

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20991

研究課題名（和文）火星環境下における酸素生成と燃料生成技術の検討

研究課題名（英文）Oxygen and fuel production technologies in the Martian environment.

研究代表者

小室 淳史（Komuro, Atsushi）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：70733137

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、プラズマを利用したCO₂分解技術を火星現地での酸素生成技術へ応用することを見据え、基礎研究として低温環境下における正極性パルスストリーマ放電の諸特性の観測実験と、応用研究としてCO₂の分解実験を行った。ストリーマ放電の観測からは、放電エネルギーと放電発光強度に関してはガスを低温にすることによる温度効果が確認された。CO₂分解実験では、気温マイナス40度、0.7 kPaのCO₂環境下で誘電体バリア放電を発生させたところ、10%程の酸素と20%程の一酸化炭素が生成されていることが確認できた。本研究により、疑似火星環境下でも問題なくCO₂から酸素と一酸化炭素を生成できることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放電プラズマを用いて温室効果ガスであるCO₂を処理する研究はこれまでも盛んに行われてきたが、本研究ではCO₂を有用な資源としてとらえ、火星環境下という特殊環境下において有効に活用するための方法を提案するものであり、これまでの研究とは一線を画すものである。本研究の成果により、火星環境を模擬した低温かつ低圧環境下においても、CO₂からO₂とCOを生成できることが示され、また基礎的な研究によりガス温度が放電特性に与える影響も一部明らかになった。本研究がさらに進展し火星環境中で効率よく酸素と燃料を自給できるようになれば、火星探査計画の進展に貢献することができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to apply plasma-based CO₂ decomposition technology to oxygen generation on Mars. As part of the basic research, we conducted observation experiments on the various characteristics of positive-polarity pulse streamer discharges in a low-temperature environment. In the CO₂ decomposition experiment, a dielectric barrier discharge was generated under a CO₂ environment of -40 °C and 0.7 kPa. The results confirmed the production of approximately 10% oxygen and 20% carbon monoxide. This study demonstrated that oxygen and carbon monoxide can be generated from CO₂ without any issues, even in a pseudo-Mars environment.

研究分野：大気圧プラズマ

キーワード：大気圧プラズマ 二酸化炭素 火星 酸素生成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

文部科学省は2014年5月、2030年以降の火星探査に向けた検討を始めた。火星には長期滞在や資源利用などの可能性があり、挑戦する意義があるフロンティアだとしている(文科省：国際宇宙探査ロードマップ)。米国は2030年代半ばまで、中国は2050年代までに人類を火星に送る方針を既に公表しており、今後世界各国で火星探査競争が繰り広げられるのは想像するに難くない。

地球から火星までの距離は55-400万kmであり、片道で6ヶ月の移動時間を要する。また現地長期滞在を実現し、かつ、地球へ安全に帰還するための燃料を確保するためには、火星に存在する資源を活用する以外に方法はない。そこで、NASAではMOXIEと呼ばれる装置を開発した。MOXIEは固体酸化物電解セルを用いて、二酸化炭素を一酸化炭素と酸素に分解する装置である。現在、実際にMOXIEを火星で作動させ、火星大気中の二酸化炭素から酸素を生成する実証実験を行っている[1]。

一方で、MOXIEにはいくつかの課題がある。まず、MOXIEに使用されている固体酸化物は主にジルコニアで作られたセラミックであり、作動には800度以上という高温まで加熱する必要があり、エネルギー効率という点で課題がある。また、電極材料にはNiサーメットという物質が用いられており、希少かつ高価である。さらに、MOXIEは大気を捕集して圧縮するプロセスが必要である。

プラズマを用いたCO₂分解であれば、これらのデメリットを克服することが可能である。プラズマではMOXIEのように高温にする必要はなく、材料についても、希少な材料を使用する必要がない。また、ガスを圧縮する必要もなく、むしろ地球の100分の1以下である火星の低圧大気は、放電が発生しやすく都合がよい[2]。

2. 研究の目的

本研究では火星で得られる資源としてCO₂に着目し、火星に滞在するためのO₂生成、探査機器の燃料として用いるCO生成を行う方法を提案する。CO₂は非常に安定な分子であり、分解することは容易ではないが、火星特有の低圧・低温環境下の特性と、放電プラズマにより効率的にCO₂解離反応を生じさせることが可能である。

