

# 石炭—水スラリーのレオロジー特性

薄井 洋基\*・佐野 雄二\*・奥村 富成\*\*  
中井 成行\*\*\*・沢田 守彦\*\*\*

## Rheological Properties of Coal-Water Slurries

Hiramoto USUI, Yuji SANO, Tomishige OKUMURA,  
Shigeyuki NAKAI and Morihiko SAWADA

### Abstract

Flow characteristics of coal-water slurries were measured by means of a flow test equipment which was specially arranged for the transportation of highly loaded coal-water slurries. It was confirmed that, as a rheological model, Bingham model was most appropriate to represent the flow characteristics of coal-water slurries. The effects of solid concentration, slurry temperature and additive concentration on the rheological parameters were experimentally determined. The way for the improvement of the slurry preparation method was discussed combining with the experimental results.

### 1. 緒 言

石炭を液体燃料として利用する際の一つの方法として、石炭—水、高濃度スラリーの直接燃焼による利用法がある。従来、COM (Coal-Oil Mixture) の利用については多くの報告例があるが<sup>1)</sup>、最近では石炭濃度を 60~70 wt% まで増加することができれば、溶媒が水であっても燃焼が十分に行われることがわかっており、積極的に石炭—水スラリーを利用する技術が模索されている<sup>2)</sup>。本研究では石炭—水スラリーの燃焼プロセス中（即ち、粉碎・脱灰・スラリー輸送・燃焼の一連の工程中）、特にスラリー輸送を取り上げ研究対象とした。石炭—水スラリーの輸送は石炭の濃度が低ければ既に多くの実績<sup>1)</sup>があるが、これを直接燃焼させる為には石炭濃度を出来るだけ高く保つ必要がある。このような高濃度スラリーにおいては、スラリー濃度、スラリー温度、添加剤濃度等がスラリーの流動性に重要な影響を及ぼす<sup>2)</sup>。そこで本研究では数種の石炭—水スラリーについて、その流動特性を回分式流通

試験器およびB型粘度計により測定し、流動特性に及ぼす種々の要因を明らかにする目的で実験的研究を行った。高濃度スラリーの流動特性に関する研究の主目的は、流動性が良く、しかも静置時には固体分の沈降分離が生じない安定性の良いスラリーの調整方法を確立することであるが、ここではその様な主目的へ到達する為の一助とすべく、上述の各種要因の流動特性に及ぼす影響を議論することとする。

### 2. 試料と実験装置および方法

原料炭として、コールバレー炭を用いた。原料炭は主に湿式粉碎機にて粉碎し、粒度分布の調整を行った。原料炭の工業分析値を Table 1 に、粒度分布を Fig. 1 に示す。粉碎された石炭を乾燥後、添加剤（β-ナフタレンスルホン酸 Na のホルマリン縮合物）を

Table 1 Proximate analysis of test coal (Coal Valley)

Moisture	8.0%
Ash	10.6%
Volatile matter	34.5%
Fixed carbon	46.9%

\* 化学工学科

\*\* 化学工学科（現、九州大学大学院化学機械工学専攻）

\*\*\* 宇部興産(株)、中央研究所

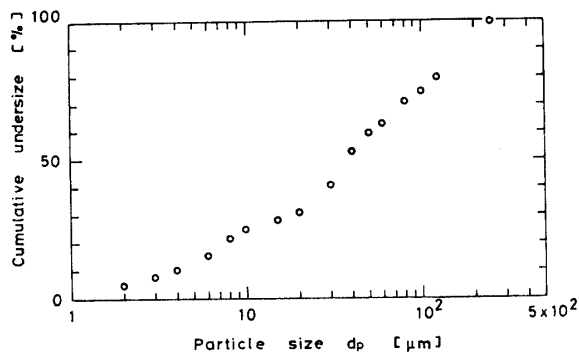


Fig. 1 Particle size distribution of "Coal Valley" coal.

