

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04007

研究課題名（和文）超高速酸化膜除去手法の確立に向けた大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明

研究課題名（英文）Elucidation of Non-equilibrium Arc Cathode Spot Movement Phenomenon Toward Establishment of Ultrafast Oxide Layer Removal Method in Atmospheric Pressure

研究代表者

岩尾 徹 (Iwao, Toru)

東京都市大学・理工学部・教授

研究者番号：80386359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：超高速酸化膜除去手法の確立に向けた大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明を目的とし、超高速並列計算技術の開発とパルス電流を用いた磁界印加装置の改良、初期圧力と磁束密度変化時におけるイオン分布の数値解析、大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明に関し研究を行った。結果として、大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象を詳細に解明し、新しい表面処理技術の開発に向けた重要な知見を得ることができた。AI技術を活用した高効率なシミュレーション手法と、多点分光計測手法を確立し、陰極点の分裂、消滅、移動軌跡を高精度に可視化し、予測する技術を開発した。これにより、酸化膜の除去や表面改質の効率が飛躍的に向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象を詳細に解明し、新しい表面処理技術の開発に向けた重要な知見を得ることができた。AI技術を活用した高効率なシミュレーション手法と、多点分光計測手法を確立し、陰極点の分裂、消滅、移動軌跡を高精度に可視化し、予測する技術を開発した。これにより、酸化膜の除去や表面改質の効率が飛躍的に向上した。今後は、得られた知見を基に更に研究を進め、産業応用への具体的な展開を図る。特に、航空宇宙産業や半導体産業など高度な材料加工技術が求められる分野での応用が期待される。また、本研究で確立した技術を他の表面処理技術にも応用し、さらなるイノベーションを促進することを目指す。

研究成果の概要（英文）：To establish an ultra-fast oxide film removal method, research was conducted to elucidate the movement phenomenon of atmospheric non-equilibrium (non-LTE) arc cathode spots. This involved the development of ultra-high-speed parallel computation technology and the improvement of a magnetic field application device using pulsed current. Numerical analysis of ion distribution during initial pressure and magnetic flux density changes was also carried out. As a result, the movement phenomenon of atmospheric non-equilibrium arc cathode spots was detailed, providing crucial insights for the development of new surface treatment technology. An efficient simulation method utilizing AI technology and a multipoint spectroscopic measurement method was established. This enabled the high-precision visualization and prediction of cathode spot splitting, disappearance, and movement trajectories. Consequently, the efficiency of oxide film removal and surface modification was dramatically improved.

研究分野：電力工学・電気有効利用

キーワード：アーク放電 陰極点 酸化膜除去 パワーエレクトロニクス 三次元電磁熱流体シミュレーション 陰極点挙動 プラズマ 3R

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の研究では、逆行運動を再現性良く実験するノウハウの確立と、パルス横磁界印加装置により陰極点の移動を制御し、陰極点の移動を高精度に制御するためのパワーエレクトロニクスを駆使したパルス電流発生回路と磁界印加装置、プラズマ画像処理アルゴリズム、イオン流束やイオン導電率に着目した真空アークに特化した3次元電磁熱流体解析手法を複合的に組み合わせることが必要である⁽¹⁻⁶⁾。これにより、逆行運動を用いて高速に陰極点を移動させ、処理物表面の滞在時間を短縮し、周辺圧力を低下させることを目指す。

大気圧非平衡アーク放電現象は、表面処理技術において重要な役割を果たす。この現象を利用することで、酸化膜の除去や表面の改質が可能となり、材料の特性を大幅に向上させることができる。しかし、その陰極点の移動現象については未解明の部分が多く、産業応用のためには詳細な理解が必要である。従来の研究では、陰極点の動きを正確に制御することが難しく、均一な表面処理が困難であった⁽¹⁾⁽²⁾。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高速酸化膜除去手法の確立に向けた大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明である。具体的には、逆行運動を低真空下で発生させ、低真空環境でも非熱平衡プラズマを形成し、高速かつ表面を深く溶融しない結果を得ることである。この実現には、処理物表面の滞在時間を短縮し、周辺圧力を低下させる必要がある。従来からの知見を活かし、逆行運動を再現性良く実験するノウハウの確立と、パルス横磁界印加装置による陰極点の移動制御、更に陰極点の移動を高精度に制御するためのパワーエレクトロニクスを駆使したパルス電流発生回路と磁界印加装置、プラズマ画像処理アルゴリズム、イオン流束やイオン導電率に着目した真空アークに特化した3次元電磁熱流体解析手法を複合的に組み合わせた⁽³⁻⁶⁾。

