

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02957

研究課題名(和文) 不純物含有人工氷とグリーンランド EGRIP アイスコア中の転位の定量評価技術の構築

研究課題名(英文) Development of quantitative technology of dislocations in artificial ice containing microparticles and Greenland EGRIP ice core

研究代表者

東 信彦 (Nobuhiko, Azuma)

長岡技術科学大学・工学研究科・学長

研究者番号：70182996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：海面上昇を左右する極地氷床の流動を氷の塑性変形で捉え、氷床中に見られる固体不純物がこの塑性変形に及ぼす影響を転位を介した塑性流動の観点で解析を試みた。この目的のため、市販のX線回折装置を低温で測定できるように改造し、X線測定用の試料ステージもあわせて作製することで、クリープ変形にともなう転位密度の変化を測定できる環境を整えた。転位密度はmodified Williamson-Hallおよびmodified Warren-Averbach法を組み合わせで評価し、不純物がクリープ変形中に転位のパイルアップを促進し、これにより再結晶が優先的に起き変形が速く進むことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷の変形が転位を介した塑性変形により生じることは古くから知られていたが、クリープ変形にともなう転位密度を測定した例は報告されていない。我々は氷床を模擬した人工氷の作成技術を確認しており、更にシリカを不純物とみなした不純物氷も人工氷として作成する技術も確立している。氷は六方構造を基本とした多結晶組織を有し、極地の降雪がやがてその自重により氷へと変化し、氷床を作る。氷床には鉱物、塩、生物起源の不純物も含有されており、比較的大きな不純物の影響はこれまで知られていたが、我々は500nm以下の微細な不純物が氷床流動に及ぼす影響をin-houseの加速試験装置を用いて評価し、その役割を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The sea level rise accelerates due to plastic deformation of ice sheets in polar regions, and hence we have evaluated such rheology of ice, which contains solid impurities, in view of dislocation assisted deformations. For this purpose, we developed an X-ray diffraction apparatus in conjunction with its stage holder at low temperature, and then the dislocation densities in crept ice samples containing an impurity are measured. Based on modified Williamson-Hall and Warren-Averbach methods are simultaneously used for the measurements of the dislocation densities, and then it is found that the impurities promotes pile-ups of dislocations, leading to recrystallization during the creep; consequently, a rapid deformation occurs in the impurity containing ice sample.

研究分野：雪氷物理

キーワード：氷床 海面上昇 クリープ レオロジー 人工氷 転位 不純物 X線

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による極地氷床氷の海への流出で、今世紀末までに約 30cm 海面が上昇すると IPCC 第 4 次報告書で予測され、2013 年に発表された第 5 次報告書では、「海面上昇が加速している」としている。現在の観測では予想以上に急な速度でグリーンランドや西南極氷床の流出が進んでおり、最新の研究では海面上昇は今世紀末には 1m に達すると推定されている (Pfeffer et al., 2008, Science)。温暖化による氷床流出加速の要因として氷河底面での融解や氷床表面融解水の底面への流下による潤滑が議論されているが、氷の流動を律速するのは氷の塑性変形であり、氷流の挙動を予測するには氷床氷のレオロジーの理解が不可欠である。

氷床中の氷の歪速度は 10^{-13} ~ 10^{-10} s⁻¹ で変形機構は「転位クリープ」および「拡散クリープ」と考えられている。氷の変形に関するこれまでの多くの実験的および理論的研究から、氷床中の氷の流動はほとんどが転位すべりによって起こり、拡散クリープは無視できるとされてきた。その結果、ひずみ速度が応力の 3 乗に比例する「Glen の流動則」が広く受け入れられ、氷床のモデリングや流動シミュレーションに用いられて来た。近年、Goldsby および Kohlstedt (1997, JGR) は氷床中では粒界拡散/粒界すべりが氷の塑性変形に大きく寄与することを実験的に示し、それ以降、氷の粒界拡散の理解が重要な課題となっている。さらに氷床氷中にはエアロゾルや気体成分が不純物として含まれており、これらの氷のレオロジーに対する影響は良くわかっていない。最近の研究では、氷床浅部での圧密速度とダスト或いは Ca イオン含有量の間に強い正の相関が発見されている (Horhold et al., 2012, EPSL, Freitag et al., 2013, JG)。氷中に微粒子として存在する Ca 塩あるいはそれとともに変動する何らかの含有物が氷を変形しやすくしていると提唱され、そのメカニズムの解明が喫緊の課題となっている。

