

一般論文

電力機器開発に貢献する シミュレーション技術

Numerical Simulation Technologies to Develop Electric Power Equipment

玉井 耕太郎* 清滝 和雄*
K. Tamai K. Kiyotaki

概要

当社では、電力機器、パワーエレクトロニクス装置、薄膜成膜装置などの開発に多様なシミュレーション技術を活用している。その中で本稿では、電磁場-熱連成解析と電場-熱流体連成解析について紹介する。

Synopsis

Numerical simulation technologies are widely used as assistant tools for development of electric power equipment. This article will introduce the electromagnetic-thermal coupled analysis and the electric-thermal fluid coupled analysis, both of which has been applied to our developments.

1. まえがき

近年のコンピュータの性能向上に伴い、CAE (Computer Aided Engineering) 技術が急速に発展し、構造解析・電磁界解析・熱流体解析をはじめとする各種シミュレーションが通常のパソコンでも十分行えるようになってきた。当社でも、製品設計の最適化や試作検証回数の低減、測定困難な現象の解明を図るため、電力機器開発におけるシミュレーション技術の活用を積極的に進めてきた^{(1)・(2)}。その中で、複数の物理・化学現象を複合的に取り扱う連成解析も実用化が進んでいる。本稿では、電力機器の電磁場-熱連成解析と、アークプラズマを対象にした電場-熱流体連成解析について紹介する。

2. 電磁場-熱連成解析

電力機器の熱設計において熱源は電流によるジュール熱であり、発熱量は(1)式のように電流密度の二乗と抵抗率に比例する。

$$q = \rho |i|^2 \quad \dots (1)$$

q : 発熱量、 ρ : 抵抗率、 i : 電流密度

電流密度は、(2)式に示す通り電界に比例し、電界は(3)式に示すMaxwell方程式に従って磁束密度の時間変化により誘起される。

$$i_e = \frac{1}{\rho} E \quad \dots (2)$$

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots (3)$$

i_e : 渦電流、 E : 電界、 B : 磁束密度

* 研究開発本部 解析検証センター

電磁場解析と熱解析を個別に実施する場合と、それらを連成した場合の比較を図1に示す。前者では電磁場解析で得られた発熱量を熱解析の解析条件として入力する必要があるのに対して、後者では発熱量の入力を必要とせず、電流を与えるだけで温度等の熱設計に必要な情報が得られるため解析工数を半減できる。また、メッシュ毎に発熱量の分布を考慮した熱解析を行う為、解析精度の点でも後者が有利である。

当社では、各種電力機器の熱設計にて電磁場-熱連成解析を積極的に活用している。

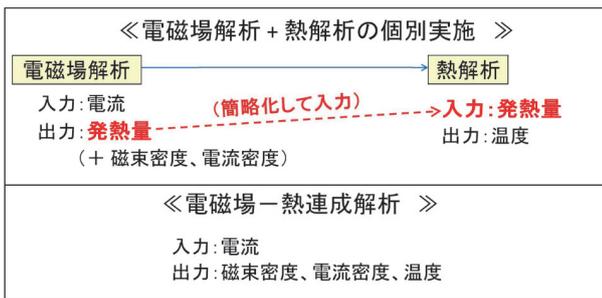


図1 個別解析と連成解析の比較

ここでは例としてバスダクトの電磁場-熱連成解析事例について紹介する。バスダクトは、ビルや工場等で、複数本の通電導体を金属製のカバー内に固定配置するものでコンパクト化を図った電力流通設備の重要な要素である。導体の形状・配置の最適化と更なるコンパクト化を図るためには、渦電流を考慮した熱設計が必要不可欠であり、電磁場-熱連成解析により詳細な渦電流分布を考慮して解析精度の向上を図っている。