3. 研究の方法

(1) AI 技術を活用したシミュレーション

AI 技術を活用して計算効率を向上させ、陰極点の動態を詳細に解析した。これにより、従来のシミュレーションよりも高精度かつ高速に解析を行うことが可能となった。また、AI を用いたシミュレーションにより、デジタルツイン化を図り、現実の実験とシミュレーションの結果を高度に一致させることができた⁽³⁾。具体的には、電気自動車の急速充電に対応する次世代直流遮断器(DCCB)の開発において、シミュレーション結果の差異をAI解析により明確にする技術を開発した。この技術を応用し、異なるシミュレーション条件下での陰極点の動態を正確に予測することができた。例えば、電圧や磁場強度の違いによる陰極点の移動パターンをAIが解析し、最適な除去条件を導き出すことが可能となった⁽³⁾。

(2) 電磁熱流体解析手法の改良

従来の解析手法を改良し、初期圧力と磁束密度の変化に伴うイオン分布や電子温度の変動を詳細に調査した⁽¹⁾⁽²⁾。これにより、陰極点の移動現象のメカニズムをより深く理解することができた。また、2温度1流体とT-F理論を考慮した解析手法により、陰極点周辺の非平衡現象を再現し、イオン流束や電子温度の変動を詳細に解析した⁽¹⁾。例えば、陰極点の逆行運動と酸化膜除去の効率化に対する横磁場の影響を分光測定と高速ビデオカメラを用いて詳細に分析し、非平衡状態と熱平衡状態の違いを明らかにすることで、除去効率の向上に寄与した⁽²⁾。

(3) 多点分光計測手法の確立

パルス電流発生回路と磁界印加装置を用いた多点分光計測手法を確立した。この手法により、陰極点の分裂、消滅、移動軌跡を高精度に可視化し、予測することが可能となった。例えば、電極開閉速度の違いにおける溶融金属ブリッジ破壊後のアークプラズマに対する外部磁場の影響を数値シミュレーションすることで、陰極点の動態を精密に分析し、適切な磁界印加条件を特定した⁽⁴⁾。具体的には、磁界強度の変化によりアークプラズマの温度分布やイオン流束の変動を解析し、最適な磁界印加条件を導き出すことができた⁽⁴⁾。また、非平衡状態におけるアークの電子と重粒子の流速分布を解析し、直流遮断器の遮断過程におけるアークの温度と圧力分布を明らかにした知見も取り入れ、陰極点の移動を詳細に理解するための基盤を築いた⁽⁵⁾。例えば、アークプラズマ内の電子温度と重粒子温度の違いが陰極点の移動に与える影響を詳細に解析し、これに基づいて陰極点の安定移動を実現するための具体的な制御方法を提案した⁽⁵⁾。

