

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：62611

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12194

研究課題名(和文) アイスコア中の結晶主軸方位集中強度の連続・高分解能スキャン技術の開発

研究課題名(英文) Development of a technology to continuously scan cluster strength of c-axis of ice crystals within ice cores with high spatial resolutions

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、アイスコア中で起こるマイクロ波の複屈折の強度を連続計測する手法を開発し確立することであった。マイクロ波共振系を試作し、15-20ギガヘルツ前後の周波数で誘電率を評価した。75mm厚の氷試料の誘電率テンソルの計測に挑戦したところ、空間分解能30mmで計測に成功した。これは本研究の目的に照らして「ブレイクスルー」と呼べるレベルの計測の成功であった。これにより、極地氷床で積雪・フィルン・アイスコア中の変態や変形が発達する過程の理解を急速に進展することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this study was to develop and to accomplish a new method to measure strength of birefringence of microwave within ice cores continuously. I developed a system of open resonator of microwave, and evaluated dielectric permittivity of ice and ice cores at frequency range of 15 -20 GHz. I challenged to measure dielectric permittivity tensor of ice specimen with 75-mm thickness. This attempt was successful; I was able to measure it with a spatial resolution of ~30mm. In the light of the purpose of this study, it was truly a breakthrough. Because of accomplishment of this technology, we are now able to innovate understanding for processes of metamorphism and deformation of snow, firn and ice in polar ice sheets.

研究分野：環境学 環境動態解析

キーワード：氷 アイスコア フィルン 誘電率 誘電異方性 複屈折 マイクロ波 結晶主軸方位

1. 研究開始当初の背景

極地氷床で採取されたアイスコアの研究では、先端技術を用いた分析手法を開発し、気候環境変動や、氷床中でのシグナル形成メカニズムの解明を目指している。氷床のなかでは、積雪が、フィルンと呼ばれる状態を経て氷に変化する。その変化の過程は、気候情報がアイスコアシグナルとして記録されていく過程である。これまで、研究代表者は、マイクロ波帯でのアイスコアの誘電率テンソルの計測を試み、基礎と応用両面でフィルンの構造発達への理解を深めてきた。氷と空隙のなす幾何構造の異方性の発達や変形の履歴が、マイクロ波誘電率の異方性、言い換えると、試料を伝搬する電磁波の複屈折の強度を介して理解できる。

南極氷床アイスコア研究グループは、南極内陸部のドームふじにおいて深層アイスコア掘削を行い、過去 72 万年間の気候変動を記録するアイスコアを採取した。アイスコアの結晶主軸方位分布を深度毎に詳細に把握することは、氷の変態や変形の履歴の理解や年代決定に不可欠であるが、既存の技術では、高分解能の連続計測は困難であった。そうした技術が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究は、極地のアイスコア中で結晶主軸方位分布等の結果として起こる複屈折の強度を連続計測するため、電波伝搬手法を用いた低コスト・非破壊・高空間分解能の簡便な独自計測手法を世界ではじめて構築することを目的とした。この手法を、南極内陸部のアイスコアに応用することにより、極地氷床で積雪・フィルン・アイスコア中の変態や変形が発達する過程の理解の進展をはかった。そして、今後のアイスコア解析の標準手法としての確立をめざした。

3. 研究の方法

2年間で研究を実施する計画とし、初年度は「透過波法」を、2年目は「反射波法」を中心に、構築および評価実験を実施することとした。計測系は室温の実験室で構築後、低温実験室に搬入し、雪・フィルン・アイスコアに対し計測基礎データを蓄積する。試料送りなしの単発計測で評価を実施した後、試料送りステージとあわせた構成をし、スキャナとしての計測系を構築することとした。

実際の計測に於いては、まず 15-20 ギガヘルツ帯で共振信号を起こすマイクロ波共振器系を試作した。この計測系は、初期段階では比較的薄い試料(10-20mm 厚)に応用する計画であった。実際の計測で様々な試みをおこなうなかで、この共振器系を用いて 75mm 厚の氷試料の誘電率テンソルの計測に挑戦したところ、誘電率の評価に十分な強度の共振信号を取得できた。このため、研究方法としてはこのマイクロ波共振器に集中した計測をおこなった。「共振器法」は、当初計画し

た「透過波法」と「反射波法」の特徴を併せ持ち、この共振器法が研究目的達成のためには最善の方法であると判断した。

4. 研究成果

試料の誘電率の評価を目的としたマイクロ波共振系を先行して試作し、比較的薄い資試料(10-20cm 厚)について、15-20 ギガヘルツ前後の周波数で誘電率を評価する体制を初年度に整えた。この性能評価と応用計測を、南極氷床やグリーンランド氷床で採取されたアイスコアを用いて実施した。当初計画に沿い、ルーチ的な計測作業は実験補助者を雇用して実施した。装置系をアSEMBルし、機器制御プログラムを作成した。具体的には、マイクロ波信号を掃引し、その掃引によって出現する共振信号を検知・記録するプログラムを作成した。また、共振信号から複屈折強度を算出するプログラムを書き下ろす作業をおこなった。試作したマイクロ波共振器系は、15-20 ギガヘルツ帯で共振信号を起こす仕様のものである。初期段階では比較的薄い試料(10-20mm 厚)に応用するものであった。この共振器系を用いて 75mm 厚の氷試料の誘電率テンソルの計測に挑戦したところ、誘電率の評価に十分な強度の共振信号を取得できた。これは本研究の目的に照らして「ブレークスルー」と呼べるレベルの計測の成功であった。その後、南極氷床やグリーンランド氷床で採取されたアイスコア試料を多数用いての計測を実施した。共振器系で信号が検知できた理由を以下のように考察した。発信信号が 15-20 ギガヘルツ帯であり、当初検討した 30-40 ギガヘルツ帯よりも低かった。これにより、定倍器を介さずに信号発生が可能になり、計測に使用できる信号強度が上がった。同じ理由により、氷の内部でのエネルギー吸収量が小さかった。当初計画段階で挙げた反射法、透過法と比較し、マイクロ波共振法は計測の安定性や信頼性の面で圧倒的に有利といえる。共振法の成功の段階で、計測手法としては共振法ひとつに絞り込んだ。

本研究の終盤では、アイスコアを用いた計測データ量産体制の整備として共振器を更に 1 台製作し、計測能力を倍増した。南極ドームふじ基地等で採取されたアイスコアのマイクロ波誘電率テンソルの計測に応用し、空間分解能 30mm で結晶主軸方位分布の変動に起因する計測値の変動を捉える計測に成功した。結果として、マイクロ波伝搬手法を用いた低コスト・非破壊・高空間分解能の簡便な独自計測手法を世界ではじめて構築できたと宣言できる。これにより、極地氷床で積雪・フィルン・アイスコア中の変態や変形が発達する過程の理解の進展を革新することが可能になった。本報告を執筆する段階で、南極ドームふじアイスコアに対する連続計測を約 400m 分実施した。今後手法および計測結果の出版を重ねてゆく。

なお、本研究に関する研究成果としては、直接の計測結果にかかる成果とともに、誘電計測使用した試料の種々の性質を明らかにした文献や発表を併せて示す。

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10件)

(1) Dome Fuji Ice Core Project: K. Kawamura, A. Abe-Ouchi, H. Motoyama, Y. Ageta, S. Aoki, N. Azuma, Y. Fujii, K. Fujita, S. Fujita, K. Fukui, T. Furukawa, A. Furusaki, K. Goto-Azuma, R. Greve, M. Hirabayashi, T. Hondoh, A. Hori, S. Horikawa, K. Horiuchi, M. Igarashi, Y. Iizuka, T. Kameda, H. Kanda, M. Kohno, T. Kuramoto, Y. Matsushi, M. Miyahara, T. Miyake, A. Miyamoto, Y. Nagashima, Y. Nakayama, T. Nakazawa, F. Nakazawa, F. Nishio, I. Obinata, R. Ohgaito, A. Oka, J. Okuno, J. Okuyama, I. Oyabu, F. Parrenin, F. Pattyn, F. Saito, T. Saito, T. Saito, T. Sakurai, K. Sasa, H. Seddik, Y. Shibata, K. Shinbori, K. Suzuki, T. Suzuki, A. Takahashi, K. Takahashi, S. Takahashi, M. Takata, Y. Tanaka, R. Uemura, G. Watanabe, O. Watanabe, T. Yamasaki, K. Yokoyama, M. Yoshimori, T. Yoshimoto 2017. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Sci. Adv.* 3(e1600446).

(2) Yoshinori Iizuka, Atsushi Miyamoto, Akira Hori, Sumito Matoba, Ryoto Furukawa, Takeshi Saito, Shuji Fujita, Motohiro Hirabayashi, Satoru Yamaguchi, Koji Fujita, and Nozomu Takeuchi 2017. A firn densification process in the high accumulation dome of southeastern Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 49(1) 13-27.