我々はこれまでこれら氷床内部での物理化学的プロセス解明に焦点を絞った氷床コア解析や解析手法/装置開発、コア氷を用いた実験的研究を行ってきた。そして南極やグリーンランドで掘削された氷床コアの詳細かつ膨大な結晶組織解析を実施し、氷床の表面から深部にわたる全域で動的再結晶が起きていること、これまで考えられてきた氷床浅部での結晶粒の成長は normal grain growth ではなくひずみ誘起粒界移動 (SIBM) による動的結晶粒成長であることを明らかにした。さらに微小気泡や不純物を全く含まない多結晶氷作成法を開発し、その人工多結晶氷と氷床コア試料を用いて結晶粒成長実験を行い、氷の粒界移動速度とこれより推定される粒界拡散係数はこれまで考えられていたものより 2-3 桁大きいこと、氷床中では気泡や含有微粒子により結晶粒成長が阻止されることを明らかにした。

このように粒界拡散がこれまでの予想よりかなり速く起こることは、氷床氷の変形機構やフィルムの圧密機構を理解するうえで極めて重要である。特に、氷床氷のレオロジーに対する超微粒子 (本研究では直径 500nm 以下と定義) の影響は良くわかっていない。我々が行った SiO₂ (シリカ) 粒子を含む人工多結晶氷の結晶粒成長実験と理論的研究から、粒子径が約 500nm より小さい微粒子が結晶粒の成長を阻止する効果が大きいこと、そして、それら微粒子の高濃度層 (高濃度不純物含有細粒層 (異常流動層)) では氷結晶粒径が小さいため、粒界拡散が活発で、塑性変形が促進されることを提起した。氷床中の微小粒子不純物は大気中のエアロゾルが降雪やドライフォールアウトとして氷床中に取り込まれるが、その種類は鉱物微粒子、塩微粒子や生物起源微粒子など様々である。微粒子と氷との界面の状態によって微粒子による粒界移動抑止効果が異なると考えられる。また、氷晶核は 500nm 以下のものがほとんどであると考えられる。一方、微粒子が転位発生源として働くことや、再結晶核として働き動的再結晶を活性化することによる塑性変形の促進も考えられる。

2. 研究の目的

氷床コア解析でこれまで測定可能であった微粒子は光学顕微鏡の分解能により約 500nm 以上と制限され、500nm 以下の超微粒子はどの程度含まれるのか、どこに存在するのか全く不明である。そこで、我々は氷床コア試料中の陸起源鉱物微粒子、塩微粒子および生物起源微粒子を模擬した超微粒子 (d: 直径、 $d \leq 500$ nm) を人工多結晶氷に分散させ、氷の塑性に及ぼす影響を転位密度の解析を通して明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、氷床を模擬した人工氷を用いて実験室レベルでクリープ変形を -20°C、2MPa で実施し、クリープ曲線を取得した。クリープ温度は特に氷河、棚氷の流失が深刻なグリーンランド氷床を模擬し、応力は実験室レベルの加速試験を行う目的で選定した。

(2) 同時に氷試料中の転位密度を測定するため、市販の X 線回折 (XRD) 装置を改良し、-30-0 °C の温度範囲で測定可能な冷却系、試料ステージ、試料ホルダーを開発した。得られた X 線回折データに対し、modified Williamson-Hall (WH) と Warren-Averbach (WA) プロットを用いて転位密度を測定し (Ungár et al., 1998, Acta Mater.)、クリープ曲線から得られるひずみとの関係を定量評価した。

4. 研究成果

(1) 異常流動層を模擬する目的で直径 300nm のシリカを選定し、これを人工氷中に分散することを試みた。超純水中にシリカを混合して攪拌し、これを液体窒素中に噴霧することで粉氷を作成した。得られた粉氷を採取後、分級し、710 μm 以下の粉氷を使用した。これを圧密用の金型に充填させ、-10°C で 1h 焼結を行った。これにより直径 33mm、高さ 65mm の圧密氷を得た。この圧密氷を旋盤加工し、直径 15mm、高さ 30mm のクリープ試験片を旋削した。荷重が均等にかかるように試験片の上面および下面の平行が保たれるよう平行だしを行った。比較のため、不純物を含まない純氷についても同様に圧密氷を作成し、クリープ試験片を加工した。



