

領域略称名：南極の海と氷床  
領域番号：4902

令和元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）」  
に係る中間評価報告書

「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

令和元年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

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

**研究組織** (総：総括班, 計：総括班以外の計画研究, 公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
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	17H6318 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学部門・教授	5
A01-3 計	17H06319 海水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	6
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	京都大学・理学研究科・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
総括・計画研究 計 8 件					
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・研究員	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	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海水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・物理工学院・助教	1
公募研究 計 6 件					

# 研究領域全体に係る事項

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募研究領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 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 300~400 ppm 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 20 m 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 30~40% 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域

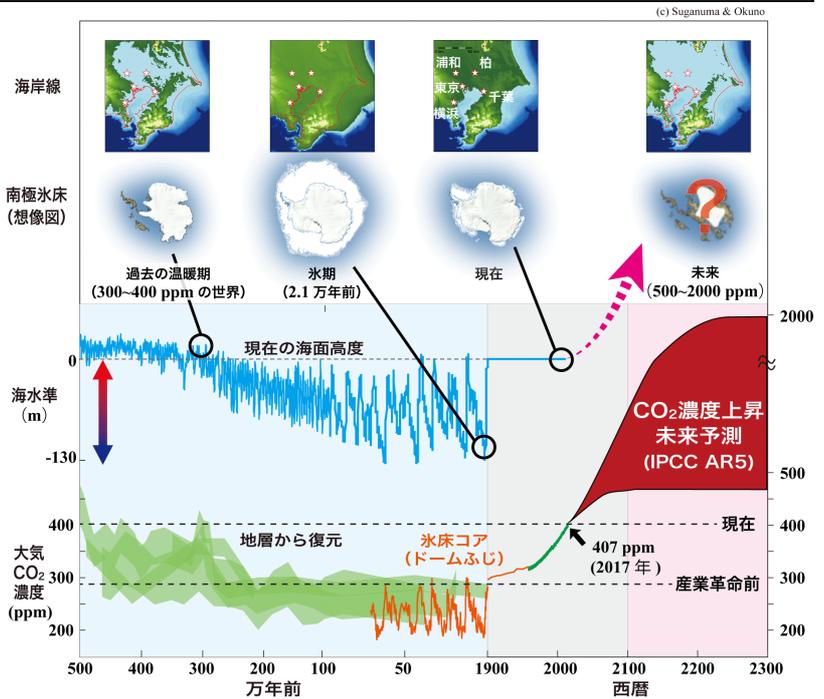


図1 海水準、大気 CO<sub>2</sub> 濃度、南極氷床の変遷と予想図。過去に CO<sub>2</sub> 濃度が高い時代には、南極氷床は現在より縮小し海水準を押し上げた。現在、CO<sub>2</sub> 濃度は数百万年来の最高値を超えて上昇を続けており、南極氷床への影響が人類的な懸念となっている。

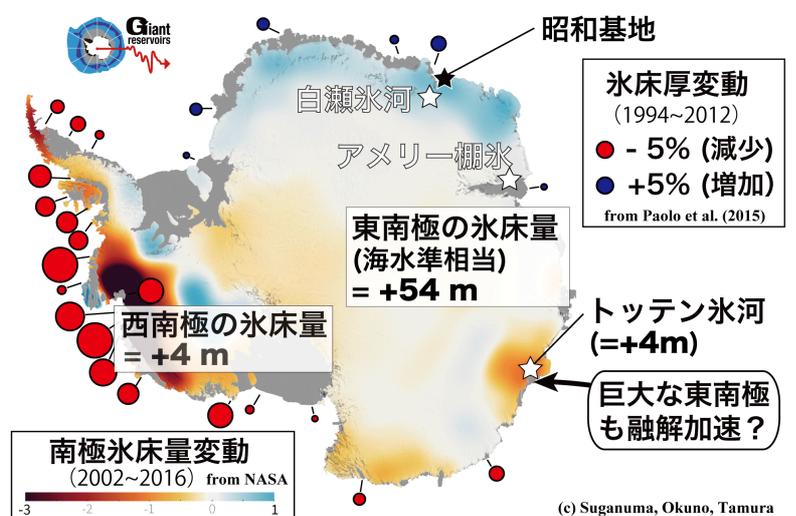


図2 南極大陸の地理的特徴と氷床量（海水準相当）。氷床厚が減少している規模を黒丸の大きさで示す (Paolo et al., 2015, *Science*)。東南極の変化については、現在も論争が続いている。

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。

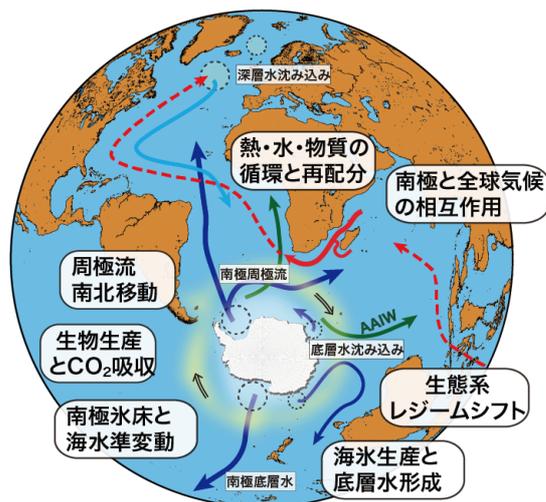


図3 全球気候変動を駆動する南大洋・南極氷床。

### 我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域である点

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。各国に先行して分野融合研究を加速することで、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将来予測において世界をリードすることが期待される。

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・アース等への大きな貢献となることが期待される。

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。

## 2. 研究の進展状況【設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する】（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

### 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）

熱-物質リザーバとしての南大洋の視点から、海洋物理・化学、生物、地質学等の観測や試料分析により、氷床-海洋相互作用を中心としたプロセスを解明し、過去から現在の海洋・物質循環、生物動態等の変動を明らかにすることを目的とする。これまで、我が国の4船を南大洋に展開して計画班間の連携による総合観測を行い、外国の2船も用いて多様な観測や試料採取を実施した。昭和基地があるリュツォ・ホルム湾における暖水貫入と氷床・棚氷融解の実態解明や、ケープダンレー底層水形成域および東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河の沖合での底層水の動態把握、過去の南大洋の温度や塩分の復元、季節ごとの生態系・物質輸送の動態把握など、領域の研究対象である南大洋・南極氷床の相互作用と全球環境への影響解明に資する進展をしてきた。

#### A01-1 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（底層水班）

ケープダンレー底層水の生成域と流出先において初めてフロンと SF<sub>6</sub> を同時に計測し（白鳳丸）、底層水の年齢や起源水の混合比を同定し、溶存酸素量と合わせて栄養塩循環の定量化につながるデータも得た（A01-3 生態系班連携）。底層水を形成する海底峡谷に3つの係留系を設置し、高密度水が形成されるポリニヤ（陸棚）域にも係留系を「しらせ」で設置した（係留系は回収後にデータを解析し、底層水流量や熱塩フラックスの定量化に加え、底層水に伴う物質輸送と季節変動の解明を狙う）。リュツォ・ホルム湾では、「しらせ」により初めて全域の海洋観測を行い、白瀬氷河の融解水の3次元分布を得た。棚氷-海氷-海洋結合モデリングおよび海底地形の詳細マッピングと連携して解析し、外洋からの暖水流入と棚氷底面融解の実態を明らかにした（A04 モデル班・A03 探査班連携）。南大洋インド洋海域では、白鳳丸、開洋丸、海鷹丸、しらせの4船の連携によって効果的に観測を行った。新たに集中観測域と定めた東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河の沖合においては、開洋丸と海鷹丸によって海氷のない陸棚斜面域を、しらせによって海氷のある陸棚上を分担して観測を行い、暖水の流入を捉えることに成功した。白鳳丸が侵入できないケープダンレー沖の陸棚海水域の係留系設置は、しらせによって実施した。

#### A01-2 南大洋の古海洋変動ダイナミクス（古海洋班）

試料前処理法・分析法の洗練や、南大洋における古環境プロキシの開発と高精度化を進めた。有孔虫が少なく古環境復元が難しい南大洋コアに対し、生物源オパール（珪藻、放散虫など）を微量で分析することで世界的ブレークスルーをもたらすべく、新たな分析システムや、世界初となる AI（人工知能）とマイクロ・マニピュレーターによる微化石の自動分取技術を確立した。海底コア解析では、取得済みのコアの年代を構築し、アイスコアの年代やデータ、海氷海洋モデルとの比較研究を開始した。また、南大洋各地の海底コアによる既存と新規のデータを解析し、過去数百万年間の半球スケールにおける表層海水温データを構築するなど（A02-1 氷床班連携）、今後の年代統合や古環境モデリングに向けたデータを蓄積した。現場観測では、白鳳丸により2本の海底コアを採取するとともに、セジメントトラップによる1年間の沈降粒子や、地震波法による海底下の地層情報を取得した（A01-1 底層水・A01-3 生態系班連携）。また、同一経線上の多点で表面海水や浮遊性有孔虫、海氷、冰山氷を採取し、水素・酸素同位体比を分析して海洋物理場と比較するなどし、古環境プロキシの高精度化を進めた（A01-1 底層水班連携）。外国共同研究では、フランス船による長尺海底コアの採取や、米国船によるロス海5地点での堆積物コアの採取と分析を進めた。

#### A01-3 海氷下の生態系と物質循環の相互作用（生態系班）

南大洋ビンセネス湾沖（インド洋セクター）において、海鷹丸による予備観測（2018年1月）および本観測（2019年1月）を行った。予備観測では、種々の装置による生物採集のほか、海氷の採取を実施した。また、係留系観測を「しらせ」と連携して行い、生物分布データや生物試料を得た。本観測では、新規に導入した大型開閉式プランクトンネットなどの各種ネットによる生物採集に加え、東経110度線上の3地点（夏季氷縁域、周極深層水の湧昇域、冬季の氷縁域）への長期係留系の設置を行った（A01-1 底層水班・A01-2 古海洋班連携）。係留系はA01-1 底層水班と共同で設計することで、従来よりはるかに多くの流速計やCTDを設置できた（2020年1月に回収予定であり、その後の解析により、生物ポンプの季節変動と海氷との関係を詳細な物理場と合わせて議論することが可能になる）。また、季節海氷域の食物網構造の把握のため、様々な生物群集構造と環境要因との関係、海水中微生物が夏季の融解・放出後に海中の生態系にどの程度寄与するかなどを明らかにした。生物の消化管分析や炭素・窒素の安定同位体比分析も進めた（食物網の上位にいるハダカイワシ科魚類の初期生活史については、仔魚が沈降粒子を食べている可能性が高く、今後の観測・分析で表層からの移出生

産との関係解明を目指す)。当該海域における高次捕食者（ハンボソミズナギドリ）の食性調査は計画通りに進んでおり、ハダカイワシ科魚類を中心としてボトムアップ・トップダウン両方の視点からのアプローチが今後期待できる進捗を得ている。

#### **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）

水-熱リザーバとしての南極氷床の視点から、氷床流動や表面質量収支、測地、固体地球物理学等の観測やアイスコアの解析を行い、現在から過去数百万年スケールまでの南極氷床の質量変動や固体地球との相互作用、南極の気候・炭素リザーバの変動特性と全球環境との相互作用など、様々な変動と相互作用の解明を目的とする。

過去の変動復元に関して、A02-1 氷床班がドームふじアイスコアからの詳細かつ高精度な古環境復元に向けた分析技術開発や各種環境指標の分析、ドームふじコア年代の高精度化、アイスコア・海底コアデータの統合解析による過去 100 万年以上の CO<sub>2</sub> 濃度復元などを進め、A02-2 固体地球班が南極大陸縁辺部における氷床拡大縮小の証拠を得た。現在の氷床変動にかかる現場観測では、氷床縁辺部から内陸にかけての氷床質量収支にかかる各種観測を行った。南極氷床と南大洋、全球気候の関連と相互作用の解明のため、今後展開を予定している連携研究に向け、着実に進捗している。

##### **A02-1 南極氷床と気候の変動及び相互作用（氷床班）**

アイスコアの解析では、特に重要なスーパー間氷期（間氷期の中でも特に温暖で海水準が高かった時代）における海底コアとの年代精密統合に向け、まず直近のスーパー間氷期の年代精度を大幅に上げるため、ドームふじコアの 2000m 以深（17 万年前）まで、酸素/窒素比とメタン濃度ほか 7 種類の気体成分を平均分解能 500 年で分析した。取得したデータを年代制約条件とし、氷床流動/涵養モデルを用いたインバージョン法による年代計算にも着手した。約 40 万年前のスーパー間氷期についても、計画を前倒しして分析を開始した。海底コアとの年代統合に利用できる可能性がある指標として、メタン濃度とダスト濃度の連続融解法による分析も進めた。また、CO<sub>2</sub> 濃度の分析手法の開発や、古環境指標の開発につながる冬季の積雪採取を行った。モデルの検証データとすべく、ドームふじコアの氷の酸素・水素同位体比から過去 72 万年間のドームふじの気温と南大洋中緯度の海面水温を復元し、CO<sub>2</sub> 変動との関係を議論し（A04 モデル班連携、*Nature Communications* 誌）、最終退氷期の全球平均海水温を大気中の希ガス濃度から復元した（国際共同、*Nature* 誌）。観測面では、熱水掘削によりラングホブデ氷河の棚氷や氷下の海洋を観測し（A01-1 底層水班、A02-2 固体地球班、A01-3 生態系班連携）、そのデータの解析から、海洋深層の暖水が棚氷の下に侵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沖に出ていく様相を克明に捉えた。南極大陸上では、表面質量収支の広域観測や氷床下の基盤地形探査を 2 シーズンにかけて実施し（A04 モデル班、公募班連携）、氷床質量収支の連携研究を今後進めていく基礎となるデータを取得した。

