

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13606

研究課題名(和文) 大気圧プラズマを用いた氷結晶中の水素結合の切断と融雪装置への応用

研究課題名(英文) Interaction between the hydrogen bond in the ice and atmospheric-pressure plasma and its applications for the snow-melting device

研究代表者

安藤 晃 (Ando, Akira)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90182998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではその大気圧プラズマを用いて、力学的、もしくは熱的なエネルギーではなく、化学的なエネルギーによって砕氷・融雪を行う技術を開発することを目的とし、低温度環境下での放電リアクタの計測と低温下における放電特性の計測を行った。放電リアクタとしては最低温度-15度、最高温度100度ほどに変えることの出来るリアクタを作成した。また放電特性計測実験としては、異なるガス温度環境下における放電様相の変化について計測した。その結果、ガス温度の影響を大きく受けるのはストリーマの径と、陰極降下領域における発光強度であることがわかり、ストリーマの径に関しては平均換算電界にほぼ比例して変化していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim to develop a technology to melt ice and snow by chemical reactions caused by an atmospheric-pressure plasma instead of mechanical or thermal energy. The discharge characteristics at low temperature were measured. The discharge reactor, which can easily change the temperature from -15 °C at a minimum and 100 °C at a maximum was prepared. From the photograph of the discharge emission of light in a different temperature, we analyzed the emission intensity and the diameter of the streamer channel. The results shows that the diameter of the streamer is almost linearly changed under low temperature depending on the averaged reduced electric field.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：大気圧プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

日本は世界でも有数の人口が多い豪雪地帯であり、日常生活と雪・氷の扱いは切っても切り離せない問題となる。特に、図1に黒色で示された地域は、「積雪が特に甚だしいため、産業の発展が停滞的で、かつ、住民の生活水準の向上が阻害されている地域」(豪雪地帯対策特別措置法：第1条)として(特別)豪雪地帯に指定されており、例年雪に関する事故や病気(季節性情動障害など)が多く報告されている。雪とどのように暮らしていくかは雪国では大きな問題となっているものの、道路を覆った根雪を砕く砕氷技術や、体への負担が少ない除雪技術、環境への負荷が少ない融雪技術の開発は未だ進んでいない。雪国の人々は、体に優しく、安全で、環境への負荷が少ない砕氷・融雪技術の開発を心待ちにしている。

通常は、融雪技術とはロードヒーターや消雪パイプによる水の散布といった技術に代表されるように、雪に熱を与えることによって融かすことが一般的な方法である。

今回、融雪技術=熱で雪を解かす技術、といった従来の発想を捨て、大気圧プラズマの爆発的な化学反応で雪を解かす手法について基礎的な研究に着手した。大気圧プラズマは別名、低温プラズマとも呼ばれており、放電の種類によっては手で触れることが出来るくらいの温度であることが1つの特徴でもある。大気圧プラズマの研究において、プラズマの化学反応によって分子の解離や結合を促すといった検討が進んでおり、大気圧プラズマを用いて分子の解離や結合を促し、水の相転移現象に応用し、融雪技術と大気圧プラズマを結びつけることを発案した。プラズマにより物質を個体から液体、もしくは気体へと相転移をさせる研究を行った例はこれまでになく、また、プラズマと水素結合との関係も全く明らかになっていない。

さらに本研究では、氷の結晶構造に関する最新の研究結果 (K. Mochizuki, Nature, 498, 350(2013)) を元に、氷の結晶構造と大気圧プラズマの相互作用についての検討も視野に入れている。氷の結晶構造に関しては、氷の融解のメカニズムを探るといった意味においてはこれまでも盛んに研究が行われているが(例えば、Z.H.Jin, Phys.Rev.Lett., 87, 055703(2001))、その融解を促進するために外部から刺激(大気圧プラズマ)を加えるといった試みはなされていない。

### 2. 研究の目的

本研究で提案するのは、大気圧プラズマを用いた新しい砕氷・融雪技術である。大気圧プラズマは現在まで、ガス処理、水処理、医療、半導体加工といった様々な分野で用いられている。大気圧プラズマの特徴は、少ないエネルギーで爆発的な化学反応を起こすことが出来る点であり、将来の低エネルギー技術として注目を集めている。本研究ではそ