3. 研究の方法

本研究は主に基礎研究としての放電実験と、応用研究としてのCO₂分解実験を行った。放電実験では実験装置の概要を図1に示す。放電チャンバーは2重構造になっており、内側のチャンバーを液体窒素との熱交換により冷却し、その周囲を真空($<1.0 \times 10^{-2}$ Pa)にすることで断熱している。電極には電極間距離13 mmの針対平板電極を用いており、針を正極とするパルス電圧を印加する。安定して放電を発生させるため、5本の針電極を適当な間隔で配置している。内側のチャンバー内には乾燥空気(N₂: 79%, O₂: 21%)を使用し、ロータリーポンプを使用することでガス圧力を調整する。電極間の乾燥空気の温度は、内側チャンバー内に挿入した測温抵抗体により測定する。本装置は、最低温度約95 Kまでの冷却が可能である。放電の撮影にはAndor製ICCDカメラを用いた。露光時間は発光強度測定では500 ns、進展速度計測では2 nsとした。

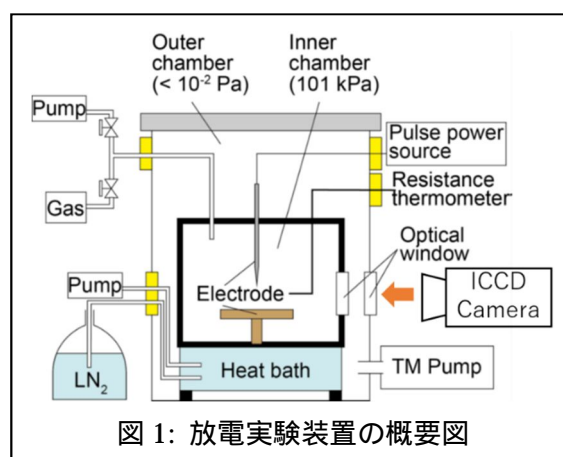


図1: 放電実験装置の概要図

CO₂分解実験では、ガラス管で出来たDBDリアクタにダイアフラムポンプをつなげて0.7 kPa程度のガス圧を実現した、ダイアフラムポンプの排気をガスクロマトグラフに導入し、DBD処理されたガスの分析を行った。ガスクロマトグラフではN₂, O₂, CO, CO₂が測れるようにした。CO₂ガスの冷却には液体窒素とアルミビーズを使って-70度ほどを実現した。

4. 研究成果

初めに図1に示した放電実験装置を用いて、二酸化炭素中における放電現象の基礎特性を計測した。火星を模擬した低圧・低温環境下で二酸化炭素の分解を行うことを見据え、圧力や温度を変化させながら二酸化炭素中のストリーマ放電の進展と電流電圧特性を計測した。ストリーマ放電は非熱平衡プラズマの中でも基本的なプラズマ形態であるため、その基礎的な特性の計測や、放電エネルギーの算出、それらの圧力や温度による影響を考察することは応用上重要であると考えた。今回の実験では、当研究室でも研究されてきた空気中での放電特性と比較しながら、二酸化炭素中でのストリーマ放電の進展の様子、発光強度、電流電圧波形を計測し、減衰時定数と放電エネルギーを計算した。

図2に大気圧室温のCO2雰囲気下において発生させたストリーマ放電の放電発光写真を示す。印加電圧はピーク電圧25 kV、パルス幅100 ns程度のパルス電圧である。空気中で発生させるストリーマ放電よりもフィラメント径が細く、枝分かれの多い構造をしていた。また放電の進展速度は空気に比べて遅かった。CO2中におけるストリーマ放電の様相は、空気中のストリーマ放電よりも窒素中のストリーマ放電に似ていた。これは、CO2中や窒素中では、空気中に比べて光電離の発生量が大幅に小さいためと考えられる。次に印加電圧と放電電流を計測し、放電1発当たりのエネルギーを算出した。結果を図3に示す。ここで、 V_0 は放電開始電圧、 T は温度、 P は圧力であり、横軸は印加電圧 V_0 を密度($\propto P/T$)で規格化した値に相当する。電子が分子との衝突間に得られるエネルギーを考えると、印加電圧を密度で規格化することで電子が電場から得るエネルギーをおおよそ見積もることができる。温度が放電に与える影響を確認するために、300Kの放電と205Kの放電に対して、同程度の $(V_0 T)/P$ を持つパラメータ領域で放電エネルギーを比較した。図3より、温度を下げることにより放電エネルギーが上昇する傾向がみられた。

