

論文の内容の要旨

論文題目 酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れの
数値シミュレーション (Numerical Simulations of Combustive Flows
in a Swirling-Oxidizer-Flow-Type Hybrid Rocket)

氏 名 本 江 幹 朗

ハイブリッドロケットは主に液体酸化剤によって固体燃料を燃焼させ推進力を得る方式のロケットのことを示す。そのコンセプトとしてはロケットの黎明期から存在する方式である。通常、燃料にはプラスチック類やパラフィン類、酸化剤には液体酸素や亜酸化窒素等が用いられる。固体ロケットと比較した場合の利点として、理論比推力が高い、推力調整が可能である等が挙げられ、液体ロケットと比較して、機械的に単純、燃料の密度が高いなどが挙げられる。さらに双方と比較して爆発燃焼の危険性が少なく管理運用が安全でありコストが削減できる。

しかしハイブリッドロケットにはその燃焼原理に起因するデメリットが存在する。ハイブリッドロケットでは火炎に熱せられ表面から気化した燃料が酸化剤と反応して燃焼する。燃料の流出量は燃料グレインに伝わる熱量によって左右されるため、その表面上でのみ燃焼が生ずるハイブリッドロケットは他のロケットと比べ燃料への熱供給量が圧倒的に少なく燃料消費量すなわち燃料後退速度が遅い。これがハイブリッドロケットの現在でも十分に克服できていない最大の課題である。そのためハイブリッドロケットはその優れた特性にもかかわらず、今まで実用ロケットとしての活躍の場をほとんど与えられてこなかった。

本研究の対象である酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットは遅い燃料後退速度という課題への対策として開発された。この型式のハイブリッドロケットは円筒状の燃料グレインの内部に酸化剤流を沿うように旋回させながら噴射し、発生する遠心力により火炎をグレインに押し付け熱伝導を増加させることをコンセプトにしている。

一般的にハイブリッドロケットの燃焼室に対する実験的手法による内部状態の詳細な把握は

その内部環境の苛烈さからほとんど不可能である。しかし、詳細な内部状態を把握することはロケットの高性能化に繋がることは論を待たない。そこで数値的手段による解析を行うことで内部状態を把握する試みがコンピュータの発達と共に進められてきたが、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットが持つ特性を評価できるような解析は十分行われておらず、この型式の燃焼室内部の状態は明らかであるといえない。

本研究の目的は酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃焼室内に対する解析に適した数値計算コードを構築し、そのコードを用いて当該燃焼室内の流れ場の構造、火炎形状、温度分布、化学種分布の詳細を示し、燃焼室内部の物理現象の解明と性能向上につながる知見を得ることである。酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの解析に適したコードの開発のため二段階に分けて検討を行った。

第一段階では旋回流にある程度対応しているとされている多重時間スケール $k-\epsilon$ モデルによる解析を行い実験値と比較した。この際、空間離散化手法に有限体積法、時間積分手法に 2 段階 Runge-Kutta 法、数値流束に SLAU 法、高次精度化に 3 次精度 MUSCL 法、勾配制限関数に van Albada 制限関数を用いた。検討の結果、速度勾配が緩く逆流が存在しない流れ場に対する解析では旋回流の特徴をある程度表現できるものの、軸方向に逆流しているような大きい速度勾配を有する流れ場においてはその特徴を表現することが出来なかった。同時に LES による旋回流の解析例を調査し、当該流れ場に対する解析性能を検討した。その結果、軸方向に逆流が存在するような強い速度勾配を有する流れ場においても LES による解析で旋回流の特徴を表現することが出来ることを確認した。以上の結果より本研究では LES を乱流の解析手法に採用した。

第二段階では解析精度と計算コストのトレードオフを検討して燃焼モデルとして採用した Flamelet アプローチと LES を組み合わせて構築した解析コードの燃焼場における旋回流に対する性能検証を行った。この解析コードは、空間離散化手法に有限体積法、時間積分手法に ADI-SGS 陰解法による 2 次精度疑似時間法、数値流束に SLAU 法、高次精度化に 5 次精度 WENO-Z 法を用いて構築した。解析対象は Bluff-Body を有しその周囲から旋回流が噴射される拡散火炎バーナの実験である。解析結果の一部として図 1 に実験で撮影された火炎の写真と解析結果の平均温度コンタを示す。両者はよく一致しており、このような検証の結果、構築した解析コードは定性的に問題ない性能を有しており、一部定量的にも良好な性能を示すことを確認した。この結果をもって酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃焼室内に対する解析に適した解析コードが構築されたと判断した。

開発された解析コードを用いて酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃焼室内に対する解析を行った。ただし、現段階では燃料グレインが燃焼することによる燃焼室の形状変化や、燃料への伝熱量の変動による吹き出し速度の変化は再現していない。すなわち、実際とは異なり燃焼室の形状は変化せず燃料の吹き出し速度も時間的に一定である。図 2 に示す解析による火炎形状と実験における可視化写真の比較と、解析から得られた火炎高さと実験による測定値の比較から解析結果は定性的に酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃焼室を表現していると判断した。

