セメント粉砕閉回路の静特性に基づく 制御系設計指針*

— 粉砕閉回路のロバスト制御に関する研究 (第2報) —

松尾 誠治¹ 岡野 靖彦²

A Control Strategy for the Cement Grinding Process Based on its Steady-State Characteristics

— A study on robust control in closed grinding circuit (2nd Report) —

by Seiji MATSUO¹ and Yasuhiko OKANO¹

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

It is known that the typical control system based on BE electric power, which has been applied in many cement grinding plants, has some problems. Other types of controls therefore have recently been proposed. They require both to stabilize the process and to improve the product quality against the changes in clinker grindability. The authors have already constructed the transfer function model from population balances of the process. The purpose of this paper is to present an optimal control strategy based on the steady-state characteristics.

Firstly we criticized several conventional control methods. For instance, it was quantitatively confirmed that the BE electric power control system could not regulate the product property and the multivariable one by manipulating the classifier cut size could not keep the product quality as well as its quantity simultaneously against the feed change in grindability.

Consequently we have proposed a hierarchy control system, consisting of the two stages. The higher one is to determine the product set-point values and the lower one is to control the stability and the product quality. In this system, when the grindability becomes low the decrease of the product quantity can be prevented by changing the set point of the product quality. This system has also an advantage of avoiding the mill choking. As to the detection of grindability it was suggested to estimate it by measuring the product quantity and quality (specific surface) simultaneously, or practically mill discharge quality only.

KEY WORDS: Cement Grinding Process, Cut Size, Multivariable Control, Hierarchy Control, Robust Control

1. 緒 言

セメント仕上げ粉砕プロセスで従来より採用されているバケットエレベータ電力定値制御は、設備面からも簡便な手法であるが、応答が遅くミル詰まりに対応できない、原料の被粉砕性の変化に伴う精粉品質の変化を補償できないなどの問題点が指摘されている¹⁾。そのため、現在さまざまな制御方法の改善が検討されており、これらの多くはプロセスの安定化に加え精粉品質の維持をも目的としたものである。

著者らは、前報において物質収支に基づいた伝達関数モデルの構築を行った²⁾。そこで、今回は構築したモデルおよび各種現場データを用い、この系に対する最適制御系の設計を検討した。制御系の設計では、この系の制御方策の検討した後、提案された系に対しコントローラの設計を行う必要がある。特に、制御方策の

検討では、従来より行われているバケットエレベータ電力定値制御の問題点や、現在さまざまな検討が行われている種々の制御手法の相違を定量的に明らかにすることが重要である。

そこで、本報ではまず制御方策に関する検討を行い、次報では提案した制御方策に対するコントローラの設計を検討する。その際、制御方策の検討では主に対象の静特性が、またコントローラの設計では対象の動特性がそれぞれ重要なため、前者では提案した厳密な伝達関数モデルの定常特性を、そして後者では動特性を考慮した簡略化モデルをそれぞれ解析に用いることとした。

今回の解析では、はじめに現在のセメント仕上げミル粉砕の制御の現状を把握した。次に、プロセスの安定化および精粉の品質維持を目的とした多変数制御に着目し、各種制御法の比較をモデルを用いて定量的に行った。そして、最後に最適と思われる制御方策を提案した。

2. セメント仕上げミル制御の現状

Table 1 に現在のセメント仕上げミルの制御の状況をまとめた。これらは大別すると、1) 応答の速応性の改善、およびミル詰まり防止を考慮した単ループ制御、2) 最適運転条件の維持を目的と

* 1997年5月22日受付 1998年1月5日受理

1. 正会員 東京大学技術官 大学院工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻

〔著者連絡先〕 FAX 03-3818-7492 (東大・地球システム)

キーワード: セメント仕上げミル, カットサイズ, 多変数制御, 階層型制御, ロバスト制御

Table 1 Present control techniques of cement grinding process.

