

# 電子機器用部品の信頼性向上に関する研究

## — Cu-Ni合金発熱体の破損原因の究明 —

河野 裕・橋田 鉄雄

### Study on Improvement of Reliability for Parts of an Electronic Apparatus

#### — Research on Cause of Damage for Cu-Ni Alloy Heater —

Hiroshi KOHNO and Tetsuo KITTA

#### 要 約

現場で使用された樹脂封着Cu-Ni合金発熱体の破損原因について、振動試験機を使用してCu-Ni合金抵抗線の疲労試験および破損品の顕微鏡観察、X線分析により検討した。その結果、疲労試験後の金属表面に剥離状痕およびデンドライト組織が認められ、さらに破損部から腐食性元素であるClが検出された。このことから、疲労と腐食の相乗作用により線径が細くなった箇所が生じ、この部分の加熱により溶断に至ったものと推察された。

#### 1. 緒 言

電子部品・機器は、民生・産業等の広い分野で使用されているが、使用環境の多様化も相まって、製品生産段階では予期し得ないトラブルが多発<sup>1)</sup>している。また、小型化・軽量化の要求や様々な使用環境に対応するため、電子部品を樹脂封着して使用する傾向<sup>2),3)</sup>にあり、当センターへの電子部品の故障解析に関する技術相談や依頼試験・分析も増加している。

本研究では、実際の製品で問題となっているCu-Ni合金発熱体の封着部の破損について、温度変化による包囲材料の伸縮・膨張現象から合金線材への応力の負荷を想定した金属の疲労実験、破断部分の観察、および封着樹脂などの腐食性成分の分析を行い、破損原因を追究した。

#### 2. 実験方法

##### 2-1 試 料

本実験に供した試料はCu-Ni合金発熱体であり、これは発光ダイオードを用いた燈火装置への着雪を取り除くための融雪ヒーターとして使用されている。試料の形状を図1に示し、その構造は次の通りである。

- ① ポリカーボネート（以下：PC）製の筒に円周方向に対して直角にアクリル系粘着剤の両面テープが貼られている。
- ② ①に対し、Cu-Ni合金抵抗線（線径0.14mm、以下：Cu-Ni線）が仮止めされて円周方向に巻かれている。
- ③ その上へ両端を両面テープに仮止めされながらポリエチレンテレフタレート（以下：PET）およびPCによる透明なフィルム（以下：PC/PETフィルム）が覆ってある。

- ④ PC/PETフィルムのつなぎ目がSi系モールド樹脂で封着されている。

試料に供したCu-Ni線の化学成分は、Ni：10～11%、

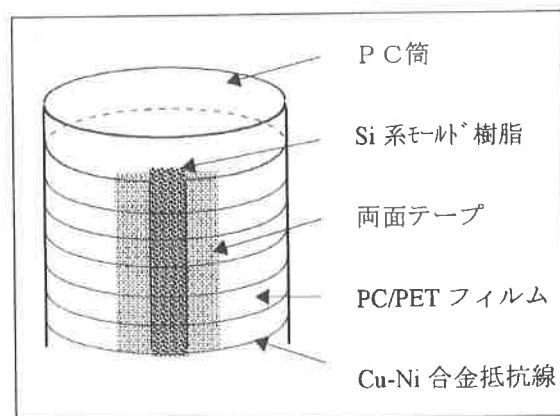


図1 Cu-Ni合金発熱体

Mn：1.0%以下、Fe：0.3%以下、Cu：残部、である。

##### 2-2 破断状況

破損品を検討すると、以下のことが観察された。

- ① 破損部分は、PC/PETフィルムのつなぎ目を、両面テープおよびSi系モールド樹脂で封着した部分で発生している。
- ② 破断箇所のCu-Ni線には歪曲が認められ、熱により、PC/PETフィルムの熱膨張と熱収縮による応力が発生した可能性がある。

### 2-3 疲労試験

2-1 および 2-2 より、基材のPC筒および包囲材のPC/PETフィルムの熱伸縮率<sup>7)</sup>とCu-Ni線の熱膨張率<sup>6)</sup>との差により、樹脂封着部分の線材に負担が集中して破断にいたった可能性が考えられる。