の大気圧プラズマを用いて、力学的、もしくは熱的なエネルギーではなく、化学的なエネルギーによって砕氷・融雪を行う技術を開発することを目的とする。

また学術的な観点として、背景ガスの温度が大気圧プラズマの特性に大きな影響を及ぼすことが知られている(Aleksandrov, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 41, 215207(2008))。これまでの研究では主に高温時のプラズマの挙動にのみ着目されており、室温よりも低温にした場合のプラズマの挙動に関して報告された例は少ない。本研究では低温から高温にかけての大気圧プラズマの特性を包括的に明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

背景ガスの温度を自由に換えられる放電リアクタを作成し、ガス温度が大気圧プラズマの諸所の特性に与える影響について調べる。初めに放電リアクタの設計を行った。その設計図を図1に、実際の外観写真を図2に示す。放電リアクタはアルミ板で出来た直方体構造をしており、側面には放電発光観測用の石英ウィンドウが付けられている。また温度を換える手法として、熱電素子の一種であるペルチェ素子を使用した。電流 8A、面積  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  のペルチェ素子を放電リアクタ壁面のアルミ板に2枚取り付け、電流を流すことで放電リアクタの壁面温度を下げ、結果として放電リアクタ内部のガス温度を操作する。またペルチェ素子は電流の向きによって外気に対して高温にも低温にも出来るため、氷点下からペルチェ素子の上限温度まで変化させることが出来る。ペルチェ素子の熱交換を促進させるため、リアクタの外部に放熱用の放熱器とファンを取り付けた。また放電リアクタ周囲の外気に暴露されている部分は断熱材で覆うことで放熱を防ぎ、リアクタ内の温度変化を容易に行えるようにした。

放電電極には基本的な針対平板電極を用いた。放電電極間隔は 0 mm から最大で 30 mm まで可変出来る設計となっているが、本申請所には放電電極間隔を 5 mm とした場合の実験結果を示してある。放電用電源には当研究室で開発したスパークギャップスイッチを用いたコンデンサ放電式のパルス電源を用いた。これはパルス幅 200 ns、ピーク電圧最大 30 kV の電圧を発生させることができる。計測としては基本的な電流・電圧特性に加えて、ICCD カメラを用いた放電発光の観測を行った。電圧プローブには Tektronix P6015A、電流プローブには Pearson 2807 を用いた。また ICCD カメラは Andor i-Star、カメラレンズには Nikkor のマクロレンズを用いた。パルス発生回路のトリガと ICCD カメラのトリガを同期し、最大でゲート幅 2 ns の発光写真を撮影した。大気圧下における放電進展速度はおおよそ  $0.1 - 1 \text{ mm/ns}$  であるので、カメラゲート幅を ns オーダーで撮影することで放電進展時の様相を計測することが出

来る。

リアクタ内の温度の計測にはTholabs社のサーミスタ温度計(TSP01)を用いた。これは気体温度-40度から125度まで、直径1mmほどのプローブを用いて温度を計測できるものである。本研究ではこのプローブを放電リアクタ内に挿入し、1秒ごとの温度データをPCに取り込んだ。

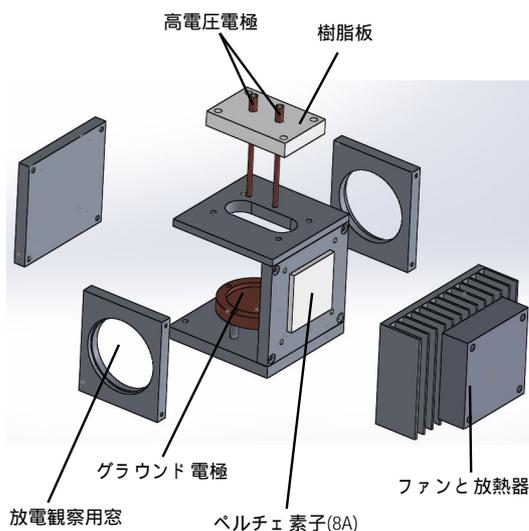


図1：放電リアクタ設計図



図2：実際の放電リアクタの外観

#### 4. 研究成果

初めにリアクタ内のガス温度が想定通りに変化できるかどうかを調べた。リアクタ内部温度の経時変化を示したグラフを図3に示す。室温状態のリアクタに、ペルチエ素子に15.6V、14Aの電流を正方向に流すことでリアクタ内の温度を冷却した。その結果、冷却開始からおおよそ15分ほどで-10に達した。このとき、放電リアクタ内の平板電極上に水滴を落とすと、即座に凍結することを確認した。冷却後、ペルチエ素子に電流を逆方向に流し、放電リアクタ内の温度を加熱した。冷却時に比べて加熱時の温度上昇は早く、

