

日本–スウェーデン共同南極トラバース 2007/2008 実施報告：
I. 企画立案・事前準備と科学研究成果の概要藤田秀二^{1,2*}・福井幸太郎³・中澤文男¹・榎本浩之^{4,1,2}・杉山 慎⁵・藤井理行¹・
藤田耕史⁶・古川晶雄^{1,2}・原圭一郎⁷・保科 優⁶・五十嵐誠¹・飯塚芳徳⁵・
伊村 智^{1,2}・本山秀明^{1,2}・Sylviane Surdyk¹・植村 立⁸Report of the 2007/2008 Japanese–Swedish joint Antarctic traverse:
I. Planning, preparations, and outline of scientific achievementsShuji Fujita^{1,2*}, Kotaro Fukui³, Fumio Nakazawa¹, Hiroyuki Enomoto^{4,1,2}, Shin Sugiyama⁵, Yoshiyuki Fujii¹,
Koji Fujita⁶, Teruo Furukawa^{1,2}, Keiichiro Hara⁷, Yu Hoshina⁶, Makoto Igarashi¹, Yoshinori Iizuka⁵,
Satoshi Imura^{1,2}, Hideaki Motoyama^{1,2}, Sylviane Surdyk¹ and Ryu Uemura⁸

(2014 年 3 月 17 日受付; 2014 年 6 月 4 日受理)

Abstract: In the seventh five-year plan of the Japanese Antarctic Research Expedition, a group of Japanese scientists (led by the National Institute of Polar Research) together with a group of Swedish scientists, conducted field surveys to better understand the glaciology of the ice sheet in Dronning Maud Land, East Antarctica, during the 2007/2008 austral summer season. This paper reports on the planning and field preparations, and outlines the scientific achievements of the field expedition. We have gained numerous new scientific insights on the spatio-temporal distribution of the ice sheet environment in the inland plateau. Here, we provide an overview of the new knowledge gained.

要旨: 南極地域観測第Ⅶ期 5 年計画に基づき, 2007/2008 年の南極の夏期シーズンに, 国立極地研究所を中心とした研究グループは, スウェーデンの研究者と

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10–3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Midori-cho 10–3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

³ (現所属 present affiliation): 立山カルデラ砂防博物館 (元国立極地研究所). Tateyama Caldera Sabo Museum, 68 aza-Bunazaka, Ashikuraji, Tateyama-machi Nakaniikawa-gun, Toyama 930-1405.

⁴ 北見工業大学. Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507.

⁵ 北海道大学低温科学研究所. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, 060-0819.

⁶ 名古屋大学大学院環境学研究科. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, D2-1 (510), Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601.

⁷ 福岡大学理学部地球圏科学科. Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University, 8–19–1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

⁸ 琉球大学理学部海洋自然科学科化学系. Department of Chemistry, Biology and Marine Science, Faculty of Science, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213.

* Corresponding author. E-mail: sfujita@nipr.ac.jp

ループと共同で、東南極内陸域のドロニングモードランド地域の内陸部の氷床環境調査を実施した。本報告は、現地調査前に5年間を費やした研究計画の企画検討の経過や行った事前準備と、現地野外観測を終了した後の6年間に得られた研究成果の概要をまとめるものである。本プロジェクトの調査により、南極内陸高原部の氷床環境の時空間分布について、多くの科学的知見が明らかになった。本報告はその概要を報告する。現地調査の実行の経過は別途の報告に記述する。

1. はじめに

1.1. 科学的背景と企画・立案までの経緯

南極氷床の拡大や縮小は、地球規模の気候変動にともなう海水準変動を直接決定づける。このため、大気中の温室効果ガスの増大にともなう全球的な温暖化に起因する南極氷床の変動は、海と常に関わり沿岸域に暮らす人類にとって生活・社会環境に直接の影響をもたらす（たとえば、IPCC レポート (Lemke *et al.*, 2007)）。さらに、南極氷床は地球気候システムの重要な要素であるため、気候変動そのものに重大な影響をもたらす。こうした気候変動に回答した将来の氷床変動や海水準変動を理解するには、氷床内部や底面の物理・化学の機構や過去の変動に関する知見が不可欠である。さらに、南極大陸は過去の気候変動史の情報を凍結保存する記録庫の役割をもち、内陸ドーム地域や尾根地域で層序記録として最高質のものを得ることができる（藤井・本山, 2011）。これらの知見を高度化することは、地球環境の将来予測や、それに対応した政策決定に必要な知識を提供することになり、地球温暖化が進む今の時代において、人類および国際社会にとり極めて重要である。

日本の南極観測は1957年の国際地球年の時代以来、半世紀を迎えた。日本が昭和基地を拠点に取り組んできた南極内陸部への調査は、時代とともに内陸への調査領域の進展をみた。そして、1990年代以降は、東南極内陸高原域のドーム頂上部であるドームふじ基地を拠点として、合計2本の氷床深層コアを掘削した。1990年代に掘削したドームふじ基地氷床深層コアは、1993年にパイロット孔の掘削を開始してから1997年まで掘削を続け、2503m深までの掘削で、約32万年の気候変動の歴史をとらえた（たとえば、Kawamura *et al.*, 2007; Watanabe *et al.*, 2003）。西暦2000年台の掘削は、2001年のパイロット孔掘削から、2007年まで掘削を続け、3035m深まで到達し、過去約72万年の気候変動史をアイスコアから調査できる状況となった（Motoyama, 2007）。地球温暖化が進行した場合、南極内陸域は、温暖化によって海から供給・輸送される水蒸気の量が増え、一時的には堆積量は増大すると考えられている（Lemke *et al.*, 2007）。アイスコアから得られるシグナルを的確に解釈するという視点、それに、今後の温暖化の進行を南極地域からとらえる視点で、南極内陸部は重要な位置を占めている。温暖化が進行したとき、東南極が、今後数百年程度の時間規模で急激な拡大や縮小するということは考えにくい（Lemke *et al.*, 2007）。しかし、大気中の温室効果ガスの増大にともない地球の気候の変化が起こったとき、地球の海水準を将来的に大きく変化させる南極大陸氷床の挙動は、人類文明が続くかぎり監視と研究の対象とならざるを得ない。

私達は、この時代に極地環境研究に関わった者として、南極内陸部の氷床環境の空間分布についての知識を深めることが、現在の南極地域研究のなかでも優先して行うべき研究アクションであると認識している。こうした時勢のなかで、日本-スウェーデン共同トラバースにかかるアイデアは、スウェーデン側の代表者ストックホルム大学の Holmlund 教授が 1990 年代に構想し、当時の国立極地研究所の雪氷関係研究者に打診を開始していた (Holmlund and Fujita, 2009)。しかし、日本の南極雪氷研究関係者は、当時ドームふじ基地氷床深層掘削に力を集中していた状況にあった (たとえば、渡邊興亜, 2002)。このため、内陸トラバース構想の具体化や実現には至らなかった。ドームふじ基地氷床深層コア掘削の 2 度目の実行が 2000 年代にはいつて行われ (Motoyama, 2007)、南極観測第Ⅵ期計画のなかで掘削が終了する目処がみえてきていた。2002 年に Holmlund 教授が来日し、日本側の当時の雪氷研究のリーダーであった渡邊興亜国立極地研究所長 (当時) に提案、そして、関係研究者による具体的な検討がはじまっていた。また、1957 年の国際地球年から 50 年目にあたり、国際極年 (International Polar Year: IPY 2007/2008, <http://www.ipy.org/>) という集中研究キャンペーンの実施が提唱され、その機運が西暦 2000 年代初頭にはいり国際的に高まった。

こうした研究上の時勢の背景、それに、IPY という集中研究キャンペーンの機会のなかで、私達は東南極内陸域に設定した測線を一様な質の高度観測手法・装置でカバーする内陸広域踏査を企画し、南極地域観測第Ⅶ期 5 年計画のなかで一般プロジェクト「氷床内陸域から探る気候・氷床変動システムの解明と新たな手法の導入」として、これを実施した。上に述べた研究展開の流れを背景にして、以下の主要 5 項目を観測の着目点とした。

- ①南極氷床存在システムを決定づける境界条件の情報取得
- ②南極氷床内部を支配する物理化学機構
- ③氷床内部や底面の構造
- ④南極氷床が保持する気候信号アーカイブの高度化や複数深層コア情報の連結
- ⑤表層・氷内部・氷下の極限環境生物の潜在性

上記の着目点にかかる課題に取り組むための主要な観測手段として、技術的な進歩や新たな着想に基づく、新しい観測手法の導入をはかった。氷床内部探査レーダ観測、気象要素や表層部試料の採取をはじめとした大気雪氷相互作用の観測、それに氷床試料の掘削採取を手法として採用した。特に、氷床内部探査レーダとして、ポラリメトリ技術や、位相検波技術、それに P バンドマイクロ波を利用した新手法を導入した。加えて、地中探査レーダや、マイクロ波放射計を導入し、観測情報の質と量の革新的な増大をはかった。また、その測線として、昭和基地、ドームふじ基地、コーネン基地 (ドイツ)、ワサ基地 (スウェーデン) を結ぶものを設置した (図 1 参照)。南極ドロンイングモードランドの西部にあたるコーネン基地やワサ基地の領域と、日本が観測を展開している昭和基地、みずほ基地、ドームふじ基地の領域の中間領域を地上から結び、踏査する新たな試みである。この計画は、ドイツの

Heinrich Millar 教授が提唱した、IPY2007-2008 の Trans-Antarctic Scientific Traverses Expeditions-Ice Divide of East Antarctica 計画の一部を担うものとしてのちに整理された。

本報告は、続けて出版する 2007/2008 年シーズンの現地調査活動の報告（藤田ほか, 2014）（以下、報告書Ⅱ）とあわせ、プロジェクトの概要を科学コミュニティへの報告としてまとめるものである。本報告の役割は、企画・立案や事前準備の流れや、科学的目的、そして、南極での観測実行を果たした後に出版をすすめている研究成果の概要をとりまとめて示すことにある。本報告に続けて出版する文献では、南極でのトラバース旅行実行の経過に焦点をしばって報告をする。観測を充実させるために本質的に重要であることは事前準備段階の取り組みである。それが成否の大筋を決めると言っても過言ではない。このため、実行経緯や科学的結果のみの報告とはせず、準備段階の様々な経過もここに報告する。将来に類似の観測を実行する際に参考ができることも多々あると考える。

1.2. 本報告の流れ

本報告は以下の流れで構成する。本イントロダクションに続けて、第2セクションでは、構想から企画・立案、事前準備に至る経過の大枠を記述する。第3セクションでは、科学的な諸課題と、観測地域にかかる考え方、そして諸課題に取り組むために選択した主要な方法について説明する。第4セクションとして、観測に基づく研究成果の概要を記述する。この第4セクション中の各項目・細目の大部分は、すでに論文等で公表をすすめたものであるため、参考文献情報とともに記述する。すでに多大な知見が得られていることをご理解いただけると思う。これまでに発表した新たな知見の一覧として以下を挙げることができる。

- ①南極氷床の堆積環境にかかる新たな知見（以下3項目は、まとめてFujita *et al.*, 2011 に記述）
 - ・東南極内陸部で 20 世紀後半以降の年間平均積雪量が増大傾向にあることが判明
 - ・強風イベントと、高堆積量と、積雪表面形態の関連の解明
 - ・ドロンイングモードランド地域の堆積量の分布の解明
- ②南極氷床の底面環境にかかる新たな知見
 - ・東南極内陸部で、氷床と大陸岩盤の界面の大部分に融解水があることが判明（Fujita *et al.*, 2012b）
 - ・南極の基盤地形図の更新についてのデータを提出（Fretwell *et al.*, 2013）
 - ・最古のアイスコアの掘削候補位置の探索（Fischer *et al.*, 2013）
- ③氷床内部反射層の分布の新知見
- ④南極氷床の層位の形成やその後の変態機構等の観測および研究
 - ・夏至前後に著しく進行する氷床表面積雪の圧密（Fujita *et al.*, 2008）
 - ・堆積量と風速の地理的勾配下での、層構造をもったフィルムの形成と変態（Fujita *et al.*, 2012a）

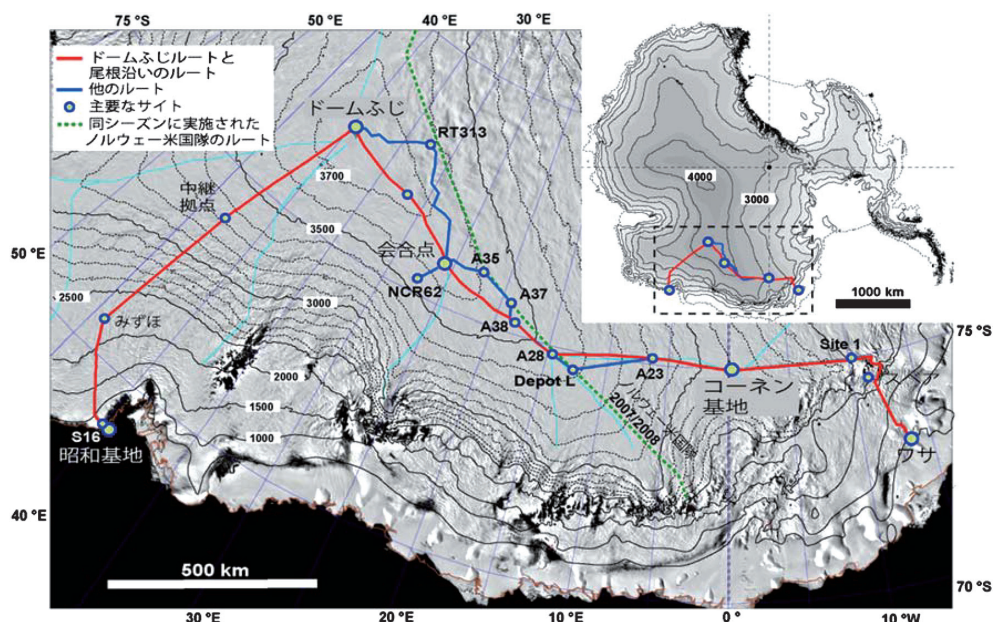


図 1 南極地図上での、日本-スウェーデン共同トラバースのルート。表面高度の地図の等高線は、2000 m よりも高いところでは 100 m ごと、低いところでは 500 m ごととしている。これはデジタル標高モデル (Liu *et al.*, 2001) による。背景においた人工衛星画像は、南極の MODIS モザイク (Haran *et al.*, 2005) である。赤いトレースで、S16 とワサ基地を結ぶルートを示している。青いトレースは、南側ルート (本文参照) を示す。主要な地点は、丸い記号で示している (付録 1 参照)。日本-スウェーデン会合点から延びる線は、分水界を横切る調査の測線 (本文参照) である。緑色の点線は、同じ 2007/2008 年シーズンに実施されたノルウェー・米国隊のトレースである。明るい青色の線は、氷床表面の分水界を示す。

Fig. 1. Routes of the Japanese-Swedish traverse. Surface elevation contours have a spacing of 500 m below 2000 m and 100 m above 2000 m (Liu *et al.*, 2001). The underlying satellite image is the MODIS mosaic of Antarctica (Haran *et al.*, 2005). The red trace shows the route between S16 and Wasa. The blue traces show the southern routes (see text). Major sites are indicated by circles (see also Appendix 1). The short line at MP is the trace of the survey across the ice divide (see text). The thick black trace is also a part of the JASE traverse. The green dotted trace is the route of the Norwegian-USA traverse during the 2007/2008 season (Anschtütz *et al.*, 2009). Light blue thin traces indicate ice divides on the ice sheet surface.

