工場設備における IC の劣化診断

正員 犬 島 浩 (三菱電機)
非会員 吉 島 宇 一 (三菱電機)

1. はじめに

近年、工場設備は電子化制御装置を駆使して制御される傾向にある。電子化制御装置は電子部品が実装されたプリント基板(電子カード)を主体として構成され、工場設備の運転上重要な役割を占めている。

このため、定期検査時などに電子カードの不適合事象を検知し除去することで装置の信頼性向上、工場設備の稼働率向上を図りたいという大きな要請がある。不適合事象の検知としては、故障の検知は当然のことながら、劣化を適切にとらえ事前に対処し得ることが望まれる。しかしながら、電子カードの故障検知については多くの研究がなされてきてはいるものの⁽¹⁾、劣化の現象に関する検討はほとんどなされていない。現在、実施されている試験方法は、対象としているカードの機能特性の良否を判定するものが多い。すなわち、規定の入力に対して、要求されている機能の出力が得られるかどうか検査する方法が一般的である。著者らは、この現在実施されている試験方法に合格したものの中から、高感度で早期に電子カードの劣化兆候を検出する劣化診断法について検討してきた。既に、実験室において低いサージ電圧を加えて模擬的に作成した劣化電子部品(IC)を用い、劣化検出法を検討してきた⁽²⁾⁽³⁾。この結果、ICの出力端で観測された内部雑音のRMS値に着目した手法が有効であることがわかった。そこでは、あくまでも実験室で模擬的に作成した劣化ICに対する検知法の検討であって、このような劣化ICに有効であることがわかったに過ぎない。従って、この手法が実際の工場設備に含まれるICに適用できるかどうかについては不明であった。

本論文では、実際の工場設備についてこの劣化診断法を適用した結果について述べ、内部雑音のRMS値に着目した手法の有効性を示す。

2. 試験対象とした電子カードおよび検討結果

〈2・1〉 対象とする劣化電子部品と検知指標

集積回路(IC)は大別してアナログ信号を対象にしたものとデジタル信号を対象にしたものに分類されるが、ここではアナログ信号を対象としたオペアンプを取上げる。

著者らは、オペアンプが劣化すると外部に表れる特性としては変化しなくても、内部雑音のRMS値が増加することを実験室で模擬的に作成した劣化ICについて見いだした⁽²⁾⁽³⁾。この内部雑音の測定法を図1に示す。内部雑音は対象とするアナログ電子カードの入力端を一定の抵抗で短絡し、信号の処理順序に従って実装されているICの出力端や電子カードの出力からデータを収集する。周波数領域は0.03~10 Hzで、ゲインはおよそ80 dbである。データはA/D変換され磁気テープに収録され、計算機で処理されてRMS値やパワースペクトル密度などが求められる。

〈2・2〉 試験対象とした電子カード 新製造のアナログ電子カード、1年間使用したもの、およびおよそ10年間使用した現場のアナログ電子カードについて、前述の内部雑音のRMS値を求めた。

各アナログ電子カードにおける内部雑音のRMS値の分布を図2に示す。新製造のアナログ電子カードと1年間使用したものにおける内部雑音のRMS値の分布にはほとんど差のないことがわかる。それに比べて、およそ10年間使用したアナログ電子カードにおける内部雑音のRMS値の分布は、新製造、1年間使用したものとは比べて明らかに異なり、内部雑音のRMS値が大きいほうへ広がっている傾向を示している。これは、経年変化による劣化の傾向が内部雑音のRMS値の大きさに表れることが指摘されているもの

Degradation Detection Methods for Analogue ICs Using in Real Plants. By Hiroshi Inujima, Member(Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp.), Uichi Kichijima(Power & Industrial Systems Center, Mitsubishi Electric Corp.)

犬島 浩：正員，三菱電機(株)中央研究所
吉島宇一：非会員，三菱電機(株)制御製作所

図 1 内部雑音測定系概略図

Fig. 1. Schematic diagram of noises maeasurement system.

と想定される。

〈2・3〉 アナログ電子カードの内部雑音の特徴

前節で述べたように、アナログ電子カードに実装されている IC の経年変化はその内部雑音に現れることを示唆するデータが得られたと考えられる。この雑音の性質をより詳しく調べるために、およそ 10 年間使用されたアナログ電子カードを収集し、観測された内部雑音の波形を検討した。223 例の内部雑音を調査したところ、RMS 値は $0.47 \sim 218.7 \mu\text{V}$ の範囲に存在した。その内訳は、 $0 \sim 5 \mu\text{V}$ のものが 160 個、 $5 \sim 10 \mu\text{V}$ のものが 18 個、 $10 \sim 15 \mu\text{V}$ のものが 22 個、 $15 \sim 20 \mu\text{V}$ のものが 7 個、 $20 \sim 25 \mu\text{V}$ のものが 4 個、 $25 \sim 30 \mu\text{V}$ のものが 4 個、 $30 \mu\text{V}$ 以上のものが 8 個であった。また、未使用の IC は $1 \mu\text{V}$ 前後に分布していることがわかっている。種々の雑音レベルのものが含まれるように、223 例の中から 20 例サンプリングし、劣化の判定基準の評価を試みた。

図 3 に観測されたランダム雑音の波形例を示す。

図 2 内部雑音の RMS 値分布図

Fig. 2. Distributions for RMS values of output noise.

