ISSN 2186-5647

－日本大学生産工学部第51回学術講演会講演概要（2018-12-1）－

3-3

垂直濃度勾配を有する希ガス混合気中を伝播する衝撃波構造

日大生産工(院)　○大塚 一輝　日大生産工　岩田 和也
日大生産工　　秋濱 一弘　日大生産工　山﨑 博司
日大生産工　　今村　宰

１　緒言

爆発事故では，高温・高圧状態に伴いブラスト波やデトネーションが観測される.福島第一原発では, 水素爆発によりデトネーションが発生していたと推測される.このような防災上の観点から超音速燃焼現象であるデトネーションは開始条件・維持条件・消失条件・ブラスト波からの遷移形態における条件など数多くの研究がなされてきた[1].デトネーションをはじめとする先行研究の多くは均一混合気を対象として計算や実験を実施しているが, 実際の爆発事故における混合気の形成は燃料の拡散を伴うむらを生じるため不均一組成から生じる爆発である場合がほとんどであると考えられる.このような不均一混合気中における衝撃波やデトネーションの物理については, 知見が不足しているのが現状であり, 反応を伴わない衝撃波について不均一組成混合気の影響を考慮した研究が基礎理解のために必要であると考えられる.また， 上記における不均一組成の影響やその効果はデトネーションを応用した航空宇宙エンジン等においても研究されており[2,3], さらに知見を深めることが期待される.

本研究では He-Ar 混合気を用いて二次元の定常計算を行い, 濃度勾配強さに依存する衝撃波構造の変化を解析することを目的とした. 計算手法として衝撃波進行方向に対し垂直な濃度勾配場における定常場を対象とし, 境界層の影響が微小なことおよび問題の単純化のため He-Ar 混合気を用いて計算を実施した.

２　計算手法

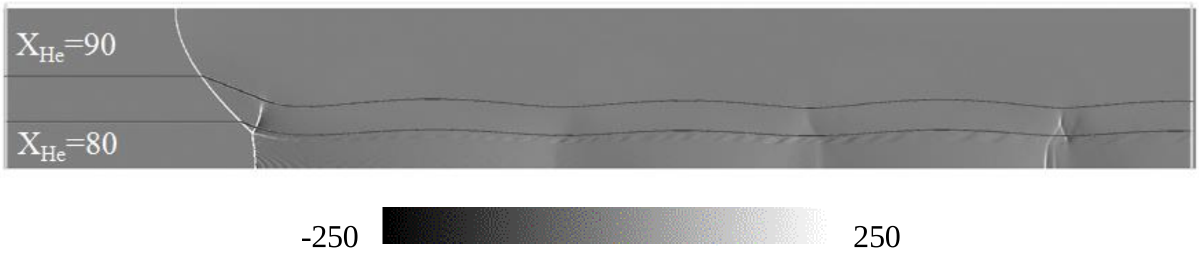
本研究では二次元のナビエ・ストークス方程式を解いた. 計算手法として, 対流項の差分に AUSM+up[5], 粘性項の差分に二次精度中心差分を用いた. 時間積分は陰的に行い, LU-SGS[6] を用いて定常状態を求めた. 計算領域は幅 47mm, 長さ 350mm の長方形流路とし, 総グリッド数 3501×471=1,648,971，$\Delta x=\Delta y=0.1$mm の正方形格子を一様に配置した. 濃度勾配は鉛直方向 h に関する正弦関数(式(1))で与え, 上端・下端における He モル分率 $X_{He}(h_{upper})$・$X_{He}(0)$を指定することで計算を実施した.

$$X_{He}=\frac{1}{2}\left(X_{He}(upper)-X_{He}(lower)\right)\sin\left(\frac{h-0.5h_{upper}}{0.5h_{upper}\frac{\pi}{2}}\right)+\frac{1}{2}\left(X_{He}(upper)+X_{He}(lower)\right) \quad (1)$$

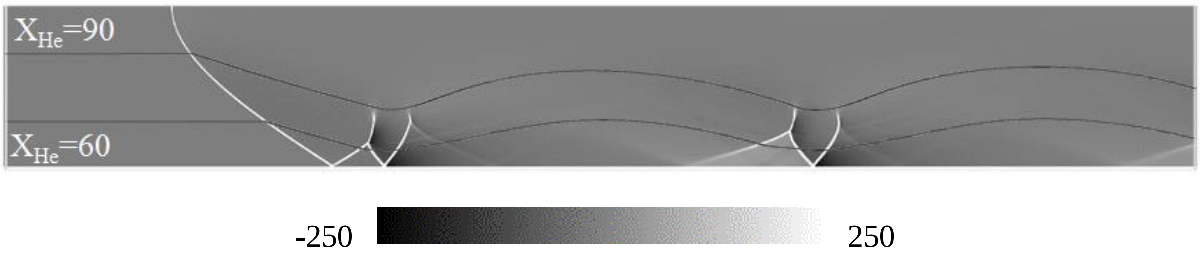
式(1)により、本研究では $X_{He}(h_{upper})=1$ と固定し, 実験条件として $X_{He}(0)$の値を変更することで計算を実行した. 計算時の流出境界を完全無反射境界として, 下流からの非物理的擾乱の伝達を抑制した. 今までの計算では乱流モデルの考慮が計算結果に影響を及ぼすことが確認されており, 今回は乱流モデルとして k と ε に関する保存方程式を新たに解いた k-ε モデルを用いて乱流混合の効果を計算結果に反映させた.また, He-Ar 混合気を用いることで境界層への影響は小さく, これに加え, 問題の単純化のため壁はすべり壁条件とした. 本計算における計算開始時の初期解は He 中を進む衝撃波として, 均一な 1atm, 300K, マッハ数=2 の解析解を与えた.初期解の流入境界に圧力・温度は一様に不変のまま式(1)の不均一分布を加えることで計算を実行した.

