



2034年に向けたサイエンスとビジョン

2034年頃と目される南極観測船の代替のタイミングを念頭に、「将来のサイエンスの方向性」を基軸に、「そのサイエンスを実行するために必要となる」、「研究観測基地や研究観測船などの主要なプラットフォームに求める機能」および「事業運営のあり方」についての長期的な方向性（ビジョン）を示す。

サイエンスの方向性

全球的な視点から、南極の地理的および環境的特異性を踏まえた独自性の高いサイエンスを戦略的に実施

国家戦略としての地球規模課題解決

社会的要請を踏まえ地球規模の課題解決に向けて国家戦略として推進すべき研究

- ・南極氷床質量収支に起因する海水準変動の予測
- ・ポストオゾンホール時代の地球温暖化
- ・人為活動によって絶滅が危惧される南極海の高鳥の保全

知のフロンティア

人類の知的領域を拡大または未来を大きく変えるような発見等につながる研究

- ・地球惑星の形成と進化の探求
- ・太陽地球システムの解明 - 宇宙天気研究
- ・環境変動に対する生物の適応・進化の理解

将来のサイエンス実現に必要なプラットフォームの機能

プラットフォームの方向性

研究観測船

氷床融解による海水準変動および大気・海洋・海水・生態系変動の検知

沿岸基地・拠点

地球惑星科学における地理的特徴を活かした継続性に大きな利点

内陸基地・拠点

アイスコアによる古環境解明と今まさに激変する氷床・大気環境の観測

事業運営の方向性

- 次期南極観測船
 - ・「しらせ」クラスの強かな砕氷能力と優れた観測機能
 - ・運携研究船導入によるマルチシップ体制
 - ・サイエンス重視の運航体制
- 昭和基地
 - ・主要基地として機能強化
 - ・69棟→10棟へ機能集約
 - ・2年に1度の給油で済むエネルギーシステム
 - ・衛星回線メガからギガへ
 - ・基地エリア拡大と基地内アクセス網の整備
- 新ドームふじ基地
 - ・大陸氷床研究の拠点として整備
 - ・通年観測可能な可動基地として

現状のアセット等を踏まえ具体的な方向性

● 移動可能・無人観測拠点

- ・サイエンスプランに応じて柔軟広域に展開
- ・居住、装備、移動手段を備えたユニット
- 実施時期・アクセス
 - ・必要な人が、必要な地域に、必要な期間だけ
 - 輸送
 - ・海水状況に左右されない物資輸送
 - 財務戦略
 - ・外部資金獲得と予算構造の見直し
 - 観測隊員・観測隊組織
 - ・大学院学生も観測隊員に
 - ・隊次の廃止とマネジメント層の拡充
 - 国内運営体制
 - ・プログラムオフィス機能強化・スタッフ倍増
 - Japanese Antarctic Science Program

南極地域観測将来構想

—2034年に向けたサイエンスとビジョン—

中間報告

2018年10月5日

大学共同利用機関法人
情報・システム研究機構

国立極地研究所

南極観測将来構想タスクフォース

「南極地域観測将来構想 —2034 年に向けたサイエンスとビジョン—」中間報告に寄せて

国際地球観測年（1957-1958 年）を契機に開始された我が国の南極地域観測事業では、これまで昭和基地やドームふじ基地等の観測基地、あるいは南極観測船「しらせ」等の観測船を舞台に数々の科学的成果を上げてきました。1977 年からは、4~6 年を一区切りとする中期的な計画を基に、各年度の実施計画を立案・実施してきており、現在は、2016-2022 年の 6 年計画の枠組みで、第Ⅸ期計画を進めています。

前身の国立科学博物館の時代から実施機関として南極地域観測事業の中核を担ってきた国立極地研究所では、現南極観測船「しらせ」の就航（2009 年）にあわせ、2008 年に 10 年先の南極地域観測事業を見据えて「新たな南極地域観測事業のあり方—新観測船時代のビジョン—」を策定し、長期的な視点により第Ⅷ期、第Ⅸ期計画に取り組んできましたが、当初想定した 10 年が経過し、南極地域観測事業や学術・科学技術を取り巻く社会的、国際的な状況にも変化が生じています。

そこで、国立極地研究所では、時代に沿った新たな南極地域観測事業の将来構想を検討するため、2017 年 10 月に所内の南極観測委員会の下に南極観測将来構想タスクフォースを設置し、南極観測センタースタッフと若手研究者を中心としたメンバーで計 29 回の会合、2 回のワークショップを重ね、2034 年頃と見込まれる次期南極観測船就航を睨んだ将来構想の検討を進めてまいりました。更に、2018 年 7 月 31 日には、より多くの研究ニーズやアイデアを構想に盛り込んでいくため、「南極観測シンポジウム 2018」を開催し、コミュニティの皆さまから、サイエンスの方向性等に関するご提案をいただきました。また、シンポジウムに併せて、中間報告を暫定版という形で公開し、それに対する建設的な意見も頂戴いたしました。

このような経過を踏まえ、タスクフォース設置からちょうど 1 年にあたるこのタイミングで中間報告をとりまとめ、南極地域観測事業の統合推進を司る南極地域観測統合推進本部に提出することとしました。最終的には、本部委員等からのご意見等を踏まえたうえで、2018 年度中を目途に報告書としてまとめる予定です。

本中間報告が皆さまの目に留まり、最終的な報告書作成までの間に、より多くの皆さまから多様なご意見をいただけることを期待します。

2018 年 10 月 5 日
南極観測将来構想タスクフォース
委員長 野木義史

目次

1. はじめに	1
2. 目的.....	2
3. 現状分析	3
3.1. 南極観測のビジョンと課題	3
3.2. 南極観測を取り巻く国際状況.....	4
3.3. 第Ⅷ期及び第Ⅸ期の重点研究観測の設定と評価	5
4. 将来のサイエンスの方向性.....	6
4.1. 国家戦略としての地球規模課題解決.....	7
4.1.1. 南極氷床質量収支に起因する海水準変動の予測	7
4.1.2. ポストオゾンホール時代の地球温暖化.....	11
4.1.3. 人為活動によって絶滅が危惧される南極海の海鳥の保全	12
4.2. 知のフロンティア	14
4.2.1. 地球惑星の形成と進化の探求	15
4.2.2. 太陽地球システムの解明－宇宙天気研究	17
4.2.3. 環境変動に対する生物の適応・進化の理解	19
5. プラットフォームの方向性.....	20
5.1. 研究観測基地・拠点.....	20
5.1.1 沿岸基地・拠点	20
5.1.2 内陸基地・拠点	22
5.2. 研究観測船	24
6. 事業運営の方向性	25
6.1. 次期南極観測船	25
6.2. 基地整備・運用	27
6.2.1. 昭和基地.....	27
6.2.2. 新ドームふじ基地.....	30
6.2.3. 移動可能・無人観測拠点.....	31
6.3. 実施期間・アクセス.....	32
6.4. 輸送	33
6.5. 財務戦略.....	34
6.6. 事業の枠組み.....	38
6.6.1. 観測隊員.....	39
6.6.2. 観測隊組織.....	40
6.6.3. 国内運営体制	40
6.6.4. Japanese Antarctic Science Program	40
7. おわりに	42
8. 参考資料	43
8.1. 各国の砕氷研究船	43



8.2.	研究観測船に必要な観測機能及び装備・搭載機器の例	45
8.3.	南極へのアクセス	47
8.4.	日本隊の活動地域	48

1. はじめに

地球規模の気候変動システムを理解し、将来の気候を高精度で予測することは大きな社会的な要請である。北極域では、近年温暖化や海氷減少の加速をはじめ、急速な環境の変化が起こっている。南極域においては、南極氷床は比較的安定とこれまで考えられてきたが、近年になり西南極の氷床融解が相次いで報告されている。地球システムの中で、両極域は全球的な環境変動の影響を受け変動し、この両極で起きる環境変動は、大気・海洋循環等を通して結合し、全球的な気候システムに大きな影響をもたらすと考えられている。しかしながら、ひとたび変動が起きれば全球的な影響が大きい南極域と、急変する北極域との両極間の結合も未だ明らかではない。一方で、全球的な気候システムを含む地球システムそのものを理解する上で、両極の相互作用を含む極域システムの解明は不可欠である。したがって、地球規模の気候変動解明の鍵であるとされる両極域において、現在、進行している温暖化等の環境変動シグナル及びその影響を精密観測により定量的に把握し、人類の生存のため、将来予測の精度を上げる事が強く求められている。

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)や IPBES(生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム)等による、気候や生態系変動等の予測の高度化や精緻化には、観測データにもとづいた現在の状態と変化、および過去の変動記録等の解明が必須である。特に IPCC 第 6 次評価報告書 (AR6) サイクルで、特別報告書として「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書」の作成が進んでおり、海洋・雪氷圏で構成される両極域、とりわけ巨大な氷床を有し周囲を海洋で囲まれた南極域が非常に重要な地域である事は明白である。しかしながら、両極域は、厳しい気象条件や、海氷、氷床等に阻まれ、他地域に比して、圧倒的に観測データの少ない地域であり、その実態は未だ十分に明らかにされていない。全球的な気候や生態系変動等の予測の高度化や精緻化に向け、今以上に両極域の現場からの多くの詳細な観測データの取得が現在においても望まれている。

以上のような、全球のおよび両極の視点をもとに、南極域での研究・観測を実現する上では、厳しい自然や限られた環境の中での計画の立案および実施となり、設営面を含めた事前準備にかなりの時間を要する。したがって、将来の研究・観測実施に向け、現時点で南極域での研究・観測の進むべき方向を整理し、その実現のために必要なプラットフォームや運営を予め検討し、速やかに整備等に着手していく必要がある。また、技術革新により、南極域での研究・観測に変化がもたらされる可能性は高く、それに対応するプラットフォームや運営等の整備も必要になる。

今回の将来構想が契機となり、分野を超えた南極域での研究・観測や国家的な政策に関する議論が活性化し、今後の南極観測が持続的に、より大きく飛躍する事を期待する。

2. 目的

地球規模気候変動の解明および将来予測の精度向上において、ますます両極域の重要性が増す中、今後の研究・観測の方向を整理し、国際的な動向も踏まえ、極域研究における日本の進むべき道を検討する必要がある。特に、南極における研究・観測においては、プラットフォームの整備等に時間を要する事から、長期的ビジョンを持って着実に進めていく事が不可欠である。国立極地研究所は新「しらせ」就航に合わせて「新たな南極地域観測事業のあり方—新観測船時代のビジョン—」（2008年）（以下「2008年構想」と言う。）を策定し、そのビジョンの下10年間にわたって、南極地域観測事業（以下「南極観測」と言う。）の実施中核機関として第VIII期及びIX期6か年計画を推進してきたが、社会、環境及び研究観測動向の変化を踏まえ、これらの見直しも必要とされている。特にこの構想では、南極観測における設営や運営方針の改善等に重点が置かれている事から、南極で行うべきサイエンスの観点からの整理および再検討の必要性がある。また、南極観測船「しらせ(5003)」も就航後8年が経過しており、次期南極観測船の建造（2030年頃から）に備え、求める機能や運用方法についても幅広く議論を行い、今後のビジョンを取りまとめる必要がある。

本構想は、上記のような問題意識のもと、南極観測において昭和基地と並ぶ最大のプラットフォームである南極観測船の代替のタイミングを念頭に、南極観測の実施中核機関である国立極地研究所（以下「極地研」と言う。）が、特に「将来のサイエンスの方向性」を基軸に、そのサイエンスを実行するために必要となる、「研究観測基地や研究観測船などの主要なプラットフォームに求める機能」および「事業運営のあり方」についての長期的な方向性（ビジョン）を示すことを目的とする。

本構想で示すビジョンは、次期南極観測船により実現する研究・観測を念頭に置くものであり、当該研究・観測の実現時期は次期南極観測船の運用期間ということになる。ここでは、現南極観測船「しらせ（5003）」の耐用年数（25年）に鑑み、次期観測船の運用開始を2034年、運用期間は概ね25年以上と仮定する。上記を踏まえ、本構想で掲げるプラットフォームや事業運営などは、2034年までに実現すべきものとして構想する。

南極観測が国民に支えられた国家事業としての枠組みで発展してきた経緯も踏まえ、本構想の内容は、国民の理解と賛同を得られる内容でなければならない。具体的な想定読者としては、上記の目的を踏まえ、政策決定者（科学技術政策における位置づけ）、研究者コミュニティ（優れた研究者の参入を促す）や産業・経済界（新たな活力を呼び込む）をターゲットとして想定するとともに、南極観測の中核実施機関としての極地研の事業推進の今後の指針となるべきものを目指す。

南極観測は、現在、文部科学大臣を本部長とした南極地域観測統合推進本部（以下「南極本部」

と言う。)が定める6か年計画により実施しているが、北極における「我が国の北極政策」(2015年)のような基本的な政策が存在しない。また、宇宙、海洋、北極などと違い、南極は政府の科学技術基本計画の中への位置づけもない。本構想は、極地研が関連コミュニティの意向を踏まえつつ構想したものであり、これがそのまま我が国の政策として位置づけられるものではないが、本構想で示す方向性が今後の我が国の南極研究・観測の方向性を示し、いずれは「我が国の南極政策」の科学部分に組み込まれていくことを期待する。

3. 現状分析

3.1. 南極観測のビジョンと課題

南極観測の最初の長期的な方針は、南極本部が1976年3月22日に策定した「南極地域観測事業の将来計画基本方針」である。ここでは、次の3点が基本方針として示され、以降、これを踏まえて5か年を1単位とする観測計画が立案されるに至った。

- ①学術的意義の高い科学調査研究を重点的に推進すること
- ②南極資源およびその開発に関連する基礎的な調査研究を推進すること
- ③科学調査研究の国際協力及び調査研究領域の拡大を図ること

このビジョンは、南極本部が初めて策定した南極条約の精神に基づく普遍性を持つ基本方針であり、40年を経過した現在でも有意義なものと評価できる。

その後、南極本部は「南極地域観測将来問題検討部会」を設置して将来のあるべき姿について長中期的な観点から検討を行い、「報告書－21世紀に向けた活動指針－」(2000年12月6月)を取りまとめた。この報告書では、機動的で開かれた研究体制、昭和基地へのアクセスの多様化、柔軟な観測隊の編制、情報通信の整備などの数々の提言がなされている。これを受けて、南極本部は「南極輸送問題調査会議」を設け、「船舶による輸送体制」および「航空機による輸送体制」の分科会において調査・検討を行い、報告書を取りまとめた(2002年6月)。この報告書では「しらせ」後継船に求められる要件を詳細に検討している。

さらに、南極本部は外部評価委員会を立ち上げて、南極観測開始以来初めてとなる全体的な評価を実施し、以下の8項目をこれからの課題として位置付けた。(2003年7月)

- ①南極観測の継続の必要性
- ②支援体制の強化
- ③航空機による人員輸送の促進
- ④開かれた研究体制の確立
- ⑤評価体制の確立、外部評価の実施
- ⑥産学官連携の促進
- ⑦国際共同観測への協力及び国際交流の促進
- ⑧研究資料の公開、研究成果の広報、広報活動の促進

これらは、この 15 年間で進んだ部分もあるが、まだまだ課題として残っていることも多いというのが実情である。

3.2. 南極観測を取り巻く国際状況

IPCC において極域が重要なパートあることは言うまでもないが、SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) では南極に関する知見をより詳しく整理すべきとの考えに基づき、IPY (International Polar Year) 2007-2008 を契機として、南極版 IPCC 報告書とも言うべき、“ANTARCTIC CLIMATE CHANGE AND THE ENVIRONMENT”を 2009 年に出版した。この動きは、さらに“SCAR HORIZON SCAN”とつながり、南極における研究の方向性を世界のステークホルダーに知らせるものとなった。SCAR HORIZON SCAN では、広く集められた多数の研究課題の中から、将来を見据えた議論と投票を通じて、重要な研究課題を選定していく手法がとられた。そして、SCAR が指名した研究者および政策担当者 75 人からなる国際委員が一堂に会し、850 以上の研究課題の中から、優先的に研究を進めるべき 6 分野と 80 課題が選定された (Kennicutt, et al., *Nature* 512, 23-25 (06 August 2014) | doi:10.1038/512023a)。6 分野は次のとおりである。

- ①南極大気と南大洋の影響が世界に及ぼす範囲を明確にする
- ②氷床が質量を失う過程、場所、原因を理解する
- ③南極地域の歴史を明らかにする
- ④南極地域の生命がどう進化して生き残ってきたのかを学ぶ
- ⑤空間と宇宙を観測する
- ⑥人間の影響を認識して軽減する

原文： Six scientific priorities

- ①Define the global reach of the Antarctic atmosphere and Southern Ocean.
- ②Understand how, where and why ice sheets lose mass.
- ③Reveal Antarctica's history.
- ④Learn how Antarctic life evolved and survived.
- ⑤Observe space and the Universe.
- ⑥Recognize and mitigate human influences.

