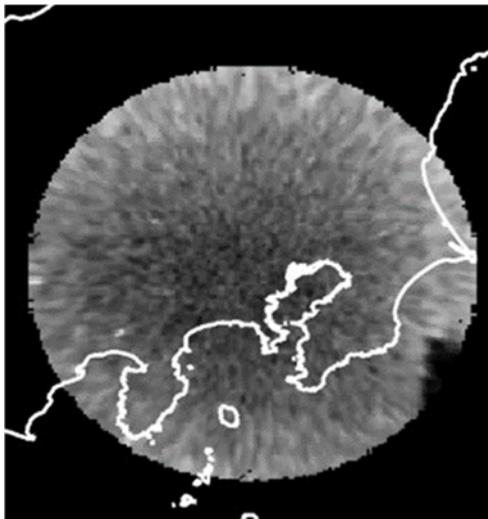


図 1 OH 大気光イメージャーの観測視野。観測した OH 大気光が高度 85 km で発光していると仮定した場合、観測視野は生田キャンパスを中心とした半径約 120 km である。

明らかになってきた。この検出数は奥田 [2018] による富士山を励起源とした山岳波動の伝搬シミュレーション結果から期待される大気光層への伝搬

例より少ない結果となった(図 2)。この理由としては、(1) そもそも関東地方周辺の下層大気で山岳波動が励起される頻度が低い、(2) 奥田 [2018] では考慮されていないブロッキングメカニズムによって山岳波の鉛直伝搬が阻止されている、の 2 つの理

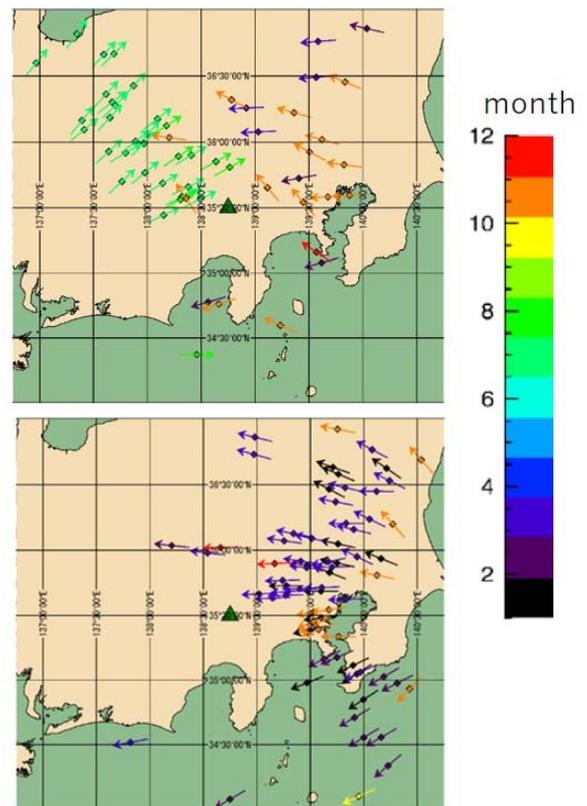


図 2 奥田 [2018] でおこなわれた富士山を励起源とした山岳波の伝搬シミュレーション結果。上図は 2016 年、下図は 2015 年の背景大気場を設定して計算された。高度 60 km に到達した地点をプロットしており、矢印の方向は山岳波の波数ベクトル方向を示す。また、各矢印の色は月を表す[奥田, 2018]。由が考えられる。そこで、(1) を検証するために、山岳波が励起された際に山の風下側に発生する波状の雲を衛星観測データから検出することで日本列島およびその周辺での山岳波の発生頻度を調査した。

解析に使用した観測データは 2018 年 1 月 1 日

～2018年12月31日に取得された静止気象衛星ひまわり8号の可視光観測データであり、その中に頻繁に現れる波状雲の抽出をおこない、下層大気における山岳波の励起頻度を調査した。2018年1年間分のひまわり8号可視画像を解析し、日本全域における山岳波動励起頻度分布図を作成したところ、1年間を通じて東北地方で波状雲が多く発生しており、山岳波動が頻繁に励起されていることが判明した(図3)。

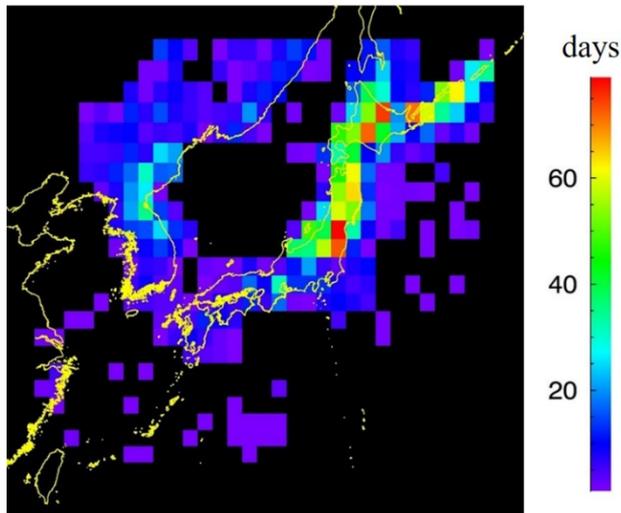


図3 山岳波動励起頻度分布図(2018)。山岳波の励起に伴って発生した波状雲が検出された日数を表示している。

東北地方は奥羽山脈を代表とした山岳が南北に伸びているため、東西風が吹く場合には東北地方のどのエリアでも山岳波動が励起されると考えられる。しかし、図3をみると東北地方全体で波状雲が発生していた日は年間で30日を超えているが、最

[参考文献]

1) Smith, R. B., S. T. Skubis, J. D. Doyle, A. Broad, C. Kiemle, and H. Volkert; Mountain waves over Mt. Blanc: Influence of a stagnant boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 59, 2073–2092, 2002.

2) 奥田雅大; 大気光イメージング観測による関東平野上空の山岳波の研究, 修士論文, 2018.

3) NICT (2020), NICTサイエンスクラウド ひまわり衛星データアーカイブ

[研究発表]

1) Study of the mountain waves above Kanto plain by an airglow imaging observation: Verification of an observed wavelength and its origin., Satoshi Ishii+, AGU Fall meeting 2019, San Francisco, 2019.12

2) 大気光イメージング観測による関東平野上空の山岳波動の研究: 卓越波長とその伝搬性の検証, 石井智士ほか, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 熊本市, 2019年10月

3) 大気光イメージング観測による関東平野上空の山岳波動の研究, 石井智士ほか, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 名古屋市, 2018年10月

大のエリアと最小のエリアではイベント発生日に約50日の差があることが判明した。東北地方でエリアごとに総観スケールの下層風の条件が大きく違うということはないため、この励起頻度の差は励起源となる地形が関係していると考えられる。

Smith et al. [2002]ではイタリアの北に位置するアルプス山脈において、最高峰であるモンブラン上空では山岳波動が励起されたが、その風下側には風下山岳波が励起されなかったというイベントを報告している。当時の背景風向はアルプス山脈の稜線に平行な方向であり、モンブランの風下側にはアルプス山脈が連なっているため複雑な地形をしている。このような地形の上空では風下山岳波の励起が抑制されると結論付けられている。

東北地方においても同様に東西の幅が狭く風下側に山岳地形がないエリア(37.5°Nを中心に±0.5°N)で風下山岳波の励起数が最大であり、それより北の地域は山岳波の励起数が最大のエリアよりも比較的幅が広く、複雑な地形であることから波動の励起が抑制されていると考えられる。また、本研究で山岳波が励起されていると考えていた富士山もその周辺には広大な山岳地形が広がっており非常に複雑な地形をしているため同じような状況であると考えられる。

以上のことから富士山やその周辺の山岳地帯では山岳波が励起されにくいいため、本研究で実施した関東地方上空のOH大気光観測での山岳波検出数が少なかったと考える。

(別紙) 参加者一覧

研究協力者(共同研究者以外)

石井 智士 明治大学大学院理工学研究科・修士学生 (共同育成研究員、H30のみ)

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（2）気 水 圏

ディストロメーターを用いた降雪量推定法の改善

◎小西 啓之 大阪教育大学教育学部・教授

(国立極地研究所)

平沢 尚彦 助教

平成 29 年～令和元 年 (3 か年)

[研究成果]

降水粒子の粒径と落下速度を測定する光学式雨量計(ディストロメーター)を用いて、より正確な降雪量を推定する方法の試行と検証を北海道陸別(図 1 参照)で行った。陸別は日本一寒い町として知られ、沿岸ではなく北海道内陸部に位置するため日本海側の多雪地帯と異なり、降雪量は少ないが、より低温域の降雪が生じる場所であり、地球上の寒冷な内陸部の降雪と似た低温型の降雪が期待される場所である。

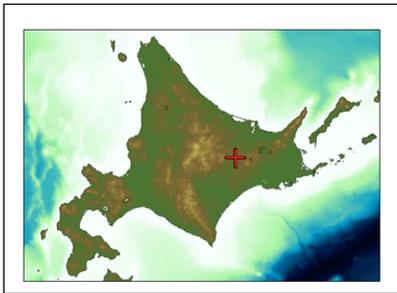


図 1. 降雪観測点である北海道

陸別町の位置 (赤十字)。

降雪量に関する観測項目は、ディストロメーター(LPM, Thies社)による降水粒子の粒径・落下速度分布観測、天秤式降雪量計を用いた弱風時の正確な降雪量観測、および降雪粒子自動観察装置による降雪粒子の形状記録である。

天秤式降雪量計は、電子天秤の上に載せたバケツの秤量を記録する方式の降雪量計で、弱風時の正確な降雪量を測定できる長所があるが、強風時やバケ



図 2. 観測点の風景。高さ 2m の位置にディストロメーター防風ネット内に天秤式降雪量計、降雪粒子自動観測装置を設置

ツの深さを超えるような大雪の場合測定誤差が生じる欠点がある。一方ディストロメーターによる降雪粒子の粒径と落下速度の測定値から個々の粒子の質量を仮定して降雪量を推定する方法は、多少の風があっても降雪量は求めることができるが、個々の粒子の質量の推定値を誤ると大きな誤差になる欠点がある。

本研究では、まず弱風時に限って、天秤式とディストロメーターによる降雪量の比較を行い、仮定した個々の降雪粒子の質量をより精度良くすることを目指した。また、これまでの観測から、ディストロメーターによる降雪量の推定値の誤差の原因の一つとして、様々な降雪粒子の形状による推定誤差もあり、ディストロメーターによる観測と同時に降雪粒子の形状を記録するため、顕微鏡を用いた降雪粒子自動観察装置による観測も行った。図 2 は、これらの装置を設置した降雪観測風景である。

降雪粒子自動観察装置は、粒子を撮影するカメラ部とカメラの上に積もった雪の除去部からなり、カメラ部は USB 顕微鏡カメラ (Dino-Lite) を直径 10cm 高さ 0.8m の塩ビ管内に鉛直上向きに設置し、USB ケーブルを介して屋内のパソコンと接続した。



図 3. 降雪粒子自動観察装置。塩ビパイプ内に上向きに置いた顕微鏡に落下した降雪粒子を撮影する。撮影確率を上げるため 6 本設置した。

空気を噴射するようにした。その設置写真を図3に示すが、雪結晶の捕捉事例を上げるため本装置を6台設置して観測に用いた。

平成29～31年度(2017/2018～2019/2020)の3冬季観測を行った結果、天秤法の降雪量と比較できる弱風時の降雪事例として、降雪時間1時間から20時間までの計39事例(初年度は6事例、2年目は8事例、3年目は25事例)が得られた。同時に降雪粒子自動観察装置も6台稼働させ、降雪粒子の形状も記録させようとしたが、機器のトラブルなどがあり、初年度は6割、2年目は0割、3年目は8割の降雪粒子の撮影数であった(表1参照)。したがって、弱風時の降雪イベントの39事例中、降雪粒子が記録できたのは約30事例であったが、降雪強度が小さい場合は、降雪粒子の捕捉撮影数が少なくなるので、さらに事例数は減って約20事例についてのみ、デイスドロメーターと天秤式の降雪量、降雪粒子の形状写真のデータが得られた。降雪粒子の写真の一例を図4に示す。2020年2月3日17:35の降雪粒子であるが、地上気温-7℃で比較的低温であるから樹枝状などの大きな結晶ではなく角板状や鼓状の結晶からなる雪片であったことがわかる。

39事例の降雪イベント時の地上気温を、5℃ごとに集計すると、表2のようになった。-10℃、-5℃、

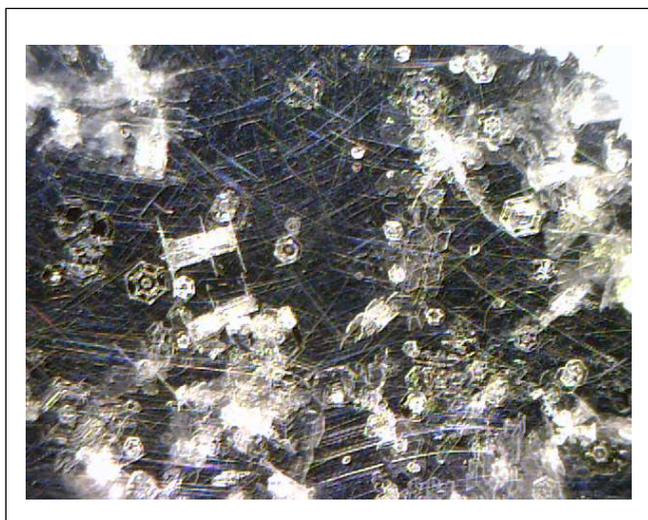


図4. 降雪粒子自動観察装置で得られた降雪粒子の写真の一例。(2020年2月3日17:35LT)

0℃の温度範囲それぞれにはほぼ同数の事例数があり、陸別では広い温度範囲で降雪事例があることが分かった。ただ-10℃以下の低温の降雪事例は、事例数は他の温度範囲と同様に数多くあったが、降雪強度は小さいことが多く、低温型の雪結晶が数多く降る事例は少なかった。

今後これらの結果を順に解析し、降雪量や降雪粒子を相互に比較し、より良い降雪量を推定する方法を調査する予定である。

表1. 各冬季の弱風時の降雪イベント事例数と降雪粒子観察用顕微鏡の稼働台数

年	事例数	6	5	4	3	2	0
2017/2018	6	0	2	4	0	0	0
2018/2019	8	0	0	0	0	0	8
2019/2020	25	13	7	2	1	1	1

表2. 各冬季の弱風時の降雪イベント事例数と気温

年	事例数	<-10	-5~-10	0~-5	>0
2017/2018	6	1	1	4	0
2018/2019	8	3	3	1	1
2019/2020	25	9	6	10	0

極地雪氷コアの金属成分分析

◎鈴木 利孝 山形大学学術研究院理学部・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 准教授 (担当教員)
 平成 29 年～令和元年 (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となる。これまで、氷コアに含まれる溶存イオン種の CFA (e.g. Bigler et al., 2006)、濾過によって集めた粒子の PIXE 測定 (e.g. Ghermandi et al., 2003)、酸可溶性部分の ICP-SFMS 測定 (e.g. Gaspari et al., 2006) 等の研究例が報告されてきた。南極氷床に供給、保存されている粒状物、特に鋳物粒子、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鋳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) を測定することを試みた。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鋳物および海塩エアロゾルの全量について定量的解析を進めることが可能となる。

本研究では、南極ドームふじ深層氷コア (DF コア) および北極グリーンランド南東ドーム氷コア (SEDome コア) に含まれる Al、Na をはじめとする金属成分の全濃度 (溶存態+粒子態) を測定し、南北

両極周辺における、過去の気候・環境変動に伴う、海洋および地殻起源エアロゾルの南極氷床への輸送量の変遷、エアロゾルの供給源の変遷および変質等を明らかにすることを目的とした。

氷コアから質量約 30g となるように氷片を分取して 1 試料とした。氷表面の汚染を除去した後、ポリエチレン容器内で全量を融解させ、0.1N 硝酸溶液とした。溶液をテフロン製容器内で蒸発乾固させた後、残渣を硝酸とフッ化水素酸を用いたマイクロ波分解法で全分解し、ICP 質量分析法により、Al、Fe、Mn、Na、Mg、Ca、Ba、Sr の濃度をした。着目元素 M の全濃度は t-M と表記することとする。

図 1 に DF コアの t-Al および t-Na の測定結果から算出した鋳物および海塩エアロゾルフラックスの過去 72 万年のフラックス変動を示した。鋳物・海塩フラックスはどちらも氷期最寒期間に極大を示し、Mid-Brunhes Event (MBE) に相当する約 43 万年前以降

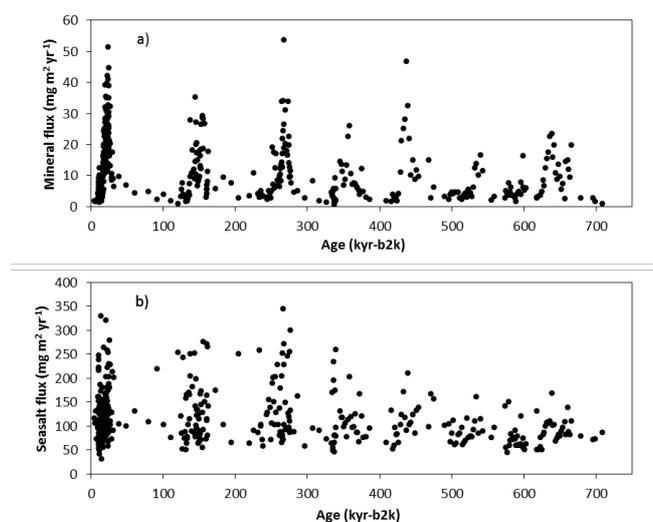


図 1 南極ドームふじにおける過去 72 万年の a)鋳物エアロゾル、b)海塩エアロゾルのフラックス変動

には振幅が大きくなることがわかった。この結果は、これまでに得られている DF コアや EDC コアなどにおける $\delta^{18}\text{O}$ やダスト濃度の結果と一致する。また、鉍物エアロゾルフラックスに比べて海塩エアロゾルフラックスの方が氷期-間氷期間の変動が小さかった。これは南極大陸近傍の海域から供給される海塩エアロゾルよりも長距離空輸を経る鉍物エアロゾルの方が子午面循環の変化等、気候変動の影響をより強く受けるためと考えられる。化学組成については、間氷期において $t\text{-Fe}/t\text{-Al}$ 比と $t\text{-Mn}/t\text{-Al}$ 比の増加がみられた。これは温暖湿潤な環境の下で化学風化を受けた粒子の供給を示すものと考えられる。また、MBE を境として $t\text{-Fe}/t\text{-Mn}$ 比の変動パターンに変化が見られ、

金属全濃度分析による化学組成解析がエアロゾル古気候変動のプロキシとして有用である可能性を示した。

図 2 には SEDome コアの Na、Mg、Al および Ca 全濃度の過去 60 年の変動を示した。これらの結果から以下のことがわかった。1960 年から 1975 年にかけて金属全濃度のバックグラウンド値の上昇が見られた。原因としては、この時期、ヨーロッパや北米で大量の化石燃料が消費されていた一方、汚染対策は十分に進んでいなかったため、文明圏における石炭の大量消費によるフライアッシュ等、大気汚染物質のグリーンランドへの供給量が増えていた可能性が考えられる。2010 年に金属全濃度のピークが見られた。ピーク時の $t\text{-Mg}/t\text{-Al}$ 比と $t\text{-Ca}/t\text{-Al}$ 比のばらつき (1σ) は、それぞれ 0.09、0.26 であり、ピークを除いた時期のそれぞれの比のばらつき、0.21、1.38 と比べて小さかった。金属成分組成のばらつきがそれ以外の時期におけるばらつきに比べて小さかったため、この濃度ピークは、組成変動の小さいエアロゾルの突発的大量供給によって形成されたと考えた。可能性としては、2010 年のエイヤフィヤトラヨークトル山の大規模火山噴火が考えられる。2010 年から 2015 年にかけて金属全濃度の上昇が見られた。近年、グリーンランド沿岸部では氷床融解が急速に進行していることが報告されているため、氷床の縮小に伴い増加した沿岸露岩部からの鉍物エアロゾル供給が増加したことが原因の一つとして考えられる。

以上の成果は未だ論文発表に至っていないが、現時点で、DF コアに関する成果は *Journal of Geophysical Research* 誌に投稿中、SEDome コアに関する成果は投稿準備中である。

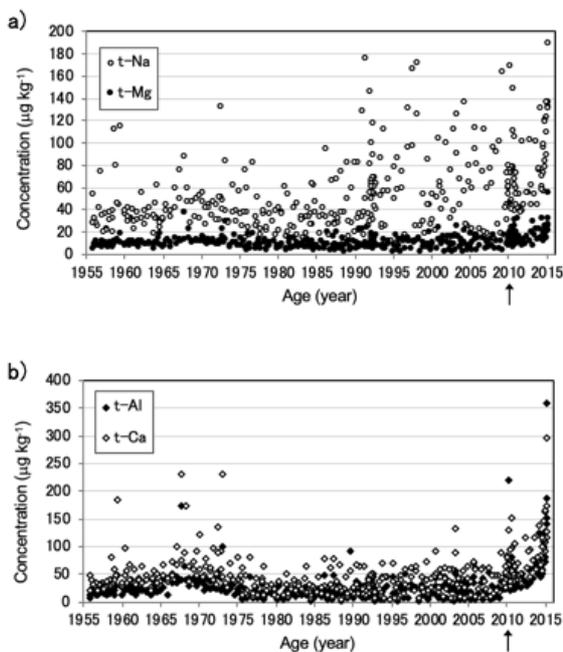


図 2 グリーンランド SEDome における過去 60 年の a)Na と Mg、b)Al と Ca の全濃度 (t-M) の変動。横軸の矢印は 2010 年のピーク位置を示す

【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(3), 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(22), 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(3), 207-221.

アジアダスト長距離輸送の十年スケール変動の解明～カナダ雪氷コアを用いた解析より～

◎長島 佳菜 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門・技術研究員

(国立極地研究所)

東 久美子 教授

平成 29 年～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

1. はじめに

東アジアの広域に広がる砂漠域を起源とするダストは、数千～数万 km という長距離に渡って輸送されることが知られるようになってきた (例えば Uno et al., 2009)。長距離ダストは放射強制力 (Tegen et al., 1996) や海洋の基礎生産に与える影響 (Maher et al., 2010) 等、環境への影響が注目されるが、これまでその輸送量、輸送プロセス、季節性に関する十分な観測データは得られていない。一方、2002 年にカナダの Mt. Logan で採取された雪氷コアを用いて、Ca イオン濃度を調べることで、カナダへと長距離輸送されたアジアダストの量を長期 (およそ 1910 年～2001 年) に渡って復元しようとする試みが行われてきた (東ほか、未発表)。東らによるこれまでの研究からは、過去 100 年あまりの間の雪氷コア中の Ca イオン濃度は数十年規模変動が卓越し、PDO (太平洋十年規模変動) インデックスの年平均値と負の相関を示すことが分かった。すなわち PDO インデックス値が負の年は、アジア内陸部からカナダへのダストの輸送が活発になっていることが示唆される。その理由として、PDO インデックスが負の年には、アリューシャン低気圧の弱化に伴い、北太平洋上のダスト輸送に寄与する偏西風ジェットが高緯度側で強くなる可能性が挙げられる。その一方で、ダストの発生源となる砂漠域において、ダスト発生頻度が十年規模で変動する可能性もある。そこで、ダスト輸送の十年規模変動のメカニズム解明に向け、本課題では雪氷コアを濾過したフィルター試料を用いて、石英の粒子単位のカソードルミネッセンス分析を行い、ダストの供給源推定を行った。また Ca イオン濃度の追加計測を行って長期データの精度を

向上させ、更に雪氷コアを切り出して中に含まれる粒子の粒径別個数を測定し、Ca イオン濃度が本当に長距離輸送されたダスト量を反映しているのか否かを検証した。

2. 対象試料・分析方法

Mt. Logan・King Col で採取された雪氷コアの 1909 年～2001 年に該当する試料の一部 (これまでの分析での精度が悪かった試料) について、国立極地研究所のイオンクロマトグラフ (DX-500(日本ダイオネクス製)) を用いた Ca イオン濃度分析を行った。また Ca イオン濃度が大きく異なる複数試料を用いて、精密粒度分布測定装置 (Multisizer4 (ベックマンコールター)) を用いた粒径別の粒子数分析を行った。更に 1941, 1951, 1967, 1983 年の春のダストピークに相当する試料、および季節変化を見るために 1983, 1986 年に相当するそれぞれ 7 試料について、海洋研究開発機構の SEM 装置 (Quanta 450 FEG (FEI)) に接続した CL 装置 (Mono CL4 (Gatan)) を用いて個別石英のカソードルミネッセンス分析を行った。

3. Ca イオン濃度はダスト含有量を反映するか?

図 1 に示されるように、各試料に含まれる粒子の体積は Ca イオン濃度と比例していることが分かった。また各試料の粒度分布 (体積頻度) からは、直径 2-3 μm にメジアン径を持つ分布が示され、ダストのように長距離輸送された細粒粒子が卓越していることが明らかになった。一方で、10 μm 近くの粗粒粒子が比較的多く観察された試料もあり、Mt. Logan 周辺の基盤岩からの寄与も存在することが明らかになった。しかしながら、周辺からの寄与が予

測される試料は、粒子の体積に比べ Ca イオン濃度が低い傾向があり（図 1 #491-493）、Mt. Logan 周辺から運ばれた粗粒粒子の Ca イオン濃度への寄与が少ない事が予想される。これらの検討の結果、Ca イオン濃度の十年規模変動は、ダスト量の変動を反映している可能性が高い。

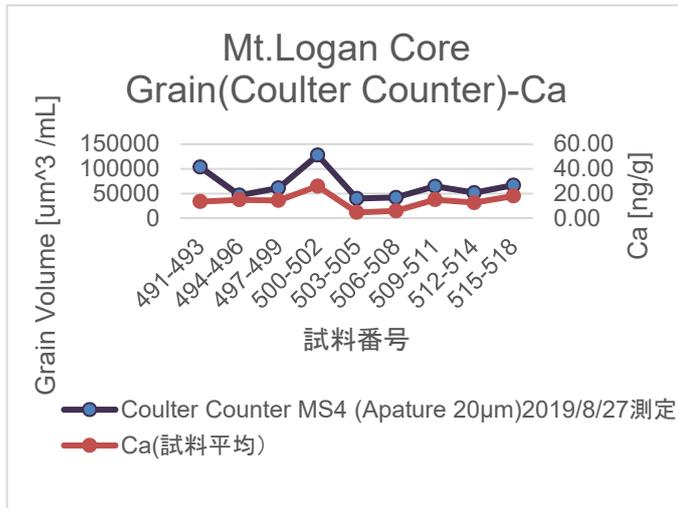


図 1. Mt. Logan コアの Ca 濃度および粒子

4. 十年規模の Ca 濃度（ダスト輸送量）変動は供給域の変動と大気循環場の変動どちらを反映？

Ca 濃度の十年規模変動における極大値が測定された 1951, 1967 年と極小値が測定された 1941, 1983 年の試料について、Nagashima et al. (2017)の方法

を基に、個別石英粒子のカソードルミネッセンス分析の結果を解析し、東アジアの主な 2 つの砂漠域（タクラマカン砂漠・ゴビ砂漠）からのダスト寄与率の違いを検証した。その結果、1941, 1951, 1967, 1983 年の試料はそれぞれタクラマカン砂漠からのダストの寄与が卓越することがわかった。この結果は、ダスト輸送量の増減がダスト供給源のシフトによるものではないことを示す。一方、タクラマカン砂漠およびゴビ砂漠におけるダスト発生頻度（例えば Qian et al., 2002 : National Agency for Meteorology and Environment Monitoring of Mongolia）も Ca 濃度変動と一致していないことから、供給源域における環境変化では Ca 濃度変化は説明できない。そのため、ダストの運搬を担う偏西風経路がアリューシャン低気圧の強弱と共に変動することが、Mt. Logan に輸送されるダスト量変動を引き起こす主要な要因である可能性が高い。

一方、1983, 1986 年の各試料についてカソードルミネッセンス分析を行った結果、Mt. Logan 試料に含まれる粒子は一年を通じてタクラマカン砂漠からの寄与が卓越することが分かった。この結果は、タクラマカン砂漠で発生したダストが、春先の大規模イベント以外にも、一年を通じてバックグラウンド的にカナダまで輸送されていることを示唆する。

[参考文献]

- Maher, B. A., J. M. Prospero, D. Mackie, D. Gaiero, P. P. Hesse, and Y. Balkanski (2010), Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum, *Earth Sci. Rev.*, 99, 61–97, doi:10.1016/j.earscirev.2009.12.001.
- Nagashima, K., H. Nishido, M. Kayama, Y. Kurosaki, S. Ohgo, and H. Hasegawa (2017), Composition of Asian dust from cathodoluminescence spectral analysis of single quartz grains, *Geology*, 45(10), 879–882.
- Qian, W., L. Quan, and S. Shi (2002), Variations of the dust storm in China and its climate control, *Journal of Climate*, 15, 1216–1229.
- Tegen, I., A. L. Andrew, and I. Fung (1996), The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils, *Nature*, 380, 419–422.
- Uno, I., K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara, and A. Shimizu (2009), Asian dust transported one full circuit around the globe, *Nature Geoscience*, 2, 557–560.

