

表3-9 衝突事故時における頂上事象発生確率の解析結果

\*\*\* ANALYTICAL RESULTS FOR THE VARIOUS CONDITIONS \*\*\*

\*\*\* CONDITION = IMPACT TO WHOLE SHIP \*\*\*

\*\*\* BASIC EVENTS AND THEIR FAILURE PROBABILITIES \*\*\*

	MISSION	COMPONENT	FAILURE
	TYPE	NUMBER	PROBABILITIES
X( 1) - DIESEL ENGINE FAIL TO START	- 0	1	0.38926E-01
X( 2) - DIESEL ENGINE FAIL TO RUN	- 1	1	0.32215E-01
X( 3) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X( 4) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X( 5) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X( 6) - WIRE OPEN CIRCUIT	- 1	1	0.10846E-02
X( 7) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	6	0.59987E-07
X( 8) - PIPE(SECONDARY) RUPTURE	- 2	6	0.49945E-03
X( 9) - EMERGENCY TANK RUPTURE OF LEAK	- 2	1	0.57494E-04
X(10) - PUMP FAILURE TO RUN	- 1	1	0.33668E-02
X(11) - MANUAL VALVE FAILURE TO START	- 0	1	0.40067E-02
X(12) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(13) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(14) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(15) - PIPE(PRIMARY) RUPTURE	- 2	2	0.11011E-05
X(16) - PIPE(SECONDARY) RUPTURE	- 2	3	0.24976E-03
X(17) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	3	0.29993E-07
X(18) - MOV FAILURE TO OPERATE	- 0	1	0.29989E-02
X(19) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(20) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(21) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(22) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(23) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(24) - MOV FAILURE TO OPERATE	- 0	1	0.29989E-02
X(25) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(26) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	1	0.99978E-08
X(27) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02

\*\*\* POINT VALUE OF THE SYSTEM FAILURE PROBABILITY \*\*\*

POINT VALUE = 0.87075E-01

表3-10 単一故障原因の頂上事象発生確率への影響

\*\*\* SINGLE GENERIC CAUSE \*\*\*

TOTAL NUMBER = 91 CUT OFF VALUE = 0.67107E-01

NO.	CAUSE	LOCATION OR LINK	POINT VALUE
( 1)	10	2	0.16857E+00
( 2)	11	2	0.16857E+00
( 3)	5	3	0.16402E+00
( 4)	5	9	0.16402E+00
( 5)	1	3	0.12742E+00
( 6)	7	3	0.10695E+00
( 7)	1	1	0.98911E-01
( 8)	7	1	0.98911E-01
( 9)	7	9	0.97775E-01
( 10)	10	6	0.90272E-01
( 11)	10	7	0.90272E-01
( 12)	11	6	0.90272E-01
( 13)	11	7	0.90272E-01
( 14)	10	8	0.89854E-01
( 15)	11	8	0.89854E-01
( 16)	4	1	0.80799E-01
( 17)	5	1	0.80799E-01
( 18)	1	9	0.80753E-01
( 19)	1	6	0.79475E-01
( 20)	1	2	0.77074E-01
( 21)	4	2	0.76134E-01
( 22)	5	2	0.76134E-01
( 23)	4	3	0.74571E-01
( 24)	4	9	0.72443E-01
( 25)	1	4	0.71654E-01

補機室内爆発, 補機室内火災, 非常用発電機室内爆発, 非常用発電機室内火災と考えられ, 第二章の解析で取り上げた事故条件に対応している。

順位 1, 2 には (10,2), (11,2) がきており, これは電気回路に過電圧, 過電流が加わり, 制御系統に故障が発生した場合に影響が大きいことを示している。

順位 4 は (5,9) で補機室内のポンプが浸水等で故障が発生する場合で (5,3) の一部と考えられる。

表3-11 には単一故障原因が複数箇所に現われた場合を示す。このリストから, 爆発, 紛塵, 湿度等の影響が大きいことがわかる。

表3-12 には, 二重の故障原因の場合のリストを示す。上位 5 位までは単一故障の再録である。

六位は過電圧と過電流が同時に作用した場合, 七位は過電圧と非常用発電機室内の粉塵, 等と意味づけられるが, リスト中には, 論理的に意味をなさないもの, 起こり難いもの等, すべての組み合わせが入っている。

三重の故障原因についても同様のリストが得られる。

以上のように, 解析プログラムにより故障原因のリストが得られる。そのリストに上げられた各項目の意味を判断するのが解析者の仕事であると言える。計算機により, すべての可能な組み合わせについて調べた中で, 影響の大きいものが一覧表として出力されているため, 解析者の考え落としは最小限になると考えられ

表3-11 単一故障原因が複数場所に現れた場合

\*\*\* SINGLE GENERIC CAUSE WITH  
MULTIPLE LOCATIONS \*\*\*  
TOTAL NUMBER = 39 CUT OFF VALUE = 0.67107E-01

CAUSE	LOCATIONS	POINT VALUE
1	( 6, 9, 0, 0)	0.97748E-01
1	( 2, 4, 0, 0)	0.86441E-01
1	( 7, 8, 0, 0)	0.73371E-01
1	( 2, 4, 9, 0)	0.10457E+00
1	( 5, 6, 8, 0)	0.81320E-01
1	( 2, 4, 6, 9)	0.10500E+00
2	( 1, 3, 0, 0)	0.76157E-01
2	( 1, 3, 4, 0)	0.76165E-01
2	( 1, 2, 3, 4)	0.76172E-01
4	( 1, 2, 0, 0)	0.94518E-01
4	( 3, 8, 0, 0)	0.79198E-01
4	( 4, 9, 0, 0)	0.72453E-01
4	( 1, 2, 3, 0)	0.10652E+00
4	( 4, 8, 9, 0)	0.77091E-01
4	( 1, 2, 3, 4)	0.10653E+00
5	( 1, 2, 0, 0)	0.94518E-01
5	( 1, 2, 4, 0)	0.94527E-01
5	( 1, 2, 4, 5)	0.94527E-01
6	( 3, 6, 0, 0)	0.67383E-01
6	( 2, 3, 6, 0)	0.67383E-01
6	( 2, 3, 4, 6)	0.67383E-01
7	( 2, 4, 0, 0)	0.71208E-01
7	( 6, 8, 0, 0)	0.67341E-01
7	( 2, 4, 6, 0)	0.71209E-01
7	( 2, 4, 5, 6)	0.71209E-01
8	( 1, 3, 0, 0)	0.80799E-01
8	( 2, 9, 0, 0)	0.79846E-01
8	( 1, 2, 3, 0)	0.89047E-01
8	( 4, 8, 9, 0)	0.74308E-01
8	( 1, 2, 3, 4)	0.89056E-01
9	( 1, 3, 0, 0)	0.80799E-01
9	( 2, 9, 0, 0)	0.79846E-01
9	( 1, 2, 3, 0)	0.89047E-01
9	( 4, 8, 9, 0)	0.74308E-01
9	( 1, 2, 3, 4)	0.89056E-01
10	( 4, 8, 0, 0)	0.89967E-01
10	( 4, 5, 8, 0)	0.89967E-01
11	( 4, 8, 0, 0)	0.89967E-01
11	( 4, 5, 8, 0)	0.89967E-01

る。また、個々の機器の故障モードに対して与えた故障データから、故障原因の影響をあらわす頂上事象発生確率の数値が得られているため、故障原因の重要度を相互に比較し、順位をつける上で大変便利になっていると言える。

### 3.10 考 察

3.6で求めた故障確率を与える式を、実際に応用する場合には、待機時間は普通一定に固定された値ではないため、最長の待機時間と最短時間の間で平均化の操作を行う必要がある。更に、連続的に作用する原因が間欠的に作用する場合もある。このような場合は、故障確率を与える式は、表3-1, 3-2とは異なってくる。しかし、式の導出は、基本的には、本章で示したのと同様の方法となる。

厳しい環境条件の影響は、この故障モデルを用いると取り扱いが可能となり、それにより、種々の条件下における故障率の値相互の間に一貫性を持たせることができるようになる。また、解析プログラムで示したように、二次的効果の算定も可能となる。更に、解析実施例において見られたように系の故障発生に重大な影響を持つ環境条件の探索が実行できるということ

は、系の弱点なり欠陥を見出すことが可能であると言える。

この故障モデルにより、共通原因故障を取り扱うための一方法も考えられる。共通原因故障とは、何らかの共通の原因により発生する故障である。本故障モデルでは、各種の条件下における条件付故障確率が得られるので、これを用い、原因を与えた時の、互に統計的に独立な、しかし、故障原因により増大した故障確率として共通原因故障の現象をとらえる方法が考えられる。

本故障モデルでは、一つの故障モードの関数  $f$  に対して100種の値が原理的に必要となる。つまり、(20種の故障原因)  $\times$  (5段階の原因の程度) である。更に、 $C=0, M=1,2$  の場合、45種の  $\lambda_i$  の値が必要となる。これは、(9種の原因)  $\times$  (5段階の原因の程度) に対応している。しかし、特定の故障モードに対し、すべての故障原因が影響するわけではなく、数種の主要な原因のみが影響するだけである。また、調整、設置、保守、試験方法、操作、製造業者、の原因に対するデータは多種類の故障モードに対し共通に使えらる。

それ故、実質的には、必要とされる故障データは、

表3-12 二種の故障原因の影響

\*\*\* DOUBLE GENERIC CAUSES \*\*\*

TOTAL NUMBER = 53      CUT OFF VALUE = 0.98602E-01

NO.	CAUSE AND LOCATIONS	POINT VALUE
( 1)	(10, 2) ( 0, 0)	0.16857E+00
( 2)	(11, 2) ( 0, 0)	0.16857E+00
( 3)	( 5, 3) ( 0, 0)	0.16402E+00
( 4)	( 5, 9) ( 0, 0)	0.16402E+00
( 5)	( 1, 3) ( 0, 0)	0.12742E+00
( 6)	(10, 8) (11, 8)	0.11675E+00
( 7)	(10, 8) ( 4, 1)	0.10797E+00
( 8)	(10, 8) ( 5, 1)	0.10797E+00
( 9)	(11, 8) ( 4, 1)	0.10797E+00
(10)	(11, 8) ( 5, 1)	0.10797E+00
(11)	(10, 8) ( 1, 9)	0.10792E+00
(12)	(11, 8) ( 1, 9)	0.10792E+00
(13)	( 7, 3) ( 0, 0)	0.10695E+00
(14)	(10, 8) ( 1, 6)	0.10668E+00
(15)	(11, 8) ( 1, 6)	0.10668E+00
(16)	(10, 8) ( 1, 2)	0.10435E+00
(17)	(11, 8) ( 1, 2)	0.10435E+00
(18)	(10, 8) ( 4, 2)	0.10344E+00
(19)	(10, 8) ( 5, 2)	0.10344E+00
(20)	(11, 8) ( 4, 2)	0.10344E+00
(21)	(11, 8) ( 5, 2)	0.10344E+00
(22)	(10, 8) ( 4, 3)	0.10192E+00
(23)	(11, 8) ( 4, 3)	0.10192E+00
(24)	(10, 8) ( 4, 9)	0.99856E-01
(25)	(11, 8) ( 4, 9)	0.99856E-01



方法によっている。

反復事象がフォールト・ツリー中に一つも存在しない場合は、各ゲートにおいて数値計算を実行してしまい、その結果を上位ゲートの入力とする。この操作を繰り返していくと最後に頂上事象発生確率の値が得られる。

反復事象がフォールト・ツリー中に存在する場合は、反復事象を含んだカット・セット間の和は各ゲートにおいては実行せず、頂上事象発生確率を計算する最終段階で実行する。

最小カット・セットを求める場合は、すべての一次事象を識別しておき、カット・セット間の和は、同じく、最終段階で実行する。

計算方法の詳細は以下の2節において説明する。

#### 4.4 各ゲートにおける手続き

各ゲートにおいては、ブール代数に従い、和、積の演算を行う。その場合、各一次事象、カット・セット間の包含関係を考慮する。

本節で、反復事象をA,Bで、非反復事象をX,Yで表わすこととする。

ORゲートにおいては、次の演算を実行する。

$$A+A=A \quad (4.1)$$

$$A+A \cdot X=A \quad (4.2)$$

ANDゲートにおいては、

$$A \cdot A=A \quad (4.3)$$

$$A \cdot \bar{A}=0 \quad (4.4)$$

$$(A \cdot X) \cdot (A \cdot Y)=A \cdot X \cdot Y=A \cdot Z \quad (4.5)$$

$$(A+B) \cdot X=A \cdot X+B \cdot X=A \cdot C+B \cdot C \quad (4.6)$$

の演算を実行する。ここで $\bar{A}$ はAの補集合、ZはX、Yよりなる中間事象、(4.6)式におけるXは名称をCと変えて、以後は反復事象と同様に取り扱う。

非反復事象間の数値計算は各ゲートにおいて実行してしまい、その結果の中間事象とその発生確率を上位ゲートの入力とする。

各ゲートにおける出力は、非反復事象だけから構成されている中間事象と、反復事象を含んだ中間事象の和となっている。

各ゲートにおいては、上記演算の他に、一次事象の積の次数が一定次数より大きい中間事象、及び、発生確率が事前に指定された値より小さい中間事象を除外する操作も行う。それにより、各ゲートの出力を構成するカット・セット(中間事象)の数を可能な限り少なくする。

#### 4.5 頂上事象発生確率の計算方法

前節で説明した、各ゲートでの操作を繰り返していくと、最終的に頂上事象に対して、次の式が得られる。

$$TOP=C_0+\sum_{i=1}^l C_i \quad (4.7)$$

$$C_i=X_i \cdot \prod_i A_{ij} \quad (i>0) \quad (4.8)$$

この式で和は、ブール和を意味しており、 $A_{ij}$ は反復事象、 $C_0$ および $X_i$ は非反復事象のみで構成されている中間事象である。

頂上事象発生確率を与える式は、(4.7)式より、次のように表現できる。

$$P(TOP)=P(C_0)+\sum_{i=1}^l P(C_i)-\sum_{\substack{i,j=0 \\ i<j}}^l P(C_i)P(C_j)/f_{ij} \\ +\sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i<j<k}}^l P(C_i)P(C_j)P(C_k)/f_{ijk}+O(h) \quad (4.9)$$

ここで、 $P(C_i)$ は事象 $C_i$ の発生する確率を意味しており、 $O(h)$ は $P(C_i)$ についての4次以上の高次の項を意味する。 $f_{ij}$ 、 $f_{ijk}$ 等は次の式で定義された因子である。

$$f_{ij}, f_{ijk}=\prod_i P(A_i)^{m-1} \quad (4.10)$$

ここで、 $A_i$ は事象 $C_i$ 、 $C_j$ 、 $C_k$ に含まれている反復事象で、 $m$ は $A_i$ が $C_i$ 、 $C_j$ 、 $C_k$ の中にあられる総数である。

原理的には、頂上事象発生確率を求める場合に(4.9)式の計算を実行しなくてはならない。カット・セットの数( $C_i$ の項数)が少ない場合は問題ないが、カット・セット数が多くなると、相互の組み合わせの数は膨大なものとなり計算はほとんど不可能となってしまう。そこで本プログラムでは、以下の手順に従い、近似的に頂上事象発生確率を求める方法を取った。(4.7)式における第1項から第 $m-1$ 項までの和が $P_{m-1}(TOP)$ と求まっているとする。その時、更に第 $m$ 項を加えた値 $P_m(TOP)$ を、第一近似として次のように求める。

$$P_m(TOP)=P_{m-1}(TOP)+P(C_m) \\ -P_{m-1}(TOP) \cdot P(C_m) \quad (4.11)$$

(4.11)式に、(4.9)式を代入すると、

$$P_m(TOP)=P(C_0)+\sum_{i=1}^m P(C_i)-\sum_{\substack{i,j=0 \\ i<j}}^{m-1} P(C_i)P(C_j)/f_{ij} \\ -P(C_m) \cdot \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i < j < k}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \cdot P(C_k) / f_{ijk} \\
& + P(C_m) \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) / f_{ij} \\
& + O(h) \tag{4.12}
\end{aligned}$$

となる。この近似方法では、 $P(C_i)$ についての一次の項まで厳密に計算していることが(4.9)式と比較してみてもわかる。それ故、第二近似として、(4.11)式に次の項を加える。

$$P(C_m) \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i) - P(C_m) \cdot \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i) / f_{im}$$

そうすると、 $P_m(TOP)$ は、

$$\begin{aligned}
P_m(TOP) = & P(C_0) + \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^m P(C_i) P(C_j) / f_{ij} \\
& + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i < j < k}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \cdot P(C_k) / f_{ijk} \\
& + P(C_m) \cdot \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) / f_{ij} + O(h) \tag{4.13}
\end{aligned}$$

となる。(4.13)式によれば、 $P(C_i)$ についての2次の項まで厳密な形をしていることがわかる。フォールト・ツリー解析の大多数は、第二近似の方法により、頂上事象発生確率を厳密な値に非常に近い値まで求めることができる。

本プログラムでは、更に、第三近似として、(4.13)式に以下の項を付け加える操作もオプションとして与えてある。

$$-P(C_m) \cdot \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \{1/f_{ij} - 1/f_{im}\}$$

この追加項においては、 $i, j$ は次の条件を満足するものだけに制限している。

$$\begin{aligned}
P(C_m) \cdot P(C_i) / f_{mi} & > COV \\
P(C_m) \cdot P(C_j) / f_{mj} & > COV
\end{aligned}$$

ここで、 $COV$ はあらかじめ与えられた、切り捨て値である。この制限を設けることにより、計算すべき組み合わせが無制限に増大することを防いでいる。

$m=1$ に対しては、 $P_m(TOP)$ は $P(C_0)$ と求まるので、上記の手続きを $m=1$ から順次繰り返していけば、すべての項を加え合せた、頂上事象発生確率の値が求まる。

もし、フォールト・ツリー中に反復事象が存在しない場合は、(4.7)式は

$$TOP = C_0 \tag{4.14}$$

となり、頂上事象発生確率は、

$$P(TOP) = P(C_0) \tag{4.15}$$

とただちに求まる。

最小カット・セットを求める場合は、すべての一次事象を反復事象と同様に取り扱い、各ゲートでの操作を繰り返していく。その場合、(4.7)式において、 $C_0$ 、 $X_i$ の項はあられず、 $C_i$ のみになる。そして、 $C_i$ が一次事象の積であらわせられ、最小カット・セットそのものとなる。

## 4.6 プログラムの説明

### 4.6.1 プログラム概説

本プログラムはFORTRAN 77により書かれており、船舶技術研究所に設置されているFACOM-180 II AD 計算機において使用可能となっている。

現時点においては、計算実行時、2048Kバイトの記憶容量を必要とする。

計算の実行により、フォールト・ツリーの頂上事象発生確率の点推定値が得られる。また、必要に応じて、最小カット・セットも得られる。その場合、最小カット・セットは各ゲートに対して求める事ができる。

解析可能なフォールト・ツリーのサイズは、一次事象の数は最大500個、ゲートの数は最大500個、求められる最小カット・セットの数は最大2800個である。また、最小カット・セットを求める際の切り捨て回数、切り捨て値は使用者が事前に定めるようになっている。

### 4.6.2 解析実施時の具体的手順

以下、本節において、解析実施時における具体的な手続きを説明することとする。

まず、入力データは、解析実施の際の条件とフォールト・ツリーについての記述から成り立っている。フォールト・ツリーについての情報は、ツリー構造、一次事象の発生確率、及び、オプションとして、一次事象の10文字以内の名称である。NOTゲートがフォールト・ツリー中に存在する場合は、NOTゲートへの入力(一次事象)を補集合に置き換え、NOTゲートを取り除く。この場合、(4.4)式の演算が可能となる様、補集合の元となる一次事象の情報も与えておく。NOR, ANOT, NAND, ONOT等のゲートは、AND, OR, NOTゲートの組み合わせで表現しなおして、入力

する。

ゲート及び一次事象に対して、整数を割り当て、計算機内部では、この整数により、ゲート、一次事象を識別する。

フォールト・ツリーの構造は、頂上事象から末端の一次事象までを結びつけているゲート番号を並べる事により表現する。例えば、図4-1に示したフォールト・ツリーの構造は、図4-2のように表現される。第1列から第3列まではゲート番号であり、第4列は、この場合、一次事象の番号である。ゲート番号0とはその位置にゲートが存在しないことを意味している。ANDゲートは偶数で、ORゲートは奇数で表現することとする。行の並ぶ順序は、フォールト・ツリーにおいて、一次事象の置かれている位置と対応している。

フォールト・ツリーの構造は、いかなる形であって

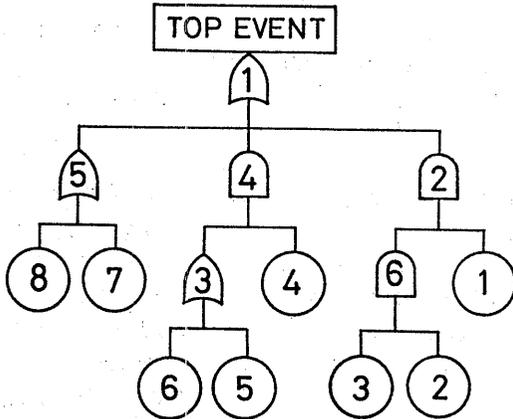


図4-1 フォールト・ツリーの一例

1	2	0	1
1	2	6	2
1	2	6	3
1	4	0	4
1	4	3	5
1	4	3	6
1	5	0	7
1	5	0	8

図4-2 フォールト・ツリーの表現方法  
(図4-1のフォールト・ツリーの場合)

も、この表現によって記述することができ、この表現から容易にフォールト・ツリーの構造が思い浮べられる。更に、この表現方法は、本解析プログラムにおける解析手順に適合している。

図4-1, 4-2の構造のフォールト・ツリーを実際に解析する際の手順をやや詳細に示し、解析手順の説明とする。

図4-3に、頂上事象発生確率を求める際の手順を示す。図中、NG(1), NG(2), NG(3), はゲート番号を記憶する変数、NEは一次事象番号を記憶する変数、PPは一次事象発生確率を記憶する変数である。P(m,n)は計算途中の値を一次的に保存する変数である。

第1ステップで、入力データの最初の行を読み込む。(1, 2, 0, 1,  $1.0 \times 10^{-2}$ ) このデータから、一次事象“1”は、ゲート“2”の入力であり、ゲート“2”は頂上事象から2段階目の位置にあることがわかる。第2ステップで、一次事象“1”の発生確率の値 ( $1.0 \times 10^{-2}$ ) を P(2,1) に保存する。ここで、2の下の下線は、2に着目していることを意味する。以下、本節においては同様の表記法とする。P(2,1)は第2段階に位置するゲートの入力値を保存するための変数である。

第3ステップで次の入力データを読み込む。一次事象“2”は、ゲート“6”の入力であり、ゲート“6”はANDゲートであることがわかる。第4ステップで一次事象“2”の発生確率 ( $3.0 \times 10^{-2}$ ) を変数 P(3,1) に保存する。

第7ステップで次の入力データを読み込む。一次事象“4”はゲート“4”の入力である。ゲート“4”は第2段階に位置しており、同じく第2段階に位置しているゲート“2”から分岐した枝には属していないことがわかる。それ故、ゲート“2”の入力はすべて出揃い、ゲート“2”の出力の計算が可能となったことがわかる。第8ステップで、P(2,1)とP(3,1)の積を計算し、その結果をP(2,1)に保存する。第9ステップで、P(2,1)の値をP(1,1)に移す。P(1,1)は第1段階に位置するゲートの入力値を保存する変数である。第10ステップで、一次事象“4”の発生確率をP(2,1)に保存する。

以上のような手順を繰り返し、第21ステップに至ることにより、頂上事象発生確率の値が  $4.569 \times 10^{-4}$  と求まる。

図4-4に最小カット・セットを求める場合の手順を示す。この手順は、図4-3の手順と類似しているが、















表4-2 解析結果及び所要計算時間

Fault Tree Number	Point Probability of Top Event	Number of Minimal Cut Sets Determined	CPU Time (sec)			
			FFTA-TP	FFTA-MCS	FTA-J-BAM	FTA-J-CUT
1	$6.469 \times 10^{-3}$	8	0.005	0.007	1.56	1.75
2	$2.062 \times 10^{-2}$	13	0.006	0.011	2.77	5.95
3	$6.449 \times 10^{-4}$	155	0.009	1.06	4.63	615.
4	$2.055 \times 10^{-4}$	300	0.009	3.90	6.40	4459.
5	$7.545 \times 10^{-3}$	73	0.134	1.06	10.71	3108.
6	$1.211 \times 10^{-4}$	20	0.71	0.81	6.47	240.

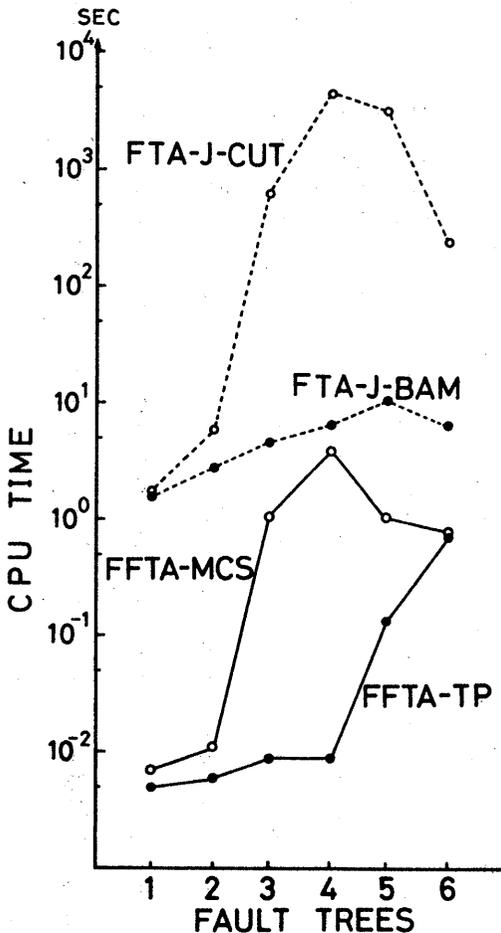


図4-6 所要計算時間

とBAMによる計算結果が一致していた。

基本事象の値がすべて同じ値となった極端な場合は、各基本事象間の二次、三次の積の組み合わせが、各々すべて同等の重みで頂上事象の値に寄与してくる。このような場合、本プログラムの近似方法で、頂上事象の値としてどの程度の精度が得られるかを調べ、一般に、実際のシステムに対して使用する際の誤差の上限の目安を求めることとする。

検討対象としては、前節で用いた6種のフォールト・ツリーを本節でも用い、基本事象の発生確率としては、すべて $3 \times 10^{-3}$ を与えた。

表4-3に、本プログラムによる計算結果と、FAT-J-BAMコードによる計算結果を示す。なお、FFTAの計算は2次までの近似方法とし、オプションとして与えてある3次までの近似方法は適用しなかった。

表4-3の結果よりわかるように、1~4のフォールト・ツリーのように反復事象を含まないか、含んでいる場合でも1,2個で単純な構造のフォールト・ツリーに対しては有効数字5桁において、まったく同一の結果が得られた。

5,6番の反復事象を多数含んだ複雑なフォールト・ツリーに対しても、FFTAによる計算結果の誤差は0.1%以下であり、本章で示したFFTAの近似方法は、2次近似まででも、実用上十分な精度を持っていることが確認できた。

#### 4.9 考察

図4-6によると、本解析プログラムの計算所要時間は、BAMあるいはCUTコードの計算時間と比較し、非常に少ないことがわかる。

第1番と2番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPとFFTA-MCSの計算所要時間は近い値となって

表4-3 頂上事象発生確率計算値の比較

Fault Tree Number	Point Probability of Top Event	
	FFTA	WAM-BAM
1	$1.1973 \times 10^{-2}$	$1.19727 \times 10^{-2}$
2	$2.6713 \times 10^{-2}$	$2.67133 \times 10^{-2}$
3	$1.6823 \times 10^{-2}$	$1.68232 \times 10^{-2}$
4	$2.0587 \times 10^{-2}$	$2.05875 \times 10^{-2}$
5	$5.5439 \times 10^{-2}$	$5.54432 \times 10^{-2}$
6	$9.0539 \times 10^{-6}$	$9.0515 \times 10^{-6}$

いる。これは、これら2つのフォールト・ツリーは小サイズのフォールト・ツリーであり最小カット・セットの数もわずか8及び13であるため、最小カット・セットが少ない計算時間で容易に見つけられるためである。

第3番と4番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPとFFTA-MVSの計算所要時間の間に大きな差がある。これは、これらのフォールト・ツリーが中サイズのフォールト・ツリーであり、最小カット・セットの数も155及び300と多いため、最小カット・セットを見つけ出すのに計算時間がかかるためである。一方、フォールト・ツリーの構造は、反復事象が一つもないことからわかるように、単純である。この場合、頂上事象発生確率を計算する本プログラムの手順は、特に計算時間の短縮に有効となっている。

第5番と6番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPによる計算所要時間が増大し、FFTA-MCSによる所要時間に近づいている。これらのフォールト・ツリーの構造は複雑であり、反復事象が多く存在する。それ故、FFTA-TPの場合でも、反復事象を含んだカット・セットを解析途中において多く求める必要があり、結局、FFTA-MCSで実施する手順と、ほとんど同じことを実施することとなる。このためにFFTA-TPの計算所要時間がFFTA-MCSに近くなってしまった。

特に、第6番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPの計算所要時間が増大し、ほとんどFFTA-MCSに等しくなっている。しかし、原理的に、FFTA-TP

の計算が、FFTA-MCSの計算時間より多くなることはない。また、このFFTA-TPの計算所要時間は、それでも、BAMの所要時間の約1/10となっている。

フォールト・ツリー解析の高速処理が可能となった理由としては以下のことが挙げられる。

1. 一次事象、ゲートに整数を割り当て、計算機内での取り扱いはこの整数値によった。
2. フォールト・ツリー構造を、上記整数を用い、数字の並びにより表現した。この表現方法は、計算機内での処理と良く適合している。
3. 解析実行時、計算機のコア・メモリを有効に使用し、外部記憶装置を使用していない。
4. 数値計算を可能な限り初期の時点で実行してしまう。
5. 各処理段階において不要な情報は切り捨てていく。たとえば、一次事象の高次の積からなるカット・セット、発生確率の低いカット・セット等は、途中のゲートにおいて、可能な限り除いていく。

また、頂上事象の値の計算において導入した近似方法及び各ゲートにおける処理方法で、前節に示したように、実用上十分な精度で頂上事象の値が得られることが確認できた。

#### 4.10 結 論

本章で説明した解析プログラムにより、フォールト・ツリー解析が、BAM, CUTコードに比較し、10～1000倍の高速で実施でき、頂上事象の値も、実用上十分な精度で得られることが示された。

この高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発により、フォールト・ツリー解析が、高速・大型計算機システムを用いずとも手軽にできるようになり、確率論的安全評価解析が今まで以上に容易に実施できるようになった。

特に、第三章で示した信頼性解析プログラムにとっては、この高速フォールト・ツリー解析プログラムの存在は必須の条件といえる。つまり、多数回のフォールト・ツリー解析の実施を行うため、既存の解析プログラムでは計算所要時間が非現実的な程長くなってしまった。この高速フォールト・ツリー解析プログラムの導入（図3-7の構成図の中のTOPに組み込まれている。）よりの信頼性解析プログラムの計算時間は現実的なものとなった。

この高速フォールト・ツリー解析プログラムの活用により、更に新しい機能の信頼性解析方法の開発、実現の途が開けたと言える。

## 5. GO-FLOW 手法

### 5.1 緒言

第二章の各種事故状態下におけるシステムの信頼性解析、及び第三章の信頼性解析プログラムの中心は、いずれも、フォールト・ツリー解析であった。フォールト・ツリー解析は確立された信頼性解析手法として、確率論的安全評価において幅広く用いられてきている。それ故、第四章においては、高速フォールト・ツリー解析プログラムを開発し、フォールト・ツリー解析の応用範囲の拡大の途を拓いた。

しかし、フォールト・ツリー解析には、解析対象、解析すべき内容等によっては、必ずしも使い易くない点もある。これらの点を補う信頼性解析手法としてGO手法<sup>(41)</sup>がある。GO手法は、フォールト・ツリー解析に置き換え得ると共に、フォールト・ツリー解析では不可能であった種類の解析も実施できる。

著者はこのGO手法に着目しその解析<sup>(42)</sup>を実施してきたが、GO手法においても、なお、不十分な点があることがわかった。そこで、GO手法を発展させた、GO-FLOW手法<sup>(43)</sup>の開発を行った。本章では、このGO-FLOW手法について述べることにする。

以下、GO-FLOW手法開発の経緯、GO手法の説明、GO-FLOW手法概説、GO-FLOW手法による具体的計算方法、解析例の順に述べていくことにする。更に比較のため、附録に、GO手法のオペレータの定義、GO

手法による解析実施例を収録した。

### 5.2 GO-FLOW 手法開発の経緯

フォールト・ツリー解析においては、頂上事象として、システムの特定の一つの事象しか選定できないこと、フォールト・ツリー作成には、解析者の熟練を要し、作成されたフォールト・ツリーに論理的な欠陥がないことを確認することが難しい等の問題点がある。

これらの問題点を補う解析方法としてGO手法がある。GO手法は1960年代中期に米国のKAMAN SCIENCES社<sup>(44)</sup>が開発し、軍事産業、航空機産業の分野で主に電気回路の信頼性解析に用いられ、最近原子力の分野への適用<sup>(45)</sup>がなされるようになってきた。

GO手法では、計算コード内部で特別に定義された16種の標準オペレータを用いて解析対象とするシステムのモデルを構築する。このモデルとして作成されるGOチャートは、解析対象とするシステムの構成と視覚的に対応しており、解析モデルの作成がより機械的に遂行でき、作成したモデルの妥当性を検討することが容易である。また、GO手法ではシステムの取り得るいくつかの状態をひとつのモデルで同時に解析できるという利点がある。

このGO手法を、配管系である原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析に適用<sup>(42)</sup>した結果、なお問題点の残ることが判明した。つまり、GO手法においては、On-to-OffかあるいはOff-to-On信号の流れを追って、解析対象のシステムの状態が変化する時点がどこにあるかを調べている。ところが、非常用崩壊熱除去系は、最初待機状態に置かれ、作動要求時に動作を開始し、動作の時間経過と共に故障を起し、機能停止に至る。システムの状態は、Off→On→Offと推移するわけであり、この推移はGO手法によって直接的には取り扱い不可能である。定期点検、保守を考慮に入れた、システムのアンアベイラビリティを求める事も同様の理由からGO手法では実施できない。また、時間経過に伴う系の故障確率の推移を求めることも、同種の解析手続きを多数繰り返す必要があり手数がかかる。

そこで、GO手法を基本としその特長を生かしたままGO手法に於ける限界を克服するため、GO-FLOW手法を開発した。この手法は、チャートによるシステム表現方法、信号の流れを追うという解析方法においてGO手法と類似しているが、信号の意味、タイム・ポイントの取り方、定義されているオペレータの機能

は GO 手法とは本質的に異なる体系である。

この手法は、特に配管系の様な流れを扱う系の解析に適している点、及び、信号の意味が、流れそのものをモデル化したイメージを持っている点から、GO-FLOW 手法と呼ぶこととする。

### 5.3 GO 手法の特長及び限界

GO 手法とは系の信頼性を解析する一方法であり、GO 手法により系の動作成功及び動作失敗の確率値をひとつのモデルで同時に解析することができる。

GO 手法においては、まず、系の構成、機能をモデル化した GO チャートを作成する。GO チャートはコード（プログラム）内部で定義された16種類の標準オペレータ及びそれらを結ぶ信号線より成り立っている。標準オペレータの中には、フォールト・ツリーで用いられる AND ゲート、OR ゲートをあらわすオペレータがある。さらに、これらの論理機能のオペレータの他に、時間遅れ、スイッチ機能、基本事象等もオペレータとしてモデル化されている。信号線は情報の流れが伝わって行く経路を示している。

次に、系の各構成機器の故障率データを用い、GO オペレータの動作モード（動作成功、動作失敗など）毎に各々の発生確率を定め、入力データとする。これらはフォールト・ツリー解析における基本事象の発生確率に対応している。

更に、系の動作モードに対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントを定義する。このタイム・ポイントは実際の時刻を表わしているわけではないが、実時刻との対応はついている。従って、タイム・ポイントの順序は実際の時刻順序通りとなっている。タイム・ポイントは、0,1,2,3,...と番号付けられている。タイム・ポイント0は実際の系の動作に先立つ仮想的時刻をあらわし実時刻との対応はない。また、タイム・ポイントの最大値は“Never”あるいは“無限大時刻”をあらわし、要求された動作が実現されない系の状態をあらわすのに用いる。これも実時刻との対応はない。各タイム・ポイントにおいて信号が発生したり、オペレータの各種動作が実施される。これらの情報は GO チャート作成の際に同時に与えておく。

GO コードは大別すると、GO コード群と FF コード群に分かれており、GO コード群で、系の特定の動作状態の発生確率を求める。ここに用いられている計算のロジックは、フォールト・ツリー解析プログラム WAM-CUT<sup>(49)</sup>で用いられているロジックと同じもの

である。FF コード群においては、指定した事象（系の動作成功、動作失敗等）を構成するフォールト・セットを見つけ出す (Fault Set Finder) ことと、特定の基本事象の発生確率を変えて、感度解析を実施することができる。

以上概説した GO 手法は以下のような長所を持っている。

体系をモデル化した GO チャートは、システムの P&I ダイアグラム、シーケンスダイアグラム等と視覚的に対応させることが可能であり、解析対象のモデル化がより機械的に実行できる。それ故、GO チャート作成の際解析者の恣意が入りにくく、作成に要する時間が短くて済む。更に GO チャートの理解、再検討が容易で、GO チャートの正当性を確認しやすい。

GO 手法では各構成要素の成功/失敗状態の任意の組み合わせからなる体系のすべての可能な動作、非動作状態をあらわすことができる。それにより、フォールト・ツリー解析とは異なり、系のすべての状態の発生確率を一つの GO チャートで同時に求めることができる。このことは、系の Failure 状態だけでなく、Success 状態あるいは Premature 状態も調べられることを意味している。

解析対象の系の構造が、設計変更等により変化した場合は、対応するオペレータ、信号線を GO チャートにおいて追加、削除するだけで良い。そのため、設計変更に対する対応は大変容易であり、常に最新の状況に対応した解析結果が得られる。更に、フォールト・セットを見つけ出せるため、不確実な解析をそのまま続けて実行できる。

以上の特長を持つ GO 手法を用いて原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を実施した結果、多くの長所にもかかわらず、まだ実際の解析においては、GO 手法には問題点の残ることが判明した。

まず、GO 手法における信号は、“On-to-Off”あるいは、“Off-to-On”信号を意味している。それ故、GO 手法においては、系の状態の、On から Off あるいは、Off から On への変化が、どの時刻にどれだけの確率で発生するかを調べている。例えば、“Off-to-On”信号を追うことは、Demand により系が起動する確率を求めることに対応している。タイム・ポイント“0”から“∞”までの信号発生確率の和は0.1であり、タイム・ポイント“∞”における信号発生の確率は、Demand による起動が失敗し、系が On 状態にならない確率を意味している。GO 手法では、系の状態が単

に1回変化する場合を取り扱っている。そのため、系の状態がOffからOnになり、更に他の指令でOffになるような、Phased Mission Problemに見られる動作モードの切替を供う系の解析は、このままでは実行不可能である。

また、GO手法における、基本事象データはすべて、発生確率値で与えてあり、発生率ではない。それ故、例えば、非常用崩壊熱除去系が起動開始後に時間経過と共に故障により停止する確率を求めることは容易ではない。この計算のためには、例えば、10時間後、20時間後、50時間後、…における機器の故障確率をそれぞれ求め、それらを、オペレータに対する入力データとして与え、各々の場合について解析を繰り返す必要がある。

## 5.4 GO-FLOW手法の概略

GO-FLOW手法は、GO手法に於ける限界を克服するために開発した、システム信頼性解析の一手法である。GO-FLOW手法により系の取り得るすべての動作状態あるいは非動作状態の確率値を一つのモデル(GO-FLOWチャート)で、一度の計算により求めることができる。

GO-FLOE手法においては、系の構成、機能をモデル化したGO-FLOWチャートを作成する。GO-FLOWチャートは標準オペレータ及びそれらを結ぶ信号線より成り立っている。

オペレータの動作モードに対し各々の発生確率をデータとして与え、オペレータの定義に基づいて信号を処理していくことにより、最終的に系の動作/不動作確率を求めることができる。

### 5.4.1 信号の意味

GO-FLOW手法に於ける信号の意味はGO手法とは異なり、配管中の流体の流れ、電流、情報、指令等を意味しており、状態の変化(On-to-Off信号あるいはOff-to-On信号)を意味するものではない。信号が物理的な流れをあらわしている場合には、“信号の存在”とは“物理的な流れの存在”ということになるが、GO-FLOWにおいては、“物理的な流れの存在”を次のように拡張して考える。つまり、“ある場所における流体の流れの存在”とは、下流の配管の流路抵抗が零になった場合にその場所において流体が流れることを意味すると考える。同様に、“電流の存在”は、現に電流が流れている場合だけでなく、下流の電気抵抗が零になった場合に電流が流れることをも意味す

る。

“信号の存在”とは、GO-FLOWにおいては、実際に流体なり電流なりが流れていることだけでなく、流れる可能性を持っていることをも意味している。物理的な流れが実際に流れるためには、流路抵抗が駆動力より小にならなくてはならない。例えば、直列配管の途中一箇所の弁が閉じていると、流路全域にわたり流体は流れないが、GO-FLOW手法においては閉じられた弁の上流側においては、“信号は存在する(弁が開けば流体を流す能力を持っている)”と考え、下流においては、“信号は存在しない(更に下流にある弁を開いても流体は流れない)”と考える。

### 5.4.2 タイム・ポイント

系の動作の進行に対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントが定義される。タイム・ポイントは実際の時刻を表わしているわけではなく、前後関係が、実際の時間経過と同一となっていればよい。

タイム・ポイントは1から始まる整数値で番号づけられている。タイム・ポイント1は、通常、系の動作の開始に先立つ時刻を表わす。タイム・ポイントの総数は、解析対象の動作モードをあらわすために必要な時間の区切りの数によって定まり、解析者が指定する量である。GO-FLOWにおいては、GO手法とは異なり、“ $\infty$ (never)”に対応するタイム・ポイントを与える必要はない。

### 5.4.3 オペレータ機能概略

以上の信号の意味、タイム・ポイントの取り方をもとに、各機能の動作、論理機能等をモデル化したオペレータがGO-FLOWにおいては定義されている。

オペレータは基本的には、GO手法と同様に主入力信号S、副入力信号P、出力信号Rの三種の入出力信号を持っている。信号発生器をあらわすオペレータ(タイプ25)は出力信号のみ、ORゲートをあらわすオペレータ(タイプ22)は主入力信号と出力信号のみを持っているように、必ずしもすべてのオペレータが三種の入出力信号を持っているわけではない。

オペレータの機能は次の三つの基本原則により支配されている。

- (1) タイム・ポイントtにおける主入力信号S(t)は出力信号R(t)にのみ影響する。
- (2) タイム・ポイントt以前に入力した全ての副入力信号P(t') ( $t' \leq t$ )は出力信号R(t)に影響を及ぼす。
- (3) タイム・ポイントt以後に入力される副入力







時、出力信号強度  $R(t)$  は  $1.0 - S(t)$  となる。主入力信号と出力信号がそれぞれ一個存在し、副入力信号は存在しない。図5-4 にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

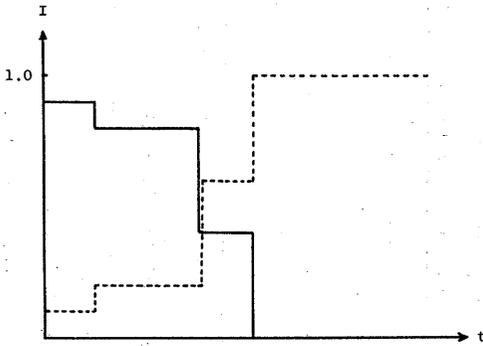


図5-4 タイプ23オペレータの機能

5.5.4 オペレータ・タイプ24

このオペレータは差分機能を持っている。タイム・ポイント  $t$  における出力信号は、タイム・ポイント  $t-1$  における入力信号強度からのタイム・ポイント  $t$  における入力信号強度の増減量となる。それ故。出力信号強度は負の値を取ることもあり得る。また、タイム・ポイント 1 における出力信号強度は 0.0 と定義する。図5-5 にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

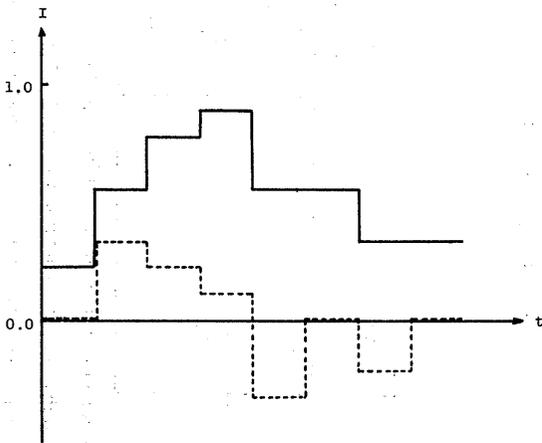


図5-5 タイプ24オペレータの機能

5.5.5 オペレータ・タイプ25

このオペレータは信号発生器をあらわす。GO 手法におけるタイプ 5 に対応する。

通常一つのタイム・ポイントにおいて信号を発生する場合を取り扱うが、複数のタイム・ポイントにおいて次々と信号を発生する場合も取り扱える。

解析対象とする系の外部からの信号、指令に用いる場合が多い。また、各機器の動作の制御、時間経過量を表現する場合にも用いられる。

GO-FLOW チャート中に、2個以上のタイプ25オペレータが存在する場合は、各々、独立な信号を発生するとして取り扱う。

5.5.6 オペレータ・タイプ26

このオペレータは、通常閉状態のバルブをモデル化している。GO 手法におけるタイプ 6 に対応している。このオペレータには、主入力信号  $S$  と副入力信号  $P$  があり、副入力信号の入力によりバルブは開状態へと変化させられる。このオペレータの定義式では、副入力信号が、 $t_1 \sim t_n$  の複数のタイム・ポイントにおいて入力する一般的な場合をあらわしている。表において、 $P_g$  は副入力信号が入力した時、機器が正常に動作する確率で、 $P_o$  は副入力信号の有無にかかわらず早まってバルブが開いてしまう確率である。

図5-6 に、このオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。この図では、副入力信号はタイム・ポイント  $t_2$  において入力し、主入力信号はタイム・ポイント  $t_1, t_3$  において入力する場合を表している。

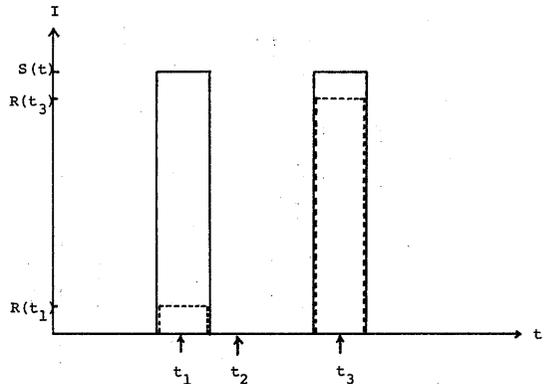


図5-6 タイプ26オペレータの機能









表5-3 信号の意味 (サンプル問題1)

Signals	意 味
1	電源の接続
2	電源よりの電圧
3	スイッチ1の閉動作指令
4	電圧がランプ1に加えられる
5	ランプ1点灯
6	スイッチ2の閉動作指令
7	電圧がランプ2に加えられる
8	ランプ2点灯
9	ランプ1か2が点灯

表5-4 オペレータに与えるデータ (サンプル問題1)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	R=1.0(1), 1.0(2), 1.0(3)	電源接続
2	25	R=0.0(1), 1.0(2), 0.0(3)	スイッチ1閉指令
3	25	R=0.0(1), 0.0(2), 1.0(3)	スイッチ2閉指令
4	21	$P_g=0.9, P_f=0.1$	電源
5	27	$P_p=0.1, P_g=0.7, P_f=0.2$	スイッチ1
6	27	$P_p=0.1, P_g=0.7, P_f=0.2$	スイッチ2
7	21	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ1
8	21	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ2
9	22	なし	ORゲート

第二行目は、オペレータ#4を取り扱うことを示す。オペレータ#4の働きにより、入力信号#1から出力信号#2の強度が得られ、その結果が各タイム・ポイントについて記載されている。例えば、タイム・ポイント1における出力信号強度は、

$$R(1)=S(1) \times P_g=1.0 \times 0.9=0.9 \quad (5-6)$$

と求まる。同様にして、タイム・ポイント2,3における信号#2の強度もそれぞれ0.9となる。回路図における意味は、電源が正常に働き、電圧がスイッチS1, S2に加わる確率がタイム・ポイント1~3において0.9であることに相当する。

第三行目は、オペレータ#2を取り扱うことを示す。オペレータ#2により発生された信号#3の存在確率(強度)が、タイム・ポイント2において1.0であり、他は、0.0であることを示している。回路図においては、タイム・ポイント2において、スイッチ1を閉じる動作の指令が出されることに相当する。

第四行目は、オペレータ#5を取り扱うことを示す。入力信号は、#2, #3であり、オペレータ#5の働きにより、信号#4の強度が得られ、その結果が記載されている。ただし、信号#2は分岐して、オペレータ#5と#6の主入力信号となっており、それらの信号はオペレータ#5~#8の変換を受けた後に、オペレータ#9のORゲートにおいて再び結合される。その時、オペレータ#9の計算をする際、入力信号#5と#8は、独立事象でない事を考慮しなくてはならない。それ故、今のような場合には、分岐した信号番号の情報を残しておく必要がある。第四行目出力信号欄においては、信号#2が存在し、なおかつ、信号#4が存在する確率値であることを明示してある、具体的な計算方法は次のようになる。

$$R(1)=S(1) \times P_p=0.9 \times 0.1=0.09 \quad (5-7)$$

$$R(2)=S(2) \times \{P_p+P(2) \times P_g\} \\ =0.9 \times (0.1+1.0 \times 0.7)=0.72 \quad (5-8)$$

表5-5 GO-FLOW 手法計算手順 (サンプル問題1)

Line	Operator(Type)	Signal		Intensity of Output Signal		
		Input	Output	Time Points		
				1	2	3
1	1 (25)	-	1	1.0	1.0	1.0
2	4 (21)	1	2	0.9	0.9	0.9
3	2 (25)	-	3	0.0	1.0	0.0
4	5 (27)	2,3	4(2)	0.09	0.72	0.72
5	7 (21)	4	5(2)	0.072	0.576	0.576
6	3 (25)	-	6	0.0	0.0	1.0
7	6 (27)	2,6	7(2)	0.09	0.09	0.72
8	8 (21)	7	8(2)	0.072	0.072	0.576
9	9 (22)	5,8	9	0.13824	0.60192	0.78336

$$R(3) = S(3) \times \{P_p + P(2) \times P_g\} \\ = 0.9 \times (0.1 + 1.0 \times 0.7) = 0.72 \quad (5-9)$$

回路図においては、スイッチ S1 に電圧が加わっており、なおかつスイッチ S1 が閉状態になっている場合に相当する。

第五行目は、オペレータ#7を取り扱うことを示している。オペレータ#7により入力信号#4から出力信号#5を得た結果を与えてある。例えば、

$$R(1) = S(1) \times P_g = 0.09 \times 0.8 = 0.072 \quad (5-10)$$

等の計算により信号#5の強度が得られる。信号#4は、オペレータ#7の入力信号としてのみ使用されているだけであるため、第五行目の出力信号欄の信号#5の記述には、信号#4の情報は入っていない。回路図においては、スイッチ S1 に電圧が加わり、なおかつ、ランプ L1 が点灯している場合に相当している。

第六行目は、オペレータ#3を取り扱うことを示している。オペレータ#3により、タイム・ポイント3において、信号#6が1.0の確率で発せられることを示している。回路図においては、タイム・ポイント3においてスイッチ S2 を閉じる動作の指令が出されることに相当する。

第七行目は、オペレータ#6を取り扱うことを示している。オペレータ#6により、入力信号#2、#6から、出力信号#7が得られた結果を記す。これは、第四行目と同様に、信号#2が分岐しており、なおかつ、分岐した信号のそれぞれの系統が先において再び

結合されるため、信号#2が存在し、なおかつ、信号#7が存在する確率であることを明示してある。回路図においては、スイッチ S2 に電圧が加わり、なおかつ、スイッチ S2 が閉状態になっている場合に相当している。

第八行目は、オペレータ#8を取り扱うことを示している。出力信号強度は第五行目と同様にして求める。

第九行目は、オペレータ#9を取り扱うことを示している。オペレータ#9はORゲートであり、信号#5と#8が主入力信号、#9が出力信号である。信号#5と#8の強度は、第五、第八行目で、それぞれ求められている。信号#9の強度を求めるためには、信号#5、#8の従属性を考慮して次のような計算を行う。

$$P(1) = \left\{ \frac{S_1(1)}{P(\#2(1))} + \frac{S_2(1)}{P(\#2(1))} - \frac{S_1(1)}{P(\#2(1))} \right. \\ \left. \times \frac{S_2(1)}{P(\#2(1))} \right\} \times P(\#2(1)) \\ = \left\{ \frac{0.072}{0.9} + \frac{0.072}{0.9} - \frac{0.072}{0.9} \times \frac{0.072}{0.9} \right\} \times 0.9 \\ = 0.13824 \quad (5-11)$$

ここで  $P(\#2(1))$  は信号#2がタイム・ポイント1において存在する確率で、第二行目において0.9と求められている。 $S_1, S_2$  は主入力信号であり、それぞれ、信号#5、#8に対応している。計算の結果が第九行に記載されている。回路図においては、ランプ

