

機関番号：32678

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760188

研究課題名（和文） 超高速酸化膜除去手法の開発に向けた減圧アーク陰極点の挙動軌跡解析

研究課題名（英文） Analysis of Moving Track of Low Pressure Arc Cathode Spots for Development of High Speed Removing Method of Oxide Layer

研究代表者

岩尾 徹（IWAO TORU）

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：80386359

研究成果の概要（和文）：減圧アーク発生電極とプラズマに特化した画像処理アルゴリズム、及び、超高速ビデオカメラを用いて、減圧アーク陰極点の挙動軌跡解析を行った。成果としては、発生電極の改良、精度良い画像処理アルゴリズム、熱伝導シミュレーションの開発を行った。これらを利用し、挙動軌跡解析を行った結果、陰極点は分裂や再結合を繰り返すこと、陰極点は酸化膜とバルクの境界に発生し、その移動は酸化膜の蒸発や吹き飛ばしをしながら連続的に生じること、及び、この蒸発や吹き飛ばしは酸化膜厚に依存することがわかった。

研究成果の概要（英文）：The moving track of low pressure arc cathode spots for development of high speed removing method of oxide layer was elucidated by using the electrode of low pressure arc generation, algorithm of plasma image processing and high speed video camera. As a result, the cathode spot was split and united, repeatedly. In addition, the oxide layer is evaporated and blows up, when the cathode spots contact with the oxide layer and moves at the boundary, continuously. These phenomena were depended by the oxide thickness.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：放電プラズマ

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子工学・電力変換・電気機器

キーワード：アーク放電、陰極点、酸化膜除去、画像処理、3R、高速度ビデオカメラ、陰極点挙動、プラズマ

1. 研究開始当初の背景

国内外において、東京電機大の柳父教授や琉球大の金子教授、Humboldt UniversityのBurkhard Juttner氏らによって真空遮断器に関わる真空アーク物理的特性に関する研究が、また100Pa程度の減圧アークによる酸化膜除去に関しては中央大学の稲葉教授や秋田県立大の武田教授、電中研の足立氏らに

よってその応用の観点から研究がされてきた。しかし、減圧アークの酸化膜除去工程を陰極点の挙動軌跡の観点からの研究がされた例はあまりない。このような研究動向を踏まえ、本格的な減圧アークの応用を図るためには、酸化膜除去時の陰極点の挙動軌跡の解明による除去工程の解明が不可欠と考えた。この理由は、本研究代表者が2006年、07年

に掲載された IEEE Trans. Plasma Science 誌にて報告しているように、陰極点の挙動軌跡、分裂、移動速度、滞在時間などは、除去する表面の表面粗さに非常に影響があるため、これら現象を定量的に解析する必要があるためである。そこで、2006～2007 年は減圧アーク発生電極と P I P (Plasma Image Processing : プラズマに特化した画像処理) アルゴリズムを開発し、通常のビデオカメラや 1,000frame/s の高速ビデオカメラを用いて、陰極点を用いた酸化膜処理において陰極点の移動速度の算出、処理時間と粗さの特性解明、母体材料への熱伝導の計算等を行ってきた。しかし、減圧アーク陰極点の確実な発生を行うためには、陽極形状や陰極のさらなる絶縁強化が必要である。また、1,000frame/s の高速ビデオカメラや従来の P I P アルゴリズムでは、陰極点の移動を的確に把握することができず、陰極点が「飛ぶ」という結果を得てしまうことから、この現象が正しいかどうか物理的な解明が必要である。国内外の論文ではこの現象を「Jump」という表現が多用されているものも多く、この解明は超高速酸化膜除去手法の開発に向けた減圧アークの酸化膜除去の理論的な基礎特性の把握のために必要である。

2. 研究の目的

本研究は、本研究代表者が独自に開発中の減圧アーク発生電極と P I P (Plasma Image Processing : プラズマに特化した画像処理) アルゴリズム、及び、超高速で長時間撮影が可能な超高速ビデオカメラを用いて、減圧アーク陰極点の挙動軌跡解析を行うものである。本解析から酸化膜除去工程を解明することにより、減圧アーク陰極点による超高速酸化膜除去手法の開発のための重要な知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、本研究代表者が独自に開発中の減圧アーク発生電極と P I P (Plasma Image Processing : プラズマに特化した画像処理) アルゴリズム、及び、超高速で長時間撮影が可能な超高速ビデオカメラを用いて、減圧アーク陰極点の挙動軌跡解析を行うものである。初年度は「減圧アーク発生装置と P I P アルゴリズムの改良」、次年度は「酸化膜厚さ変化時の陰極点挙動軌跡解析」、最終年度は「陰極点の分裂および再結合現象と酸化膜除去工程との関係の解明」として検討を行った。

