

高次精度LESを用いたSF₆ガスのアークプラズマ基礎特性解析技術

Technology for Numerical Simulation of SF₆ Gas Arc Plasma Characteristics Based on High-Order LES Turbulence Model to Develop High-Performance Gas Circuit Breakers

神保 智彦

デバシス ビスワス

新海 健

■JIMBO Tomohiko

■Debasish BISWAS

■SHINKAI Takeshi

電力用遮断器は電流を遮断し電力系統の保護や制御を行う機器で、電力需要の高まりに伴って、系統の安定性のために通常時及び事故時の電流遮断においてすばやい遮断能力が要求されている。優れた消弧性能及びシステムの信頼性から、現在、パツファ形SF₆（六フツ化硫黄）ガス遮断器（GCB：Gas Circuit Breaker）が広く用いられている。更に性能向上を図るには、GCB内部におけるSF₆ガスのアークプラズマ基礎特性及び流体とプラズマの相互作用を理解することが重要である。

そこで東芝は、GCB内部の現象を把握するために、高精度LES（Large Eddy Simulation）をコアとする数値流体解析技術を開発した。この解析技術を適用することで、超音速流れにおける流体とプラズマ干渉現象を予測することができ、より効率的なGCB開発が可能になる。

A gas circuit breaker (GCB) is a safety apparatus that plays a role in the control and protection of an electric power system by interrupting large currents. With the increase in electric power demand, GCBs are required to have large and rapid current interruption capabilities even in the case of unexpected accidents.

To meet these requirements for GCBs, Toshiba has developed a technology for the numerical simulation of sulfur hexafluoride (SF₆) gas arc plasma characteristics based on a high-order large eddy simulation (LES) turbulence model to understand the intricate fluid-plasma interaction phenomena in GCBs. The newly developed simulation technology makes it possible to realize GCBs offering high performance and high reliability.

1 まえがき

電力用遮断器^{(1),(2)}は電流を遮断し電力系統の保護や制御を行う機器で、通常の電流開閉に加えて、事故時の大電流の遮断と投入による回線の切断と復旧、及び系統の安定性を確保するため、発電技術とともに進歩してきた。近年の電力需要の高まりに伴って高電圧大容量送電が必要とされるようになり、遮断器の高電圧大容量化が進められている。

図1に示すような現在主流であるガス遮断器（GCB：Gas Circuit Breaker）では、電流遮断時に電極間に発生するアーク放電を絶縁性が高いSF₆ガスで消弧する方式が用いられているが、効率的な開発や設計を行うには電流遮断過程においてGCB内部で起きている現象を把握することが必要である。

ここでは、GCB内部の超音速流れにおける流体とプラズマ干渉現象の解析に高次精度LES（Large Eddy Simulation）をコアとする数値流体解析技術を適用し、SF₆ガスのアークプラズマ基礎特性について検討した結果について述べる。

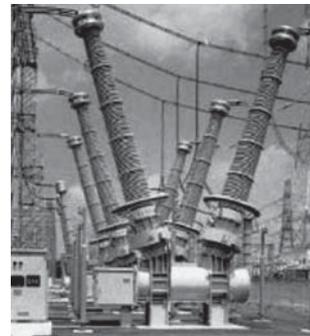


図1. GCB — 現在主流の1点切りGCBである。
GCB

2 GCBを効率的に開発するうえでの課題

電力用遮断器は、遮断媒体により油遮断器（OCB：Oil Circuit Breaker）あるいは空気遮断器（ABB：Air Blast Circuit Breaker）からGCBへと変遷し、遮断方式もそれに

伴い進歩してきた。その他にも、真空遮断器（VCB：Vacuum Circuit Breaker）や磁気遮断器（MBB：Magnetic Blow-out Circuit Breaker）などがある。

家庭にあるブレーカは接点（電極）を離せば電流は流れなくなるが、発電所や変電所などに設置される遮断器は電圧が高く遮断電流が非常に大きいため、電極を機械的に開いてもアーク放電が発生して電流が流れ続ける。そのためGCBでは、電流遮断時に電極間に不可避免的に発生するアーク放電に絶縁ガスを吹き付けることで電流を遮断する。絶縁ガスには一般に、絶縁性が高いことや、不活性で熱伝導性が高くアーク放電に