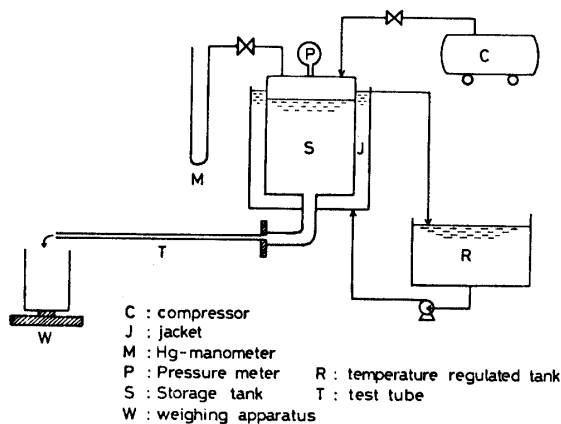


Fig. 2 Flow test equipment with a circular tube.

0~0.15 wt%/slurry 加え所定の水に混合してスラリー化した。この石炭-水スラリーの流動特性の測定には回分式流通試験機と市販のB型粘度計を用いた。回分式流通試験機の概略を Fig. 2 に示す。試料は一定温度になった後、チクソトロピー性（即ち、せん断履歴の影響に起因する粒子間構造の差異）の影響を一定にする為、10分間ハンドミキサーにより攪拌された。その後、直ちにコンプレッサーからの圧力を付加し、流量を重量法で測定すると共に、圧力容器内のゲージ圧をブルドン管圧力計（1~6 Kg/cm<sup>2</sup>）または水銀柱マノメータ（0~1.5 Kg/cm<sup>2</sup>）で測定した。圧力容器内の液柱圧力の補正を行った後、試験管管入口・出口圧力差と流量測定結果より Krieger-Maron の方法によりスラリーの流動特性曲線を決定した。試験管管は内径； $D=9.4\text{ mm}^\phi$ 、管長； $L=2000\text{ mm}$ 、および  $D=6.0\text{ mm}^\phi$ 、 $L=1000\text{ mm}$  の二種類のステンレス管を使用した。試験管管径が小さ過ぎると石炭粒子径との相対的な関係から得られる流動特性に管径の影響があらわれると考えられる。しかしながら、同一試料について  $D=6.0\text{ mm}^\phi$  と  $9.4\text{ mm}^\phi$  の場合について得ら

れた実験結果を比較したところ、両者の流動曲線は良く一致した。これより、Fig. 1 に示した本実験の粒度分布では最大  $250\sim 300\text{ }\mu\text{m}$  の石炭粒子を含むが、このような試料は管径  $6\text{ mm}$  以上の流通系では連続相と見なしてのレオロジー的取扱いが可能であると言える。そこで以下においては  $D=9.4\text{ mm}^\phi$  の試験管管によって得られた結果のみを示すこととする。 $D=9.4\text{ mm}^\phi$  の場合、 $L/D=213$  なので、管入口・出口の末端効果は無視できるとした。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 石炭濃度のスラリー流動特性に及ぼす影響

石炭高濃度スラリーの見かけ粘度に対する濃度依存性は山形等<sup>9)</sup>により相関式が提出されているが、ここでは石炭-水スラリーの流動特性曲線を表わすのに妥当と思われるビンガムモデルのモデル定数を濃度により相関する事を試みる。Fig. 3 に石炭重量パーセント； $C_w=56.74\sim 62.42\text{ wt}\%$ 、添加剤（ $\beta$ -ナフタレンスルホン酸 Na のホルマリン縮合物） $0.15\text{ wt}\%$ /slurry、温度  $23^\circ\text{C}$  のコールバレー炭-スラリーの流動特性を示す。図よりビンガムモデル、

$$\tau = \tau_y + \eta D_s \quad (1)$$

により流動特性が良く近似できることがわかる。ここで  $\tau$ 、 $\tau_y$ 、 $\eta$ 、 $D_s$  はそれぞれ、せん断応力、降伏応力、ビンガム塑性粘度およびせん断速度である。

従来、高濃度粒子懸濁液の粘度に対する濃度依存性を表わす式として Mooney<sup>3)</sup> または Roscoe<sup>4)</sup> の式が多用されている。本研究ではビンガム塑性粘度が Mooney または Roscoe の提案した式と同じ型で整理できると仮定して次式を用いることとした。

<Mooney model>

$$\eta/\eta_s = \exp\left\{\frac{2.5(C_w/100)}{1-k(C_w/100)}\right\} \quad (2)$$

<Roscoe model>

$$\eta/\eta_s = \{1-K(C_w/100)\}^{-2.0} \quad (3)$$

原式では  $(C_w/100)$  の代りに固体体積分率； $\phi$  を用いているが、本研究では実験結果との比較を容易にする為に重量パーセント； $C_w$  を用いた。 $\eta_s$  は溶媒粘度であり、 $k$  は Mooney の crowding factor、 $K$  は Roscoe モデルにおける有効濃度の増加分に対する係数である。Fig. 3 に示した実験結果を普通目盛に点綴し、その傾きと切片よりビンガムモデルのパラメータ、 $\eta$  および  $\tau_y$  を決定した。各濃度における  $\eta$  の値より、(2)式または(3)式より  $k$  または  $K$  を決定すると  $k=1.25$ 、 $K=1.51$  が得られた。一方ビンガムモデルの降

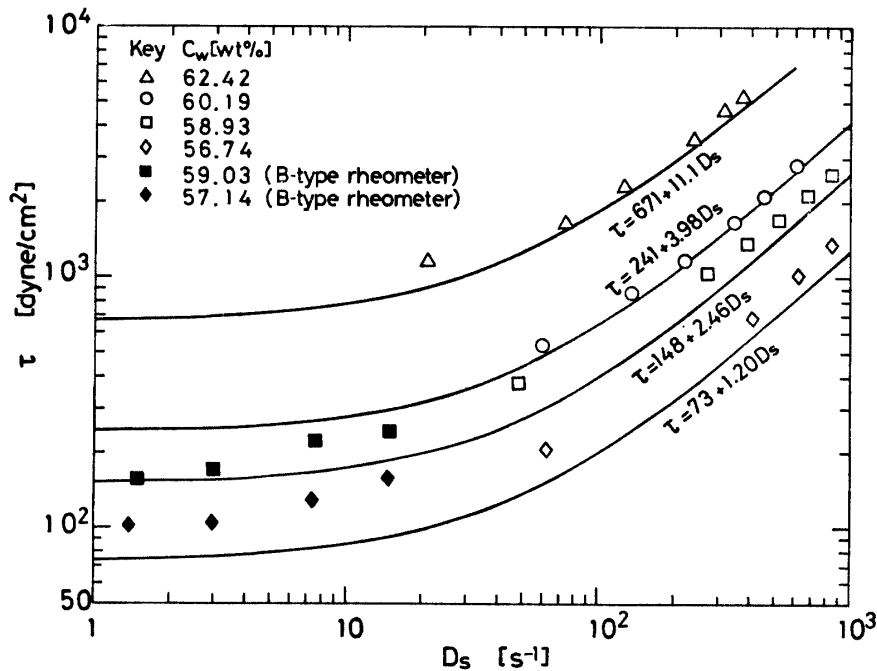


Fig. 3 Flow characteristics of coal-water slurries with 0.15 wt% additives.

伏応力； $\tau_y$  の濃度依存性については現在まで報告例が非常に少ない<sup>6)</sup>。本研究の測定結果は降伏応力とビンガム塑性粘度との比が濃度に依存せず、 $\tau_y/\eta=50\sim 70[s^{-1}]$  となる事を示した。そこで、降伏応力のモデル化は困難であるが、 $\tau_y/\eta=一定$ 、として実験結果の整理上、降伏応力の濃度依存性は塑性粘度のそれに等しいと仮定することにした。一般には粘度と降伏応力とは1対1で対応するものではなく、懸濁粒子の差異により同一粘度でも降伏応力に大きい違いがある場合が多い。本研究では同一試料で、しかも濃度範囲が  $C_w=56\sim 63\text{ wt}\%$  と、かなり狭かった為に上述のような関係が得られたものと思われる。Fig. 3 の各測定の  $\tau_y/\eta$  の平均値をとると  $\tau_y/\eta=60.5[s^{-1}]$  と決定された。