##### **A02-2 固体地球と氷床の相互作用（固体地球班）**

東南極の沿岸・内陸の測地観測・地形/地質調査や海底地形解析から、氷床変動に伴う固体地球の応答(GIA)モデルを高精度化し、過去から現在の氷床質量収支を明らかにすることで、氷床・海洋・気候の統合的モデル研究に資することを目指している。これまで、昭和基地および周辺地域における測地的・地形学的調査を実施し（A04 探査班連携）、得られた岩石や堆積物などの試料分析や、観測データの解析を実施した。特に、リュツォ・ホルム湾の露岩地域で新たな絶対重力測定に成功し、その解析の結果、同地域の重力変化勾配が 2010 年以降は降雪量増大の影響を受けている可能性を示した。また、航空網を利用した南極の外国基地での測地的調査も実施した。地形学的調査では、新規に開発した可搬型パーカッションピストンコアラーにより湖底コアの採取に成功するとともに、露岩域で採取した岩石試料の表面露出年代測定を実施し、最終氷期から完新世への全球気候遷移にとともに起こったリュツォ・ホルム湾南部における氷床後退の時期を明らかにした。国内においては、複数の GIA モデルの調整と数値実験を進め、最終間氷期以降の東南極氷床の最拡大時期を明らかにするための土台を築いた。

#### **研究項目 A03 未探査領域への挑戦**（探査班）

各班の観測に必要な技術開発や、各種の観測装置とノウハウの共有化、未探査領域である氷下の海洋や氷上の地形の観測を進めるとともに、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。特に、海氷・棚氷下の海洋データを取得できる無人海中探査機(AUV)の開発を進めた。各班から要望を聴取して基本仕様を決定し、詳細設計を進め、全体の組み立てまで完了し、現在は陸上で全体動作の試験を行っている。確実に AUV を回収するため、小型遠隔操縦ロボット(ROV)による回収機構の概念設計と試作も進行中である。AUV 展開の難しい沿岸域での観測用には、氷上から穴を開けて海中に展開できる小型 ROV の開発を進めた。また、南極沿岸域で水温・塩分の鉛直分布を観測可能なシステム（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）を開発してケープ・ダンレー沖に設置した。各システムの開発は、A01-1 底層水班、A02-1 氷床班、A01-1 生態系班および A02-2 固体地球班との連携により進めている。南極陸域の調査においては、3 種類の

無人航空機 (UAV)、固定翼 UAV、回転翼 UAV、レーザ測量用回転翼 UAV を導入し、地形測量を実施した (A02-2 固体地球班・A02-1 氷床班連携)。UAV データによる表面地形 (Digital Surface Model; DSM) の精度評価も実施した。また、A02-2 固体地球班と連携し、氷床変動に対する固体地球応答モデルに不可欠な高精細地形や積雪変動を導出し、積雪による地殻変動や重力変化を評価した。

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

海洋-氷床相互作用などの各種モデル開発や、数値実験による南大洋変動、物質循環、南極気候の変動要因の分析を独自に進めるとともに、A01 および A02 の現場観測および分析データと密に連携し、互いの結果をフィードバックさせる形で融合研究を推進することを目的とする。

これまでに、日射や温室効果ガスを入力として気候を計算する気候モデル (大気海洋海氷結合モデル MIROC) や、大気と海洋の温度や降水量を入力とする南極氷床力学モデル (SICOPOLIS)、海洋表面フラックスを入力とする海洋物質循環モデルや海洋領域モデル (COCO) などを高度化し、南極周辺のパフォーマンスを詳細に調査した。また過去 1000 年、過去 2 万年、過去 350 万年などの異なる時間スケールの古気候計算や、予備的な将来長期予測計算も開始した。今後、他班が得た海底や氷床下の地形の高度化を取り入れ、高度化されたモデルを用いて過去と将来の計算を進めて、南極のティッピング・ポイント把握に資する研究を進めるための準備が整った。

#### **研究項目 (公募) B01 大気物理とモデリング**

大気プロセスについては、従来の南極研究コミュニティの外部から最新のモデルを用いた研究者が参入し、A04 モデル班や A02-2 氷床班等と連携した氷床質量収支の把握や予測可能性、モデル高精度化に関する研究が進んでいる。

**公募・猪上 南半球における中高緯度大気循環の不確実性の定量化** 既存の観測データを用いたデータ同化実験を実施し、南極域の気象観測データは中緯度の極端気象の予測向上に貢献することを示した。南極と中緯度の気象との関連や相互作用、予測可能性の評価のため、昭和基地やドームふじでのラジオゾン観測を行った。東南極に寒冬・暖冬をもたらすメカニズムを探求するため、中緯度海洋前線と低気圧に着目した解析に着手した。

**公募・西澤 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** 南極の強安定場では、氷床量の増減の推定にとって重要となる表面昇華量の推定は難しい。シミュレーションに広く用いられている地表面フラックスの推定法の問題点や、見積もられたフラックスへの誤差を評価し、当該スキームを改良した。ラージエディーションシミュレーションモデルを用いた検証実験により、その有効性を確認した。

**公募・庭野 南極氷床表面質量収支高精度推定手法の確立** 極域気候モデルによる南極気候計算を行うための各種調整作業 (許容可能な計算速度を出せる設定の構築) を行い、本格的な計算の前に必要なスピニアップ計算を行った。また、雲放射が氷床表面質量収支に与える影響の診断機能をモデルに導入した。

#### **研究項目 (公募) B02 各種の衛星観測**

主に A01 (南大洋) と連携し、海洋の循環や移流、海氷生産に関する研究や共有データ作成を行ってきた。

**公募・溝端 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** レーダー高度計データから、2011 年 1 月以降の海面力学高度データセットを作成し、東南極の陸棚斜面に点在する時計回り循環を見出した。東経 110 度周辺における循環を、現場観測や再解析データと突き合わせ、南極底層水形成と暖水の極向き輸送などに関して知見を得た。また、1 年間の周極深層水の挙動を調べるため、A01-3 生態系班・A01-1 底層水班との共同で設置した係留系の 1 系 (南緯 63.5 度) に自動昇降式測器を設置した。これにより、衛星観測による海洋循環場モニタリングと係留系による周極深層水・南極底層水・生物パラメータ同時観測の連携を展開できる。

**公募・二橋 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** 沿岸ポリニヤ (疎氷・薄氷域) を衛星観測からモニタリングするため、薄氷の種類判別アルゴリズムの開発を、マイクロ波放射計データを用いて行った。従来のアルゴリズムは薄氷厚を過大評価しており、今回開発したアルゴリズムによると、海氷生産量が従来の推定の 1.3-1.5 倍程度となった。

#### **研究項目 (公募) B03 新しい観測・分析手法を用いた研究**

主に氷床班と連携し、アイスコア中に硫黄をベースにした新たな環境指標を見出すための研究を遂行した。

**公募・服部 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** 南極で採取した硫酸エアロゾルの分析により硫黄起源や輸送過程の分別を検討した結果、アイスコアの硫黄同位体は起源情報を有する可能性を示した。また、沿岸と内陸の酸素同位体の季節変動を全球大気化学輸送モデルと比較した。さらに、硫酸エアロゾルの挙動をモデル化して、成層圏に噴煙が達して地球規模の寒冷化をもたらした大規模噴火を識別する手法を確立し、南極浅層コアの硫酸同位体組成から過去 2600 年の火山噴火記録を復元した。

### 3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

#### 審査結果の所見の抜粋

「若手人材育成に関しては、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。」

#### 留意事項（一点）

「若手人材育成に関し、次世代の南極環境システム学を担う学際的センスを習得した研究者を育成するための、具体的で実効的な計画が求められる。」

#### コメントへの対応策等

若手人材育成に関わる活動については、領域および各計画班の申請書に多岐にわたる計画を記述したが、具体性と実効性について曖昧であったため、上のようなご指摘を受けたと反省している。

指摘事項への対応策を早期かつ真摯に検討すべく、本領域の開始直後から総括班会合やアドバイザーボードを含んだ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・再検討し、具体的かつ実効性のある計画を立案し、現在まで実行してきたと考えている。本欄では主に計画立案の土台となった議論や考え方を中心に記し、より完全な施策内容と成果については本報告書「7. 若手研究者の育成に係る取組状況」を参照されたい。

#### 南極の学校 スプリングスクール・若手向け学際的解説書

領域発足最初の総括班会合において、次代を担う若手研究者となる可能性を秘めた全国の学生に本領域を知ってもらうことと、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が何かを伝える機会をまず早期に設けるべきであるとの議論が起こった。これに類する企画として、領域および各班の申請書には、アウトリーチ活動としての「南極の学校」（対象：中学生から大学生）を記述していたが、その開催趣旨と中身を見直して大幅に変更・改良し、若手研究者の確保と育成の目的を明確に持たせる企画として再計画した。領域の継続期間のうちに効果を得て、かつ長期的な波及効果を高めるためには初年度に行うべきであると判断し、大学院入試等のタイミングを考慮したうえで、「南極 春の学校 2018～目指せ国際・学際研究者～」として2018年3月に3日間の合宿形式でのスクールを開催した。これには領域代表や計画研究班の代表メンバーが力を大きく注ぎ、海外からの講師も交えて学際性と国際性を前面に出すものとした。なお、これに先だって合宿形式で開催した領域のキックオフミーティングでは、本領域の大半の若手研究者が参集し、南極環境システムの解明についてシニア・中堅と若手が分野と世代を超えて語りあい、申請段階の構想を超えた連携を議論するきっかけとなるように配慮した。

「南極 春の学校 2018」を通じて未知なる南極の学際研究に魅力を感じ飛び込んでもらうには、それに相応しい入門書が必要であるとも考えた。学生を含む若手研究者には、実際の研究に触れる前や研究初期の段階から学術的センスを身につけていってほしいが、新たな分野である南極環境システム学には既存の教科書が存在しないことはその障壁となり得る。そのため、特に分野外の研究者や若手研究者・学生を対象とした原稿を本領域の主要メンバーに依頼し、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）を初年度内に完成させ、2018年3月に発刊した。本領域の間口を開けておくため、本書の出版には底層水班代表が所属する北大低温研の出版事業を活用し、無料でダウンロードできるようにした。

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/lts/LTS76.pdf>

「南極 春の学校 2018」には本領域に興味を持った31名の学部生と24名の大学院生が参加し、後述する南極若手会に多くの学生が参加する契機にもなった。本スクールの目に見える効果の一例としては、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名が進学したことが挙げられる。領域メンバー所属機関以外からの参加者（後の大学院進学者）もあり、3年生以下の学部学生も多かったことから、これまで手の届いていなかった全国各地からの大学院への進学希望が今後も継続すると期待され、領域の間口を広げる狙いは成功したと考えている。かくして「南極 春の学校」の効果は高かったと判断し、2020年3月にも開催することを2018年度末の拡大総括班会合で決定し、現在その準備を始めている。これにより本領域の裾野がさらに拡大し、積極性のある学生の確保と育成につながることを期待している。

このほか、日本地球惑星科学連合（JpGU）大会において展示ブースを出展し、本領域の計画について学生向けに広く発信した。その訪問者が関連大学院を受験するといった効果も見られたことから、今後はさらに研究活動や成果、進学先等についても発信を重ねることにしている。

大学院生やポスドク研究員などの若手研究者を対象として、学際的・国際的センスを養うための施策も様々な講じることを検討した。学際的・国際的センスの涵養には、それぞれの若手研究者が先鋭化した専門分野での研

究能力を高めていきつつも、他分野の研究や観測に参加して分野間の研究文化や常識の違いを理解することや、複数分野の中堅・シニア研究者が参加する研究集会や領域年次報告会における発表と議論をすることにより、自身と異なる分野の研究の基礎をお互いに学び理解しあうことは重要である。さらに、国際学会参加や海外研究機関への滞在と議論、来日した海外の一流研究者との交流なども求められ、それらを実践するための多様な機会を設けることを考えた。異分野間の連携や学際・国際共同研究を常に意識し、実践する機会を多数設けることを通じて、連携研究を自ら立案し実施する能力が養われるのではないかと考え、そのための具体的な諸策として、「南極若手会」、「若手海外派遣支援」、「学際的フィールド教育」、「国際シンポジウム」などを領域発足後速やかに具体化して実行に移すこととした。

**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計画研究班の若手研究者に周知やアドバイスをするなど、初年度のキックオフ会合（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、主に合宿形式で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ている。領域としては、若手会からの申請があった場合に審査のうえで資金面の支援をしつつ、活動内容は若手に任せている（研究と若手会活動とのバランスや勉強会の開催時期などについての助言を行っている）。初回の勉強会は「南極 春の学校2018」と連続開催となり、研究者を目指す大学院生・学部生からポスドクまで領域外からも多数参加し、若手どうしの人的なコネクションを一気に広げることにつながった。その後は大学院生以上を対象にした実践的な講習会をメインに運営を続け、領域外を含む参加者から高いニーズもあり、自由な議論から南極環境システム学の次世代を担う研究コミュニティの広がりが期待される。

