

焼結原料造粒における水分分布の 擬似粒子形成への影響

松村 勝*・川口 尊三*

Effect of Moisture Distribution of Sinter Mixture on Granulating Particles

Masaru MATSUMURA and Takazo KAWAGUCHI

Synopsis : For increase of sinter productivity, it is important to design sinter mixture granulation methods of moisture content, moisture distribution, and mixing method.

In order to design them, especially moisture distribution and its transformation with mixing, laboratory granulation tests were carried out. These tests were moisture absorption rate for a coarse iron ore (4–6 mm), adhesion of low moisture content fine iron ore (–0.25 mm) and one pseudo-particle coated with high moisture content fine ore, and granulation of coarse and fine ores with varying initial and adding moisture distribution and mixing method with a drum mixer and a high speed agitating mixer.

The main results obtained are as follows:

- (1) It took over 5 h to absorb moisture to coarse ore surrounded by raw sinter materials with 6 mass% moisture.
- (2) When adhering low moisture content fine to pseudo-particles coated with high moisture content adherent fine ores, final moisture content of total adherent fine converged to a constant value.
- (3) With mixing by a drum mixer, high moisture content fine adhered first to coarse. Next, low moisture content fine adhered to the coarse coated with high moisture content adherent fine. Then, pseudo-particle size distribution depended on moisture distribution of fine as well as ratio of coarse and fine. Pseudo-particle size distribution was sharper, when moisture distribution of fine was sharper and ratio of fine was lower.

On the other hand, with mixing by a high speed agitating mixer, moisture distribution of fine went homogeneous before adhering. This result suggests that adhering and collapse occurred at a same time. With mixing by a drum mixer after mixing by a high speed agitating mixer, pseudo-particle size distribution was sharpest.

Key words : sinter; granulation; pseudo-particle; moisture transfer; rolling; agitating; adherence.

1. 緒言

焼結原料中の水分は焼結鉱製造における生産性に多大なる影響を及ぼす。これは水分が原料の造粒性や通気性に深く関係していること、さらには焼成時の燃焼効率や燃焼前線降下速度に深く関係していることによる¹⁻⁵⁾。ここで、焼結における造粒では、10 mm以下の幅広い粒度分布を持つ鉱石に水を添加し転動攪拌作用を加えることで、粒径の小さい粉を水の毛管付着力で凝集させ、擬似粒子化する。

さて、この原料の擬似粒子化は、粗粒鉱石を核として粉鉱石を雪だるま式に付着成長する形でなされていることを特徴としている。よって原料鉱石の鉱石特性や付着成長を助長する造粒操作条件に大きな影響を受ける。鉱石特性としては、粒度分布、粘着性、表面性状、粒子形状、鉱石内への吸水量などが挙げられる^{2,3)}。また造粒操作条件としては混合・造粒時間、回転速度、粒子転動距離などが挙げられる⁴⁾。さらに水分量を変更すると造粒された擬似粒度

分布も大きく異なることが、実験的に裏づけされている^{3,6)}。また、最近では加納らの離散要素法による粒子運動の研究が試みられている⁷⁾。

一方、実用化技術として、単純に鉱石を一括混合する方法から、鉱石特性を考慮し鉱石分布を高度に設計して焼結鉱の品質と焼結生産性を図る複合造粒法が採用されている^{8,9)}。また、原料ヤードで鉱石に散水を行い、事前に含水処理を行うと焼結生産性が改善される報告¹⁰⁾もなされている。

ここで、原料の最終的な擬似粒子化状態が、造粒時の平均的な水分ばかりでなくヤードでの散水や降雨によって生産性が変化することは、原料の平均水分ばかりでなく水の分布やその時間的な変化にも左右されることを示している。そこで、本研究では、モデル原料として単一銘柄の粗粒(粒径4–6 mm)および粉(粒径–0.25 mm)を、混合機として高速攪拌ミキサーとドラムミキサーを用いて、①非混合状態における時間的な粗粒の水分変化②粉の他粒子へ

平成12年8月31日受付 平成13年1月9日受理 (Received on Aug. 31, 2000; Accepted on Jan. 9, 2001)

* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

の付着挙動調査③水の分布条件と混合機機種種の擬似粒度分布への影響を調査することによって、水の原料中での賦存状態や移動現象に着目して、水の移動および擬似粒子の形成挙動について考察した。

2. 実験方法

2.1 粗粒鉱石の吸水速度試験

原料を混合しない状態で、鉱石粒子の初期水分に差があった場合の水分移動速度を確認することを目的として、吸水速度試験を実施した。まず、105°C 2時間乾燥した豪州産赤鉄鉱（H鉱石）の、単一粒子（サイズ：10×15×8mm）を、200gの水中、または水分6%の造粒後の実機配合原料100gに浸漬させた。所定時間経過後、この単一粒子を取り出し、表面水を拭き取り、この粒子の水分を測定した。水分値は105°C 2時間乾燥処理の前後の重量変化から算出した。同一粒子を用いて、浸漬時間を変化させつつこの一連の作業（粗粒乾燥→粗粒重量計測→浸漬→粗粒重量計測→粗粒乾燥）を繰り返して、単一粒子の浸漬時間と水分値との関係を求めた。

