

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究概要 . . . . .	1
<b>第2章 準備</b>	<b>3</b>
2.1 定義 . . . . .	3
<b>第3章 BIST 故障検出能力強化手法</b>	<b>7</b>
3.1 マルチサイクルテスト . . . . .	7
3.2 中間観測技術 . . . . .	8
3.3 制御テストポイント (CP) 挿入技術 . . . . .	9
<b>第4章 組込み自己診断 (BISD)</b>	<b>12</b>
4.1 BISD の構成要素 . . . . .	12
4.2 BISD 機構の基本動作 . . . . .	13
4.3 署名の生成・比較 . . . . .	14
4.4 故障診断能力向上 . . . . .	15
<b>第5章 評価実験</b>	<b>17</b>
5.1 評価実験方法 . . . . .	17
5.2 評価指標 . . . . .	17
5.3 各 BISD の評価 . . . . .	18
5.4 考察 . . . . .	21
<b>第6章 まとめ</b>	<b>22</b>
<b>謝辞</b>	<b>23</b>
<b>参考文献</b>	<b>24</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究概要

近年、先進自動運転技術の急速な進展に伴い、車載システムの機能安全への要求が高まっている。自動車の高度な機能安全性を確保するために車載コンピューターに積込まれる集積回路の長期的な高信頼性が求められる。そのため、出荷後の集積回路において経年劣化により引き起した故障を高品質で検査するテスト技術、および故障の種類を高精度に特定できる診断技術が重要な役割を果たしている。

フィールド上で集積回路の故障の有無を判断するために、「組み込み自己テスト (Built-In Self Test: BIST)」が挙げられる。さらに信頼性を向上させるために、BIST 機構を拡張して、テストで検出した故障箇所の推定を行う「組み込み自己診断 (Built-in Self Diagnosis: BISD)」の開発が進められている [1][2]。車載システム向けの機能安全規格 ISO26262 のセーフティゴールを満たすには、故障の有無を検査するテスト機構 BIST の故障検出能力を強化することが求められる。先行研究 [7] では、従来の BIST にパターンごとに複数回のテストを実行するマルチサイクルテスト方式とその故障検出能力を最大化させるためのテスト容易化設計技術（中間観測技術と制御ポイント挿入技術）を提案した。提案手法により故障がより効率的に検出できた一方、フィールドでの故障診断能力はどのような影響を受けているのかは課題となる。

そこで、本研究の目的は、フィールドで故障を高精度に診断できる組み込み自己診断機構 BISD を開発することとなる。目標とは、先行研究で提案した故障検出能力強化手法を適用した BISD において、故障診断能力への影響を評価する。具体的には、「通常のシングルサイクル BISD」、「マルチサイクルテストを導入した BISD」、「中間観測技術を導入した BISD」及び「制御テストポイント (CP) 挿入技術を導入した BISD」の四つの組み込み自己診断機構に対して、同じテストデータを与える場合の故障診断能力を評価する。

本論文は以下の章で構成される。第1章では、研究の背景および目的について述べる。第2章では、本研究で使用する用語について述べる。第3章では、BIST における故障検出能力強化手法について述べる。第4章では、BISD とその故障診断能力向上について述べる。第

5 章では，故障検出能力強化手法を導入したマルチサイクルテストの導入による，BISD の故障診断能力への影響を評価する．第 6 章では，本研究のまとめを述べる．

## 第2章 準備

### 2.1 定義

本章では，本論文で使用する各用語について取り扱う [4] [5] [6].

#### 定義 2.1 テスト

回路に入力パターンを加え，それに対する回路の出力パターンや出力応答系列を観測し，回路に故障が存在するか否かを調べること．

#### 定義 2.2 テストパターン

被検査回路の外部入力線に，ある論理値を印加すると，回路内部の全信号線の論理値が決定する．この時，印加した論理値の組み合わせをテストパターンという．また，複数のテストパターンの集合をテスト集合という．

#### 定義 2.3 故障モデル

あらかじめ起こり得る故障を論理的な振る舞いに注目してモデル化したものを故障モデルという．本論文で取り扱う故障モデルはすべて，回路に一つだけ故障を仮定する単一故障であるとする．

#### 定義 2.4 縮退故障

信号線の論理値が 0 または 1 に固定される故障を縮退故障という．故障箇所を通る論理値が 0 に固定される縮退故障を 0 縮退故障といい，論理値が 1 に固定される縮退故障を 1 縮退故障という．このとき，入力論理値に関わらず出力論理値は縮退された値となる．本稿では，取り扱う故障モデルは縮退故障とする．

#### 定義 2.5 故障リスト

被検査回路内における，故障が発生している信号線番号と故障情報の組み合わせの一覧を故障リストという．

#### 定義 2.6 論理シミュレーション

計算機上に仮想的な論理回路を再現し、外部入力線にテストパターンを印加することで、外部出力線の論理値を求めることを、論理シミュレーションという。

### 定義 2.7 故障シミュレーション

故障リストを用いて、被検査回路内の任意の信号線に故障を発生させると、故障時の回路の挙動について調べることが可能である。正常な回路と、故障が発生した回路の2つを用いて論理シミュレーションを実行し、得られた論理値を比較することを故障シミュレーションという。また、故障リストに含まれるすべての故障に対して故障シミュレーションを実行した結果、検出できた故障の割合を故障検出率という。

### 定義 2.8 スキャンテスト

今日の大規模集積回路のテスト容易化設計にはスキャン設計が適用される。図にスキャン設計の例を示す。スキャン設計では、すべてのFFが、スキャンモード時にシフトレジスタとして動作するように設計する。赤色で示されている部分がスキャンのために付加された回路である。mode=0 とすると、各FFの入力は組合せ回路部の出力と接続され、通常動作(本来の動作)をする。mode=1 とすると、SI(Scan-In)を入力、SO(Scan Out)を出力とするシフトレジスタとして動作する。この回路により、すべてのFFの値は組合せ回路部とは独立して自由に制御・観測できるようになる。

