

次世代型航空宇宙推進システム: デトネーションエンジンの主要課題である燃焼過程の不完全性の原因解明

京都大学 工学研究科機械理工学専攻

岩田 和也

1. はじめに

デトネーションエンジンは、従来のロケットエンジンなどと異なり超音速の火炎(デトネーション)を用いることで、熱効率の向上、およびエンジンの小型軽量化を図ることが可能とされる¹⁾。名古屋大学のグループ²⁾が世界初の宇宙飛行実証を成功させるなど、研究開発が活発な一方で、理論と異なる燃焼の挙動のため、予想された性能の向上に至っていない。このような燃焼過程の不完全性は、燃焼室内の不完全な混合や乱流流れ場の効果が考慮されていないためであることが申請者らの先行研究で示された³⁾。申請者は共同研究者とともに不完全混合の影響を数値計算および実験によって検証してきた^{4,5)}。本研究ではこの研究を発展させ、総括当量比を変化させるとともに、乱流流れ場の影響も含めた研究を行うことを目的とする。

2. 乱流流れ場の中を伝播するデトネーション: スパコン「富岳」を用いた大規模シミュレーション

スパコン「富岳」若手課題である「乱流場におけるデトネーション波の燃焼ダイナミクスに関する超大規模直接数値計算」の枠組みのもと、10億計算格子クラスの大規模シミュレーションによって、乱流場が導入された場合のデトネーション物理を調べた。本成果は *Proceedings of the Combustion Institute* に採択されている⁶⁾。図1に示すような3次元直方体のモデルを採用した。メッシュサイズは流れ方向に $2\ \mu\text{m}$ 、スパン方向に $4\ \mu\text{m}$ とすることで、乱流の最小スケール、およびデトネーション波の反応誘起距離の両方を十分に解像できるように設定した。対流項の計算の際は5次精度のWENO⁷⁾によって保存量の内挿を行い、流束の計算にはHLLCとLax-Friedrichを衝撃波近傍か否かで切り替えることによって行った。粘性項は2次精度中心差分によって計算した。化学反応項はConaire⁸⁾による9化学種19素反応の詳細反応を取り入れた。

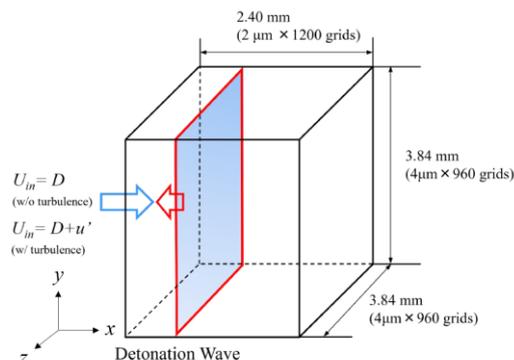


Fig. 1: Computational domain.

図1. 計算モデルセットアップ

表 1 . 計算条件

Case	Re_λ	Ma_t
1	-	-
2	140	0.17
3	360	0.34
4	360	0.51

乱流場に関する計算条件は表 1 にまとめる通りである。Case 1 のみは乱流の無い条件であり、全てのケースに共通し、圧力 40 kPa の $2H_2-O_2$ 混合気を対象にした。テイラースケールレイノルズ数 Re_λ は 140, 360 の 2 種類、乱流マッハ数 Ma_t は 0.17, 0.34, 0.51 の 3 種類である。

