

令和4年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境変動を  
駆動する南大洋・南極氷床」

領域設定期間

平成29年度～令和3年度

令和4年6月

領域代表者 国立極地研究所・研究教育系・准教授・川村 賢二

# 目 次

## **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	7
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6 研究目的の達成度及び主な成果	11
7 研究発表の状況	16
8 研究組織の連携体制	21
9 研究費の使用状況	22
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

**研究組織**

(令和4年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	17H06316 熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床	平成29年度 ～ 令和3年度	川村 賢二	国立極地研究所・研究教育系・准教授	10
A01-1 計	17H06317 南極底層水を起点とする熱塩循環・物質循環のダイナミクス	平成29年度 ～ 令和3年度	大島 慶一郎	北海道大学・低温科学研究所・教授	7
A01-2 計	17H06318 南大洋の古海洋変動ダイナミクス	平成29年度 ～ 令和3年度	池原 実	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授	5
A01-3 計	17H06319 海氷下の生態系と物質循環の相互作用	平成29年度 ～ 令和3年度	茂木 正人	東京海洋大学・学術研究院・准教授	5
A02-1 計	17H06320 南極氷床と気候の変動及び相互作用	平成29年度 ～ 令和3年度	川村 賢二	国立極地研究所・研究教育系・准教授	5
A02-2 計	17H06321 固体地球と氷床の相互作用	平成29年度 ～ 令和3年度	福田 洋一	国立極地研究所・研究教育系・特任教授	7
A03 計	17H06322 未探査領域への挑戦	平成29年度 ～ 令和3年度	野木 義史	国立極地研究所・研究教育系・教授	7
A04 計	17H06323 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング	平成29年度 ～ 令和3年度	阿部 彩子	東京大学・大気海洋研究所・教授	6
計		平成29年度 ～ 令和3年度			
計		平成29年度 ～ 令和3年度			
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 8 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
B01 公	18H05053 南半球における中高緯度大気循環 の不確実性の定量化	平成30年度 ～ 令和元年度	猪上 淳	国立極地研究所・国際北極 環境研究センター・准教授	1
B01 公	18H05054 南極氷床表面質量収支高精度推定 手法の確立	平成30年度 ～ 令和元年度	庭野 匡思	気象庁気象研究所・気象予 報研究部・主任研究官	1
B01 公	18H05055 地表面フラックス見積りスキーム の改良とそれによる南極域氷床の 表面質量収支評価改善	平成30年度 ～ 令和元年度	西澤 誠也	国立研究開発法人理化学研 究所・計算科学研究センタ ー・研究員	1
B02 公	18H05051 衛星高度計による南極海氷域の 海洋循環の解明と周極深層水の輸 送経路の推定	平成30年度 ～ 令和元年度	溝端 浩平	東京海洋大学・学術研究 院・助教	1
B02 公	18H05052 高精度薄氷厚推定アルゴリズムの 開発とその氷厚を用いた海氷生産 量データセットの作成	平成30年度 ～ 令和元年度	二橋 創平	苫小牧工業高等専門学校・ 創造工学科・教授	1
B03 公	18H05050 南極大気中の硫酸安定同位体組成 の季節変動を再現する大気化学輸 送モデルの構築	平成30年度 ～ 令和元年度	服部 祥平	東京工業大学・物質理工学 院・助教	1
A01 公	20H04961 東南極トッテン棚氷域における氷 床海洋相互作用の観測研究	令和2年度 ～ 令和3年度	平野 大輔	国立極地研究所・南極観測 センター・助教	1
A01 公	20H04962 南大洋縁辺部における準リアルタ イムな人為起源二酸化炭素の動態 解明	令和2年度 ～ 令和3年度	渡辺 豊	北海道大学・地球環境科学 研究院・准教授	1
A01 公	20H04965 南大洋水塊形成海域における乱流 鉛直混合と水塊変質・栄養物質供 給	令和2年度 ～ 令和3年度	安田 一郎	東京大学・大気海洋研究 所・教授	1
A01 公	20H04974 南極大陸を取り巻く海産微小底生 動物の分化過程と進化史の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	辻本 恵	慶應義塾大学・環境情報学 部・講師	1
A01 公	20H04984 フェオダリアが南大洋インド洋区 季節海氷域の生物ポンプに果たす 役割の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	池上 隆仁	国立研究開発法人海洋研究 開発機構・地球環境部門・ 副主任研究員	1

A01 公	20H04985 窒素循環から解き明かす南極海生態系変動	令和2年度 ～ 令和3年度	塩崎 拓平	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
A02 公	20H04966 南極氷床における多点連続観測を目指した小型絶対重力計の開発研究	令和2年度 ～ 令和3年度	新谷 昌人	東京大学・地震研究所・教授	1
A02 公	20H04971 東南極、ラングホブデ氷河における接地線の同定	令和2年度 ～ 令和3年度	奈良間 千之	新潟大学・自然科学系・教授	1
A02 公	20H04978 東南極氷床における表面質量収支の観測誤差評価	令和2年度 ～ 令和3年度	津滝 俊	国立極地研究所・研究教育系・特任研究員	1
B01 公	20H04963 南極暖湿化の原因とその影響の定量化	令和2年度 ～ 令和3年度	佐藤 和敏	北見工業大学・工学部・助教	1
B01 公	20H04967 衛星観測とLESを用いた南大洋の下層雲の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	千喜良 稔	東京大学・大気海洋研究所・特任研究員	1
B01 公	20H04982 過去40年間の南極氷床表面質量収支高精度計算	令和2年度 ～ 令和3年度	庭野 匡思	気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官	1
B02 公	20H04970 トッテン棚氷融解の引き金：海洋渦が介在する沖合から棚氷への熱輸送過程の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	溝端 浩平	東京海洋大学・学術研究院・助教	1
B02 公	20H04976 海氷過程の定量的なデータセットから示す熱塩フラックス、物質輸送、そして生物生産	令和2年度 ～ 令和3年度	二橋 創平	苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授	1
B02 公	20H04981 衛星重力データ、衛星高度計データを用いた南極氷床の長期質量変動決定	令和2年度 ～ 令和3年度	山本 圭香	国立天文台・RISE 月惑星探査プロジェクト・特任研究員	1
B03 公	20H04964 宇宙線変動に基づくスーパー間氷期古気候記録の陸海同期	令和2年度 ～ 令和3年度	堀内 一穂	弘前大学・理工学研究科・助教	1
B03 公	20H04969 南極氷床コア中の硫酸・硝酸同位体組成から復元する過去のエアロゾルの起源と生成過程	令和2年度 ～ 令和3年度	服部 祥平	東京工業大学・物質理工学院・研究員	1
B03 公	20H04972 東南極の年縞湖沼堆積物を利用した小氷期以降の氷床融解史の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	香月 興太	島根大学・学術研究環境システム科学系・講師	1

B03 公	20H04973 無視されてきた微化石「黄金色藻シスト」を用いた古環境プロキシ開発	令和2年度 ～ 令和3年度	加藤 悠爾	筑波大学・生命環境系・特任助教	1
B03 公	20H04975 鉄・硫黄・リンの化学種別の存在量と同位体組成から探る南大洋の酸化還元状態の変動史	令和2年度 ～ 令和3年度	山口 耕生	東邦大学・理学部・准教授	1
B03 公	20H04979 中央海嶺における海底マグマ活動が地球環境変動に与える影響に関する研究	令和2年度 ～ 令和3年度	藤井 昌和	国立極地研究所・研究教育系・助教	1
B03 公	20H04980 南極氷床コアのダストとブラックカーボンの高精度・高時間分解能分析による古環境復元	令和2年度 ～ 令和3年度	東 久美子	国立極地研究所・研究教育系・教授	1
B03 公	20H04983 氷床変動の高精度予測のための地質年代測定手法の開発と適用	令和2年度 ～ 令和3年度	田村 亨	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員	1
公募研究 計 29 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 29 年度	334,260,000 円	256,530,000 円	77,730,000 円
平成 30 年度	278,180,000 円	220,310,000 円	66,870,000 円
令和元年度	275,350,000 円	208,630,000 円	66,720,000 円
令和 2 年度	300,160,000 円	230,410,000 円	69,750,000 円
令和 3 年度	299,188,000 円	236,680,000 円	62,508,000 円
合計	1,496,138,000 円	1,152,560,000 円	343,578,000 円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

### 研究の学術的背景と目的

地球の氷の約90%を占める南極氷床は、海水準で約60mに相当する淡水リザーバである。例えば、約300万年前のCO<sub>2</sub>濃度は現在より低い300-400ppmであったにもかかわらず、南極氷床は現在よりも小さく海水準は最大20m高かったと推測されている(図1)。南極氷床は比較的安定であると考えられてきたが、近年になって南極氷床の縮小が相次いで報告され(図2)、大きな関心と論争の的となっている。一方、南大洋では南極底層水という地球で最も重い水が生成される。全海水の3040%を占める巨大な(負の)熱のリザーバであり、その量や温度は地球表層の熱の分配に大きく影響し、長期の全球気候を左右する。さらに、南大洋は最大のCO<sub>2</sub>リザーバであり、氷期-間氷期サイクルにおけるCO<sub>2</sub>変動は南大洋が決めてきたという説が有力である。このように、熱・水・CO<sub>2</sub>の巨大リザーバである南極氷床と南大洋は、全球気候や海水準を決定づける重要要素である。

南極氷床と南大洋との間には強い相互作用がある(図3)。例えば、南極氷床の縮小がもたらす淡水は、海水の低塩(低密度)化を招き、海洋の成層構造を安定化させる。これは南極底層水の生成を弱体化させて亜表層の水温上昇を招き、氷床末端部を底面から融解してさらなる氷床損失をもたらすと考えられる。また、CO<sub>2</sub>増加による海洋酸性化は極域で最大となり、海洋生態系への影響を通じてCO<sub>2</sub>吸収を鈍化させ、さらなる温暖化と氷床融解をもたらさう。

巨大リザーバである南極氷床や南大洋は相互に影響し合いながら変動し、全球環境の大変動をもたらす可能性が高い。しかし、観測の困難さから理解やモデル化が遅れており、特に南極氷床の9割以上を有する広大な東南極においてその傾向が顕著である。IPCC(国連の気候変動に関する政府間パネル)第5次評価報告書は、「20世紀後半の温暖化が人為起源である可能性は極めて高い」と報告したが、南大洋と南極氷床において気候モデルによる再現と観測結果との差が大きいなど、理解の遅れを指摘した。西南極では気温や南大洋深層水温の上昇が観測されているが、海面水温や東南極の気温は有意に温暖化しておらず、海氷も北極海のように単調に減少してはいない。東南極には氷床が厚みを増している地

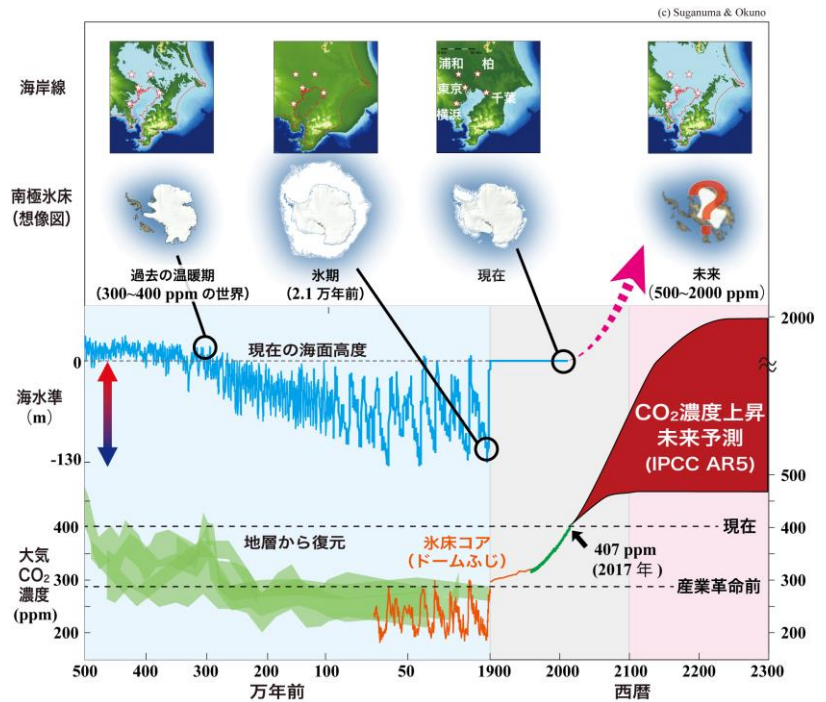


図1 海水準、大気CO<sub>2</sub>濃度、南極氷床の変遷と予想図。過去にCO<sub>2</sub>濃度が高い時代には、南極氷床は現在より縮小し海水準を押し上げた。現在、CO<sub>2</sub>濃度は数百万年来の最高値を超えて上昇を続けており、南極氷床への影響が人類的な懸念となっている。

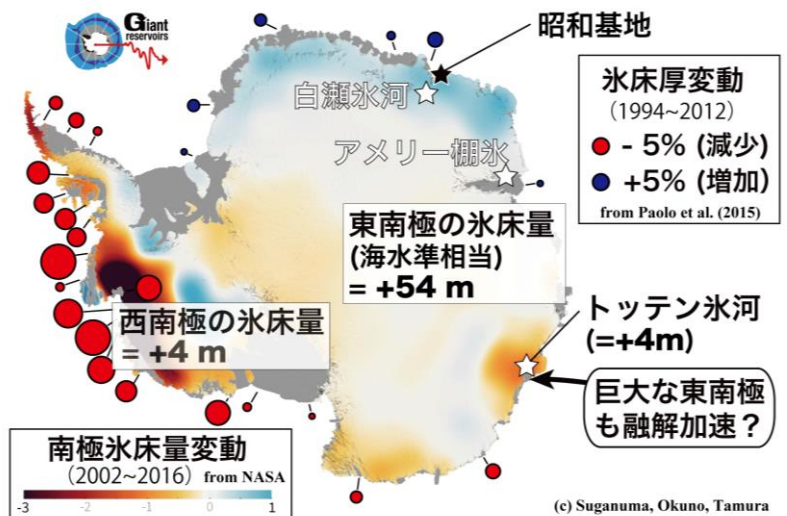


図2 南極大陸の地理的特徴と氷床量(海水準相当)。氷床厚の変化を丸の大きさで示す(Paolo et al., 2015, Science)。



域さえある。古環境の研究から、南極氷床や底層水には一度超えてしまうと容易には後戻りできない「ティッピング・ポイント (Tipping point)」が存在し、そこに近づいている可能性も指摘されているが、観測やモデリング研究の圧倒的不足から、その実態は不明である。