周囲温度が-10℃の環境下でサーモスタットが約3分に1回動作し、融雪ヒーターが動作する頻度は、1日約500回、3ヶ月では約50,000回となる。そこで、電磁式振動試験機（エミック(株)製 F-1000BD-A-E78）を使用してCu-Ni線に断続的に歪みを与え、熱によるPC筒、PC/PETフィルムおよびCu-Ni線の膨張・収縮により線材にかかる歪みを想定した疲労試験を行った。線長25cmのCu-Ni線を図2に示す治具を用いて、振動試験機のフレーム部分と加振部分に縦方向にピン間距離65mmで固定し、表1に示す条件で疲労試験を行った。

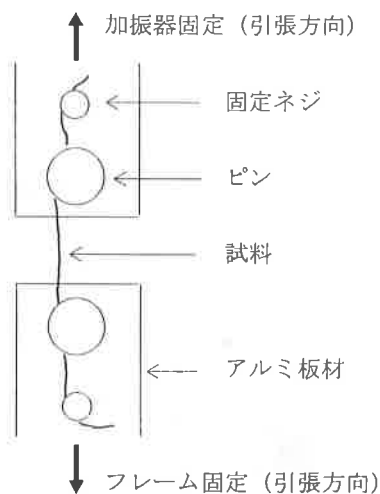


図2 試料固定治具

表1 疲労試験条件

	周波数 [Hz]	振幅 [mm]	加速度 [G]	速度 [cm/s]	繰り返し数 [回]
①	100	0.5	10.06	15.71	1x10 <sup>3</sup> , 3x10 <sup>3</sup> , 5x10 <sup>3</sup> , 7x10 <sup>3</sup> , 1x10 <sup>4</sup> , 3x10 <sup>4</sup> , 5x10 <sup>4</sup> , 7x10 <sup>4</sup> , 1x10 <sup>5</sup>
②	100	1.0	20.13	31.42	1x10 <sup>3</sup> , 3x10 <sup>3</sup> , 5x10 <sup>3</sup> , 7x10 <sup>3</sup> , 1x10 <sup>4</sup> , 3x10 <sup>4</sup> , 5x10 <sup>4</sup> , 7x10 <sup>4</sup> , 1x10 <sup>5</sup>
③	50	0.5	2.52	7.85	1x10 <sup>4</sup>
		1.0	5.03	15.71	
		1.5	7.55	23.56	
		2.0	10.06	31.41	
		2.5	12.58	39.27	

一例として、表1の疲労試験条件の②における振動試験機の加振波形を図3に示す。

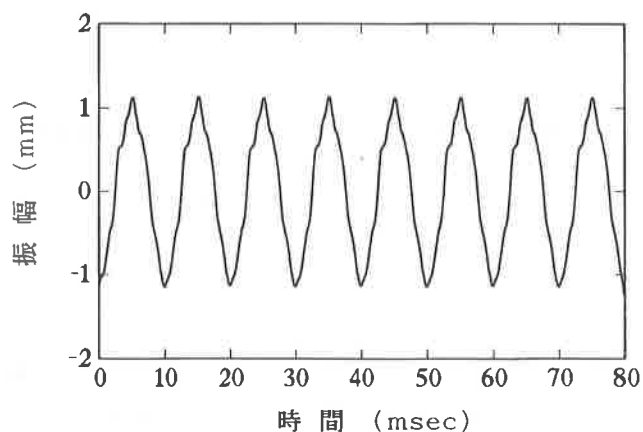


図3 100Hz, 1.0mm時の加振波形

疲労試験後の試料を材料強度測定、電気抵抗測定、および表面観察により評価した。材料強度測定は、試料を図2に示す治具にピン間距離60mmで固定して、万能材料試験機（(株)東洋ポールドウィン製 テンシロン UTM-250）により表2の条件で引張試験を行い、引張破断加重の測定値で評価した。電気抵抗測定は、デジタルマルチメータ（YHP(株)製 3457A）により、試料を長さ50mmでクランプして、4端子法による測定値で評価した。

表2 引張試験機条件

ロードセル	50kgf
クロスヘッドスピード	20mm/min
チャートスピード	20mm/min
フルスケール	1 kgf

また表面観察は、金属顕微鏡（(株)ニコン製 EPIPHOT-TME）により疲労試験のピン間中央部近傍を倍率200倍で観察して評価した。

以上の実験方法により材料の機械的な伸縮の繰り返しの疲労破損の可能性を検討した。

### 2-4 破損部分の観察・分析

現場で使用され実際に破損した融雪ヒーターについて、金属顕微鏡および走査型電子顕微鏡（日本電子(株)製 JXA-840A：以下「SEM」）によりCu-Ni線破断部分の観察を行い、またX線マイクロアナライザー（SEMに同じ：以下「EPMA」）により破断部分の定性分析を行った。さらに、蛍光X線分析装置（セイコー電子(株)製 SEA2001）により封着材料であるSi系モールド樹脂と仮止め用の両面テープ

