

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20241007

研究課題名(和文)南極氷床内陸表層部の層位形成の物理機構とその電波リモートセンシング

研究課題名(英文) Physical mechanisms for formation of strata at the surface of the ice sheet in the interior of the Antarctic ice sheet, and remote sensing for them with radio waves

研究代表者

藤田 秀二 (FUJITA SHUJI)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：30250476

研究成果の概要(和文)：南極内陸部トラバースによって得られた資試料とデータ用い、南極氷床の内陸部における、雪およびフィルの層位形成の物理機構の解明をはかった。同時に、それに対する電波リモートセンシング手法を研究した。雪氷堆積環境の広域分布、表面密度構造の季節変化、それに、氷床底面環境の広域分布を明らかにした。さらには、南極内陸部のマイクロ波放射の偏波率が、氷床探査レーダで得た堆積率と良好な一致をすることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Using the snow/firn samples and data obtained by traversing the interior of the Antarctic ice sheet, we studied physical mechanisms of the formation of the strata within snow and firn. Major findings include spatial distribution of the depositional environment in Antarctica, seasonal effects on firn density and spatial distribution of the subglacial environment. In addition, we found that polarization ratio of the microwave emissivity from the ice sheet surface is well correlated to accumulation rate observed by radar sounding.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2009年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2010年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
年度			
年度			
総計	31,500,000	9,450,000	40,950,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：フィルン、南極、氷、氷床、雪

1. 研究開始当初の背景

国立極地研究所を中心とする南極氷床コア研究グループは、東南極の「ドームふじ」において氷床深層掘削を行い、過去七十数万年に及ぶ気候変動を記録する良質の氷床コアの採取に成功した。気候環境変動や、その氷床中でのシグナル形成メカニズムの解明

を目的とした研究を行っている。氷床コア研究では、特に、氷床表層部で起こる物理化学プロセスの理解が重要である。こうした状況下で、日本の南極地域観測プロジェクトとして、今回の科研費プロジェクト参加者らを含むグループは、南極大陸氷床内陸部の表層環境を広域に調査するプロジェクト「日本・ス

ウェーデン共同トラバース」を企画・立案し、実行した。2002年以來、約5年にわたる企画と実質準備の末、2007年11月～2008年1月の期間、南極現地の探査に臨んだ。スウェーデン国チームとの協力により、全長約3000kmにわたる測線を雪上車隊の旅行により約80日をかけてトラバース調査をした。この調査の実施目的のひとつは、広域での表層過程を把握することにあつた。南極氷床コアに含まれる層序記録の理解には表面で起こっている物理・化学プロセスの理解が不可欠であり、設定した測線を一様な質の高度観測手法・装置でカバーした。この広域調査のなかで、表層物理過程にかかる種々の観測や試料採取を実施し、問題解明に資する材料を蓄積した。観測実行の努力は成功裡に完了し、それにより得られたデータや試料を基盤にして日本国内での今後3年間の表層物理過程の研究展開を企画した。それが、本科研費プロジェクトある。

トラバース調査隊のなかでは、具体的には、積雪表面近傍の物理計測（層位、密度、誘電率成分、温度分布）、10m雪温観測、積雪物理構造解析のための10mコア掘削・採取を多地点で実施した。また、移動経路に沿って連続で、計6種の氷床探査レーダや5チャンネルのマイクロ波放射計を用いて、表層の積雪層構造に起因する電磁波信号の調査を完遂し、これが本研究開始の前提となった。

2. 研究の目的

本研究は、南極氷床内陸表層部の層位形成物理機構を、特に日射と気象条件との関わりについて広域に把握し、さらにはそれと直接に関係する南極氷床にかかる電波リモートセンシング技術との関係の解明を目的とした。具体的には以下をターゲットとした。

