



セメントプラント混合プロセスの確率システム表現と解析

尾崎, 賢二
羽畑, 修
福岡, 正規

(Citation)

システム制御情報学会論文誌, 11(5):241-250

(Issue Date)

1998-05

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90000971>



セメントプラント混合プロセスの確率システム表現と解析*

尾崎 賢二**・羽畑 修**・福岡 正規**

Stochastic Process Representation and Analysis of the Homogenizing Process in a Cement Plant*†

Kenji OZAKI**, Osamu HABATA** and Masaki FUKUOKA**

This paper presents a predicting method for standard deviations of chemical composition fluctuations of raw meal at a kiln inlet using chemical analysis results of boring samples for raw materials in a quarry. A stochastic process representation for their fluctuations at the inlet of the plant is presented to specify their time domain fluctuations. The authors have also presented dedicated transfer functions which represent homogenizing effect of each constituent process and the raw material mixing control system. Using these representations, the Bode-diagrams to obtain decreasing performances of the fluctuations are finally presented. The theoretical calculation result of the standard deviation is compared with the result measured in an actual plant. As a result of a succession of these analyses, moreover, the authors could also present the structure of the mixing control system as a multivariable stochastic control system.

1. まえがき

セメント製造プロセスの典型的なフローダイアグラムを Fig. 1 に示す。この製造プロセスにおいて、キルン投入原料の組成変動をいかに小さく抑えるかが、重要な品質管理の要素となっている。ポルトランドセメントの場合では、

$$\text{水硬率: } HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$\text{珪酸率: } SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$\text{鉄率: } IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

の三つの組成比率を管理対象とし、たとえば、キルン投入原料の水硬率 HM の標準偏差が 0.027 以下になることを目標とするのが通常である¹⁾。このための設備として、ホモジナイジングベッドや混合サイロ等の均質化を

目的とした装置と、これらの装置だけでは抑えることのできない長周期の変動を抑制するため、セメント用原料が数種の原料を配合して作られることを積極的に利用し、その配合比を適時変え、上記三種の組成比率を制御する調合制御装置が用いられているのが通常である。従ってプラント計画段階に、これらの装置の効果を考慮し、キルン投入原料の組成変動を予測することができれば、プロセス計画しきわめて有効であるが、このような予測法に関する報告は見当たらない。本報告では、山場採掘原料の組成変動が各混合^{††}プロセスを経て、その均質化作用により、いかに減衰するかを体系的に理論化する方法について述べ、その解析結果と実機プラントでの実測結果を比較し、本法の有効性を説明する。さらに、この理論化の結果として、各混合設備の組成変動抑制に対する効果、およびその組合せ特性に対する検討結果について記述する。

* 原稿受付 1997年3月19日

** 川崎重工業(株)産機プラント事業部 Plant Engineering Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.; 1-1 Higashikawasaki-cho 3-chome, Chuo-ku, Kobe city, Hyogo 650-0044, JAPAN

Key Words: stochastic system, system modeling, cement plant, chemical composition, homogenizing.

† 第28回 ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications で発表 (1996.11)

†† 以下の文章では、慣例に従い「混合」と言う語句を用いるが、これは Homogenizing (均質化) を意味し、異種原料間の Mixing (配合) を意味するものではない。

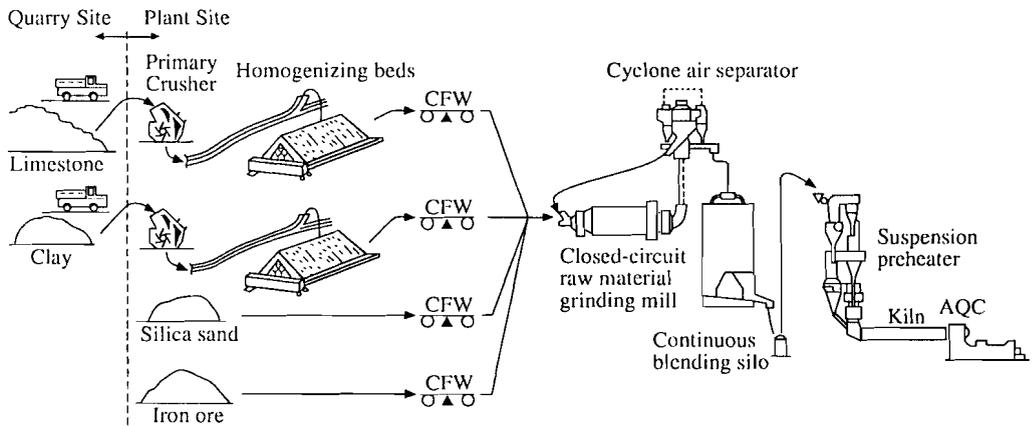


Fig. 1 Typical process flow diagram of cement manufacturing plant

2. では、理論化の概念と理論化に際し導入する仮定につき考察する。ここでは主に、山場で採掘され一次破砕機に投入される原料の組成変動過程を、当該プラントにおける山場原石のボーリングサンプルの化学分析結果から求まる静的な確率分布と、鉱石をクラッシャーへ運搬するダンプトラックの到着過程を組み合わせて表現し、パワースペクトル密度関数を求める方法について説明する。

3. では、プラントを構成する各種設備、すなわちホモジナイジングベッド、粉砕ミル、混合サイロ、さらには調合制御装置の伝達関数について記述する。これらの伝達関数が求めれば、2. の結果とあわせて、目的とするキルン投入原料の組成変動の分散が下記で定式化できることになる。

$$\sigma_{ij/Kiln}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ij}(\omega) \cdot |G_{HB}(j\omega) \cdot G_{GM}(j\omega) \cdot G_{BS}(j\omega)|^2 d\omega \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_{ij/Kiln}$ は、 j 番目の原料の i 番目成分のキルン入口での組成変動の標準偏差を表し、 Φ_{ij} は、 j 番目の原料の i 番目成分の一次破砕機入口でのパワースペクトル密度関数、 G_{HB} 、 G_{GM} 、 G_{BS} は各々ホモジナイジングベッド、粉砕ミル、混合サイロの伝達関数を表す。