図1 クリープ試験機

(2) クリープ試験を実施するため、クリープ試験機を作製した (図 1)。クリープ試験は 1 軸圧縮試験装置とし、押し棒上部におもりを乗せることで荷重を加えた。変位はデジタル変位計を用いて測定した。試験中の温度変化と氷の昇華を抑えるために、クリープ試験片は押し棒とともにシリコンオイルに浸した状態でクリープ試験を行った。試験機はフリーザー内に設置した。得られた変位-時間曲線を真ひずみ-時間曲線に変換し、図 2 に示すようなクリープ曲線を得た。典型

的なクリープ曲線が得られており、1 次クリープ領域で曲線の傾きが大きく変化 (ひずみが低下) した後、2 次クリープ領域に入りほぼ一定のクリープ速度を示している。面白いことに、シリカを含有した氷は、1 次クリープ領域から 2 次クリープ領域に遷移する過程で、純氷試料に比べてひずみの低下が起きない。このため、シリカを含有させることで、氷試料が軟らかくなっていることが理解できる。この挙動は先述の異常流動層でも見られる現象で、シリカが超微粒子としてクリープ変形に特有の影響を与えていることが理解できる。逆に、シリカを含まない純氷は、クリープ変形が抑制されているように見えることは特筆に値する。

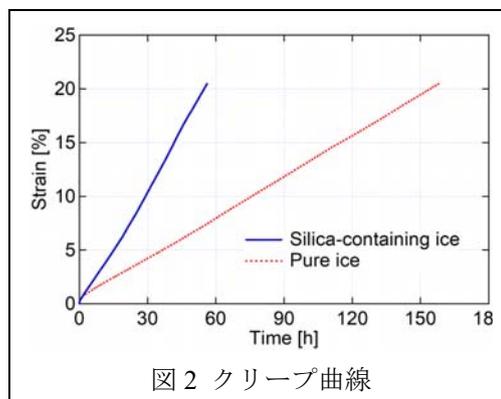


図2 クリープ曲線

(3) 氷試料用 X 線回折装置を開発するため、Rigaku 製の Ultima IV を導入した。デフォルトで備え付けられていたステージを外し、熱伝導率が優れる Cu 板で試料ホルダーを作製した。試料冷却には、N₂ ガスを利用し、液体窒素中を時間をかけて N₂ ガスが通過するよう Cu パイプをコイル状に巻き付けてそれを液体窒素のデュアー内に浸漬させ、十分に N₂ ガスが冷えるようにした。用いたガス流量は 0.01m³/min としして制御した。このガスを Al 合金製の試料ステージに誘導し、ガスが充満する空間を旋削し (図 3)、その直上に Cu 製のステージが取り付けられる機構を採用した。試料ホルダーは X 線が通過しない領域をテフロン製断熱材で覆い外部からの水蒸気の侵入を防ぎ、更にそのテフロン部にカプトンテープを貼り付けることで、低温室で加工した氷試料に直接霜が付くことを防ぐ対策を施した。なおカプトンテープは X 線回折測定時に、広角側のピークにほとんど影響を及ぼさない。図 3 では、使用した材料の熱伝導率も示している。この冷却ステージを x、y、z 方向に可変のステージに取り付け、z 方向のステージ位置を調整するため、実体顕微鏡を取り付けて試料高さも精密に調整できる機構とした。試料表面の霜は乾燥 N₂ ガスをテフロンテープに吹き付けることで除去した。この機構により、-30.0°C の温度範囲で XRD 測定を可能とした。

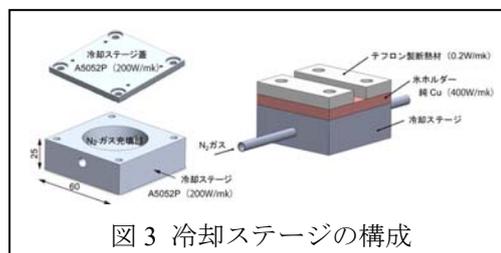


図3 冷却ステージの構成

(4) まず、クリープ変形にともなう組織変化を光学顕微鏡を用いて観察した (図 4)。クリープ前の初期組織では、概ね等軸状の結晶粒が見られ、粒界の存在から多結晶であることがわかる。シリカ含有氷では、既に平均結晶粒径が小さくなっており、実測値もシリカ含有氷の方が小さくなることを示した。クリープひずみが 10%に達すると、結晶粒内には亜粒界が粒界近傍に形成される様子が確認され、更に亜粒界から傾斜角が更に増した大傾角粒界で取り囲まれる再結晶も同時に起きていることを確認した。通常クリープ変形中への塑性変形の担い手である転位が底

