

jh190036-NAH

気液二相デトネーションに対する大規模数値解析

松尾亜紀子（慶應義塾大学）

本課題研究では水液滴が存在する未燃混合気中を伝播する気相デトネーションに関する基礎研究を実施した。瞬時場の流れ場を解析する事で、気相デトネーションの伝播中において水液滴が分裂する要因を明らかにした。水液滴の分裂は波面後方において主にジェット、横波、横波の衝突および横波とジェットの干渉によって不均一に生じる。これらの要因を経験する水液滴は他の水液滴と比べて波面後方において継続的に分裂し、単分散の水液滴群から液滴径に多分散性を生じさせる。水液滴が経験する初期衝撃波強さは分裂後の液滴径に影響を与えず、多分散性を有する水液滴群を生じさせる役割を果たさない。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学サイバーサイエンスセンター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

- ・ 松尾亜紀子（慶應義塾大学理工学部）研究総括
- ・ 江川隆輔（東北大学サイバーサイエンスセンター）並列化処理
- ・ 小林広明（東北大学サイバーサイエンスセンター）並列化処理
- ・ 磯部洋子（東北大学サイバーサイエンスセンター）並列化処理
- ・ 渡部広吾輝（慶應義塾大学理工学研究科）計算実行および分析
- ・ 笠原弘貴（慶應義塾大学理工学研究科）計算実行および分析
- ・ 重岡俊輔（慶應義塾大学理工学研究科）計算実行および分析
- ・ 鈴木寛人（慶應義塾大学理工学研究科）計算実行および分析
- ・ 山口貴史（慶應義塾大学理工学研究科）計算実行および分析

2. 研究の目的と意義

本課題研究は、液滴が存在する未燃混合気中を伝播する気相デトネーションを大規模計算によって数値的に可視化し、その伝播構造・機構を明らかにする事を目的とする。衝撃波を伴い超音速で伝播する燃焼波であるデトネーションは理論熱効率の高い燃焼器が作製できる一方で意図せず起きた場合には甚大な被害をもたらす。そのため、デトネーションに関する研究が行われ、気相デトネーションに対する知見は発達してきた。しかし、気液二相デトネーションに関しては、実験および数値解析共にその伝播機構やデトネーションと液滴の関係性に関する知見が十分に得られていない。デトネーションの工学的応用や安全工学を考えた際には、液滴がない気相デトネーションではなく液滴が存在する気液二相デトネーションに対する知見が求められている。気液二相デトネーションの伝播機構解明に向け、気液二相デトネーションを長距離伝播させる事によって定常伝播する気液二相デトネーションを得る必要がある。そこで、大規模数値解析を実施する事により、気液二相デトネーションの伝播機構を解明する事を目的とする。気液二相デトネーションの伝播機構やデトネーションと液滴の関連性の解明は、液体燃料を用いたデトネーション燃焼器の実用化およ

び水液滴を用いたデトネーションによる被害低減手法の効率化に繋がる。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

気液二相デトネーションは圧縮性流体、反応、混相流が関わりあう複雑な現象であるため、種々の数値解析モデルを組み合わせた結果計算コストが非常に高くなる。また、現象を再現する上で重要な液滴の挙動を捉えるためには個々の液滴を追跡する Eulerian-Lagrangian 手法を導入する事で更に計算コストが増加する。本課題研究における数値解析は、支配方程式を空間的に離散化した上で同一の計算処理を各離散点・離散要素上で繰り返し行うものであり、ベクトル型コンピュータが最適である。特に大規模計算においては、高メモリバンド幅を有するベクトル演算環境において最速の演算速度を達成できることから、スーパーコンピュータSX-ACE で解析を行う必要がある。

気液二相デトネーションに対する解析では、流体解析・粒子挙動解析・化学反応解析を連成して同時に行う必要がある。連成解析プログラムが小規模スケールにおいて現象再現能力を有することは確認済みであり、また個々の解析は MPI 並列化がなされ高並列効率を実現している。しかし、各解析過程に対して最も有効な並列処理モデルが異なるため、連成解析に際し大規模並列に耐える並列効率を実現する処理モデルを構築することも本研究課題の目的となる。そこで、計算科学を専門とし数値解析モデル構築を担当する慶應義塾大学と計算機科学を専門とし並列処理モデルの改善を担当する東北大学との共同研究によりこれを達成する。

4. 今年度の研究成果の詳細

上半期は水液滴を含む混合気中を伝播する気相デトネーションの伝播挙動に関する数値解析を実施した。計算対象を図 1 に示す。二次元直管内において十分に発達した気相デトネーションが水液滴を含む未燃混合気中を伝播

