

令和 2 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

回転爆轟波の詳細構造の解明

令和 3 年 5 月

宇宙航空研究開発機構

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、宇宙航空研究開発機構が実施した令和2年度「回転爆轟波の詳細構造の解明」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

(1) 研究課題の最終目標

本研究では回転デトネーション波の詳細構造を把握し、物理メカニズムを明らかにすると共に、回転デトネーションが安定して維持される条件(作動条件)の同定を最終目標とする。そのために以下の4つの項目について研究を実施する。

① 燃焼試験による回転デトネーション波の作動条件のマッピング

環状デトネーション燃焼試験装置を設計及び製作し、燃料と酸化剤の混合率、曲面流路の曲率や流路幅等をパラメトリックに変化させて燃焼試験を行い、回転デトネーションが維持される条件を探索する。

② 作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造の把握

①の回転デトネーションが維持される条件の探索と同時に燃焼試験装置内部の燃焼流れの定量計測を実施し、作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造を明らかにする。

③ 詳細数値シミュレーションによる作動条件マップの再現

①及び②と並行して、詳細な数値シミュレーションにより、①で得られた作動条件のマップを再現する。回転デトネーションの維持が困難となり、作動状態から不作動状態に遷移する条件付近についてシミュレーションを実施し、作動状態及び不作動状態を再現できることを実証する。

④ 回転デトネーション波の発生メカニズムの解明

①、②及び③で得られた結果を比較し、相互補完的な解析を行うことにより、回転デトネーション波の詳細構造及び物理メカニズムを明らかにすると共に、回転デトネーション波の作動条件の予測が可能となることを実証する。

(2) 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

最終目標を実現するために克服又は解明すべき課題は以下の通りである。

要素課題① 回転デトネーション波の密度の定量的可視化手法の確立（(1)の②に対する課題）

回転デトネーションの詳細構造を明らかにするためには、光学可視化が極めて有効である。現在、デトネーション波の密度の可視化には、影絵法及びシュリーレン法が多く用いられているが、これらの定性的手法では流れ場の構造の詳細な検討に限界がある。さらに、これらの定性的手法と数値シミュレーションとの比較では、デトネーション波の形状の対比のみの極めて粗い評価しかできず、本委託業務で対象とする高精度な評価は不可能である。そこで、他国に対して我が国が優位を持つ最新のデジタル干渉計可視化法を用いて、燃焼試験装置内部の密度の直接計測を目指す。しかしながら、このデジタル干渉計可視化法は開発途上であり、従来の Mach-Zehnder 干渉計では回転デトネーションの現象のみならず、高速ガス流れの現象の観察に使える解像度すら確保されていない。そこで、デジタル干渉計の開発のため、最適な干渉計の選定を行うことが課題となる。従って、高速で且つ高温・高圧、加えて燃焼による強い自発光を伴うデトネーション現象の定量的な観測が可能な干渉計技術の確立は極めて挑戦的である。

要素課題② デトネーション波の計測（(1)の②に対する課題）

音速以上の速度で繰り返し周回するデトネーション波が通過する時の熱流束の履歴は、現象解明の貴重なデータとなる。この計測に用いるセンサは高温の過酷な環境に耐

え、かつ数 μs の応答速度を確保する必要がある。特に、フラッシュサーフェスマウントで計測する場合、一般的に用いられる熱電対では容易に焼損するため、計測は極めて困難である。そこで本委託業務では、宇宙航空研究開発機構が開発した高速応答小型同軸熱電対を用いることで燃焼器内の表面熱流束の計測を目指す。高速応答小型同軸熱電対は、高温衝撃風洞 HIEST における極短時間計測に多く用いられた実績があり、数ミリ秒で数百度加熱される空力加熱現象でも十分な時間分解能を持つ。しかしながら、高速応答小型同軸熱電対を用いた回転デトネーション波の計測は実績がないため、燃焼試験装置内部の熱流束の時系列変化の計測手法の確立が課題となる。また、回転デトネーション波は高温であるため、絶縁体等を用いて高速応答小型同軸熱電対の耐熱性の向上を図る必要がある。

要素課題③ 直接数値シミュレーション (DNS) による回転デトネーション波の捕獲 ((1) の③に対する課題)

単一デトネーション波は、膨大な微小マイクロセル構造を有する複雑な三次元構造を持つ。また、回転デトネーション波は曲面に沿って波面が進行するため、曲面との反射回折が発生し、単一デトネーション波より更に複雑な構造を持つ。従って、回転デトネーション波の詳細構造を精密に再現するには、直接数値シミュレーション (DNS) のような大規模解析が必要である。しかしながら、本研究で実施する全ての試験条件について DNS を行うのは計算量が膨大となるため、DNS によるシミュレーションは、回転デトネーションの維持が困難となり、作動状態から不作動状態に遷移する条件付近などに限定する。それ以外の条件については、代わりに乱流モデルや燃焼モデルを組み込んだラージエディシミュレーション (LES) を用いる。DNS 及び LES を用いることで効率的にデトネーション波をシミュレーションにより再現するためには、回転デトネーションの維持が困難となり、作動状態から不作動状態に遷移する条件の特定が課題となる。また、DNS 及び LES を実施するための基本的なモデルについては、すでに実装済みであるものの、回転デトネーションに適したモデルについては、新たに構築する必要がある。

(3) 要素課題に対する攻略手段と実施項目及びそのための体制

これらの要素課題に取り組むために、宇宙航空研究開発機構では、実施項目① 環状デトネーション燃焼試験装置の設計及び製作、実施項目② 回転デトネーションの燃焼試験、実施項目④ 作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造の把握及び実施項目⑤ 数値シミュレーションによる回転デトネーション波の発生メカニズムの解明を実施する。

東海大学では、実施項目③ デジタル干渉計可視化法の確立を実施する。

実施項目① 環状デトネーション燃焼試験装置の設計及び製作 (担当：宇宙航空研究開発機構)

環状デトネーション燃焼試験装置の設計及び製作を行う。2018年度は、内筒外形が100mmの環状デトネーション燃焼試験装置#1の設計及び製作を行う。2019年度は、内筒外形が150mmの環状デトネーション燃焼試験装置#2の設計及び製作を行う予定である。なお、環状デトネーション燃焼試験装置#2は、2018年度及び2019年度に実施する実施項目②、実施項目④及び実施項目⑤の試験結果を基に、必要に応じて設計を変更する。

実施項目② 回転デトネーションの燃焼試験 (担当：宇宙航空研究開発機構)

実施項目①で製作した環状デトネーション燃焼試験装置#1及び環状デトネーション燃焼試験装置#2を用いて、燃料と酸化剤の混合率、曲面流路の曲率、流路幅、燃料・酸化剤噴射器の形状や構成等をパラメトリックに変化させることで、回転デトネーションが維持される条件を探索する。燃焼試験の試験条件は、以下の通りである。

燃料はメタンガスを基本とし、必要に応じて水素ガスを用いる。酸化剤として、酸素ガスを用いる予定である。燃料及び酸化剤の供給圧力は7 MPa以下とする。

2019年度は、環状デトネーション燃焼試験装置#1を用いて、流路幅は6 mm及び20mm、燃料の当量比は0.6、1.0及び1.4、総流量は100g/s、250g/s及び400g/sとする、2×3×3の18条件について燃焼試験を実施する予定である。また、必要に応じて環状デトネーション燃焼試験装置の噴射形態や口径等を変更する。

2020年度は、環状デトネーション燃焼試験装置#2を用いて、流路幅は8 mm及び20 mm、燃料の当量比は0.6、1.0及び1.4、総流量は200g/s、500g/s及び900g/sとする、2×3×3の18条件について燃焼試験を実施する予定である。また、必要に応じて環状デトネーション燃焼試験装置の噴射形態や口径等を変更する。

実施項目③ デジタル干渉計可視化法の確立（担当：東海大学）

デジタル干渉計可視化法については、フィゾー干渉計、ピンホール干渉計やMormarski干渉計等の干渉計の特性（解像度、時間応答性及び精密度）を評価することで、燃焼試験装置内部のデトネーション波の密度測定に適した干渉計を選定し、デジタル干渉計可視化法を確立する。また、必要に応じて二重露光ホログラフィー干渉計法についても評価する。

デトネーションの作動状態及び不作動状態については、デジタル干渉計可視化法を用いて、デトネーションの波面速度を計測し、CJ (Chapman-Jouguet condition) 速度の半分を基準速度として、それ以上の伝播速度の場合をデトネーションの作動状態として判断する。

実施項目④ 作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造の把握（担当：宇宙航空研究開発機構）

実施項目②の燃焼試験と同時に、燃焼試験装置の流路内に高速応答小型同軸熱電対をフラッシュサーフェスマウントで取り付けることでデトネーション波通過時の熱流束の直接計測を行う。高速応答小型同軸熱電対は、燃焼試験装置の下部、中部及び上部の各々の周方向に5点ずつ、計15点設置し、熱流束を計測する予定である。

高速応答小型同軸熱電対は耐熱性を向上させるため、取り付け部の冷却構造をヒートシンクや水冷等に変更し、接点の絶縁部材料を現状のカプトンテープから耐熱材料であるMgO等に変更することで、高温のデトネーション波でも熱流束の計測が可能な構造とする。

圧力については、熱による焼損を防ぐため、圧力トランスデューサの測定部分にポートを設置し、デトネーション波に接触する測定部分の面積を減らす構造にすることで、デトネーション波の圧力を測定する。

必要に応じて、レーザー吸収分光法やレーザー誘起蛍光法（LIF）等による温度測定、従来手法の圧力トランスデューサやイオンゲージによる圧力測定や推力計測等について実施する。

実施項目⑤ 数値シミュレーションによる回転デトネーション波の発生メカニズムの解明（担当：宇宙航空研究開発機構）

回転デトネーションの維持が困難になり作動状態から不作動状態に遷移する条件付近には、詳細な解析が可能なDNSを用い、それ以外の条件についてはLESを用いる。DNS及びLESによる回転デトネーションの解析には、宇宙航空研究開発機構がすでに開発済みである乱流燃焼コードであるCHARIOTを利用する。CHARIOTにはDNS及びLESを実施するための基本的なモデルを実装済みであるが、回転デトネーションに適した燃焼・乱流モデルを新たに構築する必要がある。

2018年度は、先行研究において実施した基本的な問題（一次元/二次元/三次元デトネーション問題）についてシミュレーションを実施する。

2019年度は、実施項目②及び実施項目④における環状デトネーション燃焼試験装置#

1の1回目の燃焼試験の結果を基に、回転デトネーションの維持が困難になり作動状態から不作動状態に遷移する条件付近から解析条件を選択し、燃焼試験装置を模擬したDNS又はLESで回転デトネーション波のシミュレーションを実施する。このシミュレーション結果から、シミュレーションコードの精度を検証し、必要に応じてモデルの改修を実施し、シミュレーションの精度を向上する。モデルを改修した場合は、再度、燃焼試験装置を模擬したシミュレーションを実施し、シミュレーションコードの精度を検証する。

2020年度は、実施項目②における環状デトネーション燃焼試験装置#1の2回目の燃焼試験並びに環状デトネーション燃焼試験装置#2の1回目及び2回目の燃焼試験の結果を基に、回転デトネーションの維持が困難になり作動状態から不作動状態に遷移する条件付近から解析条件を選択し、燃焼試験装置を模擬したDNS又はLESで回転デトネーション波のシミュレーションを実施する。また、シミュレーション結果から、シミュレーションコードの精度を検証し、必要に応じてモデルの改修を実施する。モデルを改修した場合は、再度、燃焼試験装置を模擬したシミュレーションを実施し、シミュレーションコードの精度を検証する。

以上より、回転デトネーション波の物理メカニズムを明らかにし、回転デトネーションの維持が困難になり作動状態から不作動状態に遷移する条件付近において予測可能なモデルを構築する。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

1項(1)に示した研究課題の最終目標を以下のとおり全て達成した。

No.	項目	目標	研究成果	達成状況
①	燃焼試験による回転デトネーション波の作動条件のマッピング	パラメトリックに燃焼試験を行い、回転デトネーションが維持される条件を探索する。	全355回の燃焼試験を行い、維持される条件を実験的に同定した。	<u>達成</u>
②	作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造の把握	上記の維持される/されない状態における回転デトネーション波の詳細構造を明らかにする。	干渉計計測による燃焼器内の密度定量計測を行い、詳細構造を把握した。	<u>達成</u>
③	詳細数値シミュレーションによる作動条件マップの再現	数値シミュレーションにより、作動条件のマップを再現する。	回転デトネーションが維持される/されないを概ね再現した。	<u>達成</u>
④	回転デトネーション波の発生メカニズムの解明	回転デトネーション波の詳細構造及び物理メカニズムを明らかにする。	回転デトネーション波の維持およびその強さには、推進薬の混合状態が大きく影響していることを明らかにした。	<u>達成</u>

3. 委託業務における研究の方法及び成果

要素課題① 回転デトネーション波の密度の定量的可視化手法の確立

点回折干渉計および位相シフト干渉計の2種類の干渉計について密度の定量計測を試みた。点回折干渉計については、干渉縞画像は取得できたものの環境外乱や燃焼の振動外乱により密度算出はできなかった。位相シフト干渉計については、1項(1)②に示す最終目標の1つである数値シミュレーションの検証に必要な定量計測として、撮影視野内の相対的な密度分布を計測できた。但し今後計測の精度向上には、直接計測等の方法で基準密度をより正確に同定する必要がある。以降に点回折干渉計および位相シフト干渉計の計測結果の詳細を示す。

(1) 点回折干渉計による回転爆轟波の定量的可視化手法の確立

回転爆轟波ロケットエンジン(RDRE)内部での伝播様態を定量的に把握するため、従前より各種の計測方法が採用されてきた。具体的には、圧力変換器(圧力センサ)で取得した圧力履歴から、爆轟波の伝播速度の算定、あるいは燃焼現象の位置特定を目的とした自発光現象の高速度ビデオ記録があげられる。これらに加え、RDRE内部での爆轟波そのものの形状、燃料・酸化剤混合気体の干渉様態など、従前からの手法では把握できないものの、RDRE実用化には極めて重要な情報を得るには、定量的可視化計測が必要となる。流れの可視化計測法にはシュリーレン法およびシャドウグラフ法と呼ばれる手法が広く活用されているが、定量的な情報を得るには干渉縞計測が可能な干渉計法の採用が妥当である。一般的な干渉計法では、光源であるレーザから出射されたレーザ光を「物体光」(対象現象の情報を取得する)と「参照光」(干渉縞発生の基準となる、対象現象を通過させないが、物体光と同一の光路長を伝播させる)に二分する。さらに、物体光だけを測定部に導き、参照光は現象を経験させず、撮像装置の直前で再び一光束に統合し、2つのレーザ光が同一光路となることで干渉縞が発生し、撮像装置に記録される。このように干渉計法の光学系は、一般的に複雑なものとなる。一方、本研究での測定対象であるRDREは、二重円筒内を伝播する爆轟波が測定対象であること、RDRE燃焼実験場所は開放空間であること、また、実験のための補機類が周囲を取り囲み、光学系が設置可能な空間的余裕が乏しいこと、を考慮し、一般的な干渉計による可視化計測が困難であると判断した。そこで、本研究では、干渉計法の中でも「コモンパス干渉計」に分類され、物体光と参照光の分離を撮像装置の直前に行う「点回折干渉計」が適当と判断し、エンジン燃焼実験に適用可能な点回折干渉計光学系を設計・製作し、RDRE燃焼実験に適用した。以下のごとく目的を達成した。

【成果 1】

RDRE内部の爆轟波と燃料・酸化剤混合気との反応過程の可視化計測に成功した。特に、回転爆轟波の特徴である爆轟波、衝撃波、接触面で構成される構造を明りょうに可視化し、RDRE内部での爆轟波伝播を干渉計測で捉えることに成功した。干渉計測でこれら現象を捉えられた例は寡聞であり、本研究の大きな成果である。

【成果 2】

RDRE内部の爆轟波伝播速度計測では、爆轟波の伝播に伴い発生する衝撃波の明りょうな可視化画像(干渉縞)を得た。さらに、干渉縞画像と、自発光現象の高速度撮影画像との比較から、爆轟波速度をほぼ同一値から15%の範囲でばらつきつつも概ね一致する結果となり、伝播速度の定量的計測は目的を達成した。計測値のばらつきは、点回折干渉計画像が瞬間値に対し、自発光計測が平均値であるため、爆轟波速度のゆらぎが一因と考える。

【成果 3】

RDRE内部での爆轟波前後での密度分布解析は、干渉縞画像の取得には成功したが、取得した干渉縞画像が解析可能な十分な状態でなく、完全な目標達成に至っていない。以下の複合的な原因と考える。

【原因・対策】

1) 環境外乱（気温の大幅な変化、日射による装置温度変化）の参照光強度への影響
環境外乱で、参照光に対する影響が完全に抑制できておらず、十分に明りょうな干渉縞の形成が達成できていない。改善は可能である。

参照光は、点回折干渉計の特徴であるピンホールで発生する。本研究でのピンホールは、表面研磨された直径25mmの円盤状のアルミ薄板に正確に直径10ミクロンの貫通穴を加工したものである。この貫通穴上に測定部を通過したレーザ光をレンズにて集光し、貫通孔を通過するレーザ光（回折光）が「参照光」となる。したがって、参照光の強度は微弱であることが必然で、加えて、環境外乱による集光点の数ミクロン変位であっても干渉縞形成に影響を与える。このため、本装置では、これら環境外乱の影響を抑制する工夫を随所に施した。しかし、結果として、干渉縞画像は取得に成功したもの、十分に明りょうな画像の取得に至らなかった。これらの環境外乱は、光学系が設置する光学定盤中にクーラント（冷却液）をチラー（冷凍機）で循環させ、光学部品の温度変動を0.5℃以内に制御することで解決可能と見込んでおり、それらを実現する新たな光学系を考案した。

2) RDRE燃焼時の振動、衝撃波による参照光強度への影響

RDRE燃焼時の振動、衝撃波による参照光強度への影響を完全に抑制できていない。上記1)と同様の理由で、RDRE燃焼時に生じる振動、発生する衝撃波による参照光強度の低下が明りょうな干渉縞発生を阻害している。改善は可能である。

RDRE燃焼実験において、点回折干渉計は、エンジン本体から距離約3 mに設置されている。そのため、計画当初から始動時の衝撃波の影響を考慮した。しかし、上記1)に述べたようにピンホールでの参照光発生は、繊細である。結果として、干渉縞画像は取得できたものの、定量的な解析には不十分な干渉縞となった。対策として、設置距離を増大し、振動および衝撃波の影響を減衰させること、除震機能を有する光学定盤の導入で大幅な改善が得られると見込んでいる。

以下に、年度毎のRDRE燃焼実験での干渉計計測の結果を示す。

○ 初年度および2年度目（R1年度）の成果

デジタル干渉計可視化法として、点回折干渉計による可視化装置を設計・製作し、角田宇宙センターにて実施された研究用回転爆轟波ロケットエンジン（RDRE）の燃焼実験において、以下の概要でRDRE内部におけるデトネーション波の可視化計測を達成した。可視化画像から経過時間に対する衝撃波移動量を推算し、それをフレームの時間間隔で除すことで波面速度をそれぞれ推算した。干渉計光学系および設置状況を、図3-1-5および図3-1-6にそれぞれ示す。

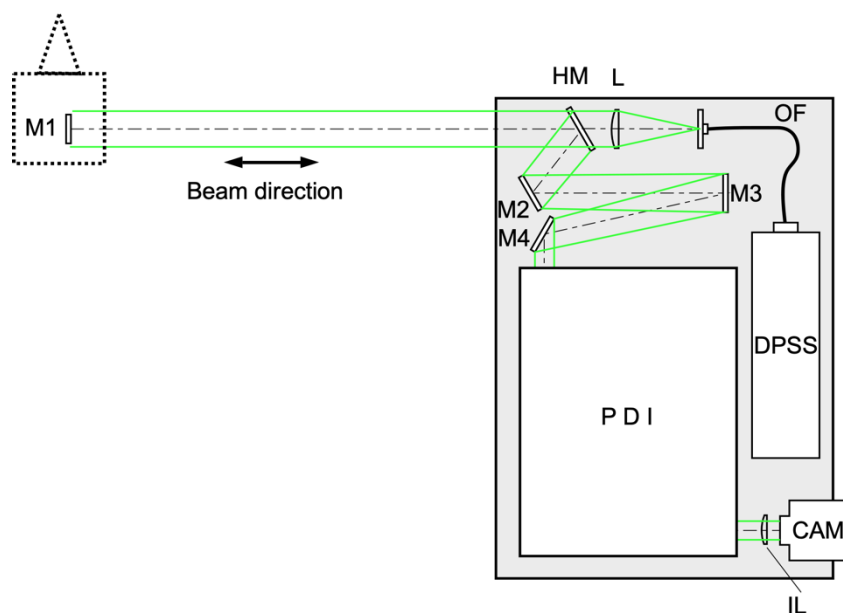


図3-1-1 可視化光学系： DPSS:固体レーザ、 M:平面鏡、 HM:半透明鏡、 L:レンズ、 OF:光ファイバ、CAM:高速度カメラ

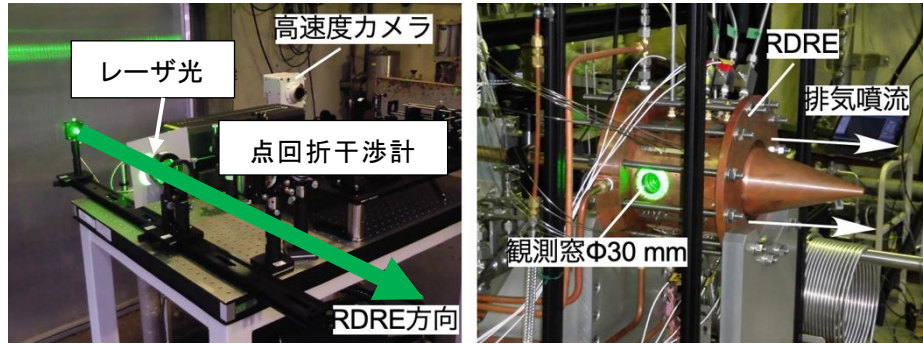


図3-1-2 干渉計設置状況:(左)干渉計光学系;(右)RDRE

RDRE運転および干渉計による可視化撮影条件を表3-1-1に、可視化試験による波面伝播方向、伝播速度の解析結果をCH*自発光観測画像から得られたそれとの比較を表3-1-2にそれぞれ示す。また、可視化計測画像の一例を図3-1-3に示す。

表3-1-1. RDRE 運転および撮影条件

試験番号	運 転 条 件			撮 影 条 件			
	スロート	流量 (g/s)	等量 比 (-)	画像 サイズ (Pix.) ²	解像度 (mm /pix.)	コマ 間隔 (ms)	露 光 (μ s)
ERD216H	なし	100	1.0	256x2 56	0.12	13.3 2	0.31
ERD217H		300	1.0	128x1			
ERD218H		150	1.4	28			
ERD219C		10MPa パージ	-				
ERD220H		500	1.0				
ERD221H	あり (幅 2 mm)	100	1.0				
ERD222H		300	1.0				
ERD223H		300	1.0				
ERD224H		300	1.4				
ERD225H		500	1.0				

表3-1-2. 干渉計による可視化結果

試験番号	干渉計			自発光観測画像		
	撮影手法	伝播方向	伝播速度 (m/s)	伝播方向 (干渉計側窓)	伝播速度 (m/s)	波数
ERD216H	無限幅	上方	1464	両方向	1318	2
ERD217H		下方	1516	下方	1351	2
ERD218H		下方	1300	下方	1167	2
ERD219C		---	---	---	---	---
ERD220H		下方	1083	トレス	トレス	2
ERD221H		左右	833	左右	1167	振動
ERD222H		下方	判定不能	下方	1194	1
ERD223H	有限幅	上方	判定不能	上方	1141	1
ERD224H	無限幅	上方	判定不能	上方	1194	1
ERD225H		上方	判定不能	上方	1223	1

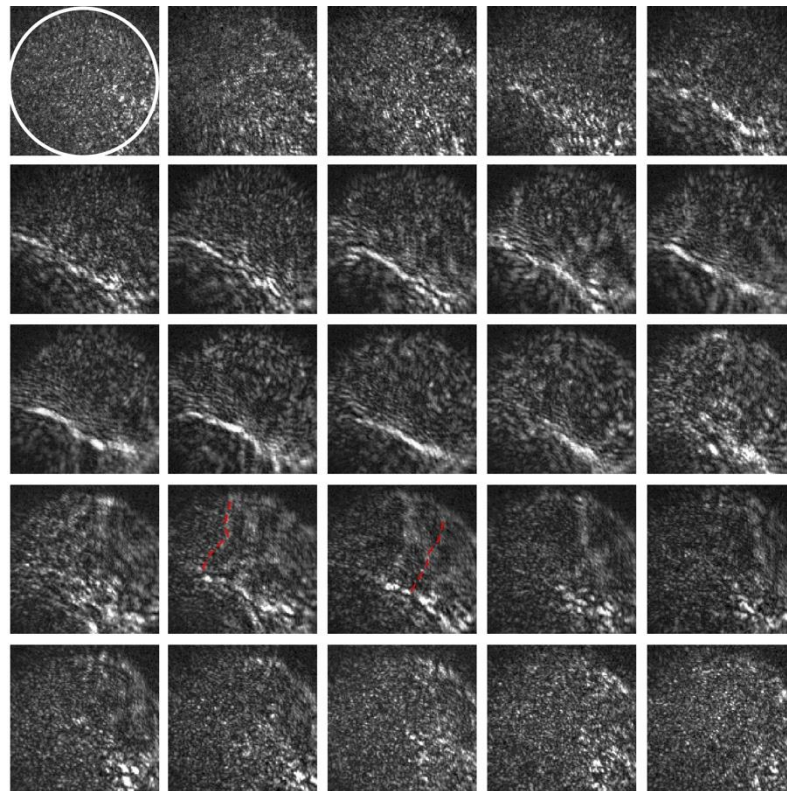


図3-1-3 点回折干渉計による RDRE 内部の可視化画像 (試験番号: ERD217H); 図中, 時間経過は同一段中では、左から右へ、段間は上から下方向. 白色円は、可視化視野を表す, 赤色破線は、伝播速度算出に利用した現象. 撮影条件は表3-1-2を参照.

○ 3年度目 (R2年度) の成果

前年度に実施した研究用回転爆轟波ロケットエンジン (RDRE) 燃焼実験に対する点回折干渉計の適用結果を基に、計測精度向上のため、RDRE燃焼室の光学的共役を実現するため凹面鏡の導入、光学系内でのレーザ光の減衰を防ぐための偏光光学素子の導入、および撮像素子直前の結像光学系を最適化することで空間分解能の向上をめざすなど、光学系改良を実施した。その後、東海大学内における予備実験を経た後、JAXA角田宇宙センターにてRDRE燃焼実験に適用し、可視化結果から得られた衝撃波位置の時系列とコマ間の時間間隔から波面速度をそれぞれ推算した。干渉計光学系および設置状況を、図3-1-4および図3-1-5にそれぞれ示す。

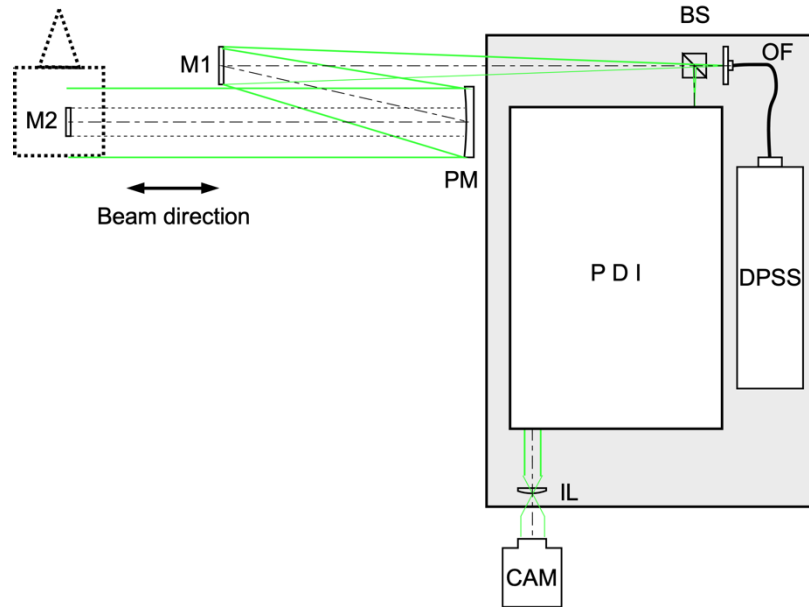


図3-1-4 可視化光学系; DPSS: 固体レーザ、OF: 光ファイバ、BS: ビームスプリッタ、IL: 結像レンズ、M: 平面鏡、CAM: カメラ、PM: 放物面鏡、PDI: 点回折干渉計光学系

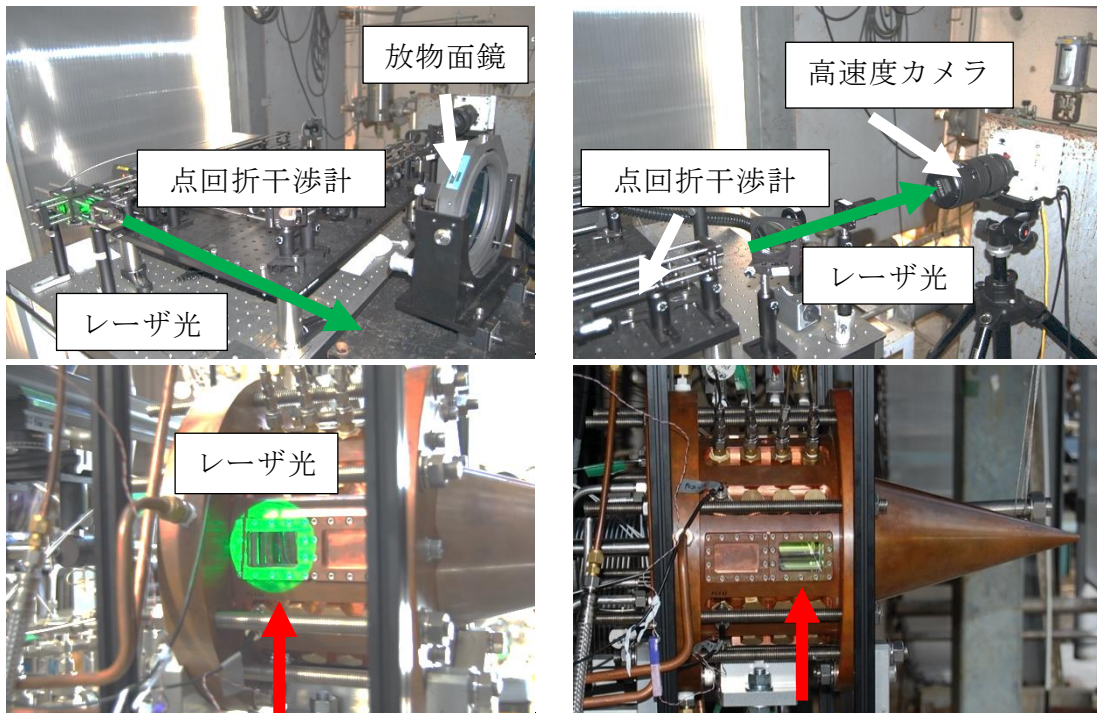


図3-1-5 干渉計設置状況: (左上) 干渉計光学系(照射側); (右上) 干渉計光学系(カメラ側)、(左下) RDRE上流側可視化窓取り付け状態、(右下) RDRE下流側可視化窓取り付け状態