[研究発表]

- ・「石英個別粒子のカソードルミネッセンス分析を用いたアジアダスト識別と供給源推定：氷床コアおよび海洋・セジメントトラップ試料への応用」長島佳菜、西戸裕嗣、鹿山雅裕、大郷周平、東久美子、藤木徹一、長谷川精、JpGU2018、2018年5月23日（口頭）
- ・「石英個別粒子のカソードルミネッセンス分析に基づく、カナダ雪氷コア中のアジアダストの供給源推定とその季節変化」長島佳菜・東久美子、JpGU2019、2019年5月30日（ポスター）

吹雪粒子からの昇華による大気への水蒸気供給の推定

◎杉浦 幸之助 富山大学学術研究部・教授

(国立極地研究所)

平沢 尚彦 助教

山内 恭 特任教授

平成 29 年～令和元年 (3 年)

[研究成果]

飛雪による視程障害を伴った暴風雪であるブリザードは、南極大陸に多く見られる。吹雪の研究は多くの研究者によって詳しくなされているが、ブリザードに関する先行研究は限られている (e.g. Nishimura and Nemoto, 2005)。また、低気圧の通過に伴って発生するブリザードでは気温が上昇する一方で、カタバ風によって発生するブリザードでは気温が下降することが報告されている (気象庁, 2008)。近年では、年十数回程度の総観規模擾乱によって効率的に水蒸気が南極沿岸部から内陸部へと輸送されるという認識が広がりつつある (Hirasawa et al., 2000)。さらに、再解析データセットを用いて全球スケールで吹雪の発生に関して解析した研究によると、南極は活発に吹雪が発生している地域の 1 つであることが報告されている (Sugiura and Ohata, 2008)。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、本研究では吹雪粒子からの昇華による大気への水蒸気供給はどれくらいなのかを推定することを目的とする。

1978 年から 2018 年までの南極観測隊報告書からブリザードの記録を抽出し、1 時間毎に観測されている気象庁南極観測データを使用した。また、2000 年から 2015 年までの気象庁南極観測データからブリザードの開始および終了日時を抽出し、その抽出した日時をもとにブリザード開始 24 時間前から終了 24 時間後までの水蒸気量の時間変動を解析した。さらに、大気へ水蒸気を供給する雪面の状況を探るために、第 59 次南極地域観測隊として参加した際の往復トラバース観測時に連続記録した雪面画像データをもとに南極沿岸部と内陸ドーム基地間の雪面状況を解析して、堆積削剥の分類を行った。

図 1 に 1978 年から 2018 年までの昭和基地におけるブリザード発生回数を示す。ABC は強弱の順の強度階級である (A 級: 視程 100m 未満, 平均風速 25m/s 以上, 継続時間 6 時間以上, B 級: 1km 未満,

15m/s 以上, 12 時間以上, C 級: 1km 未満, 10m/s 以上, 6 時間以上)。各級合計のブリザード発生回数をもっとも多いのは 1982 年の 42 回であり、もっとも少ないのは 1988 年の 9 回であった。

図 2 にブリザード発生前後の水蒸気密度の時系列変化の例を示す。いずれのブリザード階級でも、ブリザード発生前に水蒸気密度が上昇している様子がわかる。これは、低緯度からの湿った気流が流入することや、風による擾乱によって接地逆転層が混合されることで雪粒から盛んに昇華蒸発するためではないかと考えられる。また、風速が大きくなるほど空气中を舞う雪粒の空間密度は増すことから、さらに雪粒からの昇華蒸発は促進すると考えられる。一方、同じ階級であっても水蒸気密度が数倍異なっている様子がわかる。これは、同じブリザード階級であっても風速範囲には幅があり、そのため空中を舞う雪粒の数が異なることが原因の 1 つに挙げられる。また、同じ風速、同じ飛雪流量であっても雪粒の粒径が異なると空中を舞う雪粒の数が異なることも原因と考えられる。

2017 年度夏の南極氷床沿岸部 (南緯 69°) と氷床頂部 (南緯 77°) の間の雪面模様を削剥と堆積の 2 パターンに分け、雪上車でトラバースした往路と復路のそれぞれの緯度ごとの出現頻度を調べた。目視による雪面分類のために日にちによるばらつきがあるものの、沿岸部にかけて堆積の頻度が増す一方で削剥が減少した。頂部にかけても同様に堆積の頻度が増す一方で削剥が減少した。南緯 73°から 75°にかけて堆積の頻度が最小となり、対応して削剥の頻度が最大に達していた。古川ら (2008) の先行研究による斜面下降風の地点とおおよそ一致している。また、往路の 11-12 月から復路の 1 月とでは、削剥が最大 (あるいは堆積が最小) となる緯度が上昇していた。東南極域の沿岸部から頂部のルートを対象にして雪面の堆積削剥環境を解析した本結果

から、大気への水蒸気の供給源の一つである積雪域のなかで大きく削剥される地点の緯度が夏季へと季節進行に伴い高くなることを示唆している。大気と雪面との相互作用の結果として形成される雪面模様の緯度分布には季節進行に伴う違いが見られたものの、目視による解析のために十分な検証が必要である。

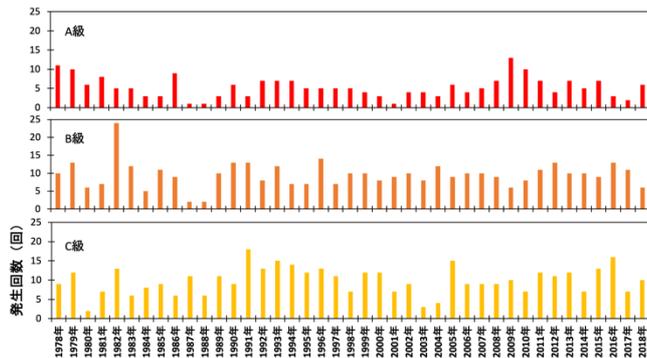


図1 昭和基地における階級別ブリザード発生回数。

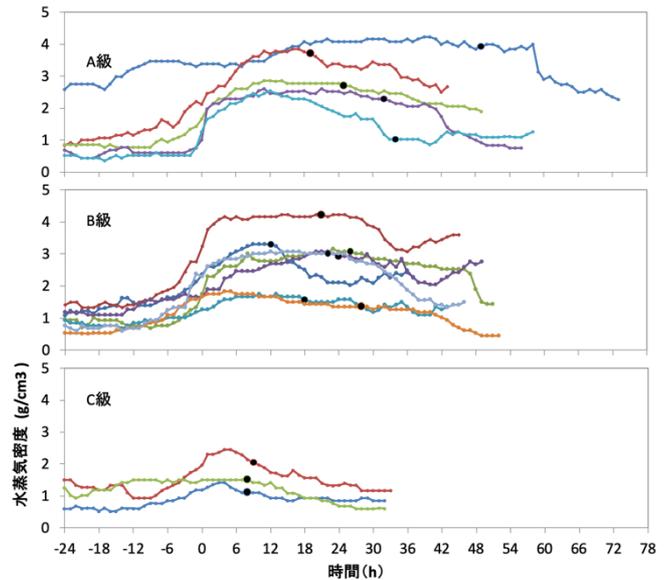


図2 ブリザード発生前後の水蒸気密度の時系列変化の例(2008年)。ブリザード発生時刻は0時、終了時刻は●印。

[参考文献]

- 1) 古川晶確・本山秀明・亀田貴雄, 2008; 沿岸からドームふじへ至るルート沿いの光沢雪面の分布特性, 南極資料, 52, p232-p237.
- 2) Hirasawa, N., H. Nakamura, T. Yamanouchi, 2000: Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. *Geophysical Research Letters*, 27, 1911-1914.
- 3) 気象庁, 2008; 南極気象観測五十年史, 気象庁, 255pp.
- 4) Nishimura, N., M. Nemoto, 2005; Blowing snow at Mizuho station, Antarctica, *Philosophical Transactions of the Royal Soc. of London, A*, 363, 1647-1662.
- 5) Sugiura, K., T. Ohata, 2008; Large-scale characteristics of the distribution of blowing snow sublimation. *Annals of Glaciology*, 49, 11-16.

[研究発表]

- 藤田秀二, 川村賢二, 大野浩, 大藪幾美, 中澤文男, 杉浦幸之助, 阿部彩子, 津滝俊, 小長谷貴志, 齋藤冬樹, Ralf Greve, 本山秀明, 東久美子, Kenichi Matsuoka; 東南極 Dome Fuji 近傍の新たな深層氷床コア掘削候補地の探索とその今後の展望について, 雪氷研究大会 (2018・札幌), 2018年誌上開催, 札幌.
- 美濃部祥, 杉浦幸之助, 平沢尚彦, 山内恭; 南極昭和基地におけるブリザードの変動特性, 雪氷研究大会 (2017・十日町), 2017年9月26日, 十日町.
- Minobe, S., K. Sugiura, N. Hirasawa, T. Yamauchi; Water vapor variation of blizzard at Syowa Station, Antarctica, 第8回極域科学シンポジウム, 2017年12月5日, 立川.
- Sugiura, K., N. Hirasawa, N. Kurita, K. Kawamura, F. Nakazawa, H. Ohno, S. Fujita, I. Oyabu, T. Yamanouchi, H. Motoyama; Fixed point observation for daily snow surface monitoring along a latitudinal transect from the coast to the inland of Antarctica using camera images, 第10回極域科学シンポジウム, 2019年12月4日, 立川.
- Sugiura, K., K. Watanabe, N. Hirasawa, K. Kawamura, F. Nakazawa, H. Ohno, S. Fujita, I. Oyabu, T. Yamanouchi, H. Motoyama; Estimation of snow surface patterns from the coast to the inland, Dome-Fuji Station, of Antarctica, using camera images, JpGU Meeting 2019, 2019年5月28日, 千葉.

(別紙) 参加者一覧 (研究協力者)

平成 29 年度

美濃部 祥

富山大学理学部地球科学科・学部生

平成 30 年度

渡辺 健吾

富山大学理学部地球科学科・学部生

令和元年度

富田 博隆

富山大学理学部地球科学科・学部生

有機物質によるエアロゾル粒子の光学特性変化の評価

◎古賀 聖治 産業技術総合研究所環境管理研究部門 主任研究員

(国立極地研究所)

平沢 尚彦 助教(H31 年度)

塩原 匡貴 准教授(H29-H30 年度)

平成 29 年～令和元年(3 か年)

【研究成果】

1. 目的

エアロゾル粒子の光学特性は、粒子中の化学組成と粒子の個数濃度に依存する。エアロゾル粒子中には海洋起源の有機物質も含まれていることがわかってきた。これには揮発性・不揮発性の物質が存在する(e.g., Rinaldi et al., 2010, Dall'osto et al., 2012)。

エアロゾル粒子に含まれる揮発性有機物質が粒子の光学特性に与える影響を評価するため、試料空気から揮発性有機物質を除去した場合と除去しなかった場合でエアロゾル粒子の光学特性を比較した。

2. 観測手法

砕氷艦「しらせ」の第一観測室にエアロゾル粒子の消散・散乱係数(それぞれ CAPS-EXT((株)汀線科学研究所)とネフェロメータ(TSI, Model3563))、エアロゾル粒子の個数濃度(TSI, Model3330)の各計測装置を設置し、「しらせ」の大井埠頭停船中および国内訓練航海を利用して観測を行った。

ネフェロメータの校正作業を毎年の JARE 航海の前後で実施した。両者の校正データを比較した結果、装置の検出感度にほとんど変化がないことを確認した。また、経年変化もほとんど認められなかった。

試料空気から揮発性有機物質を除去するために、

活性炭繊維(Kynol、群栄化学(株))を使用した。これは、粒状活性炭と比べて、揮発性有機物質の吸脱着速度に優れ、吸着量も多い。これを長さ 50 cm、外径 1/2 inch のステンレス管に挿入し、内壁に密着させ、内径が 1/4 inch になるように調整した。これは管内の空気の流れが層流になるように、試料空気を通る配管の内径と同じにするためである。このステンレス管を TSI Model3330 あるいは CAPS-EXT の上流側に 30 分から 1 時間設置して計測値の変化を観測した。なお、CAPS-EXT のインレット部には、PM2.5 サイクロンを取り付けた。

使用済みの活性炭繊維から、揮発成分を除くために、ステンレス管にリボンヒーターを巻き付けて約 100℃に保持し、フィルターでエアロゾル粒子を除去した空気を 30 分間流した。

3. 結果

試料空気は「しらせ」の露点甲板に設置した直径 20 cm、長さ 4 m の採気管から引き込まれ、第一観測室の天井に設置した捕集管を通して、各装置に吸引される。平成 29 年度は大井埠頭停泊中の「しらせ」艦内でエアロゾル粒子の捕集効率を計測した。平成 30 年度は「しらせ」の大井埠頭停泊中に、エアロゾル粒子の消散・散乱係数、エアロゾル粒子の個数濃度を

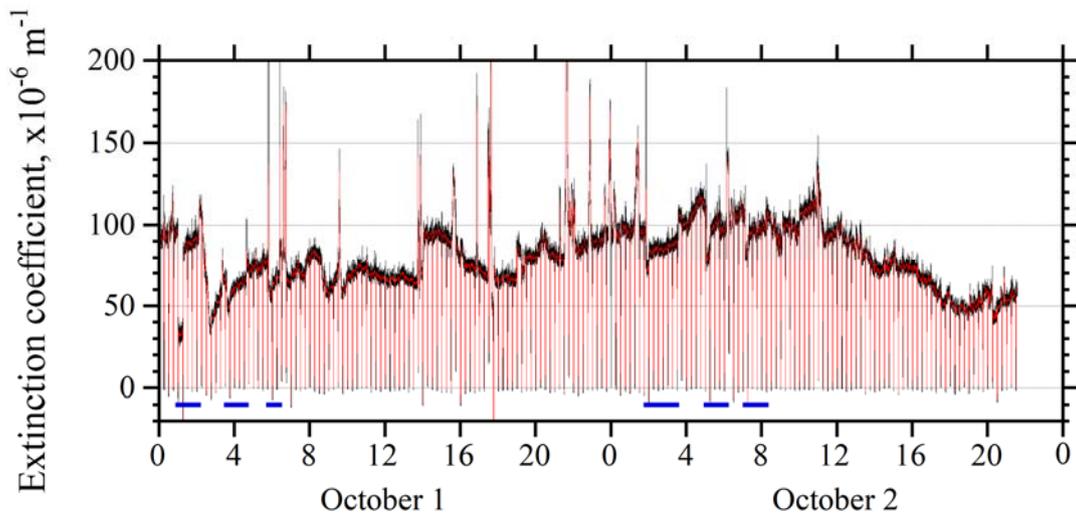


図 1. CAPS-EXT を用いて計測した消散係数の変化(2019 年 10 月 1 日から 2 日 (UTC))

太い青線は活性炭繊維を用いた期間。赤線は 1 秒間隔の計測値、黒線は 1 分移動平均値。

計測した。そのため、都市大気中のエアロゾル粒子を対象とした計測になった。ここでは、活性炭繊維を使用してもエアロゾル粒子の個数濃度にほとんど変化は見られなかった。

図 1 は、平成 31 年度に「しらせ」の国内訓練航海中、CAPS-EXT を用いて消散係数を計測した例である。計測時間間隔は 1 秒であり、15 分間隔でエアロゾル粒子を除去した空気を流してバックグラウンドを計測した。図中では、活性炭繊維を用いて消散係数を計測した期間を太い青線で示している。

環境大気中の消散係数の自然変動そのものが大きい。そのため、揮発性有機物質の除去による消散係数の変化を定量的に示すことは難しい。ただし、10 月 2 日 2～3 時にかけての低下は明瞭である。揮発性有機物

質の除去により、エアロゾル粒子の直径が減少し、それに伴って消散係数が減少したと考えられる。

4. まとめと今後の展望

試料空気からの揮発性有機物質の除去において、都市大気ではエアロゾル粒子の個数濃度はほとんど変化しなかった。しかし、海洋大気では消散係数が減少した。このことは、都市大気とは異なり、海洋大気中のエアロゾル粒子に揮発性有機物質が含まれていることを示唆している。

JARE 航海ではエアロゾル粒子の消散・散乱係数、個数濃度を計測している。そこで、今後の課題は、これまでに取得したデータを解析することで、複素屈折率を推定して、その値から有機物質がエアロゾル粒子の光学特性に与える影響を調査することである。

【参考文献】

Rinaldi et al. (2010), Primary and Secondary Organic Marine Aerosol and Oceanic Biological Activity: Recent Results and New Perspectives for Future Studies, *Advances in Meteorology*, Vol., 2010, Article ID 310682, 10 pages doi:10.1155/2010/310682.

Dall'Osto, M., et al. (2012), Nitrogenated and aliphatic organic vapors as possible drivers for marine secondary organic aerosol growth, *J. Geophys. Res.*, 117, D12311, doi:10.1029/2012JD017522.

アイスコア試料の高精度・大量測定に備えた水の同位体標準試料の作成

◎植村 立 名古屋大学環境学研究科・准教授

(国立極地研究所)
川村 賢二 准教授
東 久美子 教授

平成29年～令和元年（3か年）

[研究成果]

・目的

南極アイスコアの分析において、水の水素・酸素安定同位体比は気温復元に必要な重要な指標である。国立極地研究所をはじめとする研究グループでは、過去100万年間の気候復元を目指してドームふじ第3期コアを掘削する予定である。このような新規コアに加えて、既存のドームふじ第2期コアの分析には、大量の標準試料の長期的な維持管理という問題が懸念されている。試料の測定に、連続化学分析システム(CFA)を用いて測定する場合は、さらに多くの標準試料が必要になる。そこで、標準試料の適正な測定・管理体制の構築と最新の分析機器を用いた3酸素同位体の標準値の校正、を目的に共同研究を行った。

・作成

水の同位体用ワーキングスタンダードとして、純水(Purew16)、グリーンランドの降雪を融解した水(Greenland16)、南極ドームふじの降雪を融解した水(Dome16)をそれぞれ20Lずつ作成した。

作成した水は、密閉性の高いガラス瓶(5 L, 500 mL)に保存するとともに、一部をガラスアンプル(20 mL)に封緘した(図1)



図1 作成した水の同位体ワーキングスタンダード

・同位体比分析

作成した水の同位体ワーキングスタンダードの測定は国立極地研究所と琉球大学理学部で行う予定であった。期間中に代表者が異動したことにより、琉球大学で実施予定分については、名古屋大学環境学研究科で測定した。

国立極地研究所においては、安定同位体比質量分析計(Delta V, Thermo Fisher Scientific)と同位体比平衡装置を用いて VSMOW2、VSLAP2 と各種ワーキングスタンダードを同一バッチにセットして測定を行った。同位体交換平衡法。分析精度(1σ)は、δD で0.5‰、δ¹⁸O で0.05‰程度である。

名古屋大学においては、分光式(CRDS)同位体比分析計(Picarro 2130i, Picarro Inc.)と気化装置を用いて、各種ワーキングスタンダードの分析を行った。分析精度(1σ)は、上記の平衡法と同等である。

・結果

作成したワーキングスタンダードの同位体比の分析結果を表1に示した。それぞれの手法の分析データは、相互の誤差範囲で一致していた。なお、表中のデータ予備的なものであり、分光式による分析回数を4倍程度に増やすことで、最終的な校正値を決定する予定である。

表1 予備的な分析結果

	平衡法		CRDS	
	δD	δ ¹⁸ O	δD	δ ¹⁸ O
Purew16	-55.5	-8.52	-55.1	-8.41
Greenland 16	-238.4	-31.17	-237.4	-31.10
Dome16	-414.6	-53.33	-415.0	-53.39

表中の単位は全て‰ (vs. VSMOW)

(裏面に続く)

今後、今回作成したワーキングスタンダードを国内で共同研究を行っている各研究所・大学において相互分析することで研究コミュニティ内のデータの質の向上に貢献したい。

[参考文献]

- 1) 植村 立, 南極アイスコアの安定同位体比解析による周辺海域の温度復元, *Isotope News*, 762,18-21
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201904_TRACER_UEMURA.pdf

[研究発表]

- 1) Ryu Uemura, Hideaki Motoyama, Valérie Masson-Delmotte, Jean Jouzel, Kenji Kawamura, Kumiko Goto-Azuma, Shuji Fujita, Takayuki Kuramoto, Motohiro Hirabayashi, Takayuki Miyake, Hiroshi Ohno, Koji Fujita, Ayako Abe-Ouchi, Yoshinori Iizuka, Shinichiro Horikawa, Makoto Igarashi, Keisuke Suzuki, Toshitaka Suzuki & Yoshiyuki Fujii, Asynchrony between Antarctic temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years, *Nature Communications*, 9, 961, doi:10.1038/s41467-018-03328-3
- 2) Goto-Azuma, K., M. Hirabayashi, H. Motoyama, T. Miyake, T. Kuramoto, R. Uemura, M. Igarashi, Y. Iizuka, T. Sakurai, S. Horikawa, K. Suzuki, T. Suzuki, K. Fujita, Y. Fujii, Y. Kondo Reduced marine phytoplankton sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials, *Nature Communications*, 10, 3247, doi.org/10.1038/s41467-019-11128-6

両極の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 三重大学大学院生物資源学研究科・准教授
 (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
 平成29年～令和元年(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。また、研究期間中に発生した異常な気象についても解析した。例えば、2017年日本を始め世界各地、極端気象が頻発し災害をもたらした。また全球年平均気温は2016年に次いで過去2番目の高温を記録した。このような状況下で発現した極端気象事例に関して、上空の寒気を伴った低気圧である「寒冷渦」に着目して解析を進めた。寒冷渦は力学的には渦位を指標として追跡することが可能で、新潟大学では自動的に渦位を計算して表示する「顕著大気現象追跡監視表示システム」の運用を開始し、極端気象事例発現に伴う渦位挙動監視を開始した。以下に代表的な研究成果の例を数点挙げる。

【北極振動と南極振動と一緒に変動していることを発見】多発する異常気象のいくつかは北極振動が原因であり、日本の異常気象が遠い南極と関係を持つことを初めて示唆した研究。上空のオゾン層が北極振動と南極振動の同期の仲立ちとなっていると考えられる (Tachibana et al., 2018)。

【北極温暖化の新プロセス シベリアからの「atmospheric river」が北極上空を熱する】ロシア砕氷船から海水上で気球を打ち上げ、北極温暖化の説明に資する新説を見いだした。図1のようにシベリア上空の水蒸気が、川のように北極に流れ込み、その atmospheric river が、海水の影響で冷やされた海水上の冷たい大気(cold dome)の上を極向きにグライダーのように滑翔し、北極中心部の上空に到達し雲を発生させ、雲の発生に伴う凝結熱によって北極中心部の上空の大気を暖める。(Komatsu et al., 2018)

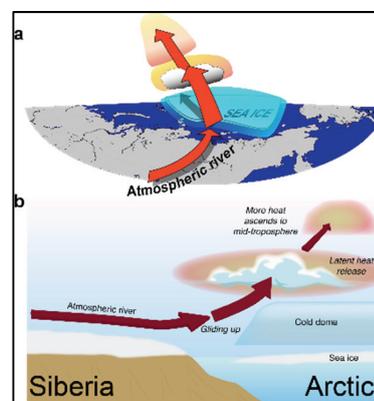


図1 シベリアからの「atmospheric river」が北極上空を熱するプロセスの模式図 (Komatsu et al., 2018)

【負の北極振動と中緯度寒波の新因 「北極海アラスカ沖に空いた氷の巨大な穴(warm hole)】2017-18冬は、西日本を中心として32年ぶりの記録的大寒波年となった。一方、北極ではアラスカ沖の北極海の海水が観測史上最も少なく、「大穴」のように空いた海水が少ない場所の上空の気温が観測史上最高となりました(図2参照)。これらの遠く離れた記録的な異常の間には密接な関係があることが分かった。この「海水の巨大な穴」を、暖穴(warm hole)と命名し、この暖穴が、遠く離れた日本の記録的寒波の遠因となる説を提唱した。

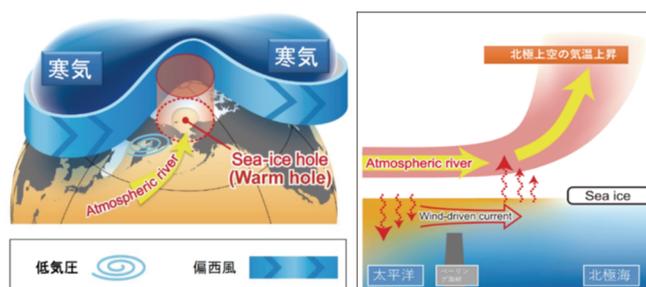


図2 (左) warm hole が寒波をもたらす模式図。(右) 大気・海洋・海氷の正のフィードバックの模式図。アラスカから北極にかけての南北鉛直断.Tachibana et al., (2019)から引用

【バレンツ海の水氷分布が低気圧のライフサイクルに及ぼす影響】領域気象モデルを用いて、2011年1月にバレンツ海で発生した低気圧の高解像度数値シミュレーションを行い、バレンツ海の水氷分布が低気圧のライフサイクルに及ぼす影響について検討した。水蒸気量の変動に大きな影響をあたえることから、北極域の気候変動を考える上で重要である。本研究では2011年1月にバレンツ海で観測に成功した低気圧の発達メカニズムを数値シミュレーションによって調べた。北極域における低気圧の動態は北極域におけるこの低気圧は、発達期には熱帯低気圧的な暖気核をもち、最盛期から成熟期にかけては温帯低気圧的な構造をもつことと、最盛期以降3日程度持続するという寿命の長さが特徴であった。シミュレーションの結果から、発生から発達期までは南方からの湿潤気塊の移流の寄与が大きく、成熟期には局所的な蒸発の効果が重要であることと、スピッツベルゲン島南部の水氷縁周辺の水氷からの蒸発が、凝結加熱と暖気移流を強化し、その結果北極低気圧を長寿命化させることが明らかになった。さらに、水氷分布を人為的に改変する感度実験を行い、水氷分布が低気圧の発達に及ぼす影響を調べた。水氷が特に少なかった2006年の水氷分布を用いた場合、再現実験と比べ低気圧の中心気圧が2hPa程

度下がり、海上風も5m/s程度強化された。海面気圧の時間発展方程式を使った診断によって低気圧強化のメカニズムについて調べた。水氷分布を減らすと元々水氷であった海域からの海面熱フラックスが強化される。これによって生じた暖気移流が低気圧強化の主な要因であることが分かった。

【北太平洋亜寒帯前線上の十年規模変動】北太平洋亜寒帯前線上の十年規模変動に伴う海面水温の正偏差を与えた大気大循環モデル実験を行い、北太平洋上において高気圧性循環応答を得た。さらにこの循環偏差の維持メカニズムを、エネルギー収支の観点から明らかにした。(Okajima et al., 2018)

【突然昇温や極渦強化イベント】北極域成層圏循環で観測される突然昇温や極渦強化イベントなどの極端な現象の、持続期間ごとの特徴や、その持続期間を左右する対流圏循環の特徴について明らかにした。(Orsolini et al., 2018)

【日本海側降水量の増加傾向】近年の初冬に確認されている、日本海側降水量の増加傾向が、熱帯東部インド洋と海洋大陸付近の増加傾向と関連していることを示した。具体的には、後者に伴う非断熱加熱偏差が、亜熱帯ジェット上のロスビー波を励起し、この伝播によって日本上空の気圧の谷が深まることを示した。(Yasunaga et al., 2019)

[研究発表]

1. Tachibana, Y., K. K. Komatsu, V. A. Alexeev, L. Cai, and Y. Ando, Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017-18, *Scientific Reports*, 9, 5567, DOI: 10.1038/s41598-019-41682-4, 2019
2. Yamazaki, K., M. Ogi, Y. Tachibana, T. Nakamura, and K. Oshima, Recent breakdown of the seasonal linkage between the winter North Atlantic Oscillation/Northern Annular Mode and summer Northern Annular Mode, *Journal of Climate*, 32, 591-605 DOI:10.1175/JCLI-D-17-0820.1, 2018
3. Ando, Y., K. Yamazaki, Y. Tachibana, M. Ogi, and J. Ukita, Detection of a climatological short break in the polar night jet in early winter and its relation to cooling over Siberia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 12639-12661, <https://doi.org/10.5194/acp-18-12639-2018>, 2018
4. Komatsu, K. K., V. A. Alexeev, I. A. Repina, and Y. Tachibana, Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air, *Scientific Reports*, 8, 2872, doi:10.1038/s41598-018-21159-6, 2018
5. Fathrio, I., S. Iizuka, A. Manda, Y.-M. Kodama, S. Ishida, Q. Moteki, H. Yamada, and Y. Tachibana, Assessment of western Indian Ocean SST bias of CMIP5 models, *J. Geophys. Res.*, 122, doi:10.1002/2016JC012443., 2017
6. Hoshi, K., J. Ukita, M. Honda, T. Nakamura, K. Yamazaki, Y. Miyoshi, and R. Jaiser, 2019: Weak stratospheric polar vortex events modulated by the Arctic sea ice loss. *J. Geophys. Res.*, **124**, 858-869
7. Oshima, K., K. Ogata, H. Park, and Y. Tachibana, 2018: Influence of atmospheric internal variability on the long-term Siberian water cycle during the past 2 centuries, *Earth System Dynamics*, 9, 497-506.
8. Tachibana, Y., Y. Inoue, K. K. Komatsu, T. Nakamura, M. Honda, K. Ogata, and K. Yamazaki, 2018: Interhemispheric synchronization between the AO and the AAO, *Geophysical Research Letters*, 45, 13477-13484.
9. Yamanouchi, T., 2019: Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard, *Polar Science*, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.10.009>.
10. Yamazaki, A., M. Honda, and H. Kawase, 2019: Regional snowfall distributions in a Japan-Sea side area of Japan associated with Eurasian jet variability and Siberian blocking. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 205-226.
11. Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, A. Kuwano-Yoshida, B. Taguchi, M. Mori, and Y. Kosaka, Mechanisms for the maintenance of the wintertime basin-scale atmospheric response to decadal SST variability in the North Pacific subarctic frontal zone, *Journal of Climate*, 2018, Vol. 31, No. 1, 297-315.
12. Orsolini, Y. J., K. Nishii, H. Nakamura, Duration and decay of Arctic stratospheric vortex events in the ECMWF seasonal forecast model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144, 2876-2888.
13. Yasunaga, K., A. Hamada, and K. Nishii, An increasing trend in the early-winter precipitation around Japan and its relationship with enhanced heating over the tropical eastern Indian Ocean, *SOLA*, 2019, 15, 238-p243.
14. Manda, A., T. Mitsui, J. Inoue, M. E. Hori, K. Kawamoto, and K. K. Komatsu, 2020: 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.
15. Iijima, Y. and M. E. Hori, Cold air formation and advection over Eurasia during “dzud” cold disaster winters in Mongolia, *Natural Hazards*, 2017, DOI: 10.1007/s11069-016-2683-4
16. Iijima, Y., H. Park, P. Ya. Konstantinov, G. G. Pudov et al., Active layer thickness measurements using a handheld penetrometer at boreal and tundra sites in eastern Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 28, 306-313. DOI: 10.1002/ppp.1908
17. Erdenebadrakh Munkhjargal, M. Shinoda, Y. Iijima, B. Nandintsetseg, Recently increased cold air outbreaks over Mongolia and their specific synoptic pattern, *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.6531>, 2020