次にCO2の分解実験を行った。初めに大気圧の空気条件で実験を行い、段階的に気圧や温度、ガス種の条件を偏光していった。ガス圧を0.75 kPa、室温(293 K)でCO2+N2の分解実験を行ったときの結果を図4に示す。図4の縦軸はガスクロマトグラフの面積比から算出したガス成分比であり、各ガス種に対してそれぞれ校正してある。横軸は時系列になっており、プラズマOFFの条件から初めは10 kVピークトゥピーク(kVpp)のサイン波を放電電極に印加し、徐々に電圧を上げ最終的には14 kVppまで実験を行った。結果より、プラズマを発生する前はO2とCOは存在していないが、プラズマを付けるとO2とCOが生成されていることがわかる。この時、40分ほど持続的に電圧を印加したが、O2とCOの生成量は大きくは変化しなかった。その後、電圧を12 kVpp、14 kVppと上げると、COとO2の生成量が増えていった。この時の実験条件においては、最終的には7.5%程度のO2と、15%程度のCOが得られた。また、図4で示した実験とは別に、低温(-40度程度)で実験を行ったときも同様にO2とCOが生成されていることを確認した。これらの結果より、低圧かつ低温の条件下でも、プラズマを用いてCO2からO2とCOを生成できることが示された。今回の研究期間で研究環境の構築とCO2分解の実証を行うことができた。今後はCO2の分解効率の向上とそのメカニズムの解明に取り組み、火星環境下に対してプラズマ技術をさらに適応させていき

