脱灰石炭造粒粒子の解砕による石炭—重油—水 混合物の静置安定性

Static Stability of Coal-Oil-Water Mixture Prepared by Disintegration of Deashed Coal Agglomerates

高 瀬 均*, 宮 崎 修 治*

Hitoshi TAKASE, Shuji MIYAZAKI

The static stability of COW (Coal-Oil-Water Mixture), which is made by the disintegration of deashed coal agglomerates, is investigated. The static stability is evaluated by two methods, that is, the direct measurement of coal volume fraction in COW and the rod penetration test. When the static stability of COW is high, the difference of coal volume fraction between the upper section and the lower section of the storage column is small, and the 50% diameters of coal particles in both sections are almost equal in size. On the other hand, when the static stability of COW is low, the coal volume fraction becomes large in the lower section, and in contrast the water volume fraction becomes large in the upper section. It is found that the rod penetration test only shows whether the hardpack layer of coal particles is formed on the column bottom. An empirical equation, which represents the degree of the static stability of COW, is obtained.

Key Words : COW, Static Stability, Yield Value, Deashed Coal Agglomerate

1. 緒 言

エネルギー資源の枯渇化が懸念される中において、石炭は現在においても世界的に見ればその埋蔵量は膨大である。しかし、我が国の石炭資源は少なく、現在、石炭消費量のほとんどを海外から輸入している¹⁾。これより我が国では、輸入炭、国内産炭を問わず、石炭資源の一層の有効利用がなされねばならない。石炭可燃成分の含有量の少ない低品位炭の脱灰による高品位化は、石炭資源の有効利用法の一つとして、今後ますますその重要度が増すと考えられる。著者らは前報²⁾において、石炭の脱灰をオイルアグロメレーション法^{3,4)}により行い、得られた脱灰石炭造粒粒子を添加剤が無添加の条件で再び解砕して、石炭—重油—水混合物（以後、COW と呼ぶ）を製造し、その流動特性について検討した。その結果、製造された COW は、30～50℃ の条件においてビンガム流動性

を示し、ずり速度が 10s^{-1} の条件でみかけ粘度が $0.33 \sim 4.0\text{Pa} \cdot \text{s}$ となることを示した。

COW は、石炭の流体化エネルギーとして、主にボイラーなどで燃焼させて利用されることが考えられる。COW の製造地と消費地が異なる場合、COW は製造→貯蔵→輸送→貯蔵→燃焼という経路をたどって利用されることになる。本研究では、COW の貯蔵がタンク内など静置下で行われることを仮定して、静置条件下での COW の安定性について検討を行う。COW の静置安定性が良いとは、静置前後で静置容器内の各地点における石炭、重油、水の容積分率の変化が小さいことを意味する。静置安定性が悪い場合、静置後、静置容器の上部と下部では COW 中の成分割合が大きく異なる。このような状態の COW を使う場合には、前処理として COW 中の成分の再均一化を行う必要が生じる。静置安定性が極度に悪い場合には、容器底部付近に石炭粒子の沈降圧密層であるハードパック層が形成される。ハードパック層は堅固であり、これを破壊して再び容器中で各成分の均一化を行うことはかなり困難である。

本研究では、COW の静置安定性について、静置後の COW 中の各成分の容積分率測定、特に石炭粒子の

1998年9月7日受付

* 富山大学工学部物質生命システム工学科

(〒930-8555 富山市五福3190) TEL 0764-45-6830

Department of Material Systems Engineering and Life Science, Toyama University

(3190 Gofuku, Toyama-shi 930-8555)

容積分率測定の結果に基づく検討を中心に行う。また、同時に現場サイドでよく利用される棒貫入法試験を行い、各成分の容積分率測定の結果との関係などから、同試験より得られる結果の意味について考察する。

