

地質標本館 特別展

南極

の過去と現在、そして未来

研究最前線からのレポート

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

協力：国立極地研究所

文部科学省 科学研究費助成事業

新学術領域研究「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・南極水床」

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



GEOLOGICAL MUSEUM

地質標本館



目次

はじめに	板木拓也 ¹	3
------	-------------------	---

* 南極ってどんなところ?

氷に覆われた大陸	名和一成 ¹ ・奥野淳一 ²	4-5
海に囲まれた大陸	大島慶一郎 ³ ・石野沙季 ¹ ・板木拓也 ¹	6-7
氷床の縮小と海面の上昇	板木拓也 ¹ ・杉山 慎 ³ ・奥野淳一 ²	8-9

* 地質時代の気候変動

氷床ができるまで	鈴木克明 ¹ ・川村賢二 ² ・藤井昌和 ²	10
氷床ができてから	菅沼悠介 ² ・鈴木克明 ¹	11
繰り返す氷期と間氷期	杉崎彩子 ¹ ・川村賢二 ² ・菅沼悠介 ² ・板木拓也 ¹	12-13

* 南極研究の最前線

日本の南極観測	板木拓也 ¹ ・川村賢二 ² ・菅沼悠介 ² ・青山雄一 ²	14-15
陸の調査	杉崎彩子 ¹ ・名和一成 ¹ ・菅沼悠介 ² ・奥野淳一 ²	16
海の調査	板木拓也 ¹ ・杉崎彩子 ¹	17
海底に沈んだ池を探せ!	石輪健樹 ² ・田村 亨 ¹	18
南極の複雑な地形	藤井昌和 ² ・高下裕章 ¹	19
氷の下を調べる革新的技術	杉崎彩子 ¹ ・板木拓也 ¹ ・杉山 慎 ³	20
海水の近くには生き物がいっぱい?!	真壁竜介 ² ・石野沙季 ¹	21
世界初! トッテン氷河沖の採泥観測	板木拓也 ¹	22-23
温暖化と南極氷床の未来	岡 顕 ⁴ ・鈴木克明 ¹ ・小長谷貴志 ⁴	24-25

引用文献		26
------	--	----

南極 MAP		27
--------	--	----

¹ 地質調査総合センター 地質情報研究部門、² 国立極地研究所、³ 北海道大学、⁴ 東京大学



はじめに

南極

地球上で最も寒いこの場所は人類が最後に到達した大陸であり、未だにその素顔は十分に明らかにされていません。

国連の IPCC^{*}（気候変動に関する政府間パネル）は、2019年9月に「海洋・雪氷圏特別報告書」を発表し、近年、南極氷床^{ひょうしゅう}の融解速度が加速しつつあることを指摘しました。このまま氷の融解と流出が続けば、世界の海面は数世紀のうちに数メートル上昇することが懸念されています。しかし、このような将来予測にはまだ不確実性が残っており、より正確な予測のためには、時空間的な観測の拡充、大気-海洋-氷床の複雑な相互作用の理解の蓄積、さらにスーパーコンピュータによる検証を行っていく必要があります。

今、南極で何が起きているのか。今後どうなっていくのか。これらの疑問を明らかにしていくためには、人類史よりはるか以前、地質時代に何が起っていたのかを理解することが重要な鍵となります。

本特別展では、最新の研究から明らかにされつつある南極大陸とそれを取り囲む海の謎を、臨場感あるパネルと展示で紹介します。

^{*} IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

ぼくたちも
南極に行ってきました！
「しらせ」から南極大陸を望む



氷に覆われた大陸

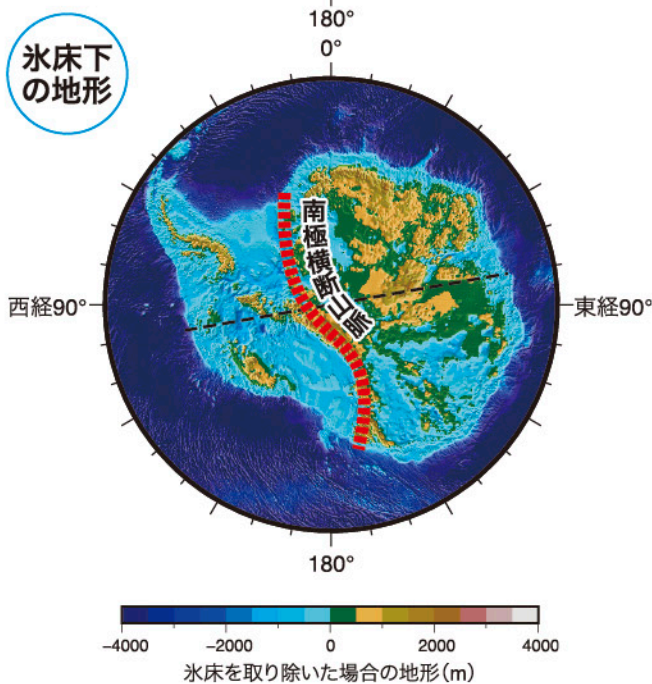
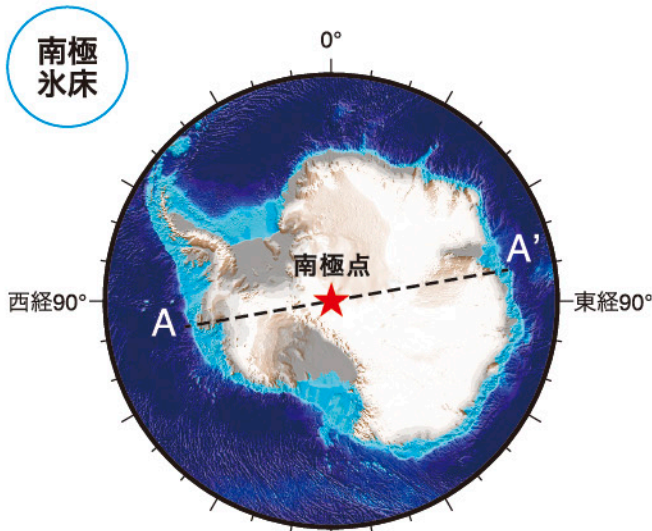


図1 南極大陸の地形。ETOPO1 データより作図。

● 淡水の巨大貯蔵庫 (ジャイアント・リザーバー)

南極大陸はオーストラリア大陸のほぼ2倍の広さの世界で5番目に大きな大陸です。その大地のほとんどは氷で覆われており、この大地を覆う氷の塊のことを「氷床」といいます。氷床の厚さは4,000 mを超える所もあります。現在、地球上にある氷の約90%が南極大陸に集中しており、もし、南極大陸の全ての氷が融けると、海水面が約60 m 上昇するほどの量になります。

● 南極大陸の形

南極の氷は、南極横断山脈より東側に全体の90%が、西側に残りの10%が分布します。西南極氷床の下に地形は、東南極氷床の下に地形に比べて標高が低く、その地面の大半は今の海面の高さより低いことが分かっています。

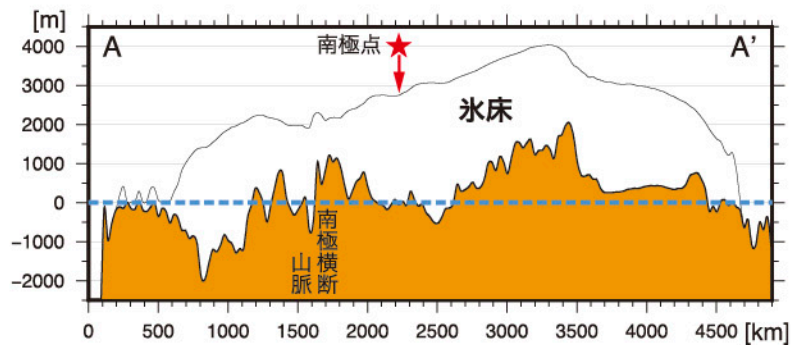


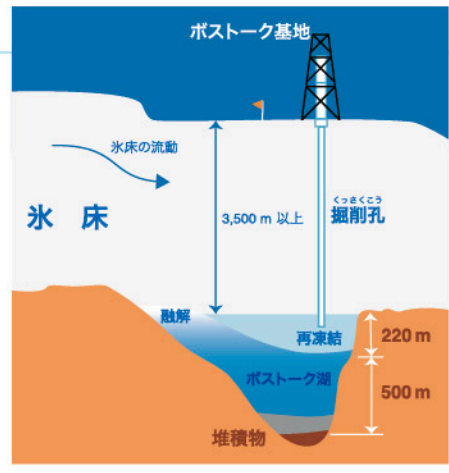
図2 南極大陸と氷床の断面図(図1のA-A')。

おまけ の話

氷床下の湖

南極大陸内には氷以外にも液体の水があることが知られています。大陸氷床の底にある氷底湖です。このような氷底湖は無数に存在し、最も大きなポストーク湖は、3,500 m 以上の厚さの氷床の下にあります。塩分を含まない淡水の湖です。長い間、完全に隔離されていたため、独自に進化した未知の細菌が多数存在するとされています。

図3 ポストーク基地の下にある氷底湖の模式図。



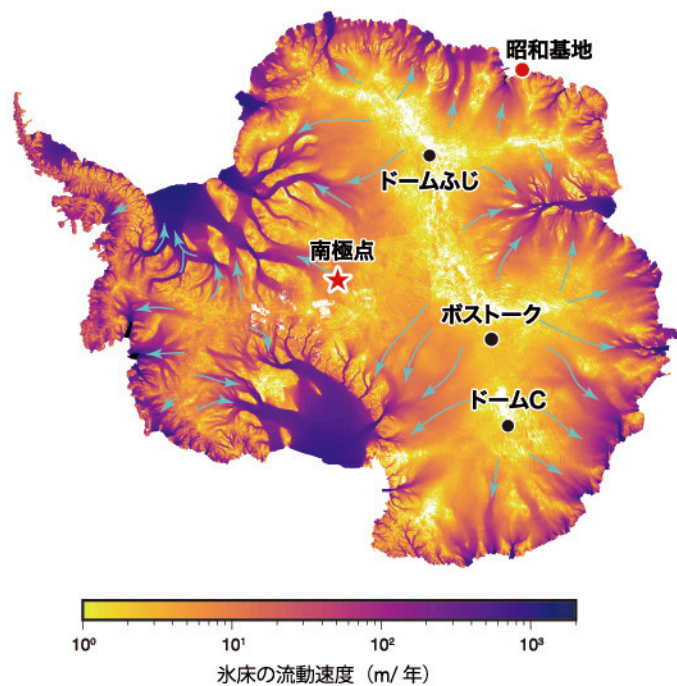


図4 氷床の流動速度を色で表した地図。MEaSURES InSAR-Based Antarctica Ice Velocity Mapより作図。黒丸は主な掘削孔。

● 氷床の流動

人工衛星を用いたリモートセンシングによって、南極氷床が流れる速さ分かるようになってきました。図4は人工衛星に搭載された「合成開口レーダ」を使って調べた南極大陸全体の流れの速さの分布です。氷床の頂上や尾根近くではほとんど動きませんが、氷河や棚氷は速い所では1年間に100 m以上移動していることがわかります。人工衛星観測が本格化する1990年代まで、このような南極氷床流動の全体像をとらえることはできませんでした。

アメリカのアムンゼン・スコット基地にある南極点の印は、氷床の流動で少しずつ移動します。

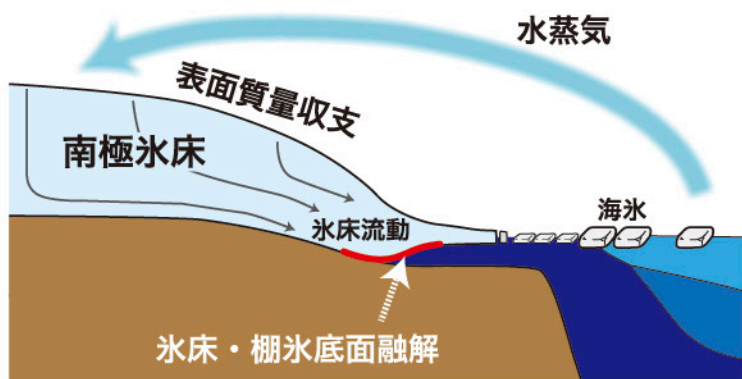


図5 氷床と周辺の海を循環する水の模式図。

● 循環する氷と水

南極の氷床は、氷河として流動し、やがて海に流れ出します。これが氷山です。氷山は融けて海水と混ざりますが、その一部は、蒸発して水蒸気として再び南極に戻ってきます。このように、氷の大陸は、水の循環によって形成されていると言えます。地面が海面下にある氷床縁辺域では、海面の高さの変化や海水温度の上昇の影響を受けやすくなっています。

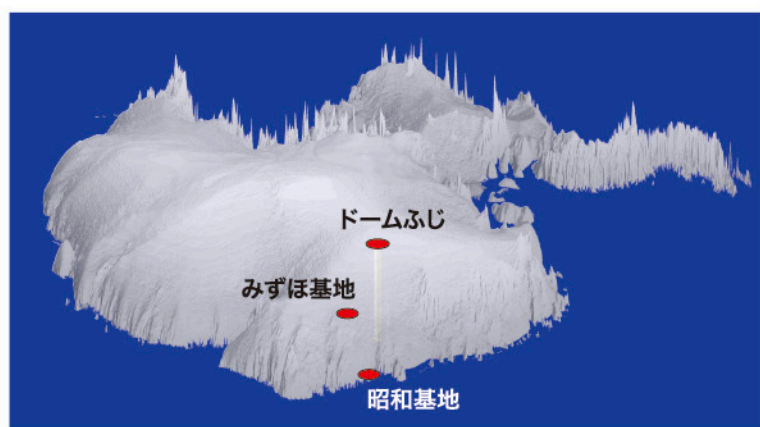


図6 南極を見た鳥瞰図と日本の観測基地の位置。

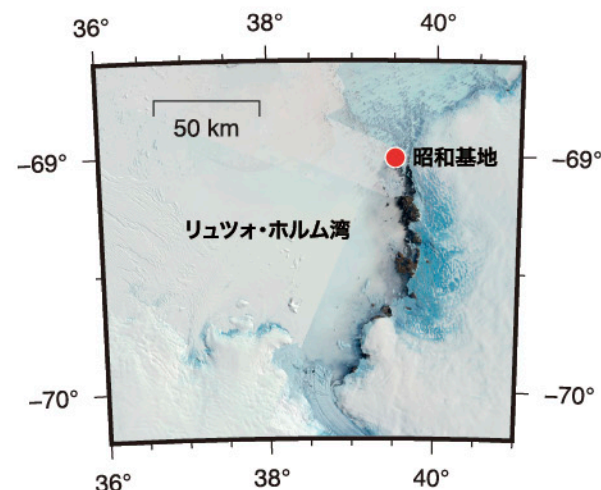


図7 昭和基地周辺の衛星画像。Landsat 7 データより作図。

● 南極氷床と日本の観測基地

日本は、数十万年間をさかのぼる氷床コアを掘削するため、氷床のドーム状の頂上の一つで、氷が水平方向へはほとんど動かない場所に「ドームふじ」という観測基地を作り、3,000 mを超える氷床コアを採取しました。

日本の昭和基地は大陸沿岸の露岩域にあります。露岩域とは、ほとんどの地面が氷に覆われた南極において、地面が氷に覆われていない部分を指します。リュツォ・ホルム湾岸には湾奥の白瀬氷河をはじめ、大小の氷河が分布しています。