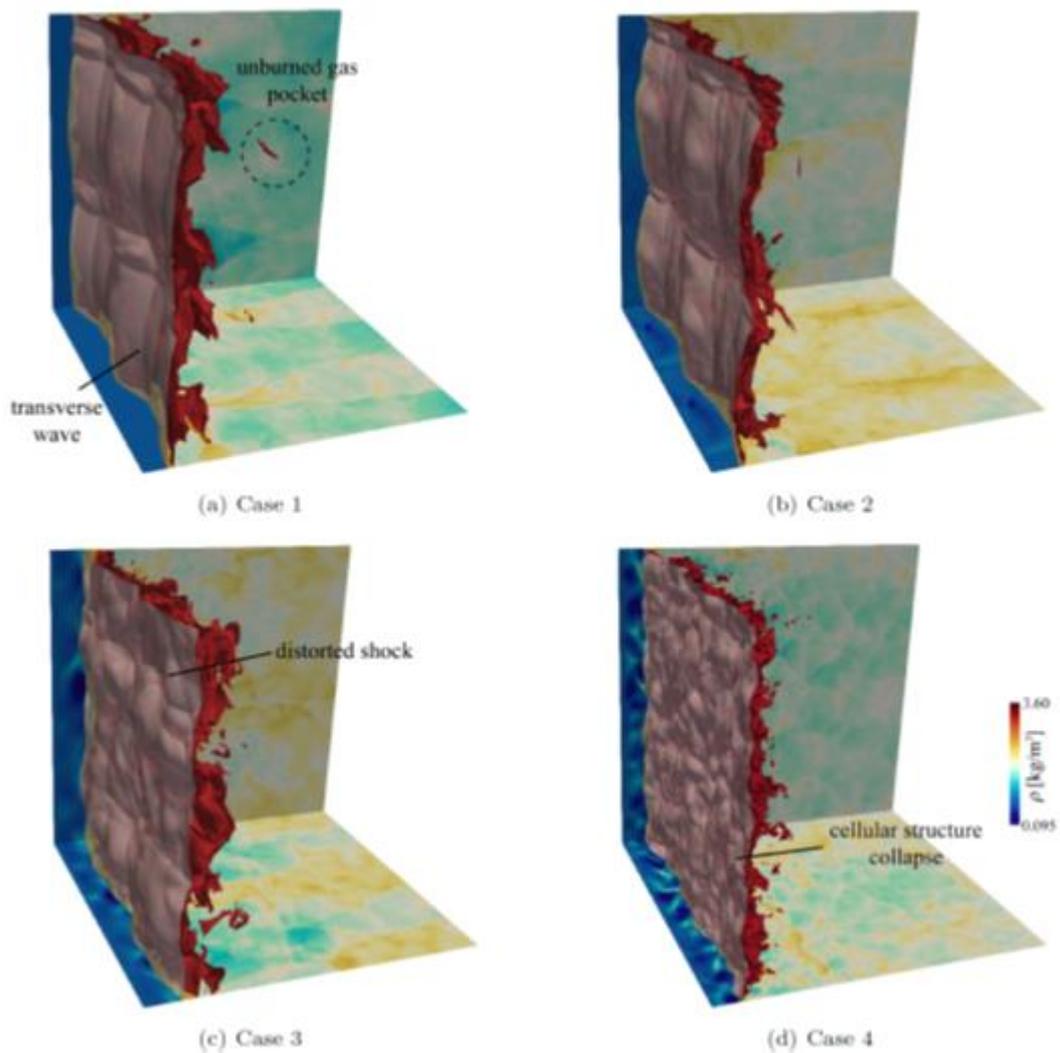


図 2 . 乱流場中を伝播するデトネーションの構造

図 2 に得られたデトネーションの 3 次元構造を示す。半透明の面が衝撃波、赤い面が火炎を表し、スパン方向端面には密度分布を示している。Case 1 の乱流場が存在しない場合では、「セル構造」を形成する横波と呼ばれる衝撃波が、主となる垂直衝撃波に対して沿う方向

(y, z 方向)に伝播しており、両方向に 2 波長分が含まれるような周期的な構造を呈している。それに対し、Case 2、Case 3 では比較的弱い乱流であり、横波による周期的なセル構造パターンは Case 1 と同様に健在である。ただ、Case 3 ではこの衝撃波面の凹凸が激しく、ランダムに乱れる様子が顕著である。最も強い乱流場となる Case 4 ではこの周期的なパターンが完全に崩壊している。このようなセル構造の崩壊はエンジン内の可視化実験の知見³⁾と合致した結果であり、エンジン性能低下につながる事が報告されていることから、重要な新規の知見といえる。

