粉砕プロセスにおける鉱物の単体分離性に 及ぼす加重方法の影響*

—— 2 成分粒子の単体分離に関する研究(第 2 報) ——

朴 在 九¹ 岡 野 靖 彦² 井 上 外 志 雄³

[UDC 622.73]

Effect of Loading Methods on Mineral Liberation Characteristics in Comminution

—— A study on mineral liberation of binary composite particles (2nd Report) ——

by Jai Koo PARK¹, Yasuhiko OKANO² and Toshio INOUE³

1. R & D Center, Toshiba Ceramics Co., Ltd.

2. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

The liberation properties of progeny mineral particles were discussed, considering the compression and impact comminution in the experimental study with an iron ore.

It was proved that fractional degree of liberation (FDL) remains nearly irrespective of the reduction ratio. It was also proved that FDL obtained by impact comminution is greater than by compression comminution. It can be explained by the preferential breakage of iron mineral grains due to its selective fracture. It means that FDL can not be determined uniquely by the particle size.

Size distribution of the constituent mineral grains was also estimated by converting the areal data, measured by an image analysis on polished sections of raw materials, into volumetric distribution.

KEY WORDS: Binary Composite Partice, Selective Fracture, Mineral Liberation, Volumetric Distribution

1. 緒 言

2 成分以上の鉱物成分よりなる鉱石は細かく粉砕するほど、単体分離が進行するが、一方では過粉砕と粉砕エネルギーの損失をひき起こす。鉱石の粉砕と単体分離の関係を解明するためにわれわれは産物の各粒度区間における単体分離度すなわち部分単体分離度に着目するのがよいと考えた。粉砕方式や粉砕比などの粉砕条件が単体分離度に与える影響についての実験的研究には例が少ない¹⁾。

前報²⁾では、原鉱中の着目成分の単体分離度に影響を及ぼす因子を原料の特性および粉砕プロセスの特性に関するものに分け、モデルによるシミュレーション結果を中心に報告した。

本報では、画像解析システムにより構成鉱物粒径を測定し前報のシミュレーション結果と比較・検討した後、単体分離度へ影響を及ぼす粉砕条件について考察した。特に、粉砕機構の異なる圧縮および衝撃の両粉砕方式に注目し、単体分離度は粉砕方式にはよらず産物粒度のみに依存するという Kissらの報告³⁾について検討した。

その結果、衝撃粉砕によるいわゆる選択粉砕の効果が認められたが、シミュレーション結果と同様に粉砕比による影響は僅少であることが判明した。なお、第 1 報で報告したモデルによる構成鉱物粒径分布の推定が可能であることが確認できた。

2. 粉 砕 実 験

2・1 実験試料

実験に用いた試料は低品位鉄鉱石である。原鉱はスベリオー型鉄鉱床のカナダ Carol Lake 鉱山産の組織の緻密なタコナイトで、赤鉄鉱と磁鉄鉱を約 6:1 の質量割合で含有するものである。また、クレリーチ溶液を用いた浮沈分析結果、試料の平均密度 $\bar{\rho}$ は 3.25 g/cm³ であり、これは有用成分の体積基準品位に換算すると 24.5 Vol.% に対応することがわかった。なお、実験に用いた試料は粒子径 3.36 ~ 4.76 mm に整粒したものである。

2・2 単粒子圧縮粉砕

単粒子圧縮粉砕装置は、2 つの加圧板に単粒子を挟み込み、軸方向に圧縮力を加えて粒子を粉砕する構造である。加圧板への加重には許容圧力および内径がそれぞれ 0.9 MPa, 40 mm であるエアシリンダを用い、これにエアポンプから圧縮空気を供給することにより、粒子を加圧した。荷重・変位の測定にはストレインゲージ式のロードセル (最大荷重約 10⁻² MN) 1 台と非接触型の変位計 (最大検出変位 4 mm) 3 個を用いた。また、変位を検出する

Fig. 1 Main parts of compression and impact apparatus.

