

価値工学概説

大阪大学工学部 笠原芳郎
手塚慶一

価値工学は1947年ごろ、アメリカのGE社やフォード自動車会社が、部品調達や資材購入費節減のために独自に考案した価値分析法や購買解析法の研究が基礎となって成長してきたもので、アメリカの空軍や船舶局などが、この思想を発展させて価値工学を生み出したといわれる。

この価値工学は一つの企業のなかで製品を開発したり製作するのにあたって考えたり、計画したり、実際につくったりする一連の操作を、その企業としてもっとも利益があがるように判断するための科学的な手段であるという。したがって、たんに製品のコストダウンをはかるという、消極的な経済観念の議論でなく、オペレーションズ・リサーチ、システム工学、インダストリアル・エンジニアリングといった技法と結びつけて企業やプロジェクトの利潤追求の総合的な価値を判断する工学である。それはまた電子計算機による設計、計画、評論の手段——たとえばPERT法によるプロジェクト設計など——も導入されて、ますます総合の有効性を発揮しなければならない工学である。電気技術者が企業のシステム・エンジニアとして重用されるケースが多い今日、システム工学の一環としての「価値工学」をここに解説し、ご参考に供したい。

1. 価値工学のねらい

【1】価値工学の定義

製品が開発され、生産に移されようとする場合、そこには少なくとも二つの意義を見いだすことができる。

その一つは新製品から得られる利潤によって企業の発展を意図するものであり、他は純粋に科学的な問題として、たんに新しい物の実現可能性を立証することである。

前者では利潤の大小が開発、生産の成功、不成功に連なり、後者では物の実現性の難易がその仕事を評価するめやすとなる。

しかし、企業での生産の価値は利潤を大きくすることを目的とすることは明白であり、問題をこの点に限定するならば、企業でのすべての活動から生まれる製品の価値は、

$$\text{利潤(profit)} = \text{収入(revenue)} - \text{原価(cost)} \quad (1)$$

によって定義される利潤ならびにこの利潤への等価変換値も含めて判定することができよう。

ここではこの観点から、生産企業に存在する既存の諸技術をさらに高度の点からとらえ、向上させるために製品ならびにそれをつくり出すための操作を常に価値という概念を用いて表わし、

- (1) どのような製品ならびに技術を開発するか
- (2) その生産工程をどのように計画するか
- (3) 使用技術を全体からみてどのように価値づけるか
- (4) 経年生産計画をどのように計画するか
- (5) 製品にどのくらいの総合利潤を期待するか
- (6) 資材調達(購買計画)をどのように行なうか

などの問題を中心に論じていくことにする。すなわち、ここでは価値工学(Value engineering, VE)とは、

「行動、思考、計画など、われわれの日常生活を構成する一連の基本的操作に対して、それを価値づける測度を与え、その価値を最大にすることによって、総合的利潤を最大にするための観念ならびに手法を与える科学的方法である」

と定義し、生産開発技術を中心に、その問題のありかならびにその有効性について考えていきたい。

なお以下で、評価対象となるものをシステムということばで表現し、それを構成する単位要素をサブシステム、またサブシステムの構成要素をコンポネントと呼んで表わすことにする。

【2】価値とはなにか

ここで問題の主体をさらに具体的につかむために、価値そのものについて考えてみよう。

われわれはどんな判断を行なうにしても、結局、程度の差異はあれ、その事がらに価値があるかどうかをいろいろと考え、その是非を判定するのがふつうである。このことは人間の通性をも考えられることであって、第三者からみて「なんとおろかなことをするか」と冷笑的になる事がらでも、本人にはその当初それ相当の理由、すなわち価値の存在が認められていたと判定しなければならないであろう。研究題目の選定にしてもそうであり、また設計操作にしても同じことをうかがうことができる。

たとえば、わが国の道路計画の問題を考えてみよう。一つの都市からほかの都市にいたる幹線道路を敷設しようとする場合、どんな経路で、どんな規模の道路を設けるかという問題にはいろいろの解答がある。

一方では迂回都市の影響を考えなければならないであろうし、他方では交通量、予算の適合性などを考慮に入れなければならない。おそらく、数人の設計者に独立に設計を行なわせれば、その結果はすべて異なってくるであろうし、またそれぞれに自己の妥当性を申し立てることができるであろう。しかし、科学的には、最良の設計はただ一つでなければならない、これをその当初でどのように判定するかがもっとも重要で、しかも困難な問題となる。

価値工学のねらいの一つはこのことを可能にするところにある。

この種の問題は

- (1) 問題を構成する価値概念の判定
- (2) 価値測度の付与
- (3) 将来に対する価値予測

の三つの操作によって可能となるのであって、おそらく現在の時点では10年後を対象にした最適設計の判定結果と20年後の結果は一致しないであろう。これには都市計画の変遷とか、使用資材の発達による保修問題も影響してくるであろう。

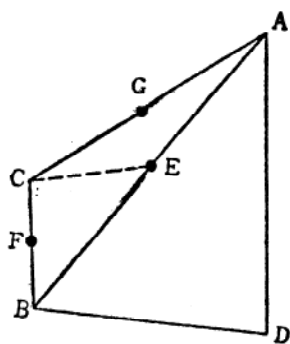


図1 価値判定のモデル

以上の考慮から従来経済学で論じられてきた価値論から離れて価値という概念のもつべき共通要素としてつぎの諸点をあげることができる。

(1) どんな対象の価値も、すべて同じ測度（たとえば円）に変換されて、総合価値を定義できるように付値されなければならない。

たとえば道路の建設費にしても人件費 (h_i)、資材費 (m_i)などを考慮し、全体の価値を、 $P = F\{T(m_i), T(h_i)\}$ あるいは $P = \sum P_i$

ただし

T : m_i, h_i の等価変換価値を表わし、

$$P_i = T(m_i) + T(h_i) \text{ とする。}$$

により判定する必要がある。

(2) 価値にはいわゆる経済価値のほかに、心理的価値をも考慮に入れるべきである。

図1に示すように、 $B \rightarrow C \rightarrow A$, $B \rightarrow D \rightarrow A$ にいたる2本の道路があり、前者は旧国道であり、後者は観光地Dを通る道であったとしよう。いまこの地域の交通緩和のためにB, A間に高速道路を敷設した場合、この道路の価値をどう判定すればよいであろうか。またC, E間に連絡路を設けることを仮定すれば、A, B間の経路をどのように決定すればよいであろうか。

このような問題では前述の敷設に関する原価と、輸送能力に関する共通価値測度の決定による価値づけが当然行なわれなくてはならない。しかし、これ以外に通行者の心理的な通路選択の影響が実際の交通量に大きく影響を与えるものである。

たとえば、FからGにいく車は途中のC地点での混雑を避けてB, Aを通り、利用価値を上げうることも考えられるであろうし、時間に余裕のある車はBからAにいくのにDを経由することもあるであろう。たんに幾何学的、経済学的、時間的な要素だけが道路の価値を決定づけるものではなく、その時代の社会環境などに支配される心理的要素の価値測度への変換をも十分考えなくてはならない。このことは生産でいえば需要者の要求度が生産の価値を左右することにも連なるものである。

(3) 価値はその物のもつ機能によって支配され、時とともに変化する。

あとで詳しく述べるように、物の価値を決定するほとんどすべての要素はその物のもつ機能に連なるものである。したがってつくるべき製品にどんな機能を付与するかは、価値工学の最初の大きな問題となる。