4. では、以上の理論化方法に基づき、山場採掘原料からキルン投入原料までの標準偏差の減衰特性を表現するダイアグラムを例示する。さらに、予測計算と実際のプラントのキルン投入原料の標準偏差を比較し、本方法の有効性を確認した結果を説明する。

2. モデル化の概要

Fig. 1 に示した代表的プロセスにおいて、一般的に使用する原料は、石灰石、粘土質原料、珪石、鉄分原料の

4種類であり、その配合割合として石灰石と粘土質原料で90%以上を占めるのが一般的である。主要原料である石灰石と粘土原料は、プラントに隣接した山場で切り出し、ダンプトラックで一次破砕機へ搬送する。一次破砕後のれき状の原料をコンベヤで搬送後、ホモジナイジングベッドで多段層に積みつけることにより、最初の均質化が行われる。その他の二次原料は、別途外部より搬入し貯蔵する。その後、4種の原料は、粉砕ミル前にて定量配合し、ミルにおいて攪拌を伴う粉砕を行う。さらにキルン投入前の原料粉を、混合サイロの下部に空気を圧入することにより攪拌混合して、焼成前の原料としている。

2.1 理論化に対する仮定

理論化にあたり導入した仮定を以下に記す。

- 山場における各原料中の主成分の変動は、静的にはプロジェクト計画の初期に得られるボーリングサンプルの化学分析結果から求める標本平均、および標本分散を用いた正規分布に従うとする。主成分とは、石灰石中のCaO、粘土質原料中のSiO₂、珪石中のSiO₂、鉄分原料中のFe₂O₃である。
- 各原料中の二次成分含有量は、主成分含有量による一回帰式で表されるものとする。
- 山場採掘原料を運搬するダンプトラックの到着過程はポアソン到着で、かつ各運搬バッチ間の原料の組成分布は互いに独立に上記(a)で仮定した正規分布に従うものとする。
- ホモジナイジングベッド、原料粉砕ミル、混合サイロの混合特性は、変動が微小であるとして線形時不変モデルで近似し、かつその混合特性はいずれの原料においても同一とする。

2.2で上記の確率的な仮定(a)~(c)の検証結果を説明する。なお以下で使用した変数の内容は、付録1に列挙して示した。

2.2 仮定の検証・検討

(a) 主成分組成変動の確率分布

山場原石の化学成分の組成分布を検証するために、主要原料である、石灰石、粘土質原料について四カ所のプラントの計画時に得られたボーリングサンプルの化学分析結果による、CaO%、SiO₂%の度数分布を求めた。Fig. 2は、4地区全体での石灰石中のCaO%の度数分布を示しており、純粋石灰石のCaO含有量56%を限界値とするRayleigh分布に近いことがわかる。しかし、目的とする配合後の原料の組成変動の標準偏差の評価には、統計量の四則演算が必要となるため以下の理論展開では正規分布に従うものと仮定する。

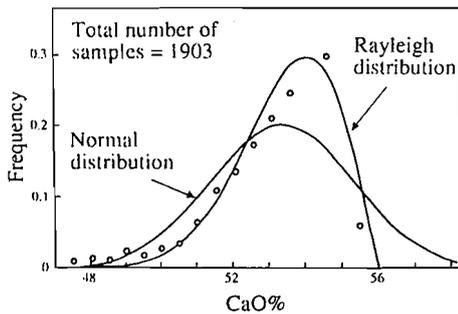


Fig. 2 Frequency distribution of CaO% in limestone

一方、Fig. 3はある一地区の粘土原料中のSiO₂%の度数分布を表示したものであるが、おおむね正規分布に近いといえる。これは、一般的に粘土が、カオリナイト等の各種粘土鉱物や石英等の不純物の複合原料であることから、中心極限定理の現れとして正規分布に近くなっていると考えられる。

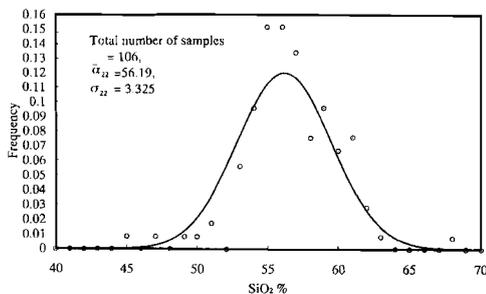


Fig. 3 Frequency distribution of SiO₂% in clay

(b) 二次成分の主成分による回帰

例えば粘土質原料では、複数の構成元素が結晶構造として共存していることにより、各組成の重量%には強い相関があるのが一般的である。そこで一地区の石灰石231点、粘土質原料199点のサンプルの分析結果を用い、二次成分すなわち石灰石中のSiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、粘土原料中のCaO、Al₂O₃、Fe₂O₃に対する回帰分析の結果を付録2に示す。含有率5%以上の成分については、いずれも一回帰後の重相関係数が0.80以上、回帰後の残差が平均含有量の11%以下であり、一回帰が十分成立していることを示している。

(c) 組成の時間的変動のモデル化

上記により、山場原料組成の静的な統計量としてのとらえ方が明らかになったが、(1)式を用いてキルン投入原料の組成変動の標準偏差を計算するためには、プラントの入り口、すなわち山場原料がダンプトラックで運搬され、一次破碎機に入る点での時間軸方向の変動仕様をモデル化し、そのパワースペクトル密度関数を求める必要があるが、その変動過程を理論的に求めることは困難であり、本報告では仮定(c)においてその近似モデルを考える。この近似モデルの概念図をFig. 4に示した。まず鉱石を山場よりクラッシャーへ運搬するダンプトラックの到着過程をポアソン到着過程と仮定し、 j 番目の鉱石を運搬するトラックの平均到着時間間隔を T_{Mj} とする。さらに、各運搬バッチごとの原石組成の分布は、各々独立に、かつ同一の平均値 \bar{a}_{ij} と分散 σ_{ij}^2 に従うものとする。実プラントでは、到着したダンプトラックがホッパー内に順次排出する原石を連続して一次破碎機に投入しているのである。そこで一次破碎機に投入する j 原料の i 番目成分の組成変動過程 $z_{ij}(t)$ を導入する。この変動過程 $z_{ij}(t)$ に対し、 $z_{ij}(t)$ と $z_{ij}(t+\tau)$ を考える。 τ