* 1991 年 3 月 29 日受付 10 月 25 日受理

1. 工博 東芝セラミックス (株) 中央研究所研究主務

2. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科

3. 正会員 工博 東京大学教授 工学部資源開発工学科

キーワード: 2 成分粒子, 選択破壊, 単体分離, 3 次元分布

ために直径140mm、厚み3mmであるアルミニウム・プレートを用いた。

実験パラメータとしては材料の種類、初期粒径および粉碎比をそれぞれ用いた。ここで、粉碎比は加圧板の初期間隔(粒子高さ)とストッパの高さの比率をもって定義し、ストッパの高さを变化させることで粉碎比を調節した(図1(a)参照)。

粉碎エネルギーは、圧縮力による粒子のひずみ量の増分がある一定の微小量を越えた際、荷重とひずみ量の A/D 変換値をコンピュータに取り込み、数値積分(台形法)を行う方法で測定した。ここで、粒子のひずみ量はプレートと変位計との距離の測定によって求めた。なお、粉碎後の破片は吸引ポンプを用いて捕集し、粒度分析に供した。

2・3 高速衝撃粉碎

粉碎装置は、ロータの高速回転による遠心力を利用し粒子を加速させ衝撃板に衝突させ粉碎する機構の試験機である。装置は電磁フィード、粒子加速ロータ(直径200mm、厚さ16mm)、衝撃板(39×36×8mm)ならびに、回転速度制御のための可変周波数電源から成り立っている。ロータは中空円板で側面に4個の粒子排出口を持つものである(図1(b)参照)。フィードからロータに投入された粒子はその内部で加速され、排出口より接線方向に飛び出す仕組みになっている。回転速度は誘導モータ(0.4kW2極)の電源周波数を変化させることにより、4,000~9,500rpmの範囲に変化させた。

粉碎エネルギー E は $E=1/2mv_p^2$ と定義した。ここで、 m は粒子質量、 v_p は衝撃板への粒子の衝撃速度で、ロータの出口からの飛び出し速度がロータの周速度に等しいものと仮定したものである。一方、フィード量は毎分1.0kgにし、2分間粉碎した。なお、一定の粉碎時間を経て、ロータの回転を止める際、粉碎機内に滞留した未粉碎粒子が産物捕集器に落ちてくることを避けるために、回転数を落とさないまま粉碎産物を採取するように注意した。採集した粉碎産物は縮分器で1/8に縮分したのち、JIS規格試験用ふるい(公比2^{1/2})を用い約10分間機械ふるい分けを行った。

3. 単体分離度および構成鉱物粒径の測定

単体分離度の測定は、i)構成成分の密度の差を利用した重液による浮沈分析法とii)構成成分の密度は問わない画像解析法に大別できる。i)の方法は適当な重液さえあれば、原鉱があまり微細でない限り、妥当な測定法と考えられる⁴⁾。一方、ii)の方法では、数学的扱いの正確さやモデルの制約も問題となる^{a)}。

3・1 浮沈分析装置

用いた原料の密度が高いため、重液としてクレリーチ溶液(Clerici solution; $\text{HCOOTl} \cdot \text{CH}_2(\text{COOTl})_2$)⁷⁾を用いた。この場合、恒温水槽を用いて30~90℃の温度範囲でクレリーチ溶液のタリウム化合物の濃度を調整して比重4.2以上の高比重重液を作った。また、比重の低い重液は高比重でのろ過回収液を希釈する方法で簡単に作る事ができた。なお、浮沈分析には浮遊物を捕集するために中間点に分岐管を設けた沈降管(高さ120mm、直径18mm)を製作して試験に用いた。

単体分離度の測定に用いた粉碎産物は4種類(圧縮2、衝撃2)である。それぞれの産物を5~6の粒度区間にわけ、10区間の密度について測定した。以下は粒子密度の測定手順である。i)各粒度区間に合う適当比重重液を作る、ii)比重重液を入れた沈降管におのおの粒度区間の粒子をいれ、約10~20分間放置する、iii)沈降管の浮遊物は分岐管のcockを開き、ろ過と同時に重液の回収を行

a) 測定された1または2次元のデータを3次元データに変換する必要があるが、これを省略する場合もある⁵⁾⁶⁾。

う、iv)ろ過産物を乾燥した後、秤量する。

3・2 画像解析システム

粉碎産物の単体分離の測定に加えて、粉碎作用を受けてない原鉱中の構成鉱物の粒径の測定も、単体分離を評価する上で欠かすことができない。そこで、(株)レコ製画像解析システムLUZEX2を用いて構成鉱物粒径の測定を行った。測定に用いたシステムは、テレビカメラなどがとらえた画像の面積、長さ、形状等を定量解析することができる。基本画像濃度階調は濃淡画像8ビット(256階調)および2値画像1ビット(2階調)をそれぞれ持つ。

