

氏 名 森井 雄飛

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1547 号

学位授与の日付 平成24年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 爆轟伝播形態の反応特性依存性に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 坪井 伸幸 九州工業大学
准教授 小川 博之
准教授 徳留真一郎
准教授 高木 亮治
教授 越 光男 東京大学
教授 林 光一 青山学院大学

論文内容の要旨

爆轟は超音速で伝播する高温・高圧な現象であり、安全工学の面から爆轟伝播限界に関する研究は長年行われている。また、爆轟現象の持つ高温・高圧な現象を利点と捉えて、近年では推進エンジンへの応用を考えた研究も数多くなされている。しかし、未だに爆轟現象の理解は十分ではなく、現在でも基礎研究が続けられている。爆轟の基礎研究に用いられる実験方法は主に管内を伝播する爆轟を調査するものであり、長年の実験によって爆轟伝播限界近傍では管径を狭めることや圧力を下げることによって、爆轟伝播形態が大きく影響を受けることが報告されている。管径が十分広い条件では、爆轟伝播速度は理論解として得られる CJ(Chapman-Jouget)速度で伝播するが、爆轟伝播限界近傍では爆轟速度が CJ 速度とその半分の値を周期的に大きく振動する Galloping Detonation や理論値の半分程度の遅い速度で伝播する Low Velocity Detonation などの現象も観測されている。しかし、伝播限界近傍であっても爆轟は超音速で伝播する現象であるため、実験のみでは詳細な構造を明らかにすることは難しく、未だにこれらの現象の発生原因は解明されていない。そのため、近年では計算機の進歩とともに発展してきた数値流体力学を用いた爆轟解析により、これらの現象の詳細な理解に向けて研究がされている。

本研究の目的は数値流体力学を用いた解析を行い、爆轟限界付近の伝播形態における水素燃料およびメタン燃料の反応特性依存性を評価することである。まず初めに、数値流体力学を用いた解析を可能とするために、計算法の検討を行った。炭化水素燃料、たとえば最も炭素数が少ないメタン燃料を用いた計算ですら化学種が 68、素反応数が 334 と莫大になるため、計算負荷の問題から一段階反応モデルを用いた計算が多い。しかし、爆轟伝播限界近傍では化学反応による発熱速度が重要であり、信頼性が高い化学反応モデルを利用する必要がある。詳細化学反応モデルを利用すると信頼性は十分確保される、計算負荷が非常に大きく現実的ではない。そこで、DRG 法を用いて 30 化学種 145 素反応のメタン予混合気の準詳細化学反応モデル DRG30 を構築し、実験値や詳細化学反応モデルを用いた結果と比較した。その結果、詳細化学反応モデルである k311 と比較して DRG30 は十分信頼性が高いことが分かり、本研究で用いるメタン予混合気の準詳細化学反応モデルとして採用した。次に、水素予混合気比べてメタン予混合気は硬直した方程式を解く必要があるが、数値流体力学に炭化水素燃料を組み込んだ例は非常に少なく、生成項の積分法の安定性については知見が少ない。そこで、メタン予混合気でも利用可能な生成項の積分法を評価した。その結果、従来の反応を含む数値流体力学で用いられていた Point Implicit 法は水素予混合気の Stiffness(硬直さ)を解決することは可能である、メタン予混合気の Stiffness を解決することができなかった。よって、Stiff Solver として知られている RKC 法、RODAS 法、RADAU5 法、VODE 法を流体解析コードに組み込み、安定性・計算時間の比較を行った。その結果、反応解析ソフトウェアである CHEMKIN II でも利用されている VODE 法は安定性・計算時間共に優れていることから本研究で用いる計算コードに組み込むこととした。以上の結果から、世界的に見ても例が極めて少ない、30 化学種以上の反応を含む爆轟解析が現実的な計算時間で可能となった。

上記で述べた検討結果に従って構築した非粘性の反応を含む数値流体力学計算コードを用いて酸素予混合気及びメタン酸素予混合気の 2 次元解析を行い、反応特性として重要な燃料の半反応距離 (1 次元の ZND(Zel'dovich-Von Numann-Doring)モデルの計算で燃料が半分消費されるまでの距離) を元に決定したチャンネル幅を用いて爆轟伝播形態を評価した。

まず、1 次元の計算及びチャンネル幅が半反応距離の 0.5 ~ 6 倍の条件で、水素予混合気を用いた解

析を行った。その結果、水素予混合気の爆轟はチャンネル幅を大きくすることによって、爆轟の伝播が安定になることがわかり、半反応距離の1~2倍のチャンネル幅で Galloping Detonation として伝播、半反応距離の3, 6倍のチャンネル幅で Single-head Marginal Detonation (狭い管径において CJ 速度で伝播する爆轟) として伝播することがわかった。次に、1次元の計算及びチャンネル幅が半反応距離の0.1~2.5倍の条件で、メタン予混合気を用いた解析を行った。その結果、メタン予混合気は、チャンネル幅が広がるとおおむね安定するが、半反応距離の0.25倍のチャンネル幅で Galloping Detonation として伝播し、半反応距離の2, 2.5倍のチャンネル幅では、不安定な Marginal Detonation として伝播した後、爆轟は消炎することが分かった。さらに、酸水素及びメタン酸素予混合気を用いた1次元解析の結果と2次元の計算結果の相関係数を算出した。、酸水素爆轟は反応特性距離を基準としたチャンネル幅が爆轟伝播形態に与える影響が明確であり、Galloping Detonation はチャンネル幅の変化により1次元爆轟から2次元爆轟へ遷移する際に発生することが分かった。メタン酸素爆轟は、チャンネル幅が広がると伝播距離が長くなり、おおむね安定することは分かったが、爆轟不安定性の影響により詳細な相関関係を見ることが出来なかった。そこで、Ar 希釈を行うことにより爆轟伝播が安定することが過去の実験から知られているため、本解析でも Ar 希釈を用いたメタン酸素爆轟の解析を行った。結果として、Ar 希釈によって、爆轟安定性が増し、チャンネル幅が爆轟伝播形態に与える影響は明確になった。そして、半反応距離の0.25倍のチャンネル幅で Galloping Detonation として伝播し、0.5, 1倍のチャンネル幅で Single-head Marginal Detonation として伝播することが明らかになった。

