

アーク誘発乱流構造に着目したアーク消滅メカニズムの解明 - 次世代ガス遮断器の開発に向けた新アプローチ -

キーワード: 乱流, 空間周波数分解シュリーレン法, 分子性ガス

【代表者】 稲田 優貴 (埼玉大学) 【共同研究者】 田中 康規 (金沢大学)、熊田 亜紀子 (東京大学)、藤野 貴康 (筑波大学)、茂田 正哉 (東北大学)

背景

- 超高压送電用の遮断器で使用されているSF₆ガスが排出削減ガスに指定され、代替ガスの開発は喫緊の技術課題であるが、アークがガスとどのような相互作用を起こして消滅に至るのか、その詳細は解明されていない。

目的

- 計測・数値解析技術を高度に融合させることで、これまで実測もシミュレーションも不可能であったアーク誘発乱流の基礎メカニズムと、それがアーク遮断プロセスに果たす役割を解明する。

卓越したセンサとシミュレーションの融合

未知なる現象「アーク誘発乱流」の解明

新しいガスや遮断方式を採用した次世代型ガス遮断器の開発

研究概要

- 新手法「空間周波数分解シュリーレン法」を、各種ガス吹付けアークに適用することで、数百から数十μmの空間構造を高解像度で連続撮影し、乱流構造のサイズ・空間分布がガス種によってどのように異なるのかを明らかにした。
- 茂田と藤野が開発したそれぞれ異なる数値解析コードを用いて数値シミュレーションを行い、ガス種による乱流構造の違いを生み出すガス物性や、乱流が遮断プロセスに果たす役割を明らかにした。

研究成果

アーク誘発乱流の存在と性状を実験により明らかにし、乱流の発生メカニズム(=大きな質量密度により対流熱伝達の支配的な系が生成されること)と、乱流が遮断プロセスに果たす役割(=乱流の生成によりアーク内外で大きな熱・物質輸送が生じ消弧が促進される)を数値シミュレーションにより解明した。

1 空間周波数分解シュリーレン法を用いた乱流ダイナミクスの可視化

【担当】稲田 優貴、田中 康規、熊田 亜紀子

- 稲田と熊田が開発した新手法「空間周波数分解シュリーレン法」を用いて、乱流ダイナミクスの可視化を行った。
- Air, CO₂, SF₆を吹き付けた定常アークの自発光および乱流構造の経時変化から、アークにAirを吹き付けた場合には、Airとアークの境界面で乱流構造は発生していなかった。
- CO₂吹付けアークでは、赤模様(=乱流構造)がアークの蛇行に伴い、アーク形状に沿って形成された。これはCO₂吹付けガスとアークの境界面で生じた乱流構造であると考えられる。
- SF₆吹付けアークでもアークの蛇行に追従する赤模様(=乱流構造)が観測された。SF₆の乱流構造は様々な方向性を持ち、アークの蛇行に伴いアーク径が軸方向に一定とならず、緊縮が起こる様子が観測された。

