

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540426

研究課題名（和文） 極地深層氷コアの結晶組織解析および変形実験に基づく氷床の変成過程に関する研究

研究課題名（英文） Metamorphic processes of ice sheet based on crystal texture analysis and deformation test of polar deep ice core

研究代表者

宮本 淳（MIYAMOTO ATSUSHI）

北海道大学・低温科学研究所・研究員

研究者番号：00374645

研究成果の概要（和文）：

氷床の成り立ちや変動に関わるその内部構造や物性の詳細を知ることがを目的に、氷床深部のコア試料や人工単結晶試料を用いた氷体の結晶組織解析、変形実験を行ったが、特に氷結晶のa軸方位分布に注目して研究を進めた。標準試料となる単結晶氷育成装置、変形中の結晶方位・結晶組織・結晶の配列の変化が測定・観察可能な薄片試料変形装置の開発など、実験装置の開発、改良も進めた。その結果、これまで氷床深部で見つがっていたa軸方位の異方性分布は、限定的な条件下で形成されることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand metamorphic processes of ice sheet, ice crystal texture analysis and deformation test of artificial ice samples and ice core samples from ice sheet were carried out. In particular, this research was focused on the a-axis orientation distribution of ice crystals. Ice single crystal growth apparatus as a standard sample and thin section sample deformation test apparatus which can be observed crystal orientation and structure during deformation were also designed and developed. As a result, the anisotropic distribution of a-axes orientation was previously found in deep ice core samples may be formed under limited condition was suggested.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、内部変動・物性

キーワード：氷、氷床コア、結晶組織、a軸方位、力学試験、X線ラウエ法

1. 研究開始当初の背景

南極やグリーンランドなどの極地氷床から得られる氷床コア試料は、地球の気候・環境変動の歴史の記録媒体として重要な役割

を果たしている。近年、氷床コア掘削技術の向上により、氷床内陸部において基盤岩近くまで、3000mを超える深層コア掘削に日本をはじめ各国が成功しており、化学分析から過

去約 90 万年におよぶ気候・環境変動が明らかにされている。また、地球温暖化の影響による巨大氷床の質量バランスの変化は海水準上昇を引き起こすため、氷床変動（質量バランスや流動状態の変化）の歴史、将来予測に関するモデル計算が活発に行われている。しかし、これらのモデル計算はモデルを簡略化させるという目的もあり、氷床の詳細な内部構造を考慮することなく発展してきている。実際にコア掘削後、深部の年代がモデル計算で予想されたものよりも大幅に若く、目的の年代に達しなかったという報告がある。また、グリーンランド氷床頂上部においてわずか 30 km 離れた地点で掘削されたコア深部の気候・環境情報シグナルの不一致も報告されている。このように、氷床深部に限っては、氷床の変形の大部分を担っているにもかかわらず、不明な点が多く、氷の年代の見積もり誤差を大きくしている。また、これまでの研究成果は氷床深部に非常に流動し易い氷体が存在していることを示しているが、その原因の詳細も明らかになっていない。よって、氷床深部のコア試料から高精度に地球の気候・環境変動の歴史を読み取るためには、氷床流動モデルの基礎情報となる氷体の結晶組織、力学的性質等の氷床の内部構造・物性の詳細を知ることが重要である。そこで、変形にともなう層位構造の変化や氷床の結晶組織、特にこれまで議論されていた c 軸方位分布に加え、a 軸方位分布にも注目し、氷体の結晶組織の詳細と変形特性との関係に焦点を絞った研究を行う。

2. 研究の目的

氷床コア研究の中心課題は、コア試料中に保存されている不純物や空気ガス成分を分析することによって地球の気候・環境変動の歴史を理解することである。より深層に達する氷床コアの採取成功にともない、より古い氷を得て、気候・環境変動の議論は約 90 万年前にまでさかのぼっている。しかし、深部の氷は数十万年におよぶ変成過程を経て現在の層序、結晶組織を形成している。氷床コアの目視観察や薄片試料の観察から層位の傾き、小規模な褶曲構造、特殊な結晶方位、結晶の配列を持つ集合組織等を見出すことができる。巨大氷床内陸部の堆積環境は広範囲、長期間にわたり比較的安定しており、氷床コア研究でも地質学で言う“地層累重の法則”を適用してきたが、深部においては、堆積後の内部構造の変成過程に注目しなければ、正確な気候・環境変動の復元は不可能である。そこで、本研究は、氷床深部のコア試料や人工単結晶氷試料を用いた実験的研究から氷体の結晶組織、力学的性質等を明らかにし、氷床の内部構造・物性の詳細を知ることが目的に推進した。

