

機関番号：62611
 領域設定期間：平成29年度～令和3年度
 領域番号：4902
 研究領域名（和文）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
 研究領域名（英文）Giant reservoirs of heat/water/material：Global environmental changes driven by the Southern Ocean and the Antarctic Ice Sheet
 領域代表者
 川村 賢二（KAWAMURA Kenji）
 国立極地研究所・先端研究推進系・准教授
 研究者番号：90431478
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,152,560,000円

研究成果の概要

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。各分野単独では不可能であった様々な成果を得て、*Nature*, *Science*, *Nature Communications*, *Science Advances* などの学際誌を含む合計 418 本の論文を国際査読誌に公表した。分野間連携による成果の例を以下に挙げる。

南大洋については、我が国の5船と外国の2船により多様な観測や試料採取を実施し、雪氷分野や海洋-棚氷相互作用モデリングとも連携して、昭和基地があるリュツォ・ホルム湾や東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河域への暖水流入と棚氷融解過程を解明した。また、東南極での南極底層水の物理・化学・物質循環の実態と近年の変化や、海氷と生態系・物質輸送の関係の解明、過去の南大洋の温度・塩分の復元や年代の精密統合など、多様な連携研究成果を得た。

南極氷床については、氷河上から氷床末端部やその直下の海を直接観測し、海洋分野との連携で、暖かい海水が氷を融解し、淡水が海水と混合して流出する様相や、氷河の流動速度と海洋環境の関係の捉えた。また、沿岸から内陸の基盤地形と表面質量収支・形状の観測や、外国基地を含む氷床縁辺部での重力観測や測位を展開し、過去の観測や人工衛星のデータと合わせた解析から、氷床質量変化と固体地球変形の制約が進んだ。過去の気候・氷床変動については、アイスコアからの詳細かつ高精度な古環境復元や年代の高精度化、南極大陸縁辺部の地形調査や試料による過去の大規模氷床変動とその原因解明が進んだほか、数値モデルとの連携も進んだ。

新技術の開発による探査については、海氷・棚氷下を観測できる無人探査機の開発に成功したほか、氷下の海洋や氷上の地形観測、表面地形の精度評価、海底地形データの解析などで成果を得て、他班の観測研究やモデリング研究へ貢献し、多様な連携研究につながった。

数値モデルについては、気候モデルや氷床モデル、海洋物質循環モデル、海洋領域モデルなどを高度化し、南極周辺での性能を精査した上で、現場観測や古気候データとの連携を進めた。その結果、棚氷融解の鍵となる暖水流入のメカニズムや、過去の氷床縮小をもたらした温暖化の原因、将来1000年間の南極氷床の予測とティッピング・ポイントの提案などの成果が上がった。

また本領域では、若手研究者の段階に応じた多岐にわたる若手人材育成（連携研究への中心的参加、若手会、海外研究支援、学際フィールド教育、南極春の学校、年次報告会や国際シンポジウムでの議論などの取り組み）を行ったことにより、次世代の融合・連携研究を担える有力な若手研究者が多数育った。

研究分野：気候力学、気象学、雪氷学、海洋物理学、海洋化学、地質学、地形学、測地学、地球力学、生物学、計算科学、機械工学

キーワード：南極環境システム、南大洋、南極氷床、気候変動、海水準、ティッピング・ポイント

1. 研究開始当初の背景

地球の氷の約90%を占める南極氷床は、海水準で約60mに相当する淡水の巨大リザーバ（貯蔵庫）である。南極氷床は安定していると考えられてきたが、研究開始当初には、衛星観測などから相次いで縮小が報告されていた。また、南大洋では南極底層水という地球で最も重い海水が

生成されるが、その量は全海水の約4割を占め、その生成量や温度の変化は、熱や物質（CO₂や栄養など）の地球規模の分配に影響し、気候を左右する。すなわち、南極氷床と南大洋は熱・水・CO₂の巨大リザーバであり、全球気候や海水準を決定づける重要要素であり、その変化とメカニズムの解明が急務である。

南極氷床と南大洋との間には強い相互作用がある。例えば、南極氷床の縮小がもたらす淡水は、南極底層水の生成を弱体化させ、垂表層の水温上昇を招いて氷の底面融解を加速する可能性がある一方、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。観測の困難さから理解やモデル化が遅れているが、古環境の研究からは、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」が存在し、そこに近づいている可能性も指摘された。また、全球炭素循環の理解には、莫大な生物生産量を持つ南大洋生態系への物理・生物・化学過程の影響の解明や、栄養塩濃度の変化と海洋循環や海水変動との関連の解明も重要課題である。IPCC（国連の気候変動に関する政府間パネル）の第5次評価報告書（2013）でも、南大洋と南極氷床において気候モデルと観測結果との食い違いが大きいなど、理解の遅れが指摘されていた。

2. 研究の目的

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ため、本領域では、多分野の研究者が連携、融合研究し「南極環境システム学」を創成する。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した上で、古環境復元によるモデルの検証を経て、南大洋及び南極氷床の将来と全球環境への影響の予測につながる融合研究をめざす。

3. 研究の方法

南極域では、大気場・氷床・海水・海洋場が周極的に分布し、各環境要素の間には強い相互作用があるので、これらを一つのシステムとして捉える。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。観測は特に東南極をターゲットとし、海洋・氷床・固体地球・生態系の研究を展開する。また、氷床や海洋は長い時間スケールで変化するため、アイスコアや堆積物、岩石等を用いて過去の変動を復元する。局所スケールから半球・全球スケールまでを対象とした大気・氷床・海水・海洋・固体地球のモデル研究を行い、観測や分析データとの連携による高度化を通じ、南大洋と南極氷床の変動要因と各種の相互作用を解明する。研究対象と研究体制の関係を図1に示す。

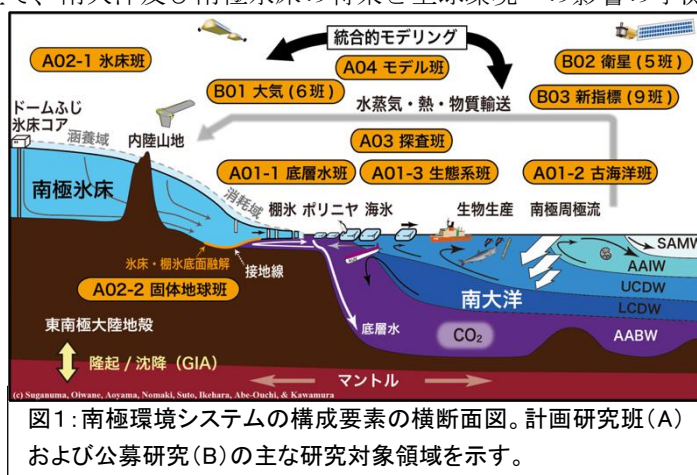


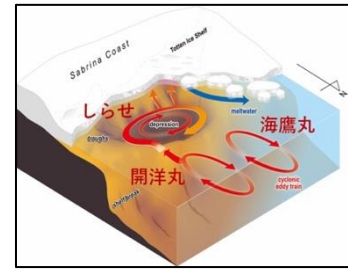
図1に示すように、南極環境システムは、南極大陸（氷床・氷床コア・氷床棚・氷床流）と南大洋（南極周極流・SAMW・AAIW・UCDW・LCDW・AABW）とを主要な構成要素とする。また、大気（水蒸気・熱・物質輸送）や海洋（生物生産・南極周極流）も重要な要素である。本研究は、これらの相互作用を解明し、南極環境システムの総合理解を進めることを目的とする。

- (1) 研究項目 A01 熱・物質リザーバ南大洋とその変動（計画研究3班、公募6件）：海洋物理・化学、生物、地質等の観測や試料分析により、氷床-海洋間や海洋-生態系間などの相互作用プロセスや、過去の南大洋の物理環境・物質循環・生物動態等の変動の研究に取り組む。
- (2) 研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動（計画研究2班、公募3件）：南極大陸上の観測や衛星観測、アイスコアや堆積物の試料分析を行い、現在から氷期-間氷期スケールまでの南極の氷床・気候変動や固体地球との相互作用を解明する。
- (3) 研究項目 A03 未探査領域への挑戦（計画研究1班）：探査困難な領域に新たな観測機器を導入し、研究にブレークスルーをもたらすデータを取得する。特に、無人探査機および通年観測測器の氷下の海への導入や、無人航空機による氷河形状や地形の広域マッピングを行う。
- (4) 研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング（計画研究1班）：各種モデルの開発や観測データによる検証・改良を経て、観測と直接連携可能な高解像度シミュレーションから、過去の大規模気候・炭素循環変動や将来の長期氷床予測などの多彩な数値実験を展開することで、南極環境システムの総理解を進める。
- (5) 研究項目 B01 大気の物理とモデリング（公募6件）：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、大気大循環と南極気候との関連など、大気科学を基本とした研究を進める。
- (6) 研究項目 B02 各種の衛星観測（公募5件）：氷床・海水・海洋の変動を南極全域で連続して捉えるため、新たな衛星やセンサー、アルゴリズムを用いた研究を進める。
- (7) 研究項目 B03 新しい観測・分析手法を用いた研究（公募9件）：現場観測で得られる各種試料の手法による分析や、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による新知見の獲得を進める。