海に囲まれた大陸

南極大陸の周りは、南極点を同心円状に取り囲むように海が広がっています。深い所では水深 6,000 m 以上もあります。この広く深い海、特に南緯 40 度より南の海は「南大洋」と呼ばれています。

● 南極をとりまく海洋の流れ

南大洋は、図1のように南半球の高緯度を占めています。そして東向きにぐるっと一周する南極周極流しゅうきょくりゅうが流れています(図1)。この海流は世界最大の流量を持つ大海流です。そして、太平洋・大西洋・インド洋の南部をつなぐ共通海域でもあります。そのため、南大洋は地球全体の気候において重要な役割を果たしています。

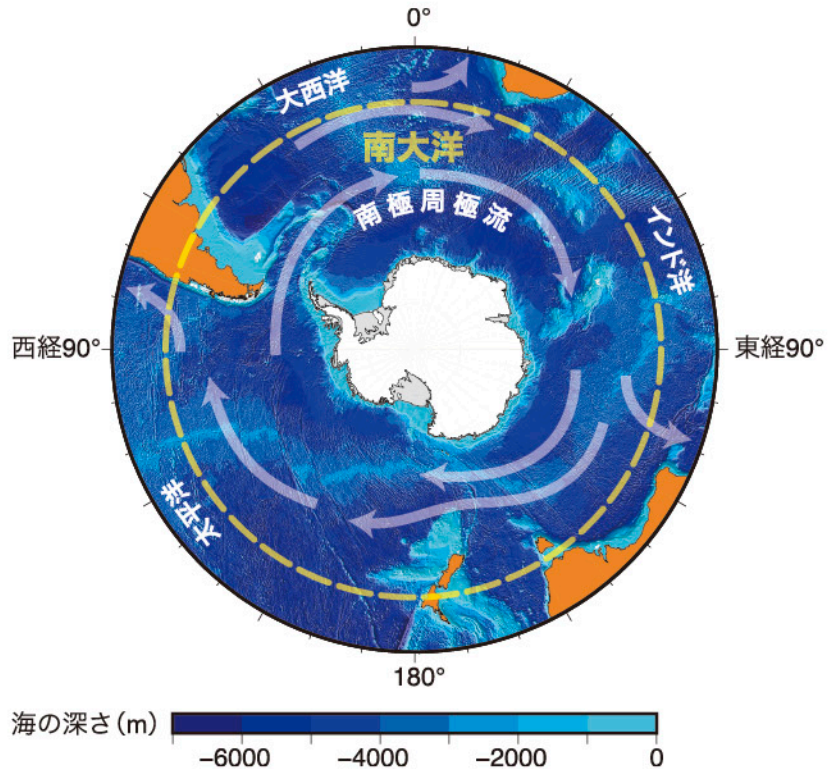


図1 南極大陸周辺の海底地形と海流.

● 海洋のコンベアベルト

温度が冷たいほど、また塩分が高いほど、海水は重くなります。上にある水が冷やされて下の水より重くなると、上方の水が下方の水に潜り込むこととなります。世界の海洋を巡る最も大きな循環は、高緯度域・極域きょくいきで冷たく重くなった水がドーンと深層まで沈み込んでそれが徐々に湧き上がってくる、という循環です。この循環は全世界の深底層まで及び、平均すると約 1,500 ~ 2,000 年かけてゆっくりと一巡りします。

このようにしてできる海洋の深層循環を模式的に示したのが図2で、「海洋のコンベアベルト」と呼ばれています。南極の周りでは世界で一番重い海水「南極底層水」なんきょくていそうずいが作られ、それが沈み込んで全世界の海洋深層に広がっていきます。

南極底層水起源の水は、全海洋の 30 ~ 40% を占めます。

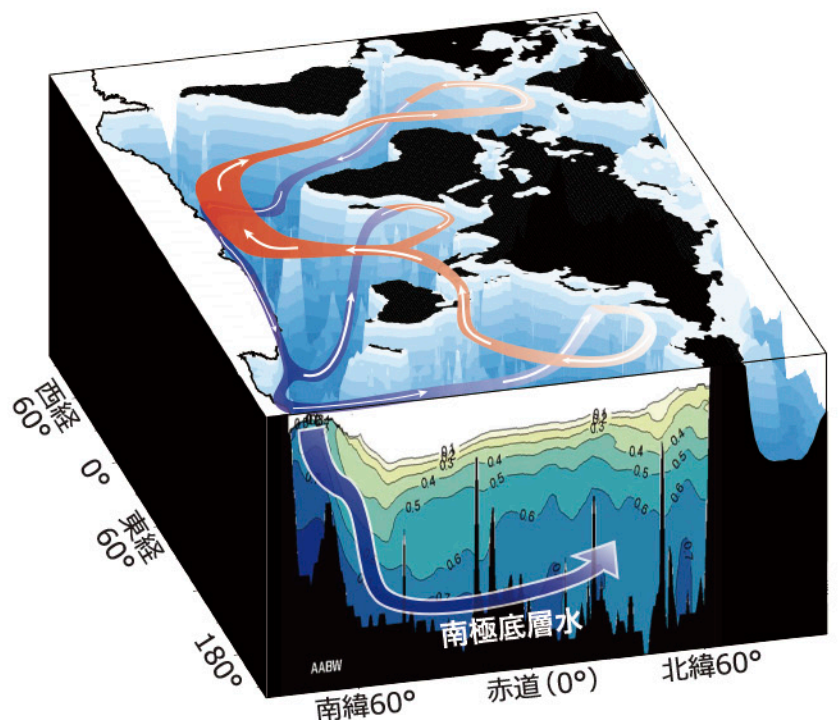


図2 世界の海洋を巡る深層循環の模式図. 断面は太平洋における南極底層水起源水の占める割合.

● 南極底層水ができるメカニズム

南極底層水は「沿岸ポリニヤ」と呼ばれる場所でできます。沿岸ポリニヤとは、風や海流によって海水が次々と沖へ運ばれ、氷が無い（または氷が薄く維持される）水面のことです。ここでは大陸からの冷たい風によって海水が冷やされて凍り、大量に海氷が作られます（図3）。海氷が作られるとき、海水の塩分の大半は氷からはき出されるので、冷たくて塩分の高い重い水が作られるのです。

南極底層水が作られる海域として、ロス海、ウェッデル海、アデリーランド沖が知られていました（図4）。近年、日本が中心になり、昭和基地の東方1,200 kmのケープダンレー沖に未知（第4）の底層水生成域があることを突き止めました。この海域の巨大ポリニヤで海氷が作られ、低温・高塩の重い水が海の峡谷に沿って沈み込んで南極底層水になるのです（図5）。

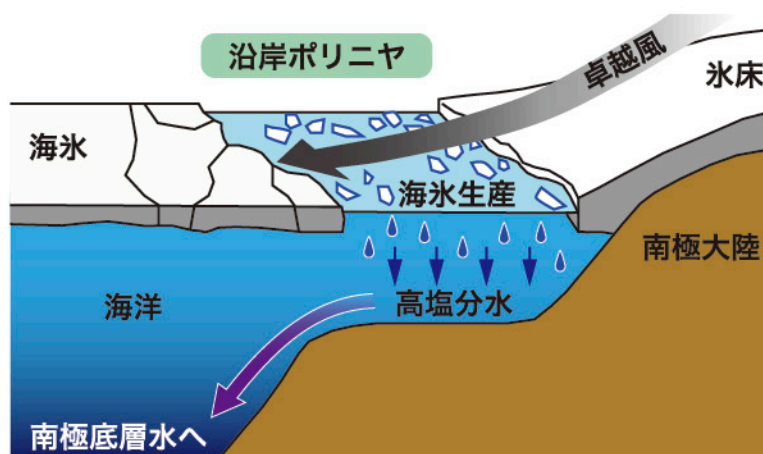


図3 沿岸ポリニヤ域における南極底層水の形成を示した模式図。

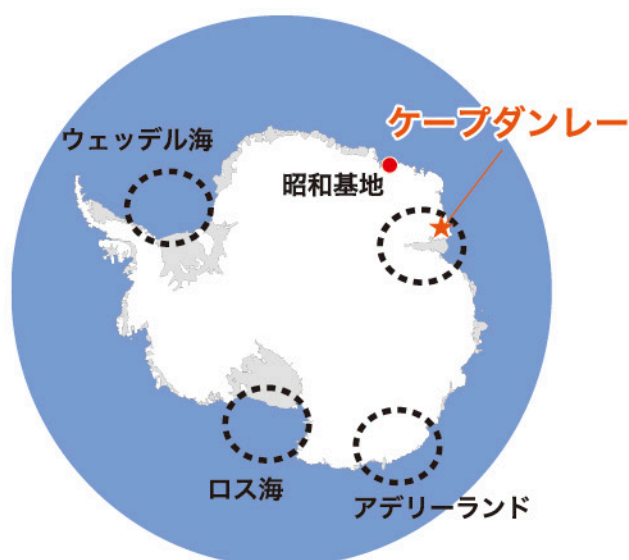


図4 南極底層水が形成される地域（点線円内）。

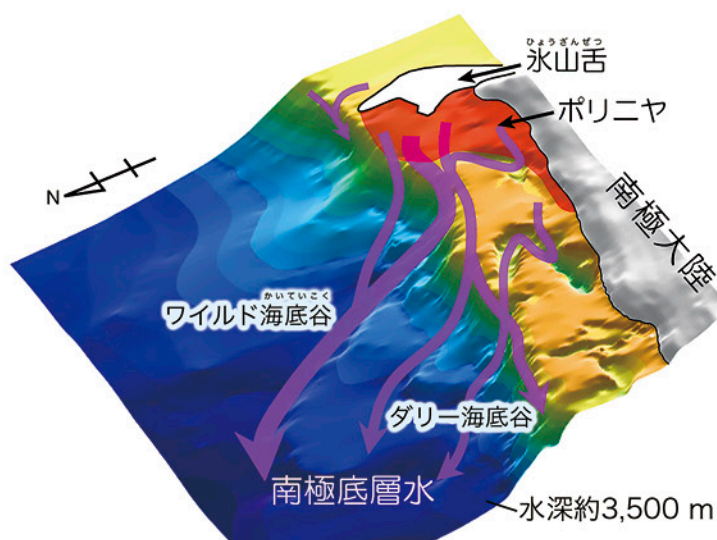


図5 ケープダンレー沖で発見された南極底層水の形成域と流路。Ohshima et al. (2013) に加筆。

おまけの話

海底の流れを記録する堆積物

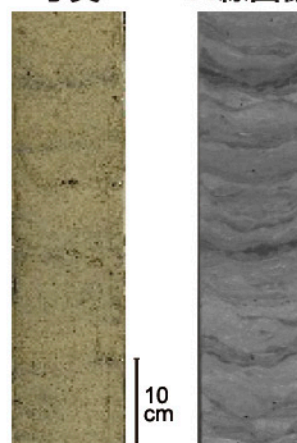
海底に堆積した粒子は、流れの影響を受けます。流れが強いと泥のような細かい粒子は流されてしまい、粗い堆積物が残ります。また、堆積物の断面を見ると縞状の構造が発達することがあります。

図6は、底層水が形成されているケープダンレー沖から採取された堆積物の地層断面の写真とX線画像（つまりレントゲン写真）です。写真の見た目は均質な泥ですが、X線画像では縞々がよく見えますね。この縞々は底層水の流れによって形成されたと考えられます。このような記録は、過去に底層水ができていた時代などを知る手掛かりとなります。

図6 ケープダンレー沖から採取された堆積物の断面写真とX線画像（提供：産総研 清家弘治氏）。

写真

X線画像

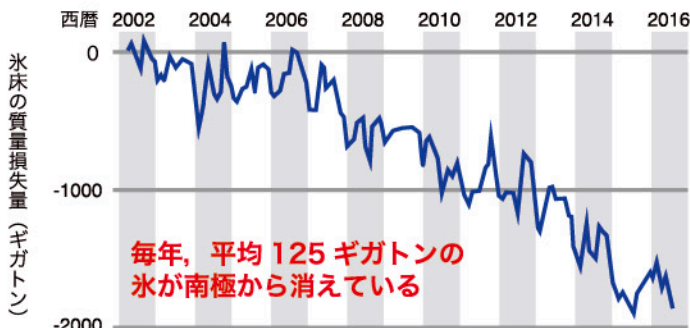




ひょうしょう

氷床の縮小と海面の上昇

—氷を融かす海—



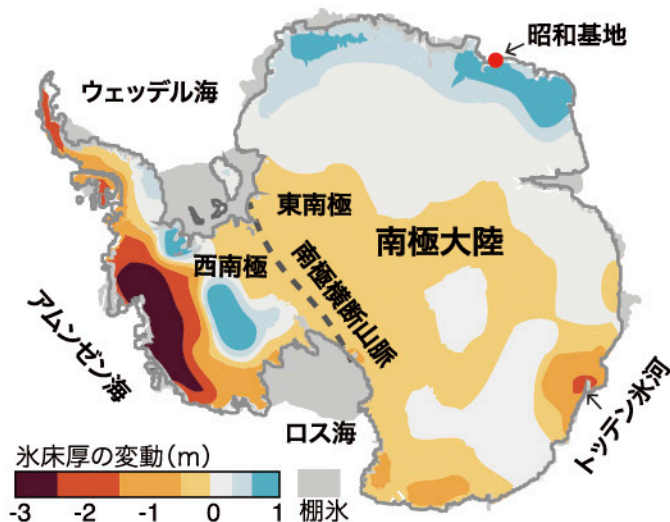
南極氷床には莫大な量の氷が蓄えられており、その全てが融けて海に流れ出すと、世界の海面が約 60 m 上昇します (P4 参照)。その氷床が今、縮小しつつあります。

● 南極氷床の著しい縮小傾向

2002 年に開始された人工衛星を用いた観測により、南極氷床の縮小が継続して起こっていることが明らかになりました。これにより、海面が年間約 0.3 mm 上昇していると見積もられています。

氷床量の消失が特に著しいのは、^{にしなんきょく}西南極のアムンゼン海に面した氷河です。

^{ひがしなんきょく}東南極には、西南極よりもずっと多くの氷があります (P4 参照)。氷の変化は西南極と比較して目立ちませんが、最近ではトッテン氷河で氷の減少が確認されています。



氷床が大陸から押し出されて海に浮いた状態のものを「^{たなごおり}棚氷」といいます。この棚氷が割れて海に流れ出ていったものが冰山となります。

図1 2002～2016年における氷床損失量の変化(上図)と氷床厚変動の分布(下図)。NASAゴダード宇宙飛行センター(2017)をもとに作図。

● 海面が上昇するって本当？

20世紀に入って、氷河氷床の融解や、温暖化による海水膨張により、海面が世界の広範囲にわたって上昇しています。氷床融解に関しては、現時点ではグリーンランド氷床の融解が大きく影響していますが、将来的に南極の寄与が増加すると予測されています。