具体的には、酸化膜付き S S 4 0 0 試験片を陰極として、気圧 100Pa において減圧アークを発生し減圧アークの特徴である陰極点を試験片上に発生させ、この陰極点により酸化膜が除去される時の陰極点挙動軌跡を解

析した。本研究代表者が開発し 2007 年 8 月の IEEE Trans. Plasma Science に掲載された P I P アルゴリズムによる画像処理手法を用いて滞在時間や挙動軌跡などの処理工程を解明し、その結果をもとに酸化膜除去の高速化のための条件を解明するものである。この際は、減圧アーク発生装置を用いた。円筒中空陽極を用いることにより、1 台のカメラでも 2 次元撮影が可能でかつ位置情報を正確に得ることができ、また、陰極エッジ部の絶縁強化や高周波ではなくヒューズ線発孤法を採用することにより、一定の場所での確実な発孤が可能にした。このように本研究では、陰極点の分裂や再結合現象も把握できる P I P アルゴリズムの改良と減圧アークの確実な発孤のための陽極形状や陰極ホルダーの絶縁強化等の改良を図った。また、世界的にも超高速な超高速ビデオカメラ (最大 250,000 frame/s) を活用し、減圧アーク陰極点の挙動軌跡を解析し、「酸化膜厚さ変化時の陰極点挙動軌跡解析」、「陰極点の分裂および再結合現象と酸化膜除去工程との関係の解明」の結果を得た。

4. 研究成果

本研究は、減圧アーク発生電極とプラズマに特化した画像処理アルゴリズム、及び、超高速ビデオカメラを用いて、減圧アーク陰極点の挙動軌跡解析を行うものである。

初年度は、減圧アーク発生装置の陽極形状の改良と陰極部の絶縁強化や P I P アルゴリズムの改良を図った。2 年度は、一昨年度に製作をした装置とアルゴリズムを用いて、酸化膜の厚さを変化させた際の陰極点の挙動軌跡の解析を行った。3 年度は、既に製作をした装置とアルゴリズムを用いた挙動軌跡の解析を基に、陰極点による酸化膜の蒸発量の計算をすると共に、熱伝導解析シミュレーションを用いて酸化膜やバルクへの熱の伝導や酸化膜の蒸発に関する検討を行い、陰極点の分裂および再結合現象と酸化膜除去工程との関係の解明を行った。

具体的な結果を以下に示す。

(1) 研究の主な成果

- ① 減圧下での実験では、除去処理中において、陰極点が瞬間的に陰極表面以外の場所に発生したり、絶縁カバーと試験片の隙間に入り込んだりすることがあるため、新しく減圧アーク発生装置の設計・製作を行い、本改良により実験成功確率を高めた。
- ② P I P アルゴリズムの精度をさらに高め、陰極点の分裂や再結合時の検出も可能な基本アルゴリズムの作成を行った。また、陰極点の分裂や再結合時の検出ができるように、輝度情報に演算を加え、挙動軌跡

算出の際の精度向上を図った。また、P I P アルゴリズムを改良し、結果の妥当性を検討するため、電流・電圧特性や陰極点の挙動軌跡等に関する実験を行い、画像処理結果と実験との比較を行った。図 1 に酸化膜除去軌跡を、図 2 に陰極点の分裂現象を示す。結果として、画像処理結果と実験結果は良い一致をみた。画像処理により、減圧アークは酸化膜とバルク表面の境界に発生すること、分裂と再結合が繰り返されること、及び、分裂した陰極点は、バルクを通過し境界に戻るということがわかった。