このようなセル構造の崩壊に関しては、崩壊に至るメカニズム、崩壊した場合の伝播を維持するメカニズムについては解析の余地を残している。将来の研究ではトレーサー粒子を導入した Lagrangian 解析を行うことによって、流体要素が経験する反応流れ場を高精度に理論解析することを目指す。

3. 不均一混合気の中を伝播するデトネーション: 二段式軽ガス銃を用いたハイスピード可視化実験

実験では、不均一混合気の効果調べることを目的とした。実験装置は共同研究者である埼玉大学熱工学研究室の前田慎市准教授が所有する二段式軽ガス銃(図 3)、および ULTRA CAM HS-106E (NAC)を中心としたシュリーレン撮影系を用いた^{5,9)}。本成果は学術雑誌 *Physics of Fluids* に投稿中である。

軽ガス銃によって 2000-2300 m/s の発射速度で 9.52 mm 球体の発射を行い、テストチャンバーに充填された H_2/O_2-3Ar 混合気を通過することで、球体まわりに斜めデトネーション(固体に対し静止したデトネーション)が形成される。テストチャンバーはスパン方向に $\Phi 141$ mm の BK7 ガラスを通した可視化セクションを設け、上記のハイスピードカメラ HS-106E を用いて 500,000 fps の高速撮影を行った。露光時間は 300 ns, 解像度は 412 x 360 とした。

不均一混合気を作成するために、図 4 に示すような水素インジェクターをテストチャンバー上部に導入した。テストチャンバーには初期状態では酸化剤 O_2+3Ar のみを充填しておき、続いて上部から水素噴射を行い、所定の総括当量比 Φ , 最終圧力 70 kPa となったところで供給を停止する。その後、球体の発射を行うまでの待機時間 t_w を設定することによって、デトネーションが形成される濃度勾配の強さを設定する。これにより t_w の増加とともに均一混合気へと漸近していくことになる。

