

研究状況の概要【中間報告】

氏名	伊東山 登
1. 研究題目	反応性材料の燃焼器壁への積極的適用による回転デトネーションエンジンの効率的高性能化
2. 研究内容	<p>デトネーションとは衝撃波を伴いながら超音速で予混合気中を伝播する燃焼形態の一つである。本形態を活用した回転デトネーションエンジン (RDE) は、デトネーションの反応速度の速さによる燃焼器の小型化や、自己昇圧機構による高い熱効率といった特徴から、従前の内燃機関と比較して、より効率的なエネルギー利用に資することが期待される。一方、従前の燃焼器と異なり、デトネーション波直後で限定的かつ急速な燃焼反応が進行し、時空間的に局所的で高い熱負荷 (実績最大で 10^7 W/m² オーダー) が発生することから、定常長秒動作の実現には熱負荷に関連する技術課題が未だ根強く残っている。そこで本研究では、従来式の気体燃料/気体酸素駆動式 $\phi 20$mm 級 RDE (図 1) を研究軸に、当該エンジンにおいて高い熱負荷が加わる燃焼器内壁部を高分子材料 (燃料) に置き換えた、ハイブリッド型 RDE 機構の概念設計と実証を目指す。本概念は、燃焼器に加わるデトネーション由来の熱負荷を高分子の吸熱的化学反应 (昇華・熱分解) に効果的に活用するとともに、発生した昇華・熱分解ガスを RDE の燃料として利用することで、当該エンジンの初期条件に対する作動範囲 (O/F 比) の拡大等に貢献可能である (図 2)。</p> <p>気相が関連する混相デトネーションに関しては複数研究例 (例: Bowen et al., Proc. Combust. Inst., 1971) があるものの、RDE としての研究は現在発展途上であり (例: Kawalec et al., J. Prop. Power, 2023)、反応性固体壁に関する研究例は申請者が調べた限り存在しない。故に研究の初手として、反応性材料の燃焼器壁への適用が当該 RDE の作動特性に及ぼす影響の網羅的調査が重要である。反応性燃焼壁のデトネーション燃焼への寄与は、デトネーション燃焼に由来する高い熱流入とこれによる壁材料の熱分解、熱分解ガスと周囲ガスとの混合気形成、当該混合気のデトネーション燃焼のサイクルで描画できる。すなわち、壁材料や壁材料の分解ガスの物理・化学特性と、RDE 側の変数 (推進剤ガスの物理・化学特性、エンジンの幾何形状等) とが相互作用して、各現象における時間スケールや熱スケールが決定される。故に、実験変数として、推進剤流量、当量比、インジェクタ幾何形状、燃料器長、壁材料、等に主眼を置く。また、RDE は燃焼器周方向に伝播するデトネーション波を中心に、圧力や温度、濃度勾配を有するため、エンジン内部の燃焼構造の同定が RDE 作動特性の解明に直結する。そこで、RDE 燃焼試験中の圧力・温度計測、ハイスピードカメラ観察や燃焼器壁部の非破壊 3 次元計測などを組み合わせた実験フローを通じて、RDE 作動に関する各種変数と RDE 作動特性の関係を体系的に整理することで、エンジンシステムとしての工学的特徴の抽出を目指す。</p>

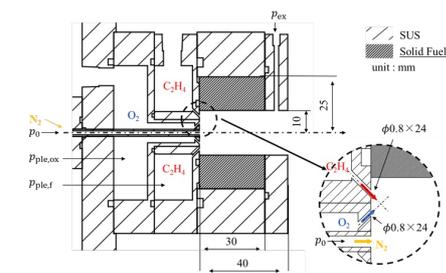
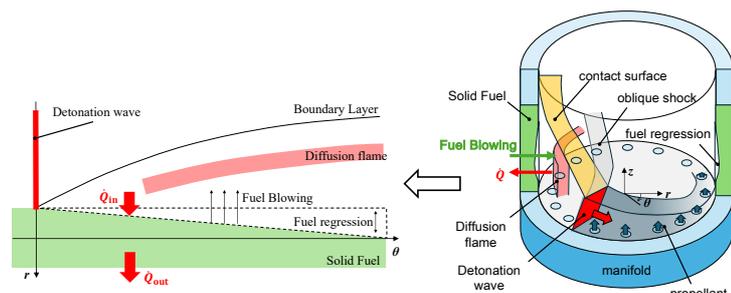
図1. $\phi 20$ mm $C_2H_4-O_2$ RDE断面図

