石炭浮選における粒度の影響

——石炭浮選の研究（第1報）——

村 田 逞 詮*・岡 田 信 三**

Influence of Particle Size on Coal Flotation

—A Study on Coal Flotation (1st Report)—

Toshiaki MURATA and Shinzo OKADA

It has been said that the flotation rate of coal is favourable within the size range of 48~150 mesh. In the case of both sizes of over 20mesh and under -325 mesh, however, the flotation operation is very difficult on account of the decrease of flotation rate.

In the present paper, a series of flotation tests was done by using fraction of different sizes. The experimental samples was prepared by the clean coal and refuse from the baum jig in Yubari-Shinko washing plant.

As can be seen in Fig. 2, the flotation yield was the best within the size range of 35~100 mesh. On the other hand, it decreased with the decrease of particle size. Especially, the flotation yield of -325 mesh fraction was very poor. In the case of over 20 mesh fraction, it was 51.1~63.7%. these results was rather better than fine particle fractions. If the addition of flotation oil and the flotation time are increased, the flotation yield will increase even if particle size is larger than over 20 mesh.

The flotation yield of refuse increased with the decrease of particle size. The yield of under 325 mesh was 16.9%.

1. 緒 言

選炭工場における浮選操業管理において、粒度管理は浮選性におよぼす影響が大きいので、一般に重要な問題とされ、選炭工場によっては、浮選原炭シクナーのスピゴットをバンドシーブなどにかけ、粒度チェックをしているところもある。

そこで、こうした問題に参考資料を提供することを意図して、水選精炭、および水選研を供試原料とし、精炭はどの程度の大きさまで浮かすことができるか、また研は、どのような粒度範囲で、どの程度泡に付着して浮くのかを、実験的に確かめ、考察したので報告する。

2. 実 験

2.1 実験試料

* (財)石炭技術研究所, 春日部試験場, 現在三井造船㈱ (The Coal Mining Research Center, Kasukabe Laboratory, at present, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.)

** 日本セメント㈱鉱業部
昭和57年12月7日受理

実験試料には、夕張新鉱バウム樋先水選精炭、および同水選研を使用した。精炭の分析性状は第1表に示す。

2.2 実験装置

浮選試験機は MS 型試験機を使用した。同試験機の概略は第1図に示す。なお、主たる仕様は、次の通りである。

容 量	: 0.8 l
インペラー径	: 43 mmφ
インペラー回転数	: 2500 r. p. m.
インペラー周速	: 5.6 m/sec
気泡発生量	: 0.39 m ³ /min/m ²
浮選油量	: 400~1000 g/原炭t

2.3 実験手順

実験手順は次の通りである。

① 水選精炭を湿式ふるいにて、6~3mm, 3~1.7mm, 1.7~0.83mm, 0.83~0.42mm, 0.42~0.15mm, 0.15~0.074mm, 0.074~0.044mm, -0.044mm の8区分にふるい分けする。

② 水選研を -6mm に破碎して、水選精炭の場合と

Table 1 Analysis of Sample (Clean Coal)

Sample	Approximate analysis				Cal. value Kcal/kg	Ultimate analysis					
	I. M	Ash	V. M	F. C		(d. a. f.)					(d. f.)
						C	H	O	N	S	T. S.
Yubari shinko clean coal	0.9	5.0	35.3	58.8	8410	87.57	6.28	4.23	1.68	0.24	0.27

Sample	Atom ratio ⁽¹⁾				[Q] ⁽²⁾	Specific gravity	Contact angle ⁽³⁾
	[H]	[O]	[N]	[S]			
Yubari shinko clean coal	85.46	3.57	1.646	0.096	12200	1.31	70.1

notes (1) [H], [O], [N], and [S] : atomic ratios of H, O, N and ignitable S per 100atom C, respectively

(2) [Q] : Kcal per a mass of coal contained 100 mol atom C

(3) measuring method : see Nihonkogyokaishi (J. Mining Metal Inst. Japan), 96, (1110), 547, 1980 (by Toshiaki Murata)

Fig. 1. MS Type Flotation Test Machine

同様にふるい分けする。

③ 粒度別に分けられた水選精炭、および、水選研それぞれ16個の試料に、選炭シャワー水（廃水シクナーのオーバーフロー水）を加え、固形物濃度が15%程度以下を目安とし、それぞれ、800ml 程度のスラリーを作成する。

④ このスラリーそれぞれを別々に MS 型試験機に移し、30秒間予備攪拌し、浮選油（MIBC：ケロシン＝3：7）を注射針にて10滴（84mg）添加し、30秒間コンディショニングする。

⑤ 16試料それぞれについて、この30秒間のコンディショニングの後、ただちに、フロス No. 1（0～1分）、フロス No. 2（1～2分）、フロス No. 3（2～3分）の採取を行ない、残分をすべてテールとして底から抜き取る。

⑥ それぞれの試料について、フロス No. 1、フロス No. 2、フロス No. 3、およびテールの、湿重量、乾重量、灰分を測定する。

3. 結果および考察

実験結果を、第2表、および、第3表に示す。

この結果から、浮選性は、粒度および原炭の灰分に影響されていることがわかるが、この点をより詳細に検討する。なお、浮遊性に大きな影響を与える原液スラリーの pH 値は、ほぼ一定なので、議論の対象からはずす。

言うまでもなく、石炭浮選は、石炭表面の水に対する“ぬれ”にくさ、すなわち疎水性、および、油に対する“ぬれ”やすさ、すなわち親油性に基づく技術で、石炭表面の疎水性、親油性は、村田の研究^{1,2)} からわかるように、炭種・炭質によりまちまちで、単に灰分量の問題に帰結される問題ではなく、海外炭を含めた多炭種を検討する場合には、石炭の有機構造から派生する、石炭表面、および、石炭マイクロポア表面の官能基、例えば含酸素官能基のカルボキシル基や、ヒドロキシル基の検討⁴⁾ が必要になる。

しかし、今回は、特定の一炭種についての検討であるから、こうした問題は出てこない。だが、上記に関連して、夕張新鉱炭の有機質が、[H] 値³⁾ が高く、[O] 値³⁾ が低い、すなわち [H]－[O] コールバンド³⁾ と言うと、屈曲点より左側に位置する、疎水性で、親油性の高い炭質であることは浮選で浮きやすい炭質であることを示す。なお、表4に、当夕張新鉱炭と、他炭種・炭質との[H] 値および、[O] 値を、比較のために、掲載する。

石炭表面の疎水性、親油性などの“ぬれ”性は、本質的には、粒度によって左右されるものではないわけであ

Table 2 Results of flotation test in the case of the clean coal.

