

石炭スラリー燃料の着火・燃焼特性に関する研究 (I)

(高温壁面における挙動)

堀 昭三*, 澤 則弘*

(平成3年8月31日受理)

A Study on the Ignition and Combustion Characteristics of Coal Slurry Fuels (I) (Behaviors on a Hot Surface)

Shozo HORI* and Norihiro SAWA*

ABSTRACT—Coal slurry fuel as alternate petroleum fuel for IC engines have attracted is interested recently. However, the compound fuel showed complicated fluidities and combustion characteristics, as which were not seen in the single fuel.

In order to use coal slurry fuel for heat engines, in this paper, we described an experimental study to make clear the fundamental properties, that is, behaviors of evaporation, ignition, combustion on hot surface of CWM (coal water mixture), CMW (coal methanol mixture) and COM (coal oil mixture) fuels. Moreover, we showed the effects of surfactants on them.

1. まえがき

石油系燃料の代替として石炭の有効利用が考えられ、石油と石炭の中間的燃料として石油に微粉炭を混入した、いわゆる石炭スラリー燃料が注目され、ボイラー用燃料として実用化されている。また、内燃機関用燃料としての評価に関しても、実用機関を用いた研究が活発に進められている⁽¹⁾。

しかし、かかる複合燃料は単一燃料では見られない複雑な流動特性や燃焼特性を示すので、その挙動の詳細な解明はなされていないといえる。一般に熱機関において燃料は噴射によって微粒化されたのち、加熱、蒸発、着

火、燃焼をする。この燃焼機構には、高温壁面に接触して燃焼するものと、高温空气中で燃焼をするものとが考えられる。

本研究では、石炭スラリー燃料を熱機関に適用するため、その基本的特性を解明する目的で、CWM (Coal Water Mixture), CMM (Coal Methanol Mixture) およびCOM (Coal Oil Mixture) 燃料の3種類について、まず高温壁面における蒸発、着火、燃焼などの挙動および界面活性剤を添加したときの影響について、壁面温度と燃料の組成割合を変えて調べたので報告する。

*茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

2. 実験装置および実験方法

2.1 供試燃料

供試燃料は、ボールミルで200メッシュ通過量が80%前後に粉砕した太平洋炭（工業分析揮発分47.1%，固定炭素40.5%，水分6.3%，灰分6.1%），蒸留水，工業用メタノール（純度99.3%，JIS K 1501），A重油（JIS K 2205，1種2号）および界面活性剤（CWMに東亜合成化学工業(株) アクリルポリマーA-6340，2%とCMMに第一工業製薬(株) ACOM 202，2%）を用い，それぞれ混合して作り，代表例として供試COM燃料の流動特性（絶対粘度～剪断速度）および分離度の変化をFig. 1およびFig. 2に示す。

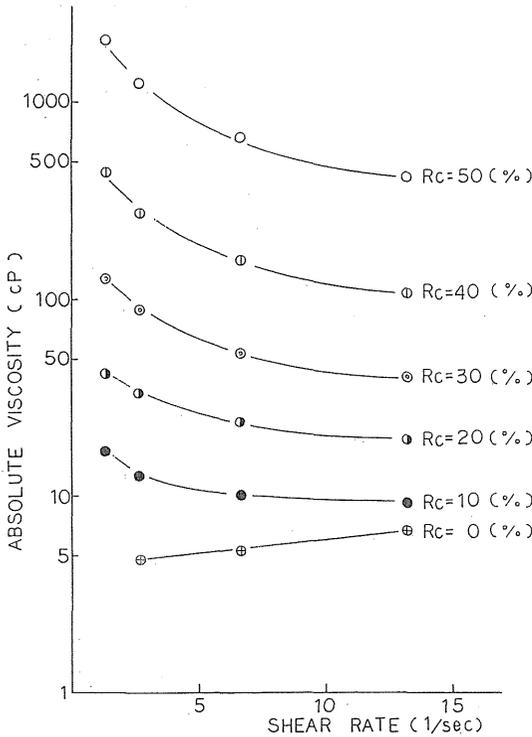


Fig. 1 γ - η Curve of COM Fuels

2.2 実験装置および実験方法

実験装置は，Fig. 3に示すように自作の熱板炉，液滴落下装置（1 ml注射器），デジタル温度計（K熱電対），デジタルストップウォッチ（1/100秒），デジタル天秤（感量1mgf），ホモミキサーなどから構成されている。なお，加熱板上の雰囲気温度分布はFig. 4のとおりである。