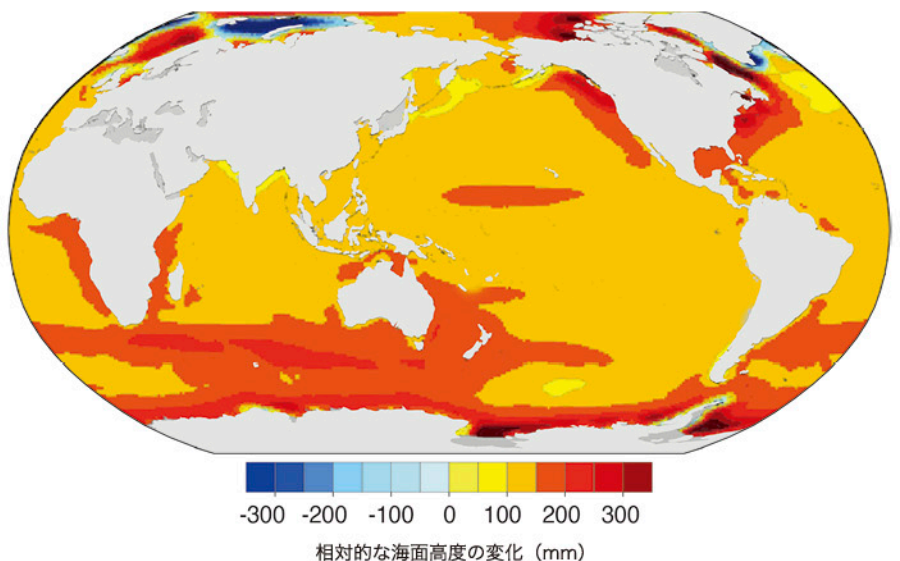


図2 20世紀に生じた海面上昇。IPCC(2019)「海洋・^{セツユウカン}雪氷圏特別報告書」より。



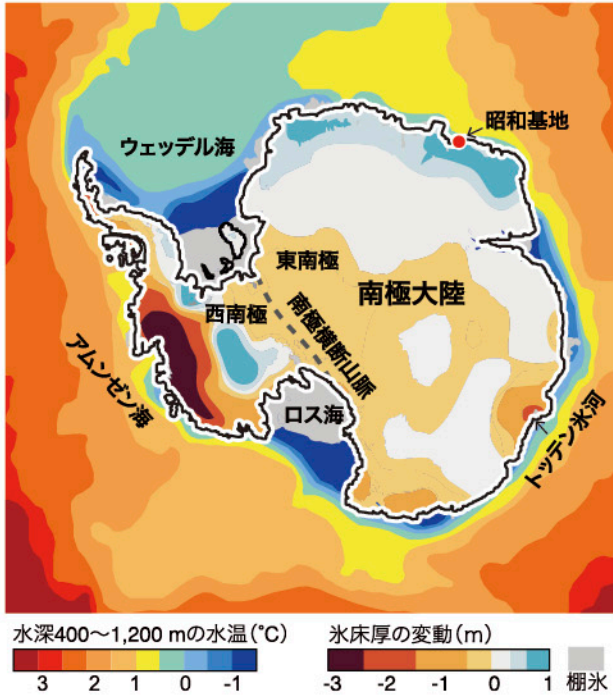


図3 2002～2016年の氷床厚の変動と南極周辺海域の水深400～1,200mの平均水温の分布。NASAゴダード宇宙飛行センター(2017)とJenkins et al. (2016)をもとに作図。

南極の大陸基盤は、そのほとんどが海水準よりも低く (P4 参照)、そのために氷床の下に温暖な深層水が入り込むと、広い範囲で融解が促進します。

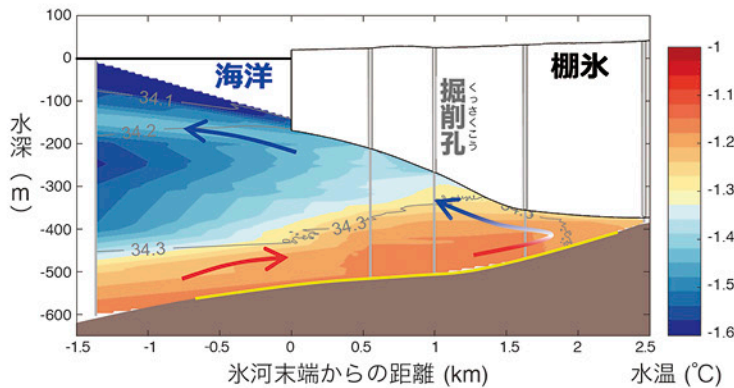


図5 ラングホブデ氷河の下の水温断面。

● 氷河の流出が止まらなくなるティッピング・ポイント

南極氷床の融解が進むと、いずれ後戻りできなくなるティッピング・ポイント (臨界点) に到達することが懸念されています。そうなると、世界の海面上昇は加速し、島国や沿岸にある大都市、低地に広がる穀倉地域などにも多大な影響を与えます。

過去にもあった！ 温暖化による海面上昇

世界の気候は周期的に変動していますが、今から約12万5千年前は現在よりも温暖だったことがわかっています (P12～13 参照)。この温暖化によって北極や南極の氷床が融け出し、世界の海面が上昇したことで関東平野も広く水没していました。現在、徐々に当時の気候に近づきつつあります。今後、当時のように海面は上昇するのでしょうか？

おまけ
の話



図6 海面が5m上昇した場合の地図。関東平野が広範囲にわたって水没。

● 原因は、氷床の下に潜り込んだ温暖な深層水

南極大陸周辺には、温暖な「周極深層水」があります (図3)。この深層水が氷床の周りに張り出した棚氷の下に潜り込むことによって棚氷の底面が融かされ、さらに氷河と海底の接地線が後退します (図4)。その結果、氷河の流動速度が増加して氷が冰山として流出し、大規模な氷床崩壊をもたらします。深層水が潜り込んでくる原因は、まだはっきりとは分かっていません。南極では、冷やされて底層水ができる場所もあります (P7 参照)。南極の沿岸域では、地形や気候の違いによって、温暖な深層水が入ってくる場所があれば、冷たい底層水ができる場所もあるのです。

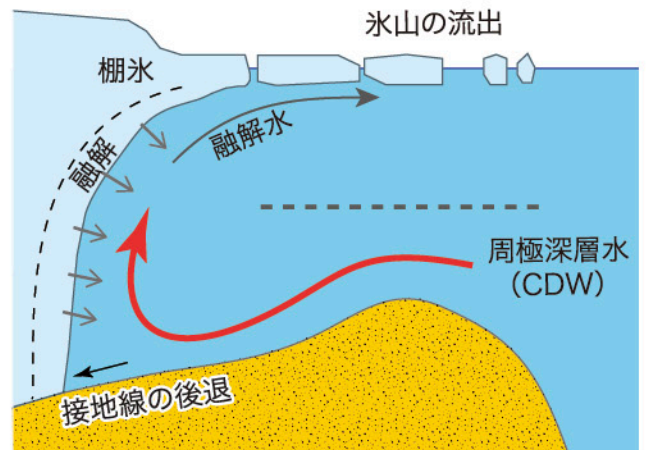


図4 周極深層水による氷床融解を示した模式図。

南極の氷は下から融ける！

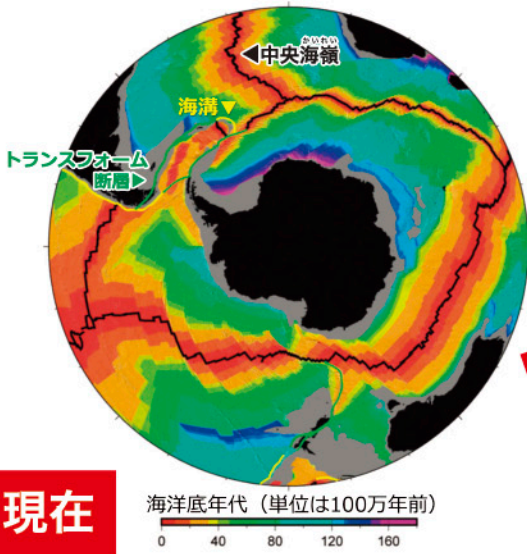
昭和基地の近くにあるラングホブデ氷河では、棚氷を掘削してその下の水温と塩分が観測され (P20 参照)、温暖な深層水の移入による棚氷の底面融解が確認されました。



ひょうしょう

氷床ができるまで

—大陸移動による寒冷化!?!—



● 海洋底年代から分かる大陸移動

海底観測で得られる「古地磁気縞模様」から、世界中の海洋底が何年前にできたのか(海洋底年代)がおおよそ分かっています。このような手がかりから、はるか昔の大陸配置や移動の様子を知ることができます。南極大陸を取り巻く南大洋の海底は、その多くが一億年前より後から徐々に形成されたことが知られています。

1億5,000万年前:
ゴンドワナ大陸が存在

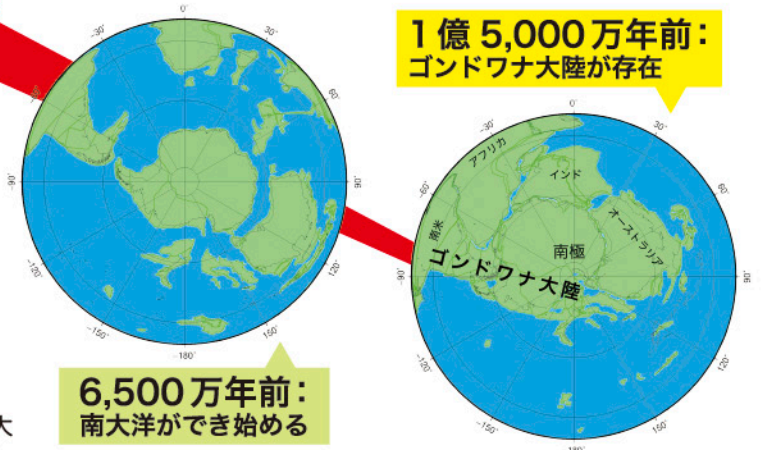


図1 大陸移動と南極大陸の成立。左図は佐藤ほか(2018)に一部加筆。中央、右: ODSN Plate Tectonic Reconstruction Service で作成。

● 南極大陸ができるまで

巨大な大陸「ゴンドワナ大陸」から、長い時間をかけて他の大陸が分裂し、南極大陸は周囲から孤立しました。氷床ができたのはさらに後の時代ですが、このような大陸移動が、2つのプロセスで南極に氷床をもたらしたと考えられています。

● 南極氷床を作った2つのプロセス

① 大陸の化学風化が地球を冷やした

南極から分かれていった大陸が移動することで、ヒマラヤ山脈など新しい陸地が生まれました。新しい陸地の新鮮な岩石は化学風化を起こし、CO₂を消費します。これにより地球全体が寒冷化していきました。

② 南大洋による断熱

大陸移動の結果として3,300万年ほど前に完成した南大洋には、温度勾配の大きな「極前線」が存在し、暖かい地域から南極大陸への熱輸送を妨げています。このため、冷えていく地球の中でも南極は特に激しく冷え込み、陸地のほとんどが雪と氷に覆われました。

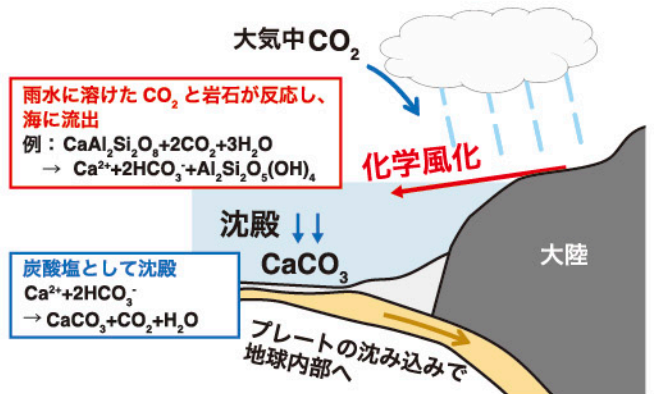


図2 化学風化の模式図。

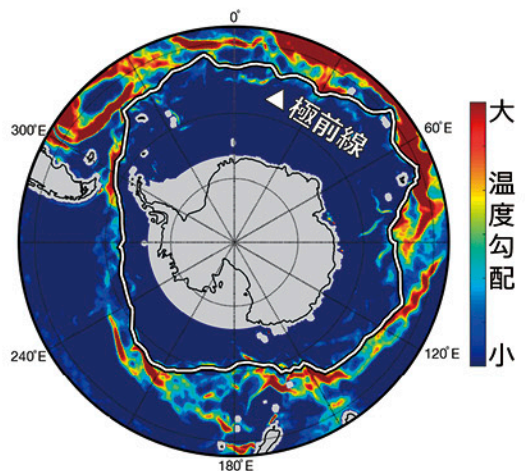


図3 南極周辺の海を海水の温度勾配で塗り分けた図。Freeman and Lodenski (2016)に基づく。

おまけ の話

南極の恐竜

南極がゴンドワナ大陸の一部だった中生代は、地球上で恐竜が大繁栄した、とても暖かい時代として知られています。南極大陸の地層からも、温暖な気候を示すシダなどの植物や、恐竜の化石が見つっています。



ひょうしょう

氷床ができてから

—降雪と融解で決まる氷の量—

● 氷床の量は どうやって決まる？

南極はとても寒いので、基本的に氷床の表面では融けません。そのため、南極氷床は降雪によって成長し、沿岸域で融解します (P5 参照)。つまり、氷床の形や大きさは、降雪量と消費量のバランスによって決まっています。

● 過去の氷床の変動を知る

生物がほぼ存在しない南極において、「化石」や「放射性炭素年代測定」などの一般的な年代測定法を利用することはできません。そこで、「表面露出年代測定」と呼ばれる特殊な年代測定法を用いて過去の氷床変動を復元します (図2)。地球上には、遠い宇宙から「銀河宇宙線」がほぼ一定の割合で降り注いでいます。

この「銀河宇宙線」と岩石中の石英が反応して、「ベリリウム-10 (^{10}Be)」などの宇宙線生成核種が作られます。内陸山地の岩石中の宇宙線生成核種を分析することで、氷床が変動した年代を調べ、地球環境と南極氷床変動の関係を調べます。

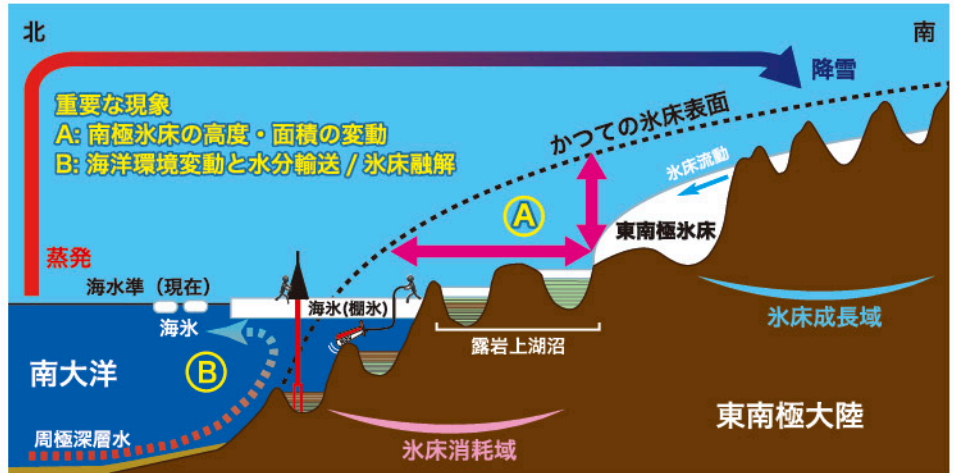


図1 氷床変動の仕組みを示した模式図。

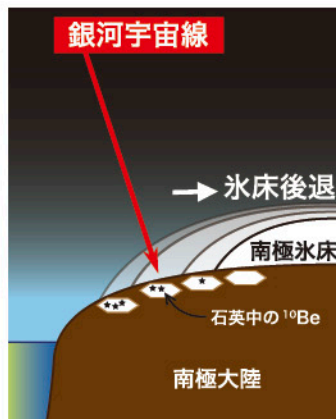


図2 氷床後退に伴う石英中の ^{10}Be 増加の関係を示した模式図。



図3 南極沿岸近くの山地で採取した岩石の「表面露出年代測定」によって、この地域が過去9千~6千年前にかけて、約400 mも急激に氷床高度が低下したことが分かった (Kawamata et al., 2020)。

