選 鉱 原 鉱 の 均 一 化 に つ い て*

井 上 外 志 雄**

Blending of Mill Feeds,

Tohio INOUE

選鉱原鉱の均一化は選鉱操業の安定と選鉱成績の向上をもたらすものと一般に考えられている。しかし均一化設備のための投資を償って余りある起業効果が得られるかどうかの検討が必ずしも容易でないため、選鉱界、とくにわが国の選鉱界は均一化設備の建設に対し、ややもすれば消極的であった。選鉱工場の自動化を推進する上にも、均一化プロセスの技術的評価を確立することが是非とも必要ではないかと思われる。

ここでちょっと選鉱プロセス自動制御と均一化との将来の位置関係を考えてみたい。そもそも自動制御へのもっとも大きな動機は、原鉱石の変動に対して安定的な操業状態を確保し、各時点において最良の選鉱成績を保持することにあるといえよう。自動制御は種々の要因の変動による影響を排除し、一定の操業状態なり産物なりを確保するための技術であり、選鉱の場合、原料の変動、とくに粒度を含めた質的な変動、がもっとも大きな変動要因であると思われるわけであるから、均一化と自動制御とはある意味で、同一の目標を共有する立場にあるといえよう。したがって両者のいずれに重点をおくかは究極的には経済効果の大小によって判定されるべき性質のものであるが、選鉱成績のレベルで考えるならば、原鉱石の変動に対して最適自動制御によって得られる選鉱成績の時間平均は、均一な原鉱石に対して得られる最適選鉱成績に比して、同等以下であると考えられる。

また自動制御されたシステムは程度の差こそあれ外部条件の急激な変化に対して即応し得ない性質を持っており、そのために原鉱石の変動を小さく、かつ緩やかにすることが望ましい。

以上のような見地から、本稿では鉱石類を対象とした均一化技術の現状把握につづき、原鉱石の変動特性、均一化の原理など、均一化技術の評価に関して重要と思われる2、3の問題について考えることにしたい。

1. 均一化技術の現状

均一化はフランス語の *homogénéization*、ドイツ語の *vergleichmäßigung* に対し、英語では慣用的に *blend-*

ing と呼ばれることが多いが、実は品質* のばらついているものを一様な品質のものにするための操作を指している。このような均一化の概念は配合 (blending)、混合 (mixing) などのそれときわめて関係が深く、また試料採取 (sampling) の技術とも相通ずる点がある。混合については理論的にかなり突込んだ研究が行なわれているし、また試料採取については少し違った意味で統計学の一部として、しっかりした理論体系が確立されているのに対し、均一化については従来あまり高度に学問的な追究がなされていなかったように思われる。

ベルトコンベヤの上の原鉱石の流れを例にとれば、その品質* はベルト上の位置により、あるいは一定点を通過する時刻により、多かれ少なかればらついている**。このような変動をならすには大きく分けて、次の二通りの方法が考えられる。

(1) 計画配合

(2) 確率的混合による平均化

(1)は計画的切羽出鉱、炭層別バンカリング・配合払出し、などに見られるように、(2)に比して効率のよい均一化法であり、(2)を考える前に検討すべき方法であるといえよう。(2)は具体的には第1図aのようなパターンにしたがって行なわれる。すなわちA、B、C、Dの矢印の順に受入れた原鉱石をa、b、cの順に払出す。すると、たとえば最初に払出される鉱石aの品質はaとA、B、C、D、Eとの交点の品質、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 の平均値として表わされることになる。重力を利用する関係上、装入が水平であれば払出しは垂直、装入が垂直であれば払出しは水平の方向に行なうのが普通であるが、両方向が完全に直交する必要はない。この均一化の操作は第1図bのように書き直すことができる。すなわちこのようなパターンによる均一化は、原料の流れからある間隔*** をもって鉱石を取出し、合一することを意味している。合一される X_1 、 X_2 …間の距離が極端に

* ここで品質とは粒度、水分なども含めた広い意味で考えたい。

** 量的なばらつきが問題となる場合もあるが、本稿ではこの問題にはとくに触れない。

*** この間隔はコンベヤ上の距離、 X_1 、 X_2 …間の鉱石量などによって表わすことも可能であるが、便宜上時間間隔によって論議を進めることとする。

* 昭和45年7月15日 浮選研究会第44回例会にて発表

** 東京大学助教授 工学部総合試験所 工博

第1図 確率的混合による均一化の模式図

短かければ、①～⑤の品質の差が小さいため、合一しても意味がないことに気がつく。すなわち、合一が平均化のために有効であるためには、①、②…間にある程度の隔りがあることが必要であり、この距離は後に述べる鉱石の変動特性に関係があると思われる。Sommer¹⁾は“均一化時間”または“均一化量”という考え方によってこの問題を取扱っている。これらはどれだけの時間または量にわたって均一化を行なうかを指定する概念である。

さて、現在鉱石類の均一化には、大別して二通りの方法が使われている。その一つはいわゆるベッド・ブレンディング (bed blending) で、屋外または屋内の堆積場に2つの細長い鉱石の山 (ベッド) を設け、スタッカ (stacker) と呼ばれる荷役設備によって、一方の山に細長く層状に鉱石を堆積する間に、他のベッドからは堆積層に対して、これを直角に切る方向にリクレーマ (reclaimer) によって払出す方法である。スタッカおよびリクレーマの形式および操作法によって若干の相違はあるが、ベッドの層数は数十以上数百におよび、ベッドの両端を除き、ほぼ理想的な均一化を行なうことができる。ベッドブレンディングは大量貯鉱を行なうのに適した均一化方法であり、1カ月分もの鉱石を1つのベッドに堆積する場合も少なくない。大型化した場合のトン当りの設備費は次に述べるビンブレンディングに比してはるかに低い³⁾。

鉱石類に対するもう一つの均一化法はビンブレンディング (bin blending) と呼ばれ、容器に貯鉱する方法である。容器として中仕切のないサイロ (silo) 形式のものを使う方式と多数の小容器よりなるいわゆるセルバンカ (cell bunker) 形式のものを使う方式とがある。前者の代表的な例はスリットバンカ (slit bunker; Schlitzbunker) である。スリットバンカは横長の無区画の容器で、底部の払出口がスリット状になっている (第2図)。鉱石はトリッパコンベヤにより、安息角を利用して層状に装入される。払出しはバンカ底部のスリットから装入された鉱石の層を斜めに切る形で行なわれる。羽根車を搭載した台車がスリットに沿って往復し、羽根車によって掻き出された鉱石はスリットに対し平行に設

置されたベルトコンベヤに落とされる。スリットバンカを円環状に丸めたような特殊な構造の均一化バンカが Kelly により考案されたが、建設費が高いために実用化に至っていない模様である。

多数のセルを並べたセルバンカの場合、単に鉱石を各セルに分配して下から同時に払出した

p: 装入用トリッパコンベヤ
g: 払出用ベルトコンベヤ
r: 払出しのための羽根板

第2図 スリットバンカ²⁾

だけでは均一化は行なわれない。第1図で示したように合一されるべき鉱石、①、②…の間に最大の時間差を与えることが必要である。払出しは各セルから同時に行なうが、装入は一つのセルが満杯になってから次のセルに移る方式と各セルに同時に少しずつ分配する方式とが可能であり、両方式の間に優劣の差はないと考えられる。

セルバンカの一変種と見られるオルガンパイプバンカ (organ pipe bunker; Orgelpfeifenbunker) は普通のセルバンカの半分の容積で同一の均一化量を有するのが特長である。オルガンパイプバンカは20～30区のセルよりなっており、各セルの払出口のレベルに段差が設けられている。また受入鉱量に変動がある場合には、第3図のようにセルの上部にその変動を吸収するための容積をつけ加えることができる。