Rc (%)	airn (mgf)	t (sec)	x (mm)
10	762.0	21.4	6.0
20	762.0	22.0	6.0
30	762.0	22.0	6.0
40	762.0	22.0	6.0

- Rc=50 (%)
- Rc=40 (%)
- Rc=30 (%)
- Rc=20 (%)
- Rc=10 (%)

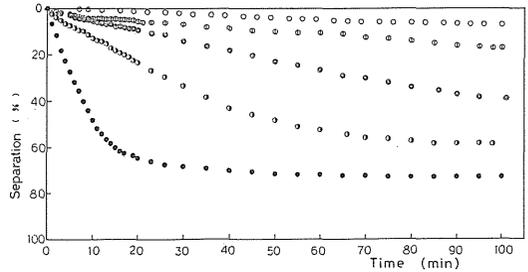


Fig. 2 Separation Curve of COM Fuels vs. Lapse of Time

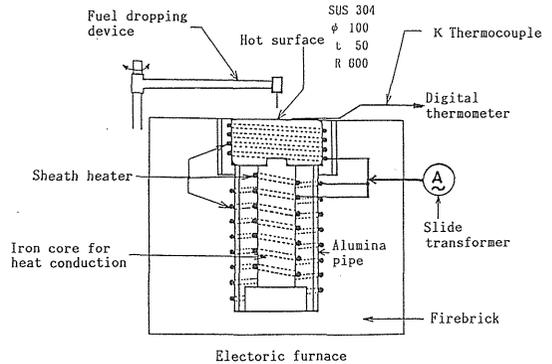


Fig. 3 Experimental Apparatus

実験方法は，熱板炉を加熱し，予定温度に熱板表面が達したら，あらかじめ調製しミキサーで攪拌しておいた試料を30mmの高さから液滴として落下させ，蒸発あるいは燃焼が終わるまでの時間をストップウォッチで測定しつつ，挙動を観察した。代表的なものについては高速度ビデオ（400コマ/秒）で録画し，スロー再生して挙動解析の助けとした。このような一連の実験を石炭含有率 Rc（重量%）0，10，30，50%について実施した。

