放射熱再循環を伴う燃焼器の数値シミュレーション*

香月正司*¹, 水谷幸夫*¹, 小野裕司*²

Numerical Simulation of a Cylindrical Furnace with Radiative Heat Recirculation

Masashi KATSUKI, Yukio MIZUTANI and Yuji ONO

A numerical method was presented to predict the flow and heat transfer in the cylindrical combustor with internal heat recirculation by radiation from a porous media. The SIMPLE method, associated with $k-\epsilon$, turbulence model was used to predict the flow field, and the radiative heat transfer was evaluated by the heat ray tracing method. The predicted flow field and the heat recirculation rate were demonstrated for a mixture close to the lean flammable limit.

Key Words: Combustion, Premixed Combustion, Thermal Radiation, Furnace, Numerical Prediction, Finite-Volume Method, Heat Ray Tracing Method

1. まえがき

サイクロン炉を用いて希薄混合気や低カロリーガスを燃焼させるには、過剰エンタルピーの存在が重要な役割を果たすので、燃焼系からのむだな熱損失を十分コントロールする必要がある⁽¹⁻³⁾。また、燃焼装置の排気系にふく射熱変換体を置くことによって実現できる放射熱還流炉は、過剰エンタルピーを燃焼室内に閉じ込める有効な手段として注目を集めている^(4,5)。

以前に報告したように⁽⁶⁾、耐火材で内張りし、上流端と下流端に通気性固体を置いた円筒型燃焼室を持つ炉において、希薄可燃限界濃度付近の混合気を燃焼させると、あたかも緩慢燃焼が生じているかのような温度分布が得られた。この燃焼過程でも、燃焼室内では厚みの薄い層流火炎が大きくゆらぎながら伝播しており、気相中での燃焼形態は特に放射の影響を受けていない。しかしながら、火炎は炉壁の赤熱面に付着して安定化されており、その位置は火炎の温度ならびに放射熱還流量に依存することが明らかになった。したがって、上述の燃焼場の解析には熱流動だけでなく、放射伝熱も含めたモデルが不可欠である。

従来、燃焼流のシミュレーションでは放射伝熱が省略されることが多かったが、幸いにも著者らは、放射熱線追跡法⁽⁷⁾による放射伝熱計算を組み入れた燃焼流のシミュレーション手法⁽⁸⁾を開発しているので、この手法を利用して、上述の放射熱再循環を伴う燃焼

図1. 放射熱還流炉と解析対象領域

* 昭和63年11月29日 第26回燃焼シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和64年1月5日.

*¹ 正員, 大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1).

*² 学生員, 大阪大学工学部.

器における熱還流量や、火炎の挙動を検討する。

2. 解析モデル

前報⁽⁶⁾で報告した放射熱還流炉(図1)を解析の対象として取り上げる。炉は全長 471mm, 内径 112.5mm, 側壁耐火材厚み22.5mmの軸対称2次元炉で、燃焼室の上下に厚み10mmと30mmの通気性固体板が置かれ、その間の空間で燃焼が行われる。この燃焼室と通気性固体板を含む300mmの範囲を解析領域とする。解析領域入口からは、整流されたプロパン-空気予混合気が一様流速で供給されるものとする。

解析の対象には、燃焼室内の流れのほか、放射伝熱、通気性固体内の流れと熱伝達、側壁内の熱伝導が含まれる。したがって、数値解析に用いられる計算格子点

図2. 解析対象領域と格子点配列

は、通気性個体内および側壁内にも配置される。図2は用いた格子点配列を示したもので、対称軸と点線で囲まれた解析領域に対し、実線の交点(軸方向に45点、半径方向に23点)が計算格子点を示している。

軸方向にx座標、半径方向にr座標をとると、運動量、エンタルピ、化学種などの保存方程式は、すべてつぎのような一般形保存式に表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) = S_{\phi} \quad (1)$$

