

# 最適造粒水分に及ぼす鉄鉱石中微粒子の定量的影響

河内 慎治\*・笠間 俊次\*

Quantitative Effect of Micro-particles in Iron Ore on the Optimum Granulation Moisture

Shinji KAWACHI and Shunji KASAMA

**Synopsis** : Anionic polymer dispersant (APD) has been applied to the granulation process for enhancing sintering productivity. It is reported that APD accelerates micro-particle dispersion. In this study, the amount of micro-particles whose diameter was less than 10  $\mu\text{m}$  has been surveyed by means of Andreasen pipette method. And in order to understand granulation mechanism focused on micro-particle, effect of micro-particles on granulation has been analyzed by granulation test with single ore. As results, total amount of micro-particle was in the range from 2 to 10% in all ores. The increase in amount of micro-particles by APD differed according to ores. These differences mostly could be explained with mineral characteristics of micro-particle. From the granulation test, the optimum moisture in wet state did not correspond with one in dry state. In wet state, micro-particles dispersed by APD increased effective volume of water, resulting in lowering water requirement for optimum granulation. Therefore, APD addition is seemed to enable optimum moisture of granulation to move wet optimum moisture closer to dry optimum moisture. In dry state, dispersing micro-particles may result in concentrating in contact point of iron ores and reinforces the strength of granules. This understanding based on this result can make comprehensive interpretation for granulation.

**Key words**: agglomeration; iron ore sintering; granulation; moisture; micro-particle; anionic-polymer-dispersant.

## 1. 緒言

最近の世界的な鉄鋼需要の増加を受けて、日本国内でも1億2000万tを越える高生産状況が続いており、日本の鉄鋼メーカー各社では高炉高出銑のための具体的な対策が実施されている。高炉の出銑比をより一層高める手段として、鉄源ソースとしては塊鉱よりも被還元性や溶け落ち性状に優れた焼結鉱の高配合が望まれている。

焼結鉱の生産性向上技術としては、パレット拡幅、ストランド延長等による焼結面積拡大や、ブローア増強による高負圧操業などの設備増強が各社で広く実施されてきた。これらは多大な投資が必要であるが、確実な増産効果が期待できる技術であり、多くの製鉄所で確実な効果を享受できている。

焼結ベッド全体の充填構造を制御することによって通気性改善を図る技術も種々開発されてきた。代表的な技術としては、スタンド焼結<sup>1)</sup>による焼結ベッド収縮抑制技術、通気バー<sup>2)</sup>による原料層の通気孔確保技術、整粒分散式粒度偏析装入装置 (ISF)<sup>3)</sup>や磁気シュート<sup>4)</sup>などの偏析装入技術などが挙げられ、いずれも現在の焼結鉱増産に大きな効果をもたらしている。

事前処理技術も1970年代より活発に研究されてきており、鉄鉱石間の結合力を強化するために生石灰などのバインダーを添加する技術<sup>5-7)</sup>や、ディスクペレタイザーによ

り造粒物の嵩密度を向上させる技術<sup>8)</sup>、高速攪拌ミキサーなどの強力な混練によって特定鉄石中に存在している粘土成分を有効活用する造粒技術<sup>9-11)</sup>などが開発され、広く適用されている。これらの造粒技術は、核粒子の周囲に0.5mm以下の粉(付着粉)が水架橋により付着した造粒物<sup>12-14)</sup>を基に論じられてきた。近年、岡田<sup>15)</sup>らは、水架橋だけでなく、付着粉よりもさらに小さいサブミクロン粒子の挙動が造粒性に大きな影響を及ぼすことを見出し、分散剤バインダーを使った新技術を開発した。これは、分散剤により水中に遊離した鉄鉱石中のサブミクロン粒子が核粒子と付着粉、あるいは付着粉同士の接点を架橋する新しいバインダー技術である。

微粒子の挙動に着目した造粒現象については、岡田らの研究により定性的なメカニズム解明はなされているが、定量的な解析という点では未だ不足しており、効果の発現メカニズムについても解明すべき課題が残されている。本研究は、微粒子の挙動という新しい視点に立った造粒メカニズムの解明を目的として、鉄鉱石中の微粒子量の実測定量化と、湿潤状態での造粒性ならびに乾燥状態の粉化性に対する微粒子の本質的な影響について解析した。

## 2. 実験方法

鉄鉱石中の微粒子量の測定方法を標準化し、代表的な鉄

Table 1. Chemical composition of sample ores.

	(mass%)			
	T.Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	C.W
Ore A	56.8	2.75	6.01	7.80
Ore B	58.2	1.45	5.11	9.31
Ore C	61.2	2.35	3.50	5.80
Ore D	63.5	2.23	3.88	2.16
Ore E	66.4	0.69	3.20	0.96
Ore F	67.7	0.70	0.74	1.05
Ore G	62.5	1.78	2.13	4.26

鉱石について微粒子量の測定を行った。さらに、湿潤状態での造粒性ならびに造粒物の乾燥時の粉化性に及ぼす微粒子量の影響を定量的に評価するため、異なる水分条件における単銘柄の造粒試験を行った。

2・1 試料

使用した鉱石を Table 1 に示す。鉱石 A~D は豪州産鉱石であり、鉱石 A は高アルミナピソライト鉱石、鉱石 B は低アルミナピソライト鉱石、鉱石 C はマラマンバ鉱石、鉱石 D は高りんブロックマン鉱石である。また、鉱石 E, F はブラジル産のヘマタイト鉱石であり、鉱石 E は比較的多孔質な組織、鉱石 F は最も緻密質な組織を特徴とする。さらに鉱石 G はインド産ヘマタイト鉱石である。

本試験では、すべての鉱石を完全乾燥したのち、+5 mm, 5~2 mm, 2~1 mm, 1~0.5 mm, 0.5~0.25 mm, および -0.25 mm の 6 区分に分級調整したものを使用した。

