
高炉への COM の適用基礎実験

Fundamental Study of Injection of COM in Consideration of Blast Furnace Use

安藤 博文(Hirofumi Ando) 荒谷 復夫(Fukuo Aratani) 一宮 正俊(Masatoshi Ichimiya) 木村 光蔵(Kozo Kimura) 大森 英明(Hideaki Omori) 相場 克巳(Katsumi Soma)

要旨：

石油価格の高騰のため、高炉吹込重油に替わるより安価な燃料が求められている。その要求を満たす燃料の一つである COM (Coal Oil Mixture) の物性その測定、沈降防止のための分散剤テスト、送流、熱焼実験を行った。その結果、次のような知見を得た。(1) COM の粘度はその中の石灰の体積濃度と一義的な関係にある。(2) COM 中の固体粒子の沈降速度は、実用的な粒度範囲でかなり大きい。(3) 分散剤の効果は、炭材の分散材の組み合わせで異なる。(4) COM 用設備における摩耗は、COM の流速が速いと、異常に速く進行する。(5) COM の燃料性は重油とほぼ同じであるが、ダスト発生があり、さらに炭材によっては NOx の増大がみられる。

Synopsis：

Because of rises in oil prices, fuels cheaper than heavy oil are strongly desired for injecting into the blast furnace. COM (Coal Oil Mixture) is one of the fuels satisfying such a need. But COM is a slurry of high viscosity and little was known about its properties and handling method. In this study, measurements of COM properties a test of surfactants preventing sedimentation of solid particles, and a flow and combustion test were practised to confirm such conclusions as follows: (1) Viscosity of COM is a function of the solid fraction in it (2) Sedimentation rate of solid particles in COM is fairly large. (3) A surfactant can prevent sedimentation of solid particles, but its effect is limited to a specified solid. (4) Wear of COM apparatus progresses fast only when it flows at high speed. (5) Combustibility of COM is nearly the same as that of heavy oil except for occurrence of dust, and NOx is increased when the solid contains much N.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

高炉へのCOMの適用基礎実験

Fundamental Study of Injection of COM in Consideration of Blast Furnace Use

安藤 博文*
Hirofumi Ando

荒谷 復夫**
Fukuo Aratani

一宮 正俊***
Masatoshi Ichimiya

木村 光蔵****
Kozo Kimura

大森 英明*****
Hideaki Omori

相馬 克己*****
Katsumi Soma

Synopsis:

Because of rises in oil prices, fuels cheaper than heavy oil are strongly desired for injecting into the blast furnace. COM (Coal Oil Mixture) is one of the fuels satisfying such a need. But COM is a slurry of high viscosity and little was known about its properties and handling method.

In this study, measurements of COM properties a test of surfactants preventing sedimentation of solid particles, and a flow and combustion test were practised to confirm such conclusions as follows:

- (1) Viscosity of COM is a function of the solid fraction in it.
- (2) Sedimentation rate of solid particles in COM is fairly large.
- (3) A surfactant can prevent sedimentation of solid particles, but its effect is limited to a specified solid.
- (4) Wear of COM apparatus progresses fast only when it flows at high speed.
- (5) Combustibility of COM is nearly the same as that of heavy oil except for occurrence of dust, and NO_x is increased when the solid contains much N.

1. 緒 言

過去数年にわたる重油価格の高騰から高炉操業は、全コークス操業へと移行している。しかしながら羽口吹込み燃料は単にコークスの代替であるばかりでなく、燃料比の低減、安定操業の確保に重要な役割りを果しており、より安価な羽口吹込み燃料の開発が要請されている。

これに対して資源的に豊富な一般炭の利用が検討されているが、石炭-重油スラリー(COM)も、その重要な一端を担うものと考えられる。高炉へのCOMの吹込みについては昭和36年頃¹⁻³⁾、2、3の高炉に吹込んだ実績が報告されているが、現在の高炉操業は当時と比較して大巾な改善がなさ

れ、熱的にも限界に近い状態になっており、COMの吹込みに対しては、石炭濃度の上昇のみならず、高炉羽口への安定供給技術の確立が不可欠となっている。

このため本研究では石炭の選択ならびに供給方法に関する知見を得るためにCOMの物理的性質の測定、ならびに実験プラントにおけるCOMの流送、燃焼実験を行なったので報告する。

2. COMの物理的性質の測定

COMの物理的性質の測定は100~130℃で乾燥した炭材を所定量、約130℃に加熱した重油中に入れ、かくはん混合して調整したCOMを用いて行なった。

* 水島製鉄所企画部企画室主任(部長)
*** 水島製鉄所動力部動力技術室主任(課長補)
***** 水島製鉄所企画部設計室主任(部長)
〔昭和56年12月16日原稿受付〕

** 技術研究所水島研究部主任研究員(課長)・工博
**** 水島製鉄所動力部動力技術室
***** 水島製鉄所システム部計測課課長

2-1 使用した炭材

実験に使用した炭材は石炭5銘柄、木炭2銘柄およびコークス粉で、それらの分析値をTable 1に、また、粒度分布をFig. 1に示す。石炭は高炉に吹込むことを考慮し灰分の少ない、水素含有量は約5%の一般炭を使用した。また、木炭は炭化過程の変動に起因すると考えられる成分変動が大きくTable 1の値は平均値である。