- ・積雪の水同位体に対する堆積率の効果 (Hoshina *et al.*, 2014)
- ・海塩の硫酸塩化が大気中と氷床表面積雪中で発生する割合 (Iizuka *et al.*, 2012)
- ・大陸上の積雪の密度を決定する要素 (Sugiyama *et al.*, 2012)
- ・大陸上の積雪の高周波誘電率 (Sugiyama *et al.*, 2010)

⑤このほかの研究成果

- ・大気中のエアロゾルの空間分布や混合状態 (Hara *et al.*, 2014)
- ・積雪中の微量成分分析 (Han *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2012)

2. 構想から企画・立案, 事前準備に至る経過

2.1. 国際性と学際性

構想から企画・立案, 事前準備に至る具体的な経過を表 1 に記載する。これらの段階では, 国際極年のなかで発展的に行う科学研究としての国際性や学際性が常に問われた。国際性という点では, 国際極年のなかでドイツの Heinrich Millar 教授が中心になって立てた科学研究の柱「Trans-Antarctic Scientific Traverses Expeditions-Ice Divide of East Antarctica 計画 (TASTE-IDEA)」に沿って, 南極内陸観測の国際調整が実施された。当時, 主要な内陸探査計画としては, 日本-スウェーデンに加え, たとえばノルウェー・米国際隊や中国隊, 南米共同隊, 露・仏共同隊など, 多数の計画が提起されていた。日本は, 実施にあたってはスウェーデンと向き合っていたが, 実際の南極研究は, 氷床深層コアの掘削, 雪氷資試料の分析やシェアをはじめ, 欧州勢の雪氷研究者らは横のつながりをもつ傾向にある。今回の共同トラバースも, 結果的にはスウェーデンを窓口として欧州勢と広く向き合う側面があり, 現地で採取した雪氷資試料はドイツやイタリアの雪氷研究者に配布され, 結果として論文検討段階でもドイツの研究者が参加した。日本-スウェーデントラバースの調査範囲は, ドームふじ基地氷床深層コアと, コーネン基地で掘削された深層コア (通称, EDML コア) の 2 箇所の氷床深層コアの掘削地点をカバーする。このため, 2 本のコアの研究をリンクする役割ももっていた。また, 学際性としては, ①南極氷床の雪や氷の研究を行う分野, ②大気・気象分野, そして, ③極限環境生物の融合を念頭においてすすめた。特に③については, 情報・システム研究機構のなかで開始された, 機構融合研究センタープロジェクトの一つとしての位置づけをもっていた。こうした国際性や学際性の検討のなかで, 観測地域, ルート設定, 二国間連携, 観測期間にかかる考え方が練り上げられた。

2.2. 2002-2006 年段階の経過の概要

日本-スウェーデン共同トラバースに関する各種初期検討は 2002 年に始まり, 表 1 に示した流れのなかで, 国立極地研究所の藤井理行と古川晶雄, それに, 千葉大学の西尾文彦 (当時) が対応した。その後 2004 年になり, 国立極地研究所の藤田秀二 (著者) がトラバース実行担当を想定し, 各種検討においても主担当となった。2004 年頃までの段階では, 日本とスウェーデンの 2 国間の主担当者間 (研究担当者および設営担当者) で計画の大枠を話し合い, 双方の興味の紹介や, 使用可能な研究面や設営面での資源の紹介といったすり合わせが行われた。トラバース実施にかかる 2 カ国の関わり方は, この段階での大枠の形は以下のように検討されていた。

- ①スウェーデン隊は夏隊のみとし, 2007 年 11 月あるいは 12 月にワサ基地を出発する。
- ②日本隊は越冬隊と夏隊で構成し, 2007 年の 10 月あるいは 11 月には S16 地点を出発する。
- ③日本隊はドームふじ基地を経由して, 内陸に設定する日本-スウェーデン会合点に至る。

表 1 日本-スウェーデン共同トラバースの準備段階での主要な諸経過 (1/2)
 Table 1. Major events at the stage of prior planning and preparations of the Japanese-Swedish joint traverse. (1/2)

年・月	イベント
2002 年 2 月	来日したストックホルム大学ホルムルンド教授から、日本-スウェーデントラバースの提案あり
2002 年 7 月	上海で開催された SCAR 総会で、スウェーデン極地観測局 (SPRS) と国立極地研究所長らとで基本合意
2002 年 12 月	「南極観測第 V 期計画の自己評価と第 VI 期計画の見直し」の中で、計画を提案
2003 年 4 月	「総合計画特別委員会中長期目標計画分科会」で観測計画を評価
2003 年 4-5 月	「国立極地研究所研究会」で学術的観点からの評価 (「日独航空機観測、専用観測船、日本-スウェーデン共同トラバース」が同時に評価を受けた)
2003 年 4 月	国立極地研究所気水圏専門委員会へ計画を提出
2003 年 5 月	国立極地研究所研究主幹と観測協力室長へ VI 期見直し用観測計画・設営計画を提出
2003 年 10 月	南極中・長期計画検討分科会での評価 (計画 P1-2 としての ID 付与)
2004 年 5 月	日本-スウェーデン共同ワークショップを国立極地研究所で開催
2004 年 9-12 月	国際極年 2007/2008 に向けた研究計画書の提出
2005 年 1 月	南極観測審議会への計画資料提出
2005 年 5 月	南極観測審議会への計画資料提出
2005 年 7 月	ブルガリアで開催された COMNAP で、Trans-Antarctic Scientific Traverses Expeditions-lee Divide of East Antarctica 計画 (TASTE-IDEA) の国際検討
2005 年 7 月	日本-スウェーデン共同トラバース観測計画検討のための研究集会を国立極地研究所で開催

表 1 日本-スウェーデン共同トラバースの準備段階での主要な諸経過 (2/2)
 Table 1. Major events at the stage of prior planning and preparations of the Japanese-Swedish joint traverse. (2/2)

年・月	イベント
2006 年	隊員候補の人選と調整
2006 年 2 月	南極観測審議会への計画資料提出
2006 年 3 月	スウェーデン側の国内調整連絡会議
2006 年 4 月	ストックホルムに藤田 (国立極地研究所) が向き、連絡調整
2006 年 5 月	日本-スウェーデン共同トラバース観測計画検討のための国内研究集会を国立極地研究所で開催
2006 年 6 月	日本-スウェーデン共同トラバース観測計画検討のための国際研究集会を国立極地研究所で開催
2006 年 6-10 月	必要物資や機材の調達、調整、梱包、第 48, 49 次合同の準備、第 48 次南極地域観測隊に託しての物資の発送
2006 年 8 月	第 48, 49 次候補の合同で高地トレニング (富士山) 実施
2006 年 9 月	南極観測センター長鮎川勝教授の主催により、「日程、人員、使用する雪上車・橇、ルート、航空機の利用等について、関係者が共通認識を持つための所内会合」を開催
2007 年 4 月以降	「第 48 次越冬隊内陸旅行準備連絡会」を毎月開催し、日本-スウェーデン共同トラバースの準備支援が以降本格化
2007 年 6 月	ストックホルムに、藤田 (国立極地研究所)、榎本 (北見工大)、杉山 (北海道大) が向き、スウェーデン側の全トラバースメンバーと顔合わせ。そして、トラバース観測プランの最終的な調整と打ち合わせ
2007 年 8 月	第 49 次隊の高地トレニング (富士山) 実施
2007 年 10 月 ～2008 年 2 月	日本-スウェーデン共同トラバースの実施

④スウェーデン隊はコーネン基地を經由して、日本-スウェーデン会合点に至る。

⑤日本隊がスウェーデン隊の帰路の燃料を支援する。

日本側が越冬隊と夏隊の構成をとることを当時判断した理由は、越冬隊の参加がなければ夏の調査日数の確保は不可能であることや、氷床深層コアの輸送のために内陸への輸送隊が必要であることが日程上明確であったからである。実際のトラバースには、この当時検討した大枠がほぼ反映されることとなった。この段階で会合点の位置を明確にどこにするかは決まっていなかったが、上記①と②に記載した日程を考慮すれば、会合点は、ドームふじ基地とコーネン基地のほぼ中間的な地点か、あるいは、それよりもコーネン基地側に近い場所が適切と日本の関係者ら（藤井、古川、西尾ほか）は考えていた。そうしなければ、スウェーデン側の夏隊チームが到達できないと判断をしていた。ただし、そうした日本側の認識とは別に、スウェーデン側は、日本側の想定よりドームふじ基地に近づくか、あるいはドームふじ基地まで到達したい希望をもっていた。このため、会合点の位置はドームふじ基地とコーネン基地のほぼ中間的な地点よりも約 100 km ドームふじ基地側に設定され、ドームふじ基地とコーネン基地を結ぶ尾根上のなかの東経約 25° 付近として仮に設定された。上記の項目⑤（燃料支援）はスウェーデン側から日本側への要請である。東経約 25° 付近に至るには、ドームふじ基地からと、コーネン基地からの行程はそれぞれ約 400 km と約 600 km になる。

観測期間については、日本隊側は、その活動期間につきスウェーデン側の活動期間よりも当初から約 1 カ月長く想定していた。この時間的な設定は、計画の実行段階において日本隊に時間的な余裕を作り出した。対照的に、スウェーデン隊は実行段階でたびたび悪天に見舞われた事情も重なり（報告書Ⅱ参照）、時間的な余力が少なく、科学調査にさける活動時間が限定されてしまう状況が生まれた。

人員構成や、2 名ずつの人員と機材を日本-スウェーデン会合点で交換するというプランを始めとする、より具体的で詳細なプランは、2004-2006 年の期間の交渉と多数の研究集会を通じて検討がくりかえされ積み上げられた。また、氷床探査レーダ研究を積極的に推進していた日本側の立場から、日本側の氷床探査レーダを 2 台、スウェーデン側のトラバースに供給することを 2006 年 4 月にスウェーデン側に提案し、先方の了承をうけた。このレーダ供給の背景としては、国立極地研究所が中国極地研究所（上海）のドーム A 探査に 2 台の氷床探査レーダを貸し出し、先方が問題なく運用し成功裡に観測が実現したということがある。レーダ運用の手順書とソフトが整っており、それにしたがって設置・運用をすれば、貸し出し先でも運用が可能である目処がついていた。また、関連して、2006 年の段階では、スウェーデン隊に米国からの氷床レーダ科学者が参加し、日本-スウェーデンからの会合点から日本隊に参加したい、つまり全行程を走破したいとの打診をうけていた。複数の氷床探査レーダを同地点で同時運用するということは、仮にレーダ間の使用中心周波数が異なっていたとしても、中心周波数からはずれた電磁波成分の干渉がレーダ機器間の深刻な干渉を引

き起こすことは予測できた。この理由から、氷床レーダ観測を目的とした第三国の隊員の参加については、藤田は同意せず、米国科学者の参加は取り止めとなった。日本側の氷床レーダ 2 台は、結果的にスウェーデン隊により運用され、ワサ基地～コーネン基地～日本-スウェーデン会合点を結ぶ貴重なレーダデータを取得することができた。

2.3. 極地研究コミュニティの中での調整と議論

日本-スウェーデン共同トラバースに関する極地研究コミュニティへの情報の提供は、日本雪氷学会の極地雪氷分科会で行われた。構想を学会において示し、それについて意見を集める段取りをとった。科学的興味をもち参画や参加を希望する研究者を募ったほか、このプロジェクトの実行・推進を担うことを期待する研究者に打診をした。表 1 中にあるような研究集会の開催を重ねるなかで、幹事役の藤田は、トラバースに関わる実務議論・見通しや課題の情報提供を行った。具体的には、以下の項目である。

- ①サイエンスの軸に関する議論や枠組み
- ②第 49 次夏隊観測を軸に、第 48 次越冬隊の支援の形態を検討
- ③中心検討メンバーや参加志望メンバーの募集
- ④第Ⅱ期深層掘削を終えた後の今後のドームふじ基地の研究上の役割検討
- ⑤深層掘削計画完了後の南極氷床や雪や氷にかかわる研究の展開の検討

計画を検討していくなかで、約 80 日におよぶ夏期の現地観測を実現するために、第 48 次観測隊による支援と、そのなかで中心的に準備に取り組む越冬メンバーの存在は不可欠であった。仮に、越冬隊の支援のない状態で夏期間のみの内陸調査オペレーションを行った場合に、内陸ドームふじ基地近傍に滞在できる日数は、1 週間～10 日に満たなくなる。ただ、そうした必要性に反し、2006 年 11 月に第 48 次観測隊員として越冬観測を担当する隊員の決定は 2006 年初頭までずれこんだが、最終的に、福井幸太郎氏（当時、国立極地研究所）と中澤文男氏（当時、信州大学）がこれらの大きなタスクを担当することとなった。

2.4. トラバース計画の大枠

2006 年の段階で、日本-スウェーデン共同トラバースの大枠はかたまっていた。2006 年 6 月に実施した国際研究集会（国立極地研究所）で、実際の研究メンバー間の相互紹介や現場実施プランの詰めをすすめ、隊員構成と日程の概要は、表 2、表 3 のようにかたまった。また、行動概念図を図 1 のように検討した。行程の概念図を、図 2 のように検討した。2007 年 6 月には、ストックホルムに藤田（国立極地研究所）、榎本（当時北見工大）、杉山（北海道大学）の 3 名が出向き、Swedish Polar Research Secretariat の設営関係者らとも顔合わせをしたうえでプランの最終調整をした。

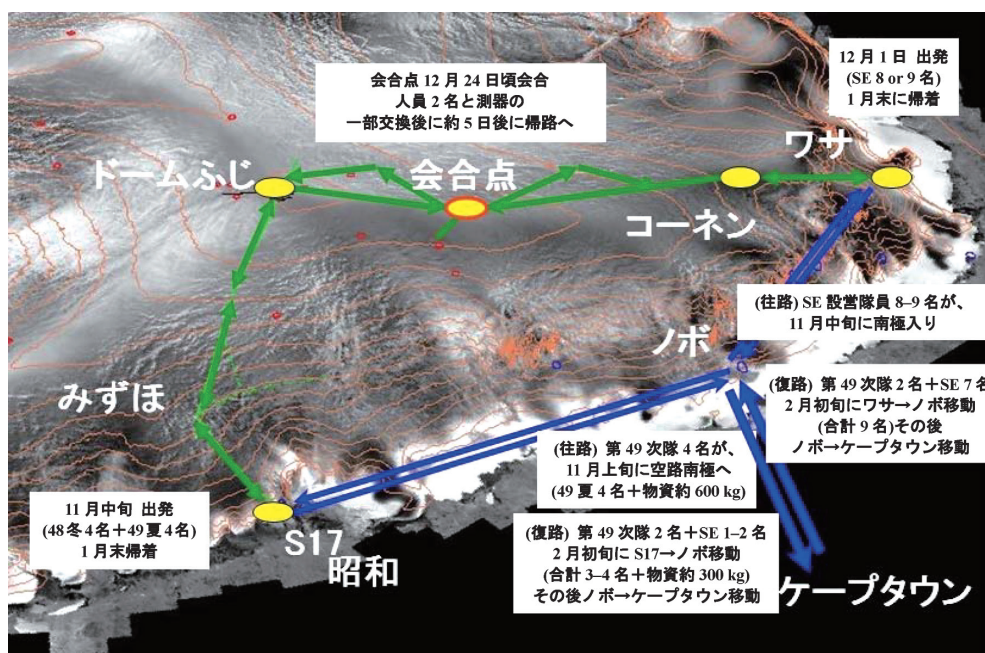


図 2 計画段階での 2007/2008 シーズンの行動概念図。背景図は、南極の RADARSAT 合成開口レーダ画像 (Jezek and RAMP Product Team, 2002) にデジタル標高モデル (Liu *et al.*, 2001) をもとに等高線を引いたもの。南極大陸の調査地域を、インド用上空から眺めた図となっている。空路の移動を青線、陸路の移動を緑線で示す。図中、ノボラザレフスカヤ基地を、「ノボ」と略して記載している。

Fig. 2. Schematic figure of the transportation routes for the 2007/2008 season, designed at the timing of planning. The underlying satellite image is the RADARSAT Synthetic Aperture Radar image of Antarctica (Jezek and RAMP Product Team, 2002), with elevation contours (Liu *et al.*, 2001). This is a bird's eye view of the Dronning Maud Land region, as seen from the Indian Ocean. Air transportation routes are shown in blue, and ground transportation routes are shown in green.

表 2 日本-スウェーデン共同トラバースでの隊員構成

Table 2. Organization of members for the Japanese-Swedish joint traverse.

隊		役割	人数
日本隊 8 名	第 48 次越冬隊	プロジェクト担当	2
		機械・設営担当	1
		医療担当	1
	第 49 次夏隊	プロジェクト担当	3
		機械・設営担当	1
スウェーデン隊 9 名		研究担当	5
		機械・設営担当	3
		医療担当	1

表 3 日本隊側からみた、日程の大枠
Table 3. Outline of the schedule for the Japanese team.

