

不均一組成を有する予混合気中の極超音速飛翔体上に 形成される斜めデトネーション

日大生産工 ○岩田和也

1 緒言

デトネーションは、衝撃波と火炎2つの波面が組み合わさった相互作用を伴う超音速燃焼である¹⁾。チャプマン・ジュゲ(C-J)速度 D_{CJ} とよばれる一定の定常伝播速度を有し、それを超える極超音速の予混合気流中では物体上に一定角度で保持・静止されるようになる。このようなデトネーションの形態を斜めデトネーション(ODW, Oblique Detonation Wave)と呼ぶ。物体後方の波面はC-J解に相当して既燃ガス速度が音速となり自己保持され、波面角 β_{CJ} が次式(1)のように表される。

$$\beta_{CJ} = \sin^{-1}(D_{CJ}/V_{in}) \quad (1)$$

このようなODWは連続燃焼にて高速かつ高熱効率の内燃機関に有用として、再使用宇宙往還機への応用が提唱されている²⁾。

しかしODWを対象に多くの基礎研究がなされている一方で、そのほとんどが均一混合気を想定したものである。実際のエンジン内では高速流に伴う短時間の混合過程の制限のため不均一性は不可避であり³⁾、また不均一性によって、従来の均一混合気に対する知見では整理できない重大な変化も確かめられ⁴⁾、不均一性中のODWの研究は重要であると考えられる。そこで本研究では数値計算により、特に濃度勾配中の物体後方の自己保持ODWを議論する。

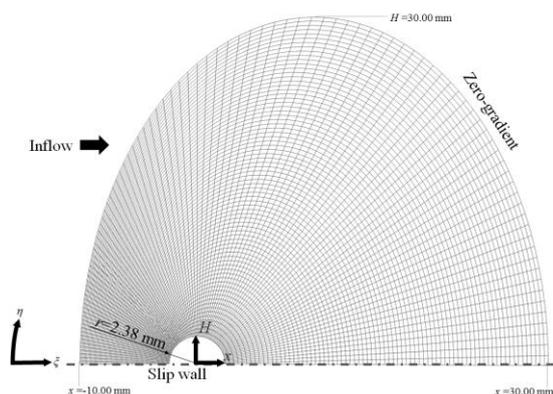


図1 計算領域

表1 数値解法

	解法
支配方程式	2次元Navier-Stokes方程式
対流項	AUSM ⁺ -up
拡散項	2次精度中心差分
反応項	9化学種27素反応
時間積分	TVD2次精度Runge-Kutta法

2 数値計算

本研究で用いた計算領域を図1に示す。物体前方から遠く後方まで延長し、総グリッド数は750×999である。計算手法について表1に要約する。計算は2次元Navier-Stokes方程式を用い、対流項はAUSM⁺-upスキーム、H₂/O₂+3Ar混合気を対象とし化学反応は9化学種27素反応を解いた。時間積分は2次精度の陽解法を用いた。濃度勾配は人工的に仮定し、次式(2)の通り水素濃度をガウス関数で与えた。

$$X_{H_2} = X_0 \exp(-aHP) \quad (\text{or } 1 - X_0 \exp(-aHP)) \quad (1)$$

濃度以外の状態量は均一条件と同様とし流入速 $V_{in}=2188.00$ m/s, 静温300K, 静圧100kPaで均一とした。

3 結果および考察

まずは検証計算を兼ね、均一量論条件に対する計算を行った。その結果得られた波面構造を図2に示す。黒線は圧力、赤・黄・白のカラーマップはH₂O質量分率を示し、それぞれ衝撃波および火炎帯を示している(以降の分布図も同様)。物体後方で一定角波面のODWが形成されており、図3に黒線でその角度分布を示す通り、CEAによって式(1)から計算される解析値(赤線)と漸近的に良い一致を示す。やや下回るのはC-J状態に至るまでの非定常的な遷移過程や曲率による弱体化の影響と考えられる。

Oblique detonation on a hypersonic projectile in a combustible mixture with composition inhomogeneity