地中レーダー (GPR) を用いた南極氷床, 山岳氷河, 多年性雪渓の内部構造探査に関する研究

◎福井 幸太郎 富山県立山カルデラ砂防博物館・主任学芸員
 飯田 肇 富山県立山カルデラ砂防博物館・学芸課長
 (国立極地研究所)
 藤田 秀二 教授
 平成29年～令和元年(3年間)

[研究成果]

1. はじめに

国立極地研究所所有の地中レーダー (GPR: GSSI 社製 SIR3000) は第 48/49 次隊の日本スウェーデン内陸トラバース旅行や第 54 次隊の内陸旅行の際にフィルン層の内部構造探査に使われた。今後も氷河・氷床の内部構造探査に積極的に活用していく予定である。

この地中レーダーによる氷河観測の有効性や限界について検討するために 2017～2019 年 5～9 月にかけて飛騨山脈北部の氷河・雪渓で地中レーダーを用いた内部構造探査を実施した。使用するアンテナの周波数は 100MHz である

2. 結果

【唐松沢氷河】 飛騨山脈後立山連峰の唐松岳 (2696m) から北東にのびる唐松沢の谷底にある多年性雪渓。長さ 1.1km、幅 150m。地中レーダー探査による氷厚測定, GNSS 測量による流動測定を実施し, 現存氷河の可能性を検討した。

現地調査の結果, 唐松沢雪渓は平均氷厚 25m (最大氷厚約 35m), 長さ約 1.1km の氷体と, 融雪末期の 29 日間で最大傾斜方向へ約 250mm の氷体の流動が確認された。流動測定を実施した融雪末期は, 積雪荷重が 1 年で最も小さいため, 流動速度も 1 年で最小の時期であると考えられている。このことから, 唐松沢雪渓は現存氷河であると考えられた。

【劔沢雪渓】 越年する面積が約 0.26 km² に達する日本最大の多年性雪渓である。2016 年秋に中央部 2 カ所で雪渓が消失し河原が露出、雪渓は大きく 3 つに分割された。

8 月中旬に行った地中レーダー観測の結果から、武蔵谷、平蔵谷、長次郎谷など支流の合流点 (出合) では、厚さ 18 m 前後の氷体が存在するが、それ以外では存在しないことが判明した (図 1)。氷体が無い場所で 2016 年秋に雪渓が消失した。この雪渓は

流動する氷体をもっておらず、氷河の可能性が低いと判断された。

【白馬大雪渓】 越年する面積が 0.17 km² に達する多年性雪渓で、白馬岳山頂に通じる日本屈指の人気登山ルートが雪渓上に設置されている。2016 年秋、支流の三号雪渓から下流側でスノーブリッジの崩落やクレバスの発達が激しく、同年 9 月 1 日に登山ルートが通行止めになった。

10 月下旬に行った地中レーダー観測の結果から、二号雪渓の合流点から下流側 200 m では、雪渓の厚さが 20 m と厚いものの、それ以外の部分は厚さ 5～10 m と薄いことが分かっていた。この雪渓は面積の割に全体的に薄く、融解が進んだ年にはかなりの部分が消失してしまう可能性があったといえる。この雪渓も流動する氷体をもっておらず氷河では無いと判断された。

3. まとめ

(1) 100MHz アンテナで厚さ 70 m までの氷厚観測が可能であった。国内の氷河の氷厚と内部構造調査では、この周波数をもっとも有効であることが分かった。これまでの調査で国内 7ヶ所の氷河の存在を確認できた。

(2) 探査するときは毎秒当たりのデータサンプリング数を限界まで上げ、さらに、ゆっくり歩いて測線方向の分解能の上げることが鮮明なデータを取得するコツであることも分かった。

今後も国内外の氷河や南極氷床で最適な氷厚および内部構造観測ができるように立山・劔岳の氷河、多年性雪渓で gain 調整やサンプリング間隔などのセッティングを煮詰めていく。

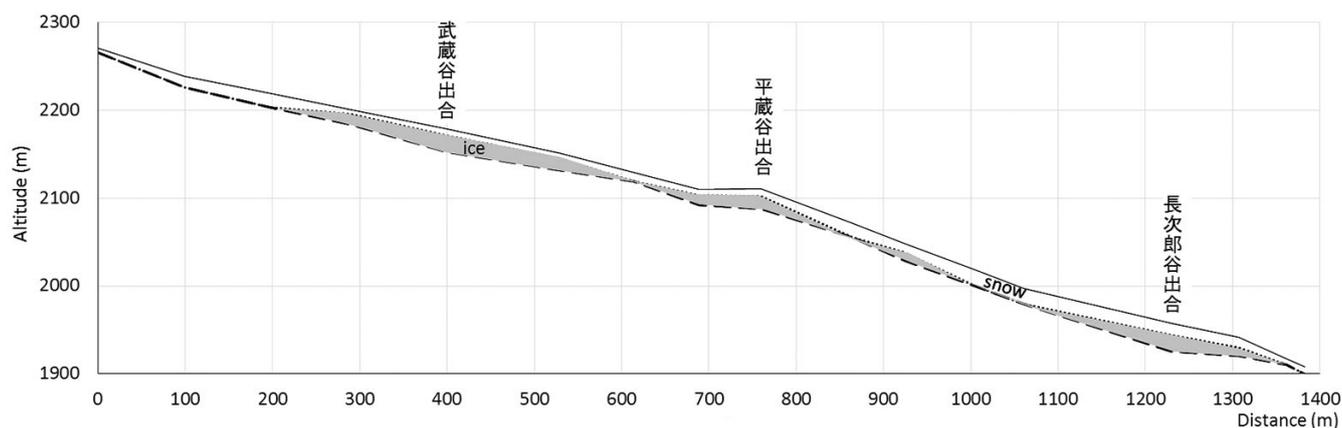


図1 8月下旬の剣沢雪溪の地中レーダー縦断面

[研究発表]

福井幸太郎・飯田肇・小坂共栄 (2018) : 飛騨山脈で新たに見出された現存氷河とその特性。地理学評論、91、43-61。 ※2018年度日本地理学会 学会賞 (優秀論文部門) 受賞

福井幸太郎 (2019) : 気候の変わり目と日本の氷河。科学 (岩波書店)、89、597-598。

福井幸太郎・飯田肇 (2018) : 鹿島槍ヶ岳カクネ里雪溪で実施した氷河観測の概要。市立大町山岳博物館研究紀要。3、5-12。

有江賢志朗・奈良間千之・福井幸太郎・飯田肇・高橋一徳 (2019) : 飛騨山脈北部、唐松沢雪溪の氷厚と流動。雪氷、81、283-295。

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。

北極海における大気-海水-海洋相互作用と海氷変動

◎島田 浩二 東京海洋大学学術研究院海洋環境科学部門・教授
 (国立極地研究所)
 猪上 淳 准教授
 令和元年 (1 年)

[研究成果]

1.背景

2019 年は、マイクロ波放射計観測が開始された 1978 年以降、チャクチボーダーランド海域での結氷が最も遅れた年となった。結氷直前の 10 月から 11 月初旬にかけて、海洋地球研究船「みらい」を利用し、海洋混合層観測を行い、結氷タイミングに与える海洋の影響を調査した。またとない事前調査研究が実施できたので、ここに報告する。

図 1 は、2019 年「みらい」観測海域における表層混合層の水温、塩分と厚さを示したものである。チャクチ海北東の陸棚斜面域では、水温 5℃、塩分 30-31 であることから、夏季太平洋水 (Pacific Summer Water : PSW) (Shimada et al., 2001, 2006) であると同定できる。その混合層の厚さは 20-25m 程度であり、同海域では、600-700MJ/m² もの海洋熱が蓄えられていた。2007 年以降、同海域で海水が消滅したときの典型的な 9 月の貯熱量 (400MJ/m²) (Mizobata and Shimada, 2012) よりもはるかに大きい。実際、海流による熱輸送を考えない場合、海水消滅から海水最小期 (9 月) までに海洋が受ける熱量はおおよそ 400MJ/m² 程度である。600-700MJ/m² の海洋熱が冷却開始期の 9 月ではなく、1 か月後の 10 月においても蓄えられていたことから、2019 年はこれまでにない結氷遅延が起ると予測された。

チャクチ海北東部の陸棚斜面域からチャクチボーダーランド海域は PSW の主流路であり、高水温の PSW が観測された海域からチャクチボーダーランド海域までの移流時間は、これまでの現場流速観測から、1.5 か月程度であると推定される。つまり、12 月には、チャクチボーダーランド海域に PSW の影響が及んでいたと考えられる。2019 年 12 月 1 日のチャクチボーダーランド海域の海水分布は PSW の主流路上で PSW の流向きと同じ北に向かって湾状に開水面が広がっている (図 2)。1978 年のマイクロ波放射計による海水観測

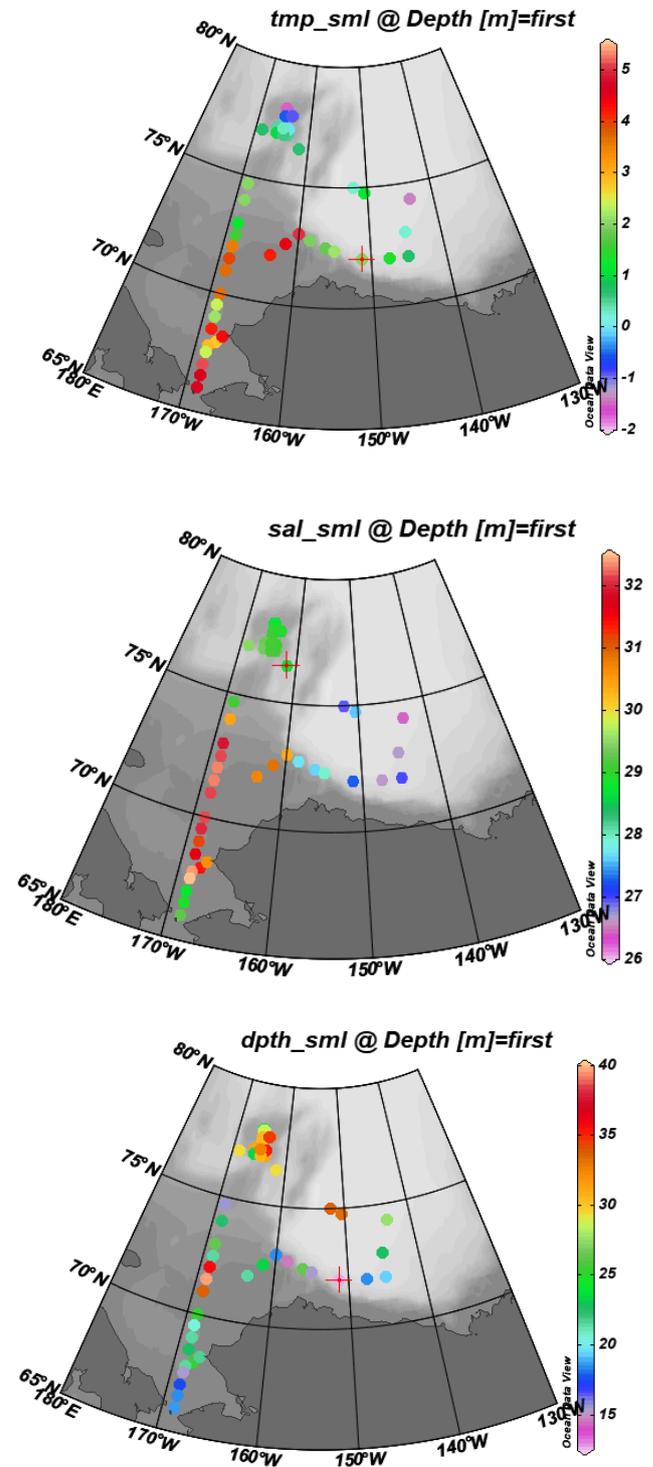


図 1 : 2019 年みらい航海 (10-11 月) で観測された水温 (上段)、塩分 (中段)、表層混合層の厚さ (下段)

開始以降、12月にチャクチボーダーランドで開水域が観測されたのは初めてであり、同海域における冬季の海氷成長は抑制され、翌年（2020年）の海氷分布に特異性が生じると推定される。

大気海洋相互作用の結果は、海氷にメモリとして残り（Yoshizawa, et al., 20115）、翌年の海氷分布、そして大気海洋相互作用に遅延効果をもって影響する。海氷厚分布の推定研究（Yoshizawa et al., 2018）とリンクさせて研究を進展させる予定である。

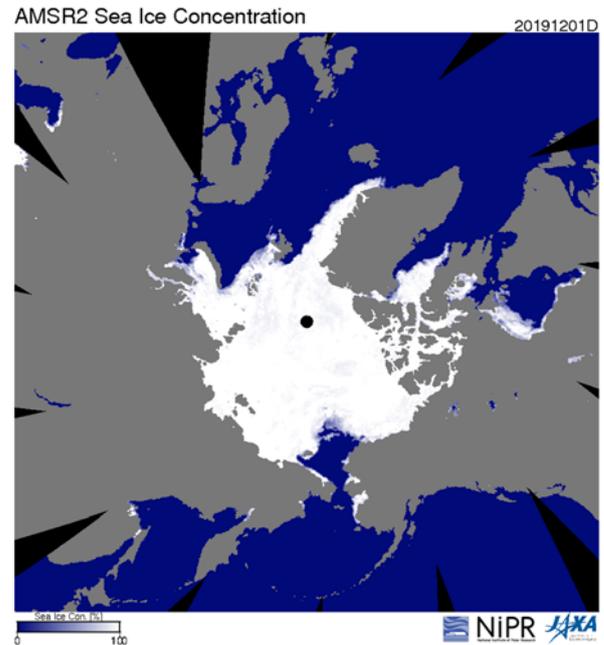


図2：2019年12月1日の海氷密接度分布。ADSホームページより。

[参考文献]

- 1) Shimada, K., E. Carmack, K. Hatakeyama and T. Takizawa (2001), Varieties of shallow temperature maximum waters in the western Canadian Basin of the Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, 3441-3444.1.
- 2) Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmerman, and A. Proshutinsky (2006), Pacific Ocean Inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- 3) Mizobata, K., and K. Shimada (2012), East-west asymmetry in surface mixed layer and ocean heat content in the Pacific sector of the Arctic Ocean derived from AMSR-E sea surface temperature, *Deep Sea Res. Part II*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.005>.
- 4) Yoshizawa E., K. Shimada, H. K. Ha, T. W. Kim, S. H. Kang, and K. H. Chung (2015), Delayed responses of the oceanic Beaufort Gyre to winds and sea ice motions: influences on variations of sea ice cover in the Pacific sector of the Arctic Ocean, *J. Oceanogr.*, 71, 187-197
- 5) Yoshizawa E., K. Shimada, K. H. Cho (2018), Algorithm for flat first-year ice draft using AMSR2 data in the Arctic Ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 35, doi: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0034.1>.

[研究発表]

- 1) Yamamoto, J., K. Shimada (2020), Formation mechanisms of localized sea ice bands, The 35th international symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans, Monbetu.
- 2) Shimada, K. (2020), Improvement of first year sea ice thickness algorithm and its application to prediction of sea ice distribution using AMSR2, GCOM-W PI workshop, Tokyo

別紙

参加一覧（研究協力者）

韓国極地研究所研究員	吉澤枝里	（研究協力者）
東京海洋大学大学院修士 1 年	山本順平	（研究協力者）
東京海洋大学大学院修士 1 年	真矢梨央	（研究協力者）

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（3）地 圏

極域の地震活動・地震発生機構・地球内部構造に関する総合的研究

- ◎ 坪井 誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター・情報技術担当役
 趙 大鵬 東北大学大学院理学研究科・教授
 宮町 宏樹 鹿児島大学大学院理工学研究科・教授
 竹中 博士 岡山大学大学院自然科学研究科・教授
 伊藤 喜宏 京都大学防災研究所・准教授
 小林 励司 鹿児島大学大学院理工学研究科・准教授
 岩田 貴樹 県立広島大学・准教授
 伊藤 武男 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授
 豊国 源知 東北大学大学院理学研究科・助教

(国立極地研究所)

金尾 政紀 准教授

平成 29 年 ～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

近年グリーンランド氷床、特に縁辺部での流出に伴う振動現象(氷河地震, Glacial Earthquake)が顕著に観測されている。氷床内あるいは氷床底部で起きていると考えている氷河地震の発生メカニズムと頻度は、氷河流動および近年の気候変動との関連性が指摘され、これらを解明することは極域氷床の変動メカニズムと温暖化増幅作用を知る上で重要である。本研究では、南極氷床縁辺やグリーンランドやで発生する氷河地震の活動度を統計学的に解析、また地震波形データ解析により氷床変動のダイナミクスを解明する。既存のグローバル観測網(FDSN)と合わせた広域解析により、温暖化による氷床後退と氷河地震発生との関連性を明らかにする。

南極定常観測点のデータを用いた遠地地震活動の時系列解析として、昭和基地の地震検知率を統計的手法により季節依存性と気温との相関解析(Iwata and Kanao, Polar Science, 2015)を行ったが、これを継続発展して海水・風速・微気圧変動データとの相関を調べた(岩田, 2018)。また、昭和基地で2013-2015年に記録された氷河微動の波形・周波数変動の特徴から、3グループに分類して季節変化と周辺環境、特に海水変動との関連を調

べた(Tanaka et al., Polar Science, 2019)。さらにリュツォ・ホルム湾域の氷山・海氷・氷河変動に伴う高周波共鳴地震微動を海水衛星データと対比し、定着氷と氷山の衝突等、発生原因について考察した(Kanao et al., 2017)。なお、雪氷圏地震学の国内外の最近の動向の取りまとめを合わせて行った(Kanao, 2018)。これらに加えて、ペイズ的手法によるS波速度構造推定方法を開発し、地殻浅部の2層構造を用いた数値実験による検証を行った(Cho and Iwata, 2018)。

北極域においては、グリーンランドの氷河地震観測網(GLISN)データを用いて、氷床観測点のノイズ相関解析により、氷床底部の温度状態を地震波干渉法による波形解析から推定した(Toyokuni et al., 2018)。氷床底部に感度を持つ表面波を抽出し、その位相速度の4.5年分の季節・経年変化を調べた結果、隣接する地域でも速度変化のパターンが逆転する現象が見いだされ、氷床底部の融解・凍結状態を反映していることが示された。今後は3成分に拡張して解析を行い、氷床下の地殻・上部マントル熱構造と氷床下部・及び底面での融解状態の3次元構造を把握する。島内全域のマッピングと共に経年・

季節変化を検知することで、温暖化の極域氷床への影響とその増幅メカニズム解明への貢献が期待される。さらに、グリーンランド地震観測網データを用いた P 波走時トモグラフィー解析 (Toyokuni et al., 2019) からは、かつてグリーンランド下に沈み込んだ海洋性プレート (スラ

ブ) の低速度層の存在や、アイスランドホットスポットの大西洋拡大に伴う地震波低速度領域がグリーンランド中央部を東西に横切る様相、等が明らかにされた。

[研究発表]

- Tanaka, Y., Y. Hiramatsu, Y. Ishihara and M. Kanao, Characteristics of non-tectonic tremors around the Lützow-Holm Bay, East Antarctica, during 2013–2015, *Polar Science*, 19, 77-85, DOI:10.1016/j.polar.2018.11.010, 2019
- Toyokuni, G. Matsuno, T. and D. Zhao, P-wave tomography beneath Greenland, The Tenth Symposium on Polar Science, OG_Toyokuni_00132_01, 3-5 December, National Institute of Polar Research, Tachikawa, Tokyo, Japan, 2019
- Cho, I., and T. Iwata, Development and numerical tests of a Bayesian approach to inferring shallow velocity structures using microtremor arrays, *Exploration Geophysics*, DOI:10.1071/EG18011, 2018
- Kanao, M., A New Trend in Cryoseismology - Proxy for Detection of Polar Surface Environment, *Polar Seismology - Advances and Impact*, ISBN 978-1-78923-569-2, 8, 75-86, IntechOpen, London, United Kingdom, DOI:10.5772/intechopen.78557, 2018
- Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs and D. Zhao, Changes in Greenland ice bed conditions inferred from seismology, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 277, 81-98, DOI:10.1016/j.pepi.2017.10.010, 2018
- 岩田貴樹, 複数の気象要因を用いた南極・昭和基地における地震検知能力の季節変化の統計モデル化, 月刊地球 2018年9月号<通巻468号>, 40, 485-492, 2018
- Kanao, M., T. Murayama, M.-Y. Yamamoto and Y. Ishihara, Temporal-spatial variations in infrasound sources related to cryosphere dynamics in Lützow-Holm Bay Region, Antarctica, EGU General Assembly, X1.310, Vienna, Austria, April 8-13, 2018
- Tanaka, Y., Y. Hiramatsu, Y. Ishihara and M. Kanao, Classification of ice tremor recorded at Syowa Station in Antarctica, Joint Scientific Assembly of IASPEI-IAG, J01-P-01, Kobe, Japan, July 30 - August 4, 2017
- Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs and D. Zhao, SEISMOLOGICAL EVIDENCE FOR ICE SHEET PRESSURE MELTING IN GREENLAND, ASSW-2017, O 062, Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, March 31- April 7, 2017
- Kanao, M., T. Murayama, M.-Y. Yamamoto and Y. Ishihara, Seismic tremors and their relation to cryosphere dynamics in April 2015 around the Lützow-Holm Bay, East Antarctica, *Inter. J. Geosci.*, 8, 1025-1047, DOI:10.4236/ijg.2017.88058, 2017

南極及び環太平洋に分布する迷子巨礫の古地磁気学による年代推定

◎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 准教授

平成29年～令和元年(3ヵ年)

[研究成果]

世界中の沈み込み帯沿岸部や南極大陸において、津波や氷河の消長によって運ばれた迷子石と呼ばれる巨礫が分布している。これらの巨礫の定置年代を決めることで、津波の発生年代や氷河の消長の年代を知ることができる。そこで、粘性残留磁気を用いた年代推定法の高度化及びその自然界への適用に関する研究課題を提案した。極地研究所の SQUID 磁力計、熱消磁炉、交番型磁力計等を利用し、巨礫が有する非常に弱い2次的な磁気を取り出した。この2次的な磁気成分の消磁温度から定置年代を推定する。年次進行で、地球上に存在する多くの迷子石、特にトンガや南極の巨礫の定置年代を調べてゆく。

(1) 拡張型指数関数による迷子石の定置年代決定

これまでに2次的に着磁した粘性残留磁気を利用して、迷子石がいつ定置したのかを Neel の残留磁気理論を利用して推定してきたが、一部の迷子石は上記の残留磁気理論に沿わないことが問題であった。そこで、業績番号 1), 5), 6) では Neel 理論に従わない粘性残留磁気に関する室内実験結果を、拡張型指数関数を導入することでフィッティングし、Neel 理論の拡張モデルを提案した(成果1)。また、石垣島産

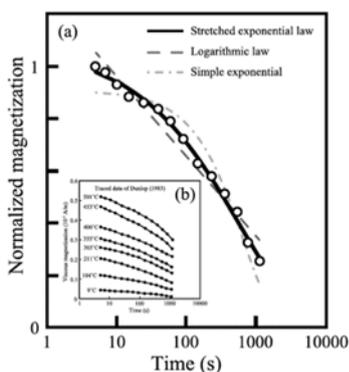


図1 Neel理論が予想する指数関数に従わない粘性残留磁気の実験値を拡張型指数関数でフィッティングした例

迷子石の残留磁気を担う鉱物を、極地研究所の振動型磁力計と東北大学の電子スピン共鳴装置を用いて同定した(成果5)。さらに、この拡張型モデルを利用して、天然の迷子石の定置年代を推定することを実施した(成果6)。

(2) 津波堆積物中の異方的な鉱物配列

帯磁率異方性を利用して津波が平野部へ流入したときの流向を推定することが、世界各地で実施されている。しかし、帯磁率異方性が当時の流向を反映しているかどうかは確かめられていない。そこで、東日本大震災の際に堆積した津波堆積物を利用して検証した。その結果、一部の津波堆積物では津波の流向を直交するデータがあることをみいだした。これは、帯磁率異方性の原因となる磁性鉱物がナノサイズの時に引き起こされるという原因も突き止めた(成果2)。

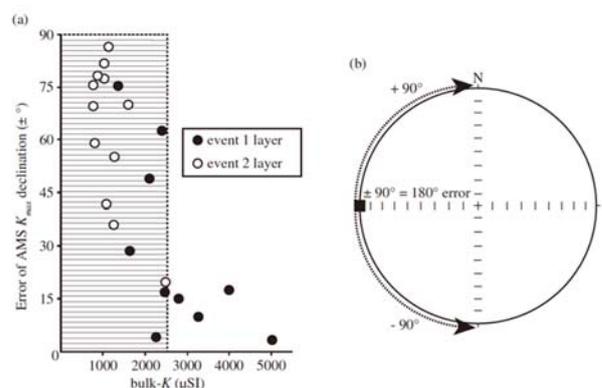
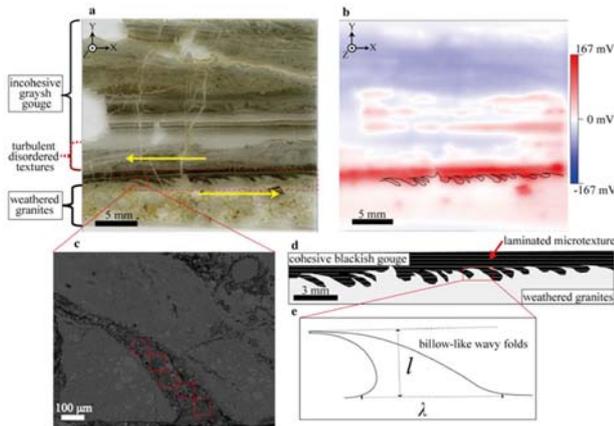


図2 帯磁率異方性が90度ずれる

(3) 野島断層破碎帯の誘電率と残留磁気の研究

野島断層岩中にはケルビン・ヘルムホルツ型の褶曲が形成されており、この褶曲部分を走査型 MI 磁場

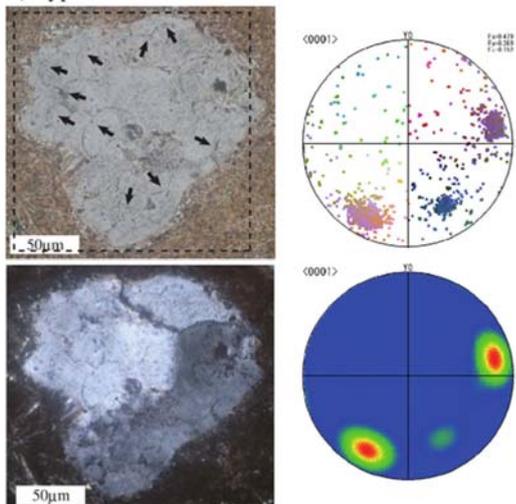
顕微鏡と産総研所有の SQUID 磁場顕微鏡で観察した結果、褶曲部に磁鉄鉱が濃集しているために残留磁気を有していることが判明した。さらに、破碎部の試料を人工的に加熱することで、350°C 付近から磁鉄鉱が形成されることを実験的に確かめることで、褶曲部分はその形成時に 350°C 以上の摩擦熱にさらされたことを実証した(成果3)。



(4) 月面クレーターの誘電率と地下構造

日本の月面探査衛星かぐやは、短波レーダーを利用して月面の地下構造を観測し、地下に複数枚の地層構造を見出している。しかし、クレーター近傍ではこのような地層構造を観測されていなかった。この原因を探るために、月面と同等の玄武岩試料にアクリル球を高速で発射して人工クレーターを形成する実験をおこない、回収した試料の破壊度合いと誘電率を測定した。その結果、破壊度合いが高く空隙が高いほど誘電率は低下することが判明し、この結果を月面に応用することでクレーター直下の空隙率を推定した(成果4)。

a) Type-II



(5) インド・ダーラ隕石孔周辺の衝撃変成作用

インド北部のダーラ地区には約 20 億年前の隕石孔と考えられる円盤状の地質構造が存在する。この地質構造が隕石衝突によるものかどうかを検証するために、衝撃変成作用の存在を調べた。その結果、多くの衝撃由来の鉱物を発見することができた。さらにその衝撃を受けた鉱物の結晶構造を後方散乱電子線回折によって決定し、衝撃時の圧力の大きさを推定した(成果8)

[研究発表]

- 1) Sato, T., Nakamura, N., Nagahama, H., Minoura, K. (2016) Stretched exponential relaxation of viscous remanence and magnetic dating of erratic boulders. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)* 121, 7707–7715.
- 2) Kon, S., Nakamura, N., Nishimura, Y., Goto, K., Sugawara, D. (2017) Inverse magnetic fabric in unconsolidated sandy event deposits in Kiritappu Marsh, Hokkaido, Japan, *Sedimentary Geology*, 349, 112–119.
- 3) Fukuzawa, T., Nakamura, N., Oda, H., Uehara, M., Nagahama H. (2017) Generation of billow-like wavy folds by fluidization at high temperature in Nojima fault gouge: microscopic and rock magnetic perspectives, *Earth Planets and Space* 69(54), 1–10.
- 4) Ishiyama, K., Kumamoto, A., Takagi, Y., Nakamura, N., Hasegawa, S. (2018) Effect of crack direction around laboratory-scale craters on material bulk permittivity, *Icarus* 319, 512–524.
- 5) Kumagai, Y., Nakamura, N., Sato, T., Oka, T., Oda H., (2018) Ferromagnetic Resonance Spectroscopy and Rock Magnetic Characterization of Fossil Coral Skeletons in Ishigaki Islands, Japan, *geosciences* 8(400), 1–11.
- 6) Sato, T., Nakamura, N., Goto, K., Kumagai, Y., Nagahama, H., Minoura, K., Zhao, X., Heslop, D., Roberts, A. P. (2019) Dating of tsunami boulders from Ishigaki Island, Japan, with a modified viscous remanent magnetization approach, *Earth and Planetary Science Letters*, 520, 94–104.
- 7) Watanabe, M., Goto, K., Imamura, F., Kennedy, A., Sugawara, D., Nakamura, N., Tonosaki, T. (2019) Modeling boulder transport by coastal waves on cliff topography: Case study at Hachijo Island, Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 2939–2956.
<https://doi.org/10.1002/esp.4684>
- 8) Pati, J. K., Poelchau, M.H., Reimold, W.U., Nakamura, N., Kuriyama, Y., Singh, A.K. (2019) Documentation of shock features in impactites from the Dhala impact structure, India, *Meteoritics and Planetary Science*, 54(10), 2312–2333.