時期	主体者等	イベント
2007 年	第 48 次越冬隊	内陸調査の準備: 雪上車, 橇, 観測機器, 装備・食糧等 S17 での滑走路整備
11 月 初旬	第 49 次 夏隊	DROMLAN を利用し, S17 に到着. 日本隊全メンバーで 約 10 日間準備作業にあたったのち, 内陸旅行へ出発
11 月 15 日頃	日本隊全体	内陸へ出発
12 月 初旬		ドームふじ基地に到着
12 月 中旬		西方 (会合点方面への調査開始)
12 月 下旬		スウェーデン隊と会合点で合流 合同調査・測器交換・2 名ずつの人員を交換
12 月 末		帰路観測の開始
2008 年 1 月 末		S17 へ帰還. 撤収作業
2 月 初旬		越冬隊員はしらせへ帰還予定 夏隊員とスウェーデン研究者 2 名は空路帰還予定

2.5. トラバース観測計画のコストとタスクサイズ

観測に必要な機材や物資の調達は, 第 48 次観測隊と第 49 次観測隊のなかで行った. 一般プロジェクト「氷床内陸域から探る気候・氷床変動システムの解明と新たな手法の導入」として, 新たな切り口をつかうことが研究上の重要な点であった. 179 MHz の新型アイスレーダと 270 MHz 地中探査レーダを第 48 次観測隊で, そして, 434 MHz の新型アイスレーダの調達, それに, マイクロ波放射計の調達を第 49 次観測隊で行った. 第 49 次観測隊で調達をした物資は, すべて DROMLAN で空路南極に輸送することとなった. 2 年次の観測隊のなかで申請し措置をうけた観測予算の大枠は, 表 4 のとおりであった. 申請時には, 十分に検討し, 予算計画としてしぼっていること, それに, 減額配分は, 計画の遂行に大きな支障をもたらす可能性があることを申し述べた. 予算の最も大きな部分は, 上記機器群の開発や調達と, 航空機チャーターであった. 実際には, 内陸での雪上車隊の広域探査の際には, 雪上車の導入・保守や, 燃料の内陸への陸上輸送に大きなコストがかかっている. こうしたコストは, 南極観測体制の設営の大枠のなかで扱っているため, 今回のような 1 プロジェクトに計上する予算枠としては表面化しない. 内陸で用いる燃料は, 遠隔地に行くほどに, 雪上車の輸送コストと人的なコストを考えれば非常に高額になることが知られている. 諸外国が実施している航空機からの投下 (エアードロップ) が実際にははるかに安価になる.

表 5 には, 計画段階で検討をした, 日程と雪上車移動や雪上車運用にかかるトラバース旅行のタスクサイズを示す. 設営的な観点では, 大型雪上車 4 台でそれぞれ 2800 km の行程を走行し, かつ, 全体では, 容量 200 l のドラム缶にはいった軽油を約 280 本 (つまり 56000 l)

表 4 予算申請をした主要な項目とその経費
Table 4. Major items and the cost for the funding proposal.

隊次	備品・消耗品の別	項目	経費 (千円)
第 48 次隊 小計 39000 千円	備品	携帯型表層ドリル	3000
		マイクロ波アイスレーダ	35000
	消耗品	サンプリング用品	500
		試料梱包用品	500
第 49 次隊 小計 47200 千円	備品	広域自動気象観測システム	8200
		雪氷・気象観測補用品	6000
	消耗品	サンプリング用品	500
	その他	航空機チャーター	32000
		訓練経費 (国立極地研究所)	600
		訓練経費 (富士山)	600

表 5 日程と雪上車運用にかかる、トラバースのタスクのサイズ
Table 5. Task size of the traverse in terms of the schedule and use of tracked vehicles.

項目	データ
トラバース行動期間	2007 年 11 月 12 日～2008 年 1 月 30 日
総日数	79 日
総移動距離	2800 km
移動観測日	約 56 日
固定地点での観測日	約 15 日
休養日 (活動最小限とする)	約 8 日
会合日	2007 年 12 月 24 日
平均移動速度	55 km/日
往路平均移動速度	45 km/日
復路平均移動速度	65 km/日
燃料消費	軽油 200 l ドラムを 280 ドラム、このうち、スウェーデン隊への会合点での支援が 33 ドラム

内陸で消費する大プロジェクトである。内陸トラバースの成否に非常に重要な要素は、雪上車をいかに安定的に維持し、運行に支障が発生しないようにするかという点にある。これを実現するために、第 48 次観測隊に依頼し、雪上車整備をはじめとした支援をうけることは不可欠であった。その点を次の項目に述べる。

表 6 第 48 次日本南極地域観測隊からの支援の一覧
Table 6. Outline of the support by the 48th Japanese Antarctic Research Expedition.

時期	イベント
2007 年 4 月以降	「第 48 次越冬隊内陸旅行準備連絡会」を毎月開催し、日本・スウェーデン共同トラバースの準備を支援
7 月以降	「第 49 次越冬隊内陸旅行準備連絡会」も発足し、準備にかかわる情報共有を第 48 次隊側と実施
4-5 月	昭和基地—とつぎ岬の氷厚測定とルート工作, S16 オペレーション
6-7 月	S16 オペレーション: S16 から昭和基地へ橇と雪上車の移動. S16に残っている橇をすべて掘り起こし, 日本・スウェーデン共同トラバースで使用するすべての橇を昭和基地に移動
同	昭和基地にて橇の整備, ごみや空ドラムの処分, 整備済みの橇に燃料ドラムの積載
8 月	SM100 輸送のための昭和基地—S16 ルートの氷厚測定 (1-2 回)
同	S16 オペレーション (2 回): SM100 をとつぎ岬から昭和基地へ移動. S16 で H72 旅行用雪上車の車両整備. H72 旅行用燃料橇を昭和基地から S16 へ移動
同	昭和基地にて橇の整備, ごみや空ドラムの処分, 整備済みの橇に燃料ドラムの積載
9 月	H72 旅行: S16—H72 で地中探査レーダーのテストと S30 付近で積雪ピット観測 (1 週間程度)
同	S16 オペレーション (1 回): SM100 を昭和基地からとつぎ岬へ移動
同	昭和基地にて SM100 の整備. レーダーアンテナやマイクロ放射計台座の取り付け加工. 通信機の整備. 気象観測装置の整備
同	昭和基地にて橇の整備, ごみや空ドラムの処分, 整備済みの橇に燃料ドラムの積載
10 月	S16 オペレーション (2 回). 旅行用燃料橇を昭和基地から S16 へ移動. 装備, 食料, 観測機材を昭和基地から S16 へ移動. とつぎ岬にて車両および通信機の整備
11 月	航空隊到着前に滑走路整備 到着後に, アイスレーダーや放射計, 気象観測機器の雪上車への設置, 橇編成 準備終了後, 出発

2.6. 第48次観測隊からのトラバース観測前一年間の支援

トラバースを実行するための越冬隊の準備は、主に2007年の第48次観測隊の越冬開始以降に開始された。まず、2006年9月に、当時南極観測センター長であった鮎川勝教授の主催により、「日程、人員、使用する雪上車・橇、ルート、航空機の利用等について、関係者が共通認識を持つための所内会合」が国立極地研究所内で開催された（表1参照）。関係者との意思疎通を円滑にすることについては、この会合を開催したことが非常に大きかった。第48次越冬隊の内部では、宮岡越冬隊長が「第48次越冬隊内陸旅行準備連絡会」を毎月開催し、日本国内で中心的に準備にあたっていた藤田との連絡を密にした。これに対応する第49次観測隊側の動きとして、「第49次越冬隊内陸旅行準備連絡会」も発足し、準備にかかる情報共有を第48次観測隊側と実施した。設営面では、越冬隊の支援を全面的にうけて、多数回のS16オペレーション、雪上車整備、橇整備、測器、通信機の整備や動作確認が行

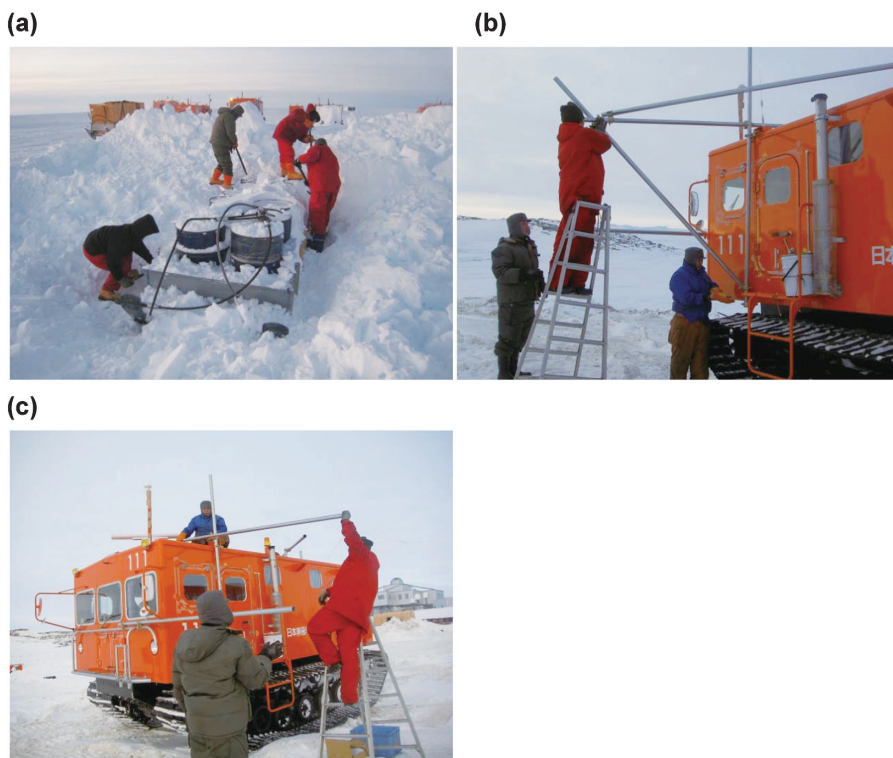


図3 第48次日本南極地域観測隊による、2007年10月までのトラバース準備の事例写真。(a) S16地点での埋没橇の掘り出し。(b)、(c) 短管パイプを用いて、レーダアンテナ取り付け機構を雪上車に設置。

Fig. 3. Some example images of the preparations for the traverse (until October 2007) by the 48th Japanese Antarctic Research Expedition team. (a) Digging out the buried sledges at site S16 in winter. (b) and (c) Mechanics setting the metal pipes for mounting the radio echo sounding antennas to the snow vehicles.

われた。氷床探査レーダのアンテナを車体に設置する機構の取り付けも、この段階で実施された。雪上車整備は、雪上車を氷上で輸送したうえで、昭和基地で実施された。これらにかかる状況の例を、図3の写真に示した。越冬中のこれらの支援アクションがあつてはじめて、11月初旬のS16地点からのトラバース隊の出発と、雪上車や橇に関しては無事故・無故障の運営が可能になった。なお、第48次観測隊からの支援については、観測隊報告（国立極地研究所，2009）に詳述されている。

3. 科学的な諸課題と、それに取り組むために選択した方法

3.1. 科学的な課題

南極内陸部の氷床環境の空間分布についての知識を、特にドームふじ基地周辺やさらに広域の内陸について深めるために、1.1.に主要5項目を示した。ここでは各項目についての科学的視点について、より詳細を述べる。多くの事項は密接に相互依存している。また、図4

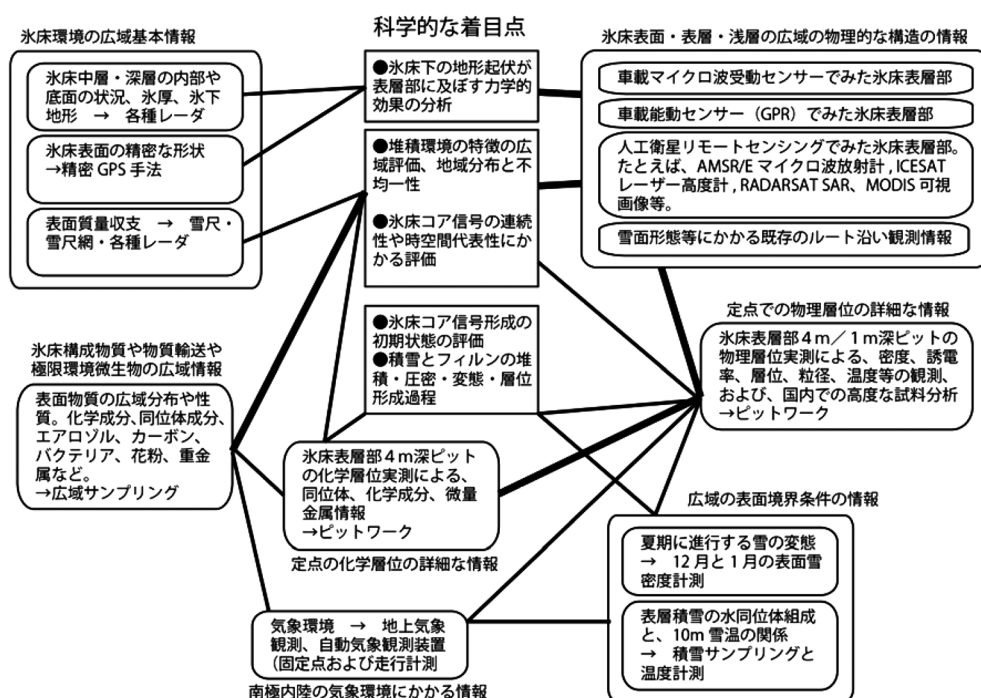


図4 観測で得る情報と、科学的な着目点の関連構造を示した図。中央上部に、科学的な着目点を分類して記載した。観測や試料採取で得られる情報項目を周辺に記載している。矢印とともに示したのは、観測手法。関連の強さを、連結線の2種の太さとして表現している。

Fig. 4. Schematic figure showing the relations between observation-based information and scientific objectives. The scientific objectives are listed in the upper middle of the figure, surrounded by items of information gained from observations and/or samples. Arrows provide the methods of observation. Lines with two different thicknesses are used to express the strength of links.

には、観測で得る情報と、科学的な着目点の関連構造図を示した。これは、私達自身が、課題にかかる思考整理のために作成したものである。

(1) 南極氷床存在システムを決定づける境界条件

地球のなかでの南極大陸氷床は、約 3400 万年前に発生した急速な気候変動のなかで形成されたと考えられている（たとえば、Zachos *et al.*, 2001）。氷床流動モデルと気候モデルによれば、大気中の炭酸ガス減少と南極周回海流の発達、南極が氷河・氷床で覆われる原因となり、そしてその後、地球が太陽をまわる軌道がペースメーカーとなって気候変動が起きてきたと考えられている（DeConto and Pollard, 2003）。氷床深層コアの年代に基づけば、現在の南極大陸は、大陸上に年々降り積もる雪や霜の堆積が、 $10^5 \sim 10^6$ 年規模の時間スケールで堆積したことによって成立している。大陸を覆った氷は、氷床にかかる重力が駆動力となり、内陸から沿岸に向かって最大傾斜に沿って流動する（たとえば、Cuffey and Paterson, 2010）。氷床流動のメカニズムとしては、氷や雪の変形、底面すべり、大規模な氷流（アイスストリーム）がある（たとえば、Cuffey and Paterson, 2010; Rignot *et al.*, 2011a）。さらに、氷床底面は地熱によって圧力融解点に達しており、水が生成されている（たとえば、Fujita *et al.*, 2012b; Pattyn, 2010）。水は氷床下の水流となり海に向かって流出するほか、上記の底面すべりや大規模な氷流の原因になる。このようにして、大陸岩盤の上に巨大氷床が存在し、拡大や縮小をする際には、大気や海洋や岩盤とのインターフェース（境界面）の条件が重要な役割を果たす。さらには、氷床という大陸を覆う氷体の、質量や温度や内部構造を特徴づける要因は基本的にその表面や底面にある（Cuffey and Paterson, 2010）。こうした科学的な認識に基づいて、現在の南極氷床の存在条件の知識を高度化する目的で、以下の項目の調査を行った。①現在や過去の表面質量収支、②現在の表面気象条件、③現在や過去の積雪中の化学成分、④雪とフィルンの中に存在する物理プロセス。氷床底面にかかる境界条件は非常に重要なものであるが、これについては別項目として述べる。

(2) 南極氷床内部を支配する物理化学機構

古気候アーカイブとして、アイスコアのシグナルを読み解くには、氷床表面で取り込まれた各種の信号が、氷床内部にはいる際にどういう変質経過をたどるかという点の理解が重要になる（たとえば、藤井・本山, 2011）。この点にかかる知識の高度化が、今回のプロジェクトの主要目的の一つであった。この点の理解が深まれば、アイスコアから得られるシグナルの情報の価値を引き上げることができる。具体的には、①積雪・フィルン・氷にかかる、堆積・変態・変形の物理プロセス、②堆積後のエアロゾルに起こる各種の化学反応や堆積後の諸プロセス、③ガスの氷床中への取り込み機構を着目点とした。また、氷床動力学的な観点から、氷床内部での堆積の流動や歪みを読み取ることも着目点とした。

(3) 氷床内部や底面の状態や構造

現在、氷床の内部構造や底面の構造は、南極氷床に赴いての地上探査あるいは航空機探査

によってのみ調査可能である。人工衛星搭載のレーダでは、電波信号を約 10² m 以深に送り込むような形でこれらを直接調査できるには至っていない。本プロジェクトでは、複数の種類の氷床探査レーダを用いた、地上にプラットフォームをおいての探査の利点である、地点ごとの詳細情報取得をはかった。氷床内部の電波散乱やその層構造、それに、氷床底面からの電磁波の反射を詳細に調べることにより、氷床の 3 次元構造や、底面の融解や凍結の状態を調査した。

