

故障活性化率向上のためのドントケア判定及び割当て法

日大生産工(院) ○ 北尾 隆志 日大生産工(院) 山崎 紘史
日大生産工 細川 利典 京産大 吉村 正義

1. はじめに

従来, 大規模集積回路(VLSI: Very Large Scale Integrated circuits)のテストには縮退故障モデルや遷移故障モデルが広く用いられている. これらの故障モデルは取り扱いが容易でかつ, 多くの欠陥が縮退故障用のテストや遷移故障用のテストで検出できることなどが利点として挙げられる[1, 2].

しかしながら, 近年の VLSI の製造技術の進歩に伴い, 回路の大規模化, 高速化, 複雑化が進み, それに伴って故障モデルも複雑化している. それに伴い, 従来取り扱われてきた縮退故障モデルや遷移故障モデル以外にも, ブリッジ故障モデル[3]やオープン故障モデル[4-6], 微小遅延故障モデル[7]のようなさまざまな故障モデルに対してもテストを行う必要がある. しかしながら, テスト生成においては各故障モデルに対してテスト生成を行う必要があるため, 故障モデルの増加に伴いテストパターン数が増加するという問題点があげられる. そのため, テストパターン数を増加させることなくさまざまな故障モデルを検出できる高品質なテスト集合の生成が望まれる.

高品質なテスト生成手法の1つとしてn回検出テスト生成[8, 9]が知られている. n回検出テストとは, 回路中の各故障が, 異なる n 個以上のテストパターンで検出されるようにテスト集合を生成し, テストを行うことである. 異なるテストパターンで故障を検出することで, 各故障箇所から様々なパスを活性化できる可能性が上がり, テスト品質が向上する. n回検出テストにおいて, 縮退故障モデルを対象として, できるだけ多くの故障伝搬経路を活性化させるような技術を組み込んだ故障活性化率指向 n 回検出テスト生成法(FSOD: Fault Sensitization Coverage Oriented n-Detection Test Generation)が提案されている[10]. 文献[10]では, 縮退故障に対して様々な経路を活性化するようにテスト生成を行うことで, 様々な故障モデルの検出条件を満たす可能性が上がり, 実際にブリッジ故障に対するテスト品質の向上に効果的であることが報告されている.

本論文では文献[10]で述べられている, 「ある故障に対して活性化される信号線数が多いほど, テスト品質も向上する」という考えに基づき, テスト品質評価尺度として故障活性化率を採用する. 抵抗性オープン故障, 微小遅延故障など2パターンテストが必要な故障に対して高品質なテストパターンを生成するために, 遷移故障を検出するようなテストパターンにおける故障活性化率を向上させることを目的とする.

本論文では, 遷移故障に対して生成されたテスト集合において, 各故障の故障活性化率が保証されるようにドントケア判定を行い, さらに判定されたドントケアに対して, 故障活性化率が向上するように0または1の値割当てを行い, 最終的なテスト集合を生成する方法を提案する.

本論文では, ISCAS'89 ベンチマーク回路に対して, 提案したドントケア判定及びドントケア割当て法によって得たテスト集合の故障活性化率及びテスト品質について評価する.

2. 故障活性化率

本論文では, 文献[10]に示す故障活性化率と呼ばれる評価尺度を用いてドントケア判定及びドントケア割当てを行う. 次に故障活性化率について定義する. 信号線 ℓ の故障 v の故障活性化率とは, ℓ から構造的に到達可能な信号線数のうち, テスト集合 T によって信号線 ℓ の故障 v について活性化された信号線数の割表したものである. 本論文では, 活性化された信号線とは故障 v が疑似外部出力において検出された時の故障伝搬経路上の信号線を示す. 次に故障活性化率の算出に用いる式について説明する. 初めに本論文では, 式で使用する $TFO(\ell)$ を信号線 ℓ から到達可能な信号線(トランシブファンアウト)集合と定義し, 故障活性化率の算出を行う. 式(1)は, $TFO(\ell)$ 内の信号線 $j(j \in TFO(\ell))$ に重みを付ける式を表している. この式(1)では, テストパターン t_i で故障 v が信号線 j を伝搬して検出された場合, 信号線 j に重み1を与えそれ以外の場合には重み0を与える.

$$FS(t_i, v, j) = \begin{cases} 1 & \text{テストパターン} t_i \text{で故障 } v \text{ が} \\ & \text{信号線 } j \text{ を伝搬して検出} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (1)$$

式(2)では, 信号線 ℓ のトランシブファンアウト数を表している.

$$|TFO(\ell)| \quad (2)$$

式(3)に信号線 ℓ の故障 v の故障活性化率の算出式を示す.

$$Sen(T, \ell, v) = \frac{\sum_{j=1}^{|TFO(\ell)|} \bigvee_{i=1}^{|T|} FS(t_i, v, j)}{|TFO(\ell)|} \quad (3)$$

Don't care identification and don't care filling methods
to improve fault sensitization coverage

Takashi KITAO, Hiroshi YAMAZAKI,
Toshinori HOSOKAWA and Masayoshi YOSHIMURA

3. 故障活性化率向上のためのドントケア判定及び割当て法

本章では、本提案手法である故障活性化率向上のためのドントケア判定及びドントケア割当て法について示す。本提案手法の問題定式を以下に示す。

[問題定式]

入力 初期テスト集合 T
回路 C
出力 最終テスト集合 $FINAL_TP$
制約 T に対する故障活性化率を保証
最適化 故障活性化率の最大化

本提案手法は、生成された初期テスト集合 T に対する故障活性化率が保証されるようにドントケア判定を行い、テスト集合 XID_TP を生成する。その後 XID_TP 中に存在する X (ドントケア)に対して故障活性化率が向上するようにドントケア割当てを行い、 $FINAL_TP$ を作成する。次章から故障活性化率保証ドントケア判定法と故障活性化率向上のためのドントケア割当て法について説明する。

3.1. ドントケア判定法

本節では、故障活性化率を保証するドントケア判定法について説明する。図1にドントケア判定法の全体アルゴリズムを示す。

step1

初期テスト集合 T に対して故障シミュレーションを実施し、検出故障集合 V を作成する。

step2

V から選択した故障 v_i に対して、故障活性化率をどのテストパターンで保証するかという情報を持つドントケア判定対象リスト XID_LIST を作成する。選択した故障 v_i が複数のテストパターンで検出される場合、最小個のテストパターンで選択した故障 v_i の故障活性化率が保証されるようにテストパターンを選択する。

step3

XID_LIST からテストパターン選択したテストパターン tp_j に対して、故障 v_i の故障伝搬経路が保証されるようにドントケア判定を行う。

step4

ドントケア判定後のテスト集合として XID_TP を出力する。

3.2. ドントケア割当て法

本節では、故障活性化率向上のためのドントケア割当て法について説明する。図2にドントケア割当て法の全体アルゴリズムを示す。

```
1. 故障活性化率保証ドントケア判定( $T, C$ )
2. {
3.    $V =$  故障シミュレーション( $T, C$ ); /*step1*/
4.   for( $i=0; i <$  検出故障数;  $i++$ ){
5.      $XID\_LIST =$  ドントケア判定対象リスト生成( $T, v_i$ ); /*step2*/
6.     for( $j=0; j <$  対象リスト数;  $j++$ ){
7.        $XID\_TP =$  ドントケア判定( $C, v_i, tp_j$ ); /*step3*/
8.     }
9.   }
10.  return  $XID\_TP$ ; /*step4*/
11. }
```

図1. ドントケア判定法

step1

入力されたテスト集合 XID_TP に対して故障シミュレーションを実行し、検出故障集合 V を作成する。

step2

故障集合 V から故障 v_i を選択し、どのテストパターンのどの経路を活性化させるかという情報を持つドントケア割当て対象リスト $FILL_LIST$ を作成する。故障の選択は、1回の故障の選択で活性化される信号線をできるだけ増加させるため、活性化されていない信号線が多くかつ故障活性化率の低い故障から優先的に選択する。

step3

$FILL_LIST$ からテストパターンと経路の組合せ $list_j$ を選択し、選択したテストパターンで故障 v_i を選択した経路で検出できるようにテストパターン中のドントケアに値割当てを行う。テストパターン及び経路の選択は、1回の値割当てで活性化される信号線をできるだけ多く増加させるため、活性化されていない信号線の多い経路とテストパターンの組み合わせから優先的に選択する。

step4

残ったドントケアを初期テスト集合の値に戻す。

step5

ドントケア割当て後テスト集合として $FINEL_TP$ を出力する。

4. 実験結果

本論文では、故障活性化率保証ドントケア判定及び故障活性化率向上指向ドントケア割当てを実行したときの実験結果を示す。本論文ではISCAS'89ベンチマーク回路を対象回路とし、テスト生成ツールTetraMaxを用いて遷移故障を対象に生成したテスト集合を初期テスト集合として使用し、実験を行った。実験対象回路の情報を表1に示す。表1には回路名、テストパターン数、PI数、DFF数、遷移故障の検出故障を示している。また表4に示す抵抗性オープン故障[5]の検出するにあたり、レイアウト情報の代わりに文献[12]で用いられている、論理段数の値に近い信号線同士を隣接信号線とし抵抗性オープン故障の検出を行った。

本論文では初めに、提案したドントケア判定法と1回故障検出を保証したドントケア判定法[11]でのドントケア判定率及び故障活性化率未保障故障数を評価した。故障活性化率未保障故障数とは初期テスト集合を T 、ドントケア判定後テスト集合を XID_TP とした場合、式(4)を満たす故障 v の数を示す。

$$Sen(XID_TP, \ell, v) - Sen(T, \ell, v) < 0 \quad (4)$$

ドントケア判定法を適用した段階でのドントケア判定率及び故障活性化率を表2示す。表2において、回路名、文献[11]実行後のドントケア判定率と故障活性化率未保障故障数と検出故障数に対する故障活性化率未保障故障数の割合、提案手法を適用した場合のドントケア判定率と未保障故障数と検出故障数に対する故障活性化率未保障故障数の割合、文献[11]と提案手法でのドントケア判定率の差を示している。表2より文献[11]では未保障故障数が平均約23.09%存在するが、提案手法では平均約7.2%のドントケア数の

```

1. 故障活性化率向上指向ドントケア割当て(T,XID_TP,C)
2. {
3.   V = 故障シミュレーション(XID_TP,C); /*step1*/
4.   for(i=0; i<検出故障数; i++){
5.     LIST=ドントケア割当て対象リスト作成(vi); /*step2*/
6.     for(j=0; j<対象リスト数; j++){
7.       FINAL_TP=ドントケア割当て(vi,listj); /*step3*/
8.     }
9.   }
10.  FINAL_TP=残ったドントケアを初期テスト集合の値に戻す(T,FINAL_TP)
    /*step4*/
11. return FINAL_TP/*step5*/
12.}

```

図 2. ドントケア割当て法

表 1. 実験対象回路情報

回路名	テスト パターン数	PI数	DFF数	検出 故障数
s5378	161	35	179	6546
s9234	319	19	228	13813
s13207	310	31	669	19261
s15850	199	14	597	20009

減少で全ての故障の故障活性化率が保証されていることが分かる。

次にドントケア割当て適用後の実験結果を図 3, 図 4, 表 3 に示す。本ドントケア割当てでは, 1 つの故障に対してドントケア割当てを実行するに当たり, 100 回失敗した場合選択した故障に対するドントケア割当てを打ち切り, 次の故障のドントケア割当てを行う。図 3 は s13207, 図 4 は s15850 の回路に対して提案手法を適用した場合の故障活性化率を示している。図 3, 4 中の点は故障を示し, 縦軸は最終テスト集合の故障活性化率, 横軸は初期テスト集合の故障活性化率を示している。点が左上にある故障は故障活性化率が向上していることを示し, 図 3, 図 4 より一部の故障の故障活性化率が向上していることがわかる。次に, 表 3 は, 回路名, 対象故障数として故障活性化率を向上させる対象の故障数, 初期テスト集合での故障活性化率の平均, 割当て後テスト集合に対する故障活性化率が増加した故障数と, 対象故障数に対する増加した故障の割合と故障活性化率の平均, 初期テスト集合から最終テスト集合で増加した故障活性化率の平均を示している。対象故障数は総故障数から初期テスト集合の故障活性化率が 0%または 100%の故障を引いた数を示している。表 3 よりすべての回路において故障活性化率が増加しており, 平均約 34. 08%の故障の数の故障活性化率が向上し, 平均約 1. 73%の故障の数の故障活性化率が向上していることがわかる。

最後にテスト品質評価についての結果を示す。表 4 表 4 には回路名, 初期テスト集合と最終テスト集合でのそれぞれの抵抗性オープン故障の検出故障数, 初期テスト集合での抵抗性オープン故障の故障検出数に対する, 検出故障数が増加した割合を示している。表 4 より全ての回路に対して検出故障数は増加しており, 平均約 12. 14%の故障が新たに検出されていることがわかり初期のテスト集合よりもテスト品質が向上していることがわかる。

5. まとめ

本論文では, 故障活性化率の向上のためのドントケア判定及び割当て法を提案し, 故障活性化率を評価し

た。実験結果より, 比較手法より平均約 7. 2%のドントケア率の減少で故障活性化率が保証されることが

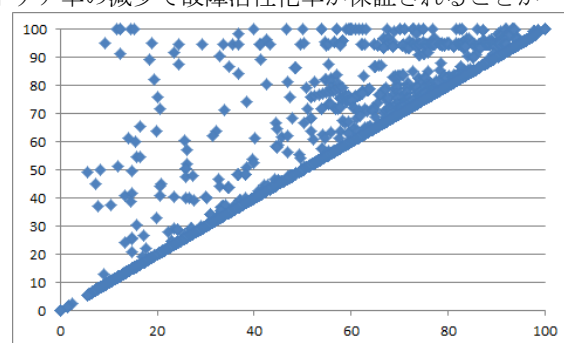


図 3. 故障活性化率(s13207)

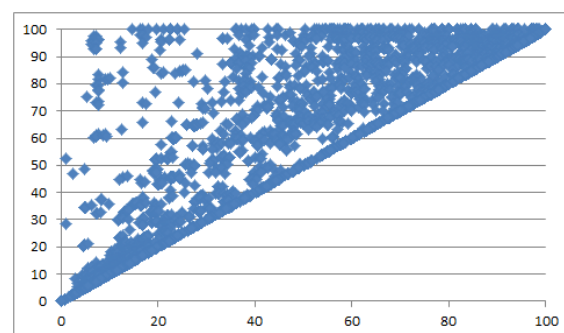


図 4. 故障活性化率(s15850)

わかり, また提案手法のドントケア割当てを適用することで平均約 34. 08%の故障の故障活性化率が向上し, 平均約 1. 73%の故障活性化率が向上することがわかった。またテスト品質評価として, 抵抗性オープン故障の検出故障数を評価し, どの回路に対しても検出故障数が増加し平均約 12. 14%の故障が新たに検出されていることからテスト品質が向上していることがわかった。

今後の課題として, 今回打ち切り数を 100 にして実験を行ったため, 打ち切り数を増加することでどれだけ故障活性化率が向上するのかの評価を行うとともに, 提案手法適用後のテスト品質として微小遅延故障などの抵抗性オープン故障以外の検出故障数の評価を行いたい

参考文献

- 1) Intaik Park, Ahmad Al-Yamani and Edward J. McCluskey"Effective TARO Pattern Generation", VLSI Test Symposium, (2005), p. 161-166
- 2) E. J. McCluskey, Ahmad Al-Yamani, James C. -M Li, Chao-Wen Tseng, Erik Volkerink, Francois-Fabien Ferhani, Edward Li, and Subhasish Mitra"ELF-Murphy data on defects and test sets", VLSI Test Symposium(2004), p. 16-22
- 3) 藤原 秀雄, デジタルシステムの設計とテスト, 工学図書株式会社, (2004)
- 4) Haluk Konuk, "Voltage- and Current-Based Fault Simulation for Interconnect Open Defects", Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, (1999), p. 1768-1779
- 5) James C. -M. Li, Chao-Wen Tseng, and E. J. McCluskey, "Testing for Resistive Opens and Stuck

Opens"Test Conference, (2001), p. 1049-1058
6) Yoshinobu Higami, Hiroshi Furutani, Takao Sakai, Shuichi Kameyama and Hiroshi Takahashi"Test Pattern Selection for Defect-Aware Test", Test Symposium (ATS), (2011), p. 102-107
7) Gordon L. Smith
, "MODEL FOR DELAY FAULTS BASED UPON PATHS"Proceeding of the International Test Conference, (1985) pp. 342-349
8) Siyad C. Ma, Piero Franco and Edward J. McCluskey, "An Experimental Chip to Evaluate Test Techniques Experiment Result"Test Conference, (1995), p. 663-672
9) Sudhakar M. Iledy, Irith Pomeranz and Seiji Kajihara, "On the effects of Test Compaction on Defect Coverage", VLSI Test Symposium(1996), p. 430-435
10) 細川利典 山崎浩二, "故障活性化率向上のため

の n 回検出テスト法," 電子情報通信学会論文誌 D vol. J90 No. 6, (2007) pp. 1474-1482,
11) K. Miyase, K. Noda, H. Ito, Kazumi Hatayama, T. Aikyo, Y. Yamato, H. Furukawa, X. Wen, S. Kajihara, "Effective IR-Drop Reduction in At-Speed Scan Testing Using Distribution-Controlling X-identification" Computer-Aided Design, 2008. ICCAD2008. IEEE/ACM International Conference on(2008), p. 52-58
12) I. Pomeranz, S. M. Reddy, "The Cut Delay Fault Model for Guiding the Generation of n-Detection Test Sets for Transition Faults," VLSI Design, 2006. Held jointly with 5th International Conference on Embedded Systems and Design. , 19th International Conference on(2006) pp. 828-831

表 2. ドントケア判定率と故障活性化率未保証故障数

回路名	文献[11]			提案手法			△×判定率 (%)
	×判定率 (%)	故障活性化率未保証故障数	故障活性化率未保証故障数割合(%)	×判定率 (%)	故障活性化率未保証故障数	故障活性化率未保証故障数割合(%)	
s5378	78.46	2824	43.14	63.37	0	0.00	-15.09
s9234	73.41	2914	21.10	65.83	0	0.00	-7.58
s13207	91.11	2128	11.05	89.92	0	0.00	-1.19
s15850	83.72	3415	17.07	78.78	0	0.00	-4.94
平均	81.675		23.09	74.475		0.00	-7.20

表3. 故障活性化率増加故障数

回路名	対象故障数	初期テスト集合	最終テスト集合			△故障活性化率平均
		故障活性化率平均	故障活性化率増加故障数	増加率(%)	故障活性化率平均	
s5378	2735	52.91	1008	36.86	55.95	3.04
s9234	4758	63.45	2372	49.85	65.51	2.06
s13207	6279	65.20	936	14.91	65.70	0.50
s15850	6648	55.67	2308	34.72	57.00	1.33
平均		59.31	1656	34.08	61.04	1.73

表4. 抵抗性オープン故障 検出故障数

回路名	初期テスト集合	最終テスト集合	検出故障数増加率(%)
	抵抗性オープン故障検出故障数	抵抗性オープン故障検出故障数	
s5378	677	764	12.85
s9234	1239	1446	16.71
s13207	2285	2292	0.31
s15850	1545	1834	18.71
平均			12.14