2. 実験方法

2.1 静置安定性試験装置

前報²⁾において脱灰石炭造粒粒子からCOWを製造したが、そのCOWの一部が前報でのCOWの流動特性の測定に使われ、残りのCOWを本研究での静置安定性試験に用いた。COW製造時に混入した気泡の除去操作後、スパチュラでCOWを十分に混合し、その後直径4cm、高さ22cmの円筒型の静置安定性試験容器に18cmの高さまでCOWを入れた。静置安定性試験容器は、透明アクリル樹脂製で上端は解放されており、底部には取り外しのできる底板が付けてある。次に、試験容器上部をフィルムで密封し、これを恒温槽内に静置した。静置温度を30、40、50℃とし、静置期間を10日間とした。COW中の石炭、重油（A重油とC重油の混合重油）、水の平均容積分率、 ϕ_{vc0} 、 ϕ_{vo0} 、 ϕ_{vw0} を、それぞれ0.26~0.37、0.48~0.62、0.10~0.19の範囲内で変化させた。また、これを石炭、重油、水の平均重量分率、 ϕ_{wc0} 、 ϕ_{wo0} 、 ϕ_{ww0} の変化で表すと、それぞれ0.37~0.49、0.38~0.51、0.09~0.18となる。Table 1、Fig. 1に、COW中の石

Table 1 Properties of coal

Ultimate analysis (dry ash free basis) (%)						$\rho_c(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$d_{90}(\text{m})$
C	H	O	N	S			
81.9	5.0	10.7	1.9	0.5		1.50×10^3	1.03×10^{-5}

Fig. 1 Particle size distribution of coal in COW

Table 2 Properties of mixed heavy oil

T (°C)	ρ_o ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	μ_o ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	γ_{ow} ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
30	8.90×10^2	53.0	2.49×10^{-2}
40	8.83×10^2	32.2	2.55×10^{-2}
50	8.76×10^2	21.0	2.64×10^{-2}

炭の物性および遠心沈降式粒度分布測定装置（島津製作所、SA-CP3）で測定された粒子径分布を示す。乾燥石炭中の灰分含有率は10.5%である。Table 2に、COW中の重油の物性を示す。

2.2 静置安定性の判定法

2.2.1 成分容積分率測定

(1) 各成分の容積分率測定法

10日間の静置後、静置安定性試験容器内の各成分の容積分率測定を、以下のように行った。測定位置を、試験容器底部から1、3、7、11、15、17cmの高さの位置とした。静置終了後、試験容器を4℃に保った恒温槽に入れて、COWを冷却、固化させた。次に、試験容器上部の密封のためのフィルムおよび底板を取り外し、直径3.9cm、厚さ2cmの円板を先端に付けた押し出し棒で、試験容器内から固化したCOWを押し出した。COW柱から各測定高さを中心にして厚さ約1cmの円板状部分を切り取り、その重量 w_i を測定した。

円板状COW中の各成分の容積分率を、次の方法で求めた。まず、円板状COWを幾つかに分割してそれぞれ重量を求めた後、これらを以下の測定に用いた。COW中の石炭重量測定を次のように行った。分割されたCOWの1個を約50℃に温めたヘキサン中に入れて攪拌し、COW中の重油の洗い出しを行った後、これをろ過した。ろ過後、COW中の石炭粒子はろ紙（ADVANTEC社、GF75）上に分離される。ヘキサンによる重油の洗い出しが不十分な場合には、ろ液がもとのヘキサンと同じ色となるまで、ろ紙上の石炭粒子に更にヘキサンを掛けて洗浄した。ヘキサン洗浄後、ろ紙上の分離石炭粒子の乾燥重量を測定し、分割されたCOWともの円板状COWとの重量比から、円板状COW中の全石炭重量 w_c を算出した。円板状COW中の全水分重量 w_w を、次のように求めた。分割されたCOW数個中の水分重量を、JIS K 2275「原油及び石油製品水分試験方法」の蒸留法により求め、円板状COW重量と分割されたCOW数個の重量との比から w_w を求めた。円板状COW中の全重油重

量 w_o を、 w_i から w_c 、 w_w を差し引いて求めた。これより、各成分の静置温度における密度を使うことにより、各測定高さにおける石炭容積分率 ϕ_{vc} は、Eq. (1)により求められる。

$$\phi_{vc} = \frac{\frac{w_c}{\rho_c}}{\frac{w_c}{\rho_c} + \frac{w_o}{\rho_o} + \frac{w_w}{\rho_w}} \quad (1)$$

