

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2004-2008
 課題番号：16104006
 研究課題名（和文） 高分解能計測技術を用いた極地氷床氷のミクロ物性の解明と変形機構図の構築
 研究課題名（英文） Investigation of micro-physical and chemical processes in polar ice sheet using high-resolution laser techniques
 研究代表者
 東 信彦 (AZUMA NOBUHIKO)
 長岡技術科学大学・工学部・教授
 研究者番号 70182996

研究成果の概要：

氷床中のミクロ物理化学プロセス解明のため、精密計測技術を応用し、以下の成果を得た。氷床中と同等な極低速な氷試料のクリープ変形速度を計測するため、ナノメートルオーダーの変位計測が可能なレーザー干渉計を開発した。氷中の不純物濃度分布を測定するため、レーザーアブレーション質量分析装置を構築した。また、氷床コアの詳細な測定および人工試料の実験から、結晶粒成長について新たな知見を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	43,200,000	12,960,000	56,160,000
2005年度	23,400,000	7,020,000	30,420,000
2006年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
総計	83,100,000	24,930,000	108,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：環境変動，極地，超精密計測，結晶物性

1. 研究開始当初の背景

地球の気候変動メカニズムを解明するために極地氷床氷の分析や氷床モデリングが盛んに行われているが、分析データの解釈やモデル構築のうえで極めて重要である氷床中のミクロ物理化学プロセスについては未解明な部分が多い。特に氷床中の氷結晶の変形機構や変形に伴う結晶集合組織の変化、含有不純物分布の時間空間的变化などはそのプロセスを実験室で再現することが困難なため殆ど研究が進んでいない。

2. 研究の目的

最近発達が著しい精密計測技術を応用することにより、氷床中の氷結晶変形機構の解明と流動に伴う氷中の環境・気候指標物質の挙動の解明を目的として、下記の方法で研究を行なう。

3. 研究の方法

氷床中で起きている 10^{-13} s^{-1} オーダーの歪速度領域での変位の測定は、これまでの計測技術では不可能であったが、レーザー干渉計長技術を用いて、氷の拡散クリープ領域でのナノメートルオーダーの微小変位の観測手法を確立する。

水中の不純物分布計測のため、レーザーアブレーションによる氷試料の微小領域の含有不純物分析技術開発を行なう。

両極の氷床で採取された深層コアの結晶粒組織観察および人工試料の結晶粒成長実験を行い、氷床氷の結晶集合組織の発達について検討する。

4. 研究成果

開発した氷の微小変位測定装置の構成を図1に示す。氷の歪はレーザ干渉計で測定するが、この測定では次の(1)~(4)に注意を払う必要がある。(1)氷が解けない温度であること。(2)氷の線膨張率が 10^{-5} オーダと大きいので熱膨張が影響しないように1 mK 級の温度安定度をもつこと。(3)空気屈折率変動の影響を受けないこと。(4)光源が低温に影響されないこと。これらに配慮し(A)~(E)の対策を行った。(A)干渉計は極低熱膨張材(ガラスセラミクス、線膨張率 2×10^{-8})を構造部材とする。(B)低温室を利用するが干渉計まわりの温度安定度を1 mK 級とするために銅材と断熱材を複層構造とする恒温冷却セルにより熱遮断し、低温室に内包する。(C)干渉計は恒温冷却セル内に設置する。(D)屈折率変動が空気よりも1桁小さいヘリウムガスを恒温冷却セルに充填する。(E)光源は低温室に隣接する常温の部屋に設置し、恒温冷却セル内のレーザ干渉計には光ファイバで導光する。

