

石炭スラリー燃料の着火・燃焼特性に関する研究（Ⅱ）

（高温雰囲気中における挙動）

堀 昭三^{*}, 澤 則弘^{*}, 稲村一郎^{**}

（平成3年8月28日受理）

A Study on the Ignition and Combustion Characteristics of Coal Slurry Fuels (Ⅱ)

(Behaviors of a Suspended Droplet in High Temperature Environment)

Shozo HORI^{*}, Norihiro SAWA^{*} and Ichiro INAMURA^{**}

ABSTRACT—At present time, new energy sources in stead of fossil fuels are being expected in a global scale. A most expected energy is the coal, which exists in everywhere of earth.

The authors planned to use new coal base fuels for IC engine and these fuels are COM (coal and heavy oil mixture) and CWM (coal and water mixture). Therefore, in this paper, we investigated and reported to clear the coal slurry fuel's fundamental properties such as evaporation, ignition and combustion by measurement of a heat balance of suspending fuels changing coal content ratio in high temperature environment.

1. まえがき

近年、石油系燃料に替わるエネルギー源として、また長期的エネルギー需給の観点からも、燃料の多用化が望まれ、その一端として石炭資源が再確認され、その利用拡大が囑望されている。しかし、石炭は固体燃料であるため、輸送や貯蔵、完全燃焼の達成、灰の処理などに難点がある。このため、石炭のガス化や液化、さらにスラ

リー化などの石炭利用技術の開発研究が進められている。とくにスラリー化はガス化や液化よりもエネルギー利用効率が高いので、いちはやく石炭・重油混合（COM）燃料が開発され、ボイラー用燃料として一部で実用されている。さらに、石炭利用率を高めるため、石炭・水混合（CWM）燃料の開発研究も活発である。しかし、こ

* 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

** 昭和電工(株) 総合技術研究所（東京都大田区）

Technical Research Laboratory, Showa Denko K.K., Tokyo 146, Japan

れら石炭スラリー燃料は、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、その詳細の解明は十分とはいえない。そこで、本研究では高温雰囲気中での石炭スラリー燃料液滴の蒸発、着火および燃焼の挙動を解明するため、加熱炉内に挿入した石炭スラリー燃料液滴の温度と重量を熱天秤装置を用いて連続的に測定するとともに、高速ビデオカメラによる観察を加え蒸発、着火および燃焼特性を明らかにし、諸因子の影響を実験的に調べた。その結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