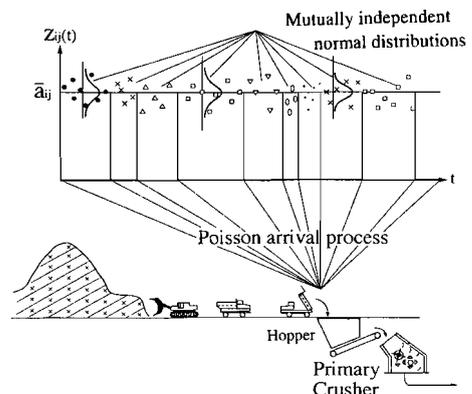


Fig. 4 Stochastic representation of composition fluctuation

の間でバッチが変わらない確率は $\exp(-|\tau|/T_{Mj})$, 変わる確率は $1 - \exp(-|\tau|/T_{Mj})$ である. バッチが変わらない場合, $z_{ij}(t)$ と $z_{ij}(t+\tau)$ の積の集合平均は, σ_{ij}^2 であり, バッチが変わる場合は 0 である. よって, $z_{ij}(t)$ の自己相関関数は, 下記の (2) 式となる.

$$R_{ij}(\tau) = \sigma_{ij}^2 \cdot e^{-|\tau|/T_{Mj}} \quad (2)$$

従いパワースペクトル密度関数は (3) 式となる^{2),3)}.

$$\Phi_{ij}(\omega) = \frac{2T_{Mj}\sigma_{ij}^2}{1+(\omega T_{Mj})^2} \quad (3)$$

次に上記のポアソン過程の平均到着時間間隔を実プロセスにおいては, (ダンプトラックの積載平均重量) ÷ (クラッシャーの処理流量) で算出できるダンプトラックの平均搬送周期と対応づけることができる. もちろん以上の考えには, ダンプトラックがポアソン到着, すなわち全くでたらめな到着をするという非現実的な仮定を含んでいる. しかし最終目的であるキルン投入原料組成の変動の推測のためには, 後続プロセスの極めて大きな低域濾波特性により, 山場原料組成の変動のパワースペクトル密度関数の形状, すなわち変動を各周波数へどのように分配するかは, 最終結果にあまり影響しないので上記の考えで解析した. なお, (3) 式は, 分散が $2T_{Mj}\sigma_{ij}^2$ である定常白色過程が一次の Shaping Filter $1/(1+T_{Mj}s)$ を通過した確率過程のパワースペクトルと同一である.

3. 混合プロセスの伝達関数

以下では, 代表的なセメントプラントの混合プロセスとして, シェブロン方式のホモジナイズングベッド, 閉回路粉砕ボールミル, 下部混合室を備えた連続式ブレンディングサイロの伝達関数の導出方法について説明する. その他の方式の設備の伝達関数については, 筆者らによる参考文献 4) を参照のこと.

3.1 シェブロン方式ホモジナイズングベッドの伝達関数

本方式のホモジナイズングベッドは, Fig. A1 に示したように, スタッカーにより N 層の原料を積みつけ, 原料パイルが完成した後, ブリッジタイプリクレーマで原料パイル長手方向に直角に原料を切り出す方法である. この方法におけるベッド中央部の組成変動の分散の減衰比は, 入り口原料の組成変化の相関関数が (2) 式で表され, スタッカーの走行速度がコンベヤ速度に比較し無視できるとした場合, 付録 3 に示したように (4) 式で表される.

$$\frac{\sigma_{ij}^2(out)}{\sigma_{ij}^2(in)} = \frac{1}{N} + \frac{1}{N} e^{-x} + \frac{1}{N^2} \frac{e^{-x}}{(1-e^{-x})^2} \left\{ N(1-e^{-2x}) - 2(1-e^{-Nx}) \right\} \quad (4)$$

ここに, $x = T_L/T_M$, T_L : 積み付け周期, T_M : ダンプトラックの搬送周期, N : 積み付け層数である. この理論式の分散の減衰比を, T_L/T_M に対しプロットすると Fig. 5 の実線となり, 次の一次進み遅れの伝達関数に相関関数が (2) 式で表される過程が入力された場合の分散の減衰比と同型となる.

$$G_{HB}(S) = \frac{1 + \frac{\sqrt{N}}{2} T_L \cdot s}{1 + \frac{\sqrt{N}}{2} T_L \cdot s} \quad (5)$$

Fig. 5 に, 一般的な積み付け層数 $N = 400$ の場合の (4) 式と (5) 式の減衰比を図示し, 近似が十分成立することを示した.

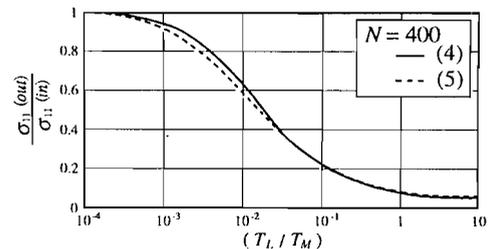


Fig. 5 Variance decreasing characteristics expressed by equation (4) and (5)

3.2 閉回路粉砕ボールミルの伝達関数

(a) 調合制御装置を含まないミルの開ループ伝達関数
閉回路粉砕系の伝達関数は, 筆者らによる参考文献 5) で示されたようにミルや分級機等構成機器の入口と出口でのマスバランス, および粉砕効果を考慮した表面積バランスの式をたて, それらを線形近似して求めることができる. 組成変動の減衰を検討する場合は, 表面積バランスは無視し, マスバランスのみを考慮すれば十分である. この場合, 閉回路粉砕ボールミルの伝達関数はよく知られているように次式で近似できる.

$$G_{GM}^O(s) = \frac{1}{(1+L_c)(1+T_B s)^n - L_c} \quad (6)$$

ここに, nT_B はミル単体の平均滞留時間に相当し, L_c は分級機よりの戻り粉流量の定常処理能力に対する割合 (循環比) である. また, 参考文献 5) による実験結果より (6) 式の遅れ次数 n は 5 とした.

