

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02351

研究課題名（和文）新規開発した微粒化・遷臨界蒸発モデルによる航空エンジン燃焼器性能向上の解析

研究課題名（英文）Numerical analysis of aircraft engine improvement using a newly-developed atomization and transcritical vaporization model

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） 7,520,000円

研究成果の概要（和文）：航空エンジン内の噴霧性能を正確に予測する目的で、乱流微粒化モデルが旋回流れにおいても十分な予測精度を持つか確認し、その機構を解明した。エンジン内の旋回流れのせん断の影響は正しくモデルで認識され実験の粒径分布とよい一致を見せた。また液膜の発達の仕方も実験とよい一致を見せた。これにより、我々の提案した乱流微粒化モデルの妥当性を確認し、航空エンジン内での噴霧予測技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、強乱流下における旋回流れ内の微粒化が、局所のせん断に起因するRayleigh-Taylor不安定性による微粒化機構によって決定されていることが分かったこと、提案した乱流微粒化モデルがそれを正しく捉えることができることが分かったことである。これにより、流れ場の形態によってモデルのパラメータなどを変更するなどの操作が必要ではないことが分かった。

社会的には、航空機のエンジンから排出される二酸化炭素や窒素酸化物などは気候変動等の原因となり、持続可能な社会を維持するには燃費効率を向上するとともに排出物の抑制を図らなければならないという要請があり、これに資するものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to establish an accurate numerical simulation model to predict the spray characteristics in aero-engines. Our proposed turbulent atomization model has been evaluated and used to elucidate the mechanism of atomization in a swirled flow. The results indicate that the swirled shear can be accurately captured and included, with good agreement in the droplet size distribution and the liquid sheet shape in comparison with experimental results. This indicates that the turbulent atomization model is well structured and the prediction of aero-engine flows can be possible using the present model.

研究分野：熱流体工学

キーワード：航空エンジン 微粒化モデル スワール流れ 遷臨界

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機のエンジンから排出される二酸化炭素や窒素酸化物などは気候変動等の原因となり、持続可能な社会を維持するには燃費効率を向上するとともに排出物の抑制を図らなければならない。航空機にも電動化の動きはあるが、太平洋や大西洋をまたぐような長距離の航空路線については電気エンジンで実現できたとしてもそれはまだ先の将来であり、依然として(バイオ燃料等を使用したとしても)ガスタービンでの燃焼を利用したエネルギー変換方式の性能向上を図ることには社会的な意義がある。

燃焼効率や排出物特性を決定するのは火炎の噴霧燃焼形態であり、それは燃料と酸化剤の混合特性に依存する。燃料は液体であるので、燃料噴霧の形成が燃焼特性を決定付ける重要な要素となる。現状では、実際の条件での噴霧の様子を実験的に観察するのは容易ではなく、また数値解析における従来の噴霧微粒化モデルは必ずしも予測精度が高精度ではなかった。このため、航空機ガスタービンにおける噴霧特性を正確に予測できる手法が求められている。

2. 研究の目的

我々の研究グループでは、これまでの研究で理論解析、無重力実験(国際宇宙ステーション実験含む)、数値解析などを駆使し、新しい高精度な LES (Large Eddy Simulation) 用乱流微粒化モデルを開発した[1,2]。これは自動車エンジンでの直進ジェット噴霧において良好な予測精度を実現した。本研究では、これを航空エンジンのスワラ流れ(旋回流れ)に適用しその妥当性と改良を行うことで高精度な予測を可能にし、航空エンジンにおける燃焼性能、排出物性能の向上に資することを目的にする。

自動車エンジンの噴霧では燃料を高速で直進形状に噴くため、噴霧の液柱コア内部の乱流と液面でのせん断による微粒化、また液柱ジェットが表面不安定性により変形していくことで起こる Rayleigh-Taylor 不安定性の影響での微粒化、が主要因であった。一方、航空エンジンでは保安のために旋回流れ(スワラ流れ)を利用するが噴出された液体燃料は外側に向かって広がると同時に旋回によるせん断を受ける。このため、このような条件での微粒化特性を正しく予測できるか検討し、改良が必要であれば実施する。

3. 研究の方法

数値解析は、いくつかのステージを用意し精度の検討を行う。本研究で使用する LES 計算コードは、我々が開発した TATM-MEX コード[1,2]である。まずはスワラ近傍の流れ場に着目した計算領域での検証計算を実行する。その後、領域を広げ下流側の全体の旋回流れを入れた形態での解析を実施する。

スワラ噴射器は、株式会社 IHI で実施された実験を模擬して二重反転スワラとしてある。なお、スワラ内のベーン等の構造は容易には解けないため、流入条件として旋回をかける。参照データとして、東北大学および株式会社 IHI で実施されたコールドフローの微粒化実験のデータを利用させていただき研究協力を得ることができた。ここに記して謝意を表したい。この実験では、局所および全体の液滴径分布を測定している。

また、微粒化モデルの展開として、燃焼器圧力が高圧側にシフトしたときの亜臨界から遷臨界への遷移についてもモデルを拡張する。

4. 研究成果

(1) 近傍場の微粒化特性

まずは近傍場での微粒化特性を探った。ここでは、領域は $316\text{mm} \times 137\text{mm} \times 137\text{mm}$ とし、雰囲気圧は 7 気圧、空燃比は 10 とした。図 1 に 2 つの時刻での液滴径分布を示す。いずれの時間・位置においても小粒径側にピークを持つ液滴径分布を得ている。なお、(直接のデータはここでは示せないが)実験による計測でのピーク径および分布と本解析の結果はきわめて類似になっている。また液膜形状も旋回流れの特有の広がり方をしており、軸中心上およびコーナー部での再循環領域の形成を確認している。なお、液膜の形状も実験との比較を行い良好な結果を得ていることを確認している(実験の結果は現時点ではここには掲載出来ない)。なお、下流側中心軸上にある分裂途上の液膜の残りは初期条件の影響(初期に流れ場に旋回をかけていない)によるものと思われる、このため(2)で初期旋回をかけた流れ場を解いている。

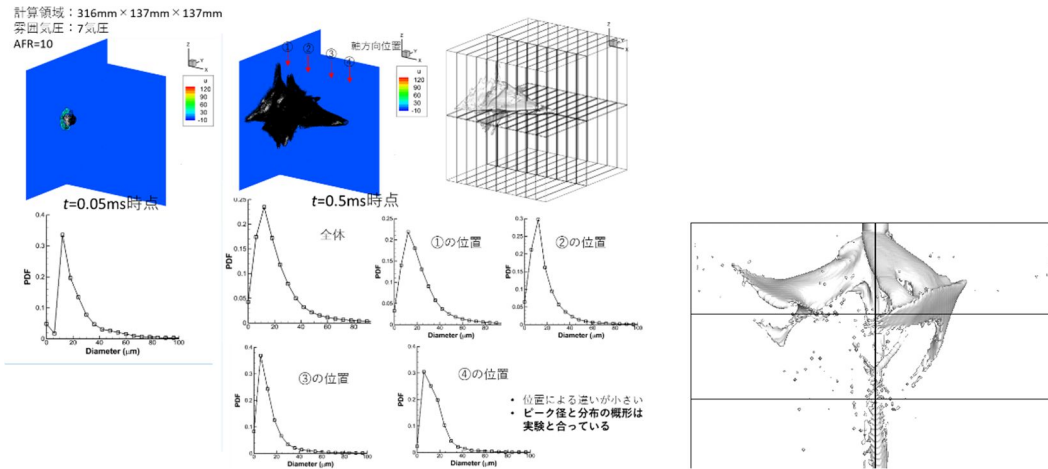


図1 近傍場の微粒化特性。(左) 粒径分布 (右) 液膜形状 (2.1ms 時点)

(2) 旋回流れ

旋回流れの解析を格子解像度を上げて総格子点数 1.08 億点の解析として行った。静止気体中での計算開始を行った際に比べて初期には相対的に局所のせん断が若干減じるがその影響を見た。全体に旋回をかけることで中央の再循環領域の発達が促進され外側に広がる液膜の形状が捉えられている。この場合の微粒化特性も同様の結果を得ている。このため、旋回をかけても同様の結果を得ることができる。

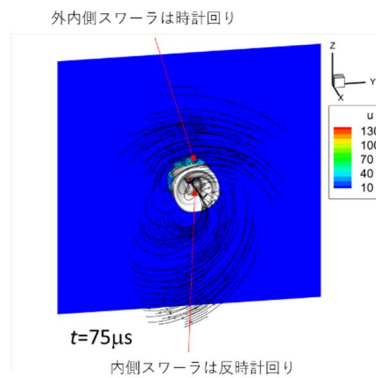


図2 発達途中の旋回流れ

微粒化による生成液滴の粒径分布を実験との比較でみると、良好に再現できている。これは強乱流の条件下では Rayleigh-Taylor 不安定性によって微粒化が促進されるためと考えられ、これまで提案してきた乱流微粒化モデルの考え方が旋回流においても正しいことが分かる。これにより、流れ場の形態によってモデルの中身のパラメータなどを変更するなどの操作が必要ではないことが分かったことは汎用性という点で意義は大きい。

(3) 遷臨界への展開

霧困気圧が亜臨界から遷臨界に移ると気液の区別が曖昧になり気液界面がぼやけてくる。このような流れ場においても密度が局所的に高い液塊様のものが分断していくことが知られている。このような場に亜臨界の手法を援用するため、TATM-MEXにおいて Lagrange 粒子追跡の数値手法は残しつつ臨界点付近の疑似沸騰を組み込んだ[3]。これにより、亜臨界の微粒化と同様に遷臨界での液塊の分断およびその後の混合を扱える計算コードを開発した。

以上の結果、航空用エンジンの燃焼器においても予測が可能なコードを構築した。これらの結果は実際の設計の現場においても有用であると考えられる。

< 引用文献 >

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

processes in high-pressure liquid-injectant engines," Proceedings of the Combustion Institute, 38 (2021) 3107-3129.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Umemura Akira, Shinjo Junji	4. 巻 38
2. 論文標題 A new LES approach to trans-critical mixing and combustion processes in high-pressure liquid-injectant engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3107 ~ 3129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proci.2020.07.031	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 新城淳史、梅村章
2. 発表標題 遷臨界域におけるLESのための噴霧微粒化モデル
3. 学会等名 第30回微粒化シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Umemura
2. 発表標題 A new LES approach to trans-critical mixing and combustion processes in high-pressure liquid-injectant engines
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J Shinjo
2. 発表標題 Spray autoignition LES using a tuning-free turbulent atomization model
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics & European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

島根大学熱流体工学研究室ウェブページ
<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~jshinjo/>
島根大学熱流体工学研究室ウェブページ
<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~jshinjo/index.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)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------