の粘着部分の定性分析を行い、腐食による破断について検討した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 疲労による破壊の検討

振動試験機によるCu-Ni線の疲労試験後に行った評価試験結果を図4、5に示す。図4は繰り返し数を $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 回とした試料の引張破断加重および抵抗値の変化を示し、図5は加振器の振幅設定を0.5~2.5mmとした試料の引張破断加重および抵抗値の変化を示す。図4、5より微少ではあるが、疲労による破断加重の低下が見られた。これは、振幅・繰り返しによる疲労試験によりCu-Ni線がのびて断面積が減少したためと考えられる。しかし、変化が微少であることから、これだけで破断の主原因とは判断できない。また、抵抗値はバラツキが大きく疲労試験との関連性を得ることができなかった。

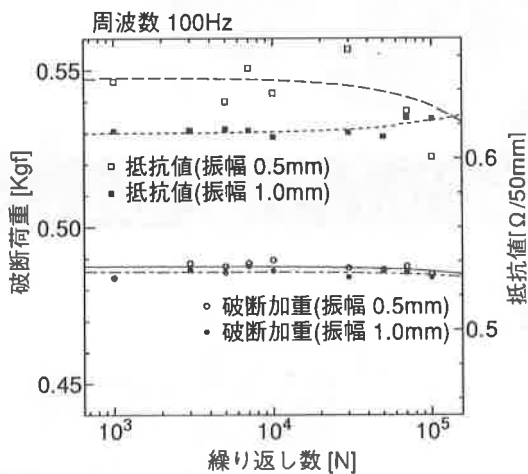


図4 繰り返し数による破断加重と抵抗値の変化

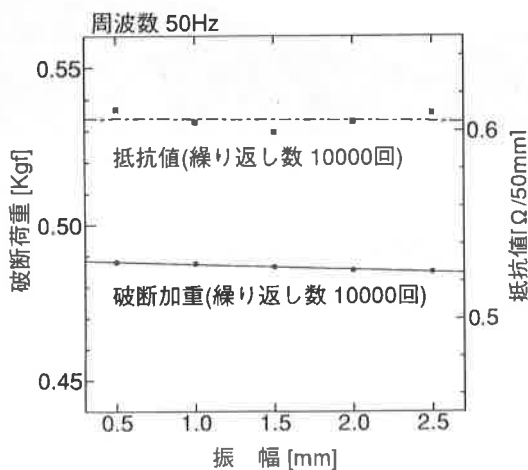


図5 振幅による破断加重と抵抗値の変化

次に、金属顕微鏡によるCu-Ni線の観察結果を図6~11に示す。図6は疲労試験前、図7~8は振幅0.5mm時の繰り返し数による変化、図9~10は繰り返し数10,000回時の振幅による変化を示す。図11は実際に現場で使用された破損品のCu-Ni線破断部近傍である。

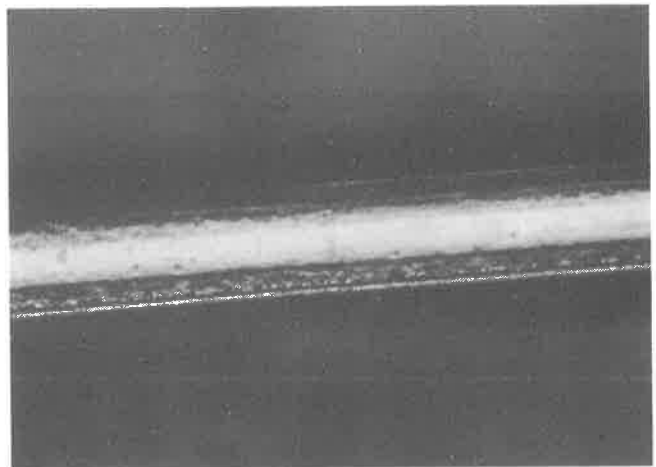


図6 疲労試験前の表面



図7 繰り返し数 $10^3$ 回 (周波数100Hz, 振幅0.5mm)