開発したレーザ干渉計の構成を図2に示す。干渉計自体は前述したとおりガラスセラミクスを構造部材とする。ホモダイン差動式4倍光路差の干渉計で、基本ピッチ(この場合 $\lambda/8$, $\lambda = 633 \text{ nm}$)以下の変位は90度位相差の異なる2個の干渉縞(図ではフォトダイオード PD1 と PD2) からリサージュ波形を得、これから位相補間する方法を採用した。図に示すように同じ形状を持つ氷サンプル2個を干渉計の2個のアームに置き、一方に荷重をもう一方には荷重をかけず、荷重差による歪を作動式の干渉計で捉える。光源から干渉計までは偏光面保存ファイバで導光するが、このファイバに外乱が加わると干渉計入口での偏光面が回転し、結果として氷に歪

が生じなくてもリサージュ波形が回転する。これを解決するためにファイバ入口に電気光学素子(EOM)を導入し、干渉計を位相変調ホモダイン型とした。ファイバ出口(すなわち干渉計入口)にビームサンプラ(BS)を置き偏光子(図では PBS:干渉計入口で偏光面が45度向きになるように設定)を通してフォトダイオード(図では PD5)で観察する。この出力と EOM に与えられた正弦波出力を同期検波し常にその出力がゼロ(すなわち干渉計入口での偏光面が45度向き)になるように EOM に加える直流電圧を制御する。PD1 と PD2 の出力も EOM に与えた正弦波出力と同期検波することで位相の90度異なる干渉縞を得るようにする。現状では次の結果を得ている。(結果1)恒温冷却セル内の温度安定度はおよそ半日間ではあるが5 mK 以下を達成した。ただし、ナノメートルオーダーの歪測定には1 mK 以下の温度安定度が必要である。低温室外部からの外乱抑制あるいは能動制御などが必要であろう。(結果2)干渉計の1個のアームを固定しもう片方のアームに圧電素子を置きリサージュ波形を観察したところリサージュ波形はほぼ円形となっており圧電素子の変位に伴って干渉計出力が変化することが判った。ただし、リサージュの中心が回転ごとにずれており、これは偏光面保存ファイバの外乱補償制御がうまく行われていないことを示す。偏光面保存ファイバの外乱特性を明らかにし、新たな制御系を設計する必要がある。本研究の目的である氷の微小変位を測定するにはさらにこれらの不具合を克服する必要がある。