面すべりを起こして移動し、試料内のひずみが増加する。その転位は一般的に結晶粒界に堆積してパイルアップを起こし、転位はそれ以上動けなくなる。クリープ変形は塑性変形のみならず、同時に温度も上昇しているため、転位の回復現象が促進され、転位の再配列が起こると考えられている。その証拠に、粒界近傍には亜粒界が生成していることが認められる。更に転位の回復が進むと、小傾角粒界（一般的に隣り合う結晶の角度差 θ が $5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ の粒界）が大傾角化（ $\theta \geq 15^\circ$ ）し、再結晶が起きる。実際、10%ひずみまで変形させた試験片では粒界近傍に微細な結晶粒が生じており、クリープ変形中に動的再結晶が起きていることを裏付ける。特に不純物含有氷で再結晶が優先的に起きていることがわかった。

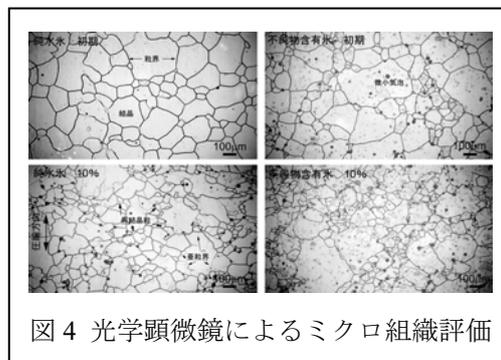


図4 光学顕微鏡によるマイクロ組織評価

(5) 最後に、クリープ試験を中断させ、その試料に X 線を入射して回折パターンを取得し、転位密度解析を行った。X 線回折により、明瞭な回折パターンを取得することができた。得られたパターンから最低 4 つの回折ピークを抽出し、ピークフィッティングを行うことで半値幅やピーク強度の回折角度を求めた。これを modified WH 法を用いて以下の式から粒径とひずみの効果を分離した。

$$\Delta K \cong \frac{0.9}{D} + \left(\frac{\pi M^2 b^2}{2} \right)^{1/2} \rho^{1/2} K \bar{C}^{1/2}$$

$\Delta K = 2 \cos \theta (\Delta \theta) / \lambda$ 、 $\Delta \theta$ は半値幅、 θ ブラッグ角、 λ は用いた X 線の波長 (Cu K α)、 D は結晶粒径、 M は定数、 b はバーガースベクトル、 ρ が転位密度、 $K = 2 \sin \theta / \lambda$ 、 \bar{C} は転位の平均コントラスト因子である。更に回折ピークをフーリエ変換し、以下の WA 法から近似曲線を算出することで β を求めた。

$$\ln A(L) \cong \alpha - \beta (K^2 \bar{b}^2 \bar{C}) + \gamma (K^4 \bar{b}^2 \bar{C}^2)$$

$$\beta = \gamma = \rho \frac{\pi}{2} L^2 \ln \left(\frac{R_e}{L} \right)$$

α 、 β 、 γ はフィッティングパラメーターで、 β の式を利用して縦軸 Y/L^2 、横軸 $\ln L$ のグラフを作成して得られた直線の傾きから転位密度を算出した。ここで L はフーリエ長さである。この手法を転位密度測定に用いてクリープひずみとの関係を求めた。

