

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13740

研究課題名（和文）微小金属粒子に起因したマイクロオーダ放電現象に関する研究

研究課題名（英文）Research on Micrometer-Scale Discharge Phenomena Induced by Tiny Metal Particles

研究代表者

岩淵 大行 (Iwabuchi, Hiroyuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：50757341

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では真空ギャップでのアーク消弧後に発生する金属粒子に起因する放電現象のメカニズムを実験とシミュレーションの両面から検証した。ギャップ間の微小な金属粒子から放電に至る過程を、蒸発、拡散、破壊の3ステップとし、それぞれの時間オーダを数値解析により計算したところ、粒子の蒸発には数10 μ m、拡散に数10 μ s、破壊は10ns程度の時間オーダで発生することが分かった。この結果から、真空ギャップで観測される放電の時間遅れは、放電過程より金属粒子の発生までの時間遅れが主要因であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

事故発生時の電流遮断や系統の復旧には高性能な遮断器が必要不可欠である。従来ではSF6ガスを用いて開極時のアークを消弧するガス遮断器が一般的であったが、SF6ガスの温暖化係数が非常に大きいことから真空遮断器の小型化、高性能化が注目されるようになった。しかし、真空遮断器の遮断試験において、アーク消弧後に短時間で絶縁を回復する絶縁破壊(NSDD: Non-Sustained Disruptive Discharge)の発生が報告されている。本研究の成果はNSDDの発生に与える電界電子放出電流の影響を定量的に評価したもので、高性能な真空遮断器の開発に不可欠な重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, non-sustained disruptive discharge (NSDD) which occurs after interrupting the current in a vacuum circuit breaker was investigated. The breakdown process was investigated through following three steps: evaporation of metal particles, diffusion of metal vapor, and the breakdown. The numerical simulation suggests that the time scales of evaporation, diffusion, and the breakdown were 10 μ s, 10 μ s, 10ns, respectively. The results indicated that the time delay of late breakdown process is mainly determined by the generation of moving metal particles.

研究分野：高電圧・大電流工学

キーワード：真空遮断器 電界電子放出 放電 真空放電 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

事故発生時の電流遮断や系統の復旧には高性能な遮断器・開閉器が必要不可欠である。従来では SF6 ガスを用いて開極時のアークを消弧するガス遮断器が一般的であったが、SF6 ガスの温暖化係数が非常に大きいことから真空遮断器の小型化、高性能化が注目されるようになった。しかし、真空遮断器の遮断試験において、アーク消弧後に短時間で絶縁を回復する絶縁破壊の発生が報告されている。この非持続性破壊放電(NSDD: Non-Sustained Disruptive Discharge)の発生機構についてはこれまでの研究で様々な議論がなされてきたが、そのメカニズムは未解明な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では真空ギャップでのアーク消弧後に発生する金属粒子に起因する放電現象のメカニズムを実験とシミュレーションの両面から検証することを目的とする。

3. 研究の方法

ギャップ間の微小な金属粒子から放電に至る過程を、蒸発、拡散、破壊の 3 ステップとし、拡散、破壊のメカニズムはモンテカルロ法により、蒸発のメカニズムは有限要素法による熱解析を用いて解析を行った。解析においては下記の 2 つの仮定をおいている。

- ・ギャップ間を運動すると仮定する金属粒子は、実験結果より径が 20 μm 程度の球形とする。
- ・電極表面からの電界電子放出現象を考慮し、表面状態は電界強化係数により表されたとする。
- ・電界強化係数の値は先行研究から 130 程度と仮定する。

4. 研究成果

4.1 蒸発過程

本シミュレーションでは陽極近傍に存在する半径 12 μm の Cu 粒子が陰極から放出された電子と衝突し加熱されることを想定し、COMSOL Multiphysics の伝熱モジュールを用いて計算を行う。その際、Cu 粒子に衝突する電子のエネルギーを求める必要がある。そこで、電極半径 6mm、ギャップ長 2mm の電極において、次の式を用いて陽極表面へ流入する電子のエネルギーを計算したところ、 $1.78 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ のエネルギー密度であることが分かった。シミュレーション中ではこのエネルギー密度を熱流束として Cu 粒子の下方から与える。

$$P_{eff} = \frac{1}{T_{rf}} \int_0^{T_{rf}} [V_{dc} + V_{rf} \cos(2\pi ft)] I_t(t) dt \quad (1)$$

