

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—

2019年5月

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

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 | 6 |
| 4. 将来のサイエンスの方向性 | 8 |
| 4.1. 国家戦略としての地球規模課題解決 | 8 |
| 4.1.1. 南極氷床質量収支に起因する海水準変動の予測 | 9 |
| 4.1.2. ポストオゾンホール時代の地球温暖化 | 12 |
| 4.1.3. 人為活動による攪乱からの南極生物多様性の保全 | 14 |
| 4.2. 知のフロンティア | 16 |
| 4.2.1. 地球惑星の形成と進化の探求 | 17 |
| 4.2.2. 太陽地球システムの解明－宇宙天気研究 | 19 |
| 4.2.3. 環境変動に対する生物の適応・進化の理解 | 21 |
| 4.2.4. 南極天文学の推進 | 22 |
| 5. プラットフォームの方向性 | 24 |
| 5.1. 研究観測基地・拠点 | 24 |
| 5.1.1. 沿岸基地・拠点 | 24 |
| 5.1.2. 内陸基地・拠点 | 26 |
| 5.2. 研究観測船 | 28 |
| 6. 事業運営の方向性 | 30 |
| 6.1. 南極観測船 | 30 |
| 6.2. 基地整備・運用 | 32 |
| 6.2.1. 昭和基地 | 32 |
| 6.2.2. 内陸基地 | 35 |
| 6.2.3. 移動可能・無人観測拠点 | 37 |
| 6.3. 実施期間・アクセス | 38 |
| 6.4. 輸送 | 40 |
| 6.5. 国際戦略 | 41 |
| 6.6. 財務戦略 | 42 |
| 6.7. 事業の枠組み | 45 |
| 6.7.1. 観測隊員 | 46 |

| | |
|---|----|
| 6.7.2. 観測隊組織 | 46 |
| 6.7.3. 人材育成 | 47 |
| 6.7.4. 社会連携 | 47 |
| 6.7.5. 環境保全 | 48 |
| 6.7.6. 民間とのパートナーシップ | 49 |
| 6.7.7. 研究推進体制 | 49 |
| 6.7.8. 運営体制 | 50 |
| 6.7.9. Japanese Antarctic Science Program | 50 |
| 7. おわりに | 52 |
| 8. 参考資料 | 53 |
| 8.1. 各国の砕氷研究船 | 53 |
| 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 | 56 |

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要請である。北極域では、近年温暖化や海水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、ひとたび変動が起こ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、2021年発行予定）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水・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、今後の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ことから、現状の予算や研究・観測資源に捕われない構想が必要となる。

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。この構想では、特に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。

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「しらせ」(図1)が就航25年の節目となる2034年を念頭に、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、「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。そのため、サイエンスの方向性としては2034年頃に実現すべき又は実現したいもの、それを実現させ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は2034年までに実現すべきもの、又は実現に向けて道筋をつけるべきものとして構想している。

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)を想定する。

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、今後は更に、科学技術基本計画などの政府の基本的な科学技術政策でも重要な位置づけを担っていくべきであると考え。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、いずれは科学技術基本計画等においても重要な位置付けを担うようになっていくことを期待する。



図1：南極観測船「しらせ(二代目)」

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」（図2）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。



図2：大陸間の移動に使用している大型航空機
イリュージン

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；南極科学委員会) 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；国際極年) 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しめるものとなった。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

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

一方、COMNAP (Council of Managers of National Antarctic Programs；南極観測実施責任者評議会) 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” (2016) 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

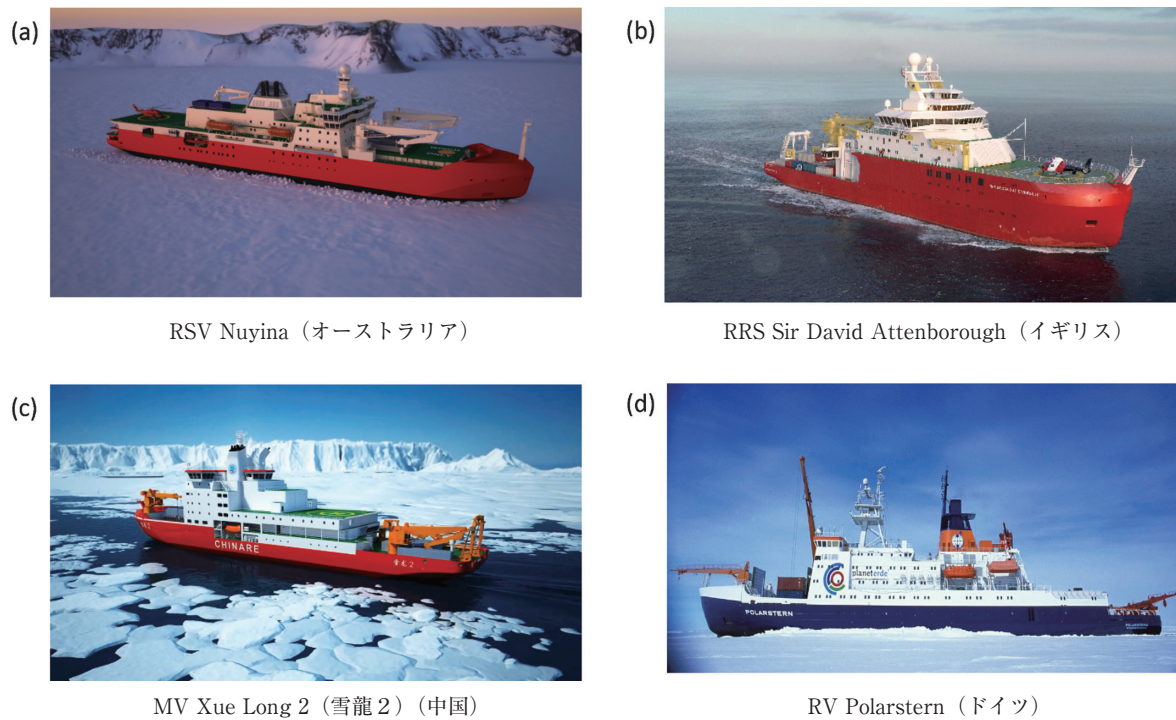


図3：各国で計画中または使用中の砕氷観測船

(a) Credit: Damen/DMS Maritime/Knud E Hansen A/S

(b) Credit: Rolls-Royce.

(c) <https://www.thecommonsdaily.tw/a/372635211019081.html> より

(d) “In der Atka-Bucht, Antarktis 2002 mit Logo zum Jahr der Geowissenschaften” by Hannes Grobe, AWI is licensed under CC BY-SA 2.5

氷船（2019年就航予定、図3a）、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（図3b）および中国（図3c）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ーシュテルン（図3d）は1982年に就航し、30年以上南北両極の最先端の海洋・海水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（McMurdo Station Master Plan 2.1, 2015、図4）。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。

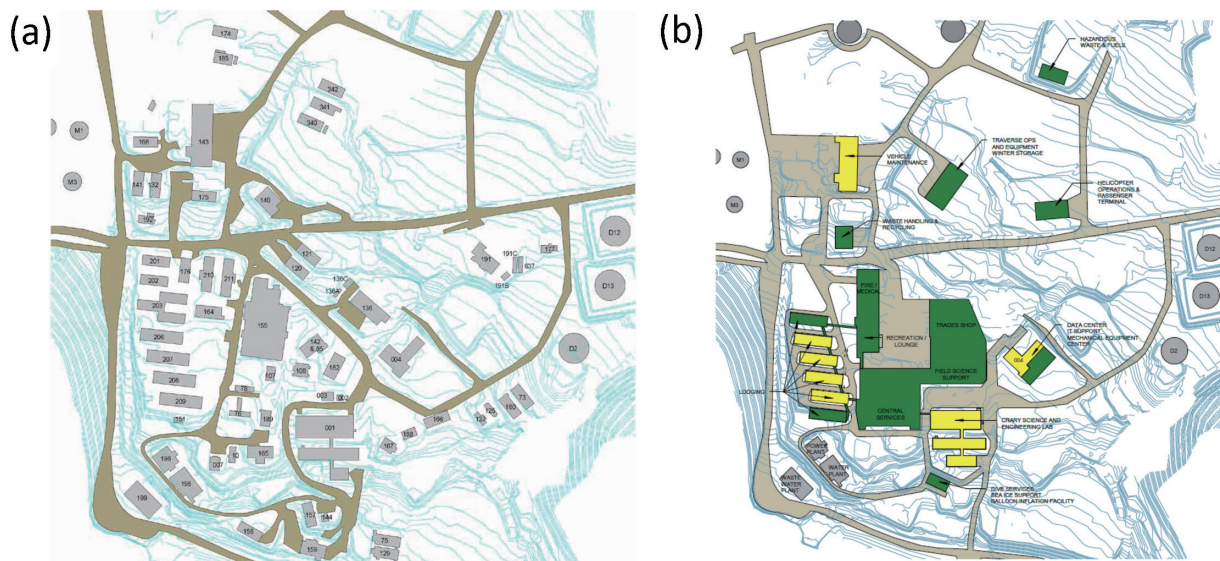


図4：アメリカのマクマード基地では、基地の再整備を検討中で、現在の105棟ある建物(a)をわずか6棟に集約する計画(b)である。(McMurdo Station Master Plan 2.1, 2015, p12-13)

