

論文の内容の要旨

論文題目 濃度勾配を有する予混合気中の斜めデトネーションに関する研究

氏 名 岩田 和也

1. 序論

デトネーションは衝撃波と火炎が一体となり超音速で伝播する予混合火炎の形態だが, その伝播速度以上の極超音速気流中で生じると物体上に波面角をもって静止し, 斜めデトネーションとして保持される. この斜めデトネーションは宇宙輸送に適用可能な極超音速域の推進手段として, 斜めデトネーションエンジンやラム加速器という形で応用が提唱されている[1]. また衝撃波と火炎が分離した誘導領域や, 横波構造が出現しない領域が存在する点で伝播デトネーションと物理的特性が大きく異なり, 現在に至るまで基礎研究が多岐に進められてきた[2-4].

それら先行研究の殆ど全てが, 理想的条件として均一の量論混合気流を対象としているが, 実機への応用において不可避となる不均一な混合気組成の影響に関する知見はほぼ皆無である. そのような不均一組成における斜めデトネーションの理解は, 斜めデトネーションの基礎的知見の発展に資するだけでなく, 極超音速推進における推力性能への影響を評価する上で重要である.

そこで本研究では, そのような不完全混合で生成される不均一混合気を模擬した, 燃料の濃度勾配を導入した斜めデトネーションの波面構造, 燃焼特性に関する知見の取得を目的とした. また, 濃度勾配が影響を与える強さや機構を体系的に考察, 整理を行った.

2. 数値計算

本研究では, 斜めデトネーションにおいて3つの異なる1次元解析解領域に属するものとして, くさび平面上, 鈍頭物体上, および物体後方のC-J斜めデトネーションを個別に対象とし, 2次元(平面/軸対称)のナビエ・ストークス方程式による有限差分法をもとにした数値計算を行った.

化学反応は H_2 -Air, および H_2/O_2 -3Ar混合気の燃焼を想定し, 不活性化学種を含めた9化学種の輸送方程式を解き27段の素反応モデル[5]を用いて解いた. また対流項はHarten-Yeeの対称風上TVDおよびAUSM++-up[6]の2次精度スキーム, 粘性項は2次精度の中心差分法を用いて求めた. そして本研究では定常/非定常現象のそれぞれに応じ時間積分法を選択し, 定常解を得るのにLU-SGS

と対角化点陰解法[7]を組み合わせ、一方非定常解にはTVD2次精度ルンゲ・クッタ法を用いた。

濃度勾配は人工的にガウス関数を用いることで水素のモル分率分布として導入した。以降の各章においては、原則的に一定領域内の総当量比を1として固定することを拘束条件とした上で、物体中心軸へ流入する混合気流成分の当量比 Φ_0 を選択し条件設定を行った。また、速度、静圧、静温は主流条件に依存して濃度勾配とは独立に設定し、原則数条件で固定した。

3. くさび平面上の斜めデトネーション

まず、波面背後が超音速を維持する弱いオーバードリブン解に属する、くさび平面上に付着して保持される斜めデトネーションを対象として数値計算を行った。計算領域は半頂角 θ を有するくさび平面に沿ってx軸、垂直にy軸を定義した長方形に対し等間隔直交格子を配置し、その大きさはx方向に125 μm 、y方向に50 μm と一定値とした。速度、静圧、静温、および θ はDa SilvaとDeshaiesの先行研究[2]から参照した2条件、およびそれらからさらに個別の状態量に変更を加えた、表1に示す計5条件を用いた。全て水素-空気混合気流である。

表1 くさび平面上の斜めデトネーションの計算に用いた主流条件

主流	M	θ [°]	p [kPa]	T [K]	Φ
A	8.00	28.20	8.50	300	1.00
B	8.00	23.80	34.00	300	1.00
C	8.00	23.80	8.50	300	1.00
D	8.00	28.20	34.00	300	1.00
E	7.00	28.20	8.50	300	1.00

得られた波面構造のうち一部を図1に示す。同図(a)では曲線形状の斜めデトネーション波面が見られ、先行火炎位置は流入マッハ数の影響によりCenter-rich濃度勾配では大きく後退し、Center-lean濃度勾配では前進した。また同図(b)では先行火炎がV字型になる特異な形態が得られ、このV字の出現に伴い下流に反射衝撃波、および第2三重点を形成することでデトネーション波面が強められる様子が観察された。このV字型先行火炎とマッハステムが組み合わさったV+Y字型マッハステムも得られた。また燃焼特性に関して、全域にて不足成分となる反応物が概ね完全に消費されたが、過剰成分が拡散燃焼的に消費される傾向はなく燃料消費率は低下した。