2.2 単一擬似粒子における粉付着成長試験

造粒機内では、散水の不均一性により、加水直後に比較的高い水分の初期擬似粒子が形成され、その後の転動作用により、その高水分擬似粒子のまわりに水分の低い粉が付着成長すると考えられる。ここでは、高水分初期擬似粒子として核のあるものと粉のみのものの2通りについて、高水分初期擬似粒子への低水分粉の付着限界を調べた。

核のある高水分初期擬似粒子は、ピーカー内で4-6mmのH鉱石を核とし、それに-0.25mmのH鉱石と水を徐々に添加し攪拌棒でよく混合して調整した。水分は13mass%に調湿し、混合後サンプルの一部を採取し乾燥による重量変化を確認した。なお、核鉱石は付着粉からの水分移動を防止する目的で、吸水飽和状態とし、24h水浸漬して遠心分離器にかけて表面付着水を除去したものをを用いた。遠心分離処理後の核鉱石の水分は3.6mass%であった。

粉のみからなる高水分初期擬似粒子は、500cc仕様のピーカー内に試料を加え、振動を加えることにより球形に整形して調整した。なお、初期擬似粒子の大きさを変更する目的で高水分粉量は1-4gまで変更した。

前記初期擬似粒子に付着させる低水分粉および乾燥粉には-0.25mmのH鉱石を用い、水分は各々4.3mass%および0.0mass%に調湿した。4.3mass%の調湿は高水分粉と同一方法、0.0mass%の調湿は乾燥機で105°C 24h乾燥した。

前記初期擬似粒子に前記低水分粉や乾燥粉を付着させて、その付着限界を求める実験では、初期擬似粒子をピーカーに入れ、次に低水分粉を0.5g添加し、ピーカーを手で振動混合して付着させた。すべての低水分粉の付着完了後、さらに低水分粉0.5g添加し、同一方法で付着させた。

この一連の操作を付着が飽和するまで実施した。付着飽和後、擬似粒子を乾燥処理し、付着粉全体の水分および質量を計測した。

2.3 モデル原料による造粒実験

2.3.1 目的

造粒操作において、造粒後の水分だけではなく、原料の初期水分値¹⁰⁾や混合方法が異なると擬似粒度分布が変化することが知られている。この挙動解明を目的として、擬似粒子の核として機能する粗粒と付着粉として機能する粉に単純化したモデル原料を、高速攪拌ミキサーおよびドラムミキサーを用いて混合処理を行った。

2.3.2 原料および調湿条件

前記モデル原料のうち、粗粒は粒径4-6mmのH鉱石、粉は-0.25mmのH鉱石を用いた。単一擬似粒子における粉付着成長試験と同様に、付着粉から粗粒への水分移動を防止する目的で粗粒鉱石は吸水飽和状態（水分値3.6mass%）とした。また、粉では調湿量の異なる（0.0mass%、7.0mass%）2種類を準備した。

2.3.3 水分添加および混合処理

各ミキサー（ドラムミキサーもしくは高速攪拌ミキサー）内に、乾燥質量換算で粉と粗粒の計12kg原料を、粗粒を下に粉を上敷設し添加水分を所定量散布した後、1分間混合した[混合1分段階]。この各ミキサーによる1分間混合後、ドラムミキサーでさらに4分間混合した[混合5分段階]。実験に使用したドラムミキサーおよび高速攪拌ミキサーの仕様をTable 1に示す。

2.3.4 調査項目および実験方法

混合1分段階および混合5分段階において、擬似粒度分布および擬似粒度別の付着粉水分を調査した。擬似粒度については、原料を500±100gまで縮分した後に、ふるい分けし、105°C 2時間乾燥後各粒度の質量を測定した。擬似粒度別の付着粉水分については、6-8、8-10、+10mmの擬似粒子それぞれ20個ずつまとめて、擬似粒子全体の湿潤質量を計測し、次いで乾燥（105°C 2時間）後の質量を計測し、さらにこの乾燥後擬似粒子を0.5mm篩上で水洗して周りの付着粉を除去して乾燥（105°C 2時間）後の粗粒鉱石の質量を計測し、これら3つの計測値と乾燥前の粗粒水分値3.6mass%から算出した。ここで、粗粒の粒径は4-6mmなので、粒径-2mmは未付着粉量とみなした。ま

Table 1. Specifications of drum mixer and high speed agitating mixer.

	drum mixer	high speed agitating mixer
Diameter(mm) pan agitater	600	325
Pan height (mm)	200	270
Revolutions(rpm) pan agitater	24	39
Number of agitater	—	1
Capacity of raw material (kg)	20	15

