

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14722

研究課題名（和文）輻射伝熱場と電磁流体場の連成解析による遮断器アーク放電の消弧機構の解明

研究課題名（英文）Study on Quenching Mechanism of Circuit Breaker Arc Discharge by Coupled Numerical Analysis of Radiation Heat Transfer and Magnetohydrodynamics

研究代表者

平山 智士（Hirayama, Satoshi）

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：70759274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題で新たに開発する輻射熱輸送の解析モジュールを、申請者が開発した電磁流体解析プログラムに組み込むことで輻射伝熱と電磁流体場の連成解析プログラムを完成させ、電力用遮断器内アーク放電の消弧現象に関して検討を行った。解析結果から、輻射エネルギーの再吸収を考慮することで、アーク放電内部での電流集中が緩和され、アーク放電プラズマの温度評価における輻射モデルの重要性を示すことができた。さらに、消弧現象中の電気抵抗に与える輻射モデルの影響を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アーク放電の消弧現象は、電力用遮断器の性能を決定づける最も重要な現象であり、その詳細を数値解析から理解する試みがなされてきた。しかしながら、複雑な輻射/吸収過程に起因した膨大な計算コストから、輻射エネルギーの再吸収現象に関しては未だ十分に議論されておらず、再吸収を無視して消弧現象を解析すると遮断器の性能を過大に評価してしまう問題があった。本研究課題で、遮断器内アーク放電の輻射電磁流体解析技術を確立できたことで、遮断器の設計開発に大いに貢献できると期待される。さらに、アーク消弧現象中の3次元・非定常場を明らかにした研究は、本研究課題が初めてであり、学術的にも意義のある成果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：The present study developed a coupled numerical simulation program for radiation heat transfer and electrohydrodynamics to make clear the quenching phenomenon of arc discharge in power circuit breakers. Numerical results showed that the current concentration in the arc discharge is mitigated by considering the reabsorption of radiation energy, and the importance of the radiation model in the temperature evaluation of arc discharge plasma was demonstrated. Furthermore, the influence of the radiation model on the electrical resistance during arc quenching was clarified.

研究分野：電力エネルギー工学

キーワード：交流遮断器 アーク放電 輻射電磁流体力学 数値解析 電気機器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電力用遮断器は、配電系統や送電系統において事故電流を遮断することで系統・電気機器を保護する責務を担っており、電力系統における基幹機器の一つである。電気接点を開極し、接点間に生じたアーク放電を消滅させる、すなわち電気的な絶縁状態にまで冷却することで電流を遮断する仕組みであるが、そのアーク放電の消滅現象(一般的に、消弧現象と呼ばれる)の詳細を解明するには至っていない。そのため、遮断試験で得られる電流・電圧波形や高速度カメラによる放電の発光部の観測データを蓄積し、それらをもとにした経験的な予測から製品設計を行っているのが実情である。放電プラズマ工学の観点で考えると、封入ガスの違いはあるが遮断器内部の放電は遮断器の電圧区分に依らず同様のアーク放電が生じており、そのアーク放電の解析技術が確立できれば様々な種類の遮断器の設計開発に大いに貢献できると考えられる。

アーク放電の消滅は非正常性の強い現象であり、数  $10\mu\text{s}$  ~ 数  $100\mu\text{s}$  の時間で数万 K の導電性のプラズマが冷却され、数千 K の絶縁ガスにまで回復する。プラズマの温度低下に起因したイオンと電子の再結合反応、並進/回転/振動/電子励起といった微視的内部エネルギー状態の遷移、巨視的な流体場、電磁場の非一様・非定常挙動をとともなう系は非常に複雑であり、主として数値解析により現象解明が試みられてきた。

報告者はこれまで、独自に遮断器アーク放電解析用の電磁流体解析プログラムを開発し、72kV 級の高電圧  $\text{SF}_6$  ガス遮断器や 200V 級の配線用空気遮断器のアーク放電に関して、実現象を再現した 3 次元非定常解析を実施してきた。これらの解析では、アーク放電の挙動及びアーク柱の構造の変化と電圧波形の関係性を説明づけることができている。しかしながら、この解析プログラムを用いて遮断性能の評価を行ったところ、輻射エネルギーがアーク放電周囲のガスに吸収される現象(以下では、単に再吸収現象と呼ぶ)を無視していることが原因で、アーク放電の消滅が速すぎて遮断器の性能を過大に評価してしまっていた。現状の計算機能力では、輻射/再吸収過程を無視して遮断器の数値解析を実施される場合がほとんどであり、アーク放電の消弧現象における輻射/再吸収の寄与については十分に議論されていない。

輻射エネルギーの再吸収はこれまでの消弧現象に対する数値解析的研究では無視されており、最大の要因は、その物理的な輻射・吸収現象の複雑さに起因した膨大な計算コストである。プラズマ内部での輻射は、並進/振動/回転/電子励起の遷移によりエネルギー状態が変化すると、その差に相当するエネルギーをプランク定数で除した周波数の光が周囲へ放出され、紫外光から赤外光の広い領域に分布し、強い周波数依存性がある。再吸収過程においても同様の周波数依存性が現れるため、高温のプラズマ領域から放出された光は、その進行方向上のガスの温度や化学種組成に依存した光が吸収される。ある領域のプラズマの放射・吸収過程を解析するだけでも、周波数  $10^{12}$ - $10^{16}$  Hz、全立体角方向に積分する必要があるため、遮断器の数値解析で必要となる 2 次元・3 次元空間での非定常現象に適用するのは現実的ではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、遮断器内アーク放電の消弧現象を解明することが目的であり、これまでの研究で無視されてきた輻射エネルギーの再吸収過程を考慮した輻射伝熱場と電磁流体場の連成シミュレーションを実施した。過去の遮断器アークの輻射/吸収伝熱場を考慮した解析は、時間定常アーク放電の検討に限られており、遮断器の性能を議論する上で最も重要であるアーク消弧現象中の 3 次元・非定常場に適用された研究は報告されておらず、本研究課題が初めての試みである。

### 3. 研究の方法

本研究課題の目的を達成するために、2020 年~2022 年の 3 年間で、以下の 3 項目の検討を実施した。

- (A) 高温プラズマの放射/吸収係数の計算
- (B) 輻射/再吸収伝熱場と電磁流体場の連成解析を目的とした大規模並列化プログラムの開発
- (C) 3 次元・非定常解析による遮断器内アークの消弧現象の解明

報告者がこれまでの研究で開発してきた電磁流体解析プログラムに、小目的(A),(B)で新たに開発する輻射伝熱場の解析モジュールを組み込むことで輻射伝熱と電磁流体場の連成解析プログラムを完成させ、遮断器内アークの消弧現象の解明(C)に関する検討を実施した。

### 4. 研究成果

- (A) 高温プラズマの放射/吸収係数の計算

輻射/再吸収伝熱場の解析では、予め計算してテーブル化した吸収係数データを参照しながら解析を実行する。数万 K までの温度領域を想定した場合、束縛エネルギー準位間での遷移により生じる束縛-束縛線スペクトル放射、電子再結合により生じる自由-束縛連続スペクトル放射、制動放射により生じる自由-自由連続スペクトル放射を考慮する必要があるため、温度・圧力条件ごとに存在する化学種とそれらの励起状態から放射/吸収係数の計算を行った。消弧ガスである  $\text{SF}_6$  の吸収係数を、温度 300~40000K、圧力 0.01~3.0 MPa での吸収係数を計算した。図 1 に 0.1 MPa、10000 K における吸収係数の各成分を示し、図 2 に 0.1MPa における異なる温度での吸収係

数を示す。10000 K を超える高温では、線スペクトルからの寄与が大きく、この強い周波数依存性を再現して輻射輸送を解析するには、周波数方向の分割数を膨大にとる必要があると考えられる。そのため、本研究課題では、平均吸収係数法により、周波数領域を、図2の上部に記載された7区間に分割し、各領域での平均吸収係数から、以降の輻射伝熱場を計算した。なお、分割する周波数と区間の数に関しては、下記(B)で開発した輻射伝熱場の解析プログラムで比較検討し、平均吸収係数法でも、SF<sub>6</sub> アークの消弧に関して十分な現象再現性があることを確認している。

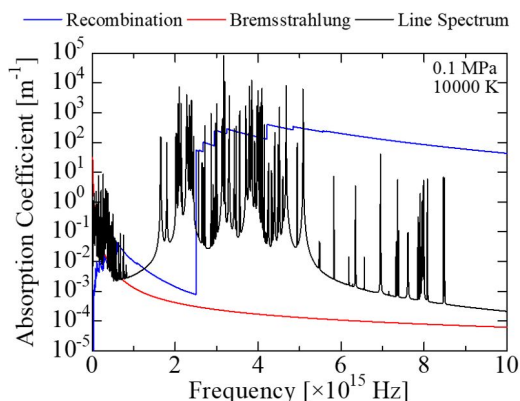


図1 圧力0.1 MPa, 温度10000 KにおけるSF<sub>6</sub> プラズマの吸収係数の各成分

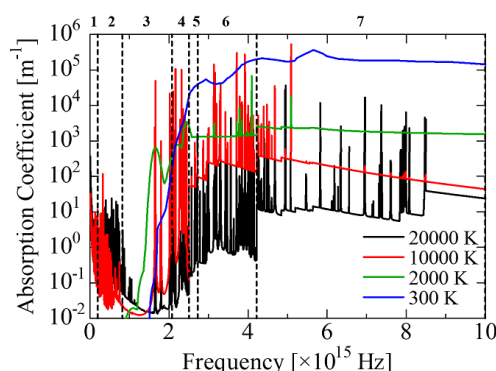
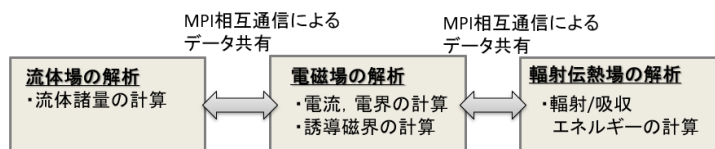


