

2024年4月25日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

ガスタービンにおける液体燃料の 微粒化機構を解明し数理モデルを開発

－ CO₂・NO_x 排出量をさらに減らす次世代燃焼器開発での利用に期待 －

【発表のポイント】

- 燃料噴射弁から噴射された燃料液膜の破断・分裂は、液滴の衝突により生じることを発見しました。
- 燃料液膜が振動・変形し、破断して大小様々な液滴になる過程（微粒化機構）を明らかにしました。
- 開発した微粒化数理モデルに噴射弁の形状・寸法と燃料・空気の流速・物性値を入力すれば、実験データに基づくチューニング無しで燃料噴霧の粒径分布を予測できるフレームワークを構築しました。
- 本研究は経験則的研究開発からの脱却への一歩であり、マルチスケールの複雑な気液二相流現象の根源的理解に肉薄する新しい取り組みです。

【概要】

航空機や発電機用ガスタービンの燃焼器の設計には、燃料噴霧の粒径や空間分散の予測が不可欠です。これまでは実験経験則に基づく推算式しかなく、複雑な微粒化過程の物理機構に基づく汎用的な噴霧粒径分布の予測手法はありませんでした。2050年カーボンニュートラルの実現へ向けたさらなる二酸化炭素（CO₂）排出量削減には、燃料噴霧の粒径や空間分散を予測できる汎用的な技術を開発し、燃焼器の設計に生かす必要があります。

東北大学流体科学研究所の大島逸平助教、神戸大学海事科学研究科の宋明良教授らの研究グループは、ガスタービンの燃焼器で用いられる気流式液膜噴射弁に注目し、噴射される燃料液膜の微粒化過程の解明とモデル化を推進してきました。

その結果、気流により振動・変形する液膜の破断が、従来考えられていた気流の乱れや分子間力ではなく、高速膨張する液膜が浮遊する液滴に衝突して生じることを発見しました。また高速度カメラやレーザー計測装置を巧みに使った実験により、液膜が大小様々な液滴群に微粒化する過程を数理モデル化し、物理機構に基づいた燃料液滴径分布の予測モデルを構築しました。

本成果は経験則的設計開発から脱却する最初の一步であり、4月24日（現地時間付け）で流体力学の専門誌 Journal of Fluid Mechanics に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、航空機や発電機で用いられるガスタービンも、CO₂排出量の大幅削減や新燃料の導入へ向けた研究開発が強力に進められています。

ガスタービンの燃焼器内では、燃料噴射弁から噴射された液体燃料を微粒化して微小液滴からなる燃料噴霧を形成しますが、噴霧特性の高精度制御が不可欠です。しかし、燃料の微粒化過程はマルチスケールの複雑な高速気液二相流動現象です。このため、その詳細な微粒化メカニズムは明らかにされておらず、噴射弁を試作・試験するサイクルを繰り返すことで、噴霧の粒径分布や空間分布などを制御していました。

東北大学流体科学研究所の大島逸平助教、神戸大学海事科学研究科の宋明良教授らの研究グループは、気流式液膜噴射弁から噴射される燃料液膜の複雑な微粒化過程を多数の素過程に分解し、高速度可視化実験や数値シミュレーションを駆使して各々の物理機構を解明して数理モデルを構築してきました（参考文献1~3）。

今回の取り組み

並行高速気流によって液膜が振動・変形する過程を高速度拡大撮影した結果、気流を受けて袋状に急速膨張する液膜の破断は、気流の乱れや分子間力などにより生じると予想されてきましたが、液膜が浮遊液滴に衝突することで生じることを発見しました（図1）。その後、穿孔が生じた液膜が表面張力によって収縮する破断端においてマイクロメートルサイズの微小液滴が形成され、残った液は縁に集まって液糸となり、最終的に大液滴群を形成することがわかりました。この複雑な微粒化過程を素過程に分解し、各々の特性を予測する数理モデルを構築し、最終的に実験相関式を必要としない、物理機構に基づく機構論的な噴霧粒径分布の予測のフレームワークを初めて構築しました（図2）。

構築した噴霧粒径分布予測モデルの妥当性検証のため、破断端で形成される微小液滴径分布はレーザー計測し、大液滴径分布は画像解析によって実測しました。その結果、実験値と推算値は良好に一致することが確認され、提案モデルの妥当性が確認されました。

今後の展開

本研究で開発した物理機構に基づく噴霧粒径分布予測体系は、ガスタービン燃焼器の経験則的研究開発からの脱却へ進む革新的な一歩であるのみならず、マルチスケールの複雑な気液二相流動現象の根源的理解に肉薄した新しい取り組みであり、今後の研究開発を加速させることが期待されます。また、近い将来には、噴霧の3次元空間分布の予測にも応用が期待されます。