図 3 観測された内部雑音の時系列データ

Fig. 3. Observed output noises of sequential data.

(a)図に見られる波形のRMS値は $0.47\mu\text{V}$ で、新製造品や1年間使用したアナログ電子カードで観測されるものとよく類似している。(b)図に見られるランダム雑音のRMS値は $20.3\mu\text{V}$ で、(a)図より大きなRMS値を有し、実験室で劣化させたICの波形に類似している。図4に図3(a)～(c)のパワースペクトル密度を示す。比較のため、新製造品および実験室で

劣化させたICから得られた内部雑音のパワースペクトル密度を示す。パワースペクトル密度の形状には大きな差がなく、これらの雑音における差異は実効値に最も大きく表れている。

3. ICの解体調査

〈3・1〉 解体調査方法 現場で収集した内部雑音

図4 内部雑音のパワースペクトル密度

Fig. 4. Power spectral densities of output noises.

表1 検討対象とした内部雑音のRMS値と欠陥の状況

Table 1. Effects of output noise RMS value on defects.

内部雑音の RMS 値 (μV)	酸化膜欠陥	配線膜欠陥	拡散部欠陥	評 価	光学顕微鏡観察	ボルテージコ ントラスト観 察	EBIC 像観察	赤外線顕微鏡観察	アルミ被膜除 去後の観察
0.47									
0.48									
0.66									
1.42									
1.88									
2.49									
2.59									
9.22									
11.1	×	×		欠陥	×		×	×	
13.1									
14.4	×	×		欠陥	×			×	×
15.9		×		欠陥	×			×	
16.8	×	×		欠陥	×			×	×
17.0	×			欠陥	×		×	×	×
19.5									
20.3	×	×	×	欠陥	×			×	×
20.9		×		欠陥	×			×	×
26.4									
125.0			×	欠陥	×			×	×
218.7	×	×	×	欠陥	×			×	×

×印は何らかの欠陥が発見されたことを意味する。

図 5 IC 等価回路と欠陥が観察された位置(○印)

Fig. 5. Equivalent circuit of tested ICs and positions of defects.

図 6 欠陥 No. 1 の光学顕微鏡写真

Fig. 6. Optical microscope photograph of the defect (No. 1).

図 7 欠陥 No. 2 の光学顕微鏡写真

Fig. 7. Optical microscope photograph of the defect (No. 2).

の大きい IC には、具体的にどのような物理的变化が生じているかを見るために解体調査を行った。内部チップを損傷せずに機械的手法によりパッケージを除去した後、腐食、打こん跡、スクラッチ、サージ印加などによる pn 接合面の欠陥を観察するために、以下に示す 5 種類の解体調査法を用いて調査した。

- (i) 内部チップの表面観察(光学顕微鏡倍率 400 倍)
- (ii) 電圧コントラスト像による電位状態観察
- (iii) EBIC(Electron Beam Induced Current)像による接合面の観察
- (iv) 赤外顕微鏡によるチップ裏面観察(観察倍率 400 倍)
- (v) チップ表面アルミ配線パターン除去後の表面観察

〈3・2〉 オペアンプの解体調査結果 内部雑音の RMS 値をパラメータとして前述の 20 例を調査対象

とした。以下、5 観察方法においては、同一の IC を用いて検討している。解体調査結果を表 1 にまとめて示した。内部雑音が $9.22 \mu\text{V}$ 以下の 8 例に関しては、解体した結果、何ら欠陥は観察されなかった。内部雑音が $11.1 \mu\text{V}$ 以上の 12 例に関しては、 13.1 , 19.5 , $26.4 \mu\text{V}$ の 3 例を除いて何らかの欠陥を有している。欠陥が発見された 9 例のうち、経年変化によると推定されるものが 3 例あった。残りの 6 例は製造時に形成されたものであった。

(1) 経年変化によると推定される欠陥例 経年変化によると推定される欠陥の例として、内部雑音が $125.0 \mu\text{V}$ を有する IC の解体結果を示す。