考案者の K. Lemke 氏によれば、最近数年間にドイツのルール地区で新設された石炭の均一化バンカはすべてこの形式であり、その建設費はフィーダなどの周辺設備を含めて、邦貨換算で約70,000円とのことである。

セルを円形にまとめた形式のセルバンカも Driessen により考案されている⁷⁾。

以上のほか、機械的混合装置 (いわゆるミクサ) によ

第3図 オルガンパイパンカの断面図⁵⁾

る均一化も考えられるが、必要な均一化時間をうるためには膨大な装置となり、現実的でないと思われる。

次に、実際に均一化を行なう場合、問題となる2、3の点について述べてみたい。第1は受入れ鉱量の変動に対する措置である。採鉱あるいは破碎工程から送られてくる鉱量が時間的に変化する（とくに夜間は中断するなど）ことはむしろ普通であり、そのような場合には均一化設備は質的な均一化のために有効に働く容積（active volume）のほかに、装入量と払出量の量的な差を吸収するための容積を備えることが必要である。しかしそれだけの設備投資が困難である場合には、質的な均一化をある程度犠牲にすることも考えられる。そのようなケースに対しては、設計時に適切な配慮を払うことが必要であろう。第2はパンカ、ベッドなどにおける鉱石の流動特性に関する問題である。とくに流動性が悪い場合、それに適した貯鉱設備および払出設備を用いる必要があることはいうまでもない。ブレンディングベッド、スリットパンカなどの場合、良好な層形成がなされることが肝要である。セルバンカ形式の場合、鉱石が装入された順に払出されることがとくに重要である。この条件を完全に満たす理想的なパンカ（またはホッパ）内の流れは mass flow または first-in first-out flow と呼ばれている（第4図b）。これに対し、現実の鉱石の流れは鉱石の性状、パンカの形などによって異なるが第4図cのようになっている。均一化の効果を充分に高めるために

は、これをできるだけbに近づけることが望ましい。dのように排出口の上に筒状の流動空間を生じ、堆積層の表面から順次流出する形態を plug flow と呼んでいるが、これではセルバンカにおいて均一化のために必要な時間の段差をうることができない。なおc～dの流出形態においては若干の混合が行なわれることも事実であるが、マイナスの効果の方が大きいと思われる。

鉱石の流動特性に関連して無視できないのは粒度偏析（size segregation）の問題である。堆積層の表面が傾斜していて、新たな鉱石の供給またはその堆積層からの払出しによってその表面が更新され、あるいは変形されるとき、粒度偏析をさけることはできない。この種の粒度偏析は粒子の転動および粗粒による細粒の“フルイ分け”効果のためとされており、鉱石の粒度分布および流動性によってその粒度は異なる。粒度偏析を少なくするために槽内の流動形態を改善するなど適切な措置を講ずると同時に、粒度偏析の影響をうけにくい払出し方法を採用することが必要であろう。

その他、均一化設備の設計に当っては、操業・管理の容易さを充分に考慮すべきであることは当然である。

2. 鉱石の流れの変動特性

選鉱工場あるいはその中のいわゆるミルビンに到着する鉱石は量的にも質的にも時間とともに変動しているのが常である。ここで質というのは品位、粒度分布、いわゆる鉱質、水分などを指している。このような時間変動の原因は必ずしも単純でないが、たとえば品位変動については、鉱床内の鉱石鉱物の賦存状態が巨視的にも微視的にも空間的に偏在していることにそのそもその原因を求めることができよう。量的な時間変動を極力少なくすることは安定な選鉱操業を確保するための第1歩であり、この要件は質の変動の低減に比較すれば容易に達成されるので、以下、量的に均一な鉱石の流れを想定して論議を進めることにしたい*。

* 同様の考え方は必要があれば量的変動特性に対しても適用することができる。

a 1,2...の順に装入された状態 b mass flow
c 実際の流出形態 d plug flow

第4図 パンカからの流出形態

第5図はこれから均一化その他の処理をうけるべき原鉱石の質の時間的変動の様様を模式的に表わしたものである。鉱石の質（品位，粒度など）を表わす特性値 $x(t)$ は時間とともに不規則に変動しており，その集合を一種の不規則過程（random process, 確率過程 stochastic process ともいう）とみなすことができる。 $x(t)$ の時間的変動の性質は次の式で定義される自己相関関数（auto-correlation function） $R(\tau)$ によって表わすことができる。

$$R(\tau) = [Ex(t) \cdot x(t+\tau)] \cdots \cdots (1)$$

第5図 鉱石の質（品位，粒度など）を表わす特性値 $x(t)$ の時間的変動

ここに E は [] 内の積の期待値を意味する*。自己相関関数の一般の性質については，ここでは直接必要な点以外には触れないが， Ψ^2 を2乗平均， μ を $X(t)$ の平均， δ^2 をその分数とすれば

$$R(0) = \Psi^2 = \mu^2 + \delta^2 \cdots \cdots (2)$$

という関係が成立し，また $X(t)$ に周期的変動成分が含まれていない場合には $\tau \rightarrow \infty$ で $R(\tau)$ は μ^2 に漸近することが知られている（第6図a）。また $x'(t) = x(t) - \mu$ とすれば，平均値ゼロの不規則変数 $x'(t)$ についての自己相関関数 $R'(\tau)$ では $R'(0) = \delta^2$ ， $R'(\infty) = 0$ となる。 $R'(\tau)$ は（自己）共分散関数（covariance function）とも呼ばれている⁶⁾。

均一化設備を合理的に設計し，また操作するためには，そこに供給される原鉱石の変動特性を知ることが必要であると考え，同和鉱業株式会社の松峯選鉱工場において，次のような実験を実施させていただいた。

この実験は鉱石のサンプリングとそのデータの解析による簡単なもので，ここでは破碎工場からミルビンへ送られてくるいわゆるミル元鉱を対象として行なった結果について述べる。21.2sec から 24h の範囲の各時間間隔について25個ずつのデータが得られるように計画を立て，それにしたがってサンプリングを行なった。各試料は 4.67mm でフルイ分け，粒度構成を調べたのち，網土，網下を合わせて蛍光X線分析に付し，銅，亜鉛，鉄の分析を行なった。サンプル値の偏りおよびサンプリン

第6図 周期的変動成分を含まない不規則過程についての自己相関関数

グ誤差を除去するための処理⁸⁾を加えたのち，銅，亜鉛，鉄および -4.7mm 含有率について得られた自己相関関数は第7図のようになり， $R'(\tau)$ は τ に対し次のような指数関数の形で表わされることがわかった。

$$R'(\tau) = R'(0) \cdot \exp(-\tau/\theta) \cdots \cdots (2)$$

式中のパラメータ θ は相関時間（correlation time）と呼ばれることがある。自己相関関数を特性づける2つのパラメータ $R'(0)$ と θ の値を第1表に示す。 θ はすべての着目特性値に対してほぼ一定で，約60min という値を示している。 θ は $R'(\tau)$ が $R'(0)$ の $1/e \approx 0.3679$ 倍に減衰する時間差を表わしており，時間差が小さいほど特性値の自己相関が強いこと，時間差無限大では，無相関となり，同期的な変動は認められないことがわかった。

第1表 第7図から求めた自己相関関数のパラメータ

変 数	銅	亜 鉛	鉄	-4.76mm 含有率
$R'(0)$ (%)	0.33	0.35	4.55	76
θ (min)	69.0	65.0	52.5	67.5

またこれとは別に，サンプル値を正規確率紙にプロットした結果，直線的な傾向が得られ，これらの特性値は正規分布にしたがうことが簡略なテストによってではあるが，一応判明した。