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Ⅷ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Ⅷ期計画（第48次隊～51次隊）は、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Ⅷ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、成果の創出に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Ⅷ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（図5）」、「氷床・海水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（図6）」が立てられ、現在概ね順調に観測・研究が進展中である。



図5：昭和基地に設置されたPANSYレーダーのアンテナ群。左奥の円形の建物は大型のパラボラ・アンテナが収められたレドーム。



図6：2018/19シーズンに内陸氷床探査で使用したアイスレーダー

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、上記方向性ととも国際的な動向（SCAR Horizon Scan 等）や国内の科学者コミュニティの構想（「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」日本学術会議）等を踏まえつつ、将来実施するサイエンスを、社会の要請に基づいて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」と、人類や地球の未来を拓くポテンシャルを持つボトムアップ的研究としての「知のフロンティア」に整理し、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 に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する。このため、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、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を表している。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今後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喫緊の課題となっている国が存在する。それらの国々と比べて、現時点では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。

最近50年程度の海面上昇の半分は水温上昇による海水膨張で説明できるが、過去数百万年における海水準上昇については、海水の熱膨張の寄与はわずかであり、大部分は大陸氷床の融解の結果、海に流入した淡水によって生じたものであることがわかっている。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。すなわち、今後の海水準変動を正確に予測するためには、海水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。地球上に存在する氷の割合は、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。近年の温暖化による山岳氷河・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。しかしながら、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ず、南極大陸氷床の融解こそが最も大きく海水準を押し上げる要因となる。

南極大陸氷床の拡大・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。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、特に北極域において温暖化が顕在化し、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が全て海に流出すると、海水準が6～7m程度上昇する。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流入すると約50～60m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(図7)。

グリーンランド氷床の融解においては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

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。

末端部にあたる棚水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（図8）。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れていて、南極氷床の状態がこれに近い可能性があるが指摘されている。

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10から1,000倍の潜在力を持っているのみならず、今後急激に融解の進行が起こる可能性がある。さらに、近年の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って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。東南極は西南極の約10倍の氷床体積を持つため、むしろ東南極の動向こそ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は氷床縁辺部の融解による氷床減少が起こっている証拠が揃いつつある。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他国に先行して大きな国際貢献ができる。

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各プロセスを理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明ら

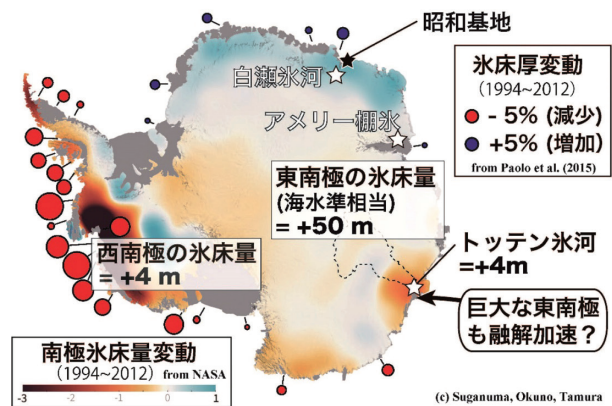


図7：南極大陸の沿岸にある氷河がどの程度融解または成長しているかを示す。西南極（図の左半分）で融解が顕著になっている。（Paolo et al., 2015, *Science* を改変）

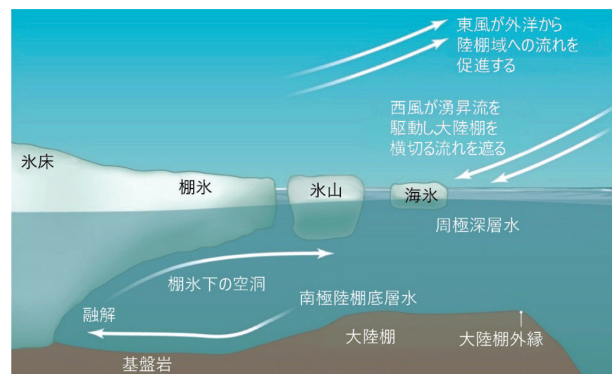


図8：海洋の熱により棚氷の底面が溶かされ、その結果氷床が氷山として流出することで融解が加速する。（Sarah Gille, 2014, *Science* を改変）

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、過去数十万年間の気温と二酸化炭素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、重要な調査地域である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、数千から数万年という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、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、氷床流動の加速、氷床崩壊と接地線の後退といった各プロセス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に対して、アイスコアや古海洋のデータによる検証を加えることにより、南極氷床融解による海水準上昇のより正確な予測が可能となる。

人類の生存戦略への貢献

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る。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・南極周極流・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。

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（図9）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。

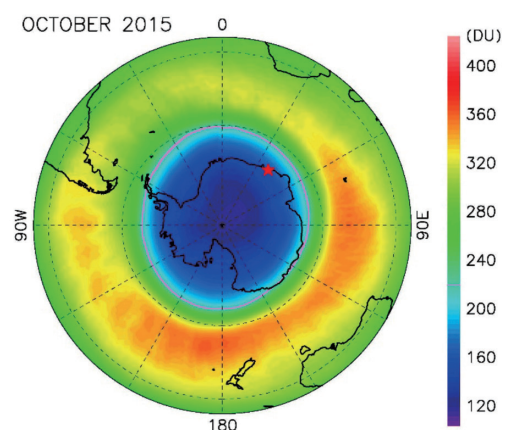


図9：ここ10年で最もオゾンホールが発達した2015年10月のオゾン全量の分布図（Aura衛星搭載OMIでの観測）。南極大陸のほぼ全域でオゾン全量が顕著に減少している。昭和基地の位置を赤い星印で示す。

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（フロンガスの一種）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。

スーパープレッシャー気球による面的観測の拡充

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気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気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（図10）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。



図10：マクマード基地周辺でのスーパープレッシャー気球の放球準備（Concordiasi チームによる）。

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. 人為活動による攪乱からの南極生物多様性の保全

現在、人類が引き起こしている自然環境の破壊や大規模な環境変動は、地球に6度目の大量絶滅をもたらし、人類を含む全ての種を危機にさらしつつあると言われる。生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）においても、この状況を受けて生物多様性の保護に関する目標設定がなされ、政府間組織としてのIPBESが設立された。人間活動からはるかに隔離された南極でさえも、地球規模の環境危機とは無縁ではない。南極大陸やこれを取り巻く南大洋の生態系の保全に向けた研究は、各国の南極観測の重要な柱の一つとなっており、その成果をもってIPBESに貢献することが求められている。2014年にSCARによって取りまとめられたHorizon Scanにおいても、南極研究における6つの最優先課題の一つとして「人間活動の影響の評価とその軽減」が挙げられた。

南極における人為活動の影響は、主に南極半島域で顕著に見られる。温暖化の進行による棚氷の崩壊や気温上昇により、海洋・陸上環境は大きく変動しており、同時に観光事業の拡大による移入種の持ち込みなどによる生態系攪乱は、脆弱な南極生態系を脅かしつつある。昭和基地の位置する東南極地域では、温暖化の影響が顕著でなく観光活動による影響も小さいため、大きな問題はまだ報告されていないが、予想される今後の変動を見据えての生態系の現状把握と長期のモニタリングは極めて重要である。ここでは、南極海における漁業活動がそこに生息する海鳥に及ぼす影響について着目する。

人為活動によって絶滅が危惧される南極海の家鳥の未来

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。

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）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（図11）。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（図12）ので、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 (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。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。



図 11：延縄漁の餌のついた針にひっかかり、海中に引き摺り込まれ溺死したアホウドリ。年間約10万羽のアホウドリを含む約30万羽の海鳥が溺れ死んでいることが確認されている。(Photo by Graham Robertson/AAD)

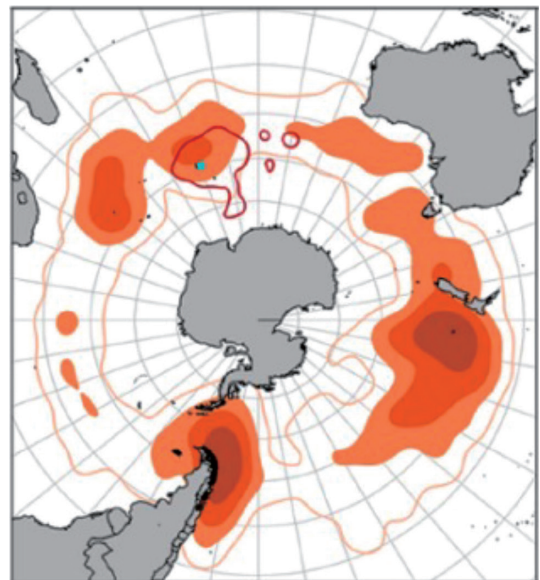


図 12：ケルゲレン諸島（青丸印）から追跡したワタリアホウドリは、南大洋に広く分布している。(Weimerskirch et al., 2015, *Scientific Reports*)