重油、水の容積分率 ϕ_{vo} 、 ϕ_{vw} も、Eq. (1)と同様な式により求められる。

(2) 静置安定性の判定

静置安定性試験容器の底部から1cmと17cmの高さの位置における石炭容積分率 ϕ_{vc1} 、 ϕ_{vc17} を使って、Eq. (2)により石炭容積分率測定に基づく静置安定性指数 ψ_c を定義した。

$$\psi_c = \frac{|\phi_{vc1} - \phi_{vc17}|}{\phi_{vc0}} \quad (2)$$

本研究では、 ψ_c の値を基準として、成分容積分率測定に基づくCOWの静置安定性の判定を行った。すなわち、 $\psi_c \leq 0.1$ のとき静置安定性が良いと判定し、 $\psi_c > 0.1$ のとき静置安定性が悪いと判定した。また、Eq. (3)により水の容積分率に基づく静置安定性指数 ψ_w を定義し、 ψ_c との関係について検討した。

$$\psi_w = \frac{|\phi_{vw1} - \phi_{vw17}|}{\phi_{vw0}} \quad (3)$$

2.2.2 棒貫入法試験

棒貫入法試験は、スラリーの安定性を定性的に簡便に判定するために行われる方法である。棒貫入法試験は、石炭スラリーであるCOM⁶⁾やCWM^{6,7)}の安定性の判定法としてもよく行われているが、貫入棒の大きさ、重量、あるいは安定性の判定基準は様々である。

本研究では、棒貫入法試験に基づくCOWの静置安定性の判定を、以下のように行った。静置期間終了後、前記のCOWの固化操作の前に、静置安定性試験容器内のCOW上端面よりガラス棒（直径0.5cm、長さ45cm、重さ20g）を垂直に落下させ、ガラス棒先端位置と経過時間を測定した。このとき、ガラス棒が試験容器底部まで達した場合、COWの静置安定性は良いと判定した。これに対し、落下途中において3分間以上落下距離がゼロとなった場合、COWの静置安定性は悪いと判定した。ガラス棒が落下しなくなるのは、ガラス棒の先端が石炭粒子のハードバック層に

Fig. 2 Volume fraction of coal and water in COW after 10 days storage

達したためである。前記2.2.1項のCOW中の各成分の容積分率測定においては、COW中にガラス棒を落下させたことによる影響を無視した。

3. 実験結果および考察

3.1 COWの静置安定性

3.1.1 石炭容積分率測定による判定

Fig. 2に、COWを10日間静置させた後の、静置安定性試験容器内の各高さ h における、石炭と水の容積分率 ϕ_{vc} 、 ϕ_{vw} の測定結果を示す。COW A ($\phi_{vc0} : \phi_{vo0} : \phi_{vw0} = 0.37 : 0.50 : 0.13$, $T = 30^\circ\text{C}$)の場合、 ϕ_{vc} 、 ϕ_{vw} は試験容器内の各高さでほぼ同じ値を示しており、静置期間中にCOW中の分散石炭粒子および分散水滴はほとんど移動していないことがわかる。これに対し、COW Aと同じ成分組成で静置温度 T を高くしたCOW B ($\phi_{vc0} : \phi_{vo0} : \phi_{vw0} = 0.37 : 0.50 : 0.13$, $T = 50^\circ\text{C}$)の場合、 ϕ_{vc} は試験容器下部で大きくなり、 ϕ_{vw} は試験容器上部で大きくなっている。これは静置中に、連続相である重油との密度差が水滴に比較してより大きい石炭粒子が下方へ沈降し、これに伴い重油より密度は大きいものの密度差が小さい水滴が上方へ押し出されたためと考えられる。COW C ($\phi_{vc0} : \phi_{vo0} : \phi_{vw0} = 0.27 : 0.60 : 0.13$, $T = 30^\circ\text{C}$)については ϕ_{vc} の結果のみを示したが、この場合も ϕ_{vc} は試験容器底部へ向かうほど大きくなり、石炭粒子の沈降が起きていることがわかる。静置安定性指数 ψ_c により各COWの静置安定性を判定すると、COW Aは $\psi_c \leq 0.1$ となり静置安定性は良く、COW B, Cは $\psi_c > 0.1$ となるこ

