

第 IX 期南極地域観測重点メインテーマ

【重点メインテーマ】

「南極から迫る地球システム変動」

第 VIII 期南極地域観測計画の実施に伴い、地球環境全体の変動に大きな影響を与えてきた南極域での現在と過去の変動の解明が、地球システムや地球環境変動の解明および将来予測に不可欠であることが明確になってきた。第 IX 期南極地域観測計画では、地球システムにおける現在と過去の南極サブシステムの変動と、サブシステム内の相互作用の解明を目的に、標記重点メインテーマ「南極から迫る地球システム変動」を提案する。

【背景】

南極域は、巨大な氷床を有し冷源域として全球の気候システムの形成に大きな役割を果たしている。南極氷床・南大洋（南極寒冷圏）の変動は、地球環境全体の変動に大きな影響を与えてきたと考えられているが、その実態は未だ十分に明らかにされていない。例えば、最近公表された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第 5 次評価報告書（IPCC, 2014）において、西暦 2100 年における海水準上昇量は最大でも +1m とされているが、この推定には南極氷床融解は考慮されていない。特に、東南極での氷床等が、どのように温暖化等の地球規模環境変動にともない変動するかは、現在でも不明である。また、太平洋、大西洋およびインド洋をつなぐ南大洋は、北大西洋とともに海洋熱塩循環（深層循環）を駆動する底層水が形成される気候システム上の重要な場であるが、南極氷床融解による淡水流入に伴う深層循環の変化や、海氷分布変化に伴う大気循環場の変化等も未だ不明である。氷床変動は大気-海洋-固体地球の相互作用に大きな影響を受けることから、南極氷床変動を理解するためには大気、海洋、固体地球、生物圏などから構成される南極サブシステムの現在の変化および、これらのサブシステム内の相互作用の理解に加え、過去の環境変動の復元を通じた氷床や海洋循環の長期変遷とそのメカニズムの解明が不可欠である。また、南極サブシステムの変化に伴う生物多様性や生態系の変化は全球の環境変動とその影響を評価する上で極めて重要である。さらに、南極域は、地表から超高層大気まで広範囲に人間活動の影響を含む多種の変動が地球上で最も顕著に現れる領域であることから、地球環境変化の予測に不可欠な観測域でもある。加えて、南極域は、太陽活動の変動の影響が大きく現れ、太陽活動と気候変動との関連を理解するためにも重要な地域である。特に、第 IX 期には観測史上前例のない極端に太陽活動度の低いグランドミニマム期に突入する可能性があると考えられ、太陽活動の低下に伴う気候変動の解明にとって重要な時期である。

地球環境変動の解明にあたっては、温暖化の影響が特に顕著な南極域と北極域の両極からの視点が強く求められる。北極域は、冷源域であるとともに近年温暖化とそれに伴う海氷減少が加速され急速に大気・海洋・陸域・雪氷の状況が変化している。地球システムの

中で、両極域で起きる環境変動は、大気・海洋循環等を通して、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、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相互の関係性も未だ明らかではなく、両極域の変動の全球的な環境変動へのフィードバックの解明が求められる。このように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サブシステムの解明は不可欠であり、地球規模の気候・環境変化は極めて複雑な要因に支配されていることから、その解明には、両極の視点を持った複合領域研究あるいは境界領域研究が重要となってきた。さらに、こうした極域研究の推進は、南極条約協議国会議、SCAR や北極評議会研究協力タスクフォース (SCTF) などで表明されている国際社会の要請に応え、極域科学活動の国際協調を促進することも期待される。

IPCC 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の解明が必須である。しかし、全球的な気候や生態系変動等の予測に不可欠である両極域は、厳しい気象・海象条件や、海氷や氷床等に阻まれ、他地域に比して、未だ圧倒的に観測データの少ない地域であり、観測の空白域と言っても過言ではない。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望まれ、我が国の南極観測においても積極的な貢献が必要である。

第 VIII 期南極地域観測においては、重点研究観測として「南極域から探る地球温暖化」と題して、科学的にも社会的にも極めて重要な問題である地球温暖化をメインテーマに据えた。そのもとに、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」、サブテーマ 2「南極海生態系の応答を通して探る地球環境変動」、およびサブテーマ 3「氷期-間氷期サイクルから見た現在と将来の地球環境」の 3 つのサブテーマの軸として現在実施されている。「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」では、大型大気レーダーを初めとする機器で南極域の下層から超高層まで連続した大気を精密観測し、その変動のしくみを解明して温暖化等地球環境変化の予測に貢献する事を目的としている。サブテーマ 2 は、南極海の温暖化や海洋への CO₂ の供給に伴う海洋酸性化等の変化が生態系に与える影響等から地球環境変動の解明を目指すものである。さらに、サブテーマ 3 では、過去数十万年から現在までの、氷期から間氷期への温暖化過程を中心として、南極氷床を中心とする「南極寒冷圏」が、地球規模の気候や環境変動に果たしてきた役割の解明を目的としている。

