フルイ分け・分級技術に関する最近の進歩

岡 野 靖 彦*

Recent Progress in Screening and Classification Technology

Yasuhiko OKANO

1. は じ め に

我々粉体を扱う技術者が「フルイ分け・分級」ということばを聞くとき、単味のプロセスとしての意義はもとより、粉碎系における粒度のコントロールプロセスとしての重要性が想起される。省エネルギー時代に効率の向上がとくにまたれる粉碎系においてその多くが閉回路方式であり、構成要素である当該プロセスとくに分級プロセスの性能が閉回路全体すなわち粉碎系の効率に著しい影響を与えるからである。このことは定性的には以前より認識されているが、最近の研究ではかなり定量的に調べられている。

本報ではまずそのうちの2, 3の例を引用し当該プロ

セスの重要性の一側面を再認識したのち、フルイ分けおよび分級のそれぞれに関する理論ならびに装置の新しいところをいくつか紹介する。

2. 粉碎系の構成要素としてのフルイ分け・分級プロセス

この点に注目して早くから系統的な研究を進めているのが Hukki であって、彼は1965年世界各国から集めた200余りのデータをもとにして、現場の湿式分級操作が如何に低い分級精度の下に実施されているかを図1のように明らかにし¹⁾、以後今日まで分級精度の改善がもたらす粉碎系の質の向上を解析的に調べるだけでなく新しい高性能の分級機の開発をも試みてきている。なお図

図1 湿式粉碎閉回路における循環荷重比と分級精度 (201件の実績)¹⁾

* 東京大学工学部資源開発工学科助教授
昭和53年10月19日受理

1で縦軸の分級精度とはミルディスチャージ中の目的粒群の分級機オーバーフローつまり最終産物への実収率である。したがって横軸の循環荷重率 (CL) が0は分級精度100%に対応する。また彼の解析によると、例えばこの分級精度を45%から90%に上げることができたとすると処理能力 32 t/h, CL=300%, 消費動力 16 kwh/t の粉碎閉回路が処理能力 64 t/h, CL=100%, 消費動力 8 kwh/t に改善される²⁾。

小沼は乾式粉碎閉回路における分級機の細粒分率率 β が最終産物の粒度分布あるいは CL に及ぼす影響を解析的に調べている³⁾。

また制御の観点からこの β の値が湿式ボールミル粉碎閉回路の被制御性 (controllability) に及ぼす影響を定量的に検討した筆者らの研究もある⁴⁾。

3. フルイ分け理論

フルイ分け理論の分野においては速度論にもとづく理論展開が最近の特徴といえよう。

国際選鉱会議においても、第11回 (1975年) および第12回 (1977年) に何れも Ferrara らによってフルイ分け速度論に関する論文発表がなされている^{5), 6)}。彼らはフルイ網上で粒子が混み合っていて粒子間に相互作用がある場合と空いていて粒子間の相互作用がない場合とに分けてフルイ分け過程を解析し、フルイ目開きの丁度半分の粒度の粒子のフルイ分け速度定数 k_{50} に注目し、配分率曲線に対するフィード流量、フルイの長さなどの影響を調べている。

一方、フルイ分けプロセスにおける目詰まりは實際上重要な問題であり、古くから種々の対策が考慮されてきた。また理論解析によるフルイ分け結果の予測が、目詰まりを考慮に入れないことによって、非現実的なものとなってしまう例もすくなくない。そこで Rose はフルイ分け過程がもっぱら目詰まり現象によって制約されるという前提の下に、新しいフルイ分け理論を展開している⁷⁾。すなわち粒子の目詰まり速度、目詰まり粒子の離脱速度およびフルイ目以下の粒子のフルイ目通過速度をそれぞれ規定する3つの拡散係数——これらは何れも実験によって求める——を導入して、フルイ分けプロセスの数学モデル化を行なっている。このモデルによれば、任意の時点でのフルイ上産物の粒度構成を計算することができる。

なお目詰まりがポアソン過程に従うとした Kapur らのシミュレーション結果によれば、フルイ分け速度およびふるい分け結果のばらつきに対する目詰まりの影響は図2および図3のごとくなっている⁸⁾。とくに図3のようにフルイ目以下の粒子のフルイ上への残存率の分散があるフルイ分け時間で最大値を示す傾向は実験的にも

図2 ふるい分け時間とふるい目以下の粒子の網上残存量 ($\kappa_{1,0}$) と目詰まり定数 (β) との関係⁸⁾

図3 ふるい分け時間とふるい目以下の粒子の網上残存量の分散 ($\kappa_{2,0}$) と目詰まり定数 (β) との関係⁸⁾

認められた例が示されており、興味深い。彼らの報告では目詰まりがフルイ分け結果の誤差の主たる要因であると強調されている。

4. 分級理論

分級プロセスは古くから体系化されている沈降理論の適用によって解析されうるはずであるが、解析結果の実際との一致は必ずしも良くない。その主な理由としては実際の分級プロセスでは自由沈降が考えられるほどスラ