Size (mm)	Raw Slurry pH	Product		Slurry Weight		Slurry Density	Solid		Ash
				(g)	(%)	(%)	(g)	yield (%)	(%)
6.0-3.0 (+6 mesh) (4.5 mm)	8.08	Raw Coal		1009	100.0	11.6	117	100.0	4.4
		Froth	No. 1	25	5.5	68.0	17	14.5	—
			No. 2	38	3.8	57.9	22	18.8	—
			No. 3	33	3.2	63.9	21	18.0	—
			Total	96	9.5	62.5	60	51.3	3.3
		Tail		913	90.5	6.2	57	48.7	20.5
3.0-1.7 (6-10 mesh) (2.4 mm)	8.05	Raw Coal		1178	100.0	11.3	133	100.0	3.9
		Froth	No. 1	68	5.8	30.9	21	15.8	—
			No. 2	70	5.9	34.3	24	18.0	—
			No. 3	67	5.7	34.3	23	17.3	—
			Total	205	17.4	33.2	68	51.1	2.9
		Tail		973	82.6	6.7	65	48.9	21.3
1.7-0.8 (10-20 mesh) (1.3 mm)	8.09	Raw Coal		1111	100.0	14.1	157	100.0	3.9
		Froth	No. 1	86	7.7	44.2	38	24.2	—
			No. 2	93	8.4	38.7	36	22.9	—
			No. 3	81	7.3	32.1	26	16.6	—
			Total	260	23.4	38.5	100	63.7	3.2
		Tail		851	76.6	6.7	57	36.3	30.8
0.8-0.42 (20-35 mesh) (0.6 mm)	8.09	Raw Coal		976	100.0	12.6	123	100.0	4.5
		Froth	No. 1	126	12.9	38.1	48	39.0	—
			No. 2	110	11.3	35.5	39	31.7	—
			No. 3	90	9.2	23.3	21	17.1	—
			Total	326	33.4	33.1	108	87.8	3.5
		Tail		650	66.6	2.3	15	12.2	88.9
0.42-0.15 (35-100 mesh) (0.3 mm)	8.09	Raw Coal		901	100.0	13.0	117	100.0	7.4
		Froth	No. 1	170	18.9	33.5	57	48.7	—
			No. 2	148	16.4	27.0	40	34.2	—
			No. 3	105	11.7	11.4	12	10.3	—
			Total	423	47.0	25.8	109	93.2	4.7
		Tail		478	53.0	1.7	8	6.8	78.9
0.15-0.074 (100-200 mesh) (0.11 mm)	8.08	Raw Coal		847	100.0	9.2	78	100.0	18.4
		Froth	No. 1	135	16.0	25.9	35	44.9	—
			No. 2	110	13.0	22.7	25	32.0	—
			No. 3	69	8.1	15.9	11	14.1	—
			Total	314	37.1	22.6	71	91.0	8.3
		Tail		533	62.9	1.3	7	9.0	82.3
0.074-0.044 (200-325 mesh) (0.06 mm)	8.09	Raw Coal		889	100.0	6.3	56	100.0	30.1
		Froth	No. 1	131	14.7	16.8	22	39.3	—
			No. 2	103	11.6	10.7	11	19.7	—
			No. 3	77	8.7	6.5	5	8.9	—
			Total	311	35.0	12.2	38	67.9	10.9
		Tail		578	65.0	3.1	18	32.1	79.1
-0.044 (-325 mesh) (0.02 mm)	8.11	Raw Coal		876	100.0	7.5	66	100.0	34.8
		Froth	No. 1	98	11.2	12.2	12	18.2	—
			No. 2	82	9.4	11.0	9	13.6	—
			No. 3	50	5.7	10.0	5	7.6	—
			Total	230	26.3	11.3	26	39.4	22.7
		Tail		646	73.7	6.2	40	60.4	77.1