3. 研究の方法

(1) 単結晶氷育成装置の開発

氷床深部の氷は結晶 c 軸方位が強い単極大型を示し、a 軸方位もある深度において同じ方位に集中する傾向がある。つまり、多結晶体である氷床氷が単結晶氷に近づいているということを意味している。よって、結晶方位の発達過程および氷の変形を定量的に議論するためには、標準試料として人工単結晶氷を用いた実験が必要であり、育成装置を開発、自作した。当初、育成した氷が多結晶になる、気泡が入るなど標準試料としては不適當であった。しかし、種氷を用い、上方へ成長するよう成長方向変更した結果、結晶方位をコントロールした単結晶氷の育成が可能になり、標準試料として用いた。

(2) NEEM コアの結晶組織解析

NEEM 計画（北グリーンランド氷床深層掘削計画、デンマーク中心の 14 カ国国際プロジェクト）により、2010 年 7 月に岩盤に到達する 2537 m 長のコア試料の掘削に成功し、試料の一部の提供を受けた。掘削後時間が経過しておらず、体積緩和等、物理的に変質が進んでいないこの試料については、最初に X 線ラウエ法により c 軸および a 軸方位を測定し、NEEM コアの結晶方位の深さ分布を明らかにした。

(3) 氷薄片試料変形装置の開発

a 軸方位については、結晶が塑性変形により回転しているのか、あるいは再結晶により現れた新しい結晶が特別な方位関係を持っているのかを判断するために、X 線装置に載せ、その場観察することできる変形装置を開発した。構造地質学で用いられている装置を参考にし、低温科学研究所技術部と共同で、単純せん断変形中の結晶方位・結晶組織・結晶の配列の変化が測定・観察可能な装置を開発した。50×50×5 mm 程度の大きさの薄片試料の変形実験が可能であり、X 線装置ステージに載せるために、おもりで一定荷重を発生させ、変形させる単純な稼働方式を採用した。変位計にはレーザー変位計を用いた。実験温度は-16°C で、試料の昇華と大きな温度変化を防ぐために、試料とホルダー部分はシリコンオイルに浸かるようにした。

(4) 氷試料の変形実験

一軸圧縮試験と薄片試料の単純せん断試験の 2 種類の変形実験を行った。一軸圧縮試験機については、定荷重型の既存のものを用い、データ収集システムを更新することにより、ネットワーク経由で操作可能になった。また、より早いサンプリング速度で長時間の記録が可能になり、数か月にお

よぶ実験に対応した。この実験では試料に単結晶氷を用い、大きさは $20 \times 20 \times 70$ mm 程度である。圧縮軸に対して c 軸が 45° 傾き、最大分解せん断応力が、結晶の c 面（基底面）働くように設定した実験を -15°C の環境で行った。

単純せん断試験では、単結晶氷と NEEM コアの薄片試料を用い、 -16°C の環境で実験を行った。単結晶氷の c 軸方位は、せん断変形方向に対して垂直であり、ひとつの a 軸方位が、せん断方向に一致するように試験を行った。

4. 研究成果

研究代表者らにより開発された X 線ラウエ法による結晶組織解析装置により、氷床の深部においては、氷結晶の c 軸方位のみならず、 a 軸方位も部分的に集中化していることが明らかになった。この a 軸方位の発達過程と氷体の力学的性質に与える影響を実験的に明らかにすることが本研究の課題であり、主な成果は以下の通りである。

a 軸方位の集中化については、まず標準試料となる単結晶氷を用いて実験を行った。圧縮軸と c 軸のなす角度を 45° に設定し、応力 0.23 MPa、 -15°C の実験条件下で行われた一軸圧縮試験では、基底面滑りにより変形したが、均一に変形せず、座屈した。しかし、変形量の大きいせん断変形帯に、せん断面に再結晶粒が並んだ（図 1）。試料の底面や表面に接しておらず、図 1 に示すように隣接せず、距離をおいて分布する結晶粒も含む 3 つの再結晶粒の結晶軸方位を調べた結果、 c 軸、 a 軸ともに揃った方位関係であることが明らかになった。この再結晶粒の方位は母結晶である元の単結晶氷の方位には一致せず、 c 軸はせん断面にほぼ鉛直で、ひとつの a 軸が滑り方向にほぼ一致することが明らかになった（図 2）。この結果は、氷床深部のコアにおいて発見されている a 軸方位分布を実験的に再現できたことを意味している。つまり、 a 軸方位が揃うという特殊な結晶方位分布は、当初予想した通り、せん断変形によるもので、新しく核生成した再結晶粒の a 軸方位分布が異方性を持っていることがわかった。