RDRE運転および干渉計による可視化撮影条件を表3-1-3に、可視化試験による波面伝播方向、伝播速度の解析結果をCH*自発光観測画像から得られたそれとの比較を表3-1-4にそれぞれ示す。点回折干渉計による波面速度は、自発光計測によるそれと比較すると、ほぼ同一速度から差異が15%の範囲でばらついた。このばらつきは、燃料・酸化剤の流量を増加させるとともに増加し、常に点回折干渉計での結果が高い値を示した。自発光画像からの爆轟波伝播速度は、燃焼時間の大半を通じた平均値であり、点回折干渉計からの値は、測定部を通過する数コマを利用して計測しており、爆轟波伝播速度の瞬間値として捉えることができる。このことから、流量増加による爆轟波伝播速度に揺らぎが発生し、その程度は燃料流量増加に比例していることを示唆するものと考えられる。

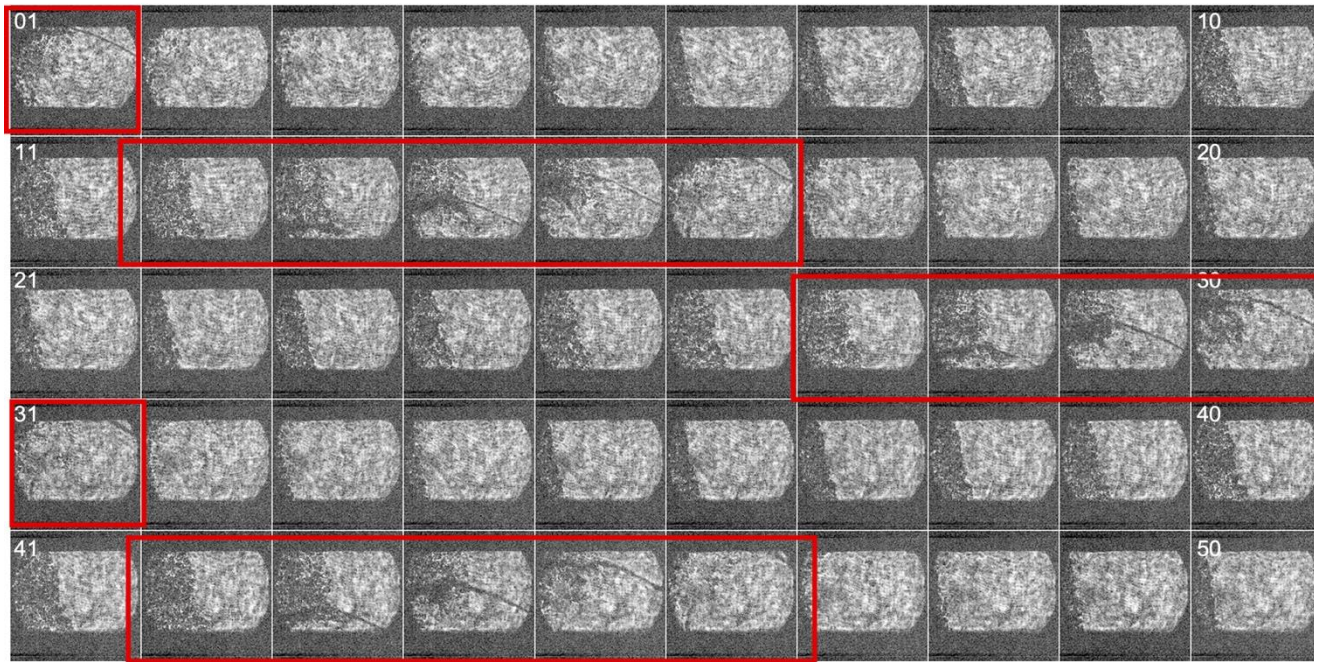
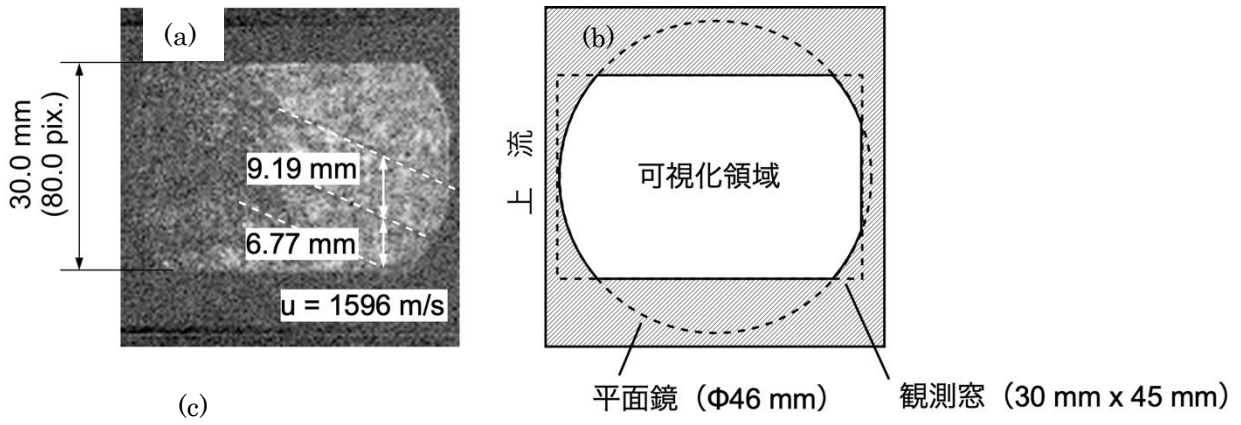
図3-1-6に、RDRE内部で爆轟波と供給された燃料・酸化剤混合気とが反応し、爆轟波、衝撃波、および接触面で構成される特徴的な波面構造の形成を捉えた干渉縞画像を示す。また、図3-1-7にその詳細を示す。RDRE内部での燃料・酸化剤と伝播する爆轟波の反応様態と波面構造が点回折干渉計で、はじめて取得できた画像であり、本研究の大きな成果である。燃焼器内部を伝播する爆轟波が、あらたに供給された燃料・酸化剤混合気に測定窓下側から上側に向け突入し(図3-1-7(a))、爆轟波が混合気と反応し、爆轟が継続する。観測部を爆轟波が伝播するにつれ、爆轟波、衝撃波、接触面によって構成される特徴的な波面構造が確認できる(同図(b)(c)(d))。爆轟波が測定部上側に移動し、その背後に発生した高圧部のため、燃料・酸化剤の流入は、抑制されるが、圧力の減少に伴い、再注入される(同図(e))。

表3-1-3 RDRE 運転および撮影条件

試験番号	日程	時刻	運 転 条 件			撮 影 条 件				
			スロート	流量 (g/s)	等量 比 (-)	画像サ イズ (Pix.) ²	解像 度 (mm /pix.)	コマ 間隔 (μs)	露 光 (μs)	
ERD433C	3/09	16:44	なし	-	-	128x128	0.24	5.00	1.00	
ERD434H		17:28		300	1.0				0.31	
ERD435H	15:40	あり								
ERD436H	16:59	なし	0.4							1.00
ERD437H	17:48									
ERD438H	3/11	12:36	500	1.0	0.31					
ERD439H		15:43	300							
ERD440H		16:27	500							
ERD441H		17:52	900							

表3-1-4 干渉計および自発光によるデトネーション波の可視化結果

試験番号	干 渉 計				自 発 光		
	手法	伝播方向	伝播速度 (m/s)	観測窓 位置	伝播方向	波数	速 度 (m/s)
ERD433C	無限幅	-	-	上流側	時計回り	3	1765
ERD434H		不安定	N/A				
ERD435H		混合	1338				
ERD436H		反時計	1596				
ERD437H	影写真法	不明瞭	N/A	-	-	-	
ERD438H	有限幅 (縦)	反時計	1648	下流側	反時計	4	1765
ERD439H		時計	1748				
ERD440H		反時計	2032				
ERD441H		影写真法	反時計				



赤色四角のコマが爆轟波と燃料・酸化剤との干渉

図3-1-6 点回折干渉計によるRDRE内部での燃料・酸化剤噴流と内部を伝播する爆轟波の干渉様態(試験番号:ERD441H); (a) 可視化領域を通過する爆轟波の移動を3フレーム分を1画像として表示、(b)可視化領域とRDRE観測窓との位置関係、(c) 時間分割表示(時間経過は同一段中では、左から右へ、段間は上から下方向)。撮影条件は表3-1-3を参照。

燃料・酸化剤混合気

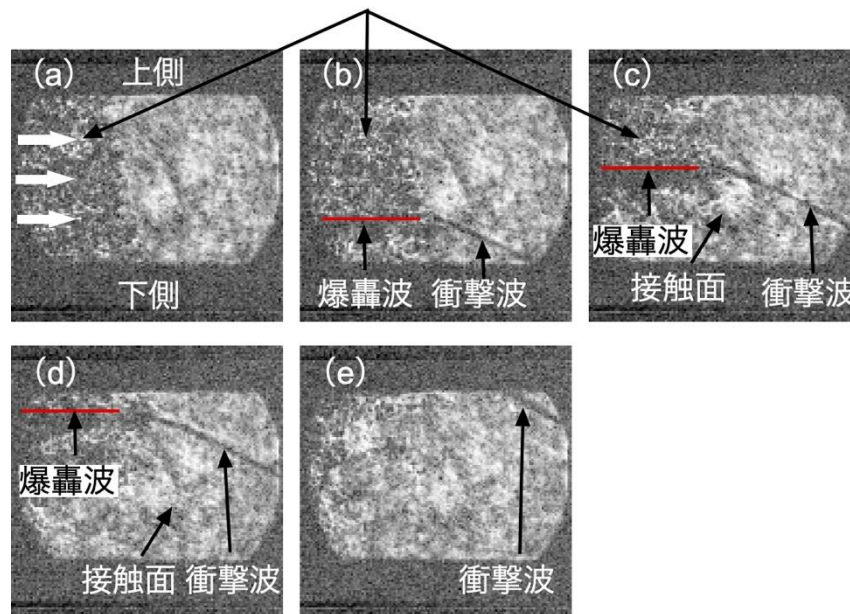


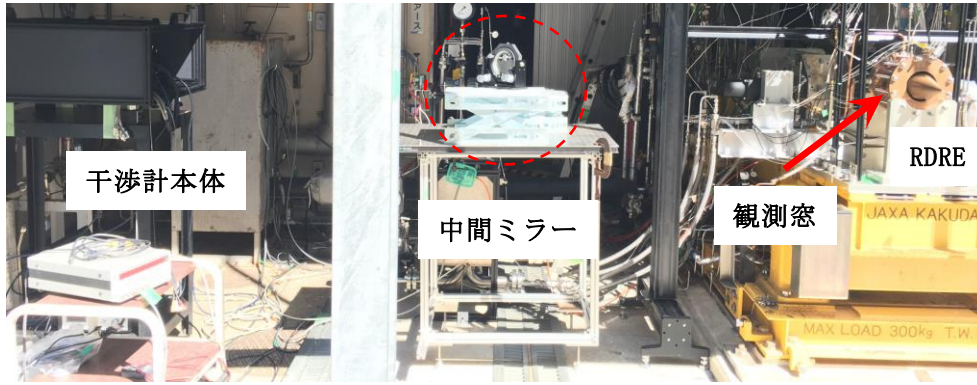
図3-1-7 燃料・酸化剤混合噴流中を爆轟波が通過し、爆轟現象が継続する様子を捉えた可視化画像（拡大）；a：燃料・酸化剤が上流側から噴射される。b：爆轟波が噴流に下側から突入し、噴流中で爆轟が開始する。c、d：爆轟波が噴流と干渉しながら爆轟が継続するため、爆轟波、衝撃波、接触面で構成される回転爆轟波の特徴的な構造が確認できる。e：爆轟波が測定部の上側に移動し計測範囲から出る。

(2) 位相シフト干渉計による回転爆轟波背後の位相情報取得法の確立

RDRE内部の爆轟波伝播の干渉計による定量解析法を発展させるため、前述した点回折干渉計による計測と並行して、位相シフト干渉計（Phase-Shift Interferometry: PSI）の適用研究と燃焼試験での計測を実施した。図3-1-1に本件で設計・製作したPSIの光学系概略を示す。PSIは、干渉計計測で基本となる2つの光波（物体光および参照光）に対して、撮像装置（図3-1-8では、H-CAM）の直前で4段階の位相差を、MEMS技術で微細加工したフィルタ（図3-1-8では、PP）で与えることで、干渉縞解析のより高精細な解析を実現させる。PSIの設置状況を図3-1-9に示す。当該燃焼実験における撮影条件を表3-1-5に示す。本件では、爆轟波背後の流れ場の位相情報を取得し、回転爆轟波伝播に関する詳細解析の実現を目的に適用し、以下のごとく、目的を達成した。

表3-1-5 位相シフト干渉計計測条件

項目	設定値	備考
撮影速度 (pfs)	75,000	コマ間隔: 13.3 μs
露光時間 (μs)	0.37	
画素数 (pix ²)	320×264	一部の条件で160×132
レーザー光波長 (nm)	532	
レーザー出力 (mW)	20	



(a) 第1期 (R3.03.05から03.09、屋内設置)



(b) 第2期 (R3.03.15から03.19、屋外設置)

図3-1-8 RDRE燃焼実験時の位相シフト干渉計配置状況

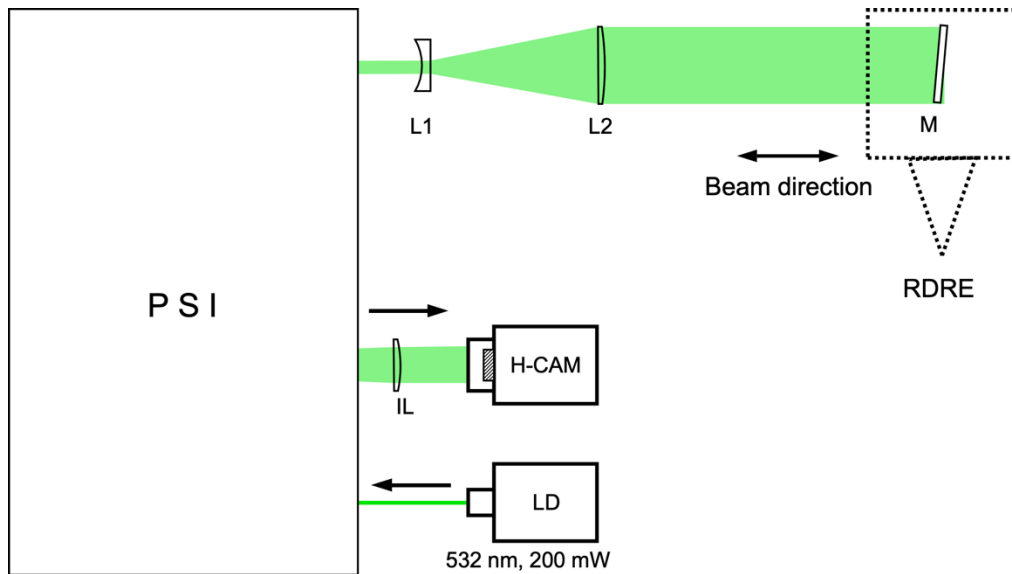


図3-1-9 位相シフト干渉計光学系. LD : ダイオードレーザ、M : 平面鏡、L : レンズ、HM : 半透明鏡、H-CAM : 高速度カメラ、PSI : 位相シフト干渉計.

位相シフト干渉計による爆轟波計測の代表例を図3-1-10および図3-1-11に示す。図3-1-10の結果は、PSIを屋内設置で計測したものの、図3-1-11は屋外設置の結果である。双方を比較すると、いずれも偏光主軸方向（各図a）、直線偏光度（同b）、およびそれらを解析した位相分布（同c）において、爆轟波の可視化と爆轟波前後の位相情報が干渉縞としての取得に成功している。得られた位相情報には、観測窓の熱応力によるゆがみなど、補正すべきノイズが含まれているものの（図3-1-11（a）参照）、計測精度として、およそ100 nm/pix.の位相分解能が達成できた。相対密度に換算した結果を図3-1-12に示す。撮影視野内の相対的な密度分布が計測できており、数値シミュレーションの検証に必要な定量計測を達成したと考える。但し今後計測の精度向上には、直接計測等の方法で基準密度をより正確に同定する必要がある。

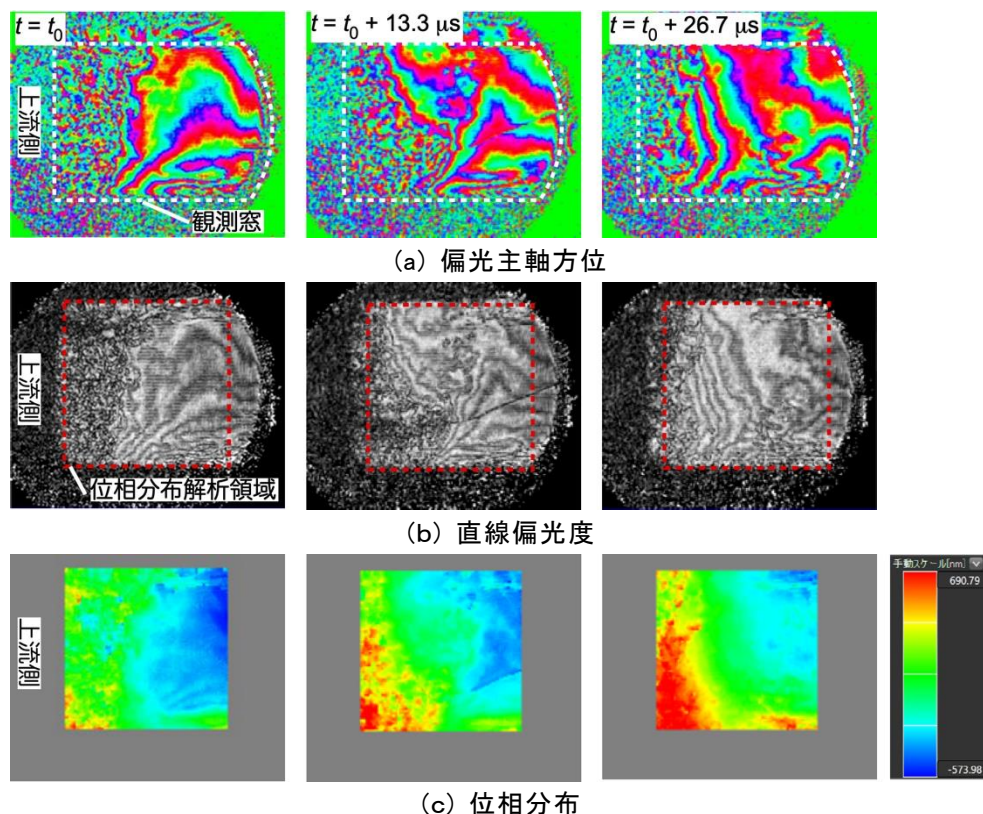


図3-1-10 位相シフト干渉計による爆轟波計測結果（試験番号ERD415H）

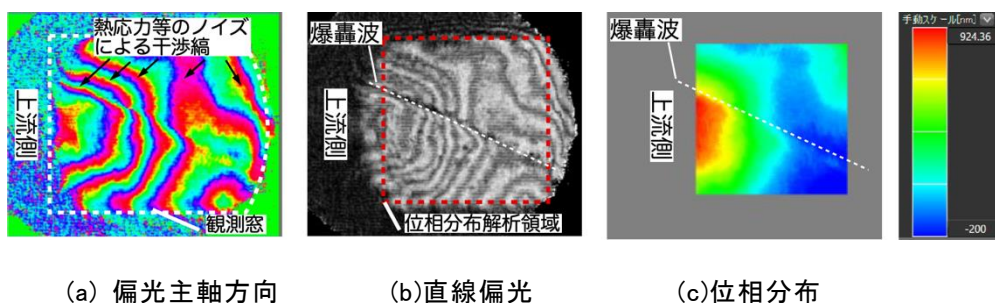
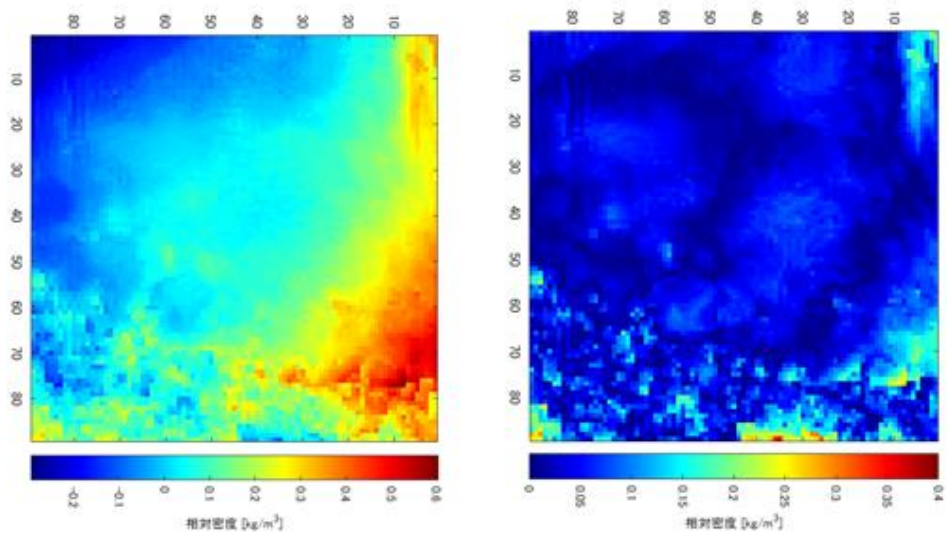


図3-1-11 位相シフト干渉計による爆轟波計測結果（試験番号ERD455H、屋外設置）



(a) 傾き補正なし (b) 傾き補正あり
 図3-1-12 相対密度分布計測結果

要素課題② デトネーション波の計測

・ 燃焼試験概要

回転デトネーション波の構造解明のためサイズの異なる 2 式の供試体を用いて燃焼試験を行った。まず共通となる燃焼試験設備に関する情報を以下に整理する。

燃焼試験設備としては角田宇宙センターにおける燃焼試験スタンドを使用した。燃料としてメタンガスを、また酸化剤として酸素ガスを用いた。燃料/酸化剤供給系を図 3-2-1 に示す。燃料、酸化剤はストレージに充填されボンベから切り離された後、ストレージからドーム式レギュレータおよびオリフィスを介して定常流量で供給される。各流量は環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 を用いた試験ではコリオリ流量計(RHM シリーズ、Rheonik)を用いて流量校正されたオリフィスを用いて算出し、環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 を用いた試験ではコリオリ流量計の応答速度が試験時間に対し十分であることが確認されたことから両系統ともコリオリ流量計を用いて測定した。

燃焼器の点火は燃焼器外筒より鉛直上向きに取り付けたプリデトネータを用いて行い、メタンガスと酸素ガスをブロードダウン方式で供給の上、スパークプラグ(BUR7EQ、日特陶)でデトネーションを開始し燃焼室へ入射させた。各推進剤供給は空圧作動弁、電磁弁をシーケンス制御で行い、スパークプラグへの電圧付加も同様にした。試験シーケンスの概要を流量・燃焼圧・推力履歴例とともに図 3-2-2 に示す。点火後の実効燃焼期間は約 0.6s と見積もられ、燃焼圧がほぼ一定になる 0.15-0.30s の期間を定常状態とみなし流量、当量比などの測定値の平均値算出期間とした。

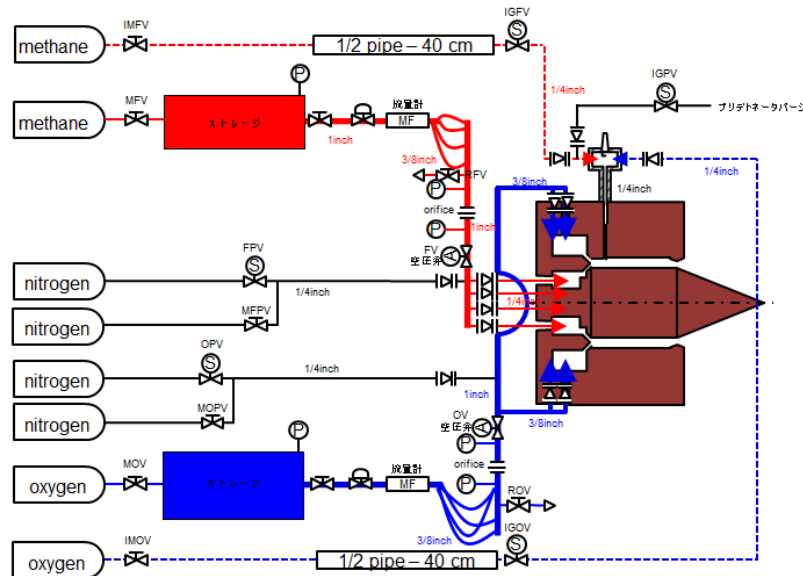


図 3-2-1 試験系統図

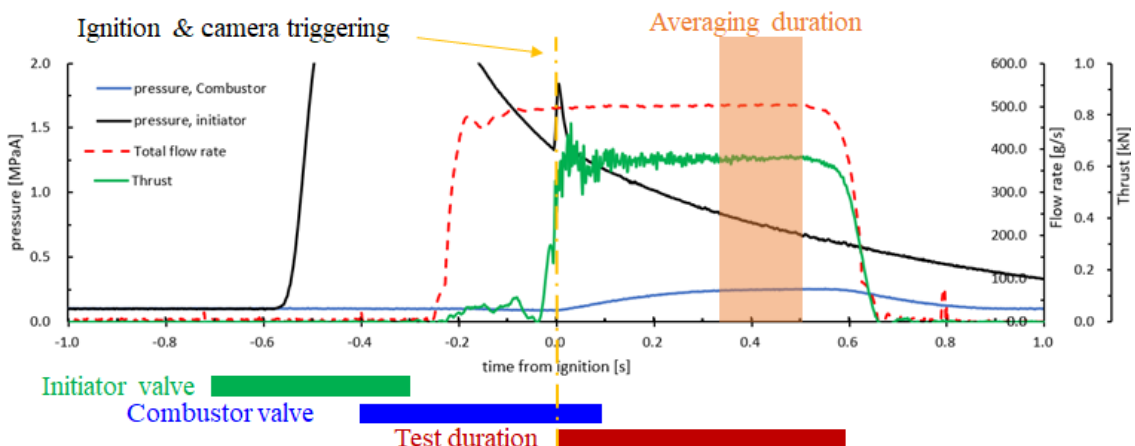


図 3-2-2 試験シーケンス

次に 2 式の供試体について以下説明する。

【環状デトネーション燃焼試験装置 # 1】別称：中型、Medium

燃焼室内径	101mm
燃焼室外径	117mm、137mm
燃焼室溝幅	8mm、18mm
燃焼室出口幅	8mm(スロート無)、18mm(スロート無) 2mm(スロート有)、3.7mm(スロート有)
燃焼室長さ (噴射面～出口)	127mm
CH ₄ 噴射器	φ 1.7mm×150 孔-45° φ 1.7mm×150 孔-70°
O ₂ 噴射器	φ 1.9mm×150 孔-30° φ 1.9mm×150 孔-20°
プラグノズル底辺角	74°
可視化用観測窓	円形 3 か所

コンフィギュレーション組合せ

	燃焼室溝幅	スロート有無	CH 噴射角	O ₂ 噴射角
a	8	無	45°	30°
b	8	有	45°	30°
c	8	無	70°	20°
d	8	有	70°	20°
e	18	無	45°	30°
f	18	有	45°	30°

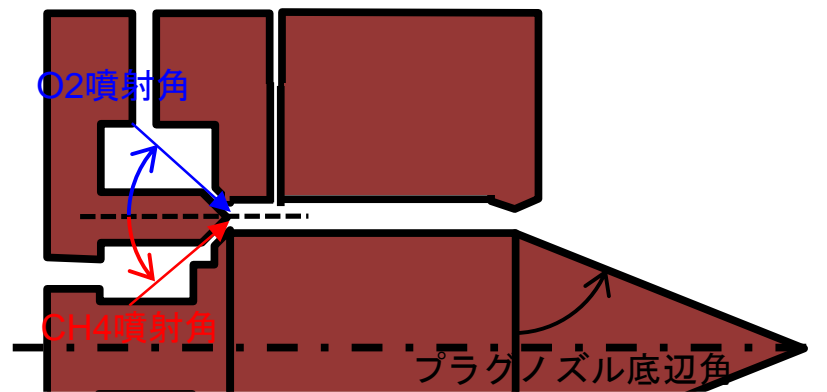
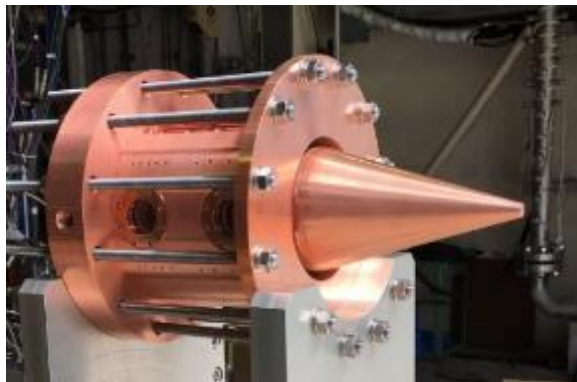