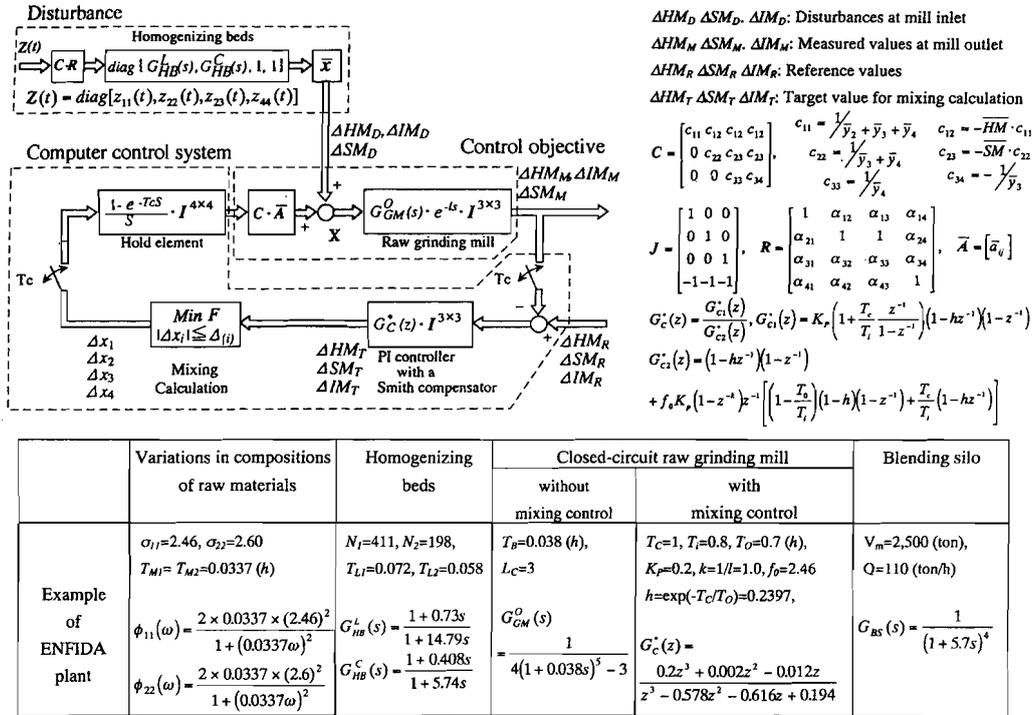


Fig. 6 Overall block diagram of homogenizing processes and their examples

(b) 調合制御を含めたミルの閉ループ伝達関数

一般に、閉回路粉砕ミルに装備する調合制御システムは、粉砕・分級後の原料粉製品を一定時間間隔でサンプリングし、そのサンプルを蛍光 X 線分析計で分析する。分析結果より計算した、HM, SM, IM の実測値に対し、制御用計算機を利用してサンプリング周期ごとにミル前での 4 原料の配合比を変えているのが一般的である。参考文献 6) に紹介した我々の制御方式を Fig. 6 中に示し、付録 4 にその内容を説明した。調合制御を設置した場合、ミル投入原料の組成変動とミル出口原料の組成変動間の閉ループ伝達関数 $G_{GM}^C(s)$ は、付録 4 の結果より以下のように表すことができる。

$$G_{GM}^C(s) \cong \frac{C_{GM}^O(s)e^{-l_s}}{1 + G_{CA}(s)G_{GM}^O(s)e^{-l_s}} \quad (7)$$

ただし、 $G_{CA}(s)$ は付録 4 で示した計算機によるサンプル値調合制御の近似伝達関数である。調合制御による組成変動の減衰効果への特徴は、(7) 式内の制御系の伝達特性、特にその積分動作により、組成変動の低周波数成分を大幅にカットすることができることである（後掲の Fig. 7-1 の特性線図 (4) 参照）。

3.3 連続式ブレンディングサイロの伝達関数

この装置の中での粉体の挙動は、ピストン流れと完全混合の中間の状態を与える槽リモデルで近似することができる⁴⁾。滞留時間分布の実験結果から求めた伝達関数は下記のとおりである。

$$G_{BS}(s) = \frac{e^{-\frac{V_P}{Q}s}}{\left(1 + \frac{V_m}{4Q}s\right)^4} \quad (8)$$

ただし、 V_P, V_m は、サイロ内のピストンフロー部と完全混合部の容積、 Q は粉体の体積流量を表す。次数“4”は滞留時間分布の応答の形から推定した。なお、分散の減衰効果にはピストンフロー部は寄与しないので以下ではむだ時間部を無視している。

以上、提示した各設備の伝達関数を用いて、(1) 式に従って、キルン投入原料の組成変動の分散を計算することができる。

4. 計算結果と考察

Fig. 6 に以上の解析結果を要約した総合ブロック線図を示し、付録 4 にその導出説明をした。Fig. 6 には、実機計測を行った、チェンジア国 ENFIDA セメント工場の

場合の各関数の数値例もあわせて例示した。この対象プラントの原料配合率の平均値は、石灰石 77.4%，マール 21.1%，珪石 0.1%，鉄分原料 1.4%と 98%以上を主成分原料で占めており、以下の解析はすべて石灰石原料と粘土質原料であるマールの組成変動のみ考慮し、これらに関する数値例を示している。また、プラント入口の組成変動を表現するダンプトラックの平均到着時間間隔は、一次破碎機の能力 (950 ton/h) とダンプトラックの平均積載量 (32 ton) から決まるトラックの平均到着間隔より、石灰石、粘土質原料いずれに対しても、 $T_M=0.0337$ [h] すなわち約 2 分とした。

4.1 変動減衰特性線図

これらの伝達関数の個々の周波数特性を Fig. 7-1 に示す。なお、一次破碎機入口の組成変動を表現する Shaping Filter の周波数特性もあわせて表示した。また、これらの伝達関数の縦列結合として表現できる、プラント入口からみた各設備出口までの伝達関数の周波数特性を Fig. 7-2 に示した。さらに Table 1 には、各プロセス出