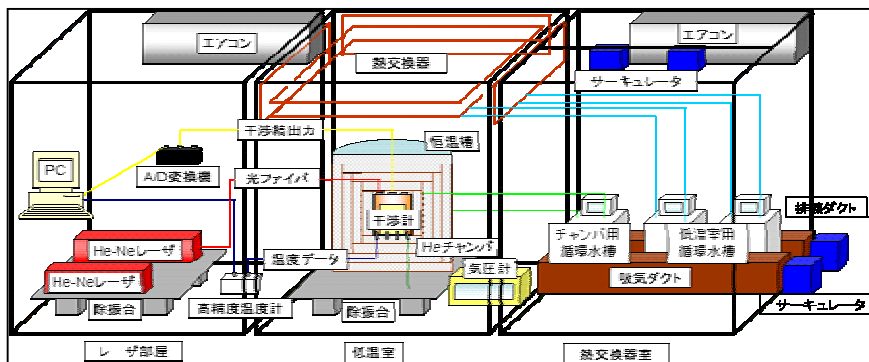


図1
氷の微小変位測定装置の構成

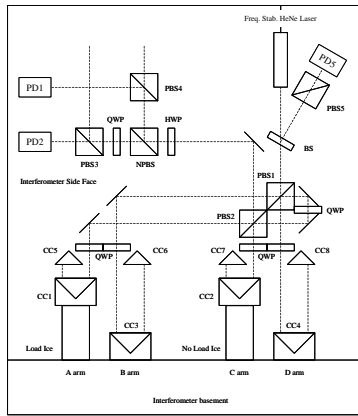


図2 レーザー干渉計の構成

氷試料分析用のレーザーアブレーション質量分析装置の概要を図3に示す。この装置では、氷試料は超高真空圧力 (10^{-5} Pa 台) の質量分析チャンバに導入し、この中でレーザーアブレーションを行なう方式とした。この超高真空圧力下で氷試料を固体状態で安定させるためには、試料を -120 以下に保つ必要がある。そこで、氷試料ホルダー背面を液体窒素循環により冷却した。また、質量分析チャンバに大気圧から試料を迅速に挿入するため、ゲートバルブで仕切られた試料導入チャンバおよび直線導入機を設置した。これらにより、超高真空中でも氷試料を保持することに成功した。この装置でまず塩化ナトリウム試料を用いて、レーザー照射強度を大きくして試料を大量にアブレーションさせた条件で質量分析したが、いずれの質量数においてもアブレーション直後に大きなピークが現れるだけで、ナトリウムに起因するシグナルの検出は出来なかった。そこで、レーザー照射強度について検討した結果、アブレーションの下限近くのレーザー照射強度 (1 mJ/Pulse) において、ナトリウムの質量数である質量数 23 付近でシグナルの検出に成功した。しかし、レーザー照射強度が 2 mJ/Pulse 以上となると、ナトリウムのシグナルが検出できないことも分かった。次に、ナトリウムを含有した氷の分析を行なった。し

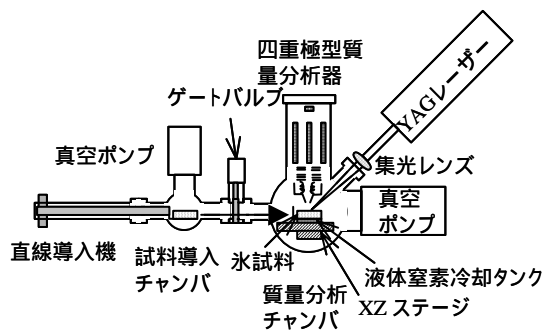


図3 レーザーアブレーション質量分析装置の概要

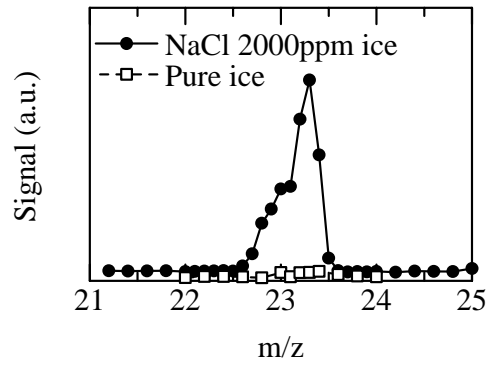


図4 人工氷試料の分析結果

かし、氷試料をアブレーションさせるには、レーザー照射強度を上げる (10 mJ/Pulse 以上) 必要があったので、ナトリウムのシグナルを得ることが出来なかった。そこで再度、塩化ナトリウム試料において、レーザー照射強度を上げた状態で測定可能な方法について検討した。その結果、レーザー照射位置と質量分析装置の軸をずらし、両者の距離を $2 \sim 5$ mm 程度離すことにより、ナトリウムのシグナルを得ることができるようになった。ナトリウムに相当する質量数 23 の信号はレーザー照射後 $40 \sim 150 \mu\text{s}$ の間で検出できた。そこで、 2% の塩化ナトリウム含有させた氷で試したところ、同様にナトリウムを検出することができた。更に、 2000 ppm の塩化ナトリウム含有氷および純氷において、質量数 23 の信号について詳細に調べた。この結果、図4に示すように質量数 23 のピークは、塩化ナトリウムを含んだ氷では存在するが純氷では認められず、ナトリウムの検出が確認された。またレーザー照射の痕跡は微小であり、本研究の目的である結晶内部の不純物分布の測定は可能である。

最近掘削された南極やグリーンランドの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 ではなく歪誘起粒界移動 (SIBM) による動的結晶粒成長であることを明らかにし、これまでの常識を覆した (Kipfstuhl et al, JGR, in press). さらに、我々は特殊な方法により無気泡多結晶氷の作成に成功しそれを用いて結晶粒成長実験を行い、粒界易動度はこれまで考えられていたものより $2, 3$ 桁大きいこと、これまで用いられている結晶粒成長速度とその活性化エネルギーは気泡による粒界移動阻止効果と歪による影響が複合した見かけ上のものであることを明らかにした (Hamann et al, J.Glaciol., 53, p.479, 2007).

