

COMSOL Multiphysics®による電気放電のシミュレーション

Simulation of Electric Discharges using COMSOL Multiphysics®

修 立柱¹⁾

Lizhu Tong

1) 博(工) 計測エンジニアリングシステム株式会社 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F,
E-mail: tong@kesco.co.jp)

Discharges, such as streamers, coronas, dielectric barriers, arcs and so on, often occur in consumer electronics and high-voltage power system components. However, electric discharges involve complex chemical reactions and material properties that make simulation difficult. In this work, we present two simulation approaches to analyze the behavior of electric discharges in gases, liquids, and solid dielectrics, in which the Electric Discharge module of COMSOL Multiphysics® is used. Two application models are presented. One is a transient DC arc model that uses a magnetohydrodynamics (MHD) approach and the other is a partial discharge (PD) model of oil-paper insulation, established based on the hydrodynamic drift-diffusion theory in oil and the bipolar charge transport theory in paper.

Key Words : *Electric Discharge, MHD Approach, Hydrodynamic Drift-diffusion Model, Bipolar Charge-transport Model*

1. はじめに

アークとは空気などの気体が1万度以上の高温となり気体分子が電離および解離することで気体の電気伝導率が増加し、気体中に電流が流れる現象である[1]。アーク溶接などの定常状態としたシミュレーション研究が昔から研究されてきたが、ガスを放電させて大電流を流すと、瞬間的に放電路が熱せられて局部的に急激な圧力上昇が起こり、そこから衝撃波が発生することがある。衝撃波の形成とともに放射損失が非常に重要になるが、このショックフロントを解決するのは計算上で非常に困難である。

絶縁油などの液体誘電体は、多くの高電圧(HV, High Voltage)電力機器の絶縁材料として利用されている。高電圧環境下に置かれた絶縁油中で、発生するストリーマ放電と進展メカニズム、さらに、液体中の固体絶縁表面上に沿面放電の諸部分放電現象を解明することが重要である。しかしながら、現在、油紙絶縁の部分放電特性に関する研究は、主に劣化度、温度、電圧振幅、および破壊電圧や部分放電初期電圧など部分放電特性に及ぼす因子について主に実験的手法を用いて調べる。部分放電の完全なメカニズムを理解するには、微視的な電荷輸送に基づいた研究が必要であるため、数値解析的な手法が有効となる[2]。

本報では、COMSOL Multiphysics®電気放電モジュール[3]を用いて、アーク溶接におけるMHD非定常解析モデルおよび油紙絶縁の部分放電モデルを構築して、電気放電シミュレーションする手法を報告する。

2. 数値計算方法

(1) 電磁熱流体モデル

熱プラズマの電磁流体力学(MHD)の解析は、局部熱平衡 (LTE, Local Thermodynamic Equilibrium) 近似として行われる手法がよく使われる。一般的な熱流動を記述する基礎方程式にプラズマ特有の項を加えることで基礎方程式を記述する[4]。プラズマ放電の熱源 Q を熱流体計算に加入させ、非定常解析の支配方程式を次の式に示す。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 C_p は比熱容量、 T は温度、 \mathbf{u} は流速、 \mathbf{q} は熱流束、 k は熱伝導率である。熱源 Q は抵抗加熱(ジュール加熱)、正味放射損失およびエンタルピー輸送が含まれる。ガスを放電させる際、局部的に急激な圧力上昇(衝撃波)に対して、ここではMHD非定常解析に等方性拡散という安定化手法を導入した。等方性拡散項は次の式で定義される。

$$c_{\text{art}} = \nabla \cdot (\delta_{\text{id}} h \|\rho \mathbf{u}\| \nabla \mathbf{u}) \quad (3)$$

ここで、 δ_{id} はチューニングパラメーター、 h は局部メッシュのサイズである。

(2) 液体および固体誘電体における電荷輸送モデル

液体および固体誘電体における電荷輸送モデルでは、液体の電子(e)、正イオン(p)および負イオン(n)、固体の電子(e)、正孔(h)、そしてトラップされた電子(te)と正孔(th)の挙動を解く。固体誘電体における電荷輸送モデルはバイポーラ電荷輸送モデルとも呼ばれる。電荷輸送モデルの計算式はポアソン方程式と完全に結合される。支配方程式を次の式に示す[3]。

