

## 赤外線画像による 回路の故障診断のための基礎検討 - II

Study on Fault Diagnosis of Circuits by Thermography - II

西野 聰

Satoshi NISHINO

小山工業高等専門学校

Oyama National College of Technology

あらまし 本稿では、標準-TTL、LS-TTL、CMOS、ICメモリの故障時の発熱特性を検討し、この発熱を赤外線カメラでとらえて処理することにより故障診断が可能なことを明らかにした。また、本手法ではICの発熱というアナログ情報を扱うのでIC内部での故障か外部の故障かの判別の可能性があることが明らかとなった。また、テスト入力数はkHzクロックにより、カウンタを駆動して全ての入力集合を順次入力することにより十分実用に耐えることを示した。

Abstract This paper reports a method for fault diagnosis of circuits at board level or IC level with the thermography. The method is that thermography camera takes picture of heat distribution of operating IC. Diagnosis is accomplished by comparing the heat produced in fault IC with the normally operating IC on the supplied current. The method is able to detect most single and multiple faults and analog IC's faults.

### 1. まえがき

半導体技術が進歩し、VLSI化が進んだことにより、回路の複雑化も進み、回路の故障検出及び診断が困難となってきている。実用的な観点からは、ボード・レベルで故障検出を行い、その上でボードに搭載されている故障IC又はプリントパターンの故障箇所が指摘できればよい。

近年、赤外線検出器の発達により、感度のよい赤外線カメラが実用化されている。また、今後の進歩により、低コスト化も望まれる。そこで本論文では、この赤外線カメラにより動作中のボードの

赤外線画像を得て、搭載されているICの発熱温度や、温度分布画像をコンピュータ処理することによりICレベルで故障診断を行う手法の開発を行うための基礎検討を行った。

先に、赤外線画像により動作中の各ICの温度によりICレベルで故障診断を行える可能性を報告<sup>(1)</sup>したが、さらに現在のVLSI構成素子の主流であるCMOSと重要な構成素子であるICメモリについても検討を加えた。また、電源電流と発熱温度の関係についても故障実験を行った。

さらに、近年使用頻度の多いLS-TTLについて検討を加えた。

また、実用的な観点からは、故障が検出された時に、IC外部の配線の短絡による故障か、IC自体の故障かの判別が重要である。従来の故障診断手法ではボード上にICが実装されている状態ではこの判別は不可能であったが、本手法ではICの発熱温度というアナログ情報を用いることにより判別の可能性があることを示した。

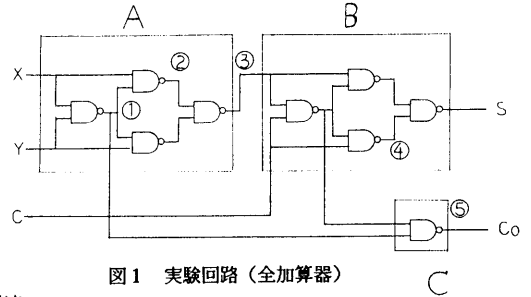


図1 実験回路(全加算器)

表1 標準-TTLの発熱温度と電源電流

7400		正 常 値		s - a - 1		s - a - 0	
入 力	出 力	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)
0 0	1	10.5	4.2	10.5	4.2	10.5	4.2
1 0	1	10.5	4.2	10.5	4.2	10.5	4.2
0 1	1	10.5	4.2	10.5	4.2	10.5	4.2
1 1	0	13.5	5.0	13.5	5.0	13.5	7.4

表2 LS-TTLの発熱温度と電源電流

74LS00		正 常 値		s - a - 1		s - a - 0	
入 力	出 力	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)
0 0	1	2.71	2.4	2.69	2.4	2.69	2.4
1 0	1	2.71	2.4	2.69	1.6	2.69	1.6
0 1	1	2.71	2.4	2.69	2.4	2.69	2.4
1 1	0	3.23	2.4	3.21	2.4	3.21	2.4

表3 実験回路による故障実験 (LS-TTL)

