多点熱源によるデトネーション生成に関する数値解析

Numerical Analysis on Detonation Production due to Multi-Hot Spots

○ 籠橋 歩 (名城大院) 正 杉村 忠良 (名城大)

Ayumu Kagohashi, Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502
Tadayoshi Sugimura, Meijo University

Generation of a detonation wave is related to the ignition study. A combustion flame provides turbulence to the front gas mixture by interference with a tube wall. The turbulence accelerates the flame and creates the larger turbulence. Finally, this repetition occurs a detonation with a shock front. In this study, formation process of a detonation was numerically found under the combustion propagation due to multi-hot spots which are placed in a tube. Hydrogen gas is used as fuel which is comparatively advanced with other fuels, and some detailed chemical reaction mechanisms exist for the gas mixture with oxygen. Used numerical method is the second order semi-implicit MacCormack-TVD scheme.

Key Words: Numerical Analysis, Detonation, Multi-hot spots

1. 緒言

デトネーションの発生は着火の研究と関連している。火炎は管壁との干渉により、前方の気体に乱れを与える。その乱れは火炎を加速し、より大きな乱れを作る。この繰り返しは衝撃波面を形成するまで続き、ついにはデトネーションを生じる。

本研究では、熱源からの燃焼波伝播に関するものであるが、熱源を複数設置した場合におけるデトネーション生成過程を数値計算によって、波面の形状変化や伝播形態から調べた。その結果を以下に報告する。

2. 気体力学基礎方程式及び数値計算法

本研究では以下の仮定事項に基づいて数値計算を行った。

- (1)流れは二次元非定常化学反応流である。
- (2)輸送効果として粘性、拡散、熱伝導を考慮する。
- (3)重力や表面張力等の外力は、考慮しない。
- (4)化学反応は $H_2, O_2, O, H, OH, HO_2, H_2O_2, H_2O$ の計8種の化学種に対して、19組の素反応式を考慮する。
- (5)混合気は酸水素化学量論混合気である熱的状態方程式に従い、比熱は温度の多項式で表される。

上記の仮定事項から導出された気体力学基礎方程式を保存形で表すと(1)式のようにになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + S \quad (1)$$

マトリックスの成分表示は(2)式のようにになる。

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \\ \rho_i \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ (E + p)u \\ \rho_i u \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho_i v \end{pmatrix},$$

$$L = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_x \\ \rho D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_y \\ \rho D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで ρ は密度、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の速度成分、 p は圧力、 E は内部エネルギーと運動エネルギーから成る単位体積当たりの全エネルギー、 D_i は拡散係数、 ρ_i は各化学種の密度、 w_i は生成率である。また、 τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} は粘性応力項、 q_x 、

q_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の熱流束成分を表す。また、 S は生成項で微分項である。なお、数値計算法は2次精度の半陰解 MacCormack-TVD 法を用いた。予測子に前進差分、修正子に後退差分を用い、数値計算特有の振動現象を抑えるために人工粘性項として TVD スキームを用いた。

3. 計算領域及び初期条件

図1は解析に用いた計算領域である。格子点間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.03$ [mm] の正方格子を用い、2つの熱源は 0.3×0.3 [mm] を用いており管中心軸に対して上下対称に設置する。青色の一点鎖線は中心軸を示す。

本研究では、熱源に与える初期温度は 1600 [K] とした。管内の初期圧力 5.06625×10^4 [Pa]、初期温度 298.15 [K] の酸水素化学量論混合気で満たされており、 $LI=21$ [mm]、 $LJ=2.4$ 、 4.2 [mm]、 $W=H=0.9, 0.6, 0.3, 0.24, 0.18, 0.12, 0.06, 0$ [mm] と変化させ計算を行った。

2つの着火源に対して 3 [μ s] の加熱時間を与えた。

Fig.1 Computational domain

4. 計算結果及び考察

(a) $t=3.34$ [μ s] (b) $t=4.00$ [μ s]

Fig.2 Temperature distributions in $W=H=0.6[\text{mm}]$ Fig.3 Pressure distributions closeup in $W=H=0.6[\text{mm}]$