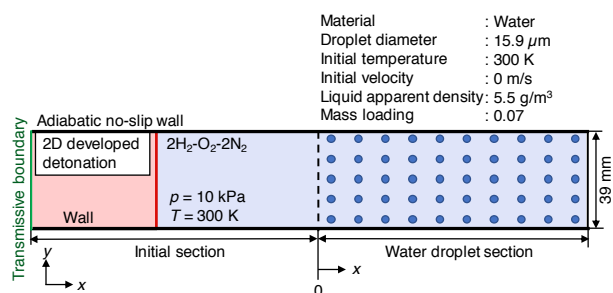


図 1 計算対象

する事を計算対象としている。対象とする混合気は量論窒素 40%希釈水素酸素混合気であり、初期圧力および温度はそれぞれ 10 kPa, 300 K とした。管幅は 39 mm であり、管幅あたりのセル数は 1.5 となっている。計算領域は初期区間と水液滴区間の 2 つに分割される。予備計算で得られた十分に発達した二次元デトネーションが初期区間から水液滴区間へと伝播する水液滴区間では直径 15.9 μm の水液滴が混合気中に均一に配置され、その見かけの密度は 5.5 g/m³ である。

水液滴を含む混合気中を伝播する気相デトネーションは気液二相流現象の 1 つである。本研究では Eulerian-Lagrangian 手法を用いて解析を行った。気相は粘性かつ圧縮性を有し、化学反応を考慮し熱的に完全な理想気体と仮定した。気相に対する支配方程式は気相の体積分率を考慮した二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。水素酸素の化学反応の模擬には Hong *et al.* によって提案された 9 化学種 20 素反応を考慮する詳細化学反応モデルを使用した。

水液滴に対しては、粒子追跡法によって解析を行う。水液滴に対する支配方程式はニュートンの運動方程式、エネルギー式、水液滴質量式、数密度の式である。本解析では水液滴の蒸発を Abramson *et al.* のモデルにより考慮し、水液滴の分裂は Chauvin *et al.* のモデルによって評価している。

計算結果より、水液滴を含む気相デトネーションの伝播中における水液滴の分裂挙動を

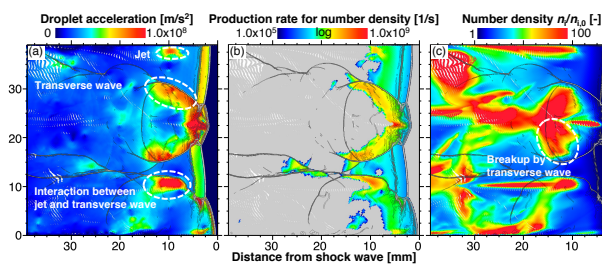


図 2 水液滴に関する二次元流れ場
(a)液滴の加速度, (b)数密度の生成率, (c)数密度. (b)における灰色は水液滴がその瞬間では分裂を生じていない事を示している. 図中にはシュリーレン画像を合わせて表示している.

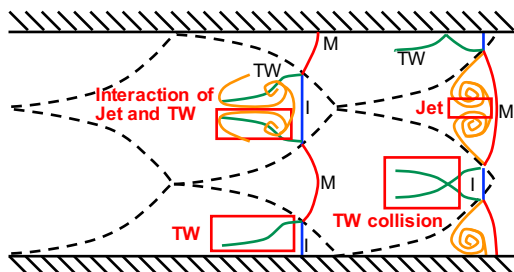


図 3 水液滴を含む気相デトネーションの伝播中における水液滴の分裂が生じる箇所に関する概要図

明らかにした. 図 2 に水液滴に関する二次元流れ場を示す. 図 2(a)の液滴の加速度分布より, 水液滴はジェット, 横波および横波とジェットの干渉によって運動が誘起されている事がわかる. これにより表面張力と比較して強い慣性力が水液滴に作用し, 水液滴は分裂を生じる (図 2(b)). このように水液滴が衝撃波後方においてジェット, 横波および横波とジェットの干渉によって, 図 2(c)の数密度分布に示すように水液滴は不均一に分裂が生じる. 数値解析結果より水液滴の分裂が生じる箇所を特定する事に成功し, その知見に関する概要図を図 3 に示す. セル構造を有する気相デトネーションでは水液滴の分裂は垂直衝撃波とは異なり衝撃波面ではなく, その後方においてジェット, 横波および横波とジェットの干渉によって生じている.

