

セメント製造工程における

目標計画法の適用

木 藤 正 章・三 隅 正 機

線形計画法の一手法である目標計画法を、セメント製造工程の原料調合制御に適用し、顕著な成果を得ているので、その内容と製造現場への定着過程について報告する。

セメントは通常4種類の原石すなわち石灰石、粘土、珪石、鉄原料を混合し、粉砕し、焼成して製造する。供給される各原石の化学成分は、時々刻々に変動するが、製品を所定の品質に維持するために、各原石の化学成分の変動に応じて各原石の供給量を調整する。このことを原料調合といい、一般には小型電算機や蛍光X線分析計の中に含んだ計算機制御で実施される。

当社荊田セメント工場（福岡県）でも昭和40年以来計算機制御によって原料調合を実施してきた。昭和50年に蛍光X線分析計の更新を行なったが、これを機に原料供給量の計算ロジックに目標計画法を適用し、

- (i) 原石の成分変動の許容範囲が広がった
- (ii) 調合後の原料の品質のばらつきが小さくなった
- (iii) 計算機制御を手動に切り換え、現場担当者がバックアップするという事象が減少した

等の評価を得ている。当例は、生産現場では、一見とっつきにくそうに思われる目標計画法が、日々の生産活動のメカニズムの中に、所を得て組込まれ、その機能を大いに発揮している好例と考えるので、ここに発表するものである。

1. 原料調合システムについて

セメント原料は通常4種類の原石すなわち石灰石、粘

表 1 セメント製造の原料の化学成分例(%)

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
石灰石	52.6	3.3	1.2	0.6
粘土	0.4	62.2	19.2	4.0
珪石	0.7	91.4	3.1	1.4
鉄精鉱	0.8	30.1	4.1	67.6

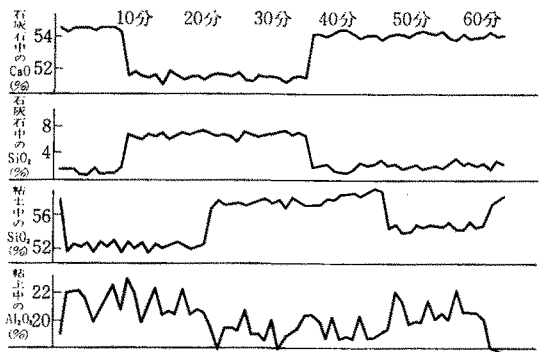


図 1 原料の成分組成の変動例

土、珪石、鉄原料を粉砕混合して製造される。各原石の化学成分の例を表1に示す。4種類の原石は、いずれもCaO（酸化カルシウム）、SiO₂（二酸化ケイ素）、Al₂O₃（酸化アルミニウム）、Fe₂O₃（酸化鉄）を含有している。原石供給量を定める計算を複雑にしている。原石のうち石灰石は、原料全体の8割近くを占め、工場の近くの石灰石鉱山から運ばれている。他の原石すなわち粘土、珪石、鉄原料は、購入している。通常セメント工場では、1日に数千トンもの原料を使用する。そのため所定の成分の原石のみを、選択して使用するのは困難である。したがって各々の成分がある所定の範囲内に入っていれば、これを使用せざるを得ない。一方製造されたセメントを所定の品質のものにするためには、キルン（焼成窯）へ供給する化学成分を所定の値にする必要がある。すなわち原石の成分が変動しても、これを調合した原料は、所定の規格を満足せねばならない(図1)。このため各原石の供給量を調整する。これを原料調合制御といい、つぎにその概要を述べる(図2)。

工場の原石置場から抽出された原石は、ホッパー→原石供給機→ベルトコンベア→粉砕装置→自動サンプラー→ブレンディングサイロなる工程を経て、調合され、粉砕されて粉体となって、ブレンディングサイロに入る。自動サンプラーにて抽出

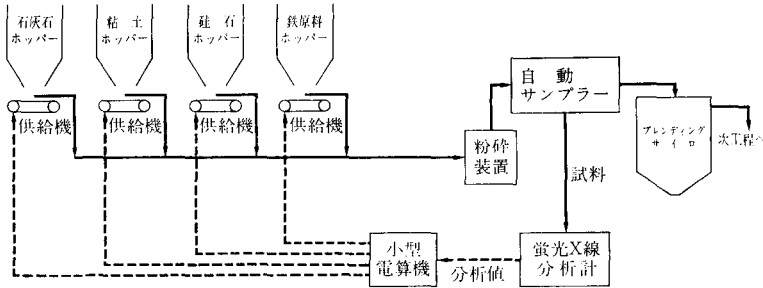


図 2 調合工程における原料の流れ

された試料は、蛍光 X 線分析計に送られる。蛍光 X 線分析計では、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ の 4 成分の含有率(%)を分析し、その結果が小型電算機に送られる。小型電算機は原料調合制御の中枢部をなしており、ここで調合後の原料の化学成分が所定の値になるように、調合計算が実施され、修正信号を出して原石供給機の設定値を調整する。

なお調合後の原料の成分組成をあらわす指標として、水硬率 *HM*、硅酸率 *SM*、鉄率 *IM* の 3 種が用いられこれらはいずれも、原料中の化学成分の比率であり、その定義式と数値例とを表 2 に示す。

2. 小型電算機での調合計算

小型電算機の中で行なわれる調合計算について述べる(図 3)。小型電算機にはディスクファイルがあり、このファイル内に原石供給機の過去の実測値(トン/時)や蛍光 X 線分析計から伝送されてきた調合後の原料の成分値(%)などが格納されている。このファイルを基礎として以下の(A)(B)(C)の調合計算を行ない、(C)のところで目標計画法を適用した。

(A) 原石供給機入口での各原石の化学成分の推定

原石供給機を通過している各原石の化学成分は、時々刻々に変動している。電算機のファイルに格納されている過去に調合した原料の分析値を用いて、現在供給されている原石の成分を推定する。

表 2 原料調合のための化学成分の諸比率

名称	算出式	普通セメント	早強セメント	中庸型セメント
水硬率 <i>HM</i>	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	2.08	2.23	2.00
硅酸率 <i>SM</i>	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	2.59	2.67	2.95
鉄率 <i>IM</i>	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	1.83	1.89	1.16

(セメント協会 セメント試験報告より)

(B) ブレンディングサイロ出口での調合原料の成分の推定および目標諸率 (*HM*, *SM*, *IM*) の設定

ブレンディングサイロでの混合効果を加味して、サイロ出口での化学成分を推定する。これは、原料調合制御の目的が、ブレンディングサイロ出口での調合原料の化学成分を所定の基準値にすることにあるためである。

ここで求めたサイロ出口の化学成分の推定値と、所定の基準値とを比較し、両者の差異がなくなるように調合の目標諸率(水硬率 *HM*、硅酸率 *SM*、鉄率 *IM*)を設定する。

(C) 原料供給量の計算

上で算出された供給中の原石の成分の推定値および調合の目標比率とを用いて、各原石の供給量を決定する。その他に必要な情報たとえば、原石総供給量、原石供給機的能力等は、入力装置より現場担当者が入力した値を用いる。いま石灰石、粘土、硅石、鉄原料の供給すべき量を各々 f_1, f_2, f_3, f_4 (トン/時)とすると、つぎの成分比率の式と物質収支の式とが成り立つ。