表1 湿式分級プロセスにおける乱流⁹⁾

	Reynolds-Zahl Ro	Turbulenzgrad $Tu = \sqrt{u'^2}/\bar{u} = f(Ro)$	Turbulenter Diffusionskoeffizient $D_t = \sqrt{u'^2} \Lambda$ in $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Schraubenklassierer	$Re = \frac{nL^2}{\nu}$ $Re_{krit.} = 10^6$ $Re_{off} \approx 10^6 \dots 5 \cdot 10^5$		$\frac{D_t}{nL^2} \approx 10^{-2}$ $D_t \approx 5 \dots 50$
Rechenklassierer	$Ro = \frac{nL^2}{\nu}$ $Re_{off} \approx 10^6 \dots 5 \cdot 10^6$		$\frac{D_t}{\bar{u}D} \approx 0,3 \dots 0,6$ $D_t \approx 30 \dots 100$
Hydrozyklon	$Ro = \frac{\bar{u}D}{2\nu}$ $Ro_{krit.} \approx 10^3$ $Re_{off} \approx 10^5 \dots 10^6$	$Tu = 0,01 \dots 0,05$	$\frac{D_t}{\bar{u}D} \approx 10^{-3}$ $D_t \approx 1 \dots 20$

リー濃度が低くないこと、装置内での流れの様子が把握しにくいことがあげられるのではなかろうか。

そこでとくに後者に関連して、乱流による粒子移動の考え方にもとづいて分級プロセスを解析した Schubert の研究に注目したい⁹⁾。すなわち表1のように湿式分級プロセスにおいても乱流条件はみられそれがプロセスの支配的要因になりうるものがまず指摘されている。そこで乱流拡散を伴う沈降過程における粒子 flux q_i を与える(1)式をもとにして平衡状態における濃度分布を(2)式のように決定している。

$$q_i = -D_{ty} \frac{\partial n_i}{\partial y} - v_{im} n_i \dots \dots \dots (1)$$

$$n_i' = \frac{n_{io}}{n_i} = \exp \left[-\frac{v_{im}}{D_{ty}} y \right] \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

図4 2つの基本的な分級モデル⁹⁾

n_i : i 番目の粒度区分の粒子濃度

n_{io} : 同 上 ($y=0$ の位置での濃度)

v_{im} : i 番目の粒度区分の粒子の沈降速度

D_{ty} : 乱流拡散係数

そして2つの典型的な分級モデルを設定し(図4, 図5参照) これをもとにして機械分級機および湿式サイクロンの数学モデルを構築している。

5. フルイ分け装置

過去において弧状ふるい、網目を強制的に動かして付着粒子を除去するふるい、電熱ふるいなど注目すべきアイデアが出ているが、フルイ目開きを目的とするフルイ分け粒度より大きくとって確率論にもとづいてフルイ

図5 トロンプ配分率曲線⁹⁾

①—図4の Trübbeteilungsmodell の場合

②—図4の Trübeanzapfmodell の場合

分けを行なう方法は現在でも特筆するべきものであろう。その代表例であるモーゲンゼンサイザ (Mogensen Sizer) は、実用に供されてから既に20年余りになるが、今日全世界で約3000の操業例がみられるという。その大部分が乾いたあるいは湿った粉体を対象としているが、スラリーを処理している場合もいくつかある。新機種としては密閉型のものや、Divergator として知られているロッドタイプ (rod type) のものがある¹⁰⁾。この種の装置の処理能力が大で目詰まりしにくいという特徴の外に次のような効用も最近 Mogensen によって示唆されている¹⁰⁾。すなわち選鉱工場における粉碎閉回路における分級機をこの種のふるい分け機におきかえることによって金属鉱物粒子の過粉碎を防げるというのである。つまり、高比重の微細な金属鉱物粒子が低比重の粗い脉石粒子とともに下流となりミルに繰り返されるという分級機における不都合を免れることができると指摘している。

6. 分級装置

乾式ならびに湿式のサイクロン型分級機は着実に現場

図6 種々のタイプの加圧水導入式新型湿式サイクロン¹¹⁾
(ただし左上は在来型、また Boda は water
Пульпа は pulp を指す)

に浸透しつつある。微細粒子の下流への迷い込みはこの種の分級機における一般的な問題点であり、過去においても Dahlstrom によって jet injection cyclone が考案されている。それは湿式サイクロンの apex に接線方向から加圧水を注入し迷い込み微細粒子を上流へ押し戻すというものであった。Riabtsiev らの最近の報告によると加圧水を湿式サイクロンの円筒部へ導入する(図6参照)ことによって、微細粒子の下流への迷い込みを少なくできるといわれている¹¹⁾。