図 3-2-3 噴射角とノズル底辺角



(a)溝幅 8mm



(b)溝幅 18mm

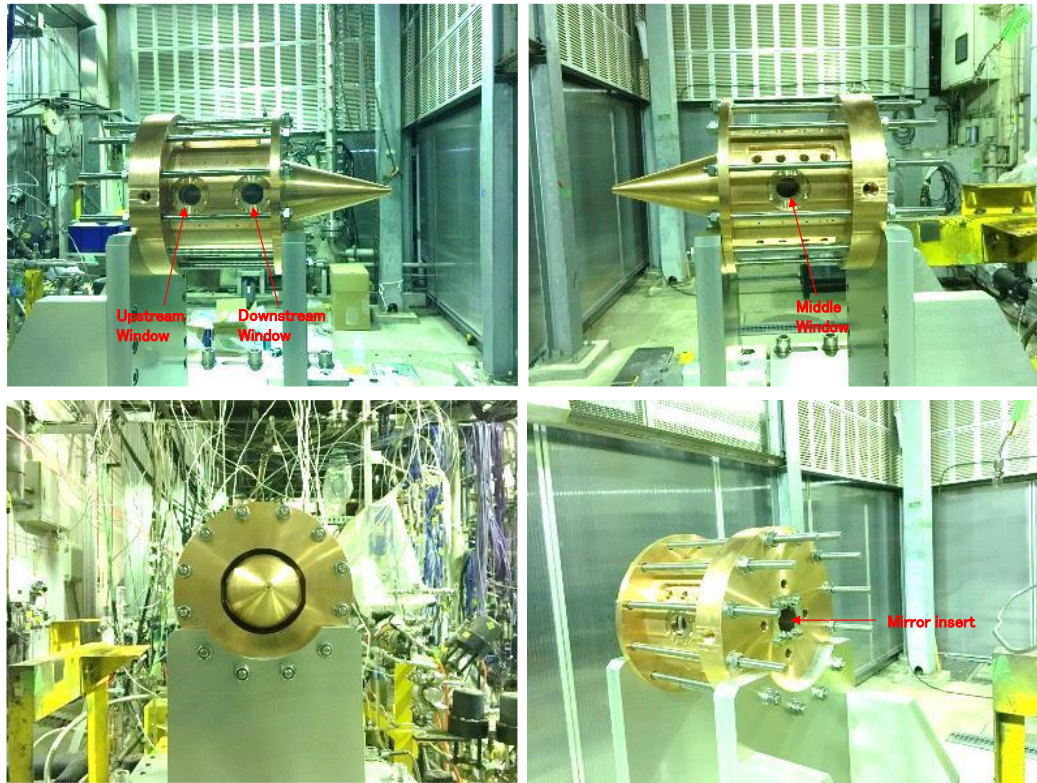


図 3-2-4 環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 外観

サイズの影響を確認するため#2 は更に大きいサイズとした。

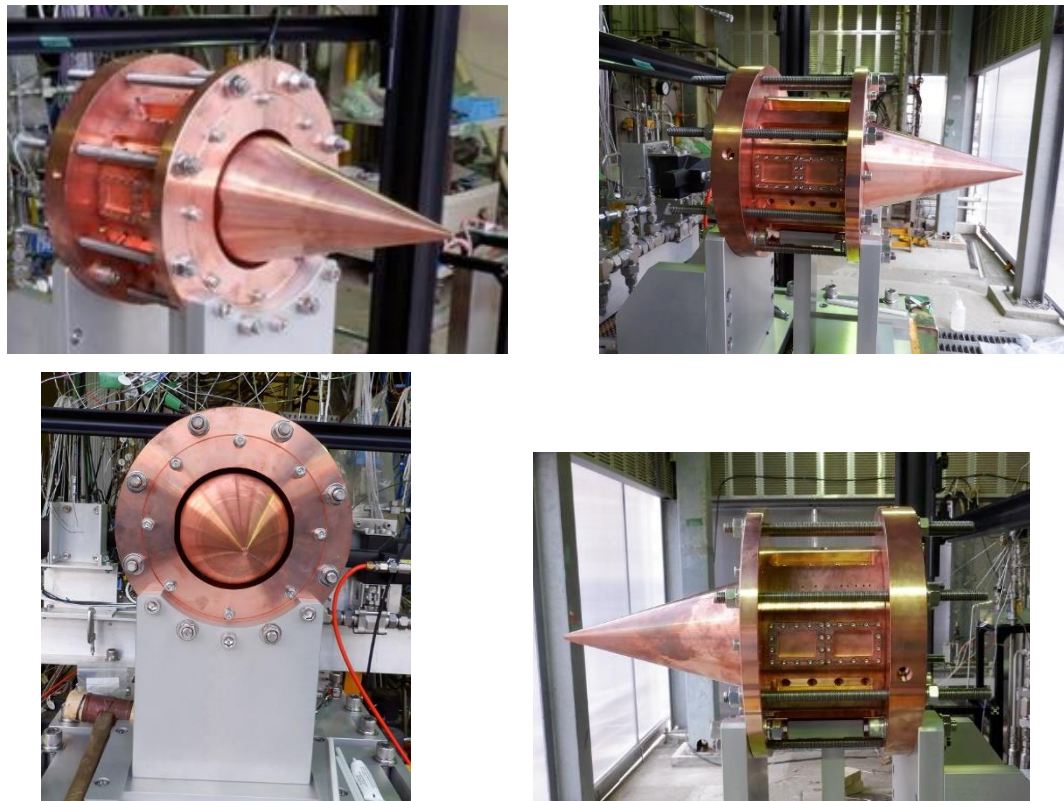
【環状デトネーション燃焼試験装置 # 2】

燃焼室内径	150mm
燃焼室外径	166mm、186mm
燃焼室溝幅	8mm、18mm
燃焼室出口幅	8mm(スロート無)、18mm(スロート無) 2mm(スロート有)、2mm(スロート有)
燃焼室長さ (噴射面～出口)	127mm
CH ₄ 噴射器	φ 0.9mm×150 孔-45° φ 0.7mm×250 孔-45° φ 0.9mm×250 孔-45°
O ₂ 噴射器	φ 1.0mm×150 孔-30° φ 0.78mm×250 孔-30° φ 1.0mm×250 孔-30°
噴射器相対位相	噴射衝突位相、噴射非衝突位相
プラグノズル底辺角	74°
可視化用観測窓	矩形 4 か所

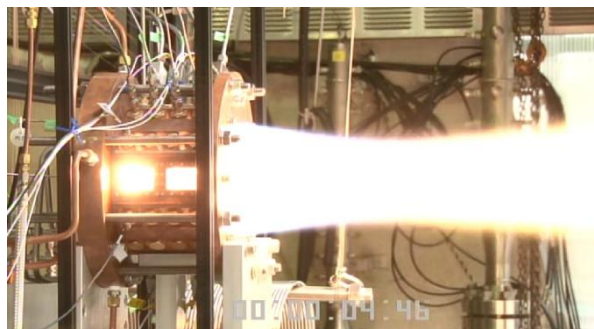
コンフィギュレーション組合せ

	燃焼室溝幅	スロート有無	CH 噴射器	O ₂ 噴射器	噴射器位相
A	8	無	φ 0.9mm×150 孔	φ 1.0mm×150 孔	衝突
B	8	有	φ 0.9mm×150 孔	φ 1.0mm×150 孔	衝突
C	8	無	φ 0.9mm×150 孔	φ 1.0mm×150 孔	非衝突
D	8	有	φ 0.9mm×150 孔	φ 1.0mm×150 孔	非衝突
E	8	無	φ 0.7mm×250 孔	φ 0.78mm×250 孔	衝突
F	8	有	φ 0.7mm×250 孔	φ 0.78mm×250 孔	衝突

G	8	無	$\phi 0.9\text{mm} \times 250$ 孔	$\phi 1.0\text{mm} \times 250$ 孔	衝突
H	8	有	$\phi 0.9\text{mm} \times 250$ 孔	$\phi 1.0\text{mm} \times 250$ 孔	衝突
I	18	無	$\phi 0.9\text{mm} \times 150$ 孔	$\phi 1.0\text{mm} \times 150$ 孔	衝突
J	18	有	$\phi 0.9\text{mm} \times 150$ 孔	$\phi 1.0\text{mm} \times 150$ 孔	衝突



(a)外観



(b)燃焼時

図 3-2-5 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 外観

計測項目

項目	計測位置(噴射面からの軸方向位置)
燃焼圧	9mm
燃焼室変動圧:PCB 113b24	9, 35, 65, 95mm
自作変動圧センサ:ピエゾ素子	9mm
燃焼室壁内温度(肉厚 1.2mm):K 型熱電対	2, 9, 18, 35, 65, 95mm
燃焼室壁内温度(肉厚 2.2mm):K 型熱電対	2, 9, 18, 35, 65, 95mm
高速応答 E 型熱電対	9mm

・ 作動状態マッピング

回転デトネーションエンジンがどのような作動条件で安定して運転されるのか確認するため研究計画段階では当初、環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 で総流量 100~400g/s、当量比 0.6~1.4、環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 で総流量 200~900g/s、当量比 0.6~1.4 の範囲で探索する予定であったが、試験を進めるに従い安定—不安定の境界を見極めるにはより広範囲を探索する必要に至り、試験回数が当初計画に比べ膨大に増える結果となった。

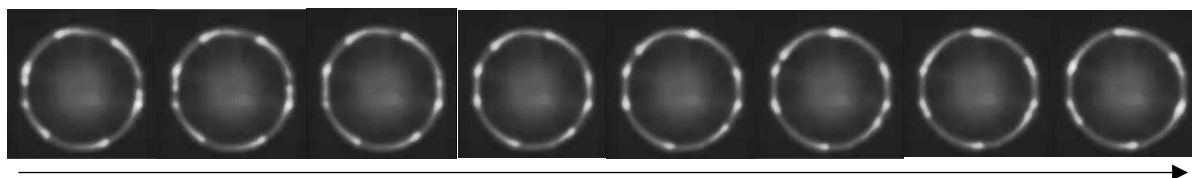
作動状態の確認には供試体出口軸方向から高速カメラ Phantom VEO710S(ノビテック)を用いて燃焼室内のデトネーションの伝播の様子を撮影した映像を用いた。撮影速度は 200,000 fps、露光時間 5 μ s とし、解像度はおよそ 1mm/pixel 程度とした。

以下にまず回転デトネーションエンジンの運転状態である本研究における「安定(Stable)」、「不安定(Unstable)」、またその中間ともいえる「遷移(Transition)」の区別を定義する。

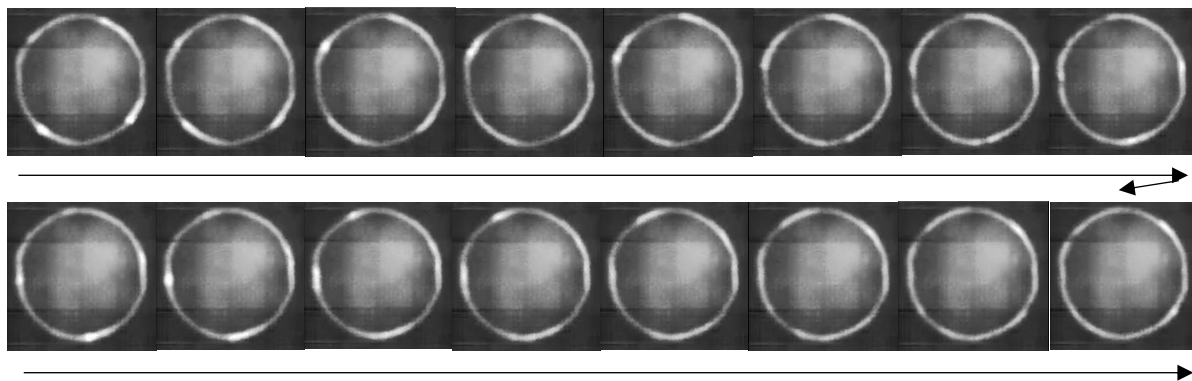
「安定(Stable)」：定常中にデトネーション波数および回転方向が一定で変化がない。

「遷移(Transition)」：デトネーション波の回転伝播は確認できるが、定常中波数および回転方向が変化したり、対向波（反対回転のデトネーション波）が確認される。

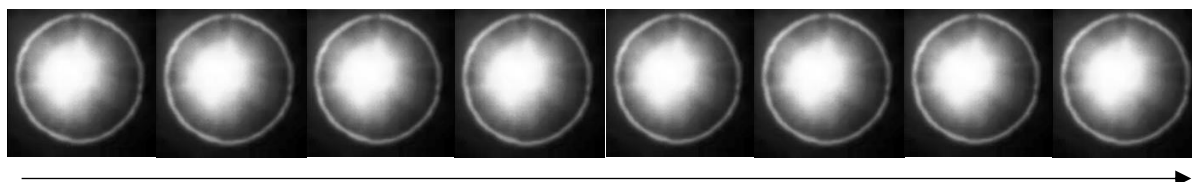
「不安定(Unstable)」：軸方向高速画像から回転伝播するデトネーション波が確認されない、もしくは軸方向高速画像では局所的な点滅が確認されるものの側面観測窓における CH*画像から燃焼を伴う波面の伝播が確認されない。



(a) 「安定(Stable)」の軸方向高速画像連続写真 一例
(コンフィギュレーション A_総流量 693g/s_当量比 0.54_6 枚左回転)



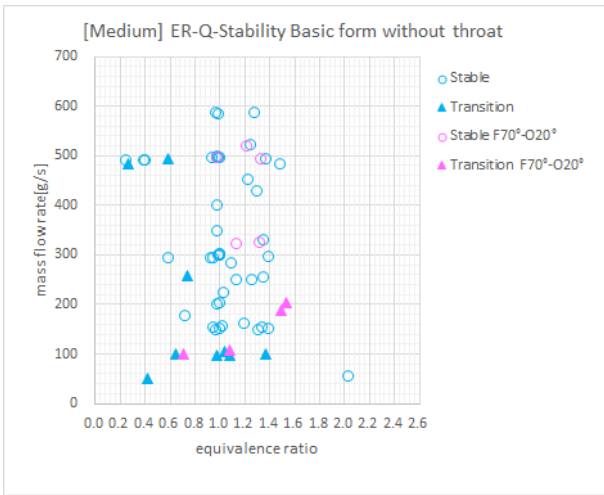
(b) 「遷移(Transition)」の軸方向高速画像連続写真 一例
(コンフィギュレーション A_総流量 206g/s_当量比 1.23_対向波有)



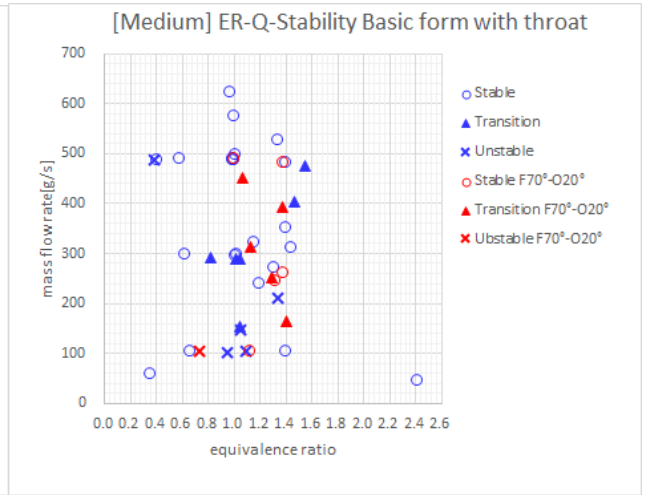
(c) 「不安定(Unstable)」の軸方向高速画像連続写真 一例
(コンフィギュレーション C_総流量 526g/s_当量比 1.27_デトネーション非発生)

図 3-2-6 軸方向高速画像連続写真 一例

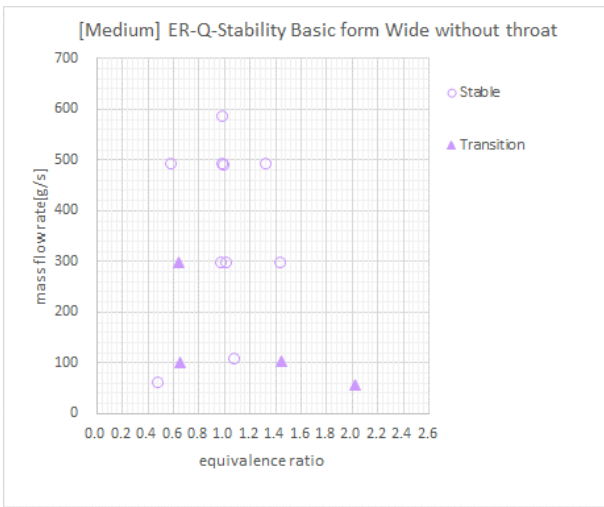
以降に各コンフィギュレーション毎に観測された作動状態マッピングを示す。



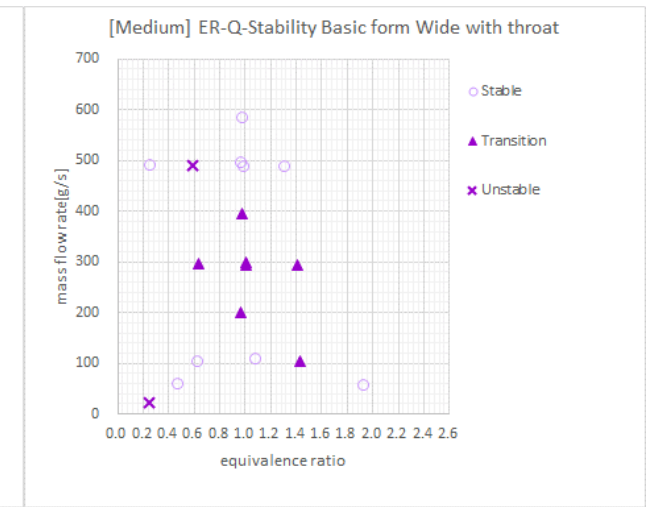
(a) コンフィギュレーション a,c



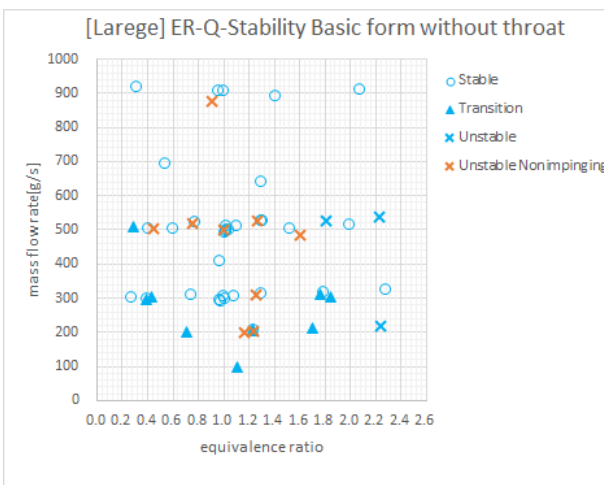
(b) コンフィギュレーション b,d



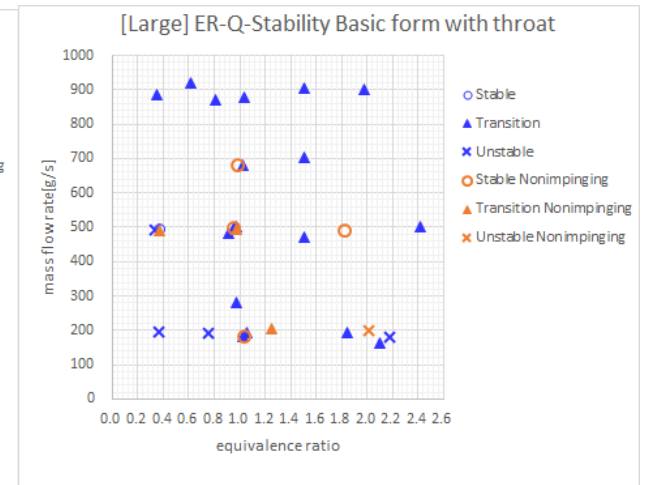
(c) コンフィギュレーション e



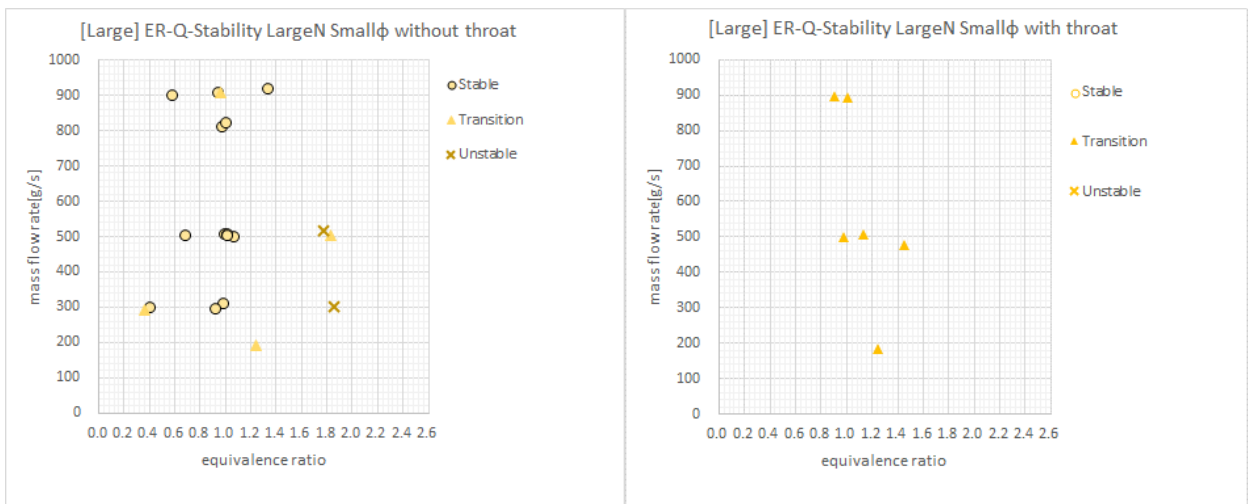
(d) コンフィギュレーション f



(e) コンフィギュレーション A,C

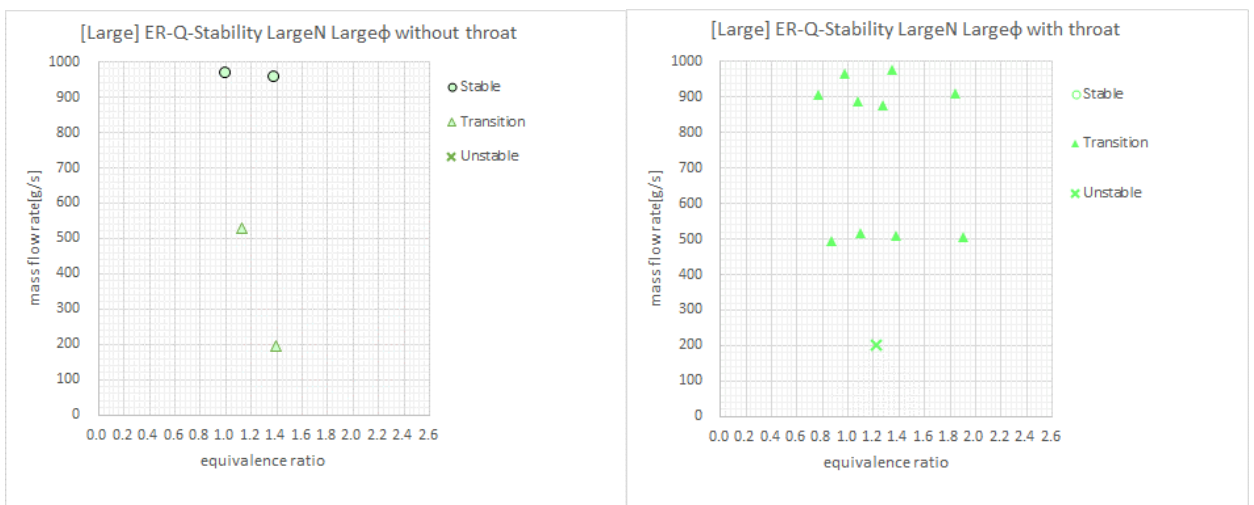


(f) コンフィギュレーション B,D



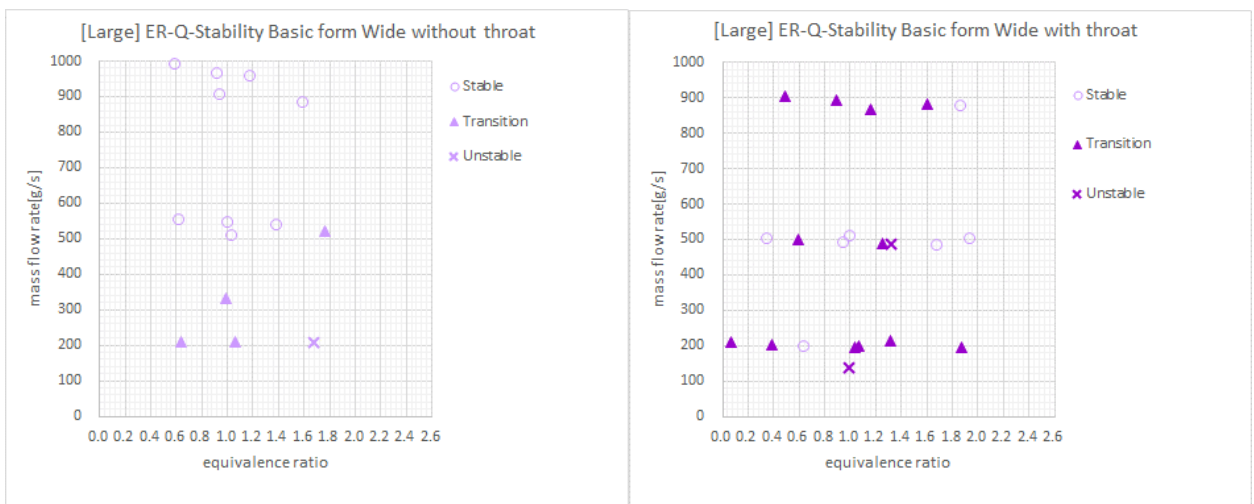
(g) コンフィギュレーション E

(h) コンフィギュレーション F



(i) コンフィギュレーション G

(j) コンフィギュレーション H



(k) コンフィギュレーション I

(l) コンフィギュレーション J

図 3-2-7 安定/不安定作動マップ((a)~(d): 環状デトネーション燃焼試験装置 # 1、(e)~(l): 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2)

まず(a) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 のコンフィギュレーション a,c について、低流量および当量比 1.0 から離れた領域において、「不安定」まで至らないものの「遷移」が確認された。これは噴射器の違いによらず比較的同じ領域で「安定」から「遷移」に移行するようにみられる。

次に(b) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 のコンフィギュレーション b,d について、低流量において「不安定」が確認されたことから低流量領域はデトネーション伝播に不向きであると考えられる。一方で当量比は 1.0 付近でも比較的「遷移」が確認されており、スロート付き条件においては当量比に関わらず「安定」から「遷移」に移行する可能性がある。この要因については不明であるが、噴射器の衝突位相について 0.5mm 以下でズレる可能性がありセットアップが影響している可能性がある。なおここにおいても噴射器の違いによる差異はあまり見られなかった。

次に(c) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 のコンフィギュレーション e について、低流量・低当量比において例外がみられるが、総じて低流量、低/高当量比領域において「安定」から逸脱するようにみられる。(d) コンフィギュレーション f について、特徴的な分布を示しており、低/高流量では「安定」が多くみられるが、200~400g/s 付近の中流量付近では「遷移」が多くみられた。この要因についても不明であるが、セットアップの状態に加え、流量によって噴射器近傍でデトネーションが遷移しやすい混合場か否か左右することにより、流量によって伝播の状態が変化した可能性も考えられる。

次に(e) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション A について、これまでのスロート無コンフィギュレーションと同様に低流量、低/高当量比領域において「遷移」もしくは「不安定」が確認された。一方でコンフィギュレーション C 非衝突噴射器位相においては流量 900g/s などのいかなる条件においてもプリデトネータからのデトネーション伝播は着火時に確認できるものの、その後のデトネーションの発生、伝播は確認できず、「不安定」との判定に至った。これにより噴射器の衝突位相ズレはデトネーション伝播が可能な未燃ガス混合場を形成するにあたり重要なパラメータであることが判明した。

次に(f) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション B について、低流量では「不安定」が確認されたが、その他はほぼ全域に渡って「遷移」という判定となった。同条件で噴射器を非衝突位相としたコンフィギュレーション B については一部鮮明なデトネーション波が観測され「安定」という判定となった。これについてはまずスロート有とした場合、概ね全域において「安定」とはなりにくい条件である一方で、噴射器の位相を変えるなど未燃ガスの混合場を変更することでデトネーションが発生することから、スロート無に比べ燃焼圧が上がり噴射流速が変化し燃焼室内の混合状態が変化することにより発生しているものと考えられる。

次に(g) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション E であるが、低流量および低/高当量比で「遷移」もしくは「不安定」となる様相はこれまでと同様とみられ、噴射器が変わってもスロート無形態では同様の様相となることが分かった。

次に(h) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション F であるが、試験数は少ないもののすべて「遷移」であり、スロート有の形態においても噴射器が変更された影響は衝突状態を維持した場合においては軽微とみられる。

次に(i) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション G であるが、試験数は少ないものの総流量 500g/s_当量比 1.0 付近の条件において「遷移」と判定され、前述のスロート無形態の 2 つの様相 A,E とは異なる。当該噴射器は A と口径は変えず最密配置としていることから噴射流速は相対的に最も遅いこととなり、何らかの影響があった可能性がある。

次に(j) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション H であるが、高流量においても「遷移」であり、これまでのコンフィギュレーション B,F と同様の様相である。

次に(k) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション I であるが、全般的にはこれまでの傾向と同様であるが、総流量 300g/s_当量比 1.0 付近で「遷移」となっており、コンフィギュレーション A,E とは異なり、G に近い傾向とみられる。当該コンフィギュレーションは燃焼室溝幅が広がり、噴射器を出た後の空間体積が広がっていることから、A と同じ噴射器においても噴射流速が遅くなった G と同様な影響が I において起こり「遷移」領域が低流量側から広がった可能性が考えられる。

次に(l) 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 のコンフィギュレーション J であるが、これまでの傾向から一転して「安定」がみられる領域が確認された。これは燃焼室体積の増大により何らかの影響があったためと考えられるが、領域が限定されておりどういった影響によるものか不明である。

ここまでの結果を総じると

- ・スロート有・無では作動状態に差が見られた。
- ・スロート無形態では低流量、低／高当量比において「遷移」および「不安定」となった。
- ・スロート有形態では低流量で「不安定」となることは同様であるが、広く「遷移」がみられる一方、一部の条件では「安定」もみられることから何らかの影響を受けて「安定」「不安定」を左右している可能性がある。
- ・噴射器を非衝突位相とすることでスロート無形態ではデトネーションを発生しにくく、スロート有ではデトネーションを発生しやすくする影響がある可能性がある。

・ 可視化による構造解明

(1)CH*画像撮影

燃焼室内の波面の構造確認には側壁方向から CH*ラジカル発光分布の測定のため、中心波長430nm のバンドパスフィルタ、および信号増幅のためにイメージインテンシファイア C10880(浜松ホトニクス)を組み合わせ撮影した高速度画像を用いた。カメラは FASTCAM SA5 (Photron) を使用し、150,000 fps もしくは 60,000fps、露光時間 0.37 μ s で撮影を行った。画像は高速度映像から切り出し、輝度を各試験毎にカラーに変換し補正を加えた。そのため試験間での輝度比較は困難である。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 1

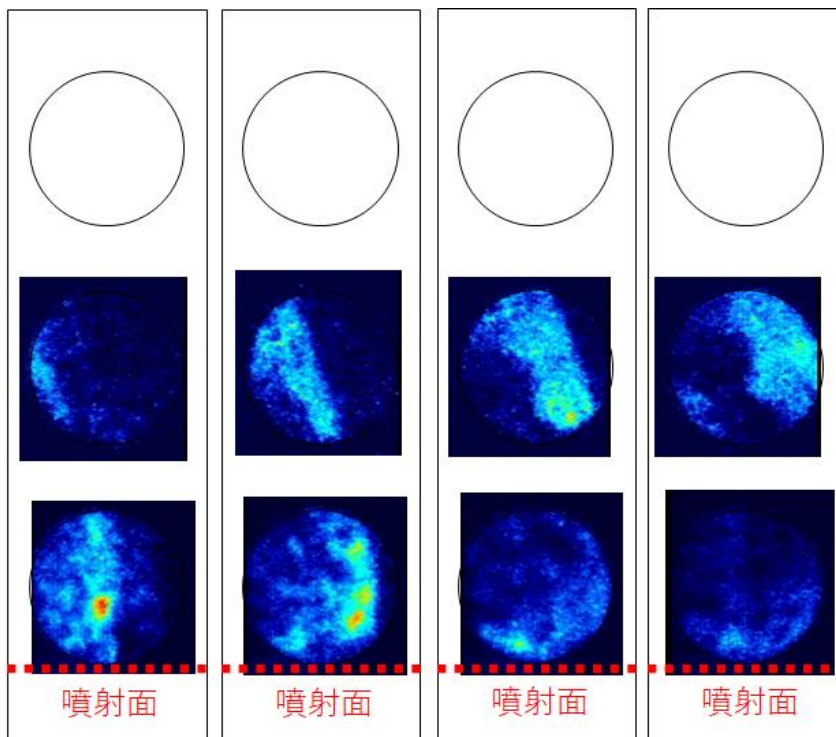


図 3-2-8 コンフィギュレーション a_上流:総流量 493g/s_当量比 0.94_中間:総流量 493g/s_当量比 0.98_抽出

波面の形状が鮮明である。中間窓にみられる斜め衝撃波とみられる波面は斜めの形状を保ったまま伝播しており、典型的な波面形状とみられるが、中間窓においても CH*が計測されていることからある程度下流でも燃焼が起こっているものと考えられる。



図 3-2-9 コンフィギュレーション a_総流量 489g/s_当量比 0.41
 全体的に弓なりの形状とみられる。波面形状も当量比 1.00 付近と比べると鮮明ではない。