(6) クリープ変形にともなう転位密度の変化は、1、10、20%ひずみについて測定を行った。初期試料に対して転位密度は純氷で $1.4 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ 、シリカ含有氷で $3.5 \times 10^{11} \text{m}^{-2}$ とシリカの添加により 3 桁も転位密度が低下した。一つの解釈として、焼結時にも再結晶が生じることが予想され、特にシリカ含有氷では、圧密化時にシリカ周囲に転位がパイルアップすることが予想され、それにより焼結時に再結晶が生じ、それにより転位密度が低下していることが考えられる（焼結時の温度は -10°C ）。1%ひずみで両者とも転位密度は増加するが、純氷はその後転位密度がほぼ一定となり飽和する。一方、シリカ含有氷では、転位密度が10%ひずみまで単調に増加し、最大 $2.0 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ にまで達する。20%ひずみでは、転位密度は $3.1 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ まで急激に低下し、純氷の転位密度 ($6.3 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$) よりも低い値を示した。

ひずみ1%は1次クリープ領域に見られた加工硬化が生じる領域に相当しており、このため転位が増殖し転位密度が増加したことがわかる。その増加量はシリカ含有氷の方が大きく、粒界のみならずシリカにも転位がパイルアップしていることが予想される。シリカ含有氷では、その後も転位密度が増加したが、この間亜粒界密度も増加しており、結晶全体に転位が堆積している。この転位の増殖は、図2より不純物含有氷の方が軟らかくなる挙動を説明することができ、クリープによる軟化は、シリカを介した転位の増殖過程で説明ができる。一方、ひずみが20%に達すると、転位密度が急激に低下した。同時に亜粒界密度も低下し、平均結晶粒径も小さくなることがわかっている。これら全ての情報を総合的に考えると、20%ひずみで再結晶が促進されていることが予想される。再結晶は転位の再配列を経て粒界の大傾角化を伴う現象であり、一般的に再結晶の生成とともに転位密度は低下する。実験結果は、この現象を如実に物語っている。他方、純氷は転位密度の変化が1%ひずみ以降緩やかであり、典型的な遷移クリープ領域（2次クリープ領域）における転位密度の挙動を示している。亜粒界密度の上昇と再結晶の生成に伴う転位の増殖と消滅がバランスした状況を実現しており、平均結晶粒径は10%ひずみまで緩やかに減少する。20%ひずみに達すると、再結晶がさらに進むことで亜粒界密度が低下し、10%ひずみで生じていた再結晶が粗大化を起こし、平均結晶粒径は増加する。しかし、シリカ含有氷では平均結晶粒径は単調に減少しており、これはシリカの凝集体が氷の粒界に偏析することで粒界ピン止