その結果、サブテーマ 1 では、南極での大型大気レーダーの整備が進み、対流圏から成層圏、中間圏にいたる幅広い領域で、南極固有あるいは他地域と非常に異なる特性の大気現象の観測データが取得されており、大気光観測では上下結合の鍵を握る大気重力波の特性が明らかになりつつある等、昭和基地上空の大気の運動、輸送、物質、雲などの本格観測が始動して総合的なデータが集積しつつある。第 IX 期においては、VIII 期で整備、本

格観測が行われてきた観測装置群について、特に地表から 500km までを連続的に観測できる大型大気レーダーの本格的稼働を核として、多面的な協同観測を展開するとともに、種々の高性能大気モデルとの連携により、南極上空を通じて全地球大気システムを明らかにしていく必要がある。

サブテーマ 2 では、南極海のプランクトン群集中には全球で進む海洋酸性化の影響を受ける生物種が存在し、酸性化が進行すると群集構造の変化、さらには食物連鎖の変化が起こることが予想されており、海氷縁付近の生物群集調査では、海氷起源と考えられる特徴的な生物群集構造が明らかになってきている。特に、酸性化の影響を受けると思われる有孔虫が海氷中及び海氷が溶けて間もない海水中において多量に見出され、食物連鎖に多大な影響を与えていると推定されている。第 IX 期に向けた展開として、夏季に生物生産が高くなる海氷縁付近における生物群集構造と食物連鎖については未だ不明な点が多い事から、全球の海洋酸性化を把握する鍵として、海氷縁付近の詳細な観測・研究が期待される。

サブテーマ 3 においては、ドームふじアイスコア研究から、硫酸塩エアロゾルが氷期-間氷期の気温変動に寄与していた事や、氷期の硫酸イオンの起源として、従来考えられていた海洋生物起源のものだけでなく、ダスト起源のものが多かった可能性が高いこと等が明らかになっている。また、第四紀地形・地質研究では、内陸のセール・ロンダーネ山地での調査結果から、第四紀を通した氷床高度低下史の復元と、その原因となる地球システム変動の解明が進められており、さらに、マルチナロービーム測深機を用いたリュツォ・ホルム湾の海底下氷河地形の調査から、大陸棚末端付近まで氷床が着底したことや、現在の沿岸付近で堆積物が欠如している事等が明らかになっている。第 IX 期に向けて、アイスコア研究においては、より古い年代まで遡る 100 万年を超える氷床コアの掘削を目指した新たな掘削点の探査や、過去 2000~3000 年間の詳細な気候・環境変動が研究可能な沿岸に近い氷床上で 500m 級の中層コア掘削による、大気-氷床-海洋相互作用の研究の推進が望まれる。一方、第四紀地形・地質研究においては、より広域に内陸山地の氷河地形地質調査の範囲を広げて氷床変動史を復元する事や、大陸棚の地形探査と堆積物採取等をより広域で実施し、南極氷床の拡大・縮小史を復元する事で、地球規模の海水準変動に与える氷床体積変化量の見積もり等の実施が期待される。

【南極地域観測の重要課題】

以上のような背景を考慮した検討結果として、今後昭和基地を中心とした東南極および南大洋インド洋区を対象として、地球システムにおける現在と過去の南極サブシステムの変動と、サブシステム内の相互作用の解明を目指す必要がある。特に、第 IX 期南極地域観測では、第 VIII 期で実施されてきている重点研究観測を大きく発展させ、地球温暖化を含む全球環境変動という包括的な視点からのアプローチが期待される。したがって、第 IX 期において南極域で推進していくべき重要課題としては、過去の地球変動に遡る観測、および現在の変動を精査・検出する観測という、大きな二つの時間軸上の視点のもとに、超高

層大気から地球内部までの鉛直・水平方向の空間的に大きな広がりを持つ融合的な研究が望まれる。以下に、南極域の特殊性や優位性等を活かし、上述のような全球環境変動解明等の進展に対して大きな寄与が見込まれ、次期第 IX 期 6 ヶ年計画の中核として期待される研究分野等毎の重要な側面を挙げる。