4. 研究の成果

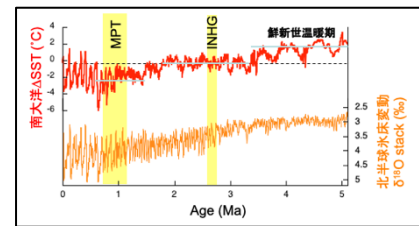
(1)研究項目 A01 熱-物質リザーバ南大洋とその変動：日本の5船による総合観測を行い、外国の2船も用いて多様な観測や試料採取を実施した。しらせ氷河及び東南極最大の氷床減少域であるトッテン氷河が周極深層水により融解されるプロセスの解明や、底層水の動態把握、海底コア解析による水温と南極前線位置の復元、海氷変動が生態系に及ぼす過程の解明など、南大洋・南極氷床の相互作用と全球環境への影響解明に資する成果を得た。

①氷床・海洋相互作用：海洋観測を軸に、数値モデルや測地・雪氷学分野との融合研究から、沖合起源の暖水の流入と氷の底面融解に関する一連のプロセスを解明した。トッテン氷河の周辺海域でも観測を展開し、沖合に定在する巨大な海洋渦が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。



トッテン氷河への暖水輸送過程

②底層水変動：東南極での底層水について、30年ほど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や、その氷床変動との関係、周極深層水を輸送する渦の活発化、底層水量の減少、ケープダンレー底層水の循環や物質循環などを解明した。

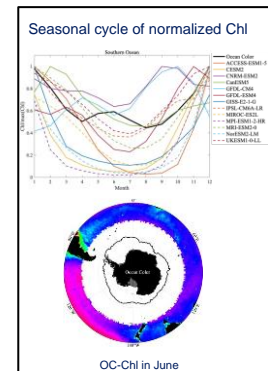


500 万年間の南大洋の表面温度

③AI 等による試料分取・処理の手法開発：AIを応用した自動分取システムやセルソーターによる珪藻殻分離手法を開発し、広分野に応用可能な技術に発展した。

④海底コアと氷床コアの年代精密対比：海底コアと南極氷床コアとの年代精密対比のために、南大洋インド洋区海底コアにおけるダスト指標による対比の有効性を示した。

⑤海底コアによる古海洋変動の解明：南大洋の表層水温変動を復元し、海氷分布と気候モードとの関連や、スーパー間氷期の高温化、数百万年間の南極の気温やCO₂と調和した水温変動など、南大洋の変動と氷床や炭素循環との関連などを解明した。



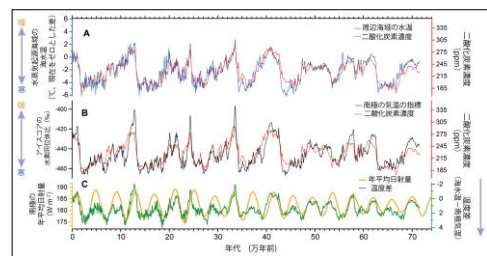
生態系モデルと衛星観測データの不整合(上)と冬季観測データの欠如(下)

⑥海氷が海氷下の低次生産および生態系構造と物質循環に及ぼす影響：海水中微小生物の水柱生態系への寄与や、南大洋の多くの種が海水中の炭素に依存する実態を解明した。

⑦季節海氷域の低次生産と高次生産との関係：高次捕食者の調査から、南大洋生態系の低次生産の変動の影響が高次捕食者の移動により速やかに北半球まで伝播する可能性を示した。

⑧南大洋生態系と海洋物理場・全球生態系との関係：海洋物理場が小型動物プランクトンの分布に与える影響や、生態系モデルの誤差の原因が冬季極域データの不足であることを明らかにした。メタゲノム解析などの新たな研究手法も確立した。

(2)研究項目 A02 水-熱リザーバ南極氷床とその変動：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た。



72 万年間の南極の気温と南大洋の温度 (Uemura et al., 2018 より)

①アイスコアによる古気候研究：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、両極間の気候リンク、希ガス濃度による最終氷期の全球平均海水温復元、ダスト供給源や大気輸送、最終氷期最寒期の地表気温推定値の刷新と気候モデルの妥当性の証明など、多様な成果を得た。

②アイスコア年代構築と海底コアとの年代統合：気体分析から17万年前までの年代精度を高めたほか、メタン濃度とダストの連続解析や、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など、年代構築と対比に関する成果を得た。

③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：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。

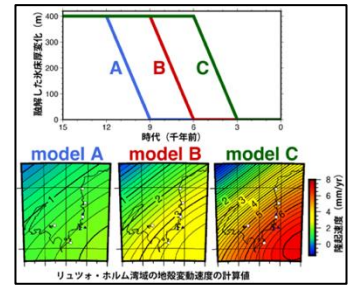
④広域の表面質量収支と氷床基盤地形の観測研究：氷床表面質量収支と表面形状、基盤地形の

