論文の内容の要旨

論文題目　Electric Breakdown Detection of Gases Based on Global Linear Stability Analysis
（全体安定性解析による気体絶縁破壊の検出）

氏　名　　柴田　寿一

1800 年代後半における電気工学の発展、特に架線など高電圧を扱うニーズとともに、気体の放電現象を調べる研究は数多くなされてきた。感電すれば生命を脅かす危険のある高電圧を安全に扱う為には、気体の性質を調べ上げ、厳格な基準をもって漏電等の事故を防ぐ必要がある。

この気体の重要な性質の一つに、絶縁破壊現象がある。すなわち、どれ程の電圧を気体に電極を通して印加すれば放電（本研究では Townsend 放電）が起こるか、さらに言えばどのような経路で放電が起こるかを調査することは極めて重要である。気体の絶縁破壊に関する理論的・実験的先行研究は数多くある。初期の研究では、よく知られた Townsend 理論や Paschen の相似則が導かれた。これらの理論は十分に一次元と見なせる平板電極のみ扱えることに留意したい。

実験コストが嵩む場合や、実験を行う環境が整えにくい場合（例えば、常温・大気圧下であっても微細な放電が問題となる MEMS デバイスや、宇宙空間で使われる太陽電池パドルの帯電による絶縁破壊予測等）は別手法が望まれる。最先端の研究では、DNS（直接数値シミュレーション）を用いてプラズマの支配方程式を時間発展的に解く手法が好まれて使われる。DNS は本研究で開発した手法が現れるまでは多次元複雑形状電極間の絶縁破壊電圧推定問題に対するほぼ唯一の数値解法であった。

しかしながら、DNS は以下に列挙する複数の欠点を抱えている。（１）不安定な計算―放

電は電子雪崩、すなわち指数関数的な数密度の増大によって引き起こされるが、それを捉える為に一般に計算は発散的になりやすい。そこで、発散を抑える、または検出して補正する為のアルゴリズムが必要となる。この際にパラメータの設定が必要になる。（２）高い計算コスト—放電電圧を調べる為には境界での電位を振ってそのたびに計算を行う必要が生じ、計算コストが嵩む。（３）収束性の問題—特に臨界電圧（絶縁破壊電圧）の周囲では電子数密度等の成長が緩やかになり、臨界電圧の推定値が真値に近づくほど収束性が悪くなる。以上の欠点を克服した、以下に列挙するような新しい臨界電圧の計算アルゴリズムの構築が望まれる。（１）堅牢性—計算は常に安定であり、かつチューニングパラメータを必要としない。（２）低い計算コスト—従来手法と比べて、実用計算を高速に実行可能である。（３）高い収束性—超一次収束性が望まれる。

本研究では従来手法と比べて実用的なアルゴリズムを開発し、一般問題へ適用することを目的とする。すなわち、任意複雑電極間の絶縁破壊電圧を高速に検出可能な手法を構築する。

本論文の構成は以下のとおりである。

第一章では、先に挙げた、絶縁破壊電圧の検出に関する、これまでの研究の問題点、先行研究の詳細が述べられている。

第二章では、Drift-Diffusion 方程式系と Townsend の放電開始式を線形安定性によって結びつけ、放電開始電圧を検出する枠組みが整えられている。放電開始を扱うことが出来ると推察される方程式として、Drift-Diffusion 方程式及びスカラ電位に関するポアソン方程式を導入し、線形安定性が中立であることを要請することで、Townsend の放電開始式を導出できることを確認している。次に、線形安定性を解析する為の手法の一つとして、全体安定性解析を導入している。また、有限要素法による空間離散化が導入されている。有限要素法は、ヤコビ行列を簡単に構築でき、かつ一般複雑形状への対応が容易な為、用いられる。

第三章では、解析解、或は経験式が知られた、一次元平板間問題及び一次元軸対称形状に次元を落とした同軸円筒の解析が、提案されている。格子収束性が、最大固有値の増幅率を指標として、十分に検証されている。特に電極が曲率を持つ場合には風上化が必要である事が判明したため、風上流線ペトロフ・ガラーキン有限要素法を以後全ての解析に用いている。また、本手法では二次電子放出係数が零に近づくと、問題の性質が悪くなるため、適用範囲の限界が存在することが示されている。

第四章では、本手法を高速化するための手法が述べられている。計算コストを多く要する非対称疎行列の最大固有値の計算を、計算コストの格段に小さな問題に変換する。なお、この手法では原点に最大固有値以外の根が配置される可能性があり、その状態ではアルゴリズムは実用的で無い。そこで、高次の固有ベクトルの性質等に着眼し、アルゴリズムの改良を行い、実用的な手法を得ている。

第五章では、二次元の一般的な問題に提案手法を適用した場合の結果が述べられている。実験との比較もなされており、絶縁破壊電圧の検出結果には良好な一致が見受けられる。

第六章は、結論である。つまり、本研究では、絶縁破壊電圧・及び経路推定問題に対して、プラズマ物理の分野で確立されている Drift-Diffusion 方程式に、全体安定性解析の手法を適用することにより、高速に絶縁破壊電圧を検出可能な手法を構築した事が述べられている。

以上、要するに、本研究では気体の絶縁破壊電圧・及び経路を推定する為に、プラズマ流体の安定性解析に基づく革新的手法を提案した上で、幾つかの実用的な理工学的問題への適用例を示し、手法の有効性を示した。