505 CH₄/Air/CO₂ 拡散火炎の NO 生成における圧力の影響に関する研究The Study of Pressure Effect on NO Formation in CH₄/Air/CO₂ Diffusion Flames

○ 王 景甫 (東北大学流体研) 正 新岡 嵩 (東北大学流体研)

Jingfu WANG, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai

Takashi NIIOKA, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Key words: NO formation, Pressure effect, Non-gray gas radiation, CH₄/Air/CO₂ counterflow diffusion flames

1. 緒言

近年、燃焼による排気ガスに含まれる NO_x や CO₂ などの大気汚染物質を低減させることは重要な課題となっている。これらの目標を実現するため、多くの研究が行われており、その中の一つとしては排気ガス再循環による低 NO_x 燃焼方法が注目されている。

火炎中の CO₂ や H₂O などの輻射は強いバンド特性を持ち、温度と圧力の変化によって大きく変化する。特に燃焼ガス再循環による燃焼においては、燃焼ガスの光学厚さが大きいと、バンド特性を持つ輻射の再吸収は燃焼構造や NO_x 生成に大きな影響を与える。しかし、これまでの研究の大部は Optically-thin モデルを用いて、輻射再吸収は考慮されなかった。著者らは常圧の CH₄/Air 対向流拡散と予混合火炎を解析することにより、NO_x 生成におけるふく射再吸収の影響は既に明らかにした^(1,2)。圧力はガスふく射とふく射再吸収に重要な影響がある因子であるため、圧力変化させたときの NO_x 生成に及ぼすふく射効果を調べる必要がある。特に燃焼ガス再循環を想定した CO₂ 添加火炎に着目した。そこで、本研究では統計狭域輻射モデルと詳細反応機構を用い、CO₂ 添加した CH₄/Air 対向流拡散火炎を解析し、NO 生成に対する圧力と輻射再吸収の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデルと解析方法

解析に用いた火炎モデルは対向流拡散火炎である。燃料と酸化剤のノズル間の距離は 3 cm である。燃料は CH₄ で、酸化剤は Air+CO₂ である。この計算では、20% CO₂ は空気に添加し、空気中の N₂ を置換した。燃料と酸化剤の初期温度はともに 300 K に設定し、圧力は 0.1 MPa から 0.5 MPa まで変化させた。火炎モデルの支配方程式は文献[1, 3]に参照されたい。対流項と拡散項はそれぞれ上流差分と中心差分で離散し、**Damped Modified Newton** 方法⁽⁴⁾を用いて解いた。

ふく射の影響を調べるため、ふく射損失項はエネルギー方程式に加えた。ふく射損失は二つのふく射モデルで計算された。ふく射再吸収無しの場合には Optically thin model (OTM)、ふく射再吸収を考慮する場合には統計狭域輻射モデル (SNB) を用いた。燃焼ふく射ガスには、CO₂, H₂O と CO のみを考慮した。SNB モデルでのふく射計算には、CO₂, H₂O と CO のバンドパラメータは Soufiani らのデータ⁽⁵⁾を採用して、ふく射の輸送方程式の解析には DOM⁽⁶⁾法を用いた。化学反応機構は 48 成分、277 個の GRI 2.11 Mech. 素反応機構⁽⁷⁾である。また、物性値と輸送係数の計算には CHEMKIN のデータベース⁽⁸⁾を用いた。

3. 解析結果及び考察

Fig. 1 Distribution of flame temperature and radiation heat loss in flames (CH₄/Air+20%CO₂, $\epsilon=10 \text{ s}^{-1}$, $T_a=T_r=300 \text{ K}$)

Fig. 2 Effect of radiation and reabsorption on NO formation in flames (CH₄/Air+20%CO₂, $\epsilon=10 \text{ s}^{-1}$, $T_a=T_r=300 \text{ K}$)

図 1 (a) と (b) はそれぞれ圧力 0.1 MPa と 0.5 MPa の時の火炎温度に対するふく射とふく射再吸収の影響を示す。図 1 には火炎のふく射損失も示す。また、図 2 には NO 濃度分布を示す。圧力を 0.1 から 0.5 MPa に高くすると、火炎温度僅かに高くなる一方、火炎の厚さはかなり狭くなる。再吸収を無視した OTM モデルの場合の火炎ふく射損失は常に正であるが、再吸収を考慮した SNB の場合では、火炎のふく射の一部は低い温度領域に再吸収されるため、全体的に OTM モデルの場合より小さくなり、酸化剤側と燃料側においてはとも負になる。圧力 0.5 MPa の火炎ではふく射損失が負の値は圧力 0.1 MPa の火炎に比べ約 5 倍に増大する一方、この負になる領域は圧力 0.1 MPa の火炎より狭くなる。これはガスふく射のスペクトル線が圧力の増加につれて、ブロードニング(broadening)するため、圧力の増加に伴う高温火炎領域からの熱放射が低温領域に有効かつ速