上記のV字型構造の出現は、反応誘導距離勾配因子 $g = -\tan(\beta - \theta) dl_{ind}/dy$ の導入により、 $g > 1$ の条件において達成されることが明らかになった。また、流入マッハ数だけでなく、組成の差異による化学反応速度の差異への依存性が強いことも、流線追跡による反応計算から導かれた。

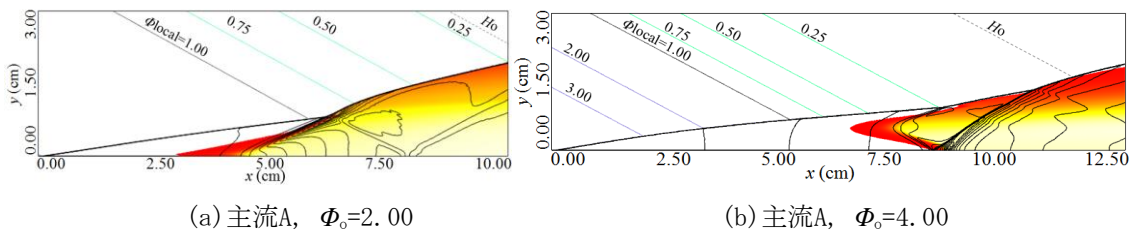


図1 くさび平面上での不均一流斜めデトネーション(黒：圧力、カラー：水質量分率)

4. 鈍頭物体上の斜めデトネーション

次に、波面背後が亜音速となる強いオーバードリブン解に属する、球面上に離脱衝撃波を伴い保持される斜めデトネーションを対象とし数値計算を行った。計算領域は球面前方から側面に沿った曲線座標系(ξ - η)を採用しグリッド数は 750×800 とした。主流の条件はLehrの先行研究[3]から参照した2条件として、静圧は43.38 kPa、室温で同一だが当量比1相当のマッハ数6.46(主流a)および5.03(主流b)と主流速度は2種類用いた。いずれも水素-空気混合気である。

得られた波面構造の例を図2に示す。同図(a)では振動燃焼を生じたが、中心軸から離れた外側領域のみに非定常性が限られるような特異な形態が得られた。また同図(b)では衝撃波と火炎面が分離し、中心軸より外側の領域でそれらが最接近するような構造が見られた。これらの構造変化は流入マッハ数の変化だけでなく、組成の差異が有意に影響して生じたものである。また既燃ガスは前章と同様に不足成分のみが概ね完全に消費される傾向となった。

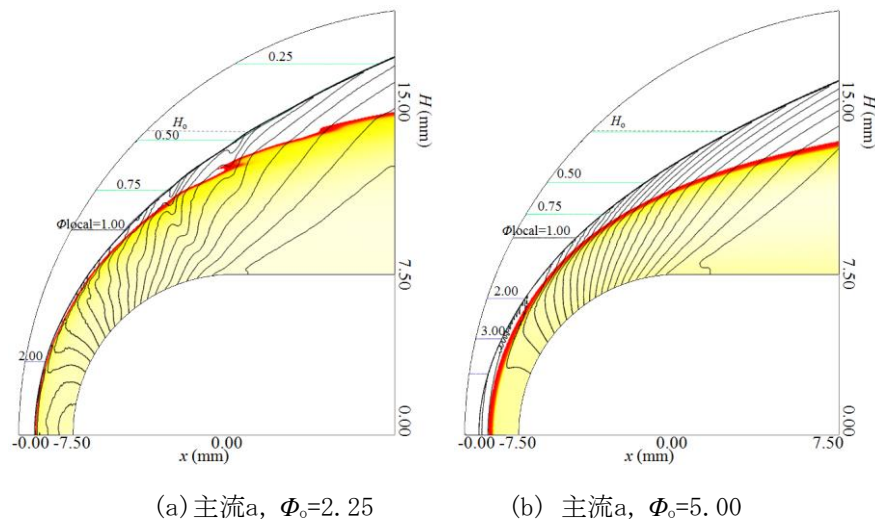


図2 鈍頭物体上での不均一流で形成される波面構造(黒：圧力、カラー：水質量分率)