広域調査と過去のデータを合わせ、世界最長データとして整備した。東南極の一部では、1990年以降の表面質量収支が増加傾向にあることを明らかにした。

⑤**絶対重力およびGNSSの観測によるGIAモデルの高精度制約**:昭和基地および周辺沿岸地域、4つの外国基地において絶対重力測定を実施し、将来の基準となる値を得た。GNSS観測データから、GIAによる地殻変動速度も明らかにした。

⑥**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**:湖底コアや岩石試料の分析から、3-4万年前の氷床荷重が従来の推定値の2倍に達していたことや、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などを解明した。

⑦**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**:過去から現在の観測結果はGIAモデルで矛盾なく説明できることを示し、衛星データ解析や他のモデル研究との連携による南極氷床変動の解明や将来予測に貢献する成果を得た。



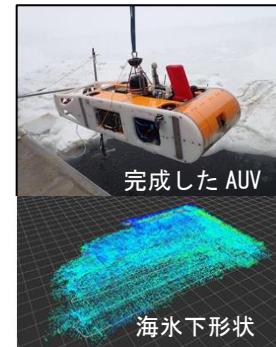
GIAモデルによる過去の氷床融解と現在の地殻隆起の統一的理解

(3) **研究項目 A03 未探査領域への挑戦**:海氷域・氷床縁で運用可能な無人海中探査機を完成させた。また、無人通年観測システムの導入や、無人航空機による氷床・露岩・海氷のマッピング等、厳しい自然環境を持つ南極域における無人観測技術を大きく進展させた。

①**無人海中探査機 (AUV)**:仕様決定から設計・製作、氷海試験と改良を経て、南極海での運用を可能にした。AUV回収のための遠隔操縦ロボット (ROV) や、氷上から穴をあけて展開可能な小型ROVも開発した。

②**氷海プロファイリングブイ**:海氷との衝突を回避できる係留ブイを開発し、海氷下の海洋鉛直構造の時間変化データ取得に成功した。

③**無人航空機 (UAV)**:3種類のUAV導入による地形測量や、表面地形の精度評価、積雪分布変動の導出など、地殻変動や重力変化の精密制約に不可欠なデータを得た。



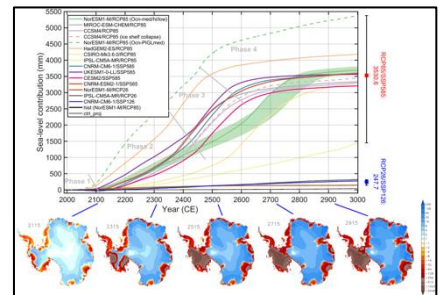
(4) **研究項目 A04 南極氷床・海洋・気候の統合的モデリング**

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を高度化し、観測研究との連携により南極環境システムの理解を進めた。

①**各種数値モデルの開発と改良**:各モデルを高度化して南極周辺のパフォーマンスを詳細に検証した。南極周辺の温暖バイアスの解消や、古環境の再現性向上、異なる解像度の南極氷床モデル完成、暖水流入・棚氷融解過程の解明などの成果が上がった。

②**スーパー間氷期への遷移と、現在の南極氷床の存在要因**:完新世と最終間氷期 (スーパー間氷期) の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による南極の「寒の戻り」の有無であったことを解明した。

③**南極氷床の将来とティッピングポイント**:長期氷床予測や長期定常計算を展開し、2100年までの予測結果はIPCC報告書の主要成果となった。将来1000年のCO₂高排出シナリオの計算では、気候状態が2100年以降一定でも氷床は縮小し続け、2300年以降にティッピングポイントを迎えるなど、温暖化に対する氷床応答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 (Chambers et al., 2021)

(5) **研究項目 (公募) B01 大気物理とモデリング**: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んだ。

(6) **研究項目 (公募) B02 各種の衛星観測**: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。

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

5. 主な論文 計 418 本 (国際査読誌)

- 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.
- 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.
- 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, *Quat. Sci. Rev.*, 286, 107508, 2022.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 Commun.*, 11, 4221, 2020.
- 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.
- 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, 2020.
- 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.
- 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.
- 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.
- Uemura R., H. Motoyama, et al. (計 19 名, K. Kawamura, 5 番目), Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications* 9, 961. 2018.
- 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.

主な受賞

- 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.
- 菅沼悠介 地球環境史学会貢献賞, 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.
- 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.
- 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.
- 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(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.

ホームページ等

- 日本語版 : <http://grantarctic.jp> 英語版 : <http://grantarctic.jp/enhp/>
ブログ : http://grantarctic.jp/gr_news/
ツイッター : <https://twitter.com/GRAntarctic17>
YouTube : <https://www.youtube.com/channel/UCfz85ZltzqD6q9Nk8MpUwQg>