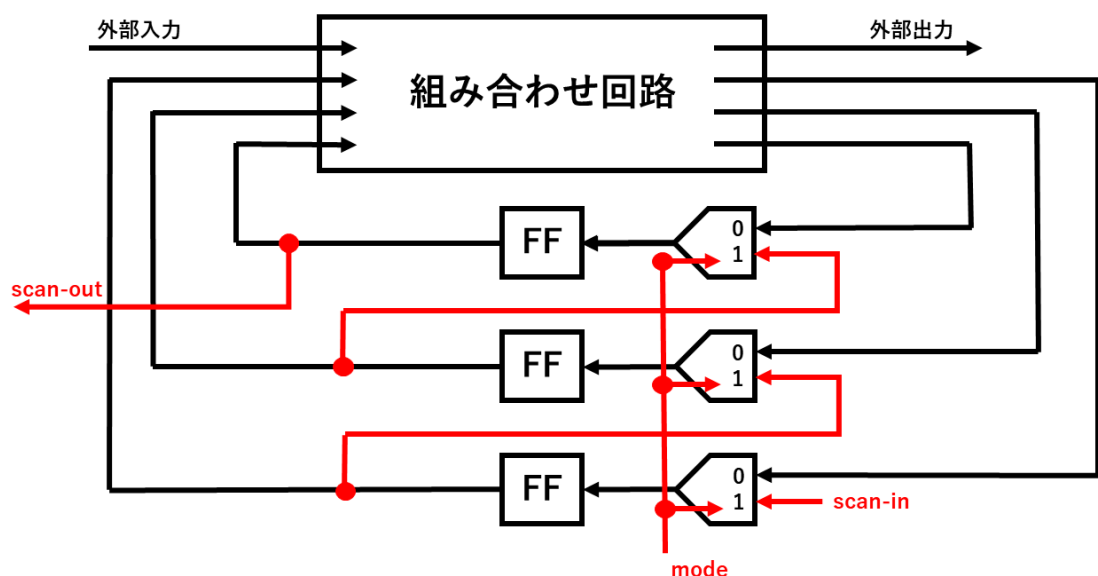


図 2.1 スキャンテスト設計

このスキャン設計された回路に対するテスト実行は次のようになる。ここでFF数をNと

する。mode=1 として、SI から N ビットの系列を入力し、FF の値を設定する (スキャンイン)。mode=0 として、外部入力からテストパターンを入力し、1 クロックを進める (キャプチャ)。組合せ回路部の出力の一部は外部出力で観測され、残りは FF に記憶される。mode=1 として、N クロックを進める (スキャンアウト)。FF に記憶された組合せ回路部の出力を SO から N ビットの系列として観測する。

### 定義 2.9 組込み自己テスト (Built-in Self Test: BIST)

集積回路内部に、フィールドテスト環境を組込んだ回路を組込み自己テスト機構という。組込むフィールドテスト環境は、「テストパターン生成回路」、「被検査回路」、「署名解析器」の3つである。これらのテスト用回路を用いて、集積回路単体で故障の有無の判定を行う。

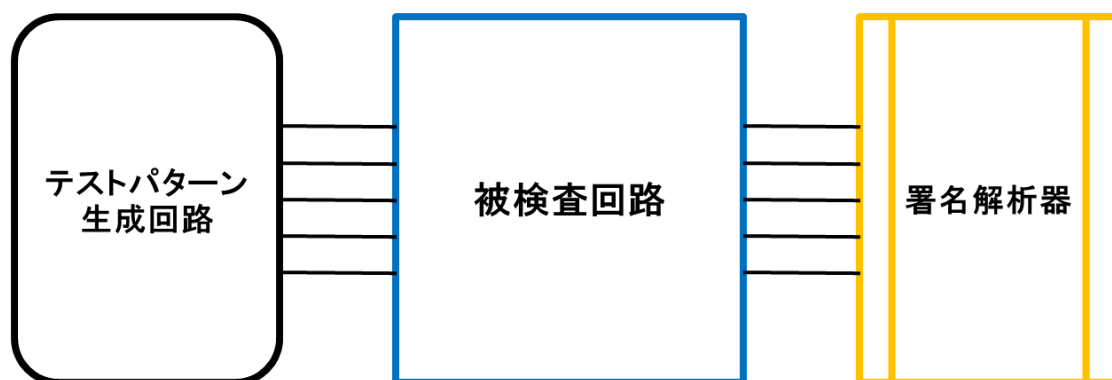


図 2.2 BIST 機構

### 定義 2.10 故障検出率

テストパターン (系列) 集合で、最初に想定した故障のうちどれだけの故障が検出されるかを示す比率 (%) を故障検出率と呼ぶ。

$$\text{故障検出率} = \frac{\text{検出された故障数}}{\text{総故障数}} \times 100(\%)$$

### 定義 2.11 故障診断

テストによって不良と判定された集積回路について、集積回路内部の故障箇所の推定を行うことを故障診断という。故障診断は被検査回路に対してテストを行い、得られた出力値と

被疑故障に関するシミュレーション結果とを比較することで行う。シミュレーション結果と被検査回路から得られた出力値が一致する場合、故障箇所の推定を行うことが可能となる。