**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）、海外研究者招聘は公募制とし、将来の連携研究に関しても記述させることや、学会前後の研究所訪問を推奨することなどを通じ、支援対象者の自覚と責任感を促している。予算の制約から大人数や長期の派遣支援は難しいが（最長で1ヶ月程度）、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てきたことが年次報告会で生き生きと報告されるなど、周りの若手研究者への刺激にもなっており、良い効果が生まれている。

**学際的フィールド教育**：南極環境システム学は、学際的な視点で行われる極寒地におけるハードなフィールドワークと、様々な時空間スケールを持ったモデリングを融合して成り立つものであることから、各自の専門分野外のフィールドワークへの（モデリング研究者も含めた）参加は重要である。平成30年度の白鳳丸航海では、領域内の計画研究7班のうち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して、若手の分野間交流が大いに促進され、将来の学際研究に期待が持てる。領域としてモデル分野の若手研究者がフィールドワークに参加するための支援を行い、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**：若手研究者が学際的センスを養うには、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が必須であろう。そのような機会を早期に設けるべく、3年目に計画していた国際シンポジウムを2年目に前倒しして開催することとした。この国際シンポジウムに若手研究者の発表を促し、32名の若手が参加した。プログラム編成は中堅・シニア研究者が行い、質の高い研究であれば経験の浅い若手研究者であっても口頭発表の機会を積極的に与える方針とした。世界的かつ学際的な一流の議論が行われることを狙い、計画研究7班全ての分野から著名な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。結果、多くの海外研究者や領域外の参加者から、本シンポジウムでの若手の発表のレベルの高さに賛辞が寄せられた。領域の研究者と海外招聘者との打ち合わせも多数開かれ、若手が多いに刺激と自信を得る機会に満ちたものとなった。国際シンポのほかには、多くの異分野の研究者が集結する年次報告会などでも若手の発表を奨励するなど、教育的配慮を心がけている。

**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）を作成して全員で共有し、領域の報告会や学会等で見聞きして後に興味が湧いた際や、分野外のスキルを要する困難に当たった際などに、若手研究者が気軽に連絡や連携が取りやすい仕組みを作っている。また、各班の裁量となるが、分野外の若手研究者をポスドクとして雇用し（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でいる。

#### 4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

(3 ページ以内)

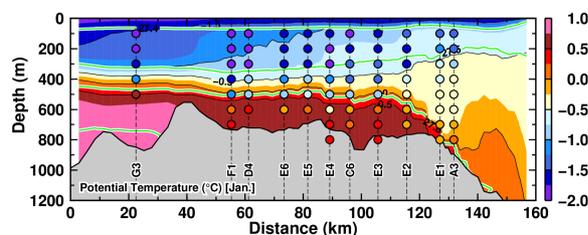
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限ること**とします。

##### 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)

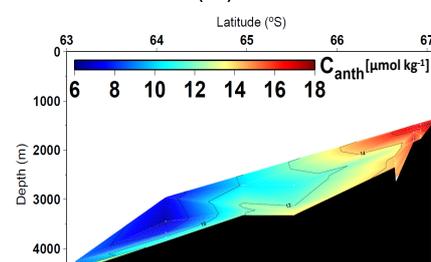
##### 白瀬氷河域における氷河・海洋相互作用の観測とモデリング (A04 モデル班・A03 探査班連携)

砕氷船しらせにより初めてリュツォ・ホルム湾全域での海洋観測を行い、同位体比などから白瀬氷河の融解水の 3 次元分布を得た。氷河海洋結合モデルの結果と合わせて解釈し、沖合から流入した温暖な周極深層水が峡谷に沿って白瀬氷河末端域へと流入して氷河底面を融解させ、棚氷融解水と混合しながら北向きに流出するという、氷河と海洋との相互作用を克明に描き出した(右図で○は観測データ、背景カラーはモデル結果。図の左が沖合、右が氷河の方向を示す)。(投稿準備中)



##### 複数化学トレーサによる南極底層水と炭素・栄養塩循環の解明

白鳳丸により、ケープダンレー底層水の生成・拡大域において、南大洋では初めてのフロンと SF<sub>6</sub> の複数トレーサ計測を行った。これにより底層水の平均年齢がほぼ一意に決まり、底層水の循環時間スケールや栄養塩循環の定量化が可能となった。さらに、底層水に含まれる人為起源 CO<sub>2</sub> 濃度の推定も可能となり、海底付近での高濃度が示唆された(図のカラーがトレーサから見積もった人為起源 CO<sub>2</sub> 濃度)。(投稿準備中)



##### トッテン氷河海域での集中海洋観測 (A01-3 生態系班連携)

東南極最大の氷床量減少海域であるトッテン氷河海域を新たに日本の集中観測海域と定め、開洋丸・しらせによる海洋観測を行った。両船の観測より、峡谷に沿って外洋起源の非常に温暖な(氷河融解の原因となっている)周極深層水が氷河域に流入している様子を捉えることに成功した。(投稿準備中)

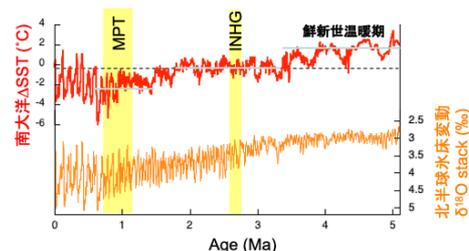
A01-2(計画・古海洋班・池原)

##### AI (人工知能) による微化石の自動分取技術の確立と南大洋コアへの応用

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) から成る自動分取システムを確立し、大量の微化石画像の学習による AI モデルの構築を進めた結果、群集組成の自動解析や微化石の高速自動抽出が可能となり、南大洋で採取された海底コアへの応用に向けた実用段階に至った。

##### 海底コアの古海洋変動解析 (A02-1 氷床班連携)

南大洋各地の堆積物コアから復元した既存と新規の海面水温 (SST) データを統合し、500 万年間の南大洋全体の SST を復元した。過去 300 万年間における SST 変動は南極の気温や CO<sub>2</sub> の変動と調和的であったことや、スーパー間氷期の SST が現在より約 1°C 高かったこと(氷床融解に海洋温暖化が寄与した可能性)が示された。さらに、350-330 万年と 200-150 万年の間に著しい SST 低下が見られ、北半球氷床の発現や氷期サイクルの周期の変化を南大洋が駆動した可能性を示した。



南大洋の表層水温 (SST) スタックカーブと底生有孔虫 δ<sup>18</sup>O スタックカーブ (Lisiecki & Raymo, 2005) との比較

##### 白鳳丸および外国船による観測と試料採取 (A01-1 底層水班・A01-3

生態系班連携) 2本の海底コア採取とともに、セジメントトラップを回収し1年間の沈降粒子サンプルを得た。反射法地震探査により、セジメントウェーブの分布情報も得た。フランス船により4本の長尺海底コアを採取した。米国船によりロス海の5地点にて海底コアを採取し、その分析から、鮮新世温暖期における西南極での植生繁茂や千年スケールの気候変動の存在など、温暖気候における南極環境に関する知見を得た。

A01-3 (計画・生態系班・茂木)

##### 海氷流動がもたらす物質や生物の水平輸送解明 (A01-1 底層水班連携)

海氷の流動に伴う物質輸送は、広大な季節海氷域の物質循環の鍵となるプロセスである。沿岸域での海氷生成時の物質取り込みや、融解過程に生じる水柱への放出と季節海氷域生態系への影響について、微細藻類 (Takahashi et al., 投稿中)、有機物粒子、動物 (Hasegawa et al., 投稿中) の動態を明らかにした。

##### 古環境プロキシ開発のための生態系観測 (A01-2 古海洋班連携)

海底コア、海氷の双方からアプローチすることで、新たな環境指標プロキシの候補を見出した (Kato and Suto, 2019; Takahashi et al., 投稿中)。

##### 炭素隔離過程理解のための海氷下の食物網・物質循環観測

南大洋では、季節海氷域の生態系構造が表層で固定された炭素の深層隔離を制御する。様々な生物群によって構成される食物網と、それを通じた物質循環についての観測的知見が蓄積しつつある。

## 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 モデル班連携)

ドームふじアイスコアの氷の酸素・水素同位体比のデータを同位体モデルで解析し、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を復元した (Uemura et al., 2018, *Nature Comm.*、右図)。南極とグリーンランドのアイスコアの解析から、両極間の大気と海洋を通じた気候のリンクを見出した (Buizert et al., 2018, *Nature*)。希ガス濃度から最終退氷期の全球平均海面水温を復元し、南極の気温変動との調和性を見出した (Bereiter et al., 2018, *Nature*)。

#### 海底コアとの年代精密統合に向けた分析

酸素/窒素比とメタン濃度ほか 7 種類の気体成分の分析を平均分解能 500 年で分析し、最近のスーパー間氷期を含むドームふじアイスコアの 2000m 以深 (17 万年前) までの年代精度を大幅に向上させるデータを取得した (大藪・川村ら、投稿準備中)。連続融解法によるメタン濃度とダストの分析も進めた。

#### 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氷の下の海洋を観測し、海洋深層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を克明に捉えた (杉山ら、論文準備中)。

#### 広域の表面質量収支と氷床基盤地形の観測研究 (B01 公募班、A02-1 モデル班、A02-2 固体地球班連携)

南極沿岸から内陸ドームふじ周辺にかけて、表面質量収支と基盤地形の広域調査を実施した。得られたデータを過去に取得されたデータと合わせて解析し、今後の連携研究に資する時系列データとして整備した (津滝・本山ら、論文準備中)。

### A02-2(計画・固体地球班・福田)

#### 絶対重力測定

昭和基地および周辺沿岸地域で絶対重力を測定し、昭和基地では過去のデータとの比較から重力の時間変化勾配を求めた ( $-0.22 \mu\text{gal}/\text{yr}$ )。また、トロール (ノルウェー)、マイトリ (インド) 両外国基地での絶対重力測定を行い各基地での重力変化を求めた。(Polar Data Journal に投稿準備中)

#### 地形調査

過去 2 万年間の東南極氷床融解史の復元のため、昭和基地近くの宗谷海岸で、新開発の可搬型パーカッションピストンコアラ (特許出願中、菅沼ほか、2019) を用いて湖底・海底堆積物の掘削と岩石試料の採取を行った。試料分析の結果、同地域では約 14000 年から 9000 年前にかけて急激に氷床後退が進んだことを見出した (川又ほか、投稿準備中)。(図: リュツォ・ホルム湾の南極氷床融解モデルと年代測定から求めた過去の氷床表面高度の比較)

#### GIA モデリング

絶対重力測定、GNSS 観測、地形調査など、昭和基地や周辺地域で実施されている各種観測との比較を進めるため、鉛直地殻変動に加えて重力場変動を計算可能にした GIA モデルを開発し、異なる粘性モデルでの GIA の影響を計算した。その結果、氷床融解史の改訂や現在の荷重変動 (積雪等) の影響除去の必要性が明らかになった。(図: 異なる GIA モデルによるリュツォ・ホルム湾の鉛直地殻変動の比較)

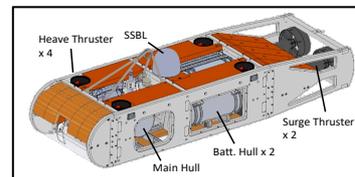
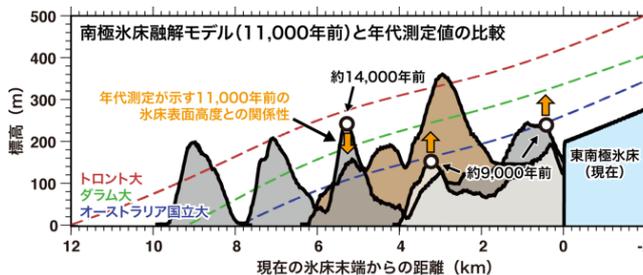
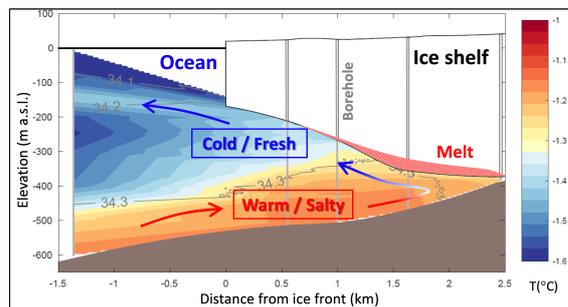
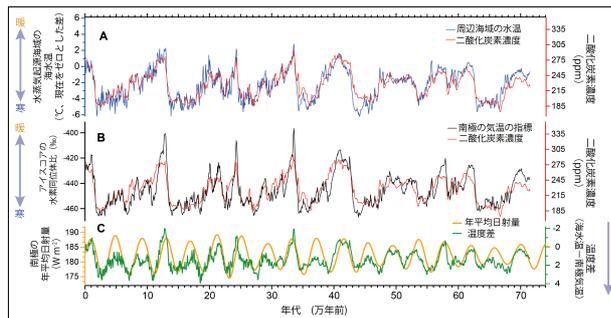
## 研究項目 A03 未探査領域への挑戦 (探査班・野木)

### プロファイリングブイ・システムの開発と設置 (A01 南大洋 3 班連携)

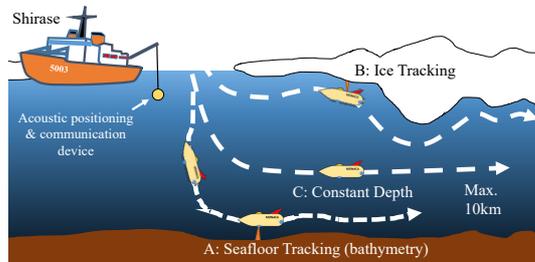
南極沿岸域で利用可能な本システムは、浮上時に水温・塩分の鉛直プロファイルを計測しつつ、海面に浮上したタイミングで、人工衛星経由で観測データを送信する。海水衝突回避のためのソフトウェアを実装した。様々な試験を経て南極ケーブダンレー沖に設置した。