く吸収されると考えられる。この対流拡散領域前後のふく射再吸収領域の存在はふく射再吸収火炎の特徴である。これによって、再吸収火炎の火炎温度と厚さは再吸収しない火炎より大きくなる。

図2に示すように火炎温度より NO 生成に対するふく射再吸収の影響は極めて大きい。また、圧力 0.5 MPa の火炎では、このふく射再吸収の影響はさらに増大する。圧力は 0.1 MPa から 0.5 MPa に増加すると、ふく射再吸収火炎 (SNB) とふく射再吸収しない火炎 (OTM) における NO 最大濃度の増加はそれぞれ 59% と 24% である。明らかに NO の計算にはふく射再吸収を考慮する必要がある。

図3には火炎の NO Emission Index (EINO)⁽⁹⁾の圧力による変化を示す。全ての圧力に渡りふく射再吸収を考

Fig. 3 Effect of radiation and reabsorption on NO Emission Index with variation of pressure

(CH₄/Air+20%CO₂, $\epsilon=10 \text{ s}^{-1}$, $T_a=T_f=300 \text{ K}$)

慮しない場合 (OTM) と考慮する場合 (SNB) に比べ、EINO が減少していることが分かる。圧力が大きいほどその差は大きくなる。圧力の増加につれて、ふく射再吸収を考慮しない場合 (OTM) と考慮する場合 (SNB) の EINO 変化は全く異なった傾向である。OTM モデルの場合では、圧力の増加に伴って、EINO が線形に減少していく。それに対して、SNB モデルの場合では、圧力の増加に伴って、EINO が徐々に増加する。これは、圧力の増加は OTM モデルと SNB モデルによるふく射損失に及ぼす影響が異なるためである。図4に示すように、OTM モデルでは、圧力の増加につれて、放射ガスの分圧も増加し、平均プランク吸収係数が単調に増加するので、ふく射損失が増大する。一方、SNB モデルでは、圧力の増加につれて、放射ガスの分圧の増加によるふく射損失の増加だけではなく、スペクトル線のブロードニングによる再吸収も強くなり、正味のふく射損失の増加が抑制されていると考えられる。

この異なった EINO 変化傾向によって、圧力の増加に伴う EINO に対するふく射再吸収の影響が大きくなる。

Fig. 4 Variation of radiation heat loss and reabsorption parameter with pressure

(CH₄/Air+20%CO₂, $\epsilon=10 \text{ s}^{-1}$, $T_a=T_f=300 \text{ K}$)

図5はふく射再吸収を考慮しない火炎 (OTM) と考慮する火炎 (SNB) と断熱火炎における EINO の比率の圧力による変化を示す。この図に示すように圧力が 0.1 MPa から 0.5 MPa に増加すると、再吸収を考慮しない火炎と考慮する火炎の EINO の比率、 $EINO_{OTM}/EINO_{SNB}$ は 0.53 から 0.39 までに減少する。圧力の上昇により、ふく射再吸収は NO 生成に対する影響が顕著になる。つまり、ふく射再吸収を考慮しない OTM モデルはふく射による NO 生成の低減を過大に見積る。従って、より高い圧力の火炎では、OTM モデルによる火炎の NO 生成を正確に予測するのは不適当で、SNB モデルのような非灰色ふく射モデルが必要である。

Fig. 5 Ratio of NO Emission Index versus pressure (CH₄/Air+20%CO₂, $\epsilon=10 \text{ s}^{-1}$, $T_a=T_f=300 \text{ K}$)

4. 結論

本研究は、統計狭域輻射モデルを用いて CH₄/Air/CO₂ 対向流拡散火炎における NO 生成に対する圧力と輻射再吸収の影響を解析した。以下の結論を得た。

(1) ふく射再吸収は CO₂ を添加した CH₄/Air 火炎の NO 生成に大きな影響があることが分かった。また、圧力の増加によりこの影響はさらに高まることを明らかにした。

(2) 圧力の増加につれて、ふく射再吸収を考慮しない場合 (OTM) と考慮する場合 (SNB) の EINO 変化は全く異なった傾向を示すことが分かった。より高い圧力の火炎では、ふく射再吸収を考慮しない OTM モデルによる火炎の NO 生成を正確に予測するのは不適当である。

参考文献

- (1) Jingfu Wang and Takashi Niioka, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 5, pp 385-398 (2001)
- (2) Jingfu Wang and Takashi Niioka, *Proceedings of International Combustion Institute*, Vol. 29 (2002)
- (3) V. Giovangigli and M. D. Smooke, *Combust. Sci. Tech.* Vol. 53, pp23-49 (1987)
- (4) M. D. Smooke, *Journal of Computational Physics*, Vol. 48, pp72-105 (1982)
- (5) A. Soufinani and J. Taine, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp987-991 (1997)
- (6) W.A. Fiveland, *ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp809-812 (1987)
- (7) R. J. Kee et al., *Sandia Rep., SAND 96-8216* (1996)
- (8) C. T. Bowman et al., http://www.berkeley.edu/gri_mech/
- (9) T. Takeno and M. Nishioka, *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp465-468 (1993)