

審査の結果の要旨

氏名 柴田 寿一

博士（工学）柴田 寿一 提出の論文は、「**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）」と題し、本文6章および付録4項から成っている。

プラズマアクチュエータやプラズマ推進など、近年、航空機や宇宙機の性能を向上させる装置として電離気体の利用が注目されている。その際、気体を電離させるための印加電圧の大きさや放電領域を知る必要がある。プラズマ放電に関する研究は、航空宇宙工学のみならず、高電圧ガス絶縁など、高電圧や気体の放電を扱うすべての機器において重要である。気体の絶縁破壊に関する理論的・実験的先行研究はこれまでに数多くなされているが、その予測手法は確立されているとは言えない。例えば、Townsend 理論や Paschen の相似則では、一次元と見なせる平板電極にのみ適用可能であり、電極形状の汎用性はない。計算機性能の発展に伴い盛んになってきた DNS(直接数値シミュレーション)では、放電に伴う計算の数値的不安定化や、高い計算負荷など、実用上に問題がある。筆者は、放電を無電荷状態が電圧印加によって不安定化する現象であると捉え、気体の支配方程式の解の安定性が失われる中立条件を求めることによって絶縁破壊電圧や初期の放電領域を効率よく数値的に予測する手法の開発に成功している。

第1章は序論であり、本論文の背景や、これまでの研究の問題点を明らかにした上で、研究目的を、任意複雑形状電極間の絶縁破壊電圧を安定かつ高速に検出可能な数値的手法の構築であるとしている。

第2章では、方程式系と数値解析手法について説明されている。本研究では直流 Townsend 放電の開始を検出する。それを表現するため、電子、正イオン、負イオンに対して、局所場近似と組み合わせた Drift-Diffusion 方程式とスカラ電位に関するポアソン方程式が導入された。あわせて、二次電子放出 (γ 効果)などを考慮した各種境界条件も定式化されている。まず、一次元を仮定し、この方程式の解の中立安定条件を解析的に求め、それが Townsend の絶縁破壊電圧の式に一致することから、放電を無電荷状態の不安定化であると考えること

の妥当性を示している。次に、放電前の電荷ゼロの状態が **Drift-Diffusion** 方程式の自明な定常解となっていることから、そのまわりで摂動方程式系を境界条件も含めて導出している。さらに、この摂動方程式の線形安定性を数値的に解析するために用いた全体安定性解析法について説明している。空間離散化には、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であることから、有限要素法が用いられている。

第3章では、解析解あるいは経験式が知られている一次元平板電極および軸対称同軸円筒電極問題を対象とし、本法で予測した絶縁破壊電圧が、それらをよく再現することを示し、妥当性を検証している。さらに、格子収束性や風上法適用の効果なども調べられている。また、本手法では二次電子放出係数がゼロに近づくと、解の精度が悪くなるため、適用限界が存在すると指摘している。

第4章では、解析を高速化するための手法が述べられている。中立安定の印加電圧では、最も不安定なモードについて、固有値の実部と虚部の両方がゼロになる性質を見出し、それを用いて、感度行列による高速化されたアルゴリズムを開発した。さらに、最不安定モードの検出漏れを防ぐ方法も考案している。

第5章では、二次元の様々な問題に高速化アルゴリズムを適用した結果が述べられている。平行平板電極問題では、最も不安定なモードには二次元性は現れず、絶縁破壊電圧は一次元解析の結果と一致することを見出している。同軸二重電極、偏心二重電極、平行円筒電極、棒と平板電極などの問題について、固有値分布や空間モードなど、解の性質が詳しく説明されている。最後の2つの問題については、絶縁破壊電圧について実験値があり、それと計算結果は良い一致を見せている。また、複数の同電位円柱が存在する問題は、ガス絶縁器における金属粉混入の影響を示唆するものとなっている。これらの問題を通じて、ここで開発した手法が、任意複雑形状に適用でき、安定かつ高速に絶縁破壊電圧とその際の放電領域を予測できることを実証している。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本論文は、航空機、宇宙機の性能向上をはじめ、電離気体を利用する機器一般において、その鍵となるプラズマ応用に関し、絶縁破壊電圧および放電領域を効率よく推定する数値解析法の開発に成功し、その精度や有効性を実証した点で、航空宇宙工学、特にプラズマ理工学上、貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。