(4) 南極氷床が保持する気候信号アーカイブの高度化や複数深層コア情報の連結

アイスコアの研究は、ドームふじ基地アイスコアの研究を、国内の関連研究者が推進している。氷床探査レーダのデータを分析し、その層構造を読み解くこと、それに、多地点の氷床コア掘削点を連結できるようなレーダのデータを得ることで、アイスコアシグナルの解釈の高度化ができる。本プロジェクトは、その調査地域の内部層を連結し、この地域での既存の氷床コア（ドームふじ基地および EDML コア）の年代の連結をはかった。また、将来、この地域近傍のより広域のどこかでアイスコアを掘削する際に、レーダ信号を読み解くことにより、各深度の年代につき事前に予測できるデータを獲得することをめざした。

(5) 表層・氷内部・氷下の極限環境生物の潜在性

本研究計画では、氷床内陸部の極限環境でのバクテリア等の生物や、そうした生物が潜在的に存在できる環境の調査をした。具体的には、バクテリアの分析を目的とした積雪試料の採取、南極に飛来した花粉分析のための積雪試料の分析、生物が潜在的に存在可能な氷床底面融解領域の把握である。

3.2. 観測地域、ルート設定、二国間連携、観測期間にかかる考え方

上記の課題にかかる観測を、東南極の南緯 75° ± 3°、西経 15° ~ 東経 45° 範囲（図 1）で実施した。日本は、南極観測開始にかかる歴史的な諸経緯から、昭和基地をベースにした観測を展開してきた。東南極地域の標高第 2 のドーム状地域の頂上であるドームふじ基地での観測が実現している理由の一つも、昭和基地からのアクセスが、一夏シーズンの陸上活動で対応できる範囲にある地の利からであると考え、この地域の南極大陸はインド洋セクターに属し、この地域に輸送される水蒸気は、主にインド洋に起源をもつと見積もられている（Suzuki *et al.*, 2008, 2013）。この地域の内陸部を広域に調査することは、インド洋海域を視点軸とした地球環境の動態を調査することを意味する。広域調査の結果は、南極のなかでのドームふじ基地というポイントの氷床深層コアの位置づけを明確にする。ドロンイングモードランドの南極大陸は、沿岸付近に太古代～古生代の山塊が連なり、沿岸から内陸に向けて表面標高は急速に高くなる。空気塊の移動の観点では、空気塊の内陸への侵入をさまたげる一種の壁（escarpment）が形成されている（図 1 参照）。その結果として、南極海上に発生・移動・消滅を繰り返す低気圧性の擾乱による比較的低層の空気塊がドームふじ基地のような内陸に

ははいり込みにくい。一方、ひとたび低緯度からの空気塊がはいったときには、斜面を上昇する空気塊から、水蒸気が霜や雪の堆積として供給される。対照的な地域としては、東南極のドームCやポストーク基地の地域を挙げることができる。これらの地域には大陸縁辺部の escarpment が存在せず、比較的低層の空気塊が高頻度で内陸にはいる。その結果として、気候としては周辺海洋の影響をより受けやすく、冬の堆積が多いことがわかっている (Suzuki *et al.*, 2013)。

こうした背景認識のうえで、今回の主要な観測ルートとしては、ドームふじ基地とコーネン基地（ドイツ）とを、氷床表面の尾根沿いに結ぶようにルートを設定した（図1中、赤色で示した測線）。ドームふじ基地とコーネン基地の間は分水界を結ぶルートとし、尾根沿いの環境情報を取得した。この尾根沿いのルート設定は、主に氷床コア信号の連結の目的に重要であるが、このルート設定のみでは、堆積環境の情報量が限定されてしまう。広大な氷床のなかで、北方の海洋側に面する広大な傾斜面でもなければ、南方の内陸側に面する広大な傾斜面でもない、ある意味特異な環境の連なりをトレースすることになってしまう。このため、両側の情報を確実に取得する目的で、日本-スウェーデン会合点（図1中参照）に、尾根を横切る測線を設置した（通称としてクロストラバースと呼ぶ）。さらには、未調査の内陸地域にかかる情報を得るために、「南側ルート」（図1中、青色で示した測線）を設定した。このルートに沿い、尾根沿いルートの内陸側 100 km 程度までの内陸地域の環境の調査を行った。ドームふじ基地とコーネン基地を結ぶ尾根沿いの測線からみたとき、北方の海側に面した斜面の観測は、今回は限定的であった。その理由はまず、国際共同観測として広域に展開する機会となった今回、よりアクセスが困難な内陸側を優先したことが挙げられる。また、尾根筋から北側は、基本的には S16 地点～みずほ基地～ドームふじ基地を結ぶ、通称ドームルートで、観測情報の長い蓄積がある。さらには、国際極年のなかのプロジェクトとして、ノルウェー・米国共同隊が、ノルウェーのトロル基地を出発地点として南極点方向に向かった（図1中、緑色の点線で示す）(Anschütz *et al.*, 2009)。このノルウェー・米国共同隊のルートは、沿岸基地から出発し尾根を越えて内陸に向かったため、日本-スウェーデントラバースの計画した調査ルートと交差する位置関係にあった。こうした状況を総合的に考え、かつ、トラバースにかけることが可能であった実質約 80 日の期間、さらには燃料やロジスティクスにかかる諸条件を念頭に、尾根沿いを中心にした調査ルートを決定した。

二国間連携のありかたとしては、以下のような方式を選択した。両国の雪上車は、内陸トラバース完了後にそれぞれの拠点（日本は S16 地点、スウェーデンはワサ基地）に帰還する必要がある。しかし、科学的な視点で考えたとき、機器やオペレーターが全測線を走行して一様な質の観測をすることが望ましい。これらの条件を検討し、日本-スウェーデン会合点で、それぞれの国の2名の隊員が相手の国のチームにはいり、観測機器も相手の国の雪上車や橇に積み替えたうえで、全測線を継続して計測できるようにした。この方式を利用し、

氷床レーダ探査観測、マイクロ波放射計観測、各種積雪サンプリング、各種の氷床表面調査の調査につき、全測線で行うことを実現した。

観測期間については、往復約 2800 km にわたる行程を雪上車隊による移動で調査するために、約 80 日の日数を要すると当初から見積もった。南極までの移動手段や、シーズンはじめと終わりの種々の束縛条件を考慮にいったとき、2007 年の 11 月初旬～中旬に S16 地点を出発し、翌年の 1 月下旬あるいは 2 月初旬にすべての活動を終えることが必要な条件であった。こうした観測を実現するために、第 48 次観測隊の越冬隊員として、福井と中澤が参加し、トラバースの諸準備を越冬隊全体の支援を受けつつ整えた。2007 年 11 月初旬に、第 49 次観測隊の夏隊員として、榎本、杉山、谷口、藤田の 4 名が DROMLAN の航空路を利用して S16 入りし、トラバースを実施する体制が整い、実質的に 73 日の観測期間（S16 を出発し S16 に戻るまで）を確保することができた。観測にかけうる時間は、取得できるデータの量に直結する。また、現地で予期せぬ悪天やアクシデントに見舞われた際に、隊がもつ余力にも直結する。そうした意味で、越冬したメンバーが引き受けて担った大きな準備タスクのお陰をもって、上記の夏期間の観測時間を確保でき、本報告に述べた質や量の観測が実現した。

3.3. 主要な観測方法

上記の課題に取り組むために選択・用意をした、主要な観測方法を以下に述べる。多くの科学的な目的群や観測手法群は、密接かつ複合的に相互依存している。観測で得る情報と、科学的な着目点の関連構造は、再度図 4 を参照いただきたい。下記の観測方法による観測実績の詳細は、報告書 II に記載した。

(1) 氷床探査レーダを用いた氷床内部構造の広域調査

国立極地研究所では、氷床探査を効率的に行う目的で、多数の異なる周波数やパルスを活用できるレーダを整備してきた（藤田, 2008）。本調査では、179 MHz 氷床探査レーダ（空 179-II 陸）、60 MHz 氷床探査レーダ（陸 60-II）、270 MHz 地中探査レーダ（GSSI 社製 SIR3000）、位相検波型 179 MHz 氷床探査レーダ（陸 179-III）、位相検波型 434 MHz 氷床探査レーダ（陸 434）を雪上車搭載として用いた。ここに述べたレーダ整理記号は、藤田（2008）で用いたものである。VHF 帯や UHF 帯の異なる周波数の氷床探査レーダを用いることにより、氷床内部からの異なるメカニズムの電磁波散乱を計測した。国立極地研究所で 1998 年までに製作した氷床探査レーダは、主に氷厚計測を念頭においていた。このため、電磁波の位相情報は活用せず、電波強度のみを受信するタイプのレーダであった。空 179-II 陸や、陸 60-II がこれに該当する。今回の内陸調査においては、これらの従来型レーダのみではなく、位相検知や偏波方位依存性もできるタイプのレーダを、179 MHz と 434 MHz の 2 周波数で用意した。これらが、陸 179-III と陸 434 である。陸 434 の周波数帯域は、UHF 帯、あるいは P バンドマイクロ波であり、氷床探査レーダとしては非常に高周波で、氷床内部の密度

層構造と結晶主軸方位分布の層構造を観測できるものである。しかし、準備をしたこれらの新型レーダのうち、陸 434 は雪上車の走行時の振動により内部配線が破損し、2007/2008 年のトラバース調査ではデータ取得は実現しなかった。このレーダを用いた再チャレンジは、その後 2012/2013 年の内陸トラバース調査によって行い、5 年越しでデータ取得を実現できた。基本的には、雪上車の全走行行程においてレーダ観測を実施した。ただし、複数のレーダの同時運用は、異なる周波数であっても、受信信号の干渉を引き起こす。このため、大部分のルートにおいて、観測は複数レーダのうちの 1 種類とした。空 179-II 陸と陸 60-II は、レーダの送信信号のタイミングをずらし干渉を予防するための同時運用機構を整備している (Matsuoka *et al.*, 2002)。これら 2 機のレーダは、全く問題なく同時運用できる。

(2) マイクロ波放射計を用いた氷床表面付近の電波放射および積雪層構造の広域調査

積雪表層付近からのマイクロ波放射の観測を通じ、積雪の層構造や表面粗さ、それに、結晶粒径や温度に関係した情報の取得をはかった。物理原理や応用例は、文献群 (Stogryn, 1986; Surdyk, 2002; Surdyk and Fily, 1993, 1995) で参照できる。この目的のために、三菱特機社製のマイクロ波放射計 MMRS2 (<http://www.melos.co.jp/products/mmrs2.html>) を用い、全部で 5 チャンネルのセンサーを利用した。周波数と受信偏波方向の組み合わせを、6 GHz V/H, 18 GHz V, 36 GHz V/H として構成した。ここで、V とは、鉛直偏波を意味し、電磁波のもつ電場ベクトルが縦方向に向く状態での観測である。H とは、水平偏波を意味し、電場ベクトルが水平面に沿っている状態での観測を意味する。こうした偏波の設定は、マイクロ波放射計が使用する「ホーンアンテナ」と呼ばれるタイプのアンテナの偏波面を縦にするか水平にするかで設定できる。マイクロ波放射計は車載として用い、常に雪上車の側方を観測し、走行期間全体を通じて、毎秒の観測データを蓄積した。雪上車のもつ方位 (ヘディング) は GPS コンパスで毎秒の記録をし、また、雪面状態もこの MMRS2 が備えるデジタルカメラで毎秒撮影した。マイクロ波放射計を用いた計測は、日本隊の出発地点である S16 から開始し、みずほ基地、ドームふじ基地、そして、日本-スウェーデン会合点まで日本の雪上車に搭載して実施した。日本隊とスウェーデン隊の会合後、スウェーデン側の大型橇に積み替えをした。隊員の寝本がオペレートし、ワサ基地までの観測を行った。

(3) 広域での積雪含有成分の調査

多種の積雪サンプリングを行った。積雪のサンプリング項目により、観測頻度は異なる。主要なサンプリングの目的項目としては、積雪の化学成分、極限微生物環境の調査、花粉分析、エアロゾル、宇宙塵採集があった。

(4) 氷床の堆積環境の広域調査

堆積環境の広域調査のために、ルート沿い雪尺および雪尺網の計測を実施した。ルート沿い雪尺は、従来から行ってきたモニタリング観測としてのルート沿い雪尺に加え、新規走行ルートに関しては新たな雪尺を設置した。さらに、雪尺網を、DK190 と日本-スウェーデン

トラバースの2箇所を設置をした。DK190の雪尺網については、その後2013年1月と2014年1月にドイツ隊が航空機で現地を訪れ、再計測が実現した。

(5) 広域での気象観測

広域での気象観測として、①地上気象観測、②無人気象観測点の設置、それに、③雪上車走行時自動気象連続計測を実施した。①の地上気象観測としては、毎日1200 UTに、「気圧、気温、風向、風速、雲量、天気、視程、雲の種類」の計測を行った。②の無人気象観測は2種類実施した。新規設置の無人気象観測装置として、2007年12月20日、DK190点にCMOS式装置（気温、風向・風速）を、同年12月25日、日本-スウェーデン会合点に、米国のウィスコンシン大学が供給したARGOS式の装置（Keller *et al.*, 2010）を新規設置し、「気温、風向・風速、気圧」を計測した。その後、DK190地点に設置したロガーは、設置から5年後の2013年1月に、ドイツ隊が航空機で現地を訪れ、データ回収が実現した。後者は、ARGOS式であり、観測結果をインターネット上で随時モニターでき、データはリアルタイムで公開されている。既存の無人気象観測点の保守として、ドームふじ基地「気温、風向風速、雪温」のロガー回収と交換を実施したほか、S16からドームふじ基地のルート沿い設置のCMOS式気温測定装置（ドームサミット点、中継拠点、みずほ基地、S16）の回収を実施した。③としては、気温、風向・風速、気圧の自動連続観測を実施した。

(6) 氷床の形状や流動の広域調査

この目的のために、全走行路を通じて車載GPS技術を用いた位置決定を行い、氷床表面形状計測をした。また、GPS定点精密測位による氷床流動調査を実施した。

(7) 氷床表層部の物理・化学層位構造形成についての広域調査

この目的のために、積雪表面近傍の物理計測を行った。以下、それらの概要である。

①表面層位の物理計測として、1日1回キャンプ地にて1m（または0.5m）深ピットを作成し、サンプラーを用いた密度計測、スノーフォークを用いた誘電率計測（Sihvola and Tiuri, 1986）、Denoth式誘電率計測（Denoth, 1989; Denoth *et al.*, 1984）、雪質計測、雪温計測を実施した。この観測は、杉山と榎本が担当し、S16～日本-スウェーデン会合点～ワサ基地までの全2800 km、46箇所での計測が実現し、貴重なデータを得ることができた。

②また、上記①とは別に、氷床表面付近の密度の計測として、10 km 区間ごとに、12 cm 深の縦サンプリングか、あるいは、3 cm ごと 21 cm 深までの7分解能密度サンプリングを実施した。特に、往路の中継拠点とドームふじ基地の区間は2007年12月初旬にこれらの計測をし、復路の同区間の計測を2008年1月中旬に行った。これらを比較することによって、夏期に進行する積雪の変態に関する情報の取得をはかった。この観測は藤田が担当した。

③年平均気温と水同位対比の関係を明らかにするために、トラバース旅行往復でキャンプ地ごとに10 m 雪温観測と水同位体用の積雪サンプリングを実施した。この観測は福井が担当した。

④ 4-2m 深ピットを用いた化学層位と物理層位の研究を、計 4 地点（中継拠点（11/30）・MD732（12/10-12）・DK190 地点（12/20）・日本-スウェーデン会合点（12/24-26））で実施した。これらのうち、中継拠点・中間点では 2m 深のピットを掘削した。MD732 と、日本-スウェーデン会合点では 4m 深のピットを掘削した。ピットの壁から、多種のサンプルを取得した。以下列挙する。

- ・化学イオン成分および水同位体用として、2 cm 間隔の試料を採取した。
- ・微量金属成分用として、5 cm 間隔の試料を採取した。
- ・積雪サンプラーを用いた密度測定を、3 cm 分解能で実施した。
- ・層位観察を連続、雪温測定を 3 cm ごとに実施した。
- ・スノーフォーク式の誘電率測定を 3 cm ごと、Denoth 式誘電率計測を 3 cm ごとに行った。
- ・物理計測用の積雪ブロック試料採取を行い、日本に持ち帰った。日本国内では、ガンマ線透過法を用いた密度計測、マイクロ波帯での誘電率テンソル計測、C 軸分布計測、結晶粒や結晶粒界の計測を行った。