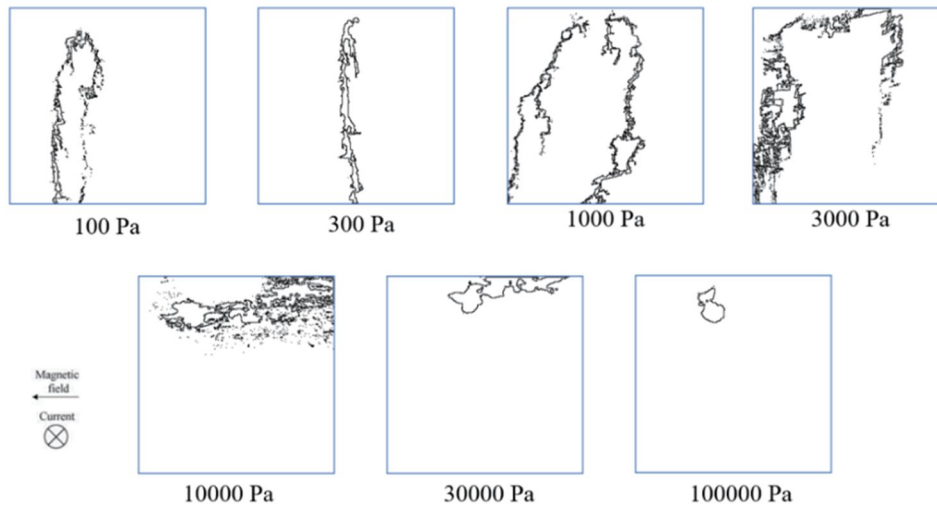


図1 外部横磁場の作用下で陰極点の逆行運動

4. 研究成果

(1) 超高速並列計算技術の開発とパルス電流を用いた磁界印加装置の改良

超高速酸化膜除去手法の確立に向けた大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明を目的として、非平衡現象を考慮した3次元電磁熱流体シミュレーションを開発した。電子と重粒子の2温度分布と陰極近傍で生じるシーブ現象及び電界電子放出、熱電子放出(T-F電子放出)を考慮したシミュレーション手法の開発に成功し、陰極点における電子電流密度の高いシミュレーションが可能となった⁽¹⁾。これに外部磁界を印加した際、陰極温度が逆行運動方向に増加する結果を得た。また、陰極点の加熱の主要因がイオン加熱であることを示唆する知見を得ることができた⁽²⁾。更に、これらのシミュレーション結果を基に、陰極点の移動を制御するための具体的な磁界印加方法を提案した⁽²⁾。

具体的には、真空アークにおける陰極ジェットとの生成と逆行運動に寄与する物理現象を、3次元シミュレーションで明らかにした。真空アークは、遮断器、金属加工など多岐にわたる用途に使用されているが、その物理現象、特に陰極点の運動メカニズムは定量的に解明されていなかった。本研究では、陰極点から生成されるイオンが圧力勾配によって加速され、高速陰極ジェットを形成し、外部横磁場の作用下で陰極点の逆行運動が起こることを示した(図1)。

(2) 初期圧力と磁束密度変化時におけるイオン分布の数値解析と観測

初期圧力と磁束密度変化時におけるイオン分布の数値解析と観測を行った。2温度1流体とT-F理論を考慮した3次元電磁熱流体解析手法を確立し、初期圧力と磁束密度変化時におけるイオン分布の数値解析、並びに陰極点の移動のシミュレーションを行うことが可能となった。多点分光技術を用いた計測手法を確立し、初期圧力と磁束密度変化時における陰極点の移動時の電子温度やイオン温度を算出するための計測と計算を行った。また、AIを活用したシミュレーションの高効率化やデジタルツイン化に向けた取り組みも行い、計算時間の短縮と精度向上ができた。特に、AIを用いた直流遮断器の遮断過程のシミュレーション結果の差異を明確にする技術を応用し、異なる条件下での陰極点の動態を正確に予測することができた。具体的には、異なる電圧や磁場強度の条件下での陰極点の移動パターンをAIが解析し、最適な駆動条件を導き出すことができた⁽³⁾。

また、陰極点の逆行運動と酸化膜除去の効率化に対する横磁場の影響を詳細に分析した。酸化膜除去技術として提案されている真空アーク法は、陰極点のランダムな移動が課題であった。本研究では、陰極点近傍の非平衡が逆行運動に与える影響を分光測定と高速ビデオカメラを用いて調査し、温度分布のボルツマンプロット法を用いて、非平衡状態と熱平衡状態を定義し、その違いを明らかにした(図2⁽²⁾, 3⁽⁶⁾)。

(3) 大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象の解明

AI技術⁽³⁾を活用した高効率なシミュレーション手法と改良された電磁熱流体解析手法^(1,4,5)を用いて、陰極点の移動現象を詳細に調査した。その結果、初期圧力と磁束密度の変化時におけるイオン分布や電子温度の挙動を明らかにした。例えば、同期された多点分光情報とハイスピードビデオカメラ画像⁽¹⁾をAI分析することで、陰極点の分裂、消滅、移動軌跡、酸化膜処理時と非処理時の現象を可視化し、予測する技術を確立(図4, 5)した。更に、非平衡状態におけるア