以上の2次元爆轟の解析結果から、酸水素爆轟は半反応距離の1.5倍のチャンネル幅で Galloping Detonation, 3倍, 6倍のチャンネル幅で Single-head Marginal Detonation として伝播し、メタン酸素爆轟は半反応距離の0.25倍のチャンネル幅で Galloping Detonation, 0.5倍, 1倍のチャンネル幅で Single-head Marginal Detonation として伝播することがわかった。そして、半反応距離の倍率を α_{fuel} とすると、 $\alpha_{H2} = 6 \times \alpha_{CH4}$ の関係があることがわかった。爆轟伝播限界と比べて十分大きな管径を用いた実験で得られる爆轟のセル幅 λ は、着火誘導距離 $L_{induction}$ との間に、 $\lambda = A_{fuel} \times L_{induction}$ の関係があることが知られており、本研究で用いた半反応距離(着火誘導距離と同等)と実験で得られたセル幅 λ を比較すると、良い一致を示すことが明らかになり、 $A_{H2} = 6 \times A_{CH4}$ の関係があることがわかった。したがって、爆轟伝播形態を分類する倍率 $\alpha_{H2} = 6 \times \alpha_{CH4}$ と、セル幅 λ を決める倍率 $A_{H2} = 6 \times A_{CH4}$ の関係から、狭い管内を伝播する爆轟伝播形態は、実験で得られるセル幅 λ と強い相関があり、Galloping Detonation は本解析条件では、セル幅 λ の3%程度のチャンネル幅で発生することが分かった。また、Ar 希釈を用いたメタン爆轟で様々な希釈条件・圧力で比較しているため、このセル幅 λ と Galloping Detonation の発生領域は他の燃料でも十分利用可能であると予測でき、実験でセル幅 λ を測定すれば、チャンネル幅を3%程度にすれば Galloping Detonation を発生させることが可能であると考えられる。

結論としては、今まで計算方法が確立していなかった「30化学種以上の反応を含む爆轟解析に成功」し、爆轟伝播限界近傍では、「半反応距離及び爆轟不安定性が爆轟伝播形態に大きな影響を与える」ことを明らかにし、今まで発生条件や伝播挙動が詳細に知られていなかった「Galloping Detonation は、非粘性の条件でも1次元爆轟から2次元爆轟への遷移途中に存在し、実験で得られるセル幅の3%程度のチャンネル幅で発生する爆轟現象である」ことが分かった。

博士論文の審査結果の要旨

爆轟は超音速で伝播する高温・高圧な現象であり、安全工学の面から爆轟伝播限界に関する研究は長年行われている。しかし、未だに爆轟現象の理解は十分ではなく、現在でも多くの基礎研究が続けられている。爆轟伝播限界の主な調査方法は実験で管内を伝播する爆轟を調査する方法である。過去の研究では、十分管径が広い条件では、爆轟速度は理論解として得られる CJ(Chapman-Jouget)速度で伝播するが、爆轟伝播限界近傍では爆轟速度が CJ 速度とその半分程度の速度の間を周期的に大きく振動する Galloping Detonation や CJ 速度の半分程度の速度で伝播する Low Velocity Detonation などの爆轟伝播形態も報告されている。しかし、爆轟は超音速で伝播するため、実験のみでは詳細な現象を理解することは困難であり、未だにこれらの現象の発生原因は解明されていない。そのため、数値流体力学を用いた爆轟の解析が注目されている。

本論文では、反応を含んだ数値流体力学を用いた解析を可能とするために、信頼性を十分に保ったメタン/酸素燃焼に対する 30 化学種準詳細化学反応モデルを構築し、メタン/酸素燃焼における Stiffness を克服可能な積分法を導入、その結果、実用的な計算時間でメタン/酸素予混合気に対する爆轟解析が世界で初めて可能にした。そして、酸水素予混合気及びメタン酸素予混合気に対する 2 次元非定常爆轟解析を実施し、両者の結果を比較することにより、爆轟伝播形態として発生原因が不明であった Galloping Detonation が、1 次元爆轟から 2 次元爆轟への遷移途中に存在することを初めて明らかにした。また、「燃料の半反応距離」と「爆轟のセル幅」の関係で利用される燃料ごとに決められた倍率が、「燃料の半反応距離」と「狭い管内を伝播する爆轟伝播形態」の関係と強い相関があることを示し、利用する燃料によらず、Galloping Detonation が実験で得られるセル幅の 3 % 程度のチャンネル幅で発生することを明らかにした。この知見は爆轟特性として知られているセル幅が、狭い管内を伝播する爆轟形態に大きな影響を与えており、実験で得られたセル幅から爆轟伝播限界となるチャンネル幅の予測を可能とするものである。本成果は安全工学の面から高く評価でき、今後の爆轟を用いた高効率なエンジン開発への応用研究にも役立つものである。

本研究は爆轟の基礎研究において重要な爆轟伝播限界の理解に新たな知見を与えるものとなっており、申請された論文は博士（工学）の学位論文としてふさわしい水準にあると判定する。