・大気研究に関わる側面

現在の変動を精査・検出して短期から長期にわたる将来の気候変動等の地球環境変化を予測するには、地表から超高層大気までの広範囲な大気を一つのシステムである「全球大気 (Whole Atmosphere)」として捉え、地球環境変化の予測に不可欠な、多様な南極大気現象の物理化学過程を定量的に理解する観測が必須である。第 VIII 期重点研究観測サブテーマ 1「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」の核として整備がなされ第 IX 期の本格連続観測が期待される昭和基地の最新型大型大気レーダー (PANSY レーダー) を駆使した、対流圏から電離圏までの広い高度領域の 3 次元風速やプラズマパラメータの高分解能・高精度観測を軸に、各種の電波・光学観測を組み合わせ、ネットワーク観測および数値モデリング研究とも連携した、極域大気を多元的に捉える研究観測が重要となる。さらに、第 IX 期には観測史上前例のない極端に太陽活動度の低いグランドミニマム期に突入する可能性がある。グランドミニマムが全球規模の気候変動へ及ぼす影響を解明するためには、オーロラ帯の縮小や高エネルギー粒子環境など太陽地球系外部環境の変化の影響を最も強く受ける極域超高層大気の変容を定量的に理解するための研究観測が必要である。

・南極サブシステム内の相互作用研究に関わる側面

最近になって東南極ドロンイングモードランドで降雪量の増大や大陸斜面表面の広域にわたる融解の痕跡を観測する等、全球において進みつつある地球温暖化に関連した変化が東南極域でも顕在化してきた可能性がある。こうした東南極域で起こりつつある気候変化を検出するために、大気-氷床-海洋の相互作用に焦点を絞った観測を、内陸や氷床末端部底面等で実施する必要がある。さらに、現在進行している南極氷床の縮小は、氷河が棚氷に溢流しているいくつかの地域の質量収支にほぼ支配されており、南極の質量収支や海面上昇に与える南極氷床の寄与を研究するため、特に棚氷や氷床の安定性に大きな影響を与えるアイスライズ(棚氷に囲まれ、盛り上がった海洋底を基盤とする氷帽)に注目した課題の実施も必要である。

こうした氷床融解に伴う海水の低塩化等の東南極の気候変化は、南大洋や南極沿岸域の生態系に急激な変化をもたらす可能性がある。しかし、これまでの生物の環境応答・多様性の変化の調査は観測点が限定的で夏季に偏っており、冬季・春季に重点をおいた広域的な生物観測も重要な課題の一つである。特に、第 VIII 期重点研究観測サブテーマ 2「南極海生態系の応答を通して探る地球環境変動」を発展させ、海氷縁付近の生物群集・食物連鎖等の生態系を明らかにするとともに、陸域氷床周辺や沿岸域での生物学的調査を実施し、

大気-氷床-海洋-生物圏の相互作用を理解するための、総合的な生態系の解明が期待される。南極域の生態系の解明は、南北両極の環境変動に対する生物的反応の違い等を明らかにするためにも重要である。これらに加えて、氷床下湖に代表される氷床下生物圏の探査等も今後重要な課題となると考えられる。

また、時間スケールとしては、大気、海洋、氷床や生物の変動に比べ、長期的な変動ではあるが、氷床変動による極域固有の固体地球の応答である、Glacial Isostatic Adjustment (GIA)に伴う地殻変動速度の推定は、過去の氷床モデルに制約を与える上で大変重要であり、氷床の形成・発達を理解する上で不可欠である。GIA の定量的評価をより正確に行い、氷床-固体圏の相互作用を解明するためには、現在の地殻変動、過去の氷床変動、基盤地形・地質やリソスフェア（岩石圏）の厚さ等の地球内部構造を理解する必要がある。GIA の定量的評価を可能にするため、第 IX 期では第 VIII 期の観測をより発展させ、モデル計算と組み合わせた、固体地球科学に関係する研究分野の連携による、南極大陸沿岸域での集中的かつ高精度基準座標系に基づいた観測が必要である。

