

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03481

研究課題名(和文) ISS実験研究成果の社会還元のための噴霧シミュレータ開発と噴霧物理解明

研究課題名(英文) Development of a novel spray simulator and elucidation of spray formation mechanisms based on ISS atomization experiments

研究代表者

新城 淳史 (Shinjo, Junji)

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：10358476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：国際宇宙ステーションでの長時間実験により明らかになった表面張力波が液体微粒化に及ぼす影響を含めた新規の乱流微粒化モデルを噴霧解析コードに組み込んだ。それにより、過大な計算時間を必要とせずに液体噴霧の形成を解析できる数値解析コードが構築され、噴霧の形成物理を明らかにした。また、産業界の諸問題に適用できるようにコードを改良した。コードは非燃焼から燃焼噴霧までを解析できるようにし、その妥当性を確認した。これによりこれまでできなかった精度での予測が可能になった。また、室温の噴霧と高温の噴霧の詳細な物理を初めて明らかにした。結果は高く評価され、日本燃焼学会論文賞の受賞にもつながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、これまで正しく予測できなかった噴霧形成という数十年来の懸案を解決する方法を提示したことが大きい。これによりこれまでの噴霧解析において機構が分からないまま実験に頼っていた部分が科学として扱えるようになった。

噴霧燃焼は内燃機関エンジンで使用されており、その台数の多さおよびしばらくは世界中で使われることを考えるとその燃費や環境性能の向上に資することは環境エネルギー問題に重要な意義がある。また、燃焼に限らず、医薬品製造、塗装、食品製造などにも応用分野があり社会的インパクトは大きい。

研究成果の概要(英文)：A novel spray simulation code has been developed, which includes a turbulent atomization model based on the ISS experiments on the role of capillary waves. This code enables highly accurate spray simulations within reasonable resources. The spray formation mechanisms have been clarified and the spray code has been modified to be used in industrial applications. The code can simulate cold and reacting sprays, and its high predictability has been achieved for the first time in this field. This study is highly recognized in the community and the 2019 paper award was given by the Combustion Society of Japan.

研究分野：熱流体工学

キーワード：推進・エンジン シミュレーション工学 国際宇宙ステーション (ISS) 流体工学 噴霧燃焼

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

噴霧燃焼は、自動車、航空機などのエンジンや発電機などのガスタービンなどに幅広く使われており、その応用範囲は広い。また噴霧単体でも、創薬、粉末製造、塗装など多くの分野で使われている。しかしながら、噴霧の形成過程(微粒化)は乱流との関係もあり複雑でありいまだにすべて解明されている訳ではない。そのため、近年盛んになっている数値シミュレーションにおいても噴霧の生成の挙動をうまく解けない。数値シミュレーションの本来の目的である予測という観点からは、これは望ましいものではなく、実際産業界からも噴霧に関係した数値シミュレーションの予測精度の向上は望まれている。

産業界での設計に資する数値シミュレーションでは、実スケールの機器における噴霧の挙動を予測することが求められる。これは、直接数値計算(DNS)のアプローチでは計算機資源の要求が大きすぎるため不可能である。したがって、より粗い格子で非定常の流れ場を扱える Large Eddy Simulation (LES) のアプローチが適当である。LES では格子解像度未満の現象はサブグリッドモデルとして与えなければならない。したがって、モデルの精度が肝要であり、ここでは格子解像度未満のサブグリッド液滴生成機構のモデル化をいかに精度良く作るかが重要になる。残念ながら、既存の噴霧モデルは物理機構を正確に反映していないので予測精度は高くなく、また実験結果を見ながら結果を合わせていくパラメータチューニングが必要になるが、ここは改善が求められるところである。

我々は、これまで、その噴霧の生成から物理過程の予測精度を上げるべく、理論解析、実験、直接数値計算などの手法を駆使して微粒化に関連する物理を探ってきた。それらにより新しく微粒化の物理を体系化してきた。また、国際宇宙ステーションでの長時間実験の機会を得たことで、表面張力波が微粒化に果たす役割について明らかになった。そこで、これらを統合した LES コードを作ることが社会還元として大きなインパクトを持つとの思いに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの微粒化物理の知見に加えて、国際宇宙ステーション実験の知見を組み合わせることで、噴霧の形成過程を物理的に正しく再現するモデルを構築し、LES コードとして組み上げることで社会の求める予測ツールを提供することを目的にする。これにより、国際宇宙ステーションの実験結果の社会還元を図る。