液滴の平均重量はCWM燃料では21.21，CMM燃料では7.11，COM燃料では8.73mgfであった。

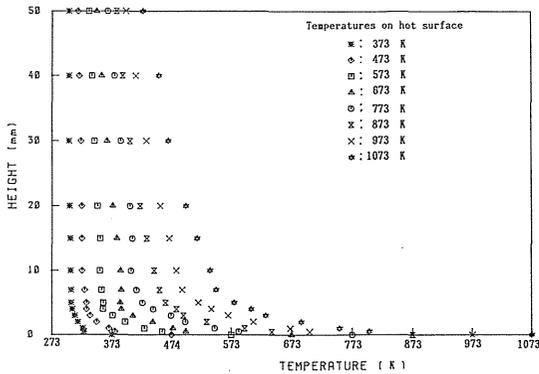


Fig. 4 The Height Direction Distributions of Temperature on Hot Surface

3. 実験結果および考察

3.1 CWM燃料の挙動

石炭スラリー燃料液滴の加熱壁面上における蒸発の基本的挙動は、水滴の蒸発曲線（寿命曲線）と類似している。

CWM燃料を作成するにあたって安定化を増すため界面活性剤（アクリルポリマーA-6340）を利用したので、その影響も調べ、Fig. 5に示す。図において、壁面温度が比較的低い領域（ $t_w < 350\text{K}$ ）では、液滴中の水分が徐々に蒸発し石炭分が加熱壁面上に残る。これが核沸騰の始まる370K付近から最小蒸発時点の470K付近までの加熱壁面温度領域では、図中（A）に示すように時間経過とともに含有水分の核沸騰が始まり、やがて小爆発を誘発し、微細粒が周囲に飛散する。次いで微細な液滴中の水分が蒸発し、後に石炭が残る（例えば図中a→b）。この現象は加熱壁面温度が高くなるほど顕著である。しかも、石炭含有率Rcにより若干異なり、図中（A）に示すようにRc=10%の場合にはほとんど飛び散るが、30%、50%とRcが大きくなるに連れて含有水分が少なくなるので石炭粒は一定の位置に集まり、クレタ状の穴ができる。この加熱壁面温度領域では、蒸発時間に対するRcの影響が比較的小さいといえる。これに界面活性剤（A-6340 2%）を添加すると、残留石炭粒の表面にその残留物による光沢をもった皮膜が生ずる。最小蒸発時点（c）から600K付近（赤熱無炎燃焼が始まる）までは、図（B）に示すように蒸発挙動はライデンフロスト現象状態であり、水分の蒸発が終ると石炭粒が残る。この場合界面活性剤を加えると、内部に空洞

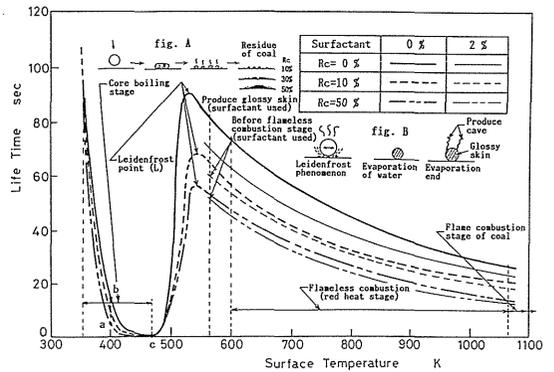


Fig. 5 Life Time and Combustion of CWM Fuels on Hot Surface

ができ光沢のある皮膜がまくれ上ってくる。ライデンフロスト（L）点の寿命時間は、Rcが高くなるに連れて水分が少なくなるので短くなる。さらに、加熱壁面温度が高い領域（ $t_w = 600 \sim 1070\text{K}$ ）では主として石炭中の揮発成分の燃焼、いわゆる赤熱無炎燃焼を起し、壁面温度が高いほど、Rcが大きいくほど寿命時間は短くなる。この場合界面活性剤を加えると、皮膜ができるので燃焼開始は遅れるが、寿命時間はむしろ少し短くなる。また Rc=0%（水と界面活性剤）のときでも870K付近で残留物（界面活性剤）が赤熱無炎燃焼するのが見られる。さらに加熱壁面温度が高く1070K以上になると石炭分の有炎燃焼が始まる。このようなCWM燃料の燃焼挙動を詳細に観察したのがFig. 6（Rc=30%）である。L点以後から赤熱無炎燃焼を開始する温度までの間（ $t_w = 470 \sim 600\text{K}$ 付近）では、たとえば $t_w = 600\text{K}$ の加熱壁面にCWM燃料液滴を落下させると（a点）、液体分が順次蒸発し、b点で液体分の蒸発がほぼ終る。さらに時間が経過すると残りの石炭球から煙が発生する。やがてc点に達すると赤熱無炎燃焼を開始し、石炭球全体が発光するが、火炎は認められない。その後、発光は消滅し、いわゆる赤熱無炎燃焼は終了する（d点）。このa～d間の時間がFig. 5に示した寿命時間に相当する。この赤熱無炎燃焼が起きる加熱壁面温度は590～610K程度で、Rcが大きくなるほど低温で生ずる。これは水分量と残留石炭球の大きさに起因し、水分量が少なく、残留石炭球が大きいものほど、着火し易いことを意味している。赤熱燃焼開始時間（c点）と終了時間（d点）は、ともに加熱壁面温度の上昇に伴い短くなっている。また、赤熱燃焼継続時間は加熱壁面温度上昇に伴って短縮するが、加