図2にバスダクト断面の解析モデルを示す⁽³⁾。また、導体に通電した電流の振幅・位相・周波数を表1に示す。

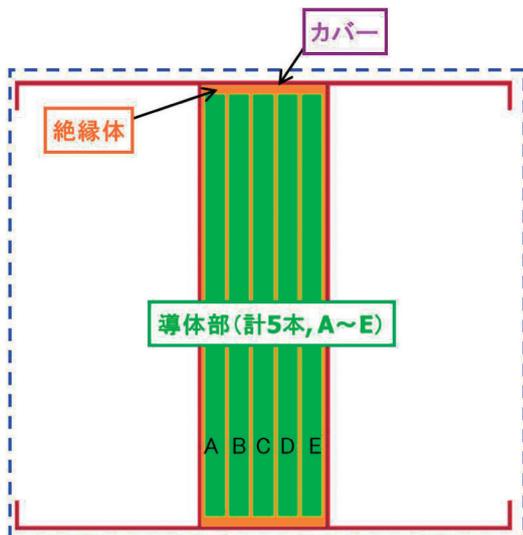
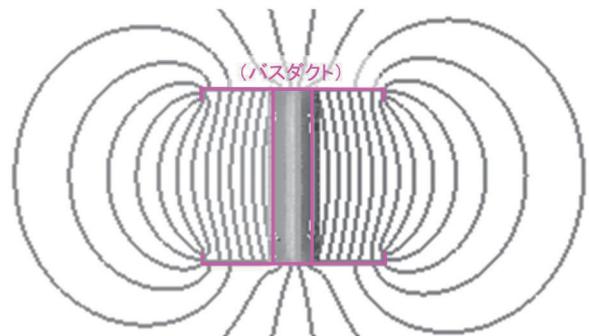


図2 バスダクトの電磁場-熱連成解析モデル

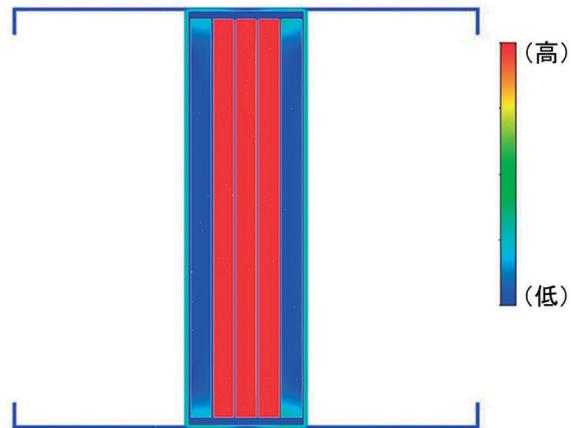
表1 導体の通電条件

導体	振幅	周波数	位相
B	2828 A	60 Hz	120°
C			0°
D			-120°

図3に、電磁場-熱連成解析で得られた磁束線・電流密度分布を示す。これらの出力は、磁場の空間分布や、通電導体を含む周囲の導体に磁場が鎖交して発生する渦電流の分布の確認に有用である。



(a) 磁束線



(b) 電流密度分布

図3 電磁場-熱連成解析による磁束線・電流密度分布

また、図4(a)に解析で得られた温度分布を示し、図4(b)に図4(a)で示される各測定箇所における温度上昇値の解析と実測の比較結果を示す。解析結果と実測結果が良好な精度で一致していることを確認できる。

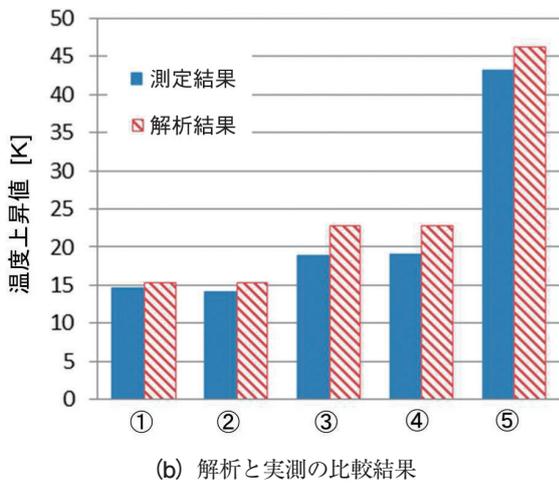
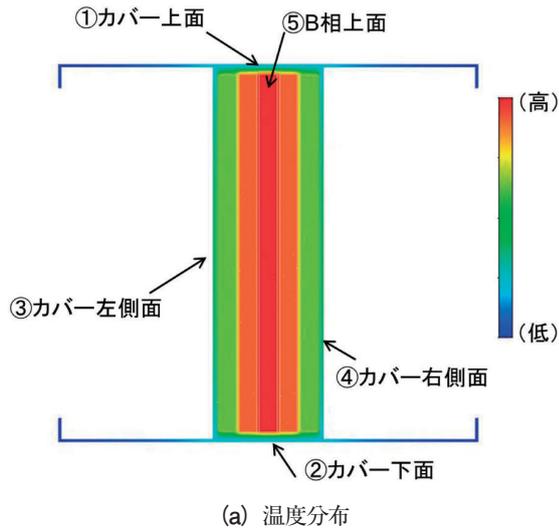


図4 電磁場-熱連成解析による温度分布および解析と実測の比較

3. 電場-熱流体連成解析

アークを対象にした電場-熱流体連成解析の事例について紹介する。この手法は遮断機構のアーク解析等で特に重要となる。アークは、高温状態のガス分子の電離による導電性のプラズマ領域中を電流が流れる状態であり、ジュール熱によって高温状態が維持される。アークの発熱量は、電気伝導率と電流密度を含んだ形で (4) 式のように表される。

$$q = \frac{|i|^2}{\sigma} \quad \dots (4)$$

q : 発熱量、 σ : 電気伝導率、 i : 電流密度

ここで、電流密度分布は、境界条件を与えて電位のポアソン方程式 (5) を解くことにより得られた電位から式 (6) を用いて求められる。

$$\text{ポアソン方程式} \quad \text{div}(\sigma \text{ grad } \phi) = 0 \quad \dots (5)$$

$$\text{電流密度と電位の関係} \quad i = -\sigma \text{ grad } \phi \quad \dots (6)$$

ϕ : 電位

以上のように得られた発熱量を用いて、式 (7) ~ (9) で記述される流体基本方程式と連成することにより、アークを含んだ流体の温度・流速・密度・圧力等が求められる。

連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad \dots (7)$$

運動量方程式

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} u_i) = \text{div}(\rho \nu \text{ grad } u_i) - \text{grad } p \quad \dots (8)$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \text{div}(\rho c T \bar{u}) = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + q \quad \dots (9)$$

ρ : 密度、 \bar{u} : 流速ベクトル、 u_i : 流速ベクトルの成分、 ν : 動粘性係数、 P : 圧力、 T : 温度、 c : 比熱、 λ : 熱伝導率

図5にアーク解析事例の解析モデルを示す。この例では、電極に直流電流を通電し、アークにガスを吹き付けた。電流値、ガス流量等の条件は表2のとおりとした。

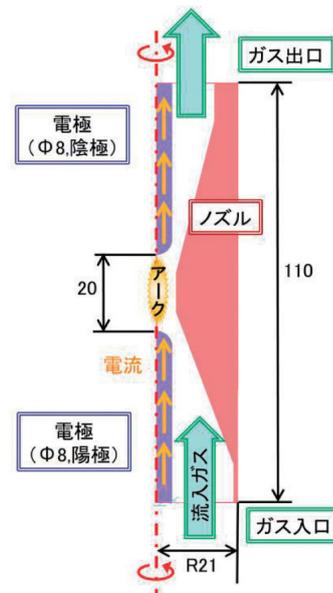


図5 アーク解析モデル (2次元軸対称)

