

令和 3 年 10 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04276

研究課題名(和文) 静電冷却の2重境界熱拡散理論に基づく過冷却氷晶の凍結化促進技術

研究課題名(英文) Freezing Enhancement for Supercooled Ice Nucleation by Electrostatic Cooling based on Double Layer Theory

研究代表者

小林 厚子 (Kobayashi, Atsuko)

東京工業大学・地球生命研究所・研究員

研究者番号：50557212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：静電冷却とは、静電界内で冷却・熱効果を示す現象として知られているが、低温度環境下で氷晶の温度下降に応用された例はほとんどなく、その物理理論はあきらかではない。そこで本研究は、このモデルに基づき、過冷却氷晶状態から迅速に熱を奪うことによって、固体結晶化する技術を確認することを目的とした。まず常温でコロナ風を発生させ、物質移動の効果を検討した。またコロナ風による熱移動の促進の効果の測定に成功した。現在低温度環境下での設定をおこない、成果をあげつつある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、静電界内で冷却・熱効果を示す現象として知られている静電冷却の物理現象を凍結技術に応用することに着想した点である。予想される結果と意義は、冷凍技術の向上を図ることは、計画的な食糧保存・原種の長期保存に期待できる点である。またiPS細胞・ES細胞・精子・卵子の凍結保存技術に向けた医療への応用が大いに期待される。

研究成果の概要(英文)：Electrostatic cooling is known as the phenomena of enhancing the cooling or heating effects by application of an electrostatic field, but the physical theory is not well known. Our research is based on this theory that electrostatic cooling disrupting will increase the heat faster from supercooled ice slush, allowing it to solidify rapidly. The purpose of this research was to create a new technology for doing this transition efficiently. First at room temperature we generated a corona wind to investigate the mass transfer effect. I succeeded to measure the effect of heat transfer with this system. At present we are setting this up to test at low temperature environment, and proceeding well.

研究分野：顕微鏡科学・バイオ鉱物学

キーワード：静電冷却 コロナ放電

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

#### 1. 研究開始当初の背景

細胞組織を破壊しない無氷晶凍結は、食料保存・医学治療技術の進歩において中心課題の一つである。水が凍結する時、氷晶核サイトとなる金属・ミネラル等の微粒子結晶の表面で、水分子クラスターは針状に成長する。微粒子を除去した水の場合、過冷却が促進する。そして水分子クラスターの熱運動の動きが止まる瞬間に融解熱を放出し始め、過冷却氷晶を形成し始める。この氷晶は無針状であるが、融けやすい。過冷却氷晶状態からできるだけ早く熱を奪い凍結固体化する必要があるが、気・液境界膜内では、物質拡散移動は、定常的な拡散に支配されるため、効率が悪い。

#### 2. 研究の目的

マグネタイト微粒子を含有する超純水では、零度付近に達すると融解熱(80cal/g)を放出し、針状の氷晶を形成する。一方、マグネタイト微粒子を除去した超純水から熱を奪い続けると、氷晶核がない為、水クラスターの熱運動が止まるまで過冷却が促進する。運動が止まる瞬間に、水クラスターから融解熱を放出し、無針状(ガラス状)の過冷却氷晶を形成する。この氷晶は崩れやすい硬さであり、針状に結晶化するのを阻止しなければならない。静電冷却とは静電界内で冷却・熱効果を示す現象として知られているが、低温度環境下で氷晶の温度下降に応用された例はほとんどなく、またその物理理論は明らかではない。本研究は、過冷却氷晶の温度下降を促進させる技術の確立を目的とする。

#### 3. 研究の方法

静電冷却理論に基づいて、温度を効率よく下降させ、凍結する技術の開発のために、過冷却から氷晶形成過程(融解熱を放出する)に移行する直後に実験を開始できるような実験体制を整え、以下の方法に従って実験開始した。