(3) F. Parrenin, S. Fujita, A. Abe-Ouchi, K. Kawamura, V. Masson-Delmotte, H. Motoyama, F. Saito, M. Severi, B. Stenni, R. Uemura, E. W. Wolff. 2016. Climate dependent contrast in surface mass balance in East Antarctica over the past 216 ka., *Journal of Glaciology* 62(236), 1037-1048.

(4) Ohno, H., Iizuka, Y., Hori, A., Miyamoto, A., Hirabayashi, M., Miyake, T., Kuramoto, T., Fujita, S., Segawa, T., Uemura, R., Sakurai, T., Suzuki, T., and Motoyama, H. 2016. Physicochemical properties of bottom ice from Dome Fuji, inland East Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*,

121(7), 1230-1250.

(5) Touzeau, A., Landais, A., Stenni, B., Uemura, R., Fukui, K., Fujita, S., Guilbaud, S., Ekaykin, A., Casado, M., Barkan, E., Luz, B., Magand, O., Teste, G., Le Meur, E., Baroni, M., Savarino, J., Bourgeois, I., and Risi, C. 2016. Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters, *The Cryosphere* 10, 837-852

(6) Kazuho Horiuchi, Kanae Kamata, Shun Maejima, Sho Sasaki, Nobuyoshi Sasaki, Toshitsugu Yamazaki, Shuji Fujita, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki 2016. Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion, *Earth and Planetary Science Letters* 445 105-114.

(7) Shuji Fujita, Kumiko Goto-Azuma, Motohiro Hirabayashi, Akira Hori, Yoshinori Iizuka, Yuko Motizuki, Hideaki Motoyama and Kazuya Takahashi 2016, Densification of layered firn in the ice sheet at Dome Fuji, Antarctica, *Journal of Glaciology* 62(231).

(8) Ingvander, S., P. Jansson, I. A. Brown, S. Fujita, S. Sugiyama, S. Surdyk, H. Enomoto, M. Hansson and P. Holmlund 2016, Snow particle sizes and their distributions in Dronning Maud Land, Antarctica, at sample, local and regional scales, *Antarctic Science* 28(2) 636-645.

(9) S. Fujita, F. Parrenin, M. Severi, H. Motoyama, E. Wolff, 2015. Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr. *Climate of the Past* 11 1395-1416.

(10) Svensson, A., Fujita, S., Bigler, M., Braun, M., Dallmayr, R., Gkinis, V., Goto-Azuma, K., Hirabayashi, M., Kawamura, K., Kipfstuhl, S., Kjaer, H. A., Popp, T., Simonsen, M., Steffensen, J. P., Vallenga, P., and Vinther, B. M. 2015. On the occurrence of annual layers in Dome Fuji ice core early holocene ice, *Climate of the Past*, 11, 1127-1137.

〔学会発表〕(計24件)

(1) 過去 21.6 万年間の、東南極における気候に依存した表面質量収支のコントラスト *藤田 秀二 1,2, Parrenin Frédéric3,4、阿部 彩子 5,6、川村 賢二 1,2、MASSON-DELMOTTE V.7、本山 秀明 1,2、齋藤 冬樹 6、SEVERI M.8、

STENNI B.9、植村 立 10、Wolff E.W.11 (1. 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、2. 総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻、3. CNRS, LGGE, F-38041 Grenoble, France、4. University Grenoble Alpes, LGGE, F-38041 Grenoble, France、5. 東京大学 大気海洋研究所、6. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、7. Laboratoire des Sciences du Climat et de l' Environnement, Institut Pierre Simon Laplace, UMR CEA-CNRS-UVSQ-UPS 8212, Gif-sur-Yvette, France、8. Department of Chemistry, University of Florence, Florence, Italy、9. Department of Environmental Sciences, Informatics and Statistics, Ca' Foscari University Venice, 30123 Venice, Italy、10. 琉球大学 理学部 海洋自然科学科 化学系、11. Department of Earth Sciences, University of Cambridge, UK)
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 2017年5月24日

(2) 東南極氷床「ドームふじ」頂部位置の氷期・間氷期の変遷に応じた移動について
*藤田 秀二 1,2、福井 幸太郎 3、本山 秀明 1,2、中澤 文男 1,2 (1. 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、2. 総合研究大学院大学 複合科学研究科 極域科学専攻、3. 立山砂防カルデラ博物館)
JpGU-AGU Joint Meeting 2017 2017年5月23日

(3) 掘削候補地 最終氷期 LGM におけるドームふじ頂上の安定位置
藤田 秀二
国立極地研究所 共同研究集会「南極ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究」 2017年3月29日

(4) 厚いアイスコアを用いた C 軸集中度の連続計測手法
藤田 秀二
国立極地研究所 共同研究集会「南極ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究」 2017年3月29日