1. Feedback controls to regulate the circuit and to avoid the mill choking -- input : new feed	
(1) output : mill discharge (BE electric power), circulating load	
(2) output : mill sound level	
(3) output : mill vibrating level	
(4) cascade control -- main: mill discharge, sub: mill sound level	
2. Hierarchy control -- supervisory of stabilizing controls	
(1) output : mill discharge	set point : mill sound level
(2) output : mill vibrating level	set point : mill discharge
3. Multivariable control -- control of stability and product quality	
(1) input : new feed	cooling water
output : mill vibrating level	mill temperature
(2) input : new feed	cut size
output : circulating load	product
(3) input : new feed	cut size
output : product	s.s.a. of product
(4) input : new feed	cut size
output : circulating ratio	s.s.a. of product
input : manipulated variable, set point : set point deciding variable	
output : controlled variable	

した階層型制御, 3)安定性および精粉の品質維持を考慮した多変数制御の3つに分けられる。

1)の単一ループの制御では, ミル排出量, 戻り粉量に替わり音響, ミル振動といったミルの内部状態を直接反映する諸量を検出量とした制御の検討が行われている¹⁾³⁾⁴⁾。これらは, 原料被粉砕性, 供給量などの急激な変動に対する応答が速く, さらにミル詰まり現象を把握することができるという利点がある。しかし, 最適運転レベルが原料の被粉砕性により大きく変化するため, これらを単独で用いる制御にはまだ問題が残されている。

2)の階層型制御は, 1)の単一ループ系に対しミルの粉砕性に応じた設定値変更機能を階層的に付加したもので, ミルの最適運転状態を常に維持することを目的としたものである⁴⁾⁻⁶⁾。その設定値変更基準は, 原料の被粉砕性, 温度, ミル詰まりなどの現象を総括的に考慮する必要があるため, 知識ベースの制御が用いられる場合が多い。また, これによりミル詰まりの回避が可能である。現在, 階層構造を多変数系に適用しているケースもみられる¹⁰⁾。

3)の多変数制御系では, 安定性に加え精粉品質の維持を目的とした制御の検討が近年数多く行われている⁷⁾⁻¹⁰⁾。これらは, ミルの最適状態を考慮するのではなく精粉品質を検出しそれをある操作量により直接制御することを目的としたもので, その操作量には多くの場合分級機のカットサイズが用いられている。また, 精粉量とともに比表面積をも直接の制御量として選ぶことが, それらに対する測定計器の実用化によって可能になっている⁸⁾。多変数制御における制御量および操作量の選定には現在さまざまな組み合わせが考案されているが, どの組み合わせが有効であるか今後検討する必要がある。

3. 制御系の設計指針

このうち, 今回は, 3)の安定性および精粉品質の維持を目的とした多変数制御について検討する。

この制御の主な目的は, 「原料の被粉砕性の変化に対し系の安定性および精粉品質を常に維持すること」である。原料の被粉砕性が一定ならば, 本来精粉の品質はミルホールドアップ量, ボール配合などといったプロセスの運転条件により決定される。しか

し, 原料の被粉砕性の変化に伴うミルの粉砕性の変化が, 精粉の品質や系の安定性の維持に影響を及ぼす。具体的な設計指針としては以下のようなものが考えられる。

- 1) 原料の被粉砕性が悪化したときの精粉の品質と量の維持
- 2) 原料の被粉砕性が向上したときの精粉量の増加
- 3) ミル詰まりの防止
- 4) 原料の被粉砕性の変化に対する電力原単位の維持

ここで, 精粉の品質とは精粉の比表面積を示している。また, 電力原単位 (以下原単位) にはいくつか定義があるがここでは「ある粒度条件を満足した精粉量に対するプロセス, 特にミルの消費エネルギー」を考える。

また, ミルの粉砕性の変化は(1)式に示す選択関数 S_i の係数 k_0 の変化として考える。

$$S_i = k_0(x_i/x_1)^{ns} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち, 原料の被粉砕性 g_f の悪化は選択関数の係数 k_0 の減少を意味する。また, この係数 k_0 は粉砕助剤量 a_m , ミルホールドアップ量 w などのミル自身の粉砕特性を左右する要因によって次式のように変化する。

$$k_0 = f(g_f, a_m, w) \dots\dots\dots (2)$$

これらの量は悪化した原料の被粉砕性を改善するための操作量として用いられる。

4. 静特性に基づく各種制御手法の検証

この系における従来の各種制御法の比較を厳密な伝達関数モデルの定常特性を用いて定量的に検証する。

4・1 バケットエレベータ電力定値制御について

まず, 従来より採用されているバケットエレベータ電力定値制御 (以下ミル排出量定値制御) について考える。Fig. 1 に, ミル排出量定置制御のブロック線図を示す。この系における目標値 r からミル排出量 m および精粉量 q の伝達関数は, コントローラを $C(s)$ とすると(3)式, (4)式のようになる。

$$M(s) = \frac{P_{MF}(s)C(s)}{1+P_{MF}(s)C(s)}R(s) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q(s) = \frac{P_{MF}(s)C(s)}{1+P_{MF}(s)C(s)} \frac{P_{QF}(s)}{P_{MF}(s)}R(s) \dots\dots\dots (4)$$