- A) 使う試料水が過冷却を生じる条件を見出す為、大型低温冷凍庫（零下90度）を購入する。添加する磁性体微粒子を均一に分散させるために、消磁・粘性媒体の選択・容器の製作。
- B) 試料中の磁性体微粒子の含有量を測る為、超伝導量子干渉素子（SQUID）を使用する。
- C) コロナ風発生装置を試作する為、コロナ放電用の電極を設計製作。
- D) コロナ風による氷晶の温度下降効果を検証の為、(A)で購入した超低温フリーザーに取り付ける。温度制御用のPC、CCDカメラ、温度センサーを接続しプログラミングをする。
- E) 冷却理論モデル考察の為、冷却効果と熱収支計算する。
- F) 凍結装置を試作する為、試料の凍結効果を検証する。

#### 4. 研究成果

静電冷却とは、静電界内で冷却・熱効果を示す現象として知られているが、低温度環境下で氷晶の温度下降に応用された例はほとんどなく、またその物理理論は明らかではない。そこで本研究は、(1)このモデルに基づき、過冷却氷晶状態から迅速に熱を奪うことによって、ガラス状の氷晶から固体結晶化する技術を確立することを目的とした。

本研究は、静電界中で発生するコロナ風に注目し、過冷却氷晶の温度下降を促進させる技術の確立を目的とした。まず本研究では、過冷却から氷晶形成過程(融解熱を放出する)に移行する直後に実験を開始できるような体制が必要なため、A)標準水として使う試料水の過冷却を生じる条件を見出すこと、B)コロナ風を発生させるコロナ電極の製作、C)コロナ風発生装置の製作と装置の取り付け、試作する装置に温度センサーを搭載して、コロナ風

による温度降下を測定すること、D) 冷却効果と熱収支より、モデルの考察をおこなうことを目的とした。(A)では、試料水が必ず過冷却を生じる条件で、過冷却を設定することが可能になった。(D)の熱収支のところでは、常温でコロナ風を発生させ、濾紙の乾燥速度を測定し、物質移動の効果を検討できた。またコロナ風による気・液界面における熱移動の促進の効果の測定に成功した。常温で設定条件が整ったので、現在低温度環境下での設定をおこない、成果をあげつつある。

## 5. 主な発表論文等

- 1) Kobayashi Atsuko, M.Horikawa, J.L.Kirschvink, H.N.Golash, Magnetic control of heterogeneous ice nucleation with nanophase magnetite: Biophysical and agricultural implications, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018 115(21), p5383-5388. doi/10.1073/pnas.1800294115 (2018) (査読有り)
- 2) Stamenkovic,....Atsuko.Kobayashi, et al., The next frontier for planetary and human exploration, Nature Astronomy, 2019 3(2), DOI: 10.1038/s41550-018-0676-9 (査読有り)
- 3) Atsuko Kobayashi and Timothy Raub, "Magnetite controls Ice nucleation: Implications for Cloud Formation", American Geophysical Union, Fall meeting 2018, Dec. 10<sup>th</sup> Washington DC, USA. (学会口頭発表)

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

〔図書〕 (計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

プレスリリース等

Magnetic fields disrupt ice nucleation

<https://phys.org/news/2018-05-magnetic-fields-disrupt-ice-nucleation.html>

マグネタイト微粒子の機械操作により氷晶形成をあやつる

<https://www.titech.ac.jp/news/2018/041562.html>

Moving magnetic fields disrupt ice nucleation

[https://www.myscience.org/wire/moving\\_magnetic\\_fields\\_disrupt\\_ice\\_nucleation-2018-caltech](https://www.myscience.org/wire/moving_magnetic_fields_disrupt_ice_nucleation-2018-caltech)

Moving magnetic fields disrupt ice nucleation

<https://www.technology.org/2018/05/11/moving-magnetic-fields-disrupt-ice-nucleation/>

マグネタイト微粒子の機械操作により氷晶形成を操る（東工大ニュース）

<https://www.titech.ac.jp/news/2018/041562.html>

化学工業日報、共同通信社、カリフォルニア工科大学プレス、PNAS プレス、Journal of Chemical Engineering

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：Joseph Lynn Kirschvink

ローマ字氏名：ジョセフ リン カーシュビンク

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：地球生命研究所

職名：客員教授

研究者番号（8桁）：80721258

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。