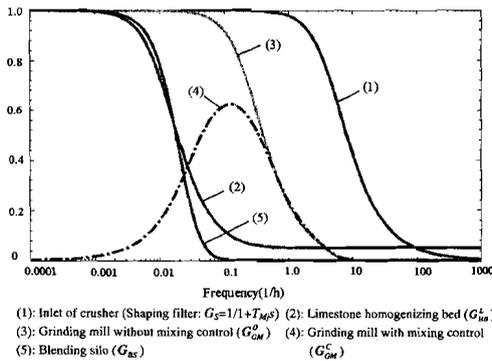


Fig. 7-1 Individual process performance

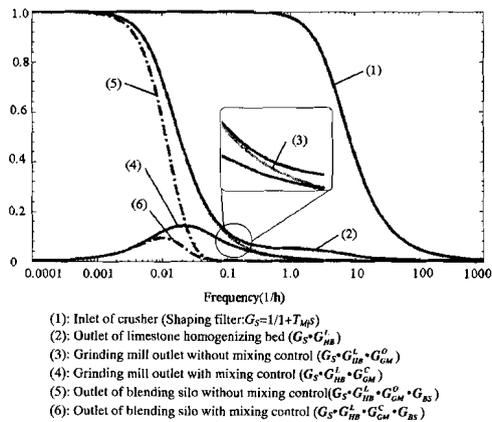


Fig. 7-2 Combined performance

Table 1 Standard deviation of HM and CaO% at several points in a plant () : data with raw material mixing control

		Inlet of Crusher	Inlet of Raw Mill	Outlet of Raw Mill	Inlet of Kiln
Standard Deviation of Raw Mixture	HM	0.390	0.0253	0.0154 (.0055)	0.0123
	CaO %	2.46%	0.128%	0.077% (.0264)	0.063%

口での CaO, HM の標準偏差の計算結果を例示した。Figs. 7-1, 2 を利用して、設備計画画面で一般的に以下のことがいえる。

- (1) 原料ミル単体の均質化作用は、他の設備に比較しわずかであるが、原料調合制御を含めることにより低周波特性が向上し大きな減衰効果を期待できる。
- (2) ブレンドングサイロの減衰特性について、調合制御を設置しない場合と設置した場合のサイロの入口・出口間の標準偏差の減衰比は各々約 70% および 80% であり、いずれもその減衰効果は小さい。一方ホモジナイジングベッドとブレンドングサイロの単体特性の低域濾波特性は類似している。このことは、山場原料の組成変動があまり大きくない場合は、ホモジナイジングベッドまたはブレンドングサイロを貯蔵機能のみの安価な設備に置き換え、他の混合設備のみで標準偏差を目標値以内に示得ることを示唆している。Table 2 に計算の対象としたプラントで、ホモジナイジングベッドとブレンドングサイロを仮に減衰特性を持たない単純なバッファ機能に置き換えた場合のキルン入口の HM を計算した結果を例示した。1. で述べた HM の標準偏差目標値 0.027 を採用するならば、いずれかの設備をバッファ機能のみに置き換えることができると考えられる。またそのような場合も本報告の方法により、定量的な検討が行えることは明らかである。

Table 2 Comparison of standard deviation of HM at the kiln inlet when replacing the homogenizing storage and blending silo

Type of homogenising storage	Type of blending silo	
	Buffering silo	Blending silo
Buffering storage	0.0785	0.0161
Chevron type homogenizing bed	0.0191	0.0123

4.2 実機計測結果との比較

前述のチュニジア国のプラントで、キルン入口原料を6日間52サンプル採取し、 HM の標準偏差を実測した結果は、 $\sigma_{HM}=0.0142$ であった。一方(1)式による計算結果は、Table 1に示したように $\sigma_{HM}=0.0123$ であり、種々の仮定をおいたにもかかわらずよく一致しているといえる。なお、実機のデータは調合制御をOFFした状態での化学分析結果によるものである。調合制御を含めた場合について、我々の実機における手動運転と自動制御運転の HM の標準偏差の比較では平均で約1/2程度である⁷⁾。一方本報告による計算では、調合制御を含めた場合は、含めない場合に比較し標準偏差は約1/3となっている。手動運転の場合もオペレータによる配合比の修正が時折行われており、これを考えあわせると上記の結果は、調合制御を含めた場合においてもおおむね合致しているといえる。

5. あとがき

本報告では、セメントプラントにおいて、プラント入口の原石の組成変動を確率過程で表現するモデルとともに、プラントの各混合設備の均質化特性を表す伝達関数を与え、これらのモデルを用いて、プラント計画段階でキルン投入原料の組成変動を予測する有効な手法を提供した。このモデルによる予測計算結果を実機の計測結果と比較して、工業的に満足しうる精度で予測できることを確認した。また、この方法を用いることにより、原料調合制御システムを含めた、これらの設備の系統的な組合せ方法を検討できることの一例を示した。さらに我々は、調合制御システムの構造が正規性有色雑音を含む、線形多変数制御系で表すことができることを示し、外乱部を含めた制御対象の伝達関数を明示することができた。筆者らは、この構成をもとに従来から実装しているPI制御を基本とした方式より、性能の改善を指向し、多変数適応制御の適用の検討を行っており、その検討結果については別途報告する。

参考文献

- 1) セメント協会編：セメント工場における蛍光X線分析計使用状況に関する報告，化学分析専門委員会報告146(1978)
- 2) 市川：体系自動制御理論，pp. 276-279，朝倉書店(1965)
- 3) A. Papoulis: Probability, random variables and stochastic processes, pp. 288-290, McGraw-Hill (1965)
- 4) 杉本，尾崎ほか：セメントプラントの総合調合・混合管理法の開発—第一報・第二報—；川崎技報，90号，95号(1985, 1987)
- 5) 尾崎ほか：閉回路ボールミル粉碎系の動特性解析と制御；化学工学論文集 Vol. 24, No. 1, pp. 5-11 (1998)
- 6) 尾崎，羽畑：セメントプラント原料調合制御への確率的適応制御の応用；SICE第17回適応制御シンポジウム予稿集