● 温暖化で南極氷床が大きくなる？

現在は融解が顕著な南極氷床ですが、一部の地域では降雪量の増加で氷床が成長していることが分かっています。現在と同じように二酸化炭素濃度が高く、温暖だった時代 (約300万年前) には、この地域の氷床高度が高かった、つまり南極氷床が大きかったことが分かりました。

この結果は、今後の温暖化で、この地域の氷床が成長を続ける可能性を示します。しかし、温暖化がさらに進行すれば、この地域の氷床も最終的には融解すると考えられます。

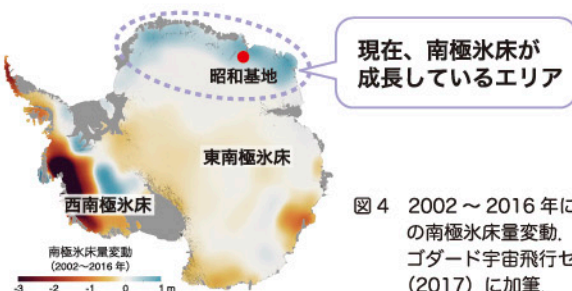
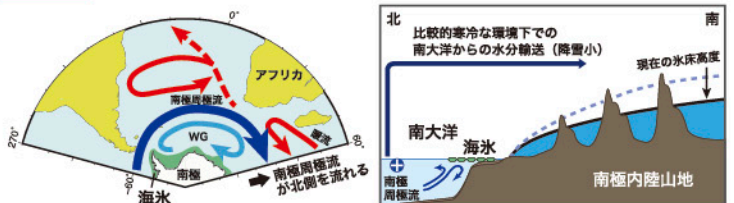


図4 2002~2016年にかけての南極氷床量変動。NASAゴダード宇宙飛行センター (2017) に加筆。

現在



300万年前

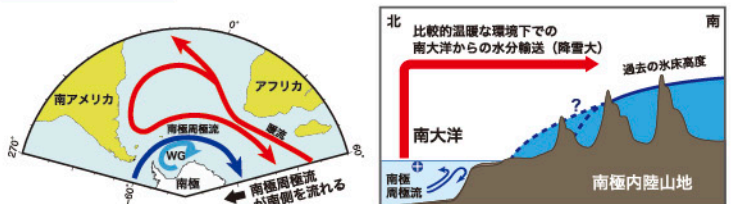


図5 地球環境が温暖になると、南大洋からの水分輸送が活発になり、東南極の一部では氷床が拡大すると考えられる (Suganuma et al., 2014)。



繰り返す氷期と間氷期

● 気候変動を記録する有孔虫

海底の泥は、長い時間をかけてゆっくりと降り積もっています。海底の表面には現在の泥が、その下には昔に積もった泥が、さらに深くなるほどに、より古い時代の泥が積み重なっています。この泥を掘削して海洋コアを採取し、例えば中に含まれている有孔虫（微生物の一種）の化石を分析することで過去の気候変動が分かります。

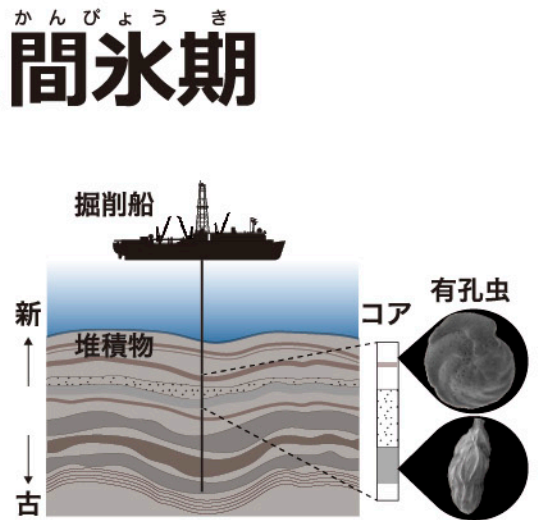


図1 海底掘削の模式図（有孔虫写真提供：秋田大学 松井浩紀氏）。

おまけ の話

過去の氷床量変化を記す酸素同位体比

海水が蒸発する際、酸素16は分子の重さが酸素18よりわずかに軽いために選択的に海水から取り除かれます。氷期においては、それらは積雪によって氷床の中に蓄積するため、相対的に海水中の酸素18の比率が高くなります。逆に、間氷期には酸素18の比率は小さくなります。

有孔虫の殻は炭酸カルシウムできています。この殻に海水の酸素同位体比（酸素18/酸素16）が記録されるため、過去の気候変動に対応した氷床量変化を知ることができるのです。また、酸素同位体比は、水温によっても変化します。

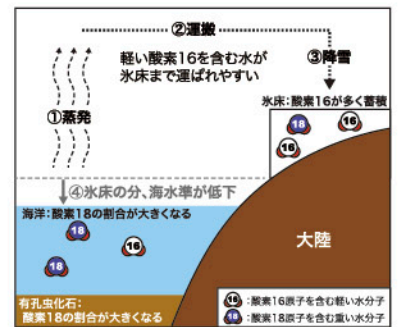


図2 酸素同位体比が過去の気候変動を記録する仕組み。

ニュージーランド沖の堆積物に記録された海水中の酸素同位体比を見てみましょう（図3の紫線）。これは、水温変化の小さい海底に生息する有孔虫から得られた値のため水温の影響は小さい、つまり氷床変動の影響を大きく反映していると考えられます。値が小さい時期が温暖な間氷期、大きい時期は寒冷な氷期に対応します。過去155万年間、周期的に氷期と間氷期を繰り返していることが分かります。

この周期性は、ミランコビッチ・サイクルと呼ばれています。地球が太陽から受ける日射量は、自転軸の歳差運動（P）、地球の公転軌道の離心率（E）、および地軸の傾きを示す地軸傾斜角（T）が持つ周期性（それぞれ約2万年、10万年、4万年）により変化し、これらが地球の気候変動に影響を与えています。

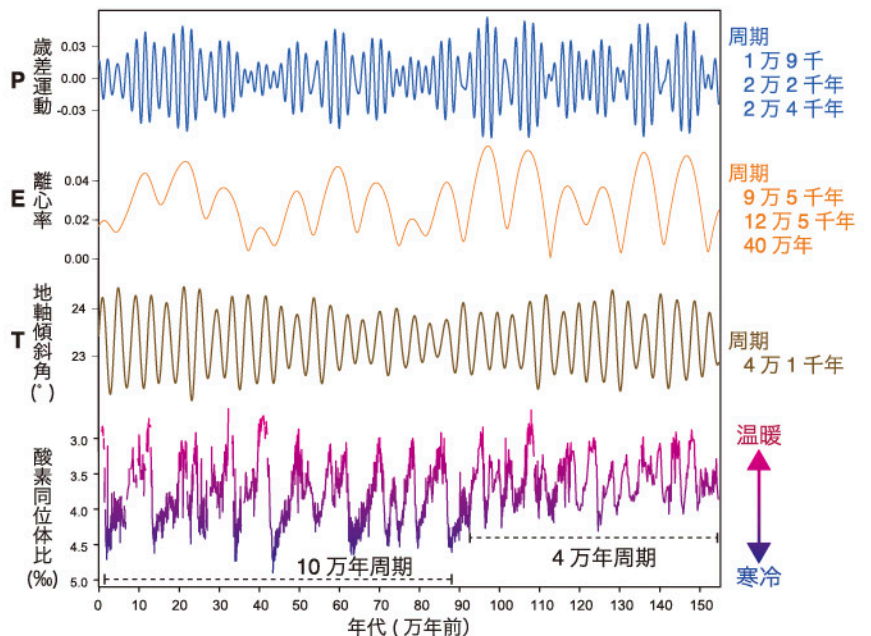


図3 歳差運動、離心率、地軸傾斜角の周期とニュージーランド沖の酸素同位体比変動。Laskar et al. (2004) と Elderfield et al. (2012) をもとに作図。

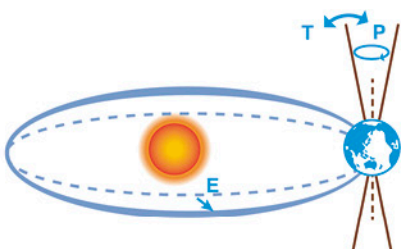


図4 歳差運動（P）、離心率（E）、地軸傾斜角（T）の模式図。

約90万年前を境にして、気候変動の周期性が変化しました。それまでは地軸傾斜角の変動と同じ4万年周期で氷期と間氷期が繰り返していましたが、それ以降は離心率と同じ10万年周期で変動するようになりました。これは、「前期-中期更新世気候遷移期」(Early-Middle Pleistocene Transition: EMPT) と呼ばれ、地軸傾斜角（T）よりも離心率（E）の影響が強くなったことを示しています。しかし、このころの周期性の変化の原因については謎が多く、解明に向けて研究が進められています。

● アイスコア —大気のタイムカプセル—

南極に降り積もった雪は、時間をかけて氷になります。その時に氷の中に閉じ込められた空気は、当時の大気成分（二酸化炭素など）を記録しています。また氷の水素同位体比は気温を反映しています。氷床掘削で得られた氷の柱状試料「アイスコア」には、過去に起こった気候変動の記録が脈々と刻まれています。

日本の「ドームふじ」で掘削されたアイスコアからは、過去72万年間の気候変動が復元されました。水素同位体比から推定される気温と二酸化炭素濃度は、海底堆積物のコアから得られたような周期的な変動を示し、それぞれが互によく似た変動をしています。



写真1 氷床掘削によって採取されたアイスコア。

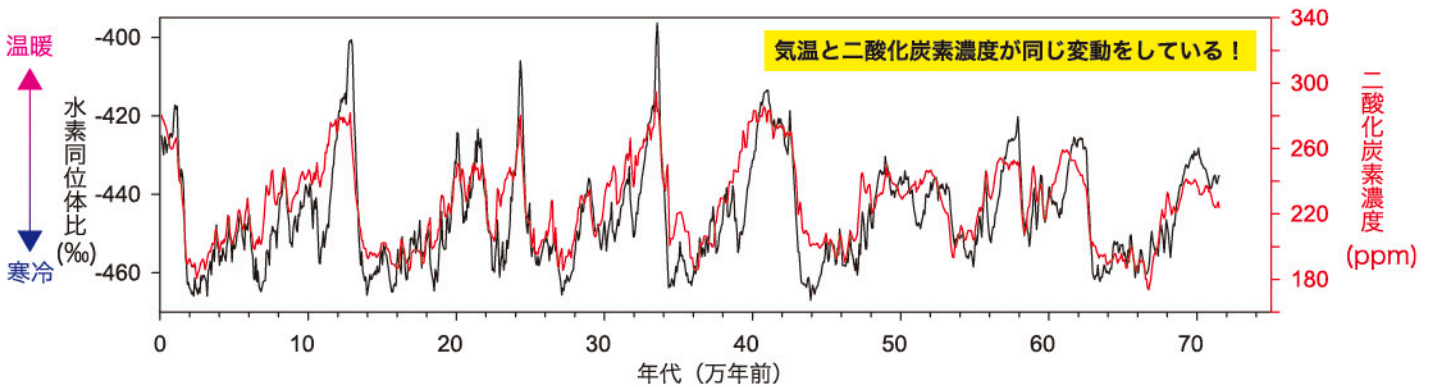


図5 「ドームふじ」のアイスコアに記録された過去72万年間の水素同位体比と二酸化炭素濃度の変動。Uemura et al. (2018) をもとに作図。

● 堆積物とアイスコアをつなぐ

大気と海洋の気候変動に関する相互作用を理解するためには、双方の変動のタイミングを合わせて議論することが重要です。アイスコアと海底コアは、それぞれ独立した方法で年代を決定していますが、アイスコアは数十万年間で2,000年程度の誤差という高精度な年代の決定が可能であるのに対し、海底コアは数十万年間で1万年の誤差をもつこともあります。最近では、大気中に舞っているダストの堆積量や宇宙線の照射量の変動を対比することで、年代モデルを統合する試みがなされています。

もっといろいろ 分かるアイスコア

アイスコアからは、気温や二酸化炭素濃度の他にも、大気中のメタン濃度やダストの量、周辺海域の海水温の変動、火山活動、宇宙線照射量など、さまざまなことが分かります。現在までに得られている最古のアイスコアは約80万年前のもですが、さらに100万年前までさかのぼることができると、謎の多い前期-中期更新世気候遷移期（EMPT）の解明にもつながるかもしれません。

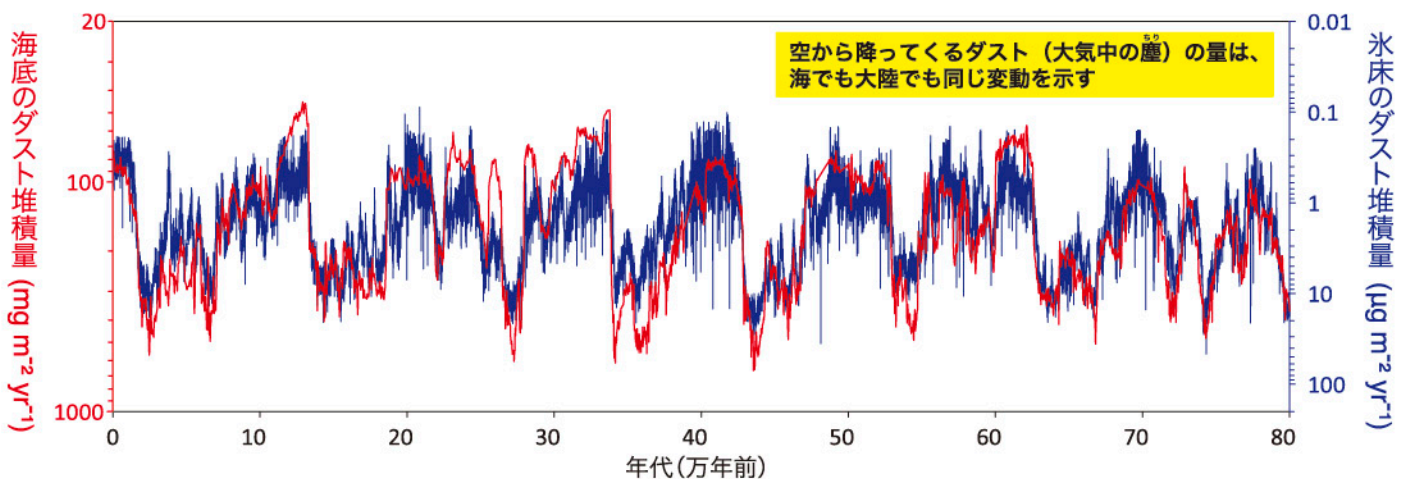


図6 海底（海洋コア）と氷床（アイスコア）から復元されたダスト堆積量の変動。Lambert et al. (2008), Martínez-García et al. (2011) をもとに作図。



