

# 空気吸い込み式 PDE における デトネーション開始に関する研究

## 学位論文内容の要旨

従来型宇宙用推進機関であるロケットエンジンに代わる、次世代の再使用型宇宙往還機および超音速旅客機用の推進機関として、パルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine, PDE) が有望視されている。PDE は衝撃波を伴った燃焼形態であるデトネーション波 (爆轟波) が燃焼器内に充填された未燃混合気を圧縮しながら自走するため、機械的な圧縮機を用いることなく推力を取り出すことが出来る。その結果、非常に単純な構造の燃焼器でありながら、空気吸い込み式ジェットエンジンからロケットエンジンとしての利用までが実現可能であり、大気中および大気圏外での動作が求められる宇宙往還機用エンジンに適している。空気吸い込み式エンジンとして PDE を作動させる場合、反応性の乏しい燃料 - 空気混合気ではデトネーション波の開始が非常に困難となるため、効率的なデトネーション波の開始を可能にする PDE イニシエータの開発が不可欠である。

デトネーション開始の方法として、プリデトネーターと呼ばれる細い管内で発生させたデトネーション波を燃焼器へ入射させる方法が有力視されている。この方法では、管路の急拡大部で発生する膨張波によりデトネーション波は減衰し、最悪の場合は消滅する。これを避ける方法として、遷移領域となる拡大部に設置された障害物によって生じるデトネーション波の反射または集中を利用し、一度消滅したデトネーション波を再開させる方法が有効である。その一つとして、管路の急拡大部に反射板と呼ばれる板を設置した PDE イニシエータが提案されてきた。本研究は、この手法を更に発展させ、宇宙往還機用途の場合は必ず搭載される酸化剤を積極的に利用してより強いデトネーション波を燃焼器に入射させることにより、PDE イニシエータの小型化および PDE の比推力向上に寄与することを目的としている。

拡大部での減衰に耐え得るだけの十分な強度を保ったデトネーション波を燃焼器内へと入射させることで、より爆轟性の低い混合気にデトネーション波を伝播させることが可能であることは過去に報告されている。一方、互いに異なる組成の混合気であるドライバースガスからターゲットガスへのデトネーション伝達が急拡大部において起こる場合については、混合気組成の遷移と断面積の不連続的な変化が同時に起こるときのデトネーション波の伝播という基礎燃焼学的に興味深い現象であるにも関わらず、その挙動を詳細に明らかにした研究はほとんど存在しない。また、反射板を用いた PDE イニシエータにおいてプリデトネーターに燃焼器と異なる混合気組成を用いる方法については研究例が皆無である。

本研究では、ドライバースガス充填量を変化させることで、反射板を用いた PDE イニシエータのデトネーション波伝播促進能力向上を図るとともに、従来の PDE イニシエータでは困難とされる空気吸い込み式条件でのデトネーション開始に必要な条件とその伝播挙動を明らかにすることを目的とする。

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 イニシエータについての詳細と、デトネーション波の伝播挙動観察のための「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について考察を交えながら述べる。3.1 節では、急拡大部におけるデトネーション波の伝播限界に及ぼす反射板の影響を確かめるため、反射板周囲を同一組成の混合気で満たし実験を行い、反射板によるデトネーション波の伝播促進効果、およびその再開始機構を明らかにした。3.2 節では、より強いデトネーション波を燃焼器内へ入射させることで反射板による伝播促進効果を改善するとともに、急拡大部における混合気組成の変化が反射板による伝播促進効果に及ぼす影響を確認した。3.3 節では、反射板による伝播促進効果に新たな伝播促進方法である「ドライバーガス過供給」を組み合わせることで更なる伝播促進を図り、空気吸い込み式 PDE を想定した燃料（水素）- 空気条件でのデトネーション開始に成功した。3.4 節では、混合気充填時における実験装置内の混合気の分布状況を再現するため、汎用熱流体解析コードを用いて CFD 解析を行い、得られた CFD 解析の結果と 3.3 節の実験結果との比較から、反射板前方領域における混合気条件が同領域におけるデトネーション波の伝播に影響を与えている可能性を示した。

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、反射板を用いた PDE イニシエータにおける伝播限界を調べ、反射板による伝播促進効果の詳細を明らかにするとともに、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の強度によって反射板表面で得られる反射圧縮効果に変化することを明らかにした。また、空気吸い込み式条件でのデトネーション波伝播を実現するため、新たな伝播促進方法として「ドライバーガス過供給」を反射板と組み合わせることによって、水素-空気条件へのデトネーション波伝播を実現した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 永 田 晴 紀  
副 査 教 授 藤 田 修  
副 査 教 授 工 藤 一 彦  
副 査 助 教 授 戸 谷 剛