4. 観測に基づく研究成果の概要

本章では、観測に基づく研究成果の概要を述べる。観測実施以来、本報告書の出版までに 6 年の時間が経過した。研究成果は重要と考えるものから出版し、これまでに多数の論文や報告が生まれた。論文群は、出版後着実にその後の主要な文献から引用を受けている状況にある。記述した論文ごとの項目として紹介をしていく。南極地域観測第Ⅶ期計画の外部評価が平成 23 年に実施され、本プロジェクトでは、自己評価として、以下を申告した。そして、外部評価の結果としても同様の評価を得た。

- (1) 観測の実績・成果は、観測計画を適切に達成したといえる成果を得た。
- (2) 観測の目的については、十分に達成をした。
- (3) 国際共同観測計画に関する貢献としては、IPY プロジェクト 152 に貢献する成果をあげ、南極ドロンイングモードランドの広域をカバーする研究成果を得た。
- (4) 観測の成果は、国際共同観測計画のなかでも、高度な独自視点とこれまで蓄積をしてきた観測ノウハウを用いてきており、研究の質として非常に高いものをあげた。

主要成果の要点を本報告では以下に記述する。

4.1. 南極氷床の堆積環境にかかる新たな知見

4.1.1. 東南極内陸部で 20 世紀後半以降の年間平均積雪量が増大傾向にあることが判明

Fujita *et al.* (2011) では、ピット観測の結果とレーダ観測結果を分析し、氷床の内部に堆積した過去約 44 年前、722 年前、7900 年前の火山爆発に起因する硫酸エアロゾルの堆積層の深度（図 5 に事例）を、雪氷試料の化学分析と氷床探査レーダから広域に高精度で導出し

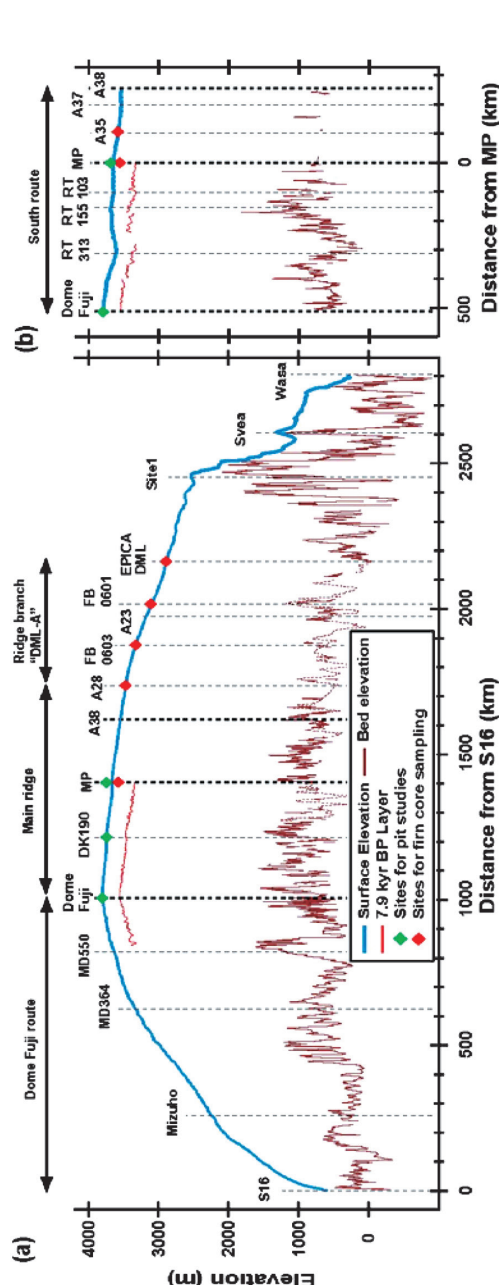


図 5 図 1 に示した米床の断面図。(a) 図 1 において赤色で示した尾根沿いのルート沿い、(b) 青色で示した南側のルート沿い、グラブの横軸は、(a) では S16 からトラバースルートに沿ってワサ基地までの距離を、(b) では南側のルートに沿って会合点からの距離を、それぞれ示している。形状は、鉛直方向に約 200 倍強調されている。鉛直に書いた点線をつかつて、主要なサイトの位置を示している。米床表面形状のデータ（青線）は、Bamber *et al.* (2009) のデジタル標高モデルに基づく。米床探査レーダーで検知した内部層のうち、比較的小規模の層を一層を赤色の線で示している。これは、 7.9 ± 0.5 kyrBP と年代付けをした、基盤岩高度のデータは、レーザ観測のデータから求めた。水厚のデータは BEDMAP2 に供給され、南極基盤地形図の更新に役立てられた (Fretwell *et al.*, 2013)。また、図中には、ピットワークを実施した 3 地点を緑色で、フィルンコアの掘削をスウェーデン隊が実施した 5 地点を赤色で示している。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2011) からの転載。

Fig. 5. Cross section of the ice sheet along the JASE traverse routes shown in Fig. 1. (a) The main ice divide route is the red trace in Fig. 1. (b) The south routes are the blue traces in Fig. 1. Abscissas show (a) the distance along the traverse from SI6 toward Wasa Station, and (b) the distance from MP along the south routes. The vertical exaggeration is 200 times. Vertical dashed lines show the locations of major sites. Surface elevation data (blue curves) are based on the digital elevation model of Bamber et al. (2009). A shallow isochrone within the ice sheet is shown as a red profile, based on analysis of the radar sounding data, and is dated as the 7.9 ± 0.5 kyr BP layer (see text). Bed elevation is derived from the radar sounding data. Ice thickness data are provided to the BEDMAP2 project, for compilation of updated bed topography map (Frenwell et al., 2013). Green and red symbols indicate pit study and/or firn core sampling sites, respectively. The figure is from Fujita et al. (2011).

た。あわせて、無人気象観測装置の設置や氷床表面の形態調査や氷床の厚さの調査を実施し、人工衛星観測データとの比較も実施した。積雪量の時空間分布と関連のプロセスが明らかになった。

東南極での広域の積雪量分布を決定づける要素は、表面標高、海岸域からの距離、氷床のなす尾根との相対的な位置関係であることが明らかになった。20世紀後半以降の年間の平均積雪量が、過去722年間や7900年間の年間平均積雪量と比べて約15%多かったことが判明した(図6)。さらに、南極大陸広域の多地点の観測結果とあわせた検討から、この積雪量の増加は南極大陸上で広く起こっていることが明らかになった。この事実、南極地域に周辺海域から輸送された水蒸気が増えたことを示しており、近年の地球温暖化に対応した現象である可能性がある。今後の地球の海水面変動を予測するうえで、特に監視と分析を必要とする。

4.1.2. 強風イベントと、降水イベントと、積雪表面形態の関連

同上の論文で明らかにした重要な事項として、強風イベントと、降水イベントと、積雪表面形態の関係を挙げることができる。積雪表面形態の観測は、ルート上での10km区間ごとに実施された。観測は、サスツルギやデューンなどの風成の表面形態やその方位を地点ごとに観測したものである。今回調査をした全トラバースの行程でこれを実施した。今回新たに日本-スウェーデン会合点(図7中ではMPと記載)に新規設置をしたArgos式自動気象観測装置のデータとの比較から、強風イベントは海岸付近に低気圧が接近した際に起こることがわかった。その際に、海から大陸上の尾根を越える方向の強風が吹き、積雪の再配分に寄与することがわかった。

4.1.3. ドロンイングモードランド地域の堆積量の分布

同上の論文で、氷床探査用レーダから、ドームふじ基地～日本-スウェーデン会合点の年間堆積量の分布が明らかになった。ドームふじ基地からコーネン基地に向かう尾根からみて、海側と内陸側では年間堆積量に大きなコントラストがあることがわかった(図8)。さらに、こうして求めた堆積量の分布は、次の図9に示すように、人工衛星搭載マイクロ波放射計(AMSR-E)の6.9GHzのPolarization ratioの分布とよく一致することを明らかにした。人工衛星搭載マイクロ波放射計(AMSR-E)のPolarization ratioの値は、年間堆積率の指標になるとされてきた(Surdyk and Fily, 1993, 1995)。今回、Polarization ratioの分布は、図8に示すような年間堆積率の分布とよく一致した。この人工衛星データと卓越風向の現地データから、年間堆積率を支配する要因が、高度、大陸性(海からの距離)、反時計回りに分布する卓越風と、尾根の位置関係によることが明らかになった。

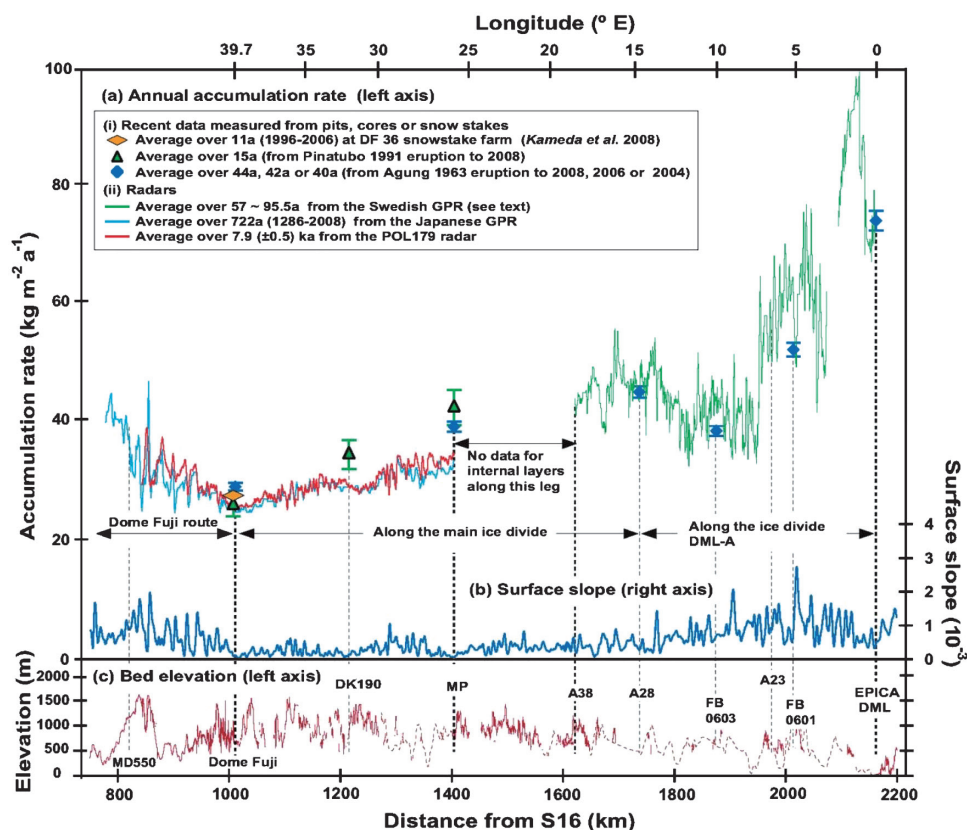


図 6 トラバースの主要ルートに沿って広域で判明した様々な時代における表面堆積率の算出結果を、表面堆積の指標とともに示す。横軸は内陸での S16 からのルート沿いの距離。縦軸は、上から順番に、(a) 様々な時間スケールで平均した年間堆積率。ピット研究やフィルクアを用いた研究からは、44 年平均や 15 年平均の年間堆積率を示している。また、36 本雪尺を用いて求めた、1996–2006 年の間の 11 年の平均値としての年間堆積率 (Kameda *et al.*, 2008) も示す。このほか、レーダを用いて算出した、過去 57–96 年間、～722 年間や 7.9 k 年間の平均年間堆積率も示した。(b) Bamber *et al.* (2009) のデジタル標高モデルを用いて計算をした氷床表面傾斜、(c) レーダ観測で求めた岩盤の高度。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2011) からの転載。

Fig. 6. Annual accumulation rates over various time scales, with indicators of the depositional environment along the main route of the traverse. The abscissa represents distance from S16 along the traverse route. Details are as follows. (a) Annual accumulation rate averaged over various time scales. Pit studies and firn core studies provide accumulation rates averaged over 44 yr and/or 15 yr. The annual accumulation rate averaged over 11 yr from 1996 to 2006 (Kameda *et al.*, 2008), using a stake farm with 36 stakes at Dome Fuji, is also shown. Subsurface radars provide annual accumulation rates averaged over 57–96 yr, ~722 yr and 7.9 kyr. (b) Surface slope at each point along the route, calculated from the digital elevation model of Bamber *et al.* (2009). (c) Bed elevation, derived from radar sounding. The figure is from Fujita *et al.* (2011).

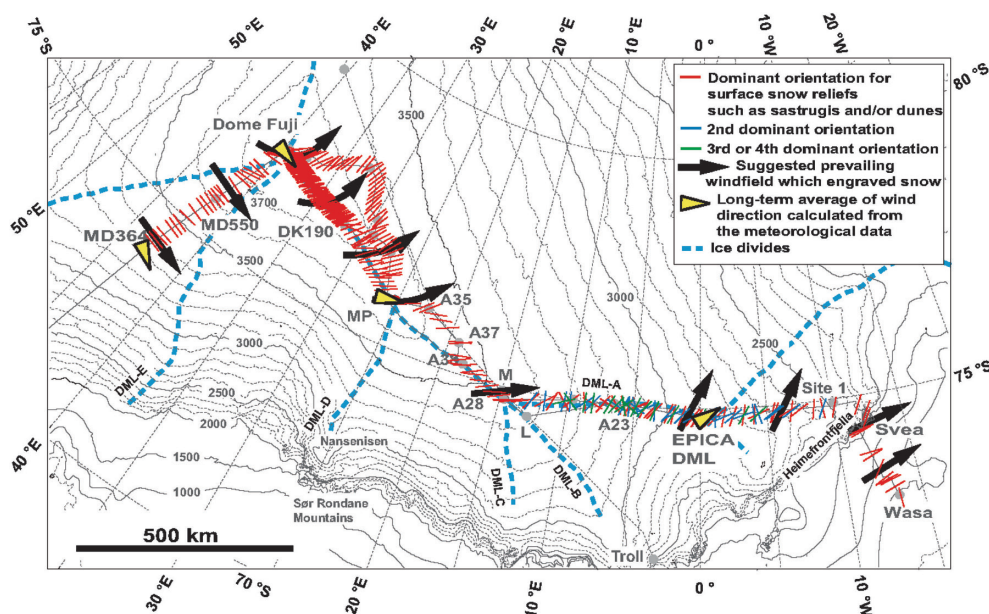


図 7 トラバースルート沿いのサスツルギやデューンなどの表面積雪の形態のもつ主要な方位。方位は、地図上の細い線として表現している。場所によっては、複数の方位が見いだされた。最も卓越した方位は赤で示し、他の弱い卓越方位は緑や青で示す。黒い太線の矢印は、こうした雪の表面の特徴をつくったと推定した DML 域の強風イベントの方位の分布。黄色い矢印は、それぞれの地点での地上気象観測に基づく年間平均風向を示す。太い青色の点線は、氷床表面地形での尾根筋をあらわす。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2011) からの転載。

Fig. 7. Dominant orientation of surface snow reliefs, such as sastrugis and dunes, observed along the traverse routes. Orientations are plotted as thin lines on the map. At some sites, where two or more orientations were observed, the dominant orientation is shown in red, and the second and lesser orientations are shown in green and blue, respectively. Thick black arrows give the suggested directions of the strong winds that shaped the surface snow reliefs. Yellow arrows represent the orientation of the average wind field, calculated from the meteorological data. Bold blue dashed curves indicate ice divides. The figure is from Fujita *et al.* (2011).