おおよそ10分程度で73度に達した、本報告書では結果を記してはいないが、最低温で-15度まで、最高温で100度まで達することを確認できており、設計時の要求をほぼ満たせるようなリアクタの設計に成功した。

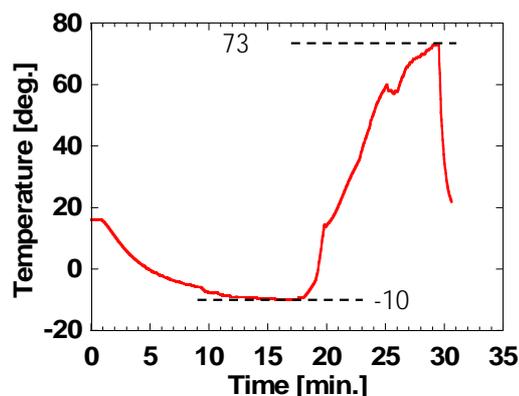


図3：リアクタ内の温度変化

次に放電発光の様子をICCDカメラで撮影した。その結果を図4に示す。印加している放電電圧波形のピーク電圧は20kVであり、放電周波数は1Hzとした。ガス温度はそれぞれリアクタ内温度は(a)-3、(b)20度、(c)60度となっている。このときゲート幅は1μsに設定したため、放電1発分の積分された発光を撮影していることになる。なおイメージンテンシファイアの設定はそれぞれの写真において同じにしているため、発光強度はそのまま比較することができる。図4より、低温時にはストリーマの直径が細く、温度を上げることによって直径が太くなっていることがわかる。また、平板近傍の陰極効果領域における放電発光強度が、温度を上げるにつれて顕著に強くなっていることがわかる。

図5にはそれぞれの写真からストリーマの直径を計測し、温度に対してプロットした結果を示す。ガス温度を上げるにつれて、ストリーマの直径は直線的に増加していることがわかる。大気圧プラズマにおいては放電の特性は、電界をガス密度で除した換算電界に大きく影響を受けることが知られている。ガス密度はガス温度の逆数で見積もることができる。その結果を図5に合わせて記してある。今回実験を行った範囲内においては、放電電極間の平均換算電界は73Tdから90Tdほどに直線的に変化しており、これがストリーマチャンネルの径の増加に影響しているものと考えられる。ストリーマ放電において、ガス温度を高温にした場合においては、放電特性は換算電界のみで決まるのではなく、放電チャンネル中で生じる化学反応速度の温度依存性も影響する。今回、低温温度下における放電特性について実験を行い、換算電界との関係や化学反応の影響について検討を進めることができた。これらの温度による放電特性の変化を把握したうえで、今後、さらに高電界による氷の融解実験を現在進め、学会

