

## クリティカルエリアの重複と重み付き故障カバレッジ Overlap between Critical Areas and Weighted Fault Coverage

小林 泰生†  
Taiki Kobayashi

岩崎 一彦†  
Kazuhiko Iwasaki

### 1. はじめに

重み付き故障カバレッジを求める際に、クリティカルエリア (CA: Critical Area) の重複部分に注意を払う必要がある。本稿では、ブリッジ CA の重複部分の影響は実務上十分小さく、従来用いていた計算法は若干悲観的な値を与えることを示す。

### 2. 配線 ABC 間ブリッジ故障検出

図 1 に示されるように、3 個の配線 a, b, c 間にブリッジ故障が生じた場合のテストについて考える。ブリッジ故障モデルとして 4 方向モデルを対象とする。配線 a, b 間のブリッジ故障を検出するため、端子 A, B, C にはテストパターン (0, 1, d) および (1, 0, d) が印加される。ここで d はドントケアを表す。テスト応答を端子 D, E, F で観測し、故障フリー値と異なる場合には仮定した 4 方向ブリッジ故障が検出される。

配線 a, b 間に加え配線 b, c 間にもブリッジ故障が生じた場合を考える。配線 c を駆動するインバータの駆動能力が高ければ、配線 a, b, c はオール 0 またはオール 1 となる。配線 b, c 間のブリッジ故障が端子 D, E, F のいずれかで検出されるかどうかは配線 a, b 間のブリッジ故障が検出されるかどうかと近似的に同一となる。配線 c を駆動するインバータの駆動能力が低ければ、配線 a, b, c 間のブリッジ故障検出は、やはりオール 0 またはオール 1 を生じる。このとき、配線 b, c 間のブリッジ故障が検出されるかどうかは配線 a, b 間のブリッジ故障が検出されるかどうかと近似的に同一となる。

すなわち、配線 a, b, c 間に生じたブリッジ故障は、配線 a, b 間、配線 b, c 間、配線 c, a 間ブリッジ故障テストによって、それぞれ近似的に同一程度の割合で検出される。

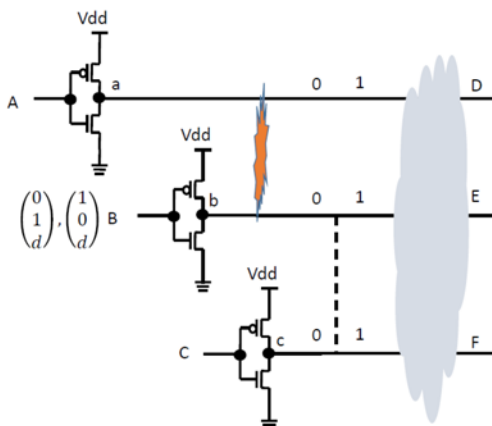


図 1 配線 a, b, c 間に生じたブリッジ故障検出  
Fig.1. Bridge fault detection for wires a, b, and c.

### 3. クリティカルエリアの重複

ブリッジ CA の重複例を図 2 に示す。最小配線幅および最小配線間隔は width であり、異物は 1 辺  $2 \times \text{width}$  の正方形とした場合である。配線 a, b 間、配線 b, c 間、配線 c, a 間、配線 a, b, c 間の CA をそれぞれ  $CA_{ab}$ ,  $CA_{bc}$ ,  $CA_{ca}$ ,  $CA_{abc}$  と表す。クリティカルエリア  $CA_{ab}$  と  $CA_{bc}$  は  $CA_{abc}$  の部分が重複している。同様に、 $CA_{bc}$  と  $CA_{ca}$ , および  $CA_{ab}$  と  $CA_{ca}$  も重複しており、 $CA_{abc}$  は 3 重に重複している。図 2 における CA の総計は、重複を除いて下記で表される。

$$CA_{total} = CA_{ab} + CA_{bc} + CA_{ca} - 2 \times CA_{abc}$$

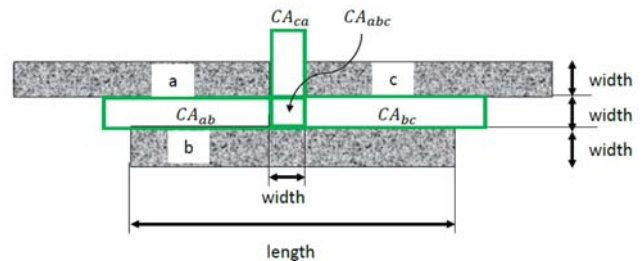


図 2 クリティカルエリアの重複例  
Fig. 2. Example of critical area overlap.