4.2. 南極氷床の底面環境にかかる新たな知見

4.2.1. 東南極内陸部で、氷床と大陸岩盤の界面の大部分に融解水があることが判明

本プロジェクトで得られた氷床探査レーダのデータを分析した結果、Fujita *et al.* (2012b) では、大陸岩盤を最大約 3000 m 以上の厚さで覆う氷床の底面の大部分で、底面融解が発生していることを見出した。対照的に、南極の沿岸地域では氷床底面と大陸岩盤との界面が凍結している傾向にあり、谷地形や低地にのみ融解水が存在していることを見出した。この観測事実から、南極大陸氷床では、内陸部の広域で大量の底面融解水が形成され、それが海岸部に向かって流れ出し、南極沿岸部の低地や谷地形を通じて海に流出している構造が存在することが明らかになった。本研究は、南極大陸上を覆う巨大な氷床の基本的な存在メカニズム

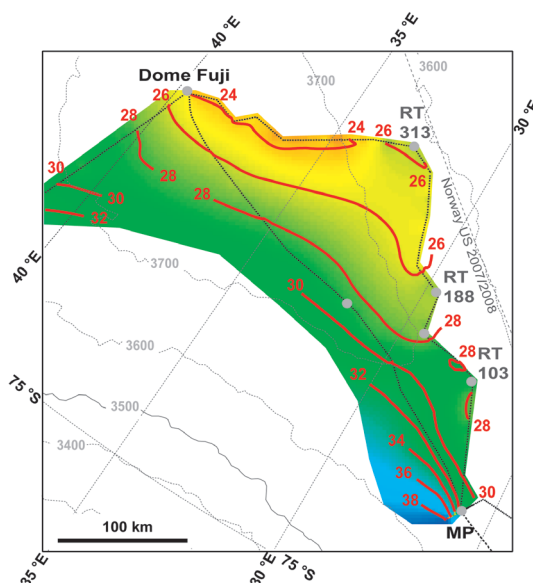


図 8 地中探査用レーダ（GPR）から明らかにした、ドームふじ基地～日本・スウェーデン会合点の過去 722 年間の平均の年間堆積量分布。赤色のコンターラインをつけたカラー画像は、 $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ の堆積率を表現している。氷床表面高度は、グレーのコンターラインで示している。この図の作成目的は、この地域の大きなスケールでの年間堆積率の分布を示すことである。このため、生データは 40 km の距離区間ごとに平均化されており、堆積率の空間的変動が図にあらわれにくく処理をしている。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2011) からの転載。

Fig. 8. Map of annual accumulation rate, averaged over 722 yr, derived from the GPR data. The color scale image with red contours and letters indicates the distribution of the accumulation rate in $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$. Thin gray contours show the ice sheet surface elevation. The original data were smoothed over a distance of 40 km to reduce fluctuations. The figure is from Fujita *et al.* (2011).

ムの一端を明らかにしたほか、将来的に地球温暖化が進行した際の南極大陸氷床の挙動を数値モデル化して予測するうえで、重要な基礎情報になる。

氷床と大陸岩盤の界面で反射する電磁波の反射強度とその変動の特徴（図 10）をとらえることにより、界面が融解しているかあるいは凍結しているかを判別した。これにより、融解・凍結の空間分布と関連のプロセスが明らかになった。図 11, 12, 13 に、融解と凍結を判別した結果の地域分布を示す。

4.2.2. 南極の基盤地形図の更新についてのデータの貢献

南極の基盤地形図の国際的な編集 BEDMAP は、前回の編集が 2001 年に行われた (Lythe *et al.*, 2001)。これが 2013 年までに更新され、BEDMAP2 として公開された (Fretwell *et al.*, 2013)。過去 10 年以上の間に新たに得られたデータを取り込んだ、大きな更新になる。この

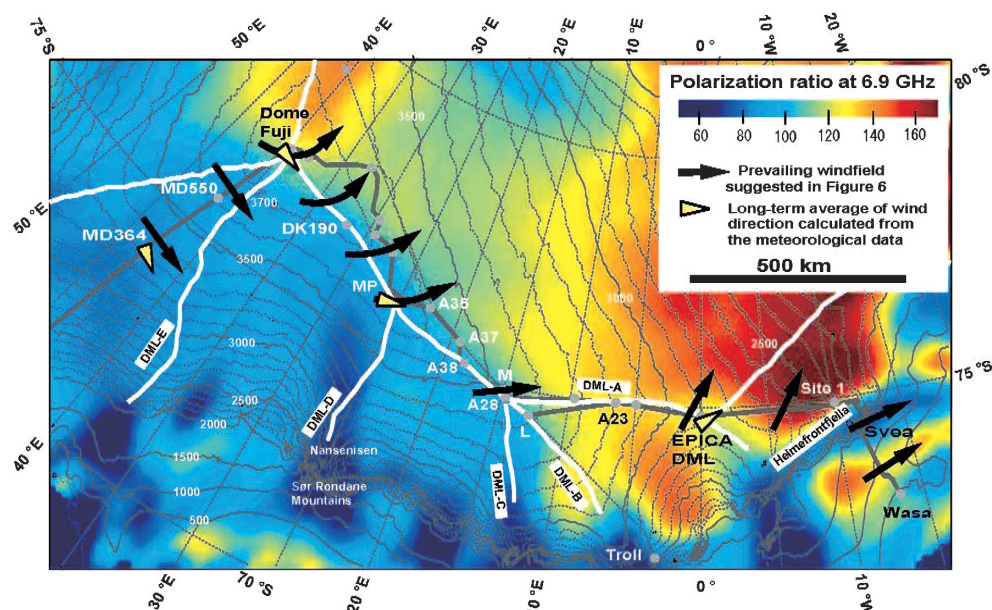


図 9 人工衛星搭載マイクロ波放射計 (AMSR-E) の 6.9 GHz の Polarization ratio の分布. 従来の研究 (Surdyk and Fily, 1993, 1995) によれば, 周波数 10 GHz 以下では, Polarization ratio は, 約 2 m 深までの単位深さあたりに存在する層構造の数の指標になる. 低い (高い) 値は, 層位数が少ない (多い) 状況を意味し, これは, 年間堆積量に相関していると考えられている. ドームふじ基地の近傍での Polarization ratio の分布は, 図 8 に示した年間堆積率の分布とよく似ている. 図は, 論文 (Fujita *et al.*, 2011) からの転載.

Fig. 9. Distribution of the polarization ratio of passive microwave data at 6.9 GHz. Data were obtained from the Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E). Previous studies (Surdyk and Fily, 1993, 1995) suggested that the polarization ratio at frequencies lower than 10 GHz is an indicator of the number of layers per unit depth of strata to a depth of ~2 m. Lower/higher values mean fewer/more layers in the strata, which would qualitatively suggest that the accumulation rate is higher/lower. In the area between Dome Fuji and MP, the distribution of the polarization ratio closely resembles that of the accumulation rate shown in Fig. 8. The figure is from Fujita *et al.* (2011).

更新にかかるデータ増強としては, IPY 期間に米・英・独等が航空機を用いて大規模に展開して得たデータが, かつて計測値の乏しかった空間を埋めた. 日本-スウェーデントラバースの全区間で取得されたデータ (Fujita *et al.*, 2011) も供給し, コンパイルに活用された. 次の大きな更新時期がくるまで当面は, この BEDMAP2 が最新データとして扱われることになるであろう.

4.2.3. 最古のアイスコアの掘削候補位置の探索

南極のどこで掘削をすれば最古のアイスコアにアクセスできるかについて検討をした論文を, アイスコア研究の国際連携グループ International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) が出版した (Fischer *et al.*, 2013). 日本-スウェーデントラバースに基づく, 上記の堆積環境

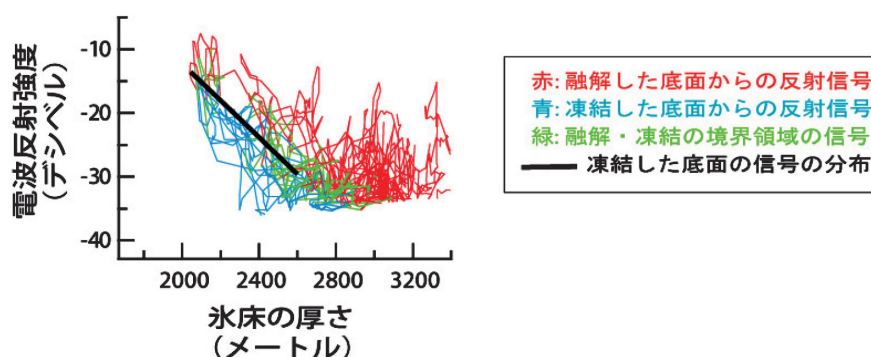


図 10 氷床の底面から反射してきた電磁波についての、氷厚-電波強度プロットの一例。データのトラジェクトリーとして示す。ドームふじ基地近傍の約 300 km の範囲のもの。推定した氷床底面の状態、たとえば、融解、凍結、不明瞭を、赤、青、緑でそれぞれ示している。底面が凍結している場合には、氷床が厚いほど、電波強度は減衰により弱まる。しかし、底面に水が存在すると、変則的に電波強度がはねあがる特徴をもつ。こうした特徴を分析し、底面に水があるかないかを地点ごとに判別できる。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2012b) からの転載。

Fig. 10. Graphs of radar-derived ice thickness and returned power. The red, blue, and green traces indicate temperate bed, frozen bed, and uncertain conditions, respectively. If the bed is frozen, the returned power decreases as the ice thickness increases due to attenuation. However, if water is present at the bed, returned power increases anomalously. By analyzing such features, we can distinguish between presence or absence of water from one location to another. The figure is from Fujita *et al.* (2012b).

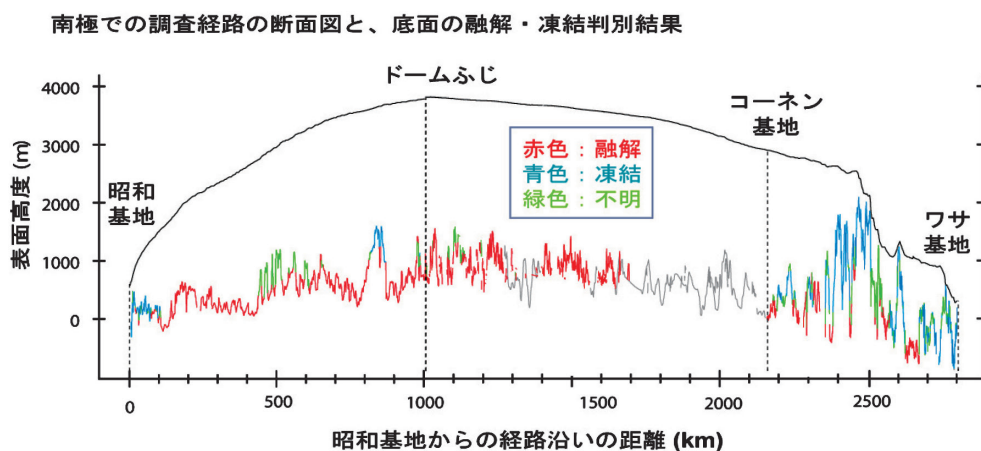


図 11 図 5 に示した探査地域に沿った氷床の断面図のなかで、氷床底面の融解と凍結の状態を色で表現している。融解、凍結、不明瞭を赤、青、緑でそれぞれ示している。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2012b) からの転載。

Fig. 11. Predicted bed conditions for the cross-sectional plot of the ice sheet in Fig. 5. The red, blue, and green traces are predicted temperate bed, frozen bed, and uncertain (or intermediate) bed conditions, respectively. The figure is from Fujita *et al.* (2012b).

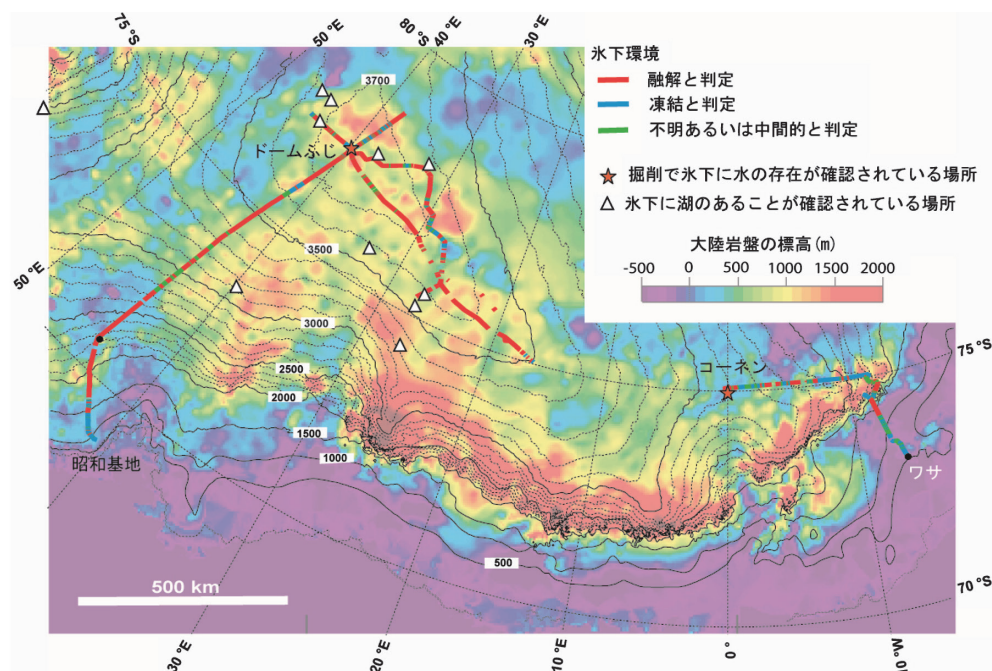


図 12 調査地域の大陸岩盤の BEDMAP 標高図 (Lythe *et al.*, 2001) と氷床表面高度 (等高線) に載せた、底面の融解・凍結の判別結果。融解、凍結、不明瞭を赤、青、緑でそれぞれ示している。内陸部は、その大部分が融解している。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2012b) からの転載。

Fig. 12. Predicted bed conditions shown on a bed topography map of DML. The red, blue, and green dots indicate sites of temperate, frozen, and uncertain bed conditions, respectively. The bed topography map is from the BEDMAP compilation (Lythe *et al.*, 2001). In the inland regions, melting is taking place at a majority of bed. The figure is from Fujita *et al.* (2012b).

と氷床底面環境の情報 (Fujita *et al.*, 2011, 2012b) が、この掘削候補位置の探索検討の重要な位置を占めている。

4.3. 氷床内部反射層の分布の解明

南極内陸部の広域で、レーダ電波反射層の空間分布を明らかにし、ドームふじ基地コアに照らして年代決定を実施した。これにより、顕著な等年代層が距離 2000 km をこえて分布することを明らかにした。また、これらが東南極氷床の動力学的環境の解明や氷床コア掘削の際に、基準層として取り扱いができることを明らかにした。加えて、南極氷床が保持する気候信号アーカイブの高度化や複数深層コア情報の連結を行った。

4.4. 南極氷床の層位の形成やその後の変態機構等の観測および研究

南極内陸部での積雪観測から、化学物質の堆積過程と、堆積後の時系列変化過程を明らか

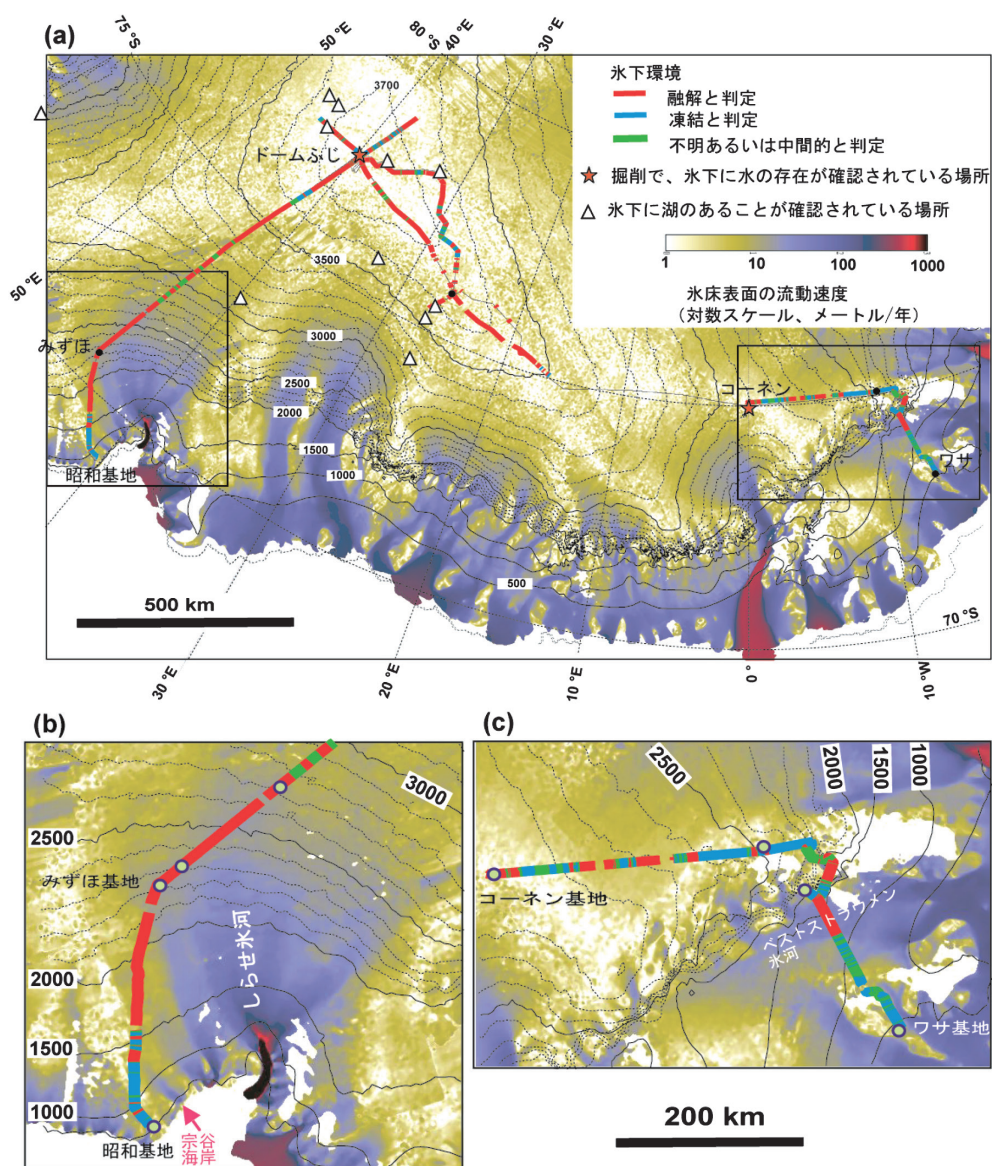


図 13 (a) 底面の融解・凍結の判別結果を、調査地域の南極氷床の表面流動速度地図 (Rignot *et al.*, 2011a, 2011b) に載せた。氷床の流速の色スケールは、対数スケールになっている。表面高度を、背景の等高線図として示している。赤、青、緑色は、融解、凍結、そして不明瞭をそれぞれ意味する。(b)、(c) 流速の早い氷河近傍の詳細。図は、論文 (Fujita *et al.*, 2012b) からの転載からの転載。

Fig. 13. (a) Predicted bed conditions shown on an ice velocity map of DML (Rignot *et al.*, 2011a, 2011b). Surface elevation is shown by thin black contours. The overlying red, blue, and green dots indicate sites that we diagnosed as temperate, frozen, and uncertain/intermediate, respectively. (b) and (c) Details of two areas close to fast-flowing glaciers. The figure is from Fujita *et al.* (2012b).

