

南極海での近年の海氷拡大が自然変動である可能性 ～南極海における過去 2000 年間の海氷分布がエルニーニョや 南半球環状モードと連動して変化していたことを解明～

1. 概要

高知大学海洋コア総合研究センターの池原実教授は、ボルドー大学（仏）の Xavier Crosta 博士との国際共同研究の一環として、ノルウェー極地研究所、ビクトリア大学（NZ）、グラナダ大学（スペイン）らの研究者と共同で、南極海における過去 2000 年間の海氷分布と表面海水温の変動を詳細に復元しました。その結果、南極海の水氷分布が熱帯域のエルニーニョ/南方振動（ENSO）（※1）や南半球における十年規模変動である南半球環状モード（SAM）（※2）と連動して変化していることを明らかにしました。

2. 発表のポイント

- 南極海（南大洋）における過去 2000 年間の海氷分布と表面海水温の変動を詳細に復元することに成功。
- 海氷分布が熱帯域のエルニーニョや南極域の十年規模変動（SAM）と密接に連動して変化していることを解明。
- 近年の南極海の水氷拡大傾向は自然変動によるものである可能性が高い。



南極海の水氷と氷山（撮影：池原実教授）

3. 研究の背景

池原教授らの研究グループは、東京大学大気海洋研究所による共同利用システムを活用して**学術研究船白鳳丸**（※3）を用いた南大洋インド洋区における調査航海をこれまでに5回（2007年度、2010年度、2016年度、2018年度、2019年度）実施してきました。2007年度のKH-07-4 Leg3航海でコンラッドライズから採取した海洋コア COR-1PCの解析からは、過去約1万年間の完新世において南極前線が数百年スケールで南北移動していたことを明らかにしました（Katsuki, Ikehara et al., 2014, Journal of Quaternary Science）。また、2010年度の航海でも同じ海域から複数の海洋コアを採取し、本研究でも活用した COR-1GCの解析から、最終融氷期の14,200年前以降の表層水温変動を詳細に復元し、200年～260年の周期で表層水温が変動していたことを明らかにしました（Orme et al., 2020, Climate of the Past）。

このように南大洋のコンラッドライズ付近の海域は、南極前線の南に位置するために中深層からの栄養塩が豊富に供給されることによって珪藻を主体とする植物プランクトンの生産量が大きいため、堆積速度の速い珪藻軟泥が厚く堆積していることが海底下地層探査からも明らかになります（Oiwane, Ikehara et al., 2014, Marine Geology）。大陸から遠く離れた外洋域では特異的に速い堆積速度をもつ珪質堆積物をコンラッドライズから採取して、センチメートルスケールで細かく分析することによって、10年程度の時間解像度で過去から現代までの海洋環境変動を復元することができます。

本研究では、現代に続く約2000年間の南極海の海水と海水温の変動を詳細に研究しました。この過去2000年間という期間は、中世温暖期や小氷期など人類が直接経験した気候変動が古文書などの歴史記録として残っていると同時に、最近の100数十年は一定の精度をもつ海洋観測データが蓄積されている期間でもあることから、現代と過去をつなぐ時代として重要視されています。実際に、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が定期的にとりまとめている報告書でも、過去2000年間の気候変化についてのデータと情報がまとめられています。また、国際的な古気候研究ネットワークであるPAGES（Past Global Changes）の中にも、過去2000年間の古環境変動解析に焦点を絞った「2K network」（<http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/intro>）が2008年に組織され、現代に続く気候変動の実態と将来予測のためのデータ集約がなされています。

4. 研究の目的・内容・成果

近年人為的な地球温暖化が進行しているにもかかわらず、南大洋の海水は過去40年間で拡大する傾向を示していることが人工衛星による観測から指摘されています。海水拡大傾向は、海洋の熱の鉛直再配分の変化と大規模な大気循環場の移動が関連していると考えられていますが、調査船による現場観測データや人工衛星などによる海水分布記録は長くても100年程度に限定されるため、このような海水分布の変動トレンドが人為的な要因による変動なのか、自然変動なのかを解き明かすことはできません。