(1) 表層部約10mまでの氷床のなかで、日射が雪粒子の焼結や結晶粒成長や水蒸気移動をもたらした痕跡を網羅的・系統的に把握する。

(2) (1)で述べた氷床表層部物理構造と、高周波電波リモートセンシングデータとの関係を明らかにし、その成果が将来に人工衛星マイクロ波リモートセンシングのデータをなかだちとして内陸氷床のより広域に適用できるような知見の基盤の構築をする。

サマリーとしては、氷床表層部でのフィルンの現地観測に基づき、試料解析と多数のデータの分析から、氷床氷生成初期の変態・変形の物理機構とその広域特性の研究をすすめた。その電磁波伝搬との繋がりを明らかにし、極地内陸部の物理機構の面的な広がりを探るほか、人工衛星リモートセンシング解釈に必要な物理機構の研究をすすめた。

3. 研究の方法

本研究は、H19年11月～H20年1月の期間に実行した以下のデータや試料取得を前提とした。

(1) 試料： 南極内陸地域3箇所での氷床表層4m深ピット試料および10m深コア1箇所。
(2) 現地観測の物理構造データ： 氷床多地点での、密度、マイクロ波誘電率、粒径、目視層位解析、温度計測

(3) 電波リモートセンシングデータ： 179MHz氷床探査用レーダ、270MHz地中探査レーダ、5チャンネルのマイクロ波放射計。その他、観測地域を広域に網羅するマイクロ波リモートセンシングの人工衛星データ（合成開口レーダデータ、マイクロ波放射計データ）。これら3項目に要約できる試料およびデータを元に、試料分析とデータ解析を実施し、平成20年～22年の3か年に研究目的に記述した研究を推進した。試料分析としては、南極の観測現場で実施可能なレベルの計測に加え、国内ラボで実施可能なレベルの高度な解析を推進した。具体的には、「①マイクロ波誘電率テンソルの連続計測、②結晶集合組織計測、③主要イオン分析、④ガンマ線透過法を用いた高分解能密度計測」である。データ分析としては、270MHz地中探査レーダの処理・編集作業、ならびに、マイクロ波放射計計測データの処理・編集作業を実施した。これらの記述・照合作業を実施し、氷床内部で発生するガス分別や含有空気量との関連を含め総合的な考察と論文化をするまでのタスクを本研究の実施範囲とした。

4. 研究成果

(1) 雪およびフィルンの層位形成の物理機構の解明

まず、南極内陸部トラバースによって得られた資試料とデータ用い、南極氷床の内陸部における、雪およびフィルンの層位形成の物理機構の解明をはかった。この研究成果は、成果リストにある発表論文 *Fujita, S. et al.* (2009)にとりまとめた。南極の観測現場において得られたデータとして、南極の夏期に積雪の変態が顕著に進行することがあきらかになった。この事実を、かねて南極浅層コアで得ていた物理的層構造のデータとあわせて解析し、南極ドームふじ基地で採取された氷床コアの空気組成に過去数十万の南極の日射強度が記録されるメカニズムを解明した。氷床コアを用いた気候変動史の研究では、氷の年代を正確に決める必要がある。南極地域の日射強度の変遷は、太陽と地球の天文学的な軌道計算によりわかることから、空気組成のうちの「酸素・窒素比率」のデータをこれと比較することにより、年代を決定してきた。しかし、なぜ日射強度が酸素・窒素比率に影響をあたえたのかが未解明だった。

研究グループが南極の雪の微細層構造を先端技術群を用いて調べた結果、夏に強い日射を受けた雪の層ほど硬くなり、より長い時間をかけて氷に変化することを見いだした。そして、時間の長さが氷床コア中の空気組成に影響を与えていることを説明した。本研究は、過去の気候変動の発生年代やタイミングの研究を進展させる基盤となる。

