

生産工程無人化の基本的手法

Foundamental Technics for Automatic Productions

森 政 弘*

Masahiro MORI

最近のわが国の労働力不足は工場の生産工程に深刻な問題を投げかけている。戦後 20 年以上、オートメーションの必要性がとなえられ、また実施されてきているが、その労働力節約に対する効力は今日なお期待はずれで、オートメーションによる首切りの心配とは逆に、人手不足に悩まされているのが現実である。この現象は、オートメーションの実施にあたって考慮すべき基本項目に大きな盲点が多いということにも原因している。本稿はこの観点から、とくに少人数による工場の操業、すなわち工程無人化を目的としたオートメーションシステムを計画するに際しての基本姿勢について解説し、こんごのわが国の労働力不足に対処するための一助とするものである。

1. 日本の労働人口と無人化の必要性

図 1 は、昭和 35 年当時のわが国の全人口を、左側を男性、右側を女性とし、5 才階級別で表わした人口ピラミッドである。そのうち斜線の部分が労働人口、すなわち職を持っている人たちである（家庭の主婦や動産利子とか借家賃で生計を立てている人はその中には含まれていない）。この労働人口の中には管理職の人や経営者もすべて含まれているので、そういった人たちを除いて実際に工場現場や畑や海で、いわゆる手をよごして働いている人口を表わすと、だいたい図中に太い斜線でハッチした部分となる。この図で 9 才以下にはすでに人口減少のきざしが見えるが、これが 昭和 65 年にはどう変化するかを予測した結果が図 2 の太い破線である。この図には細い実線で図 1 の昭和 35 年のピラミッドが重ねてある。図 2 によれば、日本の人口は、ベビーブームの子供に多少の山は見られるが、大局的に逆三角形の減少形をたどるといってよい。工場その他の現場で、手をよごして働く人、つまり工員さんに相当する人たちも、人口の減少とともに減り、図 2 のハッチのようになる。ところが逆に、老人の人口は、医学や薬品の進歩、環境の改善ともなっていて寿命がいちじるしく延びて、昭和 65 年には昭和 35 年の 2 倍以上になると予想される。

以上より、わが国全体として、こんご国を支える働き手はいちじるしく減少し、その少ない働き手一人当たりが扶養すべき老人の数は増加するということが結論できる。これをさらに定量的に検討した結果、筆者は昭和 65 年に、は労働生産性（働き手一人あたりの生産量）を現在の 3 倍には上げなければ、今日と同じ程度の豊かな生活は保証できないということがわかった。このことをやさしく言えば、あ

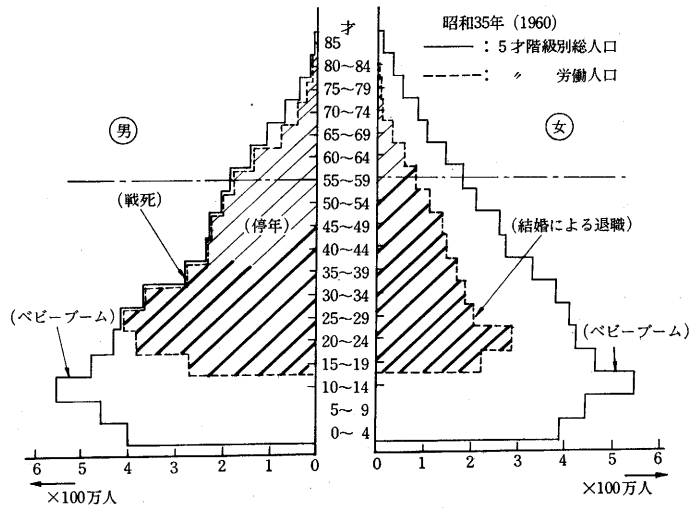


図 1 昭和 35 年のわが国の総人口および労働人口についての 5 歳階級ピラミッド

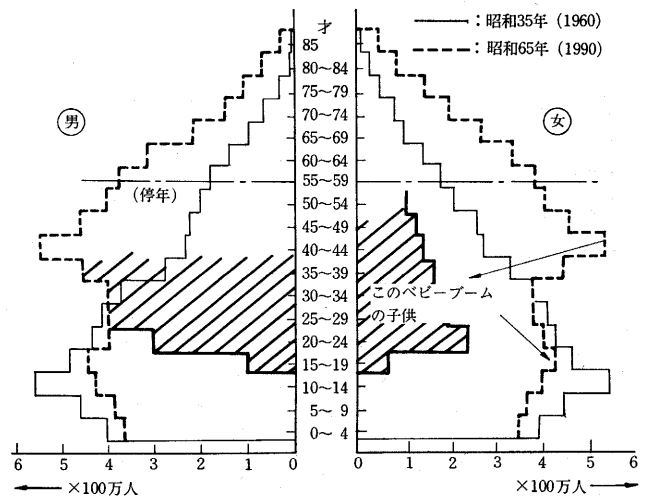


図 2 わが国年齢別人口構成の将来変化

りとあらゆる仕事について、現在 3 人がかりでやっている作業を 1 人でやれるようにすることなのである。これは考えてみれば、今日のアメリカの労働生産性（表 1 の