以上、決定された  $k=1.25$ ,  $K=1.51$ ,  $\tau_y/\eta=60.5[s^{-1}]$  を用いて、(2)式または(3)式より任意の濃度に対するビンガムモデルのパラメータ、 $\eta$  および  $\tau_y$  を求めることができる。Fig. 3 中には、この様にして決定されたビンガムモデル式とその流動曲線を実線で示したが、実測値との一致は良好である。これより或る石炭—水スラリーがある場合、2～3の濃度について流動特性を測定し、実験的に上述の  $k$ ,  $K$ ,  $\tau_y/\eta$  の値を決定しておけば、Mooney または Roscoe の式を用いて任意の濃度についての流動特性曲線を予測することが可能であると結論される。

実際の石炭—水スラリー輸送プロセスにおいては固

体粒子の管壁に対するエロージョンの問題から余り流速を高くとれず、管内の平均せん断速度は  $50\sim 200[s^{-1}]$  程度と予想される。本研究において製作した回分流通試験器は Fig. 3 で示されたせん断速度範囲で明らかな様に実用上の、せん断応力 vs. せん断速度の関係を求めるのに十分な機能を有している。ただ低せん断速度域での測定が不可能であり、一方B型粘度計による低せん断速度域での測定結果も定量的には信頼性に欠ける面もあるので、本研究で求めた降伏応力の値はあくまで高せん断速度域のデータからの外挿値であると解釈すべきである。

### 3.2 添加剤濃度の流動特性に及ぼす影響

添加剤の濃度の影響を議論する以前に安定性と流動性が共に良い添加剤としてどの様なものを選定するかが重要な問題である。ここでは宇部興産(株)中央研究所にて検討した結果、コールバレー炭に対して最も性能が良いとされた添加剤、 $\beta$ -ナフタレンスルホン酸 Na のホルマリン縮合物についてのみ、その濃度の影響を考察する。前節と同様の実験および整理方法により得た添加剤無しの場合のコールバレー炭—水スラリーの流動特性曲線を Fig. 4 に示す。紙面の都合上、結果は図示しないが、添加剤濃度； $c=0.075\text{ wt}\%/slurry$  についても同様の結果を得た。