#### 無人海中探査機 (AUV) 開発

海氷・棚氷下のデータを取得できる AUV の開発を進めている。観測項目は海底地形と氷の 3 次元形状、水質であり、カメラ等も装着可能とし、将来的な拡張に備えて分割構造のフレームを採用した。全長 2.1m、空中重量 230kg、最大潜航深度 1500m、海氷・棚氷下に最大 10km 進入する仕様とした。行動パターン



は A : 海底追従 (海底地形計測)、B : 氷追従 (海水・棚氷の下部形状計測)、C : 深度一定 (水質計測) の 3 パターンとする。一部測器を上下反転させ海底、氷底の計測に対応する。全体組み立てまで完了し、陸上での動作試験中である。



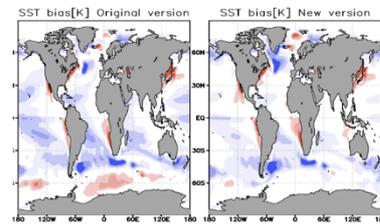
**無人航空機 (UAV) 観測 (A02 南極氷床 2 班連携)**

南極昭和基地ならびに沿岸露岩域で固定翼 UAV と回転翼 UAV の飛行試験を行い、地形測量や空撮を実施した。データを基に東オングル島の表面地形モデル (Digital Surface Model; DSM) を作成し、各 UAV による DSM の精度を評価した。固体地球班と連携し、氷床変動に対する固体地球応答モデルに不可欠な高精細地形や積雪変動を導出し、積雪による地殻変動や重力変化を評価した。

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

**全球気候モデルのバイアス解消**

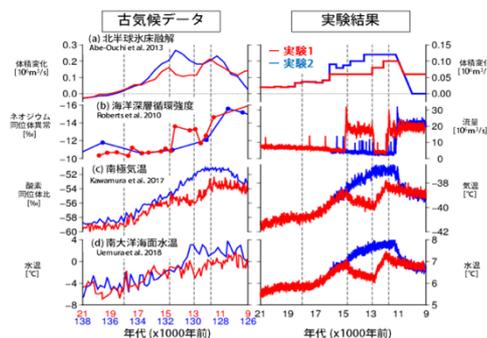
世界のほぼ全ての気候モデルに、海面水温が観測と食い違うという共通の問題がある。日本のモデルにも温暖バイアスが南極周辺に見られたが、海洋混合パラメータと雲物理特性の改良によって解消することに成功した (右図)



(Sherrif-Tadano et al, 投稿準備中)。その結果、氷期の海洋循環が古海洋データと整合的になった。

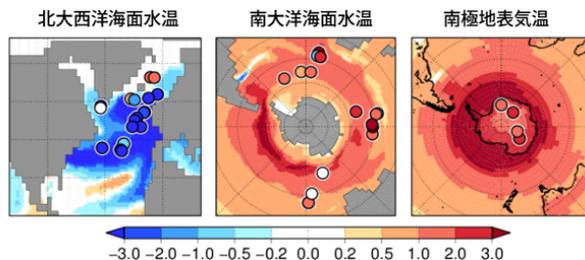
**氷期から間氷期への遷移を気候モデルで再現することに成功**

完新世と最終間氷期 (スーパー間氷期) への氷期からの遷移における南極周辺における気候状態の違いを、世界で初めて気候モデルで示した (Obase and Abe-Ouchi, 投稿準備中)。右図: 完新世 (赤) と最終間氷期 (青) への退氷期における古気候データとシミュレーション結果の比較 (北大西洋海洋循環強度、南極気温、南大洋水温)。数値実験設定における違いは、入力データとした北半球氷床の融解履歴のみである。



**現在の南極氷床が存在し得た要因を解析**

上記のシミュレーション結果の解析と考察を進めた結果、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は、最終退氷期に南北で逆位相の「寒の戻り」が生じたためであることと、その原因が、大気中 CO<sub>2</sub> と北半球氷床の融解速度が一定の範囲に収まる場合に起こる大気海洋システムの自励振動である可能性が分かった。右図: 2 つの退氷期における海水温や気温の最大差の分布。丸印はアイスコアや海底コアのデータ。



**研究項目 B01 大気物理とモデリング (A04 モデル班、A02-1 氷床班連携)**

**公募・猪上 南極と中緯度の気象・気候リンク** 昭和基地やドームふじでラジオゾンデ観測の強化を行った。それに先立ち、既存の観測データを用いたデータ同化実験を当公募課題により実施し、南極域の気象観測データは遠隔地 (豪州等) の極端気象の予測向上に貢献することを示した (Sato et al., 2018)。

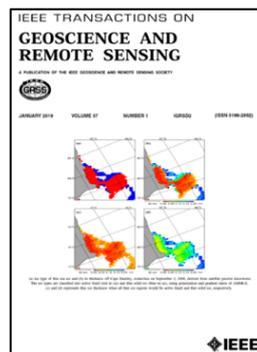
**公募・西澤 数値シミュレーションモデルにおける地表面フラックススキームの改良** 既存の地表面フラックス見積もりスキームがもつ問題を明らかにし、それを解決するスキームの開発に成功するとともに、ラージエディシミュレーションモデルを用いた検証実験においてその有効性を確認した。

**公募・庭野 領域気候モデルによる氷床涵養量の推定** 南極の気候計算を行うため、水平解像度を 6km としスピンアップ計算を行った。また、雲放射が氷床表面質量収支に与える影響を診断する機能を導入した (論文投稿中)。

**研究項目 B02 各種の衛星観測 (A01 南大洋 3 班連携)**

**公募・溝端 海面力学高度データセットの作成** 衛星レーダー高度計データから、2011 年以降の海面力学高度データ・セットを作成した。東南極の陸棚斜面に点在する時計回り循環を見出し、東経 110 度周辺海域における循環を観測と比較して、同海域の渦による周極深層水 (暖水) の極向き輸送を示唆した。

**公募・二橋 薄氷厚推定アルゴリズム開発と海水生産量データセット作成** 衛星マイクロ波放射計データから薄氷の種類判別アルゴリズムを開発し、種類に応じた薄氷厚を日毎に求めた。推定した海水生産量は従来の 1.3-1.5 倍となった (Nakata et al., 2019)。右図: 研究成果論文の図 (ジャーナル表紙を飾った)。



**研究項目 B03 新しい観測・分析手法を用いた研究 (A02-1 氷床班連携)**

**公募・服部 アイスコアで火山噴火を復元** 成層圏に噴煙が到達し地球規模の寒冷化をもたらした大規模噴火を識別する手法を確立し、南極浅層コアの硫酸同位体組成から過去 2600 年の火山噴火記録を復元した。 (Gautier et al., 2019)

## 5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したものの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 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)

- ◎\*Nakata K., Ohshima K.I., Nihashi S., Estimation of thin ice thickness and discrimination of ice type from AMSR-E passive microwave data., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1), 263-276, 2019.
- \*Kitade Y., K. Shimada, S. Aoki, K.I. Ohshima, Recent research results and future project in the Antarctic Ocean by Umitaka-maru research group for physical oceanography, 123-135, In *Oceanography Challenges to Future Earth - Human and Natural Impacts on our Seas-*, 413pp., Ed. By T. Komatsu et al., Springer Nature Switzerland AG 2019. ISBN 978-3-030-00137-7.
- \*大島慶一郎, 2015 年度日本海洋学会賞受賞記念論文「海氷域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究」, *海の研究*, 27(2), 75-96, 2018.
- \*百留忠洋, 吉田弘, 澤隆雄, 中野善之, 渡邊佳孝, 福田達也, 中谷武志, 松本宙, 菅良太郎, 依田貴志, 山内由章, 奥田幸人, 江口和樹, 黒岩良太, 森英男, 洋上中継器 (ASV) の開発, *日本ロボット学会誌*, 36(4), 286-293, doi:10.7210/jrsj.36.286, 2018.
- ◎\*Nihashi S., Ohshima K.I., Tamura T., Sea-ice production in Antarctic coastal polynyas estimated from AMSR2 data and its validation using AMSR-E and SSM/I-SSMIS data. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 10(9), 3912-3922, 2017.

#### A01-2(計画・古海洋班・池原)

- \*Salabarnada A., Escutia C., Röhl U., Nelson C.H., McKay R., Jiménez-Espejo F.J., Bijl P.K., Hartman J.D., Strother S.L., Salzmann U., Evangelinos D., López-Quirós A., Flores J.A., Sangiorgi F., Ikehara M., Brinkhuis H., Paleoclimatology and ice sheet variability offshore Wilkes Land, Antarctica - Part 1: Insights from late Oligocene astronomically paced contourite sedimentation. *Climate of the Past*, 14, 991-1014, 2018.
- \*McKay R., Exon N., Müller D., Gohl K., Gurnis M., Shevenell A., Henrys S., Inagaki F., Pandey D., Whiteside J., Flierdt van de T., Naish T., Heuer V., Morono Y., Coffin M., Godard M., Wallace L., Kodaira S., Bijl P., Collot J., Dickens G., Dugan B., Dunlea A. G., Hackney R., Ikehara M., Jutzeler M., McNeill L., Naik S., Noble T., Opdyke B., Pecher I., Stott L., Uenzelmann-Neben G., Vadakkeykath Y., Wortmann U. G., Developing community-based scientific priorities and new drilling proposals in the southern Indian and southwestern Pacific oceans, *Scientific Drilling*, 24, 61-70, <https://doi.org/10.5194/sd-24-61-2018>, 2018.
- \*井尻暁, 微量生物源オパール中の酸素同位体比測定法の開発と応用, *号外海洋*, 61, 91-96, 2018(査読無)

#### A01-3 (計画・生態系班・茂木)

- \*Kato Y., Suto I., *Thalassionema bifurcum* sp. nov., a new stratigraphically important diatom from Pliocene subantarctic sediments. *Diatom Research*, 34, doi: 10.1080/0269249X.2019.1572650, 2019.
- \*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.
- \*Watanuki Y., Thiebot J.B., Factors affecting the importance of myctophids in the diet of the world's seabirds. *Mar. Biol.* 165, 79, 2018.

#### A02-1(計画・氷床班・川村)

- \*Miyake F., K. Horiuchi, Y. Motizuki, Y. Nakai, K. Takahashi, K. Masuda, H. Motoyama, H. Matsuzaki,  $^{10}\text{Be}$  signature of the cosmic ray event in the 10th century CE in both hemispheres, as confirmed by quasi-annual  $^{10}\text{Be}$  data from the Antarctic Dome Fuji ice core. *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2018GL080475, 2019.
- ▲\*Sugiyama S., Minowa M., Schaefer M. Underwater ice terrace observed at the front of Glaciar Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia. *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2018GL081441, 2019.
- ◎▲\*Uemura R., H. Motoyama, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, K. Kawamura, K. Goto-Azuma, S. Fujita, T. Kuramoto,

M. Hirabayashi, T. Miyake, H. Ohno, K. Fujita, A. Abe-Ouchi, Y. Iizuka, S. Horikawa, M. Igarashi, K. Suzuki, T. Suzuki, Y. Fujii, Asynchrony between Antarctic temperature and CO<sub>2</sub> associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications* 9:961. doi: 10.1038/s41467-018-03328-3, 2018.

- ▲\*Bereiter B., Shackleton S., Baggenstos D., Kawamura K., Severinghaus J., Mean global ocean temperatures during the last glacial transition, *Nature*, 553(7686),39-44, doi:10.1038/nature25152, 2018.
- ▲\*Buizert C., M. Sigl, M. Severi, B.R. Markle, J.J. Wettstein, J.R. McConnell, J.B. Pedro, H. Sodemann, K. Goto-Azuma, K. Kawamura, S. Fujita, H. Motoyama, M. Hirabayashi, R. Uemura, B. Stenni, F. Parrenin, F. He, T.J. Fudge, E.J. Steig, Abrupt Ice Age Shifts in Southern Westerlies and Antarctic Climate Forced from the North, *Nature*, 563, 681-685, doi.org/10.1038/s41586-018-0727-5, 2018.
- PAGES2k Consortium (川村, 本山, 植村, 堀内を含む), A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era, *SCIENTIFIC DATA*, 4, 170088, doi: 10.1038/sdata.2017.88, 2017. (オープンアクセス)(国際共著)
- \*Schmidt G. A., Severinghaus J., Abe-Ouchi A., Alley R. B., Broecker W., Brook E., Etheridge D., Kawamura K., Keeling R. F., Leinen M., Marvel K., Stocker, T. F., Overestimate of committed warming, *Nature*, 547 (7662), E16-E17, 2017.
- ▲\*杉山慎, 箕輪昌紘, 伊藤優人, 山根志織, 南極ラングホブデ氷河における熱水掘削, *北海道の雪氷*, 37, 7-10, 2018.(査読無)
- ▲\*山根志織, 杉山慎, 箕輪昌紘, 伊藤優人, 南極ラングホブデ氷河における氷河下の海洋環境, *北海道の雪氷*, 37, 75-78, 2018. (査読無)
- \*本山秀明, 雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動, *気象研究ノート第 233 号*, 193-204, 2017.
- \*本山秀明, 南極氷床内陸ドームふじ基地における特異な気温変動及び熱収支について, *気象研究ノート第 233 号*, 377-386, 2017.