そこで本研究では、南大洋インド洋区の2地点（図1）から採取された**海洋コア**（※4）を解析することで、過去2000年間の海水分布と海水温の変動を詳細に復元することに取り組みました。海洋コア試料の1つは、**統合国際深海掘削計画（IODP）**（※5）第318次航海（Exp.318）において南

極大陸近傍のアデリー海盆で掘削された U1357B であり、もう 1 つは南極前線に近い南大洋インド洋区のコンラッドライズから学術研究船白鳳丸の KH-10-7 次航海で採取された海洋コア COR-1GC です。これらの海洋コア試料について、珪藻化石群集と珪藻バイオマーカーを分析することによって、表面海水温の変動と海氷の被覆期間の変化を 10 年以下の解像度で復元しました。その結果、それぞれの変動パターンの特徴が次の 4 つの期間に分類されることがわかりました。

第 1 期：紀元前 200 年～西暦 500 年

第 2 期：西暦 500 年～830 年

第 3 期：西暦 830 年～1520 年

第 4 期：西暦 1520 年～1900 年

U1357B においては、第 1 期と第 3 期では海氷珪藻種の *Fragilariopsis curta* と *F. cylindrus* が多産するとともに、海氷プロキシである高分岐イソプレノイドの組成比 (Diene/Triene) が増加することから、この期間には南極大陸沿岸域において海氷が増加し、1 年のうち 8～10 ヶ月の間海氷に被覆されていたことが示されました。一方、第 2 期と第 4 期では、海氷プロキシが減少することから海氷被覆期間が 7～8 ヶ月に縮小していたことが示されています。南極前線付近の COR-1GC の珪藻群集からは、この地点には海氷が到達しなかったこと、夏季表層水温が第 1 期と第 3 期初期におよそ 4.5℃、第 2 期にはおよそ 3℃であったことが示されました。

先行研究による古気候古海洋記録と比較することによって、南大洋の海水温が高く南極沿岸域での海氷被覆期間が長い第 1 期と第 3 期は、南半球中緯度の偏西風ベルトが南下し、南半球環状モード (SAM) が強い正を示し、熱帯域ではエルニーニョ的な環境が卓越する時代であることがわかりました。これらの現象は気候モデルからも復元されています。このことは、エルニーニョ的な熱帯環境と正の南半球環状モードが継続する時代は、亜熱帯から南極域への熱移送が増加することで海氷の北方への移動 (拡大) が妨げられることになり、結果として海氷が南極沿岸に制限され、海氷分布が縮小することになることを物語っています。

近年の人為的な地球温暖化にもかかわらず、南大洋では海氷分布が拡大する傾向を示していましたが、両者の同様の関係は人為的な影響が無い時代においても存在していたため、自然変動によるものである可能性が高いと考えられます。

5. 成果の意義・今後の展望

現在進行する地球温暖化が極域の海氷と氷床に与える影響の評価と将来予測は極めて重要であり、2019 年には IPCC から「海洋と雪氷圏に関する特別報告書」が公表され、温暖化による雪氷圏の変動、海氷分布の変化、氷床融解、海面上昇などに関するリスクがまとめられています。本研究は、観測記録のない時代の環境変動を海洋コアから詳細に復元し、南大洋の海氷と水温が熱帯域と連動しながら周期的に変動することを世界で初めて解明しました。

人為的な温暖化の進行に伴って、強いエルニーニョ状態の発生頻度の増加や南半球環状モードの

継続が予測されていることから、我々の研究成果に基づくと南大洋の海水分布は今後数十年で縮小していくと考えられます。

このような研究分野は古海洋学 (paleoceanography) と呼ばれており、世界中の海洋底から採取される海洋コアを試料として過去から現代に至る気候変動の実態を明らかにする研究が行われています。将来の温暖化地球のアナログとして注目されている時代が、およそ 12 万 5000 年前を中心とする最終間氷期最盛期です。今後、最終間氷期最盛期における南大洋の海水分布や海水温の変化を詳細に復元解析し、全球的な気候変動や南極氷床の融解程度との関係を解明する研究が進展することが期待されます。