この系に対し, 定常偏差が生じない (PI 制御のように積分項 (1/s) が存在する) コントローラが設計された場合, 最終的なミル排出量 m , 精粉量 q および比表面積 ss_q の定常値はそれぞれ(5)~(7)式のように表される。

$$m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{P_{MF}(s)C(s)}{1+P_{MF}(s)C(s)} \frac{R(s)}{s} = r \dots\dots\dots (5)$$

$$q(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{P_{MF}(s)C(s)}{1+P_{MF}(s)C(s)} \frac{P_{QF}(s)}{P_{MF}(s)} \frac{R(s)}{s} = r \cdot \frac{P_{QF}(0)}{P_{MF}(0)} = r / \left\{ [1 \dots 1] \begin{bmatrix} P_{m1}(0) \\ \vdots \\ P_{mn}(0) \end{bmatrix} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$ss_q(\infty) = [C_1(1-D_1) \dots C_n(1-D_n)] \begin{bmatrix} P_{m1}(0) \\ \vdots \\ P_{mn}(0) \end{bmatrix} / [1-D_1 \dots 1-D_n] \begin{bmatrix} P_{m1}(0) \\ \vdots \\ P_{mn}(0) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 1 Block diagram of BE constant control method.

ただし,

$$\begin{bmatrix} P_{m1}(0) \\ \vdots \\ P_{mn}(0) \end{bmatrix} = K^l \left[\begin{bmatrix} K + B_{2,1}S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -b_{n,1}S_1 & \cdots & K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_1K^l & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & D_nK^l \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \vdots \\ \nu_n \end{bmatrix}$$

ここで, r はミル排出量設定値, S_i , B_{ij} はミルの選択関数および破壊関数, D_i は分級機のアnderフローへの配分率, ν_i は i 区分の粒度の頻度分布, そして, K はミルの装置定数を示す。

これらの式より, ミル排出量 m に関しては, 対象が変動しても設定値を維持することが可能であるが, 精粉に関しては選択関数や分級特性などの各変数に依存するため, これらの量は変化することが分かる。原料の被粉砕性が向上した場合は, 精粉量 q も増加するため問題ないが, 被粉砕性が悪化した場合はこれを補正する手段がない。理論的には設定値 r を増加すれば精粉量が増加することになるが, 設定値の増加はミルへの過負荷を意味し粉砕性が悪化し実現不可能である。精粉量の減少は当然原単位の増加を招く。また, 精粉量をフィード量により直接制御すれば一定の精粉量が維持できるように思えるが, 被粉砕性が悪化し精粉量が減少するとフィード量の増加による補正が行われるため, この場合もミルの過負荷を招く。したがって, 原料の被粉砕性の変化に対し精粉品質や量を維持するには, 分級特性やミル自身の粉砕特性を直接変更可能な操作量に基づいた制御が必要であることが分かる。また, この制御ではミル詰まりに対する改善が行えない。

4・2 分級特性の変更による精粉品質の改善

そこで, まず分級特性, 特に分級カットサイズの変更による精粉品質の制御について考える。

カットサイズによる精粉の制御は, 例えば劣化した粉砕性に対し精粉品質を維持しようとする, カットサイズが減少しそれに伴い戻り粉量が増加するためミルの安定性や粉砕特性に悪影響を及ぼす。したがって, 制御系としてはミルの安定性の制御も同時に考慮した多変数系を構築する必要がある。

Fig. 2, 3 は(6), (7)式の関係をもとに, このような制御を行った場合のカットサイズ d_0 と各産物量および比表面積との関係を選択関数の係数 k_0 をパラメータに示している。カットサイズによる制御には, 次の2つの場合が考えられる。

- ・精粉比表面積およびミル排出量定値制御
- ・精粉量およびミル排出量定値制御

カットサイズの制御は, 劣化したミルの粉砕性を改善するのではなく, 閉回路出口の分級特性を直接変更することで精粉品質の補償を行うため, 精粉品質および量をともに補償することができない。Fig. 4 は, Fig. 2, 3 をもとにカットサイズ d_0 を変更した場合の精粉比表面積と精粉量との関係を選択関数の係数 k_0 をパラメータに示している。これより, 悪化した原料の被粉砕性, すなわち選択関数の係数 k_0 の減少に対し精粉品質を維持した制御を行おうとすれば精粉量が減少し, 逆に精粉量を維持した制御の場合は精粉比表面積が減少する様子が確認できる。