$$(1) \text{水硬率 } HM = \frac{C_0}{S_0 + A_0 + F_0}$$

$$(2) \text{硅酸率 } SM = \frac{S_0}{A_0 + F_0}$$

$$(3) \text{鉄率 } IM = \frac{A_0}{F_0}$$

石灰石 粘土 硅石 鉄原料 調合原料

CaO 収支式

$$(4) C_1 f_1 + C_2 f_2 + C_3 f_3 + C_4 f_4 = C_0 f_i$$

SiO₂ 収支式

$$(5) S_1 f_1 + S_2 f_2 + S_3 f_3 + S_4 f_4 = S_0 f_i$$

Al₂O₃ 収支式

$$(6) A_1 f_1 + A_2 f_2 + A_3 f_3 + A_4 f_4 = A_0 f_i$$

Fe₂O₃ 収支式

$$(7) F_1 f_1 + F_2 f_2 + F_3 f_3 + F_4 f_4 = F_0 f_i$$

総流量式

$$(8) f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = f_i$$

(9) 原料供給機的能力

$$f_i, \min \leq f_i \leq f_i, \max \quad i=1 \sim 4$$

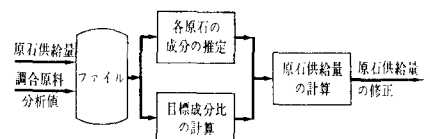


図 3 原料調合制御計算ブロック図

表 3 成分の記号表

原料の種類	供給量 (t/h)	化学成分 (%)			
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
石灰石	f_1	C_1	S_1	A_1	F_1
粘土	f_2	C_2	S_2	A_2	F_2
珪石	f_3	C_3	S_3	A_3	F_3
鉄精鉱	f_4	C_4	S_4	A_4	F_4
調合原料	f_i	C_0	S_0	A_0	F_0

ここに HM, SM, IM は(B)で設定された値である。 $C_1 C_2 \dots S_1 S_2 \dots A_1 A_2 \dots F_1 F_2 \dots$ は、(A)で算出された値である(表 3)。 $C_0 S_0 A_0 F_0$ は、調合後の原料の化学成分をあらわし、ここでは中間変数として扱われる。(1)~(9)の関係式を満たすように、目標計画法を用い原石供給量 f_1, f_2, f_3, f_4 を算出する。

3. 原料調合制御への目標計画法の導入とその定式化

前節で述べた物質収支式と他の関係式(1)~(9)式を変形すると、

$$(10) \text{ (水硬率の式)} \quad a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 = 0$$

$$(11) \text{ (珪酸率の式)} \quad a_{21} f_1 + a_{22} f_2 + a_{23} f_3 + a_{24} f_4 = 0$$

$$(12) \text{ (鉄率の式)} \quad a_{31} f_1 + a_{32} f_2 + a_{33} f_3 + a_{34} f_4 = 0$$

$$(13) \text{ (総供給量の式)} \quad f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = f_i$$

$$(14) \text{ (原石供給機の能力)}$$

$$f_i, \min \leq f_i \leq f_i, \max \quad i=1 \sim 4$$

なる関係式が成り立つ。ここに、

$$a_{1k} = HM (S_k + A_k + F_k) - C_k$$

$$a_{2k} = SM (A_k + F_k) - S_k$$

$$a_{3k} = IM \cdot F_k - A_k, \quad k=1 \sim 4$$

であり、他の記号は2節と同一である。

目標計画法を導入する以前は、(10)~(13)式を4元連立方程式として解 f_1, f_2, f_3, f_4 を求めていた。原料の組成変動が小さいとき、4元連立方程式の解はそのままで、(14)式(原料供給機の能力)を満足していた。ところが、原料の組成変動が大きいとき、すなわち一部の原石の成分が大きく変化したとき、4元連立方程式の解は、(14)式(原料供給機の能力)を満たさなくなる。このような事態は、通常起こらないが、原料事情の悪化、とくに良質の粘土資源が少なくなってきたことと、原料コストの面からみると珪石使用量の少ないほうが有利であることから、粘土中の SiO₂ の高いものを使用するようになったので、珪石供給量が少なくなり上記(14)式を満たさない危険度が高くなった。

(14)式を満たさない場合でも、原料調合制御を中止するわけにもいかないので、電算機から警報を出し、原石

供給量の設定を自動から手動に切換え、それ以降は人間の判断にて原料調合を実施していた。人間の判断で調合制御を行なうと、一般的には個人差が大きくあらわれる。すなわち調合後の成分諸率の一つ水硬率を合せることができるが、他の珪酸率や鉄率については充分に考慮しにくく、このあたりが熟練者とそうでない人の違いの出るところであった。

このような事態を解決する方法として、目標計画法の適用が考えられた。目標計画法では、たとえば(10)式(水硬率の式)に合致させようとするとき、非負の変数 x_1, x_2 を導入し次式のように書き換える。

$$(15) \quad a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 - x_1 + x_2 = 0$$

ここで線形計画法を採用し、目的関数 $x_1 + x_2 \rightarrow$ 最小、制約式(14)のもとで、(15)、(11)、(12)、(13)式を解く。その結果もし $a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 > 0$ となるとき、 $x_1 > 0, x_2 = 0$ となり、偏差が x_1 に残る。もし $a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 < 0$ となるとき、 $x_1 = 0, x_2 > 0$ となり、偏差が x_2 に残る。 x_1, x_2 はともに目的関数 $x_1 + x_2 \rightarrow$ 最小の中に入っているため、偏差が正負のいずれにしても、

$(a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4)$ の絶対値 \rightarrow 最小の解が得られたことになる。当然のことではあるが、 $x_1 + x_2 = 0$ なる解が得られたとき、

$$a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 = 0$$

となり、これは4元連立方程式の解と一致する。

珪酸率、鉄率についても同様に非負の変数 x_3, x_4 および x_5, x_6 を導入する。目的関数として正定数 W_{HM}, W_{SM}, W_{IM} を与え、

$W_{HM}(x_1 + x_2) + W_{SM}(x_3 + x_4) + W_{IM}(x_5 + x_6) \rightarrow$ 最小とする。正定数 W_{HM}, W_{SM}, W_{IM} としては、目標比率の達成度の間に、実用上、

(水硬率の達成度) > (珪酸率の達成度) > (鉄率の達成度) なる関係があることを考慮して、

$$W_{HM} > W_{SM} > W_{IM}$$

なる実定数を選ぶ(このことより、シンプレックス法にて容易に解くことができる)。

目標計画法を適用して、調合計算を行なう際に関係式を改めて書き直す。

$$\begin{aligned} \text{(目的関数)} \quad & W_{HM}(x_1 + x_2) + W_{SM}(x_3 + x_4) + \\ & W_{IM}(x_5 + x_6) \rightarrow \text{最小化} \end{aligned}$$

(制約条件)

$$a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + a_{13} f_3 + a_{14} f_4 - x_1 + x_2 = 0$$

$$a_{21} f_1 + a_{22} f_2 + a_{23} f_3 + a_{24} f_4 - x_3 + x_4 = 0$$

$$a_{31} f_1 + a_{32} f_2 + a_{33} f_3 + a_{34} f_4 - x_5 + x_6 = 0$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = f_i$$

(非負条件) $f_1, f_2, f_3, f_4, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \geq 0$

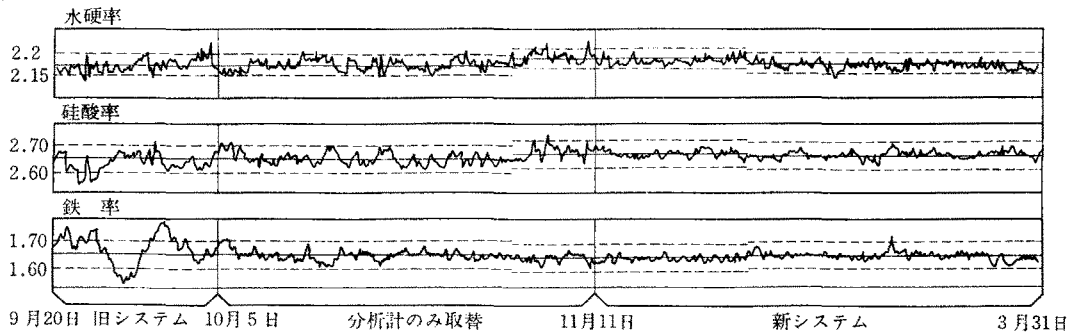


図 4 調合計算結果の比較

4. 目標計画法の適用による効果

原料調合制御へ目標計画法を適用し、種々の成果が得られた。原料の組成変動が小さいとき、調合計算に目標計画法を適用して得られる解は、目的関数=0となり目標の成分比率 HM 、 SM 、 IM の式を完全に満足する。つぎに、原料の組成変動がなんらかの要因で大きくなったとき、目標計画法による解は、原料供給機の装置上の制約を満足し、なおかつ目標の成分比率 HM 、 SM 、 IM を一定の割合で合致するようになっている。目標計画法を適用する以前は、このようなとき調合制御を自動から手動に切換えていた。

手動制御中には、調合後の組成の偏りが徐々に累積し、正常状態に復帰するのに長時間を要したという現象がときどき見られたが、これがなくなった。換言すれば、原石の成分変動の影響を拡大して、調合制御系が発振することはなくなった。むしろ逆に原石中の成分変動の波及を最小限に留めるような現象となってあらわれている(図4)。原料組成がかなり変動しても、調合制御系が安定に機能するということは、現場の担当者に対して、安心感と信頼感を与え、目標計画法を適用した調合制御系が現場に定着する一要因となっている。

最新の原料調合システムでは、石灰石の成分変動をおさえるための石灰石ブレプレンド装置が設置され、その他蛍光X線分析計についても調合後の原料を分析するのに、従来の1時間に1回人手を介して行なう方式の間欠式分析計から、1分間隔に連続的にしかも自動的に分析する連続式分析計へと交換された。この連続式分析計の採用により調合制御計算を行なう周期も1時間から15~30分へと短縮された。このような事実と、目標計画法の適用とにより、原石の成分変動の許容範囲を広げてもさしつかえないようになり、しかも調合後の原料の成分比率のばらつきが小さくなった。そして以下のようなメリットが得られた。

表 4 キルン送入原料の成分比率の比較 (標準偏差)

制御方式	成分比率の標準偏差			試料の大きさ	対象期間
	水硬率	珪酸率	鉄率		
旧システム	0.0191	0.0492	0.0806	96	S50年9月20日 ~10月5日
分析計のみ取替	0.0206	0.0390	0.0290	214	10月6日 ~11月11日
新システム	0.0134	0.0220	0.0208	439	11月12日~ S51年3月31日

(i) 原料として使用できる原石の変動範囲が広くなり、原料選択の自由度が増加したため原料コストを低減することができるようになった。

(ii) 石灰石の鉱山において、原料として使用できる鉱石の量が増大した。特異な事例としては、石灰石の採掘時に副産物として出ている表土も、その組成が粘土質に近いものは、石灰石の中に混入して原料として使用できるようになった。従来この表土は廃棄物として処理していたが、近年、公害などの関係で、廃棄する場所が限定され、運搬費がかさんでいたものである。

(iii) 調合後の原料成分のばらつきが小さくなったことは、つぎに続く焼成工程でのセメント生成反応が安定化することに寄与している。焼成工程の安定化は、燃料の節約と装置の補修費の低減に結びついている。

(iv) 調合後の原料は、ブレンドサイロにて攪拌されて、品質の均質化がはかれる。調合後の原料の組成のばらつきが小さくなれば、ブレンドサイロの容量も小さくても、均質化ははかれることになり、セメント製造プラントの建設費と運転費とを安くすることができる。

5. 今後の改善点

目的関数のウェイト W_{HM} 、 W_{SM} 、 W_{IM} として、

$$W_{HM} > W_{SM} > W_{IM}$$

なる実定数を採用している。このようなウェイトのもと

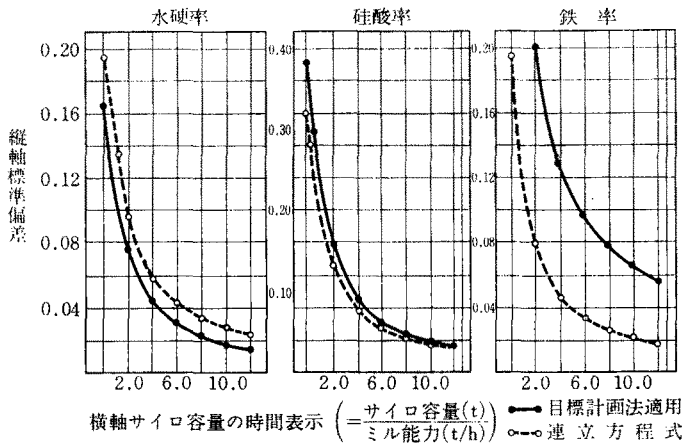


図 5 調合シミュレーション結果

では、原石の成分変動は調合後、鉄率 IM に最大の影響をおよぼすことになる。シミュレーション結果によれば、原料組成の変動が大きくなるにつれて、調合後の鉄率 IM の目標からの偏差は、大きくなる(図 5)。成分比率の偏差を一定値以上に大きくしない方法として、目標成分比率との偏差を 2 段階にわけ、評価する方法が考えられる。例として、鉄率 IM について述べる。鉄率の式(19)にさらに、非負の補助変数 x_{15} 、 x_{16} を追加して、

$$a_{31}f_1 + a_{32}f_2 + a_{33}f_3 + a_{34}f_4 - x_5 + x_6 - x_{15} + x_{16} = 0$$

とする。目的関数を、 $c_1(x_1 + x_2) + c_2(x_3 + x_4) + c_3(x_5 + x_6) + c_{18}(x_{15} + x_{16}) \rightarrow$ 最小 として、

c_{18} として $c_{18} > c_1 > c_2 > c_3$ なる実数を選ぶ。制約条件にも $x_{15} + x_{16} \leq D_{IM}$ を追加し、実数 D_{IM} として鉄率 IM の偏差の許容値を与える。このようにして、シンプレックス法にて解くとき、鉄率 IM の偏差が D_{IM} より小さいときウエイト c_3 にて評価され、 D_{IM} を越えたときは大きなウエイト c_{18} にて評価される。したがって、得られた解の鉄率 IM の偏差が、 D_{IM} を越えることは稀となる。水硬率や硅酸率についても同様に補助変数や制約式を追加すれば、目標計画法による解は目標比率を指定した偏差内で求まることになる。原料調合制御システムをさらに安定なものに、そして頑強なシステムにするため、近く目標計画法の適用の修正を行なう予定である。

あとがき

本報告では、セメント製造工程の原料調合制御に目標計画法を適用し、成果が得られたことを述べた。原料調合制御に目標計画法を適用することは、ぜひ必要であった。目標計画法を適用した結果、原料としてかなり幅広く成分が変動するような原石を使用した場合でも、比較

的制御しやすくなった。また一方では、調合制御後の成分のばらつきは、従来のものに比べ小さくなり、現場担当者が調合制御を運用するうえで、人が介入する場面が減少し、目標計画法が定着する要因となっている。

当社荏田セメント工場に目標計画法が、突然出現したのではない。長い年月の間、現場担当者が原料調合システムを運用した実績があり、工場に新技術を導入する意欲とそれを消化する能力とがあったからこそ、目標計画法の適用が可能となった。目標計画法の採用については、別のシミュレーションを行なっていて、そこで付随して発生した問題を検討

するうちに、目標計画法が浮び上ってきたのである。現在原料調合制御システムは、着実に稼動し、セメント製造の効率化に役立っている。

最後に、本報文を書く機会を与えていただいた宇部興産(株)荏田セメント工場の部坂所長、宮原工務部長および本社システム部の村上部長をはじめとする関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] A. Lunden "A system for the control of homogenisation of the cement raw meal", 4-th IFAC international conference on digital computer application to process control, 1974.
- [2] 小黒良郎, 他 "セメント原料調合における ON-LINE 蛍光 X 線分析装置と計算機制御システムについて" セメント製造技術シンポジウム報告, 昭和47年.
- [3] 立畑節郎, 他 "ON-LINE X 線分析計による原料調合工程の無人化について" セメント製造技術シンポジウム報告, 昭和47年.
- [4] 内川 浩, 他 "セメント原料工程計算制御へのオンライン連続自動蛍光 X 線分析システムの活用" セメント技術年報, 昭和46年.
- [5] 井尻雄士 "計数管理の基礎" 岩波書店.
- [6] 園田, 宮原, 北浜, 白鳥 "セメント原料調合計算制御装置" 富士技報, 第3号, 昭和41年.

きとう・まさあき 宇部興産(株)システム部
みすみ・せいぎ 宇部興産(株)荏田セメント工場工務部