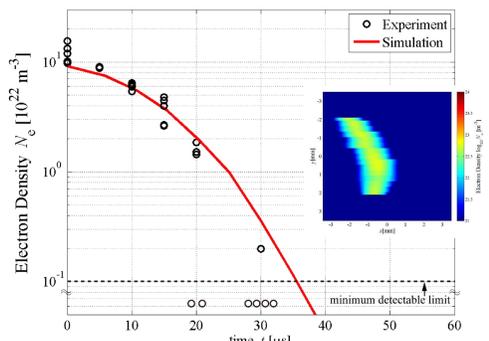


図1 SF₆減衰アークにおける電子密度の経時変化

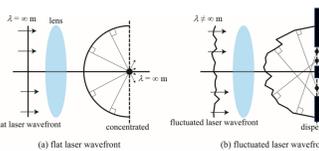


図12 レンズによるレーザー波面のフーリエ変換作用

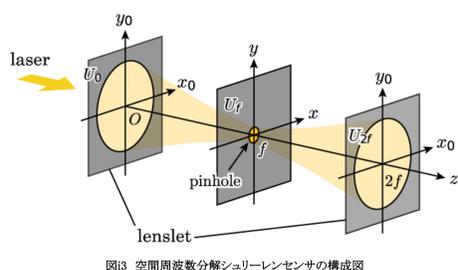


図13 空間周波数分解シュリーレンセンサの構成図

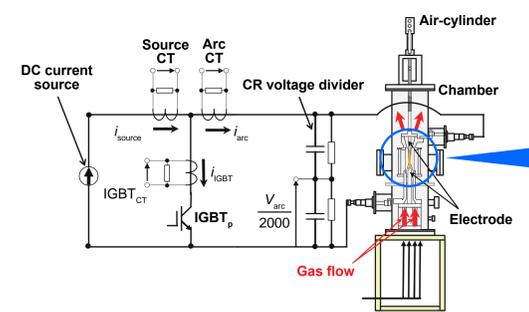


図14 アーク放電発生回路

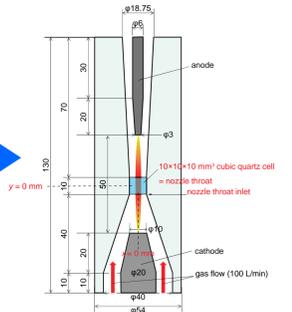


図15 ガス吹付けノズル

ガス種	乱流の最小サイズ [μm]
空気	120
CO ₂	57
SF ₆	27

表1 乱流サイズとガス種依存性

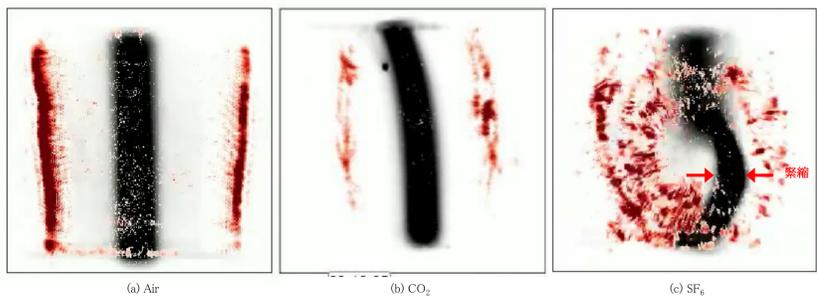


図18 乱流構造のガス種依存性 (乱流サイズ120-210 μm)

2 コンピュータ仮想実験によるアーク誘発乱流の発生メカニズム解明

【担当】茂田 正哉、田中 康規

- ①吹付けガス種の違いが数値シミュレーションでも再現されるかの検証と、②乱流的挙動の主要因とメカニズムを解明することの2点を目的に、数値シミュレーションにおいて、アーク誘発乱流の仮想実験を実施した。
- アーク誘発乱流を支配する主要な因子は質量密度であり、SF₆ガスでは、その大きな質量密度を主要因として対流熱伝達が支配的な系となる。
- 消弧過程に寄与するアーク誘発乱流をスケールリングするパラメータとしては、Péclet数が有効である。