日本の南極観測



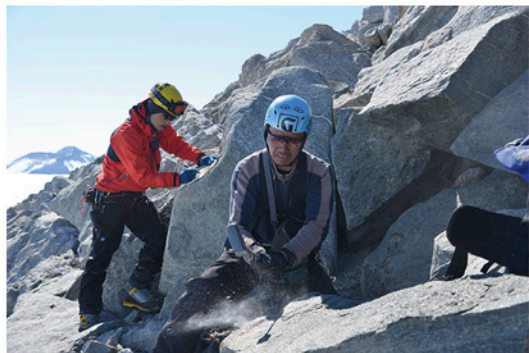
リュツォ・ホルム湾東オングル島の昭和基地（2020年2月）。

● 日本南極地域観測事業

日本の南極地域観測は、国立極地研究所が実施中核機関となり、国の事業として実施されています。1957年以降、昭和基地を拠点にさまざまな観測を行ってきました。



昔は犬ぞりで氷上を移動していましたが、今は雪上車とスノーモービルが主役です。



南極大陸の地盤となる地質は、氷に覆われていないわずかな露頭を頼りに調査されます。

高層大気の観測。南極上空のオゾンホールは、日本の南極観測により発見され、現在も継続的に観測が続けられています。



提供：国立極地研究所 石野咲子氏



「ドームふじ」での掘削現場。柱状の氷の試料「アイスコア」が氷床深部から次々に上がってくる。



太古の気候変動を調べるために、氷床を掘削してアイスコアを採取します。各国が掘削記録を更新して、日本の「ドームふじ」では氷床面から3,035 mまでの掘削に成功しています。最古のアイスコア掘削への挑戦は続きます。

● GRAntarctic プロジェクト

さまざまな専門分野を横断した連携により
新たな研究領域を創出

2017～2022年の5年間の計画で文部科学省の科学研究費助成事業、新学術領域研究『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』(略称: 新学術領域研究「南極の海と氷床」)が実施されています。

この研究プロジェクトは、現場観測とモデル研究を融合させ、南極とその周辺における底層水・周極流・生態系・氷床・固体地球の実態と変動の素過程、およびそれらの相互作用を明らかにします。特に、氷床-海洋の相互作用や、過去の南大洋と南極気候・氷床変動の復元、生物動態などの変動の解明を目指しています。

図1 南極システム学のイメージ。



地球環境変動の最前線とも言える南極で、自然を感じ、自然を理解してみませんか？

デジタル技術を活用したバーチャルツアーなど、自宅に居ながらいろいろな場所を訪れたような体験ができるようになってきました。でも、ちょっとした気の緩みが生死に関わるような厳しい自然と向き合う南極の観測現場にいくと、やはり五感を通じた体験に勝るものは無いと感じます。地球環境を正しく知るためには、長い期間継続した観測が必要です。日本は昭和基地を中心拠点として、観測や研究を何十年にも渡って行っています。また、最新の技術を使った新しい観測や研究も行っています。そのため、毎年多くの研究者が南極で活動しています。そのような観測・研究を支援したり、昭和基地の観測設備や建物などを運営・維持するための設営隊員も多数参加しています。一年間通しての越冬観測では、観測設備や越冬隊員の生活を守る設営隊員の支え無しでは成り立ちません。昭和基地での生活、つまり建物、車両、電気、上下水、暖房、食事、通信、医療、廃棄物処理などを全て自分たちだけで維持することはとても大変ですが、やりがいのある仕事です。みなさんが南極や地球環境に興味を持ち、観測や生活に役立つ得意技を身につけて、将来、南極観測隊員に加わってくれることを期待しています。

第61次日本南極地域観測隊越冬隊長 青山雄一



帰ってきたばかりの観測隊越冬隊長からメッセージ！





陸の調査

● 地形・地質調査

南極氷床から岩が露出しているエリア（露岩域）で、氷河の作用で作られた地形を調査し、岩石や堆積物を採取します。多くの場合はキャンプを設営して、数日間から数ヶ月にわたる調査を行います。夏といえども気温は低く、過酷な環境下での調査です。

写真1 堆積物掘削のため徒歩で湖を目指す。



写真2 氷床上でのキャンプ。



写真3 スノーモービルでの移動。

● 重力測定

氷期に氷床が発達すると、氷床下にある地殻が沈降し、その周辺は隆起します。これは、地下のマントル物質が氷の重みで押しつけられるために起こります。地球は意外に柔らかいのです。このように、氷床の重みで地殻が浮いたり沈んだりすることを氷河性アイソスタシー調整（Glacial Isostatic Adjustment : GIA）と呼びます。

GIAで生じる地面の変形量は、絶対重力測定や衛星観測など最先端の観測技術を用いて観測することにより検出することができます。昭和基地や露岩域、ならびに世界各国の基地で観測を実施しています。



写真4 重力測定に使用する機器。

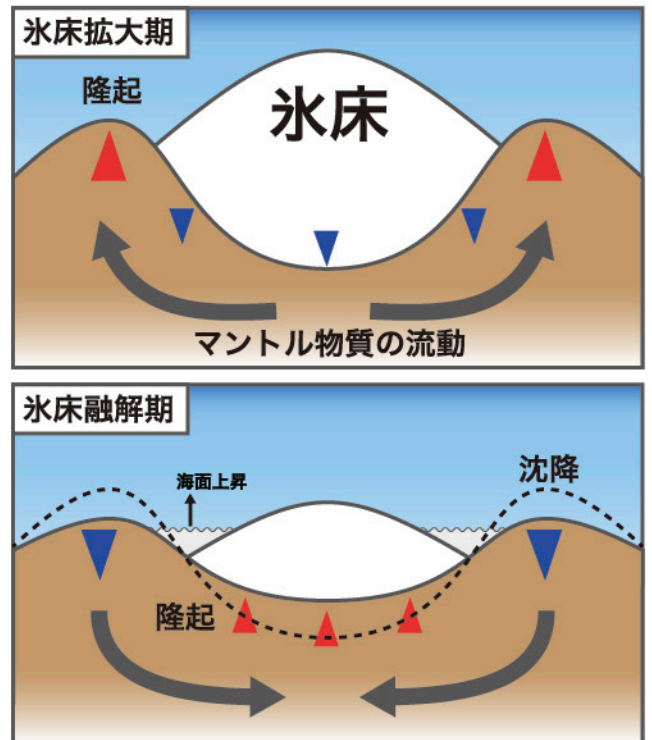


図1 GIA 概念図。



海の調査

● 白嶺丸による南極周辺海域の地質調査

1980～1999年、石油公団[※]は、20回にわたって「白嶺丸」を用いた南極海の調査航海を実施し、計49,000 kmに及ぶ地震波地層探査データと176地点で海底堆積物の柱状試料（コア）を取得しました。これらの貴重なデータや試料は、現在でも研究に使われています。

[※]現在の独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構



白嶺丸の模型が、地質標本館のどこかに展示されています。探してみましょ。

写真1 ベリングスハウゼン海に行く白嶺丸（1981年）
（提供：元 石油公団 佐木和夫氏）。

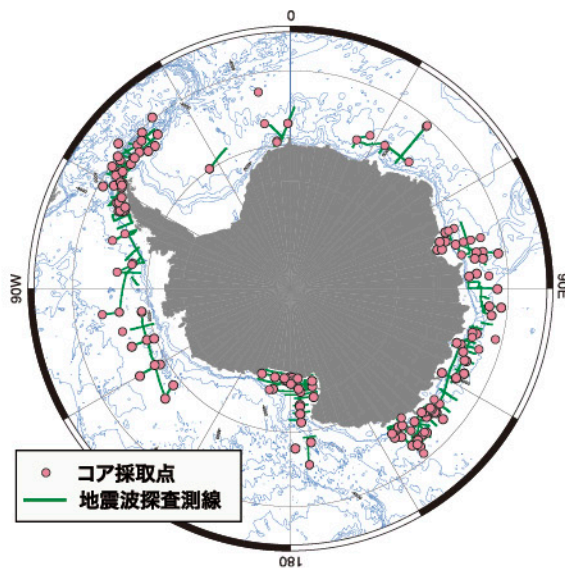


図1 白嶺丸が20年間にわたって取得した堆積物コアの採取地点と地震波探査測線。村上（2000）をもとに作図。

南大洋で活躍する調査船

さまざまな調査船を使って南大洋の謎を解明します。

南極観測船 しらせ

高い砕氷能力を持ち、厚い海氷に覆われた海の観測ができます。



提供：国立極地研究所

深海掘削船 JOIDES Resolution

国際深海掘削計画で運行されている船です。深海底にパイプを突き刺して数 km にも及ぶ堆積物を掘削します。



提供：IODP JRSO

学術研究船 はくほう丸 白鳳丸

世界中の海でさまざまな海洋観測を行っています。



2代目「白鳳丸」2004年6月撮影
提供：東京大学大気海洋研究所



写真2 海中を沈降する粒子を捕集する装置セジメントラップ。沈降粒子の特徴や季節変化などを調べる。

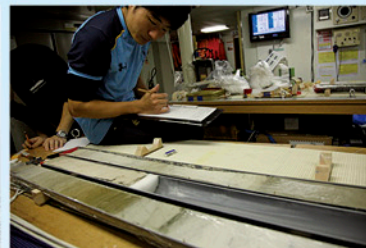


写真3 採取された堆積物を船上で観察し、その特徴を記録する。



海底に沈んだ池を探せ！

● 過去の南極氷床

約2万年前に当たる「最終氷期最盛期」は、氷期の中でも最も寒かった時期で、南極には今よりもはるかに大きな氷床がありました。この時期から現在までの地球温暖化による氷床の変化を知れば、これからの温暖化が南極氷床に与える影響について、精度良く予測することができるようになります。

● 過去の南極氷床を記録する「海底に沈んだ池」

過去の氷床の大きさは、「相対海面変動」と数値シミュレーションから求めます。氷床の拡大・縮小による大陸地殻の沈降・隆起を、地層に記録される相対海面変動から解釈し、氷床の大きさの変化をシミュレーションします。南極にはかつての湖が海面の上昇で「海底に沈んだ池」になっている所があり、そこで地層を採取して相対海面変動の復元に役立てることは、南極観測隊のミッションです。

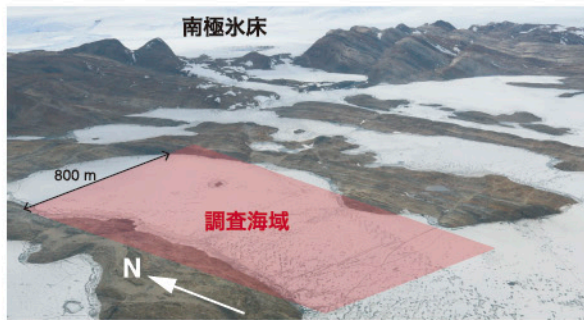


図2 「海底に沈んだ池」があると考えられる場所

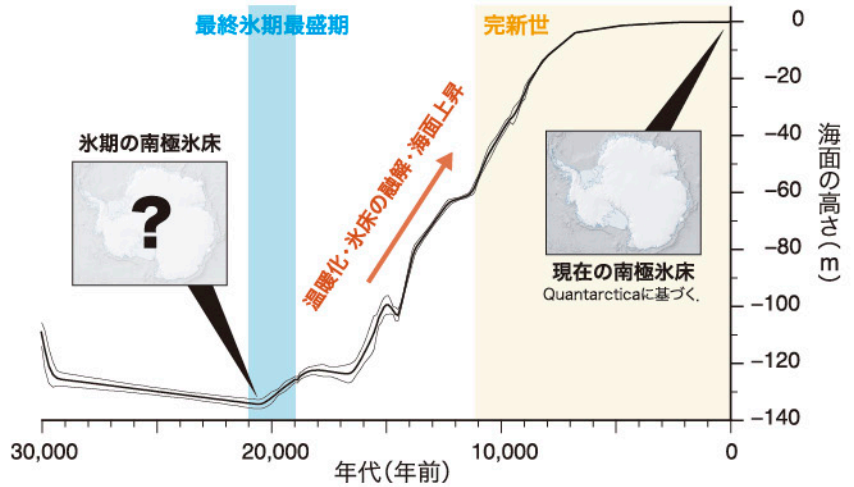


図1 過去3万年間の海面変動。Lambeck et al. (2014) のデータを用いて作成。

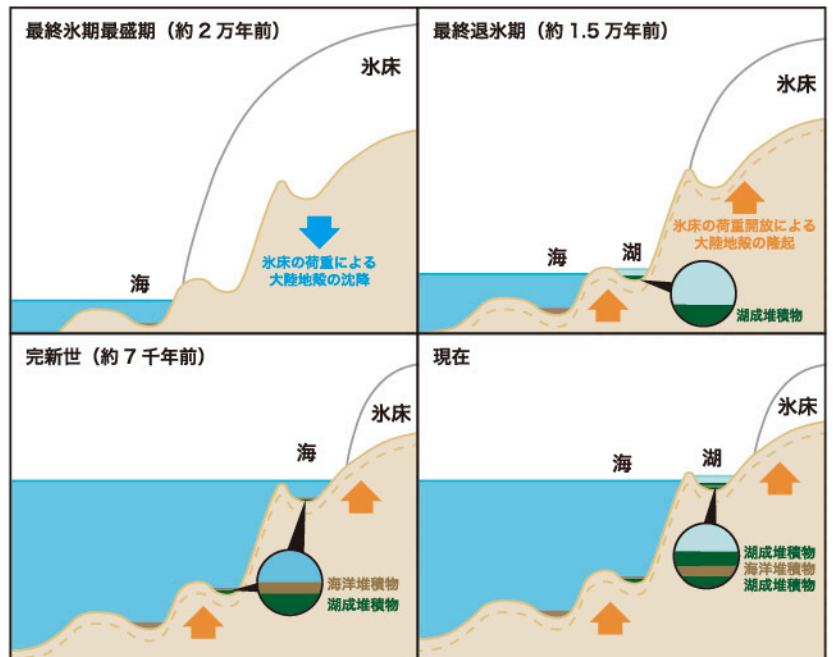


図3 海水準変動に伴って変化する沿岸堆積物の特徴を示した模式図。

● 小型ボートでの現地調査

海底に沈んだ池は、大型船が入れない浅瀬にあります。小型ボートによる調査の結果、新たに池を発見し、地層試料を採取しました。ここから過去の南極氷床の姿が明らかになる見込みです。



写真1 沿岸調査の拠点となったキャンプ。



写真2 ボートから海底地形を調査する様子 (提供：国立極地研究所)。



写真3 ボートから海底を掘削している様子 (提供：島根大学 佐々木聡史氏)。



南極の複雑な地形

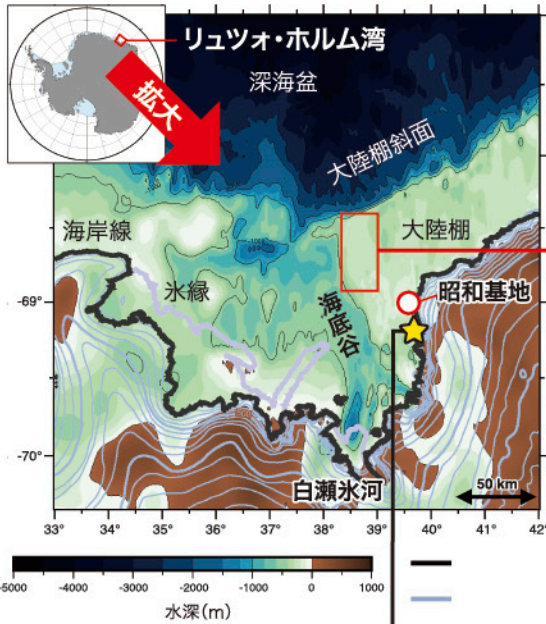


図1 リュツオ・ホルム湾とその周辺の地形.