3. 鉱石の時間変動と均一化の原理

前節で鉱石の流れの変動を評価する方法とその一例を示した。鉱石の量的，質的な時間変動の特性は鉱床の性質ならびに採鉱性その他，採掘された鉱石が測定点に到着するまでに経たる履歴によって異なるであろう。これらの変動特性を上記述べたような方法で実際に測定し，あるいは予測し得たならば，そのデータを均一化設備の設計，均一化効果の予測などに利用しうると考えられる。

形式，構造のいかんを問わず，均一化設備から出てくる鉱石の特性値（品位，粒度など）の時刻 t における値 $y(t)$ は，次式によって与えられる。

* このような解析の数学的妥当性云々については文献1) および確率過程理論に関する専門書にゆずりたい。

第7図 ミルピンに到着する鉱石流の自己相関関数

$$y(t) = \sum_{i=1}^n w_i x(t - T_i) \dots \dots \dots (3)$$

右辺の $x(t - T_i)$ は時刻 $t - T_i$ に均一化設備に到着し、時刻 t に出口から排出された鉱石の当該特性値の値であり、 w_i は均一化設備の出口で合一された鉱石の中で、時刻 $t - T_i$ に到着した鉱石が占める割合、つまり重みである。 n は合一されるインクリメントの数を表す。ブレンディングベッド、スリットバンカ、セルバンカなど、多くの均一化設備の場合、正常な操業状態においては $w_i = 1/n$ と考えてよいであろう。

X が前節(2)式に示めすような自己相関を有する場合、すべての $i, j; 1 \leq i, j \leq n$ について $|T_i - T_j| \gg \tau$, かつ $w_i = 1/n; i = 1, 2, \dots, n$ であり、 x が正規分布を示すならば、統計学の教えるところにより y もまた正規分布を示し y の分散 δ^2_y は x の分散 δ^2_x の $1/n$ 倍になる。

$$\delta^2_y / \delta^2_x = 1/n \dots \dots \dots (4)$$

これが n 点の鉱石を合一した場合得られる最大の均一効果を表わしている。しかるに $T_i - T_j$ が τ に比して十分に大きくなく、 $x(t - T_i)$ と $x(t - T_j)$ が相関している場合には、 $y(t)$ の変動は(4)式で示されるよりも大き

くなる。もっとも極端な場合、 $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T$ では

$$y(t) = x(t - T)$$

となり、その分散は x の分散と変わらない。結局、(2)式の θ (前節の数値例では $\theta = 60 \text{ min}$) に比して $T_i - T_j$ を十分に大きくとれば、 $R'(0)$ を低下させるという意味において合一は有効であり、逆に $T_i - T_j$ が θ に比して十分に小さければ、その合一は同じ意味で無効であることがわかる。

特性値の変動幅を小さくすることは選鉱操業にとってもっとも好ましいことではあるが、十分にゆっくりした変動に対しては手動の調節または自動制御により操業条件を変動に追従させることができるであろう。(3)式によって示される均一化の結果、変動の分散値 $R'(0)$ が減少するだけでなく、 τ の増加を伴う $R'(\tau)$ の減衰がゆるやかになり、変動がゆっくりしたものになることがわかる。均一化によって変動の波が実際にどのようなものになるかについては、自己相関を有する乱数列により鉱石の変動をシミュレートする方法と理論計算による予測の両面から検討を進めつつあり、この方向から均一化設備の基

本方針を見いだしうと考えている。

最後に光和精鉱株式会社戸畑工場、同和鉱業株式会社、花岡鉱山松峯、堂屋敷両選鉱工場で行なわれている興味あるビンブレンディング法に言及したい¹⁰⁾。これは数区セルよりなる均一化バンカからの排出鉱の一部を循環してバンカへの新到着鉱の流れに加える方法（第8図）であって、(3)式と同じ流儀で表わすと、均一化後の特性値 $y(t)$ は次式の形で表わされることになる。