重元素の局所同位体分析の開発と宇宙化学への応用

◎日高 洋 名古屋大学大学院環境学研究科・教授
 (国立極地研究所)
 堀江 憲路 助教
 平成 29 年～令和 元年 (3 年間)

[研究成果]

本研究では、隕石などの宇宙化学的試料を構成する元素の中で、太陽系創成時の同位体不均一性を議論するうえで重要な情報を保持している可能性のある Ba や、宇宙空間において宇宙線照射の影響で生じる原子核反応によって同位体変動を起こす可能性のある Sm 等の重元素に着目し、マルチコレクター搭載の SHRIMP-IIe/AMC を用いて、数十 μm 以下の個々の鉱物サイズレベルでの高精度同位体分析手法の確立を目指した。特に、Ba の 7 つの安定同位体のうち、 ^{135}Ba については、太陽系創生時には存在したと考えられる半減期 200 万年の短寿命放射性核種 ^{135}Cs の壊変による同位体過剰成分が見いだされる可能性があるため、太陽系始原物質であるコンドライトの Ba 同位体の局所分析には興味をもたれる。

本研究では炭素質コンドライトの一種である Tagish Lake (以下、TL) 隕石の厚片を用いた。試料は岡山大学・山下勝行先生より貸与いただいた。SHRIMP による Ba 局所同位体測定のための分析点を選択するにあたり、同位体分析に先駆け、レーザーラマン分光を用いて TL 隕石試料中のフォルステライト、ドロマイト、マグネタイト等の鉱物を同定した。図 1 に試料表面の光学顕微鏡写真ならびに鉱物同定したラマンスペクトルの例を示す。

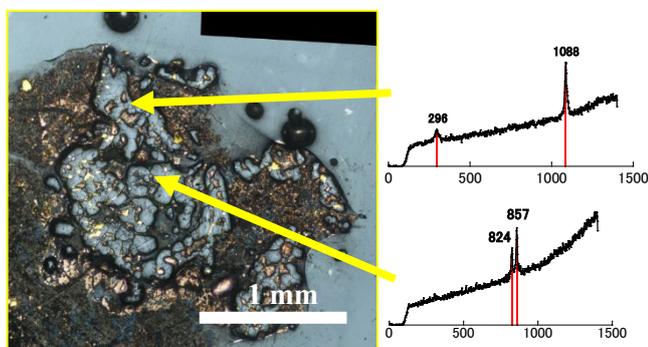


図 1. 表面研磨した TL 隕石の厚片試料の実体顕微鏡写真 (左)、試料内で特定したフォルステライト (右上)、ドロマイト (右下) のラマンスペクトルの例。写真中のスケールバーは 1 mm を示す。

Ba 同位体比から始原 ^{135}Cs の存在の痕跡を探るには、試料内から Cs/Ba 元素濃度比の高い部位を特定することが必須である。Ba 精密同位体測定に先駆け、レーザーラマン分析で特定した試料内の各鉱物中に含まれる一連のアルカリ元素 (Rb, Sr, Cs, Ba) についてその定量分析を行った。TL 試料中で特定した微小鉱物に含まれる一連のアルカリ元素含有量の結果を、図 2 にまとめた。これまで隕石試料中の高い Cs/Ba 元素濃度比を有する部位の特定するためには、酸による連続溶出法が採られており、本研究に先駆けておこなった同手法によって Cs/Ba=0.001~0.06 が見いだされていた。一方、本研究で SHRIMP による局所分析を行った結果、図 2 に示すように、より高い Cs/Ba 比 (0.015~1.3) を有する部分を特定するに至った。本結果をもとに、Cs/Ba 比 > 0.5 を有する部位を SHRIMP 測定のための分析点の候補として選択した。

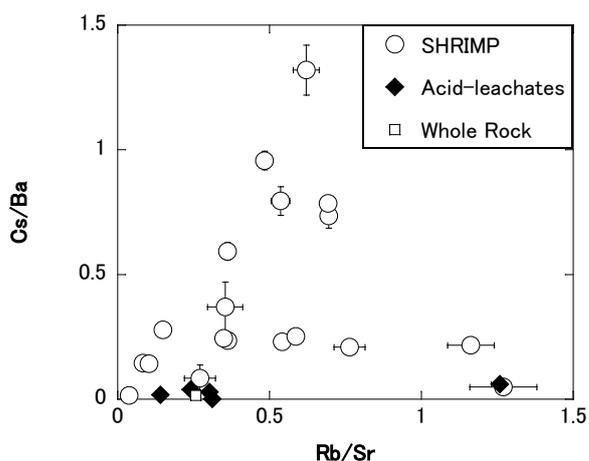


図 2. Tagish Lake 隕石中の各種微小鉱物中の Rb, Sr, Cs, Ba の定量分析結果にもとづく Rb/Sr と Cs/Ba の元素濃度比の相関図。図中の◆および□は各々、ICP-MS を用いて酸による連続溶出成分、隕石の全岩を分析した結果を、○は SHRIMP を用いて本研究によって得られた結果を示す。

SHRIMP-IIe/AMC による Ba 同位体の局所精密分析を行うために、まず標準試料を用いて分析手法の確立を行った。表 1 に得られた結果を示す。以前に測定した広島大学所有のシングルコレクター型 SHRIMP による同一標準試料の測定値に対し、マルチコレクター型 SHRIMP では $^{135}\text{Ba}/^{138}\text{Ba}$ において相対誤差 1/4 以下での同位体分析を行うことが可能であることがわかった。

表 1 広島大学 (HU) と国立極地研究所 (NIPR) の SHRIMP を用いて測定した標準試料 SRM610 中の Ba 同位体比の結果の比較

	$^{135}\text{Ba}/^{138}\text{Ba}$	$^{136}\text{Ba}/^{138}\text{Ba}$
HU	0.09212 ± 0.00060	0.15651 ± 0.00052
NIPR	0.09190 ± 0.00015	0.15646 ± 0.00016

表中の分析誤差は繰り返し測定による標準誤差を 2σ で表している。

次いで、TL 隕石について Ba 同位体測定を実施した。質量スペクトルを確認したところ、一部データにおいては、 ^{135}Ba および ^{138}Ba 同位体ともにマススペクトル上にて、試料のマトリックスに由来すると思われる複合化合物イオン種の干渉があることが確認され、いくつかの分析ポイントにおいて精密同位体データ取得には至らなかった。これらについては、今後、エネルギーフィルター法により干渉イオン種を減らす等の対処により、同位体測定に関しては分析法の改善をはかる必要がある。

一方、本研究で得られた Ba 同位体比と Cs/Ba 濃度比との相関を図 3 に示す。太陽系始原物質中には太陽系外からの原子核合成付加成分が混入しており、それが多くの元素の同位体組成に変動を与えていることが知られている。本研究における TL 隕石の Ba 同位体も同様で、その $^{135}\text{Ba}/^{138}\text{Ba}$ 比には s-過程によって生じる原子核合成の過剰成分が含まれていることが判明したため、その過剰成分を理論計算

により差し引いて補正したが、その補正值 $^{135}\text{Ba}^*/^{138}\text{Ba}$ と Cs/Ba 濃度比との間には相関は認められなかった。よって、本研究の結果からは消滅核種 ^{135}Cs の太陽系内における存在の痕跡を見出すことはできなかった。

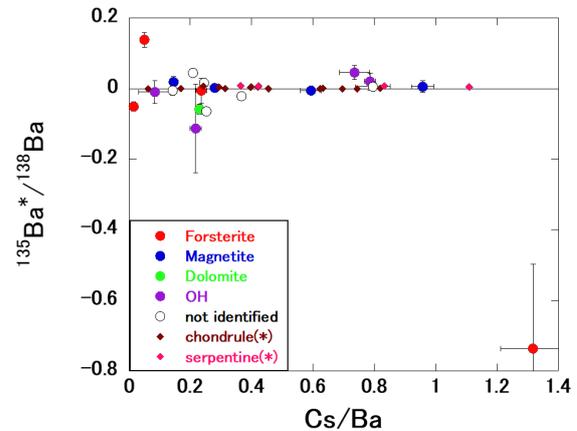


図 3. s-過程原子核合成の過剰成分の補正をほどこした $^{135}\text{Ba}/^{138}\text{Ba}$ 比 ($^{135}\text{Ba}^*/^{138}\text{Ba}$) と Cs/Ba 濃度比との相関図。図中のデータの内訳は、ラマンスペクトルによる鉱物同定によって区分されており、そのうち、「not identified」は鉱物同定に至らなかった部位、「OH」は水酸基の存在が特定できた部位を示す。また、「chondrule」および「serpentine」は文献値を示す。

TL 隕石は、その母天体上で激しい水質変成を受けていることが知られており、その水質変成の影響で、水と反応性が高い Cs から成る ^{135}Cs - ^{135}Ba 壊変系が大きく乱されたことが考えられる。 ^{135}Cs - ^{135}Ba 壊変系と類似したアルカリ元素による壊変系である Rb-Sr 壊変系についても TL 試料に関しては、化学処理を施して求められた Rb-Sr 壊変系についても乱されていることが報告されていることから、本研究による結果の妥当性が示される。

なお、本研究結果については、現在、投稿論文を改訂中である。

[参考文献]

- 1) H. Hidaka, T. Higuchi and S. Yoneda; Redistribution of alkaline elements in association with aqueous activity in the early solar system. *The Astrophysical Journal*, 2015, Vol.815, 76(p1-p6).
- 2) H. Hidaka, Y. Ohta, S. Yoneda and J.R. DeLaeter; Isotopic search for live ^{135}Cs in the early solar system and possibility of ^{135}Cs - ^{135}Ba chronometer. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, Vol.193, 459-466.
- 3) K. Sakuma, H. Hidaka and S. Yoneda; Isotopic and chemical evidence for primitive aqueous alteration in the Tagish Lake meteorite. *The Astrophysical Journal*, 2018, Vol.853, 92(p1-p8).

(別紙)

参加者一覧

山下勝行 岡山大学大学院自然科学研究科・准教授

佐久間圭佑 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生

合成開口レーダ (SAR) データの偏波特性に着目した南極域の観測手法の高度化

◎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

平成 29 年～令和元年 (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、衛星搭載合成開口レーダ (SAR : Synthetic Aperture Radar) データから作成した強度画像、干渉画像ほかを活用する研究を継続してきた [たとえば 1]。SAR データを用いると、極夜や雲の存在など光学センサが活用できない場合にも、南極域の面的な情報を得ることができる。近年、我が国の ALOS 衛星 (Advanced Land Observing Satellite)、その後継の ALOS-2 衛星など高分解能多偏 SAR センサを搭載した人工衛星が運用されており、偏波データ解析を南極域の観測に応用することも期待されている。極地研究所に蓄積されてきた南極域の衛星搭載 SAR (ALOS ほか) データによる強度、干渉解析に加えて、現在運用中の ALOS-2 衛星のフルポラリメトリデータに対して偏波特性に着目した解析手法を組みあわせて、SAR データを生かした総合的な解析手法の高度化を目指した。

2. 氷河流動・定着氷の観測

南極域における氷河・氷床の質量収支をモニタリングする試みが行われている。南極昭和基地のある、リュツォ・ホルム (LH) 湾に流入する白瀬氷河については、我が国の 3 つの衛星によって得られた SAR データを用いて 1996 年からの約 20 年間について氷河流速の変動が報告されている [2]。2016 年～2018 年に ALOS-2 衛星からの SAR データ (HH 偏波) から強度画像を作成し、画像相関法を適用して得られた、白瀬氷河と氷河末端を取り囲む LH 湾の定着氷の流動速度変動が報告された [3,4]。白瀬氷河の下流域の流動速度は定着氷の有無および安定/不安定に関係していることが示された。氷河の上流から下流に向かって、氷河の流動速度は、定着氷が不安定なときは、定着氷が安定な時よりも、急に増加する (図 1 [4])。この空間的、経時的な流速データをもとに、氷河・氷床の運動のダイナミクスについての議論が進むことが期待される。

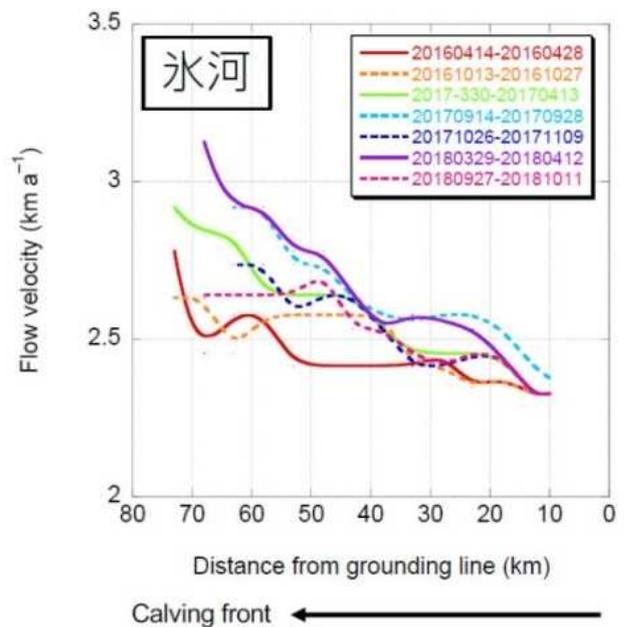


図 1 白瀬氷河 (中央部) の流動速度プロファイル
 縦軸：流速 (km/年)、
 横軸：白瀬氷河の Grounding line からの距離 (km)
 実線：定着氷が不安定、破線：定着氷が安定な期間
 (中村ほか [4])

3. 地質学分野の画像解析技術の応用可能性

SAR データからの画像をもとに、氷河・氷床上のクレバスや傾斜急変域などの線状構造を検出することも考えられる。氷河・氷床の上の線状構造を、地形・地質的な構造 (リニアメント、断層など) に類似したものとみなせば、地質学分野の手法が応用できる可能性がある。ここでは、リニアメントを検出する手法の一つである STA (Segment Tracing Algorithm : 線素追跡アルゴリズム たとえば [5]) に着目する。とくに SAR 画像解析への適用には、SAR 観測の幾何学的特性から地形画像に歪みが生じることに留意する必要がある。そのため、反対向きのレーダー照射となる、北行軌道および南行軌道からの観測による 2 つの強度画像を使用し、一部修

正した mSTA (modified STA) が用いられた[6]。その例を図2に示す。氷河・氷床の観測への応用には、さらに検討が望まれる。

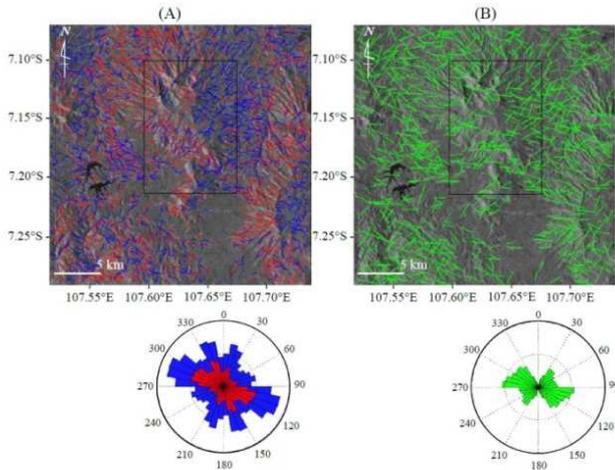


図2 同一地域の2つの SAR 強度画像を用いて mSTA で抽出したリニアメント分布の例
(A)赤：北行軌道／青：南行軌道からの抽出リニアメント
(B)緑：まとめられたリニアメント
下のダイヤグラムはリニアメントの走向ごとの頻度 (Asep ほか[6]に基づく)

4.氷河表面の偏波特性

前述のように白瀬氷河とその周囲の定着氷では、ALOS-2 衛星の HH 偏波データからの強度画像を用いて流動速度が経時的に観測された。フルポラリメトリで観測されたときの強度画像を作成し、ごく簡単な画像処理を適用した例を示す (図3)。

図3の左右の図を比較すると、右図で、白瀬氷河の中央部では、特徴を示す偏波が中流部から下流部にかけて HV→HH→HV のように変化しており、氷河表面の状態が変わっていることを示唆している。

ALOS-2/PALSAR-2 (2015/06/07)

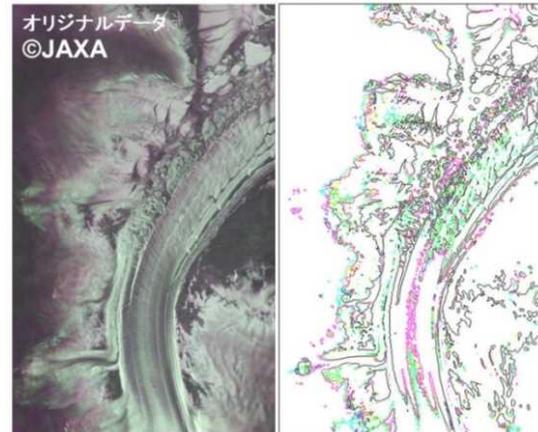


図3 白瀬氷河の偏波カラー合成画像
(赤：HH、緑：HV、青：VV)

左：強度画像 白瀬氷河は図の下から上に流れる
右：強度画像の一定強度以上の領域の境界線

5.まとめ

本研究で当初目的とした偏波 SAR データ解析の高度化はできなかった。しかし、我が国の ALOS-2 衛星からの SAR データによる強度画像をもとに白瀬氷河などの流動速度の議論を進めるデータを提供できた。また、地質学分野などの衛星画像解析技術の極域観測への応用可能性を検討した。今後も衛星搭載 SAR データの活用に取り組みたい。

本研究で使用した 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 (PI No. 1191,1496, 3049)の枠組で提供されました。

[参考文献]

- 1)大村 誠, 小池克明, 山之口 勤, 中村和樹, 土井浩一郎: 合成開口レーダ (SAR) データの高度利用による南極域の観測手法の開発, 平成28年度共同研究報告書, 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所, pp.79-80, 2017.
- 2)中村和樹, 山之口勤, 青木茂, 土井浩一郎, 澁谷和雄: 南極・白瀬氷河の20年間の流動速度変動, 雪氷, 79巻, 1号, pp.3-15, 2017.
- 3)Kazuki Nakamura, Shigeru Aoki, Tsutomu Yamanokuchi, Takeshi Tamura, Shuki Ushio, and Koichiro Doi: Fluctuations of the ice flow velocity of Shirase Glacier and its surrounding landfast ice displacement in east Antarctica derived from ALOS-2/PALSAR-2 image correlation, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019 (IGARSS 2019), pp.4172-4174,2019.
- 4)中村和樹, 青木茂, 山之口勤, 田村岳史, 牛尾収輝, 土井浩一郎: 白瀬氷河と氷河末端を取り囲む定着氷の流動速度, 日本リモートセンシング学会第67回学術講演会論文集, pp.87-88, 2019.
- 5)上堀内利道, 小池克明: 衛星画像と DEM 陰影図との組み合わせによるリニアメント解析, 第13回日本情報地質学会講演会講演要旨, 2002.
- 6)Asep Saepuloh, Haeruddin Haeruddin, Mohamad Nur Heriawan, Taiki Kubo, Katsuaki Koike, Dwiyoarani Malik: Application of lineament density extracted from dual orbit of Synthetic Aperture Radar (SAR) images to detecting fluids paths in the Wayang Windu geothermal field (West Java, Indonesia), Geothermics, vol. 72, pp. 145-155, 2018.

南極での野外絶対重力測定方法に関する研究

◎福田 洋一 京都大学大学院理学研究科・教授
 風間 卓仁 京都大学大学院理学研究科・助教
 西島 潤 九州大学大学院工学研究院・准教授
 (国立極地研究所)
 土井 浩一郎 准教授
 青山 雄一 准教授
 平成 29 年～令和元年 (3 か年)

【研究成果】

1. はじめに

絶対重力測定は、近年、GIA や氷床変動の研究に欠かせない手段になっている。特に、2010 年以降、南極においても野外での測定が実施されるようになり、その具体的な測定方法の研究や測定ノウハウの蓄積が求められている。そこで、本研究では、南極での効果的な野外絶対重力測定方法について、第 59 次日本南極地域観測隊(JARE-59)夏観測で実施された測定を主に、国内外での測定実施状況など参考に、これまでに実施されてきた測定方法についてのレビューや、問題点等の洗い出し・確認を行ない、今後の測定に向けた有効な測定方法について検討することを目的とした。

2. 野外用絶対重力計 A10 による測定

現在、野外で実用的に利用できる絶対重力計は、ほぼ、Micro-G LaCoste (MGL)社製の A10 重力計に限られている。我が国で A10 が野外測定に用いられるようになったのは 2000 年代末頃からで、地下水変動や地盤変化(例えば、Fukuda et al., 2016)、また地熱発電所での地熱貯留層モニタリング(例えば、Nishijima et al., 2010)などを目的とした研究がなされている。我が国の南極観測で、初めて A10 が用いられたのは JARE-53 で、昭和基地のほか、ラングホブデの野外での初の絶対重力測定に成功している(Kazama et al., 2013)。その後、JARE-55 ではベルギーのプリンセス・エリザベス基地(PES)およびあすか基地近郊のシール岩での測定が行われた。

これらの経験をもとに、JARE-59 では、昭和基地およびリュツォホルム湾周辺の沿岸露岩地域8箇所、計 12 点での測定が行われた。本報告は、基本的にこれらの測定をとおして得られた知見に基づくものである。

室内での測定に比べ、A10 による野外測定で注意すべき点は、機器の運搬方法、電源、風対策、温度対策等であり、これらはいずれも測定精度にも直結する重要

な要素である。以下、これらの各要素について述べる。

3. 機器の運搬

機械的に精密かつ繊細な機構を多く有する絶対重力計の運搬は、測定精度にも直結する極めて重要な要素である。また、A10 の測定では常時イオンポンプによる高真空の維持が必要なことと、測定点に到着後、迅速に測定を実施するためには、輸送中も通電し、機械内部の温度を一定に保つことも重要である。

国内での車両を用いた A10 の移動観測では、通常、バン・タイプの車両を使用し、車内でも電源を確保した上ですぐに測定できる状態で輸送すること多い。南極でも、雪上車などの車両を用いる場合には同様の方法が可能であり、実際、JARE-55 での PES からシール岩への移動の際にはこのような方法を用いた。また、今後、氷床上での絶対重力測定を実施するような場合には、同様の方法が可能である。

一方、夏場の昭和基地周辺の露岩地域での測定では、輸送は基本的にヘリコプターに頼ることとなり、小型のバッテリーによるイオンポンプへの通電以外、輸送中の電源確保は困難である。また、高周波の振動の大きなヘリ輸送に対しては十分な除震対策が重要で、これらの両立はさらに困難である。これまでの経験からも、振動の影響は重力計本体へのダメージにもつながる危険性があることから、ヘリ輸送では、電源供給よりも除震対策を優先すべきで、A10 の輸送箱を利用し、さらに防振マウントを併用することが効果的と思われる。なお、防振マウントの利用は、FG5絶対重力計の航空機輸送の際にも有効性が認められている。

4. 電源

A10 は 12VDC 電源で駆動できるため、移動に車両が利用できる場合には、適当な数のバッテリーを充電しながら併用することで大きな問題はない。

しかし、ヘリ輸送の場合には、輸送中、本体への給電が困難なため、測定点に到着後、測定開始前に本体に通電し、機器の内部、特にレーザー発振を安定化させる必要である。このため、バッテリーだけでの運用は困難で、発電機の利用がより望まれる。

JARE-59 では、ガソリンエンジンの 1.6KVA およびディーゼルエンジンの 3.0KVA 発電機を使い分けているが、A10 の測定用としては、いずれも容量的には十分であり、実際は、燃料の確保のしやすさ、重量、他のオペレーションとの兼ね合いで決められた。A10 用にはもう少し小型・軽量の発電機でも十分であるので、現場での運搬等を考えると、A10 測定専用の発電機を用意することが有効と思われる。なお、JARE-59 では、発電機が輸送できない地域で 14.4V、90AH のリチウムイオン電池も用いられ、数時間以内の測定であれば、利用可能であることが示された。今後、ソーラーパネルも含め、さらに多様な電源の併用も検討することが必要である。

5. 風よけシェルター

風の影響を如何に軽減するかは、重力測定では測定精度に直結する最も重要な課題の一つである。国内の測定では、作業性も考慮し、衝立や風よけ幕など、簡易な方法が多く用いられてきた。一方、JARE-59 で実施された A10 データの解析結果などをみると、南極では野外測定での風ノイズの影響が大きく、その軽減のための

風除けは極めて重要で、作業性の低下はある程度やむを得ないとしても、しっかりしたテント等の利用を考える必要がある。

具体的に、JARE-59 では図 1 (a)~(c)の異なるタイプのテントを用いた測定を実施した。このうち、(a)の空気で膨らませるタイプは、設置の容易さを狙ったものであるが、実際には強風時にはほとんど使用できず、また、耐久性の点でも実用性は低かった。(b)のタイプは、設置は簡単であるが、やはり、強風には弱く、実用的には風の弱いときの利用に限られる。一方、保温効果はあり、実際、暖房のない屋内での、FG-5 の保温に小型ヒーターを併用して利用したが、このような目的では大変有用である。結果として、強風の際に最も有用なのは(c)のタイプであった。しかし、使用したものはテント底面に布があるため、A10 測定用には、底面を切り抜くなどの加工をして使用するのが望ましい。

6. おわりに

南極での野外における絶対重力測定方法について、主に A10 の使用を想定し、問題点や対策の検討を行い、幾つかの有用な知見を得た。今後、原子干渉式絶対重力計や、その他、異なる方式の重力計が用いられる場合でも、重力計の輸送、電源、風対策などは共通の検討課題であり、これまでの経験や今回の検討が生かされるものと期待している。



図 1 (a)



(b)



(c)

[参考文献]

- Fukuda, Y, J. Nishijima, Y. Sofyan, M. Taniguchi, M. Yusuf, H.Z. Abidin (2016): Application of A10 absolute gravimeter for monitoring land subsidence in Jakarta, Indonesia, IAG Symposia 145, Springer, DOI: 10.1007/1345_2016_221.
- Kazama, T., H., Hayakawa, T. Higashi, S. Ohsono, S. Iwanami, T. Hanyu, H. Ohta, K. Doi, Y. Aoyama, Y., Y. Fukuda, J. Nishijima, and K. Shibuya (2013): Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica, Polar Science, 7, 260-277, doi: 10.1016/j.polar.2013.07.001.
- Nishijima, J., Y. Fujimitsu, Y. Sofyan, Y. Fukuda, T. Hasegawa, M. Taniguchi (2010): A geothermal reservoir monitoring using an absolute gravity measurement around Takigami geothermal power plant, central Kyushu, Japan, RENEWABLE ENERGY 2010 Proceedings (CD-ROM), 2010.10.

