蒸発および燃焼中の CWM 液滴の表面温度測定*

松江孝博^{*1}, 新井雅隆^{*2}, 廣安博之^{*3}Measurement of the Surface Temperature of a CWM
Droplet during Evaporation and Combustion

Takahiro MATSUE, Masataka ARAI and Hiroyuki HIROYASU

A single CWM droplet was suspended in a hot air stream by a fine *R*-type thermocouple. The surface temperature of this evaporating and burning droplet was measured by a radiation thermometer. The emissivity of the CWM droplet surface was kept at around 0.98 until the char combustion of the droplet proceeded to its middle stage. In the later stage of the char combustion, the emissivity decreased gradually to 0.82. Several degrees of temperature difference between the center and the surface of the droplet remained at the dry-up time, even when the diameter of the droplet was reduced to 2 mm. The surface temperature at the start of char combustion was 700 K when the droplet was exposed in surroundings of less than 900 K. However, the surface temperature at the start increased from 700 K in surroundings where its temperature exceeded 900 K. When the surroundings were 650 K, the surface temperature at the char combustion start was 700 K and higher than the surroundings, and the center temperature of the droplet was higher than that of the surface, which suggested that slow exothermic reactions in the droplet were already initiated before the char combustion started.

Key Words: Coal, Pulverized Coal, CWM, Droplet, Combustion, Emissivity, Dry-up, Char Combustion

1. ま え が き

微粉炭と水とを混合して作られる CWM などの微粉炭スラリー燃料は、液体燃料として取扱うことができるため、重質油の代替燃料として注目されている。このため、実用炉での燃焼研究⁽¹⁾⁽²⁾のほか単一液滴による燃焼の基礎研究⁽³⁾⁽⁴⁾なども数多く行われている。

微粉炭スラリー液滴の燃焼では、単なる液滴燃焼とは異なり表面に灰分の層が形成されるため、燃焼後期における燃焼特性がこの灰分層の影響を受けることが知られている⁽⁵⁾。灰分層の性状は雰囲気や表面温度によって異なるため、灰分層とチャー燃焼の関係を詳細に議論するためには、まず CWM 液滴の表面温度を測定する必要がある。ところが熱電対を CWM 液滴の表面に接触させた状態に保って表面温度を測定することは困難であるため、その計測例は見当たらない。また、燃焼する CWM 液滴群の表面温度を二色法により非接触で測定した例⁽⁶⁾もあるが、CWM 液滴の着火や燃焼の形態と結び付けた研究は行われていない。

そこで本研究では、非接触で測定可能な放射温度計を用いて、高温雰囲気中で蒸発および燃焼する CWM 液滴の表面温度を測定した。ここでは乾燥終了およびチャー燃焼の開始時の表面温度、表面温度と熱電対で測定した中心温度の関係などについて報告する。また、可能な限り初期直径の小さい CWM 液滴による実験も行い、CWM 液滴の蒸発と燃焼を初期直径の大きい場合に特有な現象と一般性のある現象に分離することを試みる。

2. 実験装置および方法

2・1 高温空気発生炉と液滴懸垂用熱電対 本研究に使用した実験装置のうち、高温空気発生炉の上部に設けた測定部の概略を図 1 に示す。測定部に流出する高温空気の流速 V は、直接測定することが困難であるため、常温下で炉に供給する空気量を求め、それを高温空気温度による体積補正を施して求めた。液滴は測定部の外部で懸垂用の熱電対に付着させ、液滴径を確認した後、熱電対を矢印の方向にスライドさせて高温気流中にさらした。表面温度の測定位置は液滴の側面であり、放射温度計は液滴から水平方向 100 mm の位置に設置した。

