



セメントプラントにおける粉砕・混合プロセスの解析と適応制御

尾崎, 賢二

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1999-03-10

(Date of Publication)

2009-08-21

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2305

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3156455>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002305>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

セメントプラントにおける
粉碎・混合プロセスの解析と適応制御

1999年1月

(2月4日, 序文の一部と補遺を追記、誤謬修正)

尾崎賢二

序 文

1970年代よりミニコンの普及により、プロセス制御への計算機の利用が盛んになり、従来のアナログ計装装置によるPID制御の計算機制御への単純な移植だけでなく、フィードフォワード制御、非干渉制御、むだ時間補償制御、最適化計算等の種々のアドバンスト制御技術が適用される様になった。セメントプラントにおいてもデジタル計算機が得意とする計算機能を利用していち早く原料調合制御が行われるとともに、反応と熱計算モデルを利用したModel based control、統計的制御理論やファジー制御を応用したキルンの計算機制御も実機に適用されてきた。これらのプロセス計算機制御の発展に欠くことの出来ない技術として、制御理論とその応用技術に加え制御対象のモデリング技術が挙げられ、このことは制御理論の著しい発展を見た現在でも変わっていない。このモデリングの手法としては対象を物理モデルで表現する方法と統計的手法を利用するシステム同定を主体としたデータ駆動型モデルによる方法が代表的である。

本研究の目的は、セメントプラントを構成する主要プロセスである粉砕プロセスと混合プロセスに対し、これらのモデリング技術を応用した動特性モデルの開発とそのモデルを利用した適応制御等の有効な制御方式の提示である。

粉砕プロセスに対しては粉砕と分級に関する静的特性の研究や実験式の開発は行われているが、これを動特性モデルに拡張したものは数が少ない。さらに粉砕プロセスの制御変数で最も重要な製品粒度と粉砕機の負荷流量に対する制御方式の開発に結びつけた動特性モデルの開発例は見当たらない。本研究では閉回路粉砕ボールミルを対象に、マスバランスと粒度の代表値である比表面積バランスを動的に考慮した物理モデルとこれを利用した制御方式の開発を行い、実機で良好な結果を得た。

混合プロセスに関しては、このプロセスを構成するベッドブレンディング装置や粉砕プロセス、ブレンディングサイロ単体の混合特性を単独に解析した報告はあるが、混合対象である石灰石、粘土等の複数原料の組成変動過程を考慮し、キルン投入原料粉の組成変動を予測した例は見当たらない。本研究では、原料の組成変動に原料の到着過程と静的な化学組成の統計量を組み

合わせた確率過程を導入し、各混合プロセスの伝達関数と合わせ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モデルを提示した。

適応制御のセメントプラントへのこれまでの応用例として調合制御への応用例が挙げられる。しかしこれらの応用例では、制御系が一段予測に基づく Self-tuning regulator であり、ロバスト性能の観点から我々の在来制御に置き換え得るとは言い難い。この点から本論文ではプロセス制御への応用が有望視されている多段予測適応制御の一手法の調合制御に対する応用を考察し、プロセスの特性変化に対するロバスト性を含め、シミュレーションにより実機適用の事前検証を行った。さらにこれら一連の適応制御に対する検討から多変数系を含めた適応制御応用の留意点に言及した。

さらに補遺を設け、学位審査の主査高森教授より提示された設問に対し、現在までに得た制御における筆者の適応観を記す意味で、適応制御の生い立ちと各種理論の原理と特徴、および応用例二例を紹介し読者諸氏のこの分野への理解の一助とした。

なお末尾を借りて、師・米持政忠神戸大学名誉教授への哀悼の気持ちに代え、筆者の今後の目標を追記する。

先生の葬儀の日に凶らずも接した儒学者伊藤仁斎『童子問』巻の下、第三十三章より：

『一にして万に之く、之を博学と謂う。万にして又万、之を多学と謂う。博学は猶根有るの樹、根よりして而して幹、而して枝、而して葉、而して花実、繁茂稠密、算え数うべからずと雖ども、然れども一气流注して、底らずという所無く、弥長じて弥已まざるがごとし。』
(岩波書店：「現代数学の広がり1」の序より)

米持先生の「人格」と仁斎に依る「博学」を目標に、Kathleen Ollerenshaw の静かな「永続した情熱」で綴ること、そのことをこれからの人生の目標とす。

平成 11 年 1 月 24 日

尾崎賢二

目次

	ページ
序文	
第一章 緒論	1
第二章 セメントプラントの構成とその機能	3
2.1 はじめに—セメントの定義とその原料—	3
2.2 セメントの製造工程	3
2.2.1 原石の採掘	5
2.2.2 原石の破碎	5
2.2.3 予混合プロセス	6
2.2.4 原料粉碎プロセス	6
2.2.5 焼成プロセス	6
2.2.6 仕上げ粉碎プロセス	8
2.2.7 セメント出荷プロセス	8
2.3 原料・仕上げ粉碎プロセスの構成と機能	8
2.3.1 粉碎操作の概要	8
2.3.2 セメントプラントでの粉碎機の種類	9
2.3.3 原料・仕上げ粉碎プロセスの構成	11
2.4 原料調製・混合プロセスの構成と調合制御の機能	12
2.4.1 予混合プロセスの機能と方式	13
2.4.2 原料調合制御の構成と機能	17
2.4.3 プレンディングサイロの構成	18
2.5 結言	19
第三章 閉回路ボールミル粉碎プロセスの解析と制御	20
3.1 はじめに	20
3.2 閉回路ボールミルの動特性モデル	20
3.2.1 動特性モデルの基本式	22
3.2.2 実験結果とその解析	23
3.2.3 閉回路ボールミル粉碎系の線形摂動モデル	29
3.2.4 開ループ動特性のシミュレーション結果	32
3.3 閉回路ボールミル粉碎系の制御方法	33
3.3.1 制御方式	34
3.3.2 シミュレーション結果	35
3.3.3 制御方式の実機性能テスト結果	36
3.4 結言	37
付録 3-A: ミル内滞留時間の計算方法	38
付録 3-B: セバレータ特性 β_{ij} の計算方法	40
付録 3-C: 閉回路ボールミル粉碎プロセスの非線形モデル	40

第四章 混合プロセスの確率システム解析とプラント計画への応用	47
4.1 はじめに	47
4.2 混合プロセスの確率システム解析	48
4.2.1 混合プロセスのモデル化の概要	48
4.2.2 混合プロセスの伝達関数	53
4.2.3 計算結果と考察	59
4.3 混合プロセス組み合わせ計画への応用	63
4.4 調合制御系の多変数確率制御モデル	65
4.4.1 総合ブロック線図の導出	65
4.4.2 調合制御方式と閉ループ伝達関数の導出	67
4.5 結言	69
付録 4-A: パルス伝達関数 $G_c^*(z)$ の導出	69
付録 4-B: 連続式ブレンディングサイロの伝達関数	71
第五章 セメントプラント調合制御への適応制御の応用	74
5.1 はじめに	74
5.2 調合制御系の多変数確率制御系としての特徴と 在来制御の問題点	74
5.3 適応制御方式（最小分散型 STR, Stochastic MRACS, EHAC）の 定式化と特徴	78
5.3.1 最小分散 STR の定式化と特徴	78
5.3.2 Stochastic MRACS の定式化とその特徴	83
5.3.3 Extended Horizon Adaptive Control (EHAC) の定式化と特徴	86
5.4 シミュレーションによる性能比較	90
5.4.1 スカラー系としての制御性能比較	91
5.4.2 三指標の多重ループ構成による制御性能比較	95
5.5 適応制御の応用の留意点と多変数適応制御への考察	98
5.5.1 適応制御の実機への応用上の留意点	98
5.5.2 多変数適応制御への考察	101
5.6 結言	103
付録 5-A: 可変忘却変数によるパラメータ適応則	104
付録 5-B: U-D 分解のアルゴリズム	106
付録 5-C: 多変数適応制御系の一般的構成 —インタラクタ行列と適応制御—	107
第六章 結 論	122
使用記号一覧	124
謝 辞	128
補遺 I 主だった適応制御理論の原理と特徴	129
補遺 II 適応制御理論のプロセス制御応用例二例の概要	134

第一章 緒 論

セメントは各種産業やその国のインフラストラクチャーに係わる各種土木工事の材料として利用されており、我が国では設備過剰による生産調整の時代が長く続いているが、発展途上国では国の産業を興す最初にその製造プラントの建設を手がけるのが普通である。その製造には多くの燃料と電力を必要とし製造原価に占める割合は各々約 28%、12%と極めて大きい（楢橋、1976）。

我が国におけるセメント産業は明治維新直後に興されすでに 100 年以上を経過しており、この間の研究開発も製造様式の改良を含めた燃料・電力消費の削減を主目標としていた。またプロセス解析、同定を含むシステム理論、制御理論の顕著な成果としては、多変数回帰モデルによる同定と制御に関する研究（赤池、1972）やファジー制御の最初のプロセス制御への応用（菅野、1983）等が挙げられ、これらは主に原料焼成部門における燃料消費の削減を目的としたものであった。一方粉砕プロセスに対しては、粉砕効率の向上による電力消費の削減が主題であり、粉砕機構を含めた静特性の解析に関する研究が多く、システム制御の分野から見れば顕著な報告はなされていない。また原料の採掘からキルンに至る間に装備する各種の原料混合プロセスの性能は焼成部門の燃料消費に関係するが、その解析と制御に関しても顕著な報告は見あたらない。

本研究の報告内容は三つの主要点に分けられる。第三章では、粉砕プロセスに対する動特性モデルをまず提示する。その方法として原料のマスバランスに加え、粉砕により増加する砕料の表面積のバランスを合わせて考慮した物理モデルを作成し、実機粉砕プロセスでの広範囲な実験結果を基に、そのモデルの妥当性を確認し、かつモデル内の各種の定数を求め、実用に耐えうるモデルの開発を行った。さらにこの動特性モデルを利用し、粉砕プロセスの製品品質である製粉の比表面積（単位重量当たりの表面積）と粉砕系の安定化運転を司る負荷制御系の新しい構成法を提示し、品質の安定化と粉砕効率の向上を実機およびシミュレーションで確認した結果を報告する。

次に第四章では、セメント製造に使用する四種の原料の混合プロセス[†]を取り上げ、山場で採掘するこれらの原料の組成変動を表す確率過程をまず導

入した。次に各種混合プロセスの伝達関数を与え、前述の確率過程と組み合わせ、混合プロセスを通過した後の製粉の組成変動をプラント計画時にあらかじめ計算し得ることを示し、その応用例として各種混合プロセスの組み合わせ計画の方法を例示した。さらにこの確率モデルを用いて、四原料の配合比を制御する原料調合制御系が確率外乱を含む多変数制御系であることを示した。

最後に第五章では、この調合制御系に対する我々の在来制御方法の構成と制御効果および問題点を整理し、その改善を意図して適応制御の応用を検討した。適応制御に関しては、セルフチューニングレギュレータ(Self Tuning Regulator-STR)およびモデル規範形適応制御(Model Reference Adaptive Control-MRACS)の構成と特徴、および実機適用上の問題点を示し、多段予測に基づく Extended Horizon Adaptive Control(EHAC)法が、応用上重要となる調合品質の安定化と対象の特性変動に対するロバスト性に優れることをシミュレーションにより確認した。さらにこれらの研究結果から適応制御を他の一般的な対象へ応用する場合の留意点と、多変数適応制御の構成法に対する理論面の限界、および実用的な構成法について論述した。

なお第二章はセメントプラントの構成と機能の説明に充て、第六章の結論において本研究を総括するとともに今後の検討課題を整理し結びとした。

なお、各章で使用した記号については巻末に一覧表示した。

参考文献

- (赤池弘次、1972) 中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社
- (菅野道夫、1983) 高木友博：“あいまい制御”，計測と制御、Vol.22, No.1, p.84-86
- (檜橋 寛、1976)：セメントの製造と化学、川崎重工業、p.354-355

†(注)：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 (配合または調合) を意味するものではない。

第二章 セメントプラントの構成とその機能

2. 1 はじめに—セメントの定義とその原料—

「セメント」は、ギリシャ語の Caeder すなわち切石または碎石と言う意味を持つ語を起源とし、Caeder → Caedimentum → Cementum を経て最終的に現在の Cement に転じたらしい。すなわち岩石を砕いたものと言う本来の意味より転じて広く“物と物を継ぎ合わす材料”をさすこととなった。

この様な材料には種々の物が考えられるが、今日一般にセメントと言えば水硬性セメントを意味し、ポルトランドセメントおよびこれを主体とする数種の混合セメントを総称している。JIS R 5210によれば、「ポルトランドセメントは、主として石灰質原料および粘土質原料を適当な割合で十分に混ぜ、その一部を熔融するまで焼成して得たクリンカーに、適量の石膏を加え、粉碎したものである。」と規定されている。ポルトランドセメントの原料は

クリンカー焼成用原料と仕上げ粉碎の段階でクリンカーに添加される原料に大別される。クリンカー焼成用原料は石灰質原料としての石灰石と粘土、またその補助材料としてシリカ分を補う珪石、酸化鉄分を補う鉄滓等を加える場合が多い。一方クリンカー粉碎の段階ではセメントの凝固開始を遅らせる作用のため石膏を加えるのが一般的である。以上をまとめると表 2. 1 の様にセメントの原料構成を表すことができる。

表 2. 1. ポルトランドセメントの原料とその構成比

	原料	標準品位	原単位	構成比
ク リ ン カ	石灰石	CaO ; 55%	1.200	76.2 %
	粘土	SiO ₂ ; 57%	0.270	17.1 %
		Al ₂ O ₃ ; 19%		
	珪石	SiO ₂ ; 91%	0.040	2.5 %
	鉄滓	Fe ₂ O ₃ ; 48%	0.030	1.9 %
	石膏	SO ₃ ; 45%	0.035	2.2 %
	計		1.575	100 %

(出典) セメント協会資料による全工場
平均値

2. 2 セメントの製造工程

セメントの製造方式は、原料の粉碎方法によって、乾式と湿式に分かれる

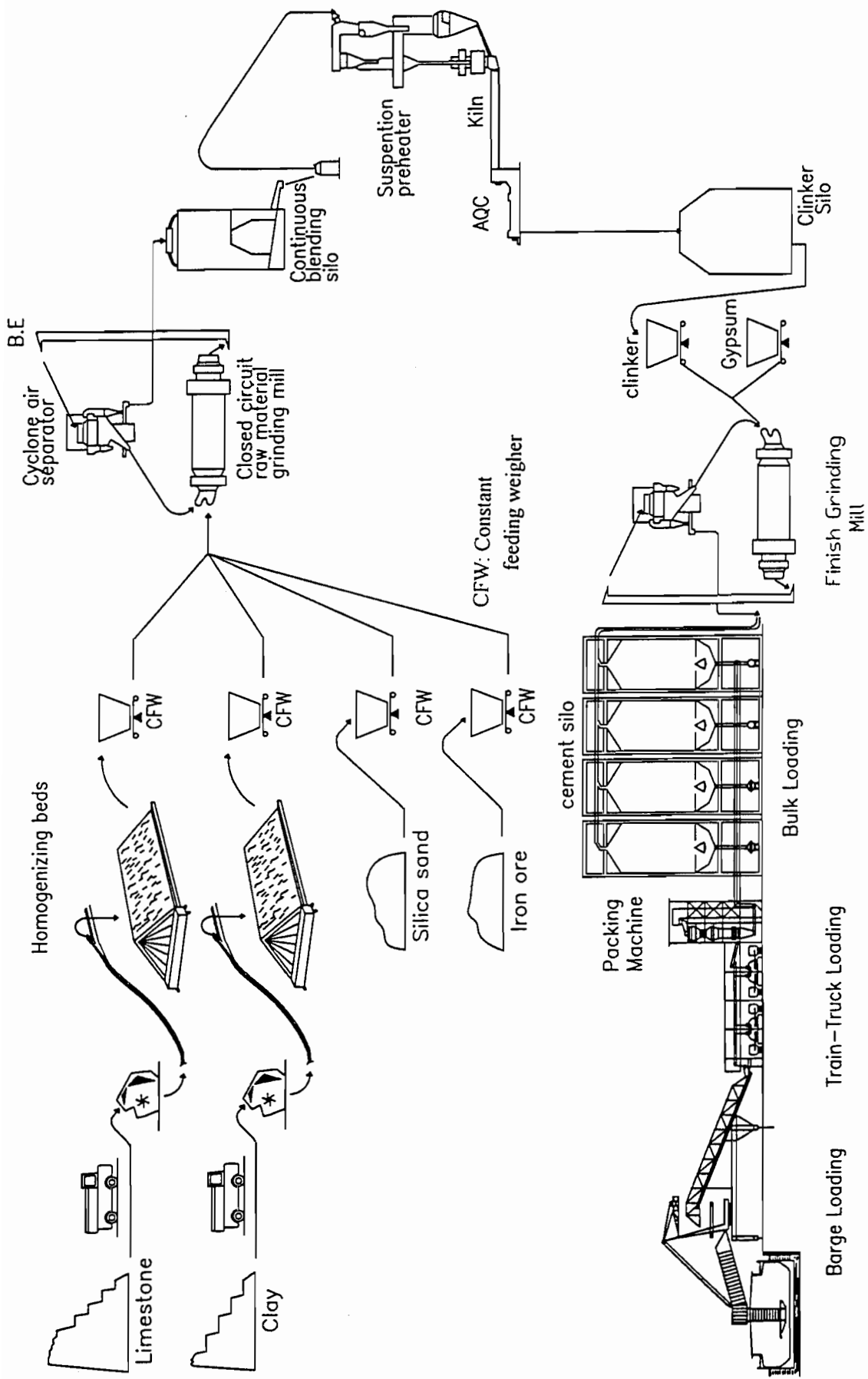


図 2.1 セメント製造プラントの構成

が、20 数年前より新設のプラントはいずれも大半が乾式であり、以下の解析も全て乾式を対象としているため、乾式の製造工程を概説する。図 2.1 に山場の原石採掘からセメントの出荷までの代表的な製造フローを示す。

2.2.1 原石の採掘

表 2.1 に示した通り、セメントの原料は石灰石と粘土で 90%以上を占め、セメントプラントは、これらの原料特に石灰石鉱山の近くに建設するのが一般的である。石灰石の採掘方法にも二、三の方法があるが、現在は国内、海外とも大半が、図 2.2 に示したベンチカット工法を採用している。各ベンチで発破により切り崩した石灰石の原石を、最下段に落としショベルローダ等でダンプトラックに積み込み、次工程の破碎機まで運搬する。粘土原料も同様な採掘方法により、石灰石鉱山の近辺の粘土山より採取する。

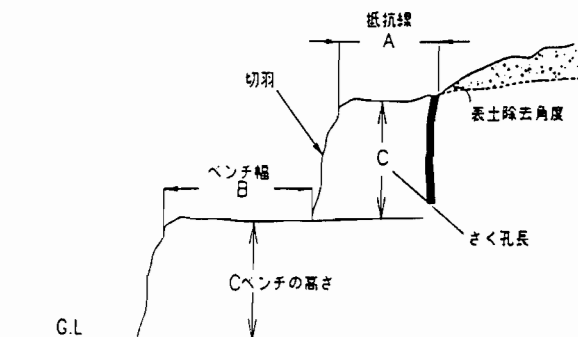


図 2.2 ベンチカット工法

2.2.2 原石の破碎

採掘された原料は、山場に近接して設置した破碎機によって、れき状の原料に破碎し、コンベヤにてプラントサイトに搬送されるか、または原石をそのままプラントサイトに搬送後破碎する。原石の大きさや硬さにより種々の破碎機を使い分けるが、一例としてコンパウンドクラッシャーの構造図を図 2.3 に示す。

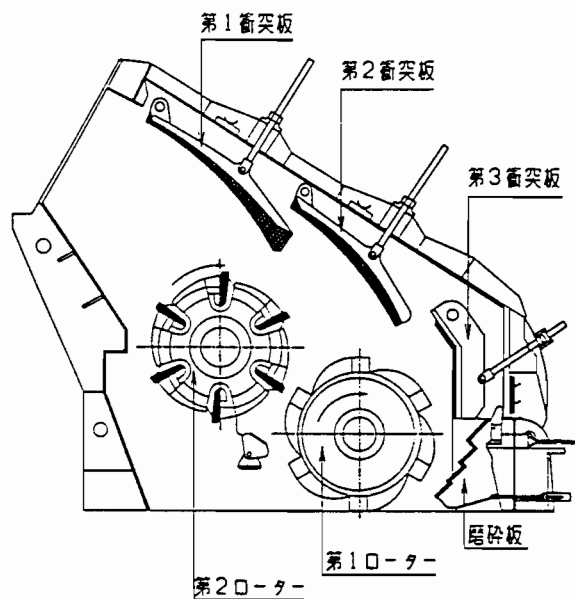


図 2.3 破碎機の一例

2.2.3 予混合プロセス

石灰石と粘土のいずれの原石も天然産であり不均一な混合物である。従って鉱床品質や鉱床の分布状態、採掘順序等によりプラントサイトでの受け入れ原料の組成は変動する。現状の国内・海外の新設プラントでは、図 2.1 に示した様なスタッカーによる層積とリクレーマによる払い出しによる予混合プロセスを設置するのが一般的である。詳細は 2. 4 節に記述する。

2.2.4 原料粉砕プロセス

四種の原料を混合粉砕するプロセスである。乾式法の場合は同時に原料内の水分を焼成部門の余剰ガスを利用して乾燥させる方式を採る。粉砕後の原料粉はブレンディングサイロにおいて、圧縮空気を利用し攪拌混合させ、キルン投入前にさらに組成変動の均一化を図っている。機器の種類とその特徴等の詳細は 2. 3 節に記載する。

2.2.5 焼成プロセス

粉砕プロセスと並び、セメントプラントにおける主要プロセスであり、焼成窯の英字キルンの名で知られている。乾式法においても古くは、レポールキルン、シャフトキルン等の方式もあるが、現在稼働中または新設のキルンの大半は、SP (Suspension Pre-heater)キルンか NSP (New SP)キルンのいずれかである。SP キルンと NSP キルンの構成図を各々図 2.4, 2.5 に示す。サスペンションプレヒーター部では、垂直に配置した数段のサイクロン中に原料粉末を上部より定量投入し、ロータリーキルンの排ガスと熱交換を行い、主に原料中の水分の蒸発と石灰石の脱炭酸反応を行う。SP キルンではプレヒータ部での脱炭酸率は約 40%程度であるが、NSP キルンでは図 2.5 に示した様にキルン本体以外に SP 部にも助燃炉を有し、プレヒータ部での脱炭酸率を約 90%に高めている。ロータリーキルン部では回転する傾斜円筒内を原料を連続流動させつつ、燃焼熱によってクリンカーの主要鉱物組成であるアリット (主成分は $3CaO \cdot SiO_2$)、ベリット (同 $2CaO \cdot SiO_2$)、フェリット (同 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) を生成する焼成反応を行わせている。焼成後ロータリーキルンより落下した約 1300℃のクリンカーをクーラー部で空気により急冷させる。図 2.6 にクーラーの構成を示したが、水平方向に往復運動をする格子状上にクリンカーの移動層を形成し冷却していることと、冷却空気をロータリーキルンの燃焼用二次空気として利用していることが特徴である。

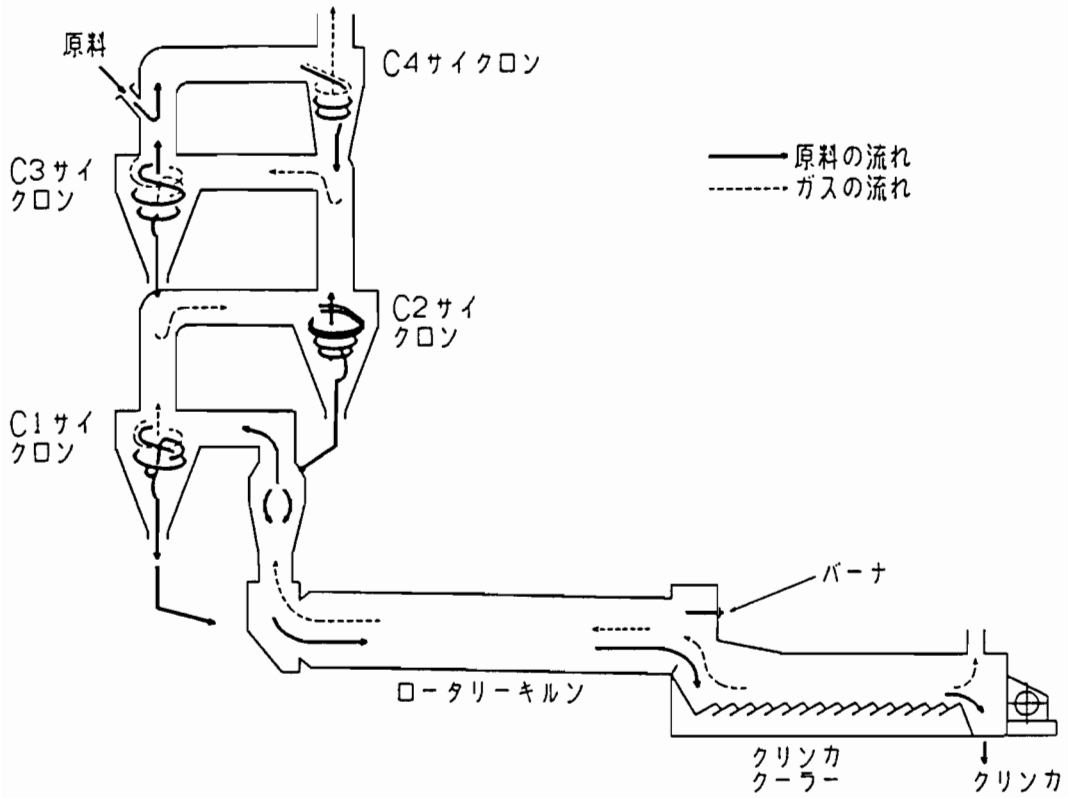


図 2.4 SP キルンの構成

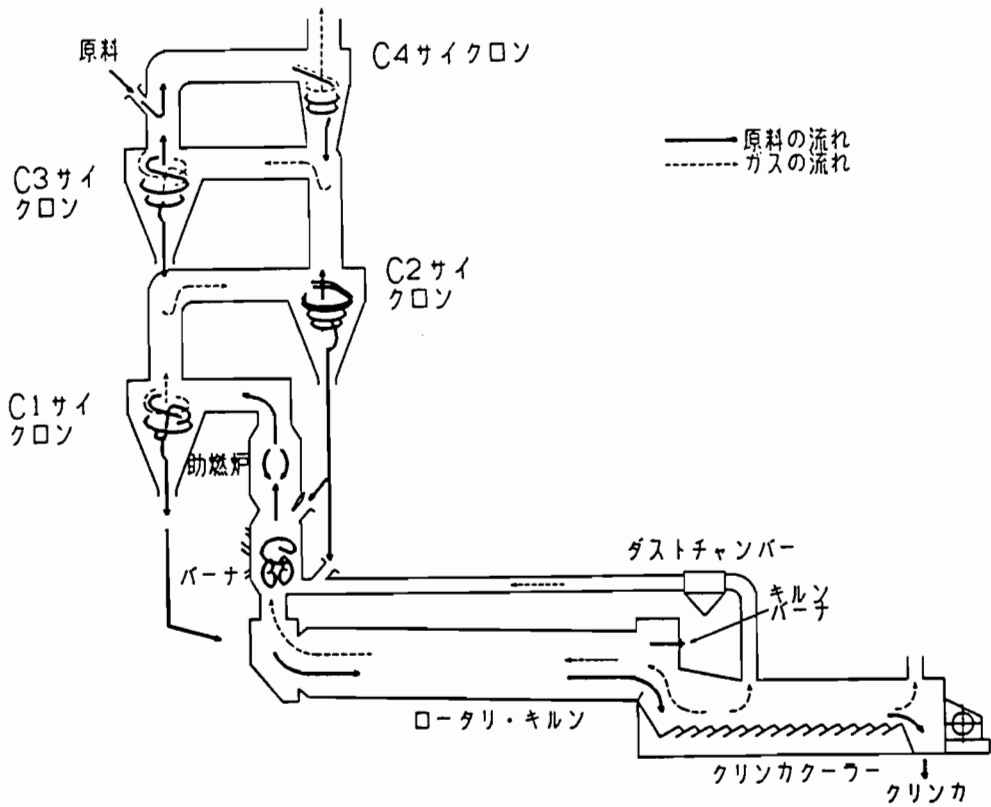


図 2.5 NSP キルンの構成

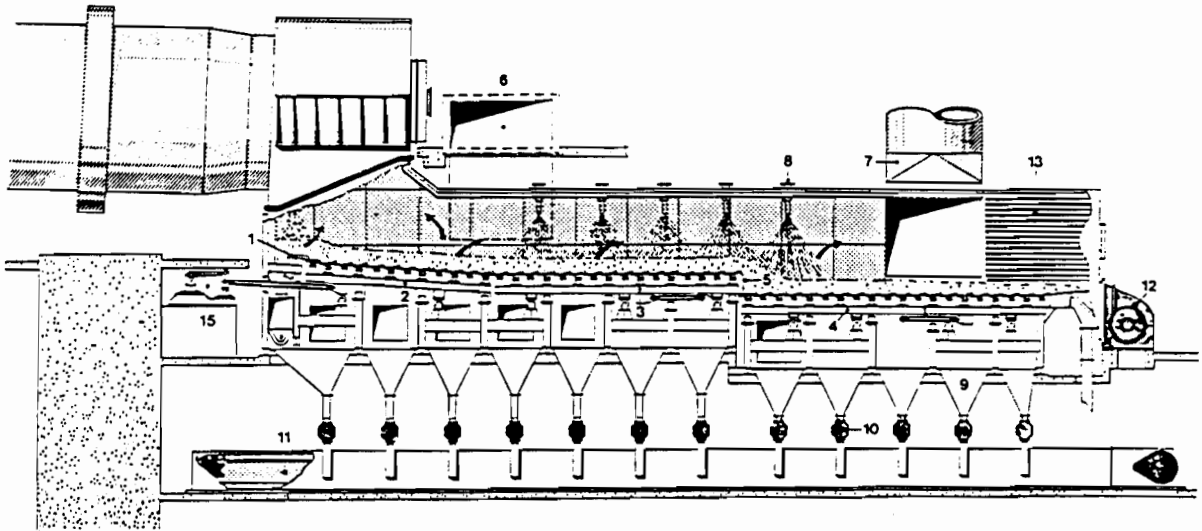


図 2.6 クリンカクーラーの構成

2.2.6 仕上げ粉砕プロセス

焼成後のクリンカーは粒状であるが、これに約 2~3 %程度の石膏を混ぜ再度粉砕することによりセメント粉を得る。セメント粉砕の方式としてはセパレータによる分級機能を持つ閉回路ボールミル粉砕が主流である。2.3節で詳述する。

2.2.7 セメント出荷プロセス

仕上げ粉砕後のセメントはサイロに貯蔵し出荷を待つ。出荷の形態はバラ出荷・袋詰め出荷の二種類であり、輸送形態としてトラック、鉄道、船舶の三種類があり、各々工場の立地条件や顧客層によってこれらの組み合わせが変わってくるのが一般的であるが、これらの出荷・搬送形態に応じて袋詰め機械（パッカー）や空気式搬送機を配置しプロセスを構成している。

2.3 原料・仕上げ粉砕プロセスの構成と機能

2.3.1 粉砕操作の概要

セメントの製造工程において、原料粉碎、仕上げ粉碎などの粉碎プロセスはクリンカーの焼成とともに最も重要なプロセスとなっている。粉碎プロセスには多量の電力を必要とする関係上、エネルギー価格の上昇や環境問題が叫ばれる現在、粉碎効率の向上はますます重要となってきた。

粉碎とは英語で Size reduction とも呼ばれている様に固体を細かく砕く操作、すなわち固体の粒子径を次第に小さくしていくことである。セメントプラントの原料・仕上げ粉碎操作は、いずれも大きさが数 cm から数 mm 程度の原石やクリンカー等の砕料を数百 μm から数十 μm の製品（砕製物または製粉とも言う）にする微粉碎操作であるが、純粹に粉碎に要する動力に対し熱損失が多く、効率 1 % 以下の極めて効率の悪い操作である。この様なエネルギー損失の大きい操作であるが、セメントプラントにおいては以下の二つの目的より粉碎操作は不可欠な操作である。

- 1) 単位重量当たりの表面積、すなわち比表面積を増すことにより、後段での反応速度や溶解速度を高める。すなわち原料粉碎ではキルンでの反応速度や溶解速度を高め、仕上げ粉碎では製品セメントの水和反応速度を適切に保つことにより製品強度を所定の値とする。
- 2) 多成分の混合度を高め、均一にし易くする。原料粉碎の各種原料の混合度を高めることは焼成効率に影響し、仕上げ粉碎でのクリンカと石膏の混合度は製品強度に影響する。

以下に粉碎プロセスの主要構成要素である粉碎機と分級機の構造と機能を説明する。

2.3.2 セメントプラントでの粉碎機の種類

セメントプラントで使用する粉碎機は、ボールミルとローラミル（ボールミルが横型であることに対比して縦型ミルとも呼ばれる。）の二機種である。各々の構造を図 2.7、図 2.8 に示す。

ボールミルは、直径数メートルの水平回転円筒内に砕料を連続的に流し、ミル内の鋼鉄製ボールに外部から与えられた運動エネルギーを砕料との衝突による衝撃力、およびボールと砕料の相互運動時の摩擦力の形で砕料を粉碎する動力に変換している。

一方、ローラミルはいわばひき臼を大型にし臼部に相当するテーブルを回転させ、テーブルに接触し円周上に配置された回転ローラとテーブルの間に

碎料を流し込み、ローラからの圧縮力と碎料とローラ・テーブル間の摩擦力により粉碎を行っており、一般的にボールミルに比較し効率が良いが製品の粒度構成（粒度分布形状特にその広がり）が十分とは言えず、この方式が利用され始めた当初は原料粉碎にのみ適用されていたが、最近はローラミル内部に装備する分級機の特性向上やローラ形状の工夫等により、仕上げ粉碎にも利用されつつある。

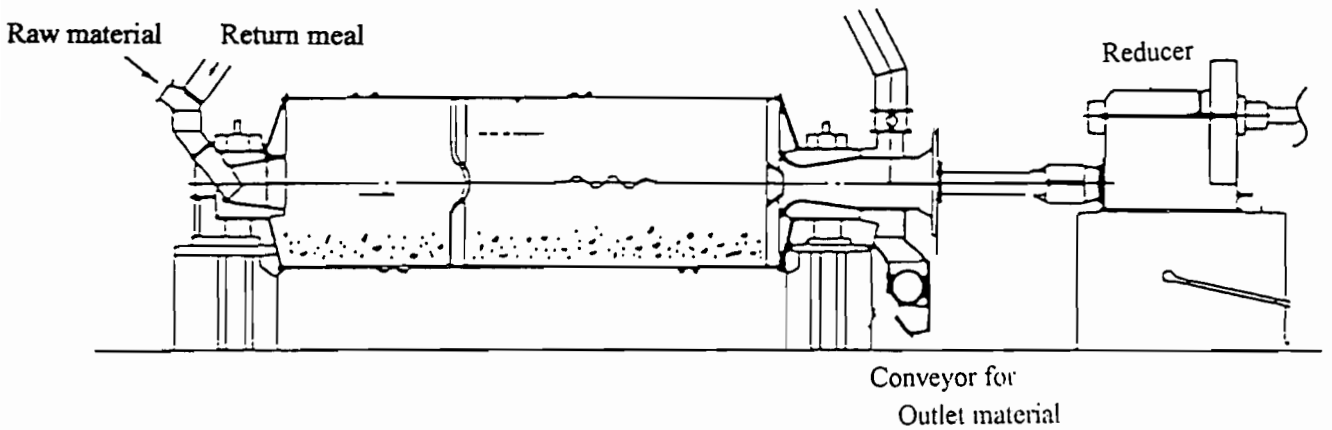


図 2.7 ボールミルの構造

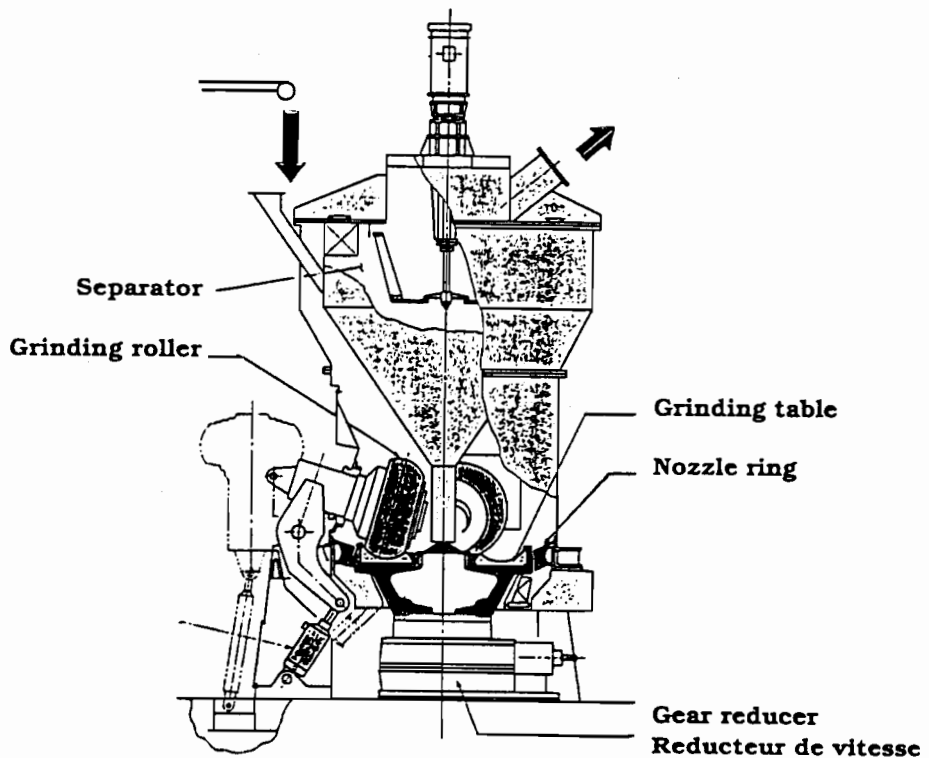


図 2.8 ローラミルの構造

2.3.3 原料・仕上げ粉碎プロセスの構成

粉碎操作は碎料の比表面積を増加させることが基本機能であることは前述したが、製品の比表面積を出来るだけ一定にすることが、品質を確保しかつ過粉碎を防ぎ結果として粉碎効率を上げることになる。このためにセメントプラントの粉碎プロセスには、粗粉と微粉を気流選別する分級機（セパレータ）を備え、微粉を製粉として取り出し所望の製品を得るとともに、粗粉を粉碎機に帰還させ再度粉碎機を通過させる閉回路粉碎プロセスを採用するのが一般的である。図 2.9 にボールミルとサイクロンエアークラスフィカータ(C.A.S)を用いた閉回路ボールミル粉碎プロセスの構成と C.A.S の構造を示した。分級機は一般に、外部送風機による気流内に分散した原料粉が上部の回転翼と衝突する確率が、気流状態が同じ条件では原料粉粒子に働く遠心力（粒子の大きさに依存する）と回転翼の回転数によって決まることを利用した粒子の選別機能を持っている。なお、ローラミルにおいても図 2.8 に示した様に、ミルのハウジング上部に回転翼を設け、その分級機能を利用した閉回路粉碎機構をミル本体内に内蔵している。いずれにせよ分級機からの粗粉の粉碎機

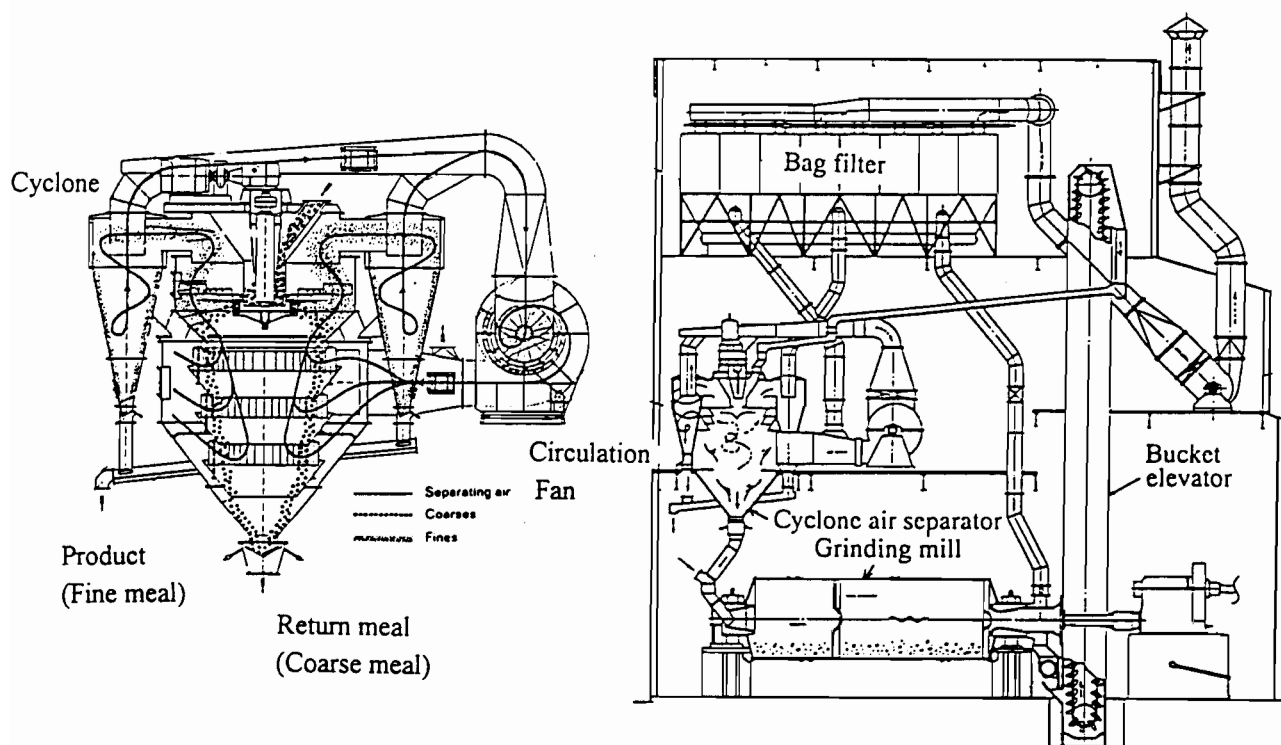


図 2.9 閉回路ボールミル粉碎プロセスと分級機の構造

への再循環は、プロセスとして正帰還回路を内蔵した特徴を有している。なお、オンラインで比表面積や粒度構成を測定出来る装置を利用すれば、分級機の回転翼の回転数等を操作量として比表面積を制御出来、品質の安定化と粉碎効率の向上を期待できる。

以上粉碎プロセスの機能と構成を説明したが、ボールミルとローラミルの比較では、新設の原料ミルには粉碎効率の優れたローラミルを適用する機会が多いが、仕上げ粉碎にはセメントの品質に係わる微粉域での粒度構成とその制御性の面から依然としてボールミルを利用した閉回路粉碎方式の採用が一般的である。また既設工場では原料粉碎にも閉回路ボールミル粉碎を利用している。次章では閉回路ボールミル粉碎プロセスのマスバランスと表面積バランスを考慮した動特性モデルを提示し、その結果を利用して製品比表面積を制御する方法とその実機への適用結果を説明する。

2. 4 原料調製・混合プロセスの構成と調合制御の機能

図 2.1 のセメント製造プロセスにおいてキルンにいたる原料調製工程において最も基本的なことはできるだけ化学成分のばらつきの少ない原料粉を作ることであり、そうすることによってクリンカーの焼成効率とセメントの品質を高めることができる。出来るだけばらつきの少ない品質の安定した原料粉を造るためには、まず第一にできるだけ品質の安定した原石・原料を受け入れなければならないが、それにも限界があり、特に今後資源事情の悪化が予想される中で、品質の安定した原料の受け入れがますます困難になると考えられている。従って原料（調製）工程においてできるだけ品質のばらつきを吸収する必要がある。原料工程において品質のばらつきを減少させる方法として三つの段階を考えることができる。第一の段階は利用する各原料を個別に予混合する方法であり、第二段階は原料粉碎部で複数原料の配合比をオンラインで制御する原料調合制御である。第三の段階はキルン投入前のブレンディングサイロによる最終の混合である。これら三つの段階は互いに独立しているものではなくお互いに関連し合っている。別な言い方をすると一つの段階のみが単独に優れていても必ずしもそれ程の効果を期待できない場合が多く、混合効果を考える場合はこれらのプロセスや装置の組み合わせ特性を検討する必要がある。

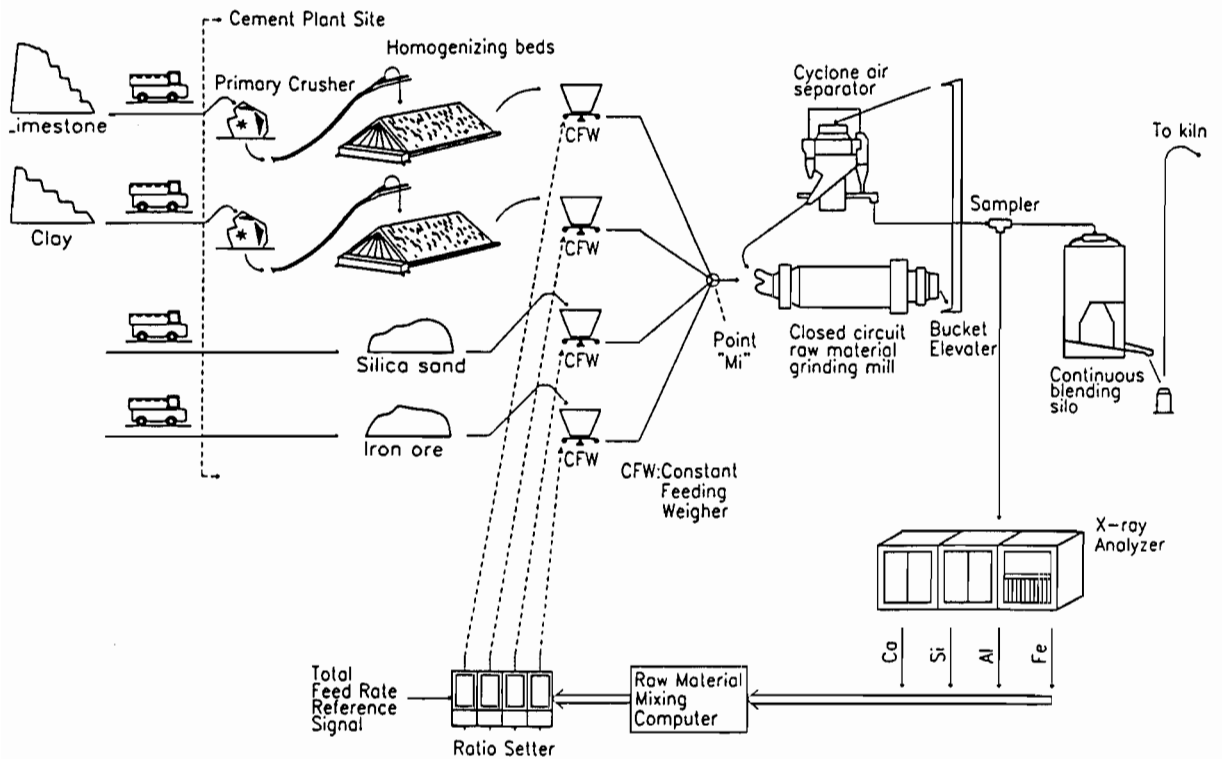


図 2.10 原料調製工程のプロセスフロー

なお、調合制御の構成概要を含めた原料調製工程のプロセスフローを図 2.10 に示し、以下では上記三つの段階の設備の概要とその機能を説明し、四章・五章への導入説明とした。

2.4.1 予混合プロセスの機能と方式

原石等の受け入れ原料の化学組成変動を減少させる最初のプロセスである。原石組成は天然産であり、不均一な混合物である限り組成変動を避けることはできない。その変動には次の諸要因が考えられる。

(1) 鉱山事情 (変動周期大)

- (a) 鉱床品質 … 質的変動
- (b) 鉱床分布状態 … 量的変動
- (c) 採掘方法

(2) 受け入れ・貯蔵・運搬事情（変動周期小）

- (a) 破碎条件、粒径分布等による原石の偏石による変動
- (b) 工場への運搬方式等の受け入れ条件による変動
- (c) 貯蔵とその後の運搬・供給条件（機械装置・労働条件等）による変動

1960年代までの我が国におけるセメントプラントの建設において予混合を本格的に考えることはほとんどなかった様であるが、近年は上記の変動要因を考慮して何らかの予混合プロセスを設置する場合が多い。その利点は下記にまとめられる。

- (1) 従来使用されなかった低品位鉱や組成変動の大きい原石の利用が組成の平滑化により可能となった。
- (2) 選鉱の必要性が減少し、採掘・碎石費用が減少した。
- (3) 予混合プロセスは完全自動化が可能な設備であり、昔の様なバケットクレーン混合のための人手が省ける。
- (4) 以上のメリットに比較し相対的に設備費が安価である。

予混合の方式は原石をどの様に積層貯蔵し、どの様に払い出すかによって分類できるが、以下にその方式と構成設備につき説明する。

[1] 山積み方式

図 2.11 に示した様に原料置き場内に円錐状の山を順次作り、上部より古い山からバケットクレーン等で払い出す方式。均質化の効果は小さいが専有面積が限られる場合にも利用可能である。

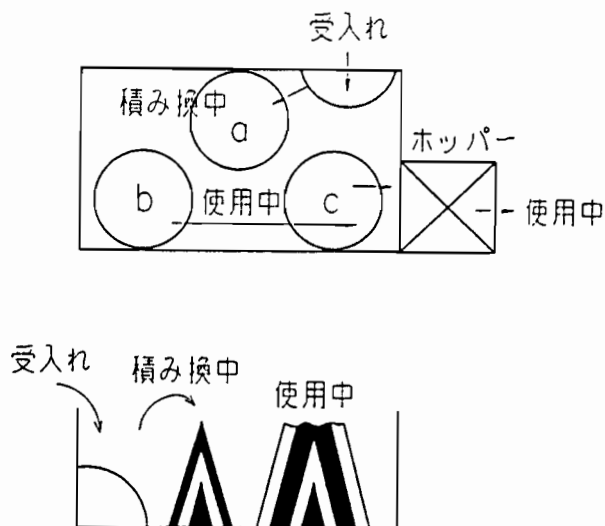


図 2.11 山積み方式

[2] 層積方式

数種の銘柄を同じ置き場に貯蔵したり、受け入れ原料の組成変動が大きい場合に有効な方式であり現在の主流である。図 2.12 の様に受け入れ原料を受け入れ順に層状に積み重ね、使用に際してはこのベッドを垂直方向に切り取って使用する。一般に層積を行う装置をスタッカー、切り出しを行う装置をリクレーマーと呼ぶが、図 2.13 と図 2.14 に代表例を示した様に直線方向または円周方向の積付・切出により装置の構成・形状が異なる。四章では本方式の場合の組成変動の減衰特性を定式化した。

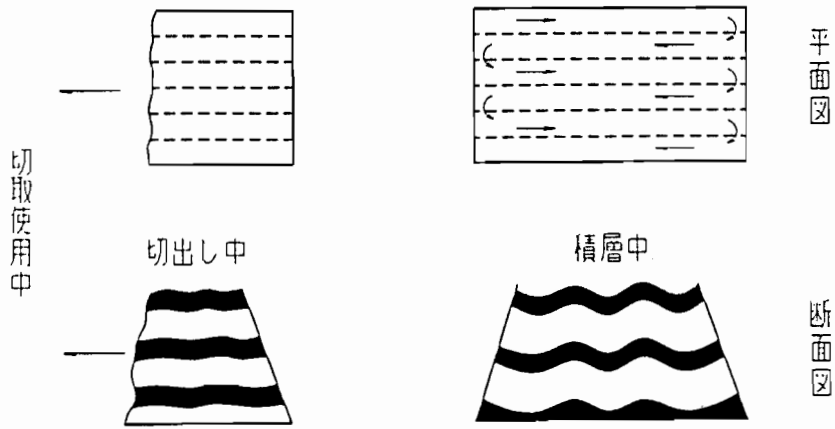


図 2.12 層積方式

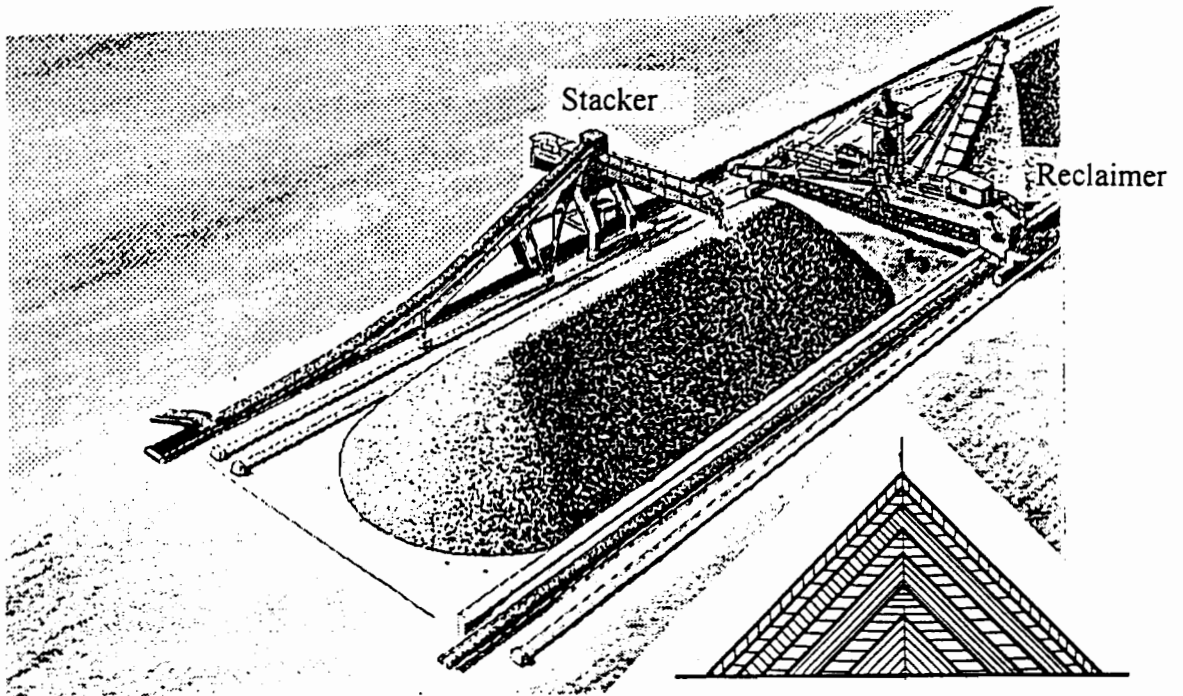


図 2.13 直線方向ベッドブレンドの構成

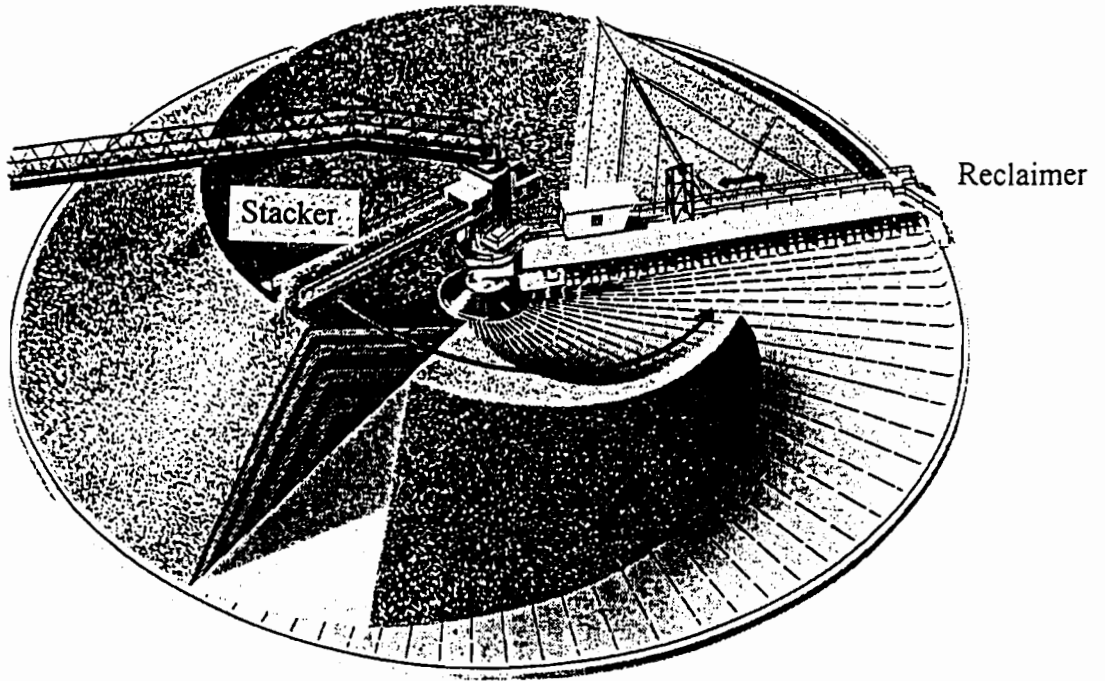


図 2.14 円周方向ベッドブレンディングの構成

[3] 流し積み方式

図 2.15 に示した様に受け入れ原料を順に斜面を流して層を作り、切り出しにあたっては逆の傾斜面を逆方向に斜めに切っていく方法。置き場の中でむだになる空間が少ないが、層積方式に比較し自動化した機械設備を構成しにくい。

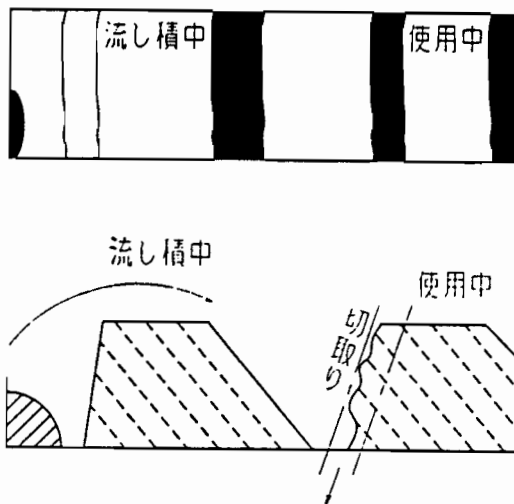


図 2.15 流し積み方式

2.4.2 原料調合制御の構成と機能

予混合後の原料は原料粉砕プロセスで粉砕される。原料粉砕プロセスでは粉砕機内で原料を攪拌混合する機能を有するとともに、投入原料の配合比を調整する調合制御装置による混合機能を備えるのが一般的である。図 2.10 に示した様に原料調合制御は、ブレンディングサイロに投入される前の製粉をサンプリングし、X線分析計を利用してその化学組成（ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 の四成分）を分析することにより行う。X線分析計では一般的に製粉の他の化学成分 MgO , SO_3 他も同時に分析し、キルンでの焼成運転の参考としているが、原料粉以外にも受け入れ原料や焼成後のクリンカー、仕上げ粉砕後のセメント等の組成分析も逐次バッチ処理にて行っており、調合制御に占有できるわけではない。従って原料調合用の四成分分析は間欠的に行い、制御系はサンプル値制御系として構成している。

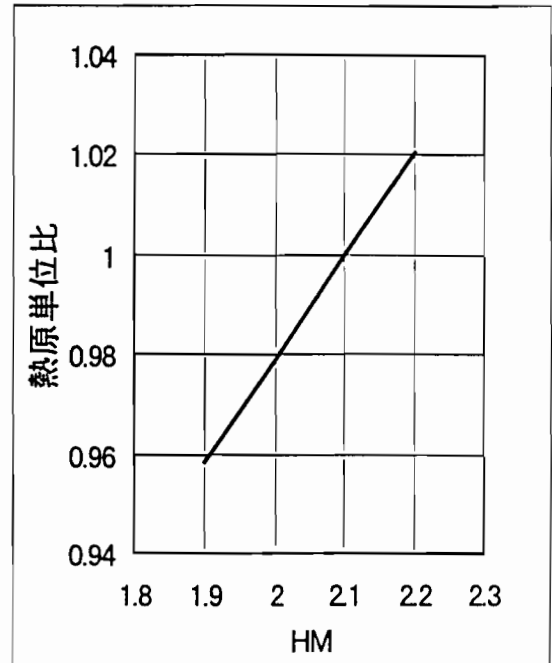
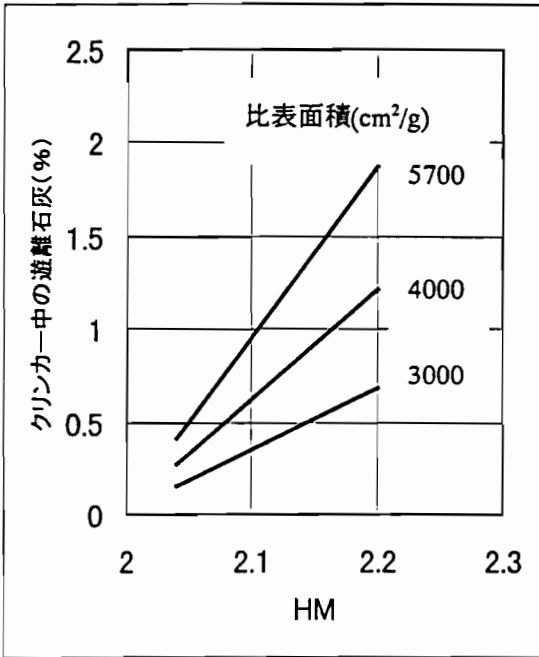
調合制御では上記の四成分に対し、以下の三種類の組成比率 HM , SM , IM

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

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

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

の値を制御量、原料粉砕プロセスへ投入する四種の原料の配合比を操作量としており、他の予混合プロセスやブレンディングサイロで取り除くことのできない極めて長周期の組成変動による製粉組成のドリフト変動を除くとともに、短・長周期に係わらず総合的に変動の分散を抑えることがその最大の目的である。例えば、 HM のばらつきがキルンでの焼成効率にどの様に影響するかについては、図 2.16 に示した様な特性が知られており、 HM の標準偏差を 0.01 下げることにより、約 0.2%すなわち約 1.5 kcal/kg・clinker の熱量原単位の低減を計ることができ、標準的な一系列での生産量を 5,000 ton/day とすると一日当たり 7,500Mcal の熱量を削減できその効果は極めて大きい。



(1) HM の易焼成度への影響

(2) HM の変動と熱消費の関係

図 2.16 原料の水硬率変化のキルン焼成プロセスへの影響

2.4.3 ブレンディングサイロの構成

この装置では粉状の乾燥済み原料をサイロに投入し、下部より圧縮空気を混入して混合している。現状では、図 2.17, 2.18 に示した連続式とバッチ式の混合様式が考えられる。連続式は同一のサイロを貯蔵と混合に利用する様式であり、あらかじめサイロに原料を規定レベルまで満たしておき、その後サイロ下部の攪拌槽部に圧縮空気を送り込み混合しつつ原料を排出する方式である。一方バッチ式は上部の混合サイロと下部の貯蔵サイロを別々に持ち混合サイロでは所定の時間を掛け圧縮空気を送り込んで混合する方式である。混合効果は一般的にバッチ式が連続式より優れているが、設備費または建設費が高く、最近では連続式を採用するケースが大半である。

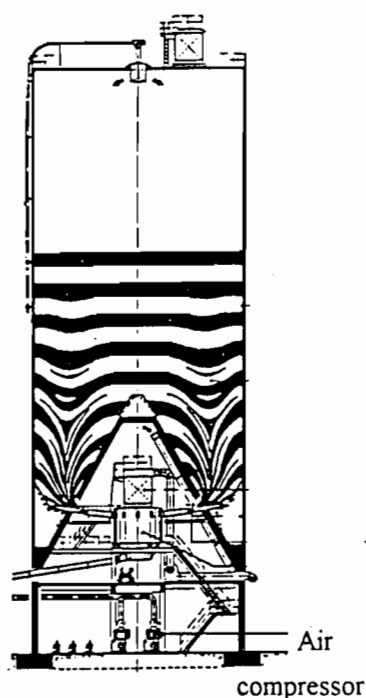


図 2.17 連続式ブレンドイングサイロ

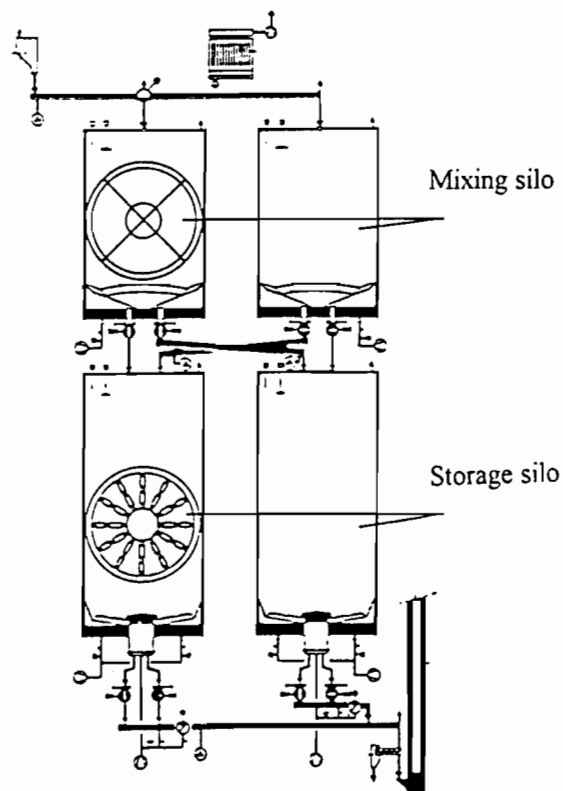
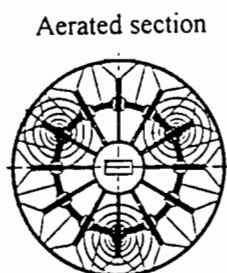


図 2.18 バッチ式ブレンドイングサイロ

2. 5 結 言

以上セメントプラントを構成する各種のプロセスを原料の流れに従って概説し、本論文で解析の主題となる粉碎プロセス、原料調整・混合プロセスおよび調合制御装置に対するその構成要素と機能について説明を加えた。なお本章でのセメントプラントの説明と各種の図には以下の和・欧の解説書、ハンドブックと川崎重工業（株）の製品カタログを参照し、引用箇所が複数に亘るため、本文中での参考文献の表記は省略した。

参考文献

- (楢橋 寛) : セメントの製造と化学, 川崎重工業 (1976)
- (W. H. Duda) : Cement Data-book, Bauberlag GmbH, Berlin, (1985)
- (宇部興産編) : セメントの生産技術 (1975)

第三章 閉回路ボールミル粉砕プロセスの解析と制御

3. 1 はじめに

2. 3節で説明した原料粉砕・クリンカー粉砕に共通した構成となる閉回路ボールミル粉砕プロセスでは、運転の安定化だけでなく、粉砕効率の向上や製品品質となる粒度の制御が重要な要素となる。しかしこのプロセスに対する粉砕効率の向上や粒度制御技術は十分な状態とは言えない（伊藤、1995a）。特に制御を意識したモデリングでは、マスバランスのみを考慮したものが多く（Tomaru, 1986）（和田、1993）、一方粒度バランスまで考慮したモデリングに関する研究では（Keviczky, 1989）（Rajamani, 1991）、状態量が多すぎて粒度制御系の検討まで至っていないのが現状である。

3. 2節ではこの粉砕プロセスに対し、マスバランスと粒度バランス、特に粒度の代表特性としての比表面積のバランスに着目した動特性モデルを提示し、種々の実験結果を説明するとともに、実験結果から線形摂動モデルとその諸定数を導出し、シミュレーションにより求めた動特性を説明する。

3. 3節では、以上の線形モデルを用いて閉回路ボールミルの制御方法の検討結果とそのシミュレーション確認結果、さらにこの制御方法を実機に適用した結果について記述する。3. 4節では、これらの結果を要約するとともに、付録3-Cに掲げた粉砕と分級に関わる非線形特性を利用した非線形動特性モデルの開発の要点を今後の課題として説明し結びとする。

3. 2 閉回路ボールミルの動特性モデル（尾崎、1998）（杉本、1975）

解析と実験の対象とした閉回路ボールミルプロセスの構成と主要な仕様を図3.1と表3.1に示す。閉回路ボールミル系の動特性解析を行うには、碎料のマスバランスと粒度バランス、ガス系のマスバランスとモーメントバランスおよび系全体のエネルギーバランスを考えなければならないが、解析の目的を運転の安定化および製品粒度の均一化を目的とした制御方式の検討に絞るならば、碎料のマスバランスと粒度バランスのみ考慮すれば十分である。粒度バランスの表現として、付録3-Cで示した粒度分布そのものの変化を定式化する方法を考えることもできるが、制御系検討の上での次数の低減を意図し、粒度の総合的な表現である比表面積を本節では利用する。

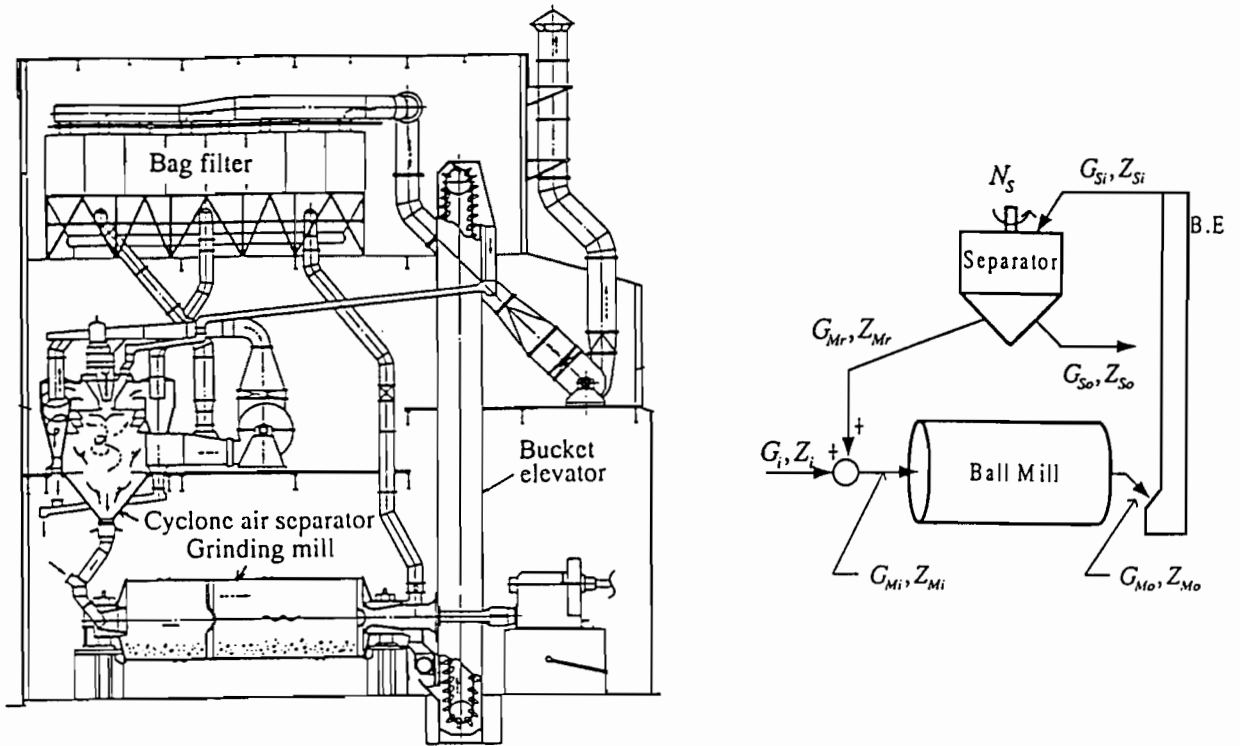


図 3.1 対象プロセスの構成

表 3.1 対象プロセスの代表仕様

NO.	ミル内径 mm ϕ	ミル長さ (mm)		ミル回転数 (rpm)	媒体量			能力 (ton/hr)	ミルモータ容量 (kW)	セパレータ形式
		一室 /二室	計		一室 (mm ϕ : ton)	二室 (mm ϕ : ton)	総計 (ton)			
1	2,900	3,259 / 6,241	9,500	18.1	75 ϕ : 1.8 60 ϕ : 4.2 50 ϕ : 5.1 40 ϕ : 7.5 計 : 18.6	40 ϕ : 5.0 25 ϕ : 40.0 計 : 45.0	63.6	28	950	サイクロン エアー セパレータ 呼び寸法 2,800mm
2	4,400	4,565 / 8,435	13,000	14.7	75 ϕ : 14.5 60 ϕ : 15.0 50 ϕ : 22.5 40 ϕ : 16.0 計 : 68.0	50 ϕ : 25.0 40 ϕ : 66.0 30 ϕ : 36.0 計 : 127.0	195	100	3,700	サイクロン エアー セパレータ 呼び寸法 4,800mm

3.2.1 動特性モデルの基本式

以下ミル入口・出口、分級機入口・出口各部の重量流量 $G(\text{kg/h})$ と比表面積 $Z(\text{gr/cm}^2)$ のバランスを考えるが、該当箇所は下添字を利用して識別する。

(1) ミル入口合流部

原料と戻り粉との合流部でのマスバランスと表面積バランスを考え、

$$G_{Mi}(t) = G_i(t) + G_{Mr}(t) \quad (3-2-1)$$

$$Z_{Mi}(t) \cdot G_{Mi}(t) = Z_i(t) \cdot G_i(t) + Z_{Mr}(t) \cdot G_{Mr}(t) \quad (3-2-2)$$

(2) ボールミル本体

ミル内において碎料は入口から出口に向かって混合移動しつつ粉碎されており、本来分布系として取り扱うべきであるが、制御方式の検討を容易にするため以下では集中定数系で考える。混合移動については、ミル内の閉塞が無い定常状態を考え、流入流量と流出流量間に(3-2-3)式が近似的に成り立つものと仮定する。

$$G_{Mo}(t) = \frac{1}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + 1} G_{Mi}(t - \tau_{BM}) \quad (3-2-3)$$

ここに、 $D=d/dt$ は微分演算子を表し、 τ_{BM} はミル内における碎料の流動特性のうちピストン流れよる要素を表すむだ時間である。

一方粉碎については、その基本式を付録 3-C に示したが、ここではその機能を比表面積の増加と考え、アンドレーフの粉碎速度式（三輪、1965）(3-2-4)式に、粉碎された碎料の $20\mu\text{m}$ 残分と比表面積との間に成り立つ実験式 (3-2-5.1),(3-2-5.2)を代入して得られる(3-2-6)式を粉碎による比表面積の増加を表現する式として採用する。なお、アンドレーフの粉碎式中の粉碎動力 E は、同一ミルでは運転条件による変化は少ないことより以下一定と考える。

$$\bar{R}_{Mo}(20\mu) = \bar{R}_{Mi}(20\mu) \cdot \exp\left\{-k(E \cdot \hat{T}_B / \bar{G})^m\right\} \quad (3-2-4)$$

$$\bar{Z}_{Mi} / b + \bar{R}_{Mi}(20\mu) / c = 1 \quad (3-2-5.1)$$

$$\bar{Z}_{Mo} / b + \bar{R}_{Mo}(20\mu) / c = 1 \quad (3-2-5.2)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{Mo} &= \bar{Z}_{Mi} \cdot \exp\left\{-k(E \cdot \hat{T}_B / \bar{G})^m\right\} + b \cdot \left[1 - \exp\left\{-k(E \cdot \hat{T}_B / \bar{G})^m\right\}\right] \\ &= f(\bar{G}) \cdot \bar{Z}_{Mi} + b \cdot (1 - f(\bar{G})) \end{aligned} \quad (3-2-6)$$

なお、 $\bar{\quad}$ は当該変数の定常状態での値を示し、 b, c は実験式(3-2-5.1), (3-2-5.2)

に共通する定数である。また、式(3-2-6)では平均滞留時間もミル通過流量 \bar{G} の関数であることを考慮して表記している。次に比表面積の動特性を考える。例えばミル流入粉の比表面積がステップ状に変化したとき、流出粉の比表面積が(3-2-6)式で表される値に変化するまでに、碎料の混合移動による遅れを伴うとして、(3-2-7)式でその動特性を表す。

$$Z_{Mo}(t) = \frac{1}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + 1} \cdot \frac{\bar{Z}_{Mo}}{\bar{Z}_{Mi}} \cdot Z_{Mi}(t - \tau_{BM}) \quad (3-2-7)$$

(3) 垂直搬送機

搬送装置は単なる時間遅れ要素であり下記で表現する。

$$G_{Si}(t) = G_{Mo}(t - \tau_{BE}) \quad (3-2-8)$$

$$Z_{Si}(t) = Z_{Mo}(t - \tau_{BE}) \quad (3-2-9)$$

(4) 分級機

分級機としてサイクロン式エアーセパレータを考えると、その内部での碎料の滞留時間は、ミルの滞留時間に比較し極めて小さいので無視できる。

この時、セパレータから排出される製粉の流量と比表面積は、セパレータの動作条件である、碎料の流入流量、流入碎料の比表面積、主軸回転数および分級空気流量制御用ダンパ開度の関数として、下記で表せる。

$$G_{So}(t) = h_G \{G_{Si}(t), Z_{Si}(t), N_s(t), D_s(t)\} \quad (3-2-10)$$

$$Z_{So}(t) = h_Z \{G_{Si}(t), Z_{Si}(t), N_s(t), D_s(t)\} \quad (3-2-11)$$

なお、関数 h_G, h_Z は実験より求めるものとする。一方、分級機よりミルに再循環する戻り粉に関しては、次のバランス式が成り立つ。

$$G_{Mr}(t) = G_{Si}(t) - G_{So}(t) \quad (3-2-12)$$

$$Z_{Mr}(t) \cdot G_{Mr}(t) = Z_{Si}(t) \cdot G_{Si}(t) - Z_{So}(t) \cdot G_{So}(t) \quad (3-2-13)$$

ただしセパレータからミルまでの粉体の輸送時間は、一般にミルの滞留時間に比し極めて小さいため無視した。

3.2.2 実験結果とその解析

上記のモデルの実証と各部の定数を求めるために、東北開発(株)(現三菱マテリアル(株))に当社が納入した二基のクリンカー粉碎用閉回路粉碎ボールミルで各種の実験を行った。その結果を以下に示す。

(1) ボールミル内碎料の滞留時間分布

二基のミルに対し、セパレータの回転速度を変更し、表 3.2 の様に循環比の異なる定常運転状態を人為的に作った上で、ミル入口シュート部に塩化カルシウム $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ を 25Kg インパルス状に投入し、30 秒間隔でミル出口粉、戻り粉を採取し、塩素含有量の分析結果より、付録 3-A の方法（小沼、1968）によりボールミル単体の滞留時間分布すなわちインパルス応答特性を求めた。

表 3.2 実験時の運転状態

ミル号機	循環比	G_1 (ton/h)	G_2 (ton/h)	N_s (rpm)
一号	1.41	18.95	45.7	570-580
	1.97	19.89	59.0	570-580
	2.73	20.85	77.9	590-600
	3.63	20.59	95.4	620-625
二号	4.00	81.04	405.0	440

一号ミルの各循環比に対する滞留時間分布を図 3.2 に示す。なおサンプル採取後運転を急停止し、バケットエレベータの二つのバケット内の原料を掻き出し、その重量を測定することにより循環比を推算している。循環比すなわちミル通過流量の増加に従い滞留時間は短くなっている。この実験結果より前節の(3-2-3), (3-2-7)式で表現した動特性を最小二乗法で求めた結果 (3-2-14)式の様むだ時間と 5 次遅れ系でボールミル単体の特性は表せる。

$$T(s) = e^{-2/Lcs} / \left(1 + \frac{\hat{T}_B}{5} s \right)^5 \quad (3-2-14)$$

ここに \hat{T}_B はピストンフロー効果すなわちむだ時間を除いたミル内の混合移動の平均滞留時間を表している。図 3.2 には (3-2-14)式によるインパルス応答を各循環比に対し計算し、実測のプロット値と比較して示したが広い範囲の循環比に適合した動特性の表現として (3-2-14)式が利用できることが判る。次にミル本体の形状が変わった場合にも (3-2-14)式を適用するために、実験データより求めた一号・二号ミルの各滞留時間分布からむだ時間を差し引いた分布曲線の平均滞留時間を計算し、ミルの単位断面積当たりの通過流量に対して、単位長さ当たりの平均滞留時間を計算し図 3.3 を得た。目板の形状やボール充填率等の設計条件が等価なミルに対しては、ミルの直径・長さ・通過流量の設計条件により平均滞留時間すなわち \hat{T}_B を図 3.3 から求め、(3-2-14)式より一般的なボールミルの動特性の表現式を得ることが出来る。

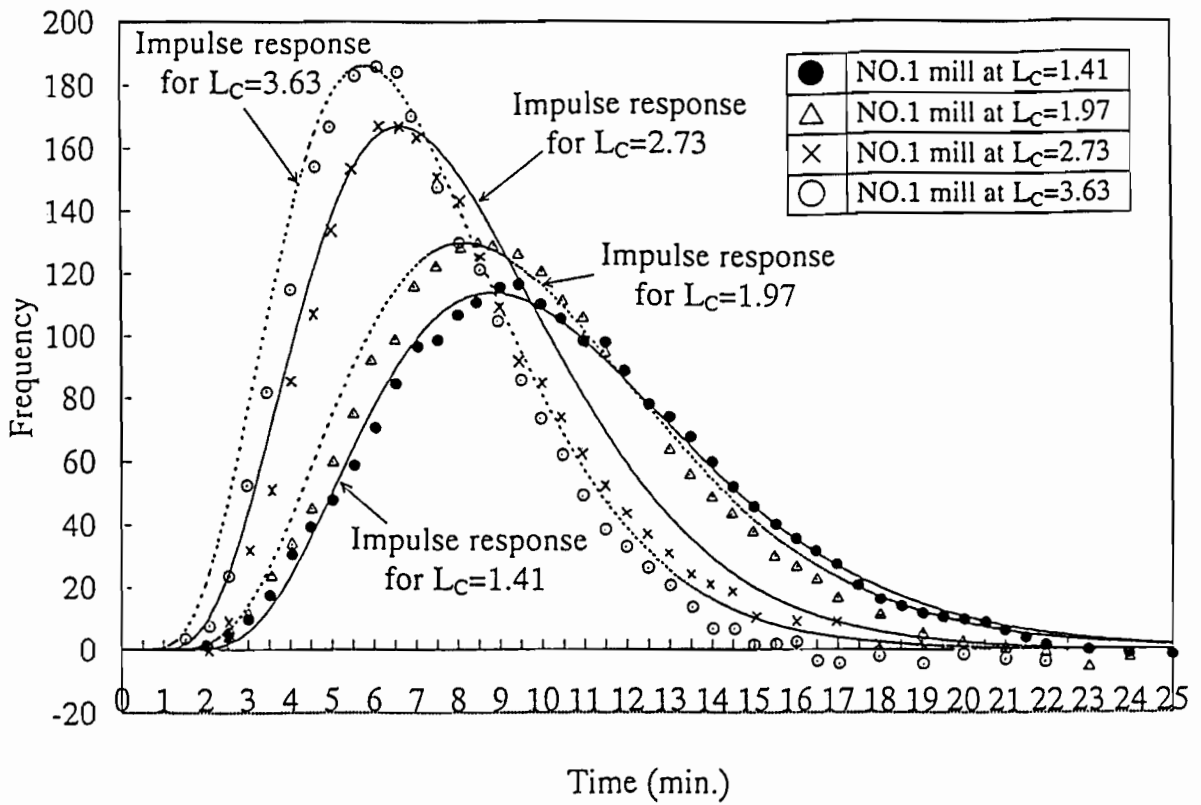


図 3.2 各循環比での滞留時間分布特性とインパルス応答

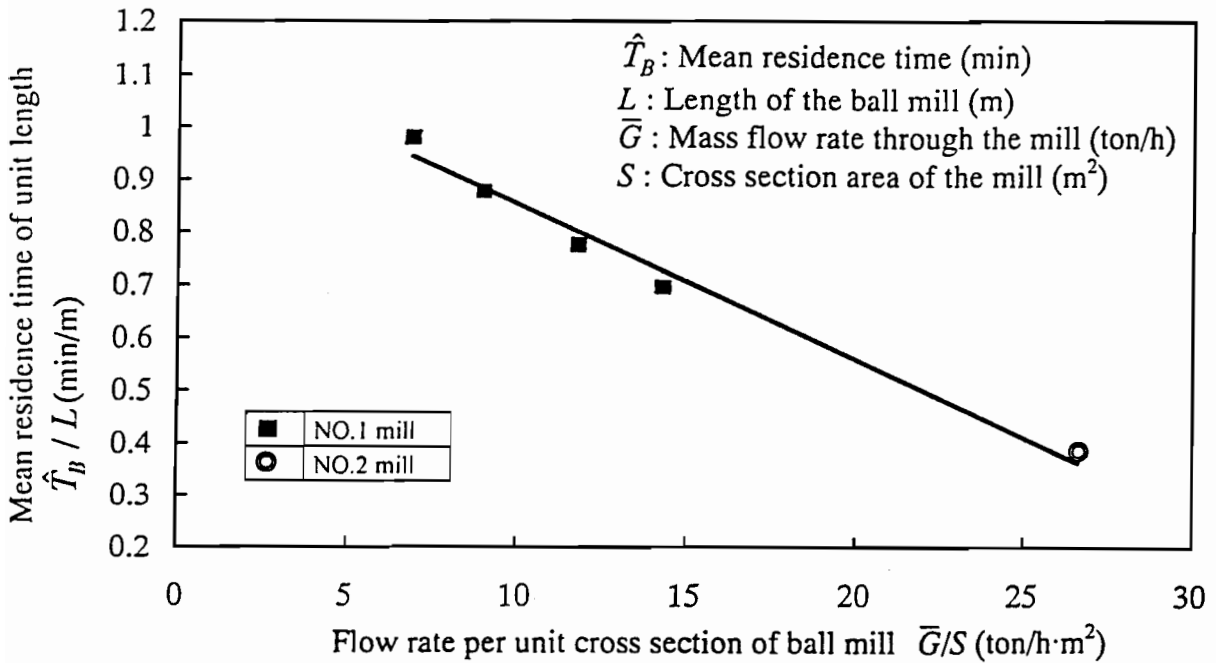


図 3.3 ミルの主要寸法と平均滞留時間特性

(2) 粒度・比表面積の測定結果と分析

両ミルの各循環比における定常運転状態で、ミル入口・セパレータ出口製品・同戻り粉のサンプル、および一号ミルに対しては定常運転から瞬時停止させた後、ミル内のミル長さ方向で一室4点、二室5点のサンプルを採取した。これらのサンプルに対し、沈降法（川口、1964）による粒度分布の分析と空気透過法による比表面積の計測を行った。その結果を以下に示す。

一般に粒度分布について原料・クリンカー粉砕いずれにおいても (3-2-15) 式の Rosin-Rammler 分布に従うとされている。

$$R(\eta) = 100 \times \exp(-k\eta^n) \quad (3-2-15)$$

ここに $R(\eta)$ は径 η の篩いに残る粒子の百分率を表し、 k, n は定数である。

図 3.4 に閉回路粉砕系におけるプロセス内三ヶ所のセメント粉の粒度分布を Rosin-Rammler 線図上にプロットした結果を示す。いずれも Rosin-Rammler 分布に従っていること、および循環比の値に係わらず定数 k, n は概ね一定値で表しうることが判る。

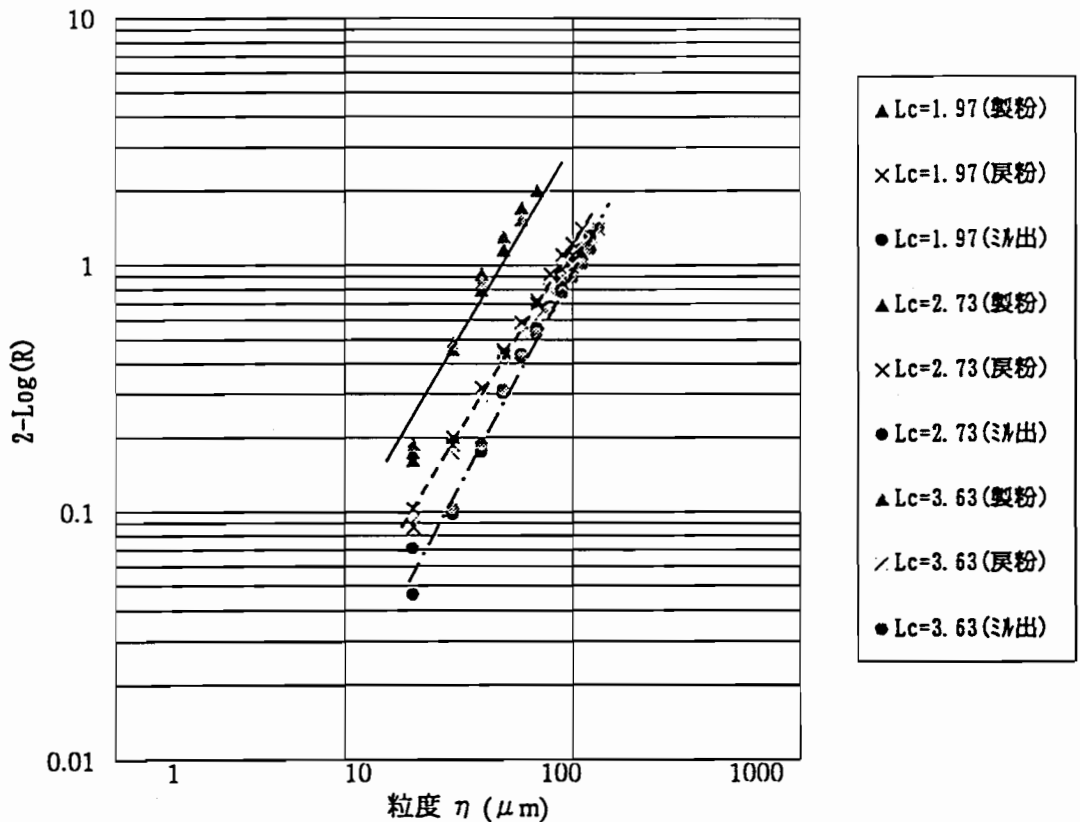


図 3.4 各部のセメント粉の粒度分布

次に各部の粒度の代表値として $20\mu\text{m}$ 残分に着目し、この百分率と比表面積の分析結果を対比し、3.2節のモデルに使用する実験式 (3-2-5) の確認を行った。図 3.5 にその結果を示したが、通常の循環比の運転状態ではミル出口、製粉、戻り粉に共通して $20\mu\text{m}$ 残分と比表面積の間に線形の関係式が成立していることが分かる。図 3.6 にはミル内碎料の粒度がミルの軸方向で

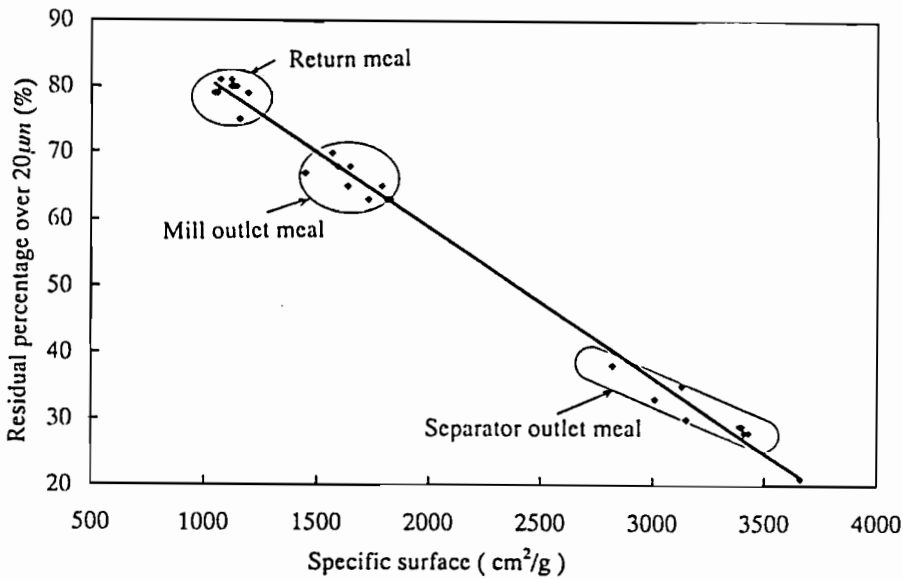


図 3.5 $20\mu\text{m}$ 残分と比表面積の線形関係

どの様に変化しているかの一例として、比表面積の変化状況を示した。図から分かる様に軸方向の比表面積の増加率はミル通過流量に反比例している。図中の A_1 部で比表面積が大きい値を示しているのはミル停止時にセパレータ内の製粉や戻り粉がミル内に落下したためである。

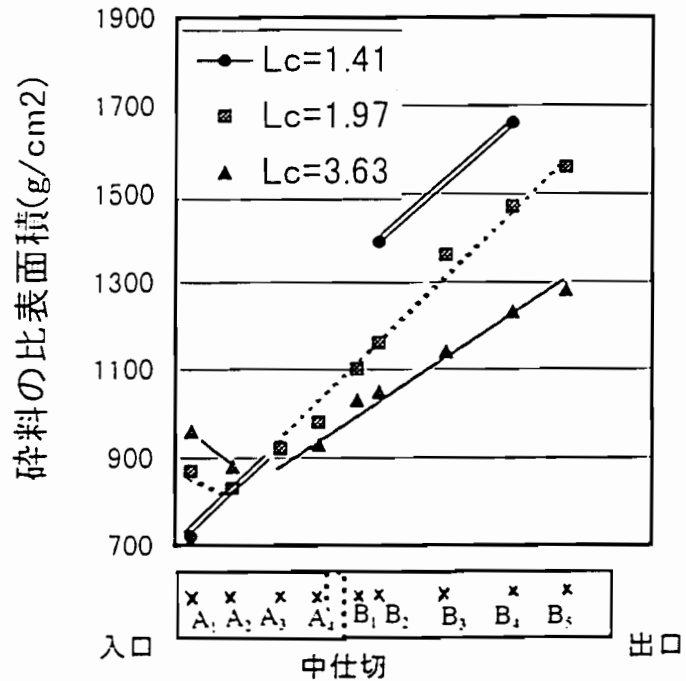


図 3.6 ミル内碎料の比表面積変化特性

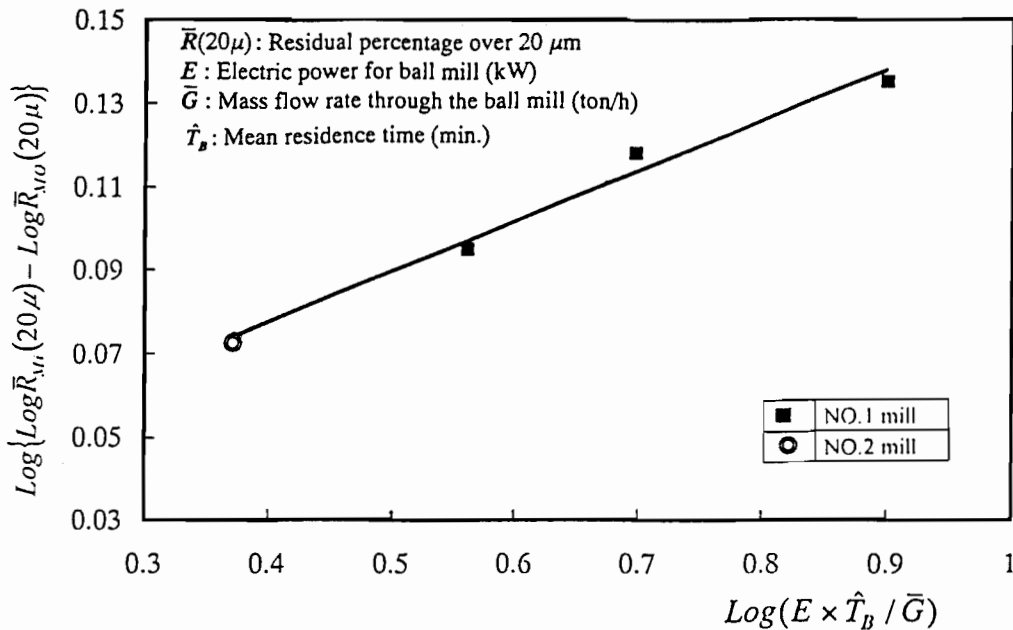


図 3.7 アンドレーフ粉砕速度式の確認結果

次に 3. 2 節の動特性モデルで採用したボールミルの粉砕能力を表現するアンドレーフの粉砕速度式 (3-2-4) を NO.1, NO.2 の両ミルの各循環比における $20\ \mu\text{m}$ 残分の分析結果で確認し、図 3.7 を得た。データ数は十分とは言えないが、大きさの異なる二つのボールミルに対し、ミル入口・出口の $20\ \mu\text{m}$ 残分比の対数と $\text{Log}(E \times \hat{T}_B / \bar{G})$ の間に線形近似が成立しており、アンドレーフの粉砕速度式が粉砕能力の近似表現として成立していることが分かる。

(3) セパレータの分級特性

セパレータの分級性能は、セパレータへ投入された原料粉の各粒度に対し精粉側へ回収する割合を示す部分回収率特性で表現するのが一般的である。実験に供したセパレータはいずれも当社製のサイクロンエアークレータであり、その分級性能を制御出来るのはセパレータの主軸回転数と循環空気流量を変えるダンパー開度である。実機計測では定常な運転状態でこれらの操作変数を変更し、その前後で投入粉、製粉、戻り粉のサンプルを採取し、それらの粒度分布の分析結果を用いて部分分級率特性を求めた。その結果の一例を図 3.8、図 3.9 に示した。ダンパ開度による循環流量の変更に比し主軸回転数による分級特性の制御が効果的であることが分かる。