* 東京大学生産技術研究所第 2 部

表1 主要企業の国際比較 (1965 年のデータ, カッコ内は 63 年のもの), (昭和 42 年 6 月 25 日, 日経朝刊より) とくにわが国と外国との労働生産性を比較されたい。

		売り上げ高 (日本企業を 1とする)	労働生産性 (一人当た り1000円)	設備 生産性	人件費 粗付加価値
普通鋼	八幡製鉄(日)	1.00	2,287	24.36%	40.8%
	U・S スチール(米)	5.41	5,236	40.98	64.1
	アウグスト・ティッセン(西独)	2.12	(1,976)	(33.3)	—
総合電気機械	H 立(日)	1.00	1,943	45.08	47.4
	G E(米)	7.83	4,672	154.84	69.8
	A E I(英)	0.90	(928)	(74.7)	—
	シメソンス(西独)	2.43	—	—	—
通信機械	日本電気(日)	1.00	1,222	74.28	50.0
	I B M(米)	15.02	—	—	—
	フリッブス(オランダ)	14.00	1,581	75.18	70.7
自動車	トヨタ(日)	1.00	2,617	51.60	23.5
	G M(米)	30.16	4,738	111.42	51.6
	フォード(米)	16.78	5,263	102.03	—
	フォルクスワーゲン(西独)	2.71	—	—	56.7
総合化学	三菱化成(日)	1.00	3,202	28.05	28.8
	デュポン(米)	12.45	6,498	60.96	45.8
	I C I(英)	9.41	(2,392)	39.62	54.0
合 織	東洋レーヨン(日)	1.00	1,461	23.72	36.9
	セラニーズ(米)	1.73	—	—	—
	コートールズ(英)	2.10	—	—	—

ように平均として日本の2倍)をしのぐ生産性をあげなければならぬのだから至難の業である。

すでに今日上記のことは生産現場にあらわれて来ていて、若い働き手となるべき中学卒就職者の不足は全国で180万人、逆に中高年令者の過剰は30万人となっている。

さらに、このような労働力の絶対量の不足に対して、悪い条件が浮び上がっている。それは若者はもっとも重要な第一次産業である農漁業や第二次産業としての工業へは行きたがらず、いわゆるカッコイイ事務やサービス業へ向かう傾向が強いということである。このファクタを考慮すると、上記のわが国の将来の労働生産性は今の4倍以上にもせねばならぬと結論できる。

このように考えてくると日本のオートメーションのあり方は、現在のままでけってよいとは言えないことがわかる。今日のオートメーションは、ともしれば人間以上の大量高速な情報処理装置としての電子計算機の応用だけに考えが止まり、上記30万人の過剰中高年令者の仕事だけを自動化し、不足180万人の若者の作業の自動化はかえりみられもしないというむじゅんを引き起こしている。“オートメーションを実施したら人がふえた”という素人でもすぐ間違いとわかる珍現象が現実には少なくないのである。

オートメーションには表2のように、少人数操業以外にもたくさんの効果がある。しかしこの意味で筆者は、日本のこんどのオートメーションは、無人化をこそ目指して進むべきであると主張する。電子計算機によって無人化が可能になるのなら使うがよからう。しかしそれ

表2 オートメーションの目的と効果

目的・効果	内 容
少人数操業	◎労働力不足に対処する。 人件費削減による安価製品。
少ないミス	ミス・ごまかし・手抜きの解消。
高速と安全	作業の高速化、安全化。
大形と小形	人によっては不可能な超大形、超小形の対象のとり扱い。
高効率と少ないむだ	製品品質の向上、収率の向上、作業時間・原料・材料・燃料・電力などのむだの減少、プラント建設費の節約、装置・プラントの寿命延長、操業の単純化。
精神面と衛生面	精神的余裕の増加、労務管理の向上、ブルーカラーのホワイトカラー化によるコンプレックス解消、不安の解消、作業環境の改善、衛生性の向上。
そ の 他	P R の効果、ボイラの重油専焼・原料秤量精度など法的規制への対処など。

が無人化への方向に貢献しない場合には採用しないがよい。その場合の方法は別のところにある。

2. オートメーションシステム・デザインの基本項目

図3の三角形の10個の丸印*中の項目は、筆者がオートメーションシステムを計画する際に考える基本のものである。これら10項目のうち、現在のオートメーション一般は、要素として電子計算機を使うことだけに関心が集中されているように感じられる。つまり要素だけが注目的となって他の項目への関心が非常にうすくなっていると思われる。とりわけ対象・目的・環境と在来・弾力性については無関心といってよいほどの場合もある。