(2) 南極内陸部の雪の誘電率の解明

次に、南極氷床表層部に対する電波リモートセンシング手法を研究した。連携研究者の杉山を中心として、成果リストにある発表論文 *Sugiyama, S. et al. (2010)* に以下のような研究をまとめた。南極大陸氷床上の 2800km 長の測線に沿って、約 50km 毎に 1m 深の積雪ピットを作成し、そのなかの層位をスノーフォークと呼ぶ誘電率測定装置で計測した。スノーフォークとは、平行線を用いた共振器である。注意深く校正をした 2000 以上の計測を実施し、その大部分は南極の内陸部で実施したものである。誘電率 ϵ' は、従来の研究で判明しているとおり雪の密度の関数として決定できる。しかし、その値は従来知られた値よりも有意に小さい。誘電混合体理論に照らせば、今回の研究で得られた小さめの誘電率 ϵ' は、研究対象とした南極の地域の雪の構造の特徴に起因すると推定できる。本研究のデータは、南極内陸部の誘電率のデータは、低温下のしもざらめ発達に起因する雪粒子間の弱い結合に有意に影響されることを示唆した。

(3) ドームふじ表層 4 m の詳細物理層位

南極氷床は、年々降り積もる雪の積層構造体として、数十万年の地球気候変動史をカバーする。研究のなかで、年変動や季節変動のシグナルが氷床コアのなかに残っているか、あるいは、欠損や変質が起こっているかという点は常に問題になってきた。南極氷床の表層 4 m における、層構造の生成・変質・変形のプロセスを理解する目的で、フィルムの詳細な物理構造の調査を実施した。南極ドームふじ基地近傍において、4 m 深のピットを掘り、その内壁を利用して雪質の物理・化学的な特徴を調査したほか、積雪試料をブロック状にして内部の微小構造が維持されるように非破壊で日本に持ち帰り、その分析をすすめた。南極の現場の作業としては、密度計測 (30mm 分解能)、目視層位計測、マイクロ波誘電率 (30mm 分解能)、温度計測、各種化学分析用サンプリングを実施した。日本に持ち帰った試料の物理解析として、ガンマ線透過

法を用いた密度計測 (3.3mm 分解能)、白色光ラインスキャナーを用いた層位計測、近赤外光反射式ラインスキャンを用いた粒径計測等を実施した。

これら、mm スケールの高空間分解能での計測の結果として、(i) 高密度層と細粒の短周期の相関を再確認し、また、(ii) 結晶粒径は 2 m 深付近で極小をみせる事実を見だし、さらには、(iii) 顕著な高密度層を複数年層とみなせば年層カウント可能という結論を導いた。ただし、約 30m 深付近以深では密度クロスオーバーが発生することが (1) に記載した研究から既に判明しているため、今後の課題として塑性変形強度、結晶主軸方位、空隙構造の異方性の計測をすすめていくべきことを示した。

(4) 南極 Dronning Maud Land 地域の表面堆積の時空間分布

東南極 Dronning Maud Land (DML) 地域の堆積環境の時空間分布の理解を深めるため、日本・スウェーデン共同トラバース 2007/2008 において雪氷学的な調査を実施した。トラバースルートは、東南極の氷床表面の尾根に沿っており、ドームふじと EPICA DML の 2 つの掘削地点を含む。表面質量収支の分布を、氷床表面に掘った 4 m 深ピットサンプルや、表層コア試料や氷床探査レーダの中にある当年代面の調査から求めた。その結果、ホロシオン期の様々なタイムスケールでの表面質量収支にかかるデータセットができあがった。そうしたデータセットを、表面標高、表面傾斜、卓越風向や風速、氷の厚さ、表面マイクロ波放射の偏波率、それに、VHF 帯電磁波の氷床内部からの散乱強度を用いて解析をすすめた。新知見は以下のとおりである。広域分布の視点で見ると、堆積環境は、表面標高、大陸性 (海岸からの距離)、それに、氷床の尾根の位置と DML 域で反時計回りに分布する卓越風との相互作用に依存する。尾根からみて風上側と風下側では、対照的な表面質量収支がみられる。局地的なスケールでの空間分布は、本質的に基盤地形が表面地形に影響し、そして、積雪が堆積する確率に影響することにより決定づけられる。DML 域の東側では、20 世紀の中盤以降に堆積率が過去 722 年間の平均や過去 7900 年の平均堆積率にくらべ約 15% 高いことが明らかになった。こうした高い堆積率は東南極の内陸部の多数の地点で見いだされたものと一致し、地球温暖化との関わりについて今後の検討を必要とする。