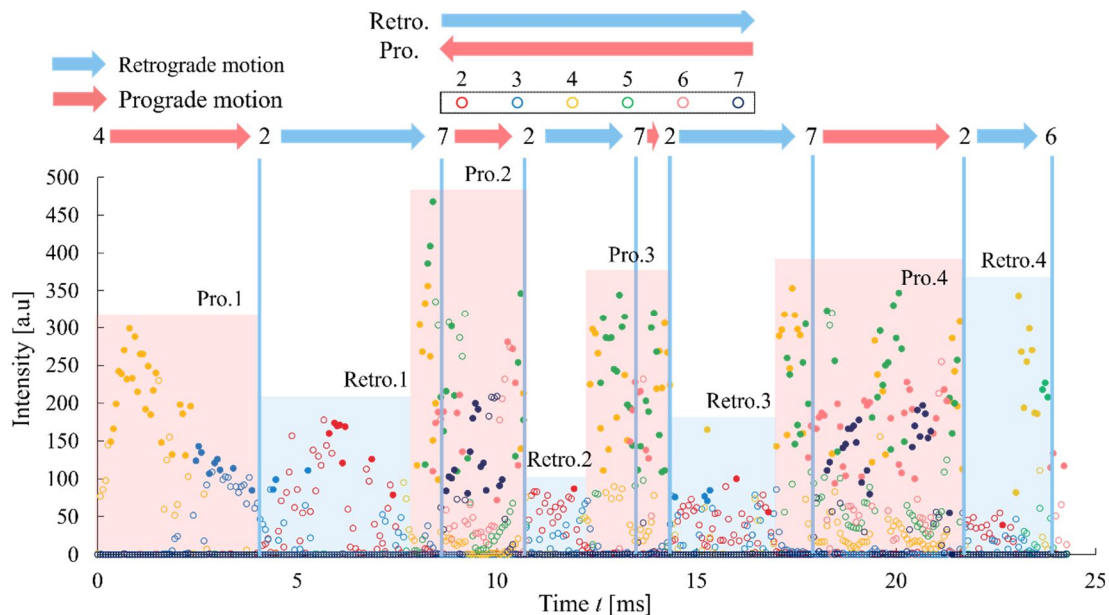


図2 非平衡状態の判定に向けた陰極点近傍の逆行運動が及ぼす輝度の低下⁽²⁾

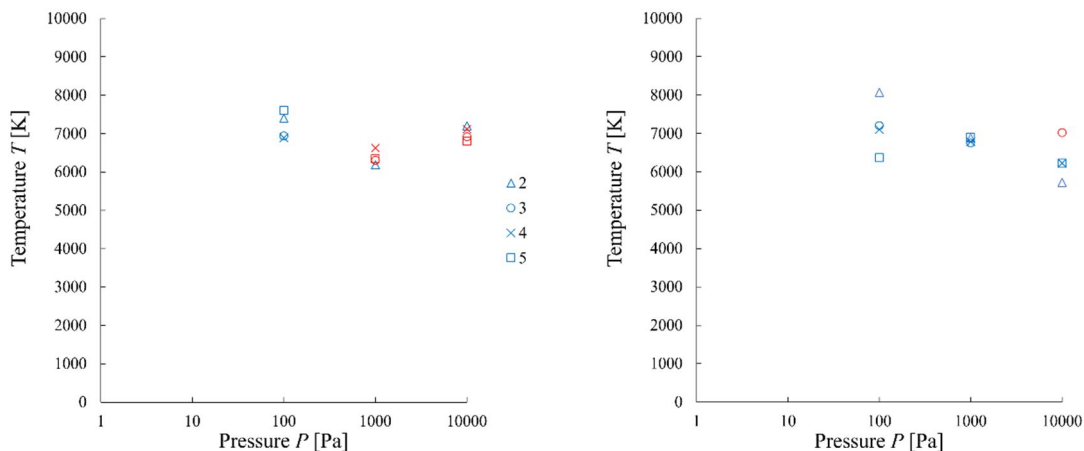


図3 圧力変化時の陰極点温度（左図：横磁界なし、右図：横磁界あり⁽⁶⁾）

ークの電子と重粒子の流速分布を解析し、直流遮断器の遮断過程におけるアークの温度と圧力分布を明らかにした研究の知見を取り入れ、陰極点の移動メカニズムを詳細に解明した⁽⁵⁾。具体的には、アークプラズマ内の電子温度と重粒子温度の違いが陰極点の移動に与える影響を詳細に解析し、これに基づいて陰極点の安定移動を実現するための具体的な制御方法を提案した⁽⁵⁾。