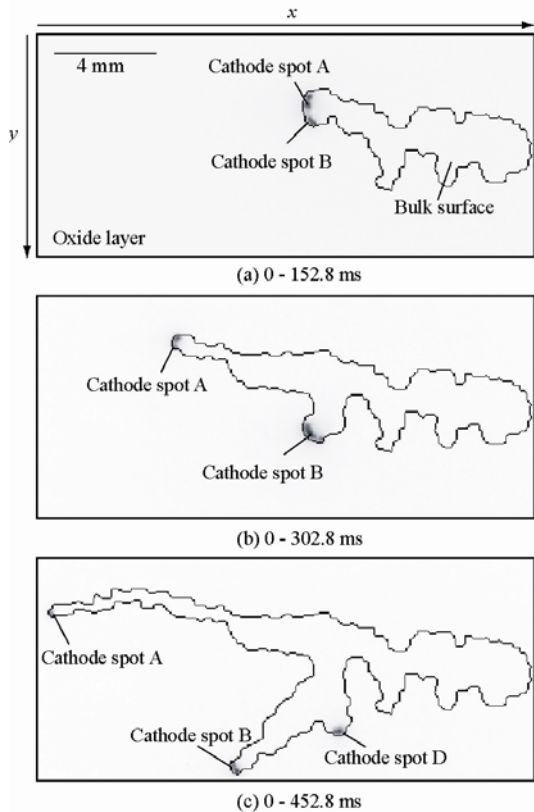


図 1 酸化膜除去軌跡

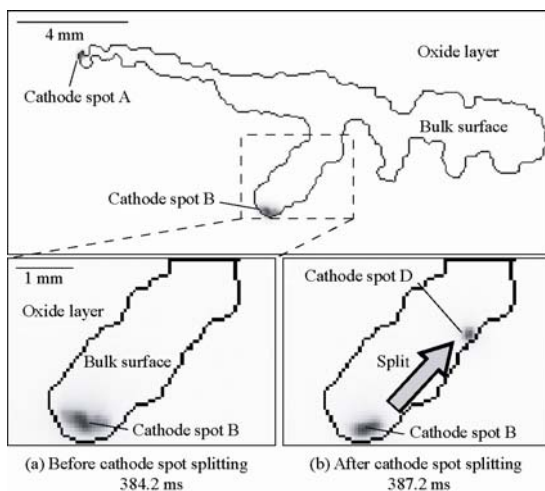


図 2 陰極点の分裂現象

③ 30,000 frame/s での撮影と挙動軌跡の解析を行った結果、陰極点は時間と共に連続して移動した。また、このことがアーク電圧にも現れ、アーク内に酸化膜蒸気が混入するために、圧力や導電率が変化することが示唆された。これは、酸化膜蒸気が陰極点に混入することにより、アーク内部の粒子密度、電子、イオンの各密度が増加し、アークが維持されるため、陰極点が酸化膜を優先的に除去することによる。したがって、陰極点による酸化膜除去過程は、陰極点が酸化膜に接触することによる蒸発が主要因であることが示唆された。

④ 陰極点による酸化膜への熱伝達の解明のため、超高速ビデオカメラの撮影速度を 30,000 frame/s として、アークの移動画像と電圧電流を計測し、アークの入力電力、陰極点と酸化膜の接触面積を得た。超高速ビデオカメラや分光器を用いて、図 3 に示すアークの移動画像と電圧、電流、及び、図 4 に示す陰極点の輝度やスペクトルを計測した。陰極点が移動する際に、酸化膜が厚いほど蒸発量が増加したが、厚くなりすぎると、図 5 や図 6 に示す除去体積が減少するが、時間によっては急激に増加する結果を得た。また、酸化膜が厚くなることにより、陰極点近傍に混入する酸化膜蒸気の量が増加し内部圧力が上昇するため、吹き飛ばしが生じることを計算により明らかとした。

