ISSN 2186-5647

P-36

実在環境における超音速燃焼に関する研究

日大生産工　○岩田　和也

1 序論

現在に至るまで，化石燃料を用いた陸海空の交通手段の推進エネルギー変換手段として，その大部分において燃焼が担ってきた．非枯渇性資源を用いた再生可能エネルギーへの転換がしきりに叫ばれる今日においても，それらが十分な実用化レベルに達する段階が訪れるまでも，成熟化した信頼性・コスト性の両立する既存技術として問題視されるクリーン化・高効率化に努めつつ積極的に利用していくべきであると考えられる．

こと航空，宇宙輸送に関しては近年ますます加速する国際化，そして人工衛星，宇宙環境・資源利用など生活水準向上のために欠かせない技術のために今後その需要の増加に備えなければならないが，これらの輸送技術においては今後大きな技術発展が見込まれても，化石燃料の長期にわたる利用は避けられないと考えられている．また将来的な航空輸送・宇宙開発の発展にむけてこれら航空宇宙機の高速化技術もますます求められると考えられている．

そのような状況において，航空宇宙機の高速化にとっての技術的要となる推進装置の1つとして，最近数十年間にわたってメイントピックの1つとなっているのが超音速燃焼技術である[1, 2]．超音速燃焼にはコンセプトとこれまでの研究背景から，大きく分けて2つがある．一つには，デトネーションと呼ばれる，超音速流れに特有な音波の集合である衝撃波と，火炎が合体したような形態をとる特殊な燃焼現象であり[3]，もともとは福島第一原発でも見られたような爆発事故において観測される，いわば防ぐべき現象として研究されてきた．近年ではその多くの基礎物理が明らかとなり，デトネーションを制御して航空宇宙推進に利用する研究および開発が非常に活発である[2]．パルスデトネーションエンジン(PDE, 間欠的に伝播するデトネーションを推進利用)，回転デトネーションエンジン(RDE, 連続回転伝播するデトネーションを利用)の二形態が主なコンセプトである[2]．もう一つには，宇宙打ち上げにおいて経験するマッハ6(音速の6倍)以上の極超音速領域で利用が見込まれる燃焼形態であり，エンジンに導入する大気流を超音速に保持した上で燃料を供給し引き起こすものである．このような形態のエンジンはスクラムジェットエンジン[1]と呼ばれ，従来のスペースシャトルに代わる再使用宇宙往還機の推進機としての応用が期待されている．先述のデトネーションが燃料と酸化剤を予め混合する燃焼形態に対し，スクラムジェットエンジンではこれらを別々に供給するという差異がある．

これら二形態による超音速燃焼は，もともとは同時期[4]に共通したコンセプトのうちに提唱された技術であるが，その後今日に至るまでは別々の研究分野としての発展を経ている．そしてそれぞれの超音速燃焼現象は，デトネーションにおいては理想的な条件として均一に混合された形態における基礎物理について，スクラムジェットエンジン燃焼においてはその正反対の状況として燃焼室に至るまで空気と燃料が完全に分離した状況を想定した研究が殆ど全てを占めている．しかし，現実の応用環境において，これらのような予混合/非予混合にはっきりと分かれることはむしろ稀であると考えられ，その中間，すなわち混合が不完全であったり，あるいは部分的に燃料を混合した状況を研究対象とすることは有用であり、また実用上でも有効になり得ると考えられる．デトネーションエンジンにおいては超音速伝播に伴う混合時間の制限，スクラムジェットエンジンは保炎の困難から部分的予混合あるいは予燃焼が効果的と目されるためである．これはデトネーションがもともと発見された，爆発事故においても同様に圧倒的に現実的であり，事故環境において可燃性混合気に空間分布があるケースが圧倒的多数であると考えられる．しかし，以上のような実在環境に関わらず，不完全・部分混合状態の超音速燃焼に着目した研究例は非常に少なく，そのような非理想的な現象に関する理解を深めることは実用上非常に重要であり，研究努力がなされるべきところである．