10項目のうち、もっとも大切で計画の最初にとりあげ

* 池辺氏のデザインズゴックよりヒントを得たもの。生産研究, Vol. 19, No.10, p.29 参照。

じものに統一するか、記憶にはデジタルを掛算にはアナログをというふうに、あるいは情報処理は電気ですり操作には油圧を使うというふうに、信号を適材適所に用いるべきかということを表す。信頼性に関する項目中の高ひん度・低ひん度の項については、とくに安全回路などに要求される超低ひん度使用での信頼性と、寿命のような高ひん度高使用での信頼性とは異質なものであることに注意されたい。1億回の連続使用に耐える部品であっても、3年間放置した後は、さびつきが原因でたった1回さえも動作しないことがある。

図4はオートメーション計画に際しての、基本的チェックリストでもある。

3. 対象の把握

オートメーション、ひいては無人化の技術的根柢は対象の詳細で適確な把握にある。これはたとえば、化学プロセス工場の場合なら、原料の産地、その産地からの運搬と通関、貯蔵、種類、工程、反応などといったことから、工場内の工程はもとより、製品の荷姿や種類、販売システムなどにいたるまで十分に飲み込んで自分のものとするを意味する。また工程の運転については、まず最初に入れるべきスイッチはどれか、そのつきに開けるべき弁はどれか、またそれはどの程度開ければよいのか……、などということすべて調査する必要がある。このような始動・停止をはじめ、定常運転、例外運転、事故トラブルの生じた場合の処置、各装置や工程の静特性、動特性、マテリアルバランス、エネルギーバランス、中間製品・助剤・副産物・廃物などの流れや処置などについても十分に認識しておかねばならない。これをシステムティックに行なうための表が図5である。図5には1~40までの各項目相互間の交差ます目が820個あるが、この820個の意味を片一端からブレーストローミング的に考えてゆくのである。たとえば、ます目1-6(ハッチ)の意味するところは、原料の種類であって、これはます目1-4, 1-11, 1-13(十文字)などとの関連において、定常運転を安定化して均一な品質の製品を作るために各種名柄の原料を適当に混合して工程へ送り込む、いわゆるブレンドである。またトラブルと流れ・ためとの交差ます目18-26(○印)の意味するところのものは、たとえば工程の一部に故障が生じた場合、プロセス工場ではタンク、組立ラインでは部品のストックスペースの容量や構造・配置などである。

これら対象把握の項目の中には、図4の環境・在来に関する各項目と、重複するものもある。たとえば手動による運転状況、トラブルの処置、熟練工の動作、静特性や動特性の定性的な面などはこれである。これらについては、工場の工務課あるいは製造課から現場に与えられている作業指示テキストなどによるよりは、現場操作員について直接聞き出すことが必要である。それは現場と

いうところは、筆者の経験では、作業指示テキストの内容とは2~3%ていど異なった良い方法を自分で経験的に見だし、それによって現実に運転していることがほとんどだからである。なお現場と十分に話し合うためには、心の通いが大切であり、現場用語の習得と同時にそれなりの態度が必要であることを付記しておく。このことはとくに熟練工の動作分析にあたっては不可欠である。

工程の中でも、加工工程や組立工程に類するものでは対象の特性が設計者に科学的に明確に理解される場合がほとんどだが、化学プロセスではプロセス特性に不明確な因子を含んだまま現実に運転操業されている場合が少なくない。溶鉱炉、セメント用キルンのようなものはその代表例である。また身近かな例としては家庭の飯たき用電気がまがそうである。でん粉という高分子が、飯たきプロセスという3次元の分布定数系、それも時間に応じて特性が激変する非線形非定常系内で、どう変化するかという微分方程式は解けていないのにもかかわらず、またさらに、たけた飯の良否の判定基準が数量的にとらえられていないのにもかかわらず、3000円でいどの値段で満足に使える自動電気がまが実用になっている。化学プロセスの無人化にはこの電気がまがな一面があることを忘れてはならない²⁾。

4. 対象を無人化に適した形態に設計しなすこと

オートメーション化、無人化のためには、化学工場ならばその工程や装置などを、また加工組立工場ならば加工組立のための工作機械と同時に製品の細部を、それに適合した形態にしておくことが不可欠な準備となる。

このことは、オートメーションの質を高いものにし、またオートメーションの装置に極端に高額の費用がかかるのを防ぐための原則でもある。

加工工程についてこのことを考えてみよう。まずこれをスムーズに実施するためには、製品の設計者とその製品を製作するための(オートメーション)装置設計者とが緊密に協力することと、その協力ができそうなシステムを作っておくことが先決である。製品というものには将来かならずモデルチェンジや部分的な変更・改良が行なわれるものである。このことをあるていど考慮しておかねば、加工装置の設計者は後程その変化に対処できないことになるため、装置の償却がまだ終わらないうち、あるいは装置の耐用年限中に、それを破棄しなければならなくなる。また加工装置をまともに動作させるためにも部品設計が決定的な要因となる。たとえばその装置に部品をかけるにあたって、その位置ぎめに利用できる加工された面があるかどうか、もしそれがなければ、面を作るまでの間、その部品の他のどの部分を位置ぎめに利用できるか。それがなければ位置ぎめ用の穴をあけるべきかどうか。その場合、部品に悪影響をおよぼさないように穴がかけられるかどうか……、というよう