南大洋・南極氷床の変動には、異なる時間・空間スケールの様々な相互作用が関与している。南極氷床では、棚氷下の海洋への暖水貫入による底面融解が鍵であり、氷床-海洋の相互作用の理解が重要である。一方で、温暖化には積雪増加により氷床を成長させる働きもあるため、大気-氷床の相互作用や、南極周極流と極前線帯の南北移動といった要素も重要である。南極アイスコアからは、南極の気温と CO<sub>2</sub> 濃度が同期して変動したことが示され、全球炭素循環における南大洋の物理・生物・化学過程の重要性は明らかである。南大洋では栄養塩濃度の変化が観測され、その海洋循環や海水変動との関連、莫大な生物生産量を持つ南大洋生態系への影響の解明が喫緊の課題となっている。

本領域では、南大洋および南極氷床に関して、観測とモデリングにより素過程を理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明らかにすることを目的とする。さらに、南大洋及び南極氷床を起点として生じる全球環境変動の将来予測につながる融合研究をめざす。本領域は、多分野の研究者が連携、融合研究することで、このシステムの理解と将来予測をめざして「南極環境システム学」を創成する。

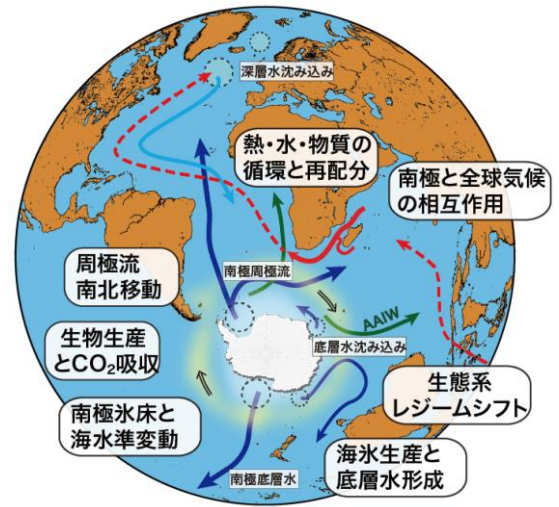


図3 全球気候変動を駆動する南大洋・南極氷床

### 革新的・創造的な学術研究の発展が期待される点

南大洋・南極氷床の複雑な相互作用を紐解く鍵は、現在の氷床・海洋・大気の相互作用に重点を置いた現場観測データに加え、アイスコア・海底コアや地形情報などによる古環境データを取得し解析すること、また、それらの知見を取り入れた気候-氷床モデルや海洋・物質循環モデルを用いた数値実験を総合的に展開することである。本領域は、それらの観測とモデルの融合から、過去-現在-将来を通じた南極氷床・海洋・物質循環の応答特性を定量的に明らかにする。様々な相互作用の理解が本質的であり、既存の学問分野を超えた融合領域研究を進めることで、我が国の学術水準の向上・強化につながることを期待される。そのため、地質学、地形学、測地学、地球力学、気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、生物学、計算科学、機械工学の多岐にわたる分野の研究者を組織した。

本領域では、日本が実績を持つ東南極に観測の軸足を置いて研究を進める。東南極(図2)は西南極より1桁大きい氷床体積を持つため、日本が地の利を活かして東南極の空白域に研究を展開すれば、南極氷床や南大洋が海水準や全球気候に深刻な影響を与える可能性を先んじて捉えられる。分野融合研究を加速し、南大洋・南極氷床結合システムの理解と全球環境へのインパクトを含めた学術研究の発展が期待される。

本領域の具体的な成果は以下に集約される。

- ・ 東南極氷床の代表的な流域と周辺海域をターゲット観測域として、表面や底面での融解過程、広域の表面質量収支や流動といった素過程や諸量を押さえ、衛星観測も合わせて現在および過去数十年の氷床質量収支と海洋・海氷・生態系の変動を明らかにする。
- ・ 観測の知見を取り入れた南極氷床モデルと海洋モデルを開発・結合し、アイスコアや古海洋のデータによる検証を経て、南極氷床融解による海水準上昇を予測する。

これらの成果は、南極氷床や底層水の不可逆的な激変への臨界点である「ティッピング・ポイント (Tipping point)」の条件(海洋や気候の状態)やメカニズム解明を通じ、IPCC やフューチャー・アース等への貢献が期待される。

南大洋・南極氷床の理解には、長期の継続的な観測が不可欠である。本領域が中心となり、東南極に軸足を置く諸外国との連携を進め、長期のモニタリングに向けた国際協力体制の整備も期待される。また、無人海中探査機や無人航空機を展開し、氷の下の海洋データ取得や氷床変化の広域マッピングを可能にする。外国でも開発と応用が模索されている分野であり、国際協力への寄与が期待される。

さらに、若手研究者が融合研究を進めることにより、個々の研究分野を超越した広い視点を持つ研究者に育ち、本領域が創出する「南極環境システム学」の発展への大きな継承財産となることが期待される。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

（審査結果における指摘）「若手研究者育成に関しては、より積極的に取り組み、一層促進するための工夫を行うことが望まれる」。

### ＜対応策等＞

総括班や運営委員会において若手人材の確保と育成にかかる活動計画を議論し、具体的かつ実効性のある計画を立案し実行した。

### 南極春の学校（スプリングスクール）・若手向け学際的解説書

全国の学生に本領域を知ってもらい、関心を持った学生や若手研究者に本領域が目指す学際研究を伝えるべく、初年度に「南極 春の学校 2018～目指せ国際・学際研究者～」として3日間の合宿形式でのスクールを開催した。31名の学部生と24名の大学院生が参加し、南極若手会に多くの学生が参加する契機になったとともに、本領域メンバーが所属する大学院に参加者の11名が進学するなど、領域の間口を広げた。このほか、日本地球惑星科学連合（JpGU）大会における展示ブースによる学生向けの発信を行い、訪問者が関連大学院を受験するといった効果が見られた。

また、未知なる南極の学際研究に魅力を感じてもらうための入門書として、分野外の研究者や若手研究者・学生を対象とし、20編284ページからなる解説集「南大洋・南極氷床」（低温科学第76巻）を初年度に出版した。<https://www2.lowtem.hokudai.ac.jp/pdf/LTS76.pdf>

### 南極若手会

発足については、領域主要メンバーの30代の常勤研究者が中心となってキックオフ会合（9月）に合わせた発足の支援を行った。その後はポストドクと学生が運営の主体となり、学際・国際研究者を目指すことを念頭におき、分野を超えた勉強会や研究ツールの演習、研究計画作成ワークショップなどの取り組みを行った。

### 若手海外派遣支援

若手研究者の国際学会派遣支援や海外派遣支援（外国での研究滞在）を実施した。将来の共同研究や長期在外研究を視野に入れた滞在を行ったことが年次報告会で報告されるなど、周りの若手研究者への刺激にもなり、良い効果が生まれた。

### 学際的フィールド教育

船舶観測に6班から学生やポストドクが乗船し、共同観測や船内セミナーを行うなど、若手の分野間交流を促進した。領域としてモデル分野の若手研究者のフィールドワーク参加の支援を行い、計画班の複数の代表が乗船するなどして、フィールド学際教育の実践を心がけた。

### 国際シンポジウム・年次報告会

学際的な場で多様な分野の聴衆に伝わる研究発表や、異分野の研究者との質疑応答や議論の経験の機会を設けるため、国際シンポジウムを2年目に前倒しして開催し、32名の若手が参加した。経験の浅い若手研究者に口頭発表の機会を積極的に与え、計画研究の全ての分野から海外研究者を招聘し、若手研究者のモチベーションと緊張感を高めることも考慮した。海外研究者や領域外の参加者から若手の発表のレベルの高さに賛辞が寄せられたほか、領域研究者と海外招聘者との打ち合わせも多数開かれるなど、若手が刺激と自信を得る機会となった。ほかには、多分野の研究者が集まる年次報告会で若手の発表を奨励するなど、若手育成を心がけた。

### その他の取り組み

連携促進CVシート（研究協力者を含む全員の専門分野や研究テーマ、スキルや売り、連絡先などの一覧表）を作成して共有し、領域の報告会や学会等で見聞きして後に興味を湧いた際や、分野外のスキルを要する困難に当たった際などに、若手研究者が連絡や連携を取りやすい仕組みを作った。また、各班の裁量により、分野外の若手研究者をポストドクとして雇用し（海洋物理で学位を取得した者を海洋化学の研究室で雇用）、学際性の高い研究者の育成に取り組んだ。

中間評価においては「若手研究者に対する積極的な支援により極域研究分野の若手研究者育成に尽力されている点も高く評価できる」という、若手研究者育成策を評価する所見が示された。

また、研究領域の期間後半において、若手研究者が主著者となり、領域の成果を代表するような論文が多数出版されたことは、これらの取り組みを通じた若手研究者育成の効果を反映していると考えられる。

(中間評価結果における指摘)「研究成果が理工系に集中する傾向にあるため、生物系研究に一層の進捗が望まれる。南大洋及び全球的な生命圏に対する示唆が得られるような複合領域としての研究成果を期待したい」  
<対応策等>

### 生物系研究の強化

生態系班研究は、当初は個別の研究やデータ取得を進める必要があったが、後半は個々の成果をつなげ、生態系全体の構造に関する研究を推進した。例えば、ハダカイワシ仔魚が主に沈降粒子を摂餌することや、動物プランクトンの端脚類が他の動物プランクトンの糞粒を捕食する可能性、また頭足類稚仔の食性についての研究などから、南大洋における比較的低次の食物網構造が明らかになり、食物網と生物ポンプ機能との関連が示唆された。また、生物試料の安定同位体比を分析し、南大洋食物網には炭素の起源が2種類あることを発見したほか、各生物間の食物網における関係性が分かったことや、DNAメタバーコーディングを用いた食性解析や生物の分布様式の研究手法を確立するなど、新手法による生物系研究の強化も行った。

### 生態系全体の取り扱い(複合領域としての強化)

複合領域としての強化のため、生態系全体や、海洋物理との複合過程に関する研究を新たに推進した。まず、海氷と食物網を介する物質循環について、各生物種の安定同位体比分析により、南大洋生態系には、海氷(アイスアルジー)依存、ブルーム(植物プランクトン)依存、そしてその中間のエネルギーフロー(食べる・食べられるの関係)があることを見出した。南大洋の生物の大部分が海氷起源の炭素から始まる食物網に含まれるとともに、気候変動が海氷変動を通じて生態系変動に影響しうること示した。また、海洋の中規模渦と海氷消長との関係が小型動物プランクトンの個体群構造に影響を及ぼすことなど、南大洋の海水や物理場の変化が生態系に影響を及ぼす可能性を示した。さらに、世界で最も長距離を移動する海鳥(ハシボソミズナギドリ)の移動ルートや食性を明らかにすることで、南極海の生態系が日本を含む北半球にまでつながっていることを示した。また、公募研究に窒素循環プロセスや周極的炭酸変動に関わる研究課題が加わり、異分野との議論から新たな連携研究も創出された。このように、観測データと素過程の理解を中心とし、主に底層水班と生態系班の連携により、南大洋や全球的な生態系変動のキーファクターに関する研究成果があがった。さらに、観測やデータに基づく知見を南大洋や全球的な生態系全体を扱う研究へと活かすために、生態系モデルの構築や検証に向けた取り組みが重要であると考え、次項に挙げるモデル班との連携強化を実施した。

### 生態系-モデル連携タスクチーム

近年発展を遂げている全球生態系モデルでさえ、南大洋の観測結果を再現できず、気候変動が全球的な生態系に与える影響を理解する上でのボトルネックとなっている。そのため、生態系班とモデル班を中心に、生態系-モデル連携タスクチームを結成し、現状のモデルの問題点と、観測データからモデルを検証する際に重要なパラメータについて議論し、以下の優先課題を設定して取り組んだ。

(1)日本の南極観測隊が観測し個別に公開してきた低次生態系の長期データセットを再構築し、モデルの検証に利用可能とすること。

→総括班の代表裁量経費により長期データセットを集約・整理し、生態系班で長期変動解析を行ったほか、公募課題による炭酸系のパラメタリゼーション確立や、モデル班による同化モデルの検証データとして活用された。

(2)全球および領域海洋-生態系モデルと海色衛星データから推定される海洋表層の生物生産を比較する際、衛星データの欠損値の扱いに問題があるため、その改善手法を確立すること。

→問題点がデータの季節性にあることを見出し、季節的なデータ欠損を考慮した解析方法を開発した(論文準備中)。

(3)海氷中の生物・有機物粒子が季節海氷域の生態系・物質循環に果たす役割や、海氷の消長・流動が生物過程に与える影響を解明すること。

→南大洋インド洋セクターの複数エリアにおいて2019-2020年に採取した海氷試料の分析結果から、海氷中の粒状有機物濃度が水中の濃度を遥かに超えることや、海氷融解による生物活動の強化が広範囲で生じ得ることを明らかにした。一方、アイスアルジーの存在量には個々の海氷試料間で大きな差があり、このことが海域間の氷縁ブルームの不均一性の一因である可能性を見出した。

以上のように、南大洋の生物生産や食物網における海氷の役割の解明や、過去数十年間の海洋観測データと衛星データの比較、IPCC第6次評価報告書で引用された複数の全球海洋生態系モデルの衛星データによる検証評価など、南大洋全域や全球生態系の理解に通ずる新たな連携研究を行い、良好な成果を得た。



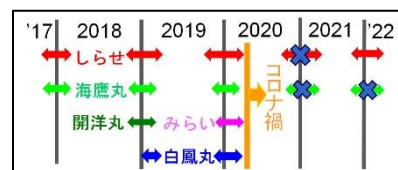
## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

