

氏名 (本籍)	神谷 朋宏 (愛知県)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第590号
学位授与日付	令和3年3月25日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	スクラムジェットエンジンの実現に向けた高速気流による液滴微粒化特性 (Characteristics of liquid drop breakup by high speed gas flow for realization of scramjet engine)
学位論文審査委員	(主査) 教授 佐々木 実 (副査) 教授 高橋 周平 教授 宮坂 武志

論文内容の要旨

超音速航空機や宇宙往復機への利用が期待されているスクラムジェットエンジンでは、燃焼器に高速で流入した気流に対して垂直に液体燃料が噴射され、微粒化、蒸発、空気との混合を経て燃焼を行う。高速気流中での燃焼であるため燃焼完了までを数ミリ秒に収める必要があり、微粒化完了までの時間短縮や、微粒化により形成される微細液滴径を小さくすることによる蒸発促進が重要となる。そのため、微粒化の完了に要する時間や、微細液滴径分布を予測することは、エンジン設計において有益である。高速気流に対して噴射された液体燃料は、まず液体噴流の崩壊によって大きな液塊が形成され、さらに液塊が微粒化されることで微細液滴が形成される。本研究では、後者の液塊微粒化過程 (secondary breakup) について高速気流である高 Weber 数の流れによる微粒化に注目し、液滴微粒化開始及び完了時間の予測式の導き、微細液滴粒径分布特性を明らかにした。

本研究では衝撃波管により高速気流を発生させ鉛直下向きに落下する液滴と干渉させることで、液滴微粒化過程を撮影するシステムを開発した。しかし、この方法では液滴と衝撃波との干渉が避けられない。そこで、圧縮性気液二相流解析コードによる直接数値解析によって衝撃波と液柱の干渉を評価し、衝撃波により複雑な液柱内部圧力が現れるものの液柱変形には殆ど影響しないことが確認された。また、限られた撮影範囲内において高速流と液滴との干渉を撮影するため位置精度の向上が必要であることからレーザー隔膜法を開発し、破膜時間の標準偏差を 0.1ms 程度とすることが可能となった。

撮影画像を用いた測定者によらない微粒化開始時間の評価方法として、親液滴重心法、画像堆積法、アンサンブル平均処理によって得られる平均輝度値を用いる平均輝度値法の3つを提案し、高時間分解能撮影結果から測定された微粒化開始時間との比較によりこれらの方法の妥当性が確認された。また、剛体球が直径分だけ移動する時間で無次元化された微粒化開始時間の予測式を提案した。また、親液滴が崩壊する時間を微粒化完了時間とみなし、平均輝度値分布において平均輝度値が最小となる流れ方向位置の差分値が振動し始める無次元時間を親液滴崩壊時間として定義した。この親液滴崩壊時間は条件によらず同様の値となることからその予測式を提案した。

また、パルスレーザーをバックライトとした顕微鏡による超高解像度撮影により、液滴微粒化で形成される微細液滴径の測定を実施し、微細液滴の確率密度分布特性や平均粒径が明らかになった。

論文審査結果の要旨

本論文は、スクラムジェット実現に向けた知見を得る目的で、高速流による液滴の微粒化について衝撃波管を用いた撮影により微粒化開始及び終了時間、微粒液滴の確率密度分布及び平均粒径を評価するものである。衝撃波管を用いた場合、一様な高速流を実現することが可能となるが、破膜タイミングによる高速流と液滴との干渉位置のずれや衝撃波による微粒化への影響、といった問題がある。そこで、高速流と液滴との干渉位置の高精度化を目的に

レーザー破膜法を確立し破膜時間精度を高めることが可能になった。このレーザー破膜法は微粒化だけでなく今後の衝撃波管を用いた測定の高精度化に大いに貢献する技術である。この高精度化により微粒化時間評価時にアンサンブル平均処理を行うことが可能になった。また、数値解析により衝撃波が微粒化へ与える影響は殆どないことを示した。これらの技術、知見を基に、高速度撮影による微粒化に関する時間、粒径分布の評価が行われた。ここで、撮影画像を用いた微粒化開始時間の評価方法として3つの方法が提案されたが、これらは視覚的な観察による方法に比べ、評価者の主観が入らないことから有用な方法であるといえる。また、微粒化完了時間においても最小平均輝度値位置を用いた方法を提案し、その予測式を提案した。この微粒化完了時間を画像から視覚的に評価しようとすることは親液滴がフラグメントで覆われていることから困難であり、これまで研究例がほとんどなかったものである。また、本論文では微粒液滴径評価法及其分布に関する知見を得ることができた。

本論文で得られた高 Weber 数の流れによる微粒化開始時間、完了時間の評価法及び予測式、微細液滴の粒径評価法及び確率密度分布特性は、高速流と液滴との微粒化過程を有するスクラムジェットエンジン燃焼を実現するために重要な高速気流中における secondary breakup の予測の発展に大きく寄与することができる。このように本論文は有用な知見を数多く見出し、新規性、有用性の点で優れていると評価できることから、学位審査委員会は、審査の結果、この論文を学位論文に値するものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付き論文 3 編）の内容を確認し、令和 3 年 2 月 12 日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. 衝撃波発生時間の高精度制御を実現するレーザー破膜衝撃波発生法の確立, 朝原誠, 服部晏明, 宮坂武志, 神谷朋宏, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.887, pp.1-12, 2020.
2. Effect of a wake on drag and deformation of liquid column at high Weber number, Kamiya, T., Asahara, M., Miyasaka, T., Journal of Fluid Science and Technology, Vol.15, No.1, pp.1-14, 2020.
3. 高速気流中における液滴微粒化挙動の可視化画像を用いた微粒化開始時間の評価, 神谷朋宏, 朝原誠, 服部晏明, 宮坂武志, 安里勝雄, 微粒化, Vol.28, No.95, pp.78-89, 2019.