(5) 南極 Dronning Maud Land 地域の氷床底面環境の空間分布

東南極の氷床下環境の広域空間分布を理解することを目的として、南極 Dronning Maud Land 域で実施をした氷床レーダ探査によるデータを解析した。解析手法としては、デシベルスケールで見た受信電力 P (dBm) と、伝搬長としての氷の厚さ H を解析することによって、底面が濡れ・温暖である状況と、乾燥・凍結状態にあることを判別した。内陸部においては、底面が圧力融解点に達し濡れ・温暖である状況が大部分であることが判明した。対照的に、沿岸域においては、乾燥・凍結状態が大部分であることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Makoto Igarashi, Yoichi Nakai, Yuko Motizuki, Kazuya Takahashi, Hideaki Motoyama, Kazuo Makishima, Dating of the Dome Fuji shallow ice core through volcanic eruption records. From 1260AD to 2001AD. Polar Science (投稿中) 査読有

② Sugiyama, S., Enomoto, H., Fujita, S., Fukui, K., Nakazawa, F. and Holmlund, P., Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese-Swedish Antarctic Expedition 2007/2008, Ann. Glaciol., 51 (55), 9-15, 2010. 査読有

③ Fujita, S., J. Okuyama, A. Hori, and T. Hondoh, Metamorphism of stratified firn at Dome Fuji, Antarctica: A mechanism for local insolation modulation of gas transport conditions during bubble close-off, Journal of Geophysical Research - Earth Surface, 114, F03023, doi:10.1029/2008JF001143, 2009 査読有

④ 三宅隆之、平林幹啓、植村 立、東久美子、本山秀明、極域氷床深層コアの化学成分分析用試料の汚染除去前処理方法の検討、南極資料、Vol. 53、No. 3、259-282.、2009 査読有

⑤ 亀田貴雄、本山秀明、藤田秀二、高橋修平、南極ドームふじにおける 1995 年から 2006 年の表面質量収支の特徴、南極資料、52、151-158.、2008 査読有

⑥ 高遠徳尚、浦口史寛、本山秀明、福井幸太

郎、田口真、市川隆、谷口友一郎、村田千紘、南極ドームふじ基地の天文観測サイト利用に関する予備調査 - 夏季接地乱流層の検出及び輸送中の振動記録-、南極資料、52、182-192、2008 査読有

[学会発表] (計 20 件)

① 藤田秀二、榎本浩之、福井幸太郎、藤田耕史、保科優、飯塚芳徳、中澤文男、杉山慎

ドームふじ表層 4 m の詳細物理層位- 氷床コアシグナル形成過程理解の深化を目指して-、日本地球惑星科学連合 2011 年大会 2011 年 5 月 22 日(日)~27 日(金) 幕張メッセ国際会議場、2011

② 藤田秀二、Holmlund, P.、Andersson, I.、Brown, I.、榎本浩之、藤井理行、藤田耕史、福井幸太郎、古川晶雄、Hansson, M.、原圭一郎、飯塚芳徳、伊村智、Ingvander, S.、Karlin, T.、本山秀明、中澤文男、Sjoberg, L.、杉山慎、Surdyk, S.、Strom, J.、東南極の 2 箇所氷床コア深層掘削点である EPICA-DML とドームふじの間の地域の雪氷環境の空間的分布、第 1 回極域科学シンポジウム「極域大気圏を通して探る地球規模環境変動」、2010(2010 年 12 月 国立極地研究所(東京))