故障箇所: 図1のA-①, カウンタ入力1kHz

構成IC	LS-TTL	標準-TTL
s-a-0	14.0°C	8.7°C
s-a-1	17.1°C	8.0°C

## 2. TTLの発熱

### 2.1 標準-TTLの発熱

TTL単体でファンアウトしていない時の正常時、s-a-0, 1故障時の電源電流と発熱温度(以下本稿では電源を供給しない温度基準ICと被測定対象ICとの温度差<sup>(1)</sup>を発熱温度と呼ぶ)を測定した結果を表1に示した。これから、正常値とs-a-0, 1故障時の発熱温度差は大きいので、故障検出は十分可能であることが分かる。

### 2.2 LS-TTLの発熱

SN74LS00単体の正常時と故障時の電源電流と発熱温度差を表2に示す。この表と前出の表1から、単体ではSN74LS00はSN7400よりも発熱温度が小さいことが分かる。しかし、図1に示す全加算器を構成して故障検出を行った結果、LSの方が発熱温度が大きい。この様子を表3に示す。この原因については現在検討中であり、まだ明かとなっていない。

### 2.3 同一ICパッケージ内の多重故障

SSIには同一パッケージ内に数回路封入されているものが多い。SN7400の温度と故障ブロックとの関係を図2に示す。この図の横軸は、同一ブロック内の故障数を示す。例えば、8の場合は4

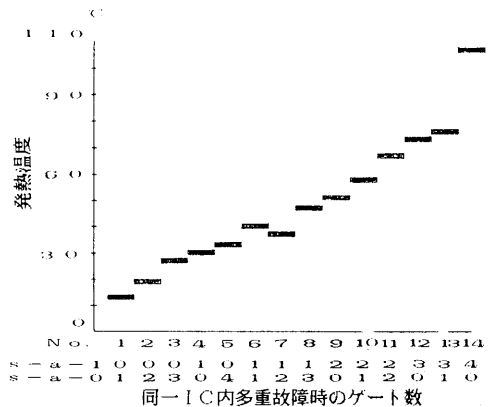


図2 同一パッケージ内の多重故障時の発熱 (SN7400)

つの回路ブロック中の1つにs-a-1、残りの3つにs-a-0を挿入した場合の発熱温度である。この図から、同一ICパッケージに挿入されているゲートに多重故障が生じた場合は、単一故障時よりも発熱温度が高くなり、より故障検出が可能となることが分かる。また、図2のようなデータを蓄積することにより、IC中の何個のゲートに故障が発生しているかの判別を行うことができる可能性もある。

### 3. CMOSの故障診断

電源電圧 ( $V_{DD}$ ) を +5V ~ +15V として、故障検出実験を行った結果を表4に示す。この表から分かるように正常動作時と故障時の温度基準IC (電源を印加せず) からの温度差は2℃と小さく、周囲温度の影響を受ける範囲なので故障検出不可能である。

CMOSの消費電力は

$$P = C_L V_{DD}^2 f \quad [W]$$

$C_L$ : 出力容量,  $V_{DD}$ : 電源電圧,  $f$ : 動作周波数で求められることから、2入力NAND (TC4011BP) において、 $f$  を変えて発熱温度を測定したが、大きな発熱は生じなかった。次に、 $V_{DD}$  は2乗で消費電力、すなわち発熱に関与するので、+5Vから順次高い電圧にして、正常時と故障時の発熱温度を測定したものを図3に示す。これから、電源電圧が高い方が発熱温度が高く、故障診断が容易であることが分かる。従って、+5Vで動作しているCMOS回路も、故障診断の場合は電源電圧を高くして行えば、診断可能である。

### 4. 内部故障と外部故障

従来の出力理論に基づく方法では、固定故障が発見されても、この固定故障が信号線上に生じた短絡によるもの (以下外部故障と呼ぶ) ののか、素子自体の内部に故障が生じた (以下内部故障と呼ぶ) 為なのかの判別は不可能であった。しかし、ICの搭載されたプリント基板を修復する場合などの実用的な観点からは、この両者の判別は重要である。