各添加剤濃度について  $C_w$  を一定に保つ事が実験上困難であったので、各スラリーについて決定した  $k$ ,

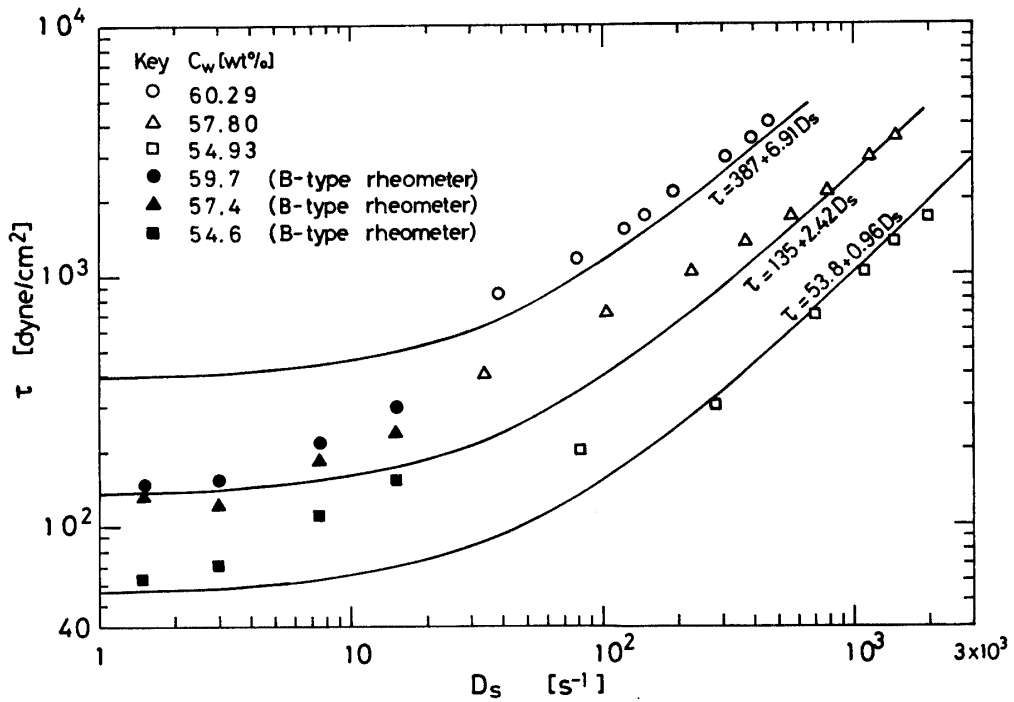


Fig. 4 Flow characteristics of coal-water slurries with no additive.

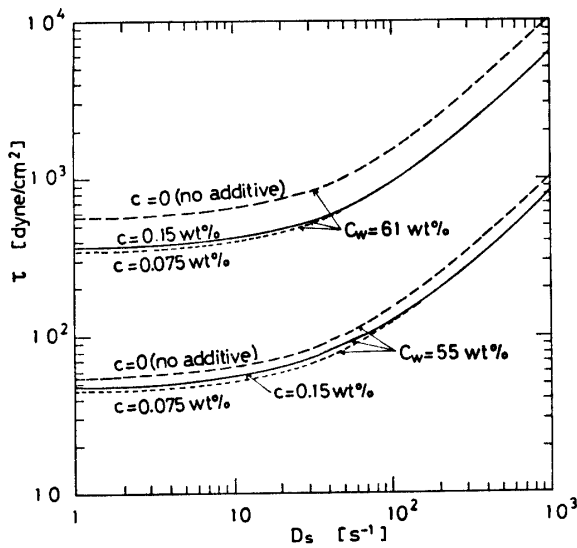


Fig. 5 Effect of additives on the flow characteristics of coal-water slurries.

$\tau_y/\eta$  を用いて同一濃度における流動曲線を比較したのが Fig. 5 である。図より  $c=0.075$  wt% と  $c=0.15$  wt% ではほとんど流動曲線に差がなく、添加剤の効果は 0.075 wt% 程度で飽和していると考えられる。添加剤の効果があどの程度少量の添加量であらわれるのかは今後の検討課題である。無添加の場合は、 $C_w=55$  wt% の時、添加剤有りのものと余り差がないが、 $C_w=61$  wt% と石炭濃度が高くなるにつれ添加剤

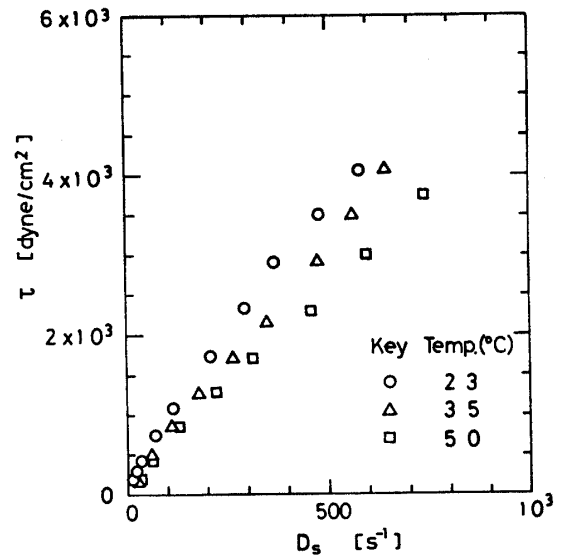


Fig. 6 Effect of slurry temperature on the flow characteristics of coal-water slurries.