● 氷河が削る大地

南極では、日本では見慣れない氷河の削剥による複雑な地形が広がっています。地形から氷床の拡大と後退、海の進入、地盤の隆起などの様子を読み取れます。

陸上だけでなく、海底にも氷河の影響を受けた地形が見られます。昭和基地付近のリュツオ・ホルム湾には、白瀬氷河から続く大きな海底の谷（海底谷）が目につきます。

大陸棚の陸に近い所では、平らな地形に引っかき傷のような模様が見られます。これらの複雑な地形は、氷床の拡大や後退の履歴を反映しています。

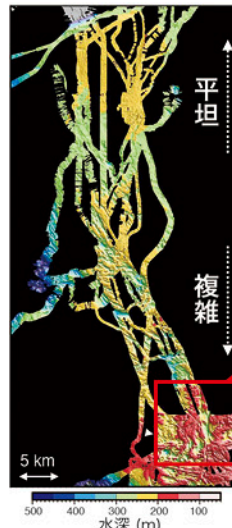


図3 海底地形。図7の手法で取得。黒地はデータの無い所。

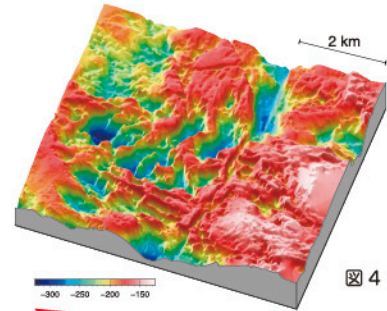


図4 陸に近い海底地形（図3右下）を拡大。



図2 昭和基地周辺（ラングホブデ）の陸上に見られる地形.

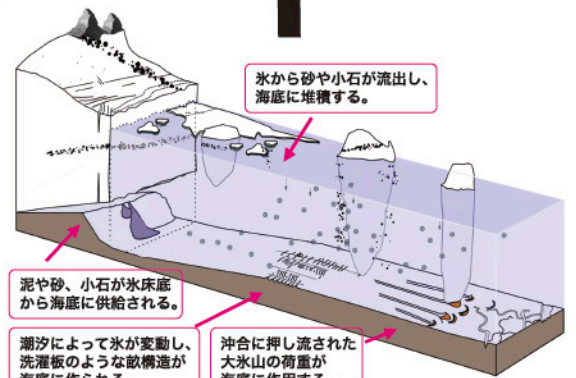


図5 線状に凹みが発達する仕組み。Smith et al. (2019) に加筆修正

おまけ の話

南極の地形を測る

南極の陸上と海底の地形はさまざまな最先端の技術を使って調べられています。

陸上地形

空から衛星やドローンを活用した測量で精密な地形が捉えられます。



写真1 陸上の地形を調査するドローン（提供：極地研 土井浩一郎氏）。

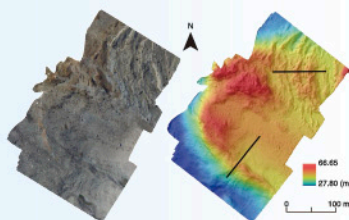


図6 ドローンで取得された航空写真（左）と地形（右）。

海底地形

船の底に扇状に音波を発信できる装置を取り付け、発信した音波が戻ってくる時間を測ることで水深を調べています。

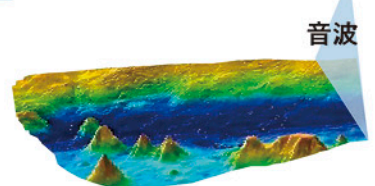


図7 観測船から音波で取得する海底の詳細地形のイメージ（提供：国立極地研究所）。



氷の下を調べる革新的技術

南極沿岸部の厚い棚氷や海水の下は、観測が困難な領域です。
革新的な技術を駆使して、この未知なる領域の調査を行います。

棚氷の掘削

昭和基地近くのラングホブデ氷河では、熱水ジェットで氷を融かしながら掘り進む熱水掘削により厚さ400 m以上の棚氷を掘り抜きました。

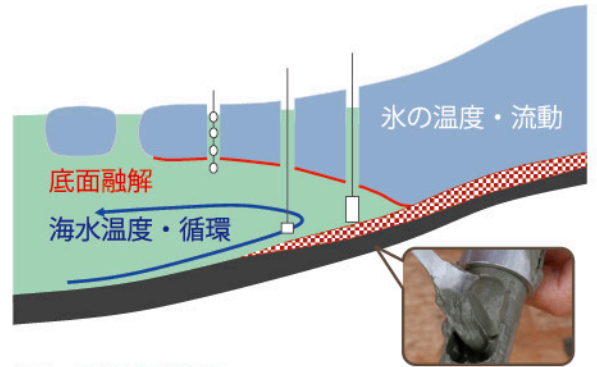


図1 棚氷掘削の模式図。

堆積物採取



写真1 熱水掘削。



写真2 掘削孔内部の様子。

この掘削孔から、センサーを降ろして水温や塩分を測定すると同時に、海底の堆積物採取やビデオカメラによる生物の撮影が行われています。

ヘリコプターからの海洋観測

厚い海水で覆われた南極の広大な海域は、砕氷船ですら十分な調査をすることができません。そこで、ヘリコプターで上空から海水の割れ目（リード）を探し、そこから水深、水温、塩分などのデータを取得するセンサー（プローブ）を投下します。



提供：国立極地研究所

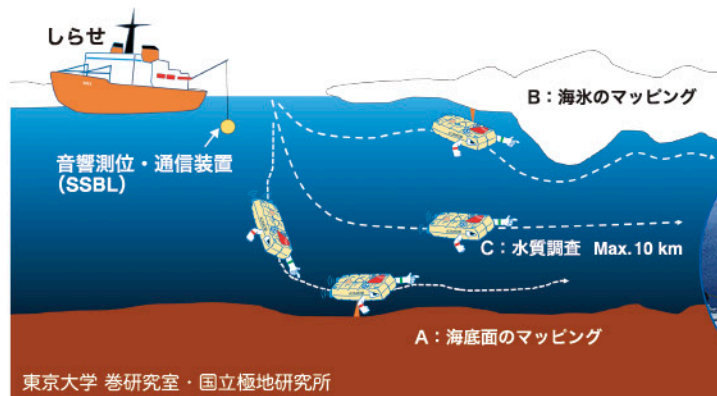
図2 プローブを投入するシステム AXCTD (Air-borne eXpendable Conductivity, Temperature and Depth). ヘリ後部の扉を開き、プローブを投入する。

無人探査機での調査

未探査領域であった沿岸の海水域における海中の観測を無人探査機で行う試みが行われています。



写真3 遠隔操縦ロボット (ROV: Remotely Operated Vehicle) により、海水下の観測が行われている。



東京大学 巻研究室・国立極地研究所

オホーツク海での試験運行
2021年3月



図3 自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) 「MONACA」, 海水や棚氷の下に入り込み、全自動で航行しながら氷の裏面の形状や海底地形を高精度に計測。



かいひょう

海氷の近くには生き物がいっぱい?!

海氷は海中への光をさえぎり、南極の海に生きる生物にとって長く厳しい冬をもたらします。この海域には多様で豊富な生物が存在していますが、さまざまな生物が厳しい環境にどのように適応して生きているかはあまり分かっていません。



氷縁域の生態系を調査する海鷹丸 (東京海洋大学練習船)



写真1 海氷の採集風景。

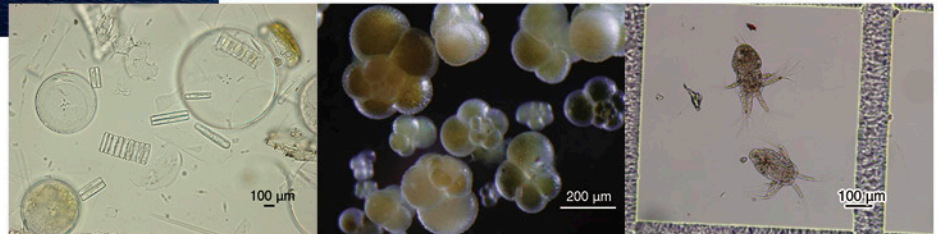


写真2 プランクトン (左: アイスアルジー, 中央: 有孔虫, 右: カイアシ類幼生).

南大洋の食物連鎖

南極に生息する多くの動物は、主に海氷が融けるときに放出されるアイスアルジーや植物プランクトンとして存在する藻類を土台とした食物連鎖に依存しています。

アイスアルジーは、さまざまな粒子とくっつくことで小さな塊になり海中を沈降します。これは、まるで海中に降る雪のように見えることから「マリンスノー」と呼ばれています。

裏返った氷が黄褐色になっています。これは、アイスアルジーが氷の底に密集して増えているためです。



写真3 漂流ブイ。海氷が融ける期間を連続観測。

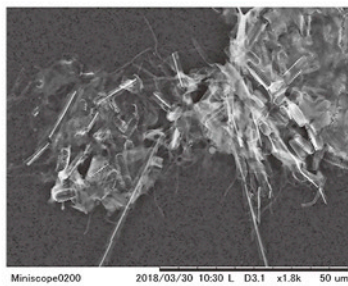


写真4 ハダカイワシ仔魚の胃の内容物を電子顕微鏡で撮影。提供: 東京海洋大学 藤塚 諭氏。

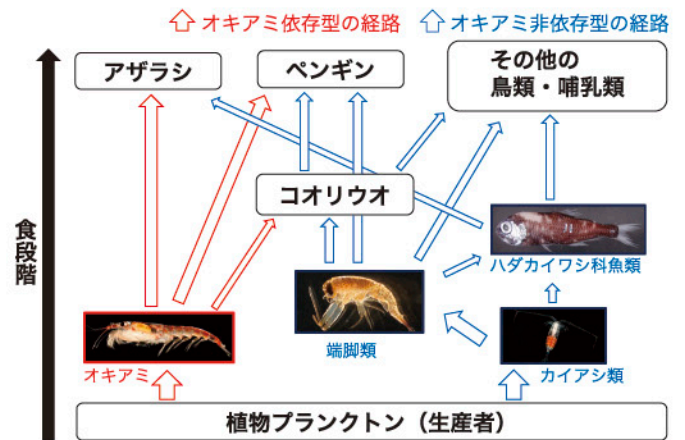


図1 南大洋における食物連鎖 (Murphy et al., 2007 をもとに作図)。

ハダカイワシ仔魚の胃の中には、珪藻の殻などが塊となっている様子が見られます (写真4)。動物由来のマリンスノーを捕食した痕跡も見られ、ハダカイワシ仔魚の餌として、マリンスノーが重要なことがうかがえます。南極といえばオキアミが有名ですが、最近では「オキアミ非依存型」の食物連鎖として、このハダカイワシ科魚類の役割が注目されています。

おまけの話

海底に沈んだマリンスノー

マリンスノーが海底に降ると、主に珪藻を含んだ泥が堆積します。右の写真は堆積物コアの断面です。水分が多くもやもやとしているのは珪藻化石がたくさん含まれるためです。この化石群集の変化を調べると、過去の生態系の様子を知ることができます。



写真5 ほとんど珪藻化石のみからできている海底堆積物 (珪藻軟泥)。



世界初！ トッテン氷河沖の採泥観測

東南極は、西南極よりもさらに巨大な氷床を有しています。その中でも特にトッテン氷河の下には温暖な深層水の流入が確認され、氷床流出の懸念は一層強まっています（P8 参照）。しかし、トッテン氷河周辺の海域は厚い海氷にはばまれて、これまで観測は進んでいませんでした。

● 調査の空白域

高い砕氷能力を持つ南極観測船「しらせ」は、2017～2018年と2019～2020年にこの海域に進入しました。さまざまな観測が行われ、特に2019～2020年にはトッテン氷河の末端付近では初となる本格的な採泥調査が実施されました。

「しらせ」以外では、オーストラリアの砕氷船「オーロラ・オーストラリス」がこの海域の調査を行っています。

● 氷海での採泥にチャレンジ

これまでの日本の南極観測事業では、観測船において大型採泥器を使用した本格的な採泥は行われておらず、今回が初の試みとなりました。

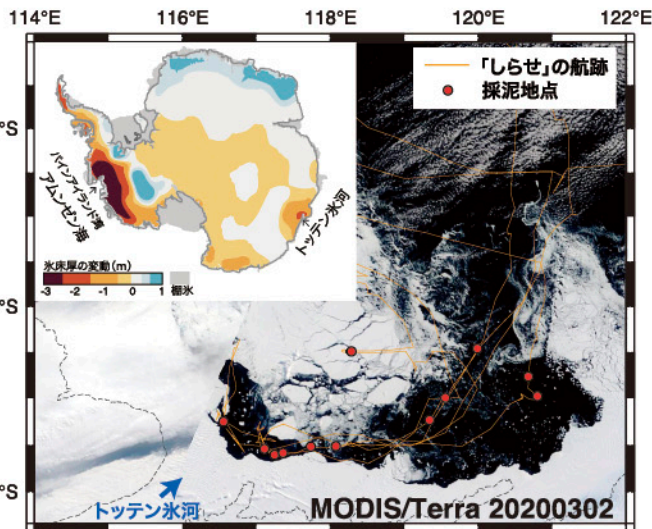


図1 2019～2020年のトッテン氷河沖の観測における「しらせ」の航跡と採泥地点。NASAの衛星画像を利用し、極地研ウェブサイトの図（GMT ver. 6を使用）をもとに作図。

大口径 グラビティー コアラー



写真1 コアラーによる採泥風景。

長いパイプを海底に突き刺し、降り積もった泥を柱状に抜き取ります。

海底表層の堆積物を大量に採取します。また、海底付近の海水を採取する装置、海底カメラ、水温や塩分などを測定するセンサーが設置され、さまざまなデータを同時に取得することができます。

木下式 グラブ採泥器

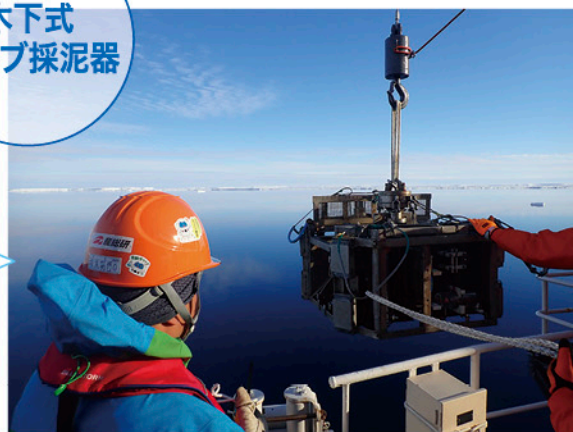


写真2 グラブ採泥器による採泥風景。

おまけ の話



過去にも起こった氷河の大量流出

約2万年前の最終氷期、南極氷床は今よりも発達しており、その後の温暖化で氷床は縮小しました。現在、氷床の融解傾向が顕著な西南極ですが、アムンゼン海のピンアイランド湾から採取された海底堆積物の研究から、約1万年前にも温暖な深層水の流入で、急激な棚氷の縮小が起きたことが明らかになっています（Hillenbrand et al., 2017）。トッテン氷河はどうだったのでしょうか？