構成鉱物粒径の測定においては、エポキシ樹脂に埋め込んだ10個の研磨片サンプルを用意し、以下のアルゴリズムで測定に供した。a)測定条件や測定パラメータを設定した後、測定された画素数を実寸法に換算するためにキャリブレーションを行う(1画素当たり15μmに設定した)。b)前処理として入力画像のシェーディングの補正および画像の平均化を行う。c)粒子と樹脂の境界を取るために、適当なスレッシュド値によって2値化した後、穴埋めを行う。d)構成物質とマトリクスとを区分するために、スレッシュドをかけて2値化像を得る。e)c)およびd)で得られた像の論理積演算を行い、測定対象の鉱物粒のみの像を得る。

以上の手順で得た像について、鉱物粒の面積からHeywood径を得た。なお、測定値は8区間に分類されており、1区間ごとに60μmの幅をもっている。

4. 実験結果および考察

4・1 単体分離度の評価規準

着目成分の単体分離度を評価するための規準は、数学的扱いやすさおよび評価の目的によって定められる^{8)~11)}。粉碎作用を受けた産物の粒子群に対して、粒度および密度の2つの変量について離散型確率変数(X, Y)の組(x, ρ)が定義できる。2つの確率変数の取り得る値をそれぞれ

$$p(X=x_i, Y=\rho_j)=h(x_i, \rho_j) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で示す。ここに i, j はそれぞれ粒度および密度区間を表す添字であり、 n, m はこれらの上限区間を表すものとする。 $h(x_i, \rho_j)$ は確率変数 X, Y の結合確率密度関数であり、その分布関数 $H(x_k, \rho_l)$ を

$$p(X \leq x_k, Y \leq \rho_l) = H(x_k, \rho_l) \\ = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l h(x_i, \rho_j) \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように表すこととする。また、確率変数 X, Y の分布関数をそれぞれ F, G 、密度関数を f, g とすると、

$$F(x_k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m h(x_i, \rho_j) = \sum_{i=1}^k f(x_i) \\ G(\rho_l) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l h(x_i, \rho_j) = \sum_{j=1}^l g(\rho_j) \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が成り立つ。従って、これらの関係は、

$$H(x_n, \rho_m) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h(x_i, \rho_j) \\ = F(x_n) = G(\rho_m) = 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

でまとめられる。さらに、密度 ρ_l なる粒子の全量を1として正規化された粒度分布は

$$F^*(x_k; \rho_l) = \sum_{i=1}^k h(x_i, \rho_l) / g(\rho_l) \\ = \sum_{i=1}^k h^*(x_i, \rho_l) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。同様に粒度 x_k なる粒子の全量を 1 として正規化された密度分布は

$$G^*(\rho_i; x_k) = \sum_{j=1}^l h(x_k, \rho_j) / f(x_k) \\ = \sum_{j=1}^l h^*(x_k, \rho_j) \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表せる。従って、粒度 x_i における平均密度 $\bar{\rho}_i$ は、

$$\bar{\rho}_i = \sum_{j=1}^m \hat{\rho}_j h^*(x_i, \rho_j) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 $\hat{\rho}_j$ は区間 j における平均密度である。よって、粒度 x_i における有用成分の体積基準の平均品位 $\bar{c}_i$ は、

$$\bar{c}_i = \frac{\bar{\rho}_i - \rho_g}{\rho_m - \rho_g} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここで、 ρ_m 、 ρ_g はそれぞれ有用および無用成分の密度を表す。従って、区間 i での有用成分の部分単体分離度 (fractional degree of liberation; FDL) は、

$$FDL_i(t) = \frac{1}{(\rho_m - \rho_g) \bar{c}_i} \sum_{j=i}^m (\hat{\rho}_j - \rho_g) h^*(x_i, \rho_j) \quad \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。ここで、 t はカットオフ品位を指定するための密度区間を表す。なお、粒度区間 j から k までの有用成分の積算単体分離度 (integral degree of liberation; IDL) は、