簡単化のため、配線 a, b 間、配線 b, c 間、配線 c, a 間ブリッジ故障に対し、テストパターン  $T_{ab}$ ,  $T_{bc}$ ,  $T_{ca}$  はそれぞれ 4 方向ブリッジ故障カバレッジ 100% とする。

図 2 で示される回路に  $T_{ab}$  を印加したときのブリッジ故障カバレッジ  $FC_1(T_{ab})$  は、厳密には前節の議論を踏まえ以下のように評価されるべきである。

$$FC_1(T_{ab}) = \frac{CA_{ab}}{CA_{total}}$$

しかし、ブリッジ CA の重複を生じるレイアウトパターンは、図 2 の他にも図 3 で示されるように多数存在する。このような部分をレイアウトパターンから検出することはきわめて困難であり、従来下記の式が用いられてきた[1]。

$$FC_2(T_{ab}) = \frac{CA_{ab}}{CA_{total} + 2 \times CA_{abc}}$$

すなわち、それぞれの配線間の CA を重複して加算したものを分母とし、検出した CA を重複して加算したものを分子としていた。上記 2 個の式を比較すると、 $FC_1(T_{ab})$  の分母に  $2 \times CA_{abc}$  を加算して  $FC_2(T_{ab})$  が得られるので、 $FC_2(T_{ab}, T_{bc})$  は  $FC_1(T_{ab}, T_{bc})$  より若干悲観的な値になる。

同様に、 $T_{ab}$ ,  $T_{bc}$  を印加したときのブリッジ故障カバレッジ  $FC_1(T_{ab}, T_{bc})$  は、厳密には以下のように評価される。

$$FC_1(T_{ab}, T_{bc}) = \frac{CA_{ab} + CA_{bc} - CA_{abc}}{CA_{total}}$$

従来下記の式が用いられてきた[1]。

$$FC_2(T_{ab}, T_{bc}) = \frac{CA_{ab} + CA_{bc}}{CA_{total} + 2 \times CA_{abc}}$$

† 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

上記の式は $FC_1(T_{ab}, T_{bc})$ の分母に $2 \times CA_{abc}$ を、分子に $CA_{abc}$ を加算すると得られる。3個のテストパターン $(T_{ab}, T_{bc})$ ,  $(T_{bc}, T_{ca})$ ,  $(T_{ca}, T_{ab})$ は均等に生じると考えられるので $FC_1 > FC_2$ が成立する。よって、従来の故障カバレッジ計算法は若干悲観的な値となる。故障カバレッジ $FC_1()$ および $FC_2()$ の相違を精査するためには図2中の配線長 $length$ と $width$ から $CA$ を求めればよい。

表1は、Nangate FreePDK45 Open Cell Libraryを用いたレイアウトにおける10個の回路に対する平均配線長を示すものである。最小配線幅および最小配線間隔はいずれも $width = 70nm$ である。

表1 平均配線長

Table I. Average wire-lengths

circuit	#wires	average wire-length (um)
LN45-s298	136	8.89
LN45-s444	205	8.07
LN45-s838	512	7.01
LN45-s1488	641	10.37
LN45-s5387a	2993	7.87
LN45-s9234a	5844	7.36
LN45-s13207a	8651	10.57
LN45-s15850a	10382	9.6
LN45-s35932	17968	7.7
LN45-s38584	20716	15.68

表1に示されるように、平均配線長は回路規模にはあまり依存しておらず、10個のベンチマーク回路の平均配線長 $length = 9.321um$ である。

以下、簡単化のために $CA_{ab} = CA_{bc}$ とする。図2で示される配線のブリッジ故障テストを考える。テストパターン $T_{ab}$ に対し故障カバレッジを求めると次式が得られる。

$$FC_1(T_{ab}) = 0.496354546$$

$$FC_2(T_{ab}) = 0.489220819$$

上記の差は約0.00713である。同様に2個のテストパターン $T_{ab}$ ,  $T_{bc}$ に対する故障カバレッジは次の通りとなる。

$$FC_1(T_{ab}, T_{bc}) = 0.985404504$$

$$FC_2(T_{ab}, T_{bc}) = 0.971434401$$

上記の差は約0.00698である。従来用いられていた故障カバレッジ $FC_2()$ は $FC_1()$ に比べて、図2で示される1箇所に対して約0.7%程度悲観的な値となる。