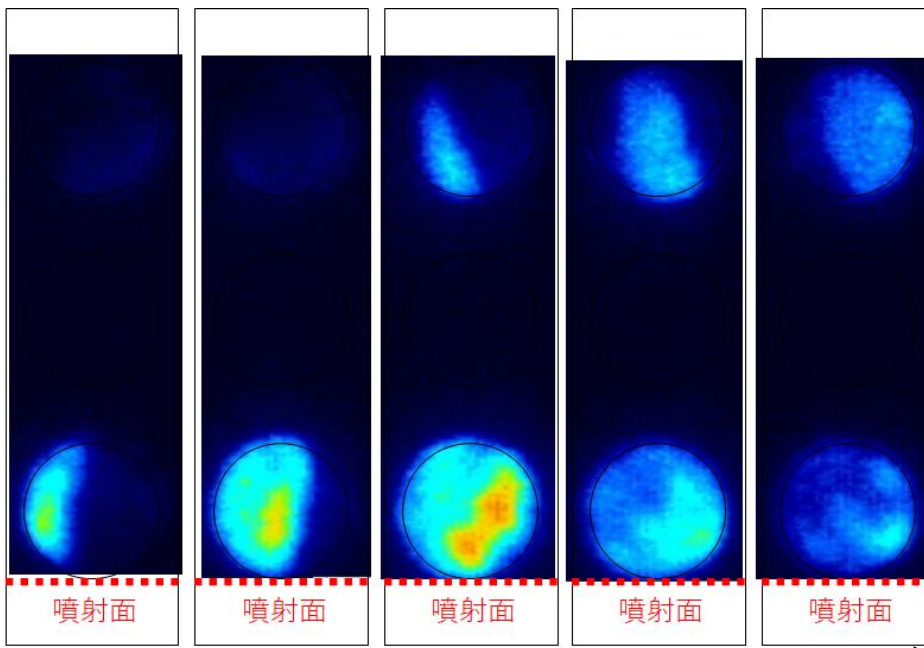


図 3-2-10 コンフィギュレーション a_総流量 535g/s_当量比 1.23_連続
 鮮明な波面が確認される。ただし当量比 1.00 付近よりも波面が立っているように見られた。一方下流窓でも CH*の発光が確認されることからある程度下流でも燃焼が起こっているものと考えられる。

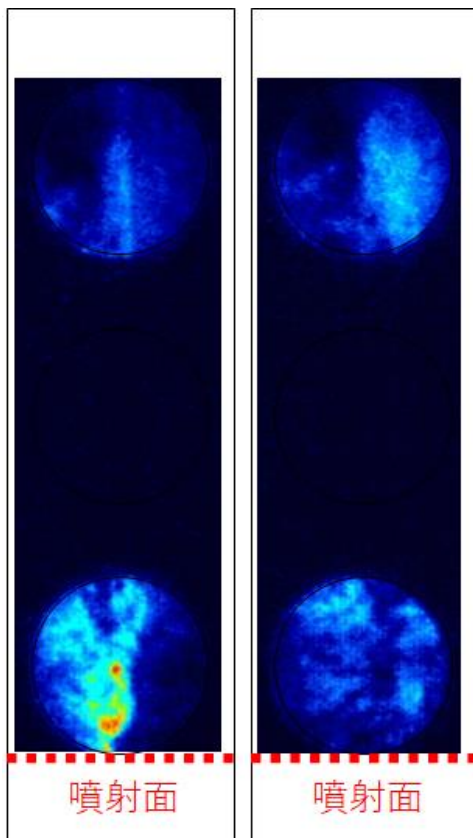


図 3-2-11 コンフィギュレーション b_総流量 487g/s_当量比 1.01_連続

スロートありのコンフィギュレーションにおいては比較的下流側まで波面が鮮明である。対向波がない影響とも考えられる。噴射器近傍でデトネーション波によって燃焼が促進している様子が確認される。また波面形状は波面が立っておりほぼ垂直、若干弓なりといった形状であった。

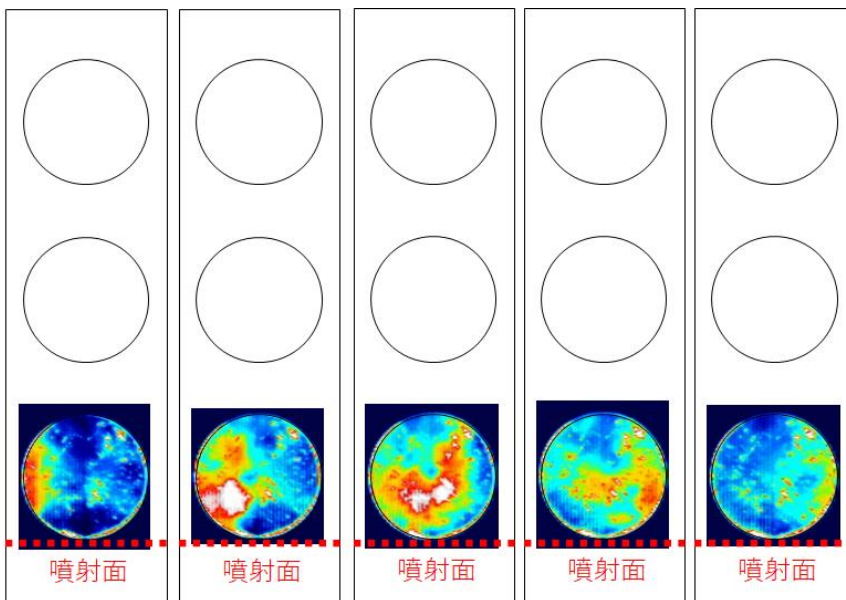


図 3-2-12 コンフィギュレーション c_総流量 493g/s_当量比 0.99_連続

上流側のみの観測となるが、鮮明なデトネーション波面が確認されており、噴射器近傍でデトネーションにより燃焼が促進していたことが確認される。

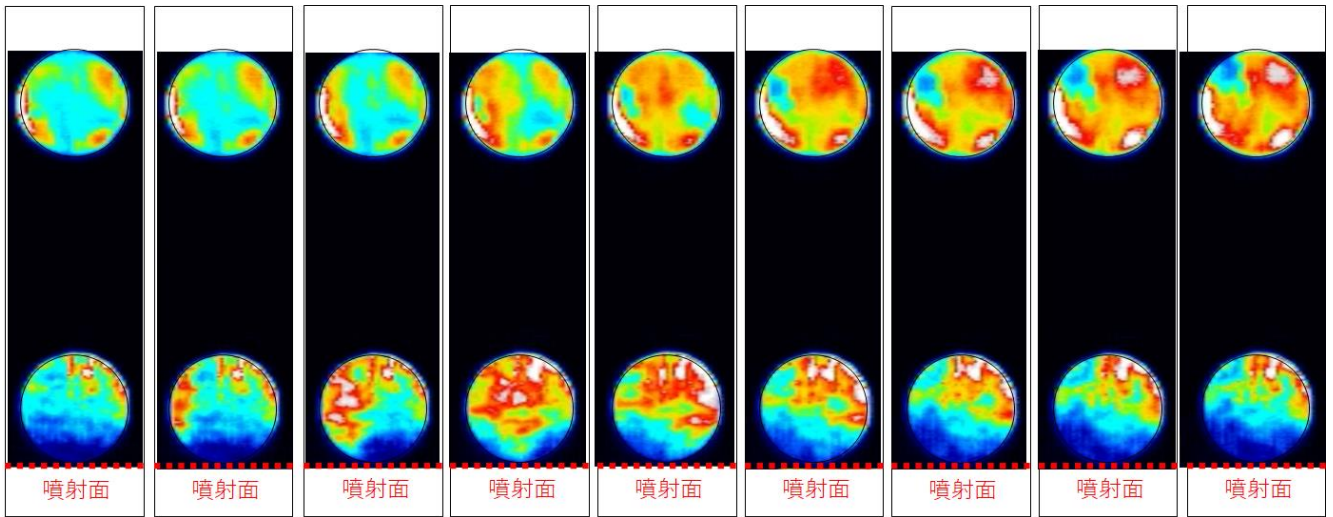


図 3-2-13 コンフィギュレーション d_総流量 451g/s_当量比 1.07_連続

デトネーションによらない定常的な燃焼が発生し下流へ流れていく様相が確認される中、デトネーション波の伝播も確認されており、本試験も比較的下流側でも波面の伝播が確認できる試験であった。波面形状は下流に向けて立っており、また噴射器から噴出した未燃ガス層も明確に確認された。

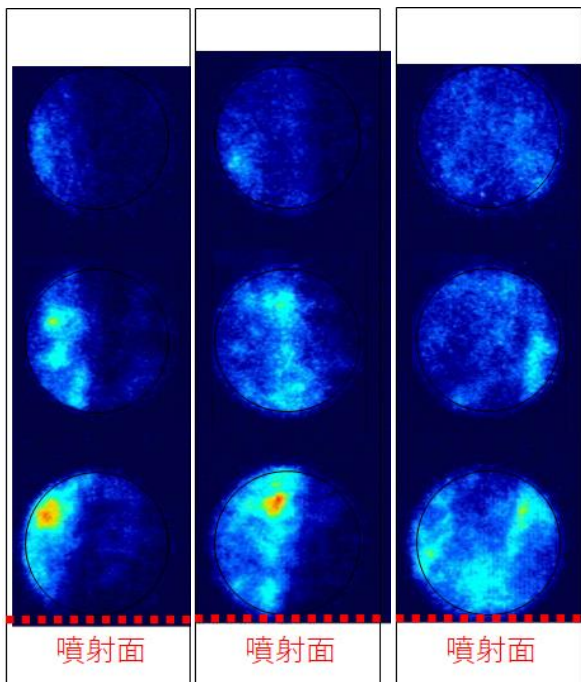


図 3-2-14 コンフィギュレーション e_上流/下流:総流量 488g/s_当量比 1.00_中間: 総流量 490g/s_当量比 0.99_抽出

比較的鮮明な波面が確認された。波面形状は弓なり形状であり、スロート無形態においては比較的立っている方と考えられる。

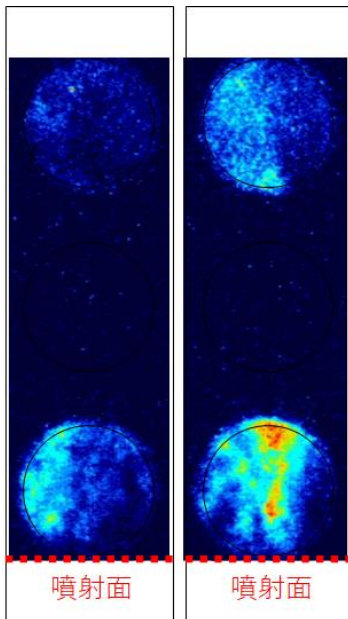


図 3-2-15 コンフィギュレーション e_総流量 294g/s_当量比 1.44_抽出
鮮明な波面が確認された。波面形状は当量比 1.00 付近に比べると下流側で立っているようにみられる。

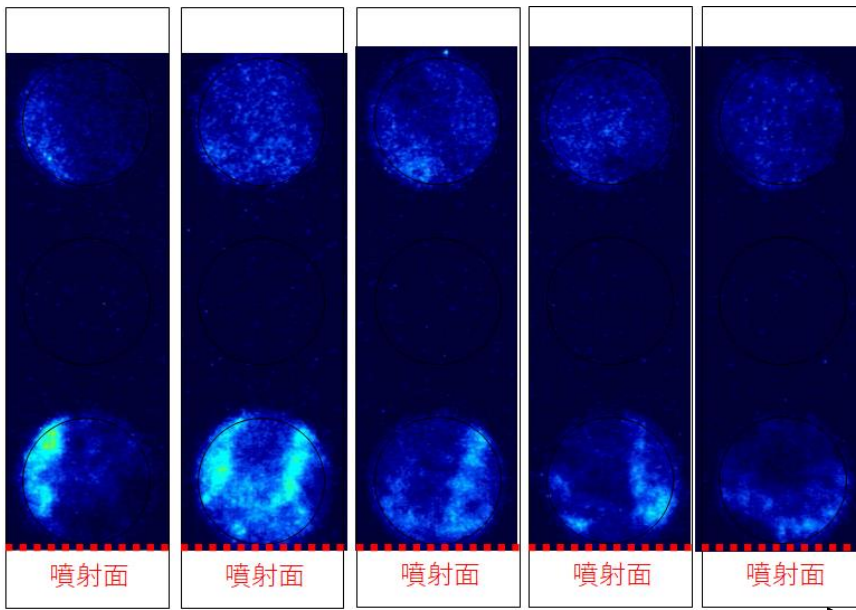


図 3-2-16 コンフィギュレーション e_総流量 295g/s_当量比 1.02_連続
比較的不鮮明な波面形状となっていた。特に下流側は不鮮明である。しかし特徴的な形態を有しており、上流側は1枚目の波面直後にもう1枚の波面とみられる CH*の発光が確認された。これは不鮮明ながら下流側でも同様に見られ、本条件に特徴的な波面形状で伝播するものと考えられる。

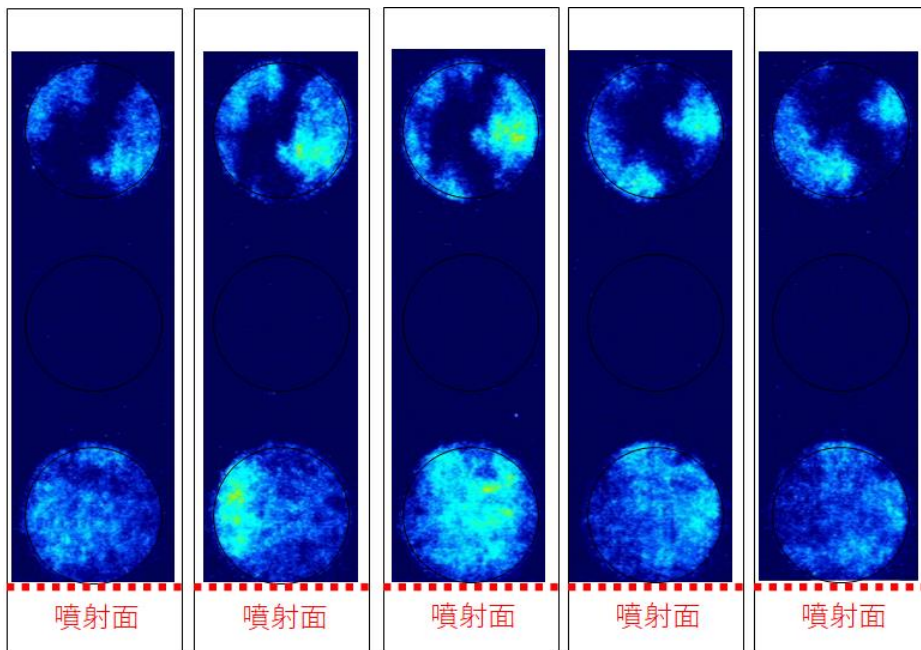
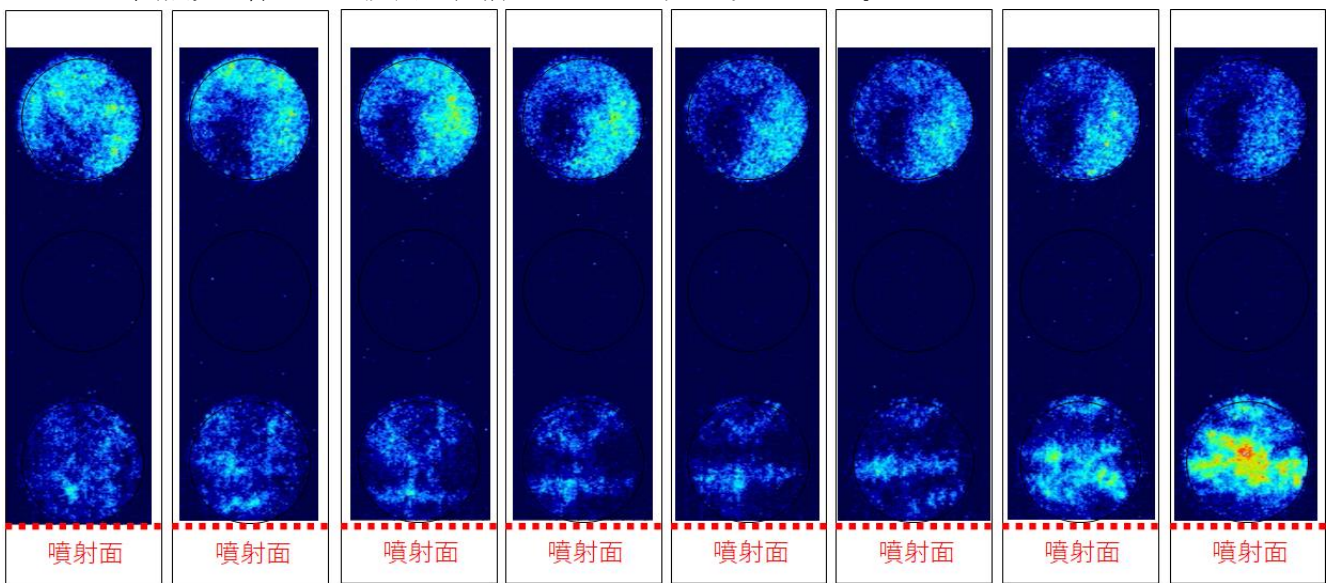


図 3-2-17 コンフィギュレーション f_総流量 486g/s_当量比 0.99_連続

上流側は不鮮明ながら波面の伝播が確認されるが、下流側は定常的な燃焼ガスの軸方向流れが見られており、波面の通過とみられるタイミングで燃焼ガス全体が発光するといった様相が見られており、燃焼は伴わない波面が伝播しているように考えられる。



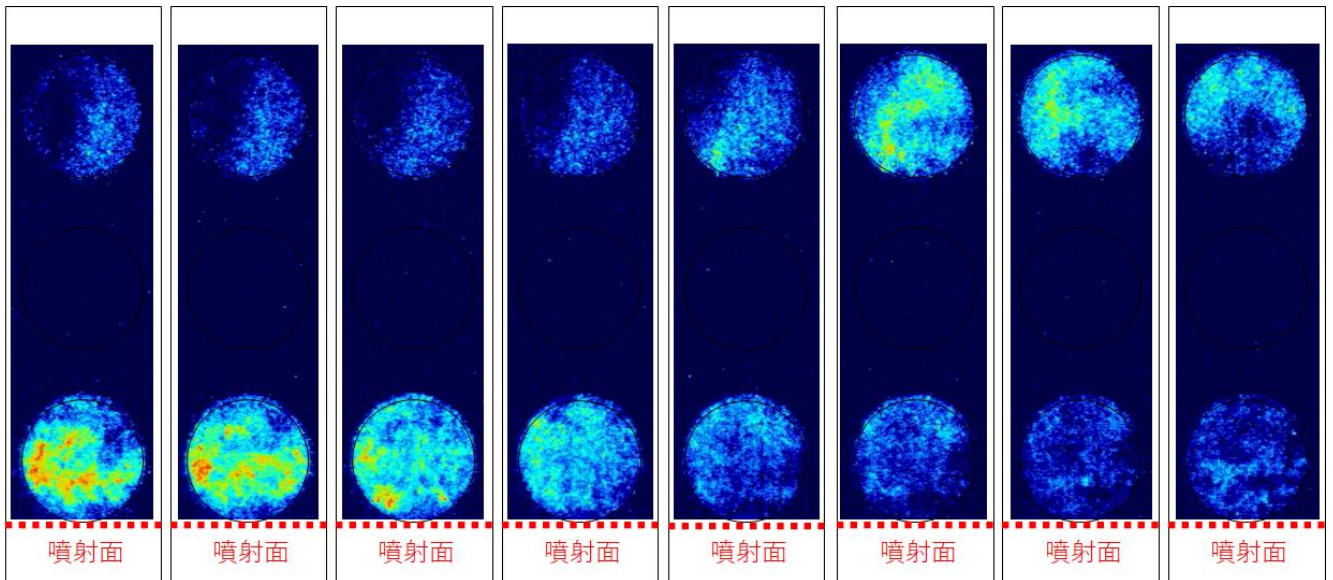


図 3-2-18 コンフィギュレーション f_総流量 297g/s_当量比 0.63_連続

本試験条件も非常に特徴的な燃焼形態であった。噴射器近傍より CH^* 発光を伴う噴射面に平行な波面が軸方向下流に伝播し、上流側観測窓中央付近に到達後、当該波面より噴射器側に存在すると考えられる未燃ガスが燃焼し、この燃焼ガスが軸方向下流へ流れていく、といった様相が確認された。この噴射器近傍の周期的燃焼が回転する波面によるものかは不明である。

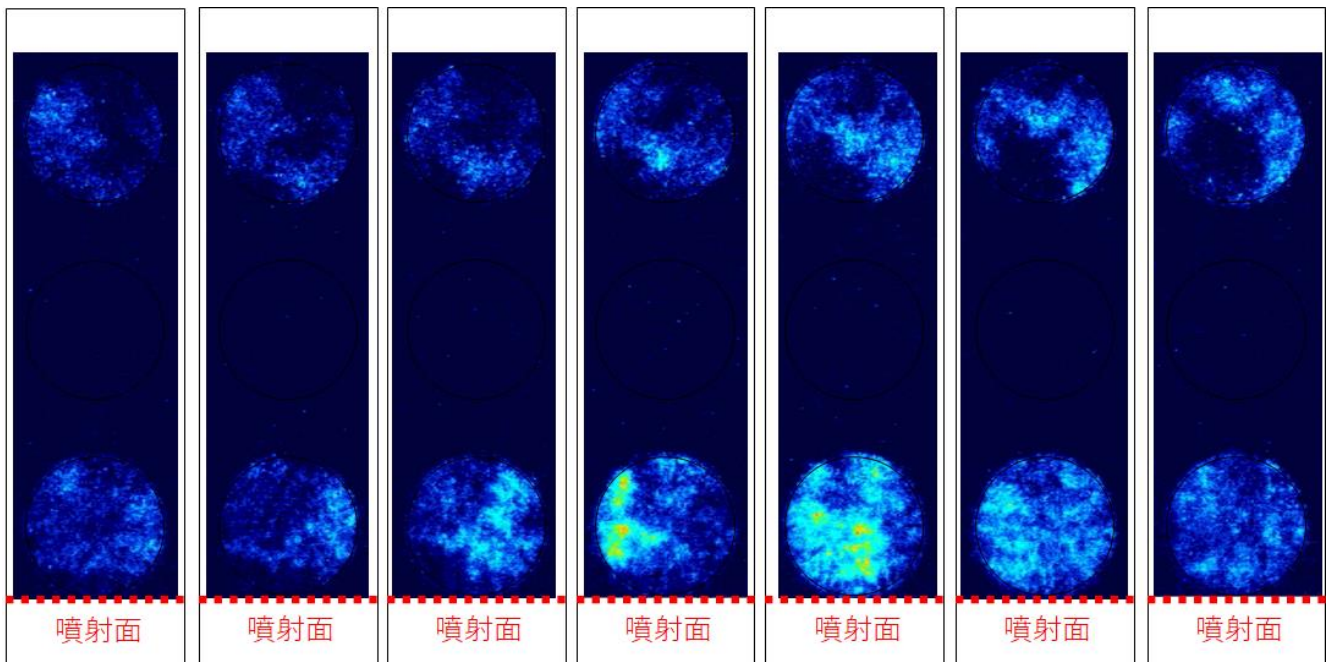


図 3-2-19 コンフィギュレーション f_総流量 298g/s_当量比 1.01_連続

本試験条件も特徴的な伝播形態が確認された。上流側においてまず弱めの発光を伴う波面が画像右から左方向へ伝播し、それに対向するように強めの発光を伴う波面が画像左側から右側へ伝播する様相が確認される。また上流側でもその波面形状は比較的不鮮明であり、下流側においては波面とみられるものは確認されなかった。

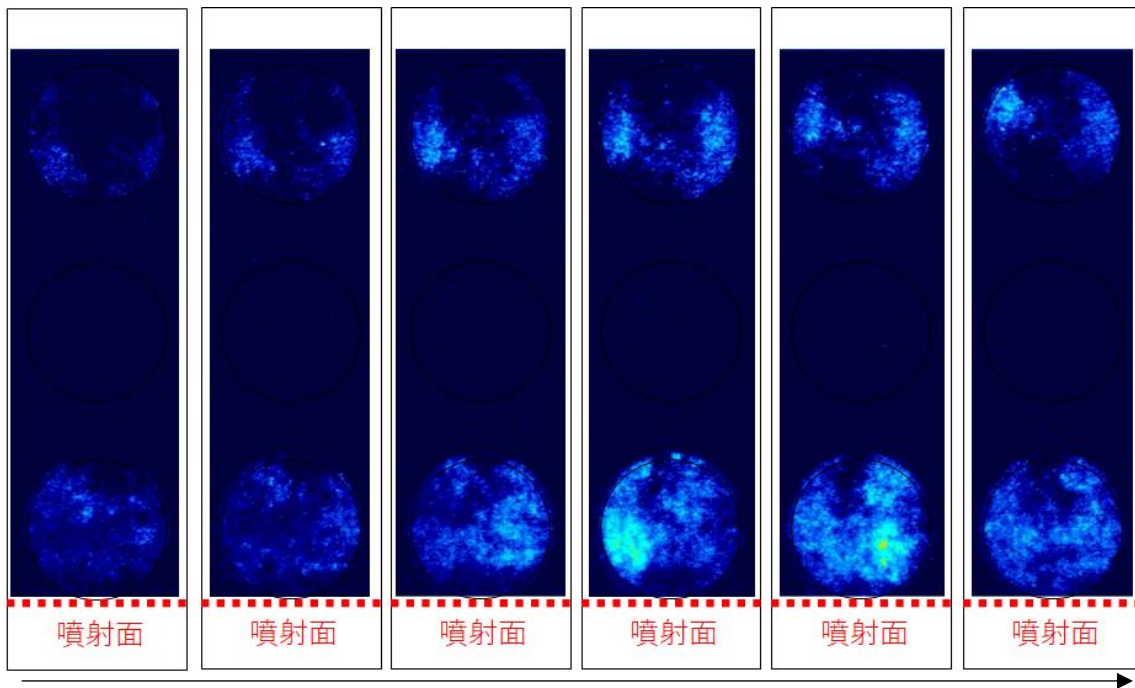


図 3-2-20 コンフィギュレーション f_総流量 293g/s_当量比 1.41_連続
 波面は非常に不鮮明であった。上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側は鮮明な波面は確認できず、衝突する瞬間に若干燃焼ガスの発光が強まる程度であった。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 2

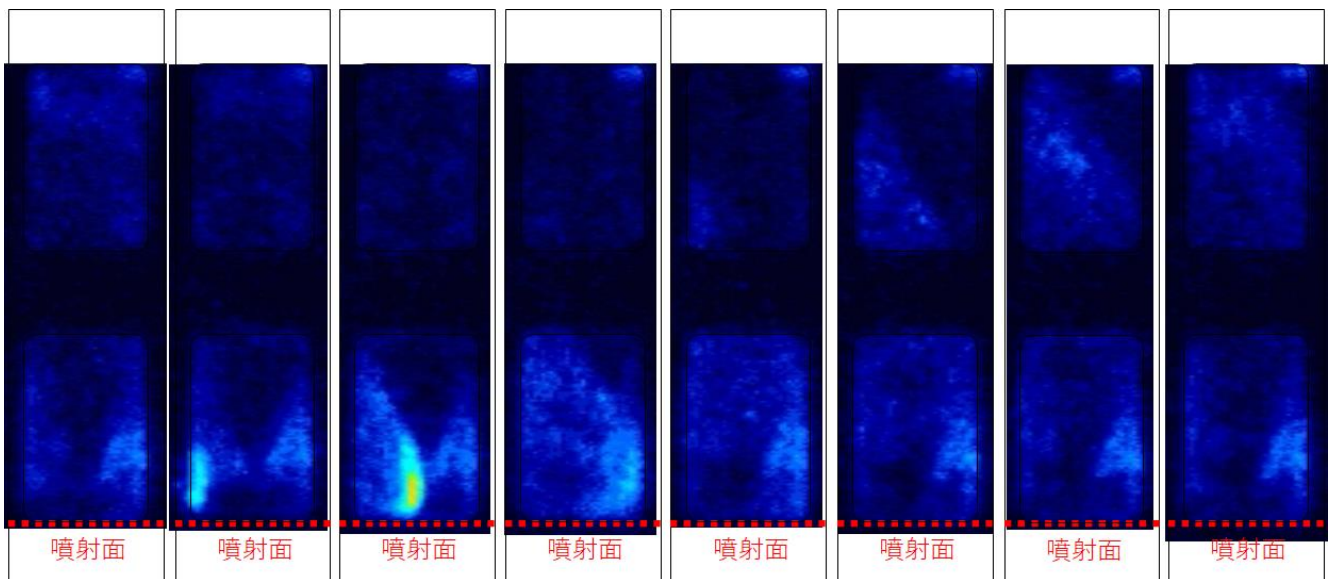


図 3-2-21 コンフィギュレーション A_総流量 904g/s_当量比 0.97_連続
 鮮明な波面が確認された。スロート無コンフィギュレーションの典型的な波面形状とみられ、噴射器近傍でデトネーションによりほぼ燃焼が完結しているようにみられる。下流側も波面は斜めの形状を維持して伝播しているのが確認された。

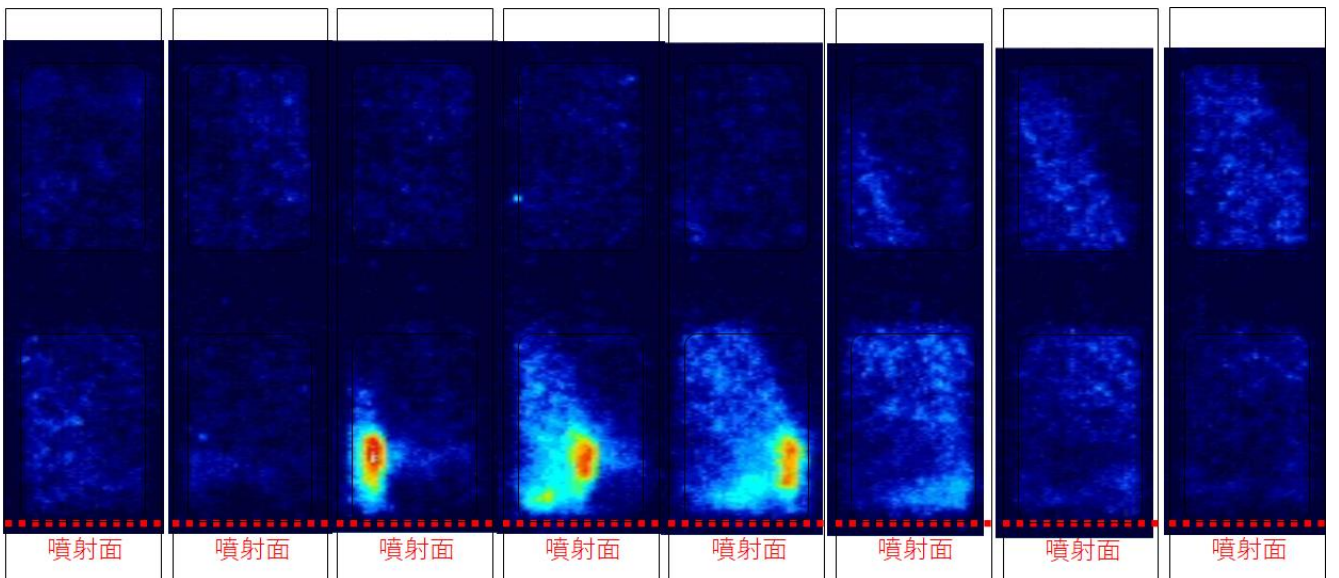


図 3-2-22 コンフィギュレーション A_総流量 500g/s_当量比 1.02_連続

鮮明な波面が確認された。スロート無コンフィギュレーションの典型的な波面形状とみられ、噴射器近傍でデトネーションによりほぼ燃焼が完結しているようにみられる。下流側も波面は斜めの形状を維持して伝播しているのが確認された。