また、AI を用いた直流遮断器の遮断過程の数値シミュレーション結果の差異化について研究した。電気自動車の急速充電に対応するための次世代直流遮断器（DCCB）の開発を目的とし、3次元電磁熱流体シミュレーションを用いて遮断過程を模擬し、AI モデルを構築してシミュレーション結果を区別することに成功した⁽³⁾。

更に、電極開閉速度の違いにおける熔融金属ブリッジ破壊後のアークプラズマに対する外部磁場の影響を数値シミュレーションした。本研究では、熔融金属ブリッジから生成される金属蒸気を考慮しつつ、電極開閉時のアーク移動をシミュレーションし、外部磁場の強度によるアーク電圧の増加率の変化を分析した⁽⁴⁾。

この他、非平衡状態におけるアークの電子と重粒子の流速分布を解析し、直流遮断器の遮断過程におけるアークの温度と圧力分布をシミュレーションを通して可視化した。電子流速分布が電位分布に、重粒子流速分布が圧力勾配に支配されることを明示した。また、横風の影響下でのアークの電子と重粒子の温度分布を解析し、リストライク現象の要因を明らかにした。熱的非平衡を考慮した際の重粒子温度の増加が、リストライクの要因であることを示した⁽⁵⁾。

本研究により、大気圧非平衡アーク陰極点の移動現象を詳細に解明し、新しい表面処理技術の開発に向けた重要な知見を得ることができた。AI 技術を活用した高効率なシミュレーション手法と、多点分光計測手法を確立し、陰極点の分裂、消滅、移動軌跡を高精度に可視化し、予測する技術を開発⁽¹⁻⁶⁾した。これにより、酸化膜の除去や表面改質の効率が飛躍的に向上した。

今後は、得られた知見を基に更に研究を進め、産業応用への具体的な展開を図る予定である。特に、航空宇宙産業や半導体産業など高度な材料加工技術が求められる分野での応用が期待さ