(i) 内部雑音が $125.0 \mu\text{V}$ の場合 対象 IC の等価回路および欠陥が見られる箇所を図 5 に示す (No.1, No.2)。欠陥が見られる箇所の光学顕微鏡による表面観察を図 6 と図 7、赤外顕微鏡チップ裏面観察チップ表面を図 8、図 9、アルミ配線パターン除去

後の表面観察を図 10, 図 11 にそれぞれ示す。

図 5 に示した欠陥 No. 1 はコンデンサ部分で, 図 6 に見られるようにパターン生成時に発生したものと考えられる。これは IC の機能上大きな影響を与えるものとは考えられない。図 5 に示した欠陥 No. 2 はトランジスタ Q_{13} のコレクタ部分に相当している。これはパターン生成時に異物が付着し, 経年変化により拡散領域で腐食が進行したものと考えられる。アルミ配線パターン除去後の図 11 を見ると, 拡散領域まで腐食が進行しており, このことを裏付けている。EBIC 像は正常と考えられるパターンと比較するとコントラストは弱く, 異常を示していた。これは pn 接合面にリークの存在が発生していることを示唆している。図 3 (c) に示した大きなランダム雑音は, トランジスタのコレクタ部分の欠陥, pn 接合面のリークに起因したものと考えられる。電圧コントラスト像による電位状態には何ら欠陥は観察されなかった。

(2) 製造時に形成された欠陥例 製造時に形成された欠陥の例として, 内部雑音が $20.3\mu\text{V}$ を有する IC の解体結果を示す。

(i) 内部雑音が $20.3\mu\text{V}$ の場合 対象 IC の等価回路および欠陥が見られる箇所を図 5 に示す (No. 3, No. 4, No. 5, No. 6)。欠陥が見られる箇所の光学顕微鏡による表面観察を図 12~図 15 にそれぞれ示す。図 12 は図 5 に示した欠陥 (No. 3) でトランジ

図 8 赤外顕微鏡写真(欠陥 No. 1)
Fig. 8. Infrared spectroscopy of defect (No. 1).

図 9 赤外顕微鏡写真(欠陥 No. 2)
Fig. 9. Infrared spectroscopy of defect (No. 2).

図 10 アルミパターン除去後の顕微鏡写真
(欠陥 No. 1)

Fig. 10. Optical microscope photograph of the defect (No. 1) after removing Al pattern from the IC chip surface.

図 11 アルミパターン除去後の顕微鏡写真
(欠陥 No. 2)

Fig. 11. Optical microscope photograph of the defect (No. 2) after removing Al pattern from the IC chip surface.

図 12 欠陥 No. 3 の光学顕微鏡写真
Fig. 12. Optical microscope photograph of the defect (No. 3).

図 13 欠陥 No. 4 の光学顕微鏡写真
Fig. 13. Optical microscope photograph of the defect (No. 4).

図 14 欠陥 No. 5 の光学顕微鏡写真
Fig. 14. Optical microscope photograph of the defect (No. 5).

図 15 欠陥 No. 6 の光学顕微鏡写真
Fig. 15. Optical microscope photograph of the defect (No. 6).

図 16 赤外顕微鏡写真(欠陥 No. 3)
Fig. 16. Infrared spectroscopy of defect (No. 3).

図 17 アルミパターン除去後の顕微鏡写真
(欠陥 No. 3)
Fig. 17. Optical microscope photograph of the defect (No. 3) after removing Al pattern from the IC chip surface.

図 18 アルミパターン除去後の顕微鏡写真
(欠陥 No. 5)
Fig. 18. Optical microscope photograph of the defect (No. 5) after removing Al pattern from the IC chip surface.

スタ Q_1 のコレクタ部分に相当する。IC 製作時に生成されたひっかき傷(スクラッチ)がある。図 16 の赤外顕微鏡チップ裏面を見ると、経年と共に腐食したこん跡も観察される。図 17 のアルミ配線パターン除去後の表面を観察すると、エミッターベース間に欠陥が見られる。図 13 と図 15 は図 5 に示した欠陥 (No. 4, No. 6) の製作時に生成されたスクラッチである。赤外顕微鏡チップ裏面およびアルミ配線パターン除去後の表面には大きな欠陥は観察されなかった。図 14 は図 5 に示した欠陥 (No. 5) で R_{11} の抵抗に相当する部分である。アルミ配線と抵抗体の接続部分に欠陥がある。図 18 のアルミ配線パターン除去後の表面を見ると、このことが裏付けられていることがわかる。トランジスタ Q_1 のコレクタ部分アルミ配線の欠落による抵抗の増加 (No. 3), エミッターベース間に欠陥 (No. 3), アルミ配線と抵抗体の接触抵抗の増加 (No. 4, No. 5) などが推定される。なお, No. 3 ~ No. 6 の欠陥は、電圧コントラスト像による電位状態および EBIC 像による接合面の観察には何ら欠陥は観察されなかった。