⑤ 熱伝導解析シミュレーションによる、陰極点からの酸化膜やバルクへの熱伝導や酸化膜の蒸発の計算により、バルクよりも酸化膜の方が蒸発されやすい結果を得た。

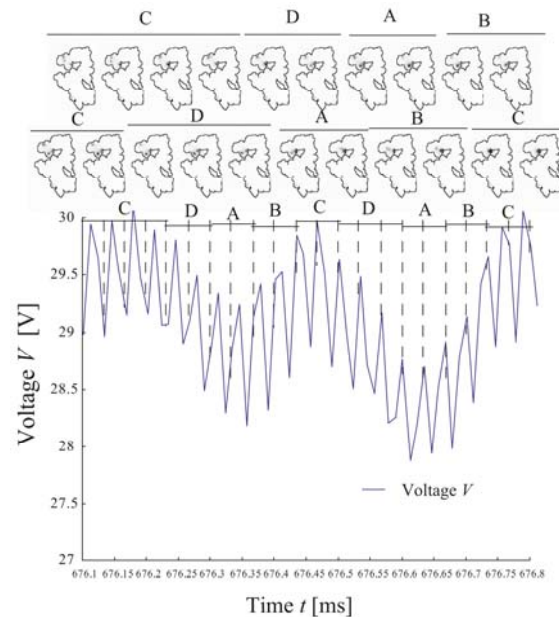


図 3 陰極点の移動画像と電圧変動

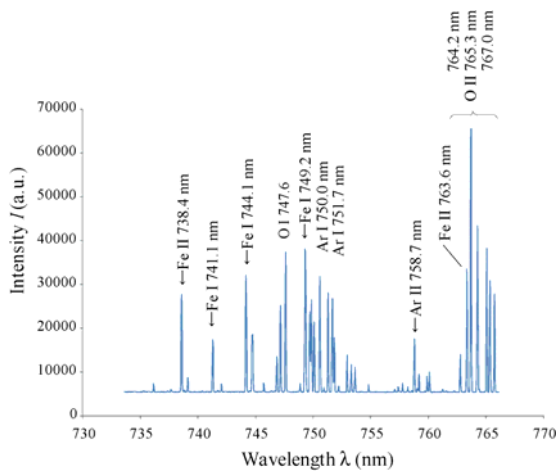


図4 酸化膜除去時のスペクトル

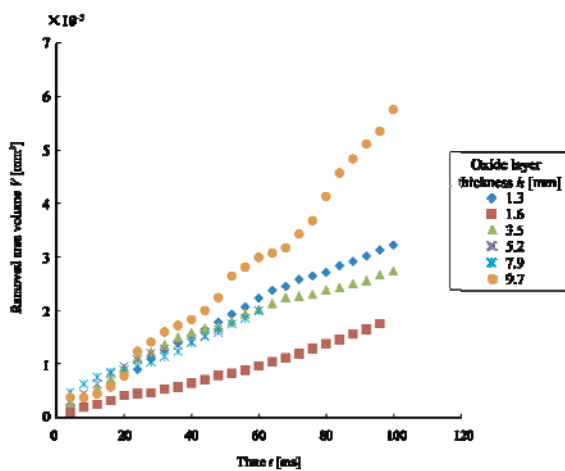


図5 除去体積の時間依存性

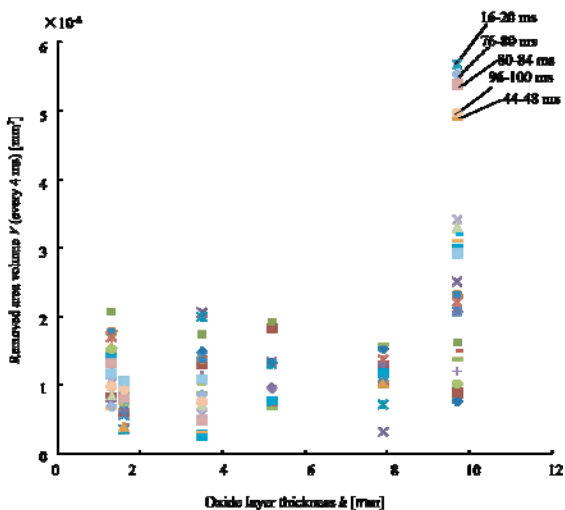


図6 酸化膜厚変化時の除去体積

⑥ 最後に3年間のまとめを行い、滞在時間や挙動軌跡などのモデル(図7)を構築し、超高速酸化膜除去手法の開発への大きな知見を得た。また、論文誌、研究会、国際会議にて発表し、広く世界に情報発信した。

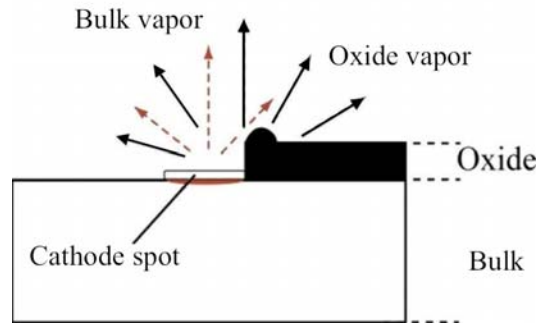


図7 酸化膜除去モデル案

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究は、国内外において今まで提案されてきた仕事関数が陰極点の発生や移動に寄与するといったモデルに対し、従来のポテンシャルハンプ理論では説明できないことがあるため、減圧アークの発生・挙動軌跡・酸化膜除去工程に関し、定量的な議論を行い新しいモデルを構築する点が特色かつ独創的な点である。本研究代表者が独自に開発している減圧アーク発生装置、PIP (Plasma image processing : プラズマに特化した画像処理) アルゴリズムを用いている点、及び、世界的にも超高速な超高速ビデオカメラ (最高 250,000 frame/s) を用いる点は世界的にも他に例を見ない。上記の背景の基、減圧アーク陰極点の挙動軌跡を解析し、前述のように「酸化膜厚さ変化時の陰極点挙動軌跡解析」、「陰極点の分裂および再結合現象と酸化膜除去工程との関係の解明」の結果を得た。この結果、滞在時間や挙動軌跡などのモデルが構築をし、酸化膜除去の高速化のための条件に関する解明を進めることができた。特に、減圧アークが、今まで論文等で述べられていたこととは異なり、連続的に動くこと、分裂と再結合を繰り返すこと、酸化膜とバルクの境界を動くこと、酸化膜を蒸発させることで電子の供給を受けアークを維持すること、及び、高速除去時は酸化膜の吹き飛ばしがあることの解明を行うことができた。このことは、超高速酸化膜除去手法の開発への大きな知見であり、今後の社会ニーズである3R (Reduce, Reuse, Recycle) への応用が期待できる。