[研究発表]

古生代炭酸塩岩のストロンチ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・助教

(国立極地研究所)

三澤 啓司 准教授

平成 29 年～令和元年 (3 年)

[研究成果]

1. はじめに

ストロンチウム同位体は、安定同位体 ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{88}Sr と放射壊変起源 ^{87}Sr がある。 ^{87}Rb - ^{87}Sr 同位体系は、放射年代法、化学層序編年など、半世紀以上地球化学分野で多く利用されてきた。一方、ストロンチウム安定同位体 ($\delta^{88}\text{Sr}$) は、最近高精度な分析ができるようになり、天然での同位体分別について未解明なことも多い段階ではあるが、全海洋 Sr 収支において重要な役割を果たしている海洋炭酸塩の生成・溶解の指標として利用出来ることが報告された (例えば, Vollstaedt et al., 2014)。

本研究では、顕生代最大の海洋 Sr 収支変動が起きたと考えられる古生代末ペルム紀中期-後期境界 (Guadalupian/Lopingian boundary; GLB) の表層環境変動の解明のために、詳細な生層序学データのある炭酸塩試料のストロンチウム安定同位体分析を実施した。炭酸塩の分析に先立ち、 ^{84}Sr - ^{87}Sr ダブルスパイク法 (DS 法) による高精度ストロンチウム安定同位体分析法の確立のために、各種標準試料の繰り返し分析をおこなった。

1. 分析方法

試料の前処理、Sr カラム分離法は、De Muynck et al. (2009) と Neymark et al. (2014) に従っておこなった。DS 法は、 ^{84}Sr (Oak Ridge National Laboratory) ^{87}Sr (ISOFLEX USA) を用いて、Neymark et al. (2014) と Krabbenhöft et al. (2009) に従い、ダブルスパイクの調整をおこなった。同位体測定には、TRITON TIMS (Thermo-Fisher) を用いた。

2. 標準試料の $\delta^{88}\text{Sr}$ 分析結果

分析した標準試料は、玄武岩標準試料 6 種 (JB-1, JB-2, JB-3, BCR-1, BHVO-2, BIR-1a), 炭酸塩標準試料 2 種 (EN-1, JcP-1), 標準海水 (NASS-6) で、それぞれ、3-6 回繰り返し測定をおこなった。その結果、測定誤差は $\pm 0.03 \text{‰}$ ($\pm \text{SD}$) で高い再現性が得

られた (図 1)。標準海水 NASS-6 の繰り返し測定結果は、 $\delta^{88}\text{Sr}=0.374\pm 0.024\text{‰}$ ($n=9$) が得られ、文献値 (Neymark et al. (2014); $\delta^{88}\text{Sr}=0.378\pm 0.026\text{‰}$, $n=8$) とよく一致している。文献値のある標準試料は、JcP-1, EN-1, BHVO-2 の測定結果も誤差の範囲でよく一致した。これにより、本研究で調整をおこなったダブルスパイクを用いて信頼性の高い安定同位体分析結果が得られることが確認された。

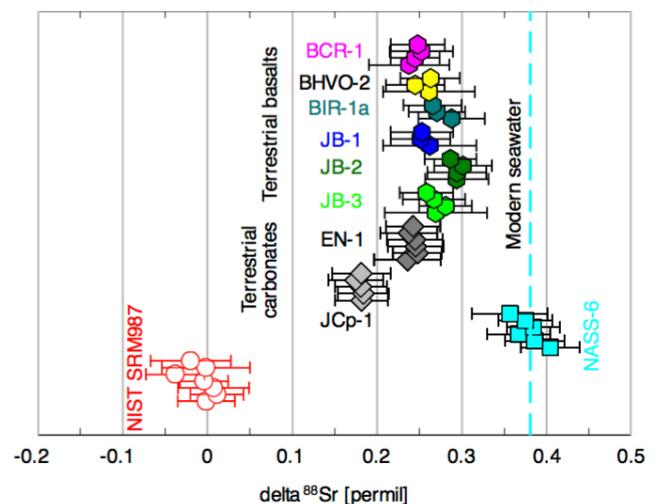


図 1 標準試料の $\delta^{88}\text{Sr}$ 分析結果

3. ペルム紀炭酸塩の $\delta^{88}\text{Sr}$ 分析結果

分析した炭酸塩試料は、中国 Liangshan セクション (Wuchiapingian 期模式地) のペルム紀後期炭酸塩岩及び Penglaitan セクション (GLB の GSSP) のペルム紀中期炭酸塩岩と、岐阜県のペルム紀中期赤坂石灰岩から試料を採取した。Liangshan, Penglaitan セクションの堆積場は、超大陸パンゲア陸棚 (Jin et al., 2006), 付加体石灰岩の赤坂石灰岩の初生堆積場は、低緯度超海洋中央部の海洋島頂部と考えられる (例えば, Ota and Isozaki, 2006)。

分析結果により、 $\delta^{88}\text{Sr}$ 値は、GLB 直前までペルム紀中期キャピタニアン期の炭酸塩は0.17-0.30%の範囲で変動し、ペルム紀後期の炭酸塩では、0.37-0.51%へ上昇していることが明らかになった。炭酸塩は、生成時に海水より軽い ^{86}Sr を選択的に取り込み、低い $\delta^{88}\text{Sr}$ を持つため、海洋炭酸塩生成・溶解の指標として利用出来る。本研究の結果は、キャピタニアン期の海洋炭酸塩の生成に対する溶解の卓越を示唆する。その仕組みについて次のような説明が考えられる。キャピタニアン期は、グローバルな寒冷化により、海水準が低下した（例えば、Kofukuda et al., 2014）。それにより、陸棚が露出し、炭酸塩の堆積場縮小および既存の炭酸塩の溶解/侵食が進んだと考えられる。海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、キャピタニアン期に顕生代最小値（ <0.7070 ）がおよそ500万年間続き、ペルム紀後期以降急上昇し、その原因と

して、寒冷化に伴う乾燥や氷床拡大で大陸地殻が被覆され、高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持つ大陸ケイ酸塩の風化率が低下したと説明された(例えば、Kani et al., 2008)。大陸内部に分布する形成年代の古いケイ酸塩に比べて低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持つ陸棚の若いケイ酸塩や炭酸塩の風化率の上昇は、海洋への“大陸フラックス”の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比も低下させることとも整合的である。

$\delta^{88}\text{Sr}$ は海洋Sr収支の主要なフラックスである海洋炭酸塩の生成・溶解の指標として有用なプロキシのひとつであり、顕生代最大の海洋Sr収支変化の全体像やその原因、キャピタニアン期の表層環境の理解のために重要な成果が得られた。本研究で確立されたDS-TIMS分析法は、今後も様々な研究での応用が期待できる。

$$\delta^{88}\text{Sr} = \left(\frac{{}^{88}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}}{({}^{88}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

[参考文献]

- 1) Vollstaedt et al. (2014); The Phanerozoic $\delta^{88/86}\text{Sr}$ record of seawater: new constraints on past changes in oceanic carbonate fluxes, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 128, 249-265
- 2) De Muynck et al. (2009); Systematic evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic resin for obtaining a purified Sr fraction with quantitative recovery from complex and Ca-rich matrices, *J. Anal. At. Spectrom.*, 24, 1498-1510.
- 3) Neymark et al. (2014); Precise determination of $\delta^{88}\text{Sr}$ in rocks, minerals, and waters by double-spike TIMS: a powerful tool in the study of geological, hydrological and biological processes, *J. Anal. At. Spectrom.*, 29, 65-75
- 4) Krabbenhöft et al. (2009); Determination of radiogenic and stable strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}/\delta^{88/86}\text{Sr}$) by thermal ionization mass spectrometry applying an $^{87}\text{Sr}/^{84}\text{Sr}$ double spike, *J. Anal. At. Spectrom.*, 24, 1267-1271.
- 5) Jin et al. (2006); The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian Stage (Permian). *Episodes* 29, 253-262.
- 6) Ota and Isozaki (2006); Fusuline biotic turnover across the Guadalupian-Lopingian (Middle-Upper Permian) boundary in mid-oceanic carbonate buildups: Biostratigraphy of accreted limestone in Japan, *J. Asian Earth Sci.*, 26, 353-368.
- 7) Kofukuda, D., Isozaki, Y., Igo, H., 2014. A remarkable sea-level drop across the Guadalupian-Lopingian (Permian) boundary in low-latitude mid-Panthalassa: irreversible changes recorded in accreted paleo-atoll limestones in Akasaka and Ishiyama, Japan. *J. Asian Earth Sci.* 82, 47-65.
- 8) Kani et al. (2008); The Paleozoic minimum of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratio in the upper Guadalupian (Permian) mid-oceanic carbonates: a critical turning point in the Late Paleozoic. *Journal of Asian Earth Sciences* 32, 22-33.

[研究発表]

Stable Sr isotopes of the Middle Permian carbonate: its implication of ocean Sr budget change, 可児 智美, 三澤 啓司, 第10回極域科学シンポジウム 2019年12月4日
 ペルム紀中期後期海水の $\delta^{88}\text{Sr}$ と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 記録: 大量絶滅期の海洋Sr収支変化, 可児 智美, 磯崎 行雄, 三澤 啓司, 石川 晃, 米田 成一, 日本地球惑星科学連合 2019年大会 2019年5月28日
 標準物質のストロンチウム安定同位体組成 ($\delta^{88}\text{Sr}$), 可児 智美, 三澤 啓司, 米田 成一, 第8回同位体環境学シンポジウム 2018年12月
 $\delta^{88}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in Middle-Upper Permian seawater, 可児 智美, 磯崎 行雄, 三澤 啓司, 石川 晃, 米田 成一, 日本地球惑星科学連合 2018年大会 2018年

日の出岬のアダカイト質トーナル岩の成因論

◎廣井 美邦 千葉大学理学研究科・名誉教授
 (国立極地研究所)
 本吉 洋一 教授
 外田 智千 准教授
 平成29年～令和元年(3か年)

[研究成果]

アダカイト質マグマの成因は、大陸地殻の成因・発達に直結する重要な課題である。それは「沈み込んだ海洋地殻が部分熔融して発生する」とする説が有力である。しかしこれまでの高温高压実験結果を含めたアダカイト質マグマの成因論では、海洋地殻を玄武岩で代表させ、それ以外の構成岩類、特に含水鉱物に富む変成層状斑レイ岩にはあまり注意が払われてこなかった。南極、プリンス・オラフ海岸の日の出岬に産するアダカイト質トーナル岩は次の2点の注目すべき特徴を示す；(1) 塩基性～超塩基性のグラニュタイトと石灰珪質岩の岩塊を含む、(2) 残晶状のざくろ石と藍晶石を含む。石灰珪質岩塊は主としてグロッシュラー成分に富むザクロ石あるいは単斜輝石と灰長石のシンプレクタイトで構成される(図1)。また藍晶石の出現と密接な関連性を示し、それが堆積岩起源ではなく、変成した海洋地殻の層状斑レイ岩の一部(斜長岩)に由来する可能性を示唆している。このように、日の出岬に産するトーナル岩はアダカイト質マグマの成因に直結する重要な手掛かりに富んだ岩石として特に貴重であり、その詳細な分析的研究所含水変成層状斑レイ岩の高温高压部分融解実験が重要と考え、実施した。

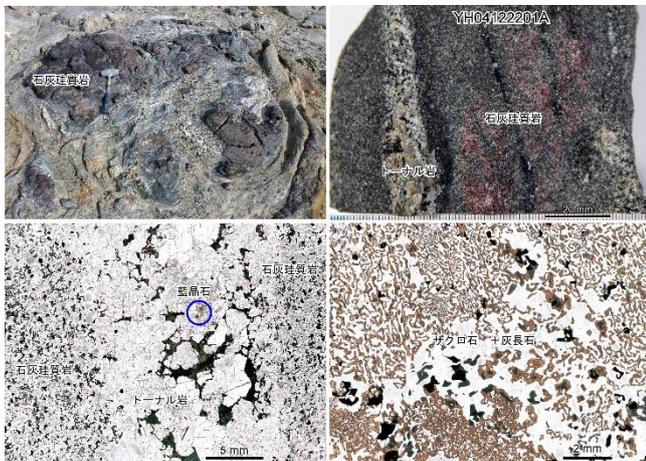


図1 日の出岬産の石灰珪質岩塊とその中の藍晶石を含むトーナル岩細脈(孫羽ら(2014)の図3より)

	TO10_ME	DATE25_07b2-1	DATE25_07b2-2	YM181_12603	1811270_1X
SiO2	43.56	41.79	41.71	43.14	44.32
TiO2	0.10	0.10	0.06	0.08	0.04
Al2O3	25.45	26.90	27.36	25.40	26.46
Fe2O3	3.64	4.86	3.33	3.39	3.59
MnO	0.05	0.06	0.04	0.05	0.04
MgO	4.72	5.78	4.02	4.51	4.93
CaO	17.37	17.07	18.70	18.26	15.65
Na2O	1.08	0.77	0.67	0.34	1.43
K2O	0.15	0.11	0.09	0.27	0.03
P2O5	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
LOI	2.30	1.98	2.58	2.78	2.13
Total	98.43	99.45	98.57	98.24	98.63
Ba	67	23	56	46	35
Ce	1	5	7	7	4
Cr	213	73	226	281	75
Ga	7	6	8	8	8
Nb	1	0	1	0	0
Ni	50	65	45	56	52
Pb	2	3	2	1	3
Rb	5	4	4	8	1
Sc					
Sr	655	824	651	607	683
Th	10	18	11	11	14
V	44	35	36	45	23
Y	3	3	2	3	2
Zr	10	10	9	12	10

表1 本邦の四国三波川変成帯で採集したゾイサイト角閃岩試料の全岩化学分析値(島根大学の亀井淳志教授分析) 試料 18112701-X を実験に使用した。

高温高压実験は愛媛大学の川寄智佑名誉教授によって山口大学に設置のピストンシリンダー型装置で実施された。出発物質には本邦の四国三波川変成帯に産するゾイサイト角閃岩試料(Sp. 18112701-X)を用い、18kbar・900℃の条件下で240時間加熱し、部分融解させた(図2)。表1に出発物質を含む三波川変成帯産の

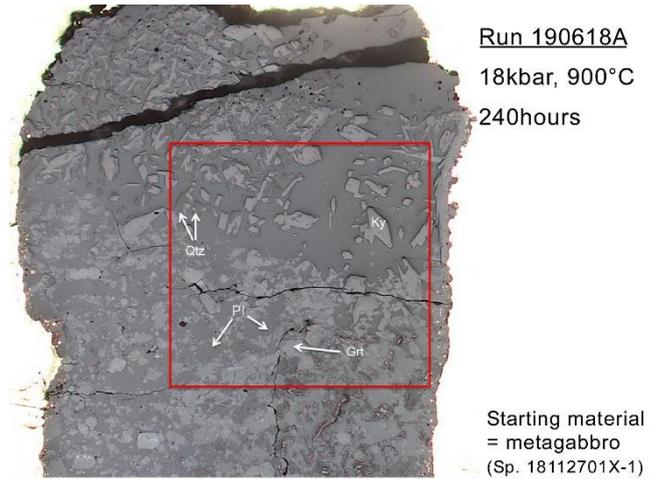
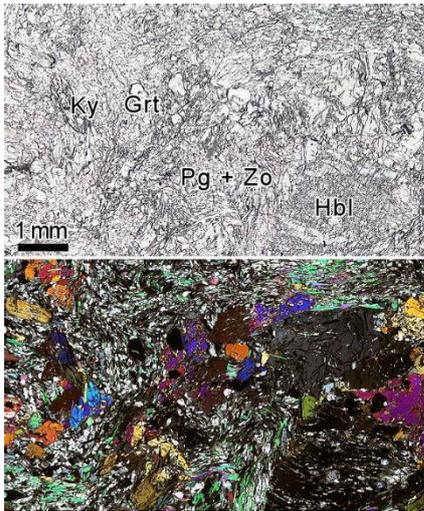


図2 高温高压部分融解実験の出発物質として使用した四国三波川変成帯産のパラゴナイト (Pg) - ズイサイト (Zo)角閃岩 (試料 18112701-X) の偏光顕微鏡写真。少量の藍晶石 (Ky)、ザクロ石 (Grt) と石英を含む。

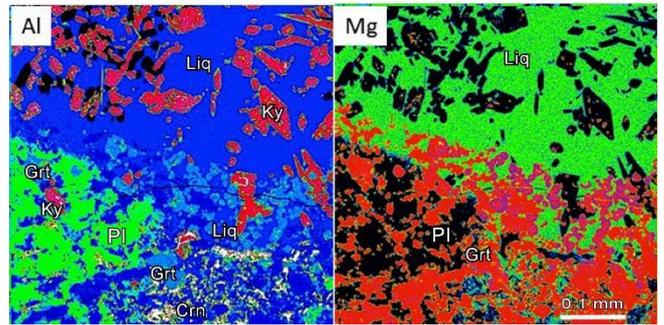


図4 四国三波川変成帯産のパラゴナイト (Pg) - ズイサイト (Zo) 角閃岩の高温高压部分融解実験生成物の液 (Liq) と藍晶石 (Ky)、ザクロ石 (Grt)、斜長石 (Pl)、石英 (Qtz)、コランダム (Crn)

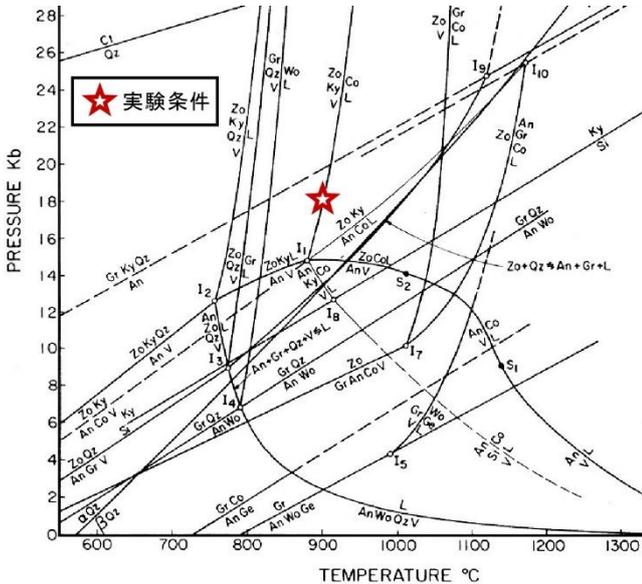


図3 Boettcher (1970)による CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O 系での単変反応群と高温高压部分融解実験の条件を示す温度-圧力図

ズイサイト角閃岩試料の全岩化学分析値を示したが、著しく Al₂O₃ に富み、もともと斜長石の濃集した斜長岩的な斑レイ岩であったことと調和する。それらは少量の藍晶石、ザクロ石、石英を含むパラゴナイト-ズイサイト角閃岩である。これまでの CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O 系での実験と理論的解析から、過剰な水があれば 18kbar・900°C の条件下でズイサイトは他の共存鉱物と反応して液とザクロ石やコランダムを生成するが、灰長石は生成されないと予測される (図2)。図4に実験生成物の2次電子線像と元素マップを示したが、この実験の

結果では、ズイサイトとパラゴナイトは完全に消失し、液とザクロ石、コランダムに加えて灰長石、藍晶石、石英も生成された。単純な CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O 系での予測と実験結果との相違は、実験の系には比較的多量の普通角閃石とパラゴナイトで具現されているように MgO、FeO、Na₂O の成分が含まれており、また過剰の水がないことで、斜長石とザクロ石+藍晶石+石英の組合せ (灰長石の分解生成物に相当) の両方の安定領域

No.	2	17	21			
SiO ₂	40.36	51.43	40.38	47.19	55.85	66.42
TiO ₂	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.06
Al ₂ O ₃	18.52	23.60	31.00	36.22	13.53	16.09
FeO*	1.00	1.27	0.72	0.84	0.80	0.95
MnO	0.06	0.08	0.02	0.03	0.00	0.00
MgO	3.82	4.87	2.69	3.14	2.77	3.29
CaO	13.34	17.00	9.74	11.39	10.16	12.08
Na ₂ O	1.15	1.47	0.88	1.02	0.81	0.96
K ₂ O	0.18	0.23	0.11	0.13	0.13	0.15
Total	78.48	100.00	85.58	100.00	84.08	100.00

表2 高温高压部分融解実験によって生成した液の分析値 Total を100%に換算したものも示す

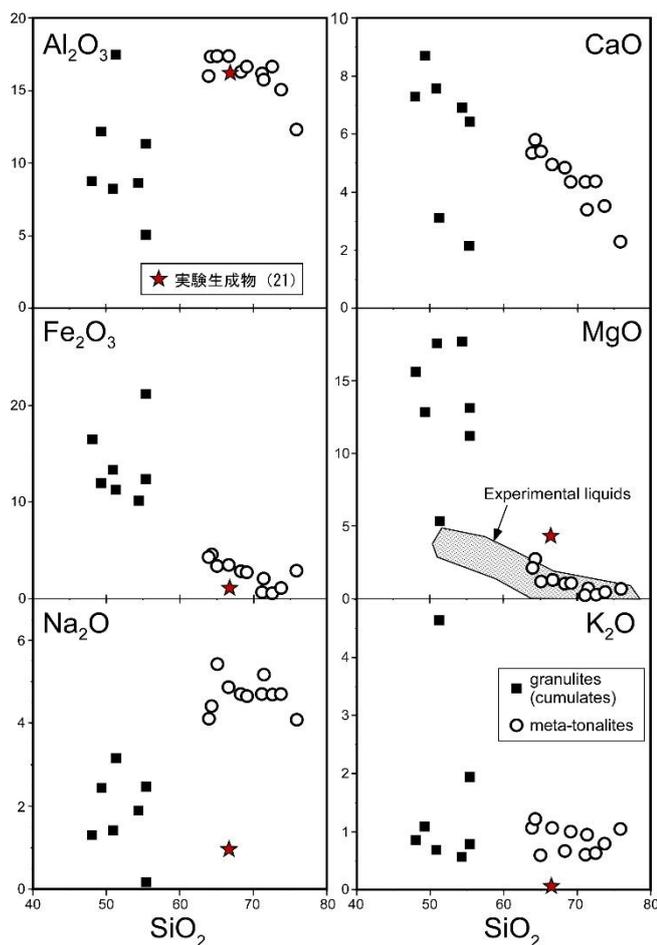


図5 高温高压部分融解実験によって生成した液(表2の21)と日の出岬のアダカイト質トータル岩等との比較(Hiroi et al. (2008)の図3にプロット)

が拡大し、斜長石+ザクロ石+藍晶石+石英+液の組合せが安定化した結果と考えられる。実際、生成したザクロ石はグロッシュラーではなく、パイロプ成分を主成分として含むものであり、斜長石の灰長石成分は85モル%以下である(表3)。一方、コランダムが石英とは異なる領域に出現していることは、実験カプセルの中で局所的にSiO₂に過剰なところと不飽和なところが生じたこと、したがって液の組成も不均質であることを示している(表2参照)。しかしもっとも重要

[参考文献]

- 1) Boettcher, A.L. (1969) The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O at high pressures and temperatures. *Journal of Petrology*, Vol. 11, Part 2, pp. 337-379.
- 2) Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, Vol. 46, p411-p429.
- 3) Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite and sanukitoid: relationships and some implications for crustal

No.	Garnet					Plagioclase		
	25	26	28	40	41	42	46	47
SiO ₂	40.78	40.98	42.86	42.32	42.10	47.33	49.42	48.23
TiO ₂	0.05	0.05	0.04	0.08	0.03	0.03	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	22.91	23.24	23.41	23.76	24.27	33.93	31.20	32.50
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
FeO	18.82	17.79	7.23	10.17	10.44	0.09	0.15	0.14
MnO	0.29	0.52	0.18	0.23	0.20	0.00	0.01	0.00
MgO	11.46	11.21	14.27	14.12	15.59	0.03	0.14	0.08
CaO	7.02	7.81	13.09	11.43	8.99	17.23	15.15	16.15
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	2.60	2.18
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.04
Total	101.35	101.62	101.11	102.12	101.65	100.31	98.72	99.34
O	12	12	12	12	12	8	8	8
Si	3.015	3.013	3.061	3.012	2.993	2.168	2.291	2.225
Ti	0.005	0.003	0.002	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001
Al	1.997	2.014	1.971	1.993	2.034	1.832	1.704	1.767
Cr	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.544	1.094	0.432	0.605	0.621	0.003	0.006	0.005
Mn	0.014	0.032	0.011	0.014	0.012	0.000	0.000	0.000
Mg	1.393	1.229	1.520	1.498	1.652	0.002	0.010	0.006
Ca	1.032	0.615	1.002	0.872	0.685	0.846	0.752	0.798
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.146	0.234	0.195
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.002
XMg/An	0.719	0.529	0.779	0.712	0.727	85.111	76.036	80.201
Alm	18.237	36.835	14.57	20.241	20.909			
Prp	46.698	41.38	51.265	50.117	55.623			
Grs	34.596	20.707	33.794	29.174	23.064			
Sps	0.4693	1.0774	0.371	0.4684	0.404			

表3 高温高压部分融解実験によって生成したざくろ石と斜長石の化学組成

な点は、生成した液がアダカイト質ではないことである(図5)。この液が固相から分離し、含水層状斑レイ岩の他の部分で生成した液と混合してマグマとなるはずであるが、それらの液の組成や量比は不明であり、最終的にアダカイト質になるかどうかは不明ではない。

以上のように、斜長岩的な斑レイ岩が変成して含水鉱物に富むものとなり、それが部分融解することによって、ざくろ石と斜長石の集合体に加えて藍晶石も生成されることが実証され、鉱物組合せの面で日の出岬の石灰珪質岩塊が再現された。他方、鉱物や液の化学組成の点では必ずしも再現されているとはいえず、さらなる実験と検討が必要である。

evolution. *Lithos*, Vol. 79, p1-p24.

- 4) Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Ishikawa, N., Hokada, T. and Shiraishi, K. (2008) Origin of xenocrystic garnet and kyanite in clinopyroxene-hornblende-bearing adakitite meta-tonalites from Cape Hinode, Prince Olav Coast, East Antarctica. In; *Geodynamic evolution of East Antarctica: a key to the East–West Gondwana connection*, Geological Society of London Special Publication 308, 333-350.
- 5) 孫 羽、廣井美邦、大和田正明 (2014) 東南極、日の出岬の藍晶石を含むトーナライト：特に、石灰珪質岩塊近傍に産出するものについて. *岩石鉱物科学*, Vol. 43, p203-p214.

[研究発表]

(別紙) 参加者一覧

研究協力者

愛媛大学	名誉教授	川寄智佑
島根大学	教授	亀井淳志
山口大学	教授	大和田正明
新潟大学	教授	サティッシュ・クマール

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 首都大学東京大学院理学研究科・助教
海老原 充 早稲田大学教育学部理学科地球科学専修

(国立極地研究所)

山口 亮 准教授 (担当教員)

平成 29 年～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

南極隕石の化学組成を用いた分類を行うために、誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) を用いた分析手法の確立を行った。ICP-MS はほとんどの元素に対し高感度であり、地球・宇宙化学的試料の元素組成を求めるためによく用いられている。通常、酸を用いて固体試料の溶液化し、ICP-MS 装置に溶液を導入する方法が用いられている。レーザーアブレーション法を用いて固体試料を溶液化せずに固体のまま測定する方法もある。そこで、本研究課題では、レーザーアブレーション法を用いて、南極鉄隕石の分析法の確立を行った。得られた成果を以下に示す。

鉄隕石の元素組成分析

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。鉄隕石は構造あるいは化学組成から 13 個のグループに分類されている。近年、鉄隕石の分類は化学組成を用いて行われており、その元素組成は、中性子放射化分析法を用いて得られている。一方、溶液化を伴い ICP-MS による分析例は報告されているが、鉄隕石試料の溶液化の際、一部の元素は揮発する恐れがある。そこで本研究課題では、より簡単に鉄隕石の化学的分類を行うために、レーザーアブレーション法を用いた分析手法の確立を目

指した。レーザーアブレーション法により得られた分析値は、機器中性子放射化分析法で得られた値と比較することによって評価した。

1) レーザーアブレーション法による測定

鉄隕石の 20 元素 (P, S, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Mo, Ru, Rh, Pd, W, Re, Os, Ir, Pt と Au) の定量を試みた。分析に用いたスポットサイズは 100 μ m であり、照射パターンはラインモードを用いた。低分解能 (R=300) で 34 個の同位体 (^{31}P , ^{32}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 , ^{97}Mo , ^{99}Ru , ^{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) を測定した。

Ni, Cu, Ga, Ge, Mo, Ru, Pd, W, R, Os, Ir と Pt は、測定におけるスペクトル干渉を確認するために、複数の同位体を測定した。定量には、2 つの鉄隕石 (Hoba, North Chile) と黄鉄鉱を用いた。分析した試料は、異なるグループである Canyon Diablo (IAB-MG), Cape York (IIIAB), Muonionalusta (IVA) と Dronino (ungrouped) である。Ni, Cu, Ga, Os, Ir, Pt にはどの同位体にもスペクトル干渉が生じていなかったが、 ^{73}Ge , ^{97}Mo , ^{99}Ru には、それぞれ ^{57}FeO , $^{57}\text{FeAr}$, $^{59}\text{CoAr}$ のスペクトル干渉があり、

^{74}Ge , ^{95}Mo , ^{101}Ru で得られた値より系統的に高い値が得られることがわかった。 ^{102}Ru と ^{187}Re は、同重体である ^{102}Pd と ^{187}Os のスペクトル干渉があるが、 ^{105}Pd と ^{188}Os を用いて適切にスペクトル干渉を補正することが可能であることがわかった。

2) Canyon Diablo, Cape York, Muonionalusta と Dronino の分析

確立した測定方法を用いて4つの鉄隕石の分析を行った。鉄隕石は、ニッケル含有量の異なるカマサイトとテーナイトから成り、副構成鉱物としてトロイライトやシュライバーサイトやコーヘナイトも含まれる。そこで、副構成鉱物が元素組成にどの程度影響するのか検証した。トロイライト、シュライバーサイトやコーヘナイトは、副構成鉱物であるため、鉄隕石の元素組成にあまり影響しないことがわかった。しかし、分析した場所によりカマサイトとテーナイトの割合で鉄隕石の元素組成に変化がある

ことがわかった。以上より、分析にはより代表的な場所を選ぶあるいは、分析する場所をより多く取ること、より代表的な値が得られることがわかった。レーザーアブレーション法により得られた値を機器中性子放射化分析法により得られた値と比較した。ほとんどの元素でレーザーアブレーション法と機器中性子放射化分析法で得られた値で、よい一致が見られたが、Crでは、不一致が見られた。機器中性子放射化分析法では、約150 mgの試料を用いており、機器中性子放射化分析法で用いた試料にはクロム鉄鉱がより多く含まれていたと考えられる。以上より、鉄隕石のレーザーアブレーション法を用いた化学的分類の分析方法を確立した。

3) 南極隕石の化学的分類

確立した分析手法を用いて、これまでに分類されていない南極鉄隕石の分析を行い、分類を行った (Yamaguchi et al., 2020)。

[研究発表]

Yamaguchi A., Shirai N. Okamoto C. and Ebihara M. (2017) Petrogenesis of the EET 92023 achondrite and implications for early impact events. *Meteoritics & Planetary Science*, 52, 709-721.

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

FeAlO₃ 相の安定領域と超高温変成岩類の酸素分圧の解析

◎川崎 智佑 愛媛大学理学部・名誉教授

(国立極地研究所)

本吉 洋一 教授

平成 30 年～令和元年 (2 年間)

[研究成果]

東南極リュツオホルム岩体ルンドボークスヘッタで、層状構造をなす珪線石片麻岩とサフィリン堇青石グラニュライト中の珪線石の Fe 含有量が大きく異なっている (Kawasaki et al, 2011). この原因を調べている過程で、珪線石、コランダムと共存する FeAlO₃ 相を 9 kbar, 1050 °C で得た (Run no. 171018A). この FeAlO₃ 相は大気圧下で酸素分圧が 0.21 気圧では、1318~1410 °C の温度範囲で以上で安定であり、1318 °C 以下ではヘマタイト Fe₂O₃ とコランダム Al₂O₃ に、1410 °C 以上では、スピネルとコランダムに分解すると報告されている (Muan and Gee, 1956).

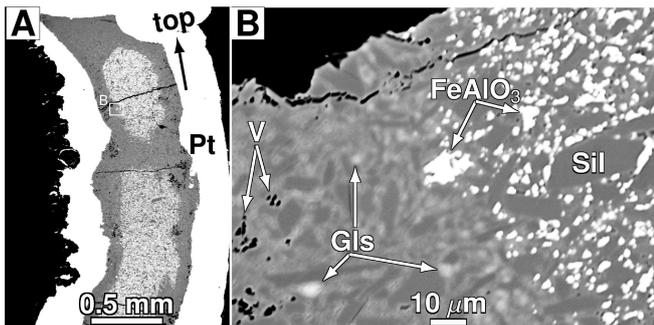


Figure 1. 東南極ルンドボークスヘッタ産ケイ線石と Fe₂O₃ (重量比 95:5) の含水混合試料を Pt 試料容器内で 5 kbar/1050 °C で、548h30m 焼結して得られた生成物 (Run no. 081119A; 研究業績 1). FeAlO₃, FeAlO₃ phase. Gls, glass. Pt, platinum capsule. Sil, sillimanite. V, vapour.

