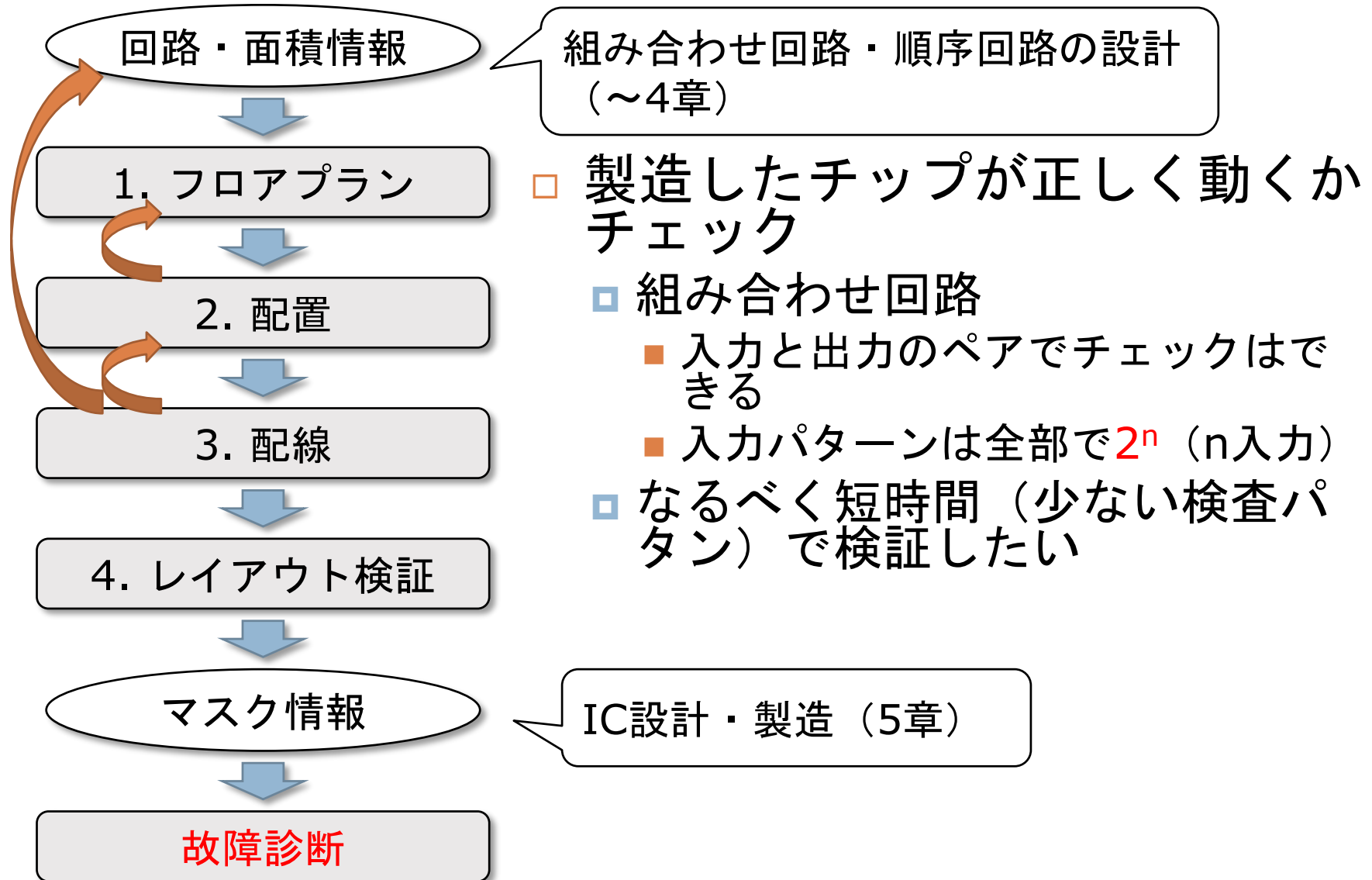


集積回路設計 (INTEGRATED CIRCUIT DESIGN) 第13回

2020/06/16

故障診断（6章）

6



故障モデル

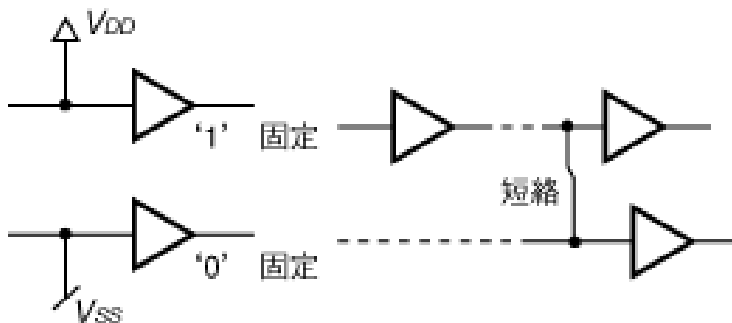
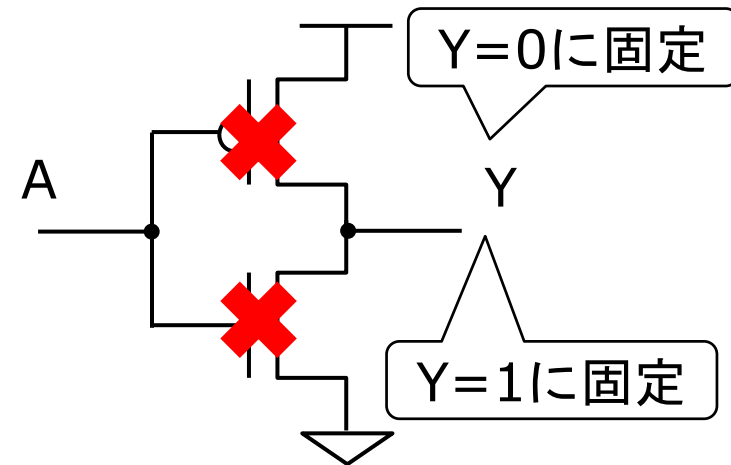
7

故障の原因

1. 縮退故障 (stuck-at-0/1)
2. ブリッジ (短絡) 故障
3. 開放 (オープン) 故障
4. 遅延故障

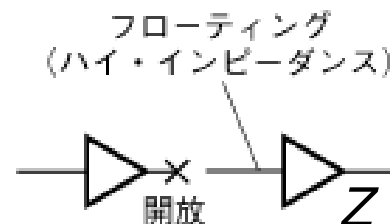