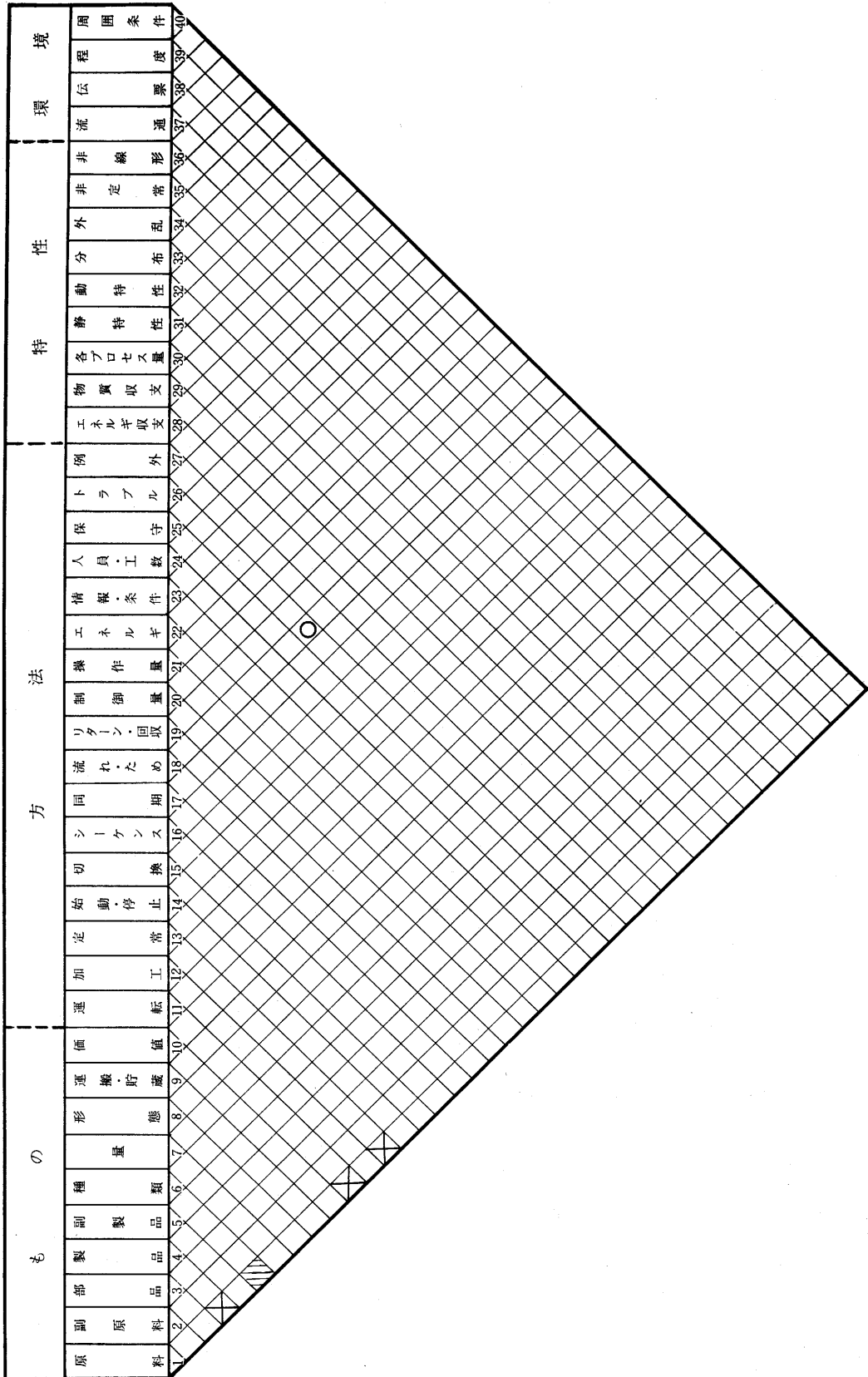


図5 対象把握のための相関表

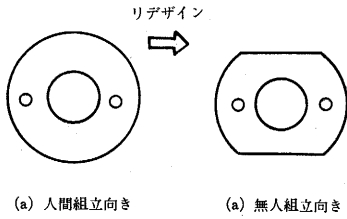


図6 座金のような円形部(a)は両側に直線部分を設けて(b)のようにしてやると自動整列はるかにやさしくなる

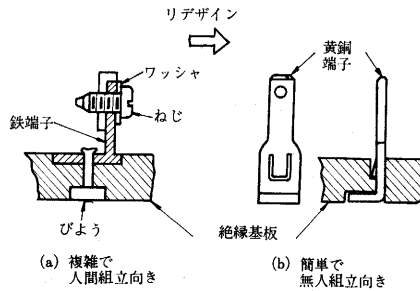


図7 電気部品端子の例
(a)の組立ては複雑で人間でなければ困難
(b)は単に下から端子を押込めばすむので無人化むき

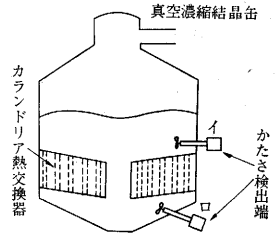


図9 かたさ検出端を口の辺りにとり付ける余地がなければ、結晶缶運転の無人化は不可能

な工合である。したがって、製品の設計者は加工技術について、また加工装置設計者は製品について(つまり対象について)深く詳細な知識を持っていなければならない。そしてこの両者の密接な協力こそ必要である。これがオートメーションの基礎の一つである。

図4左上部の要素の項目中、手足の内側にマテリアルズハンドリングがある。さらに頭脳と手足の中間に自動組立がある。無人化は頭脳としての要素である計算機だけでは実施できず、手足としてのハンドリングが絶対に必要である。自動組立にもハンドリングこそ不可欠である。このハンドリングを無人化するためには、加工工業では対象としての製品やその部品がそれなりに設計されている必要がある。つまり、無人化とはこれまで人間が扱っていたものを機械に扱わせることであると解釈すると、製品や部品を機械が扱いやすいようなふうにしてやる必要があるわけである。有史以来これまでのものは、すべて人間が扱いやすいようにできているのであ