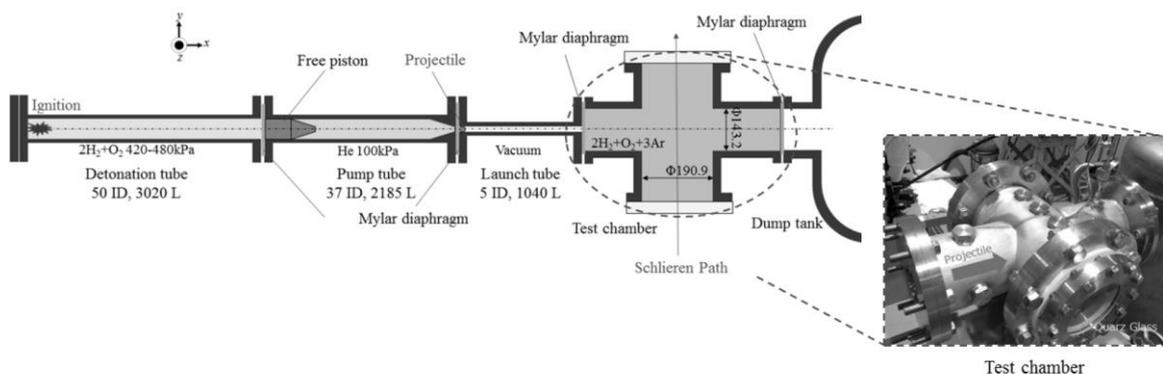


図 3. 二段式軽ガス銃の構成

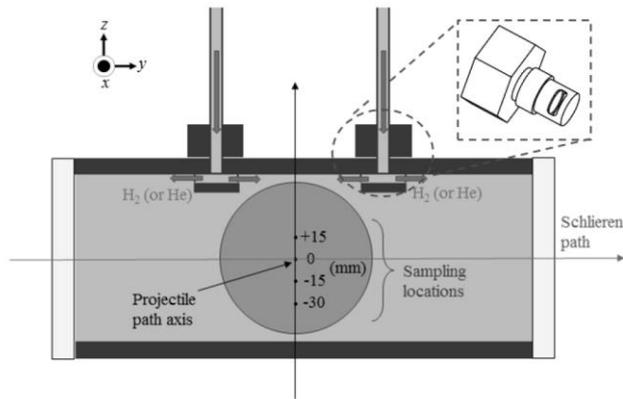


図 4. 不均一混合気生成用の水素インジェクター

図 5、6 には高速シュリーレン撮影によって得られた、球体まわりの斜め detonation の構造をそれぞれ総括当量比 $\Phi=0.7, 2.0$ に対して示す。 $\Phi=0.7$ に関し、均一混合気中であれば、球体に対して上下対称に直線形状の斜め detonation が得られる。 $\Phi=0.7$ $t_w=20$ s (図 5 左) では濃度勾配が弱く、この状況に近いのに対し、 t_w を短く設定するほど非対称性は強まり、detonation 面は曲率を顕著にする。それとともに、燃料濃度の薄い下側では衝撃波面と火炎面が完全に離れ detonation が消失する。最も強い濃度勾配 $t_w = 3$ s では球体上でも detonation が消失してしまっている。

その一方、 $\Phi=2.0$ では均一混合気では衝撃波・火炎が分離した振動燃焼形態となり、 $t_w=5-20$ s ではこの通りとなっている。しかし最も強い濃度勾配 ($t_w=3$ s、図 6 右) では、燃料濃度が量論値に近い球体下側で detonation が発生する傾向が得られた。

このような濃度勾配によって均一混合気中と全く異なる構造が得られるというのは、ほとんど考えられてこなかった現象である。そのため、たとえエンジン内の総括当量比が 1 に近く detonation が維持されやすい条件であっても、濃度分布によっては detonation が生じえない領域ができることを意味し、その逆も起りうるということである。つまり濃度勾配の制御を行うことによって、detonation の発生をうまくコントロールできる余地を示しており、detonation を安定させてエンジン性能を向上させる、新たな指針につながりうる。