2・2 微粒子量の定量化

鉱石中の微粒子量は、1000 mL アンドレアゼンピペットを用いた粒子沈降法<sup>16)</sup>によって測定した。模式図を Fig. 1 に示す。まず、10 g の試料、300 mL の純水およびアニオン性高分子分散剤（以下、APD と略す）をビーカーで混合し、3 分間超音波攪拌した。このとき、APD の添加量は鉱石当たりそれぞれ 0 mass%, 0.05 mass%, 0.50 mass% および 5.00 mass% の 4 水準とした。次に、攪拌調整した懸濁液および鉱石粒をすべてアンドレアゼンピペットに移し、さらに 700 mL 純水を加え、3 回振蕩攪拌した。その後、20 分間静置したのち、水面下 200 mm 位置の懸濁液を 10 mL 採取し、乾燥後の固形物の重量を測定した。

この方法で採取される粒子の密度をヘマタイトと脈石成分の間である 4000 kg/m<sup>3</sup> と仮定すると、ストークスの式 (1) より粒子の上限粒径は約 10 μm と見なすことができる。本論文では、式 (1) から (4) 中のパラメータである *t*, *h*, *M*, *V*, *v* をそれぞれ、*t*=1200, *h*=0.2, *M*=10<sup>-2</sup>, *V*=10<sup>-3</sup>, *v*=10<sup>-5</sup> として採取された懸濁粒子を微粒子と定義し、鉱石中の微粒子量を式 (2) より求めた。式 (2) で算出される *R* は、対象としている鉱石中に存在している微粒子の質量比率を表しており、測定および *R* の算出はすべての鉱石において 2・1 に記した 6 粒度区分それぞれについて行った。

$$D = \{ (18\mu h / ((\rho_s - \rho_f)gt)) \}^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

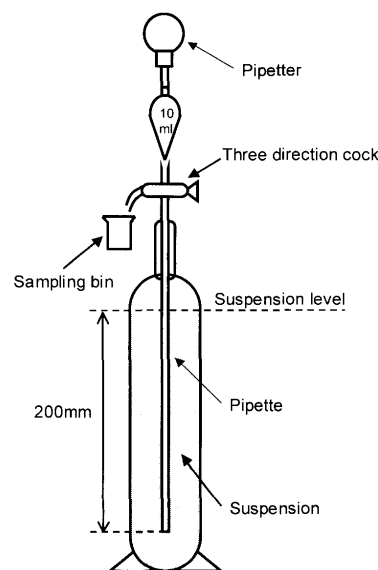


Fig. 1. Schematic of Andreasen pipette.

$$R = 100 \times (1 - \alpha) \times C_t / C_0 \dots \dots \dots (2)$$

$$C_0 = M / V \dots \dots \dots (3)$$

$$C_t = m / v \dots \dots \dots (4)$$

- D* : ストークス径 (m)
- $\mu$  : 流体の粘度 (kg/(m·s))
- t* : 静置時間 (s)
- $\rho_f$  : 流体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- g* : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $\rho_s$  : 粉体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- R* : 微粒子量 (mass%)
- h* : ピペット先端から水面までの距離 (m)
- C<sub>t</sub>* : 時間 *t* におけるピペット先端の粒子濃度 (kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>0</sub>* : 沈降開始時の全体粒子濃度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\alpha$  : APD 濃度 (kg-APD/kg-Ore)
- M* : 初期試料質量 (kg)
- V* : アンドレゼンピペット容量 (m<sup>3</sup>)
- m* : 採取した懸濁液中の固形物質量 (kg)
- v* : 採取した懸濁液量 (m<sup>3</sup>)

2・3 鉱石および微粒子の表面形状観察

鉱石中の微粒子の存在形態を調べるために、2~5 mm 粒度の鉱石を用いて、超音波攪拌前後の鉱石表面形状を走査型電子顕微鏡（以下、SEM と略す）により観察した。また、粒子沈降法により採取した微粒子を乾燥させ、6.2 GPa の圧力でシート状に成形した試料についても、同様の SEM 観察を行った。

2・4 造粒試験

湿潤状態での造粒性ならびに乾燥時の造粒物の粉化性に及ぼす APD の影響をそれぞれ定量的に解明するために、ここでは Table 2 の基準粒度分布に調製した鉱石を用いて単銘柄の造粒試験を行った。

Table 2. Size distributions of iron ores for granulation test.

Size (mm)	Ratio (mass%)
10~5	15.4
5~2	23.0
2~1	15.0
1~0.5	12.2
0.5~0.25	10.6
-0.25	23.8

Table 3. Content of micro-particle in each split size for ores.

	APD (mass%)	Micro-particle (mass%)						Average
		+5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	-0.25mm	
Ore A	0.0	1.5	2.2	5.7	10.8	12.8	16.9	7.5
	0.05	1.8	3.3	5.8	9.9	14.1	19.5	8.1
	0.5	1.9	2.8	5.5	12.1	14.1	19.8	8.4
	5	1.7	3.1	6.4	11.1	13.8	18.9	8.3
Ore B	0.0	1.4	2.8	5.1	9.4	8.3	13.7	5.7
	0.05	1.4	2.5	4.6	9.1	8.9	12.7	5.5
	0.5	1.2	3.6	6.2	10.1	9.3	16.3	6.5
	5	2.3	3.5	6.5	9.9	9.5	16.1	6.8
Ore C	0.0	3.5	4.2	3.3	2.8	2.6	5.2	3.9
	0.05	2.2	3.9	6.1	13.8	15.4	18.4	10.0
	0.5	1.8	3.1	5.2	13.7	16.1	20.9	10.3
	5	1.7	3.6	5.7	13.8	16.3	21.8	10.7
Ore D	0.0	1.4	2.3	4.3	5.3	12.1	11.7	6.4
	0.05	2.0	3.0	4.6	10.9	13.3	17.6	9.0
	0.5	1.5	2.8	4.6	11.6	13.1	17.6	8.9
	5	2.1	2.8	4.7	11.3	13.8	17.8	9.1
Ore E	0.0	2.1	1.9	3.2	5.4	4.2	3.2	3.1
	0.05	1.1	1.5	3.5	5.2	6.5	17.0	6.4
	0.5	1.2	1.9	2.4	5.5	7.6	16.7	6.3
	5	1.7	1.8	3.4	6.1	7.5	17.7	6.9
Ore F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.8	0.8	0.4
	0.05	0.0	0.1	0.3	1.3	1.6	1.4	0.9
	0.5	0.6	0.9	1.0	1.6	2.3	2.7	1.8
	5	0.8	1.1	0.9	1.7	2.5	2.9	1.9
Ore G	0.0	2.0	2.2	4.3	7.9	7.2	6.4	5.6
	0.05	1.1	2.1	3.8	8.0	7.1	7.5	5.8
	0.5	1.4	2.4	4.5	8.7	7.5	8.1	6.4
	5	0.6	1.9	4.9	8.9	8.2	8.5	6.7

