



燃 焼 の 基 礎 技 術 (II)

水 谷 幸 夫*

Fundamentals of Combustion Technique (II)

Yukio MIZUTANI

5. 気体燃料の燃焼技術

5.1 燃焼室内の流れと保炎技術

炉や燃焼機器においては、燃焼現象は空気力学的現象の支配下にあり、両者の相互作用、もしくは相乗作用を無視しては、燃焼過程の完全な理解は不可能である。これは何も気体燃料に限ったことではないが、一応ここで説明しておく。

炉や燃焼装置の流れ模様を計画する際に考慮すべきことは、つぎのとおりである。(1)保炎手段を確保する。(2)CO, HC, NO_x, ばい塵等の有害物質の生成を抑制しながら、完全燃焼をはかるように、燃料と空気の混合を調節する。(3)発熱率や放射率の分布、火炎形状、雰囲気(酸化・還元性)を希望どおりにするよう流れ模様を選定する。(4)振動燃焼や燃焼騒音を抑制する。

保炎手段としては、(a)安定した循環流を作る、(b)パイロット火炎で連続的に点火する、(c)対向噴流などで低流速領域を作る、(d)炉壁や火炎からの放射伝熱や炉壁からの対流伝熱により、未燃混合気を加熱する、などがある。循環流を作る方法としては、(i)直立物体(ブラフボディ)を保炎器として利用する、(ii)バーナリムの厚みを利用する、(iii)旋回流を利用する、(iv)ステップ状の急拡大やくぼみを利用する、(v)周囲を壁で囲まれた制約噴流で、同軸周囲流の流量を制限する、などがある。

直立物体というのは、円柱、円板、球、V面、円すい面等の非流線形の形状を持つ物体のことで、これを流れにそう入すると、流線がはく離し、非燃焼時にはカルマン渦が、燃焼時には閉じた還流領域が形成される。この還流領域に高温の燃焼ガスを閉じ込めて、点火源として働かせようというのが保炎器である。保炎器周囲の流れ場を図6に示す。還流領域が点火源として有効に働くためには、周囲流との境界に存在する強いせん断層を通し

て、火炎が外側へ伝ばしなければならない。ところが、そこには強い乱れがあるために、混合の特性時間 $\tau_t (= l_K \sqrt{u^2})$ 、ただし l_K = 乱れのコルモゴロフ・スケール、 $\sqrt{u^2}$ = 乱れの絶対強さが化学反応の特性時間 $\tau_c (= \delta / S_L$: δ = 層流火炎の予熱帯厚み、 S_L = 層流燃焼速度) より短くなると、化学反応が混合に追いつかなくなつて、火炎の吹き消えが起る。

ブンゼンバーナのような円管形バーナでは、バーナリムの厚みが火炎の安定性に大きな影響を持つ。厚肉リム(リム厚み 3mm 以上)では、図7に示すように、リム後流に閉じた還流領域が形成され、それが点火源の役目

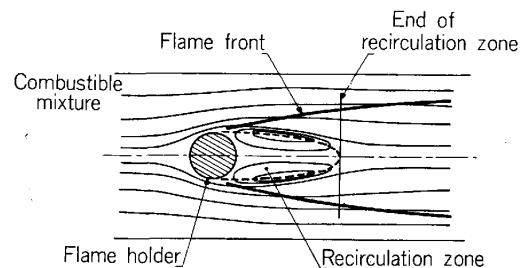


Fig. 6. Flow field around a bluff body.

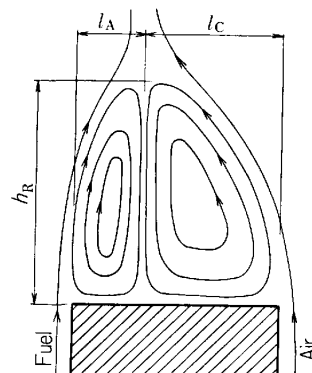


Fig. 7. Recirculation zone behind a burner rim.

昭和 58 年 12 月 29 日受付 (Received Dec. 29, 1983) (依頼技術資料)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita 565) 「燃焼の基礎技術(I)」は、「鉄と鋼」第70年第7号(1984年5月号)に掲載

目次は以下のとおりです。

1. ま え が き
2. 基礎技術の項目
3. 燃焼管理技術
4. 燃焼特性の測定技術と予測技術

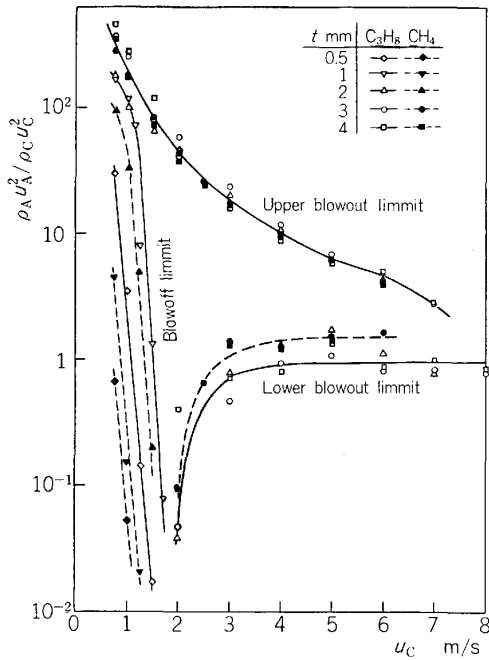


Fig. 8. Stable regions for coaxial-flow jet diffusion flames.

を果たすので、薄肉リムやナイフエッジ・リムに比べて、火炎の安定範囲が広い。同軸流非旋回拡散火炎に対する例を図8に示す。これは内径 50 mm の燃焼筒に速度 u_C で空気を流し、中心に置かれた内径 7.6 mm のバーナ管 (肉厚 t) から燃料を速度 u_A で吹き出した場合の火炎安定範囲を示したもので、 ρ_A 、 ρ_C は燃料と空気の密度である。 $t=0.5\sim 2$ mm の薄肉リムでは、火炎は吹き飛び限界線より下の領域でしか安定化されないが、 t が 3 mm 以上の厚肉リムでは、上・下吹き消え限界線間の領域で火炎が安定化される。流速や乱れ強さが大きいときには、さらに肉厚が必要で、フランジ付きバーナを用いた方がよいことさえる。

図9は工業用バーナで最もよく利用される旋回噴流の流れ模様である³⁹⁾。旋回の強さはスワール数

$$S = G_\phi / (G_x R) \dots\dots\dots (18)$$

で表示される。ただし、 R は噴流ノズルの半径、 G_ϕ と G_x は角運動量流束と軸運動量流束で、

$$\left. \begin{aligned} G_\phi &= \int_0^R (wr)(\rho u)(2\pi r) dr \\ G_x &= \int_0^R u(\rho u)(2\pi r) dr + \int_0^R p(2\pi r) dr \end{aligned} \right\} \dots\dots (19)$$

である。ここで、 r は半径方向座標、 u と w は流速の軸方向成分と旋回成分、 ρ は密度、 p は静圧である。ノズル中心軸付近にかなり大きな還流領域が形成され、噴流外縁では炉内の燃焼ガスが誘引されている。ノズル軸上のガンから気体燃料や液体燃料噴霧を噴射すると、中心軸上の循環流が点火源となり、さらに噴流外縁からの燃焼ガスの誘引によつて火炎が安定化される。

図10は工業用バーナでよく使用される末広ノズルか

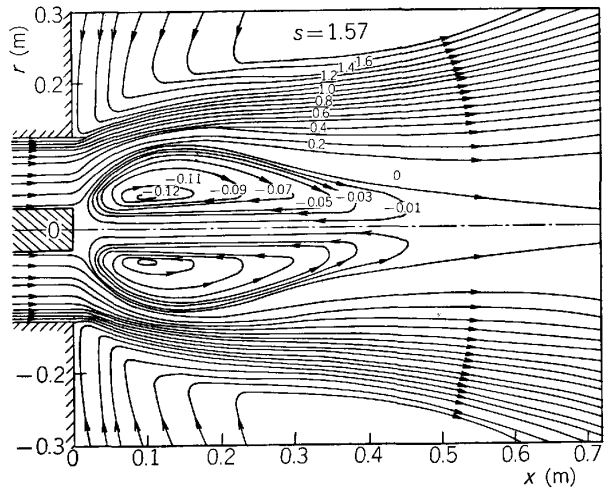


Fig. 9. Flow pattern of a swirling jet³⁹⁾.

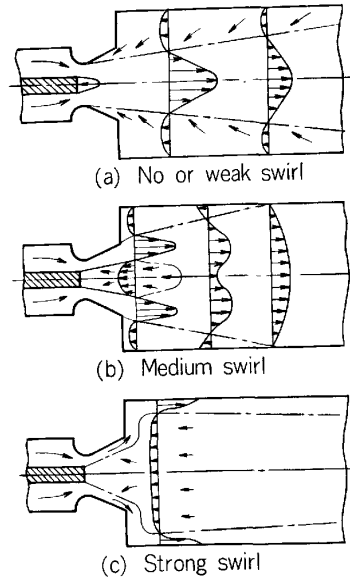


Fig. 10. Swirling jets injected through a divergent nozzle³⁹⁾.

ら噴出する旋回噴流の流れ模様である。(a)は旋回がないか、ごく弱い場合で ($S < 0.6$)、ノズル壁からの離れと出口ステップによつて環状逆流領域が生じ、燃焼ガスが還流される。この場合にはノズル出口下流に火炎が安定化されるが、振動を起こしやすい。(b)は中程度の強さの旋回 ($S = 0.6\sim 3$) を掛けた場合で、ノズル出口中央部に大きな還流領域が形成され、ステップによる環状逆流領域とあいまつて、ノズル内部から安定な火炎が形成される。(c)は強い旋回 ($S = 3\sim 10$) を掛けた場合で、壁に沿つた順流と、中央部に広い逆流領域を持つサイクロン型の流れが生じる。ノズル壁から燃焼室壁に沿つて火炎が生じ、壁面温度が上がるので、ふく射加熱に適している。また、未燃混合気が高温壁と接触し、火炎や燃焼ガスから壁を介して、未燃混合気へと熱の再循環が生じるので、希薄な燃料ガスや低発熱量ガスの燃焼

に好都合である。なお、ガスタービン燃焼器などでは、図 10 (b) のような流れ模様に加えて、燃焼筒に多数の空気穴列を設けて、二次空気、希釈空気の計画的な混合をはかり、高負荷燃焼を可能にしている。

特に気体燃料を燃焼させる場合、図 10(a) のように軸上の中央還流領域が発達せず、着火点が明確でないときには、火炎は振動を起しやす、とりわけ予混合燃焼では着火点がノズル内外を往復し、激しい振動燃焼を起すことがある。それに対して、(b) のように中央還流領域が大きく発達すると、火炎の安定性が増し、振動が軽減される。予混合燃焼においても、拡散燃焼においても、火炎の安定性を増し、着火点の脈動に基づく振動燃焼を防止する最も確実な手段は、保炎器、厚肉リム、ステップ状拡大部の後流に生じる循環流を利用して、火炎を安定化させることである。

なお、拡散燃焼では、図 9 や図 10 の中央のガンから半径方向または円すい面方向に数本の噴流として燃料を噴射し、初期混合の促進をはかるが、噴流の貫通距離を制御して還流領域内の混合比を適当にしないと、火炎が不安定になることがある。

同軸噴流で、周囲流に比べて中心部の噴流の運動量が卓越すると、周囲流の流量が噴流への誘引量をまかないきれなくなり、円環状の循環流を発生する。この現象は外側燃焼筒の長さが短いときに、その出口付近で起こりやすい。この円環状循環流を保炎に利用することもできるが、急拡大ステップを利用した方が安全である。なお、リセス型バーナは空気流量を零とした極限と見なし得る。

対向噴流では岐点付近に低流速領域ができるために、ここに火炎を安定させることができる。また、逆流する火炎によつて燃料または空気噴流の予熱ができるので、いつそう火炎の安定性がよくなる。この場合、一様予混合気と空気噴流を対向させても、一様空気流と燃料噴流または予混合噴流とを対向させても、火炎を安定化させることができる。図 11 は一様空気流と濃予混合気噴流とを対向させた場合に生じる火炎の一例である⁴⁰⁾⁴¹⁾。バーナリムの右側にかかなり大きな還流領域が生じ、この領域内を高温燃焼ガスが循環するため、軸上の岐点付近で噴流と空気との混合が行われ、かつ、ここに低流速領

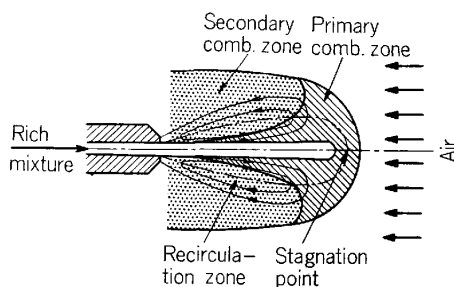


Fig. 11. Opposed-jet diffusion flame.

域が生じるために火炎が安定化される。還流領域は高温燃焼ガスを保有して、予混合噴流に対する点火源として働くと同時に、空気を噴流の方へ拡散させる働きもする。

バーナの周囲に円すい状のバーナタイル (図 10 の円すい状拡大部) を設置して、これを赤熱させ、火炎やバーナタイルからの放射伝熱や、バーナタイルからの対流伝熱によつて未燃混合気を加熱することは、火炎の安定化に非常に有効である。バーナタイルを設けない場合でも、火炎や炉壁からの放射伝熱によつて未燃混合気を加熱することは、重質油や微粉炭の燃焼には不可欠と言つてよい。特に、図 10(c) のサイクロン炉では、火炎や燃焼ガスから炉壁への放射伝熱、炉壁から未燃混合気への対流伝熱が熱の還流路を形成し、独特の火炎安定化が行われる。

5.2 点火技術

点火の方法としては、(1)電気火花によつて火炎核を作る火花点火、(2)電流加熱したニクロム線など、赤熱表面を混合気と接触させる熱面点火、(3)混合気中に火炎をそう入する方法、(4)高温ガスまたはプラズマを混合気中に吹き込む方法、(5)針金を大電流で溶断して発生する金属蒸気で点火する方法、(6)ピストンや衝撃波で混合気を断熱圧縮する方法、などがある。この内で最もよく利用されるのが火花点火法である。

可燃混合気を火花点火する場合、点火エネルギーを下げてゆくと、初期火炎核から安定な火炎球へと成長する誘導期間が増加してゆき、臨界値 E_{min} に至って点火不能に陥る。 E_{min} を最小点火エネルギーと呼ぶが、これは燃料の種類や混合比、酸素分圧、全圧、温度、火花の性質、流速と乱れ、電極の形状と間隙などの影響を受ける。

E_{min} が電極間隙 d によつて変化する様子を図 12 に示す。 d を小さくしすぎると、電極の消炎作用によつて E_{min} は増加する。この状態から d を増加させてゆくと、 E_{min} はしだいに低下し、電極の消炎作用がなくなつたところで極小値 E_{min}^0 をとる。このとき、初期火炎核の形状はほぼ球形になつている。この状態は d がある範囲内にある間維持されるが、 d が臨界値を越える

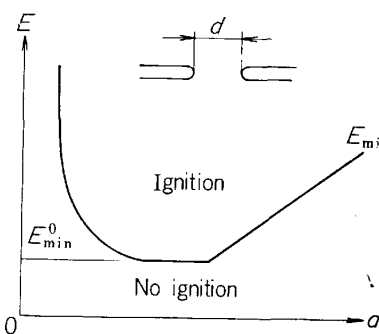


Fig. 12. Relation between minimum ignition energy and spark gap.

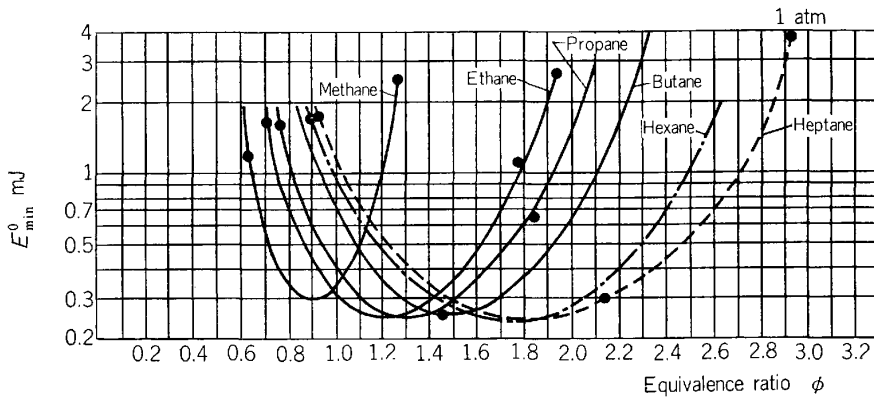


Fig. 13. Minimum ignition energy E_{min}^0 .

と、 E_{min} は再度増加し始める。これは火炎核の形状が球形から円柱形に変化するためである。 E_{min}^0 と圧力の2乗との間には逆比例関係がある (式 (17))。

E_{min}^0 と当量比 ϕ (空気比 α の逆数) との関係を種々の燃料と空気との混合気について、常圧下で測定した結果を図 13 に示す。 E_{min}^0 の極小点は層流燃焼速度もしくは断熱燃焼ガス温度の極大点 $\phi = 1.1$ から、メタンのように軽い燃料では希薄側へ、ヘプタンのように重い燃料では過濃側へずれる。これは選択拡散によつて、燃料と酸素の内の軽い方が初期火炎核に拡散してきて、火炎近傍の組成が混合気の平均組成より軽質成分側に寄るためである。

なお、実用点火装置では、容量性火花と誘導性火花が混在する設計になっており、その割合が適当なところで最も点火性能が良好になる。 E_{min}^0 は混合気温度の上昇とともに減少し、流速が高くなるほど増加する。その場合、流速 20 m/s 程度まではほぼ直線的に、それ以上では加速度的に増加する。

5.3 バーナ火炎の吹き飛びと逆火

ブンゼンバーナで火炎がバーナリムに付着する現象は、つぎのように説明されている²⁸⁾。バーナの壁面近くには境界層があり、そこでは図 14 の 01'~05' のような速度分布が存在する。それに対して、壁面の消炎作用により、燃焼速度 S_u は壁面からの最短距離 $s = (x^2 + y^2)^{1/2}$ に応じて変化し、したがつて、火炎位置 2, 3, 4 に応じて、02 S_u ~04 S_u のように分布する。対応する流速分布と燃焼速度分布 (02' と 02 S_u 等) とは一点で接するが、その点で燃焼速度と流速とがつり合い、火炎が安定化される。この点を火炎の付着点と呼ぶ。火炎 4 より火炎が下降して、バーナ管内に侵入しても、 s と y の関係、したがつて燃焼速度分布は変化しないから、速度こう配 g が 05' まで低下すると、局部的に燃焼速度が流速を上回つて、火炎はバーナ管内を下降し続ける。この現象を逆火と呼び、04' のこう配を逆火限界速度こう配と呼ぶ。また、流速こう配 g が 01' となると、火炎 2 はさらに上方へ移動しようとするが、そこではリムの消炎作用の減少が、周囲空気との混合による混合気の

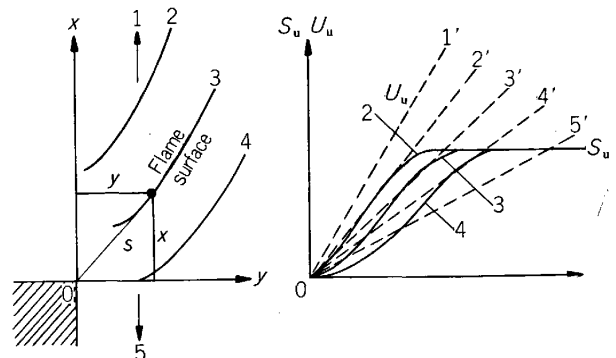


Fig. 14. Mechanism of flame attachment.

希釈によつて打ち消されてしまい、かえつて燃焼速度が低下する。したがつて、どの点でも流速が燃焼速度を上回り、火炎が吹き飛んでしまう。この現象を火炎の吹き飛びと呼び、02' のこう配を吹き飛び限界速度こう配と呼ぶ。

ところが、混合気濃度が上昇して過濃領域に入ると、周囲空気による希釈によつて燃焼速度がかえつて上昇し、しかも最適混合比の位置が低流速の周囲空気側へと移動するので、混合比が上昇するほど、吹き飛び限界速度こう配は上昇する。これが予混合火炎より拡散火炎の方が格段に安定な理由である。ただ過濃混合気では、火炎が吹き飛ばすまでに、火炎基部がリムから離れて浮き上がる浮き上がり火炎が見られるようになり、しかも、いったん浮き上がると、火炎基部をリムに再付着させるには、流速こう配を浮き上がり限界よりさらに下げなければならない。なお、浮き上がり火炎は乱流火炎に遷移していることが多い。

横軸に当量比 ϕ をとつて、各限界流速こう配 g を図示すると、図 15 のようになる。 g の単位は s^{-1} であり、この図はバーナ寸法には関係しない。厚肉バーナを用いたり、リムに円環状パイロット火炎を置くと、火炎の安定性が増すが、この場合でも g があまり大きくなると、境界層を横切つて火炎が主流の方へ伝ばできなくなる伸長吹き消えという現象が生じる。これは火炎が速度こう配 g を持つ流れにほぼ平行に生じると、予熱帯厚み

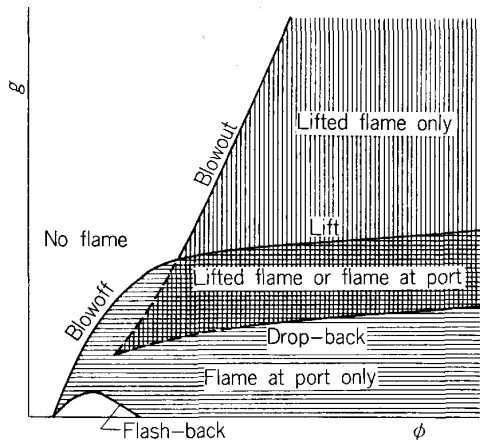


Fig. 15. Behavior of Bunsen flames.

δ の間で、混合気流量に $\rho_u g \delta$ なる流量差が生じ、これを平均流量 $\rho_u U_u$ で割ると、 $g\delta/U_u$ なる相対流量差が現れることによる。この場合、反応帯を流れる混合気流量より予熱帯を流れる流量の方が $(1+g\delta/U_u)$ 倍だけ多く、余分の予熱が行われる分だけ火炎温度が下がって、ついには火炎が消滅する。

$$K = g\delta/U_u \dots\dots\dots (19)$$

のことをカルロヴィッツ数、このような吹き消え現象を伸張吹き消えと呼び、 $K=1\sim 2$ 以上で吹き消えが起こる。5.1 節で述べた還流領域から火炎が広がらなくなる現象や、強い乱れによつて火炎が吹き消される現象も、微視的に見ると火炎伸張によるものと言われている。

5.4 混合過程と火炎長さの制御技術

予混合火炎では、火炎長さは燃焼速度と流速との関係から決まり、乱流火炎ではそれに乱流火炎帯厚みの半分を加えるだけでよい。それに対して、噴流拡散火炎では混合過程によつて火炎長さが決まるので、問題は複雑になる。厳密には理論解析や数値解析によつて予測しなければならないが、簡易理論¹⁷⁾によると、火炎長さ x_f 、燃料流速 u_{fu} 、バーナ口径 d 、燃料の拡散係数 D_{fu} の間には、

$$x_f \propto u_{fu} d^2 / D_{fu} \dots\dots\dots (20)$$

なる関係がある。層流拡散火炎では D_{fu} が流れ場に関係しないから、火炎長さは u_{fu} と d^2 に比例することになる。一方乱流火炎では D_{fu} はうず拡散係数となり、混合距離仮説に従うと、 l を混合距離として、

$$D_{fu} = l \sqrt{u^2} \propto d \cdot u_{fu} \dots\dots\dots (21)$$

となるから、 x_f は u_{fu} に無関係で、バーナ口径に比例する。周囲空気流や燃料噴流に特に強い流れや、スケールの大きい乱れを与えると l や $\sqrt{u^2}$ はそれに応じて変化するので、火炎長さを変えることができる。また、燃料噴流と周囲空気流の速度差を大きくして、せん断を作つたり、周囲空気流に旋回を与えると、 D_{fu} の値は大きく変化する。旋回は乱れを増加させるが、流れ場の状況によつては遠心分離効果で混合を抑制することも

あるので、注意を要する⁴²⁾。

6. 液体燃料の燃焼技術

6.1 微粒化と混合

微粒化（霧化）とは液体燃料を微細な油滴に分解して、単位質量あたりの表面積を増加させるとともに、油滴の分散、周囲空気との混合を適当に行わせることで、噴霧燃焼の最初の重要な段階である。微粒化には、つぎのような方法が用いられる。

- (1) 燃料ノズルから高速で噴出させる方法
- (2) 旋回を与え、噴口から液膜状に噴出させる方法
- (3) 空気や蒸気などの噴霧媒体を使う方法
- (4) 回転体の外周から遠心力によつて飛散させる方法
- (5) 回転噴孔より遠心力で液を噴出させる方法
- (6) 液噴流を他の液噴流か固体面と衝突させる方法
- (7) 音波や超音波を利用もしくは併用する方法
- (8) 高圧の静電場中で液噴流を分裂させる方法

各方法の詳細については文献 17) や 43) を参照されたい。よく利用される方法は (1)~(4) であり、(1) には単孔噴射弁が、(2) にはうず巻き噴射弁が、(3) には二流体（空気または蒸気）噴射弁が、(4) には回転カップ噴霧器が対応する。それぞれ特色があり、長い火炎を得るには単孔噴射弁が、広がりを持った火炎を得るには旋回噴射弁が、微細な噴霧や高粘度油の微粒化には二流体噴射弁が、不純物を含んだ燃料油には回転カップ噴霧器が用いられる。

噴霧特性としては、油滴の粒度分布、平均粒径、分散度、貫通距離、噴射率、推力、旋回数などが考えられる¹⁷⁾。粒度分布の表示法としては、粒数分布曲線、質量分布曲線、粒数累積分布曲線、質量累積分布曲線、それにこれらの折線または柱状図表示法がある。また、分布曲線を近似的に表示するための解析関数として、ロジックラムラの分布関数、抜山-棚沢の分布関数、カイ二乗分布関数、対数正規分布関数、平方根正規分布関数がある。

噴霧の平均粒径の一般形は次式で与えられる。

$$\bar{x}_{pq} = \left(\int_0^\infty x^p \frac{dn}{dx} dx \right) / \left(\int_0^\infty x^q \frac{dn}{dx} dx \right)^{1/(p-q)} \dots\dots\dots (22)$$

ただし、 x は各油滴の直径、 n は油滴数、 $p > q$ は整数である。 \bar{x}_{pq} はもとの油滴群と直径の p 乗の総和及び q 乗の総和が等しい均一粒径油滴群の直径を与えるもので、 $p=1, q=0$ ならば算術平均粒径、 $p=3, q=2$ ならば体表面積平均粒径で、後者を特にザウテル平均粒径と呼ぶこともある。また、累積分布曲線の 50% 点に対応する直径をメディアン直径と呼び、粒数メディアン直径と質量メディアン直径がある。

分散度を表すものには、噴霧の分散範囲と、噴霧内における油滴の流量分布がある。この内、分散範囲は軸対称噴霧の場合、噴孔の位置で噴霧流の外縁に引いた 2 接

線のなす角度, すなわち噴霧円すい角, もしくは 80% の油滴が流れる範囲に対応する 80% 噴霧角で表示される. 貫通距離は無重力場における非定常噴霧の到達距離, 噴射率は単位時間あたりの燃料の噴射量と定義される. 推力と旋回度はバーナ火炎の長さや周囲空気との混合に関係する量である.

6.2 噴霧燃焼技術

液体燃料噴霧は図 9 のような旋回噴霧の流れ場の中に, 中心軸上のガンから円すい面に沿って噴射されることが多い. この場合, 中央還流領域は噴霧円すいによつて二分され, より複雑な流れ場となる. 大まかに言つて, 微小な油滴は循環流に捕えられて, その内部で蒸発・燃焼し, 大きな油滴は還流領域から外に飛び出す. その割合は噴霧の推力, したがつて噴射圧に関係し, 還流領域内部の混合比が適当な範囲に入らないと, 火炎は吹き消えてしまう. また還流領域内部で燃焼が継続されても, この領域から外部に火炎が広がつて, 高い燃焼効率が維持されるかどうかは, 流速, 旋回強度, ならびに噴霧の推力などの組み合わせが適正かどうかにかかつている. 一般的に言つて, 還流領域界面のせん断層に十分な密度の燃料油滴が確保できるかどうか, 火炎が還流領域外に広がるかどうかに関係する.

噴霧火炎を安定させる方法 (保炎技術) としては, (1) 旋回流などによつて生じる循環流の中に噴霧を噴射する, (2) 保守器の中央に噴霧器を置き, 保炎器後流に生じる循環流の中に噴霧を噴射する, (3) 前置燃焼器などで生じた高温流の中に噴霧を噴射する, のいずれかが採用される. 低温の空気流中に噴霧を噴射したときの火炎の安定性はきわめて悪く, 流れの温度が 500°C を越えると, 火炎の安定性が改善される.

噴霧燃焼においては, 蒸発によつて発生した燃料蒸気は油滴周囲で全周炎もしくは後流炎として拡散燃焼するのではなく, 多数の油滴から発生した燃料蒸気が全体として予混合的, もしくは部分予混合的に燃焼すると言われている. 炭化水素から CO と H₂ への総括熱分解反応は, 比較的蒸発直後に起こるものと見られるが, 緩慢反応である CO の酸化反応は酸素不足の噴霧中核部よりは, 外周部もしくは外周部への拡散途上で生じる可能性が高い. また, 油滴は火炎の前半部で蒸発をほぼ完了

し, 後半部ではガス噴流拡散火炎と類似の現象が生じていると言われている.

6.3 噴霧火炎の長さ

噴霧火炎の長さは油滴の蒸発速度にはほとんど関係せず, 周囲空気との混合に支配される. 大部分の油滴は数十 mm 以内に蒸発を完了するが, 火炎長さはそれより, はるかに長いのが普通である.

混合過程が火炎の長さや形状を支配することは, 噴霧角 2θ を変えてみると明らかになる. 辻ら⁴⁴⁾は空気噴霧器 (Y ジェット型) で霧化された軽油噴霧の噴霧角を 65°~110° の範囲で変化させ, 火炎写真をとつた. そのスケッチを図 16 に示す. 噴霧角が大きくなると, 周囲空気流の噴霧円すいへの誘引量が増し, 混合過程が加速される. それで, これだけ大きな火炎長さと形状の差となつて表れるわけである.

前沢⁴⁵⁾はセメント焼成用ロータリキルンの空気噴霧器で作られる噴霧火炎に対して, 火炎長さをつぎの実験式で与えている.

$$x_f = 0.0146 \dot{m}_{fu} / (k \sqrt{\bar{\rho} \cdot G_x}) \dots\dots\dots (23)$$

ただし, x_f は火炎長さ (m), \dot{m}_{fu} は燃料の噴射率 (kg/s), $k = \sqrt{\pi} \tan \theta$, $\bar{\rho}$ は火炎全長にわたるガスの平均密度 (kg/m³), G_x は噴霧の推力 (N) である. さらに前沢は火炎軸上でガス分析を行い, 火炎末端の軸上での空燃比は 18~20 であつたと報告している. 軽油の量論空燃比は 14.8 程度であるから, 火炎は軸上のガス組成が量論混合比になる位置よりも下流まで続くことになるが, これは火炎長さが脈動しており, 肉眼では火炎が最も伸びた瞬間が観察されるのに対して, ガス組成は時間平均値が観測されることにも原因がある.

7. 固体燃料の燃焼技術

7.1 微粉炭燃焼

粉碎機で粉碎された石炭の微粒子 (200 メッシュふるい下 80% 程度) を一次空気と混合してバーナから噴出させ, 二次空気と混合しながら燃焼させる空間燃焼方式である.

微粉炭燃焼は (1) 二相の状態での燃焼する, (2) 最初の分解燃焼期に多量の可燃ガス (揮発分) を放出し, 続いて残炭の表面燃焼期に入る, という 2 点で重質燃料油

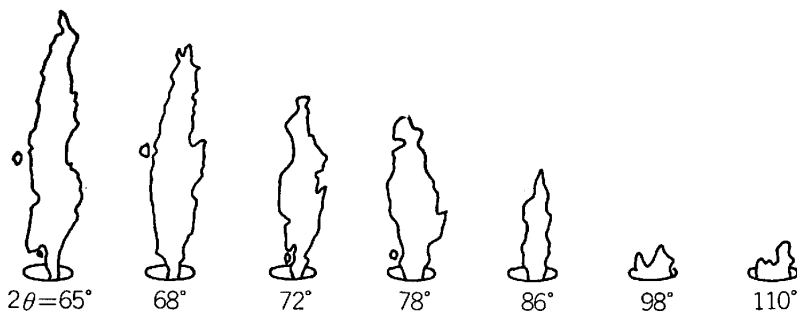


Fig. 16. Effect of spray angle 2θ on flame length.

の噴霧燃焼に似ているが、(3)ガス化速度が低く、燃え切りに時間と距離が必要である、(4)明りような火炎面を生じず、火炎が燃焼室全体に広がる、(5)炉壁や火炎からのふく射伝熱が火炎の安定性や燃え切りに必要な距離に大きな影響を及ぼす、という点で噴霧燃焼とは異なっている。

炭質と揮発分含有率によつて異なるが、石炭は 10~70% (w/w) が分解燃焼を行い、残りが表面反応を行う。石炭粒子を高温ふん囲気中に入れると、まず熱分解を起こして、熱分解生成物、いわゆる揮発分を放出する。この放出量と放出時間はふん囲気温度、ひいては粒子の温度上昇率に左右される。揮発分の多い低質石炭ではすすの生成しやすいことが知られているが、これは微粉炭の粒子密度が高く、揮発分が急速に放出されて酸素不足を生じたときに起こりやすい。しかも火炎からのふく射が関係する。

微粉炭粒子の燃え切り時間 (固定炭素の 99% が燃焼するに要する時間) は表面反応速度によつて決まり、空気比 1.2、炉内温度 1300°C のとき、1.8s 前後である。これは燃焼速度定数 $C_b=1 \text{ mm}^2/\text{s}$ として計算される油滴蒸発時間 (100 μm の油滴で 10ms) に比べて 2 桁以上長い。

微粉炭火炎が安定する機構としては、(1)火炎伝ば、(2)炉壁や火炎からのふく射伝熱による着火、(3)高温燃焼ガスとの混合による着火、(4)高温炉壁との接触による着火、が考えられる。開放大気中で逆円すい火炎バーナを用いて測定された微粉炭の燃焼速度は 0.1~0.2 m/s となつており、このような条件下での高速燃焼は不可能である。しかし、900°C 以上の高温ふん囲気中では 20ms 以内に揮発分の 80% が放出されるので、気相中の火炎伝ばが可能となり、0.8~10 m/s という燃焼速度が観測されている。したがつて、炉壁や火炎からのふく射伝熱と高温燃焼ガスとの混合により、微粉炭粒子の温度が 10⁴°C/s 以上の割合で上昇し、急激に放出された揮発分と空気との混合気中を火炎が伝ばするというのが、標準的な微粉炭火炎の安定機構であろう。

微粉炭バーナには種々の形式があるが、いずれも石炭微粉と一次空気に浮遊させて燃焼炉に吹き込み、炉内で二次空気と混合するように設計される。石炭微粉は火炎や炉壁からのふく射伝熱、ならびに高温燃焼ガスとの混合によつて熱分解を起こし、急速に揮発分を放出して、分解燃焼を行う。その際、揮発分は石炭粒子周囲の境界層で燃焼するのではなく、噴霧燃焼における燃料蒸気と同様、多数の粒子から放出された揮発分が一体となつて、予混合燃焼もしくは部分予混合燃焼をすると見た方がよさそうである。したがつて、揮発分と空気との混合比が、水素が優先的に燃焼した後の空気比にして 0.75 以下になると、すすを発生する。バーナを出た直後の微粉炭が火炎や炉壁から受けるふく射熱が、揮発分の放出

速度と放出後の温度上昇速度、ひいては火炎の安定性に関係するので、バーナ出口領域への放射熱流束を高くするように設計する必要がある。

揮発分の燃焼が進行し、二次空気との混合が進むと、残炭表面に酸素が拡散するようになり、表面反応が開始される。この表面反応期間は非常に長く、数秒にも達することがあるので、滞留時間を十分長くとらないと、燃焼効率が低下する。微粉炭燃焼においては、分解燃焼期にかくはん反応器に近い状態で燃焼させ、その後二次空気が徐々に混合されるプラグ流反応器 (一次元反応器) が続くのが、最も燃焼負荷率 (燃焼室の単位体積あたりの熱発生率) を高くとれると言われている。

7.2 流動層燃焼

けい砂や石灰石などの粉体層の底部から、分散板を通して空気を吹き込むと、吹き込み量がある範囲にあれば、粉体が流動化し、沸とうに似た様相を呈する。このように流動化された粉体層のことを流動層と呼び、その上部の空間をフリーボードと称する。流動層の中に粉炭 (直径数 mm~十数 mm) を投入すると、高温に熱せられた粉体と共に層内を循環しながら、空気と接触して燃焼する。流動層炉には常圧流動層炉と加圧流動層炉があるが、後者はガスタービン用、もしくは複合サイクルプラント用燃焼器としてしか採算がとれないと思われる。図 17 に流動層炉と付属設備の模型図を示す。

流動層燃焼の特色はつぎのとおりである。(1)粉体の熱容量が大きく、燃料の層内滞留時間が非常に長いので、発熱量の低い燃料でも燃焼可能である。(2)フリーボード部を別にすれば燃焼負荷率が高く、伝熱面への熱伝達率も高いため、炉が小型化できる。(3)炉内で脱硫が可能で、低温燃焼のためサーマル NO_x の発生もほとんどない。(4)スラギング、ファウリング、コロージョンといった伝熱面障害が発生しにくい。(5)残炭のかなりの部分がフリーボードから炉外に排出されるので、これを捕集し、再燃焼させないと、燃焼効率が低下する。

なお、表面反応は流動層内を循環しながら繰り返し行われるが、揮発分の燃焼は気泡中で 1 パスでしか行われないので、揮発分の完全燃焼のためには、フリーボード

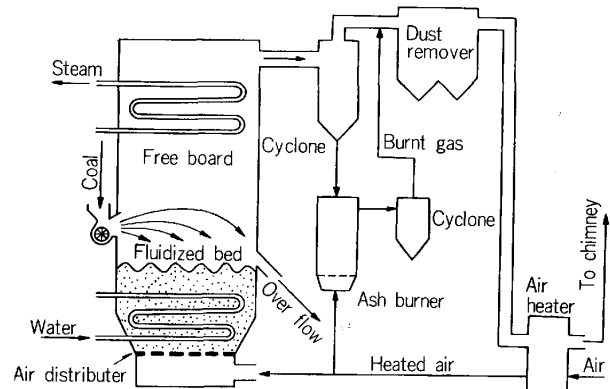


Fig. 17. Fluidized-bed furnace system.

内の反応が非常に大切である。

7.3 COM 燃焼と水スラリー燃焼

COM (Coal-oil mixture) には微粉 COM と粗粉 COM があるが、前者は 200 メッシュふるい下 70~95% という石炭微粉を質量分率にして 10~50% C 重油に混入したもので、少量の安定剤と水を加えることもある。その燃焼特性は重油と微粉炭の間であつて、火炎安定性は重油に近く、廃煙中の NO_x, SO_x, ばい塵濃度は両燃料の中間、火炎長さは微粉炭に近い。微粒化特性は重油よりかえつて良好と言われている。したがつて、COM の燃焼技術は重油の燃焼技術と本質的に同じであり、それに微粉炭燃焼の灰の問題が付け加わるだけである。ただ、炉内滞留時間の不足、ならびに噴霧器の閉そくと摩耗には注意しなければならない。現在試みられている噴霧器は空気または蒸気を噴霧媒体とする二流体噴射弁で、外部混合、内部混合、中間混合 (Y ジェット) のいずれの形式も用いられる。ノズル孔径が石炭最大粒径の 6~7 倍以上、できれば 10 倍以上 (約 3 mm) あれば、ノズルの閉そくは回避でき、摩耗量も少なくなる。

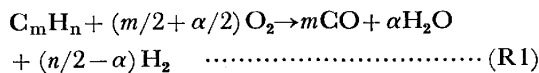
水スラリー燃焼は COM の C 重油を水に変えたものである (石炭 70% 前後)。この場合は重油蒸気による火炎安定化作用は期待できないが、石炭と水の間の水性ガス反応が期待でき、そのためか灰中未燃分の割合が低下する。また火炎温度が低下して、NO_x 排出量も低減される。さらに、COM のときは石炭粒子どうしの凝集が生じたものが、水スラリーではそういうこともなく、むしろ滴のマイクロ爆発による二次微粒化が期待できる。それに、いおう含有量の高い重油を使わなくてすむので、SO_x の発生量が低減される。その上、石油消費の節減にもなる。

COM にしろ、水スラリーにしろ、その利点は燃焼過程にあるのではなく、輸送と貯蔵の容易さにあると言われている。したがつて、供給基地と流通機構が整備されて、始めて存在価値が生じるものと言えよう。

8. 大気汚染防除技術

8.1 未燃炭化水素と一酸化炭素

炭化水素系燃料 (C_mH_n) は



なる総括熱分解反応によつて CO, H₂, H₂O に分解し、その後



なる部分平衡を保ちながら、CO から CO₂ へと酸化されると考えると、実用燃焼機器内での燃焼反応の概略がは握できる。反応 (R1) の途中で CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈ などの低級炭化水素が生成し、これらが未燃のまま排出されると、未燃炭化水素 (UHC) と呼ばれる排

出成分となる。また、CO の酸化反応はかなり遅く、状況しだい未燃のまま排出される。

UHC にしろ、CO にしろ、空気比 1.1 以上で十分な時間をかけて反応させれば、ほとんど排出されないものである。排出される原因としては、つぎのことが考えられる。(1) 平均空気比が 1.05 以下である。(2) 混合が不十分で、局部的に空気比 1.05 以下のガス塊が排出される。(3) 炉内滞留時間が不十分で、酸化反応が終結しない。(4) 燃焼中のガスが低温表面や低温の二次空気と接触・混合して急冷され、酸化反応が途中で凍結される。(5) 往復式内燃機関などでは、燃焼ガスの急膨張によつて温度の急下降が生じ、酸化反応が途中で凍結される。

工業用炉やボイラでは (1) 以外の現象はほとんど生じないが、ガスタービンなどの高負荷燃焼器では (2)~(4) の現象も起こり得る。UHC が排出されるときには、(4) が原因となることが多いようである。ただ、低カロリー燃料ガスを二段燃焼させるような場合には、空気比が 1.1 以上になる二次燃焼領域の温度が低下しがちであり、滞留時間には注意を払わなければならない。

8.2 すずとばい塵

すずは空気比 0.8 以下の燃料過濃領域で、燃料ガスや燃料蒸気の熱分解や脱水素反応によつて生成され、重合、表面析出、凝集によつて成長する数 nm~数百 nm の微粒粒子である。それに対して、ばい塵は重質燃料油滴や石炭粒子の未燃分である。すなわち、重質油の油滴は、高温ふん囲気中では激しい膨張と収縮を繰り返しながら急速に蒸発し、場合によつては自己分裂 (マイクロ爆発) を起こして、細かいコークス状粒子を生成する。また、低温ふん囲気中では蒸発過程が緩慢で、熱分解量が増し、多孔質の粗大残炭を形成する。石炭粒子も燃料比の低いものでは、分解燃焼期にすずを、また表面反応末期に残炭を含んだ灰を生成する。灰を除けば、すずも残炭も酸化可能であるが、すずは急冷によつて、また残炭は高温領域滞留時間の不足によつて、酸化反応が完了しないまま、排出されるに至る。

すずとばい塵の排出量を低減させるためには、ガスの流れを制御して過濃ガス塊の急冷を防止するとともに、燃料の噴射方向や噴霧の貫通力を調節して、蒸発と燃焼を終えるまでは油滴が高温ふん囲気中にとどまるように留意しなければならない。また、微粉炭燃焼では分解燃焼期の揮発分濃度を上げすぎないようにし、二次空気供給点以後の温度を高温に保つ必要がある。

ガスの流れは一次空気と二次空気の噴口形状、流速、流量比、旋回度を変更することによつて、制御することができる。特に旋回度はばい塵の発生量に大きな影響を与えるもので、最適値が存在する。旋回流や保炎器によつて循環流を発生させ、それによつて火炎を安定させることはバーナ設計の定石であるが、燃料の噴射方向や貫

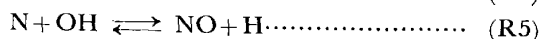
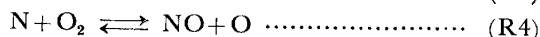
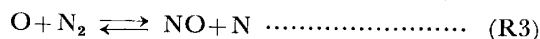
通力を調節して、循環流に捕そくされる燃料量と還流領域への空気の乱流拡散量とを適当な割合に保たないと、火炎の安定性が悪化したり、ばい塵や未燃分の排出量が増加する。

すす排出量の低減には燃焼廃ガス再循環法が有効であり、またバリウム等の金属化合物を燃料に添加しても、すす粒子の凝集・粗大化を防ぎ、酸化を促進させることができる。

8.3 窒素酸化物

窒素酸化物は主として NO_x と NO_2 から成り、 NO_x と表現される。 NO_x は生成経路により、(1) 空気中の N_2 と O_2 とが反応して生じるサーマル NO_x 、(2) 燃料中に含まれる窒素が酸化されて生じるフューエル NO_x 、(3) 燃焼過程で生じるラジカルと空気中の N_2 が反応して生じるプロンプト NO_x の 3 種に分けられる。

サーマル NO_x は拡大ツェルドビッチ機構、



で生成される。この反応は酸素が十分存在し、温度が 1500°C 以上であると活発化するので、酸素不足か低温にしてやれば、 NO_x の発生量は激減する。ただ、乱流燃焼では酸素濃度も温度も大きく脈動しており、たとえ時間平均値が低くても、ピーク値が高いことが多いので、注意を要する。

フューエル NO_x は生成機構が明確でないが、つぎの性質は判明している。すなわち、(1) 燃料中の N 分は 10%~70% の範囲で NO_x に転換される。(2) 転換率は温度にはあまり関係しない。(3) 燃料中の N 分が多いほど転換率は低下するが、 NO_x の生成量は増加する。(4) 空気比を 1 以下に下げると転換率が低下し、空気比 0.6~0.7 で零に漸近する。したがって、燃焼過程を 2 段階以上に分け、1 段目を空気不足にすることにより、燃料中の N 分の NO_x への転換率を下げた上、熱損失を起こさせて火炎温度が上昇しないようにしながら、2 段目以降で燃焼を完了させる方法が考えられる。これを段階燃焼と呼ぶ。ただ、燃料中の N 分が窒素ガスに変わる前に 2 段目に送り込むと、 NO_x への転換が継続されるので、注意を要する。

プロンプト NO_x は燃料過濃の火炎帯で生成され、予熱しない拡散火炎で生成される NO_x の内、フューエル NO_x 以外のものの、ほとんどがこれである。火炎帯で N_2 が燃料中の N 分と同様に振舞い、HCN などを経て NO_x になるという説があり、温度にほとんど関係しない。この低減方法は不明であるが、生成量自体が少ないので、無視されることが多い。

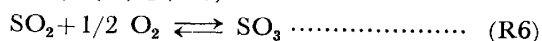
N 分の少ない燃料では、分割火炎による燃焼ガスの急冷、廃ガス再循環や水噴射による火炎温度の低下、低空気比燃焼、二段燃焼等によつて、サーマル NO_x を低減

させる。それに対し、重質油や石炭等の N 分の多い燃料では、低空気比燃焼か段階燃焼以外にフューエル NO_x を低減させる手段はない。ただ、 NO_x は比較的還元されやすいので、少量の炭化水素、微粉炭、残炭を火炎の下流部に添加することで、かなり N_2 に還元できる。また、アンモニアを吹き込んでも、 NO_x が N_2 に分解される。以上の手段でも不足のときは、廃煙脱硝もしくは燃料の低窒素化という手段に訴えなければならない。

NO_x の低減対策は UHC, CO, すず, ばい塵の低減対策と矛盾する点が多いので、妥協点を見いだす必要がある。

8.4 いおう酸化物

燃料中に含まれる燃焼性いおうの大部分は、いつたん SO_2 になり、冷却されて、



の平衡点が右に移動する。 SO_3 は水と反応して硫酸を作り、煙道ガスの露点を上昇させるとともに、低温部分に付着して、腐食を起こす。したがって、廃煙温度を下げ省エネルギーを行おうとすれば、低空気比燃焼により O_2 濃度を下げねばならない。

SO_2 発生量を低下させるには、低いいおう分燃料を使うよりほかはなく、あとは廃煙脱硫に頼ることになる。

9. 燃焼のシミュレーション技術⁴⁶⁾⁴⁷⁾

9.1 数学模型の構成と取り扱い

燃焼現象や燃焼機器の数学模型の中核となるのは、つぎの支配方程式群である。(1) 連続則、(2) 運動量保存則、(3) 物質保存則、(4) エネルギー保存則。

これらを与えられた境界条件と初期条件の下に解くわけであるが、その際、(a) 燃焼反応、(b) 乱流輸送、(c) 放射伝熱、(d) 空力加熱、(e) 相間相互干渉、(f) 有害物質生成、等に関するサブモデルが必要で、その数式表現されたものを支配方程式に代入するか、連立させる必要がある。また、流れ場の性質と幾何学的形状が考慮される。

このようにして数学模型ができあがると、それを動作させる。換言すれば、支配方程式で表現される論理に従つて、境界条件や初期条件に適合する場の状態(解)を決定しなければならないが、その段階で数学解析法と数値解析法とに分岐し、後者は方程式の離散化の過程で変質を受ける。場の状態が得られると、実験データとの対比、数値解析の精度検討によつて、精度や仮定の妥当性の検討がなされて、研究や設計に利用される運びとなる。

9.2 流れ場の性質と形状

(1) 流体の性質による分類 流体は圧縮性流体と非圧縮性流体、粘性流体と非粘性流体、ニュートン流体と非ニュートン流体、に分類される。燃焼機器の数学模型には非圧縮性流体-粘性流体-ニュートン流体という組み合わせが使われるのが普通であるが、場合によつては

圧縮性流体や非粘性流体の仮定が使われることもある。

(2) 流れの性質による分類 流れはその性質によつて、層流と乱流、亜音速流と超音速流、定常流れと非定常流れ、放物形流れとだ円形流れに分類される。放物形流れというのは、支配方程式が放物形の偏微分方程式の形をとるものであり、だ円形流れというのは、だ円形の偏微分方程式の形をとるものである。本来、すべての流れはだ円形流れであるが、主流方向の流速、温度、濃度のこう配が直角方向のそれに比べて小さく、また、直角方向の速度成分が相対的に小さい場合には、境界層近似が成立し、支配方程式を近似的に放物形の偏微分方程式の形に書くことができる。この場合には、数値解析において試行錯誤法は不要となり、上流境界から行進法で計算を行うことができる。当然、計算機の記憶容量は格段に小さくでき、計算時間も大幅に短縮できる⁴⁸⁾。

ところで、炉や燃焼器内の流れは例外なく脈動や変動を伴い、非定常である。ただ、時間平均的に観察すると定常とみなせることが多いので、数学模型も定常モデルの形で作成されることが多い。しかし、現象が本質的に非定常なものである以上、何らかの形で非定常性を考慮しなければならず、通常は輸送係数等の調節によつて非定常性を考慮するわけであるが、多分に便宜的な手段に過ぎず、その取り扱いや評価には注意を要する。

(3) 流れ場の形状による分類 流れ場を幾何学的形状によつて分類すると、零次元流れ、一次元流れ、二次元流れ、三次元流れとなる。

(a) 零次元流れ 特に主流方向というものを持たない流れにおいて、混合をしないで激しくしてゆくと、その極限において、流れ場に温度や濃度のこう配が存在しなくなり、流れ場全体が均質になつてしまう。このような流れを零次元流れ、内部に零次元流れ場を持つ燃焼器のモデルを零次元モデルまたは、かくはん反応器モデルと呼ぶ。均質とは言つても、分子レベルまで均質か、乱流うずのレベルで均質かによつて燃焼過程に差を生じ、前者を完全かくはん反応器モデル、後者をうず混合かくはん反応器モデルと呼ぶ。

(b) 一次元流れ 主流と直角な断面内で流速、温度、濃度が一様で、変化が主流方向にのみ存在する流れ場である。この変形として、流路断面積の変化のみは許す準一次元流れや、途中で空気などの混合があつても、瞬時にして断面内に一様に拡散・混合する瞬時混合型一次元流れがある。このような流れ場を仮定する炉や燃焼器のモデルをプラグ流反応器モデル、断面内が乱流うずのレベルでは均質でも、分子レベルではそうでないものを、うず混合プラグ流反応器モデルと呼ぶ。

(c) 二次元流れ 二次元流れは平面二次元流れと軸対称二次元流れに分けられる。炉や燃焼器は円環形や円筒形に近い形状のものが多く上に、三次元流れに比較して、計算機の記憶容量や計算時間が格段に少なく

すむので、この流れ場を対象とした数学模型が広く用いられる。噴流を含む流れ場でも、同軸噴流であれば軸対称二次元流れとして扱えるが、横断噴流や傾斜噴流は三次元流れに分類される。

(d) 三次元流れ 箱形炉等、三次元形状を持つ炉や燃焼器は、当然、三次元流れを考慮しなければならない。また、前述のように、平面二次元や軸対称二次元形状を持つように見えても、実際には三次元流れ場を持つ炉や燃焼器も少なくない。

(4) 複合反応器モデルと埋め込み反応器モデル 零次元流れや一次元流れに基づく反応器モデルは、炉や燃焼器の数学模型としては不十分である。それでも、かくはん反応器モデルやプラグ流反応器モデルが単独で燃焼器や炉に適用された時期があり、そのような炉や燃焼器の数学模型を単一反応器モデルと呼ぶ。それに対して、炉や燃焼器の各領域を単純な反応器モデルで代表させ、それらを回路網のように接続して構成された炉や燃焼器の数学模型を複合反応器モデルと呼ぶ。

いま一つのゆき方は、炉内流れ場を軸対称二次元放物形モデルで近似し、どうしても放物形の扱いができない循環流領域や逆流領域だけを、かくはん反応器モデルで近似して、放物形流れの中に埋め込む埋め込み反応器モデルである。ここでは横断噴流も適当にモデル化される。

複合反応器モデルや埋め込み反応器モデルによると、複雑な流れを比較的容易に扱えるが、数学模型の中に実測値や推測値を多数導入しなければならず、シミュレーション技術としては低次のレベルに属することになる。

9.3 詳細数学模型

数学模型の中核を形成する支配方程式はつぎのとおりである。

連続則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (24)$$

運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (p \delta_{ij} + \tau_{ij}) + \rho g_j$$

$$(j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (25)$$

物質保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (j_{ki}) + R_k$$

$$(k = 1, 2, \dots, s) \dots\dots\dots (26)$$

エネルギー保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h)$$

$$= - \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i + \sum_k j_{ki} h_k) + Q_h \dots\dots\dots (27)$$

ただし、 t = 時間、 x_i = 位置座標 ($i = 1, 2, 3$)、 ρ = 密度、 $u_i = x_i$ 方向速度成分、 p = 静圧、 δ_{ij} = クロネッカー

の δ ($i=j$ で 1, $i \neq j$ で 0), τ_{ij} =せん断応力, $g_j=x_j$ 方向重力加速度, $m_k=k$ 化学種の質量分率, $j_{ki}=k$ 化学種の x_i 方向拡散質量流束, R_k =単位体積あたり k 化学種の生成率, h =比エンタルピ, $q_i=x_i$ 方向伝導熱流束, $h_k=k$ 化学種のエンタルピ, Q_h =単位体積あたりのふく射等による受熱率, で $\partial f_1/\partial x_1 = \partial f_1/\partial x_1 + \partial f_2/\partial x_2 + \partial f_3/\partial x_3$ なる総和規約が適用される。

式 (24)~式 (27) は層流に対する式であるが, 乱流に対しては, 通常, $u_i = \bar{u}_i + u_i'$, $p = \bar{p} + p'$, $m_k = \bar{m}_k + m_k'$, $h = \bar{h} + h'$ 等と置いて, これらの式を時間平均するか (\bar{u}_i 等は時間平均値, u_i' 等は変動成分), さらに $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ と置いて, ファブレ平均をとる. このようにすると, 変動成分の相関項 $\overline{u_i' u_j'}$, $\overline{u_i' m_k'}$, $\overline{u_i' h'}$ 等が出現し, さらに拡散質量流束 j_{ki} や伝導熱流束 q_i にも時間平均値が要求されるので, これらの定式化のために乱流サブモデルが必要となる。

k 化学種の生成率 R_k もしくは, その時間平均値の定式化のためには燃焼反応サブモデルが, 受熱率 Q_h もしくは, その時間平均値の定式化のためには放射伝熱サブモデルや空力加熱サブモデルが要求される. さらに, 噴霧燃焼や微粉炭燃焼においては混相流れ場となるために, 液相や固相に対する支配方程式を追加する必要が生じる上に, 相間干渉によつて, 気相に対する連続則, 運動量保存則, 物質保存則, エネルギー保存則のすべてに, 新しい発生項が付け加わる. そのために多相流サブモデルが必要となる. 燃焼機器の設計においては, CO , NO_x , SO_x , 未燃炭化水素, すす, ばい塵等の有害物質の排出量を予想する必要も生じるが, そのためには有害物質生成サブモデルが必要となる. これらのサブモデルは, それぞれ非常に困難な問題を包含しており, 一研究分野を形成している。

9.4 数値解析

燃焼のシミュレーションでは, 数学モデルは数値解析に付されることが多い. その際, 支配方程式を偏微分方程式から差分方程式, まれには有限要素式に変換する離散化の手続きが必要となる. この離散化の過程, 緩和係数の導入, 演算様式の決定, 計算機コードのプログラミン

グの各段階で数多くの問題が生じ, 収束性, 計算時間, 計算精度が大幅に変わってくる. これに関しては, 文献 49) に詳細な解説があるので, 参照されたい. 偏微分方程式と差分方程式や有限要素式とは多分に異質のものであり, 計算機に掛けさえすれば正しい結果が得られるというものではないことに注意する必要がある。

10. 結 び

燃焼の基礎技術について, ごくかいつまんだ解説を行った. 書き残したことが数多くあり, 説明も不十分なものに終わってしまった. これは筆者の能力の不足にもよるが, 燃焼現象や燃焼技術が複雑で, 限られた紙面で記述し尽くせるものではないことをご理解いただきたい. 一日も早く燃焼の基礎技術が体系化されることを期待して, 筆を置くしだいである。

文 献

- 39) J. M. BEÉR and N. A. CHIGIER: *Combustion Aerodynamics* (1972) [Applied Science Publishers]
- 40) 牧 忠, 山口誉起: 日本機械学会論文集, 35 (1969), p. 1732
- 41) 牧 忠, 山口誉起, 今村孝治: 日本機械学会論文集, 36 (1970), p. 1909
- 42) 高城敏美, 岡本達幸, 北谷好一: 日本機械学会論文集, 49 (1983), p. 1078
- 43) 広瀬靖夫: 工業加熱, 17 (1980) 5, p. 59; 19 (1982) 2, p. 47
- 44) 辻 正一, 浅井 稔: 日本機械学会誌, 73(1970), p. 1014
- 45) 前沢昌武: 日本機械学会論文集, 31 (1965), p. 1689
- 46) 水谷幸夫: 日本機械学会第 562 回講習会教材 (1983), p. 17
- 47) 日本機械学会関西支部: 第 101 回講習会「燃焼のモデリングと数値解析」教材 (1982)
- 48) S. V. PATANKAR and D. B. SPALDING: *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*, 2nd Ed. (1970) [Intertext Books]
- 49) S. V. PATANKAR: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* (1980) [Hemisphere/McGraw-Hill]