Shock Wave Structure in Noble Gas Mixture with a Vertical Concentration Gradient

Kazuki OTSUKA, Kazuya IWATA, Kazuhiro AKIHAMA,
Hiroshi YAMASAKI and Osamu IMAMURA

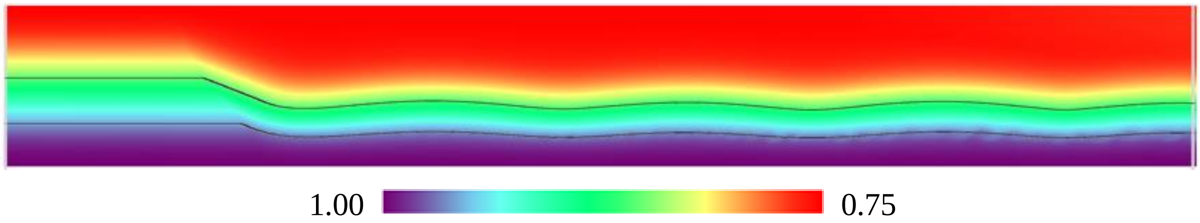


(a) $X_{He}(0)$=0.75

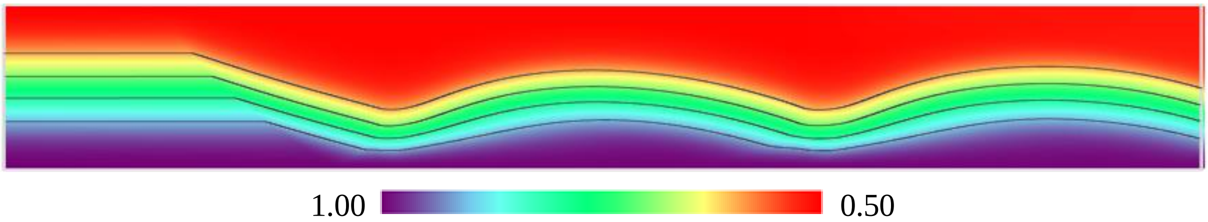


(b) $X_{He}(0)$=0.50

図1 非均一な He-Ar 混合気中を進む衝撃波における数値シュリーレン(密度勾配)



(a) $X_{He}(0)$=0.75



(b) $X_{He}(0)$=0.50

図 2 非均一な He-Ar 混合気中を進む衝撃波における He 分率分布図

3 結果および考察

本研究では式(1)を用いて下端He分率を0.75,0.50の2条件で計算を実行した.図1は上記の計算結果をシュリーレン画像にあたる密度勾配として出力した図を示している. (a) $X_{He}(0)$=0.75条件では先頭衝撃波上で不連続変化が発生し,下側の末端に変曲点を生じてマッハ反射を形成している. 一方で, (b) $X_{He}(0)$=0.50条件では正常反射への遷移が確認できる.図2は上記2条件における計算結果をヘリウムのモル分率分布図として出力した図を示している.2条件とも等しいヘリウム分率領域に沿って流れており混合の影響は確認できなかった.また,本計算ではすべての条件において定常構造に収束していることが確認できた.

4 結言

He-Ar混合気を用いて濃度勾配のある衝撃波流れの計算・解析を実施した. その結果, マッハ反射から正常反射への遷移が確認できた. 今回は乱流モデルを用いて計算を実施したが混合の影響は確認できなかった. 他のモデルでも同様の検証を行う必要があると考えられる. また, 今後は衝撃波管を用いた実験を実施し実験結果との比較を検討している.

「参考文献」

[1] デトネーション研究会編, デトネーションの熱流体力学 基礎編, 理工図書 (2009).

[2] P. Wolanski, Proc. Combust. Inst. 34: 125-158 (2013).

[3] F. A. Bykovskii et al., J. Prop. Pow. 22 (6): 1204-1216 (2006).

[4] F. Diegelmann et al., Combustion and Flame 181: 300-314 (2017).

[5] M.-S. Liou, J. Comput. Phys. 214: 137-170 (2006).

[6] A. Jameson et al., AIAA J. 25 (7): 929-935 (1987).