

## 高分解能計測技術を用いた極地氷床氷のマイクロ物性の解明と 変形機構図の構築

Investigation of micro-physical and chemical processes  
in polar ice sheet using high-resolution laser techniques

東 信彦 (AZUMA NOBUHIKO)  
長岡技術科学大学・工学部・教授



### 研究の概要

(1) レーザー干渉測長技術を用いて、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。(2) レーザーアブレーションによる氷結晶中の微小領域の含有不純物分析技術を開発する。(3) これらの精密計測技術を用いて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行う

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

極地氷床氷の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マイ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

レーザー等を用いた高分解能精密計測技術を用いることにより氷床中の氷結晶変形機構の解明、氷結晶中の不純物分布構造とその熱力学的挙動の解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

- 1) 氷の歪測定用位相変調ホモサイン干渉計を開発し超低速クリープ現象を観測する。
- 2) レーザーアブレーションによる微小領域分析技術を開発し氷床コア中の不純物分布を明らかにする。
- 3) 氷の変形実験を行い変形に伴う不純物移動と粒界の挙動を調べる。

### 4. 研究の主な成果

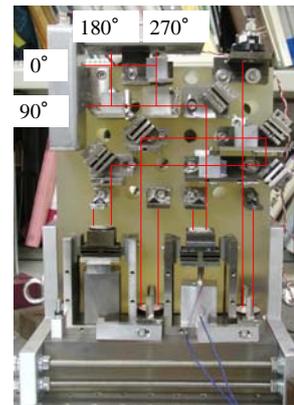
#### 1) レーザー干渉測長法による微小変位計測技術の開発

製作した氷の歪み測定用のレーザー干渉計(写真)はヘリウムガスで充填した恒温冷却セルの中に設置した。干渉計は極低熱膨

張材(ガラスセラミクス、線膨張率 $2 \times 10^{-8}$ )で製作した。

恒温冷却セルは干渉計まわりの温度安定度を1mK級とするために銅材と断熱材で四層にし、低温室に設置した。光源は低温室に隣接する常温の部屋

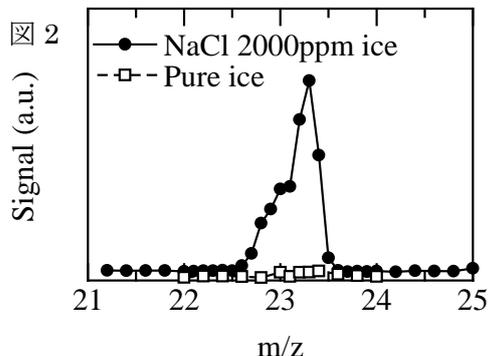
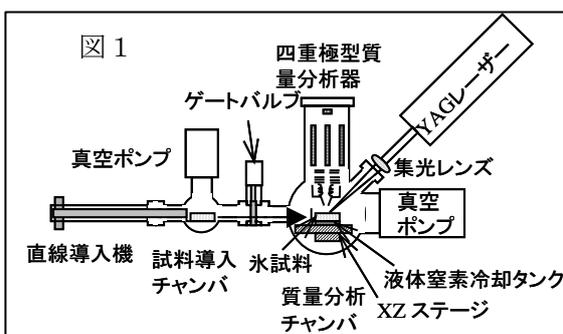
に設置し、恒温冷却セル内のレーザー干渉計には光ファイバで導光した。干渉計自体はガラスセラミクスを構造部材とする。ホモサイン差動式4倍光路差の干渉計で、基本ピッチ(この場合 $\lambda/8$ 、 $\lambda=633\text{nm}$ )以下の変位は90度位相差の異なる2個の干渉縞を検出し、リサージュ波形を描きこれから位相補間する方法を採用した。同じ形状を持つ氷サンプル2個を干渉計の2個のアームに置き、一方に荷重をいま一方には荷重をかけず、荷重差による歪みを作動式の干渉計で捉える。光源から干渉計までは偏光面保存ファイバで導光するが、このファイバに外乱が加わると干渉計入口での偏光面が回転し、結果として氷りに歪み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サイン型とした。現在のところ恒温冷却セル内の温度安定度は5mK以下



を達成した。リサーチ図形の中心がずれるもののほぼ円形の図形が得られるところまで開発が進んだ。

## 2) レーザーアブレーションによる微小領域の含有不純物分析技術の開発

開発した装置概要を図1に示す。この装置では、改良を重ねた結果、氷試料は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。質量分析チャンバの超高真空圧力 ( $10^{-5}$ Pa 台)での氷試料の昇華であり、氷の状態で安定させるためには、試料を $-120^{\circ}\text{C}$ 以下に保つ必要がある。そこで、氷試料ホルダーを液体窒素を循環により冷却した。また、質量分析チャンバに大気圧より試料を迅速に挿入するために、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。ナトリウムを含有した氷試料を用いて実験を行い、レーザー照射強度、照射後の検出時間および照射位置について検討し改良を重ねた結果、 $10\text{mJ/Pulse}$ 以上のレーザーパワーでレーザー照射位置と質量分析装置の軸間の距離を $2\sim 5\text{mm}$ とし、レーザー照射後 $150\mu\text{s}$ までの間でナトリウムのピークを検出することに成功した(図2)。今後低濃度にまで検出感度を上げることで、本研究の目的である氷結晶内部の不純物分布の測定は可能である。



## 3) 氷床氷の結晶集合組織発達と含有不純物との相互作用を含めた氷床氷変形機構図の構築

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。さらに、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。

### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

(1) 氷床中で起きているような超低速クリープ速度を計測可能な方法は例が無く独創的であり氷の変形機構の解明が進展することが予想される。

(2) レーザーアブレーション分析により氷床コア中の不純物分布が明らかになれば環境・気候指標物質(微量不純物)の解読に大きく貢献する。

(3) 氷結晶の粒界易動度や活性化エネルギーはこれまで考えられてきたものよりかなり大きいことが明らかで、氷床氷の結晶組織発達メカニズムの解明に大きく貢献する。

### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

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. 2007. Evolution of ice crystal microstructure during creep experiments. J. Glaciol. 53 (182), 479-489

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~azuma/>