た、付着粉率は粉全体量を分母として算出した。

3. 実験結果

3.1 粗粒鉱石の吸水速度

粗粒鉱石水分値と浸漬時間との関係を Fig. 1 に示す。水浸漬、鉱石浸漬によらず粗粒鉱石水分値は最終的に 2.7 mass% に達した。この 24 時間経過時の到達水分値を飽和水分値と考えれば、水浸漬の場合には、粗粒鉱石水分値は実験開始から 30 分で飽和水分値の 80% に達した。一方、6 mass% 水分の造粒後原料への浸漬の場合には、飽和水分値の 80% に達するのに 5 時間を要した。

3.2 単一擬似粒子における粉付着成長

Fig. 2 に、初期擬似粒子の付着粉量と、付着粉増加量および混合後の付着粉水分との関係を示す。Fig. 2(a) より初期水分値が同じであれば、造粒後の付着粉増加量と初期擬似粒子の付着粉量は正比例する。さらに、添加粉水分値が 4.3 mass% (●) の場合での初期擬似粒子の付着粉量の変化に対する造粒後の付着粉増加量の変化度は、0.0 mass% (○) の場合での上昇度と比較して大きい。この上昇度は粗粒内包の有 (◎) 無 (○) によらない。Fig. 2(b) より初期擬似粒子付着粉量、粗粒内包の有無、添加粉水分値によらず、造粒後擬似粒子の付着粉水分値は 9~10 mass% で一定となった。以上のことから、擬似粒子成長の飽和は、造粒後の擬似粒子径に関係なく、付着粉の水分値に支配されるといえる。そして、最終的に付着粉全体の水分値がある一定の値 (H 鉱石の場合、9~10 mass%) となる条件で限界に達するものと考えられる。

3.3 モデル原料による水分添加造粒実験

Fig. 3 には諸条件を変更した場合における粉全体の水分値と付着粉率との関係を示す。なお、粉全体の水分値は、粉初期水分の量に添加水分の量を加えて粉の質量で割った値とした。粗粒鉱石には事前に吸水飽和が施されているので、造粒時に粗粒鉱石への吸水がないと考えられ、粉初期水分と添加水分が粉の付着に参与するとみなした。Fig. 3 より、各ケース共に粉全体の水分値が上昇すると付着粉率

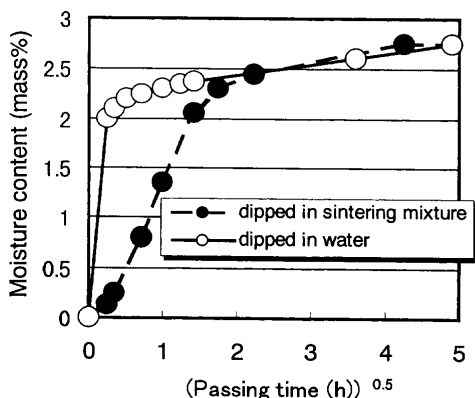


Fig. 1. Absorbing rate of moisture into coarse ore.

が上昇し 100% に取れんする。また、粉全体の水分が 7~9% の領域では、粉初期水分値 7% (●, ▲) のケースは 0.0% (○) のケースよりも付着粉率が低く、高速攪拌ミキサーで混合したケース (□) はドラムミキサーで混合したケース (○) よりも付着粉率が低い。

次に付着粉率が 100 mass% になった粉平均水分値 11 mass% 付近での擬似粒度分布および粒度別水分について

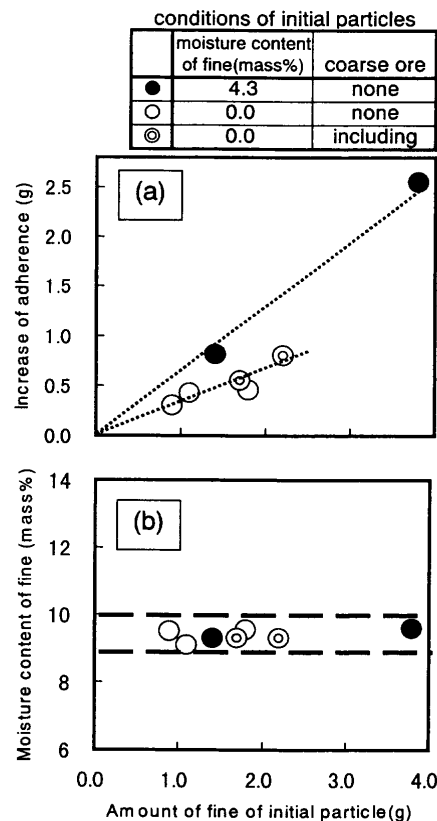


Fig. 2. Relationship between amount of initial adherent fine, and increase and moisture content of adherent fine after granulation.