#### 研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動 (略称: 南大洋)

海洋観測や試料分析により、氷床-海洋相互作用プロセスや、過去から現在の海洋・物質循環、生物動態等の変動の解明を目指した。日本の5船による総合観測を行い(右図)、外国の2船も用いて多様な観測や試料採取を実施した。なお、主な連携観測は2019年度までに終了したため、コロナ禍による航海延期の影響は軽微であった。しらせ氷河域に加え、当初計画を超えて、2019年度には東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河域の観測も実施した。棚氷が周極深層水により融解されるプロセスの解明や、底層水の動態把握、海底コア解析による水温と南極前線位置の復元、海氷変動が生態系に及ぼす過程の解明など、南大洋・南極氷床の相互作用と全球環境への影響に関する成果を得て、当初目的以上の達成を得た。



領域期間中の南大洋航海観測

#### 研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動 (略称: 南極氷床)

東南極を中心に現場観測や衛星データ解析、アイスコアや堆積物の分析を行い、現在から氷期-間氷期スケールまでの南極氷床変動や固体地球との相互作用、南極と全球気候の関係等の解明を目指した。棚氷の熱水掘削による観測や、広域の表面質量収支、基盤・表面地形、重力、GNSS や無人機による測量等の観測が成功し、過去の復元では、ドームふじアイスコアによる年代制約と古環境復元や、地形地質調査・試料解析による過去数万年間の氷床変動の規模とタイミングの制約などの成果を得た。氷床質量と気候変動の関連の理解が進んだ上、GIAモデルが高精度化され、他班との連携による南極氷床の実態と変動の解明や気候モデル検証への寄与なども着実に進捗し、当初目的を十分達成した。

#### 研究項目 A03 未探査領域への挑戦 (探査班)

南極の海氷域と沿岸域に対して、無人観測技術の開発とデータ取得を目指した。海氷域から氷床縁で運用可能な無人海中探査機を中心として、設計から組立を経て、コロナ禍の影響は国内での氷海試験などにより回避し、南極海で運用可能なシステムを完成させた。また、無人通年観測システムの導入・運用による海洋鉛直構造の時系列データの取得や、沿岸域での無人航空機による氷床・露岩・海氷の表面地形広域マッピング、地上定点無人連続観測システムのデータ回収を実現した。厳しい自然環境を持つ南極域における無人観測技術開発等を大きく進展させ、当初目的を十分達成した。

#### 研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング (モデル班)

各種モデルの開発や数値実験により、南極の気候と氷床、南大洋の物理・化学過程や物質循環等からなる南極環境システムの理解を進めるとともに、現場観測および分析データとの連携によるモデル検証を経た変動メカニズムの解明を目指した。日射や温室効果ガスを入力して気候を計算する気候モデルや、大気と海洋の温度や降水量を入力する氷床力学モデル、海洋表面フラックスを入力する海洋物質循環モデルや領域モデルなどの高度化に成功し、観測研究との連携により棚氷融解に関する氷床-海洋相互作用を解明した。古気候に関するモデル計算とデータとの比較検証や、氷床モデルによる1000年間の長期予測や氷床のティッピングポイントの把握など、当初目的以上の達成を得た。

#### 研究項目 (公募) B01 大気物理とモデリング

南大洋や南極氷床の変動に重要な、大気-海洋間や大気-氷床間の相互作用の解明を目指した。南極域における雲の物理と放射過程や、大気境界層プロセス、大気大循環と南極大気との関連など、大気科学を基本とした公募研究により計画研究を補い、領域気候モデルの南極への適用や全球気候モデル改良、各種のモデル班や氷床班、固体地球班との連携が進み、当初目的は十分達成された。

#### 研究項目 (公募) B02 各種の衛星観測

氷床・海氷・海洋の変動を南極全域で連続して捉えるため、人工衛星リモートセンシングの新展開を目指した。計画研究に含まれない衛星やセンサー、アルゴリズムを用いた研究が展開され、現場観測研究やモデル研究の計画研究との連携が進んだことから、当初目的は十分達成された。

#### 研究項目 (公募) B03 新しい観測・分析手法を用いた研究

南極環境システムの解明に資する新たな手法の開発と応用を目指した。現場観測で得られる各種試料の新手法による分析や、それによる環境代理指標の開発、新手法を用いた観測研究など、多くの計画研究班との連携による多様な研究が行われ、当初目的は十分達成された。

(2) 本研究領域により得られた成果 (計画研究・公募研究)

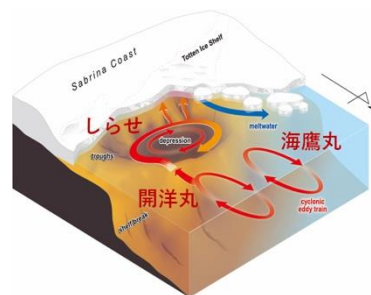
※主要論文は「7研究発表の状況」にまとめ、以下では高インパクトジャーナルのみ括弧内に記載した。

研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動

A01-1(計画・底層水班・大島)

氷床・海洋相互作用の解明 (A03 探査班・A04 モデル班・A02-1 氷床班・A02-2 固体地球班・B02 公募連携)

白瀬氷河が流出するリュツォ・ホルム湾において、大規模な海洋観測と氷河観測を実施した。観測データの解析を軸に、数値モデルや測地・雪氷学との融合研究から「白瀬氷河の底面に、沖合起源の暖かい海水が流入することで顕著な融解が生じ、その強度は卓越風の季節変動に制御される」という一連のプロセスを解明した(10 *Nature Communications*)。同様の観測を、東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河の沖合で実施し、定在する巨大な海洋渦が沖合の暖水を効率的に氷河方向へ輸送していることを明らかにした。同時に取得した海底地形や係留系データから、トッテン氷河前面へ至る暖水の輸送過程や特性の一部も明らかになった。



トッテン氷河への暖水輸送過程

底層水変動の解明

「開洋丸」観測から、南極底層水の 10 年規模の変動について、ここ 30 年ほどは塩分が低下していたが、2010 年代後半に塩分増加に転じたことを解明し、氷床融解の変動に起因する東方 (ロス海) の底層水の塩分増加の影響であるとの仮説を提唱した(9 *Nature Geoscience*)。また、周極深層水を南極に輸送する渦の活発化も観測された(3 *Science Advances*)。「海鷹丸」観測から、豪州南極海盆の下部子午面循環の浅化と南豪州海盆への南極底層水供給量の減少が示された。「白鳳丸」での係留系や化学トレーサー・栄養塩等の観測から、ケープダンレー底層水 (CDBW) の循環時間スケールや底層水形成に伴う物質循環を解明した。特に、陸棚上で生成される高密度水が CDBW として北西方向へ輸送される際、有機物分解による炭素や栄養塩濃度の増加が見られないことや、CDBW による人為起源 CO<sub>2</sub> 輸送量が南極底層水全体の 10%を占めることを突き止めた。

A01-2(計画・古海洋班・池原)

AI 等を駆使した試料分取・処理の手法開発と海底コアへの応用

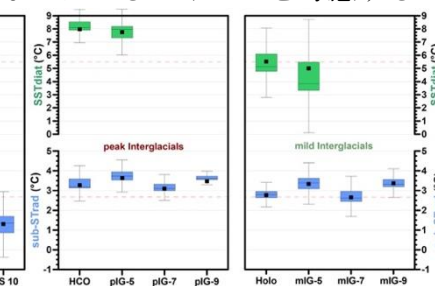
マイクロ・マニピュレーターと AI 深層学習プログラム (特願 2018-163981) から成る微細試料の自動分取システムを開発し、微化石群集組成の自動解析や微化石の高速自動摘出など、海底コアのみならず微細試料分析に広く応用可能な技術に発展した。また、セルソーターにより特定の形態の珪藻殻を大量に分離する手法を開発し、南大洋海底コアの古環境指標として期待される珪藻殻の酸素同位体比分析に適用した。

海底コアと氷床コアの年代精密対比 (A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班、B03 公募連携)

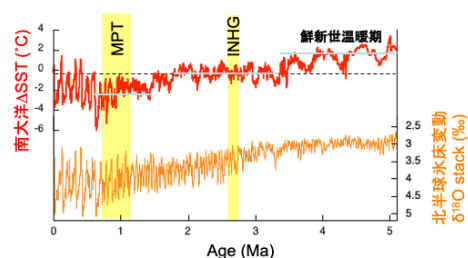
海底コアと南極氷床コアとの年代精密対比のために、南大洋の大西洋区や太平洋区の海底コアで利用されているダスト指標による対比の有効性をインド洋区の海底コアで示した。一定の精度を保った状態でダスト対比が可能であるとともに、ダスト変動の地域性や火山砕屑物の混入などによるバイアスを考慮する必要のあることが初めて明らかとなった。

海底コアによる古海洋変動の解明 (A01-1 底層水班・A01-3 生態系班・A02-1 氷床班連携)

南大洋インド洋区の表層水温変動を復元し、過去 2000 年間の海水分布がエルニーニョや南半球環状モードと連動して変化したことを解明した (16 *Nature Geoscience*)。また、珪藻や放散虫の解析から南大洋インド洋区の表層水温 (SST) および亜表層水温を復元し、スーパー間氷期の水温は他の間氷期より高かったことや (右上図)、ケルゲレン海台付近で南極前線が南下したことを解明した。新規データを含む南大洋のデータを統合し、500 万年間の南大洋 SST を復元した (右下図)。過去 300 万年間における南極気温や CO<sub>2</sub> と調和した変動や、スーパー間氷期における約 1°C の温暖化など、南北の氷床や炭素循環に南大洋が影響した可能性を示した。現場観測においても、海底コア採取と連携した沈降粒子採取や、水素・酸素同位体比データと海洋物理場との比較による古環境プロキシの高精度化など、多様な連携成果を得た。



過去の間氷期の温度復元結果



500 万年間の南大洋の表面温度

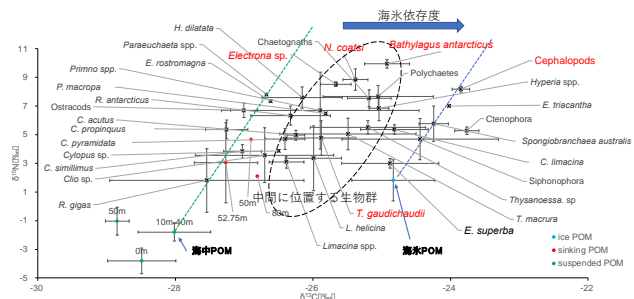


### A01-3 (計画・生態系班・茂木)

#### 海水が海氷下の低次生産と生態系構造と物質循環に及ぼす影響の解明

珪藻類やカイアシ類の海水中と周辺海水の比較から、海水中微小生物群集 (SIB) の水柱生態系への寄与を明らかにした。また、炭素と窒素の安定同位体分析から、南大洋には海氷 (アイスアルジー・粒状有機炭素) と、海水 (植物プランクトン) を起点とする 2 種類のエネルギーフローがあることや、それらの間に位置 (両方に依存) する生物種が大半であり、多くの種が海氷中の炭素に依存する実態を解明した (右図)。また、海氷下における窒素固定の証拠が確認され、南大洋における窒素循環プロセスの理解が深まった

(84 *Nature Geoscience*)。さらに、変質周極深層水に高次捕食者の餌となる中深層性生物の稚仔が高密度で分布することや、それらの食性を明らかにし、安定同位体と合わせて氷縁付近の食物網を解明した。季節海氷域における係留系の設置・回収にも成功し、沈降粒子の通年試料を得た。コロナ禍の影響により、最終盤で得た試料の分析とデータ解析は最終年度の繰越で進め、得られる情報は南大洋の生物ポンプによる炭素隔離の実態解明に寄与する。



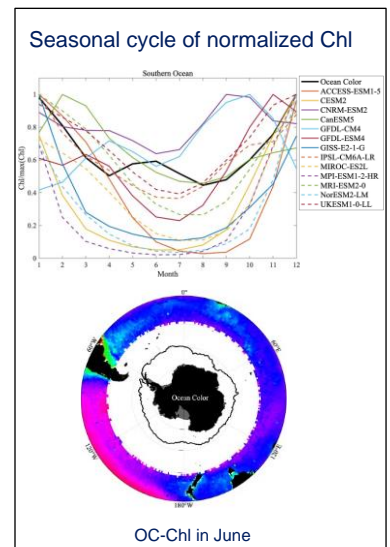
同位体データに現れた、海水を起点とする南大洋生態系のエネルギーフロー

#### 季節海氷域の低次生産と高次生産との関係解明

高次捕食者であるハンボソミズナギドリの採餌海域や餌生物などの調査の結果、オーストラリア南東部での育雛の間に、南大洋でナンキョクオキアミやハダカイワシ科魚類を採餌することを明らかにした。南大洋生態系の低次生産の変動の影響が、高次捕食者による移動によって速やかに北半球にまで伝播することを示唆する結果を得た。

#### 南大洋生態系と海洋物理場・全球生態系との関係 (A01-1 底層水班、A01 公募、A04 モデル班連携)

海洋物理場 (中規模渦) による小型動物プランクトンの個体群構造や分布への影響を見出し、海氷や物理場の変動が生態系に影響を及ぼすことを示唆した。また、IPCC 等で使用されるモデル群による全球クロロフィル現存量に大きなバイアスが存在し、その原因が冬季の極域のデータ不足であることを明らかにした (右図)。さらに、メタゲノム解析を応用した新手法や、遺伝子解析や安定同位体分析に耐える生物試料の長期保存方法の確立など、今後の南大洋や全球の生態系研究の進展に資する成果を得た。



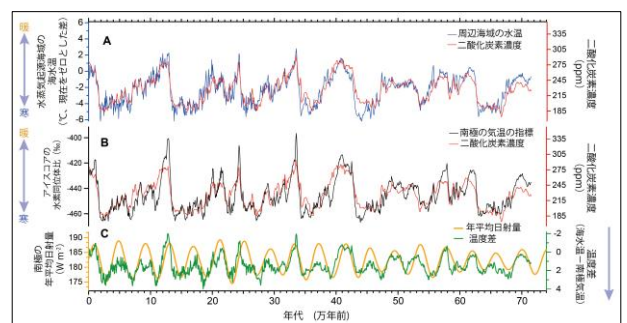
生態系モデルと衛星観測データの不整合 (上) と冬季観測データの欠如 (下)

### 研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動

#### A02-1 (計画・氷床班・川村)

#### アイスコアによる古気候研究 (A04 モデル班、B03 公募連携)

ドームふじアイスコアの酸素・水素同位体比の解析による 72 万年間にわたる南極の気温と南大洋中緯度の海面水温の復元や (40 *Nature Communications*, 右図)、両極間の大気と海洋を通じた気候リンクの解明 (42 *Nature*)、希ガス濃度による最終退氷期の全球平均海水温復元と南極の気温変動との調和性の解明 (41 *Nature*)、エアロゾルとダストの供給源や大気輸送の解明 (38 *Nature Communications*)、最終氷期最寒期の地表気温と氷床高度の推定値の刷新と気候モデルの妥当性の証明 (34 *Science*) など、多様な成果を得た。