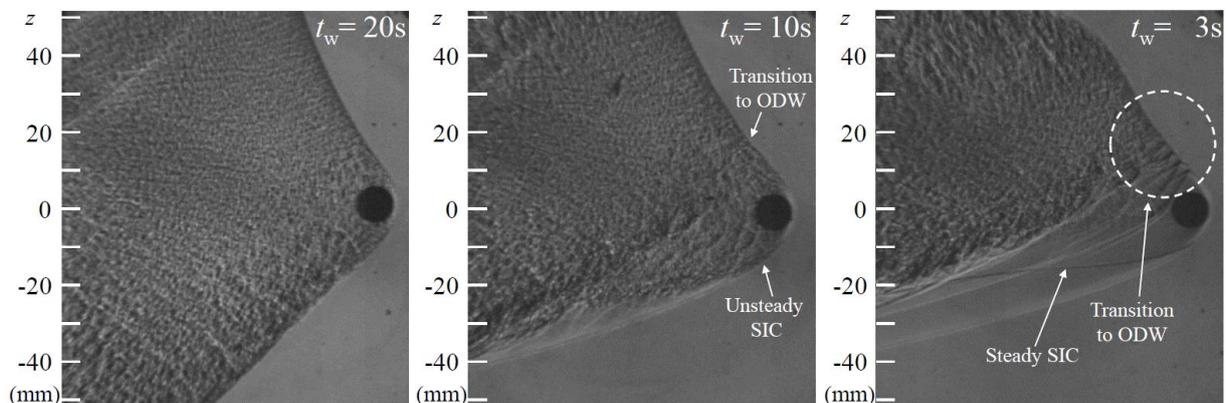


図 5 総括当量比 $\Phi=0.7$ 、各待機時間 t_w における不均一混合気中斜め detonation

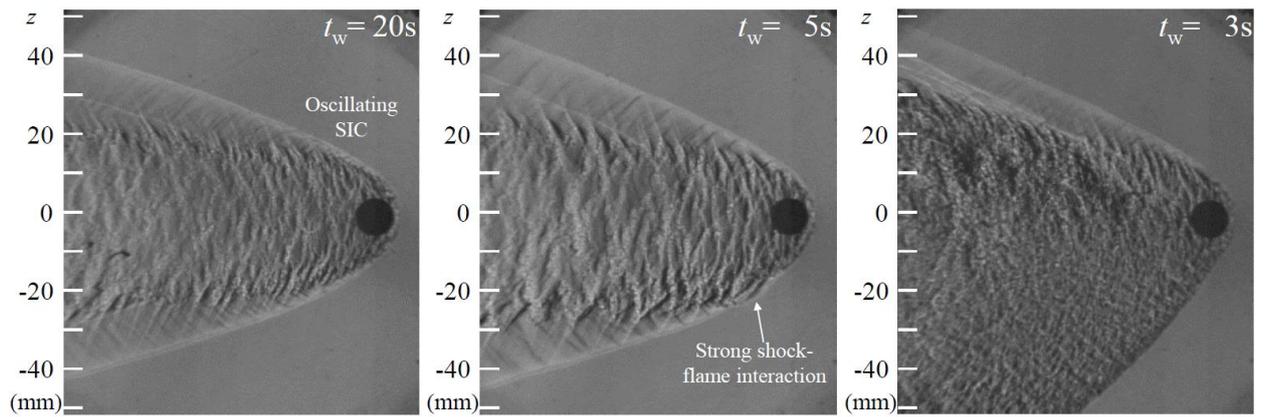


図 6 総括当量比 $\phi=0.7$ 、各待機時間 t_w における不均一混合気中斜めデトネーション

4. デフラグレーション-デトネーション遷移の問題への発展 : 等容燃焼容器を用いた基礎的実験検討

前章までの課題では定常的なデトネーションを基準としたものだったが、発展的課題として現在、亜音速燃焼(デフラグレーション)からデトネーションに至る遷移現象(Deflagration-to-Detonation Transition, DDT)を取り上げ、不均一混合・乱流場の影響の調査へ向けて研究を行っている。このような DDT はエンジンの始動や再始動に関わる重要な現象である。

図 7 に実験装置のセットアップを示す。一辺 100 mm の立方体体積を有する等容燃焼容器を製作し、 $\Phi 70$ mm アクリルガラスによる可視化セクションを設けた。可視化は前章と同様、シュリーレン撮影によって行った。燃焼容器中心部には対向する点火電極を有し、球状火炎伝播を観察できるようになっている。壁面には圧力センサ 123B24 (PCB) を設け、燃焼圧履歴を計測可能にしている。

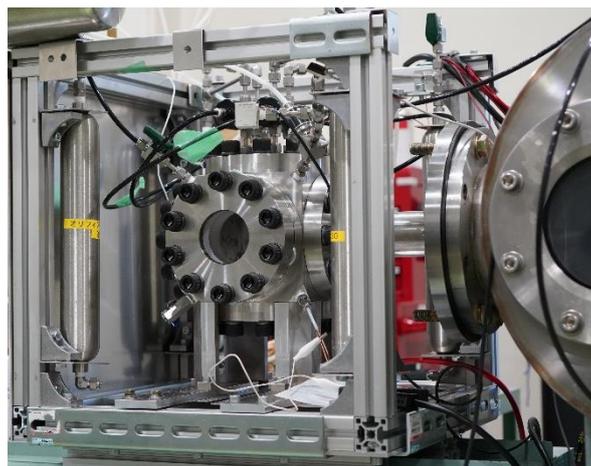


図 7 DDT 可視化実験装置セットアップ

現在は不均一場・乱流場の導入にあたって基準となる、静止均一混合気を対象にした燃焼可視化実験を行っている。図 8 では $\Phi=0.5$ 、初期圧 1.0 MPa でのシュリーレン撮影結果の例を示している。静止均一混合気では先行研究¹⁰⁾と異なり、DDT は得られなかった。そのため不均一場、乱流場、および固体障害物など付加的な要素による影響を慎重に考える必要があり、これからの課題とする。