5. C-J斜めデトネーション

最後に、波面背後が波面と垂直に音速となるチャップマン・ジュゲ(C-J)解に属する、物体後方にて自己保持される斜めデトネーションを対象とした。計算領域は球体の前面から下流遠方まで延長した曲線座標系を用い、グリッド数は 750×999 とした。主流条件としてMaedaらが行った先行研究[4]から、 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-3Ar}$ 混合気組成、マッハ5.26、室温大気圧の1条件のみを用いた。

結果として生じた波面構造の例を図3に示す。ここでは例外的に中心軸上を当量比 $\Phi=1$ とした条件だが、C-J斜めデトネーションが局所当量比に応じたC-J角に沿う形で曲線状に変化し、著しく過濃組成の領域では流入マッハ数減少による反応誘導距離の増加が主因となって波面分離を生じた。この波面分離には組成の差異による反応速度の変化も有意に関わっていることが示唆された。また燃焼特性も前章までと同様、過剰成分のみが追加的に消費されることなく残留し、燃料消費率、エネルギー変換率が低下する結果となった。

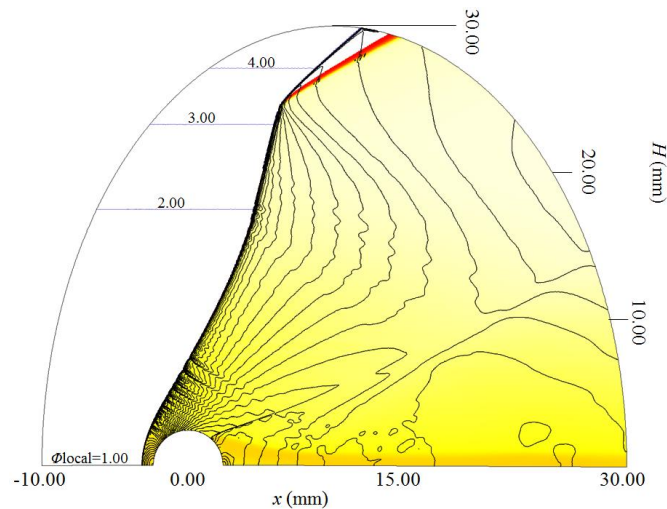


図3 $\Phi=1-5$ の濃度勾配を導入した場合のC-J斜めデトネーション(黒:圧力, カラー:水質量分率)

6. 結論

水素-空気混合気における濃度勾配中で形成する斜めデトネーションについて、2次元の詳細化学反応機構を含んだ数値計算を行った結果、下記のような特殊な波面現象が得られた。

- (1) くさび平面上の斜めデトネーションでは、V字型、V+Y字型の先行火炎形状が出現し、反射衝撃波と第2三重点が伴った。これらの出現は反応誘導距離勾配により整理されることがわかった。
- (2) 鈍頭物体上の斜めデトネーションでは、内側/外側に振動が限定される振動燃焼や、中心軸外で波面が最接近する衝撃波誘起燃焼が得られた。
- (3) C-J斜めデトネーションでは、C-J状態移行後に波面が分離する現象が観察された。

そしてこれらの斜めデトネーションに共通して、下記の結論が導かれた。

- (4) 流入マッハ数、当量比の変化により斜めデトネーションは曲率を有する波面に変化した。
- (5) 濃度勾配中の斜めデトネーションでは不足成分の反応物がほぼ消費される一方で過剰成分は残留し、燃料消費率は低下した。
- (6) 火炎面位置、形状の決定において最も影響の強いパラメータは局所の流入マッハ数だったが、特に局所当量比3を超える領域では組成の差異による反応速度の影響も有意になった。

参考文献

- [1] P. Wolanski, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013), pp. 125-158.
- [2] L. F. F. da Silva and B. Deshaies, *Combust. Flame*, 121 (2000), pp. 152-166.
- [3] H. F. Lehr, *Astronaut. Acta*, 17 (1972), pp. 589-597.
- [4] S. Maeda et al., *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013), pp. 1973-1980.
- [5] A. A. Konnov, *Eurasian Chemico-Techn. J.*, Vol. 2 (2000), pp. 257-264.
- [6] K. Kitamura, and E. Shima, *J. Comput. Phys.* Vol. 245 (2013), pp. 62-83.
- [7] Y. Ju, *AIAA J.*, Vol. 33, No. 8 (1995), pp. 148-1425.