

氏名	Nicolas Jourdain (フランス)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第554号
学位授与の日付	令和4年9月26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	Eulerian-Eulerian Method for Two-phase Detonation Propagation in a Dilute Hydrocarbon Fuel Spray (希釈された炭化水素燃料噴霧中を伝播する二相爆轟に対する Eulerian-Eulerian モデル)

論文審査委員	主査	教授	坪井 伸幸
		〃	梅景 俊彦
		〃	宮崎 康次
		〃	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

デトネーションを用いたエンジンに関する研究は、1990年代から多くの研究がされてきたが、その代表的なエンジンである、回転デトネーションエンジン (Rotation Detonation Engine : RDE) やパルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation engine : PDE) などのデトネーションを基本とするエンジンは、従来の定圧燃焼エンジンと比較して最大で15%の理論熱効率の向上が見込まれる。このため、RDEとPDEは世界中で実用化に向けて研究されているが、エンジンサイズの制限などの実用化の制約の下では、エネルギー密度が高い液体燃料を使用する方が有利である。本論文は、数値解析により気液二相デトネーションおよび気液二相RDEに対して液滴の影響を把握することを目的とした。まず、気液二相デトネーションの2次元数値解析を行い、液滴粒径、液滴燃料の蒸発率などの影響を調べ、複雑なデトネーションの波面構造を明らかにした。次に2次元気液二相RDEの数値解析を行い、デトネーションが維持する条件と消炎のメカニズムを明らかにした。本論文はこれらの成果を纏めたものであり、以下全7章から構成される。

第1章では、気液二相デトネーションや気液二相デトネーションエンジンに対して、既往研究を纏め、その上で本研究の現象における学術的な課題を明らかにすることで本研究の意義を明確にしている。

第2章では、本研究で使用する物理化学モデルについて説明している。気相および液相の支配方程式、化学反応モデル、気液二相間の干渉モデル、液滴の蒸発モデル・抵抗モデル・分裂モデルについて詳細に述べている。本研究で特徴的な点は、液滴を1つずつ追うのではなく、流体的な取り扱いにすることで大規模3次元模計算を可能とするものであり、その方法についてもこの章で述べている。

第3章では、本研究で使用する数値解析法について説明している。気液二相流体に関する非

定常Navier-Stokes方程式と硬直化しやすい化学反応モデルに対する数値解法について詳細に述べており、デトネーションを数値的に安定に解くために必要な数値解法を採用している。

第4章ではn-ヘプタンおよびケロシンの燃焼に対する化学反応モデル、これらの液滴の蒸発モデル・分裂モデルについて検証計算を行っている。まず化学反応モデルに関しては、平衡デトネーション速度や着火遅れ時間について、実験値や理論値との比較を行った。また、液滴の蒸発モデルについては液滴直径と経過時間について実験と比較した。液滴の分裂モデルについては、実験データが存在する水滴を含む空気中を衝撃波が伝播する1次元計算を行った。いずれも、実験結果や理論値と比較して本計算手法が妥当であることを確認した。

第5章ではn-ヘプタン/空気予混合気中を伝播する気液二相デトネーションについて、2次元数値解析を行った。まず、当量比が0.8, 1.0, および1.3のn-ヘプタン液滴の単分散（計算セル中の液滴直径を単一直径で代表する）について数値解析を行った。次に、爆轟特性に対する液滴直径の多分散度（計算セル中で使用する液滴直径の数を複数用意する）の影響の評価を行った。多分散度が増加するほどデトネーションの伝播速度が低下し、セルサイズが増加し、そしてデトネーションの反応誘起距離、反応距離が1.5~2.5倍ほど長くなることも示された。さらに多分散度が大きい解析結果の方が、実験におけるデトネーション速度およびデトネーションのセルサイズ、圧力履歴に一致する傾向が見られた。

第6章ではケロシン/水素/空気予混合気に対する2次元気液二相RDEの数値解析を行った。デトネーションは消炎せずに定常的に伝播する条件が存在することが示され、そしてデトネーション速度は実験データと概ね一致することが示された。また、デトネーションの波面背後の燃焼ガスのケロシン液滴の接触時間および接触面の挙動に対して、エンジンへの噴射方法が大きく影響することが示された。さらに、噴射孔間の距離を大きくすると、ケロシン液滴と高温ガスが接触することにより、ケロシン液滴の加熱・気化が促進され、結果としてデトネーションが維持されやすくなるというメカニズムを明らかにした。一方、デトネーションの前に気化した燃料が不足したり大きな燃料密度勾配がある場合、衝撃波と燃焼面の分離につながることも数値解析により示された。

第7章では、本研究で得られた知見を総括している。

以上を要約すると、本論文は気液二相デトネーションおよび気液二相RDEの伝播構造と維持する条件を高い精度で予測可能な数値解析手法を構築し、気液二相爆轟特性について多くの知見を示しており、流体工学及び燃焼工学の発展に大きく寄与することが示された。

## 学位論文審査の結果の要旨

本論文は気液二相デトネーションおよび気液二相RDEの伝播構造と維持する条件を高い精度で予測可能な数値解析手法を構築し、気液二相爆轟特性について多くの知見を示しており、流体工学及び燃焼工学の発展に大きく寄与することが示された。

最終試験では、審査委員及び公聴会出席者から、実験結果との差異、粒子を直接追跡する

手法と本手法との得失，液滴の分散数がデトネーションの波面構造に与える影響など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．