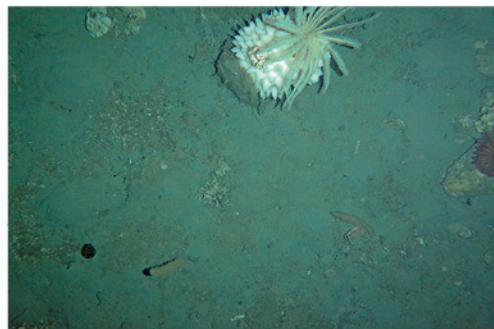


写真3 グラブ採泥器で撮影された海底の様子。不思議な生物も写っている。



写真4 採取した堆積物を船上で処理する様子。

● ^{たいせきぶつ}堆積物は語る

海底の泥は、長い時間をかけてゆっくりと降り積もっています。この泥（堆積物：写真5）には、積もった当時の環境が記録されています。

泥の中に石ころが入っています。これは、氷山が陸を削って海に運んできたものです。

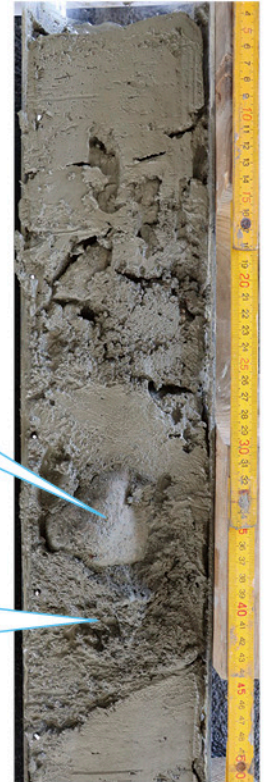


写真5 堆積物コア。
海底の堆積物を採取した柱状の試料。

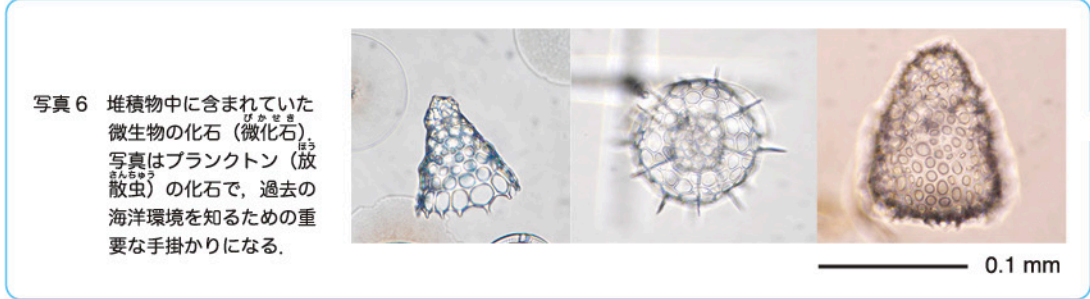


写真6 堆積物中に含まれていた微生物の化石（微化石）。写真はプランクトン（放射虫）の化石で、過去の海洋環境を知るための重要な手掛かりになる。

● 最新技術を使った分析

採取された堆積物試料は、さまざまな手法で詳細に分析され、過去の海洋環境の変化や氷河流出との関連性について解明されることが期待されています。

微化石自動分類・集積システム

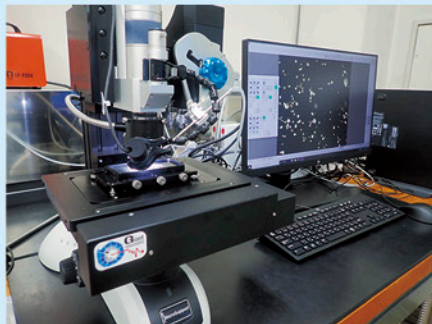


写真7 微化石を拾い出している様子。

堆積物試料に含まれる微化石の種を人工知能（AI）で分類し、それらをマニピュレーターで拾い出す装置です。これまで人の手では難しかった作業を自動で、しかも迅速に行うことができます。南極研究のプロジェクトで開発されました。

X線 CTスキャナー



写真8 堆積物コアのデータを取得している様子（提供：産総研 天野敦子氏）。

医療現場で使われるように、X線を使って堆積物の内部を非破壊で見ることができます。

写真9 取得された堆積物コアのX線画像（提供：産総研 清家弘治氏）。写っている白い影は、氷山が運んできた石ころ。



10 cm

XRF コアスキャナー (ITRAX)



写真10 堆積物コアのデータを取得している様子（提供：産総研 天野敦子氏）。

堆積物試料の表面にX線を照射し、発生した蛍光X線から元素濃度の変化を連続的に計測します。

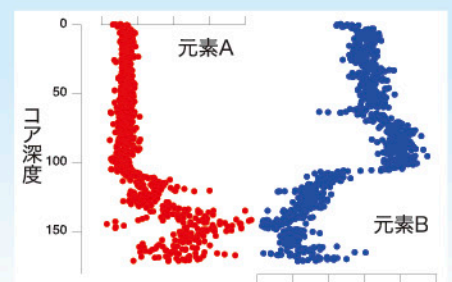
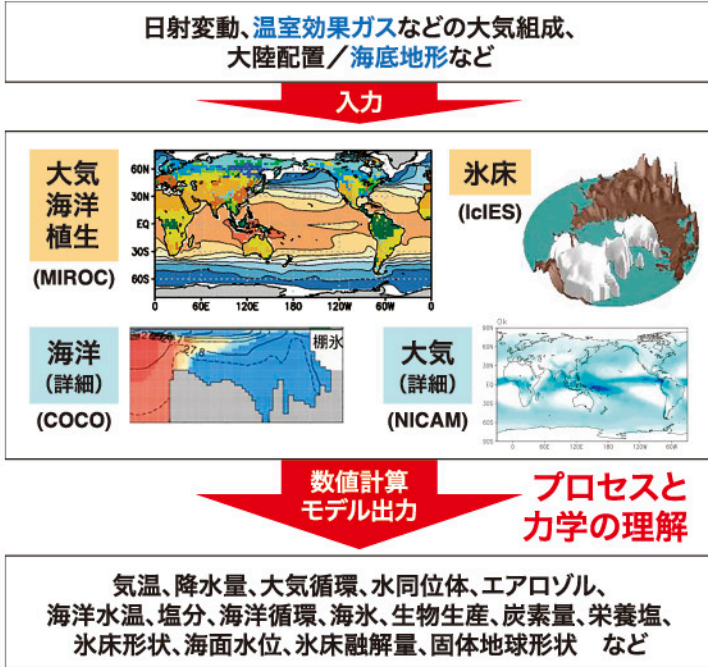


図2 堆積物コアから取得された元素濃度変化のイメージ。



温暖化と南極氷床の未来



● 環境変動研究の「切り札」

フィールドでの観測や試料の分析データから、現在・過去に起こった現象を捉えることができます。が、それぞれの因果関係（メカニズム）を正確に知ることは簡単ではありません。スーパーコンピュータを用いた数値モデル実験は、過去や現在に起きている環境変動のメカニズムを解明し、将来の環境変動を予測するための切り札となります。

● 氷床－海洋－気候の統合モデリング

数値モデル実験では、気候システムを構成する大気、海洋、氷床などの要素を「サブシステム」として捉え、以下のようなサブシステム間の相互作用に着目した数値モデル実験を行います。

- ・大気－氷床
- ・大気－海洋－海氷
- ・氷床－海洋
- ・海洋－炭素循環－生態系
- ・氷床－固体地球

さらに、それぞれの数値モデルを組み合わせる統合モデルを構築することで、複雑な気候システムを理解することができます。

図1 統合モデリングのイメージ。

モデリング例

高解像度海洋モデリングの例

- 入力：海面での気温や風速
- 出力：海水の温度、塩分、流速

図2は、リュツォ・ホルム湾における、観測された海水温（○）とモデル実験で得られた海水温（背景）の比較です。

この湾では、^{たなごおり} 棚氷の融解を引き起こす温暖な深層水が流入していることが海洋観測から知られています。この現象をモデル実験でも再現することができました。

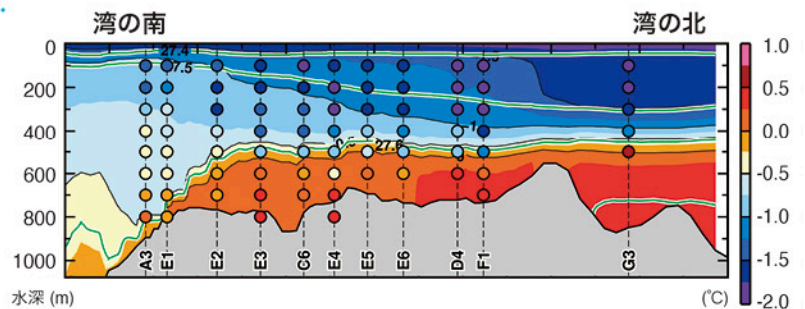


図2 観測結果とモデル結果の比較。

氷床モデリングの例

- 入力：気温、降雪量、棚氷の融解量など
- 出力：南極氷床の大きさや厚さ

地球温暖化が進むと、海水温が上がったり海洋循環が変化することで、棚氷の溶解が加速することが指摘されています。氷床モデル計算からは、棚氷の融解が増えると南極全体に影響が及び、氷床の末端部を中心に南極氷床の融解が進むという結果が得られています。

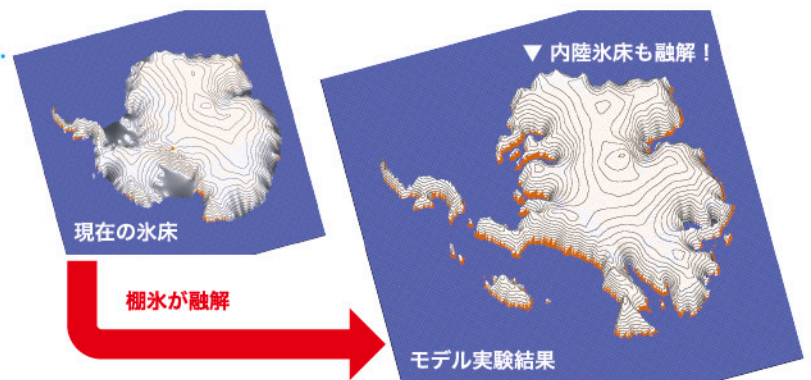


図3 氷床モデリングの実験結果。

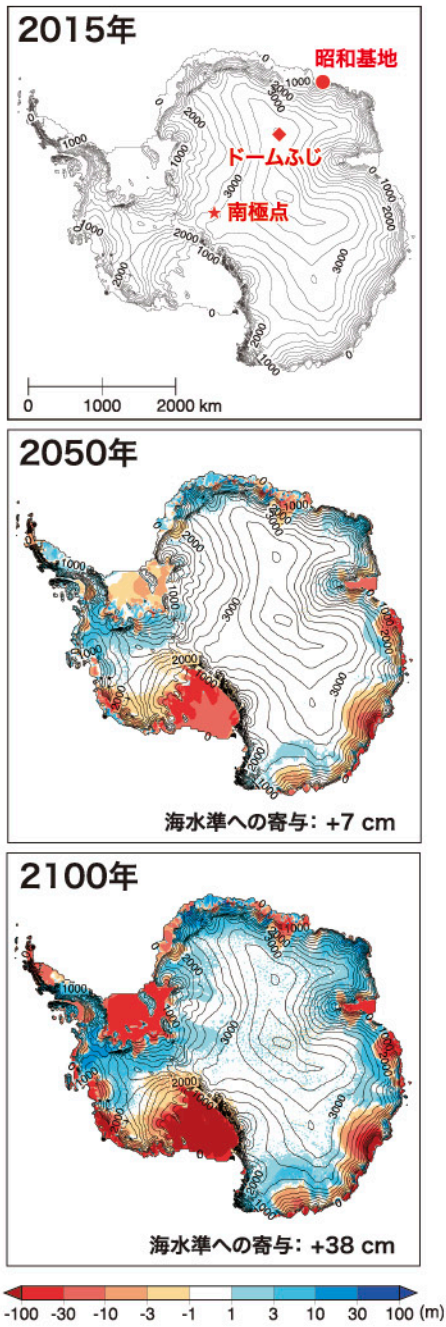


図4 氷床量と海水準の将来予測結果。

● どうなる？ 未来の南極

入力：2100年までの気温や降雪量の変化
(温暖化・気候変動予測)

出力：南極氷床量の変化、海水準変動への寄与

将来の気候変動により南極氷床がどれだけ融解するか、またその融解がどれだけ海水準を上げるかを予想するため、世界中の研究者がさまざまなモデルを使ってシミュレーションを行っています。

例えば、氷床モデル SICOPOLIS (Greve, 1997) による計算では、2100年には温暖な沿岸部を中心に氷床が失われ、それにより海水準が38 cm上昇するというシミュレーション結果が得られています。温暖化による氷床の融解には地域性があり、積雪が増えることで氷床が厚くなる地域もあります。

● 精密な将来予測のために

ただし、将来の氷床変化の予想はモデルによって大きくばらつきます。これには、以下の2つの理由があります。

- ① 2100年までの気温上昇予測が気候モデルにより異なる
- ② 同じ気温上昇量でも氷床モデルによって氷床の増加・減少量が異なる

こうした不確実性を少しでも減らし、気候と氷床モデルの両方の精度を上げるための取り組みが現在でも続けられています。

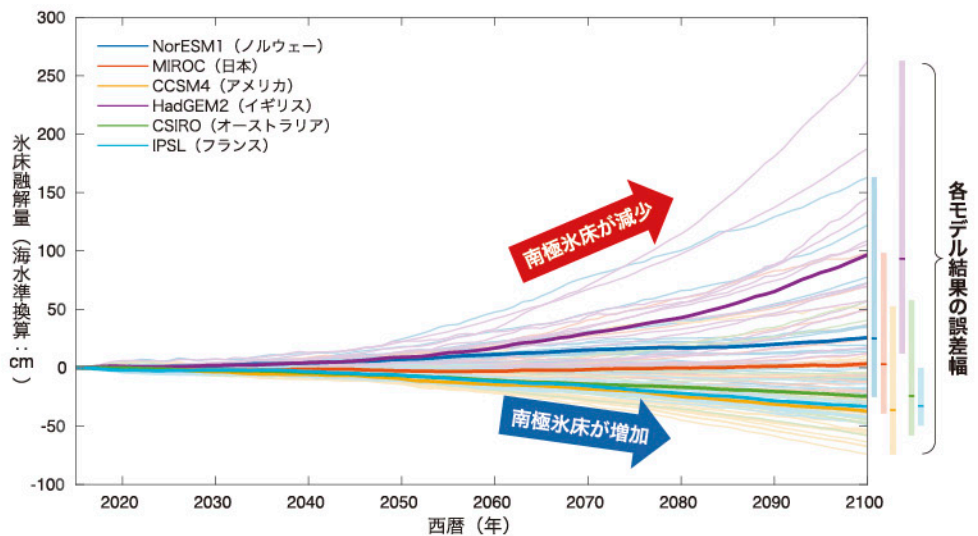


図5 さまざまなモデルによる氷床融解量の将来予測 (Serrousi et al., 2020 の図7より一部改変)。

南極が海面上昇を左右する !?

