

壁面の濡れ性が壁面衝突を伴うクロスフロー型液体燃料噴流の微粒化・蒸発に及ぼす影響に関する数値的検討

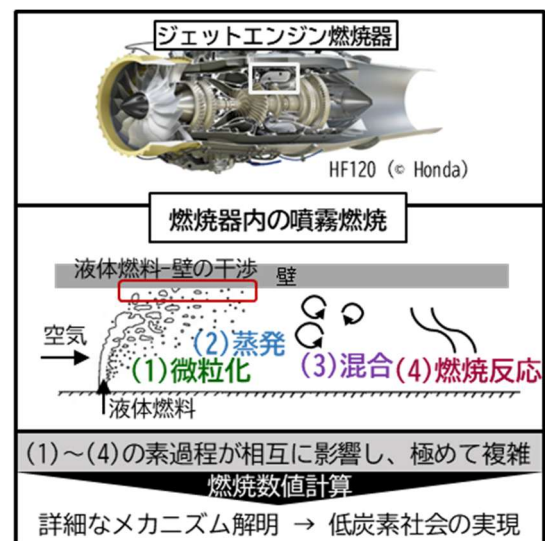
工学研究科機械理工学専攻 熱物理工学研究室

博士後期課程 3 年 北田 絢也

本資料にて紹介する研究論文は、申請者が第一著者として査読付き国際ジャーナル Physics of Fluids (IF = 4.1 (2023)) にアクセプトされた原著論文[1]である。タイトルは「Surface wettability effect on atomization and evaporation of wall-impinging liquid fuel jets in crossflow」で、ガスタービンエンジンの燃焼器内で起こる、壁面衝突を伴う液体燃料の微粒化・蒸発メカニズムを数値解析により明らかにしており、その概要を以下に示す。

■緒言

低炭素社会の実現に向けて、自動車や航空機のエンジンには、二酸化炭素(CO_2)・窒素酸化物(NO_x)排出量の削減や、従来の炭化水素系燃料からカーボンフリー燃料(水素、アンモニアなど)への置き換えが求められている。これらの要請を受けたエンジン開発を迅速に進めるためには、燃焼器内で起こる現象メカニズムの解明と燃焼挙動の高精度予測が重要である。特に航空機のエンジンの燃焼器には、液体燃料噴流を壁に衝突させて霧状に微粒化させることで、酸化剤との混合を良くして燃焼させる噴霧燃焼方式が広く採用されている(図1参照)。しかし、噴霧燃焼は、液体燃料の微粒化、燃料液滴の蒸発、燃料蒸気と空気の混合、燃焼反応などの素過程が同



時かつ相互に影響を及ぼしながら起こる極めて複雑な現象であるため、その詳細なメカニズムは十分に解明されていない。そこで、近年の計算機性能の急速な向上から、数値解析への期待がますます高まっている。しかし、前述のような液体燃料の壁との干渉を伴う場合、液体と固体表面の親和性(すなわち、壁面の濡れ性)の違いが液体燃料の微粒化・蒸発挙動に影響を及ぼすと考えられるが、モデリングの複雑さと計算コストの高さから、その影響はこれまで明らかにされていない。

したがって、本研究の目的は、3次元の直接数値シミュレーションにより、壁面衝突を伴う液体燃料噴流における、壁面の濡れ性の違いが微粒化・蒸発挙動に及ぼす影響を解明することとする。

■計算手法

本研究では、申請者が開発してきた気液二相流用のインハウスコード FK³[2]を用いて、3次元の直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation: DNS)を実施する。また、液体燃料の微粒化から蒸発までのマルチスケールな現象に対して、計算コストの抑制に有効なオイラー・ラグランジュ法を採用する。この手法では、微粒化前の液柱や大径液滴の気液界面はオイラー的に計算格子で解像する一方、十分な格子解像度を確保するのが難しい微粒化後の小径液滴は質点近似のラグランジュ液滴として追跡する。さらに、液体燃料噴流が壁面と干渉する際の、液体と固体表面の親和性(すなわち、壁面の濡れ性)は接触角モデルにより考慮し、壁面の濡れ性は接触角を 30°, 90°, および 150° と設定することにより変化させる。接触角の詳細は次ページで説明する。

■結果および考察

本論文では、高温壁面への衝突を伴う液体燃料噴流の微粒化・蒸発現象に関する一般的特徴を述べたのち、壁面の濡れ性の違いが、液体燃料噴流の微粒化、蒸発、壁面からの熱伝達に及ぼす影響を明らかにしている。本資料ではスペースの都合上、一般的特徴、および壁面の濡れ性の違いが微粒化に及ぼす影響のみを以下に述べる。

