

組合せ回路における多重短絡故障の診断法

山崎浩二 山田輝彦

明治大学理工学部情報科学科

あらまし 組合せ回路における多重短絡故障の診断法を提案する。本手法では、外部出力での観測値が正当化されるまでプローブと含意を繰返すことにより回路内部の信号線の値を決定し、その結果から故障箇所の推定をする。予備実験の結果は、全信号線の1%~25%程度をプローブすることにより短絡箇所のほとんどを指摘することができることを示している。

Method of Diagnosing Multiple Bridging Faults in Combinational Circuits

Kouji Yamazaki Teruhiko Yamada

Department of Computer Science

School of Science and Technology

Meiji University

1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, 214, Japan

Abstract We propose a method of diagnosing multiple bridging faults in combinational circuits.

In this method, the internal net values are determined by alternations of probing and forward implications until the observed values at the primary outputs are justified. From the result, the faulty nets are deduced. Experimental results show that the fault locations are almost completely identified by probing 1%~25% of the nets.

1. はじめに

多品種小量生産の傾向が強くなるにつれ、VLSIの開発時における設計期間の短縮やコストの低減のために故障診断の効率向上が重要になっている。

従来の故障診断法としては、故障辞書法[1]や結果原因分析法[2]、EBテストを用いる方法[3]などがあるが、それぞれに実用上の問題点を持っている。最近ではより実用的な診断法として、大規模な回路に対して有効な単一縮退故障診断法[4]や推論とプローブを組み合わせた多重縮退故障診断法[5]などが提案されている。しかし、いずれの診断法も主として縮退故障を対象としており、短絡故障についての研究はほとんど行われていない。VLSIでは短絡と断線の発生頻度が同程度といわれており、短絡故障についても研究の必要がある。

筆者らは以前、短絡故障の診断法[6][7]を提案したが、これらの方法は短絡箇所が一箇所の場合のみを対象としており、二箇所以上で短絡故障が起こった場合は診断を行うことができなかった。ここでは、全信号線が観測可能な環境下での多重短絡故障の診断法を提案し、計算機実験によりその性能を評価する。

2. 短絡故障回路の動作[8]

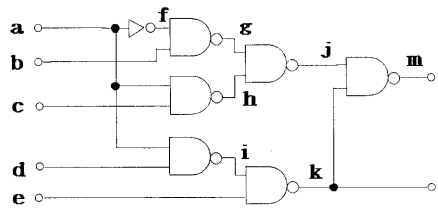
論理ゲートで構成され、フィードバックループを持たない組合せ回路における、ワイヤードANDまたはORとして機能する短絡故障を診断の対象とする。

以下にワイヤードANDとして機能する短絡故障が2本の信号線間に生じた場合の動作を述べる。3本以上の信号線が短絡した場合も同様に考えることができる。

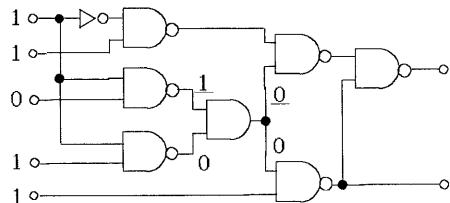
AND短絡した信号線間に経路が存在しない場合は、短絡した信号線の少なくとも一方の値が0であるとき、両方の信号線の値が0になる。

【例1】図1(a)の回路において、信号線hとiに短絡故障が生じた場合、(b)のようにモデル化できる。

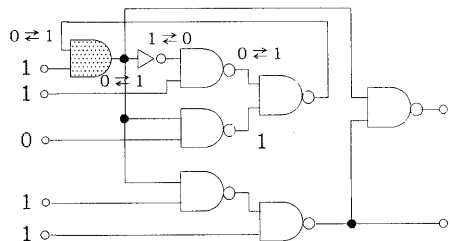
入力(a, b, c, d, e) = (1, 1, 0, 1, 1)を加えたとき、(a)の正常回路ではh = 1, i = 0であるが、(b)の故障回路ではhの値が故障の影響により0に誤り、h = i = 0となる。 □