シミュレーション結果として、熱流束を与えてからの Cu 粒子中心部温度の時間変化を図 1 に示す。この結果より Cu 粒子の温度は時間とほぼ比例することが分かり、およそ 8 μs の時点で銅の沸点である 2835K へ到達していることがうかがえる。このことから 12 μm の Cu 粒子が電子との衝突により蒸発するのにかかる時間は数 μs 程度であることが示された。また、実験では様々な大きさの金属粒子が観測されている。そこで Cu 粒子の粒子半径と沸点への到達時間の関係を図 2 に示す。実験では半径 50 μs 程度の粒子も確認されたため、実際の粒子蒸発に必要な時間は数 μs ~ 数十 μs が妥当であると判断できる。

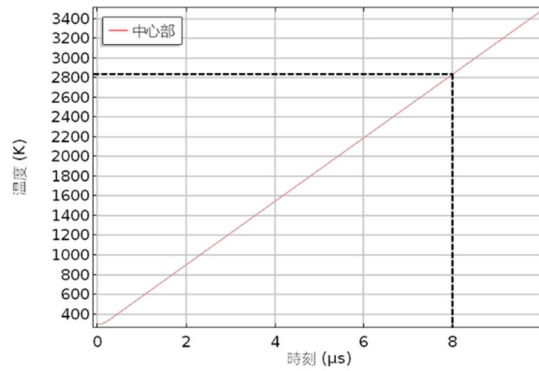


図 1 Cu 粒子中心部温度の時間変化

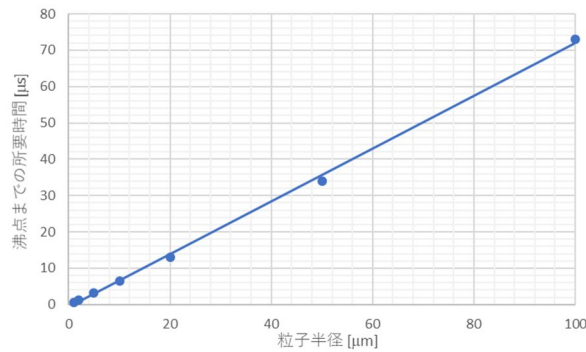


図 1 粒子半径と沸点到達時間

4.2 拡散過程

前節より Cu 粒子が蒸発するには数 μs ～数十 μs の時間を要することが分かった。本節では粒子が蒸発したことで供給された中性粒子が電極間に拡散していく過程についてのシミュレーションを PEGASUS ソフトウェアの DSMCM モジュールを用いて行う。そのシミュレーションモデルを図 3 に示す。上側電極近傍で Cu 粒子が蒸発した直後を想定し、電極間に中性粒子密度の高い領域を設定してその後の中性粒子の挙動を計算する。

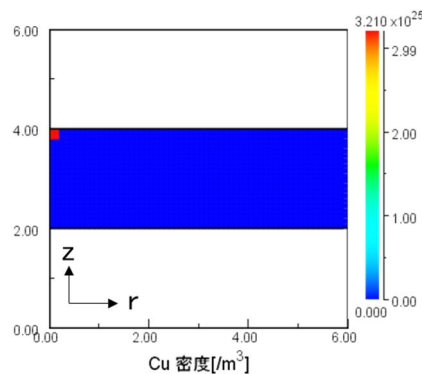


図 32 中性粒子拡散過程シミュレーションモデル

シミュレーション開始から 3 μs 、5 μs 時点での中性粒子密度を図 4～図 6 に示す。これらの結果から上側電極付近で発生した中性粒子は放射状に拡散していき、およそ 5 μs で対向電極まで到達することが分かる。また全体的な密度は $10^{21}/\text{m}^3$ オーダーであることがうかがえる。ここで、後述する電界電子放出電流の増加に必要な中性粒子密度は $3.21 \times 10^{21}/\text{m}^3$ であることから、この 5 μs 時点で電極間には絶縁破壊を引き起こすのに十分は中性粒子が供給・拡散していると考えられる。