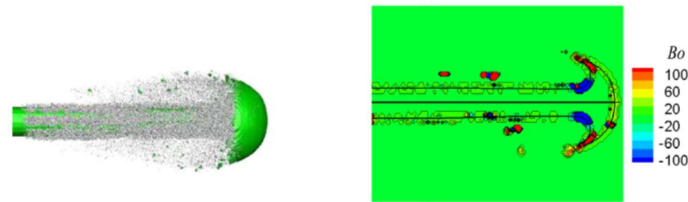
3. 研究の方法

研究は、モデルの構築、数値解析コードへの組み込み、実証という段階を経て行われた。モデルの構築にはこれまでの実験や単純化した解析、直接数値解析に加えて国際宇宙ステーションの実験結果を使用し、理論に基づいて行う。計算コードへの実装は、本経費により整備した並列化 PC クラスタを使用して行う。LES 解析は、過度に大きすぎない計算規模で設計に使用できる精度を出すことが重要であり、10 ノード程度の PC クラスタ規模で十分に計算できるコードを開発する。また、実証として、自動車エンジンの典型的な噴霧の例を解析し、詳細な噴霧の挙動(液柱コアの分裂挙動、液滴特性、霧困気流れ)などを検討することで開発したコードの妥当性を示す。また、コールド噴霧だけでなく、霧困気温度の上昇に対応して蒸発や燃焼の効果も組み込み、それらの噴霧との関連も初めて一貫して解くことで明らかにする。

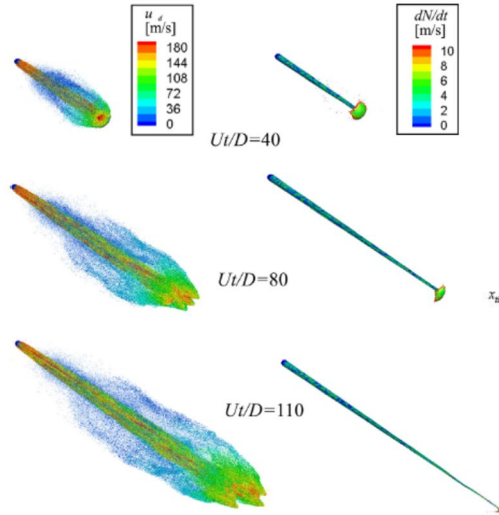
4. 研究成果

微粒化のモデルは、これまでの知見を総合し、乱流微粒化のモードは乱流共鳴モードと Rayleigh-Taylor 不安定性モードによるものとして定式化された。LES で解像できる表面での情報(ウェーバー数とボンド数)の関数として表され、モードマップが作成された[1]。これにより、これまでの実験結果等と一致する挙動を予測することが可能になった。このマップを組み込むには、気液界面を追跡できる LES コードが必要であるが、基本のコードはこれまでに構築してあったので、いくつかの追加の機能を組み込むことで上記の乱流微粒化モデルを組み込むことが可能になった。これにより、LES 解像の意味での気液界面を解く二相流コードと、サブグリッドの液滴を追跡する粒子コードのハイブリッドコードになっている。

まず、噴霧の形成について常温場でのコールド噴霧を解析した[1]。対象は、自動車エンジンを模擬し円形のノズルから静止空气中に高速で液体を噴き込む形状とした。既存の噴霧コードは、ノズル直下の液体比率の高い(濃い)噴霧を解くことができないが、本研究で開発したコードは問題なく解ける。その結果、ノズル直下からの初期の発達(液柱コア頭部の巻き込み)から、液柱コア表面での微粒化、コアの伸展に伴う表面不安定化、最終のコアの消滅および完全な噴霧化、までに至る過程を正確に再現できた(図 1)。この結果に至るまでに、実験結果は参照していない(すなわち既存コードのようなチューニングは施していない)が、結果を計算後に実験結果と比較してみると、液柱コア長さ、液滴径、噴霧形状など重要な特性は予測できていた。これは本研究のアプローチとそのコード化が正しいことを示しており、これまで既存コードでできなかった噴霧の形成を解析できることを初めて示した。