図2 圧力0.1 MPaにおける異なる温度での吸収係数

### (B) 輻射/再吸収伝熱場と電磁流体場の連成解析を目的とした大規模並列化プログラムの開発

遮断器内部のアーク放電は、非常に高い電流密度のため、アーク中心部は数万 K のプラズマ状態にある一方で、その周りは常温程度の気体に囲まれている。したがって、アーク中心部からの強い発光があり、アークの外縁部や周辺の気体中で、輻射エネルギーの一部が吸収される。このような輻射伝熱場では、放射強度の立体角方向へ強い依存性が現れると考えられ、その解析には適したスキームを選定する必要がある。研究当初は遮断器アークの解析で使用されることのできる P1 近似モデルを使用することを予定していたが、本研究では、アーク放電の解析に、より適していると考えられる有限体積法を採用した。

図3に、本研究で開発した遮断器内アーク放電の現象再現を目的とした輻射・電磁流体解析プログラムの概要を示す。このプログラムでは、MPMD(Multiple Program Multiple Data)モデルにより、流体場、電磁場、輻射伝熱場を別々のスレッドで、同時に並列して解析する。また、流体場と電磁場は領域分割、輻射電磁場は周波数・立体角分割により、さらに並列化されている。上述の輻射伝熱場の膨大な計算コストの問題に対して、MPMD モデルによる並列化とプログラムの効率化を行った結果、従来の電磁流体場のみ解析と比較して、同程度の計算時間に抑えることに成功した。



MPMDモデルによる同時並列処理

図3 輻射・電磁流体解析プログラムの概要

### (C) 3次元・非定常解析による遮断器内アークの消弧現象の解明

72kV を超える送電システムでは、SF<sub>6</sub> ガスを高速でアークに吹き付けることで電流を遮断するパuffa式ガス遮断器が用いられている。近年では、さらに、アークに対して外部磁場を印加することで遮断性能の向上を狙った、外部磁場印加型ガス遮断器も提案されている。本研究では、これらの送電システム用ガス遮断器内部でのアーク消弧現象を解明することを目的として、輻射・電磁流体解析から検討を行った。

図4に送電システム用遮断器モデルの概略図を示す。このモデルでは、超音速ノズルの上流と下流に一对の電極を備えた構造になっており、電極の間で生じるアーク放電は、パuffa式ガス遮断器と同様に、上流からの高速流れにより、強い対流冷却を受ける。さらに、図4中のx軸方向に外部磁場を印加することで、外部磁場印加型ガス遮断器でのアーク消弧を模擬した検討も実施した。

本検討において、輻射輸送方程式 (RTE: Radiative Transfer Equation) から輻射エネルギーの放射量と吸収量を計算する RTE モデルに加えて、NEC (Net Emission Coefficient) モデルの解析も実施した。NEC モデルでは、プラズマの温度・圧力から計算される放射量のみを考慮しており、アーク放電周囲での再吸収現象は考慮されていない。これらの輻射モデルの解析結果を比

較することで、遮断器内アーク放電に及ぼす再吸収現象の影響を調べた。

図5に外部磁場印加型ガス遮断器内部のロータリアークの構造を示す。ノズルのくびれ部分（スロート）を境として、図中左側のスロート上流では、アーク柱は螺旋状で、細く絞られた構造をとっている。図6に、スロート上流域でのアーク柱断面方向における電流密度と温度の分布を示す。NECモデルの解析結果では、アーク中心部で、過度な電流集中が生じており、これに起因して、プラズマの温度も高くなってしまっている。一方で、RTEモデルでは、電流集中が抑えられている。パuffa式ガス遮断器を再現した解析においても、RTEモデルを使うことで、電流集中が緩和される結果が得られており、本研究から、アーク放電プラズマの温度評価における輻射モデルの重要性を示すことができた。

図7に、アーク放電の消弧中におけるアーク電流と電気抵抗の関係を示す。ここでは、電流減少率  $di/dt = -23.75 \times 10^6 \text{ A/s}$  の割合で、アーク電流を2 kAから減少させた。パuffa式を再現した解析では、輻射モデルの違いによる差は小さかったが、その一方で、外部磁場印加型では、輻射モデルによる差が顕著である。NECモデルで電気抵抗が高くなる要因としては、輻射エネルギーの再吸収を無視しているため、プラズマの温度低下が過度に早まってしまったと考えられる。