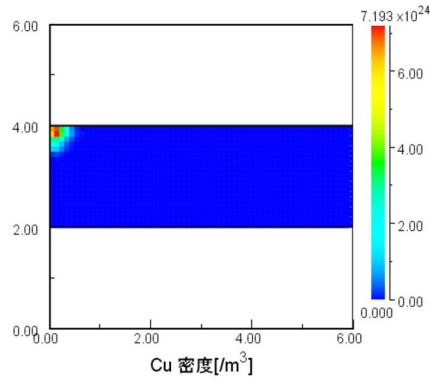


図 4 中性粒子密度(1 μ s)

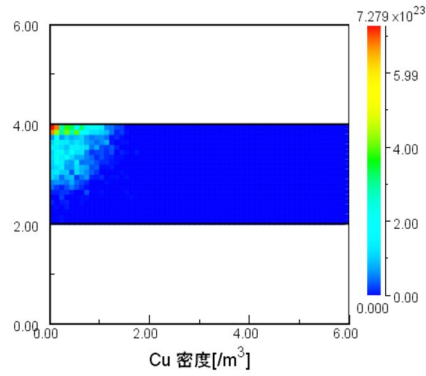


図 5 中性粒子密度(3 μ s)

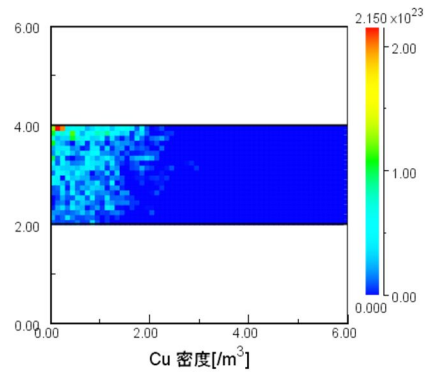


図 6 中性粒子密度(5 μ s)

4.3 破壊過程

中性粒子が供給・拡散した後の電界電子放出電流に注目し、PIC-MCC 法によってシミュレーションを行った。この時、電界電子放出電流は次の式で与えられる。

$$j = 1.54 \times 10^{-6} \frac{\beta^2 E^2}{\phi} \exp\left(-6.83 \times 10^7 \frac{\phi^{\frac{3}{2}} v(y)}{\beta E}\right) \quad (1)$$

$$v(y) = 0.956 - 1.062y^2 \quad (2)$$

$$y = 3.79 \times 10^{-4} \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\phi} \quad (3)$$

ただし、 ϕ は仕事関数、 β は電極の表面状態により電界がどれだけ強調されるかを示す電界強化係数である。

その結果、中性粒子密度が $3.21 \times 10^{21}/\text{m}^3$ かつ β が 130 の場合に図 7 のような電界電子放出電流密度が増加し、およそ 10.5ns で絶縁破壊に至るという結果が得られた。この時のギャップ間を $3.21 \times 10^{21}/\text{m}^3$ という密度の Cu 中性粒子で満たすにはおよそ 12.7 μm の金属粒子が蒸発する必要があることが分かった。

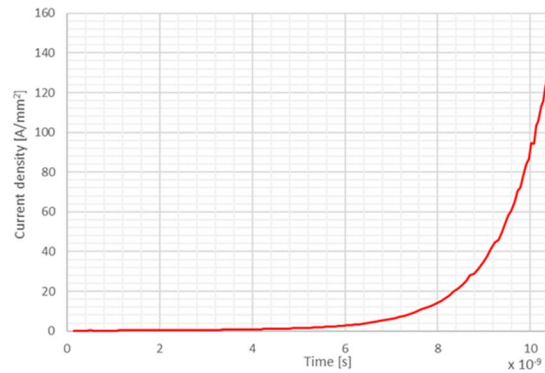


図7 電界電子放出電流密度の増加[6]

