



Title	システムの構造的分析に関する研究
Author(s)	薦田, 憲久
Citation	大阪大学, 1982, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/829
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

システムの構造的分析に関する研究

昭和 56 年 6 月

薦 田 憲 久

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 サイクルを含むシステムの階層的構造分析法－H S A	9
2.1 緒 言	9
2.2 階層的構造分析法（H S A）の考え方	10
2.2.1 システムの表現	10
2.2.2 サイクルのあるシステムの階層化	11
2.3 階層的構造分析法（H S A）の階層化アルゴリズム	12
2.3.1 アルゴリズムの詳細	12
2.3.2 アルゴリズムの有解性の検討	14
2.3.3 候補集合の意味とフィードバック枝の最少性	16
2.3.4 適用例とI S Mによる階層化結果との比較	17
2.4 H S Aの適用範囲	17
2.5 結 言	18
第3章 システム構造分析システム－P P D Sシステム	22
3.1 緒 言	22
3.2 構造化アルゴリズム	23
3.2.1 H S A	23
3.2.2 S S A	24
3.3 P P D Sシステムの機能	25
3.4 P P D Sシステムの構成と仕様	26
3.5 P P D Sシステムの評価	27
3.6 応用例	28
3.7 結 言	30
第4章 階層的構造分析法（H S A）による会話型目的樹木生成法	33
4.1 緒 言	33
4.2 目的項目初期抽出法	34
4.3 階層構造化による項目の見直し方法	35
4.3.1 不完全な項目を含む階層構造化結果	35

4.3.2	階層構造図見直しの観点	36
4.4	支援システムの機能	37
4.5	目的樹木作成手順	38
4.6	提案手法の適用例による効果の評価	39
4.7	結 言	40
第5章	不確定な負荷を有するプラントの信頼性評価基準の明確化と定量的評価方法	43
5.1	緒 言	43
5.2	不確定負荷を処理するプラントにおける信頼性評価問題の定式化	45
5.3	あふれ確率の計算方法の検討	46
5.3.1	あふれ確率計算方法	46
5.3.2	平均値を用いる評価との比較	49
5.4	信頼性評価の手順	50
5.5	あふれ確率による信頼性評価手法の廃液処理プラントへの応用	50
5.5.1	廃液処理プラントの概要	50
5.5.2	廃液発生量分布の推定	51
5.5.3	故障時の設備容量評価と信頼性評価	51
5.6	結 言	52
第6章	結 論	55
	謝 辞	57
	付 録	58

第 1 章 緒 論

第1章 緒 論

システムの計画は、目的の明確化、代替案の生成、代替案の評価、という3つのフェーズからなっていると考えられる。特に、「システムは、所定の目的を果たすべく、選定され、配列され、¹⁾ 連係して動作する一連の構成要素の組合せである」と言われているように、目的の明確化は、システム開発の基本方針を与えるものである。しかし、これまでのシステム工学の多くの議論は、システムの目的が把握されているという前提で議論が進められて来たと言える。これは、従来のシステムにおいては、比較的少数の目的がシステムを支配しており、それらの抽出が容易で、それらの間の個々の関連を調べることにより全体の目的構造を容易に把握できたためと考えられる。しかし、大規模複雑なシステム、例えば大規模な計算機アプリケーションシステムにおいては、多様な価値観を持つ多数の関係者が存在し、システムの目的抽出が難しく、しかも、個別に関連を調べるだけでは相互関係が複雑で全体の目的体系を把むのが非常に困難になっている。

同様のシステムの大規模化に伴う全体体系の把握の困難さの問題は、次の代替案の生成、評価のフェーズにおいても生じている。例えば、システムの機能を実現するための個々の機能の代替案の数が増え、しかもその相互関係が複雑になり、有望なシステムの代替案の組み合わせをぬけなく抽出することが難しくなっている。また、シミュレーションモデルの構築においても、モデルを構成するパラメータの数が多くなり、まず、パラメータ間の関連の有無を調べ、それらから全体モデルを作り、関係者の合意を得ることが有力となりつつある。さらに、具体的な評価においても、価値体系に関し、関係者の合意を得ることが必要となりつつある。

このように、システム計画においては、詳細検討に先立ち、全体の構造の大枠をまず把握し、それについて関係者の合意を得ることが重要となっている。この全体の構造の把握のための基本的な技術としては、多数の要素間の断片的な関連の情報から全体の要素のつながりを整理分析する技術が必要であると考えられる。本論文では、この要素間の断片的な関連の情報をもとに、全体の要素のつながりの様子を明らかにすることを「構造化」と呼ぶ。構造化技術の実用化のためには、大きく次の2つの課題が考えられる。

(1) 構造化のためのツール

システム構造化における大きな特徴は、取り扱うべき要素（目的、パラメータ等）数の多さである。少数の要素であれば、人手で構造化を行なうことも可能であるが、

多数の要素を効率的に取り扱うには、計算機の利用が必要である。そのため、アルゴリズムの開発、マンマシン性の検討などを行なう必要がある。

(2) 構造化のための手順

ツールを有効に利用するためには、それを利用するための手順が不可欠である。例えば、目的構造化の明確化のためには、目的項目の抽出方法、および抽出された目的項目の内容の精選方法などを構造化のためのツールと結び付けて整備することが、分析者の力量の差による得られる結果のバラツキを少なくするために必要である。また、システム計画における他の作業とのインタフェースの整理も必要である。

これらに対する研究も、いくつか行なわれている。(1)のシステム構造化のツールに関しては、J.N.WarfieldによるISM(Interpretive Structured Modeling)^{2,3)}のように要素を何らかの順序関係に従い階層化する技法、E.Fontella等によるDEMATEL⁴⁾(DEcision Making And Technological Evaluation Laboratory)法のように要素間の関連の強さに従い項目を整理する技法、M.McLean等によるSPIN⁵⁾法のようにシステムの動的構造を分析する技法、といった多様な技法が提案され始めている。しかし、未だその緒についたばかりで、システム計画における位置付け、実用化を進める中での改良、等の研究が必要とされる。

(2)の構造化の手順に関しては、アイデアあるいは問題の発掘整理という立場から、K J⁸⁾法、N M⁹⁾法、ブレンストーミング/ライティング¹⁰⁾、NGT(Nominal Group Technique)¹¹⁾などの手法が提案されている。^{12,13)}これらは、手軽に適用できることから広く普及しているが、手順が記述的に述べられているだけのため、その実施においては、ノウハウや利用者の力量などに依存する面が多く「Art」としての域を出ていない。このため、問題が大規模かつ複雑になると、急速に手法の適用が難しくなる。これに対し、中尾らのSHS¹⁴⁾(Successive Hierarchical Structuring)では、項目を構造化手法を用いて順々に階層化しながら項目の抽出を行なっている。このような構造化技法を組み込んだ、より「機械的」な構造化の手順および他のフェーズの作業との関連づけの研究が、構造化アルゴリズム自体の開発と共に、構造化技法の実用化において必要とされる。

以上、システムの構造化における課題として、筆者は、次の2つの課題を指摘した。

- (1) 構造化ツールの実用上の見地からの改良。
- (2) 構造化アルゴリズムを利用した構造化の手順の開発。

上記の2つの課題の各々に対して、筆者が現場の研究者として具体問題を解決していく

中で行なった研究の目的を以下に述べる。

(1) 構造化ツールの改良

構造化アルゴリズムとしては、先に述べたような多様なものが提案されている。しかし、ここでは実用上応用範囲の広い階層的構造化に話を限定する。階層的構造で表現できる対象は、目的樹木、因果関連図、モジュール階層図、Fault Tree 等と非常に多い。これらを構造的に分類すると、最も単純なものとして各要素が高々 1 つしか上位要素を持たないトリー構造、次に複雑なものとして各要素は 2 つ以上の上位要素を持つことはあるがサイクリックな関係は含まないもの、最も複雑なものとしてサイクリックな関連を含むもの、という 3 つに分けられる。この内、サイクルを含まない最初の 2 つについては、階層的構造化はさほど困難でない。しかし、構造中にサイクルが含まれると構造化は難しくなる。同種の階層的構造化手法である I S M^{2,3)}では、サイクル全体を仮想的に 1 つの要素と見なし階層化する方式を取っている。このため、サイクルに多くの要素が含まれると構造化された結果を見ても、構造が理解できないという問題が生じる。筆者は、サイクルを含む構造を理解し易い階層的構造に体系化するため、サイクルの中の 1 つの関連をフィードバック枝とすることにより、サイクルを含む構造をフィードバック枝付きの準階層構造に構造化する階層化アルゴリズム H S A (Hierarchical Structural Analysis)^{15,16,17)}を開発した。

また、システム構造化においては、システム分析者は構造化アルゴリズムにより計算された結果を見て、要素および関連の見直し、修正を行ない、再び計算機に入力するという繰り返し作業が行なわれる。従って、構造化アルゴリズムの効率的使用のためには、システム分析者と計算機のインタフェース部分のサポートが重要となる。筆者は、先に述べた H S A のほか、筆者が共同開発した S S A (Structural Sensitivity Analysis)^{18,19,20)}を、構造化アルゴリズムとして持ったオンラインシステム P P D S (Planning Procedure to Develop Systems)^{17,21,22)}システムを開発した。

(2) 構造化アルゴリズムを利用した構造化の手順の開発

システムの構造化の手順としては、構造化そのものの手順と、構造化作業と接続する作業とのインタフェース部分の手順の 2 つがある。まず、前者については、要素の抽出とその関連付けの 2 つのフェーズがあるが、これらを別々のものとして捉え、関連付けの部分のみ計算機を用いて支援することにより、構造化が進められるような対象については、手順はあまり重要でない。シミュレーションモデルの構造分析、モジ

ユーロ構造図の作成等がそのような対象の例にあげられる。一方、目的樹木の作成などでは、正確な項目の抽出自体が非常に困難であり、項目抽出の部分と関連付けの部分に関連させながら作業を進める必要がある。この場合、構造化アルゴリズムの利用方法、アルゴリズムの階層化結果の検討の指針、等を問題に合わせて整備することが実用上不可欠である。構造化アルゴリズムを利用した目的樹木の作成法に関しては、^{23,24)}ISMを利用したものもあるが、項目抽出のフェーズと項目の関連付けのフェーズが完全に切り離せるという立場で手順が構成されている。このため、項目数が20~30程度のものにしか適用できない。筆者は、システムの多くの関係者から100を越える目的項目を抽出し、それらの内容を精選しながら目的樹木を作成するHSAを利用^{25,26,27)}した手法を開発した。

一方、構造化作業と接続するフェーズの作業とのインタフェースの明確化という立場からは、目的樹木のような価値体系をシステム代替案の評価にどのように接続するか、ということを確認にする必要がある。代替案の評価においては、システムの目的、実システムの特徴の両面からの検討により、これらに合致した評価基準を設定し、その評価基準を具体的に定量化する所まで展開することが必要である。しかし、この作業を実際のシステムに関し実施することは容易なことではない。本論文では、筆者が実際に遭遇したある廃液処理プラントの信頼性評価の問題について、上記の作業を実施した結果を述べる。評価基準を設定するための方法論としては十分に詰められておらず、今後の検討が必要であるが、このような価値体系と評価の関連づけの面からのアプローチの重要性を提起した。また、同時に、対象とした廃液処理プラントの信頼性^{28,29)}評価手法を提案した。

本論文は、以上述べた研究の目的、階層的構造化アルゴリズムの開発、構造化作業支援ツールの開発、構造化アルゴリズムを用いた目的樹木作成法、価値体系（目的樹木）と評価基準の関連づけに関する方法のプラント信頼性評価問題への適用について述べたものである。以下、各章の内容を簡単に述べる。

第2章では、多数の要素間の断片的に知られている関連から、システム全体の構造を体系化する階層的構造化アルゴリズム^{15,16,17)}HSAを提案する。階層的構造化を行なう対象のシステム中にサイクルが含まれる場合、HSAでは、上位に位置する要素に直接関連を持つサイクル中の要素を選び、その要素より出発するサイクル中の関連をフィードバック枝とする階層化を行なう。これにより、サイクルの内部および外部との関連が容易に理解できる。

また、システムの大部分の要素がサイクルに含まれる場合でも、要素を理解しやすい階層的構造に整理できる。このアルゴリズムの有解性および動作の特徴を述べ、同種の階層化アルゴリズムである I S M^{2,3)}の階層化アルゴリズムとの比較し、H S Aによる階層化の有効性を示す。

第 3 章では、構造化アルゴリズムを組み込んだ計算機対話型システム^{17,21,22)}について述べる。この対話型システムは、構造化アルゴリズムとして、H S Aと筆者が共同開発した S S A^{18,19,20)}を備えている。構造化を支援するシステムにおいて必要なデータの修正、管理、結果の表示等の機能について考察し、それらをどのように実現しているかを説明する。また、システムの構成、主な仕様について述べ、システムの評価を行なう。

第 4 章では、H S Aを用いた会話型目的樹木作成法^{25,26,27)}について述べる。目的樹木作成における問題として、目的項目の抽出と、抽出した多数の項目の精選がある。まず、目的項目の内部構造に注目した、より定形的な「関与者利害関連表」を用いた項目抽出法を示す。次に、あいまいな項目や重複した項目が存在すると、階層構造化の結果、サイクリックな関係が生じたり、分岐のない構造を生じることを示す。これらの現象を重点的に見直すことにより、多数の項目の精選が構造化の過程で行なえることを示す。そのための支援ツールと手順について述べ、その適用例を通じ評価を行ない有効性を示す。

第 5 章では、目的構造の分析と評価の関連づけを目的として研究した、ある廃液処理プラント^{28,29)}の信頼性評価の問題について述べる。対象としているプラントにおいては、負荷が不確定に変動し、それを吸収するためのバッファ系が存在している。このような特徴およびにプラントの運転者および設置者の立場の両面を考慮して、信頼性評価基準として、バッファ系のあふれ確率を導入する。次に、あふれ確率をもとにしてプラントの故障状態を定義し、その状態にある確率を定量的に計算する方法を示す。提案した手法をある集中廃液処理プラントの系統案の比較評価に適用し、この種のプラントに対する信頼性の定量的評価が可能となることを示す。

最後に、第 6 章で、本研究全般にわたり、その結果の意義と残された問題点についてまとめる。

第 1 章 の 参 考 文 献

- (1) 猪瀬 編；システム工学(I)，岩波書店(昭和 4 4 年)
- (2) J.N. Warfield ; Societal Systems : Planning , Policy and Complexity , John Wiley & Sons , New York (1976)
- (3) M.M. Baldwin (ed) ; Portraits of Complexity , Applications of Systems Methodologies to Societal Problems , Battelle Monograph, No 9 (June, 1975)
- (4.a) A.Gabus , et al ; DEMATEL 1973 REPORT : Communication Procedure , Battelle Geneva Research Center
- (4.b) ibid ; ibid : Views of a group , ibid
- (4.c) ibid ; ibid : Analytical Methods , ibid
- (5) M.McLean et al ; The Importance of Model Structure , Future , pp 40-51 (Feb. , 1976)
- (6.a) H.A. Linstone , et al ; The Use of Structural Modeling for Technology Assessment, Research Report of Futures Research Institute , Portland State University , Publication 78-1 (Feb. , 1978)
- (6.b) ibid ; ibid , Technology Forecasting and Social Change , Vol. 14 , No 4 , pp 291-329 (1979)
- (7) G.G. Lendaris ; Structural Modeling — A Tutorial Guide , IEEE tran. on SMC, Vol. SMC-10 , No 12 , pp 807-840 (Dec. , 1980)
- (8) 川喜田； 発想法, 中公新書(昭和 4 2 年)
- (9) 中山；発想の論理, 中公新書(昭和 4 5 年)
- (10) T.Rickards ; Problem-solving through Creative Analysis , Grower Press (1974)
- (11) A.L. Delbecq , et al ; Group Techniques for Program Planning , Scott , Foresman and Co. (1975)
- (12) H. Geshka , et al ; Modern Techniques for Solving Problems , Chemical Engineering , pp 91-97 (Aug. , 1973)

- (13) 高橋；新しい発想技法，経営開発センター出版部（昭和52年）
- (14) 中尾 他；複雑な問題認識のための一手法 — 逐次階層構造化手法の提案 — ，
電気学会論文誌 C ， Vol. 100-C, No 1, pp 9-16（昭和55年）
- (15) 薦田 他；サイクルを含むシステムの階層的構造分析法 — H S A ， 電気学会論文誌
C ， Vol. 100-C, No 12 , pp 395-401（昭和55年）
- (16) 薦田，春名；フィードバックを有するシステムの階層構造化のための一方法，
昭和52年電気学会全国大会予稿集，No 1658
- (17) N.Komoda, K.Haruna；Accessibility and Maintainability in Man-
Machine Structural Modeling, Proceedings of the 1978 Interna-
tional Conference on Cybernetics and Society , pp1242-1246
(1978)
- (18) 春名，薦田；構造的感度解析法（SSA）の提案，電気学会論文誌 C ，
Vol. 99-C , No 8 , pp185-192（昭和54年）
- (19) K.Haruna , N.Komoda；An Algorithm for Structural Sensitivity
Analysis in Structural Modeling, Proceedings of the 1978
International Conference on Cybernetics and Society, pp989-994
(1978)
- (20) ibid ； Structural Sensitivity Analysis and its Applications ,
Large Scale Systems : Theory and Applications , Vol. 1 , No 1 ,
pp79-87（1980）
- (21) 薦田，春名；システム構造分析システム（PPDSS）の機能試作，昭和52年電気学
会東京支部大会予講集，No 272
- (22) 薦田，春名；システム構造分析システムの試作とその応用，電気学会情報処理研究会
資料 IP78-77（昭和53年11月）
- (23) R.Fitz；Organizing for Development Planning : Methodology ,
Models and Communication, Proceedings of the 1976 International
Conference on Cybernetics and Society , pp652-659(1976)
- (24) D.W. Malone；Strategic Planning : Applications of ISM and Rela-
ted Techniques , Proceedings of 1978 International Conference
on Cybernetics and Society , pp995-1000（1978）

- (25) 薦田 他；階層的構造分析法（HSA）による会話型目的樹木生成法，電気学会論文誌C（投稿中）
- (26) 薦田 他；階層的構造分析法（PPDS-HSA）による目的樹木作成法の一提案，昭和54年電気学会東京支部大会予講集，No334
- (27) N.Komoda, et al；An Innovative Approach to System Requirements Analysis by Using Structural Modeling Method，Proceedings of 5th International Conference on Software Engineering，pp305-313（March, 1981）
- (28) 薦田 他；不確定な負荷を有するプラントの信頼性評価手法とその廃液処理プラントへの応用，電気学会論文誌C，Vol. 100-C，No10，pp337-344（昭和55年）
- (29) 薦田，春名；不確定負荷を処理するシステムの信頼性評価法の一提案，昭和51年電気学会全国大会予講集，No1272

第 2 章 サイクルを含むシステムの階層的構造分析法－H S A

第2章 サイクルを含むシステムの階層的構造分析法—HSA

2.1 緒言

システムの大規模化に伴い、システムの構成要素（目的、設計パラメータ等）を抽出し、それらの間の関連を調査し、全体像を把握することは急速にむづかしくなる。近年、このようなシステムの全体像、システムの構造を計算機を用いて計算する方法がいくつか提案^{1,2)}されている。J.N.Warfield による ISM (Interpretive Structural Modeling) のように要素を何らかの順序関係に従い階層化する技法、E.Fontella 等による DEMA³⁾TEL (DEcision Making And Technological Evaluation Laboratory) 法の⁴⁾ように要素間の関連の強さに従い要素を整理する技法、M.McLean 等による SPIN 法の^{5,6,7)}ようにシステムの動的構造を分析する技法、等がある。本章では、応用範囲の広い階層的構造化の1手法として、サイクリックな関連を含むシステムを、理解し易い階層的構造に構造化する階層的構造分析法 HSA (Hierarchical Structural Analysis) を提案し、考察を加える。

階層的構造で表現できる対象は、目的樹木、因果関連図、モジュール階層図、Fault Tree 等と非常に多い。このような階層構造図を作成するためには、個々に理解される要素間の関連から全体の構造を創り出すことが必要である。しかし、大規模システムでは要素が多いため、個別に与えられる個々の関連から全体のイメージを得ることは難しく、要素を階層構造に整理するためのツールが必要となる。このため、システムを、構成要素を節点、要素間の関連を有向枝に、それぞれ対応づけた有向グラフと見なし、この有向グラフを計算機で処理することにより階層構造を得ることが考えられる。

サイクルを含まないシステムの場合には、要素を適当なレベルに分けることにより、システムの構造を示す有向枝が一方向を向くようにシステムの要素を整理し階層構造とすることが可能である。しかし、物理システム、社会システム等の変数間の関数関係のモデル⁴⁾では、大きいサイクルが含まれることが多い。また、目的樹木のように本来サイクルがない対象の分析においても、分析の過程では、全体の構造が正確に理解できないための関連付の誤りや要素の抽出もれ等により、サイクルが生ずることが多い。このようなサイクルがシステム中に含まれると、有向枝を一方向のみに向くようにすることは不可能となる。

これまでに、サイクル全体を一つのかたまりと見なし、階層構造化する方法が提案されている。システムの対話的構造分析法として J.N.Warfield により提案されている ISM

(Interpretive Structural Modeling ^{1,2)}) の階層化アルゴリズムがこの考え方を採っている。しかし、この方法では、サイクルが大きくなると、ほとんどの要素がこのサイクル内の要素のかたまりに含まれ、このかたまりとその他の少数の要素の関連しか整理できなくなり、全体の構造は理解できなくなる。また、サイクル内部の関連も整理されない。⁸⁾

このような問題点を解決するため本論文では、サイクルをフィードバック枝を用いて表現する構造整理の考え方を導入する。本論文で提案する階層的構造分析法 (Hierarchical Structural Analysis : HSA と略す) は、サイクルのない場合の単純な階層化アルゴリズムで階層化を進め、サイクルに遭遇するとサイクルの一部の関連を無視し、無視した関連をフィードバック枝とする。これにより、サイクルを含むシステムの構造をフィードバック枝を含む階層的な構造で表現することができる。このような機能により、システムの分析者は、サイクルを含むシステムの要素の全体的なつながりを理解できると共に、サイクルの存在をフィードバック枝により知ることができる。

以下、本章では、まず、提案する HSA の階層化の考え方を述べ、次に、それを実現するアルゴリズムを示し、その性質を調べる。最後にその適用例を示す。

2.2 階層的構造分析法 (HSA) の考え方

2.2.1 システムの表現

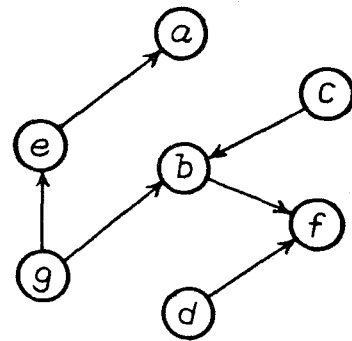
システムの構成要素間の方向性の有る関連は、有向グラフを用いて表わせる。システムは n 個の要素からなり、各要素間には 2 項関係 R が存在しているとする。なお、関連に推移律が成立する必要はない。システムの構成要素の集合 S の要素 s_i から要素 s_j に関連がある場合、 $s_i R s_j$ 、関連がない場合、 $s_i \bar{R} s_j$ と記述する。 S の要素を行と列に持つ 2 値行列 M を考え、 M の $i j$ 要素 m_{ij} を次式に従って決定することにより、システムの全体の構造を表現することができる。

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & ; s_i R s_j \quad (i \neq j) \\ 0 & ; s_i \bar{R} s_j \quad (i \neq j) \\ 1 & ; i = j \end{cases} \quad (2.1)$$

なお、同一の要素の関連 ($s_i R s_i$) は定義されておらず、計算の便宜上 $m_{ii} = 1$ と定義する。この 2 値行列 M を、要素関連行列と名づける。第 2.1 図(a)は、第 2.1 図(b)に示す有向グラフに対応する要素関連行列である。

	a	b	c	d	e	f	g
a	1						
b		1				1	
c		1	1				
d				1		1	
e	1				1		
f						1	
g		1			1		1

(a) 要素関連行列

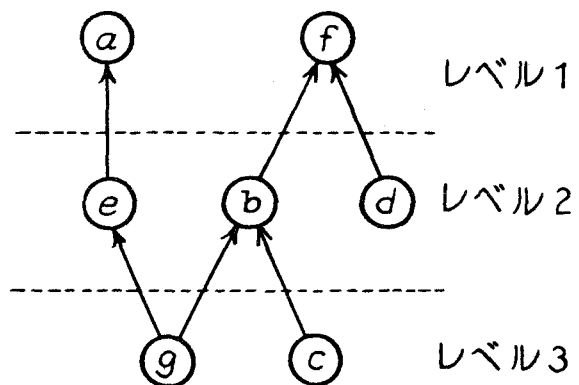


(b) 有向グラフ

第 2.1 図 2 値行列と有向グラフ

	a	f	b	d	e	c	g
a	1						
f		1					
b		1	1				
d		1		1			
e	1				1		
c			1			1	
g			1		1		1

(a) 階層化要素関連行列



(b) 階層構造図

第 2.2 図 階層化要素関連行列と階層構造図

分析の対象となるシステムにサイクルがない場合、要素関連行列の行、列の順序を変更し、対応する有向グラフ内の有向枝を一方向のみにすることができる。このような操作を仮に「階層化」と名づけ、階層化により得られる2値行列を「階層化要素関連行列」、有向グラフを「階層構造図」と呼ぶ。第2.1図に示した有向グラフに対する階層化要素関連行列、階層構造図を第2.2図に示す。また、階層化により要素はいくつかのレベルに分かれる。有向枝の出ないレベルを第1レベル、第1レベルのみに有向枝を出すレベルを第2レベル、第2レベル以上のレベルに有向枝を出すレベルを第3レベル、のように以下同様に名前を付ける。

2.2.2 サイクルのあるシステムの階層化

サイクルを含むシステムの場合、前節で定義した意味の階層化は不可能となる。そのため、HSAでは、次のように階層化の考え方を拡張する。なお、サイクルとは、ある要素 s_1 から出発した有向枝を順々にたどっていったとき、再び要素 s_1 にもどって来るパスを^{脚注)}言う。要素 s_1 から有向枝に沿って要素 $s_2, s_3, \dots, s_{k-1}$ を通過して s_k に至る有向パス P を、 $P = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ で定義する。サイクルでは、 $s_1 = s_k$ である。

サイクルの少なくとも1つの関連を無視すると、システムはサイクルのない構造と見なせ、階層化が可能である。このように階層化した有向グラフに無視した関連を付け加えると、それらはフィードバック枝となる。これを、本論文では、サイクルを含む場合の「階層化」と呼び、得られる2値行列、有向グラフをそれぞれ前節と同様に「階層化要素関連行列」「階層構造図」と呼ぶ。

サイクル内の関連は構造的には対等であるので、どの関連を無視してもよい。サイクルよりも上位レベルにある要素に直接関連を持つサイクル中の要素を s とする。HSAでは、要素 s から出発するサイクル中の関連をフィードバック枝とする。要素 s は、サイクルの要素の中で最も上位レベルの要素となるので、この要素をサイクル内の最上位要素と呼ぶ。この考え方を第2.3図に例示する。第2.3図では、第1, 第2レベルが既に階層化されており、サイクルは (f, g, h, e, j, f) である。サイクル中の要素 f が上位レベルの要素 d と直接関連を持っており、要素 f が第3レベルとなり、 $f \rightarrow g$ の関連がフィードバ

