

# 片方向故障デバイスによる単一故障マスク構成法

古賀義亮

令和3年9月

## 片方向故障デバイスによる単一故障マスク構成法

古賀 義亮\*

(令和2年12月21日受付：令和3年6月11日受理)

### Single-fault-masking Design Methods by using Unidirectional Fault Devices

By Yoshiaki KOGA\*

This paper presents single-fault-masking design methods by using unidirectional fault devices such as fail-safe relays which are actually used now for rail-road signal control logical systems. In this paper, unate logical functions are realized with single-fault-masking properties by the duplicated redundancy methods with unidirectional fault devices, where the concept of transmission function is applied. It is presented in this paper that the exclusive-OR function is able to be realized with single-fault-masking properties.

**Keywords:** unidirectional faulty device, transmission function, single-fault-masking

## 1. 緒言

片方向故障の特性を持つフェイルセーフ電磁リレーは鉄道信号の制御等に利用されている。最近では電磁リレーと同等な機能をもつフォトリレーが新たなデバイスとして利用できる。電磁リレーのスイッチング接点はブール変数として、中嶋<sup>1)</sup>、Shannon<sup>2)</sup>により1930年代台にスイッチングを行う電磁リレーに適用できる導通関数(transmission function)を提示し、現在もデジタル制御システムの設計に応用されている。

本論文では、フェイルセーフ論理構成に適応した片方向故障のデバイスの特徴をもとに、単一片方向故障をマスクする論理構成法を述べる。

さらに非ユネイト関数論理も片方向故障デバイスを用いて多重化すれば、単一片方向故障をマスクできる構成法を提示する。

2章では、単一故障がマスクされる高信頼化の有効性、スイッチング・デバイスの論理機能を果たす導通関数の特性、その故障モードなどの前提となる事項を記述する。

3章では代表的な2変数論理関数を片方向故障デバイスにより単一故障をマスクする手法を提示する。

4章では片方向故障デバイスを用い多重化排他的論理と構成の単一故障をマスク可能な構成法を提示する。

5章の結言では、本論文で記述した内容の概要と残された課題を記述する。

## 2. 一般の論理関数を片方向故障デバイスにより故障をマスクする論理構成法

### 2.1 電磁リレーにブール代数を適用する導通関数

スイッチング・デバイスである電磁リレーに、ブール代数を適用した論理関数は、グラフ理論の側面から再検討され、当初はスイッチング関数(switching function)として引用されている<sup>3)</sup>。その後はスイッチング・デバイスの導通関数(transmission function)と定義されている<sup>4) 5)</sup>。

導通関数はスイッチング・デバイスにより電氣的エネルギーを論理的に導通(on)と非導通(off)によりブール代数として扱う論理関数である。

まず電磁リレーをもとに導通関数の論理変数として、導通変数を定義する。

励磁コイルの通電状態を表す論理変数を $X$ とし、通電により励磁されている状態を $X = 1$ 、無通電により

励磁されていない状態を  $X = 0$ 、または  $\bar{X} = 1$  と定義する。励磁コイルの動作状態によりスイッチング接点に通電することを接（閉成、on など）といい、導通しない場合を断（開放、off など）という。

図1 電磁リレーの導通関数

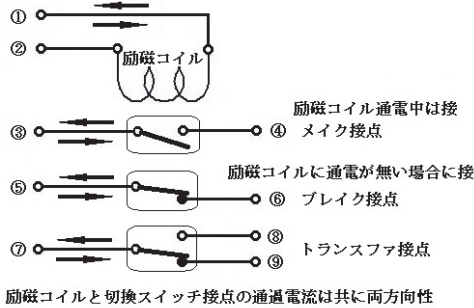


Fig. 1 Transmission variables with regard to magnetic operating relay contacts

励磁コイルの通電で励磁されている状態をもとに、慣例に従ってスイッチング接点の変数も同一の記号を用いる。すなわちスイッチング接点が励磁コイルの通電により導通するメイク接点状態の導通関数を  $X = 1$  と定義して図記号を○、無励磁状態でスイッチング接点が通電するブレイク接点状態の導通関数を  $\bar{X} = 1$  と定義して図記号を●で表す。

