

審査の結果の要旨

氏名 趙 徹

理学修士 (M.Sc.) 趙徹は, 「Effects of fuel injection angle on combustion efficiency in a model hydrogen ram combustor (モデル水素ラム燃焼器における燃料噴射角度が燃焼効率に及ぼす効果)」と題し, 6章からなっている.

水素を燃料とし, 離陸からマッハ 5 程度の速度で飛行する極超音速機用エンジンとしてジェットおよびラムジェット複合サイクルである予冷ターボジェットエンジンが JAXA において開発されている. そこでは, ペイロードや環境負荷物質低減の観点から, ラム燃焼器において水素過濃条件で燃焼が行われる. ラム燃焼器において燃焼効率を増大させることはエンジンの性能を向上させる上で重要である. しかしながら, 高温, 高乱流場における水素過濃燃焼に関する研究は限定的である. それらの現象のモデリングのためには実験計測データの蓄積や適切な数値計算モデルが必要である. ナノ秒以下の時間スケールを持つ化学反応からマイクロメートルオーダーのコルモゴロフスケール渦を解像する必要のある直接数値計算を実施することは風洞実験のスケールにおいても困難である. そのような観点から, 本研究ではエンジン内現象の理解や開発に寄与しうる数値計算モデルとして非定常 Flamelet 法を用いた Large Eddy Simulation(LES)による解析を実施した.

第 1 章では研究対象である液体水素を燃料とする予冷ターボジェットに関し, そのエンジン構造, 飛行条件およびエンジンの運転条件について概説し, 特に本研究では水素過濃条件での運用のため, ラム燃焼器が重要であることを示している. ラム燃焼器において, 燃料噴射器が燃焼の安定性や高効率燃焼において重要な役割を示すことを, 燃料噴射器の形態や先行研究に基づき説明している. 燃料噴射器に関わる研究課題を示した後, 本論文の研究手法や論文の全体構成について説明している.

第 2 章では高エンタルピー風洞を使用したモデルラム燃焼器を用いた実験について説明している. 実験装置および計測系の説明を行い, 実験で用いる噴射器の形態や噴射孔の配置について示している. 熱電対を用いた温度測定手法や, 実験結果を数値計算結果と比較するため, 近赤外発光測定手法について示して

いる。本研究の燃焼状態を示す指標として、燃焼効率を用いておりその算出方法について述べている。結果については、噴射孔が二列直線状に配置された場合において、一列目と二列目の噴射角度の組み合わせと燃焼効率の関係を示し、本研究の数値解析の対象を示している。また、数値解析の検証に用いるため、噴射孔がジグザグ配置の時の水蒸気からの近赤外発光挙動を説明している。

第 3 章では本研究で使用する数値計算手法について説明している。数値解析に用いた支配方程式、乱流モデルおよび非定常 Flamelet 法である Flamelet Progress Variable (FPV) 法について説明している。参照テーブルの作成について説明し、標準火炎として知られる Sandia D 火炎に対して、妥当性検証のための数値解析を実施している。温度や化学種などの測定結果と比較して、本数値解析手法により Sandia D 火炎を良く再現していることを示している。

第 4 章ではラム燃焼器の数値解析における水素/空気燃焼の Flamelet 表の作成および境界条件について述べている。風洞条件の水素および空気の二次元対向流拡散火炎において FPV 法および詳細反応モデルを用いた数値計算を実施した。それらの数値計算結果の比較を行い、本研究で用いる FPV 法による水素反応計算が詳細反応計算を用いた数値流体解析結果と比較して概ね妥当であることを示している。その後、風洞実験の燃焼器接続部に関する数値解析を実施し、ラム燃焼器数値計算における境界条件を求めている。

第 5 章では第 4 章で評価された Flamelet 表や境界条件を使用して計算を実施している。計算条件、計算領域や境界条件を示し、モデルラム燃焼器における噴射角が燃焼形態に及ぼす影響をパラメトリックに調べている。燃焼効率に及ぼす噴射形態の違いが数値解析結果により明らかにされており、最適な噴射形態について示されている。シリアルおよびジグザグ噴射孔の配置による燃焼効率の違いについて、流れ場や火炎構造の違いについて述べている。水素過濃燃焼においては、インジェクタ後流部分に混合比が量論混合比付近となるようにすることで、保炎性能が良いことが示された。断熱の Flamelet 法を用いた数値計算であるが、比較的少ない計算負荷で過濃燃焼メカニズムをよく再現している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果についてまとめられている。

以上要約すると、実験および数値計算アプローチにより、極超音速機に用いられるラム燃焼器の水素過濃燃焼を解明し、計算負荷の少ない乱流燃焼数値計算手法を確立することは、高効率な極超音速エンジンの設計につながり、航空宇宙推進工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。