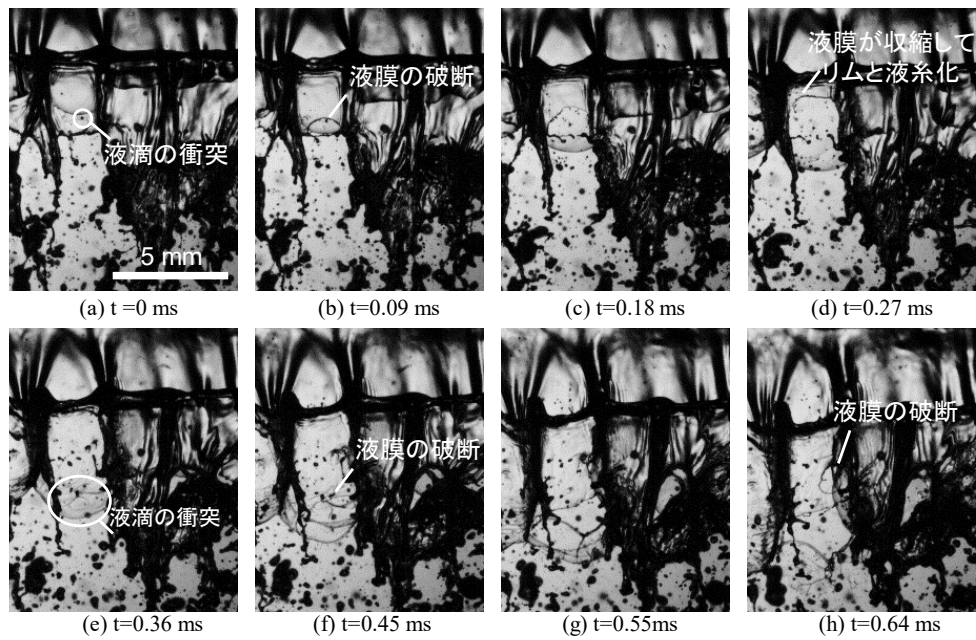


図 1. 液滴の衝突によって液膜が破断する様子

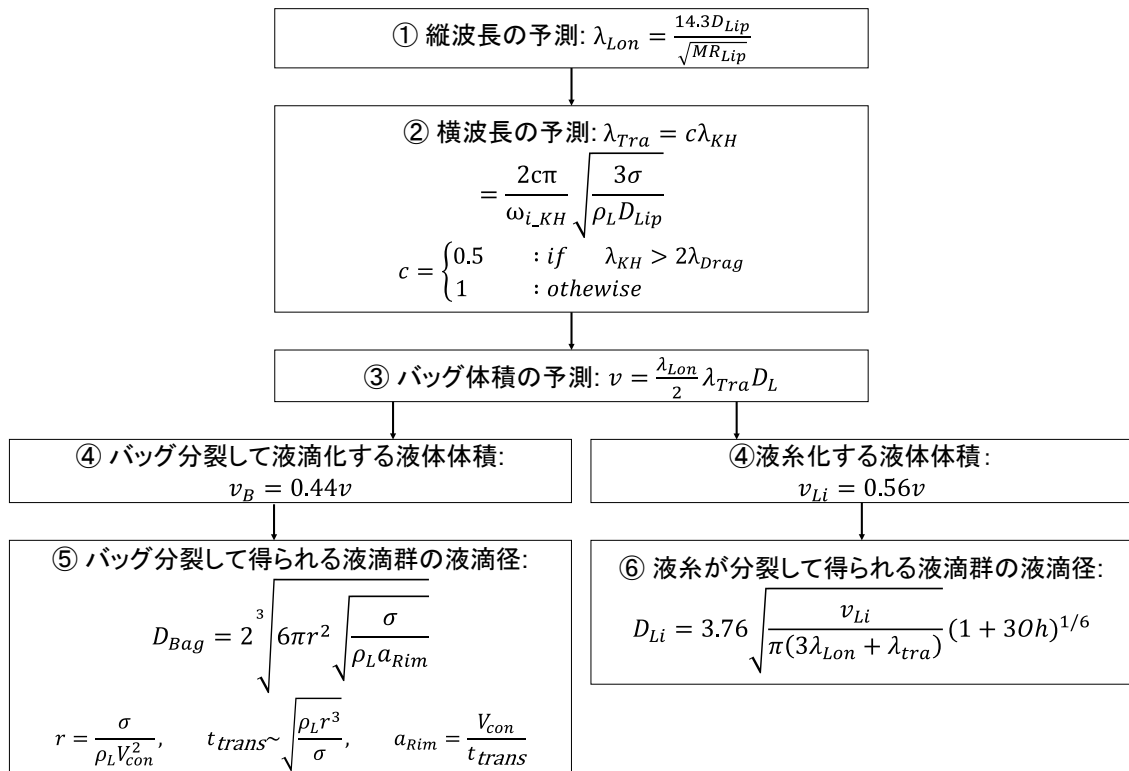


図 2. 液膜の振動特性や液滴粒径を予測する微粒化予測体系

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K23489、JP19KK0110、JP21K14084 の助成を受けて実施されました。また大島逸平助教は「神戸大学の多数の学生に実験および画像解析にご協力いただきました。宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

の松浦一哲氏には長年にわたり多大なご協力とご助言をいただきました。ここに謝意を表します」と述べています。

【参考文献】

1. Ippei OSHIMA, Akira SOU, Numerical Simulation of Liquid Sheet Deformation Caused by Air Flow, Transactions of the Japan Society For Aeronautical And Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 16(4), 2018, DOI: 10.2322/tastj.16.319
2. Ippei OSHIMA, Akira SOU, Longitudinal Oscillation of a Liquid Sheet by Parallel Air Flows, International Journal of Multiphase Flow, 110, 2019, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.09.010
3. Ippei OSHIMA, Akira SOU, Transversal Oscillation of a Planar Liquid Sheet Induced by Co-Current Airflows, Multiphase Science and Technology, 33(2), 2021, DOI: 10.1615/MultScienTechn.2021038042

【論文情報】

タイトル : Air-blast atomization of a liquid film

著者 : Ippei Oshima*, Akira Sou

*責任著者 : 東北大学流体科学研究所 助教 大島逸平

掲載誌 : Journal of Fluid Mechanics

DOI : 10.1017/jfm.2024.279

URL: <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.279>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学流体科学研究所

助教 大島逸平

TEL:022-217-5313

Email: i.oshima@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学流体科学研究所

広報戦略室

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp