

審査結果の要旨

論文題目 「Experimental and numerical study on propagation of detonation wave in combustible jet train」

(可燃性噴流列中を伝播する爆轟波に関する実験および数値解析的研究)

学位申請者 王 發明

本論文は、既存の航空宇宙用推進機の熱効率を 20%ほど改善する理論性能を有するとされ、現在、世界的に基礎研究と実用研究が取り組まれているデトネーションエンジン内部の数値解析手法に関するものである。デトネーションエンジンのうち、回転デトネーションエンジンの実用化実現のための重要技術的課題のひとつである理論熱効率に対して実測値を漸近させるための解決策を、実験と数値解析的手法で提案した。具体的には、独自の実験手法を開発し、その実験結果に基づき独自に構築したデトネーション波の数値解析手法を用いて、燃料酸化剤混合気の混合状態が、燃料器内部のデトネーション波伝播様態に与える影響を明らかにした。本論文で報告されている主な学術的成果は、これまで、実験的手法では、詳細が不明確であった燃料酸化剤の混合方法が、燃焼器内部でのデトネーション波伝播様態に対して与える効果を、2次元ではあるものの、明瞭にその差異があり、燃料噴射方法を工夫することで、理論熱効率に漸近できる可能性を数値解析的に明らかにした事である。

本論文の背景には、地球温暖化対策としてのカーボン・ニュートラルのための脱炭素燃料による航空宇宙推進用の新型エンジンの開発と、化石燃料を利用する場合の既存のエンジンを上回る高い熱効率を有する新型エンジンの開発への待望がある。デトネーションエンジンは、脱炭素燃料である水素を利用でき、かつ、理論的に高熱効率を持ち、さらに、既存の航空宇宙用推進機と比べ単純な構造であるため軽量化による燃費向上が期待されているため、高い注目を集めているが、実用化には技術課題が多数ある。これに対して、本論文の目的は、燃焼室内における燃料酸化剤混合気における、予混合と非予混合が、デトネーション波の伝播に与える影響と効果の解明である。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、デトネーション波の研究史とそのデトネーションエンジンへの応用における重要な研究に対する言及がなされており、序論としての的確であり、申請者がデトネーション現象およびデトネーションエンジン研究について十分な知識と経験を有していると判断できる。

第 2 章では、本論文においてデトネーション波の数値解析手法（以下、単に「数値解析手法」）に関する論理的側面の記述と、1次元解析結果の格子依存性について詳細に検討されている。この検討結果から、数値解析手法で、デトネーション波の伝播様態を模擬するために達成すべき格子間隔について述べられ、計算資源が限られた環境下においても高精度な解析を実現できる指針が示されており学術的価値が高い。

第 3 章では、第 2 章で明らかにした格子間隔に基づき、数値解析手法の精度検証の次元を 1次元から 2次元とした。具体的には、デトネーション伝播における特徴的な現象であるセル構造の

再現性について、実験と数値解析手法による結果を比較し、数値解析結果の妥当性が詳細に述べられている。デトネーションの基礎研究においては、2次元現象による実験が支配的であるため、デトネーションに関する多くの実験結果の検証に用いることができ、波及効果も大きい。さらに、この検討から、数値計算手法の結果の実験値との差異の許容範囲を最大 5%とした際の格子間隔（実用格子間隔）を提案している。このことは、実機エンジンの解析では3次元計算となるため、莫大な計算資源が必要となる。実用的格子間隔により、計算資源の適切な配分の目安となり、学術的意義に加え実用上の意義も大きい。

第4章では、回転デトネーションエンジンの燃焼器内部でのデトネーション波伝播の基礎研究用として独自考案した、リニア・デトネーション燃焼器（LDC）の構造とそれを用いた実験結果、および同条件での数値解析手法による結果の比較を注目すべき状態量毎に詳細に述べられている。特に、LDCによる実験では、実機における燃料酸化剤混合気の燃焼器内噴射を模擬するために、独自設計の噴射機構を考案し、約 2300 m/s で伝播するデトネーション波に同期させた噴射を可能にする実験装置を考案しており、学術的独自性が高い。実験においては、LDCの流路幅が極めて小さく（5 mm）、また、燃料酸化剤充てん圧力が大気圧以下であるため、デトネーション波の細部構造の明瞭な測定画像が得られない。これに対し、数値解析手法では、伝播するデトネーション波の細部構造が明瞭に得られている。このことは、これまで不明確であった回転デトネーションエンジンの燃焼器内の状況を、数値解析手法で明瞭な結果を得られることを示唆しており、学術的意義が大きい。

第5章では、前章までに確立させた数値解析手法を、さらに発展させ、周期境界条件を適用させた2次元解析空間中でのデトネーション波伝播様態を、燃料酸化剤の予混合、非予混合と噴射形態の違いによる影響を、詳細に解析している。この結果において、予混合気を用いた場合は、デトネーション波の伝播速度（Chapman-Jouguet 速度）の90%程度まで達成できるものの、非予混合気ではそれに届かず、また、燃焼器内に発生するデトネーション波の数の増加と伝播速度の低下が強く関連していること、さらに、非予混合気の場合、燃料酸化剤の噴射方式として対向方式が比較したものの中で最も有意であるなど、これまで、定性的な理解であった燃焼器内の現象を定量的かつ詳細に明らかにしたことは、学術的価値が高く、今後の回転デトネーションの実用化研究に大きく貢献すると評価できる。

第6章は、本論文のまとめである。

以上の結果、本論文は学位論文として十分な内容を有するものと審査委員全員の一致で判定された。

したがって、学位申請者 王 發明 氏は東海大学博士（工学）の学位を授与されるに値すると判断した。

論文審査委員

主査	博士（工学）	堀澤 秀之	工学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	稲田 喜信	工学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	水書 稔治	工学部教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	福田 紘大	工学部准教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	高橋 俊	工学部准教授	（総合理工学研究科総合理工学専攻）
委員	博士（工学）	沼田 大樹	工学部講師	（総合理工学研究科総合理工学専攻）

委員 博士（工学） 松尾 亜紀子 慶應義塾大学 理工学部教授