本手法では、赤外線画像により素子の発熱温度というアナログ情報の内容を検討することにより

表4 CMOSの発熱

故障状態	$V_{DD}=+5V$		$V_{DD}=+15V$	
	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
正常時	0.0	0.06	0.4	0.20
s-a-0	1.6	1.59	19.0	15.40
s-a-1	2.8	4.73	44.8	34.30

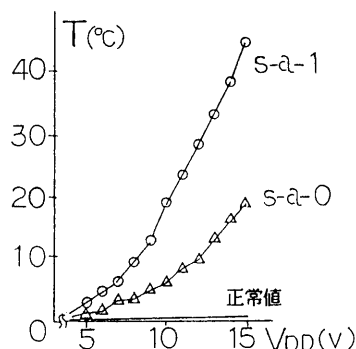


図3 CMOS・ICの電源電圧と発熱温度

表5 内部故障のモード

CMOS 2入力NAND

$V_{DD} = +15V$

故障モード-1

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
1 2 3			
1 1 0	0	0.0	0.01
1 0 1	1	12.4	11.2
0 1 0	0	12.6	11.2
0 0 1	1	22.2	22.1

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
5 6 4			
1 1 0	0	0.0	0.01
1 0 0	0	14.4	12.3
0 1 1	1	12.2	11.3
0 0 1	1	24.6	23.0

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
8 9 10			
1 1 0	0	0.0	0.01
1 0 1	1	14.6	12.4
0 1 0	0	12.2	11.3
0 0 1	1	24.6	23.0

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
11 12 13			
1 1 0	0	0.0	0.01
1 0 0	0	12.4	11.2
0 1 1	1	12.2	11.2
0 0 1	1	24.6	22.0

判別の可能性がある。IC単体で発熱温度を測定したところ、内部故障の原因によっても種々の発熱温度があると思われるが、表5に示すように外部故障とは異なった温度差となった。図1の全加算器で故障診断実験を行った結果の一部を表6に示す。

外部故障と内部故障が同時に発生しないと仮定すれば、表6に示したように、明らかに発熱温度差が異なるので、内部故障と外部故障の判別が可能である。

内部故障の原因にもよるが、一般には内部アルミ配線の溶断などが多いので、表5に示したように、発熱温度が正常時よりも低くなることが多い。実際には、種々の故障パターンが存在すると考えられるので、フィールド・データを基にデータを蓄積する必要がある。

## 5. テスト入力

どの診断手法でも問題となるのはテスト入力である。理想的には、全てのテスト集合を入力して発熱状態をその都度測定することである。そこで、カウンタを入力ピンに接続して、全ての入力系列を順番に入力して観測した例が図4のAのグラフである。入力を加えて、30秒経過すれば発熱温度は飽和に達するので、Aのグラフは30秒ごとに全ての入力系列を順番に入力して測定した結果である。

このようにすることにより、どのICのどのゲートに故障が発生しているかを判定することが可能である。しかし、入力数が増えた場合は、測定に膨大な時間がかかり現実的ではない。

そこで、入力に接続したカウンタのクロック周波数を1Hz、1kHz、1MHzと変えて測定したが、発熱温度は変わらなかった。この様子を図4のBのグラフで示した。

30秒ごとに固定テスト入力を加えた場合よりは発熱温度は低いが、正常時よりは高い温度となり、故障検出が可能である。図4のグラフA、Bを比較すると、ほぼBはAを積分した値となっていることが分かる。

この方法によると、例えば入力が20ピンのボードにテスト入力を加えて発熱が飽和する時間は同様に30秒である。ICレベルでの診断を目的とするのであれば十分実用に耐えるテスト時間である。

## 故障モード-2

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
1 2 3			
1 1 0		1.2	0.8
1 0 0		1.0	0.7
0 1 0		1.0	0.7
0 0 0		0.0	0.0

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
5 6 4			
1 1 0		3.6	1.7
1 0 1		2.8	1.2
0 1 1		2.8	1.2
0 0 1		2.8	1.2

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
8 9 10			
1 1 0		0.0	0.07
1 0 1		5.6	4.0
0 1 1		4.4	3.0
0 0 1		4.4	3.0

入力	出力	発熱温度 (°C)	電源電流 (mA)
12 13 11			
1 1 0		3.6	2.80
1 0 1		0.0	0.08
0 1 1		0.0	0.08
0 0 1		0.0	0.12

表6 内部故障と外部故障の温度比較(全加算器)

故障状態	XYC:000 発熱温度(°C)		故障状態		XYC:000 発熱温度(°C)	
	XYC:100 発熱温度(°C)	XYC:100 発熱温度(°C)	XYC:100 発熱温度(°C)	XYC:100 発熱温度(°C)		
正常時	4.4	4.6	正常時	0.0	0.0	
外部故障	0.0	0.0	外部故障	54.6	22.4	
内部故障	13.0	11.4	内部故障	48.0	48.0	

(a) TTL

- ・内部故障はAのIC  
(全ての出力s-a-0)
- ・外部故障は①がs-a-0

(b) CMOS

- ・内部故障はAのIC  
(全ての出力s-a-1)
- ・外部故障は②がs-a-1

## 6. ICメモリ

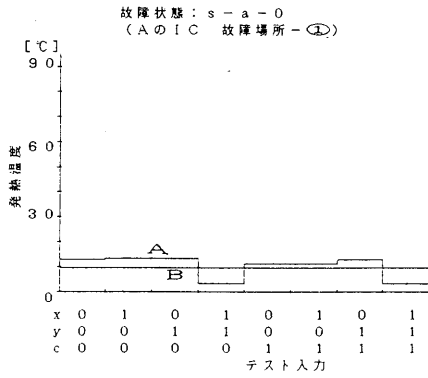
デジタル回路にはICメモリが多用される。従って、診断対象となるボード上にICメモリが搭載させていることが多いことから、ICメモリの故障検出実験を行った。

実験は、1KCMOSメモリ(256×4ビット)の0~15番地までの16アドレスにデータを書き込み、読みだし時はアドレス入力に接続された16進カウンタをクロックにより駆動し、このメモリの出力に単一、及び多重故障を挿入して行った。この結果を表7、8、9に示す。

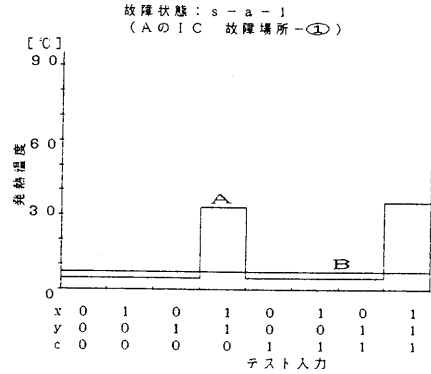
この表から次のことが分かる。

- (1) 正常動作時のメモリLSIは周囲温度と同じで発熱しない。
- (2) 単一故障時は6~10°C程度発熱し、故障検出可能(アドレスはカウンタで入力)

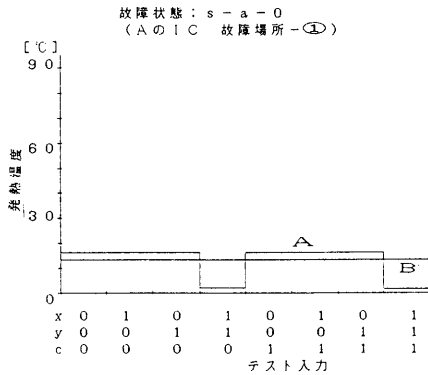
(表7)



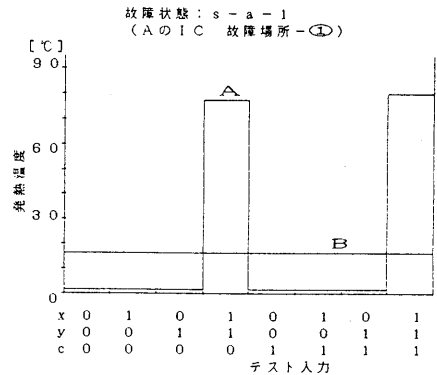
(a) SN7400 (s-a-0)



(b) SN7400 (s-a-1)



(c) SN74LS00 (s-a-0)



(d) SN74LS00 (s-a-1)