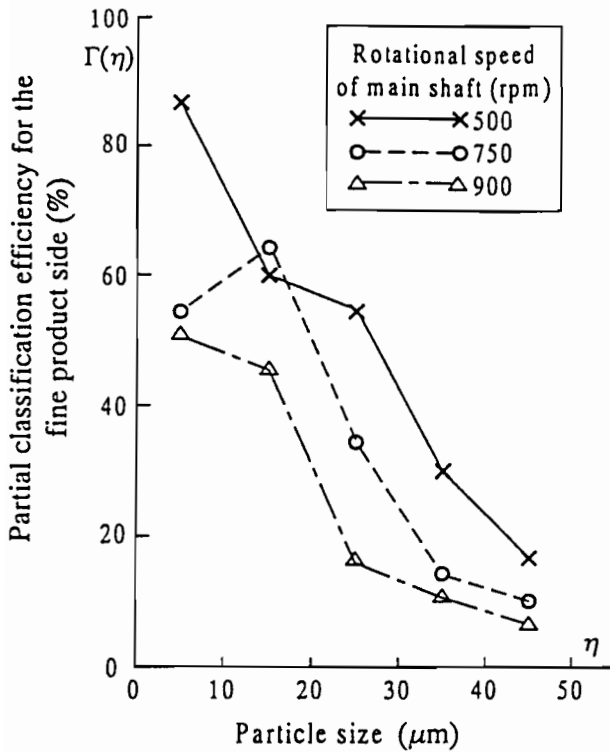


図 3.8 主軸回転数変化による部分回収率特性

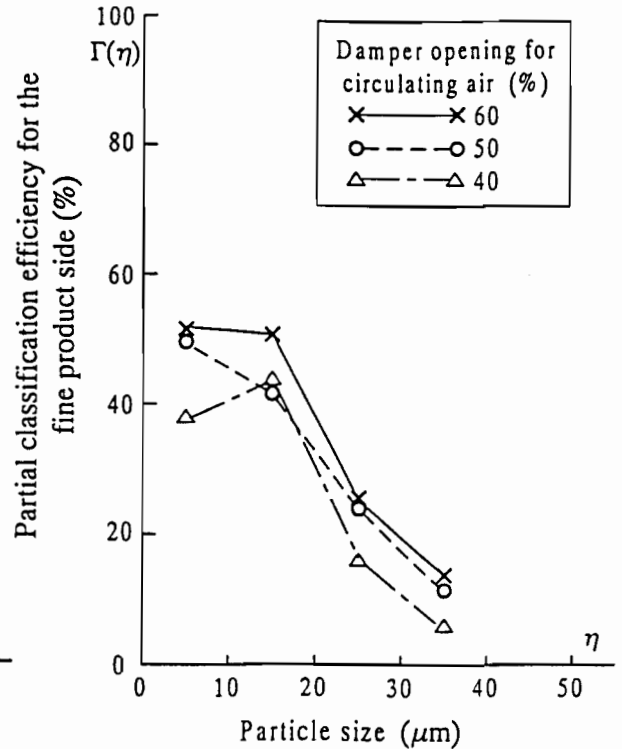


図 3.9 ダンパ開度変化による部分回収率特性

3.2.3 閉回路ボールミル粉碎系の線形摂動モデル

3.2.1 で述べたモデルの基本式を一つの定常動作点回りで線形化して線形摂動モデルを求め、これに前節の実験結果を利用してそのモデル内の各定数を求めれば、閉回路ボールミル粉碎系の動特性モデルを得ることができる。このモデルを利用すれば、各部の流量や比表面積の定量的な動きや、原料投入量・セパレータ回転数の操作量の変更に対する閉回路粉碎系の挙動をシミュレーションする事が出来、制御方法の検討や安定運転の検討に有益である。以下では線形摂動モデルを求め、NO. 1 ミルを対象にモデル内定数を求めた結果を整理して示す。

まず線形摂動モデルを導出する。以下変数 X の定常動作点 \bar{X} からの無次元の摂動量を小文字で $x = \frac{\Delta X}{\bar{X}}$ と表し、この摂動量に対するラプラス変換を使い、結果として(3-2-16)~(3-2-25)式が求められ、これらを閉回路ボールミル系の線形動特性モデルとして利用する。

$$g_{Mi}(s) = \frac{1}{1 + \bar{L}_C} \cdot g_i(s) + \frac{\bar{L}_C}{1 + \bar{L}_C} g_{Mr}(s) \quad (3-2-16)$$

$$z_{Mi}(s) = \chi \cdot z_i(s) + (1 - \chi) \cdot z_{Mr}(s) + \left(\frac{1}{1 + \bar{L}_C} - \chi \right) \cdot \{g_{Mr}(s) - g_i(s)\} \quad (3-2-17)$$

$$g_{Mo}(s) = T(s) \cdot g_{Mi}(s) \quad (3-2-18)$$

$$z_{Mo}(s) = T(s) \cdot \{ \alpha_1 \cdot g_{Mi}(s) + \alpha_2 \cdot z_{Mi}(s) \} \quad (3-2-19)$$

$$g_{Si}(s) = e^{-\tau_{BE}s} g_{Mo}(s) \quad (3-2-20)$$

$$z_{Si}(s) = e^{-\tau_{BE}s} z_{Mo}(s) \quad (3-2-21)$$

$$g_{So}(s) = \beta_{11} \cdot g_{Si}(s) + \beta_{12} \cdot z_{Si}(s) + \beta_{13} \cdot n_s(s) + \beta_{14} \cdot d_s(s) \quad (3-2-22)$$

$$z_{So}(s) = \beta_{21} \cdot g_{Si}(s) + \beta_{22} \cdot z_{Si}(s) + \beta_{23} \cdot n_s(s) + \beta_{24} \cdot d_s(s) \quad (3-2-23)$$

$$g_{Mr}(s) = (1 + \bar{L}_C) / \bar{L}_C \cdot g_{Si}(s) - 1 / \bar{L}_C \cdot g_{So}(s) \quad (3-2-24)$$

$$z_{Mr}(s) = (1 + \gamma) \cdot z_{Si}(s) - \gamma \cdot z_{So}(s) + (\gamma - 1 / \bar{L}_C) \cdot \{g_{Si}(s) - g_{Mo}(s)\} \quad (3-2-25)$$

ただし、 $T(s)$ は (3-2-14) 式で示したミルの混合移動特性を表す伝達関数であり、 $\bar{L}_C = \bar{G}_{Mr} / \bar{G}_i$ は循環比を表す。

また $\gamma = \bar{Z}_{So} \bar{G}_{So} / \bar{Z}_{Mr} \bar{G}_{Mr}$, $\chi = \bar{Z}_i \bar{G}_i / \bar{Z}_{Mi} \bar{G}_{Mi}$, $\alpha_1 = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial G} \right)_{G=\bar{G}} \times \bar{Z}_{Mi} - \left(\frac{\partial f}{\partial G} \right)_{G=\bar{G}} \right] \times \frac{\bar{G}_{Mi}}{\bar{Z}_{Mo}}$,

$\alpha_2 = f(\bar{G}_{Mi}) \frac{\bar{Z}_{Mi}}{\bar{Z}_{Mo}}$, $\beta_{23} = \left(\frac{\partial h_z}{\partial N_s} \right)_{N=\bar{N}_s} \times \frac{\bar{N}_s}{\bar{Z}_{So}}$ 等である。これらを総合して図 3.10

に閉回路ボールミル粉碎系の線形摂動モデルのブロック線図を示した。ただし、 $\chi = \bar{Z}_i \bar{G}_i / \bar{Z}_{Mi} \bar{G}_{Mi}$ は $\bar{Z}_i \ll \bar{Z}_{Mi}$ より“0”としている。ただし、閉回路粉碎系において Make-up 原料の被粉碎性の変化 z_i は対象の主要な外乱であり (3-2-17) 式の第一項は $\chi \doteq 0$ とするものの、別途外乱項としてミル入口比表面積 z_{Mi} にその変化量を付加している。(厳密にはアンドレーフ粉碎速度式 (3-2-4) 内の粉碎速度定数 k が原料の被粉碎性により変化するものとして定式化すべきであるが、帰還回路の影響もあり複雑となるため簡略化してこの様にモデル化した。)

さらに、NO.1 ミルが循環比 $\bar{L}_C = 2.73$ の定常状態で運転中の摂動を考え、実験結果より求めたモデル内各定数の計算値を表 3.3 に整理して示した。

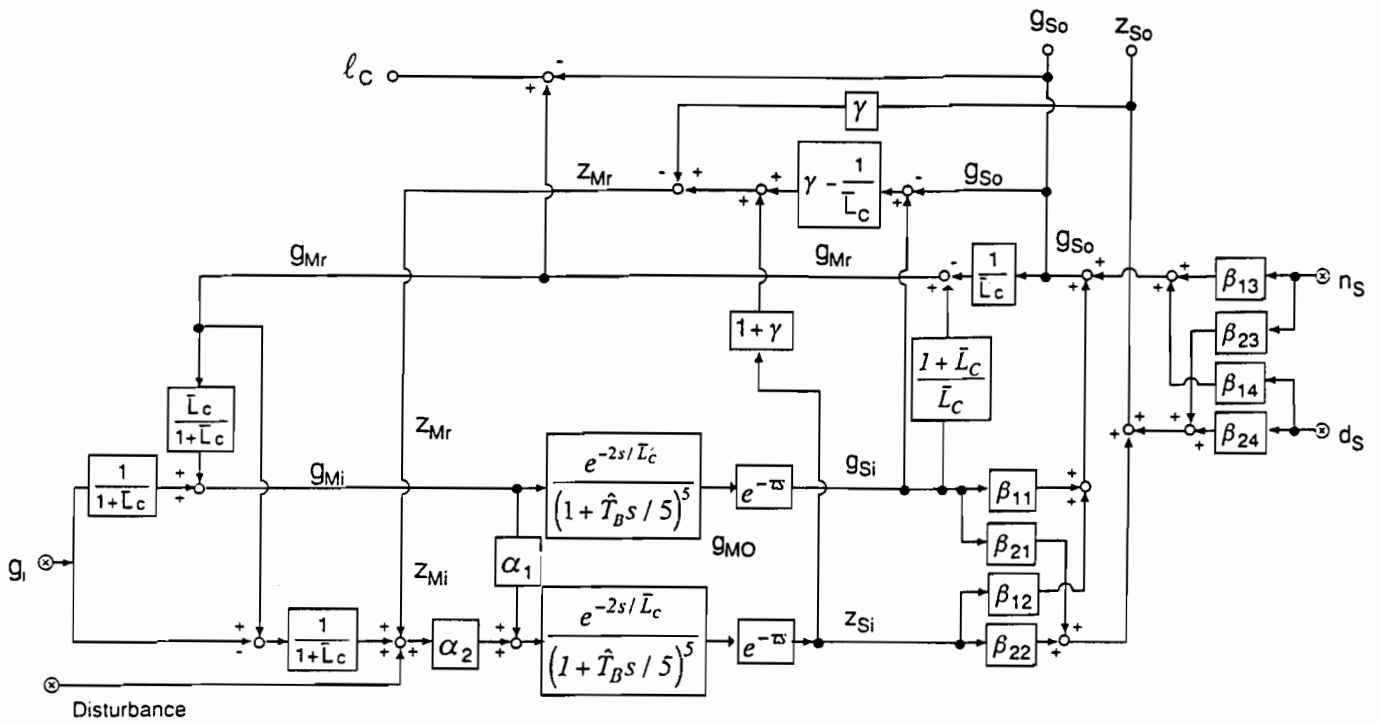


図 3.10 閉回路ボールミル粉砕系の線形モデル

表 3.3 モデル内定数の計算値

各部流量(ton/h)	各部比表面積 (cm ² /g)	時定数,むだ時間(h)	セパレータ特性
$\bar{G}_i = \bar{G}_{So} = 21.33$	$\bar{Z}_{So} = 3170$	$\hat{T}_B = 0.3$	$\beta_{11} = 1.0, \beta_{12} = 0.844$
$\bar{G}_{Mr} = 56.57$	$\bar{Z}_{Mr} = 1059$	$\tau_{BE} = 0.013$	$\beta_{13} = -0.961,$ $\beta_{14} = 0.573$
$\bar{G}_{Mi} = \bar{G}_{Mo} = \bar{G}_{Si}$ $= 77.9$	$\bar{Z}_{Mo} = \bar{Z}_{Si} = 1637$		$\beta_{21} = 0.0, \beta_{22} = 0.238$
$\bar{L}_C = 2.69$	$\bar{Z}_{Mi} = 772$		$\beta_{23} = 0.281, \beta_{24} = 0.0$
ミル粉砕速度関連	γ, χ		
$\alpha_1 = -0.309$	$\gamma = 1.13$		
$\alpha_2 = 0.364$	$\chi = 0.0$		

なお、セパレータの特性を表す、(3-2-22), (3-2-23)式内の定数 β_{ij} の近似計算方法については、付録 3-B に示した。

3.2.4 開ループ動特性のシミュレーション結果

閉回路粉碎系を制御対象として見た場合、制御量としては、安定運転を維持するためのミル流出流量またはミル内滞留量と、製品の品質となる精粉比表面積である。またこの系における主要な外乱は、ミル内部やシュート部での詰まり等の異常状態を除外すれば、原料の被粉碎性の変化が主要なものである。そこで、ミル系の主要な操作量である、Make-up 流量とセパレータ回転数、さらに外乱として Make-up 原料の被粉碎性がステップ状に変化した場合の系の応答をシミュレーションにより求めた。これらの結果を図 3.11, 3.12, 3.13 に示した。なおシミュレーションの方法として、MATRIX_x Version5 を利用し、図 3.10 のブロック線図をそのまま MATRIX_x のモデル化の CAD システムである“System-Build”で構成し、Runge-Kutta-Maison 法による可変メッシュ数値積分機能を利用して数値解を求めグラフ化した。

これらの結果より次のことが言える。

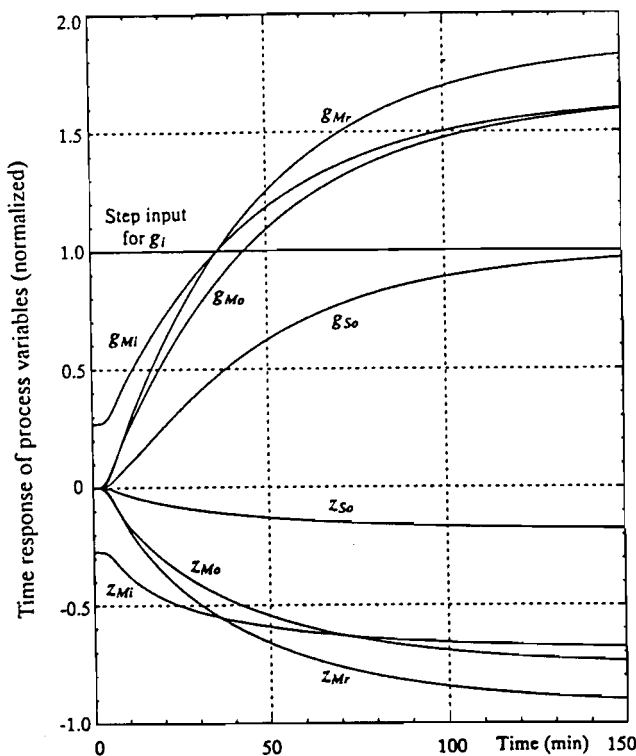


図 3.11 Make-up 流量変化に対するステップ応答

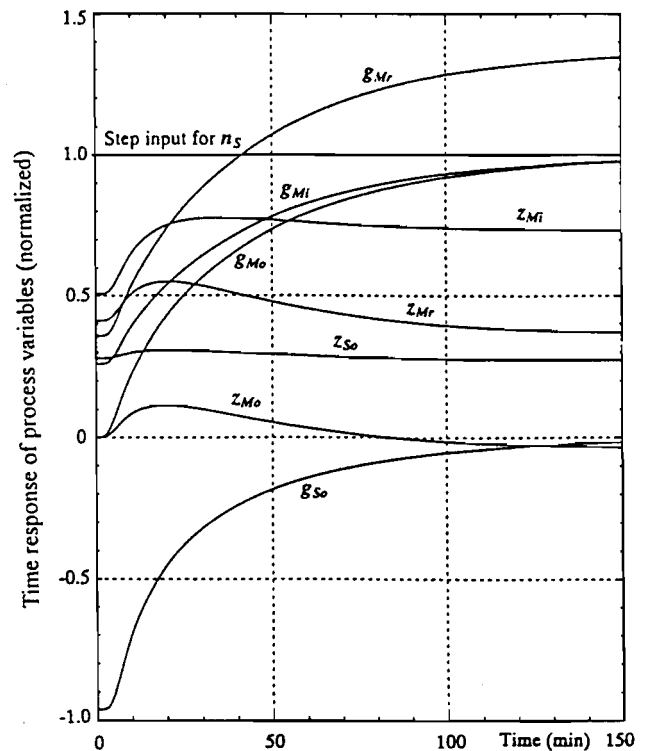


図 3.12 セパレータ主軸回転数変化に対するステップ応答

(1). Make-up 流量の増加が製粉等の各部の流量の増加と比表面積の減少をもたらす。その 95% 静定時間は、ミル単体では別途計算した結果で約 14 分程度だが、閉回路系では戻り粉による正帰還回路のために、約 2 時間を要する。

(2). セパレータ主軸回転数を増加させると、製粉・戻り粉の比表面積は増加し、戻り粉の流量もまた増加する。このためミル流入粉の流量・比表面積はともに増加するが、この変動は相殺しあって、ミル流出粉の比表面積はほとんど変化していない。

(3). 原料の被粉碎性が増加するとミル流出粉が細くなり、戻り粉の流量減少と比表面積の増加を引き起こし、これがミル流入粉に帰還されてミル流出粉は一層細かくなっていく。被粉碎性が 10% ステップ状に上昇すると製品流量は過渡的に一旦約 3% 上昇するが最終的にマスバランスによって元の値に収束していくがその収束には約 2 時間を要している。

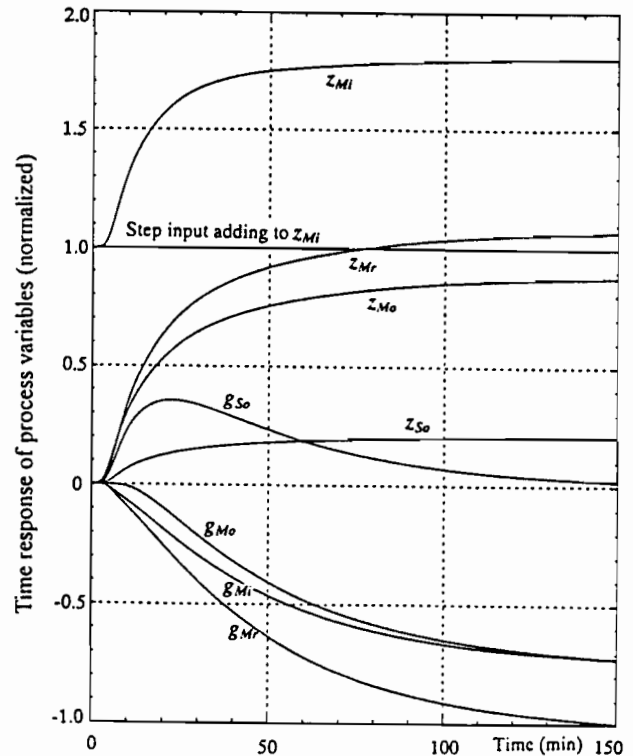


図 3.13 原料の被粉碎性の変化に対するステップ応答

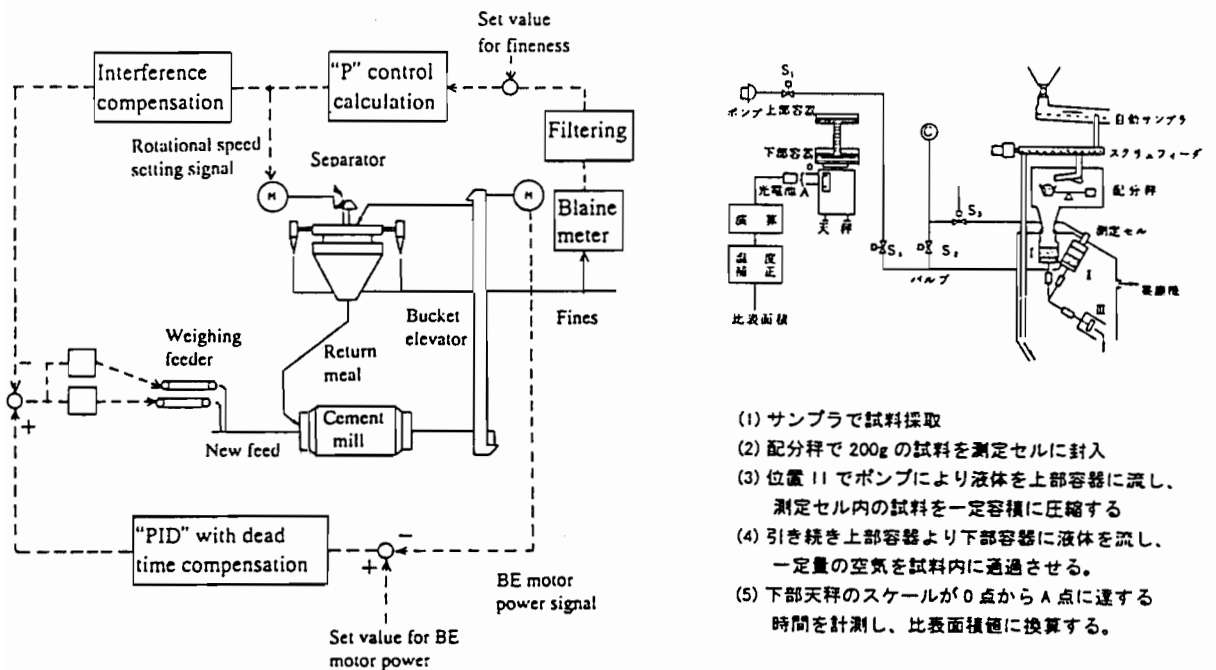
3. 3 閉回路ボールミル粉碎系の制御方法

従来より閉回路ボールミル系に装備する制御方式としては、各部の流量の安定化とミル内での碎料の閉塞を防止する観点から、垂直搬送機の負過電流を一定に保つミル通過流量制御や、インパクトライン流量計を利用してセパレータからの戻り粉を一定に保つ循環流量制御、ミル内の滞留量に反比例するミル本体からの放射音を一定に保つ制御方法等が採用されてきた(神保、1977)。しかしこれらの制御だけでは、原料の被粉碎性が変化した場合に前節のシミュレーション結果からも予測できるように、製品の粒度不十分による品質の劣化や、逆の場合の過粉碎による品質不良と効率の低下を招くこと

になる。我々は、図 3.14 内に示したオンラインで利用できる空気透過法によるブレン計（大森，1978）を採用し、製品比表面積を規定範囲に保ち、品質の安定化と結果としての処理能力増大を計った制御方式（尾崎，1979）の実装を計画し、二章で求めた閉回路ボールミルの動特性モデルを使ってまずシミュレーションによりその効果を検討した。その結果品質の安定化だけでなく閉回路粉砕系の処理能力の向上が期待できることを確認することができた。この結果を実機の仕上げ粉砕プロセスに適用し良好な結果を確認した。以下ではその制御方法とシミュレーション結果、実機での制御結果を説明する。

3.3.1 制御方式

制御方式の系統図を図 3.14 に示す。ミルの安定化のための制御ループとして、ミル通過流量制御にスミスのむだ時間補償付きの PI 制御を採用し、製品比表面積制御系は P 制御と非干渉演算部を持つ構成とした。この非干渉演算は比表面積制御系による主軸回転数の変化によって生じる戻り粉の



- (1) サンプラで試料採取
- (2) 配分秤で 200g の試料を測定セルに封入
- (3) 位置 II でポンプにより液体を上部容器に流し、測定セル内の試料を一定容積に圧縮する
- (4) 引き続き上部容器より下部容器に液体を流し、一定量の空気を試料内に通過させる。
- (5) 下部天秤のスケールが 0 点から A 点に達する時間を計測し、比表面積値に換算する。

自動比表面積測定器（ブレンメータ）の構成と原理

図 3.14 閉回路ボールミル粉砕系の制御方法とブレンメータの構成

流量変動が、ミル通過流量制御系の外乱になることをあらかじめ打ち消すために設けている。

3.3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例として投入原料の被粉碎性がステップ状に上昇した場合の応答を図 3.15 に示す。この結果によると、被粉碎性が 10% 上昇するとミルの能力すなわち原料の投入流量を約 6% 自動的に上げ得ることを示している。このことは、比表面積制御系を設置せず負荷制御系のみで運転した場合の図 3.16 に比較し、約 1.5% の処理能力の向上をもたらしている。さらに、負荷外乱として原料の被粉碎性が正規性白色雑音の形で変化した場合の製品比表面積 Z_{so} と操作量としての Make-up 流量 G_i の標準偏差を比較したが、プレーン制御を施さない場合に比較して、製品比表面積 Z_{so} の標準偏差が 65% 減少している。また、非干渉演算部の効果としてこの場合、非干渉演算を含めない場合に比較して 7% Z_{so} の標準偏差を減少させることを確認した。

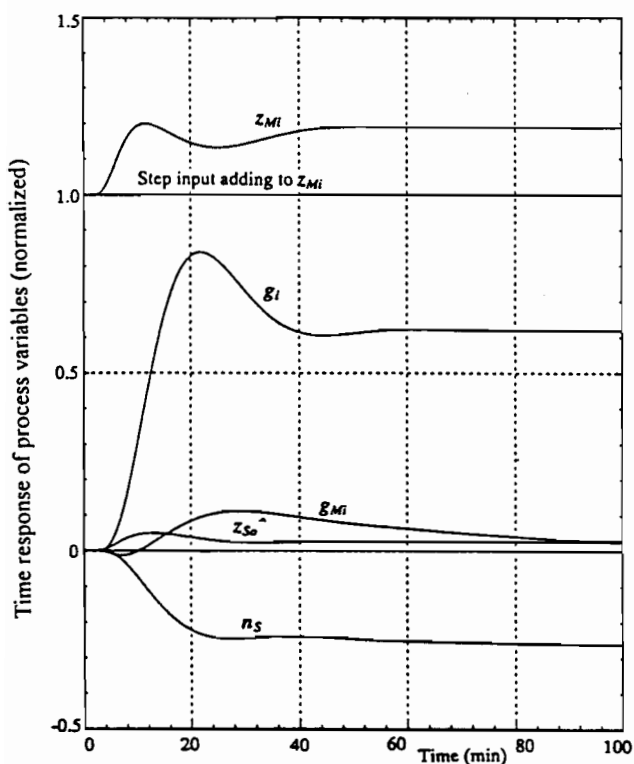


図 3.15 非干渉演算を含む制御系の外乱応答

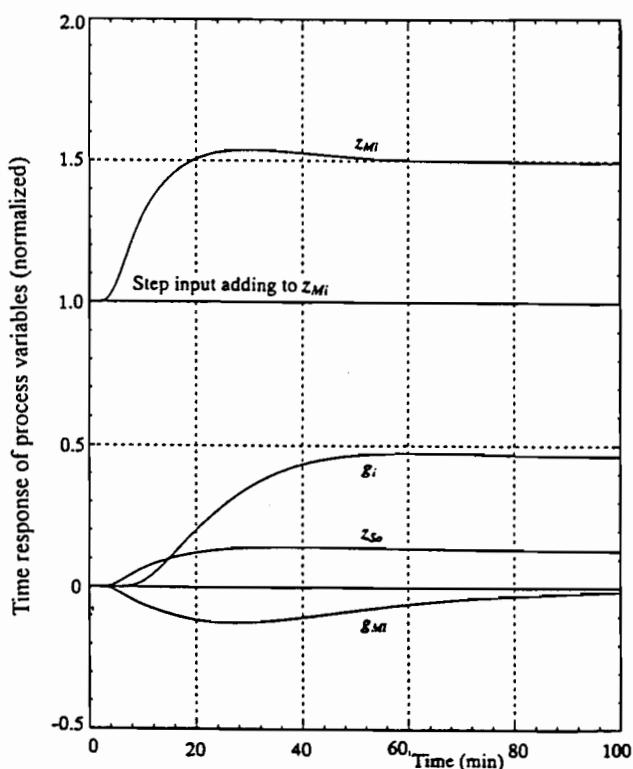


図 3.16 負荷制御系のみの場合の外乱応答

3.3.3 制御方式の実機性能テスト結果

上記のシミュレーションによる確認結果をもとに、130(ton/h)のクリンカ粉砕ミルに本制御方法を適用したがその結果の一例を図 3.17 に示す(杉本、1984)。実機ではシミュレーションと直接対応を取れる様な原料被粉碎性の変化を模擬することは出来なかったが、計算機制御運転期間中一時間間隔で二日間の測定データより、制御量すなわち比表面積の標準偏差を、その設定値 2800(cm^2/g)に対し、 $\pm 18(\text{cm}^2/\text{g})$ 以内に抑えることが出来た。さらに、この期間中に採取したデータの一部を図 3.17 に示したが、原料の被粉碎性が向上した場合にセパレータ主軸回転数を減少させ、その結果として負荷制御系の機能により最終的に 8(ton/h) {130(ton/h)の定格処理量に対し約 6% }の処理能力を向上させ得ることが分かった。なお、実機の計算機制御の制御周期は負荷制御系 5 分、比表面積制御系は 30 分である。また比表面積の測定は 2 分間隔で行い、測定誤差の影響を除くため 30 分間 15 回の分析値の平均値を制御量として利用している。この実機確認結果から、本制御方法はミルの安定運転だけでなく、粒度の変動を極小化できるとともに、処理能力の向上に寄与することが確認できた。

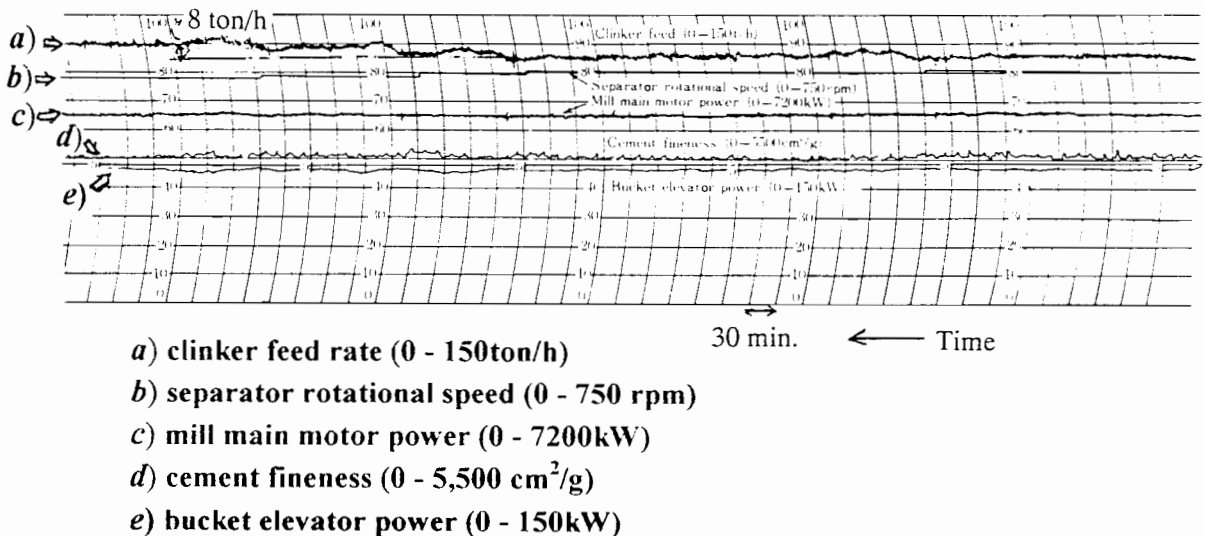


図 3.17 実機での制御性能確認結果

以上の実機実装結果より、我々の制御方式は閉回路粉碎系の安定化のみならず、製品比表面積の均一化とその結果として粉碎効率の向上に寄与し閉回路粉碎系運転の現状を十分改善し得る方式であると言える。

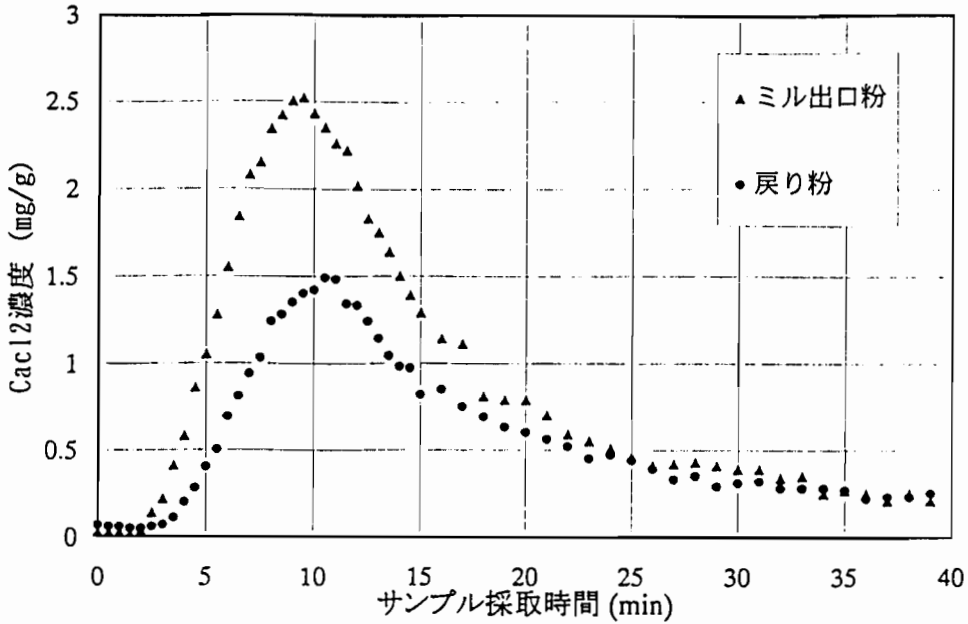
3. 4 結 言

第三章ではセメントプラントの原料粉碎と仕上げ粉碎の二つの部門に利用されている閉回路ボールミル粉碎プロセスに対して、品質としての製品粒度の均一化と粉碎効率の向上を目的とした制御方式の検討を行うために、特にその動特性に着目した数式モデルを提示し、定常運転状態からの摂動量に対して線形動特性モデルを示した。さらにこのモデルを利用し、閉回路ボールミル粉碎系における外乱すなわち原料の被粉碎性が変化した場合や、操作量としての Make-up 流量、セパレータ主軸回転数を変更した場合の各部の重量流量と比表面積の変化およびそれらの相互干渉についてシミュレーションにより示した。さらにこの結果をもとに循環負荷制御と比表面積制御を構成し、かつそれらの制御系の間干渉をあらかじめ補償する非干渉演算を含めた制御方法を提示し、シミュレーションによる粉碎効率の向上の確認結果と実機プラントでの結果を説明した。結論として製品の比表面積の安定化を実現するとともに、同一条件での処理能力すなわち粉碎効率を数パーセント向上できることを確認した。

これらの実績を踏まえ、今後の課題としては 3. 2 節で示したマスバランスと表面積バランス式をそのまま利用し、付録 3-C に提示した粉碎速度とセパレータの分級特性の非線形特性を考慮したモデル式を利用し、非線形動特性モデルを開発することである。このようなモデルが開発できれば、より精度の高い制御方法の検討や広範囲にわたる静特性の算定に利用できると考えられる。

〈付録 3-A〉 ミル内滞留時間の計算方法

実際に 30 秒間隔で取り出したミル出口と戻り粉の試料の $CaCl_2$ 濃度の分析結果の一例を付図 3.1 に示す。



付図 3.1 一号ミル試料の $CaCl_2$ 濃度分析結果

付図 3.1 のデータよりミル入口・出口間のインパルス応答を求めるには、付図 3.2 に従って連続系を離散近似して求める。

$$HG(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = (1 - z^{-1}) \cdot Z[G(s)/s]$$

より

$$Z[G(s)/s] = \frac{Y(z)}{X(z) \cdot (1 - z^{-1})}$$

$$= \frac{Y(z)}{X(z)} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} z^{-k} \right\} \quad (3A-1)$$

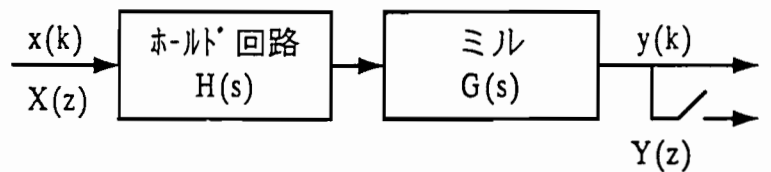
$$Y(z)/X(z) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j \cdot z^{-j}$$

ここで、

$$Z[G(s)/s] = \sum_{j=0}^{\infty} h_j \cdot z^{-j}$$

とおき、(3A-1)に代入し係数

を比較すると、



$x(k), y(k)$: ミル入口・出口 $CaCl_2$ 流量

付図 3.2 入出力の離散系表示

$$h_j = \sum_{i=0}^j c_i, \quad (3A-2)$$

$$c_i = h_i - h_{i-1}, \quad c_0 = h_0$$

h_j は定義より対象のステップ応答の離散値である。一方インパルス応答の離散値である c_i は下記(3A-3)式で表すことができる。

$$c_i = \int_{(i-1)\Delta T}^{i\Delta T} g(\tau) \cdot d\tau \cong \Delta T \cdot g\left\{\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta T\right\} \quad (3A-3)$$

c_i は、入出力の離散値より下記で逐次求めることができ、従って(3A-3)式より対象のインパルス応答 $g(t)$ の離散値を求めることができる。

$$c_0 = \frac{y(0)}{x(0)}$$

$$c_1 = \frac{\{y(\Delta T) - x(\Delta T) \cdot c_0\}}{x(0)}$$

$$c_2 = \frac{\{y(2\Delta T) - x(\Delta T) \cdot c_1 - x(2\Delta T) \cdot c_0\}}{x(0)}$$

$$\vdots$$

$$c_i = \frac{\left\{y(i\Delta T) - \sum_{k=0}^{i-1} x((i-k)\Delta T) \cdot c_k\right\}}{x(0)}$$

以上の準備のもとに滞留時間分布を求める。 $x(t)$ としてミル流入の CaCl_2 流量、 $y(t)$ をミル出口の CaCl_2 流量とすれば、式 (3A-3)より滞留時間分布を求めることができる。一方測定値は戻り粉とミル出口の CaCl_2 濃度であり、これらの離散値を $x_c(k), y_c(k)$ と表記し、ミル通過流量を \bar{G} (ton/h)とすると

$$x(k) = \frac{\bar{L}_c}{1 + \bar{L}_c} \cdot \bar{G} \cdot x_c(k) \quad (3A-4)$$

$$y(k) = \bar{G} \cdot y_c(k) \quad (3A-5)$$

より、 $x(k), y(k)$ を計算することができる。ただし、 \bar{L}_c は CaCl_2 を投入した運転状態の循環比であり、別途急停止後掻きだしたバケットエレベータの碎料の量より推算できる値である。また、 $t=0$ での CaCl_2 の投入量 $x(0)$ [kg/h]は、

$$x(0) = \frac{\text{CaCl}_2\text{の投入量 [kg]}}{\text{サンプル間隔 [h]}} \quad (3A-6)$$

より求めることができる。以上が滞留時間分布の計算方法である。

〈付録 3-B〉 セパレータ特性 β_{ij} の計算方法

これらの定数を求める為の実験として、例えば流入粉の流量と比表面積を独立に変化させることが必要となるが、この様な実験は一般的に不可能である。そこで他の実験結果より下記の手順でモデル内定数を推定した。但し、流入粉の粒度分布は実験結果より、 $R = 100 \exp(-b \cdot \eta^{1.22})$ の Rosin-Rammler 分布に従うものとした。

1).セパレータ流入粉の変動係数 ($\beta_{11}, \beta_{21}, \beta_{12}, \beta_{22}$)

流入流量が変化しても分級率曲線は変化しないと仮定し、流入粉の比表面積が一定の場合は、図 3.5 の線形関係より粒度分布も変化しないと仮定する。これらの条件より、 $\beta_{11}=1.0, \beta_{21}=0$ を得る。次に流入粉の比表面積のみが変化した場合の算出手順を下記する。

- ①.動作点近くで Z_{si} を複数点とる。
- ②.図 3.5 より対応する粒度分布の $20\mu\text{m}$ 残分を求める。
- ③.セパレータ流入粉の Rosin-Rammler 分布を定める。
- ④.この流入粉に対し、動作点でのセパレータ分級率曲線より精粉の $20\mu\text{m}$ 残分と循環比を求める。
- ⑤改めて図 3.5 より対応する精粉比表面積を求める。

以上より、 β_{12}, β_{22} を求めることができる。対象とした動作点での計算結果は、 $\beta_{12}=0.844, \beta_{22}=0.238$ であった。

2).セパレータ操作条件の変動係数 ($\beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{14}, \beta_{24}$)

セパレータ流入粉の粒度分布を動作点の一つに固定し、実験結果より求めた回転数、ダンパ開度変化による分級率曲線に従い、上記手順②—⑤によって、求めることが出来る。結果は、 $\beta_{13}=-0.961, \beta_{14}=0.573, \beta_{23}=0.281, \beta_{24}=0.0$ である。

〈付録 3-C〉 閉回路ボールボールミル粉碎プロセスの非線形モデル

3. 2 節では、閉回路ボールミル系のマスバランスと比表面積バランスの式を (3-2-1) 式から(3-2-13)式で与え、これらの式を定常運転状態からの摂動量を対象に線形動特性モデルを求めたが、粉碎速度式と分級特性に関し

てより厳密な非線形モデル式を与えておけば、今後より厳密な非線形動特性計算、さらには閉回路粉碎系の部分負荷時の静特性計算にも利用できる。そこでこれらの特性について以下に整理する。

1 粉碎の基礎式

開回路および閉回路に係わらずボールミルの粉碎過程を表す基礎式を以下に示す。ボールミル内碎料の粒度分布を、粒径 η に対する密度関数 $f(\eta)$ とし、粉碎によるその動的变化を考える。動的な基礎式は、次の (3C-1) 式で与えられる (例えば Keviczky, 1989)。

$$\frac{df(\eta)}{dt} = -k(\eta) \cdot f(\eta) + \int_0^{\eta_{\max}} B(\eta, \zeta) k(\zeta) d\zeta \quad (3C-1)$$

ただし、 $k(\eta)$ はミル内の粉碎速度を表わす選択関数、 $B(\eta, \zeta)$ は粒径 ζ の碎料が粒径 η になる確率を表す粉碎分布関数 (Breakage function) と呼ばれている。

(3C-1) 式を粒径の分割範囲 i で離散表示する。すなわち直径 η_i と η_{i-1} の篩目 (篩目の粗い側より番号付けする。すなわち $\eta_i < \eta_{i-1}$) の間に入る重量分率を f_i とすると次式で表わせる (Olsen, 1972 または Keviczky, 1989)。

$$\frac{df_i}{dt} = -k_i f_i + \sum_{j=1}^i B(i, j) k_j f_j \quad (3C-2)$$

$B(i, j) k_j f_j$ は、 j 番目の粒径範囲の碎料が i 番目の範囲の粒径に変わる量を表わしている。この分布関数 $B(i, j)$ に対して次の仮定を置くのが一般的である。

(1) $B(i, j)$ は粒径 d_j, d_i の絶対値には関係せず、粒径比 d_j/d_i のみに関係する。

(2) 細かい粒子が凝縮等により粗くなることはない。

以上の仮定を置くと $B(i, j)$ は下記の形となる。

$$\begin{aligned} B(i, j) &= 0 & , j > i \\ B(i, j) &= b_{i-j} & , i \geq j, i < n \\ B(n, j) &= b_{n-j} = \sum_{k=n-j}^{\infty} b_k \end{aligned} \quad (3C-3)$$

ここで粒度分布のベクトル表示 $f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ を利用すると、

$$\frac{df}{dt} = -(I - B) \cdot K \cdot f \quad (3C-4)$$

$$\text{ここに、} K = \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_n] \quad (3C-5)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & b_0 & 0 \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n-1} & b_{n-2} & \dots & b_0 \end{bmatrix} \quad (\text{下三角行列}) \quad (3C-6)$$

すなわち粒度分布の離散表現ベクトル f を状態変数とする状態方程式の形でミル内の粉碎過程を表わすことが出来る。 B, k が時間に関して不変な定数の場合は、(3C-4) 式の解は良く知られている様に次式となる。

$$f(t) = f(0) \cdot \exp[-(I - B) \cdot K \cdot t] \quad (3C-7)$$

2 閉回路ボールミルの粉碎速度式

次に閉回路ボールミルプロセスにおいて粉碎によりボールミル入口の碎料の粒度が出口でどのように変わるか、またどのような要素が影響するかを考える。1項に基づき閉回路ボールミルに対し、粉碎分布関数と選択関数の形を仮定し(3C-1)式の積分方程式を解く方法や、(3C-7)式を行列演算で解く方法があるが、いずれも分布関数や選択関数の選定がポイントであり、その定まったものは無い。これはこれらの関数を理論的に求めることが困難であったり、実機の実験データを得ても粉碎分布関数と選択関数を分離して決めることが難しいためである(伊藤、1995a)。しかし、これらの関数の形を仮定し(3C-1)式を解くことにより、実験式として提示され、ボールミル粉碎に広く適用されているアンドレーフの粉碎速度式(3C-8)式が結果として得られることが示されている。

$$\frac{R(\eta, t)}{R(\eta, 0)} = \exp(-k' t^m \eta^n) \quad (3C-8)$$

ただし、 $R(\eta, \cdot)$ は粒径 η 以上の粒子の割合を表わす累積分布関数である。伊藤(伊藤、1995a)は、閉回路ボールミルによる仕上げ粉碎の多くの運転実績に適合する上記の粉碎速度式の具体的な形を次式で提示している。

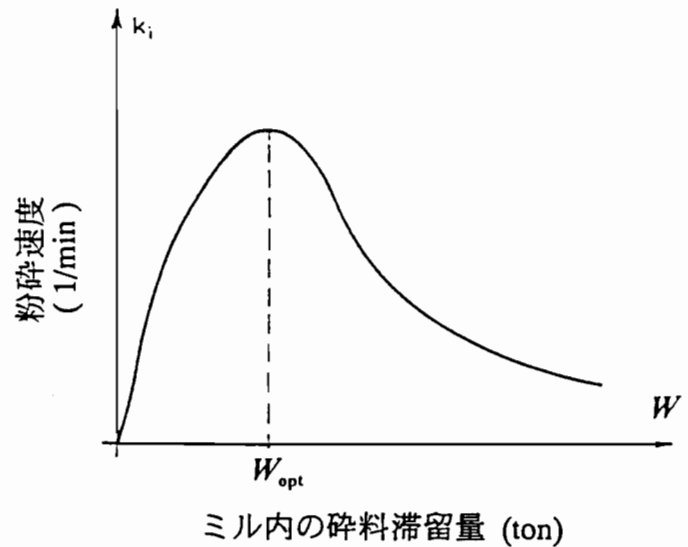
$$\frac{R(\eta, t)}{R(\eta, 0)} = \exp\left\{-3.56 \times 10^{-2} \xi \cdot t \cdot \left(\frac{\eta^n}{22.5}\right)\right\} \quad (3C-9)$$

$$\xi \approx 1 - \exp\left(-\frac{\eta^2}{1.85}\right) \quad (3C-10)$$

ただし、 n は粒度分布関数のべき指数、例えば(3-2-15)式の Rosin-Rammler 分布式の η に対するべき指数、 ξ は $4\mu\text{m}$ 以下の微粉域での粉碎速度の補正項である。

以上の粉碎速度式は仕上げ粉碎ミルの定常運転状態の各種測定結果より得られた関係式であるが、実際のミル内の粉碎を考える場合ミル内の碎料の滞留量に応じて粉碎速度が変わるとされており（田中、1968）、付図 3.3 に示した様に滞留量が一定値を超えると極端に粉碎効率が低下することが知られている。この特性を $\frac{\alpha W}{W_{OPT}^2 + W^2}$ の形で粉碎速度式の補正項として追加することが提示されている

（Keviczky, 1989）。



付図 3.3 ミル内滞留量と粉碎速度

この補正項を利用すると(3C-9)式は次式のように滞留量の変化による粉碎効率が変化することを考慮した、より一般的な粉碎速度式として利用できる。

$$\frac{R(\eta, t)}{R(\eta, 0)} = \frac{\alpha W}{W_{OPT}^2 + W^2} \exp\left\{-3.56 \times 10^{-2} \xi \cdot t \cdot \left(\frac{\eta^n}{22.5}\right)^{-n}\right\} \quad (3C-11)$$

3 セパレータ分級特性の実験式

セパレータの分級特性についても多くの報告がなされているが、セメントプラントで一般的に利用されている三種のセパレータ {サイクロンエアークレータ、籠型ロータ内蔵式エアークレータ (商品名 O-Separator)、スターテバンド式セパレータ} に共通して利用できる下記の実験式が提示されている (伊藤、1995b)。

$$\Gamma(\eta_p) = \frac{(1 - \vartheta) \left(\frac{\eta_{pc}}{\eta_p} \right)^2 \exp \left[\pi \left\{ 1 - \left(\frac{\eta_p}{\eta_{pc}} \right)^2 \right\} \right]}{1 + \left(\frac{\eta_{pc}}{\eta_p} \right)^2 \exp \left[\pi \left\{ 1 - \left(\frac{\eta_p}{\eta_{pc}} \right)^2 \right\} \right]} \quad (3C-12)$$

ただし、 ϑ は分級を受けず無条件に粗粉側へ排出される割合すなわち分割率、 η_{pc} は 50% 分離粒径、 π は分級の鋭さを表わすパラメータであり、 ϑ と π についてはセパレータの種別とサイズに応じて以下の実験式が与えられている。

サイクロンエアークレータ：

$$\begin{aligned} \vartheta &= 1 - \exp(-190 \times \frac{G_{Si}}{Q_a}) \\ \pi &= 7 \times \left\{ 0.60 \times \exp \left(-228 \times \frac{G_{Si}}{Q_a} \right) \right\}^{3.6} \end{aligned} \quad (3C-13)$$

O-セパレータ

$$\begin{aligned} \vartheta &= 1 - \exp(-36 \times \frac{G_{Si}}{Q_a}) \\ \pi &= 7 \times \left\{ 0.80 \times \exp \left(-94 \times \frac{G_{Si}}{Q_a} \right) \right\}^{3.6} \end{aligned} \quad (3C-14)$$

ただし、 G_{Si} 、 Q_a は各々セパレータへ投入する碎料流量 [ton/h] と分級用空気の体積流量 [m³/h] である。

以上に示した粉碎速度式(3C-11)とセパレータの分級特性(3C-13)または(3C-14)式を利用し、本文と同様な考えである粒度範囲に相当する碎料のマスバランスを考えることにより、閉回路ボールミル粉碎プロセス各部の粒度構成を粉碎と分級に関する非線形特性を考慮した上で計算することが出来る。