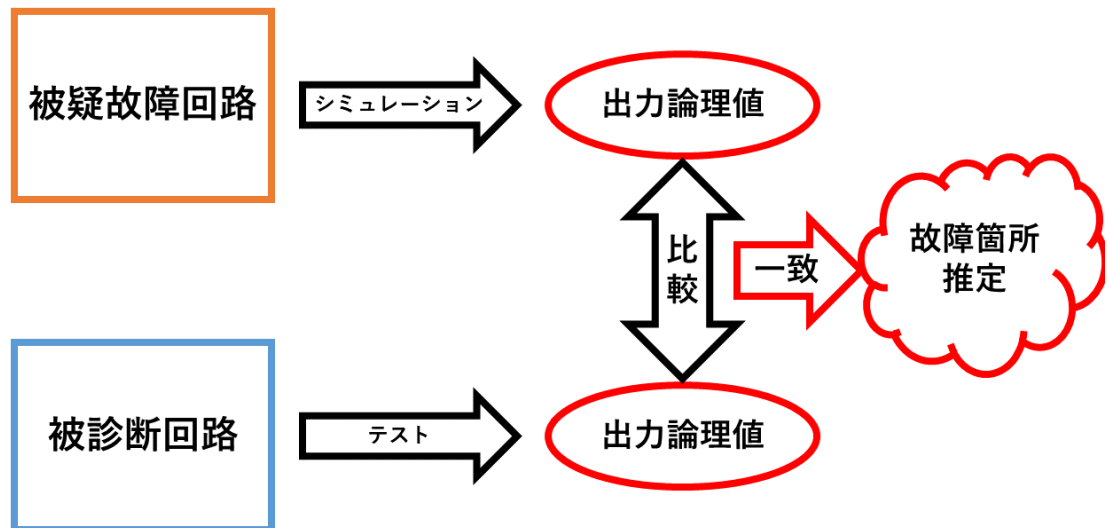


図 2.3 故障診断

## 第3章 BIST 故障検出能力強化手法

### 3.1 マルチサイクルテスト

ここでは、マルチサイクルテストについて説明する。

スキャンテストでは、FF 数  $N$  に比例したテスト実行時間を要することが課題である。そこで、キャプチャクロックを複数回実行するマルチサイクルテストが提案された。マルチサイクルテストとは、キャプチャされたパターン系列を次のテストの入力として再利用する方法である。[7]

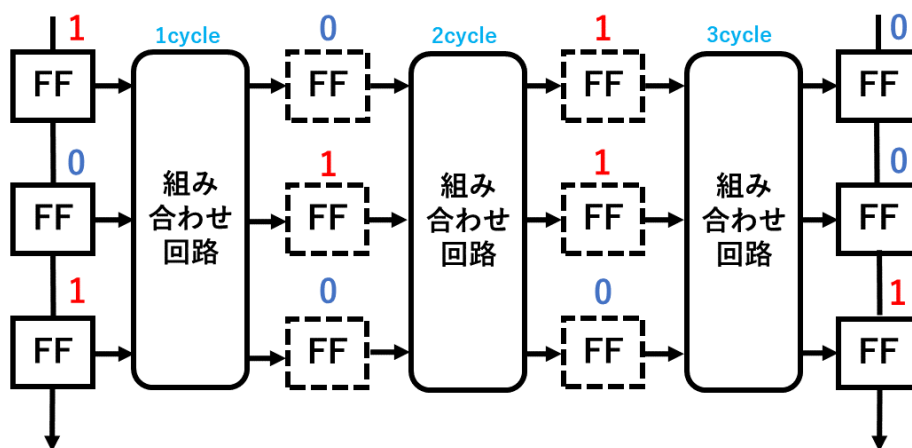


図 3.1 マルチサイクルテスト

マルチサイクルテストでは、1 回のスキャンイン動作で複数個のテストパターンでのテストを実行することができる。そうすることで、多くの故障を励起する機会が与えられ、1 回のスキャンイン動作に対する故障検出能力の向上ができるため、テスト実行時間の短縮が期待される。



### 3.2 中間観測技術

マルチサイクルテストにおいて、励起された故障が長い伝搬経路のために、観測点まで到達できずに消失してしまうことで故障検出率が向上しない問題がある。

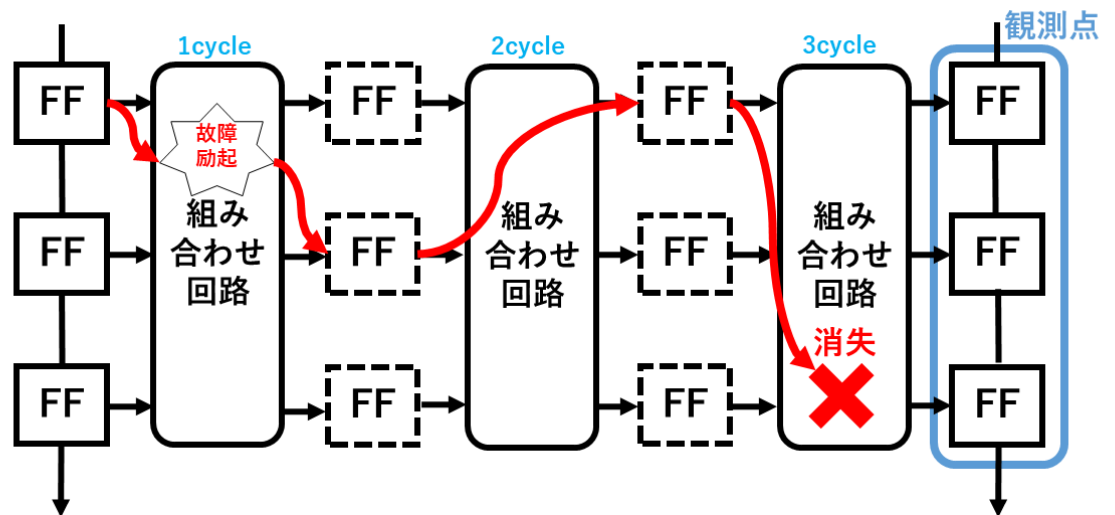


図 3.2 故障信号消失

この問題の解決策として、「中間観測技術」が提案されている。「中間観測技術」は、一部のフリップフロップを毎サイクルで観測することにより、故障信号が消失するまでに故障検出を可能にしたものである。[3]