$$IDL(t) = \sum_{i=j}^k FDL_i(t) \cdot f(x_i) \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。一方、粒度区間 i における有用成分の理論回収率 r_i は、

$$r_i(t) = FDL_i(t) \cdot \bar{c}_i \cdot f(x_i) / c \quad \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ただし、 c は原料の有用成分の品位を表す。同じく粒度区間 k から m までの積算理論回収率 $R(t)$ は、

$$R(t) = \sum_{i=k}^m r_i(t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

から与えられる。

4・2 鉱物粒径の3次元変換

画像解析法により測定した構成鉱物粒の2次元の断面分布を3次元の空間分布に変換し、シミュレーション結果との比較を試みた。変換方法としては直径分布による変換法の中で Schwarz-Saltykov 法¹²⁾を用いた。

観測された研磨片での粒径分布 (断面の直径分布) を与えるような、実際の粒径分布 (球の分布) を推定するためには、次の基本式が必要である。

$$N_V = \frac{N_A}{D} \quad \dots\dots\dots (13)$$

これは単分散系の粒子における単位面積当たりに観測される断

面の数 (N_A) を、単位体積当たりの球の個数 (N_V) に関係づける式で、直径に基づく方法の基礎方程式となっている。ここで、 D は球の直径を表す。さらに、特定の大きさ d_i の断面だけを数える場合、課せられる任意の制限を考慮するための適当な確率を導入しなければならない。これらの条件のもとでは(13)式は、

$$N_V(j) = \frac{N_A(i, j)}{p} \cdot \frac{1}{D_j} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$p = \frac{h}{D_j/2} = \frac{h_{i-1} - h_i}{D_j/2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。ここで、 p は平面が直径 D_j の球に交わって、大きさ d_i の断面をつくる確率である。 $N_A(i, j)$ は直径 D_j の球から得られる直径 d_i をもつ断面の単位面積当たりの個数である。従って、研磨面の単位面積上で観測される断面の数と、単位体積中の粒子数を結びつける一般式は、(14)式と(15)式から

$$N_A(i, j) = 2(h_{i-1} - h_i) N_V(j) \quad \dots\dots\dots (16)$$

で与えられる。ここで、粒子直径をある任意の大きさのグループにわけて最大直径とグループの数 k の比を Δ とすると、第1グループの直径は Δ 、2番目のグループは 2Δ となり、最大直径 D_{max} は $k\Delta$ となる。(16)式を粒子直径 $D = j\Delta$ と断面直径 $d = (i-1)\Delta \sim i\Delta$ の場合について表すと、

$$N_A(i, j) = 2 N_V(j) \Delta [\sqrt{j^2 - (i-1)^2} - \sqrt{j^2 - i^2}] \dots\dots\dots (17)$$

となる。(17)式はおのおのの大きさのグループに対して別々に適用され、断面直径および粒子径の大きさのグループをそれぞれ表す整数 i および j を逐次的に代入することによって、 N_A を N_V に関係づける係数が決定される。

この Saltykov 係数を用いて8個のそれぞれのグループでの N_A (測定データ) から N_V を求めた (表1参照)。なお、表1から得た平均鉱物粒径は $\bar{\alpha} = 83.2 \mu\text{m}$ であり、初期粒子径 $L_0 = 4 \text{ mm}$ 、体積基準平均品位 $\bar{c} = 0.25$ とした場合、前報のモデルにおける鉱物粒を構成する最小限のサイズである単位体の数は $n = 63$ 個となる。この場合、研磨片の画像解析による測定値 (面積基準の個数分布) に基づく3次元変換値 (体積基準の個数分布) とシミュレーション結果を比較したものを図2に示す。図によると、シミュレーション結果は3次元変換値とほぼ一致し、モデルによる構成鉱物粒径の分布の推定が妥当であることが確認された。なお、体積基準の個数分布は面積基準の個数分布に比べ、より微粒側に移動することが認められる。これは、表1で示したように第1グループ ($0 \sim 60 \mu\text{m}$) の単位面積当たりの個数割合は単位体積当たりの個数割合より小さいためである。このことは、第1グループよりも大きい粒子が平面で切られて断面の直径が $60 \mu\text{m}$ 以下となる確率 (13式参照) よりも、微粒子であるために平面で切られない確率の方が大きいことに原因があると考えられる。しかし、

Table 1 Grain size distribution data for a Canadian iron ore in 24.5 vol.% valuables.