ルンドボークスヘッタのケイ線石濃集岩から取り出したケイ線石と Fe₂O₃ (重量比 95:5) および

ケイ線石と Fe₃O₄ (重量比 86:14) の細粒混合物を用いて、超高温変成作用の条件 (5~11 kbar の圧力範囲, 850~1050 °C の温度範囲) で、それぞれ Pt および AuPd 試料容器内で加湿再結晶化させた。

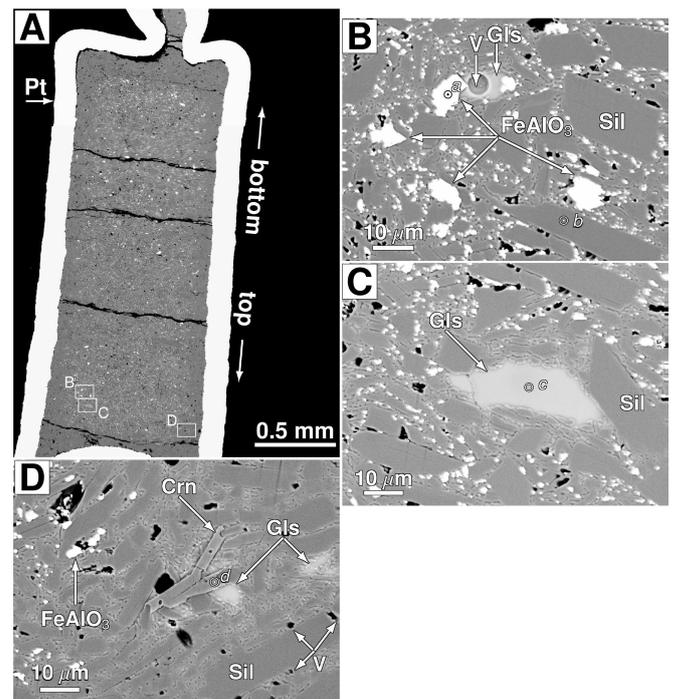


Figure 2. 東南極ルンドボークスヘッタ産ケイ線石と Fe₂O₃ (重量比 95:5) の含水混合試料を Pt 試料容器内で 9 kbar/1050 °C で、31h 焼結して得られた生成物 (Run no. 171018A; 研究業績 1). Crn, corundum. FeAlO₃, FeAlO₃ phase. Gls, glass. Sil, sillimanite. Pt, platinum capsule. V, vapour.

ケイ線石-Fe₂O₃ 系では、SiO₂ に富むメルトと気相を伴って、FeAlO₃ 相とコランダムがケイ線石結晶粒間に晶出した (Fig. 1 および Fig. 2).

また、ケイ線石– Fe_3O_4 系では、局所的に FeAlO_3 相、コランダム、マグネタイト・ヘルシナイトスピネルおよびウルボスピネルからなる結晶集合体が存在していたが、 FeAlO_3 相と SiO_2 に富むメルトおよび気相がケイ線石結晶の間に見い出された (Fig. 3).

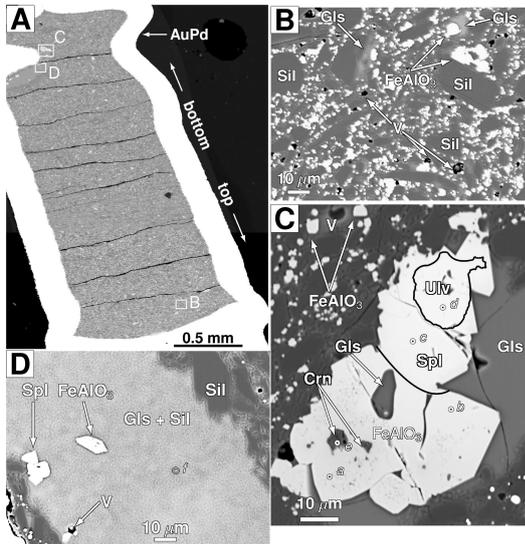


Figure 3. 東南極ルンドボークスヘッタ産ケイ線石と磁鉄鉱 (重量比 86:14) の含水混合試料を AuPd 試料容器内で 9 kbar/1050 °C で、31h 焼結して得られた生成物 (Run no. 171018D; 研究業績 1). AuPd, gold–palladium capsule. Crn, corundum. FeAlO_3 , FeAlO_3 phase. Gls, glass. Sil, sillimanite. Spl, magnetite–hercynite spinel. Ulv, ulvöspinel. V, vapour.

FeAlO_3 相は、含水条件であれば、鉄とアルミニウムに富んだ超高温変成岩中に見出される可能性を示唆している。

[参考文献]

T Kawasaki, N Nakano, Y Osanai, 2011. Osumilite and a spinel + quartz asso-

ciation in garnet–sillimanite gneiss from Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. *Gondwana Research*, 19, 430–445
A Muan, CL Gee, 1956. Phase equilibrium studies in the system iron oxide– Al_2O_3 in air and at 1 atm. O_2 pressure. *Journal of the American Ceramic Society*, 39, 207–214.

[研究業績]

1. T Kawasaki, T Adachi, H Ohfuji, Y Osanai, 2019. FeAlO_3 under ultrahigh-temperature metamorphic conditions Experimental evidence from the sillimanite – Fe_2O_3 and sillimanite – Fe_3O_4 systems. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 114, 238–254.
2. T Kawasaki, T Adachi, N Nakano, Y Osanai, 2019. Metamorphic P – T path of West Ongul Island, Lützow-Holm Complex, East Antarctica inferred from inclusions within magnetite – ilmenite megacryst in microcline pegmatite dyke. 2019 IAGR Annual Convention & 16th International Conference on Gondwana to Asia. IAGR Conference Series No. 25, 33–34.
3. M Owada, T Kawasaki, A Kamei, 2019. Adakitic granodiorite derived from normal thickened crust inactive continental margin, Shikanoshima Island, Kyushu, southwest Japan. 2019 IAGR Annual Convention & 16th International Conference on Gondwana to Asia. IAGR Conference Series No. 25, 58–60.

東南極リュツォ・ホルム岩体の地体構造論的構成・大構造と地殻進化の研究

◎豊島 剛志 新潟大学自然科学系（理学部）・教授
 石川 正弘 横浜国立大学環境情報研究院・教授
 香取 拓馬 新潟大学大学院自然科学研究科
 （国立極地研究所）
 外田 智千 准教授
 平成 30 年～令和元年（2 か年）

[研究成果]

本研究の目的は、東南極リュツォ・ホルム岩体の地体構造論的構成・区分を再検討し、地殻進化・テクトニクスを理解することである。これまで、同岩体の多様な岩石の地質構造、特に大構造や相互関係についての理解が不十分なままで、地殻進化・テクトニクスの解釈には大きな問題があった。そこで本研究では、極地研究所保有の岩石試料や調査資料を活用して、同岩体の地質構造と岩石相互の関係、変形作用・変成作用・火成活動・年代論の関係を整理して、地体構造論的構成・区分を再検討し、同岩体の地殻進化・テクトニクスの理解を進める。また、これまでに同岩体の研究を推進してきた地学の種々の専門分野の研究者の助言・協力を仰ぎ、共同研究育成研究員による研究を加えて、本研究を実施することとした。本研究成果は、当初メンバーに入っていない北野一平（九州大学）を加えた 5 名による共同研究結果である。

その結果、岩相およびその組み合わせ、地質図に示されている地質構造、構造的連続、ジルコン年代、変成作用の性格などから見て、リュツォ・ホルム岩体は、以下の少なくとも 5 つのユニットおよびそれらの組み合わせからなると解釈される。これらユニットの区分の相互関係（不整合、貫入関係、断層関係など）は一部を除いて不明である。

1) 600Ma 岩石ユニット：600Ma の島弧・付加堆積物からなるユニット。東オングル島東部から、海岸沿いに南に延び、ラングホブデ東部、スカルブスネス東部にわたって分布する。10 億年前の基盤の上に堆積した堆積物を原岩とする変成岩を含む。

2) 1000Ma 深成岩 (orthogneiss) ユニット：東オングル島西部と西オングル島から、海岸沿いに南に延び、ラングホブデ西部、スカルブスネス西部、ヒューカにわたって分布する。

3) 1800Ma 深成岩 (orthogneiss) ユニット：1800Ma の深成岩を主体とし、石灰岩を含む堆積岩起源変成岩を伴う。orthogneiss は基盤で、堆積岩

起源変成岩は被覆層の可能性あり。ENE-WSW トレンドで、テーレン、スカーレン、スカルビークハルセンにわたる。狭長な分布を示すが、西方延長は不明である。

4) 2500Ma 深成岩 (orthogneiss) ユニット：当時の大陸地殻の一部である。ルンドボークスヘッタ北部を北限として、ストランドニッパ、ボツヌーテンを含んで広がっている。すだれ岩は 25 億年前のユニット。1) ~3) のユニットの基盤岩類である可能性あり。

5) レイナーコンプレックスに属するユニット：かすみ岩からあけぼの岩まで広がる。

以上のユニットは、以下の露岩域において接していると考えられ、ユニット境界（不整合、貫入関係、断層関係など）には次のような可能性が抽出された。

- (1) 東オングル島：600Ma 岩石ユニットと 1000Ma 深成岩ユニットの境界があると考えられる。斜交関係にあるざくろ石片麻岩と角閃石片麻岩・輝石片麻岩互層との関係からみて、不整合または断層関係である。
- (2) ラングホブデ：北部～中央部および東部において、構造的連続が認められ、600Ma 岩石ユニットと 1000Ma 深成岩ユニットの境界が予想される。断層関係あるいは不整合関係であると予想される。パイルナップ構造や付加体構造が復元できる可能性がある。
- (3) スカルブスネス：北東部（クナッペン周辺）・東部（円山周辺）・南西部（鳥の巣湾東方）・南部（すりばち山・すりばち池周辺）では、600Ma 岩石ユニットと 1000Ma 深成岩ユニットが、付加堆積物と基盤の境界（不整合）として、あるいは断層によって接していると考えられる。すりばち池東方には、東オングル島の岩石・ユニット境界の南方延長が予想される。

- (4) スカーレン：既存の地質図では、おしあげ浜西方、かど岬東方、ひみ山周辺に構造的な不連続が見られ、基盤岩 (brown gneiss) と被覆層 (paragneiss) の境界 (不整合あるいは断層) が予想される。
- (5) スカレビークハルセン：基盤岩 (1800Ma 深成岩ユニット) と被覆層 (paragneiss) との境界があり、不整合あるいは断層関係の可能性はある。
- (6) ルンドボークスコラネ：600Ma 変成堆積岩ユニットと 1000Ma 深成岩ユニットの境界があり、不整合あるいは断層関係、貫入関係が予想される。
- (7) ルンドボークスヘッタ：Takahashi et al. (2017)により、非常に大きな構造線 (ユニット境界) が北部に存在するとされている。2500Ma 大陸地殻 (基盤岩) とそれを覆う変成堆積岩のユニット境界 (現在は断層関係であるが、当初は不整合関係) である可能性がある。
- (8) ボツンヌーテン：2500Ma 大陸地殻 (主に paragneiss) であるが、より新しいユニットとの境界が考えられる。
- (9) 明るい岬：構造的な不連続、斜交構造があるので、基盤と被覆層との関係が予想される。1000 Ma 深成岩ユニット・600 Ma 深成岩とこれらを被覆する paragneiss との境界である。
- (10) 天文台岩・長岩：orthogneiss と paragneiss との境界があり、基盤と被覆層の関係が予想される。
- (11) かすみ岩：付加体構造が残存している可能性がある。
- (12) 二番岩：1000 Ma アダカイトと 900Ma paragneiss との境界があり、不整合あるいは断層関係が予想される。
- (13) 日の出岬：1000 Ma アダカイトと 900Ma paragneiss との境界があり、不整合あるいは断層関係が予想される。
- (14) あげぼの岬：1000 Ma アダカイトと 900Ma paragneiss との境界があり、不整合あるいは断層関係が予想される。
- (15) 竜宮岬：orthogneiss と paragneiss との境界があり、基盤と被覆層の関係が予想される。
- (16) 新南岩：大きな構造歴不連続があり、orthogneiss と paragneiss との境界があり、基

盤と被覆層の関係が予想される。

上記すべての構造的な不連続・岩石境界の実体の解明には既存資料・試料だけでは限界があることがわかった。そこで、それらの実体解明のため、既存資料・試料の解析とともに、第 60 次南極地域観測隊夏隊として野外調査を実施して、各地における構造解析と構造的な不連続線の直接観察を行った。

その結果、次のことが特に明らかとなった。

ラングホブデ北部の二子山周辺の地質図に認められる NNE-SSW トレンドの構造的な不連続線は、その西側にある花崗岩質岩体東縁の貫入境界が初生的構造であったことが明らかとなった。さらに、その貫入境界に沿って花崗岩体が、東側が上昇する逆断層センスの剪断帯 (マイロナイト帯) となったことによって、構造的な不連続が強調されたことが明らかとなった。現在の構造的な不連続線は剪断帯の東縁である。その剪断帯にはシェードタキライトが伴われており、構造的な不連続の出現には地震を伴った構造運動があった。

スカレビークハルセン北部の結晶質石灰岩層とその上に重なるざくろ石・角閃石片麻岩との境界は、逆転した不整合面である可能性が大きく、元々ざくろ石・角閃石片麻岩を不整合で石灰岩が覆ったと考えられる。逆転後、石灰岩ドームとして石灰岩が上昇し貫入する構造も認められる。逆転は ENE-WSW トレンドの北フェルゲンツの転倒褶曲によって生じたとみなされる。結晶質石灰岩に貫入する深成岩 (orthogneiss) も認められることから、形成年代の異なる 3 つのユニットが分布すると考えられる。

リュツォ・ホルム岩体の基本的な大構造は、水平から東に極めて緩い傾斜からなる低角構造である。この低角構造が複数ステージの褶曲によって曲げられている。プリンスオラフ海岸の基本構造のトレンドは NW-SE であるが、後の WNW-ESE トレンドの褶曲帯によって曲げられており、同じトレンドの断層によって切断されている可能性が考えられる。複数ステージの褶曲の影響があるものの、リュツォ・ホルム岩体の大構造を見ると、南西側により古い岩石ユニットが分布していると考えられる。また、リュツォ・ホルム岩体の各岩石ユニットは低角な重なりが基本構造であるように見える。

[参考文献] Takahashi, et al., 2017, *Journal of Asian Earth Sciences*, 157, 245-268.

[研究発表] なし。

I . 共同研究報告（終了）

一般共同研究

（4）生 物 圈

極域地衣類に共在する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

平成 29 年度～令和元年度 (3 か年)

【研究成果】

極域の陸上生物のモデル生物として、本研究では荒原性風衝地生態系で優占する「地衣類」をターゲットとしいる。先行共同研究として平成 26～28 年度に「極域生物に共在する微生物の生物地理に関する研究」を行い、地衣類に共在する微生物の生物地理に関する基礎的な知見を得た。本研究ではこれを発展させ、生物地理的な観点だけでなく、多様性解析の観点から地衣類、特に葉状地衣類のイワタケに共在する微生物の種組成を網羅的に知ることを目的とした。平成 29 年度は、これまでに研究代表者らが採集した極域地衣類および極地研ハーバリウムに保管されている地衣類サンプル、さらに新たに共同研究者らが採集した地衣類などから共在微生物の DNA を抽出し、Illumina 社の次世代シーケンサー MiSeq を用いて、従来よりも格段に大量の 16S rRNA 遺伝子データを得た。平成 30 年度も同様に試料を入手し、大量の遺伝子データ解析を行った。そして、令和元年度にはそれらの大量データに対して、網羅的な多様性解析を行なった。この背景や結果などについて、以下に報告する。

1. 地衣類の共在微生物を研究する目的

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）の共生体としてよく知られているが、近年の研究により、地衣類に共在する微生物、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。また、それにともない、地衣類に共在する微生物の多

様性・固有性・汎存性などにも関心が持たれるようになってきた。その理由のひとつは生物地理学的な調査がしやすいという期待である。その地衣類の中でも、本研究では特に *Umbilicaria* 属の「イワタケ」に着目した（図 1）。なお、本研究では地衣類とバクテリアの関係を共生ではなく「共在」と呼んでいる点に留意されたい。現時点では地衣類とバクテリア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。

イワタケは見つけやすく、また、採集しやすいことから、その生物地理に関する研究は多い。しかし、イワタケに共在する微生物、特にバクテリアに関する研究はまだ多くなく、共在微生物の多様性や種組成のパターンについての知見はほとんどないといつてよい。そこで、本研究では、前述したように極域を含む世界各地から採集されたイワタケの共在微生物について、下述する非培養法を用いて網羅的な多様性解析を行うことにした。

2. 非培養法による共在微生物の多様性解析

採集したイワタケ個体を粉碎し、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（おもにバクテリア）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）を解析した。

一方、共在微生物についてはバクテリア 16S rRNA 遺伝子の一部（V3-V4 領域）をターゲッ

トとした PCR を行い、Illumina 社の MiSeq を用いて大量のシーケンス・データを得た。これらの V3-V4 シーケンスは 97% の類似度でグループ分けされた。それぞれのグループはファイロタイプと呼ばれ、おおむね「種」に相当する分類単位として扱われた。

得られた 18S 遺伝子の塩基配列を DNA データベースに照合することで、地衣類の構成菌類・藻類を推定したところ、菌類はおおむねイワタケ属 (*Umbilicaria* 属) の菌であることがわかったほか、光合成生物としては緑藻類の *Trebouxia* 属と *Coccomyxa* 属の種が多いこと、まあ、場合によってはシアノバクテリアが優占することなどがわかった。

3. 共在微生物の分類群構成 (門レベル)

イワタケ類の共在微生物のファイロタイプについては、種レベルでの特徴や傾向性はまだ確定できない一方、門レベルでは顕著な特徴が見出された。それは、南極域のイワタケ類では *Bacteroidetes* 門が優占する一方、非南極域のイワタケ類では *Proteobacteria* 門が優占していることである (図 1)。このことは、南極域と非南極域の間、すなわち周南極域に、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、微生物ウォレス線と呼べるかもしれない。ただし、調査例 (サンプル数) をさらに増やすことと、門レベル以下の分類単位での詳細な検討を行なうことが必要なことはもちろんであり、今後はサンプルおよびデータの拡充と、近年の発達が目覚ましいバイオインフォマティクスを用いた大量データの高精度解析を行なうことを期したい。

【研究発表】

(1) Merry S. Faluaburu, Ohsato Ayaka, Jun Uetake, Satoshi Imura, Takeshi Naganuma (2017) Biogeography of bacterial flora associated with rock tripe and related lichens inhabiting polar,

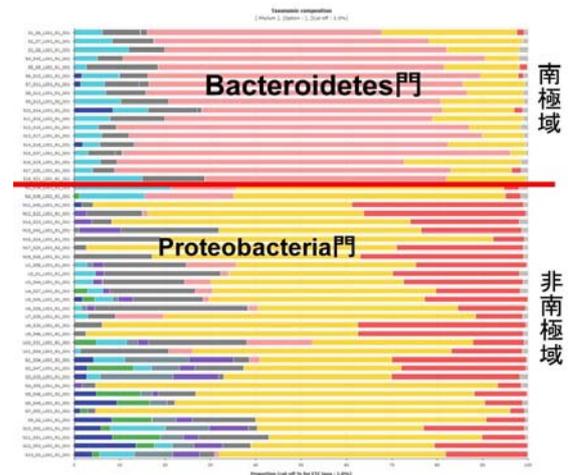


図 1. *Umbilicaria* 属イワタケの共在微生物の門レベルの組成

alpine and equatorial regions. Poster OBp5, The 9th Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, 4-6 Dec 2017.

- (2) Merry S. Faluaburu, Katsuhiko Kashihara, Ayaka Ohsato, Jun Uetake, Satoshi Imura, Martin Hahn, Takeshi Naganuma (2018) Analysis of bacterial microbiota associated with genus *Umbilicaria* lichen by Illumina MiSeq and Sanger sequencing method. Poster OBp24, The 9th Symposium on Polar Science, NIPR, Tokyo, 4-6 Dec 2018.
- (3) Merry S. Faluaburu, Ryosuke Nakai, Satoshi Imura, Takeshi Naganuma (2019) Phylotypic characterization of mycobionts and photobionts of rock tripe lichen in East Antarctica. *Microorganisms*, 7(7), 203. DOI: 10.3390/microorganisms7070203
- (4) Merry S. Faluaburu (2019) Microbiomics and phylogeography of bacteria associated with *Umbilicaria* and related rock tripe lichens. Doctoral Dissertation, Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, July 2019.
- (5) He Zichen (2020) Phylogenetic profiling of microorganisms associated with lichens. Master's Thesis, Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, February 2020.

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 助教
 平成29年～令和元年 (3か年)

[研究成果]

極域から進行する海洋酸性化は、化学的に不変な現象から予想されるとおり、冷水性有殻翼足類の貝殻溶解を促進することが、フィールド調査および室内実験から証明されている。一方で、裸殻翼足類の一種、ハダカカメガイについては、発達ステージにおいて貝殻を有する期間があるが、これまでに、海洋酸性化に関する直接的な影響について評価された例はない。本研究では、国内において入手が比較的容易なハダカカメガイを中心に、研究を進めるに当たり重要な次の①から③に続く基礎的知見について研究を行った。

①オホーツク海南部における2集団のハダカカメガイについて (Yamazaki et al., 2018)

オホーツク海南部には、体サイズが比較的小さく冬期沿岸で多く見られる冬集団と (図1 WCP)、体サイズが比較的大きく春期沖合で見られる春集団が見られることが明らかとなりました (図1 SOP)。両集団の mtDNA COI 領域を比較したところ、同種であることが解りました (図2)。時空間スケールで出現が異なるハダカカメガイの機構は、複雑な海洋構造、特に日本海中層から湧昇する冷水帯が大きく関係していると考えられました (図1 CWB)。

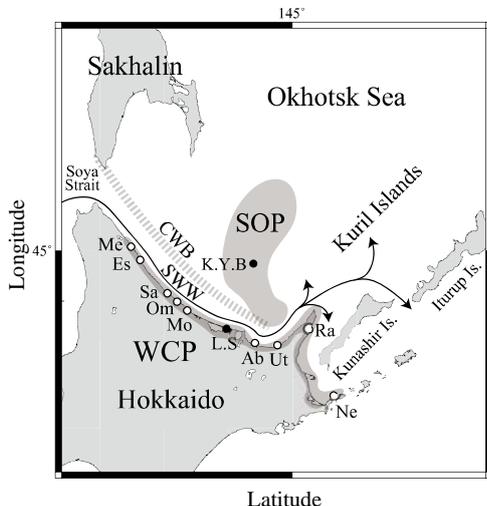


図1 オホーツク海南部における2集団のクリオネ

と、冷水帯の分布。

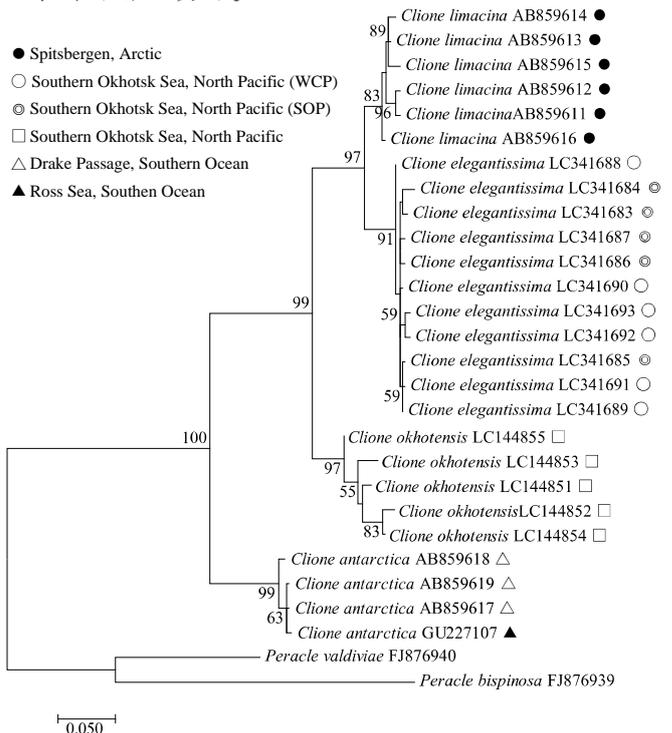


図2 冬集団 (WCP) と春集団 (SOP) の遺伝的距離の関係。

②麻酔を用いたハダカカメガイ類の安定した体長測定法の確立について (Yamazaki et al., 2019)

ハダカカメガイ類の体は、伸び縮みする。そのため、安定した体長測定は難しかった。そこで、麻酔を用いたハダカカメガイ類の体長測定について検討した。

結果、1-メントールが有効で、麻酔に掛かっている間 (図3)、心臓が動いている様子が観察され、麻酔から覚めると、通常通り、翼足を前後に動かして泳ぐ様子が観察された。メントール麻酔法による体長測定の確立は、ハダカカメガイ類の安定した体長測定のほか、外部形態の観察に大きく寄与します。

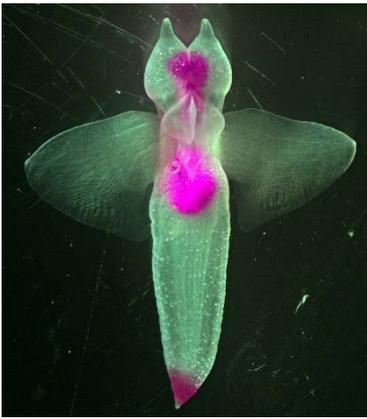


図3 1-メントール麻酔法による麻酔下におけるハダカカメガイ。

③北極海に生息するナンキョクハダカカメガイの国内への生体持ち込み及び飼育（山崎・他，投稿中）

研究を進めるうえで、北半球の極域に生息するハダカメガイだけではなく、南半球の極域に生息するナンキョクハダカカメガイについても、将来的に実

験対象とする必要がある。そのためには、採集と日本への生体持ち込み、飼育の確立が重要となる。そこで、既存の南極航海における調査で採集されるナンキョクハダカカメガイを生体のまま日本に持ち帰り、飼育可能かどうかの2点について検討した。結果、南極海から日本の飼育施設へ生体を持ち込むことに成功し（図4）、ハダカカメガイと同様な飼育システムで飼育可能であることが解った。



図4 南極海から採集して日本へ持ち帰ったナンキョクハダカカメガイの生体。

[参考文献]

- 1) 山崎友資・桑原尚司・高橋邦夫. (投稿中) 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.
- 2) Yamazaki T, Kuwahara T, Takahashi K. 2018. Genetic differences in spatially and temporally isolated populations: winter and spring populations of pelagic Mollusk *Clione* (Mollusk: Gymnosomata), southern Okhotsk Sea, Japan. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 34: 447–458.
- 3) Yamazaki T, Kuwahara T, Takahashi K. 2019. Application of menthol as an anesthetic for body size measurements and morphological observation of the genus *Clione* (Pteropoda: Gymnosomata). OBP32. The Tenth Symposium on Polar Science hosted by the National Institute of Polar Research (NIPR). (Poster)

[研究発表]

山崎友資・桑原尚司・高橋邦夫. (投稿中) 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.

Yamazaki T, Kuwahara T, Takahashi K. 2018. Genetic differences in spatially and temporally isolated populations: winter and spring populations of pelagic Mollusk *Clione* (Mollusk: Gymnosomata), southern Okhotsk Sea, Japan. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 34: 447–458.