造粒試験には内径 380 mmφ、幅 140 mm のドラムミキサーを用いた。このドラムミキサーを用いて粒度調整した試料 3 kg を 60 秒混合した後、水と APD を添加してさらに 240 秒造粒した。APD 量は鉄鉱石当たり 0 mass% および 0.5 mass% の 2 水準とし、水分を 5 mass% から 10 mass% の範囲内で変化させた。得られた造粒物の内 600 g を、105°C 雰囲気にて 3±1 mass% 水分まで乾燥させた後に手篩いし、各粒度の質量を測定した。この粒度分布を湿潤粒度と定義し、造粒性の評価に用いた。さらに、乾燥時における粉化を評価するために、得られた造粒物の内 200 g を完全乾燥させ、300 秒のロータップ処理後の -0.25 mm 比率を測定した。

### 3. 結果

#### 3.1 鉄鉱石中の微粒子量

全試料の粒度毎の微粒子量測定結果を Table 3 に、全粒度加重平均の微粒子量を Fig. 2 にそれぞれ示す。なお、

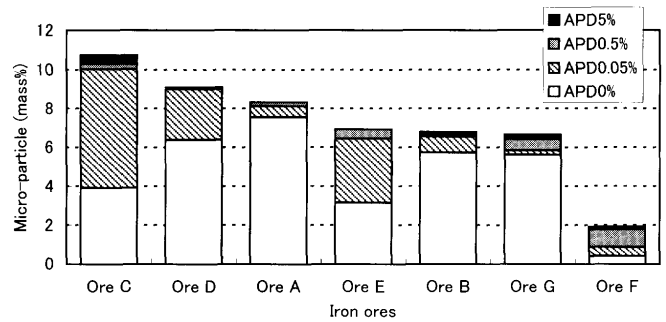


Fig. 2. Amount of iron ore micro-particle measured by Andreason pipette method.

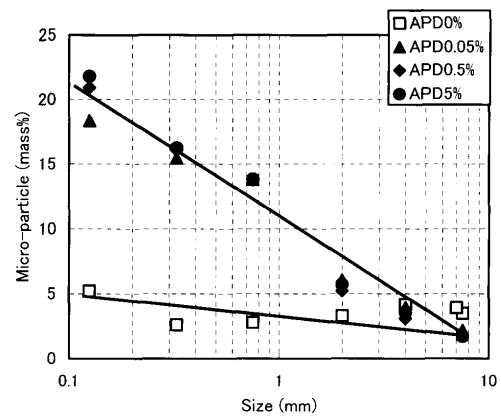


Fig. 3. Content of micro-particle in each split size for Ore C.

Fig. 2 中の色付け部分は、APD 添加による微粒子量の増分を表している。この結果より、乾燥分級処理した鉄鉱石であるにも関わらず、APD の添加によって 10 μm 以下の微粒子が 2~10 mass% も発生したことがわかった。この APD 添加による微粒子量は、鉄鉱石毎に異なる特徴が見られた。すなわち、マラマンバ鉄鉱石である鉄鉱石 C は、APD による微粒子量の増加が最も大きく、最大 10 mass% 以上の微粒子量を示した。一方、ピソライト鉄鉱石である鉄鉱石 A および B は、APD 無添加の条件でも 5.7~7.5 mass% と比較的微粒子量が多く、APD を添加しても微粒子がほとんど増加しなかった。また鉄鉱石 F は、APD を添加しても 2 mass% 程度と、微粒子量が極端に少ない銘柄であった。このように、水中での微粒子量や APD 添加による微粒子量の増加量については、銘柄ごとに大きな差異が見られた。次に APD 添加量の影響を比較すると、APD 添加量 0.05 mass%、0.5 mass% および 5 mass% の間に微粒子量の大きな差異はいずれの鉄鉱石でも見られなかった。この結果より、APD による微粒子分散効果は APD 添加量に単純に比例するものではなく、0.05 mass% で既に飽和した状態であると考えられる。

最も微粒子量の多かった鉄鉱石 C について、鉄鉱石粒度と微粒子量との関係を Fig. 3 に示す。APD 無添加の場合はいずれの粒度においても微粒子量は 2~5 mass% 程度であるが、APD を添加した場合は細粒度ほど微粒子量が大幅に増加する傾向が見られた。これより、APD の添加によって新

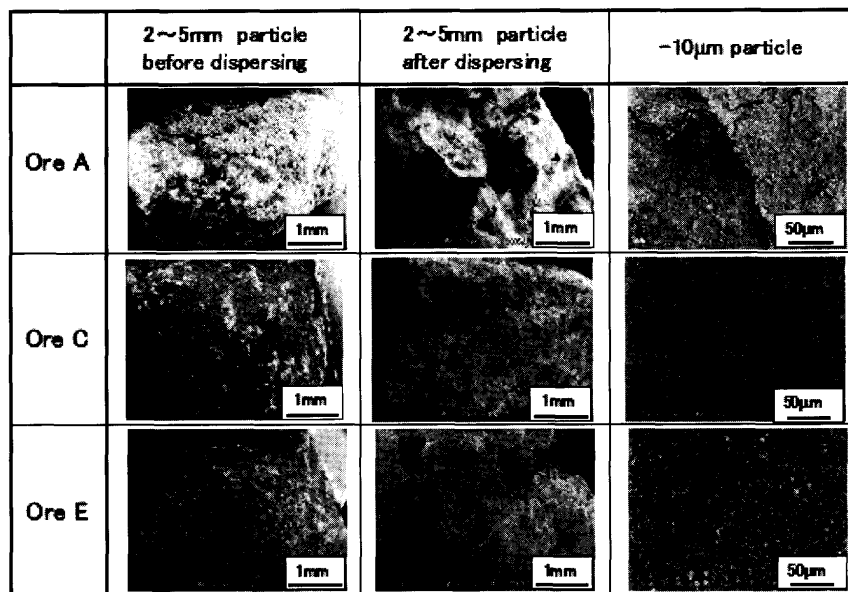


Fig. 4. Surfaces of Scanning Micro-scope Image of iron ores and micro-particles as received and after water washing.