Fig. 3 50 % diameter of coal particle in COW after 10 days storage

Fig. 4 Maximum diameter of waterdrop in COW after 10 days storage

とから、静置安定性は悪いと判定される。

Figs. 3, 4 に、静置後の COW 中の石炭粒子の 50 % 粒子径 d_{50} 、最大液滴径 d_w の測定結果を示す。 d_{50} は、COW 中の石炭粒子をヘキサン洗浄した後乾燥し、その粒子径分布を遠心沈降法により測定することにより求められた。 d_w を前報²⁾で述べた方法により測定した。静置安定性の良い COW A の場合には、 d_{50} 、 d_w とともに測定位置の高さ h の違いによる差はほとんど見られない。一方、静置安定性の悪い COW B, C では、 d_{50} はともに試験容器底部で大きくなり、上部で小さくなっている。これは、石炭粒子の粒子径が大きいほど沈降が起こり易く、その移動距離も大きいこと

Fig. 5 Relationship between ψ_w and ψ_c

を示すものと言える。COW B に対する d_w の値は、水の容積分率 ϕ_{vw} が大きくなる試験容器上部で急激に大きくなり、 $h=17\text{cm}$ における d_w は静置前の d_w の値である $61\mu\text{m}$ の約 2 倍となっている。これは、 ϕ_{vw} が大きい試験容器上部では各液滴が接近し、これにより液滴の合体が進んだためと考えられる。Figs. 3, 4 の結果からわかるように、静置安定性が悪いと判定される場合には、静置後の COW 中では各成分は均一に分布しておらず、このような COW を使う場合には、攪拌などによる COW 中の成分の再均一化が必要である。

Fig. 5 に、Eqs. (2), (3) で定義される ψ_c と ψ_w の関係を示す。図より明らかなように、 ψ_c と ψ_w はほぼ比例関係にあり、 ψ_c の増大につれて ψ_w も増大することがわかる。これは前記したように、石炭粒子の沈降と水滴の上昇が互いに連動した現象であるためである。これより、 ψ_c の値は COW 中の全成分の分布状態の指標となりうると考えられ、成分容積分率測定に基づく COW の静置安定性の判定を、 ψ_c の値に基づいて行うことは妥当と考えられる。

3. 1. 2 棒貫入法試験による判定

Fig. 6 に、前の 3.1.1 項で検討した 3 種類の COW に対する棒貫入法試験の測定結果を示す。COW A, C の場合、所要時間は異なるがそれぞれ貫入棒は試験容器底部まで達しており、棒貫入法試験により COW A, C は共に静置安定性が良いと判定される。COW B の場合には、貫入棒は貫入棒先端と試験容器底部との距離 h_r が 5.9cm となったところで停止しており、これより静置安定性は悪いと判定される。貫入棒が $h_r=5.9\text{cm}$ のところで停止したのは、 $h_r \leq 5.9\text{cm}$ の部分に堅固な石炭粒子のハードパック層が形成されているためである。Fig. 2 より、この部分の ϕ_{vc} は 0.45

Fig. 6 Rod penetration test

～0.48であることがわかる。また、本研究全体においても、ハードパック層中の ϕ_{vc} は0.44～0.48の範囲となった。一方、脱灰前の粉碎石炭粒子($d_{50}=11.2\mu\text{m}$)の空气中で測定されたランダム密充填状態での充填容積分率は、0.43～0.45である。空气中で測定された充填容積分率の結果を液中に直接適用することはできないが、ハードパック層中の $\phi_{vc}=0.44\sim 0.48$ という値は、重油中における石炭粒子のランダム密充填における充填容積分率に近い値と考えられる。このため、ハードパック層は堅固となり、また ϕ_{vc} が0.48を超える値にもならないものと考えられる。COW Cに対するFig. 2とFig. 6の結果より、棒貫入法試験で静置安定性が良いと判定される場合、それは再均一化が困難なハードパック層が形成されていないことを保証するものであり、COW 中での各成分の均一性を保証するものではないことがわかる。