以上の研究成果から、アーク放電の消弧現象中における輻射エネルギーの再吸収現象の重要性を示すことができ、本研究課題の目的を概ね達成できたと考えられる。

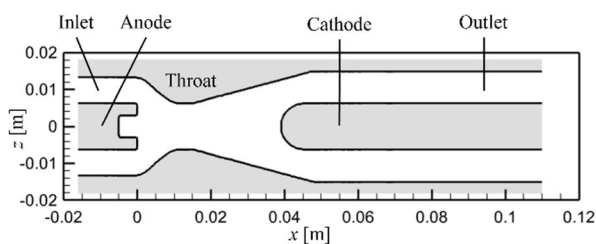


図4 送電用遮断器モデル

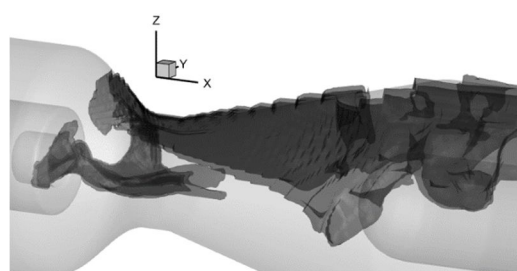
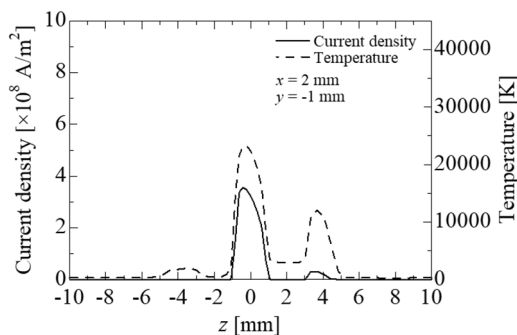
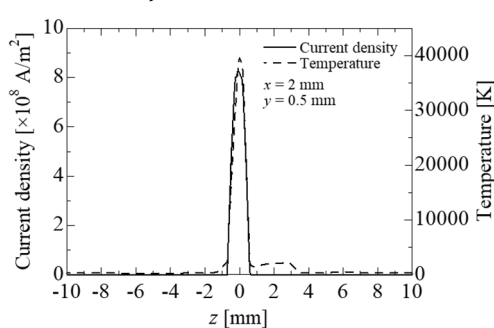


図5 外部磁場印加型ガス遮断器内部のロータリアーク（黒：15kK、薄灰：7kK等温面）

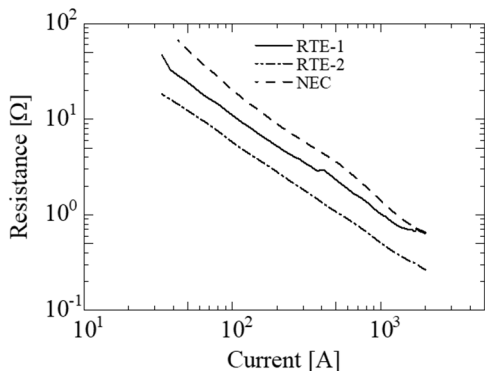


(a) RTEモデル

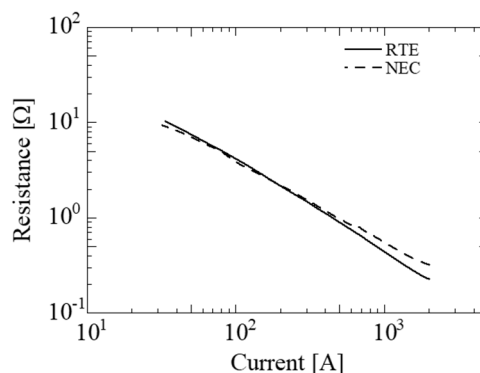


(b) NECモデル

図6 スロート上流域におけるアーク柱の断面方向の電流密度と温度分布



(a) ガス吹き付け + 外部磁場印加（外部磁場印加型）



(b) ガス吹き付けのみ（パuffa式）

図7 アーク放電の消弧中におけるアーク電流と電気抵抗の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金井 豊, 平山智士, 乾 義尚, 加藤裕明
2. 発表標題 配線用遮断器内のアークプラズマに与える電極開極速度の影響
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山岡智裕, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 ラバルノズル内のロータリアークの3次元非定常挙動に関する数値解析
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 信木 慎, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 輻射輸送を考慮したSF6アークプラズマの3次元数値解析
3. 学会等名 電気学会 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 信木 慎, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 磁気ロータリアークに与える輻射熱輸送の影響
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 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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