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し、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し、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し、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。

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りが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？

われわれの生きる地球上の陸地が、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（図13）。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1,000°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た。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。

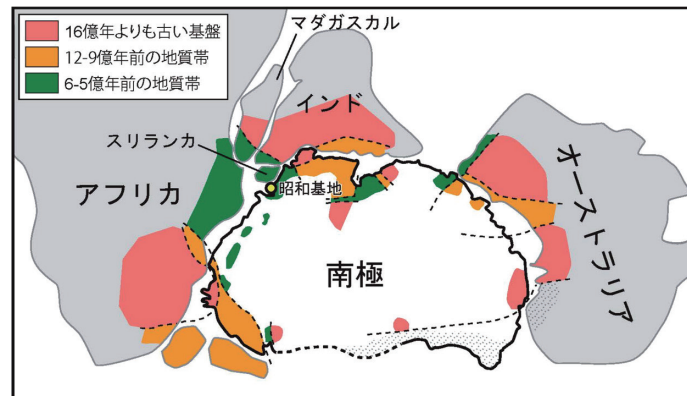


図13：最新のデータによる Gondwana 超大陸の中での南極と周辺の地域との地質対比

南極大陸とその周辺の海洋を含む南極域は、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。

南極の水河地形発達記録は、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14）。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（固定翼、回転翼）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で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



図14：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。

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。

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。しかしながら、これまで得られた情報から見て、南極大陸は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。例えば、38億年前にさかのぼる初期地殻の情報の取得、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の観察、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といった過去の情報が得られるのみならず、現在進行形の地殻変動を検知する場としても重要である。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。

また、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。

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、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（図15）。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мум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(図16)。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мум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мум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мум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

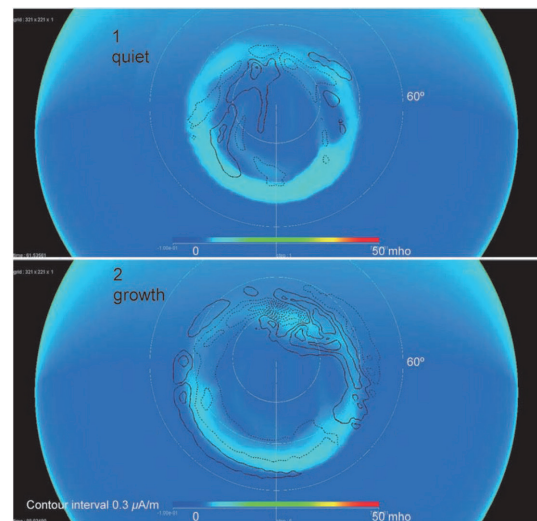


図15：オーロラ数値シミュレーションの例。(田中高史, 2014, 南極資料)

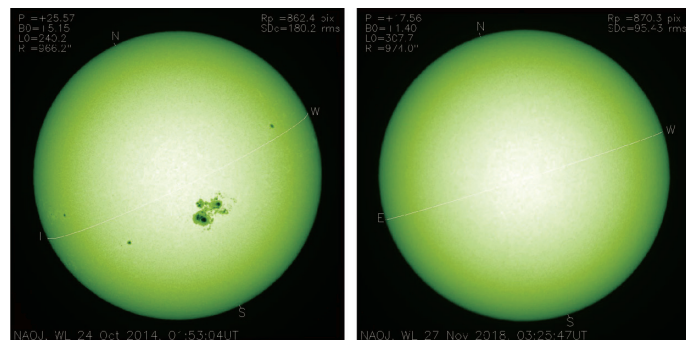


図16：第24太陽周期(2008年12月～)で観測された最大級の黒点(左図、2014年10月24日)と無黒点(右図、2018年11月27日)。国立天文台太陽活動データベースより。

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、北極の水は消え、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を理解は、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」(1999年5月11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

野生生物の適応・進化の謎に挑む自然の実験室

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15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、生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のかを理解することである。

南極の陸上・海洋生態系は、生物にとっての極限に近い極めて厳しい環境であると共に、環境の変動幅が極めて大きいという特性を持つ。更に近年の地球規模の環境変動は、この地域の環境に長期的かつダイナミックな変質をもたらしつつある。このような南極の環境特性は、そこに生きる生物の適応、さらには進化の機構を解明するための実験室と捉えることが出来るのではないだろうか。

アデリーペンギンをモデル種とした環境適応の解明

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、海水がすっかり流出して海面が露出していることもある。そうした海水の変動は、海水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。

適応進化の例をはっきりと

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し、(図17、18)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

リングする。そのような観測を毎年、途切れることなく実施して、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水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。

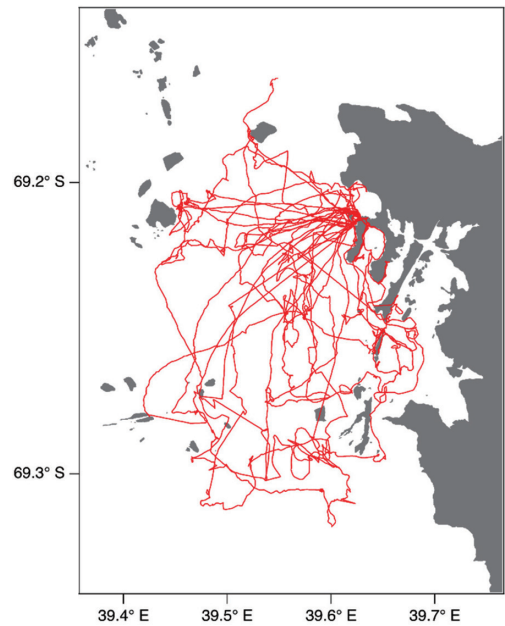


図 17：袋浦で営巣中のアデリーペンギンを GPS を用いて追跡した軌跡（未発表）

4. 2. 4. 南極天文学の推進

銀河と巨大ブラックホールの誕生と進化

銀河は宇宙の主要構成天体であり、生命誕生の源である星惑星の母体である。その銀河がいつ、どのように誕生したのかは現代天文学の最重要課題のひとつである。また銀河には円盤状をした渦巻銀河や楕円状をした楕円銀河などがあるが、そのような形態の違いがなぜ生じたのか、また前者にはガスが豊富に存在し、そこから星が現在もたくさん誕生しているのに対し、後者はガスがほとんどなく、およそ 100 億年前に星形成がほぼ停止してしまったが、なぜそのような星形成の違いが生じたのかなどは過去数十年来の謎である。これらを明らかにするためには銀河がどのように誕生し、進化してきたかを調べる必要がある。



図 18：「ペンギンビデオ」から切り取った写真 (Watanabe and Takahashi, 2013, PNAS)

少なからぬ銀河の中心核は極めて明るく輝いたり、高速の電波ジェットを噴出したりするなどの活動的な現象が見られる。このような中心核を活動的銀河核 (AGN) と呼ぶ。そこには太陽の数百万倍から数十億倍の質量の巨大ブラックホールがあると考えられ、実際に発見されている。しかし、このような巨大質量のブラックホールを作るのは理論的には容易ではなく、母体である銀河の形成進化と密接な関係があると推測されているが、未だに解明されていない重要課題である。

このような銀河の誕生進化や巨大ブラックホールの形成を明らかにするためには、130 億年以上さ

かのぼった超遠方宇宙にある銀河、特に可視光では見えない「暗黒銀河」を電波（サブミリ波、テラヘルツ波）や赤外線で観測する必要があるが、現在のところ観測できていない（図19の宇宙暗黒時代）。

南極高地は地上で最高の天文観測拠点

銀河は一般に可視光よりも赤外線でもっと明るく輝いている。一方、遠方にある銀河は宇宙膨張に乗って我々から遠ざかっているために、銀河から放射された赤外線は地上では赤方偏移を受けて波長が長くなり、サブミリ波やテラヘルツ波、長波長赤外線として観測される。すなわち、地上ではこのような波長で遠方銀河が最も明るく見え、発見には最も有利なのである。

ところが、このようなサブミリ波～赤外線は大気中の水蒸気等によって吸収を受けるために地上では観測が困難であった。南極内陸部の高原地帯は標高が高く且つ極寒であるため、大気中の水蒸気は極端に少ない（図20）。そのため、大気透過率は非常に高く、周波数1THz以下では地上で最も優れており、1THz以上では地上で唯一、観測可能である。また、1年を通じて観測可能である。更に風も弱いので大型望遠鏡の設置運用にも適している。そのため、南極高地は地上で最高の天文観測拠点であるといえる。加えて、人工衛星搭載の望遠鏡に比べて、大型の望遠鏡が可能なこと（感度と角分解能が良い）、安価であること、修理が可能なこと、検出器等を最新のものに更新可能なことなどの点で有利である。