Study on Supersonic Combustion in Realistic Environment

Kazuya Iwata

2 研究方法

これまで述べてきた研究状況から，例はまだ少ないものの実在環境で想定される不完全混合条件の超音速燃焼に関する研究が漸増しており，筆者も数値計算・実験の両面において着手している[5-7]．本発表ではより問題が単純化されると考えられる，デトネーションが不完全混合条件下におかれた場合の現象を対象とし，これまで筆者らの研究方法を紹介し，現状まで明らかになってきた物理について概観する．

2.1. 数値計算方法

不完全混合時のデトネーションを研究するにおいて問題となるのが，空間伝播する形態のデトネーションが濃度分布中におかれた場合，場所ごとのデトネーション波面の伝播方向が分散し発散的になり，時々刻々と波面成分が置かれる混合気組成が変化するため波面物理と局所混合気の状態が一対一対応で整理できないことである．それを解消するため，図１に示すような物体上に静止する斜めデトネーションと呼ばれる形態を利用し，波面が経験する濃度の時間変化がないような系とした．濃度分布は人工的に与え，ガウス関数を利用し物体上へと与える(図2)．詳細な数値計算方法については[6]に譲る．

2.2. 実験方法

対応する実験方法としては同様な(詳細は[7])斜めデトネーションを対象としたものにした．実験装置としては二段式軽ガス銃を用い，デトネーション起爆とヘリウム圧縮の二段階圧縮で得られた高圧駆動によって直径4.76 mmの飛翔体を2000-2500 m/sの極超音速速度まで加速し，混合気へ射出することで物体上に発生させた．斜めデトネーション波の観測は高速シュリーレン撮影によって行った．

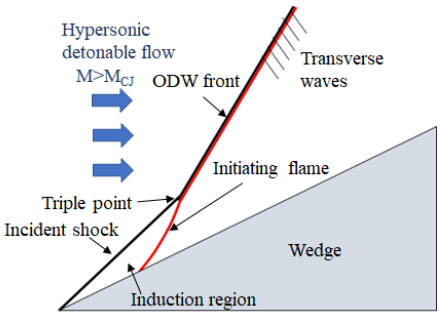

図１　斜めデトネーション

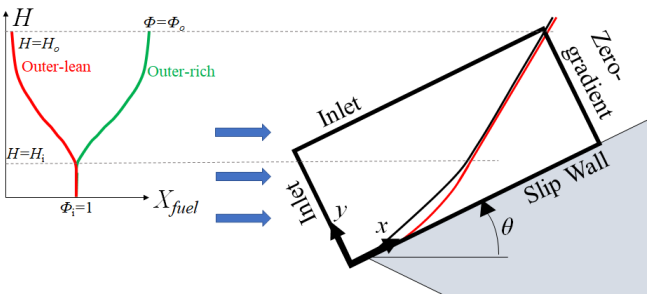

図2　数値計算モデル

3 これまで得られた知見と展望

これまでの研究では，濃度分布の存在によってデトネーションの形態が非定常振動，定常な分離火炎[5]，あるいはデトネーション遷移までの先行火炎がV字に変形する[6]など特異かつ新規な波面形態が得られた．また理論上重要な特性であるデトネーション速度の特性の表れであるデトネーション角度を観察したところ，定性的には理論的傾向に沿うことが明らかにされている[7]．

将来的には，デトネーションエンジン，スクラムジェットエンジン燃焼の中間の形態としての範囲に及ぶまで広いパラメータ範囲での研究を経て，これら2つのコンセプトを統合したような，それぞれが抱える混合・保炎の問題を解決しうるような燃焼形態の物理および実用性について議論していきたい．

「参考文献」

1)C. Segal, Scramjet Engine, Cambridge (2009).
2)P. Wolanski, Proc. Combust. Inst. 34(1) 125-158 (2013)
3)J.H. S. Lee , The Detonation Phenomenon, Cambridge (2008).
4)辻廣，超音速燃焼，日本機械学会誌，70 (583), 1205-1214 (1967).
5)K. Iwata et al., AIAA J. 54(5) 1682-1692 (2016).
6)K. Iwata et al., Proc. Combust. Inst. 36(2) 2761-2769 (2017).
7)岩田和也ほか，日本燃焼学会誌，60(192) 124-132 (2018).