しかし、世のなかの進展とともに技術が進歩し、需要者の好みを変遷した場合、その時代でちょうど好まれたものの機能は、時代の経過とともにほとんど見向きもされなくなることがあるであろう。蓄音機、ラジオの時代からステレオの時代に移り、小規模な映画館から、ワイド・スクリーン、シネマの時代に移るようなものである。ここで、価値工学は将来の機能評価を予測して、当初計画を最適なものとする手法を与えなければならない。

以上のことから、ここでは価値というものを「経済的、心理的、社会的要素から変換された共通測度の合成によって、計画時で決定できる総合的な金銭的有用度（利潤）である」と定義し、今後の論議を進めていくことにする。

【3】 価値工学の問題点

ここでふたたび1.〔1〕で述べた生産企業の例をとりあげ価値工学の問題点を一般的に論じてみよう。

(1) 機能のもつ価値の決定

「なにを生産すべきであるか」という問題を考えてみても明らかなように、おおよそ製品には単一機能をもつものは数少なく、同じ種類の機能にしても、たとえば速度、精度、感度、寿命などの技術的要素でその差異が存在する。1個の機能を満足する装置をつくるために必要な最小コストというものは必ず見積もらなければならない。

このような場合

(a) その機能にどれだけの価値があるか

(b) 1個の装置にどれだけの機能を付与するのが最適であるか

という問題にまず当面する。

このことは事務操作を主務とする機関で、どの部課にどれだけの仕事（機能）を割当てるか、あるいは企業内で、特定の書類の通過経路をどのように決定するか、という問題に連なり、すべて機能の価値づけから解決される事がらである。

(2) 作業工程の計画

一つの機能を果たすための作業が与えられた場合、その作業内容の価値は人員、作業時間などの作業の構成要素、すなわち原価によって決定される。したがって、構成要素の原価を定め、全体の価値を定義して、価値を最大にするような作業工程の計画を可能にする基礎を与えるのも価値工学の一つであろう。

(3) 計画当初での価値判断と経年計画の樹立

これは前節で示した価値予測とそれに適合した計画変更の問題である。

(4) 購売計画

機能を一定にすれば、どんな時点でも物の利潤は原価から決定される。

したがって、必要な資材をどのように安価に購入するかが残された問題となる。

【4】 オペレーションズ・リサーチ、システム工学などとの関係

上述の所論から明らかなように、ここで対象とする価値工学は生産、事務を問わず企業のあらゆる部分に、価値評価、計画決定を行なう問題として存在する。

したがって、従来論じられてきたオペレーションズ・リサーチ (OR) やシステム工学 (SE) などの問題描写と確かに一致するように思われる。

しかし、価値工学は前にも定義したようにすべて決定

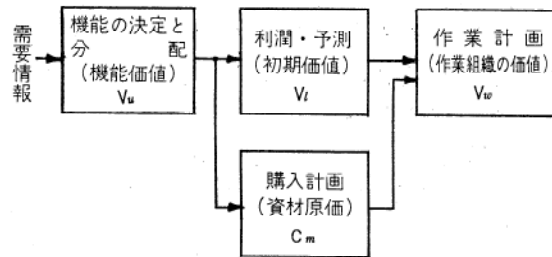


図2 生産企業での設計、改善操作の順序

のきめ手を価値におき、後述の POED 手法でも述べるように、対象を価値関数によって特性づけ、これを最大にするよう設計、改善を行なう点に特徴がある。前節で述べたように、たとえば生産企業での操作は図2の順序で行なわれると考えられる。

価値工学は企業の全段階にわたって存在すると考えられる同一測度をもつ単位価値 $V_{\alpha}(\alpha=u, i, w)$ を求め、これらの関数として全体の価値関数 V を、

$$V = F(V_u, V_i, V_w, C_m) \quad (2)$$

あるいは

$$V = G(V_u, V_i, V_w) - C_m \quad (3)$$

として定義して計画、決定を行なうところに特徴がある。

したがって、価値工学は対象全体とそれに影響を与える周辺の諸要素を解明し、問題の構成を明確につかむ必要のある点、システム工学の手法を用いなくてはならず、価値評価という価値工学固有の技法を用いてシステム全体を特性づける点、システム工学の一部門であるとみなすこともできる。システム全体を価値だけを対象に表現した場合、これを価値システムと呼ぶ。

価値工学は問題の大小を問わず、たんに総合的な価値があるかどうかという判定によって、行動を決定する利潤に直結した科学である。

この問題の対象を生産問題に限定すればインダストリアル・エンジニアリング (IE) の問題となるであろうし、事務組織に適用すれば、事務管理の問題となる。

しかし、価値工学を実際に行なう場合

(1) 客観的な必要性、作業計画の内容などの抽象概念などのように価値測度に変換するか。

(2) 目的関数としての価値関数をどのようにして最大にし、それをどんな形で計画決定に取り入れるかなどの問題が存在し、実際にはこれらの問題がもっとも至難なものである。

前者の問題は人文科学、自然科学の統一、連絡をねらいとするサイバネティクス (Cybernetics) の思想に通じるものであり、後者の問題は計画、決定の最適化手法としてオペレーションズ・リサーチの助けを借りなければ

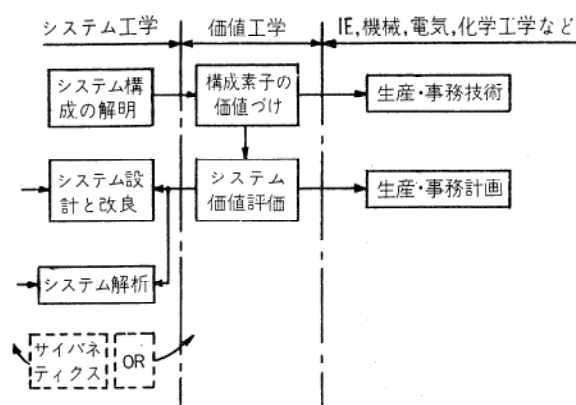


図3 価値工学の位置

ならないであろう。

このようなことから、価値工学の位置づけをすると図3のようになる。

【5】価値工学の歴史と必要性

これまでの話しは「企業は結果的には利潤の追求であり、そこには価値の設定と評価が基本として存在し、この成果を行動に直結させるべきである」との見解で価値工学を定義し、論じてきた。

しかし、価値工学という概念の起源はさらに狭義のものであって、1947、1948年ころアメリカのGE（ゼネラル・エレクトリック）社、フォード自動車会社などで部品調達、資材購入費節減のための手法として考え出された一つの思考操作であったわけである。

すなわち、フォード社では企業不振の挽回策として、購置部門の再編成を主体に経費節減を目的とする独自の手法を考案し、これに購買解析法（purchasing analysis）と命名した。これは社内担当者と業者の購入資材に関する見積り価格の差異調査、ならびに価格の動向と市場分析などから、購入価格の予測と購入先の決定を主眼とする組織的な活動であって、その当初1年間に64億8000万円の経費削減に成功したといわれている。

一方、GE社でも購入部品の品不足を打破するための手段として同一機能をもつほかの部品の選定問題に当面し、その思考結果を社内機関の各部署に適用することにより、多額の経費削減に成功した。このような思考的観念は価値分析法（Value analysis）と命名され、社内教育を拡充することにより、資材経費の節減から、さらに部品設計の改良へと進み価値分析法の確固たる基礎を与えたわけである。

ちなみに価値工学（Value engineering）ということばは同じ考え方をプロジェクト関係に適用しアメリカ空軍ならびにアメリカ船舶局などによって用いられたもの