ただし、 ϕ は一般従属変数で、具体的な ϕ の意味とそれに対応する Γ_{ϕ} と S_{ϕ} の値を表1にまとめて示す。ここで、 ρ は密度、 u は流速の軸方向成分、 v は半径方向成分、 k は乱れエネルギー、 ε はその消散率、 h は全エンタルピ、 m_{fu} は燃料の質量分率である。また、表中には、乱流モデルに含まれる経験定数が示されている。

表1中に現れる Q_r は放射伝熱による正味受熱量、 R_{fu} は燃料の燃焼率を表す。また、 S_u 、 S_v および Q_r は通気性固体内部の流れに対してのみ現れる項で、 S_u 、 S_v はそれぞれ通気性固体の通気抵抗のxおよびr方向成分、 Q_r は通気性固体からの熱伝達量を示している。

本研究で扱う流れは、入口流速 $u = 0.4\text{m/s}$ 程度の低流速流れなので、通気性固体板内では層流、その他の領域では層流に近い乱流となる。したがって、層流域では層流粘性係数 μ_0 を、また乱流域では、実効粘性係数 μ_{eff} を用いる。

表1. 保存方程式の従属変数と係数

ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
1	0	0
u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial p}{\partial x} - S_u$
v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}) - \mu_{eff} \frac{2v}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} - S_v$
k	μ_{eff}/σ_k	$G_1 - \rho \varepsilon$
ε	$\mu_{eff}/\sigma_{\varepsilon}$	$c_1 G_1 \varepsilon / k - c_2 \rho \varepsilon^2 / k$
h	μ_{eff}/σ_h	$Q_o + Q_r$
m_{fu}	μ_{eff}/σ_{fu}	R_{fu}

$$G_1 = \mu_{eff} [2 \{ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial r})^2 + (\frac{v}{r})^2 \} + (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})^2]$$

$$\mu_0 = c_0 \rho k^2 / \varepsilon$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_0$$

c_0	c_1	c_2	σ_k	σ_{ε}	σ_h	σ_{fu}
0.09	1.44	1.92	1.0	1.22	0.7	0.7

表2. 通気性固体の特性

タイプ	空孔率 β	骨格表面積 s (1/m)	通気抵抗係数	
			B	D
I	0.875	2.11×10^3	1.87×10^3	1.75
II	0.293	8.10×10^2	$5.12 \times 10^4 \cdot \mu$	1.0

2.1 通気性固体 通気性固体板は2種類で、燃焼室下流側にはスポンジ状構造を持った厚さ30mmのセラミック板(タイプI)を用い、上流側には、軸方向に直径2.5mmの穴が4.4mmの間隔で千鳥配列にあって厚さ10mmのセラミック多孔板(タイプII)を用いた。ここでは近似的に、いずれも一様な抵抗係数として取り扱う。運動方程式中に現れる S_u 、 S_v は通気性固体の通気抵抗で、次式で表される。

$$S_u = B u^D, \quad S_v = B v^D \quad (2)$$

また、エネルギー式中に現れる Q_r は、つぎのように与えられる。

$$Q_r = \alpha s (T_g - T_s) \quad (3)$$

ただし、 B と D は経験定数、 T_g は気体温度、 T_s は通気性固体板の温度、 s はその通気性固体板の骨格表面積である。

表2には通気性固体板の特性として、空孔率 β と骨格表面積 s 、通気抵抗の定数 B 、 D の値をまとめてある。熱伝達係数 α は、ヌッセルト数 Nu より算出される。なお、 Nu の算出に当たっては、タイプIに対しては微小充填球群に対する式⁽⁹⁾

$$Nu = 0.840 Re \quad (4)$$

を用い、タイプIIに対しては、円管内の流れに対する式⁽¹⁰⁾

$$Nu = 5.364 \left\{ 1 + \left(\frac{220 x^*}{\pi} \right)^{-1/4} \right\}^{3/4} - 1.0 \quad (5)$$

を適用した。ただし、 $x^* = (x/d) Re Pr$ 、 d は円孔の直径で、ここでは2.5mmである。

通気性固体板内では放射伝熱も考慮するが、固体内熱伝導は無視する。

2.2 反応モデル 後に述べる放射伝熱量の計算の過程で、燃焼ガスの吸収係数の評価に CO_2 、 H_2O などの濃度が必要となる。 C_3H_8 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 、 N_2 の5種類の化学種を取り上げ、燃焼反応として