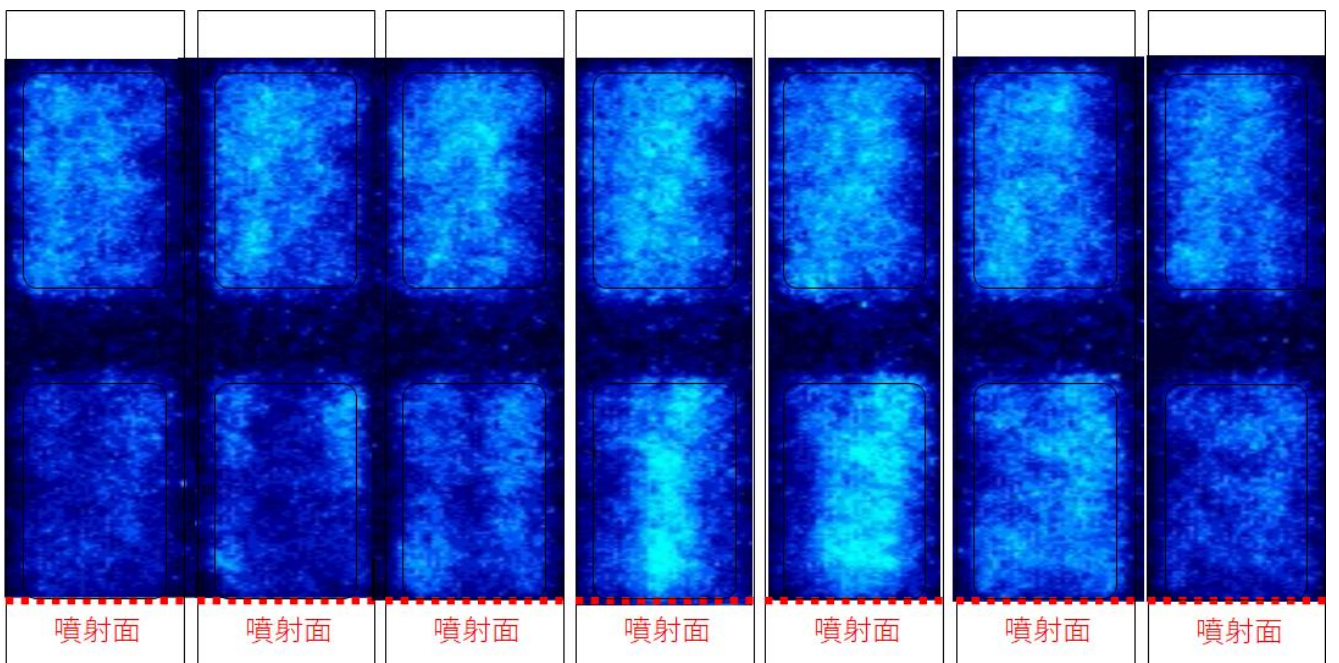


図 3-2-23 コンフィギュレーション B_総流量 879g/s_当量比 1.04_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。特に上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側でも上流側よりは不鮮明であるが、ほぼ同様の様相が確認された。

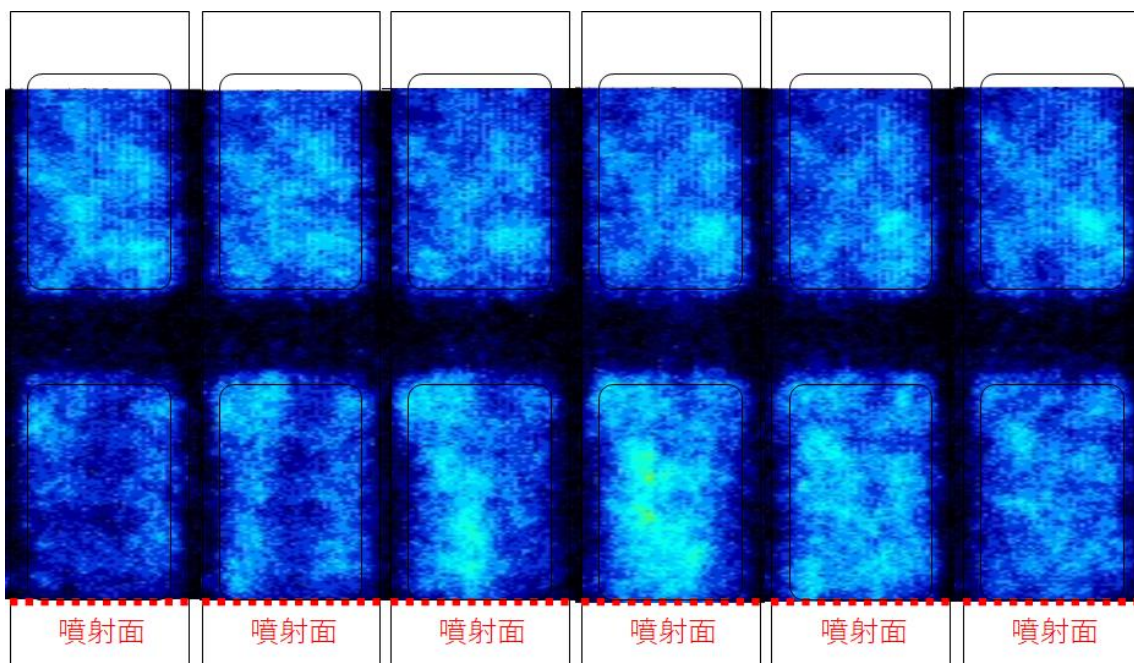


図 3-2-24 コンフィギュレーション B_総流量 872g/s_当量比 0.81_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。特に上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側は鮮明な波面は確認できず、衝突する瞬間に若干燃焼ガスの発光が強まる程度であった。

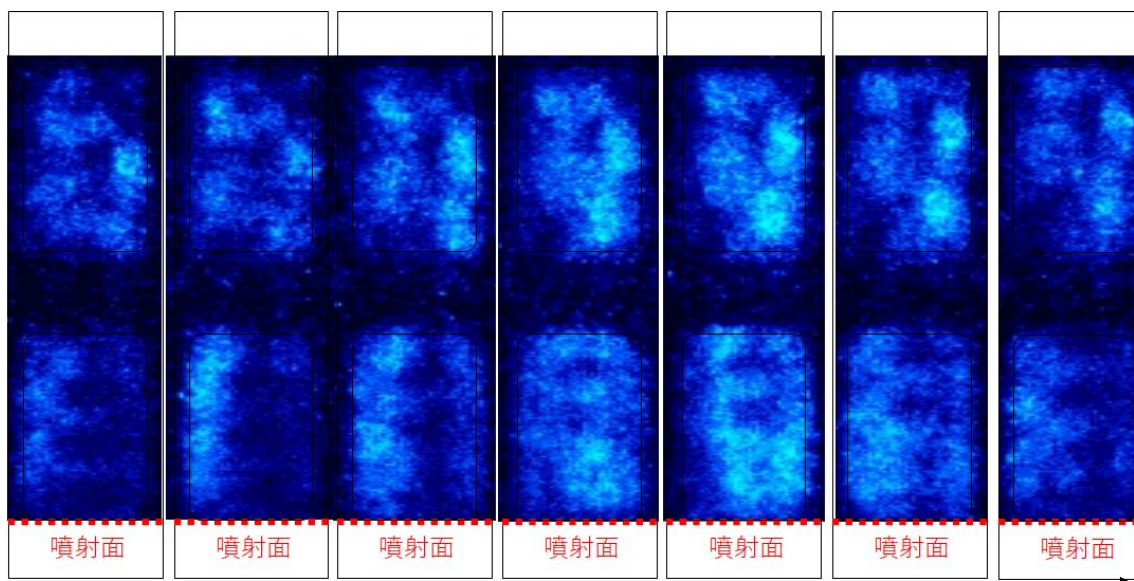


図 3-2-25 コンフィギュレーション B_総流量 904g/s_当量比 1.50_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。特に上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側でも上流側よりは不鮮明であるが、ほぼ同様の様相が確認された。

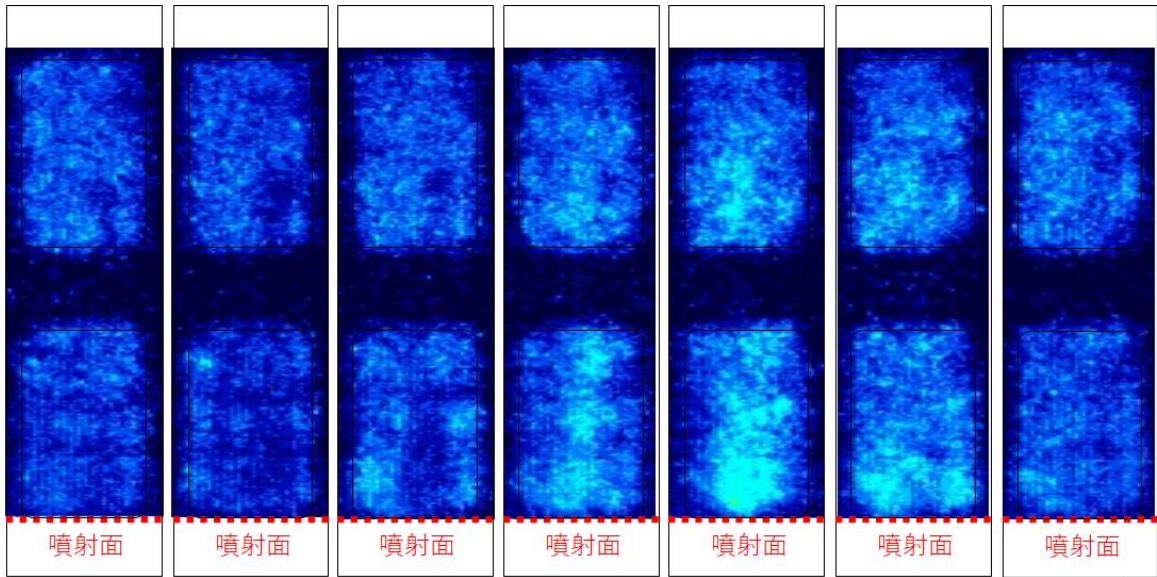


図 3-2-26 コンフィギュレーション B_総流量 502g/s_当量比 0.98_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。特に上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側でも上流側よりは不鮮明であるが、ほぼ同様の様相が確認された。

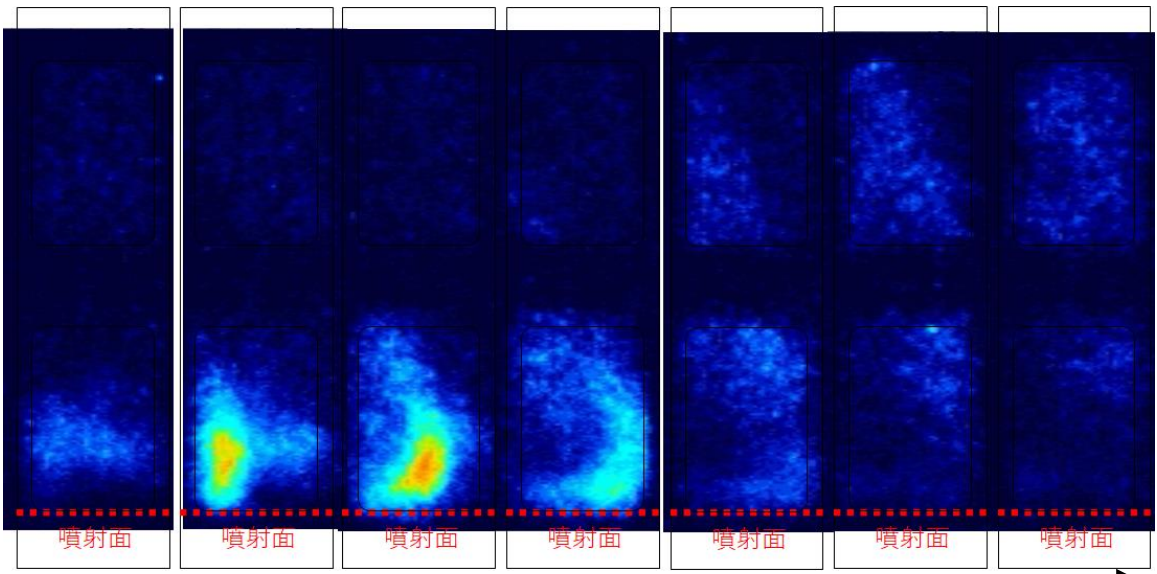


図 3-2-27 コンフィギュレーション E_総流量 505g/s_当量比 1.00_連続

鮮明な波面が確認された。スロート無コンフィギュレーションの典型的な波面形状とみられ、噴射器近傍でデトネーションによりほぼ燃焼が完結しているようにみられる。下流側も波面は斜めの形状を維持して伝播しているのが確認された。

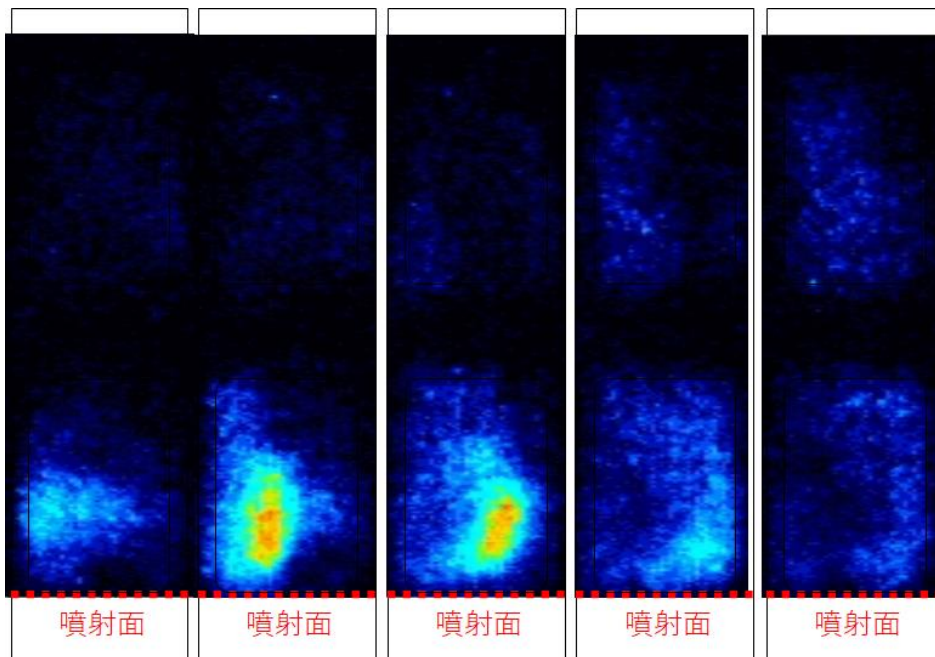


図 3-2-28 コンフィギュレーション G_総流量 530g/s_当量比 1.12_連続

鮮明な波面が確認された。スロート無コンフィギュレーションの典型的な波面形状とみられ、噴射器近傍でデトネーションによりほぼ燃焼が完結しているようにみられる。下流側も波面は斜めの形状を維持して伝播しているのが確認された。

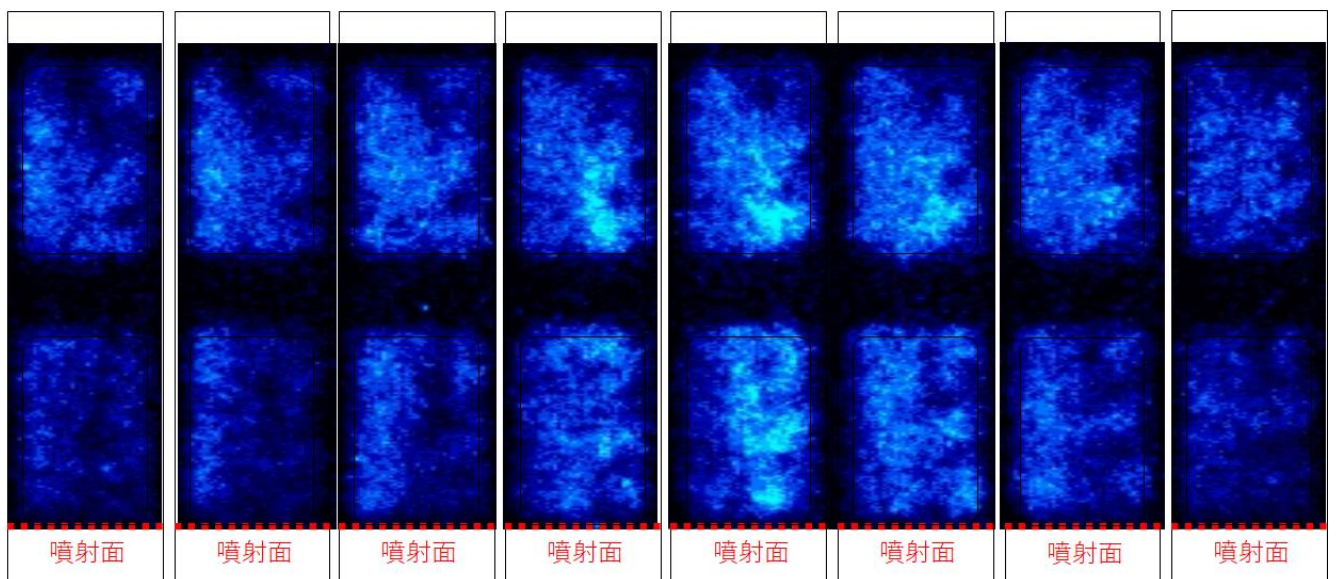


図 3-2-29 コンフィギュレーション H_総流量 515g/s_当量比 1.09_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。特に上流側では対向する波面が伝播し、衝突する瞬間に発光が強まり、そのまま波面が左右に離れていく様相が周期的に確認された。下流側でも上流側よりは不鮮明であるが、ほぼ同様の様相が確認された。

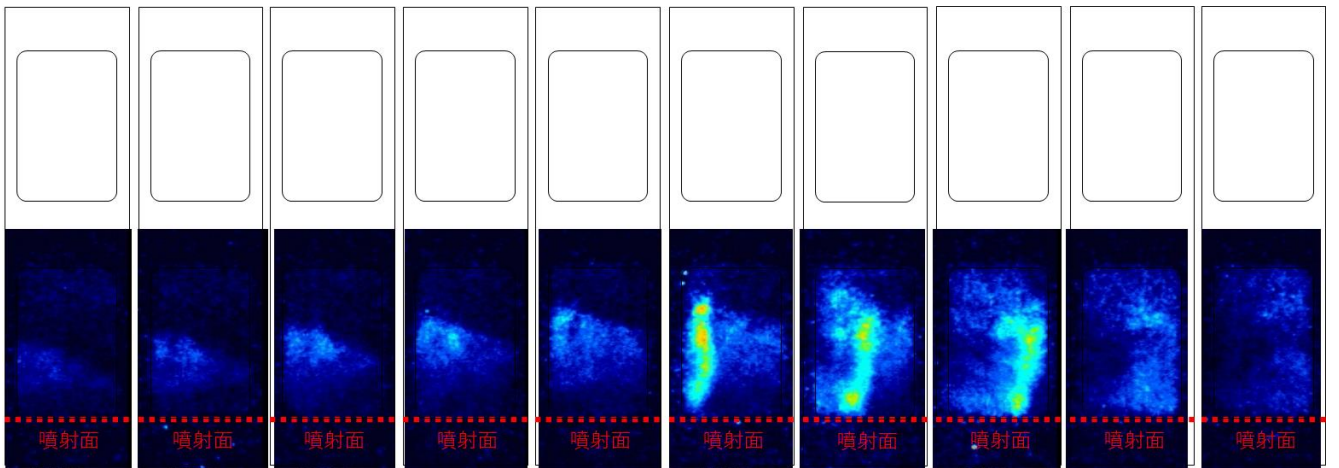


図 3-2-30 コンフィギュレーション I_総流量 545g/s_当量比 1.01_連続

鮮明な波面が確認された。スロート無コンフィギュレーションの典型的な波面形状とみられ、噴射器近傍でデトネーションによりほぼ燃焼が完結しているようにみられる。

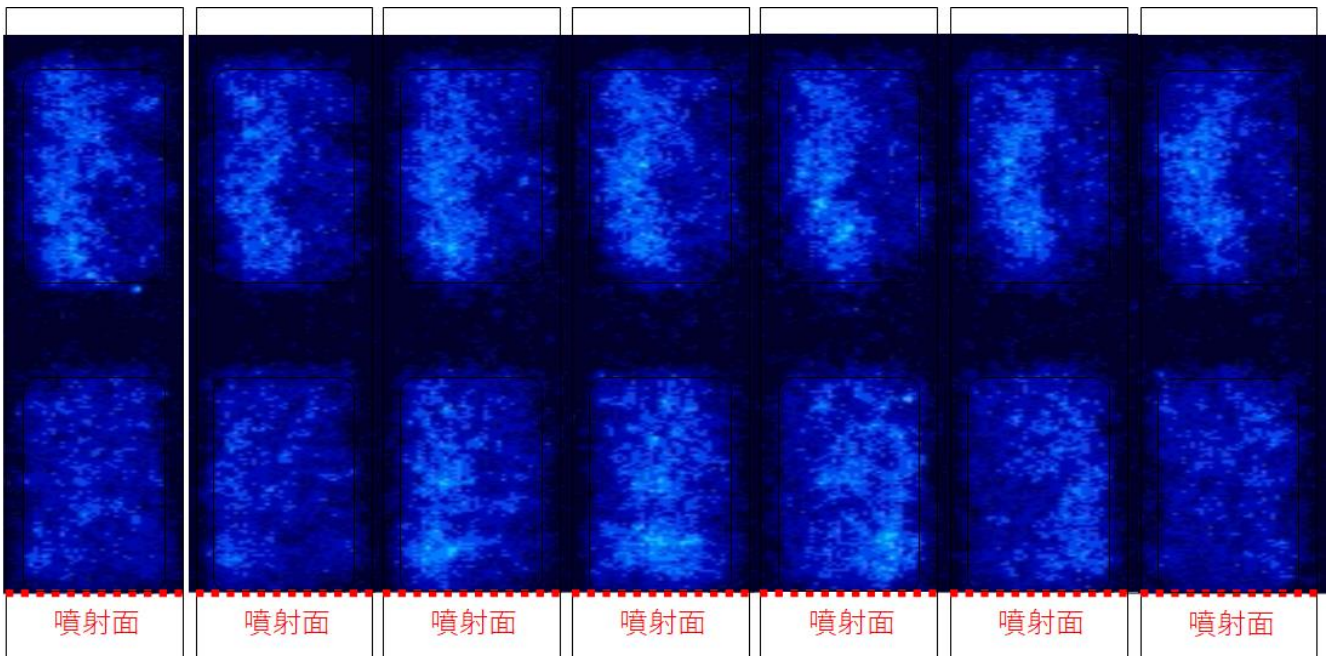


図 3-2-31 コンフィギュレーション J_総流量 490g/s_当量比 1.25_連続

スロート有コンフィギュレーションに特徴的な対向する不鮮明な波面が確認された。波面形状はほぼ垂直であった。図 3-2-31 は波面が画像左側から右側へ伝播する様相のみを捉えているが、上流側では不鮮明ながら波面の伝播が確認できるものの、下流側は波面が通過したとみられる瞬間に燃焼ガスの発光が若干強まる程度であった。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 における燃焼室溝幅の影響

図 3-2-8 コンフィギュレーション a と図 3-2-14 コンフィギュレーション e を比較すると燃焼室溝幅の狭い a では斜め衝撃波の傾きが大きく波面がねている形状であるが、燃焼室幅の広い e では全体的に弓なりの形状にはなっているものの比較的波面が立っているようにみられ、スロート有形態にてみられた現象と似ている。これは燃焼室体積が増え、同じ流量の場合、軸方向流速が遅くなることが影響しているものと考えられる。一方スロート有形態については図 3-2-11 コンフィギュレーション b と図 3-2-17 コンフィギュレーション f を比較すると、燃焼室溝幅の狭い b ではほぼ垂直な鮮明な波面が確認されるものの、燃焼室溝幅の広い f では波面は鮮明ではなく、デトネーション波面により燃焼が促進される効果が薄いようにみられる。この要因は燃焼室体積、燃焼圧の違いが考えられる。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 における燃焼室溝幅の影響

図 3-2-22 コンフィギュレーション A と図 3-2-30 コンフィギュレーション I を比較すると、上流側窓のみとなるが、デトネーションとみられる波面の高さが I の方が高いことが確認される。I の方が燃焼室体積が大きいため軸方向への未燃ガスの広がりが遅いと考えられ、その場合デトネーション波面が低くなると考えられるが、本事象は逆の傾向である。これは伝播速度の項でも記載するが、A に比べ I は波数が少なく、その分波面が高くなったものと考えられる。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 における流量の影響

図 3-2-21 総流量 904g/s と図 3-2-22 総流量 500g/s を比較するとほぼ同様の形状にみられ、流量の影響は軽微であると考えられる。またスロート有形態についても、図 3-2-23 総流量 879g/s と図 3-2-26 総流量 502g/s を比較するとほぼ同様の形状にみられ、同様に流量の影響は軽微であると考えられる。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 1 スロート無形態における当量比の影響

図 3-2-8 当量比 0.94 は斜め衝撃波の角度も大きくなっている形状であるが、図 3-2-9 当量比 0.41 は比較的弓なりで立っており、図 3-2-10 当量比 1.23 においても当量比 0.94 に比べ波面が立っているようにみられ、当量比 1.0 から離れると波面が立つ傾向があるようにみられる。

環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 スロート有形態における当量比の影響

図 3-2-23 当量比 1.04、図 3-2-24 当量比 0.81、図 3-2-25 当量比 1.50 を比較すると概ねすべて似通った様相をしており、当量比の影響は軽微であると考えられる。

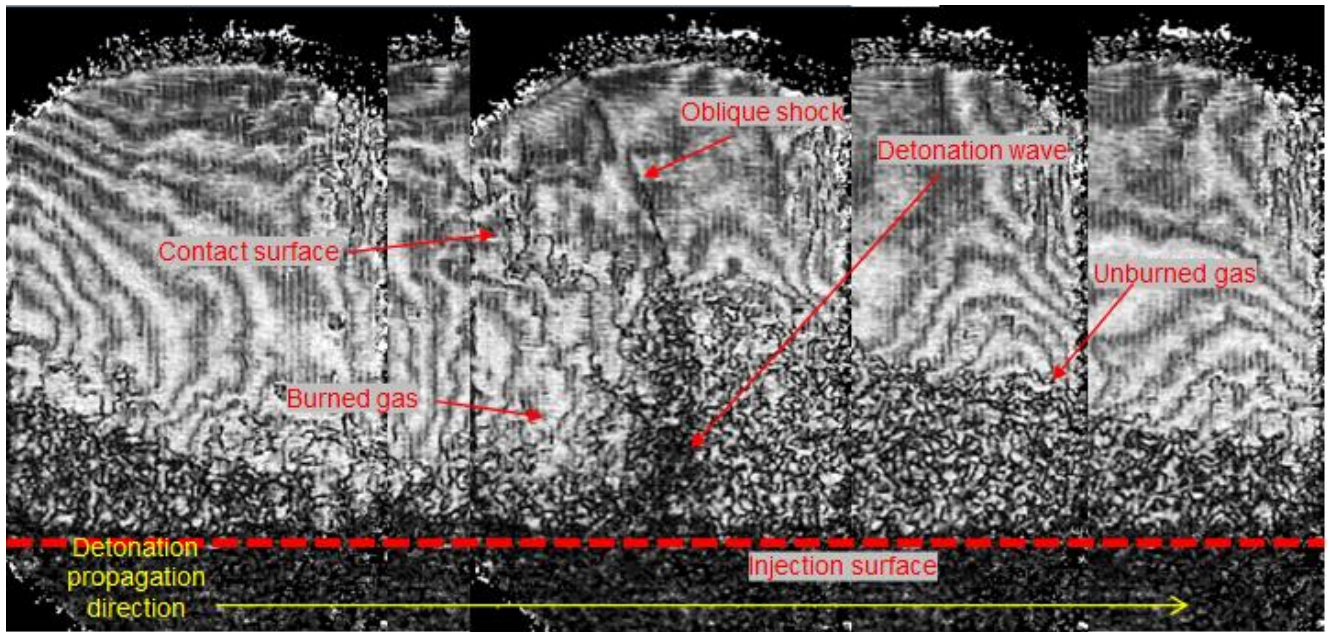
(2) 干渉計画像

燃焼室内を回転伝播する波面構造解明を目的として、前述の点回折干渉計と位相シフト干渉計の 2 種類の干渉計撮影を行った。ここでは、密度分布を評価可能だった位相シフト干渉計の結果について述べる。

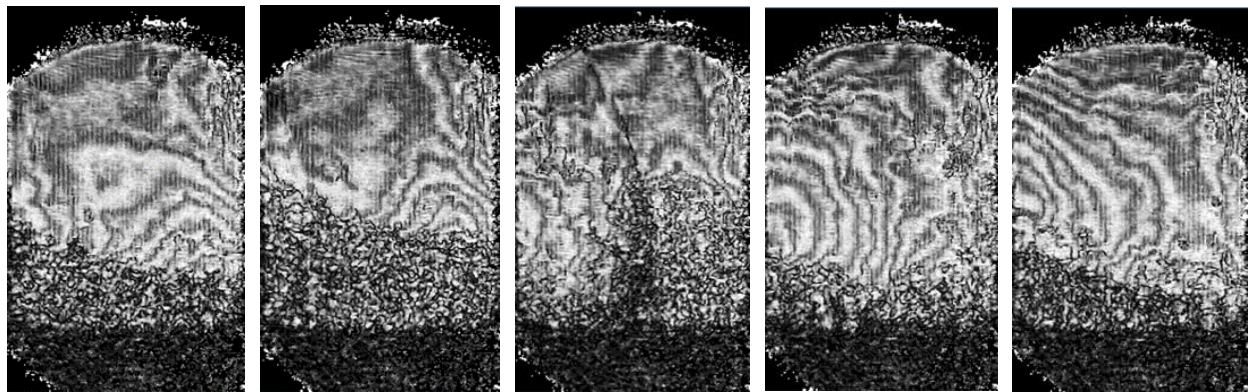
撮影された高速度画像から偏光度マップへ変換したものを図 3-2-32(a)に示す。

噴射器より噴出する未燃ガス層、デトネーション波面、そこから延びる斜め衝撃波と反応面が確認される。次にこれらを Gladstone-Dale の式を用い、フレーム内の相対密度分布とした画像に変換した。(b) また燃焼時の衝撃等により光学測定用のミラーが傾いた可能性があり、その傾きを補正する試みを実施した。(c)