図1の③と④の導通は励磁コイルの導通状態と一致するので導通関数を  $f_{34} = X$ 、⑤と⑥の導通関数を  $f_{56} = \bar{X}$  と定義する。図1の⑦⑧⑨はトランスファ接点といい、それぞれの導通関数は  $f_{78} = X$  であり、導通関数は  $f_{79} = \bar{X}$  である。これらの接点の組を極といい、2-6極が組み込まれた電磁リレーが製品化されている。

## 2.2 単一故障マスクによる信頼性向上効果

信頼性の単位として1時間あたりに故障が発生する確率を  $1\text{FIT}=10^{-9}$  とする定義がある。つまり約10万年に一つの故障が発生する確率である。FITは1個の製品の信頼性の単位である。鉄道信号用の電磁リレーの1個あたりの故障率は、高い信頼性が確保されて  $1\text{FIT}$  以下となっている<sup>9)</sup>。いま電磁リレーの信頼性を  $1\text{FIT}$  と仮定し、1個の故障がマスクされるようなシステムの設計を行った場合、電磁リレーを1千個用いたシステムは100年間にわたり故障がマスクできると数値計算の結果から、単一故障をマスクできる信頼性向上の効果は大きいことがわかる。

しかしながら、電磁リレーの接点は固着防止のために銀カーボンのような物質を用いているので動作ごと

に損耗することから寿命がある。その寿命は万回を単位とした耐久回数で表示されている。鉄道信号の制御に用いられている電磁リレーでは、機種ごとに80万回とか、1000万回など表示されている。

電磁リレーは使用経過した動作回数をもとに保守交換が必要であるので、実装にはソケットを用いる。現実の運用にあつては、ソケットの接触不良による故障率は電磁リレーの故障率よりもはるかに高いと思われるので、初期故障の検出は重要である。

故障検出も重要であるが本論文では単一故障マスクについてのみ記述する。

## 2.3 スwitching接点論理回路の導通関数

導通変数は、上記定義に従って複数の接点の直列接続はブール代数の積演算、並列接続はブール代数の和演算として扱うことができる<sup>5)</sup>。

この定義から端子  $ij$  間の二つの導通変数を接続して構成する導通関数の論理式を次の図2に表示する。

| 直列接続 | 接続の形態                                     |                                      | 導通関数による論理式                                                                 |
|------|-------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|      | $\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}$ (右上) | $\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$ |                                                                            |
|      | $\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}$ (落下) | $\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$ | $f_{ij}(X, Y) = \bar{X} \cdot \bar{Y} = \bar{X} + \bar{Y}$<br>ド・モルガンの定理を適用 |
| 並列接続 | $\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}$ (右上) | $\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$ | $f_{ij}(X, Y) = X + Y$                                                     |
|      | $\begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}$ (落下) | $\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$ | $f_{ij}(X, Y) = \bar{X} \cdot \bar{Y} = \bar{X} + \bar{Y}$<br>ド・モルガンの定理を適用 |

図2 電磁リレー接点の二つの回路を直列接続と並列接続する場合の導通関数の論理式

Fig. 2 Transmission functions by serial and parallel connections of transmission variables

図2に示した接点接続による導通関数の論理式は両方向の電気的エネルギー伝送に対応できるので、いずれか一方の端子を入力、反対側の端子を出力とすることができる。

## 2.3 フェイルセーフ故障のスイッチング・デバイス

フェイルセーフの方策は現在も鉄道の技術分野の重要な施策である<sup>7)</sup>。

フェイルセーフの理論、並びにその応用に関しては多くの貢献が行われている<sup>9)10)</sup>。ここではフェイルセーフ理論が導出された背景を述べる。用語のフェイルセ

イフはデペンダビリティに関する国際的な用語集から引用する<sup>11)</sup>。

電氣的エネルギーを論理的に制御するスイッチング・デバイスとして、鉄道の線路や信号装置を制御する電磁リレーが用いられるようになり、様々な故障に遭遇した。

スプリングにより励磁状態から無励磁状態に復帰させる電磁リレーでは、スプリングの疲労破損や、電流作用でコイルが導通状態のまま接点が融着するなど復帰しない故障があった。そのために本来は赤信号にすべき状態であるにも関わらず、青信号のままで列車事故を起こす誘因が生じていた。そこでスプリングの代わりに重力錘により復帰させ、接点にはカーボンを用いることで接点融着を防止するフェイルセーフ電磁リレーが開発されて利用された。

いまでも鉄道信号の分野では電磁リレーの励磁が無い状態を「落下」と呼び、励磁コイルに電流を流して励磁することを「扛上(こうじょう)」と言う習わしが残されている。重力錘を持つフェイルセーフ電磁リレーは重くてかさばり、しかも重力復帰のために設置位置が制限される。重力の代わりに永久磁石を用い、電磁コイルの電流は永久磁石の吸引力以上の力で動作させる小型化した磁気保持リレーが開発された。

以上の電磁リレーは、無励磁状態の片方向故障モードがある。このようなスイッチング・デバイスを本論文ではフェイルセーフ性スイッチング・デバイスと呼ぶことにする。最近では新たなフォトリレーがスイッチング・デバイスとして利用できる。

## 2. 4 片方向故障デバイスの故障モードの定義

以上の説明から片方向の故障モードをもとに接点のフェイルセーフの故障モードを次のように定義する。

本論文では、フェイルセーフ性スイッチング・デバイスのスイッチング接点の導通関数  $X$  が故障する場合を  $X = 0$ 、導通関数  $\bar{X}$  が故障する場合を  $\bar{X} = 1$  と定義し、以下フェイルセーフ故障モードを簡略化して FS 故障と表記する。

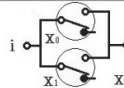
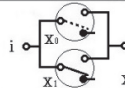
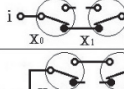
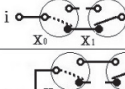
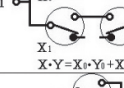
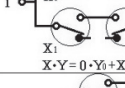
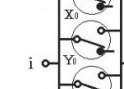
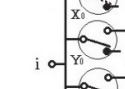
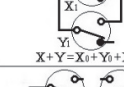
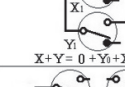
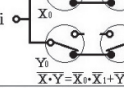
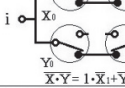
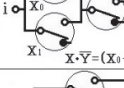
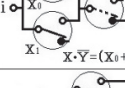
導線による接続には故障がないと仮定すれば、従来の AND は直列接続で実現でき、OR は並列接続で実現できるので、本論文では AND と OR には無故障とする。

従来の半導体論理デバイスの故障モードとは異なり、電磁リレーと半導体デバイスとしてはフォトリレーの導通関数による論理構成に適用できる。

## 3. ユネイト導通関数の FS 故障マスキ法

### 3. 1 ユネイト導通関数の定義

ユネイト論理関数とは、単調増大論理関数である論理積 AND とか論理和 OR、単調減少論理関数である NOT、NAND、NOR、さらには単調増大、単調減少の複合関数であっても論理減算あるいは抑止と称する  $X \cdot \bar{Y}$  などの論理関数もユネイト論理関数と定義されている。排他的論理和  $X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y$  と論理式で表され、簡略化した記号により  $X \oplus Y$  と記す関数、ならびにその関数と双対な対等関数は線形関数とも定義されており、非ユネイト論理関数である。

|         | 基本的な接続                                                                              | $X_0$ の FS 故障                                                                         |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 肯定      |    |    |
| 否定 NOT  |    |    |
| 論理積 AND |    |    |
| 論理和 OR  |    |    |
| NAND    |   |   |
| NOR     |  |  |
| 論理減算 抑止 |  |  |
| 合意      |  |  |

図中  の記号はブレイク側(落下)の故障モード

図3 ユネイト導通関数の FS 故障のマスキ法

Fig. 3 Fault-masking for unate transmission functions by duplicated connections

### 3. 2 ユネイト導通関数の FS 故障マスキ

デバイスに故障が生じた場合にその故障をマスクする手段として多重化する技術がある。当麻編<sup>8)</sup> p107. 変数  $X$  のデバイスを 2 重化するために同一の 2 つのデ

バイス  $X_0$  と  $X_1$  を用いる。図 3 は片方向故障デバイスの導通関数によりユネイト論理構成は 2 重化によって単一 FS 故障をマスクする構成法を示している。FS 故障は点線棒により図中に例示している。図 3 によりユネイト論理関数はデバイスの 2 重化によって単一 FS 故障が全てマスクできることを表している。

#### 肯定の導通変数の FS 故障マスク定理

導通変数  $X$  は導通関数を並列接続した二重化導通変数により単一 FS 故障はマスクできる。

##### 証明

肯定の導通変数  $X$  は図 3 に示したように  $X_0 + X_1$  と並列接続の 2 重化にする。いずれか一方の導通関数の FS 故障は 0 となる。 $X_0 = 0$  となれば導通関数は  $X = 0 + X_1$  であるから、単一 FS 故障はマスクされる。

#### 否定の導通関数の FS 故障マスク定理

導通関数  $\bar{X}$  は導通関数を直列接続した二重化導通関数により単一 FS 故障はマスクできる。

##### 証明

否定の導通関数  $\bar{X}$  は図 3 に示したように  $\bar{X}_0 \cdot \bar{X}_1$  と直列接続の二重化にする。いずれか一方の導通関数の FS 故障は 1 となる。 $\bar{X}_0 = 1$  になるとすれば導通関数は  $\bar{X} = 1 \cdot \bar{X}_1$  であるから、単一 FS 故障はマスクされる。

上記に示した二重化した 2 変数の導通変数と導通関数をもとにして、与えられた論理式の積演算は直列接続とし、和演算は並列に接続することで図 3 に示したようにユネイト論理関数の二重化により単一 FS 故障はマスクされる。

#### 4. 排他的論理和回路の単一 FS 故障のマスク法

次に、排他的論理和回路の単一 FS 故障がマスクできる構成法を提示する。

まず電磁リレーのトランスファ接点による一般的な排他的論理和の構成について説明する。

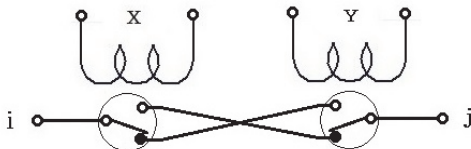


図 4 排他的論理和の一般的なリレー接点回路  
(X と Y はともに非励磁状態)

Fig. 4 EOR logical function by two variable transfer relay contacts

図 4 の 2 個の電磁リレーの励磁変数  $X$  と  $Y$  により、 $i$  と  $j$  間の排他的論理和の導通関数は次式で与えられる。

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y$$

排他的論理和には、2 変数の一つに NOT 変数が存在する導通関数が 2 組存在する。フェイルセーフ性スイッチング・デバイスにより排他的和回路を 4 重化して、単一故障の仮定の下では FS 故障をマスクできることを以下に証明する。

図 4 をもとにして単一 FS 故障を想定すると、図 5 に示すように排他論理構成は  $X$  側の FS 故障による導通関数は  $f_{ij}(X, Y) = Y$  となり、 $Y$  側の FS 故障による導通関数は  $f_{ij}(X, Y) = X$  となる。

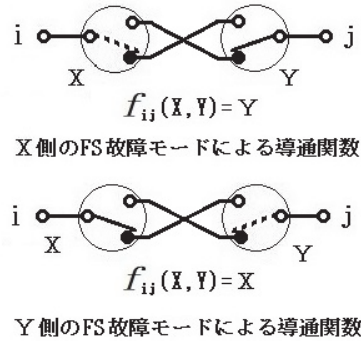


図 5 排他論理構成の FS 故障による導通関数

Fig. 5 Transmission functions in case of X and Y faults in EOR logical function

図 4 の回路を  $XY$  と呼び、デバイス  $X_0$ 、 $Y_0$  に対しては  $X_0Y_0$  と書くことにする。 $X_0Y_0$ 、 $X_1Y_1$  を直列接続するとその導通関数は次式で与えられる。

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y = (X_0 \cdot \bar{Y}_0 + \bar{X}_0 \cdot Y_0) \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1)$$

この直列接続を行った 2 組の排他的論理和回路に FS 故障が  $X_0$  に生じた場合の導通関数は次式となる。

$$f_{ij}(X, Y): X_0 \text{ fault} = Y_0 \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1) = \bar{X} \cdot Y$$

一方変数  $Y_0$  に FS 故障が発生した場合の導通関数は

$$f_{ij}(X, Y): Y_0 \text{ fault} = X_0 \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1) = X \cdot \bar{Y}$$

となる。2 重系の直列接続だけでは上記の結果から本来の排他的論理和の論理機能すべてにわたって単一 FS 故障をマスクすることは実現できない。

#### 4. 1 4 重化排他的論理和構成

そのため、さらに下記の導通関数 2 組の排他的論理和回路を準備する。

$$\begin{aligned} f_{ij}(X, Y) &= X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y \\ &= (X_2 \cdot \bar{Y}_2 + \bar{X}_2 \cdot Y_2) \cdot (X_3 \cdot \bar{Y}_3 + \bar{X}_3 \cdot Y_3) \end{aligned}$$

この2組の排他的論理和回路と前述の2組の排他的論理和回路を並列接続した導通関数は

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y = (X_0 \cdot \bar{Y}_0 + \bar{X}_0 \cdot Y_0) \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1) + (X_2 \cdot \bar{Y}_2 + \bar{X}_2 \cdot Y_2) \cdot (X_3 \cdot \bar{Y}_3 + \bar{X}_3 \cdot Y_3)$$

と与えられ、2重の直列導通関数をさらに2重の並列接続にすることで全体としては4重化の構成とすれば単一のFS故障をマスクすることができる。

### 単一FS故障がマスクできる証明

4重化した上述の論理式について $\bar{Y}_0 = 1, Y_0 = 0$ となる単一FS故障した場合の導通関数は次式となる。

$$f_{ij}(X, Y) = (X_0 \cdot 1 + \bar{X}_0 \cdot 0) \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1) + (X_2 \cdot \bar{Y}_2 + \bar{X}_2 \cdot Y_2) \cdot (X_3 \cdot \bar{Y}_3 + \bar{X}_3 \cdot Y_3)$$

上記の式から次式が導かれる。

$$f_{ij}(X, Y) = (X_0) \cdot (X_1 \cdot \bar{Y}_1 + \bar{X}_1 \cdot Y_1) + (X_2 \cdot \bar{Y}_2 + \bar{X}_2 \cdot Y_2) \cdot (X_3 \cdot \bar{Y}_3 + \bar{X}_3 \cdot Y_3)$$

上式における変数の添え字を同一変数とみなすと次式に変形でき、単一FS故障マスク可能が証明される。

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y + X \cdot \bar{Y} = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y$$

$Y_0$  以外の四重化した変数も同様に証明される。

次の図6に上記の論理式で提示した四重化排他論理構成に $Y_0$ にFS故障が生じた場合の例を示す。

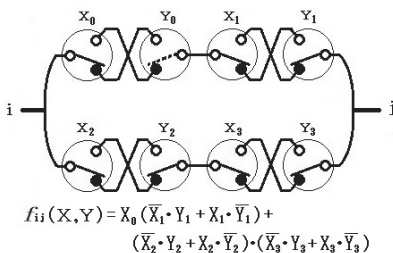


図6 フェイルセーフ・スイッチング接点による排他論理和構成のFS故障マスク例 ( $Y_0$ がFS故障とした場合を例示)

Fig. 6 Transmission functions in case of  $Y_0$  fault in fault-masking EOR logical function

### 4. 2 接点を削減する排他的論理和構成

導通関数が導入できるデバイスでは、前記の四重化構成は単一の片方向性のない故障、すなわち導通関数 $X$ が単一のFS故障に限らないで $X = 1$ あるいは $X = 0$ となる場合にも適用できることが当麻善弘・東京工業大学名誉教授から指摘があったので片方向故障に限定して接点を削減する構成を次に提示する。

図7は、トランスファ接点とメイク接点を持つ2極の電磁リレーを二重化して構成する排他論理和回路構

成であり、励磁コイル断線等を含む単一FS故障はマスクできる。

ここで図7の下方の図の細い実線で囲まれた範囲(③④⑤⑥⑦)は2極リレーの $X_0, \bar{X}_0, \bar{Y}_0$ の部分、同様に $X_1, \bar{X}_1, \bar{Y}_1$ の部分、 $Y_0, \bar{Y}_0, \bar{Y}_0$ の部分、 $Y_1, \bar{Y}_1, \bar{Y}_1$ の部分は、それぞれ2極リレーを表している。

排他的論理和の構成に故障はないと仮定した非直列並列であるブリッジ接続を用いる。この接続形態は半導体論理デバイスでは双方向の電流が流れるので実現できないが、フォトリレーによる構成では導通関数が導入できるので実現可能であり、接点数を削減できることから効用がある。

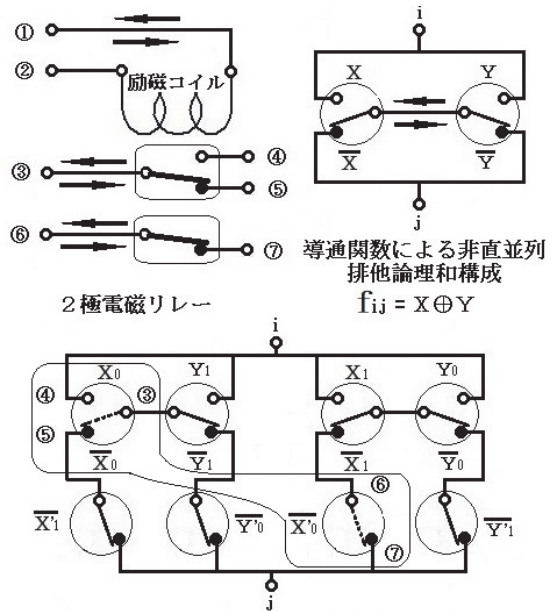


図7 2極フェイルセーフ・スイッチング接点による排他論理和構成のFS故障マスク例

Fig. 7 Transmission functions in case of  $X_0$  fault in fault-masking EOR logical function

図7の排他論理和構成の導通関数は次式で与えられる。

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y = X_0 \cdot \bar{Y}_1 \cdot \bar{Y}_0$$

$$+ Y_1 \cdot \bar{X}_0 \cdot \bar{X}_1 + X_1 \cdot \bar{Y}_0 \cdot \bar{Y}_1 + Y_0 \cdot \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_0$$

単一FS故障がマスクできることを次に証明する。

### 単一FS故障マスクの証明

図7から肯定の導通変数は並列に二重化されているので単一FS故障がマスクできること、さらに否定の導通関数は直列に二重化されているので単一FS故障がマスクできることは明らかである。

電磁リレーコイルの断線等によるFS故障は二重と

なった多重化故障であるが、それぞれ独立した導通関数に生じる故障なので排他論理和の機能を阻害しない。

図7の点線棒で示した  $X_0$  と  $\bar{X}'_0$  に同時に FS 故障が生じた場合の導通関数は  $X_0 = 0$ 、 $\bar{X}_0 = 1$  および  $\bar{X}'_0 = 1$  から次式となる。

$$f_{ij}(X, Y) = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y$$

$$= Y_1 \cdot 1 \cdot \bar{X}'_1 + X_1 \cdot \bar{Y}_0 \cdot \bar{Y}'_1 + Y_0 \cdot \bar{X}_1 \cdot 1$$