#### 4. 配線の出現頻度と故障カバレッジ

図2で示されるような、すなわち $CA$ の多重カウントが生じるレイアウトパターンは必ずしも頻度が高いとはいえない。3個の配線間のパターンを接続次数にしたがって分類する。3個の配線の次数をそれぞれ $d_a$ ,  $d_b$ ,  $d_c$ と表す。

$$d_a + d_b + d_c = \text{偶数},$$

$$d_a = 0, 1, 2, \quad d_b = 0, 1, 2, \quad d_c = 0, 1, 2$$

なので、可能な $(d_a, d_b, d_c)$ の組合せは下記の通りである。

$$(0, 0, 0), (0, 1, 1), (1, 1, 2), (2, 2, 2)$$

上記のうち $(0, 0, 0)$ に対して $CA$ は生じない。これらの次数型に対して、ベンチマーク回路のレイアウトにおいて実際に出現した一部を図3に示す。 $(1, 1, 2)$ 型のほとんどは(b)であり、 $(2, 2, 2)$ 型では(d)が比較的多く見られた。

表2は、LN45-s838の金属層L1, L2, L3における3個の配線の次数の型とその個数を示したものである。他の回路においても規模にあまり関係なく同様の傾向であった。

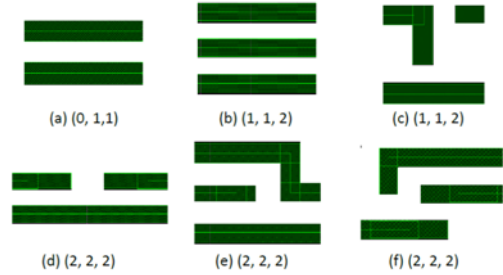


図3 次数の型レイアウトパターンの例

Fig. 3. Examples of degree types and its actual layouts.

表2 LN45-s838における次数の型とその個数

Table II. Degree types and its appearance for LN45-s838.

type	L1	L2	L3	L1+L2+L3	ratio
(0, 1, 1)	752	354	521	1627	0.387381
(1, 1, 2)	245	1367	886	2498	0.594762
(2, 2, 2)	4	58	13	75	0.017857
total	1001	1779	1420	4200	1

表2のうち $CA$ の多重カウントを生じる型は $(2, 2, 2)$ の約1.79%とみなしてよい。例えば、 $CA$ を生じさせる部分が100箇所であると仮定する。このうち98.21箇所では多重カウントは生じないので、故障カバレッジとして $FC_1()$ を用いても $FC_2()$ を用いても同一となり、これを99%とする。残りの1.79箇所について、多重カウントが生じ、故障カバレッジの計算に差が生じる。

テストパターン $T_{ab}$ が印加されると、

$$FC_1(T_{ab}) = 0.9821 \times 0.99 + 0.0179 \times 0.496 = 0.9811574$$

$$FC_2(T_{ab}) = 0.9821 \times 0.99 + 0.0179 \times 0.489 = 0.9810321$$

となる。上記の差は0.0001253であり、実用上問題とはならない。

テストパターン $T_{ab}$ ,  $T_{bc}$ が印加されたときには以下のように計算される。

$$FC_1(T_{ab}, T_{bc}) = 0.98991766$$

$$FC_2(T_{ab}, T_{bc}) = 0.98966706$$

上記の差は0.0002506であり、実用上問題とはならない。

テストパターン $T_{ab}$ ,  $T_{bc}$ ,  $T_{ca}$ が印加されたときには以下のように計算される。

$$FC_1(T_{ab}, T_{bc}, T_{ca}) = FC_2(T_{ab}, T_{bc}, T_{ca}) = 1.0$$

最小線幅および最小配線間隔がともに $width$ のとき、1辺 $3 \times width$ 以下の正方形の異物に対してオープン $CA$ の多重カウントは生じない。

#### 5. おわりに

従来のブリッジ故障カバレッジ計算法は厳密な計算法と比べ実用上問題ない程度の差を生じ、若干悲観的な値を与えることを示した。

謝辞

有益なご議論を頂いた日本大学生産工学部新井雅之准教授に感謝します。

参考文献

- [1] 新井雅之, 犬山慎吾, 岩崎一彦, “クリティカルエリアに基づくブリッジ故障テスト生成の高速化に関する一検討,” 電子情報通信学会ディペンダブルコンピューティング研究会, DC2015-17, pp. 7-12, 2015年6月。