Group no.	Range of section diameter, [mm]	No. of grains observed on the polished section, $(N_A)_i$ [-]	Distribution [%]	Diameter of particles, D_i [mm]	No. of grains calculated in the corresponding volume, $(N_V)_i$ [-]	Distribution [%]	Total volume of grains in each class [mm ³]	Distribution [%]
1	0.00-0.06	465	59.09	0.06	7,750	73.73	0.22	2.85
2	0.06-0.12	213	27.06	0.12	2,050	19.50	1.85	24.00
3	0.12-0.18	49	6.23	0.18	365	3.47	1.11	14.40
4	0.18-0.24	30	3.81	0.24	189	1.80	1.37	17.80
5	0.24-0.30	18	2.29	0.30	100	0.95	1.41	18.30
6	0.30-0.36	8	1.02	0.36	40	0.38	0.98	12.70
7	0.36-0.42	3	0.38	0.42	14	0.13	0.54	7.00
8	0.42-0.48	1	0.13	0.48	4	0.04	0.23	2.98
Totals		$N_A = 787$	100.0		$N_V = 10,512$	100.0	7.71	100.0

Fig. 2 Size distribution of mineral grains obtained from microscopic observation, 3-D transformation and simulation.

鉱物粒径の体積分布はある特定のグループに偏らず、全般的にゆるやかな分布の型を示すことが確認できた。

4・3 粒度区間ごとの粒子密度分布

鉄鉱石試料の衝撃および圧縮粉碎試験から得られた産物について粒度と密度を測定した。まず、両粉碎産物の粒度分布関数を図3に示す。両者の微粒側（例えばフルイ通過50%以下）においては分布の形がよく似通っているが、粗粒側では衝撃粉碎の方が分布の幅が広いことがわかる。このことは、衝撃粉碎の場合に粉碎ゾーンでの粒子衝突確率が分布するためと思われる。さらには試料が不均質であるために起こり得るいわゆる選択粉碎による効果も考慮しなければならない。

粉碎比を変えて行った圧縮試験から得た産物の密度分布のヒストグラムを図4に、また衝撃粉碎産物のそれを図5にそれぞれ示す。これらのグラフは $\rho_0 = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_M = 5.10 \text{ g/cm}^3$ の場

Fig. 3 Size distribution of progeny particles of iron ore for different comminution methods.

合で、密度区間（または体積基準の品位区間）は10等分されている。当然のことながら、いずれの粉碎方式においても各産物ごとの粒度が細くなるに従って両成分の分離が進むことがわかる。また、衝撃粉碎産物は圧縮粉碎産物に比べ全粒度区間にわたって分離の傾向が強いこともわかった。これは衝撃粉碎により、有用成分の選択的破壊が進行していることを示している。

4・4 部分単体分離度

図6に部分単体分離度の粉碎条件の変化による特性を示す。ここで、部分単体分離度はカットオフ品位^{b)}を70%または90%で評価されている。図によると、カットオフ品位に関係せず衝撃粉碎産物の方が圧縮粉碎産物に比べ部分単体分離度が大きい傾向を示す。この傾向と前述した産物の密度分布の分離の度合から、衝撃粉碎が圧縮粉碎に比べ単体分離性がよいことが明らかになった。

Fig. 4 Density distribution of progeny particles after compression comminution.

Fig. 5 Density distribution of progeny particles after impact comminution.

b) ここでは一定の品位すなわちカットオフ品位以上の粒子を単体と見なした。

Fig. 6 Fractional degree of liberation as a function of particle size for the different cut off grade.