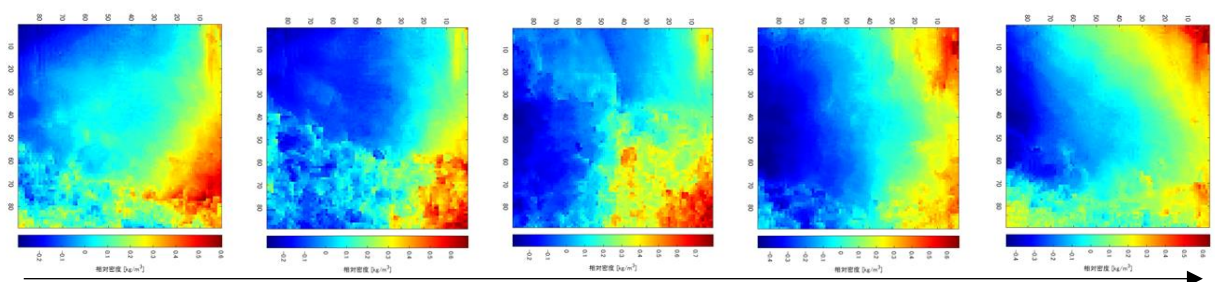
(a)にみられるとおりに噴射面より噴出した未燃ガス層は干渉縞が潰れてしまい密度評価が非常に難しい状況となった。また(b)に見られる通りここで選択したフレームにおいては常にフレーム右端に高密度の映り込みがあり、波面の動きに連動しないことから実際の密度分布を捉えられていないものと考えられる。またこれが燃焼の衝撃に伴う光学ミラーの傾きによってフレーム全体に一律な傾きが発生しているためと推定し、その傾きを補正することを試みたが、(c)に示すとおりに未燃ガスと既燃ガスが同程度の密度と表示されるようになり、実現象に即してないと思われる結果となった。そのため補正前の(b)が比較的实际の密度分布を表しているものと考えられる。



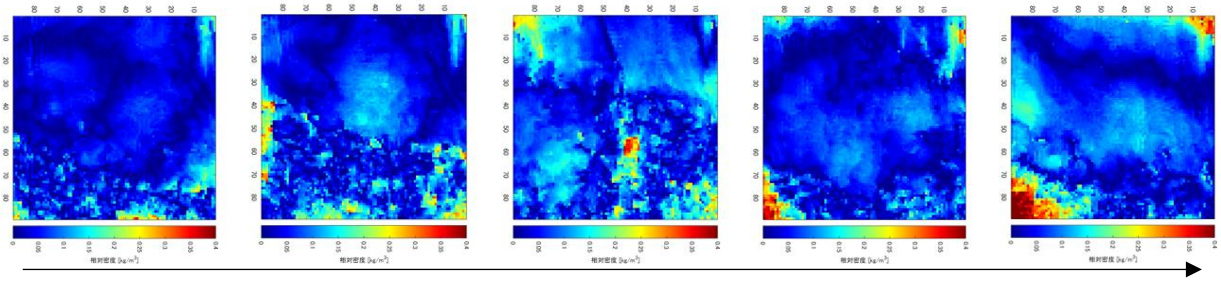
(a) 偏光度マップ (重ね合わせ)



(a) 偏光度マップ (連続写真)



(b) 相対密度分布



(c) 相対密度分布(傾き補正)

図 3-2-32 干渉計撮影画像 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 コンフィギュレーション A_総流量 500g/s_当量比 0.41

次に今回得られた相対密度分布の重ね合わせ画像(図 3-2-33)と、文献にみられる回転デトネーションの密度分布解析結果(図 3-2-34, -35)との比較を行う。

図 3-2-33 より、相対的に最も密度が高く現れているのはデトネーション波面であり、それ以降未燃ガス領域(一部黄色)→デトネーション背面近傍燃焼ガス(濃い水色)→斜め衝撃波と反応面に囲まれた領域(薄い水色)→デトネーション波面から離れた既燃ガス領域(青)といった順序となる。

一方で燃料・酸化剤は異なるものの Natural Gas-Air(図 3-2-34)および H₂-Air(図 3-2-35)における解析結果をみると、上記試験結果とほぼ同じ傾向となることが確認された。

以上より今回取得した干渉計より算出した相対密度分布は実現象に近い状態を捉えられていると考えられ、一定の定量性を評価できるものと考えられる。

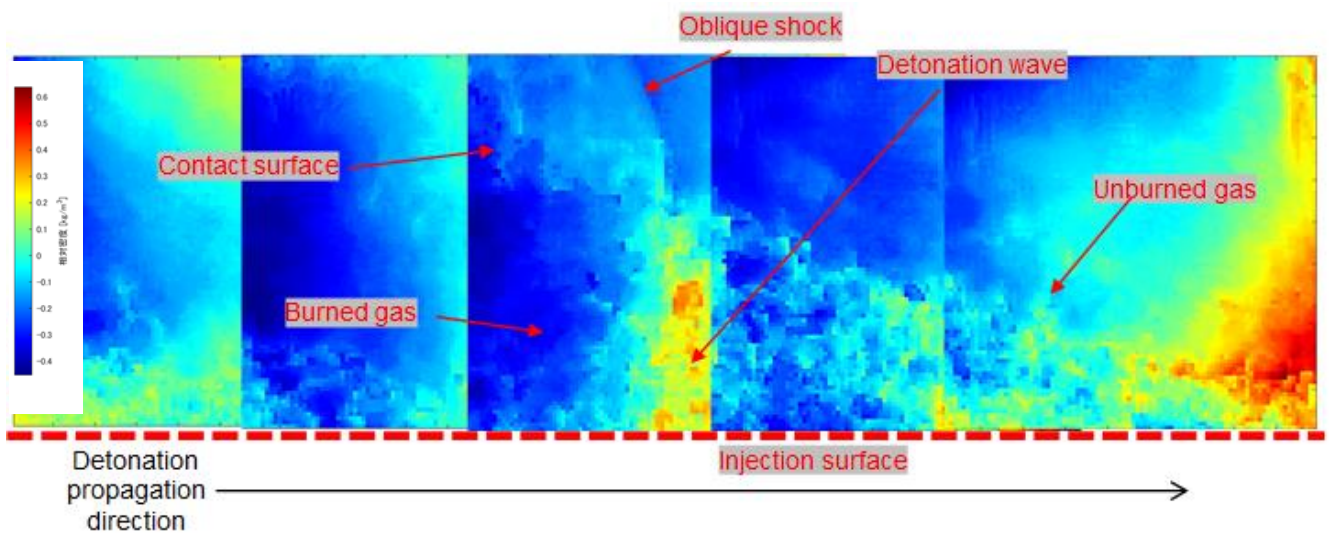


図 3-2-33 相対密度分布画像 環状デトネーション燃焼試験装置 # 2 コンフィギュレーション A_総流量 500g/s_当量比 0.41_重ね合わせ

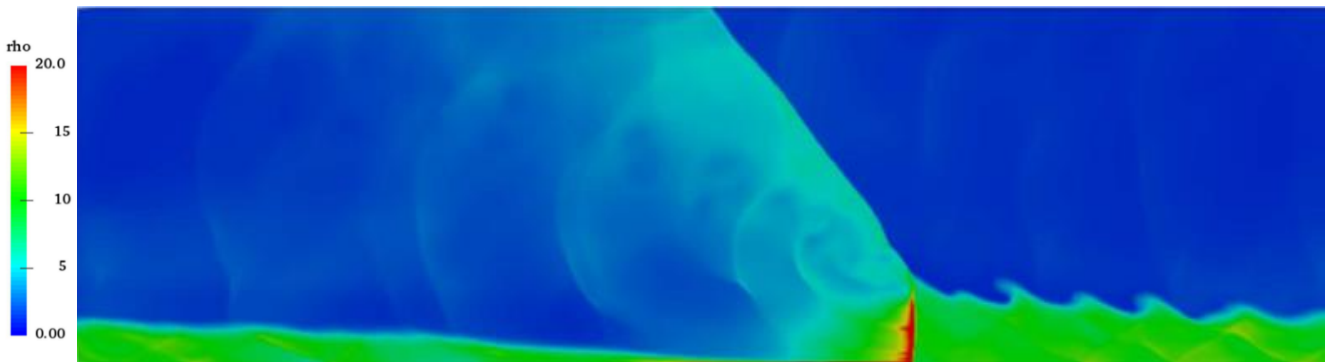


図 3-2-34 Natural Gas-Air 回転デトネーション密度分布 (Saha, P., Strakey, P., Ferguson, D and Roy, A., "Numerical Analysis of Detonability Assessment in a Natural Gas-Air Fueled Rotating Detonation Engine"より)

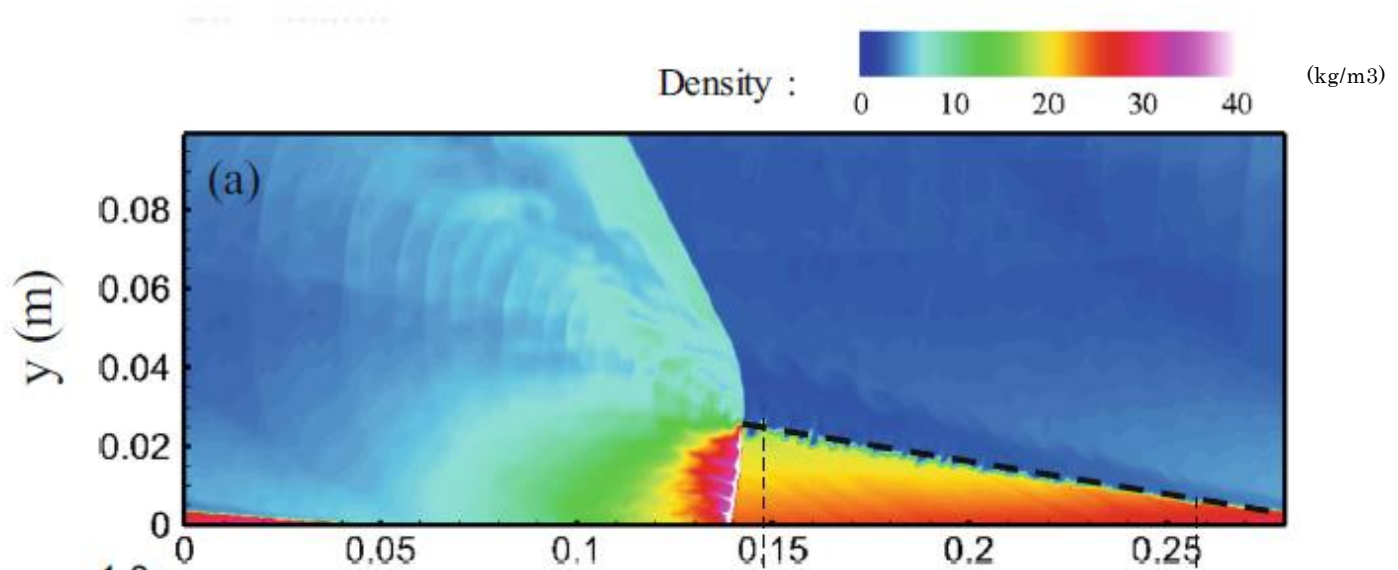


図 3-2-35 H₂-Air 回転デトネーション密度分布 (Zhao, M., Li, J., Teo, C., Khoo, B and Zhang, H., "Effects of Variable Total Pressures on Instability and Extinction of Rotating Detonation Combustion"より)

・同軸熱電対

高速応答の E 型熱電対をフラッシュマウントで燃焼室壁面に設置し、デトネーション通過時のピーク温度測定を試行した。なお当該センサは Pulse Laser による検定で 2MHz 以上の周波数応答性を有していることを確認している。取付前の熱電対の外観を図 3-2-36 に示す。

デトネーション波面通過時のピーク圧を計測している変動圧センサ(PCB)にて捉えているデトネーション旋回周波数(図 3-2-37(a))を当該熱電対でも捉えられること(図 3-2-37(b))を確認したが、定量的にはデトネーションとはかけ離れた小さい温度上昇であり、また試験によってはデトネーション旋回周波数を捉えられない場合もあり再現性が低いため、熱流束の定量評価には至らなかった。

なお、別途燃焼室壁面からの距離を 1mm および 2mm と変えて取り付けた熱電対による静的熱流束については図 3-2-38 に示す通り燃焼圧に伴い熱流束が増加し、デトネーション有無により差が見られた。

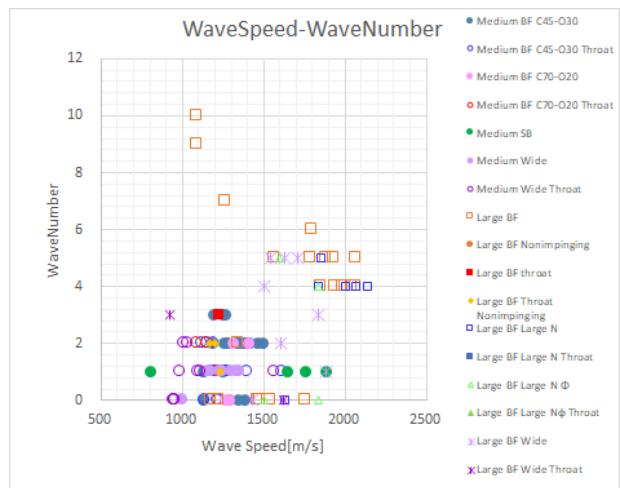


図 3-2-39 波数—伝播速度相關

要素課題③ 直接数値シミュレーション (DNS) による回転デトネーション波の捕獲

(1) 数値シミュレーションの方針

本研究では図3-3-1～図3-3-3に示すような3つのアプローチにより数値シミュレーションを実施した。フル三次元デトネーション解析 (図3-3-1) は実際の燃焼器を最も忠実に再現する解析であるが、計算コストが非常に大きいため代表的な条件についてのみ解析を実施した。当初の計画ではフル三次元解析を主体にして研究を進める方針であったが、現実的な計算時間で解を求めることが非常に難しいことが明らかになったため、二次元解析を主体とすることに方針を変更した。なぜ、フル三次元解析では現実的な計算時間で解を求めることが難しいか、という点であるが、第一に解析結果が格子解像度に非常に強く依存するためである。当初、 $200\mu\text{m}$ もしくは $100\mu\text{m}$ 程度の格子解像度でフル三次元解析を実施する方針であったが、後述する二次元解析の結果から、場合によっては $50\mu\text{m}$ 以下の格子解像度でなければ現象を正確に捉えられない可能性が高いことが明らかになった。また、着火から何秒後までの時間について解析を実施するか、という点においても、当初はデトネーション波が燃焼器内を10周する程度 (約 2ms) の解析を実施すれば良いと想定をしていた。しかしながら、これも二次元解析による結果を見ると不十分であり、50周期以上 (約 10ms) の解析を実施しないと十分に安定した状態に至らないことが明らかになった。図3-3-1の例に示すフル三次元解析では $200\mu\text{m}$ の格子解像度 (約7900万セル) で 2ms 程度の解析を実施したものであるが、JAXAに2020年末に導入されたばかりの最新鋭のスーパーコンピュータ (富士通PRIMEHPC FX-1000) の10%程度の計算資源を使用したにも関わらず、約1カ月の計算時間を要した。したがって、 10ms の解析を実施する場合には5カ月の計算時間を要するだけでなく、さらに格子解像度を $50\mu\text{m}$ まで向上させて解析を実施しようとすると計算コストは $256 (=4^4)$ 倍に増加するため、日本最大最速である理化学研究所のスーパーコンピュータ「富嶽」をもってしても現実的な時間で結果を求めることが容易ではないことは明白である。

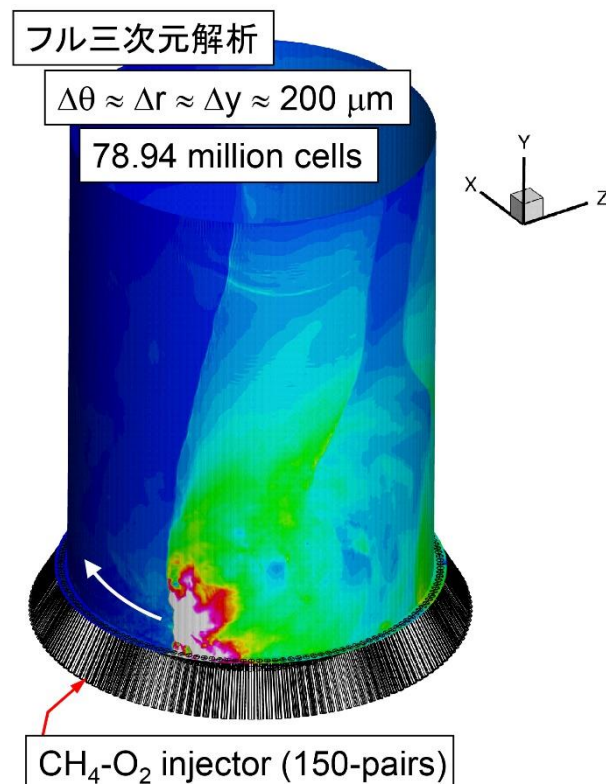


図3-3-1 フル三次元デトネーション解析

そこで、当初の研究計画から方針を変更して、図3-3-2および図3-3-3に示すような二次元解析によって高解像度で長時間の解析を実施することとした。もちろん二次元解析は実際の燃焼器形態を完全に再現するものではないが、適切な問題設定を行うことで有意義な解析を行うことが可

能である。二次元解析では円環状の燃焼器を二次元平面上に展開して周期境界を仮定した解析(図3-3-2)、および、円環流路断面を二次元平面上に切り出した解析(図3-3-3)の2つのアプローチを組み合わせることで回転デトネーション燃焼器内の現象を理解する方針とした。以降、図3-3-1～図3-3-3に示した3つのアプローチによる解析をそれぞれ「フル三次元解析」、「二次元解析(周期境界)」、「二次元解析(円環流路)」として区別する。

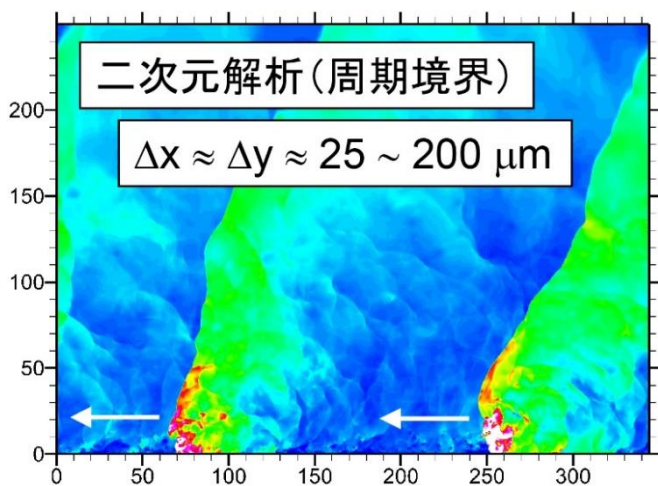


図3-3-2 周期境界を仮定した二次元デトネーション解析

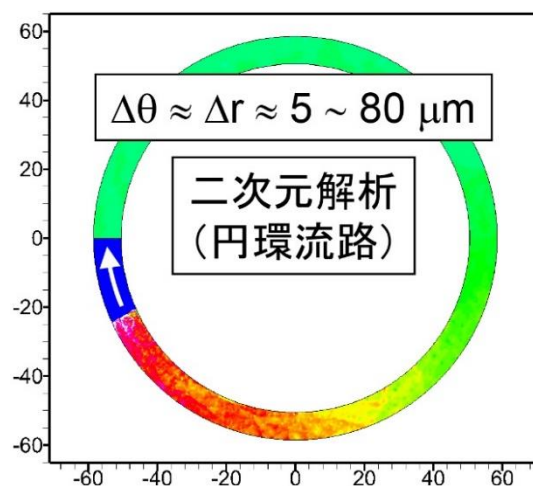


図3-3-3 円環流路を仮定した二次元デトネーション解析

本研究ではJAXA航空技術部門において開発中の燃焼解析コードCHARIOTによりシミュレーションを実施した。流れ場の支配方程式はフィルター操作を施した二次元もしくは三次元の圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。SGSモデルは使用せず、数値粘性がその役割を果たす陰的LESによる解析を行った。デトネーション波の詳細構造、および、乱流による混合の微細構造はモデルを使用せず、高解像度の計算格子と空間高次精度スキームを使用することで直接捉えるアプローチをとることとした。乱流解析に関して二次元を仮定した場合、厳密には直接シミュレーション(DNS)とは言えない面があるが、二次元解析であっても格子解像度が高くなればより微細な混合構造度が捉えられるようになり、乱流モデルや燃焼モデルを使用しなくとも格子上で主要な現象が正確に捉えられるものと期待できる。

メタン(CH₄)・酸素(O₂)の詳細反応モデルには Zhukov らによる21化学種51反応モデルを用いた。化学反応計算に伴う解の硬直性を緩和するため、化学反応による生成項はQuasi-Steady-State approximation(QSS)を仮定してoperator-splitting法により計算を行った。輸送係数(粘性・熱伝導・拡散係数)の計算には CHEMKIN データベースを用いた。

支配方程式は有限体積法により離散化、SLAU2スキームにより対流流束を計算し、粘性流束は二次精度の中心差分法により求めた。空間高次精度化はセル界面での原始変数(ρ, u, v, w, p, Y_s)を高次関数によって補間することで実現する。密度、圧力、化学種の質量分率(ρ, p, Y_s)については二次精度 MUSCL 法により、速度成分(u, v, w)は五次多項式により高次精度化する。また、低速領域における数値粘性を低減するためThornberらによる手法を導入した。時間積分には三段三次の Runge-Kutta 法を用いた。

上記の手法により数値計算を実行するにあたっては宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータ「JSS2」および「JSS3」を用いた。

(2) 作動/不作用状態の再現

燃焼試験では、作動状態と不作用状態(および遷移状態)が観測されている。ここでは、主に二次元解析によってそれらの作動状態を再現することを試みた結果を報告する。

a) 作動状態の再現について

まず、周期境界を仮定した二次元解析によって作動状態にあるデトネーション燃焼器の解析を

行った。二次元解析（周期境界）の問題設定を図3-3-4に示す。計算領域の下部境界（ $y=0$ mm）に $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ 噴射孔にスプリッターを挟んで交互に配置し、 $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ を非予混合の状態（流量一定、温度300K）で噴射する。流出境界（ $y=300$ mm）では圧力を一定（主に大気圧）とする。 x 方向には周期境界を設定し、回転デトネーション波が $\pm x$ 方向へ周期的に伝播するような解析を実施する。 $0 < x < 344$ mm, $0 < y < 125$ mm の領域では格子解像度を一定として等間隔に格子点を配置し、 $y > 125$ mm の領域では y 方向へ徐々に格子が粗くなるようにバッファー領域を設けた。噴射当量比 ϕ （全噴射流量は一定を保ち、 $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ の流量比を変更させて当量比を設定する）を変化させ、格子依存性を評価するために格子解像度を $25\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ で変化させて解析を行った。また、噴射孔配置による計算結果への影響を評価するため、43ペア（ $d_{\text{CH}_4} = d_{\text{O}_2} = d_w = 2\text{mm}$ ）および75ペア（ $d_{\text{CH}_4} = 1.6\text{mm}$ 、 $d_{\text{O}_2} = 1.8\text{mm}$ 、 $d_w = 0.6\text{mm}$ ）の噴射器で2通りの解析を実施した。

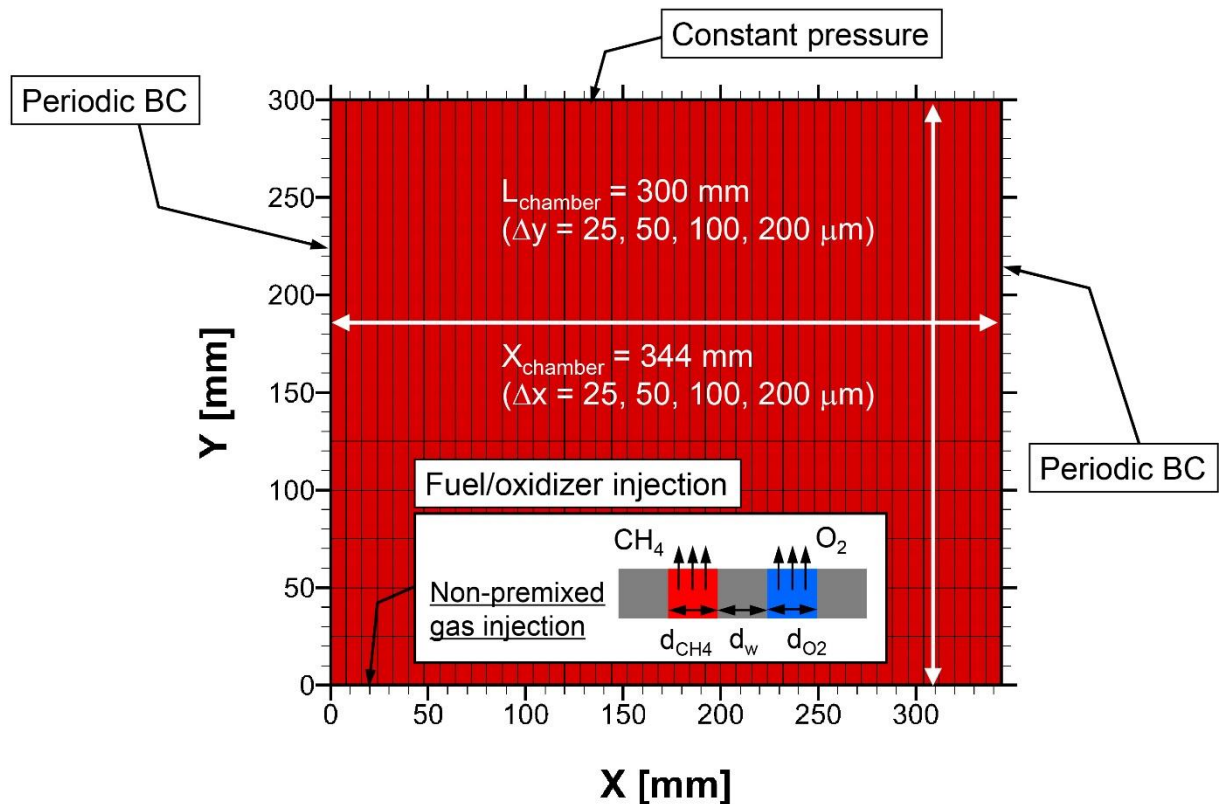


図3-3-4 周期境界を仮定した二次元デトネーション解析の問題設定

図3-3-5 に $\phi = 1.0$ の条件について格子解像度 $200\mu\text{m}$ で解析を行った結果を示す（環状デトネーション燃焼試験装置 #1, スロートなし, 噴射器43ペア, 噴射流量 = 500g/s ）。図の結果は回転デトネーション波が安定的に維持され 10 周期以上伝播した瞬間（ $t > 2$ ms）の圧力場である。 $-x$ 方向へ伝播する 2 つのデトネーション波とそれに続く斜め衝撃波が解析により捉えられている。この解析で得られた回転デトネーション波の伝搬速度は 1789 m/s であったが、これは 1 気圧における $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ 予混合気の Chapman-Jouguet (CJ) 速度 (2390 m/s) に対して約 75% の速度である。

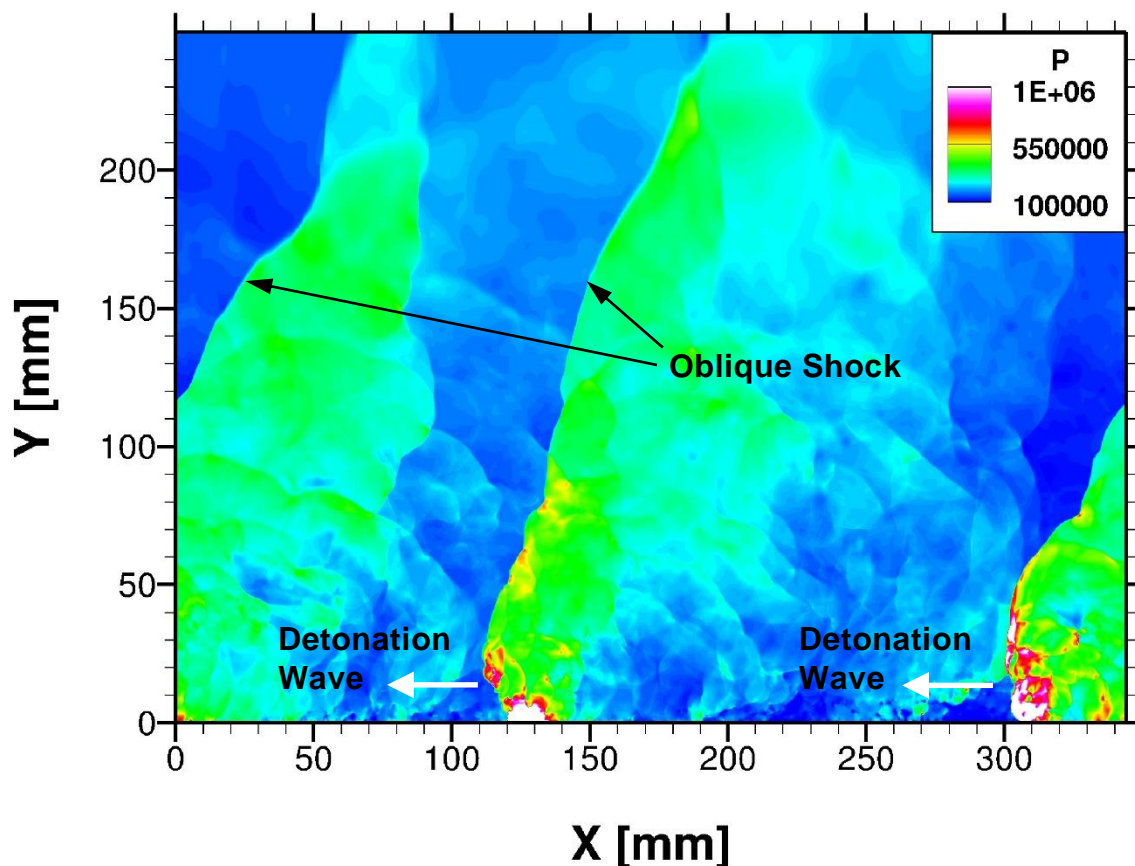


図3-3-5 二次元解析（周期境界）の解析結果（環状デトネーション燃焼試験装置 #1，スロートなし，噴射器43ペア、噴射流量 = 500g/s、格子解像度 = 200 μ m）

以下では、43ペアおよび75ペアで噴射器ペア数を変化させた二通りの二次元解析（周期境界）による結果を燃焼試験データと比較する。いずれの解析も実際の燃焼器とは噴射器のペア数と配置形態が異なる（実際の燃焼器は、環状デトネーション燃焼試験装置 #1の場合、噴射角 45° の CH_4 と噴射角 30° の O_2 との150ペア）ため、ペア数の違いによる解析結果への影響を評価しながら、1ケースのみであるが、噴射器配置を実際の燃焼器に一致させた三次元解析（噴射器150ペア）の結果も加味して作動状態にある実験データが再現できているかを検討する。

図3-3-6に、噴射器43ペアを仮定した二次元解析（周期境界）により得られたデトネーション波の伝播速度を燃焼試験データ（環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし）と比較した結果を示す。図中、1-wave~4-wavesの結果がプロットされているが、これは解析で観測されたデトネーション波の枚数を示す。また、同じ噴射当量比条件で異なる枚数の結果がプロットされているものは、解析中にデトネーション波の枚数が変化したことを意味する。最も粗い格子（200 μ m）を用いた二次元解析による伝播速度はいずれの当量比条件でも燃焼試験データよりもおおむね 30% 程度、高めの伝播速度となった。それに対して格子解像度を向上させた結果ではデトネーション波の伝播速度が低下し、実験データにかなり近い結果が得られた。格子解像度 50 μ m と 25 μ m の結果で大きな違いがないことから判断すると、現象を正しくとらえるには 50 μ m 程度の格子解像度が必要であると考えられる。燃焼試験では 2 ないし 3 枚のデトネーション波が観測されたのに対し、解析でも同程度の枚数となる結果が得られた。また、当量比が 0.6 や 1.6 付近ではデトネーション波の枚数が増加する傾向がみられた。格子解像度に対する傾向としては、格子解像度が向上するとより微細な構造が捉えられるようになるため、微細構造とデトネーション波の干渉が生じやすくなり、結果としてデトネーション波の枚数が増え、伝播速度が低下する傾向がみられた。