(1997)

- 7) 杉本ほか：計算機制御の実セメントプラントへの適用(その1) —原料調合および前調合の実証—；川崎技報，84号(1984)
- 8) N. R. Draper and H. Smith (中村 訳)：応用回帰分析，森北出版(1968)

付 録

付録 1. 記号説明

- a_{ij} : j 番目原料の i 番目の成分の含有率
 $j=1$: 石灰石, $j=2$: 粘土質原料,
 $j=3$: 珪石, $j=4$: 鉄原料,
 $i=1$: CaO, $i=2$: SiO₂, $i=3$: Al₂O₃, $i=4$: Fe₂O₃
 添字の意味は以下同様。
- x_j : j 番目原料の配合比率
 y_i : 粉碎ミル入口で四原料配合後の i 成分含有率
 $A=[a_{ij}]$: 原料組成マトリックス
 $\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x}$, $\bar{y} = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4]^T$, $\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4]^T$
 ただし、 $-$ は定常状態の値を示す。
- σ_{ij} : j 番目原料の i 番目の成分の標準偏差
 α_{ij} : j 番目原料における i 番目成分の主成分含有率による一次回帰係数。
 β_{ij} : 同上回帰式の定数項
 $R=[\alpha_{ij}]$: 回帰係数マトリックス
 $\Phi_{ij}(w)$: j 原料の i 番目成分の組成変動のスペクトル密度関数
 $G_{HB}(s)$: ホモジナイジングベッドの伝達関数
 $G_{GM}^O(s)$: 粉碎ミルの伝達関数(開ループ特性)
 $G_{GM}^C(s)$: 粉碎ミルの伝達関数(調合制御を含む開ループ伝達関数)
 $G_{BS}(s)$: 混合サイロの伝達関数
 $G_C^*(z)$: むだ時間補償PI制御のパルス伝達関数

付録 2. 山場原石のボーリングサンプルの回帰分析結果

—チュニジア国 ENFIDA プラントの例

同地区のボーリングサンプルの石灰石と粘土質原料であるマール(Marl)の化学分析データの回帰分析結果をTable A1に示す。表内の \bar{a}_{ij} は各成分の平均含有率， α_{ij} ， β_{ij} は主成分による一次回帰の回帰係数およびその定数項， R は次式で計算した一次回帰後の重相関係数で、

$$R^2 = \frac{\sum (Estimated\ data - Sample\ mean)^2}{\sum (Sample\ data - Sample\ mean)^2} \quad (A1)$$

この値が1に近いほど回帰式が観測値の変動をよく表しているといえる。また σ_R は、回帰後に残る残差の標準偏差を示している⁸⁾。この表より含有率5%以上の二次成分の回帰の重相関係数はいずれも0.80以上であり回帰が十分成立しているが、石灰石中のAl₂O₃、Fe₂O₃につ

Table A1 Regression analysis results

	Mean content \bar{a}_i	Correlation coefficient				Regression results				
		(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	β_{ij}	α_{ij}	R	σ_R
Limestone	CaO	50.3	1.0	-.98	-.55	-.46	—	—	—	—
	SiO ₂	6.18		1.0	.41	.32	67.65	-1.22	.95	.684
	Al ₂ O ₃	1.26			1.0	.88	7.66	-.127	.30	.478
	Fe ₂ O ₃	0.57				1.0	2.90	-.047	.21	.220
Marl	CaO	24.2	1.0	-.99	-.92	-.94	54.06	-.977	.99	.872
	SiO ₂	30.5		1.0	.89	.91	—	—	—	—
	Al ₂ O ₃	12.0			1.0	.96	2.22	.320	.80	1.36
	Fe ₂ O ₃	5.03				1.0	.907	.135	.83	.510

$$R^2 = \frac{\sum(\text{Estimated data} - \text{Sample mean})^2}{\sum(\text{Sample data} - \text{Sample mean})^2}$$

σ_R = Standard deviation of error between regression result and real sample data

いは回帰が成立せず主成分とは独立に変動していることがわかる。しかしこれらの平均含有率は、各々 1.26%、0.57%と少なく、配合後原料の組成変動に対する影響が少ないため一次回帰式でその変動を近似できるものとし、変動の次数の低減を計っている。

付録 3. ホモジナイジングベッドの分散減少特性

—(4) 式の導出

シェブロンタイプの本ホモジナイジングベッドは、Fig. A1 のように機能表示できる。以下の記号表示を使う。 V_B : 投入側コンベヤの搬送速度、 V_S : スタッカの横行速度、 V_R : リクレーマの横行速度、 L : パイル長さ、 N : 積付け層数、 T_L : 積付け周期、 Q : 原石供給流量、 ζ : 積付けと切出しの時間差、すなわちむだ時間

$u(t)$ を原石の供給側での組成変動とし、切出し側での組成変動を $w(t)$ とすると、(A2) 式が得られる。ここに、

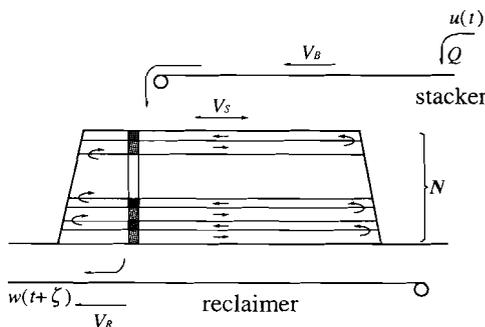


Fig. A1 Schematic flow of bed homogenizing process

$Q_f = Q \cdot (1 - V_S/V_B)$, $Q_r = Q \cdot (1 + V_S/V_B)$ はスタッカの進行方向により変わる前進・後進時の層積流量であり、また $\alpha = V_R/V_S$, $\beta = V_S/V_B$ である。

$$\begin{aligned}
 w(t+\zeta) &= \frac{Q_r}{Q} \left\{ u \left(\frac{V_R}{V_S} t \right) + u \left(\frac{V_R}{V_S} t + 2T_L \right) + \dots \right. \\
 &\quad \left. + u \left(\frac{V_R}{V_S} t + (N-2)T_L \right) \right\} \\
 &\quad + \frac{Q_f}{Q} \left\{ u \left(2T_L - \frac{V_R}{V_S} t \right) + u \left(4T_L - \frac{V_R}{V_S} t \right) + \dots \right. \\
 &\quad \left. + u \left(NT_L - \frac{V_R}{V_S} t \right) \right\} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N/2} \left[(1+\beta) \cdot u(\alpha t + 2(i-1)T_L) \right. \\
 &\quad \left. + (1-\beta) \cdot u(-\alpha t + 2iT_L) \right] \tag{A2}
 \end{aligned}$$