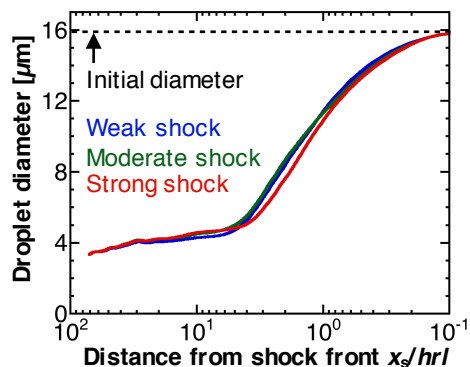


図 3 初期衝撃波強さによって分類した水液滴に対する液滴直径の Favre 平均一次元プロファイル

気相デトネーションではセル構造を有するため, 波面の伝播速度はセル内において平均伝播速度に対しておよそ 0.8-1.2 倍の伝播速度となる. 水液滴の分裂は先行研究より衝撃波速度が支配的なパラメータになる事が判明している. 気相デトネーションにおいて初期衝撃波伝播速度が水液滴の分裂に与える影響を定量的に示すため, 初期衝撃波速度によって水液滴を 3 つのグループに分類した. 理論伝播速度に対して, 1.1 倍以上の衝撃波伝播速度を経験する水液滴を Strong shock, 0.9 倍以下の衝撃波伝播速度を経験する水液滴を Weak shock, 0.9-1.1 倍の伝播速度を経験する水液滴を Moderate shock と分類した. 図 3 に示すように, これら 3 つの水液滴群に対して液滴直径について Favre 平均一次元プロファイルを取得した. 図 3 より, 初期衝撃波速度が異なる 3 つの水液滴に対するプロファイルは互いに良く一致している. この事から, 気相デトネーションにおける水液滴の分裂に対して, 初期衝撃波伝播速度が与える影響は小さいと判明した. これは, 気相デトネーション中における水液滴の分裂は, 図 3 に示すように衝撃波通過後のジェットと横波によって主に生じるために, 初期衝撃波速度が与える影響が小さくなったためだと考えられる.

5. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は水液滴を含む気相デトネーションに関して、数多くの研究成果を生み出す事ができた。現在、本課題研究で得られた成果について、威厳のある国際学会である 38th International Symposium on Combustion に口頭発表が決定しており、国際ジャーナル誌である Proceedings of the Combustion Institute の出版に向けて review process が進行中である。また、Proceedings of the Combustion Institute の採択後には、本課題研究で得られた成果についてさらに国際ジャーナル誌にもう 1 本研究成果を投稿する予定である。

本課題研究で得られた研究成果は、水液滴を用いたデトネーションによる被害低減手法の提案や液体燃料を用いたデトネーション燃焼器の実現に向けて、重要な知見を提供できるものである。

6. 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文（査読あり）

H. Watanabe, A. Matsuo, A. Chinnayya, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, `Numerical analysis on behavior of dilute water droplets in detonation`, Proceedings of the Combustion Institute, Submitted on November 7th, 2019.

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

H. Watanabe, A. Matsuo, A. Chinnayya, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, `Numerical analysis on behavior of dilute water droplets in detonation`, 38th International Symposium on Combustion, 24-29 January, 2021, Australia

(3) 国際会議発表（査読なし）

T. Suzuki, A. Matsuo, Y. Daimon, H. Kawashima, A. Kawasaki, K. Matsuoka, J. Kasahara, `Prediction of Pressure Loss in Injector for Rotating Detonation Engines Using Single-element Simulation`, AIAA Propulsion Energy Forum and Exposition, August 24-26, 2020, USA

H. Watanabe, A. Matsuo, A. Chinnayya, K. Matsuoka, A. Kawasaki, J. Kasahara, `Numerical Investigation on Characteristic Lengths for Gaseous Detonation with Dilute Water Spray`, AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, August 19-22, 2019, USA

(4) 国内会議発表（査読なし）

渡部広吾輝, 松尾亜紀子, Chinnayya Ashiwn, 松岡健, 川崎央, 笠原次郎, 初期液滴直径分布を有する希薄な水液滴群を含む混合気中を伝播する気相デトネーションに関する数値解析, 日本機械学会 2020 年度年次大会, 2020 年 9 月 13-16 日, 名古屋

鈴木寛人, 松尾亜紀子, 大門優, 川島秀人, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎, 回転デトネーションエンジン開発のためのインジェクタ圧力損失予測手法の提案, 2019 年度衝撃波シンポジウム, 2020 年 3 月, 神戸

鈴木寛人, 松尾亜紀子, 大門優, 川島秀人, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎, 回転デトネーションエンジンの燃焼室モデル化手法の検討, 第 57 回燃焼シンポジウム, 2019 年 11 月, 札幌

山口貴史, 松尾亜紀子, 川崎央, 松岡健, 笠原次郎, 中空型燃焼器を持つ回転デトネーションエンジンの特性に関する数

値解析, 第 57 回燃焼シンポジウム, 2019
年 11 月, 札幌

重岡俊輔, 松尾亜紀子, 機械学習を用い
た高効率な化学反応積分法の検討, 第 57
回燃焼シンポジウム, 2019 年 11 月, 札
幌

- (5) その他(特許, プレスリリース, 著書等)
なし