図2は時間変化における温度分布である。図3は時間変化における圧力分布の波面拡大図である。

着火源を2点配置した場合においては管幅を大きくしても上壁面角部において局所的な圧力上昇を観察することができる。図3(a)において壁面にできた高圧点が矢印の方向へ移動し、最終的には図3(b)に観られるように上壁面角部に到達しさらには横からくる反射波と干渉しあい、図3(b)の赤丸に観られるような局所的な高圧点を形成する。図2(c)においては着火後の燃焼領域の大きさにおおきな違いがみられる。上の着火源より発生した燃焼波はおおきく、下の着火源からの燃焼波は小さくなっている。これは上からの燃焼領域によって下の燃焼領域が広がるができなくなっているからである。さらに上からの燃焼領域によって下の燃焼領域が圧縮され、壁に衝突した反射波が上方に移動することで高圧点の形成を促進させていると考えられる。

図3(b)のような高圧点の形成によって、図2(d)で観察できる局所爆発が引き起こされる。局所爆発によって活性化した高温領域は前方を先行している衝撃波に追いつき、 $t=9.51[\mu\text{s}]$ で完全に燃焼波面と衝撃波面は一体となり、デトネーションが生成したと考えられる。よって図3(b)の壁面角部における高圧点の形成と先行していく燃焼領域との干渉がデトネーション生成に大きな影響を与えたと考えられる。

局所的高圧点は熱源の間隔 W と H の幅に関係なく形成される、しかし下の着火源からの燃焼波と上の燃焼波のぶつかるタイミングがずれるということから、先行していく燃焼波に対し管壁上部から飲み込んでいくようなデトネーション生成の仕方と、管壁下部から飲み込んでいくようなデトネーション生成過程の違いを観察することができる。

今回、 $W=H=0[\text{mm}]$ という設定条件にした場合にのみ他の形状とは異なったデトネーションの生成過程が観察された。

Fig.4 Pressure and temperature distributions closeup in $W=H=0[\text{mm}]$

図4は $W=H=0[\text{mm}]$ における圧力温度分布の拡大図である。図4(a)に示すようにこの条件下のみで高温高圧領域が2つ確認することができた。衝撃波三重点が2つできる要因としては、 W と H が大きい場合よりも下流方向に先行していく燃焼波が遅いため、壁面上角部での局所爆発によって誘起された燃焼波と先行する燃焼波とが早く干渉することによって高温高圧の点を形成し、その点が管壁に衝突し2つの衝撃波三重点ができる。さらに壁面に衝突した衝撃波三重点は管軸方向に移動し、図2(b)の温度分布のように管壁上下部両側から前方の衝撃波面を燃焼波面が合体する形でデトネーション生成過程を確認することができる。2つの衝撃波三重点の形成と、壁面上下両側からの合体する形は $W=H=0[\text{mm}]$ の場合のみ起こる。

Fig.5 Trajectories of shock triple points in $W=H=0[\text{mm}]$ Fig.6 Trajectories of shock triple points in $W=H=20[\text{mm}]$

図5、6は $W=H=0[\text{mm}]$ と $W=H=20[\text{mm}]$ での衝撃波三重点の軌跡を表したものである。この条件下では衝撃波三重点が2つできるということから、図6よりも図5のセル模様の方が小さくなるが、より安定したデトネーション形態であると考えられる。さらにデトネーションが生成される位置も衝撃波三重点の個数が多いほうが早期に生成されるため若干ではあるが $W=H=0[\text{mm}]$ の方が上流側になると考えられる。

5. 結言

壁面角部での局所爆発と先行する燃焼波との干渉がデトネーション生成に大きく影響する。

干渉が早期に起こることによって衝撃波三重点の形成個数に変化があり、さらにはセル模様が小さくなり安定したデトネーション形態になる。

参考文献

- (1)伊神茜, 着火エネルギーによるデトネーション発生とその波面構造に関する数値解析, 名城大学大学院修士論文 2006
- (2)新屋ら, 分岐流路内を伝播するデトネーションの数値解析, 第45回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会 2008