中心温度を測定するため CWM 液滴は熱電対に懸

* 平成元年 12 月 4 日 第 27 回燃焼シンポジウム(福岡)において講演, 原稿受付 平成 3 年 3 月 18 日。

*¹ 正員, 広島工業大学 (〒731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1)。

*² 正員, 群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町 1-5-1)。

*³ 正員, 広島大学工学部 (〒724 東広島市鏡山 1-4-1)。

垂するが、このために製作したリング形状の熱電対を図2に示す。各種線径の熱電対で同一径の液滴の温度測定を行った結果、大きな差はなかった。このことから、今回使用した熱電対は線径0.3 mmのR形のものを用い、ビデオで観察しながら液滴が球形となるようにリングの形状を決定した。また温度測定は同一条件で5回程度行い再現性があることを確認した。燃焼後の灰の内部の観察結果から、温度測定部が液滴のほぼ中心に位置していることも確認した。

太平洋炭から作成した微粉炭は粒径が75 μm 以下の粒子が70%を占める。今回はそれと水を混合して得られるCWMのみを使用し、その濃度 ϕ はCWM全質量に対する微粉炭の質量割合とした。本報における主要なデータは、直径3.4 mm、濃度0.45のCWM液滴を流速0.5 m/sの高温空気中にさらした場合について得られたものである。なお、この条件で観察されるCWM液滴の挙動は以前の実験⁷⁾から同じ温度の高温壁面上での挙動に近いことが明らかにされている。

2・2 放射温度計の検定 使用した放射温度計はミノルタカメラ製のIR-0506 C形である。この放射温度計は、0.5 s間のCWM液滴からの放射エネルギー量を積算し、その間の平均温度を出力するものである。この放射温度計を用いてCWM液滴の表面温度を測定する場合、測定可能な最小面積を確認する必要がある。また、高温空気内で計測するために、周囲の温度の影響についてもその影響が及ばないことも確認しておく必要がある。そこで、図3に示すように表面温度

図1 実験装置

図2 液滴懸垂および中心温度測定用熱電対

と放射率が既知の発熱体によって、放射温度計の検定を行った。

温度 T_w の壁面前方20 mmの位置に直径 D の銅線を置き、それを通電加熱して発熱体とした。なお、壁面および発熱体にR形熱電対をセラミックボンドでそれぞれの表面に固定した。数種類の径の発熱体の表面温度 T_{hs} を熱電対で測定した。同時に発熱体から100 mm離れた位置で放射温度計を矢印方向に移動することにより、発熱体とその周囲の温度を測定した。放射温度計の焦点が発熱体から横にずれているときは、後方の壁の温度 T_w を示すが、焦点が発熱体の中心に近づくにつれ、放射温度計の温度は発熱体の表面温度に近づく。発熱体の中心付近では、放射温度計は一定の温度を示すようになり、その温度は熱電対の指示温度と一致する。そこで、放射温度計の指示温度が、発熱体の温度 T_{hs} の95%以上になる範囲をここでは測定可能範囲とし、この幅を $H_{0.95}$ と表した。

数種類の径の発熱体を用い、前述した定義の測定可能な範囲を求めた結果を図4に示す。発熱体の直径が減少するにつれ測定可能な範囲は直線的に減少する。

図3 放射温度計の空間分解能の検定

図4 放射温度計の測定可能範囲

図4の結果から、直径0.7 mm以上の発熱体については、放射温度計の焦点を発熱体の中心軸にあわせれば、正しい温度が測定できることが明らかになった。検定に使用した発熱体は円柱状であり、測定対象とする液滴は球体であるが、液滴の直径が2 mm以上であるため、面の曲率の影響がさほど大きいとは考えられない。したがって、図3に示した配置の装置により、CWM液滴の表面温度の測定は十分可能であるとの結論に達した。

2.3 放射率の決定 放射温度計でCWM液滴の表面温度を測定する場合では、まず、CWM液滴の放射率を決定する必要がある。そこで、初期径の大きいCWM液滴が蒸発および燃焼中に径変化が比較的小さく、熱電対の取付けも容易であることに注目して、直径6.0 mmの液滴表面に接点が加熱中に液滴表面から離れないように熱電対を設置した。それを空気温度750 K、気流速度0.5 m/sの高温空気内に懸垂して、熱電対による表面温度と放射温度計の指示値が一致するように放射率を決定した。