たに分散した微粒子の多くは鉱石表面に存在していたと考えられ、比表面積の高い細粒ほど微粒子量が高くなったものと思われる。

### 3・2 微粒子の賦存形態および表面形状

鉱石A、CおよびEについて、超音波攪拌前後の鉱石表面と採取した微粒子のSEM観察を行った。その結果をFig. 4に示す。鉱石AおよびEでは、微粒子遊離後の鉱石表面に0.2~1mm程度の空洞が見られるなど、多孔質な表面形状が確認された。一方、鉱石Cは緻密な表面形状をしており、空洞の存在は確認されなかった。したがって、鉱石AおよびEの微粒子は主に空洞内から、鉱石Cの微粒子は鉱石表面全体から遊離したと思われる。

微粒子の形態を比較すると、鉱石Aの微粒子圧粉体にはクラックが無数に確認されたが、鉱石Cおよび鉱石Eの微粒子圧粉体にはクラックの存在は確認されなかった。また、鉱石Cの微粒子はサブミクロンサイズの微粒子が主体、鉱石Eの微粒子は10 $\mu$ m程度の微粒子が主体となっており、微粒子自身の形態についても銘柄差があることが確認された。元の鉱石銘柄から考えて、鉱石Aの微粒子はゲーサイト主体、鉱石Cの微粒子は粘土主体、鉱石Eの微粒子はヘマタイト主体と考えられる。このような微粒子の物性差がAPDによる分散作用の違いにも影響を及ぼすと考えられる。

### 3・3 造粒物粒度に及ぼす水分およびAPDの影響

造粒試験結果をTable 4に示す。なお、表中のハイフンは水分過多のため、ドラムミキサー内の付着が著しく、転動造粒が不可能であったことを示す。典型例として鉱石Aの造粒水分と湿潤粒度の関係をFig. 5に示す。2mm以下の造粒物については造粒水分が高い領域で比率が低下する傾向が見られた。このような造粒水分による湿潤粒度分布の

変化はいずれの鉱石においても同様に見られた。

Table 4のデータを用いて、湿潤粒度区分-0.25mmの比率がゼロになる水分値をFig. 6に例示したように外挿して求め、その値を飽和水分値( $w_s$ )と定義した。この $w_s$ は、粉を核粒子に付着させることを目的とする造粒操作の1つの最適水分と判断できる。各鉱石の $w_s$ をTable 5に示す。APD無添加の場合の $w_s$ は、マラマンバ鉱石Cの9.1mass%からヘマタイト鉱石Fの5.6mass%まで、鉱石銘柄毎に大きく異なることがわかった。また、Fig. 6に示したとおり、APDの添加によって $w_s$ は低下する現象が確認された。銘柄によって効果の差異はあるが、APD添加で $w_s$ は0.6~1.9mass%低下する傾向を示した。岡田<sup>15)</sup>らは、APDの分散作用が凝集体中を解することによって、凝集体の取り込まれていた水分を開放して実質的な水分量を増加させると指摘している。本試験の結果は岡田らが指摘した実質水分の増加効果をより定量的に示したものである。

### 3・4 乾燥粉化性に及ぼす水分およびAPDの影響

造粒水分と乾燥状態における粉化性の関係の一例として、鉱石Cの造粒水分と乾燥-0.25mm粉率の関係をFig. 7に示す。Fig. 7に示すとおり、APDの添加によって乾燥-0.25mm粉率は大幅に低下しており、乾燥による粉化を本質的に抑制できたと考えられる。

また、乾燥-0.25mm粉率は、7.5mass%の水分値で極小値を示すことがわかった。この粉率が極小となる水分値も造粒操作の1つの最適値であると思われる。ここではこの乾燥-0.25mm粉率の極小値水分を $w_d$ と定義し、各造粒試験における $w_d$ を求めた。その結果をTable 5に示す。湿潤粒度区分-0.25mmの比率がゼロとなる飽和水分値 $w_s$ と同様に、 $w_d$ も鉱石銘柄毎に異なる値を示した。また、多くの条件で $w_d$ は $w_s$ より小さい値を示した。これは湿潤

Table 4. Wet and dry size distributions of granules and degradation after drying after granulation.

(mass%)