また、各粉碎方式で単体分離に対する粉碎比の影響を調べたところ、シミュレーション結果と同様にさほど差がないようであった。ただし、衝撃速度が小さい場合には部分単体分離度が最も大きい値を示した。これは、衝撃速度が小さくなったために粉碎されやすい成分と、粉碎されにくい成分の粉碎確率の差が拡大されたことによるものと思われる。すなわち、粒子の衝撃速度が大きくなると、いわゆる体積粉碎効果が相対的に強まる傾向を示唆する。また圧縮粉碎の場合には粉碎比の影響はほとんど見られなかった。

Fig. 7 Theoretical recovery of valuables as a function of particle size.

4・5 理論回収率

図7は産物の粒度とカットオフ品位90%に対する理論回収率の関係を示したものである。図によると、衝撃粉碎による着目成分の理論回収率が圧縮粉碎のそれより大であることがわかる。

単位質量当たり入力エネルギーが比較的に近い衝撃粉碎 ($v_p = 41.9 \text{ m/s}$, $E = 0.88 \text{ J/g}$) と圧縮粉碎 ($h = 0.7 \text{ mm}$, $E = 1.10 \text{ J/g}$) の両者を比較した場合、衝撃粉碎の方がエネルギー当たりの理論回収率がかなり高いことがわかる。これは、両粉碎産物の粒度分布特性が似通っていることから、粉碎方式による単体分離性の違いによるものと考えられる。しかし、衝撃速度の大きい粉碎ではもちろん理論回収率は高いが、粉碎エネルギーを考慮した場合には必ずしもその方が有利であるとはいえない。このエネルギー損失は、粒度の減少に伴う単体分離の増加率が著しく落ちる粒度範囲 (図6参照) のものが占める割合が大きいため、一種の過粉碎によるものと考えられる。一方、圧縮粉碎の場合では、入力エネルギー当たりの理論回収率はほぼ一定であることが認められる。

5. 結 言

鉄鉱石原料の圧縮および衝撃の両粉碎産物について単体分離特性を調べた結果、以下のことがわかった。

- (i) 粒子の衝撃力による粉碎方式が圧縮力による粉碎方式に比べ、単体分離性がよい。
- (ii) 着目成分の部分単体分離度は粉碎方式には影響を受けるが、粉碎比 (粉碎エネルギー) にはほとんど影響を受けない。しかし、衝撃粉碎では、衝撃速度がある程度低くなると、単体分離性がよくなることがわかった。
- (iii) 鉱物粒度分布のシミュレーション結果は、研磨片の画像解析による測定値 (面積基準の個数分布) に基づいた3次元変換値 (体積基準の個数分布) とはほぼ一致することが認められた。
- (iv) 入力エネルギーが比較的低い場合、着目成分の理論回収率は衝撃粉碎が圧縮粉碎に優る。

最後に、試料を提供して頂いた(株)トーマンと画像解析システム使用させて下さった(株)レコに心よりお礼を申し上げる。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金5846195によるものである。

参 考 文 献

- 1) Malvik, T.: Proc. of 14th IMPC, Toronto, VIII 2.1-2.5, (1982)
- 2) 朴在九・岡野靖彦・井上外志雄: 資源・素材学会誌, 107 [No.11], 801~804, (1991)
- 3) Kiss, L. and Schörner, K.: Aufbereitungs Technik, 5, 223~230, (1980)
- 4) 高桑 健: 選鉱工学-粉粒体工学の基本-, NREリサーチ社, 110~119, (1979)
- 5) Berube, M.A. and Marchand, J.C.: Int. J. Miner. Process., 13, 223~237, (1984)
- 6) Rixon, P. M. and Kostic, N.: Proc. of 14th IMPC, Toronto, VIII 5, 1~15, (1982)
- 7) O'Connell, W. L.: Trans. AIME, 220, 126~132, (1963)
- 8) Wiegand, R. L. and Li, K.: Trans. Soc. Min. Eng. AIME, 59~88, (1967)
- 9) Andrews, J. R. G. and Mika, T. S.: Proc. of 11th Int. J. Miner. Cong., Cagliari, 59~88, (1976)
- 10) King, R. P.: Int. J. Miner. Process., 6, 207~220, (1979)
- 11) Prez, J. W. and Aplan, F. F.: Process Mineralogy VI, A Publication of the metallurgical Soc. Inc., 376~389, (1986)
- 12) Underwood, E. E.: Quantitative stereology, Addison-wesley N. Y. (1970)