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 4 件)

1. S. Kipfstuhl, S. H. Faria, N. Azuma, and 6 others: Evidence of dynamic recrystallization in polar firn, JGR-Solid Earth, in press
 2. Hamann, I., S. Kipfstuhl, S. H. Faria, and N. Azuma: Sub-grain boundaries in EPICA Dronning Maudland (EDML) deep ice core, J. Glaciol., in press
 3. Faria, S. H., S. Kipfstuhl, N. Azuma, J. Freitag, I. Hamann, M. M. Murshed, W. F. Kuhs: The multiscale structure of the Antarctic ice sheet. Part I: inland ice, Physics of Ice Core Records, volume 2, Hokkaido Univ. Press, in press
 4. Hamann, I., C. Weikusat, N. Azuma and S. Kipfstuhl: Evolution of ice crystal microstructure during creep experiments. J. Glaciol., 53 (182), 479-489, 2007.
- [学会発表](計 20 件)
1. Azuma, N.: Is grain growth in polar ice sheets normal grain growth? Differences between ice core studies and laboratory experiments. ESF Exploratory Workshop, Modeling and Interpretation of Ice Microstructures, Goettingen, Germany, 2008
 2. N. Azuma, Y. Ohba, T. Maeda and T. Ishii: Mechanical properties of dust and ice mixtures expected in the Martian polar caps and permafrost. European Geosciences Union general assembly, Vienna, Austria, 2007
 3. N. Azuma, K. Nishimura, S. Yokoyama and M. Takata: Effect of impurities on grain growth of ice. 11th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice, Bremerhaven, Germany, 2006
 4. M. Takata, T. Hondoh, Y. Fujii, N. Azuma: Optical Scattering Analysis of Dome Fuji Ice Core, Antarctica. European Geosciences Union general assembly, Vienna, Austria, 2006
 5. 高田守昌, 伊藤義郎, 東信彦, 大場勝行: レーザーアブレーション質量分析による水中不純物分布の測定法の開発. 第 57 回質量分析総合討論会(大阪), 2009
 6. 東信彦: 極地氷床氷のレオロジー. 日本地球惑星科学連合 2008 年大会(幕張), 2008
 7. 大庭 泰治, 明田川 正人, 木暮 貴博, 菅原 亮太, 安濃 一樹, 石下 雅史, 高田守昌, 東 信彦: レーザー干渉測長法によ

る氷の微小変位計測技術の開発 III. 2007 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集(富山), 55, 2007

8. 明田川正人, 高田守昌, 東信彦, 安濃一樹, 木暮貴博: 極地氷床氷の歪速度の精密干渉計による計測(第 1 報: 装置の基本構想と常温での性能確認). 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演予稿集(東京理科大学野田校舎), N06, 2006

6. 研究組織

(1)研究代表者

東 信彦 (AZUMA NOBUHIKO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 70182996

(2)研究分担者

伊藤 義郎 (ITO YOSHIRO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 60176378
明田川 正人 (AKETAGAWA MASATO)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 10231854
高田 守昌 (TAKATA MORIMASA)
長岡技術科学大学・工学部・助教
研究者番号: 50377222
佐藤 和秀 (SATO KAZUhide)
長岡工業高等専門学校・教授
研究者番号: 80113398

(3)連携研究者

Ilka Hamann
Alfred Wegener Institute, Ph.D.
Sepp Kipfstuhl
Alfred Wegener Institute, Senior researcher