故障の数

- 単一故障
- 複数故障

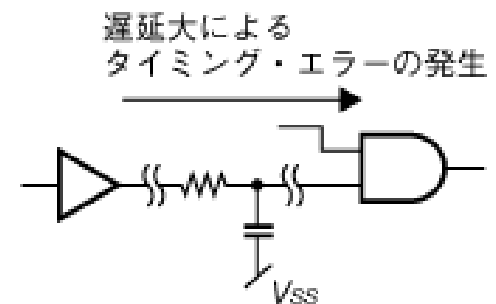


①縮退故障

②短絡故障



③開放故障



④遅延故障

テストベクタ

8

□ 例) $f(A,B)=A\bar{B}$

□ $f_{l_2/0}(A,B)=A$

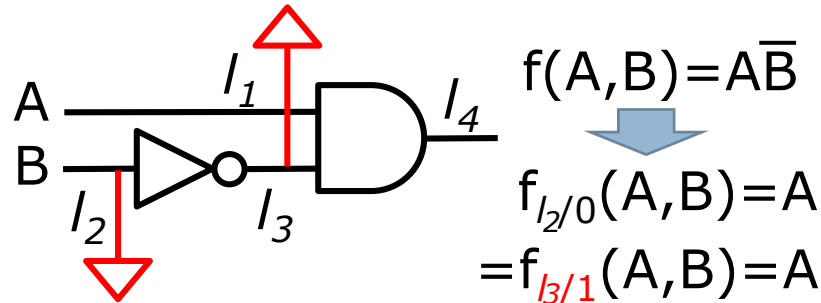
■ 配線 l_2 が0縮退故障 (stuck-at-0) の場合の論理関数

■ $l_2=0$ と $l_3=1$ は等価

□ f と $f_{l_2/0}$ の違いが分かる入力=テストベクタ (検査パターン)