参考文献

- (伊藤光弘、1995a)：“セメント粉砕用チューブミルにおける粉砕速度式”，
化学工学論文集, 21, 657-665
- (伊藤光弘、1995b)：“セメント用大型閉回路粉砕系における粉砕速度
パラメータと分級効率が粉砕能力に及ぼす影響”，化学工学論文集,
21, 666-673
- (川口寅之輔、1964) 田村皖司：計量管理技術双書(31)-粒度-, p.61-70,
コロナ社
- (Keviczky, L., 1989) M. Hilger and J. Kolostori : Mathematics and Control
Engineering of Grinding Technology – Ball Mill Grinding –, p.13-31,
Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Netherlands
- (神保元二、1977) 浅井信義：“粉砕”、オートメーション、22-9, 35-40
- (三輪茂雄、1965)：“閉回路粉砕過程の実験的研究”，化学工学、29, 113-118
- (Olsen, T. O, 1972) and S. R. Krogh：“Mathematical Model of Grinding at
Different Conditions in Ball Mills” Trans. AIME. 252, 452-457
- (小沼栄一、1968)：“閉回路チューブミルにおける被粉砕物の滞留時間
分布の解析”，化学工学、32, 1026-1033
- (大森豊明、1978) 編：センサ実用便覧、富士テクノシステム、p.793-794
- (尾崎賢二、1979)：“閉回路粉砕系の制御方法”，工業所有権広告
第 955742 号
- (尾崎賢二、1998) 中川修、庵原滋：“閉回路ボールミル粉砕系の動特性
解析と制御”，化学工学論文集、24, 5-11
- (Rajamani, R., 1991) and J. A. Herbst：“Optimal Control of a Ball Mill Grinding
Circuit –I. Grinding Circuit Modeling and Dynamic Simulation”，
Chemical Engineering Science, 46, 861-870
- (杉本博、1975) 尾崎賢二、中川修、鈴木武司、村尾三樹雄、橋本真一、
永田修：“閉回路粉砕系の解析と制御について”，川崎技報、59, 1-8
- (杉本博、1984) 岡本健三、朝倉建介、庵原滋、植田真、睦好英司、平石純
一、三浦克也：“計算機制御の実セメントプラントへの適用（その
2）”，川崎技報、85, 82-90

- (田中達夫、1968) : 粉体プロセス入門、工学図書出版、p.117
- (Tomaru, T, 1986) K. Miyamoto, H. Amemoto and K. Akaboshi : “The Characteristics and Self-stabilizing Control of the Grinding Mill Process”
Preprint of IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, p. 42-47, Tokyo, Japan
- (和田憲造、1993) 浜田淳一、中村浩彦、伊藤宏、三輪敦史、森本映治
“粉碎システムの最適運転”, 日本機会学会論文集 59, C560
1109-1114

第四章 混合プロセスの確率システム解析と プラント計画への応用

4. 1 はじめに

二章で説明した様にセメント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。普通ポルトランドセメントの場合では、

$$\text{水硬率： } HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}, \quad \text{珪酸率： } SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3},$$

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

の三つの組成比率を管理対象とし、例えば、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（セメント協会、1978）。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出来れば、プロセス計画上きわめて有効である。しかし、Bed Blending (Gerstel, 1977) やホモジナイジングサイロ (Röben, 1984) の単独の混合特性を求めた例はあるが、これらのプロセスを組み合わせた総合的な予測法に関する報告は見当たらない。本研究では、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、本法の有効性を立証する。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、およびその組み合わせ特性に対する検討結果について説明する。

4. 2 節では、まず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、山場で採掘される原料の組成変動過程を、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る表現し、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。次に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、粉碎ミル、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、前述のパワースペクトル密度関数と合わせて、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出来ることになる。

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ij}(\omega) \cdot |G_{HB}(j\omega) \cdot G_{GM}(j\omega) \cdot G_{BS}(j\omega)|^2 d\omega \quad (4-1-1)$$

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とともに、以上の手法による予測計算と実機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。

4. 3節では、混合プロセスの初期計画に上記の解析方法を適用し、各混合プロセスを如何に組み合わせるかにつき説明する。特に予混合プロセスでは層積方式と流し積み方式、原料粉碎系にはボールミルと縦型ミル、混合サイロにはバッチ式と連続式混合サイロを採り上げ、これらを組み合わせた場合の組成変動の予測値を計算し、設備の要不要を含めて検討した結果につき報告する。

さらに4. 4節では、調合制御の対象である混合プロセスが4. 2節の解析結果として正規性有色外乱を含む多変数確率制御系であることを説明し、次章における調合制御系への適応制御系の構成への導入とした。

4. 2 混合プロセスの確率システム解析（尾崎、1998）（Ozaki, 1996）

4.2.1 混合プロセスのモデル化の概要

図2.1に示したセメントプラントの代表的プロセスフローにおいて、山場からキルンへ投入するまでの各プロセスが原料の均質化機能を有し、これらのプロセスに加え、原料ミルプロセスに装備する調合制御装置を含めて一般的に混合プロセスと呼んでいる。二章で説明した様に使用する原料は、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、粉碎ミル前に

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。

(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。

- (a). 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ものとする。主成分とは、石灰石中の CaO 、粘土質原料中の SiO_2 、珪石中の SiO_2 、鉄分原料中の Fe_2O_3 である。
- (b). 各原料中の二次成分含有量は、主成分含有量による一次回帰式で表わされるものとする。
- (c). 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であるとする。
- (d). 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定常状態からの摂動による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。

次に上記の確率的な仮定 (a)~(c) の検証結果を説明する。

(2) 仮定の検証・検討

(a) 主成分組成変動の確率分布 (杉本、1985)

解析に使用したボーリングデータは、三ヶ国四地区を対象にし、石灰石 1903 点、粘土質原料 489 点のデータであり (Naigai Consultant, 1974) (Holderbank, 1978)、表 4.1 に四成分の平均組成と標準偏差を各地区毎に示した。さらに石灰石、粘土質原料の各々の主成分である $CaO\%$ 、 $SiO_2\%$ の度数分布を求めた。図 4.1 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、純粹石灰石の CaO 含有量 56% を限界値とする Rayleigh 分布に近いことが判る。しかし、目的とする配合済み原料組成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。一方、図 4.2 はある一地区で使用する粘土原料中の $SiO_2\%$ 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言える。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

表 4.1 山場ボーリングデータの平均値と標準偏差

Plant Site	Number of Samples	Mean contents / standard deviations (%)			
		upper : Limestone, lower : Clay material			
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
ENFIDA /Tunisia	231	50.3/2.46	6.18/3.08	1.26/0.57	0.565/0.248
	199	24.2/8.27	30.5/8.42	12.0/3.01	5.03/1.25
EL-ASNAM /Algeria	451	52.8/1.10	2.28/1.08	0.557/0.37	0.702/0.463
	104	1.52/0.696	56.4/3.01	20.0/1.59	7.86/0.932
KUBISA /Iraq	412	53.3/1.89	1.58/2.24	0.685/0.804	0.186/0.36
	186	28.8/5.86	26.1/4.40	7.27/1.51	4.29/0.913
AL-TAMIN /Iraq	809	54.5/1.03	0.755/0.662	0.124/0.114	0.210/0.390
Overall for 4-districts	1903	53.3/2.00	1.95/2.35	0.485/0.595	0.365/0.39
	489	21.2/12.2	34.3/13.2	11.9/5.22	5.35/1.72

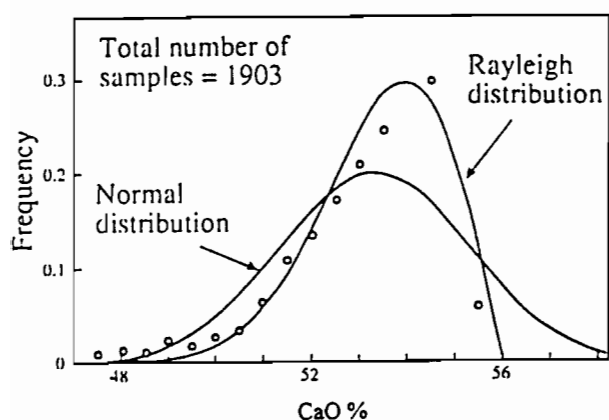


図 4.1 石灰石中の CaO 含有量の度数分布

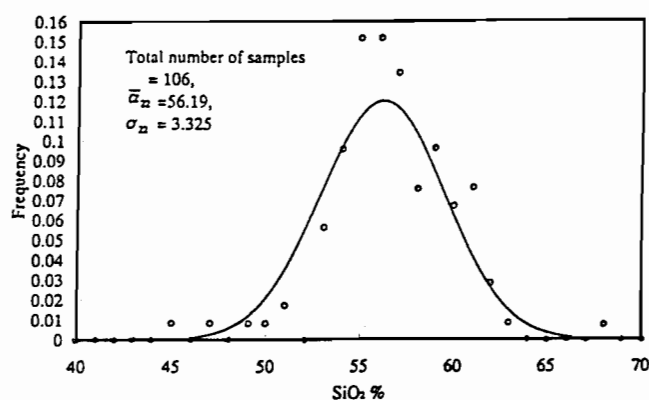


図 4.2 粘土質原料中の SiO₂ 含有量の度数分布

限定理（宮川、1969）の現れとして正規分布に近づいていると考えられる。

(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。そこで当社がプラントを納入したチュニジア国 Enfida 地区の石灰石 231 点、粘土質原料 199

表 4.2 石灰石と粘土質原料 (Marl) 組成の回帰分析結果

		Mean content \bar{a}_{ij}	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	-0.55	-0.46	-	-	-	-
	SiO ₂	6.18	-	1	0.41	0.32	67.65	-1.22	0.95	0.684
	Al ₂ O ₃	1.26	-	-	1	0.88	7.66	-0.127	0.30	0.478
	Fe ₂ O ₃	0.57	-	-	-	1	2.90	-0.047	0.21	0.220
Marl	CaO	24.2	1	-0.99	-0.92	-0.94	54.06	-0.977	0.99	0.872
	SiO ₂	30.5	-	1	0.89	0.91	-	-	-	-
	Al ₂ O ₃	12.0	-	-	1	0.96	2.22	0.320	0.80	1.36
	Fe ₂ O ₃	5.03	-	-	-	1	0.91	0.135	0.83	0.510

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表 4.2 に示す。

ただし表内の \bar{a}_{ij} は各成分の平均含有率、R は次式で計算した一次回帰後の重相関係数である。

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

この値が”1”に近いほど回帰式が観測値の変動を良く表していると言える。

また σ_R は、回帰後に残る残差の標準偏差を示している (Draper, 1968)。

回帰分析の結果より、含有率 5%以上の成分についてはいずれも一次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、一次回帰が十分成立していることを示しているが、石灰石中の Al₂O₃、Fe₂O₃ について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分かる。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出来るものとし変動の次数の低減を図っている。他の原料である珪石と鉄滓についても一次回帰が成立すると仮定すれば以下の関係式が近似式として成立する。すなわち、四原料各々に対する四元素の含有量 CaO%、SiO₂%、Al₂O₃%、Fe₂O₃%を z_{ij} とし、各原料における主成分 (各原料順に CaO、SiO₂、SiO₂、Fe₂O₃) に対する回帰係数とその定数項を γ_{ij} 、 β_{ij} とおくと、

$$Z(t) = [z_{ij}(t)] = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} & \beta_{24} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} & \beta_{34} \\ \beta_{41} & \beta_{42} & \beta_{43} & \beta_{44} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \gamma_{14} \\ \gamma_{21} & 1 & 1 & \gamma_{24} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} & \gamma_{34} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11}(t) - \bar{a}_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}(t) - \bar{a}_{22} & a_{23}(t) - \bar{a}_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44}(t) - \bar{a}_{44} \end{bmatrix} \quad (4-2-1)$$

(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捉え方が明らかになったが、(4-1-1)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。この変動仕様として、図 4.3 にその概念を示したモデルを考える。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、その平均到着時間間隔を T_{Mj} とする。さらに、各運搬バッチ毎の組成分布は、各々独立に、かつ同一の平均値 \bar{z}_{ij} と分散 σ_{ij}^2 に従

うものとする。この様な変動過程 $v_{ij}(t)$ に対し、 $v_{ij}(t)$ と $v_{ij}(t+\tau)$ を考える。 τ 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、 $v_{ij}(t)$ と $v_{ij}(t+\tau)$ の積の集合平均は、

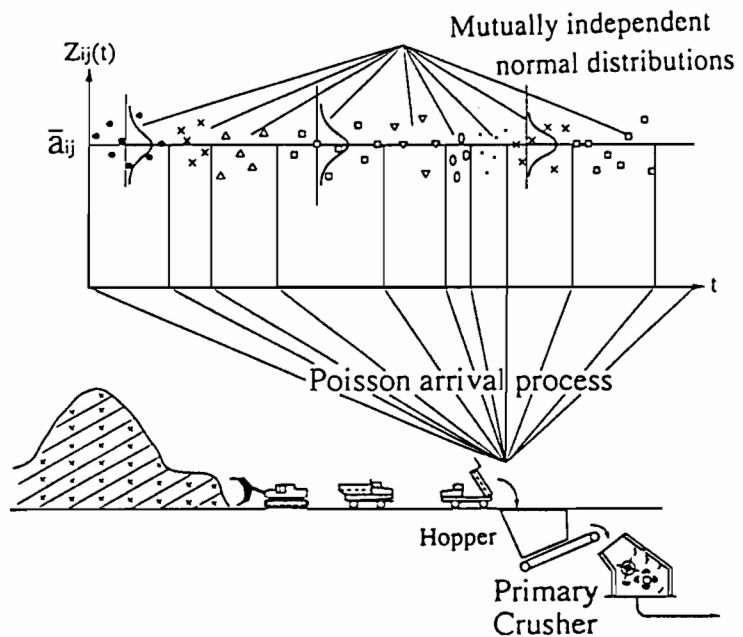


図 4.3 受け入れ原料組成変動の確率過程表現

σ_{ij}^2 であり、バッチが変わる場合は、互いのバッチ間の独立性の仮定より"0"となる。よって、 $v_{ij}(t)$ の自己相関関数は、下記の(4-2-2)式となる。

$$R_{ij}(\tau) = \sigma_{ij}^2 \cdot e^{-\tau/T_{Mj}} \quad (4-2-2)$$

従いパワースペクトル密度関数は(4-2-3)式となる (Papoulis, 1965) (市川, 1965)。

$$\Phi_{ij}(\omega) = \frac{2T_{Mj}\sigma_{ij}^2}{1 + (\omega T_{Mj})^2} \quad (4-2-3)$$

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 (森村, 1975)、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ろ波特性により、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様に分配するかは、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、(4-2-2)、(4-2-3)式は、正規白色雑音在一次の Shaping Filter を通過した確率過程と同型である。

4.2.2 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ジングベッド、閉回路粉碎ボールミル、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、混合設備の組み合わせ計画とあわせて

4.3 節に記載する。

(1) シェブロン方式ホモジナイジングベッドの伝達関数— $G_{HB}(s)$ —

本方式のホモジナイジングベッドは、図 4.4 に示した様に、スタッカーにより N 層の原料を積み付け、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。図 4.4 において、

L : パイル長さ、 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、 N : 積み付け層数、 T_L : 積み付け周期、

Q : 原石供給流量、 ξ : 積み付けと切り出しの時間差、すなわちむだ時間、

$u(t)$: 原石の供給側での組成変動とし、切り出し側での組成変動を $w(t)$ とすると、次の式が得られる。

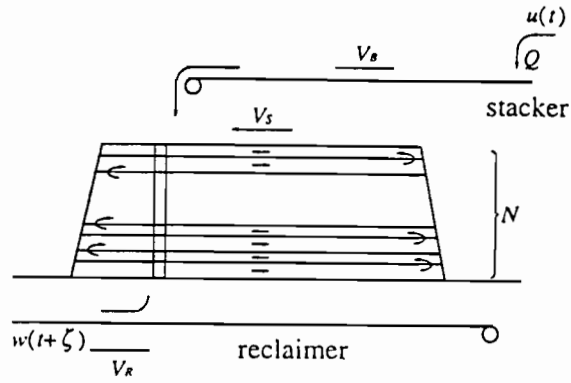


図 4.4 層積ブレンディングの構成

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

ここに、 $\beta = V_f/V_b$ とし、 $Q_f = Q \cdot (1-\beta)$ 、 $Q_r = Q \cdot (1+\beta)$ はスタッカーの進行方向により変わる前進・後進時の層積流量である。このとき、

$$\begin{aligned}
 \sigma_w^2 = R_{ww}(0) &= E\left[\{w(t+\xi) - \bar{w}\}^2\right] = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N/2} \sum_{j=1}^{N/2} \left[(1+\beta)^2 R_{uu}\{2(i-j)T_L\} \right. \\
 &+ (1-\beta^2) R_{uu}\{2\alpha t + 2(i-j-1)T_L\} + (1-\beta^2) R_{uu}\{-2\alpha t + 2(i-j+1)T_L + (1-\beta)^2 R_{uu}\{2(i-j)T_L\} \left. \right]
 \end{aligned} \tag{4-2-5}$$

一方、入り側組成変動が (4-2-2) 式で表現できるとの仮定より、

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

を代入して、次の様に変動分散の減衰比が得られる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_w^2}{\sigma_u^2} &= \frac{1}{N} (1+\beta^2) + \frac{1}{N} (1-\beta^2) C^{1-\gamma} + \frac{1}{N^2} \left\{ 2(1+\beta^2) + (1-\beta^2)(C^\gamma + C^{2-\gamma}) \right\} \\
 &\times \frac{1}{(1-C)^2} \left\{ N(1-C) - 2(1-C^{N/2}) \right\}
 \end{aligned} \tag{4-2-6}$$

ここに、 $C = \exp(-2T_L/T_M)$ 、 $\alpha t = \gamma T_L$ ($0 \leq \gamma \leq 1$)。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、パイル中央付近

における原石の分散の減衰比は、上記で $\beta = 0, \gamma = 0.5$ とおくことにより求められ、その結果は (4-2-7)式である。

$$\frac{\sigma_{ij}^2(out)}{\sigma_{ij}^2(in)} = \frac{1}{N} + \frac{1}{N} e^{-x} + \frac{1}{N^2} \frac{e^x}{(1-e^x)^2} \{N(1-e^{-2x}) - 2(1-e^{-Nx})\} \quad (4-2-7)$$

ここに、 $x = T_L / T_M$ 、 T_M :ダンプトラックの搬送周期である。

この理論式は、分散の減衰に着目すれば、次の一次進み遅れの伝達関数で近似出来る。

$$G_{HB}(s) = \frac{1 + \frac{\sqrt{N}}{2} T_L \cdot s}{1 + \frac{N}{2} T_L \cdot s} \quad (4-2-8)$$

図 4.5 に、一般的な積み付け層数 $N = 400$ の場合の(4-2-7)式と(4-2-8)式の減衰比を图示し、近似が十分成立することを示した。(4-2-8)式と図 4.5 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、ベッドの積み付け周期 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。

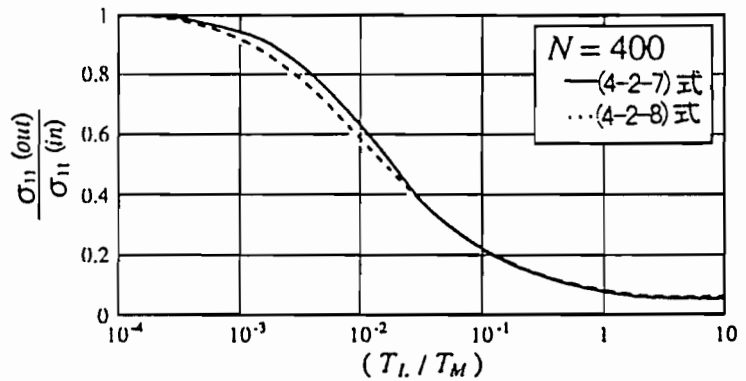


図 4.5 シェブロン方式予混合プロセスの分散減衰特性

(2) 閉回路粉碎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— $G_{GM}^O(s)$ —

3. 2節で閉回路粉碎系において、マスバランスと表面積バランスを考慮した線形摂動モデルによる伝達関数を求めたが、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、閉回路粉碎ボールミルの伝達関数は次式で近似できる。

$$G_{GM}^O(s) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{30 \cdot L_C}\right\}}{(1+L_C)\left(1+\frac{T_B}{5}s\right)^5 - L_C} \quad (4-2-9)$$

ここに、 T_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。

(b). 調合制御を含めたミルの閉ループ伝達関数— $G_{GM}^C(s)$ —

一般に、閉回路粉碎ミルに装備する調合制御システムは、粉碎・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毎にミル前での4原料の配合比を変えているのが一般的である。文献（杉本、1977）（尾崎、1997）に紹介した我々の制御方式を図4.6の調合制御系の全体を模式的に表現したブロック図の中に示した。閉回路粉碎ミルは、(4-2-9)式の通り、高次遅れ系であり、さらにサンプル点までの輸送時間や分析時間等（これらを合わせてそのむだ時間を図4.6に示した様に t_d で表す）を含んでいる。そこで、対象を $f_0 e^{-s t_d} / (1+T_0 s)$ で近似し、スミスのむだ時間補償付きのPI制御を離散時間表示したパルス伝達関数 $G_c^*(z)$ （付録4-A参照）、を HM 、 SM 、 IM いずれの測定値にも同一形式で施して、設定値変化との差による修正目標 ΔHM_T 、 ΔSM_T 、 ΔIM_T を算出し、動的な補償を行っている。さらにこれらの動的補償後の修正目標値に対し、四種の原料配合比の変更による三品質指標の変化の予測値との差の重み付き二乗和が最小となる様な配合比を最適化計算により求めて、次の時点の4原料の配合比を決めている。ただし通常状態で四原料の平均組成の変化が少ない場合は、修正目標 HM_T 、 SM_T 、 IM_T に対する四原料の配合比を逆行列演算で求めることが出来、図4.6に並記したような行列表示による線形系として考えることが出来る。この場合は調合制御を含めた原料ミル系の閉回路伝達関数は次式で近似することが出来る。

$$G_{GM}^C(s) \cong \frac{G_{GM}^O(s)e^{-t_d}}{1+G_{CA}(s)G_{GM}^O(s)e^{-t_d}} \quad (4-2-10)$$

ただし、 $G_{CA}(s)$ は、 $G_c^*(z)$ 内の z を双一次変換した連続系の近似伝達関数で

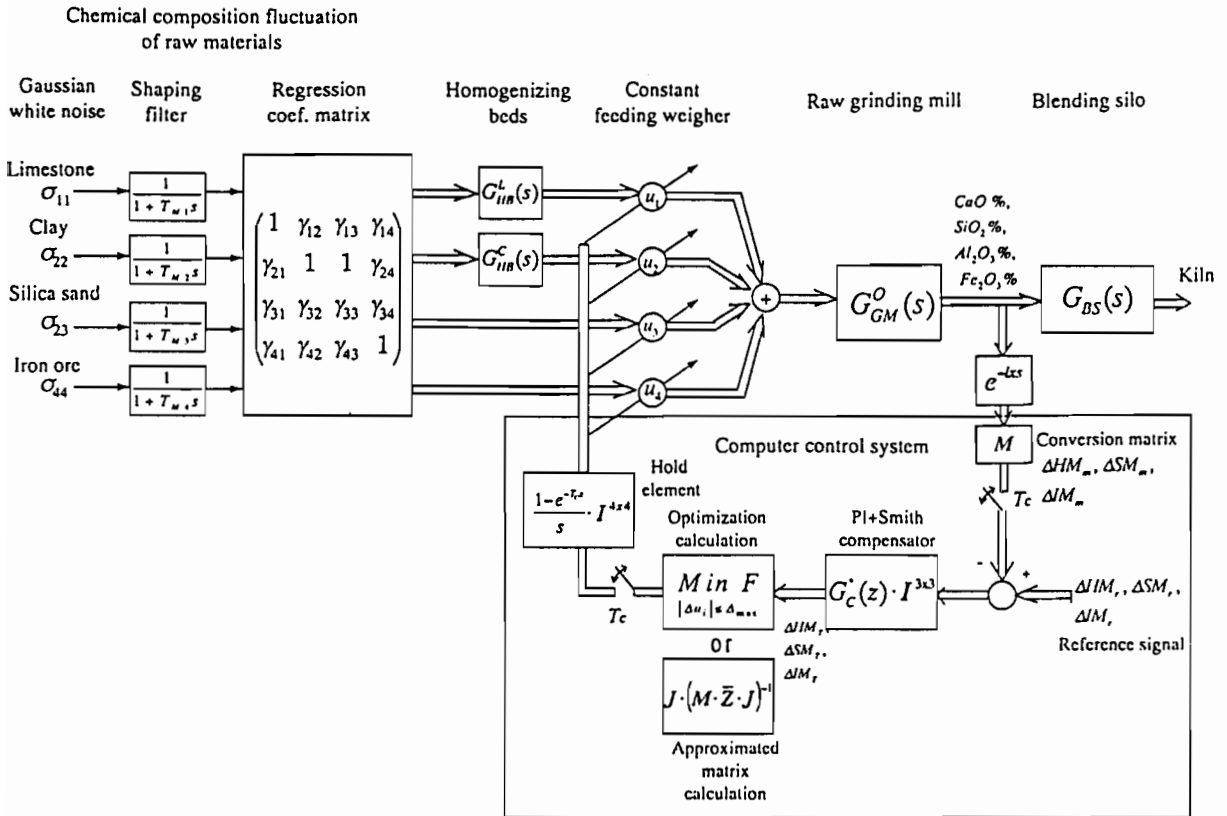


図 4.6 混合・調合プロセスの機能ブロック線図

ある。外乱項の周波数成分の内サンプル周波数（本例では 1 hr）以上の成分は後掲の図 4.8 よりわずかであることよりこの近似は成立する（Middleton, 1991）。なお原料調合制御系の詳細な検討と式の展開は、改めて 4. 4 節に記載した。

(3) 連続式ブレンディングサイロの伝達関数— $G_{BS}(s)$ —

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列モデルで近似することが出来る。このことから付録 4-B に示した様に滞留時間分布の実験データより下記の伝達関数を得ることが出来る。

$$G_{BS}(s) = \frac{e^{-\frac{V_p s}{Q}}}{\left(1 + \frac{V_m}{4Q} s\right)^4} \quad (4-2-11)$$

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量(kg)、 Q

は粉体の重量流量(kg/h)を表す。

以上、提示した各設備の伝達関数を用いて、(4-1-1)式に従って、キルン入口原料粉の四成分の組成変動の分散を計算することができる。その組成変動を各々 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 に対し、 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 と表記すると山場の四原料の各組成が仮定(a)、(b)より正規分布であり、 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 が四原料の各組成の線形結合で表されることより、これらも正規分布に従う。従ってキルン入口での HM 、 SM 、 IM の標準偏差は、以下(4-2-12)–(4-2-14)の三式で計算できる。すなわち、

$$\text{静的配合計算式} \quad y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4] = \bar{Z} \times \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

ただし、 $u = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ は四原料の配合比である。三指標の定義式

$$IM = \frac{y_3}{y_4}, \quad SM = \frac{y_2}{y_3 + y_4}, \quad HM = \frac{y_1}{y_2 + y_3 + y_4}, \quad \text{と } y \text{ の要素がいずれも正規}$$

分布に従うことより

$$\sigma_{IM}^2 = \frac{(\bar{y}_3)^2}{(\bar{y}_4)^2} \cdot \left\{ \frac{\sigma_{y_3}^2}{(\bar{y}_3)^2} + \frac{\sigma_{y_4}^2}{(\bar{y}_4)^2} - 2\eta_{34} \frac{\sigma_{y_3}\sigma_{y_4}}{(\bar{y}_3)(\bar{y}_4)} \right\} \quad (4-2-12)$$

$$\sigma_{SM}^2 = \frac{(\bar{y}_2)^2}{(\bar{y}_3 + \bar{y}_4)^2} \left\{ \frac{\sigma_{y_2}^2}{(\bar{y}_2)^2} + \frac{\sigma_{y_3}^2 + \sigma_{y_4}^2 + 2 \cdot \eta_{34} \sigma_{y_3} \sigma_{y_4}}{(\bar{y}_3 + \bar{y}_4)^2} - \frac{2 \cdot \sigma_{y_2} (\eta_{23} \sigma_{y_3} + \eta_{24} \sigma_{y_4})}{\bar{y}_2 (\bar{y}_3 + \bar{y}_4)} \right\} \quad (4-2-13)$$

$$\sigma_{HM}^2 = \frac{(\bar{y}_1)^2}{(\bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4)^2} \left\{ \frac{\sigma_{y_1}^2}{(\bar{y}_1)^2} + \frac{\sigma_{y_2}^2 + \sigma_{y_3}^2 + \sigma_{y_4}^2 + 2\eta_{23}\sigma_{y_2}\sigma_{y_3} + 2\eta_{24}\sigma_{y_2}\sigma_{y_4} + 2\eta_{34}\sigma_{y_3}\sigma_{y_4}}{(\bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4)^2} - \frac{2 \cdot \sigma_{y_1} (\eta_{12}\sigma_{y_2} + \eta_{13}\sigma_{y_3} + \eta_{14}\sigma_{y_4})}{\bar{y}_1 (\bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4)} \right\} \quad (4-2-14)$$

ただし、 $\sigma_{y_i}^2$ 、 η_{ij} は上記の配合計算式と線形回帰式 (4-2-1) を用いて下記の様に計算出来る。なお異種原料の組成間に相関の無いことを自明のこととして式展開している。

$$\begin{aligned} \sigma_{y_i}^2 &= \overline{(y_i - \bar{y}_i)^2} = \overline{\{ (a_{i1} - \bar{a}_{i1})\mu_1 + (a_{i2} - \bar{a}_{i2})\mu_2 + (a_{i3} - \bar{a}_{i3})\mu_3 + (a_{i4} - \bar{a}_{i4})\mu_4 \}^2} \\ &= u_1^2 \cdot \sigma_{i1}^2 + u_2^2 \cdot \sigma_{i2}^2 + u_3^2 \cdot \sigma_{i3}^2 + u_4^2 \cdot \sigma_{i4}^2 = u_1^2 \gamma_{i1}^2 \sigma_{11}^2 + u_2^2 \gamma_{i2}^2 \sigma_{22}^2 + u_3^2 \gamma_{i3}^2 \sigma_{33}^2 + u_4^2 \gamma_{i4}^2 \sigma_{44}^2 \end{aligned} \quad (4-2-15)$$

$$\eta_{ij} = \frac{(y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sigma_{y_i}\sigma_{y_j}} \quad (4-2-16)$$

$$= \frac{1}{\sigma_{y_i}\sigma_{y_j}} (u_i^2 \cdot \gamma_{i1}\gamma_{j1}\sigma_{11}^2 + u_i^2 \cdot \gamma_{i2}\gamma_{j2}\sigma_{22}^2 + u_i^2 \cdot \gamma_{i3}\gamma_{j3}\sigma_{23}^2 + u_i^2 \cdot \gamma_{i4}\gamma_{j4}\sigma_{44}^2)$$

次に以上のモデルによる理論計算値と比較するために行った実機計測の対象としたプロセスの各部の伝達関数を表 4.3 にまとめて示した。なお、プラント入り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、一次破碎機的能力 (950 ton/hr) 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、 $T_M=0.0337$ (hr) すなわち約 2 分とした。

表 4.3 実機計測対象プロセスの伝達関数 (チュニジア国 Enfida Plant の例)

Homogenizing Beds	Closed-circuit raw grinding mill		Blending silo
	Without mixing control	with mixing control	
$N_1=411, N_2=198,$ $T_{L1}=0.072,$ $T_{L2}=0.058$	$T_B=0.038$ (h), $L_C=3$	$T_C=1, T_i=0.8, T_o=0.7$ (h), $K_p=0.2, k=1/l=1.0, f_o=2.46$ $h=\exp(-T_C/T_o)=0.2397,$	$V_m=2,500$ (ton), $Q=110$ (ton/h)
$G_{HB}^L(s) = \frac{1+0.73s}{1+14.79s}$ $G_{HB}^L(s) = \frac{1+0.408s}{1+5.74s}$	$G_{GM}^O(s) = \frac{1}{4(1+0.038s)^5 - 3}$	$G_C^L(z) = \frac{0.2z^3 + 0.002z^2 - 0.012z}{z^3 - 0.578z^2 - 0.616z + 0.194}$	$G_{BS}(s) = \frac{1}{(1+5.7s)^4}$

山場より投入する石灰石と粘土質原料のパワースペクトル密度関数は、

$\sigma_{11}=2.46, \sigma_{22}=2.60, T_{M1}=T_{M2}=0.0337$ (h)より

$$\phi_{11}(\omega) = \frac{2 \times 0.0337 \times (2.46)^2}{1 + (0.0337\omega)^2}, \quad \phi_{22}(\omega) = \frac{2 \times 0.0337 \times (2.6)^2}{1 + (0.0337\omega)^2}$$

4.2.3 計算結果と考察

以下に表 4.3 で例示した各伝達関数のゲイン特性と各混合プロセスを縦列結合した場合のゲイン線図を示し、一般的に各プロセスが組成変動の分散の減少にどの様に寄与しているかを説明するとともに、前述の理論式 (4-1-1)式に従って計算した対象プラント (チュニジア国 Enfida セメントプラント) の HM の標準偏差を実機計測結果と比較し、本法の有効性を説明する。

(1) 変動減衰特性線図とその結果の考察

表 4.3 に示した混合プロセスを構成する各伝達関数の個々の周波数特性を図 4.7 に示す。また、これらの伝達関数の縦列結合として表現出来る、プラント入り口からみた各設備出口までの伝達関数の周波数特性を図 4.8 に示した。

さらに図 4.9 には、対象プラントの各プロセス出口での CaO 、 SiO_2 、 HM 、 SM の標準偏差の計算結果を例示した。これらを利用して、設備計画面で一般的に以下のことが言える。

(A) 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。図 4.9 にも示したように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が約 1/3 になっている。一方我々の実機における手動運転と自動制御運転の比較では平均で約 1/2 程度である(杉本、1984)。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概ね合致していると言える。

(B) 組み合わせ特性では、前段設備による変動の減衰結果により後段設備の減衰効果が著しく影響を受けることが分かる。すなわち、ある設備について過去に得た分散の減衰比データをそのまま次のプラントに適用しようとしても単純な比例計算による演繹は不可能であり、必ず前段設備を含め本報告の様に総合的に計算しなければならないことを示している。

(C) ブレンディ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のサイロの入口・出口間の標準偏差の減衰比(図 4.7 で横軸を実数軸で取った線図を考え、その線図上で特性曲線(3)と(5)各々が周波数軸を囲む面積の比に相当する)と調合制御を設置した場合(同様に曲線(4)と(6)各々が周波数軸を囲む面積の比に相当)の減衰比は約 80%であり、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ディングサイロの単体特性の低域炉波特性は類似している(図 4.7 の特性(2)と(5)参照)。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ディ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し得ることを示唆している。

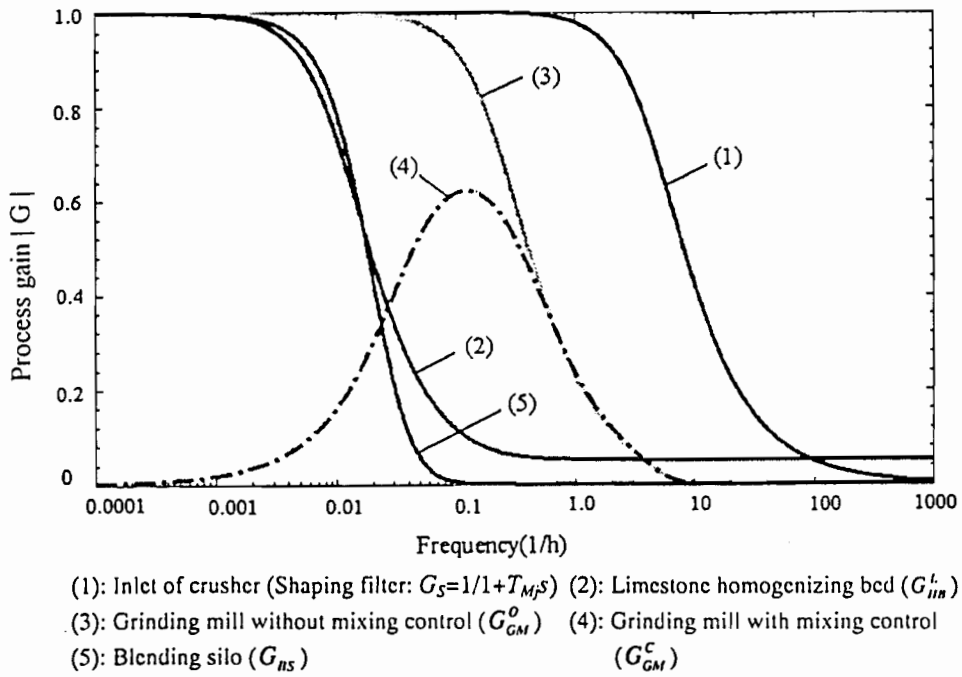


図 4.7 各プロセス単体の変動減衰特性

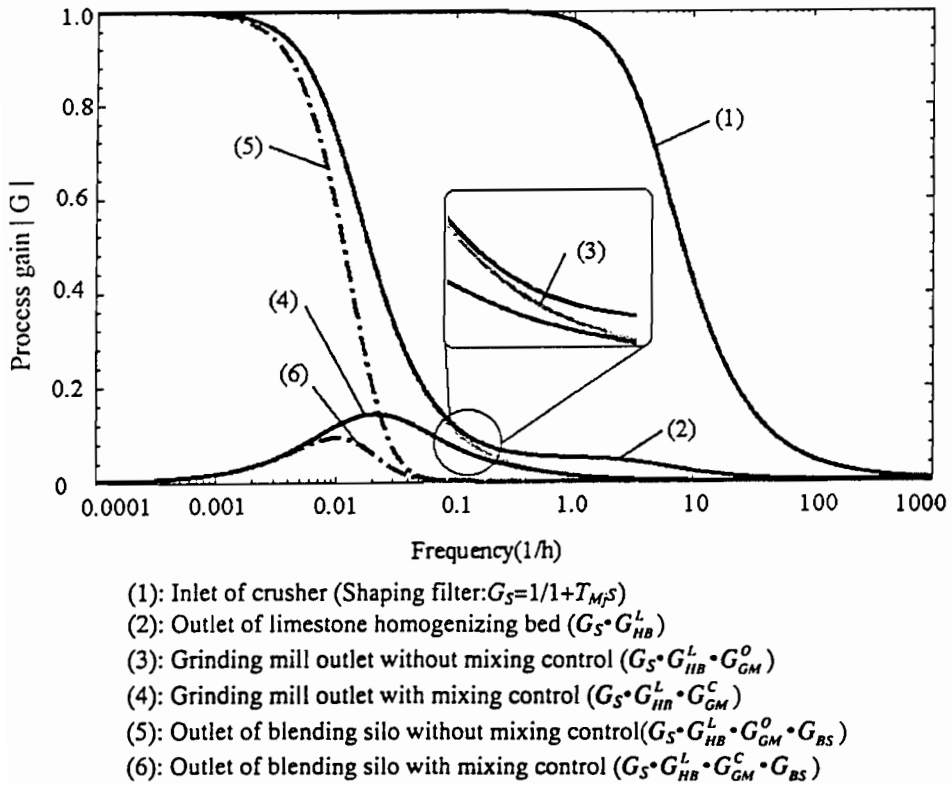
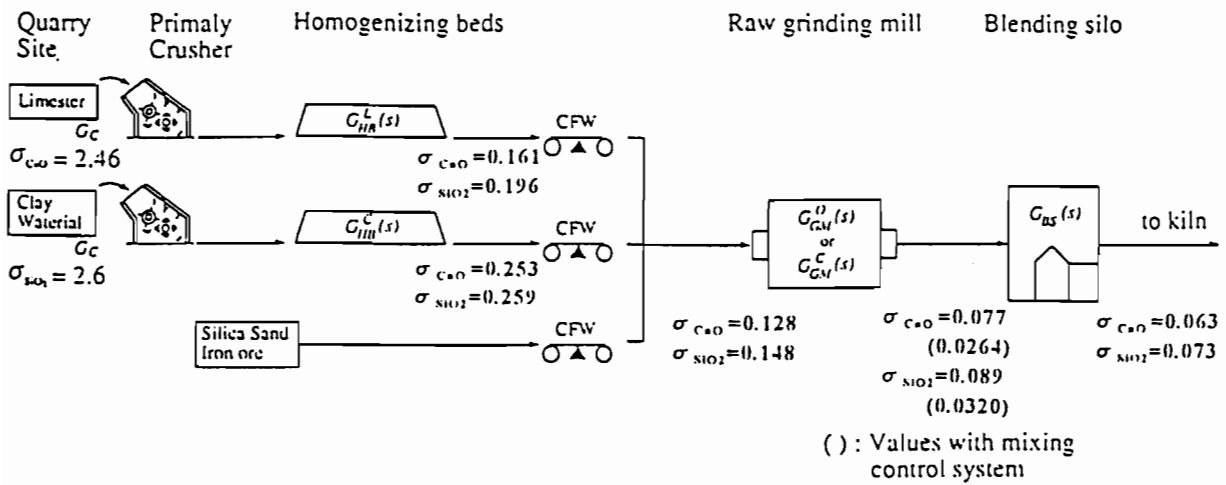


図 4.8 混合プロセスの組み合わせ特性



σ_{HM} and σ_{SM} for mixture of four materials (supposed)	$\sigma_{HM} = 0.390$	$\sigma_{HM} = 0.0253$	$\sigma_{HM} = 0.0154(0.0055)$	$\sigma_{HM} = 0.0123$
	$\sigma_{SM} = 0.442$	$\sigma_{SM} = 0.0304$	$\sigma_{SM} = 0.0180(0.0064)$	$\sigma_{SM} = 0.0148$
	Inlet of crusher	Inlet of mill	Outlet of mill	Outlet of silo

図 4.9 対象プロセス各部分での $CaO\%$ 、 $SiO_2\%$ 、 HM 、 SM の標準偏差の計算結果

表 4.4 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ディ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 章で述べた 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出来ると考えられる。またその様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。

表 4.4 予混合・サイロ形式による HM の標準偏差 (調合制御を含まない場合)

予混合方式	キルン前サイロ方式	
	バッファサイロ	ブレンディングサイロ
バッファストレージ	0.0785	0.0161
シェアロタイプ混合ストレージ	0.0191	0.0123

(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、キルン入り口原料を 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 (4-1-1)式による計算結果は、表 4.4 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良く一致していると言える。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。

4. 3 混合プロセス組み合わせ計画への応用 (杉本、1987)

4. 2 節で示した解析法を応用すると、セメントプラントの初期計画時に混合プロセスの組み合わせ計画、すなわちプロセスの選定計画を行うことが出来る。すでに表 4.4 にはその一例を示した。以下ではさらに一般化し、2. 3 節で紹介した原料粉砕プロセスの代表例として縦型ミルと閉回路粉砕ボールミル、代表的予混合プロセスとして通常採用する流し積み予混合方式と層積方式

(シェブロンタイプ)、サイロ形式として連続ブレンディングサイロとバッチブレンディングサイロを各々選択した場合に、それらの混合効果が組み合わせ特性としてキルン入口の組成変動の減衰効果にどの様に影響するかを分析した。採用したこれらのプロセスの伝達関数を表 4.5 に示し、組み合わせ特性の計算結果を表 4.6 に示した。以下これらに対し説明を加える。

(1) 縦型ミルの伝達関数

縦型ミルはボールミルに比較し、構造上混合移動の滞留時間が短い。また分級機をミル内に内蔵しているため循環量を計測することは困難である。縦型ミルの混合移動を表現する伝達関数は、文献 (Rötzer, 1977) に提示された時定数 100 秒 (0.028 h) の一次遅れの伝達関数をそのまま採用した。

(2) 流し積み予混合プロセスの伝達関数

流し積み方式の混合効果は層積方式と考え方は同一であるが、一般に積みつけ層数、積みつけ周期いずれも小さく混合効果は同一の処理量の層積方式に比較し小さい。そこで同一の処理量の予混合方式として流し積み方式を考える場合、(4-2-8)式と同一の一次進み遅れの伝達関数を利用し、当該処理量に対する一般的な層数 N と積みつけ周期 T を石灰石と粘土原料に対し設定し伝達関数を求めた。比較対象とするプラントの場合これらの値は各々 $N_L=345$, $T_L=0.027$, $N_C=187$, $T_C=0.020$ である。

(3) バッチ式ブレンディングサイロ

バッチ式ブレンディングサイロの場合、混合槽での圧縮空気による混合は理想的な完全混合と考えることができる。この場合攪拌時間で決まる周波数以下の変動に対しては標準偏差の減衰効果は無く、この周波数以上の成分に対してある一定の減衰比が適用できる。従って想定プラントの処理量と攪拌槽の設計容量より表 4.5 の伝達特性を得た。

以上の結果より設備計画面で次のことが言える。

- (A) キルン投入前原料の *HM*, *SM* の標準偏差を目標値以下とするための組み合わせは多数存在する。表 4.6 には *HM* の標準偏差 0.027 以下と出来る組み合わせを識別している。

表 4.5 各種混合プロセスの伝達関数

山場原料の組成変動	ホモジナイジングベッド	原料粉砕ミル	ブレンディングサイロ
$\Phi(\omega) = \frac{2T_{Mj}\sigma_{ij}^2}{1 + (\omega T_{Mj})^2}$	(層積方式) $G_{HB}^L = \frac{1 + 0.73s}{1 + 14.76s}$ $G_{HB}^C = \frac{1 + 0.408s}{1 + 5.74s}$	(ボールミル) $G_{GM}^O = \frac{1}{4(1 + 0.038)^5 - 3}$	(連続式サイロ) $G_{BS} = \frac{1}{(1 + 5.7s)^4}$
	(流し積み方式) $G_{HB}^L = \frac{1 + 0.25s}{1 + 4.67s}$ $G_{HB}^C = \frac{1 + 0.134s}{1 + 1.84s}$	(堅型ミル) $G_{GM}^O = \frac{1}{1 + 0.028s}$	(バッチサイロ) $0 \leq \omega \leq 0.79$ $ G_{BS} = 1.0$ $\omega > 0.79$ $ G_{BS} = 0.08$

表 4.6 混合プロセスの組み合わせによるキルン入口 *HM* の標準偏差

原料ミル	混合サイロ	貯蔵のみ	バッチ式	連続式
	予混合方式			
堅型ミル	貯蔵機能のみ	0.820	0.0465	0.0168
	流し積み方式	0.0321	0.0289	0.0136
	層積方式	0.0191	0.0223	0.0128
ボールミル	貯蔵機能のみ	0.0785	0.0447	0.0161
	流し積み方式	0.0300	0.0278	0.0131
	層積方式	0.0181	0.0214	0.0123

(B) 堅型ミルの混合効果は閉回路ボールミルに比較し少ないが、前段に予混合プロセスか後段にブレンディングサイロを装備する場合は、その影響は少ない。

(C) ボーリングデータよりあらかじめ山場の組成変動が少ないと予見できる場合で調合制御を装備する場合は、予混合プロセスまたはブレンディングサイロを単純なバッファ機能の設備に置き換えうる可能性が高い。ブレンディングサイロは最終段階の混合プロセスであることより、予混合プロセスを省略するのが妥当であろう。

いずれにせよ前節で提示した解析方法を用いれば種々のプロセスの組み合わせによる混合効果をあらかじめ推算できることが分かる。

4. 4 調合制御系の多変数確率制御モデル

4. 2 節の解析結果を要約し、調合制御系を三つの調合指標を制御目標とし原料ミル前での四原料の配合比を操作量（配合比の総計は“1”であることより操作量としては三種である。）とする三入力・三出力の確率制御系として表現し、在来制御の方法を多変数制御の観点から考察する。さらに 4. 2. 2 項で利用した制御を含めた粉碎系の閉ループ伝達関数の導出について補足する。

4. 4. 1 総合ブロック線図の導出

図 4.6 の原料調合制御系を HM , SM , IM の三種の制御量に置き換えて表現すると、最終的に図 4.10 の総合ブロック線図を得るがその導出を以下説明する。

(1) 原料ミル前の四原料の混合点の組成変動

図 4. 10 の点 M_i 、すなわちミル前で四原料を配合・合流後の原料の四成分の組成変動ベクトル $y_{M_i}(t)$ を考える。 $y_{M_i}(t)$ は、ミル入り口での四原料の組成成分行列 $Z_{M_i}(t)$ と四原料の配合率ベクトル $u(t)$ の積として(4-4-1)式で表せる。

$$y_{M_i}(t) = Z_{M_i}(t) \cdot u(t) \quad (4-4-1)$$

以下全て変動量を定常状態からの線形摂動量で考え、かつ s 領域で表現すると、(4-4-2)式で近似できる。

$$\Delta y_{M_i}(s) \approx \Delta Z_{M_i}(s) \cdot \bar{u} + \bar{Z}_{M_i} \cdot \Delta u(s) \quad (4-4-2)$$

ただし、 $\bar{\quad}$ は定常状態の値を示しており以下全て同様である。

第一項の $\Delta Z_{M_i}(s)$ は、受け入れ原料の組成変動がホモジナイジングベッド等を通じた結果として、原料ミル前に現れる四原料の組成変動外乱であり、

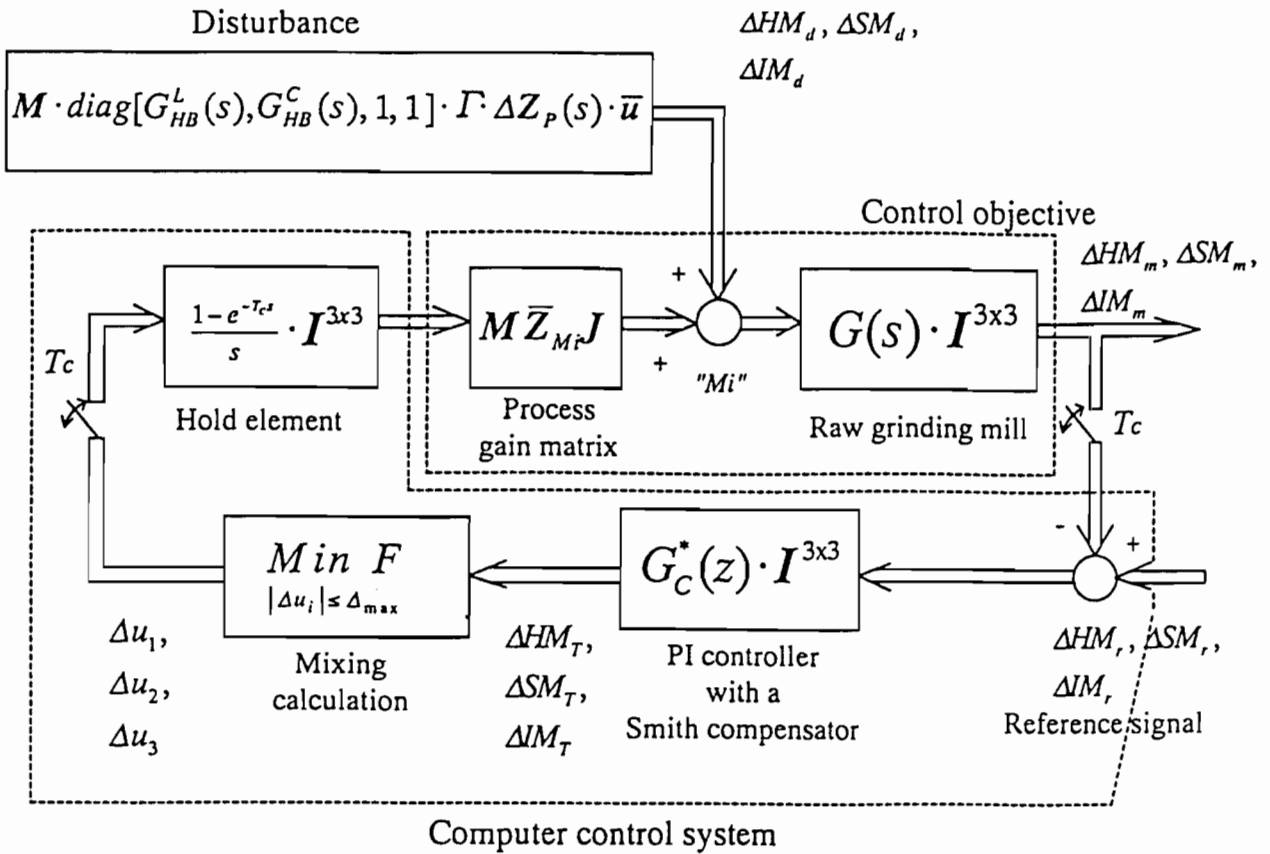


図 4.10 原料調合制御系の総合ブロック線図

4. 2節で示した受け入れ各原料の組成間に成り立つ線形回帰式 (4-2-1)式と各原料が通過するホモジナイジングベッドの伝達関数を利用すると、(4-4-3)式で表せる。

$$\Delta Z_{M_i}(s) = \text{diag}[G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s), 1, 1] \cdot \Gamma \cdot \Delta Z_p(s) \quad (4-4-3)$$

ただし、 ΔZ_p は各原料の主成分の組成変動過程を表す正規有色過程を(1,1), (2,2), (2,3), (4,4)の各要素に持ち他の全ての要素が"0"である4行4列の行列である。次に以上の関係を HM, SM, IM の変動量で表すことを考える。合流原料中の四成分含有量の変動と三指標の変動量 $\Delta HM, \Delta SM, \Delta IM$ の間に成り立つ下記の線形摂動による近似変換式(4-4-4)を利用すると、最終的に(4-4-3)式は(4-4-5)式に変換することが出来る。

$$[\Delta HM(s), \Delta SM(s), \Delta IM(s)] = M \cdot \Delta y_{M_i}(s) \quad (4-4-4)$$

$$\text{ただし、} \quad M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{12} & m_{12} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{23} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{\bar{y}_{SiO_2} + \bar{y}_{Al_2O_3} + \bar{y}_{Fe_2O_3}} \\ m_{22} &= \frac{1}{\bar{y}_{Al_2O_3} + \bar{y}_{Fe_2O_3}} \\ m_{33} &= \frac{1}{\bar{y}_{Fe_2O_3}} \\ m_{12} &= -\overline{HM} \cdot m_{11}, m_{23} = -\overline{SM} \cdot m_{22}, m_{34} = -\frac{1}{\bar{y}_{Al_2O_3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\Delta HM_{Mi}(s), \Delta SM_{Mi}(s), \Delta IM_{Mi}(s)]^T \\ & \equiv M \cdot \text{diag}[G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s), 1, 1] \cdot \Gamma \cdot \Delta Z_p(s) \cdot \bar{u} + M \cdot \bar{Z}_{Mi} \cdot \Delta u(s) \end{aligned} \quad (4-4-5)$$

(4-4-5)式が、図 4. 10 の M_i 点での外乱項と配合比変更操作によるミル前の三指標変動特性の表現である。

(2) 原料ミル・サンプラー通過後の三指標の測定量

(4-4-5)式により表した原料ミルプロセスへ投入する原料の三指標の変動に対し、原料ミルプロセスを通過しサンプラーを經由し X 線分析計で分析された測定量の変動がどの様に表されるかを考える。原料ミルの代表例として閉回路ボールミル粉碎系を取り上げ(4-2-9)式を利用し、さらにサンプル輸送と分析に要するむだ時間 l_x を考慮すると、最終的に三指標の測定量の変動は(4-4-6)式で表される。

$$[\Delta HM_m(s), \Delta SM_m(s), \Delta IM_m(s)]^T = G(s) \cdot I \cdot [\Delta HM_{Mi}(s), \Delta SM_{Mi}(s), \Delta IM_{Mi}(s)]^T \quad (4-4-6)$$

$$\text{ただし、} \quad G(s) = G_{GM}^O(s) \cdot \exp(-l_x s) = \frac{\exp\left\{-\left(l_x + \frac{1}{30} L_c\right)\right\}}{(1 + L_c) \left(1 + \frac{T_B}{5} s\right)^5 - L_c} \quad (4-4-7)$$

4. 4. 2 調合制御方式と閉ループ伝達関数の導出

調合制御は一般的に混合粉碎後の原料粉を間欠的にサンプリングし、そのサンプルを X 線分析計で分析し、一定時間間隔毎に原料ミル前の定量供給機の配合割合を変更するサンプル値制御系である。我々の在来制御方法について、すでに図 4. 6 に例示し概説した。三指標の測定量とそれらの設定値変化量との誤差量に対し、スミスの補償器を伴う PI 制御のパルス伝達関数により、まず動的な修正目標 $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ を算出する。この修正目標に対し、下記に示した最適化計算により、最終的に配合比の修正量を決めてい

る。ただし K_1, K_2 は評価の重み係数である。

$$F = K_1(\Delta HM_T - \Delta HM)^2 + K_2(\Delta SM_T - \Delta SM)^2 + (\Delta IM_T - \Delta IM)^2$$

$$\text{with } \sum_{i=1}^4 \Delta u_i = 0 \text{ and } |\Delta u_i| \leq \Delta_{\max}(i), \text{ where } \Delta HM = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial HM}{\partial u_i} \right) \cdot \Delta u_i, \text{ etc.} \quad (4-4-8)$$

この最適化計算は $\Delta HM = \sum_{j=1}^4 \left(\frac{\partial HM}{\partial u_j} \right) \cdot \Delta u_j$ 等、三指標変更量が配合比の関数

であることより、あらかじめ設定した定常状態での四原料の四成分組成値(行列 \bar{Z} の各要素の値)を用いて静的に計算し、かつ各配合比の変更量の総和が"0"であることと各変更量に上限を設ける拘束条件のもとに、評価関数 F を最小にする配合比の変更量 Δu_j を求めている。ただし定常状態からの変動量がわずかな摂動モデルを考える場合は、評価関数 F を"0"とする配合比が下記の代数演算で算出できる。ただし、四原料の配合比の総計は常に"1"であることより操作量は三つであるが、以下これを改めて

$\Delta u(s) = [\Delta u_1(s), \Delta u_2(s), \Delta u_3(s)]$ と表記している。

$$J \cdot \Delta u = [\Delta u_1, \Delta u_2, -(\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3), \Delta u_3]^T = J \cdot (M \cdot \bar{Z} \cdot J)^{-1} [\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T]^T \quad (4-4-9)$$

ただし、 $J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ の様に珪石の配合比を従属変数としている。

なお(4-4-9)式が成立し、かつミル前ホッパ内の四原料の平均組成行列 \bar{Z}_{mi} が、上記の \bar{Z} に一致する場合は、図 4.10 から分かる様に $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ から見たプロセスのゲイン行列は $M \cdot \bar{Z}_{mi} \cdot J \cdot (M \cdot \bar{Z} \cdot J)^{-1} = I$ より単位行列となり、スカラー系として三指標を独立に制御することと同等となる。本章における三指標の標準偏差の計算等は全てこの状態を仮定し、三指標に独立にスミス補償のパルス伝達関数 $G_c^*(z)$ を適用したものとして行っている。

なお、付録 4-A に $G_c^*(z)$ の導出方法を示した。さらに調合制御の制御周期は一般的に 30 分から一時間程度であり、図 4.8 の特性(2)からも分かる通り外乱項のサンプル周期以降の周波数成分はわずかであることより、 $G_c^*(z)$ は、双一

次変換を用いた下記の連続系の伝達関数 $G_{CA}(s)$ で近似出来る。

$$G_{CA}(s) = G_C^*(z) \Big|_{z = \frac{2+T_c s}{2-T_c s}}$$

この $G_{CA}(s)$ を利用すれば、再掲(4-2-10)式で調合制御を含めた閉ループ系の伝達関数 $G_{GM}^C(s)$ を求めることが出来る。

$$G_{GM}^C(s) \cong \frac{G_{GM}^O(s)e^{-ls}}{1 + G_{CA}(s)G_{GM}^O(s)e^{-ls}} \quad \text{再掲 (4-2-10)}$$

4.2.3 節に示した特性線図はこの伝達関数を利用して求めている。

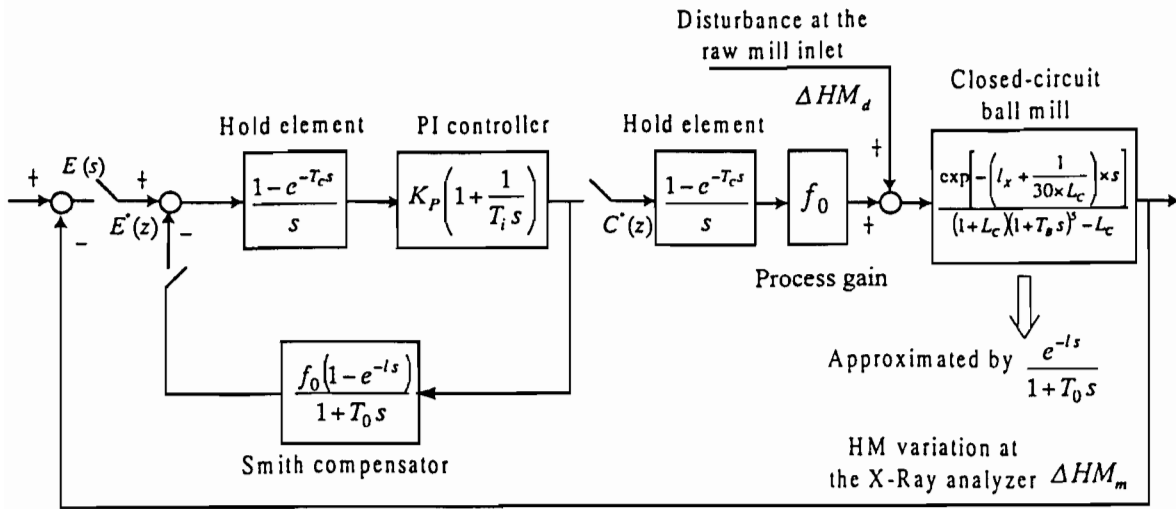
4.5 結言

四章では、セメントプラントにおいてプラント入り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わす伝達関数を与え、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、工業的に満足し得る精度で予測出来ることを確認した。また、この手法を用いることにより、原料調合制御システムを含め、各種の異なった形式のプロセスに対する伝達関数を与えてこれらのプロセスと設備の系統的な組み合わせ方法を検討できることを示した。さらに本章では、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出来ることを示し、外乱部を含めた制御対象の伝達関数を明示した。

〈付録 4-A〉パルス伝達関数 $G_c^*(z)$ の導出

簡単化の為に HM 制御のみのスカラー系で考える。連続制御系との対応を考慮した制御対象も含めたブロック線図は下図の通りである。ここでスミスの補償器では対象の高次遅れプラスむだ時間項を一次遅れプラスむだ時間で近似している。この図から計算機制御の中の動的補償部、即ちスミス補償付きサンプル値 PI 制御のパルス伝達関数を以下の様に求めた。

この図から制御部のパルス伝達関数は(4A-1)式で表せる。



T_c : Sampling time T_b : Mean residence time of ball mill
 L_c : Circulation load T_0 : Approximated time constant
 l_x : Dead time by sample transport and X-Ray analysis
 l : Total dead time with raw mill process and l_x

付図 4.1 HM 制御を例とした制御ブロック図

$$G_c^*(z) = \frac{C^*(z)}{E^*(z)} = \frac{Z \left[\frac{1-e^{-T_c s}}{s} \times K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \right]}{1 + Z \left[\frac{1-e^{-T_c s}}{s} \times f_0 K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \times \frac{1-e^{-l s}}{1+T_0 s} \right]} \quad (4A-1)$$

$l/T_c = k$ (k は整数) とし、分母・分子の Z 変換部を計算して $G_c^*(z)$ を得る。

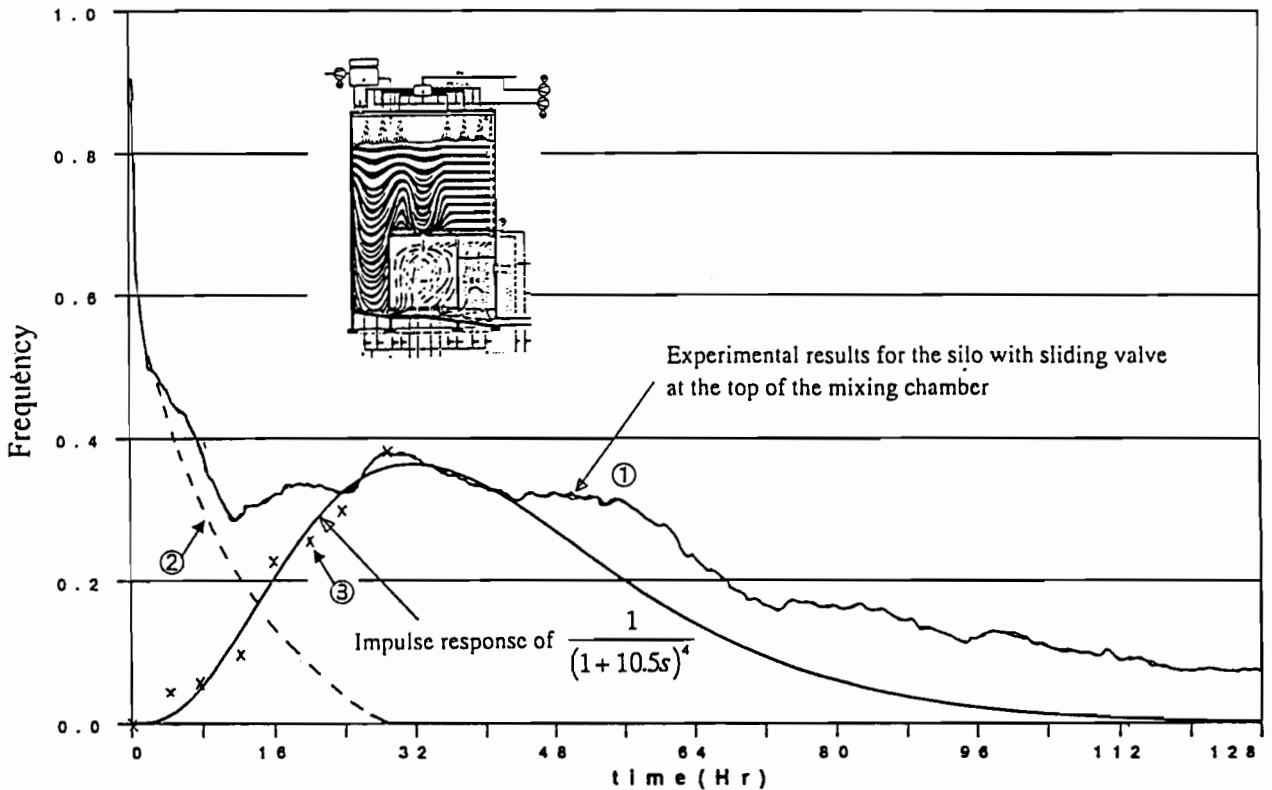
$$G_c^*(z) = \frac{K_p \left(1 + \frac{T_c}{T_i} \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \right) (1-hz^{-1})(1-z^{-1})}{(1-hz^{-1})(1-z^{-1}) + f_0 K_p (1-z^{-k}) z^{-1} \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) (1-h)(1-z^{-1}) + \frac{T_c}{T_i} (1-hz^{-1}) \right]}, \quad (4A-2)$$

ただし、 $h = \exp\left(-\frac{T_c}{T_0}\right)$ 、 K_p 、 T_i は連続系での PI 制御のゲインと積分時間である。

〈付録 4-B〉 連続式ブレンディングサイロの伝達関数

上部にバイパス注入口を持った連続式ブレンディングサイロに対して文献 (Röben, 1984) では放射線トレーサを用いて滞留時間分布を実測している。サイロの構造と実測値を付図 4.2 に示している。ただし、サイロ上部のピストンフロ一部 (むだ時間要素) は混合効果に関係しないので省略している。一方本文に示した解析の対象プラントであるチュニジア Enfida プラントのブレンディングサイロは図 2.17 に示した上部のバイパス注入口を持たない形式である。そこでまず付図 4.2 の実測値 (特性①) から、バイパス経路からの粉体の流れによる影響 (特性②) を除外し、等価的に下部攪拌槽による滞留時間分布特性 (特性③、×印) を求めた。その特性を高次遅れのインパルス応答に当てはめ結果として(4B-1)式の 4 次系で近似した。

$$G_1(s) = \frac{1}{(1+10.5s)^4} \quad (4B-1)$$



付図 4.2 連続式ブレンディングサイロの滞留時間測定結果
—上部バイパスゲートを持つサイロ—

一方、次数 n の槽列モデルの伝達関数は次式で与えられる（日本自動制御協会編、1971）。

$$G_2(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{V_m}{nQ}s\right)^n} \quad (4B-2)$$

ただし、 V_m は攪拌槽の容量（kg）、 Q は通過流量(kg/h)。

そこで文献の実験対象であるサイロの有功攪拌槽の容量 5400×10^3 [kg]、通過流量 133×10^3 [kg/h]より次数 n を”4”として(4B-2)式に当てはめると(4B-3)式となり概ね実験式(4B-1)と合致している。

$$G_3(s) = \frac{1}{(1 + 10.2s)^4} \quad (4B-3)$$

以上より連続式ブレンディングサイロの混合特性は、次数”4”の槽列モデルで近似できることが分かる。本文で対象としたサイロの伝達関数は(4B-2)式に、所定の仕様値 V_m , Q を代入しむだ時間要素を加えて示したものである。

参考文献

- (Draper, N. R., 1968) and H. Smith（中村訳）：応用回帰分析、森北出版
 (Gerstel, A. W., 1977)：Bed Blending Theory, in R. H. Wöhlder eds, “Stacking Blending Reclaiming of Bulk Materials”, p.321-341, Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany,
 (Holderbank, 1978)： “Etude des Matieres Premiere Campagne de Sondage – Rapport Final pour Cimentrie d’ Enfida –”
 (市川邦彦、1965)：体系自動制御理論、p.276-279, 朝倉書店
 (森村英典、1975) 大前義次：応用待ち行列理論、p.6-17,日科技連
 (Middleton, R. H., 1991) and G. C. Goodwin：Digital Control and Estimation A Unified Approach, p. 109-117, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. USA.

- (宮川洋、1969) 佐藤拓末、茅陽一：不規則信号論と動特性推定、p.25-26,
コロナ社
- (Naigai Consultant, 1974) : “Rapport Comprehensif sur Recherche Geologiques
des Materiars Premieres de Ciment Elasm, Algerie”
- (日本自動制御協会編、1971) : プロセス制御ハンドブック, p.378-385
朝倉書店
- (Ozaki, K., 1996) , M. Fukuoka and O. Habata : “Stochastic Process Representation
and Analysis of the Homogenizing Process in a Cement Plant”, Proc. 28th
ISCIE International Symposium on Stochastic System and Its Applications,
p.129-136, Kyoto, Japan (1996)
- (尾崎賢二、1997) 羽畑修： “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 28 回適応制御シンポジウム資料
- (尾崎賢二、1998) 羽畑修、福岡正規： “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”, システム制御情報学会論文誌、11, 241-250
- (Papoulis, A., 1965) : Probability, Random Variables and Stochastic Process, p.288-
290, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- (Röben, K. W., 1984) , H..Rotzer, Wien und H. Vogt : “Experimentelle Ermitt-
lung der Verweilzeitverteilung eines Durchlau - Mischsilos-” Zement-Kalk-
Gips, 8. 413-420
- (Rötzer, H., 1977) und W. Hagspie : “Tot-unt Ausgleichszeit-Unlersuchungen bei
Mahlanlagen mit Hilfe von Radioisotopen” Zement-Kalk-Gips, 2, 63-70
- (セメント協会、1978) 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 p.146
- (杉本博、1977) 尾崎賢二、中川修、日下部幸男、庵原滋： “セメントプラン
トの計算機制御技術について”, 川崎技報、64, 1-8
- (杉本博、1985) 神田一基、尾崎賢二、朝倉建介、福岡正規、羽畑修： “セメ
ントプラントの総合調合・混合管理法の開発 (第一報)”, 川崎技報、
90, 65-74
- (杉本博、1987) 神田一基、尾崎賢二、朝倉建介、福岡正規、羽畑修： “セメ
ントプラントの総合調合・混合管理法の開発 (第二報)”, 川崎技報、
95, 70-76

第五章 セメントプラント調合制御への適応制御の応用

5. 1 はじめに

原料ミルへ投入する四種の原料の配合比を操作量とし、*HM*, *SM*, *IM* の三指標を制御量とする調合制御に対し、我々は四章でも説明した様に、スミス法によるむだ時間補償を持つ PI 制御と最適化計算による配合計算を応用した方法を採用し、数々のプラントでキルン投入の原料粉の組成変動を抑える効果を確認してきた。しかし、調合制御の制御対象では、受け入れ原料の鉱床変化等による平均組成の変動が直接プロセスゲインの変化となるだけでなく、原料ミルプロセスにおいては、そのむだ時間を含めた動特性が変化し易いことより、在来制御のみではその制御性は必ずしも満足できるものとは言えない。この様な対象の特性変化に対応し得る制御方式として適応制御の応用が考えられる。本章では 5. 2 節で調合制御対象の多変数確率制御系としての特徴と適応制御に対するニーズを整理する。特に調合制御系が静的な前置補償行列を導入し非干渉化を行うことにより、*HM*, *SM*, *IM* の動的補償を個別に行うことが出来ることを示す。次に 5. 3 節では適応制御に対し、特に第一世代 (Landau, 1993) の一段予測に基づく STR と確率的 MRACS、および第二世代の適応制御の一例として多段予測に基づく Extended Horizon Adaptive Control (EHAC) 法の定式化とその特徴、さらには調合制御への適用の趣旨を説明する。5. 4 節では、すでに実績のある在来制御法と一段予測に基づく確率的 MRACS の一手法および EHAC 法のシミュレーションによる性能比較を行った結果につき説明する (尾崎、1999)。以上の検討結果をもとに 5. 5 節では適応制御を各種のプロセス制御へ応用する場合の留意点と特に多変数系に対する対処方法につき、応用の立場から論述し、5. 6 節で今後の検討課題を整理し結びとする。

5. 2 調合制御系の多変数確率制御系としての特徴と在来制御の問題点

原料調合制御系の総合ブロック線図、図 4.10 において 4. 4 節で説明した在来制御方法は要約すると、受け入れ原料の組成変動による *HM*, *SM*, *IM* の原料ミル入口での確率外乱に対し、スミスの補償器を持つ PI 制御のパルス伝達関数 $G_c^*(z)$ を対角要素に持つ対角行列により、動的補償を各指標独立

に施し、三入力・三出力系としての静的な非干渉演算を最適化計算による配合計算部で行っていると言える。特に、図 4.10 におけるプロセスゲイン行列 $B_0 = M \cdot \bar{Z}_{Mi} \cdot J$ の要素である \bar{Z}_{Mi} が、配合計算部であらかじめ設定する四原料の平均組成行列 \bar{Z} と一致する場合は、外乱と設定値から見た三指標の測定量への伝達関数行列は全て対角行列となり、スカラー系として三指標を各々独立に扱うことと同等であることを説明した。このことから $\bar{Z}_{Mi} \neq \bar{Z}$ の一般的な場合にも動的補償は各指標に対し独立に施し、多変数系としての扱いは静的な前置補償行列 $P = (M \cdot \bar{Z} \cdot J)^{-1}$ を挿入し、プロセスのゲイン行列 B_0 との間での $B_0 \cdot P = M \cdot \bar{Z}_{Mi} \cdot J \cdot (M \cdot \bar{Z} \cdot J)^{-1}$ によって三個の制御量と三つの配合比変更量の間干渉を補償する方法を一般的な調合制御の方法として利用できると考えられる。事実後述の 5. 4 節でシミュレーションの対象としたプラントの例でも、山場の鉤床変化により平均組成行列 \bar{Z} が従前の値（すなわち \bar{Z}_{Mi} ）より変化した場合でも、干渉部すなわち $B_0 \cdot P$ の非対角項は対角項に対して最大約 15 %程度であり、上記の考えが実機においても概ね成立することを示している。以下二種の適応制御の検討およびシミュレーションで比較対象とした在来制御方法いずれに対しても上記の考えが成り立つものとして、まずスカラー系での性能比較を行う。次に多変数系としての扱いは全て前置補償行列 P を挿入して静的に行い、動的な補償は各指標独立に実施している。以上の説明を調合制御の制御対象と外乱部を含めて(5-2-1)式のように ARMAX モデルで表現した上で以下に説明する。

$$A(z^{-1}) \cdot I \cdot y(k) = z^{-d} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(k) + C(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (5-2-1)$$

ここに、 $y(k) = [\Delta HM_m, \Delta SM_m, \Delta IM_m]^T$: 三指標の摂動量の測定値ベクトル、
 $u(k) = [\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3]^T$: 三成分の配合比変更量を表す操作変数ベクトル、
 $w(k) = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$: 四原料の主成分の変動過程を表す正規白色過程、
 $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$: z^{-1} に対するスカラー多項式、

$$B(z^{-1}) = B_0 \cdot B'(z^{-1}) = B_0 \cdot (1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n+1}) : \text{プロセスゲイン行列 } B_0$$

と z^{-1} に対するスカラー多項式 $B'(z^{-1})$ からなる多項式行列。

$$C(z^{-1}) = I + C_1 z^{-1} + C_2 z^{-2} + \dots + C_{n-1} z^{-n+1} : \text{三指標の外乱特性を表現する 3 行 4 列の多項式行列。}$$

上記で $z^{-d} \cdot \frac{B'(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ が (4-4-7)式で示した原料ミルプロセスの s 領域伝達関数

にサンプラとホールド回路を含めた系のパルス伝達関数を表している。

(厳密には、図 4. 10 において外乱部のパルス伝達関数の分母多項式と原料ミル伝達関数の分母多項式の最大公約多項式が $A(z^{-1})$ に該当するが、外乱部

のミル出口側の離散表現を $\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ と表現するように多項式行列 $C(z^{-1})$ の各項

を選定すれば上記のことが言える。)

(5-2-1)式において、 $u'(k)=B_0 \cdot u(k)$ なる変換を施し $u'(k)$ から見た対象を拡大プラントと考えると、下記の(5-2-2)式の様に y と u' に関しての伝達特性は全て対角行列となる。

$$A(z^{-1}) \cdot I \cdot y(k) = z^{-d} \cdot B'(z^{-1}) \cdot I \cdot u'(k) + C(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (5-2-2)$$

なお、(5-2-1)式の $B(z^{-1})$ の非対角項に z^{-l} の多項式を含む一般的な多変数適応制御を考える場合には、多変数系の構造を規定するインタラクタ行列 (Wolovich, 1976) (Dugard, 1984) を導入して適応制御を構成する必要があるが、その構成とインタラクタ行列の構造による適応制御性能への影響、さらに調合制御系に対して制御対象のモデルとインタラクタ行列がどの様に関係するかの考察については、5. 5節に改めて記述した。

次に在来制御の実績と問題点、および適応制御応用上の要点につき説明する。我々は、すでに説明した在来制御の方式を多くのプラントに利用し、その制御効果を確認してきた (杉本、1984)。その結果を要約すると、調合制御を off した手動制御状態に対し、主要指標である HM の標準偏差を約 1/2 に低減することが出来ている。PID 制御は、適応制御を含めた各種のアドバンスド制御方法に比し、対象の数学モデルを必ずしも必要とせず、かつその調整規範が明確かつ簡単であるとともに対象プロセスの構造変化すなわち次数の変化や、プロセスゲインと時定数等のパラメータの変動に対して比較的ロバストな制御系である。しかし、調合制御の対象プロセスである閉回路粉碎系は、プロセス自身にセパレータからの正帰還を含む系であり不安定に陥りやすいこと、また(4-2-9)式に示した様に、その時定数やむだ時間が循環比により変動すること、および山場で採掘する原料の平均組成の変化が制御対

象プロセスのゲイン行列に直接影響を与え、これらの変動によって制御効果に変化をもたらすことが確認出来ている。

一方、調合制御の制御目標を要約すると、これらのプロセスの変動に対しても、*HM*, *SM*, *IM* の最小分散 Regulation を達成し、かつ Tracking 性能も併せ持つことが望ましい。後者の目標は、原料ミル後段のブレンディングサイロの混合特性を見込んだ上で調合指標の設定値を積極的に変更する運転が、製造セメントの品種変更やキルンでの焼成状況による運転状態の変更を目的として利用する場合があるためである。このような対象の特性変化に対して適応制御の応用が考えられ、実機に適用した例も報告されているが(Csaki, 1978) (Westerlund, 1979)、いずれも一段予測に基づく適応制御方式であり、プロセスの特性変化特にむだ時間の変化に対しロバストな制御系で無いこと、さらに外乱等による制御量の変化に対し操作量が過大になりすぎる点より在来制御方式に置き換え得るとは言い難い(尾崎、1997)。一方、MRACS と STR を含めた適応制御の発展経緯を総括した報告(Landau, 1993)や、プロセス制御への応用の観点からの総括的な報告(Seborg, 1986)と対比して、調合制御への応用の観点から適応制御理論に対する所用の要件は以下の四点にまとめられる。

- (1) 制御則とパラメータ推定機構を含め、総合的に対象の変化にロバストな制御であること。
- (2) むだ時間が既知と言う第一世代の適応制御の欠点を補う必要がある。
- (3) 不安定な零点や極を持つ系にも対応出来る必要がある。
- (4) 以上を踏まえた上で、多変数系への拡張に見通しを持ち得る構成であること。

次節では、第一世代の適応制御の内、確率外乱に対する最小分散制御性能を目的とした、Self Tuning Regulator および、Dugard & Landau により提示された Stochastic Model Reference Adaptive Control 法の定式化とその特徴・問題点を整理した上で、上記の四つの目標を達成しうる可能性が示唆されている(Dugard, 1984) (Ydstie, 1988)、Extended Horizon Adaptive Control 法を調合制御系に適用する場合の定式化について述べる。

5. 3 適応制御方式（最小分散型 STR, Stochastic MRACS, EHAC）の定式化と特徴

適応制御は良く知られている様に、セルフチューニングレギュレータ（STR）とモデル規範型適応制御（MRACS）の二方式が理論的体系も整い、かつ実用的にもその価値が認められた方法である（計測自動制御学会編、1983）。この内 STR は確率制御系に対する制御方式として開発され、特に Regulation 問題を主として扱うプロセス制御への応用が多い（Narendra, 1980）。一方 MRACS は確定系を対象に定式化され、安定論を主体としたパラメータの収束性の解析や、システム理論に基づく多変数系への拡張、ロバスト性の検討等理論面の研究が盛んに行われるとともに、応用面ではその構成上 Tracking を主体としたサーボ問題に応用されるのが一般的であった。我が国での理論面での検討の多くは MRACS に関するものが大半であり、しかも確率的外乱に対する制御性や適応則の検討を積極的に行ったものは数少ない（大松、1996）。

一方、前述の様に調合制御系は、確率外乱を含む制御系であり、ここでは第一世代の適応制御の代表例として Åstrom らによる最小分散 STR と Landau & Dugard による Stochastic MRACS の定式化とその特徴・問題点を説明し、さらに第二世代の適応制御の内、Ydstie により提案された Extended Horizon Adaptive Control 法の定式化とその特徴について説明する。なお、前二者の定式化はいずれもスカラー系として行い、EHAC 法については、(5-2-2)式をもとに三入力・三出力系として行った。

5.3.1 最小分散 STR の定式化と特徴

良く知られている様にこの方式は、Åstrom による確率制御系に対する最小分散制御方策（Åstrom, 1970）を利用した適応制御方式である。対象を、

$$A(z^{-1}) \cdot y(k) = z^{-d} B(z^{-1}) \cdot u(k) + C(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (5-3-1)$$

のスカラー系の ARMAX モデルとする。 $w(k)$ は有限な分散 σ^2 を持つ正規性白色雑音系列とし、 $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $C(z^{-1})$ は一般性を失うことなく下記のスカラー多項式とする。

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_m z^{-m} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \cdots + c_n z^{-n} \end{aligned} \right\} \quad (5-3-2)$$

次の仮定を置く。以下の式の展開は（大松、1996 または Goodwin, 1984）を参照のこと。

(STR-A1): 次数 n, m は既知である。

(STR-A2): むだ時間 $d (\geq 1)$ は既知である。すなわち $b_0 \neq 0$ である。

(STR-A3): 多項式 $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$ は既約である。

(STR-A4): $B(z^{-1})$ は漸近安定多項式である。すなわち、 $B(z^{-1})=0$ の全ての零点が単位円内 ($|z| < 1$) に存在する。

(STR-A5): $C(z^{-1})$ は漸近安定多項式でかつ $C(z^{-1}) - \lambda/2$ は強正実性を満足する。ここに、 λ は後述のパラメータ適応則で与える係数である。

まず、適応制御を構成する上で、一旦各多項式の係数は既知と考え d 時点先の y の予測値 $\hat{y}(k+d)$ を考える。次の Diophantine 恒等式を利用して多項式 $R(z^{-1}), S(z^{-1})$ を導入する。

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-d} R(z^{-1}) \quad (5-3-3)$$

$$\text{ただし、 } S(z^{-1}) = 1 + s_1 z^{-1} + \dots + s_{d-1} z^{-d+1} \quad (5-3-4)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n-1} z^{-n+1} \quad (5-3-5)$$

この恒等式を利用すると、 R と S の係数は以下の通り逐次一意に定まる。

$$\begin{aligned} c_1 &= a_1 + s_1, & c_2 &= a_2 + a_1 s_1 + s_2, & \dots, & c_{d-1} &= a_{d-1} + a_{d-2} s_1 + \dots + a_1 s_{d-2} + s_{d-1} \\ c_d &= a_d + a_{d-1} s_1 + \dots + a_1 s_{d-1} + r_0, & \dots, & c_n &= a_n + a_{n-1} s_1 + \dots + a_{n-d+1} s_{d-1} + r_{n-d}, \\ 0 &= a_n s_1 + a_{n-1} s_2 + \dots + a_{n-d+2} s_{d-1} + r_{n-d+1}, & \dots, & 0 &= a_n s_{d-1} + r_{n-1} \end{aligned}$$

(5-3-1)式の両辺に $z^d S(z^{-1})$ を掛け(5-3-3)式を利用して整理すると(5-3-6)式を得る。

$$y(k+d) = [R(z^{-1})y(k) + S(z^{-1})B(z^{-1})u(k)] / C(z^{-1}) + S(z^{-1})w(k+d) \quad (5-3-6)$$

右辺第一項は k 時点で制御系から取得可能な信号により合成可能である。さらに $w(k)$ の白色性を利用すれば、 d 時点先の y の予測値は(5-3-7)式で求まる。

$$\hat{y}(k+d) = E[y(k+d)|k] = [R(z^{-1})y(k) + S(z^{-1})B(z^{-1})u(k)] / C(z^{-1}) \quad (5-3-7)$$

今 d 時点先の目標値系列を $y_M(k+d)$ とし、 $\hat{y}(k+d)$ を出来るだけ $y_M(k+d)$ に一致させることを考える。(5-3-7)式を利用すると k 時点の操作信号 $u(k)$ として下記の(5-3-8)式の様を選べば、(5-3-9)式の様、目標値と予測値の二乗誤差評価規範 J_f を最小にすることができる。このことが最小分散制御の名前の由来である。

$$\begin{aligned}
 u(k) &= \frac{1}{S(z^{-1})B(z^{-1})} \{C(z^{-1})y_M(k+d) - R(z^{-1})y(k)\} \\
 &= \frac{1}{b_0} [C(z^{-1})y_M(k+d) - R(z^{-1})y(k) - \{S(z^{-1})B(z^{-1}) - b_0\}u(k)]
 \end{aligned} \tag{5-3-8}$$

$$\begin{aligned}
 E[J_1] &= E\left[\{y(k+d) - y_M(k+d)\}^2\right] \\
 &= E\left[\{E[y(k+d)|k] + S(z^{-1})w(k+d) - y_M(k+d)\}^2\right] \\
 &= E\left[\{S(z^{-1})w(k+d)\}^2\right] + E\left[\{E[y(k+d)|k] - y_M(k+d)\}^2\right] \\
 &\geq E\left[\{S(z^{-1})w(k+d)\}^2\right] = \left(1 + \sum_{j=1}^{d-1} s_j\right) \sigma^2
 \end{aligned} \tag{5-3-9}$$

ここに、 $S(z^{-1})B(z^{-1}) - b_0 = S'(z^{-1})$ は、 z^{-1} 次以上の多項式であり、(5-3-8)式の u に関する項は全て過去に取った操作出力から計算出来ることになっている。
 (5-2-1)式と(5-3-8)式より最小分散制御系のブロック線図を図 5.1 に示した。
 (5-3-8)式で b_0 による零割りが生じないために、仮定(STR-A2)が必要となり、
 図 5.1 よりこの制御方策では、 $B(z^{-1})$ の極・零相殺が基本であり、従って仮定
 (STR-A4)が必要となることも分かる。

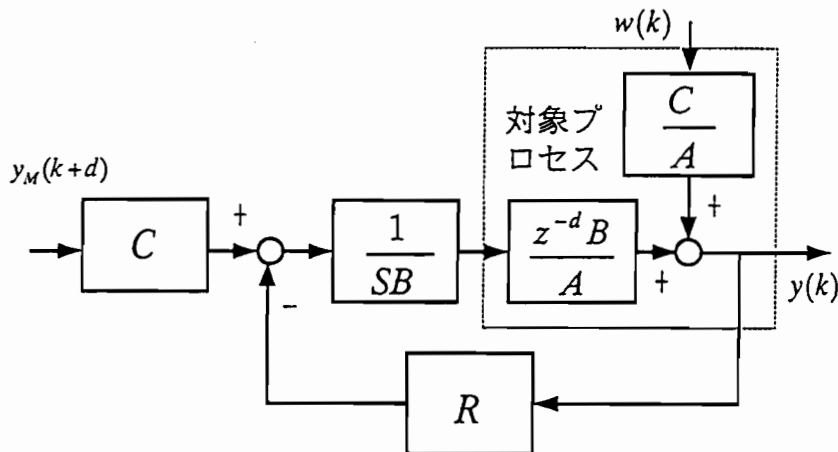


図 5.1 最小分散制御系のブロック線図

次に $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $C(z^{-1})$ の各係数が未知の場合の適応制御方式について、最小分散制御を達成する制御系の定数、すなわち b_0 と $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ の係数を逐次的に求める直接法で説明する。

未知パラメータベクトル $\hat{\theta}$ を下記とする。

$$\hat{\theta} = [\hat{r}_0, \hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_{n-1}; \hat{b}_0, \hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_{m+d-1}; \hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_n]^T \quad (5-3-10)$$

このベクトルを利用し、さらに k 時点で入手できる、現在と過去に得られた制御量、操作量、希望出力の系列による Regressor ベクトル $\phi(k)$ を下記で導入する。

$$\phi(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m-d+1); -y_M(k+d-1), -y_M(k+d-2), \dots, -y_M(k+d-n)]^T$$

これらを用いると(5-3-8)式の関係は、

$$\phi(k)^T \cdot \hat{\theta}(k) = y_M(k+d) \quad (5-3-11)$$

$$\text{または、 } u(k) = \frac{1}{\hat{b}_0} [y_M(k+d) - \hat{\theta}'^T(k) \cdot \phi'(k)] \quad (5-3-12)$$

$$\text{ここに、 } \hat{\theta}' = [\hat{r}_0, \hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_{n-1}; \hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_{m+d-1}; \hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_n]^T$$

$$\phi'(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1); u(k-1), \dots, u(k-m-d+1); -y_M(k+d-1), -y_M(k+d-2), \dots, -y_M(k+d-n)]^T$$

パラメータ適応則として下記の(5-3-13)～(5-3-15)式を利用して、逐次 $\hat{\theta}$ を求めていく。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{F(k-1) \cdot \phi(k-d)}{1 + \phi^T(k-d) \cdot F(k-1) \cdot \phi(k-d)} \cdot e(k) \quad (5-3-13)$$

$$F(k) = \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[F(k-1) - \frac{\lambda_2(k) \cdot F(k-1) \cdot \phi(k-d) \cdot \phi^T(k-d) \cdot F(k-1)}{\lambda_1(k) + \lambda_2(k) \cdot \phi^T(k-d) \cdot F(k-1) \cdot \phi(k-d)} \right] \quad (5-3-14)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{\theta}^T(k-1) \cdot \phi(k-d) \quad (5-3-15)$$

ただし、 $0 < \lambda_1(k) \leq 1$ および、 $0 \leq \lambda_2(k) < \lambda < 2$ を満足すること。

上記のパラメータ適応則については、適応則の漸化式を近似の微分方程式に置き換えて解析する Ordinary Difference Equation (ODE) 法（計測自動制御学会編, 1983）による局所収束性が保証されている。

以上を整理して、図 5.2 にパラメータ適応則を含めた最小分散型 STR の構成を示した。

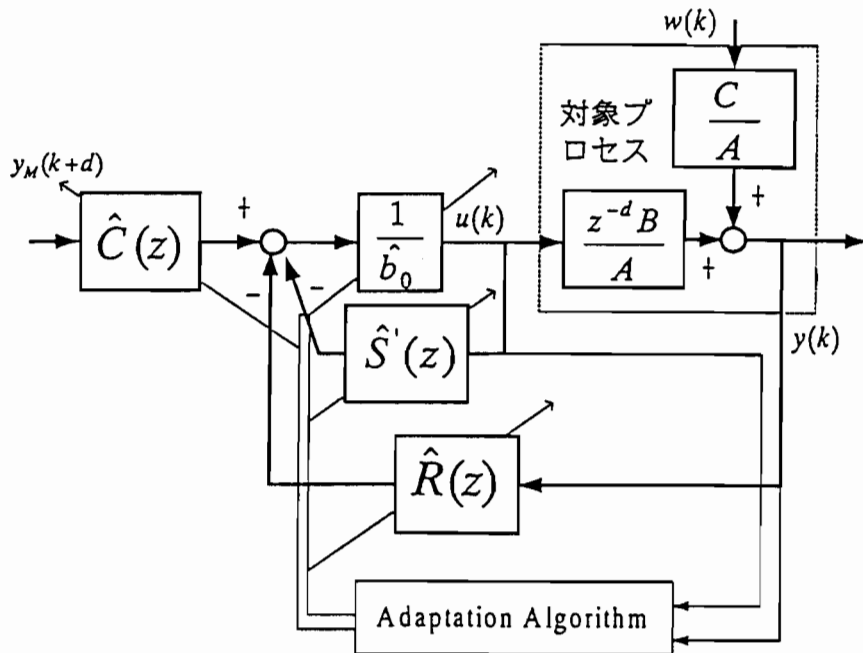


図 5.2 最小分散型 STR の構成

この STR の特徴を下記に示す (Goodwin, 1984)。

- (a) 最小分散型 STR の構成は基本的に d 時点先の一段予測に基づく制御であり、操作出力が過大になりすぎる恐れがある。
- (b) このことに対処するために (5-3-9) 式の評価関数に過大な操作出力に対する Penalty を課した次の評価関数を考えることが出来る。

$$J_2 = \{y_M(k+d) - y(k+d)\}^2 + \gamma u(k)^2$$

この考えによる STR の構成は、Clark らによる一般化最小分散制御策 (Clark, 1975 または、大松, 1995) と等価である。ただしこの方策では、Tracking に対する定常偏差を生じる。

- (c) 以上の問題に対する自然な拡張として、設定値を直接評価関数に入れるのではなく、Reference Model の出力として評価することが考えられる。この MRACS の構成を取った最小分散制御策の一例が次項 (5.3.2 項) の Stochastic MRACS の構成である。
- (d) 最小分散制御策は、出力の d 時点先の最適予測値を Feedback 則に利用している点で、古典制御のスミスの補償器と同等の考えである。スミスの補償器を利用すると、良く知られている様にむだ時間 d を

制御ループ外に追い出し、制御系は結果的に(5-3-1)式の $\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ に対

して設計または Tuning するのと同様となる。一方(5-3-1)式のモデルで $C(z^{-1})=A(z^{-1})$ の場合の最小分散制御策における y の予測器は、

$$A(z^{-1})\hat{y}(k+d|k) = B(z^{-1})u(k)$$

を満たしており、スミスの補償器と同様な Open-Loop 系の予測器に対し制御系を構成していることになっている。

5.3.2 Stochastic MRACS の定式化とその特徴

前述の最小分散型 STR とモデル規範型適応制御は各々別々に体系化されてきたが、1979年 B. Egart により、これら二つの方式の等価性が指摘された(新、1993)。Landau も同時期に確率外乱存在下の MRACS と最小分散型 STR に対し、そのパラメータ適応則の類似性を含めて統一した理論展開を行っている(Landau, 1981)。さらに Dugard & Landau は、この考えを拡張し、設定値の変化が無く確率外乱のみが存在する場合に最小分散 STR として動作し、確率外乱存在下で設定値変化がある場合には、最小分散 Tracking を達成する MRACS を Stochastic MRACS として提示した(Dugard, 1980)(Dugard, 1982)。この構成は、5.2節で述べた調合制御の目標に合致しているため、我々は第一世代の適応制御の代表例としてこの方式を取り上げ、その定式化と特徴を以下に記すとともに5.4節にシミュレーションによる制御性能の確認結果を示した。

まず制御対象を、より一般的な次のモデルで表す。

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) \cdot y(k) &= z^{-d} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(k) + v(k) \\ N(z^{-1}) \cdot v(k) &= M(z^{-1}) \cdot w(k) \end{aligned} \tag{5-3-16}$$

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \quad (b_0 \neq 0) \\ N(z^{-1}) &= 1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} + \dots + n_n z^{-n} \\ M(z^{-1}) &= 1 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2} + \dots + m_n z^{-n} \end{aligned} \right\} \tag{5-3-17}$$

$w(k)$: 平均値 0、分散 σ^2 の正規白色過程

以下の五つの仮定を置く。

(S/MRACS-A1) : 次数 n, m は既知。

(S/MRACS-A2) : むだ時間 d は既知。

(S/MRACS-A3) : $A(z^{-1}), B(z^{-1})$ は互いに既約な多項式。

(S/MRACS-A4) : $B(z^{-1})$ は漸近安定多項式。

(S/MRACS-A5) : $N(z^{-1}), M(z^{-1})$ は互いに既約な漸近安定多項式

結論を先に示すとこの適応制御方式は上記の制御対象に対し、図 5.3 の構成を取り、次の様な制御則を考える。

$$\text{制御則} : \hat{S}'(z^{-1})u_f(k) + \hat{R}(z^{-1})y_f(k) = [D(z^{-1}) - \hat{Q}(z^{-1})] \cdot y_{Mf}(k) \quad (5-3-18)$$

ただし、 $\hat{S}'(z^{-1})$ は $B(z^{-1})S(z^{-1})$ の多項式の係数の推定値を要素に持つ多項式、下添字 f はいずれも図 5.3 に示した様に該当変数の $1/L(z^{-1})$ (L はモニク安定多項式) によるフィルター値を示す。また $H_1(z^{-1}), H_2(z^{-1})$ はパラメータ適応則の収束性のために導入するモニク安定多項式である。 $D(z^{-1})$ は、Regulation 特性を指定するモニク多項式、 $R(z^{-1}), S(z^{-1})$ は次の Diophantine 方程式を満たす多項式である。

1) 確定的 ($v(k) \equiv 0$) トラッキングの場合 :

$$D(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-d} R(z^{-1}) \quad (5-3-19)$$

2) 確率外乱に対する Regulation 問題の場合 :

$$M(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-d} R(z^{-1}) \quad (5-3-20)$$