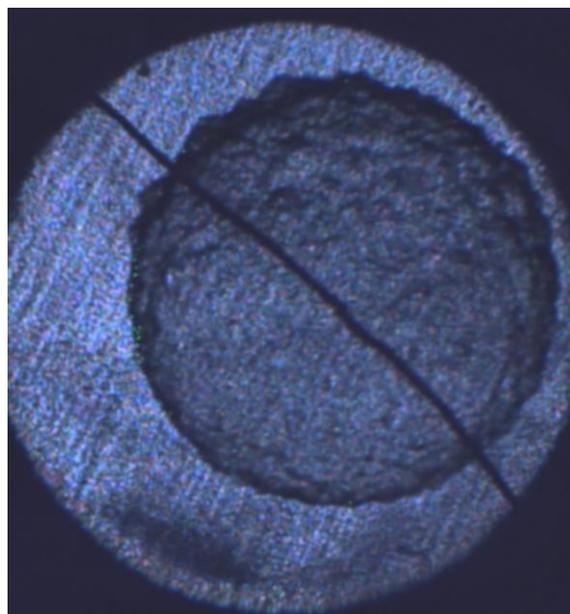


図 8 $\Phi=0.5$ 、初期圧 1.0 MPa の火炎伝播のシュリーレン写真

9. まとめ

本研究では、乱流場および不均一混合場によるデトネーション物理の変化を調べ、セル構造の崩壊など新規の現象が得られ、エンジン性能への影響解析のための重要な知見が得られた。今後は DDT に対する不均一混合や乱流場の影響を考えていく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) P. Wolanski, “Detonative Propulsion,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, pp. 125-158 (2013).

- 2) A. Kawasaki et al., “Flight demonstration of detonation engine system using sounding rocket s-520-31: System design,” in: AIAA SciTech 2022 Forum, pp. 0229 (2022).
- 3) 岩田和也ほか, ” JAXA における回転デトネーションロケットエンジンの基礎的波面現象の解明および性能実証への取り組み” , 日本燃焼学会誌, Vol. 62, pp. 94-102 (2020).
- 4) K. Iwata et al., “Wedge-stabilized oblique detonation in an inhomogeneous hydrogen-air mixture,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, pp. 2761-2769 (2017).
- 5) K. Iwata et al., “Experimental visualization of sphere-induced oblique detonation in a non-uniform mixture,” Combustion and Flame Vol. 244, 112253 (2022).
- 6) S. Suzuki et al., “A DNS study of detonation in H₂/O₂ mixture with variable turbulent intensities,” Proceedings of the Combustion Institute, in press (2024).
- 7) G. Jiang, and C.-W. Shu, “Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes,” Journal of Computational Physics, Vol. 126, pp. 202-228 (1996).
- 8) M. O. Conaire et al., “A comprehensive modeling study of hydrogen oxidation,” International Journal of Chemical Kinetics, Vol. 36, pp. 603-622 (2004).
- 9) S. Maeda et al., “Experimental study on acceleration of projectile by a gaseous detonation-driven gas gun using a light gas,” Science and technology of energetic materials Vol. 77, pp. 79-85 (2016).
- 10) Y.B. Zel’dovich, and A.I. Rozlovskii, “On the onset of unstable normal burning: transition of a spherical flame to detonation,” Doklady Akademii Nauk SSSR Vol. 57, pp. 365-368 (1947, in Russian) .