→ $(A,B)=(1,1)$

□ 目標：なるべく少ないテストベクタでなるべく多くの故障検出



A	B	f	$f_{l_2/0}$
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1

故障関数と故障差関数

9

- 正しい論理関数 : f
- 故障論理関数
 - ▣ $f_{l/0}$: 配線 l が0縮退故障した場合の論理関数
 - ▣ $f_{l/1}$: 配線 l が1縮退故障した場合の論理関数
- 故障差関数
 - ▣ $d_{l/0} = f \oplus f_{l/0}$: 論理関数 f , $f_{l/0}$ の差分
 - ▣ $d_{l/1} = f \oplus f_{l/1}$: 論理関数 f , $f_{l/1}$ の差分

回路の中は見られない→ 出力で観測
どんな入力で, 出力で故障を観測できるか？

故障関数と故障差関数

10

□ 例) $f(A,B)=A\bar{B}$

▣ $f_{l_2/0}(A,B)=A$

■ 配線 l_2 が0縮退故障 (stuck-at-0) の場合の論理関数

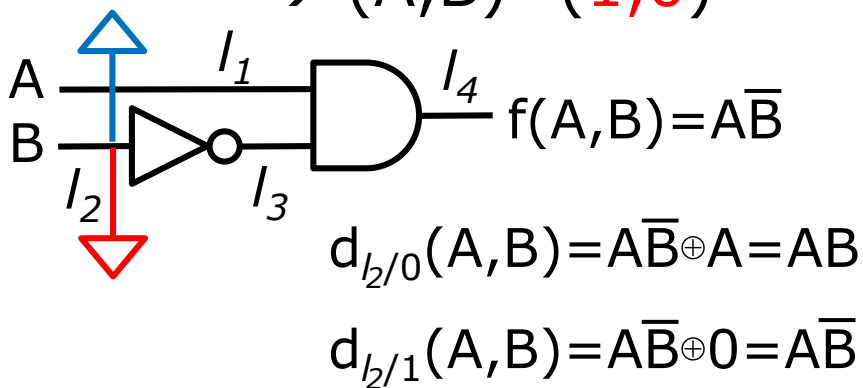
■ f と $f_{l_2/0}$ の違いが分かる入力
→ $(A,B)=(1,1)$

▣ $f_{l_2/1}(A,B)=0$

■ 配線 l_2 が1縮退故障 (stuck-at-1) の場合の論理関数

■ f と $f_{l_2/1}$ の違いが分かる入力
→ $(A,B)=(1,0)$

直接回路の中
を見られない
→出力で判断



A	B	f	$f_{l_2/0}$	$d_{l_2/0}$	$f_{l_2/1}$	$d_{l_2/1}$
0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	1	1	0	0

等価故障

11

- 出力で判断＝どこの故障か区別できない場合がある

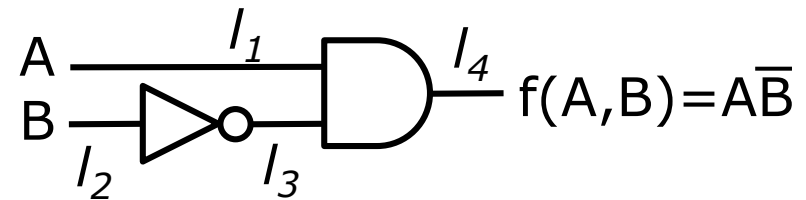
- ▣ 例) $f(A,B)=A\bar{B}$ では故障全8パターンは4つの故障関数に分類