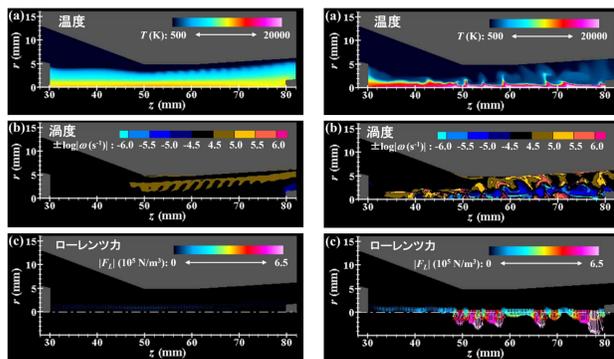


図19 空気系の瞬間像

図20 SF₆系の瞬間像

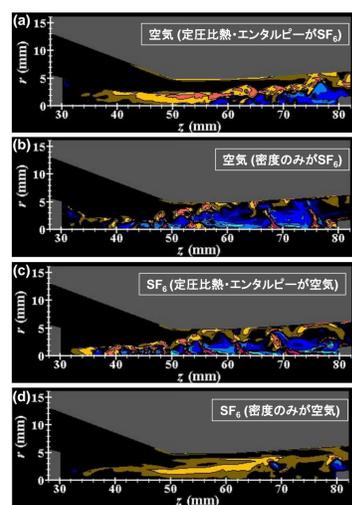


図21 仮想実験によって得られた渦度場の瞬間像

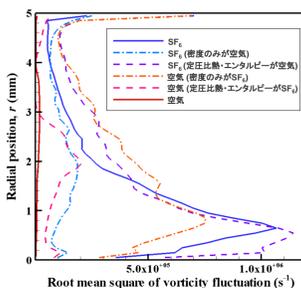


図22 z = 55 mmにおける渦度変動の二乗平均平方根の半径方向分布

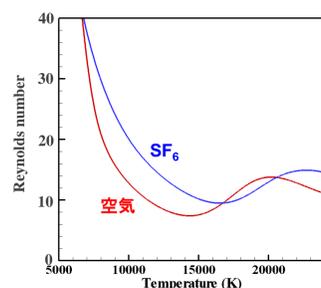


図23 Reynolds数

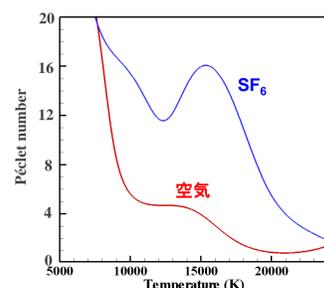


図24 Péclet数

3 高い時空間解像度を有する圧縮性電磁流体解析プログラムによる高精度シミュレーション

【担当】藤野 貴康、田中 康規

- 圧縮性電磁流体解析プログラムを用いて、アーク誘発乱流がアーク減衰過程に及ぼす影響について数値シミュレーションを行った。
- アーク電圧の時間変動は、電極間アークの非一様かつ非定常な乱流挙動に起因し、この乱流挙動の発端は、アーク外縁付近に産まれる剪断層にあると考えられる。
- 電流遮断プロセスの中で、アークの減衰時間がアークの非定常乱流挙動により分散することを示唆する解析結果を得た。

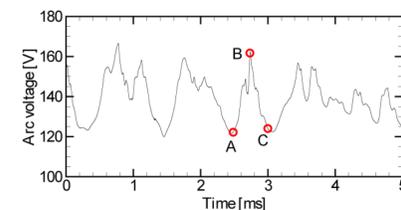


図25 数値解析から得られた定電流運転条件下でのアーク電圧変動の様子 (吹きつけガス:CO₂)

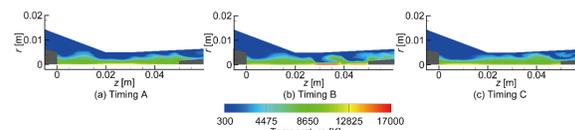


図26 数値解析から得られた定電流運転条件下でのノズル内ガス温度分布 (吹きつけガス:CO₂, 図25(a), (b), (c):図25の時点A, B, Cでの温度分布を意味する)

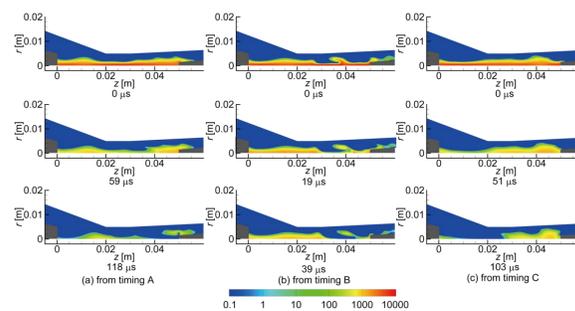


図27 数値解析から得られたフリーカバリー条件下でのノズル内電気伝導率分布の時間変化 (吹きつけガス:CO₂, 図25(a), (b), (c):図25の時点A, B, Cからフリーカバリー条件に切替えた場合にそれぞれ対応する)