前者の場合, 原料の被粉砕性の悪化に対する補償として行われるカットサイズの減少は, 戻り粉量の増加を招くためミルの安定性に対するコントローラの設計が以前に増して困難となることが

Fig. 2 Relation between d_0 and m, z, q for various S_i . Fig. 3 Relation between d_0 and ss_m, ss_z, ss_q for various S_i . Fig. 4 Relation between ss_q and q for various d_i, k_0 .

と予想される。また, 後者の場合, 被粉砕性が向上した場合に精粉量が増加しないため, 設定値の変更が重要となる。また, この制御はこれらの比を考える循環荷重比の定値制御と本質的には等価であり, 循環荷重比を一定に保つ制御もまた必ずしも重要でないことが示唆される。

4・3 ミル排出量の設定値変更による精粉品質の改善

次に, ミル排出量の設定値変更に伴う精粉品質の制御⁵⁾について考える。

この手法は, 設定値変更によりホールドアップ量が増え変えられることでミルの粉砕性を改善することを目的としている。今回制御を検討している仕上げミルに対しては現場において各ホールドアップ量に対するミル電力とミル排出産物比表面積との関係を求めて

Fig. 5 Relation between hold up w and selection function parameter k_0 .

Fig. 6 Relation between set-point m and q , ss_q for various S_i .

いる。そこで、これらの関係をもとにミルホールドアップ量と選別関数の係数 k_0 との関係を選定した結果を Fig. 5 に示す。なお、便宜上ここでは $w = 15$ の場合を $k_0 = 1$ とした。これより、この条件ではホールドアップ量の変更がミルの粉碎性に与える影響が大きいことが分かる。この関係と (6), (7) 式をもとに、ミル排出量設定値の変更に対する精粉量および精粉比表面積の変化を求めると Fig. 6 のようになる。これによると、ミル排出量の設定値を増加させると粉碎性の悪化により精粉比表面積および精粉量が減少し、逆に、設定値を下げた場合は粉碎性は向上するものの精粉量を増加させるほどには至っていないことが分かる。

また、この制御における階層型の制御構造は、ミル内の音響などを検出することによりミル詰まりの防止にも有効である。したがって、この手法は制御指針をある程度満足する有効な手法であることが再認識される。

4・4 助剤、ミル回転速度の変更による精粉品質の改善

最後に、ミルの粉碎特性を直接変更する制御について考える。ミルの粉碎性に直接影響を及ぼす要因には種々のものが考えられるが、このうち操作量として用いられるものは意外に少なく⁷⁾、現状では粉碎助剤や回転速度の変更が考えられる。しかし、一般に粉碎助剤の添加量には最適値が存在しその効果には限界がある¹¹⁾。これは、ミルの回転速度を操作量とした場合にも臨界速度が存在するなど同様である¹²⁾。また、最も問題なのはこれらの操作量の増加に伴う粉碎費の増加であり、この増加は結果として原単位の大きな増加を招く。特にミル回転速度変更は消費エネルギーの増大に加え、ボールの磨耗や機械のメンテナンスにも問

Table 2 Effect of the amount of grinding aids on the product flow rate and the grinding cost.

amount of aids [ml/t]	product q [t/h]	grinding cost [yen/t]
100	44.0	302
200	44.8	302
300	45.5	305

Fig. 7 Relation between a_m and q , ss_q for various S_i .

題が生じるため、操作量として取り扱われないのが現状である。

この場合も、今回の仕上げ粉碎プロセスに対し現場において助剤添加量を変更した場合の精粉量および粉碎費の変化を調べているので、その結果を Table 2 に示す。これより、助剤添加量を増加させればミル粉碎特性は改善され精粉量は増加するが、それに伴い粉碎費が増大することが分かる。Fig. 7 には、この結果および (6), (7) 式をもとに、Fig. 6 同様、助剤添加量の変化に対する精粉量および精粉比表面積の変化を示している。このように、助剤添加量の増加は、精粉量および精粉面積の増加をもたらすため、この手法では悪化した被粉碎性に対しこれら両者の補償が行えることが分かる。しかし、粉碎費の増大による助剤添加量の上限のため、この制御により補償できる範囲は狭く、被粉碎性の大きな悪化に対しては別の補償が必要であると考えられる。さらに、この制御では粉碎性が向上した場合、比表面積の設定値を上げることで精粉量の増加が可能であるが、カットサイズの場合のように精粉量のみを増加させることはできない。