であり、1959年にはアメリカ電子工業協会（EIA）で価値工学の会議が開かれるまでになった。

海外でのコスト・ダウンに関する情報は数年前からわが国にも導入され、各社でしだいに効果を発揮しつつある。しかし、これまでの価値工学はそのほとんどが製品のコスト・ダウンを対象とするいわば消極的な活動であり、製品のもつ機能の改良、販売市場での demand research など、売り上げ額の向上に対する価値工学に皆無に近かった。最近ようやく、GE社などでその方面への研究、調査が行なわれている段階であり、むしろシステム工学の技法確立の必要性から、価値評価の問題が取りあげられ、脚光を浴びるようになった状態である。

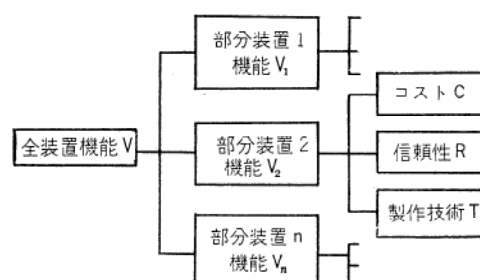


図4 機能の割り当て

ある機能をもつ製品の生産を計画する場合、そこには図3に示した機能決定にいたるまでの価値評価の問題のほかに図4に示すようなサブシステム、コンポーネントなどの機能割り当て、設計の問題が存在する。これらの問題を解決するPOED、PERT手法（後述）などの改良、発展も価値工学の思想と手法を用いなければ不可能であろう。

2. 価値基準

【1】価値システム

システムをたんに価値という概念だけに着目して表現する場合、とくにこれを価値システムと呼ぶ。

ここでは対象とするシステムの価値を評価する場合、どのような基準によってその価値の有無を判定すればよいかについて考えてみることにする。

価値システム論はシステムのもつ目的の妥当性を論じ、また、その目的を実行に移すための方式の最適性を評価する場合に有効な役割を發揮する。

しかし、どんな方式であっても周囲条件を無視して評価を行なうことはできない。一般に与えられた条件または目的を満足する方式 S_j の価値 V は、その方式の適用される環境状態 N_i の関数により定められ、

$$V=f(N_i, S_j) \quad (4)$$

によって与えられる。したがって起こりうる N_i を想定

し、 V を最大にするような S_j を求めるのが設計の第1歩と考えられ、価値判定の基準の基礎を与えるものとみることができる。

このような考え方は決定理論によって用いられているところであり、価値評価に対する決定理論の有効性を見いだすことができる。

一方、与えられた対象の価値解析はそこに用いられている方式 S_j の一定環境条件 N_i のもとで V を求める問題となる。

しかし、設計、解析のいずれでも N_i, S_j のを定量化行ない、さらに関数 f の形を求めなくてはならず、このような操作はシステムの複雑度が大きくなればなるほど困難となる。このような場合には試行錯誤法などの実験的な手法が用いられるのが一般である。

これによって一応その結論を見いだすことができてもそれに科学的な最適性の保証を与えることはできない。したがってシステムの要素になんらかの測度を与え、価値を定量づけられる数学的価値基準法を適用することを常に心がけておく必要がある。

つぎにこのための考え方の基礎を述べる。

【2】価値の定量化

価値工学はその対象システムを構成する諸要素を抽出することからはじまる。価値を求めるためには、これらの諸要素を定量づける測度を与えなくてはならない。それには各要素に存在する下記の諸性質を用いることが考えられる。

(1) 対等性

- $$\left. \begin{array}{l} \text{(a)} \quad A = B, \text{ あるいは } A \neq B \\ \text{(b)} \quad A = B \text{ ならば } B = A \\ \text{(c)} \quad A = B, B = C \text{ ならば } A = C \end{array} \right\} \quad (5)$$

(2) 順序性

- $$\left. \begin{array}{l} \text{(d)} \quad A > B \\ \text{(e)} \quad A > B, B > C \text{ ならば } A > C \end{array} \right\} \quad (6)$$

(3) 加法性

- $$\left. \begin{array}{l} \text{(f)} \quad A = P, B > 0 \text{ ならば } A + B > P \\ \text{(g)} \quad A + B = B + A \\ \text{(h)} \quad A = P, B = Q \text{ ならば } A + B = P + Q \\ \text{(i)} \quad (A + B) + C = A + (B + C) \end{array} \right\} \quad (7)$$

すなわち、各要素に対等性を適用するなんらかの特性が存在すれば、その特性によって評価対象群を分類し、各分類に一定の記号を付与してこれを測度として用いることが可能である。これを名称測度と呼ぶ。名称測度は各分類を統計的に操作する場合に用いることができる。

各要素に存在する共通の性質にしたがってシステムを比較し、優劣を論ずることができる場合、(2)の順序性を

適用した測度を設定することができる。このような測度を順序測度と呼ぶ。順序測度はシステムの概念的な総合価値を求める場合有効である。

システム要素が加法性を満足する場合、われわれが日常用いているような定量的測度を付与することができる。これを比測度と呼ぶ。比測度が対等性、比較性を満足していなければならないことは明らかである。上記の諸測度はシステムを同一単位の測度（たとえば円）だけについて評価する場合に効力を発揮するが、多数要素からなるシステムを総合的に評価する場合には、諸要素のもつ測度をすべて考慮した新しい表示方式を用いる必要がある。ふつうこのためには各要素のもつ測度をそれぞれに対応する座標軸上に表わしてベクトル表示をする方法が考えられている。

【3】経済価値

システムの目的ならびにそれに用いられている方式の価値を評価する場合、機能、コストなどのほかにシステムのもつ経済評価を考える必要がある。たとえば、一つのプロジェクトを開発したり、生産会社で新製品の生産に着手する場合、その経済価値は図5のようになることが予測される。ここで $S(t)$ はその製品から得られる利潤の年変化を示し、 $C(t)$ は開発に必要な経費を示している。いまそれぞれの曲線によって囲まれた面積を R, C

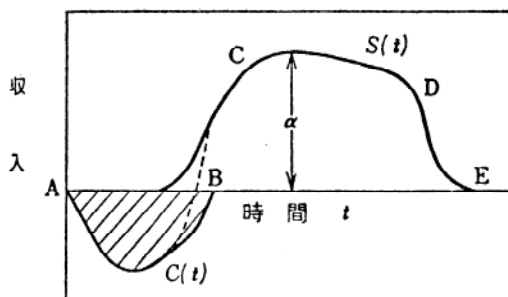


図5 新製品の経済価値予測の曲線

とすると、価値 V は前述のように、

$$V = R - C \quad (8)$$

によって示され、 V を大きくするためには R を大きくし C を小さくする必要がある。 R を大きくするためには

- (i) BC 部のたち上がりを急峻にし、
- (ii) α を大きく
- (iii) CD 部を長く

すればよい。(i) は宣伝効果の問題であり、(ii) は生産品種と市場需要との整合性によって決定され、(iii) はその製品のもつ機能によって定まると考えられる。したがって (i) の宣伝効果の問題を考慮の外においた場合、価