地球上で最高の条件を誇るこの南極内陸部に30m級のテラヘルツ望遠鏡を建設して天文観測を行うことで、地球上の他の望遠鏡では成し得ない超遠方宇宙にある暗黒銀河を観測する。これこそが、南極の特殊性を生かした、南極でしか実現できないサイエンスといえる。

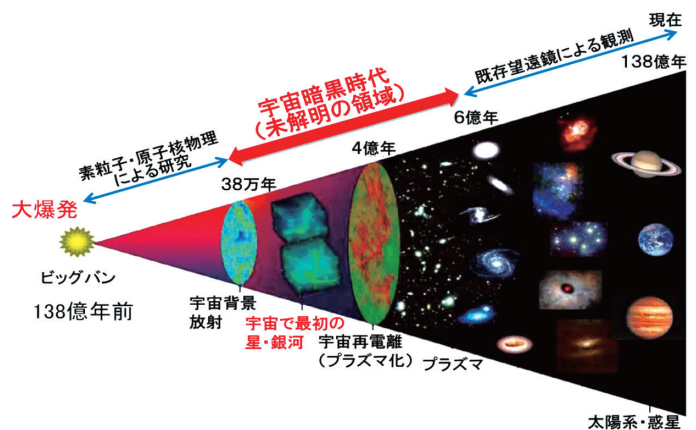


図19：宇宙の進化の模式図

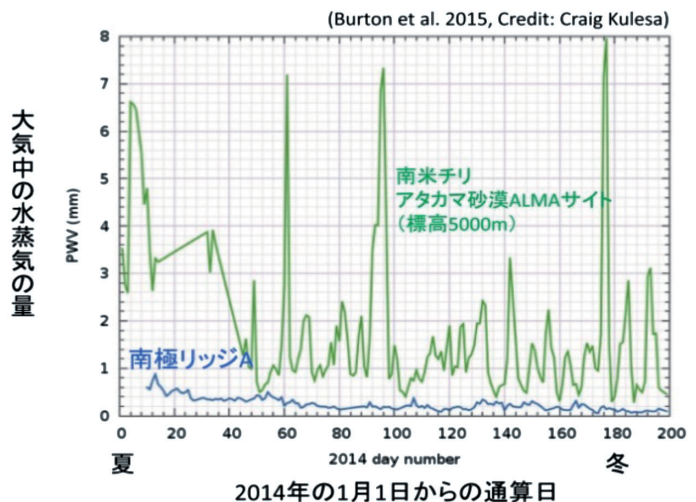


図20：現在、地上で最も水蒸気の少ない南米チリ北部のアタカマ砂漠にある電波干渉計アルマの地（標高5050m）と南極のリッジA（標高4050m）での大気中の水蒸気量。南極高原地帯の水蒸気量は極めて少なくかつ安定しているのがわかる。

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、将来の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、現在の海陸分布から考えて、全球をカバーする均等な観測点の配置は不可能である。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ことから、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（図21）。

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（図22）、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、貴重な観測の継続により、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



図 21：昭和基地（赤丸）は、GGOS コアサイトのひとつとなっており、南半球における非常に貴重な観測点のひとつである。(Michael Pearlman, GGOS Days 2018)

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も重要な点となる。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。



図 22：昭和基地はオーロラ帯の直下に位置しているため、その観測に絶好の基地であり、我が国が南極観測を開始した当初から精力的に観測が行われている。

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、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動手段、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のも選択肢となる。氷床上では、雪上車・スノーモービル・四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四輪駆動車の導入は不可欠である。機能③の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となる。

5. 1. 2. 内陸基地・拠点

内陸での観測の必要性

南極の内陸域は、莫大な淡水を蓄える南極氷床の存在、3,000mを超える標高、極低温・乾燥といった特異な気候など、地球上の他地域にはない極めてユニークな地理的特性を有する。そのため、4.1.1で述べた海水準変動の源としての南極氷床の質量収支に関する観測や、4.2.4で述べた超遠方宇宙にある銀河の謎を探る天文観測（図23）等、南極でしか実施できない又は南極でこそ実施すべきサイエンスの宝庫である。

これらに加え、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（図24）や、地球規模での気候変動が進む今日の課題として気候変動と南極大陸氷床の関係を探るための気温・降水・放射等の一連の気象（図25）、エアロゾルをはじめとした物質の長距離大気輸送、氷床の流動量などの観測等の重要性を踏まえると、南極の内陸域に観測の拠点を設置する必要性は極めて高い。

上記を踏まえ、表1に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。

質量収支研究に必要な地理的要素

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から、おそらくは人類社会が続く限り先まで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

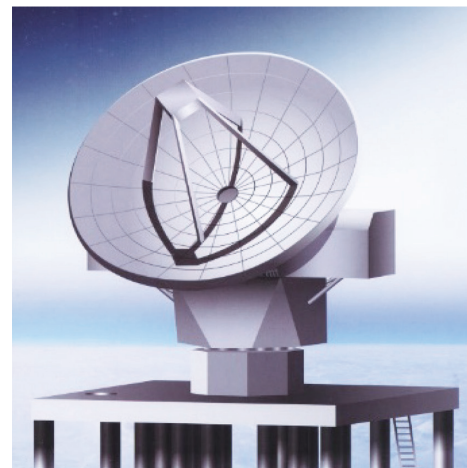


図23：南極10m テラヘルツ望遠鏡の完成予想図。



図 24：ドームふじ基地での氷床アイス・コア掘削



図 25：内陸でのゾンデによる気象観測

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 |
| 超遠方宇宙にある銀河 | 銀河の誕生進化や巨大ブラックホールの形成を解明 |
| 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 |

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 26 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。

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によるリモートセンシングになるが、衛星観測には特有の誤差要因や不確実性があり、誤差の理解には現地観測に基づく研究が不可欠である。たとえば、内陸部の堆積量の増減や、氷床の流動・融解・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、堆積の空間的変動が小さい内陸ドーム（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。

天文観測に適した地理的要素

天文観測においては、大気中の水蒸気量が少ないことが最も重要である。南極の内陸域は、極低温・乾燥により、大気中の水蒸気量が極めて少ないことがわかっているが、その中でも、内陸ドームの頂

上付近より少し内陸側にあつて海からの湿った風を遮断できる地点が理想的である。

通年観測可能な可動基地

上記を踏まえ、内陸に観測拠点を設置する場合、どのような規模で、どのように運用する基地が必要かを考えると、通年観測可能な可動式基地ということになる。

目指すべきサイエンスを考えると通年観測は必須である。表2には、天文観測に必要な基地の要件を挙げた。これによると、最終的には、最低でも10名程度が活動できる基地が必要ということになる。

基地の位置は、大きくいえば内陸のドーム頂上付近が最適ということになるが、天文観測においては、そこから少し内陸に入った場所が望まれるなど、観測によって、多少地点が異なることが想定される。これに対応するため、一定期間（数年程度）には固定点に置くことを念頭に置きながらも、観測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、ここでは、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。

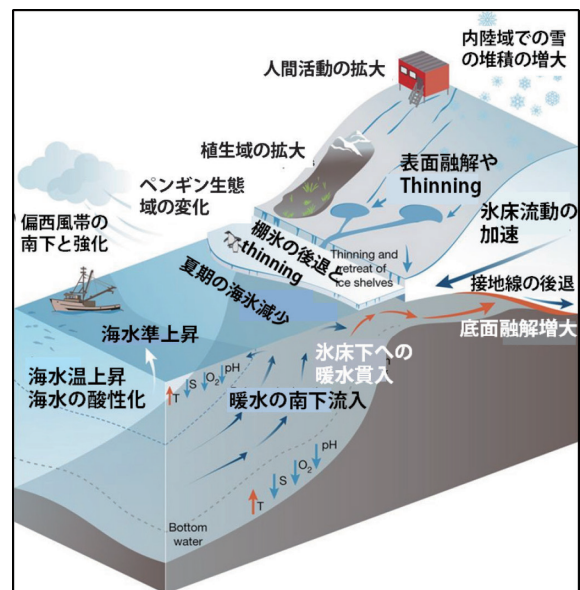


図26:温室効果ガスの排出が続き、対策が手薄になった場合の2070年の南極のイメージ。(Rintoul et al., 2018, *Nature* を改変)

表2 南極内陸域での天文観測に必要な基地の要件

| | 10m 望遠鏡 | 30m 望遠鏡 |
|----------|---------|-----------|
| 夏期人員 | 5名 | 10名 |
| 冬期人員 | 2名 | 3-5名 |
| 必要電力 | 50kVA | 600kVA |
| 最低通信回線速度 | 512kbps | 左記から大幅に向上 |