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{w}_i n_i - D_i \nabla n_i) = R_i \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (5)$$

ここで、 $i=e, p, n$ と $i=e, h, te, th$ はそれぞれ液体と固体誘電体の電荷キャリアを意味する。 n_i は数密度、 \mathbf{w}_i はドリフト速度、 D_i は拡散係数、 R_i は反応速度である。 $\mathbf{w}_i = z_i \mu_i \mathbf{E}$ であり、 μ_i は移動度、 \mathbf{E} は電場、 z_i はキャリア電荷、液体と固体誘電体に対してそれぞれ $z_{e,p,n} = -1, 1, -1$ と $z_{e,h,te,th} = -1, 1, -1, 1$ である。式(5)中の ρ は空間電荷密度、 $\rho = e \sum_i z_i n_i$ 、 e は電気素量、 ϵ は誘電率である。

パイポラ電荷輸送モデルにおける空間電荷の注入はショットキー法則に従い、注入電流密度 J_{in} が次の式で計算される[5]。

$$J_{in} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi_i}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{e}{k_B T} \sqrt{\frac{e|\mathbf{E}|}{4\pi\epsilon}}\right) \quad (6)$$

ここで、 A はリチャードソン定数、 T は温度、 k_B はボルツマン定数、 ϕ_i はショットキー注入障壁、 $i=e, h$ である。

油紙絶縁の界面における電荷輸送の計算方程式は次の式に示す[3]。

$$\mathbf{n}_p \cdot (\mathbf{D}_p - \mathbf{D}_o) = -\rho_s \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\sigma_s \mathbf{E}) = \mathbf{n}_o \cdot \mathbf{J}_o + \mathbf{n}_p \cdot \mathbf{J}_p \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{n} は法線ベクトル、 ρ_s は表面電荷密度、 σ_s は表面電気伝導率、 \mathbf{J} は電流密度である。

3. 結果

図-1にアーク溶接におけるMHD非定常解析モデル[6]の

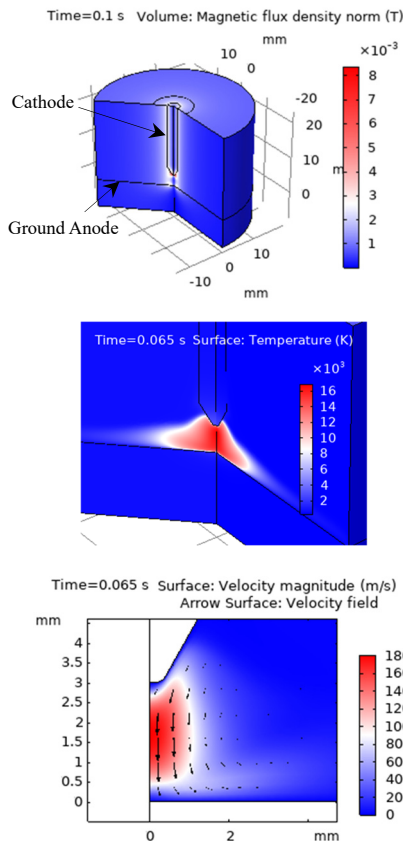


図-1 アーク溶接における磁束密度、温度および速度

計算結果を示す。視覚的に示すため、異なる時刻での結果を示している。20 Aのベース電流から180 Aのピーク電流まで形成された周波数20 Hzのパルス電流を採用した[7]。

溶接時間を2周期、0.1 sとして計算を行った。第1周期でアークが形成され、第2周期以後は安定したパルス放電になると考えられる。環境温度は20°C、ガスはアルゴンである。ガスの密度、比熱、粘度および熱伝導率は温度の関数として24,000 Kまで扱われた[8]。

液体誘電体の放電プロセスは非常に短く、液体に浸透するのに数百ナノ秒しかかからない。そのため、放電プロセスはHVサイクルよりもはるかに短い時間で済む。従って、液体内の部分放電プロセスのシミュレーションにはDC電圧が適すると考えられる。ここでは、HV電極の電圧、 V_{app} を60 kV、80 kVおよび100 kVとした。