Kazuya Iwata

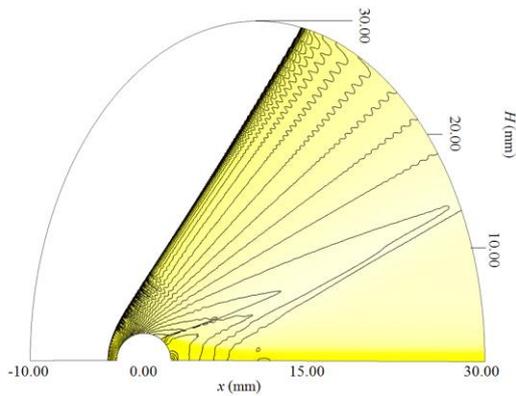


図2 均一量論条件($\Phi=1.00$)のODW構造

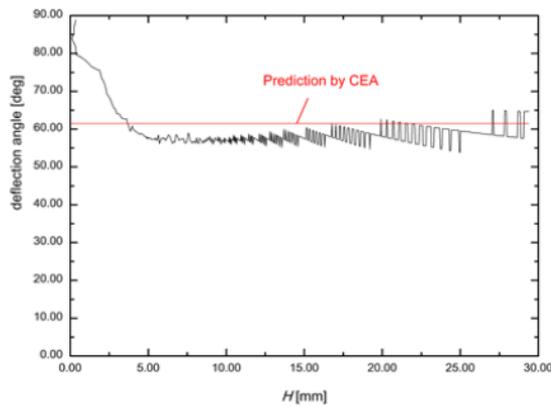


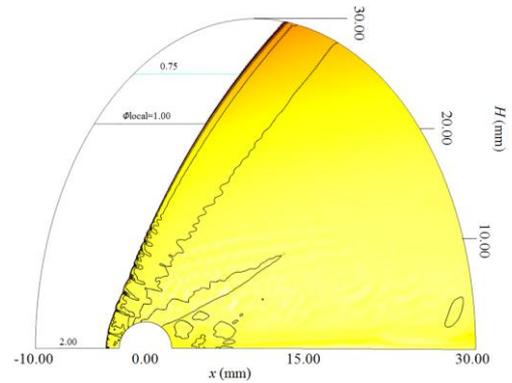
図3 均一量論条件のODWの波面角分布

続いて式(2)によって導入した濃度勾配中のODWに関して3つの不均一条件の中で得られた波面構造を同様に図4に示す。各図には数点流入流線に局所当量比を付記して示す。まず図4(a)は、全体当量比1.00の拘束条件において中心軸当量比 $\Phi_{\text{c}}=2.00$ とした条件であり、全体でODWが維持されているが、波面が曲率を有しており、外側(燃料希薄側)ほど波面角が小さくなっている。これはCEAによる β_{CJ} が燃料希薄ほど小さくなることと傾向が一致している。一方 $\Phi_{\text{c}}=1.00$ として最外当量比を指定した2条件(図4(b), (c))では、強く燃料過濃/希薄な領域においてODWが消失し波面分離が起きている。図4(b)では連続的に、図4(c)では不連続的に衝撃波角が減少している。これらの変化は波面間の相互作用の弱体化に起因している。

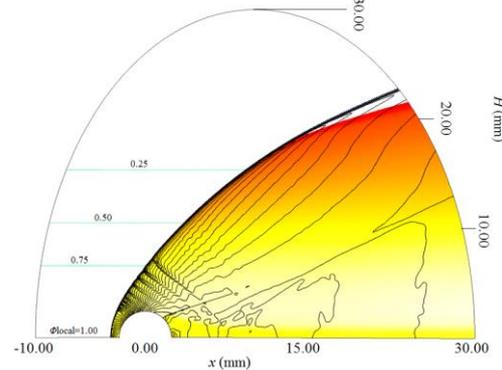
4 まとめ

濃度勾配中の自己保持斜めデトネーションについて数値計算を行った結果、以下の知見が得られた。

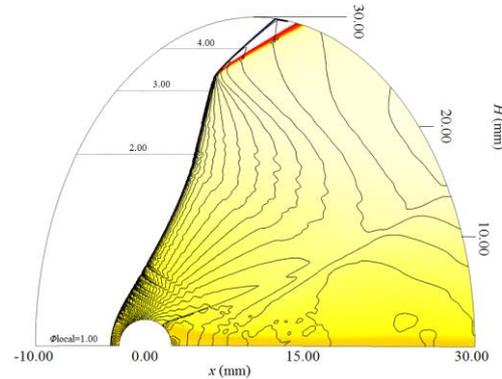
- ・波面は曲率を有しC-J角の変化傾向に沿った。
 - ・強い過濃/希薄組成領域で波面分離が生じた。
- 他燃料の混合気の調査、および波面分離のさらなる解析が今後の課題である。



(a) $\Phi_{\text{c}}=2.00$, $\Phi_{\text{total}}=1.00$



(b) $\Phi_{\text{c}}=1.00$, $\Phi_{\text{out}}=0.01$



(c) $\Phi_{\text{c}}=1.00$, $\Phi_{\text{out}}=5.00$

図4 不均一条件におけるODW構造

「参考文献」

- 1) デトネーション研究会, 「デトネーションの熱流体力学」理工図書(2009) p.73-101.
- 2) P. Wolanski, "Detonative Propulsion", Proc. Combust. Inst. Vol. 34 (2013) p.125-158.
- 3) J.-L. Cambier et al., " ", Jet Prop. Vol. 3, No. 3 (1990), pp. 315-323.
- 4) K. G. Vollmer et al., "Deflagration to Detonation Transition in Hydrogen/Air Mixtures with a Concentration Gradient", Combust. Sci. Tech. Vol. 184 (2012), pp. 1903-1915.