一方、COMNAP (Council of Managers of National Antarctic Programs) は、“SCAR HORIZON SCAN”を受けて、そこに構想された研究・観測を実施する上で必要な設備・技術開発・輸送などの設営的課題を、実現可能な機関、予算などの観点から洗い出す作業を行い、“Antarctic Roadmap Challenges”として整理した (Kennicutt, et al., *Antarctic Science*, First View, 1-16 (September 2014) | doi:10.1017/S0954102014000674)。“SCAR HORIZON SCAN”

および”Antarctic Roadmap Challenges”は、各国の南極研究コミュニティや観測実施責任機関にとって、今後の将来計画策定の礎となり得る。

個別の国における中長期計画において、先進的な取り組みを見せているのは豪州である。豪州政府は2011年3月に”Australian Antarctic Science Strategic Plan 2011-12 to 2020-21”を発表した。新砕氷船（2019年就航予定）、航空機アクセス、内陸輸送再整備、そして基地設備の更新などをベースとした、南大洋の海洋研究および深層掘削によるアイスコア研究の展開を柱に、20年間にわたる具体的なサイエンスプランを策定し、それに基づいて、組織、予算、あらゆる活動のベクトルを合わせていく計画である。注力する研究領域を絞り込んで、経費を重点的に配分することが特徴的である。

近年では、前述の豪州の他にも英国および中国が新砕氷船を建造中であり、インドやドイツ、米国も新砕氷船建造プランを公表している（参考資料 8.1 参照）。豪州砕氷船オーロラ・オーストラリスは1990年に就航し2019年までの30年間、ドイツ砕氷船ポーラシュテルンは1982年就航し、30年以上南北両極の最先端の海洋・海氷観測と南極基地の物資輸送を担ってきた。英国は、新砕氷船が2019年に就航するのに合わせて、既存の2隻の砕氷船を退役させ、新砕氷船1隻による両極海洋観測と南極基地への輸送体制にシフトする。合わせて、南極における基盤基地であるロゼラ基地の棧橋を新船の能力に対応させるべく、大規模な設備更新を計画している。米国は、老朽化した砕氷船の更新に臨むにあたり、必要とされる装備や性能の意見集約を開始した。また、60年以上経過したマクマード基地の再整備を計画し、105の建物を6に集約するとの方針を打ち出した。IGYを契機に整備された南極研究の基盤プラットフォームの多くが更新の時期を迎えており、国策としての対応の一端が見て取れる。

3.3. 第Ⅷ期及び第Ⅸ期の重点研究観測の設定と評価

第Ⅷ期以前の重点研究観測のテーマ設定と評価

第Ⅵ期5か年計画までは、宙空圏、気水圏、地圏、生物圏の4つの研究分野・研究領域において、大学共同利用機関としての極地研が、それぞれコミュニティの意向を踏まえて、観測計画を立案して実施してきた。また、MAP（中層大気国際共同観測計画）、WCRP/ACR（南極気候研究計画）、BIOMASS（南極海洋生態系及び海洋生物資源に関する生物学的研究計画）など、国際共同研究計画の一翼を担い、かつ分野横断的な一面をもつ大型計画も実施されてきた。

国立大学法人化に伴い、主として中期計画の立案や実施における効率性の観点から、第Ⅶ期計画は4か年、第Ⅷ期計画以降は6か年で実施されることとなった。第Ⅶ期計画は（第48次隊～51次）、輸送においても大きな過渡期と重なった。すなわち、初代「しらせ」の最終年次（第49次隊）、オーロラ・オーストラリス号の備船（第50次隊）、新「しらせ」の就航（第51次隊）である。他方、研究観測においては、計画期間を通して集中的にとりくむ研究観測として「重点プロジェクト研究観測」という枠組みを設定し、「極域における宙空圏－大気－海洋の相互作用からとらえる地球環境システムの研究」が設定された。そして、2つのサブテーマ「極域の宙空圏

「大気圏結合研究」および「極域の大気圏－海洋圏結合研究」のもと、境界領域を研究対象とする観測が実施された。南極本部の外部評価委員による第Ⅶ期計画の外部評価書では、「全体として計画通り達成され、以降の研究基盤として発展的に引き継がれ、成果創出の貢献することが期待される」との評価であった。

第Ⅷ期計画（第52次隊～57次隊）は期間が6か年となり、当該計画のフラッグシップ計画は第Ⅶ期計画の流れを受けて、「重点研究観測」として設定された。このテーマ設定において、極地研が中心となり、広く研究コミュニティからの課題のシーズ・ニーズ提案を受けて議論する場として「南極観測シンポジウム」を開催し、課題の集約を図った。これらを踏まえ、南極本部では、国際的な研究動向や、研究観測アセットなどを考慮して、重点研究観測「南極域から探る地球温暖化」を定め、このもとに3つのサブテーマ「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」「南極域生態系の応答を通して探る地球環境変動」「氷期－間氷期サイクルから見た現在と将来の地球環境」を実施した。南極本部外部評価委員会は、「我が国の南極観測は、学術研究面のみならず、南極における様々な活動を通して国際貢献にも重要な役割を果たしており、今後も明確な戦略に基づき、継続的に実施することが適当」と総論している。個別評価では、サブテーマ1「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」は、計画をはるかに上回ったと評価された。一方で、分野横断的・融合的な研究観測計画の立案、先端領域に開拓や将来を見据えた極域科学研究体制の戦略的構築、環境保全に対する取り組みの推進、国際連携の強化、成果の国民への発信などを一層進めるべきとの指摘があった。

第Ⅸ期の重点研究観測のテーマ設定

第Ⅸ期計画（第58次隊～63次隊）では、前期の重点研究観測のテーマを発展させ、「南極から迫る地球システム変動」を、2014年11月にメインテーマと定めた。さらに、南極本部観測・設営計画委員会のリーダーシップにより、国内外の研究動向を踏まえた第Ⅸ期で実施すべき課題として、また、我が国の南極コミュニティが目指す研究の指向とも重なるように、3つのサブテーマ「南極大気精密観測から探る全球大気システム」、「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気－氷床－海洋の相互作用」、「地球システム変動の解明を目指す南極古環境復元」が立てられた。

4. 将来のサイエンスの方向性

南極域での将来のサイエンスの方向性として、全球的な視点から、南極の地理的および環境的特異性を踏まえた独自性の高いサイエンス、言わば、南極でしか実施できない、または南極で実施する事にこそ大きな意味があるサイエンスを戦略的に進めていく必要がある。

本構想では、南極条約の継続を堅持し、上記方向性ととともに国際的な動向（SCAR Horizon Scan 2014等）等を踏まえつつ、将来実施するサイエンスを、トップダウン的に実施すべき「国家戦略としての地球規模課題解決」、およびボトムアップ的ではあるが人類や地球の未来に大きく資す

るポテンシャルを持つ「知のフロンティア」の大きく2つの観点で整理し、ここにいくつか具体例を示す。いずれの観点の研究課題も、これまで行ってきた南極域でのモニタリング等の継続的な観測データの蓄積を基礎とし、これらの観測の継続を前提として成り立つものである。

4.1. 国家戦略としての地球規模課題解決

地球温暖化に伴う地球規模の環境問題は、人類にとっての喫緊の課題であり、国家戦略として進めるべき研究課題である。この中で極域、特に南極域で進めていかなければならない課題は何であろうか？

両極の特徴が、自ずとその将来的な道筋を浮き彫りにする。その大きな特徴は、氷床の存在である。両極の氷床は、海水準で約70m相当する地球上の淡水の貯蔵庫であり、その内の約89パーセントが南極に存在し、温暖化に伴う氷床の挙動と海水準の変動等の将来予測は、人類の生存戦略の策定に欠かせないものである。IPCCにおいても、第6次評価報告書（AR6）サイクルで作成する特別報告書のうちの1つとして、2019年秋に公表予定で、「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書」の作成が進んでいる。これは、海洋・雪氷圏が今後の地球規模の気候変動の予測に非常に重要な要素である事を物語っている。すなわち、海洋に囲まれ、中央部を雪氷圏である氷床に覆われた大陸を有する南極域は、今後の地球規模環境変動に重要な影響を与える地域である事も表している。また、極域の特徴的な現象として、オゾンホールが挙げられる。南極オゾンホールは回復していくと考えられているが、最近になり、地球温暖化と南極オゾンホールの変動に起因する様々な気候変動の可能性が指摘されている。このメカニズムの解明は、地球温暖化の進行を予測する上で、早急に取りかかるべき新たな環境問題の課題と位置付けられる。更に、進行する温暖化や人為的活動に伴う生態系の変動の観点からは、IPBES等の国際的な枠組みへの貢献も含め、極域特有の種の保全等も国家的に進めるべき課題である。

4.1.1. 南極氷床質量収支に起因する海水準変動の予測

海水準変動の鍵 南極

近年の地球温暖化による海面水位上昇については、国土の消失という形で緊急の課題となっている国が存在する。現時点で他国と比べて危機的な状況に陥っていない日本でも、2034年という未来を念頭に置くと、その時までには大きな脅威となっている可能性は高い。精度の高い海水準変動の予測データは、21世紀やそれ以降の将来の人類の生存戦略にとって不可欠となる主情報の一つになることは疑いない。

近年50年程度の海面上昇の50%は海水膨張成分で説明できるが、過去数百万年間における海水準上昇については、それに対する熱膨張の寄与はわずかであり、その大部分は大陸氷床の縮小によって生じたものである。今後温暖化が進んでも海水膨張による海水準上昇はせいぜい数十cm程度であるが、一方で地球に存在する全ての氷が融解すると海水面は60～70m上昇する。今

後の海水準変動予測については、海水熱膨張よりも大陸氷床の質量収支の変動に着目する必要がある。地球上の氷の存在量の約 89%が南極氷床、約 9%がグリーンランド氷床、約 1%が山岳氷河、約 1%が永久凍土、約 0.1%が海水である。近年の温暖化によって山岳氷河・永久凍土・海水の減少が大きな注目を集めており、これらは重要な地球環境課題であるが、今後の海水準変動の予測という点では主要成分とはなり得ない。海水準変動の問題において、南極大陸氷床の規模が最も大きく、海水準を大きく押し上げる原因となる。

南極大陸氷床の規模の拡大や縮小は、南極大陸に降り積もる積雪の総量と、融解や氷河・氷床の流出で失われる氷の総量の収支で決まる。これらの多くの要素のなかで、大陸氷床が海と直接接触する縁辺部での融解が、今後の南極氷床全体の挙動に大きな影響を与えると予測されている。融解の進行が、海に流出する大陸氷床の氷の量にも大きく関わると考えられている。また、海水準変動に関わる要因の中で、大きな割合を占めかつ予測困難な要因は、南極大陸氷床の規模の拡大や縮小、とりわけ、大陸縁辺部での氷床融解に直接あるいは間接的に起因する海水準変動である。これらに起因する海水準変動の予測を行うためには、過去の氷床変動を解明し、現在において氷床縁辺部での融解を加速させている氷床海洋相互作用を解明した上で、未来の海水準変動をシミュレーションする必要がある。

南極氷床の大規模融解はいつ起こるのか

近年、北半球において環境変動が特に高緯度で顕在化し、グリーンランド氷床の融解が顕著になってきた。このグリーンランド氷床の氷の全てが融解や流出によって海に流出すると、海水準としては約 6~7m 程度のインパクトがある。一方で南極氷床は、その氷の全てが流出と融解によって海に移動すると約 50~60m 程度の海水準上昇に直結する。南極氷床は比較的安定であると考えられてきたが、近年になって西南極¹における氷床縁辺部の融解を主因とする氷床の縮小・後退が相次いで報告されている。

グリーンランド氷床の融解において大気氷床相互作用が重要と考えられている一方で、南極氷床においては氷床海洋相互作用の重要性に近年注目が集まってきている。氷床海洋相互作用とは、氷床末端部にあたる棚氷の下の海洋に暖水が貫入して、棚氷底面融解やそれに伴う氷床流出から融解が進むプロセスである。南極氷床下には基盤地形が海面下である地域が多く、西南極のほぼ全域および東部東南極の大部分（約半分の地域）がこれに該当する。基盤地形が海面下である地域において暖かい海水が氷床下に流入すると、氷床を底面から連続的に融解させる事が可能となる。海は熱容量も影響範囲も大きく、氷床に対して急激な変化を起こしうる。たとえば、氷床の流動と大陸岩盤の間にはたらく摩擦力が低減するため、氷床の流動速度が加速し、大量の氷が氷床から海に流出する。こうしたプロセスは、海水と内陸の界面がさらに氷床内陸部に向けて移動する状況を生じさせる正のフィードバックを生む。このため、南極氷床の変動には一度超えてしまうと容易に後戻りできない臨界点、いわゆる、「ティッピング・ポイント」が存在すると考えら

¹ 西南極とは、南極地域のうち西半球に位置する部分を指す。同様に東半球側を東南極という。東西は南極横断山脈により分断され、特徴が異なる。

れていて、今現在の南極氷床の状態がこれに近づいている可能性が指摘されている。

南極氷床は海水準変動に対して他の氷河・氷床等と比べて1~3桁大きい潜在力を持っていると同時に、今後急激な進行が起こる可能性がある。さらに、近年、各種の人工衛星データの解析から、西南極の氷床縁辺部の融解が大きく加速していることが明らかになった。この事実は専門分野の研究者にとっても衝撃的な観測結果であり、西南極に基地を構える各国は精力的に現場観測を行い変動の素性をとらえつつある。しかしながら、西南極はあくまでも南極の一地域であり、そこでの限られた事象から南極全体の理解を進めることは困難である。東南極は西南極よりも1桁大きい氷床体積を持ち、この東南極の動向が南極全体の動向の把握に決定的に重要である。各種の人工衛星データからは、東南極でも場所によって氷床縁辺部の融解現象による質量損失が有意に発生しつつあると報告されている。日本が観測対象地域の地の利を活かして東南極の空白域に研究を展開すれば、南極氷床融解に起因する海水準変動予測に対して先行して大きな国際貢献ができる。

日本は、沿岸の昭和基地と内陸のドームふじ基地を構える東南極地域をホームグラウンドとしてきた長い歴史的背景を持つ。将来の国際連携の観点からも、東南極を将来の観測の主たる対象地域とするのは必然である。遡って約60年前、IGY（国際地球観測年）に日本が南極観測に参入して観測基地を持つことになった際、唯一の選択肢が当時「到達不能地域」とされた当地域であり、これはこの周辺的环境が南極の中でも特に厳しいことを表している。その中で営々と長期の観測を展開してきた日本こそが、未知多き南極域の変動を監視し国際社会に周知・貢献していく責任を担っていると言える。国際社会からの期待も大きい。

棚氷下からのアプローチ

南極氷床の質量収支に起因する海水準変動の予測のためには、南極氷床およびその周辺の南大洋に関して、観測とモデリングによって素過程を理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明らかにする必要がある。南極氷床・南大洋が関わる全球環境変動メカニズムには、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。南極アイスコアからは、数万~数千年の時間スケールで気温とCO₂濃度が同期して変動していたことが示されており、全球気候に影響を与えてきた炭素循環変動における、南大洋の物理・生物・化学過程の重要性は明らかである。南大洋では過去50年間に栄養塩濃度の変化が観測されており、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インパクトの解明が重要課題となっている。

このため、重要な調査地域が多い東南極をターゲットとし、海洋・氷床・固体地球・生態系の実態と変遷について、研究・観測を集中的に実施する必要がある。具体例として一例を挙げると、氷床末端部にあたる棚氷の下の海洋に暖水が貫入して、氷床底面から融解が進むプロセス、すなわち氷床海洋相互作用を明らかにする観測が必要である。それを現場の実証的な観測として捉えるには棚氷下の海洋観測というハードルの高い観測が必須となり、無人探査技術を含めた新技術の導入が不可欠となる。全体としては、沿岸・外洋境界域に位置する氷床-海水-海洋システムに対して複合的な相互作用をもたらしている、大気・海洋・海水・物質循環・生態系変動場につい

て明らかにする観測が必要である。さらに、長い時間スケールで変化する氷床や海洋を理解するため、南極大陸や南大洋でアイスコアや堆積物を採取し、岩石等を用いた過去の変動の復元も行う必要がある。

具体的には、東南極氷床の代表的な流出域および周辺海域と上流の氷床をターゲット観測域として、表面や底面での融解過程、氷床流動の加速、氷床崩壊と接地線の後退といった素過程を解明するとともに、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・海水・生態系の変動を明らかにする。これらの観測の知見を取り入れた南極氷床モデルと海洋モデルによるシミュレーション、アイスコアや古海洋のデータによる検証を経ることより、南極氷床融解による海水準上昇の予測が可能となる。

人類の生存戦略の策定

上記に示したように、南極氷床の質量収支の変動に起因する海水準変動の予測を目的とし、東南極を第一のターゲットとして、これまでのこの地域における日本の歴史的な取り組みを活かし、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する必要がある。特に、氷床海洋相互作用や、過去の南大洋と南極気候・氷床変動の復元、生物動態等の変動の解明が不可欠となる。これらを通して、南大洋と南極氷床が種々の相互作用を通じて全球環境変動に果たす役割とそのメカニズムを解明する事ができる。また、IPCCを含む気候の将来予測や社会的影響など、多くの分野への波及効果も期待される。数値モデルによるシミュレーションと現場観測データとの融合、分野横断による現場観測や、無人探査技術の工学的発展など、学際的側面の意義も大きい。