4.4 まとめ

本研究では、ギャップ間の微小な金属粒子から放電に至る過程を、蒸発、拡散、破壊の3ステップとし、それぞれの時間オーダを数値解析により計算したところ、粒子の蒸発には数10 μ m、拡散に数10 μ s、破壊は10ns程度の時間オーダで発生することが分かった。この結果から、真空ギャップで観測される放電の時間遅れは、放電過程より金属粒子の発生までの時間遅れが主要因であることが示唆された。

本研究で提案した絶縁破壊の発生モデルの一連の流れを整理すると以下のようになる。

- 遮断電流や電界により電極間に金属粒子が放出
- 電子の衝突により金属粒子が加熱・蒸発 (数～数十 μ s)
- 発生した中性粒子が電極間に拡散 (数 μ s)
- 電界電子放出電流が増加 (数十 ns)
- 絶縁破壊発生

したがって、電極間に金属粒子が与えられてからおよそ数～数十 μ sで絶縁破壊が発生するということになる。このことからNSDDの電流遮断からの時間遅れは絶縁破壊の進展よりも電極から金属粒子が離脱するまでの時間に大きく依存していると考えられる。本研究の成果はNSDDの発生に与える電界電子放出電流の影響を定量的に評価したもので、高性能な真空遮断器の開発に不可欠な重要な知見を与えるものといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroyuki Iwabuchi, Tsutomu Oyama, Akiko Kumada and Kunihiko Hidaka	4. 巻 Vol. 26, No. 5
2. 論文標題 Breakdown Phenomena across Micrometer Scale Surface Gap under Negative Voltage Application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION	6. 最初と最後の頁 pp. 1377-1384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2019.007921	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 Haruki Ejiri, Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka, Yuki Taguchi, Yuki Inada, Yasushi Yamano, Hiroyuki Iwabuchi and Eiji Kaneko	4. 巻 Vol. 47, No.8
2. 論文標題 Late Breakdowns Caused by Microparticles After Vacuum Arc Interruption	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 pp.3392-3399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2019.2917379	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 岩淵大行	4. 巻 Vol. 61, No. 1
2. 論文標題 国際会議報告 第20回高電圧工学国際会議, "Topic C, E, F, G"	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 放電研究	6. 最初と最後の頁 pp.10,17,22,25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 岩淵大行	4. 巻 Vol. 62, No. 1
2. 論文標題 国際会議報告 第22回気体放電とその応用国際会議, "総括" および "B-Corona Barrier and Surface Discharges および C-Glows and Breakdown"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 放電研究	6. 最初と最後の頁 pp. 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 4件）

1. 発表者名 H. Iwabuchi, Y. Nakaso and T. Oyama
2. 発表標題 Breakdown Phenomenon across mm-scale gap with thin cavity
3. 学会等名 GD2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Hachiman, F. Oshiro, Y. Nagayo, E. Kaneko, Y. Inada, Y. Taguchi, Y Yamano, M. Maeyama, Y. Kitabayashi, H. Iwabuchi, H. Ejiri, A. Kumada and K. Hidaka
2. 発表標題 Late Dielectric Breakdown Phenomenon Caused by Microparticles Released after Current Interruption
3. 学会等名 ISDEIV2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Inada, Y. Taguchi, Y Yamano, M. Maeyama, Y. Kitabayashi, H. Iwabuchi, H. Nagai, H. Ejiri, A. Kumada, K. Hidaka, F. Oshiro, Y. Nagayo, Y. Hachiman, and E. Kaneko
2. 発表標題 Systematic Comparison of Vacuum Arc between CuCr and AgWC Electrode by Using Various Optical Technique
3. 学会等名 ISDEIV2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Kitabayashi, H.Iwabuchi and T.Oyama
2. 発表標題 Effect of Field Electron Emission Current on Breakdown Phenomenon under Low Pressure
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北林優祐, 岩淵大行, 大山力
2. 発表標題 低気圧下における電界電子放出に起因した絶縁破壊現象
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野智哉, 岩淵大行, 大山力
2. 発表標題 部分放電を介するmmオーダ沿面放電進展挙動のシミュレーション
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020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