4. 増幅器における雑音発生

増幅器における雑音は、増幅器の内部において熱雑音、ショット雑音、生成・再結合雑音などとして発生する。これらの雑音を無雑音な理想増幅器の入力に置き換えて、図 19 のモデルとして表すことができる。

増幅器内部から発生する雑音は、入力換算雑音電圧源 (E_n)、入力換算雑音電流源 (I_n) に置き換えられるほか、増幅器の入力端に接続する信号源抵抗 (R_s) の熱雑音電圧に相当する信号源雑音電圧源 (E_s) を考える。 R_s は無雑音抵抗として取扱う。一般に上記の三つの雑音源は独立であり、これらを一つの雑音源としてまとめた等価入力雑音 (E_{ni}) の平均電力は (1) 式で

図 19 増幅器の雑音発生モデル
Fig. 19. Noise generation model of an amplifier.

表される。

$$\hat{E}_{ni}^2 = \hat{E}_s^2 + \hat{E}_n^2 + \hat{I}_n^2 R_s^2 \dots \dots \dots (1)$$

バイポーラトランジスタで観察される雑音について、第3章で行った解体調査と雑音発生の関連を推定する。バイポーラトランジスタの入力換算雑音電圧 E_n の平均電力は熱雑音に対するナイキストの定理を用いて(2)式で表されることが知られている⁽⁴⁾。ただし、フリッカ項は無視している。

$$\hat{E}_n^2 = 4kT(r_{bb} + r_e/2)\Delta f \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 r_e : エミッタ抵抗、 T : 絶対温度、 r_{bb} : ベース広がり抵抗、 Δf : 等価雑音帯域幅、 k : ボルツマン定数

次に、入力換算雑音電流は pn 接合面で発生する電子の不規則発生に基づく電流の揺らぎである。その平均電力は、例えば文献(5)における陰極線の揺らぎと同じように計算することができ、(3)式で与えられる。

$$\hat{I}_n^2 = 2qI_B\Delta f \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 I_B : ベース電流、 q : 電子の電荷

トランジスタ pn 接合面の欠陥が存在する場合、電流性雑音への影響は定性的に次のように説明できる。pn 接合面の欠陥はトランジスタの性能から見てエミッタ接合抵抗の増加および電流増幅率の低下として現れると推定される。エミッタ接合抵抗 r_e の増加は E_n の増加を意味する。電流増幅率はコレクタ電流とのベース電流の比で定義されていることから、電流増幅率低下はベース電流 I_B の増加を意味する。従って、(3)式から、 I_n が増加、大きくなると考えられる。

このほか、解体調査からもわかるように、トランジスタのコレクタ部分のアルミ配線の欠落による抵抗の増加、アルミ配線と抵抗体の接触抵抗の増加などに起因して内部雑音が増加したものと推定される。

5. 終りに

本研究は、現場で収集したアナログ電子カードの IC について、著者が既に提案した雑音レベルによる劣化検出法を適用した報告である。長時間使用したアナログ IC と使用期間の短いものの内部雑音には RMS 値の分布に差が見られた。内部雑音の大きなものについて解体調査した結果、欠陥が存在することが認められた。その多くは製造時に形成された欠陥であるが、経年変化によると考えられるものも存在する。製造時の欠陥が多いのは、当時の製造技術の限界と考えられる。現在の製造技術は格段に向上しており、ここで発見されたチップ上のスクラッチなどは皆無である。しかし、腐食や弱いサージ電圧が加わるなどの原因で劣化し IC の中で構成されているトランジスタの電流増幅率が低下した場合、内部雑音を測定することで、劣化の検知が可能であることを指摘した。IC の出力端で観測された内部雑音の RMS 値に着目した手法は機能上差の表れないアナログ IC の劣化検出法の一つとして有効な手法であると考えられる。

最後に、本研究を進めるのにあたり、終始直接御指導いただきました早稲田大学理工学部電気工学科秋月影雄教授に對し心からお礼申し上げます。

(昭和63年11月4日受付、平成元年6月27日再受付)

文 献

- (1) 例えば、塩見・岡本・高橋 編：電子デバイス・部品の故障解析と材料評価最新実例資料集(昭59)サイエンスフォーラム社
- (2) 新谷・森・犬島・吉島：「電子回路の異常診断」, 日本原子力学会「昭62秋の大会」, 予稿集, B 46
- (3) 犬島・吉島：「電子回路の劣化診断」, 電学論 C, 109, 499 (平成元)
- (4) Nielson: "Behavior of Noise Figure in Junction Transistors", *Proc. IRE*, 957 (1957-7)
- (5) Aldent Van Der Ziel: 雑音(昭32)近代科学社