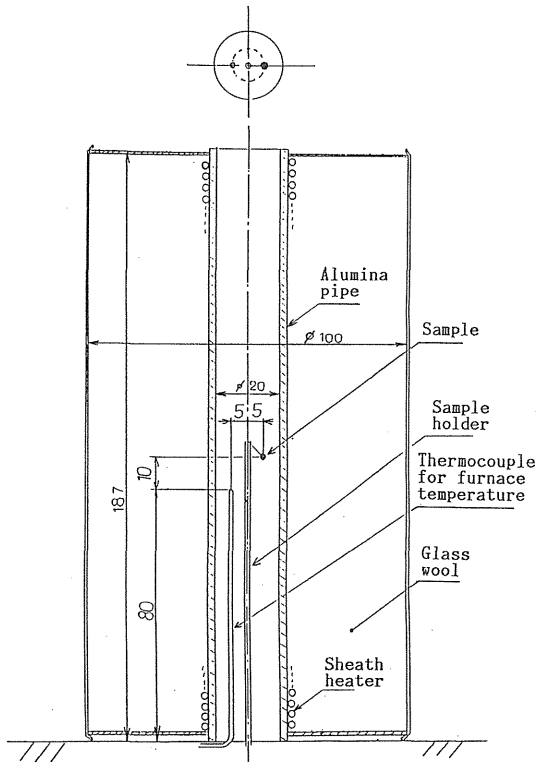


Fig. 1 Electric Furnace Used

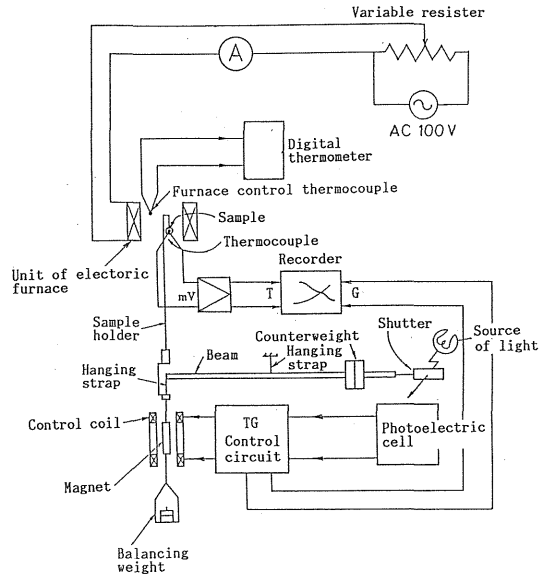


Fig. 2 Principle of TG Measurement

実験装置はFig. 1およびFig. 2に示すように電気炉(内径φ20mm、長さ190mm)、炉温測定用シース型熱電対(JIS C 1605, KS, φ1mm)、熱電対(JIS C 1602, R)の先端をリング状(径φ2.5mm)とした燃料液滴ホルダーおよび熱天秤(測定部、制御部および記録部)から構成されている。

燃料液滴ホルダーに保持された石炭スラリー液滴は電気炉内に挿入されると、蒸発、着火および燃焼をへて消滅する。このとき、石炭スラリー液滴の温度(TS)と重量(TG)の変化を連続測定するとともに、高速ビデオカメラでその挙動を観察した。このような実験を炉温

Table 1 Properties of Coal Used

Coal Name	: Taiheiyō (Japan)							
Coal Brand	: Bituminous							
Industrial Analysis %					Fuel Ratio			
Moisture	Ash	Volatile Matter	Fixed Carbon		0.86			
7.0	13.9	43.9	36.9					
Ultimate Analysis %								
C	H	O	N	S				
62.9	5.1	14.2	1.1	0.26				
Compositions of Ash %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Cl	F
50.6	24.2	6.64	9.74	2.06	2.76	1.13	<0.01	<0.005
Calorific Value	: 6,200		kcal/kgf					
Crushability	: 37.1		HGI					
Melting Point of Ash	: 1833		K					

(雰囲気温度) T_f や石炭含有率 R_c などを変えて実施した。

供試燃料はA重油 (JIS K 2205, 1種 2号), 大平洋炭 (Table 1) の200メッシュ微粉炭, 界面活性剤 ACOM 202 (第一工業製薬(株)製, 0.2wt%) および蒸留水を適宜ミキサーで混合して製造したCOM燃料およびCWM燃料である。COM燃料 ($R_c=60\%$), CWM燃料 ($R_c=60\%$) および微粉炭の顕微鏡写真をFig. 3に示しているが, 石炭スラリー燃料はいずれも微粉炭が均一に混合しているとはいえない。

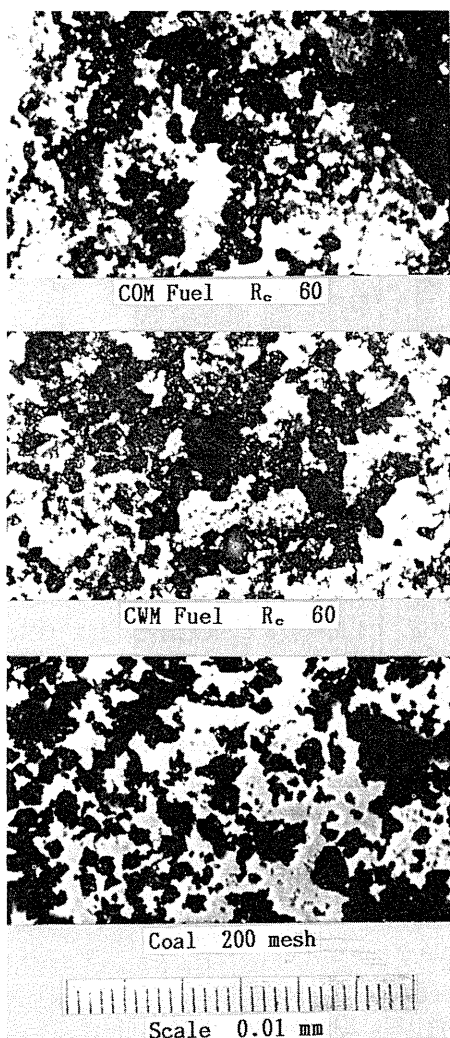


Fig. 3 Microphotographs of Fuels Used

なお, 燃料の粘度および分離度は前報で示したとおりである。ここに供試燃料の石炭成分含有率 (質量) は

$$R_c = G_c / (G_c + G_L) \times 100\%$$

で定義した。

ここに G_c は石炭, G_L はA重油 (または水) の質量である。また, 試料ホルダーに保持された石炭スラリー燃料液滴の重量は燃料の種類 (粘度, 表面張力など) および石炭成分含有率によってTable 2のように変化する。

Table 2 Weight of Fuel Used

COM Fuel [mg]	CWM Fuel [mg]
R_c 0 : 4.5	R_c 20 : 7.6
R_c 20 : 5.1	R_c 40 : 7.9
R_c 40 : 5.2	R_c 60 : 7.5
R_c 60 : 5.3	R_c 60 ₂ : 11.7
R_c 60 ₂ : 11.5	

3. 実験結果および考察

3.1 COM燃料およびCWM燃料の一般的燃焼挙動

実験結果の代表例としてCOM燃料 ($R_c=60\%$, 炉温 $T_f=550^\circ\text{C}$) およびCWM燃料 ($R_c=60\%$, $T_f=570^\circ\text{C}$) の燃料液滴の温度 (TS) および (TG) の変化をFig. 4に, COM燃料液滴 ($R_c=60\%$, $T_f=550^\circ\text{C}$) の高速ビデオカメラ撮影写真をFig. 5に示す。

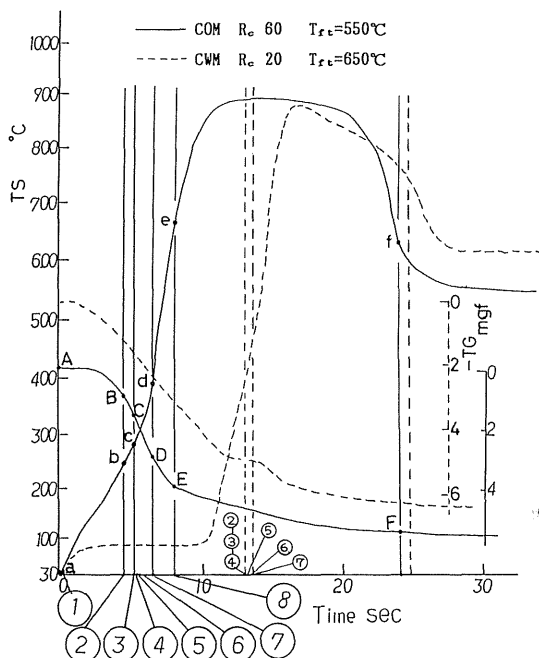


Fig. 4 TS and TG Curves vs. Lapse Time in Hot Environment

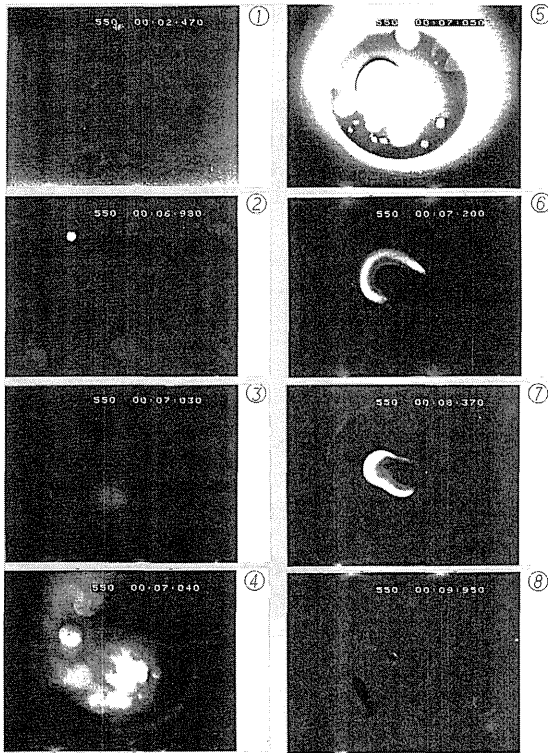


Fig. 5 Photographs of Fuel Combustion by High Speed VTR Camera

図において、COM燃料液滴が炉内に入り始めると (Fig. 4のa。A点, Fig. 5 ①) 同時に試料温度は上昇し (a → b), 蒸発が始まり (TG曲線はA → Bと下降), 試料液滴周辺に混合気形成される。約5.2秒後 (b, B点) 炉内の広範囲 (約2/3) が青く光り (Fig. 5の②), 約1/100秒後に炉中央部から白橙色の火炎は成長し, 炉内全域に達する (Fig. 5の③)。このような燃焼過程 (予混合燃焼) は約0.15秒後には終わり (Fig. 4のc。C点), COM燃料が激しく破裂飛散 (ポップコーン現象) しながら燃焼を続け (Fig. 5の④, ⑤), TGの低下, TSの上昇も大きい (Fig. 4のd, D点)。この爆発拡散燃焼はリング状のオレンジ色火炎を伴う。次第に破裂飛散が少なくなり, 輪が縮まり, 約3.2秒付近で白橙色の円錐状の火炎となり (Fig. 5の⑥), 先端から黒煙を排出しながら燃焼を続ける (Fig. 5の⑦)。この拡散燃焼火炎は約3.0秒で消え (Fig. 5 ⑧), 赤熱燃焼が始まる (Fig. 4のe, E点)。この赤熱燃焼の期間は, TGの減少も少なく, 温度 (TS) の低下もほと

んど認められない。その後, 温度も急速に下がり, 約31.5秒後, 輝点が消える (Fig. 4のf, F点)。なお, 炉温が低い場合には, 炉内に液滴を挿入後着火までの間に, 液滴の飛散が少し認められる。これに対し, CWM燃料では, 青色火炎から白橙色火炎の予混合燃焼に移行した後, いわゆる爆発拡散火炎や, リング状橙色火炎が発生することはなく円錐状橙色火炎の拡散燃焼が発生し, やがて消炎し, 赤熱燃焼に移る。

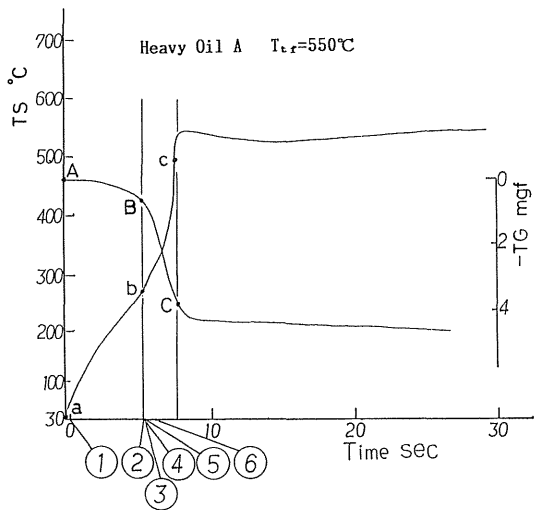


Fig. 6 Combustion Curves of Heavy Oil A

次にA重油のみの, TG, TS曲線をFig. 6に示す。Fig. 6とFig. 4を比較すると, COM燃料およびCWM燃料と異なった経過をたどることがわかる。A重油の場合, 試料が炉内に入り始めると (Fig. 6のa), 試料温度は上昇し, 蒸発 (主としてA重油の軽質留分) し, 炉内に混合気を形成し, 自発着火する (青淡い光が炉内全域で発生)。同時に輝炎が始まり, 中央液滴部から白色火炎が発生し爆発する (b点 ~ c点)。やがて輝炎が終り, 根元の定まった火炎となる。このように, COM燃料の燃焼挙動にはA重油および微粉炭が大きく関与していることがわかる。

3.2 燃焼状態に及ぼす諸因子の影響

炉温を変えた場合の実験結果から着火時期, 輝炎発生時期, 白橙色火炎終期 (=液滴飛散開始時期), 赤熱燃焼開始時期などを求めたのがFig. 7, 着火時期の試料温度 (Fig. 11), 爆発拡散燃焼 (COM), 主燃焼 (COM,

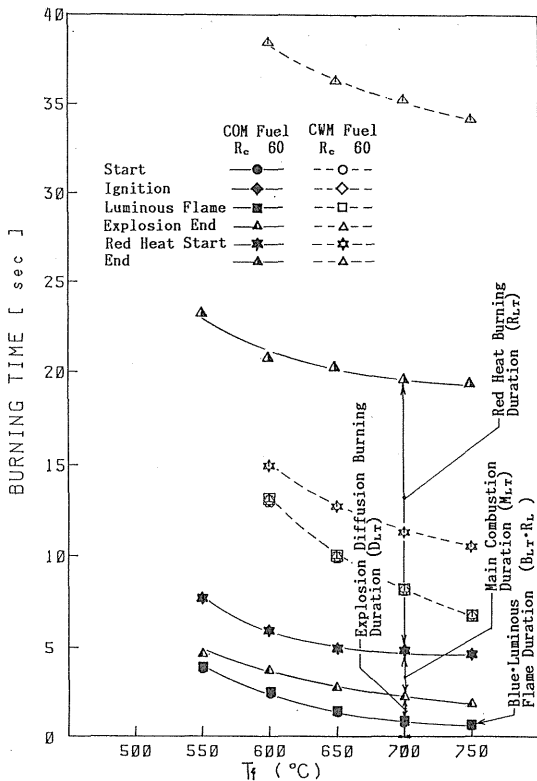


Fig. 7 Burning Times of COM and CWM Fuels vs. Environment Temperature (T_f)

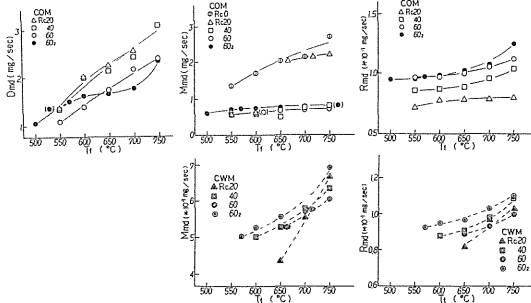


Fig. 8 D_{md} , M_{md} and R_{md} vs. T_f

CWM) および赤熱燃焼 (COM, CWM) 時における重量減少率 (燃焼速度に対応) を求めたのが Fig. 8 である。両図において、主燃焼速度および赤熱燃焼速度はいずれも炉温に比例して増加し、前者の値は COM 燃料が CWM 燃料の値の約 10 倍であり、後者の値は前者の値の $1/5 \sim 1/8$ 程度で、しかも COM 燃料と CWM 燃料の

値はほぼ等しい。

COM 燃料の着火温度はかなり低い。このことは A 重油の軽質分がまず蒸発して、周辺に混合気を形成し、その混合気から着火が始まり、やがて液滴の拡散燃焼に移行することを示すものである。

(1) 着火遅れおよび着火温度に及ぼす諸因子の影響

COM 燃料および CWM 燃料と炉温 (T_f)、石炭含有率 (R_c) および液滴重量 (G_f) との関係を示したのが Fig. 9 である。

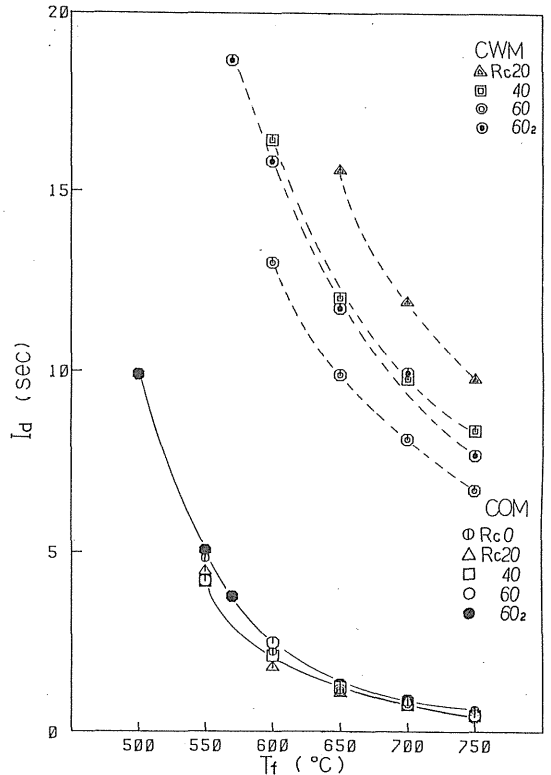


Fig. 9 Ignition Delays of Fuels Used vs. Environment Temperature (T_f)

図によると、着火遅れ (I_d) は炉温 (T_f) が高くなると指数関数的に減少しており、COM 燃料では R_c や G_f の影響は比較的小さいが CWM 燃料では R_c が大きいほど、 G_f が小さいほど、 I_d は短くなっている。これは COM 燃料では着火遅れを左右するのは含有 A 重油 (比熱 $0.45 \text{ kcal/kgf} \cdot ^\circ\text{C}$, 蒸発熱 70 kcal/kgf) が影響 (石炭の比熱 $0.25 \text{ kcal/kgf} \cdot ^\circ\text{C}$) するためと思われる。

これらの実験値を Arrhenius 表示すると Fig. 10 に示すようにいずれも直線で示される。

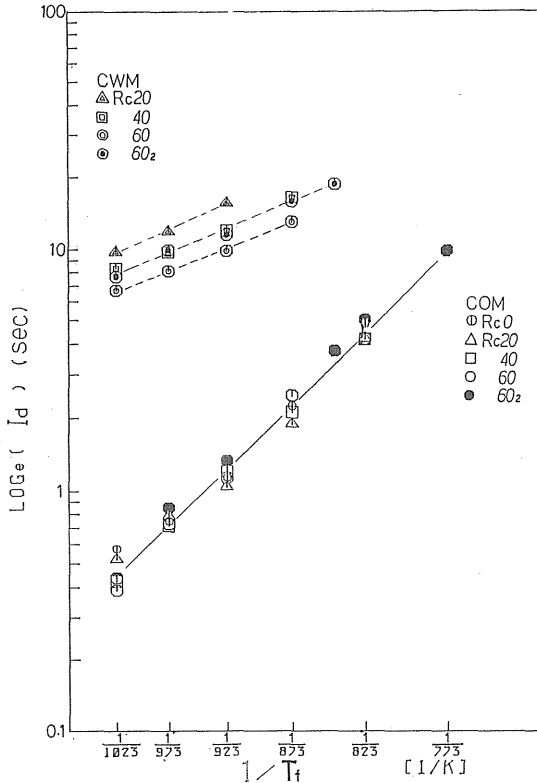


Fig. 10 Ignition Delays on Log Scale

いま、着火遅れ、 (I_d) を $I_d = A \exp(B/T_f)$ とおく。ここに、 A 値は着火遅れ時間の絶対値に対応し、直線の傾き B 値は着火遅れの雰囲気温度依存性を表すことになる。

Table 3 Comparisons of Observed Activate Energy on Ignition Delay Time

Reporter	Condition	Sample	E kcal/mol	A Value
I. Inamura	Single Droplet 1 atm 4.5 mg	A heavy oil	18	8.0×10^{-5}
		COM 20	17	9.6
		COM 40	19	3.9
		COM 60	20	1.6
		COM 60 ₂	20	3.2
	7.6 mg	CWM 20	8.8	1.2×10^{-1}
		CWM 40	8.0	1.6
		CWM 60	7.8	1.3
		CWM 60 ₂	7.4	2.0
		K. Moriya	Single Droplet 1 atm 973~1073 K Dia. 0.5~1.0 mm	Gasoil A
Gasoil E	16			
Gasoil F	16			
Gasoil G	15			
Lamp oil A	20			
E.G. Masdin & H.W. Thring	Single Droplet 1 atm 873~1073 K Dia. 1.5 mm	Gasoil	18	
		Lamp oil Heavy oil	17 16	
K. Iinuma	Spray Droplet 1 atm 923~1073 K	Cetane	21	

Arrheniusの反応速度論において B 値は一般に $B = -E/R$ (R : 一般ガス定数, E : 見かけの活性化エネルギー) で表される。この E 値を求めたが Table 3 である。同表には文献から引用した単一液滴や噴霧液滴の値を併記しているが、COM燃料の E 値は $E = 16 \sim 20 \text{ kcal/mol}$ で軽油や灯油単体の値と近似している。これに対し CWM燃料では逆に低下している。このことは前述した両燃料の着火機構に関する推論を裏付けているものとおもわれる。

なお、50%以上の確率で着火する最低炉温 (T_{fmin}) は COM燃料では 490°C 、CWM燃料では 570°C (A重油の発火点 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 、石炭の発火点 $300 \sim 400^\circ\text{C}$) と約 80°C の違いがある。

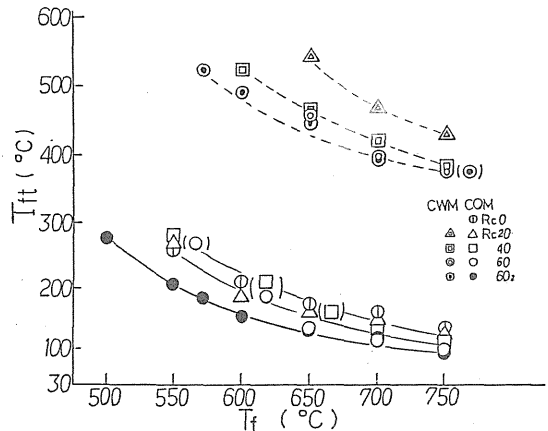


Fig. 11 Fuel Droplet Temperature ($T_{f,i}$) at Ignition Timing

(2) 各種燃焼期間に及ぼす諸因子の影響

Fig. 7 に示した各種燃焼期間を Arrhenius 表示したのが Fig. 12 であるが、いずれも直線的関係が成立することがわかる。なお、 R_c を変えた場合も同様の結果が得られる。また、個々の燃焼期間について実験結果を詳細にみると、次のことがいえる。