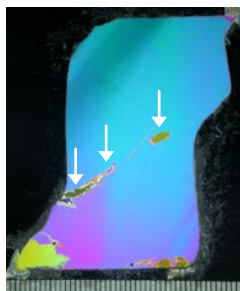


図 1. 単結晶氷の変形実験後の薄片写真（写真下部スケールの最小目盛は 1 mm）。せん断

変形部に結晶方位の揃った再結晶粒が並ぶ（矢印部）。

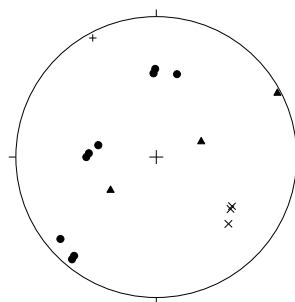


図 2. 変形後の母結晶と 3 つの再結晶粒の結晶方位分布をシュミット・ネットにプロットした。+ : 母結晶の c 軸方位、▲ : 母結晶の a 軸方位、× : 再結晶粒の c 軸方位、● : 再結晶粒の a 軸方位。それぞれの再結晶粒の方位はほぼ同じ方位に揃っている。

NEEM コアについては、掘削後間もない試料の配分を受け、426 m から 2489 m までの 8 深度の結晶方位を、X 線ラウエ法により詳細に調べた。その結果、最も浅部の間氷期に当たる 426 m の c 軸方位分布は弱い単極大型であった。間氷期と氷期の境界である 1419 m 以深では、単極大型を基本としながら、一部の結晶の c 軸の分布が特定の方向に分散する（図 3）、あるいは少数の結晶の方位が単極大の集中方向とは全く異なる方位に分布するなど、複雑な流動状態を反映したものであった。 a 軸方位に特徴的な分布が確認されたのは、深部 2351 m のみであり、各結晶の a 軸が同じ方向に揃う傾向が確認された。 a 軸方位の異方性分布の議論は c 軸方位分布が単極大型に発達した場合に限られるが、NEEM コアの測定結果が示すように、単極大型を基本としながら、 c 軸分布が特定の方向に延びている場合には、 a 軸方位に特徴的な分布は確認されず、 a 軸方位の異方性分布は限定的に現れることが示唆された。

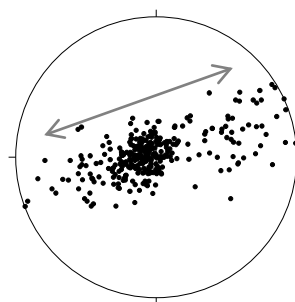


図 3. NEEM コア 2076 m の c 軸方位分布。測定結晶粒数は 309 個で、シュミット・ネットの中心が、コア軸方向を示す。分布は単極大型に集中しながら矢印の方向に分散している。

氷薄片試料を用いた単純せん断変形実験では、単結晶氷と比較的粒径が大きく目視観察が容易な NEEM コア (2489 m) を用いた。単結晶氷の実験は、c 軸方位がせん断変形方向に対して垂直、ひとつの a 軸方位が、せん断方向に一致するという、最も変形しやすいと考えられる条件で行った。応力 0.089 MPa で、最終ひずみ量約 55% まで変形させた結果、試料は座屈することなく均一に変形し、目視観察で再結晶粒やクラックの発生などの組織変化はなかった。また、X 線による方位解析において、変形前後の結晶方位は、c、a 軸ともに変化しなかった。さらに、低応力の実験ではあるが、約 30 時間以降に変形速度が急速に増加している (図 4)。均一に変形している本変形実験において、この変形速度の急加速が、単に転位の増殖で説明できるかは明らかではないが、結晶組織の変化がなく変形している点も、変形速度の加速に影響している可能性がある。氷床の変形を考える上では、a 軸方位が揃うなどの条件下では、変形速度が急加速することを示しており、重要な情報である。

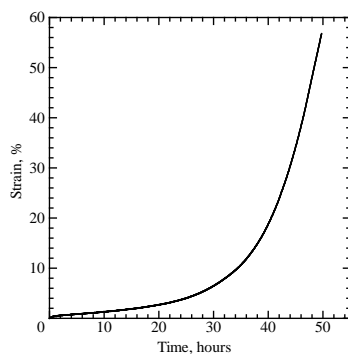


図 4. 単結晶氷薄片試料のクリープ曲線。

多結晶体である NEEM コア (2489 m) の薄片試料の単純せん断変形実験からは、最終ひずみ量約 4% と、単結晶氷の実験に比べて小さいが、変形中に X 線による結晶方位測定を行った結果、明瞭な方位の変化は見られなかった。特に a 軸方位の変化に注目するために、c 軸方位がせん断方向に対して垂直に近い結晶を選び、変形中に c 軸を回転軸にして a 軸方位が変化するかを X 線により高精度に調べたが、これについても変化は確認できなかった。

