

## 論文の内容の要旨

論文題目 弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する研究

氏名 佐藤 英司

(本文)

近年、弱電離プラズマを用いた流れ制御技術が注目され、流れとプラズマの干渉について盛んに研究が行われている。本技術はプラズマを用いた電気的手法であるため、小型化が可能、可動部がないことから機械的劣化が少ない、ON-OFFの制御が容易、などの利点がある。

本技術を用いたアプリケーションとしては、低速流から高速流まで幅広く提案されており、オフデザイン飛行時におけるエンジンインテークの衝撃波制御、スラットやフラップなどの高揚力装置の代替となるような翼面上の剥離制御、航空機騒音の低減など様々なものがある。

中でも、高速流において現れる衝撃波の制御は、航空宇宙分野において広い応用範囲があり特に注目を集めている。プラズマと衝撃波の干渉に関する研究については、主に定常衝撃波を扱うアプリケーションの観点のみならず、基本的物理現象を明らかにすることに主眼を置いて、伝播衝撃波についても調べられている。

これまでの弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する研究から、プラズマ中を伝播する衝撃波について、衝撃波の加速、減衰、変形の3つの特異な現象(衝撃波の特性変化)が観察され、その現象を説明するメカニズムとして thermal effect と non-thermal effect が提案された。

thermal effect とは、弱電離プラズマが生成するジュール熱により、空間に非一様な温度分布が形成され、それに伴い気体の物性値が変化し、最終的に衝撃波の特性変化が生じるという概念である。一方、non-thermal effect とは、thermal effect 以外のプラズマ固有の効果のことで、electric double layer など、thermal effect では無視したプラズマのマイクロなレベルの影響を考慮した概念である。現在のところ、衝撃波特性変化のメカニズムについて未だ完全なコンセンサスは得られていない。

以上の背景から、本研究の目的は、プラズマを用いた衝撃波制御の実現に先立ち、弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する未解明な物理現象の解明に力点をおき、弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する、衝撃波の加速、減衰、変形のメカニズムを明らかにすることである。そして、そのメカニズムを明らかにするために、関連研究で不十分であった、1．プラズマ中を伝播する衝撃波の可視化、2．伝播する空間の温度分布計測とそれに基づく数値計算、3．衝撃波伝播中のプラズマの状態計測を行った。

本研究の実験では衝撃波管を用いる。衝撃波管内に連続 DC グロー放電で弱電離プラズマを生成した後、その領域に衝撃波を入射し、非定常な伝播衝撃波とプラズマの干渉について、以下に示す各種実験を行った。

本研究では、可能な限り単純な波面構造をもつ垂直衝撃波が観測領域に入射してくるように、放電電極を流路の下壁に埋め込み、衝撃波が電極に衝突して反射波などが生じないセットアップを採用した。また、流路の中で、局所的な表面放電を行うことにより、観測領域内にプラズマの影響が強く及ぶ領域とそうでない領域をより明確につくり出し、それらを対比しながら衝撃波の伝播過程を観察した。試験気体は空気を基本とし、必要に応じてアルゴンを用いて空気の場合と比較した。

上記のセットアップに対し、以下の実験を行った。

### 1．可視化実験

本研究の中心となる実験であり、弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉の様子を、シュリーレン法を用いて可視化した。

### 2．放電発光強度計測

放電プラズマの状態を、時系列的かつ定量的に確認するため、光電子増倍管を用いてプラズマ発光強度の時間依存性計測を行った。

### 3. 発光分光計測

試験気体が空気の場合に、発光分光法を用いて、衝撃波入射前の定常状態における温度分布計測を行った。また、瞬間的なプラズマの状態を把握するため、同様のセットアップを用いて衝撃波伝播中の非定常状態における発光スペクトル強度の計測も行った。

### 4. レーザー吸収分光計測

試験気体がアルゴンの場合に、レーザー吸収分光法を用いて温度分布計測を行った。

これまでの弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する研究では、衝撃波管を用いた実験的研究が主に行われ、温度分布データの不足もあり、数値解析はあまり行われてこなかった。そこで、本研究では衝撃波管実験を模擬する数値計算を行い、プラズマと伝播衝撃波の干渉について詳細な解析を試みた。

本計算では、放電プラズマについて素過程などを考慮したモデル化は行わず、プラズマは流れ場に非一様な温度分布を与える効果(thermal effect)のみを及ぼすものとして扱う。この設定により、実現象からプラズマ固有の効果を取り除いた場合の解析を行うことができるため、純粋に衝撃波に対する thermal effect の影響について調べることができる。つまり、この状況設定の数値計算によって実験結果を再現することができれば、それは thermal effect の有力な証拠となる。本計算では基礎方程式として層流圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた。