図2. ハイブリッド型RDEの燃焼・動作機構の概念図

3. 研究成果、課題等

今年度は研究全体としてのキックオフとして、次の3点に着眼して段階的な検討を進めた。

1. ハイブリッド型単円筒 RDE の概念検証

可燃性固体燃料として高密度ポリエチレン (HDPE) を用いて、当量比、供給ガス推進剤流量を実験変数に当該 RDE の燃焼試験を実施した。HDPE 分解ガスがデトネーション伝播に与える影響を明確化すべく、SUS 内壁の実験も同一の試験条件で一通り行った。

SUS 壁条件では当量比 0.6-0.7 が明確なデトネーション作動の下限であったのに対し、HDPE 条件ではさらに低当量比である 0.4 の場合でも、燃焼器周方向に自発光領域が 2 箇所確認されるデトネーション伝播形態 ($n=2$) であることが確認された。その伝播速度は振動計から得られた周波数およびエンジン内径から算出される速度と概ね一致した。また、本傾向は供給されるガス推進剤流量に依存せず、自発光領域の発光強度については当該流量の増加とともに強くなる傾向にあった。以上のことから、小課題目であった「ハイブリッド型単円筒 RDE の概念」の成立解が広く存在することに加え、①固体燃料の分解量は供給するガス推進剤および当量比を受けて自律的に決定されている可能性、②デトネーション燃焼が主として進行する部分は従前の単円筒 RDE と同様、内壁近傍であること、③固体燃料からの燃料ガス湧き出しと供給ガス推進剤との流体的相互作用によりデトネーション燃焼の進行度合いが決定すること、が示唆された。

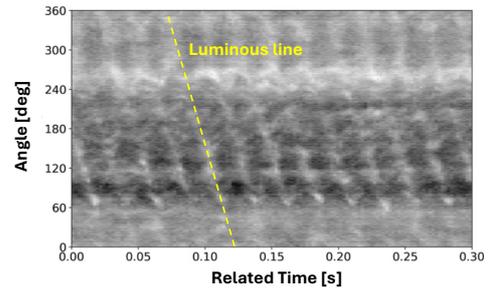


図3. エンジン出口側観察動画の解析結果 (角度-時間の画像輝度値履歴)

2. 固体壁分解度分布の計測と熱負荷予測モデルの構築

デトネーション伝播形態の理解をすべく、3次元X線CTを用いて燃焼試験後の固体燃料部の構造を解析した。特に軸方向位置 5~10mm での固体燃料損耗量が多いことがわかった。この地点はガス推進剤の運動量交換を伴った壁面への衝突点近傍であり、この領域でデトネーション燃焼が主として進行していると考えられた。さらに本結果から推定された固体燃料壁の分解速度をフィッティングパラメータとして、準一次元軸対称熱伝導方程式と熱負荷面の熱平衡式の連立から、固体燃料壁適用による燃焼器内壁への有効熱負荷の推定を行なった。本計算から、SUS 内壁の場合 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/m}^2$ であった有効熱負荷量が、HDPE 内壁の場合、 10^5 W/m^2 程度まで減衰することがわかった。このことは、提案する当該 RDE の概念を保証する結果と判断された。

