

氏名	吉田 啓祐
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第452号
学位授与の日付	平成30年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	メタン/酸素予混合気における不安定爆轟伝播現象に関する研究
論文審査委員	主査 教授 坪井 伸幸 " 宮崎 康次 准教授 豊田 和弘 名誉教授 林 光一 (青山学院大学)

学位論文内容の要旨

爆轟の伝播限界は安全工学的に重要であり、抑制・制御することは必要な技術である。特に爆轟の伝播限界近傍においてみられる不安定現象を解明することは爆轟の安全利用、応用利用のために重要である。そこで、本研究では円管内において爆轟を伝播させる実験を行うことにより不安定現象が起きる条件の推測、現象の解明を目的とした。不安定な現象は化学的不安定性の強い気体種で確認されているため、本研究では不安定性の強いメタン/酸素予混合気によるデトネーションの伝播限界近傍における挙動の解明を行った。空間スケールのパラメータとして管径、化学種の状態のパラメータとして予混合気の初期圧力、当量比、希釈剤を変化させて実験を行った。また、同条件において定常1次元解析を行うことで爆轟の伝播挙動の解明を目指した。

第1章では、爆轟に関する国内外の研究動向と現在の爆轟研究における課題についてまとめ、本研究の位置づけと目的を明らかにしている。

第2章では本研究で用いた実験装置と、実験手法について説明している。光ファイバーと、PMT (photomultiplier tube)を用いて爆轟の自発光を計測することで伝播速度を取得する手法と、爆轟特有の多次元構造を可視化する煤膜法について触れている。

第3章では、爆轟伝播挙動の管径依存性について考察している。3種類の管径を用いて断面積の大きさが伝播挙動に与える影響を調査した。その結果、伝播限界近傍となる低圧条件では、音速度からC-J(Chapman-Jouget)速度を超える速度までの幅広い速度振動が見られる不安定な現象が見られ、ギャロッピングデトネーションの特徴である周期的な速度振動が観測された。そして、管の内周長さに対して予混合気の特徴から決定されるセルサイズを用いて無次元化 ($\alpha = \pi d / \lambda$, d :管径, λ :セル幅)を行うことで、安定伝播と不安定伝播の境界を予測可能であることを示した。さらに、爆轟の特性の一

つであるセル構造の可視化実験では、セルの消失と再出現現象が観測される不安定な現象が見られた。セルの消失が観測されない安定な条件においても、単一スピンモードと多頭モードが繰り返し観測され、爆轟速度の安定性の議論に用いた無次元パラメータ α を用いてこれらのモードの予測が可能であることを示した。次に、定常 1 次元解析による伝播速度の予測可能性を評価した。安定伝播する条件においては適切な摩擦・エネルギー損失パラメータを用いることで速度が予測可能であるが、不安定な伝播においては予測が不可能であり、非定常 1 次元解析及び多次元解析の必要性を示した。

第 4 章では、爆轟特性に影響を与える予混合気の当量比の依存性を実験的に評価した。伝播挙動は当量比を変化させた場合において、定性的には差が見られないことを示した。そして、管の内周長さに対して予混合気の特徴から決定されるセルサイズの比をとった無次元パラメータ α を用いることで、安定伝播と不安定伝播の境界を第 3 章と同様に予測可能であることを示した。爆轟の特性の一つであるセル構造の可視化実験では、セルの消失と再出現現象が観測される不安定な現象が見られた。セルの消失が観測されない安定な条件においても、単一スピンモードと多頭モードが繰り返し観測された。伝播挙動については当量比を変化させた場合においても定性的な差は見られなかった。また、第 4 章の当量比依存性の議論においても、無次元パラメータ α を用いて伝播モードの予測が可能であることを示した。

第 5 章では、予混合気に希釈剤を付加することによる爆轟抑制効果と伝播限界に与える影響について述べている。予混合気に希釈剤を追加することで爆轟伝播速度を低減し、伝播限界を大きく変化させる効果があることを示した。また、窒素希釈に比べ二酸化炭素希釈のほうが爆轟伝播速度の抑制効果は大きいことが示された。爆轟の伝播限界に与える影響においても、窒素希釈に比べ二酸化炭素希釈のほうが不安定伝播の境界は高压側へと遷移したことから、二酸化炭素希釈の影響が大きいことを示した。さらに、これらの影響の予測として化学的不安定性を示す誘導距離と反応距離の比で定義される爆轟不安定性パラメータ β を用いることで、希釈剤を用いた場合においても不安定な挙動を示す条件を予測することが可能であることを示した。

第 6 章では、爆轟伝播速度の計測とセル構造の可視化を同時に行うことで爆轟伝播速度と多次元構造の相関関係について述べている。その結果、爆轟伝播速度と多次元であるセルの安定伝播条件は概ね一致していることを示した。また、伝播速度とセルの同時計測を行うことで、爆轟の伝播速度が C-J 速度以上になる区間では、セル構造を持つことを示した。セル構造が観測できない区間においては、伝播速度は低下し、C-J 速度を大きく下回る値となった。このことから、爆轟伝播速度はセルの有無に強く影響されていることを示した。