5. 最適制御系の構築について

上述の結果より、単に分級特性やミルの粉碎特性の変更を操作量とした制御系を構築しただけでは設計指針を満足する制御系が得られないことが分かった。そこで、これらの結果を考慮し、各手法を複合的に組み合わせることで最終的にこの系に対する最適制御系の構築を提案した。

5・1 カットサイズによる制御系の改善

カットサイズを操作量とした精粉の制御では、原料の被粉碎性の悪化に対し、例えば精粉品質を維持しようとすれば精粉量が減少することが問題であった。これを改善するには「原料の被粉碎性に応じ精粉に関する設定値の変更を行う」必要がある。このような要求を実現するには、先の多変数制御系に対しそれらの設定値変更を行う機構を組み合わせた階層型構造の制御系を構築すればよい。Fig. 8, 9 には、先の 2 種類の制御に対しそれぞれ階層型制御構造を付加した制御系を示す (以下「type I」, 「type II」)。これらの制御構造は、精粉量と精粉比表面積、およびミル詰まりを防止するためのミル振動レベルなどをすべてをオンラインで検出

Fig. 8 Hierarchy control system (「type I」).

Fig. 9 Hierarchy control system ("type II").

することが可能なため、実機への適用が十分可能である。

この場合、「typeⅠ」では精粉量が大きく減少した場合にはその設定値を下げることで精粉量のこれ以上の減少を抑え、逆に、「typeⅡ」では精粉比表面積が許容範囲を超え悪化した場合は、設定値を下げることで精粉品質のこれ以上の減少を抑えることが可能となる。また、最終的な精粉は原料の被粉砕性に応じて生成された産物を混合したものとして考える。さらに、この階層型制御構造は、ミル排出量の設定値を変更することでミル詰まりに関してもこれを防止することができるという利点を持つ。

「type I」および「type II」の制御の有効性はミルの運転条件などに依存する。Fig. 10 はそれぞれ運転条件が異なる場合の粉碎性の変化に対する精粉比表面積と精粉量との関係を示す。これは、ミルの滞留時間 T がそれぞれ異なる場合を想定したもので、(a)が最も滞留時間が長く細かな精粉を多く排出する条件である。なお、(b)は今回の運転条件 ($T_0 = 20$) である。これによると、(a)の条件では、精粉量の維持を行っても粉碎性の変化に対する精粉品質の変動が小さいため、「type II」の精粉量の制御が望ましいことが示唆される。一方、(c)のようなタイプでは、粉碎性

Fig. 10 Relation between ss_q and q for various grinding conditions.
((a) $T = 1.25T_0$, (b) $T = T_0 = 20$, (c) $T = 0.75T_0$)

Fig. 11 Relation between q and k_0 for various set-point ss_q .

の変化に対し精粉比表面積の変動が大きいため、「type I」の制御を行わなければ精粉品質の大きな悪化を招いてしまうと考えられる。

また、この階層型制御で重要なのは、ミルの粉碎性の変化の検出である。原料の被粉碎性があらかじめ認識できることが望ましいが現況ではそれが難しく、そのため、プロセス内の検出量をもとに粉碎性の変化を推測する必要がある。これに関しては、先の Fig. 4 の関係からも推測されるように、精粉の比表面積と精粉量はミルの粉碎性により一意的に決定されるため、逆に、これらの量を検出することでミルの選択関数の変化、すなわち現在の粉碎性の状況を推測することができる。Fig. 11 は Fig. 4 の関係をもとに、「type I」の制御における粉碎性の検出基準を示している。これは、各精粉比表面積の設定値に対する精粉量と選択関数の係数との関係を示しており、これより、設定値と精粉量をもとに現在のミルの粉碎性を推測することができ、これをもとに粉碎性の劣化に対する精粉量の減少を抑制することができる。

5・2 助剤添加量による制御系の改善

助剤添加量による制御では操作量の上限により精粉品質を補償できる範囲が限られることや、粉碎性の向上時に精粉量のみが増加が行えないことが問題であった。そこで、これらを改善するために、助剤によるミル排出産物の比表面積の制御とカットサイズによる精粉の制御を組み合わせた制御系を構築した。Fig. 12には、この系の制御構造を示す（以下「typeⅢ」）。これに関しても、精粉量、精粉およびミル排出量比表面積、さらに、ミル詰まりを防止するためのミル振動レベルなどをオンラインで検出することが可能なため、実機への適用が可能である。

この場合、カットサイズによる制御が付加されたことで、原料の被粉砕性が大きく悪化した場合も、精粉量が減少するものの精粉品質を維持することが可能である。また、被粉砕性の変化が小

Fig. 12 Control system by manipulating the amount of grinding aids (I type III).