なる一段不可逆反応を仮定すれば、当量比1.0以下のプロパン-空気予混合火災の燃焼であるので、燃料(C_3H_8)の質量分率 m_{fu} を保存方程式(1)の解として求めると、他の化学種の質量分率は代数式から求められる。

対象とする実際の火災は、上流側通気性固体の少し下流側において赤熱した側壁に付着し、燃焼室中央部下流方向へ向かって広がっている。そして層流火災状の極めて薄い火災面が、比較的低速の乱流中でゆらいている。したがって、数値計算の格子点間隔は火災面厚さに比較してはるかに大きく、火災面での諸量の変化を表すには、空間分解能が不足する。いいかえると、燃料の単位時間・単位体積当りの燃焼量を表す R_{fu} を考える場合、ある格子点の状態量を用いてその格子点検査体積における R_{fu} を表すには工夫を必要とする。

そこで、火災の付着点となる炉側壁に接する格子点に対しては、アレニウス型の反応速度則を仮定する。すると、着火点すなわち火災の付着点は、計算された諸量の分布から陰的に定まるので、繰り返し計算の収束とともに決定される。そして、炉側壁表面に付着した火災は、文献(11)の実験結果を参考に、次式で示される層流燃焼速度 S_u (m/s)で燃焼室中央部下流方向へ広がってゆくものとする。

$$S_u = S_u \left(\frac{T_g}{T_u} \right)^\gamma \quad (7)$$

伝ばした火災面が横切る格子点検査体積では、横切る位置に比例して燃料が消費されるように R_{fu} を定める。なお、 T_u は混合気温度、 S_u 、 T_u 、 γ は定数で、 $S_u = 0.15$ m/s、 $T_u = 298$ K、 $\gamma = 2.0$ とする。

2.3 放射伝熱 エネルギー保存式中に現れる放射伝熱による正味受熱量 Q_r は、放射熱線追跡法^(7,8)によって計算する。上に述べた流れ場は軸対称二次元として扱われるが、放射伝熱に関しては三次元計算を行う⁽⁹⁾。

微小体積 ΔV の気体の放射エネルギー E_r は、その代表温度を T_g 、吸収係数を k_g とすると

$$E_r = 4\sigma k_g T_g^4 \Delta V \quad (8)$$

と表せる。ただし σ はステファン・ボルツマン定数である。 k_g はHottelの灰色ガス近似を用いて次式で与える。⁽¹²⁾

$$k_g = \sum_{n=1}^3 a_n k_n \quad (9)$$

ここで a_n は温度の一次式であり、また k_n は CO_2

と H_2O の分圧 $p_{\text{H}_2\text{O}}$, p_{CO_2} ならびにすすの質量分率 m_s の関数であるが、ここでは希薄混合気であるので、 m_s は常に零である。

通気性固体板内では、気体からの放射エネルギーに比べ、固体からの放射エネルギーが圧倒的に強いので、前者を無視し、後者のみを考える。微小体積 ΔV 、代表温度 T 、の通気性固体板からの放射エネルギー E_r は、気体からのその類推を用いて、

$$E_r = 4\sigma k_p T^4 \Delta V \quad (10)$$

と表される。 k_p は通気性固体板の吸収係数で、構成粒子の放射率を ϵ_p とすると

$$k_p = \epsilon_p s / 4 \quad (11)$$

の関係がある。ただし、 s は通気性固体板の骨格表面積である。ここでは放射率の温度依存性を考慮して、上流側通気性固体板では $\epsilon_p = 0.95$ 、下流側通気性固体板では $\epsilon_p = 0.35$ とした。壁からの放射エネルギー E_w は、

$$E_w = \sigma \epsilon_w T_w^4 \Delta S \quad (12)$$

で与えられる。ただし、 T_w , ϵ_w , ΔS はそれぞれ壁の温度、放射率、表面積で、 $\epsilon_w = 0.6$ と仮定した。

計算にあたっては、1つの格子点から発射される放射熱線の本数を3186本とした。放射熱線の吸収は、気体と通気性固体板ではBeerの法則に従い、壁に達した放射熱線はすべて吸収されるものとする。壁の表面温度は熱伝導計算によって求められる。