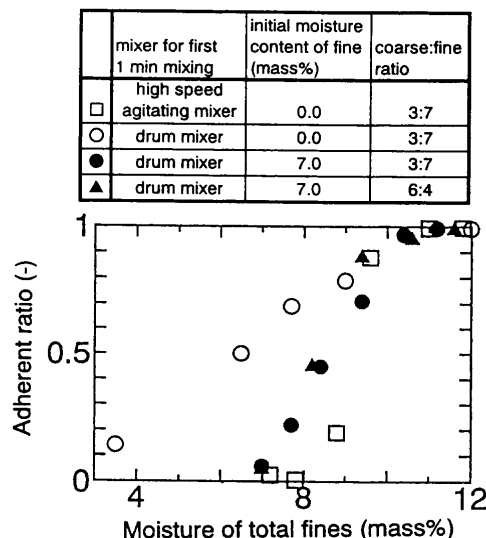


Fig. 3. Effect of calculated moisture content in total fine on adherent ratio after 5 min mixing.

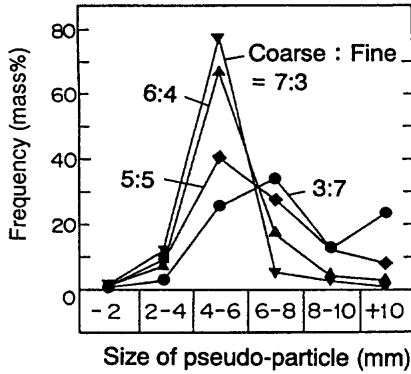


Fig. 4. Effect of coarse and fine ratio on pseudo-particles size distribution after 5 min mixing.

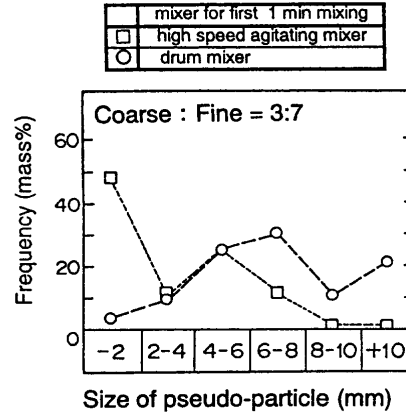


Fig. 6. Effect of first 1 min mixing method on pseudo-particles size distribution after 1 min mixing.

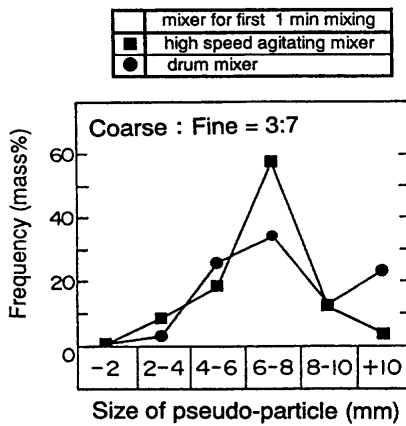


Fig. 5. Effect of first 1 min mixing method on pseudo-particles size distribution after 5 min mixing.

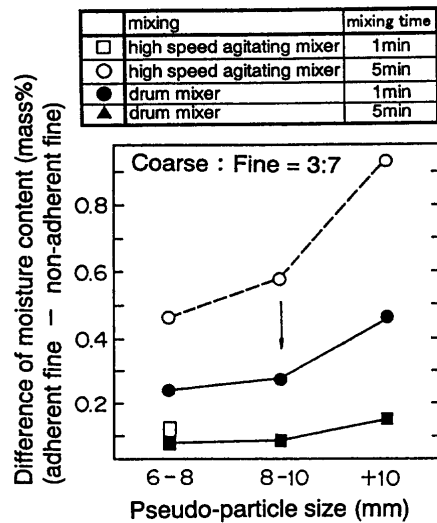


Fig. 7. Moisture content difference between non-adherent fine (-2 mm) and adherent fine for each pseudo-particles size after 1min and more 4 min granulating.

て述べる。Fig. 4にはドラムミキサーのみで混合した場合での混合5分段階における粉/粗粒の配合比率の擬似粒度分布への影響を示す。粉/粗粒比率の上昇とともに擬似粒度分布が広がった。Fig. 5には粉比率が70 mass%と高い条件(Coarse:Fine=3:7)での混合5分段階における1分間混合ミキサーの相違の影響を示す。高速攪拌ミキサーによる混合はドラムミキサーによる混合と比較して擬似粒度分布が狭まった。Fig. 6に混合1分段階における擬似粒度分布を、Fig. 7に混合1分段階および混合5分段階における+6mmの擬似粒子における付着粉水分値と未付着粉水分値との差分を擬似粒度別に示す。Fig. 6の混合1分段階においては、高速攪拌ミキサーによる混合では未付着粉比率が高く、粉の粗粒への付着が進行していないことがわかる。一方、ドラムミキサーによる混合では未付着粉の比率が低く、また擬似粒度も幅広く分布しており、この段階で既に粉の粗粒へ不均等な付着がかなり進行していることが理解される。

また、Fig. 7では、高速攪拌ミキサーによる1分混合段階で既に未付着粉と付着粉との水分差が小さく、粉の水分均一化がよく進行していることが理解される。一方、ドラムミキサーの場合には、未付着粉と付着粉との水分差が大きく、粉水分値の均一化があまり進行していないことが理