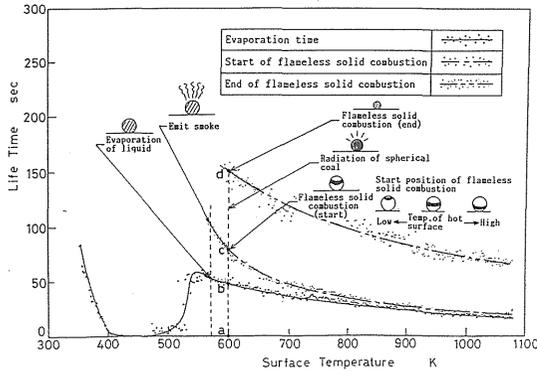


Fig. 6 Combustion Forms and Life Time of CWM Fuels on Hot Surface

熱壁面温度が同じならRcに比例する筈であるが、Rc=50%はRc=10%の3倍程度である。赤熱無炎燃焼領域における燃焼挙動は、すでに指摘したように水分が核沸騰を起こしながら蒸発し、少しの時間をおいて残留石炭球から煙が出始めるが引火せず、赤熱無炎燃焼を始める。赤熱無炎燃焼開始箇所と加熱壁面温度との関係は図のように低温のときは上部から、高温になるに従い下部に移る。ついで赤熱無炎燃焼開始箇所が広がり石炭球全体が黄赤色に発光する。その後、赤熱無炎燃焼が終了し石炭灰分が残る。CWM燃料では、1070K付近から石炭分の有炎燃焼が始まる。

CWM燃料 (Rc=30%) に界面活性剤を添加した場合の燃焼挙動をFig. 7に示す。赤熱無炎燃焼領域では水分が蒸発した後 (b点) 若干の着火遅れがあって、非常に不規則な赤熱燃焼を開始し (c点), たとえば図に示すように赤熱しながら変形し延びてゆく。延びすぎて一度加熱壁面に着き、また延び、無炎燃焼を終了した時点 (d点) では図のように残る。界面活性剤を添加したCWM燃料の赤熱無炎燃焼を開始する加熱壁面温度は、Rc=10%で780K, 30%で620K, 50%では600K程度とRcが小さいほど、高くなる。これは界面活性剤の残留物が石炭球の表面に着くため、空気と石炭の接触が妨げられ、Rcが小さいものほど結果的には界面活性剤の残留物割合が高くなり、空気と石炭との接触をより妨げているためと思われる。

3.2 CMM燃料の挙動

CMM燃料の寿命時間曲線 (Rcと界面活性剤の影響) をFig. 8に示す。Rc=0% (メタノール) における寿

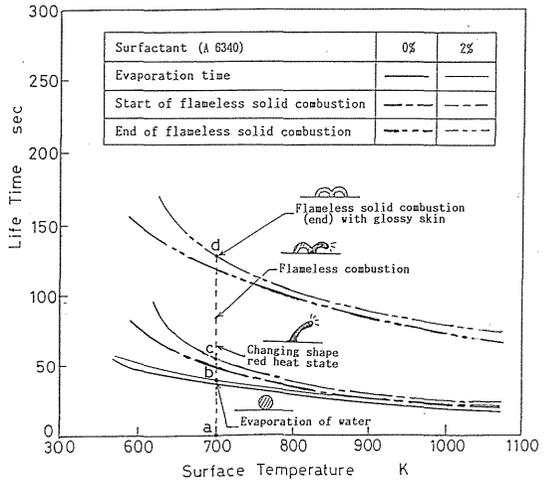


Fig. 7 Effects and Combustion Forms of Surfactant in CWM Fuels on Hot Surface

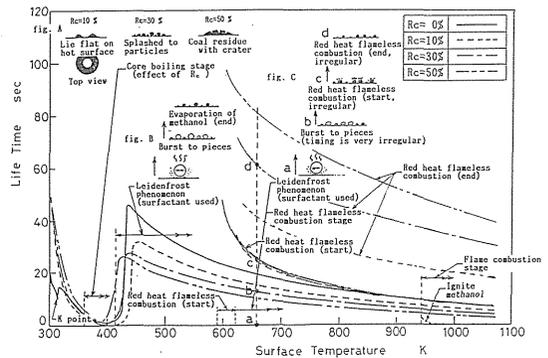


Fig. 8 Life Time and Combustion Forms of CMM Fuels on Hot Surface

命時間の起伏K点は、界面活性剤 (ACOM 202) を添加した場合にも見られた。加熱壁面温度の360K付近で核沸騰が始まる。この核沸騰領域ではRc=10%の場合、液滴はドーナツ状に加熱壁面にへばりつき、30%では粒子状に飛び散り、50%ではクレータ状の穴をもった塊となる (図中 A参照)。最小蒸発時間点やL点は、Rcが大きいほど低い温度で出現し、その寿命時間も短い。最小蒸発時間点から赤熱無炎燃焼開始壁面温度間の挙動は、