表2 アーク解析条件

電流 [A]	10
ガス流量 [L/min]	100
通電時間 [秒]	1
雰囲気ガス	アルゴン
雰囲気圧力 [MPa (abs)]	0.1

図6～8に解析結果を示す。これらの図では今回の解析対象である流体領域のみを色付け表示する。図6の流速分布より、流路が狭くなる電極間でガス流れが速くなっていることが分かる。また、図7の温度分布においてアークが発生する電極間で高温になっていることが分かる。アークの中心温度は、測定結果が約9,500±1000Kに対して解析結果が10,200Kであり、実測結果をほぼ再現出

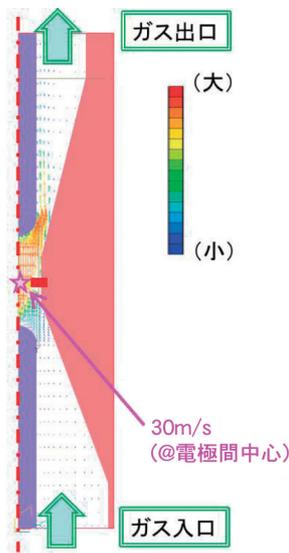


図6 流速分布

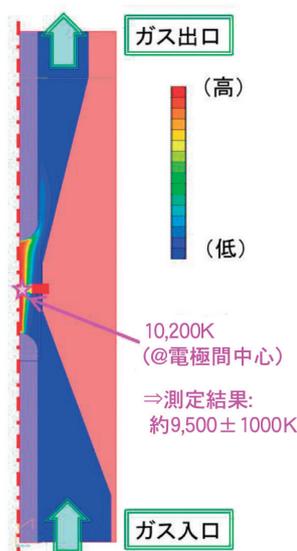


図7 温度分布

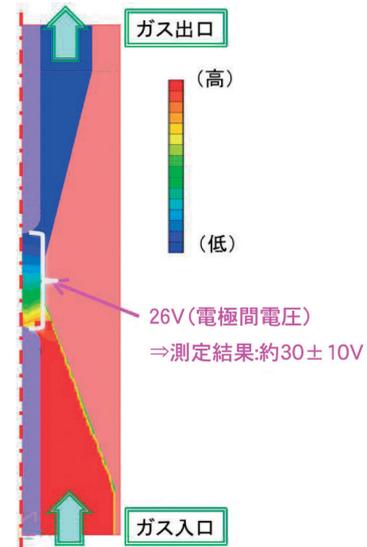


図8 電位分布

来ていることが確認できた。更に、図8の電位は、電極間電圧の測定結果が約30±10Vであるのに対して解析結果が26Vであり、実測をほぼ再現出来ていることが確認できた。

アーク解析には、ガス種別に応じた物理的な動特性や、電離・結合の化学的な動特性など複雑な現象を複合して扱う必要がある。今後、実測結果との裏付けを得ながら解析技術を高度化させ、機器の高性能化、コンパクト化に貢献していく。

4. あとがき

本稿では、

- ・電磁場－熱連成解析技術
- ・電場－熱流体連成解析技術

について、具体的な解析事例と共に紹介した。

引き続き、シミュレーション技術の高度化に取り組み、製品設計の最適化や試作検証回数の低減、測定困難な現象の解明に活用することによって、更なる機器開発のスピードアップや機器の高性能化・高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 藤田 他：「最近の当社のCAE技術について」、日新電機技報、Vol.48 No.1、pp.2-8(2003.3)
- (2) 太田 他：「ガス絶縁開閉装置を支える設計・解析技術」、日新電機技報、Vol.58 No.2、pp.23-27(2013.10)
- (3) S.L.Ho., et al.：“A 3-D Study of Eddy Current Field and Temperature Rises in a Compact Bus Duct System”, IEEE Trans. Magnetics, Vol.42 No.4, pp.987-990(2006)

✎ 執筆者紹介



玉井 耕太郎 Kotaro Tamai

研究開発本部
解析検証センター
CAE推進グループ



清滝 和雄 Kazuo Kiyotaki

研究開発本部
解析検証センター 主幹