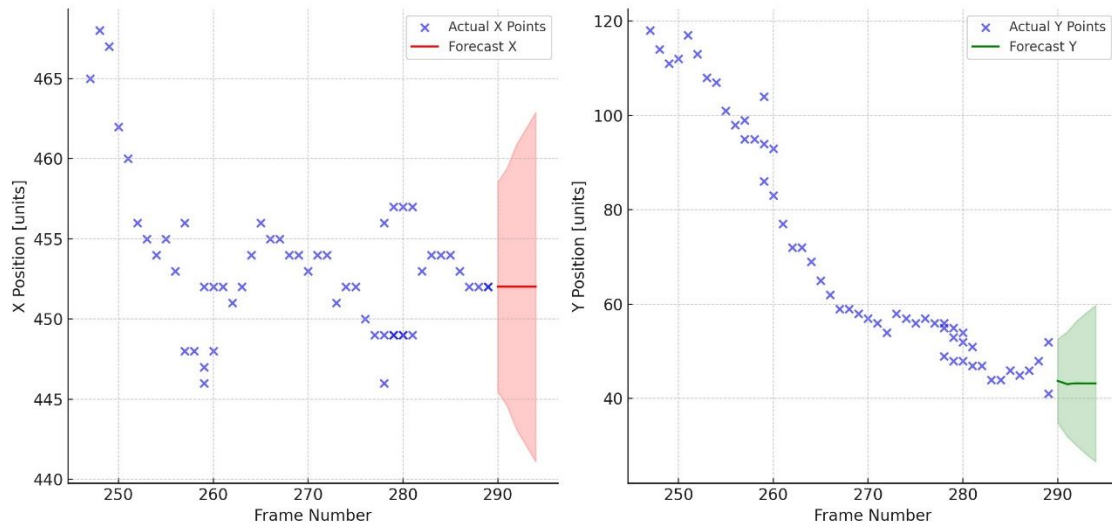


図4 AIによる陰極点の座標予測例（左図：X座標、右図：Y座標）

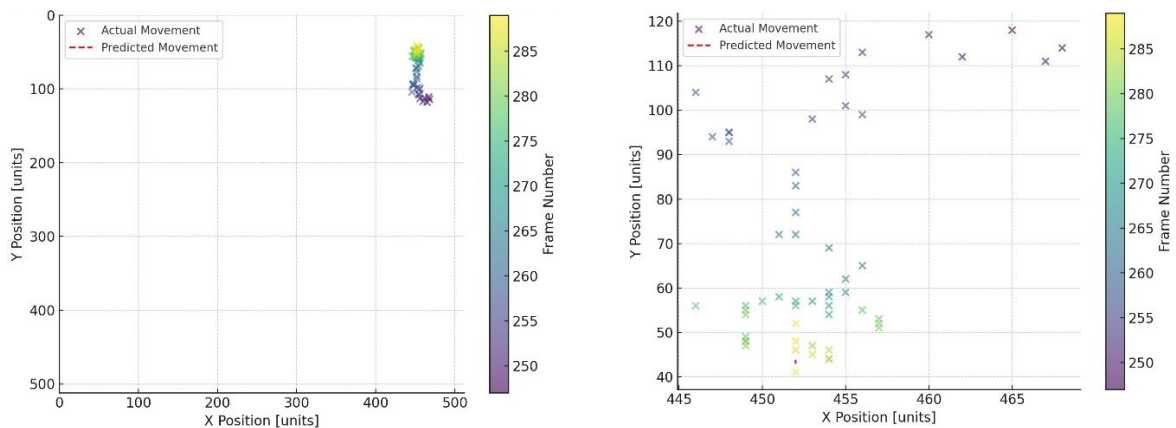


図5 AIによる陰極点の座標予測例（左図：全体図、右図：拡大図）

れる。また、本研究で確立した技術⁽¹⁻⁶⁾を他の表面処理技術にも応用し、さらなるイノベーションを促進することを目指す。

参考文献

- (1) Takagi, M., Suzuki, H., Morishita, H., Suzuki, Y., Nemoto, Y., Ren, Z., Iwao, T., Three-dimensional Electromagnetic Thermal Fluid Simulation of Cathode Jet Contributing to Motion of Cathode Spots in Vacuum Arc, International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Okinawa, Japan, June 25-30, 2023, DOI: 10.23919/ISDEIV55268.2023.10200819.
- (2) Ishihara, N., Suzuki, H., Saigo, K., Ichinose, S., Takagi, M., Morishita, H., Suzuki, Y., Ren, Z., Nemoto, Y., Iwao, T., Contribution of Non-equilibrium around Vacuum Arc Cathode Spot to Retrograde Motion in Application of Transverse Magnetic Field, International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Okinawa, Japan, June 25-30, 2023, DOI: 10.23919/ISDEIV55268.2023.10199777.
- (3) Ren, Z., Nemoto, Y., Suzuki, Y., Takagi, M., Morishita, H., Gustilo, R.C., Iwao, T., Differentiation of Numerical Simulation Result of Direct Current Circuit Breaker Interruption Process Using Artificial Intelligence. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 18(1), 147-149, DOI: 10.1002/tee.23707.
- (4) Ren, Z., Nemoto, Y., Suzuki, Y., Takagi, M., Morishita, H., Iwao, T., Numerical Simulation of External Magnetic Field Effect on Arc Plasma After Molten Metal Bridge Breaking Under Different Electrode Opening Velocities, AIP Advances, 12(3), DOI: 10.1063/5.0079263.
- (5) 根本雄介, 鈴木祐揮, 任振威, 真栄田義史, 岩尾徹, リストライク現象の解明に向けた横風吹き付け時のアークの電子と重粒子温度分布の解析, 電気学会論文誌B, 142(4), 228-234, DOI: 10.1541/ieejpes.142.228.
- (6) 石原のぞみ, 鈴木裕斗, 西郷謙伸, 一瀬謹, 高木真宏, 森下穂香, 鈴木祐揮, 根本雄介, 任振威, 岩尾徹, 雰囲気圧力変化時の真空アーク陰極点の温度計測, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 電気学会, 13-D-p3-5.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nemoto Yusuke, Suzuki Yuki, Ren Zhenwei, Maeda Yoshifumi, Iwao Toru	4. 巻 142
2. 論文標題 Analysis of Arc Electron and Heavy Particle Temperature Distribution with Lateral Flow Velocity for Elucidation of Re-strike	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 228 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.142.228	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 Ren Zhenwei, Nemoto Yusuke, Suzuki Yuki, Takagi Masahiro, Morishita Honoka, Gustilo Reggie Cobarrubia, Iwao Toru	4. 巻 18
2. 論文標題 Differentiation of Numerical Simulation Result of Direct Current Circuit Breaker Interruption Process Using Artificial Intelligence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 147 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23707	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 該当する
1. 著者名 Zhenwei Ren , Yusuke Nemoto , Yuki Suzuki , Masahiro Takagi , Honoka Morishita , Toru Iwao	4. 巻 12