よって熱せられたガスを速やかに冷却できることなどからSF₆ガスが用いられている。

GCBの開発初期は、別タンクに昇圧しておいた高压ガスを吹き付ける複圧式であったが、SF₆ガスは液化しやすいため、液化を防ぎ高压状態を維持するための複雑な構造が必要であった。そこで、ピストンシリンダの相対的な移動による機械的圧縮によりガスの圧力を高めるパッファ方式(単圧式)が開発された。この方式を用いて1970年代から約30年間に、定格電圧72～550 kV系統で1遮断点当たりの消弧室の性能を向上させた1点切り遮断器が開発され製品化されてきた。その後、更にコストダウンの観点から、機械的な圧縮を行う駆動装置の駆動エネルギーを低減するために消弧室の性能を向上させるための研究が進められている。その一つに、アークエネルギーを圧力上昇に利用する方式がある。

アークエネルギーを最大限に利用した効率的な開発と設計のためには、電流遮断過程においてGCBの中で起きている現象を把握することが求められる。特に、GCB内部の流れの様相やSF₆ガスのアークプラズマ特性⁽³⁾⁻⁽⁵⁾を知ることが重要になる。しかし、遮断電流が63 kAと非常に大きな電流を扱うことと、消弧室は絶縁ノズルで覆われているため内部の様相を詳細に測定することが非常に難しく、解析の高度化が必要である。

SF₆アークの遮断現象は μ sオーダーで遮断成否が決まる高速現象で、それはアークプラズマの発生・消滅過程が極めて複雑な現象であること、更に周辺材料との相互作用を持つことに関連している。アーク自身の現象としては、温度・圧力依存性の極めて大きい熱力学・輸送特性や、それに関連する要素としてアークの素反応(励起、電離、及び解離とその逆反応)、放射、吸収、反応性非平衡、熱的非平衡などが挙げられる。また周辺材料との相互作用としては、電極・ノズル材料のアブレーション^(注1)や電極からの電子放出現象などが挙げられる。更にGCB内部は超音速流れになっており、衝撃波と境界層の干渉や、アークプラズマとその周辺との間の乱流によるミキシングも影響を与える。このようにGCBでは、流れや、アークプラズマ、化学反応、相変化など様々な現象が短い時間スケールで起き、電子付着現象やガス分解性なども影響を与えるため、非常に複雑な流体とプラズマ干渉現象が発生している。

3 高次精度LESをコアとする高精度流体解析

一般に、数値流体力学は空間を格子と呼ばれる小さな領域に分割し、コンピュータを用いて流れの基礎方程式を解くもので、設計の現場で重要な役割を担い、汎用の流体解析コードも広く使われるようになってきた。しかし、様々な現象が絡み

(注1) 材料の表面が蒸発や侵食によって分解する現象。

合うGCB内部の流れやタービン内の詳細な渦の挙動など複雑な現象を取り扱ううえで、汎用解析コードではまだ精度が不十分なケースもある。

工学的な流れの多くは、規則的な流れである層流から始まり、やがて乱雑で複雑な流れである乱流に遷移する。流れの様相を把握するうえで重要な境界層内の層流から乱流への遷移は圧力勾配などから影響を受けるため、物理現象に基づいた乱流のモデル化が必要になる。エネルギーカスケードと呼ばれる大きい渦から小さい渦へエネルギーが伝達し散逸する過程をどのように扱うかが高精度な乱流モデルのキー技術となる。

LES乱流モデルは、ある大きさ以下の渦だけをモデル化し、それよりも大きい渦は流れの基礎方程式を直接解く方法である。今回用いている高次精度LES⁽⁶⁾は、最小格子幅、壁面近傍の小さい渦、及び壁面から離れた大きい渦の関係を考慮した渦の間のリンクにより、格子依存性が低く、小さい渦から大きい渦への影響を表現でき、乱流特性を詳細に解析できる。

また、現象を再現するためには、関連する各々の現象について物理現象に基づくモデル化及びそれらのカップリングが必要である。例えば、GCBでは流体以外にプラズマのモデルを導入したマルチフィジックスシミュレーションが重要である。更に詳細な解析を行うには、電極の融解やガスの分解など相変化や化学反応などのモデルを導入した流体とプラズマの反応などを同時に解く連成解析が必要になってくる。