6. 論文情報

本成果は、英科学誌「Nature Geoscience」に2月22日付け（日本時間2月23日1時）に掲載されました。

なお、本研究で用いられた海洋コアCOR-1GCは、高知大学が令和元年度に開設した学術コアレポジトリ（※6）において冷蔵保管されており、研究者コミュニティに公開されています。本研究の一部は科研費・新学術領域研究「南極の海と氷床」の一環で行われ、科研費JP17H06318の支援を受けて実施されました。

○論文タイトル：Multi-decadal trends in Antarctic sea-ice extent driven by ENSO-SAM over the last 2000 years

（過去 2000 年の ENSO-SAM による南極海の海水分布の数十年規模変動）

○著者名：Xavier Crosta¹, Johan Etourneau^{1,2}, Lisa Orme³, Quentin Dalaiden⁴,
Philippine Campagne¹, Didier Swingedouw¹, Hugues Goosse⁴, Guillaume Massé⁵,
Arto Miettinen⁶, Robert McKay⁷, Robert Dunbar⁸, Carlota Escutia⁹,
Minoru Ikehara (池原実)¹⁰

1 Université de Bordeaux, CNRS, EPHE, UMR 5805 EPOC, Pessac, France

2 EPHE-PSL Research University, Paris, France

3 ICARUS, Department of Geography, Maynooth University, Maynooth, Ireland

4 Earth and Life Institute (ELI), Université catholique de Louvain (UCL), Louvain-La-Neuve, Belgium

5 LOCEAN, UMR CNRS/UPCM/IRD/MNHN 7159, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

6 Norwegian Polar Institute, Tromsø, 9296, Norway

7 Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, New Zealand

8 School of Earth, Energy, and Environmental Sciences, Stanford University, California, USA

9 Andaluz Institute of Earth Sciences, CSIC-University of Granada, Granada, Spain

10 高知大学海洋コア総合研究センター/Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, Nankoku, 783-8502, Japan

