

雷放電のパーコレーションモデルによるシミュレーション

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・佐々木明

気体中の放電現象は古くから研究され、プラズマプロセス、光源、環境汚染物質処理など工学的にも広く応用されているが、印可電圧、気体の種類や圧力、電極形状などによって、コロナ、ストリーマ、グロー、アーク放電などと呼ばれる多様な様相を示し、しばしば突然、複雑な構造を伴って発生する特徴は、未だに完全に解明されていない。放電現象は、微視的には、気体分子が電子衝突や光によって電離するという知られた過程によって発生すると考えられているが、巨視的には、時間、空間的に確率的な特性を持っている。

近年、プラズマ粒子シミュレーション技術の進展により、気体分子の電離や励起の素過程から放電の発生のシミュレーションを行った結果が報告されたが[1]、現実の装置スケールでの計算を行うことは困難である。一方、DLA(Diffusion Limited Aggregation)などの現象論的なモデルを用いると、リヒテンベルグ図形などとして知られる放電の形状を再現することができる[2]。本研究では、パーコレーションモデル[3]によるシミュレーションが、放電の形状の特徴を再現するとともに、放電発生の確率などの、実験と定量的な比較ができる量を求めるためにも用いられることを示す。

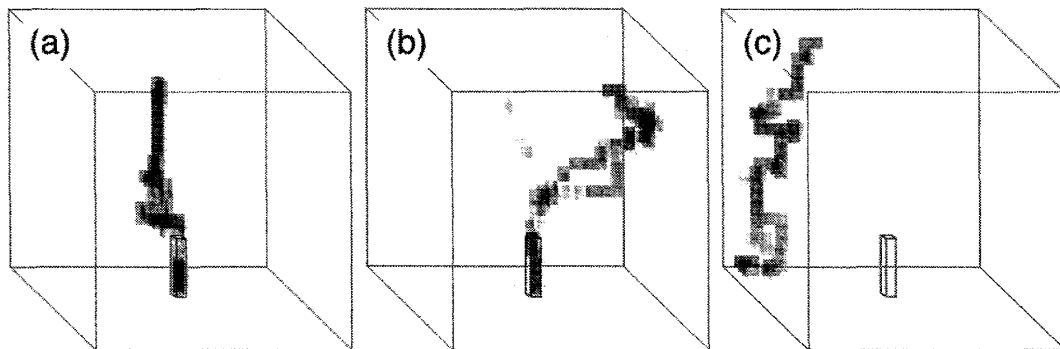
今回行ったシミュレーションでは、(図 1) に示すように、三次元空間を直方体のセルに分割し、高圧気体中の放電の条件を想定して、それぞれのセルが、絶縁体である中性気体か、導電体であるプラズマのいずれかの状態にあるとした。上下の面がそれぞれ正負の電極であるとし、空間を抵抗ネットワークと考え、回路方程式を解き、各セルの電圧値、セル間を流れる電流値を求めた。中性気体と考えているセルは高い抵抗値、プラズマ化しているセルは低い抵抗値を持ち、両者の比は十分大きい (10^6) とした。

このようなモデルで放電のシミュレーションを行うには、初期に全てのセルが中性気体であるとし、確率的に新たに一つのセルをプラズマ化させては、回路方程式を解き電圧、電流を求めるステップを繰り返す計算を行った。その結果、プラズマ化したセルによって上下の極板間が連結することで放電が発生し、放電路はしばしば遠回りや枝分かれのある複雑な構造を持つという、実験的な特徴が再現されることが分かった。プラズマ化するセルをランダムに選ぶ場合は、詳細な計算によって知られているように充填率、すなわちプラズマ化したセルの割合が全体の 0.31 の時に放電が起こることも確かめられた。

次に、放電が起こる媒質の特性について考察した。高圧気体中の放電では、放電路の

先端に電界が集中することによって、電子が加速され、あるいは加速された電子によって気体分子が励起され発光が起こり、それらの電子や輻射が気体を電離、プラズマ化することを通して、放電が進展すると言われている。他方、最近の研究では、宇宙線の入射や放電路先端においてエネルギーが 300keV 程度以上に加速された逃走電子が存在すること、逃走電子はランダムな電離を引き起こすことが、放電の進展に寄与することが指摘されている[4]。そこで電離の確率を各場所の電界強度の二乗で重み付けし、放電路先端の進展と、逃走電子の効果の両方を考慮するようにした。そして、放電を制御する技術としての、レーザーガイド放電の実験の条件における計算[5]や、避雷針の効果の評価するための計算を試みた。

(図 1) は、平行平板対針電極を模した条件での放電発生シミュレーションの結果の例で、初期条件として下側電極の中央に、高さ 5 セルの予めプラズマ化した領域を設定して計算を行い、生成した放電路を示す。計算毎に結果は異なるが、(a,b) のようにほとんどの場合、放電は針電極に誘導される。ただし、直線的な放電路が形成される場合(a)だけでなく、遠回り、枝分かれのある経路が出来る場合(b)もあり。また(c)のように針電極以外の場所から放電が発生することがある。多数回の計算を行えば、誘導の成功の確率や、針電極の存在によって、放電の発生を避けることが出来る場所の広がりを求めることもできると考えられる。



(図 1) 放電のシミュレーションの結果の例。色の濃さで放電電流の大きさを定性的に示す。

References

[1] Y. Kishimoto, et al., *J. Plasma Phys.* **72**, 971 (2006).
 [2] L. Niemeyer, et al., *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1033 (1984).
 [3] D. スタウファー、A. アハロニー著、小田垣孝訳「パーコレーションの基本原理」(原書第 2 版) 吉岡書店、2001 年。
 [4] J. R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L20808 (2005).
 [5] A. Sasaki, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 075004 (2010).