使用した炭材の比重と気孔率の測定結果をTable 2に示す。炭材の真比重はエタノールを置換液としてピクノメータ法で、また、みかけ比重は水銀置換法で測定した。石炭の真比重は1.3~1.4で気孔率も20%以下であるが、木炭は銘柄によりみかけ比重に大きな差があり、気孔率も石炭に比較して大きい。Photo. 1は44~63 μ mの粒径の各炭材の走査電子顕微鏡写真である。写真から石炭では銘

Table 1 Chemical composition of solids and oil
(Solids) (wt %)

	Ash	V.M	F.C	H	N	T.S
Coal -A	8.7	36.2	55.1	4.6	1.9	0.71
-B	7.6	29.8	62.6	4.0	1.8	0.33
-C	10.6	32.3	57.1	4.3	1.7	0.64
-D	11.4	18.8	67.8	3.9	1.4	0.32
-E	8.4	34.6	57.0	4.6	1.6	0.53
Charcoal-A	6.6	13.8	79.7	0.6	0.3	0.02
-B	1.5	36.5	62.0	3.7	0.2	0.02
Coke	10.0	1.7	88.3	0.1	0.8	0.71

(Oil) (wt %)						
C	H	O	N	S	Density	Viscosity
85.2	11.4	0.4	0.4	2.6	0.9 g/cm ³	27.3 cP

VM: Volatile matter

FC: Fixed carbon

TS: Total sulfur

Table 2 Density and porosity of solids

	Density (g/cm ³)	Apparent density (g/cm ³)	Porosity (%)
Coal -A	1.367	1.207	11.8
-B	1.418	1.197	15.6
-C	1.392	1.248	10.3
-D	1.404	1.377	1.9
-E	1.380	1.209	12.4
Charcoal-A	1.627	1.043	35.7
-B	1.381	0.483	65.2
Coke	1.900	-	-

柄が異なっても、ほとんど同様の形状を示しているが木炭は石炭と異なって炭材粒内に多量の気孔が存在し、とくに木炭Bでは、この気孔に沿って碎かれるため細長い棒状の粒子形状となっている。

また、使用した重油は、通常高炉に吹込んでい

2-2 測定結果と検討

2-2-1 密度

COMを炭材と重油の単純な混合物と考えるとCOMの密度はCOMを構成する炭材と重油の密度および混合比から(1)式のように計算される。

$$d_m = \frac{d_c \cdot d_o}{a \cdot d_o + (1-a) \cdot d_c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

d_m : COMの密度 (g/cm³)

d_c : 炭材の密度 (g/cm³)

d_o : 重油の密度 (g/cm³)

a : 炭材の濃度

Fig. 2は(1)式から計算したCOMの密度と測定結果の関係を示したもので、図から計算値と実測値は石炭、木炭ともよく一致していることがわかる。また、この結果から高炉に吹込むCOMの炭材濃度はCOMの密度測定を行なうことで推定できることが示唆される。

2-2-2 粘度

COMの粘度測定は回転粘度計を用いて行なっ

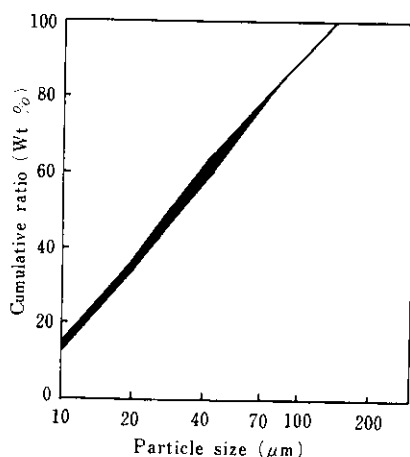


Fig. 1 Size analysis curve of coal and charcoal

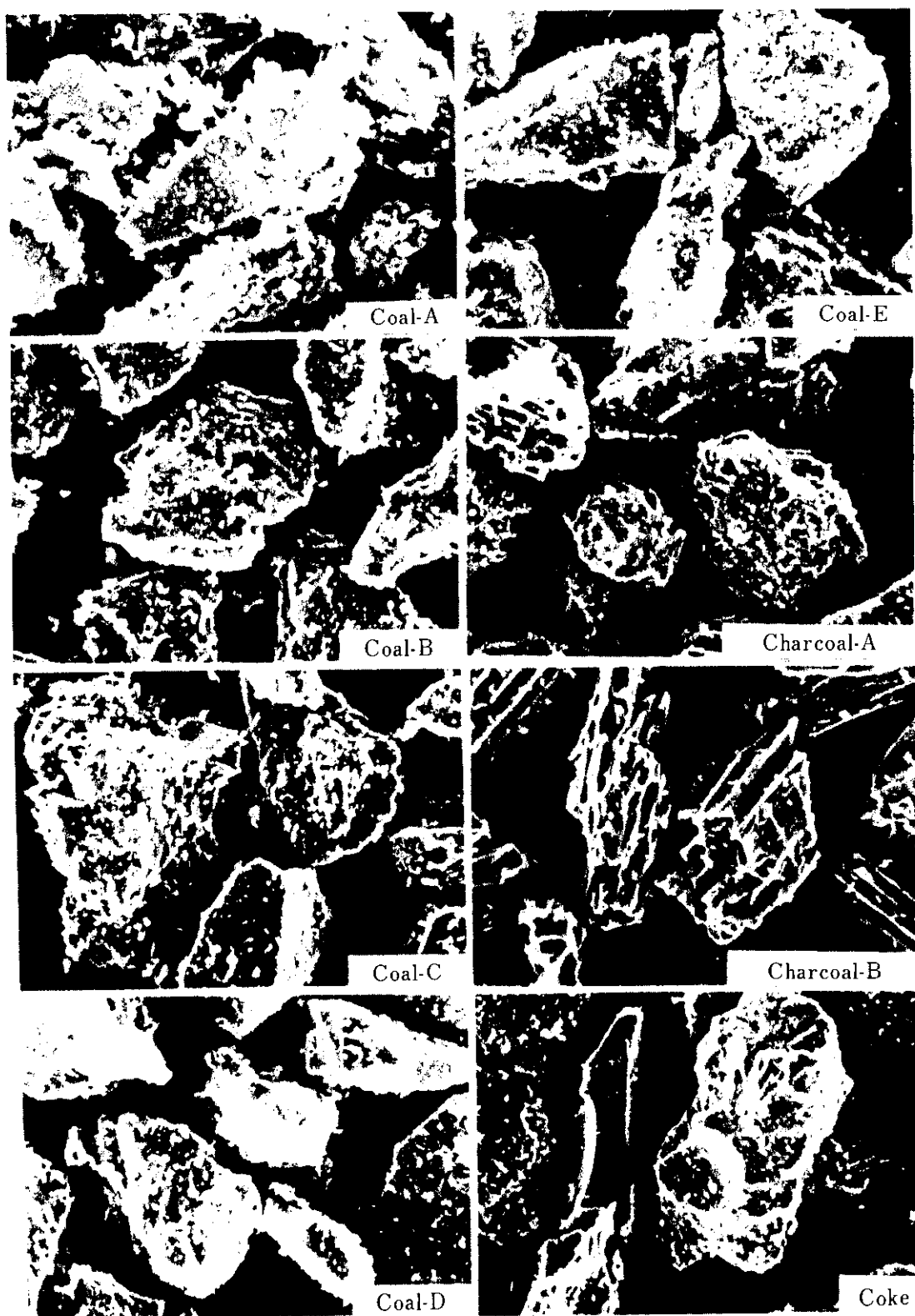


Photo. 1 Shape of particles

50 μ m

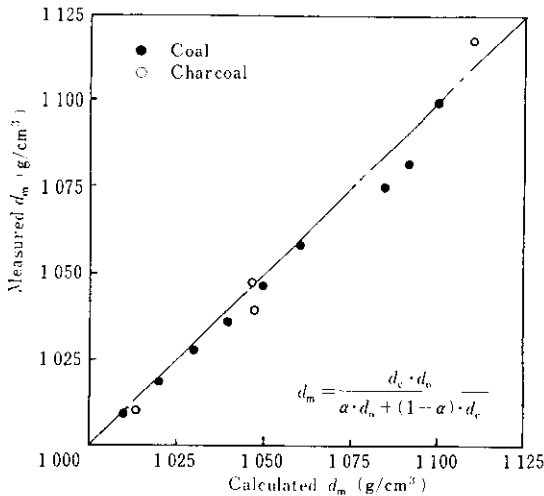


Fig. 2 Comparison of measured and calculated density of COM

た。COM は炭材の重油への懸濁液であり、必ずしもニュートン流体の性質を示さないと考えられる。本実験でも回転粘度計の回転速度とトルクの関係は原点をわずかにはずれた点を通り、ビンガム性を持った挙動が示された。Fig. 3 は各炭材銘柄で作った COM の粘度を一定条件で比較したものである。図から COM の粘度は、石炭では銘柄、濃度が異なっても同一線上で変化し、粘度は石炭の体積濃度と一義的な関係にあることが示唆され

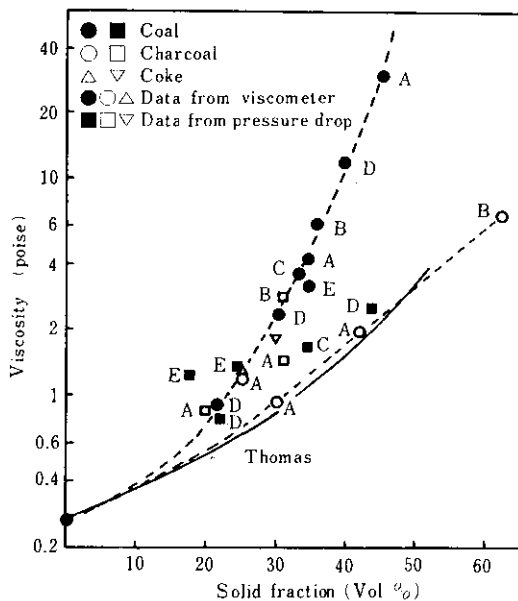


Fig. 3 Viscosity of COM

る。また、木炭では石炭の場合とは異なった線上を変化している。このように懸濁液の粘度が、固体の体積濃度に依存することは多くの研究者によって、理論的に、実験的に検証されており、Fig. 3 の結果もこれと合致している。Thomas^{4,5)}は種々の測定データを整理して高濃度域の懸濁液の粘度が(2)式の近似式で整理しうると報告している。

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + 0.00273e^{16.6\phi} \dots (2)$$

η : 懸濁液の粘度 (P)

η_0 : 純液体の粘度 (P)

ϕ : 固体の体積分率

ここで ϕ は、密度測定の結果から(3)式のように計算される。

$$\phi = \frac{\frac{W_c}{d_c}}{(1-\xi)\frac{W_c}{d_c} + \frac{W_o}{d_o}} \dots (3)$$

W_c : 固体の比率 (wt%)

W_o : 重油の比率 (wt%)

ξ : 固体の気孔率

Fig. 3 には、(2)式による計算値を実線で示した。石炭 COM では(2)式の計算値よりも粘度が高い値となっているが、これは炭材の形状、表面性質のちがいによると考えられる。

また、COM 粘度に対する温度の影響は温度上昇につれ、粘度は低下するが、その変化は炭材濃度 30% 以上では、重油粘度の温度変化より小さい。

2.3 COM 中の炭材の沈降

2.3.1 沈降性の測定結果と検討

高炉に COM を吹込む場合には、配管内の炭材の沈積による配管詰りが考えられる。COM 中の炭材の沈降性の測定は、高さ 23cm のメスシリンダー (500ml 用) に COM を入れ所定時間、所定温度の恒温槽内で静置後、高さ方向で 4 分割し、各部分の平均炭材濃度を測定して行なった。Fig. 4 は 30wt% の、Fig. 5 は 50wt% の石炭 COM についての沈降性測定結果である。図から静置時間経過につれ、炭材の沈降により、炭材濃度が頂層では減少し、下層では上昇している。また初期炭材濃度が 50% のほうが 30% の COM より炭材

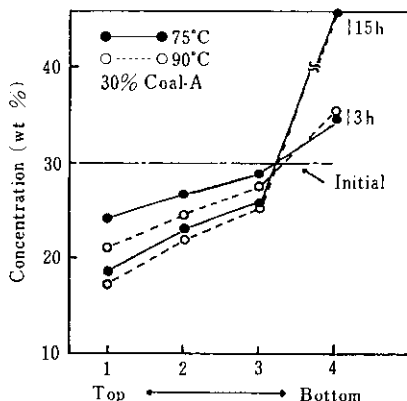


Fig. 4 Concentration of solid after settling for 30% COM

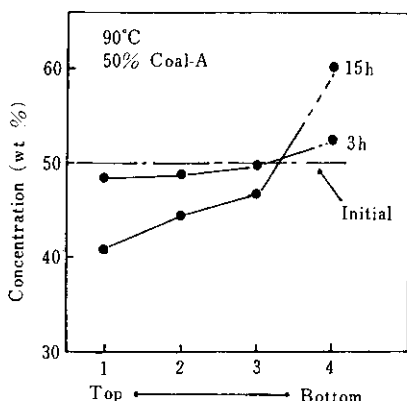


Fig. 5 Concentration of solid after settling for 50% COM

の沈降が遅いことがわかる。

Fig. 6 は沈降性に対する炭材粒度の影響を示したもので、各粒度別に、初期濃度に対する残留率を示してある。図から、粗粒の沈降速度が大きく、5時間程度で74~149μmの粒子はほとんど沈降するのに比較して、-44μmの粒子はほとんど沈降していないことがわかる。COMのような高濃度の懸濁液中の粒子の沈降は干渉沈降と考えられ、粒子の沈降速度 u は(4)式で示される。

$$u = \frac{g_c (d_c - d_o) \cdot D_p^2}{18 \eta_{oil} \cdot F(\epsilon)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

u : 沈降速度 (cm/s)

η_{oil} : 重油の粘度 (P)

D_p : 粒子径 (cm)

ここで $F(\epsilon)$ は、空間率関数である。 $F(\epsilon)$ については種々の報告があるが、 $F(\epsilon)$ が次式のごとく

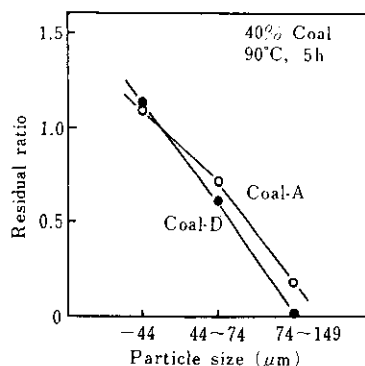


Fig. 6 Relation between residual ratio and particle size

COMの相対粘度に比例すると仮定し、実験結果を整理すると k の値は0.4~1.0になる。

$$F(\epsilon) = k \frac{\eta}{\eta_{oil}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

k : 定数

Fig. 7 は、 $k=0.4$ を(4)、(5)式に代入して、石炭AとDのCOMについて、粒子の沈降速度に対する粒子径の影響を計算したものである。Fig. 7 から、COMの相対粘度により、同一粒子径での沈降速度は大きく異なること、沈降を防止するには粒子径を10μm以下にする必要があることがわかる。

また、COMを構成する炭材銘柄が異なると、同一炭材濃度 (wt%) でも、炭材の沈降性は大き

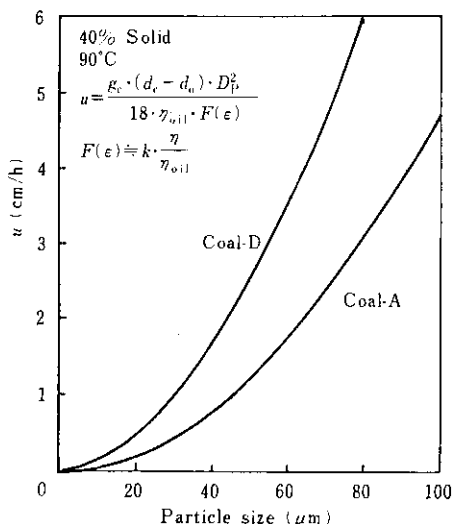


Fig. 7 Settling rate of solid particle

く異なるという結果がえられた。Fig. 8は、(4)式を考慮して、COMの相対粘度の逆数と、沈降性測定時の頂層における炭材の残留率との関係を示したものである。図から、炭材銘柄、濃度が異なっても、残留率と相対粘度の関係は同一直線と示され、COMの沈降性の相違は、COMの粘度の相違により説明されることがわかる。

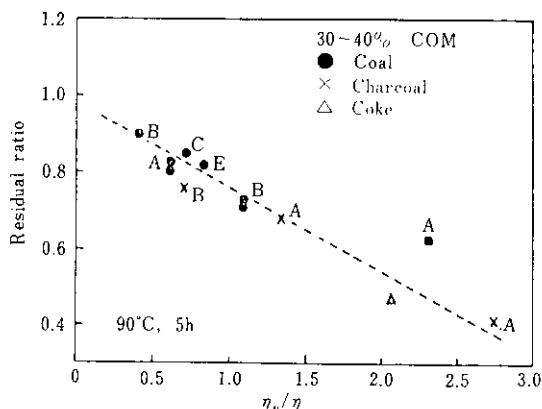


Fig. 8 Relation between residual ratio and viscosity

2.3.2 分散剤の効果

前節で示したように、COM中の炭材の沈降速

度は、いずれの炭材銘柄を選択しても相当大きく、高炉においてCOMを使用する場合には、何らかの沈降防止策が必要である。その一つの方法として、分散剤（表面活性剤）の添加があげられる。本研究でも、分散剤の効果を確認するため、炭材銘柄の異なる数種のCOMに種々の分散剤を添加し、その沈降抑制効果を調べた。前述のメスシリンダーに分散剤を添加したCOMを入れ、所定温度の恒温槽で所定時間静置し、高さ方向に3分割し、各部分の平均炭材濃度を測定した。石炭C、Dを用いた50wt%のCOMに各種の分散剤を添加した場合の実験結果をFig. 9, 10に示す。

図から、石炭Cを用いたCOMに対しては分散剤Aが効果があるのに対して、石炭Dに対して効果がある分散剤はDである。分散剤B, Cは、いずれのCOMに対しても効果がない。このように、COM中の炭材の沈降防止に対する分散剤の効果は、分散剤の種類を使用炭材に応じて選択することにより、かなり期待できる。

以上の結果から、前節の結果も含めて、以下の結論が得られる。すなわち、高炉の予定休風時間内の、炭材の配管内沈積を防止するためには、気孔率が小さく比重の大きい炭材を選択することや、炭材に応じた有効な分散剤を選択することが必要である。

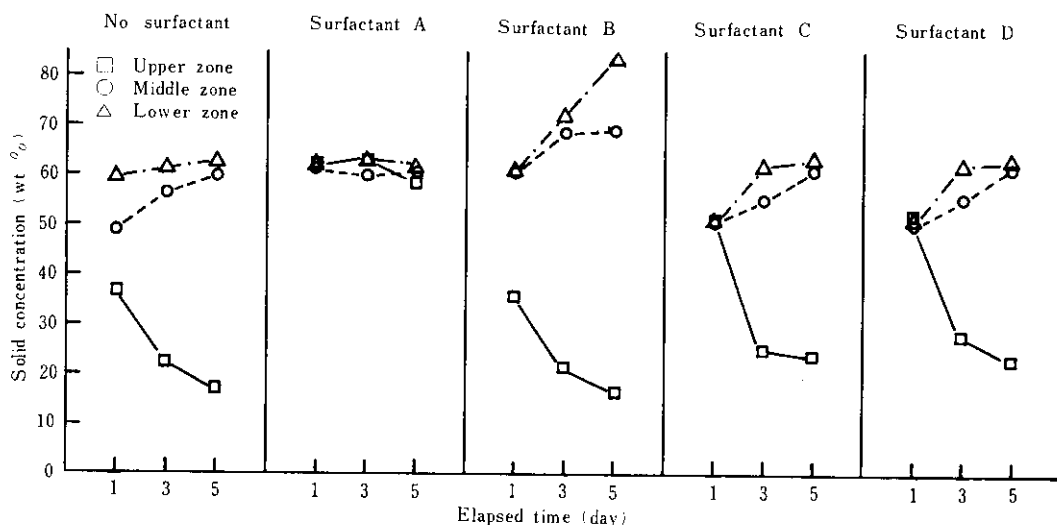


Fig. 9 Effect of surfactants on COM with coal/C mixed

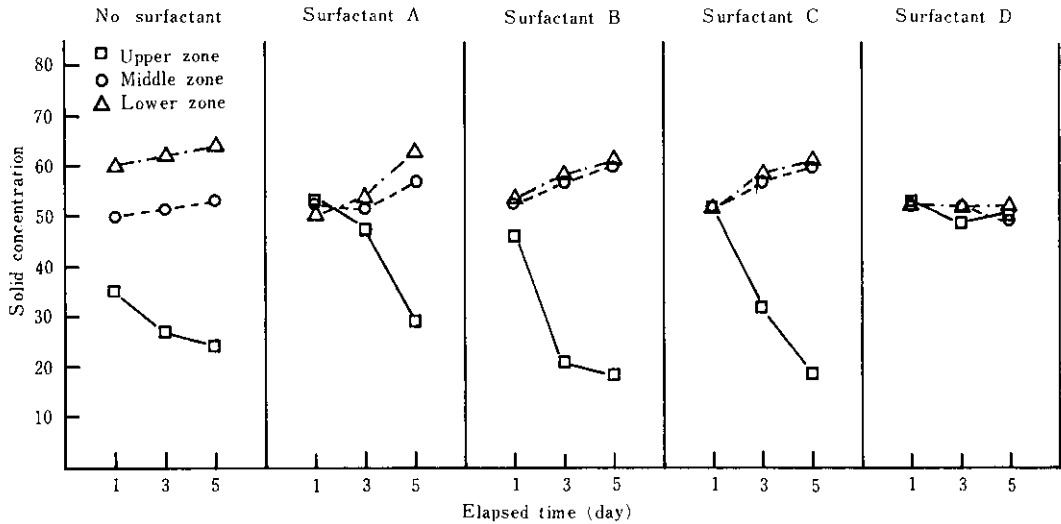


Fig. 10 Effect of surfactants on COM with coal D mixed

3. 流送実験

3-1 実験方法

高炉においてCOMを使用する場合の配管での

圧力損失、流量測定法、装置摩耗などを調べるため、COMの流送実験装置を製作し、圧力損失測定、流れ状況の観察、各種流量計の比較などを行った。

流送実験装置の概要を Fig. 11 に示す。かくは

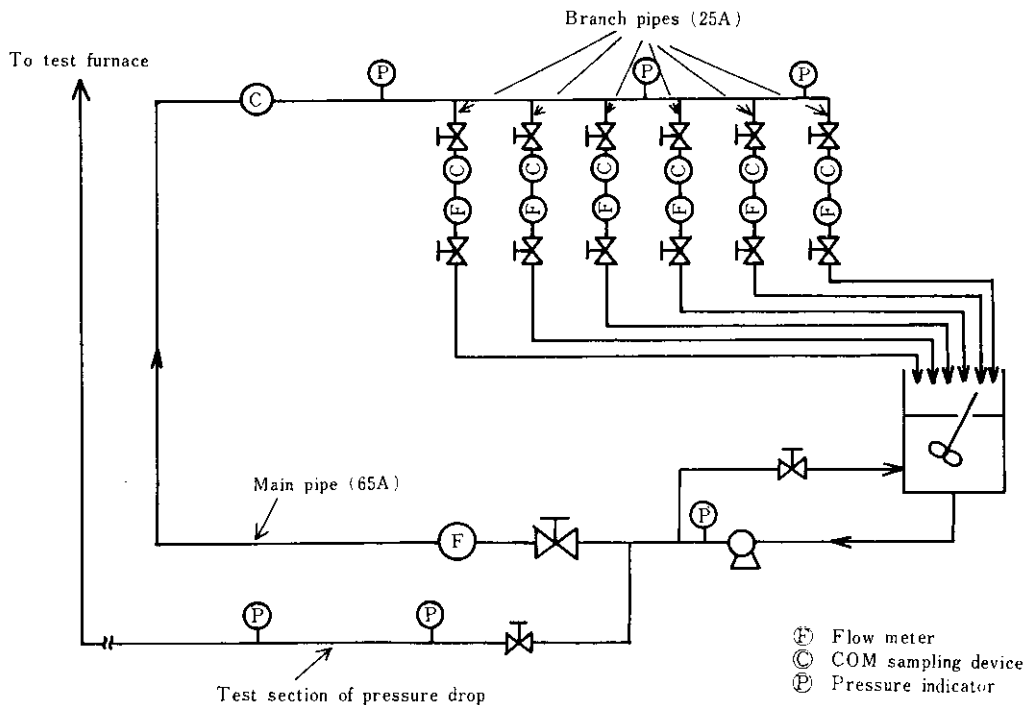


Fig. 11 Schematic flow of COM test equipment

ん槽で均一に混合されたCOMは、スラリーポンプにより3～4 kgf/cm²-Gに昇圧された後、主管(65A)を経て、順次6本の枝管(25A)へ分岐して行き、再びかくはん槽へ戻る。圧力損失測定に際しては、同図に示した圧力損失測定用管路、(25A)を使用した。この実験に使用したCOM濃度をTable 3に示す。また、測定はCOMの温度を60～100℃、流速を0.2～1m/sの範囲で変化させて行った。

Table 3 Coal fraction of COM

COM No.	Solid used	Coal fraction (wt %)	Coal fraction (Vol %)
1	Coal C	30.4	22.0
2	"	54.8	43.9
3	Coal D	25.4	17.9
4	"	34.5	25.2
5	Charcoal A	32.8	20.7
6	"	45.0	31.2
7	Charcoal B	41.5	31.6
8	Coke	47.0	29.6