解される。しかし、ドラムミキサーによる4分間の混合が加わると水分差がなくなり、粉水分の均一化がほとんど完了し造粒が安定に達していることが理解される。

4. 考察

4.1 非混合時水分移動

まず、原料が混合を受けない状態、すなわち、造粒後に擬似粒子がベルトコンベアーで焼結機への搬送における水分移動について考察する。Fig. 1より乾燥粗粒鉍石の造粒後原料中への浸漬によって、造粒後原料の水分が乾燥粗粒鉍石へ吸収された。これは、水分の分布として、擬似粒子内空隙や擬似粒子表面での存在よりも、飽和するまで鉍石内気孔への吸水が優先されることを意味する。これは、粒子間より鉍石内の毛細気孔径が小さいので、水分未飽和の鉍石の吸水力が擬似粒子を構成する鉍石の界面張力より大きいためだと考えられる。

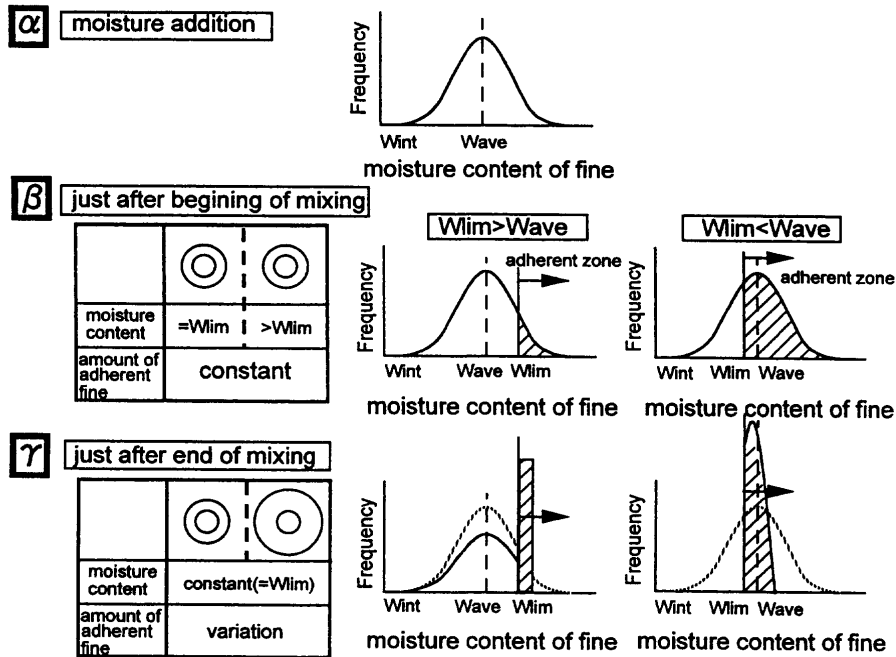


Fig. 8. Concept of change in pseudo-particles structure and moisture distribution of fine by mixing with drum mixer.

鉱石への吸水速度に関しては、水中浸漬と比較して、造粒後原料中への浸漬は低下し、飽和水分の80 mass%に達するのに5時間要した。一方、実プロセスのミキサーでの混合時間は長くとも10分程度である。よって、鉱石内気孔への吸水が不十分な状態で混合すると、造粒直後に鉱石内への吸水が未飽和のため、その後鉱石内への吸水によって擬似粒子が崩壊することが示唆される。

なお、この水中浸漬に対する造粒後原料中への浸漬での鉱石への吸水速度の低下は、吸水される水に対して、水中浸漬では他鉱石からの界面張力が作用しないのに対し、造粒後原料中への浸漬では他鉱石からの界面張力が作用することによると考えられる。

4.2 混合による水分移動と擬似粒子形成

4.2.1 ドラムミキサーによる混合

次に、原料が混合を受ける状態、すなわち、造粒機内における原料粒子間の水分移動と擬似粒子形成挙動についてFig. 8に考察する。なお、考察に際し以下の仮定をおいた。

- ①粗粒および粉は、それぞれ単一粒径に限定。
- ②擬似粒子は、1個の粗粒鉱石の周囲に粉が付着した形態とする。
- ③水添加時には原料水分分布が存在する。[水添加の不均一性]。
- ④粉鉱石は付着限界水分(W_{lim})以上の水分を含有すると最初に接触した粒子と付着する。
- ⑤一度付着した粉は剥離しない。

ここで、付着限界水分(W_{lim})は、H鉱石についてはFig. 2より9.5 mass%であった。粉が最密充填構造の付着粉層を形成した場合に空隙率は26 vol%と計算される。この空隙率と鉱石吸水性指数³⁾(5.8 mass%)、鉱石見掛密度(4.0 g/cm³)よ