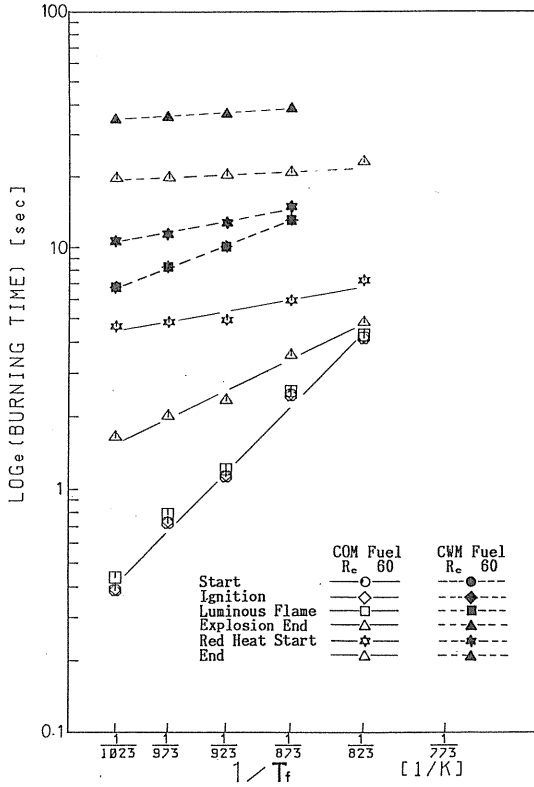


Fig. 12 Burning Times on Log Scale

- ① 青炎継続時間 (B_{LT}) および輝炎継続時間 (R_L) は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 秒で非常に短い, 一般に B_{LT} は炉温 (T_f) が高いほど短く, R_c の影響は比較的小さい。これに対し R_L は B_{LT} と同様に T_f が高いほど短くなるが, COM燃料では R_c が大きいと R_L は短縮し, CWM燃料では逆に増加する傾向がある。
- ② COM燃料の爆発拡散燃焼 (Fig. 13) は炉温が高いほど活発となり, しかもその継続時間 (D_{LT}) は $T_f < 650^\circ\text{C}$ の範囲では T_f が高いほど長くなる。また, D_{LT} の値は $1 \sim 2$ 秒程度であるが, 同一炉温では R_c が大きいほど, G_f が小さいほど短くなる。なお, A重油やCWM燃料では爆発拡散燃焼は認められない。

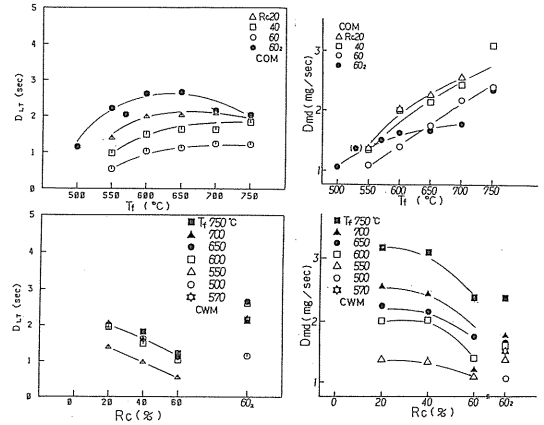


Fig. 13 D_{LT} and D_{md} vs. T_f and R_c .