動物化石資料や氷試料からの古代 DNA 解析

◎瀬川 高弘 山梨大学総合分析実験センター・特任助教
 篠崎 陽一 山梨大学総合研究部医学域基礎医学系・講師
 (国立極地研究所)
 伊村 智 教授
 本山 秀明 教授
 平成29年～令和元年(3か年)

[研究成果]

1. はじめに

化石やアイスコアなどの環境サンプルから得られる古代DNAは、過去の地球環境を推定するうえで非常に重要な情報を提供する。寒冷・凍結地帯は良質な古代DNA情報が取得できる可能性が高く、寒冷環境から採取された古代試料からのDNA解析は近年非常に注目されている。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からの古代DNA解析をおこなった。クリーンルーム内にて古代試料からのゲノム増幅に最適化した手法を用いて全ゲノム増幅を実地し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バイオインフォマティクス解析や分子進化解析を実施した。この三カ年における研究成果を以下に報告する。

2. ミイラ化したアザラシ遺体のゲノム解析

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。



写真: Lang Hovdeで採取されたミイラ化したアザラシ遺体

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、外側を削り遺体の内部からDNAの抽出・分析をおこなう必要がある。国立極地研究所のクリーンルーム下で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。

先進ゲノム支援の支援を受けて、Illumina HiSeq 2500, およびNovaSeq 6000 シーケンサーを用いて、8個体のアザラシサンプルから約16億リード解読した。サンプルには細菌や菌類などの微生物が大量に含まれており、アザラシのDNAは相対的に少なかったが、平均約0.01%のリードがアザラシのミトコンドリアにマッピングされ、24x—400xのcoverageでミトコンドリアゲノムの構築に成功した。構築した各ミトコンドリアゲノム配列をNCBIにBLAST検索をおこない、どの個体も、ウェッデルアザラシ *Leptonychotes weddellii* であることを確認した。試料年代は全て数千年前の個体であるが、DNAの保存性は非常に高く、断片化やDNAの死後の塩基置換等もあまり観察されなかった(図1)。

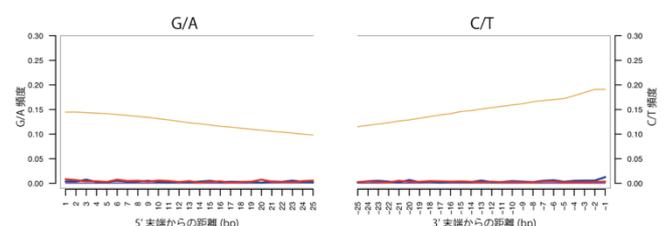


図1 現生とミイラアザラシとのG/A、C/Tの塩基置換の頻度を末端からの距離ごとに赤・青線で示した。

本研究で決定した8個体のミトコンドリアゲノムとウェッデルアザラシの参照配列(NC008424)の最尤法(ML)系統樹の構築をおこなった(図2)。その結果、昭和基地周辺(SkarvsnessとLang Hovde)とマクマード基地周辺のミイラアザラシでは、明確な地理的な構造は見られなかった。

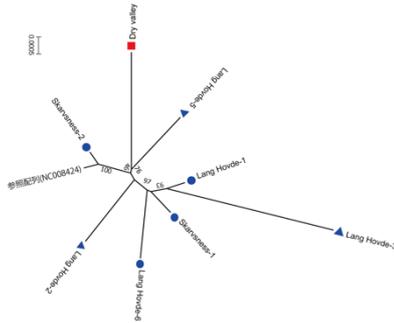


図2 ミトコンドリアゲノムでの ML 系統樹

続いて、先行研究で報告されている現生のアザラシ 344 個体のミトコンドリア DNA 調節領域との比較をおこなった (図3)。

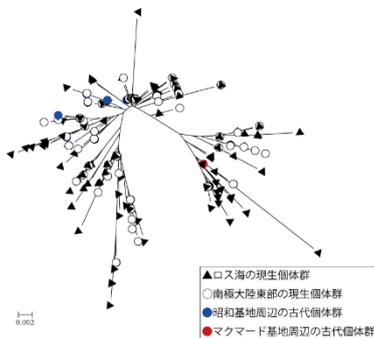


図3 ミトコンドリア DNA 調節領域での NJ 系統樹

その結果、ロス海および南極大陸東部の個体群は系統樹上に散在し明確な地理的構造を持たないことが明らかとなった。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 (未発表)、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。今後の詳細な核遺伝子の分析で南極大陸の海洋生態系で捕食者として重要な地位を占めるウェッデルアザラシの生態進化史が解き明かされていくことが期待される。

3. アイスコア試料中に含まれる微生物解析

アイスコアは古い年代の遺伝子情報を直接得るこ

とができるため、アイスコア中の遺伝子情報を解析することで、生物がどのように多様化・進化してきたのかを明らかにすることができる。しかしアイスコア中に含まれる微生物量が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的プロトコルの確立を重点的におこなった。

南極ドームアイスコア解析では、遺伝子解析用に開発し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。その結果、氷期と間氷期には検出される細菌の種類や由来に大きな違いがあることや、氷期には好冷性細菌が多く検出され、アイスコア中の細菌を古環境指標として利用できる事を示した。

また、アジア域から採取されたアイスコア試料解析では、現在から 8000 年前までの試料のアイスコアから得られた大規模な配列データを用いて、サンプルごとの系統組成と機能組成などの解析を実地した。また、得られた配列がコンタミネーションではなく古代試料由来であることを確認するための分子進化的検定法を考案し、検証をおこなった。さらにアイスコアから検出されたシアノ細菌の塩基配列データに基づき、遺伝的多様性と遺伝的分化度の経時的な変化の推定をおこなった。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たことになる。

[研究発表]

Takahiro Segawa and Takahiro Yonezawa (2020) Evaluation of reported sediment samples from 20 Ma using a molecular phylogenetic approach: comment on Liu et al. (2017), *Environmental Microbiology* 22, 813-818.

Takahiro Segawa, Ryo Matsuzaki, Nozomu Takeuchi, Ayumi Akiyoshi, Francisco Navarro, Shin Sugiyama, Takahiro Yonezawa, Hiroshi Mori (2018) Bipolar dispersal of red-snow algae. *Nature Communications* 9, 3094.

Takahiro Segawa, Nozomu Takeuchi, Koji Fujita, Vladimir B. Aizen, Eske Willerslev, Takahiro Yonezawa (2018) Demographic analysis of cyanobacteria based on the mutation rates estimated from an ancient ice core. *Heredity*.120.562-573.

[研究協力者]

高橋晃周 国立極地研究所 准教授
秋好歩美 国立極地研究所 技術専門員
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 助教

極域生態系にみられる菌類多様性の空間パターンの分析

◎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

平成 29 年～令和元年 (3 年間)

[研究成果]

菌類は極域生態系における生物多様性の一翼を担うのみならず、分解や共生といった機能を通じて生態系の動態にも影響を及ぼす (Osono 2007, 2020)。極域生態系では、近年の地球規模での温暖化傾向にともない氷河の後退が進行しており、それにもなると新たに出現した地表面への菌類の定着が進行しつつある。このため、極域生態系における菌類の種多様性や群集組成には、さまざまな空間スケールでの分布パターンが認められることが予想される。本研究では、北極と南極の生態系を対象として、菌類の種多様性の空間的なパターンを、土壌層内における垂直分布の局所スケールから、緯度系列に沿った地理的スケールに至るまでの、様々な空間スケールで検討した。平成 23～25 年度の共同研究では分離菌株を対象とした解析を行い、平成 26～28 年度の共同研究では分子生物学的アプローチを用いた解析手法を確立した。これらの成果をふまえて本研究では、平成 21 (2009) 年度の第 51 次南極地域観測隊で採取した試料などを研究に用いた。菌類群集データを採取地点の環境条件および植物・土壌試料の化学組成と比較することで、菌類の分布パターンを生態学的に解明した。また、菌類生態学の一般書および啓蒙書において、研究成果を紹介した。

(1) 大陸性南極の露岩域にみられるコケ層における菌類の垂直パターンと環境要因との関連

南極大陸リュッツ・ホルム湾の露岩域にみられるコケ群落の内部における菌類の垂直分布を明らかにした。ラングホブデ・スカルブスネスの 5 地点でコケ群落 (深さ 6～10cm) を計 25 点採取し、それらを深さ方向で 4 層に区分し解析した。その結果、14 種の菌類が得られた。コケ層の表層から下層に向かって、菌糸量、出現する菌類の種数、および優占種である *Phoma herbarum* と *Pseudogymnoascus pannorum* の出現頻度は増加傾向にあった。これらの変化は、コケ層の分解にともなう有機物および窒素の濃度変化と関連していた。

(2) 北極と南極の菌類群集の比較

北極と南極において、植物リター (コケ類、ヤナ

ギ類) の分解プロセスと菌類群集を比較し、菌類による分解パターンが両極の環境条件の違いを反映している可能性を指摘した。南極のデータは Hirose et al. (2013, 2017) を、北極のデータは Osono et al. (2012, 2014) をそれぞれ用いた。これらの研究では、近似分析により有機物の組成を、また燃焼法により全炭素と全窒素の含有率を明らかにし、寒天薄膜法により菌糸量を、また分離培養法により菌類相を調べた。その結果、北極と南極で得られた菌類の種数はほぼ同じであったが、北極ではホロセルロースの選択的な分解により酸不溶性残渣と窒素の相対的な集積が認められた一方、南極では分解にともなうホロセルロースと酸不溶性残渣の存在比率に検出可能な変化は認められなかった。この研究成果を、極域生態学の専門書にまとめるとともに、菌類生態学の一般書および啓蒙書のなかで紹介した。

(3) 緯度系列に沿った菌類群集の比較

熱帯林から極地ツンドラに至る緯度系列に沿った各種生態系を対象に、菌類の多様性および生態系機能と、その環境変化に対する応答を実証した。熱帯から極域に至る環境傾度において、微小菌類と大型菌類を対象として落葉分解に関わる菌類多様性と分解機能のデータを独自に広範に収集し、総合化した結果、これまで落葉分解研究で認められていたリグニン分解の緯度勾配が、分解菌の種多様性および分解機能の側面からも矛盾なく説明できることを明らかにした。

(4) 氷河後退および標高に沿った菌類の分類学的・機能的・系統的多様性の変化

カナダ・ブリティッシュコロンビア州のロブソン州立公園において、氷河後退および標高にそった環境軸に注目し (図 1)、環境変化にともなう菌類の分類学的・機能的・系統的多様性の変化を明らかにし、環境要因との関連について検討した。リボゾーム DNA の ITS 領域を対象とした DNA メタバーコーディングにより 330 種の菌類が検出され、その多くが腐生菌であった。氷河後退域では、氷河後退から

の年数と落葉の植物種が菌類の分類学的多様性と系統的多様性に影響を及ぼしていた。系統的多様性の指数は氷河後退の年数にともなって有意に増加していた。トレイルに沿った標高約 800~1600m の環境傾度では、落葉生息菌類の分類学的・機能的・系統的多様性には有意な変動は認められなかった。

図 1. ロブソン州立公園の採取地点の様子。左上、ロブソン氷河の後退域、氷河後退から 14 年目；左中、氷河後退から 60 年目；左下、氷河後退から 102 年目；右上、バーグレイクトレイルに沿った標高傾度、標高約 1400m；右中；標高約 1200m；右下、標高約 800m (Matsuoka et al. 2019)。



[参考文献]

- 1) Hirose D., Tanabe Y., Uchida M., Kudoh S. & Osono T. (2013) Microfungi associated with withering willow wood in ground contact near Syowa Station, East Antarctica for 40 years. *Polar Biology* 36: 919-924.
- 2) Osono T (2007) Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research* 22: 955-974.
- 3) Osono T. (2020) Functional diversity of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research* 35: in press.
- 4) Osono T., Ueno T., Uchida M. & Kanda H. (2012) Abundance and diversity of fungi in relation to chemical changes in arctic moss profiles. *Polar Science* 6: 121-131.
- 5) Osono T., Matsuoka S., Hirose D., Uchida M. & Kanda H. (2014) Fungal colonization and decomposition of leaves and stems of *Salix arctica* on deglaciated moraines in high-Arctic Canada. *Polar Science* 8: 207-216.

[研究発表]

Hirose D., Hobara S., Tanabe Y., Uchida M., Kudoh S. & Osono T. (2017) Abundance, richness, and succession of microfungi in relation to chemical changes in Antarctic moss profiles. *Polar Biology* 40: 2457-2468.

大園享司 (2018) 環境変化と菌類群集：熱帯から極域まで. *日本生態学会誌* 68: 149-168.

大園享司 (2018) 基礎から学べる菌類生態学. 共立出版.

大園享司 (2018) 生き物はどのように土にかえるのか—動植物の死骸をめぐる分解の生物学. ベレ出版.

大園享司 (2018) カビが映し出す北極と南極の極限環境. *生物学者、地球を行く～まだ知らない生きものを調べに、深海から宇宙まで* (小林真・工藤岳編)、文一総合出版、pp. 32-38.

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, 17-29.

Matsuoka S., Ogisu Y., Sakoh S. Hobara S. & Osono T. (2019) Taxonomic, functional, and phylogenetic diversity of fungi along primary successional and elevational gradients near Mount Robson, British Columbia. *Polar Science* 21: 165-171.

極域に生息する植物プランクトン種からの揮発性有機化合物放出に関する研究

◎亀山 宗彦 北海道大学大学院地球環境科学研究院・准教授
 鈴木 光次 北海道大学大学院地球環境科学研究院・教授
 (国立極地研究所)
 小達 恒夫 教授
 平成 29 年～令和元年 (3 か年)

[研究成果]

本研究では極域に生息する植物プランクトンが生成する揮発性有機化合物について研究を行った。本研究期間中では平成 30 年度に北極海で行われた海氷域の観測航海 (韓国極地研究所、砕氷船 Araon 号、ARA09B) に実際に乗船し、海氷付近の研究試料の採取を行った (図 1)。

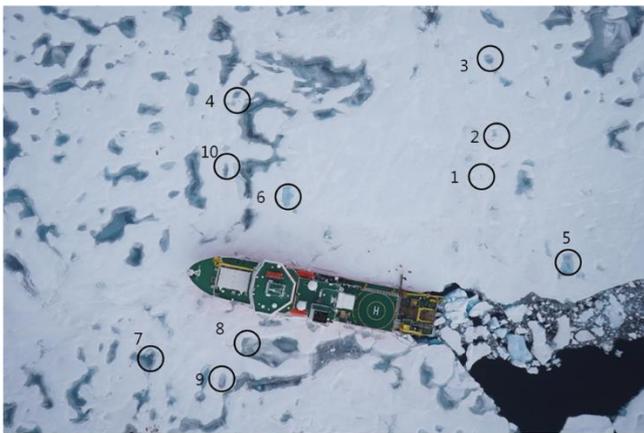


図 1 ARA07B において観測されたメルトポンド

既に平成 28 年度に行われていた航海 (ARA07B) 及び本航海において採取された海水、メルトポンド水、アイスコアの試料を船上で分析した本分析の結果のうち特にアイスコアの試料では鉛直方向の顕著な硫化ジメチル (DMS) の濃度勾配を検出した (図 2)。アイスコア底部で検出された高濃度 DMS は周辺海水に比べ最大 5 倍の濃度であった。この原因として、海氷下部に生息するアイスアルジーの活動によって放出された DMS の前駆体であるジメチルスルホニオプロピオネート (DMSP) が分解され DMS が放出された可能性があげられる。しかし、この DMS 濃度は過去にカナダ北極海で観測されたものよりも 2 桁程度低い値であった (例、カナダ北極海の DMS 濃度 $> 1000 \text{ nmol}^{-1}$ 、Levasseur, 2013)。この原因は海氷下部に含まれるアイスアルジーの量 (濃度) の違いであろう。本研究で対象とした海域は外洋域であり、貧栄養の海域であるといえる。そのため、沿岸とみなすことが出来るカナダ北極海における

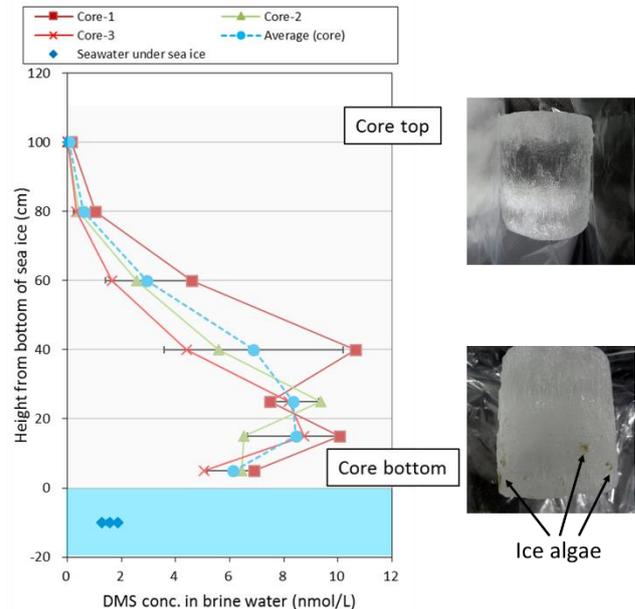


図 2 アイスコア中 DMS 濃度鉛直分布

アイスアルジーの量にくらべ圧倒的に量が少ない。海氷の形成・融解のサイクルに伴うアイスアルジーの生育と DMS をはじめとした揮発性有機化合物の放出量やそのフラックスを見積もるためには、このような栄養塩環境を含めた海氷形成の場の評価も議論されるべきである。

また、メルトポンドの観測からは、最長でも 100 m 程度しか離れていないようなメルトポンドから採取されたメルトポンド水中の DMS の濃度が最大 100 倍もの濃度差があることが分かった (表 1)。この原因はまだ議論中ではあるが、メルトポンドにおいて成層化が発達し、海氷下部で生物活動によって生成された DMS が外気へと放出されずに水中に蓄積されるといったことが起きているものとそうではないものがあるということが原因であると考えている。

また、本研究で使用している GC-FPD を用いた新しい DMS をはじめとした揮発性有機化合物の分析方法の開発に取り組んだ。この手法はキューリーポイントインジェクターと GC-FPD を組み合わせたものである。まず海水中の DMS 及びイソプレンを高純度ヘリウムで脱気した後、下流に備え付けた吸着剤 (CarboPackX) に常温で捕集し、キューリーポイ

ントインジェクターを用いて瞬時に加熱することで目的気体種を GC-FPD に導入・検出するという方法である。本研究では DMS・イソプレン共に外洋で見られる低濃度でも十分に検出できる感度を実現することが出来た。この成果は既に英文誌 *Marine Chemistry* で掲載が受理されているものである (Li et al., in press)。

表 1 ARA07B において観測されたメルトポンド内の DMS・DMSP 濃度

Melt pond No.	Salinity	Temperature (°C)	Chl-a (µg/L)	DMS (nmol/L)	DMSP (nmol/L)
1	1.6	0.5	0.064	0.7	NA
2	3.3	0.1	0.055	0.3	0.5
3	3.0	0.0	0.049	0.7	1.1
4	4.4	-0.1	0.049	18.6	1.2
5	25.1	NA	0.053	0.4	5.1
6	4.0	0.1	0.030	0.1	0.7
7	0.5	0.5	0.064	0.1	0.8
8	27.2	-1.2	0.045	0.3	2.1
9	19.6	-1.0	0.045	1.7	1.3
10	0.9	-0.1	0.041	0.2	0.9

[参考文献]

Levasseur, M., (2013) Impact of Arctic meltdown on the microbial cycling of sulphur. *Nature Geoscience*, 6, doi: 10.1038/ngeo1910.

[研究発表]

Li, J.-L., S. Kameyama, and G.-P. Yang, *In-situ* measurement of trace isoprene and dimethyl sulfide in seawater and oceanic atmosphere based on room temperature adsorption-thermal desorption, *Marine Chemistry*, in press.

研究協力者

Jian-Long Li

Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ocean University of China, Qingdao
266100, China

北海道大学大学院環境科学院に特別研究学生として在籍

極域湖沼における炭素・窒素の特性と循環に関する研究

◎藤嶽 暢英 神戸大学大学院農学研究科・教授

林 健太郎 農業・食品産業技術総合機構農業環境変動研究センター・ユニット長

木田 森丸 神戸大学大学院農学研究科・日本学術振興会特別研究員

(国立極地研究所)

田邊 優貴子 助教

令和元年（1年間）

[研究成果]

東南極リュツォーホルム湾ならびにアムンセン湾露岩域において湖沼中の溶存有機炭素の特徴づけをおこなった。また、同地域の湖沼集水域土壌の硝化特性を明らかにした。

1. 湖沼中の溶存有機物の特徴付け

溶存有機炭素 (DOC) は水中に遍在し、光減衰効果、金属錯体形成、pH 緩衝能、微生物代謝への影響などのさまざまな生物地球化学プロセスに関与しており、湖沼はもちろん、地球全体の生態系に影響を与える最も重要な構成成分の 1 つである。維管束植物が存在しない南極露岩域の DOC は主に水域の原位置生物活動（底生および浮遊性の両方の光合成生物）と集水域の光合成生物（コケ、藻類、地衣類、シアノバクテリア）に由来し、湖水は不浸透性の岩盤によって独立した集水域で隔離されている。こうした有機炭素起源の単純さと他の水文システムとの接続の欠如は、

DOC 特性に影響する環境要因を制限するため、変遷プロセス解明を有利に導く。しかし、DOC の生物地球化学的研究は東南極のマクマードドライバレー地域を除いてほとんどおこなわれていない。

そこで東南極のリュツォーホルム湾とアムンセン湾の露岩域における 47 の湖と 2 つの河川から得られた採取水試料 (n = 74) について、樹脂分別定量法、紫外可視分光法、および励起発光マトリックス蛍光分光法と並行因子分析 (EEM-PARAFAC) を実施し、DOC の化学特性を明らかにすることを試みた。

試料水の塩分濃度は、低濃度から高濃度まで非常に広範囲に及び、 $S_{275-295}$ 値との相関解釈から DOC の保水（滞留）時間長が光分解度を反映することが示唆された（図 1）。分別された PARAFAC 成分のうち、遍在性腐植様成分は S_{275-}

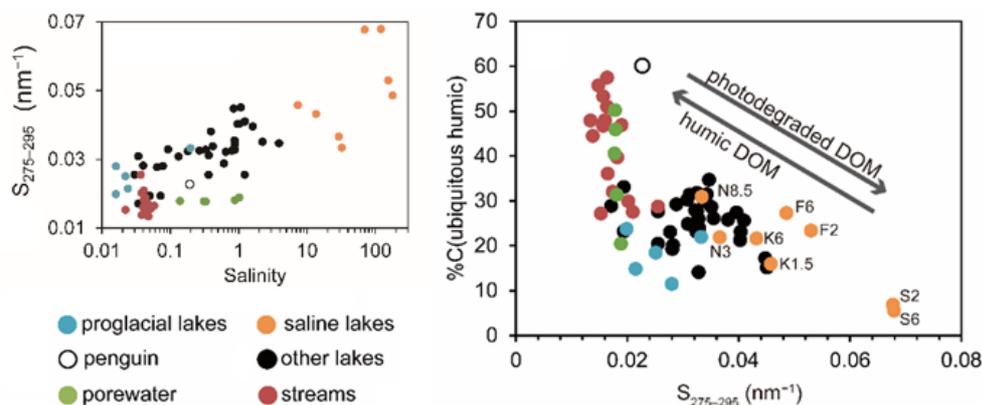


図1 紫外可視分光分析パラメータ $S_{275-295}$ 値と塩分濃度、ならびに PARAFAC 遍在性腐植様物質 C% の関係

295 値が示す光分解の進行と共に減少し (図 1), 光不応性の UVC 腐植様成分の相対量は増加した。他のパラメータ解析を通じて, 遍在性腐植様成分の一般的な生成プロセスがこの地域の湖沼生態系にも存在することを示唆した。従来は, 南極湖沼間の DOC の化学特性は供給源が単純なためにほとんど変化しないとされてきたが, 各種分析値には大きな変動が認められ, 南極湖沼 DOC の化学特性は一様ではないことが見出された。成果の詳細は Kida et al. (2019) に公表のとおりである。

2. 集水域土壌の硝化特性

東南極の雪鳥沢 (ドローニングモードランド, ラングホブデ) 2 地点およびリーセルラセン山付近 (エンダビーランド) 1 地点において採取した土壌の硝化特性 (アンモニア酸化能: AOP, アンモニア酸化細菌: AOB およびア

ンモニア酸化古細菌: AOA の細胞数および種組成) を明らかにした。最大の AOP は雪鳥沢で得られた土壌表層の $22.1 \pm 2.4 \text{ ng N g}^{-1} \text{ 乾土 h}^{-1}$ (2 mM アンモニウム, 10°C , $n=3$) であった。この土壌は, 10°C において 2 つの好適基質濃度ピーク (1 および 2 mM アンモニウム) を示したものの, これらのピークは 20°C では消失した。AOB および AOA それぞれにつき, 6 種および 10 種の操作的分類単位 (OTU) が検出された。AOB は全て *Nitrosospira* 属であり, 主要な 2 種はエベレストで発見されたクラスターと相同であった。AOA は 3 つのクラスターに該当し, うち *Nitrososphaera* および *Nitrosocosmicus* が主要なクラスターであった。図 2 に各地点各層位の OTU の相対出現度を示す。成果の詳細は Hayashi et al. (2020) に公表のとおりである。

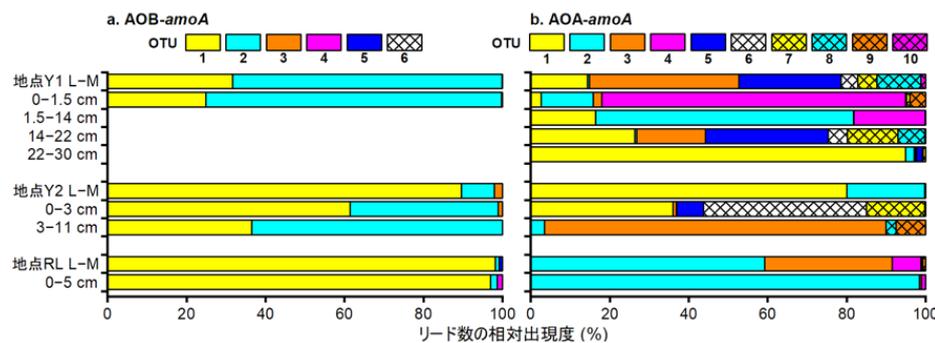


図 2 調査 3 地点の各層位におけるアンモニアモノオキシゲナーゼサブユニット A (*amoA*) シーケンスの相対出現頻度. (a) アンモニア酸化細菌 (AOB), (b) アンモニア酸化古細菌 (AOA). OTU: 操作的機能分類, L-M: 地衣類・コケ層

[参考文献]

- 1) Findlay, S.E.G., Sinsabaugh, R.L., 2003; Aquatic Ecosystems, Academic Press. Elsevier.
- 2) Matsumoto, G.I., 1989; Biogeochemical study of organic substances in Antarctic lakes. *Hydrobiologia*, **172**, 265–299.
- 3) McKnight, D.M., Andrews, E.D., Spaulding, S.A., Aiken, G.R., 1994; Aquatic fulvic acids in algal-rich antarctic ponds. *Limnol. Oceanogr.*, **39**, 1972–1979.

[研究発表]

- 1) Kida, M., Kojima, T., Tanabe, Y., Hayashi, K., Kudoh, S., Maie, N., Fujitake, N. 2019; Origin, distributions, and environmental significance of ubiquitous humic-like fluorophores in Antarctic lakes and streams. *Water Research*, **163**, Article No. 114901 (DOI: 10.1016/j.watres.2019.114901).
- 2) Hayashi, K., Tanabe, Y., Fujitake, N., Kida, M., Wang, Y., Hayatsu, M. and Kudoh, S. (2020); Ammonia oxidation potentials and ammonia oxidizers of lichen–moss vegetated soils at two ice-free areas in East Antarctica. *Microbes and Environments*, *in press*.

Ⅱ. 研究集会報告

研究集会

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	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	2019.09.09-10	開催場所	京都大学生存圏研究所			
概要	「STE連絡会現象報告会およびSTE現象解析ワークショップ」を他の複数の研究集会とともに開催した。当該期間(2019.3-9)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太陽から地球までの地上・衛星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。基本的なイベントとして2019年5月、8月、9月の磁気嵐を選定したが、他の期間の現象に関する報告もなされ、それぞれの現象の解釈について各種データを用いて活発な議論が行われた。					
報告者 (担当者)	西谷 望(名古屋大学宇宙地球環境研究所)					
所内参加者数	1名	合計	22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
総研大(極域科学専攻)	0	0	0	0	0	
ISAS/JAXA	1	0	0	0	0	
三菱電機	1	0	0	0	0	
気象庁地磁気観測所	1	0	0	0	0	
京都大学大学院理学研究科	2	0	0	0	0	前職含
京都大学生存圏研究所	3	0	1	1	0	
九州大学	4	0	2	2	2	
情報通信研究機構	2	0	0	1	0	
名古屋大学宇宙地球環境研究所	7	1	2	0	1	

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

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> ワークショップ <input type="checkbox"/> その他		いずれかを■にしてください。				
集会名	SuperDARN研究集会					
開催日時	2019年6月2日～7日	開催場所	富士急ハイランドResort Hotel & SPA, 山梨県富士吉田市			
概要	<p>極地研、NICT、名古屋大/ISEE、電通大、九州大/ICSWSEの共同主催で、富士吉田市でSuperDARN Workshop 2019、名古屋大ISEE研究集会と平行する形で開催とし、国内参加者の旅費希望について、本研究集会と名古屋大集会の経費を充てた。参加者は約80人(内海外:48名)、発表は口頭74件、ポスター38件、計112件。活発な質疑応答があり、ポスターも含め活況で盛会となった。極冠域～中緯度・赤道域に至る地球規模の電離圏磁気圏対流・電流系、オーロラ等の宇宙天気研究、中層大気や電離大気との上下結合、あらせ/ERG衛星と地上観測との連携観測による成果、国内外のprojectとSDとの共同研究、Dome C基地2基目のレーダーや中国国内等新規参入のレーダーの状況や初期結果や新レーダーの計画紹介、新しい観測手法や観測精度向上の研究、Deep learning (AI)を用いた解析の試みも含む解析手法の紹介や議論など、宇宙天気やGeospace Dynamics研究について、創設以来の研究分野の拡大を反映する多岐に亘る発表が行われ、また、最近逝去した南アの元PIのA.D.M. Walker氏の追悼特別sessionやtutorial/historical review session等も設けられ、国内外の共同研究の発展に資することができた。PI会議の他複数のactiveなWorking Group会議も開かれ、今後について、若手研究者や技術者も参加し熱心な議論が行われた。SD Executive Councilの約15年ぶりの代表者の交代(選出)、中国の2つ目のSD参加の承認、ロシアの参加の検討他、創設時期設置レーダー維持の重要性等の懸案やSMILE衛星等との共同研究、現行Open Data policyの発展他の将来構想にかかわる事項についての多くの議論がなされた。また、これを機にPolar Science Special Issueを発行することとなり、広く投稿を呼び掛けた。</p>					
報告者(担当者)	行松 彰					
所内参加者数	5名	合計	79名			
所外参加者数	74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	1	
統数研	1					
名古屋大	9		4		2	
九州大	3					
電通大	2				1	
京都大	1					
NICT	9		2	4		
Leicester Univ., UK	3	3	1	1	1	
Lancaster Univ. UK	3	3	2	1	1	
British Antarctic Survey, UK	2	2	1			
IRAP/CNRS, France	1	1		1		
INAF/IAPS, Italy	1	1		1		
UNIS, Norway	2	2		1		
Norwegian Univ. of Sci.&Tech, Norway	1	1				
SANSA, South Africa	1	1				
Univ. KwaZulu-Natal, South Africa	1	1		1		
ISTP, Russia	1	1	1			
Phys. Res. Lab, India	1	1	1		1	
PRIC, China	2	2	2			
CAS, China	4	4	3	2	1	
Shandong Univ., China	2	2	1			
Univ. Saskatchewan, Canada	9	9	6	4	1	
Univ. New Brunswick, Canada	1	1				
Univ. Alaska Fairbanks, USA	2	2	1			
Dartmouth College, USA	2	2	1			

Virginia Tech, USA	4	4	1			
JHU/APL, USA	1	1				
Univ. Texas, Dallas, USA	1	1				
NASA, GSFC, USA	1	1				
Air Force Res. Lab, USA	1	1	1			
US Naval Res. Lab, USA	1	1	1	1		
(小計)	74	48	30	18	9	