#### A02-2(計画・固体地球班・福田)

- \*香月興太, 瀬戸浩二, 菅沼悠介, Dong Yoon Yang, 湖底堆積物調査における携帯型採泥器具の種類と特徴について, *地学雑誌*(印刷中)
- \*菅沼悠介, 香月興太, 金田平太郎, 川又基人, 田邊優貴子, 柴田大輔, 可搬型パーカッションピストンコアラーの開発, *地質学雑誌*(印刷中)
- ◎▲Suganuma Y., Haneda Y., Kameo K., Kubota Y., Hayashi H., Itaki T., Okuda M., Head M.J., Sugaya M., Nakazato H., Igarashi A., Shikoku K., Hongo M., Watanabe M., Satoguchi Y., Takeshita Y., Nishida N., Izumi K., Kawamura K., Kawamata M., Okuno J., Yoshida T., Ogitsu I., Yabusaki H., Okada M., Paleoclimatic and paleoceanographic records through Marine Isotope Stage 19 at the Chiba composite section, central Japan: A key reference for the Early- Middle Pleistocene Subseries boundary, *Quaternary Science Reviews*, 191, 406-430, 2018.
- ▲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, doi: 10.1016/j.geomorph.2018.05.015, 2018.
- \*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.
- ▲\*Zhao X., Fujii M., Suganuma Y., Zhao Z., Jiang Z., Applying the Burr Type XII Distribution to Decompose Remanent Magnetization Curves, *Journal of Geophysical Research*, 132, doi:10.1029/2018JB016082, 2018.
- \*Nakada M., Okuno J., Irie Y., Inference of viscosity jump at 670 km depth and lower mantle viscosity structure from GIA observations, *Geophys. J. Int.*, 212, 2206-2225, doi:10.1093/gji/ggx519, 2018.
- \*青山雄一, 土井浩一郎, 渋谷和雄, GGOS における南極昭和基地の測地観測の貢献, *測地学会誌*, 第 63 卷 3 号, 211-217, doi:10.11366/sokuchi.63.211, 2018.
- \*Shiramizu K., Doi K., Aoyama Y., Generation of a high-accuracy regional DEM based on ALOS/PRISM imagery of East Antarctica, *Polar Science*, 14, 30-38, doi:10.1016/j.polar.2017.10.002, 2017.
- \*菅沼悠介, 川又基人, 白水薫, 小山拓志, 土井浩一郎, 金田平太郎, 青山雄一, 早河秀章, 小花和宏之, 南極における無人航空機(UAV)を用いた高解像度地形情報取得の試み, *地学雑誌*, 126 卷 1 号, 1-24, 2017.

#### A03 (計画・探査班・野木)

- \*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 (RA-L)*, doi: 10.1109/LRA.2019.2902744, accepted.
- \*Maki T., Y. Noguchi, Y. Kuranaga, K. Masuda, T. Sakamaki, M. Humblet, and Y. Furushima, Low-altitude and High-speed Terrain Tracking Method for Lightweight AUVs, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30(6), 971-979, 2018.
- \*Matsuda T., T. Maki, Y. Sato, and T. Sakamaki, Experimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating

Landmark Navigation by Multiple AUVs, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 288-310, 2018.

- \*Silvano A., Rintoul S. R., Pena-Molino B., Hobbs W. R., Van Wijk E., **Aoki S.**, **Tamura T.**, Williams G. D., Freshening by glacial meltwater enhances melting of ice shelves and reduces formation of Antarctic Bottom Water., *Science Advances*, 4(4), eaap9467, 2018.
- ◎\*Labrousse S., Williams G., **Tamura T.**, Bestley S., Sallee J-B., Fraser A., Sumner M., Roquet F., Heerah K., Picard B., Guinet C., Harcourt R., McMahon C., Hindell M., Charrassin J-B., Coastal polynyas: Winter oases for subadult southern elephant seals in East Antarctica. *Scientific Reports*, 8, 3183, doi:10.1038/s41598-018-21388-9, 2018.
- \***巻俊宏**, 自律型海中ロボット 一魚のごとく, 人工知能, 34(2), 222-227, 2018.
- \***巻俊宏**, AUV: 自律型海中ロボット, 日本機械学会誌, 121(1199), 24-27, 2018.
- \*百留忠洋, **吉田弘**, 澤隆雄, 中野善之, 渡邊佳孝, 福田達也, 中谷武志, 松本宙, 菅良太郎, 依田貴志, 山内由章, 奥田幸人, 江口和樹, 黒岩良太, 森英男, 洋上中継器 (ASV) の開発, *日本ロボット学会誌*, 36(4), 286-293, doi.org/10.7210/jrsj.36.286, 2018.
- \***巻俊宏**, 水中ドローン ~ローコスト AUV は使い物になるか~, *オキシーテック ニュースレター「海」*, 33, 14-18, 2017.
- \***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, *Journal of Geophysical Research*, 122(8), 6277-6294, doi:10.1002/2017JC012925, 2017.

**A04 (計画・モデル班・阿部)**

- ▲\*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*, doi:10.5194/cp-15-981-2019, 2019.
- ▲Nakamura, Y. and \***Oka, A.**: CMIP5 model analysis of future changes in ocean net primary production focusing on differences among individual oceans and models. *Journal of Oceanography*, doi:10.1007/s10872-019-00513-w, 2019.
- \***Kusahara K.**, Reid P., Williams D. G., Massom R., Hasumi H., An ocean-sea ice model study of the unprecedented Antarctic sea ice minimum in 2016, *Environmental Research Letters*, 13(8), 1-9, 2018.
- \***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*, 1-18, 2018.
- ▲\*Goelzer H. 他 30 名 (**阿部** 5 番目, **Greve** 12 番目, **齋藤** 25 番目)(2018): Design and results of the ice sheet model initialisation initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison. *The Cryosphere*, 12, 1433-1460, 2018.
- ▲\*Ohgaito R., **A. Abe-Ouchi**, R. O'ishi, T. Takemura, A. Ito, T. Hajima, S. Watanabe, M. Kawamiya, Effect of high dust amount on surface temperature during the Last Glacial Maximum: a modelling study using MIROC-ESM. *Climate of the Past*, 14, 1565-1581, doi:10.5194/cp-14-1565-2018, 2018.
- ▲\*Kobayashi H., **A. Oka**: Response of atmospheric pCO<sub>2</sub> to glacial changes in the Southern Ocean amplified by carbonate compensation, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33(11), 1206-1229, 2018.
- \*Yamamoto A., **A. Abe-Ouchi**, Y. Yamanaka, Long-term response of oceanic carbon uptake to global warming via physical and biological pumps. *Biogeosciences*, 15, 4163-4180, doi:10.5194/bg-15-4163-2018, 2018.
- \*Sherriff-Tadano S., **A. Abe-Ouchi**, **M. Yoshimori**, **A. Oka**, W-L. Chan, Influence of glacial ice sheets on the Atlantic meridional overturning circulation through surface wind change. *Climate Dynamics* 50:2881-2903, 2018.
- \*Kageyama M. 他 28 名 (**阿部** 8 番目)The PMIP4 contribution to CMIP6-Part 1: Overview and over-arching analysis plan. *Geoscientific Model Development* 11:1033-1057. doi: 10.5194/gmd-11-1033-2018, 2018.
- \***Yoshimori M.**, **A. Abe-Ouchi**, H. Tatebe, T. Nozawa, **A. Oka**, The Importance of Ocean Dynamical Feedback for Understanding the Impact of Mid-High-Latitude Warming on Tropical Precipitation Change. *Journal of Climate* 31:2417-2434. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0402.1, 2018.
- ◎▲\*Seddik H., **R. Greve**, T. Zwinger, S. Sugiyama: Regional modeling of the Shirase drainage basin, East Antarctica: full Stokes vs. shallow ice dynamics, *The Cryosphere*, 11, 2213-2229, 2017.

**B01 (公募・大気・猪上)**

- ▲\*Sato K., **J. Inoue**, S. P. Alexander, G. McFarquhar, A. Yamazaki, Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 11406-11413, 2018.

**B01 (公募・大気・西澤)**

- ▲\***Nishizawa S.**, Y. Kitamura, 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・二橋)** (◎A01-1 参照)

**B03 (公募・環境指標・服部)**

- ▲\*Gautier E., Savarino J., Hoek J., Erbland J., Caillon N., **Hattori S.**, ... & Farquhar J., 2600-years of stratospheric volcanism through sulfate isotopes. *Nature Communications*, 10(1), 466, 2019.

## 特許

特願 2018-240581「土砂採取装置」(2018年12月25日出願) 菅沼悠介(極地研), 香月興太(島根大), 田邊優貴子(極地研)。

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) 欽守直樹(NEC), 平陽介, 板木拓也, 前林利, 竹島哲, 戸谷健二。

## 書籍

猪上淳, 昭和基地を襲ったブリザード級の暴風, 世界気象カレンダー2019年版(分担執筆、「2月」), ジャムハウス, 2018。

須藤齋, 「海と陸をつなぐ進化論」, BLUE BACKS, 講談社, 2018年12月19日出版。

堀内一穂, 古環境・古気候研究:(日本加速器学会編)加速器ハンドブック, 丸善出版, 459-460, 2018。

奥野淳一, 図説地球科学の事典(後氷期地殻変動)(分担執筆), 朝倉書店, 248, 2018。

大島慶一郎・須藤齋・北川暁子編: 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, 総ページ288p(2018)。(本領域執筆者: 勝又、大島、川合、池原、関、茂木、真壁、高尾、須藤、川村、飯塚、杉山、福田、三浦、青木、藤井、野木、佐藤、草原、丘、齊藤、グレーベ)

三浦英樹, 南極半島の生いたちを語る地形・地質と火山活動, 極地, 53(2), 4-13, 2017。

## 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: grantarctic.jp, 英語版: grantarctic.jp/en

ブログ: grantarctic.jp/gr\_news、ツイッター: <https://twitter.com/GRAntarctic17>

ほか、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) The First GRAntarctic International Symposium and the Ninth Symposium on Polar Science (第一回新学術領域研究『南極の海と氷床』国際シンポジウム/第九回極域科学シンポジウム ジョイントシンポジウム), 東京, 2018年12月3-4日。

(共催) International Symposium on Cryosphere and Biosphere (雪氷圏と生物圏に関する国際シンポジウム, 国際雪氷学会主催), 京都, 2018年3月14-19日。

## プレスリリース

「地球規模の寒冷化を引き起こす大規模噴火記録を復元」, 服部祥平, 2019年2月4日。

「AI(人工知能)を活用した微化石の正確な鑑定・分取技術を確率-高速自動化した革新的な地層解析に道筋」, 板木拓也, 2018年12月3日。

「北極から南極へ気候変動が伝わる2つの経路 ~南極アイスコアのデータから立証~」, 東久美子, 川村賢二, 藤田秀二, 本山秀明, 平林幹啓, 植村立, 2018年11月29日。

「南極海での船上気象観測で豪州の低気圧予報を改善 ~豪州の観測船と日本のデータ同化による南極予測可能性研究のさきがけ~」, 猪上淳, 2018年10月23日。

「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 一過去72万年間の南極と周辺海域の温度変動を復元」, 植村立, 本山秀明, 川村賢二, 東久美子, 藤田秀二, 平林幹啓, 阿部彩子, 飯塚芳徳, 2018年3月7日。

## メディア取材協力・掲載情報等

「水中ロボコン入門 第1回 水中ロボコンのルールと参加機体の特徴を知ろう!」, 山縣広和, ロボコンマガジン3月号, 122, 50-53, 2019年2月15日。

「化石の鑑定にAI導入で、分析効率が向上!」, 板木拓也, 子供の科学, 2019年2月10日。

「5億年前から生きている「不思議な生物」が教えてくれること」, 板木拓也, 講談社現代ビジネス(WEB), 2019年1月4日。

「細かな作業はお手の物: 深層学習を活用した微化石の鑑定・分取システム」, 板木拓也, Marvin(WEB) 2018年12月27日 (<https://marvin.news/5260>)。

「AIで化石鑑定 ロボが分取」, 板木拓也, 日刊工業新聞, 2018年12月18日。

「AI活用 地層解析に革命」, 板木拓也, 科学新聞, 2018年12月14日。

「AIで高精度な地層解析を実現 微化石を自動で分取」, 板木拓也, 電経新聞, 2018年12月10日。

「駿河湾の超巨大ザメ、4Kで撮影成功」, 巻俊宏, 朝日新聞デジタル, 2018年12月4日。

「東大、自律海中ロボ開発 深度300m対応・漁船運用可能」, 巻俊宏, 日刊工業新聞, 2018年12月3日。

「ロボコン OBOG の履歴書 第17回 水中ロボットコンベンション」, 山縣広和, ロボコンマガジン11月号, 120, 60-61, 2018年11月1日。

「情報・システム研究機構 国立極地研究所 南極氷床コアから過去・未来の地球環境変動を知る」, 本山秀明, “特集 大学共同利用機関 大学とともに未来へ進む”, 国大協広報誌 国立大学, Vol.50, 2018年9月。  
(<http://www.janu.jp/report/koho/50gou.html>)

「Let Things Work Themselves Out～Exploring Earth's Past Present Through Ice」, **本山秀明**, “Future Story Explore INNER VIEW”, Shake Hands, RION, Vol.7, 2-3, 2018年9月. (<http://rion-sv.com/shakehands/Rion-ShakeHands-007-E-view.pdf>)

「人生はなんとかなる、掘削はなんとかする～氷から探る地球の過去と未来」, **本山秀明**, “特集 探る INNER VIEW”, Shake Hands, リオン, Vol.7, 2-3, 2018年8月. ([http://svmeas.rion.co.jp/shakehands/shakehands\\_vol7\\_閲覧用.pdf](http://svmeas.rion.co.jp/shakehands/shakehands_vol7_閲覧用.pdf))

「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**, 日本経済新聞朝刊, 2018年7月22日.

