



気流に誘起される液膜微粒化機構の解明と噴霧粒径モデルの構築

大島, 逸平

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2019-03-25

(Date of Publication)

2020-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7531号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007531>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 大島 逸平専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

気流に誘起される液膜微粒化機構の解明と噴霧粒径モデルの構築指導教員 宋 明良 教授

航空機、船舶、発電などで用いられるガスタービンでは、燃費低減、CO₂、NO_xの排出量削減を両立することを目的に、燃料噴射制御技術に技術革新が求められている。ガスタービンエンジンでは、高速な気流によって燃料液膜を微粒化させる噴射弁であるエアープラスタトマイザーがしばしば用いられている。実機のエアープラスタトマイザーでは、円環状の液膜を噴射し、その液膜を挟み込むように気流を噴射する。このとき、液膜の内側及び外側を通過する気流は時計回りないしは反時計回りに旋回がかかっている。この噴射弁がもつ多数ある設計因子のうち一つの設計因子を変化させると、他の複数の設計因子との相互作用により噴霧の微粒化特性が複雑に変化するため、全ての設計因子の最適化は容易ではない。そこで、旋回などの影響を排除して現象を理解するために、平面液膜式の燃料噴射弁を用いた研究が多数報告されているが、この平面液膜式の燃料噴射弁であっても、実験によらない微粒化特性の予測は未だ達成できていない。

この噴射弁から噴射された平面液膜の微粒化過程は一次微粒化過程と二次微粒化過程に分けられる。そのうち、噴射弁近傍における一次微粒化過程では、液膜と周囲気体の相互作用によって液膜が変形し(以下、初期変形過程とする)、液糸、液滴へと微粒化する。また、二次微粒化過程では、一次微粒化によってできた液糸・液滴がより微細な液滴へと分裂する。このように、液膜の初期変形過程が微粒化特性に大きく影響を与えているものの、従来研究では、微粒化特性を予測するにあたり、最終的な噴霧粒径のみに着目して研究が行われていた。

そこで本研究では、気流による燃料液膜の微粒化過程における初期変形過程を含む一次微粒化過程を明らかにし、噴霧粒径の機構論的予測体系を構築することを最終的な目的とした。本目的を達成するために、『液膜の初期変形過程における支配因子の特定および支配因子が初期変形過程に与える影響の把握』、『液膜の縦振動特性の把握』、『液膜の横振動特性の把握』、『気流に誘起された平面液膜流の微粒化機構を基にした噴霧粒径モデルの構築』の4点に着目して研究を行った。

本論文は7章により構成されている。

第1章では、序論として研究の背景や先行研究について説明し、本研究の位置づけを明らかにしたうえで、本研究の目的を説明した。

第2章では、研究方法として数値解析の手法、実験装置の概要、可視化計測および光学計測の方法について説明した。

第3章では、液膜の初期変形過程における支配因子の特定および気液物性値である気液流速 V_G, V_L , 気液密度 ρ_G, ρ_L , 気液粘性係数 μ_G, μ_L や噴射弁幾何形状などの各支配因子が初期変形過程に与える影響の把握を目的として、噴射弁近傍における初期変形過程の数値解析を行い、各支配因子が液膜の振動波長および振動変位の成長率などに及ぼす影響を系統的に調べ、以下の結論を得た。

- (1) 本研究で用いた PLIC 型 VOF 法に基づく数値解法は、気流に誘起される液膜流の振動特性を良好に解析することができる。
- (2) 気液各相を隔てるリップの後流が、気液界面における気相速度勾配を低減するため、リップをもつ液膜振動は緩やかに成長する。
- (3) 液膜の初期変形過程に対しては、気液の流入速度差ではなく気液界面での気相速度勾配が支配的である。
- (4) リップが存在すると、気液界面の気相速度勾配は V_G ではなく V_L に依存するため、 V_L が液膜の初期変形過程に対して支配的である。
- (5) 気液の粘性係数 μ_G, μ_L は液膜振動の成長を抑制する効果をもつため、リップレイノルズ数 Re_{Lip} および液相レイノルズ数 Re_L が小さいと、液膜初期変形での成長率は抑制される。
- (6) 液膜の振動波長 λ_{Lon} は気液の運動量フラックス比の平方根 $\sqrt{\rho_L V_L^2 / (\rho_G V_G^2)}$ に比例する。

第4章では、液膜の縦振動特性の汎用相関式構築、定式化を目的として、先行研究をもとに液膜の振動現象を考察し、振動波長 λ_{Lon} の相関式を構築した。そのうえで、気液物性値 $V_G, V_L, \rho_L, \rho_G, \mu_L$ および噴射弁の幾何形状として液膜厚さ D_L とリップ厚さ D_{Lip} が気流による燃料液膜流の液膜振動特性に与える影響を明らかにするため、平面液膜式気流微粒化過程の可視化計測を行い、以下の結論を得た。