72 万年間の南極の気温と南大洋の温度

#### アイスコア年代構築と海底コアとの年代統合 (A01-2 古海洋班、B03 公募連携)

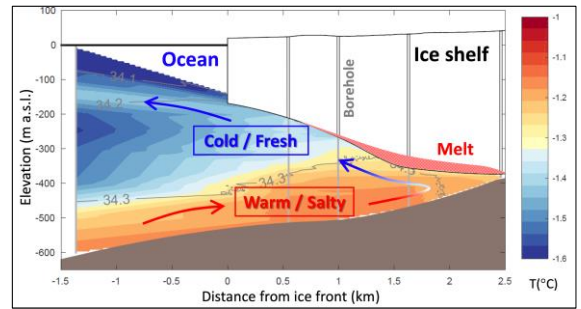
酸素/窒素比とメタン濃度などの気体成分分析から、スーパー間氷期を含む 17 万年前間の年代精度を大幅に向上させた。また、メタン濃度とダストの連続データ取得 (この時代の深層コアとして世界初) や、古海洋班との連携によるダストデータを用いた年代統合 (上述) など、年代構築と対比に関する成果が得られた。

#### 広域の表面質量収支と氷床基盤地形 (B01 公募、A04 モデル班、A02-2 固体地球班連携)

東南極氷床の表面質量収支と表面形状、基盤地形の広域調査を実施し、過去に取得されたデータと合わせて解析した。今後長期にわたる氷床動態把握に必須であり、質量変動メカニズムに関する分野間連携研究に

資する世界最長データとして整備した。その結果、東南極で質量が増加している地域においては、1990 年以降の表面質量収支が沿岸から内陸までの広域で、有意に増加傾向にあることを明らかにした。

**ラングホブデ氷河の熱水掘削による氷床-海洋相互作用の観測研究 (A01-1 底層水班、A02-2 固体地球班、A01-3 生態系班連携)** 熱水掘削孔から棚氷内部や底面、氷下の海洋を観測し、海洋の暖水が棚氷の下に浸入して氷を大量に融解し、融解水と混合しながら表面に浮き上がって出ていく様相や、氷河流出速度との関係などを解明した (35 *Nature Communications*, 右図)。



ラングホブデ氷河下の暖水移流と融解過程

**A02-2(計画・固体地球班・福田)**

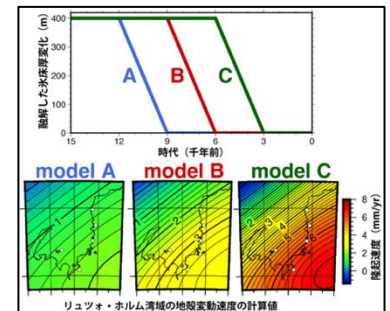
**絶対重力と GNSS の観測による GIA モデルの高精度制約**

**(B02 公募連携)** 昭和基地および周辺沿岸地域に加え、トロール (ノルウェー)、マイトリ (インド)、ジャンボゴ (韓国)、マリオズッケリ (イタリア) の各基地における絶対重力測定を実施し、現在の重力変化勾配とともに将来の観測の基準となる値を得た。また、リュツォ・ホルム湾沿岸での GNSS 観測データから、GIA による地殻変動速度の地域差を明らかにし、南極大陸全体での地殻変動速度の地域差についても明らかにした。これらは、現在の GIA の影響を見積もる上で高精度な拘束条件を与える成果となった。

**地質・地形学的調査と GIA モデルによる過去の氷床変動復元 (B03 公募, A02-1 氷床班連携)** リュツォ・ホルム湾沿岸やマイトリ基地周辺において、新開発の掘削システム (特許第 6824503 号) による湖底コアの採取・分析や、岩石試料の表面露出年代測定から、最終間氷期から完新世までの全球気候遷移に伴う南極氷床の変動を復元した。3 - 4 万年前の氷床荷重が従来の推定値の 2 倍に達することや、完新世の約 9000 - 6000 年前にかけて氷床高度が急激に低下したこと、その原因が周極深層水の流入である可能性など、従来の常識を覆す新たな知見を得た。

**各種データと GIA モデルによる氷床変動と地殻変動の相互作用解明**

**(B02 公募連携)** 複数の GIA モデルによる数値実験により、過去から現在の観測結果は、GIA モデルや関連パラメータを調整することで矛盾なく説明可能であることが示された (右図)。GIA モデルの改良は、衛星データ解析や他のモデル研究とも連携し、現在の南極氷床変動の解明や将来予測にも貢献するものと期待できる。



GIA モデルによる過去の氷床融解と現在の地殻隆起の統一的理解

**研究項目 A03 未探査領域への挑戦**

**A03 (計画・探査班・野木)**

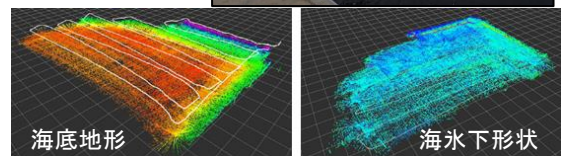
以下の観測技術開発や、観測装置とノウハウの共有化、氷下の海洋や氷上の地形の観測を進めたほか、棚氷-海洋モデルに必要な海底地形データの解析等も進めた。

**無人海中探査機 (AUV) (A02-2 固体地球班連携)** 各班の要望を反映した仕様決定から詳細設計、製作、氷海を含む国内試験と改良を経て、南極海での実運用が可能となった (右図)。また、AUV を確実に回収するための小型遠隔操縦ロボット (ROV) による回収機構や、氷上から開けた穴を用いて海中に展開可能な小型 ROV も開発した。新型コロナウイルス感染拡大の



完成した AUV

影響により南極航海は延期となったが、国内試験への切替などにより開発への影響はなく、令和 4 年度に南極海での AUV および ROV の実際の運用が実現する。



**プロファイリングブイ・システム (A01-1 底層水班、A01-3 生態系班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携)**

南極沿岸域で水温・塩分の鉛直分布を観測可能にするため、海水衝突回避のためのソフトウェア等を実装した氷海係留プロファイリングブイを開発した。本システムをケーブ・ダンレー沖に設置し、海洋鉛直構造の時間変化データの取得に成功した。

**無人航空機 (UAV) (A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携)** 南極陸域の調査において、3 種類 (固定翼、回転翼、レーザ測量用回転翼) の無人航空機 (UAV) を導入し、地形測量を実施したほか、UAV データによる表面地形 (Digital Surface Model; DSM) の精度評価を実施した。また、地殻変動や重力変化の精密な測定に不可欠な高精細地形や積雪分布変動を導出し、積雪による影響を評価した。

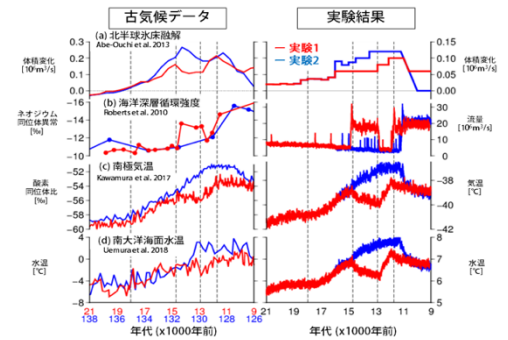


## 研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング

A04 (計画・モデル班・阿部)

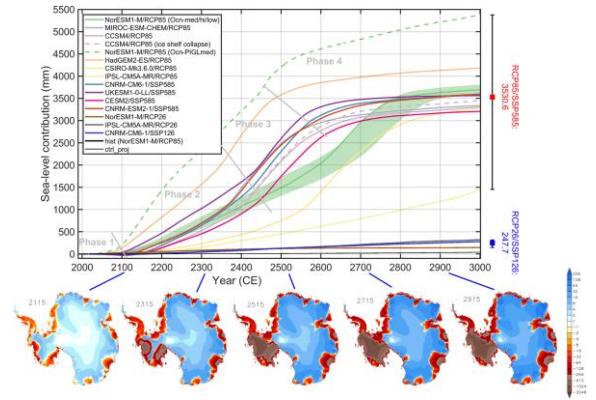
**各種数値モデルの開発と適用 (A01-1 底層水班、A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班、A03 探査班、B01 公募連携)** 気候モデル (大気海洋海氷結合モデル MIROC) や、南極氷床モデル (SICOPOLIS)、海洋物質循環モデル・海洋領域モデル (COCO) などを高度化し、南極周辺のパフォーマンスを詳細に検証した。世界中の気候モデルに共通する南極周辺の温暖バイアスの解消や、海洋物質循環モデル改良による古環境の再現性向上と氷期 CO<sub>2</sub> 低下要因の解明 (62 *Science Advances*)、異なる解像度の南極氷床モデル開発、海洋領域モデルによる暖水流入・棚氷融解過程解明など多くの成果が上がった。

**スーパー間氷期への遷移と、現在の南極氷床の存在要因 (A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班連携)** 完新世と最終間氷期 (スーパー間氷期) への遷移における南極気候の違いの再現に成功し、その原因が北半球氷床の融解履歴にあることを突き止めた (右図)。特に、現在の南極氷床が最終間氷期のように縮小しなかった理由が、退氷期に起こった南北逆位相の「寒の戻り」であることを解明した。また、過去 1000 年、2 万年、350 万年などの古気候計算により、氷床モデルを駆動する気候状態を詳細に再現した。



全球気候モデルによる最終間氷期の温暖化メカニズムの解明

**南極氷床の将来とティッピングポイント** 領域内連携で高度化された南極氷床モデルにより、100 年や 1000 年スケールでの長期予測や、過去の氷床縮小、ティッピングポイント解明のための定常計算を展開した。成果の一部は国際気候モデル比較・氷床モデル比較プロジェクトで中心的な役割を果たし (67 *Nature* 等)、IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書及び第 6 次評価報告書の主要成果となった。将来 1000 年の CO<sub>2</sub> 高排出シナリオの計算では、気候状態が 2100 年以降一定の仮定でさえ氷床は縮小し続け、2300 年以降に西南極氷床がティッピングポイントを迎え海水準が急激に上昇する結果 (右図) など、温暖化に対する氷床の非線形応答や不可逆的变化の解明に資する成果を得た。



西暦 3000 年までの南極氷床の将来予測 (気候状態は 2100 年以降で一定)

**公募研究** 第 1 期は分野横断型として B01 大気科学、B02 衛星観測、B03 新たな手法の 3 テーマで募集し、第 2 期はそれらに加えて計画研究と直接連携する課題も募集した。合計 29 課題が採択され、計画研究 (A01, A02) の補強的研究のほか、多分野を繋ぐ研究、周辺分野の研究が展開し、領域目標である南極環境システム学の創成に大きく寄与した。以下に研究項目 B から数例を挙げる。

**研究項目 B01 大気の物理とモデリング (A04 モデル班、A02-1 氷床班連携)** 従来の南極研究コミュニティの外部から、最新の気候モデルやデータ解析手法が加わり、南極域を対象にした領域気候モデルの開発と過去数十年間の計算や、氷床表面質量収支のトレンド解析、高層気象観測による気象予測向上、南極温暖化のテレコネクション解析 (89 *Nature Communications*)、全球気候モデルの高精度化等に関して、計画班と連携した研究成果のほか、今後の多分野連携につながる多くの成果が得られた。

**研究項目 B02 各種の衛星観測 (A01、A02 の 5 班と連携)** 南大洋及び南極氷床の変動や素過程に関する研究が展開された。氷床末端に暖水を運ぶ海洋渦構造の発見や、周極深層水・南極底層水・生物パラメータの同時観測との連携と共有データ作成、沿岸ポリニヤでの薄氷種類判別アルゴリズムの開発による海氷生産量推定値の一新、衛星搭載重力衛星及び高度計を用いた南極氷床の動態把握に関する成果が得られた。

**研究項目 B03 新しい観測・分析手法を用いた研究 (A01-2 古海洋班、A02-1 氷床班、A02-2 固体地球班連携)** 信頼性の高い古環境指標や年代決定・対比の確立に向けたアイスコアや海底コアの新たな手法による研究が展開した。過去数千年の火山噴火記録の復元 (98 *Nature Communications*) や、宇宙線生成核種による年代精密同期、堆積物の微化石や同位体を用いた新たな環境指標や年代決定手法の開発等の成果が得られた。現場観測でも、海底マグマ活動と南極環境の関連といった、計画班との連携による周辺分野の研究が行われた。



## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和4年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### 主な論文(注釈無いものは査読有り)

#### A01-1(計画・底層水班・大島)

- 1 \* Ohashi Y., Yamamoto-Kawai M., Kusahara K., Sasaki K., Ohshima K. I., Age distribution of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, estimated using chlorofluorocarbon and sulfur hexafluoride, *Scientific Reports*, **12**, 8462, 2022.
- 2 \* Shimada K., Kitade Y., Aoki S., Mizobata K., Cheng, L., Takahashi T. K., Makabe, R., Kanda J., Odate T., Shoaling of abyssal ventilation in the Eastern Indian Sector of the Southern Ocean, *Communications Earth & Environment*, **3**, 120, 2022.
- 3 \* Yamazaki K., Aoki S., Katsumata K., Hirano D., Nakayama Y., Multidecadal poleward shift of the southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current off East Antarctica, *Science Advances*, **7**, eabf8755, 2021.
- 4 \* Hirano D., Mizobata K., Sasaki H., Murase H., Tamura T., Aoki S., Poleward eddy-induced warm water transport across a shelf break off Totten Ice Shelf, East Antarctica, *Communications Earth and Environment*, **2**, 153, 2021.
- 5 \* Mensah V., Nakayama Y., Fujii M., Nogi Y., Ohshima K. I., Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: Sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley polynya, *Ocean Modelling*, **165**, 101843, 2021.
- 6 \* Kashiwase H., Ohshima K. I., Nakata K., Tamura T., Improved SSM/I thin ice algorithm with ice type discrimination in coastal polynyas, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **38**, 823-835, 2021.
- 7 \* Mizuta G., Fukamachi Y., Simizu D., Matsumura Y., Kitade Y., Hirano D., Fujii M., Nogi Y., Ohshima K. I., Seasonal evolution of Cape Darnley Bottom Water revealed by mooring measurements, *Frontiers Marine Sci.*, **8**:657119, 2021.
- 8 \* Nakata K., Ohshima K. I., Nihashi S., Mapping of Active Frazil for Antarctic Coastal Polynyas, With an Estimation of Sea-Ice Production, *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL091353, 2021.
- 9 \* Silvano A., Foppert A., Rintoul S. R., Holland P. R., Tamura T., Kimura N. (他 6 名), Recent recovery of Antarctic Bottom Water formation in the Ross Sea driven by climate anomalies, *Nature Geoscience*, **13**, 780-786, 2020.
- 10 \* Hirano D., Tamura T., Kusahara K., Ohshima K. I., Nicholls K. W., Ushio S., Simizu D., Ono K., Fujii M., Nogi Y., Aoki S., Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica, *Nature Communications*, **11**, 4221, 2020.
- 11 \* Aoki S., Yamazaki K., Hirano D., Katsumata K., Shimada K., Kitade Y., Sasaki H., Murase H., Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s, *Scientific Reports*, **10**, 14415, 2020.