り、付着限界状態は付着粉層空隙の40%を水で埋めた状態であると計算された。

さてまず水添加によって、粉は水分添加前の粉水分(W_{in})を最小値とする水分分布が生じると考えられる (Fig. 8中(α))。

次に混合を開始すると、直ちに W_{lim} 以上の高水分粉が粗粒に付着して擬似粒子の外殻を形成する。粗粒と W_{lim} 以上の高水分粉の接触機会は粗粒各粒子均等であり粗粒の粒径は同一なので、この付着粉量は各粒子に均等であると考えられる。ここで付着粉の水分は付着限界水分(W_{lim})以上であり、また混合直後であるので、付着粉と未付着粉とを合わせた粉全体の水分分布は水添加直後の混合前と同一であり、粗粒に付着する粉の水分は粒子間で分布を持っていると考えた。換言すれば、混合直後のこの付着は極めて短時間で行われると考えた。これはFig. 6およびFig. 7におけるドラムミキサーの転動混合1分の段階で未付着粉と付着粉との水分差が大きく、かつ、かなりの粉が付着している結果から推察される (Fig. 8中(β))。

次に混合時間の経過によって、未付着粉である水分 W_{lim} 以下の低水分粉が、擬似粒子表面に存在する高水分粉に付着し、粉水分の均一化が進行する。この段階では、付着粉の量は増加し水分値は低下する。付着する粉の平均水分は W_{lim} 以下の粉の平均水分で擬似粒子間で差異はない。この未付着粉の付着は擬似粒子付着粉の水分が W_{lim} へ低下するまで進行する。よって、混合直後に擬似粒子の外殻を形成した粉の水分が高いと、付着粉量が多くなる。この付着粉量の差異が擬似粒度分布を発生させる。なお、粉全体の水分(W_{ave})が W_{lim} 以上の場合には、粉の水分が W_{lim} に低下する前に粉がなくなる。しかし、同じ機構で粉水分の均一化

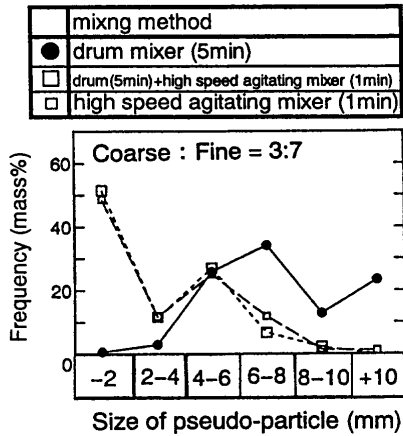


Fig. 9. Change of pseudo-particles size distribution by mixing pseudo-particles with high speed agitating mixer.

と擬似粒度分布は生じる (Fig. 8中(γ))。

4.2.2 高速攪拌ミキサーによる強攪拌処理

高速攪拌ミキサーによる混合では Fig. 6 および Fig. 7 にみられるように粉の付着を抑制して粉の水分を均一化している。1分間という短時間での粉水分の均一化には、高水分粉と低水分粉との接触が必要であるが、付着粉率が低い結果から接触によって付着結合を起こしても、擬似粒子はアジテータによる強攪拌作用によって崩壊すると考えられる。

そこで、この考えを確認するために、モデル原料による水分添加造粒実験において5分間ドラムミキサーで処理した付着率100mass%の原料(粗粒:粉=3:7, 粉初期水分7.0mass%)を、高速攪拌ミキサーで混合し、擬似粒度分布を調査した。結果を Fig. 9 に示す。高速攪拌ミキサーの混合によって未付着粉が増加し、ドラムミキサーの処理を行わずに高速攪拌ミキサーで混合したケースとほぼ一致した。すなわち、転動混合で形成した擬似粒子は強攪拌混合で崩壊する。

また、高速攪拌ミキサーによる混合に続いてドラムミキサーで混合した場合は、Fig. 5 に示すように擬似粒度分布幅が狭くなった。これは、粉の付着結合前の段階で粉水分が均一な状態になる。また粗粒各粒子への粉の接触機会が等しい。よって、粉平均水分値が W_{lim} 以上であれば、粗粒に付着する粉量が等しくなり擬似粒度は均一化するが、粉平均水分値が W_{lim} よりも低い場合には、粉は付着力を有せず付着は起こらない。

ここまで非混合時および混合時における、水の移動および粒子の付着/崩壊について考察した。従来、吸収性指数³⁾等により、水の原料粒子での分布と粒子の付着結合への関与有無とを関連づける概念は導入されていた。また、高速攪拌ミキサーによる混合処理では、擬似粒度分布がシャープ化しその要因は擬似粒子の崩壊にあること¹¹⁾は指摘されていた。今回のモデル試験による検討では、非混合

の系では粒子の吸水力で水の分布が変化する概念や、混合の系では粒子の付着結合によって水の分布が時系列に変化する概念を導入した。高速攪拌ミキサーによる混合処理では一度合体した擬似粒子の崩壊とともに水分が均一化する概念を導入した。これらの概念から、事前散水による擬似粒子の崩壊抑制およびドラムミキサーの混合前に高速攪拌ミキサーによる混合処理による擬似粒度分布のシャープ化を説明できるに至った。

4.3 モデル計算による検証

ここまで記載した概念に基づいて、擬似粒度分布を解析するモデルを構築し実験結果との整合を検討した。

まず、擬似粒子径は(1)式で計算される

$$D/D_c = ((M_c + M_f \cdot R / (1 - \epsilon)) / M_c)^{1/3} \dots \dots \dots (1)$$