界面活性剤を添加したものと無添加のものとは大きな違いがある。まず $Rc=0\%$ (メタノール) の場合、この領域においては界面活性剤を添加すると液滴は界面活性剤に包まれ、ついで破裂する。しかし、CMM燃料の蒸発は図に示すように、ライデンフロスト現象状態であり、そのうちメタノール分が全て蒸発する前に液滴がばらばらにはじけ飛ぶ。そして加熱壁面温度が同一ならば、 Rc が大きいほどはじけ飛ぶまでの時間が短い。これはメタノールがある程度蒸発して界面活性剤の皮膜が液滴のまわりにでき (Rc が大きいと蒸発時間が短い)、それを突き破って小爆発が起きるためと思われる。L点より高い加熱壁面温度領域では、その温度が上昇すると共に蒸発時間は短くなり、同一温度では Rc の小さいものほど蒸発時間 (b点) が長い。赤熱無炎燃焼領域での燃焼挙動は本質的にCWMと同一であるが、液体がメタノールであるため Rc に関係なく赤熱無炎燃焼時間 (c点) はほとんど変わらない。同一温度では赤熱燃焼終了時間 (d点) は Rc が小さいほど短く、燃焼継続時間は当然 Rc が大きいほど長い。この領域において界面活性剤を添加したものの挙動は、図 (C) に示すようにライデンフロスト現象をへて激しくはじけ飛び、粒子の大きさは不規則で小さいものになる。粒子が小さいほど赤熱無炎燃焼に入る時間は遅れるが、赤熱燃焼開始時間は Rc が同じならば無添加のものよりも短い。これは、はじけ飛ぶことにより表面積が大きくなり、蒸発時間が短くなることが原因と考えられる。また、赤熱燃焼終了時間はCMM燃料の飛び散り方が不規則なため非常に不安定でばらつき、 Rc の大きいものほどその傾向は強く、その時間は明らかに短くなっている。加熱壁面温度が950Kを越えると、メタノールの着火による有炎燃焼領域に入る。

Fig. 9はFig. 8の右下角の拡大図でCMM燃料における有炎燃焼の挙動を示す。メタノールが着火を始める加熱壁面温度950K付近から有炎燃焼を開始する。図に示すように、CMM燃料の有炎燃焼形態は次の3種類に分類できる。

- (1) は加熱壁面温度が低い段階で起こるもので、若干の着火遅れの後にはメタノールが有炎燃焼を始め、それが終って更に一定時間をへて残留炭素球から煙りが出始め赤熱無炎燃焼状態に入る。
- (2) は(1)より加熱壁面温度が上昇すると、ある着火遅れの後メタノールの有炎燃焼が始まり、それが終って更に若干の着火遅れの後、今度は残留炭素球の揮発分が有炎燃焼を開始し、それが終了するとほぼ同時に赤熱

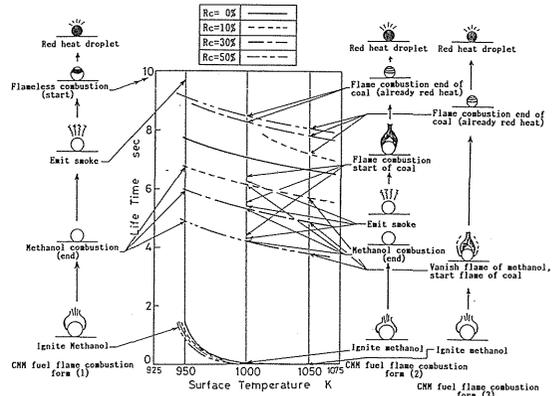


Fig. 9 Combustion Forms of CMM Fuels on High Temperature Surface

無炎燃焼を始める。この燃焼形態は非常に不安定で観察されないことが多い。

- (3) は加熱壁面温度の高いところで起こり、(1), (2)と同様に着火遅れがあつて、メタノールが有炎燃焼を開始し、終ると同時に石炭揮発分の有炎燃焼が始まり、それが終了と同時に赤熱無炎燃焼を始める。