一方一部で遠心力を利用しているが重力式というべき新しい湿式分級機(図7)が Hukki によって考案されている¹²⁾。円筒部(分級槽)と円錐部(沈降・クリーニング槽)とからなり、下流への迷い込み微細粒子の除去を洗浄水の圧入によって行なうと同時に、サンドの排出

図7 新型分級機¹²⁾

ただし、

- 円筒部(分級槽): ①フィード管, ②静止翼, ③オーバフローリップ, ④とい
円錐部(沈降・クリーニング槽): ⑤サンド沈降槽, ⑥洗浄水供給リング, ⑦捕集円錐槽, ⑧排出口
回転部: ⑨中空シャフト, ⑩および⑪スラリ分散用デスク, ⑫上昇管, ⑬翼群, ⑭円錐体, ⑮翼群
サンド排出自動制御系: ⑯検出子, ⑰バルブ, ⑱噴流水用パイプ, ⑲ジョイント, ⑳中空シャフト, ㉑ノズル

を jet 水量によって自動制御するようになっている。さらに考案者は従来の一般的な閉回路粉碎方式、つまり閉回路ロッドミルにボールミル——サイクロン閉回路を接続させた方式を、ロッドミルにサイクロンとこの新型分級機を組み合わせた 1 段粉碎・2 段分級方式に置き換えることの利点を指摘している。

7. お わ り に

フルイ分け・分級理論の発展は実際のプロセスの改善に必ず役立つはずであり、事実当該プロセスの成績評価方法やモデル化あるいはシミュレーションによる解析の進歩が、装置の選択、回路の設計に効果的に利用されるようになってきた。さらに新しい装置の開発に当っても解析的な研究が重要な基礎となろう。たとえば、図 4 の後者 (Trübeanzapfmodel) のモデルの方が前者 (Trübeileilungsmodel) より分級成績が良いことが図 5 から判るから、次はそのようなモデルに対応する装置は如何なるものかということが課題となる。

また選鉱工場における分級プロセスでは一般に密度の異なる粒子群を扱うために、場合によって密度差が分粒結果に影響しないフルイ分けプロセスを積極的に組み込むか、あるいは一つの装置内にふるい分け作用をも包含させることも考えられる。たとえば図 7 の装置で上部分級槽の側面をふるい網におきかえたものも考案されている。要するに実際面ではフルイ分けと分級とを独立に扱わず場合によっては互いにオーバーラップ (over lap) させて考えることも必要と思われる。

参 考 文 献

- 1) R. T. Hukki and H. Eklund: The relationship between sharpness of classification and circulating load in closed grinding circuits, Trans. SME, Sept. 1965, 265~268.
- 2) R. T. Hukki: An analysis of mill and classifier performance in a closed grinding circuit, Trans. SME, Sept. 1967, 233~239.
- 3) E. Onuma: An analysis of the closed-circuit grinding system with a semi-ideal classifier, J. Ch. Eng. Japan, Vol. 8, No. 6 (1975), 482~487.
- 4) 今泉常正, 井上外志雄, 岡野靖彦: 湿式ボールミル粉碎閉回路制御系の制御特性について, 日本鉱業会誌, 85巻977号 (1969) 791~794.
- 5) G. Ferrara and U. Preti: A contribution to screening kinetics, Paper presented at 11th IMPC.
- 6) A. De Pretis, G. Ferrara, M. Guarascio and U. Preti: A new approach to screening design, Paper presented at 12th IMPC.
- 7) H. E. Rose: Mechanics of sieving and screening, Trans. IMM, Vol. 86 (1977), c 101~104.
- 8) P. C. Kapur, B. Ball and D. W. Fuerstenau: A stochastic approach to sieving kinetics, Intl. J. Mineral Processing, vol. 4 (1977), 131~147.
- 9) H. Schubert: Zur prozeßbestimmenden Rolle der Turbulenz bei Aufbereitungsprozessen, Aufbereitungstechnik Nr. 9 und 12. (1974), 501~512, 680~685.
- 10) L. A. Adorjan: Mineral Processing, EMJ Annual Review 1978.
- 11) O. S. Riabtsiev, V. G. Bragin, M. N. Porshniev, V. V. Boiarshinov, V. K. Rozhniva: Results of classification of magnetite pulp by cyclones with various constructions, VUZ Gornij Zhurnal, No. 5 1977, 146~148.
- 12) R. T. Hukki: A new way to grind and recover minerals, EMJ, April (1977), 66~74. (日本鉱業会誌 94, 1079 に摘録)