図-2に油紙絶縁の部分放電モデル[9]の計算結果を示す。 $V_{app}=60$ kVである。ここに、ストリーマの典型的な放電過程を再現し、ストリーマ発達の先頭に高電界が生成された。空間電荷が電界分布に与える影響は明確に示唆されている。ストリーマが絶縁紙表面に達する時間は60 kVで190 ns、80 kVで134 ns、100 kVで103 nsであった。絶縁紙の表面電気伝導率を 10^{-16} S/m²と扱われた。

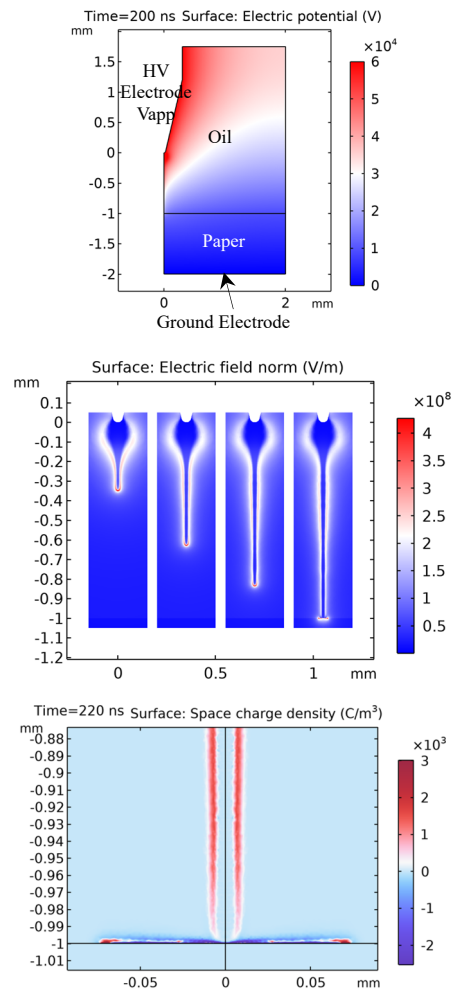


図-2 油紙絶縁の部分放電における電位、ストリーマ(左から $t=50, 100, 150, 200$ ns)および電荷密度

4. 結言

本稿では、電気放電のシミュレーションに対する熱プラズマのMHD非定常解析手法および高電圧環境下での液体および固体誘電体の部分放電解析のモデリング技術を報告した。アーク溶接におけるアーク放電および油紙絶縁の部分放電の計算を行った結果によって、本研究で提示した手法は、気体、液体および固体における電気放電のシミュレーションに適用でき、今後とも幅広い産業分野に応用されると期待する。

参考文献

- [1] 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会：大気圧プラズマ基礎と応用－，オーム社，2009.
- [2] He, D., Gong, W., Xu, Z., Geng, P., Liu, H., Li, Q.: Effect of the DC Electric Field Polarity and Amplitude on Partial Discharge of Oil-Paper Insulated under Wedge-shaped Electrodes, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol.29, No.2, pp.599-606, 2022.
- [3] COMSOL Multiphysics®: <https://www.comsol.jp/comsol-multiphysics> and the Electric Discharge Module User's Guide.
- [4] 渡辺隆行, 田代真一: 熱プラズマの解析に用いられる電磁熱流体モデル, *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.87, No.8, pp.514-521, 2011.
- [5] 澤田 亨, 門脇和丈, 宮路仁崇: 複合材料における空間電荷挙動の2次元シミュレーション手法の構築, 電気学会論文誌A, Vol.143, No.10, pp.335-336, 2023.
- [6] Traidia, A., Roger, F., Chidley, A., Schroeder, J., Marlaud, T.: Effect of Helium-Argon Mixtures on the Heat Transfer and Fluid Flow in Gas Tungsten Arc Welding, *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, Vol.49, pp.1053-1058, 2011.
- [7] 平田好則: パルスアーク溶接, 溶接学会誌, Vol.71, No.5, pp. 389-404, 2002.
- [8] Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E.: Thermal Plasmas - Fundamentals and Applications, Vol.1, Plenum Press, Springer, 1994.
- [9] Zhao, Y., Zhou, Y., Zhou, Z., Chen J., Zhang, Y.: Simulation and Analysis of Corona Discharge in Insulating Oil from Power Frequency to Very Low Frequency," *IEEE Int. Conf. HV Eng. Appl. (ICHVE)*, Beijing, China, pp.1-4, 2020.