3. 2 静置安定性についての考察

Fig. 7に、本研究で行ったCOWの静置安定性試験の結果を示す。静置安定性は、COW中の全分散相容積分率である $\phi_{(vc+vw)0}$ が大きいほど、また静置温度 T が低いほど良いことがわかる。これは連続相である重油の粘度が温度の低下につれて増大すること、また分散粒子間に働く相互作用力が、スラリーの流動性の低下を一層助長することが原因と考えられる。前報²⁾で示したように、 $\phi_{(vc+vw)0}$ が大きく T が低いほど、COWのビンガム流動性が強くなり、特に降伏値が急激に増大する。その結果、分散粒子がCOW中を移動しにくくなり、静置安定性が良くなる。

これまで、石炭スラリーの安定性はスラリーの降伏値との関係から多くの検討がなされてきたが、そのほ

Fig. 7 Results of static stability test of COW
R.P.T.: Rod penetration test

とんでは両者の定性的な関係について述べるに止まっている^{5, 6, 8)}。その原因は、ビンガム流体中での沈降現象の複雑さにあると考えられる。一方、Meyerら⁹⁾は、ビンガム流体中の球形粒子を沈降させない降伏値 σ_y の条件として、実験結果および粒子に働く力に関する簡単なモデル化から、Eq. (4)を提案している。

$$\sigma_y > \frac{2}{3} d (\rho_p - \rho_d) g \quad (4)$$

ここで、 ρ_p 、 ρ_d は粒子および分散媒の密度である。Eq. (4)は、分散粒子の安定化のための条件を定量的に論ずることができる点で優れており、薄井ら⁷⁾はEq. (4)を参考にしてCWMの安定性について検討している

Fig. 8は、本研究で行った静置安定性試験の結果とCOWの降伏値 σ_y 、全分散相容積分率 $\phi_{(vc+vw)0}$ との関係を示したものである。 σ_y は、回転粘度計（東京計器、B8L型粘度計）を使って測定された値²⁾を用いた。 σ_y の値はCOWの静置安定性に影響し、 $\phi_{(vc+vw)0}$ が同じ条件では、 σ_y が大きくなると静置安定性が増す傾向が見られる。図中の破線は、分散石炭粒子に対してEq. (4)の右辺を計算した値を示したものである。ここで、粒子径 d としては、COW中の最大石炭粒子径である $100\mu\text{m}$ を用いた。静置温度 $T=30\sim 50^\circ\text{C}$ において、この計算値はほぼ同じ値となる。破線の上には静置安定性が良好な結果が多く、破線の下には $\psi_c \leq 0.1$ となるような安定したCOWは存在しない。これより、Eq. (4)はCOWの静置安定性を考える場合においても、有効な一つの判断基準を与えるものであるといえる。しかし、全体的には $\phi_{(vc+vw)0}$

Fig. 8 Influence of σ_y and $\phi_{(vc+vw)0}$ on static stability of COW

Fig. 9 Influence of σ_y and ϕ_{vc0} on static stability of COW

が大きくなるにつれて、良好な静置安定性を保つに必要な σ_y が増大する傾向が見られ、Eq. (4) のように分散粒子の物性値などから決まる σ_y の値のみで、COWの静置安定性が決定されていないことがわかる。この原因として、以下のことが考えられる。

石炭粒子径 $d=100\mu\text{m}$ に対するEq. (4)の右辺の値である 0.40Pa に比較して、COWの σ_y の値が圧倒的に大きい場合には、COW中での石炭粒子の沈降は不可能で、このとき $\psi_c \approx 0$ となってCOWの静置安定性は良くなる。一方、 $\sigma_y < 0.40\text{Pa}$ となる場合には、COW中の石炭粒子は静置期間中沈降することになる。Fig. 8の結果より、このような状況は、 σ_y が 0.40Pa よりも若干大きいような条件においても起こっていることになる。本研究で採用したCOWの静置安定性の判定法では、静置試験容器の底部付近の堆積石炭粒子層の充填状態が、静置安定性の判定に大きく影響を与える。降伏値 σ_y が比較的大きいCOWの場合、分散石炭粒子の沈降速度は小さくなる。しかし、 σ_y が大きいことはCOW中の平均石炭容積分率 ϕ_{vc0} が大きいことにつながり、静置容器底部の ϕ_{vc} が最初からハードパック層が形成される $\phi_{vc} = 0.44 \sim 0.48$ に近いことになる。このため、10日間の静置期間中に、試験容器底部に $0.44 \sim 0.48$ あるいはそれに近い ϕ_{vc} を持つ沈降圧密層が形成され、その結果として静置安定性が悪いと判定されることになる。一方、 σ_y が小さいCOWの場合には、COW中の ϕ_{vc0} は小さいものの、分散石炭粒子の沈降速度が大きくなる。このため、10日間の静置期間中に多量の石炭粒子が静置容器底部に沈降し、堅固な圧密層が形成され、静置安