近年、南極氷床の融解と世界の海面上昇が、想定以上の速さで進んでいることが分かってきました。国連の IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は、南極氷床の融解が今後も加速していく可能性が高いと予測しており、海面上昇に重大な影響を及ぼすと考えられています。未来の地球環境を正確に予測するには、これからも過去と現在の南極を詳しく調べていくことがとても重要なのです。



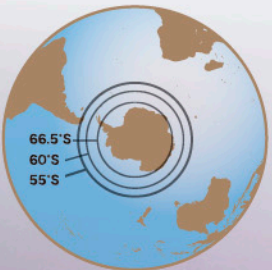
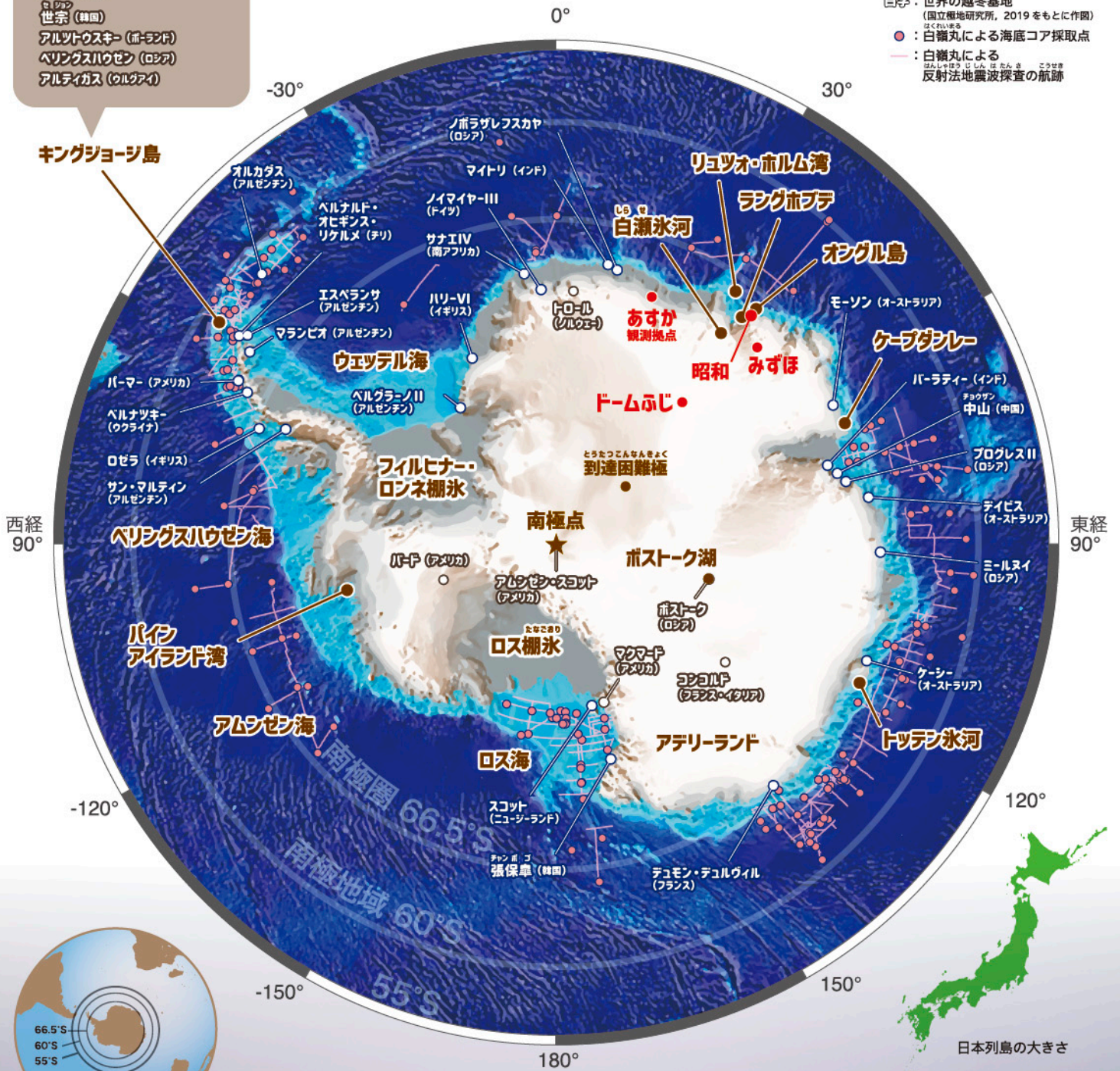
【引用文献・データソース】

- Elderfield, H., Ferretti, P., Greaves, M., Crowhurst, S., McCave, I. N., Hodell, D. and Piotrowski, A. M. (2012) Evolution of Ocean Temperature and Ice Volume Through the Mid-Pleistocene Climate Transition. *Science*, **337**, 704-709. doi: 10.1126/science.1221294.
- Freeman, N. M. and Lovenduski, N. S. (2016) Mapping the Antarctic Polar Front: weekly realizations from 2002 to 2014. *Earth System Science Data*, **8**, 191-198. doi: 10.5194/essd-8-191-2016.
- 藤井昌和・野木義史 (2018) 音波探査で海底を見る：海底地形に記録された地球環境変動. 低温科学, no. 76. doi: 10.14943/lowtemsci.76.269.
- Greve R. (1997) Large-scale ice-sheet modelling as a means of dating deep ice cores in Greenland. *Journal of Glaciology*, **43**, 144, 307-310. doi: 10.3189/S0022143000003257.
- Hillenbrand, C.-D., Smith, J. A., Hodell, D. A., Greaves, M., Poole, C. R., Kender, S., Williams, M., Andersen, T. J., Jernas, P. E., Elderfield, H., Klages, J. P., Roberts, S. J., Gohl, K., Larter, R. D. and Kuhn, G. (2017) West Antarctic Ice Sheet retreat driven by Holocene warm water incursions. *Nature*, **547**, 43-48. doi: 10.1038/nature22995.
- IPCC (2019) *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (海洋・雪氷圏特別報告書). <https://www.ipcc.ch/srocc/2021/7/1>.
- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs, S., Steig, E. J., Gudmundsson, G. H., Smith, J. and Heywood, K. J. (2016) Decadal ocean forcing and Antarctic ice sheet response: Lessons from the Amundsen Sea. *Oceanography*, **29**, 106-117. doi: 10.5670/oceanog.2016.103.
- 環境省 (2020) IPCC「海洋・雪氷圏特別報告書」の概要. http://www.env.go.jp/earth/ipcc/special_reports/srocc_overview.pdf [2021/7/1].
- Kawamata, M., Suganuma, Y., Doi, K., Misawa, K., Hirabayashi, M., Hattori, A. and Sawagaki, T. (2020) 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. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106540.
- 国立極地研究所 (2019) 南極観測. 16p. <https://www.nipr.ac.jp/kouhou/PDF/kansoku2019.pdf> [2021/7/1].
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y. and Sambridge, M. (2014) Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**, 15296-15303. doi: 10.1073/pnas.1411762111.
- Lambert, F., Delmonte, B., Petit, J. R., Bigler, M., Kaufmann, P. R., Hutterli, M. A., Stocker, T. F., Ruth, U., Steffensen, J. P. and Maggi, V. (2008) Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature*, **452**, 616-619. doi: 10.1038/nature06763.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A. C. M. and Levrard, B. (2004) A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, **428**, 261-285. doi: 10.1051/0004-6361:20041335.
- Martínez-García, A., Rosell-Melé, A., Jaccard, S. L., Geibert, W., Sigman, D. M. and Haug, G. H. (2011) Southern Ocean dust-climate coupling over the past four million years. *Nature*, **476**, 312-316. doi:10.1038/nature10310.
- Mouginot, J., Scheuchl, B. and Rignot, E. (2012) Mapping of Ice Motion in Antarctica Using Synthetic-Aperture Radar Data. *Remote Sensing*, **4**, 2753-2767. doi: 10.3390/rs4092753.
- 村上文敏 (2000) 白嶺丸による南極調査. 地質ニュース, no. 551, 51-56. https://www.gsj.jp/data/chishitsunews/00_07_09.pdf [2021/7/1].
- Murphy, E. J., Watkins, J. L., Trathan, P. N., Reid, K., Meredith, M. P., Thorpe, S. E., Johnston, N. M., Clarke, A., Tarling, G. A., Collins, M. A., Forcada, J., Shreeve, R. S., Atkinson, A., Korb, R., Whitehouse, M. J., Ward, P., Rodhouse, P. G., Enderlein, P., Hirst, A. G., Martin, A. R., Hill, S. L., Staniland, I. J., Pond, D. W., Briggs, D. R., Cunningham, N. J. and Fleming, A. H. (2007) Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **362**, 1477, 113-148. doi: 10.1098/rstb.2006.1957.
- NASA's Goddard Space Flight Center (2017) Antarctic Ice Loss 2002-2016. <https://svs.gsfc.nasa.gov/30880> [2021/7/1].
- NOAA National Geophysical Data Center (2009) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model. *NOAA National Centers for Environmental Information*. Accessed [2021/7/1].
- ODSN Plate Tectonic Reconstruction Service. <https://www.odsn.de/odsn/services/paleomap/paleomap.html> [2021/7/1].
- Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Williams, G. D., Nihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., Tamura, T., Hirano, D., Herraiz-Borreguero, L., Field, I., Hindell, M., Aoki, S. and Wakatsuchi, M. (2013) Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nature Geoscience*, **6**, 235-240. doi: 10.1038/ngeo1738.
- Rignot, E., Mouginot, J. and Scheuchl, B. (2011) Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet. *Science*, **333**, 1427-1430. doi: 10.1126/science.1208336.
- 佐藤 暢・野木義史・藤井昌和・佐藤太一 (2018) 南大洋の形成. 低温科学, **76**, 243-258.
- Seroussi, H., Nowicki, S., Payne, A. J., Goelzer, H., Lipscomb, W. H., Abe-Ouchi, A., Agosta, C., Albrecht, T., Asay-Davis, X., Barthel, A., Calov, R., Cullather, R., Dumas, C., Galton-Fenzi, B. K., Gladstone, R., Golledge, N. R., Gregory, J. M., Greve, R., Hattermann, T., Hoffman, M. J., Humbert, A., Huybrechts, P., Jourdain, N. C., Kleiner, T., Larour, E., Leguy, G. R., Lowry, D. P., Little, C. M., Morlighem, M., Pattyn, F., Pelle, T., Price, S. F., Quiquet, A., Reese, R., Schlegel, N.-J., Shepherd, A., Simon, E., Smith, R. S., Straneo, F., Sun, S., Trusel, L. D., Van Breedam, J., van de Wal, R. S. W., Winkelmann, R., Zhao, C., Zhang, T. and Zwinger, T. (2020) ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21st century. *The Cryosphere*, **14**, 3033-3070. doi: 10.5194/tc-14-3033-2020.
- Smith, J. A., Graham, A. G. C., Post, A. L., Hillenbrand, C. D., Bart, P. J. and Powell, R. D. (2019) The marine geological imprint of Antarctic ice shelves. *Nature Communications*, **10**, 5635. doi: 10.1038/s41467-019-13496-5.
- 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 (2017) 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**, 1-24. doi: 10.5026/jgeography.126.1.
- Suganuma, Y., Miura, H., Zondervan, A. and Okuno, J. (2014) East Antarctic deglaciation and the link to global cooling during the Quaternary: evidence from glacial geomorphology and ¹⁰Be surface exposure dating of the Sør Rondane Mountains, Dronning Maud Land. *Quaternary Science Reviews*, **97**, 102-120. doi: 10.1016/j.quascirev.2014.05.007.
- Uemura, R., Motoyama, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J., Kawamura, K., Goto-Azuma, K., Fujita, S., Kuramoto, T., Hirabayashi, M., Miyake, T., Ohno, H., Fujita, K., Abe-Ouchi, A., Izuka, Y., Horikawa, S., Igarashi, M., Suzuki, K., Suzuki, T. and Fujii, Y. (2018) Asynchrony between Antarctic temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, **9**, 961. doi: 10.1038/s41467-018-03328-3.
- USGS EROS Archive - Landsat Archive - Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level-1 Data Products. doi: 10.5066/F7WH2P8G.

南極MAP

- カリリミ (アルゼンチン)
- コマンドンテ・フェラス (ブラジル)
- フリオ・エスクテロ (チリ)
- エドアルド・フレイ・モンタルバ (チリ)
- ル＝テルナント・ロドルフォ・マシヨMエアロローム (チリ)
- 長城 (中国)
- 世宗 (韓国)
- アルツトウスキ (ノルウェー)
- ペリグスハウゼン (ロシア)
- アルティガス (ウルグアイ)

- 赤宇: 日本の基地・観測拠点
- 白宇: 世界の越冬基地
(国立極地研究所, 2019 をもとに作図)
- : 白瀬丸による海底コア採取点
- : 白瀬丸による
反射法地震波探査の航跡



【執筆】

板木拓也	地質調査総合センター	地質情報研究部門
名和一成	地質調査総合センター	地質情報研究部門
鈴木克明	地質調査総合センター	地質情報研究部門
石野沙季	地質調査総合センター	地質情報研究部門
杉崎彩子	地質調査総合センター	地質情報研究部門
高下裕章	地質調査総合センター	地質情報研究部門
田村 亨	地質調査総合センター	地質情報研究部門
川村賢二	国立極地研究所	
菅沼悠介	国立極地研究所	
奥野淳一	国立極地研究所	
真壁竜介	国立極地研究所	
青山雄一	国立極地研究所	
石輪健樹	国立極地研究所	
藤井昌和	国立極地研究所	
大島慶一郎	北海道大学	低温科学研究所
杉山 慎	北海道大学	低温科学研究所
岡 顕	東京大学	大気海洋研究所
小長谷貴志	東京大学	大気海洋研究所

【図・写真・試料提供】

国立極地研究所		
東京大学大気海洋研究所		
IODP JRSO		
石野咲子	国立極地研究所	
松井浩紀	秋田大学大学院	国際資源学研究科
佐木和夫	石油公団 (当時)	
佐々木聡史	島根大学	総合理工学研究科
土井浩一郎	国立極地研究所	
葦塚 諭	東京海洋大学	大学院海洋科学技術研究科
山縣広和	東京大学	生産技術研究所
天野敦子	地質調査総合センター	地質情報研究部門
清家弘治	地質調査総合センター	地質情報研究部門

【編集】

板木拓也	地質調査総合センター	地質情報研究部門
名和一成	地質調査総合センター	地質情報研究部門
鈴木克明	地質調査総合センター	地質情報研究部門
菅沼悠介	国立極地研究所/新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局	
田村岳史	国立極地研究所/新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局	
真壁竜介	国立極地研究所/新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局	
安藤とも枝	国立極地研究所/新学術領域研究「南極の海と氷床」事務局	
森田澄人	地質調査総合センター	地質情報基盤センター
瀬戸口希	地質調査総合センター	地質情報基盤センター

【デザイン・レイアウト】

都井美穂	地質調査総合センター	地質情報基盤センター
------	------------	------------

【発行】 2021年8月3日

【発行元】

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
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7
<https://www.gsj.jp>