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・南極氷床に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・海水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、海水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、厚い海水域の航行も可能となり、海水そのもの及び海水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・海水・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を確実に安全に実施するには欠かせない。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、前章までで掲げた2034年のサイエンスの方向性とそれを実現するために必要なプラットフォームの方向性を踏まえ、2034年までを目途に実現又は実現に向けた道筋をつけることを目指す事業運営の方向性について具体的に構想する。

6. 1. 南極観測船

「しらせ」の観測機能

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」はスラスターと呼ばれる定点保持機構を持たないので、風によって船体がドリフト（移動）したり、回転したりしてしまう。このため、船に対する相対風向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に対応できない。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。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十分に行う事はできない。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、沿岸の棚水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、現行船の寿命を先代「しらせ」と同様25年と考えると、海洋観測能力の欠如が中長期に亘る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。

硬直化した運航形態

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、複数回の航海（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往復程度のレグを組ん

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、ケープ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。

世界最強の研究砕氷船とマルチシップ

以上の問題点を解消し、2034 年のサイエンスを実現するためには、厚い海水域に侵入するために必要な現行「しらせ」同様の世界屈指の砕氷能力と、そこでの観測や棚氷下に直接アプローチできるような優れた観測機能（スラスタ・アーマードケーブル・A フレーム等）を備えた観測船（図 27）が必要となる。また、昭和基地の革新のために、少なくとも現行「しらせ」と同レベルの基地輸送能力も必要となる。

つまり、南極観測船の目指すべき方向性としては、世界屈指の砕氷力と優れた観測能力、さらには基地輸送に十分な輸送能力を有する世界最強の研究砕氷船ということになる。

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とを目指す。

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



図 27：南極観測船による棚氷下観測のイメージ図

はない。しかしながら、連携研究船の導入が実現すれば、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運用も可能となり、観測計画の幅を劇的に拡げることができ得ることから、他国の観測船との連携も含め、ぜひ実現に向けて検討を進めたい。上記をまとめると、表3のようになる。

表3 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」 | △ | ○ | ◎ |
| 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

サイエンスの目的に応じた柔軟な運航体制

南極観測船の運用にあたっては、硬直化した運航形態を脱却し、サイエンスの目的に応じた柔軟な運航体制、つまり、運行計画立案段階から実際の現場オペレーション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を目指す。具体的には、目的に応じて観測時期や観測場所を自由に設定することや複数回のレグ設定などを実現する。

柔軟な運航計画を採るためには、観測計画によっては一時的に運航日数が膨らむ可能性があるが、観測船が毎年日本に戻ってドックに入らなくても済むような体制を整えることや、乗船者比率の見直し等により効率化を図ることで、十分な運航日数の確保を目指す。

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、内陸基地、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

他国が Inaccessible（接岸不能）と敬遠したリュツォ・ホルム湾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、地球規模で見て重要であると考ええる。

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革新し、本構想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%）となり、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10棟程度に集約する（図28）。

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度の燃料補給で、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。

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いといけない。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4Mbpsの速度しかない国内と昭和基地との通信速度を、最低1,000倍程度向上させ、数Gbps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通信ネットワーク網を構築する。

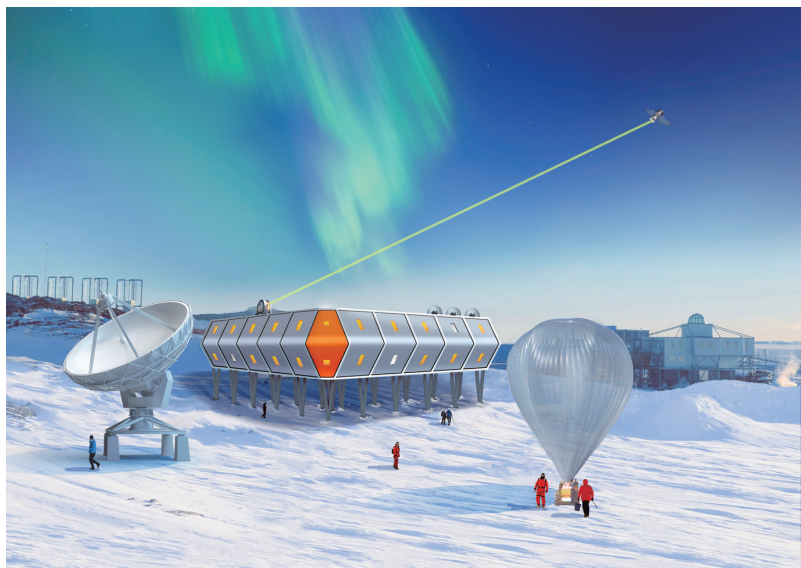


図 28：2034 年ごろの昭和基地のイメージ

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と、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と、観測エリアと生活エリアを大別してゾーニングを行う（図29）。

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。



図29：昭和基地の置かれている東オングル島および西オングル島。
（国土地理院 2.5万分の1 南極地形図 オングル諸島を改変）

6. 2. 2. 内陸基地

南極の内陸域は、未だ容易に人類を寄せ付けない未知のエリアである。それゆえに、貴重なサイエンスのフィールドとしてあり続け、2034年においてもその位置づけは変わらないと考える。

ここでは、南極内陸域で実施すべき様々なサイエンスを実現するために、通年観測可能な可動基地として、ドームふじ周辺地域に、新たな内陸基地を構想する。また、この基地を、ドローンモードランドに基地を持つ国々の共通プラットフォームと位置づけ、国際協力体制による運営を志向する（図30）。

「ドームふじ」の歴史

昭和基地から約1,000km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



図30：2034年ごろの新ドームふじ基地のイメージ

極地研

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、それに2004年から2005年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。現在でも、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。

「ドームふじ」の地理的優位性

南極の内陸域に観測の拠点を設ける場合、ドームと呼ばれる氷床の頂部付近が理想であることについては、5.1.2. で述べた。ここでは、南極にいくつかある、「ドーム」のうち、「ドームふじ」を我々が拠点とする理由を述べる。

理由の一つ目は、上述したこれまでの歴史にある。3期にわたる深層アイスコアの掘削計画を通じ、輸送ルートも含めた周辺域の様々なデータを既に有している点は大きい。

二つ目として、「ドームふじ」は、大西洋とインド洋に面しており、この地域からの水蒸気流入を堆積として受け止める位置にある点あげられる（図31）。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、ダンスガールド・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。

加えて、南極の広大な内陸域の重要ポイントでの観測を各国で協調してカバーするという観点でも、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、ヨーロッパ連合が運営するドームC基地が担うという構図を描くことができる。

国際連携を前提としたハブ型の基地として

南極高地では大気温度が低いので大気放射（雑音）が少なく、高感度の中間赤外線・近赤外線観測も可能である。さらに、晴天率は極めて高く、大気揺らぎに起因するシーイングも良い（最良0.2”）

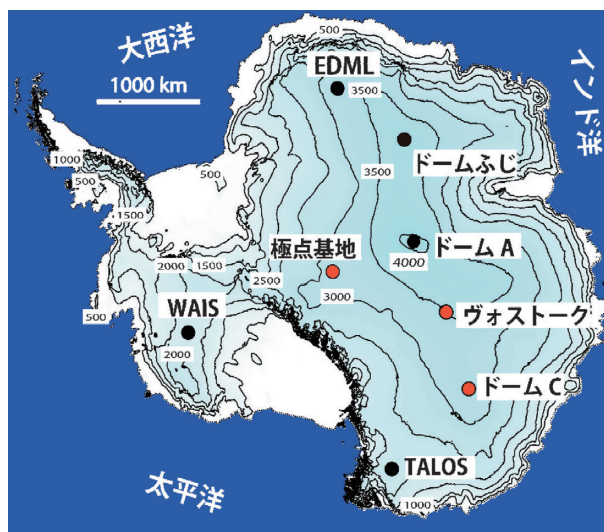


図31：南極氷床上の主要な内陸基地。
赤色は現時点での越冬基地を示す。

ので可視光の観測にも適している。そのため、SCARのAAA（Astronomy & Astrophysics from Antarctica）は国際協力で南極高地に大規模な天文台を建設し、世界中から望遠鏡を持ち込んで観測ができる基地を構想している。

日本が主導する内陸基地にこの国際南極天文台を誘致し、地上最高の天文観測拠点とすることができれば、波及効果は計り知れない。天文観測においては、大気中の水蒸気量が少ないことが最も重要であり、現「ドームふじ基地」より約60 km程度内陸側では水蒸気量が10%ほど少ないことが期待され、現在のところ国際南極天文台の有力候補地であるドーム A と同程度の水蒸気量であることから、国際南極天文台を「ドームふじ」に誘致することは、実現不可能な構想ではない。