これらの有炎燃焼形態に共通していえることは、当然ながら Rc が大きいものほどメタノールの燃焼時間は短く、石炭分燃焼時間は長い。

界面活性剤を添加した場合、加熱壁面に液滴が落下し、着火遅れの後、メタノールの有炎燃焼が始まり、その燃焼中に激しくばらばらにはじけ飛び、その後有炎燃焼の3形態がそれぞれの状況に応じて、ほとんど不規則に起こる。この種の界面活性剤を石炭系スラリー燃料に加えることは安定性を増すばかりでなく、石炭球表面に生ずる皮膜のため、液滴の破裂が激しくなり、そのため燃焼が急速に進行するという望ましい状態になる。その反面、壁面へのデポジットの増加をもたらす。

3.3 COM燃料の挙動

COMでは適切な界面活性剤が手元に見当らなかつたので無添加のものについてのみ報告する。

Fig.10にCOM燃料の挙動を示す。蒸発曲線は Rc によって差があり、CWM, CMM燃料に比べ加熱壁面温度の増加に対して時間の減少割合はゆるやかであり、温度依存性が小さい。核沸騰が生ずるのは620K程度からで、この領域における燃料液滴は Rc の影響を受け図中 (A) に示すような形になる。最小蒸発時間の出現する加熱壁面温度は、 Rc が大きくなるに従って低くなっている。

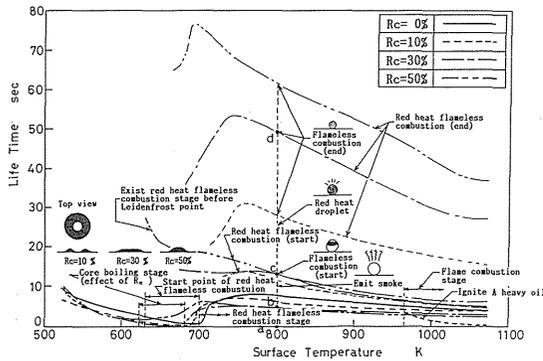


Fig.10 Life Time and Combustion Forms of COM Fuels on Hot Surface

またライデンフロスト現象も確認できるが、CWM、CMM燃料に比べ高温側で出現し、あまりはっきり表れないという特徴がある。また、L点以前にRcの大きいものは赤熱無炎燃焼を起こすことがあって、これはCWM、CMM燃料に比べて特異な現象といえる。また、赤熱無炎燃焼開始時間、終了時間および継続時間もL点に達するまでは長くなる傾向がある。このことはCOM燃料の蒸発挙動が他の燃料に比べ高温にずれていることと、L

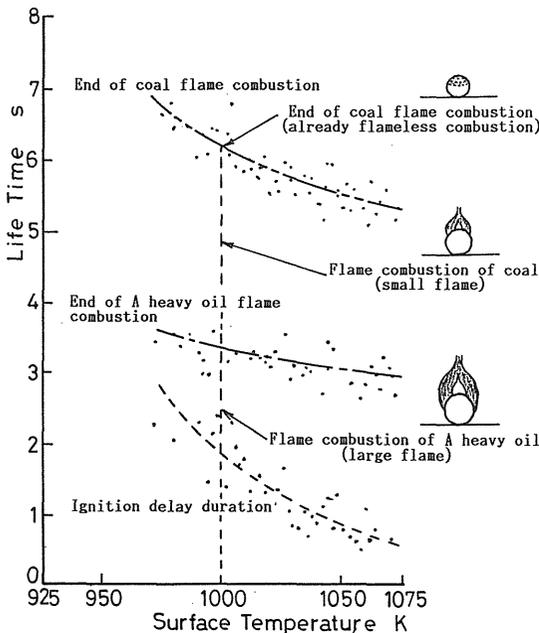


Fig.11 Magnify Figure of Combustion Forms of COM Fuels on High Temperature Surface