2. 論文標題 Numerical simulation of external magnetic field effect on arc plasma after molten metal bridge breaking under different electrode opening velocities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP ADVANCES	6. 最初と最後の頁 35239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0079263	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 Zhenwei Ren , Yusuke Nemoto , Yuki Suzuki , Shinji Yamamoto , Gaku Asanuma , Toshiyuki Onchi , Toru Iwao	4. 巻 17
2. 論文標題 Analysis of Adverse Influence of Metal Vapor to Arc Movement Between Electrodes with External Magnetic Field Applied by Numerical Simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING	6. 最初と最後の頁 183-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23498	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 Zhenwei Ren , Yusuke Nemoto , Yoshifumi Maeda , Shinji Yamamoto , Gaku Asanuma , Toshiyuki Onchi , Toru Iwao	4. 巻 16
2. 論文標題 Cathode Spot Velocity of Atmospheric Arc Plasma after Arc Ignition Affected by Self and External Electromagnetic Force between Parallel Electrodes Using 3D Numerical Simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1656-1663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23469	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 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高木 真宏 , 鈴木 裕斗 , 森下 穂香 , 鈴木 祐揮 , 根本 雄介 , 任 振威 , 岩尾 徹
2. 発表標題 真空アークにおける3次元電磁熱流体シミュレーションを用いた陰極ジェットの流れと陰極温度の時間推移の解析
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/静止器/開閉保護合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 裕斗 , 高木 真宏 , 根本 雄介 , 任 振威 , 鈴木 祐揮 , 森下 穂香 , 岩尾 徹
2. 発表標題 真空アーク陰極点の移動要因の解明に向けたシース長が及ぼすシース電界と電子電流密度
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/静止器/開閉保護合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西郷 謙伸 , 鈴木 裕斗 , 一瀬 謹 , 草刈 雄己 , 任 振威 , 根本 雄介 , 岩尾 徹
2. 発表標題 磁気駆動アークのリストライク直前における陽極点近傍の分光計測によるアーク温度算出
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/静止器/開閉保護合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木真宏, 鈴木裕斗, 森下穂香, 鈴木祐揮, 根本雄介, 任振威, 岩尾 徹
2. 発表標題 真空アークにおける陰極からのT-F電子放出を考慮した3次元電磁熱流体解析
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木真宏, 根本雄介, 鈴木裕斗, 任振威, 鈴木 祐揮, 岩尾徹
2. 発表標題 真空アークにおける陰極シースを考慮した陰極点の電流密度分布に及ぼす陰極界面のエネルギーバランス
3. 学会等名 電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー/開閉保護/高電圧 合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Suzuki, Masahiro Takagi, Zhenwei Ren, Yusuke Nemoto, Yuki Suzuki, Toru Iwao
2. 発表標題 Analysis of Ion Density at Sheath Region Affected by Moving Speed of Vacuum Arc Cathode Spot Using Three-Dimensional Electromagnetic Thermal Fluid Simulation
3. 学会等名 APS GEC (Annual Gaseous Electronics Conference)
4. 発表年 2021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	鈴木 憲史 (Suzuki Kenji) (20638134)	東京都市大学・理工学部・准教授 (32678)	

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
---------	---------