- $f_{l1/0}=f_{l2/1}=f_{l3/0}=f_{l4/0}=0$

- $f_{l1/1}=\bar{B}$

- $f_{l2/0}=f_{l3/1}=A$

- $f_{l4/1}=1$



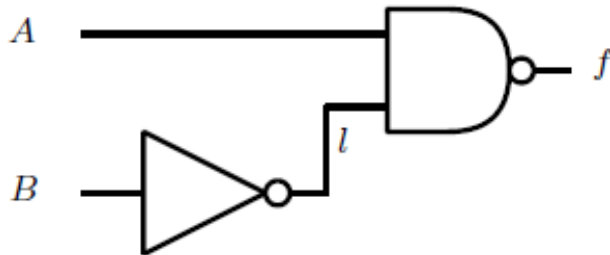
- ▣ 区別できない故障＝等価故障

- この例の場合 4 つを区別できれば良い

故障関数・故障検出パターン（例題）

12

- 下図に示す論理回路について、
以下をそれぞれ示せ
1. 出力論理関数 $f(A,B)$
 2. 信号線 l が1縮退故障した場合の故障論理関数 $f_{//1}(A,B)$
 3. 故障差論理関数 $d_{//1}(A,B)$
 4. 信号線 l の1縮退故障を検出する故障検出パターン



冗長故障

13

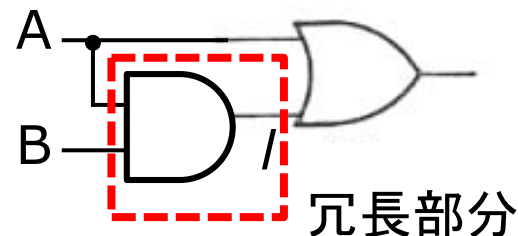
故障論理関数がもとの正しい論理関数と等しい場合

起こっても問題ない故障 = 冗長故障

その部分回路自体不要 (= 冗長)

故障診断をすることで、回路の冗長性の検出・特定にも繋がる

コスト vs. 冗長性 (信頼性) はトレードオフ



A	B	f	$f_{I/1}$	$f_{I/0}$
0	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	0	1	1	1
1	1	1	1	1

検出可 検出不可

故障検査パターン

14

- なるべく少ない検査パターンでなるべく多くの故障検出したい（最小ベクトル：NP困難）

- どの故障（どの故障関数）か判断できれば，修正や設計改良ができる

- $f_{l_1/0} = f_{l_2/1} = f_{l_3/0} = f_{l_4/0} = 0$
- $f_{l_1/1} = \overline{B}$
- $f_{l_2/0} = f_{l_3/1} = A$
- $f_{l_4/1} = 1$

- 検査パターンの組み合わせで診断

故障があっても，回路が正しく動作しているように見える入力
＝故障検出には無意味

故障表

A	B	$l_1/0$	$l_1/1$	$l_2/0$	$l_4/1$
0	0	0	1	0	1
0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0
1	1	0	0	1	1

- $(A,B)=(1,1)$ で出力が1
→ $l_2/0$ or $l_4/1$ （検出できるが区別不可）
→ 他の検査パターンを併用して区別
- $(A,B)=(1,1)$ で出力が0
→ $l_2/0$ でも $l_4/1$ でもない
→ 別の検査パターンで他の故障を診断

故障診断

15

- 検査パターンが2つの故障を区別するためには、以下の両方が成立
 1. どちらの故障も **検出(=1)**する検査パターンがある
 2. 片方の故障は **正常(=0)**，もう片方の故障は **異常(=1)**と判定する検査パターンがある



- 検査パターンのセットが故障診断可能とは，「等価故障以外のどの2つの故障についても上の条件を満たす」セット

故障検出パターン導出法

16

- 配線 l の0(1)縮退故障を検査する入力検査パターン
 $= d_{l/0}(X)(d_{l/1}(X))$ を1にする入力パターン X

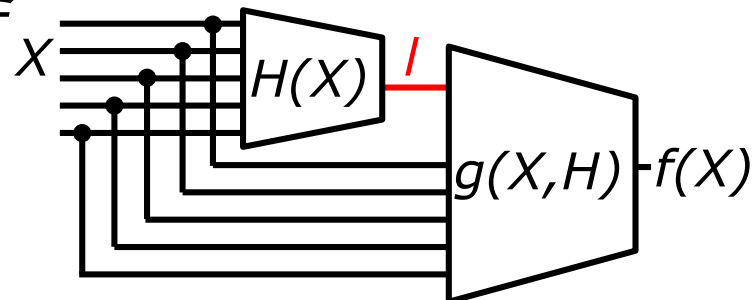
$$\blacksquare f(X) = \underbrace{H(X)g(X,1)}_{l=1\text{のとき}} \oplus \underbrace{\overline{H(X)}g(X,0)}_{l=0\text{のとき}}$$