D_c : 粗粒粒径(m), D : 擬似粒子径(m), M_c : 粗粒の質量(kg), M_f : 粉の質量(kg), R : 粉付着率(—), ϵ : 付着粉層内の空隙率(—), W_{lim} : 付着限界水分(mass%), W_{int} : 初期水分(mass%)

ここで、 R は(2)式で記載される。

$$R = \left(\frac{\int_{W_{lim}}^{\infty} F dw}{\int_{W_{int}}^{\infty} F dw} \right) \dots \dots \dots (2)$$

F : 水添加後の水分を変数とする粉の質量分布関数

また、混合により粉の水分が変化するとともに、関数 F も変化する。混合前における粉の質量分布関数を F_1 , 混合後における粉の質量分布関数を F_2 とする。

Fig. 8 で記載の混合直後の付着粉量は粗粒各粒子に等しいとすれば上記(1)式および(2)式により、混合直後の擬似粒子径 D_1 (m)と粉付着率 R_1 (—)は(3)式および(4)式で記載される。

$$D_1/D_c = ((M_c + M_f \cdot R_1 / (1 - \epsilon)) / M_c)^{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

$$R_1 = \frac{\int_{W_{lim}}^{\infty} F_1 dw}{\int_{W_{int}}^{\infty} F_1 dw} \dots \dots \dots (4)$$

一方、混合終了時の擬似粒子径 D_2 (m)と粉付着率 R_2 (—)は(5)式および(6)式で記載される。なお(6)式は、混合終了時には付着粉の水分は W_{lim} まで低下する結果に基づいている。(6)式より粉付着率 R_2 は混合直後の付着粉水分(w_1)に依存する。

$$D_2/D_c = ((M_c + M_f \cdot R_2 / (1 - \epsilon)) / M_c)^{1/3} \dots \dots \dots (5)$$

$$M_f (R_2 - R_1) = M_f \cdot R_1 \cdot ((w_1 - W_{lim}) / (W_{lim} - W_b)) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 R_2 は混合終了時の付着粉率(—), W_b は混合直後の未付着粉平均水分(mass%)で、(7)式で算出される。

$$W_b = \frac{\int_{W_{int}}^{W_{lim}} F_1 \cdot w dw}{\int_{W_{int}}^{W_{lim}} F_1 dw} \dots \dots \dots (7)$$

また、(6)式は粉全体の水分(W_{ave} (mass%))が W_{lim} 以下の場合に成立する。 W_{ave} が W_{lim} を越えると粉の水分が W_{lim} に低下する前に粉がなくなる。よって、(8)式が成立する定数 p を用いて、(6)式は(9)式に修正される。

$$M_f(R_2 - R_1) = p M_f \cdot R_1 \cdot ((w_1 - W_{lim}) / (W_{lim} - W_b)) \dots\dots\dots (8)$$

$$\int_{W_{lim}}^{\infty} p \cdot M_f \cdot R_1 \cdot ((w_1 - W_{lim}) / (W_{lim} - W_b)) dw_1 = (1 - R_1) M_f \dots\dots\dots (9)$$

高速攪拌ミキサーによる混合では、粉の付着結合の前に粉の水分が均一化するので、混合終了時の付着粉率(R_2)は(10)式で記載され、擬似粒子径は一定値になる。

$$R_2 = 1 \quad (W_{ave} \geq W_{lim}) \\ = 0 \quad (W_{ave} \leq W_{lim}) \dots\dots\dots (10)$$

以上のモデルの精度を確認するために、モデル原料造粒実験における実測値と計算値を比較した。実験における水分添加方法より、ドラムミキサーのみの混合の場合、水分添加段階での粉の質量分布関数は(11)式および(12)式のような一様分布を仮定した。

$$F_1 = M_f / (W_{max} - W_{int}) \quad (W_{int} \leq W \leq W_{max}) \\ = 0 \quad (W \leq W_{int}, W_{max} \leq W) \dots\dots\dots (11)$$

$$W_{max} = 2W_{ave} - W_{int} \dots\dots\dots (12)$$

モデル計算結果と実験結果を Fig.10 に示すが、対応は良好であった。この結果から、粗粒に高水分粉、次いで低水分粉が付着し、かつ崩壊は起こらないドラムミキサーの混合特性、および付着結合と崩壊の双方が同時に起こる高速攪拌ミキサーの混合特性の考え方は妥当であると考えられる。

4.4 擬似粒子形成における適正水分分布と造粒法

擬似粒子内に存在し付着結合として機能する水分や擬似粒子表層に存在する水分は、吸水未飽和鉱石中へ移動する。この水分移動は擬似粒子を崩壊させる可能性がある。しかし省エネルギーの観点から鉱石中の水分は付着結合に関与しないので、その水分は低い方が望ましい。むしろ、付着粉として機能する粉鉱石には、付着力を発現すべくその表層部に水分を保持する必要があるので粉内への吸水は避けられない。従って、粗粒鉱石について、混合前後を通じて鉱石への吸水を抑制する必要がある。