以上のように、爆轟の伝播速度の計測と多次元構造の可視化を行うことによって爆轟の伝播挙動の不安定性の解明を行った。管径依存性、当量比依存性を示すとともに、爆轟の抑制に希釈剤が効果的であることを示した。また、無次元パラメータ α と化学的不

安定性を示す□を用いることで、既存のデータベースを用いて爆轟の不安定な挙動を示す条件を推測することの可能性を示した。そして、伝播速度にはセルの有無が強く影響することを示した。

学位論文審査の結果の要旨

爆轟の伝播限界は安全工学的に重要であり、抑制・制御することは必要な技術である。そして、特に爆轟の伝播限界近傍においてみられる不安定現象を解明することは爆轟の安全利用、応用のために重要である。本研究では不安定性の強いメタン/酸素予混合気による爆轟の伝播限界近傍における挙動の解明を目的とし、実験及び定常1次元解析により不安定現象が起きる条件の予測及び現象の解明を行った。

第1章では、爆轟に関する国内外の研究動向と現在の爆轟研究における課題についてまとめ、本研究の位置づけと目的を明らかにしている。

第2章では本研究で用いた実験装置と、実験手法について説明している。光ファイバーとPMT (photomultiplier tube)を用いて爆轟の自発光を計測することで伝播速度を取得する手法と、爆轟特有の多次元構造を可視化する手法について触れている。

第3章では、爆轟伝播挙動の管径依存性について考察している。3種類の管径を用いて断面積の大きさが伝播挙動に与える影響を調査した。伝播限界近傍となる低圧条件では、音速程度からC-J(Chapman-Jouguet)速度を超える速度までの幅広い速度振動が見られる不安定な現象が見られ、ギャロッピングデトネーションの特徴である周期的な速度振動が観測された。管の内周長さに対して予混合気の特徴から決定されるデトネーションのセルサイズを用いて無次元化 ($\alpha = \pi d / \lambda$, d :管径, λ :セル幅)を行うことで、安定伝播と不安定伝播の境界を予測可能であることを示した。また、爆轟の特性の一つであるセル構造の可視化実験では、セルの消失と再出現現象が観測される不安定な現象が見られることも示した。セルの消失が観測されない安定な条件においても、単一スピニングモードと多頭モードが繰り返し観測され、爆轟速度の安定性の議論に用いた無次元パラメータ α を用いてこれらのモードの予測が可能であることを示した。次に、定常1次元解析による伝播速度の予測可能性を評価した。安定伝播する条件においては適切な摩擦・エネルギー損失パラメータを用いることで速度が予測可能であるが、不安定な伝播においては予測が不可能であり、非定常1次元解析及び多次元解析の必要性を示した。

第4章では、爆轟特性に影響を与える予混合気の当量比の依存性を実験的に評価した。伝播挙動は当量比を変化させた場合において、定性的には差が見られないことを示した。そして、管の内周長さに対して予混合気の特徴から決定されるセルサイズの比をとった無次元パラメータ α を用いることで、安定伝播と不安定伝播の境界を第3章と同様に予測可能であることを示した。爆轟の特性の一つであるセル構造の可視化実験において、伝播挙動については当量比を変化させた場合においても定性的な差は見られなかった。

当量比依存性の議論においても、無次元パラメータ α を用いて伝播モードの予測が可能であることを示した。

第 5 章では、予混合気に希釈剤を付加することによる爆轟抑制効果と伝播限界に与える影響について述べている。予混合気に希釈剤を追加することで爆轟伝播速度を低減し、伝播限界を大きく変化させる効果があることを示した。また、窒素希釈に比べ二酸化炭素希釈のほうが爆轟伝播速度の抑制効果は大きいことが示された。爆轟の伝播限界に与える影響においても窒素希釈に比べ二酸化炭素希釈のほうが不安定伝播の境界は高圧側へと遷移したことから、二酸化炭素希釈の影響が大きいことを示した。

第 6 章では、爆轟伝播速度の計測とセル構造の可視化を同時に行うことで爆轟伝播速度と多次元構造の相関関係について述べている。爆轟伝播速度と多次元であるセルの安定伝播条件は概ね一致していることを示した。また、伝播速度とセルの同時計測を行うことで、爆轟伝播速度はセルの有無に強く影響されていることを示した。

第 7 章において、伝播限界近傍の低圧条件下における本実験及び本解析で得られた成果を総括している。

以上のように、本論文では爆轟伝播限界近傍で見られる不安定現象について、実験により解明した。さらに、予混合気の状態から不安定現象の発生領域の予測について、新たに普遍的かつ重要な知見を得ることができ、本論文の成果は機械工学、特に燃焼工学分野の発展に大きく寄与することが示された。

本論文に関して審査委員及び公聴会出席者から、研究の位置づけ、実験データの新規性、無次元数の重要性と定義の妥当性などに関する多くの質問があったが、いずれも著者の的確な説明により質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。