学 位 論 文 題 名

## 空気吸い込み式 PDE における デトネーション開始に関する研究

従来型宇宙用推進機関であるロケットエンジンに代わる、次世代の再使用型宇宙往還機および超音速旅客機用の推進機関として、パルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine, PDE) が有望視されている。PDE は衝撃波を伴った燃焼形態であるデトネーション波 (爆轟波) が燃焼器内に充填された未燃混合気を圧縮しながら自走するため、機械的な圧縮機を用いることなく推力を取り出すことが出来る。その結果、非常に単純な構造の燃焼器でありながら、空気吸い込み式ジェットエンジンからロケットエンジンとしての利用までが実現可能であり、大気中および大気圏外での動作が求められる宇宙往還機用エンジンに適している。空気吸い込み式エンジンとして PDE を作動させる場合、反応性の乏しい燃料 - 空気混合気ではデトネーション波の開始が非常に困難となるため、効率的なデトネーション波の開始を可能にする PDE イニシエータの開発が不可欠である。

デトネーション開始の方法として、プリデトネーターと呼ばれる細い管内で発生させたデトネーション波を燃焼器へ入射させる方法が有力視されている。この方法では、管路の急拡大部で発生する膨張波によりデトネーション波は減衰し、最悪の場合は消炎する。これを避ける方法として、遷移領域となる拡大部に設置された障害物によって生じるデトネーション波の反射または集中を利用し、一度消炎したデトネーション波を再開させる方法が有効である。その一つとして、管路の急拡大部に反射板と呼ばれる板を設置した PDE イニシエータが提案されてきた。本論文は、この手法を更に発展させ、宇宙往還機用途の場合は必ず搭載される酸化剤を積極的に利用してより強いデトネーション波を燃焼器に入射させることにより、PDE イニシエータの小型化および PDE の比推力向上に寄与することを目的としている。

拡大部での減衰に耐え得るだけの十分な強度を保ったデトネーション波を燃焼器内へと入射させることで、より爆轟性の低い混合気にデトネーション波を伝播させることが可能であることは過去に報告されている。一方、互いに異なる組成の混合気であるドライバーガスからターゲットガスへのデトネーション伝達が急拡大部において起こる場合については、混合気組成の遷移と断面積の不連続的な変化が同時に起こるときのデトネーション波の伝播という基礎燃焼学的に興味深い現象であるにも関わらず、その挙動を詳細に明らかにした研究はほとんど存在しない。また、反射板を用い

た PDE イニシエータにおいてプリデトネーターに燃焼器と異なる混合気組成を用いる方法については研究例が皆無である。

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 イニシエータについての詳細と、デトネーション波の伝播挙動観察のための「すす膜模様法」について詳述している。

第 3 章は実験結果および考察である。3.1 節では、急拡大部におけるデトネーション波の伝播限界に及ぼす反射板の影響を確かめるため、反射板周囲を同一組成の混合気で満たした実験を行い、反射板によるデトネーション波の伝播促進効果、およびその再開始機構を明らかにしている。3.2 節では、より強いデトネーション波を燃焼器内へ入射させることで反射板による伝播促進効果を改善するとともに、急拡大部における混合気組成の変化が反射板による伝播促進効果に及ぼす影響を明らかにしている。3.3 節では、反射板による伝播促進効果に新たな伝播促進方法である「ドライバーガス過供給」を組み合わせることで更なる伝播促進を図り、空気吸い込み式 PDE を想定した燃料（水素）- 空気条件でのデトネーション開始に成功している。3.4 節では、混合気充填時における実験装置内の混合気の分布状況を再現するため、汎用熱流体解析コードを用いて CFD 解析を行い、得られた CFD 解析の結果と 3.3 節の実験結果との比較から、反射板前方領域における混合気条件が同領域におけるデトネーション波の伝播に影響を与えている可能性を示している。

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、混合気組成の変化と断面積の変化が共存する場を伝播するデトネーション波を詳細に観察し、より強いデトネーション波を入射させた場合には、入射デトネーション波のセル構造が混合気組成変化後も暫く維持されることにより円筒デトネーション波への遷移限界が改善されること、これにより伝播促進のために最適な反射板距離が、混合気組成の変化が無い場合に比べて小さくなることを明らかにした。更に、ドライバーガス過供給による伝播促進手法と反射板による伝播促進とを組み合わせることにより、より効率的にデトネーション波を生成することが可能であることを示した。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。