

反射板を用いた PDE イニシエーターにおける デトネーション波伝播促進機構の解明

学位論文内容の要旨

航空宇宙分野における次世代の推進機関としてパルスデトネーションエンジン (PDE) が注目されている。PDE は燃焼器内に充填される燃料と酸化剤に間歇的にデトネーションを発生させて推力を得る推進機関である。デトネーションは衝撃波圧縮により自己着火した燃焼波がその衝撃波の減衰を支える形で自走する超音速燃焼である。燃焼器内で発生したデトネーション波は音速の 5~10 倍の速度で瞬時に混合気内を伝播し、高温高圧の既燃混合気を生み出す。PDE はデトネーションの衝撃波圧縮を利用しているため、機械的な圧縮機構が一切必要なく構造が極めて簡素である。またデトネーションによる燃焼は定積燃焼に近い高い熱効率が期待できる。

PDE を実用化する上での大きな課題の一つとして「デトネーションの開始」がある。エアブリージングエンジンとして PDE を作動させる場合は一般的に混合気の反応性が低くデトネーションの開始が困難である。この問題を解決する一つ的手段として、プリデトネーターと呼ばれる径の小さな管を利用する方法が検討されている。デトネーションは管径が細いほど開始しやすいことが知られており、さらに水素-酸素混合気等の反応性の高い混合気を用いることによりプリデトネーターでは容易にデトネーションを開始させることが出来る。これを燃焼器に接続しデトネーション波を入射させる事により、燃焼器内の混合気にデトネーション波を伝播させる。

このプリデトネーターと燃焼器の接合部のような急拡大する管路におけるデトネーション波の挙動に関しては、基礎燃焼学的にも興味深い現象であるため、現在に至るまで様々な研究が行われている。このような急拡大部を通過するデトネーション波には伝播条件が存在し、プリデトネーター直径の $1/13$ 以上のセルサイズをもつデトネーション波は回折による膨張により消滅してしまう。

エアブリージングエンジンとしてプリデトネーターを用いた PDE を使用する場合、燃料とは別に追加的に酸素などの酸化剤を搭載する必要がある。しかしこれは搭載推進剤重量の大幅な増加につながり PDE の比推力や燃料消費率が著しく低下する。よって 1 サイクルあたりに必要な酸素量を軽減するために、可能な限り管径の小さなプリデトネーターから、燃焼器へのデトネーション波の伝播を実現する必要がある。

著者は、急拡大部におけるデトネーション波の伝播促進を図るため、反射板と呼ばれる板をプリデトネーター出口の部分に取り付けた PDE イニシエーターを提案した。デトネーション波は衝撃波の反射および集中によって生まれる高温高圧の領域 (ホットスポット) において再開することが知られている。反射板はプリデトネーターから入射し減衰する衝撃波を強制的に反射圧縮することによってホットスポットを形成し、このホットスポットにおいて再開したデトネーション波を燃焼器内に伝播させることによって伝播促進を図るものである。

本論文では、この反射板を利用した PDE イニシエーターにおける伝播限界を調べ反射板の有用性を示すと同時に、主に「すす膜模様法」を用いて反射板周囲におけるデトネーション波の再開始機構の詳細を明らかにした。

本論文は 4 章で構成されており、内容は以下の通りである。

第 1 章は序論でありパルスデトネーションエンジンの研究背景と研究目的について示す。

第 2 章は本実験に用いた実験装置と実験手法について述べる。反射板を用いた PDE イニシエーターについての詳細と、デトネーション波の 3 次元構造を観察する方法として広く用いられている「すす膜模様法」について詳述する。