4 超音速流れにおける流体とプラズマ干渉現象

4.1 解析モデル

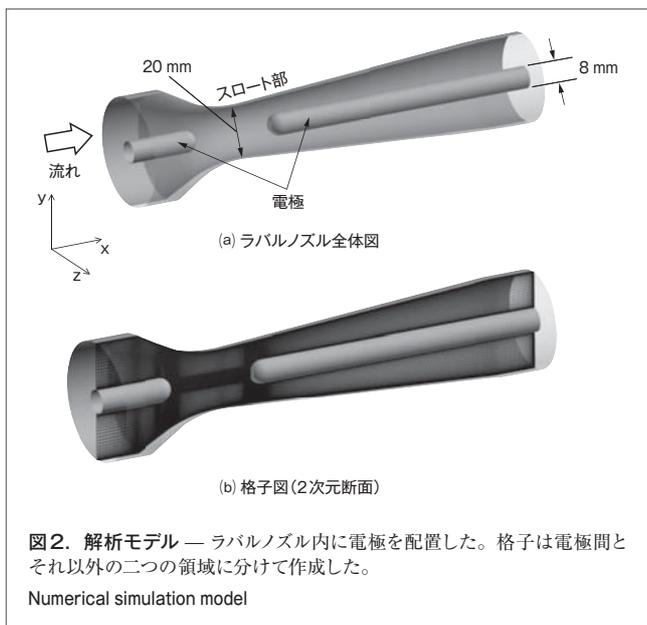
ここでは、図2(a)に示すような、狭まりと広がりのあるラバルノズル内に配置された電極間にアークを発生させたときの、流体とアークプラズマの干渉について解析を行い、SF₆ガスのアークプラズマ基礎特性について検討する。

流れ方向をx軸とし、電極間の距離を30 mm、電極及びラバルノズルのスロート部分の直径をそれぞれ8 mm、20 mmとする。計算格子の2次元断面を図2(b)に示す。ここでは、電極間は中心軸上の特異性を回避するためにH型格子を、それ以外の領域にはO型格子を用いた。格子点数はそれぞれ151×51×51 = 392,751、481×41×201 = 3,963,921である。SF₆ガスの物性値は温度と圧力の関数とした。また、図の左から右への流れがマッハ数^(注2) 1.2となるように入口全圧と出口静圧を与え、アークありの条件では直流100 Aの電流を与えた。

4.2 アークなしの解析結果

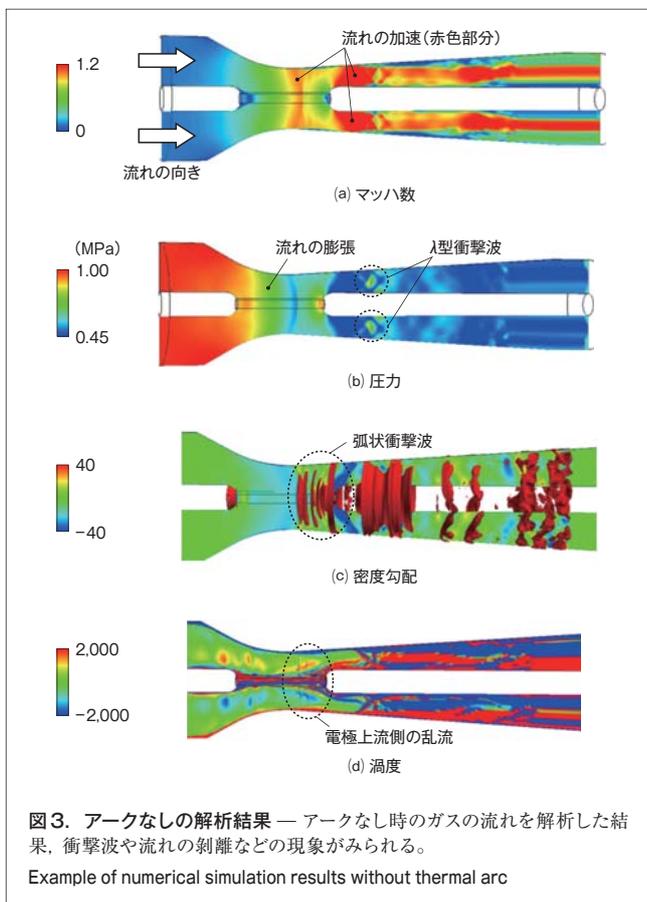
電極間にアークを発生させない場合、ガスの流れのマッハ

(注2) 流体の流れの速さと音速の比で、値が大きくなると圧縮性を無視できなくなり、1を超えると衝撃波が発生する。



数、圧力、密度勾配、及び渦度（回転の度合い）について、x-y面上の各分布の解析結果を図3に示す。

(a), (b), 及び(c)から、流れが電極間で膨張して加速され、電極間では弧状の衝撃波が形成されていることがわかる。その後、下流側のノズル内で流れは再び加速し、λ型の疑似衝