一方、粉鉱石については、初期水分と添加水分との和が一定であればその初期水分を付着限界水分(W_{lim})以上に高めることによって、水添加時に水分の質量分布が狭くでき、擬似粒度が均一化できる。これは、擬似粒径が 10mm 以上になると粒子内への燃焼酸素供給や伝熱の面で悪影響が現れるので、造粒においては未付着粉を減少させると同時に 10mm 以上の擬似粒子も減少させることが重要とされてい

conditions				experi- mental	calcu- lated
mixer for first 1 min mixing	initial moisture content of fine (mass%)	coarse: fine ratio			
high speed agitating	0.0	3:7	□	---	
drum mixer	0.0	3:7	○	---	
drum mixer	7.0	3:7	●	---	
drum mixer	7.0	6:4	▲	---	

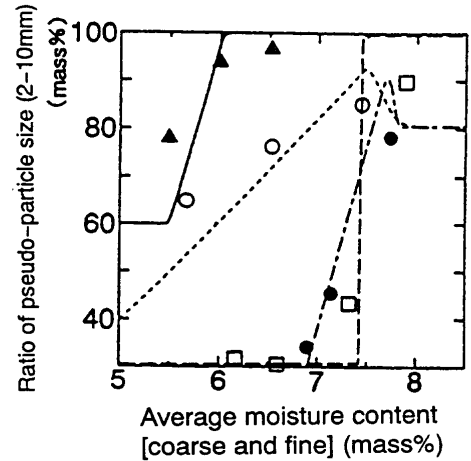


Fig. 10. Comparison between calculating and experimental results for pseudo-particles size distribution.

る¹²⁾ことによる。

以上より、粗粒鉱石は乾燥させ、粉鉱石は水分を W_{lim} で強攪拌作用により均一に調湿する。その後、粗粒鉱石と粉鉱石を転動処理し、粗粒鉱石内部への吸水前に焼結することが望ましい。

5. 結言

焼結鉱製造における原料水分に関する実験と考察を行い、以下の知見が得られた。

(1) 原料中の水分は、付着粉粒子間より鉱石内気孔の方が安定に存在する。乾燥粗粒鉱石が水で飽和するのに5時間以上要する。よって、水分が未飽和のまま造粒した場合には、造粒後に擬似粒子が崩壊することが考えられる。

(2) 高水分付着粉を外殻とする擬似粒子へ低水分粉を付着させていくと、付着粉の水分は一定値に収束する。

(3) ドラムミキサーによる混合によって、まず高水分の粉鉱石が粗粒鉱石に付着し、しかる後に低水分の粉鉱石が既付着粉と合体する。混合前における原料粉鉱石の水分分布と粉鉱石比率によって、造粒後の擬似粒度分布が決定される。粉鉱石の水分が不均一な程、また粉鉱石比率が高い程、擬似粒度分布の幅が広がる。

(4) 高速攪拌ミキサーによる混合では、粉鉱石が付着成長せずに水分が均一化する。これは、粉鉱石の付着と崩壊の双方が生じていることによる。

(5) ドラムミキサーによる混合に先立ち高速攪拌ミキサーで混合すると、最終的には擬似粒度分布の幅を狭める

ことができる。

(6) 今回の検討では、粉のみで構成される擬似粒子の存在を無視したが、粗粒と粉の水分条件によってはこの型の擬似粒子も生成されることが考えられる。今後の研究課題である。

文 献

- 1) E.A.Voice and R.Wind: *Iron Coal Trades Rev.*, **11** (1957), 841.
- 2) Y.Hida, K.Itou, J.Okazaki, M.Sasaki and Y.Umezu: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2166.
- 3) S.Satou, M.Yoshinaga, M.Ichidate and T.Kawaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2174.
- 4) S.Suzuki, K.Satou and M.Fujimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1932.
- 5) M.Wajima, Y.Hosotani, M.Shibata, H.Souma and K.Tashiro: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1719.
- 6) A.G.Water, J.D.Lister and S.K.Nicol: *ISIJ Int.*, **29** (1989), 274.
- 7) J.Kano, N.Chujo and F.Saito: *Adv. Powder Technol.*, **8** (1997), 39.
- 8) T.Kawaguchi, K.Kuriyama, S.Satou and K.Takada: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1642.
- 9) Y.Hida: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 263.
- 10) R.Nakajima, S.Kurosawa, M.Fukuyo, Y.Matsunaga and T.Wada: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 937.
- 11) K.Satou, S.Suzuki, M.Fujimoto and Y.Shimomura: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), S21.
- 12) M.Matsumura, T.Kawaguchi, M.Yariyama, K.Tajiri and Y.Hadano: Proc. 6th. Int. Symp. on Agglomeration, Soc. Powder Technol., Jpn., ISIJ, and Soc. Chem. Eng., Jpn., Kyoto, (1993), 180.