③ スーディク スィルヴィアン、藤田秀二、人工衛星リモートセンシングデータにみる、JASE traverse ルート沿いの内陸表面環境、第 33 回極域気水圏シンポジウム、2010 (2010 年 11 月 30 日-12 月 1 日 国立極地研究所(東京))

④ 藤田秀二、榎本浩之、藤井理行、福井幸太郎、伊村智、本山秀明、中澤文男、杉山慎、Surdyk, S.、東南極ドームふじ近傍の氷床底面環境および氷床下湖の分布、第 33 回極域気水圏シンポジウム、2010 (2010 年 11 月 30 日-12 月 1 日 国立極地研究所(東京))

⑤ 藤田秀二・Holmlund, P.・Andersson, I.・Brown, I.・榎本浩之・藤井理行・藤田耕史・福井幸太郎・古川晶雄・Hansson, M.・原圭一郎・飯塚芳徳・伊村智・Ingvander, S.・Karlin, T.・本山秀明・中澤文男・Sjöberg, L.・杉山慎・Surdyk, S.・Ström, J.、日本スウェーデン共同内陸トラバース観測、国際極年 2007-2008 シンポジウム - 地球規模の変動現象と極域の役割 - 平成 22 年 3 月 1 日(月) 10:00 ~ 17:35 日本学術会議 講堂、2010

⑥ Fujita, S., J. Okuyama, A. Hori, and T. Hondoh, Metamorphism of stratified firn at

Dome Fuji, Antarctica: A mechanism for local insolation modulation of gas transport conditions during bubble close-off, American Geophysical Union, Fall Meeting, 14-18 December, San Francisco, 2009

⑦ Fujita, S., J. Okuyama, A. Hori, and T. Hondoh, Metamorphism of stratified firn at Dome Fuji, Antarctica: A mechanism for local insolation modulation of gas transport conditions during bubble close-off, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, 18 to 20 November 2009, 2009 National Institute of Polar Research, Tokyo

⑧ 藤田秀二、榎本浩之、亀田貴雄、本山秀明、杉山慎、南極ドームふじ地域の表面積雪密度の夏の変化、第32回極域気水圏シンポジウム 開催期日: 2009年11月17日(火) - 18日(水) 国立極地研究所、2009

⑨ 藤田秀二、奥山純一、堀彰、本堂武夫、ドームふじの積層構造をもったフィルンの変態: 気泡クローズオフの際にフィルン内のガス輸送が夏の地域日射により変調されるメカニズム、雪氷研究大会 2009・札幌 平成21年9月29日(火)~10月3日(土) 於北海道大学、2009

⑩ Shuji Fujita, Hiroyuki Enomoto, Takao Kameda, Hideaki Motoyama, and Shin Sugiyama, Changes of surface snow density in a summer in the Antarctic Dome Fuji region: along the traverse route of the Japanese-Swedish Antarctic Expedition 2007-2008, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GLACIOLOGY IN THE INTERNATIONAL POLAR YEAR, Newcastle, UK, 27-31 July 2009, 2009

⑪ 藤田秀二、奥山純一、堀彰、本堂武夫、夏の日射が南極氷床フィルン中のガス輸送を変調するメカニズム、日本地球惑星科学連合 2009年大会 (平成21年5月16-21日 幕張メッセ国際会議場) セッションハイライト講演、2009

⑫ 藤田秀二、Per Holmlund、日本・スウェーデン共同トラバースのルート沿いの、氷床深層探査レーダの観測初期結果、第31回極域気水圏シンポジウム (平成20年12月2-3日、国立極地研究所)、2008

⑬ 藤田秀二、日本・スウェーデン共同トラバース 2007/2008 実施概要報告 -日本チームによるS16~会合点区間の活動を中心にした報告-、第31回極域気水圏シンポジウム (平成20年12月2-3日、国立極地研究所)、2008

⑭ Shuji Fujita, Junichi Okuyama, Akira Hori and Takeo Hondoh, Metamorphism of stratified firn at Dome Fuji, Antarctica: A mechanism for local insolation modulation of gas transport conditions during bubble close-off, Quaternary Climate: from Pole to Pole, EPICA Open Science Conference, November, 2008 Ilciocco, Ital