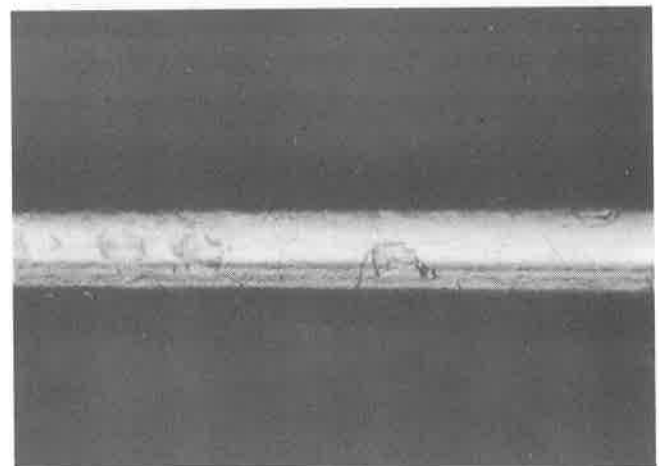


図8 繰り返し数 $10^5$ 回 (周波数100Hz, 振幅0.5mm)

図7~8を見ると、Cu-Ni線の表面に、疲労試験前の図6では見られなかった剥離状の痕跡が発生し、繰り返し数

の増加とともにその数が増加している。また、図9～10において同様に、振幅の増加とともに表面の剥離状の痕跡が増加している。また、破損品の破断部近傍を観察した図11でも同様な現象が見られたことから、繰り返し数の増加および振幅の増加、すなわち疲労の進行にともないCu-Ni線の表面に剥離が生じて線材の強度が低下したことが推察される。

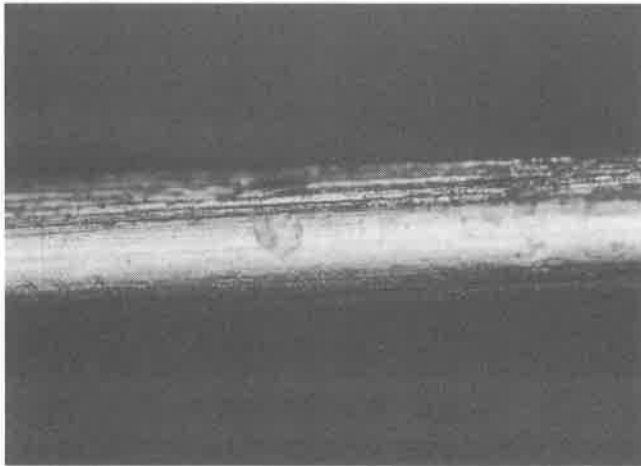


図9 振幅0.5mm (周波数50Hz, 繰り返し数10<sup>4</sup>回)

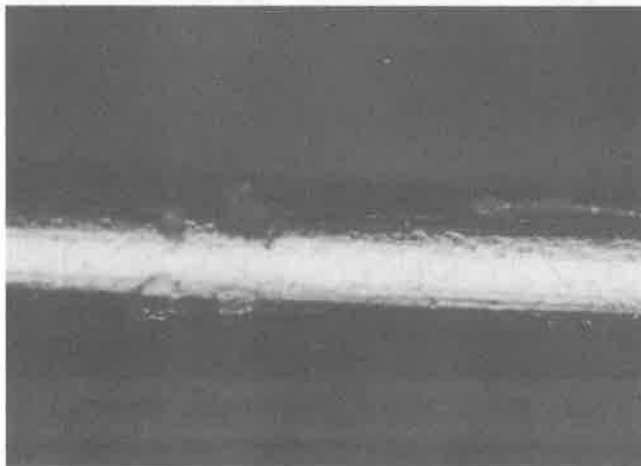


図10 振幅2.5mm (周波数50Hz, 繰り返し数10<sup>4</sup>回)

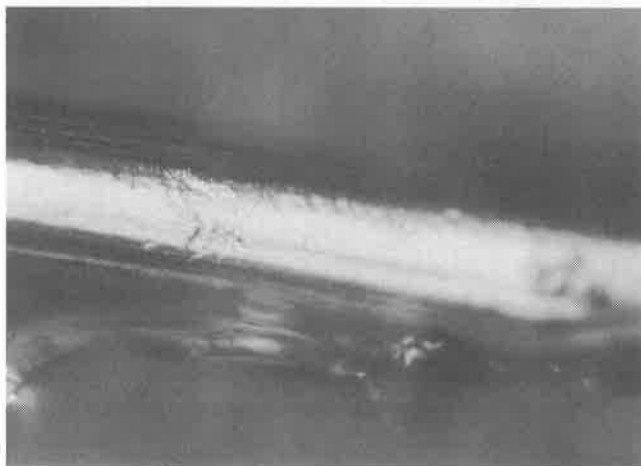


図11 破損品破断部近傍の金属顕微鏡観察

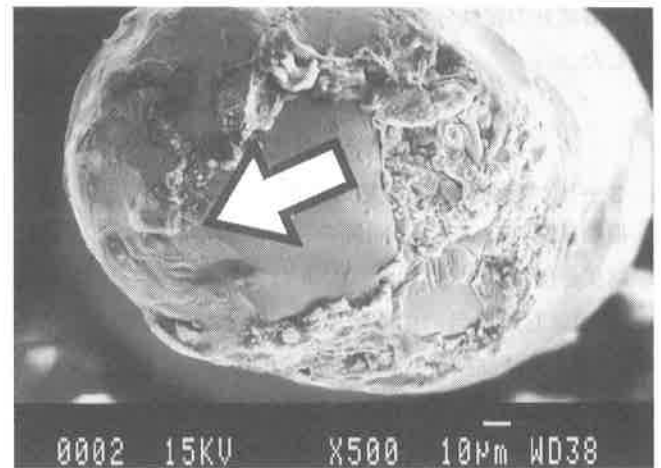


図12 破断部断面のSEM観察 - 1

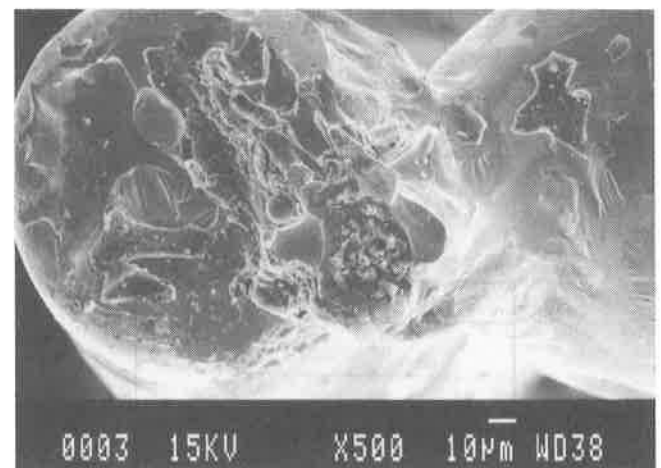


図13 破断部断面のSEM観察 - 2

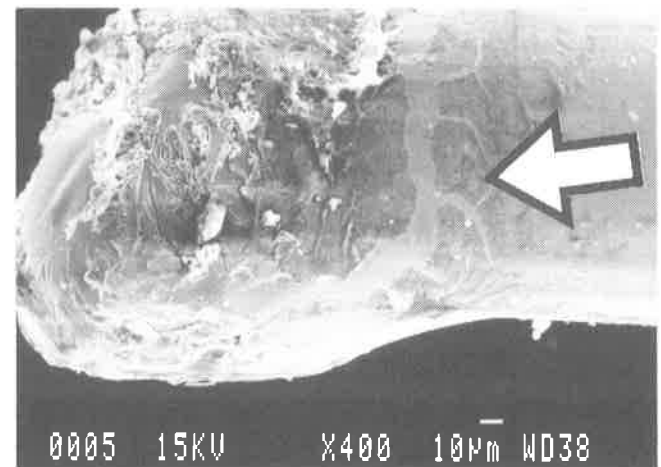


図14 破断部側面のSEM観察

### 3-2 SEM観察による破損品の検討

SEMによる破損品のCu-Ni線破断部近傍の観察結果を図12～13に、破断部側面の観察結果を図14に示す。観察条件は、加速電圧15kV・照射電流  $6 \times 10^{-8}$  A、倍率は、破断部近傍観察が500倍、側面観察が400倍である。図12、13は本来1本の線で繋がっていたものであるが、破断面に共通する部分が見当たらない。図12の矢印部分からはデンドライト状の痕跡が見られ、溶断の可能性が高いが、図13には見

当たらず、その破断面は疲労破壊に近い。図14の破断面右側の膨れ部分からは、図12と同じデンドライト状の痕跡が認められた。図14より、破断面から線長方向へ向かって約150 $\mu\text{m}$ の部分に数 $\mu\text{m}$ 程度のくびれが見られ、Cu-Ni線表面が引き剥がされたような形跡が認められた。