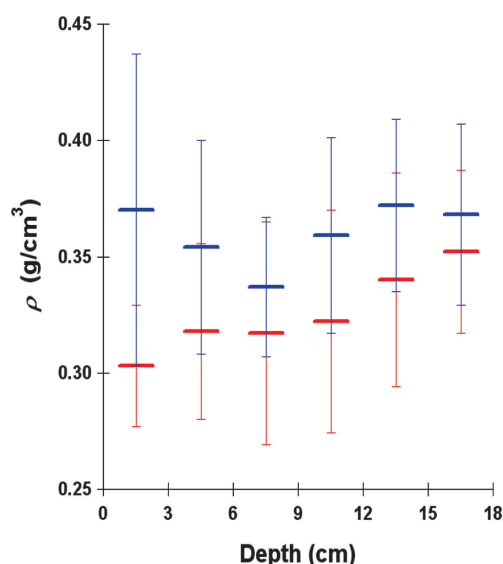


図 14 氷床表面の雪の密度の短期変動の初期結果. 南極ドームふじ基地近傍での, 2007 年 12 月中旬の密度分布 (赤) と, 1 月 10 日前後の密度分布 (青). 夏至をはさんだ夏期に, 表面圧密が急速に進行したことを検知した.

Fig. 14. A preliminary presentation of temporal variations in snow density at the ice sheet surface, with density profiles collected in the middle of December 2007 (red) and January 2008 (blue). Some layers were traceable over distances of greater than 2000 km. Snow density increased rapidly near the summer solstice.

にした。

4.4.1. 夏至前後に著しく進行する氷床表面積雪の圧密

ドームふじ基地と, 中継拠点を結ぶ 364 km にわたる区間において, 表面積雪の密度を 2 回計測した (Fujita *et al.*, 2008). 1 回目は 2007 年 12 月 2-9 日に, そして, 約 1 カ月後の 2008 年 1 月 10-15 日に, 同じ区間で再度の計測を実施した. そして, それら二つのデータを比較した. 2 地点間の標高差は 460 m である. 比較の結果として, 表層部 4-5 cm においては, 顕著な圧密がこの期間に進行したことが判明した. 例を図 14 に示す. さらに, 見いだした圧密の量は, 通常氷床表層部のフィルムのなかで見いだされる密度コントラストと一致していることがわかった. この観測事実から, 夏期間の圧密が, フィルン中の密度層位構造の形成に重要な役割を果たしている可能性がわかった. この観測結果は, ドームふじ地点のフィルムの圧密と変態の初期過程の重要な情報として, その後発表した論文 (Fujita *et al.*, 2009) 中で参考にした重要な情報となった.

4.4.2. 堆積量と風速の地理的勾配下での、層構造をもったフィルンの形成と変態

4-2 m 深の積雪ピットのもつ物理層構造の初報を, Fujita *et al.* (2012a) に発表した. 積雪の堆積後の初期的な変態について, ドームふじ基地と日本-スウェーデン会合点の区間で, 氷床の分水界の尾根に沿って調査をした. 初期変態については, 堆積量と風速の地理的勾配下でのそれを調べた. この課題についての理解は, 氷床コアのフィルン圧密の初期状態を知る重要な手がかりになる. 3箇所 に設置した 4-2 m 深の積雪ピットにおいて, 密度, 粒径, 近赤外光反射率, それにマイクロ波帯での誘電異方性を, cm~mm の深さ分解能で調査した. 研究の結果, 誘電異方性 $\Delta\epsilon$ は, 0.028-0.067 の間の高い値を示し, それは, 表層 10 cm においてすでに発生していることを見いだした. さらに, 密度 ρ と, 誘電異方性 $\Delta\epsilon$ は短区間で正の相関をもち, そして, 粒径 D とは逆比例していることを見いだした. この結果は, Fujita *et al.* (2009) で提唱されてきた初期高密度層と初期低密度層の特徴を確認したものであり, さらに, 初期の変態はこのコントラストをより成長させていることがわかった. 密度 ρ の雪がもつ $\Delta\epsilon$ の値は, 堆積率が小さい地点ほど, そして, 風速が小さいほど, 大きいことがわかった. 夏の日射は, そうした環境下では効率的にフィルンの層位構造を発達させる. より風速の大きい環境下では, 層位は風成による固いスラブ層ををもち, それは, 大きな密度 ρ と誘電異方性 $\Delta\epsilon$ をもつため, その変動幅は大きくなる. こうした観測結果から, フィルンの物理的な層構造は, 初期の可変性とその後曝される温度勾配によって決定され, それは圧密がすすんでも保存されることを推定した. 風速の大きい環境下では積雪の密度が高まることは, 日本-スウェーデントラバースの結果として, Sugiyama *et al.* (2012) も論文発表を行った (後述).

4.4.3. 積雪の水同位体に対する堆積率の効果

Hoshina *et al.* (2014) は, 上記の 3 箇所 に設置した 4-2 m 深の積雪ピットにおいて, 堆積後の水同位体成分の再配分についての研究を行った. 研究では, 水同位体比, 主要イオンの濃度, それに, トリチウムの濃度を, 深さ方向の分解能 2 cm で調査した. 現地の堆積率は 29-41 kg m⁻² a⁻¹ の範囲にあり, 時間幅としては約 50 年をカバーしている. 酸素同位体比のプロファイルをみたとき, 年層カウントをできるような層構造はみえない. しかし, 代わりに, 複数年を 1 サイクルとした変動を観察できる. この複数年サイクルの周波数は, ドームふじ基地では他の 2 地点よりも相対的に低い. 酸素同位体比のサイクルのピークは, いくつかのイオン濃度の最小値と一致した. この傾向は, 海岸付近の積雪でみられる傾向とは異なる. 観測事実から, 以下の考察を行った. 非常に小さい堆積率によって, 雪は比較的長時間, 氷床表面付近にとどまる. その結果, 堆積後の変化が, 積雪内の空気の移動や昇華・凝結により進行する. 計算によれば, 酸素同位体比は, 10% 以上の変化をすると見積もった. そして, ドームふじ基地では, 堆積直後には存在したはずの季節サイクルは, 完全に上書きされて消えてしまう. さらに, 雪尺計測結果を考慮すれば, ドームふじ基地では堆積率の時空

的な不均一性が、この多数年サイクルを引き起こす原因である学説を提案した。

4.4.4. 海塩の硫酸塩化が大気中と氷床表面積雪中で発生する割合

上記と共通のピットの積雪中に含まれるエアロゾル粒子の研究結果を、Iizuka *et al.* (2012) が発表した。南極内陸部において、表面積雪やフィルンに含まれるエアロゾル粒子の大部分は、基本的には海塩 (NaCl) や、海洋生物活動の結果としてのメタンスルホン酸や硫酸である。南極内陸の表面積雪や、フィルンや、ホロシーン期の氷には、ナトリウムイオンや塩素イオンや硫酸イオンが含まれている。海塩起源のエアロゾルが、硫酸と反応し、硫酸塩化する現象はよく知られてはいるが、このプロセスが、エアロゾルが輸送や堆積をするプロセスのなかでいつ起こるのかについてはわかっていない。Iizuka *et al.* (2012) の研究では、大気中と表面積雪のなかで、硫酸塩化を起こした海塩起源エアロゾルの割合を、より深層の氷から見いだされるそれと対比して計測することを試みた。この試みによって、アイスコアのなかでの海塩起源エアロゾルの情報が、過去の気候情報のプロキシーになりうるかを理解することが目的である。研究では、ドームふじ基地でのピットから採取された比較的近年の降雪を用い、海塩の硫酸塩化の割合を、X線散乱分光を用いて直接計測した。この手法を用いれば、融解性粒子の元素成分を決定し、そして塩化ナトリウムと硫化ナトリウムのモル比率を計算することができる。海塩起源のエアロゾルが、堆積としてドームふじ基地に固定されてから1年以内に、約90%が積雪のなかで硫酸塩化すると見積もった。

4.4.5. エアロゾル観測

Hara *et al.* (2014) は、トラバース中に行われたエアロゾルの数密度と、直接採取による分析の結果について、以下に箇条書きする内容でとりまとめた。

- (1) 夏季南極大陸上のエアロゾル水平分布。たとえば、数濃度・粒径分布・組成とその混合状態を明らかにした。
- (2) 夏季南極大陸上の海塩粒子変質。たとえば、沿岸域は硫酸やメタンスルホン酸で変質が起こること、大陸上では、硝酸による変質の寄与が大きくなることなどがわかった。
- (3) 大陸積雪表面の海塩組成分別。たとえば、Mg-rich 海塩粒子、Mg-free 海塩粒子に分離していることがわかった。積雪表面で海塩組成分別が進行していることを示唆する結果が得られた。強風時には、積雪の削剥により海塩粒子の再放出がみられる。これは、夏季に南極大陸上で観測される組成分別海塩粒子の発生過程と対応している。

4.4.6. 大陸上の積雪の密度を決定する要素

Sugiyama *et al.* (2012) では、昭和基地からワサ基地に至る2800 kmのルート沿いの46箇所で、1 m 深（あるいは0.5 m 深）の積雪ピット観測の結果を論文発表した。平均の積雪密度は、海拔標高365–3800 mの範囲で、333–439 kg m⁻³の幅で変動した。積雪密度は、採取地点の標高と相関があった。標高が高く内陸にはいるほど、積雪密度は低下した。しかし、ドームふじ基地からコーネン基地に至る分水界の尾根に沿ってみたとき、標高が変わっても密度

変化は小さいことが見いだされた。この領域で表面風速は標高が変わっても小さいため、風速が、表面積雪密度を決定するキーの役割を果たしていることが推定された。統計解析により、風速と圧密には $13.5 \text{ kg m}^{-3} (\text{m s}^{-1})^{-1}$ の相関があることがわかった。この関係は、南極大陸で従来考えられてきた係数の 3 倍の大きさをもつ。研究の結果から、表面積雪の密度の決定に、風速が従来仮定されてきたより重要であることがわかった。この結果は、上記 4.4.2. に記述した研究の結果を支持するものといえる。

4.5. 大陸上の積雪の高周波誘電率

Sugiyama *et al.* (2010) では、上で述べた 2800 km のルート沿いの 46 箇所の 1 m 深（あるいは 0.5 m 深）の積雪ピットで、平行線共振器である「スノーフォーク」(Sihvola and Tiuri, 1986) を用いて、数百メガヘルツ帯の高周波の誘電率の計測を行った。校正を注意深く行った環境下において、合計 2000 をこえる計測を実施した。誘電率 ϵ' は積雪密度の関数であるが、従来報告されてきた誘電率と比較して、今回の観測値が有意に小さいことがわかった。混合誘電体の理論からみたととき、有意に小さな ϵ' は、この地域に特有の積雪の構造的特徴に原因がある可能性がある。研究によって得られたデータから、非常に低い温度環境下での霜ザラメの成長にともない雪粒子同士が弱い結合をもっていることが、低い誘電率と関連があると推定した。

4.6. その他の研究成果

上に述べたものは、主要な論文発表として具体化したものであった。上に述べたほかに、主要な研究進展があった項目をいくつか述べる。氷床表層の極限環境生物の潜在性調査として、バクテリア採取用の雪試料を大量に採取した。また、南極大陸外から飛来した生物関連物質として、花粉採取用の雪採取を大量に採取した。さらには、上に述べてきた氷床探査レーダの結果として、氷床下湖の分布調査を実施し、ドームふじ基地近傍約 50 km の距離にある大型の氷床下湖を同定した。この湖をルートが横切る際には、約 20 km の区間にわたり、通常より 20–30 デシベル高い電磁波の反射が観測できた。これらのほか、氷床内部探査レーダ観測、気象観測や表層部試料の採取をはじめとした、大気雪氷相互作用の観測や試料採取を実施した。氷床ポラリメトリレーダ技術やマイクロ波放射計などの新手法を導入し、観測情報の質と量の革新的な増大を実現した。深層コア掘削との関連としては、深層コア掘削地点であるドームふじ基地とコーネン基地で、底面が融解状態にあることを明らかにした。これらの多数の項目については、継続して分析やデータ処理を続け、今後も論文発表や適切なデータアーカイブを行っていく。なお、上記の 4 m 深のピットサンプルを用いて、韓国の研究者らは重金属成分を調査し、数編の論文 (Han *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2012) を発表している。

5. まとめおよび将来に向けて

IPY のなかで、南極氷床内陸部の調査隊が複数編成されてきたなかで、本プロジェクトは、東南極ドロンイングモードランド地域の環境の把握に貢献した。日本とスウェーデンの協力を基盤とした観測であり、また、データ解析段階ではドイツの研究者も交え研究を展開している。日本1カ国で行う際には、雪上車隊をプラットフォームとして観測をする際に、観測の空間的範囲の限界はドームふじ基地近傍に限られる。しかし、南極の異なる地域に基地を持つ2カ国が協力したことにより、日本側の2隊員がドームふじ基地を経由し、コーネン基地、そして、ワサ基地に到達することができた。その結果として、本報告書に述べたような広域をカバーする詳細な観測を実現でき、多数の論文出版に至る土台をつくることができた。将来の観測計画のなかでも、多国間協力のメリットを強く見いだせる場合には、今回のケースを一つの参考例としてすすめることができると考えられる。

また、南極における深層氷床コア掘削はボストーク、ドームC、コーネン基地等で実施されているが、これまで、掘削点周辺の環境データは、各基地周辺とも非常に限定されていると言わざるを得ない。研究をするうえで、最も基本的と思えるデータ、たとえば、フィルンの層位データや、地上気象観測データも、これらの基地関連で十分に出版されてきたとはいえない。日本が拠点をおき、氷床深層コアの研究をすすめているドームふじ基地を中心とした広域において氷床環境のデータを得ることは、非常に重要であった。今回は長足の進展をみたと考えている。

2008年の2月に現地観測が終わり、その後、データ処理、サンプル処理、そして論文執筆にとりかかってきた。現地で得たデータやサンプルからは、まだ多大な科学的成果のアウトプットを期待できる。今後も研究活動や論文発表を継続する。

謝 辞

日本-スウェーデントラバースは、宮岡宏氏が越冬隊長をつとめた第48次日本南極地域観測隊、それに、伊村智氏が総隊長をつとめた第49次日本南極地域観測隊の両隊による全面的な支援があつてはじめて実現することができた。第48次日本南極地域観測隊の越冬段階の諸準備があつてはじめて、11月初旬からの内陸調査が可能になった。特に、トラバースチームに参加し、設営を担ってくださった第48次観測隊機械担当金子弘幸氏、第48次観測隊医療担当の志賀尚子氏、それに、第49次観測隊機械担当の谷口和幸氏には、トラバース旅行への参加と、旅行中に払ってくれた献身的な努力に、心からの感謝を申し上げる。スウェーデン側の研究スタッフ、それに設営スタッフにも、心から謝意を表する。設営的な準備にあたっては、国立極地研究所南極観測センター長の鮎川勝教授（当時）や、センターの多くのスタッフからの多大なご支援やご助言をいただいた。渡邊興亜前国立極地研究所長や西尾文彦前千葉大学教授によるスウェーデン側との交渉開始により本研究が実現した。本研究の国