⑮ 藤田秀二、榎本浩之、亀田貴雄、本山秀明、杉山慎、南極ドームふじ地域の氷床表面における夏期の高密度積雪層の形成、雪氷研究大会 (2008・東京) 2008.9.24-27、2008

⑯ 藤田秀二、宮本淳、東信彦、氷結晶方位・粒径の自動解析装置の、東南極内陸高原部で採取したフィルン試料の計測への応用、雪氷研究大会 (2008・東京) 2008.9.24-27、2008

⑰ Fujita, S., Enomoto, H., Kameda, T., Motoyama, H., Sugiyama, S., Changes of surface snow density in a summer in the Antarctic Dome Fuji region, SCAR/IASC IPY Open Science Conference, July 8th-11th 2008, St. Petersburg, Russia, Abstract Volume, 273-274., 2008

⑱ Shuji Fujita, Per Holmlund Hiroyuki Enomoto, Kotaro Fukui, Susanne Ingvander, Shin Sugiyama, Sylvaine Surdyk, Radio-glaciology studies in the Japanese-Swedish Antarctic Expedition (JASE) 2007-2008, INTERNATIONAL GLACIOLOGICAL SOCIETY, International Symposium on Radioglaciology and its Applications, Madrid, Spain, 9 - 13 June, 2008

⑲ Fujita, S., Mae, S., Effect of temperature on the dielectric properties of hexagonal ice at 30-40 GHz measured using an open resonator, INTERNATIONAL GLACIOLOGICAL SOCIETY, International Symposium on Radioglaciology and its Applications, Madrid, Spain, 9 - 13 June, 2008

⑳ 藤田秀二、日本スウェーデン共同トラバースの実施概要報告、国立極地研究所研究

集会「南極氷床の物理・化学・生物のフロンティア4」国立極地研究所平成20年3月17-19日、2008

〔図書〕(計1件)

①藤井理行、本山秀明(編)アイスコアー地球環境のタイムカプセル、成山堂書店、2011、268頁

分担執筆者：藤井理行、本山秀明、東久美子、飯塚芳徳、伊村智、植村立、川村賢二、神田啓史、河野美香、藤田秀二、堀内一穂、三澤啓司、望月優子

〔その他〕

表彰・受賞：藤田秀二 平成22年9月2010年日本雪氷学会学術賞受賞(「南極氷床内陸部の浅層層位の物理形成機構の研究」による)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 秀二 (FUJITA SHUJI)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：30250476

(2) 研究分担者

福井 幸太郎 (FUKUI KOTARO)
研究者番号：10450165
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
なお、分担は平成20年度のみ。平成22年度は連携研究者。

川村 賢二 (KAWAMURA KENJI)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：90431478

東 久美子 (AZUMA KUMIKO)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：80202620

SURDYK Sylviane
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：30532618
なお、研究分担は平成21、22年度のみ。

五十嵐 誠
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：50435624
なお、研究分担は平成22年度のみ。

(3) 連携研究者

榎本 浩之 (ENOMOTO HOROYUKI)
北見工業大学・工学部・教授
研究者番号：00213562

中澤 文男 (NAKAZAWA FUMIO)

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構・新領域融合研究センター・特任研究員
研究者番号：80432178

杉山 慎 (SUGIYAMA SHIN)
北海道大学・低温科学研究所・講師
研究者番号：20421951

宮本 淳 (MIYAMOTO ATSUSHI)
北海道大学・低温科学研究所 博士研究員
研究者番号：00374645

飯塚 芳徳 (IIZUKA YOSHINORI)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号：40370043
堀 彰 (HORI AKIRA)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号：60280856

(4) 研究協力者

西村 大輔 (NISHIMURA DAISUKE)
北海道大学大学院環境科学院・低温科学研究所大学院生