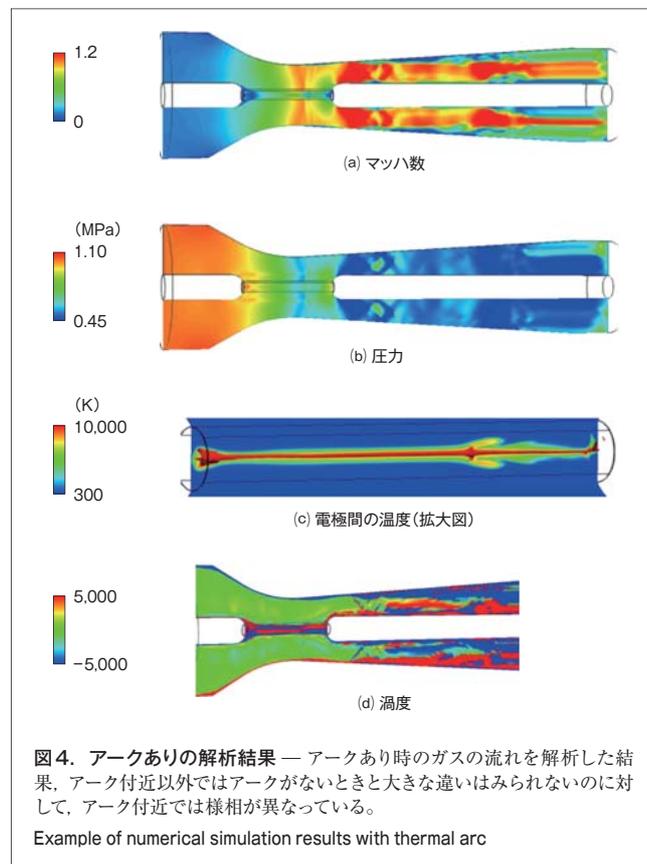
撃波が形成されている。λ型の疑似衝撃波の下流側で衝撃波とノズル壁面の境界層が干渉し、流れが剥離している。(d)からは、右側の電極の上流側で乱流になっており、衝撃波により乱流の強度が大きくなっていることがわかる。同様に、下流側の流路でも衝撃波と境界層の干渉により流れが乱れていることがわかる。

4.3 アークありの解析結果

電極間にアークを発生させた場合、ガスの流れのマッハ数、圧力、電極間の温度、及び渦度について、x-y面上の各分布の解析結果を図4に示す。

アーク以外の領域では、電極間での流れの膨張と加速や、電極間の衝撃波の形成、下流部分の流れの加速や疑似衝撃波などについて、アークなしの場合の流れと比べて大きな違いは見られない。

それに対して、アーク部分の様相は異なる。(a)からは、アークのコア部分とその外側の領域間でマッハ数が不連続に変化していることがわかる。これは、アークコア部分はアーク熱によりその周囲に比べて温度が高くなっており、音速が異なるためである。(b)からは、アーク熱による急激な膨張で生じた圧力波が上流側及び下流側の電極に向かって伝播（でんぱ）し、電極先端部分の圧力が上昇していることがわかる。(c)からは、アークコア部分と隣接する周囲の低温部分がアークにより熱せられた高温側に引き込まれ、また熱拡散により温度が上



昇していることがわかる。更に、電極間の衝撃波近傍で温度の急激な変化が見られる。(d)からは、電極間や下流側の電極とノズル壁面から成る流路で流れのミキシングが起きていることがわかる。

4.4 アークが流れに与える影響

アークなしとアークありにおけるx-y面上のx軸方向速度とy軸方向速度の分布について、アークなしのケースを図5に、アークありのケースを図6にそれぞれ示す。

アークなしの流れでは、図5(a)から電極間での流れの膨張と、電極の上流付近の衝撃波群が見られ、流れが加速していることがわかる。その後、下流側の電極とノズル壁面から成る流路で流れが再び加速している。下流部分の加速領域でλ型の擬似衝撃波が形成され、衝撃波と境界層の干渉によるノズル壁面上の流れの剥離により急激に境界層の厚さが増加している。また(b)からは、電極先端部分でy軸方向の速度が増加していることがわかる。