定性が悪いと判定されると考えられる。Fig. 9は、COWの静置安定性の実験結果を、 σ_y vs. ϕ_{vc0} のグラフ上にプロットしたものである。図中の破線は、Fig. 8と同じく $d=100\mu\text{m}$ の石炭粒子に対するEq. (4)の右辺の計算値を示したものである。全体として、平均石炭容積分率 ϕ_{vc0} が大きくなるにつれて、静置安定性を保つのに必要な σ_y の値は大きくなる傾向が見られる。しかし、静置安定性の程度を示す3種類の記号の存在領域の区別は、Fig. 8ほど明瞭でない。これは、COWの静置安定性は分散石炭粒子の沈降に大きく影響されるものの、同時に分散水滴の存在によっても影響を受けているためと考えられる。分散水滴の与える影響は、主に沈降石炭粒子とそのために上昇せられる分散水滴の置換現象に関係していると考えられる。本研究におけるCOW中の分散水滴の最大径である $200\mu\text{m}$ を使って、分散水滴に対してEq. (4)の右辺を計算すると、その値は 0.14Pa となり、 $d=100\mu\text{m}$ の石炭粒子に対する 0.40Pa より小さい。これは、COWの静置安定性が悪い場合、まず粒子径の大きな石炭粒子が下方へ沈降し、それに伴い分散水滴が上方へ押し出される置換現象が起こるという考えを支持するものである。

以上の結果より、本研究で検討した範囲内のCOWの静置安定性は、次のEqs. (5), (6)によって分けられる。

$$\log \sigma_y > 6.6\phi_{(vc+vw)0} - 3.4 \quad (5)$$

$$\log \sigma_y > 6.6\phi_{vc0} - 3.2 \quad (6)$$

すなわち、Eq. (5)の条件を満たす降伏値 σ_y を持つ

COW は、すべて棒貫入法試験で安定と判定された。また、Eq. (6) を満たす σ_y を持つ COW は、すべて石炭容積分率測定に基づく安定性基準である $\psi_c \leq 0.1$ の条件を満たした。ただし、Eqs. (5), (6) は静置期間が 10 日間の場合に対して適用されるものであり、静置期間が異なる場合には、Eqs. (5), (6) の式形も異なってくると考えられる。また、COW 中の石炭粒子の粒子径分布などが本研究のものと異なる場合にも、Eqs. (5), (6) の式形は異なってくると考えられる。

4. 結 言

脱灰石炭造粒粒子から製造された COW (石炭—重油—水混合物) の静置安定性について、静置後の静置安定性試験容器の上部と下部の石炭容積分率の差を使って定義される静置安定性指数 ψ_c に基づく判定の結果、および棒貫入法試験により検討を加えた。これにより、以下の 1) ~ 3) の結果を得た。

1) $\psi_c \leq 0.1$ となって、 ψ_c の値に基づく判定法で静置

安定性が良いと判定される COW の場合、試験容器内の各高さにおける石炭粒子および水滴の容積分率、粒子径は、静置前後でほぼ同じ値となった。一方、 $\psi_c > 0.1$ となって静置安定性が悪い場合、石炭容積分率は試験容器下部で大きくなり、水の容積分率は試験容器上部で大きくなった。