「南極の氷で探る、72万年の気候変動 未知の周期発見」, **本山秀明**, 日本経済新聞電子版, 2018年7月21日.  
対談「海鷹丸は今冬も南極海へ 国家事業である南極地域観測事業の一翼を担う」, **北出裕二郎**, **茂木正人**ほか, 楽水, 863, 2018年7月.

「冰山と流氷」, **杉山慎**ほか, 朝日新聞 ののちゃん do 科学, 2017年10月14日.

「氷床調査は命懸け」, **菅沼悠介**, 産経新聞, 2017年9月4日.

「高知大と極地研 南極公開シンポジウム」, **池原実**ほか, 文教ニュース, 2017年8月14日.

「南極の氷の世界紹介 高知市 極地研と高知大シンポ」, **池原実**ほか, 高知新聞, 2017年7月2日.

## 一般向けアウトリーチ企画

(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、将来を探る～」東京大学駒場、2019年7月20日から9月29日

(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年11月2日.

(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年3月11-13日.

(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年2月17日. (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年7月26日.  
(池原、野木が主企画者、ほか川村、野木、菅沼、奥野、田村が講演)

## 一般向け講演

南極中継

**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, 2018年10月14日.

**川村賢二**, アイスコアから知る過去の気候と温室効果気体の変動、バーチャルラボラトリ講習会、東北大学大気海洋変動観測研究センター, 2018年9月.

**川村賢二**, 弘前大学 基礎ゼミナール, 弘前大学文京町キャンパス, 2018年5月21日.

国立極地研究所サイエンスカフェ:5件

北海道大学低温科学研究所, 「低温の不思議な世界を探検しよう!」, 2018年6月2日.

・南極(-50℃の世界)を体験しよう、南極・北極・世界の氷河・氷床を学ぼう

ほか一般講演 合計70件

## 受賞

津滝俊, 日本雪氷学会 2018年度平田賞「カービング氷河の急激な変動メカニズムの解明」 2018年9月

**大島慶一**, 第11回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) 「海洋に関する顕著な功績」分野, 極域海洋での中深層水形成・循環の解明, 2018年8月

影沢歩友子(指導教員:**小達恒夫**, **真壁竜介**), Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean 2018, Student Poster Award, 「Biogeochemical cycling in the subsurface chlorophyll maximum off Wilkes Land, East Antarctica, during the austral summer」, 2018年4月

**川村賢二**, 日本第四紀学会学術賞「氷床コア中の気体分析による高精度年代測定法の確立と氷期-間氷期サイクルの研究」 2017年8月

**青木茂**, 日本気象学会 2017年堀内賞「南大洋における大気・海洋結合系の長期変動に関する観測的研究」, 2017年8月

## 6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### 計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と研究項目との関係

本領域の計画研究班は研究項目 A に配置し、それらの主な研究対象や項目 A 内での連携関係は次の通りである。

- ・研究項目 A01：熱-物質リザーバ南大洋とその変動：南極の「海」の観測や試料解析に基づく研究を行う 3 班で構成され、海洋観測での A01 内や A03(探査班)との連携、海と氷の境界領域の観測や試料・データ共有での A02(氷床班・固体地球班)との連携、各種のプロセスや相互作用解明のための A04(モデル班)との連携を進めている。
- ・研究項目 A02：水-熱リザーバ南極氷床とその変動：南極の「氷」の観測やコア試料分析に基づく研究を行う 2 班で構成され、上記の 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 B01 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 モデル班との連携を進めている。
- ・研究項目 A03：未探査領域への挑戦（探査班）：探査が困難な氷下の海洋観測や上空からの氷床・地形の観測などを、新技術の開発と導入によって可能にする単独の班であり、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 と連携している。
- ・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）：南極環境システムの構成要素（氷床・海洋・大気・生態系等）の状態や変動、相互作用を表現できるモデルを A01～03 と連携して構築し、過去から現在のデータによりモデルを検証しつつ種々の相互作用やメカニズムの理解、長期の将来予測を行う。単独の班であり、全ての計画研究班と連携している。

本領域の公募研究は研究項目 B に配置し、それらの主な研究対象や計画研究との連携関係は次の通りである。

- ・研究項目 B01：大気の物理とモデリング：大気や降雪に関わる最新の数値モデルや解析を軸とした 3 課題からなり、大気によるエネルギー・物質循環や、降雪、氷床表面質量収支などの研究で A02、A04 と連携している。
- ・研究項目 B02：各種の衛星観測：南極沿岸部や南大洋を人工衛星から広域観測する 2 課題からなる。海洋循環や海水生産、底層水生成に関する研究で A01 と連携している。
- ・研究項目 B03：新しい観測・分析手法を用いた研究：アイスコア中に新たな環境指標を見出す基礎研究を進める 1 課題からなり、A02 と連携している。

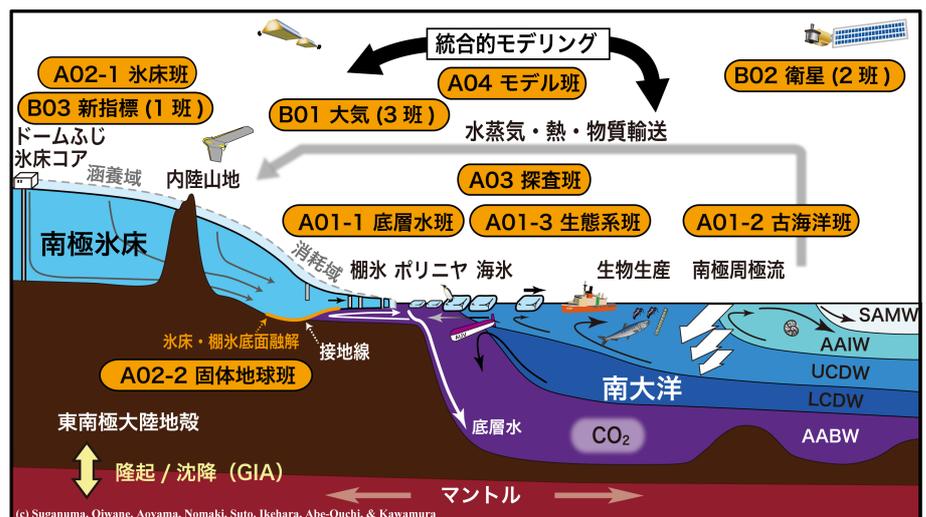


図1：南極環境システムの構成要素の横断面図。計画研究班（A）および公募研究（B）の主な研究対象領域を示す。

### 研究組織間の連携状況

以下に、本領域の連携状況を主なテーマごとにまとめる。

- ・氷と海の境界域における観測とモデルの連携（氷床-海洋相互作用）

底層水班(A01-1)と探査班(A03)が連携してリュツォ・ホルム湾の海水温・塩分などを詳細に観測し、モデル班(A04)が外洋-沿岸の海洋循環や湾内の循環、棚氷融解などを計算できる海洋-棚氷モデルを開発した。底層水班(A01-1)が取得した音響測深データから探査班(A03)が海底地形図を作成しモデル班(A04)に境界条件として提供した結果、観測された温度・塩分の3次元分布をモデルで極めて良く再現することに成功した。このモデルは外洋から沿岸域への暖かい深層水の流入を克明に描き出し、白瀬氷河末端の底面融解量を推定した。今後の連携観測によってモデルの検証を進め、また、過去数十年の時間変化もモデルで再現し、他班がコンパイルする過去の観測データとの比較検証を行う。

一方、氷床班(A02-1)と固体地球班(A02-2)、探査班(A03)の連携でラングホブデ氷河とその周辺の観測を行い、熱水掘削によって棚氷にあけた孔を用いて棚氷やその下の海洋（氷の底面融解がまさに起こっている場所）の温度や塩分などのデータを得た。その一方、無人飛行機による表面地形（雪氷、露岩）の精細なマッピングも行われた。棚氷内や下の海洋の温度などはその後も無人での通年観測を続けており、今後モデル班(A04)と連携して解析する。また、氷床班(A02-1)と固体地球班(A02-2)が連携して棚氷直下の海底堆積物を採取した。今後その分析から過去の氷床拡大時期の推定を目指す。

・氷床質量の近年および長期変化に関する観測とモデルの連携

氷床班が取得した南極の沿岸から内陸（ドームふじ周辺）にかけての雪面高度の現場観測データを、過去のデータとともに解析し、過去数十年にわたる表面質量収支データとして**モデル班**(A04)や大気関連の**公募3課題**(B01 庭野、猪上、西澤)に提供し、氷床の涵養に関わるモデルの再現性の検証や、2012年頃に見られた降雪増加の要因（人為起源か自然起源か）の解明に関して連携を進めている。**固体地球班**(A02-2)が精密に観測した重力や地形のデータをあわせ、今後、氷床全体の質量変化を定量的に見積もる。また、**氷床班**(A02-1)が実施した内陸から沿岸にかけてのレーダー測深データを用いて、今後**固体地球班**(A02-2)と連携して氷床下の詳細基盤地形図を作成する。このようにして氷床モデルの境界条件として重要な涵養量と基盤地形のデータを整備し、**モデル班**(A04)による南極氷床全体の質量の増減やティッピング・ポイントに関するシミュレーションに供する。

・底層水生成域および季節海水域における海洋物理・化学・生物総合観測

沿岸付近では海水の生産に伴って底層水が生成し、海水が生物や有機物、鉄などを取り込む。この海水が沖合に運ばれ融解する際に生物活動が活発化し、新たな有機物が沈降する（炭素の深層隔離）。これらのプロセスの解明のため、**底層水班**(A01-1)と**生態系班**(A01-3)、**公募課題**(B02 溝端)の連携で、海洋物理・化学・生物の船舶観測に加え、海水の採取や沈降粒子の補足機能を備えた係留系を、東経110度沿いの季節海水域に3系、ケープダンレーの底層水流の通過域（海底渓谷沿い）に3系、底層水の生成域に1系設置した。物理・化学データのほか生物の種類や総量、粒子サイズや質量（沈みやすさに関係）を通年で把握することを目指している。**底層水班**(A01-1)、**古海洋班**(A01-2)、**生態系班**(A01-3)は沿岸から沖合で海水の採取も行っている。観測データの解析のため、**公募課題**(B02 二橋)が衛星観測による海水推定の新アルゴリズムを開発中である。

・AUV+回収システムの開発と運用方法

**探査班**(A03)が各班の要望を取り入れたAUV設計と組立を行い、**底層水班**(A01-1)、**生態系班**(A01-3)と各船舶での運用に向けて議論した。令和2年のテスト運用に向け、海鷹丸において実地調査を行い、具体的な投入・回収方法の検討に入った。

・スーパー間氷期に関わる南極氷床と気候のデータ・モデル連携研究

古環境復元と年代精密統合 --- 気候-氷床モデリングの境界条件や比較データとして、**氷床班**(A02-1)がドームふじアイスコア分析による気温と海面水温、ダスト、メタン濃度などの72万年間にわたる復元や、CO<sub>2</sub>復元に向けた分析技術開発、**古海洋班**(A01-2)が海底コアデータによる300万年のCO<sub>2</sub>推定や、南大洋海底コアの採取と分析を進めている。アイスコアと海底コアに含まれる共通の指標により年代精密統合を行う準備を進めている。一方、新たな古海洋環境指標の開発のため、**生態系班**(A01-3)がセジメントトラップを表層直下と海底直上に設置し、**古海洋班**(A01-2)が堆積物コアの微化石の分析を進めている。**生態系班**(A01-3)と**古海洋班**(A01-2)、**底層水班**(A01-1)が連携し、海水の存在を示す生物的指標を探索している（2種の珪藻に海水中でしか見られない連鎖形態を発見）。アイスコアの環境指標に関して、**公募課題**(B03 服部)と**氷床班**(A02-1)が雪氷試料採取や分析で連携している。

南極氷床モデル --- 氷床質量変化に関わる降雪、流動、消耗、海洋による末端融解、地殻変動などの諸プロセスの詳細化を**モデル班**(A04)が進め、上述した各連携による知見を取り入れる準備を進めている。また、**氷床班**(A02-1)と**古海洋班**(A01-2)によるCO<sub>2</sub>等のデータを入力としてスーパー間氷期と前後の気候シミュレーションを行い、結果を世界的な4つの南極氷床モデルに共通の境界条件として与え、南極氷床変動の数値実験を行うための準備を進めている。