発光分光法を用いた空気の温度分布計測について、電流値が大きいほど温度が高くなり、最大の  $I = 115$  mA (陰極)の場合にピーク温度は約 1600 K であった。陰極と陽極では陰極面上の方が温度が高く、流れ方向の分布については電極を中心にしてほぼ対称的であった。また、空間の温度は放電開始から衝撃波の入射タイミングを含む数秒間の中で大きく変化しないことが分かった。

レーザー吸収分光法を用いたアルゴンの温度分布計測について、ピーク温度は約 1100 K ( $I = 90$  mA) であり、空気の場合よりもピーク位置が電極表面に近く、非一様な温度領域が電極近傍の局所領域に限られることが分かった。

空気とアルゴンの温度分布を比較すると、電流値が多少異なるが、空気の場合の方がピーク温度が高く、また非一様な温度領域が電極から離れた測定部遠方にも及んでいることが分かった。これらの違いは、両者の放電電流・電圧と熱伝導率の違いによると考えられる。

シュリーレン法を用いた可視化による干渉の観察について、試験気体が空気の場合には、プラズマの影響は発光している電極(10 mm)近傍の局所領域に限らず、そこから 25 mm 程度離れた遠方にまで及んでいることが分かった。一方、試験気体がアルゴンの場合には、その影響は電極近傍領域にしか及んでいないことが分かった。

プラズマ中を伝播する衝撃波は、プラズマが存在しない場合の垂直形状から変化し、鉛直方向と水平方向に湾曲して 3 次元の構造変化を起こすことが分かった。

衝撃波の通過に伴いプラズマの発光強度や放電電流が減少し、その減少は衝撃波マッハ数が大きいほど速いことが分かった。つまり、衝撃波マッハ数が小さいほど、プラズマの影響が測定部に残る状態にあると言える。

放電プラズマは、衝撃波マッハ数( $M_s$ )が 1.6 や 2 のような比較的強い衝撃波の通過に伴い最終的には消失することが分かった。これは、衝撃波の通過に伴う圧力上昇と、衝撃波背後の誘起された流れによって消失すると考えられる。しかし、 $M_s = 1.04$  のような弱い衝撃波が、電流値 ( $I = 115$  mA)の大きいプラズマ中を伝播する場合には、プラズマは消失しないことが分かった。

数値計算による干渉の解析について、分光法を用いた温度計測から得られた非一様な温度分布のみを与えた数値計算によって、実験で観察された衝撃波の特性変化を定性的に再現することができた。また、これまで実験的に観察されていた衝撃波の加速・減衰のみならず、空間の温度分布に応じて、衝撃波は減速・圧力回復へとその伝播特性を変化させることが分かった。

弱電離プラズマと伝播衝撃波の干渉に関する、衝撃波の特性変化である衝撃波の加速、減衰、変形のメカニズムを明らかにするため、関連研究では不十分であった、プラズマ中を伝播する衝撃波の可視化、伝播する空間の温度分布計測とそれに基づく数値計算、衝撃波伝播中のプラズマ状態の計測を行った。その際、これまでの研究とは異なる衝撃波管測定部のセットアップを採用し、干渉の様子がより明確になる設定で実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

これまで、弱電離プラズマ中を伝播する衝撃波の明瞭な可視化画像は極めて少なく、干渉の全体像が理解されていなかったが、本研究のシュリーレン法を用いた可視化実験から、プラズマ中を伝播する衝撃波は、プラズマが存在しない場合の垂直形状から変化し、鉛直方向と水平方向に湾曲して 3 次元の構造変化を起こすことが分かった。

これまで詳しく調べられていなかった衝撃波伝播中のプラズマの状態を、放電発光強度と発光スペクトル強度計測から解析し、衝撃波の通過に伴いプラズマの発光強度や放電電流が減少し、その減少は衝撃波マッハ数が大きいほど速いことが分かった。つまり、衝撃波マッハ数が小さいほど、プラズマの影響が測定部に残る状態にあると言える。

計測例が不足していた流れ場の温度分布を分光法を用いて計測した。その結果に基づいて流れ場に非一様な温度分布のみを与えた数値計算を行い、実験で観察された衝撃波の特性変化を定性的に再現することができた。また、数値計算による詳細な解析から、これまで実験的に観察されていた衝撃波の加速・減衰のみならず、空間の温度分布に応じて衝撃波は減速・圧力回復へとその伝播特性を変化させることが分かった。

非一様な温度分布のみを与えた数値計算により衝撃波の特性変化を定性的に再現できたことは、特性変化のメカニズムとして、thermal effect が支配的であることを示唆するものである。