第 VIII 期では、大気、氷床、海洋の変動抽出及び観測方法構築を主な目的として、重点観測・一般観測において内陸旅行、氷床縁辺部底面観測、昭和基地におけるエアロゾル・温室効果気体観測、海洋観測等を実施し、東南極域の大気 - 氷床 - 海洋相互作用に関わる、気候的な変動が進行中である可能性を見出した。生物学的研究は、重点研究観測サブテーマ 2「南極海生態系の応答を通して探る地球環境変動」が南インド洋を中心に展開され、加えて、沿岸域の湖沼等の生態学的な研究も進められている。固体圏の研究では、GIA の評価に向け、南極沿岸域および内陸山地での測地学調査や、周辺海域を含む地形地質調査等を実施している。第 IX 期では第 VIII 期において顕在化し始めた氷床を取り巻く環境の変動に特に注目し、大気-氷床間の水・物質の交換過程及び、氷床末端部（特に棚氷）での氷床の挙動と底面融解の詳細な調査に、生物・生態系および固体地球研究の視点を加えた総合的な観測を実施し、海面上昇、広域物質輸送・放射過程、氷床変動、全球海洋循環の変動、生態系の解明および固体圏との相互作用の解明を目指す。

・古気候・古環境研究に関わる側面

過去の地球変動に遡る観測としては、40-38 億年前に遡る南極大陸地殻の生成と変遷の解明に加えて、深層氷床コアや広域氷床観測、陸上・海底の地形地質や極域海洋に残された堆積物の解析などに基づき、南極氷床が発生したとされる新生代、特に新第三紀後半から近年にかけての南極域から全球規模に至る様々な時空間スケールの環境変動史を復元し、全球気候変動に南極が果たす役割の解明が重要である。

第 VIII 期では、重点観測サブテーマ 3「氷期-間氷期サイクルから見た現在と将来の地球環境」においてドームふじ氷床コアの輸送や掘削孔観測、コアシグナル理解のための浅層コア掘削、内陸広域雪氷観測、ドームふじ近傍の氷床レーダー探査、氷床変動史解明のための内陸山地における地形地質調査等を行ってきた。第 IX 期には、100 万年を超える氷

床コアの掘削を目指した新たな深層コア掘削点を探るための雪氷学的調査と、東南極の氷床拡大範囲や安定性の理解に向けた内陸山地調査の拡大や、沿岸域から大陸棚にかけての地形地質調査が必要である。また、南極氷床の拡大縮小に伴い激しく変動する環境のもと、南極の陸上生態系は大きくその姿を変えてきており、現在の生物の多様性・分布・遺伝的多様性のパターン、および堆積物中の生物起源マーカーなどの情報から、第四紀における南極生態系の変遷を復元する課題も重要である。

【国際性】

現在の変動を精査・検出する観測の中で、南極昭和基地大型大気レーダー計画は、5つの主要国際学術組織(IUGG, URSI, SCAR, SPARC, SCOSTEP)から勧告を受けて推進されており、昭和基地は南極域初の大型大気レーダーを実現し、かつ相補的な各種観測装置も充実した重要観測拠点として国際的にも注目され高い競争力を有している。南極内陸の現在気候に関する新しい知見は、ドームC基地及びコーネン基地から得られた成果が大半を占めており、ドームふじ基地-昭和基地の領域での現在気候に関する研究観測活動が今より強力に行われ新しい成果が提供されることが世界的に期待されている。また、太陽活動の低下に伴う気候変動の解明は、国際的にも、SCOSTEP(太陽地球系物理学科学委員会)の新国際プログラムVarSITI(太陽活動変動とその地球への影響)の重点テーマになっている。さらに、生物学的な研究観測は、SCARのSOOS、ANTOSやAntERAなどに対応するもので、大規模な国際計画として立ち上がっている。

過去の地球変動に遡る観測として、アイスコア研究の国際組織(IPICS)では、今後の大目標の一つとして100万年を超える氷床コアの掘削を挙げている。欧州勢もドームふじ基地近傍の氷床調査に乗り出す動きを見せているが、これまでのドームふじ基地で取得した氷床コアの研究実績や、世界的に高水準の日本の掘削技術等から、国際連携も視野に入れつつ、日本主導での実施が望まれる。また、SCARの下で実施されている科学計画のひとつであるPast Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS)や、日本も参加予定である国際的な計画であるANDRILL (ANtarctic geological DRILLing) Coulman High Projectとも密接に関係する。さらに、第四紀における南極生態系の変遷の復元に関しては、SCARの次期研究計画であるAntEcoに対応する国内計画として位置づけられる。固体地球の応答に関しては、SCARのSolid Earth Response and influence on Cryosphere Evolution (SERCE)と直接関係する課題である。加えて、昭和基地は南極で唯一のVLBI、GNSS、DORISという3つの宇宙測地技術を有する高精度基準座標系を提供する、IAGの全地球測地観測網の重要な観測局である。