南極氷床の質量収支の変動に起因する海水準変動の予測には、南大洋・南極氷床の理解が必要であり、このためには長期の継続的な観測が不可欠である。特に東南極は観測が限られており、南極全体の研究において未解明部分が多い。日本の極域コミュニティが中心となって東南極をホームグラウンドとする諸外国との国際連携を進めることで、長期的な東南極域のモニタリングに向けた国際的な研究協力体制やプラットフォームの整備が期待される。また、分野横断的なアプローチを行うため、「氷床海洋相互作用」や「氷床下の生態系システム」などの新しい分野の創出・発展が期待される。南極観測主要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。さらに、若手研究者が融合研究の場で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つことが期待され、将来の南極観測に不可欠な継承財産となる。

また、精度の高い海水準変動の予測データは、今後の人類の生存戦略を考える際に不可欠であり、人類の未来は我々が調査し報告していく情報を常に必要としている。

4.1.2. ポストオゾンホール時代の地球温暖化

南極の温暖化増幅

北極域では、雪氷の融解によって温暖化が加速する温暖化増幅により、地球上で最も早く温暖化が進行している。一方、南極域では、全域を温暖化させる地球温暖化の効果と、南極大陸上を寒冷化、その周辺域を温暖化させる南極オゾンホール発達の影響が重なり合い、中緯度に近い南極半島では温暖化増幅、それ以外の南極大陸では温暖化抑制が起こっていた。しかし、今後はオゾン破壊物質排出の規制効果により南極オゾンホールは回復していくと見込まれることから、それに伴って南極大陸での温暖化が加速すると考えられている。ただし、雪氷の融解が地表面の露出を引き起こして温暖化を加速する北極とはメカニズムが全く異なることから、その正確な予測が喫緊の課題となっている。また近年、地球温暖化の進行と南極オゾンホールの発達に起因すると考えられる様々な気候変動（偏西風の強化や降水量の増加等）が南半球中低緯度域で報告されている。しかし、南極オゾンホールの回復が見込まれる今後数十年のポストオゾンホール時代に、南半球、そして全球においてどのような変動が起こるかは、そのメカニズムを含めて全く分かっていない。将来の全球における気候変動を正確に見積もり、地球規模であるいは各地域において必要とされる適応策・緩和策を検討するために、南極域における温暖化増幅のメカニズム解明と正確な予測が求められている。

南極域での観測の不足

気候変動の影響は、人間が体感できるほどまで大きくなってしまったときには既に手遅れであり、僅かな変化のシグナルをいち早く把握できるよう、気温・風などの基本的な観測を長期にわたって途切れることなく継続することが求められる。一方で、近年の全球気候モデルや全球気象再解析データの発達は、全球の気候を網羅的に把握することを可能にしつつある。しかし、それらを検証・改良するために必須の観測データは、南極域では他地域に比べて圧倒的に不足している。特に、最も基本的な観測量である地上の気温や風、そしてモデルによる気候の再現性を左右する上空の気温や風といった観測データの拡充が求められている。

また、1987年のモントリオール議定書の締結により、1990年代中盤以降、オゾン破壊物質は順調に減少していると考えられてきた。しかし、主要なオゾン破壊物質であるCFC-11の減少速度が遅くなっていることが2018年に報告されるなど、オゾン破壊物質の減少と南極オゾンホールの回復は必ずしも確定したものではない。南極オゾンホールの状況をリアルタイムで監視し、随時必要な施策を実施していくためにも、南極域でのオゾン観測の継続が重要である。

基本的な観測の継続と新たな面的観測の提案

上述の通り、南極域でこれまで実施されてきた基本的な観測（気温、風、オゾン等）の継続と、他地域に比べて圧倒的に少ない南極内陸部の地上観測と南極域全体の高層観測の拡充が必須である。

南極内陸部には有人基地がほとんどなく、定期的なメンテナンスと一定量の電力供給が必要とされる無人氣象観測も困難であった。その困難さは現在も変わらないが、今後の技術革新により南極内陸部でも使用可能な無人氣象観測装置が開発されれば、それを南極内陸部に展開することで、他地域に匹敵する地上気象観測網を構築することが可能となる。

現在の南極域では、10 余りの基地のみで行われている高層気象観測が、上空の気温や風の状況を知る数少ない手段の一つである。基地は大部分が南極大陸沿岸部に位置しているため、特に南極大陸内陸部および南極海上空の高層観測が不足している。これらを補完するため、南極におけるスーパープレッシャー気球観測を提案する。スーパープレッシャー気球は、上空 10~30km の高度を数か月にわたって浮遊することができ、南極上空の風に乗って南極域全域を観測することができる。気温や風の観測装置をスーパープレッシャー気球に搭載し、常時多数の気球が南極上空を飛揚している状態を作り出すことで、これまで得られなかった南極域全体の上空の気温や風の観測データを定常的に取得することが可能となる。

これらの面的観測を定常的に実施することは日本だけでは不可能であり、南極大陸に基地を持つ多くの国々が連携・協力して実施する必要がある。

南極観測による国際社会への貢献

これまで述べてきたように、本課題の最大の目的は、これまで不足していた南極域の（特に面的）観測を拡充し、ポストオゾンホール時代の全球の気候変動を正確に見積もるために必要な情報を提供することで、IPCC 等による予測の改善に資することである。これにより、将来的な気候変動に対する緩和策・適応策の策定に貢献する。また、本課題で提案する南極域における面的観測の拡充は、短期的な数値予報の精度も向上させることから、今後増加するであろう南極域のツーリズムや航空管制にも必須と考えられる。そして、これらの観測を日本が主導する国際協力の下で実施することで、国際社会における日本のプレゼンスを高めることにも貢献する。

4.1.3. 人為活動によって絶滅が危惧される南極海の海鳥の保全

漁業活動が脅かす海鳥の未来

16 年先の未来を正確に見通すことはもちろん誰にもできないが、地球の人口増加にともなって天然資源を採取する様々な人間活動が現在以上に広範囲に、そして徹底して行われるようになってきていることは間違いないだろう。そしてそれにともない、人間活動によって負の影響を受ける生物種の管理や保全が、現在以上に深刻な社会的課題になっていることも間違いないように思われる。

南半球の高緯度地域には広大な公海が広がっており、日本を含む多数の国々が大規模な漁業活動を展開している。産業として最も重要なのは、マグロ類（ミナミマグロ、キハダ、ビンナガ、メバチ）をターゲットとした延縄漁（餌のついた多数の釣り針を仕掛ける漁法）である。これは最も効率よくマグロ類を捕獲できる伝統的な漁法であるが、アホウドリ類（ワタリアホウドリ、マ

ユグロアホウドリ等、図1参照）が仕掛けた餌を飲み込んだり、漁具に絡まったりして死亡する事故が頻繁に起きる。アホウドリ類は高い飛翔能力を持ち、非常に広い範囲を飛び回って獲物を探しているため、延縄漁船を見つけると自ら進んで追跡し「飛んで火に入る夏の虫」になる。その結果、南極海のアホウドリ類はほとんどの種が数を激減させており、IUCN（国際自然保護連合）のレッドリストで絶滅危惧種（endangered）や危急種



図1 絶滅危惧種に指定されているワタリアホウドリ。

（vulnerable）に指定されている。漁業大国である日本の責任はとりわけ大きく、少し古いデータではあるが、1991年に発表された論文によると、南極海で操業されている日本のマグロ延縄漁業により最低でも毎年44,000羽のアホウドリが死亡しているとされる。

アホウドリ類だけではない。南極海を代表するもう一つの海鳥であるペンギン類（キングペンギン、アデリーペンギン、エンペラーペンギン）も近年の気候変動にともなう生息環境の変化によって、個体数を減少させている。たとえばエンペラーペンギンはここ数十年の間に個体数が半数にまで減ったという報告があり、この傾向はしばらく続くと予想されている。

地球上で最も広い公海の一つである南極海。ここで現在起きている海鳥類の個体数の激減を食い止めることが、2034年時点で解決すべき大きな社会的課題であると考えられる。

リアルなデータとリアルな分析

アホウドリ類の延縄漁業による混獲を減らすためには、広大な南極海のどこで、どの時期に、どの種が延縄漁船に遭遇しているのかを正確に把握しなければならない。そのためにはアホウドリ類の生態と延縄漁船の操業パターンの両方を調べる必要がある。それだけでなく、個々の延縄漁船が必要な防止策を講じるためには、アホウドリ類がどのように延縄漁船を探し出し、なぜ執拗に追いかけるのかを理解する必要がある。それと並行して、アホウドリ類のそれぞれの種の営巣数やヒナの巣立ち率など、個体数の増減に直結する基礎的な情報のモニタリングを続け、短長期的な変動のパターンを把握しなければならない。

ペンギン類についても同様である。（図2参照）アホウドリ類と比べると、ペンギン類は漁業という直接的な人為活動の影響は少ないが、人為活動に起因する気候変動の影響によって個体数を減らしていると考えられている。その背景にあるメカニズムを理解し、必要な防止策を講じるためには、ペンギン類がどのような海洋環境を好み、また海水をどのように利用しているのかを正確に理解しなくてはならない。いっぽうで営巣数やヒナの巣立ち率などのモニタリングも続ける必要がある。

広大な南極海で確かに起きている海鳥の個体数減少の実態を把握し、必要な対策を講じるためには、現場観測が欠かせない。

広大な南極海を最新技術と国際連携でカバーする

アホウドリ類に最新鋭の記録計を取り付け、その行動を詳しくモニタリングする。リモートセンシングによるデータと合わせ、どのような風をどのように利用して獲物を探しているのかを明らかにする。それと同時に、南極海で操業されている延縄漁船の航行データを取得して分析する。アホウドリ類と延縄漁船の時空間的なオーバーラップの大きいホットスポットを特定する。

ペンギン類にも記録計を取り付け、一年にわたる行動パターンを詳しく記録する。リモートセンシングによるデータと合わせ、どこで、どのような海洋環境や海水を利用しているのかを明らかにする。

アホウドリ類においても、ペンギン類においても、モニタリングの場所を複数設定し、営巣数、親鳥の体重、ヒナの成長率、ヒナの巣立ち率などを長期にわたって記録する。また国際的な連携を強化し、南極の各国の基地で行われている海鳥のモニタリングプログラムを一つの枠組みに入れる。営巣数などの基礎的なデータをリアルタイムでアップデートしていくデータベースを構築する。

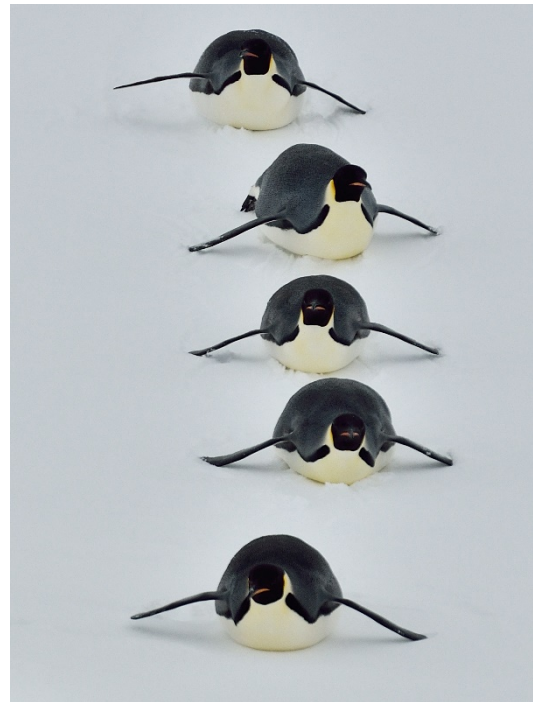


図 2 準絶滅危惧種に指定されているエンペラーペンギン。

日本が率先する種の保全

アホウドリ類の分布と延縄漁船の操業パターンとの時空間的な重なるの多いホットスポットを特定する。当該海域での漁業効率等も考慮に入れながら、避けるべき海域や避けるべき時期を総合的に判断し、国際機関を通して提言を行う。またペンギン類においても、海洋環境や海水の利用パターンを明らかにし、それに基づいて保全のためにできる手段を総合的に判断し、国際機関を通して提言を行う。こうした活動の結果、南極海の家鳥類の個体数の減少を食い止めることができれば、それが何よりも大事なアウトカムである。どの国の領海でもない広大な南極海で、日本が率先して種の保全という大きな社会的課題に取り組み、成果を挙げることができたのなら、国際的に非常に大きなインパクトを与えることができるだろう。

4.2. 知のフロンティア

南極域は、大陸の周囲を海で囲まれ、東西方向に遮る陸地がない。南極大陸と一番近い南米との間が最短で約 1,000 km、オーストラリアやアフリカでは 3,000 km 以上離れている。大陸周囲の海洋域は暴風圏であり、また南極大陸に近づくと、冰山や海水に覆われていく。南極大陸そのものも、約 98%が氷床に覆われた大陸である。さらに、南極地域は低温、乾燥と強風等の過酷な自然環境であり、周囲の海も含め、未だに人を寄せ付けない。それ故、南極域は、未だ調査が進んでいない未探査の領域が広大に広がっており、人類の知的領域を拡大もしくは未来を大きく変えるような発見等に繋がるポテンシャルが極めて高い地域である。人類共通の知的資産に貢献し、人類や地球の未来に資するような研究は、基礎的な地道な研究の積み上げによって成し遂げられるものであり、これらの基礎研究を可能とする持続可能な南極域での研究観測体制が必要である。

4.2.1. 地球惑星の形成と進化の探求

地球が現在の姿に至るまでの形成と進化のプロセスとは？

われわれ人類の生きる地球が、どのような過程を経て現在の姿・状態に到達したのか、その手がかりは地表に露出する様々な岩石の中に記録されている。プレートテクトニクスによって、例えば海洋底の岩石は最大でも 2 億年程度でマントル中にリサイクルされて消滅する一方で、ひとたび陸上に固定された岩石すなわち大陸地殻の中には、約 40 億年前にさかのぼる古い岩石も存在する。こうした地球の歴史を知る鍵が南極大陸にある。

地球上に残された最後の空白域

南極大陸は地球上の総大陸面積の約 1 割を占める重要な大陸である。今から約 5 億年前に地球上の大陸の多くがひとつに集まっていたという Gondwana 超大陸において、南極大陸はその中核部として、周囲のアフリカ・インド・オーストラリアといった大陸の接合の鍵を握る重要パーツである。また、地質時代区分の重要な境界である 25 億年前（太古代／原生代境界）と 5 億 4 千万年前（原生代／古生代境界）の岩石が、昭和基地を含む ドロンイングモードランドから エンダビーランドにかけて広く分布する。それらは、Gondwana 超大陸を構成する「典型的」な大陸地殻であるとともに、その一部は地殻内部が 1000°C の高温にまで熱せられた“超高温変成岩”と呼ばれる特異な岩石となっており、その形成メカニズムはきわめてホットな研究テーマである。さらに、現存する地球最古の岩石（40 億年前のカナダのアスタ片麻岩）に匹敵する約 38 億年前の古い地質記録が日本の南極観測の活動域の東端のエンダビーランドのナピア岩体から見つかっている。このように、地球史 46 億年の時間スケールでの不可逆的な変動と地球内部で起きている物理・化学的現象を理解する重要なフィールドとして、ドロンイングモードランドからエンダビーランドにかけての地域への足がかりを持つ日本の南極観測が主導する観測には、国際的にも強い関心が寄せられている。南極大陸はその表面積の約 98%を厚い氷で覆われているため

に、大陸氷床下の岩盤や氷海の下の大陸棚を含む周辺海域には、これまで探査が困難であった広大な未知の領域が広がっている。また、基地や船からのアクセスの制約や困難さ、また限られた調査可能期間のために、これまでに得られている基盤地質の情報は他の大陸と比較して圧倒的に不足している。さらには、南極大陸のほとんど調査のされていない領域にどのような石が残されているのか、その探索が急務である。

南極大陸とその周辺の海洋底は、物理・力学的に地球上で最も安定した領域のひとつである。そのため、地球物理観測、特に測地観測などからは固体地球・雪氷圏・海洋圏の微小な変動や地球回転などの地球変動を検出することが可能である。さらに、南極域は、全球的に見て測地観測の空白域となっており、2015年に国連決議による地球環境監視や地球変動観測、または地理情報の基盤として不可欠な世界共通の地球の位置・高さ基準の高精度化のために、南極域での総合的な測地観測拠点の構築が強く求められている。

南極の氷河地形発達記録は、氷期-間氷期サイクルを含めた地球環境変動の理解に不可欠であるとともに、固体地球と氷床との間の相互作用を調べる上で、氷床下の岩盤の地殻熱流量などの観測も重要である。また、南極大陸周辺海域は海水の発達のために海底探査データの乏しい空白域が広がっており、砕氷船や航空機を用いた地磁気や重力などの地球物理観測が必要である。こうした南極大陸自体の観測や調査に加えて、南極氷床上で採取される隕石からは太陽系創生期の重要な知見が得られる。

露出する岩盤、氷床下・海底下の地質情報から南極大陸の全貌を解明する

南極大陸に露出する岩盤（露岩）の岩石を徹底的に調べることが、まずは全ての基本となる。南極には植生がほとんどないために、岩盤を全面で観察できる稀有な、また、非常に魅力的なフィールドである（図3）。露岩を歩き回って石をじっくりと観察し、必要なものを採取する、ということが南極でおこなう観測となる。地質の調査には、極論すれば、地図とハンマーがあれば必要十分である。その代わり、必要な露岩に必要な人が必要な期間、調査に行ける、という体制が重要である。そのためには、広い範囲に散在する露岩域への安全なアクセス手段として航空機・ヘリコプターによる輸送支援や車両を使った氷床上の移動手段、また野外で安全な調査活動をおこなうための装備が必要である。2034年頃には、これまでアクセスの難しかった遠隔露岩なども機動的な野外調査が可能になることを期待している。基盤地質の情報が基本であるが、それをベースとし、南極氷床下や海洋底の重力・地磁気・地震波等のデータを得るための航空機や観