#### A01-2(計画・古海洋班・池原)

- 12 \* Matsui H., Ikehara M., Suganuma Y., Seki O., Oyabu I., Kawamura K., Dust correlation and oxygen isotope stratigraphy in the Southern Ocean over the last 450 kyrs: An Indian sector perspective, *Quaternary Science Reviews*, **286**, 107508, 2022.
- 13 \* Sato H., et al. (計 8 名), Petrology, geochemistry, and geochronology of plutonic rocks from the present Southwest Indian Ridge: Implications for dropstone distribution in the Indian Ocean, *Polar Science*, **29**, 100725, 2021.
- 14 \* Ijiri A., Izumi T., Morono Y., Kato Y., Terada T., Ikehara M., Purification of disc-shaped diatoms from the Southern Ocean sediment by a cell sorter to obtain an accurate oxygen isotope record, *ACS Earth Space Chem.*, **5**, 2792-2806, 2021.
- 15 \* Civel-Mazens M., Crosta X., Cortese G., Michel E., Mazaud A., Ther O., Ikehara M., Itaki T., Antarctic Polar Front migrations in the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the past 360 kyrs, *Glob. Planet. Change*, **202**, 103526, 2021.
- 16 \* Crosta X., et al. (計 13 名, Ikehara M. 13 番目), Climate modes drove Antarctic sea-ice multi-decadal heterogeneity over the last 2000 years, *Nature Geoscience*, **14**, 156-160, 2021.
- 17 \* Itaki T., Taira Y., Kuwamori N., Saito H., Ikehara M., Hoshino T., Innovative microfossil (radiolarian) analysis using a system for automated image collection and AI-based classification of species, *Scientific Reports*, **10**, 21136, 2020b.
- 18 \* Itaki T., Taira Y., Kuwamori N., Maebayashi T., Takeshima S., Toya K. Automated collection of single species of microfossils using a deep learning-micromanipulator system, *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 19, 2020a.

#### A01-3(計画・生態系班・茂木)

- 19 \* Takahashi K.D., Makabe R., Takao S., Kashiwase H., Moteki M., Phytoplankton and ice-algal communities in the seasonal ice zone during January (Southern Ocean, Indian sector), *Journal of Oceanography*, **35**, 3, 2022.
- 20 \* Makabe R., Hasegawa T., Sano M., Kashiwase H., Moteki M., Copepod assemblages in the water column and drifting sea-ice floes in the ice-edge region in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the austral summer, *Polar Biology*, **45**, 749-762, 2022.
- 21 \* Takahashi K.T., Takamura T.R., Odate T., Zooplankton communities along a Southern Ocean monitoring transect at 110°E from three CPR surveys (Dec 2014, Jan 2015, Mar 2015), *Polar Biology*, **44**, 1069-1081, 2021.
- 22 \* Sugioka R., Matsuno K., Takahashi K.D., Makabe R., Takahashi K., Moteki M., Odate T., Yamaguchi A., North-south changes of zooplankton community and copepods population along the 110°E line in the Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer, *Bulletin of Fisheries Science*, Hokkaido University **71**, 39-50, 2021.
- 23 \* Nirazuka S., Makabe R., Swadling K.M., Moteki M., Phyto-detritus feeding by early-stage larvae of Electrona Antarctica (Myctophidae) off Wilkes Land in the Southern Ocean, austral summer 2017, *Polar Biology*, **44**, 1415-1425, 2021.
- 24 \* Weldrick C.K., Makabe R., Mizobata K., Moteki M., Odate T., Takao S., 他 2 名, The use of swimmers from

- sediment traps to measure summer community structure of Southern Ocean pteropods, *Polar Biol.*, **44**, 457-472, 2021.
- 25 \* Sano, M., **Makabe R.**, **Kurosawa N.**, **Moteki M.**, **Odate T.**, Effects of Lugol's iodine on long-term preservation of marine plankton samples for molecular and stable carbon and nitrogen isotope analyses, *Limnology and Oceanography: Methods*, **18**, 635-643, 2020.
- 26 \* **Takao S.**, Nakaoka S., Hashihama F., Shimada K., Yoshikawa-Inoue H., Hirawake T., Kanda J., Hashida G., Suzuki K., Effects of phytoplankton community composition and productivity on sea surface  $p\text{CO}_2$  variations in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. Part I*, **160**, 103263, 2020.
- 27 \* Kato Y., **Suto I.**, *Thalassionema bifurcum* sp. nov., a new stratigraphically important diatom from Pliocene subantarctic sediments. *Diatom Research*, **34**, 499-508, 2019.
- 28 \* Kato Y., **Suto I.**, Potential of fossil chrysophyte cysts as a useful paleoceanographic indicator: comparison with the diatom assemblages in the Southern Ocean. *Nova Hedwigia, Beiheft*, **148**, 113-129, 2019.
- 29 \* **Watanuki Y.**, Thiebot J.B., Factors affecting the importance of myctophids in the diet of the world's seabirds. *Marine Biology*, **165**, 79, 2018.
- A02-1(計画・氷床班・川村)**
- 30 \* **Uemura R.**, Masaka K., Iizuka Y., Hirabayashi M., Matsui H., Matsumoto R., Uemura M., Fujita K., **Motoyama H.**, Soluble salts in deserts as a source of sulfate aerosols in an Antarctic ice core during the last glacial period, *Earth and Planetary Science Letters*, **578**, 117299, 2022.
- 31 \* Tsutaki S., Fukui K., **Motoyama H.**, Hattori A., Okuno J., Fujita S., **Kawamura K.**, Surface heights over a traverse route from S16 to Dome Fuji, East Antarctica as measured by kinematic GNSS surveys in 2012–2013 and 2018–2019, *Polar Data Journal*, **5**, 144–156, 2021.
- 32 \* Oyabu, I., **Kawamura K.**, Uchida T., Fujita S., Kitamura K., Hirabayashi M., Aoki S., Morimoto S., Nakazawa T., Severinghaus J. P., Morgan J. D., Fractionation of  $\text{O}_2/\text{N}_2$  and  $\text{Ar}/\text{N}_2$  in the Antarctic ice sheet during bubble formation and bubble-clathrate hydrate transition from precise gas measurements of the Dome Fuji ice core, *The Cryosphere*, **15**, 5529–5555, 2021.
- 33 \* Van Liefferinge B., et al. (計 20 名, **Kawamura K.** 6 番目, **Motoyama H.** 15 番目), Surface mass balance controlled by local surface slope in inland Antarctica: implications for ice-sheet mass balance and Oldest Ice delineation in Dome Fuji, *Geophysical Research Letters*, **48**, 1–10, 2021.
- 34 \* Buizert C., et al. (計 31 名 **Kawamura K.** 8 番目, **Motoyama H.** 10 番目), Antarctic surface temperature and elevation during the Last Glacial Maximum, *Science*, **372**, 1097-1101, 2021.
- 35 \* Minowa M., **Sugiyama S.**, Masato I., Yamane S., Aoki S., Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica, *Nature Communications*, **12**, 4209, 2021.
- 36 \* Oyabu I., Iizuka Y., **Kawamura K.**, Wolff E., Severi M., Ohgaito R., Abe-Ouchi A., Hansson M., Compositions of dust and sea salts in the Dome C and Dome Fuji ice cores from Last Glacial Maximum to early Holocene based on ice sublimation and single particle measurements, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**, 1205–25, 2020.
- 37 \* Oyabu I., **Kawamura K.**, et al. (計 15 名), New technique for high-precision, simultaneous measurements of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  concentrations; isotopic and elemental ratios of  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  and Ar; and total air content in ice cores by wet extraction, *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 6703–6731, 2020.
- 38 \* Goto-Azuma K., et al. (計 16 名, **Motoyama H.** 3 番目, **Uemura R.** 6 番目), Reduced marine phytoplankton Sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials, *Nature Communications*, **10**, 3247, 2019.
- 39 \* Minowa M., Podolskiy E. A., **Sugiyama S.**, Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **60**, 57-67, 2019.
- 40 \* **Uemura R.**, **H. Motoyama**, et al. (計 19 名, **K. Kawamura**, 5 番目), Asynchrony between Antarctic temperature and  $\text{CO}_2$  associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, **9**, 961. 2018.
- 41 \* Bereiter B., Shackleton S., Baggenstos D., **Kawamura K.**, Severinghaus J., Mean global ocean temperatures during the last glacial transition, *Nature*, **553**, 39–44, 2018.
- 42 \* Buizert C., et al. (計 19 名, **Kawamura K.** 10 番目, **Motoyama H.** 12 番目, **Uemura R.** 14 番目), Abrupt Ice Age Shifts in Southern Westerlies and Antarctic Climate Forced from the North, *Nature*, **563**, 681–685, 2018.
- A02-2(計画・固体地球班・福田)**
- 43 \* Shi T., **Fukuda Y.**, **Doi K.**, **Okuno J.**, Extraction of GRACE/GRACE-FO Observed Mass Change Patterns across Antarctica via Independent Component Analysis (ICA), *Geophysical Journal International*, **3**, 1914–1926, 2022.
- 44 \* **Kazuki N.**, Aoki S., Yamanokuchi T., Tamura T., **Doi K.**, Validation for ice flow velocity variations of Shirase Glacier derived from PALSAR-2 offset tracking, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **15**, 3269 – 3281, 2022.
- 45 \* **Fukuda Y.**, **Okuno J.**, **Doi K.**, Lee C., Capra A., Absolute gravity measurement data at Jang Bogo Station and Mario Zucchelli Station in 2019, *Polar Data Journal*, **5**, 11, 2021.
- 46 \* Hattori A., Aoyama Y., **Okuno J.**, **Doi K.**, GNSS Observations of GIA-Induced Crustal Deformation in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL093479, 2021.
- 47 \* Ishiwa T., **Okuno J.**, **Suganuma Y.**, Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period, *Geology*, **49**, 1182–1186, 2021.
- 48 \* Kawamata M., **Suganuma Y.**, **Doi K.**, Misawa K., Hirabayashi M., Hattori A., Sawagaki T., Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, Lützow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating, *Quaternary Science Reviews*, **247**, 106540, 2020.
- 49 \* Kanamaru T., **Suganuma Y.**, Oiwane H., Miura H., Miura M., **Okuno J.**, Hayakawa H., The weathering of

- granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: a case study from the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica, *Geomorphology*, **307**, 62-74, 2018.
- 50 \* Yokoyama Y., Esat T. M., Thompson W. G., Thomas A.L., Webster J. M., Miyairi Y., Sawada C., Aze T., Matsuzaki H., **Okuno J.**, Fallon S., Braga J. C., Humblet M., Iryu Y., Potts D. C., Fujita K., Suzuki A., Kan H., Rapid glaciation and a two-step sea level plunge into the Last Glacial Maximum, *Nature*, **559**, 603-607, 2018.
- A03 (計画・探査班・野木)**
- 51 \* **Aoki S.**, Takahashi T., Yamazaki K., Hirano D., Ono K., Kusahara K., Tamura T., G. D. Williams, Warm surface waters increase Antarctic ice shelf melt and delay bottom water formation, *Communications Earth & Environment*, **3**, 142, 2022.
- 52 \* Yamagata H., Kochii S., **Yoshida H.**, **Nogi Y.**, **Maki T.**, Development of AUV MONACA - A hover capable platform for detailed observation under ice -, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **33**, 1223-1233, 2021.
- 53 \* Noguchi Y., **Maki T.**, Tracking Omnidirectional Surfaces using a Low-cost Autonomous Underwater Vehicle, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **46**, 11-23, 2021.
- 54 \* **Aoki S.**, Ono K., Hirano D., Tamura T., Continuous winter oceanic profiling in the Cape Darnley Polynya, East Antarctica, *Journal of Oceanography*, **76**, 365-372, 2020.
- 55 \* **Aoki S.**, Katsumata K., Hamaguchi M., Noda A., Kitade Y., Shimada K., Hirano D., Simizu D., **Aoyama Y.**, Doi K., **Nogi Y.**, Freshening of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **125**, e2020JC016374, 2020.
- 56 \* Matsuda T., **Maki T.**, Sakamaki T., Accurate and Efficient Seafloor Observations with Multiple Autonomous Underwater Vehicles: Theory and Experiments in a Hydrothermal Vent Field, *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 2333 – 2339, 2019.
- 57 \* **Maki T.**, Noguchi Y., Kuranaga Y., Masuda K., Sakamaki T., Humblet M., Furushima Y., Low-altitude and High-speed Terrain Tracking Method for Lightweight AUVs, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **30**, 971-979, 2018.
- 58 \* Labrousse S., et al. (計 15 名, Tamura T. 3 番目), Coastal polynyas: Winter oases for subadult southern elephant seals in East Antarctica. *Scientific Reports*, **8**, 3183, 2018.
- 59 \* 巻俊宏, 自律型海中ロボット 一魚のごとく, *人工知能*, **34**, 222-227, 2018.
- 60 \* **Aoki S.**, Kobayashi R., Rintoul S. R., Tamura T., Kusahara K., Changes in water properties and flow regime on the continental shelf off the Adelie/George V Land coast, East Antarctica, after glacier tongue calving, *J. Geophys. Res.*, **122**, 6277-6294, 2017.
- A04 (計画・モデル班・阿部)**
- 61 \* **Kusahara K.**, Hirano D., Fujii M., Fraser A. D., Tamura T., Modeling intensive ocean-cryosphere interactions in Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, *The Cryosphere*, **15**, 1697-1717, 2021.
- 62 \* Kobayashi H., **Oka A.**, Yamamoto A., **Abe-Ouchi A.**, Glacial carbon cycle changes by Southern Ocean processes with sedimentary amplification, *Science Advances*, **7**, eabg7723, 2021.
- 63 \* **Oka A.**, **Abe-Ouchi A.**, Sherriff-Tadano S., Yokoyama Y., Kawamura K., Hasumi H., Glacial mode shift of the Atlantic meridional overturning circulation by warming over the Southern Ocean. *Commun. Earth Environ.*, **2**, 169, 2021.
- 64 \* Chambers C., **Greve R.**, Obase T., **Saito F.**, **Abe-Ouchi A.**, Mass loss of the Antarctic ice sheet until the year 3000 under a sustained late-21st-century climate. *Journal of Glaciology*, **269**, 618-624. 2021.
- 65 \* Obase T., **Abe-Ouchi A.**, **Saito F.**, Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation. *Scientific Reports*, **11**, 22359, 2021.
- 66 \* Sherriff-Tadano S., **Abe-Ouchi A.**, **Oka A.**, Mitsui T., **Saito F.**, Does a difference in ice sheets between Marine Isotope Stages 3 and 5a affect the duration of stadials? Implications from hosing experiments. *Clim. Past*, **17**, 1919-1936. 2021.
- 67 \* Edwards T.L., et al. (計 84 名, **Abe-Ouchi A.** 13 番目, **Greve R.** 40 番目), Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. *Nature*, **593**, 74-82. 2021.
- 68 \* **Kusahara K.**, Summertime linkage between Antarctic sea-ice extent and ice-shelf basal melting through Antarctic coastal water masses' variability: a circumpolar Southern Ocean model study. *Environmental Research Letters*, **16**, 074042, 2021.
- 69 \* Sherriff-Tadano S., **Abe-Ouchi A.**, **Oka A.**, Impact of mid-glacial ice sheets on deep ocean circulation and global climate: Role of surface cooling on the AMOC., *Climate of the Past*, **17**, 95–110, 2021.
- 70 \* Otto-Bliesner B.L., et al. (計 39 名, **Abe-Ouchi A.** 15 番目), Large-scale features of Last Interglacial climate: results from evaluating the lig127k simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)–Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4)., *Climate of the Past*, **17**, 63–94., 2021.
- 71 \* **Saito F.**, Obase T., **Abe-Ouchi A.**, Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models., *Geoscientific Model Development*, **13**, 5875-5896., 2020.
- 72 \* **Oka A.**, Ocean carbon pump decomposition and its application to CMIP5 earth system model simulations, *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 25, 2020.
- 73 \* Sherriff-Tadano S., **Abe-Ouchi A.**, Roles of sea ice-surface wind feedback in maintaining the glacial Atlantic meridional overturning circulation and climate., *Journal of Climate*, **33**, 3001–3018, 2020.
- 74 \* Levermann A., et al. (37 名 **Greve R.** 6 番, **Saito F.** 34 番), Projecting Antarctica's contribution to future sea level rise from basal ice shelf melt using linear response functions of 16 ice sheet models. *Earth Sys. Dyn.*, **11**, 35-76, 2020.
- 75 \* Yamamoto A., **Abe-Ouchi A.**, Ohgaito R., Ito A., **Oka A.**, Glacial CO<sub>2</sub> decrease and deep-water deoxygenation by iron fertilization from glaciogenic dust. *Climate of the Past*, **15**, 981–996, 2019.
- 76 \* **Kusahara K.**, Williams D. G., Massom R., Reid P., Hasumi H., Spatiotemporal dependence of Antarctic sea ice variability to dynamic and thermodynamic forcing: a coupled ocean-sea ice model study, *Climate Dynamics*, **52**, 3791–3807, 2018.
- 77 \* Kobayashi H., **Oka A.**, Response of atmospheric pCO<sub>2</sub> to glacial changes in the Southern Ocean amplified by carbonate compensation, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, **33**, 1206-1229, 2018.

#### A01 (公募)

- 78\* **Ikenoue T.**, Otsuka S., Honda M.C., Kitamura M., Mino Y., Narita H., Kobayashi T., Neocalanus cristatus (Copepoda) From a Deep Sediment-Trap: Abundance and Implications for Ecological and Biogeochemical Studies, *Frontiers in Marine Science*, **9**, 884320, 2022.
- 79\* Pan XL., Li BF., **Watanabe YW.**, Intense ocean freshening from melting glacier around the Antarctica during early twenty-first Century. *Scientific Reports*, **12**, 383, 2022.
- 80\* **Shiozaki T.**, Hashihama F., Endo H., Ijichi M., Takeda N., Makabe A., Fujiwara A., Nishino S., Harada N., Assimilation and oxidation of urea-derived nitrogen in the summer Arctic Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, **66**, 4159-4170, 2021.
- 81\* **Yasuda I.**, et al. (計 12 名), Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence, *Journal of Oceanography*, **77**, 17-28, 2021.
- 82\* Pan XL., Li BF., **Watanabe YW.**, The Southern Ocean with the largest uptake of anthropogenic nitrogen into the ocean interior, *Scientific Reports*, **10**, 8838, 2020.
- 83\* Hirose Y., **Shiozaki T.**, Otani M., Kudoh S., Imura S., Eki T., Harada N., Investigating Algal Communities in Lacustrine and Hydro-Terrestrial Environments of East Antarctica Using Deep Amplicon Sequencing, *Microorganisms*, **8**, 497, 2020.
- 84\* **Shiozaki T.**, Fujiwara A., Inomura K., Hirose Y., Hashihama F., Harada N., Biological nitrogen fixation detected under Antarctic sea ice, *Nature Geoscience*, **13**, 729-732, 2020.

#### A02 (公募)

- 85\* Yamanokuchi T., **Narama C.**, Sugiyama S., Long term monitoring of grounding line on Shirase Glacier by double differential InSAR. *ISRS2022 (International Symposium on Remote Sensing)*, in press, 2022.
- 86\* **Araya A.**, Kasai K., Yoshida M., Nakazawa M., Tsubokawa T., Evaluation of Systematic Errors in the Compact Absolute Gravimeter TAG-1 for Network Monitoring of Volcanic Activities, In: *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp1-7, 2020.

#### B01 (公募・大気)

- 87\* **Niwano M.**, Kajino M., Kajikawa T., Aoki T., Kodama Y., Tanikawa T., and Matoba S., Quantifying relative contributions of light-absorbing particles from domestic and foreign sources on snow melt at Sapporo, Japan during the 2011-2012 winter, *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL093940, 2021.
- 88\* **Sato K.**, Inoue J., Seasonal change in satellite-retrieved lower-tropospheric ice-cloud fraction over the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL095295, 2021.
- 89\* **Sato K.**, Inoue J., Simmonds I., Rudeva I., Antarctic Peninsula warm winters influenced by Tasman Sea temperatures, *Nature Communications*, **12**, 1497, 2021.
- 90\* Sato K., **Inoue J.**, Alexander S. P., McFarquhar G., Yamazaki A., Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 11406-11413, 2018.
- 91\* **Nishizawa S.**, Kitamura Y., A surface flux scheme based on the Monin-Obukhov similarity for finite volume models. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 3159-3175, 2018.

#### B02 (公募・衛星)

- 92\* Mori, M., **Mizobata K.**, Ichii, T., Ziegler, P. & Okuda, T., Modeling the egg and larval transport pathways of the Antarctic toothfish (*Dissostichus mawsoni*) in the East Antarctic region: New insights into successful transport connections, *Fish. Oceanogr.*, **31**, 19-39, 2021.
- 93\* **Mizobata K.**, Shimada K., Aoki S., Kitade Y., The Cyclonic Eddy Train in the Indian Ocean Sector of the Southern Ocean as Revealed by Satellite Radar Altimeters and In Situ Measurements, *J. Geophys. Res.: Oceans*, **125**, 1-16, 2020.

#### B03 (公募・新手法)

- 94\* **Tamura T.**, Ishiwa T., Tokuda Y., Itaki T., Sasaki S., Suga Y., Luminescence characteristics of coastal sediments in Langhovde, East Antarctica. *Quaternary Geochronology*, **70**, 101298, 2022.
- 95\* Kanzawa, K., Miyake F., **Horiuchi K.**, 他 15 名, High-resolution <sup>10</sup>Be and <sup>36</sup>Cl data from the Antarctic Dome Fuji ice core (~100 years around 5480 BCE): An unusual Grand Solar Minimum occurrence? *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **126**, e2021JA029378, 2021.
- 96\* **Kato Y.**, Diatom-based reconstruction of the Subantarctic Front migrations during the late Miocene and Pliocene. *Marine Micropaleontology*, **160**, 101908, 2020.
- 97\* Ishino S., **Hattori S.**, et al. (計 13 名), Regional Characteristics of Atmospheric Sulfate Formation in East Antarctica Imprinted on <sup>17</sup>O-Excess Signature, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **126**, e2020JD033583, 2021.
- 98\* Gautier E., Savarino J., Hoek J., Erbland J., Caillon N., **Hattori S.**, et al., 2600-years of stratospheric volcanism through sulfate isotopes. *Nature Communications*, **10**, 466, 2019.

#### 特許

特許: 第 6980255 号「水中観測システム及び水中観測システムの音波競合排除方法」(2021 年 11 月 19 日登録)  
特許: 第 6824503 号「土砂採取装置」(2021 年 1 月 15 日登録)  
特願 2018-163981「分類装置、分類方法およびプログラム」(2018 年 8 月 31 日出願)

#### 書籍

杉山慎, 中央公論新社, 南極の氷に何が起きているか - 気候変動と氷床の科学, 2021/11.  
塩崎拓平, 朝倉書店, 図説「窒素と環境の科学」(分担執筆), 朝倉書店, 2021/12.  
渋谷和雄, 福田洋一, 京都大学学術出版, 南極地球物理学ノート 南極から探る地球の変動現象, 320p, 2020.  
奥野淳一, 朝倉書店, 図説地球科学の事典(後氷期地殻変動)(分担執筆), 248, 2018.  
大島慶一郎編: 巨大リザーバ: 南大洋・南極氷床. 低温科学, 76, 北海道大学低温科学研究所, 288p, 2018.

#### ホームページ・SNS 等

新学術領域研究『南極の海と氷床』日本語版: <http://grantarctic.jp>, 英語版: <http://grantarctic.jp/enhp/>

ブログ: [http://grantarctic.jp/gr\\_news/](http://grantarctic.jp/gr_news/)、ツイッター: <https://twitter.com/GRAntarctic17>  
YouTube【新学術「南極の海と氷床」チャンネル】<https://www.youtube.com/channel/UCfz85ZltzqD6q9Nk8MpUwQg>  
YouTube【極地研チャンネル】極地研探検 2021 <https://www.youtube.com/niprchannel>  
他、南極航海ブログ(白鳳丸)、南極内陸調査隊ブログ

#### シンポジウム主催・共催・後援・ワークショップ

(主催) First GRAntarctic International Symposium and the Ninth Symposium on Polar Science, 東京, 2018/12/3-4.  
(共催) International Symposium on Cryosphere and Biosphere (国際雪氷学会主催), 京都, 2018/3/14-19.

#### プレスリリース(全46件)

「海洋由来のエアロゾル粒子が南極海上空の雲の性質に影響～衛星観測をもとに解明～」, 2021/12/15.  
「巨大な海洋渦が暖かい海水を南極大陸方向へ運ぶ 東南極トッテン氷河を下から融かす主要な熱源」, 2021/10/26.  
「セルソーターによる円盤型珪藻の完全分離手法を確立」, 2021/9/13.  
「南極の氷河の下で海と氷を直接観測～熱水掘削によって氷床融解のメカニズムを解明～」, 2021/7/9.  
「最終氷期の南極大陸の気温低下と氷床高度の見積もりを刷新」, 2021/6/17.  
「海中ロボットによる海水裏面の全自動計測に成功～南極海での調査に向けて大きな一歩～」, 2021/3/18.  
「南極現地調査で明らかになった過去の急激な南極氷床の融解とそのメカニズム」, 2020/9/18.  
「氷期から間氷期への遷移期の温暖化によって生じた急激な気候の変化」, 2019/11/1.  
「AI(人工知能)を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確立」, 2018/12/3.  
「南極の気温と二酸化炭素変動の不一致は日射量が引き起こす」, 2018/3/7.

#### メディア取材協力・掲載情報等(全152件)

「地球温暖化の教科書」記事監修 川村賢二, 杉山慎, 科学雑誌ニュートン別冊 2022/5.  
「南極氷床の融解メカニズム」菅沼悠介, 信濃毎日新聞 2022/1/3.  
「瀬戸際に立つ南極危機」記事監修 川村賢二, 杉山慎, 科学雑誌ニュートン 2021/10.  
「東大・極地研, 海氷下潜行・探査ロボ 南極海調査に活用」, 巻俊宏, 日刊工業新聞, 2021/3/26.  
「氷河溶け出す水、生態系を支える」, 杉山慎, 日本経済新聞, 2020/10/11.  
「バイオロギング 海中水温・塩分 アザラシで」, 大島慶一郎, 読売新聞(朝刊), 2020/3/8.  
「南極で地球を探る」, 青木茂, 朝日新聞, 2019/11/27.  
「2100年、想定超す温暖化」, 阿部彩子, 日本経済新聞, 2019/9/26.  
「AI活用 地層解析に革命」, 板木拓也, 科学新聞, 2018/12/14.  
「気温・海水温に4万年周期-地球の自転軸の傾きが影響」, 本山秀明, 植村立, 日本経済新聞, 2018/7/22.  
「氷床調査は命懸け」, 菅沼悠介, 産経新聞, 2017/9/4.