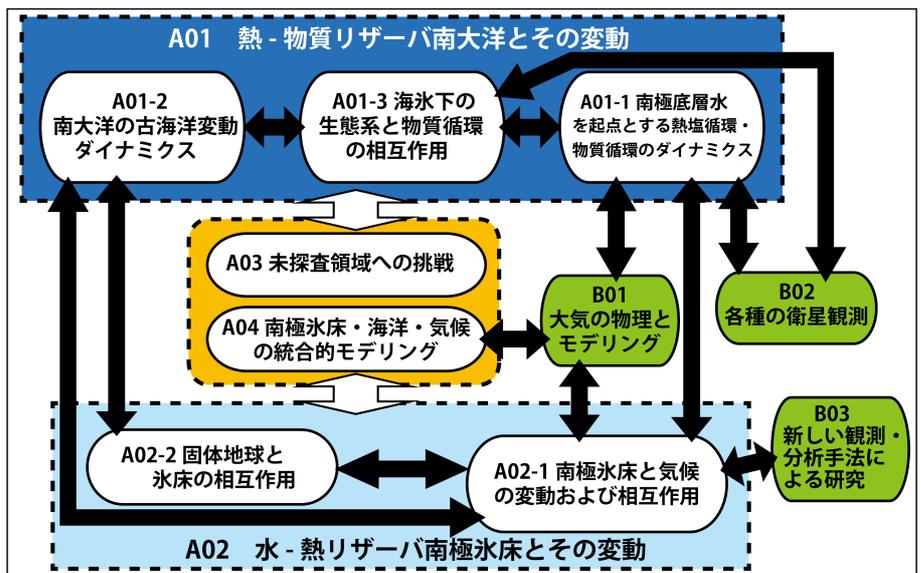


図2：計画研究と公募研究、研究項目の連携関係。

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。

## 7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

### 南極若手会

キックオフ workshop の開催時に若手勉強会の発足に向けた支援を行った。発足後は本領域の若手研究者が主体的に運営を行っており、現在までに2回の合宿形式での勉強会が開催された。日本地球惑星科学連合大会等の学会や領域年次報告会の際にも若手勉強会での学際的な議論が活発に行われている。領域外を含む参加者から高いニーズがあり、自由な議論から南極環境システム学の次世代を担う研究コミュニティの広がりが期待される。

### 国際シンポジウム

前述の国際シンポジウムには計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

本領域の若手研究者の研究面での国際競争力強化のため、若手国際学会派遣事業と若手研究者派遣事業を実施した。前者は11件実施し、若手研究者に国際学会での発表経験の機会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、より教育効果の高い派遣となっている。後者は2件実施し、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・本格共同研究に繋がるようなコネクション作りに従事する派遣となっている。

### 学際的若手教育事業

本領域には多数のフィールドワークが計画されているが、予算の制限により、参加できる人数には限りがある。一方で、学際的な視点を持つ若手研究者を育成するためには、例えば数値モデル研究者をフィールドワークに参加させ、南極観測の現場を肌で感じ自ら手を動かしながら南極環境システム学を考える必要がある。数値モデルの若手研究者を南極海洋観測航海に参加させる試みを2件行った。

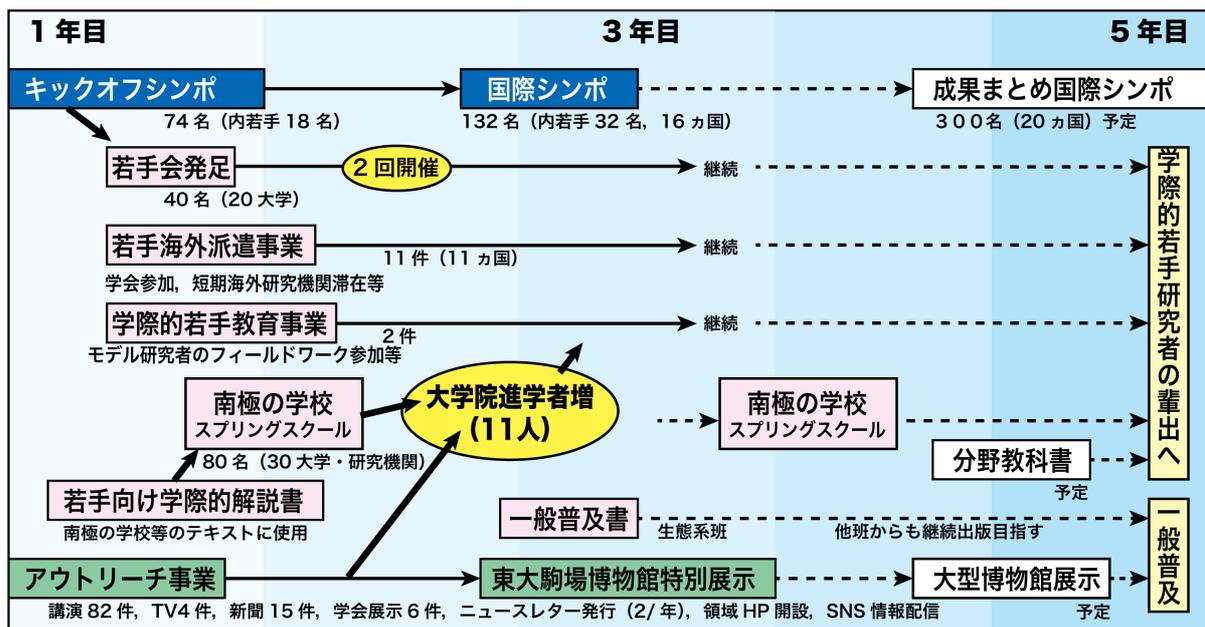
### 若手向け学際的解説書

大学院に進学して、本領域が推進する南極環境システム学の研究を行う際に、その導入部分を担う教科書が存在しなかったため、本領域の主要メンバーの分担執筆により、若手向け学際的解説書・入門書を出版した。この解説書は本領域の関連研究室に常置されるのはもちろん、前述の「南極春の学校2018」において講義の教科書として使用された。多くの受講者から好評であり、研究分野を超越した視点を持つ若手研究者育成には非常に有効な投資となった。

### 南極の学校 スプリングスクール

次世代を担う多くの学生を本領域に誘い込み、さらに南極環境システム学を軸とした国際的・学際的センスを持つ若手研究者を育成する事を目的として、南極春の学校2018を開催した。本領域に興味を持つ31名の学部生と24名の大学院生が参加し、この参加者からは前述の南極若手会に多くの学生が参加する事となり、さらに本領域メンバーの関連する大学院に累計11名が進学した。参加者には学部学生も多く、この余波は今後も続くと考えられる。

以上のように、学生・若手研究者のそれぞれ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事により、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ると期待される。



## 8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

### 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

東京海洋大学の海鷹丸を総括班経費により傭船し、領域が推進する海氷縁の海洋物理・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月及び2019年1月に実施した（傭船関連費用9,947千円）。これらの航海では、生態系班と古海洋班、底層水班、公募課題の各種観測を連携して実施し、なかでも大規模な観測であった係留系観測は、班間の議論により観測目的や項目や設置場所を決定し、全て設置に成功した。

#### ・若手育成（2,900千円）・国際支援（9,377千円）

次世代の分野横断型研究者の育成を図るため、若手を国際学会や野外観測に派遣した。また、上記の海鷹丸観測に4大学から多数の大学院生が参加し、その旅費を総括班経費で支援した。

#### ・領域全体会合（3,720千円）

キックオフミーティングや年次報告会・総括班会議を開催し、有機的連携と領域研究の効率的推進を主導した。

#### ・アウトリーチ活動（4,246千円）

学会ブース、ニュースレター、ホームページなどにより本領域の目標や成果を発信した。

### 領域内で共有する設備・装置・試料等の活用状況（総括班以外の予算）

#### ・無人探査機の活用（A03: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・固体地球班が協力し、無人水中探査機の開発を進めている。また、海氷上からの海底地形マッピングを目的とした小型無人水中探査機（有索）と、空中からの精密地形マッピングのための回転翼・固定翼の無人航空機は、実際の南極での観測に使用し、航空機については地上の検証点を用いた測量方法改良と他手法との精度比較を実施した。

#### ・白鳳丸による連携観測（A01: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乗船して連携観測を行った。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（例えば、底層流が作った可能性がある深海底の峡谷地形）。

#### ・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（A01-2 古海洋班が導入）や酸素計・自動採水器（A01-1 底層水・A01-3 生態班が導入）を各班が持ちより、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する予定である。

#### ・AIを活用した「自動選別・集積システム」（A02-2 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領域の年次報告会で紹介され、その場の議論を経て、固体地球班による氷床融解年代測定に応用することが決まった。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、環境負荷の低減を狙う。

#### ・南極沿岸・南大洋での海底堆積物試料の採取と分析（A01-2 古海洋班・A02-2 固体地球班・A02-1 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ている。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ている。モデル班には推定した過去の海水温変動などを共有し、当時の気候変動メカニズムに関する研究を進めている。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ている。

## 9. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 住 明正 東京大学サステナビリティ学術連携研究機構 特任教授

本研究は、海洋観測船による現場観測やアイスコアの解析により与えられる観測データを、気候-氷床結合モデルを用いて総合的に解釈し、将来の南極の気候変動を推測することが目標になっている。その意味で、まずは、日本船 4 隻および外国船 2 隻による南大洋の観測が無事終了したことは評価したい。現在のところ、個々の観測船の結果が出ているが、今後、各観測船の測定結果を合わせた総合的な結果が出てくることを期待したい。そのほかでは、各班で重要な研究成果が出されていると思う。特に、海底コアデータの自動分取システムの確立や、ドームふじのコアデータを用いた 72 万年にわたる気温や海面水温の復元などは評価したい。各班の協力も、それぞれの分野で取り組まれていると思う。探査技術の開発も地道に活動していると認められる。

モデリングの分野でも興味深い結果が出ていると思う。特に、南大洋付近の温暖バイアスは、世界中のモデルで共通の欠点であり、それが除去できたことは高く評価できる。また、氷期-間氷期の遷移過程をシミュレーションできたことは、本来の意味での南極の気候システムの解明に一步近づいたことであり高く評価したい。モデルと観測データの比較なども取り組まれており、今後の発展が期待できると思う。

後半の 2 年は、最終成果の取りまとめに向けて、精力的に取り組んでもらいたい。

### 藤井理行 国立極地研究所 名誉教授

本領域は、順調に進展していると評価でき、計画期間内での目的達成を期待できる。

南極氷床と南大洋を熱-水-物質の巨大リザーバと考え、その変動の実態と全球環境変動との相互作用・メカニズムを理解するのは、様々な点で大きなチャレンジである。幾つかの観点から評価を行う。

- 1) **領域の運営**：総括班の他、4 つの研究項目に 7 つの計画研究班を配置するとともに、それを補完するように 6 課題の公募研究を取り込んでいる。総括班は、計画研究班の代表者らから構成され、運営委員会で領域全体にかかわる事項を決定している。研究の公募もその一つであるが、7 の計画研究に対して公募研究が 6 とは少なすぎる。公募時点で、本領域への認知が低かったことが理由と思われるが、今後の公募では、さらに多くの関連研究者の参加が望まれる。
- 2) **研究班間での連携**：異なる研究分野間の連携は実が上がりにくいだが、総括班の主導により、連携が良く機能していると判断される。観測分野では、海洋観測船や係留系など観測プラットフォームの最適な利用など、また、研究分野では観測とモデル間の統合研究支援などがうまく行われ、結果を出し始めている。
- 3) **研究成果**：計画研究班の一部に、観測や解析での当初計画からの遅れが見られるが、大きな問題ではなく、今後取り戻せる範囲と言える。全体として、質の高い研究が進み、順調に研究の成果が出ていると判断できる。ドームふじアイスコアの解析による過去 72 万年にわたる南極の気温と南大洋中緯度の表面海水温を復元、異なる複数の化学トレーサーによる南極底層水の年齢推定や混合過程、観測とモデリングによる白瀬氷河の末端海域での氷床・海洋相互作用、ラングホブデ氷河での熱水掘削による氷河・海洋相互作用など、多くの重要な知見が得られているのは評価できる。また、AI を活用した微化石の自動分取技術の確立、無人海中探査機 (AUV) の開発など、今後の研究の進展に繋がる手法の開発も順調に進展していると言える。
- 4) **若手人材育成**：本領域の審査段階で指摘された事項である。総括班が主導して、若手海外派遣事業、南極-春の学校、若手向け学際的解説書など多岐にわたる事業を推進したのは評価できる。「南極-春の学校」では、多くの学部学生も参加し、その 1/3 ほどが本領域メンバーの大学院に進学するなど、成果を上げている。
- 5) **今後の展開**：これまで、当初計画に従って順調に進捗し成果を上げているので、基本的には大きく変更することなく領域研究を進めて行くのが良い。本領域の 5 年の研究期間のゴールとして、国際的にもインパクトのある成果を期待したい。特に、本領域研究の課題名とした「熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南極氷床と南大洋」をどのようにまとめ上げるのか。総括班のリーダーシップが求められる。

## 花輪公雄 東北大学 名誉教授

評価者として本中間評価報告書では、研究の進捗、連携研究の推進、若手研究者の育成、本領域の運営体制の4点についてコメントする。

**[研究の進捗]** 総括的に言えば、すべての計画班・公募班で計画通り順調に研究が進展していると判断している。

本領域のフィールドは言うまでもなく環境が厳しい遠隔地であるため、これまで十分な観測が行われてきたとは言い難く、本領域自身で観測を行う必要がある（A01：底層水班・生態系班・古海洋班）。このグループは国内研究船4隻の動員を確定させ、加えて海外研究船の使用も実現することとなった。今年の航海では観測の要である係留系の設置が実行され、来年の航海での回収が待たれている。また、陸上にあつては氷床変動観測や絶対重力場の精密観測なども行われた（A02：氷床班・固体地球班）。世界的に見て、現在これだけの資源を南極域観測に投資している国はなく、我が国が南極域研究で世界をリードする立場となることが期待される。