3.2 圧力損失測定結果

No. 2 COMの圧力損失測定例をFig. 12に示す。

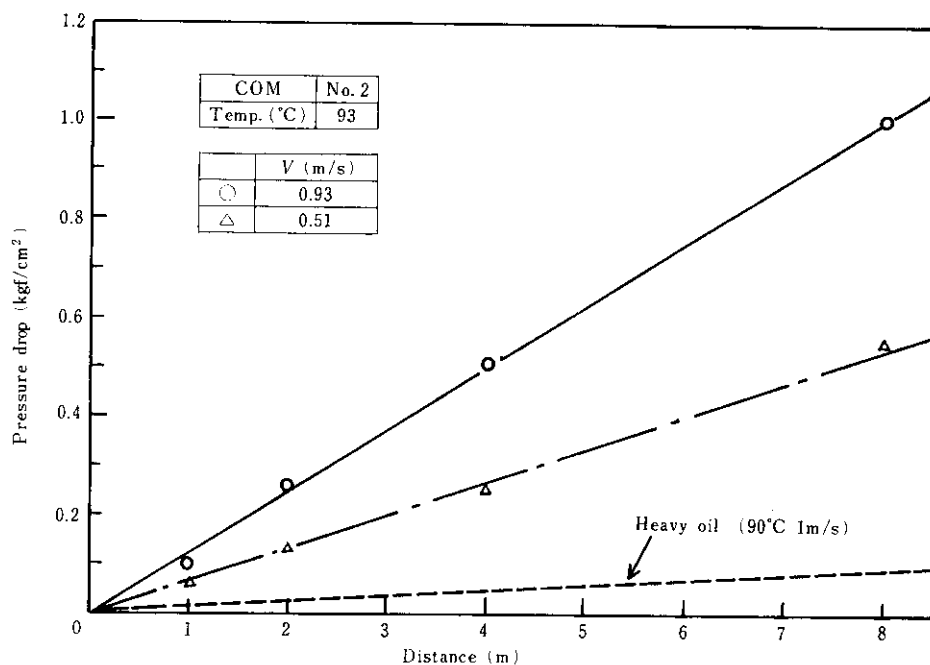


Fig. 12 Pressure drop of COM flow test

実験範囲が、レイノルズ数で100以下の層流範囲であるため、圧力損失は流速に比例して大きくなっている。流速が1m/sの場合には、配管(25A)の長さ1m当たりの圧力損失は約0.1kgf/cm²と同温度の重油の約10倍に達した。

配管内でのCOMの流動特性を知るために、この圧力損失の測定から求めた管壁のせん断応力 τ_w (kgf/cm²)とせん断速度 $\dot{\gamma}_w$ (1/s)を以下の式で求めた。

$$\tau_w = \left(\frac{D}{4}\right) \times \frac{dP}{dx} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8v}{D} \quad \dots\dots\dots (7)$$

D : 管径 (cm)

x : 距離 (cm)

P : 圧力損失 (kgf/cm²)

v : 平均流速 (cm/s)

NO.2 COMの τ_w と $\dot{\gamma}_w$ の関係をFig. 13に示す。図から、COMの τ_w と $\dot{\gamma}_w$ はほぼ直線関係がある。2章で述べたように、この直線が原点を通ればニュートン流体であるが、NO.2 COMでは、直線は

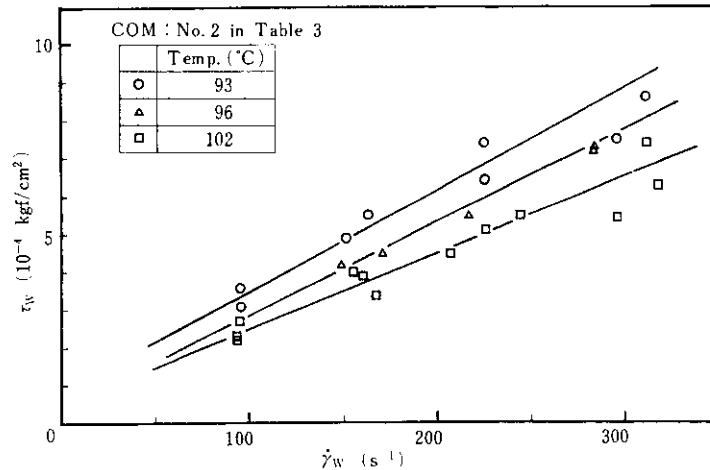


Fig. 13 Relation between shear stress, τ_w , and rate of shearing strain, $\dot{\gamma}_w$, at pipe wall

原点を通らず、しかも、そのずれは温度が低いほど大きい。すなわち、ビンガム性の非ニュートン流体の性質が現われている。また、この τ_w と $\dot{\gamma}_w$ の直線の勾配がみかけ粘度を示すが、Fig. 3 に、Table 3 の各種 COM のみかけ粘度を示した。同図から、粘度計で求めた粘度と圧力損失から求めた粘度の傾向はほぼ一致する。両者の差の原因としては、粒度分布、粒子形状の違いが考えられる。

流送可能な COM の濃度、流速は設備の計画にあたって重要な項目であるが、COM の温度を 100 °C 程度とすると、流送実験の結果から、均一な COM の流送が可能であるのは、濃度が約 50wt % で、流速が 0.2m/s 以上である。この限界を越えると、流れが脈動化したり、配管の詰まりが生じるなどの現象が現われる。但し、木炭のような見掛け密度が小さい炭材を使用すると限界濃度は 50 wt % より低くなる。

3-3 流量計の使用実績

COM の使用にあたって、その流量を正確に測る必要があるが、現状では、COM 用流量計として確立されたものはない。そこで、今回の実験においても各種の流量計の使用テストを行った。その結果、面積式、容積式流量計はそのほとんどが石炭の詰まり等を生じ、使用不可能であった。一方、超音波式ドップラー型流量計は、実配管での校正が必要であるが、回転部分を持たず、流体に

接触しないなどの利点を有しており、流量制御用として最も適していると考えられる。超音波式ドップラー型流量計の使用実績を Fig. 14 に示す。

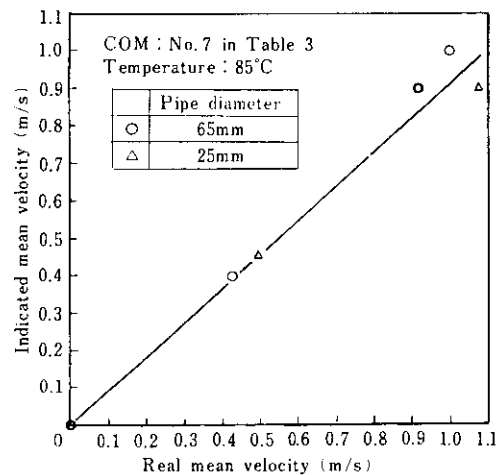


Fig. 14 Characteristics of doppler type flowmeter

3-4 装置摩耗状況

今回の実験は、その連続運転期間が短く、摩耗による配管の損傷はなかった。しかし、流送用ポンプの回転軸部や、流量制御用ボール弁等、接触する COM の流速が速い部分では摩耗が著しかった。摩耗により破損したボール弁のシートリングを Photo. 2 に示す。この結果から、COM の装置