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

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	第9回南極無人機研究会(無人機の活用による極地観測の展開)					
開催日時	令和元年11月21日	開催場所	C201			
概要	これまでの南極地域観測隊における無人機利用の経験について意見交換を行うとともに、第62次、第63次の観測の計画、第X期への展望等について議論を行った。係留無人機発電や無人機—基地間の高速度光通信など今後の新しい利用の提案などについても議論を行った。					
報告者 (担当者)	平沢 尚彦, 林 政彦					
所内参加者数	4 名	合計	25 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	内訳				備考
		内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	
総研大(極域科学専攻)	0					
極地研	5					
九州大	2				1	
福岡大	1					
弘前大	2				1	
東海大	2				1	
山梨大	1					
明治大	1					
金沢大	1					
気象研	1					
TMIT	2					
その他企業	7					

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

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 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	2019年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究会					
開催日時	2020/2/18～2/19	開催場所	国立極地研究所			
概要	エアロゾル・雲・降水とそれらの相互作用に関して、全国の研究者が一堂に会して観測・室内実験・数値モデルなどの最新の研究結果や動向を共有し、意見交換を行った。今回の研究会では、「全球モデルでの雲・エアロゾル研究」と「北極域での雲凝結核・氷晶核の研究」に関する総説講演(2件)をプログラムを取り入れ、当該分野以外の人にもわかりやすいように解説を行った。今回は例年以上に、それらの研究に興味を持つ学生参加者(大学院生・学部生)の参加も目立った。					
報告者 (担当者)	佐藤 陽祐 (當房 豊)					
所内参加者数	8 名	合計	45 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
気象研究所	7	1	2			
防災科学技術研究所	2					
理化学研究所	1					
東京大学	2		1		1	
北海道大学	3		2		1	学部生:1名
東京理科大学	1		1			
防衛大学校	1					
東京工業大学	1		1	1		
名古屋大学	1		1			
産業技術総合研究所	1					
兵庫県立大学	3		3	1	2	学部生:1名
名古屋工業大学	1		1			
東海大学	1					
総合研究大学院大学	2		2	1	2	
統計数理研究所	1					
筑波大学	5		5	1	2	学部生:3名
京都大学	1		1			学部生:1名
京都産業大学	1		1	1		学部生:1名
東京学芸大学	1		1			学部生:1名
英弘精機	1					

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

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

○ 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)

○ 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究ワークショップ <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	南極海洋-海氷-氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会					
開催日時	令和1年11月5日	開催場所	極地研3Fセミナー室			
概要	<p>南極氷床-海氷-海洋システムにおいて、西南極氷床の融解加速と海洋の役割が注目を集める一方、東南極サブシステム間における相互作用の地域的相違と十年規模から数百万年規模の時間変動の存在が明らかになりつつある。本課題は、東南極におけるサブシステム間相互作用特性の海盆間差異の解明と十年規模変動の実態把握を目指す。ウィルクスランド沖及び白瀬氷河周辺域を舞台とした氷床-海洋相互作用の素過程の詳細な把握を目指す。また、リュツォ・ホルム湾域にみられる定着氷や氷河氷舌の十年規模変動、および海洋経年変動の実態と関係性を明らかにする。各チームで進められているデータ・試料の解析結果を報告し、国内外の研究動向に関する情報交換や今後の共同研究の方向性についての検討・議論を行なう。</p>					
報告者 (担当者)	青木 茂(田村岳史)					
所内参加者数	6 名	合計	31 名			
所外参加者数	25 名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内訳				備考
		内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	
総研大(極域科学専攻)	3			1	3	
北海道大学	12	1	5		4	
東京大学	3			1	2	
苫小牧高専	1					
東京海洋大学	2					
JAMSTEC	1					
新潟大学	1					
法政大学	1					
RESTEC	1					

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

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

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input type="checkbox"/> 研究会 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <input type="checkbox"/> 研究集会 <input type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 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 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <input type="checkbox"/> その他 </div>						
いずれかを■にしてください。						
集会名	大気・雪氷・海洋間の物質循環と極域への輸送プロセスに関する研究集会					
開催日時	令和元年11月18～19日	開催場所	国立極地研究所			
概要	これまで実施してきた大気・雪氷・海洋間の物質循環に関わる研究の成果について12件の発表を行い、それぞれの発表について事実確認、議論を行った。また、今後予定されている研究計画について6件の報告がなされ、極域における観測をベースにした研究計画の連携や将来展望などについて議論を行った。					
報告者 (担当者)	的場澄人					
所内参加者数	8名	合計	21名			
所外参加者数	13名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	2			1	2	
北海道大学	2					
福岡大学	2				1	
大阪府立大学	1					
九州大学	1					
気象研究所	1		1			
東京工業大学	1		1			
学術振興会特別研究員	1		1	1		
法政大学	1			1		
早稲田大学	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。
- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> ワークショップ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	極域のオープンデータ・オープンサイエンスに関する研究集会 -II					
開催日時	2019年(令和元年)8月27日(火) 10:30 ~ 18:30	開催場所	データサイエンス棟1F			
概要	オープンデータ・オープンサイエンスに関する最新の国内外の状況を踏まえ、極域科学に関連するデータ活動の情報交換を行った。特に極域関連データベースやデータシステム、公開手法、データ共有・データ出版・引用・データジャーナル等について、現状と課題・問題点や将来計画、極域科学研究の進展に望まれる機能等についての議論を行った。					
報告者 (担当者)	金尾 政紀					
所内参加者数	21 名	合計	38 名			
所外参加者数	17 名					
所外参加者の内訳						
大学・機関名	参加者数	内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	備考
総研大(極域科学専攻)	1				1	
JAMSTEC	1					
気象庁	1					
国土地理院	1					
産総研	2					
法政大	1			1		
高知工科大	1					
北大	1					
NICT	3					
情報研	1					
環境研	1			1		
日本気象協会	1					
日本オラクル(株)	2					

○ 総研大生(極域学専攻)は所外扱いとします。

○ 外国人・若手・女性・大学院生の人数は、わかる範囲で記入してください。

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

○ 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)

○ 行が不足する場合、適宜追加してください。

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 ■ 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	可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究会-V					
開催日時	2020年(令和2年)3月26日14:00 ～ 3月27日12:00	開催場所	DS棟1Fオープンスペース			
概要	極域において様々な励起源をもつ可聴下周波数帯域(数10Hz～0.001Hz)の波動(地震波・インフラサウンド等)の伝播特性から、大気-海洋-雪氷-固体地球という多圏システムにおける物理的相互作用のメカニズム解明に関する研究成果の発表・意見交換を行った。雪氷圏地震学に関係する最近の研究成果、インフラサウンドを用いたリュツォ・ホルム湾域での最新の研究、長期モニタリングのデータ収集と統計解析、60次夏隊の観測報告、グリーンランドでの観測及びトモグラフィー研究、並びに62次隊以降の準備に関する打合せを実施した。					
報告者 (担当者)	山本 真行(金尾 政紀)					
所内参加者数	3名	合計	21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					備考
		内、 外国人	内、 若手	内、 女性	内、 大学院生	
極地研	3					
環境研	1					
北海道情報大	1					
小林理研	2		1			
金沢大	1					
高知工科大	2				1	
県立広島大	1					
地震予知振興会	1		1	1		
日本気象協会	1					
九大	2				1	
東北大	2		1			
北大	2			1	1	
JAXA	1		1	1		
(株)日本海洋事業	1					
(内、リモート参加13名)						

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

集 会 等 実 施 報 告 書

		※係記入欄				
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 <input checked="" type="checkbox"/> 研究会 <input type="checkbox"/> 研究談話会 <input type="checkbox"/> 研究打ち合わせ <input type="checkbox"/> ワークショップ <input type="checkbox"/> その他						
いずれかを■にしてください。						
集会名	両極性分布を持つ冷水性翼足類の分類、分布および生理生態に関する研究集会					
開催日時	令和1年7月17日	開催場所	北海道立オホーツク流水科学センター			
概要	近年、環境変動に対する生物の応答メカニズム解明へ向けた課題の一つとして、海洋の酸性化が炭酸カルシウム外骨格を持つ海洋性物に及ぼす影響評価が精力的に研究されている。酸性化の進行が早い両極域海洋に分布する翼足類は浮遊性の巻貝であり、対象生物群として注目されている。しかし、生息域である氷海はアクセスが困難であり、現場観測の機会は乏しいのが現状である。オホーツク海沿岸海域は極域海洋の擬似現場として活用されており、対象種である翼足類が容易に採集出来る世界でも珍しい海域である。本研究集会は極域海洋、およびオホーツク海産翼足類を用いた基礎的学術研究を進めている研究者間での情報共有を図り、翼足類を用いた酸性海水の影響評価へ向けた研究計画の立案および研究協力網の構築を目指すことを目的とした。					
報告者 (担当者)	高橋邦夫					
所内参加者数	1名	合計	5名			
所外参加者数	4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					
紋別市(北大特任教員)	2					

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

集 会 等 実 施 報 告 書

						※係記入欄
<input type="checkbox"/> シンポジウム <input type="checkbox"/> 講演会・セミナー <input checked="" type="checkbox"/> 研究集会 研究会 <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	南極医学医療ワークショップ 2019					
開催日時	令和1年7月20日	開催場所	国立極地研究所 大会議室			
概要	<p>これまでの南極医学医療研究の成果をとりまとめ、今後の研究発展に向けた議論を行う場として開催された。同時に、南極観測経験者からの意見や、昭和基地とのTV会議による現地の医師からの報告を受けることで、これから南極へ向かう医師に医学医療に関わるアドバイスをを行った。また中国、インドからの参加を受け、南極医学医療のアジアの交流・討論の場としても重要な機会となった。</p>					
報告者 (担当者)	大野義一郎：東葛病院					
所内参加者数	9名	合計	37名			
所外参加者数	28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
宇宙航空研究開発機構	5					
東京医科歯科大学	2		1		1	
Tongji University School of Medicine	1	1				
NATIONAL CENTRE FOR POLAR AND OCEAN RESEARCH	1	1				
(個人医院)	1	1		1		
帝京科学大学	1					
都立多摩総合医療センター	1					
なごやかクリニック	1			1		
奈良女子大学	1			1		
宮城県成人病予防協会	1					
京都光華女子大学	1					
京都大学	1					
大阪府立大学	1					
筑波大学付属病院	1					
鳥取大学 国際乾燥地研究教育 機構	1					
東葛病院	1					
東邦大学医療センター大森病院	1			1		
東邦大学	1		1	1	1	

所外参加者の内訳						
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	
日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所	1					
福島県立医科大学	1					
北海道大学	1					
明石市立市民病院	1					
蕨市立病院	1					

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

- 大学・機関は略称でも可です。(例:北海道大学低温科学研究所 → 北大低温研)
- 行が不足する場合、適宜追加してください。

Ⅲ. 平成31年度（令和元年度）共同研究課題一覧

1.平成31年度(令和元年度)共同研究実施件数

区分	研究分野	一般共同研究			平成31年度 終了件数	平成31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	22	12	34	16	18
	気水圏	10	10	20	9	11
	地圏	15	4	19	10	9
	生物圏	14	11	25	6	19
	極地工学	3	3	6	0	6
	計	63	41	104	40	64
研究集会		33			25	-

※研究集会の8件は開催せず

2. 一般共同研究

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
宙空間	29-1	地上多点光学観測による電離圏・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	H29～R元	3年
	29-3	大型レーダー流星ヘッドエコーと超高感度高速カメラを用いた超微光流星の観測	阿部 新助	日本大学理工学部航空宇宙工学科・准教授	H29～R元	3年
	29-5	サブストーム・オーロラシーケンスの統一理論	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	H29～R元	3年
	29-6	北極域における人工衛星電波を用いた電離圏シンチレーション観測	大塚 雄一	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授	H29～R元	3年
	29-7	オーロラ活動時におけるVLF、降下電子特性に関する研究	田所 裕康	武蔵野大学工学部環境システム学科・講師	H29～R元	3年
	29-8	惑星間空間磁場北向き時の特異な極域電離圏対流の起源	渡辺 正和	九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・准教授	H29～R元	3年
	29-9	降下粒子によるオーロラ発光モデルの開発と粒子コードとの連携計算	加藤 雄人	東北大学大学院理学研究科・教授	H29～R元	3年
	29-10	SuperDARNIによる極域・中緯度における熱圏・電離圏・磁気圏ダイナミクスの比較研究	西谷 望	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授	H29～R元	3年
	29-11	磁気嵐時におけるグローバルなプラズマ圏・プラズマ圏界面の時間・空間変動特性	新堀 淳樹	名古屋大学宇宙地球環境研究所・特任助教	H29～R元	3年
	29-14	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	H29～R元	3年
	29-15	極域の大気電場観測データを用いた全地球電気回路の研究	鴨川 仁	静岡県立大学グローバル地域センター・特任准教授	H29～R元	3年
	29-16	極域擾乱電場による低緯度電離圏の時間変動特性の研究	橋本 久美子	吉備国際大学地域創成農学部・教授	H29～R元	3年
	29-18	PBIの新解釈：電離圏起源のAlfven波による爆発的オーロラ増光理論の構築	吉川 顕正	九州大学国際宇宙天気科学教育センター・准教授	H29～R元	3年
	30-1	ULF波動はオーロラ励起出来るか？	櫻井 亨	東海大学・名誉教授	H30～R元	2年
	30-3	トロムソにおける複数観測装置を用いた北極下部熱圏・中間圏大気の観測研究	野澤 悟徳	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授	H30～R2	3年
	30-4	レーダ観測、数値シミュレーションによる極域熱圏・電離圏変動の研究	藤原 均	成蹊大学理工学部・教授	H30～R2	3年
	30-5	極域および中低緯度レーダ観測による地磁気脈動電場の研究	菊池 崇	名古屋大学宇宙地球環境研究所・名誉教授	H30～R2	3年
	30-6	南極大型大気レーダにおけるアダプティブアンテナ技術を用いた電離圏観測法の研究	齊藤 昭則	京都大学大学院理学研究科・准教授	H30～R元	2年
	30-7	北欧地上観測ならびに衛星観測に基づくMF/HF帯オーロラ電波の研究	佐藤 由佳	日本工業大学共通教育系・講師	H30～R2	3年
	30-8	地形性重力波の大気光イメージ観測による研究	鈴木 秀彦	明治大学理工学部・専任准教授	H30～R元	2年
30-11	飛翔体観測・地上観測に基づく電離圏・内部電磁圏プラズマダイナミクスの研究	熊本 篤志	東北大学大学院理学研究科・准教授	H30～R2	3年	
30-12	デジタルプラネタリウムへの数値オーロラ投影のための可視化ソフトウェアの開発	才田 聡子	北九州工業高等専門学校・准教授	H30～R2	3年	

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	31-1	新しいレーザー技術の南極観測への応用	桂川 眞幸	電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授	H31～R3	3年
	31-2	地上デジタル放送波の伝搬遅延を用いた水蒸気量推定の技術開発及び実証実験	川村 誠治	情報通信研究機構 電磁波研究所・主任研究員	H31～R3	3年
	31-3	光学リモートセンシングによる超高層領域の大気組成に関する研究	津田 卓雄	電気通信大学大学院情報理工学研究科・助教	H31～R3	3年
	31-4	SuperDARNで観測されるFLRを用いた磁気圏領域の連続的固定	河野 英昭	九州大学大学院理学部地球惑星科学専攻・准教授 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター・准教授	H31～R3	3年
	31-5	VLF/LF帯電波の電波伝搬を用いた高エネルギー電子降下現象の実証的研究	土屋 史紀	東北大学大学院理学研究科・助教	H31～R3	3年
	31-6	大気微量成分の経年変化に及ぼす力学輸送効果の研究	村田 功	東北大学大学院環境科学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-7	金属原子ライター観測に応用するハルスレーザー分光計測のための光ヘテロダイン計測手法の確立	川原 琢也	信州大学学術研究院工学系・准教授	H31～R3	3年
	31-8	南極昭和基地の宇宙船観測による宇宙天気現象の研究	加藤 千尋	信州大学学術研究院理学系・教授	H31～R3	3年
	31-9	EISCATレーダーとあらせ衛星の観測に基づく地球電離圏から磁気圏へのプラズマ供給機構に関する研究	関 華奈子	東京大学大学院理学系研究科・教授	H31～R3	3年
	31-10	船舶搭載用のプラズマバブル・熱圏大気光観測システムの開発	坂野井 健	東北大学大学院理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-11	南米赤外線カメラによる超高層大気波動のイメージング	鈴木 臣	愛知大学地域政策学部・准教授	H31～R2	2年
	31-12	太陽圏と宇宙線のシミュレーション研究	三宅 晶子	茨城工業高等専門学校国際創造工学科・准教授	H31～R2	2年
気水圏	29-19	ディストロメーターを用いた降雪量推定法の改善	小西 啓之	大阪教育大学・教授	H29～R元	3年
	29-20	極地雪氷コアの金属成分分析	鈴木 利孝	山形大学学術研究院理学部・教授	H29～R元	3年
	29-21	アンアタスト長距離輸送の十年スケール変動の解明～カナダ雪氷コアを用いた解析より～	長島 佳菜	国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター・技術研究員	H29～R元	3年
	29-22	吹雪粒子からの昇華による大気への水蒸気供給の推定	杉浦 幸之助	富山大学大学院理工学研究科・教授	H29～R元	3年
	29-23	有機物質によるエアロゾル粒子の光学特性変化の評価	古賀 聖治	産業技術総合研究所環境管理研究部門・主任研究員	H29～R元	3年
	29-24	アイスコア試料の高精度・大量測定に備えた水の同位体標準試料の作成	植村 立	名古屋大学大学院環境学研究科・准教授	H29～R元	3年
	29-25	両極の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部・教授	H29～R元	3年
	29-27	地中レーダー(GPR)を用いた南極氷床、山岳氷河、多年性雪溪の内部構造探査に関する研究	福井 幸太郎	立山カルデラ砂防博物館・主任学芸員	H29～R元	3年
	30-13	後方散乱電子回析法とX線回析法を併用した氷の転位密度測定条件の確立	本間 智之	長岡技術科学大学工学研究科機械創造工学専攻・准教授	H30～R2	3年
	30-14	グリーンランド氷床および山岳氷河浅層アイスコアの化学、生物解析	的場 澄人	北海道大学低温科学研究所・助教	H30～R2	3年
	31-13	衛星搭載合成開口レーダデータを用いた東南極の氷河と海氷の変動解析	中村 和樹	日本大学工学部・准教授	H31～R3	3年

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間		
	31-14	北極海における大気－海洋相互作用と海水変動	島田 浩二	東京海洋大学学術研究院海洋環境科学部門・教授	H31	1年	
	31-15	南極域のエアロゾル長期変動の解析	原 圭一郎	福岡大学理学部・助教	H31～R3	3年	
	31-16	北極広域に沈着した光吸収性粒子の測定手法の確立とその空間分布の観測的解明	森 樹大	東京理科大学理学部第一部物理学科・助教	H31～R3	3年	
	31-17	雲ゾンデを用いた冬季の北極海で生じる雲特性変化の解明	佐藤 和敏	北見工業大学地球環境工学科・特任助教	H31～R3	3年	
	31-18	しらせ氷海モニタリングデータの解析による海水状況の把握および船体着氷メカニズムの解明	山口 一	東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授	H31～R2	2年	
	31-19	東南極氷床境界域における海洋物理過程の研究	大島 慶一郎	北海道大学低温科学研究所・教授	H31～R3	3年	
	31-20	気球・UAV・地上in-situ観測データによる極域エアロゾル循環機構解析	林 政彦	福岡大学理学部・教授	H31～R3	3年	
	31-21	北極海における海水の係留・衛星観測研究	深町 康	北海道大学北極域研究センター・教授	H31～R3	3年	
	31-22	両極田米の寒気に伴う顕著な気象現象発現にかかわる極域－熱帯域大気海洋結合システムの解明	本田 明治	新潟大学理学部・教授	H31～R3	3年	
	地圏	29-28	極域の地震活動・地震発生機構・地球内部構造に関する総合的研究	坪井 誠司	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター・情報技術担当役	H29～R元	3年
		29-29	南極及び環太平洋に分布する迷子巨礫の古地磁気学による年代推定	中村 教博	東北大学高度教養教育・学生支援機構・教授	H29～R元	3年
		29-30	重元素の局所同位体分析の開発と宇宙化学への応用	日高 洋	名古屋大学大学院環境学研究科・教授	H29～R元	3年
29-31		合成開口レーダ(SAR)データの偏波特性に着目した南極域の観測手法の高度化	大村 誠	高知県立大学文化学部・教授	H29～R元	3年	
29-32		南極での野外絶対重力測定方法に関する研究	福田 洋一	京都大学大学院理学研究科・教授	H29～R元	3年	
29-34		古生代炭酸塩岩のストロンチ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	H29～R元	3年	
29-36		日の出岬のアダカイト質トータル岩の成因論	廣井 美邦	千葉大学大学院理学研究科・名誉教授	H29～R元	3年	
29-37		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	首都大学東京大学院理工学研究科・助教	H29～R元	3年	
30-15		インフラサウンドによる極域表層環境変動の研究	山本 真行	高知工科大学 システム工学群・教授	H30～R2	3年	
30-16		東南極リュツォ・ホルム岩体を形成した原生代火成活動とそのテクトニクス背景の解明	亀井 淳志	島根大学学術研究院環境システム科学系・教授	H30～R2	3年	
30-17		FeAlO ₃ 相の安定領域と超高温変成岩類の酸素分圧の解析	川崎 智佑	愛媛大学理学部・研究員	H30～R元	2年	
30-18		月岩石中カリ長石に記録された水惑星・地球の揮発性元素同位体初期進化史の解読	橋爪 光	茨城大学理学部・教授	H30～R2	3年	
30-19	南極産アングライト隕石の鉱物学的研究	三河内 岳	東京大学総合研究博物館・教授	H30～R2	3年		
30-20	東南極リュツォ・ホルム岩体の地体構造論的構成・大構造と地殻進化の研究	豊島 剛志	新潟大学自然科学系(理学部)・教授	H30～R元	2年		

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	30-21	角礫岩コンドライトの分類及び衝撃履歴の解明	木村 眞	茨城大学理学部・名誉教授	H30～R2	3年
	31-23	東南極セール・ロンターネ山地における下部地殻流体活動の温度—圧力—時間条件の精密解析	河上 哲生	京都大学大学院理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-24	リュツォ・ホルム岩体の精密な温度構造および物質移動の素過程の解明	池田 剛	九州大学大学院理学研究院・准教授	H31～R3	3年
	31-25	インパクトが引き起こす物質進化と天体進化の解明	宮原 正明	広島大学大学院理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-26	UAVを利用した東オングル島積雪深分布変化解析の研究	荒川 逸人	防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所・契約研究員	H31～R3	3年
生物圏	29-38	極域地衣類に共生する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科学研究科・教授	H29～R元	3年
	29-39	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	H29～R元	3年
	29-40	動物化石資料や氷試料からの古代DNA解析	瀬川 高弘	山梨大学総合分析実験センター・特任助教	H29～R元	3年
	29-41	極域生態系にみられる菌多様性の空間パターンの分析	大園 享司	同志社大学理工学部・教授	H29～R元	3年
	29-44	極域に生息する植物プランクトン種からの揮発性有機化合物放出に関する研究	亀山 宗彦	北海道大学大学院地球環境科学研究院・准教授	H29～R元	3年
	30-22	マルチオミクス解析による極限環境生物の耐性能力機構および進化傾向の理解	河野 暢明	慶應義塾大学先端生命科学研究所・特任講師	H30～R2	3年
	30-23	季節海水域におけるアイス・アルジーの環境変化に対する不凍物質生産の研究	野坂 裕一	東海大学生物学部・助教	H30～R2	3年
	30-24	南極陸上生態系における未知ウイルスの実態解明に関する研究	堀江 真行	京都大学日盾センター/ウイルス・再生医科学研究所・特定准教授	H30～R2	3年
	30-25	飛翔性海鳥類の食性のDNA分析と海洋環境の関係について	山本 麻希	長岡技術科学大学大学院工学研究科・准教授	H30～R2	3年
	30-26	植物プランクトンの冷温適応に関する研究	高澤 伸江	京都学園大学バイオ環境学部・准教授	H30～R2	3年
	30-27	海鳥類の採餌行動と活動中のエネルギー消費の環境応答	新妻 靖章	名城大学農学部・教授	H30～R2	3年
	30-28	極域大型動物資料や燻蒸された古代標本からのDNA解析	米澤 隆弘	東京農業大学農学部動物科学科・准教授	H30～R2	3年
	30-29	双方向通信・GPSロガーを用いたアデリーペンギンの群れの行動解析	三田村 啓里	京都大学大学院情報学研究科・准教授	H30～R2	3年
	30-30	周北極要素植物の環境適応と分化の解明: 北極圏と中緯度高山の集団比較	和田 直也	富山大学研究推進機構極東地域研究センター・教授	H30～R2	3年
	31-27	南極の短波長紫外線が生物に及ぼす影響に関する生化学的研究と気象データの統計解析	高橋 哲也	島根大学人間科学部・教授	H31～R3	3年
	31-28	南極クマムシの生活史戦略に関する研究	辻本 恵	慶應義塾大学環境情報学部・専任講師	H31～R3	3年
	31-29	極域の光合成生物の生理応答機構の解析	菓子野 康浩	兵庫県立大学大学院生命理学研究科・准教授	H31～R3	3年
	31-30	南極沿岸における海産微小動物相とその特徴の解明	上野 大輔	鹿児島大学大学院理工学研究科・助教	H31～R3	3年

分野	No.	研究課題名	研究代表者氏名	所属・職	研究期間	
	31-31	沿岸海跡湖能取湖におけるアイスアルジーの一次生産の動態と動物プランクトンの分布動態の関りについて	西野 康人	東京農業大学生物産業学部・教授	H31～R3	3年
	31-32	南極湖沼生態系の数理モデル化に関する研究	佐々木 顕	総合研究大学院大学先端科学研究科生命共生体進化学専攻・教授	H31～R3	3年
	31-33	極域湖沼における炭素・窒素の特性と循環に関する研究	藤嶽 暢英	神戸大学大学院農学研究科・教授	H31	1年
	31-34	南極におけるレジオネラ属菌とその宿主となるアメーバの解析	石井 良和	東邦大学医学部・教授	H31～R3	3年
	31-35	極地土壌のCO2放出と土壌ガス拡散係数に関する研究	米村 正一郎	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター・主	H31～R3	3年
	31-36	極域に生息する植物寄生性糸状菌の多用性と生態の解明	東條 元昭	大阪府立大学大学院生命環境科学研究科・教授	H31～R3	3年
	31-40	南極をめぐる科学と国際動向に関する社理連携研究	柴田 明穂	神戸大学大学院国際協力研究科・教授、極域協力研究センター長	H31～R3	3年
極地工学	30-31	深層掘削機の次世代コンピュータの実用化	高田 守昌	長岡技術科学大学・助教	H30～R2	3年
	30-32	極地における高空風力発電手法の研究	赤坂 剛史	金沢工業大学工学部航空システム工学科・講師	H30～R2	3年
	30-34	第Ⅲ期ドーム計画に向けた新規深層掘システムの設計及び実証実験を通じた改良の推進	古崎 睦	旭川工業高等専門学校・教授	H30～R2	3年
	31-37	南極昭和基地におけるエネルギー供給に関する極地工学研究	小原 伸哉	北見工業大学工学部地球環境工学科・教授	H31～R3	3年
	31-38	南極内陸基地に関する輸送および建築等に関する極地工学研究	香川 博之	公立小松大学生産システム科学部・教授	H31～R3	3年
	31-39	極地建築・土木に関する雪氷防災工学研究	金 高義	福島工業高等専門学校都市システム工学科・助教	H31～R3	3年

3. 研究集会

No.	研究課題名	研究代表者	所属・職
31集1	第4回古典籍文理融合研究会	山本 和明	国文学研究資料館・教授
31集2	サブストリームトリガー機構のトポロジー研究会	田中 高史	九州大学・名誉教授
31集4	PANSY研究集会	佐藤 薫	東京大学大学院理学系研究科・教授
31集5	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・助教
31集6	極域科学計算機システムを用いた極域科学研究の展開	岡田 雅樹	国立極地研究所・准教授
31集7	太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用	阿部 修司	九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター・学術研究員
31集8	STE研究連絡会現象報告会および現象解析ワークショップ(極域を軸とする宇宙天気現象の予測精度向上に向けて)	西谷 望	名古屋大学宇宙地球環境研究所・准教授
31集10	SuperDARAN研究集会	行松 彰	国立極地研究所・准教授
31集11	無人機の活用による極地観測の展開	林 政彦	福岡大学理学部・教授
31集12	南極氷床・海氷・海洋システムの研究に関する今後10年を見据えた将来構想	溝端 浩平	東京海洋大学・学術研究院・助教
31集13	2019年度 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会	佐藤 陽祐	北海道大学理学研究院・助教
31集14	南極海洋・海氷・氷床システムの相互作用と変動に関する研究集会	青木 茂	北海道大学低温科学研究所・准教授
31集15	南極エアロゾル研究会	原 圭一郎	福岡大学理学部・助教
31集16	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・准教授
31集17	テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像	久野 成夫	筑波大学数理物質系・教授
31集19	永久凍土の変動とそのモニタリングに関する研究集会	原田 鉦一郎	宮城大学食産業学群・准教授
31集22	大気・雪氷・海洋間の物質循環と極域への輸送プロセスに関する研究集会	的場 澄人	北海道大学低温科学研究所・助教
31集23	若手研究者・学生を対象とした南大洋・南極研究集会	松井 浩紀	高知大学海洋コア総合研究センター・特任助教
31集24	極域のオープンデータ・オープンサイエンスに関する研究集会 - II	金尾 政紀	データサイエンス共同利用基盤施設/国立極地研究所・准教授
31集25	極域から探る多様な時空間スケールの地球表層変動と固体地球の応答	奥野 淳一	国立極地研究所・助教

No.	研究課題名	研究代表者	所属・職
31集27	可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会-V	山本 真行	高知大学システム工学群・教授
31集28	両極性分布を持つ冷水性翼足類の分類、分布および生理生態に関する研究集会	高橋 邦夫	国立極地研究所・助教
31集30	2019年 南極医学・医療ワークショップ	大野 義一郎	東葛病院・副院長／国立極地研究所・客員教授
31集31	南極条約協議国会議(ATCM)をめぐる科学と法政策の相乗効果に関する研究	伊村 智	国立極地研究所 副所長
31集32	ニーオルスン新基地を中核とした北極ツンドラ生態系研究の新展開	内田 雅己	国際北極環境研究センター・准教授

本報告書は、令和元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。