め効果を発現し、結晶粒の粗大化が抑制されたためと理解できる。

以上の結果より、シリカ（不純物）には少なくとも2つの効果があることがわかった。1つはシリカが転位の増殖のソースになること、もう一つは粒界ピン止め効果である。以下は氷床を仮定した仮説であるが、不純物が氷中に分散されると、直径 500nm 以下の超微粒子も凝集体を作ることである程度の大きさの粒子に発達することが予想される。その不純物周囲には塑性変形に伴い転位が堆積することが予想され、温度の上昇も相まって、その周囲で優先的に再結晶が促進される。実際、図4に示すように再結晶は粒界近傍から発生している様子が伺える。同様に氷床コアに見られる異常流動層でも微粒子が多く存在する層では、同時に結晶粒も微細化しており不純物まわりで再結晶が促進されることが示唆されている (Faria et al., 2014, J. Struc. Geol.)。更に不純物は粒界に偏析することが予想され、それにより再結晶を起こした結晶粒の粗大化を抑制する。これによる結晶粒の微細化は Goldsby および Kohlstedt (1997, JGR) や Saruya et al. (2019, JG) が実験により明らかにしているように、転位クリープのみならず拡散クリープを伴うクリープの発現も予想されている。このように、不純物周囲の転位の増殖および粒界拡散の影響は、更に流動速度を増加させることが予想され、結果的に不純物含有氷ではひずみ速度が増加し軟化する。氷床中にどの程度 500nm 以下の不純物が含有されているかはまだ明らかにされていないが、ある期間、ある時期に優先して大気中のエアロゾルが降雪やドライフォールアウトとして氷床中に取り込まれ、鉱物、塩、生物起源微粒子が氷床中に堆積することは容易に想像される。これら超微粒子と氷床流動の促進との関係は、本研究を含めまだ明らかにされていないが、転位密度の定量評価技術を介して、超微粒子の氷床流動に及ぼす役割を一部明らかにすることに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Komuro, F. Nakazawa, M. Hirabayashi, K. Goto-Azuma, N. Nagatsuka, W. Shigeyama, S. Matoba, T. Homma, J.P. Steffensen, D. Dahl-Jensen	4. 巻 27
2. 論文標題 Temporal and spatial variabilities in surface mass balance at the EGRIP site, Greenland from 2009 to 2017	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2020.100568	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Goto-Azuma, T. Homma, T. Saruya, F. Nakazawa, Y. Komuro, N. Nagatsuka, M. Hirabayashi, Y. Kondo, M. Koike, T. Aoki, R. Greve, J. Okuno	4. 巻 27
2. 論文標題 Studies on the variability of the Greenland Ice Sheet and climate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100557
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2020.100557	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 W. Shigeyama, N. Nagatsuka, T. Homma, M. Takata, K. Goto-Azuma, I. Weikusat, M.R. Drury, E.J.N. Kuiper, R.V. Mateiu, N. Azuma, D. Dahl-Jensen, S. Kipfstuhl	4. 巻 37
2. 論文標題 Microstructural analysis of Greenland ice using a cryogenic scanning electron microscope equipped with an electron backscatter diffraction detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of Glaciological Research	6. 最初と最後の頁 31-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5331/bgr.19R01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Saruya, K. Nakajima, M. Takata, T. Homma, N. Azuma, K. Goto-Azuma	4. 巻 65
2. 論文標題 Effects of microparticles on deformation and microstructural evolution of fine-grained ice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 531-541
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jog.2019.29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 東久美子, 川村賢二, 中澤文男, 平林幹啓, 永塚尚子, 繁山航, 尾形純, 福田かおり, 本間智之
2. 発表標題 グリーンランドEGRIP計画における2016～2018年の日本の観測活動及び氷床コア解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 繁山航, 永塚尚子, 本間智之, 高田守昌, 東久美子, Weikusat, I., Drury, M., Kuiper, E., Pennock, G., Mateiu, R., 東信彦, Dahl-Jensen, D.
2. 発表標題 グリーンランド深層アイスコアに含まれる固体微粒子のその場観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猿谷友孝, 中島甲斐, 高田守昌, 本間智之, 東信彦, 東久美子
2. 発表標題 微細結晶粒氷のクリープ変形における結晶粒径と含有不純物の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 繁山航, 永塚尚子, 本間智之, 高田守昌, 東久美子, Mateiu, R. V., 東信彦, Dahl-Jensen, D.
2. 発表標題 氷期のグリーンランド氷床コアにおける固体微粒子のその場観察
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猿谷友孝, 高田守昌, 本間智之, 東信彦, 東久美子
2. 発表標題 多結晶氷の力学特性・組織変化における結晶粒径の影響
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東久美子, 川村賢二, 中澤文男, 平林幹啓, 永塚尚子, 繁山航, 尾形純, 福田かおり, 本間智之
2. 発表標題 グリーンランドEGRIP計画における2016～2018年の日本の観測活動及び氷床コア解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 繁山航, 永塚尚子, 本間智之, 高田守昌, 東久美子, Weikusat, I., Drury, M., Kuiper, E., Pennock, G., Mateiu, R., 東信彦, Dahl-Jensen, D.
2. 発表標題 グリーンランド深層アイスコアに含まれる固体微粒子のその場観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猿谷友孝, 中島甲葵, 高田守昌, 本間智之, 東信彦, 東久美子
2. 発表標題 微細結晶粒氷のクリープ変形における結晶粒径と含有不純物の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 繁山航, 永塚尚子, 本間智之, 高田守昌, 東久美子, Mateiu, R. V., 東信彦, Dahl-Jensen, D.
2. 発表標題 氷期のグリーンランド氷床コアにおける固体微粒子のその場観察
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猿谷友孝, 高田守昌, 本間智之, 東信彦, 東久美子
2. 発表標題 多結晶氷の力学特性・組織変化における結晶粒径の影響
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	本間 智之 (Homma Tomoyuki) (50452082)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	
研究分担者	高田 守昌 (Takata Morimasa) (50377222)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教 (13102)	
研究分担者	東 久美子 (Goto-Azuma Kumiko) (80202620)	国立極地研究所・研究教育系・教授 (62611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
デンマーク	コペンハーゲン大学			
ドイツ	AWI			
スペイン	Basque Centre for Climate Change			