(5) Raymond Arch of Dome Fuji, East Antarctica -Dome summit of the ice sheet in the LGM period was found by radar methods -
藤田 秀二
国立極地研究所 共同研究集会「グリーンランド氷床の変動と気候・環境変動の関わりに関する研究集会」 2017年3月9日

(6) グリーンランド S E コアのフィルムの特性
藤田 秀二
低温研共同研究集会 「グリーンランド氷床

の質量変化と全球気候変動への影響」 2016年12月19日

(7) Migration of Dome Fuji summit position in glacial and interglacial periods - an approach to detect principal axes of strain within the ice sheet using a radar sounding method -
Shuji Fujita, Ice Core Research Center (ICRC), National Institute of Polar Research
The Seventh Symposium on Polar Science 2016年11月29日

(8) Metamorphism of layered firn at Dome Fuji, Antarctica: Evolution of relations between Near-infrared reflectivity and the other textural/chemical properties
Shuji Fujita(NIPR, SOKEIDAI), Kumiko Goto-Azuma(NIPR, SOKEIDAI), Hiroyuki Enomoto(NIPR, SOKEIDAI, KIT), Kotaro Fukui(NIPR), Motohiro Hirabayashi(NIPR), Akira Hori(KIT), Yu Hoshina(Nagoya U.), Yoshinori Iizuka(ILTS), Yuko Motizuki(RIKEN), Hideaki Motoyama(NIPR, SOKEIDAI), Fumio Nakazawa(NIPR), Shin Sugiyama(ILTS), Sylviane Surdyk(NIPR), Kazuya Takahashi(RIKEN)
The Seventh Symposium on Polar Science 2016年11月29日

(9) Evolution processes of the firn structure in polar ice sheets based on analyses of dielectric anisotropy - latest results of analyses for Greenland SE core as a central topic -
Shuji Fujita(NIPR, SOKEIDAI), Yoshinori Iizuka(ILTS), Sumito Matoba(ILTS), Atsushi Miyamoto(Hokkaido Univ.) and Takeshi Saito(ILTS)
The Seventh Symposium on Polar Science 2016年11月29日

(10) 誘電異方性解析からみえた、極域氷床のフィルム構造の発達過程 ~グリーンランド SE コアの最新の解析結果を中心に~
藤田秀二(国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 飯塚芳徳(北海道大学低温科学研究所), 的場澄人(北海道大学低温科学研究所), 宮本淳(北海道大学高等教育推進機構), 斎藤健(北海道大学低温科学研究所)
雪氷研究大会(2016・名古屋) 2016年10月1日

(11) Metamorphism of layered firn at Dome Fuji, Antarctica: Evolution of relations between Near-infrared reflectivity and the other textural/chemical properties
Shuji Fujita, Kumiko Goto-Azuma, Hiroyuki Enomoto, Kotaro Fukui, Motohiro

Hirabayashi, Akira Hori, Yu Hoshina, Yoshinori Iizuka, Yuko Motizuki, Hideaki Motoyama, Fumio Nakazawa, Shin Sugiyama, Sylviane Surdyk, Kazuya Takahashi
SCAR 2016 Open Science Conference (OSC)
2016年8月25日

(12) Glaciological conditions in Dronning Maud Land, East Antarctica
Shuji Fujita, Kumiko Goto - Azuma, Kenji Kawamura and Hideaki Motoyama
Japan-Norway Arctic Science and Innovation Week 2016 2016年6月2日

(13) 過去21万6千年間の東南極における、気候に依存した質量収支のコントラスト
*藤田 秀二 1,2、Frederic Parrenin^{3,4}、阿部 彩子^{5,6}、川村 賢二^{1,2}、Masson-Delmotte Valerie⁷、本山 秀明^{1,2}、齋藤 冬樹⁵、Severi Mirko⁸、Stenni Barbara⁹、植村 立¹⁰、Wolff Eric¹¹ (1.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、2.総合研究大学院 大学複合科学研究科 極域科学専攻、3.CNRS, LGGE, Grenoble, France、4.Univ. Grenoble Alpes, Grenoble, France、5.独立行政法人海洋研究開発機構、6.東京大学 大気海洋研究所、7.Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, France、8.University of Florence, Italy、9.Ca' Foscari University Venice, Italy、10.琉球大学、11.University of Cambridge, UK)
日本地球惑星科学連合 2016年大会 2016年5月25日

(14) 南極ドームふじのでのフィルム層構造の変態：近赤外光の反射率と他の結晶組織構造や化学特性との関係の発達
*藤田 秀二 1,2、東 久美子^{1,2}、榎本 浩之^{1,2,3}、福井 幸太郎^{1,7}、平林 幹啓¹、堀 彰³、保科 優^{4,8}、飯塚 芳徳⁵、望月 優子⁶、本山 秀明^{1,2}、中澤 文男¹、杉山 慎⁵、スーディク スィルヴィアン¹、高橋 和也⁶ (1.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、2.総合研究大学院 大学複合科学研究科 極域科学専攻、3.北見工業大学、4.名古屋大学、5.北海道大学低温科学研究科、6.理研、7.現在：立山砂防カルデラ博物館、8.現在：地球環境研究所 地球環境研究センタ 2016年5月25日

(15) 南極内陸ドームふじ次期氷床深層アイスコア掘削計画での「最古の氷」掘削地点の選定
*藤田 秀二 1,2、川村 賢二^{1,2}、東 久美子^{1,2}、本山 秀明^{1,2}、ドームふじ アイスコアコンソーシアム³ (1.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、2.総合研究大学院 複合科学研究科 極域科学専攻、3.ドームふじアイスコアコンソ -

シアム)
日本地球惑星科学連合 2016年大会 2016年5月25日

(16) 南極内陸ドームふじ次期氷床深層アイスコア掘削計画での「最古の氷」掘削地点の選定
藤田 秀二
研究集会「両極域における第四紀の気候・環境変動」 2016年3月30日

(17) 南極ドームふじのでのフィルム層構造の変態：近赤外光の反射率と他の結晶組織構造や化学特性との関係の発達
藤田 秀二
研究集会「両極域における第四紀の気候・環境変動」 2016年3月30日

(18) Glaciological conditions of the ice sheet at Dome Fuji, Dronning Maud Land, East Antarctica
Shuji Fujita, Kumiko Goto - Azuma, Kenji Kawamura and Hideaki Motoyama
The International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) Second Open Science Conference 2016年3月11日

(19) Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr
*S. Fujita (NIPR, SOKENDAI), F. Parrenin (CNRS, LGGE, Univ. of Alpes, France), M. Severi (University of Florence, Italy), H. Motoyama (NIPE, SOKENDAI) and E. Wolff (University of Cambridge, UK)
The International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) Second Open Science Conference 2016年3月7日

(20) Densification of layered firn of the ice sheet at Dome Fuji, Antarctica
*Shuji. Fujita (NIPR, SOKENDAI), Kumiko Goto-Azuma (NIPR, SOKENDAI), Motohiro Hirabayashi (NIPR), Akira Hori (Kitami Institute of Technology), Yoshinori Iizuka (ILTS, Hokkaido Univ.), Yuko Motizuki (RIKEN), Hideaki Motoyama (NIPR, SOKENDAI) and Kazuya Takahashi (RIKEN)
The International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) Second Open Science Conference 2016年3月7日

(21) Recent progress in understanding densification phenomena of polar firn: textural effects and some soluble impurities control creep deformation
Shuji Fujita (NIPR / SOKENDAI, Tokyo)
ILTS International Symposium on Low Temperature Science 2015年12月1日

(22) Phasing between Deuterium records at Dome Fuji and Dome C in Antarctica over the past 216 kyr

*S. Fujita (NIPR, SOKENDAI), F. Parrenin (CNRS, LGGE, Univ. of Alpes, France), M. Severi (University of Florence, Italy), H. Motoyama (NIPE, SOKENDAI) and E. Wolff (University of Cambridge, UK)

第6回極域科学シンポジウム 2015年11月17日

(23) Densification of layered firn of the ice sheet at Dome Fuji, Antarctica

*Shuji. Fujita (NIPR, SOKENDAI), Kumiko Goto-Azuma (NIPR, SOKENDAI), Motohiro Hirabayashi (NIPR), Akira Horii (Kitami Institute of Technology), Yoshinori Iizuka (ILTS, Hokkaido Univ.), Yuko Motizuki (RIKEN), Hideaki Motoyama (NIPR, SOKENDAI) and Kazuya Takahashi (RIKEN)

第6回極域科学シンポジウム 2015年11月16日

(24) Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr

*S. Fujita (NIPR, SOKENDAI), F. Parrenin (CNRS, LGGE, Univ. of Alpes, France), M. Severi (University of Florence, Italy), H. Motoyama (NIPE, SOKENDAI) and E. Wolff (University of Cambridge, UK)

第6回極域科学シンポジウム 2015年11月16日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

該当なし。

〔その他〕

ホームページ等

該当なし。

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

該当なし。

(3)連携研究者

該当なし。

(4)研究協力者

該当なし。