	APD0%								APD0.5%							
	Moisture	Wet						Dry	Moisture	Wet						Dry
		+5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	-0.25~mm			-0.25mm	+5mm	2~5mm	1~2mm	0.5~1mm	0.25~0.5mm	
Ore A	6.2	17.2	28.5	17.8	12.7	10.3	13.6	17.5	6.4	19.9	22.4	23.2	16.3	11.7	6.5	10.1
	7.2	18.6	31.2	17.7	12.9	10.5	9.1	15.3	7.3	21.4	26.7	22.9	20.3	7.8	1.0	2.7
	7.9	20.9	33.4	17.7	14.3	10.2	3.5	7.6	8.1	22.5	26.3	29.7	18.2	2.7	0.5	2.6
	8.5	21.6	34.2	20.0	16.8	5.5	1.8	5.8	9.0	22.6	41.1	29.0	5.9	1.3	0.2	3.0
	9.2	27.2	37.8	21.7	9.3	3.1	0.8	6.3	9.8	31.2	49.7	14.2	4.2	0.6	0.1	3.6
	10.1	32.5	42.5	15.9	6.9	2.0	0.3	7.5	10.3	48.6	39.1	9.9	2.1	0.2	0.1	4.3
Ore B	5.9	19.0	28.3	14.0	11.9	10.1	16.8	22.6	6.1	21.5	27.5	18.4	16.1	12.6	3.9	7.6
	6.6	21.9	27.8	17.3	13.5	10.6	8.9	15.4	6.9	23.5	35.1	24.5	12.0	3.9	1.0	6.6
	7.4	23.3	31.5	19.0	13.2	7.8	5.2	15.1	7.8	35.1	37.6	17.6	7.8	1.5	0.4	7.0
	8.2	25.4	39.8	15.9	10.8	6.0	2.1	17.6	8.6	50.9	31.8	13.6	3.1	0.4	0.2	7.4
	8.9	35.9	39.3	13.1	8.6	2.7	0.5	20.0	9.0	64.0	29.9	5.1	0.8	0.1	0.0	8.2
	9.6	43.6	36.5	14.7	4.4	0.6	0.1	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Ore C	5.3	18.6	24.1	14.7	11.1	10.1	21.3	29.1	5.3	19.2	24.5	15.0	13.5	12.7	15.1	19.1
	6.0	20.8	27.1	14.7	10.4	9.0	17.9	25.7	6.2	19.5	26.3	16.1	15.4	16.8	5.9	10.6
	6.5	24.2	28.0	14.4	11.4	9.7	12.4	21.9	7.0	22.4	31.1	18.7	17.7	7.8	2.3	6.6
	7.5	25.0	29.6	17.3	12.2	8.7	7.2	18.9	7.9	25.3	39.3	19.5	12.2	3.1	0.6	7.4
	8.3	28.1	32.8	18.2	10.9	6.2	3.8	21.1	8.6	43.8	34.4	15.8	4.9	0.9	0.2	7.3
	9.1	28.1	40.3	15.4	9.9	4.7	1.5	23.5	9.3	51.9	36.6	9.3	1.9	0.2	0.1	8.2
Ore D	5.2	25.3	31.1	16.4	11.8	8.2	7.2	18.1	5.1	22.5	35.6	22.7	16.7	2.1	0.4	2.8
	5.7	29.8	35.7	17.3	9.6	4.7	2.9	17.3	5.9	33.4	47.5	12.9	5.0	0.9	0.2	4.1
	6.5	30.1	40.4	17.1	7.3	3.8	1.4	21.4	6.7	56.7	34.3	7.1	1.4	0.3	0.2	5.1
	7.3	33.4	43.5	13.4	6.8	2.3	0.6	23.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	8.2	46.3	37.9	10.5	4.1	1.0	0.3	24.2	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ore E	4.7	23.3	30.6	18.3	12.1	8.9	6.8	22.2	5.0	26.3	40.7	18.8	10.5	3.0	0.7	5.9
	5.4	28.6	33.4	16.9	11.3	6.9	2.9	22.1	5.6	43.7	39.2	12.0	3.7	1.0	0.3	5.8
	6.0	35.9	33.2	17.3	8.8	3.2	1.7	20.2	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ore F	4.1	19.2	30.3	15.3	15.3	8.1	11.8	26.8	4.7	23.6	34.4	18.3	15.1	6.8	1.9	12.3
	5.5	19.8	32.9	26.7	15.1	4.3	1.3	26.9	5.6	24.9	37.2	20.4	14.5	2.6	0.4	12.9
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ore G	5.0	18.6	22.5	16.2	11.7	9.9	21.0	28.1	5.1	17.0	26.9	14.6	13.6	12.2	15.7	21.1
	6.0	18.4	25.2	16.5	12.6	10.2	17.1	27.0	5.9	17.4	29.6	15.6	13.8	13.4	10.2	16.9
	6.7	21.7	25.6	18.0	11.9	10.0	12.7	25.5	6.8	19.9	31.9	14.8	15.0	12.6	5.8	13.3
	7.4	21.5	27.7	19.5	12.5	10.7	8.1	25.9	7.8	21.8	34.6	16.4	17.1	7.7	2.4	13.4
	8.3	22.1	28.9	21.3	14.8	8.6	4.4	25.9	8.6	25.2	35.7	17.6	16.1	4.6	0.8	13.4
	9.1	22.0	36.1	21.8	14.6	4.2	1.3	26.9	9.3	28.7	42.2	20.7	7.8	0.5	0.1	16.2

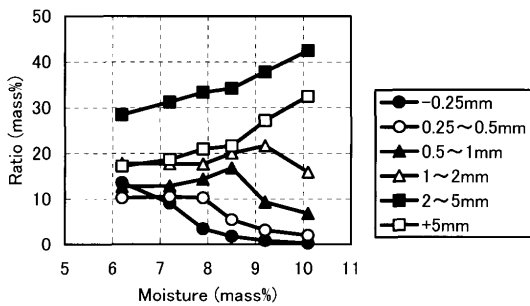


Fig. 5. Relation between size distribution of ore A after granulation and moisture.

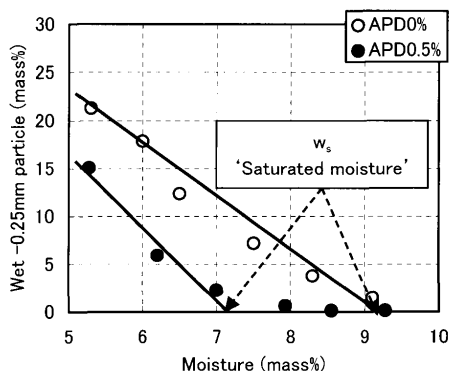


Fig. 6. Relation between wet -0.25 mm particle and moisture with or without APD.

Table 5. Saturated moisture ( $w_s$ ) and minimum degradation moisture ( $w_d$ ) for each ore with or without APD.