フィールド研究を支えるのが新探査機器の開発である（A03：探査班）。海中探査機（AUV）と航空機（ドローン）に大別されるが、双方ともロードマップに従い現在開発中である。AUVは諸外国での開発がリードしている状況であり、本課題では新発想での開発を望みたい。また、フィールド研究をラップアップし変動の機構を検証するには数値モデルによるアプローチが必要不可欠であるが、約10万年周期の氷期-間氷期サイクルの再現に成功したグループが中心となっている（A04：モデル班）。この班では、多数の課題が設定されているが、底層水班や探査班のリュツォ・ホルム湾の観測結果を再現するなど、既に他班と連携した成果も挙げている。

**[連携研究の推進]** 本領域では、「連携」を特に意識して事業を進めていると判断している。連携には「異分野間」連携（学際的研究）と「班間」連携に大別できるが、そもそも計画研究各班の構築時に異分野間連携を意識したメンバー構成としたことは特記してよいであろう。各班間および公募研究との連携は、項目6に記載の通りであるが、各班の成果が連携する班の成果を一層支援するという構造ができています。次年度から新しく始まる公募研究も同様の構造を持つよう組織化されることが望まれる。

**[若手研究者の育成]** 項目3・7に記載の通り、本領域は学部学生から博士研究員（ポスドク）を含む若手研究者までを対象とし、「南極若手会」の組織化や海外派遣支援事業など種々の事業を進めている。中でも、本領域に参加する研究者等が講師となり、3日間の合宿形式で行われた「南極 春の学校 2018」には、計55名もの学部・大学院学生が参加し大成功であった。そして参加した学部学生のうち11名が、本領域担当者が所属する大学院に進学したことは特筆に値し、この取り組みを高く評価したい。本事業は研究期間中継続して実施することを望みたい。海外派遣支援事業では若手研究者が自らの意思で応募する必要があるが、採択件数を少なく設定しているためか、今のところ多くの応募があるわけではない。今後シニア・中堅の事業担当者が、積極的に応募を推奨することが望まれる。

**[本領域の運営体制]** 代表者は本領域が走り始めた直後に南極域観測事業越冬隊に参加したが、緊密な情報交換を頻繁に行い、スカイプを利用して運営委員会に参加するなど、代表者不在の影響は全くなかった。運営委員会には総括班メンバーに加え多くの中堅研究者が参加しているが、分担した重要な役割を十分にこなしていることは大変好ましい。

## 10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

### 領域の現状総括と今後の推進方策

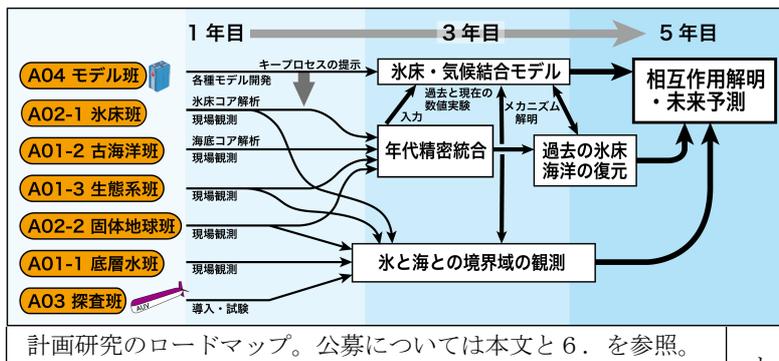
本領域は、南極氷床と南大洋を熱-水-物質の巨大リザーバと形容し、その変動の実態と全球環境変動との相互作用・メカニズムを理解するため、4つの研究項目に7つの計画研究班を配置し、それらを公募研究（3項目6課題）が補完する構成を敷いている。様々な時間・空間スケールで相互作用しながら変化し、全球環境に莫大な影響を与える「南極環境システム」の理解と予測のため、今まさに起こっている現象の把握と、過去の大変動や全球気候との関係の解明を両輪とし、モデリングを含めて統合的に進めることを基本的な戦略として研究を進めてきた。

領域が発足して約2年が経過し、各班の報告書の通り、観測とモデルの両面で連携を含んだ計画研究が順調に進捗している。公募課題は当初想定より数が少ないが、採択された課題はいずれも計画研究をうまく補完するもので、計画研究との連携が良く機能している。観測どうしやモデル分野との連携については、例えば、南大洋での係留系観測について、計画研究班だけでなく公募班も加わって物理・化学・生物/物質の学際的観点から仕様や設置点を議論するなどの連携が進んだ。また、3年目以降に予定していた氷床-海洋相互作用の観測とモデルとの連携が2年目に開始し、急速な氷河の底面融解と暖水のローカルな相互作用のみならず、外洋の海洋循環の重要性も見出されるなど、年次を前倒して進捗している部分もある。論文出版はこれからの成果が多いが、これまでの論文成果には *Nature* やその姉妹誌への掲載もあり、その中に氷床班-モデル班連携の成果もあるなど、地球科学分野として突出した部分もある。一部の班に試料分析の順番待ちなどによりデータ創出のペースが鈍い部分もあるが、全体として計画を前倒した質の高い進捗が見られている。総括班の連携促進や若手育成についても、発足直後から「南極 春の学校」開催や総説集出版といった強化策を新たに決めて進めたことや、氷床-海洋相互作用を中心テーマとした国際シンポジウムを一年前倒して開催したこと、分野外のフィールド観測への参加支援、海外の学会参加・機関訪問・動向調査の支援などの施策が効果を発揮している。

以上の現状から、今後の研究領域推進の基本方策は変更の必要はなく、領域発足時の方策およびロードマップを堅持して進めていくことが妥当であると考えている。今後の観測における当初計画からの主な変更点は、ごく最近の衛星観測から**東南極氷床で質量損失が最も大きいと言われているトッテン氷河**の沖合で、海洋観測を大きく強化することである。底層水班の中間評価報告書に詳しく記載している通り、この流域では西南極と同様に氷床底が海面下にあるため海洋による融解が起こりやすい状況にあり、研究の緊急性が高まっていると判断した。そのため、特に底層水班の人員配置（観測研究者の探査班からの移動、新たなモデル研究者の参加）や経費の変

表：計画研究班および総括班の年次計画（過去分は実績を示す）。連携については本文および6.などを参照。

	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度
X00総括/ 国際支援班	キックオフシンポジウム	国際シンポジウム	中間評価		国際シンポジウム
	← 運営会議開催・南極俯瞰セミナー開催・計画班連係促進支援 →				
	← 海外研究者招聘・研究者海外派遣・国際シンポジウム開催支援 →				
	南極 春の学校2018	若手フィールド支援	春の学校2020/若手フィールド支援	若手フィールド支援	
観測航海	海鷹丸・しらせ	白鳳丸・海鷹丸・開洋丸・しらせ・マリオン(仏)・JOIDES Res.(米)	白鳳丸・海鷹丸・みらい・しらせ	海鷹丸・しらせ	しらせ
A01-1 底層水班	← 底層水生成過程の観測 →		← 底層水の循環・混合過程の観測 →		
	← 底層水を起点とする物質・栄養塩循環過程の観測 →				
	← 棚氷・海洋相互作用の観測(船上観測、係留系) →				
A01-2 古海洋班	← セディメントトラップ沈降粒子観測 →		← 沈降粒子の生物地球化学分析 →		
	海底長尺コア採取(仏・米)		海底コア・懸濁粒子等採取		
	← 海底コア解析 →				
A01-3 生態系班	← 観測機器準備 →		← 海水採取・生物相解析 →		
	漂流系観測①		漂流系観測②	漂流系観測③	
	タスマニア海鳥調査		タスマニア海鳥調査		
A02-1 氷床班	← 解析装置準備 →		← アイスコア解析 →		
	棚氷・海洋観測①	棚氷・海洋の通年無人観測	氷河・棚氷・海洋観測②	氷河・棚氷・海洋の通年無人観測	
	ドームふじコア回収・氷床探査	内陸雪氷総合観測	氷床流動・表面質量収支解析	内陸雪氷観測	
	← 各種観測・衛星データ解析 →				
A02-2 固体地球班	← 機材準備・衛星データ等予備解析 →				
	← 氷河地形・地質・測地学的調査、沿岸、大陸棚調査 →				
	← 取得試料・データ解析、衛星データ解析、氷床モデル構築 →				
	宗谷沿岸	トロール(露)・マイトリ(印)基地	ジャンボゴ(韓)/マロスツクリ(伊)基地	デービス基地(豪)	
A03 探査班	← 測器導入 →		← 各種観測・データ解析 →		
	← 応用・発展観測 →				
A04 モデル班	← 大気海洋結合気候モデルによる数値実験・解析 →				
	← 氷床-海洋相互作用モデルと氷床モデル数値実験・解析 →				
	← 海洋物質循環・水同位体モデルなどによる数値実験・解析 →				
公募研究	← 国際気候モデル比較プロジェクトCMP実験・解析・提出 →			← IPCC第6次報告書への貢献 →	
	第1期(3項目6課題)			第2期	



更を行う。当海域は海鷹丸としらせのアクセスが良く、従来から観測している東経110度線に近いので、生態系班・古海洋班との連携は引き続き進められる。一方、リュツォ・ホルム湾とそこに流れ込む氷河は、前述した観測・モデル連携による成果に見られるように、氷床-海洋相互作用のモデルケースとしての重要性が高く、この部分に関しては引き続き氷床班と固体地球班、底層水班、探査班の連携で観測を発展させつつ、計画通りモデル班との連携を開始する。観測の国際連携も進める。

東南極氷床の質量収支の現状把握と変動解析にとっては、過去数十年の広域表面質量収支や、沿岸部の氷流、氷縁位置、重力変化などの把握が重要であり、新たな観測とともに過去の南極観測や衛星観測のデータの解析に引き続き取り組む。特にこの部分に関連して、計画研究に不足している大気科学を補うため現在公募課題3件が走っており、それらとの連携により最新の大気モデルの南極域への応用と検証にも今後進む。後半の公募期間にも引き続き大気科学の研究者を公募研究で補充するとともに、氷床変動に関する衛星観測の人材も公募研究での補充を図る。モデル班から提示された、氷床流動モデリングにおける基盤地形の精緻化の重要性を考慮して、これまでの2カ年にわたってレーダーによる氷床測深データの取得と解析を続けてきた。今後は固体地球班と連携した高度な地形解析を展開する。南極氷床に関する最新の観測的知見から、モデル班との連携により各種のプロセスを理解し高度な氷床モデリングへとつなげていく。

第1期の公募課題にもあるが、各種の衛星観測に携わる研究者が必要であり、公募で重点的に補充する。現在は海水と海洋循環に関する衛星観測の公募課題が進行しているが、その他にも海洋生物活動や氷床質量収支に関わる課題など広く迎えたい。各学会のメーリングリストや日本地球科学連合の展示ブースなどの仕組みやネットワークを用いて、これまで南極の研究に関わっていなかった研究者の取り込みを図る。

長期の南極の氷床変動と気候変動との関係性、さらには全球環境変動や炭素循環との関わりに関しては、今後も氷床班と古海洋班、固体地球班がアイスコアや海底コア、地形調査に基づいた過去の環境復元を進め、モデル班との新たな連携を進める。特に、氷期-間氷期サイクルの中でのスーパー間氷期における南極氷床の後退を理解しモデルで再現できることが長期予測やティッピング・ポイントの研究にも重要である。間氷期の氷床後退は、日射や温室効果ガス、海洋（暖水）などの強制力が様々に時間変化する中での過渡的応答であるため、その理解を通じてモデル検証に活かすためには、古環境データの側では年代の精密統合が重要である。各班のスキルを公募研究で強化して様々な環境指標（プロキシ）の開発と分析を進め、南極の過去の環境復元にブレークスルーをもたらす。様々な古環境データをモデルへの入力・検証として真に活かすため、南極大陸と南大洋、全球環境変動の年代統合に資する分析・解析にも力を入れる。

南極氷床・南大洋のティッピング・ポイントの把握と将来予測に関して、モデル班代表の阿部が、16000人以上の研究者が集まる欧州地球科学連合2019年大会（4月開催）でユニオンセッション（大会を代表するセッション）「Past and future tipping points and large climate transitions in Earth history」（過去と将来のティッピング・ポイントと地球史上の気候大遷移）を主催し、同分野の世界最先端の議論をリードした（<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/session/30246>）。阿部は2019年に出版されるIPCCの海洋と雪氷に関する特別報告書のレビューエディターも務め、本領域の国際的プレゼンスは強まっている。本領域が2018年12月に開催した国際シンポジウムと合わせて、最新の国際動向を把握して今後の研究に進む。要となる気候と南極氷床の相互作用については、当初の計画を超え、本領域以外に南極氷床全域を扱える世界の3つの氷床モデルを有する海外研究者と共同研究を行う。現状の大規模氷床モデルの含有プロセス（特に速い縮小をもたらし機構）はモデル毎に異なる部分があり（例えば、棚氷の末端を主に大気から融かすのか海から融かすのか）、直接観測による検証が難しいものもある。本領域のデータ・モデル連携から生まれる南極・南大洋の気候場を強制力として各氷床モデルに与えることで、共通かつ最も現実的な条件でのモデル応答を比較し、各モデルの検証や、重要な強制力やプロセスの同定を進める。本領域がリードする気候-氷床相互作用の国際連携研究により、南極環境システムにまつわるティッピング・ポイントの性状の理解を大きく進めたい。

総括班としては、新たな国内外の連携研究の芽が出て育つよう、連携観測や国際活動の支援、学際議論の時間を十分確保した報告会や集会、国際会合の開催などを続けていく。新たな研究には総括班から経費支援を行うなど、今後も連携強化を重視していく。