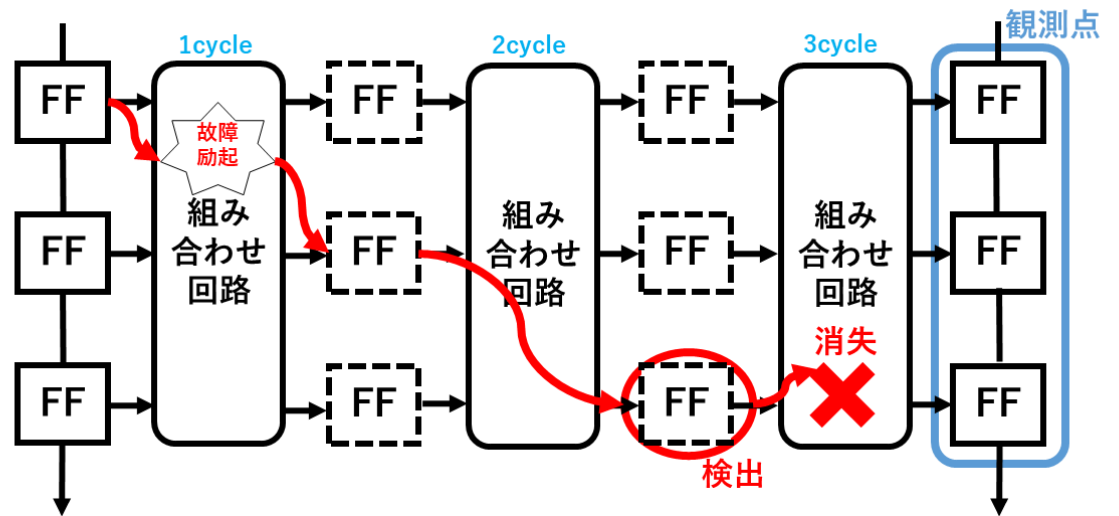


図 3.3 中間観測技術

### 3.3 制御テストポイント (CP) 挿入技術

マルチサイクルテストにおいて、キャプチャサイクルを経ることで被検査回路の論理ゲートの入出力部が固定値になり、新たな故障の検出が困難になる問題がある。

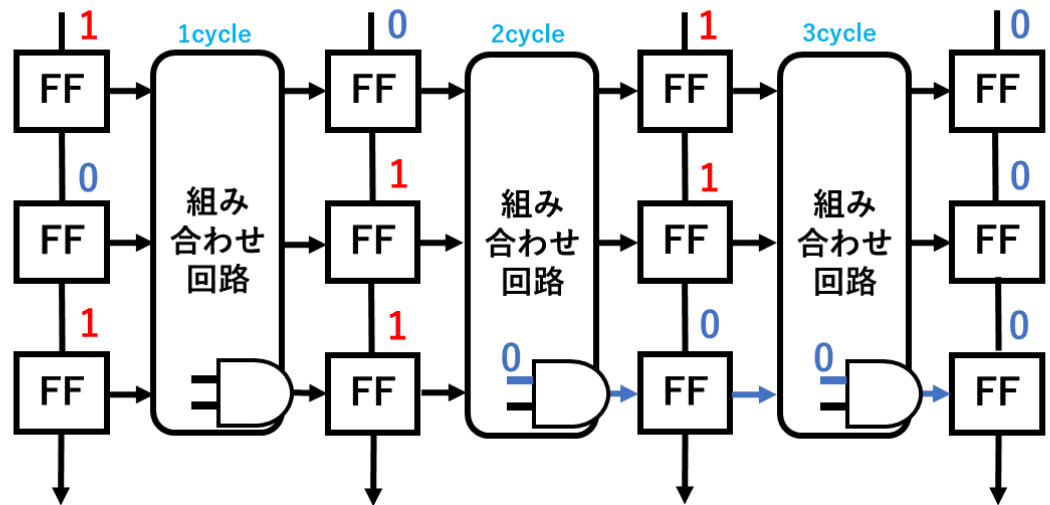


図 3.4 論理値固定

この問題の解決策として、「制御テストポイント (CP) 挿入技術」が提案されている。「制御テストポイント (CP) 挿入技術」は、固定値となることで故障信号の伝搬や励起を阻害している箇所に直接論理値を割り当てる制御テストポイント (CP) を挿入することである。[4]