(a) RT atomization at head umbrella edge at $Ut/D=11.2$



(b) Temporal evolution of the spray and liquid core shapes

図1 コールド噴霧での予測[1]。上段：初期の発達、下段：完全発達までの様子。

さらに、エンジン条件に近付けるために、蒸発および燃焼をコードに組み込んだ[2]。そして霧雰気温度を上げたうえで蒸発噴霧の特性および着火の様子を解析した。その結果、蒸発噴霧特有の三重層の形成や蒸気・空気の混合を捉えた。燃焼のケースでは一段総括反応系と多段反応系を比較し、着火に至る過程を比較した。多段反応系では低温酸化反応から高温の着火に至るまでを追跡することができた。

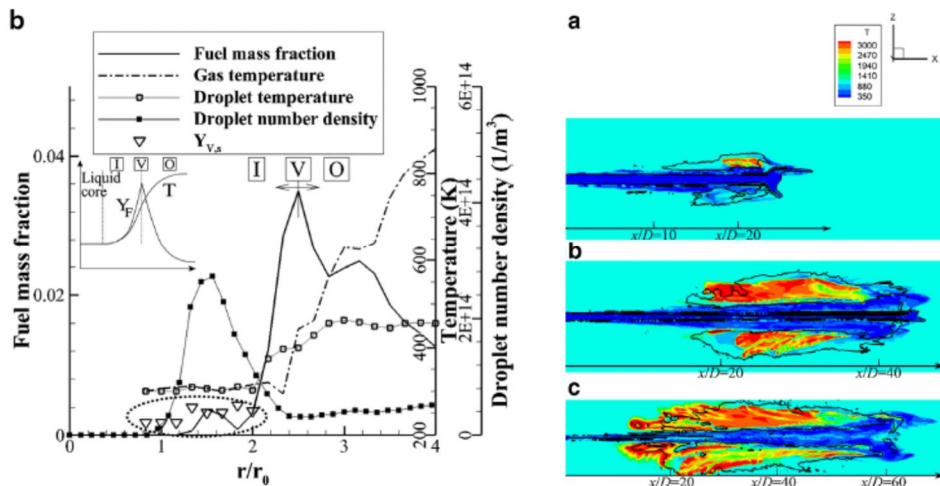


図2 蒸発ケースでの三重層の形成（左）および燃焼ケースでの着火後の温度場（右）[2]。

これらの知見により、噴霧燃焼を使用する機器の設計への適用が可能であることを示した。本研究によりこれまで不可能だった解析が可能になり、産業界に与えるインパクトは大きいと考える。より幅広い適用範囲を目指して今後もコードの改良を続ける予定である。

参考文献

- [1] A. Umemura, J. Shinjo, Detailed SGS atomization model and its implementation to two-phase flow LES, *Combustion and Flame* 195 (2018) 232-252.
- [2] J. Shinjo, A. Umemura, Fluid dynamic and autoignition characteristics of early fuel sprays using hybrid atomization LES, *Combustion and Flame* 203 (2019) 313-333.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 J. Shinjo, A. Umemura	4. 巻 203
2. 論文標題 Fluid dynamic and autoignition characteristics of early fuel sprays using hybrid atomization LES	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 313-333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.02.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Shinjo	4. 巻 11
2. 論文標題 Recent advances in computational modeling of primary atomization of liquid fuel sprays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2971
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/en11112971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Umemura Akira, Shinjo Junji	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Detailed SGS atomization model and its implementation to two-phase flow LES	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.01.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 新城淳史、梅村章
2. 発表標題 ハイブリッドLESによるエンジン条件での乱流噴霧の着火過程に関する解析
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Shinjo, A. Umemura
2. 発表標題 Hybrid LES of turbulent spray ignition under engine conditions
3. 学会等名 37th International Symposium on Combustion (poster) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新城淳史、梅村章
2. 発表標題 実験によるパラメータチューニングを必要としない新しい乱流噴霧ハイブリッドLESコードの開発
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新城淳史、梅村章
2. 発表標題 新しい乱流微粒化モデルに基づく乱流噴霧形成とその蒸発特性に関する解析
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新城淳史、梅村章
2. 発表標題 新しい乱流微粒化モデルによるハイブリッド噴霧LESコードの構築
3. 学会等名 第26回微粒化シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本燃焼学会論文賞受賞: J. Shinjo, A. Umemura, Fluid dynamic and autoignition characteristics of early fuel sprays using hybrid atomization LES, Combustion and Flame, 203 (2019) 313-333

熱流体工学研究室ウェブページ

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~jshinjo/>

熱流体工学研究室の研究

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~jshinjo/research.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梅村 章 (Umemura Akira) (60134152)	公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員 (73905)	