	(mass%)			
	APD0%		APD0.5%	
	$w_s$	$w_d$	$w_s$	$w_d$
Ore A	8.7	8.5	7.5	8.1
Ore B	8.3	7.4	7.1	6.9
Ore C	9.1	7.3	7.2	7.0
Ore D	6.2	5.7	5.0	5.1
Ore E	6.0	6.0	5.0	5.6
Ore F	5.6	4.1	5.0	4.7
Ore G	9.2	6.7	8.1	6.8

時の造粒最適水分と乾燥による粉化を加味した最適水分が必ずしも一致しないことを示している。すなわち、湿潤状態での最適水分値に合わせて造粒を行ったとしても、乾燥粉率については最適水分を超えてしまうことが本質的に避けられないことを示唆している。なお、 $w_d$ が $w_s$ より大きい値を示す条件は、実験条件の下限水分である5.0mass%近傍であり、 $w_d$ および $w_s$ の決定誤差であると思われる。APDを添加しない場合と添加した場合を比べると、 $w_d$ に大きな変化は見られなかった。したがって、APDの添加

よって  $w_s$  が低下し  $w_d$  は変化しないことから、APDの添加は、湿潤時の造粒最適水分を乾燥による粉化抑制に対する最適水分に近づける効果もあると考えられる。

### 4. 考察

#### 4.1 湿潤状態における造粒現象

造粒過程における粒度変化を統一的に解釈するために、

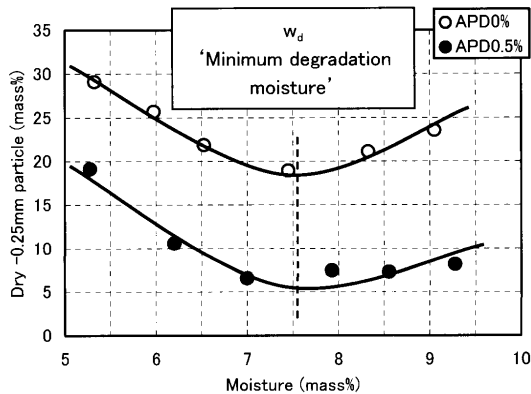


Fig. 7. Relation between dry -0.25 mm particle and moisture with or without APD.

Table 4の結果を無次元化して整理した。各鉱石の飽和水分  $w_s$  を基準として造粒水分 ( $w$ ) を無次元化し、相対水分 ( $W$ ) と定義した。また同様に、粒度区分  $i$  における湿潤粒度比率を初期粒度比率で無次元化し、相対比率 ( $X_i$ ) と定義した。この  $W$  と  $X$  を用いて Table 4の結果を再整理したものを Fig. 8に示す。相対水分を用いることで、湿潤状態の造粒挙動を鉱石銘柄によらずほぼ一意的に表現できた。また、変曲点の水分値を粉率変曲水分 ( $w_{A'}$ ) と定義することにより、鉱石銘柄によらず式 (5) の関係で整理できる。適用範囲を Table 6に、計算結果を Fig. 8の直線群で示す。すなわち、事前に  $w_s$  を求めておけば、任意の水分における粒度分布を予測することができる。

$$X_i = X_0 + \alpha(W - w_{A'}/w_s) \dots \dots \dots (5)$$

- $W = w/w_s$  : 相対水分 (-)
- $w$  : 造粒水分 (mass%)
- $i$  : 粒度区分 (mm)
- $\alpha$  : 比例定数 (-)
- $w_{A'}$  : 粉率変曲水分 (mass%)
- $X_0$  : 変曲粉率 (-)

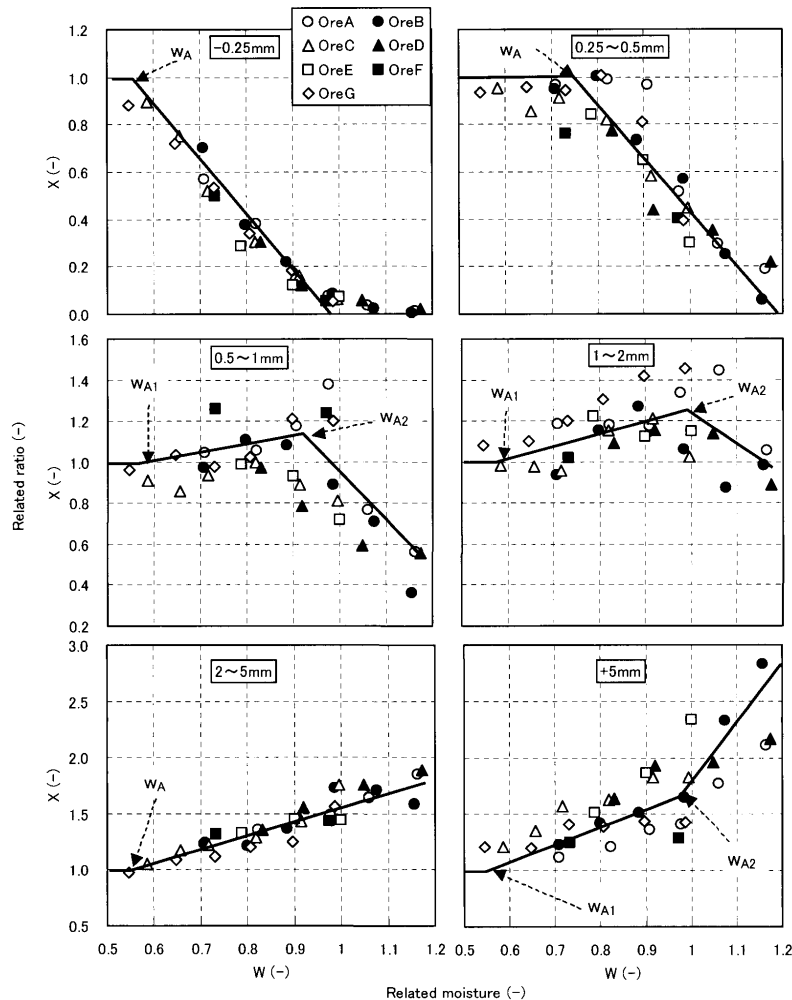


Fig. 8. Relation between wet size distribution after granulation and relative moisture ( $W$ ).