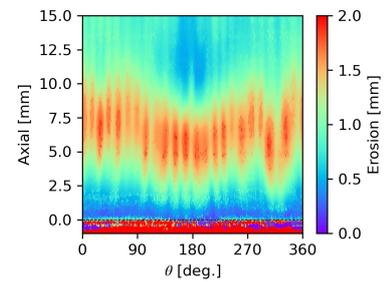


図4. HDPE 損耗分布計測結果

3. 燃料ガス湧き出しを考慮した推力予測手法の構築

本研究の主眼であるエンジンシステムとしての特性評価をするには、この燃料ガス湧き出しを考慮した推力予測手法を検討する必要がある。そこで、前述の構造解析および試験前後の質量計測結果から固体燃料の質量分解速度を仮定し、これと従前の当量比計算式、および燃焼ガス特性評価の反復推定法とを連立させた新たな推力予測手法を構築した。結果、上述する小課題 1 の試験結果すべてにおいて、固体壁由来の燃料ガスは燃焼機内部で 100% 近い燃焼完結を達成していることが見出された。当該燃焼器は極めて短い燃焼器特性長さ (従来の 1/10 程度) であるが、高い燃焼完結性を有する事実はデトネーション燃焼の短い時空間的反応完結に起因するものと結論づけた。

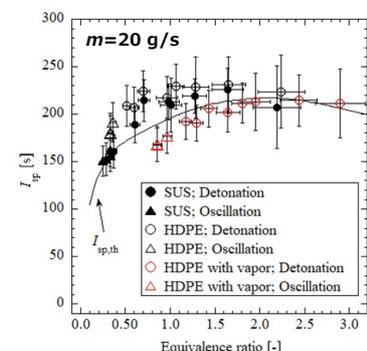


図5. 当量比-比推力プロット

4. 今後の予定 (助成希望金額とその用途についてもご記入願います)

次年度は 2024 年度成果であった「当該 RDE 機構の特徴の把握」を基盤に、燃焼時の物理場の理解とこれを軸とした固体燃料の効率的利用則、そして、当該 RDE の学理的設計則を見出す。

小課題 1. 固気混相デトネーション燃焼作動時における物理場の詳細解析

RDE 内のデトネーション燃焼はデトネーション波を中心に極めて大きな物理量勾配を形成する。本研究で提案する可燃性固体燃料を有効的に従前の RDE に適用していくには、「固気混相境界における回転デトネーション波の伝播状態」「伝播に起因した固体燃焼への熱負荷」「推進性能予測のための代表物理量の特定」が課題となる。これらの課題への打ち手として、2024 年度の成果を基に、①圧力・温度計測ポート数を増した燃焼筒および②透過性可燃性燃料を用いた当該 RDE の燃焼試験を行う (図 6)。実験条件は 2024 年度実績を踏襲する。①からは固気混相デトネーション燃焼作動時における物理場の網羅的計測、②からは燃焼自発光を用いたデトネーション燃焼構造の可視化を行い、これらの結果を統合することで、固気混相デトネーション燃焼作動時における物理場の詳細解析を目指す。燃焼試験後の固体燃料に対して、3次元 X 線 CT スキャンを行い、損耗具合と①②とを比較することで、前述の物理場分布と固体燃料のガス化分布の相似則を調査する。

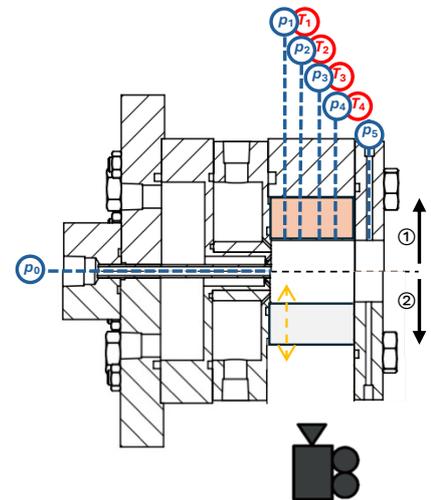


図6. 燃焼器の改良案

小課題 2. インジェクタ幾何特性が可燃性内壁を有する RDE 作動に与える影響の体系的整理

内壁材の効率的消費を考えるにあたり注目すべきは、混合気と内壁材との境界面で発生している、燃焼に関連する一連の現象である。推進剤供給直後の燃焼器中の混合気の運動量ベクトルや濃度分布により、内壁材と予混合気の相互性は変化することが予想される。これら混合気の物理量はインジェクタ幾何特性に強く依存する。