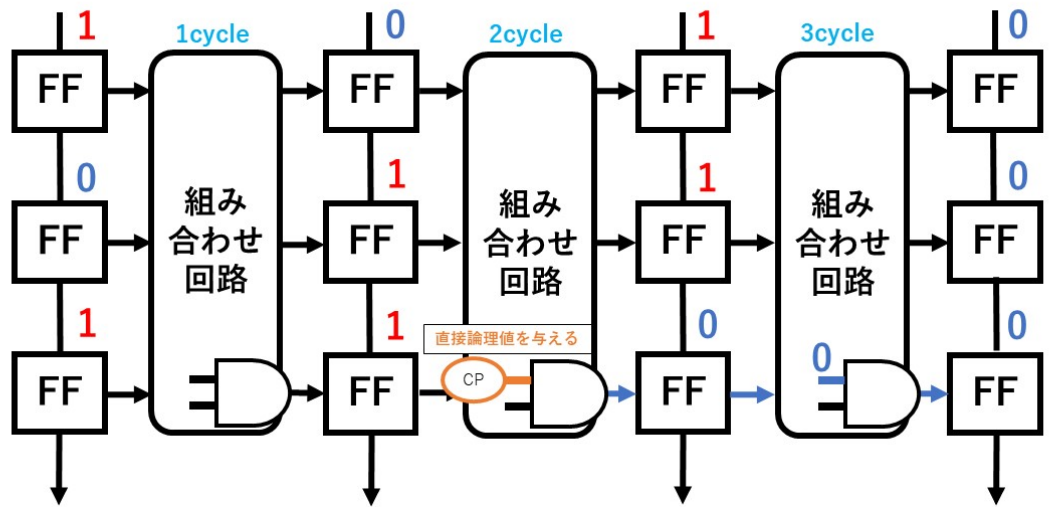


図 3.5 制御テストポイント (CP) 挿入技術

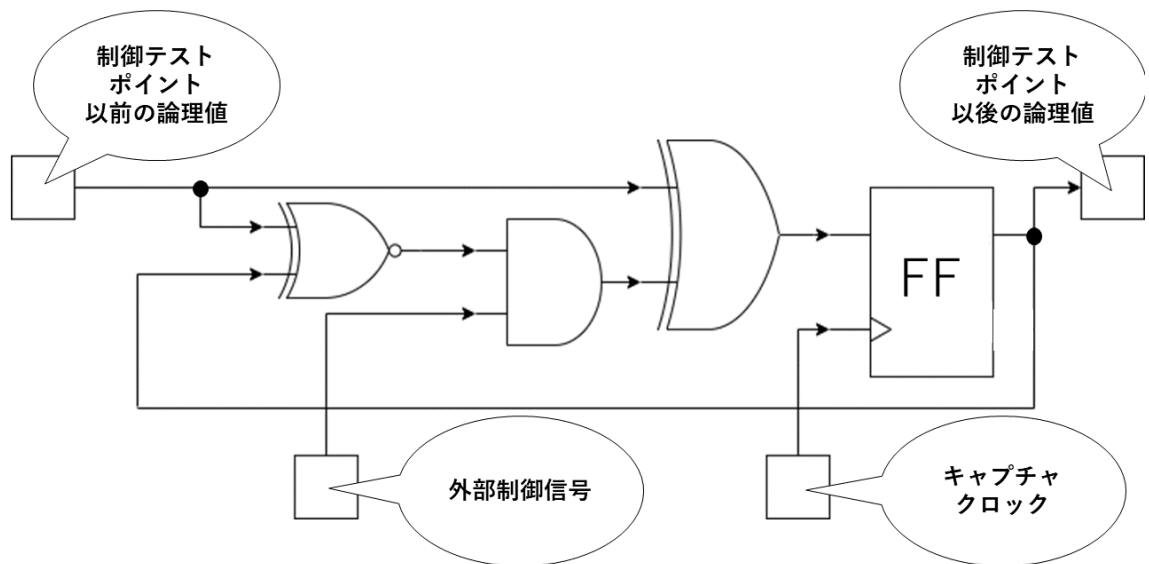


図 3.6 CP 制御回路

## 第4章 組込み自己診断 (BISD)

ここでは, BIST を拡張した組み込み自己診断 (Built-In Self Diagnosis: BISD) 機構について説明する [5][6].

### 4.1 BISD の構成要素

**要素 1)** ランダムパターン系列を生成するテストパターン生成回路

**要素 2)** テストパターン毎に被検査回路 (CUD) の故障検出情報であるパス/フェイル情報を生成する回路

**要素 3)** テストパターン毎のパス/フェイル情報を圧縮してテストパターン系列に対する診断用署名を解析する回路

**要素 4)** 被疑故障毎の被疑故障署名を格納するメモリ

**要素 5)** 診断用署名と被疑故障署名を比較し, 故障箇所の推定を行う回路

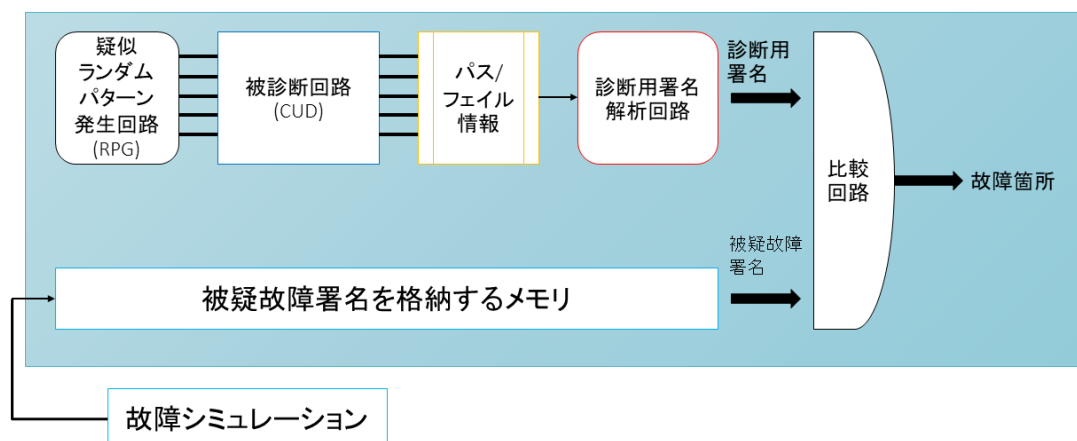


図 4.1 BISD 機構

## 4.2 BISD 機構の基本動作

- (動作 1) テスト生成回路およびリシード機構を利用して縮退故障診断能力の高いテストパターンを生成する。
- (動作 2) テストパターンに対して被診断回路のパス/フェイル情報を生成する。
- (動作 3) 診断用署名生成器を利用して、被診断回路のパス/フェイル情報を圧縮する。
- (動作 4) 所定のテストパターン数に対して、(動作 1) から (動作 3) を繰り返し実行して、被診断回路に対する診断用署名を生成する。
- (動作 5) 故障候補の指摘器を利用して、診断用署名と被疑故障署名を比較することで、情報が一致したアドレス情報から被疑故障を指摘する。

BISD では回路単体でテストパターンを発生させて故障診断を実行するため、外部テストの必要がなくコスト面での利点がある。また、フィールド上で故障箇所の推定が可能なため経年劣化にも対応することが可能である。

### 4.3 署名の生成・比較

ここでは、署名の作成及び比較について説明する [5][6]。BISD では、被検査回路から得られたパス/フェイル情報から診断用署名を生成するために、診断用署名解析器を利用する。生成された診断用署名と被疑故障署名を署名比較回路を利用して比較し、それらが一致するとき被診断回路の故障箇所を推定することが可能となる。比較に使用する被疑故障署名はあらかじめ故障シミュレーションを実行することで作成し、メモリ内に格納する。次に、被疑故障署名の生成法および診断用署名との比較法について述べる。被疑故障署名の生成および診断用署名との比較について図に示す。