#### 一般向けアウトリーチ企画

(協力) 南極氷床・南大洋変動ワークショップ, 高知大学海洋コア総合研究センター, 2022/1/18.  
(協力) 地質標本館特別展「南極の過去と現在、そして未来 一研究最前線からのレポート」, 産業技術総合研究所つくばセンター 地質標本館, 2021/8/3～2021/12/26.  
(協力) 東京大学駒場博物館展示「気候-海洋-氷床に関する特別展 ～過去・現在・未来を探る～」東京大学大学院総合文化研究科・教養学部 駒場博物館, 2019/7/20～9/29.  
(後援) 石巻専修大学 ライフサイエンスセミナー「南極の海と氷から知る環境変動」, 石巻専修大学, 2018/11/2.  
(主催) 新学術領域研究「南極の海と氷床」スプリングスクール:『南極 春の学校 2018 ～目指せ国際・学際研究者～』, 大学セミナーハウス, 参加者 80名, 2018/3/11-13.  
(後援) 日本第四紀学会シンポジウム「改めて問う“縄文海進”とは何か? - 第四紀学的視点からの再検討-」, 明治大学, 2018/2/17. (三浦が主企画者、池原、奥野が講演)  
(共催) 高知大・極地研合同公開シンポジウム「南極:大陸・海・氷床を探る」, 高知大学, 2017/7/26.

#### 一般向け講演(全122件)

松井浩紀, 「浮遊性有孔虫と古海洋」, 千葉大学テニユアトラック部会支援セミナー, 2022/2/15.  
茂木正人, 中央区環境情報センター企画「南極をしよう」 2021/9/11.  
大島慶一郎, 地球温暖化って本当? どんないろんなことが起こるのか?, 北海道大学公開講座, 北海道大学, 2021/6/10.  
野木義史, 無人探査技術が切り拓く極域科学の新たな展開, 中日本水中ロボネット, 2020/12/5.  
佐野雅美, 「プランクトン・海を支える小さな生き物達の話」, 中学生高校生シンポジウム, 国立科学博物館, 2020/2/1.  
本山秀明, 「アイスコア研究と地球規模気候変動について」, たちかわ市民交流大学, 2019/10/23.  
津滝俊, 南極氷床ってどんなところ? ～青と白の世界～, つくばエキスポセンター, 2019/9/30.  
川村賢二, 南極ドームふじ氷床コアが語る過去の地球環境—そして「最古の氷」探索へ, 大学共同利用機関シンポジウム, 名古屋市科学館(南極中継), 2018/10/14.

#### 受賞

阿部彩子 日本学士院賞, 2022年3月; EGU Milutin Milankovic Medal, 2021年4月;  
日本雪氷学会学術賞, 2021年10月.  
川村賢二 日本雪氷学会学術賞, 2021年10月; 日本第四紀学会学術賞, 2017年8月  
田村岳史 日本気象学会堀内賞, 2021年9月.  
菅沼悠介 地球環境史学会貢献賞, 2022年2月.  
羽田裕貴 地球環境史学会奨励賞, 2022年2月.  
大藪幾美 地球環境史学会奨励賞, 2022年2月; 日本雪氷学会平田賞, 2021年10月.  
箕輪昌紘 日本雪氷学会平田賞, 2021年10月.  
吉森正和 日本気象学会日本気象学会賞, 2020年9月.  
川又基人 笹川科学研究助成奨励賞, 2019年度.  
津滝俊 日本雪氷学会平田賞, 2018年9月.  
大島慶一郎 海洋立国推進功労者表彰(科学技術振興部門)(内閣総理大臣賞), 2018年8月.  
青木茂 日本気象学会堀内賞, 2017年8月.



## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

計画研究班は研究項目「A」に配置し、以下の連携体制をとった。

- 研究項目 A01：熱-物質リザーバ南大洋とその変動：A02、A03 との連携観測や、試料・データ共有での A02 との連携、各種のプロセスや相互作用解明のための A04 との連携体制をとった。
- 研究項目 A02：水-熱リザーバ南極氷床とその変動：上記 A01 との連携のほか、氷床・氷河の質量変動に関する観測で項目内や A03 との連携、各種プロセスや相互作用解明のための A04 との連携体制をとった。
- 研究項目 A03：未探査領域への挑戦：無人機（水中、空中）の開発で A01 と A02 と連携し、詳細な海底地形データの作成と提供により A04 と連携した。
- 研究項目 A04：南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング：過去から現在のデータによるモデルの高度化や制約のため、全ての計画研究班との連携体制をとった。

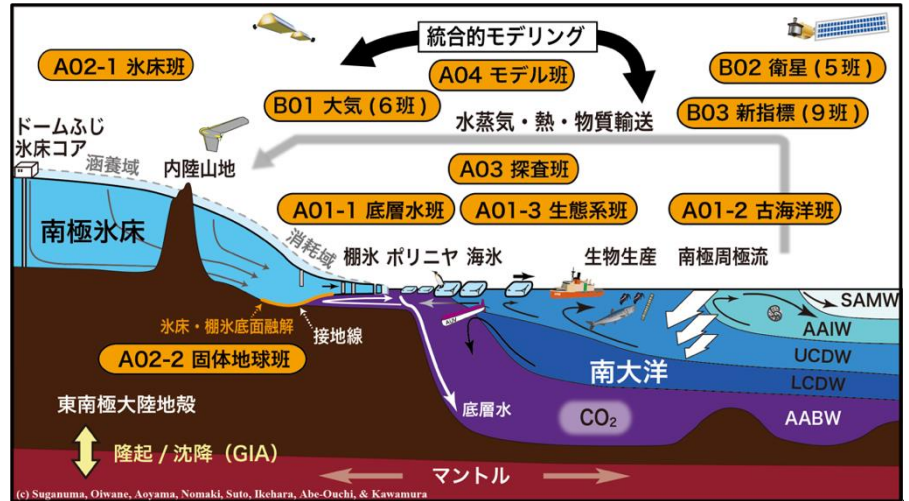


図1：南極環境システムの構成要素の横断面図。計画研究班（A）および公募研究（B）の主な研究対象領域を示す。

公募研究は、研究項目「A」に属して計画研究と直接連携する以外に、研究項目「B」を配置して多分野間の連携を促進する体制を構築した。

- 研究項目 B01：大気の物理とモデリング：エネルギー・物質循環や氷床表面質量収支、気候モデルなどについて A02、A04 との連携体制をとった。
- 研究項目 B02：各種の衛星観測：海洋循環や海氷生産、氷床変動などに関して A01、A02 との連携体制をとった。
- 研究項目 B03：新しい観測・分析手法を用いた研究：新たな環境指標の開発や境界領域の観測研究を進めるべく、試料やデータの共有や連携観測のため A01、A02 との連携体制をとった。

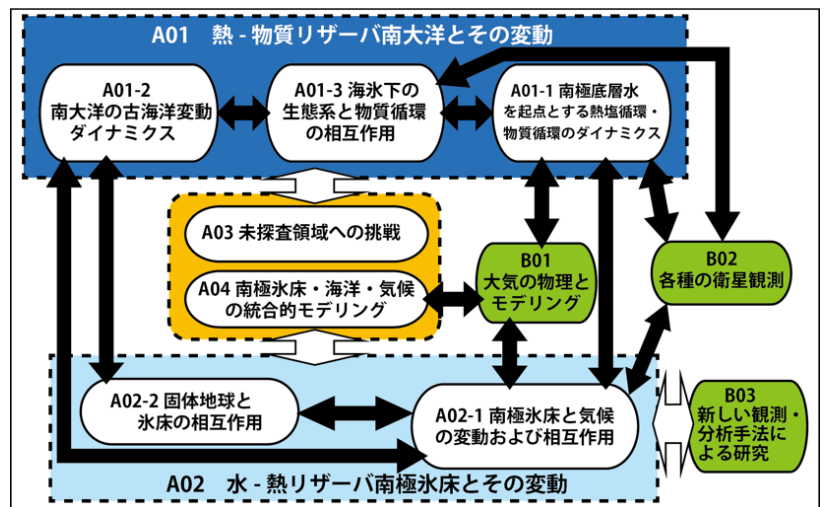


図2：計画研究と公募研究、研究項目の連携関係。

公募研究は B01~B03 に含まれる。黒矢印は、計画研究班どうしまたは計画研究班と公募研究項目との連携関係を示す。白矢印は、点線枠で囲んだ研究項目群/計画研究群どうしの連携関係を示す。

以上の連携体制は、計画班班長及び主要メンバーに若手研究者や公募研究を加えた「拡大総括班」での議論により構築し、当初より効果的な連携が行われるように配慮した。

領域期間の後半（2019年度以降）には、公募を含む各班からの参加により、3つの巨大リザーバーに対応するワーキンググループ（熱リザーバWG、水リザーバWG、物質リザーバWG）および古環境研究WG、生態系-モデル連携タスクチームを結成し、領域目標や中間評価所見を意識した連携研究議論や成果取りまとめを行い、それらを全体会合で共有・議論する活動を行った。これら一連の活動により、個々のメンバーが領域全体の目標を意識し、それぞれの研究進捗を踏まえた共通課題の発見やデータの共有、強化すべき課題の議論などを経て、さらなる連携研究を構築・実施することにつながった。

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### 総括班経費の領域連携研究等への活用状況

- ・海鷹丸を用いた連携海洋観測（傭船関連費用 17,135 千円）

東京海洋大学の海鷹丸の延長航海費を総括班経費により支出し、海氷縁の海洋物理・化学・生物や底層水の混合・変質過程など、南大洋での連携観測を2018年1月、2019年1月、2020年1月に実施した。生態系班、古海洋班、底層水班、公募研究の連携研究が行われた。

- ・連携研究促進(3,524 千円)

連携観測や堆積物サンプリング、研究集会への旅費、海洋観測データのデジタル化、春の学校で用いるテキストの印刷に使用した。

- ・若手育成（3,528 千円）・国際支援（14,370 千円）

公募制の派遣支援制度を創設し、若手研究者が積極的に国際学会や野外観測、海外研究共同研究に参加できるよう支援した。

- ・領域全体会合（6,286 千円）

キックオフミーティングや年次報告会・拡大総括班会議を開催し、研究発表や進捗報告のほか、領域内の有機的連携と融合研究に向けた議論や、学際的な場における若手研究者の発表・議論の機会として活用した。

- ・アウトリーチ活動（7,056 千円）

学会におけるブース出展、ニュースレター、ホームページ、YouTube などにより、本領域の目標や研究成果を発信し、若手研究者の間口を広げた。

### 領域内で共有する設備・装置・試料などの活用状況(総括班以外の予算)

- ・無人探査機の活用（探査班が導入）

南極での海氷および棚氷の下の海洋観測を目指し、探査班・底層水班・生態系班・氷床班・固体地球班が協力し、無人水中探査機(AUV)を開発した。確実に AUV を回収するため小型遠隔操縦ロボット(ROV)も開発した。また、固体地球班との連携で AUV 展開の難しい沿岸域の浅海観測用小型 ROV も開発した。探査班・固体地球班・氷床班と協力し、回転翼・固定翼・レーザ測量用回転翼の無人航空機(UAV)で、実際の南極で地形測量を実施し、UAV データによる表面地形の精度評価、高精細地形や積雪変動を導出して積雪による地殻変動や重力変化を評価した。

- ・白鳳丸による連携観測（古海洋班、底層水班、探査班）

平成30年度の白鳳丸航海では、各班が旅費を支出して観測に乗りだし、本領域に関わる15名ほどの研究者と学生が参加し連携観測を行った。古海洋班、底層水班、探査班の各班の観測目的に対して相互にサポートしあう体制や人員配置を事前に構築したことで、限られた人員で最大限の効率のよい観測が達成された。さらに、分野(班)間でサポートしあうことを通じて互いの理解が深まり、船上での議論を経て、分野連携研究の萌芽的テーマも見出された。

- ・係留系観測（各班が測器を導入）

ベースとなる流速・水温・塩分計(底層水班が導入)の他にセジメントトラップ(古海洋班が導入)や酸素計・自動採水器(底層水・生態班が導入)を各班が持ち寄り、効率的な系を設計・設置できた。回収後の解析も協力して行い、採集試料も共有することで連携研究を促進した。

- ・令和元年 白鳳丸による連携観測(底層水班、古海洋班、生態系班、探査班)

海底峡谷に設置した3系の係留系の回収に成功した。12本の海底コア採取とセジメントトラップ沈

降粒子サンプルの回収成功などにより、連携研究のための研究試料やデータを確保した。

・しらせによる連携観測(底層水班、探査班) (令和元年)

トッテン氷河域で、24 点の AXCTD 観測や、41 点の AXBT 観測、27 点の CTD 観測、広範囲海底地形調査といった連携観測を実施したほか、4 系の係留系を設置し、2 系の係留系の回収に成功した。

・海鷹丸による連携観測(底層水班、生態系班) (令和元年)

ビンセネス湾沖で、3 系の係留系の回収に成功した。

・AI を活用した「自動選別・集積システム」(古海洋班が導入)

古海洋班が開発し特許出願中の微化石自動分取技術が、固体地球班による氷床融解年代測定に応用された。粉碎した岩石から石英粒子を抽出する際、従来の化学的処理に代わり自動分取技術を用いることで、大幅な高速化とコストダウン、環境負荷の低減が可能となった。

・南極沿岸・南大洋での海底堆積物試料の採取と分析(古海洋班、固体地球班、氷床班)

過去に採取された南極沿岸の海底堆積物試料について、氷床・棚氷・海氷変動を理解するために、古海洋班および固体地球班がそれぞれの試料を共有して解析を進めた。また、フランス船に古海洋班メンバーが乗船して採取した試料により、南大洋の古海洋変動と南極氷床変動の解析を共同で進めた。モデル班には推定した過去の海水温変動などを共有し、気候変動メカニズムに関する研究を進めた。過去の氷床末端の位置や暖水流入による棚氷の底面融解を探るべく、氷床班が棚氷の熱水掘削孔を通じて採取した棚氷下の海底堆積物の分析を固体地球班が進めた。

・雪尺等の観測データの解析結果の共有(氷床班、モデル班、公募研究)