の効果は顕著になって来る。

### 3.3 流動特性に及ぼすスラリー温度の影響

石炭-水スラリーを燃焼器まで輸送する場合、輸送経路内でスラリー温度が変化する場合が多いので、流動特性に及ぼす温度の影響を把握することが重要である。本研究では実験装置の関係上、常温~50°C の温度範囲での測定結果しか得られなかったが、その結果

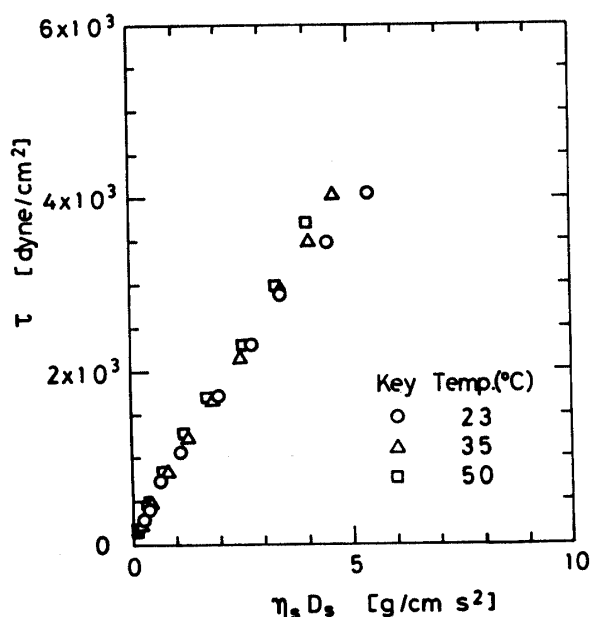


Fig. 7 Evaluation of the temperature effect using the solvent viscosity.

を Fig. 6 に示す。同一せん断速度における応力の値はスラリー温度が上昇するにつれて低下しており、粘度が低下している事を示している。温度上昇による粘度の変化は提・吉田<sup>6)</sup>が石炭スラリーに対して、(せん断応力) vs. (溶媒粘度) × (せん断速度) で評価できると報告しているの、同様の試みをしたのが Fig. 7 である。図より溶媒粘度の温度変化を考慮することにより、石炭—水スラリーの流動特性に及ぼすスラリー温度の影響を評価できることがわかる。実際のプラントでは本実験で得られた温度範囲よりも、もっと大幅にスラリー温度が変化しており、Fig. 7 の様な整理方法が、どの程度高温域まで適用できるのかは、更に実験結果の集積を行わなければ明言できない。

#### 4. 結 言

コールバレー炭—水スラリーについて、その流動特性を測定し、レオロジーパラメータの決定方法を検討した。その結果、以下の様な結論が得られた。

- 1) 高濃度スラリーはビンガム流体と見なして良い。
- 2) 適当な粘度分布、添加剤が与えられると、まず常温で2~3の濃度に対する回分流通試験を行い流動特性より Mooney または Roscoe のパラメータ： $k$  または  $K$  を決定し、 $\tau_0/\eta$  の値も決定しておく。溶媒粘度の温度変化を評価しておく。以上のデータを用いて本文中に述べた方法により、任意の温度・石炭濃度に対するスラリーの流動特性を予測することが可能である。

本報告で取り扱った石炭—水スラリーは炭種・添加剤・粘度分布・濃度、温度範囲等、極く限られた条件下での実験に止まっており、今後広範囲の実験条件下での測定結果の集積が望まれる。

#### 参 考 文 献

- 1) Fister, L.C.: Can. Inst. Minn. Metal Bull., 75, 71 (1982).
- 2) Miyazaki, T. and Y. Shoji: 粉体工学会誌, 20, 221 (1982).
- 3) Mooney, M.: J. Colloid Sci., 6, 162 (1951).
- 4) Roscoe, R.: Erit. J. Appl. Phys., 3, 267 (1952).
- 5) Tsutsumi, A., K. Yoshida and K. Murata: 化学工学, 46, 482 (1982).
- 6) Thomas, D.G.: AIChE J., 9, 310 (1963).
- 7) Yamagata, Y., T. Kokubo, S. Suzuki and T. Moro: Proc. 7th Int. Conf. Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Sendai (1980).

(昭和59年4月12日受理)