CWM 微量噴霧群の燃焼挙動とシミュレーション*

難波 邦彦^{*1}, 木本 恭司^{*1}, 越智 敏明^{*1}Combustion Behavior and Simulation of a Small Amount
of Spray with Coal-Water Mixture

Kunihiko NAMBA, Kyoji KIMOTO and Toshiaki OCHI

The ignition and combustion behavior of a small amount of spray with coal-water mixture (CWM) and that of emulsified CWM were observed in an electric furnace in order to obtain fundamental data in prediction of practical furnace combustion. The experiments were carried out in the furnace temperature range of 973 K to 1 273 K under nozzle pressure of 0.168 MPa to 0.294 MPa. They showed reasonable results such as that the time lag and the location of ignition tend to become shorter at higher furnace temperature under constant nozzle pressure. The data of experimental time lag and the location of ignition were compared with the simulation predictions for each size of CWM droplet under several experimental conditions of both the furnace temperature and the nozzle pressure. The predictions are in rough agreement with the experimental data for the time lag and the location of ignition.

Key Words: Combustion, Slurry, Fuel, Ignition Time Lag, Ignition Location, Simulation, Coal-Water Mixture

1. 緒 言

著者らは、CWM（石炭・水スラリー）単一液滴を熱電対に懸垂、電気炉内に挿入し、その蒸発、着火、燃焼過程について系統的な実験を行ってきた^{(1)~(3)}。また、上記の一連の過程についてシミュレーション計算を行い、液滴の時間的な温度変化、蒸発、着火、チャー燃焼時の温度および時間などの実験結果の傾向をかなり予測できることを示した⁽⁴⁾。しかし、実炉において、これらの結果を用いて予測するには、液滴径が大きすぎることで、熱電対の支持による影響があること、自然対流であることなどの検討すべき点がいくつかある。本研究では、上記の問題を検討するために、有効長さ1mの大形電気炉内の上部に設けた単孔ノズルよりごく微量のCWM、乳化CWM(CWM 80%+C重油 5%+水 15%)を噴霧させ、着火および燃焼挙動を観察するとともにシミュレーション計算を行い、実験結果との比較検討を行った。

2. 主 な 記 号

C_p : 比熱
 D : 拡散係数
 d : 直径
 K : 反応速度
 L : 潜熱 (発熱)
 $M, \dot{M}$: 質量, 質量反応速度
 Nu : ヌッセルト数
 P : 水蒸気分圧
 Re : レイノルズ数
 Sh : シャーウッド数
 T : 温度
 V : 揮発分放出量
 λ : 熱伝導率
 ρ : 密度
 τ : 時間
 添 字
 ch: チャー反応
 O_2 : 酸素
 p : CWM 滴
 v : 揮発分, 揮発
 w : 水分, 蒸発

* 原稿受付 平成4年5月18日。

*¹ 正員, 大阪府立工業高等専門学校 (〒572 寝屋川市幸町 26-12)。

$wv, 0$: 飽和状態, 標準状態

∞ : 炉内

3. 実験装置および方法

電気炉および装置の概要を図1に示す。炉は断面 90×100 mm, 長さ 1 m の長方形炉でシリコニット発熱体と断熱ボードの積層構造となっている。炉は3分割され, 各段に設けられた熱電対とサーモスタットによって温度制御され, 1273 K の常用温度において ± 5 K で設定可能である。前面と背面にはバイコールガラスが二重にはめ込まれ, 内部観察と写真撮影が可能である。CWM はコンプレッサの設定圧力下で噴射制御装置により, 直径 1.5 mm の単孔ノズルから 1 回噴射される。噴射と同時に炉上部の断熱ボード製のシャッタが開閉し, 噴霧は所定温度に設定された炉内に挿入される。噴射開始時刻と液滴の着火時刻および着火位置がビデオ装置 (60 pps) に記録されるので, その解析より着火遅れおよび着火位置がおおよそ判定できる。

表 1 CWM 燃料の性状

Slurry Concentration (%)	68.5
Specific gravity	1.20
Apparent viscosity (cp)	3620
Size-distribution	
<149 μm (%)	92.3
<74 μm (%)	71.6
Gross heating value (kJ/kg)	31100
Ash (%)	1.30
Fixed Carbon (%)	52.3

表 2 原炭の元素分析

C (%)	78.4
H (%)	5.0
N (%)	1.5
S (%)	0.46
O (%)	13.6

図 1 実験装置

実験に用いた CWM 燃料の性状を表 1 に, 原炭の元素分析を表 2 に示す。燃料の混合割合を表 3 に示す。なお乳化 CWM の C 重油 5% と水 15% の添加割合は自然対流における実験結果⁽¹⁾ から激しい破裂を引き起こす条件の割合を選んだ。実験条件を表 4 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 噴霧の粒径分布

噴霧状態の写真の一例を図 2 に示す。シリコンオイルを塗布したガラス面上に各所定圧力下での噴霧を採集し, 噴霧の粒径分布を調べた。顕微鏡写真の一例を図 3 に示す。図 3 より粒子形状はさまざまである。受け止め時の衝撃の影響もあるが, 通常の液体燃料の噴霧とは異なっている。また小さな粒子は水分が抜け, 石炭微粉ではないかと思われる。そこで代表径としては, 一定方向粒径 (グリーン径) を採用し, 各所定圧力下での粒径を測定した。そのヒストグラムを図 4 に示す。図 4 中の Sum は測定した粒子個数である。図 4 中には算術平均粒径 $\bar{d}$ とザウ

表 3 燃料混合割合

Fuel \ content	CWM (wt%)	Water (wt%)	C-heavy oil (wt%)
CWM	100	0	0
Emulsified CWM	80	15	5

表 4 実験条件

Furnace Temperature (K)	1073, 1173 1273, 1373
Nozzle Pressure (MPa)	0.168, 0.196 0.245, 0.294

図 2 噴霧状態

ター平均粒径 (SMD) が書き込まれている。ヒストグラムよりノズル圧力が高いと、大きい粒径が減少していくことがわかる。乳化 CWM についても測定を行い、その粒径分布が CWM の場合と類似していること、およびノズル圧力との関係が CWM と同じであることを確認した。

4・2 噴霧の速度 レーザドップラー流速計を用いてノズル圧力 0.245 MPa (絶対圧) での噴霧中心軸上の速度を測定し、ノズル圧力より計算される初期速度と比較した。図 5 にその結果を示す。ノズル出口直後での測定は不可能であったが、ノズル出口より下流 0.12 m 程度まではノズル圧力より計算された平均値 (15.8 m/s) と測定より求められた平均速度はだいたい一致していることがわかる。なお、図 5 中の実線はシミュレーション計算で用いた炉に入るまでの速度変化を示している。炉入口はノズル出口から 0.253 m である。

4・3 着火・燃焼状況 ビデオ録画より CWM 微量噴霧の着火、燃焼の様子を図 6 に示す。この写真で観察される火炎は、粒径の比較的大きい液滴 (概略 100 μm 程度以上) のものであると考えられるが、写真より液滴が個々に着火、燃焼していることがわかる。乳化 CWM については、炉内温度が高くなると若干燃焼が激しくなっているように思われるが、着火、燃焼挙動について大きな差異は見られない。熱電対による懸垂 CWM の実験とは異なり、この実験では、液滴径が特定できないため、ビデオ観察より噴射から噴霧群先端部が着火するまでの時間 (着火遅れ) とノズル噴出口から着火までの距離 (着火位置) を各所定圧力、炉内温度について整理した。図 7 に炉内温度の影響を、図 8 にノズル圧力の影響を示す。着火あるいは着火後燃焼している時刻・位置を範囲 I で示している。これらは設定された条件下での数回 (5~6 回) の実験結果である。時間経過とともに範囲 I が下方に移動することがわかるが、実験の性格上、ノズルからの距離が長い

所では、着火直後であるか、上部で着火し、落下したものかの判断が困難である。すなわち、小さな噴霧液滴の着火遅れは範囲 I のうちの最も経過時間の短い実

図 4 噴霧の粒径分布

図 5 中心軸上速度

図 3 噴霧の顕微鏡写真 ($P=0.294 \text{ MPa}$)

図 6 着火および燃焼状況 ($T_{\infty}=1273 \text{ K}$, $P=0.294 \text{ MPa}$)

験値の周辺と考えてよいであろう。このような観点から実験値の傾向を見ると、ノズル圧力一定では、自然対流の場合と同様に炉内温度が高くなるほど着火は早くなる。また、その距離も短くなる。炉内温度一定の状態では、ノズル圧力が高くなると、着火遅れは短くなる傾向にある。これはノズル圧力が高くなると、噴射時に液滴径の小さなものが増えるからであろう(図3)。着火遅れと着火位置について、乳化CWMとCWMの比較の一例を図9に示す。CWMの実験値を範囲Ⅰで、乳化CWMの実験値を範囲Ⅱで示している。乳化CWMについても炉内温度とノズル圧力に対する傾向はCWMと同様である。2種の燃料を比較すると、ノ

ズル圧力が低い場合($P=0.196$ MPa)では乳化CWMの着火遅れがかなり短くなるが、ノズル圧力が高い場合($P=0.294$ MPa)では着火遅れの差があまり見られない。着火遅れの差は、乳化CWM特有の水蒸気などによるマイクロ爆発が影響するものと思われるが、ノズル圧力が高くなれば、初速度が速くなり噴霧の粒子径が小さくなるので、影響が現れにくくなるのではないかと考えられる。なお、図9中には5章で行うシミュレーションによる計算結果も書き込まれている。

5. 計算モデルおよび方法

計算については、自然対流下での単一液滴のモデ

図7 着火遅れおよび着火位置(炉内温度の影響)

図8 着火遅れおよび着火位置(ノズル圧力影響)

ル⁽⁴⁾を強制対流に改良し、運動方程式と連立させて計算した。シミュレーションに際しての主な仮定を次に示す。

(1) 液滴は個々に燃焼しており、干渉しあわない。

(2) CWM 液滴内部の温度は一樣であり、生じる現象は球対称とする。

(3) 密度・比熱などの物性値は、液滴内部では均一である。

計算に用いた基礎式を表5に示す。自然対流の実験結果、解析との比較がこのシミュレーションの主な目的であるので、計算にあたっては自然対流の解析で用いた値⁽⁴⁾をそのまま流用した。液滴の炉内挿入後の熱収支から、温度の時間的変化を式(1)より、ルンゲ・クッタ法を用いて計算した。式(1)で熱拡散率 a_p は水分蒸発後、微粉炭の値を0.3倍した値を用い、対流による伝熱量 Q_c [式(2)] については、有炎燃焼期間では火炎からの対流を考慮した [式(3)]。火炎半径 d_{ff} は観察より液滴径の2倍とし⁽⁴⁾、火炎温度 T_{ff} は文献(5)から求めた。放射伝熱量 Q_r [式(4)] で、放射率 ϵ は0.85とした。水分の蒸発潜熱 Q_w [式(5)] の強制対流中の液滴表面からの水分蒸発量 $\dot{M}_w$ については Ranz-Marshall の実験式の Pr 数を Sc 数に置き換えて、式(6)で計算した。式(6)中の $W_{i\infty}$, W_{iw} は炉内、液滴表面の蒸気濃度、 D_v は混合気の拡散係数である。揮発分の放出による潜熱および発熱 Q_v [式(7)] は、着火までは潜熱、着火後は潜熱と発熱の和として考え、実験結果と比較して L_v を決定した。揮発分放出量 $\dot{M}_v$ は一次反応を考え、式(8)⁽⁶⁾で計算した。 V_∞ は十分な時間経過後の揮発分放出量である。着火の条件としては、揮発分の放出量が揮発分全体の0.1%を超えたときとした⁽⁴⁾。乳化CWMについては、含有するC重油によって閉じ込められた水分の急激な蒸発によって破裂が生じ、その直後に着火すること、およびそのとき

の液滴温度は水の飽和温度に近いことが確認されている⁽¹⁾⁽³⁾。そこで着火条件としては、温度が373 Kを超えたときとした。消炎後のチャー燃焼による発熱量 Q_{ch} [式(9)] でチャー反応量 $\dot{M}_{ch}$ は式(10)~(15)⁽⁶⁾⁽⁷⁾で計算した。総括反応速度 K_T [式(11)] は、反応律速による反応速度 K_{CHEM} と拡散律速による反応速度 K_{MT} から求められる。式(11)中の α_A は、水分蒸発後のチャーの内部でも反応が進行することを考慮した増大

表5 基礎式

$\frac{dT_p}{d\tau} = \frac{6 \cdot a_p}{\pi \cdot d_p^3 \cdot \lambda_p} (Q_c + Q_r + Q_w + Q_v + Q_{ch})$	(1)
$Q_c = \pi \cdot d_p^2 \cdot Nu \cdot \frac{\lambda_v}{d_p} (T_\infty - T_p)$	(2)
$Q_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_v}{\left(\frac{1}{d_p}\right) - \left(\frac{1}{d_{ff}}\right)} (T_{ff} - T_p)$	(3)
$Q_r = \pi \cdot d_p^2 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot \left[\left(\frac{T_\infty}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_p}{100}\right)^4 \right]$	(4)
$Q_w = -L_w \cdot \dot{M}_w$	(5)
$\dot{M}_w = \pi \cdot d_p \cdot \rho_a \cdot D_v \cdot (W_{i\infty} - W_{iw}) \cdot (2 + 0.60 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3})$	(6)
$Q_v = L_v \cdot \dot{M}_v$ $\begin{cases} L_v = -1675 \text{ KJ/Kg} & (\tau < \tau_i) \\ L_v = 1000 \text{ KJ/Kg} & (\tau \geq \tau_i) \end{cases}$	(7)
$\dot{M}_v = K (V_\infty - V)$ $K = 2.08 \times 10^4 \exp(-22000/RT)$	(8)
$Q_{ch} = L_{ch} \cdot \dot{M}_{ch}$ $L_{ch} = 10000 \text{ KJ/Kg}$	(9)
$\dot{M}_{ch} = \pi \cdot d_p^2 \cdot K_T$	(10)
$K_T = \frac{1}{1/K_{MT} + 1/\alpha_A \cdot K_{CHEM}}$	(11)
$K_{MT} = -\frac{4.8}{3.2} \frac{D_a \cdot \rho}{d_p} \left(\frac{T_p}{T_a}\right)^{0.75} \frac{\ln(1 - \gamma \cdot f_a)}{\gamma}$	(12)
$K_{CHEM} = K_{CHEM} \cdot [1 + (2/F_R)^{1.5} \times 2] / 3$	(13)
$K_{CHEM} = 8710 \cdot \exp(-17980/T_p) \cdot P_{O_2}$ $(T_p \leq 1500 \text{ K})$	(14)
$K_{CHEM} = (3.85 \times 10^{-4} \cdot T_p - 0.525) \cdot P_{O_2}$ $(T_p > 1500 \text{ K})$	(15)
$M_p \frac{dU_p}{d\tau} = M_p \cdot g - \frac{1}{2} \rho_a \cdot C_d \cdot U_p^2 \cdot A_p$	(16)
$U_p = \frac{dX_p}{d\tau}$, $C_d = \frac{1}{1+B} \cdot C_d$	(17)
$B = C_{Pa} \cdot \frac{T_\infty - T_p}{L_w}$ $C_d = \frac{18.5}{Re^{0.6}}$	(18)

図9 着火遅れおよび着火位置 (乳化CWM との比較)

図 10 計算結果 ($T_{\infty}=1073\text{ K}$, $d_{p0}=0.125\text{ mm}$)

係数で、微粉炭燃焼の数値解析で用いられた $\alpha_A=5$ の値を採用した⁽⁸⁾。式(12)、(13)中の f_m は酸素の質量分率、 F_R は微粉炭の燃料比、 γ は拡散と燃焼の量論係数により決まる値である。式(13)中の K_{CHEM} は式(14)、(15)で計算されるが、実験結果との比較から、最高温度到達後は温度一定として計算した。

式(16)は式(1)と連立する落下の運動方程式である。式(16)中の液滴断面積 A_p は、落下時の液滴の変形を考慮して液滴径を真球の 1.1 倍と仮定した。また、 C_D は抗力係数で蒸発を伴うため、式(17)で計算した⁽⁹⁾。また、 g は重力の加速度、 U_p 、 X_p は液滴の速度と落下距離を示す。

6. 計算結果および考察

6.1 着火遅れおよび着火位置 着火遅れと着火位置の関係について予測値と実験値の比較検討を行った。図 7～9 中の○印は、その下に記入されている直径を用いて計算した着火時刻と位置で、実線は CWM の予測値、破線は乳化 CWM の予測値を表している。実験値を予測値と比較すると、粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下の液滴に相当するものは存在していない。現象としては非常に小さい液滴は、噴射後直ちに急激な水分蒸発によって石炭微粉となり(図 3)、火の粉のように光るのが観察される。また急激な破裂により生じる微粉もあると思われる。一方、粒径の比較的大きい液滴(概略 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度以上)については、前述のように単独で着火、燃焼するので、本報ではこのような液滴を計算対象とした。予測値を実験値と比較すると、実験結果におけるノズル圧力と炉内温度の関係を定性的にはあるが、うまく表している。また、定量的にも炉内温度あるいはノズル圧力が高くなる(実炉での噴霧に近い状態になる)ほど、予測値は実験値に近づくことがわかる。また、図 9 について、実験値においては、乳化 CWM

は CWM に比べてかなり早く着火しており、破裂が生じているという前提で計算した予測値においても、その違いは明らかである。しかし、乳化 CWM について、実験条件によっては予測値と実験値について差異が見られるのは、粒径の違いによる破裂の有無、あるいはその強度の違いが実験値に大きなばらつきを与えるためであると考えられる。

6.2 温度変化 図 10 に液滴の温度 T_p 、落下距離 X_p 、速度 U_p 、質量 M_p の変化についての計算結果の一例を示す。温度変化については、自然対流下での単一液滴の計算結果も破線で書き込んでいる。 T_p の変化を比較すると、自然対流に比べて強制対流では蒸発時間が短く、蒸発終了後の温度上昇が急激で早く燃え尽きることがわかる。 X_p はノズル先端よりシャッタ入口まで速度が一定であることから直線的に増加し、その後、抵抗の増大で増加は鈍る。 U_p については、炉内に入ると急速に減速することがわかる。

7. 結 言

(1) 炉内温度を変化させた場合の着火遅れおよび着火位置の実験結果の傾向は、自然対流場での単一液滴の実験から類推されるとおりである。また、ノズル圧力に対しては圧力が高くなるほど、小さな液滴が増えるため、着火遅れは若干短くなる傾向にある。

(2) 自然対流場で着火のシミュレーションに用いた諸数値によって、強制対流場での CWM 噴霧液滴の着火遅れおよび着火位置についても、ほぼ妥当な予測ができた。

本研究の実験装置は、昭和 63 年度文部省科学研究費補助金(一般研究 C)の助成を得たものであることを記し感謝申し上げます。また、レーザ流速計による噴霧速度測定に協力していただいた神戸大中島研究室、本研究に熱心に取り組まれた橋本 昇、岡本和男、松元健一君に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 難波・ほか 2 名, 機論, 58-548, B(1992), 1221.
- (2) 難波・ほか 2 名, 第 26 回燃焼シンポジウム前刷集, (1988), 233.
- (3) 難波・ほか 2 名, 第 27 回燃焼シンポジウム前刷集, (1989), 59.
- (4) 難波・ほか 2 名, 機論(関西支部), NO. 904-2(1990), 6.
- (5) 水谷, 燃焼工学, (1977), 32.
- (6) Mitchell, J. W. and Tarbell, J. M., *AIChE J.*, 28-2(1982), 302.
- (7) 加藤・ほか 3 名, 機論, 49-437, B(1983), 233.
- (8) 今中・ほか 4 名, 第 27 回燃焼シンポジウム前刷集, (1989), 65.
- (9) シガー(田中訳), 燃焼の空気力学, (1976), 166, 日本熱エネルギー技術協会.