図3 南極の露岩域は、植生が乏しいために全面露頭観察できる稀有な場所である。

測船による地球物理観測、氷床下岩盤までの掘削による氷床底岩石の回収や氷河堆積物を用いた内陸域の地質推定、また、氷床下の岩盤の地殻熱流量測定などをおこなう。氷床上での隕石探査も重要な観測テーマである。

昭和基地では20年以上にわたり、総合的な測地観測を実施してきた。そうした観測をベースとして、レーザー測距 (Satellite Laser Ranging; SLR)などを加えた宇宙測地技術と重力・潮位観測を合わせた統合観測を行う GGOS(Global Geodetic Observing System) コア・サイトを設立し、南極域での測地・重力データを詳細に解析することで、地表付近の地殻の変形や非常に長い時間スケールを持つ地球内部の物理プロセスを明らかにするとともに、極軌道地球観測衛星の軌道決定精度の向上に貢献する。結果として、衛星観測を利用した氷床変動の検知や氷床下の固体地球の変動の解析精度向上につながると期待される。

固体地球圏と地球全史の理解に向けた南極からの貢献

南極大陸は、基盤地質の観点からは、現在たまたま極域に位置している大陸であり、地球上の他の大陸と比べて地質学的特質として、特別なものである必然性はない。しかし、これまでに南極大陸で見つかっている38億年前にさかのぼる初期地殻の情報や、太古代-原生代境界と原生代-古生代境界という時代区切りとなるタイミングの地殻の物理化学現象、また、太陽系の原材料や惑星形成の初期情報を持つ隕石の採取や現在進行形の地殻変動を検知する場として、地球惑星の進化の記録を紐解く重要な情報が残されているフロンティアである。氷床下の広大な未踏査の空白地帯の情報を埋めるとともに、地球惑星の成り立ちや現在の地球の状態と変動を人類が理解するための鍵としての情報が、南極大陸の観測と研究から得られる筈である。

4.2.2. 太陽地球システムの解明－宇宙天気研究

宇宙と地球の接続に関する問題の背景と宇宙天気予報

宇宙空間に浮かぶ地球という惑星の大気や地磁気が、宇宙空間を流れる太陽風や宇宙線と、どのように作用し、どのように接しているか、ひいては生命への影響はどのようなものかについて知ることは、古くは地上で調べられるオーロラの変動や地磁気の変動を頼りにした研究から始まった。半世紀ほど前からは、人工衛星や探査機の活躍する宇宙時代に入り、より直接的に宇宙空間のプラズマや高エネルギー粒子を調べられるようになったが、そんな現代でも、その実態解明は困難を極めている。ここで実態解明とは、より具体的に言うならば、私たちは、やみくもに経験則に頼るのではなく、物理的に、オーロラの発生分布や、高エネルギー粒子による大気への影響について、定量的に予測できるか、ということであり、近い将来に起こるであろう太陽活動の減衰や、遠い将来に起こるであろう、地磁気反転などの大きな変化の際にも、正しく評価できるか、ということである。

1990年代以降になり、近場の宇宙環境の変化に敏感な、人工衛星、電力網、通信網などの社会インフラを安定的に利用するための、宇宙天気予報という言葉や、実際の国際的な取り組みが充

実し、いまは各国の注目する、応用研究の一分野として、国際社会に対して非常に大きな被害を生む自然災害対策の重要課題としても広く常識として知られるようになった。この予報を主目的として発展してきたコンピュータ・シミュレーションは、いまや基礎研究の理論ツールとしても、必要不可欠な存在となりつつある。極域科学の中心課題であるオーロラを例に挙げれば、観測データをもとにして、簡単な理論をもとにオーロラの世界分布を予測することは不可能であり、太陽風と磁気圏と電離圏のエネルギーのやりとりをプラズマと磁場の保存則に従って、コンピュータが丁寧に解くことでのみ、定量的で信頼性の高い、しかし短期間の、予測が可能となりつつある。

グランドミニマムには何が？

太陽活動の活発だった、過去半世紀の宇宙時代は終わり、近場の宇宙環境は、いままさに新たな時代に入りつつある。現在、太陽活動は2重の意味で、弱体化の傾向にある。一つは、いわゆる11年周期と呼ばれるもので、2020年ごろには、太陽黒点が1年を通して出てこないような、太陽活動の極小期を迎えるはずである。この弱体化は、あくまで一時的なもので、数年もすれば、また黒点が何度も出現する太陽活動の極大期を迎えることが期待される。しかし、過去40年ほどかけて、太陽磁場が明らかに弱体化し続けていることから、次の太陽活動極大期では、もう黒点もあまり出てこない状態になり、17世紀に数十年も太陽黒点が消えた「マウンダー極小期」と呼ばれるような、グランドミニマムの状況に突入することも予測されている。

このような変化の大きな状況にあって、私たちにとって未経験のことであるため経験則に頼ることもできず、定量的に宇宙環境と、その地球への影響を予測できるような体制には至っていない。もし数十年でグランドミニマムに入ったらオーロラは見えなくなるのだろうか？太陽活動が極端に弱い時代には、宇宙からの影響によって、地球の大気は変化するだろうか？緊急性の低い、より長期的な問題としては、地磁気が弱くなり続ける地球では、磁気嵐や放射線帯はどう変わるのか？地磁気反転のときには、大気や気候にどのような影響があるのか？という問題も、類似する側面がある。

観測とシミュレーションが予測に貢献

宇宙からの影響や、地球大気へのインパクトについて、異様に詳しいレベルまで確認しながら実験・観察・研究できるのは、いつの時代になっても地球の極域だけである。特に、南半球は磁場が北半球に比べて弱いため、将来の地球を一部、先取りしたような特異な状況にある。まず、オーロラ活動などに関する、非常に精密な定量観測データ（現在よりも精度を高めたデータ）が、これからますます重要になることは自明であり、これは太陽活動の減少とともに、オーロラの明るさや磁場の変動も、弱くなるためである。また、グランドミニマムや、さらに長期的な大気への（あるいは大気から宇宙空間への）影響などを議論する上では、太陽の11年周期などに比べて長期的かつ高品質のデータが不可欠であり、地道に2030年代まで、現在の南極昭和基地で継続されてきたようなモニタリング観測を、品質を損なうことなく継続しておくことが、将来の人

間にとって、宝となるだろう。オーロラのグローバルシミュレーションは発展を続け、将来、現実そっくりの再現性を持ち、北極の氷は消え、両半球の極を埋め尽くす観測ネットワークが実現し、メソスケールのオーロラの理解は、今の気象業界に似た、確固たるものになっているだろう。そんな中で、残された最大のフロンティアは、極冠のオーロラだろう。オーロラの環の内側は、まだほとんど何もよくわかっていない。太陽風密度が極端に減少した「太陽風が消えた日」には、極冠を埋め尽くすようなオーロラも出現した。北極と連携した形での、南極のオーロラの冠に関する、新たな研究が、宇宙天気予報のフロンティアとして、よりチャレンジングな長期的な定量予測の検証の場として、将来の人間にとって不可欠なものになっているだろう。

4.2.3. 環境変動に対する生物の適応・進化の理解

野生動物の進化の謎

生物学のゴールは、突き詰めていけば進化の謎を解き明かすことである。それはダーウィンの活躍した19世紀からそうだったし、現在でも、そして16年後の2034年でもそうだろう。20世紀を通して遺伝学が飛躍的な発展を遂げ、小型の飼育動物（ショウジョウバエやメダカ等）を対象にして、遺伝子レベルの解析が多数行われるようになった。しかし、いまだに残されている課題は、大型の野生動物がどのように環境に適応し、どのように次世代に残す子孫の数を最大化して、さらにそれが数十年間という長い時間スケールにおいてどのように変化するかを理解することである。

環境変動の大きさを利用する自然実験

南極大陸の沿岸部は地球上で最も環境変動の大きい地域の一つである。夏の時期、分厚い海水がびっしりと海面を覆っていることもあれば、海氷がすっかり流出して海面が露出していることもある（図4）。そうした海氷の変動は、海氷の上を歩いて移動し、隙間から潜水して獲物を捕らえるアデリーペンギンに劇的な影響を及ぼしていると予想される。実際、これほど大きな環境変動を毎年のように経験している野生動物はめったにいない。そこで、南極のアデリーペンギンをモデル種にすることで、長期的な環境変動に対する野生動物の適応、進化という大きな学問的課題にチャレンジすることができる。

リアルで詳細なデータを継続的に

南極のアデリーペンギンに記録計を取り付け、その移動経路、潜水パターン、捕食行動を詳細に記録する。それと並行して、営巣数、親鳥の体重、ヒナの成長率、ヒナの巣立ち率をモニター



図4 南極のアデリーペンギン。背景に見える海水の状況は、年によって劇的に変化する。

ングする。そのような観測を毎年、途切れることなく実施する。作業をマニュアル化し、ペンギンの研究者が参加しない年でも、フィールドアシスタント等の助けを借りてデータが取得できるような体制を整える。

適応進化の例をはっきりと

ペンギンの行動パターンおよび繁殖に関する数十年分のデータを蓄積させ、リモートセンシングによって得られる海氷のデータと合わせて総合的に解析することにより、ペンギンが環境の変動に対してどのように対応し、またどのような影響を受けてきたのかを明らかにする。さらに、集められた膨大なデータから、ペンギンの進化につながる環境適応の蓄積を読み取る。南極という環境変動のとりわけ大きい特殊な環境を利用することで、野生動物における適応進化の一例をはっきりと示すことができれば、学術的に大きなインパクトがある。それだけでなく、ペンギンという世間の注目を集めやすい動物を使った最先端の研究は、科学の裾野を広げ、次世代の研究者を育成することにも大きく貢献すると期待される。

5. プラットフォームの方向性

前章で示したサイエンスの方向性を実現するためには、そのためのプラットフォームが必要となる。現在の南極観測のプラットフォームとしては、基地として昭和基地、観測船として「しらせ」が大きな位置づけを占めるが、ここでは現状のプラットフォームの機能・枠組みに捉われることなく、前章で示したサイエンスの方向性を実現するために必要なプラットフォームの機能を洗い出し、方向性について構想する。

5.1. 研究観測基地・拠点

研究観測基地・拠点については、求められる地理的要素および機能から、沿岸と内陸との2つに分けて構想する。

5.1.1 沿岸基地・拠点

沿岸研究観測基地・拠点に求められる地理的要素

地球規模環境変動の理解および監視には、全球的な観測網が必要となる。観測網は全球に観測点が均等に配置され、安定した観測の継続とデータの提供が理想的である。しかしながら、現在の大陸海洋配置から観測点の均等な配置は困難である。中でも南極域は、広大な南大洋に囲まれ、他の大陸と比較して大陸上の観測点は極めて少なく、全球に可能な限り均等に観測点を展開する上で、重要な地理的位置を占める。昭和基地が位置する東南極においては、現存の基地は特に疎

らである事から、地球上における観測点としての重要性は極めて高く、開設して 60 年以上となる昭和基地において継続的に取得された観測データの蓄積は、人類にとって貴重な資産である。

同時に、南極地域は、人間活動の活発な地域から最も遠く、その影響が極めて少ないことから、地球環境の現状を理解するための人為起源のノイズが極めて少ない良好な大気、海洋、生物などのデータを収集できる地球上で唯一の場であり、今後の地球規模環境変動を監視する上で、南極の定点での長期的な継続観測は必須である。特に、海水準変動など微小な地球環境変動を記述するための基準を高精度で維持するためには、近傍で巨大地震などが無く非常に安定した大陸であることに加え、GGOS の空白域である南極大陸で、観測を継続することが不可欠である。

一方で、極域という観点からは、極域特有のオーロラに代表される宙空圏現象の観測ができる場であり、地球を取り巻く宇宙空間の環境変動を知る手掛かりとなっている。昭和基地は、オーロラ帯直下に位置する数少ない基地であり、貴重な観測が継続により、地球を取り巻く宇宙空間の理解に大きく貢献している。さらに、今後の観測の継続とともに、昭和基地を足掛かりとした極冠域への観測の展開も期待される。

基地において継続して観測を行うとともに、これらのデータを基礎とし、基地を拠点とした、周辺域への野外調査を中心とした研究・観測の展開も可能である事は重要な点となる。地磁気観測やオーロラ観測などの宙空圏に関する研究、大気観測や雪氷調査などの気水圏に関する研究、測地・重力・地震観測や地形地質調査及び隕石探査などの地圏に関する研究、陸上生物や海鳥類の調査などの生物圏に関する研究・観測には、野外での観測が不可欠であり、その拠点となるべき観測拠点は、科学的な目的に応じて広域に展開することが求められる。

沿岸研究観測基地・拠点に必要な機能

基地観測において、安定した観測の継続とデータの提供という点では、継続的な観測には、安定的な電力供給等の基盤インフラは必須であり、それらのデータの即時的な有効利用において、観測データの即時国内伝送を可能にする通信インフラの整備も必要とされる。また、研究・観測のための基地・拠点という観点から、国内と同水準の研究環境の確保も重要である。そのために、研究のために必要とする時期・期間に基地に滞在する方策、例えば、冬期にも日本からの人員物資のアクセスを可能とするような輸送手段の確保も必要である。今後、様々な観測に機動的に対応するために、新たな観測装置を設置するためのキャパシティーを必要とする。観測船への搭載や基地にそのまま運び込めるプロジェクト毎のコンテナラボの活用なども有効な方策である。

基地から離れて野外観測を実施するためには、①野外観測を準備するための拠点、②野外観測地点にアクセスするための移手段、③野外観測地点で安全に観測を実施するための装備、といった機能を必要とする。機能①については、野外装備物資保管庫、野外観測の準備作業のための空間、野外用物資の荷捌き用の物資一時保管庫、などの野外観測物資の集積・準備拠点を基地あるいは観測船の中に設ける。機能②について、夏期間の輸送の基本は観測船に搭載するヘリコプターと考える。ヘリコプターの航続距離を考えると、遠隔地や広域に展開するためには、ヘリコプターを搭載する観測船の機動的・広域的な運用が必要である。また、航空機を利用して遠隔

地の露岩近くの氷床上に直接アクセスするということがも選択肢となる。氷床上では、雪上車・スノーモービル・4輪駆動車などの車両を目的に応じて利用できることが重要である。特に、氷床上で抜群の機動力を誇る4輪駆動車（アークティックトラック等）の導入は不可欠である。機能③として、野外活動の標準装備として、野営設備や通信・発電・安全対策などの装備類のパッケージ化と適切なアップデートが必要である。また、国内で集約・準備することはもちろんであるが、基地や観測船にも適切なパッケージを配備して、状況に応じて臨機応変な対応ができる体制や専門スタッフの配置が必要である。

5.1.2 内陸基地・拠点

南極大陸内陸に研究観測・拠点が必要な理由として、特に、①海水準変動の源としての南極氷床の質量収支を調査するうえで内陸で進行する現象をとらえることが必要であること、②南極内陸部が気候変動と南極大陸氷床の関わりを観測する適地であること、③南極内陸部が地球上で最も重要な古気候アーカイブの一つである「アイスコア」掘削の適地であること、が挙げられる。

質量収支研究の重要拠点

地球の将来の海水準に大きく影響する要素が南極大陸氷床の質量収支の変動であることを4.1.1で述べた。氷床の質量収支が年々変わる状況を、少なくとも数十年スケール、おそらくは人類社会が続く限りの時間スケールで供給していくことが、南極観測の大きな役割の一つであると考えられる。地球上での温室効果ガスの排出によって、数十年後の南極では図5に表現されるような変動が進行すると多くの科学者が考えている。

地球上の気温や海水温は今後上昇し、偏西風帯は高緯度側に移動し、そして強まる。炭酸ガスの吸収によって海水の酸性化はさらに進み、その上、氷床や氷河を構成する水が海洋に流出することから海水準は上昇する。気温の増大にともない、大気を含む水蒸気量は増大し、それは南極内陸域での堆積量の増大をもたらす。一方、4.1.1で述べたような、暖水の南下、そして氷床下への暖水の貫入現象を経て、棚氷の後退や、氷床流動の加速が発生する。南極氷床の表面では、沿岸部を中心に表面融解が起こるほか、氷床が薄くなる現象(thinning)が発生する。これに対して内陸域では氷床が厚くなる現象(thickening)が起こる可能性が高い。海水準変動に關与する要