図5は横軸にCWM液滴の表面温度をとり、高温空気内に液滴を挿入してから燃焼終了までの放射率の変化を燃焼の進行にともなって追跡した結果である。図5中、Dry Upは水分の乾燥終了、C.C.SとC.C.Eはチャー燃焼の開始と終了、D.C.SとD.C.Eは分解燃焼の開始と終了を示している。この結果によれば、チャー燃焼が開始してからしばらくの間までは放射率が0.98であるが、分解燃焼の期間を中心に放射率が増大する期間がある。分解燃焼中は液滴が火炎に包まれているため、ここでの増大は火炎からのふく射の影響によるものと考えられる。分解燃焼の終了後の放射率は再び0.98に戻るが、チャー燃焼の終了近くで徐々に小さくなる。チャー燃焼が終了して表面がすべて灰に覆われると、放射率は0.82に落ち着き一定となる。

図5 CWM液滴の表面温度と放射率

燃焼の進行にあわせて放射率を変えていくことは、実際の測定では困難であるため、チャー燃焼の途中までは放射率を0.98のまま計測を行い、その後放射率を0.82に切替える方法が考えられる。図6はこの方法を検討するため直径6.0 mmのCWM液滴の表面温度を放射率0.98で計測した場合と0.82で計測した場合の両者を、表面に設置した熱電対による測定値と比較した例である。

放射率を0.98とした場合の結果を熱電対の結果と比較すると、チャー燃焼の途中までは両者はほぼ一致するが、その後は熱電対の値のほうが高い温度を示し、チャー燃焼の終了時では放射率を0.82にした場合と一致している。また分解燃焼の期間を中心に若干のずれも見られるが、これは火炎の影響と思われる。この結果から、最高温度を示した後に放射率を変更し、チャー燃焼後期の温度を図6中の破線で示したように滑らかな曲線で近似すれば、放射温度計で測定した温度は全体として熱電対の指示温度に近づくと予想される。

今回の報告で問題とする温度は主にチャー燃焼の途中までの温度であり、このような近似を行っても不都合は生じない。そこで、以後の測定においてチャー燃焼の終了直前で放射率を切替え、表面温度の破線のように近似することにした。

3. 測定結果および考察

3.1 液滴表面温度の測定 流速0.5 m/sの高温空気内に懸垂したCWM液滴の表面温度 T_s の変化を種々の雰囲気温度 T_a のもとで計測し、その結果を横軸に経過時間をとって示したのが図7である。雰囲気温度が700 Kの場合ではチャー燃焼の開始は遅いが、そのときの表面温度も約700 Kであり、雰囲気温度にほぼ等しい。また、チャー燃焼の開始により表面温度

図6 放射温度計と熱電対による指示温度の比較

図 7 表面温度の変化と燃焼状態の比較

は急激に上昇し、分解燃焼が開始されるが、このときの表面温度は約 1050 K になっている。チャー燃焼の開始時の表面温度は、雰囲気温度が 900 K まではほぼ 700 K に保たれ、その後は雰囲気温度とともに上昇する。分解燃焼の開始時の表面温度は雰囲気温度の増加にともない低下する傾向にあるが、雰囲気温度が 900 K から 1000 K に増加する場合では若干増加の傾向を示し、チャー燃焼の開始温度に近づく傾向にある。

懸垂用の熱電対で測定した CWM 液滴の中心温度 T_c と放射温度計で測定した表面温度 T_s を雰囲気温度 650 K で比較した結果が図 8 である。図 8 中の白丸の測定点は放射率を 0.98 とした測定点、黒丸は放射率を 0.82 に変更した後の測定点であり、前述したように、両測定点をなめらかにむすぶ近似曲線で表面温度を表している。

CWM 液滴を高温雰囲気内に懸垂すると、液滴表面温度と中心温度は液滴内に含まれる水の沸点までまず上昇する。水の蒸発中は両温度は等しく、しばらくは一定温度に保たれる。この間の CWM 液滴をビデオカメラで観察した結果、表面は光沢をおびた状態であった。その後両温度は上昇を開始するが、中心温度の上昇開始は表面温度よりもやや遅れる。本研究では、チャー燃焼および分解燃焼の開始と終了は、目視による液滴表面の赤熱の開始と終了および液滴周囲の火炎の発生と消滅を定義している。また、乾燥終了を、ビデオカメラで観察した CWM 液滴の表面が光沢を失うときとしている。この時点と温度変化を対応させた結果、乾燥終了は中心温度が上昇を再開する時点に一致していることが明らかになった。

雰囲気温度は 650 K であるが、チャー燃焼の開始時の表面温度は約 700 K であり、この時点に達する前に中心温度は表面温度を超えている。すなわち、雰囲気

 図 8 中心温度と表面温度の比較 ($T_a=650$ K)

 図 9 中心温度と表面温度の比較 ($T_a=1000$ K)

温度である 650 K を超える温度は、まず CWM 液滴の中心に出現した後表面にまで波及し、表面が 700 K を超えると、目視観察によるチャー燃焼が開始する。このことは目視観察によるチャー燃焼開始以前に CWM 液滴の内部で発熱反応が開始していることを示唆している。中心温度が表面温度を超える時点からこの発熱反応が発生すると考え、そのときの温度を図 8 から読取ると、およそ 500 K であり、相当低い温度から液滴内部で発熱反応が開始されていると考えられる。

チャー燃焼の開始により中心および表面の両温度とも急激に上昇する。また、この急上昇の途中で分解燃焼が開始する。短時間の分解燃焼の後、両温度とも最高値に達する。中心部が最高温度に達する時刻は表面より若干遅れるが、この最高温度は表面の最高温度より 160 K 程度高くなっている。このことは発熱反応は前述したとおり CWM 液滴の中心から開始されるが、チャー燃焼自体は液滴の表面から内部に向かって進行していくことを示している。

図 9 は雰囲気温度が 1000 K の場合について中心と

表面の温度の変化を示したものである。雰囲気温度が 650 K の場合と異なり、中心より表面の温度が高い状態が分解燃焼の終了付近まで維持される。これは雰囲気温度が高いため、内部で発熱反応が引き起こされる以前に表面からチャー燃焼が開始したか、仮に発熱反応が発生して中心の温度上昇が起きても、それ以上の速度で表面温度が上昇したことを示している。

3.2 チャー燃焼の開始時刻と開始温度 CWM 液滴を高温雰囲気中に懸垂したときを基準とし、チャー燃焼の開始時刻を τ_{ccs} 、中心温度および表面温度が雰囲気温度と等しくなる時刻を $\tau_{Tc=Ta}$ と $\tau_{Ts=Ta}$ とし、種々の雰囲気温度で図 10 のように三者を比較した。雰囲気温度が 700 K より低い場合では、まず中心続いて表面の温度が雰囲気温度と等しくなり、その後、チャー燃焼が開始する。一方、雰囲気温度が 700 K より高い場合ではチャー燃焼の開始が最初に見られ、その後、表面温度から先に雰囲気温度に等しくなっていく。

チャー燃焼の開始時の CWM 液滴の中心および表

図 10 CWM 液滴が雰囲気温度に達する時刻とチャー燃焼開始時刻の関係

図 11 チャー燃焼開始時の温度

面温度は、図 11 に示したように雰囲気温度により変化する。チャー燃焼開始時の中心温度は、雰囲気温度が 700 K より低い場合は雰囲気より高いが、雰囲気温度が 700 K を超えると低下する傾向にある。一方、雰囲気温度が 900 K 付近までは表面温度は 700 K であり、さらに雰囲気温度を高めると、チャー燃焼開始時の表面温度は高くなる傾向にある。乾燥終了からチャー燃焼の開始までの中心と表面のそれぞれの平均の温度上昇率を求めてみると、図 12 のようになる。温度上昇率は両者とも雰囲気温度が 900 K に近づくとき急激に高くなり、この温度を境にしてチャー燃焼の開始に至るまでの加熱の機構が異なることを示している。

乾燥終了時における液滴の写真を図 13 に示す。雰囲気温度が 650 K の場合では表面は滑らかな状態である。ところが、雰囲気温度が 1000 K の場合では表面に空気の吹き出したあとと見られる気孔が観察される。雰囲気温度が高い場合では図 9 に示した温度変化から明らかなように、表面がまず乾燥し、その後中心部が乾燥して CWM 液滴の乾燥終了に至る。中心部に存在した水分は蒸発後乾燥した表面を突き破って吹き

図 12 乾燥終了後の温度上昇率

図 13 乾燥終了後の CWM 液滴の表面状態

出すようになり、その結果、表面に気孔ができたと解釈できる。雰囲気温度が900 K以上で温度上昇率が図12に示すように急激に高くなることは、この気孔の存在により乾燥後のCWM液滴と雰囲気との実質的な接触面積が増加したためと考えられる。

3・3 チャー燃焼の開始形態 以上の結果からCWM液滴のチャー燃焼の開始の状態は雰囲気温度によって次の3形態に分けることができる。雰囲気温度が700 K以下の場合では液滴中心部の発熱反応によって液滴表面が700 K以上に加熱された後、チャー燃焼が開始される。雰囲気温度が700 Kから900 Kの範囲では雰囲気によって表面がすばやく加熱され、表面温度が700 Kを超えるとチャー燃焼が始まる。言い換えると表面温度が雰囲気温度に達する以前からチャー燃焼が開始されている。

雰囲気温度が900 Kを超えた場合では表面温度は中心温度に先行して急速に上昇し、チャー燃焼の開始温度は700 Kより高くなり雰囲気温度に近づく。この場合でも表面温度が700 Kを超えると表面の一部はチャー燃焼が開始していると考えられる。しかし、チャー燃焼が開始されても気孔が存在しているため、それが表面全体に行き渡るのに若干の時間が必要であり⁽⁷⁾、その間の温度上昇も急激であるため、CWM液滴全体がチャー燃焼を開始する表面温度は図11のように高くなったものと考えられる。また、雰囲気温度が900 K以上の場合では分解燃焼がチャー燃焼とほぼ同時に開始されることから⁽⁸⁾、チャー燃焼開始直前においてもCWM液滴から可燃成分の吹出しがあると考えられる。この吹出しは表面近傍の酸素濃度を低下させる要因となるため、これにより、チャー燃焼開始温度が上昇していることも考えられる。

3・4 初期液滴径の影響 初期液滴径を変化させた場合の乾燥終了時およびチャー燃焼開始時の中心および表面温度を雰囲気温度が800 Kの場合について図14に示す。チャー燃焼開始時の液滴表面温度は初期直径によらず約700 Kで一定値を示す。これは液滴径の大小によらず表面が一定温度に達すると、チャー燃焼が開始されることを示している。中心温度は液滴径が約2 mm以下の場合では表面温度に一致する傾向にあるが、液滴径が大きくなると低下する。これは液滴径が大きいと、内部が十分加熱されないうちにチャー燃焼が始まることを示している。乾燥終了時の中心温度はほぼ373 Kで一定である。初期直径が大きい場合には乾燥終了時の表面温度は中心温度より高く、径が小さくなるにつれ中心温度にわずかながら近づいていく。しかし、チャー燃焼開始時と異なり、液滴が2 mm

の場合でも80 K程度の温度差が存在している。

図14から微小液滴の場合を単純に外挿すると、50 μm 程度の初期直径の場合でも20 K程度の温度差が乾燥終了時に存在することになる。また、雰囲気温度が高い場合ではこの温度差は大きくなることが予想される。したがって、実際の炉内燃焼の場合でも、図13に示した気孔が中心と表面との乾燥終了時の温度差によって形成されていると推定される。この結果は初期直径の減少とともに乾燥終了時に表面がち密になり、また、液滴径の収縮率が高くなるという以前の測定結果⁽⁸⁾と一見矛盾している。しかし、以前の結果は雰囲気温度が低く、温度差のできにくい条件であること、また、液滴径が小さいと表面張力の影響が大きくなり、気孔からガスを噴出しながら乾燥期間中に収縮する可能性のあることを考慮すれば、矛盾した結果ではなく、微小液滴の場合でも気孔が存在することを示唆している。

初期直径が小さいと加熱がすみやかに行われるため、内部での発熱反応はチャー燃焼開始以前ではおこりにくいと考えられる。したがって、微細なCWM液滴群の燃焼形態としては、本実験で雰囲気温度が700 K以上の場合に見られた形態が主となり、チャー燃焼の開始時に中心温度のほうが表面温度より高くなる現象などは出現しないと考えられる。このことは、以前に報告したCWM液滴を着火させる最低雰囲気温度が液滴径の減少とともに上昇する結果⁽⁸⁾とも対応している。また、高温雰囲気中でチャー燃焼開始時の表面温度が上昇している現象も大粒径のCWM液滴に特有の現象と考えられる。

4. ま と め

放射温度計と熱電対を用いて、高温雰囲気中に懸垂

図14 乾燥終了およびチャー燃焼開始温度の初期液滴径による変化

したCWM液滴の表面と中心温度を測定した結果、次の結論を得た。

(1) チャー燃焼の途中まではCWM液滴の放射率を0.98とし、チャー燃焼の後半から放射率を0.82に変更することで、CWM液滴の表面温度を計測することができた。

(2) 乾燥終了はCWM液滴の中心温度が水の沸点を超える時点と一致する。

(3) 乾燥終了時に表面温度が中心温度より高くなる傾向にあり、これが内部の水蒸気の噴出による気孔を表面に形成する原因となる。

(4) CWM液滴内部の発熱反応は500 K付近から開始されている。

(5) チャー燃焼の開始時の表面温度は約700 Kであるが、雰囲気温度が900 K以上の場合ではチャー燃焼の開始温度が高くなる傾向が見られる。

(6) 雰囲気温度が前述のチャー燃焼開始温度以下でも着火することがある。この場合でも着火時の表面温度は約700 Kであり、中心の温度はさらに高いことが明らかである。

なお結論(5)の後半と(6)は、考察の結果、実験に

使用したCWM液滴が3.4 mmと大きいために現れた現象であり、微小液滴の場合では出現しないと考えられる。

今回使用した微粉炭は、バブコック日立(株)呉研究所から供給を受けたものであることを記し謝意を表す。

文 献

- (1) Walsh, P. M., Zhang, M., Farmayan, W. F. and Beer, J. M., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1984), 1401.
- (2) Mchaler, E. T., Scheffee, R. S. and Rossmessl, N. P., *Combust. Flame*, **45** (1982), 121.
- (3) Fu Wei-Biao, Wei Jing-Bin, Han Hong-Qiao and Zhang Yan-Ping, *Combust. Sci. Technol.*, **43** (1985), 67.
- (4) Sakai, T. and Saito, M., *Combust. Flame*, **51** (1983), 141.
- (5) Kawaguchi, O. and Noto, T., *Proc. 21st Symp. (Int.) Combust.* The Combustion Institute, (1988), 97.
- (6) Timothy, L. D., Sarofim, A. F. and Beer, J. M., *Proc. 19th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1982), 1123.
- (7) 松江・新井・廣安, 機論, **56**-528, B (1991), 2476.
- (8) 松江・新井・廣安, 機論, **57**-533, B (1991), 373.