Table 6. Parameters and application range of Eq. (5).

i	X <sup>0</sup>	α	w <sub>A</sub>	Application
-0.25	1.00	-2.20	0.55	0.55 ≤ Z ≤ 1.0
0.25~0.5	1.00	-2.20	0.75	0.75 ≤ Z ≤ 1.2
0.5~1.0	1.00	0.50	0.55	0.55 ≤ Z ≤ 0.92
	1.20	-2.20	0.92	0.92 ≤ Z ≤ 1.2
1.0~2.0	1.00	0.50	0.55	0.55 ≤ Z ≤ 1.0
	1.23	-2.20	1.00	1.0 ≤ Z ≤ 1.2
2.0~5.0	1.00	1.43	0.55	0.55 ≤ Z ≤ 1.2
+5	1.00	1.43	0.55	0.55 ≤ Z ≤ 0.92
	1.53	4.23	0.92	0.92 ≤ Z ≤ 1.2

4・2 造粒水分における水分飽和度の評価

粉体工学の分野では、湿潤状態の造粒物構造の評価に飽和度という指標がしばしば用いられる<sup>17,18)</sup>。飽和度とは、造粒物中の粉体間隙体積に占める水分の体積割合を表し、水分が間隙をすべて満たした状態で飽和度は1.0となる。関口<sup>17)</sup>らは凝集粒に付着性が生じるためには閾水分値を越える必要があり、飽和度1.0を超えると粉体がペースト状になると論じている。しかし、飽和度の測定は容易でないため、鉄鉱石造粒物の解析に飽和度を適用した例は少ない。

Table 5で示したw<sub>s</sub>が実質的に飽和度1.0の状態であると考えれば、水分の上昇に伴う粒度分布の変化を次のように理解することができる。W=0.55以上の領域で、-0.25 mm比率の減少と+0.5 mmの比率の増加が始まる。これは-0.25 mm粉がより大きな粒子に付着することで造粒物を形成する領域と考えられる。このときの粒子間の付着は、飽和度が1.0以下であることから、粒子接点の水架橋によるものと考えられる。水分を高くするにつれて架橋水が増え、W=0.75近傍で0.25~0.5 mmの粒子が付着ようになる。さらに水分を高くしてW=0.9~1.0になると、それまで粒度比率が上昇していた0.5~2 mmの粒子も比率減少に転じ、これらの中間粒子もより粒度の大きい核へと取り込まれていくと考えられる。W=1.0近傍で-0.25 mm粉の付着が完了し、W=1.0を超えると、+5 mm粒子の急激な増加が見られる。ここでは関口らの報告によると飽和度が1.0を超え、液状化領域に入ると考えられ、試料がペースト状になり転動造粒が不可能となる。鉄鉱石Bの+5 mm造粒物の付着粉層の顕微鏡写真をFig. 9に示す。造粒水分の増加するにつれて粗い粒子が取り込まれており、W=1.16では-0.25 mm粉だけではなく、0.25~0.5 mmの粉が付着している。この結果は、上述の考え方の妥当性を示すものと考えられる。したがって、飽和水分を用いた考え方は、今まで主に造粒性指数や粉率などの粒度データを用いて解析していた鉄鉱石の造粒現象を、より体系的に説明するための基礎理論として活用できると考えられる。

4・3 微粒子挙動を考慮した造粒現象の理解

まず、湿潤状態において微粒子が造粒性に及ぼす影響に

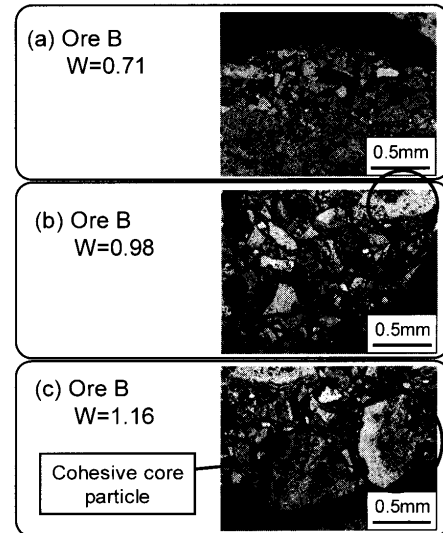


Fig. 9. Observation of cross-section of granules with change of relative water.

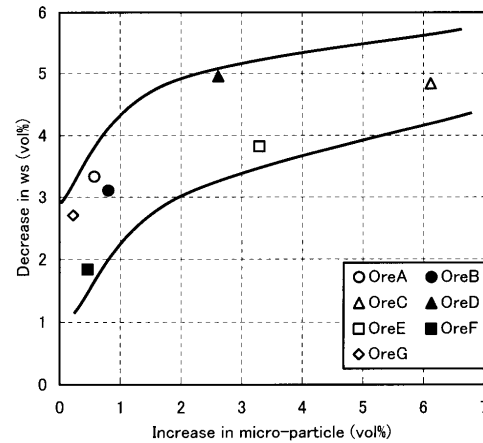


Fig. 10. Relation between the decrease in w<sub>s</sub> and the calculated volumes of micro-particle dispersed with APD.