第 3 章は実験結果及び考察である。本研究で得られた実験結果を考察を交えながら述べる。水素-酸素の量論混合気を様々な濃度で窒素希釈した条件でデトネーション波の伝播実験を行い、以下のことを示した。プリデトネーター出口に反射板を距離 5~30 mm の位置に装着することにより、反射板を使用しない場合に比べて最大で 3 倍近い入射セルサイズでも急拡大部を越えてデトネーション波の伝播が可能になる。プリデトネーターから入射したデトネーション波は、フランジ壁面とデトネーションチャンバーの間を半径方向に伝播する円筒デトネーション波に遷移するが、入射セルサイズに対して反射板距離が小さすぎると円筒デトネーション波が維持できないため、反射板距離が小さいほど反射板による伝播促進効果が低下する。またプリデトネーターから入射したデトネーション波は回折による膨張波の影響により減衰する。このデトネーション波が完全に減衰する距離はプリデトネーター直径の約 0.9 倍であり、本研究の実験装置では約 18 mm である。反射板距離がこれより大きいと、反射板表面に到達する圧縮波が急激に減衰するため、反射板表面におけるデトネーション波の再開始が困難になる。その結果、反射板距離が 20 mm より大きい条件では伝播促進効果が極端に低下する。以上により本研究に使用した実験装置における最適反射板距離は 15~20 mm となる。

伝播限界条件において、反射板後方における圧縮波の集中によるデトネーション波の再開始が確認された。反射板は、プリデトネーターから入射する平面デトネーション波をドーナツ状の入射波に変換し、後方で圧力波を爆縮させる効果を持つ。

窒素希釈条件に加え、アルゴン希釈条件において実験を行い、反射板を利用した PDE イニシエーターについて、入射セルサイズによる伝播限界条件の包括的な評価を行い、以下のことを示した。反射板を用いた伝播促進において、反射板前方におけるデトネーション波の挙動は伝播の可否に対して大きな影響を与える。反射板距離 5~20 mm の条件では反射板前方におけるデトネーション波あるいは圧縮波の挙動は入射デトネーション波のセルサイズによって評価することが可能であり、伝播限界も希釈ガスの種類によらず、セルサイズのみによって評価することができる。しかし、反射板距離が 20 mm より大きい条件では、入射デトネーション波が反射板に到達する前に消失するため、反射板表面に到達する圧縮波の性質は個々の混合気条件によって異なる。以上のことから、反射板前方におけるデトネーション波の挙動がセルサイズによって評価できないため、伝播限界も希釈条件によって異なる。

第 4 章は結論であり、本研究で得られた成果を要約して述べる。

本論文で著者は、反射板周りのデトネーション波の挙動を観察し、反射板表面における衝撃波のマッハ反射によるデトネーション波の再開始機構を示し、プリデトネーターから入射するデトネーション波が減衰しきらない距離に反射板を装着することで、強い衝撃波の反射圧縮効果が得られること、またこの距離内に反射板を装着した条件における伝播限界は、プリデトネーターから入射するデトネーション波のセルサイズを用いて評価できることを明らかにした。また反射板表面でデトネーション波が再開始しない伝播限界条件において、反射板後方における圧縮波の集中によるデトネーション波の再開始機構を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 永 田 晴 紀
副 査 教 授 工 藤 勲
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

反射板を用いた PDE イニシエーターにおける

デトネーション波伝播促進機構の解明

航空宇宙分野における次世代の推進機関としてパルスデトネーションエンジン (PDE) が注目されている。PDE は燃焼器内に充填される燃料と酸化剤に間歇的にデトネーションを発生させて推力を得る推進機関であり、デトネーションの衝撃波圧縮を利用しているため機械的な圧縮機構が不要で構造が極めて簡素である等の利点を有する。PDE を実用化する上での大きな課題の一つとして「デトネーションの開始」がある。プリデトネーターと呼ばれる径の小さな管に水素-酸素混合気等の反応性の高い混合気を用いて発生させたデトネーション波を燃焼器に入射させる方法が多く検討されているが、プリデトネーターの内径をデトネーションセルサイズ λ の 13 倍以上に大きくしないと入射したデトネーション波が回折時の膨張により持続できないことが知られている。搭載推進剤重量を削減するためにはプリデトネーターに使用する酸素量を削減する必要がある、このため可能な限り管径の小さなプリデトネーターから燃焼器へのデトネーション波の伝播を実現することが求められている。