さいときは、この制御の利点である精粉量および品質の両者の維持が行える。さらに、粉碎性の向上時に関しても、ミル排出産物の設定値を上げることで精粉量の増加を行っても、カットサイズによる制御により精粉量のみを増加することが可能である。なお、ミル詰まりに関しては、「type I」、「type II」同様である。

6. 結 論

セメント仕上げ粉碎プロセスの最適制御方策を厳密な伝達関数モデルの静特性および現場データをもとに検討した。解析では、まず現在検討が行われている各種制御法の比較を定量的に行った後、これらを考慮したこの系に対する最適制御方策を提案した。その結果、今回以下のようなことが明らかになった。

(1) 従来のミル排出量定値制御では、原料の被粉碎性の変化に対して安定性は確保されるが精粉品質および量の制御が行えない。

(2) カットサイズによる精粉の制御を行っただけでは、悪化した原料の被粉碎性に対し精粉比表面積および精粉量を同時に維持することができない。

(3) ミル排出量の設定値変更による精粉品質の改善は、粉碎費を増大させることなく粉碎特性をある程度改善することが可能であり、さらにミル詰まりに関しても有効であることを考えるとこの手法の有効性が再認識される。

(4) 助剤添加量による粉碎特性の変更を行えば、精粉品質と量の維持が行える。しかし、この制御では、助剤の効果の限界や粉碎費の増大に伴う操作量の上限のため、この制御で補償される範囲は大きくない。

(5) カットサイズによる制御にその設定値変更を組み合わせた階層型制御系を提案したことで、粉碎性の劣化に対する精粉量の減少をある程度抑えることが可能となる。また、この制御で重

要な粉碎特性の変化の検出は、精粉比表面積および精粉量を同時に検出することで、現在の粉碎特性の状況を推測することができる。

(6) 助剤による制御とカットサイズによる精粉品質の制御を組み合わせた制御系を提案したことで、原料の被粉碎性の大きな悪化に対しても精粉品質の維持が可能となる。また、これにより被粉碎性の向上時も、カットサイズの制御により精粉量のみが増加が可能となる。

次報では、今回提案した3つの方法に対し、それぞれ動特性を考慮したコントローラの設計について検討する。

謝辞 本研究において参考にした現場データはすべて住友大阪セメント(株)により提供していただいたものである。ここに同社関係各位に厚く謝意を表する。

引 用 文 献

- 1) 三村武教：粉体と工業，N. 4，p. 36-42，(1985)
- 2) 松尾誠治・岡野靖彦：資源と素材，Vol. 113，p. 339-344，(1997)
- 3) Hilger, M., Hetthessy, J., Keviczky, L. and Kolostori, J.: Zern Kalk Gips, Vol. 34, p. 146-150, (1981)
- 4) 三隅正機：計装，Vol. 32，p. 50-54，(1989)
- 5) 和田憲造・三輪敦史・早野延男・本田昌弘・中村浩彦：粉体工学会秋季大会，p. 66-70，(1987)
- 6) 前野光善・小川佳久：セメント製造技術シンポジウム報告集，N. 52，p. 22-27，(1995)
- 7) Keviczky, L., Hilger, M. and Kolostori, J.: TIZ, Vol. 107, p. 858-886, (1983)
- 8) Ciganeck, C.: ZKG Int Ed B, Vol. 44, p. 364-374, (1991)
- 9) Breusegem, V. V., Chen, L., Werruck, V., Bastin, G. and Wertz, V.: IFAC 12th triennial World Congress, p. 539-542, (1993)
- 10) Werbruck, V., Perpont, C. D., Breusegem, V. V., Chen, L. and Ishibashi, K.: セメント製造技術シンポジウム報告集，N. 52，p. 28-35，(1995)
- 11) 古川 猛：セメント技術年報，XXV，p. 69-75，(1971)
- 12) 田中達夫：「粉体プロセス入門」，工学図書，(1981)