それに対して、アークありの流れでは様相が異なる。図6(a)からは、アークのコア部分の高圧の領域から上流及び下流側

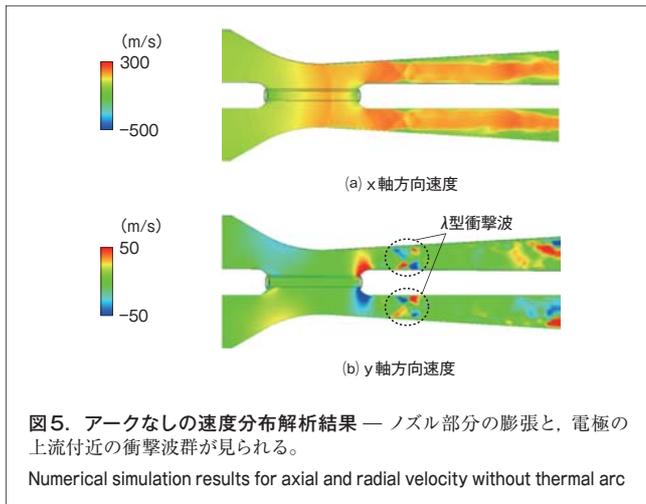


図5. アークなしの速度分布解析結果 — ノズル部分の膨張と、電極の上流付近の衝撃波群が見られる。

Numerical simulation results for axial and radial velocity without thermal arc

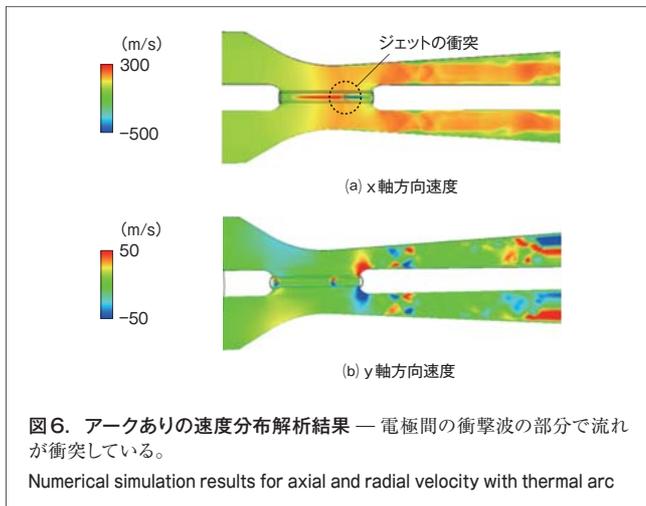


図6. アークありの速度分布解析結果 — 電極間の衝撃波の部分で流れが衝突している。

Numerical simulation results for axial and radial velocity with thermal arc

に向かう高速なジェットが生じていることがわかる。このジェットは電極間の弧状衝撃波部分で衝突している。(b)では、アークなしでは見られなかったジェットの衝突により、y軸方向の速度が大幅に増加している。ジェットの衝突は乱流活動の活性化による強いミキシングを生じさせ、衝撃波下流のアーク層の急激な増加をもたらす。強いミキシング現象とジェット衝突部分の乱流活動の増加は図4(d)の渦度分布からもわかる。

5 あとがき

高次精度LESによる流体解析技術を開発し、ラバルノズル内に配置された電極間にアーク放電が発生したときの超音速流れにおけるSF₆ガスの流体とプラズマ干渉現象に適用し、流れがアークから受ける影響などについて検討した。この技術を用いることによって、GCB内部で起きている複雑な現象を予測することが可能になった。今後、GCBの開発や設計を効率的に進めるための解析技術として活用を図っていく。

文献

- (1) 豊田 充. 電力用遮断器の技術変遷. 電気学会誌. 127, 9, 2007, p.607 - 610.
- (2) 日高邦彦. 高電圧工学. 東京, 数理工学社, 2009, 288p.
- (3) Frost, L.R.; Liebermann, R.W. "Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model". Proc. IEEE. 59, 4, 1971, p.474 - 485.
- (4) 田中康規 他. "SF₆アークプラズマ-固体電極相互作用のモデリングと電磁熱流体解析". 電気学会 電力・エネルギー部門 放電・静置器・開閉保護合同研究会. 東京, 2010-06. 電気学会, 2010.
- (5) Jimbo, T. et al. "Studies on fluid-plasma interaction associated with gas blast characteristics based on a high-order LES turbulence model". The 11th Asian Symposium on Visualization. Niigata, Japan, 2011-06. The Visualization Society of Japan, 2011, asv11-15-10.
- (6) Biswas, D. "Studies on separation control CFD validation test case based on high order LES model". 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. San Francisco, CA, USA, 2006-06, AIAA, 2006, AIAA-2006-2881.



神保 智彦 JIMBO Tomohiko, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務, 博士(工学)。流体解析技術に関する研究・開発に従事。日本機械学会, 可視化情報学会会員。

Mechanical Systems Lab.



デバシス ビスワス Debasish BISWAS, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹, 工博。電子機器及びエネルギー機器の研究・開発に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会, AIAA 会員。

Mechanical Systems Lab.



新海 健 SHINKAI Takeshi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 送変電機器開発部主務, 博士(工学)。遮断現象及び遮断器の研究・開発に従事。電気学会, IEEE 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center