図2に、接触角を(a)30°、および(b)150°と設定した壁に衝突する液体燃料噴流の瞬間分布を示す。ここで、接触角とは、液体の自由表面と壁面とのなす角を指し、前述の壁面の濡れ性を表す指標としてよく用いられる。具体的に、接触角が大きいことは、液体と壁の親和性が低く、濡れ性が低い状態を意味する。図より、いずれのケースにおいても、下側の壁から噴射された液体燃料は壁面衝突により壁面に液膜を形成し、液膜から多数の小径液滴が分裂することがわかる。また、微粒化前の液柱や微粒化後の液滴の気液界面から蒸発が起こることがわかる。さらに、接触角の増大に伴い、液膜が壁面からより上流で離れることにより、微粒化が促進され、微粒化した液滴からの蒸発もより活発に起こることがわかる。

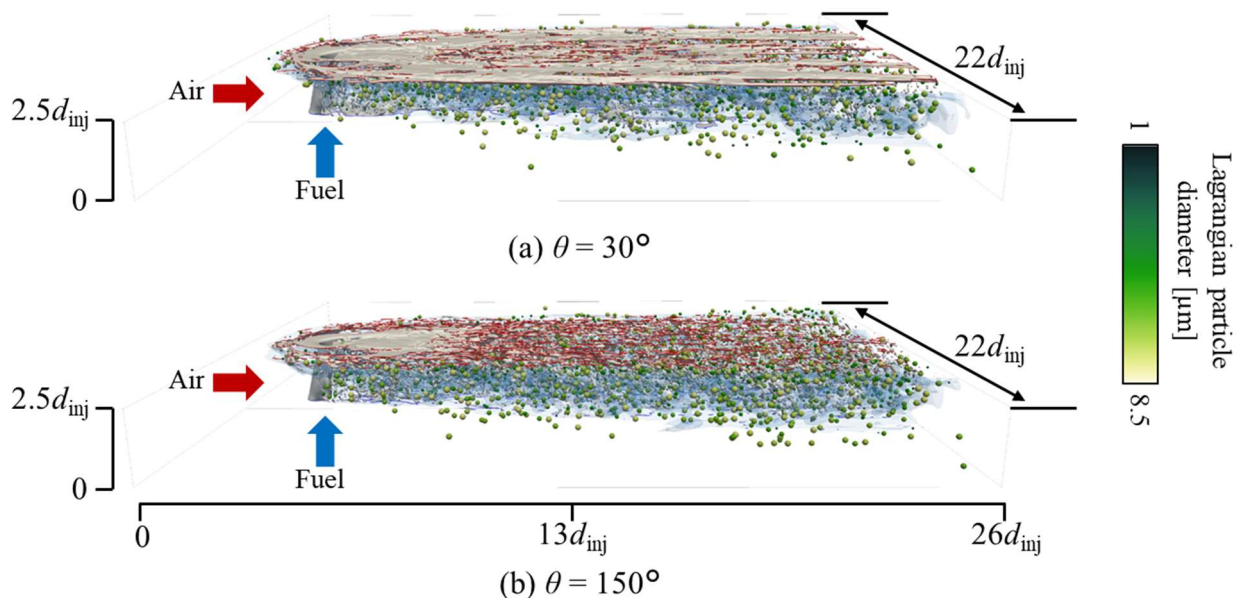


図2 接触角を(a)30°、および(b)150°と設定した壁に衝突する液体燃料噴流の微粒化・蒸発現象における、 $t=0.25\text{ ms}$ での気液界面、および燃料蒸気の質量分率が0.05の等値面。赤色、および青色の等値線はそれぞれ、上側、および下側の壁面上に形成された液膜の接触線（固-液-気の交線）である。粒子はラグランジュ液滴であり、その直径で色付けしている。

■結言

オイラー・ラグランジュ法を用いた3次元DNSにより、壁面の濡れ性の違いが、壁面衝突を伴う液体燃料噴流の微粒化・蒸発現象に及ぼす影響を調査した。濡れ性は、接触角を境界条件として用いる接触角モデルにより考慮し、接触角を30°、90°、および150°と変化させて3ケースの計算を実施した。その結果、いずれのケースについても、壁面衝突により形成された液膜が液滴へと微粒化し、その気液界面から蒸発することがわかった。また、接触角の増大に伴い、液膜が壁面からより上流で離れることにより、微粒化、および蒸発が活発に起きる一方、高温壁面からの伝熱量は減少することがわかった。

【参考文献】 [1] K. Kitada et al., *Physics of Fluids*, 37, 033315 (2025).

[2] R. Kurose, FK³, http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link_e.php.