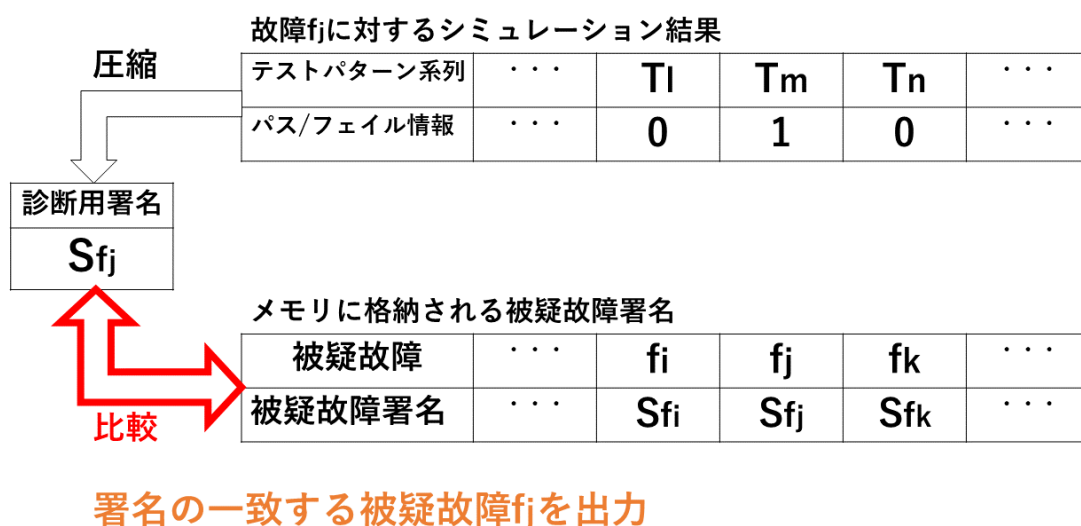


図 4.2 署名の生成・比較

故障診断においては、 $I$  個のテストパターンからなるテストパターン系列  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_I$  が与えられる。また、故障リストは  $J$  個の仮定故障からなるものとする。まず、仮定故障  $f_j$  に対応する被疑故障署名  $S_{f_j}$  を求めるために、故障シミュレーションを実行する。故障シミュレーションによってテストパターン  $t_i$  における故障  $f_j$  をもつ回路のパス/フェイル情報  $pf_{ji} = PF(f_j, t_i)$  を求める。 $t_i$  が縮退故障  $f_j$  を検出するなら  $pf_{ji} = 1$ 、検出しないなら  $pf_{ji} = 0$  とする。次に、 $I$  個のテストパターンからなるテストパターン系列に対して求めたパス/フェイル情報から、被疑故障署名  $S_{f_j} = SA(pf_{j1}, \dots, pf_{ji}, \dots, pf_{jI})$  を求める。同様の処理を繰り返すことで、 $J$  個の仮定故障に対して  $J$  個の被疑故障署名  $S_{f_1}, \dots, S_{f_j}, \dots, S_{f_J}$  を求める。求められた  $J$  個の被疑故障署名  $S_{f_1}, \dots, S_{f_j}, \dots, S_{f_J}$  はメモリに格納されているとする。次に、テスト

パターン毎の被診断回路のパス/フェイル情報  $pf_i = PF(CUD, t_i)$  を求める.  $t_i$  が被診断回路の故障を検出するならば  $pf_i = 1$ , 検出しないならば  $pf_i = 0$  とする.  $I$  個のテストパターン系列のパス/フェイル情報から診断用署名  $S_{CUD} = SA(pf_1, \dots, pf_i, \dots, pf_I)$  を生成する. 最後に, 故障候補を指摘するために,  $S_{CUD}$  と  $S_{f_1}, \dots, S_{f_j}, \dots, S_{f_J}$  を順次比較する. もし,  $S_{CUD} = S_{f_j}$  ならば, 被診断回路に縮退故障  $f_j$  が存在すると推定する.

#### 4.4 故障診断能力向上

マルチサイクルテストでは, 1 回のスキャンイン動作で複数個のテストパターンでのテストを実行することができる. これにより, 通常のシングルサイクルテストで検出不可の故障を検出することができる. この特徴を活用することで, テスト生成機構を改良せず, 初期パターンに対して適切なサイクル数で診断対象回路を動作させるだけで, 区別不可の故障を区別可能にすることが考えられる.

しかし, マルチサイクルテストには, 「故障信号消失」と「論理値固定」の2つの問題点がある. そのため, 通常のシングルサイクルテストで検出可能な故障を検出しないことが起きる. この問題を解決するために「中間観測技術」と「制御テストポイント (CP) 挿入技術」を導入する. そうすることで, 多くの故障を励起する機会が与えられ, 1 回のスキャンイン動作に対する故障検出能力の向上ができる. そのため, BISD に故障検出能力強化手法を導入したマルチサイクルテストを導入することで, 故障診断能力が向上することが期待される. 図において, テストパターン系列  $t_1, t_2, t_3$  が故障  $f_1, f_2, f_3$  を検出できる場合「1」検出できない場合「0」とする. シングルサイクル BISD では, 故障  $f_1$  を検出できるテストパターン系列は  $t_1, t_2$ , 故障  $f_2$  を検出できるテストパターン系列は  $t_3$ , 故障  $f_3$  を検出できるテストパターン系列は  $t_1, t_2$  となる. このことから, 故障  $f_1$  と  $f_3$  を検出できるテストパターン系列は  $t_1, t_2$  の2つであるので, 故障  $f_1, f_3$  は区別不可能である. 次に, 故障  $f_1, f_3$  に対してマルチサイクルテストを実行する. 2 サイクル目において, テストパターン系列  $t_1@2cycle, t_2@2cycle, t_3@2cycle$  が生成される. 故障  $f_1$  を検出できるテストパターン系列は  $t_1@2cycle, t_3@2cycle$ , 故障  $f_3$  を検出できるテストパターン系列は  $t_1@2cycle, t_2@2cycle$  となる. よって, 2 サイクル目において, 故障  $f_1, f_3$  は区別可能である. 同様に, 3 サイクル目においても, 故障  $f_1, f_3$  は区別可能である.