第8図 鉱石流の一部循環による均一化

$$y(t) = \frac{1}{1+\beta} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t-T_i) + \left(\frac{1}{n^2}\right)^2 \frac{\beta}{1+\beta} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x(t-T_{ijk}) + \left(\frac{1}{n}\right)^3 \left(\frac{\beta}{1+\beta}\right)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x(t-T_{ijk}) + \dots \right) \quad (5)$$

この式は各セルが mass flow の条件を満足し、かつ系全体が定常状態、すなわち到着鉱量 Q_i = 排出鉱量 $Q_o = Q$ の状態で運転されていることを前提とした場合を表わしており、 β は到着鉱または最終的な排出鉱に対する循環鉱の量的比率 Q_c/Q を表わし、式中のたとえば T_{ijk} ははじめ i 番のセルに到着し、次いで j 番のセルに、さらに k 番のセルへと循環されたのち、系外に排出された鉱石の系内滞留時間を表わしており、かなり複雑ではあるが、計算は可能である。(5)式からわかるように、 $y(t)$ は到着鉱 $x(t)$ の無限に多数のインクリメントを含んでおり、 β が大きくなるほど、その意味での平均化は増進される。それとともにインクリメント間の時間間隔 (T_i , T_{ijk} などの相互の差) は次第にせまく、ち密になり、系全体が一つの巨大な完全混合槽 (complete mixer)⁹⁾ に近づくことになると思われる。

× × ×

以上、鉱石類を対象とした均一化設備の現状、鉱石の変動特性均一化の原理、などについてとりまとめた。鉱石の変動と均一化の原理については確率過程の考え方の導入を試み、鉱石の変動特性について僅かではあるが興味あるデータが得られた。まだ充分に考えがままとまっていない部分も多いが、近い将来に均一化設備の性能や均一化後の鉱石の変動特性などについても調べて見たいと考えている。

終りに現場実験に際し多大の御援助、御協力を賜った同和鉱業株式会社に厚く御礼申上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) O. Sommer: 均一化設備の必要容量, グルックアウフ **13**, 11, 654 (1964)
- 2) M. Hampel: 特に灰分を考慮したコークス用炭炭質の均一化, グルックアウフ **14**, 12, 791 (1965)
- 3) K. Eichholtz: 水選原炭の事前均一化のための二つの貯炭場の設計, 建設および操業, グルックアウフ **16**, 3, 130 (1967)
- 4) K. Lemke: 原炭の均一化に関する研究, グルックアウフ **12**, 11, 601 (1963)
- 5) R. Straußfeld und F. Velhagen: Planung, Aufbau Planung, Aufbau und Betriebserfahrungen mit einem Vergleichmäßigungsbunker, Aufbereitungs-Technik Nr. 10/1969, 569
- 6) J. S. Bendat and A.G. Piersol: Measurement and Analysis of Random Data, John Wiley & Sons (1966) 70—71
- 7) P. Iohn: Stapel Dosier und Mischbunker für Rohkohle, Aufbereitungs-Technik, Nr. 2/1965, 84
- 8) T. Inoue and T. Imaizumi: Homogenization of Mill Feed by Partial Recycling of Bin Discharge, A Paper presented to the 8th International Symposium on Techniques for Decision Making in the Mineral Industry. 1970, Montreal.
- 9) 宮内照勝: 流系操作と混合特性, 続・新化学工学講座 **14**, 日刊工業新聞社
- 10) 鷺見博生, 伊藤壮一: 選鉱元鉱の均質化について, 浮選 No. 35 (1968) 5—10
- 11) A. L. van der Mooren: The homogenization of streams of coal. Proceedings, 5th International Coal Preparation Congress, Paper A 3, 1966, Pittsburgh.
- 12) O. Sommer: Statistische Untersuchungen über die Bemessung von Vergleichmäßigungsbunkern. Bergbau-Archiv, **21**, Nr. 2, 59—71 (1960)