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。

6. 2. 3. 移動可能・無人観測拠点

6.2.1 と 6.2.2 で、昭和基地と内陸基地の将来を構想した。確かに、両基地は、南極のサイエンスを支えるプラットフォームとして必要であるが、今回構想した将来のサイエンスの方向性は、両基地や海洋観測のみでなし得るものではない。

ここでは、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、運用の在り方について構想する。

野外の観測拠点は、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（図32）、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（図33）などと組み合わせることで、迅速・広域に展開



図 32：日本・スウェーデン共同南極トラバース（2007/2008）で使用した居住カブース。



図 33：内陸で使用可能な四輪駆動車を導入すれば、雪上車のみで移動している現状と比較して、圧倒的に速く行動することができる。（Arctic Truck 社 <http://antarcticachallenge.com/> より）

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。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（GPS）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ると見込まれ、現在のGNSS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と構想する。

6. 3. 実施期間・アクセス

航空機と船舶を利用して（図34）、必要な人が、必要な地域に、必要な時期に、必要な期間だけ滞在し、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き帰国できる体制を目指す。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、月に1度などの定期的な運行を実施する。

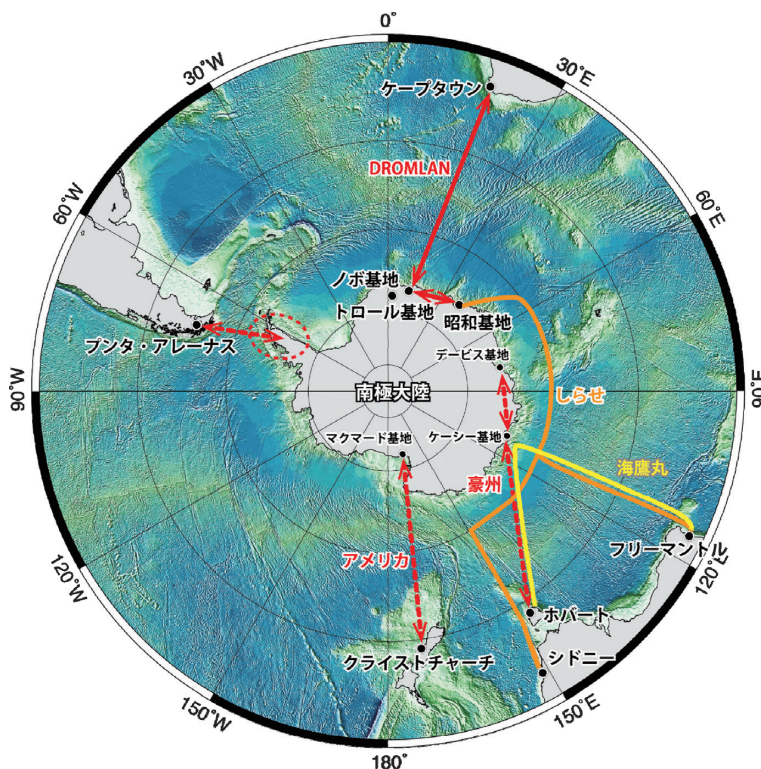


図 34：南極大陸へのアクセスルートの概念図。
オレンジはしらせの航路、黄色は海鷹丸の航路、赤は航空路を表す。
海底地形データには ETOPO1 を使用した。

柔軟に運用する観測船

これまでの人員移動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、毎年同じ時期にしか観測を行えないと

いうことになる。この固定化された運航形態を、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(図35)。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、観測時期にバリエーションを作る。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。

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、海氷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、海氷が厚く、容易に割れない状況であれば輸送時期を遅らせて、少しでも海氷が緩む2月頃から実施するという計画が可能になる。逆に、海氷の融解が進んで1月頃の氷状は水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となる。

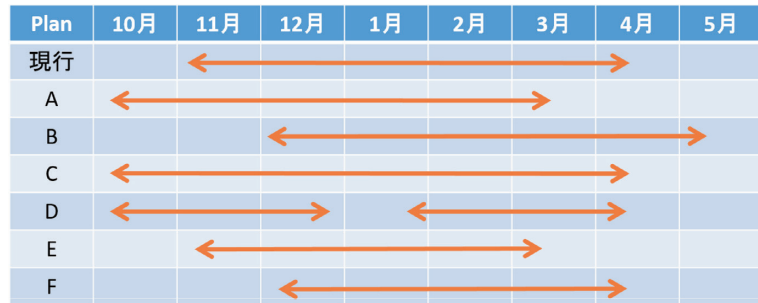


図35：観測船航海スケジュールのバリエーション。現行の運航日程との比較。(A)全体に1ヶ月前倒し(B)全体に1ヶ月後ろ倒し(C)1ヶ月前に伸ばす(D)1ヶ月早く出発し、2往復(E)1ヶ月早く帰国(F)1ヶ月遅く出発

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(図36)、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に、人や物の受け入れを行うス



図36：航空機による南極大陸へのアクセスと、内陸の四輪駆動車での移動との組み合わせにより、南極での観測期間が大幅に短縮できる。(Arctic Truck社 <http://antarcticachallenge.com/>より)

タッフを常駐させる。

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した（2018年5月）。オーストラリアと日本との間では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、南極観測で強固な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、オーストラリアとも協働することを構想していく。

6. 4. 輸送

「しらせ」による輸送の現状

昭和基地への物資輸送は、その大半を「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。

昭和基地への輸送の他に、内陸基地への輸送についても大きな問題がある。現在の内陸基地への物資輸送は、計画実行の前年の夏までに必要物資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冬期を待ち、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、海水上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ない。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。

船舶と航空機の有効利用で輸送を効率化

昭和基地への物資輸送の方向性として、「海水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。海水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で実現する。現状の決められ

た日程の中での運用から、海水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、昭和基地のエネルギーシステムを革新し、2～3年に1度の船舶の接岸による給油でも基地観測を継続できるようにする。さらに、空輸のみの輸送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、クラウン湾へ揚陸する方法を構想する（図37）。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、昭和基地周辺の海水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。更に、車両の充実とともに、大量の物資輸送に対応した櫓も配備する。または、航空機によって直接内陸まで輸送し、パラシュートで投下する方法も、物資の内容によっては検討に値する（図38）。

また、我が国の観測船は、将来的にも高い砕氷能力を維持する必要があるため、この輸送力を活かし、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. 国際戦略

研究・観測の方向性については、SCARにとどまらず、IPCC、IPBES、GEOあるいは国際連合（UN）のような全球規模の国際的な情勢を常に踏まえつつ課題設定をしていく必要がある。一方で、基地運営や輸送といった部分では、昭和基地や内陸基地の地理的な要素を重視し、これらが位置するインド洋区沿岸やドロンイングモードランドに基地を置く国々との連携を戦略的に強化することが重要にな



図37：内陸基地への輸送ルートの概念図。昭和基地から荷揚げするルート（黒色破線）と、クラウン湾からのルート（赤色破線）の2系統を利用予定である。地形データにはETOPO1を使用した。



図38：オーストラリアが行っている航空機（C-17A Globemaster）から南極大陸上の基地へのパラシュートによる物資補給。
(<http://www.antarctica.gov.au/news/2017/mid-air-refuel-extends-reach-of-australian-antarctic-program> より)

る。

具体的には、昭和基地への輸送あるいは南大洋の海洋観測などにおいては、同じインド洋区沿岸を主な守備範囲とするオーストラリアと、これまでの良好な協力関係をベースとして相互協力体制をさらに強化していく。オーストラリアは、独自に航空網を整備し昭和基地までも航空機を飛ばす能力を有し、また現在建造中の新研究砕氷船 Nuyina は砕氷能力においても研究・観測能力においても最新鋭の能力を誇り、特に戦略的に関係を強化する意義が高い。

また、内陸基地への輸送については、大型の物資陸揚げが昭和基地より容易なクラウン湾からドームふじへの輸送ルート上に位置するプリンセス・エリザベス基地を運営するベルギーとの協力関係を強化する（図 37）。加えて、内陸部での通年観測可能な基地の運営には莫大な運営コストが必要なことから、ドーム C 地点でフランスとイタリアがコンコルディア基地を共同運営しているように、ドームふじ地域に置く新たな内陸基地の運営方法については、同地域での観測実績が豊富な我が国がイニシアチブをとりつつも、他国と共同運営を当初より想定する。南極天文台構想など、より大規模なプロジェクトを実施する場合には、各国が必要な観測基地や施設を持ち込んで共同運営する国際宇宙ステーションのような運営方法を構想する。

6. 6. 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 39 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 カ国を抜き出したものになる。各国の予算に含まれている範囲が明らかではなく、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。