脚注) パス(path)とは、有向枝(edge)が直接の関連を言うのに対し、いくつかの有向枝を経由しての間の関連を意味する。

ク枝となる。もし仮に、サイクル内の最上位要素を別の選び方で決めると、その要素からはフィードバック枝しか出なくなり、関連を第1レベルから順に追いかけて構造の検討を行う場合、不便である。また、後述するようにサイクルの検出を事前に行う必要がなくなり、サイクル検出のための複雑なアルゴリズムを組み込むことによるプログラムの複雑化、計算時間の増大を防ぐことができる。

以上述べた考え方で構造化を行うため、HSAでは、サイクルのない場合の階層化機能のほか、サイクル内で一時的に無視する関連、つまりフィードバック枝となる関連の決定の機能を備えている。サイクルのない場合の階層化アルゴリズムは、サイクルが現われる¹¹⁾と先に進めなくなる。これを利用することにより、サイクルの存在を知ることができる。次に、フィードバック枝の出発点となる可能性を持つ要素、すなわち、既に階層化されている上位レベルの要素と直接関連を持つ要素について、関連を順次たどっていくことにより、サイクルを検出し、フィードバック枝を決定する。この方法によれば、サイクルがない場合、特別なサイクルの検出作業を行う必要がなくなる点も利点である。

2.3 階層的構造分析法 (HSA) の階層化アルゴリズム⁶⁾

2.3.1 アルゴリズムの詳細

[ステップ 1] 要素関連行列の作成

システムの要素関連行列 M を、(2.1)式に従って決定する。また、レベル l を1とする。

[ステップ 2] 隣接可到達集合 $R(s)$ 、隣接先行集合 $A(s)$ の決定

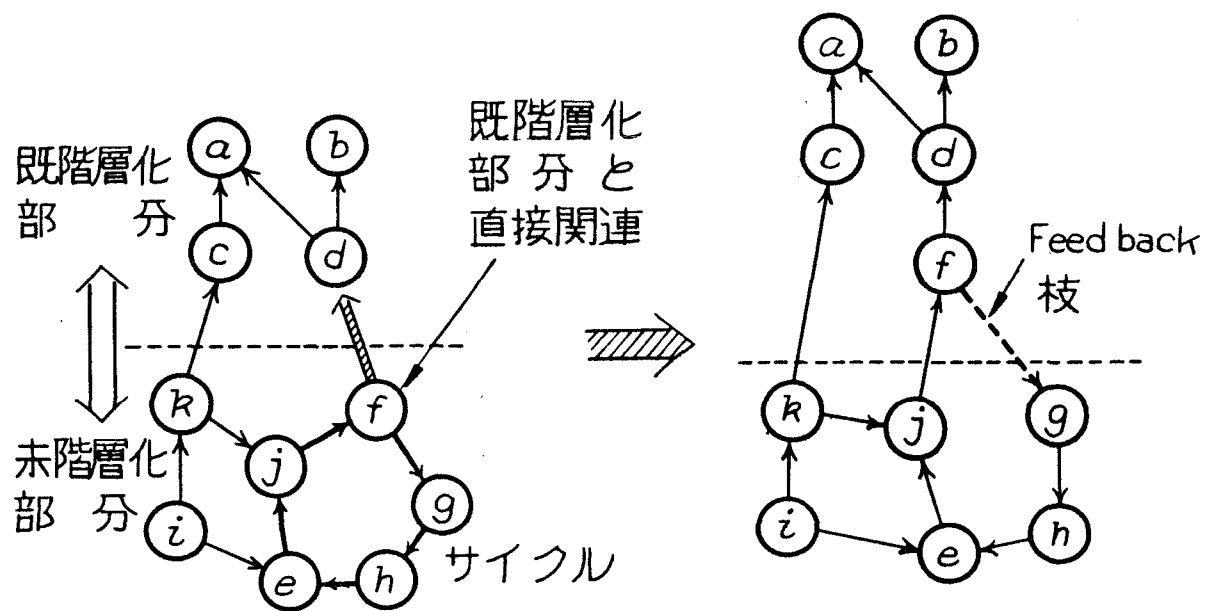
次式で定義される隣接可到達集合 $R(s)$ と隣接先行集合 $A(s)$ をそれぞれ決定する。

$$R(s_i) = \{ s_j \mid s_j \in S, m_{ij} = 1 \} \quad (2.2)$$

$$A(s_i) = \{ s_j \mid s_j \in S, m_{ji} = 1 \} \quad (2.3)$$

なお、 $R(s_i)$ は要素 s_i から出る有向枝の先にある要素 (s_i から直接到達できる要素) の集合、 $A(s_i)$ は要素 s_i に到達する有向枝の出発点となっている要素 (s_i に直接入って来る関連の出発要素)^{脚注)} の集合である。可到達行列に対する可到達集合 $\tilde{R}(s_i)$ 、先行集合 $\tilde{A}(s_i)$ と区別するため、本論文では(2.2)式、(2.3)式で定義した集合を隣接可

脚注) 可到達行列とは、(2.1)式で定義した要素関連行列を数回ブール代数的に累乗して得られる行列で、すべての間接的関連に対応する行列の i, j 要素が1となっている。



第 2.3 図 HSA におけるサイクルの処理

到達集合，隣接先行集合と呼ぶ。

[ステップ 3] 第 l レベル要素集合 L_l の決定

次式を満足する要素を見出し，第 l レベル要素集合 L_l の要素とする。

$$R(s) \cap A(s) = R(s) \quad (2.4)$$

(1) $L_l = \phi$ (空集合) のとき， $l = 1$ ならステップ 6 へ， $l \neq 1$ ならステップ 4 へ行く。

(2) $L_l \neq \phi$ かつ $l = 1$ のとき， $R(s) \not\subseteq L_1$ なる要素をすべて L_1 より取り除く。

$L_1 = \phi$ となれば，ステップ 6 へ， $L_1 \neq \phi$ であれば，ステップ 8 へ行く。

(3) $L_l \neq \phi$ かつ $l \neq 1$ のとき，第 l レベル以上の要素に直接到達可能な関連を持たない要素を， L_l より取り除く。 $L_l = \phi$ となれば，ステップ 4 へ， $L_l \neq \phi$ であれば，ステップ 8 へ行く。

[ステップ 4] 候補集合 C の決定

すでに選択した第 $(l-1)$ レベル以上の要素に直接到達可能な要素をすべて選出し，これらの要素の集合を候補集合 C とする。もし， $C = \phi$ ならば，ステップ 6 へ行く。

$C \neq \phi$ ならば， $k = 2$ とし，ステップ 5 へ行く。

[ステップ 5] フィードバック枝の決定

$(k-1)$ 個の要素を経由しての関連を含めて，要素 s に入ってくる関連の元にある要素の集合 $A^k(s)$ を，次式により求める。

$$A^k(s) = A(s) \cup \bigcup_{s_i} A(s_i) \quad , \quad s_i \in A^{k-1}(s) \quad , \quad s \in C \quad (2.5)$$

なお，この $A^k(s)$ は，要素関連行列をブール演算により k 乗した 2 値行列 M^k に対応する先行集合に等しい。次式を満足する要素を見出し，第 l レベル要素集合 L_l の要素とする。

$$R(s) \cap A^k(s) = R(s) \quad , \quad (s \in C) \quad (2.6)$$

(1) $L_l = \phi$ ，および，候補集合内の要素の少なくとも 1 つについて $A^k(s) \neq A^{k-1}(s)$ のとき， $k = k + 1$ とし，本ステップを繰り返す。

(2) $L_l = \phi$ ，および，候補集合内のすべての要素について $A^k(s) = A^{k-1}(s)$ のとき，ステップ 6 へ行く。

(3) $L_l \neq \phi$ のとき，ステップ 8 へ行く。

[ステップ 6] 候補集合 C の再定義

まだレベル要素集合に属していない要素をすべて候補集合 C の要素とする。 $k = 2$ とす

る。

[ステップ 7] サイクル全体のレベル化

ステップ5と同様に(2.6)式により、第 l レベル要素集合 L_l の要素を求める。

(1) $L_l = \emptyset$ のとき、 $k = k + 1$ として、本ステップを繰り返す。

(2) $L_l \neq \emptyset$ のとき、 L_l の全ての要素について、 $R(s) \subseteq L_l$ なることを調べる。

$R(s) \not\subseteq L_l$ なる要素が存在すれば、その要素を L_l より取り除く。この操作を L_l のすべての要素が、 $R(s) \subseteq L_l$ を満足するか、 $L_l = \emptyset$ となるまで繰り返す。

$L_l \neq \emptyset$ であれば、ステップ8へ行く。 $L_l = \emptyset$ となれば、 $k = k + 1$ として、本ステップを繰り返す。

[ステップ 8] 第 l レベル要素集合の除去

要素関連行列および要素集合 S より、第 l レベルの要素を取り除く。まだどのレベルにも属していない要素が存在するとき、 $l = l + 1$ として、ステップ2へ戻る。すべての要素が、いずれかのレベルに分割されれば、元の要素関連行列 M の行と列の要素を、レベルの順にならべかえ、行列 H を作る。(終了)

2.3.2 アルゴリズムの有解性の検討

本節では、前節で述べたアルゴリズムの有解性について検討する。なお、本アルゴリズムは要素関連行列における要素の順序に依存する部分はないので、要素の順序が階層化結果に影響することはない。まず、アルゴリズムのステップ3に関し次の定理を証明する。

[定理 1] もし、ステップ3で第 l レベルの要素が発見できない場合、サイクルが存在する。

(証明) ステップ3で第 l レベルの要素が見い出せない場合、ステップ3後半の処理により3通りの状態が考えられる。ステップ3(1)の条件にあてはまる場合、すべての要素について、 $R(s) \cap A(s) \subset R(s)$ が成立する。故に、任意の要素 s_i を通ると、

$s_i R s_{i+1}$ かつ $s_{i+1} \bar{R} s_i$ なる要素 s_{i+1} が存在する。 s_{i+1} についても同様である。従って、次の有向パス P が存在する。

$$P = (s_i, s_{i+1}, \dots, s_{i+k}) \quad (2.7)$$

有向パス P の中に含まれる要素の数には制限はなく、一方、システムの要素数は有限である。従って、少なくとも k がシステムの全要素数を越える時までには、必ず、 $s_i = s_{i+l}$ を満足する。すなわち、サイクルが存在する。

ステップ 3 (2) の条件にあてはまり、ステップ 3 で第 1 レベルの要素が見い出せない場合、 $R(s) \cap A(s) = R(s)$ かつ $R(s) \not\subseteq L_1$ なる要素 s が存在する。即ち、 $s_1 \in R(s)$ 、 $s_1 \notin L_1$ なる s_1 が存在し、要素 s は $R(s) \cap A(s) = R(s)$ を満たすので $s_1 \in A(s)$ である。従って、 $s \rightarrow s_1 \rightarrow s$ なるサイクルが存在する。

ステップ (3) の条件に該当する場合、(2.4) 式を満たす要素 s は $l = 1$ であるので要素 s を出発点とする関連を必ず有し、しかも、第 $(l + 1)$ レベル以下の要素に向う関連のみである。そのような第 $(l + 1)$ レベル以下の要素の 1 つを s_1 とする。一方、要素 s は (2.4) 式を満たすので $s_1 \in A(s)$ である。従って、 $s \rightarrow s_1 \rightarrow s$ なるサイクルが存在する。(Q E D)

ステップ 3 で第 l レベルの要素が見い出せない場合には、サイクルが存在することが示された。なおステップ 3 (2) の条件は、第 1 レベルの要素からフィードバック枝が出ないようにするためのものである。また、ステップ 3 (3) の条件は、ステップ 3 (2) の条件で第 1 レベルに選ばれなかった要素が途中で止まるのを防ぐためのものである。

次に、サイクルがある場合でも必ずステップ 7 で第 l レベルの要素が見い出せることを示す。

[定理 2] ステップ 7 で必ず第 l レベルの要素が見い出せる。

(証明) もし、 k を十分に大きくしても (2.6) 式を満足する要素が発見できないとすると、定理 1 の証明に示した (2.7) 式の有向パス P が存在することになる。しかし、要素関連行列 M をブール演算により k 乗することにより、 M^k は k が十分大きくなったとき、可到達行列になる。可到達行列に対する可到達集合 $\widetilde{R}(s)$ 、先行集合 $\widetilde{A}(s)$ においては、サイクル内の要素はすべて互いにそれぞれの $\widetilde{R}(s)$ および $\widetilde{A}(s)$ に含まれ、従って、 $\widetilde{R}(s) \cap \widetilde{A}(s)$ にも含まれる。故に、有向パス P 内にはサイクルは存在しない。一方、システムの要素数は有限であるので、(2.7) 式のような有向パスは存在しない。従って、必ず次式を満足する要素 s が存在する。

$$\widetilde{R}(s) = \widetilde{R}(s) \cap \widetilde{A}(s) \quad (2.8)$$

(2.8) 式より、 $\widetilde{R}(s) \subseteq \widetilde{A}(s)$ であり、また、可到達行列の性質より明らかに $R(s) \subseteq \widetilde{R}(s)$ である。従って、 $R(s) \subseteq \widetilde{A}(s)$ であるので、(2.8) 式を満足する要素 s は、 k が十分に大きいとき (2.7) 式を満足する。

この要素 s の可到達集合 $R(s)$ の要素の任意の 1 つを s_1 とすると、可到達行列の性質より明らかに $s_1 \in L_l$ である。故に、要素 s はステップ 7 (2) の条件に抵触せず第 l レベ

ルの要素となる。(Q E D)

なお、ステップ 5 で第 l レベルの要素が見い出せない場合は、第 2.4 図に示すような場合である。すなわち、サイクルを構成している要素が、上位レベルの要素とは独立に存在し、しかも、サイクルの外にある要素が、上位レベルの要素とサイクル内の要素の両方に関連を持っている場合である。

また、ステップ 7 (2) の処理はステップ 3 (2) の処理と同様に、上位レベルの要素と関連を持たない第 l レベルの要素からフィードバック枝が出ないようにするものである。

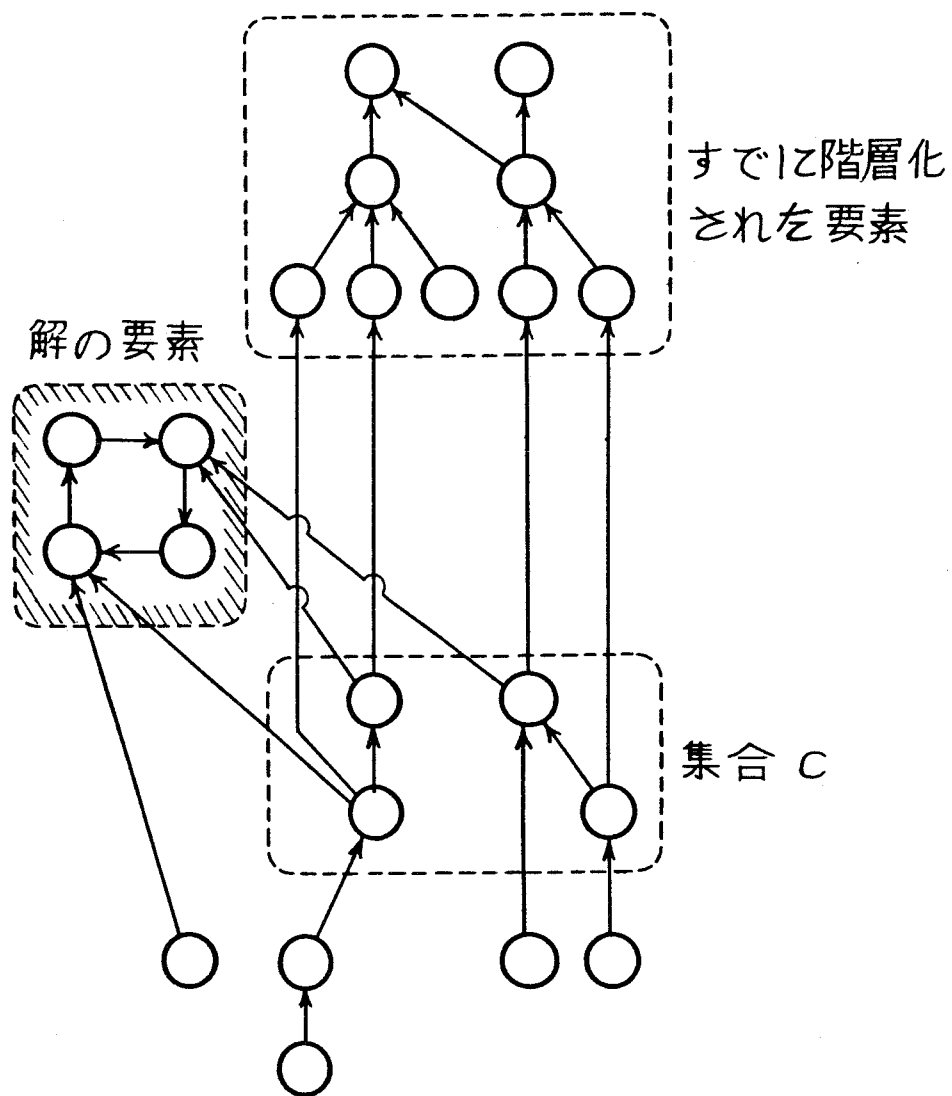
2.3.3 候補集合の意味とフィードバック枝の最少性

サイクルが存在する場合、本アルゴリズムでは、サイクルを構成する要素が上位レベルの要素と独立に存在する第 2.4 図のような場合と、第 1 レベルにサイクルが存在する場合を除き、候補集合内に第 l レベルの要素を見つける。これにより、サイクル内のどの要素をサイクル内の最上位レベルの要素とするかを決め、その要素から出ているサイクル中の枝をフィードバック枝とし、サイクル内の要素のレベルづけを行なっている。もし、候補集合を考えないと、サイクル中の全要素が同一レベルになる場合があり、フィードバック枝付きの階層構造を得ることはできない。

同一のサイクル内の 2 つ以上の要素が候補集合に含まれている場合には、その全部が第 l レベルの要素となり、フィードバック枝の数が増えることがある。最少フィードバック枝を与えない場合の例を第 2.5 図に示す。この例の場合、ステップ 5 で要素 a, d の 2 つが候補集合に含まれ、第 2.5 図(b)に示すようにその両方の要素が第 2 レベルの要素となり、フィードバック枝が 2 本生じている。第 2.5 図(c)は最少フィードバック枝となる階層構造図の例であり、この場合フィードバック枝は 1 本である。

このように、H S A は最少フィードバック枝となる階層構造を与えない場合もあるが、H S A では上位レベルの要素に直接関連を持つサイクル中の要素をサイクル中の最上位レベルの要素とすることにより、サイクルを含むシステムの構造を理解しやすくすることを
脚注)
目的としており、必ずしも最少フィードバック枝の構造とする必要はないと考える。

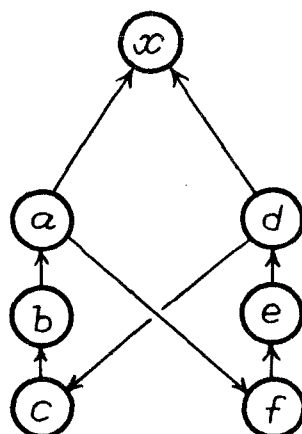
脚注) たとえば、第 2.5 図(c)のような階層構造図を与えられた場合には、要素 a から要素 f に至る関連のみが強調され、構造上同じ意義を持つ要素 d から要素 c に至る関連が、他の関連の中に埋れてしまう欠点がある。第 4 章で示すようにフィードバック枝の出発する要素は特別な意味を持っていることがあり、このような場合には、第 2.5 図(b)のような階層化が良いと考えられる。



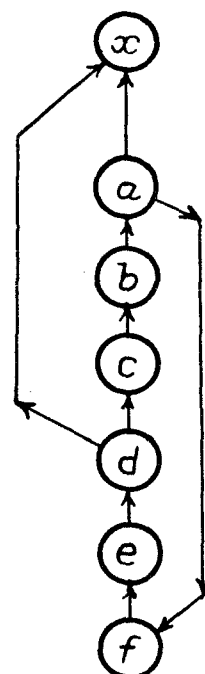
第 2.4 図 候補集合 C 内に第 ℓ レベル要素が存在しないシステムの例

	x	a	b	c	d	e	f
x							
a	1						1
b		1					
c			1				
d	1			1			
e					1		
f						1	

(a) 要素関連行列



(b) HSA による
階層構造図



(c) 最小フィードバック
となる階層構造
図の例

第 2 5 図 最少フィードバック枝とならない階層化の例

2.3.4 適用例とISMによる階層結果との比較

階層化アルゴリズムの適用例を簡単な例で説明する。第2.6図はサイクルを含む要素数10のシステム要素関連行列である。このシステムの第1レベルの $R(s)$ 、 $A(s)$ および $R(s) \cap A(s)$ は、第2.1表に示すようになり、(2.4)式を満足するものとして、要素aが第1レベルの要素となる。同様に、第2レベルの要素として、要素bが選択される。ところが、第3レベルの $R(s)$ 、 $A(s)$ および $R(s) \cap A(s)$ は、第2.2表に示すようになり、(2.4)式を満足する要素はなくなる。そこで、ステップ4、5の手順により第3レベルの要素を見出す。 $C = \{c\}$ である。 $k=2$ の時、 $A^2(c) = \{c, d, e, f, h, i\}$ となり、 $R(c) \cap A^2(c) = \{c, f\}$ で $R(c)$ と等しくなる。従って、要素cが第3レベルの要素として選択される。以下、第4レベルの要素にd、g、第5レベルの要素にe、h、i、第6レベルの要素にf、jが、それぞれ選択される。この結果を階層構造図に表わしたものが、第2.7図(a)である。参考のため、同一システムのISMの階層化アルゴリズムによる階層構造図を、第2.7図(b)に示す。第2.7図より分かるように、ISMの階層化アルゴリズムでは同一レベルにかたまってしまうサイクルを持ったシステムでも、HSAではフィードバック枝付きの階層構造図を得ることができる。このため、サイクルの内および外部との関連が1枚の構造図上で分析できる。この意味で、HSAの階層化アルゴリズムの方が、ISMのそれよりも優れていると言える。

2.4 HSAの適用範囲

HSAは、(1)大規模、複雑システムのモデル構造の決定^{12,13)}、(2)目的樹木の作成^{14,15)}、(3)シーケンスの整理¹⁶⁾、(4)システムプログラム外部機能の階層表現¹⁷⁾、(5)Fault Treeの作成^{18,19)}、等に使われている。以下、特にサイクリックな関連を取り扱う応用について概要を述べる。

(1) モデル構造の決定

大規模なシステムのモデル構造の決定において、要素間の個々の関連（関数関係、因果関係等）は把握できても、全体のつながりを他人に構解しやすい形で表示することは難しい。また、大きくかつ複雑なサイクリックな関連を持つことも多い。一方、全体のつながりを図示することは、モデルの構造レベルのコンセンサスを得る上に非常に有効である⁴⁾。第2.8図は、あるシステムの設計変数を、その決定の順序関係により、HSAを用いて階層化した例である。丸印内の2文字のIDは設計変数を示し、2重線はフィードバック枝を示している。この例では、合計7本のサイクリックな関

連を持っており、ISMの階層化アルゴリズムを用いると、ほとんどすべての要素が同一レベルに階層化され、構造がほとんど理解されなくなる典型的な例である。また、中量軌道輸送システムの計画評価モデルの構造図作成の場合では、92の要素を関数関係により構造化した。この場合、7本のフィードバック枝を含む19レベルの階層構造図が得られた。

(2) 目的樹木の作成^{14,15)}

目的樹木の作成において、全要素をもれなく検討するためには、要素関連行列を作成しHSAを用いて階層化するのが有効である。第29図は、そのようにして得られた階層構造図の一部である。目的樹木の作成の初期においては、第4章でくわしく述べるように、表現のあいまいさ、誤判断等のため、この図に示すようにサイクルが生じることが多い。このような場合、サイクル内の要素、関連を重点的に検討することにより、目的樹木を効率的に作成していくことが可能である。

2.5 結 言

本章では、全体構造が未知で、要素間の断片的な関連しか理解されていないシステムに対し、断片的な関連のみから全体構造を生成する階層的構造化アルゴリズムHSAを提案した。HSAのアルゴリズムが必ず解を持つことを証明した。HSAは、種々の要因により生じるサイクリックな関連をフィードバック枝で表現するように階層化できる。これにより、システムの大部分の要素を含むサイクルが存在する場合でも、理解し易い階層的構造を与えることができることを、例証した。HSAの代表的な適用例に関し、簡単に説明した。なお、代表的適用例である目的樹木の作成に関しては、本論文の第4章でくわしく扱う。また、HSAを実システムに適用するためには、階層化のあと構造図の理解の容易化および見直しにより生ずる修正作業の効率化のため、階層構造図の作図機能を付加する必要がある。このようなインタラクティブな使用のため計算機対話型システムが必要である。この計算機対話型システムについては、本論文の次章で述べる。^{7, 19, 20)}

本章では、サイクルのある場合の階層構造化ということで、関連に方向性がある場合について述べたが、システム構造化技術の対象となるシステムでは、関連の方向すら分からずただ関連の有無しか分からないようなシステムから、関連の方向はもちろんその強さまで分かるシステムまで、関連の理解の明白さのレベルは巾広くある。最後にこれらの関連の明白さのレベルに対応した構造化技術については付言して置きたい。要素間の無方向関

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>
<i>a</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>b</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>c</i>	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
<i>d</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
<i>e</i>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>f</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-
<i>g</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
<i>h</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>i</i>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>j</i>	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-

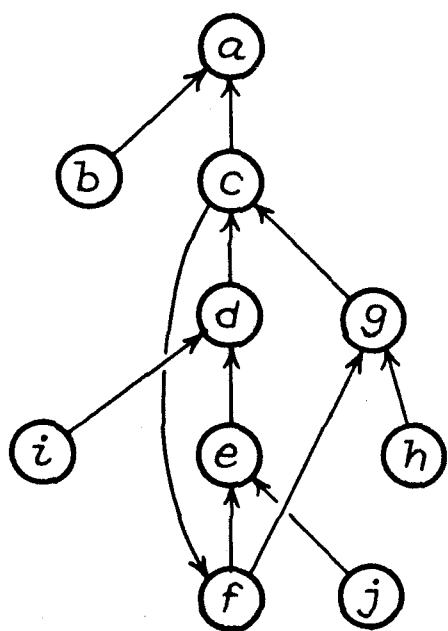
第 2.6 図 要素 関 連 行 列

第 2 1 表 第 1 レベルの隣接可到達集合および隣接先行集合

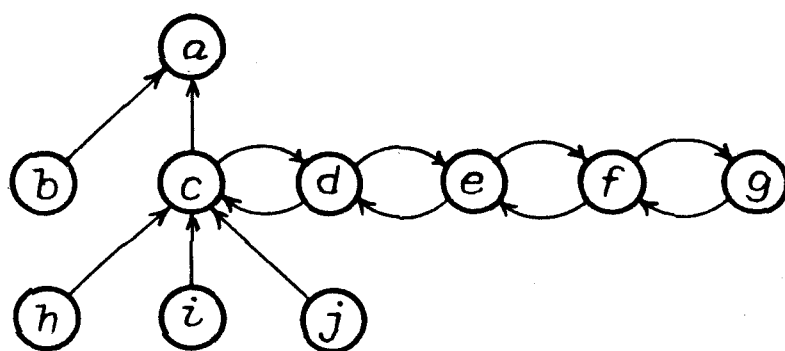
要素 s	$R(s)$	$A(s)$	$R(s) \cap A(s)$
①	a	a	a
b	a, b	b	b
c	a, c, f	c, d, g	c
d	c, d	d, e, i	d
e	d, e	e, f, j	e
f	e, f, g	c, f	f
g	c, g	f, g, h	g
h	g, h	h	h
i	d, i	i	i
j	e, j	j	j