このとき、

$$\begin{aligned}
 \sigma_w^2 &= R_{ww}(0) = E \left[\{w(t+\zeta) - \bar{w}\}^2 \right] \\
 &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N/2} \sum_{j=1}^{N/2} \left[(1+\beta)^2 R_{uu} \{2(i-j)T_L\} \right. \\
 &\quad \left. + (1-\beta^2) R_{ww} \{2\alpha t + 2(i-j-1)T_L\} \right. \\
 &\quad \left. + (1-\beta^2) R_{uu} \{-2\alpha t + 2(i-j+1)T_L\} \right. \\
 &\quad \left. + (1-\beta)^2 R_{uu} \{2(i-j)T_L\} \right] \tag{A3}
 \end{aligned}$$

一方、入り側組成変動が(2)式で表現できるとの仮定より、

$$R_{uu}(\tau) = \sigma_u^2 \exp(-|\tau|/T_M)$$

この $R_{uu}(t)$ を (A3) 式に代入して、次のように変動分散の減衰比が得られる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_u^2} &= \frac{1}{N} (1+\beta^2) + \frac{1}{N} (1-\beta^2) C^{1-\gamma} \\
 &\quad + \frac{1}{N^2} \left\{ 2(1+\beta^2) + (1-\beta^2)(C^\gamma + C^{2-\gamma}) \right\} \times \\
 &\quad \frac{1}{(1-C)^2} \left\{ N(1-C) - 2(1-C^{N/2}) \right\} \tag{A4}
 \end{aligned}$$

ここに、 $C = \exp(-2T_L/T_M)$, $\alpha t = \gamma T_L$ ($0 \leq \gamma \leq 1$) である。さらに、スタッカの横行速度が原石の供給速度に比べ無視し得るほど小さいと仮定し、パイルの中央付近の原石の分散の減衰比を考えると、その値は上記で $\beta=0, \gamma=0.5$ とおくことにより求められ、その結果が(4)式である。(4)式と Fig. 5 より層数一定の場合、投入原料の組成変動の折点周波数を規定する T_M に対する、ベッドの積付け周期 T_L の比、換言すれば、組成変動周期に対するベッドの相対的長さが変動の分散の減衰比を決めていることを意味している。

付録 4. 総合ブロック線図 Fig. 6 の導出説明

ミル前で四原料を配合した後の原料の四成分の組成変動ベクトル $y(t)$ を考える (Fig. 6 の点 X での変動). $y(t)$ は, ミル入り口での四原料の組成成分行列 $A_{M_i}(t)$ と四原料の配合率ベクトル $x(t)$ の積として (A5) 式で表せる.

$$y(t) = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T = A_{M_i}(t) \cdot x(t) \quad (A5)$$

定常状態からの変動分を考え, s 領域で表現すると, (A6) 式で近似できる.

$$\Delta y(s) \cong \Delta A_{M_i}(s) \cdot \bar{x} + \bar{A} \cdot \Delta x(s) \quad (A6)$$

なお, 行列 \bar{A} および以下で使用した定数行列 C, J, R の構成は Fig. 6 内に表示した. さらに, 四種の組成と三つの組成比率の変動量の間に成り立つ線形摂動による近似式 (A7) を用いると (A8) 式で表すことができる.

$$[\Delta HM, \Delta SM, \Delta IM]^T \cong C \cdot \Delta y \quad (A7)$$

$$\begin{aligned} & [\Delta HM(s), \Delta SM(s), \Delta IM(s)]_{M_i}^T \\ & \cong C \cdot \Delta A_{M_i}(s) \cdot \bar{x} + C \cdot \bar{A} \cdot \Delta x(s) \end{aligned} \quad (A8)$$

◀Fig. 6 の外乱項—(A8) 式右辺第一項▶

第一項の $\Delta A_{M_i}(s)$ を考える. まず山場での四種の原料の組成変動は 2.2 で導入したプラント入口の各原料の主成分変動過程 $z_{11}(t), z_{22}(t), z_{23}(t), z_{44}(t)$ と, j 番目原料の i 番目の成分の主成分による回帰係数 α_{ij} を要素に持つ行列 R を用いて次のように表すことができる.

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} CaO \\ SiO_2 \\ Al_2O_3 \\ Fe_2O_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} z_{11}(t) & \alpha_{12}z_{22}(t) & \alpha_{13}z_{23}(t) & \alpha_{14}z_{44}(t) \\ \alpha_{21}z_{11}(t) & z_{22}(t) & z_{23}(t) & \alpha_{24}z_{44}(t) \\ \alpha_{31}z_{11}(t) & \alpha_{32}z_{22}(t) & \alpha_{33}z_{23}(t) & \alpha_{34}z_{44}(t) \\ \alpha_{41}z_{11}(t) & \alpha_{42}z_{22}(t) & \alpha_{43}z_{23}(t) & z_{44}(t) \end{bmatrix} \\ & \begin{matrix} limestone & clay & silica & sand & iron\ ore \end{matrix} \\ & = R \cdot \text{diag}[z_{11}(t), z_{22}(t), z_{23}(t), z_{44}(t)] \end{aligned} \quad (A9)$$

以下 $z_{ij}(t)$ の s 領域表現 $z_{ij}(s)$ を用いる. $\Delta A_{M_i}(s)$ は上記の組成変動がミル入り口までに装備されるホモジナイジングベッドの伝達関数を通過した過程として, 次のように表せる.

$$\begin{aligned} \Delta A_{M_i}(s) &= R \cdot \text{diag}[z_{11}(s), z_{22}(s), z_{23}(s), z_{44}(s)] \\ & \quad \times \text{diag}[G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s), 1, 1] \end{aligned} \quad (A10)$$

ただし, $G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s)$ は各々石灰石, 粘土原料に設置するホモジナイジングベッドの伝達関数を表し, 珪石と鉄分原料については Fig. 1 のように一般にホモジナイジングベッドを設置せず, 受入れ原料を直接ミル前ホッパに投入するため伝達関数を “1” としている. 以上より

第一項は,

$$\begin{aligned} & C \cdot \Delta A_{M_i}(s) \cdot \bar{x} = C \cdot R \cdot \\ & \quad \text{diag}[z_{11}(s), z_{22}(s), z_{23}(s), z_{44}(s)] \\ & \quad \times \text{diag}[G_{HB}^C(s), G_{HB}^L(s), 1, 1] \cdot \bar{x} \end{aligned} \quad (A11)$$

これが Fig. 6 の外乱項に相当する.

◀Fig. 6 の計算機制御ブロック—(A8) 式右辺第二項 $\Delta x(s)$ の導出▶

計算機制御は以下のように実施している. 原料ミル出口の各組成比率変動量の測定値 $\Delta HM_M, \Delta SM_M, \Delta IM_M$ とこれらの設定値との偏差量に対し, 原料ミルによる遅れを考慮したスミスの補償器を持つ PI 制御を各偏差量に各々独立に施し, まず動的な各組成比率の補正量 $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ を求めている. この補正量を次のステップの修正目標として, 静的な配合計算により四種の原料の配合比の変更量 $\Delta x(s)$ を求めている. これをブロック線図に表したのが, Fig. 6 の計算機制御ブロックであり, $G_C^*(z)$ はスミスの動的補償器付き PI 制御を表すパルス伝達関数である. 以下に静的な配合計算の表現, および調合制御を含めた原料ミルの閉ループ伝達関数の導出について説明を加える.

1. 配合計算

実機の制御では, 前述の修正目標 $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ を満たす四原料の配合比を, 各配合比の変更幅の許容範囲内で, 次の評価関数を最小にする最適化計算により求めている.

$$\begin{aligned} F &= K_1(\Delta HM_T - \Delta HM)^2 + K_2(\Delta SM_T - \Delta SM)^2 \\ & \quad + (\Delta IM_T - \Delta IM)^2 \\ & \text{with } \sum_{i=1}^4 \Delta x_i = 0 \text{ and } |\Delta x_i| \leq \Delta_{\max}(i) \\ & \text{where } \Delta HM = \left(\frac{\partial HM}{\partial x_i} \right) \cdot \Delta x_i, \text{ etc.} \end{aligned} \quad (A12)$$

ただし, 通常の運転状態で HM, SM, IM の変動幅が小さく評価関数を “0” とする配合比が代数演算で求められる場合は, 次のような逆行列計算で配合比を計算できる.

$$\begin{aligned} \Delta x(s) &= [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4]^T \\ &= J[\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3]^T \\ &= J \cdot (C \cdot \bar{A} \cdot J)^{-1} [\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T]^T \end{aligned} \quad (A13)$$

ここで四原料合計の配合比の総計は常に “1” であることより二番目の等式を利用している. なお (A13) 式で配合計算を行いうる場合で, かつ実際の四原料の定常状態で

の組成行列 \bar{A} が配合計算であらかじめ仮定する平均組成行列と一致する場合は, Fig. 6 からわかるように制御部のゲイン行列 $J \cdot (C \cdot \bar{A} \cdot J)^{-1}$ とプロセス部のゲイン行列 $C \cdot \bar{A}$ はキャンセルされ, PI 演算部以降のゲイン行列は結果的に単位行列となる. このような場合を想定すると X 点の操作出力は, ΔHM_T , ΔSM_T , ΔIM_T をサンプル周期でホールドした値となっている. さらにこの場合には, Fig. 6 の閉ループ系のすべての要素は対角行列となる. 本論文での性能評価の解析はこの状態を仮定してすべてスカラ系として行っている.

2. 調合制御を含めたミル系の伝達関数 $G_{GM}^C(s)$

(A13) 式が成り立つ場合に外乱 ΔHM_D , ΔSM_D , ΔIM_D より見た ΔHM_M , ΔSM_M , ΔIM_M への伝達関数を考える. ホモジナイジングベッドの低域濾波特性により, これら外乱の周波数成分の内サンプル周波数 (本例では 1h) 以上の成分はわずかである (Fig. 7-2 の特性 (2) 参照). したがって, パルス伝達関数 $G_C^*(z)$ によるサンプル値制御系を双一次変換を用いた連続制御系で近似できる. その近似伝達関数 $G_{CA}(s)$ は $G_C^*(z)$ で $z = \frac{1+T_{CS}/2}{1-T_{CS}/2}$ とおいた形となる. この $G_{CA}(s)$ を利用すれば, (A14) 式で $G_{GM}^C(s)$ を近似できることになる.

$$G_{GM}^C(s) \cong \frac{G_{GM}^O(s)e^{-ls}}{1+G_{CA}(s)G_{GM}^O(s)e^{-ls}} \quad (\text{A14})$$

著者略歴

おぎ 尾崎 けん 賢 じ 二 (正会員)



1946年9月23日生. 1971年神戸大学大学院工学研究科計測工学専攻修了. 同年川崎重工業(株)入社. 現在産機プラント事業部電装制御総括部所属. 各種プラントおよび物流システムの電気・制御設計に従事. 計測自動制御学会, オペレーションズリサーチ学会会員.

は 羽 畑 おさむ 修 (正会員)



1953年5月20日生. 1978年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修了. 同年川崎重工業(株)入社. 現在産機プラント事業部電制御総括部所属. 各種プラントの電気・制御・計算機システム設計に従事. 計測自動制御学会会員.

ふく おか まさ 福 岡 正 規



1949年8月20日生. 1972年山形大学工学部電気工学科卒業. 同年川崎重工業(株)入社. 現在産機プラント事業部電装制御総括部所属. 各種プラントの電気・計装・制御設計に従事.