この解析を行った結果、燃焼室内の温度場、速度場、各化学種の質量分率の分布や火炎形状、渦構造が明らかにされた。このうち、図3に瞬時の温度場のコンタ、図4に渦の可視化を示す。また実験で得られている燃料グレイン先端部での後退速度の局所的な増大は、グレイン最前縁部で火炎が壁面直近に生じることにより局所的にグレインへの熱流束が増大し生じる可能性があることを明らかにした。火炎高さの分布を考察することで、燃焼室中ほどにおいて火炎が壁面より浮き上がる現象の原因が明らかにされた。さらに、設計への知見として燃焼室中心部における大規模渦により酸化剤成分を残した生成ガスが排気される可能性が存在することが明らかとなった。

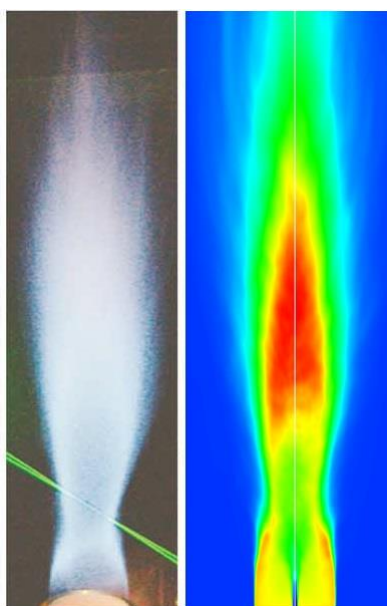


図1 火炎の写真と解析結果の平均温度コンタ

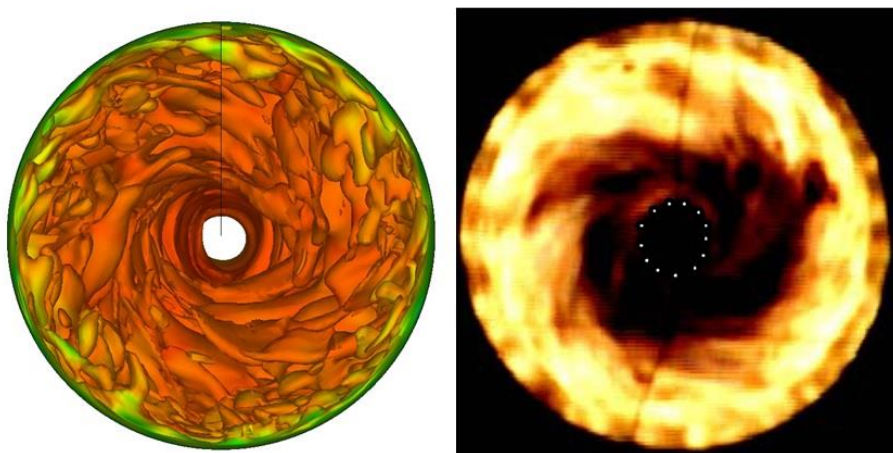


図2 解析による火炎形状（左）と実験における可視化写真（右）

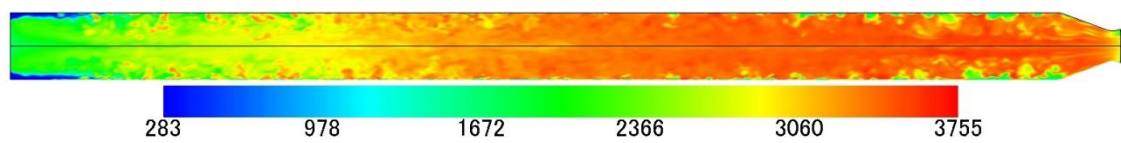


図3 瞬時の温度場のコンタ

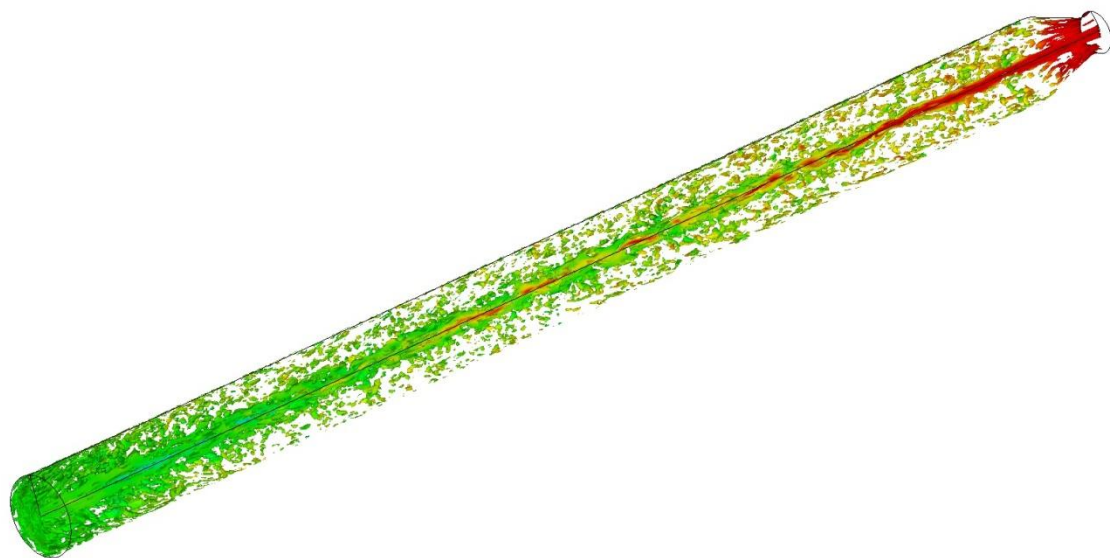


図4 渦の可視化