(a) 正常回路



(b) フィードバックループを生じない短絡故障の例



(c) フィードバックループを生じる短絡故障の例

図1 短絡故障回路の動作

表1 "保持", "発振"の例

(a) テスト

	a	b	c	d	e	k	m
t ₀	0	0	0	1	1	0	0
t ₁	1	0	1	1	1	1	0
t ₂	1	1	0	1	1	1	1

(b) 故障回路での各信号線の値

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t ₀	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
t ₁	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
t ₂	x	1	0	1	1	x	x	1	x	x	x	0

※表中のxは発振を表す

短絡した信号線間に経路が存在する場合は、図1(c)のようにフィードバックループをもつ非同期順序回路としてモデル化できる。このフィードバックループの作用により以下に例示する”保持”，”発振”と呼ばれる現象が生じ得る。

[例2] 図1(a)の回路において、信号線aとjに短絡故障が生じた場合、(c)のようにモデル化できる。

この故障回路に表1(a)のテストを行った場合は、(b)のように動作する。

・図1(a)の正常回路ではテストt1においてa=j=1であるが、(c)の故障回路ではテストt0での値を保持して、a=j=0となる。

・図1(c)の故障回路にテストt2を加えると信号線aとjには0と1が交互に現れ、発振する。 □

ワイヤードORとして機能する短絡故障の場合は、図1(b)、(c)の回路でANDゲートの代わりにORゲートを挿入することにより同様に考えることができるので、以下ではAND短絡についてのみ述べる。

3. 診断手順

本手法では、各テストを行、各信号線を列とする診断テーブルを、プローブを行うごとに更新していき、外部出力の全てについて診断テーブルの値と観測値が一致した段階での診断テーブルから、回路の内部状態を推定している。なお、診断テーブルの初期値は正常回路での期待値である。

プローブされた信号線は値が確定しているので、擬似的に外部入力、外部出力とみなすことができる。このことから本手法では、例えば図1(a)の信号線hをプローブしたとき、図2のようにhを切断して、hを外部出力、h'をプローブによる観測値が印加された外部入力とする回路を想定する。切断によって得られた回路もとの回路の互に対応する信号線は、各テスト入力のもとで同一の値を持つことは明らかである。従って、切断によって得られた回路を用いてもとの回路の状態を定めることが可能である。

本手法では、プローブを行うごとに上記のように信号線を切断した回路を想定し、切断によって得られた

回路の期待値を診断テーブルの新たな値とすることにより診断テーブルを更新していく。このようにプローブと診断テーブルの更新を繰返すことにより、外部出力における診断テーブルの値と観測値との差を縮めていき、両者が一致した段階での診断テーブルから故障回路の内部状態を推定する。

切断によって得られた回路の期待値を求める際、全ての信号線の値を再計算する必要はなく、プローブによる観測値を外部出力に向かって伝播させるだけでよい。診断テーブルの更新の例を以下に述べる。

[例3] 図1(a)の回路において、更新前の診断テーブルの値が表2(a)のようであったとする。信号線hをプローブして(0, 0, 1)という値が観測された場合、診断テーブルは(a)から(b)のように更新される。 □

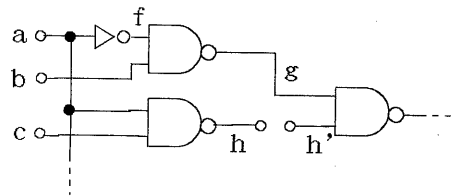


図2 信号線の切断の例

表2 診断テーブルの更新の例

(a) 更新前の診断 テーブルの値					(b) 更新後の診断 テーブルの値						
	g	h	j	k	m		g	h	j	k	m
t0	1	0	1	1	0	t0	1	0	1	1	0
t1	1	1	0	1	1	t1	1	0	1	1	0
t2	1	0	1	1	0	t2	1	0	0	1	1

プローブする信号線は、”そこに単一の0誤り(OR短絡の場合は1誤り)が生じたことにより観測値と一致するような信号線”の中から選択する。0(1)誤りのみを対象としているのは、AND(OR)タイプの短絡故障では短絡している信号線には0(1)誤りしか起こらないためである。外部出力で発振が観測されている場合も、単に誤りが観測されたものとして単一0誤りを探す。例えば、あるテストにおいて外部

出力で発振が観測され、その外部出力の期待値が0(1)である場合、この外部出力線を1(0)に誤らせるような0誤りを探す。"単一誤り"の中からプローブする信号線を選んでるのは、プローブする信号線の候補を求めるための計算を簡単にするためである。

なお、本手法ではプローブを行う上で次のことを前提としている。

- ・全信号線が観測可能である
- ・発振の状態が観測できる

また、1回のプローブでその信号線の値を全てのテスト入力について測定する。

<診断手順>

- (1) 正常回路の期待値を診断テーブルの初期値とする。
- (2) 外部出力での診断テーブルの値と観測値とで異なる値を持つテストの集合を T_e とする。
- (3) 各テスト $t_i \in T_e$ について、そこに単一の0誤りが生じたことにより観測値と一致するような未プローブ信号線を探す。この信号線の集合を P_i とする。
- (4) 次の規則でプローブする信号線 l_p を選択し、 l_p をプローブする。対応する信号線がない場合は(8)へ。

選択規則：

R1) 要素がただ1つの集合 P_i が存在するならば、その信号線

R2) 最も多くの P_i に含まれる信号線
選択規則の優先順位はR1, R2とし、いずれの場合も同一順位の信号線が複数ある場合は外部入力に最も近い信号線を選択する。

- (5) 信号線 l_p を切断し、プローブによる観測値を外部出力に向かって伝播させることにより診断テーブルを更新する。
- (6) 診断テーブル上で、 l_p を出力とするゲートの入出力間に矛盾がない場合は、 l_p は正常であると*1。
- (7) 外部出力における診断テーブルの値と観測値が一致していない場合は(2)へ。
- (8) 正常であるとも短絡であるとも診断されていない

いプローブ済みの信号線のうち、外部入力に最も近い信号線を取り出す。この信号線を l_u と表す。ない場合は診断終了。

- (9) l_u を出力とするゲートの入出力間で矛盾があり、かつその矛盾がこのゲートのプローブ済みの入力線の値でわかる場合、 l_u は短絡していると診断する。 l_u が短絡していると診断された場合は(8)へ。

- (10) 短絡している信号線を特定するために、次の選択規則を満たす信号線 l_p をプローブする。

R3) 信号線 l_u を出力とするゲートの入力信号線のうち、まだプローブされていないもののうちの1本

- (11) 診断テーブル上で、 l_p を入力、 l_u を出力とするゲートの入出力間で矛盾が解消された場合は、 l_u は正常であるとする。矛盾が解消されず、かつその矛盾がプローブによる観測値でわかる場合は、 l_u は短絡していると診断する。
- (12) (6)と同様にして信号線 l_p が正常であることを診断する。
- (13) (5)と同様にして診断テーブルを更新する。更新した結果、診断テーブルの外部出力の値が変化した場合は(2)へ。変化しなかった場合は(8)へ。

*1: l_p が正常であることを確定するためには、 l_p を出力とするゲートの全入力信号線をプローブする必要がある。このようにすると、ほとんどの信号線をプローブしなければならなくなるので、ここで示したように処理した。このため、短絡している信号線を見逃す可能性がある。

4. 診断例

前記の手順による診断例を以下に示す。

図1(a)の回路に表3(a)のテストを行ったときに(b)の観測値が得られたとする。但し、表中のxは発振が観測されたことを意味する。

診断テーブルの下段には空白、b, n, uのいずれかが入る。空白はその信号線がまだプローブされていないことを表す。b, nはそれぞれ短絡している、正

常であると診断された信号線を表す。uは短絡とも正常とも診断されていない信号線であることを表す。

表3 テストと観測値

	(a) テスト					k m	(b) 観測値	
	a	b	c	d	e		k	m
t0	1	1	1	1	1	1	0	
t1	0	1	1	1	1	0	1	
t2	0	0	1	1	0	1	1	x
t3	1	1	0	1	0	1	1	
t4	1	1	0	0	1	0	1	
t5	0	1	0	0	0	1	0	1

(診断開始)

(1) 診断テーブルの初期値を期待値とする

(表4-1)。

表4-1 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
t3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0

(2-1) 観測値と異なる値を持つテストの集合は、

$$T_e = \{t_2, t_3, t_5\}$$

(3-1) 全ての $t_i \in T_e$ について P_i を求めると、

$$P_2 = \{g, h, m\}$$

$$P_3 = \{a, g, h, m\}$$

$$P_5 = \{b, f, j\}$$

(4-1) R1を満たす信号線はないので、R2を満たす信号線hを選択し、プローブする。

(5-1) 信号線hから値を伝播し、診断テーブルを更新する(表4-2)

(6-1) 信号線hを出力とするゲートの入出力間には矛盾がある。

(7-1) 外部出力における診断テーブルの値と観測値は一致していない。

(2-2) 観測値と異なる値を持つテストの集合は、

$$T_e = \{t_2, t_5\}$$

(3-2) 全ての $t_i \in T_e$ について P_i を求めると、

$$P_2 = \{g, m\}$$

$$P_5 = \{b, f, j\}$$

(4-2) R1を満たす信号線はない。R2を満たす信号線はb, f, g, j, mである。このうち外部入力に最も近い信号線であるbを選択し、プローブする(表4-3)。

(5-2) 信号線bではテスト入力と同じ値が観測されているので、bは正常であるとする。

(6-2) 信号線bは外部入力であり、テスト入力と同じ値が観測されているので、bは正常であるとする。

(7-2) 外部入力における診断テーブルの値と観測値は一致していない。

(2-3) 観測値と異なる値を持つテストの集合は、

$$T_e = \{t_2, t_5\}$$

(3-3) 全ての $t_i \in T_e$ について P_i を求めると、

$$P_2 = \{g, m\}$$

$$P_5 = \{f, j\}$$

(4-3) R1を満たす信号線はない。R2を満たす信号線はf, g, j, mである。このうち外部

表4-2 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0

表4-3 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	
t1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	
t2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0

入力に最も近い信号線である f を選択し、プローブする (表 4-4)。

(5-3) 信号線 f では診断テーブルの値と異なる値は観測されていないので、診断テーブルは更新されない。

(6-3) 信号線 f を出力とするゲートの入出力間には矛盾がないので f は正常であるとする。

(7-3) 外部出力における診断テーブルの値と観測値は一致していない。

(2-4) 観測値と異なる値を持つテストの集合は、

$$T_e = \{t_2, t_5\}$$

(3-4) 全ての $t_i \in T_e$ について P_i を求めると、

$$P_2 = \{g, m\}$$

$$P_5 = \{j\}$$

(4-4) R1 を満たす信号線 j を選択し、プローブする。

(5-4) 信号線 j から値を伝播し、診断テーブルを更新する (表 4-5)。

(6-4) 信号線 j を出力とするゲートの入出力間には矛盾がある。

(7-4) 外部出力における診断テーブルの値と観測値は一致している。

(8-1) 正常とも短絡とも診断されていないプローブ済みの信号線のうち、外部入力に最も近い信号線は h であるから、

$$l_u = h$$

(9-1) 信号線 h を出力とするゲートの入力線 a, c はまだプローブされていない。

(10-1) R3 を満たす信号線 c をプローブする (表 4-6)。

(11-1) t3 で NAND のプローブ済みの入力線 c の値 0 に対して出力線 h の値が 0 となっているので、信号線 h は短絡していると判定する。

(12-1) 信号線 c は外部入力であり、テスト入力と同じ値が観測されているので、正常であるとする。

(13-1) 診断テーブルは更新されていない。

(8-2) 正常とも短絡とも診断されていないプローブ済みの信号線は j のみであるから、

$$l_u = j$$

(9-2) 信号線 j の値と、j を出力とするゲートのプローブ済みの入力線 h の値は矛盾していない。

(10-2) R3 を満たす信号線 g をプローブする (表 4-7)。

表 4-4 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
	n			n			u					

表 4-5 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	x	1	x
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	x	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
	n			n			u			u		

表 4-6 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	x	1	x
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	1	1	1	x	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
	n		n		n		b		u			

表 4-7 診断テーブル

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m
t0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
t1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
t2	0	0	1	1	0	1	x	1	1	x	1	x
t3	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
t4	1	1	0	0	1	0	x	1	1	x	0	1
t5	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
	n		n		n		b		b		b	

(11-2) t_1, t_5 でNANDのプロープ済みの入力線 g の値 0 に対して出力線 j の値が 0 となっているので, j は短絡していると判定する。

(12-2) 信号線 g を出力とするゲートの入力線 f はプロープ済みであり, t_4 でNANDの入力線 f の値 0 に対して出力線 g の値が x となっているので, g は短絡していると判定する。

(13-2) 診断テーブルは更新されていない。

(8-3) 正常とも短絡とも診断されていないプロープ済みの信号線はないので, 診断終了。

結果として, 信号線 g, h, j で短絡故障が生じていると診断する。さらに, g と j は全てのテストで同じ値となっているので, g と j が短絡していると診断する。 h については, 短絡していると診断された信号線の中には全てのテストで同じ値となっている信号線がないので, どの信号線と短絡しているのか確定することができない。本手法では, このように, 短絡している信号線の全てを指摘できない場合がある。

5. 実験結果

前章で述べた手法に基づくプログラムをC言語を用いてSUN4/60上にインプリメントした。

性能評価には, ISCAS'85ベンチマーク回路とFANアルゴリズム[9]によって生成された単一縮退故障検出用のテストパターンを用いた。表5に回路の諸元とテスト入力数を示す。

評価実験は, 表5の回路毎に, 3線間の単一, 2重, 3重短絡故障について行った。サンプル数は各回路, 各故障ごとに100である。表6にプロープ数, 分解能及び診断に要したCPU時間の平均を示す。ここでいう分解能とは, 診断の結果短絡していると診断された信号線の数をいう。

どの多重度の故障の場合も, ほとんど全ての短絡した信号線を指摘することができている。このとき, 正常である信号線を短絡していると誤って判定することはない。

全信号線数に対するプロープ数の割合は, 多重度に対してほぼ比例して増えている。但し, 同じ多重度でも回路によりかなりばらつきがある。

CPU時間は, いずれの回路も多重度に対してはほ

ぼ比例している。

6. むすび

全信号線が観測可能な環境下での多重短絡故障の診断法を提案し, 計算機実験によりその性能を評価した。実験結果は, 非常に簡単なプロープ箇所の選択規則を用いているのにもかかわらず, 全信号線の1%~25%程度をプロープすることにより, ほとんどの故障点を指摘することができることを示している。

故障している信号線が完全には見つからない場合があったが, これはプロープ箇所の選択規則によるものと思われる。プロープ箇所の選択規則についてはさらに検討する必要がある。また, 今回は短絡故障を診断の対象としたが, 他の論理故障に対する本手法の有効性についても評価する予定である。

謝辞

テスト生成プログラムFAN及び評価用の回路データを提供して頂きました本学藤原秀雄教授に感謝致します。

参考文献

- [1]H.Y.Chang, E.Manning and G.Metz: "Fault diagnosis of digital systems", John Wiley & Sons, Inc. (1970).
- [2]M.Abramovici and M.A.Breuer: "Fault diagnosis based on effect-cause analysis: an introduction", Proc.17th DAC, pp.69-76 (June 1980).
- [3]T.Tamama and N.Kuji: "Integrating an electron-beam system into VLSI fault diagnosis", IEEE Design & Test, 3, 4, pp23-29 (Aug. 1986).
- [4]山田輝彦, 中村芳行: "組合せ回路における単一縮退故障の一診断法", <信学論, (D-1), J74-D-1, No.11に掲載予定)
- [5]山田輝彦, 濱田周治, 松本竜男, 高橋利彦, 中山尊雄: "組合せ回路における多重縮退故障の診断法", 信学論, (D-1), J74-D-1, 1, pp.50-57 (Jan. 1990).
- [6]山田輝彦, 山崎浩二: "組合せ回路における単一短絡故障の診断法", 信学論, (D-1), J74-D-1, 1, pp.59-64 (Jan. 1991).

[7]山崎浩二, 菊池秀和, 山田輝彦: "組合せ回路における n 本の信号線の短絡故障の診断法", 情処研報 vol.91 DA-57-4 (May 1991).

[8]山田輝彦: "組合せ論理回路における短絡故障のテスト", 信学論誌 D, J64-D, pp.963-968 (Oct. 1981).

[9]H. Fujiwara and T. Shimono: "On the acceleration of test generation algorithms", IEEE Trans. Comput., C-32, pp.1137-1144 (Dec. 1983).

表5 評価用回路の諸元とテスト数

回路名	入力数	出力数	ゲート数	テスト
c 8 8 0	6 0	2 3	3 8 3	7 6
c 1 3 5 5	4 1	3 2	5 4 6	1 2 2
c 1 9 0 8	3 3	2 5	8 8 0	1 6 3
c 3 5 4 0	5 0	2 2	1 6 6 9	2 0 8
c 5 3 1 5	1 7 8	1 2 3	2 3 0 7	1 7 5
c 7 5 5 2	2 0 7	1 0 8	3 5 1 2	2 7 0

表6 実験結果

(a) 3線間の単一短絡故障

回路名	c 8 8 0	c 1 3 5 5	c 1 9 0 8	c 3 5 4 0	c 5 3 1 5	c 7 5 5 2
プローブ数	1 8 . 6 (4.2%)	6 6 . 1 (11.3%)	4 0 . 5 (4.4%)	3 2 . 6 (1.9%)	1 8 . 6 (0.7%)	4 0 . 1 (1.1%)
分解能	2 . 9 1	2 . 8 3	2 . 9 5	2 . 7 6	2 . 9 4	2 . 7 1
CPU時間(s)	1 . 7	1 3 . 6	1 8 . 5	1 4 8 . 1	3 5 . 9	4 5 . 0

(b) 3線間の2重短絡故障

回路名	c 8 8 0	c 1 3 5 5	c 1 9 0 8	c 3 5 4 0	c 5 3 1 5	c 7 5 5 2
プローブ数	3 8 . 4 (8.7%)	1 1 2 . 7 (19.2%)	1 0 0 . 8 (11.0%)	7 8 . 5 (4.6%)	5 4 . 8 (2.2%)	1 2 8 . 0 (3.4%)
分解能	5 . 6 2	5 . 5 4	5 . 7 3	5 . 4 8	5 . 8 8	5 . 2 1
CPU時間(s)	3 . 2	2 7 . 7	3 4 . 3	2 9 8 . 9	6 9 . 0	8 4 . 9

(c) 3線間の3重短絡故障

回路名	c 8 8 0	c 1 3 5 5	c 1 9 0 8	c 3 5 4 0	c 5 3 1 5	c 7 5 5 2
プローブ数	5 5 . 3 (12.5%)	1 5 3 . 4 (26.1%)	1 4 3 . 8 (15.8%)	1 1 9 . 1 (6.9%)	9 0 . 1 (3.6%)	1 6 0 . 2 (4.3%)
分解能	8 . 1 9	8 . 1 8	8 . 5 7	8 . 1 4	8 . 7 5	7 . 7 9
CPU時間(s)	4 . 4	3 7 . 9	4 9 . 7	3 5 9 . 7	9 7 . 0	1 1 9 . 3

※プローブ数の()内は, 全信号線数に対するプローブ数の割合

※使用計算機: SUN4 / 60 (12MIPS)