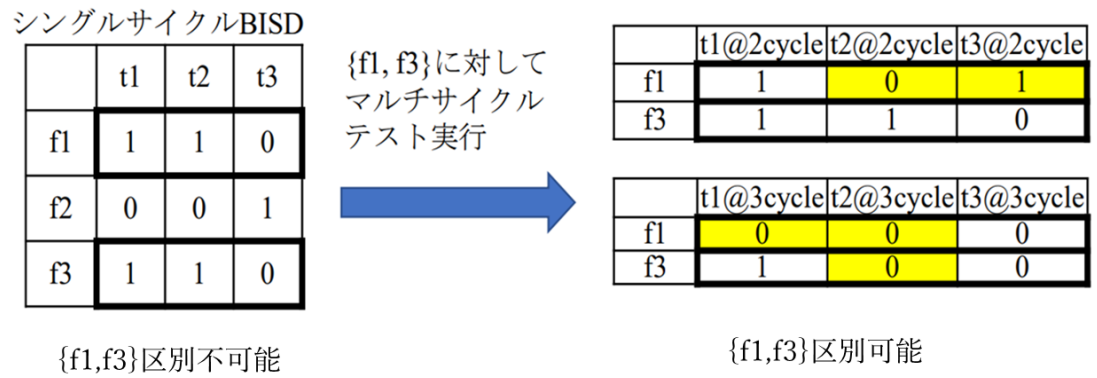


図 4.3 マルチサイクルテストの故障診断能力向上

本論文において、組込み自己診断において、故障検出能力強化手法の導入による、故障診断能力への影響を評価する。

## 第5章 評価実験

### 5.1 評価実験方法

評価実験では、「シングルサイクル BISD」,「マルチサイクルテストを導入した BISD」,「中間観測技術を導入した BISD」及び「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」の四つの組み込み自己診断診断機構に対して,同じテストデータを与えた場合の故障診断能力を評価する. 提案手法を評価するために,提案手法を C 言語を用いて実装し評価実験を行った.「マルチサイクルテストを導入した BISD」,「中間観測技術を導入した BISD」及び「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」では,キャプチャサイクルを最大5サイクルとする縮退故障テストを実装し,ISCAS89のベンチマーク回路を用いた. 16ビット LFSR により生成された 1000 パターンを使用した.

### 5.2 評価指標

テストパターン (系列) 集合で,最初に想定した故障のうちどれだけの故障の箇所が推定できるかを示す比率 (%) を故障診断率と呼ぶ.

故障ペア: 検出された故障を組み合わせ得たペア.

$$\text{故障診断率} = \frac{\text{区別できる故障ペア数}}{\text{総故障ペア数}} \times 100(\%)$$

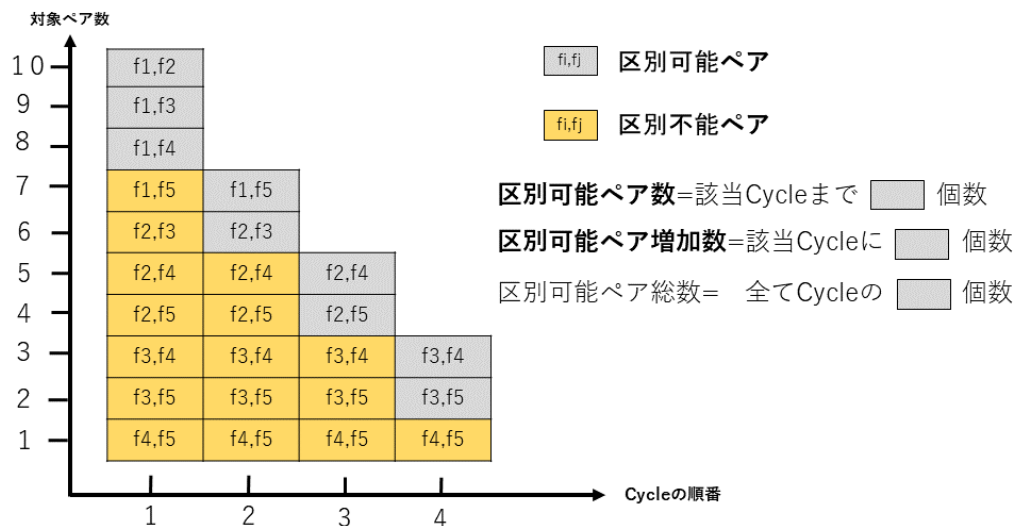


図 5.1 評価指標に関するグラフ

### 5.3 各 BISD の評価

表 5.1 では、通常のシングルサイクル BISD の実験結果を示す。表 5.2 では、マルチサイクルテストを導入した BISD の実験結果を示す。表 5.3 では、中間観測技術を導入した BISD の実験結果を示す。表 5.4 では、制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD の実験結果を示す。表 5.5 では、「シングルサイクル BISD(シングルサイクル)」「マルチサイクルテストを導入した BISD(マルチサイクル)」「中間観測技術を導入した BISD(中間観測技術)」及び「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD(CP 挿入技術)」の故障診断率を示す。また、表 5.5 において「マルチサイクルテストを導入した BISD(マルチサイクル)」「中間観測技術を導入した BISD(中間観測技術)」及び「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD(CP 挿入技術)」では 5 サイクル時の故障診断率を示す。

表 5.1 シングルサイクル BSD

回路名	対象故障ペア数	区別可能故障ペア数	区別不可能故障ペア数
s382	67896	67774	122
s1423	1008910	1008550	360
s5378	3638253	3636471	1782
s9234	9961416	9954593	6823
s13207	21232386	21221879	10507
s15850	41555286	41547645	7641
s38417	352331785	352316341	15444
s38584	489610278	489580540	29738
平均	114925776	114916724	9052

表 5.2 マルチサイクルテストを導入した BSD

回路名	対象故障ペア数	区別可能故障ペア数				
		cycle1	cycle2	cycle3	cycle4	cycle5
s382	67896	67774	67777	67747	67692	67632
s1423	1008910	1008550	1008492	1008508	1008515	1008523
s5378	3638253	3636471	3635709	3622275	3618566	3609927
s9234	9961416	9954593	9956288	9953079	9954370	9955746
s13207	21232386	21221879	21213585	21186711	21171997	21156837
s15850	41555286	41547645	41548078	41545733	41545035	41542557
s38417	352331785	352316341	352321315	352323533	352322035	352322691
s38584	489610278	489580540	489540076	489451316	489299550	489122750
平均	114925776	114916724	114911415	114894862	114873470	114848331