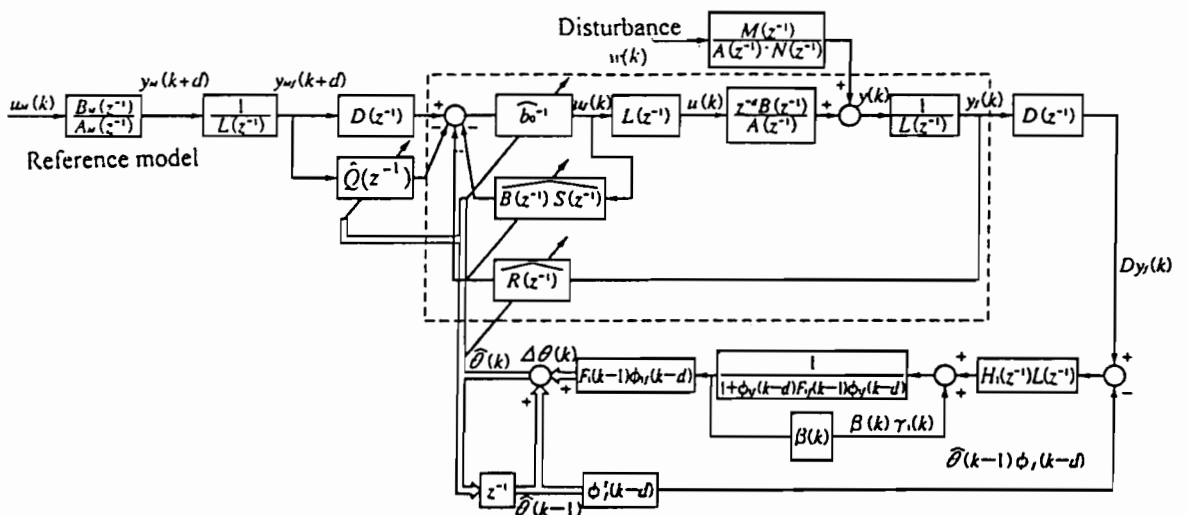


図 5.3 Stochastic MRACS の構成

あるいは、(5-3-18)式を変形して、

$$\hat{\theta}^T(k) \cdot \phi_f(k) = D(z^{-1}) \cdot y_{Mf}(k+d) \quad (5-3-21)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \hat{\theta}^T(k) &= [\hat{r}_0(k), \dots, \hat{r}_{n-1}(k); \hat{b}_0(k), \hat{s}'_1(k), \dots, \hat{s}'_{d+m-1}(k); \hat{q}_1(k), \dots, \hat{q}_n(k)] \\ \phi_f^T(k) &= [y_f(k), \dots, y_f(k-n+1); \mu_f(k), \mu_f(k-1), \dots, \mu_f(k-d-m+1); \\ & y_{Mf}(k+d-1), \dots, y_{Mf}(k+d-n)] \end{aligned} \quad (5-3-22)$$

パラメータ適応則：以下の漸化式 (5-3-23) 式で表現される。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + F(k) \cdot \phi_f(k-d) \gamma(k) \\ F(k) &= \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[F(k-1) - \frac{\lambda_2(k) \cdot F(k-1) \cdot \phi_f(k-d) \cdot \phi_f^T(k-d) \cdot F(k-1)}{\lambda_1(k) + \lambda_2(k) \cdot \phi_f^T(k-d) \cdot F(k-1) \cdot \phi_f(k-d)} \right] \\ \gamma(k) &= \frac{1}{\alpha(k)} \left[H_1(z^{-1}) \cdot L(z^{-1}) \{ D(z^{-1}) y_f(k) - \hat{\theta}^T(k-1) \cdot \phi_f(k-d) \} + \beta(k) \cdot \gamma(k) \right] \\ \alpha(k) &= 1 + \phi_f^T(k-d) \cdot F(k-1) \cdot \phi_f(k-d) \\ \beta(k) &= \{ 1 - H_2(z^{-1}) \} + \{ 1 - H_1(z^{-1}) \cdot L(z^{-1}) \} \cdot \phi_f^T(k-d) \cdot F(k-1) \cdot \phi_f(k-d) \end{aligned} \right\} \quad (5-3-23)$$

この適応制御系の特徴は、確率外乱が存在しない場合の MRACS の構成に対し、図 5.3 に示した様に設定値回路にも補償要素 $Q(z^{-1})$ を導入することにより、確率外乱存在下で最小分散 Regulation を達成しつつ、外乱が存在しない場合の Tracking 性能の劣化を補償できることにある。

すなわち、特徴を詳述すると：

- (a) $v(k) \equiv 0$ の確定系の場合：図 5.4 に破線で示した Feedback 系の伝達関数の分母が上記の適応則によって $D(z^{-1})$ に収束し、かつ $Q(z^{-1})$ は "0" に収束する。従い、

$$A_M(z^{-1})y(k+d) \Rightarrow B_M(z^{-1})u_M(k) \quad (5-3-24)$$

となり、 $D(z^{-1})$ で指定した Regulation 性能と規範モデルに従った Tracking 性能を合わせ持っている。

- (b) 確率外乱が存在し設定値変化のない場合：Feedback 系の伝達関数の分母は $M(z^{-1})$ に収束し、かつ $Q(z^{-1}) \rightarrow D(z^{-1}) - M(z^{-1})$ となる。この場合、

$$y(k+d) \Rightarrow y_M(k+d) + \frac{S'(z^{-1})}{N(z^{-1})} w(k+d) \quad (5-3-25)$$

となる。従って、 $N(z^{-1})=1$ の場合に STR と同一構成となり、最小分散制御を達成出来る。

(c) この方式も d 時点先の一段予測による適応制御方式であり、 d を under-estimate した場合は操作出力の過大や、場合により適応則の発散を招く恐れがある。

(d) 適応則の収束性確保のためにモニック安定多項式 $H_1(z^{-1})$ 、 $H_2(z^{-1})$ を設計要素として導入しているが、その系統的な決定方法は示されておらず、Trial & error に頼らざるを得ない。

の四点を挙げる事ができる (杉本、1988) (尾崎、1997)。

なお、パラメータの収束性についても STR と同様 ODE 法による局所収束性が示されている。

5.3.3 Extended Horizon Adaptive Control(EHAC)の定式化と特徴

EHAC 法は、SISO 系を対象として Ydstie により提案され (Ydstie, 1984)、二酸化炭素吸収プラントの制御への応用結果が在来方式に比較し、有効であることが報告されている (Ydstie, 1985)。また、第一世代の適応制御構成上の主要な仮定である、むだ時間が既知であることに対する緩和がなされるとともに、 $B(z^{-1})$ の漸近安定性に対する仮定についても緩和できる可能性が示唆されるとともに多変数系への拡張もなされている (Dugard, 1984) (Ydstie, 1988)。この制御法の定式化に対しては、対象として調合制御を考え、(5-2-1)式あるいは(5-2-2)式で表される多変数系を考える。

EHAC ではその構成上(5-2-1)式の対象に対し以下の仮定が必要となる。

(EHAC-A1) : $w_i(k)$ は有限な分散 σ_i^2 を持つ正規白色過程である。

(EHAC-A2) : むだ時間 d は有限である。

調合制御を対象とする場合、四章の説明からこれらが成立することは容易に推察でき、また一般的な対象を考える場合も特別な仮定ではない。

制御系の構成と定式化

EHAC 制御では、対象のむだ時間の最大値 d_{max} に対して、予測区間 T ($T \geq d_{max}$ なる整数) を導入し、 $E\{y(k+T) | Y_k\} = y_M(k+T)$ を満たす $u(k)$ を逐次求めていくことを基本としている。なお、 $E[\cdot | Y_k]$ は、 k 時点までに制御系から得られる情報集合 Y_k を基にした期待値を表し、 $y_M(k+T)$ は規範モデルより得られ

る T 時点先の目標値系列ベクトルである。まず Diophantine 方程式を(5-3-26)式で導入する。

$$S(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-T}R(z^{-1}) \equiv I \quad (5-3-26)$$

$S(z^{-1}), R(z^{-1})$ は各々、 $(T-1)$ 次、 $(n-1)$ 次のスカラー多項式である。(5-3-26)式を(5-2-2)式に代入し各出力 y_i 毎に整理すると最終的に(5-3-27)式を得る。

$$y_i(k+T) = \phi_i^T(k) \cdot \theta_i + F(z) \cdot w(k) + P(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (5-3-27)$$

ただし、

$$\phi_i^T(k) = [y_i(k), y_i(k-1), \dots, y_i(k-n+1); u_i^?(k+T-d), \dots, u_i^?(k+1), \mu_i^?(k); u_i^?(k-1), \dots, u_i^?(k-n-d+2)] \quad (5-3-28)$$

$$\theta_i = [r_{i,0}, r_{i,1}, \dots, r_{i,n-1}; \beta_{i,0}, \beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,T-d}; \beta_{i,T-d+1}, \dots, \beta_{i,n+T-2}]^T \quad (5-3-29)$$

$F(z), P(z^{-1})$ は、 $w(k)$ の、各々将来と過去の系列に係わる前進、後進の要素を含む多項式行列であり、 $w_i(k)$ を正規白色過程と仮定したこと、および異なる原料間の組成に相関の無いことは自明であることより下記の諸式が成立し、最終的に(5-3-30)式を得る。

$$E[y_i(k+T) - F(z) \cdot w(k) | Y_k] = E[y_i(k+T)], \quad E[P(z^{-1}) \cdot w(k) | Y_k] = 0,$$

$$E\left[\left\{P(z^{-1}) \cdot w(k)\right\}^2 | Y_k\right] = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^{n-2} p_{i,j} \sigma_i^2 < \infty$$

$$E[y_i(k+T)] = \phi_i^T(k) \cdot \hat{\theta}_i(k) \quad (5-3-30)$$

上記の(5-3-30)式の確率的な関係式を利用し、EHAC 制御では、 $u_i^?(k), u_i^?(k+1), \dots, u_i^?(k+T-d)$ が次の(5-3-31)式を満たす様に選ぶのである。

$$y_{i,M}(k+T) - \phi_i^T(k) \cdot \hat{\theta}_i(k) = y_{i,M}(k+T) - h_i(k+T) - \sum_{j=0}^{T-d} \beta_{i,j} \cdot u_i^?(k+T-d-j) = 0 \quad (5-3-31)$$

ここに、 $y_{i,M}(k+T)$ は、規範モデルの出力であり、

$$h_i(k+T) = \sum_{j=0}^{n-1} r_{i,j} y_i(k-j) + \sum_{j=1}^{n+d-2} \beta_{i,j+T-d} u_i^?(k-j) \text{ は過去の } y_i \text{ と } u_i^? \text{ で計算できる系}$$

列である。(5-3-31)式は $T-d+1$ 個の未知数 $u_i^?(k)$ に対し一個の式であり、(5-3-31)式を拘束条件として以下の様な制御方策を導入し、receding horizon (Åstrom, 1995)の考えにより、逐次 $u_i^?(k)$ を更新して行くのがこの制御方法の特徴である。

[方策 1: ステップ入力策]: $u_i(k) = u_i(k+1) = \dots = u_i(k+T-d)$ として、

$$u_i(k) = \{y_{i,M}(k+T) - h_i(k+T)\} / \sum_{j=0}^{T-d} \beta_{i,j} \quad (5-3-32)$$

で次のステップの制御出力 $u_i(k)$ を求める方策。

[方策 2: 操作変数のパワー最小策]: $J_i = \sum_{j=0}^{T-d} u_i(k+j)^2 \Rightarrow \min.$ を満たす制御策

として $u_i(k)$ を(5-34)式から求める方策。

$$u_i(k) = \beta_{i,T-d} \cdot \{y_{i,M}(k+T) - h_i(k+T)\} / \sum_{j=0}^{T-d} \beta_{i,j}^2 \quad (5-3-33)$$

以上の式の展開は、二つの報告 (Dugard, 1984) (Ydstie, 1988) を参照して整理したが、詳細および次項のパラメータ適応則の収束性を含めた証明はこれらの文献に依るものとする。

パラメータ適応則

以上で構成を説明した EHAC に対し、特に(5-3-30)式のパラメータ $\hat{\theta}_i(k)$ を逐次推定するパラメータ適応則として、Ydstie らは可変忘却変数を導入する方法(付録 5-A 参照)として二つの方法を提示しており、以下では文献(Ydstie, 1988)による $\lambda_i(k)$ とその忘却度を調整するパラメータ g_i を持つ下記の適応則を利用した。 $e_i(k) = y_i(k) - \phi_i(k-T) \cdot \hat{\theta}_i(k-1)$ の誤差信号に対し、

$$F_i(k) = \frac{1}{\lambda_i(k)} \left\{ F_i(k-1) - F_i(k-1) \phi_i(k-T) \cdot \phi_i^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \right\} / [\lambda_i(k) + \phi_i^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \cdot \phi_i(k-T)] \quad (5-3-34)$$

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + F_i(k) \cdot \phi_i(k-T) \cdot e_i(k) \quad (5-3-35)$$

$$\lambda_i(k) = \frac{\text{trace}\{F_i(k-1)\}}{\text{trace}\{F_i(k-1)\} + g_i \cdot e_i(k)^2 / \{1 + \phi_i^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \cdot \phi_i(k-T)\}} \quad (5-3-36)$$

以上を総合して EHAC 制御による調合制御系の構成を図 5.4 に示した。なお、図 5.4 を含め以下全てステップ入力策を採用している。これは、操作出力パワー最小策では、設定値変化に対し定常偏差が生じるため、別途制御回路に積分器を導入する必要があるが、簡単化のためステップ入力策で比較検討した。

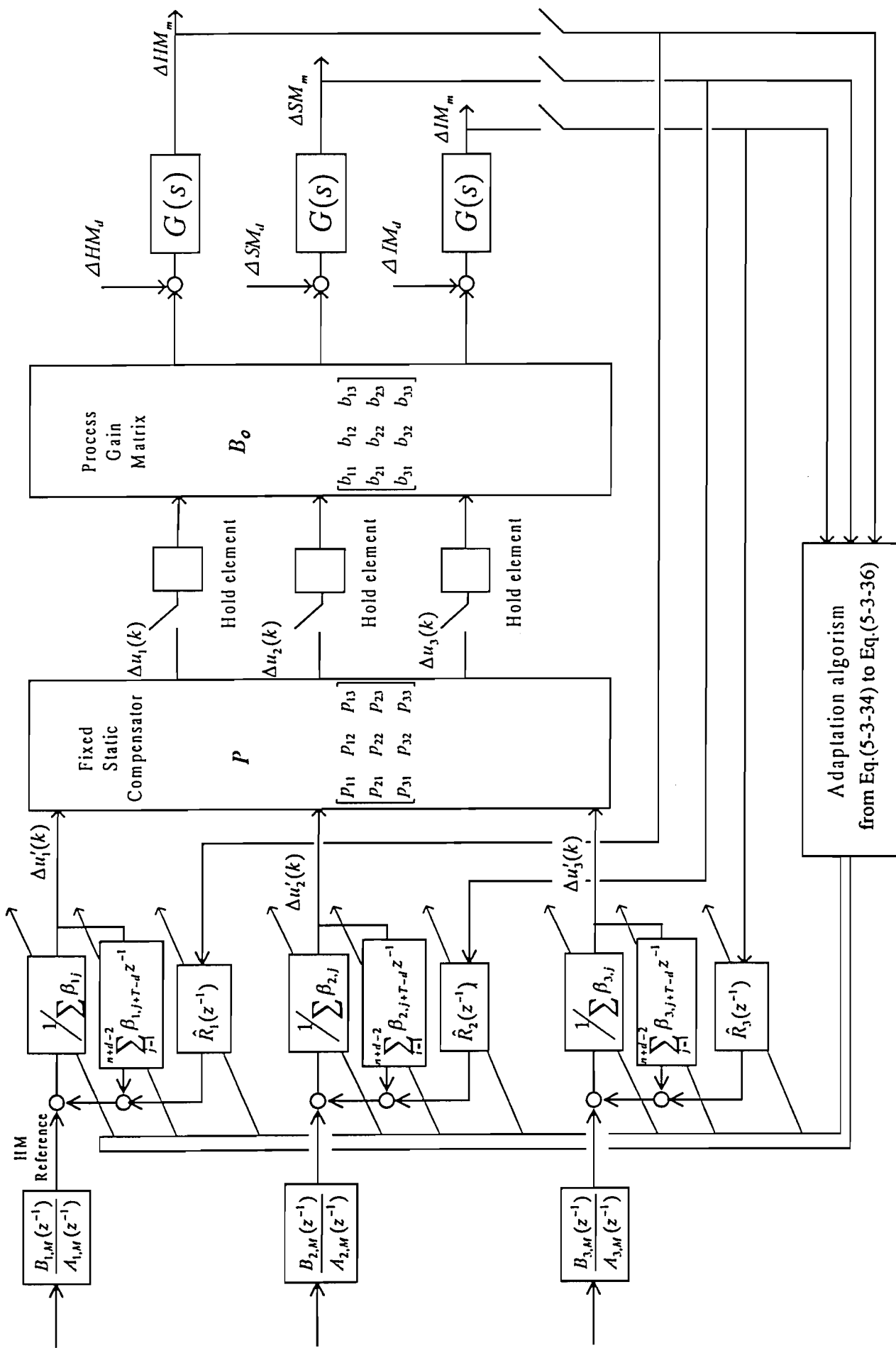


図 5.4 EHAC と前置補償器による多重ループ調整制御系の構成

EHAC 制御系の特徴

- (a) むだ時間の Underestimate による操作出力の過大や適応則の発散から逃れることが出来る。図 5.4 で制御装置のゲイン部が $1/\sum_{j=0}^{T-d} \beta_{i,j}$ となっていることからこのことが言える。
- (b) 定式化の仮定として、 $B(z^{-1})$ の漸近安定性は不要である。すなわち厳密な極・零相殺はなされておらず、ある種の非最小位相推移系にも適用可能と考えられる。
- (c) 出力の最小分散と言う点では、準最適となっている。この分散の増加は T の選定による。 T の選定は上記(a), (b)のロバスト性にも関わっており、一種の Trade Off であるが、この Trade Off を設計要素、または Tuning に出来る点が Flexibility を持っている点である。
- (d). パワー最小策では、設定値変化に対し定常偏差が残る場合が一般的であり、別途積分器を含めた構成が必要となる。
- (e) 調整パラメータは、予測区間 T 、パラメータ適応則の中の忘却度を調整するゲイン g 、および適応ゲインマトリックスの初期値 $F(0)$ の三種であり、他の適応制御方式に比べて少なく済む。しかし、これだけで必要かつ十分かどうかは定かでない。

5. 4 シミュレーションによる性能比較 (尾崎、1999)

在来制御法、Stochastic MRACS, EHAC 法の制御性能をシミュレーションにより確認した。5. 2 節で説明した様にまずスカラー系として HM を単独に制御した場合を想定し、基本的な制御性能をシミュレーション結果により比較した上で、三指標の多変数系としての性能比較を在来制御法と EHAC 法に対して行った。なお、計算には MATRIX_x Ver.5 を使用し、制御対象側の原料ミルプロセスと外乱部は、連続系として s 領域で時間応答を求め、制御部は X-Math 言語により、サンプル時間毎に制御計算を出力する形でシミュレーションを行った。なお、以下共通してサンプリング周期は 0.5 [h] とし、Tracking 目標 $y_{im}(t+k)$ を決定する規範モデルには、ステップ応答の行き過ぎ量 10%、50% までの立ち上がり時間 2 [h]、帯域幅 3 [rad/h] と決め求めた s 領域伝達関数を離散化した次式のモデルを共通して採用している (市川, 1984)。

$$y_{i,M}(k+T) = \frac{0.221 - 0.0079z^{-1} - 0.076z^{-2}}{1 - 1.54z^{-1} + 0.787z^{-2} + 0.11z^{-3}} u_{i,M}(k) \quad (5-4-1)$$

また、対象の次数 n に関しては、これらをあまり大きく取ると Regressor ベクトルの次数および結果として適応則の計算量が大きくなる割に制御性への効果が少ないことより (Seborg, 1986)、Stochastic MRACS、EHAC に共通して 3 次と設定した。さらに S/MRACS の構成で必要となる各種多項式は、以下のものを最終的に選定し適応則には $\lambda_1(k) = \lambda_2(k) = 1$ の逐次最小自乗法を採用している。 $D(z^{-1}) = L(z^{-1}) = H_2(z^{-1}) = 1 - 0.4z^{-1}$, $H_1(z^{-1}) = 1$

また、以下全ての適応則を逐次計算するに際し、適応ゲイン行列 $F_i(k)$ は (5-3-34) 式からも分かる様に、いずれも Regressor 行ベクトルと列ベクトルの積によりその修正行列要素を計算しているが、繰り返し計算による桁落ちから派生する適応則の発散を防ぐ必要がある。このために逐次更新には付録 5-B に説明した U-D 分解法を適用した (Wellstead, 1991)。

シミュレーションに際し、プロセスの特性変化としてプロセスゲイン、むだ時間、対象の時定数を下記の様に個別に変化させ、外乱応答時の制御量の標準偏差、および Tracking 時の規範出力との誤差信号の標準偏差で制御性能を比較した。

- a) プロセスゲイン：スカラー系の場合 50% 上昇、多重ループ系の場合は後述。
- b) むだ時間：1 [h] から 1.5 [h] に増加、
- c) 遅れ時定数：閉回路原料ミル系の循環比を 3.0 から 1.0 に変更し、等価時定数を 0.7 [h] から 0.35 [h] に変化。

なお EHAC では方策 1 のステップ入力策を採用している。

5.4.1 スカラー系としての制御性能比較

(1) 確定系としての性能比較

図 5.5 に HM の設定値変更途中にプロセスゲインを変化させた場合の、出力 $y(k)$ (即ち $\Delta HM_m(k)$) と操作出力 $u(k)$ (石灰石配合比率変更量) を比較した。適応制御の計算ではいずれの方法でもパラメータの初期値を必要とするが、これはあらかじめ変化前のゲインでステップ応答を取り、その整定値をパラメータの初期値として使用している。いずれの適応制御系でも当然のことながら、二回目以降の変化に対し規範モデルで指定した性能に近づいている。

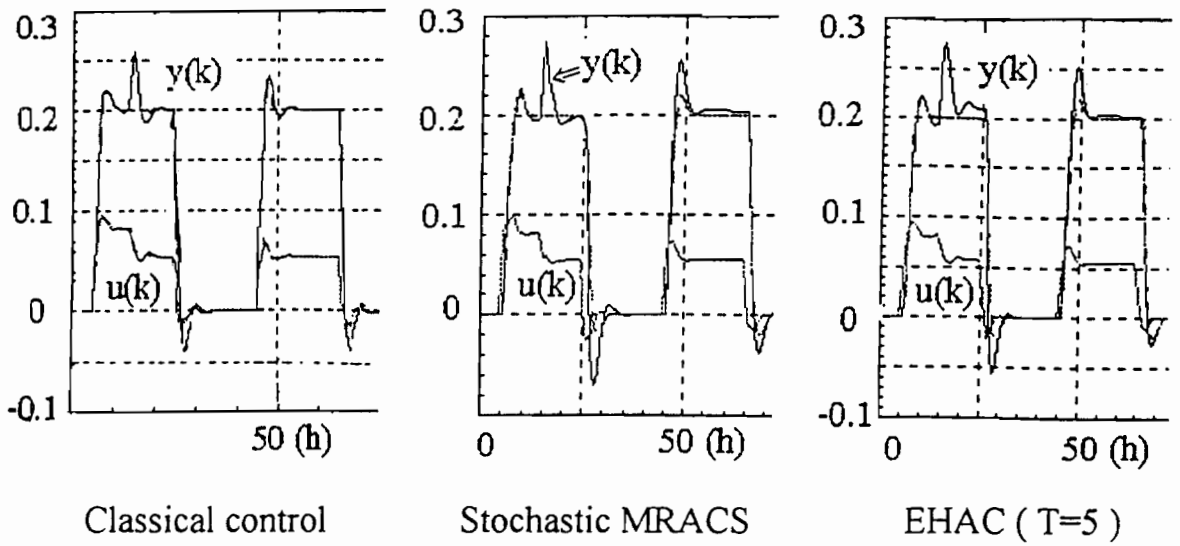


図 5.5 確定的 Tracking 性能

(2) 確率的 Regulation 特性の比較

調合制御では、原料ミル入口での原料組成変動としての確率外乱に対する制御性能が最も重要であるが、これをミル出口の HM の標準偏差で性能比較した。図 5.6 に 10 日単位で Open loop、在来制御方法、EHAC 各々に切り変えた場合の HM の変動を $y(k)$ として示した。

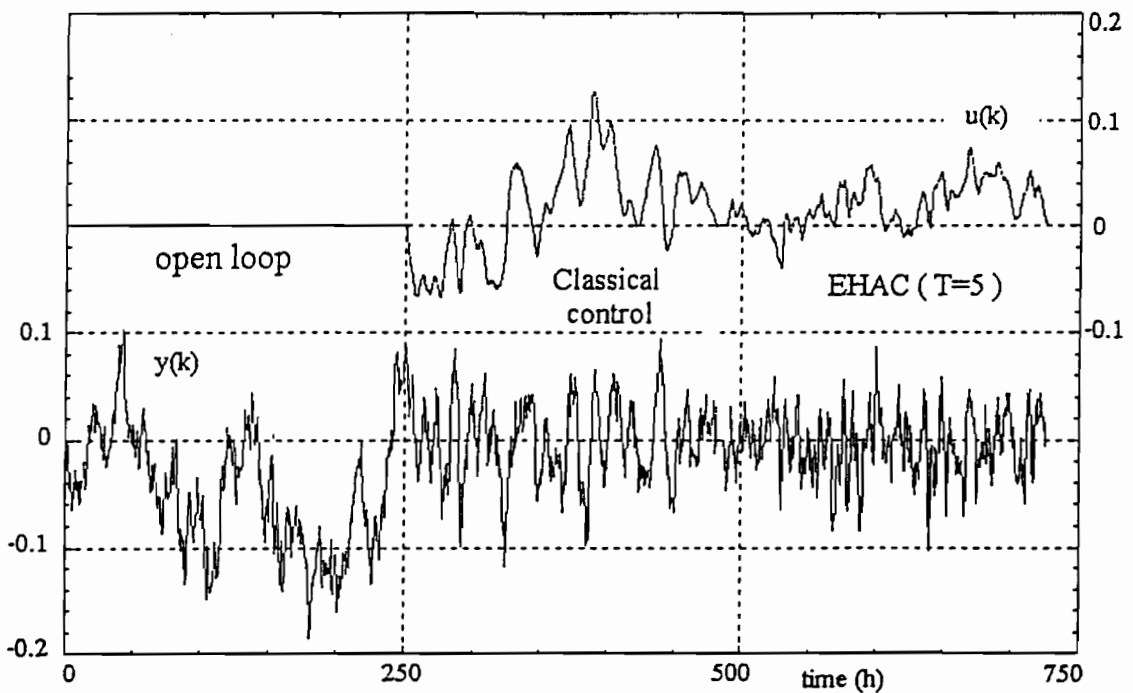


図 5.6 Open-loop/在来制御/EHAC 法によるミル出口 HM の変動

また、表 5.1 にプロセス変化を生じた場合を含め、5 日単位、即ち制御回数 240 回の *HM* の標準偏差を求め、三法による制御結果を比較した。全般的に在来法に比較し EHAC では、対象の変化に対しての制御性能の劣化を少なくし得る調整が十分に可能と判断出来る。

表 5.1 確率的 Regulation 性能の比較

Control method	Adjustable parameter	Nominal	a) $f_o = 3.69$	b) $l_x = 1.5$ $d = 3$	c) $L_c = 1$
EHAC with Step-Input Strategy	$T=4, F(0)=10xI,$ $g=100$	0.0260	0.0266	0.0301	0.0364
	$T=5, F(0)=10xI,$ $g=100$	0.0289	0.0300	0.0317	0.0358
	$T=5, F(0)=10xI,$ $g=1,000$	0.0303	0.0296	0.0332	0.0358
Classical Control (PI + Smith Method)	$Kp=0.2, T_i=0.8$	0.0374	0.0386	0.0414	0.0391
Stochastic MRACS	$F(0)=100xI,$ $\lambda_1=\lambda_2=1.0$	0.0250	0.0293	0.0308	0.0371

(note) : - Nominal Operating Condition : $f_o = 2.42, l_x = 1.0$ (hr), i.e. $d = 2, L_c = 3$

(3) 確率的 Tracking 特性の比較

図 5.7 に確率外乱存在下での設定値変更に対する Tracking 応答を示し、表 5.2 には規範出力と測定値の誤差量の標準偏差で三法の制御性能の比較を示した。プロセスの特性変動が無い場合は、確率的 MRACS の標準偏差が最小となっているが、むだ時間が変化した場合には仮定 (S/MRACS-A2) が成り立たず、特にむだ時間が想定より大きくなる場合は発散してしまう結果となっている。一方在来制御との比較で EHAC は通常状態及びむだ時間が変化した場合いずれにおいても Tracking 性能で優れている。

図 5.8 には設定値変更およびその後継続する外乱応答に対し、EHAC 制御におけるパラメータ適応則中の忘却係数 $\lambda(k)$ と適応ゲイン行列のトレース

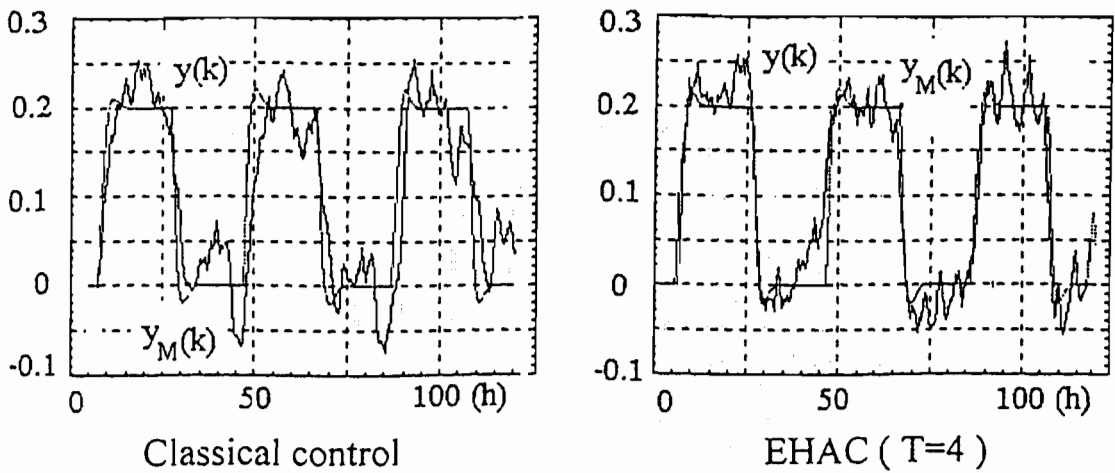


図 5.7 確率外乱存在下の Tracking 性能

表 5.2 三法による Tracking 誤差性能比較

Control Method	Adjustable Parameter	Nominal	$l_x = 1.5$ $d = 3$
EHAC With Step-Input Strategy	$T=4, F(0)=10 \times I,$ $g=100$	0.0319	0.0440
	$T=5, F(0)=10 \times I,$ $g=1,000$	0.0317	0.0438
Classical control (PI + Smith Method)	$K_p=0.2, T_i=0.8$	0.0479	0.0580
Stochastic MRACS	$F(0)=100 \times I,$ $\lambda_1=\lambda_2=1.0$	0.0296	∞

(note) :- “ ∞ ” means “ Calculation be diverged”

の変化の一例と推定パラメータ $\hat{\theta}$ の適応状況を示した。(5-3-34)~(5-3-36)式の適応則により、外部よりの設定値変化に対し忘却変数が自動的に減少し、適応則への誤差信号の効果を大きくして、パラメータの修正を早める効果が出ているが、調整変数 g をあまり大きく取りすぎると、Tracking 後の外乱応

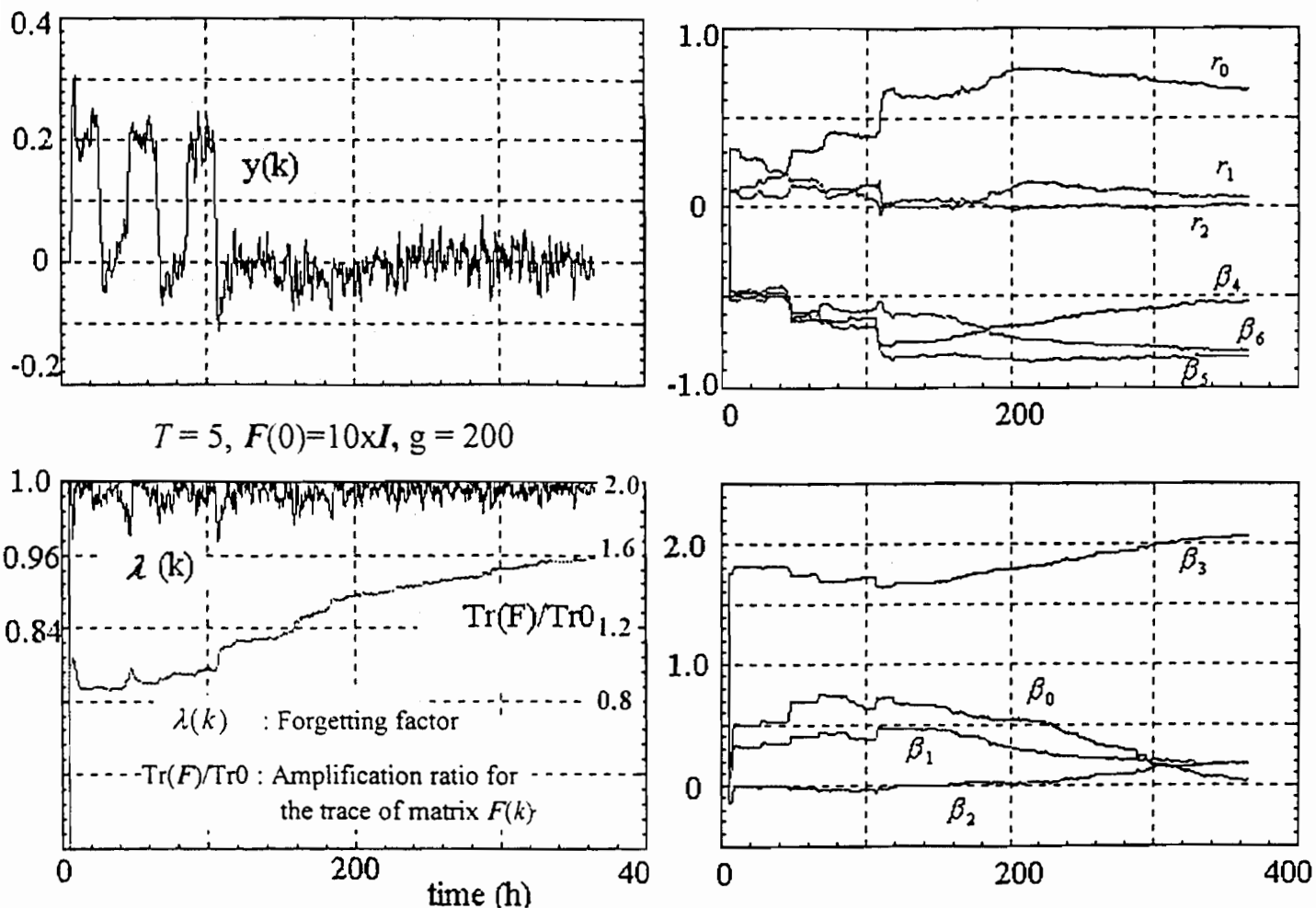


図 5.8 Regulation 後の Tracking 時の EHAC パラメータ適応則の挙動

答時に適応則が発散する可能性もあり、予測区間 T 、適応ゲイン行列の初期値、さらにプロセスの特性との関係で発散を防止し、かつ制御性能を保つ適切な調整値があると想定されるが、その調整規範については今後の課題である。

5.4.2 三指標の多重ループ構成による制御性能比較

図 5.4 で示した静的前置補償器 P を伴う多重ループ EHAC 制御による三指標の制御性能を在来方式と比較した。下記にシミュレーションに使用した実機プラントのポーリングデータより得た各種の行列等の値を示す。

$$\begin{aligned}
\bar{Z} &= \begin{bmatrix} 0.526 & 0.016 & 0.007 & 0.076 \\ 0.025 & 0.562 & 0.902 & 0.123 \\ 0.006 & 0.200 & 0.031 & 0.009 \\ 0.007 & 0.078 & 0.037 & 0.665 \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.81 & 0.0 & 0.0 \\ -0.90 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \\ -0.13 & -0.70 & 0.0 & 0.0 \\ -0.05 & -0.30 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} 0.803 \\ 0.141 \\ 0.0515 \\ 0.0047 \end{bmatrix} \\
M &= \begin{bmatrix} 4.938 & -10.37 & -10.37 & -10.37 \\ 0 & 17.78 & -46.21 & -46.21 \\ 0 & 0 & 46.22 & -73.96 \end{bmatrix} \quad \bar{B}_0 = \begin{bmatrix} 12.23 & 1.393 & 2.135 \\ -13.05 & -15.75 & -41.85 \\ 1.063 & 4.779 & -47.46 \end{bmatrix} \quad (5-4-2) \\
P &= \begin{bmatrix} 0.0897 & 0.00722 & -0.00233 \\ -0.0628 & -0.0552 & 0.0458 \\ -0.00431 & -0.00539 & -0.0165 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \overline{HM} &= 2.10 \\ \overline{SM} &= 2.60 \\ \overline{IM} &= 1.60 \end{aligned}
\end{aligned}$$

プロセスの伝達関数については、四章で例示した表 4.3 の各部の伝達関数を利用している。なおプロセスの変化として下記二点を考慮した。

- a) 山場の石灰石の鉱床が変化した場合の例として、組成行列 \bar{Z} の一行目に $[+0.081, -0.043, -0.018, 0.049]^T$ を加える場合。この変化により前置補償行列とプロセスゲイン行列の積 $B \cdot P$ は下記の通りとなる。

$$B \cdot P = \begin{bmatrix} 1.014 & -0.153 & 0 \\ -0.0387 & 0.751 & 0 \\ 0.0277 & 0.124 & 1 \end{bmatrix}$$

- b) むだ時間を 1[h] から 1.5[h] に変化させる場合。

図 5.9 は確率外乱存在下で上記 a) の場合の三指標設定値変更に対する Tracking 性能の比較を示す。明らかに EHAC 制御が優れていると言える。

表 5.3 には各指標の標準偏差による Regulation 性能の比較を示した。SISO 系の場合と同様 EHAC は特性変化に対して在来法に比較し、ロバスト性に優れていることが分かる。

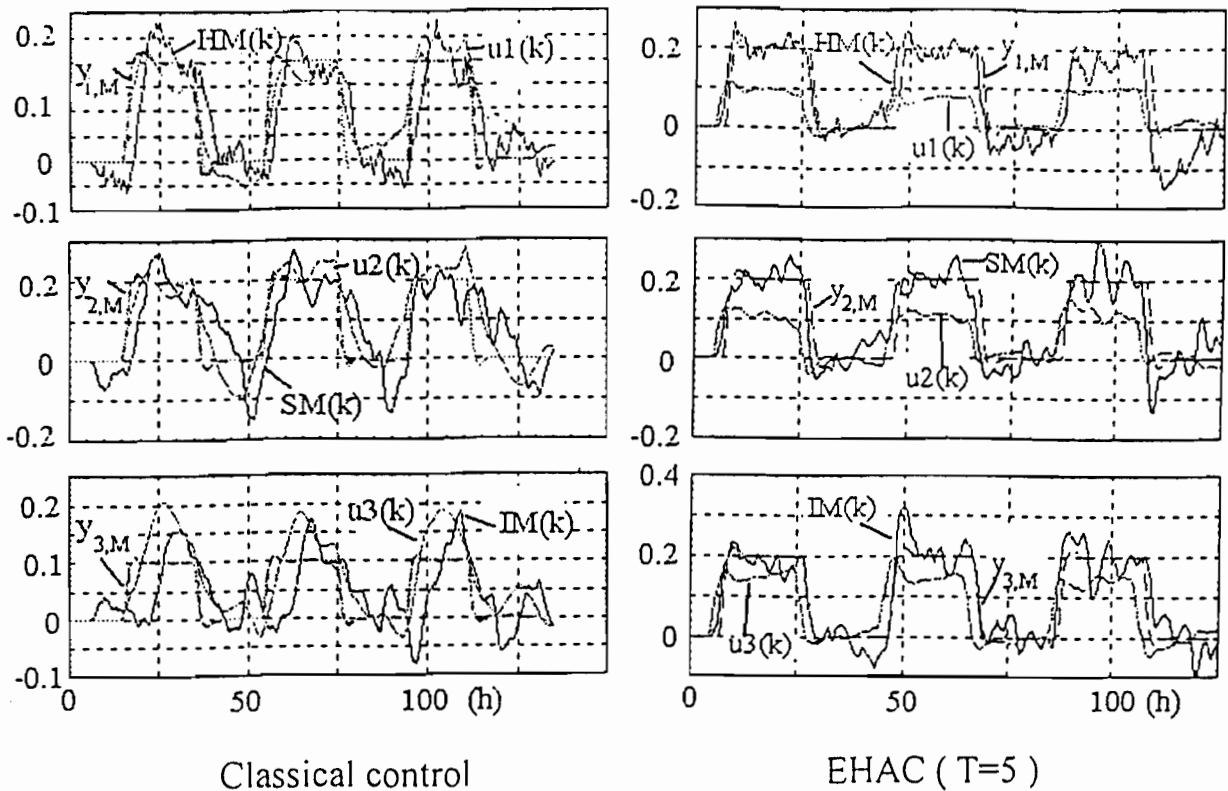


図 5.9 三指標制御での在来法と EHAC の制御結果

表 5.3 三指標の Regulation 制御性能の比較

Control Method	Adjustable Parameter		Standard Deviation		
			Nominal	"B" Change	$l_x = 1.5$ $d = 3$
Multi-loop EHAC (Step-input strategy with fixed pre-compensator)	$T=5,$ $F(0)=100 \times I,$ $g=100$	<i>HM</i>	0.0256	0.0258	0.0292
		<i>SM</i>	0.0377	0.0376	0.0400
		<i>IM</i>	0.0302	0.0215	0.0221
Classical Control (PI + Smith method with pre-compensator)	$K_p=0.484,$ $T_i=0.8 (h)$	<i>HM</i>	0.0291	0.0287	0.0325
		<i>SM</i>	0.0612	0.0586	0.0700
		<i>IM</i>	0.0302	0.0362	0.0345

(note): K_p has been decided with a try and error method to get same performance as the reference model defined by Eq.(5-4-1) and same figure for three loops.

5. 5 適応制御の応用の留意点と多変数適応制御への考察

以上セメントプラントの原料調合制御への適応制御の応用を意図して、一段予測と多段予測に基づく適応制御について、適応則を含めたアルゴリズムをシミュレーションにより在来法と比較検討した。結果として多段予測による EHAC 法の実機への応用の有効性を事前検証できたが、以下これらのシミュレーションによる検討を通して得た、実機へ適応制御を応用する際の留意点を定性的にまとめるとともに、他のプロセスへの応用を考え、一般的な多変数系に対する適応制御についての所見を述べる。これらの内容は現段階では定性的な考察であり、今後実機でテストを重ね確認する必要があるとともに理論面の裏付けを行えると想定できる項目もあり今後の課題である。

5.5.1 適応制御の実機への応用上の留意点

5. 3 節で説明した適応制御の三方式に共通した留意点を主に取り上げ、特にその方式により内容に差のある場合は特記する形で以下に列挙する。

(1) サンプリング周期を適切に選択する必要がある。

このことは、適応制御に限らず一般的な Digital Control Algorithm の実機への適用に言えることであるが (Middleton, 1991)、特に適応制御を応用する場合、適応則の収束性の条件として、付録 5-A でも説明したように Persistent Spanning (または Persistent Exciting) の条件、すなわち対象の同定のために外部から与える外乱または設定値変化が同定に十分な情報量を持っていることが必須である (新, 1996)。外乱が白色雑音から生成されていると想定しうる調合制御の場合は、理論上 Persistent Spanning 条件は満たされている。しかしその外乱の分散が相対的に小さい場合は、サンプリング周期の選定とも関連して適応則の数値計算上問題になる可能性があり、外乱と対象の周波数特性を考えたサンプリング周期の選定が重要となる。また容易に想像できることであるが、サンプリング周期が短すぎると独立性の少ない情報を多く取り入れてしまい、逆にサンプリング周期が長すぎると適応制御で着目したい動特性を見逃してしまうこととなり、適切なサンプリング周期の選定はこの点からも必要である。

(2) むだ時間に対する事前知識は重要であり実験等でその変動範囲等を確認して制御アルゴリズムの設計と調整にあたる必要がある。

この点は特に一段予測に基づく最小分散型 STR と MRACS に対して特に重要な留意点である。適応制御はどのような構成であれ、制御装置が自ら決めた過去の操作量を基本に、その操作による制御対象の出力から対象を同定し、次の時点の操作出力を逐次決めていく制御方式である。従って、むだ時間が全く不明でどの時点の操作変化に対する出力かを判定できなければ、制御以前の同定も出来ないことになるわけであり、極端な場合には適応則の発散を招く結果となる。一方プロセス制御の場合むだ時間の要素として原料の輸送等が支配的である場合も多く、この場合はあらかじめ計算しておくことは容易でありかつ重要である。また反応炉等におけるむだ時間の様にその推算が困難な場合は、対象の入出力信号を収集し、Wavelet 変換を応用したむだ時間の同定法（新、1998a）等を利用し求めておく様な考慮が肝要である。

一方、EHAC 法ではシミュレーション結果で示した様にむだ時間の変化に対しある程度のロバスト性を持っており適応則の発散を防止できるが、理論上むだ時間の上限値が必要である。対象のむだ時間に関する知識が不足しておりこの上限値を大きく見積もらざるを得ない場合は、結果として予測区間 T を大きく取る必要があり、制御性能例えば外乱応答に対する出力の分散の増加を来すことになる。従って、より目的に添った制御性能を得ることを考えるなら、むだ時間に対する事前知識がやはり重要となる。

(3) 対象の次数 n はあまり大きく取らない方が良い

調合制御の例では、モデルから事前知識として分かっている次数は“5”であるが、Stochastic MRACS, EHAC いずれでも適応制御系としての対象の次数は最終的に“3”とした。これは余り大きな次数を取っても制御結果に影響のないことと、一方対象の次数の増加は Regressor vector と適応ゲイン行列の次数を大きくし、数値計算上不利となる（Seborg, 1986）。また、サンプリング周期の選定とも関連し、Åstrom ら（Åstrom, 1984 または 1997）によって指摘された様に離散化により、制御装置から見た対象が非最小位相推移系になってしまう可能性も大きく（すなわちサンプリングにより高次のモードを取り入れることとから $B(z^{-1})$ が安定多項式でなくなる可能性が高くなること。）、次数を大きく取りすぎることは、特に極・零相殺を基本とした第一世代の適応制御では好ましくないと言える。

(4) 適応則の計算には U-D 分解法を使用すること

どのような適応制御を構成する場合でも適応則の計算には必ず Round Off の問題がつきまとう。従って上記の方法で Round off による適応則の発散を回避する必要がある。本研究の初期には UD 分解を使わずに Stochastic MRACS, EHAC いずれにおいても適応則の発散が時々発生した。さらに収束した場合でも UD 分解の使用の有無によりパラメータの収束値が異なる様な結果も得られた。このことから数値計算上確立された本法を利用することが肝要である。

(5) 適応ゲイン行列の初期値の選定

一般に対象の事前知識が十分にあり、Diophantine 方程式を利用して、パラメータベクトルの初期値 $\hat{\theta}(0)$ を自信を持って決められる場合は、適応ゲイン行列の初期値を大きく取ると、制御性能特に最初の数ステップの性能が良くなるが一般的に操作量の変化も大きくなる。一方逆の場合は適応ゲイン行列を大きく取りすぎると、初期の数ステップで $\hat{\theta}(k)$ ひいては操作出力が暴れることになる。EHAC による調合制御の場合、 $F(0) = 10 \times I$ 程度が適切であったが、この初期値は出来る限りシミュレーションで適切な値を求めておく方が良い。また何の事前知識も期待出来ない場合は、例えば $F(0) = I$ 等の小さめの値から Tuning を開始し、長期の運転状態で操作量の変化が許容しうる範囲の適切な値を選ぶ方法が妥当である。

(6) 適応制御の応用にも対象のモデリング技術が重要である。

Landau らは最新の著作 (Landau, 1998) において、適応制御に対する対象の事前知識の重要性を以下の様に集約している。“An adaptive controller is not a “black box” which can solve a control problem in real time without initial knowledge about the plant to be controlled. This *a priori* knowledge is needed for specifying achievable performance, the structure and complexity of the controller and the choice of an appropriate design method”。

適応制御はあくまでも “Parameter adaptation” の手法であり、対象の構造の知識を補うものではない。この点からも制御理論の中で「設計と Tuning を自動化する制御」との別名をいただく適応制御であるが、これを応用するに際しては、適応制御理論の基盤となる同定論、安定論、システム構造論の理解もさることながら、対象の物理モデルの開発が重要な要素となり、特に

適応制御を Implement する前の模擬 Tuning の実行には不可欠である。この点は Ydstie らが、EHAC は他の適応制御方式に比較し Tuning パラメータが少なくすむと詠いつつ、その応用への手順ではシミュレーションによる確認を重視したとの報告 (Ydstie, 1988) から伺える。以上より在来制御と同様、適応制御の応用に際しても対象のモデリング技術が不可欠であると言える。

5.5.2 多変数適応制御への考察

多変数適応制御について、理論面と調合制御および他の一般的なプロセス制御への応用の実際面に分けて以下論述する。

理論面の考察

まず多変数適応制御を構成する上で必要となる対象の構造を規定するインタラクタ行列と適応制御の関係を付録 5-C に示した。付録 5-C の内容を以下に要約し理論面の定性的な考察とする。