【社会性】

地球規模の気候変動システムを理解し、将来の気候を予測することは大きな社会的な要請である。そのために観測の不足が特に顕著であり、且つ、地球規模の気候変動解明の鍵

であるとされる南極域を、総合的な精密観測により定量的に理解し、現在南極域で進行している温暖化等の環境変動の影響を検出することが求められている。IPCC第5次報告書においても、大気中に排出されたCO₂などの温室効果ガスやブラックカーボンなどのエアロゾルが気候変動をもたらす要因として確信度が高いとしている中で、南極大陸では、長期的なデータの蓄積など観測面での貢献を行うことが重要である。

また、太陽活動が地球規模の気候変動に及ぼす影響は、人類の将来の社会活動にとって極めて重要でありながら未説明の問題であり、第IX期での成果が期待される。

さらに、過去の南極気候や氷床変動史とそれに伴う固体地球の応答を復元し理解することは、海水準変動や水資源の循環等の地球環境変動の将来予測・影響評価をする上で、社会的に極めて重要であり、IPCCの今後の検討にも、大きな貢献を果たす。

一方、現在の南極地域における各国の調査観測は、南極条約体制の下で節度を持って実施されている。領土権の主張を凍結し、科学活動の自由を保障し、南極環境及び生態系を保護する同体制の恩恵を受けてきたわが国としては、今後予想される激動する国際情勢の中にあっても同体制を維持し、南極地域における法の支配を強化していくべきである。そのためにも、わが国が確固とした科学的データを着実に、継続して取得していくことが、わが国の南極条約体制内での発言力への強力なサポートとなることは明らかである

【全球的視野】

いずれの課題も、全球的視野や両極を総合的に捉える視野が重要であり、特に両極は大気循環や海洋循環等を通して、全球的環境変動に大きな影響を与え、氷床融解等により全球的な海水準変動にも直接的に寄与する。以下に例示したような、分野の特徴を活かしつつより幅広く全球的視野や両極を総合的に捉える視野を持つ南極観測が期待される。

例えば、人間活動から隔離され、全球気候のモニタリングに適している南極大気の大気観測では、南極唯一の大型大気レーダー（PANSY）を軸にした精密な観測を実施し、全球の中でとくにデータの少ない南極上空の空白域の変化を検出して気候モデルを精緻化するとともに、北極の大型レーダー等を組み合わせた南北極域の観測や、中低緯度レーダー等による多面的なネットワーク観測、および広域人工衛星観測との連携、ならびに高解像度モデリング研究との相補的な研究を実施し、全球的な大気の振る舞いを立体的・総合的に探ることにより、地球環境変化の予測に大きく貢献することが期待される。

全球の気候に重要な役割を果たす深層水が形成されている海域は、現在北大西洋高緯度域と南極周辺域であるが、温暖化に伴う氷床融解による淡水の供給等が、深層水形成に与える影響を定量的に見積もる必要がある。深層水形成に与える定量的な評価を行うためには、未だ不明点の多い氷床末端部底面等での大気-氷床-海洋間の物質循環等に着目した物理・化学等の総合観測が必要である。さらに、氷床末端部での氷床の挙動と底面融解の詳細な調査等による、大気-氷床間の水・物質の交換過程及び質量収支の解明により、現在の氷床変動とこれに伴う全球的な海水準変動の詳細を明らかにすることが出来る。加えて、南

極氷床やグリーンランド氷床アイスコアによる時間的に高分解能な古気候復元や、海底堆積物等による氷床融解史や海洋循環変動の復元は、現在のレベルを超える過去の温暖期での氷床変動や気候変動等の解明等に繋がり、将来的な海水準変動の正確な予測、地球システムにおける南極サブシステムの役割と、北極サブシステムとの相互作用や全球環境変動への影響の解明に大きく寄与する。

さらに、極域の環境変動に対する生物的応答は、南極と北極では大きく異なることが予想され、例えば、両極の氷床末端や海氷縁域の生態系変動や、海洋酸性化の影響が顕著に現れる両極海洋域での生態系の構造転換の可能性について、豊富な中低緯度の観測結果を踏まえた比較研究は、単にそれぞれの極域での研究に留まらず、全球の生態系への影響の予測を向上させる上で有効である。

加えて、地球の内部構造、特に GIA に関係する粘性構造は、全球の固体地球の内部ダイナミクスを解明するためにも重要であり、両極や全球の氷床変動を含む表層環境変動とともに固体地球の変動や、逆に固体地球の内部ダイナミクスに起因する表層環境変動といった相互作用の理解が促進される。