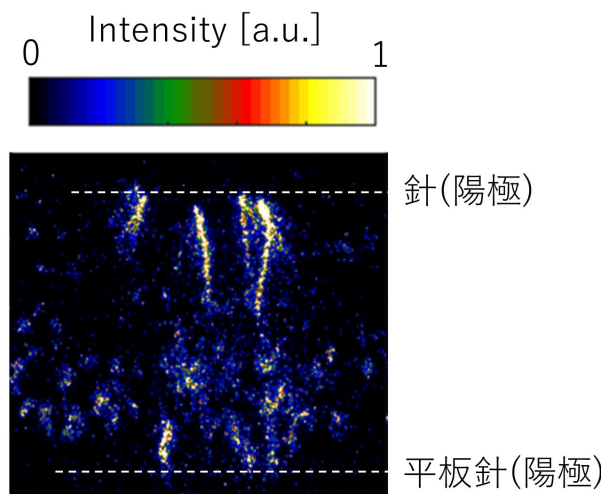


図2: CO2中におけるストリーマ放電の発光

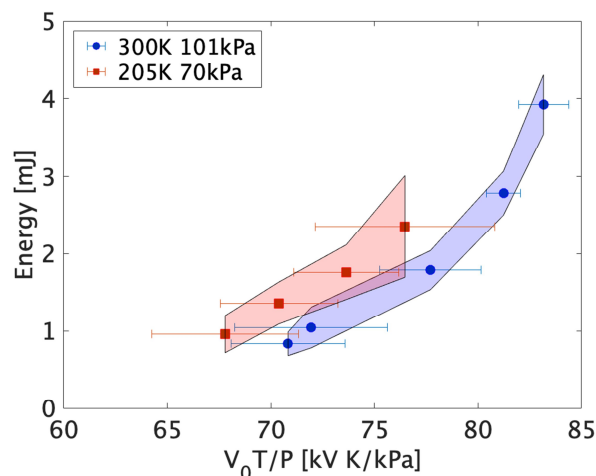


図3: CO2中における放電エネルギー

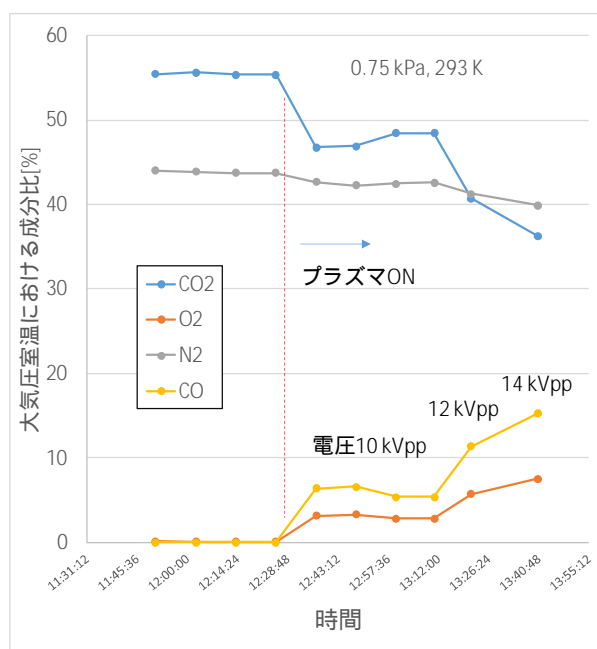


図4: CO2分解実験

たい。

参考文献

- [1] Hecht M, Hoffman J, Rapp D, et al. 2021 Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) *Space Science Reviews* **217** 9.
- [2] Ogloblina P, Morillo-Candas A S, Silva A F, et al. 2021 Mars in situ oxygen and propellant production by non-equilibrium plasmas *Plasma Sources Science and Technology* **30** 065005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Komuro Atsushi, Yoshino Akihiro, Wei Zhenyu, Ono Ryo	4. 巻 56
2. 論文標題 Effects of oxygen concentration on streamer propagation and ozone production in a single-filament streamer discharge at atmospheric pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 185201 ~ 185201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/acc18f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Keigo, Komuro Atsushi, Wada Noboru, Naito Teruki, Ando Akira	4. 巻 117
2. 論文標題 Effect of oxygen fraction in nitrogen/oxygen mixtures on primary and secondary streamers in atmospheric-pressure barrier discharge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Electrostatics	6. 最初と最後の頁 103716 ~ 103716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2022.103716	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Natsume China, Komuro Atsushi, Ando Akira	4. 巻 31
2. 論文標題 Characterisation of surface charge density and net electric field during parallel-plate dielectric barrier discharge generated in atmospheric-pressure air	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095019 ~ 095019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/ac90e9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Komuro Atsushi, Zhenyu Wei, Ono Ryo	4. 巻 16
2. 論文標題 Electric field manipulation in a conductive channel of atmospheric-pressure streamer discharge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IJPEST	6. 最初と最後の頁 e03001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34343/ijpest.2022.16.e03001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Keigo, Komuro Atsushi, Ando Akira	4. 巻 54
2. 論文標題 Effects of relative permittivity on primary and secondary streamers in atmospheric pressure dielectric barrier discharge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 315203 ~ 315203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac0010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsuhashi Kodai, Komuro Atsushi, Suzuki Kento, Natsume China, Ando Akira	4. 巻 30
2. 論文標題 Spatiotemporal variations of the electrical potential on surface dielectric barrier discharges	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 04LT02 ~ 04LT02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/abefa7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Komuro Atsushi, Ryu Terumasa, Yoshino Akihiro, Namihira Takao, Wang Douyan, Ono Ryo	4. 巻 54
2. 論文標題 Streamer propagation in atmospheric-pressure air: effect of the pulse voltage rise rate from 0.1 to 100 kV/ns and streamer inception voltage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 364004 ~ 364004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac0b0f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Komuro Atsushi, Natsume China, Ando Akira	4. 巻 30
2. 論文標題 Measurement of gas-density variation in pulsed streamer discharge at atmospheric pressure by Mach-Zehnder interferometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095007 ~ 095007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/ac1def	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小室淳史、戸田悠太、小野亮
2. 発表標題 低温環境下におけるストリーマ放電の観測
3. 学会等名 第45回静電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小室淳史、戸田悠太、小野亮
2. 発表標題 低温環境下におけるストリーマ放電の発生と相似則効果の観測
3. 学会等名 SPP39/SPSM34
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田悠太, 小室淳史, 小野 亮
2. 発表標題 低温環境下におけるストリーマ放電の放電エネルギー特性
3. 学会等名 2022年度(第23回)静電気学会春期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Komuro
2. 発表標題 Analysis of Physicochemical Processes in Atmospheric-pressure Streamer Discharges Using Simulations and Experiments
3. 学会等名 APSPT-12 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Komuro
2. 発表標題 Modeling of chemical reaction processes induced by an atmospheric-pressure streamer discharge in air
3. 学会等名 GEC 2022 & ICRP-11 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Komuro
2. 発表標題 Simulation for chemical reaction pathways in an atmospheric-pressure streamer discharge
3. 学会等名 32nd Annual Meeting of MRS-J 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	寺本 慶之 (Teramoto Yoshiyuki) (00635328)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------