- 2) 棒貫入法試験で静置安定性が良いと判定される場合には、静置後の COW 中に石炭粒子のハードパック層の形成は見られない。しかし、それは COW 中の各成分の分布の均一性を保証するものではない。
- 3) COW の静置安定性は、COW の降伏値により大きく影響され、分散粒子の沈降性と降伏値との関係を示した Meyer らの判別式が、COW の静置安定性に対しても一応の判定基準を与えることが確認された。一方、COW の静置安定性を良い状態に保つのに必要な降伏値は、COW 中の全分散相容積分率に影響された。本研究で検討した COW の安定性の程度を区別するための実験式を得た。

Nomenclature

d : particle diameter	(m)	respectively	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
d_w : maximum diameter of waterdrop in COW	(m)	ρ_d : density of disperse medium	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
d_{50} : 50 % particle diameter	(m)	ρ_p : density of particle	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
g : gravitational acceleration	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	σ_y : yield value	(Pa)
h : height from storage column bottom	(m)	$\phi_{vc}, \phi_{vw}, \phi_{vw}$: volume fraction of coal, heavy oil and water in COW, respectively	(—)
h_r : distance between lower end of rod and storage column bottom	(m)	ϕ_{vc1}, ϕ_{vc17} : ϕ_{vc} at the height of 1cm and 17cm from storage column bottom	(—)
h_0 : height of COW in storage column	(m)	ϕ_{vc+vw} : total disperse phase volume fraction in COW	(—)
R : cumulative oversize percent	(%)	ϕ_{vw1}, ϕ_{vw17} : ϕ_{vw} at the height of 1cm and 17cm from storage column bottom	(—)
T : temperature	($^{\circ}\text{C}$)	$\phi_{wc}, \phi_{wc}, \phi_{wc}$: weight fraction of coal, heavy oil and water in COW, respectively	(—)
t : time	(min)	ψ_c, ψ_w : static stability index defined by Eq.(2) and Eq.(3)	(—)
w_c, w_o, w_w : weight of coal, heavy oil and water, respectively	(kg)	<Subscript>	
w_t : total weight	(kg)	0 : average	
γ_{ow} : interfacial tension of heavy oil/water system	($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)		
μ_o : viscosity of heavy oil	($\text{Pa} \cdot \text{s}$)		
ρ_c, ρ_o, ρ_w : density of coal, heavy oil and water,			

References

- 1) Division of Coal Science and Technology : "Coal Production and Technology 1996", *Shigen to Sozai*, **113**, 723-731 (1997)
- 2) Takase, H. and S. Miyazaki : "Flow Characteristics of Coal-Oil-Water Mixture Prepared by Disintegration of Deashed Coal Agglomerates", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **35**, 856-863 (1998)
- 3) Capes, C. E., A. E. McIlhinney and R. D. Coleman : "Beneficiation and Balling of Coal", *Trans. AIME*, **247**, September, 233-237 (1970)
- 4) Takase, H., K. Higashi and M. Sugimoto : "Study on the Deashing of Coal by the Oil Agglomeration Process", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **28**, 430-436 (1991)
- 5) Takeshita, T., S. Maeda, M. Imayoshi, Y. Mitsuo, Y. Katayama and T. Kamikawa : "Effects of Additives on Sedimentation Stability of COM (II)", *J. Japan Petrol. Inst.*, **26**, 384-389 (1983)
- 6) Takezaki, H., H. Kikkawa, Y. Otani, K. Sato and K. Shoji : "Study on Storage Stability of Cleaned

- CWM", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **24**, 783-787 (1987)
- 7) Usui, H., T. Saeki and Y. Sano : "Stability Evaluation of Coal-Water Mixtures by Internal Structural Stress", *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 602-607 (1988)
- 8) Naka, A., H. Sugiyama and Y. Nishida : "Yield Point and Stability of Highly Loaded Coal-Water Mixture (CWM)", *Nippon Kagaku Kaishi*, No. 5, 899-904 (1987)
- 9) Meyer, R. J. and L. Cohen : "The Rheology of Natural and Synthetic Hydrophilic Polymer Solutions as Related to Suspending Ability", *J. Soc. Cosmetic Chemists*, **10**, 143-154 (1959)