る。だからこれを機械が扱うのに適したように根本的に変更してやらなければならない。このことを筆者は無人工化のためのリデザインといっている。たとえば、われわれ人間の行なっている“辞書をめくる”という動作をそのまま機械にさせようとするは大変困難を感じる。そこで対象である辞書という本の形態をリデザインして、巻物に変えるとよい。巻物をくるといふ動作は、本をめくるよりもずっと機械向きだからである。電子計算機の磁気テープはこのような考えのもとにできあがったと見ることはできないだろうか。このようなリデザインを二、三の実際の機械部品について示したのが、図6, 7, 8である^{3), 4)}。またこれらの例よりもさらに大がかりなリデザインとして電子回路のプリント配線、さらには集積回路(いわゆる IC, Integrated Circuit)があげられる。これらの徹底的なリデザインは、過去の一品一品の電子部品の電線の半田付けによる結合という人間向きの手法を機械向きに変改して、無人化に近づいたばかりでなく、より小さく、よりまとまっていて、より軽量で、より丈夫で、より安定で、より均一で、すばらしく周波数帯域が広い、などという利点を生み出したのである。

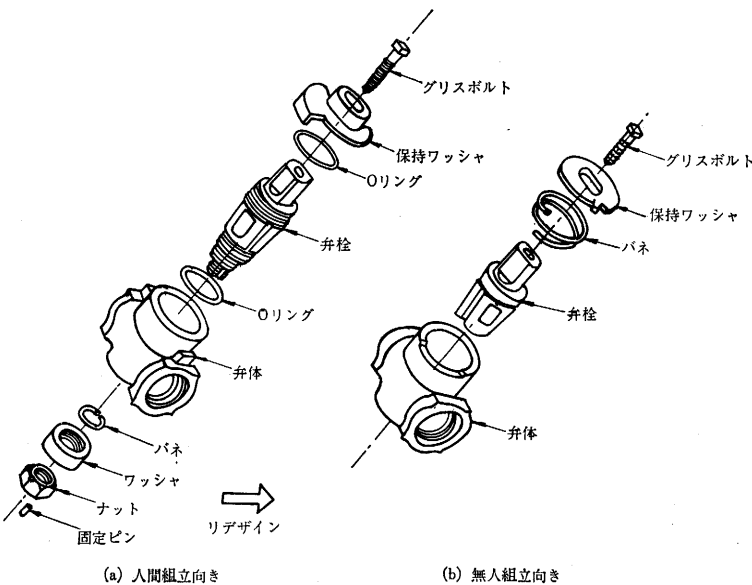


図8 弁の無人組立てのためのリデザインの例

プロセス工業においても同様のことがいえるが、この場合は、リデザインの対象は製品よりもむしろプラントの各装置となる。

図9は、精製糖用の真空濃縮形結晶缶である。この結晶缶の無人化⁵⁾には、蔗糖結晶とその母液との混合物(白下という)のかたさを自動検出する必要があるのである。このかたさは簡単には等価粘度と考えてよく、したがってその検出端としてはプロペラをモータで回して母液をかくはんし、そのかくはんに必要な動力を測るという原理のものでよいのだが、ここでかたさ検出端の取付

位置という一見さ細なことが結晶缶無人化の勝負の鍵の一つを握っているのである。たとえば 図9の点イに検出端をとり付けると失敗する。それは母液をかくはんすべき検出端のプロペラが、カランドリア熱交換器から上昇してくる液によって逆に駆動されるということになるからである。かたさの検出端は実は点ロに取付けるのが理想であるが、カランドリア熱交換器の下部にそれだけの空間がなければそれはできない相談である。だから結晶缶設計者と、オートメーション設計者との協調こそ不可欠である。

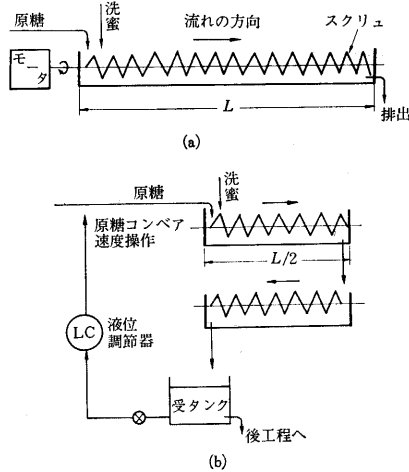


図10 ミングラで (a) のように L だけ長さにとれない場合 (b) のように $L/2$ 長の2段にすると、受タンクの液位制御は困難となる

図10 (a) は、蔗糖の原糖結晶の表面のよごれを、洗蜜をふりかけ、スクリュコンベアのようなものを回しながら洗い落とすミングラという装置である。よくきれいに落すにはミングラの長さ L はあるていど以上長くする必要がある。しかし建物その他の関係でこの長さ L がとれず、 $L/2$ ならば何とかとれるという場合に (b) のように $L/2$ ずつの長さのミングラを2段設備すればミングリング効果という点では同じであるが、無人化の立場からは (b) は落第である。それは、ミングラに続く後工程の要求に応じただけの原糖をミングラに自動供給するのにミングラの液位を検出して行なうことは、その性質上困難だから、その受タンクの液位を検出し、そのレベルを一定に制御するという方法をとることになる。(後工程でたくさん砂糖を要求すると、受タンクの液位が下がるが、その液位を下げないように原糖を供給すると、けっきょく後工程で要求する量に応じた原糖を供給することになる)。この場合、制御系は 図10(b) のような3次系 (ミングラ2段で2次、それにタンクが直列に加わって3次) となって、自動制御理論の教えるところによれば不安定になってしまう。これを防ぐには、プラント設計者と自動化設計者とは一体にならなければならない。

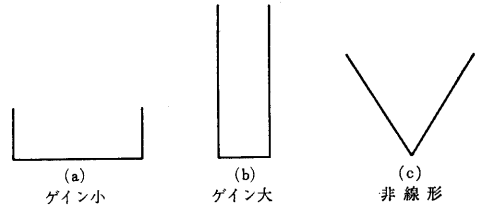


図11 (a), (b), (c) 3種類のタンクは容積は同一でも、自動制御の観点からはすべて異なる

図11 (a), (b), (c) の3種類のタンクは同一容積のものである。たんにタンク容量だけをうぬぬするのだけならどの形でもよかろうが、タンクへの流入量を入力信号とし、液位を出力信号と見た場合、流入量を一定とすれば、(a) ではなかなか液位は上がらない。(b) ではすぐ液位は上がる。(c) ははじめは液位上昇は早い、あとになるほどおそくなるという非線形特性を呈する。つまり (出力変化)/(入力変化) というゲインが (a) では低く、(b) では高く、(c) では液位の関数になる。フィードバック自動制御ではゲインの適不適はやはり重大である。タンク一つにいたるまでプラント設計技術者と自動化設計技術者が融合しなければ無人化の実は上がらない。

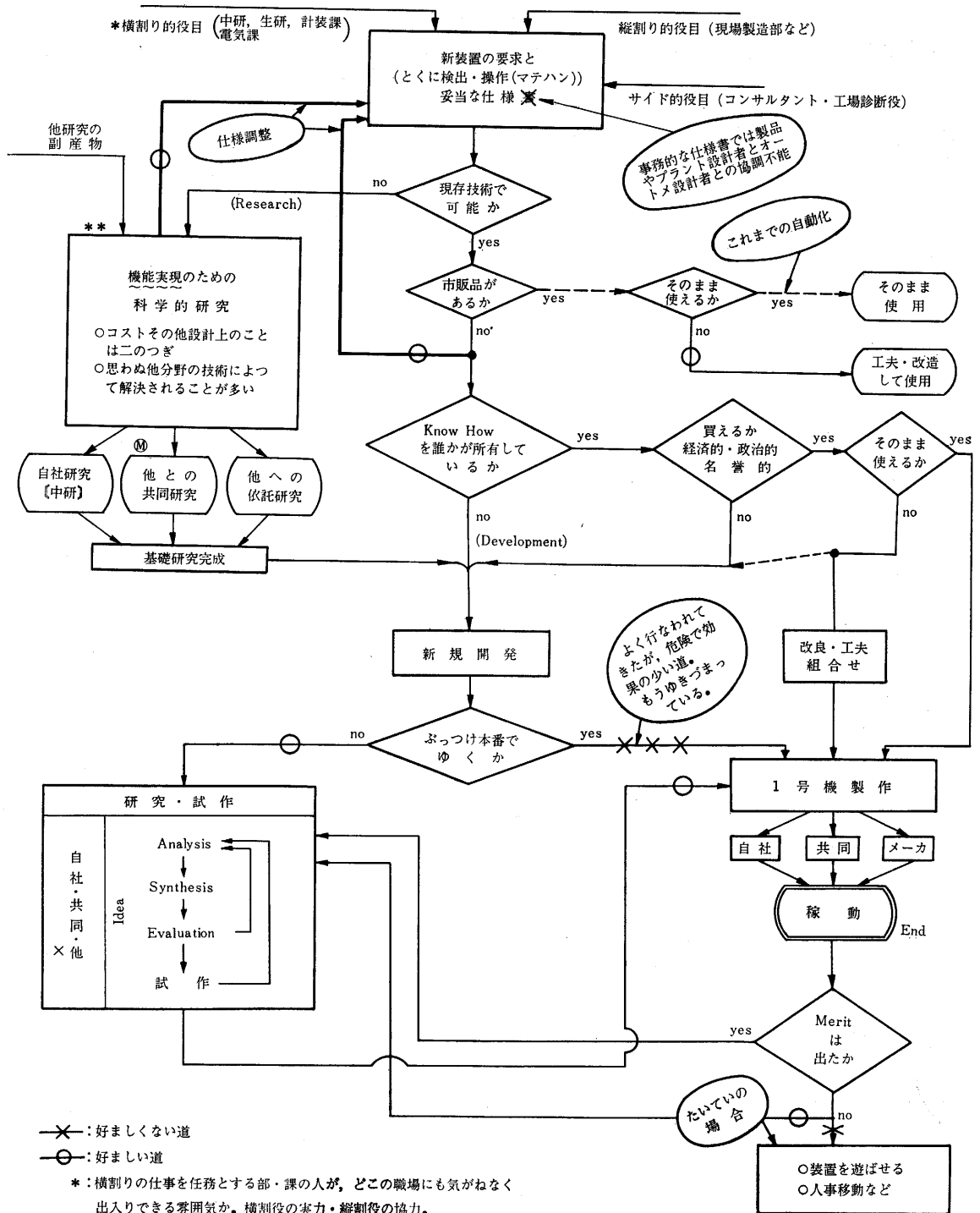
上記のプリント配線は電子回路組立工程を無人化するための抜本的なデザインであったが、同様のことは化学プロセスでも考えられる。たとえば、これまではバッチ式であったものを連続化するとか、ろ過機の形式をぜんぜん別のものにするとか、さらには同じ製品を得るのに従来は農作物を原料としていた工程を、石油系統の液を原料として合成するように全面的に変革するとか、自動ハンドリングの困難な粉体が一部に使われている工程では、その粉体を液体化することはできないか、あるいはその粉体をなすですませることは不可能かということの研究するなどがそれである。

対象を無人化に適するように設計しなおすこと。この態度が無人化のための基礎の一つとしてどんなに大切であるかは、上記の説明によって少しは理解されると思う。製品設計者とオートメーション設計者、プラント設計者とオートメーション設計者、この両者間の協調融合がうまくゆくと、たとえば製品と製造工程は一方に小さな変化が起こると他方にも敏感に影響するというハーモニのとれた状態となる。これこそ理想である。

5. 無人化用新装置の開発について

これまでのオートメーションは、オートメーション用の機器としてオートメーションメーカーで規格化され、製作されたものをユーザが購入据付けて運転をするという体制で進められて来た。しかし筆者の経験によれば、最近はこのようなやり方ではもうオートメーションは推進

表3 無人化用新装置の開発



✕:好ましくない道
○:好ましい道

*:横割りの仕事を任務とする部・課の人が、どこの職場にも気がなく
出入りできる雰囲気か。横割役の実力・縦割役の協力。
** :長い目の投資、たとえばベル研究所・デュポン研究所。

できない状況にまで来ているように感じる。本文の最初に述べたように、わが国の労働生産性を3倍ないし4倍に上昇させて労働力不足に対処し、なおかつ豊かな人間的な(モダンタイムスのチャップリンのような、味気な

い非人間的なのではなく)生活を確保するための手段としての無人化を実施してゆくには、どうしてもユーザの工程の個々に適合したオートメーション装置を新しく開発してゆかなければならないと考える。(p. 22 へつづく)

研究速報
 た式)で与えられる場合について求め、Woo の解と比較することにした。硬化特性は次のように二本の曲線で表わされる。

$$\frac{\bar{\sigma}}{Y} = 1 + 6.194\bar{\epsilon}^{0.7778} \quad (\bar{\epsilon} \leq 0.1994 \text{ に対し})$$

$$\frac{\bar{\sigma}}{Y} = 1 + 3.366\bar{\epsilon}^{0.3786} \quad (\bar{\epsilon} > 0.1994 \text{ に対し})$$

計算におけるきざみは $\Delta s = 0.1a$, $\Delta \epsilon_0$ は変形の進行に応じて, 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.005 の 4 種を選んだ。n 乗硬化則を用いる限り, 変形の初期において硬化率 H' が ∞ となるから, 計算の最初の段階ではきざみ $\Delta \epsilon_0$ を小さく選ばなければならない。

図3と図4は本研究の数値解を Woo の解と比較した結果の例である。図4については, 同一の圧力値に対する解は得られなかったため, 可能な範囲で Woo の解の圧力値に近い結果を選んで比較を行なった。とくに筆者らの方法では, Woo が instability によるものとしている点(図3の×印で与えられ, Woo の方法ではそれ以上に解を進めることが不可能であった点)を越えて, 解が得られていることは注目すべきことと考えられる。

むすび

本稿で述べた方法により, 液圧バルジ試験の数値解を精度よく求める見通しを得たので, 今後は材料の垂直異方性の r 値, (8)式の n 値および降伏応力 Y を変えた場合について計算を行ない, これらの材料特性値が液圧バルジ試験結果, ひいては材料の張出し成形性に及ぼす影響について検討を加える予定である。その他, 液圧バルジ試験における不安定問題についても考察したいと考えている。
 (1967年10月16日受理)

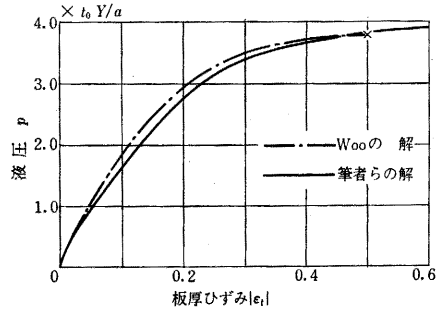


図3 頂点における板厚ひずみと液圧の関係

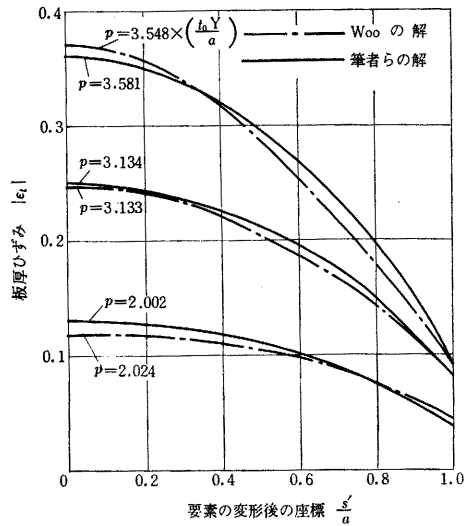


図4 板厚ひずみの分布

文献

- 1) 山田嘉昭: 生研報告 11-5 (1961)
- 2) 山田嘉昭: 機械学会誌, 67-542 (1964), 453.
- 3) D. M. Woo: *Int. J. mech. Sci.* 6 (1964), 303.

(p. 14 よりつづく)

この開発はユーザ自身で行なわれることもあろうし, メーカーもそれが可能な体制へと脱皮してゆく必要があるであろう。表3はこのような無人化に必要な新装置開発に対する, 筆者の考えにもとづいたひとつのシステムである。読者諸賢のご参考に供するとともに, ご批判をおおきたい。

6. おわりに

以上無人化のための基本的態度や, 技術的基礎のほんの一部について述べた。今日のオートメーションの考え方はこのような基本を検討することが少なく, 砂上の楼閣が築かれていることが多いように感じられる。紙面の関係で基礎的事項のほんのわずかしか説明できず, したがってまとまりの悪いものになったことは残念である。

機会を見て, 述べ足りなかった基本についても十分に論じたいと思っている。
 (1967年10月14日受理)

文献

- 1) 沢井善三郎監修, 森政弘編集, “シーケンス自動制御便覧”, オーム社, 第3編第4章. あるいは沢井善三郎, 森政弘, “自動制御を実施するための心構え”, 生産研究 Vol. 12, No. 4, 1960, pp. 161~164.
- 2) 沢井善三郎, “オートメーションの考え方, 進め方”, 電気学会雑誌, Vol. 87-7, No. 946, 1967, pp. 1266~1271.
- 3) G. H. DeGROAT 著, 谷口紀男監訳, “製造工業における自動化設計の技術”, 日刊工業, pp. 39~55.
- 4) G. H. Amber, P. S. Amber, “Anatomy of Automation”, Prentice-Hall.
- 5) 沢井善三郎, 森政弘, 山口楠雄, “精製糖工程の総合制御システム”, 計測と制御, Vol. 6, No. 2, 1967, pp. 77~90.