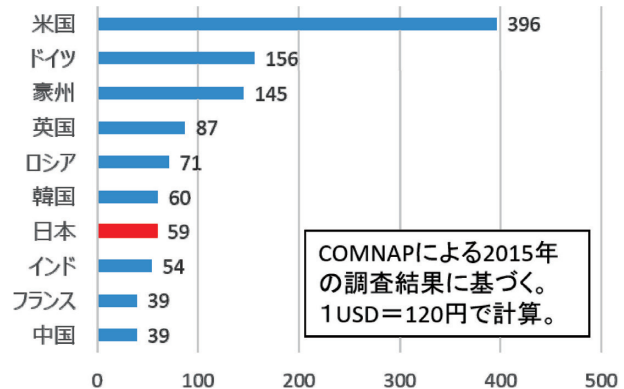


図 39：各国の南極観測関連年間予算額（単位億円）

次に、我が国の 2017 年度の南極観測の予算構造は、図 40 の通りである。

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樣ではないため、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41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。

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。

財源の多角化

我が国の科学技術予算は2000年代からほぼ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ことは合理的ではない。2004年（極地研の法人化）以降の南極観測の予算推移（図42）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

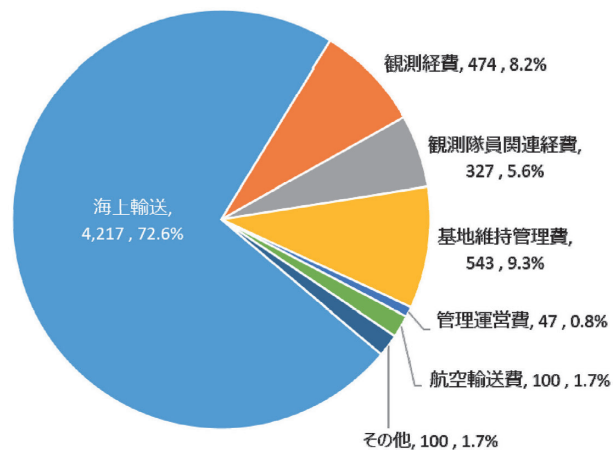


図40：2017-18 JARE（Japanese Antarctic Research Expedition）予算構造（単位100万円、総額58億円）

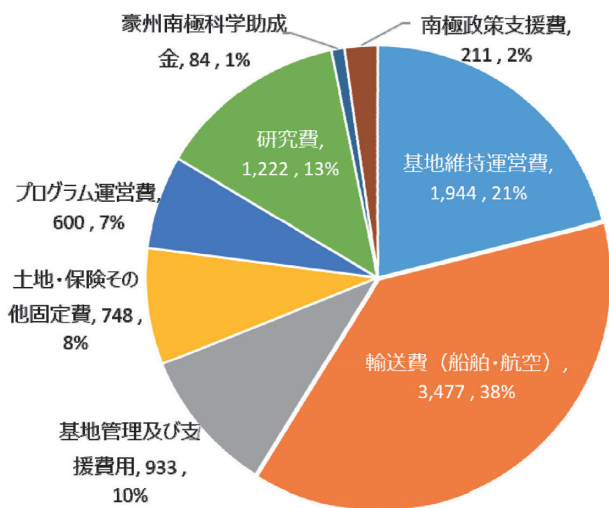


図41：2013-14 豪州南極プログラム予算構造（単位100万円、総額92億円、1AUD=80円で計算）

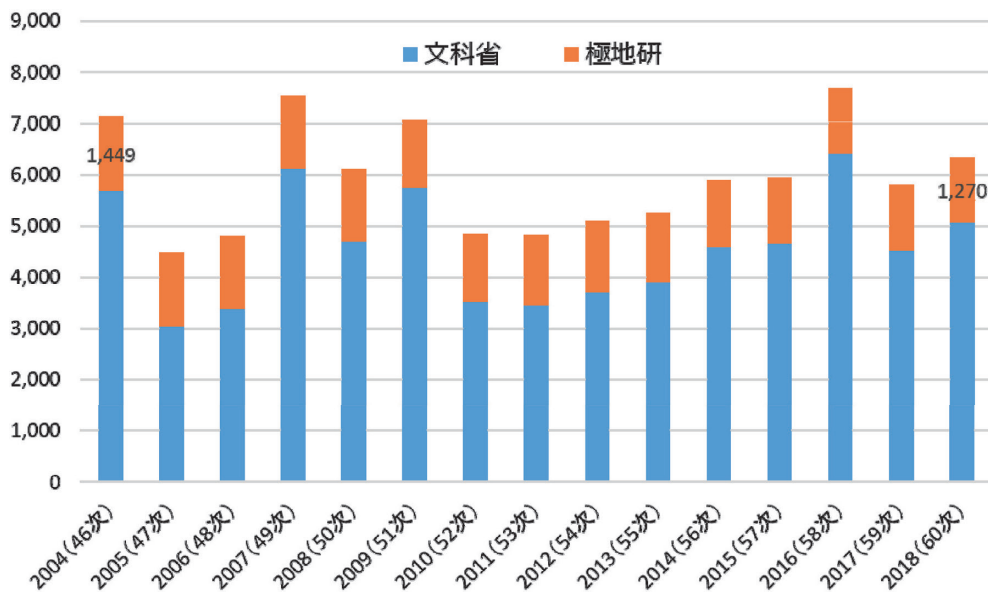


図 42 : JARE 予算額推移 (単位 : 百万円)

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。ここでは、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ことを構想する。

①民間との共同研究の推進

南極という特殊な環境下での研究・観測のための技術には、我々も想像がつかないような技術開発要素やビジネスチャンスが含まれているかもしれない。民間との共同研究という枠組み自体に目新しさはないが、企業のニーズやシーズを掘り起こし、民間と共同で研究開発を行うことにより、民間の資金を活用した事業展開を推進する。そのため、南極観測と企業との間をつなげるような人材や組織を事業運営組織に組み込む。

②寄附・寄贈の推進

南極観測開始時には小学生が自分のなけなしのお小遣いを観測隊に寄附した、あるいは、当時の最新技術の物品を企業が提供した、という話をよく聞く。現在では残念ながら、観測隊に対する寄附や寄贈はごく限られているが、財源の多角化を図るためにも、寄附・寄贈の受け入れ拡大が必要である。

具体的には、旧態然とした紙の申込書による形しかない寄附申し込みの仕組みを改善し、寄付者に対してフレンドリーな仕組みとして、クレジットカード決済などの電子的で簡便な手続きによる寄附申し込みのシステムを導入する。また、プロジェクトごとに寄附を募るなどの工夫を行っていく。

これらについては2034年までと言わず、可急的速やかにできるところから実現していくべきものと考えている。

予算構造の見直しと選択的投入

仮に財源の多角化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直結する経費に回せる予算が格段に増える。

今後の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務がある一方、事業運営主体の一翼として、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. 7. 事業の枠組み

本構想では、これまでに記載してきた通り、我が国の南極観測を、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の方向性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や、南極観測事業を永く継続していくために必要な要素をいくつか挙げ、その方向性について記す。

なお、南極観測の大枠は、1955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以下の通り構想する。

6. 7. 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（表4）。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と考える。

表4 観測隊員の区分

| 区分 | 活動内容 | 隊員委嘱 | 経費負担 |
|------|--------------|------|------------|
| 観測隊員 | 事業計画を実施 | あり | 南極本部 / 極地研 |
| 同行者 | 事業計画でない活動を実施 | なし | 所属機関 / 本人 |

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事業計画を実質的に担っていると言って過言ではないが、大学院学生は一方で教育を受ける立場であるという考えから、事業計画そのものを実施する主体とはなり得ないと整理され、同行者として扱う整理となっている。重要なのは、事業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。そこで、事業計画を自身の研究活動の一環として実施する大学院学生については、他の社会人と同様、観測隊員となり得ると正式に整理する。一方で、ケガ等のリスクに対しては、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が必要である。そのため、民間の旅行傷害保険を南極観測事業費により契約してリスク管理を行うことにより、当人が安心して南極観測に参加できる環境を創り出す。

6. 7. 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. 7. 3. 人材育成

南極観測を継続していくためには、それを担う人材の継続的な育成が欠かせない。ここでは、大学院学生から小学生までを対象に、南極を舞台あるいは素材にした人材育成のためのプログラムを、既存のものも含め、いくつか構想する。

①観測隊員としての派遣（主な対象：大学院学生）

将来の南極観測・極域研究を担い得る大学院学生を観測隊員として現地に派遣して自身の研究・観測にあたらせて研究者としての経験を積ませることで、直接的に、極域科学研究者の養成を目指す。

②南極遠隔授業（主な対象：大学生）

観測隊に参加する大学の教員が、現地から衛星回線を通じて所属大学等に対して講義を行うことを可能にする。受講学生が極域科学をはじめ地球科学に関心をもち、その中から実際に極域科学専攻への進学につなげることを目指す。

③南極北極科学コンテスト（主な対象：高校生、中学生）

極地を舞台とした科学実験提案のコンテストを実施し、優秀提案を実際に観測隊が南極で実施する。中学生・高校生の極域科学への関心を喚起し、その中から将来の極域科学研究者を志す生徒が出てくることを目指す。