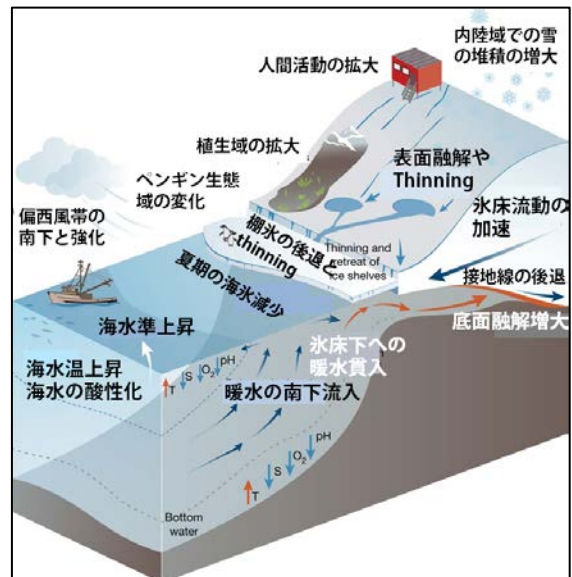


図5 温室効果ガスの排出が続く、対策が手薄になった場合の2070年の南極のイメージ。Rintoul *et al.* (2018, Nature) を改変。

素はこれだけ多様であり、連鎖したメカニズムが相互に関連している。

こうした全体像のなかで、南極氷床の質量収支変動の検知の主役は人工衛星観測である。3種の主要な方法がある。(i)人工衛星を用いた重力観測に基づく方法(重力法)、(ii)人工衛星搭載のレーダ高度計／レーザー高度計観測に基づく方法、あるいは、(iii)人工衛星で捉えた氷床流出量推定値(支出)と領域気候モデルで算出した堆積量推定値(収入)の差分を求める方法(インプット・アウトプット法)が使用されている。南極全体像の俯瞰にはこれらの手法の使用が不可欠である。しかし、3つの手法はそれぞれに特有の誤差要因や不確定性をもち、手法毎に必ずしも一貫しない結果が導出されてしまうことが知られている。こうした誤差の要因は、まさに人工衛星観測のみでは捉えきれない要素である。たとえば、内陸部の堆積量の増大の真値や、氷床の流動や内部や底面や縁辺部で起こる融解や変形、氷床の質量変化に伴うマントルの変形応答(アイソスタシー)、フィルンの圧密変態等である。これらを捉えるには、南極内陸部として堆積の代表性の高い地域である、内陸ドーム(高原状地域の頂部)での継続的な観測が最も効果的である。氷床中流域や沿岸地域では地形によって現象の空間的な変動が激しいのに対し、内陸高原域では空間的な変動が小さい。

南極の内陸環境や挙動を捉える観測

上に既に述べた要素に加え、南極の内陸環境や挙動を捉える観測としては、気温・降水等の一連の気象現象、放射収支、エアロゾルの飛来をはじめとした物質輸送、氷床の流動量などがある。また、気候システムとしては、領域気象モデル、大循環モデル、氷床流動モデルをツールとして解析していくことができる。人工衛星リモートセンシングで広域を捉える観測と、現地のこうした要素がどうなっているのか、地上真値をとらえていく観測が両輪となる。表1には、内陸基地を拠点に実施すべき主要な項目とその目的を挙げる。

表1 内陸基地を拠点に実施すべき主要な観測

項目	目的
南極氷床質量収支	海水準変動にかかる氷床内陸部の役割解明
アイスコア掘削	100万年あるいはそれ以上のスケールの古気候・古環境の解明、氷床構造の解明
気象・雪氷要素の時系列変化や空間分布	各種気象観測、堆積、昇華凝結、積雪の再配分、アルベドフィルンの生成・変態・変形
氷床構造の時系列変化や空間分布	氷床内部構造、底面状態、底面融解、内部変形、地殻熱流量
大気・雪氷界面現象	エアロゾルや水蒸気等の物質輸送
氷下地形	南極氷床の発達史と氷化地形の形成履歴の解明

5.2. 研究観測船

研究観測船を必要とするサイエンス

南大洋・南極氷床が関わる全球環境変動メカニズムには、異なる時間・空間スケールの様々な相互作用が関与しており、海洋・氷床・固体地球・生態系の実態と変遷について、観測研究を集中的に実施する必要がある。例えば、4.1.1 で述べた「南極氷床融解に起因する海水準変動の予測」のためには、南極氷床およびその周辺の南大洋に関して、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する必要がある。これには、沿岸・外洋境界域に位置する氷床-海氷-海洋システムに対して複合的な相互作用をもたらしている、大気・海洋・海氷・物質循環・生態系変動場について明らかにする観測が必要となる。

これらのサイエンスを実現する為には、南大洋・南極氷床の現場観測が不可欠である。例えば、氷床末端部にあたる棚氷の下の海洋に暖水が貫入して、氷床底面から融解が進むプロセスである氷床海洋相互作用を明らかにする観測が必要であるが、これには棚氷下の海洋観測というハードルの高い観測が必須となり、無人探査技術を含めた新技術の導入が不可欠であると共に、それらの母体となる研究観測船が必須となる。また、長い時間スケールで変化する海洋を理解するため、南大洋で堆積物コア等を採取し、過去の変動の復元も行う必要があるため、大気・海洋・海氷の現場観測だけでなく、海底コア採取を含めた海底に関わる現場観測も不可欠となり、そのプラットフォームとしての研究観測船は多面的観点からも必須と言える。

研究観測船に必要な機能

上記サイエンスを実現する為には、第一に、海氷域において通常海域と同様のパフォーマンスを発揮できる研究観測船が必要となる。そのために必要な機能は強力な砕氷航行能力である。具体的には、厚さ 2m の平坦氷を 3kt の船速で連続砕氷可能とする砕氷航行能力である。この砕氷航行能力により、厚い海氷域の航行も可能となり、海氷そのもの及び海氷下の海洋観測が可能となるだけでなく、沿岸の氷河・棚氷域周辺の氷上および海洋観測を行う事ができる。

次に観測能力を担保する観測機能及び装備・搭載機器については、大気・海洋・海氷・生態系・海底地形・地質等、多岐に渡る観測ニーズに対応する必要がある。また、野外観測の移動補給拠点としても機能する必要がある。特に欠かせないものとして、ヘリ甲板及び格納庫やコンテナラボ対応区画のような、後付けが不可能な機能が考えられる。また、現在におけるムーンプールのような新技術の導入も欠かせない。ムーンプールは通常の海洋観測の合理化・効率化に貢献するばかりでなく、ROV や AUV といった新技術を用いた観測の実施の推進に欠かせない。さらに、A フレームの搭載や、十分な広さの実験分析スペースの確保といった基本項目も同様に重要である。具体的に必要な観測機能及び装備・搭載機器については、巻末の参考資料(8.2)にまとめた。

6. 事業運営の方向性

本章の以下の項では、2008年構想の達成状況も踏まえつつ、前章までで掲げたサイエンスの方向性とプラットフォームの方向性を実現するための方策としての事業運営の方向性を構想する。

6.1. 次期南極観測船

現在の問題点（ハード面）

現行の南極観測船「しらせ」のハード面での問題点は、海洋観測の能力を著しく制限されていることである。「しらせ」はスラスタと呼ばれる定点保持機構を持たないため、風向きを固定する必要のある観測や、船からケーブルを繰り出して測器を使う観測には大きな制限が加わる。また、アーマードケーブルと呼ばれる情報送受信できるケーブルが装備されていないため、着底による測器の損傷回避や、ケーブル繰り出し中のデータ破損の早期発見等の対応ができない。さらに、Aフレームが装備されていないため、通常海底堆積物掘削等の観測にも対応できない。分厚い海水域を割って入って行くことはできても、そこで標準的な海洋観測を行う能力は備えていない事になる。

つまり、現行「しらせ」は、昭和基地への物資輸送に偏重しすぎた設計のため、その高い砕氷能力によって海水域内部に入り込む事はできても、そこでの海洋観測を行う事はできない。諸外国から「しらせ」の砕氷能力は注目を集めており、南極沿岸の厚氷域における大気・海洋・海水・雪氷・海底堆積物等の観測に関して期待を受けながらも、現状の観測能力では期待に応えられない現実が続いてきた。

全球環境変動メカニズムを明らかにする上で、南極大陸と南大洋は切り離すことのできない一体化した存在であるものの、我が国の南極地域観測では、基地観測を中心とした南極大陸上の観測に比し、南大洋の観測が十分に行われてきたとは言い難い。例えば、氷床融解に起因する海水準変動を予測するためには、南極氷床や氷床下の地質の研究だけでは立ちゆかず、沿岸の棚氷下の海洋の働きが鍵であることがこの5～10年で明らかになった。現行「しらせ」建造の際には、昭和基地周辺の海水状況を考慮し、輸送に特化した船の設計となったが、現行船の寿命である25年という時間スケールで考えると、海洋観測能力の欠如が、氷床研究の進展に結果的にブレーキをかけることとなっている。

以上の状況を踏まえると、次期南極観測船としては、現行の南極観測船「しらせ」が持つ砕氷航行能力と輸送能力を維持しながら、国際競争に勝てる海洋観測能力を付加した研究観測船が必要と考えられる。

現在の問題点（ソフト面）

現行の南極観測船「しらせ」のソフト面での問題は、観測及び輸送に関するフレキシビリティ

が著しく制限されていることである。現状では、南極地域に出入りする日程は事前に決まっており、またその回数も、1シーズンに1度、約100日の南極行動に限られる。このような運用では、観測計画に沿って、複数回のレグを組む、あるいは早期に日本を出港して観測を開始するというアレンジも容易ではない。

同様の砕氷船を持つ他国のケースを見ると、例えば豪州の場合は、年に7回程度のレグを組んで南極に出入りする事により、基地輸送と海洋観測を両立させている。ドイツの場合は、ケーブタウンでドックに入る事により、北極海を含めた年300日にわたる航海運用を実現している。また、他国の観測船（「しらせ」と同様に観測隊員が約80人乗船できる規模を想定）の場合、乗員は概ね50人程度であるところ、「しらせ」では約180人となっている。このように他国では、運行計画、運行日数、乗船者比率などで科学的な目的を重視した運用をおこなっており、効率的に研究成果を上げている。

以上の状況を踏まえると、次期南極観測船の運用にあたっては、乗員数の削減などを通じて効率化し、科学的目的を達成するための十分な観測日数を確保するとともに、柔軟な運行計画が実現できる体制を目指す必要がある。また、現場でのオペレーションに関して、観測船に対する観測隊の指揮権も明確にし、危険に関わることを除き、基本的な運行は観測計画に基づいて行われる体制も必要である。

今後の方向性（次期南極観測船の建造）

これまで本構想で記述してきたサイエンスを実現する為には、基地観測に必要な輸送と海洋観測・沿岸調査の両立が不可欠である。このために、次期南極観測船として、現行「しらせ」と同等の強力な砕氷航行能力有し、優れた観測機能（スラスタ・アーマードケーブル・Aフレーム等）を備えた船を建造する。これによりこれまでと同レベルの基地輸送に加え、厚い海水域に入り込んでの海洋観測・沿岸調査が可能となる。

一方で、海洋観測機能の中には、ムーンプールのように、現時点での技術レベルでは強力な砕氷航行能力と両立できない項目も存在する。このような事態に対応するためには、連携研究観測船の導入による砕氷研究観測船マルチシップ体制を整える。

これは現状においては、現行「しらせ」に加えてもう一隻の砕氷研究観測船を保有することを意味し、現在の日本の厳しい財政状況やサイエンスに投入できる予算状況を鑑みると簡単に実現できることではない。しかしながら、構想が進んでいる北極海用研究砕氷船等の構想が実現した場合には、その船を南極観測にも利用するという可能性は十二分に考えられる。厳しい厚氷域における観測についても、「しらせ」が先行してエスコートし、比較的砕氷能力の低い観測船がその後が続いて観測を行うという事も可能である。備船についてはこれまでもいくつかの取り組みがなされてきたが、費用対効果の観点からも、観測測器及びサンプルの輸出入に関わる諸問題を考えても、あまり効果的とは言えない。しかしながら、他国の研究砕氷船との共同観測は、日本のプレゼンスの確保という観点からも効果的と言える。各国の砕氷船にはそれぞれ特徴があり、日本の長所と他国船の長所を生かした観測を行う事も可能となる。上記をまとめると、表2のよ

うになる。

表 2 観測船の機能比較

観測船	観測機能	輸送機能	砕氷機能
現行「しらせ」	△	○	◎
次期南極観測船	◎	○	◎
連携研究観測船	⊗	—	○

凡例) ⊗：特に優れている、◎：優れている、○：十分な機能、△：十分ではない、—：不要

今後の方向性（次期南極観測船の運航形態）

これまで本報告書で記述してきたサイエンスを実現する為には、次期南極観測船には、運行計画立案段階から実際の運行に至るまでのすべての意思決定が観測計画の目的に沿ってなされる体制が必要である。当然、運行を担う組織はそのような運行が可能な組織でなければならぬため、次期南極観測船の運航体制の検討にあたっては、現行「しらせ」の運行を担う海上自衛隊の他、民間企業に委託するという選択肢を慎重に比較検討した上で、決定する。いずれの場合でも、観測計画を担う極地研が、次期南極観測船を利用した研究観測・輸送の全体計画のコーディネートをを行い、船の運航の方針を決める。なお、次期南極観測船の母港・ドックは、観測測器及びサンプルの輸出入に関わる諸問題の関係から、日本国内に設定する。

6.2. 基地整備・運用

前章プラットフォームの方向性の研究観測基地・拠点の項で、サイエンスの方向性を実現するために必要な研究観測基地及び拠点の方向性を構想した。

ここでは、それをもとに、日本の研究観測プラットフォームとなる研究観測基地及び拠点を、昭和基地、新ドームふじ基地、移動可能・無人観測拠点の3つとして、その整備及び運用の方針を構想する。

6.2.1. 昭和基地

他国から Inaccessible（接岸不能）と言われたプリンスハラルド海岸付近に位置する昭和基地をこのまま継続利用すべきか否か、60年を超える我が国の南極観測でたびたび議論されてきた。海上輸送が容易な地域や、内陸への輸送が容易な地点へ主要基地を移転すべきとして、現地調査を行ったこともあるが、適地を見つけることはできなかった。

今回、南極観測の将来を構想するにあたり、先に記述したサイエンスの方向性とプラットフォームの方向性をもとに、昭和基地をどうすべきか議論した結果、引き続き我が国の南極における主要な観測基地として、昭和基地での観測を継続する必要があることを確認した。

その根拠は、主に地理的要素と継続的要素の2点に集約される。

世界最強クラスの砕氷能力を有する「しらせ」でも時に接岸できないほどの海水に囲まれる昭和基地での観測を我が国が維持できないとなると、その能力を持たない他国には当然観測を行う能力はなく、そもそも観測が疎な東南極において、すっぽりと広大な観測空白域が生まれることになる。それにより、全球の観測網に大きな穴が開くこととなってしまう、太陽地球環境、全球環境変動監視、測地観測網等へ与える影響は計り知れない。

以上を踏まえ、昭和基地を我が国の南極観測の主要な観測基地として継続運用することが、地球規模で見ても重要であると考えられる。

では、継続していくにあたって、昭和基地を今後どのように整備・運用していくべきであろうか。ここでは、昭和基地を最先端の研究観測施設として再整備・運用し、本報告で掲げたようなサイエンスの方向性を実現していくために、老朽化した基地機能を再生させ、省エネ化や環境負荷の低減を図り、サステナブルな基地を形成して社会の先導モデルとしての役割を担うことを目指して、以下の方向性で整備・運用を考える。

基地機能の集約化による基盤整備

1957年に昭和基地が開設して60年以上が経過した。現在、昭和基地の建物数は大小合わせて69棟を数え、延床面積は7,787m²となる。これは、南極の観測基地では、McMurdo（米）、Amundsen-Scott（米）、Casey（豪）、Davis（豪）に次ぎ、5番目の大きさを誇る。一方で、施設の老朽化が確実に進行しており、69棟の建物のうち、建設後30年を超える建物が現時点ですでに23棟（33.3%）、2034年時点では57棟（82.6%）あり、このままでは、建物の維持管理に大きな労力が割かれ、結果として、高度な研究・観測の実現に辿り着かない。

そこで、敷地内に点在し、老朽化が著しい各施設について、集約・効率化を図り、南極の過酷な気候条件を踏まえ、安全で信頼性の高い施設を提供することで、基地観測の基盤を整備する。

南極で最大の規模を持つMcMurdo（米）では、現在105棟ある建物を今後10年程度で6棟の建物に集約するという発表がなされた。また、近年新設されたBharati（印 2012年）、Jang Bogo（韓 2014年）や現在計画されている中国の第五基地においても、大型の建物を配置し機能を分散させないことで、基地管理の効率化を図りながら、高度な観測機能を持たせる工夫をしている。

昭和基地でも、近年では、同様な思想のもと、自然エネルギー棟（2014年）や基本観測棟（2018年）といった大型の建物を建設して古い建物の機能を集約化してきているが、まだまだ古く規模の小さい建物が散在しており、効率的な運営に支障をきたしている。そこで、昭和基地においても、効率的な基地運営による研究・観測機能の高度化を目指し、現在69棟ある建物に分散する機能を2034年までには10棟程度に集約する。

効率的なエネルギーシステム

基地での高度な観測実施には、安定的な電力供給が欠かせない。現在、昭和基地の発電量の約98%をディーゼル発電機によって賄っている。発電機関連設備の中には導入後既に35年が経過したものもあり、現在、新たな発電設備の導入計画が急ピッチで進められている。その他、太陽光発電や風力発電が導入されているが、全電力量に占める割合は約2%と少なく、ディーゼル発電が当面昭和基地の主要電源であることに変わりはないものと想定する。