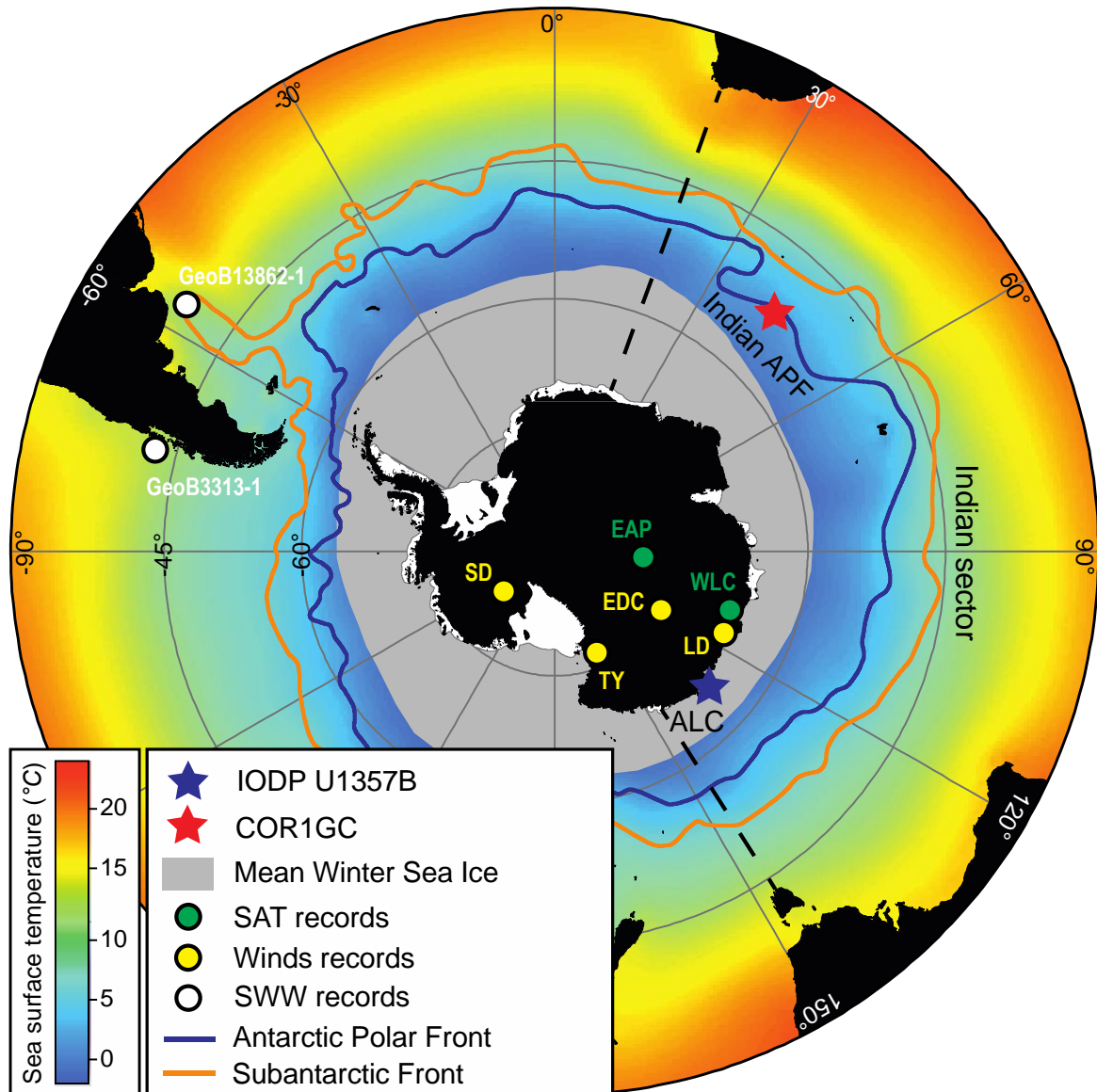


図1 研究に用いた海洋コアの位置 (★) を示すマップ。マップのベースは南大洋の表層水温分布と海洋フロント (南極前線: Antarctic Polar Front と亜南極前線: Subantarctic Front)。灰色の部分が冬季の平均的な海水分布を示す。

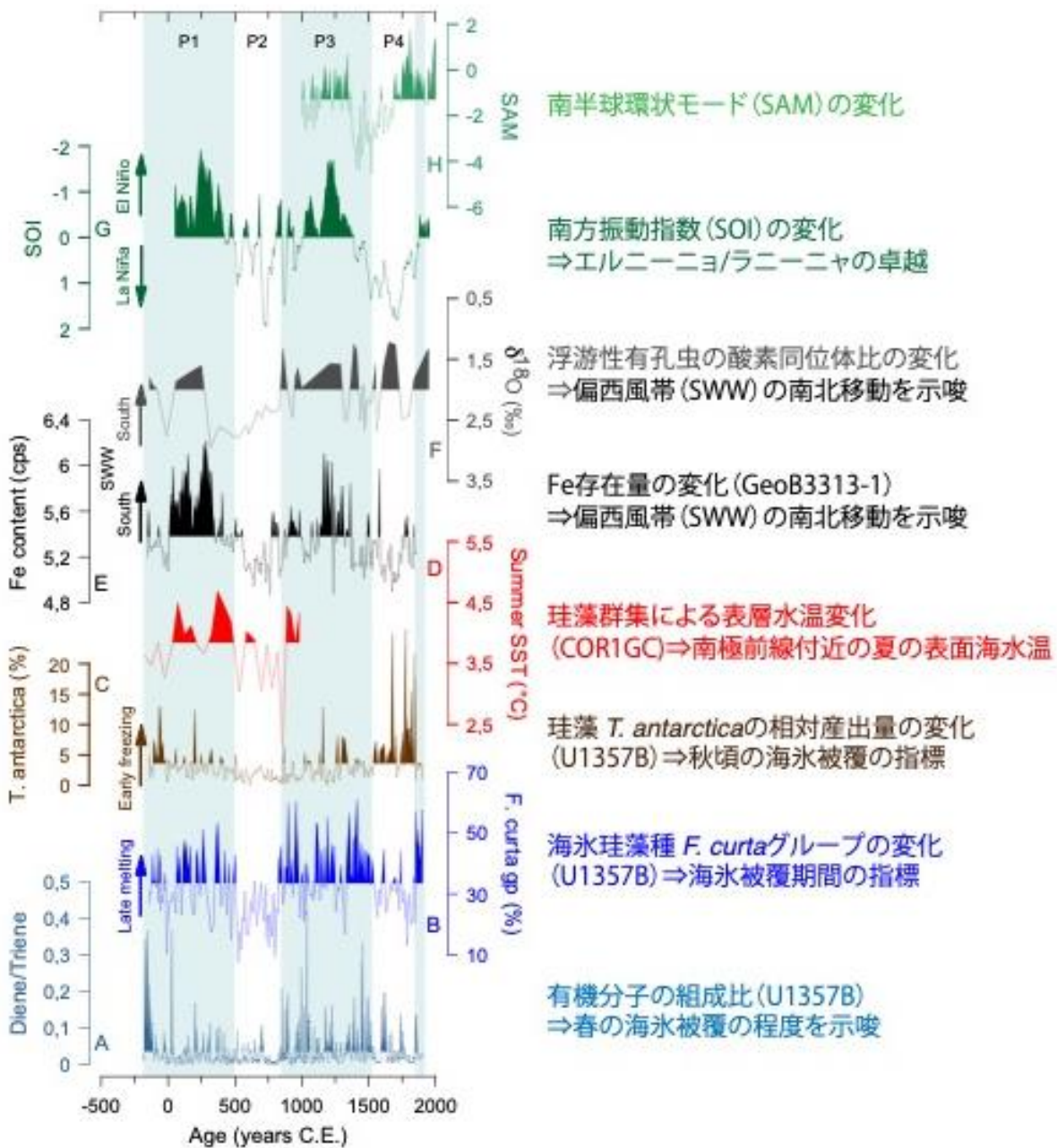
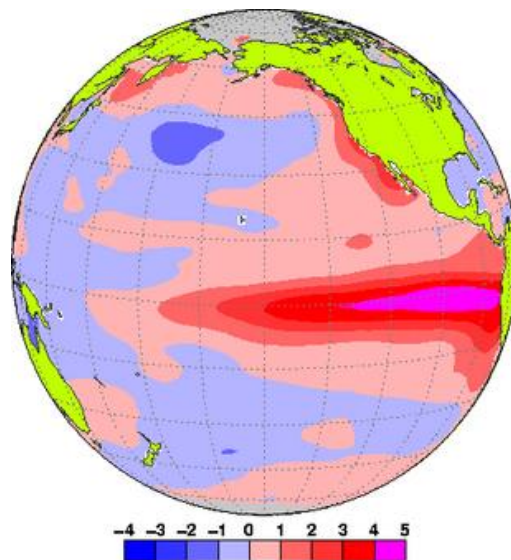


図2 過去2000年間の南極海における環境変動を示すグラフ。南半球環状モード (SAM) と熱帯太平洋におけるエルニーニョ/南方振動 (ENSO) の変化と、南半球の偏西風帯の移動、南極海における表面海水温や海水被覆期間の変化の対応が見られる。

【用語解説】

※1 エルニーニョ／南方振動 (El Niño/Southern Oscillation: ENSO) : 単にエルニーニョとも呼ばれる。太平洋の赤道域に設定されたエルニーニョ監視海域（日付変更線付近から南米沿岸）の海面水温が平年より有意に高く（低く）なる現象をエルニーニョ（ラニーニャ）と呼び、それに伴って南半球の海面気圧の東西勾配が小さく（大きく）なる南方振動で特徴付けられる。太平洋熱帯域での大気と海洋の相互作用によって引き起こされる数年規模の気候変動である。ENSO の影響は地球全体に伝搬し（テレコネクションと呼ばれる）、日本をはじめ世界各地の気候に影響を与えている。

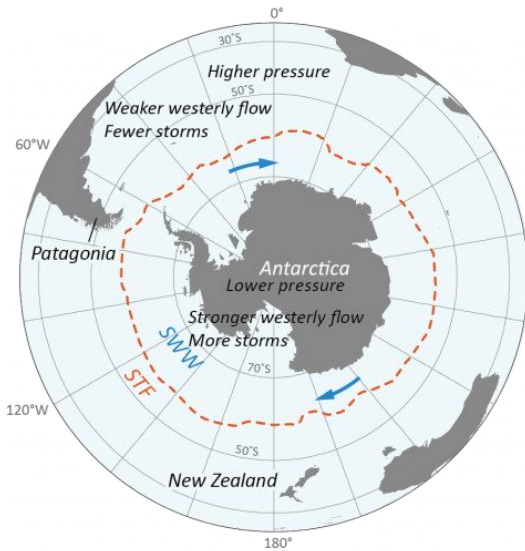


典型的なエルニーニョ現象が発生している時の太平洋の海面水温の平年偏差

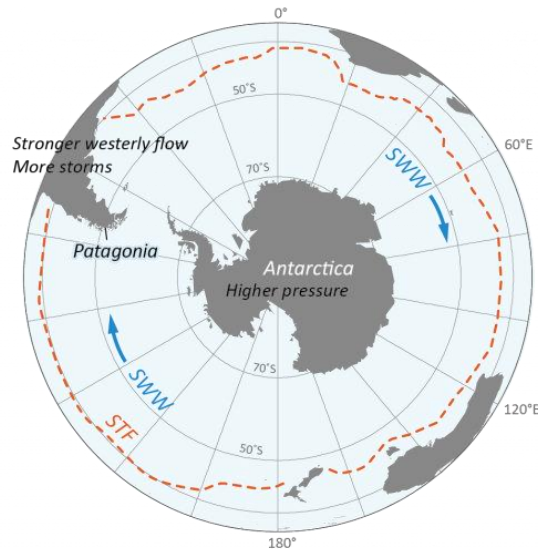
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elniño/learning/faq/whatiselnino.html>

※2 南半球環状モード (Southern Annular Mode: SAM) : 南極振動 (Antarctic Oscillation: AAO) とも呼ばれる。南半球の中～高緯度帯に卓越し、南極大陸を中心として環状に吹く偏西風ベルト（中心は南緯 50–55 度）が 10 年から 100 年規模の周期で繰り返し南北に移動（振動）する現象。南極振動指数 (SAM-index : 南緯 40 度と南緯 65 度の気圧偏差) の値が大きな正の値の時には南極域の気圧が負偏差を示し、中緯度の海上を中心に正偏差を示す。南極振動指数が負の値の時には逆パターンとなり、南極域と中緯度の気圧がほぼ環状にシーソー的な変動を示す。南極振動指数が正の時は、偏西風は南下して強くなり、周南極深層水 (Circumpolar Deep Water: CDW) の湧昇が強くなり、南極圏では相対的に温暖な CDW の影響が強くなるため南極氷床の棚氷融解を加速する。南極振動指数が負の時は、偏西風帯が低緯度側に拡大することで寒冷な環境が拡大し、CDW の湧昇は弱体化し、棚氷融解も減少する。最近 10 数年間は正の南極振動指数が続いている (Fogt and Marshall, 2020)。

POSITIVE SOUTHERN ANNULAR MODE



NEGATIVE SOUTHERN ANNULAR MODE

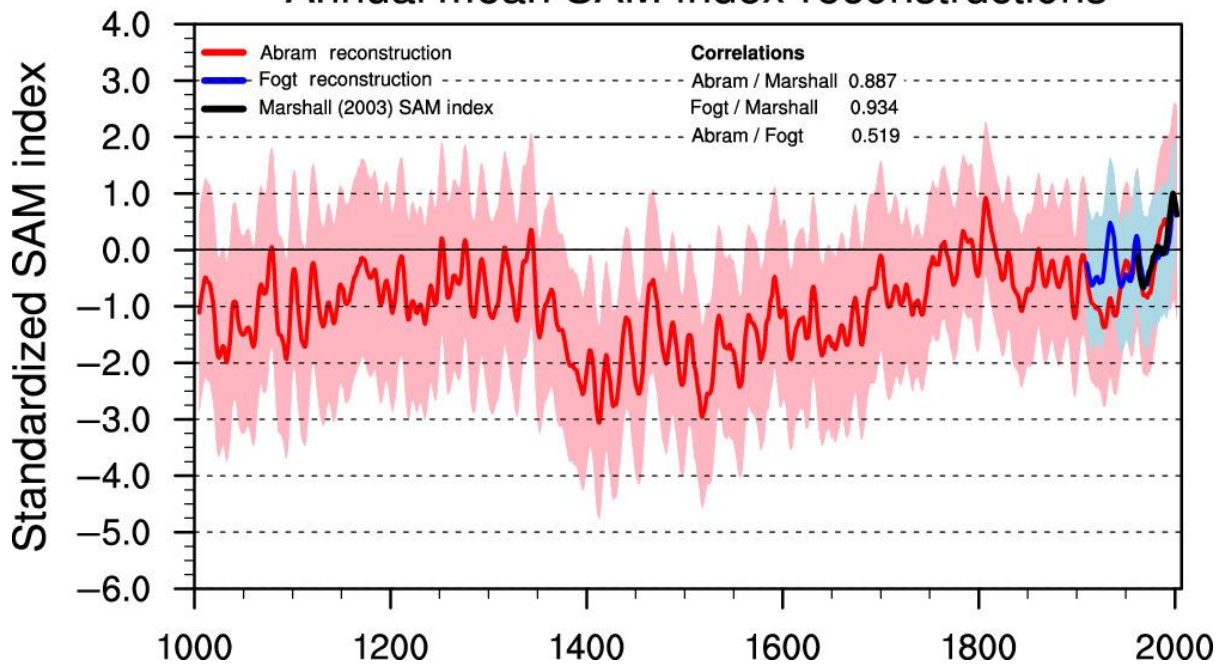


- SWW and STF contract; increased wind strength
- Winds contract poleward
 - Lower anomalous air pressure over Antarctica
 - Patagonia warms; decreased precipitation; glaciers recede. Antarctic Peninsula warms.
 - Increased CDW upwelling around West Antarctica and Antarctic Peninsula

- SWW and STF expand; SWW decreased strength
- higher anomalous air pressure over Antarctica
 - Patagonia cools; increased precipitation; glaciers advance. Antarctic Peninsula cools.
 - Decreased CDW upwelling in West Antarctica and Antarctic Peninsula

<http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/southern-annular-mode/>

Annual mean SAM index reconstructions



Fogt and Marshall, 2020

※3 **学術研究船白鳳丸**：海洋研究開発機構が運航する大型研究船（全長 100m）であり、海底地形探査装置など常設の観測設備に加えてピストンコアラーなど多様な観測機器を目的に応じて搭載することで長期間の多目的な研究航海を実施することができる。船内には 10 室の研究室があり、最大 35 名の研究者が乗船できる。東京大学大気海洋研究所の共同利用制度によって研究者コミュニティから研究航海計画が提案され、評価プロセスを経て採択された課題を基に長期航海が編成される。



ポートルイス港（モーリシャス）に停泊中の白鳳丸

※4 **海洋コア**：掘削などによって海底から採取される柱状の地質試料。プランクトンの遺骸、陸から運ばれる砂や泥、火山灰などが含まれる。

※5 **統合国際深海掘削計画（IODP：Integrated Ocean Drilling Program）**：平成 15 年（2003 年）10 月から平成 25 年（2013 年）9 月まで実施された多国間国際協力プロジェクト。日本が運航する地球深部探査船「ちきゅう」と、米国が運航する掘削船ジョイデス・レゾリューション号を主力掘削船とし、欧州が提供する特定任務掘削船を加えた複数の掘削船を用いて深海底を掘削することにより、地球環境変動、地球内部構造、地殻内生命圏などの解明を目的とした研究を推進した。平成 25 年（2013 年）10 月からは、国際深海科学掘削計画（IODP：International Ocean Discovery Program）として実施されている。

※6 **学術コアレポジトリ（KU-ABCR）**：高知大学海洋コア総合研究センターに令和元年度に開設された新たなコア保管管理システム。高知大学が海洋研究開発機構（JAMSTEC）と共同運営する高知コアセンターには、IODP などの科学海洋掘削によって全海洋の約 1/3 の海域（西太平洋やインド洋など）から採取されたコア試料（全長約 130 キロメートル分）を保管する IODP コアレポジトリ、JAMSTEC 船舶で採取された海洋コアのコアレポジトリが既に運用されていた。学

術コアレポジトリではそれらで扱われない多様な海洋コア、湖沼コア、陸上コアなどを系統的に保管・管理し、コミュニティに情報公開を行い、試料の二次利用に供する仕組みを運用している。
<http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/share/corerepository.html>



高知大学学術コアレポジトリで保管している海洋コアの位置を示すマップ