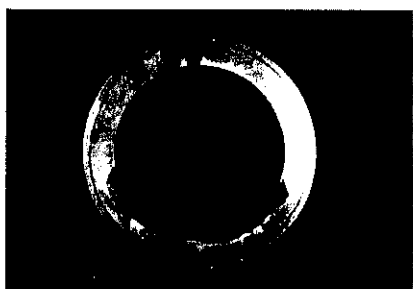


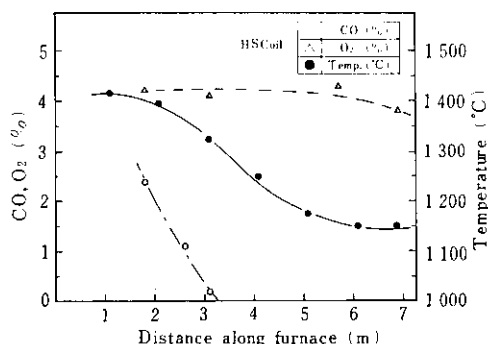
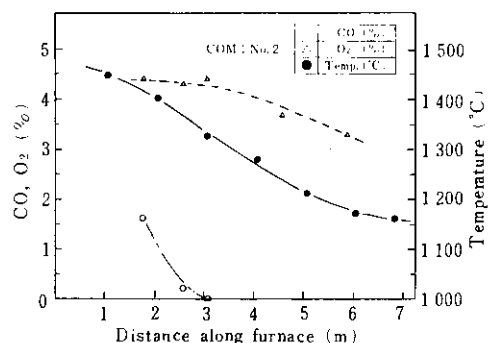
Photo. 2 An example of worn out valve sheet ring

計画にあたっては、高速でCOMが流れる部分を設けないようにすることが重要である。

4. 燃焼試験結果

COMの燃焼性は、使用炭材の種類、濃度によって変わると考えられるが、高炉においてCOMを使用する場合、重油と同程度の燃焼性であることが望ましい。

そこで、COMの燃焼性を重油との比較で調べるために、燃焼試験炉においてTable 3の各COMの燃焼試験を行った。試験方法は、重油燃焼用バーナ（蒸気噴霧による内部混合型）を用い、COMおよび燃焼用空気量を所定の値に設定し、炉内温度を1200℃に保ち、フラームガスの採取、温度分布の測定、燃焼状況の観察等を行った。測定例として、重油とNO.2 COMの炉内温度分布、ガス分布をFig. 15, 16に示す。この図から、重油とNO.2 COMでは、COの消失位置、炉内温度分布がほぼ等しく、両者の燃焼性には差はないと考えられる。炉内の温度分布、ガス分布については他のCOMも同じであった。しかし、COM燃焼時には、重油の場合と比べて、若干の未燃C

Fig. 15 CO, O₂ and temperature distribution in test furnace at oil combustionFig. 16 CO, O₂ and temperature distribution in test furnace at COM combustion

を含むダストの発生がみられ、さらに炭材として石炭を使用したCOMではNO_xの増加が著しかった。(Table 4 参照)。これは、石炭中にはN分が多いためと考えられる。高炉においてはダストもNO_xも問題とならないが、ボイラー等の設備でCOMを使用する場合には検討する必要がある。

Table 4 Result of COM combustion test

	COM No.	(Oil)	1	2	3	4	5	6	7	8
Air ratio	—	1.22	1.16	1.17	1.21	1.18	1.13	1.14	1.07	1.02
Furnace temperature	°C	1200	1230	1235	1235	1200	1220	1200	1280	1210
O ₂ concentration	%	3.5	2.9	3.2	3.6	2.7	2.9	2.2	2.2	1.5
Dust concentration (*)	g/Nm ³	0	3.0	5.8	2.5	3.7	1.7	2.5	0.66	5.4
Unburned C in dust	%	0	(**)	6.6	1.5	2.1	2.3	5.0	0.4	12.0
NO concentration	ppm	169	244	296	244	300	156	154	193	162

(*) : Calculated value

(**) : Not sampled

5. 結 言

COMの物理的性質の測定および実験プラントを用いた流送、分配実験から、炭材濃度50%程度のCOMを安定して高炉各羽口に供給するための設備条件、制御方法ならびにCOMに使用する炭

材に具備すべき要件、分散剤の効果など、COMを高炉操業に適用するための知見が得られた。しかしながら、現在なおエネルギー事情は流動的であり、今後本結果の実機への適用にあたっては、資源的背景ならびに経済的見地からの検討が必要となろう。

参 考 文 献

- 1) 森永ら; 鉄と鋼, 51 (1965) 4, 618
- 2) 森永ら; 鉄と鋼, 52 (1966) 2, 107
- 3) 菊池ら; 鉄と鋼, 53 (1967) 10, 31
- 4) Thomas, D.G.; Ind. Eng. Chem, 55 (1963) 11, 18
- 5) Thomas, D.G.; Ind. Eng. Chem, 55 (1963) 12, 27