- (1) 気流による液膜の微粒化様式は、先行研究で提示された運動量フラックス比 MFR のみで分類することができない複雑な現象である。

- (2) 本実験の範囲では、液相粘性係数 μ_L が液膜の振動周波数 f_{Lon} や振動波長 λ_{Lon} に及ぼす影響は小さく、 μ_L の影響を無視することができる。
- (3) 気相の境界層厚さを D_{Lip} とみなすことで、リップ厚さを代表長さとしたリップ運動量比 MR_{Lip} を新たに提案し、この無次元数が液膜振動特性の主な支配因子であることを示した。
- (4) 気液物性値および噴射弁の幾何形状の主要な支配因子を抽出して λ_{Lon} の無次元相関式 $\frac{\lambda_{Lon}}{D_{Lip}} = \frac{14.3}{\sqrt{MR_{Lip}}}$ および f_{Lon} の相関式 $f_{Lon} = \frac{0.095V_G}{\sqrt{\rho_L/\rho_G} \sqrt{D_L D_{Lip}}}$ を提案し、実験結果との比較によって、これらの相関式が妥当であることを確認した。

第5章では、液膜の横振動特性の定式化を目的として、液膜微粒化の可視化実験を行い、液膜の加速運動に着目した線形安定性解析を行い、横波長 λ_{tra} の予測モデルを提案した。そのうえで、平面液膜式気流微粒化過程の可視化計測を行い、以下の結論を得た。

- (1) Kelvin-Helmholtz (KH) の不安定性による加速運動に起因する Rayleigh-Taylor (RT) の不安定性により液膜に皺ができ、横波長が形成される。
- (2) KH と RT の不安定性によりできた皺と皺の間に気流が衝突し、バッグができる。
- (3) バッグの形成過程において、KH の不安定性によって形成された横波長が長い場合に、液膜が気流により受ける抗力により生じる加速運動に起因した RT の不安定性により、新たな皺ができ、横波長が短くなることがあることがわかった。
- (4) KH の不安定性による加速運動と液膜が気流により受ける抗力による加速運動に起因する RT の不安定性理論に基づき、修正係数などを用いない横波長 λ_{tra} の予測モデルを提案し、その妥当性を確認した。
- (5) 以上より、液膜微粒化では、KH の不安定性による加速運動と液膜が気流により受ける抗力による加速運動の二種類の加速運動が、液膜のスパン方向振動特性を決定することがわかった。

第6章では、気流による燃料液膜流の微粒化過程のモデル化による機構論的噴霧粒径予測モデルの構築を目的として、バッグとリガメントの形成および分裂過程の可視化を行い、以下の結論を得た。

(氏名： 大島 逸平 NO. 4)

- (1) バッグは、バッグが伸びきって分裂するよりも、空間中を飛翔する液滴やリガメントなどに衝突することで分裂する。
- (2) リガメントの形成は、バッグの分裂直後に生じ、リガメントの分裂は、リガメントの形成過程と並行して起きる。リガメントは Rayleigh の不安定性により分裂する。
- (3) 大気圧条件下の水膜の場合、バッグ分裂後の液体の収縮速度は概ね 5 m/s となり、バッグ分裂時の液膜厚さは約 6 μm である。
- (4) 表面張力波と RT の不安定性理論をもとに、バッグ分裂によって生成される液滴群の平均粒径予測モデルを構築した。バッグが破断直後に穿孔のリムより生じる微小液滴の平均粒径 D_{Bag} は概ね 16 μm と推算され、その値は計測結果とよく一致する。
- (5) リガメント分裂によって生成される液滴群の平均粒径の予測モデルを構築した。その予測値は計測値よりも若干大きいのが、気流流速 V_G の上昇とともに減少する傾向を表現できており、概ねよく予測できる。

第7章では、これまでの章で得られた知見を総括し、本論文をまとめた。

以上、本研究では従来液体微粒化研究において考慮されていなかった燃料噴射弁の幾何形状に着目し、リップ厚さが初期変形過程の支配因子であることを明らかにした。加えて、気液物性値や噴射弁幾何形状が液膜の初期変形過程および微粒化過程に及ぼす影響を明らかにし、最終的に微粒化過程のメカニズムをもとに噴霧粒径を予測する手法を構築できた。今後、本研究の成果がガスタービンの燃料噴射弁の開発において重要な役割を果たすことを期待できる。

氏名	大島 逸平		
論文題目	気流に誘起される液膜微粒化機構の解明と噴霧粒径モデルの構築		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	宋 明良
	副査	教授	西尾 茂
	副査	教授	段 智久
	副査		
			印
要 旨			
<p>本学位申請論文では、船舶、航空機、発電などで利用されるガスタービンの熱効率向上と排ガス削減の鍵となる、燃焼室内燃料噴霧粒径分布の汎用高精度予測モデルを構築するために、従来の実験相関式に基づく噴霧粒径予測モデルから脱却し、系統的な数値実験と高速度可視化計測実験によって燃料液膜流の複雑な微粒化過程を解明した上で、各素過程を流体力学に立脚したモデルで表し、独自の機構論的燃料噴霧粒径予測モデルが構築され、その妥当性が検証されている。</p> <p>具体的には、ガスタービンで採用されている気流式液膜噴射弁で見られる、高速並行気流に伴われて噴射される液膜の変形と微粒化過程の数値シミュレーションおよび高速度可視化実験ならびに噴霧粒径の光学計測実験が実施され、幅広い流速条件下で噴射される平行気液二相流に関するケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定性による液膜の縦振動、液膜の加速運動によるレイリー・テイラー(RT)不安定性による液膜の横振動、気流を受けた振動液膜のバッグ状大変形、液滴衝突によるバッグ破断およびその直後に形成されるリガメントの表面張力によるレイリーの不安定性による分裂、という一連の素過程について流体力学的に精査解明し、これら一連の各素過程に関する物理機構に立脚した機構論的噴霧粒径予測モデルが提案され、噴霧粒径光学計測結果との比較によって、その妥当性が検討されている。</p> <p>本学位論文の第1章では、本論文の背景、先行研究のレビュー、目的が記述されている。</p> <p>第2章では、本研究で行われた気液二相流の数値解析手法および大気圧下と高雰囲気圧下で行われた可視化・計測実験の装置と方法について説明されている。</p> <p>第3章では、高精度界面追跡法に基づく数値シミュレーションによって、初期液膜厚さやリップ厚さなどの燃料噴霧弁の幾何形状因子、気液両相の噴射速度、燃焼室内圧力などの主要な支配因子が、高速気流と並行して噴射される液膜の KH 不安定性による縦振動特性に及ぼす影響が明らかにされ、それらを予測できる相関式構築を目的として、系統的な数値実験が行われている。その結果、ガスタービン特有のリップ後流における液膜界面での気相速度勾配が、燃料液膜の縦振動特性を支配していることを明らかにし、液膜縦振動波長に関する独自の汎用無次元相関式を提案している。</p> <p>第4章では、ガスタービンで想定される幅広い条件に対して適用可能な液膜縦振動波長の汎用的な無次元相関式を構築することを目的として、大気圧下及び高雰囲気圧下での液膜縦振動過程の高速度可視化実験が行われ、画像解析によって縦振動周波数に関する膨大な実験データベースを獲得している。その上で、新しくリップ運動量比という無次元数を提案し、この無次元数に基づく液膜縦振動の波長と周波数に関する独自の汎用相関式を提案している。</p>			

氏名 大島 逸平

第5章では、平面液膜が縦振動した後に生じるスパン方向振動過程の高速度可視化実験が行われ、縦振動による液膜の加速運動および高速気流による液膜の加速運動に基づくRT不安定性による液膜のスパン方向振動波長に関する予測モデルが提案され、その推算結果と本実験結果が比較検討されている。その結果、液膜噴出直後の縦振動による加速運動に加えて、気流による加速運動に基づく波長低減効果によって、スパン方向振動波長が決まることが検証され、本提案相関式の妥当性が検証されている。

第6章では、気流式液膜噴射弁における液膜の振動と微粒化過程の拡大高速度撮影実験が行われている。その結果、この複雑な微粒化過程は、縦振動、横振動、気流によるバッグ形成、液滴衝突によるバッグ破断、バッグ破断面収縮に伴う微小液滴生成、リガメント形成と分裂という素過程で構成されることが解明されている。その上で、縦波長、横波長、バッグ厚さと体積、バッグ破断面生成液滴径、リガメント体積と径、リガメント分裂液滴径を順に求める機構論的噴霧粒径予測モデルが構築され、本研究で獲得された実験結果との比較によって、その妥当性と有用性が検証されている。

第7章では、結論が総括されている。

なお、第3章と第4章を構成する内容は、各々本学位申請者が第一著者として査読付き英文学術専門誌に掲載されている。また、第3～5章の内容の一部については、学位申請者本人によって第一著者として国内会議において4回、国際会議において英語で2回の口頭発表が行われている。

このように、本論文はガスタービンの燃焼特性を左右する燃料噴霧形成過程の解明と機構論的噴霧径分布予測モデルの構築に関して取り組まれたものであり、ガスタービンの設計開発に資する重要な知見を得たものとして価値のある内容の集積である。また、本研究は適切な研究課題が設定され、独創性と創造性に満ち、科学的な論理展開がなされていると判断され、本申請者は課題解決のための研究計画力と実行力、十分な専門知識とその応用展開力、論文作成力を有していると判断される。

以上より、提出された論文は海事科学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の大島 逸平は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。