



Title	システム・テストの設計および方式に関する研究
Author(s)	福井, 徹
Citation	大阪大学, 1968, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2117
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・テストの設計および 方式に関する研究

福 井 徹

昭和43年1月

内 容 梗 概

本論文は、著者が大阪大学大学院工学研究科（通信工学専攻）在学中に行った、システム・テストの設計および方式に関する研究をまとめたものである。

本論文全体は5章より成り立っている。第1章序論において、研究の現状および本研究の立場についての概説が述べられている。第2章は、発表論文(1)、(2)、(3)、(4)を中心に、有限状態システムのテスト入力系列の決定法について述べたものである。第3章は発表論文(5)、(6)、(7)、(8)を中心に、故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察について述べたものである。第4章は発表論文(9)を中心に最適システム・テスト方式に関する研究について述べたものである。第5章は結論として、本研究の新らしい成果および今後に残された問題について述べたものである。

宇宙工学の分野のみならず、あらゆる工学的分野にわたって、システムが任意の運用命令時刻に、最適な動作状態にあることが、きびしく要求されるようになってきている。本論文では、運用段階におけるシステム・テストがこれらの工学的問題を解決する上で極めて重要な位置にあるという観点にたって、システムの故障検知問題および、テスト方式に関して考察を行ったものである。

第2章では、強結合の有限状態システムを対象にして、システムの故障検出のためのテスト入力系列を求める方法について考察し、

- (1) システム M_0 をある特定の状態（初期状態）に遷移させる入力系

列 I_0 を求める。

(2) 適当な入出力系列 I_1-O_1 (I_1 としては M_0 の固有状態数が確認できる入力系列が適当であるとしている) を与え, この関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を求める。

(3) $\overline{M}$ の各要素と M_0 とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を求める。という段階からなる決定法を提案している。

この方法をシステム例に適用して, この方法が, これまでに提案されている決定法に比べてすぐれたよさをもつことと, 決定実行性およびテスト入力系列の短縮化の二つの基本的要求を最適に満足させようとする点で, テスト入力系列決定の指導理念に従った一般性のある方法であることを示している。

第3章では, 故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察を述べている。機能的に結合されたサブシステムから構成されたシステムについて, これまでの故障原因要素抽出法の多くは, 入出力端子以外の内部端子のすべてを用いることを条件にしているが, この条件は, 構成要素が集積化, 複雑化するにつれ, 極めてきびしいものとなっている。

本章は, 観測可能な内部端子の数が制限されている条件のもとで, 故障検知に最も有効な観測出力の決定法を論じたものである。

まず観測出力の状態が, システムを構成する論理ユニットを区分することに着目して, 観測出力の原因要素抽出に関してもつ平均情報量を定義している。ついで, 決定操作の可能な範囲で, できるだけ大きな平均情報量が得られるような観測出力の組決定として, 逐次観測出力決定法を提案し, この方法によって決まる観測出力の組のもつ平均情報量と, 観測出力の組の最大情報量との近似関係を与えている。

また，故障検知のための情報源としては，観測出力の他にテスト入力も存在することから，観測出力とテスト入力の互換性についても述べている。

第4章は，最適システムテスト方式に関する研究である。運用段階にあるシステムの稼働度を高くするために，保守のとるべき動作方式は，システムの信頼度，および保守度の両者を考慮した上で決定されなければならない。この保守のとるべき動作方式が，システムのテスト方式にほかならない。

本章では，周期点検方式にしたがって稼働度の向上をはかっているが，そのさい保守度の概念を導入し，新らしいパラメータの点検時間が，システムの稼働度を与える効果を定量的に論じ，最適点検時間を与える関係式を求めている。

関 連 発 表 論 文

- (1) 福井 徹，中西義郎：

「運用段階でのシステム・テストについての一考察

－ Finite state system を対象にして － 」

オートマトンと自動制御，インホメーション理論研究会資料

(昭 41 - 01)

- (2) 福井 徹，中西義郎：

「 Sequential switching system の故障検出 」

昭和 41 年電気四学会連合大会

(昭 41 - 04)

- (3) 福井 徹，中西義郎：

「システム・テストのための入力系列についての考察

－ 有限状態システムを対象にして － 」

オートマトンと自動制御，インホメーション理論研究会資料

(昭 41 - 06)

- (4) 福井 徹，中西義郎：

「有限状態システムのテスト入力系列決定法」

電子通信学会雑誌 50， 10， P P. 1911 ～ 1917

(昭 42 - 10)

- (5) 福井 徹，中西義郎：

「観測出力決定の情報理論的考察」

インホメーション理論研究会資料

(昭 42 - 01)

- (6) 福井 徹，中西義郎：

「観測出力決定の情報理論的考察」

昭和 42 年電気四学会連合大会

(昭 42 - 04)

(7) 福井 徹，中西義郎：

「故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察」

電子通信学会雑誌 51-C， 01

(昭 43 - 01)

(採 録 決 定)

(8) 福井 徹，中西義郎：

「故障検知のための観測出力とテスト入力の互換性について」

電子通信学会雑誌

(投 稿 中)

(9) 福井 徹，中西義郎：

「Maintenability を考慮した周期点検」

電子通信学会創立 50 周年記念全国大会

(昭 42 - 10)

目 次

第 1 章	序 論	1
1・1	運用段階におけるシステム・テストの位置づけ	1
1・2	本研究の分野に関する諸問題	4
第 2 章	有限状態システムのテスト入力系列決定法	15
2・1	序 言	15
2・2	テスト入力系列決定法	17
2・3	テスト入力系列の決定例	20
2・4	入力系列決定の操作	27
2・5	結 言	34
第 3 章	故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察	37
3・1	序 言	37
3・2	対象とするシステム	38
3・3	観測出力とそれが原因要素抽出に関してもつ平均 情報量	41
3・4	観測出力決定法	47
3・5	故障検知のための観測出力とテスト入力の互換性 について	57
3・6	結 言	60

第 4 章	最適システム・テスト方式に関する考察	62
4・1	序 言	62
4・2	方程式の導出	65
4・3	Availability の数学的表示	69
4・4	具 体 例	73
4・5	結 言	77
第 5 章	結 論	78
	謝 辞	81
	文 献	83

第 1 章 序 論

1・1 運用段階におけるシステム・テストの位置づけ

宇宙工学の分野のみならずあらゆる工学分野にわたって、システムが運用命令時に、与えられた使命を完全に果せる状態にあることが、きびしく要求されている。

このような工学的要求を解決するために、運用段階にあるシステムがその使命を果しうる測度として、Availability⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾（稼働度）、あるいはEffectiveness⁽⁶⁾（有効性）の概念が提案されている。

稼働度の概念はすでに信頼性工学の展開の初期から出されており、当時ではReliability⁽¹⁾（信頼度）、およびMaintenability⁽²⁾（保守度）がその基本的要素と考えられていた。

その後時代の進展にともなって、システムそのものが多様化、複雑化し、かつその運用方法も多様化するにつれ、

(i) たとえ構成要素の信頼度を高めても、システムは予期しえない、またはランダムな故障を生じる。そのため信頼度と保守度の両者を考慮して、任意の運用命令時間においても、正常な動作状態におくための対策がなされねばならない。

(ii) 保守度の工学的問題としては、故障検知と故障要素の補修とがあるが、システムの複雑化、大規模化は従来の保守方法をほとんど無力なものとし、新たな故障検知技術の開発が要求されている。

等の諸問題が発生し、稼働度の向上をはかるためには、保守の段階で種々の対策が考案されなければならないが、これについて筆者の考えをまとめてみたのが図 1・1 である。

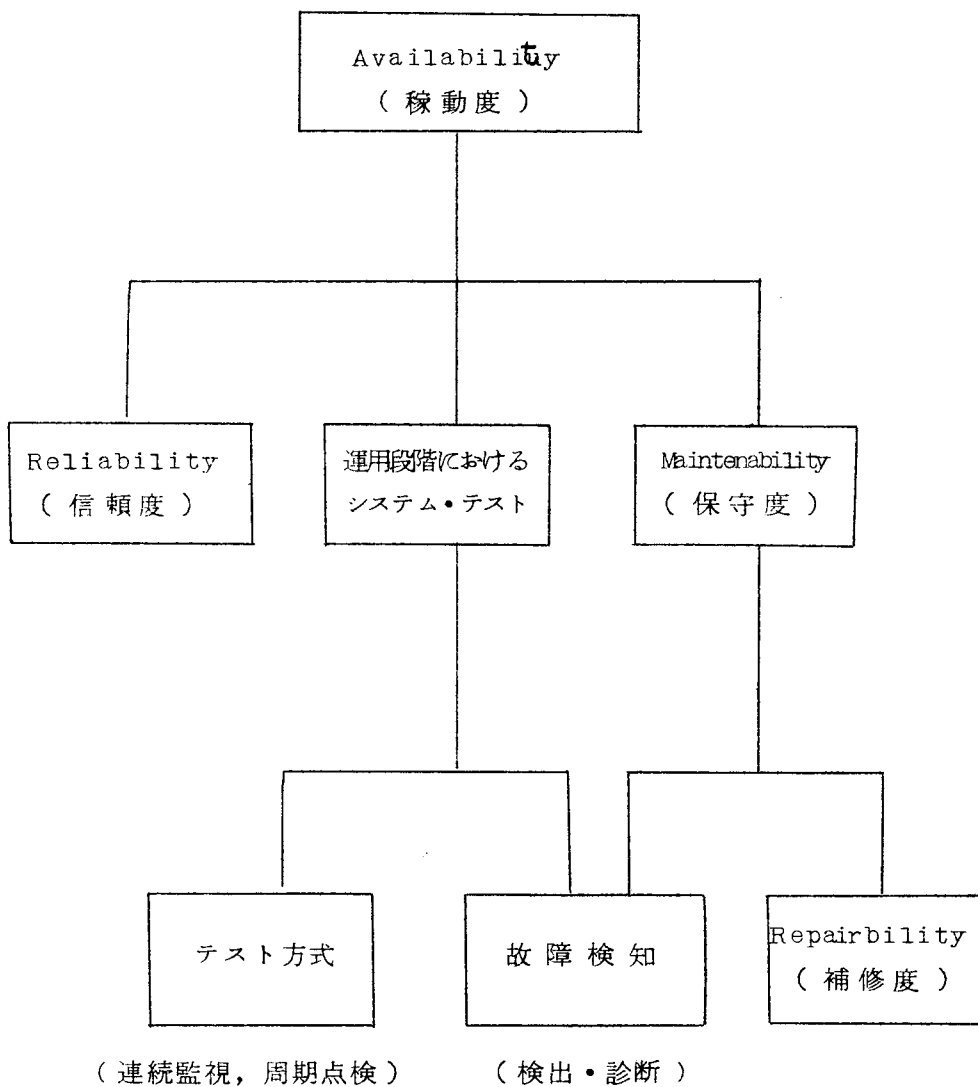


図 1・1 運用段階におけるシステム・テストの位置づけ

図 1・1 から明らかなように、保守の段階で中心問題となるのが、システム・テストであり、その内容として

(I) システムの故障検知の方法の確立⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

故障検出 —— 与えられたシステムが operable state か、

inoperable state かの判定テスト

故障診断 —— システムが inoperable state にある場合に、その原因要素を診断する。

(II) システムのテスト方式の確立⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

信頼度ならびに保守度を考慮した上で、稼働度を向上させる方式。

周期点検方式、および連続監視方式

が考えられる。

また保守能力を示す保守度とは、ある保守時間内にシステムを operable state にまで回復させる確率として定義しているが、それは repairability および、故障検知方法に依存するものである。ところで repairability とは、一たん故障した要素を他のサブシステムを分解することなしに如何に迅速に補修しうるか、という能力を示す要素であり、この補修の基礎となる(I)の故障検知方法を確立させねば、故障要素の補修能力の具体的なうらづけができない。

以上の考察によって、運用段階において稼働度に影響を与えるもっとも大きな要素はシステム・テストであることが明らかにされ、そのうちの基本問題として、故障検知の問題があることを示した。

この問題の解決によって、保守度の向上をはかり、ついで、信頼度と保守度を考慮したテスト方式を開発することにより、稼働度の向上を定量的に標値しうるわけである。

著者が本研究を始めた動機は以上の点にあり，運用段階のシステム・テストの開発に多少とも貢献しようというのが本論文の目的である。

1・2 本研究の分野に関する諸問題

本節では，この分野に関連する従来の研究を概観して，本論文の対象とする問題の所在を明らかにする。1・1で述べたように，運用段階におけるシステム・テストの基本的問題は，故障検知とテスト方式の二つであり，その内容を図1・2に示す。⁽²⁾

1・2・1 故障検知に関する諸問題

一般に，システムの故障検知方法を論理的に取扱うには，つぎの二つの過程が必要である。

(i) システムの記述

(ii) システムの動作パラメータの観測手段および方法

まず(i)については，これまでのところ，あらゆるシステムを統一された数学的モデルで一般的に記述する方法がない以上，対象とするシステムに応じた数学的モデルで記述する以外に手段はない。

しかしながら，ある種のモデルはある程度の範囲のシステムを記述することができる。機能ブロックモデルはその最も有効なものの一つである。本研究でもこのような記述法をとっているが，以下これにしたがって本研究で対象とするシステムを明確にしておく。

システムの記述

システムを図式で表わすために，図1・3に示すようなブロック表示

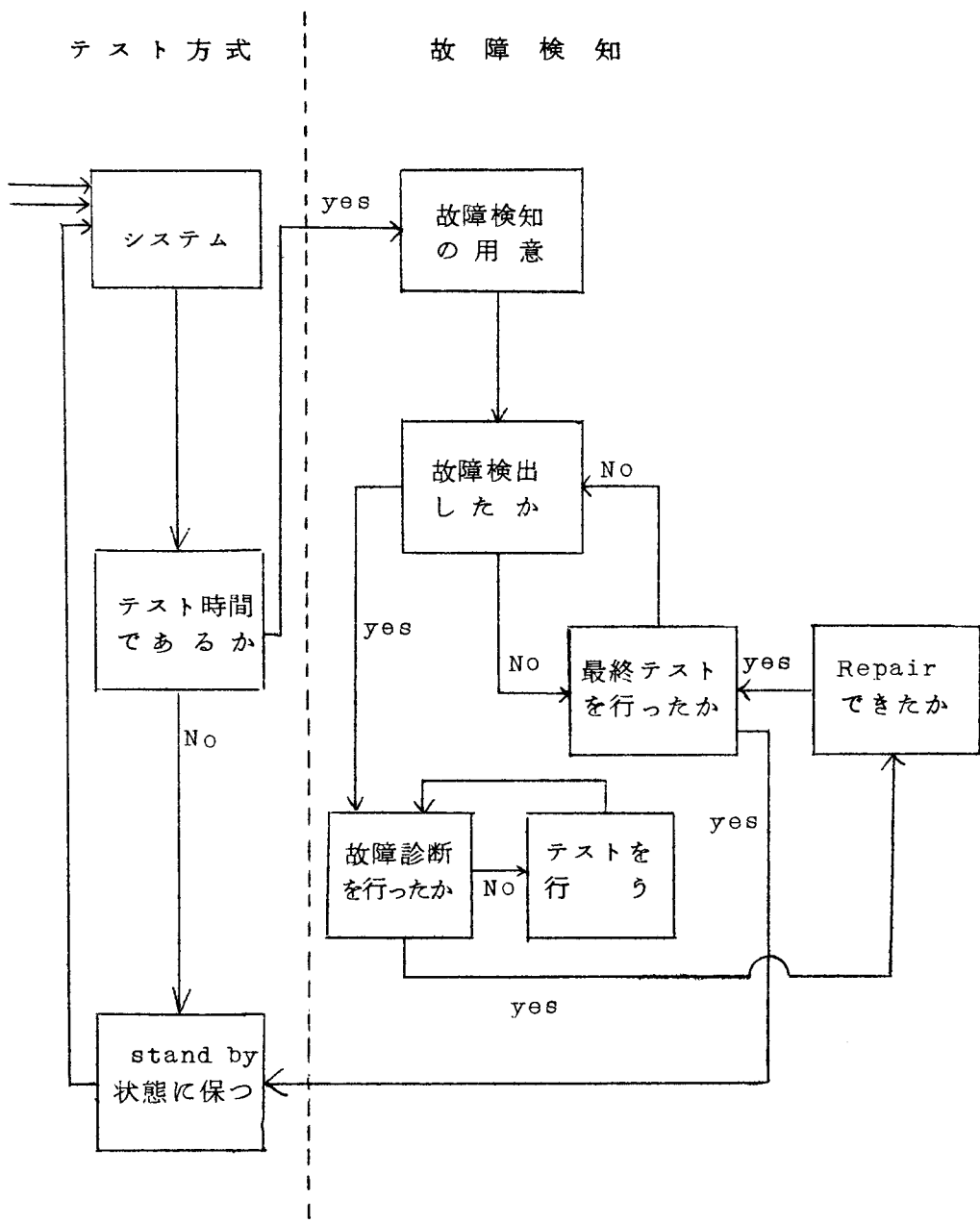
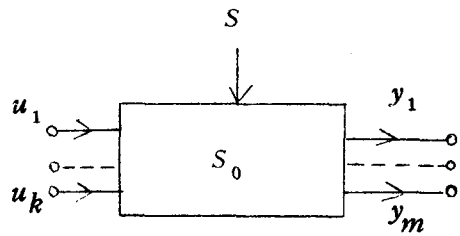


図 1 ・ 2 運用段階におけるシステム・テスト
に対するフローチャート図

を用いる。ここでリードは端子の動作パラメータを表わしており，入力および出力は，前者の場合 S_0 に向う矢印によって示し，後者の場合 S_0 から出ていく矢印によって示されている。



数学的には，

図 1 ・ 3 システムのブロック

表示

$$Y = \Psi (u , s)$$

によって誘導されるオペレータ Ψ と，入力，状態，出力の変換によって表わされる。

システムの状態 S は，そのとりうる状態の数が有限の場合に，有限状態システムと名づける。順序回路などはこのもっともよい例である。

一般に，システムは個々のサブシステムから構成されており，それぞれのサブシステムが機能的に結合されている場合，そのシステムを Functionally-Connected-System (機能的に結合されたシステム) と呼ぶ。

以上が，本研究でとりあつかうシステムに対する記述である。

システムの動作パラメータの観測方法

システムのパラメータの観測では，

(i) システムの故障検知のためには，種々の動作パラメータのうち，何を観測すればよいか。

(iii) 動作パラメータの観測に対する測定精度が問題になる。

故障検知の解析において、システムのパラメータを観測しうる内部端子のとりあつかいについては、大きくわけて2通りがある。

一つは、システムのパラメータを観測するには、その内部端子をまったく任意に抽出し観測できるという前提に立つ場合である。

従来行なわれてきた故障検知問題では、原則的にいって、このような考え方を基盤にしたものであり、故障検出、診断に必要な最小の観測出力を決定するための手法、⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾あるいは逐次検知方法が研究されてきた。⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾

ところが、システムの構成要素が複雑化し集積化するにつれ、システムの内部端子を任意に抽出し観測することはほとんど不可能になってきている。このため、運用段階におけるシステム・テストにおいて、第1の前提のように、適当な端子からシステムの状態について任意に観測できなくなると、故障検知のための操作がきわめて非能率になり、システムの稼働度を低下させる原因になる。そこで、あらかじめシステムの故障検知のための情報を収集しやすいような内部端子を設計段階で決定しておく必要があるわけである。

上述のような故障検知に対する基本的な知識をもとに、以下において、これまでに研究されてきた故障検知に関する概要、ならびに本研究でとりあつかう問題点、その手法を述べよう。

故障検知のための合理的な手法

故障検知を合理的に実行するには、前述のように、(i)システムの記述、ならびに(ii)そのシステムの動作パラメータの測定方法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾が具体的に与えられなければならないことは当然である。

まず、故障検知は、各サブシステムごとに行う方法が考えられる。こ

の方法は、たとえば、米国ではミサイルシステム等で用いられており、このシステムをいくつかの主要サブシステムー推進装置、弾導装置、制御装置、等々に分割し、それぞれを独立にテストするわけである。

システムによっては、⁽²⁰⁾ 十分多くの観測可能な内部端子を利用して、そこから適当な入力信号をあたえたり、またシステムの状態を測定できたりする場合がある。たとえば、線型電気回路を考えると、そのシステムは抵抗、コンデンサー、インダクタンスなどの要素から成り立っており、各端子間の電圧、電流によって、システムの方程式を考える。観測可能な端子の数が十分あれば、各要素の状態（operable state か、inoperable state か）は方程式の解をもとめ、各要素の値と所定の値を比較することによって、決定することができる。この方法は、ペンシルバニア大学で行なわれた研究の内容である。

この方法とならんで、システムの故障検知に有力な方法として逐次検知方法と組合せ検知方法がある。^{*}⁽²¹⁾ この場合も上述の前提と同じく、システムの適当な内部端子から適当な入力を与えたり、出力を観測できるとしている。

前者の逐次検知方法は、樹枝状に組まれたプログラムにしたがって行い、各枝の接続点でテストの判定をし、yes か No かによって次の枝に移行するわけである。この故障診断では、このように枝をつぎつぎに論理的に追っていき、他の枝を減少させながら、故障要素を決定していく方法をとる。上述の方法にしたがって行なわれた故障検知は、Johnson⁽²²⁾、Kletsly⁽²³⁾、および Brule⁽¹⁵⁾ の論文に述べられており、その結果平均検知費用を最小にする樹枝状のプログラム作製法が与えられて

いる。

つぎに後者の組合せ検知法としては，Sogononyan⁽¹⁶⁾の論文がある。ここでは，Functionally-Connected-System を対象にし，種々のテストを行い，入力，出力，およびシステムの状態について，論理変数 0, 1 を与える。システムが operable state にあるときと inoperable state のときに応じて，入力，出力パターンを行列で関連させ，システムの故障検出に必要な情報を与える最小出力の決定，ならびに診断に必要な情報を与える端子の決定法を与えている。

観測可能な内部端子の数に制限がないシステムを対象にする場合には，上に述べたような種々の方法によって故障検知を行うことが適当であった。

しかしながら，システムから外部のテスト装置へテストのリードを結合させるためには，べらぼうに大きいテスト装置を必要とすることになり，

＊

一般に，テストの方法は，基本的にいって二つの方法に分かれる。一つは，いくつかのテストを行い，その結果どのサブシステムが inoperable state かを決定する方法である。この場合には，システムの状態を分析する以前にあらゆるテストを行うので，テストを行う順序は本質的な問題ではない。このような方法を組合せ検知方法と名づける。これは故障検知のための分析にはテストの結果を組合せて行うことによる。

またこの方法と別の方法として，つぎに行うテストの選択は，すぐ前に行ったテストの結果による方法であり，これが逐次検知方法と呼ばれる。これは，テスト結果を逐次分析して，故障検知を進めることによる。

り，またテストブープをシステムに接続させることによって，システムが正常な機能を害うという問題が生じることになる．さらに前述のように，回路の小型化，集積化，シールドされたユニットなどのため，テストリードの数は制約をうける．したがって，このように故障検知に関する情報源が制約をうけている中で，いままで以上の情報をうる方法，または処理方法の発展が要求されており，各所で研究がなされている．

これらの研究のうちで，もっとも代表的なテスト方法にブラック・ボックステストがある．この場合には，システムの外部端子——内部検査をすることなしに，その入出力関係だけでテストをする．——だけから故障検知を行う．

すなわち，ブラック・ボックスに対して，適当なテスト入力を加え，最終出力を観測する方法である．

一般に論理回路の故障検知はこの方法による．組合せスイッチ回路に適用できる方法は“The Formulation of Automatic checkout Technique,”で記述されている．

また，有限状態システム—Sequential Switching system 等—に対する取りあつかいについては，Moore⁽²⁴⁾，Gill⁽²⁷⁾，Seshue⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾，ならびにHennie⁽²⁸⁾等によって論じられてきた．

たとえばSeshueの方法によると，一個のサブシステムの故障は，与えられたシステム S_0 を他のシステム S_i へ変換させるものとみるわけである．この考えにしたがって予想されうるサブシステムの故障に応じたシステム $\{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots\}$ が，それぞれ対応するわけである．したがって，この場合の故障検知とは，種々のシステム $\{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots\}$ のうち，被検知システムに適当な入力を加え，その出力系列によ

って、被検知システムがこれらの集合のいずれかであることを決定する、ということになる。

一方、Hennieの方法は、与えられたシステム S_0 の状態遷移表のみをもとにして、判定すべき状態および遷移を逐次的に追ってゆくようにして、テスト入力系列を求めようとするものである。

ところで前者のSeshueの方法は、テスト入力系列の決定操作法の点で、また後者のHennieの方法は、その系列長の点で、それぞれ問題点があり、これらを改良する必要が要求されてきた。

そこで本研究では、⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾⁽³²⁾方法論的には決定実行性と、できるだけ短い入力系列長で決定するという二つの要求を最適に満足させようという意図のもとに、新しいテスト入力系列長を考案している。その内容については、本論文の第2章においてのべる。

限定された内部端子だけから、故障検知に関する情報収集および処理を行う方法としては、上述のブラックボックステスト法以外には、パターン認識的な取りあつかいをする方法と、⁽³³⁾できるだけ種々のデータを集め、それらを辞書づくりの形にして解決しようとする方法の⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾二通りが、現在までに提案されている。

前者のパターン認識の方法によると、システムの構成要素 $X_1, \dots, X_p$ と、観測するパラメータ $y_1, \dots, y_m$ において、構成要素の正常値からの偏差と、各パラメータの正常値からの偏差の関係を確率的に対応づけ、パラメータの観測値から構成要素の偏差を事後確率により決定し、各要素の故障検知を行う方法である。

一方Bellで行なわれた辞書づくりの方法は、構成要素の故障によって観測しうるパラメータの値を記録し、構成要素のすべてについてこの

方法を行い、その結果構成要素の故障と観測値の対応をもとに辞書づくりを行う方法である。さらに、この対応関係を幾何学的に表示し、この図的表示をもとに、故障検知に対する不十分な情報から、各要素の故障検知を推定する。

以上で明らかのように、これらの方法は、観測可能な内部端子が与えられた場合に、それらの端子からえられるシステムの情報を収集し、故障検知のための情報処理方法を論じたものといえる。

ところで、一般に、システムの観測可能な内部端子の数をませば、それだけ故障検知に要する情報は増し、また故障検知のためのプログラムも簡たんになり、保守能率が上がり、したがってAvailabilityを高めることになる。一方前述のように、システムが集積化し、諸々の制約が加わると、設計段階でのコストを増大させる。

従来、この端子の数の決定は、主としてシステム設計者の直感にもとずいて決定されており、そこから得られる故障検知の情報等に関する考慮はほとんどなされず、したがって、前述の方法が開発されても、故障検知の処理能率の向上はあまり期待されない。

この点からみて、システムの観測可能な内部端子を、故障検知のための情報と設計面でのコストの両者を考慮して、設計段階で決定することは極めて有益であることになる。

本論文は、以上の点を考え、対象とするシステムが機能的に結合されている場合に、故障検知のための観測出力の決定法を論じている。⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾

方法論的には、まず、故障検知のための情報量を定義し、与えられた数の観測出力で、故障原因要素に関する最大平均情報量をうるための観測出力の決定について考察を進めている。また、故障検知のためには、そ

の情報源として観測出力のみならずテスト入力もあることから観測出力とテスト入力の互換性も論じた。⁽⁴⁰⁾ その内容については第 3 章で述べる。

なおシステムの故障検知での測定精度については，本研究で対象にしなかったが，その性質上個々のシステム，さらにはパラメータに応じた取り扱いをしなければならないことだけを指摘しておく。

1・2・2 テスト方式に関する諸問題

運用段階にあるシステムの Availability を高く保つために，Maintenance のとるべき動作方式は，システムの Reliability，およびその Maintainability の両者を考慮した上で，決定されねばならない。この Maintenance のとるべき動作方式が，ここで考慮するテスト方式にほかならない。

このテスト方式としては，

(i) 周期点検方式⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

stand by 時間 T と Maintenance (保守) の動作時間 τ とを周期的にくりかえすことによって，Availability を高める方式

(ii) 連続監視方式⁽⁵⁾⁽¹³⁾

システムの動作パラメータを連続的に監視しながら，システムの故障検知を行う方式。

の二つがあり，周期点検方式では，これまで主として T および信頼度，保守度等の諸パラメータと，稼働度の定量的な関係が論じられているが，保守度については欠陥の摘出はきわめて簡単に処理されるものとしている。

本研究の第 4 章では，保守度を取り入れたときの周期点検方式を問題

にし、新しいパラメータ、点検時間 τ がシステムの稼働度に影響を与える度合を定量的に考察し、最大稼働度を与える最適点検時間 τ_0 を与える関係式をもとめている。⁽⁴¹⁾

また、連続監視方式では、システムの諸パラメータを連続的に監視し、その時間的に変化するパラメータの分析から、以後のシステムの状態に対する予測を行い、事前保守を行うという方式であるが、これについては、パラメータの分析法、ならびに予測の問題があり、著者の知るかぎり、まだ解析的に解かれるにいたっておらず、今後の問題であるといえる。

以上、この分野に関連する従来の研究概要を述べ、本研究の対象とする問題の所存を明らかにした。

第 2 章 有限状態システムのテスト入力系列決定法

2・1 序 言

強結合の有限状態システムに対するテスト入力系列の決定法については，各所で議論されており，その代表的な方法に Gill らの方法⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾ならびに Hennie⁽²⁸⁾の方法のあることもよく知られているとおりである．

ところで，テストのための入力系列としては，系列長ができるだけ短く，かつその決定操作のできるだけ簡便であるものが望ましい．この表現はきわめて常識的なものではあるが，テスト入力系列決定法を考察するにあたっての指導理念になることはたしかである．

この理念に従って，これまでに出されている代表的な入力系列の決定法である，Gill らの方法および Hennie の方法を検討してみると，前者は決定操作の点で，また後者は系列長の点で，それぞれに問題点を含み，テスト入力決定の最適な方法を与えるものであるとはいえない．

このように，Gill らおよび Hennie の方法はそれぞれに固有の欠点をもつが，その性格はちがっている．したがって，これらの方法のもつ欠点を互いに相補させるようにすれば，指導理念にそったよりよい決定法が導出できるはずであるし，またその可能性がないわけではない．ここで提案する入力系列の決定法は，このような発想で出されたものである．

本章では，まずその決定法の導出について述べ，ついで，具体例をとおしてこの方法のよさを評価し，従来の系列長と比較して約 $1/5$ の系列長に短縮できることを示している．更に，この決定法で操作上の主問題

である与えられた入出力系列 I_1-O_1 (システム M_0 のすべての固有状態数を確認できる系列) の関係を満足するシステムの集合を求めるアルゴリズムをも与えている。

本文に入るに先き立って，準備事項をまとめておく。

(1) 対象とするシステム

強結合の有限状態システムを対象にすることはすでに述べたとおりであるが，加えて，故障した場合，その状態数がもとのシステムの状態数よりふえることはないとしておく。

(2) operable state と inoperable state

システム M_0 の入力系列，出力系列をそれぞれ $X(t_0, t], Y(t_0, t]$ とし，この入出力関係を

$$f_0(X, Y) = 0 \quad (2 \cdot 1)$$

であらわす⁽⁴¹⁾。ただし， $X(t_0, t], Y(t_0, t]$ は時間 $(t_0, t]$ の間で定義された入出力系列であり， t_0, t は任意の値とする。更に，システム M_0 に印加しうるすべての入力系列 $X(t_0, t]$ および出力系列 $Y(t_0, t]$ の集合を $X = \{X(t_0, t]\}$ ， $Y = \{Y(t_0, t]\}$ とする。いま対象とするシステム M に対して X 内のすべての入力系列を与え，それに対応する出力系列が式 (2・1) を満足する場合，そのシステム M は operable state にあり，そうでない場合は，inoperable state にあるという。このことはまた，システム M の遷移表 T が M_0 の遷移表 T_0 と同等または同型であれば， M は operable state にあり，そうでなければ，inoperable state にあるといいかえてもよい。

(3) テスト入力系列

システムのテスト入力系列は大別してつぎの二つになる。

(i) システムを任意の状態から特定の状態（一般には初期状態）に移させるに要する入力系列。これを I_0 とする。

(ii) (i)の状態から出発して、対象とするシステム M が operable state か inoperable state かを判定しうる入力系列。これを I とする。

I_0 としては、synchronizing sequence と homing sequence とがあるが、これについてはよく知られているところであり、⁽²⁸⁾ 別に問題はない。したがって、ここで問題にするのは I の決定法についてである。

2・2 テスト入力系列決定法

はじめに、これまでに提案されてきている代表的なテスト入力系列の決定法についてそれらのもつ問題点を指摘してみる。Seshu らの方法は正常なシステム M_0 と故障した状態にあるシステム $M_1, M_2, \dots, M_\ell$ についてそれぞれの遷移表をもとにして各システムを区別しうるような入力系列を求めようとするものであるが、この方法には、予想される故障状態をどのように取扱うかという点に問題点があり、一般にシステムの状態数が増加するにつれて、予想しうる故障状態のすべてを考えるとすれば、その適用がきわめて困難になるだけでなく、まずは不可能に近いともいえる。

Hennie の方法は、与えられた正常なシステム M_0 の遷移表のみをもとにして、判定すべき状態および遷移を逐次的に追ってゆくようにして

テスト入力系列を求めようとするもので、システムの状態数が増加しても適用はできるが、求まる入力系列がきわめて系列長の長いものになるという点に問題がある。

以上に指摘したように、Seshu らのあるいはHennieの方法はそれぞれに問題点をもっているが、その問題点の性格はちがっている。したがってこれらの方法のもつ問題点を何らかの形で互いに相補するような方法が考えられるならば、これらの方法のもつ特長を活用できるように総合した、より進んだテスト入力系列の決定法になることが推察される。

ある与えられたシステム M_0 について、何らかの方法（たとえばHennieの方法）でテスト入力系列 I_H が求まったとする。いま、 I_H を任意のところで $I_H^{(1)}$, $I_H^{(2)}$ に2分し、 $I_H^{(1)}$ を加えたときの出力系列が $O_H^{(1)}$ であるとすれば、 $I_H^{(1)} - O_H^{(1)}$ に含まれている情報をもとにして、この入出力関係を満足するシステムの集合 $\overline{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ を考えることができる。ここで、この集合の各要素と M_0 を区別することのできる最小入力系列を $I_{2\min}$ とすれば、 $I_H^{(2)}$ もまた $\overline{M}$ に含まれる各要素と M_0 とを区別する入力系列であることから、 $I_H^{(2)}$ と $I_{2\min}$ の間には、 $I_H^{(2)} \geq I_{2\min}$ の関係が成立することになる。

以上のことは、 $I_H^{(1)} + I_H^{(2)}$ に対してそれより短い系列の $I_H^{(1)} + I_{2\min}$ が存在する可能性を保証するものであるが、それはまた、決定実行性と系列長の短縮とを目的とした入力系列決定法導出の指導原理といえるものである。この原理に従った入力系列決定法としては、

- (1) M_0 に対して適当な入出力系列 $I_1 - O_1$ を選定し、
- (2) この関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ の各要素と M_0 とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を決定する。

という形になる。

この形のテスト入力系列決定法を具体的なものにするにあたって、つぎに問題になるのは I_1 の選定である。 I_1 としては、系統的に求められるものであって、それ自身できるだけ短く、 $\overline{M}$ を求める操作ができるだけ簡便で、かつ $I_{2\min}$ の決定にあたって実行性のあるものが望ましいということになるが、その選定は試行法的方法によらざるをえない。

ところで、 I_1 を系統的に求めるには、システムの固有状態ならびに状態の遷移に着目し、この点をまず選定基準としてとるのが適切である。

このような選定基準から、 I_1 として

- (i) M_0 のすべての固有状態を通過させるような入力系列
- (ii) M_0 のすべての固有状態および状態の遷移を通過させるような入力系列
- (iii) M_0 の固有状態数を確認できるような入力系列。

がでてくる。これらの入力系列について検討してみたところ（2・3参照），系列長および系列（ I_1 および $I_{2\min}$ ）決定の実行性の点から，(iii)がもっとも優位にあることがいえる。したがってここでは、 I_1 の標準的なものとして“ M_0 の固有状態数を確認できるような入力系列”を提案する。

この節での議論をまとめると、

- (1) システム M_0 をある特定の状態（初期状態）に遷移させる入力系列 I_0 を求める。
- (2) M_0 の固有状態数を確認できる入力系列 I_1 を求める。
- (3) $I_1 - O_1$ の関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を求め、 $\overline{M}$ の各要素と M_0 とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を求める。

となる。これが本章で提案するテスト入力系列決定法である。

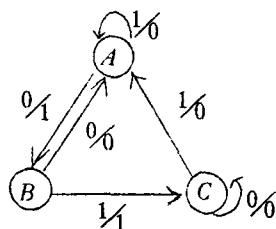
なお、ここで提案した決定法は、 I_1 をなくせば Gill らの方法に、 $I_{2\min}$ の形での短縮を考慮しなければ Hennie の方法に相当するということから、この方法はそれらの方法を含んだものと言えるが、前節で指摘した、Gill らの方法ならびに Hennie の方法では避けることのできない欠点を解決している点でそれらの方法とは質的にちがっているものである。

2・3 テスト入力系列の決定例

この節では、前節で提案したテスト入力系列の決定法を具体的にシステムを与えて考察することにするが、システムには distinguishing sequence をもつ場合と もたない場合があるので、これらを別けて考察する。

2・3・1 システム M_0 が distinguishing sequence をもつ場合

distinguishing sequence をもつシステム M_0 として図 2・1 を例にとる



	0	1
A	1B	0A
B	0A	1C
C	0C	0A

図 2・1 distinguishing sequence をもつシステム M_0

(i) I_1 として M_0 の状態，遷移をすべて通過させるような入力系列を選んだ場合 まず，特定の状態であることを保証する入力系列 I_0 によって A が保証されたとし，これから出発して M_0 の状態遷移のすべてを通過させる入力系列 I_1 とその出力系列 O_1 はつぎのように得られる．

$$I_1 : 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0$$

$$O_1 : 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1$$

ここで，以上に得られたような $I_1 - O_1$ の関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を考えてみる．このような集合に属するシステムを求める一般的な解法は与えられていないが，cut-and-try 法でこれを調べてみると，状態数 3 以下のシステムで，その数は 30 近くも存在することがわかる．このことからわかるように，一般論的にいって， I_1 として状態遷移をすべて通過させるような入力系列を選ぶことは， $\overline{M}$ および $I_{2\min}$ の決定をかなりやっかいなものにするし，またシステムの状態数が増えるにしたがって，その決定は極度に困難になってくることが推測される．このような結果になる理由は， $I_1 - O_1$ の情報ではこの関係を満足するシステムを決定するにあたっての自由度が大きすぎるということであるが，

(1) システムのもっている状態数が判明しない．

(2) その状態が入力とともにどのように遷移するかが判明しない．

という見方で，その情報の不足を考えることができる．

(iii) I_1 として M_0 の固有状態数を確認できる入力系列を選んだ場合 M_0 の distinguishing sequence I_d は 00 であるから， I_1 としてつぎのような入力系列を選べば， M_0 のもっている状態数は確認できる (28)

$$I_1 : I_d, I(A, B), I_d, I(B, C), I_d, I(C, A), I_d$$

$$O_1 : O_d^{(A)}, \alpha(A, B), O_d^{(B)}, O(B, C), O_d^{(C)}, O(C, A), O_d^{(A)}$$

ここで、 $I(A, B)$ は A なる状態で I_d を加えその最終状態から B なる状態へ遷移させるに要する入力系列で、 $O(A, B)$ はそのような入力系列に対する出力系列である。 $I(B, C)$ 、 $I(C, A)$ ； $O(B, C)$ 、 $O(C, A)$ についても同じである。

以上のような $I_1 - O_1$ ，すなわち

$$I_1 : \quad 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0$$

$$O_1 : \quad 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0$$

をもとにして、このような $I_1 - O_1$ の関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ をもとめてみると（詳細については次節参照）表2・1のような表が得られる。

$I_{2\min}$ としては M_0 と $\overline{M}$ の各要素とを区別する最小入力系列を求めればよいことになるが、 I_1 の入力系列によっていずれの場合でもその最終状態が S_1 であることに注意し、樹枝状の方法で $I_{2\min}$ としてつぎの系列が求まる。

$$I_2 : \quad 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1$$

$$O_2 : \quad 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$$

表 2 ・ 1 $I_1 - O_1$ を満足するシステムの集合 $\overline{M}$

M_1 :	0	1	M_2 :	0	1	M_3 :	0	1
S_1	$1S_2$	$0S_1$	S_1	$1S_2$	$0S_2$	S_1	$1S_2$	$0S_3$
S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	$0S_1$	S_3	$0S_3$	$0S_1$	S_3	$0S_3$	$0S_1$
M_4 :	0	1	M_5 :	0	1	M_6 :	0	1
S_1	$1S_2$	$1S_1$	S_1	$1S_2$	$1S_2$	S_1	$1S_2$	$1S_3$
S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$0S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	$0S_2$	S_3	$0S_3$	$0S_1$	S_3	$0S_3$	$0S_1$
M_7 :	0	1	M_8 :	0	1	M_9 :	0	1
S_1	$1S_2$	$0S_1$	S_1	$1S_2$	$0S_1$	S_1	$1S_2$	$0S_1$
S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_2$	$0S_1$	S_3	$0S_2$	$0S_2$	S_3	$0S_2$	$0S_3$
M_{10} :	0	1	M_{11} :	0	1	M_{12} :	0	1
S_1	$1S_2$	$0S_1$	S_1	$1S_2$	$0S_1$	S_1	$1S_2$	$0S_1$
S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$	S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_2$	$1S_1$	S_3	$0S_2$	$1S_2$	S_3	$0S_2$	$1S_3$

以上をまとめてシステム M_0 が operable state にあるかどうかを判定できる入力系列は, $I_0 + I_1 + I_{2\min}$ すなわち

1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1

ととまる. $I_0 = 1 1$ ははじめにシステムが状態 A にあることを確認できる入力系列である.

2・3・2 システム M_0 が distinguishing sequence をもたない場合

distinguishing sequence をもたないシステム M_0 として図 2・2 を例にとる.

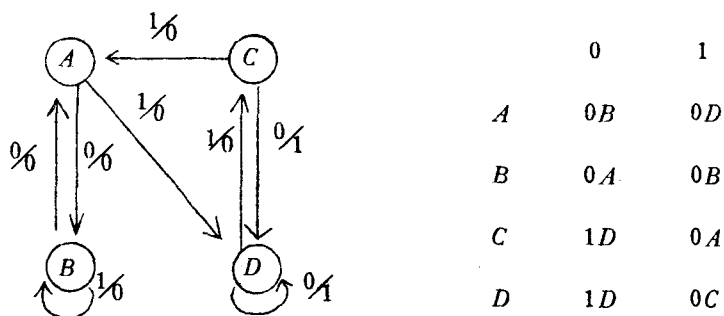


図 2・2 distinguishing sequence をもたないシステム M_0

このシステムについて I_1 として M_0 の状態, 遷移をすべて通過させるような入力系列を選ぶことは, 2・3・1 の(1) からみて同じように有効な選定法にならないことは明らかである. よってただちに, I_1 として M_0 のもっている状態数が確認できる入力系列を選ぶことにしてみる. ところで, このシステムのもつ状態 A, B, C, D を区別する入力系列, 出力系列としては

(28)

$$A ; I_A : 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0$$

$$O_A : 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1$$

$$B ; I_B : 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0$$

$$O_B : 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0$$

$$C ; I_C : 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0$$

$$O_C : 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0$$

$$D ; I_D : 0 0 0 0 0 0 1 0$$

$$O_D : 1 1 1 1 1 0 1$$

が考えられ，つぎのような入力系列 I_1

$$I_1 : I_C I_B I_A I_D$$

で四つの異なる状態が区別できる．よってこの系列を I_1 として選定する．

ついで $I_1 - O_1$ の関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を求めると（次節参照）これはつぎのように求まる．

$$M_1 : \quad 0 \quad 1 \quad \quad M_2 : \quad 0 \quad 1$$

$$S_1 \quad 1S_4 \quad 0S_2 \quad \quad S_1 \quad 1S_4 \quad 0S_2$$

$$S_2 \quad 0S_2 \quad 0S_3 \quad \quad S_2 \quad 0S_2 \quad 0S_3$$

$$S_3 \quad 0S_3 \quad 0S_1 \quad \quad S_3 \quad 0S_3 \quad 0S_4$$

$$S_4 \quad 1S_4 \quad 0S_1 \quad \quad S_4 \quad 1S_4 \quad 0S_1$$

$$M_3 : \quad 0 \quad 1 \quad \quad M_4 : \quad 0 \quad 1$$

$$S_1 \quad 1S_4 \quad 0S_3 \quad \quad S_1 \quad 1S_4 \quad 0S_3$$

$$S_2 \quad 0S_3 \quad 0S_2 \quad \quad S_2 \quad 0S_3 \quad 0S_2$$

$$S_3 \quad 0S_2 \quad 0S_1 \quad \quad S_3 \quad 0S_2 \quad 0S_4$$

$$S_4 \quad 1S_3 \quad 0S_1 \quad \quad S_4 \quad 1S_4 \quad 0S_1$$

$I_{2\min}$ としては M_0 と同型な M_4 とその他のものを区別するのに要する
最小入力系列ということになり，それは

$$I_2 : 111011110$$

$$U_2 : 000100001$$

と求まる．

以上をまとめて，システム M_0 が operable state にあるかどうかを
判定できる入力系列は $I_0 + I_1 + I_{2\min}$ すなわち，

$$010101, 0101010110,$$

$$00000000010,$$

$$00000000010,$$

$$0000010, 111011110$$

となる．はじめの 010101 は I_0 で初期状態 S_1 に遷移させるため入
力系列である．

2・3・3 評 価

この節では，2・2 で提案した決定法を具体的なシステムに適用して，
テスト入力系列を求めたのであるが，この結果からこの決定法を定量的
に評価でき，つぎのような点からこの決定法が Gill らおよび Hennie
の方法に比べてすぐれていることがいえる．

(I) Hennie の方法による入力系列との比較

(i) M_0 が distinguishing sequence をもつ場合．

Hennie の系列長 I_H

この場合の系列においては，1 個の固有状態につき distinguishing
sequence I_d が 5 回現われる．1 回は，その状態を確認するためである．

また残りの4回は、その状態において入力0および1を与えた場合の状態遷移を確認するためである。その他に、与えられた状態 S_i から任意の状態 S_j へ遷移させるのに要する系列 $I(S_i, S_j)$ も5回現われる。

したがって、 N 個の固有状態数をもつシステムに対して I_H の系列長は

$$I_H = 5N\{I_d + I(S_i, S_j)\}$$

と評価できるし、一方提案する方法によって得られる入力系列の系列長は

$$I_1 + I_{2\min} \simeq N\{I_d + I(S_i, S_j)\} + I_{2\min}$$

で評価できる。これを用いて、両者の系列長を比べてみると、

$$\frac{I_1 + I_{2\min}}{I_H} \simeq \frac{N\{I_d + I(S_i, S_j)\} + I_{2\min}}{5N\{I_d + I(S_i, S_j)\}} \simeq \frac{1}{5}$$

となる。

(ii) M_0 が distinguishing sequence をもたない場合

(i) と全く同様の考えから

$$\frac{I_1 + I_{2\min}}{I_H} \simeq \frac{1}{5}$$

が得られる。

以上から、一般には $I_1 + I_{2\min}$ は I_H に比較して約 $1/5$ の系列長になるといえる。たとえば、図2・2のシステムについて、Hennieの方法を用い、このシステムについて特別の工夫をして、やっと163ビットであるのに対して、提案する方法は52ビットである。

(II) 2・3・1で述べた(I), (III), の結果は、 I_1 として M_0 のすべての固有状態数が確認できるような入力系列を選定する具体的な根拠を与えるものである。すなわちこの方法で得られた $\bar{M}$ の各要素と M_0 を区別する入力系列を求めるにあたり樹枝状の方法を用いているが、 $I_1 - O_1$ の関係で、 $\bar{M}$ の要素数が強く制約されている点で、その適用が可能といえる。これに比べて、Gillらの方法では、故障数がふえるにつれてその適用が不可能となる。

2・4 入力系列決定の操作

本論文で提案したテスト入力系列決定法で入力系列を求めるとしてそれに必要な操作は、

- (1) システム M_0 の状態数を確認できる入力系列 I_1 を求める操作.
- (2) 入出力関係 $I_1 - O_1$ を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を求める操作.
- (3) $\overline{M}$ の各要素と M_0 とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を求める操作.

になる. これらのうち(1), (3)の操作はそれぞれ, Hennie の方法, Gill らの方法(樹枝状の方法)でよく知られているものであり, 操作としては(2)が中心問題になる.

この問題は, 状態遷移表が,

- (I) 任意の固有状態における入出力関係

$$Y^{ti} = f_0(X^{ti}, S^{ti}) \quad (2 \cdot 2)$$

- (II) 任意の固有状態における入力とそれによって遷移する固有状態の関係

$$S^{ti+1} = g_0(X^{ti}, S^{ti}) \quad (2 \cdot 3)$$

(X^{ti}, Y^{ti}, S^{ti} はそれぞれ, t_i ビットタイムにおける入力, 出力, 状態であり, $S^{ti}, S^{ti+1} \in \overline{S}$ である. $\overline{S}$ は固有状態の集合である).

を含むものであるから, 与えられた $I_1 - O_1$ から f_0, g_0 を求めることである. 以下, はじめに $I_1 - O_1$ の具体例について $\overline{M}$ をもとめる方法について考察し, あとで, 得られた操作法を一般的に使えるように整理することにする.

2・4・1 $I_1 - O_1$ の具体例について $\overline{M}$ の決定

$I_1 - O_1$ として式(2・4)を用いることにすると, 問題は式(2・4)の各 S^{ti} を決定することであり, これはつぎのようにして決めていく

ことができる。

$$\begin{array}{lcl}
 I_1 & : & 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \\
 O_1 & : & 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad (2 \cdot 4) \\
 S & : & S^{t_0} \quad S^{t_1} \quad S^{t_2} \quad S^{t_3} \quad S^{t_4} \quad S^{t_5} \quad S^{t_6} \quad S^{t_7} \quad S^{t_8} \quad S^{t_9} \quad S^{t_{10}}
 \end{array}$$

(I) $I_1 - O_1$ はシステムの固有状態が確認できる入力系列であり、 S^{t_0} , S^{t_3} , S^{t_6} においてそれぞれ異なる状態をもつことがわかるが、それらを S_1 , S_2 , S_3 とする。また S^{t_9} は S^{t_0} と同じ状態であり、 S_1 である。

(II) (I) で得た三つの状態での入出力関係を $I_1 - O_1$ よりもとめ、これをつぎのように書いておく。

これは式 (2・2) の形で書けばつぎのようになる。

$$\begin{array}{lcl}
 1 & = & f_0(O, S_1) \\
 0 & = & f_0(O, S_2) \\
 0 & = & f_0(O, S_3)
 \end{array} \quad (2 \cdot 5)$$

表 0 - 1	
	0 1
S_1	1
S_2	0
S_3	0

(III) S^{t_1} の決定; S^{t_1} は $S^{t_0} = S_1$; $X^{t_0} = 0$ のもとで遷移する状態であり、かつその出力は $Y^{t_1} = 0$ であるから

$$O = f_0(O, S^{t_1}) \quad (2 \cdot 6)$$

となるが、これを式(2・5)と比較し、 S^{t_1} は S_2 もしくは S_3 であることがわかる。この結果を表1-1、表1-2のように書いておく。

表 1 - 1		表 1 - 2	
	0 1		0 1
S_1	$1 S_2$	S_1	$1 S_3$
S_2	0	S_2	0
S_3	0	S_3	0

(Ⅳ) S^{t_2} の決定 ; 表1-1, 1-2をもとにして、(Ⅲ)と同じ手つづきで S^{t_2} を求めると、いずれについても $S^{t_2} = S_1$ が得られ、この結果を表2-1, 2-2のように書く。

表 2 - 1		表 2 - 2	
	0 1		0 1
S_1	$1 S_2$	S_1	$1 S_3$
S_2	$0 S_1$	S_2	0
S_3	0	S_3	$0 S_1$

(Ⅴ) S^{t_3} の決定 ; $I_1 - O_1$ よりこの状態は既知で、(Ⅰ)に示したことから、 $S^{t_3} = S_2$ であるから、これを表2-1, 2-2の該当するところに書きこむのであるが、これはすでに書きこまれている。ただし表2-2では異なった状態 S_3 が書きこまれているが、このことは表2-2が $I_1 - O_1$ の関係を満たさないことを示すものであり、したがってこれを

捨てる。残った表を表 3 - 1 とする。

表 3 - 1	
	0 1
S_1	$1S_2$
S_2	$0S_1$
S_3	0

(VI) S^{t_4} の決定； $S^{t_3} = S_2$ で $X^{t_3} = 0$ を加えたときの遷移状態であるが，すでに表 3 - 1 でわかるように S_1 と求まっている。

(VII) S^{t_5} の決定； (VI) の場合と同じで， S_2 と求まっている。

(VIII) S^{t_6} の決定； (I) より，この状態は S_3 と既知であるが，これはまた $S^{t_5} = S_2$ ， $X^{t_5} = 1$ ， $Y^{t_5} = 1$ で遷移する状態が S_3 であることを示している。この結果を表 6 - 1 に書く。

表 6 - 1		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	0	

(IX) S^{t_7} 決定； S^{t_7} は $S^{t_6} = S_3$ で $X^{t_6} = 0$ を加えたときの遷移状態であり (III) と同じ手つづきで S_2 もしくは S_3 であることがわかる。この結果を表 7 - 1， 7 - 2 と書く。

表 7 - 1		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_2$	

表 7 - 2		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	

(X) S^{t8} の決定； 表 7 - 1 , 7 - 2 にしたがうシステムにおいて S^{t7} はそれぞれ S_2 , S_3 であり, $X^{t7} = 0$ に対して遷移する状態 S^{t8} は S_1 , S_3 である. それぞれの表を表 8 - 1 , 8 - 2 とする.

表 8 - 1		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_2$	

表 8 - 2		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	

(XI) S^{t9} の決定； (I) に述べたことから, この状態は S_1 であるが, $X^{t8} = 1$, $Y^{t8} = 0$ を与えたときに遷移する状態にほかならない. この結果得られる表を表 9 - 1 , 9 - 2 とする.

表 9 - 1		
	0	1
S_1	$1S_2$	$0S_1$
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	

表 9 - 2		
	0	1
S_1	$1S_2$	
S_2	$0S_1$	$1S_3$
S_3	$0S_3$	$0S_1$

(XII) S^{t10} の決定； S^{t10} は表 9 - 1 , 9 - 2 をもとにしてわかる

ものであり，前者から S_2 ，後者からも S_2 ととまる．また $S^{t_{10}} = S_2$ として入力 $X^{t_{10}} = 0$ を加えたときの出力は $Y^{t_{10}} = 0$ とならなければならないが，表 9-1，9-2 とともに満足していることがわかる．

以上のようにして S^{t_i} がすべて決定されたところで， $I_1 - O_1$ の関係を満足するシステムは，状態遷移表として，表 9-1，9-2 をもつものであることがわかる．与えられた $I_1 - O_1$ の関係を満足する解として得られた表中の空欄を出力として 0 もしくは 1，遷移状態として S_1 ， S_2 ， S_3 の任意の一つでうずめることによって $\bar{M}$ は表 2・1 に示してある．

2・4・2 $I_1 - O_1$ の解となる状態遷移表を求める操作法

2・4・1 で示した， S^{t_i} を決定し $I_1 - O_1$ の関係を満足する状態遷移表を求める操作は，一般に $I_1 - O_1$ が

$$\begin{array}{ll}
 \text{ビットタイム} & ; \quad t_0, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_N \\
 I_1 & ; \quad \dots, \alpha, \alpha', \dots \\
 O_1 & ; \quad \dots, \beta, \beta', \dots \\
 \text{状態} & ; \quad \dots, S^{t_i}, S^{t_{i+1}}, \dots, S^{t_N}
 \end{array} \quad (2.7)$$

(ただし $\alpha\alpha'\beta\beta'$ は 0 または 1 である) の形で与えられるときに適用できるものである．

(1) $I_1 - O_1$ より固有状態数 n が確認され，それらを $S_1, S_2, \dots, S_n$ とする．これらの状態はそれぞれ適当なビットタイムの状態 S^{t_i} と対応している．この関係を

$$S^{t_{i1}} = S_1, \quad S^{t_{i2}} = S_2, \quad \dots, \quad S^{t_{in}} = S_n$$

とし，これを表 1 とする．

(Ⅱ) (Ⅰ)で得た各状態のもとの入出力関係を I_1-O_1 よりもとめ、状態遷移表の相当する欄に書く。

この表を 0-1 とする。

(Ⅲ) いま式(2・7)で t_{i-1} ビットタイムまでの入出力関係を満足し、 S^{ti} が決定している状態遷移表が得られたとし、それを $i-1, i-2, \dots, i-m, i-l_i$ とする ($i=0, 1, \dots, N+1$)。式(2・7)における S^{ti+1} の値をもとめる操作をまとめたアルゴリズムが図 2・3 である。

2・5 結 言

強結合の有限状態システムを対象にして、システムが operable state にあるか、inoperable state にあるかを判定するための入力系列決定法について、新しい方法を提案した。ここで提案する入力系列はつぎの 3 つから成り立っている。

(i) システム M_0 をある特定の状態(初期状態)に遷移させる入力系列 I_0 を求める。

(ii) 適当な入出力系列 I_1-O_1 を与え、この関係を満足するシステムの集合 $\bar{M}$ を求める。

(iii) M_0 と $\bar{M}$ の各要素とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を求める。

なお I_1 の選定には、(ii), (iii)の操作を簡便にしかつ、それ自身系統的に求められるものという制約から、 M_0 の状態数を確認できる入力系列を採用した。その結果、従来の系列長と比べて約 1/5 の系列長に短縮でき、また操作法で重要な問題である $\bar{M}$ をもとめるアルゴリズムも得られた。

ここに提案した方法は、方法論的には、決定実行性と、できるだけ短い系列長で決定するという 2 つの要求を最適に満足させようとしている点で、入力系列決定の基本の方針として採用できるものであるといえるし、かつ方法としてはこれまでに出版されている方法より一般性をもったものであると言える。

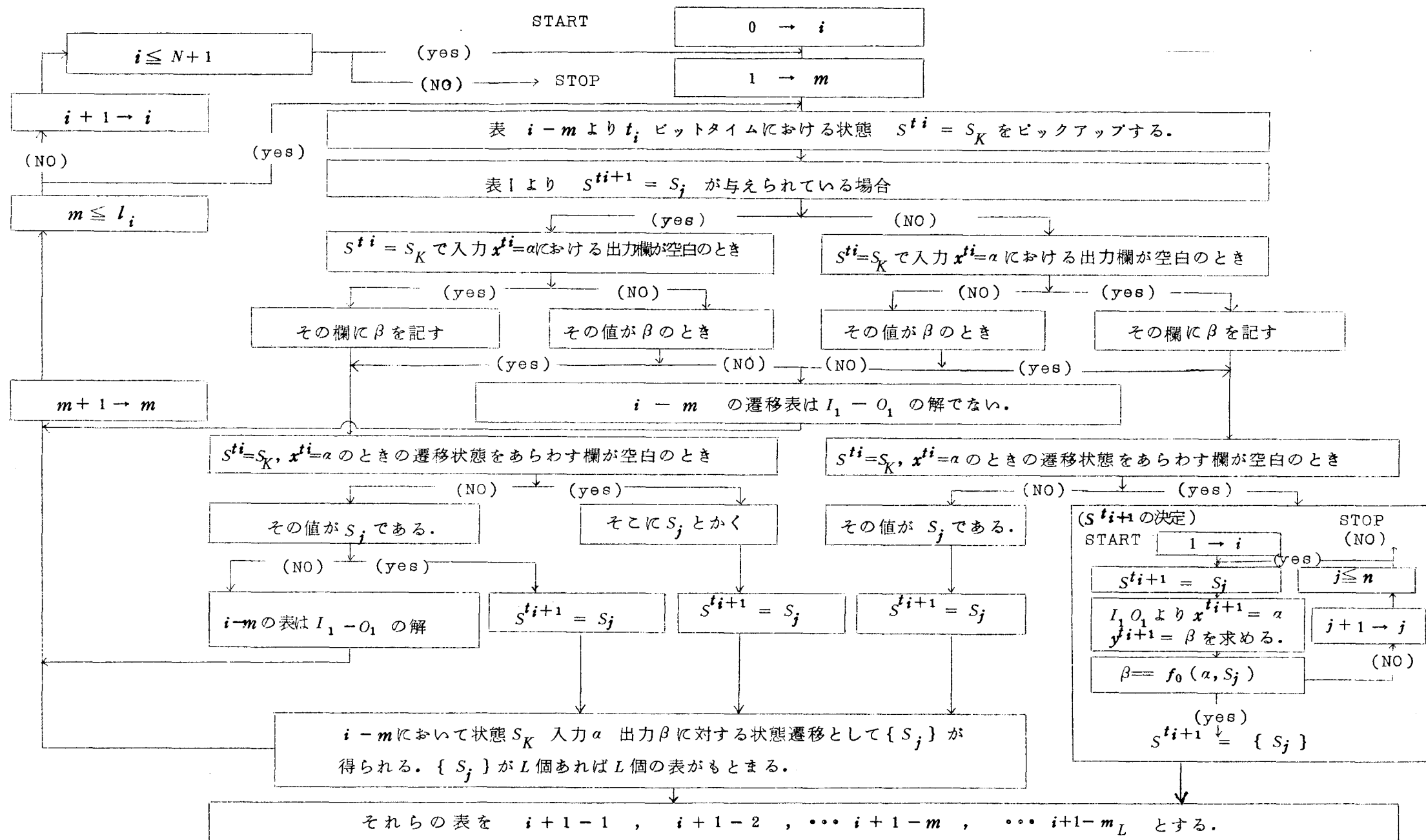


図 2・3

$I_1 - O_1$ の解となる状態遷移表をもとめる操作法

第 3 章 故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察

3・1 序 言

一般に，機能的に結合されたサブシステムで構成されているシステムが，operable state にあるかどうかを判定するには，与えられた入出力端子だけで十分である．しかしシステムが inoperable state にある場合，その原因要素を抽出するには，それだけでは必要十分な情報は得られない．

これまでの原因要素抽出法の多くは，入出力端子以外の内部端子のすべてを用いることを前提にしたものであるが，システムが複雑化し，かつ構成要素が集積化してきている現状では，コスト，スペース等の拘束から，内部端子のすべてがいつでも使用可能であるとは限らなくなってきている．ところで，この使用可能な内部端子の決定は，ほとんど経験的な判断にもとずいてなされているため，運用段階でのシステム・テストはきわめて非効率なものにならざるをえない．それゆえ，使用可能な内部端子については，上述の種々の拘束以外に，運用段階でのシステムテストをも考慮して決定されなければならないわけであり，この傾向は最近ますます顕著になってきていることは，すでに第 1 章で述べたところである．

本章では，観測可能な内部端子の数が制約をうけている場合について，原因要素抽出のために有効な観測出力の決定法を問題にしたものである．定性的には，使用可能な観測出力の数を増すほど原因要素抽出のための情報が増加するといえるが，ここではまず，この種の問題を定量的に取扱えるようにするために，観測出力の原因要素抽出に関してもつ情報量

を定義している。ついで、これを基礎にして、与えられた数の使用可能な観測出力で、原因要素抽出に関して最大平均情報量をうるための観測出力の決定法について考察を進め、逐次観測出力決定法を提案している。

なお、設計・製造の問題とからみ合せて使用可能な観測出力の数を決定する方策についても言及している。

3・2 対象とするシステム

— 機能的に結合されたシステム —⁽¹⁶⁾

本論に入るに先立って、対象とするシステムについて述べておくことにするが、ここでは、つぎに示す(1)―(5)の条件を満たすシステムを考えている。

- (1) 機能的に結合された N 個のサブシステム S_i ($i = 1, 2, \dots, N$) で構成されている。
- (2) 各サブシステムの出力はその入力に依存する。
- (3) サブシステム S_i への外部からの入力および内部入力 (S_i 以外のサブシステムの出力で、 S_i に印加される入力) はそれぞれ、 $\bar{z}_i = \{ z_{i1}, z_{i2}, \dots \}$, $\bar{x}_i = \{ x_{i1}, x_{i2}, \dots \}$ であり、 S_i の出力 (内部端子) は $\bar{y}_i = \{ y_1^{(i)}, \dots, y_{ki}^{(i)} \}$ で表わされる。
- (4) 各サブシステムにおいて、

$$F_i(\bar{x}_i, \bar{z}_i, \bar{y}_i) = 0 \quad (3 \cdot 1)$$

なる関係が与えられているものとする。 $i = 0, 1, \dots, N$ であるが、 $i = 0$ のときはシステム S_0 自身の入出力関係とする。 $\bar{x}_i, \bar{z}_i$ が S_i に加

えてよい入力である場合， $\bar{x}_i, \bar{z}_i$ を許容入力といい，それらの入力集合を $\bar{I}_i$ であらわす． $\bar{I}_i$ に属する入力を S_i に加えて得られた $\bar{y}_i$ が式 (3・1) を満たすとき， $\bar{y}_i$ を許容出力といい，それらの集合を $\bar{O}_i$ であらわす．

したがって， $\bar{I}_i$ に属する任意の入力を S_i に加えた場合，その出力が $\bar{O}_i$ に属するならば， S_i を operable state にあるといい，そうでない場合 S_i を inoperable state にあるという．

(5)* S_i の状態 (operable state , inoperable state) と入力，出力はつぎの論理式で関係づけられる．

$$L(\bar{y}_i) = L(S_i) \circ L(\bar{x}_i, \bar{z}_i) \quad (3 \cdot 2)$$

ここで， $L(\bar{y}_i)$ ， $L(S_i)$ ， $L(\bar{x}_i, \bar{z}_i)$ は，それぞれ，

$$\begin{aligned} L(\bar{y}_i) &= \begin{cases} 1, & \bar{y}_i \in \bar{O}_i \\ 0, & \bar{y}_i \notin \bar{O}_i \end{cases} \\ L(\bar{x}_i, \bar{z}_i) &= \begin{cases} 1, & \bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i \\ 0, & \bar{x}_i, \bar{z}_i \notin \bar{I}_i \end{cases} \\ L(S_i) &= \begin{cases} 1, & \text{operable state} \\ \quad [\bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i, \bar{y}_i \in \bar{O}_i] \\ 0, & \text{inoperable state} \\ \quad [\bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i, \bar{y}_i \notin \bar{O}_i] \end{cases} \end{aligned}$$

である．

* $\bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i, \bar{y}_i \in \bar{O}_i$ でも， $L(S_i) = 1$ であるとは限らないサブシステムも存在する．有限状態システム等はこの例である．

このようなシステムにおいては，

$$L(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{operable state} \\ \quad [\bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i' \subseteq \bar{I}_i, \bar{y}_i \in \bar{O}_i' \subseteq \bar{O}_i] \\ 0, & \text{inoperable state} \\ \quad [\bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i \subseteq \bar{I}_i' \rightarrow \bar{x}_i, \bar{z}_i \in \bar{I}_i' \not\subseteq \bar{I}_i'] \end{cases}$$

なる $\bar{I}_i'$ ， $\bar{O}_i'$ を決定すれば，対象とするシステムの適用範囲を拡張しうる．

以上のようなシステムについて、 $\bar{y}_i = \{ y_1^{(i)}, \dots, y_j^{(i)} \dots y_{k_i}^{(i)} \}$ の各出力 $y_j^{(i)}$ とそれに対応する入力 $\bar{x}_j^{(i)}, \bar{z}_j^{(i)}$ が式 (3・1) をもとにして得られる。この入出力関係を満たす論理ユニット $B_j^{(i)}$ とすると、サブシステム S_i は k_i 個の論理ユニット $B_1^{(i)}, \dots, B_j^{(i)} \dots B_{k_i}^{(i)}$ に変換される。このようにして、すべてのサブシステムを論理ユニットに変換すれば、 $B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_n$ ($n = \sum_{i=1}^N k_i$) を論理ユニットとするシステムの論理モデルが得られる。このモデルで、 B_i への入力集合を $\bar{x}_i, \bar{z}_i$ 、出力を y_i とすれば、

$$L(\bar{y}_i) = L(B_i) \cdot L(\bar{x}_i \cdot \bar{z}_i) \quad (3 \cdot 3)$$

が成立っている。 $L(\bar{y}_i), L(B_i), L(\bar{x}_i, \bar{z}_i)$ は式 (3・2) の場合と同じ意味のものである。一般には、論理モデル $\bar{B} = \{ B_1, \dots, B_n \}$ の部分集合がサブシステム S_i と一致するわけであり、各 B_i がそのままサブシステム S_i になるのは特別の場合といえる。

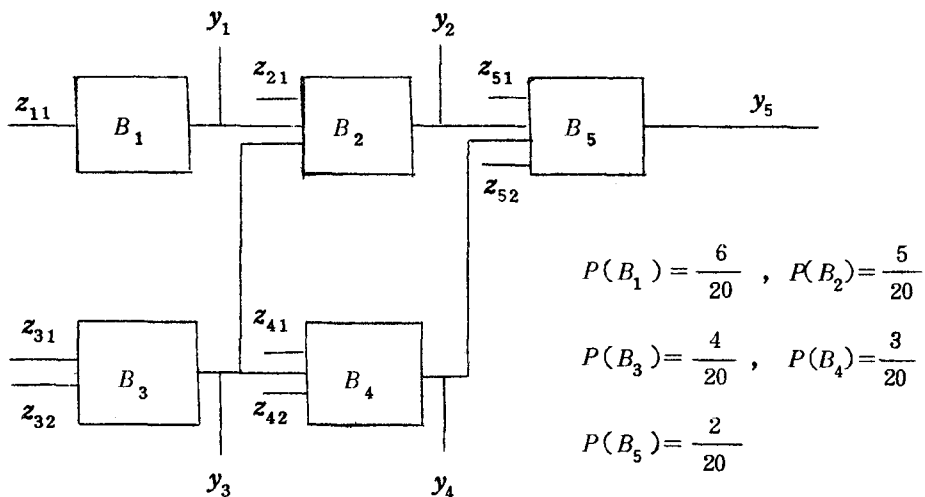


図 3・1 システムの論理モデル

図 3・1 は以上で述べたようなシステムの論理モデルの一例であるが、以下の理論にこれを用いて何ら一般性を失うことがないので、これをモデルとして用いることにする。

このモデルについて、式 (3・3) は

$$\begin{aligned} y_1 &= B_1 \cdot z_{11}, & y_2 &= B_2 \cdot z_{21} \cdot y_1 \cdot y_3, & y_3 &= B_3 \cdot z_{31} \cdot z_{32} \\ y_4 &= B_4 \cdot z_{41} \cdot z_{42} \cdot y_3 & y_5 &= B_5 \cdot z_{51} \cdot y_2 \cdot y_4 \cdot z_{32} \end{aligned} \quad (3 \cdot 4)$$

となり (L_i は省いている。), さらにこれから

$$\begin{aligned} y_5 &= B_5 \cdot z_{51} \cdot B_2 \cdot z_{11} \cdot B_4 \cdot z_{31} \cdot B_3 \cdot z_{31} \cdot B_1 \cdot z_{11} \\ &= B_5 \cdot B_4 \cdot B_3 \cdot B_2 \cdot B_1 \cdot z_{11} \cdot z_{21} \cdot z_{31} \cdot z_{41} \cdot z_{51} \end{aligned} \quad (3 \cdot 5)$$

となる。

(3・5)式から、外部入力 z_{11} , z_{21} , z_{31} , z_{41} , z_{51} , を与え、 $L(y_5)=1$ であれば、 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 はことごとく operable state であるし、また $L(y_5)=0$ であれば、 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 のうちに inoperable state の論理ユニットの存在することがわかる。このことは、このシステムが operable state か否かを判定するには、 y_5 だけあればよいことを意味するが、一般にシステムが operable state にあるか否かを判定するのに必要な最小数の出力を最小出力と呼ぶことにすると、いまは y_5 が最小出力になっているわけである。

3・3 観測出力とそれが原因要素抽出に関してもつ平均情報量

システムが inoperable state にあるか否かは、最小出力で判定できることは、前節で述べたとおりであるが、原因要素の抽出には、一般にそれ以外の内部端子の観測を必要とする。

このような最小出力以外の内部端子を観測出力と呼ぶことにし、これを附加することによって原因要素の抽出のためにどのような情報量が得られるかを問題にする。

なお、inoperable state にある論理ユニットは 1 個として議論する。

3・3・1 観測出力による論理ユニットの区分

まず、観測出力を附加することによって、論理ユニットの集合は、inoperable state にある論理ユニットを含む部分集合と、そうでない部分集合とにわけられることを示してみる。

いま観測出力として y_1 をとってみると、

(i) $y_1 \in \overline{O_1}$ であれば、inoperable state にある論理ユニットは B_2, B_3, B_4, B_5 のいずれかであり、

(ii) $y_1 \notin \overline{O_1}$ であれば、inoperable state にある論理ユニットは B_1 である。

したがって、 y_1 によって $\{B_i\}$ は

$$B(y_1); B_1 / B_2, B_3, B_4, B_5$$

に区分できる。 $B(y_1)$ は y_1 による $\{B_i\}$ の区分を示す記号として用いている。以下同じようにして、観測出力とそれによって得られる $\{B_i\}$ の区分が得られるが、これを表 3・1 に示す。

表 3 ・ 1 観測出力と、それによって得られる $\{B_i\}$ の区分

観 測 出 力		それによって得られる $\{B_i\}$ の区分	
数	指 定		
1	y_1	$B_1 / B_2, B_3, B_4, B_5$	$B(y_1)$
	y_2	$B_1, B_2, B_3 / B_4, B_5$	$B(y_2)$
	y_3	$B_3 / B_1, B_2, B_4, B_5$	$B(y_3)$
	y_4	$B_1, B_2, B_5 / B_3, B_4$	$B(y_4)$
2	$y_1, , y_2$	$B_1 / B_2, B_3 / B_4, B_5$	$B(y_1; y_2)$
	$y_1, , y_3$	$B_1 / B_3 / B_2, B_4, B_5$	$B(y_1; y_3)$
	$y_1, , y_4$	$B_1 / B_2, B_5 / B_3, B_4$	$B(y_1; y_4)$
	$y_2, , y_3$	$B_1, B_2 / B_3 / B_4, B_5$	$B(y_2, y_3)$
	$y_2, , y_4$	$B_1, B_2 / B_3 / B_4 / B_5$	$B(y_2, y_4)$
	$y_3, , y_4$	$B_1, B_2, B_5 / B_3 / B_4$	$B(y_3, y_4)$
		注 $B(y_i, y_j) = B(y_j, y_i)$	
3	y_1, y_2, y_3	$B_1 / B_2 / B_3 / B_4, B_5$	$B(y_1, y_2, y_3)$
	y_1, y_3, y_4 4	$B_1 / B_3 / B_4 / B_2, B_5$	$B(y_1, y_3, y_4)$
	y_2, y_3, y_4	$B_1, B_2 / B_3 / B_4 / B_5$	$B(y_2, y_3, y_4)$

観測出力が多数になってきた場合の区分の方法については詳しく述べなかったが、 k 個の観測出力による $\{B_i\}$ の区分 $B(\bar{Y}_i^{(k)})$ はつぎのようにして行えばよいことが示せる。

(i) $(k-1)$ 個の観測出力による $\{B_i\}$ の区分 $B(\bar{Y}_i^{(k-1)})$ を求める。

(ii) k 番目に附加する観測出力 $y_i^{(k)}$ による区分 $B(y_i^{(k)})$ を求める。

(iii) $B(\bar{Y}_i^{(k-1)})$, $B(y_i^{(k)})$ の各区分について共通するユニット集合を求める。

この結果得られる区分が $B(\bar{Y}_i^{(k)})$ になる。

また、観測出力とそれによる区分について、つぎの定理が成立つ。

定理 3・1 論理モデルにおいて、 k 個の観測出力から区分される、互いに排他的な $\{B_i\}$ の部分集合の数は高々 2^k 個である。ただし、 $2^k \leq n$ である。

証 明 $l=1$ の場合、 $y_i^{(1)}$ によって $\{B_i\}$ は

$B(y_i^{(1)}) = \{B_{1i}^{(1)}\} / \{B_{2i}^{(1)}\}$ なる 2 つの部分集合に区分されることは明らかである。

つぎに $l=k$ のとき、 k 個の観測出力によって高々 2^k 個の部分集合に区分されたとする。すなわち

$$B(\bar{Y}_i^{(k)}) = \{B_{1i}^{(k)}\} / \{B_{2i}^{(k)}\} \vee \dots \vee \{B_{mi}^{(k)}\}$$

ただし $m = 2^k$ とする。

$l=k+1$ のとき $y_i^{(1)} y_i^{(k)}$ による区分は、 $B(y_i^{(1)})$, $B(y_i^{(k)})$ の各々の部分集合からの共通部分として得られる。

$$B(y_i^{(1)} y_i^{(k)}) = \{B_{1i}^{(1)}\} \cap \{B_{1i}^{(k)}\} / \{B_{1i}^{(1)}\} \cap \{B_{2i}^{(k)}\} / \dots$$

$$\begin{aligned} & \{B_{2i}^{(1)}\} \cap \{B_{1i}^{(k)}\} / \{B_{2i}^{(1)}\} \cap \{B_{2i}^{(k)}\} / \dots \dots \\ & \dots\dots / \{B_{1i}^{(1)}\} \cap \{B_{mi}^{(k)}\} / \dots \\ & \dots\dots / \{B_{2i}^{(1)}\} \cap \{B_{mi}^{(k)}\} / \end{aligned}$$

となり，部分集合の数は高々， $m \times 2 = 2^k \times 2 = 2^{k+1}$ 個となる．

以上から定理 3・1 が得られる．

3・3・2 観測出力の原因要素抽出に關してもつ平均情報量

3・3・1で示したところからわかるように，観測出力は，“inoperable state”にある論理ユニットが，観測出力によって区分される部分集合のどれに属しているか”という通報を与えているととらえてよい．このようなとらえ方をすると，観測出力の原因要素抽出に關してもつ情報量を情報理論での情報量の概念を適用して定義することができる．

観測出力 $\bar{Y}_i^{(k)}$ によって

$$\begin{aligned} B(\bar{Y}_i^{(k)}) ; & \{B_{1i}^{(k)}\} / \{B_{2i}^{(k)}\} / \dots\dots / \{B_{ji}^{(k)}\} / \\ & \dots\dots\dots \{B_{mi}^{(k)}\} \end{aligned}$$

の区分が得られるとする．原因要素は $B(\bar{Y}_i^{(k)})$ のうちの1つの区分に属し，かつそれがどの区分に属するかは，排他独立的である．すなわち，原因要素が $B_{ji}^{(k)}$ に含まれている確率を $P(B_{ji}^{(k)})$ であらわすことにして，

$$\begin{aligned} & P(B_{1i}^{(k)} \cup \dots\dots \cup B_{ji}^{(k)} \cup \dots \cup B_{mi}^{(k)}) \\ & = P(B_{1i}^{(k)}) + \dots + P(B_{ji}^{(k)}) + \dots + P(B_{mi}^{(k)}) = 1 \end{aligned}$$

が成立っている．

いま， $\bar{Y}_i^{(k)}$ によって原因要素が $B_{ji}^{(k)}$ に含まれているという通報を受取ったとする．この通報を受取る以前では，原因要素がその区分に属

する確からしさは、 $P(B_{ji}^{(k)})$ であるから、この通報によって得られる情報量 $I(B_{ji}^{(k)})$ は

$$I(B_{ji}^{(k)}) = -\log_2 P(B_{ji}^{(k)}) \quad (44)(45)$$

と定義できる。

また、このような通報の発生の様相から、 $\bar{Y}_i^{(k)}$ の原因要素抽出に関しても平均情報量として、

$$H_{\bar{Y}_i^{(k)}} = - \sum_{j=1}^{m_k} P(B_{ji}^{(k)}) \log_2 P(B_{ji}^{(k)}) \quad (3 \cdot 6)$$

が与えられる。

以上のようにして定義するとして、平均情報量を計算できるようにするためには、 $P(B_{jk}^{(k)})$, ($j=1, \dots, m_k$) の値が必要になるが、これは各論理ユニットの事前故障確率 $P(B_i)$ をもとにして得られる。すなわち

$$\begin{aligned} P(B_{ji}^{(k)}) &= P(B_{i1} \cup B_{i2} \cup \dots \cup B_{ik}) \\ &= P(B_{i1}) + P(B_{i2}) + \dots + P(B_{il}) + \dots + P(B_{ik}) \\ &\text{ただし } B_{il} \in B = (B_1, B_2, \dots, B_n) \end{aligned}$$

さて、式(3・6) について、その性質を調べてみると、この式によってつぎのことがあらわされているのがわかる。(45)

性質1 $H_{\bar{Y}_i^{(k)}} \geq 0$ であり、これはいかなる観測出力から得られる平均情報量も決して負にならないことをあらわす。

性質2 $H(y_{i1}, \dots, y_{im}) \leq H(y_{i1}, \dots, y_{im}, y_k)$ が成り立つが、このことは m 個の観測出力 $y_{i1}, \dots, y_{im}$ に任意の出力 y_k を付加しても、それによって情報量は減少しないことをあらわす。

性質3 平均情報量の最大値は各 $\{B_{ji}^{(k)}\}$ が単一に区分されたときであることがいえるが、このことは原因要素が一義的に決定でき

るように区分されることをあらわす。

性質 4 $\{B_{1i}^{(k)}\}, \dots, \{B_{mi}^{(k)}\}$ の m_k 個を区分するために、0 または 1 の観測出力の必要数の最小限界は $H_{Y_i}^{(k)}$ である。

以上の性質はいずれも、観測出力が原因要素抽出に関してもつべき必須条件であり、このような点から、与えた定義はこの分野での問題に十分使いうるものといえる。

3・4 観測出力決定法

3・3 で定義した、観測出力の原因要素抽出に関してもつ平均情報量を基礎にすると、観測出力の決定が論理的に行えるようになる。以下 “ m_0 個の観測出力のうち $k+1$ 個 ($k=0, 1, \dots$) が使用できるとして、最大平均情報量をうるには、観測出力の組をどのように決定すればよいか” という命題を解くという形で考察を進める。

一般に、最大平均情報量 J_{k+1} を与える $k+1$ 個の観測出力の組の決定は、

- (i) m_0 個の観測出力 $\bar{Y}_0 = \{y_1, y_2, \dots, y_{m_0}\}$ から、 $k+1$ 個の観測出力の組、 $\bar{Y}_i^{(k+1)} = \{y_i^{(1)}, \dots, y_i^{(k+1)}\}$ をすべてもとめる。
($i = 1, 2, \dots, m_0$)
- (ii) (i)でもとめた各々について、 $B(\bar{Y}_i^{(k+1)})$ をもとめる。
- (iii) 式(3・6)にもとずき、 $\max_i H_{Y_i}^{(k+1)}$ を与える観測出力の組 $\bar{Y}_i^{(k+1)}$ を決定する。

というステップで決めるのが論理的には正しい。

しかし、この操作は m_0, k の値の増加にともなって実際には不可能に

なる。したがって、観測出力の組によって与えられる最大平均情報量が近似的に得られ、かつその組の決定操作が可能な方法を開発する必要がある。逐次に1つずつ観測出力を付加するものとする、付加ごとに最大平均情報量が得られる観測出力を選定してゆくのが最適であることはいうまでもない。このような選定則にしたがった観測出力決定法を逐次観測出力決定法と名づけておく。この方法による観測出力の決定操作は3・3の議論ですでに明らかであり、

$$I_1 = \max_{y_i^{(1)}} H_{y_i^{(1)}} \quad , \quad I_2 = \max_{y_i^{(2)}} H_{\{y_i^{(1)}\} y_i^{(2)}} \quad \cdots \cdots$$

$$I_{k+1} = \max_{y_i^{(k+1)}} H_{\{y_1^{(1)} \cdots y_i^{(k)}\} y_i^{(k+1)}}$$

なる $(y_i^{(1)}, \cdots, y_i^{(k+1)}) \in \bar{Y}_0$ を求めればよい。

例えば図1のモデルについて $k=2$ としてこれを行ってみると、第3.1表から y_1, y_2, y_3 となる。

結論的には、この逐次観測出力決定法を観測出力の組の決定法として提案するわけであるが、以下この方法によって得られる平均情報量 I_{k+1} ならびに $k+1$ 個の観測出力の組によって得られる最大平均情報量 I_{k+1} の性質を明らかにし、この決定法の提案を裏づけることにする。

4・4・1 逐次観測出力決定法による平均情報量

逐次観測出力決定法によって得られる平均情報量とそれを与える観測出力数の関係を調べてみると、これらの間にはつぎの定理で与えられるような関係がある。

$$\text{定理 3・2} \quad H_{Y_i^{(k)}} y_i \leq H_{Y_i^{(k)}} + H_{y_i}$$

ただし, $H_{\bar{Y}_i^{(k)} y_i}$ は観測出力 $\bar{Y}_i^{(k)} y_i$ による平均情報量である.

証明 まず $H_{y_i y_j} \leq H_{y_i} + H_{y_j}$ を証明しよう.

$$B(y_i) = \{B_{1i}\} / \{B_{2i}\},$$

$$B(y_j) = \{B_{1j}\} / \{B_{2j}\} \quad \text{とし,}$$

$$H_{y_i y_j} = \sum_{B(y_i), B(y_j)} P(B_i, B_j) \log_2 \frac{1}{P(B_i, B_j)}$$

ただし $P(B_i, B_j)$ は $B_i \in B(y_i), B_j \in B(y_j)$ なる B_i, B_j が同時に生起する確率である.

$$\begin{aligned} H_{y_i y_j} &= \sum_{B(y_i), B(y_j)} P(B_i, B_j) \log_2 \frac{\{P(B_i) \cdot P(B_j)\}}{P(B_i, B_j)} \\ &\quad + \sum_{B(y_i), B(y_j)} P(B_i, B_j) \log_2 \frac{1}{P(B_i) \cdot P(B_j)} \\ &= -I(B(y_i), B(y_j)) \\ &\quad + \sum_{B(y_i)} P(B_i) \log_2 \frac{1}{P(B_i)} + \sum_{B(y_j)} P(B_j) \log_2 \frac{1}{P(B_j)} \\ &= -I(B(y_i), B(y_j)) + H_{y_i} + H_{y_j} \end{aligned}$$

一般に, $I(B(y_i), B(y_j))$

$$\equiv - \sum_{B(y_i), B(y_j)} P(B_i, B_j) \log_2 \frac{P(B_i) \cdot P(B_j)}{P(B_i, B_j)} \geq 0$$

だから, $H_{y_i y_j} \leq H_{y_i} + H_{y_j}$ が成り立つ.

つぎに, $B(\bar{Y}_i^{(k)}) = \{B_{1i}^{(k)}\} / \dots\dots\dots / \{B_{mi}^{(k)}\},$

$$B(y_l) = \{B_{1l}\} / \{B_{2l}\}$$

に区分されているとすれば,

$$H_{\bar{Y}_i^{(k)} \cdot y_l} = \sum_{B_i \in B(\bar{Y}_i^{(k)}), B_l \in B(y_l)} P(B_i, B_l) \log_2 \frac{1}{P(B_i, B_l)}$$

(ただし, $B_i \in B(\bar{Y}_i^{(k)}), B_l \in B(y_l)$ である.)

をもとに, 上と同様の方法で,

$$H_{\bar{Y}_i^{(k)} \cdot y_l} \leq H_{\bar{Y}_i^{(k)}} + H_{y_l}$$

が得られる.

定理 3・2 をもとにしてつぎの定理をうる.

$$\text{定理 3・3} \quad I_l = \max_{y_i^{(l)}} H\{y_i^{(1)} y_i^{(2)} \dots y_i^{(l-1)}\} y_i^{(l)}$$

(ただし, $y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(l)} \in \bar{Y}_0$ である.)

のとき, I_l は $l (= 1, 2, \dots, m_0)$ に関して, 上に凸な増加関数である.

証明 I_l は l に関して増加関数であることは, 3・3・2 の性質(ii)で述べたとおりである.

いま I_l が $l = k+1$ において図 3・2 のような変曲点をもつと仮定すると,

$$a_1 = I_{k+1} - I_k < a_2 = I_{k+2} - I_{k+1}$$

となる. ただし, I_k, I_{k+1}, I_{k+2} は

$$I_k = \max_{y_i^{(k)}} H\{y_i^{(1)} y_i^{(2)} \dots y_i^{(k-1)}\} y_i^{(k)}$$

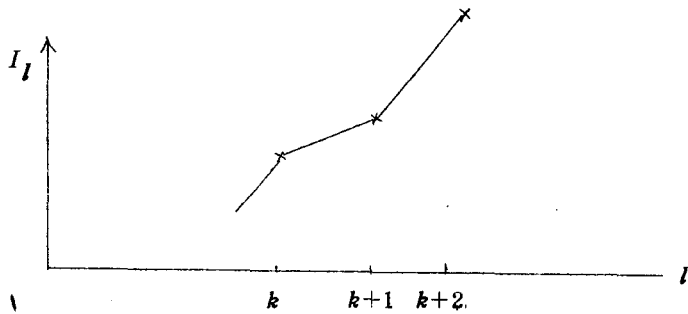


図 3・2 $I_l - l$ の 関 係

$$I_{k+1} = \max_{y_i^{(k+1)}} H\{y_i^{(1)} y_i^{(2)} \dots y_i^{(k)}\} y_i^{(k+1)}$$

$$I_{k+2} = \max_{y_i^{(k+2)}} H\{y_i^{(1)} y_i^{(2)} \dots y_i^{(k)} y_i^{(k+1)}\} y_i^{(k+2)}$$

である。

$\bar{Y}_i^{(k)} = \{y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(k)}\}$ とし, $\bar{Y}_i^{(k)}, \bar{Y}_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+1)}, \bar{Y}_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+1)}, y_i^{(k+2)}$ による $\{B_i\}$ の分割がそれぞれ, 図 3・3 に示す(i), (ii), (iii)で与えられているとする。なお (iv) は, (i), (ii), (iii)をもとに, $\bar{Y}_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+2)}$ による区分を示す。

$I_{k+2} - I_{k+1} = a_2$ であることは, (ii)(iii)から明らかなように, $B^{(3)}$ から $B_1^{(3)}, B_2^{(3)}$ の区分および, $B_1^{(k)}, B_2^{(k)}$ から $B_{11}^{(k)}, B_{12}^{(k)}, B_{21}^{(k)}, B_{22}^{(k)}$ の区分によって得られた情報量の増加分を意味する。また, (i)と(iv)をみれば明らかなように, $I_{k+1} - I_k$ の増加分は, $B^{(3)}$ から $B_1^{(3)}, B_2^{(3)}$ の区分および $B^{(k)}$ から $B_1^{(k)}, B_2^{(k)}$ の区分によって得られた情報量の増加を意味する。

したがって $I_{k+1} - I_k$ と $I_{k+2} - I_{k+1}$ の増加分の違いは, (i)' から (iv)' への増加分と, (ii)から (iii)'への増加分との違いになる。

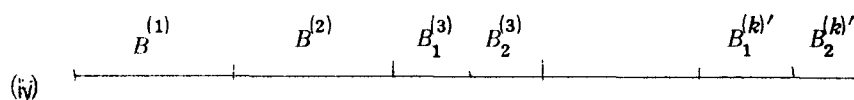
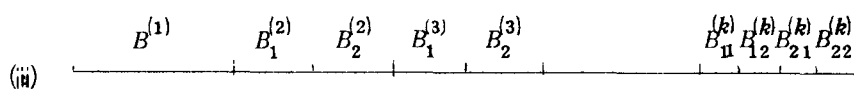
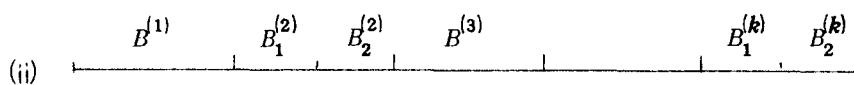
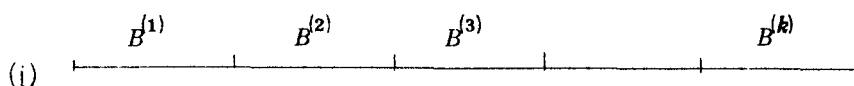


図 3 • 3 $\overline{Y}_i^{(k)}, \overline{Y}_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+1)}, \overline{Y}_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+1)} \cdot y_i^{(k+2)}, Y_i^{(k)} \cdot y_i^{(k+2)}$

による $\{B_i\}$ の区分図

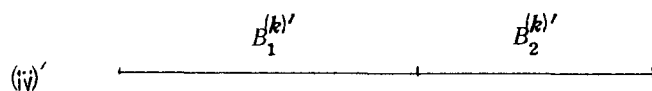
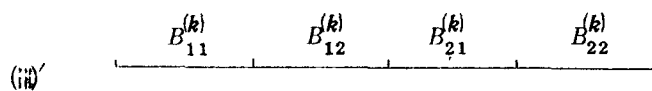
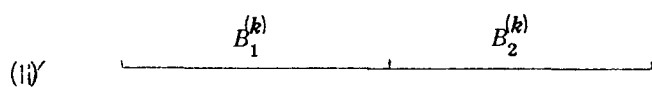
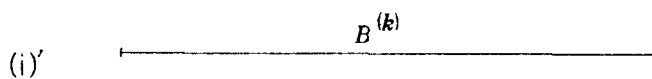


図 3 • 4 $B^{(k)}$ が与えられたときに, $y_i^{(k+1)}, y_i^{(k+1)} \cdot y_i^{(k+2)}$, および $y_i^{(k+2)}$ による $B^{(k)}$ の区分図

ところで、(i)'が与えられたとき、(ii)', (iii)', (iv)' はそれぞれ、 $y_i^{(k+1)}$, $y_i^{(k+1)} \cdot y_i^{(k+2)}$, $y_i^{(k+2)}$ をもとにして区分することのできるものである。

一方定理 3・2 から、 $H_{y_i y_j} \leq H_{y_i} + H_{y_j}$ であり、確率 $P\{B^{(k)}\}$ の値が 1 になるように $B^{(k)}$ 内の要素の確率を等しく m 倍 ($m > 1$) してやる。こうすると、図 3・4 のモデルは、定理 3・2 の場合と同様にして、

$$\begin{aligned} H_{y_i^{(k+1)} y_i^{(k+2)}} &= -I(B(y_i^{(k+1)}), B(y_i^{(k+2)})) \\ &\quad + (\log_2 m) / m + H_{y_i^{(k+1)}} + H_{y_i^{(k+2)}} \end{aligned}$$

右辺の 2 項はそれぞれ正值をとるので、

$$\begin{aligned} H_{y_i^{(k+1)} y_i^{(k+2)}} &\leq H_{y_i^{(k+1)}} + H_{y_i^{(k+2)}} \\ \therefore H_{y_i^{(k+1)} \cdot y_i^{(k+2)}} - H_{y_i^{(k+1)}} &\leq H_{y_i^{(k+2)}} \end{aligned}$$

右辺は(i)'から(iv)'への増加分、左辺は(ii)'から(iii)'への増加分だから、

$$\begin{aligned} a_2 &= I_{k+2} - I_{k+1} \leq I'_{k+1} - I_k \\ \therefore a_2 &= I'_{k+1} - I_k \\ I'_{k+1} &\geq I_k + a_2 > I_k + a_1 = I_{k+1} \end{aligned}$$

となり、 I_{k+1} が最大であるという仮定に反する。すなわち、 I_l は l に関して上に凸な増加関数になることがいえる。なお図 3・5 は、図 3・1 のモデルについて $I_l - l$ の関係を示したものである。

$$I_1 = H_{y_4} = 0.935$$

$$I_2 = H_{y_4 y_2} = 1.658$$

$$I_3 = H_{y_4 y_2 y_1} = 2.229$$

$$I_4 = H_{y_4 y_2 y_1 y_3} = 2.229$$

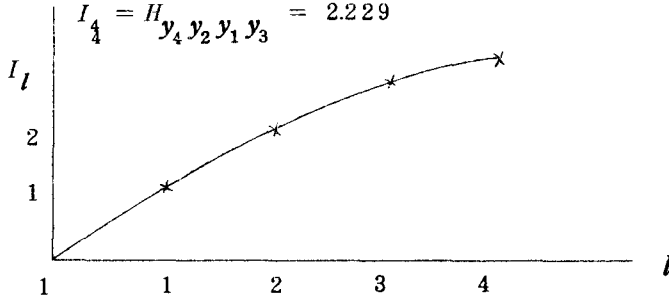


図 3・5 図 3・1 に対する $I_l - l$ の関係

3・4・2 観測出力の組によって得られる最大平均情報量

つぎに、逐次観測出力決定法によってもとまる平均情報量 I_{k+1} をもとにして、 $k+1$ 個の組によって得られる最大平均情報量 J_{k+1} を調べてみる。まず、 J_{k+1} は定理 3・4 で示されるような性質をもっている。

定理 3・4 $k+1$ 個の観測出力によって得られる最大平均情報量は

$$I_{k+1} \leq J_{k+1} \leq \log_2 q_{k+1}$$

の関係を満足する。ただし q_{k+1} は $k+1$ 個の観測出力により区分される $\{B_i\}$ の最大部分集合数である。

証明 $I_{k+1} \leq J_{k+1}$ は既に述べた。

$$\text{いま } J_{k+1} = \text{Max}_{y_i^{(1)} \dots y_i^{(k+1)}} H_{y_i^{(1)} y_i^{(2)} \dots y_i^{(k+1)}}$$

とし, $y_i^{(1)}, \dots, y_i^{(k+1)}$ から区分された $\{B_i\}$ の部分集合の数を q'_{k+1}

とし, 原因要素が各部分集合に属する確率を $P_l^{(k+1)}$ とすれば式 (3・5) より

$$J_{k+1} = - \sum_{l=1}^{q'_{k+1}} P_l^{(k+1)} \log_2 P_l^{(k+1)} \leq \log_2 q'_{k+1}$$

一方 $q'_{k+1} \leq q_{k+1}$ だから

$$J_{k+1} \leq \log_2 q'_{k+1} \leq \log_2 q_{k+1}$$

したがって定理 3・4 が成立つ。

また, J_{k+1} は組をつくる観測出力の数 l に応じてつぎのように近似できることもわかる。

$$\begin{array}{ll} l & l < m_1 < m_0 \\ J_{l+1} = \alpha_3 \log(\alpha_1 l + \alpha_2) & m_1 < l < m_2 \\ I_{l+1} & m_2 < l < m_0 \end{array} \quad (3 \cdot 7)$$

ただし, $m_1, m_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は対象とするシステムによって決まる。

〔式 (3・7) の誘導〕

$l \equiv m_0$ の場合には, $\bar{Y}_0$ に含まれている観測出力数は m_0 , 論理ユニットの数は n であり, これらはほぼ等しく, $m_0 \equiv n$ である。また $\bar{Y}_0$ のすべての観測出力数によって区分される $\{B_i\}$ の部分集合は n だから

$$q_{m_0} = n$$

$$\begin{aligned} \text{一方 } I_{m_0} &= H_{y_i^{(1)} \dots y_i^{(m_0)}} \\ &= H_{y_1 y_2 \dots y_{m_0}} \\ &= J_{m_0} \end{aligned}$$

である。また I_{m_0} は定理 3・3 から変曲点をもたないので、

$m_1 < l \cong m_0$ では、

$$J_l \cong I_l$$

で近似される。

つぎに、 $l < m_1$ に関して J_l の性質を調べてみよう。

J_l は定理 3・4 から、 $I_l \leq J_l \leq \log_2 q_l$ であり、 $m_1 < l \cong m_0$ においては、 I_l に漸近していく増加関数である。

また式 (3・6) から

$$\begin{aligned} J_l &= \text{Max } H_{\mathbf{I}}(l) \\ &= - \sum_{j=1}^{m_l} P(B_j^{(l)}) \log_2 P(B_j^{(l)}) \end{aligned}$$

であるので、

$$J_l \cong \alpha_3 \log_2 (\alpha_1 l + \alpha_2)$$

の形で近似することができる。ただし、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ はシステム固有のパラメータである。

3・4・4 観測出力の最適配分

最大平均情報量が得られるように観測出力の値を決定するとして、使用可能な観測出力の数を増加すればするほど、情報量は増加するから、その意味では観測出力数をできるだけ多くすればよい。ただし、それには設計上の困難がともなうはずである。

ここでは、この問題を含めて観測出力数決定にあたっての 1 つの指導指針を提案する。

設計上の困難性は設計製造にかかる費用で評価できるが、その費用は

使用可能な観測出力数 l の増加とともに次式のように指数関数的に上昇すると考えることにする。

$$C(l) = A l^{\beta}$$

A, β はシステムの固有定数

l 個の観測出力の組によって得られる平均情報量を $H(l)$ とし、観測出力の数のもつ Merit として、

$$M(l) = H(l) - C(l)$$

を定義しておけば、それを最大にする l を求めるという形の決定指針が得られる。

3・5 故障検知のための観測出力とテスト入力の変換性について
 N 個のサブシステムで機能的に結合されたシステムが inoperable state にある場合、原因要素抽出のための情報源としては、出力（外部出力および内部出力）と入力（外部入力および内部入力）とがある。

3・3 で、情報源として出力をとる場合について、観測出力がシステムの論理モデルを構成する論理ユニットを区分することを示し、これにもとづいて観測出力決定法を導いた。

本節では、観測出力による区分と同じ区分が適当なテスト入力（テスト入力とは正常な内部入力をいう。）によっても得られること、すなわち観測出力とテスト入力との間に変換性のあることを示し、情報源としてテスト入力と観測出力をとる場合に、前節までの結果が、テスト入力の決定法にも適用できることを指摘したものである。

観測出力とテスト入力の互換性

まず、図 3・1 に示す論理モデルであらわされたシステムを考え、観測出力 y_2 による論理ユニットの区分

$$B(y_2) = \overline{B}_{11}(B_1, B_2, B_3) / \overline{B}_{12}(B_4, B_5)$$

が適当なテスト入力集合 $\overline{X}$ によって得られることを示してみる。

$B_{12}(B_4, B_5)$ において、 B_4, B_5 の内部入力である内部出力はそれぞれ、 $[y_3, y_2, y_4]$ であり、これらの集合を $\overline{Y}_{12} = \{y_2, y_3, y_4\}$ とする。また $\overline{B}_{11}(B_1, B_2, B_3)$ について、それらの出力すなわち内部出力は y_1, y_2, y_3 であり、それらの集合を $\overline{Y}_{11} = \{y_1, y_2, y_3\}$ とする。ここで、 $\overline{Y}_{11}$ と $\overline{Y}_{12}$ の共通集合を求めてみると、

$$\overline{Y}_{11} \cap \overline{Y}_{12} = (y_2, y_3)$$

となり、このことから、サブブロック $\overline{B}_{11}$ と $\overline{B}_{12}$ とが y_2, y_3 によって機能的に結合されていることがわかる。

よって、論理ユニット B_4, B_5 にそれぞれテスト入力 y_2, y_3 ($\overline{X} = \{y_2, y_3\}$) を印加したとき、最小出力 y_5 が

(i) 許容出力なら B_1, B_2, B_3 のどれかが inoperable state にあることが、

(ii) 許容出力でなければ B_4, B_5 のどれかが inoperable state にあることがいえるが、このことはテスト入力 $\overline{X} = \{y_2, y_3\}$ によって $\{B_i\}$ が

$$B(\overline{X}) = (B_1, B_2, B_3) / (B_4, B_5)$$

に区分されることを示している。すなわち、このシステムについて

$$B(y_2) = B(\overline{X})$$

であるようなテスト入力の集合 $\overline{X}$ が存在している。

以上のことを一般的に考察すると、 y_j によって $\{B_i\}$ が

$$B(y_j) = \overline{B_{j1}} / \overline{B_{j2}}$$

に区分されるとき，

$$B(y_j) = B(\overline{X_j})$$

であるようなテスト入力集合 $\overline{X_j}$ が存在するということになるが，この命題はつぎのように証明される．

(i) $\overline{B_{j2}}$ の内部入力である内部出力をすべてもとめる．それらの集合を $\overline{Y_{j2}}$ とする．

(ii) $\overline{B_{j1}}$ の出力である内部出力をすべてもとめる．それらを $\overline{Y_{j1}}$ とする．

(iii) $\overline{Y_{j1}}$ と $\overline{Y_{j2}}$ の共通集合をもとめる．それらを $\overline{X_j}$ とする．

$$\overline{X_j} = \overline{Y_{j1}} \cap \overline{Y_{j2}}$$

もし $\overline{X_j}$ が空集合なら，(i)，(ii) の操作段階で $\overline{B_{j2}}$ と $\overline{B_{j1}}$ とを交換する．
いずれの場合にも $\overline{X_j}$ が空集合なら， $\overline{B_{j1}}$ に属する論理ユニットと，
 $\overline{B_{j2}}$ に属する論理ユニットの間に機能的な結合がないことになり，
これはシステムが機能的に結合されているという仮定に反する．

これで $\overline{X_j}$ の存在が証明されたが， $\overline{X_j}$ の存在は， k 個の観測出力による区分 $B(\overline{Y_i^{(k)}})$ と同一の区分を与えるテスト入力集合 $\overline{X_j^{(k)}}$ の存在を保証する．その理由は， $B(\overline{Y_i^{(k)}})$ は $\overline{Y_i^{(k)}} = \{y_{i1} \cdots y_{ik}\}$ に属する観測出力のそれぞれによる区分， $B(y_{i1})$ ， $\cdots$ ， $B(y_{ik})$ によって得られるものであり， $B(y_{i1}) = B(\overline{X_{i1}})$ ， $\cdots$ ， $B(y_{ik}) = B(\overline{X_{ik}})$ であるテスト入力 $\overline{X_{i1}}$ ， $\cdots$ ， $\overline{X_{ik}}$ の存在が，すでに保証されているからである．

以上では，観測出力と同じ区分を与えるテスト入力が存在するという

形をとって観測出力とテスト入力との関係を論じているが、その逆もいえることは明らかで、この関係を観測出力とテスト入力との間に存在する互換性としてとらえることができる。

この互換性から、前節までの結果がテスト入力の決定にも適用できることがいえる。

3・6 結 言

3・2で定義した機能的に結合されたサブシステムから構成されるシステムを対象にして、内部端子のすべては観測可能でないという制限のもとでの原因要素抽出のための観測出力決定法を、観測出力の原因要素抽出に関してもつ平均情報量を基盤にして考察した。

本章では式(3・6)で定義した平均情報量をもとにして、 m_0 個の観測出力のうち、 $k+1$ 個の観測出力が使用できるとして、最大平均情報量を得るには決定操作の可能性も含め観測出力の組をどのように決定すればよいかという形式の解を出しているが、ここに示した平均情報量はまた、ただちに観測出力数の決定問題を解くための基盤に使えるものである。

また故障検知のための情報源として、観測出力の他にテスト入力も存在することから、テスト入力について同様の考察を行い、観測出力とテスト入力の互換性も述べた。

本章では、原因要素を1個としている点、また対象とするシステムを3・2に示したように規定している点で、この結論はもちろんすべての種類のシステムに、また複数個の故障要素をもつ場合には、直ちに適用できないが、そのような場合に対しても有力な基盤もしくは手がかりを与えるものと考えている。

記 号 表

本章で使用した主な記号を列举する.

S_i	システムを構成する第 i 番目のサブシステム ($i = 1, 2, \dots, N$)
$\bar{z}_i$	サブシステム S_i の外部入力の集合
$\bar{x}_i$	サブシステム S_i の内部入力の集合
$\bar{y}_i$	サブシステム S_i の出力の集合
B_i	第 i 番目の論理ユニット
$\bar{B}$	論理ユニットの集合で $\{ B_1, B_2, \dots, B_n \}$ で表わす.
k_i	サブシステム S_i の出力総数である.
n	システムの端子の総数であり, $n = \sum_{i=1}^N k_i$ である.
m_0	システムの観測出力の総数である. $m_0 \leq n$
$\bar{Y}_0$	観測出力の集合で $\{ y_1, \dots, y_{m_0} \}$ である.
$\bar{Y}_i^{(k)}$	$\{ y_1, \dots, y_{m_0} \}$ から選んだ k 個の観測出力の集合.
$B(\bar{Y}_i^{(k)})$	$\bar{Y}_i^{(k)}$ によって区分された $\{ B_i \}$ のサブブロック
q_{k+1}	$k+1$ 個の観測出力により区分される $\{ B_i \}$ の最大部分集合数
$H_{\bar{Y}_i^{(k)}}^{(k)}$	$= - \sum_{j=1}^{mk} P(B_{ji}^{(k)}) \cdot \log_2 P(B_{ji}^{(k)})$
J_l	l 個の観測出力によりえられる最大平均情報量
I_l	逐次観測出力決定法により, l 個の観測出力によりえられる平均情報量
l	観測出力の数を示す一般的総称 $l = 1, 2, \dots, k, \dots, m_0$

第 4 章 最適システム・テスト方式に関する研究

4・1 序 言

複雑な装置またはシステムの Availability を高く保持するためには、Reliability を高く保つと同時に、故障を生じるような要素を連続的に監視、もしくは周期的に点検する方法をとらねばならない。

本研究の目的において、Availability は、運用段階に入ったシステムが運用命令時刻に operable state にある確率で定義されている。

動作命令の時刻が事前にわかっている場合には、Availability の向上は比較的たやすいが、一般には事前に予知できないようなものが多く、そのために、Availability のとりあつかいが困難なわけである。

これまでに、Reliability の定義を、Maintenance を含んだ領域まで拡張するような試みが種々なされ、⁽⁴⁾それらは Dependability, Operational-readiness, System Effectiveness, System Efficiency, Availability 等と呼ばれており、いまだ一つの用語に統一されるまでになっていない。

本章では、比較的広範囲に用いられている Availability を統一して使用している。

Availability に関連した、種々の諸定義および原理のいくつかを以下に示そう。

システムが inoperable state にあるとき、または周期的点検をうけている場合を “down” と呼び、stand by の時間（運用段階のシステムで、いつでも動作できるように待期している場合をいう。）内にあり、しかも operable state のときを “Up” と呼ぶ。したがって、

システムは任意の時刻に “up” , または, “down” のいずれかの状態にあることになる。

システムが時刻 t で “up” にある確率 $\bar{P}(t)$ であらわす。 $\bar{P}(t)$ はしばしば、時点 Availability と呼ばれる。⁽⁴⁾

いま運用命令の時刻が分布関数 $F_T(t)$ にしたがってランダムに分布しているとしよう。もし命令時刻が時間 $[0, T]$ 内の任意の時刻に等確率で表わされるとすれば、

$$F_T(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ t/T & 0 \leq t \leq T \\ 1 & T < t \end{cases} \quad (4.1)$$

で与えられる。

Barlow と Hunter の定義によると、System Efficiency は、 $F_T(t)$ を式 (4.1) で与えると、

$$E_{ffT} = \int_0^T \bar{P}(t) dF_T(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{P}(t) dt \quad (4.2)$$

で与えられ、この場合には、時点 Availability $\bar{P}(t)$ の時間平均として与えられることがわかる。

ところで、ここでいう Availability とは、式 (4.2) で $T \rightarrow \infty$ の極限として定義し、

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \bar{P}(t) dt \quad (4.3)$$

となる。

ここで、もしシステムがいかなるテストもうけない場合を考えてみよう。そうすると、一般には Availability は 0 に近づく、たとえば、 $\bar{P}(t) = e^{-\lambda t}$ とすると、式 (4.3) から

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e^{-\lambda t} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} (1 - e^{-\lambda T}) / T = 0 \quad (4.4)$$

となり、大部分の時間はシステムが“down”になり、 A は0になる。

ところで、Availability を高くするには、式(4.3)からわかるように、 $\bar{P}(t)$ を高くしなければならない。そのためには、システムの Reliability を高くする方法が考えられねばならないが、上の考察から明らかなように、一般には、Reliability は時間と共に減少してしまっているので、ある時期に点検して、信頼性を回復させてやる必要がある。

W. D. Moon⁽¹¹⁾ は、時点 Availability $\bar{P}(t)$ (彼は operability と名づけている。)が、周期点検を行った場合の諸パラメータによって、どのように影響をうけるかを定量的に考察しているが、そこでは、故障要素の摘出と補修はきわめて簡易に処理されるものとしている。この両者を含めたタスクは零時間で処理できるものでないことは明らかであり、事実、これに対して時間能率の測度として、次式で与えられる Main-tenability $m(\tau)$ の概念が出されている。

$$m(\tau) = 1 - e^{-a\tau} \quad (4.5)$$

$m(\tau)$ は τ 時間内にシステムを operable state に回復させる確率を示しており、 τ を大きくするほど $m(\tau) \cong 1$ になり、定性的にもうなずける。

システムのパラメータを観測しうる内部端子に制限が加わっている現状においては、故障検知のために有効な観測出力を選定した場合にでも、システムの故障検知の操作は瞬間的に行うことはきわめてむずかしいため、検知時間の消費はやむをえず、したがって、上式で定義した

Maintenability の妥当性が理論的にうなずけるものである。

定性的にいて、運用段階のシステムを全くテストしなければ、Availability は 0 になることは前述の考察から明らかであり、また式 (4・5) のテスト時間 τ を長くしてやれば、システムの時点 Availability は高くなるが、テスト時間はシステムを “down” の状態におくことになり、必ずしも Availability の向上に寄与するとはかぎらない。

以上のような考察を基礎にして、本章では、Maintenability をとり入れたときの周期点検方式を問題にしたものであり、新しいパラメータである、テスト時間 τ が、システムの Availability にどのように影響するかを定量的に示し、あわせて、最大 Availability をあたえる最適テスト時間を与える関係式を求めている。

4・2 方程式の導出

4・2・1 諸量の定義

まず、つぎのような諸量を定義する。

P_n : 第 n 回目の点検終了時に、システムが, operable state にある確率

$\bar{P}_n$: 第 n 回目の点検開始前に、システムが, operable state にある確率

T : 点検終了からつぎの点検開始までの時間

τ : 点検開始から点検終了までの時間

λ : システムが stand by のときの故障率

S : 点検時にシステムが故障しない確率

4・2・2 条件および仮定

Maintenability

Maintenability とは一定時間 τ 内にシステムを operable な状態に回復させる確率と定義し、

$$m(\tau) = 1 - e^{-a\tau}$$

で与える。

点検およびその Repair

システムは時間 T_0 の間に N 回点検される。また時間間隔 T 毎に周期的に点検するものとし、点検時間は τ である。なお Availability を求めるため $N \rightarrow \infty$ としている。

システムの Reliability

これまでの実際的ならびに理論的な多くの研究成果から見て、システム μ の Reliability の時間的減衰指数関数 $e^{-\lambda t}$ の形であらわされるものはとするのは妥当な仮定であると考えられる。

したがって以下にこの仮定をおく。

システムの動作

システムを点検期間においてのみ動作をさせ、点検終了から開始までの時間 τ 内では動作させず stand by の状態に保たせる。

したがってシステムの動作中の故障割合は、stand by 状態のシステムのそれよりも高い。

点検期間中の故障割合

点検期間中での故障発生については、点検開始直後にのみ

故障が生じるものと仮定し，その故障割合を $1 - S$ で与える．

4・2・3 方程式の誘導

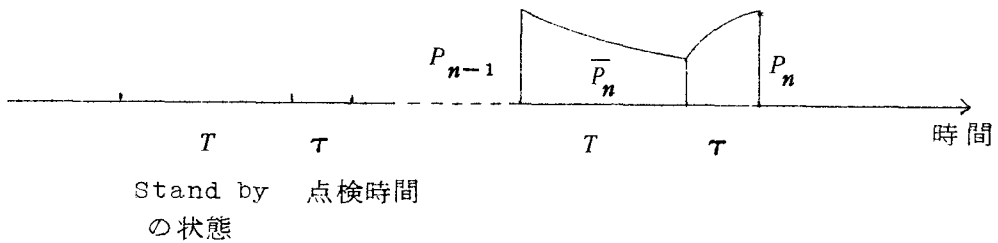


図 4・1 周期的点検図

以下では，第 n 回目の点検終了後のシステムの時点Availability
について，方程式の導出を行う．

- (i) $\bar{P}_n \cdot S$; 点検開始直前に，システムがoperable stateにあり，
点検時間 τ 内でinoperable state にならない確率
- (ii) $(1 - \bar{P}_n) \cdot m(\tau)$; 点検開始直前に，システムがinoperable
state にあり，点検時間 τ 内でシステムを operable
state に回復させる確率
- (iii) $\bar{P}_n \cdot (1 - S) \cdot m(\tau)$; 点検開始直前にシステムがoperable
state にあり，点検開始直後に故障を生じ，点検期
間 τ 内にシステムを operable state に回復させる
確率

以上の(i), (ii), (iii)点のいずれかが生じれば, 第 n 回目の点検終了後のシステムの時点 Availability P_n がえられる.

すなわち

$$P_n = \bar{P}_n \cdot S + (1 - \bar{P}_n) \cdot m(\tau) + \bar{P}_n (1 - S) \cdot m(\tau) \quad (4 \cdot 6)$$

前述の仮定でのべたように, stand byの状態でのシステムの Reliability の減衰は指数関数的であり, 第 n 回目の点検開始前にシステムが operable state である確率, $\bar{P}_n$ は

$$\bar{P}_n = P_{n-1} e^{-\lambda T} \quad (4 \cdot 7)$$

で与えられる.

この表示式を P_n に対する式 (4・6) に代入すると, システムの時点 Availability を定める階差方程式として

$$P_n = m(\tau) + (1 - m(\tau)) \cdot S \cdot P_{n-1} e^{-\lambda T} \quad (4 \cdot 8)$$

が与えられる.

この階差方程式の解は

$$P_n = [(1 - m(\tau)) \cdot S \cdot P_{n-1} e^{-\lambda T}]^n \cdot P_0 + m(\tau) \sum_{i=0}^{n-1} [1 - m(\tau) S \cdot e^{-\lambda T}]^i$$

上式における P_0 は初期状態であり, 第 1 回目の点検を行う T 時間前にシステムが operable state にある確率である. 点検回数 n を大きくすると, 上式の P_n は P_0 に無関係な値に収束する.

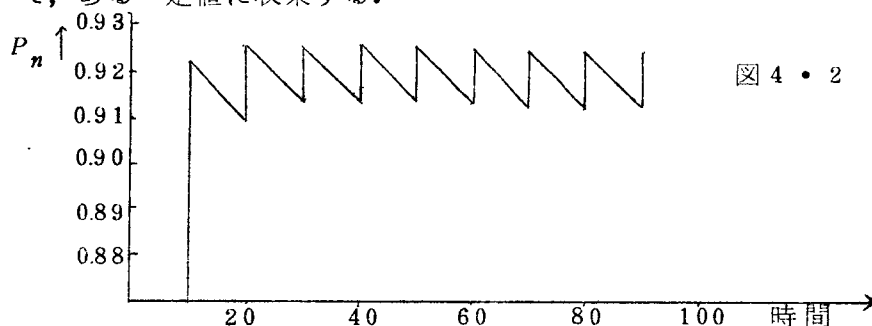
この収束値は,

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} P_n = \frac{m(\tau)}{1 - (1 - m(\tau)) \cdot S \cdot e^{-\lambda T}} \quad (4 \cdot 10)$$

もし確率 $m(\tau)$ が 1 であれば, λ , S , T に無関係に 1 に収束するが, これは定性的に述べたことがらと一致する.

4・2・4 P_n の特性

点検回数 n が大きくなるにつれて, P_n は初期条件 P_0 に無関係なある値に収束することがわかった. 図 4・2 に示すように P_n は $n = 4 \sim 5$ で, ある一定値に収束する.



P_n の収束値は次の各要素によって増加する.

1. Maintainability $m(\tau)$ を増加させる. (点検時間 τ を長くする.)
2. 点検時間内に, 故障が発生しない確率 S を増加させる.
3. 時間間隔 T を減少させる.
4. 故障割合 λ を減少させる.

ところで上の 4 項のうちで, 2 および 4 は本質的にいってシステムの Reliability の向上を意味するものであり, 現在のところこれらを飛躍的に向上させることは困難である.

一方 1, 3 は, Maintenance のとるべき動作であり, これがシステム・テストの方式を決定するものといえる.

4・3 Availability の数学的表示

4・2 では, $P_n, \bar{P}_n$ を定義し, その数学的表示を与え, それらの特性を明らかにした. 本節ではさらにそれらを発展させ, Availability に結びつける.

第 $n-1$ 回目の点検終了後で、かつ第 n 回目の点検開始前の任意の時刻 t において、システムが operable state にある確率を $\bar{P}_n(t)$ とすると、

$$\bar{P}_n(t) = P_{n-1} e^{-\lambda t} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (4 \cdot 11)$$

となる。 $t = T$ のときは式 (4・7) と一致し、 $\bar{P}_n(T) = \bar{P}_n$ に対応する。

一般にシステムが up の状態にあれば、その Availability は式 (4・3) で定義されたから、上述の場合では、

$$A = \lim_{N \rightarrow \infty} A_N = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT + (N-1)\tau} \sum_{n=1}^N \int_0^T \bar{P}_n(t) dt \quad (4 \cdot 12)$$

で与えられる。

式 (4・11) を式 (4・12) に代入して

$$A_N = \frac{1}{NT + (N-1)\tau} [P_0 + P_1 + \dots + P_{n-1}] \cdot \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \quad (4 \cdot 13)$$

また式 (4・8) から

$$P_n = \frac{m(\tau)}{1-\alpha} - (P_1 - P_0) \frac{\alpha^n}{1-\alpha}$$

$$\text{ところで } \alpha = S \cdot (1 - m(\tau)) e^{-\lambda T}$$

である。上式を式 (4・13) に代入して

$$A_N = \frac{1}{NT + (N-1)\tau} \frac{m(\tau)^N - \frac{P_1 - P_0}{(1-\alpha)^2} \alpha^N}{1 - (1 - m(\tau)) e^{-\lambda T}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \quad (4 \cdot 15)$$

式 (4・15) は有限区間、 $T_0 = NT + (N-1)\tau$ におけるシステムの Availability であり、これは式 (4・2) で定義した System Efficiency になる。式 (4・15) において $N \rightarrow \infty$ にして式 (4・12) をもとめると、

$$A = \lim_{N \rightarrow \infty} A_N = \frac{1}{T + \tau} \cdot \frac{m(\tau)}{1 - S(1 - m(\tau)) e^{-\lambda T}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \quad (4 \cdot 16)$$

になる。

一般にシステムの時点Availabilityを増加させることのみを目的とすれば、4・2・4に述べた各要素によって達成されうる。λをできるだけ小さくすることなどがその一例であるが、材料の問題とか、システムの構成方法によって、λをより小さくすることは本質的に困難なことであり、図2から明らかなように、点検時間 τ を長くすることによって $P_n(t)$ の増加を達しうる。

しかしながら、 τ を長くすることは、それだけシステムをdownの状態におくことになり、システムの動作命令がまったく任意に起る場合などでは、かえってAvailabilityの減少を起すことになる。したがって、時点Availabilityを増大させるように τ を長くしても、必ずしもAvailabilityを増大させることにはならないことになる。

以下では、Availability A と点検時間 τ およびstand by時間 T の関係について、定量的な関係を考察してみよう。

A と τ の関係

$m(\tau)$ については、式(4・5)で定義されており、この式を式(4・10)に代入する。

$$A = \frac{1}{T+\tau} \cdot \frac{1 - e^{-a\tau}}{1 - se^{-a\tau} e^{-\lambda T}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \quad (4 \cdot 18)$$

式(4・18)を τ で微分すると、

$$\left. \frac{dA}{d\tau} \right|_{T=\text{定}} = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \cdot \frac{a(T+\tau)e^{-a\tau}(1 - se^{-\lambda T}) - (1 - e^{-a\tau})(1 - se^{-\lambda T} e^{-a\tau})}{(T+\tau)^2 (1 - se^{-\lambda T} e^{-a\tau})^2} \quad (4 \cdot 19)$$

つぎに、式(4・18)で与えられるAvailabilityの τ に関する性質

を調べる。

$$\left. \frac{dA}{d\tau} \right|_{\tau=0} = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda} \cdot \frac{aT(1 - se^{-\lambda T})}{T^2(1 - se^{-\lambda T})^2} > 0$$

$$\text{また, } \lim_{T \rightarrow \infty} A = 0$$

であり、 A は $\tau > 0$ で、 τ に関して連続関数であるので、図(4・3)のような性質をもった関数になる。

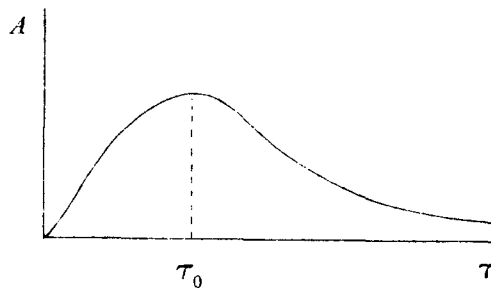


図 4・3 $A - \tau$ の関係

$A - T$ の関係

式(4・19)から明らかなように、 τ と全く同じ数学的性質をもつ。したがって、 $A - T$ 曲線も図4・3と同じ傾向をもつ。

A の諸特性

システムのAvailabilityは、つぎの諸特性をもつ。

1. stand by領域における故障割合を小さくすると、 A は増加する。
2. 点検時間内に、故障が発生しない確率 S を増加させると A は増加する。
3. 点検時間を長くしても、必ずしも A は増加しない。

4. stand by 時間を長くしても，必ずしも A は増加しない。
5. $A(\tau)$ を最大にする有限点検時間が存在する。
6. $A(T)$ を最大にする有限 stand by 時間が存在する。

τ_0 の決定

図 4・3 で， $A(\tau)$ を最大にする τ の値 τ_0 は， $A(\tau)$ が連続関数であることから，

$$\frac{dA}{d\tau} = 0$$

より求まる。

したがって，式 (4・19) から

$$a(T+\tau_0)e^{-a\tau_0}(1-se^{-\lambda T}) - (1-e^{-a\tau_0})(1-se^{-\lambda T}e^{-a\tau_0}) = 0$$

$$\therefore a(T+\tau_0)e^{-a\tau_0}(1-se^{-\lambda T}) = (1-e^{-a\tau_0})(1-se^{-\lambda T}e^{-a\tau_0}) \quad (4 \cdot 20)$$

となる。

式 (4・20) は τ_0 に関する超越方程式となり，一般には解けないが，数値解析により求めることが可能である。

4・4 数 値 例

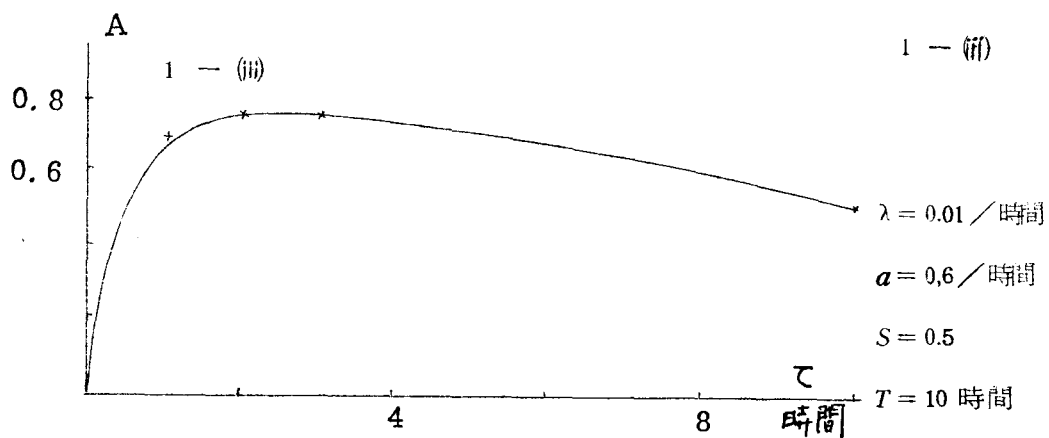
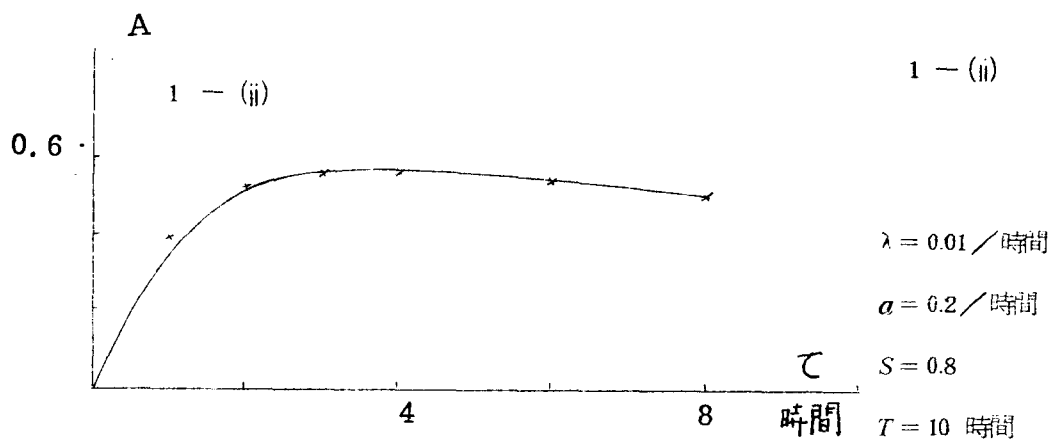
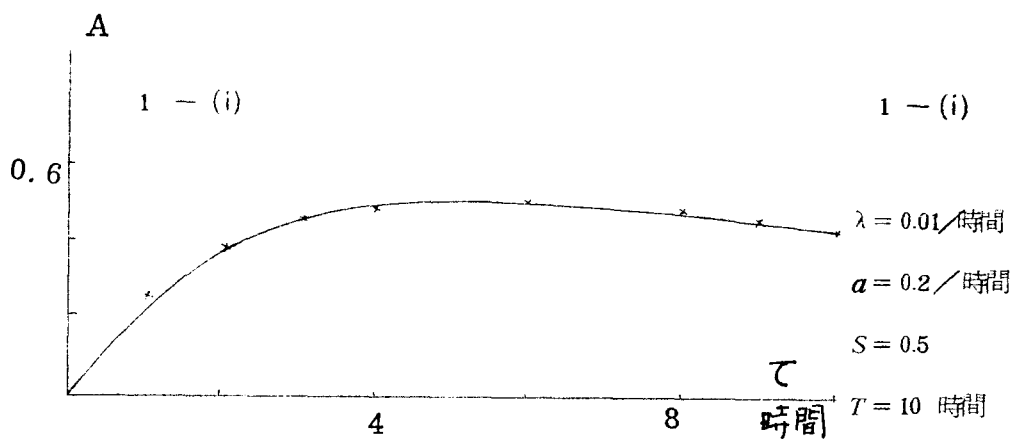
パラメータ a ， λ ， S が既知な場合，最大 Availability の決定は，

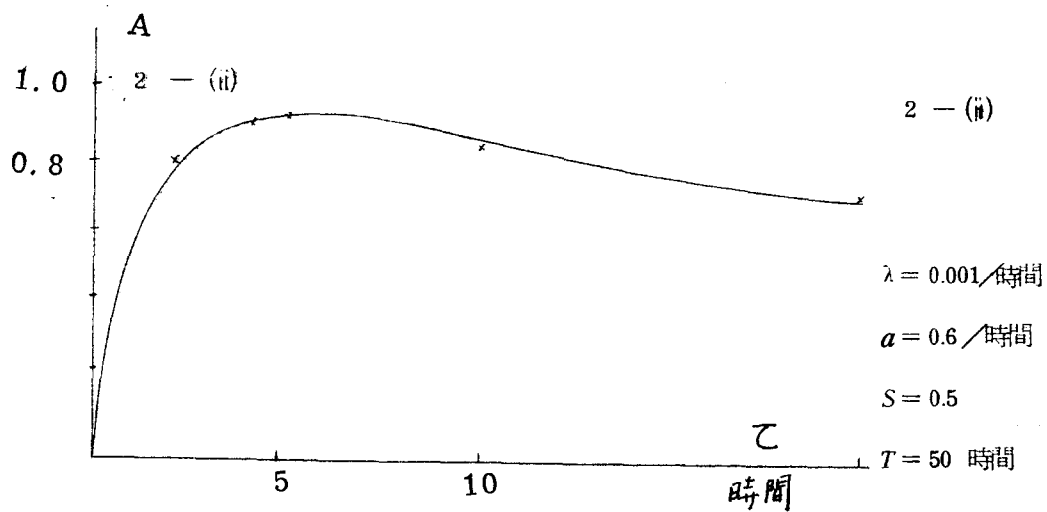
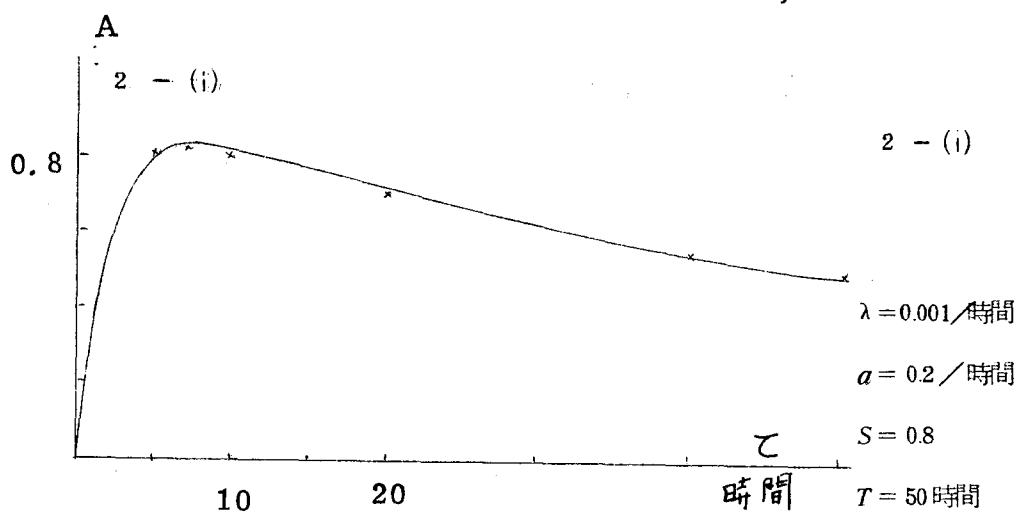
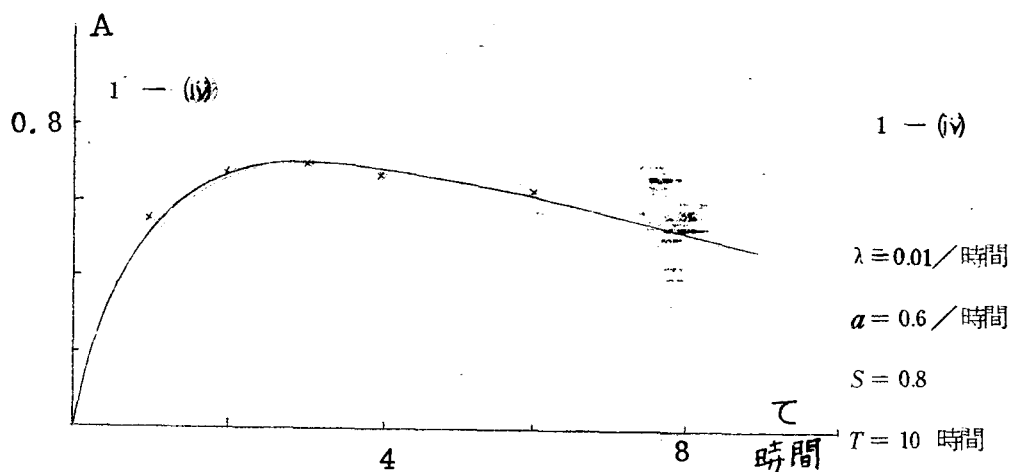
- (i) 式 (4・20) に a ， λ ， S を代入し， T と τ の関係を求める。

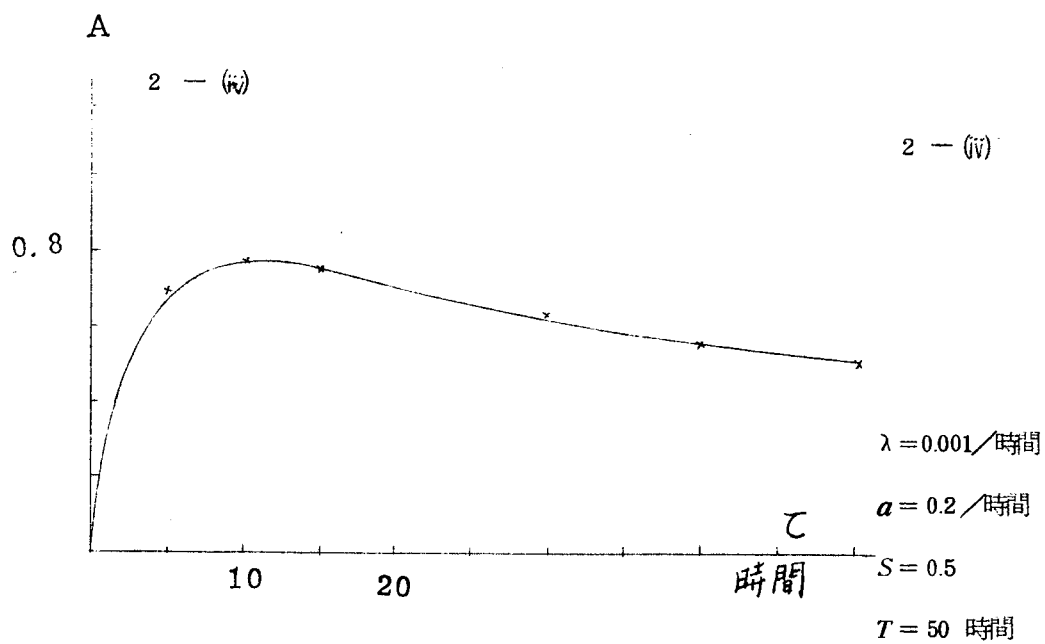
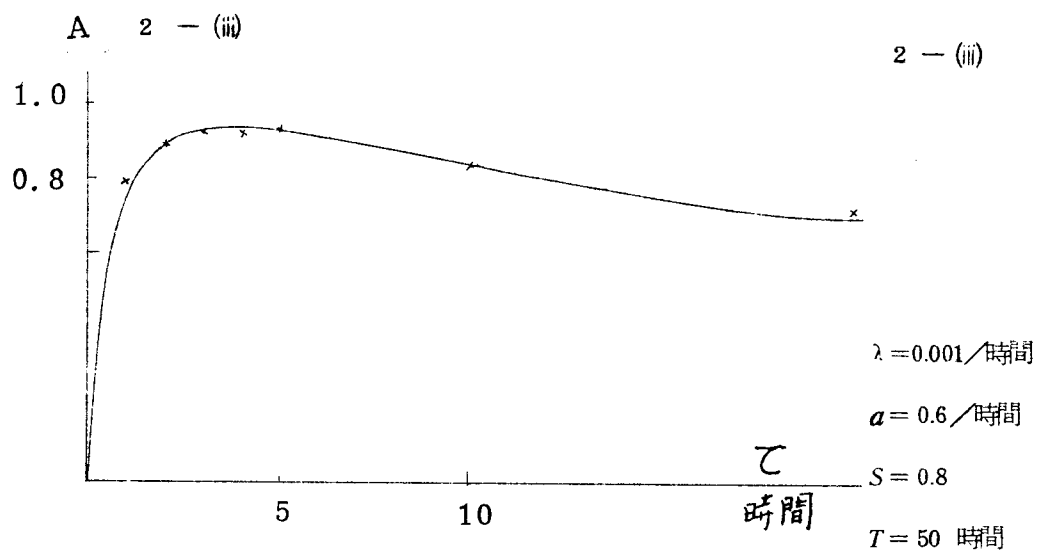
$$\varphi(T, \tau) = 0$$

- (ii) $\varphi(T, \tau) = 0$ を満足するすべての T と τ とを式 (4・18) に代入し，そのうちの最大値が最大 Availability である。

本節では取り扱いを簡単にするために， T も既知である場合を考える。







4・5 結 言

Reliability は時間とともに指数関数的に減少する。したがって式 (4・3) で定義されたシステムの Availability を向上するためには、適当な時間にシステムを点検することにより、Reliability の回復にあたらなければならない。

本章では、システムの点検時間 τ をパラメータとする、Maintenability $m(\tau)$ を考慮し、最大 Availability を与える最適点検時間 τ_0 を式 (4・20) で与え、数値例によって、4・3 で述べた A の諸特性が具体的にうられられた。

第 5 章 結 論

著者は本論文において、運用段階におけるシステム・テストの基本的な問題である故障検知、およびシステムのテスト方式について考察した。

本章はこの論文に関する結論で、本研究の成果および今後に残された問題を総括してのべたものである。

第 2 章では、強結合の有限状態システムを対象にして、システムの故障検出のためのテスト入力系列決定法を提案した。

ここで提案する入力系列はつぎの 3 つから成り立っている。

(i) システム M_0 をある特定の状態（初期状態）に遷移させる入力系列 I_0 を求める。

(ii) 適当な入出力系列 I_1-O_1 を与え、この関係を満足するシステムの集合 $\overline{M}$ を求める。

(iii) M_0 と $\overline{M}$ の各要素とを区別する最小入力系列 $I_{2\min}$ を求める。

なお I_1 の選定には、(ii), (iii) の操作を簡便にしかつ、それ自身系統的に求められるものという制約から、 M_0 の状態数を確認できる入力系列を採用した。その結果、従来の系列長と比べて約 $1/5$ の系列長に短縮でき、また操作法で重要な問題である $\overline{M}$ をも求めるアルゴリズムも得られた。

ここに提案した方法は、方法論的には、決定実行性と、できるだけ短い系列長で決定するという 2 つの要求を最適に満足させようとしている点で、入力系列決定の基本の方針として採用できるものであるといえるし、かつ方法としてはこれまでに出版されている方法より一般性をもったものであると言える。

なお、ここではシステムの故障検出問題に着目して考察を行ったが、

今後残された問題としては、

- (i) テスト入力系列の決定操作の簡易化と系列長の短縮化のために、
 I_1 , O_1 を改良する方法.
- (ii) 故障診断の取り扱いにまで発展させる.

の2点が考えられる.

以上が第2章の成果および今後の問題点である.

機能的に結合されたシステムの構成要素が複雑化し、かつ集積化しつつある現在、故障検知のために任意の内部端子を観測できるとは限らない.

第3章では、 m_0 個の観測出力のうちから k 個の観測出力が使用できる場合、故障検知に最も有効な情報を与える観測出力の決定法を新らしく提案し、情報理論的考察によって理論的に求めた. また、故障検知のためには、その情報源として観測出力のみならずテスト入力もあることから、観測出力とテスト入力の互換性も論じた. 本章の結果は、設計段階において、使用可能な観測出力の決定をするのに有効な基準を与えるものと思われる.

なお本章では、故障原因要素を1個とし、システムは機能的に結合されたものという前提に立っているため、より一般的なシステムおよび複数個の故障要素に対しては本章の結果はそのまま適用できないが、とくに後者の場合については、その適用の基盤を与えるものと思われる.

今後残された問題としては、本章の結果をもとに決定された観測出力から、原因要素を抽出するための処理方法がある. この研究はまだ緒についたばかりであり、パターン認識、または辞書づくりなどが提案されているにすぎず、新しい処理方法の開発が残されている.

以上が第 3 章の成果および今後の問題点である。

一般に，システムの信頼度は時間とともに指数的に減少する．したがって，適当な時間に保守を行い，信頼度を回復させる必要がある．この保守方法には時間的に連続して行う場合と，周期的に行う場合がある．

第 4 章では，保守度を考慮したときの周期点検方式を問題にし，新しいパラメータの点検時間 τ がシステムの稼働度に与える効果を定量的に論じ，最適点検時間 τ_0 を与える数学的表示をもとめた．また数値例をおして，稼働度に与える各パラメータの効果を具体的に示した．

今後残された問題としては，

- (i) 連続的にシステムを監視する場合に，稼働度に与える効果を定量的に求めること．
- (ii) (i)で得られた結果と本章で得られた結果の比較

等が考えられる．

以上が第 4 章の成果および今後の問題点である．

以上，総括的にのべた本研究の成果が，システム・テストの分野において，多少とも貢献できたとするならば，著者の最も幸とするところである．

謝

辞

本研究の全過程を通じて，終始御指導御鞭撻いただいた大阪大学名誉教授熊谷三郎博士（現愛媛大学学長），直接理解ある御指導をいただき，常に励まされた大阪大学工学部中西義郎助教授に深く感謝する。

本研究の第2章において適切な御助言，御討論をいただいた，大阪大学電子工学教室助教授樹下行三博士および，橋本昭洋博士（現在電々公社在職）に心から感謝の意を表する。

大学院修士，博士課程において，御指導御教示いただいた，通信工学教室，青柳健次教授，笠原芳郎教授，板倉清保教授，加藤金正教授，牧本利夫教授，藤沢和男教授に対して厚く御礼申しあげる。

文 献

- (1) S. R. Calabro
" Reliability Principles and Practices "
Mcgraw-Hill Book Company INC
(1962)
- (2) A. S. Goldman
" Maintenability
A Major Element of System Effectiveness "
John Wiley & Sons. INC (1964)
- (3) Norman. H. Roberts
" Mathematical Method in Reliability Engineering"
Mcgraw-Hill Book Company INC
(1964)
- (4) J. E. Hosford
" Measure of Dependability "
Opns. Res., P. 52, (1959)
- (5) J. J. Coleman
" Mathematical Model for Operational Readiness "
Opns. Res., P. 127,
(1961)

- (6) Stephen. W. Leibholz
" System Effectiveness as a Generalization of
System Availability "
IEEE Trans., EC-16 No.4 (1967)
- (7) C. F. Barber
" Expanding Maintainability Concepts and Techniques"
IEEE Trans., R - 16 No.1 (May, 1967) :
- (8) F. M. Sterling
" The New Role of System Testing "
IEEE Trans., AS -1, P.693 (1963)
- (9) C. Beckman S. D. Bedrosian
" Research Guidelines for Digital-Controlled S
System for Checkout and Fault Isolation."
IEEE Trans., AS-1, P.1064 (1963)
- (10) W. R. McCormach
" Diagnostic Maintenance :
A Technique Using a Computer "
IEEE Trans., AS-1, P.931 (1963)
- (11) Warren D. Moon
" Periodic Checkout and Associated Errors "
IEEE Trans., AS-2, P.356 (1964)

- (12) John. J. Coleman, Paul. D. Chaiken
" Readiness Models for Random and Schedules
Demand System "
IEEE Trans. on AES. Conference Procedures
Vol. AS-1 (Aug.1963)
- (13) Robert J. Allen
" Failure Prediction Employing Continuous
Monitoring Techniques "
IEEE Trans. On Aes. Conference Procedures
Vol. AS-1 (Aug. 1963)
- (14) R. E. Furtaw
" In-Flight Testing-A parameter-Dependent
Approach " P.535
Annals of Reliability and Maintainability.
(1965)
- (15) J. D. Brule, R. A. Johnson
" Diagnosis of Equipment Failures "
IRE Trans., RC P.23
(April, 1960)

- (16) E. S. Sogononyan
"Monitoring Operability and Finding Failures in
Functionally Connected System. "
Automatika i Telemekhanika
Vol. 25 No.6 (June. 1964)
- (17) Sidney I. Firstman
"Optimum Search Routine for Automatic Fault
Location."
Opns. Res., P.513 (1960)
- (18) K. F. Mcsweeney
"Malfunction Detection System for Advanced
Spacecraft."
IEEE. Trans. AES-2 No.2 P.27 (Jan. 1966)
- (19) Warren D. Moon
"Post-Checkout Error Computation "
Vol.77 No.6 ELECTRO-TECHNOLOGY P.58 (Jun. 1966)
- (20) R. S. Berkowitz and P. B. Krishnaswamy
"Computer Techniques for Solving Electric
Circuit for Fault Isolation."
IEEE Trans., AS-1 P.1090 (1963)

(21) S. E. Lamacchia

" Diagnosis in Automatic Checkout "

IRE. Trans., Vol. MIL-6 (July, 1962)

(22) R. A. Johnson

" An Information Theory Approach to Diagnosis."

Proc. 6th National Symposium on R, Q, C

(March, 1960)

(23) E. J. Kletsky

" An Application of the Information Theory

Approach to Failure Diagnosis "

IRE Trans. R. Q. C.

Vol. RQC-9 No.3 (Des. 1960)

(24) Edward F. Moore

" Gedanken-Experiments on Sequential Machines."

Automata Studies Study. 34

Princeton, New Jersey

Princeton University Press (1956)

(25) S. Seshu and D. N. Freeman

" The Diagnosis and Asynchronous Sequential

Switching System." IRE Trans. EC-19 P.459 (Aug. 1962)

(26) 樹下行三

“ 順序回路網の故障診断に関する一考察 ”

信学誌 P.1221 (昭 38 - 09)

(27) Gill. A.

“ Introduction to the Theory of Finite state
Machines.”

Mcgraw Hill Book Co. (1962)

(28) R. C. Hennie

“ Fault Detecting Experiments for Sequential
Circuits.”

Proc. of the 5th Annual Sympo on Switching
Cercuit Theory and Logical Design. (1964)

(29) “ 運用段階でのシステム・テストについての一考察

— Finite state system を対象にして — ”

オートマトンと自動制御, インホメーション理論研究会資料

(昭 41 - 01)

(30) “ Sequential switching system の故障検出 ”

昭和 41 年電気四学会連合大会

(昭 41 - 04)

(31) " システム・テストのための入力系列についての考察

— 有限状態システムを対象にして — "

オートマトンと自動制御, インホメーション理論研究会資料

(昭 41 - 06)

(32) " 有限状態システムのテスト入力系列決定法 "

電子通信学会雑誌 50 , 10 , PP.1911 ~ 1917

(昭 42 - 10)

(33) J. Kanton and A. Libenson

" A Pattern Recognition Approach to Fault
Isolation "

IEEE A - S. Conference Procedure

P. 1320 (Aug. 1963)

(34) Tsiang S. Hand Ulrich W.

" Automatic Trouble Diagnosis of Complex Logic
Circuit " Vol.41 (July 1962)

(35) Kruskal J. B. and Hart R. E.

" A Geomtric Interpretation of Diagnostic Data
from Digital Machine Based on a Study of the
Morris Illinois Electronis Control Office "

B. S. T. J., Vol.45 (Oct. 1966)

(36) H. Y. Chang W. Thomis

"Method of Interpreting Diagnostic Data for
Locating Faults in Digital Machine."

B. S. T. J., No. 2 (Feb. 1967)

(37) "観測出力決定の情報理論的考察"

インホメーション理論研究会資料

(昭42-01)

(38) "観測出力決定の情報理論的考察"

昭和42年電気四学会連合大会

(昭42-04)

(39) "故障検知のための観測出力決定の情報理論的考察"

電子通信学会雑誌 51-C 01 (昭43-01)

(採録決定)

(40) "故障検知のための観測出力とテスト入力の互換性について"

電子通信学会雑誌 (投稿中)

(41) "Maintenability を考慮した同期点検"

電子通信学会創立50周年記念全国大会

(昭42-10)