気体間の放射による熱移動は極めてわずかであることが分かっているので⁽⁸⁾、本解析では、計算時間、記憶容量を節約するため、固体-気体間と固体-固体間の放射熱移動のみを考慮した。

3. 結果および考察

3.1 速度および温度分布 混合気当量比 0.5、流量 4.0 L/s のときの流速分布を図3に示す。通気性固体板内ではその抵抗のために、流速分布は一様となるが、固体内の空けきを通過するため、平均流速はかなり上昇する。円すい状に形成される火炎を挟んで、燃焼による膨張と加速が明りょうに現れている。

図4には、図3と同じ条件において、半径 0, 25, 50 mm における気体の軸方向温度分布の計算結果を示す。同時に炉壁表面の温度分布も示されている。図5は同条件における実験結果⁽⁶⁾ 炉壁と通気性固体の表面温度も示されている。

図3. 炉内の流速分布

図4. 温度分布の計算値

図5. 温度分布の実測値

図6. エンタルピー変化と壁への伝熱量

図7. 計算による等温度線図

図4と図5を比較すると、燃焼形態は定性的に一致していることがわかる。つまり、火炎より上流では固体が放射伝熱によって加熱され、それからの熱伝達によってガス温度が上昇する。その結果、炉壁表面でガスの着火が起こる。この計算例では $x \approx 70\text{mm}$ 、実験では $x \approx 90\text{mm}$ で着火している。そして火炎は中心部へ向けて伝ばする。

図6は壁への放射伝熱量 q と、気体のエンタルピ h の分布を示したもので、火炎より下流では、固体は放射伝熱および熱伝導により熱を失うので、まず壁近傍の気体のエンタルピが下がる。さらに、下流側通気性固体板を通過する際にエンタルピは大きく降下する。こうした気体と固体間の熱の移動は、壁面の温度と $r = 50\text{mm}$ における気体温度を比べるとよくわかる。特に火炎付着点の前後で、壁面と気体の温度の上下関係が逆転しており、壁を介して既燃ガスから未燃ガスへ熱の還流が行われている。また、気体の吸収する放射エネルギーはあまり多くないが、既燃ガス中には吸収係数の高い成分が含まれるうえに温度も高いので、放射による熱損失は無視できない。

計算結果と実験結果を比べると、通気性固体板内部での気体温度の変化が、実験結果よりかなり大きいことが分かる。この原因は、上流側の多孔板を一樣な通気性固体としてモデル化したために、放射伝熱量が正しく評価できなかったためと思われる。実際の多孔板ではかなりの火炎放射が通過してしまうので、さらに上流の金網部から混合気の予熱が見られる。したがって放射伝熱に関しては、計算領域をもっと上流部まで拡張すべきであったと思われる。

実験では、当量比を上げると壁面上の着火点は上流へ移動し、上流側通気性固体板内で燃えるようになる。逆に当量比を下げると着火点は下流へ移動し、ついには吹き消える⁽²⁾。図7は、当量比 ϕ を変化させたときの火炎位置を示したもので、1000 Kの等温度線をもって便宜的に火炎位置としている。

ここに示した3条件の結果を見てわかるように、計

表3. 炉の熱勘定 (単位: kJ/kg, ()内は%)

当量比	入熱		出熱		
	対流	対流	壁の熱貫流	放射熱還流	
				入口へ	出口へ
0.4	1153(100)	987(83.9)	24(2.1)	14(1.2)	148(12.8)
0.5	1428(100)	1138(79.8)	30(2.1)	30(2.1)	230(16.1)
0.6	1892(100)	1280(75.7)	35(2.1)	58(3.4)	322(19.0)

表4. 通気性固体からの放射熱量 (単位: kJ/kg)

発射位置		上流通気性固体板		下流通気性固体板	
発射方向		上流	下流	上流	下流
当量比	0.4	6.19	8.44	252	181
	0.5	22.3	31.0	418	281
	0.6	53.5	72.5	614	392

算でも当量比による着火点の移動が予測され、上流側通気性固体板のすぐ下流の側壁面上で着火し、火炎が中心へ伝ばしている様子が得られる。この火炎付着位置の移動は、当量比の増加によって燃焼ガスおよび下流側通気性固体の温度が上昇し、下流から上流への放射熱還流量が増えるためである。

$\phi = 0.4$ のときには、中心軸上の火炎先端部はほとんど下流側通気性固体に達している。本解析では定常状態を対象として、変動を考慮に入れていないので、このような解が得られたが、実際には変動があるために下流側通気性固体の温度低下を生じ、時間経過とともに火炎は消滅する。

3.2 伝熱機構 計算結果から、放射熱還流炉の伝熱機構はつぎのように推定される。下流側通気性固体板は、気体から回収した熱の一部を放射熱流束の形で上流に還流する。回収された熱の約半分が未燃気体の予熱に使われ、残りが燃焼器入口・出口からの放射漏洩と壁を通しての熱貫流によって外界へ失われる。当量比を変えたときの燃焼器全体の熱勘定を表3に示す。燃焼器入口からの入熱を100%としたときの、各出熱量を%で示した。

流れ場と放射伝熱場を繰り返し計算により収束させているので、混合気の持ち込むエンタルピと燃焼器全体からの出熱のバランスは、どの条件でも1%以下の誤差である。当量比が増加するほど温度が高くなるので、放射熱漏洩が全出熱に占める割合が高くなる。こ

のことは、つぎに示す通気性固体板からの放射熱量についていえる。

表4には、通過ガス1kg当りについて、通気性固体板から放射される熱量を示す。通気性固体板内での気体の顕熱低下分以上の熱が放射されているように見えるが、これは通気性固体板に入射する熱流束を含んでいるためである。また、下流側通気性固体板から上流方向へ放射される熱量は、下流方向へ放射される熱量の約1.5倍であることがわかる。当量比が増加するほど下流側通気性固体板から上流へ還流する放射熱量が大きく増えている。このため、前述のような当量比による壁面上の着火点の移動が起こるとみられる。

4. 結 び

強ふく射場での、希薄予混合火炎の数値シミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。火炎からの放射伝熱によって温度が上昇した壁面上に保炎される火炎の前後で、気体の加速が生じることが再現された。予混合火炎を対象としたので、すすなどの放射吸収体が気体内で生じず、放射熱流束は燃焼に直接影響を与えない。しかし固体間の放射熱移動によって熱の再循環が起こる。また壁からの伝熱によって混合気が着火し、中心へ向けて火炎が伝ばする状況が再現できた。

文 献

- (1) Mizutani, Y. and Satomura, M., 19th Symp. (Int.) on Combust., (1982), 529, The Combustion Institute.
- (2) Mizutani, Y. and Matsumoto, T., 1983 Tokyo International Gas Turbine Congress, (1984), Vol.1, p.237, GTSJ.
- (3) 水谷・徳田, 機論, 51-471B(昭60-11), 3608.
- (4) 越後, 機論, 48-435B(昭57-11), 2315.
- (5) Echigo, R. et al., Proc. 1983 ASME-JSME Thermal Eng. Conf., (1983), Vol.4, p.99.
- (6) 水谷・ほか2名, 機論, 54-506B(昭63-10), 2922.
- (7) 早坂・ほか5名, 機論, 52-476B(昭61-4), 1734.
- (8) Katsuki, M. et al., First KSME-JSME Joint Thermal and Fluids Engineering Conference, (1988), Vol.1, p.329.
- (9) 関・ほか3名, 機論, 49-448B(昭58-12), 2821.
- (10) Shah, R.K. and London, A.L., Advances in Heat Transfer Suppl., 1978, Academic Press.
- (11) Metghalchi, M. and Keck, J.C., Combust. Flame, 38 (1980), 143.
- (12) Beer, J.M., Heat Transfer in Flames, (Ed., Afgan, N.H. & Beer, J.M.), 1974, p.30, John Wiley.