(1) 一段予測に基づく適応制御について、SISO 系の場合最小分散型 STR、

Stochastic MRACS のいずれにおいても対象のむだ時間が既知であると言う仮定が必要となったが (5.3.1、5.3.2 項の仮定参照)、多変数系の場合に一段予測を構成するためには、付録の (5C-3)、(5C-4) 式で定義するインタラクタ行列が既知でなければならない。制御対象が特別な構造を示す場合、すなわちインタラクタ行列がスカラーとなる場合 (付録の形式 1) や対角行列となる場合 (形式 2) にはこの事前知識を対象に結びつけて考えることは可能であるが、一般的な多変数系の場合にはインタラクタ行列の非対角項に関する事前知識が必要となる。この非対角項には入出力間の動的干渉の結果現れる実数係数を持つ多項式が存在し、この事前知識を持つと言うことは多変数系の対象の構造に対する全ての知識を持つことと同等であり、適応制御の目的からして容認できない条件となっている。この点が直説法による一段予測に基づく多変数適応制御系を構成する上での難点である。なお上記の特別な場合 (形式 1 および 2) の一段予測による適応制御の構成例として、インタラクタ行列がスカラーである場合の例が Borrison (Borrison, 1979) や Koivo ら (Koivo, 1980) により示された MIMO STR であり、対角行列となる場合を扱ったものとして Goodwin ら (Goodwin, 1980)、大川ら (大川, 1982) による構成がある (新, 1984)。

- (2) 一方付録 5-C の 3 項に示した多段予測による EHAC は、インタラクタ行列の Upper bound のみが既知であれば、その最大値以上に予測区間を拡張する事により、多変数適応制御を構成できる。この Upper bound は多変数系における最大むだ時間に相当し、その事前知識はスカラー系との対比上容認できるものである。多段予測を適用する同様な考えを Clark らによるモデル予測制御にあてはめ多変数適応制御系へ拡張した例も報告されている (Shah, 1987)。これらの方法はいずれも多段予測区間 $T (\geq \text{Upper Bound})$ を利用し、最小分散性を犠牲にする一方、制御系としてのロバスト性を確保しており、このことが結果的にインタラクタ行列の事前知識を排除していると考えられる。
- (3). 一方、多変数適応制御を入出力の非干渉化による考えから構成する方法も提示されている。この考えは多変数適応制御の構成に際しインタラクタ行列を積極的に排除し、制御系に前置補償器を設けて近似的に非干渉化を達成しつつ適応制御系を構成しようというアプローチであり各種の構成方法が提示されている (市川, 1985) (Wittenmark, 1987) (山本, 1998)。

調合制御を主体とした応用面の考察

- (1). 調合制御系を多変数系と見た場合、上記のインタラクタ行列がどの様にプロセスモデルと関係しているかを考える。まず、四章で求めた図 4.10 のモデルでは制御対象である原料粉碎ミルプロセスの伝達関数行列を (4-4-7) 式の伝達関数を同一要素として持つ対角行列で表現した。この場合はインタラクタ行列がスカラーとなる場合、すなわち付録 3-C の形式 1 に該当している。次に例えば図 2.10 のプロセスフローで原料ミル前の四種の原料ホッパーが配置上同一箇所に設置できず、例えば石灰石ホッパーのみ予混合プロセスの近辺に配置せざるを得ない場合を考えると、石灰石の搬送によるむだ時間が他の原料に比し大きくなる。この場合インタラクタ行列は各三種の原料のむだ時間に相当する前進演算子を対角行列とする形、すなわち付録 3-C の形式 2 となる。さらに一般的なインタラクタ行列を持つ場合に対応するプロセスモデルは、四章の解析で仮定した原料粉碎ミルにおける各原料の混合特性が同一であるとの仮定が成立しない場合に相当する。例えば一般的に原料の被粉碎性は粘土原料、石灰石、珪石、鉄滓の順に高いと言われており、厳密には各原料によっ

て閉回路粉碎系における循環比が異なっている。この様に厳密に考えるともはや対象を対角行列で表現することはできず、一般的な多変数系の構成となる。しかし、この様な非対角項の影響、すなわち平均的な時定数やむだ時間からのずれ量はわずかであると想定され、一般的に物理量間に強い干渉のある本質的な多変数系とは調合制御系は異なると考えられる。従って本報告で用いた疑似対角化による方法を拡張し、形式2に相当するインタラクタ行列が対角行列となる様に固定前置補償器を設けることにより、全ての調合制御系の適応制御を構成し得ると考えられる。

- (2). 次により一般的なプロセスに対する多変数適応制御の構成法を考える。この場合も結論として上記と同様のアプローチが実用的と考える。すなわちあるプロセスを制御対象と考えた場合、従前に適用していた PID 制御等の SISO 制御系の制御性をより高めるために多変数制御を考える場合が一般的であり、当然 SISO 系として制御を適用していた場合に制御量と操作量の間的一对一の対応がついているのが一般的である。従ってこの対応を基本として他の操作量からの干渉を補償する形で適応制御の原型となる多変数制御系を構成するのが自然な流れである（新、1998b）。すなわち変数間の干渉の補償法について、実用的な見地からすると入出力間のむだ時間の対応を取った上で、ゲイン間の干渉のみを前置補償器で補償する方法が最も自然な構成法と考えられる。これは通常制御系を構成する場合、我々制御技術者にはプロセス解析による方法や、従来からの同一プロセスにおけるチューニングの経験からある制御量に干渉する他のループの操作量がどれか、またそれがどの程度であるかの判断がある程度ついているのが一般的である。かつこの場合その程度とは当然静的なゲインによる干渉を意味している。理論的に証明する事は今後の課題であるが、ほとんど大半の多変数系プロセスの適応制御は、ゲイン間の干渉を前置補償器で補償し、各ループの動的な変化を適応制御系で個別に補償していく構成法で Tracking や Regulation の制御目標を十分達成できると考えられる。またこの点を立証することは、適応制御理論とロバスト制御理論の協調が図られつつある現在、今後の課題として取り組むべき重要な点であり、また可能な状況と考えている。

5. 6 結 言

以上調合制御を対象とし、四章で求めた多変数確率モデルをもとに、まず調合制御系がゲイン間の干渉を補償する前置補償器を設置することにより、三種の品質指標を三種の配合比変更量で独立に制御できる系であることを例証した。その上で、在来のスミス補償を伴った PI 制御系、一段予測に基づく確率的 MRACS、多段予測に基づく Extended Horizon 適応制御法を構成しシミュレーションにより Regulation 性能と Tracking 性能を対象の特性変化に対するロバスト性能を含めて比較した。結果として多段予測に基づく EHAC の実機への応用可能性を事前検証できた。ただし、この EHAC に含まれる可調節パラメータの系統的な調整方法の検討が今後の課題である。さらに、これらの一連の研究から適応制御を実機に応用する際の留意点と多変数適応制御の構成法に関して一般的なプロセスを対象として定性的考察を行ったが、今後適応制御の理論面の動向を注視しつつ、この定性的考察に対して定量的な検討を行うことも今後の課題と考えている。

〈付録 5-A〉 可変忘却変数によるパラメータ適応則

一般的な適応則として、STR で説明した (5-3-13)-(5-3-15) 式による重み付き逐次最小二乗法が一般的であり、 $\lambda_1(k)=\lambda_2(k)=1$ の時、逐次最小二乗法、 $\lambda_1(k)/\lambda_2(k)$ を一定に保ち逐次にゲイン行列のトレースが一定になるように $\lambda_1(k)$ を変える固定トレース法等を包含している。この適応則は逆行列補助定理を用いて逆行列演算を回避し、(5-3-14)式でゲイン行列を計算しているが、そのもとの形は次の式である (Landau, 1981)。

$$F^{-1}(k) = \lambda_1(k) \cdot F^{-1}(k-1) + \lambda_2(k) \cdot \phi(k-1) \cdot \phi^T(k-1) \quad (5A-1)$$

ただし、 $0 < \lambda_1(k) \leq 1$, $1 \leq \lambda_2(k) < 2$

この式より、 $\lambda_1(k)=1$ の場合は、 $\lambda_2(k) > 0$ より $F^{-1}(k)$ は連続して増加し、(5-3-13)式より、 θ の更新へ新しい観測値の寄与が少なくなってしまうことになる。一方 $\lambda_1(k)$ を "1" 以下の固定値とすると少ない情報しか測定値に無い時に $F^{-1}(k)$ が減少してしまい、推定値のドリフトや不安定になる問題が発生する。このことは、適応則の収束性には Persistent Spanning すなわち

Regressor ベクトル ϕ の積による行列が正則でかつパラメータ推定に十分な空間を張る必要があることと関連する。すなわち新しい情報を取り込んで、プロセスの変化による適応性を保つと同時に、十分な観測データを用いて正則性を確保したいと言う要求である（新、1996）。

この様な適応則に対する要求に対し、Ydstie は Fortescue らと提案したある種の情報尺度を一定に保つ様に、過去のデータを Constant Information Principle に従って捨て去る方式を逐次式の形にし（Ydstie, 1986）、実機の適応則に応用し効果を確認している（Ydstie, 1985）。そのアルゴリズムは下記のように表せる。

まず重み付き最小分散推定の一般形として下記の適応則を考える。

$$F_k^{-1} = \lambda_k F_{k-1}^{-1} + \phi_{k-T} \phi_{k-T}^T r_k^{-1} \quad (5A-2)$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + F_k \phi_{k-T} r_k^{-1} \{ y_k - \phi_{k-T}^T \hat{\theta}_{k-1} \} \quad (5A-3)$$

ただし、 $\hat{\theta}_k$ は時点 k までに得られる情報をもとにした θ の条件付き期待値、 F_k は対応する共分散行列、 r_k は測定値 y_k の分散、 λ_k は忘却係数である。

ここで、全ての過去のデータを対応する測定分散で尺度変換した値の重み付き残差 N_k を下記で決める。

$$N_k = \sum_{i=1}^k \sigma_{i/k} \cdot r_i^{-1} \cdot (y_i - \phi_{i-T}^T \cdot \hat{\theta}_k)^2 \quad (5A-4)$$

ここに、 $\sigma_{i/k}$ は下記の漸化式で表される重み係数である。

$$\sigma_{k/k} = 1; \sigma_{i-1/k} = \lambda_i \cdot \sigma_{i/k} \quad \text{where } \lambda_i \in (0, 1] \quad (5A-5)$$

(5A-4)式は次のように逐次式で書き表せる。誤差信号 $e_k = y_k - \phi^T \hat{\theta}_k$ に対し、

$$\begin{aligned} N_k &= \lambda_k N_{k-1} + (1 - \phi_{k-T}^T \cdot F_k \cdot \phi_{k-T} \cdot r_k^{-1}) \cdot r_k^{-1} \cdot e_k^2 \\ &= \lambda_k N_{k-1} + \lambda_k \cdot e_k^2 \cdot (r_k \cdot \lambda_k + \phi_{k-T}^T \cdot F_k \cdot \phi_{k-T})^{-1} \end{aligned} \quad (5A-6)$$

$N_k = N_{k-1} = \dots = N_0$ と選ぶと、

$$\lambda_k = \frac{1}{2} \times \left(n_k + \sqrt{n_k^2 + 4 \cdot \omega_k} \right) \quad (5A-7)$$

ただし、 $\omega_k \equiv \phi_{k-T}^T \cdot F_{k-1} \cdot \phi_{k-T} \cdot r_k^{-1}$, $n_k \equiv 1 - \omega_k - \frac{e_k^2}{(r_k \cdot N_0)}$

これらの関係を使いパラメータ適応則は下記の逐次式で行う。

$$F_k = \lambda_k^{-1} \left\{ F_{k-1} - \frac{F_{k-1} \cdot \phi_{k-T} \cdot \phi_{k-T}^T \cdot F_{k-1}}{r_k (\lambda_k + \omega_{k-1})} \right\} \quad (5A-8)$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + r_k^{-1} \cdot F_k \cdot \phi_{k-T} \cdot (y_k - \phi_{k-T}^T \cdot \hat{\theta}_{k-1}) \quad (5A-9)$$

(5A-7)式より、可変忘却係数 λ_k は次のような場合 “1” に近くなる。

- プロセスが励起されていない場合
- $\hat{\theta}_k$ が真値に近づいた場合、すなわち $e_k \approx 0$ の場合
- $\hat{\theta}_{k-1}$ 中の不確実性が大きくなった場合（すなわち F_{k-1} 、従って ω_k が大きくなった場合）
- パラメータ N_0 を大きく取った場合

逆に、 F_{k-1} が相対的に小さい状態で e_k が大きくなった場合に λ_k は “1” よりかなり小さくなり、次の F_k を大きくしてパラメータの再調整を引き起こすことになる。

Ydstie らは、上記のアルゴリズムが N_0 の選定により、敏感に反応しすぎる点から、本文で述べた(5-3-34) - (5-3-36)式の修正 Version を提示している。ただし、考え方は上記と同様である。

〈付録 5-B〉 U-D 分解のアルゴリズム (Wellstead, 1991)

適応則は一般に下記の形式をしている。この形式の適応則の誘導には逆行列補助定理を利用しているが、一般に長時間の演算の場合、 $F(k)$ の正定値・対称性が保持できなくなり、適応則が発散する場合がある。

$$F(k) = \frac{1}{\lambda} \left[F(k-1) - \frac{1}{\beta} \{ F(k-1) \cdot x(k) \cdot x^T(k) \cdot F(k-1) \} \right] \quad (5B-1)$$

$$\text{where } \beta = \lambda + x^T(k) \cdot F(k-1) \cdot x(k)$$

これは、上記の式において [] 内の演算が正定値対称行列の差となっており、計算機内部での桁落ちにより正定性を保証できなくなる可能性があるためである (片山, 1983)。このことに対処しうる $F(k)$ の更新法として、Bierman による UD 分解がある。これは、計算機の演算によって、 $F(k)$ の対称性や正定性を崩さない方法である。UD 分解とは、各時点で $F(k)$ を以下のように分解することを言う。

$$F(k) = U(k) \cdot D(k) \cdot U^T(k) \quad (5B-2)$$

ただし、 $U(k)$ は上三角行列、 $D(k)$ は対角行列

この分解を逐次行うことにより、 $F(k)$ の正定対称性を保つ方法である。計算順序を以下に示す。

Step1. m 次のベクトル f, g を下記で計算する。

$$f = U^T(k-1) \cdot x(k)$$

$$g = D(k-1) \cdot f$$

さらに、 $\beta_0 = \lambda$ (Forgetting factor) とおく

Step2. $j=1 \sim m$ まで下記の (1), (2) を繰り返す。

(1) 以下の計算をする。

$$\beta_j = \beta_{j-1} + f_j g_j$$

$$d_j(k) = \beta_{j-1} d_j(k-1) / \beta_j \lambda$$

$$v_j = g_j$$

$$\mu_j = -f_j / \beta_{j-1}$$

(2) For $i = 1$ to $j - 1$ ($j > 1$) まで下記を計算する。

$$u_{ij}(k) = u_{ij}(k-1) + v_i \mu_j$$

$$v_i = v_i + u_{ij}(k-1) v_i$$

Step3. 以下を計算する。

$$\bar{L}(k) = [v_1, \dots, v_m]^T$$

$$L(k) = \bar{L}(k) / \beta_m$$

Step4. パラメータの更新を行う。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L(k)e(k) \quad \text{ただし、} \quad e(k) = y(k) - x^T(k)\hat{\theta}(k-1)$$

Step5. $t = t+1$ として step1 へ戻る。以下同様。

〈付録 5-C〉 多変数適応制御系の一般的構成

—インタラクタ行列と適応制御—

MIMO 系の適応制御に対し、Goodwin & Sin の成著より確定系の制御構成を 1、2 項でまとめ、その結果を受け多変数確率制御系に対する構成と特徴を Dugard らと Ydstie らの報告を参照してまとめる。なお、以下全て定理等の証明は省略する。詳しくはこれらの成著・文献を参照のこと。

1. 確定系 MIMO システムに対するインタラクタ行列と一段予測による制御設計

(Goodwin, 1984. §5. 2. 3)

確定的 ARMA モデルで対象を考える。

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) \cdot y(k) &= B(z^{-1}) \cdot u(k) \\ T(z^{-1}) &= A(z^{-1})^{-1} \cdot B(z^{-1}) \end{aligned} \quad (5C-1)$$

我々は、出力 $\{y(k)\}$ が希望の出力系列 $\{y^*(k)\}$ に追随することを考える。もしそれが可能な場合、システムは *Output function controllable* と呼ぶ。次の *Lemma 1* が成立する。

Lemma 1 : (5C-1)式のシステムは伝達関数行列 $T(z^{-1})$ の階数が、ほとんど全ての z に対して出力数 m に等しいとき、かつその時に限り *Output function controllable* である。

次に二つの仮定を置く。

仮定 A : 入力数 r と出力数 m は等しく、かつほとんど全ての z に対して、 $\det T(z^{-1}) \neq 0$ を満たす。

仮定 B : 伝達関数は厳密にプロパーである。

仮定 A は *Output function controllable* を仮定し、仮定 B は各入出力間に最低一単位のむだ時間があることを示している。

次にインタラクタ行列を考える前に SISO 系 $\{A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k)\}$ でのむだ時間 d を考える。SISO 系の場合は $B(z^{-1}) = z^{-d}B'(z^{-1})$ と表したとき、 $B'(z^{-1})$ の第一項の係数が "0" でないような d としてむだ時間を考えられる。さらに正規な言い方をすると、次の(2)式を満足するあるスカラー関数 $\xi(z)$ が存在し、 $\xi(z) = z^d$ となることである。

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \xi(z)A(z^{-1})^{-1}B(z^{-1}) = k \quad (k \text{ は零で無い実数}) \quad (5C-2)$$

多変数系の場合、伝達関数行列の遅れの構造を規定するには、上記の拡張として一つの多項式行列 $\xi(z)$ を導入する。次の *Lemma 2* が多変数系の場合に成り立つ。

Lemma 2 : 与えられた伝達関数行列が、仮定 A, B を満足するとき、次の関係を満たす一つの多項式行列 $\xi(z)$ が存在しインタラクタ行列と呼ぶ。

$$(i) \quad \det \xi(z) = z^{\bar{m}} \quad \bar{m} \text{ は整数} \quad (5C-3)$$

$$(ii) \quad \lim_{z \rightarrow \infty} \xi(z) \cdot T(z) = K, \quad K \text{ は一つの正則行列} \quad (5C-4)$$

一般に、 $\xi(z)$ は次の構成をとる。

$$\xi(z) = H(z) \cdot D(z) \quad (5C-5)$$

$$\text{ここに、} \quad D(z) = \text{diag}[z^{f_1}, \dots, z^{f_m}] \quad f_i \geq d_i \equiv \min_{1 \leq j \leq m} d_{ij} \quad (5C-6)$$

d_{ij} は j 番目の入力と i 番目の出力間のむだ時間である。

$H(z)$ は (5C-7) 式の形をしたユニモジュラー行列である。

$$H(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21}(z) & 1 & 0, \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}(z) & h_{m2}(z) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5C-7)$$

ただし、 $h_{ij}(z)$ は z で割り切れるかまたは 0 である。

インタラクタ行列について、次の様な特別な形式を考える。

$$\text{形式 1 : } \xi(z) = z^d \cdot I \quad \text{ここに } d = \min_{i,j} d_{ij} \quad (5C-8)$$

これは、全ての出力が同一のむだ時間 d を持つ場合である。

$$\text{形式 2 : } \xi(z) = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_m] \quad \text{ここに } d_i = \min_j d_{ij} \quad (5C-9)$$

これは、 i 番目の出力が各入力に対し同一のむだ時間 d_i を持つ場合に相当する。

次にインタラクタ行列が出力 $\{y(k)\}$ の一段予測にどのように関係するか、さらにその結果として一段予測による制御則にどのように係わるかに関する **Lemma** と定理を示す。

Lemma 3 :

- (i) 離散系の場合、 $\xi(z)^{-1}$ は一つの安定な演算子である。
- (ii) 厳密にプロパーな伝達関数 $T(z)$ に対しては、(5C-6) 式の f_1 から f_m は結果として全て非零、すなわち $f_i > 0 \quad i=1, \dots, m$

定理 1 : 変数 $\bar{y}(k)$ を次の差分方程式を満たす様を選ぶ。

$$\bar{y}(k) = \xi(z)y(k) \quad (5C-10)$$

仮定 A, B が成立するとき、 $\bar{y}(k)$ は $u(k)$ と $y(k)$ を用いた次の一つの予測モデルとして表すことができる。

$$\bar{y}(k) = \alpha(z^{-1}) \cdot y(k) + \beta(z^{-1}) \cdot u(k) \quad (5C-11)$$

ここに、

$$(i) \quad \alpha(z^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \cdots + \alpha_n z^{-n} \quad (5C-12)$$

$$(ii) \quad \beta(z^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \cdots + \beta_n z^{-n} \quad (5C-13)$$

$$(iii) \quad \beta_0 \text{ は正則} \quad (5C-14)$$

(iv) $\bar{y}(k-d)$ は $y(k), y(k-1), \dots$ で表すことができる一つの既知関数である。

定理 1 を使って一段予測による制御則を導くために、フィルターを掛けた希望出力 $\bar{y}^*(k)$ を次式で導入する。

$$\bar{y}^*(k) = \xi(z) \cdot y^*(k) \quad (5C-15)$$

$\bar{y}(k)$ を $\bar{y}^*(k)$ に持っていく様な操作系列 $u(k)$ を求める。その様なフィードバック制御則は次の定理 2 で記述できる。

定理 2 :

(a) $\bar{y}(k)$ を $\bar{y}^*(k)$ に持っていくフィードバック則は次の形を採る。

$$\beta(z^{-1}) \cdot u(k) = \bar{y}^*(k) - \alpha(z^{-1}) \cdot y(k) \quad (5C-16)$$

(上記の方程式が可解であることは定理 1 の(iii)項より保証されている。)

(b) 上記の制御による結果として、閉ループ系は次のように表される。

$$\bar{y}(k) = \bar{y}^*(k); \quad t \geq d \quad (5C-17)$$

$$\begin{bmatrix} \xi(z) & 0 \\ A(z^{-1}) & -B(z^{-1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi(z) \cdot y^*(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5C-18)$$

$$(c) \quad \lim_{k \rightarrow \infty} [y(k) - y^*(k)] = 0 \quad (5C-19)$$

(d) $\det \xi(z) \det B(z^{-1})$ が全ての $|z| > 1$ に対して非零の場合に閉ループ系は安定である。

この定理は次のことを意味している。

—上記の一段予測制御則は希望出力 $y^*(k)$ に対する完全な tracking を達成する制御則を与えるのではなく、フィルター出力 $\bar{y}(k)$ がフィルターされた希望出力 $\bar{y}^*(k)$ に tracking する制御則である。

—(5C-19)式より、 $\xi(z)$ による動特性による過渡現象の後に、系列 $\{y(k)\}$ は $y^*(k)$ に収束する。

以上の結果は、希望出力 $y^*(k)$ を次式で表すモデル規範制御に直接拡張できる。

$$E(z^{-1}) \cdot \bar{y}^*(k) = H(z^{-1}) \cdot r(k) \quad (5C-20)$$

$$E(z^{-1}) = E_0 + E_1 z^{-1} + \cdots + E_n z^{-n}; \quad E_0 \text{ は正則} \quad (5C-21)$$

$$\bar{y}^*(k) = \xi(z) \cdot y^*(k)$$

2. 確定的 MIMO システムに対する一段予測適応制御の構成

(Goodwin, 1984. § 6. 3. 3)

(5C-1)式の確定的 ARMA モデル (DARMA モデル) を考え仮定 A, B が成り立つものとして 1 項の結果を要約しておく。

— *Lemma 2* より、伝達関数行列 $T(z)$ に対し(5C-5)式で表され (5C-4)式を満たす、一つのインタラクタ行列 $\xi(z)$ が存在する。

— $T(z)$ が厳密にプロパーであれば、*Lemma 3* より $[\xi(z)]^{-1}$ は安定な一つの演算子で、かつ (5C-6)式内の f_i について $f_i \geq 1$ が言える。

— さらに定理 1 より、以下の条件を満たす一つの正の整数 d (これは $\xi(z)$ 内の全ての多項式の最高次数に該当する) が存在する。すなわち、

$$\bar{y}(k) = \xi(z)y(k) \quad \text{再掲(5C-10)}$$

$\bar{y}(k)$ は $y(k+d), y(k+d-1), \dots$ で構成できる一つの既知関数であり、次の様に表すことができる。

$$\bar{y}(k) = \alpha(z^{-1}) \cdot y(k) + \beta(z^{-1}) \cdot u(k) \quad \text{再掲(5C-11)}$$

ここに、

$$\alpha(z^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_n z^{-n_1} \quad \text{再掲(5C-12)}$$

$$\beta(z^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n_2} \quad \text{再掲(5C-13)}$$

$$\beta_0 \text{ は正則} \quad \text{再掲(5C-14)}$$

SISO 系の適応制御構成上一般的にむだ時間は既知と仮定し、さらに対象の逆系が安定な場合に初めて有界な操作出力を得ることができるが、MIMO 系でも対応する次の二つの仮定をおく。

仮定 C: $\xi(z)$ は既知である。

仮定 D: 対象は定理 2 の (d)項の意味で逆系が安定である。

さらに、適応制御系が十分な自由度を持つために以下の仮定 E をおく。

仮定 E: (5C-12), (5C-13)式で規定する多項式 $\alpha(z^{-1}), \beta(z^{-1})$ は有限な既知の次数を持つ。

以上の準備のもとに MIMO 系の適応制御の構成を考える。

適応制御の制御目標は、SISO 系の場合と同様、系列 $\{y(k)\}, \{u(k)\}$ を有界に保ちながら漸近的に出力 Tracking を達成すること、すなわち次式を満たすことである。

$$\lim_{i \rightarrow \infty} [y_i(k) - y_i^*(k)] = 0; \quad i = 1, \dots, m \quad (5C-22)$$

1項で述べたように、あらかじめ決めうる系列 $\{y^*(k)\}$ と既知と仮定したインタラクタ行列を用いて $\{y^*(k)\}$ のフィルターされた系列を次式で導入する。

$$\bar{y}^*(k) = \xi(z) \cdot y^*(k) \quad \text{再掲(5C-15)}$$

(SISO系の場合にはこの表現は単純に $y^*(k+d)$ となっていることに注意。)

本文5.3節のSISO系に対する適応制御の構成と同様な考えで以下にMIMO系の一段予測適応制御を構成する。

再掲(5C-11)式は次のように書くことができる。

$$\bar{y}(k) = \theta_0^T \cdot \phi(k) \quad (5C-23)$$

ここに、 θ_0 は $[\alpha(z^{-1}), \beta(z^{-1})]$ の係数からなる $m \times (n_1 + n_2)$ の行列、 $\phi(k)$ は $(n_1 + n_2) \times 1$ の列ベクトルで次のように表され、 k 時点で取得可能である。

$$\phi(k) = [y(k)^T, y(k-1)^T, \dots, u(k)^T, u(k-1)^T, \dots]^T \quad (5C-24)$$

次にパラメータ適応則を導入し、以下の適応制御アルゴリズムを得る。

MIMO 一段予測適応制御則

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{a(k) \cdot \phi(k-d) \cdot [y(k)^T - \phi(k-d)^T \cdot \hat{\theta}(k-1)]}{c + \phi(k-d)^T \cdot \phi(k-d)}; \quad c > 0 \quad (5C-25)$$

$$\bar{y}^*(k) = \hat{\theta}(k)^T \cdot \phi(k) \quad (5C-26)$$

SISO系の場合と同様に式を整理し $u(k)$ を求めることができるので、(5C-26)式は一つのフィードバック制御則を表現している。該当する式が可解であるためには $u(k)$ にかかる係数行列が全ての時刻 k で正則でなければならない。この係数行列が特異となるのは確率"0"の事象であり、したがって $a(k)$ はほとんどの場合"1"とすることができる。引き続き以下の Lemma と定理を得る。

Lemma 4 : $\hat{\theta}(0)$ を $u(0)$ の係数行列が正則になるように選ぶとする。この時 $a(k)$ を $\varepsilon < a(k) < 2 - \varepsilon, 0 < \varepsilon < 1$ となるように選択することができ、 $u(k)$ の係数行列は全ての時刻 k において正則となる。

(5C-25), (5C-26)式 of アルゴリズムの大域的収束性は次の定理3で保証される。

定理3 : 仮定 A - E が成立し、(5C-25), (5C-26)式 of アルゴリズムを使用した場合

系列 $\{y(k)\}$ と $\{u(k)\}$ は全ての時刻において有界であり、かつ各出力は漸近的に目標値系列に収束する。すなわち次の式が成立する。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |y_i(k) - y_i^*(k)| = 0; \quad \text{for } i = 1, \dots, m \quad (5C-27)$$

上記の一般的な適応則を逐次最小二乗法に置き換えると次のアルゴリズムを得る。

MIMO 一段予測適応制御則（逐次最小二乗法）

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{F(k-d-1) \cdot \phi(k-d) \cdot |y(k)^T - \phi(k-d)^T \cdot \hat{\theta}(k-1)|}{1 + \phi(k-d)^T \cdot F(k-d-1) \cdot \phi(k-d)} \quad (5C-28)$$

$$F(k) = F(k-1) - \frac{F(k-1) \cdot \phi(k) \cdot \phi(k)^T \cdot F(k-1)}{1 + \phi(k)^T \cdot F(k-1) \cdot \phi(k)} \quad (5C-29)$$

$$F(0) = \varepsilon \cdot I; \quad \varepsilon > 0 \quad (5C-30)$$

$$\bar{y}^*(k) = \hat{\theta}(k)^T \cdot \phi(k) \quad (5C-31)$$

このアルゴリズムの大域的収束性も定理 3 と同様に言える。

以上の構成で MIMO 系の適応制御は構成できるが、重要なことは SISO 系の場合と異なりインタラクタ行列の事前知識が必要となることである。1 項の特別に考えた形式 1（インタラクタ行列がスカラーとなる場合）または形式 2（対角行列となる場合）はこの事前知識を対象に結びつけて考えることは可能であるが、一般的な多変数系の場合には、むだ時間に該当するサンプル周期の倍数の整数値以外にインタラクタ行列の非対角項に関する事前知識が必要となる。この非対角項には入出力間の動的干渉の結果現れる実数係数を持つ多項式が存在し、この事前知識を持つと言うことは多変数系を対象に対するほとんどの知識を持つことと同様であり、適応制御の目的からして容認できない条件となっているわけである。この点が多変数適応制御系を構成する上での難点である。

次に確率外乱を含む多変数系における一段予測適応制御についてさらにその特徴を示した上で、インタラクタ行列の事前知識を緩和できる多段予測による EHAC の多変数系への拡張を示す。

3. 確率外乱存在下の多変数適応制御

(Dugard, 1984, Goodwin, 1984. §11. 3. 3, Ydstie, 1988 による)

次に制御対象が次式の変数 ARMAX モデルで表される場合の適応制御を構成する。

$$A(z^{-1}) \cdot y(k) = B(z^{-1}) \cdot u(k) + C(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (5C-32)$$

ここに、 $\{y(k)\}$, $\{u(k)\}$, $\{w(k)\}$ は、 $m \times 1$ の出力、入力、白色外乱ベクトルである。2項と同様に仮定 A-E をおき $\{y(k)\}$ の一段予測器を求めることが基本であり、これに対して次の Lemma 5 および定理 4 が成立する。

Lemma 5 :

変量 $\bar{y}(k) = \xi(z) y(k)$ に対する最適な定常状態予測器 $\bar{y}^o(k|k)$ は次の式を満たす。

$$\bar{C}(z^{-1}) \bar{y}^o(k|k) = \bar{\alpha}(z^{-1}) y(k) + \bar{\beta}(z^{-1}) u(k) \quad (5C-33)$$

$$\text{ここに } \bar{C}(z^{-1}) = I + \bar{C}_1 z^{-1} + \cdots + \bar{C}_{n_1} z^{-n_1} \quad (5C-34)$$

$$\bar{\alpha}(z^{-1}) = \bar{\alpha}_0 + \bar{\alpha}_1 z^{-1} + \cdots + \bar{\alpha}_{n_2} z^{-n_2} \quad (5C-35)$$

$$\bar{\beta}(z^{-1}) = \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 z^{-1} + \cdots + \bar{\beta}_{n_3} z^{-n_3} \quad (5C-36)$$

$$\bar{\beta}_0 = K \quad (\text{有限かつ正則}) \quad (5C-37)$$

適応制御を構成する前に、各係数が既知とした場合の一段予測に基づく制御系の構成とその特徴について次の定理が成り立つ。

定理 4 :

(1) $\xi(z) y(k)$ を $\xi(z) y^*(k)$ へ調整しうる最小分散制御器は下記で与えられる。

$$\bar{\beta}(z^{-1}) u(k) + \bar{\alpha}(z^{-1}) y(k) = \bar{C}(z^{-1}) \xi(z) y^*(k) \quad (5C-38)$$

ここに $\{y^*(k)\}$ は与えられる設定値系列である。

(2) 制御則(5C-38)式は次の性質を持つ。

(a) 結果としてのトラッキング誤差 $y(k) - y^*(k)$ は下記を満たす。

$$\bar{C}(z^{-1}) \xi(z) [y(k) - y^*(k)] = \bar{C}(z^{-1}) F(z) w(k) \quad (5C-39)$$

ただし、 $F(z)$ は $\xi(z)C(z^{-1}) = F(z) + R(z^{-1})$ と分解した時の将来に係わる項である。

(b) 定常状態では、トラッキング誤差は $F'(z^{-1}) w(k)$ となる。

ここに $F'(z^{-1})$ は下記の形の有限な移動平均多項式である。

$$F'(z^{-1}) = \xi(z)^{-1} F(z) \quad (5C-40)$$

(c) $\xi(z)$ が対角行列の場合は、(5C-38)式の制御則は、 $y_j(k)$ を $y_j^*(k)$

($j=1,2,\dots,m$)の回りで分散を最小にしている。

(d) 一般的なインタラクタ行列の場合、制御則(5C-38)は、

- (i) $y_1(k)$ を $y_1^*(k)$ 回りで分散を最小にする。
 - (ii) 全ての k に対し、(i)を達成する種類のフィードバック則の中で $y_2(k)$ の $y_2^*(k)$ 回りの分散を最小にする。
 - (iii) 全ての時間に対し、(i), (ii)を達成する種類のフィードバック則の中で $y_3(k)$ の $y_3^*(k)$ 回りの分散を最小にする。
- 以下同様。

定理4の2(c)項は、対角行列のインタラクタの場合は(5C-38)式の制御則は、各々の出力に対し無条件に最小分散制御方策を与えていることを示している。一方、定理4の2(d)項は、非対角インタラクタの場合は、予想以上に複雑な状況になっている事を示している。後者の場合、この定理は出力の第一項にのみ無条件で最小分散制御を与えるが、二項目以上の出力に対しては、ある種の拘束条件の下で最適化が達成されることを示している。この様に、これらの出力の分散は、出力ベクトルの順序入替えにより変わるのである。さらに、分散の総和も制御則に使われる出力の順番に依存していることを示している。結論として、制御則(5C-38)式は、インタラクタ行列が対角の場合を除き同時に各出力の分散を最小にすることは出来ないということである。

次に適応制御則を考える。勿論2項と同様な MIMO 一段予測適応制御則を考えることもできるが、前述の通りインタラクタ行列の事前知識が必要となり実用に供し得ない。そこでインタラクタの事前知識を必要としない Extended Horizon Adaptive Control による方法を以下に説明する。本文 5. 3. 3 項で説明した多重ループ系の内容を一般的な多変数系に拡張し、仮定 C を次の仮定 C' に置き換えた上で次の結果を得る。

仮定 C' : インタラクタ行列の Upper Bound (前進演算の最大次数) " d_{max} " が既知である。

この仮定の下に(5C-32)式の対象を次の様に表す。

$$\begin{aligned}
 A(z^{-1}) \cdot y(k) &= B(z^{-1}) \cdot u(k) + C(z^{-1}) \cdot w(k) \\
 A(z^{-1}) &= I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2} + \cdots + A_n z^{-n} \\
 B(z^{-1}) &= B_0 + B_1 z^{-1} + B_2 z^{-2} + \cdots + B_n z^{-n} \\
 C(z^{-1}) &= I + C_1 z^{-1} + C_2 z^{-2} + \cdots + C_n z^{-n}
 \end{aligned}
 \tag{5C-41}$$

ここで拡張予測区間 T ($T > d_{max}$) を導入し、次の Diophantine 方程式を満たす様に

$R(z^{-1}), S(z^{-1})$ を決める。 $R(z^{-1})$ は $n-1$ 次、 $S(z^{-1})$ は $T-1$ 次の多項式行列である。

$$I = S(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-T}R(z^{-1}) \quad (5C-42)$$

ARMAX モデル式(5C-32)に左から $S(z^{-1})$ を掛け (5C-42)式を利用して整理すると、

$$y(k+T) = z^T S(z^{-1})B(z^{-1})u(k) + R(z^{-1})y(k) + z^T S(z^{-1})C(z^{-1})w(k) \quad (5C-43)$$

ただし、以下の様に表記する。

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + \cdots + r_{n-1} z^{-n+1} \quad (5C-44)$$

$$\begin{aligned} z^T S(z^{-1})B(z^{-1}) &= \beta_1 z^{T-1} + \beta_2 z^{T-2} + \cdots + \beta_T \\ &+ \beta_{T+1} z^{-1} + \beta_{T+2} z^{-2} + \cdots + \beta_n z^{-n+T+2} \end{aligned} \quad (5C-45)$$

この(5C-43)式を本文 5. 3. 3 項と同様各出力 $y_i(k)$ の T ステップ先の予測値を表す式として利用し、これを目標値系列 $y^*(k+T)$ にあわす制御系列を求めることとする。本文の多重ループ系の場合における展開と同様にして、Receding horizon の考えを適用し最終的に下記の二つの方策に対する各制御策を得る。

[方策 1] : 操作変数のパワー最小策

$$J = \sum_{i=1}^T u(k+i)^T u(k+i) \Rightarrow \min. \quad (5C-46)$$

の評価関数最小化により、次の制御策を得る。

$$u(k) = \beta^{-1} \left[y^*(k+T) - R(z^{-1})y(k) - \sum_{j=1}^{n-T-2} \beta_{T-j} u(k-j) \right] \quad (5C-47)$$

$$\text{ただし、 } \beta = \beta_T^T \left[\sum_{j=1}^T \beta_j \beta_j^T \right] \quad (5C-48)$$

[方策 2] : ステップ入力策

$$u(k) = \beta^{-1} \left[y^*(k+T) - R(z^{-1})y(k) - \sum_{j=1}^{n-T-2} \beta_{T-j} u(k-j) \right] \quad (5C-49)$$

$$\text{ただし、 } \beta = \sum_{j=1}^T \beta_j \quad (5C-50)$$

以上パラメータが既知の場合における EHC 制御系の構成を示したが、適応制御を構成するために各 i 番目出力に対する以下の Regressor ベクトルとパラメータベクトルを導入する。

$$\phi(k) = [y^T(k), y^T(k-1), \cdots, y^T(k-n-1); u^T(k+T-1), u^T(k+T-2), \cdots, u^T(k); u^T(k-1), u^T(k-2), \cdots, u^T(k-n+T-2)]^T \quad (5C-51)$$

$$\hat{\theta}_i = [\hat{r}_0^i, \hat{r}_1^i, \hat{r}_2^i, \cdots, \hat{r}_{n-1}^i; \hat{\beta}_1^i, \hat{\beta}_2^i, \cdots, \hat{\beta}_T^i; \hat{\beta}_{T+1}^i, \hat{\beta}_{T+2}^i, \cdots, \hat{\beta}_{n-1}^i]^T \quad (5C-52)$$

ただし、 \hat{r}_j^i は係数行列 R_j の推定値行列における i 番目の行ベクトルを表す。
 多重ループ系の場合と同様に下記の適応則でパラメータを推定する。

MIMO/EHAC 適応則

$e_i(k) = y_i(k) - \phi^T(k) \cdot \hat{\theta}_i(k-1)$ の誤差信号に対し、

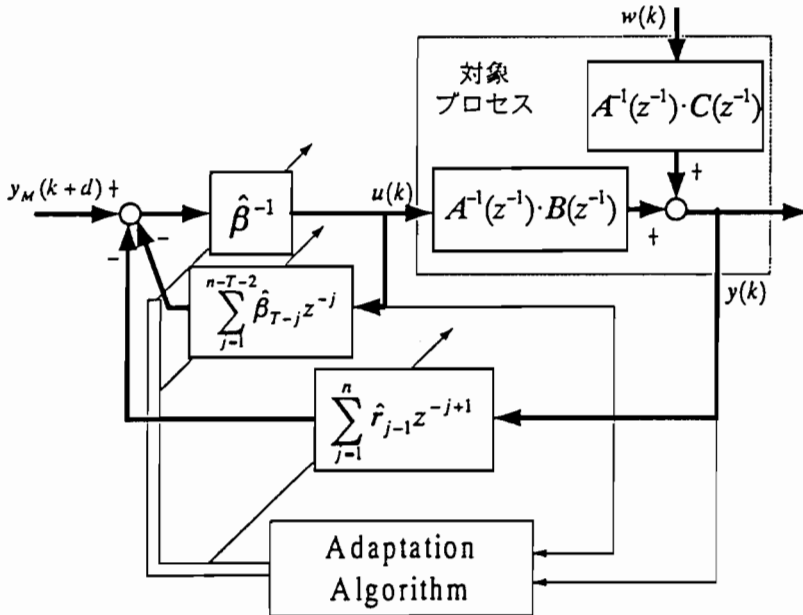
$$F_i(k) = \frac{1}{\lambda_i(k)} \left\{ F_i(k-1) - F_i(k-1) \phi(k-T) \cdot \phi^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \right\} / [\lambda_i(k) + \phi^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \cdot \phi(k-T)] \quad (5C-53)$$

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + F_i(k) \cdot \phi(k-T) \cdot e_i(k) \quad (5C-54)$$

$$\lambda_i(k) = \frac{\text{trace}\{F_i(k-1)\}}{\text{trace}\{F_i(k-1)\} + g_i \cdot e_i(k)^2 / [1 + \phi^T(k-T) \cdot F_i(k-1) \cdot \phi(k-T)]} \quad (5C-55)$$

この MIMO 適応制御系の構成を付図 5-1 に示しその特徴を下記する。

- (1) この MIMO/EHAC ではインタラクタ行列の事前知識が不要であり、単にその Upper bound すなわち最大の前進演算子の次数 d_{\max} のみが必要となる。これは一般的な多変数系に対しても容認できる範囲の事前知識である。
- (2) さらに一段予測による MIMO 適応制御の構成で必要となった仮定 D が不要であり、このことはある種の非最小位相推移系にも適用可能となることを示している。
- (3) 調整パラメータが $T, g, F_i(0)$ と比較的少ない適応制御系であり、試行錯誤の回数が少なく済むが、その系統的な決定方法については未解決である。



付図 5-1 MIMO EHAC 制御の構成

参考文献

- (Åstrom, K. J., 1970) ,中村嘉平他訳：確率制御理論入門, p.177-208, コロナ社
- (Åstrom, K. J., 1984) , P. Hagander, and J. Sternby : “ Zeros of Sampled Systems.”
Automatica, **20**, 31-38
- (Åstrom, K. J., 1995) and B. Wittenmark : *Adaptive Control - Second Edition-*, p.168
Addison Wesley, Massachusetts, USA.
- (Åstrom, K. J., 1997) and B. Wittenmark : *Computer-Controlled System-3rd
Edition-*, p.61-76, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., USA.
- (Borrison, U., 1979) : “Self-Tuning Regulators for a Class of Multivariable System.”
Automatica, **15**, 209-217
- (Clark, D. W., 1975) and P. J. Gawthrop : “Self-Tuning Controller”, *Proc. IEE*,
122D-9, p. 929-934
- (Csaki, F., 1978) , L. K. Keviczky, J. Hetthessy, M. Hilger and J. Kolostori;
“Simultaneous Adaptive Control of Chemical Composition, Finess and
Maximum Quantity of Ground Materials at a Closed Circuit Ball Mill,”
Proc. IFAC Congress, p.453-460, Helsinki, Finland
- (大松繁、1996) 山本透編著：セルフチューニングコントロール、計測自動制
御学会、 p.9-31
- (Dugard, L., 1980) and I. D. Landau ; “Stochastic Model Reference Adaptive
Controllers,” *Proc. 19th IEEE CDC*, p.1132-1137 Albuquerque, USA.
- (Dugard, L., 1982) , B. Egardt and I. D. Landau ; “Design and Convergence Analysis
of Stochastic Model Reference Adaptive Controllers” *Int. J. Control*, **35**,
755-773
- (Dugard, L., 1984), G. C. Goodwin and X. Xianya ; “The Role of Interactor Matrix in
Multivariable Stochastic Adaptive Control,” *Automatica*, **30**, 701-709
- (Goodwin, G. C., 1980) , P. J. Ramage, and P. E. Chaines : “Discrete Time
Multivariable Adaptive Control.” *IEEE. Trans. AC-25*, 449-456
- (Goodwin, G. C., 1984) and K. S. Sin : *Adaptive Filtering Prediction and Control*,
p. 119-129, 199, 202-207, 415, 457-458, Prentice-Hall, Englewood Cliffs,
N. J. USA.