上式における変数の添え字を同一変数とみなすと

$$f_{ij}(X, Y) = \bar{X} \cdot Y + X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Y$$

となり、単一 FS 故障マスク可能が証明される。 $X_0$  以外の二重化した変数も同様に証明され、励磁コイル断線等を含む単一 FS 故障はマスクできる。

$X_0$  の単一 FS 故障が生じた場合の導通関数についてさらに  $X_1 = 0$  と  $\bar{X}_1 = 1$  となる2重の FS 故障が生じた場合は次式のような別の導通関数となり、単一励磁コイル断線等以外の二重 FS 故障マスクされない。

$$f_{ij}(X, Y) = Y_1 \cdot 1 \cdot 1 + Y_0 \cdot 1 \cdot 1 = Y$$

本論文では単一 FS 故障をマスクする手法を述べてきたが、そのマスクされた単一 FS 故障の検出も重要である。

## 5. 結言

本論文では、フェイルセーフ論理に適応した電磁リレーのような片方向故障デバイスを用いれば単一故障をマスクできることを提示した。さらに排他的論理和回路も片方向故障デバイスである電磁リレーを用いれば多重化により単一 FS 故障はマスクできることを明らかにした。

本論文により単一 FS 故障マスクによるシステムは高信頼化可能である。しかしながら多重故障による安全性は保証されていない。三重化多数決システムは一つのシステム故障はマスクできるが、そのマスク状態が検知されないままに多重のシステムに故障が生じると安全性を損なう事象と同一である。

従来のフェイルセーフ理論をもとに構成されているシステムは多重故障があっても故障により安全側を確保する手段であった。しかしながらそのシステムがセーフ状態にあるとき真にセーフなのか、あるいはシステムの故障によるセーフによるのかの判定ができないという課題があった。マスクされている故障を検出すれば、その課題の解決法につながる。

本論文では故障モードを限定しているが、本来のフェイルセーフ論理構成は多重の FS 故障もセーフ状態を保証した理論である。複数の FS 故障が生じた場合にもフェイルセーフ性を確保するためには、導通関数が適用できるフォトリレーが開発途上にあるので、そ

の故障モードの解析とフェイルセーフ論理の新たな開発が望まれる。

## 謝辞

本論文に関しては、当麻喜弘・東京工業大学名誉教授に御逝去直前まで多大な示唆をいただいた。御霊前に捧げて深く御礼申し上げる。さらに笹尾 勤教授に、論文の内容の検討をいただいたことに感謝する。

## 参考文献

- 1) 中嶋 章: 継電器回路に於ける単部分路の関係式論, 電信電話学会雑誌 (1937), pp.697-706.
- 2) C. E. Shannon: "A symbolic analysis of relay and switching circuits", Trans. AIEE(1938), vol.57, pp.713-723.
- 3) 尾崎 弘、白川 功: 「グラフとネットワークの理論」、コロナ社 (1973)
- 4) 尾崎 弘、藤原秀雄: 「論理数学の基礎」、オーム社 (1980)
- 5) 笹尾 勤: 「論理設計」、近代科学社 (1995)
- 6) 坪井正男: 信号リレーの特質、日本信号技報 Vol. 2, (1978) No. 2, pp.1-8.
- 7) 鉄道信号システム編集委員会: 「鉄道信号」、日本鉄道電気技術協会 (2015).
- 8) 当麻喜弘編: 「フォールトトレラントシステム論」、電子情報通信学会 (1990)
- 9) 橋本昭洋、都倉信樹、嵩 忠雄: 「非対称誤り素子によるフェイルセーフ論理回路と2重化論理」電子通信学会誌、Vol. 50(1967), No. 4, pp. 680-697
- 10) H. Mine and Y. Koga: "Basic Properties and a Construction Method for Fail-Safe Logical Systems", IEEE Trans. EC-16, No. 3, (1967), pp. 282-289
- 11) J. C. Laprie(ed.): "Dependability: Basic Concepts and Terminology", Springer-Verlag Wien New York, (1992)