金属顕微鏡により観察された表面の剥離状の痕跡と合わせて考えると、Cu-Ni線になんらかの引張応力が作用しているものと考えられる。この応力は、PC/PETフィルムの端面がつなぎ目の部分で動くことにより発生した可能性が高いため、これも破断原因の一つと推察される。また、図14の矢印で示した部分からは、クレーター状の痕跡が認められた。Cu-Ni線がヒーターとして使用されており、周囲温度が-10 $^{\circ}\text{C}$ の環境下で約3分毎にon/offされることから、熱によるCu-Ni線自身の収縮・膨張で疲労した可能性も考えられる。

### 3-3 腐食による破壊の検討

Cu-Ni線をEPMAにより、表3に示す6つの項目について高速定性分析を行った。表4にその結果を示す。分析条件は、加速電圧15kV、照射電流 $1 \times 10^{-8}\text{A}$ である。

表3 EPMA分析項目

①	加工前の線材表面
②	図12の破断面断面
③	図13の破断面断面
④	図13の破断面右側膨れ部分近傍
⑤	図14の破断面側面
⑥	破損品の破断面近傍では無い部分

表4 EPMA分析結果

	O	Na	Si	Cl	Mn	Fe	Ni	Cu
①	—	—	—	—	●	—	●	●
②	●	●	●	●	●	—	●	●
③	●	—	●	—	●	—	●	●
④	●	—	●	—	●	—	●	●
⑤	●	●	●	●	●	—	●	●
⑥	—	—	—	—	●	—	●	●

●：検出，—：未検出

分析結果より、破断面近傍(②, ⑤)から腐食性元素であるClの検出が認められたが、加工前の線材、破損品の破断面部以外の部分(①, ⑥)からはClは検出されなかった。このことは、ClがCu-Ni線破断面の付着物に含有されていることを示すものである。③, ④ではClは検出されず、図13の膨れ部分はCu-Ni線と同一成分であった。その他の検出元素であるOは酸化物、Siはモールド樹脂成分と考えら

れる。次にSi系モールド樹脂およびアクリル系粘着材の両面テープを蛍光X線分析装置により定性分析したところ、両面テープから微量のClのピークが認められた。このことから、付着物はアクリル系粘着材中のClがCu-Ni線材と反応した腐食生成物と考えられる。Cu-Ni線は、Clにより腐食されることから、Cl系反応生成物が破断面から検出されたことは、アクリル系粘着材中のClが破断に影響したものと考えられる。以上のことから、最終的に断線した原因はデンドライト状の痕跡が認められたことより溶断と考えられるが、溶断に至るまでには、Cu-Ni線の疲労ならびにClによる腐食が発生し、Cu-Ni線の断面積が局所的に減少するものと考えられる。いったんくびれが生ずると、この箇所部分的に抵抗値が上昇するため、発熱量が増加し、腐食、疲労がさらに進行する。そして、最終的に溶断に至るものと推察される。

## 4. 結 言

現場で使用されたCu-Ni合金発熱体の封着部の破損についてCu-Ni合金抵抗線の破断原因を検討し、以下の結果が得られた。

- ① Cu-Ni線の疲労の進行にともない表面に剥離が生じて線材の強度が低下したことが推察された。
- ② SEM観察により、破断部近傍からデンドライト状及びクレーター状の痕跡が認められ、熱による線材への影響が推察された。
- ③ 破損部分の分析により、破断部および粘着テープから腐食性元素のClが検出された。

①～③の結果より、まずSi樹脂封着部分のCu-Ni線に疲労が集中して断面積が局所的に減少し、抵抗値の上昇と発熱量の増加があり、そこへ粘着テープ中のClが反応して腐食が進み、疲労と腐食の相乗作用により溶断に至ったものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 宮長文吾：材料の破損とその対策，日刊工業新聞社，1990
- 2) 日本材料学会腐食防食部門委員会編：電子部品の腐食損傷と解析，さんえい出版，1990
- 3) 川田雄一：金属の疲労と設計，オーム社，1982
- 4) 日本機械学会編：腐食と破壊—環境を考慮した設計・対策・評価と事例，日本工業出版，1985
- 5) 工業調査会編集部編：電子工業用プラスチック，工業調査会，1983
- 6) 日本金属学会編：改定3版金属データブック，丸善，1993
- 7) 日本規格協会編：非金属材料データブック，日本規格協会，1985