

論文の内容の要旨

論文題目 Ionization kinetics in a laser-supported detonation wave and its propagation limits

(レーザー支持デトネーション波における電離過程とその伝播限界)

氏 名：嶋村耕平

本論文第一章は研究背景であるレーザー推進器のエネルギー変換過程における基礎研究と、レーザー支持デトネーションの研究重要性について述べている。レーザー（支持）デトネーション及びレーザー誘起プラズマは、航空宇宙分野において幅広く研究・応用されている。レーザー推進器はレーザーエネルギーを圧力に変換する推進器と、温度に変換するものの2種類に分類され、前者は主に地上一宇宙間輸送など大気中での使用が、後者は宇宙空間においてノズルを利用した空気力学的加速が想定されている。地上一宇宙間輸送においては、近年様々な宇宙ミッションで大規模な資材を運ぶためのコストの増大が問題となっている。その最たる原因は、化学ロケットのペイロード比（全体の質量における燃料比）の低さにあげられ、9割以上を燃料が占めている。大気吸込み式レーザー推進器はその点空気を推進剤として利用し、ノズルや燃焼器不要でペイロード比を大幅に改善できる。またエネルギー源は外部からの供給となり、機体は簡素でかつ複雑なシステムは常に地上にあるためメンテナンスが容易である。これらの利点から、輸送コストを現状から大幅に低減できる可能性を持っている。大気吸込み式レーザー推進機の基礎研究においては、レーザー支持デトネーションはレーザーエネルギーを圧力波に変換する現象として、その効率や圧力依存性などが詳細に調べられてきた。

本論文第二章においては、レーザー支持デトネーションにおける電離過程や輻射による種電子生成を一次元の解析モデルを考案し、実験との比較を行った。レーザーデトネーションの構造は、

燃焼における衝撃波と強いデフラグレーション波のように、衝撃波とその背後のプラズマによって構成される。衝撃波により圧縮され高温となった気体が電離し、プラズマはレーザーを吸収することで電離が進み膨張する。その膨張によって衝撃波が押し出されるというデトネーションのような構造として理解されてきた。しかし、レーザープラズマによる輻射がプラズマの伝播に与える影響が無視できないことが明らかになりつつある。特に衝撃波前方に先駆電離層があることが我々の過去の研究などで明らかにされ、衝撃波圧縮よりも前に電離、レーザー吸収が始まっている可能性がある。レーザー支持デトネーションは伝播マッハ数が3程度でも維持される。この程度のマッハ数では衝撃波加熱で電離反応は起きない。すなわち燃焼デトネーションのような衝撃波が電離面を誘起する構造ではなく、電離面の超音速伝播が衝撃波を誘起する関係にある。そのため、ZND構造（ノイマンスパイクから反応誘起距離だけ遅れて反応領域が伝播する構造）は見られない。我々のTEA CO₂ レーザー（波長 10.6 μm, 10 J/pulse）のビームを線状集光することで誘起されるデトネーションに関して、2波長マッハツェンダーを利用した電子密度の測定結果によれば、デトネーション構造の見られる時間帯では、衝撃波の前方に電子が存在ことを示唆している。このような構造は、ストリーマ放電や衝撃波管実験などでも報告され、プラズマによる光電離が寄与していると考えられている。特に、先駆電離層の長さはレーザーデトネーションの維持条件とも密接に関係している。衝撃波前方の電離層の消滅と同時にレーザーデトネーションの終了が確認されている。以上の考察から、ストリーマ放電などの他放電現象と比較しつつ、プラズマ輻射と電離過程をプラズマ診断結果より評価し、レーザー支持デトネーションの伝播速度を得た。一方で、光学的可視化法で直接得た実験結果と比較して、そのモデルの妥当性を議論した。

本論文第三章では、レーザー支持デトネーションの伝播限界を、実験結果を基に得られたユゴニオ解析から考察を行っている。レーザー支持デトネーションの伝播限界については、Raizerによって、レーザー照射方向に伝播するデトネーションとして利用されるエンタルピと、照射方向と垂直に膨張するプラズマ及び衝撃波に使われるエンタルピの比によって表されると報告され数多くの研究が証明している。しかし、これらの伝播限界への説明は実験室レベルのレーザービームは径が細く、出力も高くないため可能であり、推進器に利用が想定される大出力レベルのレーザービームではその径が太く、伝播限界という現象が大きく異なってくる。したがって、レーザー支持デトネーションを一次元で伝播させ、膨張エンタルピへの効果をなくして、流体力学やプラズマ物理の観点でその伝播限界を明らかにする必要がある。本実験では、レーザーシャドウグラフ法による光学的な可視化から実験的にユゴニオ解析を行い、そこから得られる圧力と、圧力センサーを利用して直接求めた結果と比較した。

本論文第四章では、各章での実験結果から得られた知見をまとめている。第二章ではストリーマ放電を基に得られた伝播モデルと実験結果がその伝播速度という観点で一致を示し、我々の提唱するモデルの妥当性が見られた。第三章のユゴニオ解析では、伝播限界においてユゴニオ解析からデトネーション後面での圧力が実験結果との一致が見られ、ユゴニオ解析からデトネーション伝播限界が可能であることを示した。