ただし、「6.4 輸送」の項で詳述するが、将来的には昭和基地への輸送は、必ずしも毎年接岸する前提ではなくなると構想している。このため、2年に1度の給油で、2年間安定的な観測が実現できるエネルギーシステムを構築する。

そのために、①ディーゼル発電機自体のエネルギー効率を格段に高める、②太陽光や風力などの再生可能エネルギーに加えて水素発電等を導入するなどエネルギーミックスを進める、③大規模蓄電器・蓄熱装置の導入、④スマートグリッド（次世代送電網）の導入などを行う。

衛星通信ネットワークの高速化

サイエンスの方向性を考えると、昭和基地で生み出される膨大な量の観測データをすべてリアルタイムで国内に伝送するのが当たり前の世界にならなければならない。また、基地の効率的な運営のためには、建物数や規模を最適化するだけでなく、基地運営に必要なインフラ部分についても、遠隔監視・遠隔操作の本格導入により抜本的に効率化する必要がある。

極論すれば、研究者がわざわざ昭和基地まで赴かなくても、衛星通信を通じてすべての観測が可能となるような基地を目指す必要がある。併せて、研究者自身が現地に行き観測する必要がある場合でも、国内研究施設と同等の研究環境を提供可能とならなければならない。

そこで、現状で4 Mbps の速度しかない国内と昭和基地との通信速度を、最低3桁程度向上させ、ギガレベルの通信を実現する。現状から考えると、一見途方もない通信革命にも思われるが、言ってみれば国内一般家庭と同程水準にもっていくということであり、国内でここ10年程度に起こった通信の高速化から考えると、十分に実現可能な範囲と考える。

また、昭和基地と国内の通信回線にとどまらず、昭和基地内、あるいは大陸氷床上のS17航空拠点やリュツォ・ホルム湾沿岸の観測拠点を含む広域のネットワーク網を構築する。

基地エリアの拡大と基地内アクセスの改善

昭和基地が位置する東オングル島は、電波を発する観測機器等が乱立し、電波環境的には極めて厳しい環境にある。現在でも、隊員が生活する場とアンテナ群はゾーニングにより分けられているが、狭い東オングル島の中のみで考えているのは、新たな観測の展開の可能性に対応できない。そこで、基地の利用可能エリアを西オングル島へも大きく広げたいうえで、観測エリアと生活エリアを大別してゾーニングを行う。

そのうえで、拡大したエリアをいつでも自由に行き来できる基地内アクセスルートの整備と頻繁に行き来しなくとも済むような観測機器の無人化（遠隔操作）及び基地内ネットワーク網の構

築を図る。

6.2.2. 新ドームふじ基地

南極氷床の融解と海水準変動への影響はどうか、温暖化が進む現代に住む誰も抱く疑問に正面から答えるためには、南極大陸内陸部における観測は欠かせない。

我々は、内陸基地として、ドームふじ周辺地域に、通年観測可能な可動基地としての「新ドームふじ基地」(Dom Fuji II Station)を構想する。

「ドームふじ」の歴史と地理的重要性

昭和基地から約千キロメートル内陸に位置する「ドームふじ」は、氷床深層アイスコアの掘削に適した地域として、1980年代後半から我が国が調査を進めた。掘削に適した地域とは、堆積が安定して存在し、氷床流動や斜面下降風に乱されることなく存在している地域である。日本は、1990年代になり「ドームふじ」での越冬基地体制の整備を開始し、1995年から1999年（第35次～38次隊）、それに2004年から2005年（第44次隊）に越冬観測を実行した。これらの越冬体制を土台として、1990年代、2000年代に、それぞれ2503m深、3035m深までの深層アイスコアを取得した。そこから得られたアイスコアからは約72万年間をカバーする古気候データが得られており、我が国の南極観測における際立った成果となっている。現在我が国は2020年代に向けて、100万年の年代に至る非常に古いアイスコアの掘削プロジェクトに取り組んでいる。

過去の地球の気候変動史の知識は、さらに古い時代の古気候の知識の取得や、より高度に洗練した解析手法を用いた研究を目指して、強い必要性が今後も続くはずである。ドームふじは、大西洋とインド洋からの気候情報を主に含むことになる。その点においても、ドームふじ地域は国際的な、アイスコアサイエンスフィールドとして活用されていくことになる。日本がドームふじ近傍探査の端緒を約50年前に既に築き、その後1980年代後半から研究の場として展開してきたことを土台として、この地域の国際的なアイスコアサイエンスをリードしていくべきである。

南極大陸の主要な内陸基地の現状の分布と役割

南極大陸の内陸基地の分布の現状は図6に示すとおりである。ドームふじは

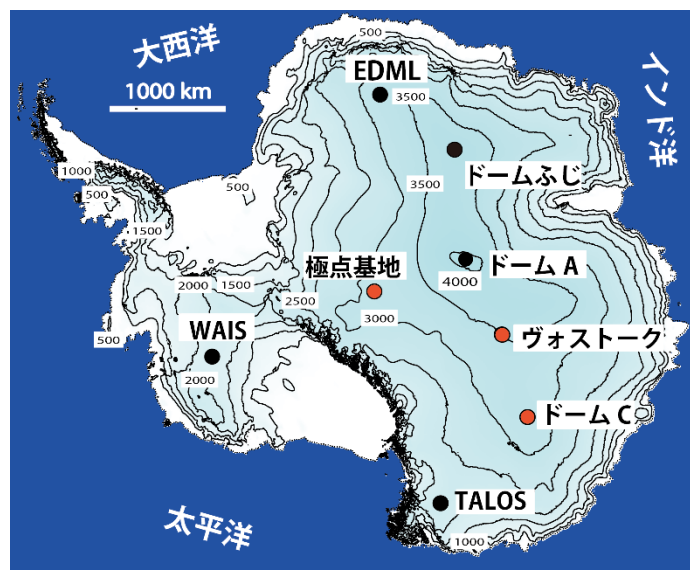


図6 南極氷床上の主要な内陸基地。赤色は現時点での越冬基地を示す。

大西洋やインド洋に面する頂部にあり、この地域からの水蒸気流入を堆積として受け止める場にある。この地域での観測やアイスコア掘削が重要性を持つ理由は、この大西洋やインド洋に面する位置にある。近年、南極のドロンイングモードランド内陸部は、堆積量の増大が起こっている事例が多数報告されている。こうした水蒸気の挙動は海水準の上昇を抑制する役割をもち、この挙動を今後も監視していくためにはこのドームふじでの観測が最適である。また、ダンスガード・エシガー振動（DO 振動）として知られるような寒冷期に起こる急激な気候変動現象は、北大西洋に端を発し、大西洋を伝い南下・伝搬し、南極ではまずこの大西洋に面した地域に影響を及ぼすことがわかっている。急激な気候変動を南極からみるうえでの最適地なのである。東南極の大西洋・インド洋海域に主にかかわる気候は、ドームふじを拠点にし、対照的に、主に太平洋・インド洋にかかる情報は、ドーム C 基地が担うという構図を描くことができる。

また、インド洋や大西洋に面した沿岸域の各南極基地からみたとき、ドームふじは内陸調査の中心ハブの役割を担うことができる国際連携の要となりうる。かつて 2007 年・2008 年に実施された「日本・スウェーデントラバース」は、沿岸に基地をもつ複数の国が協力したことで観測地域の空間を大きく広げた事例である。各国のリソースを持ち寄った協力のハブになるような内陸基地を志向する。

越冬基地か、夏基地か？固定基地か、可動基地か？

人工衛星からのみではとらえきれない氷床の内部・深部・底部の挙動が、今後現地で捉えていくべき重要な要素であることを述べた。気温、降水量、質量収支、放射収支などの現象は、その素過程をとらえる意味では、遠隔観測や自動観測ではなく、観測者が現象のその場に直接立ち会うことの出来る通年越冬観測が必要である。夏基地となったとき、日々変動するこうした現象をとらえることは困難である。フランス・イタリアが運営するドーム C 基地と並立し、通年観測ができる基地がここに必要である。

固定基地か可動基地かという点においては、一定期間には固定点に置くことを念頭に置きながらも、前章 5.1.2「内陸基地・拠点」に掲げた事象を観測する場の科学的必要性に応じて移動できるという柔軟性を維持するべきである。すなわち、必要な観測モジュールを備えた可動基地として構想する。

6.2.3. 移動可能・無人観測拠点

基地から離れた周辺域への研究・観測の展開に必要なインフラやシステムの整備が必要である。野外での観測の際の観測拠点は、様々な観測の目的に応じてフレキシブルに対応できるように、また科学的な目的に応じて広域に展開することが求められる。そのために、滞在型の調査拠点として、移動式のカブース、コンテナラボなどを、必要と目的に応じて整備し、野外装備一式とあわせてユニット・システム化する。また、機動力のある四輪駆動車（アークティックトラック）などと組み合わせることで、迅速・広域的に展開する。こうしたインフラの整備に加えて、取り

扱う専門スタッフを拡充する。

無人観測に関しては、観測目的によって必要とする仕様・内容が様々であるが、電力や通信手段など共通化して開発利用の可能なものについては、分野を超えて開発を促進すべきである。また、UAV（自立航空機・ドローン）などを利用した観測なども、様々な分野に応用可能であり、共通化して開発を進めるべきもののひとつであるかもしれない。機器の小型化や省電力化はめざましい。測地観測を例に挙げると、30年前、GNSSは非常に高価な測器であったが、近年、小型・低消費電力化・低価格化が進み、移動局や無人観測局で広く使用されるようになった。今から10～20年後には、例えば、SLRやVLBIなどの宇宙測地技術なども、小型・省電力化が進み、リモート・自動運用ができるようになれば、現在のGNSS(GPS)のように移動局や無人観測局で利用可能になり、面的な観測網が構築できるであろう。

6.3. 実施期間・アクセス

航空機と船舶（主に次期南極観測船）を利用して、必要な人が、必要な地域に、必要な時期に、必要な期間だけ南極地域に滞在し、研究活動または設営作業を行うことができる体制を構築する。夏期においては、最短1ヶ月で日本から南極に行って帰って来られる体制を目指す。また、航空機と船舶を組み合わせ、必要に応じたアクセスができるようにする。1ヶ月という短期間での観測実施体制を構築することにより、優秀な若手研究者の南極研究への参加を促すことができる。冬期においても、人員の入れ替えや物資の輸送のために航空機によるアクセス体制を整え、数ヶ月おきなどの定期的な運行を実施する。

柔軟に運用する観測船

これまでの人員移動の手段はほとんどが観測船によって行われてきた。夏隊であれば出張期間は11月末から3月末までの4ヶ月に渡るが、昭和基地周辺での活動期間は12月半ばから2月半ばまでのおよそ2ヶ月間に限られる。日本からの出港、日本への帰港などの運航日程は毎年ほとんど変わらない硬直的な運用になっている。毎年同じ運用であるということは、毎年同じ時期に観測を行うということになる。この硬直的な運航形態を様々な観測計画によって柔軟な日程を取れるように変えることが必要である。例えば、必要に応じて出港時期を最大で1ヶ月程度前後にずらす、観測船の運航期間を伸ばすまたは短縮する、南極へ1シーズンに2往復するなどの方法で、観測にバリエーションを作ることができる。これにより、幅広い観測を実施できる体制を整える。船舶による早期（11月または12月上旬に南極に到達）の人員輸送が実施できる体制ができると、夏期間の安定した天候の時期により大規模な観測・設営が可能になる。船舶の早期の輸送は、毎年実施するものではなく、観測・設営計画に応じて立案する。

柔軟な日程で運用できる観測船運航体制を構築できれば、次に述べる輸送についても、海水の状態によって時期を前後させることを検討できる。たとえば、海水が厚く、容易に割れない状況であれば輸送時期を遅らせて、少しでも海水が緩む2月頃から実施するという計画が可能にな

る。逆に、海水の融解が進んで1月頃の氷状は氷上輸送には緩すぎる恐れがある場合には、いまより半月ほど早い12月初旬には南極に到着して輸送をするという計画も可能である。

航空機輸送で観測・設営両面を効率化

南極の野外で研究・設営などを実施できる期間は、夏期に限られるため、非常に短い。できるだけ早く南極に入ることにより、観測期間などをより長くとることができる。現在でもDROMLAN (Dronning Maud Land Air Network) を用いて早期に昭和基地入りする計画が取り入れられており、陽の長くなる11月から12月までの、これまであまり活動が活発でなかった時期を有効に利用できている。夏の活動期間を長く取れることは、観測だけでなく設営作業にもメリットがある。建築などの専門性の高い隊員を派遣するケースでは、夏期のみで短期間で仕事ができるようになる。また、帰路も航空機を利用することにより、短い出張期間で観測を実施することができる。航空機による人員の輸送を更に増やし、観測を効率化していくことが必要である。このように、航空機の利用が増えた際には、航空路による南極へのゲートウェイとなっているケープタウンで、人や物の受け入れを行うスタッフが常駐することが望ましい。

現状では、冬季には昭和基地にアクセスする手段はない。非常時のレスキューについては、机上で検討されてはいるが、実施されたことはない。月に1度など定期的に航空機を運行することで、通年に渡って人・物の行き来ができる体制を構築する。

オーストラリアは、南極大陸上のデービス基地近傍（基地より6km）に通年利用可能な陸上滑走路を整備する構想を発表（2018年5月）した。50次隊（2008年）の昭和基地への輸送はオーストラリアの砕氷船オーロラ・オーストラリスによって行われるなど、オーストラリアと日本の間では南極観測で協力体制を築いている。今後は、航空路としてDROMLANだけでなく、オーストラリアとの協力も視野に入れることが必要である。

6.4. 輸送

現在の問題点

南極昭和基地への物資輸送は、その大半を観測船「しらせ」に頼っているのが現状である。

現在の「しらせ」に関しては、出港と帰港、南極圏での行動日数などの日程が毎年ほぼ変わらず、他国の南極観測における海上輸送と比較しても運用に柔軟性がなく、観測計画や設営計画の柔軟な運営を困難にしているのが現状である。高い砕氷能力を有している「しらせ」であるが、それでも海水状況によっては昭和基地への接岸が困難な場合があり、接岸不能時の輸送に関しては、大幅な計画変更を余儀なくされている。

昭和基地以外への輸送としては、内陸基地への輸送があげられる。現在の内陸基地への物資輸送に関しては、計画実行の前年までに必要物資の大半を昭和基地へ輸送した後に、越冬期間中の海水が安定する時期を待ち、雪上車による海水上の輸送を経て、内陸への出発点に物資を集積するといった状況にある。ここでも、海水の状況により雪上車での物資輸送が困難になる場合があ

り、物資輸送ができなければ観測計画の変更や中止の可能性が常につきまとう。また、海水輸送が可能となった場合でも、越冬開始後海水が安定してからの作業開始となることで、物資輸送、車両整備などに費やせる時間が非常に短い状況となっている。

さらに、サイドスラスターの無い「しらせ」では、他国砕氷船では一般的な、棚氷縁氷崖に接岸して直接物資を降ろす荷役方式を行うことができず、また、クレーンの能力に限界があり、牽引性能の高い大型トラクターを昭和基地に導入することが難しいため、内陸への輸送は現在保有している大型雪上車のみで頼らざるを得ず、輸送力を大きく改善することが難しい状況である。

今後の方向性

昭和基地への物資輸送の方向性として、「海氷状況に左右されない物資輸送」、「船舶の接岸に依存しない基地の運営」、「船舶が接岸しなくとも対応できる空輸体制」を構想する。海氷状況に左右されない昭和基地への物資輸送については、船舶運用時期を柔軟にすることにより対応は可能だと考える。現状の決められた日程中での運用から、海氷状況に合わせた日程調整や複数回の輸送を実現することにより、機動的で確実な対応が可能となる。また、昭和基地で使用する燃料の備蓄量を増やすなどの対応を行い、2～3年に1度の船舶の接岸による給油でも基地の維持が可能となる設備を構築する。また、空輸のみでも基地の運営が可能となるような、安定した大型物資輸送が可能な航空機（大型ヘリなど）の配備を行う。

内陸基地への物資輸送については、既存ルートその他、外国基地で利用されている船を用いて、クラウン湾への揚陸する方法を構想する。揚陸された物資は、雪上車によりベルギーのプリンセス・エリザベス基地を経由して直接内陸基地まで輸送する。この輸送方法を実施すれば、昭和基地周辺の海氷状況に左右されずに内陸基地への物資輸送が可能となる。この方法を実現させるために、チャーター船の利用はもちろんであるが、クラウン湾から内陸基地への雪上車による輸送に関して、ルートを整備できるゲレンデ整備車の確保と牽引力のあるトラクターなどを採用する。また、これらの車両の充実とともに、大量の物資輸送に対応した橋も配備する。