ついて考える。APDを添加したときの微粒子の増加量とw<sub>s</sub>の減少量の関係をFig.10に示す。ここでは、微粒子の真密度を4000 kg/m<sup>3</sup>と仮定して、微粒子の体積を算出した。Fig.10より、微粒子量の増加量が多いほど飽和水分の減少量が大きいことがわかった。これは鉄鉱石中の微粒子が水中へ分散することにより、鉄鉱石粒子の実質量が減少し、架橋となる液相体積量が逆に増加するためと考えられる。このとき、微粒子の増加量が1 vol%以下の条件においても比較的大きなw<sub>s</sub>の低下が見られている。この原因は明らかではないが、APDの添加によって核粒子および粉粒子の配列が密な状態へ変化し、造粒物内の間隙体積が低下する現象が起ったのではないかと考えられる。これらは今後の検討課題である。

次に、乾燥状態における微粒子の作用について考える。乾燥-0.25 mm粉率の極小値と微粒子量との関係をFig.11に示す。微粒子量が多いほど乾燥-0.25 mm粉率の極小値が低いことから、乾燥後に付着粉を保持する力は微粒子に

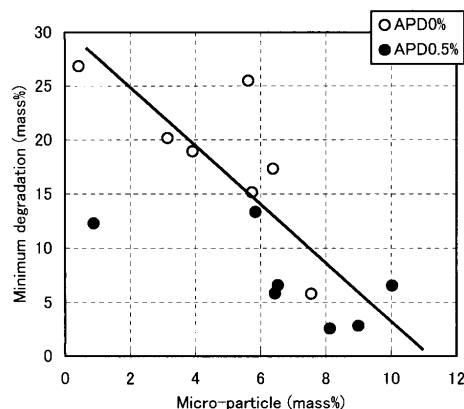


Fig. 11. Relation between content of micro-particle of iron ores and minimum degradation after drying.

起因すると思われる。すなわち、湿潤状態から乾燥状態へと変化する過程で、微粒子が架橋部分に濃縮し、最終的には固体架橋を形成して強度を発現させると考えられる。

以上の結果をもとに作成した造粒現象のイメージを Fig.12 に示す。まず、APDの添加により、鉄鉱石中の微粒子が水中に遊離し、実質的な液相の量が増加する。このため、飽和度が上昇し、低水分で造粒が可能となる。この微粒子は、乾燥過程における水分移動に伴って粒子間の架橋部分に濃縮し、完全乾燥後は固体架橋を形成する。この固体架橋による結合強度の上昇が乾燥による粉化を抑止すると考えられる。

以上のような水分の飽和度と微粒子の移動を考慮した造粒現象の捉え方は、生石灰やベントナイト等のバインダーによる造粒物の強度上昇や、高速攪拌ミキサー等の高強度混練による造粒性の改善についても矛盾するものではない。生石灰やベントナイトなどのバインダー添加技術は、外部から微粒子を添加する1つの手段と考えることができ、強混練による造粒性の改善についても、機械的な操作によって鉱石中の微粒子を効果的に分散させる技術と捉えることができる。今後、微粒子の挙動に着目した検討を進め、より包括的な鉄鉱石の造粒理論を構築することが重要である。

## 5. 結言

鉄鉱石中の微粒子量の実測定量化と、湿潤状態および乾燥状態の造粒物に対する微粒子の本質的な影響について解析し、以下の知見を得た。

(1)  $-10\mu\text{m}$ の微粒子はいずれの鉱石のどの粒度にも存在しているが、その量および分散剤の効果については鉱石毎に大きな差異がある。これは、微粒子の物性や賦存状況などの鉱石特性に起因していると考えられる。

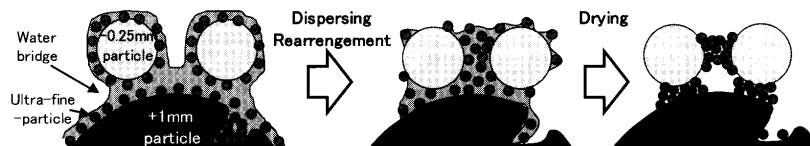


Fig. 12. The behavior of micro-particle on granulation.

(2) 湿潤-0.25 mm粉率がゼロになる水分値（飽和水分値）を用いて造粒水分を無次元化することにより、造粒挙動を鉱石銘柄によらず一意的に表現することができる。したがって、飽和水分値を予め求めておけば、任意の水分における粒度分布を容易に予測することが可能である。

(3) 湿潤状態における造粒の最適水分値は、造粒物の乾燥粉化性に対する最適水分値よりも高く、両者は一致しない。分散剤を添加すれば、低水分での造粒が可能となり、湿潤時の最適水分を乾燥粉化に対する最適水分に近づけることが可能である。これは鉄鉱石中の微粒子が水中に遊離することによる実質的な液相量の増加に起因している。

(4) 水中に遊離した微粒子は完全乾燥後に固体架橋を形成し、乾燥時の粉化に対する抑止力となる。このような造粒物の強度発現が分散剤バインダー技術の造粒性改善の本質的な効果であると思われる。

## 文 献

- 1) K.Higuchi, T.Kawaguchi, M.Kobayashi, Y.Hosotani, K.Nakamura, K.Iwamoto and M.Fujimoto: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 1188.
- 2) H.Suzuki, H.Kurokawa, H.Yoshida, S.Kabuto and H.Iida: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 905.
- 3) T.Inazumi, M.Fujimoto, S.Kasama and K.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 63.
- 4) N.Ooyama, K.Igawa, K.Nushiro, M.Ida and N.Fujii: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 309.
- 5) A.Morita, H.Toda and Y.Nosaka: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), S440.
- 6) Y.Ishikawa, K.Sugawara and Y.Umezu: *Agglomeration 77*, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Agglomeration, (1977), 503.
- 7) T.C.Eisele and S.K.Kawatra: *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, **24** (2003), 1.
- 8) Y.Niwa, N.Sakamoto, O.Komatsu, H.Noda and A.Kumasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1029.
- 9) T.Haga, A.Ohshio, K.Nakamura, T.Kozono and K.Uekawa: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 103.
- 10) T.Kawaguchi, K.Kuriyama and S.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1642.
- 11) T.Matsumura, K.Miyagawa and Y.Yamagata: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 728.
- 12) S.Sato, M.Yoshinaga, M.Ichidate and T.Kawaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2174.
- 13) M.Matsumura and T.Kawaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 290.
- 14) K.Sato: *Fusen*, **28** (1981), 99.
- 15) T.Okada, J.Okazaki, M.Nakano, K.Kawano and S.Miura: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 735.
- 16) 化学工学協会編：初歩化学工学，いずみ書房，東京，(1969)，267.
- 17) I.Sekiguchi: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **26** (1989), 586.
- 18) S.Iveson, J.Lister, K.Hapgood and B.Ennis: *Powder Technol.*, **117** (2001), 3.