④教員南極派遣プログラム（主な対象：高校生、中学生、小学生）

現職の教員を南極に派遣して、現地から衛星回線を通じて所属校等に授業を行い、南極の自然や地球環境に関する生徒・児童の興味・関心を喚起することを目指す。帰国後にも、所属校の授業や課外活動等でさらに多くの生徒・児童への波及効果を期待する。また、南極授業を事業計画に正式に位置付け、派遣教員の区分を、現状の同行者から観測隊員へと変更する。

⑤南極先生クラブ（主な対象：高校生、中学生、小学生）

教員派遣プログラムで南極に派遣した教員の知見を結集して、極域科学を教育現場に活用する方策の検討・推進することを目指す。例えば、副教材の作成を通じて、極域科学と教育現場を結びつける。

「昭和基地からの遠隔講義」については、6.7.7の「研究推進体制」で記述する大学等の研究者の観測隊への参加をやすくするための施策としても、効果は大きいと期待する。そのために必要な条件は、昭和基地の衛星通信回線を、メガからギガにすることである。

6. 7. 4. 社会連携

南極観測を国家事業として継続していくためには、南極観測が魅力に溢れ、社会から求められるものであり続けなければならない。そのためには、観測隊からの情報発信はもちろん、社会との対話を

積極的に行って、社会と連携して共に南極観測を創りあげていくことが必要となる。

ここでは、そのための手段として、新たに以下を構想する。

①南極観測オープンフォーラム

研究・観測の最新の動向を発信するとともに、社会と対話し、南極観測を共に創り上げるための場として、オープンフォーラムを定期的を開催する。

②バーチャル昭和基地展示

極地研の南極・北極科学館に、来館者がまるで実際に昭和基地に来たかのような感覚になるバーチャル展示施設を開設する。リアルタイムの昭和基地内外の映像、音声、振動や匂いなどを再現し、さらには、現地にいる隊員とリアルタイムでコミュニケーションできるものを目指す。

③芸術家同行プログラム

作家、画家、作曲家等の芸術家を南極に派遣し、南極での着想をもとに作品を創り上げてもらう。作品完成後には、その作品を元に市民参加型のワークショップを企画し、社会とのコミュニケーションを図る。

④サイエンスコミュニケーターの観測隊参加

観測隊に情報発信を含めて社会との連携を主に担う隊員枠を設け、サイエンスコミュニケーターを観測隊に参加させる。様々な社会連携に関する活動の基礎となるものであり、ここに挙げた中でも、特に重要度が高いと考える。

なお、南極観測を社会と共に創り上げるためには、前提として、社会への正確かつ迅速な情報提供が欠かせない。この意味で、これまでも取り組んできている様々な媒体を通じた情報発信や観測データの公開は、今後とも重要であり続ける。

6. 7. 5. 環境保全

南極での全ての活動は、南極条約の下の「環境保護に関する南極条約議定書」（1991年採択、1998年発効）及びそれを担保する国内法「南極地域の環境保護に関する法律」（1997年制定）に基づいて、南極の自然環境の保全を前提に認められているものである。

我が国が南極事業を継続実施するには、当然ながら、今後もこの体制の下、南極の貴重な自然環境の保全を前提にする必要がある。また、「南極地域観測第Ⅷ期6か年計画外部評価書」（2017年）においても、「今後も、過去の廃棄物の持ち帰りも含めて、環境負荷ゼロを目指した取り組みが望まれる」とされており、対応が求められている。

具体的な取り組みとしては、過去の廃棄物のうち、環境汚染の可能性が否定できない物、例えば、昭和基地の埋め立て地の廃棄物やあすか基地の廃棄物のうち現在でも曝露状態にあるものについては、確実に封じ込め又は撤去に向けた具体的な計画を策定し、実際に着手する。また、物資や人の移動に伴う移入種の持ち込みによる南極の生態系攪乱を防ぐための方策を策定し、毎シーズン実施する。なお、昭和基地運営のための化石燃料利用の削減については、昭和基地の整備・運営の方向性にも記載した通り、昭和基地のエネルギーシステムの革新により、ゼロとまでは行かずとも、化石燃料の利

用を現在の現状の半分のレベルまで引き下げを目指す。

6. 7. 6. 民間とのパートナーシップ

我が国の南極観測は一貫して国家事業として実施されてきた一方で PPP（パブリック・プライベート・パートナーシップ：公民連携）に支えられてきた側面も大きい。特に開始当初には、プレハブ建築技術をはじめ、民間企業の技術開発力が我が国の南極観測を支えてきたと言っても過言ではなく、現在でもその伝統は脈々と受け継がれている。

本構想でこれまで記してきた中でも、昭和基地のエネルギーシステムの革新や、衛星通信容量の大幅な拡大など、今後の革新的な技術開発を必要とするものが多々含まれており、今後とも、更なる PPP 拡大の方法を探っていく必要がある。

そのための施策として、ここでは、南極観測のプラットフォームを民間企業の技術開発や実証実験の場として開放することを構想する。具体的には、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、民間の技術力を活かした研究開発を南極観測の一環として実施する。

また、南極観測に協力いただいている企業に感謝を表すとともに、より多くの企業に協力いただけるようになることを目指して「南極観測パートナー」制度を創設する。観測隊員を派遣していただいている企業等を南極観測のパートナー企業と認定、定期的な情報交換会等の実施などを通じ、企業との連携を深めることも構想する。

6. 7. 7. 研究推進体制

極地研は、南極観測の中核実施機関として事業運営を担うとともに、大学共同利用機関として、全国の大学等と連携して極域科学を推進する役割を司っている。我が国の南極観測の充実化のためには、大学共同利用機関としての機能を活用し、国内の研究コミュニティの力を結集することが欠かせない。

そのためには、大学等の研究者の持つサイエンスプランを支援し実現させられる共同利用体制の強化が必要であり、また、実際に大学等の研究者が南極観測に参加しやすいプログラムである必要がある。

大学等の研究者が持つサイエンスプランを支援し実現させるためには、一言でいえば、共同利用体制の強化が必要である。昭和基地や観測船の研究・観測機能が、外部研究者を引き付けるような高機能であるのはもちろん、外部研究者への情報の提供や、計画立案に際してのコンサルタント、コーディネートを充実させる必要がある。このため、しっかりとしたプログラムオフィスを設置して優秀な研究マネジメント人材を配置することが重要である。これについては、「運営体制」の項で記述する。

大学等の研究者が南極観測に参加しやすくするために最も必要な要素は、拘束期間の短縮化である。これについては、「実施期間・アクセス」の項で記述した通り、最短で1か月で観測をして戻ってこ

られるようにすることで解決を図る。また、南極観測への参加が、所属大学等において実績として認められるような制度上の工夫も必要となる。現在は、研究観測に要する経費の執行はすべて極地研で行っているが、これを、共同研究契約を締結して共同研究経費として大学等に配分することとし、参加者個人の実績だけでなく、共同研究実施による外部資金の獲得等で大学の実績として謳えるようにすることも検討する。

6. 7. 8. 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、中核の実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、現状では所内の教員がコーディネーターを兼務する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（図43）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人件費をねん出し国内体制の拡充を図る。



図43：南極観測の運営を担っている国立極地研究所南極観測センターの全景

6. 7. 9. 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外縁部、あるいは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にあることを明確にするため、我が国の南極観測を「Japanese Antarctic Science Program」として、現地での観測のみならず科学的成果の創出や社会との連携までの含んだ一連のプログラムとして再定義することで、本構想を結ぶこととする。

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、そして研究者自身が何をしたいかをまず構想し、プラットフォームや事業運営の方向性は、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。

それを理解しつつ検討を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年後にも社会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約1年半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。

なお、本構想がより多くの方々の目に留まるよう、「南極みらいビジョン2034」というキャッチフレーズを付け、パンフレットも作成したので、そちらも併せてご覧いただきたい。

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 (p. 5, 図 3b)

| | |
|---------|---|
| 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 | PC 4 |
| 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、スラスター船首 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 (p. 5, 図 3c)

| | |
|---------|---|
| 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、海底コアラー、AUV 他 |

(3) 豪州 (p. 5, 図 3a)

| | |
|---------|--|
| 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、アイスプラットホーム、採水サンプルシステム他 |

(4) ドイツ (p. 5, 図 3d)

| | |
|---------|--|
| 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 (p. 2, 図 1)

| | |
|---------|-----------------------------|
| 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 | スラスター | 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 |
| | 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 |

| | | |
|-------------|--------------------------|-------|
| 海洋・海水 | 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 |
| | クリーン採水システム | 船体付 |
| 生態系 | 生態系海水採取装置 | 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 |
| | エコサウンダー (科学魚探) | 船体付 |
| 海底地形・ 地質 | 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 |

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、中井直正

発行：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

編集：南極観測将来構想タスクフォース

発行日：2019年5月

ISBN978-4-906651-06-1



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