また、将来的にも高い砕氷能力を有する必要がある日本の観測船の輸送力を活かし、他国からの要望があれば、厚氷域での物資輸送などを請け負うことを構想する。

6.5. 財務戦略

将来の南極地域観測事業の財務戦略を構想するにあたり、まずは、現状の分析から入りたい。

図7は、COMNAPの2015年時点での調査をもとに、各国の南極観測関連予算の上位10カ国を抜き出

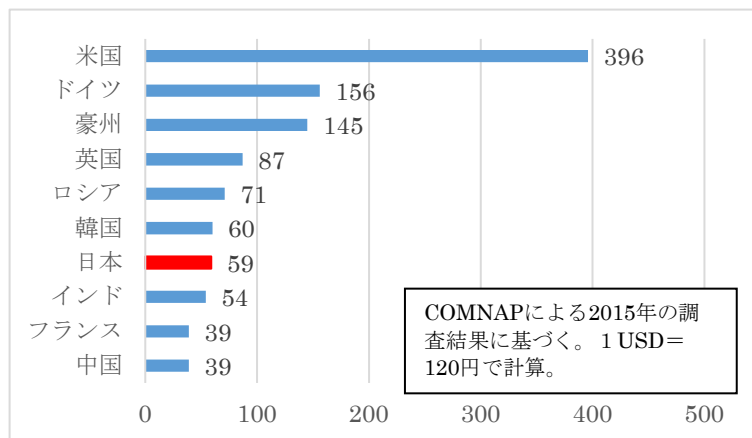


図7 各国の南極観測関連年間予算額（単位億円）

したものになる。各国の予算に含まれている範囲が不明であり、厳密な比較には適さないものの、各国の予算規模感は見取れる。これによると、米国が突出しており、ドイツと豪州が第2グループを形成、日本は、英国、ロシア、韓国、インドなどと第3グループに属している。

次に、我が国の2017年度（第59次隊）の南極観測の予算構造は、図8の通りである。

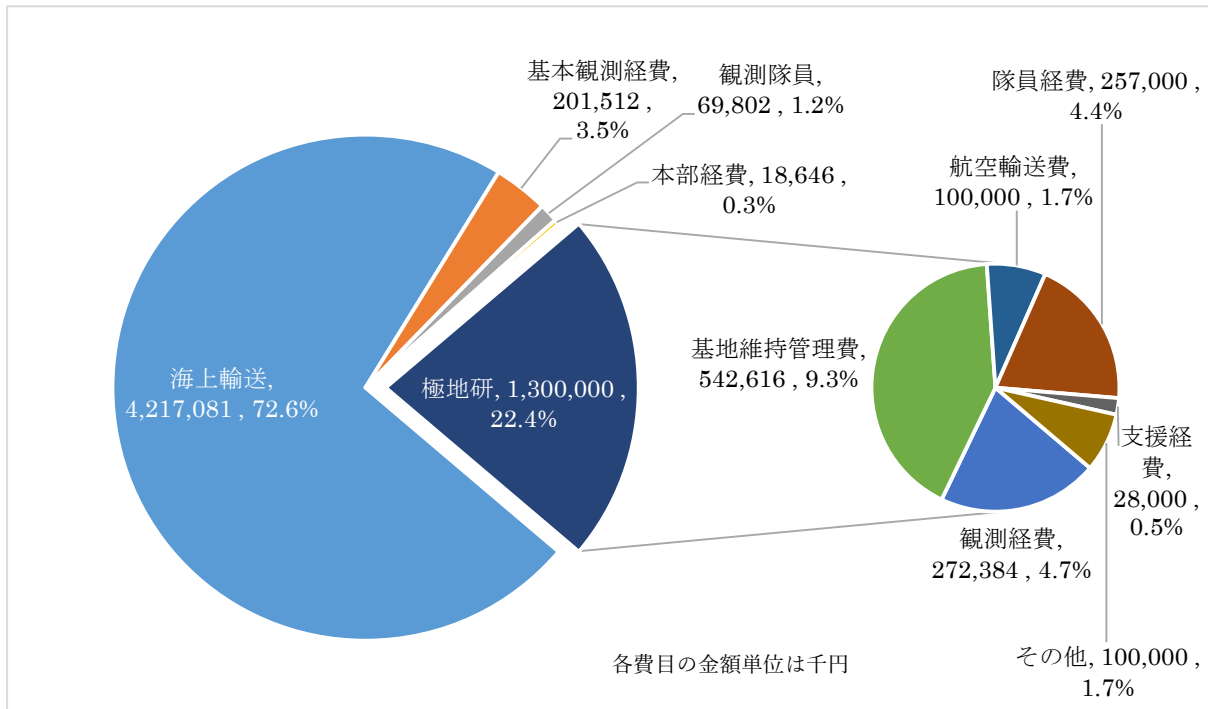


図8 2017-18 JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) 予算構造 (総額約5.8億円)

全体約58億円のうち、「しらせ」や大型ヘリコプターの運航・運用及び保守等に要する海上輸送経費が全体の72.6%の約42億円となっている。小型ヘリコプターチャーター費用とDROMLANなどの航空輸送1億円1.7%を加えると、全体で、約43億円74.3%を輸送で占めていることになる。一方で、昭和基地等の維持管理費は約5.4億円でわずか9.3%しかない。観測経費（基本観測経費+観測経費）も、4.7億円、8.2%に留まっている。

では、我が国の予算構造を他国のそれと比較した場合、どのような特徴が見られるであろうか。各国で予算の積算方法が一様ではないため、直接的な比較は難しいが、第2グループの豪州が2013-14シーズンの豪州南極プログラムの予算構造を公開（20 Year Australian Antarctic Strategic Plan, 2014）しており、その資料を図9に掲載する。なお、オーストラリア南極プログラムの主なプラットフォームの構成は基地4（Casey、Davis、Mawson、Macquarie Island）、観測船1（Aurora Australis）となっている。

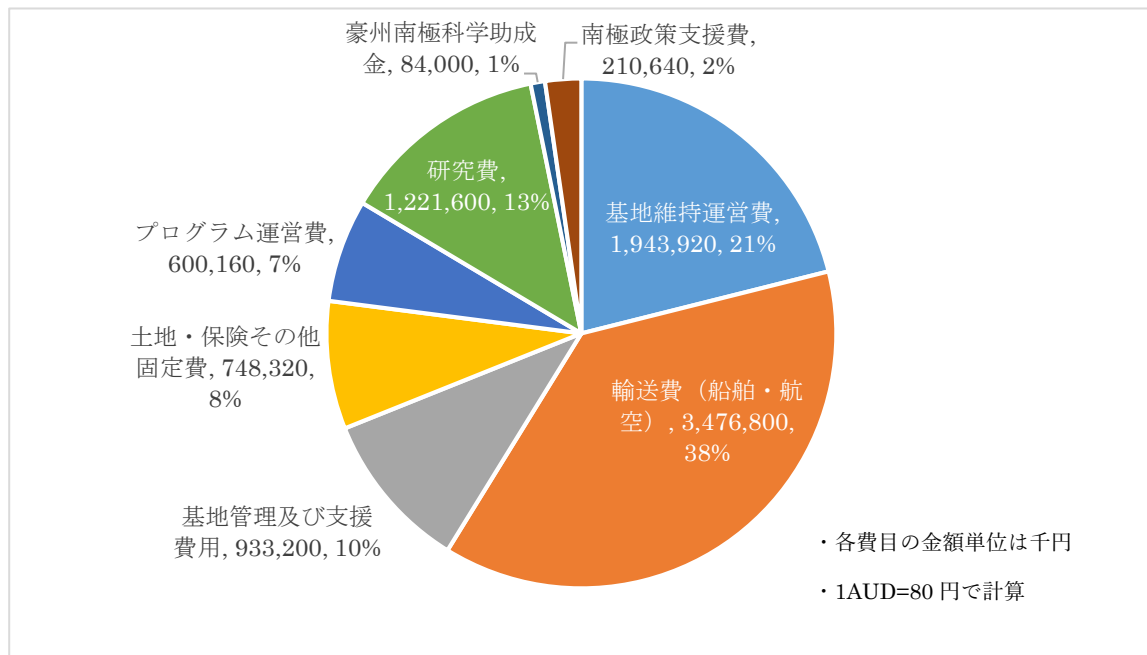


図 9 2013-2014 豪州南極プログラム予算構造（総額約 9.2 億円）

我が国とオーストラリアの南極事業に関する予算構造を比較した場合、輸送に要する経費が最大となっている点で同様の特徴を示している。他の大陸から遠く離れた南極での活動にあたって、輸送に要する経費が嵩むのは必然であり、両国において輸送経費が最大の支出となっているのは不思議ではない。一方で、予算全体に占める輸送経費の割合は、日本 72.6%、オーストラリア 37.7%と大きな差異がある。我が国の南極観測の予算構造は、このように、海上輸送の高コスト体質の影響により、研究の基礎となるべき基地をはじめとしたプラットフォーム経費や観測経費に十分な配分ができない事態を招いている。

上記を踏まえ、本構想では、南極での研究に直結するプラットフォーム経費及び観測経費の充実を目指して、将来の財務戦略として、以下 2 点を構想する。

外部資金獲得

我が国の科学技術予算は 2000 年代から横ばいで推移しており、南極観測においても、今後の劇的な予算増を考えると合理的ではない。2004 年（極地研の法人化）以降の南極観測の予算推移（図 10）を概観すると、大型ヘリコプターの調達や「しらせ」の修理等による予算の増減はあるものの、概ね 50~60 億円前後で推移している。うち、プラットフォーム経費や観測経費の財源となる、国立極地研究所の運営費交付金分の事業費は、概ね漸減傾向で、2018 年度は 2004 年度比で、約 12%減となっている。

このような予算状況の中、新たな財源を政府予算以外にも求めていくことは、論理的帰結と言

える。我が国の南極観測は、政府予算と共に、民間からの多大な寄付に支えられて出発した。開始当初の精神に立ち返り、民間との共同研究や寄附・寄贈を推進することにより、財源の多角化を図るべきである。

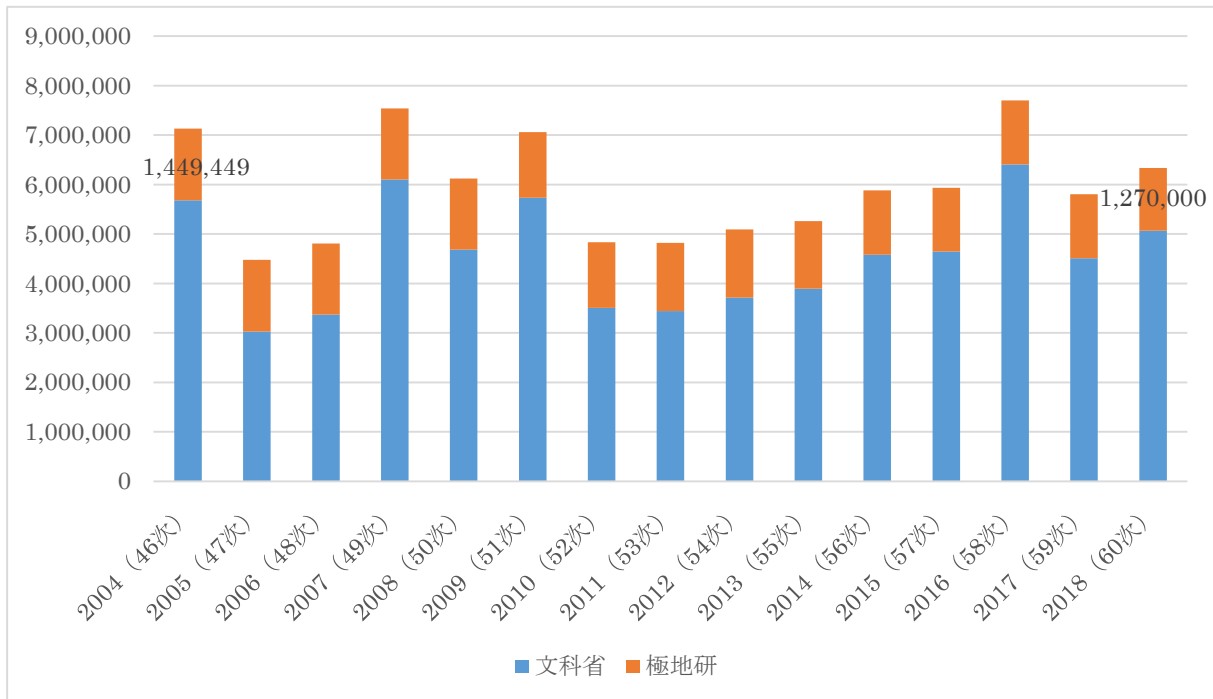


図 10 JARE 予算額推移 (単位：千円)

具体的な方策としては、以下を構想する。

①プラットフォームの開放

2008年の第51次隊以降、新たな枠組みとして「公開利用研究」を開始し、南極観測事業費に依らない研究を実施してきた。制度上、民間企業を排除しているわけではないものの、採択基準やその後の評価、あるいは成果物の扱い等が一般的な研究と同一基準となっていることから、民間企業の製品・サービス開発や実証実験などを企図した計画は実現できていない。

今後は、地理的・環境的特異性を有する南極を、企業の製品・サービス開発や実証実験の場として広く開放することを企図し、「昭和基地利用プログラム」として、民間の製品やサービス開発及び実証実験の場と昭和基地等のプラットフォームを開放することにより、民間の力、財源を活用した研究開発を南極観測の一翼として実現する。

②民間との協力フレームワークの構築

南極観測は、設営系隊員の派遣など、民間企業の協力なくしては考えられない。一方で、国家事業として運営されている観点から、民間企業の協力を表立って謳うことを積極的になかなかた。そのため、隊員派遣や寄附・寄贈等に協力してくれる企業に対して協力に見合うリターンを提供できず、ひいては広く民間企業の協力を得ることが難しかった。

そこで、民間からの協力や寄附を更に得るべく、隊員派遣に協力いただく企業をパートナー、

寄附や寄贈いただく企業をスポンサーとして正式に位置付ける「南極地域観測パートナー・サポーター制度」を制度化するとともに、民間からの寄附金を主な財源とする寄附事業を企画する。

予算構造の見直しと選択的投入

仮に外部資金の導入が上手くいったとしても、予算総額が2倍、3倍になることは考えにくい。そこで必要になるのは、予算構造の見直しと予算の選択的投入となる。

①予算構造の見直し

予算構造の見直しとしては、海上輸送経費の比率の削減が必要となる。適正比率の算定は容易ではないが、10%でも5%でも引き下げが可能となれば、プラットフォーム経費や観測経費など成果に繋がりやすい経費に回せる予算が格段に増える。

次期観測船の建造にあたっては、科学的な成果を十分に得られる機能を前提としつつ、建造経費だけでなくランニングコストやそれを実現できる運営体制も慎重に検討し、海上輸送経費の比率削減を図ることにより、予算構造の見直しを図る。

②予算の選択的投入

限られた予算を成果に結びつけるため、予算は広く薄くではなく、重点的に投入する。

南極観測の中核実施機関である極地研は、研究所として科学的成果をあげる責任がある一方、事業運営主体として、極地研所属研究者に限らない幅広い研究者がよい成果を上げるためにプラットフォームやサービスの充実を図り提供する責任も有している。両者をどこでバランスさせるかという価値判断になるが、研究そのものについては南極観測事業費以外での実施も可能であることから、南極観測でしか提供できないプラットフォームやサービスの部分（国内体制の人員配置を含む）に予算を選択的に投入する。

観測経費としては、2008年以降、公開利用研究を推進し南極観測事業費によらない研究を実施し、一定の成果を上げつつあることもあり、今後は、研究観測として経費措置している一般研究観測や萌芽研究観測の件数を絞る、あるいは、公開利用研究へと置き換えていくことにより、重点研究観測への配分比率を増やす。なお、長期間の継続が重要な定常観測やモニタリング観測に要する経費については、積算額や実施項目の精査を不断に行いつつも、安定的に予算確保する。

6.6. 事業の枠組み

本将来構想では、これまでに記載してきた通り、我が国の南極地域観測事業を、将来のサイエンスの方向性をベースに、それを実現するために必要なプラットフォームや事業運営の核になる部分について構想してきた。

ここでは、本構想の最後に、上記で記載しきれなかった事業運営の枠組みの方向性について記すとともに、「Japanese Antarctic Science Program」を構想する。なお、南極観測の大枠は、

1965年の閣議決定に基づいているが、ここでは、この歴史ある閣議決定の内容を維持することを前提に構想する。

6.6.1. 観測隊員

2008年構想では、南極地域観測事業に参加する者の区分について、「観測隊員」、「共同利用研究員」、「大学院学生」、「同行者」の4つに区分することを構想したが、完全な実現には至っていない。

現在、南極観測に参加する者は、南極本部の定める事業計画（観測計画及び設営計画）を実施する観測隊員と、それ以外の計画を実施する同行者とに区分している。この区分は、計画の優先順位をベースにした区分として合理的に機能していると理解でき、新たに別の区分を設ける理由は薄い。

隊員に関して、長らく論点になっているのは、大学院学生の取り扱いである。現状、南極観測に参加する大学院学生は多かれ少なかれ観測計画を実質的に担っていると言って過言ではない（観測計画と乖離した活動を計画する大学院生のみを南極に派遣し活動させることは安全なオペレーション実施の観点から現実的ではない）。ところが、実際の運用にあたっては、別の方針によって、大学院学生は同行者として扱う整理となっており、観測計画を遂行するうえで無用の区別が生じている。重要なのは、観測計画の遂行と科学的成果の創出に必要な隊員編成であり、そのために必要な人材が大学院学生だとしても、区別する必要も合理的理由もないため、大学院学生も他の社会人と同様、観測隊員となり得ることを正式に位置付ける。一方で、社会人には労働災害保険が適用されるのに対して大学院学生にはこの適用がないため、これに相当するリスク管理を南極観測事業費により実現する。