- ③ 爆発拡散燃焼に続く主燃焼の継続時間 (M_{LT}) は $M_{LT} = 1 \sim 6$ 秒程度で (Fig. 14), T_f が高く, R_c が大きいほど (A 重油成分が減少), G_f が大きいほど, M_{LT} は増加する傾向 (燃焼が緩慢) がある。しかし, COM燃料では T_f の影響は小さい。

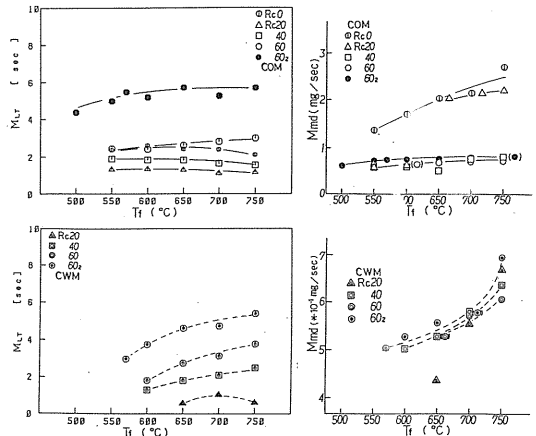
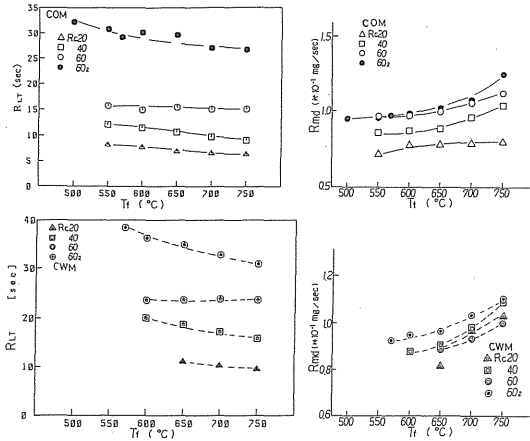


Fig. 14 M_{LT} and M_{md} vs. T_f

- ④ 赤熱燃焼速度 (重量減少率) は T_f , R_c , G_f が大きいほど早くなる (Fig. 15)。このため, T_f が高いほど燃焼継続時間は短くなるが, R_c , G_f に比例して含有石炭量が増加するので燃焼継続時間も長くなる。

Fig. 15 R_{LT} and R_{md} vs. T_f

4. まとめ

COM燃料およびCWM燃料液滴の着火および燃焼特性に及ぼす雰囲気温度（炉温）、石炭含有率および燃料液滴重量の影響について実験的に調べたが、要約すると次のとおりである。

(1) COM燃料の着火遅れは微粉炭のみ ($R_c=100\%$) の着火遅れより非常に短い。その値はA重油の着火遅れに近い。これは、COM燃料中のA重油の軽質留分がまず蒸発して混合気を形成し、それが着火し燃料液滴の拡散燃焼に移行するためである。この場合、雰囲気温度が高くなるほど着火遅れは短くなるが、雰囲気温度依存度をArrhenius表示、すなわち $\tau = A \exp(B/T)$ のB値で表示すると、B値は R_c に比例し、極く僅かに増加する傾向があるが、ほぼ一定値と見做し得る。

(2) COM燃料はその混合成分に起因する多段燃焼を行うのみならず、いわゆるポップコーン現象に起因すると思われる爆発拡散燃焼が発生する。この爆発拡散燃焼は雰囲気温度が高いほど活発となり、その継続時間は長くなる。

(3) CWM燃料の着火遅れはCOM燃焼の着火遅れよりかなり大きい。これはCWM燃料中の燃焼成分である石炭の発揮成分の蒸発、混合気形成に左右されるので、石炭含有率が大きいほど着火遅れは短くなる。

(4) CWM燃料の着火遅れの温度依存性はCOM燃料と同様にArrhenius表示で説明でき、B値はCOM燃料のB値の約1/2である。しかも石炭含有率の影響はほとん

ど認められない。

(5) A重油やCWM燃料には爆発拡散燃焼は発生しない。COM燃料およびCWM燃料はともに燃焼後半において、主として炭素分の赤熱無炎燃焼が生じ、やがて燃焼を終了する。

参考文献

- (1) 守屋：石油学会誌，16，（1973），36
- (2) 水谷幸夫：燃焼工学，森北出版，（1977）
- (3) M.Mizomoto, et al : Combustion and Flame, 63 (1986), 289-301
- (4) D.L.Sieders, T.M.Dyer : Trans. ASME, J.Eng. Gas Turbines Power, 108 (1986-10), 654-660
- (5) T.Vzkan, C.E.Horton : Trans. ASME, J.Eng. Gas Turbines Power, 112 (1990-6), 376-383
- (6) S.Wahiduzzaman, et al : Trans. ASME, J.Eng. Gas Turbines Power, 112 (1990-6), 384-390