$$\blacksquare f_{l/0}(X) = g(X,0), \quad f_{l/1}(X) = g(X,1)$$

$$\begin{aligned} \blacksquare d_{l/0}(X) &= f(X) \oplus g(X,0) \\ &= H(X)g(X,1) \oplus \overline{H(X)}g(X,0) \oplus g(X,0) \\ &= H(X)(g(X,1) \oplus g(X,0)) \end{aligned}$$

$$= H(X) \frac{dg(X,H)}{dH}$$

$$\blacksquare d_{l/1}(X) = \overline{H(X)} \frac{dg(X,H)}{dH}$$



論理関数の微分：Xの値の変化により，hの値が変化する条件

$$\begin{aligned} \frac{dh(X,Y,Z)}{dX} &= h(X,Y,Z) \oplus h(\overline{X},Y,Z) \\ &= h(0,Y,Z) \oplus h(1,Y,Z) \end{aligned}$$

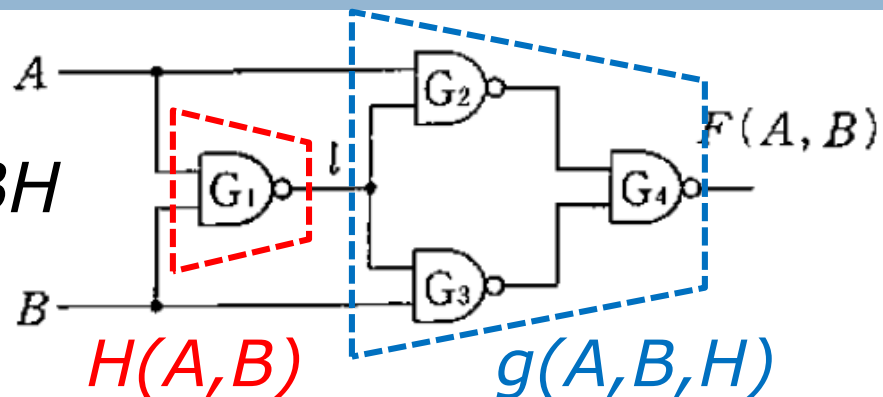
故障検出パターン導出法

17

例) 配線 l の0縮退故障

- $f(A, B) = g(A, B, H) = AH + BH$

- $H(A, B) = \overline{AB}$



- $$\begin{aligned} d_{l/0} &= \underline{H(A, B)}(g(A, B, 1) \oplus g(A, B, 0)) \\ &= AB((A + B) \oplus 0) = A \oplus B \end{aligned}$$

- 配線 l の0縮退故障の検出パターン: $d_{l/0} = 1$ にする
パターン $\rightarrow (A, B) = (1, 0) \text{ or } (0, 1)$

- $H = 1$ の時, 配線 l の0縮退故障と矛盾 (異なるパターン)