Table 3 Results of flotation test in the case of the refuse

Size (mm)	Raw Slurry pH	Product		Slurry Weight		Slurry Density	Solid		Ash
				(g)	(%)	(%)	(g)	Yield (%)	(%)
6.0-3.0 (+6 mesh)	8.10	Raw Coal		1076	100.0	16.5	178	100.0	93.2
		Froth	No. 1	—	—	—	—	—	—
			No. 2	—	—	—	—	—	—
			No. 3 Total	43	4.0	7.0	(3)	1.7	52.7
Tail		1033	96.0	16.9	175	98.3	93.4		
3.0-1.7 (6-10 mesh)	8.08	Raw Coal		871	100.0	13.9	121	100.0	93.3
		Froth	No. 1	—	—	—	—	—	—
			No. 2	—	—	—	—	—	—
			No. 3 Total	38	4.4	5.3	(2)	1.2	68.6
Tail		833	95.6	14.4	120	98.8	93.6		
1.7-0.8 (10-20 mesh)	8.09	Raw Coal		961	100.0	15.2	146	100.0	91.4
		Froth	No. 1	—	—	—	—	—	—
			No. 2	—	—	—	—	—	—
			No. 3 Total	41	4.3	7.3	(3)	2.0	66.9
Tail		920	95.7	15.5	143	98.0	91.9		
0.83-0.42 (20-35 mesh)	8.09	Raw Coal		960	100.0	12.9	124	100.0	92.9
		Froth	No. 1	—	—	—	—	—	—
			No. 2	—	—	—	—	—	—
			No. 3 Total	57	5.9	8.8	5	4.0	91.1
Tail		903	94.1	13.2	119	96.0	92.0		
0.42-0.15 (35-100 mesh)	8.13	Raw Coal		986	100.0	11.6	114	100.0	90.9
		Froth	No. 1	—	—	—	—	—	—
			No. 2	—	—	—	—	—	—
			No. 3 Total	18	1.8	22.2	4	3.8	86.5
Tail		968	98.2	11.4	110	96.2	91.7		
0.15-0.074 (100-200mesh)	8.13	Raw Coal		1029	100.0	15.8	163	100.0	91.0
		Froth	No. 1	10	1.0	30.0	3	1.8	—
			No. 2	16	1.6	43.8	7	4.3	—
			No. 3 Total	12 38	1.1 3.7	41.7 39.5	5 15	3.1 9.2	— 88.9
Tail		991	96.3	14.9	148	90.8	91.3		
0.074-0.044 (200-325 mesh)	8.12	Raw Coal		1152	100.0	5.2	60	100.0	88.7
		Froth	No. 1	8	0.7	0	0	0	—
			No. 2	25	2.2	20.0	5	8.3	—
			No. 3 Total	6 39	0.5 3.4	33.3 17.9	(2) 7	3.3 11.6	— 85.7
Tail		1113	96.6	4.8	53	88.4	89.1		
-0.044 (-325 mesh)	8.13	Raw Coal		946	100.0	6.2	59	100.0	92.3
		Froth	No. 1	29	3.1	6.9	(2)	3.3	—
			No. 2	31	3.3	12.9	4	6.8	—
			No. 3 Total	33 93	3.5 9.9	12.1 10.8	4 10	6.8 16.9	— 83.9
Tail		853	90.1	5.7	49	83.1	82.6		

Table 4 Atom ratio [H] and [O] values

Locality	Sample	H	O	Cwt%
Japan	Yubari shinko Clean coal	85.5	3.6	87.6
	Horonai Clean coal	90.2	9.7	81.7
	Taiheiyo Clean coal	95.2	13.7	78.2
China	Tasi	62.1	3.3	88.8
	Tatung A	67.0	8.3	84.3
	Tatung B	65.9	8.7	83.9
Canada	Canmore	53.3	2.4	90.6
	Coal Mountain	65.7	6.4	86.5
	Coal Valley A	79.7	17.2	76.2
South Africa	Bank	67.1	7.2	84.7
	Optimum	74.9	10.0	81.6
	Bombardie	77.3	10.1	81.2

Note [H] and [O] : atom ratios H and O per 100atom C, respectively

るから、各粒度区分の、原炭の灰分を含む炭質を一定にできれば、細かい粒度フラクションほど、浮選油と作用し、相互に付着する比表面積が大きいので、浮選速度は

Fig. 2. The coal recovery yield classified with size **Fig. 3.** The ash of raw coal, froth and tail classified with size

あがり、一定時間内の回収歩留もあがるものと思われる。

しかし、第2表および第2図からわかるように、-200 mesh (-0.074mm) になると、回収歩留は、逆に急に落ち込み、-325mesh (-0.044mm) では、すべての粒度フラクションの中で最低の回収歩留となる（とりわけ、第2図のフロス No. 1, No. 2, No. 3 の合計を参照）。

これは、いわゆる炭質を検討するまでもなく、第2表および、第3図からわかるように、各粒度区分で原炭の灰分がまちまちで、とりわけ -200mesh から急に灰分が高くなり、-325mesh では、最高の灰分値34.8%を示していることに起因していると言える。