内段階での実施は、日本学術振興会による科学研究費補助金、基盤研究（A）20241007の研究補助を受けた。

文 献

- Anschütz, H., Müller, K., Isaksson, E., McConnell, J.R., Fischer, H., Miller, H., Albert, M. and Winther, J.-G. (2009): Revisiting sites of the South Pole Queen Maud Land Traverses in East Antarctica: Accumulation data from shallow firn cores. *J. Geophys. Res.*, **114**, D24106, doi:10.1029/2009JD012204.
- Bamber, J., Gomez-Dans, J.L. and Griggs, J.A. (2009): Antarctic 1 km Digital Elevation Model (DEM) from Combined ERS-1 Radar and ICESat Laser Satellite Altimetry. National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/data/nsidc-0422>.
- Cuffey, K.M. and Paterson, W.S.B. (2010): *The Physics of Glaciers*. 4th ed., Academic Press, 704 p.
- DeConto, R.M. and Pollard, D. (2003): Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, **421**, 245–249, doi:10.1038/nature01290.
- Denoth, A. (1989): Snow dielectric measurements. *Adv. Space Res.*, **9**, 233–243, doi:10.1016/0273-1177(89)90491-2.
- Denoth, A., Foglar, A., Weiland, P., Matzler, C., Aebischer, H., Tiuri, M. and Sihvola, A. (1984): A comparative study of instruments for measuring the liquid water content of snow. *J. Appl. Phys.*, **56**, 2154–2160, doi:10.1063/1.334215.
- Fischer, H., Severinghaus, J., Brook, E., Wolff, E., Albert, M., Alemany, O., Arthern, R., Bentley, C., Blankenship, D., Chappellaz, J., Creyts, T., Dahl-Jensen, D., Dinn, M., Frezzotti, M., Fujita, S., Gallee, H., Hindmarsh, R., Hudspeth, D., Jugie, G., Kawamura, K., Lipenkov, V., Miller, H., Mulvaney, R., Parrenin, F., Pattyn, F., Ritz, C., Schwander, J., Steinhage, D., van Ommen, T. and Wilhelms, F. (2013): Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS “Oldest-Ice” ice core. *Clim. Past*, **9**, 2489–2505, doi:10.5194/cp-9-2489-2013.
- Fretwell, P., Pritchard, H.D., Vaughan, D.G., Bamber, J.L., Barrand, N.E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R.G., Blankenship, D.D., Casassa, G., Catania, G., Callens, D., Conway, H., Cook, A.J., Corr, H.F.J., Damaske, D., Damm, V., Ferraccioli, F., Forsberg, R., Fujita, S., Gim, Y., Gogineni, P., Griggs, J.A., Hindmarsh, R.C.A., Holmlund, P., Holt, J.W., Jacobel, R.W., Jenkins, A., Jokar, W., Jordan, T., King, E.C., Kohler, J., Krabill, W., Riger-Kusk, M., Langley, K.A., Leitchenkov, G., Leuschen, C., Luyendyk, B.P., Matsuoka, K., Mouginot, J., Nitsche, F.O., Nogi, Y., Nost, O.A., Popov, S.V., Rignot, E., Rippon, D.M., Rivera, A., Roberts, J., Ross, N., Siegert, M.J., Smith, A.M., Steinhage, D., Studinger, M., Sun, B., Tinto, B.K., Welch, B.C., Wilson, D., Young, D.A., Xiangbin, C. and Zirizzotti, A. (2013): Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 375–393, doi:10.5194/tc-7-375-2013.
- 藤井理行・本山秀明 (2011): *アイスコア—地球環境のタイムカプセル—*. 東京, 成山堂書店, 236 p.
- 藤田秀二 (2008): 氷床探査レーダーの開発及び現地での運用状況. *南極資料*, **52**, 238–250.
- Fujita, S., Enomoto, H., Kameda, T., Motoyama, H. and Sugiyama, S. (2008): Changes of surface snow density in a summer in the Antarctic Dome Fuji region. SCAR/IASC IPY Open Science Conference, St. Petersburg, Russia, 2008-07-8/11, 273–274.
- Fujita, S., Okuyama, J., Hori, A. and Hondoh, T. (2009): Metamorphism of stratified firn at Dome Fuji, Antarctica: A mechanism for local insolation modulation of gas transport conditions during bubble close off. *J. Geophys. Res.*, **114**, F03023, doi:10.1029/2008JF001143.
- Fujita, S., Holmlund, P., Andersson, I., Brown, I., Enomoto, H., Fujii, Y., Fujita, K., Fukui, K., Furukawa, T., Hansson, M., Hara, K., Hoshina, Y., Igarashi, M., Iizuka, Y., Imura, S., Ingvander, S., Karlin, T., Motoyama, H., Nakazawa, F., Oerter, H., Sjöberg, L.E., Sugiyama, S., Surdyk, S., Ström, J., Uemura, R. and Wilhelms, F. (2011): Spatial and temporal variability of snow accumulation rate on the East Antarctic ice divide between Dome Fuji and EPICA DML. *The Cryosphere*, **5**, 1057–1081, doi:10.5194/tc-5-1057-2011.
- Fujita, S., Enomoto, H., Fukui, K., Iizuka, Y., Motoyama, H., Nakazawa, F., Sugiyama, S. and Surdyk, S. (2012a): Formation and metamorphism of stratified firn at sites located under spatial variations of accumulation rate and wind speed on the East Antarctic ice divide near Dome Fuji. *The Cryosphere Discuss.*, **6**, 1205–1267, doi:10.5194/tcd-6-1205-2012.
- Fujita, S., Holmlund, P., Matsuoka, K., Enomoto, H., Fukui, K., Nakazawa, F., Sugiyama, S. and Surdyk, S. (2012b): Radar diagnosis of the subglacial conditions in Dronning Maud Land, East Antarctica. *The*

- Cryosphere, **6**, 1203–1219, doi:10.5194/tc-6-1203-2012.
- 藤田秀二・福井幸太郎・中澤文男・榎本浩之・杉山 慎 (2014): 日本–スウェーデン共同南極トラバース 2007/2008 実施報告: II. 現地調査活動報告. 南極資料, **59** (印刷中).
- Han, Y., Huh, Y., Hong, S., Hur, S.D., Motoyama, H., Fujita, S., Nakazawa, F. and Fukui, K. (2011): Quantification of total mercury in Antarctic surface snow using ICP-SF-MS: Spatial variation from the coast to Dome Fuji. Bulletin of the Korean Chemical Society, **32**, 4258–4264, doi:10.5012/bkcs.2011.32.12.4258.
- Hara, K., Nakazawa, F., Fujita, S., Fukui, K., Enomoto, H. and Sugiyama, S. (2014): Horizontal distributions of aerosol constituents and their mixing states in Antarctica during the JASE traverse. Atmos. Chem. Phys., **14**, 10211–10230, doi:10.5194/acp-14-10211-2014.
- Haran, T., Bohlander, J., Scambos, T., Painter, T. and Fahnestock, M. (2005): MODIS Mosaic of Antarctica 2003–2004 (MOA2004) Image Map. National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/data/nsidc-0280>, (updated 2006).
- Holmlund, P. and Fujita, S. (2009): Japanese–Swedish Antarctic Expedition, JASE. Swedish Polar Research Secretariat Yearbook 2008, ed. by A. Thorén, Stockholm, Swedish Polar Research Secretariat, 18–21.
- Hoshina, Y., Fujita, K., Nakazawa, F., Iizuka, Y., Miyake, T., Hirabayashi, M., Kuramoto, T., Fujita, S. and Motoyama, H. (2014): Effect of accumulation rate on water stable isotopes of near-surface snow in inland Antarctica. J. Geophys. Res. Atmos., **119**, 274–283, doi:10.1002/2013JD020771.
- Iizuka, Y., Tsuchimoto, A., Hoshina, Y., Sakurai, T., Hansson, M., Karlin, T., Fujita, K., Nakazawa, F., Motoyama, H. and Fujita, S. (2012): The rates of sea salt sulfatization in the atmosphere and surface snow of inland Antarctica. J. Geophys. Res., **117**, D04308, doi:10.1029/2011JD016378.
- Jezek, K. and RAMP Product Team (2002): RAMP AMM-1 SAR Image Mosaic of Antarctica. National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/data/nsidc-0103>.
- Kameda, T., Motoyama, H., Fujita, S. and Takahashi, S. (2008): Temporal and spatial variability of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by the stake method from 1995 to 2006. J. Glaciol., **54**, 107–116, doi:10.3189/002214308784409062.
- Kang, J.-H., Son, M.-H., Hur, S.D., Hong, S., Motoyama, H., Fukui, K. and Chang, Y.-S. (2012): Deposition of organochlorine pesticides into the surface snow of East Antarctica. Science of the Total Environment, **433**, 290–295, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.037.
- Kawamura, K., Parrenin, F., Lisiecki, L., Uemura, R., Vimeux, F., Severinghaus, J.P., Hutterli, M.A., Nakazawa, T., Aoki, S., Jouzel, J., Raymo, M.E., Matsumoto, K., Nakata, H., Motoyama, H., Fujita, S., Goto-Azuma, K., Fujii, Y. and Watanabe, O. (2007): Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. Nature, **448**, 912–916, doi:10.1038/nature06015.
- Keller, L.M., Lazzara, M.A., Thom, J.E., Weidner, G.A. and Stearns, C.R. (2010): Antarctic Automatic Weather Station Data for the calendar year 2009. Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin, 44 p.
- 国立極地研究所 (2009): 日本南極地域観測隊第 48 次隊報告 (2006–2008). 東京, 433 p.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. and Zhang, T. (2007): Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by S. Solomon *et al.*, Cambridge, Cambridge University Press, 337–383.
- Liu, H., Jezek, K., Li, B. and Zhao, Z. (2001): Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2. National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/data/nsidc-0082>.
- Lythe, M.B., Vaughan, D.G. and the BEDMAP Consortium (2001): BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. J. Geophys. Res., **106**, 11335–11351, doi:10.1029/2000JB900449.
- Matsuoka, K., Maeno, H., Uratsuka, S., Fujita, S., Furukawa, T. and Watanabe, O. (2002): A ground-based, multi-frequency ice-penetrating radar system. Ann. Glaciol., **34**, 171–176, doi:10.3189/172756402781817400.
- Motoyama, H. (2007): The second deep ice coring project at Dome Fuji, Antarctica. Scientific Drilling, **5**, 41–43, doi:10.2204/ioldp.sd.5.05.2007.
- Pattyn, F. (2010): Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model. Earth and Planetary Science Letters, **295**, 451–461, doi:10.1016/j.epsl.2010.04.025.
- Rignot, E., Mouginot, J. and Scheuchl, B. (2011a): Ice flow of the Antarctic ice sheet. Science, **333**, 1427–1430, doi:10.1126/science.1208336.
- Rignot, E., Mouginot, J. and Scheuchl, B. (2011b): MEaSUREs InSAR-Based Antarctica Ice Velocity Map.

- National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org/data/nsidc-0484>.
- Sihvola, A. and Tiuri, M. (1986): Snow fork for field determination of the density and wetness profiles of a snow pack. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-24**, 717–721, doi:10.1109/TGRS.1986.289619.
- Stogryn, A. (1986): A study of the microwave brightness temperature of snow from the point of view of strong fluctuation theory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-24**, 220–231, doi:10.1109/TGRS.1986.289641.
- Sugiyama, S., Enomoto, H., Fujita, S., Fukui, K., Nakazawa, F. and Holmlund, P. (2010): Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08. *Ann. Glaciol.*, **51**, 9–15, doi:10.3189/172756410791392745.
- Sugiyama, S., Enomoto, H., Fujita, S., Fukui, K., Nakazawa, F., Holmlund, P. and Surdyk, S. (2012): Snow density along the route traversed by the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08. *J. Glaciol.*, **58**, 529–539, doi:10.3189/2012JoG11J201.
- Surdyk, S. (2002): Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: An analytical approach. *Remote Sensing of Environment*, **80**, 256–271, doi:10.1016/S0034-4257(01)00308-X.
- Surdyk, S. and Fily, M. (1993): Comparison of the passive microwave spectral signature of the Antarctic ice sheet with ground traverse data. *Ann. Glaciol.*, **17**, 161–166.
- Surdyk, S. and Fily, M. (1995): Results of a stratified snow emissivity model based on the wave approach: Application to the Antarctic ice sheet. *J. Geophys. Res.*, **100**, 8837–8848, doi:10.1029/94JC03361.
- Suzuki, K., Yamanouchi, T. and Motoyama, H. (2008): Moisture transport to Syowa and Dome Fuji stations in Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **113**, D24114, doi:10.1029/2008JD009794.
- Suzuki, K., Yamanouchi, T., Kawamura, K. and Motoyama, H. (2013): The spatial and seasonal distributions of air-transport origins to the Antarctic based on 5-day backward trajectory analysis. *Polar Science*, **7**, 205–213, doi:10.1016/j.polar.2013.08.001.
- 渡邊興亞 (2002): 南極大陸の氷を掘る! : ドームふじ深層掘削計画の立案から実施までの全記録. 東京, 国立極地研究所, 248 p.
- Watanabe, O., Jouzel, J., Johnsen, S., Parrenin, F., Shoji, H. and Yoshida, N. (2003): Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature*, **422**, 509–512, doi:10.1038/nature01525.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K. (2001): Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**, 686–693, doi:10.1126/science.1059412.

付録 1 日本-スウェーデントラバース旅行での行程上の主要な地点
Appendix 1. List of main sites along the Japanese-Swedish traverse.

地点名や略称	緯度 (degrees)	経度 (degrees)	高度 WGS84 (m)	氷厚 (m)	備考
S16	−69.939	49.952	589	359	日本隊の出発拠点
みずほ基地	−79.697	44.274	2259	2969	1984 年に 799 m 深のアイスコアが掘削された地点
中継拠点 (略称 RP)	−74.998	42.996	3347	2716	みずほ基地とドームふじ基地の中間地点
ドームふじ基地 (略称 DF)	−77.317	39.793	3899	3928	ドームふじ基地氷床深層コア掘削地点
DK199	−76.794	31.999	3741	2919	無人気象観測装置を新規設置し、2 m ピット研究を実施した地点
日本-スウェーデン 会合点 (略称 MP)	−75.888	25.834	3661	2829	2 カ国のチームが会合場所とした地点
NCR88	−75.235	27.676	3597	2872	日本-スウェーデン会合点で実施した、尾根に直交した測線での調査のなかで、北方の先端点
SCR29	−76.934	25.399	3659	2921	日本-スウェーデン会合点で実施した、尾根に直交した測線での調査のなかで、南方の先端点
RT193	−76.762	27.248	3653	3919	日本隊が、日本-スウェーデン会合点から尾根の内陸側経由でドームふじ基地へ復路移動する際の通過点 (進行方位変更点)
RT155	−76.869	29.279	3791	2792	同上
RT188	−77.161	29.426	3678	2574	同上
RT313	−77.961	32.624	3629	3559	同上. 一連の観測で通過した最南端点
RT459	−77.376	37.932	3789	3333	同上. 29 km 以上の幅をもつ氷床下湖の上を通過した
ワサ基地	−73.953	−13.374	292	383	スウェーデン隊の拠点
スベア基地	−74.571	−11.179	1313	715	スウェーデン国の基地
Highway-75 (H75)	−75.999	−11.781	2195	667	スウェーデン隊の通過点の通称名
Site1	−75.991	−19.121	2528	1693	スウェーデン隊が集中科学調査を実施した
コーネン基地	−75.994	−9.996	2899	2774	ドイツ基地. 2774 m 深のアイスコアが過去に掘削された場所
ATIMG48 (A48)	−75.167	5.999	3119	2185	スウェーデン隊が集中科学調査を実施した地点
ATIMG23 (A23)	−75.168	6.493	3174	-	スウェーデン隊の通過点の通称名
DEPOT L	−74.647	12.799	3429	-	スウェーデン隊がノルウェーから燃料デポの供給を受けた地点
ATIMG28 (A28)	−74.862	14.742	3466	-	スウェーデン隊の往路ルートと復路ルートの連結点
ATIMG38 (A38)	−75.287	18.421	3543	2796	スウェーデン隊の往路ルートと復路ルートの連結点
ATIMG37 (A37)	−75.654	19.249	3544	-	スウェーデン隊ルートと、ノルウェー米国隊ルートの連結点
ATIMG35 (A35)	−76.966	22.459	3586	-	スウェーデン隊ルートと、ノルウェー米国隊ルートの連結点