以上より、(1) a 軸方位の発達、単純せん断変形応力下で、結晶粒が回転して起こるのではなく、新たに核生成した再結晶粒の a 軸方位の方位が揃うことによる。(2) a 軸方位異方性分布は、c 軸方位は一方向に集中して分布する単極大型である場合にのみ観察され、単純せん断変形帯で、再結晶が起こるような比較的温度が高い場所、あるいは褶曲などによる大きな変形帯等の限定的な条件下

で起こることが示唆される。

これらの結果から氷床の内部構造を考察すると、a 軸方位が異方性分布を持つ深度帯の氷体は、現在、あるいは過去において比較的大きな単純せん断変形を受けており、核生成をとまなう再結晶が活発に起こる高温状態に置かれている (いた) と言える。単結晶氷の実験で見られた、均一に変形していながら変形速度が急加速する現象は、モデル化することは難しいが、実際の氷床で起こり得ることであり、巨大氷床の巨視的な変動をコントロールする可能性がある。時間を要する変形実験では、データを蓄積することは難しいが、実験を継続し、氷床の内部構造・物性の詳細について議論を行っていく予定である。

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 5 件)

- ① 宮本 淳. 2013. X線ラウエ法による氷結晶の方位解析、低温科学「氷の物理と化学研究の新展開」、査読有、71巻、59-68、http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/52340/3/LTS71_007.pdf
- ② NEEM community members (Dorthe Dahl-Jensen を筆頭著者にして、研究代表者を含む 132 名の著者をアルファベット順に掲載). 2013. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. Nature, 査読有, 493, 489-494, DOI: 10.1038/nature11789
- ③ Tsutomu Uchida, Atsushi Miyamoto, Atsushi Shin'yama and Takeo Hondoh. 2011. Crystal growth of air-hydrates over 720,000 years in Dome Fuji ice cores, Antarctica: microscopic observations of morphological changes below 2000-m depth. Journal of Glaciology, 査読有, 57, 1017-1026, DOI: 10.3189/002214311798843296
- ④ Atsushi Miyamoto, Ilka Weikusat and Takeo Hondoh. 2011. Complete determination of ice crystal orientation using Laue X-ray diffraction method. Journal of Glaciology, 査読有, 57, 103-110, DOI: 10.3189/002214311795306754
- ⑤ Ilka Weikusat, Atsushi Miyamoto, Sérgio H. Faria, Sepp Kipfstuhl, Nobuhiko Azuma and Takeo Hondoh. 2011. Subgrain boundaries in Antarctic ice quantified by X-ray Laue diffraction. Journal of Glaciology, 査読有, 57,

111-120,
10.3189/002214311795306628

DOI:

(3) 連携研究者
()

[学会発表] (計5件)

- ① 堀 彰、宮本 淳、東 信彦、東 久美子、本堂武夫. X線回折法によるグリーンランド NEEM コアの氷の構造に関する研究. 第3回極域科学シンポジウム (国立極地研究所、東京)、2012年11月29日
- ② Horii Akira, Atsushi Miyamoto, Nobuhiko Azuma, Kumiko Goto-Azuma and Takeo Hondoh. X-ray diffraction study of the NEEM ice core. The first Open Science Conference of the International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) (Belembra Club, Giens, France), 2012年10月2日
- ③ Ilka Weikusat, Atsushi Miyamoto, Gill M. Pennock, Sepp Kipfstuhl, Sergio H. Faria, Nobuhiko Azuma and Martyn R. Drury. Ice microstructure in Antarctic deep drilling samples (EDML): Cryogenic EBSD, X-ray Laue diffraction and optical microscopy. Ice deformation conference 2011 (MINATEC conference center, Grenoble, France), 2011年11月9日
- ④ Ilka Weikusat, Atsushi Miyamoto, Sérgio H. Faria, Gill M. Pennock, Nobuhiko Azuma, Takeo Hondoh, Martyn R. Drury and Sepp Kipfstuhl. Dislocation activity in Antarctic ice. 12th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (北海道大学、札幌市), 2010年9月9日
- ⑤ Ilka Weikusat, Atsushi Miyamoto, Martyn R. Drury, Sepp Kipfstuhl, Sérgio H. Faria, Gill M. Pennock and Nobuhiko Azuma. Characterization of subgrain boundary types in polar ice (EPICA-DML ice core). European Geosciences Union General Assembly 2010 (Austria Center Vienna, Vienna, Austria), 2010年5月5日

研究者番号:

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号: