

# 精糖用真空結晶缶の特性と制御の問題点

Characteristics and Controls of a Vacuum Pan in Sugar Refineries

梅 谷 陽 二\*

Yoji UMETANI

精製糖工場で用いられている半回分式真空結晶缶の制御工学的な特性と制御方法の問題点について、最近の二、三の進歩を解説した。精製糖用の結晶缶が半回分式であることの必然性を考察し、その操作方法を略述した。また自動制御を実施する際の問題点を整理した上で、その制御工学的な特性を示した。さらに、もっとも特徴的な煎き上げという操業法に関する最適な方式を提示し、結晶缶特有の制御方法を示す一例とした。

## 1. 緒 言

### (1) わが国における精糖工業の概況

食料必需品としての砂糖のなかで代表的な甘蔗糖は、世界的に大規模に流通している国際的商品である。わが国においても大量の原料粗糖を輸入して精製しており、各地に大きな精糖工場がある。蔗糖に関してわが国は完全な輸入国であり、年間の輸入量は小麦、トウモロコシ、大豆と並んで食品関係の大きな輸入割合を占めている(表1参照)。また、ここ数年の商品別輸入割合を見る

表 1 おもな食品原料の輸入実績<sup>D</sup> (1965 年)

	輸 入 量 (単位: 1000トン)	金 額 (単位: 百万円)
砂 糖	1,723	56,106
小 麦	3,645	90,393
大 豆	1,847	81,272
トウモロコシ	3,434	83,325

と、蔗糖は全体の2~4%を占めており<sup>2)</sup>、国内ビート糖の育成努力や外貨割当制度があったにもかかわらず、貴重な外貨を費している現状である。

わが国の精糖工業は戦後いちやく国策としての保護を受け、そのため生産の合理化が立ち遅れていた。それゆえ1963年にはじまる貿易自由化に伴って、生産設備の近代化と操業の合理化が強く要求されるようになった。精糖工場の合理化のために行なうべき全工場の自動化は、このような時代の要請に応えるために各精糖工場では計画され一部ではすでに実施されている。精糖工場の自動化に際して常に問題となるものの一つに精糖用結晶缶の自動制御がある。本稿ではこの問題に焦点を合わせて解説を行なうことにする。

本稿の内容は、上述のような状況にある精糖業界の某大手会社から当研究所が依頼を受けて行なった研究\*\*の一部をとりまとめたものである。なお、この受託研究は、精糖工場の新設に際してその総合的な制御と自動化を目的としており、全般的な報告はすでに論文<sup>3)</sup>として発表されている。

### (2) 精糖用結晶缶の概要

精糖工場は、大きく見れば、原糖を溶解して不純物や着色物質を除き、再び結晶化させるという一種の再結晶純化工場である(図1参照のこと)。この工場の生産ライ

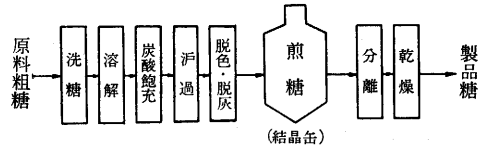


図 1 精製糖工場の生産ライン(例)

ンのなかで、製品の品質にもっとも関係が深く、しかも装置規模の大きい工程がこの精糖用結晶缶工程である。すなわち結晶の製品としての品質(粒度、純糖率、色価、その他の官能的品質)の大部分はこの工程で定まり、しかもその装置の大きさ、運転のむずかしさなどの点で他の工程よりも重要視されている。精糖工場ではこの結晶缶工程をとくに煎糖工程と呼んでいる。

蔗糖を精製する技術はきわめて古くから発達し、とりわけ煎糖用の結晶缶の構造とその操業技術は結晶化を行なう他の工業分野における模範となっており、現在の回分式結晶缶の技術を発達させる素地を作った、と言われている。

煎糖用の結晶缶は本来 vacuum crystallizer であるが、通称 vacuum pan と言われており、写真1に示すような発展をして来た。現在多用されている結晶缶にはカランドリア形とコイル形とがある。いずれも缶内の加熱部

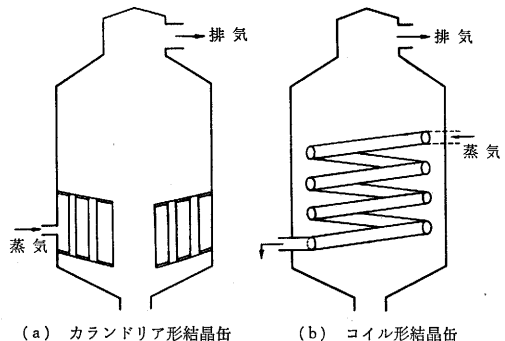
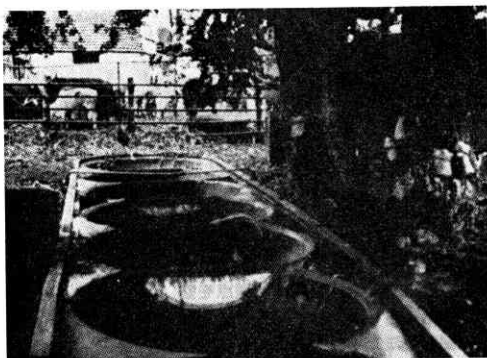
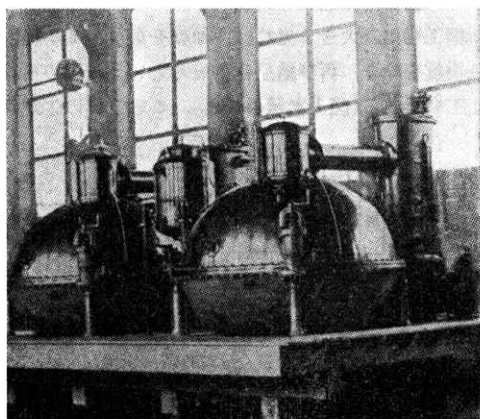


図 2 多くの精製糖工場で用いられている煎糖用結晶缶の断面図

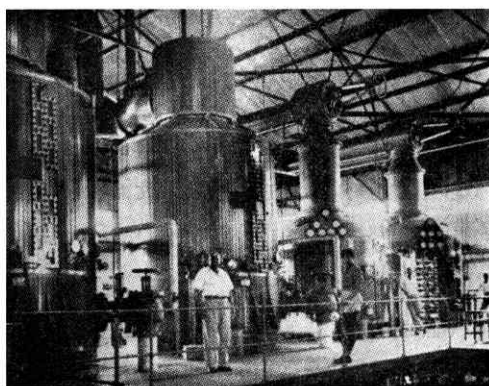
\* 東京大学生産技術研究所第2部  
\*\* 受託研究 37-37



(a) 初期の結晶缶. pan の名にふさわしい.



(b) 19世紀のもの. 球型缶である.



(c) 最近のもの. 現在ではもっとずんぐりした low head type のものが当用されており, かくはん機をつけたものが増えている.

写真 1 煎糖用結晶缶 (vacuum pan) の発展

形式で分類した名称であり(図2参照), それぞれ特徴がある. 中心部に大型のかくはん機を設けたカランドリア形の大容量のものがこれらの精糖工場で常用されるものと予想されている.

ここで煎糖用結晶缶の装置形式について説明する. 現在実用化されている煎糖用の結晶缶は, 半回分式真空槽形で熱交換部を内蔵した形式のものである. 半回分式というのは, 育晶工程において缶外から母液を連続的に注入する方式をとっているからであって, 缶内のマスク

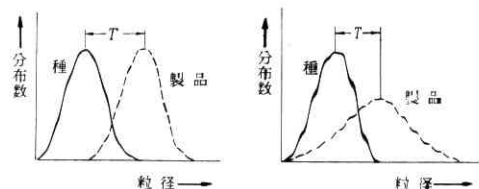
トを缶外へ連続的に取り出すからではない. また, 内蔵された熱交換部は, たとえばカランドリア形やコイル形のように, すべてマスクの自然循環を促進させるような構造になっている. さらに, 大形のかくはん機を用いて循環速度を高めるようになっているものも現われている.

完全に連続化された煎糖用結晶缶がいまだ実用化に成功していないことについて, 筆者なりの見解を示せば,

a) 結晶粒度のばらつきをある程度以上に小さく抑えようとすれば, 連続式の結晶缶では原理的に不可能と考えられること.

b) 連続式の結晶缶では結晶粒子の滞留時間をあまり長くできないこと.

などである. ここで a) の主張はいわゆる  $\Delta L$  法則にもとづいている. すなわち結晶の成長にしたがって, その粒度分布は図3に示すように, 回分式の場合は種晶の粒度分布とほぼ等しいばらつきのみまで保たれているが,



(a) 回分式結晶缶の場合

(b) 連続式結晶缶の場合

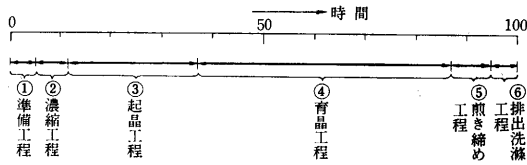
図3 回分式と連続式の結晶缶における粒径ばらつきの比較(同じ育晶時間  $T$  が経過したときの比較)

連続式の場合はばらつきが増大する傾向をもっている. したがって, 連続式結晶缶の場合は仕上りの結晶粒子の粒度のばらつきをある程度以上に小さくすることができないから, とくに蔗糖のように煎糖時間の長い場合には連続化はきわめて困難と考えられる. b) の理由は, やはり煎糖時間の長短に関係する. 蔗糖結晶の育晶時間は, 通常2~4時間にも達するくらい長いから, 連続式結晶缶を用いてこれほど長い滞留時間を実現することは構造的に無理があるように思われる.

### (3) 運転シーケンス

回分式もしくは半回分式のプラントは, ある定まった一連の操作を繰り返しながら操業される. この1バッチタイム毎に繰り返される操作を時間的に生起する工程の順序で表わし, これを運転シーケンスと呼ぶ. 制御対象としてのプラントの運転シーケンスを設定することは, そのプラントの自動化を目的とするシーケンス制御系を設計するための基礎である.

いまだ明確でなかった煎糖用結晶缶の運転シーケンスを設定するため, 結晶缶運転員 (pan-man) の操業方法を詳細に観察し, 運転員の作業動作とプラント内の状態変化とを対応させて分析したところ, 図4に示す運転シーケンスにまとめることができた. この図に見られるように, 1回分操業は六つの工程①~⑥に細分されてい



(上記の時間軸は各工程の保持時間の目安を与えるために付した)

図 4 煎糖用結晶缶の運転シーケンス

る。このうち②から⑤までの工程にはそれぞれの自動制御を行なわねばならない。なかでも③起晶と④育晶は重要な工程で、前者は種晶の安定化と結晶粒度を決定するために、また後者は結晶粒子を品質よく成長させるためにとくに着目せねばならない。

(4) 煎糖用結晶缶の自動制御についての従来の研究  
一般に結晶缶というプラントはもっとも自動制御しにくいものの一つである。

結晶缶を用いている工場は、全国のおもな化学工場の90%にも及び、そのうちの約半数は回分式ないしは半回分式の結晶缶であるといわれている<sup>4)</sup>。それにもかかわらず、結晶缶の特性および制御に関する研究はごく最近になってようやく活発になってきた、というのが世界の現状である<sup>5)</sup>。

結晶缶の自動制御がむずかしく、完全なオートメ化がごく一部の分野でしか成功していないのは、晶析という物理化学的現象がいまだに十分は握されていないことに起因している。すなわち、結晶核の発生と結晶粒子の成長という現象はひじょうにデリケートであり、それに関連する因子はきわめて多い。たとえば晶癖などと称されているように、結晶形がほんのすこしの不純物のために異常な形態を示すことがあるが、その本当の原因は大抵の場合不明である。そこで、蔗糖のように仕上がり結晶の品質が強調される場合には、いきおい運転者の経験に大きく依存しながら操業の自動化を計画するということにならざるをえない。

煎糖用の結晶缶に関する完全な自動制御はまだ成功していないといえよう。以下に述べるように、筆者を含めたグループによって行なわれた研究によって煎糖用結晶缶の特性と制御方式は大幅に進歩したが、それでもなお文字どおりの完全な自動化には多くの研究余地が残されている。

## 2. 制御工学的な特性

半回分式の結晶缶の制御工学的な特性に関する組織的な研究はほとんどなかったと言って差支えない。そこで本章では筆者らのグループによってなされた煎糖用半回分式結晶缶の制御工学的な特性について述べる (図5参照)。

## (1) 制御量の選定

いかなる量をいくつ選べば十分に制御可能であるか、という制御量の選定問題は制御系設計のもっとも基礎となる課題である。このような基礎的な問題から考察をはじめねばならない点にも、結晶缶の特性に通常のプラントとはちがった別のむずかしさがあることを示している。

制御量の必要十分な数はそのプラントのプロセス自由度の数に等しい。プロセス自由度の算定法については、すでに二、三の実用化されたものがある<sup>6)7)</sup>。しかしこの種の従来の算定法はプロセスの相平衡を仮定して導かれたものであるから、反応や移動過程の緩慢なプラントに対しては近似的に成立するが、結晶化過程を含むプラントには適用できないことがわかった。そこで筆者は非平衡熱力学の手法を用いてきわめて一般性のあるプロセス自由度の算定式を新しく導いた<sup>8)</sup>。これを用いて煎糖用結晶缶のプロセス自由度を算出し、さらに操業上の実際の見地からみて許容できる付加条件を設けて各工程ごとの制御量の数を定めたところ、起晶工程では2個、育晶工程では3個、という結論を得た。

上述の結論をもとに、具体的な制御量の選定を行なった。その結果を表2に示す。

表 2 各工程における制御量と操作量

工程	制御量	操作量
濃 縮	缶内真空度	空気吸入速度 (または冷却水流量)
起 晶	缶内真空度	空気吸入速度 (または冷却水流量)
	過 飽 和 度	加熱蒸気流量 (または温水注入速度)
育 晶	缶内真空度	空気吸入速度 (または冷却水流量)
	過 飽 和 度	加熱蒸気流量
	カ タ サ	母液注入流量
煎き締め	缶内真空度	空気吸入速度 (または冷却水流量)

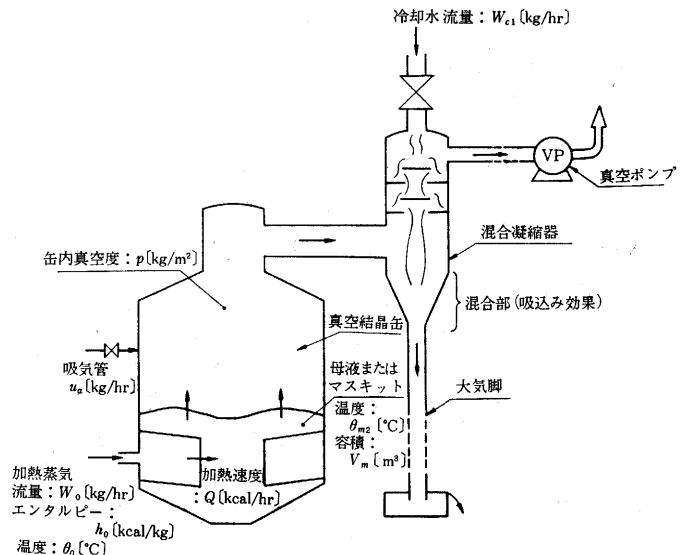


図 5 煎糖用結晶缶の構造 (記号は本文参照)

この表で、過飽和度という制御量はいうまでもなく母液の過飽和度を示す量で、結晶の成長速度を支配する最大の因子である。またカタサという制御量はマスクット(母液と結晶とのスラリー状混合液の意)の見かけ粘度に相当する複合的な量であり、この量を制御することによって間接的にマスクットの結晶含有率や循環性などを規制することができる。

(2) 動特性

プラントの特性という言葉には定常特性(静特性とも言う)と動特性(非定常特性の意)の二つの意味がある。前者は主として化学工学的な意味が強く、プラント設計の資料とされているが、自動制御系の設計にとっても必要なものである。たとえば配管系統につけるべき制御弁の大きさはその定常流量特性から決定できる。これに対して動特性はほとんど自動制御系の設計のために求めるべきものである。

プラントの動特性には一般に非線形成分が含まれており、またとくに回分式プラントにはパラメータの緩慢な変動がつきものである。しかしこのような扱いにくい特性は短い過渡的な時間内では線形化できると仮定して、とりあえず線形動特性をもとに、線形調節器を用いた制御系を設計するのがプロセス制御における常とう手段である。ただしこのようにして設計した制御系は、あらためて非線形性やパラメータ変動の影響を吟味し調整せねばならないのはもちろんである。

このような立場から、煎糖用結晶缶の動特性を理論的に導き、次式のようにもとめることができた。

起晶期:

$$\begin{pmatrix} \Delta z \\ \Delta p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{w0}S} & \frac{-1}{T_{wc}S} & \frac{-k_1}{(1+\tau_1S)(1+\tau_2S)} \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{1+\tau_1S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_0 \\ \Delta w_c \\ \Delta u_a \end{pmatrix} \quad (1)$$

育晶期:

$$\begin{pmatrix} \Delta z \\ \Delta x \\ \Delta p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{w0}S} & \frac{-1}{T_{wm}S} & \frac{-k_1}{(1+\tau_1S)(1+\tau_2S)} \\ \frac{k_3}{S(1+\tau_3S)} & \frac{-k_4}{S(1+\tau_3S)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{1+\tau_1S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_0 \\ \Delta w_m \\ \Delta u_a \end{pmatrix} \quad (2)$$

$z$ : 過飽和度,  $x$ : カタサ,  $p$ : 缶内真空度,  $w_0$ : 加熱蒸気流量,  $w_c$ : 温水注入流量,  $w_m$ : 母液注入流量,  $\tau_1 \sim \tau_3, k_1 \sim k_4, T_{w0}, T_{wm}, T_{wc}$ : パラメータ,  $S$ : ラプラス演算子,  $\Delta$  記号は微小変動量を表す。

これらの動特性式を直感的に見やすくするため、起晶期と育晶期をまとめてブロック線図で表示すれば図6のようになる。このように、煎糖用結晶缶の動特性は複雑な多変数系となっていることがわかる。

筆者らのグループは、(1)(2)式の理論的な動特性式

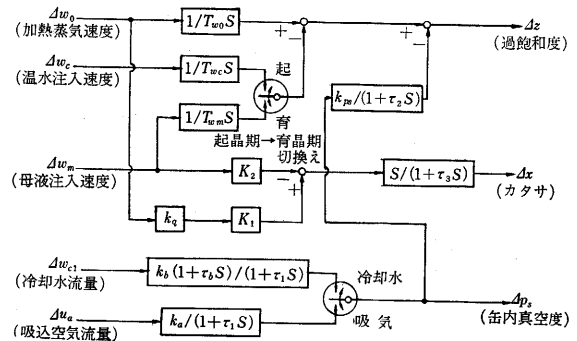


図6 煎糖用結晶缶のブロック線図 (冷却水流量の操作量を付加したもの)

を稼動中の大形結晶缶を用いて実験的に検証した。

化学プラントの動特性を求める実験にはつねに以下のような困難が伴う。

a) 応答を求めるための入力を印加することの困難さ。すなわち、入力を印加することによってプラント内の状態が乱され、そのため十分な大きさの試験入力を加えることがむずかしい。

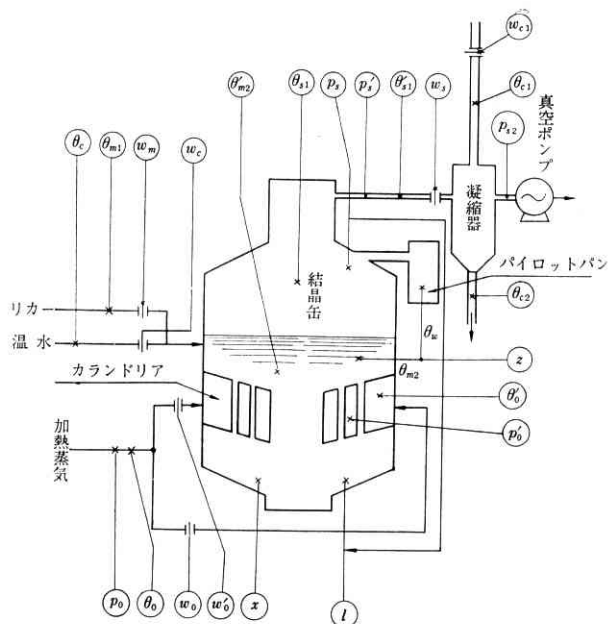
b) 測定すべき出力端子が多い。上式で示したように、動特性は多変数系であるうえに、制御量の応答を測定するだけでは十分に特性を理解できない場合が多い。

c) 測定に要する時間が長くなり、その間に制御対象の特性が変動すること。とくに回分式プラントでは操作工程が短時間のうちに移り変わることが多く、また大規模なプラントの応答は緩慢なことがあるから、短時間のうちに測定し終えるような方法が望ましい。

これらの困難を克服するため、種々の動特性試験法が開発されている。また適応制御系を構成するために不可欠な動特性の固定手段の一つとしても、動特性試験法はさかんに研究されている分野である<sup>9)</sup>。しかしそれにもかかわらず、大形プラントの動特性を試験する方法にはまだまだ未解決の問題が多い。筆者らは煎糖用結晶缶の動特性を試験する方法として、結局もっとも古くから用いられているステップ応答法を用いた。ステップ応答法とは、着目する操作量の一つにステップ状の入力信号を加え、制御量をはじめ各種の状態量の出力応答を測定する方法である。この方法の特徴は、応答曲線から比較的簡単に動特性を読みとれる点にある。

測定器の計装は、図7に示したように多岐にわたった。加えるべき入力端は、表2で示した5種類の操作量である。出力応答には通常、外乱や雑音が含まれており、これが測定値の精度を低下させる原因となっているが、本実験ではいろいろのくふうを加えて実験を行なったので5%以下の誤差範囲内におさえることができた。

以上のような実験によって理論的に導いた煎糖用結晶缶の動特性が妥当であることを確認した。実験値との誤差は約5%程度であったが、もともと理論値に含まれて



$p$ : 圧力,  $\theta$ : 温度,  $w$ : 流量,  $\alpha$ : 過飽和度,  $\alpha$ : カタサ,  $l$ : 液位

図 7 測定器の計装図

いる線形化誤差もこの中に入っているの、これを大して問題にしなかった。

### 3. 最適操業条件と制御に関する問題点

煎糖用結晶缶の操業と制御に関する最大の問題点は、育晶工程におけるいわゆる煎き上げ操作にもなってマスクットの循環性が悪化することであろう。本章ではこの問題点を考察し、その最適操業条件を検討する。

煎き上げ操作とは、育晶工程で缶外から連続的に母液を注入してマスクット量を刻々と増大させるときの操作を言う。検討の結果、この操作の意味するところは次のとおりであることがわかった。すなわちマスクットには煎き上げ量に応じた最適なカタサが存在し、したがって煎き上げ操作は、このカタサの最適プログラムに沿って行なわねばならない。なぜならば、起晶工程で一応安定化された種晶に糖分を補給して結晶成長させる場合、もし缶内のマスクット量を一定に保持できる程度の少量の母液を供給したとすれば、結晶粒子同志が次第にくっつき合ってマスクットの見かけ粘度が高くなり循環対流が悪化する結果となる。マスクットの循環対流が悪化すれば、よどみが生じて母液の濃度むらが生じ、結晶の仕上がり品質が低下するばかりでなく、カランドリア部での伝熱効率が悪くなって操業時間の遅延をもたらす。したがってこのような意味において、マスクットの見かけ粘度を下げ、循環流動性を高めねばならない。しかしながら逆に循環流動がよくなりすぎると、結晶粒子間の距離が大きくなりすぎてその空間に偽晶(false grain)が発生しやすくなる。したがって結論として、結晶の成長に合ったマスクットのカタサ(流動度)が存在するはず

である。

このような問題点に対して、従来の経験的な煎き上げ方法は文字どおり千差万別であった。筆者らは先程と同じ実規模の実験装置を用いて、もっとも合理的と思われる最適操業条件とその制御法について結論を得た。

#### (1) 循環速度とカタサ

まず、煎き上げ操作中のマスクットの速度分布を知る必要がある(マスクットの循環の様子、おおむね図8に示したとおりであろう)。これを測定する方法に2通りある。その第1は、流速計を直接缶内にそう入する方法(写真2参照)、第2はカランドリア管板のすぐ上下の2点でマスクット温度を計り、この温度差と加熱蒸気流量を用いて間接的に求める方法である。

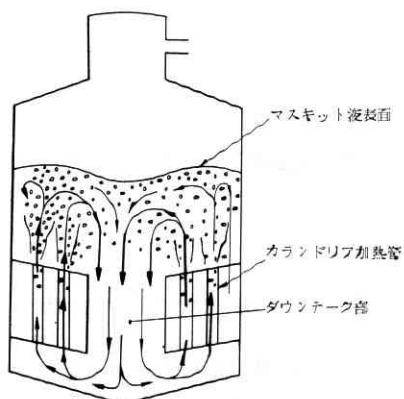


図 8 缶内マスクットの循環の様相

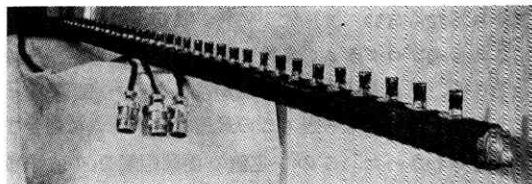


写真 2 マスクット流速計 (36個の検出端が並んでいる)

後者の方法を用いると、マスクットの平均流速  $V$  が求まり、次式の伝熱式で計算できる。

$$V = Q / C_p \gamma_m (\theta_1 - \theta_2)$$

$V$ : マスクット平均流速,  $Q$ : 加熱速度,  $C_p \gamma_m$ : マスクットの比熱および比重量,  $(\theta_1 - \theta_2)$ : 温度差

それぞれの方法による測定例を図9、図10に示す。

つぎに、マスクットの循環速度と密接な関係をもつ伝熱係数について実験を行なったところ、図11の結果を得た。詳細は割愛するが、この伝熱係数は循環速度についての理論式を用いて計算することができる。図11にその理論を付記した。

#### (2) 最適なカタサのプログラム

マスクットの循環速度を十分に大きく保ち、伝熱効率

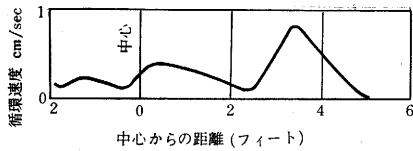


図 9 循環速度の実験値 (第 1 の方法)

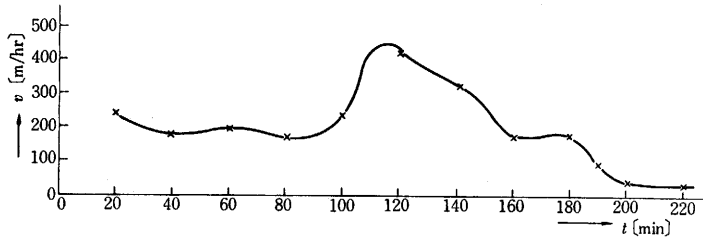


図 10 循環速度の実験値 (第 2 の方法)

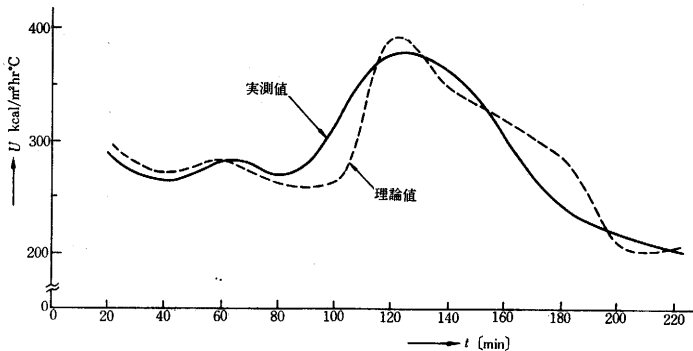


図 11 伝熱係数の理論値と実験値の比較

を低下させず、しかも偽晶の発生を最小にとどめるためには、ある最適なカタサのプログラムにマスクットを制御せねばならない。

この最適プログラムの条件を物理化学的に考察を進めたところ、結晶粒子の面間距離が常にある一定値であるような操業方法がもっともこの最適プログラムに適合することがわかった。この一定値の面間距離を  $\delta$  とすると、結晶粒子の容積濃率  $\phi_v$  は

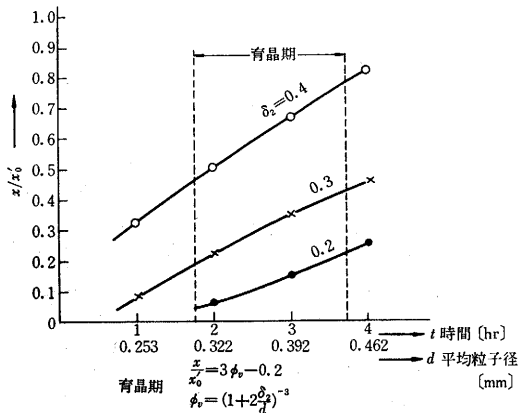


図 12 最適なカタサのプログラム (例)

$$\phi_v = \left(1 + \frac{2\delta}{d}\right)^{-3}$$

で表わすことができる。ここで  $d$  は結晶粒子の平均径である。ゆえに、育晶工程におけるカタサ  $x$  の式

$$x = x_0(3\phi_v - 0.2)$$

に上式を代入すると、最適なカタサの値が算出できる (ここで  $x_0$  は定数である)。結晶粒子の大きさは、過飽和度が一定の母液中では時間に比例して大きくなるから、結局、最適なカタサのプログラムは

$$x = x_0 \left\{ 3 \left( 1 + \frac{2\delta}{kt + d_0} \right)^{-3} - 0.2 \right\}$$

で与えることができる。これを図で示せば (図 12)、カタサの最適プログラムは近似的に直線的に増加するものと考えて差支えない。

理論的に導いたこの最適プログラムは、従来の経験的な説のうちの一つと一致している。筆者らはこのプログラムに沿ったカタサの制御を実施し、品質の良い結晶を比較的短時間で作ることができたが、このプログラムが真に最適であると確信できるためには、さらに広範な実験を重ねる必要があると思っている。

#### 4. 結 言

精糖工業で用いられている煎糖用の結晶缶の特性と制御法の二、三の問題点について述べた。元来、結晶缶というプラントはひじょうにデリケートな特性をもち、とうてい意のままに制御できないしるものであったが、近年の盛んな研究によってようやく部分的に制御が可能になったに過ぎない。本文はそのごく一端を紹介した。  
(1967年5月1日受理)

#### 引用文献

- 1) 朝日年鑑 (1967年版), p. 392.
- 2) 大内, その他「日本経済図説」第4版, p. 143, 岩波新書 620, (1967).
- 3) 沢井, 森, 山口, 「精製糖工程の総合制御システム」, 計測と制御, 6, 2, 1-14, (1967.2).
- 4) 城塚, 八幡屋, 「第5回総合シンポジウム, (4) 晶析, “展望”」, 化学工学協会主催, (1966).
- 5) 藤田「化学工学の研究テーマ」, 化学工学, 30, 4, 278-281, (1966).
- 6) Gilliland, E. R., “Degrees of Freedom in Multi-component Absorption and Rectification Columns”, I. E. C., 34, 5, 551-557, (1942).
- 7) Kwauk, M., “A System for Counting Variables in Separation Processes”, A. I. Ch. E., 2, 2, 240-248, (1956).
- 8) 梅谷, 「工学系のプロセス自由度について」生産研究, 18, 7, 24-27, (1966).
- 9) Mishkin, E., L. Braun, 編「適応制御系」(磯部監訳), コロナ社 (1965).