石炭浮選は、以上の -200mesh の粒度フラクション産物の他、+20mesh (+0.83mm) の粒度フラクション産物も、一般に、困難とされているが、本試験の場合、+20mesh で、6~3mm, 3~1.7mm, 1.7~0.83mm の各粒度フラクションにおいて、それぞれ3分間のフロス採取で、51.3%, 51.1%, 63.7%の歩留が得られている（第2表参照）。また、それぞれの、フロス No. 1, フロス No.2, フロス No. 3 の回収歩留間の量的な差が少ないが、これは、フロス採取時間をより長くするか、浮選油の添加量を増せば、回収歩留がさらに向上することを暗示している。

一般に +20mesh の浮選が困難とされる理由は、粗粒は浮選油と作用し、相互に付着する比表面積が少ないためと思われる。夕張新鉱炭の場合は、前述した様に、一般の石炭に比べ、疎水性、親油性の高い炭質であるため、単位面積当りの付着力が強く、比表面積の少ない粗粒炭でも、かなりの確率で浮遊したと考えられる。

単位面積当りの付着力をWとすると、Wは

$$W=\sigma(1+\cos\theta)$$

ここで、 σ ：水と浮選油との界面の界面エネルギー

θ ：石炭表面と浮選油との接触角

と表わされる⁵⁾から、具体的には夕張新鉱炭は、 θ がかなり、小さい石炭であることが予想される。具体的には、 θ の測定は困難である⁵⁾ため、村田は空気中における石炭表面と水との接触角値をもって、こうした問題を考えている^{5,6)}この場合、疎水性は、石炭表面と水との接触角となるので、上式の θ とは逆に、大きくなるのだが、夕張新鉱炭は比較的大きな値を示し（第1表参照）、疎水性を示す。この場合の疎水性を、親油性と同一視するのは若干問題があり、さらに深い検討が必要となるが、ここでは深入りしない。

一般に、石炭浮選の粒度範囲とされている20～200 mesh (0.83～0.074mm)では、いずれも回収成績がよく、とりわけ、通常、石炭浮選の最適粒度とされている65 mesh (0.208mm)近傍では最高値を示し、(第2図参照)、通説と一致する。ここで注目したいのは、最初の2分間の回収フロス量（フロス No. 1 とフロス No. 2 の和）が、3分間の回収フロス量全体を100.0%とした場合、それぞれ、0.8～0.42mmの粒度フラクションで、80.6%、0.42～0.15mmの粒度フラクションで、89.0%、0.15～0.074mmの粒度フラクションで、84.5%と、ほとんどの石炭が最初の2分間に浮いてしまうことである。これは、きわめて浮選速度が速いことを示している。

浮選速度は、前述の単位表面積当りの付着力 W の他、比表面積の大きさに左右されるが、前述したように、夕張新鉱炭は、炭質的に、親油性が強く、少々粗粒でも浮く性質がある上に、浮選油と反応、付着する比表面積が増大したため、きわめて高い浮選速度に達したと考えられる。夕張新鉱炭に限らず、一般に夕張炭は、コールバンド³⁾の上で、ほぼ同位置となる三池炭と共に、非常に浮選性の良い炭種であるが、これは、コールバンド上の位置すなわち、炭質の面からだけではなく、その被破碎性が、他炭種と比べて、相対的に浮選に適する粒度を産出しやすいのかもしれない。被破碎性の面からの浮選速度の検討は今後の問題としたい。

この、20mesh～200meshの3粒度フラクションでも原液スラリーの灰分は、細かい粒度フラクションになる

ほど増大している。いわゆるスライムの混入が、0.15～0.074mmの粒度フラクションでは、かなり目立ってきている。しかしスライムによると思われる浮選阻害は表面化していない。これは、石炭表面に対する、いわゆるスライム・コーティングが、本質的に起こっておらず、浮選油の石炭表面へのアタックに支障がないためであろう。