(3) 今後の展望

本研究成果より、陰極点は陰極表面をジャンプすることなく連続して移動し、酸化膜とバルクとの境界につきながら除去を行うことが明らかとなった。しかし、酸化膜除去過程の解明には、酸化膜の蒸発過程が不可欠であり、このためには分光学的解明が必要である。しかし、超高速で移動する陰極点を分光

器で測定することは困難であるため、陰極点の移動の制御と超高速現象を計測できる分光計測システムを用いることが必要となる。

今後の展望としては、本研究代表者が独自に開発している超高速ビデオカメラと分光器を組み合わせた超高速分光計測システムと、PI P アルゴリズムによる画像処理手法、及び、伝熱シミュレーションを用いて、滞在時間、挙動軌跡、酸化膜除去時の蒸発粒子の特定などの処理過程を解明し、その結果を基に酸化膜除去の高速化のための条件の解明をさらに進める必要がある。具体的には、「酸化膜厚さ変化時の酸化膜蒸発除去と電圧の解明」、「酸化膜蒸発除去時のエネルギーと除去過程の解明」の研究を進めることにより、滞在時間や挙動軌跡などのモデルが構築をすることで、酸化膜除去の高速化のための条件の解明が期待できる。このことより、超高速酸化膜除去手法の開発への大きな知見が得られ、今後の社会ニーズである 3 R (Reduce, Reuse, Recycle) へ、さらに大きく貢献することが期待できる。

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 2 件)

- ① Shinya Kamishima, Toru Iwao, Motoshige Yumoto Split Process of Low-Pressure Arc Cathode Spots on SS400 (Fe + C) Surface with Oxide Layer, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 5 巻, 2010, 670~676
- ② Atsushi Sato, Toru Iwao and Motoshige Yumoto, Relation between surface roughness and number of cathode spots of a low-pressure arc, Plasma Sources Sci. Technol., 査読有, 17, 2008, 045007 (5pp)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Toru Iwao, Shinya Kamishima, Masashi Namba, Naoko Ogura, Motoshige Yumoto, Removal of Oxide Layer on Metal Surface using Cathode Spot in Vacuum Arc for Reuse, 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2010 年 9 月 7 日, (東京)
- ② Naoko Ogura, Masashi Namba, Shinya Kamishima, Toru Iwao, Motoshige Yumoto, Removal Process of Oxide Layer on Metal Surface using Cathode Spot in Vacuum Arc, 電気学会 放電・静止器・開閉保護

合同研究会, 2010 年 6 月 29 日, (東京)

- ③ 岩尾徹, 上島進弥, 小倉奈緒子, 湯本雅恵, 減圧アーク陰極点による酸化膜除去後の断面形状, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2009/08/19, (東京)
- ④ 上島進弥, 岩尾徹, 湯本雅恵 減圧アーク陰極点の分裂時におけるバルク上の移動現象, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2009/08/19, (東京)
- ⑤ 岩尾徹, 上島進弥, 湯本雅恵. 減圧アークにおける陰極点分裂時の移動と軌跡, 電気学会全国大会講演論文集, 2009. 3. 17, (札幌)
- ⑥ 岩尾徹, 上島進弥, 湯本雅恵, 減圧アーク陰極点における分裂時の移動と軌跡, プラズマ応用科学会, 2009. 3. 6, (神戸)
- ⑦ KAMISHIMA Shinya, IWAO Toru, YUMOTO Motoshige, Split Process of Low-Pressure Arc Cathode Spots on SS400 Surface with Oxide Layer, IEEJ-EIT 日タイ合同電力システムシンポジウム, 2008.11. 4, (タイ・バンコク)
- ⑧ IWAO Toru, KAMISHIMA Shinya, INOMATA Tsuyoshi, YUMOTO Motoshige, Movement and Tracking of Low-Pressure Arc Cathode Spots on SS400 Surface with Oxide Layer, 電気学会 国際放電・高電圧ワークショップ IWHV, 2008.10. 24, (京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩尾 徹 (IWAO TORU)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号: 8 0 3 8 6 3 5 9