そこで、現在使用している対抗衝突式インジェクタ孔の角度を変更させたものを導入する (例: 45deg → 60 deg)。これらの流体的内部構造については運動量保存則の連立、流体シミュレーションによる計算的予測 (例: 図 7, 現在計算コード構築中) の両面から事前検討を行う。本インジェクタ機構を導入した RDE の燃焼試験結果と小課題 1 の結果との比較から、インジェクタ幾何形状 (≒混合気の物理量) が RDE 作動に与える影響と、インジェクタ幾何形状と熱負荷・燃焼性能等の相関性を評価する。物理場計測 (熱負荷, 推進性能の予測) や燃焼波構造の解明には小課題 1 のセットアップを踏襲する。

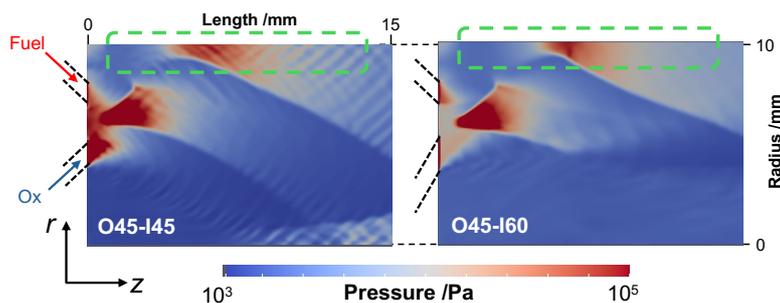


図7. インジェクタ流れの数値シミュレーション結果

小課題 3. 長秒時動作試験を介した定常動作特性の体系的整理

エンジンの定常特性評価には、熱特性・燃焼特性・固体燃料の分解特性の全てが定常である必要がある。これら 3 特性は相互関係にあり、その時間応答特性の大小は明らかではない。そこで長秒時動作試験を行い、定常動作特性の高精度理解に繋げる。本試験は 10 秒以上の動作となるため、名古屋大学保有の設備での実施が困難である。そこで、各種ロケットエンジンの長秒動作実績のある室蘭工業大学白老試験場や JAXA あきる野実験施設での実験を予定する。

個々の特性についても既往の燃焼試験から解明を試みる。固体燃料の分解特性：その経時変化を高精度で確認するために、例えば導電 CH 組み込み燃料を使った周方向燃料後退速度の計測を予定する(図 8)。燃焼特性 (デトネーション波伝播特性)：周径が変化した場合のデトネーション波挙動をハイスピードカメラ観察や振動計計測から明らかにする。熱特性：小課題 1 の計測系を用いた温度時間履歴を取得し、その結果を源泉とした熱伝導数値シミュレーション (図 9, 現在構築中) を行い、実効的な熱負荷量を試算する。当初はポリマー燃料の種類・燃焼器長さについても変数とした実験計画を想定していたが、本質的に重点課題として取り扱うべきは固気境界面の熱流体的特性であると判断したため、本小課題らは小課題 3 の副次的問いとして位置付ける。

最後に 2 ヶ年の成果の総括を行い、RDE 作動に関する各種変数と RDE 作動特性の関係を体系的に整理することで、エンジンシステムとしての工学的特徴の抽出と固体燃料の効率的利用則、そして、当該 RDE の学理的設計則の構築を図る。

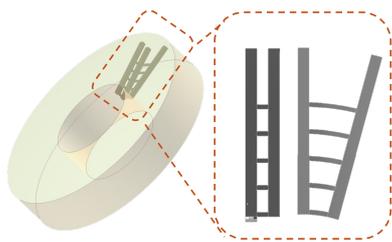


図8. 燃料後退計測CHを持つ固体燃料

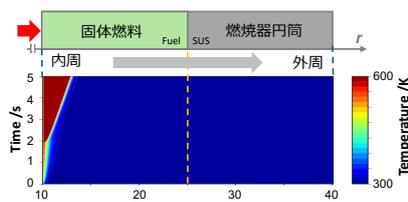


図9. 熱伝導の数値シミュレーション結果