表 5.3 中間観測技術を導入した BISD

回路名	対象故障ペア数	区別可能故障ペア数	区別可能故障ペア増加数			
	cycle1		cycle2	cycle3	cycle4	cycle5
s382	67896	67774	20	0	0	0
s1423	1008910	1008550	58	30	9	16
s5378	3638253	3636471	375	48	61	3
s9234	9961416	9954593	3321	892	161	134
s13207	21232386	21221879	4667	587	585	388
s15850	41555286	41547645	2085	314	79	36
s38417	352331785	352316341	5604	3504	463	80
s38584	489610278	489580540	4692	1436	856	378
平均	114925776	114916724	2603	851	277	129

表 5.4 制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD

回路名	対象故障ペア数	区別故障可能ペア数	区別可能故障ペア増加数			
	cycle1		cycle2	cycle3	cycle4	cycle5
s382	66795	66674	22	4	0	0
s1423	1008910	1008551	90	22	11	17
s5378	4591965	4589619	1088	67	37	6
s9234	7751953	7746587	3393	349	41	86
s13207	25722378	25709398	8817	536	533	303
s15850	34640326	34633253	3323	161	62	49
s38417	355151226	355135099	7123	482	302	158
s38584	484460628	484425642	9653	2239	1287	1032
平均	114174273	114164353	4189	483	284	206

表 5.5 故障診断率の比較

回路名	シングルサイクル	マルチサイクル	中間観測技術	CP 挿入技術
s382	99.820	99.611	99.849	99.857
s1423	99.964	99.961	99.975	99.978
s5378	99.951	99.221	99.964	99.975
s9234	99.931	99.943	99.976	99.980
s13207	99.950	99.644	99.979	99.989
s15850	99.981	99.969	99.987	99.989
s38417	99.995	99.997	99.998	99.997
s38584	99.993	99.900	99.995	99.995
平均	99.948	99.781	99.965	99.970

## 5.4 考察

「シングルサイクル BISD」と「中間観測技術を導入した BISD」の比較では、サイクル数の増加に伴い、区別可能故障ペア数が増加することが確認できた。s15850 回路では、「中間観測技術」の効果としてシングルサイクルに比べて、新たに 3595 個の故障が区別可能となった。また、サイクルの増加に伴い、区別可能故障ペア増加数が減少し、診断可能故障ペアが収束した。

「中間観測技術を導入した BISD」と「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」の比較では、「中間観測技術を導入した BISD」比べて「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」が、小規模の回路において検出できる故障ペアの割合が増えていることが確認できた。s15850 回路において、「中間観測技術を導入した BISD」の故障診断率は 99.987%、「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」の故障診断率は 99.989%である。

しかし、大規模の回路では検出できる故障ペアの割合の変化が、小規模の回路と比べて少ないことが確認できた。「制御テストポイント (CP) 挿入技術と中間観測技術を導入した BISD」では、「中間観測技術を導入した BISD」に比べて、サイクルの増加に伴う区別可能故障ペア数増加数の減少が少なくなっていることが確認できた。

## 第6章 まとめ

本論文では、故障検出能力強化手法の導入による、故障診断能力への影響を評価した。結果から、マルチサイクルテストを導入した場合は、特定のサイクル数や特定の回路で故障診断能力が向上することが確認できた。次に、「中間観測技術」の導入による診断能力の向上が確認できた。さらに制御テストポイント (CP) 挿入をすることで、診断能力は、より向上することが確認できた。しかし、大規模回路においては、制御テストポイント (CP) 挿入による故障診断能力の向上は、小規模な回路に比べて変化が少ないことが確認できた。結論として、故障検出能力強化手法の導入が、BISD の故障診断能力の向上に効果的であることが確認できた。

今後の課題として、今回の評価に基づいて、故障診断能力の向上に貢献する「中間観測技術」と「制御テストポイント (CP) 挿入技術」を考慮した診断容易化技術の提案を行っていく。

## 謝辞

本論文の作成に関し、詳細なるご検討、貴重な御教示を頂きました本学高橋寛教授および王森レイ講師に深く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、懇篤な御指導、御鞭撻を賜りました本学甲斐博准教授に深く御礼申し上げます。

また、審査頂いた本学甲斐博准教授、遠藤慶一准教及び宇戸寿幸准教授に深く御礼申し上げます。

最後に、多大な御協力と貴重な御助言を頂いた本学工学部情報工学科計算機システム研究室の諸氏に厚く御礼申し上げます。



## 参考文献

- [1] M. Elm, H. Wunderlich, "BISD:Scan-Based Built-In Self-Diagnosis," Proc.DATE, pp.12431248, 2010.
- [2] A. Cook et.al., "Advanced diagnosis: SBST and BIST integration in automotiveE/E architectures," Proc. DAC, pp.1-6, DOI:10.1145/2593069.2602971, 2014.
- [3] S. Wang, H. T. Al-Awadhi, S. Hamada, Y. Higami, H. Takahashi, H. Iwata, and J. Matsushim, "Structure-Based Methods for Selecting Fault-Detection Strengthened FF under Multi-cycle Test with Sequential Observation," Proc. IEEE Asian Test Symposium, Hiroshima, pp. 209-214, Nov. 2016. DOI: 10.1109/ATS.2016.40
- [4] 青野智己"可制御性向上を考慮した故障検出強化法に関する研究" 令和2年1月29日
- [5] 矢野郁也"組込み自己診断の高効率化法と高精度化法に関する研究" 平成29年2月13日
- [6] 松田 優大"誤り出力数を考慮した組込み自己診断用テスト生成法に関する研究" 平成31年2月13日
- [7] Y. Wang S. Wang Y. Higami H. Kai H. Takahashi "マルチサイクルテストの導入による組込自己診断の故障診断能力評価"