や論文等でその成果を広く公表していく予定である。

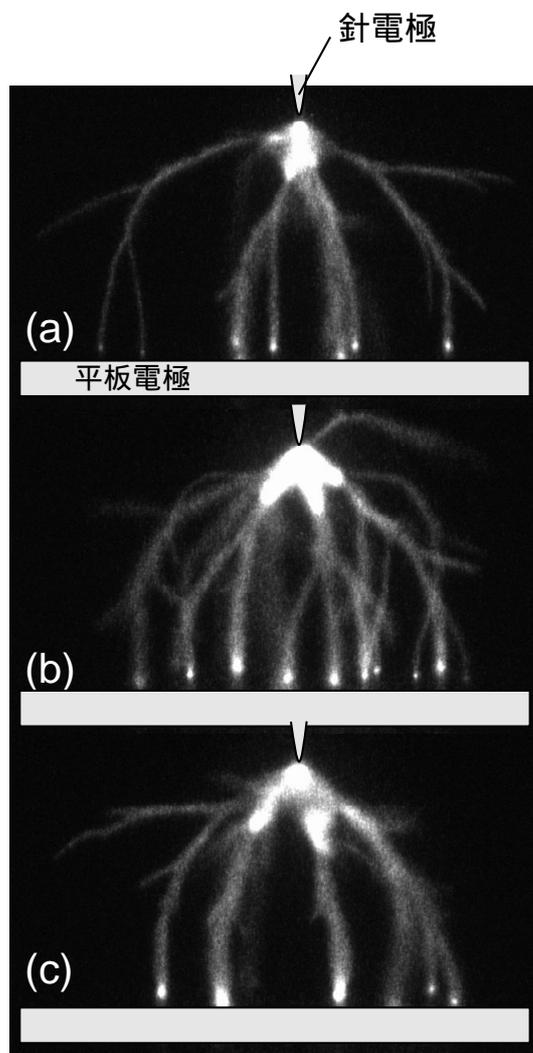


図4：リアクタ内の温度変化。それぞれリアクタ内温度は(a) -3、(b) 20度、(c) 60度となっている。

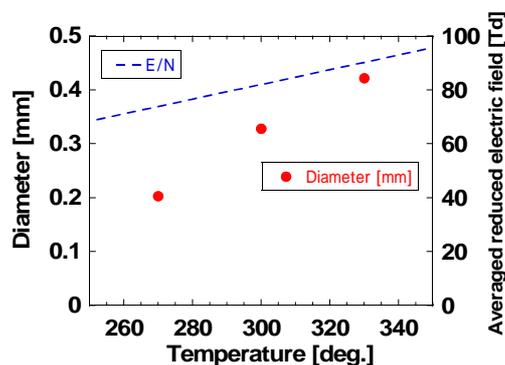


図5：ガス温度による放電チャンネル直径の変化と、電極間の平均電界。

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)

Komuro A and Ando A 2017 Effect of voltage amplitude on gas density variation in an atmospheric pressure streamer discharge *The European Physical Journal Applied Physics* **78** 20802. 査読有.

DOI: 10.1051/epjap/2017160477.

Komuro A and Ando A 2017 Simulation of spatio-temporal variation of OH radical density in atmospheric-pressure streamer discharge *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** 065003. 査読有. DOI: 10.1088/1361-6595/aa638d

Komuro A, Takahashi K and Ando A 2015 Vibration-to-translation energy transfer in atmospheric-pressure streamer discharge in dry and humid air *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 055020. 査読有.

DOI: 10.1088/0022-3727/48/21/215203

Komuro A, Takahashi K and Ando A 2015 Numerical simulation for the production of chemically active species in primary and secondary streamers in atmospheric-pressure dry air *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 215203. 査読有.

DOI: 10.1088/0963-0252/24/5/055020

〔学会発表〕(計 9 件)

Shuto Matsuyuki, Atsushi Komuro, and Akira Ando, “Simulation for the temperature effects on radical productions in atmospheric-pressure streamer discharge”, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10), Taoyuan, Taiwan, 15-17. Dec. 2017.

Atsushi Komuro, Shuto Matsuyuki, and Akira Ando, “Simulation for electron density distribution in an atmospheric-pressure streamer discharge and validation with experiments”, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-10), Taoyuan, Taiwan, 15-17. Dec. 2017.

小室淳史, 安藤晃, 「大気圧ストリーマ放電における荷電粒子の反応過程」, 第18回静電気学会春季講演会、東京大学、東京都、2017年3月7日

松行柊人, 小室淳史, 高橋和貴, 安藤晃, 「高ガス温度中の大気圧ストリーマ放電における荷電粒子反応モデルに関する検討」, 第18回静電気学会春季講演会、東京大学、東京都、2017年3月7日

小室淳史, 「負極性ストリーマ放電のシミュレーションおよび実験計測との比較」, 東京大学、東京都、2016年11月17日.

Atsushi Komuro, Kazunori Takahashi,

and Akira Ando, “Effects of pulse voltage waveforms on fast gas heating in an atmospheric pressure streamer discharge”, 16th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (HAKONE XV), Brno, Czech republic, 11-16. Sep. 2016.

小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「大気圧ストリーマ放電で発生する化学活性種の電極間領域における生成特性」、電気学会プラズマパルスパワー放電合同研究会、岩手大学、盛岡市、岩手県、2016年5月26日

小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「大気圧ストリーマ放電中のガス加熱機構について」、日本物理学会第71回年次大会、東北大学院大学、仙台市、宮城県、2016年3月20日

小室淳史、高橋和貴、安藤晃、「ストリーマ放電によって発生する化学活性種の時間・空間変化」、第17回静電気学会春季講演会、東京大学、東京都、2016年3月7日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安藤 晃 (ANDO, Akira)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90182998

### (2) 研究分担者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80451491

小室 淳史 (KOMURO, Atsushi)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70733137

### (3) 連携研究者

該当なし

### (4) 研究協力者

該当なし