- (市川邦彦、1984) : “制御系設計法[1]-[VII]” 計測と制御 23, No.6-12
- (市川邦彦、1985) 伊藤彰啓 : “Exact Model Matching 手法による離散時間多変数適応制御系の設計法”、計測自動制御学会論文集 21, 241-247
- (片山徹、1983) : 応用カルマンフィルター、p. 133-148, 朝倉書店
- (計測自動制御学会編、1983) : 自動制御ハンドブック (基礎編) , p.701-730
オーム社
- (Koivo, H. N., 1980) : “A Multivariable Self-Tuning Controller.” Automatica 16, 351-366
- (Landau, I. D., 1981a) ; “Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators-A Unified Approach”, Trans. ASME., J. of Dynamic Systems, Meas. and Control, 103, 406-416
- (Landau, I. D., 1981b) 富塚 : 適応制御システムの理論と実際、p.55-72, 134-164
オーム社
- (Landau, I. D., 1993) ; “Evolution of Adaptive Control,” Trans. ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 115, 381-391
- (Landau, I. D., 1998) , R. Lozano, and M. M’Saad ; Adaptive Control, p.7 Springer-Verlag, London, UK
- (Middleton, R. H., 1991) and G. C. Goodwin : Digital Control and Estimation, A Unified Approach, p.456-482, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. USA.
- (Narendra, K., 1980) and R. V. Monopoli eds. ; Application of Adaptive Control p.345- 357, Academic Press. New York, USA.
- (大川不二夫、1982) 米沢洋 : “むだ時間を含む多変数離散値系に対するモデル規範形適応制御系の一設計”、計測自動制御学会論文集 18, 357-362
- (尾崎賢二、1997) 羽畑修 : “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 28 回適応制御シンポジウム資料
- (尾崎賢二、1999) : “セメントプラント原料調合制御への多段予測適応制御一手法の応用”、化学工学論文集, 25 No.2 掲載予定
- (Seborg, D. E., 1986) , T. F. Edgar and S. L. Shah : “Adaptive Control Strategies for Process Control - A Survey”, AIChEJ., 32, 881-913

- (Shah, S. L., 1987) , C. Mohtadi, and D. W. Clark : "Multivariable Adaptive Control without a Prior Knowledge of the Delay Matrix." *Systems & Control Letters* **9**, 295-306
- (新誠一、1984) : "多変数モデル規範形適応制御", SICE 第 12 回適応制御部会講義会資料
- (新誠一、1993) : "適応制御とその周辺"、計測と制御、**32**, 975-980
- (新誠一、1996) : 制御理論の基礎、p.89-98, 昭晃堂
- (新誠一、1998a) : "Wavelet 解析の計測応用"、シミュレーション、**16**, 255-260
- (新誠一、1998b) : ISS 社主催講演 "制御系設計の CAD とその構築・実装技術・例", 質疑応答に対する社内報告書
- (杉本博、1984) 岡本健三、朝倉建介、庵原滋、植田真、睦好英司、平石純一、三浦克也 : "計算機制御の実セメントプラントへの適用 (その 1) ", 川崎技報、**84**, 1-8
- (杉本博、1988) 神田一基、尾崎賢二、福岡正規、庵原滋、羽畑修 : "セメントプラントの総合調合・混合管理法の開発 (第三報) ", **97**, 76-83
- (Wellstead, P. E. 1991) and M. B. Zarrop ; *Self-Tuning Systems*, p.167-179 John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England
- (Westerlund, T., 1979) , H. Toivonen and K. E. Nyman : "Stochastic Modelling and Self-Tuning of a Continuous Cement Raw Material Mixing System", *Proc. IEEE CDC* **18** No.1 610-615
- (Wittenmark, B. 1987) , R. H. Middleton, and G. C. Goodwin : "Adaptive Decoupling of Multivariable Systems." *Int. J. Control*, **46**, 1993-2009
- (Wolovich W. A., 1976) and P. L. Falb : "Invariants and Canonical Forms under Dynamic Compensation", *SIAM J. Control and Optimization*, **14**, 996-1008
- (山本透、1998) , S. L. Shah : "多重ループ型セルフチューニング PID 制御系の一設計", システム制御情報学会論文集, **11**, 163-171
- (Ydstie, B. E.; 1984) : "Extended Horizon Adaptive Control," *Proc. IFAC World Congress*, p.911-915 Budapest, Hungary
- (Ydstie, B. E., 1985) , L. S. Kershenbaum and R. W. H.Sargent ; "Theory and Application of an Extended Horizon Self-Tuning Controller," *AIChEJ.*, **31**, 1771-1780

(Ydstie, B. E., 1986) and R. W. H. Sargent ; “ Convergence and Stability Properties of an Adaptive Regulator with Variable Forgetting Factor” *Automatica* **22**, 749-751

(Ydstie, B. E., 1988) , A. H. Kemna and L. K. Liu ;“Multivariable Extended-Horizon Adaptive Control,” *Comput. Chem. Engng.*, **12**, 733-743

第六章 結 論

本研究はセメントプラントを構成する粉砕プロセスと混合プロセスのプロセス解析による動特性モデルの導出と、このモデルを用いて各プロセスの目的に応じた有効な制御方法の提示にある。以下では、本研究の総括と今後の展望について述べる。

粉砕プロセスの動特性モデルに関しては、閉回路ボールミル粉砕プロセスを対象に、その導出の基礎となるマスバランスと表面積バランスを表す基礎式を提示し、種々の実験結果をもとに定常動作点回りの摂動量に対する線形動特性モデルを導出することが出来た。この動特性モデルを用いて制御方法の検討とその実機への適用の事前検証を行い、おおむね実測値と一致することを確認した。従い制御系検討のためのモデルとしては現状で十分と考えられる。しかし閉回路粉砕系はプロセス内に正帰還を有し不安定に陥りやすい系であり、我々もいくつかの粉砕プロセスでこの正帰還と粉砕・分級の非線形特性によると考えられる自励振動現象を確認している。この様な現状に対し、上記のマスバランスと粒度バランスを粉砕系としての基本的なバランス式であるという考えに、付録 3-C に示した粉砕速度と分級特性を表す非線形特性を利用して各部流量と粒度分布を状態変数とする非線形動特性モデルを開発する事が、より一層制御性能や粉砕効率の向上に役立つと考えられ、これが今後の課題である。さらに本研究と同様な考えにより現在原料粉砕用に主流となっている縦型ローラミルの動特性モデルの開発も行えると考えられるが、この点も今後の課題である。

次に原料調製・混合プロセスに対してその目的がキルン投入原料の組成変動の抑制にあること、その変動標準偏差の低減によりキルンでの熱消費率が改善できる点をまず説明した。この様な対象に対しこの混合プロセスに投入される原料の組成変動を確率過程で表し、予混合プロセス、原料粉砕ミル、ブレンディングサイロの伝達関数モデルを与え、結果としてこれらを利用してプラント計画時にボーリングデータを用いてキルン投入原料の組成変動の標準偏差を工業的に満足できる精度であらかじめ推定できることを示した。さらにこの考えを応用し、これらのプロセスの組み合わせ計画を定量的に実施出来ることを例示した。この解析については本研究の内容で概ね完結してい

ると考える。

混合プロセスの重要な構成要素である原料調合制御に対し、上記の混合プロセスの確率システムモデルを利用し、まずその制御系の構造を三入力・三出力の多変数確率制御モデルで表わした。さらに調合制御の特徴として、多変数系としての扱いを前置補償器による静的なゲイン特性の非干渉化を行い、動的制御については三つの品質指標を独立に制御する多重ループ構成とすれば十分であることを例説した。その上で在来制御の効果と問題点、特にプロセスのむだ時間を含めた動特性の変動に対しても組成変動抑制効果を維持できる制御方法が必要であることを説明し、適応制御の必要性に言及した。適応制御に関しては、その代表例として STR と MRACS を取り上げこれらがいずれも対象のむだ時間を既知とし、そのむだ時間後の出力の一段予測による予測値が希望出力に合致するように、適宜推定した対象の動特性から次の時点の操作量を決める制御系であることを説明し、その限界特にむだ時間の変化に対して不安定となる可能性のあることを示した。この問題に対処し得る制御方法として、Ydstie らにより提案された多段予測に基づく Extended Horizon Adaptive Control の定式化を多重ループ構成として調合制御に応用し、シミュレーションにより、在来のスミス補償を持つ PI 制御および確率的 MRACS と比較し制御性能に優れることを確認した。さらにこれら適応制御の広範な文献調査とシミュレーションによる確認より、一般的な対象をも含めて適応制御を応用する際の留意点と多変数適応制御の構成法に対する考察を行った。今後の検討課題としてこの様な結果に基づきまず EHAC 法を実機の調合制御へ適用し、その機能とパラメータ適応則を含めた系統的なパラメータの調整法を確立する必要がある。また EHAC に前置補償器を加えた適応制御系については、その構成法に対するロバスト性の理論的あるいは定量的な検討と前置補償器の適応化が今後の課題である。

最後に、本研究を通して現在の制御理論の枠組みにおいて実用面での有用性について H^{∞} 制御と双璧をなすと言われる適応制御に対し、応用の観点から種々の特徴と限界を示すことが出来たが、特に制御理論を応用する立場で最も重要なことは、理論の理解特に物理的な理解力を養成することと、常に対象のモデルの開発を意識し、ある種の制御理論を基にした制御系の構成方法とその Tuning に役立てていくことの両輪がこれらの新しい制御理論の応用に不可欠であると考えている点を所感とし本研究報告の結びとする。

使用記号一覧

〔第三章〕

$B(\eta, \zeta)$: 粉碎分布関数	[-]
D_s : セパレータ循環空気流量調節ダンパ開度	[%]
E : ボールミル消費電力	[kW]
G : ボールミル通過流量	[ton/h]
$G_i(t)$: Make-up 流量	[ton/h]
$G_{..}(t)$: 各部（下添字参照）における碎料流量	[ton/h]
L : ボールミルの胴長	[m]
L_c : 閉回路ボールミル粉碎系の循環比	[-]
N_s : セパレータ主軸回転数	[rpm]
Q_a : セパレータ分級空気流量	[m ³ /h]
$R(\eta)$: 粒度分布関数（粒径 η 以上の粒度累積率）	[%]
S : ボールミル有効断面積	[m ²]
$T(s)$: ボールミル内の碎料の混合移動を表す伝達関数	[-]
\hat{T}_B : 碎料のボールミル内平均滞留時間	[min]
W : ボールミル内の碎料の滞留量	[ton]
$Z_i(t)$: Make-up 原料の比表面積	[cm ² /g]
$Z_{..}(t)$: 各部（下添字参照）における碎料比表面積	[cm ² /g]
b, c : 実験式(3-2-5.1)、(3-2-5.2)における定数	[-]
$d_s, g_i, g_{..}, n_s, z_i, z_{..}$: 対応する物理量の無次元摂動量	[-]
$f(\eta)$: 粒度分布密度関数 $f(\eta) = \frac{dR(\eta)}{d\eta}$	[%]
k : アンドリエフ粉碎速度式(3-2-4)内の定数	[-]
$k(\eta)$: ボールミル粉碎における選択関数	[-]
$\Gamma(\eta)$: セパレータの部分分級特性	[-]
α_1, α_2 : (3-2-19)式における定数	[-]
β_{ij} : (3-2-22)、(3-2-23)式における定数	[-]
η : 碎料の粒径	[μ m]
η_{pc} : セパレータにおける 50%分離粒径	[μ m]
χ : (3-2-17)式における定数	[-]
γ : (3-2-25)式における定数	[-]
π : 分級の鋭さを表す(3C-12)式内のパラメータ	[-]

τ_{BE} : 循環バケットエレベータの輸送時間 [min]
 τ_{BM} : ボールミル内でのむだ時間 [min]
 ϑ : セパレータにおける分割率 [-]

下添字 :

M_i : ボールミル入り口
 M_o : ボールミル出口
 S_i : セパレータ入り口
 S_o : セパレータ出口 (製粉側)
 M_r : セパレータ出口 (戻り粉側)

[第四章、五章共通の記号]

$A = [a_{ij}]$: 原料組成マトリックス [-]

$$\begin{array}{c}
 CaO \\
 SiO_2 \\
 Al_2O_3 \\
 Fe_2O_3
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\
 a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44}
 \end{array} \right] = [a_{ij}]
 \end{array}$$

石灰石 粘土 珪石 鉄原料

F : 四原料の配合最適化計算の評価関数 [-]

$G_{CA}(s)$: 原料調合制御を含む原料粉碎ミルの閉ループ近似伝達関数 [-]

$G_{HB}(s)$: ホモジナイジングベッドの伝達関数 [-]

$G_{GN}^O(s)$: 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 (調合制御を含む閉ループ特性) [-]

$G_{BS}(s)$: 混合サイロの伝達関数 [-]

$G_c^*(z)$: むだ時間補償 PI 制御の近似パルス伝達関数 [-]

HM : 水硬率 [-]

IM : 鉄率 [-]

J : 四原料配合比と三原料配合比の変換行列 [-]

K_1, K_2 : 四原料の配合最適化計算の重み係数 [-]

K_p : 原料調合 PI 制御系の比例ゲイン [-]

L_c : 原料粉碎閉回路ボールミルの定常運転状態の循環比 [-]

M : 四成分組成と三指標間の変換行列 (3行4列) [-]

N : ホモジナイジングベッドの積み付け層数	[-]
Q : プレンディングサイロ通過粉体の重量流量	[kg/h]
SM : 珪酸率	[-]
T_B : ボールミルの平均滞留時間	[h]
T_C : 原料調合制御系の制御周期 (サンプリング時間)	[h]
T_I : 原料調合 PI 制御系の積分時定数	[h]
T_L : ホモジナイジングベッドにおける積み付け周期	[h]
T_{Mj} : j 番目原料の平均到着時間 (ダンプトラックの平均到着時間)	[h]
V_m : プレンディングサイロ混合室容量	[kg]
V_P : プレンディングサイロにおけるピストンフロー部の容量	[kg]
Z : 四原料の組成行列 $Z = A$	[-]
Z_{Mi} : ミル入り口原料ホッパ内の四原料の四組成マトリックス	[-]
Z_P : 各原料の主成分組成変動過程を行ベクトルに持つ 4 行 4 列の行列	[-]
a_{ij} : j 番目原料の i 番目の成分の含有率	[-]
l_x : 原料粉砕ミルから X 線分析計にいたるむだ時間	[h]
l : 原料調合制御対象を一次遅れ+むだ時間近似した場合の等価むだ時間	[h]
u_j : j 番目原料の混合比率	[-]
$\bar{u} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3, \bar{u}_4]^T$: 四原料の定常状態における配合比ベクトル	[-]
$y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$: キルン入口原料の四成分組成ベクトル $y = A \cdot u$	[-]
y_{Mi} : ミル入り口原料組成変動ベクトル	[-]
$\Gamma = [\gamma_{ij}]$: 回帰係数マトリックス	[-]
$\Phi_{ij}(\omega)$: j 原料の i 組成の変動のスペクトル密度関数	[-]
σ_{ij} : j 番目原料の i 番目の成分の標準偏差	[-]
$\sigma_{HM}, \sigma_{SM}, \sigma_{IM}$: キルン入り口における HM, SM, IM の標準偏差	[-]
γ_{ij} : j 番目原料における主成分含有率による i 番目成分の一次回帰係数	[-]
β_{ij} : 同上回帰式の定数項	[-]
$\bar{\quad}$: 各変数の定常状態の値	
ΔX : 変数 X の摂動量	[-]

〔第五章のみの使用記号〕

$A(z^{-1})$: 制御対象のスカラー伝達関数の分母多項式	[-]
$A(z^{-1})$: 多変数 ARMAX モデルにおける多項式行列	[-]
$A_M(z^{-1})$: 規範モデル伝達関数の分母多項式	[-]
$B(z^{-1})$: 多変数 ARMAX モデルにおける多項式行列	[-]
$B'(z^{-1})$: スカラー伝達関数の分子多項式	[-]
B_0 : 原料調合制御系のプロセスゲイン行列	[-]
$B_M(z^{-1})$: 規範モデル伝達関数の分子多項式	[-]
$C(z^{-1})$: 多変数 ARMAX モデルにおける外乱部の多項式行列	[-]
$D(z^{-1})$: Stochastic MRACS における Regulation 規範モデル	[-]
$F(k)$: 適応ゲイン行列	[-]
$H_1(z^{-1}), H_1(z^{-1})$: Stochastic MRACS における適応則安定化モニック多項式	[-]
$L(z^{-1})$: Stochastic MRACS におけるフィルター特性モニック多項式	[-]
$M(z^{-1})$: Stochastic MRACS における外乱特性分母多項式	[-]
$N(z^{-1})$: Stochastic MRACS における外乱特性分子多項式	[-]
P : 前置補償行列	[-]
$Q(z^{-1})$: Stochastic MRACS における設定値回路補償要素	[-]
$R(z^{-1})$: Diophantine 恒等式で求めるフィードバック伝達関数行列	[-]
$S(z^{-1})$: Diophantine 恒等式で求める内部フィードバック伝達関数行列	[-]
T : 多段予測における予測区間	[-]
d : むだ時間に該当する遅れ区間 (l / T_c)	[-]
$e(k)$: 適応誤差系列	[-]
g_i : EHAC の適応則における忘却度調節パラメータ	[-]
m : 対象の分子多項式の次数	[-]
n : 対象の分母多項式の次数	[-]
$y(k)$: 制御量ベクトル (HM, SM, IM の摂動量)	[-]
$y_M(k)$: 規範モデル出力ベクトル (HM, SM, IM の設定値系列)	[-]
$u(k)$: 操作量ベクトル (三原料配合比ベクトル)	[-]
$u_M(k)$: 設定値系列	[-]
$w(k)$: 正規白色外乱ベクトル	[-]
$\xi(z)$: インタラクタ行列	[-]
$\phi(k)$: Regressor ベクトル	[-]
λ_1, λ_2 : 適応則のパラメータ	[-]
σ_i : i 番目外乱の標準偏差	[-]
$\theta(k)$: パラメータベクトル	[-]

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始温かいご指導とご鞭撻および研究内容への助言を賜りました神戸大学工学部情報知能工学科、高森年教授に心から感謝致します。

筆者が神戸大学在学中から、終始温かいご指導をいただき「制御」への扉を開けていただくとともに、本研究報告をまとめる様に助言を賜りました神戸大学、故米持政忠名誉教授に心から感謝致します。

本研究に対し有益なご助言をいただきました神戸大学工学部情報知能工学科、赤澤堅造教授、同太田有三教授にお礼申し上げます。

本研究の機会をお与えいただき、終始温かい激励を頂きました川崎重工業株式会社産機プラント事業部、山田重治常務取締役事業部長、光田芳弘副事業部長、電装制御総括部長神田一基理事、同奥山亀太郎部長に感謝致します。

また本研究の初期の段階で種々のアドバイスと上司として企業における制御技術者の歩むべき道と制御理論への関わりに種々ご指導頂きました、川重防炎株式会社杉本博常務取締役に感謝致します。

さらに本研究の初期の段階で供に考え、かつ行動をしていただいた川崎重工業株式会社 FA ロボット事業部中川修参事、産機プラント事業部電装制御総括部、福岡正規参事、庵原滋グループ長、羽畑修参事、産業プラント部橋本勲顧問、橋本真一参事、および川重 CAE 株式会社曾我一利部長、睦好英司部長、元川崎重工業株式会社永田修氏に感謝致します。

さらに事業部門に在職し本研究を遂行するにあたり、数々の激励や援助をいただいた川崎重工業株式会社技術総括本部電子制御技術開発センター、黒崎泰光理事、宮本裕一グループ長、KPA 株式会社桂木義隆専務取締役、川崎油工株式会社、織田義明理事、川崎重工業産機プラント事業部電装制御総括部村川貞明部長、北国隆一グループ長、豊田正治グループ長、城後澄和グループ長、同調達部朝倉建介参与、川重 CAE 吉村孝部長、中谷哲司部長に感謝致します。

なお最後になりましたが、仕上げ粉碎プロセスの実験の機会を与えていただきました三菱マテリアル株式会社岩手工場、混合プロセスの実機運転中における HM 標準偏差確認のために化学分析結果の提供をいただきましたチュニジア国 SICO 社 Enfida 工場の皆様に謝意を表します。

主だった適応制御理論の原理と特徴

—過去に提案された適応制御理論の概観と主な理論の原理・特徴について—

1. 適応制御理論の生い立ちとその基本構成^{1), 2), 3), 4)}

MRACS の原型であるゲインスケジューリングとその後発展した適応制御理論の二つの枠組みである MRACS と STR の生い立ちとその原理について記す。

これら三つの方法の生い立ちはいずれも 1950 年代に遡る。ゲインスケジューリングの構成を図 1 に示したが、この方法は当初航空機の Flight control system の開発に関連して考えられた。航空機はその高度と速度によりジョイスティックによる方向制御のプロセスゲインが変化するが、これを図 1 の方法で補償する方式である。すなわちその運転条件（速度と高度）の測定値から直接制御器のゲインを調整する方法であり、適応制御の原型と言える。

つぎに MRACS の基本的な構成を図 2 に示したが、この方法はサーボ問題に対して当初開発され、特に航空機の Flight control system に対する MIT ルールが著名である。この MIT ルールでは、制御器のパラメータ θ を次式の様にモデル誤差 e の関数として求めていた。

$$\frac{d\theta}{dt} = -k \cdot e \cdot \text{grad}_{\theta} e$$

すなわち、制御器のパラメータを $\text{grad}_{\theta} e^2$ の方向と反対の方向に変え、誤差の二乗を零としようと言う考えである。しかし、前述のゲインスケジューリングも MIT ルールによる MRACS も当時としては、劣悪なハードウェアや安定な制御を保証する設計理論の未発達から実用に供せられるには至らなかった。

一方 STR の原型は、1958 年に発表された最小二乗法と最適制御を組み合わせた Kalman の論文に遡る。その基本的な構成は図 3 の様に、対象のパラメータを既知と仮定して始めに設計した適切な制御方策に対し、運転時の測定値から対象のパラメータを逐次同定し、その結果から制御器のパラメータをオンラインで決定・調整する方法である。

この方法の特徴は、前に述べた二つの方法が制御器のパラメータを何らかの測定値から直接変更する直説法 (Direct adaptive control) であるのに対し、測定値から対象をまず同定し、「確定性等価原理」に従ってその結果を真とし、あらかじめ対象パラメータの値に対し最適と設計しておいた制御器のパラメータを変更する間接法 (Indirect adaptive control) であり、特に対象の同定が制御とあわせて重要となるプロセス制御を中心に発達してきた。

その後、これらの MRACS と STR の研究は、いずれにも共通して安定したパラメータの調整方法・収束性の証明とそれらに関係した最適な制御方策としてどの様な

補遺 I (審査試験設問 1 解答)

ものが適切かと言う内容を主体に各々別々に研究されて来た。特に MRACS は米国、日本でサーボ問題を対象に確定的環境下の制御方策として、一方 STR は欧州を主体にプロセス制御を対象とした確率外乱存在下の制御方法として研究されて来た。

2. MRACS と STR の統一^{5),6)}

以上のように、MRACS と STR は別々に発展してきたが、1979 年から 80 年代の初頭に掛けこれらの二方式が等価であることが、B. Egart, I. D. Landau, K. J. Åstrom により各々別々に体系化された。ここでは、Landau によるこれら二法の統一に関する理論の原理を、次項の適応制御各手法の比較の前提条件として説明する。すなわち、

MRAC : 確定的環境下での Tracking 制御、

STR : 確率的環境下での Regulation 制御

と言う構図に対し、その構成法の等価性とパラメータ適応則の等価性を明示している。本解答では、制御構成の等価性のみ取り上げる。

まず、確定的環境下における MRACS と STR の構成、特に直説法と同定を経由する間接法の対応づけをしている。すなわち、図 2 は図 4 に等価、図 3 は図 5 に変換され、図 5 のコントローラ + Adaptive Predictor の各時点での出力 (Implicit reference model の出力) が図 4 の Explicit reference model の出力の振る舞いをしていることより、等価性を示している。さらに確率外乱存在下では図 3、図 5 の Reference model を Stochastic prediction reference model に置き換えて考えることにより同様な等価性を示している。

その上で、MRACS と (最小分散型) STR の各々の制御目標をある時間後に、

確定的な環境下 : Reference model とプラントの出力差が Almost “0”になること。

確率的な環境下 : Reference model とプラントの出力差が Innovation sequence になること、

と定義し、Tracking と Regulation 問題に対する制御方策およびパラメータ適応則の体系化を行っている。

3. 適応制御の各種方式の原理と特徴^{7),8)}

2 項の体系化の結果 MRACS と STR を区別する必要はなくなった。しかし、その後にはこれらの方式だけでなく、Ydstie による Extended Horizon 適応制御 (1985)⁹⁾ や化学プロセスで多用されているモデル予測制御を基にした Clark らによる一般化予測適応制御 (1987)⁸⁾ 等の多段予測適応制御や適応極配置制御 (1979)¹⁰⁾、Self-tuning PID (1983)¹¹⁾、単純適応制御 (1979)¹²⁾、部分状態モデル規範型適応制御 (1989)⁷⁾ 等の方式も提案されている。いずれもパラメータの収束性と制御系の安定性の証明に立脚した狭義の (伝統的または王道を行く) 適応制御であるが、これら以外に産業界を主体にオートチューニング PID¹³⁾ やニューラルネットを利用した適応制御¹⁴⁾ 等の技術も応用され、前者では DCS 装置の一部として製品化されているものもある。

補遺 I (審査試験設問 1 解答)

このような広義の適応制御も含め、“適応制御の利用技術”の基本には王道を行く適応制御理論の物理的理解が不可欠であるとの認識に従って、以下では伝統的適応制御の各種理論を比較する。

狭義の適応制御の代表例を、制御策の考え方から下記に分類し、表 1 にそれらの構成 (モデルが既知とした場合の構成)、制御策の原理、特徴、代表的な応用例を整理して示した。なお、制御対象のモデルは全ての方式に共通し、下記の一般的な離散時間 ARMAX モデルとしている。

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d} B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})w(k)$$

1). 評価関数最小化制御方策：

一段予測による法： 1-A 最小分散型適応制御

1-B 一般化最小分散適応制御

多段予測による法： 2-C 一般化予測適応制御

2-D Extended Horizon 適応制御

2). 閉ループ特性指定方策： 3-E 適応極配置制御

一般化モデル予測適応制御は、その評価関数内の P, Q の多項式と係数 λ の選定により、最小分散型適応制御や一般化最小分散型適応制御を包含している⁷⁾。

一般化モデル予測適応制御と EHAC 適応制御はいずれも多段予測による方式であり、対象に対する仮定やその特徴が類似している。ただし、前者は間接法による構成であり、同定後に Diophantine 方程式を解法するアルゴリズムが必要となるが、後者は直接法でありその必要は無い点が顕著な相違点である。対象の同定結果を制御と並行して入手することを重視するか、実機での計算負荷を重視するか、目的によって使い分ける必要がある。また適応極配置制御は、極配置の考えを発展させることにより、Self-Tuning PID やスミス補償を含む PID 制御の適応 Version に展開することが出来る⁸⁾。

なお、適応制御方式の各種理論の性能比較には制御方策の特徴の比較とは別にパラメータ適応則そのものと、そのロバスト性の比較を欠くことは出来ない。しかし、本解答ではこの問題を後日の課題とさせていただく。その理由は、応用の立場では、収束性・安定性の厳密性より、その制御方式の有用性に重点を置く比較が重要であるためである。さらにこの分野の理論面に関して、全ての方式で同様な安定性や収束性が理論的に整備されていないこと¹⁵⁾、一方、“大域的安定性は保証されなくても、局所的な安定性が保証される領域が存在すれば利用可能である。”という視点¹⁶⁾もあり、ロバスト性を考慮した適応則に対する理論面の、特に実用を意識した今後の成果を待望・注視する視点も応用の立場で有効と考えるためである。 以上

補遺 I (審査試験設問 1 解答)

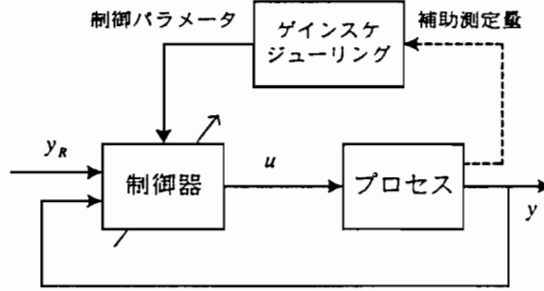


図1. ゲインスケジューリング制御系の構成

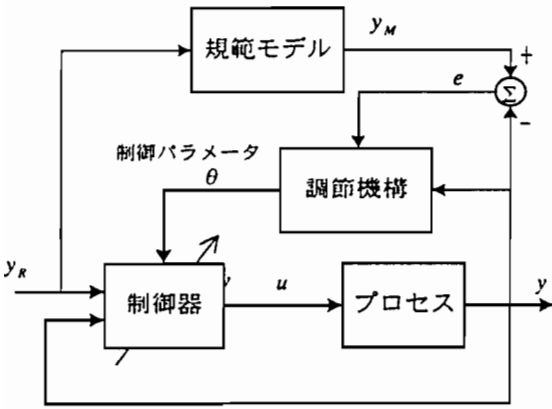


図2. モデル規範形適応制御の基本構成

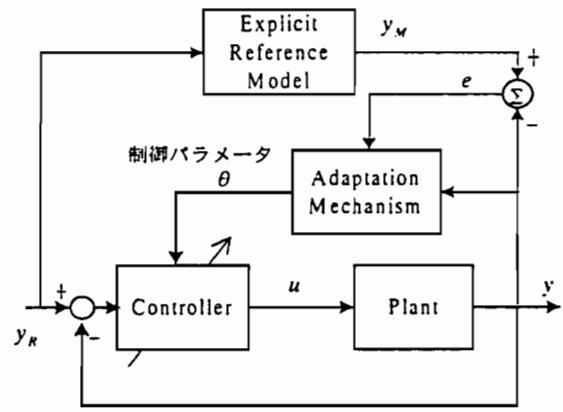


図4 Explicit model reference adaptive control

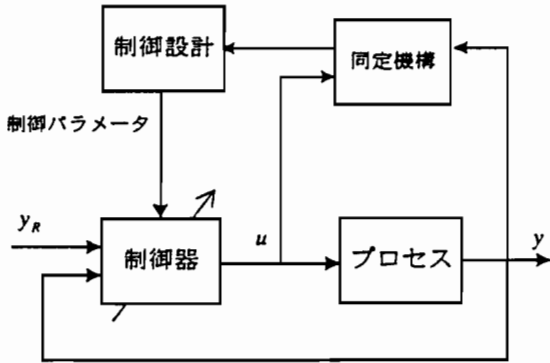


図3. Self-tuning Regulatorの基本構成

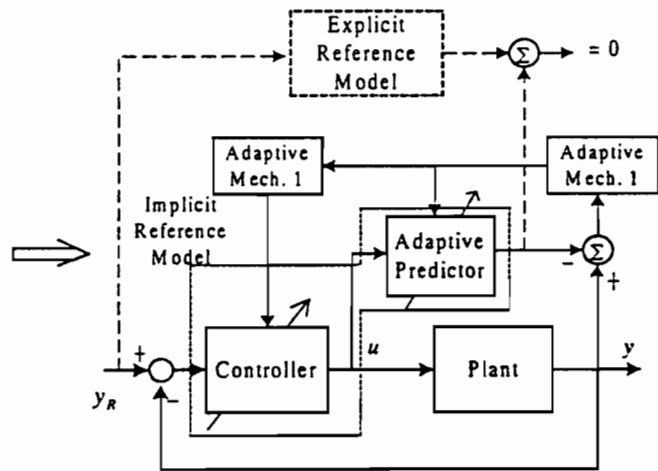


図5. Implicit model reference adaptive control

等価

表 1. 代表的適応制御方式の構成と特徴・応用例

	一段予測による評価関数最小化方策		多段予測による適応制御方策		閉ループ特性指定方策
	1-A 最小分散型適応制御	1-B 一般化最小分散適応制御	2-C 一般化モデル予測適応制御	2-D Extended Horizon 適応制御	3-E 適応極配置制御
対象に対する仮定	1) 対象の次数は既知。 2) むだ時間は既知。 3) 対象は最小位相推移系。 4) 多項式 A, B, C は既約。 5) 外乱は有界な分散の正規白色過程。	1) 対象の次数は既知。 2) 多項式 A, B, C は既約。 3) 外乱は有界な分散を持つ正規白色過程。	1) 対象の次数は既知。 2) むだ時間の上限が既知。 3) 多項式 A, B, C は既約。 4) 外乱は有界な分散を持つ正規白色過程。	1) むだ時間の上限(d_{Max})が既知。 2) 外乱は有界な分散の正規白色過程。	1) 対象の次数は既知。 2) 多項式 A, B, C は既約。 3) 外乱は有界な分散を持つ正規白色過程。 4) C は漸近安定多項式。
適応制御の構成	図 6 参照	図 7 参照	—	図 8 参照	図 9 参照
制御方策の考え方	$J = E \left\{ [y(k+d) - y_M(k+d)]^2 \right\}$ なる評価関数を最小にし、最小分散 Tracking と Regulation を達成させる。次式のように、プラントの出力の予測値と規範モデルの出力差が漸近的に外乱を規定する白色過程に収束するように各制御パラメータを調整する方式。 $\lim_{k \rightarrow \infty} [\hat{y}(k+d) - y_M(k+d)] = e(k+d)$	$J = E \left\{ \left[y(k+d) - y_M(k+d) - \lambda \frac{Q(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) \right]^2 \right\}$ の様に操作量にも重みをつけた評価関数を最小にする方策。結果として操作量の発散を抑えることが出来る。ただし、 $\lambda QA+BC$ の零点が単位円内になる様に λ と Q を選ぶものとする。	$J(k, h_p, h_i) = E \left\{ \sum_{j=h_i}^{h_p} [P(z^{-1})y(k+j) - P(z^{-1})y_M(k+j)]^2 + \lambda [Q(z^{-1})u(k+j-h_i)]^2 \right\}$ なる評価関数を最小にする制御方策。 h_p は予測開始区間でむだ時間以上の値、 h_i は予測終了区間で対象の応答時間程度とする。 P, Q は別途決める伝達演算子で、 P は閉ループ系の極、 Q は外乱特性を指定するのが一般的。	$T > d_{Max}$ なる拡張予測区間を導入し、 $\hat{y}(k+T) - y_M(k+T) = 0$ の式を満たし、 (I) $J = \sum_{j=0}^{T-d} u(k+j)^2$ を最小とする操作パワー最小策、または (II) $u(k) = \dots = u(k+T-d)$ を満たすステップ入力策	対象が非最小位相推移系でも適用出来る方式として考えられた。対象を同定後、制御則を、 $R(z^{-1})y(t) + S(z^{-1})u(t) - \gamma C(z^{-1})y^*(t) = 0$ とし、 R, S は閉ループ伝達関数 $T(z^{-1}) := [S \cdot A + z^{-d} R \cdot B] / C$ が所望の極配置となる様に多項式 R と S を決める方法。
制御則に係わる Diophantine 方程式	$A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-d} R(z^{-1}) = C(z^{-1})$	同左	$A(z^{-1}) \cdot E_j(z^{-1}) + z^{-j} F_j(z^{-1}) = P(z^{-1}) C(z^{-1})$ 但し、 $\deg E_j = j-1, \deg F_j = n$	$A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-T} R(z^{-1}) = 1$	$A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-d} R(z^{-1}) = C(z^{-1}) \cdot T(z^{-1})$
制御の特徴	1) 操作量が過大になりやすい。 2) むだ時間既知、対象が最小位相推移系と言う仮定は実際の系に対し厳しすぎる。 3) スミス補償法と等価な構成。 4) 直接法・間接法いずれの構成も可能。	1) 操作量の過大化を防止出来る。 2) むだ時間既知や最小位相推移系の仮定が緩和されている。 3) 一方仮定 4) を満たしかつ制御目標を達成する λ と Q の決め方は試行錯誤となる。 4) 直接法・間接法いずれの構成も可能。	1) プロセス制御で広く利用されているモデル予測制御の適応制御への拡張方式である。 2) 操作量の過大を防止可能。 3) むだ時間既知や最小位相推移系の仮定が緩和されている。 4) 評価関数内で決定必要な重み関数が多く、試行錯誤による。 5) 間接法であり、計算負荷が大きい。	1) 操作量の過大を防止出来る。 2) むだ時間既知や最小位相推移系の仮定が緩和されている。 3) 出力の最小分散性では準最適となり、ロバスト性との Trade off となっている。 4) 一般化予測制御に比較し、調整パラメータが少ない。 5) 直接法による構成である。	1) 不安定零点や強い振動項に該当する零点があると想定出来る対象に有効。 2) 本質的に間接法の構成。 3) 同定後の制御則の計算に逆行列計算が必要。 4) 極配置の方法により、Self-tuning PID スミス補償付き PID の適応制御化も可能。
応用例	初期の最小分散型 STR として多数 (Ore Crusher, 抄紙機, ボイラーセメント原料調合制御他)	アクティブサスペンション制御	蒸留塔制御、超臨海圧ボイラロボットの制御	二酸化炭素吸収塔 蒸留塔制御	ボイラの過熱器の制御 アクティブサスペンション Crystal growth furnace

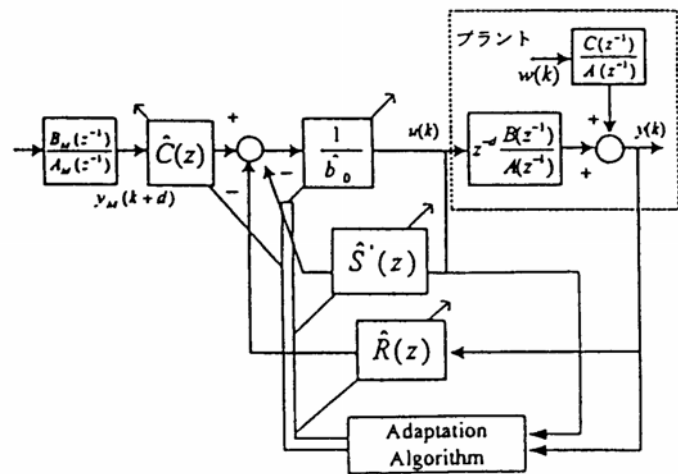


図 6. 最小分散型適応制御の構成

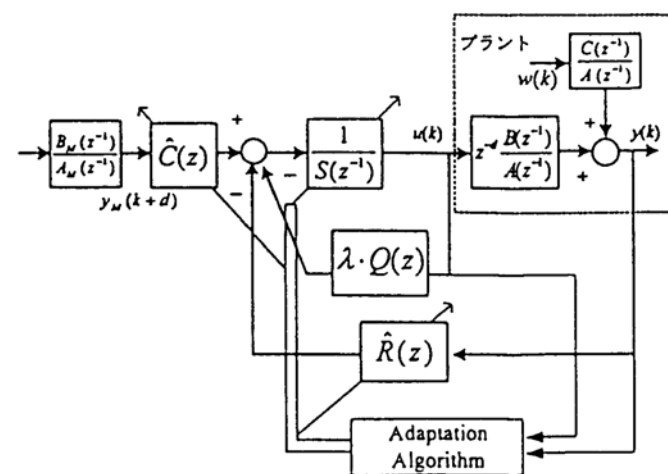


図 7. 一般化最小分散型適応制御の構成

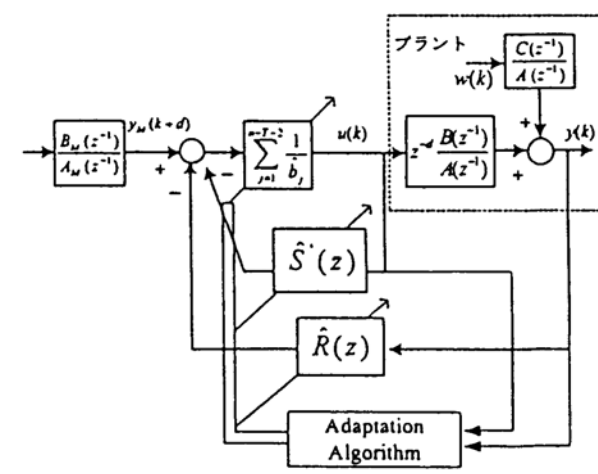


図 8. Extended Horizon 適応制御の構成

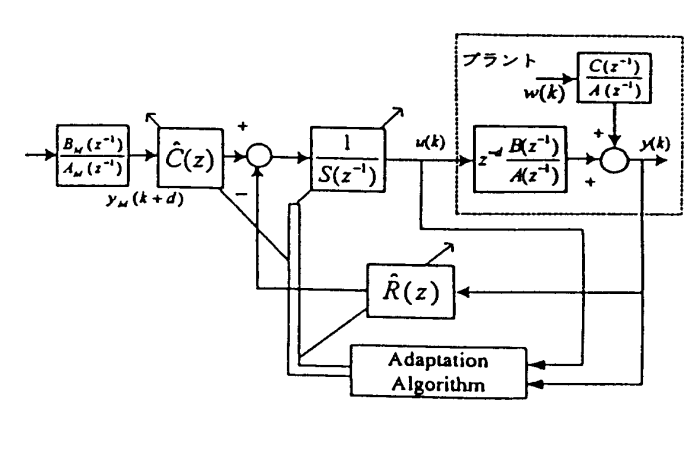


図 9. 適応極配置制御の構成

補遺 I (審査試験設問 1)

参考文献：

- 1) Åstrom, K. J : “Theory and Practice of Adaptive Control” 計測と制御 **23**, No.5, 449-459 (1984)
- 2) Åstrom K. J and and B. Wittenmark : Adaptive Control - Second Edition-, § 1 Addison Wesley, Massachusetts, USA. (1995)
- 3) Landau, I. D. : “Model Reference Adaptive Systems – A Survey (MRAS)- What is Possible and Why?” Trans. ASME., J. of Dynamic Systems, Meas. and Control, Vol., 119-132 (1972)
- 4) 新誠一 : “適応制御とその周辺”、計測と制御、**32**, 975-980 (1993)
- 5) Landau, I. D. : “Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators -A Unified Approach”, Trans. ASME., J. of Dynamic Systems, Meas. and Control, **103**, 406-416 (1981)
- 6) Landau, I. D. : “The Links between Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators”, 計測と制御 **23**, No.5, 460-471 (1984)
- 7) Landau, I. D., R. Lozano, and M. M’Saad ; Adaptive Control, § 11,12 Springer- Verlag, London, UK (1998)
- 8) 大松繁、山本透編著 : セルフチューニングコントロール, § 2 計測自動制御学会、(1996)
- 9) Ydstie, B. E.: “Extended Horizon Adaptive Control,” Proc. IFAC World Congress, p.911-915 Budapest, Hungary (1984)
- 10) P. E. Wellstead, D. Prager and P. Zanker : “Pole-Assignment Self-Tuning Regulator”, Proc. IEE. **126D**-8, 781/787 (1979)
- 11) F. Cameron and D. E. Seborg : “A Self-Tuning Control with a PID Structure”, Int. J. Control **38**-2, 401-417 (1983)
- 12) 岩井善太 : “単純適応制御”、計測と制御、**35**, 409-413 (1996)
- 13) 大松繁、山本透編著 : セルフチューニングコントロール, § 4 計測自動制御学会、(1996)
- 14) 高橋安人 : “ニューロ回路による適応制御”、計測と制御、**29**, 729-733 (1990)
- 15) R. Ortega and Y. Tang : “Robustness of Adaptive Controllers – a Survey ”, Automatica **25**, 651-677 (1989)
- 16) 計測自動制御学会特集記事 : “実例を通して制御理論の今後を探る”, 計測と制御、**38**, p.68 (1999)

適応制御理論のプロセス制御応用例二例の概要

第一例：事業用ボイラ温度制御への MRACS の応用¹⁷⁾

本例は中部電力の事業用ボイラの蒸気温度制御へ MRACS を応用し、在来型制御との性能比較を行った例である。なお本例の MRACS 適用に際しては、名工大藤井教授（現大同工科大学）との共同研究との事である。

1. 対象プロセス

対象プロセスの構成図を右図に示す。

従来法は、図のように過熱器出口蒸気温度制御と再熱器出口蒸気温度制御の二つを主制御系とし、時定数が 30 分程度と極めて長い過熱器出口温度の PID 制御演算結果を過熱器入口蒸気温度制御系にカスケード制御している点が特徴である。

2. 制御目標

二つの温度制御系は干渉系であるが、負荷変化に対し、いずれの温度も設定値からの偏差を極力少なくすること。

3. 適応制御の構成上の特徴

- 1) 既存の PID 制御器に適応制御演算結果を重畳するハイブリッド構成、すなわち PID 制御器を含めて拡大プラントと考え、かつ偏差量を制御量として構成している。
- 2) 外部要求の MW デマンドと他のループの操作量を既知外乱としてフィードフォワード補償を行う方式。則ち離散形式の対象の表現を下記としている。

$$A(z^{-1})e_1(k) = z^{-d_1}B_1(z^{-1})u_1(k) + z^{-d_2}B_2(z^{-1})u_2(k) + z^{-d}C(z^{-1})w(k)$$

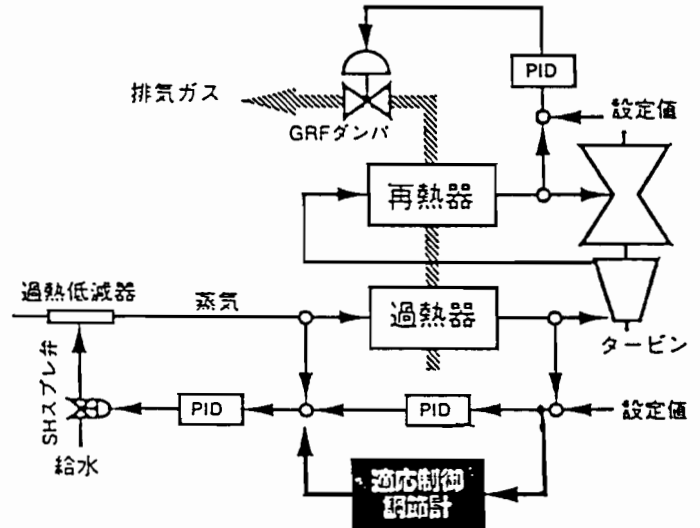
e_1 は過熱器出口蒸気温度偏差量、 u_2 は再循環ガス流量、 w は MW デマンド

一段予測適応制御を以下の様に構成している。則ち偏差減衰特性指定多項式 $D(z^{-1})$ に対し、 $D(z^{-1}) = A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d_1}S(z^{-1})$ より、 R, S を導入し下記の制御則内の多項式の

$$u_1(k) = \frac{S}{R}e_1(k) - z^{-(d_2-d_1)}\frac{B_2}{B_1}u_2(k) - z^{-(d-d_1)}\frac{C}{B_1}w(k) \quad \text{の各係数を適応則で計算している。}$$

4. 制御結果と課題

MW デマンド変化に対する在来法との比較を行っている。結果の一例を右図に示す。在来法に比べ蒸気温度偏差の変動が少なくなっている。しかし、蒸気圧力に対する蒸気温度系の非線形性のためにボイラ負荷と合わせて蒸気圧力が変化した場合は、線形性が強すぎて制御出来ていないとのことで今後の課題としている。



従来型制御

従来型+適応制御

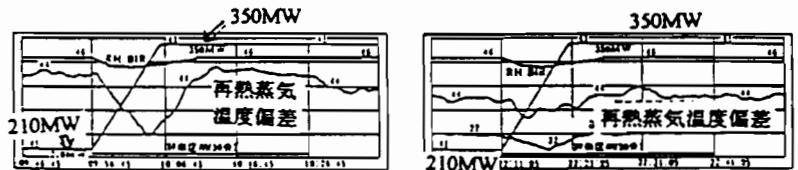


図 2. 火力発電所での実証結果(再熱蒸気温度*負荷上昇試験)

第二例：二酸化炭素吸収・分離プラントへの EHAC, 最小分散型 STR の実装比較例¹⁸⁾

最小分散型 STR と EHAC 法の大型パイロットプラントでの実装比較例で、EHAC が調整パラメータの少ないロバストな適応制御方式であることを示している。

1. 対象プロセス

下図の CO₂+N₂ 混合ガスからこれらを分離するプロセス。吸収塔でメタノール液により CO₂ を吸収し、これを再生塔で放出し再循環させる実験プロセス。主制御ではないが、再生塔の圧力制御、吸収塔内液レベル制御に PID, STR, EHAC を適用して比較している。

2. 圧力制御の比較

三方式での設定値変化に対する比較を図 1 に示す。PID の調整値は最適調整とし、D は想定する対象のむだ時間、T は多段予測区間である。

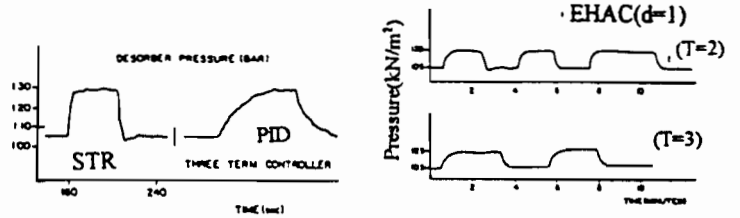


図 1

- 1) PID に比べ適応制御が即応性に優れる。
- 2) STR はオーバーシュートと整定後のリップルが好ましくない。また、むだ時間が大きくなると発散する場合が多い。
- 3) EHAC ではむだ時間変化にもロバスト性があり、また予測区間を大きくすると PID に近い動作となる。

さらに、STR で b_0 を既知として外部から調整した場合、想定次数を変化させた場合、サンプル周期を変えた場合の結果を図 2 に示す。

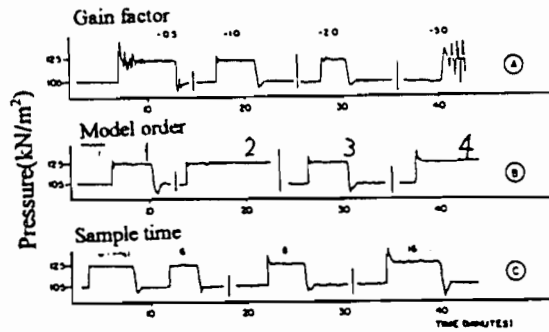


図 2

3. レベル制御の比較

STR と EHAC でのむだ時間、予測区間を種々変えた場合の制御性を比較した結果が図 3 である。EHAC では、T の選定により対象変化に対し十分なロバスト性を示している。

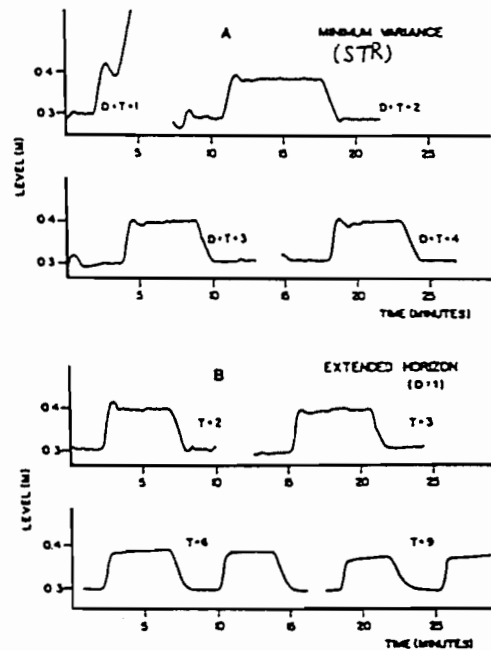
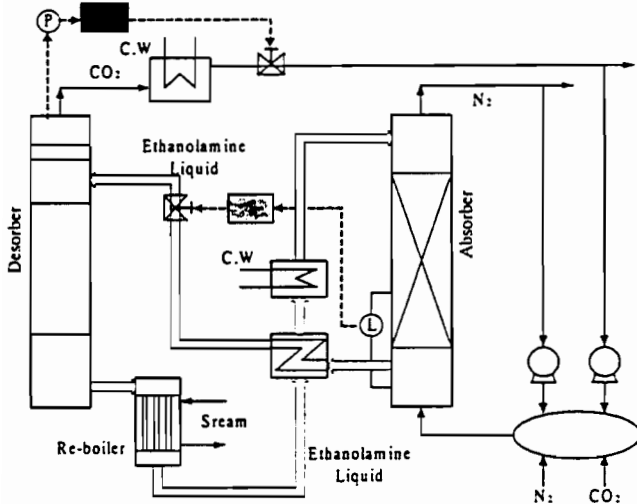


図 3

補遺 II (審査試験設問 2 解答)

参考文献：

- 1) Åstrom, K. J. : “Theory and Practice of Adaptive Control” 計測と制御 23, No.5, 449-459 (1984)
- 2) Åstrom K. J and B. Wittenmark : Adaptive Control - Second Edition-, § 1 Addison Wesley, Massachusetts, USA. (1995)
- 3) Landau, I. D. : “Model Reference Adaptive Systems – A Survey (MRAS)- What is Possible and Why?” Trans. ASME., J. of Dynamic Systems, Meas. and Control, Vol., 119-132 (1972)
- 4) 新誠一 : “適応制御とその周辺”、計測と制御、32, 975-980 (1993)
- 5) Landau, I. D. : “Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators -A Unified Approach”, Trans. ASME., J. of Dynamic Systems, Meas. and Control, 103, 406-416 (1981)
- 6) Landau, I. D. : “The Links between Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators”, 計測と制御 23, No.5, 460-471 (1984)
- 7) Landau, I. D., R. Lozano, and M. M'Saad ; Adaptive Control, § 11,12 Springer- Verlag, London, UK (1998)
- 8) 大松繁、山本透編著 : セルフチューニングコントロール, § 2 計測自動制御学会、(1996)
- 9) Ydstie, B. E.: “Extended Horizon Adaptive Control,” Proc. IFAC World Congress, p.911-915 Budapest, Hungary (1984)
- 10) P. E. Wellstead, D. Prager and P. Zanker : “Pole-Assignment Self-Tuning Regulator”, Proc. IEE. 126D-8, 781/787 (1979)
- 11) F. Cameron and D. E. Seborg : “A Self-Tuning Control with a PID Structure”, Int. J. Control 38-2, 401-417 (1983)
- 12) 岩井善太 : “単純適応制御”、計測と制御、35, 409-413 (1996)
- 13) 大松繁、山本透編著 : セルフチューニングコントロール, § 4 計測自動制御学会、(1996)
- 14) 高橋安人 : “ニューロ回路による適応制御”、計測と制御、29, 729-733 (1990)
- 15) R. Ortega and Y. Tang : “Robustness of Adaptive Controllers – a Survey ”, Automatica 25, 651-677 (1989)
- 16) 計測自動制御学会特集記事 : “実例を通して制御理論の今後を探る”, 計測と制御、38, p.68 (1999)
- 17) 松村司郎、塩谷秀夫 : “適応制御理論を応用した事業用ボイラの制御”, 第 40 回 SICE 適応制御部会講議会資料、岡山、(1997)
- 18) B. E. Ydstie,, L. S. Kershenbaum and R. W. H.Sargent ; “Theory and Application of an Extended Horizon Self-Tuning Controller,” AIChEJ., 31, 1771-1780 (1985)