本論文は、急拡大部におけるデトネーション波の伝播促進を図るため、反射板と呼ばれる板をプリデトネーター出口の部分に取り付けた PDE イニシエーターを提案している。デトネーション波は衝撃波の反射および集中によって生まれる高温高压の領域 (ホットスポット) において再開することが知られているが、反射板はプリデトネーターから入射し減衰する衝撃波を強制的に反射圧縮することによってホットスポットを形成し、このホットスポットにおいて再開したデトネーション波を燃焼器内に伝播させることによって伝播促進を図るものである。本論文では、この反射板を利用した PDE イニシエーターにおける伝播限界を調べ反射板の有用性を示すと同時に、主に「すす膜模様法」を用いて反射板周囲におけるデトネーション波の再開機構の詳細を明らかにした。

本論文は 4 章で構成されており、内容は以下の通りである。

第 1 章は序論でありパルスデトネーションエンジンの研究背景と研究目的について示している。第 2 章では本実験に用いた実験装置と実験手法について述べている。反射板を用いた PDE イニシエーターについての詳細と、デトネーション波の 3 次元構造を観察する方法として広く用いられている「すす膜模様法」について詳述している。第 3 章では本研究で得られた実験結

果を示し、考察を加えている。水素-酸素の量論混合気を様々な濃度で窒素希釈した条件でデトネーション波の伝播実験を行い、プリデトネーター出口に反射板を距離 5~30 mm の位置に装着することにより、反射板を使用しない場合に比べて最大で3倍近い入射セルサイズでも急拡大部を越えてデトネーション波の伝播が可能になることを示している。

プリデトネーターから入射したデトネーション波は、フランジ壁面とデトネーションチャンバーの間を半径方向に伝播する円筒デトネーション波に遷移するが、反射板距離が入射セルサイズの 5.7 倍よりも小さいとデトネーション波が半径方向の膨張に耐えられずに消失する。またプリデトネーターから入射したデトネーション波は回折による膨張波の影響により減衰するが、多くの混合気条件においてデトネーション波の伝播速度と燃焼ガスの音速の比を求めることにより、デトネーション波が消失する距離は混合気組成に依存せずプリデトネーター直径の約 0.9 倍となることを示している。このことは実験によっても確認されている。すなわち、反射板距離の増大は、入射デトネーション波の減衰という不利な効果と円筒デトネーション波の安定性という有利な効果を併せ持つことを見出している。

窒素希釈条件に加え、アルゴン希釈条件においても同様の実験を行い、反射板を利用した PDE イニシエーターについて、入射セルサイズによる伝播限界条件の包括的な評価を行っている。反射板距離が入射セルサイズの 5.7 倍よりも小さいとデトネーション波が半径方向の膨張に耐えられずに消失すること、および入射デトネーション波が消失する距離は混合気組成に依存せずプリデトネーター直径の約 0.9 倍であることを再度示し、これらにより与えられる伝播限界は全ての混合気組成に共通してセルサイズのみによって評価することが可能であることを示している。最大の伝播促進効果が得られる反射板距離は、入射デトネーション波が持続する範囲内で反射板距離を最大にした場合に相当し、このとき、 $0.9D$ の距離に 5.7 個のセルが並ぶことから、最適反射板距離におけるプリデトネーターの臨界内径はデトネーションセルサイズ λ の 6.3 倍であることを導き出した。これは反射板を用いない場合 (13λ) の約半分であり、ドライバガスの搭載量を 1/4 に削減できる効果に相当する。

第 4 章は結論であり、本研究で得られた成果を要約して述べている。

これを要するに、著者は、反射板周りのデトネーション波の挙動を観察し、プリデトネーターから入射するデトネーション波が持続している範囲内で反射板距離を最大とすることにより安定した衝撃波の伝播が得られることを明らかにした。また、この反射板距離における臨界プリデトネーター内径はデトネーションセルサイズ λ の 6.3 倍であることを導き出した。これは反射板を用いない場合 (13λ) の約半分であり、ドライバガスの搭載量を 1/4 に削減できる効果に相当する。これらの知見は基礎燃焼学的に重要な知見であるのみならず、工学的にも次世代航空宇宙用推進機関の開発に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。