1990 年代から続く沿岸から内陸までの雪尺観測結果の誤差を評価した上でコンパイルし、涵養量のトレンド検出や数値モデル検証等に共有活用した。

## 最終年度繰越しについて

総括班(X00) 直接経費:25,950,000 円

連携研究促進と成果取りまとめのための人件費、全体会議開催費、若手海外派遣支援費を計上した。

底層水班(A01-1) 直接経費:3,650,000 円

ポスドク雇用、国際学会での成果発表、研究成果取りまとめを行う。

生態系班(A01-3) 直接経費:3,580,000 円

試料分析、国内試験航海および南大洋観測航海(2名)を実施し、研究成果取りまとめを行う。

氷床班(A02-1) 直接経費:14,800,000 円

不測の故障が生じた質量分析計を修理し、アイスコア分析・データ解析・議論をし、研究成果取りまとめを行う。研究員・補佐員雇用費も計上した。

固体地球班(A02-2) 直接経費:5,250,000 円

データ・資料の解析、解析結果の検討を行い、研究成果取りまとめを行う。研究員を雇用する。

探査班(A03) 直接経費:11,642,993 円

南極の氷海域や沿岸浅海域における観測を行い、研究成果取りまとめを行う。研究員を雇用する。

モデル班(A4) 直接経費:16,030,129 円

古気候数値実験と結果の取りまとめ、氷床数値実験と結果の取りまとめを行う。研究員の雇用や記憶装置の購入を行う。



## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域が目指した研究においては、分野をまたがった様々な相互作用の理解が本質的であるため、既存の学問分野の枠を超えた複合的なアプローチが不可欠である。そのため、応募時には「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択した。領域計画が開始し、当初挙げた通り、地質学、地形学、測地学、地球力学、気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、生物学、計算科学、機械工学の各分野にまたがる融合研究を推進した。本領域により新たな分野融合・連携研究体制が構築され、南極氷床と南大洋を中心とする南極環境をシステムとして研究する「南極環境システム学」が創成された。その結果、以下に例示するように、地球科学や工学の広い分野にインパクトを与えたほか、海水準上昇や全球気候変動に関して社会的にも波及効果が生まれたことなどから、目標とした融合領域の創成および革新的・創造的な学術研究の発展への貢献は達成できたと言える。

### (1) 現場・衛星観測データと数値モデルの密な連携によるプロセス解明：地球科学へのインパクト

観測困難な東南極の氷床-海洋相互作用に関して、固体地球物理学・海洋物理学・地形学・雪氷学・計算科学の融合により、新たに構築した詳細海底地形図の高解像度海洋モデルの境界条件への使用や、氷河にあけた孔を利用した海洋観測を実施した結果、現場で観測された温度・塩分の3次元分布のモデルによる再現が可能になったほか、外洋からの暖水流入→棚氷融解→外洋への再流出という一連の過程の解明に成功した。また、現場観測データと衛星データ解析の連携から、暖水輸送メカニズムが海洋の定在渦であることを解明するなど、分野間の連携がもたらしたブレイクスルーは、南極のみならず、中低緯度や北半球を含む地球表層を対象とする研究分野に広くインパクトを与えた。

### (2) 過去と現在の知見によるモデル信頼性の向上：気候科学へのインパクト

海水準の将来予測は、直接観測期間ではカバーできない氷床の長期変動メカニズムの理解とモデル化や、氷床モデルを駆動する全球気候モデルの正確性の確保が不可欠である。そのため、気候力学・気象学・雪氷学・古環境学・計算科学の融合により、多くの気候モデルが持つ南大洋の温暖バイアスを解決したほか、過去の気候や氷床の変動を様々な手法により復元し、全球気候モデルの長期的振る舞いの検証を経て、最終間氷期の南極氷床縮小に至った温暖化の原因を解明した。この温暖化が北半球の氷床や気候と強くリンクしていたことなど、グローバルからローカルまでの広範なスケールを対象とした気候科学にインパクトを与えた。

### (3) 物理・化学過程と物質循環・生態系のリンク：物質・炭素循環学へのインパクト

生態系班-モデル班連携ワーキンググループによる連携研究から、各国の全球生態系モデルが予測する海洋生産量に著しいバイアスが存在し、その原因が南大洋冬期データの不足であることを明らかにした。また、物理・化学・物質循環・生態系モデルを含む海洋モデリングと古気候・古海洋学の連携から、氷期の二酸化炭素濃度低下の再現に成功し、炭素循環に係る物理・化学・生物生産の複合的過程を解明した。これらの成果は、今後の生物生産性や炭素循環等の研究にインパクトを与える。

### (4) 新たな無人観測やAI活用の技術開発：工学や環境学、産業界へのインパクト

南極の探査困難領域を対象にした無人観測技術や、AIを活用した微化石分取システムなどは、他分野や産業界への普及や応用が期待される。

### (5) 海水準上昇とティッピングポイントの理解がもたらす社会への波及効果

上述した棚氷融解過程の理解や、現在のプロセスを再現可能な南極氷床モデルによるシミュレーションから、氷床質量変化の気候変化に应答や、氷床のティッピングポイントの存在が明らかにされたことは、気候影響の緩和や対応などの検討や、人々の意識の変化につながり得るものであり、今後の連携研究による予測の高精度化を含め、大きな波及効果をもたらすことが期待される。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和4年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 南極若手会（8回開催）

本領域の若手研究者が運営を行い、分野を超えた勉強会や研究ツールの演習、研究計画作成ワークショップなどの取り組みを行った。その結果、異分野の研究者との共著論文出版など、分野間連携に取り組む姿勢や実際の研究実績につながった。

### 国際シンポジウム（2018年度開催）

計32名の若手研究者が参加し、発表・質疑を含めて南極環境システム学に関わる活発な議論の場となった。さらに、海外からの招聘研究者との研究打ち合わせがシンポジウムの期間中及び前後の期間に多数設定され、若手研究者が国際的・学際的センスを獲得する機会となった。

### 若手海外派遣事業（26件）

国際学会派遣支援は、若手研究者に国際学会での発表経験を積ませるだけに留まらず、学会の前後に関連の研究機関に短期訪問させる事により、より効果の高い派遣支援となった。若手研究者海外派遣支援は、海外の関連研究機関において精力的に研究面での技術習得に努めるに留まらず、将来のさらなる長期滞在・本格共同研究に発展するようなコネクション作りにつながる派遣となった。

### 学際的フィールド教育（若手23人が参加）

船舶観測に6班から学生やポスドクが乗船し、共同観測や船内セミナーを行うなど、若手の分野間交流を促進した。領域としてモデル分野の若手研究者のフィールドワーク参加の支援を行い、計画班の複数の代表が乗船するなどして、フィールド学際教育を実践した。

### 南極春の学校（スプリングスクール）・若手向け学際的解説書（2017年度、55人参加）

本領域研究の遂行に中心的に携わった若手研究者が、本領域が目指す学際研究や、多分野の研究手法や動向を理解するために非常に有効であり、その後の若手会活動の契機にもなった。本領域メンバーが所属する大学院にスクール参加者の11名が進学するなど、領域の間口を広げることに成功した。

### 年次報告会（各年度開催）

多分野の研究者が集まる年次報告会で、若手の発表を奨励するなど、若手育成を心がけた。実際に毎回多くの若手研究者の発表と議論が行われ、分野連携による議論や論文執筆につながった。

以上のように、若手研究者の段階に応じた多岐にわたりかつ実態のある若手人材育成を行ったことにより、本領域は次世代の研究を担える有力な若手研究者を多数育成でき、その後の就職（無期雇用6名、有期雇用23名）などの成果も上がった。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 住明正 東京大学未来ビジョン研究センター 特任教授（専門分野：気象学、気候力学）

全体としては、よい成果が出ていると思う。特に、南極域でのモデリングに関しては、今までは大きな進展が見られなかったのが、今回のプロジェクトで大きく進展したと思う。また、モデルを用いたデータの統合についても進展が見られたことは良いことと思う。以下、個別に評価を述べる。

- (1) まず、日本の観測船5隻による総合観測を成功裡に実施したことは評価できる。特に、コロナ禍の現在、海外での活動は難しいと思われるが、ギリギリ間に合ったことは良かったと思っている。
- (2) 白瀬氷河の氷床の融解のプロセスについて、「底面に沖合起源の暖かい海水が流入することによって起きていること、また、その強度は、卓越風の季節変動によってコントロールされている」という一連のプロセスを解明した。これは、大気大循環の変動、それによる南極周極流の変動、そして、氷床の融解というような気候システムとしての変動を明らかにしたという点で、南極システム学の構築の一步となったと思う。
- (3) 気候モデルに於いて、南極付近の海水温の高温バイアスは顕著であるが、雲の取り扱いを改良することによって減らすことができたことは評価される。さらに、南極氷床力学モデル、海洋物質循環モデル、海洋領域モデルなどのモデルの開発に大きな進展があった。
- (4) 観測機器の開発、あるいは、採用により新しいデータの取得に成功したことは評価するが、無人海中探査機の開発に関しては、このプロジェクトに不可欠なのか？という疑問が残る。コロナにより実施が遅延したことはおいても、プロジェクト期間中に開発が終了しても、その観測によるプロジェクトの目的に寄与するところがあるのか、疑問と思われるからである。機器開発は別のプロジェクトとし、開発された機器を現地に展開し新しいデータを得ることによってサイエンスの確立に寄与するという組み立てにしたほうがよいと思う。

### 藤井理行 国立極地研究所 名誉教授（専門分野：雪氷学）

本研究領域は、多くの異分野連携のもと共同研究や人材育成で優れた成果をあげ、新学術領域研究（研究領域提案型）の目的とした「南極環境システム学の創成」を達成したと評価できる。

本研究領域「熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」は、特定の分野を大きく超えた領域で、学際的連携や観測とモデリングとの連携がその成否の鍵を握っていた。連携研究を推進するため、各計画研究班に設置された研究チームが関連分野はもとより、探査班やモデル班とも積極的に連携する体制をとるとともに、公募研究班との連携も推進した。こうした連携体制を、総括班メンバーに主要研究者、若手研究者を加えた「拡大総括班」が運営にあたったことが、数多くの優れた成果に結びついたと言える。

中間評価で指摘された生物系分野の進捗については、生態系-モデル連携タスクの結成などの強化を図った結果改善され、南大洋の食物連鎖への新たな知見を得るなどの成果を生み出した。また、若手研究者の育成については、「南極春の学校（スプリングスクール）」、「南極若手会」、「若手海外派遣支援」、「学際的フィールド教育」などの実施を通じて取り組まれた。研究領域期間の後半には、若手研究者が主著者となり優れた論文が多数出版された。この背景に、このような若手研究者育成の取り組みがあったことと考えられる。本領域で、分野を超えた広い視野を持った研究者の育成ができ、南極環境システム学の継承発展を期待できるのは、大きな成果と言える。

こうした学際連携体制の推進、生物系研究強化、若手研究者育成などの領域運営が功を奏し、多くの優れた成果があがった。氷床・海洋相互作用、底層水変動の実態、海底コアによる古海洋変動、海

氷下の生態系と物質循環、地質・地形学的調査とモデルによる過去の氷床復元、海底コアと氷床コアの年代精密対比、氷床変動と地殻変動の相互作用などの解明のほか、南極氷床・海洋・気候の統合的モデリングの高度化、南極氷床の将来予測などでも成果をあげた。研究成果の多くは、国際学術誌や国連の IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告書に掲載された。また、無人海中探査機、無人航空機、氷海係留プロファイリングブイ・システムの開発などでも成果をあげている。

以上、本領域研究の成果を概観した。コロナ禍という予想し難い状況に見舞われ 南極での観測や国際的な活動に制限を受けたが、その影響を感じさせない優れた成果をあげたことは高く評価できる。

## 花輪公雄 山形大学 理事・副学長 （専門分野：海洋物理学）

### <総合評価>

本領域の目的であった「南極環境システム学」の構築は十分達成されたものと高く評価する。地球環境が急激に変化している現在、その実態と変動のメカニズムの解明、そして将来予測が望まれる中で、南極域は変化のキイエリアであり、諸条件が整いつつあった時代とはいえ、異分野間の連携と融合による研究を推し進め、本領域の活動で、私たちの理解は大きく前進した。新型コロナウイルス感染症パンデミックの発生する中、観測船による現地観測などが制約される事態にも直面したが、代表者のリーダーシップの下、中堅研究者による柔軟な運営により、これを克服したものと敬意を表す。

### <特筆すべき点>

【総括班の活動】目標とした知見も含め、多くの重要な科学的知見を着実に得たことは、当初よりこの点を高く評価してきたが、代表者と中堅研究者からなる総括班（執行部）の適切な運営の賜物である。

【連携・融合研究の成功】例として「氷床量の時間変化・変動」の解明を挙げれば、氷床そのものへの評価にとどまらず、変動の結果として現れる重力場の変化、海水位の変化、周辺海域の塩分（そして水温）の変化など、多数の変化・変動が痕跡として残る。本領域は、このような多くの痕跡に多角的にアプローチすることで、信頼性の高い結果を提示することができた（A01 や A02）。また、これに関しては公募研究も大きく貢献していることも注目すべき点である（B01）。

【モデル研究の進展】モデル班を中心として、極域モデルの開発と精密化が行われ、様々な時間スケールでの氷床変化を再現できるようになったことは、大きなブレークスルーであったと言える。その結果、完新世とスーパー間氷期と呼ばれる最終間氷期への氷期からの遷移が再現され、南極における遷移状態は北半球氷床の融解履歴に依存することが明らかになった（A01-2 と A02-1、A04）。

【将来予測への貢献】またモデル班では将来予測も行い、その結果は IPCC（気候変動に関する政府間パネル）報告書の中心成果となったほか、南極氷床に関し、‘ティッピングポイント（転換点）’と呼ばれる事態が生ずることを指摘できたことは、高く評価できる（A04）。

【観測機器開発の重要性】チャレンジングであるのだが、本領域に積極的に‘観測機器開発’の班を設けたことも大いに評価できる。本領域では、無人航空機分野で3種類（固定翼 UAV、回転翼 UAV・レーザ測量用回転翼 UAV）、海中分野で無人海中探査機（AUV）、プロファイリングブイ・システムなどである。短期間での開発は‘タフ’なことであるが、領域内の直接のニーズを反映した測器の開発は極めて重要なことであり、このような班を領域内に設定したことは大変意義のあることである（A03）。実際、いくつかの開発された測器での観測は、本領域研究に大いに貢献している（A03 と A01-1、A02-2 など）。

### <人材育成について>

本領域では、博士研究員（PD）を雇用のうえ研究活動を通じて育成するとともに、大学院生・学部学生も対象とした、いわゆるアウトリーチ活動の努力を惜しんでこなかったことも大いに評価したい。学部学生を対象に「南極春の学校」を開催することで大学院への進学を促し、「南極若手会」を開催することで若手研究者のネットワークの構築を行った。このような努力は、極域研究の持続的な発展に導く重要な活動であったと言える。