図4 カウンタ入力と順次入力時の比較

(3) 多重故障時でアドレスに固定的なアドレスを入力した場合は、s-a-t故障値と反対のデータ出力値のビット数が多い程発熱は大となる。(表8)

(4) 出力のs-a-t故障値と反対の出力値が1つでも存在すれば故障検出は可能である。(表9)

以上(1)~(4)から、メモリ内アドレス中の1つにでもs-a-t故障値と反対の値が書き込まれていれば、データ出力のs-a-t故障に関しては、検出可能あることが分かった。

A: 30秒ごとに順次入力

B: 1kHzでカウンタを駆動して入力

しかし、同一ビットの全アドレスに書き込まれているデータが全て“0”(“1”)であった場合、このビット出力にs-a-0(1)故障が発生した時はICは発熱せず、検出不能である。実際にはこのような事はメモリクリア時以外は存在しないので、十分検出可能であると考えられる。

表7 ICメモリの単一故障

正常時:0.0℃

s-a-0		1ビット目故障時	2ビット目故障時	3ビット目故障時	4ビット目故障時
アドレスカウンタの	1Hz	7.2℃	8.0℃	8.2℃	8.4℃
クロック周波数	1MHz	6.4℃	7.2℃	7.2℃	7.2℃

(4ビットデータ出力中の

1ビットのみに故障を挿入,

アドレスはカウンタによりスキャン)

s-a-1		1ビット目故障時	2ビット目故障時	3ビット目故障時	4ビット目故障時
アドレスカウンタの	1Hz	10.0℃	9.6℃	9.0℃	9.0℃
クロック周波数	1MHz	10.0℃	10.4℃	9.0℃	9.0℃

表8 ICメモリの多重故障

データ出力	s-a-1		s-a-0	
	発熱温度(℃)	電源電流(mA)	発熱温度(℃)	電源電流(mA)
0000	47.4	168.6	1.6	17.8
0001	41.2	135.9	8.0	32.7
0011	29.8	103.5	12.0	46.0
0111	19.2	64.4	16.0	58.9
1111	1.8	17.9	20.0	70.5

(4ビットデータ出力の全てに故障を挿入,

アドレスは固定)

表9 ICメモリの記憶データと発熱の関係

アドレスカウンタの クロック周波数	s-a-1	s-a-0
1 Hz	18.4℃	7.2℃
1MHz	19.2℃	6.4℃

アドレス:0 1 2 ...

1ビット目のデータ出力:1 0 0 ...

..... 13 14 15 のデータを出力時に

..... 0 0 0 1ビット目のデータ出力に故障挿入

## 7. むすび

文献(1)では、赤外線画像によりICレベルでの故障診断の可能性を示したが、本稿ではさらに、標準-TTL、LS-TTL、CMOS、ICメモリを個別に検討し、発熱特性を明らかにした。本手法では、ICの発熱というアナログ情報を扱うことによりIC内部での故障か外部での故障かの判別の可能性があることが明らかとなった。

また、テスト入力数は数kHzのクロックによりカウンタを駆動して全てのテスト入力を順次入力することにより十分実用に耐えることを示した。

また、本手法では、最近のVLSI化で多くなってきているワンボードタイプのボードの診断にも有効であると考えられる。

このタイプのボードでは、入出力ピンが存在しないために、テスト入力を加えて入出力を観測できない。しかし、本手法では回路を動作させて、正常時の発熱パターンと比較することにより、診断可能であると考えられる。

さらに、従来の入出力診断値や、電源電流によ

る手法<sup>(2)</sup>と組み合わせることにより、ファンイン側かファンアウト側どちらのICが故障かの判別が可能であると考えられる。

今後これらの点についても検討して行く予定である。

## 文 献

(1) 西野, 南齊, 大嶋: “赤外線画像による回路の故障診断のための基礎検討”, 信学技報 F T S 8 8 - 3 1, p.33-40 (1989-2).

(2) 橋爪, 樹田, 山田, 為貞: “自己回帰モデルを用いた電源電流波形による論理回路の故障診断法”, 信学論(D), J 7 1 - D pp.1804-1814 (昭63-09).