まとめると、本構想では、観測隊員の区分を表3の通り構想する（区分自体は現状と変更はない）。

表3 観測隊員の区分

区分	活動	隊員委嘱	経費負担	身分	現在の扱い
観測隊員	事業計画を実施	あり	南極本部/ 極地研	社会人	観測隊員
			南極本部/ 極地研	大学院学生	— (現状では事業計画を実施する大学院学生はいない整理)
同行者	事業計画でない活動を実施	なし	所属機関 / 本人	— (なし)	同行者

6.6.2. 観測隊組織

アクセスが多様化し、「必要な人が、必要な地域に、必要な時期に、必要な期間だけ南極に滞在する」時代が、もう目の前まで来ている。

そうした時代に、毎年同一時期に出発するグループを称して、「第〇次南極地域観測隊」という観測隊組織は意味をなさなくなる。隊員は、それぞれの観測計画や設営計画に必要な任期を個別に付すこととし、隊次や夏隊、越冬隊という大括りのグループは組織しない。

一方で、人員の頻繁な入れ替えが発生することで、現地での動きが複雑化し、安全や効率的なオペレーションに混乱をきたす恐れがある。それに対しては、隊長を補佐し、現地の運営が安全かつ効率的に回るよう、マネジメント層の隊員を配置するとともに、十分な権限を担保することで対応する。

6.6.3. 国内運営体制

サイエンスプログラムとしての南極観測の運営にあたって、中核的实施機関である極地研の体制を強化する。具体的には、以下の機能を有するプログラムオフィスとして整備し、所要の人員配置を行う。

①サイエンスオフィス

事業運営の肝となる研究計画の策定（募集、審査、採択、予算配分）、進行管理及び評価を担うオフィス。研究成果の発信なども担う。スタッフには、各国の科学技術動向や南極研究動向に明るい研究マネジメント人材等を配置する。

②ロジスティクス&オペレーションオフィス

昭和基地などの研究を支えるプラットフォームの設営的サービスや、安全かつ効率的な現地オペレーション及び事前準備を担うオフィス。個々のサービス分野の高い専門性を有し、南極の現場を十分に把握する人材を配置する。

現行の極地研南極観測センターは、上記②の性格が強いが、広範なロジスティクスやオペレーションのサービスをカバーする人材は十分には措置できておらず、さらなる専門人材の措置が必要である。また、①については、現状では研究系からの兼務教員がコーディネーターという形で担っている部分が多いものの、より機能させるためには、専任スタッフの配置が欠かせない。

現状では、南極観測センターの専任スタッフは、15名程度で、この中から毎年複数名を南極に派遣することも踏まえると、現在の倍の30名規模の専任スタッフの配置が必要であり、予算構造の見直し、選択的投入を行って、国内体制の拡充を図る。

6.6.4. Japanese Antarctic Science Program

アメリカの南極プログラムは「United States Antarctic Program」、オーストラリアの南極プ

プログラムは「Australian Antarctic Program」であり、その下に、現地での活動がなされている。翻って我が国の南極地域観測事業は JARE（Japanese Antarctic Research Expedition）という活動とほぼ同義という沿革で進んできた。もちろん、その活動は、中期計画等で科学的な目標を設定したうえで、その達成のために必要な活動と位置付けられているわけだが、「Expedition」や「観測」に意識が引きずられ、目標であるはずの科学的成果を出す部分は事業の枠外と捉えられて来た部分があるのは否めない。

そこで、南極観測の目標を観測そのものではなく科学的成果であると明確にするため、南極地域観測事業の英語名称を「Japanese Antarctic Science Program」と正式に定義し、JARE はこの元を実施される活動であると再定義することで、本構想を結ぶ。

7. おわりに

10年前、2008年構想では、主に事業運営の方向性について構想したが、今回の構想では、サイエンスを基軸に置き、社会的要請に応える研究や知的好奇心に訴える研究として何が必要か、何をすべきかをまず構想し、プラットフォームや事業運営の方向性は、あくまでそれを実現するためのツールや手段として位置付けた。

2034年の地球環境はどうなっているのか、南極はどうなっているのか、科学の進展は如何ほどか、いずれも我々の想像の範囲内に留まるとは思えない。

それを理解しつつ開始したつもりではあったが、本構想策定のこれまでの歩みには、紆余曲折があった。専門分野により描く将来のサイエンスと必要なプラットフォームや事業運営の仕方は大きく異なるし、同じ研究者と言えど、価値観が世代を超えるのは難しい。何度もコンセプトを練り直し、なんとかまとまったというのが正直なところである。

構想にあたり、我々には危機感があった。わずかな中断期間を除き、60年に亘って連綿と続いてきた南極観測は、果たしてこれからも続くのだろうか？現「しらせ」の後継船問題が顕在化するであろう10年後に、国民の皆さんから引き続き支持され得るのだろうか？60年の歴史の中で、組みあがった強固なシステムは、すべて今後の継続を前提としているが、継続できるかどうかは、我々が社会に必要とされるかどうかにかかっているはずである。

そうした危機感のもとで1年に亘って議論した結果が本報告書である。


今後、ターゲットとした2034年までの間に、科学や技術の進展、あるいは環境変化によって、当然、サイエンスの方向性にも変化があるはずである。そうした変化を前提に、今後も、適宜サイエンスの方向性を見直しつつ、それを実現するためのプラットフォームや事業運営の方向性についても、定期的な見直しを行っていく予定である。

最後に、繰り返しにはなるが、今回の将来構想が契機となり、分野を超えた南極での研究・観測や国家的な政策に関する議論が活性化し、今後の南極観測が持続的に、より大きく飛躍することを期待する。


8. 参考資料

8.1. 各国の砕氷研究船


（1）英国

船名	RRS Sir David Attenborough	
就航年	2019年就航予定	
所有	Natural Environment Research Council (NERC)	
運航	British Antarctic Survey (BAS)	
ポーラークラス	PC4	
砕氷能力	1m×3knot	
全長×幅	129m×24m	
排水量	15,000GT	
巡航速度	13knot（最大17.5knot）	
航続距離	19,000nm（13knot）	
推進方式	可変ピッチプロペラ2軸、スラスタ船首2基+船尾2基	
機関	ディーゼル機関4基 計18,000kW	
収容人員	乗員30人+研究者60人	
観測機能	ムーンプール、AUV、豊富なラボスペース他	


（2）中国

船名	MV Xue Long 2（雪龍2）	
就航年	2019年就航予定	
所有	Polar Research Institute of China（中国極地研究所）	
運航	Polar Research Institute of China（中国極地研究所）	
ポーラークラス	PC3	
砕氷能力	1.5m×3knot	
全長×幅	122.5m×22.3m	
排水量	14,300 tons	
巡航速度	12knot（最大15knot）	
航続距離	19,000nm（13knot）	
推進方式	アジマススラスタ2基、スラスタ船首2基	
機関	ディーゼル機関2基 計15,000kW	
収容人員	90人	
観測機能	ムーンプール、海底コアラ、AUV他	

(3) 豪州

船名	RSV Nuyina		
就航年	2020 年就航予定		
所有	Government of Australia		
運航	Serco Defence		
ポーラークラス	PC3		
砕氷能力	1.65m×3knot		
全長×幅	160.3m×25.6m		
排水量	25,500 tonnes		
巡航速度	12knot（最大 16knot）		
航続距離	16,000nm		
推進方式	可変ピッチプロペラ 2 軸、スラスタ船首 3 基+3 船尾 3 基		
機関	ディーゼル機関 2 基（計 19,200kW）推進電動機 2 基（計 7,400kW）		
収容人員	乗員 32 人+研究者 117 人		
観測機能	ムーンプール、アイズプラットフォーム、採水サンプルシステム他		

(4) ドイツ

船名	RV Polarstern		
就航年	1982 年		
所有	The Federal Ministry of Education and Research		
運航	Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI)		
ポーラークラス	PC2		
砕氷能力	1.5m×5knot		
全長×幅	117.91m×25.07m		
排水量	17,300 tonnes		
巡航速度	最大 16knot		
航続距離	19,000nm		
推進方式	アジマススラスタ 2 基		
機関	ディーゼル機関 4 基 14,000kW		
収容人員	乗員 44 人+研究者 55 人		
観測機能	小型ムーンプール、ラボシステム、海底コア処理ラボなど		

（5）日本

船名	しらせ（AGB5003）	
就航年	2009年	
所有	防衛省海上自衛隊	
運航	防衛省海上自衛隊	
ポーラークラス	PC2	
砕氷能力	1.5m×3knot	
全長×幅	138m×28m	
排水量	基準排水量 12,500t	
巡航速度	15knot（最大 19knot）	
航続距離	25,000nm（15knot）	
推進方式	固定ピッチプロペラ 2基	
機関	ディーゼル機関 4基（電気推進） 22,000kW	
収容人員	乗員 179人+研究者 80人	
観測機能	マルチナロービーム、ADCP 他	



8.2. 研究観測船に必要な観測機能及び装備・搭載機器の例

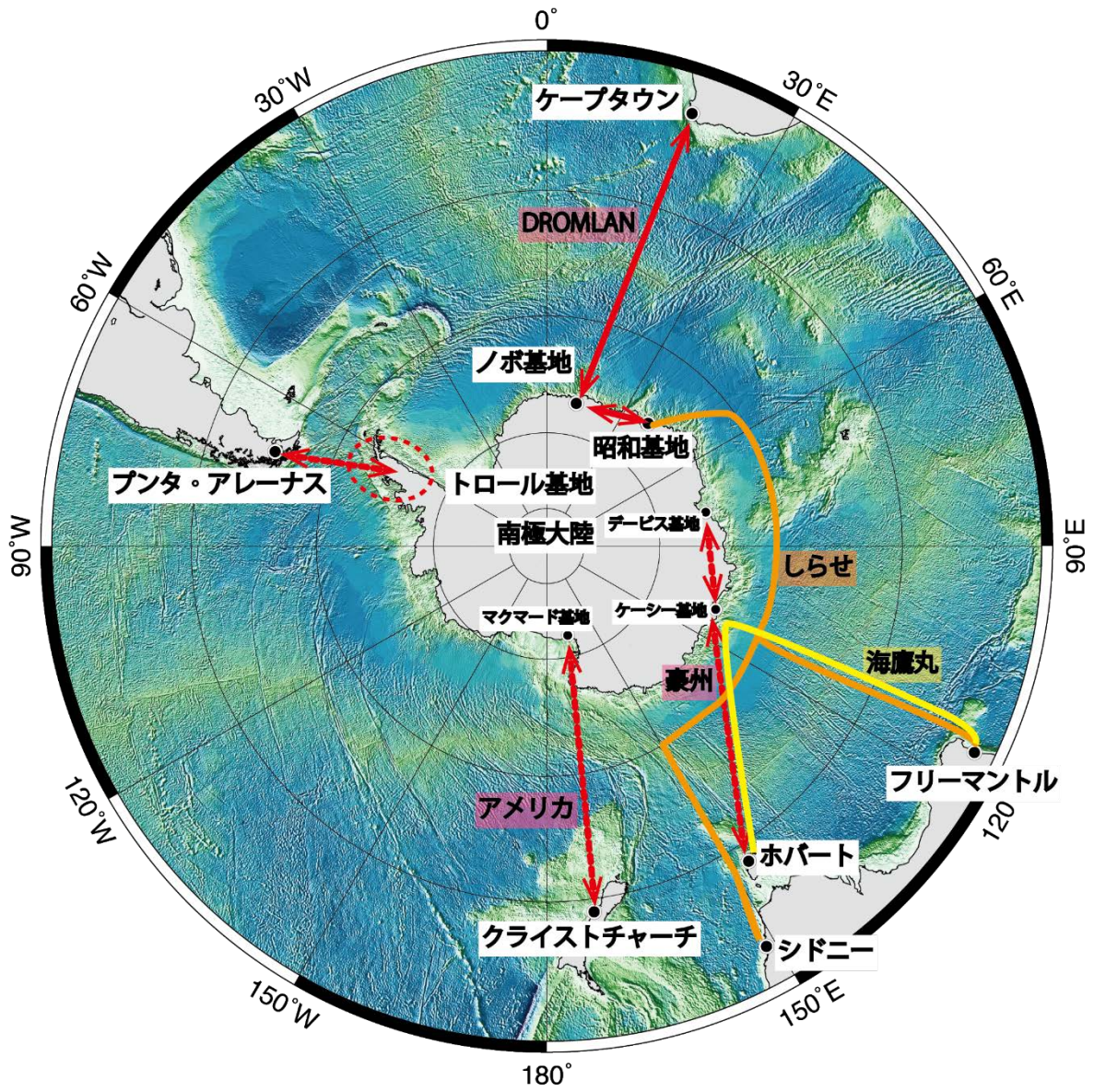
（但し、現時点で存在する技術に限る）

観測分野	設備等名称	建造時仕様に含めるか
共通	スラスタ	船体付
	ムーンプール	船体付
	A フレーム	船体付
	各種クレーン（観測機器揚降用）	船体付
	各種ウインチ（深海用含む）	船体付
	観測用ブーム	船体付
	ヘリ甲板及び格納庫	船体付
	ヘリコプター	必要時レンタル
	無人航空機	必要時搭載
	作業ボート	搭載
	スノーモービル	必要時搭載
	ホバークラフト	必要時搭載
	ROV	必要時搭載
	AUV	必要時搭載
	通信（衛星受信システム及びデータ処理装置）	船体付
開放観測甲板	船体付	

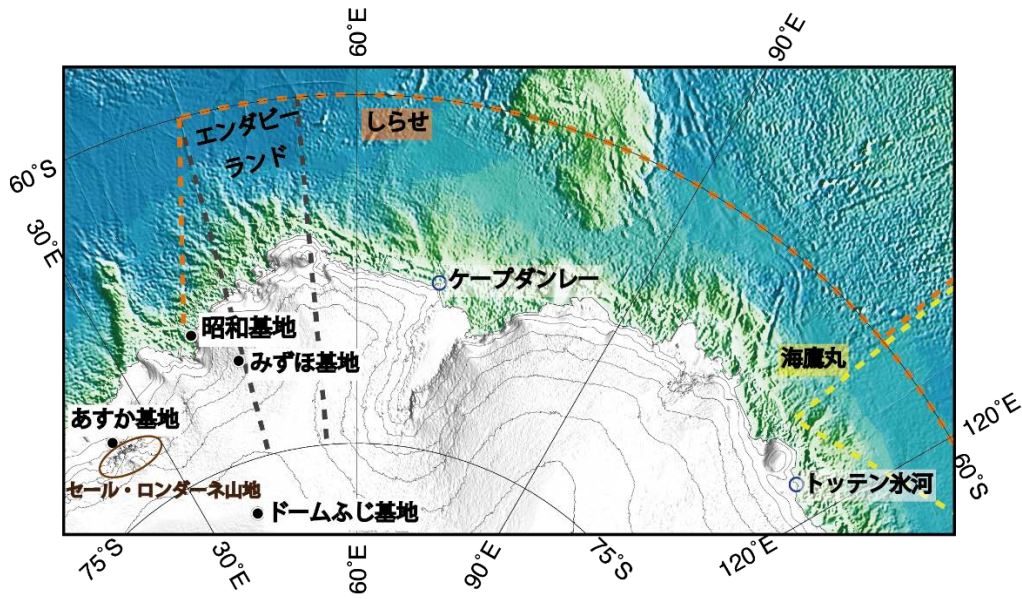
	研究室	船体付
	工作室	船体付
	低温室	船体付
	クリーンルーム	船体付
	コンテナラボ対応区画	船体付
	カメラ・ビデオ	搭載
大気	ラジオゾンデ自動放球装置	搭載
	ドップラーレーダー	搭載
	シーロメータ	搭載
	日射計、雨量計	搭載
	海上気象観測装置	搭載
海洋・海氷	CTD（アーマードケーブル付）・採水システム	搭載
	XCTD 投下システム	搭載
	ソナー	搭載
	音響ドップラー流向流速計（ADCP）	船体付
	氷厚計（EM）	搭載
	EM-bird（ヘリ用）	必要時搭載
	溶存酸素計	搭載
	溶存鉄イオン計	搭載
生態系	クリーン採水システム	船体付
	生態系海氷採取装置	搭載
	海洋生物採取装置（ネット）	搭載
	深海生物採取器	搭載
	オキアミ採取装置	搭載
	保管プール	船体付
海底地形・地質	エコサウンダー（科学魚探）	船体付
	マルチビーム（動揺検知補正器込）	船体付
	サブボトムプロファイラー	船体付
	重力計	搭載
	磁力計	搭載
	ピストンコア、マルチプルコア	搭載
	船位制御（ダイナミックポジショニングシステム）	船体付

8.3. 南極へのアクセス

赤色矢印は主要大陸間航空機アクセスルートである。



8.4. 日本隊の活動地域



将来構想タスクフォース委員

野木義史（委員長）、橋田元、末広峰政、圓谷誠（2018年3月まで）、西嶋基輝、樋口和生、富川喜弘、田村岳史、外田智千、渡辺佑基、牛尾収輝、藤野博行、金子宗一郎、熊谷宏靖、柏木隆宏、清水大輔

本報告書執筆者

野木義史、橋田元、富川喜弘、田村岳史、外田智千、渡辺佑基、藤野博行、熊谷宏靖、清水大輔、片岡龍峰、藤田秀二



国立極地研究所

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構