- 正常なら $f = 1$
- 配線 l が0縮退故障を起こすと $f_{l/0} = 0$ を出力

確かに出力も矛盾
= 配線 l の故障を検出可

Dアルゴリズム

18

□ 検査パターンを導くアルゴリズム

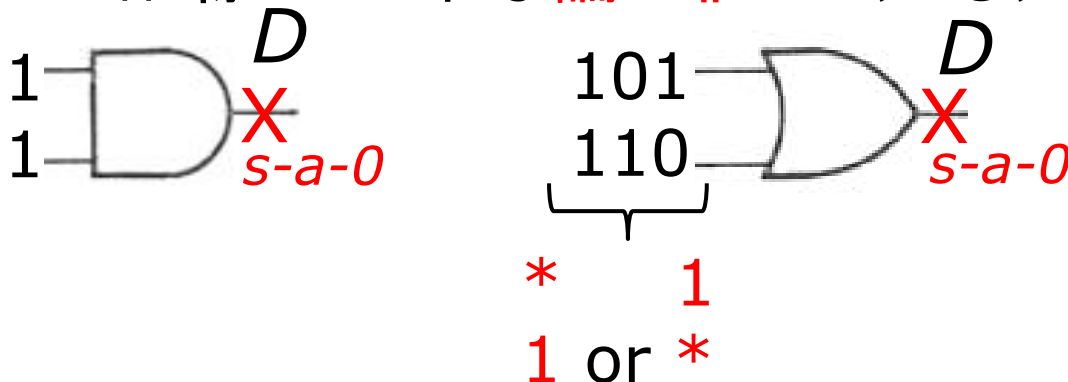
1. エラーを発生させる入力を考える
2. エラー（の伝搬）を出力で観測できるパターンを考える
3. エラー（の伝搬）に関係ない信号は適当に定める

エラー信号の発生と伝搬

19

エラー信号Dの発生

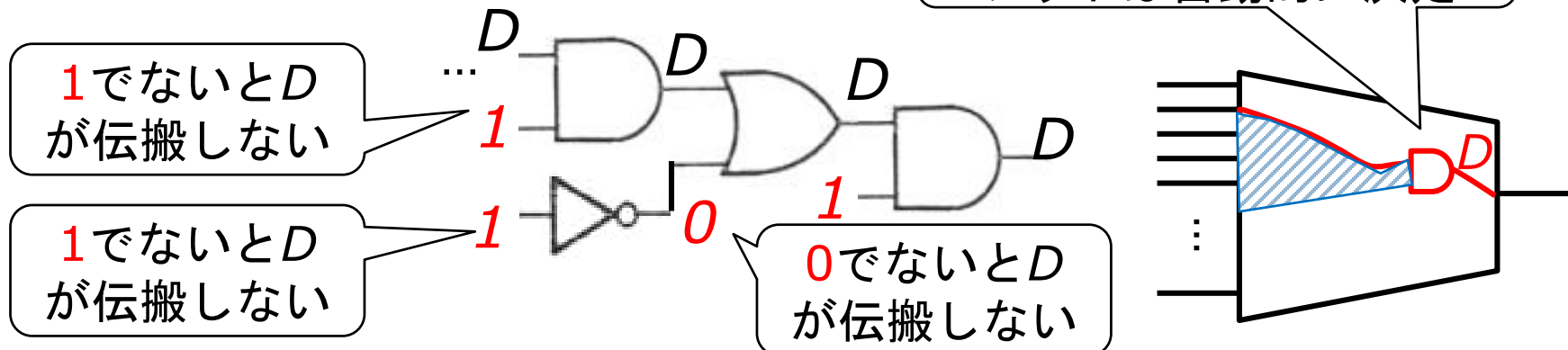
- **I/O**の配線Iに正常な論理値1が入る入力パターン



- **I/1**の配線Iに正常な論理値0が入る入力パターン

エラー信号の伝搬

Dの手前のサイドイン
プットは自動的に決定

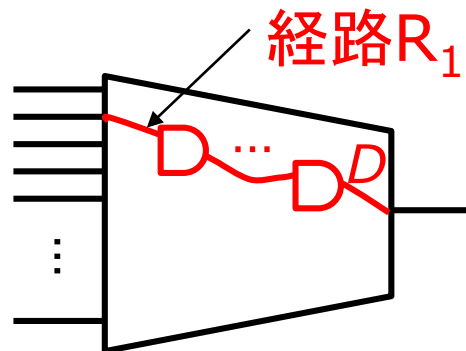


故障検出の可能性

20

□ Dの経路上の故障は検出可

- 経路上の故障は**等価故障**の可能性が高い



□ 故障表（経路別：以下の例では5経路）

- 入力：全8パターン
- 6パターンで故障検査可能

入力	経路番号/縮退故障									
	R_1		R_2		R_3		R_4		R_5	
	/0	/1	/0	/1	/0	/1	/0	/1	/0	/1
(101)	1						1			
(110)	1		1							
(001)		1				1				
(010)		1								1
(100)				1				1		
(011)					1					1