噴射器ペアの数を75ペアとした場合の二次元解析（周期境界）により得られた伝播速度を図3-3-7に示す。噴射器ペアを75とした場合、 $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ 噴射孔の間隔が狭まる（ $d_w = 0.6\text{mm}$ ）ことにより、デトネーションに寄与しない既燃ガスなどが噴射孔間に流入することが少なくなり、

デトネーション波との干渉が減少した結果、全体として伝播速度が増加する傾向がみられた。格子解像度を向上させてもこの傾向は変わらず、いずれの結果も実験データと比較して 40% 近く高い結果となった。また、デトネーション波の干渉が減った結果、デトネーション波の枚数は少なくなる傾向がみられ、解析中にデトネーション波の枚数が変化したのは1ケースのみ ($\phi = 0.6$ 、格子解像度 $100\mu\text{m}$) であった。

図3-3-8に、実際の燃焼器と同じ燃焼器配置である噴射器150ペアのフル三次元解析により得られた伝播速度の結果を示す。格子解像度を $200\mu\text{m}$ とし、 $\phi = 1.0$ についてのみ解析を行った結果であるが、伝播速度は43ペアを仮定した二次元解析（周期境界）とほぼ同じ速度が得られた。また、観測されたデトネーション波は強い2枚のデトネーション波とそれに対向する弱い1枚の合計3枚であったが、対向する弱いデトネーション波は過渡的なもので長時間の解析を実施すると消失してしまい、2枚のデトネーション波のみが残る可能性がある。計算コストの問題から三次元解析における格子依存性を評価することは難しいが、現時点で得られた結果を鑑みるに43ペアによる二次元解析が三次元解析の結果と近い結果を与えるように思われる。

二次元解析（周期境界）およびフル三次元解析により得られたデトネーション波の伝播速度を実験データと比較した結果から、格子依存性と二次元解析におけるインジェクター配置の影響に留意する必要があるものの、おおむね作動状態にある燃焼試験データを再現できているものと判断する。

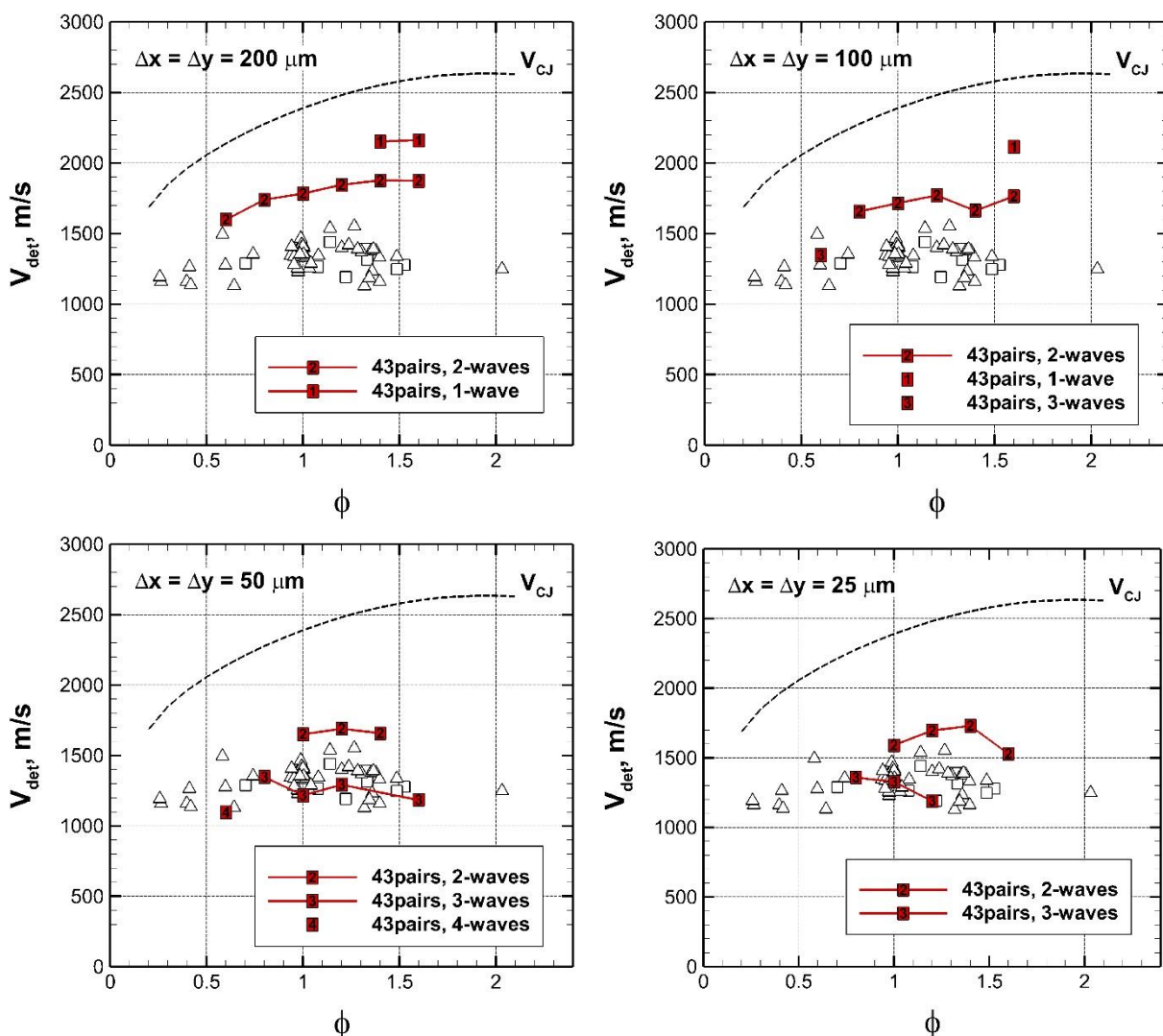


図3-3-6 噴射器43ペアを仮定した二次元解析（周期境界条件）によるデトネーション波の伝播速度。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射流量 = 500g/s。白抜きシンボルは実験データ。

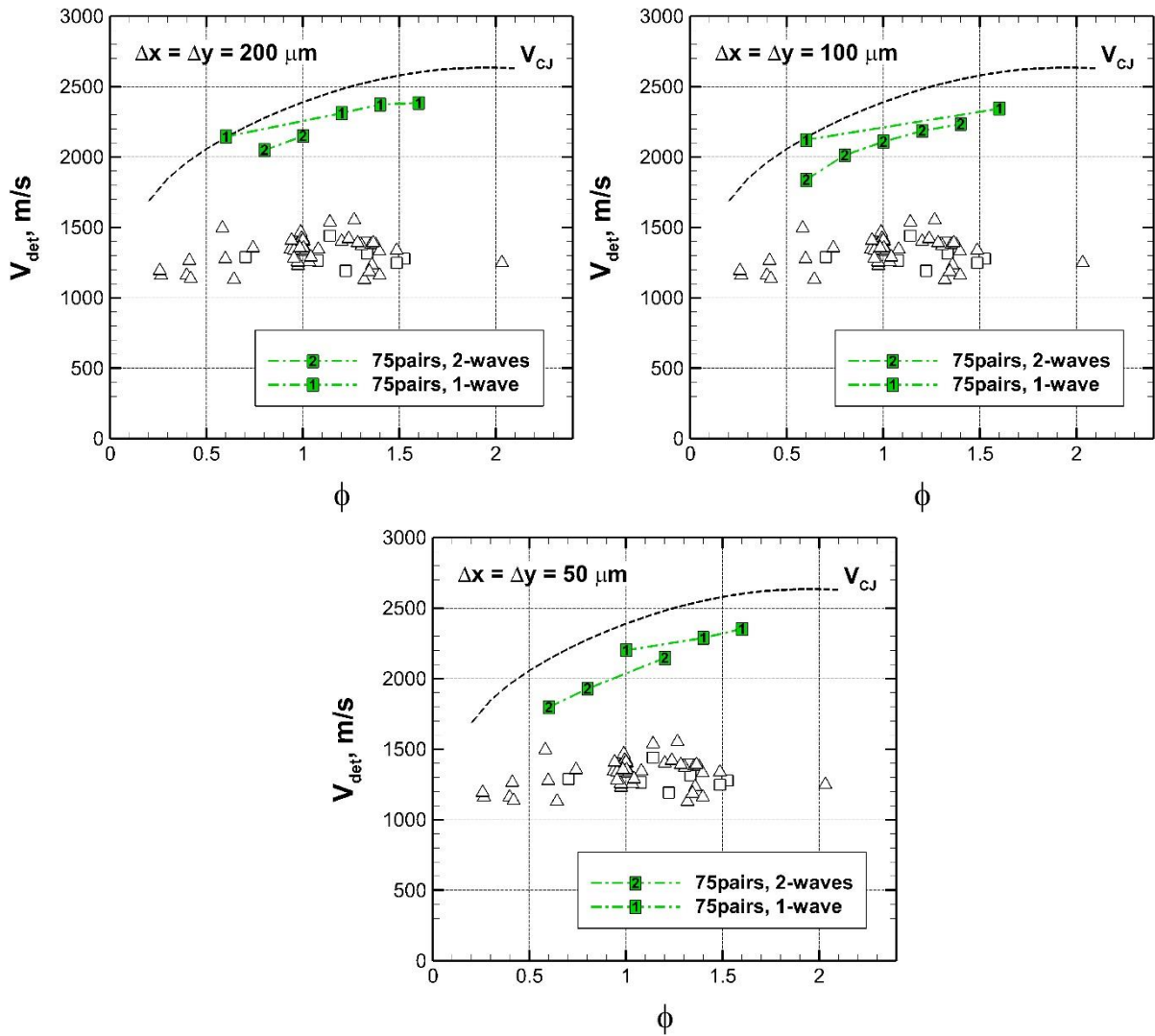


図3-3-7 噴射器75ペアを仮定した二次元解析（周期境界条件）によるデトネーション波の伝播速度。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射流量 = 500g/s。白抜きシンボルは実験データ。

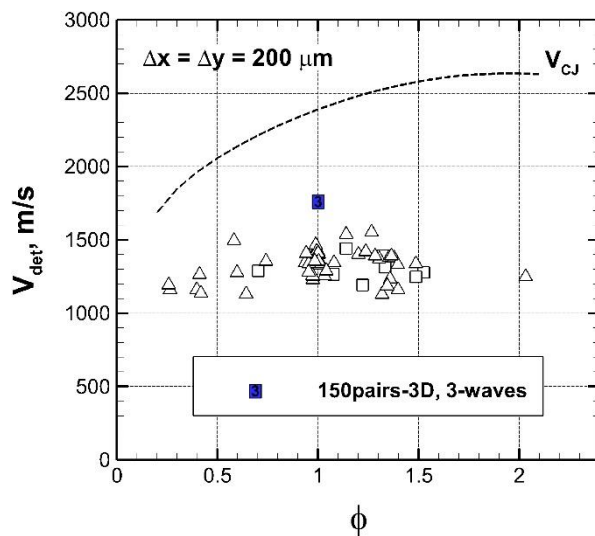


図3-3-8 噴射器150ペアのフル三次元解析によるデトネーション波の伝播速度。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射流量 = 500g/s。白抜きシンボルは実験データ。

b) 不作為状態の再現について

実験で観測された不作為状態は完全にデトネーション波が観測されない状態であるが、その中間の状態としてデトネーション波の伝播方向が切り替わるような遷移状態も観測されている。ここでは、伝播方向が切り替わる過程について二次元解析（周期境界）により再現を試みた結果を最初に報告する。問題設定を図3-3-4に示すものと同じであるが、解析対象を環状デトネーション燃焼試験装置 #2として計算領域サイズおよび噴射器配置を変更した（ $X_{\text{chamber}} = 498\text{mm}$ 、 $d_{\text{CH}_4} = d_{\text{O}_2} = 1\text{mm}$ 、 $d_w = 2\text{mm}$ 、噴射器83ペア、格子解像度 = $200\mu\text{m}$ ）として解析を実施した。実験データでは $\phi = 1.0$ から大きく外れる条件で遷移状態が観測されている。そこで、 $\phi = 0.6$ および 1.0 について噴射流量を 500g/s として解析を実施した。図3-3-9に $y = 5\text{mm}$ の位置における x 方向に沿った圧力分布を時系列にプロットした結果を示す。この結果はデトネーション波の軌跡を追った $x-t$ 線図としてみるができる。圧力ピークの軌跡から、いずれの条件でも3つのデトネーション波が伝播することが確認できる。軌跡の傾きは伝播速度に対応しており、右肩上がりであれば $+x$ 方向、右肩下がりであれば $-x$ 方向へデトネーション波が伝播していることになる。 $\phi = 0.6$ では $t = 5.5\text{ms}$ 付近までは $+x$ 方向へデトネーションが伝播するが、それ以降では $-x$ 方向へ伝播速度が切り替わる過程が捉えられている。それに対して、 $\phi = 1.0$ では安定して $+x$ 方向へデトネーションが伝播する結果が得られた。この傾向は燃焼試験で確認されている傾向と一致しており、二次元解析（周期境界）により遷移状態が再現できているものと考えられる。

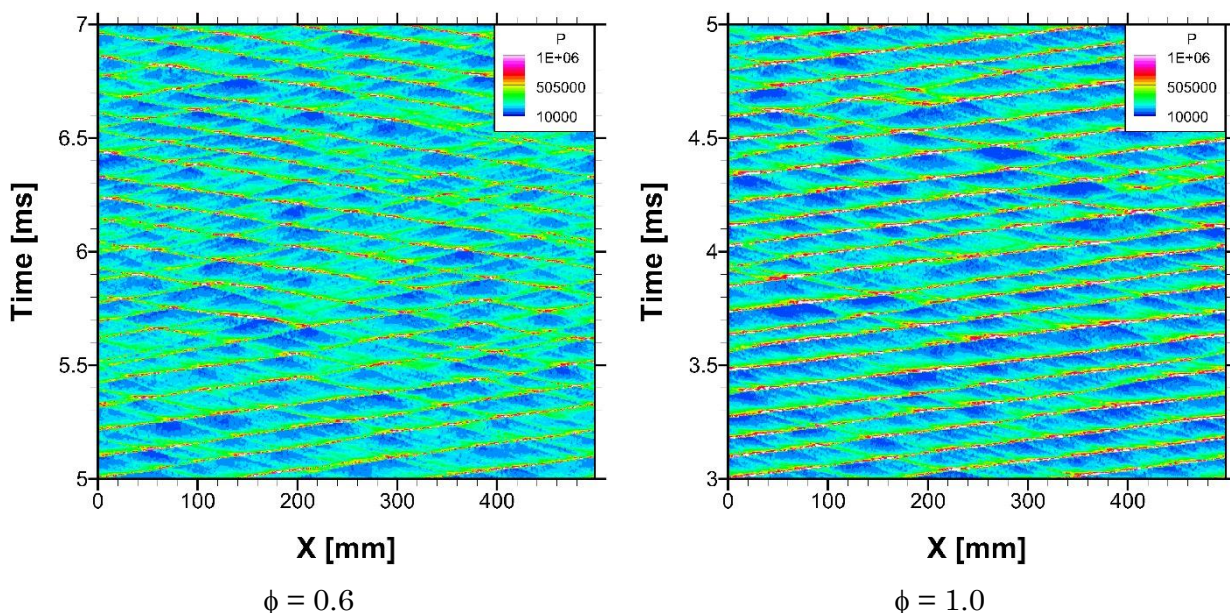


図3-3-9 二次元解析（周期境界）による $y = 5\text{mm}$ における x 方向に沿った圧力分布の時系列データ。環状デトネーション燃焼試験装置 #2、スロートなし、噴射流量 = 500g/s 。

次に、デトネーション波が観測されないなどの不作為状態についてであるが、燃焼試験では主に噴射流量の小さい条件で観測されている。そこで、噴射流量を変化させて二次元解析（周期境界）を実施し、不作為状態の再現を試みた結果を報告する。ここでも問題設定は図3-3-4と同じであるが、解析対象を環状デトネーション燃焼試験装置 #1とした（ $X_{\text{chamber}} = 344\text{mm}$ 、 $d_{\text{CH}_4} = d_{\text{O}_2} = 2\text{mm}$ 、噴射器43ペア、格子解像度 = $200\mu\text{m}$ ）。 $\phi = 1.0$ について噴射流量を 800g/s 、および、 100g/s として2ケースの解析を実施した。図3-3-10に $y = 5\text{mm}$ の位置における x 方向に沿った圧力分布を時系列にプロットした結果を示す。まず、噴射流量 = 800g/s の条件では安定して $+x$ 方向へデトネーションが伝播する結果が得られた。また、図3-3-9に示した噴射流量 = 500g/s の結果と比較してわかるように、噴射流量が大きい場合に圧力値は全体的に高くなる傾向がみられる。それに対して噴射流量 = 100g/s の結果では圧力値がかなり低くなるとともに、 $-x$ 方向へ伝播するデトネーション波は不鮮明であり、さらに、それに対向するように $+x$ 方向へ伝播する弱いデトネーション波のような軌跡も確認できる。デフラグレーション状態にはなっていないものの、噴射流量の小さい条件ではデトネーション波の伝播速度も遅く、また、デトネーション波による圧

力上昇はかなり小さくなることが二次元解析（周期境界）より確認できた。さらに、噴射流量の低下による伝播速度の低下を確認するため、噴射流量に対するデトネーション波の伝播速度をプロットした結果を図3-3-11に示す。 $\phi = 1.0$ の条件について噴射流量を 100、500、800g/sとした場合、いずれも2枚のデトネーション波が形成され、噴射流量が低下するとデトネーション波の伝播速度が低下する傾向がはっきりと捉えられている。また、図3-3-12に噴射流量（MFR）に対するデトネーション波の強度の変化を示す。この結果は瞬時の流れ場データを利用して比体積（密度⁻¹）と圧力の関係をプロットしたものであるが、左上の領域に向かっていくに従いデトネーション波の強度が強くなることを示す。これらのプロットから、噴射流量が低下するにしたがってデトネーション波の強度が弱くなっていくことがわかる。

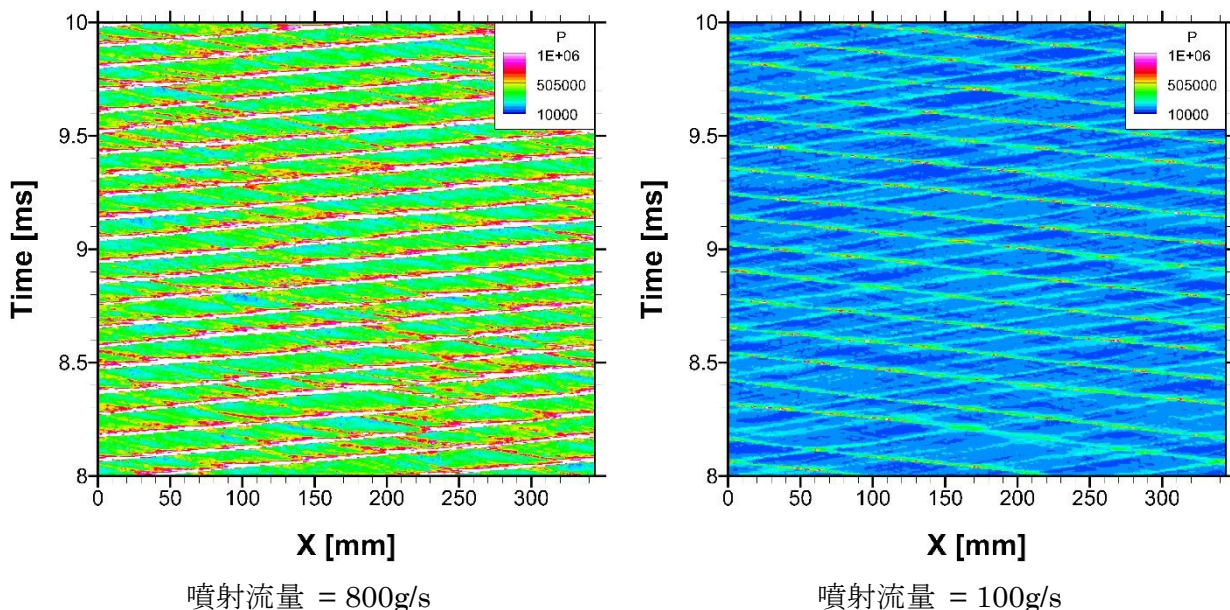


図3-3-10 噴射流量によるデトネーション波の伝播過程への影響。二次元解析（周期境界）による $y = 5\text{mm}$ における x 方向に沿った圧力分布の時系列データ。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、 $\phi = 1.0$ 。

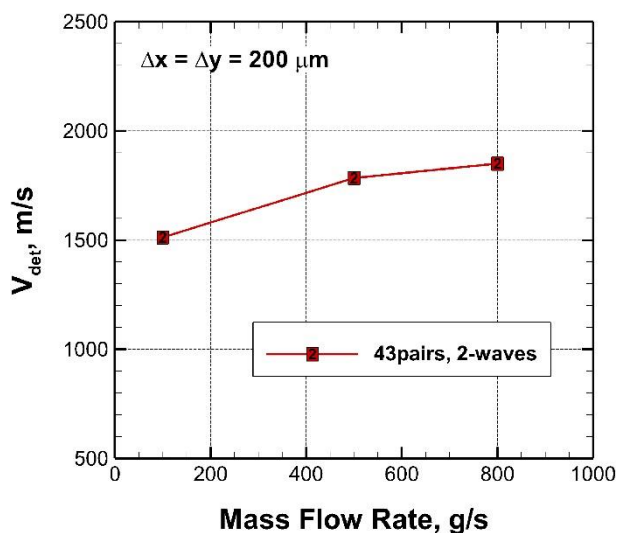


図3-3-11 噴射流量に対するデトネーション波の伝播速度の変化。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射器43ペア、格子解像度 = $200\mu\text{m}$ 、 $\phi = 1.0$ 。

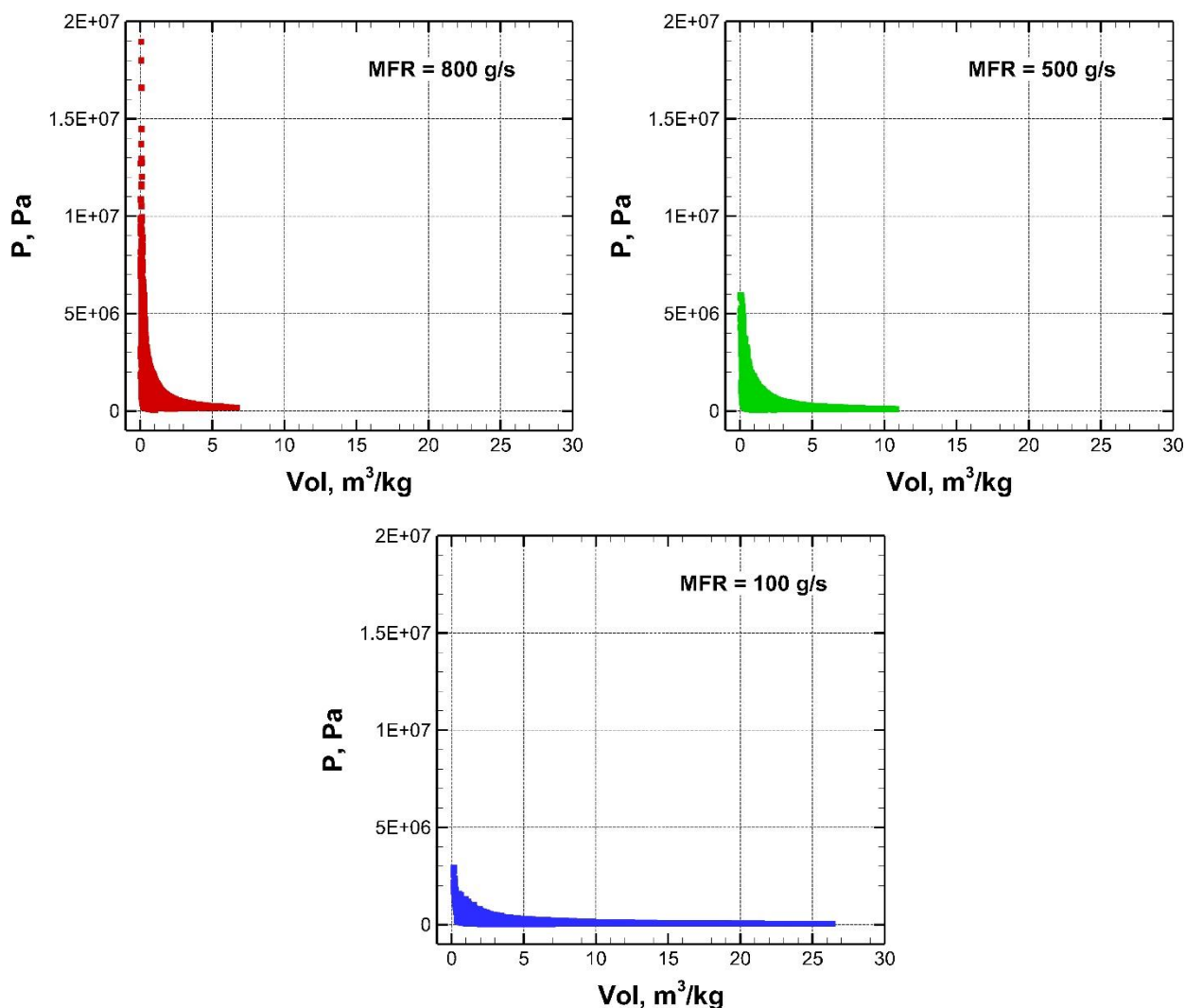


図3-3-12 噴射流量に対するデトネーション波の強度の変化。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射器43ペア、格子解像度 = $200\mu\text{m}$ 、 $\phi = 1.0$ 。

ここまでで結果を示した周期境界による二次元解析では伝播方向が切り替わる過程やデトネーション波が弱くなる傾向は捉えられたものの、デトネーションから完全にデフラグレーションに遷移する過程を捉えることはできなかった。そこで、閉じた円環流路内部を伝播するデトネーション波の二次元解析を実施し、デトネーション波が伝播できる限界を評価することを試みた。図3-3-13に円環流路を仮定した二次元デトネーション解析の問題設定を示す。この二次元解析（円環流路）では解析対象を環状デトネーション燃焼試験装置 #1とし、流路幅 W による影響を評価するために $W = 8, 16\text{mm}$ とで流路幅を変化させて解析を実施した。また、燃料と酸化剤の混合状態によるデトネーション波伝播への影響を評価するため、不完全な混合状態の未燃ガスを配置して、その中でデトネーション波が伝播する過程について解析を実施した。不完全な混合状態を与えるため、図3-3-11bに示すような問題設定により、流路幅 W 方向に $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ のモル分率を変化させて分布させる。 W_F および W_O はそれぞれ燃料および酸化剤のみが分布する領域の幅を指定し、 W_{premix} で指定される領域には $\phi = 1.0$ の完全な混合気を分布させる。 W_F 、 W_O 、 W_{premix} により指定される領域の間ではモル分率が線形に変化するように $\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2$ を分布させた。以上の問題設定は W_F 、 W_O の値を大きくする、また、 W_{premix} の値を小さくすると燃料・酸化剤の混合状態が悪くなることに対応している。

図3-3-14に W_F 、 W_O 、および W_{premix} に対するデトネーション波の伝播速度の変化を示す。 $W = 8\text{mm}$ 、 16mm のいずれの場合でも W_F 、 W_O を大きくするほど、もしくは、 W_{premix} を小さくするほど、デトネーション波の伝播速度が低下してゆき、 1500m/s を下回るあたりからデトネーション波が維持できずにデフラグレーションへと遷移する。また、流路幅が大きい $W = 16\text{mm}$ の方が伝

播速度は低い傾向となった。この結果は、混合状態が悪く十分に予混合気形成されていないとデトネーション波が維持できない、ということを示すものである。また、シミュレーションによってデトネーションからデフラグレーションへの遷移を正確に捉えるにはかなり高い解像度が必要であることがわかる。 $W = 8\text{mm}$ のケースでは格子解像度を $80\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ まで変化させて解析を実施したが、格子が粗い場合にはデフラグレーションへの遷移が生じず、解像度を $10\mu\text{m}$ まで向上させることでようやく遷移が正確に捉えられるようになった。このことは、三次元解析によってデトネーションからデフラグレーションへの遷移を捉えるためには非常に大きな計算コストを要求し、何か問題設定を工夫しながら計算領域を小さくするなどの特別な取り扱いをしなければ解析の実施が不可能であることを示唆している。

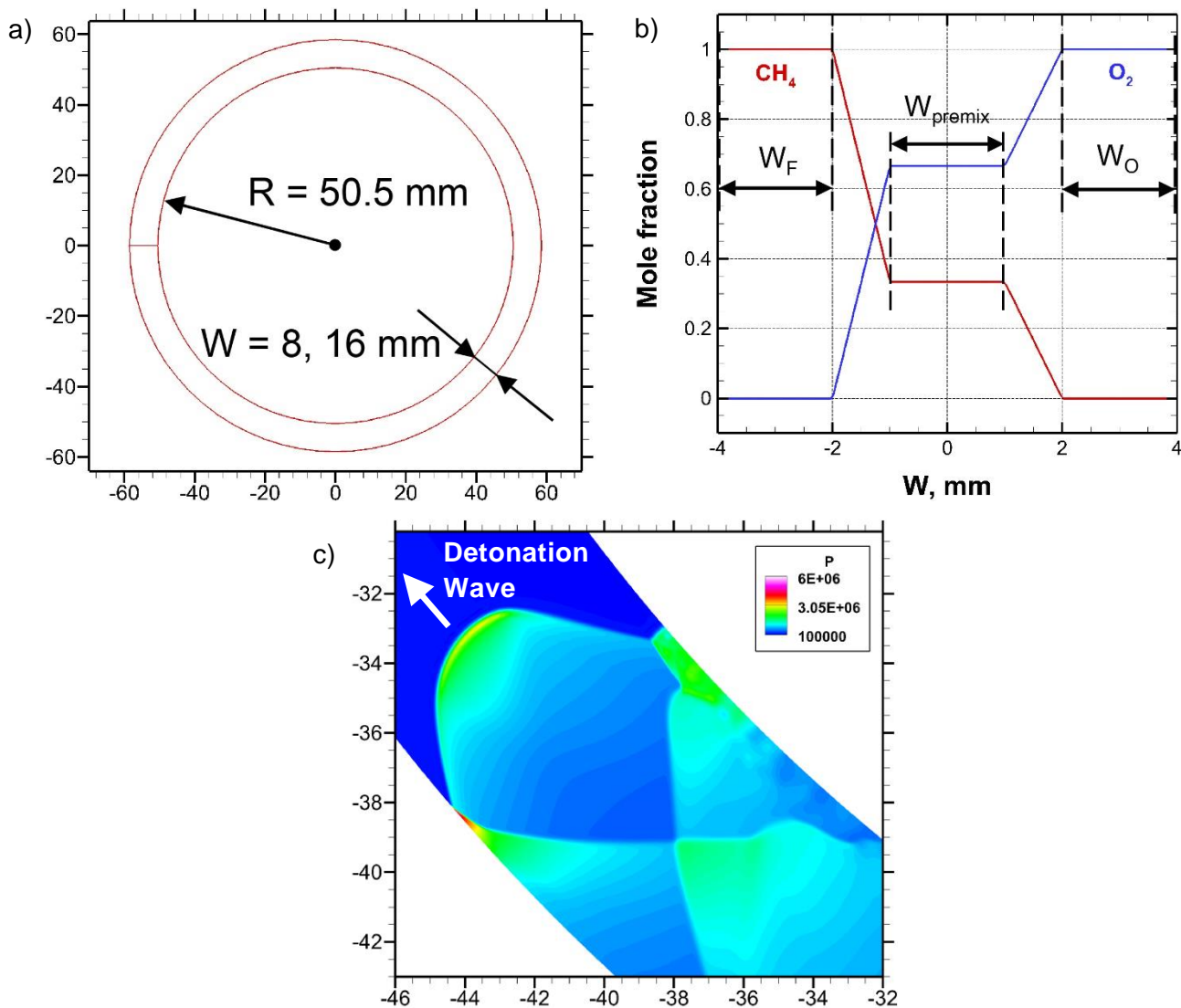
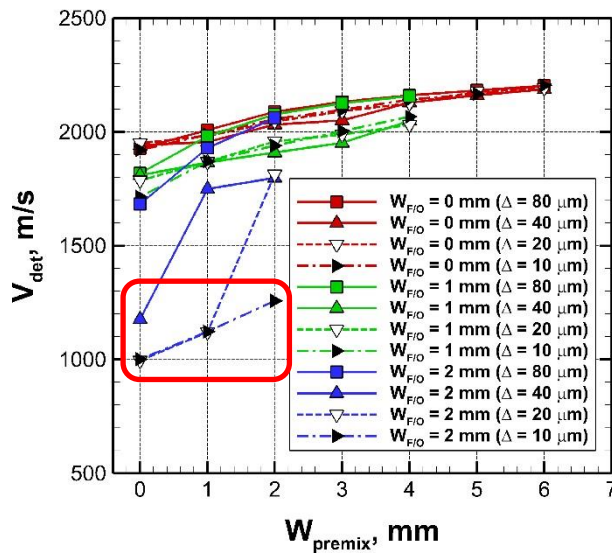
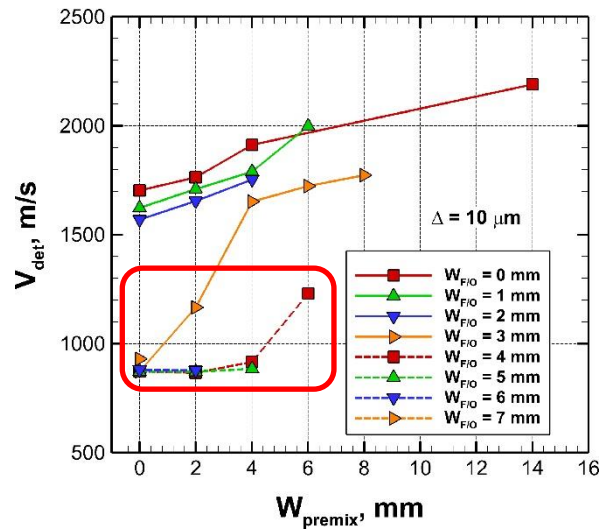