点に達するまでは石炭球は全て赤熱無炎燃焼するわけではないことによるものと思われる。赤熱無炎燃焼領域における着火後の燃焼挙動はCWM、CMM燃料の場合と基本的には同一である。有炎燃焼が始まる加熱壁面温度はRc=0%で950K、10%で960K、30%で970K、50%では990K程である。Fig.11の拡大図に示すように有炎燃焼領域においては、まずA重油が若干の着火遅れの後、有炎燃焼（炎は大きい）を始め、その後石炭分有炎燃焼（炎が小さい）が始まり、その終了とほぼ同時に石炭の無炎燃焼に入っている。Rcの大きいものほどA重油の燃焼時間は短く、石炭分の有炎燃焼時間は長くなっている。COM燃料の有炎燃焼形態はこの一種類でA重油が有炎燃焼を起こすときは、必ず石炭も有炎燃焼を起こす。

4. まとめ

石炭スラリー燃料（CWM、CMM、COM）の石炭含有率を変化させ、加熱壁面上における蒸発特性、着火遅れ、燃焼特性およびそれらに及ぼす界面活性剤の影響を調べた結果、次のことが明らかになった。

- (1) COM燃料 (Rc>10%) は非ニュートン流体の流動性を示す。粘度はRcに比例して増加するが、微粉炭の吸水状態の影響を受け易い。
- (2) COM燃料の製造において、微粉炭の添加量には限界があるが、一般にRcが大きいほど分離度は小さく、安定なCOM燃料が得られる。
- (3) 石炭スラリー燃料液滴のライデンフロスト点は、液体分が同一なら石炭含有率の高いものほど低温で生ずる。
- (4) 界面活性剤を添加したものは、ライデンフロスト点より高い加熱壁面温度になると、添加しないものと蒸発挙動が異なり、特にCMM燃料は加熱面上で蒸発終了前に激しくはじけ飛ぶ現象が観察された。燃焼領域では、このため非常に不規則な燃焼形態をとり、燃焼継続時間は短くなる。
- (5) 石炭スラリー燃料は、2段階燃焼（揮発分有炎燃焼と、それに続く固定炭素分無炎燃焼）をすることが知られているが、加熱壁面温度が低い燃焼領域においては、赤熱無炎燃焼のみが起きる。
- (6) 赤熱無炎燃焼開始の加熱壁面温度は、液体分が同一なら石炭含有率が小さいほど高くなる。
- (7) CWM燃料の無炎燃焼は加熱壁面温度600~780Kで始まり、有炎燃焼は水が点火剤となり得ないので1070

K以上で起こる。

- (8) CMM燃料の無炎燃焼は加熱壁面温度590~620Kで始まり, 有炎燃焼はメタノールの加熱壁面着火の始まる950K付近で起き, 石炭含有率にはあまり影響されない。
- (9) COM燃料の無炎燃焼は加熱壁面温度630~700Kで始まるが, ライデンフロスト点に達する前に赤熱無炎燃焼を始める場合があって(石炭含有率が高いとき), その開始壁面温度もCWM燃料やCMM燃料に比べて高い。有炎燃焼はA重油の熱面着火の始まる950~990 K(石炭含有率に比例する)で起こる。
- (10) 赤熱無炎燃焼継続時間は, 同一加熱壁面温度では石炭含有率の高いものほど長くなる。
- (11) CMM燃料およびCOM燃料の有炎燃焼の着火遅れは, 加熱壁面温度上昇と共に短くなる。
- (12) CMM燃料ではメタノール分のみが始めに有炎燃焼をし, その後石炭分が赤熱無炎燃焼あるいは有炎燃焼をするのに対して, COM燃料ではA重油分が有炎燃焼を始めると, 必ず石炭分も有炎燃焼を起こす。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 実験を担当した, 当時学部学生であった安部幸一君(現大建工業), 佐藤敏哉君(現日本電気)および界面活性剤を提供してくださった東亜合成化学工業(株)と第一工業製薬(株)に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Mizomoto, M, Ikai, S. : Combustion and Flame, Combustion of a Coal-Oil Mixture Droplet on a Hot Surface, 63, (1986), 289