第 2 2 表 第 3 レベルの隣接可到達集合および隣接先行集合

要素 s	$R(s)$	$A(s)$	$A^2(s)$	$R(s) \cap A^2(s)$
③	c, f	c, d, g	c, d, e, f, g, h, i	c, f
d	c, d	d, e, i	d, e, f, i, j	d
e	d, e	e, f, j	c, e, f, j	e
f	e, f, g	c, f	c, d, g, f	f
④	c, g	f, g, h	c, f, g, h	c, g
h	g, h	h	h	h
i	d, i	i	i	i
j	e, j	j	j	j

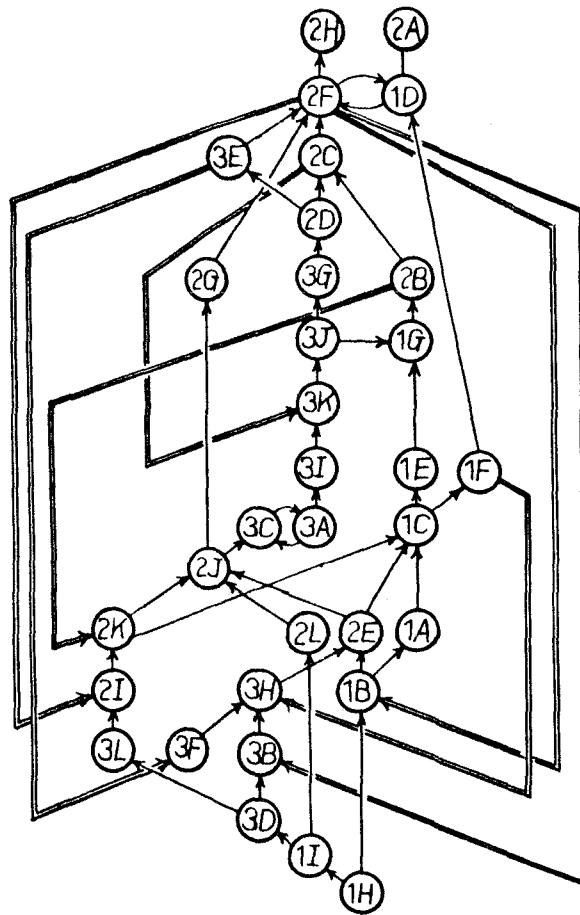


(a) HSA による階層構造化

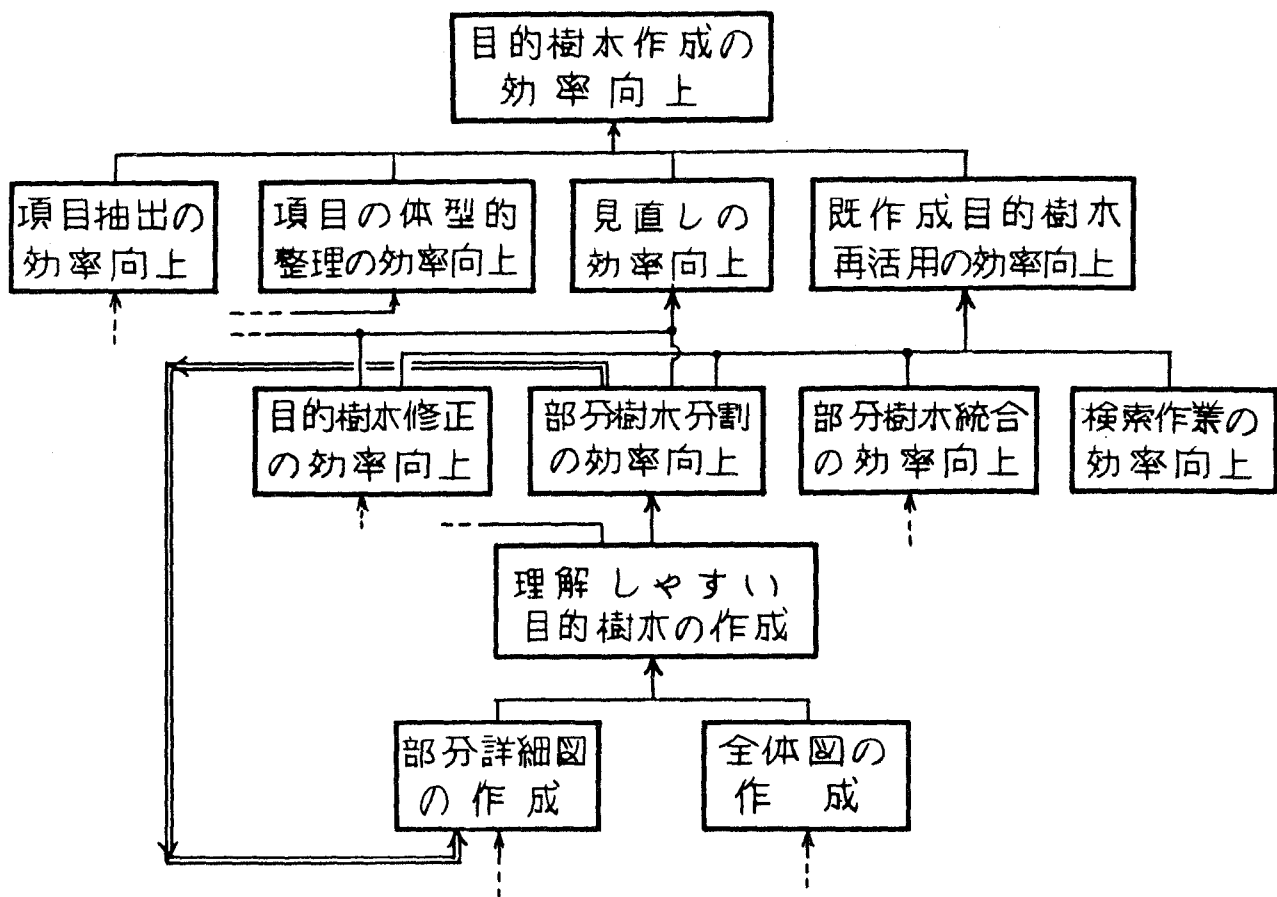


(b) ISM による階層構造化

第 2.7 図 HSA および ISM の階層化アルゴリズムによる階層構造図の比較



第 2.8 図 設計変数の決定順序による階層構造図
(要素数 33)



第 2 9 図 ある目的樹木作成初期の階層構造図の例

連の有無のみが知られている問題に関係した技術に、²¹⁾ C.L.OwenによるDCMPOSがある。DCMPOSは、指定された値以上の結合関係を持つほとんど総てのクラスタを摘出し、大きいクラスタ、あるいは小さいクラスタから順々に元のシステムを再構成していく方法である。春名博士と筆者は、DCMPOSのクラスタ摘出機能と、対象の骨格部分を切り出す方法を組み合わせることにより、複雑なグラフを取り扱えるアルゴリズムSSA(^{22,23,24)} Structural Sensitivity Analysis)を開発している。このSSAについては、次章で簡単に紹介する。一方、対象が良く理解され、関連の強さまで分かっている場合については、²⁵⁾ 戸田氏らによる研究がある。

以上のように、構造化技術が使用される状況は種々あり、それぞれに対応して新しい構造化技術が提案されているのが現状であり、それらを整理、統合して行くことが望まれる。

第 2 章 の 参 考 文 献

- (1) 第 1 章の参考文献(2)
- (2) 第 1 章の参考文献(3)
- (3) 第 1 章の参考文献(4)
- (4) 第 1 章の参考文献(5)
- (5) 第 1 章の参考文献(15)
- (6) 第 1 章の参考文献(16)
- (7) 第 1 章の参考文献(17)
- (8) R.H.Watson ; Interpretive Structural Modeling — A Useful Tool
for Technology Assesement ? , Technological Forecasting and Social
Change , Vol. 11 , pp 165—185 (1978)
- (9) A.Lempel ; Minimum Feedback Arc and Vertex Sets of a Directed
Graph, IEEE trans. on CT, Vol. CT-13 , No 4 pp399—403(1966)
- (10) 築山 他 ; 有向グラフのすべてのサイクルを求めるための一方法,
電子通信学会論文誌 A , Vol. 58-A , No 4 , pp196—203(昭和50年)
- (11) 春名, 薦田 ; 2 値マトリックスを有向グラフに変換する一方法, 昭和50年
電気学会全国大会予講集, No 1412
- (12) S.Miyamoto, et al ; STEPS—A Planning and Designing Support
System for Urban Transit System, Proceedings of the 4th Interna-
tional Congress Cybernetics and Society , (1978)
- (13) 矢島, 薦田 他 ; プラント設計項目の構造化によるプラント分割の一手法,
第20回自動制御連合講演会予講集, No 3019 (昭和52年)
- (14) 第 1 章の参考文献(25)
- (15) 第 1 章の参考文献(26)
- (16) 佐々木 他 ; 大規模複雑プラントの事故の初期事象のリストアップに対する形態学
的接近, 昭和53年電気学会東京支部大会予講集, No 96
- (17) 田代, 春名 ; システムプログラム機能の階層表現法, 昭和55年度情報処理学会第
21回全国大会予講集, No 5D-1

- (18) 北嶋，薦田 他； システム構造化・汎用支援ツール（ストラクチャベース・システム）の提案，昭和56年電気学会全国大会予講集，No 1 3 4 9
- (19) 第1章の参考文献(21)
- (20) 第1章の参考文献(22)
- (21) C.L.Owen；“DCMPOS：” An Algorithm for Decomposition of Nondirected Graphs” in “Emerging Methodology in Environmental Design and Planning” edited by G.T.Moore，MIT Press （1970）
- (22) 第1章の参考文献(18)
- (23) 第1章の参考文献(19)
- (24) 第1章の参考文献(20)
- (25) 戸田 他；多値関係データに基づくシステムの階層化と見易いグラフ表示法，昭和55年電気学会全国大会予講集，No 1 2 7 7

第3章 システム構造分析システム－PPDSシステム

第3章 システム構造分析システム—P P D S システム

3.1 緒 言

計算機を用いたシステム構造化においては、対象システムの全体イメージを断片的な情報を総合することにより得ようとするほか、構造化作業の過程を通じ関係者の間に対象システムに対する共通の認識を得ることを、目的としていると考えられる。このため、システム分析者および関係者は、構造化アルゴリズムにより計算された結果を見て、構造の見直し、修正を行ない、再び計算機に入力するという繰り返し作業が行なわれる。従って、構造化作業の効率的支援のためには、構造化アルゴリズムだけでなく、計算結果の理解しやすい表示機能、容易なデータ入力、修正機能等のシステム分析者と計算機のインタフェース部分のサポートを充実させることが重要となる。

I S M を構造化アルゴリズムとして備えた対話型システムが報告されているが、この種の支援システムでは核となる構造化アルゴリズムが異なれば、その支援機能も異なってくる。前章で提案した H S A と、筆者が共同開発した S S A (Structural Sensitivity Analysis) の 2 つの構造化アルゴリズムの効率的使用のためには、それらに適した支援システムの開発が必要である。本章では、上記の目的で開発したオンライン対話型システム P P D S システム (Planning Procedure to Develop Systems) について述べる。

システム構造化支援システムの開発における課題は、各構造化アルゴリズムの使われ方を考慮し、どのような機能を持たすべきかを決定することと、どの程度の大きさの対象を扱えるようにするかを決めること、である。必要な機能を大別すると、データの入力および修正機能、計算結果の理解しやすい表示機能、対象システムのデータ管理機能、の 3 つになる。この内、データの入力、修正機能については、要素の追加、削除、関連の追加、削除、といったものが容易に考えられ、操作性の良いものをどう具体化するかが主たる問題となる。また、データ管理機能についても、必要なデータが任意に取り出されれば十分であり、あまり機能レベルの検討は必要でない。一方、表示機能については、結果を理解しやすく提示するため、種々の工風が必要である。端末の 1 画面に入りきらない行列、構造図等大量のデータの表示方法、会議等の多人数での構造分析時における表示方法、等を、以下の節で述べる。さらに、使用経験から決定したシステムの各種仕様を示す。

まず、次節で核となる 2 つの構造化アルゴリズムの概要を紹介し、その入出力データを明らかにする。次に、開発した P P D S システムの構成を示し、表示、修正、データ管理

機能等について、どのように実現したかを述べる。次に、対話型支援システムの効果をまとめ、最後に、応用例を述べる。

3.2 構造化アルゴリズム

P P D S システムに組み込まれている構造化アルゴリズムは、方向性のある関連をもとに階層的構造を得る H S A と、方向性のない関連をもとに要素をいくつかのサブグループにまとめる S S A の 2 つである。以下、簡単に 2 つのアルゴリズムの概要を示す。

3.2.1 H S A (Hierarchical Structural Analysis)^{脚注)}

H S A は方向性のある関連をもとに階層的構造を得るアルゴリズムで、次の 3 つのサブプログラムから構成されている。第 1 のものは、要素関連行列をもとに要素をレベルに分割するもので、I S M の階層化アルゴリズムを大きいサイクルを含むシステムにも適用できるように改良したものである。^{3,4)} 第 2 のものは、階層構造図における同一レベル内の要素配置を、関連を示す線の長さの 2 乗の和が最少となるように決めるものである。最後は、得られた要素の構造図中の位置をもとに、関連線が重複しないよう配線するプログラムである。

階層化アルゴリズムの詳細は第 2 章に述べているので、ここでは説明を略す。第 2 の項目配置アルゴリズムの概要は次のようである。まず、第 1 レベルの要素の配置を、下位でできるだけ関連が入り組まないように決める。このため、共通の下位要素を持つ要素が互いに近くに配置されるようにする。第 1 レベルの要素 s_i に対する要素関連行列の列ベクトルを h_i とする。要素間の距離を、共通に関連を持つ要素の数で定義すると、要素 $s_i s_j$ 間の距離は次式で表現される。

$$V_{ij} = \sum_{k=1}^N h_i^k h_j^k \quad (3.1)$$

ただし、 N はシステムの要素数である。この式で定義される距離を用いて、簡易クラスタリング法である Shortest Spanning Method¹¹⁾ により順序付けを行う。第 2 レベル以下

脚注) 本章では、H S A という言葉を、第 2 章で述べた階層構造化アルゴリズムに、項目の配置、関連線の配線の各アルゴリズムを付け加えた、階層構造図出力のためのアルゴリズム全体の総称として用いている。

の要素に関しては、上位のレベルの要素への関連線の長さが短くなるよう配置を決める。今、第 $(l-1)$ レベルより上位の要素の配置が決まっているとする。配置を決定しようとする第 l レベルの要素 s_i の横座標を x_i とする。また、要素 s_i と関連を持つ第 $(l-1)$ レベルより上位の要素 s_j の横座標を x_j とする。要素 s_i に関する関連線の長さの2乗和は、次式で表わされる。なお、 $\sum_j$ は、要素 s_i に関連を持つ要素すべてについて加え合わせることを示す。

$$D_i = \sum_j (x_i - x_j)^2 \quad (3.2)$$

これを最少とする x_i は、要素 s_i に関連を持つ要素数を n_i として、次式で決められる。

$$x_i = \frac{1}{n_i} \sum_j x_j \quad (3.3)$$

第1レベルを除くすべてのレベルの要素が、この方法により配置される。

第3.2図は、第3.1図の要素関連行列で示されるシステムについて、上述のアルゴリズムを適用して得られる階層構造図である。

HSAの入力は、要素関連行列であり、出力は階層構造図である。階層構造図は、端末の1画面で表示可能な範囲を越える大きくなり、HSAサポートシステムにおいてはこの表示方法が問題となる。また、大きい行列についても、同様の表示上の工風を必要とする。

3.2.2 SSA (Structural Sensitivity Analysis)^{6,7,8)}

SSAは、指定された結合割合(CR: Connection Ratio)以上の結合割合を持つサブ集合を、C.Owenの提案によるDCMPOS¹²⁾により全体の要素の集合の中から選び出し、次に、数量化3類の手法¹³⁾により要素および編成されたサブ集合を互いに似たものが隣りどうしに来るように配置決めし、要素vsサブ集合行列を出力するものである。ここで、ある要素の結合割合(CR)とは、次式で定義される値である。(第3.3図参照)

$$CR = \frac{(\text{結合関係を有している要素数})}{(\text{集合に含まれる要素数}) - 1} \quad (3.4)$$

第3.5図は第3.4図の要素関連行列で示されるシステムの、要素vsサブ集合行列である。ここで、システム分析者は、要素の持つ意味、要素の含まれるサブ集合数、サブ集合に含まれる要素数等を参照して、構造を把む上で最も重要なサブ集合を選択する。このサブ集

合を「横断的サブ集合」と呼び、その要素を「中心的要素」と呼ぶ。第3.4図に示したシステムの場合、第4番目のサブ集合が、要素の含まれているサブ集合数の多い要素（K，G，A）を共通に含む集合という見方より選択される。次に、横断的サブ集合の要素を元の要素関連行列より取り除いたシステムの残りの要素について、再びSSAアルゴリズムを適用し、上述の作業を繰り返す。いくつかの横断的サブ集合が選択され、残りの要素の関連がバラバラになった時点で分析を終了する。

SSAを用いたシステム構造分析手順を、第3.6図に示す。2重枠で囲んだ部分が計算機による作業の部分である。SSAを支援するサポートシステムに必要な機能として第1に、HSAと同様に大規模な行列の見やすい表示機能があげられる。特に、要素vsサブ集合行列の表示においては、100を越える要素あるいはサブ集合の中から、横断的サブ集合がどの要素を含むか、あるいは、ある要素がどのサブ集合に含まれるか、といったことを誤まりなく、迅速に把握できる必要がある。また、SSAの使用においては、横断的サブ集合の要素を元の要素関連行列から順次取り除き、SSAアルゴリズムを実行するため、横断的サブ集合を指定すると、自動的に上記の行列処理を行なう機能も必要である。

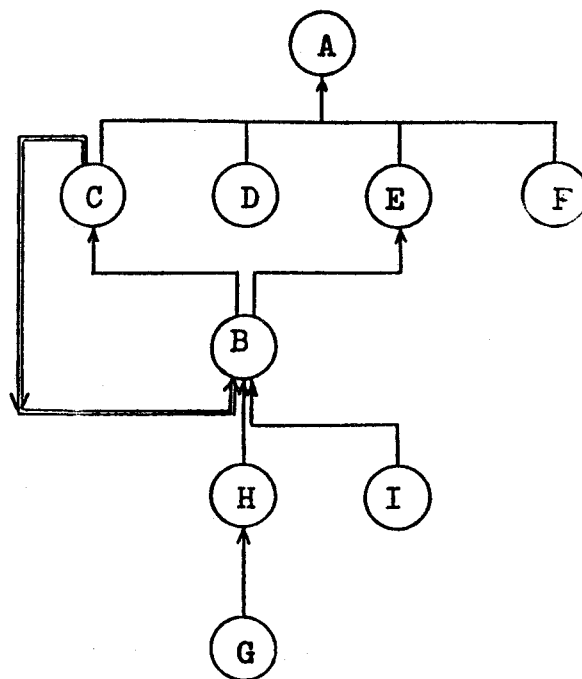
3.3 PPD Sシステムの機能

- (1) データ入力、修正機能 脚注)
PPD Sシステムへのデータ入力は、H9415 VDT^{脚注)}のキーボードより行なえるほか、中央側のカードリーダーより一括して入力できる。また、端末のキーボードより、入力要素関連行列の関連の修正、要素の追加、削除、統合、分割が行なえる。
- (2) 行列の表示機能
構造化においては、行列表示が多く用いられる。大規模な対象の場合には、CRT画面の大きさの制約より行列を1枚の画面で表示できないので、行列を分割して表示する必要がある。本システムでは、表示する行列の範囲の指定を行なえるようにするほか、オペレーションの簡単化のため、特に指定がない場合には、表示する行列の範囲が自動的に移動するようにしている。また、行列における特定の行および列を見やすくするため、行あるいは列の強調表示が行なえる。列については、対応する列の要素の「×」表示が「*」表示に変化し、行については、行全体を高輝度表示する。

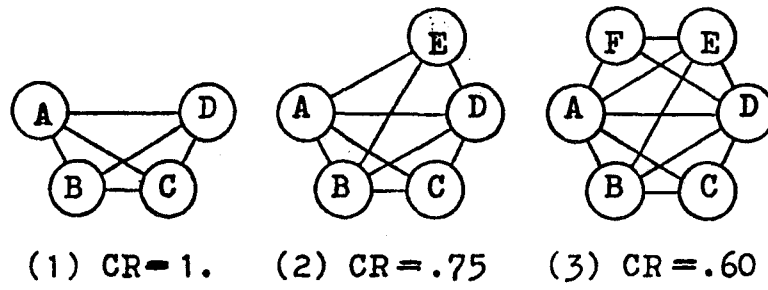
脚注) H9415 VDT (Video Data Terminal) : 80文字/行, 24行/画面
のキャラクタディスプレイを持つ端末の名称。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	1	.	.	.	.	.	.	.	.
B	1	1	1	.	1	.	.	.	.
C	1	1	1	.	.	.	.	.	.
D	1	.	.	1	.	.	.	.	.
E	1	.	.	.	1	.	.	.	.
F	1	.	.	.	.	1	.	.	.
G	.	1	.	.	1	.	1	1	.
H	1	1	.	.	.	.	.	1	.
I	1	1	.	.	1	.	.	.	1

第 3. 1 図 システムの要素関連行列



第 3. 2 図 第 3. 1 図の要素関連行列に対する階層的構造図



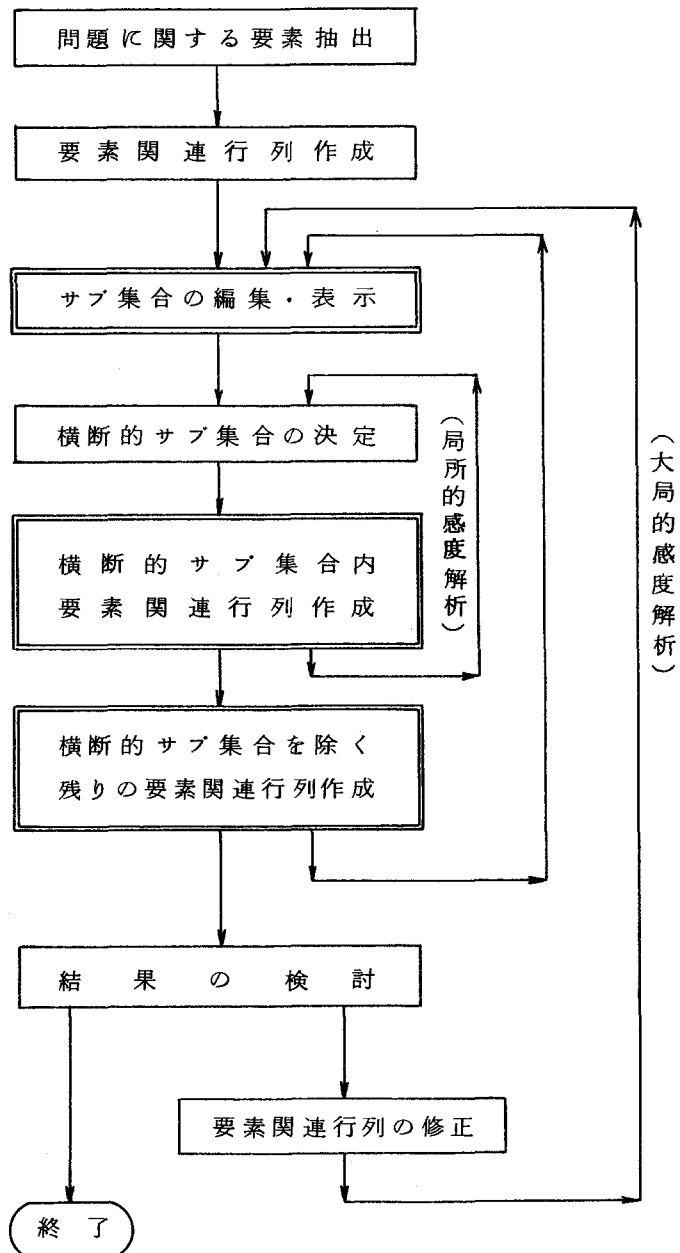
第 3.3 図 結合割合 (CR)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	.	.	1	.	1	.	1	1	.	.	.	1	.	.
B	.	.	1	.	.	.	.	1	1	.	1	.	1	.
C	.	.	.	.	1	.	.	1	1	.	.	.	.	.
D	.	.	.	.	1	1	1	.	1	.	1	.	.	1
E	.	.	.	.	.	1	1	1	.	.	1	.	.	.
F	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	1	.
G	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	1	1	.
H	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.
I	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
J	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.
K	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1
L	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
M	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
N	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

第 3.4 図 システムの要素関連行列

element	N	D	K	M	J	F	L	G	E	A	C	H	B	I
1	*	*	*	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2	.	.	.	*	.	*	.	*	.	.	.	.	.	.
3	.	.	*	.	*	.	*	*	.	.	.	.	.	.
4	.	*	*	.	.	*	.	*	*	.	.	.	.	.
5	.	.	.	.	.	.	*	*	*	*	.	.	.	.
6	.	.	.	.	.	.	.	*	*	*	*	.	.	.
7	.	.	.	.	.	.	.	.	*	*	*	*	.	.
8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	*	*	*	*

第 3.5 図 第 3.4 図の要素関連行列に対する要素 VS サブ集合行列
(CR = 1.0)



第3.6図 SSAによるシステム構造分析の手順

(3) 階層構造図の表示機能 キャラクタディスプレイでは、大きさ、機能とも限界があるので、CRT画面上に階層構造図における要素配置と関連を表示し黒板上に階層構造図をカードを用いて作成する方法と、プリンタ出力した構造図をはり合わせて一枚の階層構造図を作成する方法の2通りの方法で実現している。第3.7図に、階層構造図のプリンタ出力による作成の例を示す。"ー"および"! "がフィードフォワード枝，"="，"V"がフィードバック枝を示している。黒板を用いる場合には、CRT画面上に表示された階層構造図における要素配置をもとに、黒板上に要素の内容を書き込んだカードを入れたカードホルダを配置することにより、階層構造図を作成する。黒板上の階層構造図は、会議等の多人数でのシステム構造分析に有効である。また、階層構造図上での要素の配置の修正は、端末よりシステムに入力でき、修正された構造図あるいは配置図はプリンタに出力される。

(4) データ管理機能 構造化作業は多くの場合、複数回にわたり実施される。このため、前回までに分析した結果を何らかの形で保管しておくためのデータ管理機能が必要である。記憶すべきデータとしては、入力要素関連行列等の入力データ、階層化要素関連行列、横断的サブ集合関連行列等の分析結果、がある。各データは対象システムごとに、6文字のインデックスを用いて、ファイルに登録、検索される。

3.4 PPD Sシステムの構成と仕様

PPD Sシステムの概念図を第3.8図に示す。PPD Sシステムは、VOS2^{脚注)}のもとで動作し、オンラインサポートのためTMS-3V^{脚注)}を用いている。本システムを実行するためには、512Kバイト以上のパーティションサイズが必要である。その内、200Kバイト程度をTMS-3Vが使用している。アプリケーションソフトウェアは、H9415 VDTの画面入出力、構造分析アルゴリズム、プリンタへの出力、カード入力、ファイルI/O等の機能単位に、およそ80のモジュールに分けられている。それらは、「LINKER」

脚注) VOS2 (Virtual - Storage Operating System 2) : HITAC Mシリーズの中央演算装置のためのオペレーティングシステム。

TMS-3V (Transaction Management System - 3V) : VOS2の下で動作するオンライン実時間システムのサポートプログラム。通信制御、プログラム管理、障害対策等を行なう。

と呼ばれる制御モジュールにより管理される構造となっている。LINKERは、H9415VDTよりの受信データ中のインタラプトコード（送信に用いたキーのコード）と、LINKER内に記憶されている出力画面コードの組み合わせにより、コールするアプリケーションプログラムを決定している。この組み合わせ表を修正することにより、新しいアルゴリズムや機能を付け加えることが容易に行なえる。なお、システムで表示できる画面の種類は20種類、ドットプリンタまたはラインプリンタに印字できるデータの種類は10種類である。

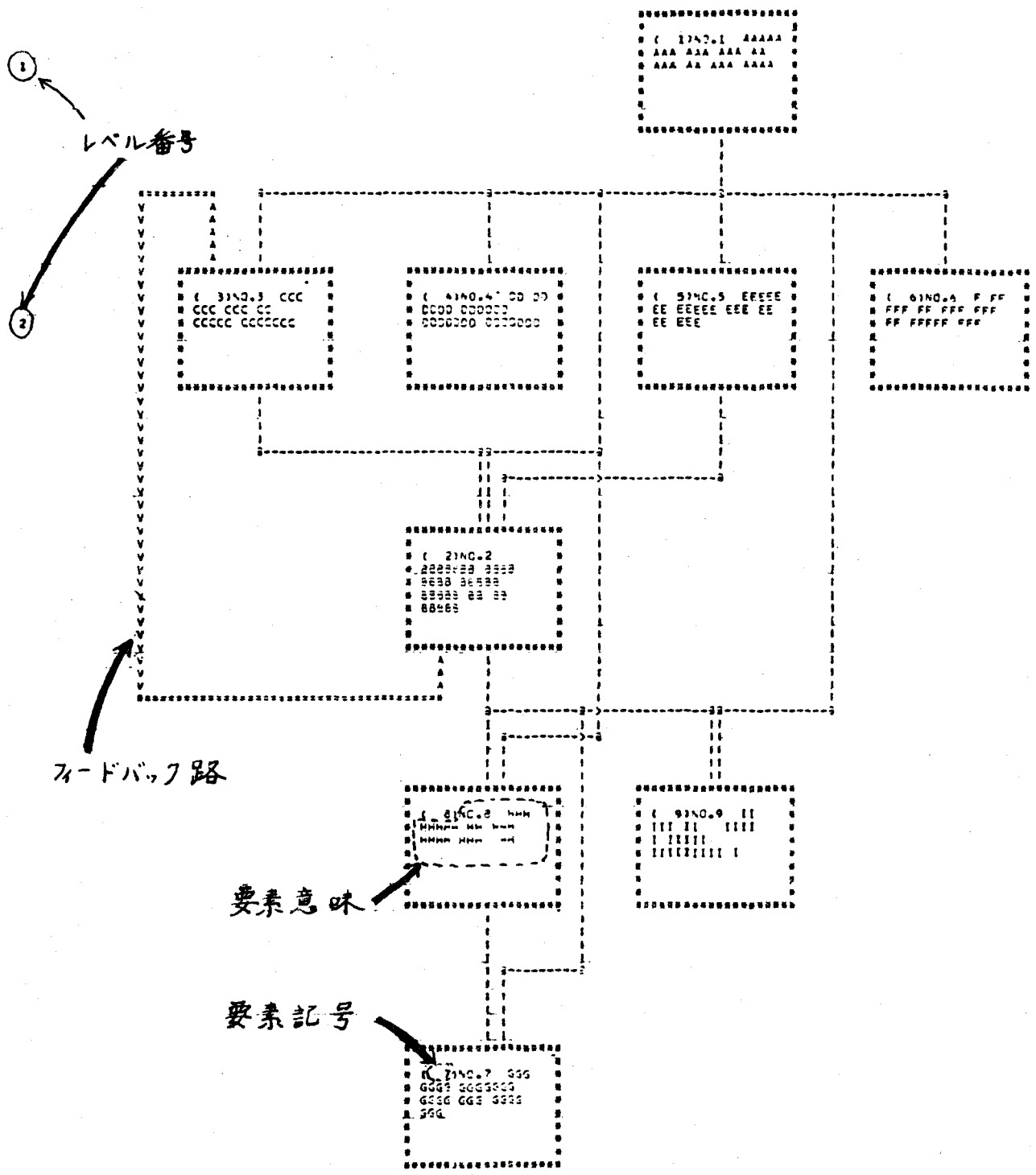
PPDSシステムは、2シリンダ（38ブロック：456Kバイト）のユーザファイルをワークエリアとして使用している。そのほか、最大73シリンダ（1386ブロック：約17Mバイト）のユーザファイルをユーザのデータ記憶用エリアとして、サポートすることができる。SSAの分析データの場合、18ブロック／データ、HSAの分析データの場合、33ブロック／データの記憶容量を必要とする。ファイル記憶データには、6文字のデータ名称が付けられ、データの登録、検索のキーとして使用される。

過去数年のSSA、HSAの応用実験を参照し、PPDSシステムの諸仕様を第3.1表に示すように決定した。なお、対象システムの最大要素数120は主として、プログラムのエリアの制約より決定されており、システムのモデル構造を決定するためにHSAを利用する場合や、目的樹木の展開にHSAを利用する場合等においては、要素数がこの制限を越えることがある。この場合には、HSA使用の前に、構造上単純な要素を除いたり、システムをいくつかに分割したりして、対処している。また、要素意味の長さ50文字については、従来のSSA、HSAの適用例について、要素意味を、カナの分かち書きをした場合の長さの分布を求め決定した。従来の例では、約95%の要素意味が、この中に納まっている。

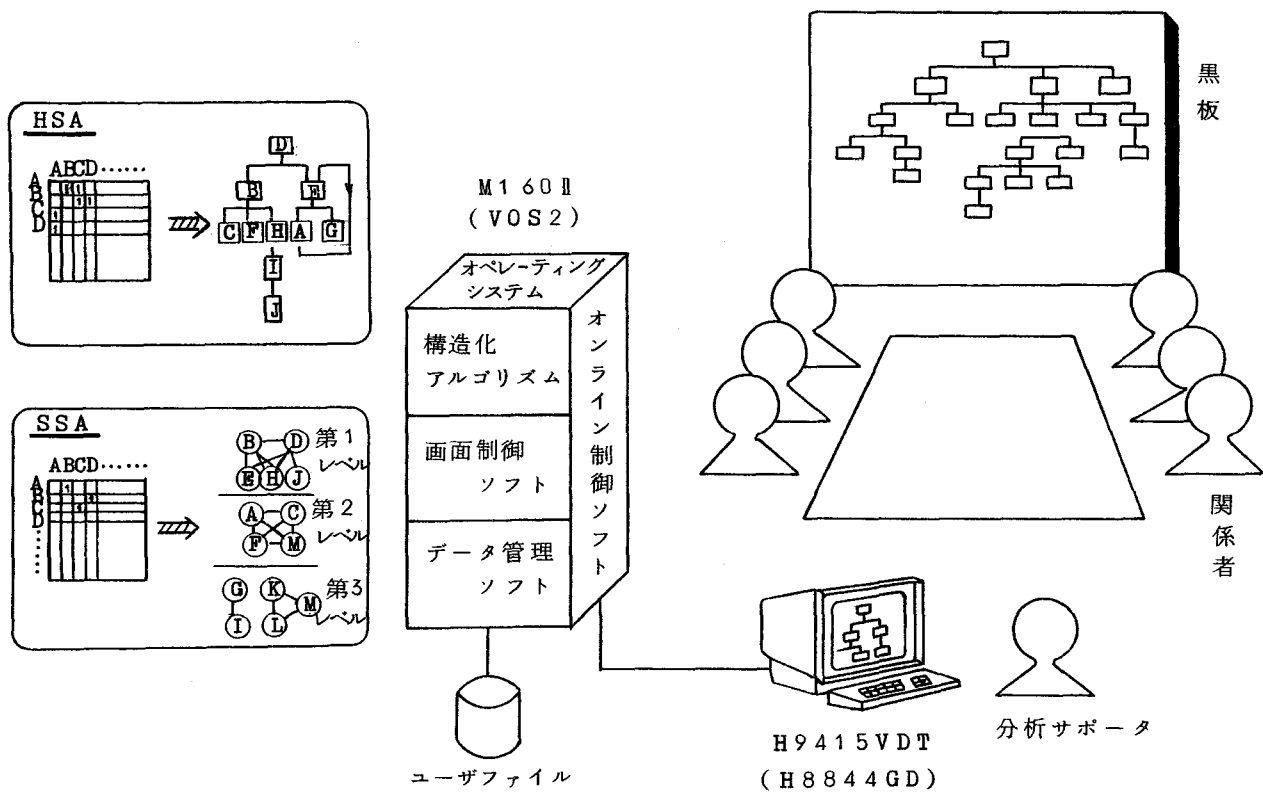
3.5 PPDSシステムの評価

バッチプログラムを用いての構造分析と比較して、PPDSシステムの利用の効果は次のようである。

- (1) 最大の効果は、計算結果を見て要素関連行列を容易に修正、再計算できる点である。これにより、再計算結果を得るまでの時間が短縮されるほか、入力カードを打ち直す手間も除け、修正ミスが減少する。特に、HSA利用の場合では、作図機能と相まって、部分的修正による全体構造の変化を視覚的に把握できるので、試行錯誤的な構造



第 3.7 図 HSA による階層構造図のプリンタ出力例
 (プリンタ用紙 2 枚をはり合せた図を $\frac{1}{4}$ に縮小したもの)



第3.8図 PPDSシステムの概要

第 3.1 表 P P D S システムの主な仕様

項 目	値	備 考
取扱い最大要素数	1 2 0 要素	
要素記号の長さ	3 文字	英数字カナ文字
要素意味の長さ	5 0 文字	英数字カナ文字
最大レベル数	2 4 レベル	H S A
同一レベル内の最大要素数	3 2 要素	H S A
最大サブ集合数	2 7 0 サブ集合	S S A
横断的サブ集合内最大要素数	1 9 要素	S S A
最大横断的サブ集合数	2 0 サブ集合	S S A
ファイル記憶可能最大データ数	4 0 データ	7 3 シリンダ使用時

分析が可能となり、目的樹木作成や事故シーケンスの抽出等項目¹⁶⁾を抽出しながらの構造化作業を大巾に効率的に行なえるようになった。

- (2) カード入力を可能とすることにより、大量の初期データ入力に要する時間を大巾に短縮できる。特に 50 文字の要素意味の入力に関しては、キーボードよりの入力ではカナ入力に時間がかかる。仮に 1 要素当り 30 秒と仮定しても 120 要素で 60 分の時間を要することになり、前もってカードにパンチしてカード入力する効果は大きい。
- (3) S S A に関しては、横断的サブ集合内部の要素関連行列の編集、横断的サブ集合を除いた残りの要素に関する要素関連行列の編集が自動化される。このため、従来分析者が手作業で行なっていたこの作業の時間が大巾に短縮され、多レベルのシステム分析や、種々の立場からの試行錯誤的な横断的サブ集合の選択を行ない結果を比較することも可能となった。
- (4) ユーザファイルをオンラインのファイルキャビネとして利用でき、複数回にわたる作業のサポートが可能となった。また、データ、結果の管理が容易になった。
- (5) H S A の階層構造図における要素配置を変更できるようになり、より見やすい図が得られるようになった。

P P D S システムの問題点としては、次のようなものがあげられる。

- (1) 取り扱い対象システムの要素数の制限 120 を越える対象がある。このような対象については、先に述べたように運用でカバーしている。取り扱える要素数をさらにあげるには、行列データのエリアを大きくすることが必要で、実行できるパーティションサイズを大きくしなければならず望ましくない。また、大きい要素関連行列を埋めることは、作業時間の面で問題がある。
- (2) 階層構造図出力時の応答性が悪い。現在、ドットプリンタに構造図を出力する場合、要素数 60 の階層構造図（ラインプリンタ用紙 9 枚分相当）の出力に約 15 分を要している。この問題については、グラフィックディスプレイの導入により解決していく予定である。なお、S S A、H S A の構造化アルゴリズムの実行を伴う操作における応答時間は要素数 60 程度でおよそ 1 分である。また、上記以外の画面操作における応答時間は数秒である。

3.6 応用例

P P D S の代表的な応用分野は、次のようである。

(1) H S Aによるシステムのモデル構造の分析と決定。^{14,15)}

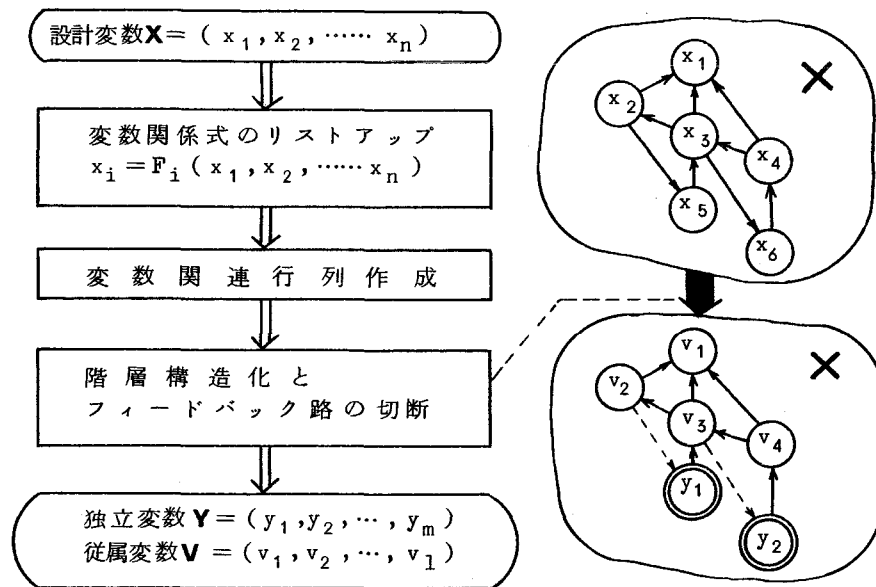
システムを決定する設計項目は数百と多く、また互いに密接な関連があり他との関連なしに独立に決定できるものは少ない。従って、最適なシステムの仕様を決めるためには、設計変数 X を、操作しやすい独立変数 Y と残りの従属変数 V に分け、システムの評価モデルを作成する必要がある。その手順を第3.9図に示す。まず、設計変数 X 間の関係式をリストアップして、その関数関係をもとに、設計変数をH S Aにより階層的に整理する。次に、この階層構造図内に含まれるフィードバック枝を関数関係を見直すことにより取り除き、モデル構造を単純化する。¹⁴⁾また、ある場合には、得られた構造図を分析者が見、相互のサブシステム間の関係が少なくなるよう、全体のシステムに分割することを行なう。¹⁵⁾この種の問題では、要素数が数百と多く、しかも、サイクリックな関連を含むため、H S Aの階層的整理の機能が主として利用される対象である。

(2) H S Aによる要素の樹木状整理、シーケンスの整理^{16,17,18,19,20)} ²¹⁾

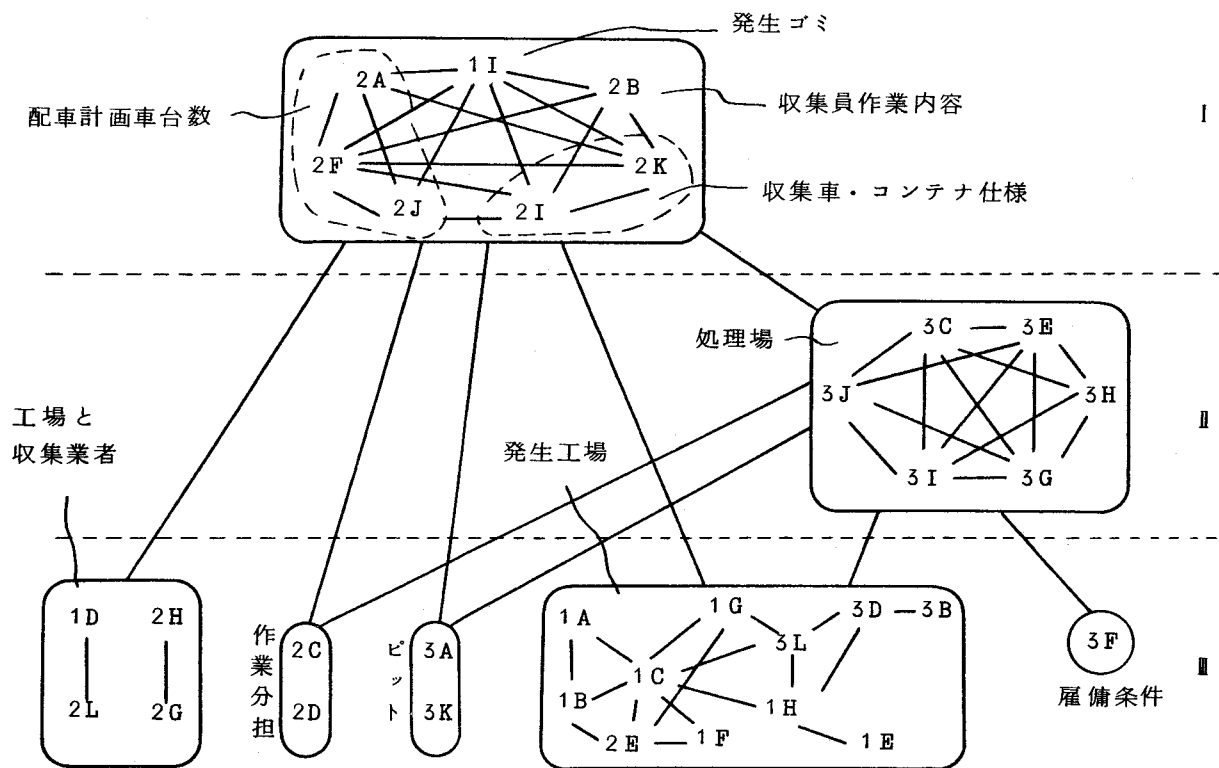
第4章に詳しく示す目的樹木の展開のほか、^{16,17,18)}機能樹木の作成、¹⁹⁾事故の波及シーケンスの整理、²¹⁾Fault Treeの作成、²⁰⁾等の問題においては、要素が1度に全部抽出できることはほとんどなく、樹木状に要素を整理しながら、整理された結果を見て新たに要素が付け加えられたり、修正されたりすることが多い。このような対象では、要素の階層的整理機能のほか、整理された図をメンテナンスする労力がぼう大となるので、作図機能の利用の意義が大きい。

(3) S S Aによるシステム開発計画の立案^{6,7)}

複雑なシステムの開発手順を立案する際には、多数の設計内容をいかなる順序で計画して行くかが問題となる。しかも、計画の初期の段階では各設計内容も必ずしも十分に明確になっていない。このような問題に対してS S Aを適用し、開発計画を立てることができる。以下、ある廃棄物収集輸送システムの計画にS S Aを適用した場合の手順を簡単に説明する。まず、設計項目をリストアップし、各設計項目間に相互の関係を考慮して設計する必要があるか否かの関係を整理した。これをS S Aにより分析した結果、第3.10図を得た。同図における2文字のIDはそれぞれ設計項目を示している。同図のレベルⅠは収集輸送システムの基本的な仕様と性能に対応しており、この部分の基本設計を行なえば、レベルⅡとレベルⅢに対応する部分の設計は分離して比較的容易に進めることができる。



第 3.9 図 モデル構造の決定手順



第 3 1 0 図 S S A によるシステム開発計画

(4) S S Aによる要素表現の精選^{7,8)}

非常にあいまいな問題においては、抽出される要素自体の意味が明確でないことがある。筆者らの取り扱った問題では、システム構造化技術のねらいに対する認識の構造化に関するものが、この例である。ブレーンストーミングにより出された要素を S S Aにより分析することにより、要素の裏にある真の意味を明確にし、キーワードとして精選して行った。さらに、得られたキーワードをもとにシナリオを作成した。

3.7 結 言

本章では、構造化の過程におけるシステム分析者と計算機との繰り返し反復作業の効率化のため開発した P P D S システムについて、構造化アルゴリズム、システムの構成、機能を述べた。P P D S システムには、方向性のある関連をもとに階層的構造を得る H S A と、方向性のない関連をもとに要素をいくつかのサブグループにまとめる S S A の 2 つの構造化アルゴリズムを持たせている。この 2 つのアルゴリズムを効率的に支援するための機能として、データの入力および修正機能、行列の表示機能、階層構造図の表示機能、データ管理機能、が必要なことを示した。これらの機能が、P P D S システムにおいて具体的にどのように実現されているかを述べ、システムの構成、仕様を示した。システムの効果をまとめ、最後に、応用例として、システム開発手順の立案、システム要求分析のための属性分析等への適用を示し、その有効性を示した。

システム構造化の研究が始まって間がないため、応用が広がるにつれ新しい機能が要求され、本システムもどんどん改良されている。P P D S システムは、現在、梶氏と筆者によりグラフィックディスプレイを用いるように改造されている^{22,23)}。これにより、従来問題であった構造図の表示時の応答性が飛躍的に向上している。また、同時に、グラフの分割、統合等の機能、X Y プロッタ出力などが追加されている。さらに、梶氏と筆者らは、単純な階層的構造以外に数値付きグラフや相互関連をも取り扱える対話型システムを開発中で^{20,24,25)}ある。

第 3 章 の 参 考 文 献

- 1) 第 1 章の参考文献 (2 3)
- 2) F.E. Langhorst ; Computer Graphics Aided Interactive Structural Modeling : A Tool for Conceptualizing Complex Design Problems ; Purdue University Ph. D. Dissertation (Aug., 1977)
- 3) 第 1 章の参考文献 (1 5)
- 4) 第 1 章の参考文献 (1 6)
- 5) 第 1 章の参考文献 (1 7)
- 6) 第 1 章の参考文献 (1 8)
- 7) 第 1 章の参考文献 (1 9)
- 8) 第 1 章の参考文献 (2 0)
- 9) 第 1 章の参考文献 (2 1)
- 10) 第 1 章の参考文献 (2 2)
- 11) J. R. Slagle, et al ; A Clustering and Data - Reorganizing Algorithm , IEEE trans. on SMC , Vol SMC-5 , No1 , pp125-128 (1975)
- 12) 第 2 章の参考文献 (2 1)
- 13) 林 ; 数量化の方法, 東洋経済新報社 (昭和 4 9 年)
- 14) 第 2 章の参考文献 (1 2)
- 15) 第 2 章の参考文献 (1 3)
- 16) 第 1 章の参考文献 (2 5)
- 17) 第 1 章の参考文献 (2 6)
- 18) 第 1 章の参考文献 (2 7)
- 19) 第 2 章の参考文献 (1 7)
- 20) 第 2 章の参考文献 (1 8)
- 21) 第 2 章の参考文献 (1 6)
- 22) 梶, 薦田 他 ; グラフィックディスプレイを用いたシステム構造分析システムの提案, 情報処理学会第 2 0 回全国大会予講集, No 1 F-2 (昭和 5 4 年)
- 23) 梶, 薦田 他 ; システムの階層構造化のための会話型システム - P P D S - ,

情報処理学会論文誌 (投稿中)

- 24) H. Kaji , N. Komoda , et al ; An Interactive System for
Analyzing Complex System Structure , Proceedings of 1981
International Conference on Cybernetics and Society (Oct.,1981)
(掲載決定)
- 25) 梶, 薦田 他 ; グラフ処理用データベースシステムの試作, 情報処理学会第22
回全国大会予講集, No.4 D-9 (昭和56年)

第 4 章 階層的構造分析法（HSA）による会話型目的樹木生成法

第4章 階層的構造分析法(HSA)による会話型目的樹木生成法

4.1 緒言

システムの構造化のためには、項目の抽出と、その関連付けの2つのフェーズがある。これらを独立のものとして捉え、関連付けの部分のみ計算機を用いて支援することにより、構造化を進めることができる対象も多い。しかし、システムの目的の明確化のため、有効な手法の1つである目的樹木の作成の場合では、正確な項目の抽出が非常に困難であり、不完全な項目を構造化しながら項目を見直していくことが必要である。このような場合には、構造化アルゴリズムの利用方法、階層図における項目の見直しの視点を整備することが実用上重要である。

本章では、システム計画において重要であると言われている目的の明確化^{1,2)}の1手法である目的樹木の階層的構造分析法(HSA)^{3,4)}による会話型生成法^{5,6)}について述べる。

目的樹木とは、目標およびそれを実現するためのサブ目的、具体的手段等の関係を理解しやすいよう階層構造に整理したものである。目的樹木の作成により、目的構造がvisual化され、とかく不明確になりがちなシステムの目的が明確化できる。また、個々の目的の全体の中での位置付けが明らかになり、全体の中でのバランスを考慮した論議を進めることが容易になる。

目的樹木作成過程のモデルとして、第4.1図を考える。目的樹木作成の第1段階として、対象システムの問題点、目的、要求等を抽出する必要がある。多くの場合、対象システムに関係する多数の関与者が、それぞれの立場で問題意識を抱いているため、ブレインストーミング^{7,8,9)}等で項目を抽出しようとする、項目の出方が片寄ったり、対象システムの目的樹木を作成するのに十分な項目が抽出されたことの確認が困難であったりする。従って、ある程度時間が経過し(ブレインストーミングでは30分ぐらいが適当と言われている⁹⁾)、項目が出なくなった時点で、項目抽出作業を打ち切ることが多い。また、ブレインストーミング等の進め方は属人的ノウハウが重要であり、セッション進行者、参加者の力量により効率、結果が大きく左右される。このようなことから、これらの方法をそのまま大規模な対象の目的項目の抽出に使用することは問題があり、より形式的な項目抽出方法の開発が必要である。

次に、抽出された項目を階層構造にまとめていくことが必要である。その際、対象に対する完全な項目が用意されていることはまれである。必要な項目がぬけていたり、抽出さ

れた項目も内容があいまいであったり、表現が適切でなかったりする。また、同じ内容の項目が複数存在することもある。目的樹木の作成においては、これらを見直し完全なものとしていく必要がある。しかし、項目数が多い場合、個々に見直す方法では、効率が悪いばかりか、不足している項目を見い出すことも難しい。本章の立場は、個々の項目の見直しは行わず、不完全な項目の集合をともかく階層化し、得られた階層構造の上で不都合な点を見いだし、項目の集合の修正を行なおうとするものである。項目がある程度整理され全体のイメージが把握すると、それに刺激され、項目の修正は比較的容易に行なえる。さらに不完全な項目を階層化した場合に生じる現象をあらかじめ明らかにしておくことにより、階層構造の見直しは効率化され、大規模な目的樹木を効率的に作成することができる。

近年、システム構造化技法の1つであるISM (Interpretive Structural Modeling^{10,11)}) を目的樹木作成における階層化ツールとして利用する方法が提案されている。^{11,12,13)}

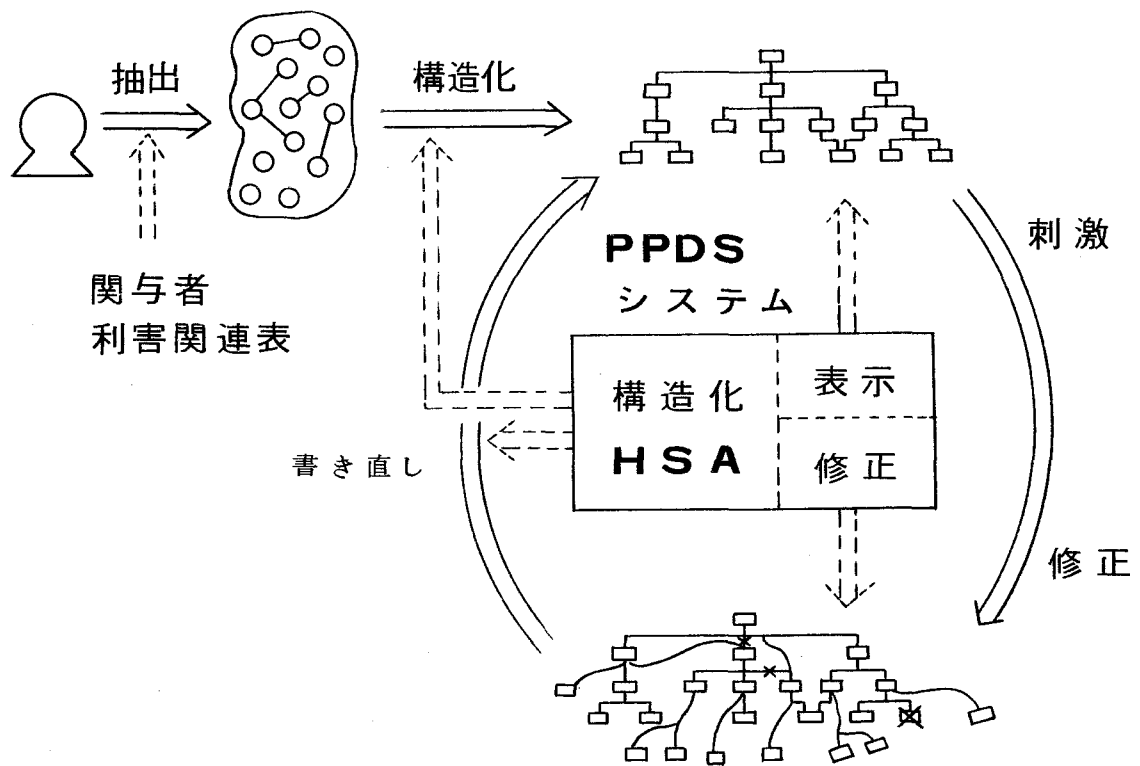
しかし、これらは比較的少数の項目をあらかじめ全部あげ、それらの間の関連の議論を通じてシステムの目的について関係者の合意を得ようとするものである。従って、計算機応用システムの計画のように、システムに対する潜在する利用者の目的を明確にすることを要求される場合には、項目数が多いため階層構造化に先立ち項目を十分に吟味し完全なものとするのは難しく、ISMによる方法の適用は適当でない。¹⁴⁾

本章では、上に述べた大規模なシステムの目的樹木作成の課題、定形的な項目抽出法の開発と構造化と項目の吟味を同時に行なう方法の開発、に対する1解決手法を提案する。

まず、目的樹木についての仮定をもとに、関与者利害関連表と名づけた2次元マトリックスを利用した均質な項目抽出法を提案する。¹⁵⁾ 次に、項目の不完全性について検討し、不完全な項目の集合を階層構造化したときに生じる現象を明らかにする。これを利用した階層化結果の見直し観点を示す。これを基に、大量の項目の階層構造化のため階層的構造化手法 (Hierarchical Structural Analysis : HSA^{3,4)}) を用い、修正作業を計算機支援^{16,17)} した、大規模な目的樹木作成法を提案した。

4.2 目的項目初期抽出方法

本章では、階層化結果を用い項目の修正を効率的に行なう方法を提案するわけであるが、最初に用意する目的項目の集合がまったく不十分であると、見直し作業の効率は非常に悪くなる。そこで、不十分な項目の集合を階層化した場合に現われる現象を調べるに先き立ち、目的項目の構造を利用した定形的なぬけの少ない目的項目の初期抽出法を提案する。



第 4. 1 図 目的樹木作成のモデル

多くの目的樹木の項目を分析することにより，目的項目は次のような構造を持っていると見なすことができる。

（関与者）×（機能）×（価値）×（手段）

なお，価値には，効用を表わす言葉，制約条件的な言葉，価値基準を表わす言葉などが対応する。項目表現の事例を第 4.1 に示す。目的樹木は，上記の目的項目を目的手段の関係で関連付け，項目を樹木状に整理したものと定義できる。この様子を模式的に第 4.2 図に示す。

このことから，目的項目を 4 次元のボックスの中にならべると，項目の現われ方の分布が分かることになる。取り扱いを容易にするため，4 つの次元の内の主要な 2 つの次元を軸として持った 2 次元のマトリックス上に項目をならべることにより，項目の出現分布を理解することができる。このような観点から，2 つの次元として，関与者と機能をとったマトリックスを，関与者利害関連表と名づけ¹⁵⁾，項目抽出に利用する。この表の作成は，ブレンライティング等と同様に，目的，課題，問題点等をカード 1 枚に 1 件ずつ記入し，表の適切な位置に置くことにより行なう。関与者利害関連表を用いた項目抽出の様子を第 4.3 図に示す。この関与者利害関連表を利用することにより，少なくとも関与者と機能に関しては，ぬけなく項目が抽出されているかどうかを判断することが可能となる。また，他の関与者の項目として出されている項目から，別の関与者の項目が誘導される等，項目を積極的に引き出す効果も大きい。

4.3 階層構造化による項目の見直し方法

4.3.1 不完全な項目を含む階層構造化結果

抽出された項目の集合には，本来必要な項目が抽出されず項目が不足しているもの，同じ内容の項目が複数個重複しているもの，本来 2 つ以上の項目に分けるべき内容が 1 つの項目に入っており意味のあいまいなもの，のような不完全性が考えられる。重複している項目の例としては，後述する第 4.9 図のようなものがある。また，あいまいな項目の例としては，第 2.9 図の項目「部分樹木分割の効率向上」や後述する第 4.7 図，第 4.8 図等があげられる。これらの不完全な項目を含む集合を階層構造化した場合に生じる現象を整理することにより，階層構造化の結果から効率的に項目のレビュー箇所を見い出すことが可能となる。

(1) 項目が不足している場合

不足項目が階層構造図の最下位にある場合と、それ以外の場合の2通りが考えられる。第4.4図(a)において、仮に項目Aが抽出されていないとすると、第4.4図(b)に示すように本来項目Aの下に付いている項目d, e, fは直接項目aにつながるか、あるいはまったく独立になるかになる。一方、第4.4図(a)における項目Bのように最下位にあるべき項目が不足している場合には、構造への影響はない。

(2) 項目が重複している場合

重複した項目間にどのような関係をつけるかにより、第4.5図に示すような2通りの結果が考えられる。

(3) あいまいな項目がある場合

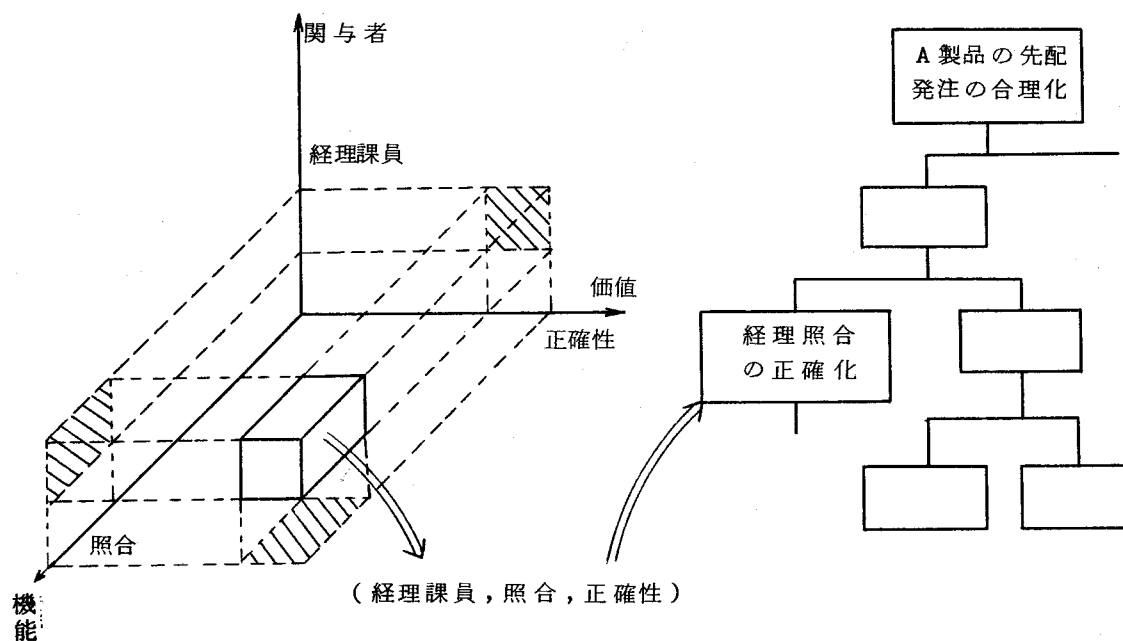
あいまいな項目に含まれる内容の、階層構造図上の相対的な位置関係により、いくつかの場合が考えられる。第4.6図(a)はそれらの代表的なものを示したもので、破線で囲んだ2つずつの項目がそれぞれあいまいな1つの項目になっている場合を考える。たとえば、項目Aは、本来項目bと項目nに分けるべき内容であるとする。しかも、項目nは項目bの下位項目である。このように、分けられる2つの項目のどちらかが他の項目の上位にある場合、第4.6図(b)に示すようなサイクリックな関係を生じる。また、項目Bあるいは項目Cのように2つの項目に分けた場合にそれらの項目の間に直接の上下関係がなければ、サイクリックな関係とはならず、第4.6図(b)に示すように2つ以上の上位項目を持つ項目が生じることになる。第4.6図に示したもののほか、ある項目につながっている下位項目の2つが内容のあいまいな1つの項目となる場合もあるが、この場合には下位項目の数が減るだけで、構造上の変化は生じない。

4.3.2 階層構造図見直しの観点

前節では、項目の不完全性の立場より、それらを階層化した場合の現象を検討したが、本節では現象より項目の見直しの観点を整理する。

(1) サイクリックな関連

あいまいな項目や重複した項目がある場合にサイクリックな関連が生じることがある。サイクリックな関連の1例を第4.7図に示す。この例の場合、「Design Reviewの考え方の徹底」という項目が、設計のいくつかのフェーズのDesign Reviewの徹底という意味と、Design Reviewの準備のために心がまえとしてDesign Reviewの考え方を徹底しておくという意味の2通りに解釈されている。この場合、項目1を

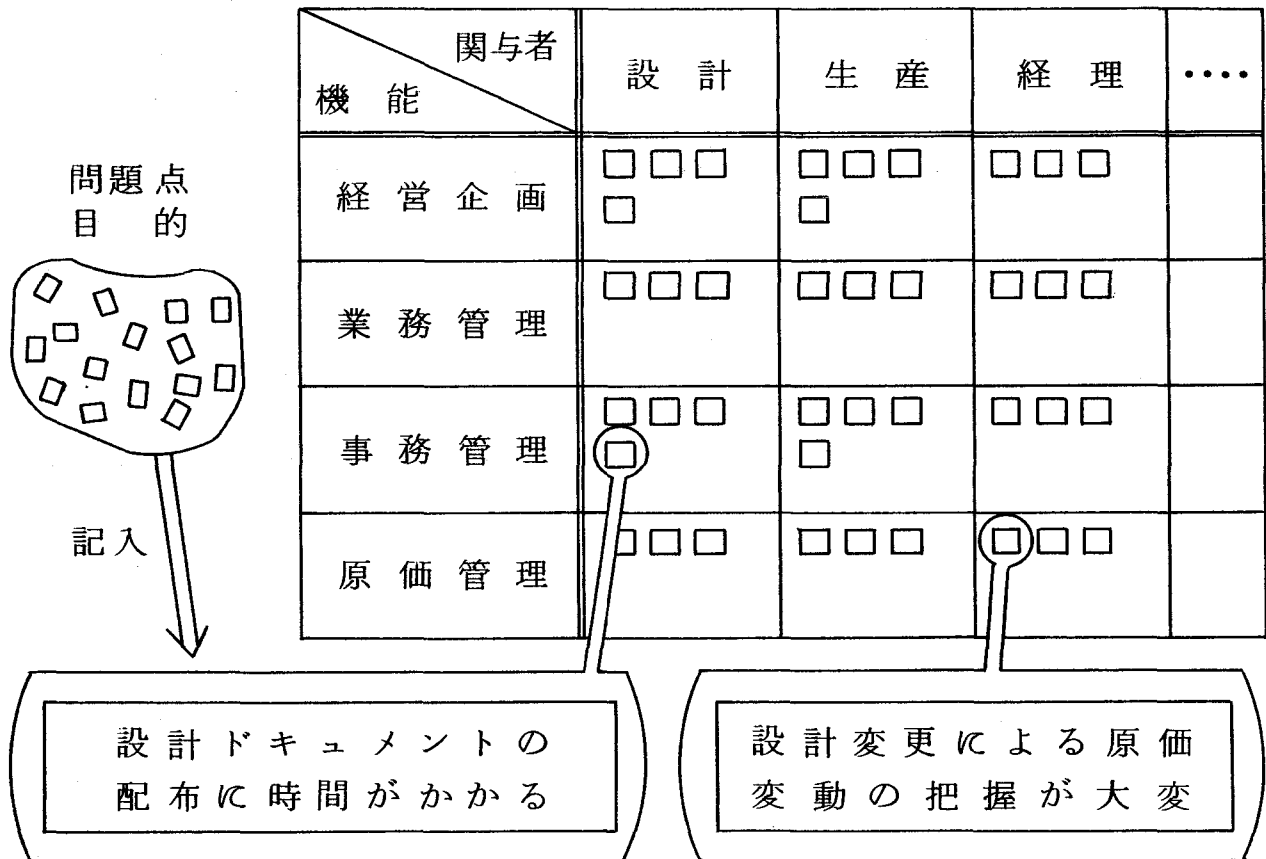


第 4.2 図 目的項目の構造と目的樹木

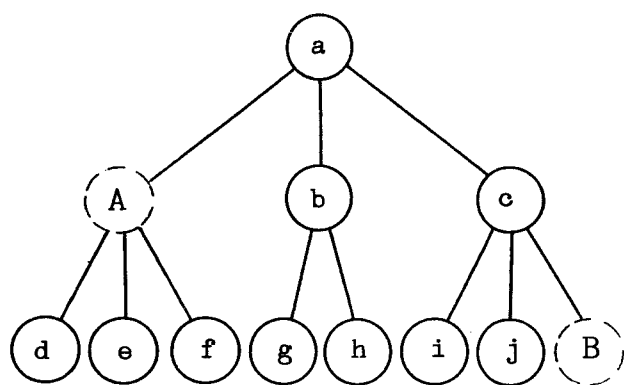
第 4.1 表 目的項目の表現形式

目 的 項 目	関 与 者	機 能	価 値	手 段
経 理 照 合 の 正 確 化	(経 理 課 員)	経 理 照 合	正 確	——
PPDSによる目的樹木の効率的作成	——	目 的 樹 木 作 成 支 援	効 果 的	PPDS
1分以内に希望品の在庫状況を把握する	(セールスマン)	希望品の 在庫状況把握	1分以内	——

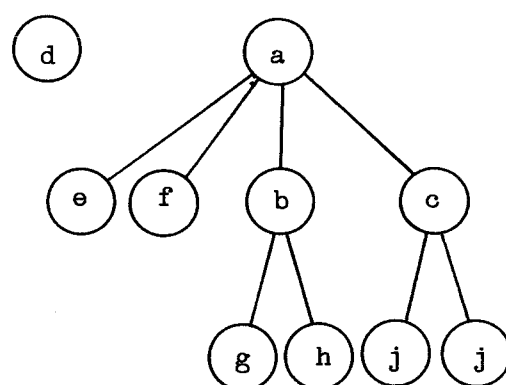
関与者利害関連表



第 4.3 図 関与者利害関連表による項目抽出

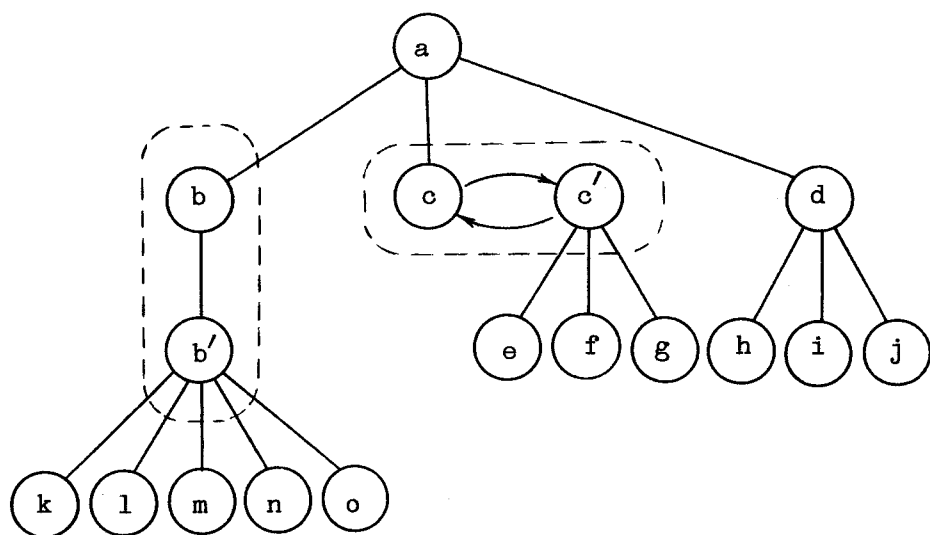


(a) 正しい目的樹木

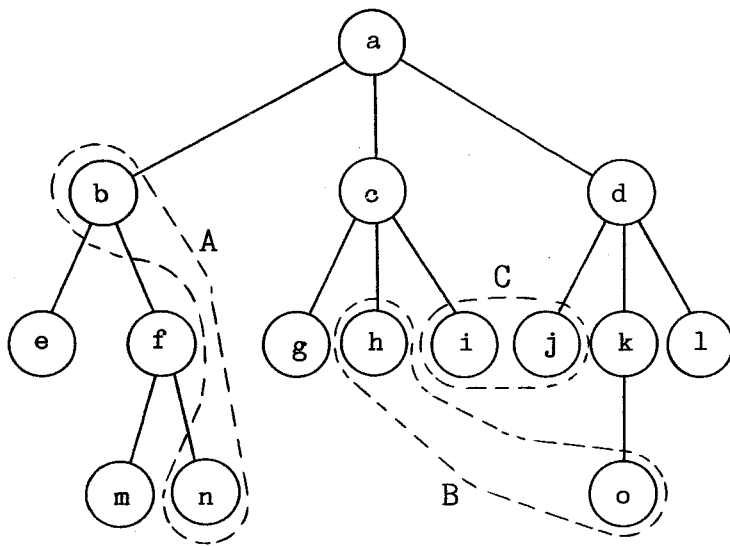


(b) 項目 A , B が不足した
目的樹木

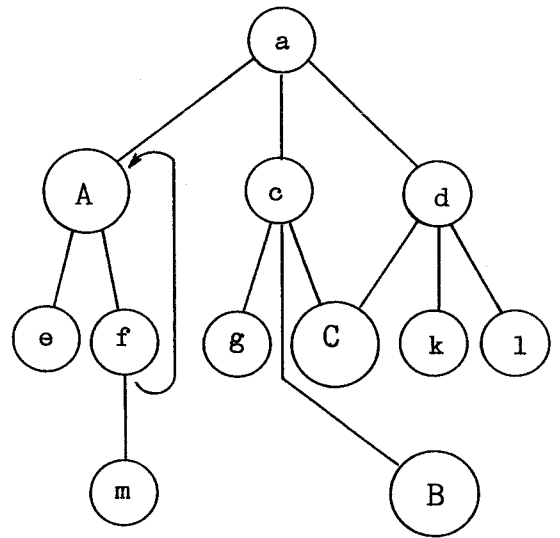
第 4. 4 図 項目の不足した場合の目的樹木



第 4.5 図 項目の重複した目的樹木

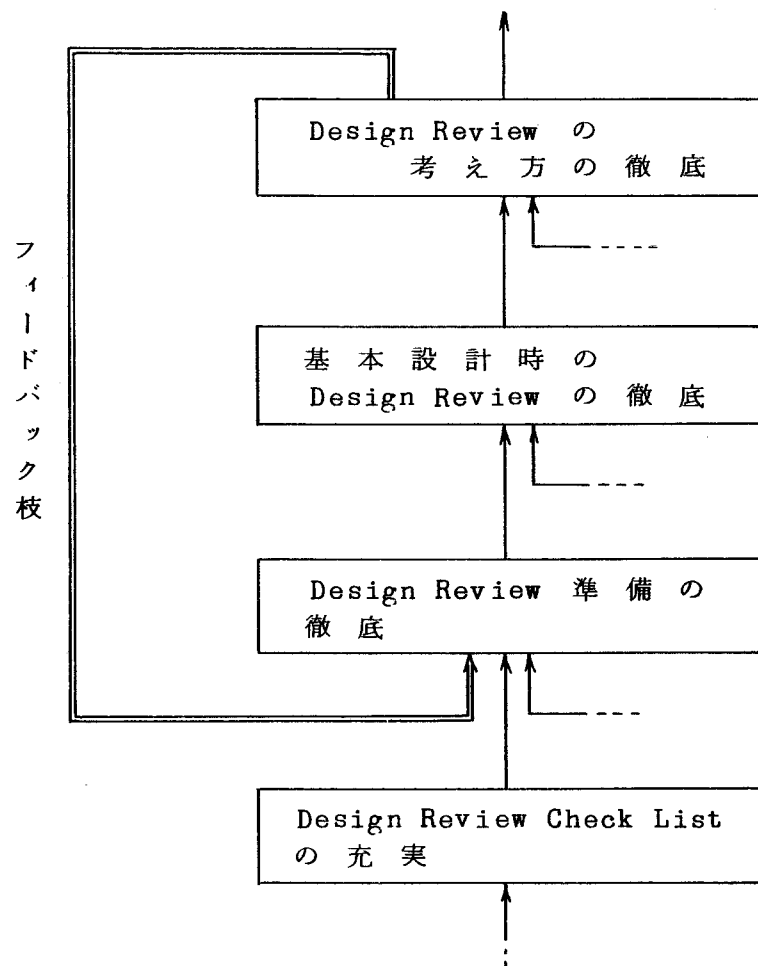


(a) 正しい目的樹木



(b) あいまいな項目を含む
目的樹木

第 4.6 図 あいまいな項目を含む目的樹木



第 4.7 図 サイクリックな関連の生じる例

「Design Reviewの徹底」と変更し，フィードバック枝を切るという修正を行なう。

(2) 複数の上位項目につながる項目の存在

サイクリックな関連と同様にあいまいな項目の存在に起因する現象に，複数の上位項目に関連を持つ項目の出現がある。この例を第4.8図に示す。この場合，「適正な査定価格をつける」という項目が，「買い取って来る品物の査定価格を安くする」という意味と，「品物を買いに来た客の下取品を高く査定し，客をにがさないようにする」という意味の2通りに解釈されている。そこで，たとえば，この項目は「高すぎない適切な査定価格をつける」と「客の下取品を適正に査定する」の2つに分割するのが適当である。

(3) 分枝のない関連

重複した項目がある場合や本来あるべき項目がぬけているとき等には，項目が分枝なしに1例にならぶことがある。その例を第4.9図に示す。この場合，最初の2つの項目は同じ内容を異なった表現で言っていると考えられ，1つの項目にまとめる。また下の2つの項目については，下の項目が上の項目に対する1つの手段となっており，その他にも上の項目に対する解決手段があると考えられる。それらの項目を抽出し，「納期を管理する」の項目の下に追加していくのが適当である。

関与者利害関連表による項目抽出では，問題となっていない機能，あたり前の項目，等がぬけやすく，階層構造を整理していく過程でチェックする必要がある。

(4) その他，独立した項目群のある場合には，項目あるいは関連にぬけがある可能性がある。また，同一のレベルにならんでいる項目の内容のレベルを比較したとき，異なったものがあれば，項目のぬけか重複があることが多い。

4.4 支援システムの機能

大規模な目的樹木の作成においては，上記のような現象を重点的に見直すことにより項目の完全化を図ることができる。このためには，項目をまず階層化する必要がある。通常，項目間の関連は断片的にしか理解されず，しかも全体イメージが把握できないことが多い。このため，システム構造化技法の利用が有効である。前述したように関連がサイクリックになることがあるため，サイクリックな関連をうまく扱えるH S A (Hierarchical Structural Analysis^{3,4)}) を，本手法では用いる。H S Aは項目対ごとの順序関係が与えられると全体の順序関係を算出し提示するアルゴリズムで，若干のサイクルが混入する場合にも，フィ

ードバック枝を含む階層的構造を提示する機能を有している。

このほか、目的樹木作成時の各種修正、作図作業等を効率的にサポートすることが重要である。この点については、梶氏と筆者らにより、19インチ蓄積管形グラフィックディスプレイ^{16,17)}を表示端末とした計算機対話型システムPPDSシステムを開発している。PPDSシステムの概要を第4.10図に示す。PPDSシステムは次のような機能を持たせている。

(1) 階層構造図編集機能

階層化アルゴリズムとしてHSAを持ち、階層構造図における各レベルの項目配置のために、関連線の交叉数が少なく、関連する項目が近接するようにするヒューリスティックな配置、配線アルゴリズムを持つ。

(2) 階層構造図表示機能

全体を把握するため項目を3文字の記号で表示する全体表示モードと、内容を理解するため項目を50文字のキーセンテンスで表示する詳細表示モードの2通りのモードがある。要検討部分を分かりやすく示すため、フィードバック枝の点線表示機能、指定された項目の関連部分の強調表示機能を持つ。また、漢字によるXYプロッタ出力機能をもつ。

(3) データ修正機能

項目の追加、削除、統合、分割および関連の追加、削除を端末より容易に行なえる。

(4) 階層構造図の分割統合機能

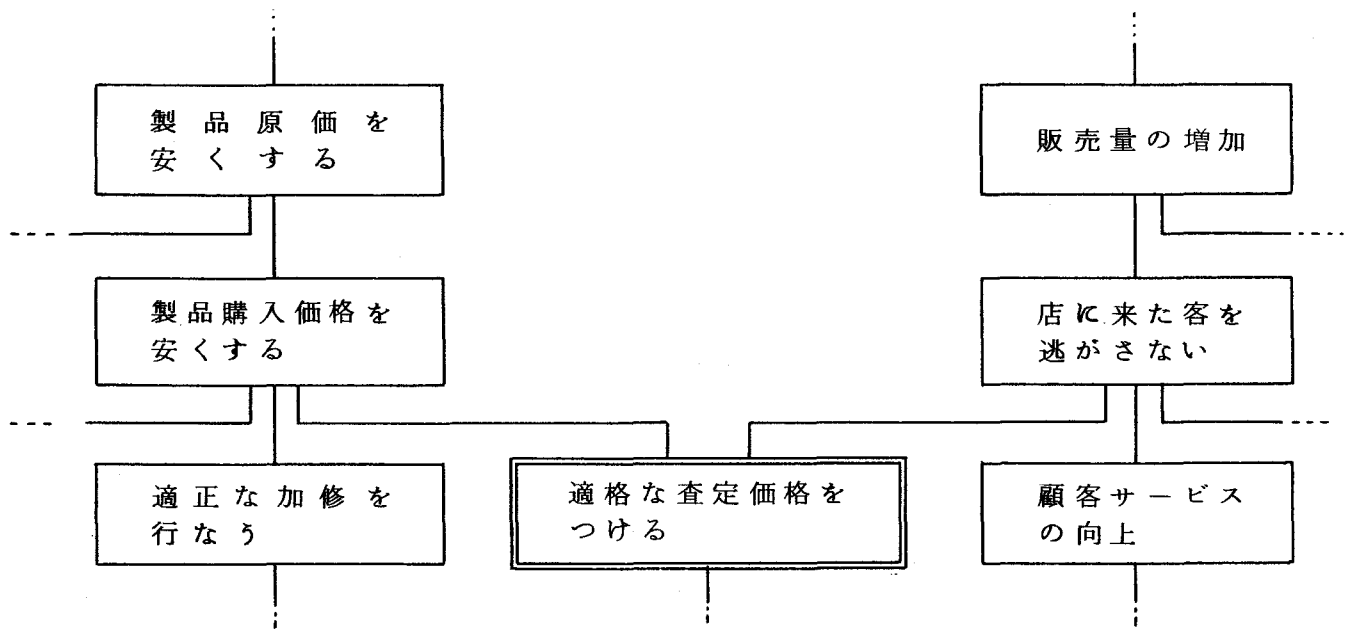
検討部分の抜き出し、A3あるいはA4サイズの部分目的樹木の清書、等のための分割機能を持つ。また、グループ単位での項目関連づけの後全体として1つにまとめるための統合機能を持つ。これらの機能は、過去に作成した目的樹木の1部分を利用する場合にも有効である。

(5) ファイル機能

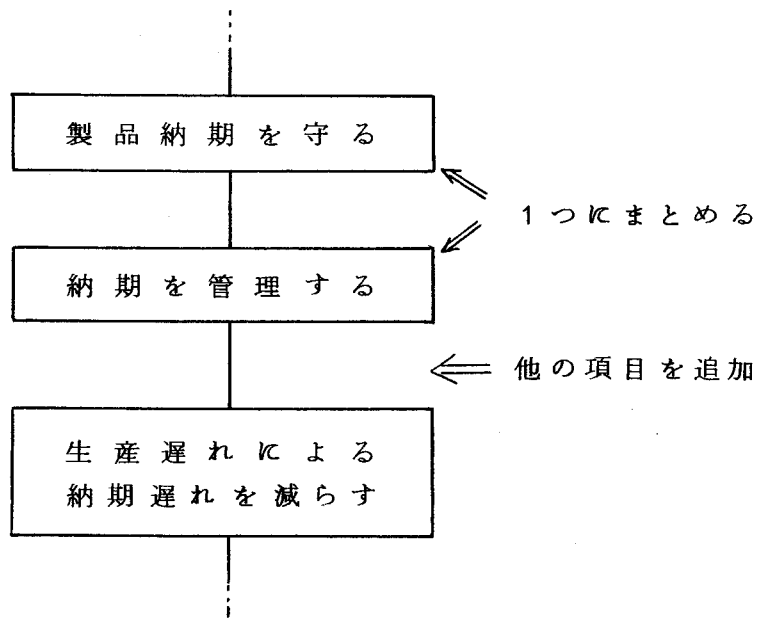
分析途中あるいは完成した目的樹木のデータは、ファイルに格納できる。これにより、複数回にわたる分析作業のサポート、過去に作成した類似の目的樹木の活用が行なえる。

4.5 目的樹木作成手順¹⁸⁾

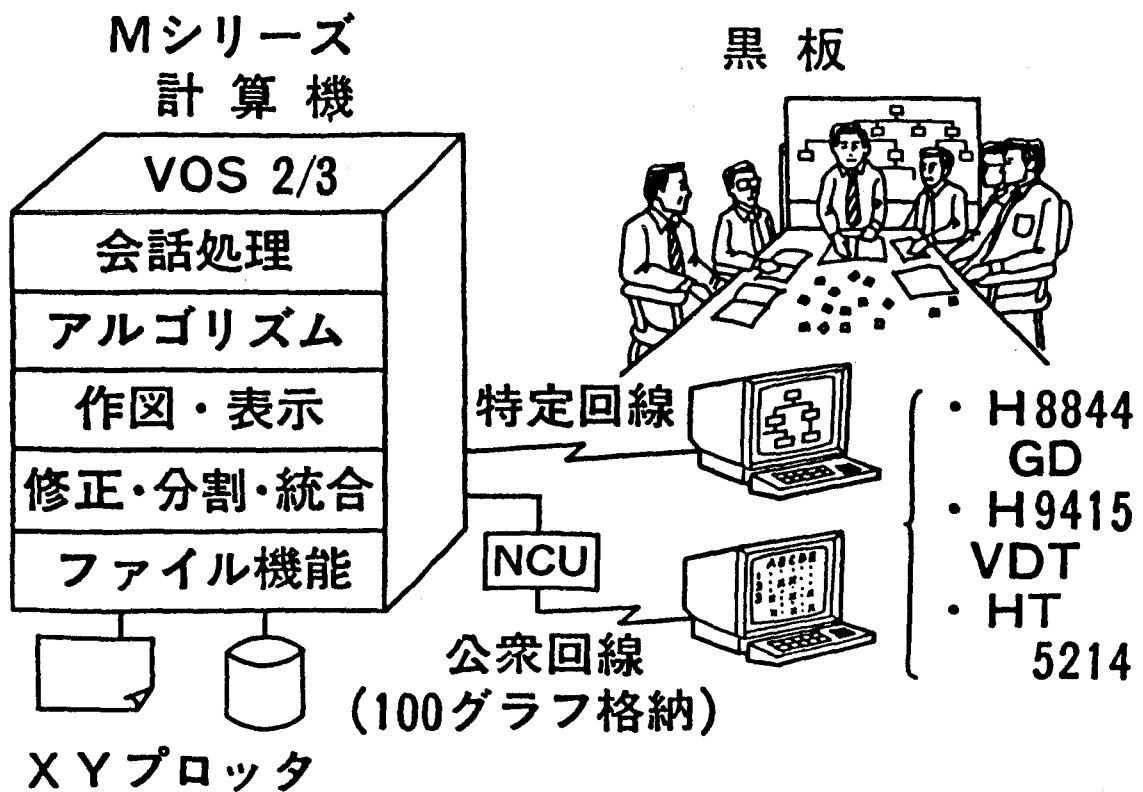
提案する目的樹木作成手順を第4.11図に示す。各作業の内容は以下のようなものである。



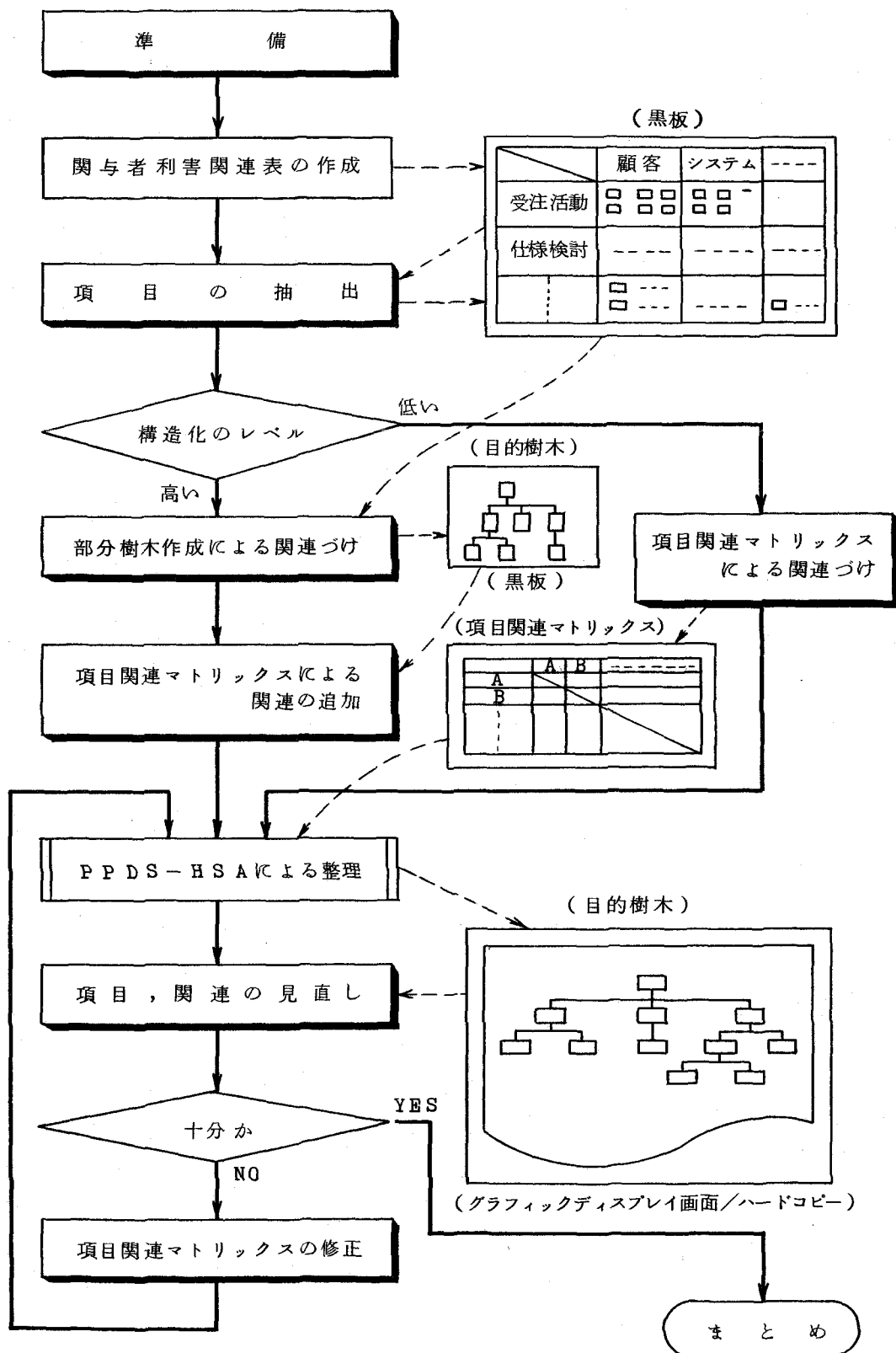
第 4.8 図 あいまいな表現の項目の存在する場合



第 4.9 図 下位項目を 1 つしか持たない項目の例



第 4.10 図 PPDS システムの概要



第 4.1.1 図 目的樹木作成手順

(1) テーマ，目標，作業方針，日程の設定，およびメンバ，リーダー，記録者の選定，治具の準備等を行なう。治具としては，R A カード，サインペン，黒板，用紙類（項目関連行列用紙，項目記入シート等），計算機，端末等がある。

(2) 項目抽出

関与者利害関連表を作成し，関与者間の相互関係，問題の範囲を明確にしながら，項目を抽出する。関与者利害関連表の枠組は，問題に関係する部署およびそれらの機能より決定するが，どちらにも「その他」の欄を設ける。

(3) 項目の関連づけ

まず，項目表現の見直しを行なう。抽出された項目には，問題点，要望，対策，目的等が混在している。そこで項目を見直し，「……を～する」という形に統一する。項目間に，「B の目的は A である」あるいは「A の手段は B である」という関連のある場合， $B \rightarrow A$ の有方向関連をつける。具体的な方法としては，項目をグループに分けグループごとにカードを用いて関連づけ，項目関連行列上で統合する方法と，全体の項目をまとめて 1 対ごとに関連を検討する方法の 2 通りがある。項目がグルーピングできる場合には，前者の方が効率的であり，また，関連づけの過程で項目が追加されやすい。

(4) 階層構造の見直し，修正

項目関連行列を H S A で処理し，グラフィックディスプレイ上に階層構造図を得る。

先の第 4.3 節で述べた観点を主体に見直しを行ない，端末より修正を行なう。

(5) 目的樹木のまとめ

完成された目的樹木の全体の図を X Y プロッタ等により作成するとともに，A 4 あるいは A 3 程度の適当な大きさに分けた部分目的樹木も作成する。

4.6 提案手法の適用例による効果の評価

本手法によるいくつかの目的樹木作成結果より，目的樹木作成に要した工数をグラフにまとめ，第 4.12 図に示す。実線が P P D S による場合で，破線が手順ツールともない場合を示している。P P D S を適用することにより，人手ではほとんど作成できない 200 項目を超える目的樹木を，許容しうる労力で作成することができる。また，項目数 100 程度の比較的小型の目的樹木の作成においても，手順ツールともない場合に比べ，手順のみ利用の場合 80%，P P D S システムも利用する場合 50% と，大巾な効率向上が行な

える。これらの理由として、関与者利害関連表による項目抽出時間の短縮，階層結果による項目の見直しの効率化，P P D S システムによる階層構造化，階層構造図修正の効率化，等があげられる。このほか，P P D S システムの利用によりグロスの所要時間が短縮される。

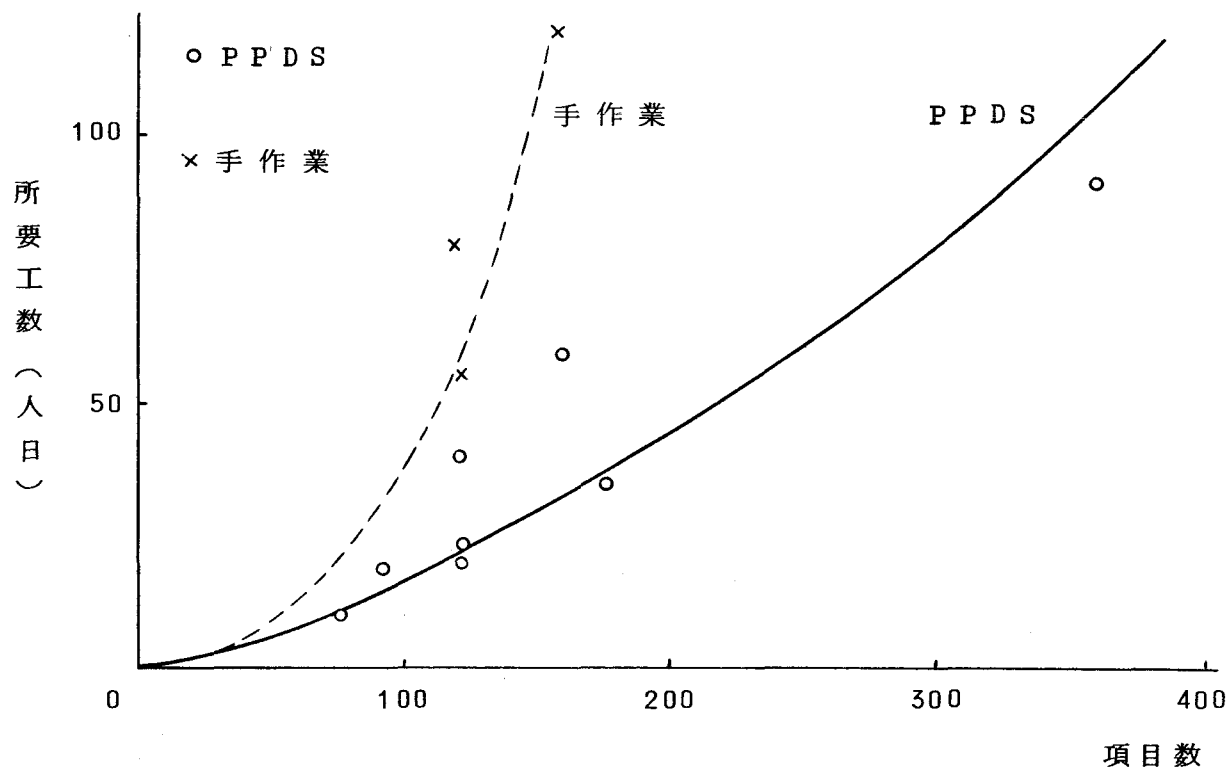
効率向上のほか，項目関連行列作成の過程で，項目間の一対比較を行なうことにより，全項目間の関連をチェックすることになり，関連検討のぬけがなくなる。また，項目の表現があいまいであると，複数の意味に解釈され，多数の項目に関係したり，フィードバック枝を生じたりする結果を与えるので，要検討個所が見い出しやすく目的樹木の質の向上が図れる。

また，従来は目的樹木の見直しにより生じる書き直し作業を忌避し，多少不満な点があっても，あえて見直すことを行なわない傾向があった。書き直し作業が自動化されることにより，書き直しの手間を考えることなく，十分な見直しが行なえるようになる。

4.7 結 言

本章では，システム構造化技法の1応用として，目的樹木の新しい作成方法を提案した。まず，目的項目の構造に注目し，従来よりある発想法よりも定形的な目的項目抽出法として，関与者利害関連表と名づけた2次元マトリックスを用いる項目抽出方法を提案した。次に，抽出された目的項目におけるあいまい性，重複，不足により生じる階層構造図上の現象を整理し，これらを利用した項目の見直しの方法を示した。さらに，これらの作業を支援するツールの機能と，一連の手順を説明した。本手法により，目的樹木の作成が50%程度効率化されるほか，十分な見直しによる目的樹木の質の向上が期待できることを示した。

本章では，目的樹木の作成法について提案したが，次にいかに目的樹木を利用するかという課題が残されている。目的樹木の作成により，システムの関係者の合意が得られるという間接的な効果は大きい⁶⁾が，目的樹木をより直接的にシステム代替案の作成あるいは評価に利用する方法論の開発が，望まれている。その1つの試みとして，筆者は，計算機アプリケーションシステムの計画において特に標準パッケージの作られている業務に対し，標準目的樹木を作成し，それにパッケージおよびファイルを関連付けておく方法を提案している。また，大規模計算機アプリケーションシステムの計画についても，中尾博士と筆者らにより，目的樹木から機能樹木を作成し業務フロー図の作成に至る一連の方法をF R



第 4.12 図 PPDS による効果

A M Eと名づけ提案している。^{19,20)}しかし，これらはまだきわめて特別な場合を取り扱っており，より一般的なものにして行く必要がある。

また，支援ツールの機能についても，目的樹木の作成支援により適したものにしていく必要がある。筆者は，このような観点から，複数の上位項目に関連を持つ項目を階層構造図上で浮き上がらせる項目配置法として，多色配線項目配置法²¹⁾の提案を行なっている。また，画面表示内容の漢字化も計画中である。

第4章の参考文献

- (1) J.D.Hill, J.N.Warfield ; Unified Program Planning, IEEE tran. on SMC, Vol. SMC-2, No.5, pp 610-621 (Sept. 1972)
- (2) J.N.Warfield ; A Unified Systems Engineering Concept, Chap. 6, Battelle Monograph (1972)
- (3) 第1章の参考文献(15)
- (4) 第1章の参考文献(17)
- (5) 第1章の参考文献(25)
- (6) 第1章の参考文献(27)
- (7) 第1章の参考文献(10)
- (8) 第1章の参考文献(11)
- (9) 第1章の参考文献(12)
- (10) 第1章の参考文献(2)
- (11) 第1章の参考文献(3)
- (12) 第1章の参考文献(23)
- (13) 第1章の参考文献(24)
- (14) 第2章の参考文献(8)
- (15) 春名 ; 多関与者を有するシステムの計画技法－P P D S , 技術と経済 , Vol. 8, No. 10, pp 46-51 (昭和49年)
- (16) 第3章の参考文献(17)
- (17) 第3章の参考文献(18)
- (18) 第1章の参考文献(26)
- (19) K.Nakao, N.Komoda et al ; A Structural Approach to System Requirements Analysis of Information Systems, Proceedings of Fourth International Computer Software and Applications Conference 1980, pp 207-213 (Oct., 1980)
- (20) 中尾, 薦田, 他 ; システム計画のためのシステム要求分析手法 (P P D S) の開発, 日立評論 , Vol. 62, No. 12 pp 867-870 (昭和55年)
- (21) 薦田 他 ; 階層構造図の見やすい表示法 (多色配線項目配置法) の一提案 , 昭和56年電気学会全国大会予講集 , No. 1345

第 5 章 不確定な負荷を有するプラントの信頼性評価基準の明確化と 定量的評価方法

第5章 不確定な負荷を有するプラントの信頼性評価基準の 明確化と定量的評価方法

5.1 緒 言

構造化作業とその前後のフェーズの作業とのインタフェーズの明確化は、構造化技術の実用化のための重要な課題の1つである。例えば、作成された価値体系（例えば、目的樹木）をシステム代替案の作成、評価にどのように接続するか、ということを確認にする必要がある。価値体系とシステム代替案の作成作業との関連づけについては、前章の結言で触れたように、計算機応用システムを対象として研究が進行中である。本章では、価値体系と実システムの評価との関連について考察する。

代替案の評価においては、システムの目的、実システムの特徴の両面からの検討により、これらに合致した評価基準を設定し、その評価基準を具体的に定量化する所まで展開することが必要である。しかし、この作業を実際のシステムに関し実施することは容易なことではない。以下で検討している対象では、まさに、このようなことが要求されており、上記を満足する評価基準として「あふれ確率」なる量を導入している。この評価基準を設定するための方法論は十分に詰められておらず、今後の検討が必要であるが、このような価値体系と評価の関連づけの面からのアプローチの重要性を提起するものである。

本章では、目的構造の分析と評価の関連づけを目的として研究した、ある廃液処理プラントの信頼性評価の問題について述べる。まず、プラントの運転者および設置者の立場ならびに対象プラントの特徴の両面より信頼性評価基準を明確にし、次に、明確にした評価基準にもとずきプラントの故障状態を定義し、その状態にある確率を定量的に計算する方法を提案する。^{1,2)}対象とする廃液処理プラントでは、負荷（廃液）がランダムに変動し、それに伴い必要とされる処理容量が変化する。また、負荷変動に対するバッファとして収集タンクが設けられ、処理系も多系統構成を取ることが多い。このため、このような不確定な負荷を処理するプラントにおいては、ある1つの構成機器が故障しても、処理がまったく不可能になることは起らず処理機能が低下するに留ることが多い。時には、処理できずに残る負荷をバッファに溜めておくことで対処することも可能である。従って、構成機器に故障が生じて、それが必ずしもプラント全体の全面的な故障につながらない。さらに、負荷が不規則であるため、どの程度処理できればバッファに負荷を溜めて対処できるかの評価も確率的に行なわざるを得ない。このように、不確定な負荷を有するプラントの信頼性評価では、故障発生確率の計算よりも、構成機器が故障した時の状態をプラント全体と

して故障と見るかどうかの判定が難しいのが特徴である。

従来、システムの信頼性評価手法として F T A (Fault Tree Analysis ³⁾), E T A (Event Tree Analysis ³⁾), 冗長システム 多重系システムの信頼性評価手法など多く⁴⁾ が提案されているが、アンアベイラビリティの計算方法を与えるものであり、故障をどのように定義し、信頼性の評価を行なうかという問題には有効でない。また、構成機器の故障をシステムの使命に与える影響の重要度により幾つかのランクに分類し評価する手法として、F M E A (Failure Mode and Effect Analysis ⁵⁾), F M E C A (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis ⁵⁾)があるが、故障のランク分けの指針を与えるものではない。

最近、多数の故障モードを持つシステムに対する信頼性を利用者から見たサービス品質と結びつけ評価する方法が、電気通信システムの信頼性評価の分野において研究されている。⁶⁾ Strandleerg 氏は電話交換システムにおけるサービス品質の1項目として、システムのアベイラビリティを直接用いるのではなく、故障時を含めたシステムの能力の期待値である「システムの有効性」を導入している。⁷⁾ システムの有効性は、システムの状態の取る確率(すなわち、故障モードごとのアベイラビリティ)とその状態におけるトラフィック能力およびトラフィックの発生確率の積分値により与えている。しかし、本章で取り扱う不確定負荷を有するプラントにおいては、電話交換システムと異なり、呼損率、平均待ち時間などに対応する「負荷が処理できなくなる確率」の期待値が重要ではなく、個々の機器の故障時にプラントの負荷を処理する能力にどのような影響があり、その状態を故障と見なすべきかを判断する方法を見い出す必要がある。また、バッファの存在の取り扱いも実際の評価においては重要な課題である。

本章では、プラントの構成機器が故障した状態における処理能力の評価の指標として、バッファのあふれ確率なる量を導入し、利用者から見た故障の分類定義方法の提案を行なう。プラントを故障と見なす基準のあふれ確率を自由に設定することにより、プラント評価者が故障と考えるプラントの機能劣化の程度を任意に選択できる。また、プラントの信頼性は、このようにして定義した故障の発生ひん度として容易に計算される。

以下、まず問題の定式化を行ない、故障の定義について述べる。次に、収集タンクのあふれ確率による設備容量の評価方法、信頼性評価の手順を説明する。最後に、この手法のあるプラントの集中廃液処理設備の系統構成案の比較評価への適用について述べ、その有効性を示す。

5.2 不確定負荷を処理するプラントにおける信頼性評価問題の定式化

不確定負荷を処理するプラントは、負荷変動を平滑化するためタンクなどのバッファを持っており、運転は間欠的であることが多い。このようなプラントを、第5.1図のように一般化して考えることができる。プラントの1日あたりの負荷量は確率密度関数 $f(x)$ に従う確率変数 x で表わせるとする。負荷は大きさ V のバッファに入る。処理系は1日 T 時間運転され、その容量は単位時間あたり U である。通常の状態においては、負荷の発生量が1日あたりの処理量 $U T$ を越える確率は極めて小さくなるよう U 、 T が設計されているものとする。処理系は、並列に機能する幾つかのサブシステムより成り、一つのサブシステムで故障が生じても処理プラントの機能は低下するが、全く処理ができない状態にはならない。

このプラントの信頼性評価は、プラント故障の定義方法と、故障の発生確率の計算方法を決定することにより行なわれる。プラント故障の発生確率の計算は、プラント故障と定義される状態になるサブシステムの故障発生確率を加え合せることにより簡単に求められる。以下、プラント故障の定義方法について、その考え方を提案する。

運転時間 T をある値に固定したとき、このプラントの故障状態として、「負荷を処理できないこと」すなわち「処理が負荷に追いつかず、バッファが満ぱいになり、負荷を受け入れられない状態」と定義する。バッファが満ぱいになる状態をバッファのあふれと呼び、バッファのあふれが生じる確率をあふれ確率と呼ぶことにする。負荷の不規則性のため、ときどきの負荷発生量により故障状態になる場合や、正常状態になる場合が生ずる。そこで、「負荷が処理できないこと」が、ある基準の確率以上で起こると予想されるとき、そのときのプラントの状態を故障と判断する。

外部からプラントを見た場合、運転時間 T を最大にしたときの上記の故障の発生確率が信頼性評価の指標となる。一方、プラント運転者の立場からは、ある運転時間 T の運転をどの程度のひん度で行なえばよいかが、プラントの信頼性評価尺度となる。プラント運転者の立場から評価したい場合には、上記の故障の定義を標準的な幾つかの運転時間について適用することにより、信頼性の評価を行なうことができる。

従って、不確定な負荷を処理するプラントの信頼性評価の問題は、構成機器の故障により残存して使用できる処理容量 U 、あるいはバッファの大きさ V が減少したとき、ある運転時間 T のもとでのあふれ確率 I が、プラント評価者により指定される基準値より大きい小さいかを判定する問題に帰着できる。すなわち、故障と見なすあふれ確率の基準値が

I_s であるとき，あるサブシステムが故障した状態におけるあふれ確率が i と計算されたとする。このとき， $i \geq I_s$ であれば，プラントを「基準 I_s のもとで故障」と判定する。このようにプラントの故障を決定すると，基準値の取り方により，任意の安全度を持ってプラント故障を定義できる。

5.3 あふれ確率の計算方法の検討

5.3.1 あふれ確率計算方法

単位時間あたりの処理容量 U ，バッファの大きさ V ，1日あたりの運転時間 T が与えられたとき，バッファの満ぱいになる事象の生起確率（あふれ確率）の計算方法を示す。説明を簡略にするため負荷は廃液であるとし，バッファは収集タンクとする。また，1日あたりの処理可能量を W ($W = UT$) とし，収集タンクには時点 0 で V_0 の廃液が入っているとす。収集タンク内の廃液量を評価する時点は，収集タンク内の水量の最も多くなる運転開始時とする。なお，24時間運転の場合には，1日の内の適当な時刻とする。

時点 i の収集タンク内の水量 V_i は，時点 $i-1$ から時点 i までの間の1日の廃液発生量を x_i として，次式で計算される。

$$V_i = \begin{cases} V_{i-1} + x_i - W & : (V_{i-1} \geq W) \\ x_i & : (V_{i-1} < W) \end{cases} \quad (5.1)$$

(5.1) 式の下式は，収集タンクが処理終了時点で空になる場合を示しており，上の式は処理終了後も廃液が収集タンク内に残る場合を示している。ここで，

$$[x]^+ = \begin{cases} x & : (x \geq 0) \\ 0 & : (x < 0) \end{cases} \quad (5.2)$$

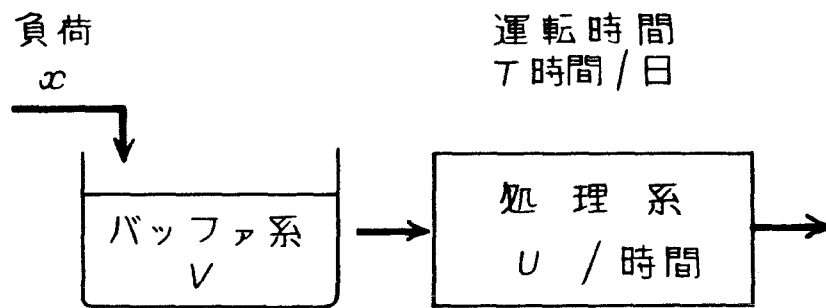
なる表現法を導入すると，(5.1) 式は次のように書ける。

$$V_i = x_i + [V_{i-1} - W]^+ \quad (5.3)$$

時点 1 に収集タンクのあふれる確率 P_1 は，収集タンクの水量 V_1 が収集タンクの容量 V を越える確率として与えられる。

$$P_1 = P_r \{ V_1 \geq V \} \quad (5.4)$$

V_1 に (5.3) 式を代入し，時点 0 における収集タンク内の廃液の初期値の分布の確率密度関数を $g(V_0)$ ，廃液の発生量の分布の確率密度関数を $f(x)$ とすると，(5.4) 式は V_0 と x_1 が独立であれば，次のように書ける。



第 5. 1 図 不確定負荷処理プラント概念図

$$\begin{aligned}
P_1 &= \Pr \{ x_1 + [V_0 - W]^+ \geq V \} \\
&= \Pr \{ x_1 \geq V - [V_0 - W]^+ \} \\
&= \int_0^V g(V_0) \int_{V-[V_0-W]^+}^{\infty} f(x_1) dx_1 dV_0 \quad (5.5)
\end{aligned}$$

時点 2 における収集タンクのあふれ確率 P_2 は，時点 1 において収集タンクがあふれない条件のもとで，時点 2 において収集タンクの水量がタンク容量を越える条件付き確率として計算される。

$$\begin{aligned}
P_2 &= \int_0^V g(V_0) \int_0^{V-[V_0-W]^+} f(x_1) \int_{V-[V_1-W]^+}^{\infty} f(x_2) dx_2 dx_1 dV_0 \\
&= \int_0^V g(V_0) \int_0^{V-[V_0-W]^+} f(x_1) \int_{V-[x_1-W+[V_0-W]^+]^+}^{\infty} f(x_2) dx_2 dx_1 dV_0 \quad (5.6)
\end{aligned}$$

(5.6) 式の V_0 および x_1 に関する積分は，時点 1 において収集タンクがあふれない確率を計算している。また x_2 に関する積分は，時点 1 において $[V_1 - W]^+$ なる水量が収集タンクに残ったときの，時点 2 におけるあふれ確率を計算している。

同様に，時点 i ($i \geq 1$) における収集タンクのあふれ確率 P_i は，次式で計算される。

$$\begin{aligned}
P_i &= \int_0^V g(V_0) \int_0^{V-[V_0-W]^+} f(x_1) \int_0^{V-[V_1-W]^+} f(x_2) \\
&\quad \times \int_{V-[V_{i-1}-W]^+}^{\infty} f(x_i) dx_i \cdots dx_2 dx_1 dV_0 \quad (5.7)
\end{aligned}$$

以上より，故障発生後の設備容量の評価の目やすとなる， N 日目までの収集タンクのあふれ確率 I は，次式で計算される。

$$I = \sum_{i=1}^N P_i \quad (5.8)$$

ただし， N ：故障の修理に要する日数である。

故障発生時点の収集タンク内の廃液の分布の確率密度関数 $g(V_0)$ については、実測で求める方法もあるが、ここでは廃液発生量の確率密度関数 $f(x)$ より簡易に求める方法を示す。収集タンク内の廃液の量は、故障発生時点で平衡状態に達していると考えられる。平常運転中の1日あたりの処理可能量を W_0 とすると、平衡状態においては収集タンク内の廃液量 V_0 は、推移式(5.3)式より次式を満足する。

$$\begin{aligned}
 g(V_0) &= \int_0^\infty f(V_0 - [v - W_0]^+) g(v) dv \\
 &= f(V_0) \int_0^{W_0} g(v) dv + \int_{W_0}^\infty f(V_0 + W_0 - v) g(v) dv
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

この式は、前の時点の廃液量が v のとき、 $x = V_0 - [v - W_0]^+$ なる廃液が発生すると、廃液量が V_0 となることを示している。

この(5.9)式の積分方程式は特殊な関数については解析的にも解けるが、ここでは以下のようにある仮定を置いて、一般的に(5.9)式を^{脚注)}解く。前節で述べたように、平常運転状態においては W_0 を越える廃液発生^{脚注)}の確率は小さいから、前日の処理において廃液が収集タンクに残ることはない^{脚注)}と仮定する(付録参照)。

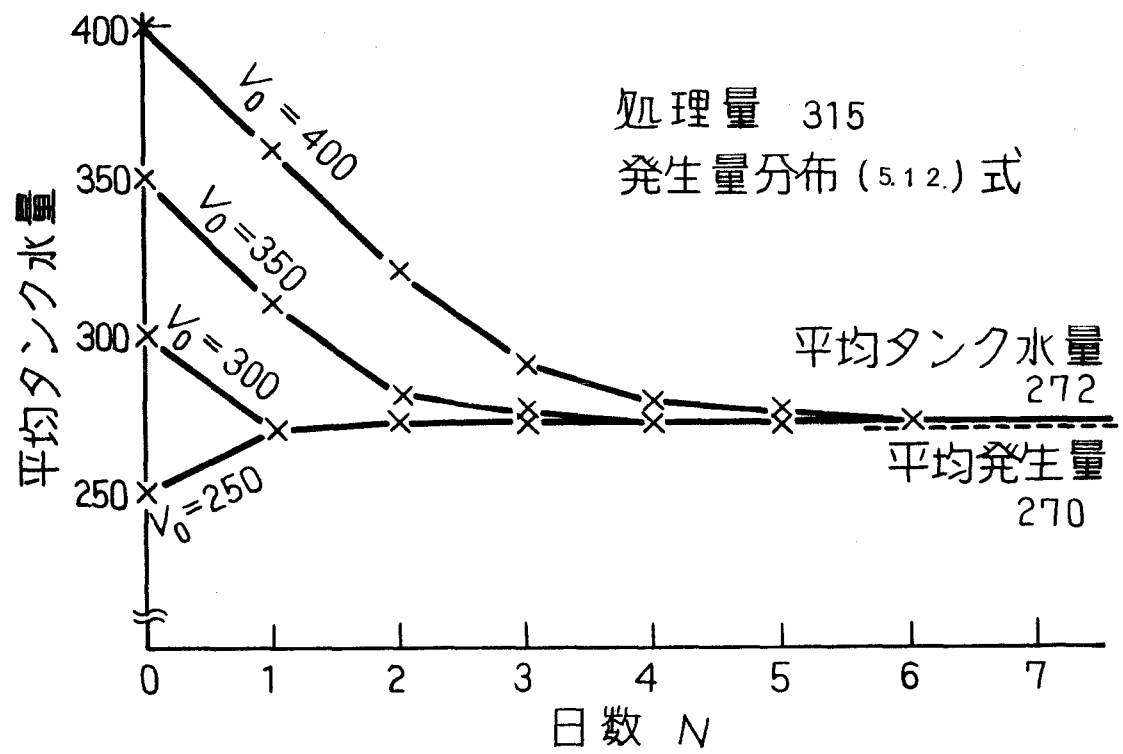
$$\int_{W_0}^\infty g(v) dv = 0
 \tag{5.10}$$

(5.10)式を仮定すると、 $g(v) \geq 0$ より(5.9)式の第2項は0となり、次のように近似できる。

$$g(V_0) = f(V_0)
 \tag{5.11}$$

廃液発生量の分布として、次式の確率密度関数で与えられるガンマ分布を考えた場合の、収集タンク水量の平均値の平衡状態への収束の様子を第5.2図に示す。

脚注) 本章では、故障時の処理能力の分類評価に目的があり、第5.5節の例でもわかるように精度はあまり必要でない。また、 $f(x)$ の精度も $g(v)$ に影響するので、応用面からは(5.11)式の近似で十分である。



第 5.2 図 タンク水量平均値の推移状況

$$f(x) = 2.3 \times 10^{-6} (x - 190)^{9.7} e^{-0.133(x-190)} \quad (5.12)$$

収集タンク水量は，図に示すように急速に平衡状態に収束することがわかる。信頼性評価の対象となるプラントにおいては，一般に故障前のプラントの処理可能量 W_0 が平均廃液発生量を越えており，故障発生時に (5.11) 式で示される平衡分布が成立していると考えても一般性を失わない。

5.3.2 平均値を用いる評価との比較

従来，故障時のプラントの能力評価は，残存処理能力と廃液の平均発生量との比較で行われていた。本節では，提案手法と廃液の平均発生量で故障を判定した場合の違いについて検討する。廃液の平均発生量を μ とする。廃液が処理できるかどうかの判定は，処理可能量 W が次式を満足しているかどうかで行なえる。

$$W \geq \mu - (V - V_0) / N \quad (5.13)$$

ここで， V_0 は収集タンク内の初期水量であるが，廃液発生量と同様に初期水量分布の平均値を用いるとする。 $V_0 = \mu$ である。

廃液発生量の分布として，(5.12) 式のガンマ分布を例にとると， $\mu = V_0 = 270$ である。 $N = 3$ ， $V = 400$ とすると，(5.13) 式より処理可能な最小の処理可能量 W は， $W = 227$ となる。一方，分布を考える本方法によると，処理可能量 W に対応するあふれ確率は第 5.3 図のようになる。(5.13) 式より決めた $W = 227$ では，ちょうど 50% の確率であふれが生じることがわかる。

第 5.3 図に示した例は収集タンクの容量が平均廃液発生量と比べ比較的大きい場合であったが，収集タンクに接続する弁，ポンプなどの故障により利用できる収集タンクの容量が小さくなる場合には，廃液発生量のばらつきの影響が顕著に現われる。処理可能量 W が (5.13) 式で計算される W よりも大きい範囲においても，かなり大きい確率であふれが生じることになる。この例を $V = 300$ ， $N = 3$ の場合について第 5.4 図に示す。一方，平均値だけの評価では，処理可能な最小の処理可能量は $W = 260$ となる。

以上示したように，平均値のみを用いるプラント故障の判定では，収集タンクの大きさが小さい場合には，プラントの機能を過大に評価することになる。また，ある一つの境界の値しかつかめない。一方，本方法では，各処理可能量に対応するあふれ確率が，収集タンク系の機能低下および処理系の機能低下の場合も同一の方法で計算できる。またプラント評価者が，任意のあふれ確率を基準として故障の判定が行なえる。

5.4 信頼性評価の手順

負荷の発生量が不確定に変動するプラントの信頼性評価手順の概要を第 5.5 図に示す。
以下、第 5.5 図に沿って手順の要点を説明する。

- (1) プラントで処理する負荷の発生量の分布を決める。
- (2) プラント構成機器の故障時に、各種運転方法を採用した場合のプラントが故障と見なされるあふれ確率を決定し、それぞれの運転方法に対応するプラントの故障の定義を行なう。
- (3) 処理プラントを構成する機器あるいはサブシステムの故障を抽出する。この機器またはサブシステムの故障想定時の処理プラントの使用可能な設備容量を求める。この設備容量に対し、収集タンクのあふれ確率を(2)項で決定した運転方法ごとに計算する。得られたあふれ確率の値を基準値と比較し、どの運転方法を採用した場合、故障と見なすかを決定する。
- (4) 考えうるすべての機器またはサブシステムの想定故障の故障ランクへの分類を行なった後、各故障ランクごとの発生確率を計算し、ヒストグラムなどに整理し評価する。

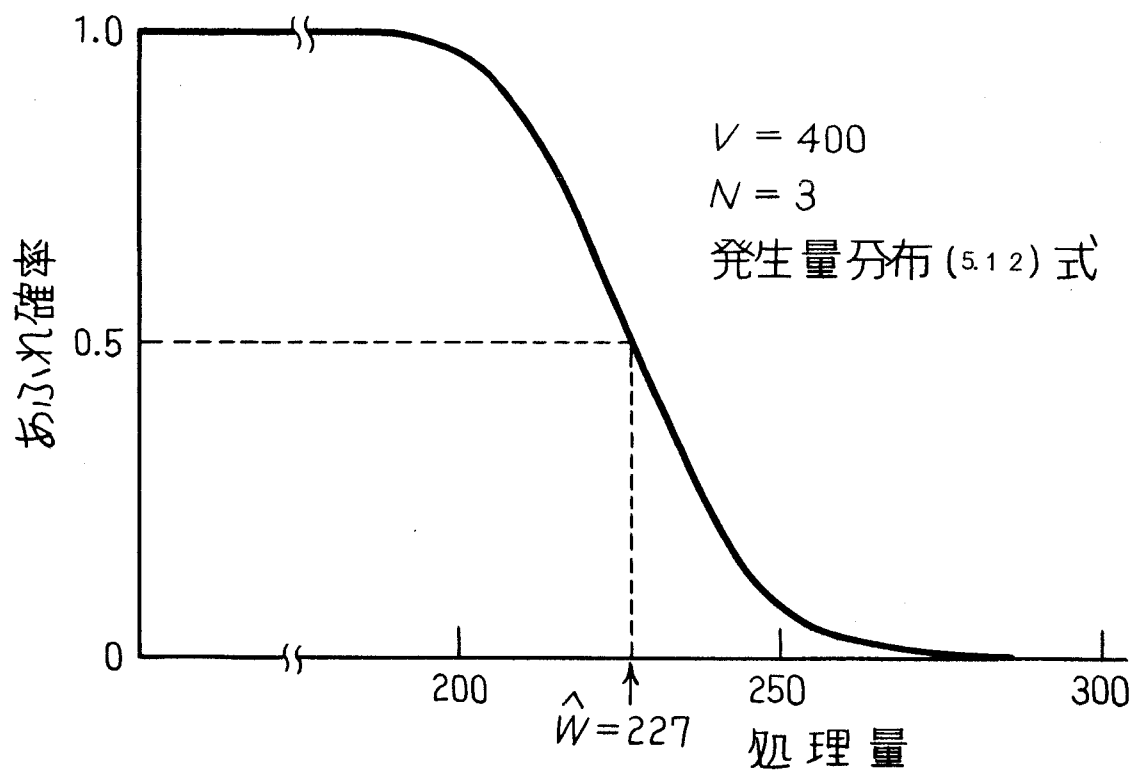
5.5 あふれ確率による信頼性評価手法の廃液処理プラントへの応用

提案した信頼性評価手法を、ある 4 基の廃液発生プラント群から発生する廃液を処理する廃液処理プラントの 3 つの系統構成案について、信頼性の比較評価に適用した。以下、その概要を述べる。

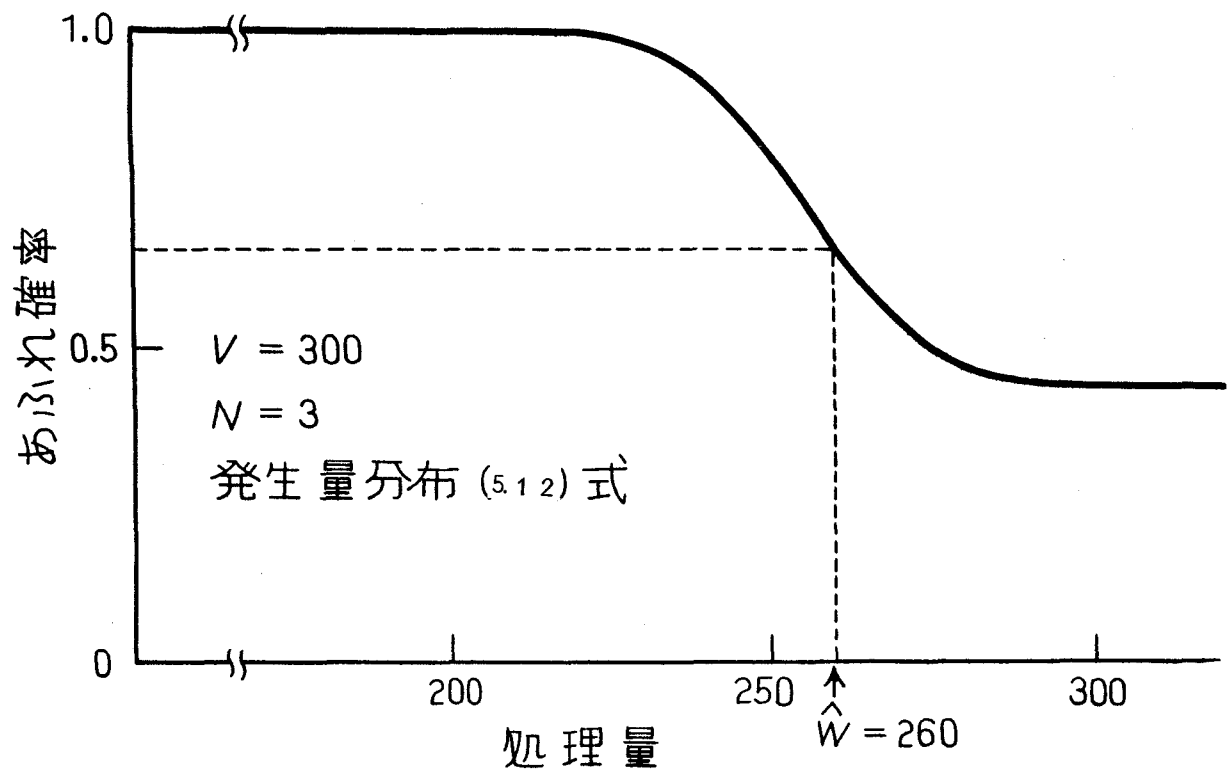
5.5.1 廃液処理プラントの概要

(a)案は、1 プラントごとに廃液処理プラントを設ける構成で、合計 4 基の廃液処理プラントを設ける案である。その構成を第 5.6 図に示す。(b)案は、2 プラントずつを組にし、2 基の集中廃液処理プラントを設ける構成である。その構成を第 5.7 図に示す。第 5.8 図に示す(c)案は、4 プラントからの廃液を一括して 1 基の集中廃液処理プラントで処理する構成である。各処理プラント案とも、処理プラントの全体としての処理容量は同じである。しかし、収集タンクに関しては、(a)案では全体で 12 基、(b)案では全体で 8 基、(c)案では 5 基と、集中処理を行なう方が余裕を共有できるため小容量となっている。

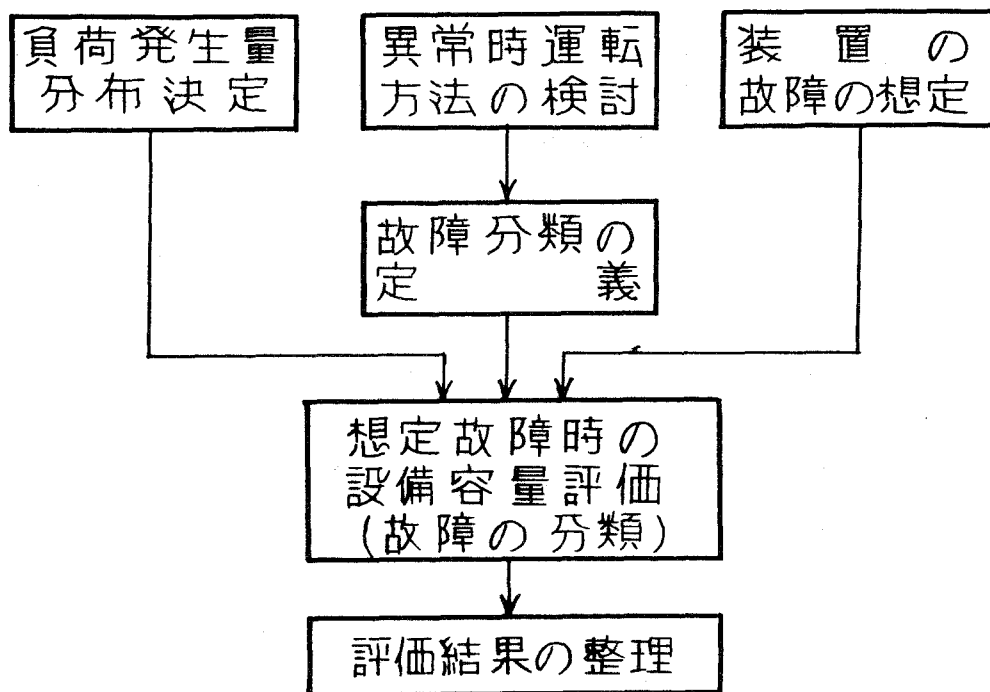
この処理プラントは 1 日 8 時間運転を原則としているが、運転前後の前準備、後処理などがあり、プラントが廃液を処理している時間は 1 日 6 時間である。一方、廃液の発生は



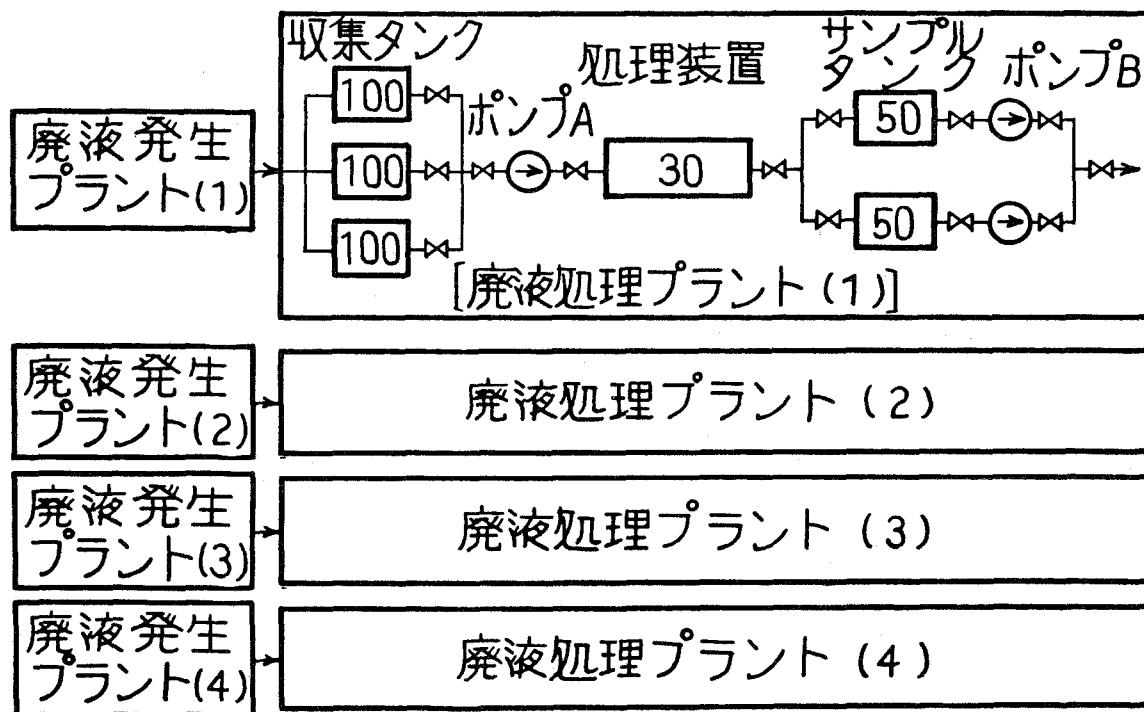
第 5.3 図 処理量とあふれ確率の関係
 (V が大きいとき)



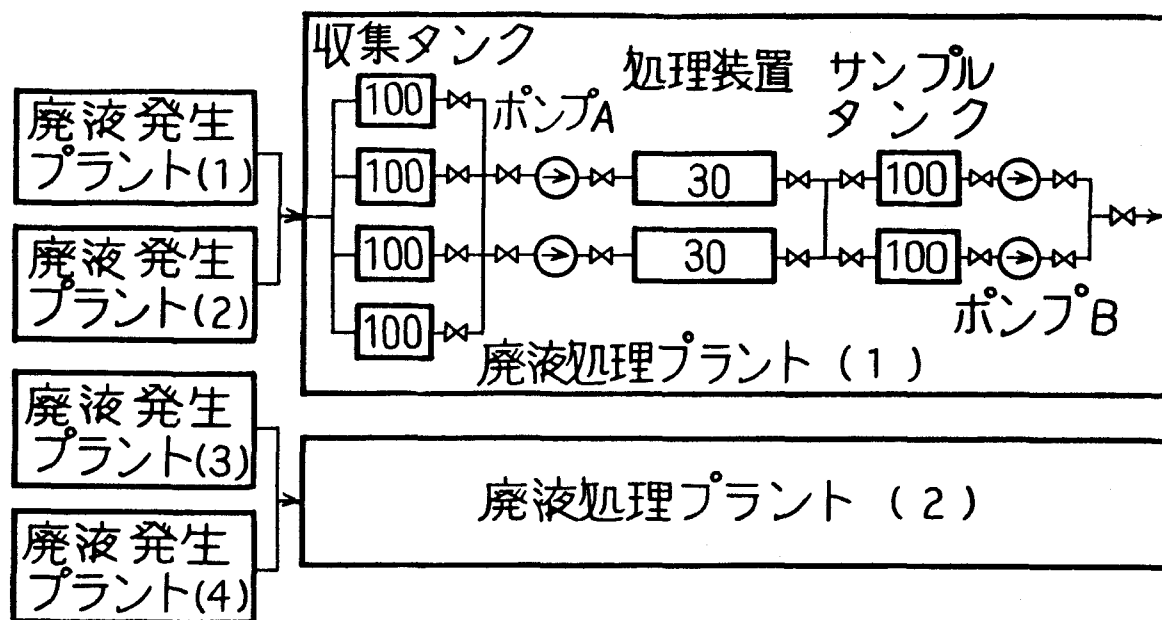
第 5.4 図 処理量とあふれ確率の関係
 (V が小さいとき)



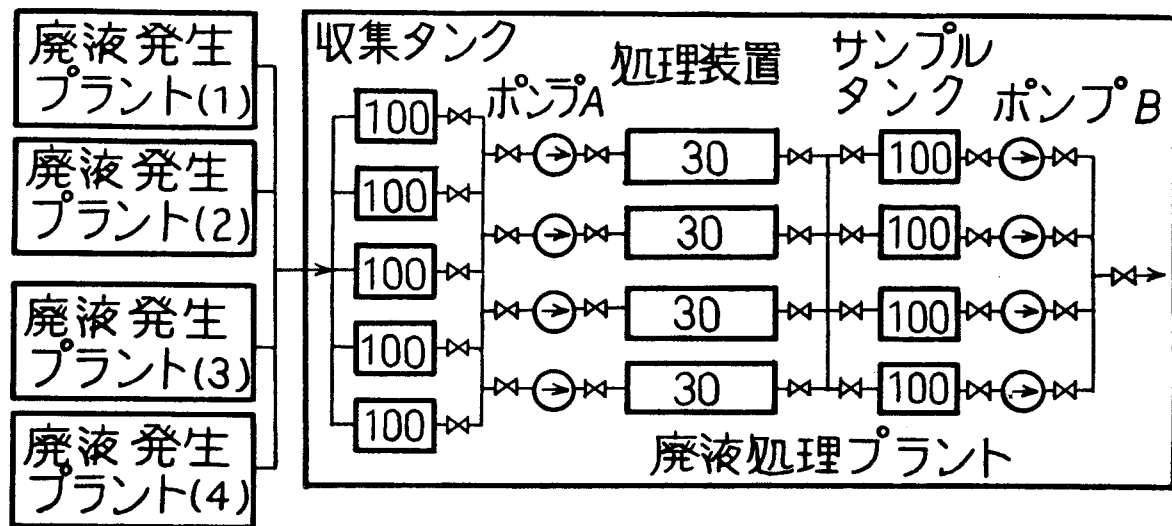
第 5.5 図 廃液処理プラントの信頼性評価手順



第 5. 6 図 廃液処理プラント構成案 (a) 案



第 5.7 図 廃液処理プラント構成案 (b) 案



第 5. 8 図 廃液処理プラント構成案 (c) 案

24時間連続であり、夜間に発生する廃液は収集タンクに蓄えられる。

廃液処理プラントで異常が生じた場合や廃液発生量が極端に多くなった場合には、処理プラントの運転時間を延長して対処するよう計画されている。そこで、廃液処理プラントの故障を、廃液処理プラントの運転時間に対応して、四つのランクに分け第5.1表に示すように定義する。なお各故障ランクで、「処理できる」、「処理できない」の判定は、第5.3節で述べた収集タンクのあふれ確率を用いて行なう。

5.5.2 廃液発生量分布の推定

処理プラントの負荷である廃液の発生量の一例を第5.9図に示す。発生量に周期性はない。この廃液発生量の分布を推定するため、種々の期間、種々の同種のプラントにおける実際の発生量の累積出現分布と、平均値、分散より推定した正規分布、対数正規分布、ガンマ分布との一致度の検討を行なった。一例を第5.10図に示す。データの一致度と、分布を加え合せる場合の取り扱いの容易さを考慮して、ガンマ分布を採用した。ガンマ分布の確率密度関数は次式で表わされる。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} & : x \geq x_0 \\ 0 & : x < x_0 \end{cases} \quad (5.14)$$

ただし、 $\Gamma(\alpha)$ ：ガンマ関数

各プラントからの廃液発生量分布が独立で、それぞれの分布が等しく、その確率密度関数 $f(x)$ を(5.14)式で表現すると、ガンマ分布の性質より集中処理の場合の廃液発生量の分布もガンマ分布となる。このようにして決定した各処理系系統案を評価する際の廃液発生量分布のガンマ分布のパラメータ値を第5.2表に示す。

5.5.3 故障時の設備容量評価と信頼性評価

第5.11図は、第5.7図に示した(b)案のプラントに対する信頼性評価のための表の一部で、ポンプAが故障した場合を示している。(b)案の処理系統案において、ポンプAが1基使用できない場合、設備容量は時間あたり30となる。修復に要する日数 N は3日とする。この条件のもとで(5.7)式を計算すると、 k 日目までに収集タンクのあふれ確率 P_k は

第 5.3 表のようになる。従って、(b)案のポンプ A の故障は、故障ランク「2」に属することがわかる。また、ポンプの故障発生確率を 1 基あたり $1 \cdot 0^{-5} \cdot 1 \text{ / 時}$ ³⁾ とすると、(b)案の場合ポンプ A は 2 基あるので、全体で $2 \times 1 \cdot 0^{-5} \cdot 1 \text{ / 時}$ となる。

以上で、一つのコンポーネントについての故障時の設備容量の評価が終了する。この作業を全コンポーネントについて行ない、各故障ランクごとの故障発生確率を合計する。この結果を第 5.12 図のヒストグラムに示す。第 5.12 図より、1 プラント 1 処理系の集中処理を行なわない(a)案の構成では、故障ランク「4」の廃液発生源のプラント運転にまで影響を及ぼす故障が大部分を占めているが、集中化により外部的に見て故障と言える故障がほとんど 0 になることがわかる。また、集中化に伴い運転時間を延長する必要も少なくなることがわかる。

このように、本節で示した方法により故障を定義することにより、系統案の信頼性の立場からの比較を定量的に評価できる。

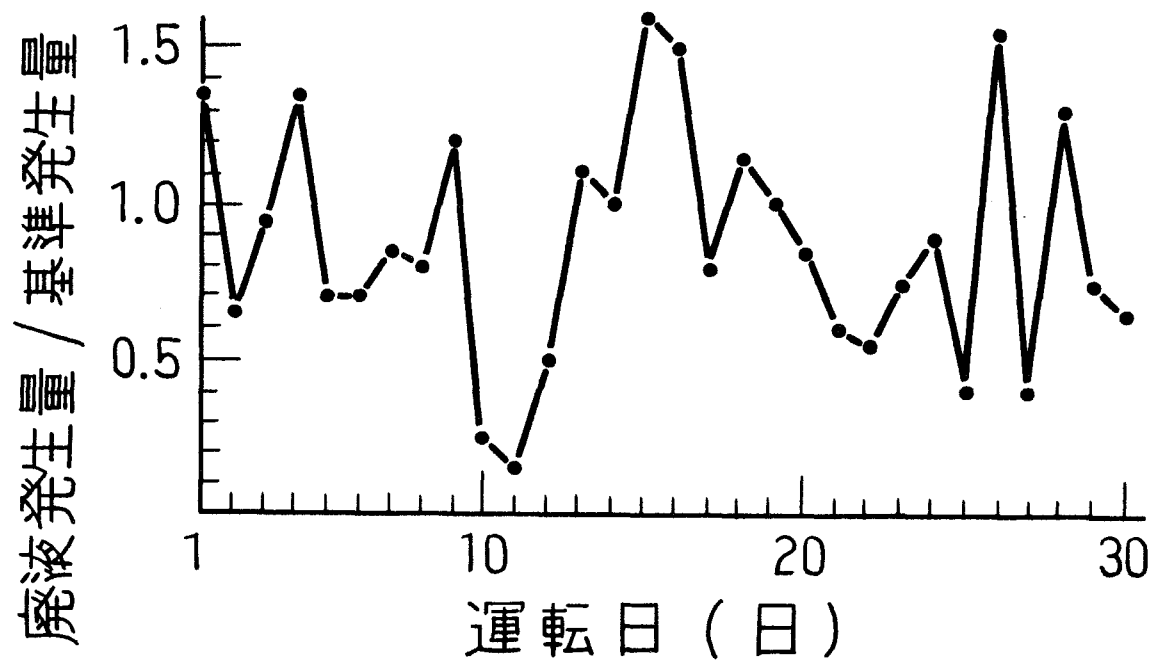
5.6 結 言

本章では、構造化作業とその前後のフェーズの作業との関連づけという立場から、価値体系と実システムの評価との関連について検討を試みたものである。ある廃液処理プラントの信頼性評価問題を例として、システムの目的、実システムの特徴の両面からの検討により、これらに合致した評価基準として「あふれ確率」なる量を導入し、それを具体的に定量化する所まで展開した。まず、プラント利用者の立場から信頼性評価の基準を明確にし、廃液発生プラントを停止させないこと、運転時間を延長しないこと、の 2 点より信頼性評価を行なえばよいことを示した。次に、プラントの状態をバッファ系のあふれ確率を用いて把握できることに着目し、その確率値と前もって定めてある基準値により、プラントが故障かどうかを判定する方法を示した。さらに、具体的にあふれ確率を計算する方法を示した。この方法により、任意の安全度を見込んで信頼性の評価が行なえる。また、バッファ系の容量が小さくなる場合のように負荷のばらつきの影響が大きく現われるときにも、処理機器の故障の場合と同様の方法で故障の判定を行なうことができる。最後に、本手法を、あるプラント群の集中廃液処理プラントの系統構造案の信頼性の比較評価に適用し、本手法により集中廃液処理による信頼性の向上の程度を定量的に示し得ることを例証した。

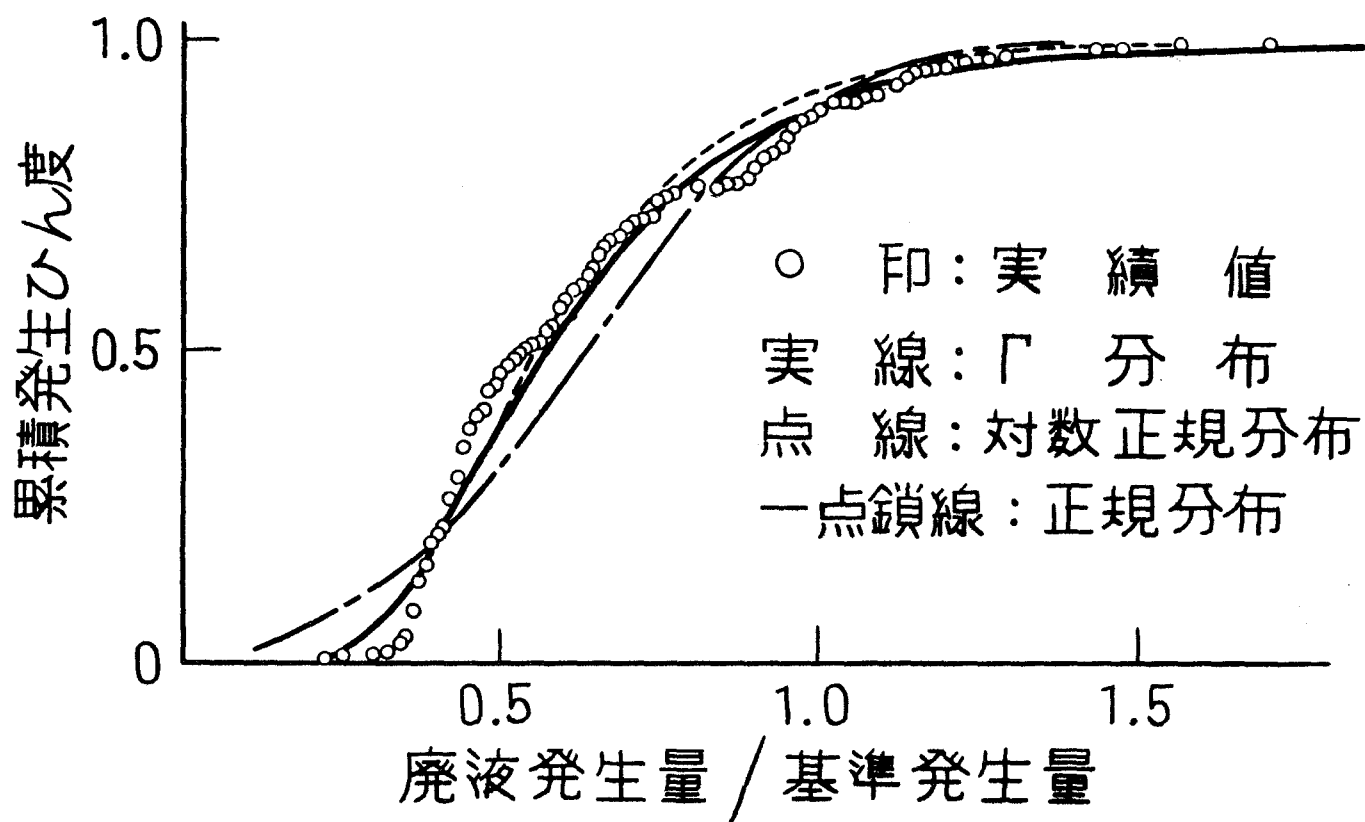
本章の内容は、価値体系と評価との関連づけを試みたものであるが、まだ、一般的な評価基準を設定するための方法論としては十分にまとまっていない。今後、さらに事例を蓄

第 5.1 表 故障時運転方法による故障分類定義

ラ ン ク	8 時 間 運 転 で 処 理 で き る 確 率	1 2 時 間 運 転 で 処 理 で き る 確 率	2 4 時 間 運 転 で 処 理 で き る 確 率
1	6 0 % 以 上	—	—
2	6 0 % 未 満	6 0 % 以 上	—
3	—	6 0 % 未 満	6 0 % 以 上
4	—	—	6 0 % 未 満



第 5.9 図 廃液発生量の変化例



第 5.10 図 廃液発生量の累積出現分布と近似分布

第 5. 2 表 推定ガンマ分布のパラメータ値

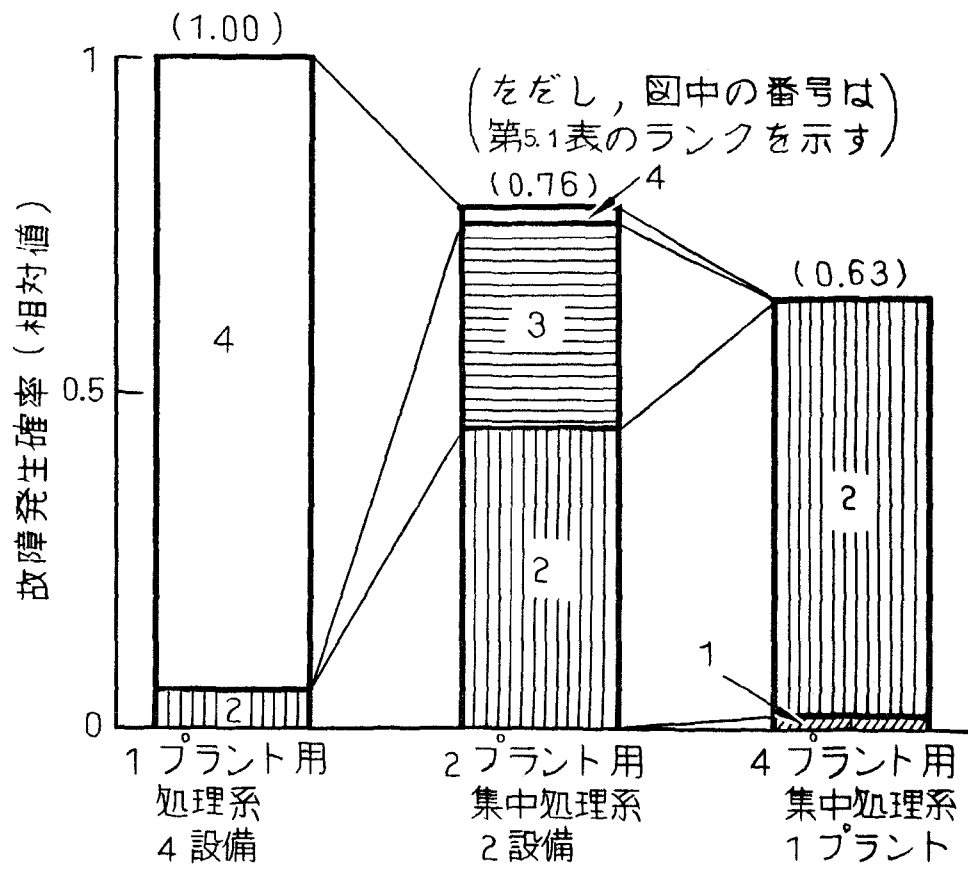
パラメータ値	(a) 案 1 プラント	(b) 案 2 プラント集中	(c) 案 4 プラント集中
α	5. 3	1 0. 7	2 1. 4
β	0. 1 3 3	0. 1 3 3	0. 1 3 3
x_0	9 5	1 9 0	3 8 0
$C=\beta^\alpha/\Gamma(\alpha)$	$6. 0 \times 10^{-7}$	$2. 3 4 \times 10^{-6}$	$3. 6 \times 10^{-38}$
平 均 (備考)	1 3 5	2 7 0	5 4 0
分 散	3 0 0	6 0 0	1 2 0 0

機器名	容量 × 基数	故障 モード	故障 確率 (時間 ⁻¹)	処理プラント運転時間 ごとの収理可能性			故障 分類	備考
				8時間	12時間	24時間		
ポンプ A	30 × 2基	破 損 不動作 つまり	10 ⁻⁸ 10 ⁻⁵ 10 ⁻¹⁰	1.0	0.0008	<10 ⁻⁷	2	
弁								

第 5.11 図 (b) 案 の 評 価 表 の 1 部

第 5.3 表 ポンプ A 故障時の収集タンクあふれ確率

運転時間	第 1 日目の あふれ確率 P_1	第 2 日目の あふれ確率 P_2	第 3 日目の あふれ確率 P_3	$I = P_1 + P_2 + P_3$
8 時間	0.146	0.759	0.094	0.9998
12 時間	0.00028	0.00025	0.00028	0.00081
24 時間	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$



第 5. 12 図 集中廃液処理系の信頼性評価ヒストグラム

積し，その中から標準的な方法論をまとめていく必要がある。

なお，本章で提案したプラントの設備容量を収集タンクのあふれ確率を用いて評価する方法は，矢島氏と筆者らによりプラントの設備計画時における収集タンク容量と処理容量のバランスの決定にも応用されている。^{8,7)} また，信頼性評価の結果として，通常非常に低いアンアベイラビリティの値が得られる。このため，他の評価項目との多目的評価を行なう際，意思決定者が十分な判断が出来ないという問題が生じている。これに対し，矢島氏と筆者らは，アンアベイラビリティを代替する，より判断が容易な評価項目を選択し，変換^{10,11,12)}された多目的評価問題を解くアプローチを提案している。

第5章の参考文献

- (1) 第1章の参考文献(28)
- (2) 第1章の参考文献(29)
- (3) U.S.AEC ; WASH-1400 : Reactor Safty Study (Aug, 1974)
- (4) 中川 他 ; 2 値数指数故障分布を持つ2ユニット並列冗長システム , 電子通信学会論文誌 D, Vol. 58-D, No. 7, pp 430-431 (昭和 50 年)
- (5) 島岡 ; 故障モードと影響の解析 - FMEA / FMECA , 電気学会誌 , Vol. 95, No. 3, pp 221-224 (昭和 50 年)
- (6) 藤木 ; 大規模システムの信頼性予測評価法の実態と今後の課題 , 電子通信学会技術報告 , R78-40 (昭和 53 年)
- (7) K. Strandberg ; Reliability Prediction in Telephone Systems Engineering, Proceedings of 7th Int. Teletraffic Congress, No 537 (1973)
- (8) 矢島 , 薦田 , 他 ; 不確定負荷を処理するシステムの計画手順 , 昭和 53 年電気学会東京支部大会予講集 , No. 90
- (9) 矢島 , 薦田 , 他 ; 調整可能な不確定負荷を処理するシステムの計画手順 , 昭和 54 年電気学会全国大会予講集 , No. 1321
- (10) 矢島 , 薦田 , 他 ; アンアベイラビリティとコストとの協調に関する一考察 , 電気学会論文誌 C , (投稿中)
- (11) 矢島 , 薦田 , 他 ; 高アベイラビリティシステムにおけるアンアベイラビリティとコストとの協調 , 昭和 54 年電気学会東京支部大会予講集 , No. 333
- (12) H.Yajima, N.Komoda, et al ; A new interactive method for biobjective optimization problem, Proceedings of 1981 International Conference on Cybernetics and Society (Oct. 1981) (掲載決定)

第 6 章 結 論

第 6 章 結 論

本論文は、大規模複雑なシステムの計画における、目的の明確化、モデルの構造決定、信頼性評価などの問題に対し、提案して来た技法を、システムの構造化という立場からまとめ直したものである。その内容は、階層的構造化アルゴリズム、構造化作業を支援する Man-Machine システム、対話型目的樹木作成法、プラントの信頼性評価法の 4 つから成る。以下に本研究の成果と今後の研究課題を述べる。

第 2 章においては、全体構造が未知で、要素間の断片的な関連しか理解されないシステムに対し、断片的な関連のみから全体構造を生成する階層的構造化アルゴリズム H S A (Hierarchical Structural Analysis) を提案した。H S A は、種々の要因により生じるサイクリックな関連をフィードバック枝で表現するよう階層化できる点に特徴がある。このように階層化することにより、大きいサイクルを含むシステムをも、理解しやすい階層的構造に整理することができる。H S A の有効性を、サイクルを含むモデルの作成、目的樹木の作成、等への適用例を通じ示した。

第 3 章においては、構造化の過程における、システム分析者と計算機との繰り返し反復作業の効率化のため開発した P P D S システムについて述べた。P P D S システムには、H S A と筆者が共同開発した S S A が組み込まれている。P P D S システムの構成、機能を述べ、システム開発手順の立案、システム要求分析のための属性分析等の適用を示し、その有効性を示した。

第 4 章においては、構造化作業そのものの手順をまとめるという立場より、システムの目的の構造化の 1 手法である目的樹木の作成方法に関し、関与者利害関連表、階層的構造化アルゴリズムによる見直し法、P P D S システムによる修正支援、より成る手法を提案した。本手法では、関与者利害関連表により抽出した目的項目を階層化することにより、あいまいな項目、重複する項目、見落している項目などを構造図の中で浮き上がらせる。これにより、最初にぼう大な数の項目をチェックする必要がなくなり、目的樹木の作成が効率化される。適用事例により、従来作成が困難であった項目数 2 0 0 を越えるような大規模な目的樹木が作成できること、項目数 1 0 0 程度の目的樹木の作成においても従来の 1/2 以下の工数で可能となること、作成された目的樹木の質の向上が期待できること、等の効果を示した。

第 5 章においては、構造化作業とその前後のフェーズの作業との関連づけという立場か

ら，ある廃液処理プラントの信頼性評価問題を例として，価値体系と実システムの評価との関連について検討を行なった。評価基準として「あふれ確率」なる量を導入し，その確率値を前もって定めた規準値により，プラントが故障かどうかを判定する方法を示した。さらに具体的にあふれ確率を計算する方法を示した。この方法があるプラントにおける集中廃液処理プラントの系統構成案の比較評価に適用し，信頼性の差を定量的に示し得ることを示し，有効性を示した。

システムの構造を分析する技術は，システムの大規模化，複雑化にともない今後ますます重要となると考えられる。本論文においても，各章の結言において筆者の研究の延長線上にあるいくつかの研究課題に触れて来た。それらの課題をまとめると以下のようになる。

- (1) より複雑な構造を持つシステムを分析するためには，単に階層化するだけでなく，何らかの分類を行ないながら階層化を行なうといった，より高度な機能が要求される。数量化理論等のクラスタ化手法を構造化手法に組み込んでいくこと等が考えられる。その1つの例として，筆者が共同開発しPPDSシステムに組み込んだSSAがあげられる。また，構造作業化のMan - Machine的性質から，問題ごとの構造化の手順の整備とそれに適した構造分析結果のより理解しやすい表示法，ガイダンス方式の開発が望まれる。
- (2) システム計画手順の中で，J.N.Warfieldは目的樹木を「価値体系の設計」の中に位置付けている。しかし，目的樹木の作成とそれに続く作業との関連は必ずしも明確でなく，「問題に対する共通の認識が得られる」というような抽象的な表現でしか位置付けられていない。このため，実際にシステム計画を遂行してその効果を理解してもらえることが多い。従って，システム計画の手順において，目的樹木とシステム設計あるいは評価との関連を明確にすることが今後の大きな課題であると考えられる。その1つの端緒として，計算機応用システムの計画に関し，中尾博士と筆者らで，目的樹木とシステム設計を結ぶ一連の手法を開発中である。いくつかの種類のシステムについて，このような一貫的なシステム計画の手法を確立していく必要がある。

謝 辞

本論文で述べたシステムの構造化に関する研究は，現場の研究者として具体問題の解決にあたる中で発見した解決方法の汎用化を努める中で，技法として提案し実証するという過程の中で行なったものである。したがって，本研究の推進に当っては，下記の多くの方々の御理解，御指導，御援助を賜った。

本論文をまとめるに際しては，大阪大学工学部 藤井克彦教授，鈴木胖教授，児玉慎三教授，および大阪大学健康体育部 黒田英三教授より，終始有益かつ懇篤なる御指導と御鞭達を賜った。

本研究の総ての段階において，日立製作所システム開発研究所 所長 三浦武雄博士には，研究の機会を与えて頂くと共に，暖かい御指導と御鞭達を賜った。また，日立製作所システム開発研究所 主任研究員 春名宏一博士には，常に有益なる御指導と御鞭達を賜った。

第2章，第3章および第4章に係る研究の段階では，東京工業大学工学部 市川惇信教授，大阪大学工学部 白川功助教授，日立製作所ソフトウェア工場 部長 篠沢博氏，システム開発研究所 副所長 川崎淳博士，同所 部長 青山義彦氏，同所 主任研究員 中尾和夫博士に，御指導と御鞭達を賜った。また，日立製作所ソフトウェア工場の方々には，本研究に関し有益な御討議をいただき，提案手法の実問題への適用に御協力いただいた。

第5章に係る研究の段階では，日立製作所電力事業本部 副技師長 田上嵩博士，システム開発研究所 主管研究員 大成幹彦博士に，御指導と御鞭達を頂いた。また，東京電力㈱，中国電力㈱，日立製作所電力事業本部，日立工場の方々には，実プラントのデータを開示して頂くと共に，種々の有益な御討論を頂いた。

また，本研究の遂行において，矢島氏，梶氏を始め，日立製作所システム開発研究所の多数の方々の御援助を頂いた。

ここに，以上の方々に深甚な謝意を表する次第である。

付 録

付 録

(5.1 0) 式が成立しない場合

(5.9) 式は次のように変形できる。

$$\begin{aligned}
 g(V_0) &= k f(V_0) + \int_{W_0}^{\infty} g(v) f(V_0 + W_0 - v) dv \\
 &\leq k f(V_0) + h \int_{W_0}^{W_0 + V_0} f(v_0 + W_0 - v) dv \\
 &= k f(V_0) + h F(V_0)
 \end{aligned}
 \tag{付・1}$$

ただし，

$$k = \int_0^{W_0} g(v) dv \tag{付・2}$$

$$h = \max_{W_0 \leq v \leq \infty} g(v) \tag{付・3}$$

$$F(V_0) = \int_0^{V_0} f(v) dv \tag{付・4}$$

$g(x)$ は確率密度関数であるので，0 から V_0 までの積分は 1 に等しい。(付・1) 式の両辺を積分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 1 &= k \int_0^{V_0} f(v) dv + h \int_0^{V_0} F(v) dv \\
 h &= \frac{1 - k F(V_0)}{\int_0^{V_0} F(v) dv} \\
 &= \frac{1 - k F(V_0)}{V_0 F(V_0) - \int_0^{V_0} v f(v) dv}
 \end{aligned}
 \tag{付・5}$$

通常， V_0 を越える負荷の発生は極めて小さいから， $F(V_0)$ は 1 に等しい。また，分母第 2 項は負荷発生量の平均値に等しい。従って，(付・5) 式は次のように簡単化できる。

$$h = \frac{1 - k}{V_0 - \mu} \quad (\text{付・6})$$

ただし， μ は負荷発生量の平均値である。次に，(付・2) 式に，(付・1) 式，(付・6) 式を代入し， k の値を求めると次式が得られる。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\int_0^{V_0} F(v) dv}{\int_0^{W_0} F(v) dv} \{1 - F(W)\}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{V_0 - \mu}{\int_0^{W_0} F(v) dv} \{1 - F(W)\}} \quad (\text{付・7})$$

第 5.7 図の処理プラントを 8 時間運転した場合を考える。廃液発生量分布は (5.12) 式であるとする。 $\mu = 270$ ， $V_0 = 400$ ， $W_0 = 360$ である。(付・7) 式，(付・8) 式より， $k = 0.997$ ， $h = 0.00003$ となり，収集タンク内の廃液分布を (5.11) 式で十分近似することができる。なお，上記の場合で， $W_0 = 300$ ， 320 ， 340 とした場合の k ， h の値はそれぞれ $(0.72, 0.002)$ ， $(0.91, 0.0007)$ ， $(0.98, 0.00015)$ となり， W_0 が平均値の 2 割増程度であれば，(5.11) 式で近似しても実用上問題がない。