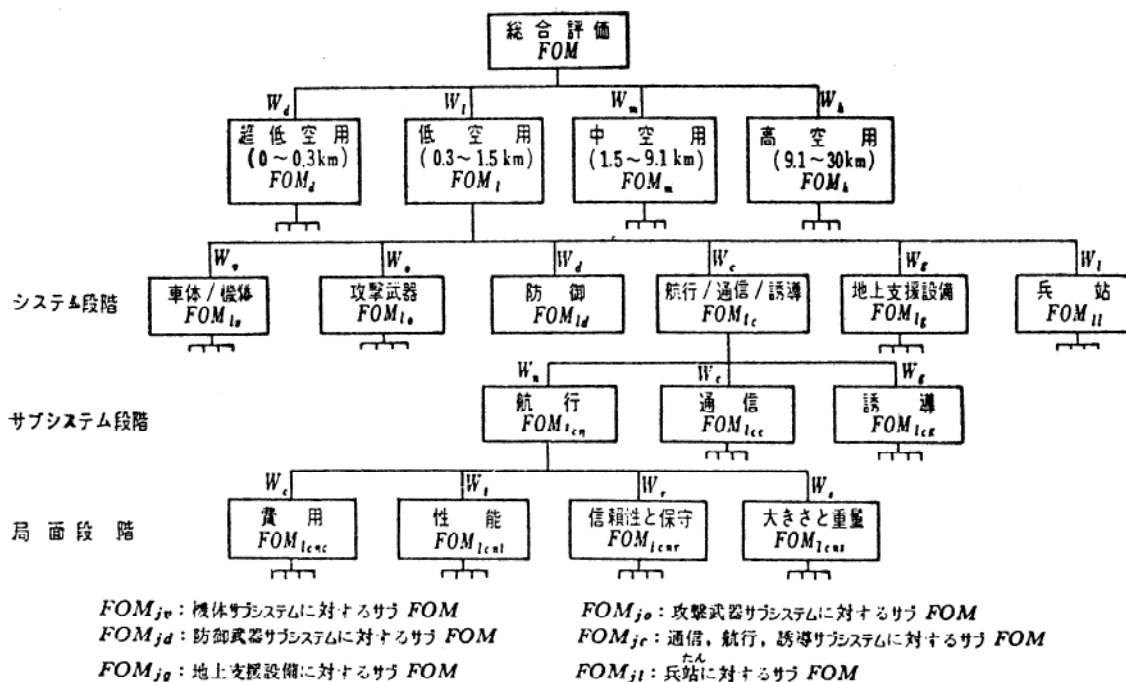


図6 評価点を示す FOM 組織図の一例

値最大化の問題は、「どんな品種の製品を生産するか」ということ、「その製品にどんな機能を与えるか」という問題に分けて扱うことが可能である。もちろん、事前にその評価対象の総合期待価値を求めたい場合には、任意時点の費用を、現時点での等価費用に換算する必要がある。

原価 C を最小にする問題は現在、価値分析 (VA) の問題として取り扱われており、これは後節に示す。

3. 価値工学の手法

【1】POED を用いる方法

POED (performance organization for evaluation and decision) の方法は簡単にいえば、システムの価値の評価度を FOM (figure of merit) で表わそうとするものである。したがって、システム全体の FOM はシステムを構成するサブシステムの FOM の積により定義しようとするものであり、つぎの三つの部分からなる。

- (i) システム組織図の作成
- (ii) サブシステムの FOM の決定
- (iii) 上段システムに影響する各システムの重要度の決定

まずシステム組織図の作成であるが一例として軍事基地システムを考えると、図6のような図が得られる。これは対象としているシステムをできるだけ分解し、そのシステムがどのようなサブシステムから構成されているかを一目でわかるようにした組織図である。

つぎにサブシステムの FOM 決定はそれぞれの要求されている機能に応じて、0～1の間の数字を与えることにより行なう。FOM の値の意味は表1のようである。

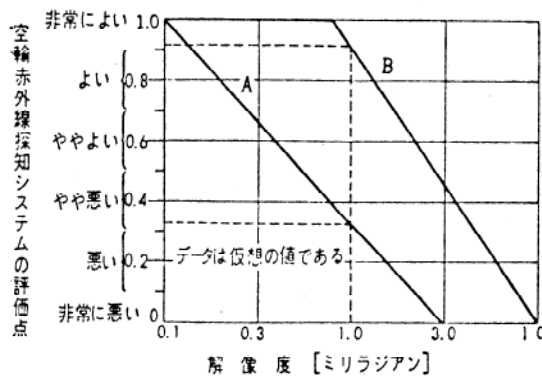
表 1

FOM	内 容
1.0	非常によい
0.8	よい
0.6	ややよい
0.4	やや悪い
0.2	悪い
0.0	非常に悪い

ただし、これはあくまで要求に応じてであって、たとえば図7のような赤外線探知システムの分解能に対する二つの違った要求に対する例を考えてみる。

Aは航空測量による地図作成のためのものでありBは航路誘導用のためのものである。このときはAに対する要求がBに対する要求よりもはるかにきびしい。

したがって、たとえば角分解能1ミリラジアンの場合、Aでは FOM は0.33で「やや悪い」となるのに対して、Bでは0.92を示し「非常によい」となる。このように FOM はなにに使用されるかによって違ってくる。さて、各段の FOM の関数として下段の FOM を FOM_{jk} ($k=v, o, d, \dots$) とすると、



(注) A: 空輸進路作成用赤外線放射計
B: 空輸誘導用赤外線放射計

図7 赤外線探知システムの要求解像度に対する評価点

$$FOM_j = f(FOM_{jv}, FOM_{jo}, FOM_{jd}, \dots) \quad (9)$$

と表わせるが、この関数 f の満たさなければならない条件は、まず連続で単調増加であること、 FOM_{jk} のうちの一つでも 0 のものであると、 FOM_j も 0 となること、さらに FOM_{jk} がすべて a であるときには、 FOM_j も a であること、 FOM_{jk} のうち最大のものを M 最小のものを m とすると、 FOM_j は m と M との間の値であることなどである。このような条件を満たす関数として、つぎのような積の形を与える。

$$FOM_j = \left[\prod_{k=1}^n FOM_{jk} \right]^{1/n} \quad (10)$$

(10)式はすべてのサブシステムが同じ割合でシステムに影響するとした場合であるが、一般に各サブシステムのシステム全体に対する重要度は異なるのがふつうである。このため、各サブシステムないしはその構成要素に重み、 W_k , $0 \leq W_k \leq 1$ を与えて上式のかわりに、

$$FOM_j = \left[\prod_{k=1}^n FOM_{jk}^{W_k} \right]^{1/\sum_{k=1}^n W_k} \quad (11)$$

を用いる。重みのつけかたは表2のようである。

表2 重みのつけ方

W_k	重 要 度
1.0	extremely important
0.9	highly important
0.8	very important
0.7	important
0.6	fairly important
0.5	probably important
0.4	some importance
0.3	a little importance
0.2	very little importance
0.1	unimportant
0.0	no importance whatever

以上をまとめると、システムが与えられると、それを各機能によって図6のように枝状に表わし、これらに重要度を表わす重みをつけ、(11)式をもちいて、そのシステムの価値の評価を行なうわけである。

また(11)式を微分すれば、どの FOM をよくすればシステム全体をもっともよく改善することができるかを知ることができる。(11)式を直接微分するかわりに、後でも述べるようにこの式の対数をとったものを考えるほうが便利であると著者は考えている。

さらに、サブシステムの FOM の値に対する信頼度からシステムの信頼度を計算することが可能である。

【2】MAUS を用いる方法

MAUS とは (method for allocating utility of systems) の略である。

システムの設計をするときには、たんに与えられた機能を満足するシステムを試行錯誤的につくり出していくのではなく、一意的に最適結果を得るシステム設計法が要求される。POED による方法はたんにシステムの評価であって、システム設計法ではない。一般に各サブシステムはたがいに関係しあうし、また構成要素間には密接な関係があるので、これらを考慮に入れて、最適結果をうる設計法を考えなければならない。このような設計法を MAUS と名づけ、著者らはその開発を試みた。この方法はいわゆるダイナミック・プログラミング (dynamic programming, DP) での最適性の原理、「初期の状態と最初の決定がなんであって、残った決定は最初の決定から生じた状態に関して最適政策を構成しなければならない」を POED 組織図に適用するものである。一例としてデータ処理システムを考えると図8のような枝状のシステム組織図を得ることができる。

ここで C, R, P は, cost, reliability, performance を

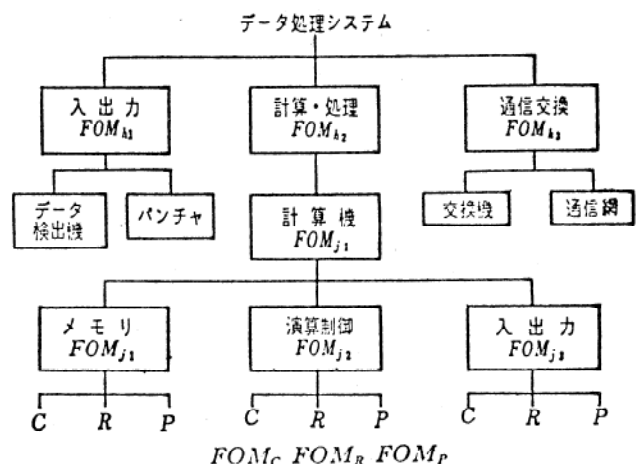


図8 データ処理システム組織図

表わすものとする。

そこで全システムの FOM を最大にすることを考えると、システム組織図の最下段以外のサブシステムごとに FOM を最大にするように C, R, P を決めれば、システム全体の FOM を最大にすることができる。図3の FOM_j を例にとると、

$$FOM_j = [FOM_C^{W_C} \times FOM_R^{W_R} \times FOM_P^{W_P}]^{\frac{1}{W_C + W_R + W_P}} \quad (12)$$

ただし、 $0 \leq FOM \leq 1$

W_C, W_R, W_P : C, R, P にかかる既知の重み

ここで

$$FOM_C = f_C(x_C) = 1 - \frac{x_C}{a} \quad (13)$$

$$0 \leq x_C \leq a \quad (13')$$

x_C : cost (円)

a : 最大許容金額

$$FOM_R = f_R(x_R) = \frac{1}{c-b} x_R + \frac{b}{b-c} \quad (14)$$

$$b \leq x_R \leq c \quad (14')$$

ここに

x_R : 信頼度

b : 許容限界信頼度

c : 可能最高信頼度

$$FOM_P = f_P(x_P) = \frac{1}{e-d} x_P + \frac{d}{d-e} \quad (15)$$

$$d \leq x_P \leq e \quad (15')$$

x_P : performance (アクセスタイム・メモリ容量など対象システムによって異なる)

d : 許容限界 performance

e : 可能最高 performance

また、 x_C, x_R, x_P のあいだには

$$x_C = f(FOM_R, FOM_P) = A \cdot FOM_R + B \cdot FOM_P \quad (16)$$

(A および B は単位 FOM_R, FOM_P につき換算した金額) のような関係があるとする。

したがって、問題は(16)式および(13'), (14'), (15)'式の制約条件のもとで FOM_j を最大にする x_C, x_R, x_P を決定することになる。さて以上の問題を解くために、まず x_C にある特定の値、 $x_{C1}(0 \leq x_{C1} \leq a)$ を与える。このとき制約条件(16)式は

$$x_{C1} = A \left(\frac{1}{c-b} x_R + \frac{b}{b-c} \right) + B \left(\frac{1}{e-d} x_P + \frac{d}{d-e} \right) \quad (17)$$

となる。つぎに(17)式の x_R または x_P を変化させて目的関数(12)式の最大値 FOM_{jmax} を求める。

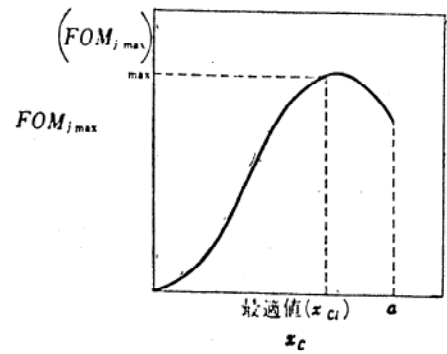


図9 x_C と FOM_{jmax} との関係

データ処理システム

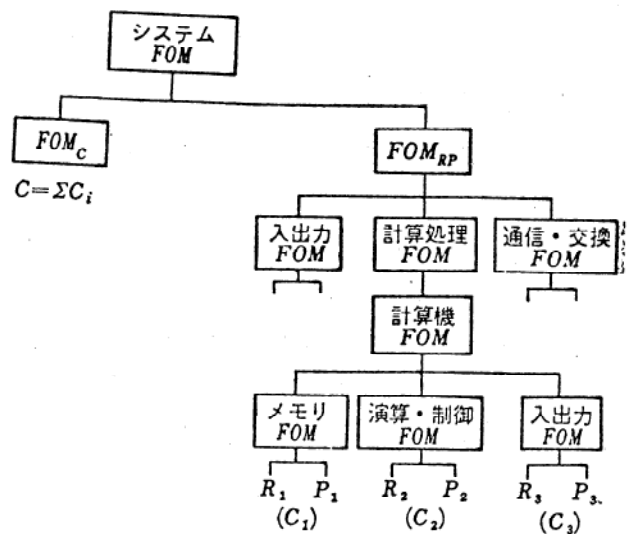


図10 コスト FOM が最上段に与えられるときのシステム組織図

この手順をいろいろの x_C つまり $x_{C1}, x_{C2}, x_{C3} \dots x_{Cn}$ についてくり返せば、 x_C と FOM_{jmax} のグラフが決定され $(FOM_{jmax})_{max}$ が求まる (図9参照)。このときの x_{C1}, x_{R1}, x_{P1} が求める解である。

以上は一つの試みであるが、たとえばコストに関する FOM は最下段の FOM に対して与えられるのではなく、システム全体のコストとして、むしろ最上段の FOM に直接関与する形で与えられることがふつうであるため、この点を考慮しなければならない。これを解決する方法としては、(11)式の数値をとれば各最下段 FOM の対数の和となることを利用してダイナミック・プログラミングで解く方法が考えられる。

たとえば図10のように reliability, performance に関する FOM は、図8の場合と同様に定められるが cost の FOM だけは、各構成要素のコストの和、すなわち、全費用に対するものとして与えられるとする。

この段階に達すれば問題は

$$FOM = (FOM_C^{W_C} \times FOM_{RP}^{W_{RP}})^{\frac{1}{W_C + W_{RP}}} \quad (18)$$

を

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= f_1(R_1, P_1) \\ C_2 &= f_2(R_2, P_2) \\ &\vdots \\ C_n &= f_n(R_n, P_n) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

という制限条件のもとで最大にすることとなる。しかるに(18)式は両辺の対数をとると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \log FOM &= \frac{W_G}{W_G + W_{RP}} \log FOM_G \\ &+ (R_1 \log FOM_{R1} + R_1' \log FOM_{P1}) \\ &+ \dots + (R_n \log FOM_{Rn} + R_n' \log FOM_{Pn}) + \dots \\ &= h_G(FOM_G) + \sum_{i=1}^n h_i(FOM_{Ri}, FOM_{Pi}) \quad (21) \end{aligned}$$

ただし、 U, R_i, R_i' は重みによってきまる定数

$$h_i = R_i \log FOM_{Ri} + R_i' \log FOM_{Pi} \quad (22)$$

ここで

$$\begin{aligned} g_i(C_i) &= \max h_i(R_i, P_i) \\ f(R_i, P_i) &= C_i \end{aligned} \quad (23)$$

とすると $\log FOM$ の最大となるときは、 $C = \sum C_i$ の各値に対して $\sum g_i(C_i)$ の最大値と $h_G(FOM_G)$ との和を最大とするときが解となる。したがって、

$$G = \sum_i g_i(C_i) \quad (24)$$

$$\text{を } C = \sum C_i \quad (25)$$

の条件のもとに最大にする問題が解ければよいことになるが、

$$\begin{aligned} G_n(C) &= \max \{g_n(C_n) + C_n - 1(C - C_n)\} \\ 0 &< C_n < C \end{aligned} \quad (26)$$

とおくと、最適性の原理を用いるダイナミック・プログラミングによって

$$\max G = G_n(C)$$

が求められる。また、 FOM の最大値とそのときの各構成要素の FOM もすべて求められる。

FOM がコストのように、システム全体またはサブシステムに対して与えられるようなものが、重量、容積、信頼性のように数多くある場合には、多次元のダイナミック・プログラミングの問題となり、次元が大きくなるにつれて、飛躍的に困難さが増大することが想像される。

【3】PERT および CPM を用いる方法

プロジェクト計画(project scheduling)などでみられるように、一定の順序にしたがって操作され、設計されるシステムの価値評価について考えてみる。

1 個の作業が完成されたり、与えられた機能が完全に具備されるようにするためには、数段階の作業ないしは機能付与のための操作が必要である。いまこれらの作業ないしは操作を総称して activity と呼ぶ。activity a_{ij} には順序を想定するのが一般であり、1 個の activity の終了時点はつぎの activity の出発時点となる。このような時点を event (e_i) という。activity を「有向線分 (arrow)」で、event を「点」で表示すれば、システムの設計ないしはその動作内容を有向性グラフで表示することができる。これをアロー・ダイアグラム (arrow-diagram) という。このグラフの各枝路 (activity) a_{ij} には、それぞれ重みが与えられている。その一つは、activity を行なうための所要時間 t_{ij} であり、もう一つは所要経費 C_{ij} である。システムをアロー・ダイアグラムで表わし、所要時間からまた経済面からそのシステムの最適化をはかろうとするのが PERT (program evaluation and review technique) である。

(1) PERT-time 法

これは操作を完全に行なうために必要な時間だけに目をつけ、そのシステムで改良すべきネックポイント (neck point) を見いだしたり、そのシステムを評価したりするための方法である。

いま、たとえば 9 個の activity から構成されるシステムを考え、そのアロー・ダイアグラムが図11のように表わされるとする。

各 activity に付された数値はそれを行なうのに必要な時間を表わす。2 個以上の activity が終了して、つぎの activity が開始されるときには、より遅く終わる activity の終了時間 t_i がつぎの activity の開始時刻となる。アロー・ダイアグラムの最初の event を基準にとり、各 activity の重み t_{ij} から event t_i の発生時点を書き込んでいけば図12が得られる。

一方、この図ではすべての activity が一定時間 (たとえば15単位時間) で終了することを仮定したとき各 event に必要とされる発生時間を t'_i で示している。すなわち、各 event は早くとも t_i でしか発生できず、おそくとも t'_i で存在しておらなくてはならない。この模様を

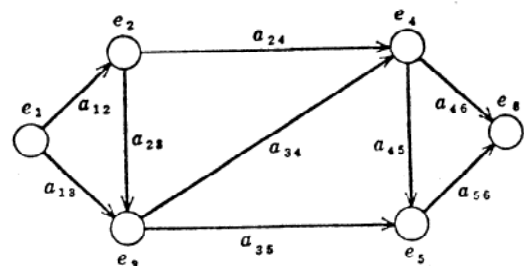


図11 PERT-time 法のアロー・ダイアグラム

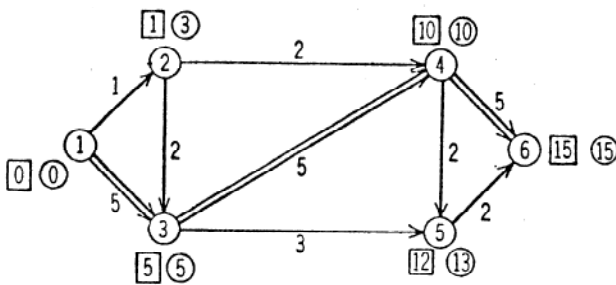
図12 t_i を書きこんだアロー・ダイアグラム

表 3

activity	t_{ij}	earliest		latest		余裕時間
		start	finish	start	finish	
a_{12}	1	0	1	2	$3=t_2'$	2
a_{13}	5	0	5	0	5	0
a_{23}	2	1	3	3	5	2
a_{24}	2	1	3	8	10	7
a_{34}	5	5	10	5	10	0
a_{35}	3	5	8	10	13	5
a_{45}	2	10	12	11	13	1
a_{46}	5	10	$15=t_6$	10	15	0
a_{56}	2	$12=t_5$	14	13	15	1
a_{ij}	t_{ij}	t_i	t_i+t_{ij}	$t_j'-t_{ij}$	t_j'	$t_j'-t_i-t_{ij}$

表にして示せば、表3のようになる。

余裕時間が0である activity は、開始、終了時間が必ず一定時間に保たれ、調整不可能なことを表わしており、余裕時間の大きいことはその時間範囲内で activity の所時間を調整して、システム諸要素を自由に調整できることを意味している。余裕時間が0である activity (critical activity) を連結して得られる path を critical path という。

結局この critical path がそのシステムのネックとなるわけであり、システムを考える場合、その部分に十分注意を払って処理していかななくてはならない。

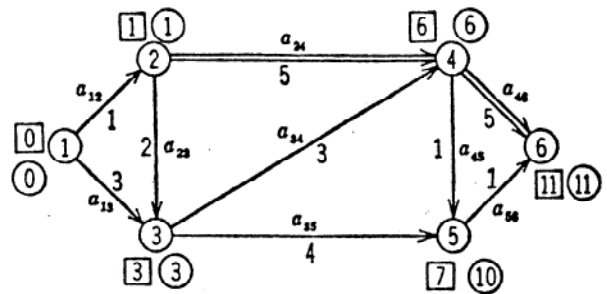
また、余裕時間の大きな activity の所要人員などを削減して critical activity に回し、全体の人員を変化させずに時間を短縮させるようなシステム最適化への接近を行なうことができる。たとえば a_{24} , a_{35} の従業員人数を削減し、それを critical activity に回し t_{ij} を表4のように変更したとしよう。

この場合、event の発生時点は図13のようになる。

この改正により 所要時間は4単位時限 短縮され、 a_{46} より以前に発生する activity にネックが現われ、唯一の

表 4

a_{ij}	t_{ij}	a_{ij}	t_{ij}
a_{12}	1	f a_{35}	④
c a_{13}	③	c a_{45}	①
a_{23}	2	a_{46}	5
f a_{24}	⑤	c a_{56}	①
c a_{34}	③		

図13 変更された t_{ij} を書き込んだアロー・ダイアグラム

余裕をもつ activity a_{56} の調整によりさらに改良できる可能性を見いだすことができる。

(2) PERT-cost 法

activity の実行には急ぎ (crash) の場合とふつう (normal) の場合があるとし、それぞれ、時間あたりの単価が異なっているとす。当然所要時間を短縮すれば経費が増加する。

ここで問題となるのは経費の増加に対してどのように効率的に時間の短縮を行なうかということである。この方法は価値工学でのコスト減少化の方法として有用である。

いま、normal な場合と crash な場合に対して、表5

表 5

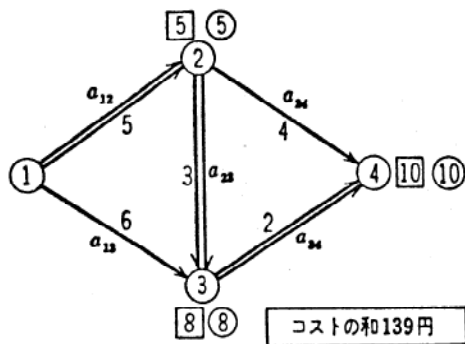
activity	normal		crash A		crash B		intermed	
	日数	円(1日)	日数	円(1日)	日数	円(1日)	日数	円(1日)
a_{12}	5	6	4	9	4	9	5	6
a_{13}	6	10	4	20	6	10	6	10
a_{23}	3	3	2	6	2	6	2	6
a_{24}	4	5	3	8	4	5	4	5
a_{34}	2	10	2	10	2	10	2	10
合計	10	日数×円 139	8	日数×円 172	8	日数×円 148	9	日数×円 142

のような時間とコストが規定されているプロジェクト問題を考える。

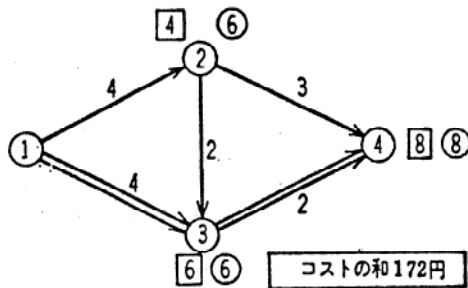
いまこれを normal, crash A, crash B および intermed のそれぞれのコストでもって作業を計画した場合のアロー・ダイアグラムを図14に示す。

図14からコストを考慮した場合の価値評価について、つぎのような考察を行なうことができる。

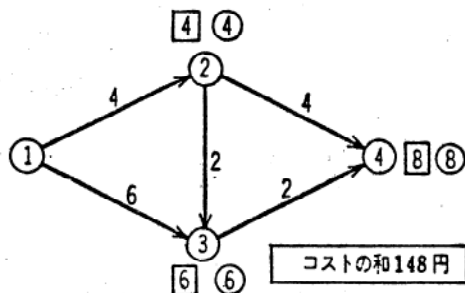
(a) normal な計画を無作為的に crash に変更することは能率的でない。



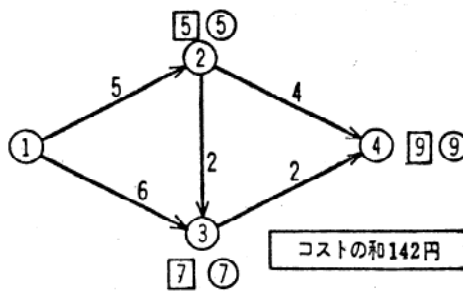
(a) normal cost



(b) crash A



(c) crash B



(d) intermed

図14 PFRT-cost 法のアロー・ダイアグラム

(b) normal のアロー・ダイアグラムで, critical path だけに対して, これらの activity を crash におきかえるのが経費削減の面からもっとも能率的である。

(c) コストと時間の両面から考えれば, 最適計画は normal と crash の間に存在するのがふつうである。

【4】価値分析 (Value analysis, VA)

(1) 価値分析の理念

できるだけ多くの価値を与えるようにシステムを計画することは, システム・デザイナーの常に心がけているところであって, とくに目新しいことではない。しかし前にもしばしば述べたように, 可能なすべてのシステムないしは方法 (alternatives) のなかから最適なものを選択・決定することはきわめて困難である。このような点からシステムの価値評価に対する考え方を体系づけ, そのための科学的な方法をつくり出そうとした最初の試みに価値分析がある。

これは「機能を一定にした場合, コストの最小なシステムがもっとも価値のあるシステムである」という思想を基本とするものである。この方法は後述のように, いくつかの尺度でもって, 可能なシステムを比較し, その良否を判定するという方法を一般としているために, 解を数学的に演えきして求めるという科学的な要求からはほど遠いものがある。

(2) 価値分析の手法

価値分析は前述のように「一定の機能を常に保持し, コストを最小にするための組織的研究」である。価値分析技術者はこの最高目標のもとに図15に示すような4段階の思考操作を用いて, 常に活動している。

図15の思考操作は価値分析法として, さらにつぎの図16のように制度化され, 実用に供されている。

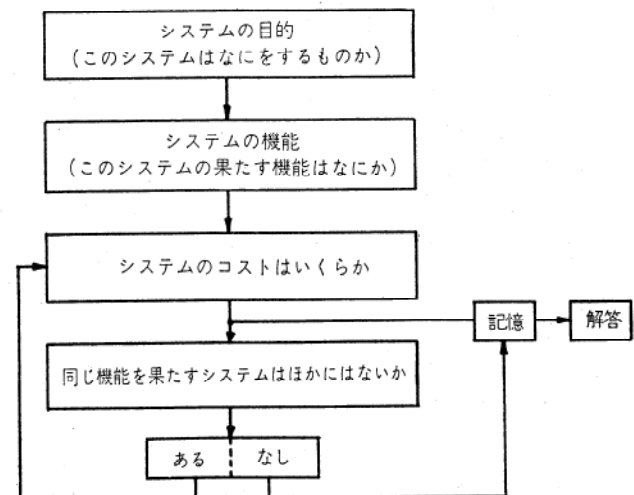


図15 価値分析の思考操作

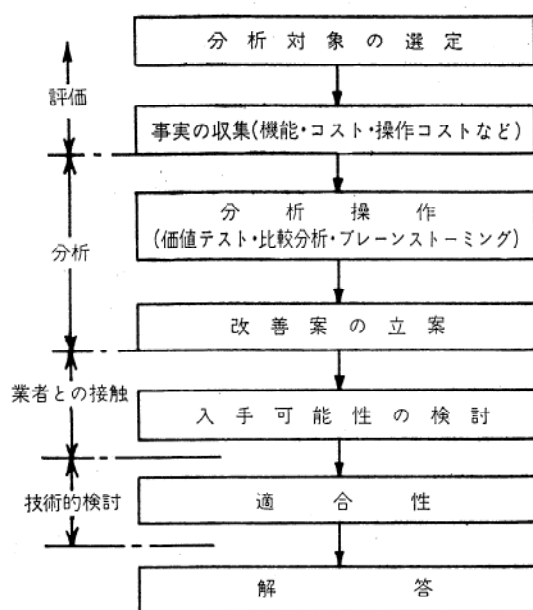


図16 価値評価の手順

図16のような価値評価の手順は実際には、各企業体で独自のチェック・リストとして作成されて用いられており、その批判も独自の方法が考案されている。

(3) チェック・リスト法

図16に示した手順を用いるさい、その分析段階で、いろいろの角度からそのものの有用性を吟味する質問表(チェック・リスト)をつくり、それを多数の人間に配布して、その答えを集計する方法が用いられている。いまこの一例をGE社に例をとり、示すとつぎのようになる。

1. この品物はなんらかの価値があるか
2. この品物のコストは用途に対してそれだけの価値があるか
3. 形にむだはないか
4. さらによいものはないか
5. 安くつくる方法はないか
6. 規格品は使えないか
7. 生産量に適合した製造工程がとられているか
8. コストの要素(材料費・労務費・間接費など)は適正であるか
9. 材料を安く買える信頼できる業者はないか
10. 自社から安く買っている例はないか

この質問表の質問に対する解答は解答者ごとに表6のような分析表に書きなおされ、さらに、表7に示す採点法により採点され、つぎの方式により集計される。

すなわち、評価のあった人数を n 人とし、 P_{ij} 、 Q_{ij} をそれぞれ第 i 番目の人がテスト j につけた点数とした

表 6

記号	テスト番号	a	b	c	d	e
Q_1	1	○				
Q_2	2		○			
Q_3	3	○				
Q_4	4			○		
P_1	5					
⋮						
P_5	9					
P_6	10				○	

(注)

a : ある

b : かなりある

c : 少しある

d : ほとんどない

e : ない

表 7

	a	b	c	d	e
Q_1	5	4	3	2	1
Q_2	5	4	3	2	1
Q_3	1	2	3	4	5
Q_4	1	2	3	4	5
P_1	5	4	3	2	1
P_2	5	4	3	2	1
P_3	5	4	3	2	1
P_4	5	4	3	2	1
P_5	5	4	3	2	1
P_6	5	4	3	2	1

場合

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (28)$$

とし

$$\left. \begin{aligned} Q &= \sum Q_i / 4n: Q \text{ 部分のテストの平均点} \\ P &= \sum P_i / 6n: P \text{ 部分のテストの平均点} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

として、全体の総合価値を次式により求める。

$$V = 3 + \frac{Q-3}{P} \quad (30)$$

総合価値 $V=f(Q,P)$ の関数決定は、質問の内容、評価対象の性質により、それぞれ適当な形に決定されるべきであり、これの決定が価値分析法の良否を支配するものである。

この分析法はシステム全体を対象とするよりも、むしろ、システムを構成する全部のサブシステム、あるいはコンポーネントに対して適用し、点数の悪いものより漸次

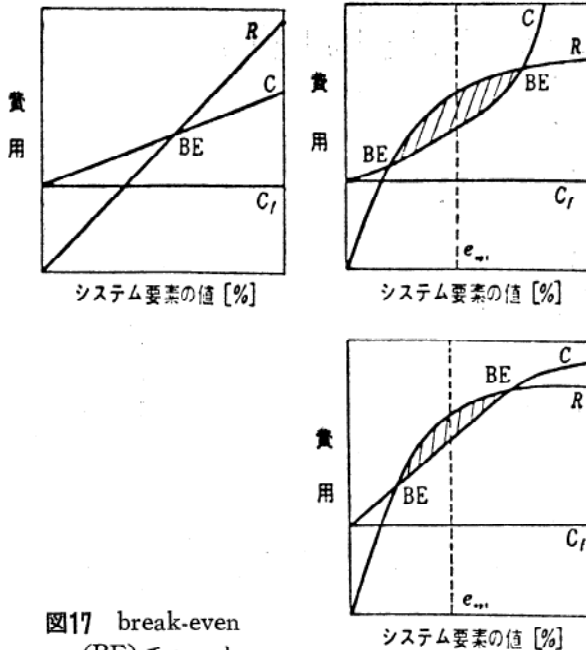


図17 break-even (BE) チャート

改良していくようにすれば有用である。

【5】break-even 法

この方法は生産企業で、生産レベルを決定するために用いられている手法を価値評価法に適用したものである。

すなわち、あるシステムを製作しようとする場合、そのシステムを支配する定量的要素（たとえば生産台数、信頼度、システム機能など）の増加により、固定費 C_f 、変動費 C_v により定められる費用は図17の3個のうちいずれか1個の変化を呈すると考えられる。いまこの図に要素の変動によって得られる収入の変化を書き込んだ場合、収入と費用が平衡する点 BE(break-even 点)を見いだすことができる。このような図を break-even チャートという。

一定機能をもついろいろなシステムの価値評価を行なうためにそのコストだけに着目するならば、この break-even チャートを用いることができる。すなわち考えられるすべての方式 (alternatives) あるいは比較対象となるすべてのシステムに対し、break-even チャートを描き、break-even 点の位置、 $(R-C)$ の大きさなどより、システム要素の変動に対する耐久性、利潤の大きさなどを求めることにより、価値評価を行なうことができるわけである。

すなわち $(R-C)$ の最大値を与える要素の値 e_{opt} から break-even 点が上位にあれば、要素の上位への変動（たとえば、信頼性向上に対する要求とか、機能追加要求）に対し、そのシステムは強く、有効性を維持しうるものとみることができわけである。

価値評価法には上述のようにたんに $(R-C)$ の大きさ

だけに着目した、いわゆる利益基準のほかに、利益率の大小を比較する比基準、および図17の横軸に対応するシステム要素の値の確率分布を考慮した最大利益基準などの諸法が用いられる。

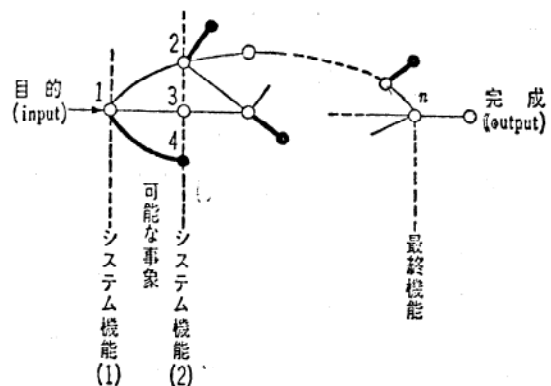
4. 価値工学の今後の発展性

ここでは製品ならびにそれに用いられている技術の価値を、そのもつ機能とコストの面からとらえ、それを最大にする方法、ならびに与えられたものの価値評価を行なう方法について述べ、価値工学の全容とその考え方について説明した。しかし、これらの手法は MAUS 法を除き、ほとんどが可能なシステムないしは手法をすべて対象にして評価し、比較する逐一的な方法である。

しかし、システムに対する目的が与えられるとそれを満足するための最適な機能は一意的に求められなければならないし、その機能を与えられるための最適なシステムないしはコンポーネントは必ず演えきの的に求められるはずであり、またそうでなくてはこの技術体系の完全な組み立ては困難となる。

たとえば与えられた目的を遂行しうるためのシステムの機能を求めるために最適な思考操作の第一歩をふみだしたとする。その結果、その操作に引き続いて起こりうると考えられる事象がいくつか存在し、この事象に対処するための機能が要求される。さらにその機能が実施された場合の事象を考えるというふうに、この操作を続けていくならば、やがてはその目的にたどりつくはずであり、その経過は図18のようになる。

いまコンポーネントの構成に必要な要求が与えられた場合それに最適なコンポーネントが技術的な見地から一意的に定まり、そのコストが既知であるならば、機能のコス



(注) —○—: 最終目的まで連なる事象とそれに要求される機能
—●—: 目的遂行を断念させる事象とその機能

図18 最適思考操作の目的から完成の経過

トを C_i として

$$\min \sum_{i=1}^n C_i \quad (31)$$

ここに

n : コンポネントの数

を満足させるような performance flow の構成が最適なシステムの構成に連なることになる。

システム設計にあたって、要求 (input) とその完成 (output) を連結する path p_h を構成する枝路を b_{hk} , b_{hk} に対応する機能を実現するためのコストを C_{hk} とした場合、(31)式は

$$\left. \begin{array}{l} \min \sum_h \sum_k b_{hk} C_{hk} \\ b_{hk}=1 \text{ あるいは } 0 \end{array} \right\} \quad (32)$$

として表示でき、 b_{hk} の値を求めることにより、最適システムを構成することができるわけである。このことは事象確率の和が1となり、input と output を連結する論理的な真理値が1であることより十分可能と考えられる。

価値工学はこのような考え方、すなわち、対象を支配する諸要素を十分考慮に入れて、その価値を最大化できるような設計法が考案されればいっそうその有効性をますものと思われる。

今後の発展が望まれるしだいである。