第3図から判断されるように、フロス灰分を粒度別に見ると原炭灰分と同様の傾向を示している。またテーリング灰分は、スライムの影響が強く出る-200meshでは、-325mesh (-0.044mm)の粒度フラクションで低くなっている。これらはスライムの挙動を次のように考えれば説明できる。

- 石炭粒子面が、スライムコーティングされ、そのために、石炭粒子表面の疎水性、親油性が、そこなわれ、フロスとして浮かずに、テーリング側に迷い込み、結果として、回収歩留を下げ、テーリング灰分を低くする。
- 石炭粒子表面へのスライムコーティングが、前述のように、著しくなく、石炭粒子はスライムを付着したまま、フロスとなり、付着スライムの迷い込みにより、結果として、フロス灰分を高くする。
- スライムの中には、ブラウン運動するような超微細な（おそらく数ミクロン以下）粒子があって、フロス側へも、テーリング側へも、その水量に比例して、分割され、結果として、フロス灰分を高くする。

また、この粒度別石炭浮選結果をメタル浮選で使用されている指標、選別指数 I 、および、分離指数 φ で表わすと（第5表）、0.15～0.074mmの粒度フラクションが最良値を示す。

ただし、

$$I = C_A - F_A / 1 - R_A, \quad \varphi = R_A (1 - \log C_A / \log F_A)$$

において、精鉱品位 C_A 、給鉱品位 F_A 、精鉱回収率 R_A は、それぞれ、

$$C_A = (100 - \text{フロス灰分}) / 100$$

$$F_A = (100 - \text{原炭灰分}) / 100$$

$$R_A = (\text{フロス歩留}) / 100$$

とした。

次に、水選研の粒度別浮選について検討する。粒度別

Table 5 Separation Index

Size		6-3 (mm)	3-1.7 (mm)	1.7-0.84 (mm)	0.84-0.42 (mm)	0.42-0.15 (mm)	0.15-0.074 (mm)	0.074-0.044 (mm)	-0.044 (mm)
Separation Index	I	0.023	0.021	0.019	0.082	0.397	1.122	0.598	0.019
	φ	0.13	0.13	0.29	0.58	0.35	0.52	0.46	0.16

Fig. 4. The refuse recovery yield classified with size

歩留を示す第4図で、+100mesh (+0.15mm) の各粒度フラクションで、それぞれ5%以下の歩留が得られているが、これは、研粒子の一部が、試験中に、MS 浮選機の攪拌によって、微細な粒子に崩壊し、フロス付着水に分割されたと思われる、この粒度フラクションでは歩留はほぼゼロと見なすべきであろう。

-100mesh になると急に、歩留が上がり、-325mesh では最高の16.9%を示している。このような微細な研スライムは、石炭表面へのスライムコーティングで、結果としてフロス側に迷い込むことがなくとも、単独でもフ

ロス付着水に分割され、浮くことがわかる。この事実は前述のスライムの挙動のCを具体的に裏付けていることになろう。また、このことは、石炭浮選操業で多くの選炭工場が採用している、粗選、精選の2ステージ方式が妥当なことを、暗示している。

なお、この水選研浮選における研スライムは、第2章で示したように、基本的に、強制破碎で準備されたもので、浮選におけるスライムの実体が、こうしたはさみ(perforations)に由来するものだけとは、もちろん、言いきれない。

文 献

- 1) 村田逞詮：日本鉱業会誌，Vol. 97, No. 1123 (1981) p. 937.
- 2) Toshiaki MURATA：Fuel, Vol. 60, No. 8(1981) p. 744.
- 3) 村田逞詮：化学工場，Vol. 25, No. 5(1981) p. 18.
- 4) 村田逞詮：日本鉱業会誌，Vol. 98, No. 1131(1982) p. 417.
- 5) 村田逞詮：浮選，Vol. 28, No. 3(1981) p. 121.
- 6) 村田逞詮：日本鉱業会誌，Vol. 98, No. 1137(1982) p.