図3-3-13 円環流路を仮定した二次元デトネーション解析の問題設定



W = 8mm



W = 16mm

図3-3-14 二次元解析（円環流路）による W_F 、 W_0 、および W_{premit} に対するデトネーション波の伝播速度の変化。環状デトネーション燃焼試験装置 #1。赤い枠で囲まれた条件でデトネーションからデフラグレーションへの遷移が生じる。

燃焼試験では噴射流量が低い条件においてデトネーション波の観測されない不動作状態が観測される傾向がみられた。また、当量比が1.0よりも小さな条件においてその傾向がより強いように思われる。これらの条件、流量が低く当量比の小さな条件においてデトネーションが維持できない理由について考察をする。図3-3-15に $\phi = 0.6$ 、および、1.0について噴射流量を100g/s、500g/sとして二次元解析（周期境界）を実施した結果を示す。解析対象は環状デトネーション燃焼試験装置 #1（スロートなし）、格子解像度は200 μm として解析を行った。図の結果は瞬時の圧力分布、 CH_4 および O_2 のモル分率分布である。まず、 $\phi = 0.6$ の条件は燃料希薄となる噴射条件であり、酸化剤 (O_2) を消費しきれずにかなりの量が燃焼室内に残ることがわかる。それに対して、 $\phi = 1.0$ では燃料の供給量が増えるため酸化剤の消費が進み、燃焼室内に残る O_2 の量は減る傾向がみられる。また、噴射流量100g/sと500g/sとで CH_4 噴流の貫通高さ（ CH_4 が到達するy方向の最大高さ）を比較すると、噴射流量が低いケースでは明らかに貫通高さが小さくなっており、 $\phi = 0.6$ の条件ではさらにその傾向が顕著になる。 CH_4 噴流の貫通高さが小さいということは燃焼室への燃料供給量が少ないことを意味しているが、噴射流量が低く当量比が小さい条件では燃料の供給量が十分ではないため、強いデトネーションを安定して維持するために必要な予混合気形成されていないと思われる。円環流路による二次元解析の結果（図3-3-14）で示されたように、混合状態が悪く予混合気が不足する場合にはデトネーションが維持できずにデフラグレーションへ遷移することから、噴射流量が低く当量比が小さい条件で不動作の状態が生じる理由は燃料供給量が不足して混合が不十分なためであると考えられる。

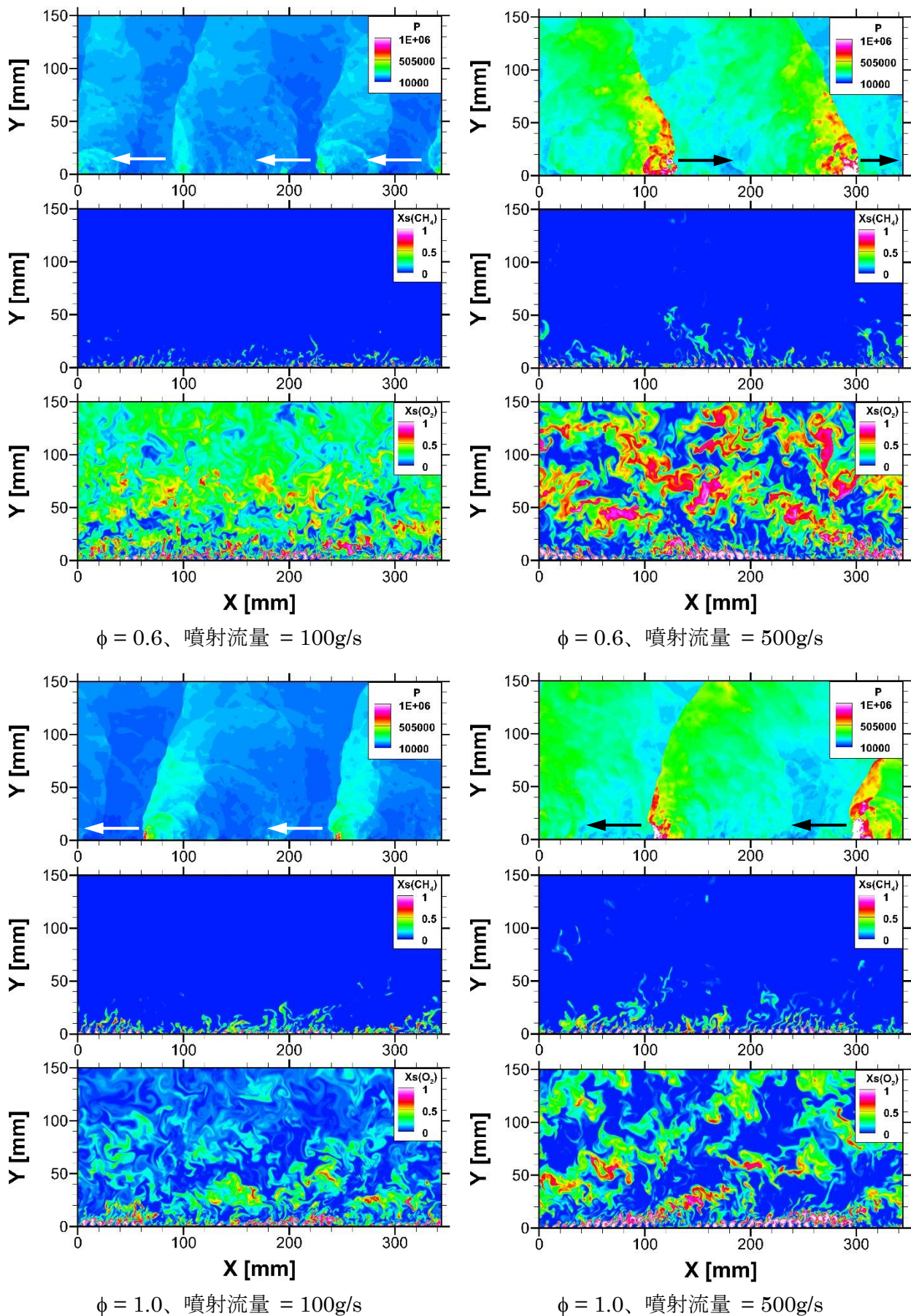


図3-3-15 二次元解析（周期境界）による瞬時の圧力分布、CH₄およびO₂のモル分率分布。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、解像度200 μ m。

(3) デトネーション波の詳細構造の定性的再現

ここでは、数値解析で捉えられたデトネーション波の構造が実際のデトネーション波を再現できているかを定性的に評価するため、二次元解析（周期境界）と燃焼試験で計測されたCH*自発光画像との比較を行った。比較対象は環状デトネーション燃焼試験装置 #1とし、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 1.0$ の条件について、スロートあり・なしの形態で計測された自発光画像と解析結果を比較した。まず、図3-3-16にスロートなしの場合の二次元解析の結果と自発光画像の比較を示す。CH*自発光は化学反応が活発に進む領域で生じるため、回転デトネーション波の場合、デトネーション波とそれに続く斜め衝撃波の背後で観測されている。二次元解析の結果では圧力分布が最もデトネーション波と斜め衝撃波の様相を表しているため、瞬時の圧力分布とCH*ラジカル自発光画像を比較した。二次元解析で得られた圧力分布は自発光画像によく似ており、垂直に近いデトネーション波とそれに追従する一定の角度をもった斜め衝撃波が再現されている。

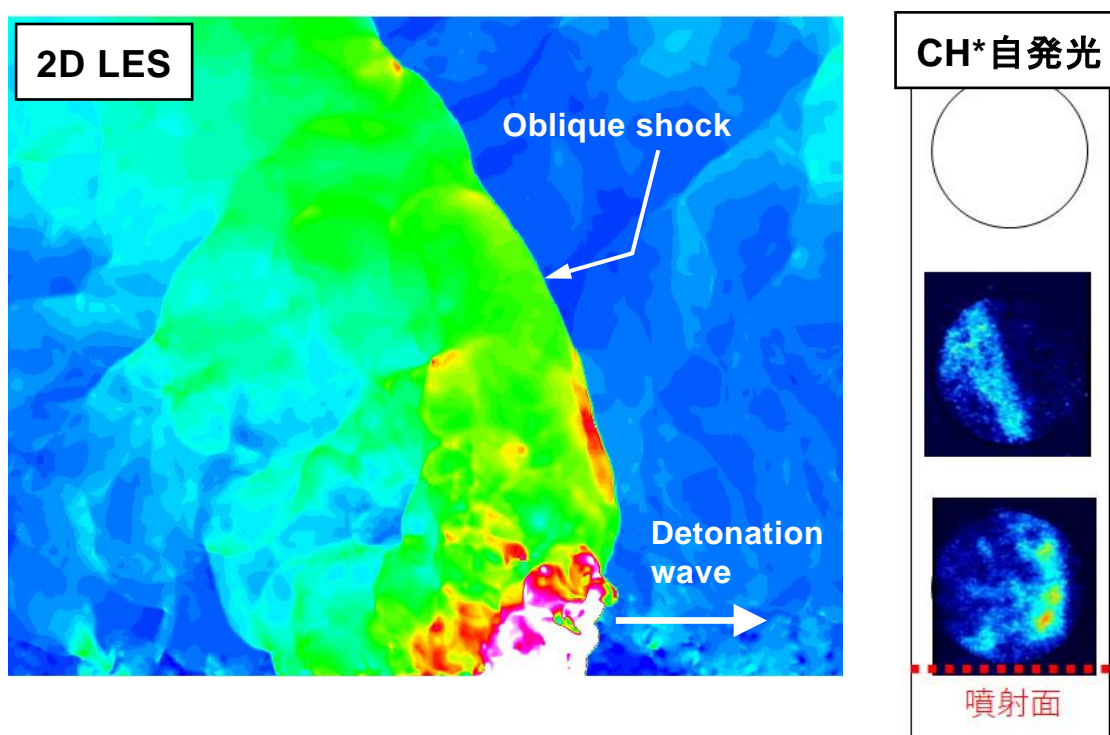


図3-3-16 二次元解析（周期境界）の結果とCH*自発光画像の比較。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートなし、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 1.0$ 。

次に、図3-3-17にスロートありの場合の二次元解析（周期境界）の結果と自発光画像の比較を示す。スロートなしの場合、燃焼室出口は大気開放されているため燃焼室圧力が大気圧程度であるが、スロートありの場合には燃焼室出口がチョークするため燃焼室圧力が増加して10気圧程度の環境となっている。二次元解析ではスロートの効果を取り入れるため、燃焼室出口の境界条件を10気圧として解析を実施した。二次元解析の結果はスロートなしの場合と同様な結果に見えるが、大きな違いは斜め衝撃波の角度が変化しており、斜め衝撃波は垂直に近い状態になっている。スロートありの場合のCH*自発光画像を見ると斜め衝撃波が垂直に近い状態になっており、二次元解析はこれを良く再現できている。

以上の比較から、実際の燃焼試験で観測されたスロートあり・なしによるデトネーション波の様相の違いが二次元解析（周期境界）によって感度良く捉えられていると考える。

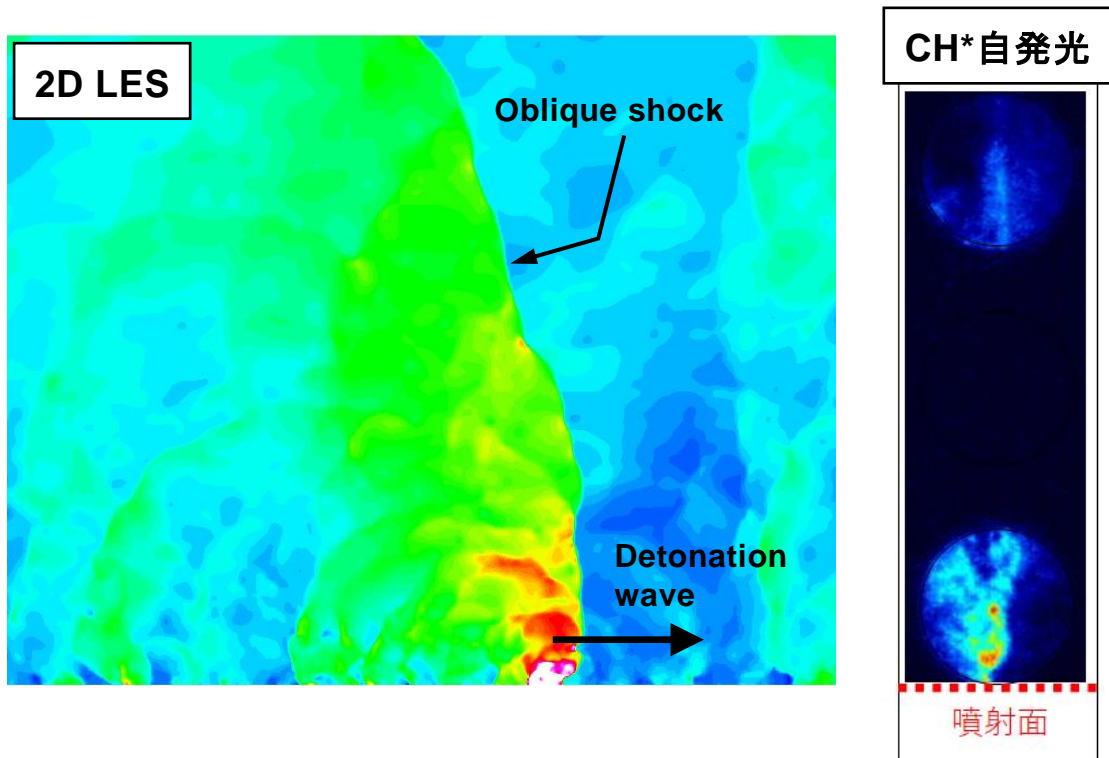


図3-3-17 二次元解析（周期境界）の結果とCH*自発光画像の比較。環状デトネーション燃焼試験装置 #1、スロートあり、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 1.0$ 。

(4) デトネーション波の密度分布の定量的再現

ここでは、数値解析によって得られた密度分布と燃焼試験で取得された干渉計画像による密度分布との定量的な比較を行う。図3-3-18に二次元解析（周期境界）によるデトネーション波付近の密度および圧力分布を示す。解析対象は環状デトネーション燃焼試験装置 #2（スロートなし）、解析条件は噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 0.6$ である。また、図3-3-19に干渉計画像によって得られた密度分布を示す（環状デトネーション燃焼試験装置 #2、スロートなし、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 0.41$ ）。図中、デトネーション波は下から上へ向かって伝播している。まず、デトネーション波とその下流域における密度変化について評価をすると、二次元解析の結果ではデトネーション波による圧縮で密度が約 2kg/m^3 まで上昇し、デトネーション波背後の下流域での密度は 0.2kg/m^3 程度となっており、その密度比は約10倍である。一方、干渉計画像による密度分布は相対密度となっているが、デトネーション波背後の下流域での密度を 0.2kg/m^3 と仮定するとデトネーション波付近の密度は 1.0kg/m^3 であり（コンターレベルの数値を0.4オフセットして評価）、密度比は約5倍となる。また、斜め衝撃波前後での密度比を比較すると、二次元解析の結果では約2倍、干渉計画像では約2.5倍となった。干渉計画像による密度計測の結果は燃焼室の幅方向に平均化された情報になっていることに加え、解析と燃焼試験とで噴射当量比の条件が若干異なるため、厳密な比較とは言いにくい部分があるものの、デトネーション波および斜め衝撃波近傍での密度変化はオーダー的に整合性のある結果となった。注意すべき点として、干渉計画像計測は視線に沿って燃焼室の幅方向の情報が積分されて計測されるため、幅方向の密度変化による影響が平均化されている。そのため、数値解析と計測データとでより厳密な比較をするには、三次元解析を実施して密度分布データを燃焼室の幅方向に平均化するなどの処理が必要であると考えられる。

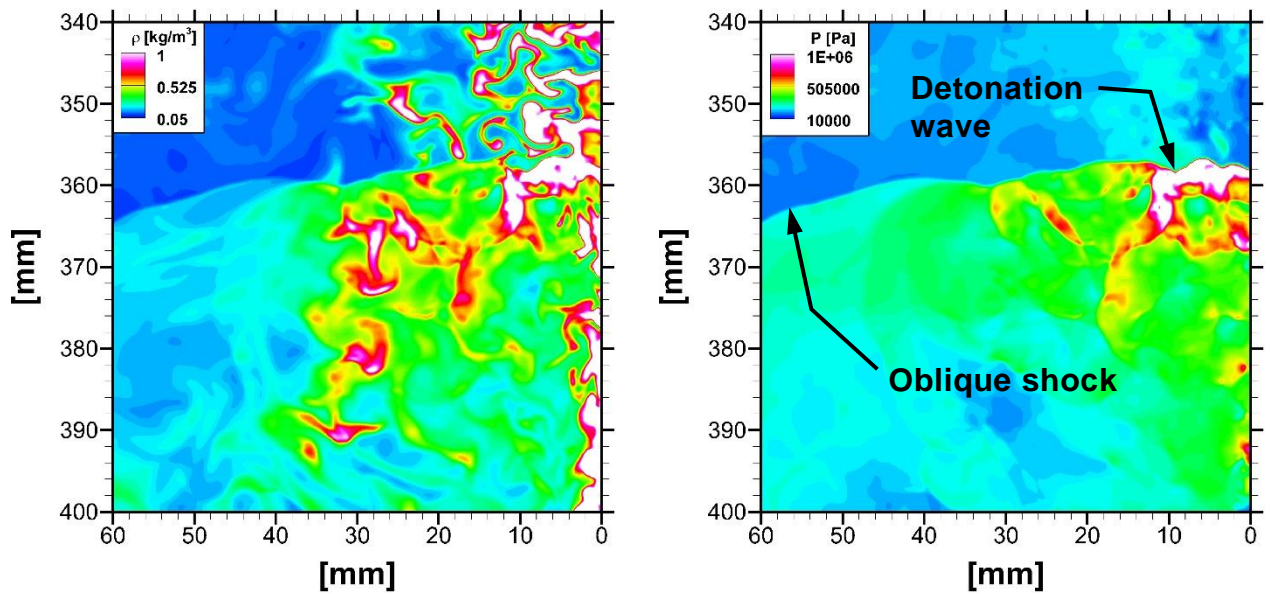


図3-3-18 二次元解析（周期境界）によるデトネーション波付近の（左）密度および（右）圧力分布。環状デトネーション燃焼試験装置 #2、スロートなし、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 0.6$ 。

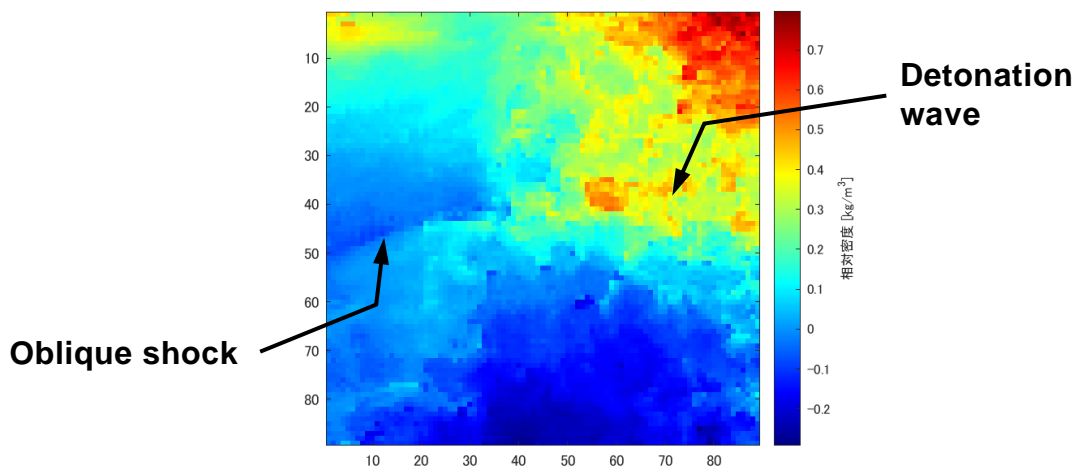


図3-3-19 干渉計画像による密度分布。環状デトネーション燃焼試験装置 #2、スロートなし、噴射流量 = 500g/s、 $\phi = 0.41$ 。

(5) 作動/不作動のメカニズム考察

デトネーション波が観測されない不作動状態ではデトネーション波が維持できずにデフラグレーションへの遷移が生じているものと考えられる。まず、二次元解析（円環流路）の結果が示すように、混合状態が不十分で予混合気の量が不足するとデトネーション波の伝播速度が低下してゆき、最終的にはデフラグレーションへの遷移が生じる（図3-3-14）。燃焼試験では噴射流量が低く当量比が小さい条件で不作動状態が観測されているが、噴射流量が低いことと当量比が小さいことはいずれも不十分な混合と予混合気の不足につながるものである。二次元解析（周期境界）の結果が示すように、まず、噴射流量が低い場合にはデトネーション波の伝播速度が低下して（図3-3-11）デトネーション波の強度も低下する（図3-3-12）。これは噴射流量が低い場合には燃焼室への燃料と酸化剤の供給量が少なく、形成される予混合気の量が減少するためと考えられる。また、当量比が小さい条件では燃料の供給量が少なく酸化剤が過多となる（図3-3-15）ため、これによっても燃焼室内で形成される予混合気の量が減少する。これらの相乗的な効果によって、噴射流量が低く当量比の小さい条件では燃焼室への燃料と酸化剤の供給量が不足し、デフラグレーションへの遷移が生じるものとする。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

特になし

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究にて回転爆轟波ロケットエンジン（RDRE）内部の爆轟波伝播の定量的可視化計測の実現を目的として設計・製作した点回折干渉計は、以下の様な特長を有する。

1) 一般的な干渉計は、光路が「物体光」（計測対象の位相情報を含む）と「参照光」（位相の基準）に二分するが、点回折干渉計は、物体光と参照光が同一光路となるコモンパス干渉計であるため、測定対象の自由度が高い。すなわち、参照光用光学系の構築が難しい狭小な場所（実機エンジン内部など）、安全管理上の理由で光学系の調整が困難な測定対象（航空機周囲、爆発を伴う現象など）、さらには野外において遠方に設置された計測対象に点回折干渉計は適用できる。これらの測定対象は、参照光用と物体光用の光学系を併設する必要がある一般的な干渉計では不可能である。この問題の解決を達成した。

2) これまでの点回折干渉計を改良し、受光部の一部でマッハ・ツェンダー干渉計を形成することで、点回折干渉計の欠点である物体光と参照光のコントラスト調整ができない問題を解決した。すなわち、点回折干渉計の重要部品であるピンホールは、撮像装置直前に設置され、干渉縞の発生に不可欠な物体光と参照光を分離する。これら2つの光は、分離後、撮像素子上で測定部の位相情報（密度分布）の空間分布である干渉縞を発生させる。参照光と物体光に分離後に撮像素子までの距離をほぼゼロとできる点が、一般的な干渉計に対する点回折干渉計の利点である。一方、明りょうな干渉縞発生には、参照光と物体光の強度比（コントラスト）を測定条件に合わせて調整する必要があるものの、点回折干渉計のピンホールには、透過率が固定された半透明鏡を基盤とした構造上の理由からコントラスト調整の機能が付加できない。そのため、コントラスト最適化には、ピンホール以外の光学部品の変更が必要となるため、対象現象以外に使用する際に光学系の再設計が必要となる。点回折干渉計のこの欠点を、受光部の光学系構成を一部改良することで、同一のピンホールを利用しつつ、コントラスト調整を可能な光学系の確立を達成した。

3) 光学系のコンパクト化を検討した結果、400 mm × 600 mm の光学ボード上に主要光学系を構築し、可搬性に優れている。一般的な干渉計を構成するために必要となる光学系設置は、光源として使用するレーザ装置の出力及び干渉能力により様々であるが、概ね1200 mm×1800 mm程度の光学定盤が必要となる。さらにこれら光学定盤は、安定な干渉計測を目的とし、制震・除震性能を高めた構造を有するため、重量200 kg以上となり、可搬性がまったくない。本研究では、点回折干渉計の設計・製作及び爆轟現象への適用検証は東海大学において、RDRE燃焼実験はJAXA角田宇宙センターにおいて実施が計画されたため、一般的な干渉計光学系実験を前提とした設計では、燃焼実験に適用する際に点回折干渉計の移動・設置・調整に困難を伴うことが明らかであった。そこで、必要最小限の光学系構成とともに、運搬時の分解・組立を短時間かつ高精度で、また、振動や温度変化による光学部品に対する影響が最小限とすることを前提に光学系設計をすすめ、上記の光学ボード上に収容可能な光学系主要部とし、付帯設備（光源レーザほか）との分離運搬可能な光学系の設計・製作に取り組み、可搬型干渉計を実現した。

4) RDRE燃焼実験を経験することで、温度、振動条件が劣悪な野外環境においても繊細な干渉計測を実現できるノウハウが反映された光学系であり、耐環境性が高い。具体的には、RDRE燃焼実験は、安全管理の観点から開放空間で実施される。そのため、RDRE近傍に設置された点回折干渉計は、日射による表面温度変化、早朝から日没後までの実験工程中での気温変化に暴露される。一方、干渉縞は、光の波長（ナノメートル単位）程度の光学部品の寸法変化で敏感

に分布形状が変化し、計測精度に影響を与える。そのため、光学部品の温度変化の抑制や調整可能な範囲を超えた場合の光学系再調整の容易さが不可欠となる。また、太陽光と比較すると微弱な光を扱うことに対する配慮が不可欠となる。これらの計測阻害要因である環境外乱は、実験室内であれば当然は発生しないため、一般的な干渉計計測では配慮する必要ない。このような環境外乱に対し、当該点回折干渉計では、2年度目および最終年度で経験したRDRE燃焼実験から、光学系調整を容易にするケージシステム（光学系全体をロッドによって結合し、ズレを抑制する）の導入、光学系をユニット化することで、調整のしやすさの実現など、他の同種の干渉計に比べ、環境じょう乱へ抗堪性を実現した。

これらのことから、本研究で確立させた点回折干渉計を利用した流体計測手法は、RDRE研究のみならず、航空宇宙工学分野をはじめ、流体力学、精密加工、光デバイス分野に適用可能である。特に野外実験による技術資料収集が不可欠な航空宇宙・防衛分野における実機開発段階での空気力学、および燃焼現象解明に大きく貢献できる。具体的には、これまで干渉計を含む流れの可視化計測が多用されてきた航空機・宇宙機開発における風洞実験、および、本研究のごとく実規模段階における各種推進器内部の可視化計測はもとより、特に、可搬性と耐環境性に利点を持つため、野外において実施される各種射撃試験における飛しょう体周囲の流れ場解析、火薬などの実爆実験、さらには航空機等に搭載し、機上からその周囲で発生する現象の定量的可視化計測結果から実機開発過程での干渉計の活用範囲の領域拡大に貢献できる。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

国内で最もデトネーション研究成果の発表が盛んに行われている学会の1つである衝撃波シンポジウムにて、本研究期間中毎年オーガナイズドセッションを開催し、本研究の成果を広くアピールした（但し2019年度はコロナ禍のためシンポジウムが中止）。また適切に外部発表手続きを行ったうえでJAXAのネットワークを生かして本研究に参加していない大学の研究者と研究会を実施し、情報交換を行うとともに安全保障技術研究推進制度への理解を高めた。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

研究の進捗に応じてWeb会議システムを活用して議論を行うとともに、学会発表の機会を活用して成果の中間まとめを適宜行った。また研究期間中にコロナ禍になったが、感染症対策を徹底したうえでの実験実施やテレワークを活用しての数値シミュレーション実施により、計画どおり研究を完了した。

5. 2 経費の効率的執行

JAXA設備/資産を有効活用するとともに、JAXAの調達システムを活用して合い見積もり等を行い無駄のない経費の執行を行った。

6. まとめ、今後の予定

研究開始時に設定した4つの目標を全て達成できた。

① 燃焼試験による回転デトネーション波の作動条件のマッピング

推進薬流量や当量比、供試体形状等をパラメトリックに変化させて全355回の燃焼試験を行い、回転デトネーション波が維持される条件を実験的にマッピングした。

② 作動状態及び不作動状態における回転デトネーション波の詳細構造の把握

作動状態及び不作動状態それぞれに対して、燃焼試験にて干渉計による光学計測を行って燃焼器内部の密度分布を定量的に計測し、回転デトネーション波の詳細構造を把握した。

③ 詳細数値シミュレーションによる作動条件マップの再現

回転デトネーションに必要な計算格子解像度等を同定したうえで、数値シミュレーションにより目標①で実験的に取得した作動/非作動を再現した。

④ 回転デトネーション波の発生メカニズムの解明

実験における回転デトネーションの維持条件の傾向を元に数値シミュレーションで更に考察を深めた結果、回転デトネーション波の維持およびその強さ（≒回転デトネーションエンジンの性能に影響）には、推進薬の混合状態が大きく影響していることを明らかにした。

今後は、本研究で得られた知見（回転デトネーション波の安定維持および高性能化には推進薬を十分混合させる必要があること）をもとに、ロケットエンジンや人工衛星のアポジモータ等への適用を目指した回転デトネーションエンジンの研究開発を進めていく計画。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	1件
学会発表	19件
展示・講演	3件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし