直流電流による プリント配線板導体箔の溶断過程

首藤 克彦*, 鶴見 策郎*

The Melting Process of Foil Conductor
in Printed Circuit by Direct Current.

Katsuhiko SHUTOH* and Sakuro TSURUMI*

* 東京理科大学理工学部電気工学科 (〒278 千葉県野田市山崎 2641)

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo (2641, Yamazaki, Noda-Shi, Chiba, 278.)

概要 本論文は、プリント配線板の導体箔に直流電流を印加した場合の溶断過程につき、モデルプリント配線板を用い、実験的に明らかにしたものである。

モデルプリント配線板は、導体箔の厚さ $35\mu\text{m}$ 、幅 $0.5\sim 1\text{mm}$ 、長さ 100mm の直線状のものをを用い、直流電流を印加した場合の溶断電流値を求めるとともに、溶断過程の観察を行った。

この結果、導体箔の厚さ $35\mu\text{m}$ のプリント配線板の場合、導体箔の幅 1mm あたり 15A の直流電流を印加すると電流印加後 10 秒以内に溶断することが判明し、また、それ以下の電流を印加した場合においても、導体箔は赤熱し溶断にいたり、場合によっては、プリント配線板基材が炎上に至る場合があることが判明した。

Abstract

The experimental studies on the melting processes of foil conductor in printed circuits by direct current are described. The experiment was carried out on the model printed circuit, which has a thickness of $35\mu\text{m}$, widths of 0.5 and 1mm , and length of 100mm .

The melting current of foil conductor in the period of 10 seconds was about 15 amperes per 1mm of widths. In case that the applied current was under 10 amperes per 1mm of widths, the foil conductor was not melted. And when the applied current was 10 to 12 amperes per 1mm of widths, the foil conductor was torn off from the plastic board and occasionally the plastic board burned up.

1. まえがき

電子機器の構成部品としてのプリント配線板は、近年、より高い信頼性と精度が要求されるようになった。また、電子機器は、一般家庭においても多く使用されるようになり、最近では、一般家庭用保安装置などにも電子応用機器が使用される傾向にある。

これらの機器の中には、通信回線で外部と接続さ

れているものも多く、このような電子機器は、落雷や、その他の障害により過電圧が印加される場合がある。民生用、特に、家庭用電子機器は、過電圧・過電流に対する保護が十分ではないものも多く、雷電流などによる障害が予想される。電子機器が雷電流など、大電流・高電圧により破壊された場合、電流の流入経路や、流入電流値についての検討は、電子機器の保護対策にとって重要である。

プリント配線板導体箔のインパルス耐電流特性に

については、前報で報告したが¹⁾、一般に、電子機器に過電圧が印加された場合、回路部品が過電圧により絶縁破壊され、このため、この部分に通常のレベルに比較すると、非常に大きい値の電流が流れ、この電流のため、プリント配線板導体箔が変形し、破断または熔断に至る場合が多い。

雷撃電流は、電源より電子機器に侵入する例が多く、侵入した電流値が大きい場合、電源トランスが絶縁破壊され、電源トランス二次側の整流素子、コンデンサ等が破壊に至る。侵入した電流値が小さい場合には、障害は整流素子の破損程度のときも多い。

これらのプリント配線板を調査すると、プリント配線板導体箔の破損状況は、インパルス電流による破損と異なる状況を示している場合が多く見うけられる。

破損状況は、雷撃電流により回路素子が絶縁破壊され、この絶縁破壊された部分を通してプリント配線板導体箔に電流が流入し、プリント配線板導体箔に通常のレベルより大きい電流が流れ、このためプリント配線板導体箔が熔断に至ったと考えられる例が多く、これらの中には、プリント配線板の基材が黒変している例も見られる。

一般に、雷撃電流等のインパルス電流は、その継続時間が、 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec と短いため、交流あるいは直流電流に比較すると、電流の最大値は大きいとそのエネルギー量は比較的小さい。このため、インパルス電流の流入により、プリント配線板の基材が黒変・炭化する例は少ない。

これらのことより、プリント配線板導体箔の直流耐電流特性を求め、プリント配線板導体箔に直流を印加した場合の形状変化を、基材の変形も含め検討する事は、プリント配線板の設計資料として、ま

た、大電流の流入により電子機器が破壊された場合の流入電流値の推定資料として重要と考えられる。

本論文は、プリント配線板導体箔に、直流を通電した場合の形状変化、ならびに直流耐電流特性について、モデルプリント配線板を用いて実験的に検討を行ったものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験回路

図1に実験回路を示す。

プリント配線板導体箔に電流を印加した場合、導体箔は温度上昇により抵抗が変化する。このため、直流電源には定電流電源を使用した。

通電時間は、試料に直列に挿入したダイオードの両端の電圧により、カウンタを動作させ測定した。

試料の両端の電圧は、トランジェントレコーダにより測定した。

2.2 試料

モデルプリント配線板は、厚さ $35\mu\text{m}$ の銅箔を張ったガラス基材エポキシ樹脂積層板を、エッチングによりパターン形成したものを用いた。

導体箔のパターンは、単純な直線状で、その形状は、図2に示すように、直線部の長さは 100mm である。また、直線部への電流の流入を考慮し、直線部の両端を曲線状とした。

試料の両端部は、試料ホルダへの取り付け時に試料ホルダとの接触抵抗を低減するため、接触部の面積を広くした。

図1. 実験回路

基材：ガラスエポキシ積層板
銅箔の厚さ： $35\mu\text{m}$
直線部の長さ： 100mm

図2. モデルプリント配線板の形状

2.3 実験方法

試料に一定の直流電流を印加し、その抵抗変化、ならびに溶断に至るまでの時間を測定した。

測定環境条件は、電流印加前における試料の周囲温度が17～20℃、無風状態である。

通電による形状変化は、写真により観測すると共に、通電後の試料の溶断部を、走査型電子顕微鏡で観察した。

溶断時間は、同一電流を10回印加し、その平均値をとった。また、電流印加時間が、15分以上となっても溶断に至らなかった場合、溶断しないものとして取り扱った。

また、通電により基材が炎上した場合も、溶断するまで通電を続けた。

3. 実験結果および検討

3.1 直流溶断電流値

モデルプリント配線板導体箔に、直流電流を印加した場合の印加電流値と、溶断に至るまでの時間を図3および図4に示す。図の電流値は、導体箔の幅

図3. 印加電流と溶断までの時間
(ソルダレジストコーティングを施していない場合)

図4. 印加電流と溶断までの時間
(ソルダレジストコーティングを施した場合)

1 mmあたりの電流値で表している。直流電流印加による印加電流値と溶断に至るまでの時間の関係は安定しており、各印加電流における溶断に至るまでの時間の誤差は、1.6 %以内であった。

モデルプリント配線板導体箔に、直流電流を印加した場合、印加電流値が、15 A/mm 程度以上では、導体箔は10秒以内に溶断するが、図に示すように表面に、ソルダレジストコーティングを施した試料の溶断電流値は、コーティングなしのものに比較すると、その値はわずかに高い値となる。

印加電流値が、10 A/mm 程度以下では、導体箔は溶断に至らない。

表1は、モデルプリント配線板のパターンの形状の違いによる、10秒の通電で溶断する電流値について比較したものである。表によると、同一電流を印加した場合、0.5 mm－1本、0.5 mm－2本、1 mm－1本の順に溶断までの時間が短くなっている。

表2に2～6A/mmの直流電流を印加したときのモデルプリント配線板導体箔の抵抗値、ならびに温度を示す。なお、ここに示す温度は、導体箔の抵抗値と銅の抵抗率の温度係数により計算で求めた値である。

印加電流値が、10 A/mm 以下の場合導体箔は溶

表1. 10秒間の通電により導体箔が溶断する電流値

モデルプリント配線板の形状	コーティングなし (A/mm)	コーティングあり (A/mm)
1 mm幅－1本	15.0	15.3
0.5 mm幅－2本	16.3	17.3
0.5 mm幅－1本	17.3	18.0

表2. 電流印加後の抵抗値と温度

印加電流値 (A/mm)	抵抗値 (mΩ)		温度 (注3)
	電流印加前(注1)	印加15分後(注2)	
2	58.0	58.7	22.0
4		66.0	54.2
6		78.3	107.0

試料の形状：1 mm幅－1本 コーティングなし

- 注1：ケルビンのダブルブリッジで測定した電流印加前の抵抗値
2：試料の端子電圧と印加電流値より求めた値
3：銅の抵抗率の温度係数より求めた値
4：実験時の室温21℃

断に至らないが、6 A/mm の電流を印加するとモデルプリント配線板導体箔の温度は、約90℃程度上昇する。

3.2 電流印加による溶断過程

モデルプリント配線板導体箔に直流電流を印加した場合、溶断に至るまでの変化は、ソルダレジストコーティングの有無、印加電流値などにより異なるが、以下のような過程で溶断に至る。

(1) ソルダレジストコーティングを施してない場合

a. 印加電流値が10～12 A/mm

導体箔全体が赤熱し、発煙、溶断に至る。プリント配線板基材が炭化する例も観察された。

b. 印加電流値が12～17 A/mm

導体箔は、数mmの長さで赤熱し、熱による膨張のため基材より剥離し、その点で溶断へと至る。

c. 印加電流が17 A/mm 程度以上

数mmの長さで赤熱し短時間で溶断に至る。

(2) ソルダレジストコーティングを施した場合

a. 印加電流値が10～14 A/mm

導体箔全体が赤熱し、発煙、時には炎上に至り溶断する。また、プリント配線板基材は炭化し、導体箔が溶断した後も、基材の炭化した部分を電流が流れ続ける例も多数観察された。

b. 印加電流値が14～18 A/mm

電流印加後ただちに数mmの長さで導体箔は赤熱し、ガスがソルダレジストコーティング膜を破り噴出する。以後、全体にこの現象が広がり、やがて溶断へと至る。

c. 印加電流値が18 A/mm 以上

数mmの長さで赤熱後短時間で溶断に至る。小爆発的な溶断のため、ソルダレジストコーティング膜が、数cmにわたり剥離している例が多数観察された。

導体箔の溶断過程を図5に示す。図はソルダレジ

(a) 電流印加後
30秒

導体箔は部分的に赤熱し変形が始まる。

(b) 電流印加後
60秒

導体箔の赤熱した部分よりコーティング膜を破り白煙を発する。

(c) 電流印加後
70秒

白煙は、多くの部分より激しく噴出する。基材は、黒変し、炭化が始まる。

(d) 電流印加後
80秒

導体箔は、全域にわたり赤熱し、基材の変形は激しい。

(e) 電流印加後
90秒

白煙は最も激しく噴出する。この直後に導体箔は溶断するが、溶断後も基材の炭化した部分を電流は流れる。

(f) 電流印加後
100秒

基材の一部より炎を上げ炎上。この状態が数秒間続く。

(g) 電流印加後
120秒

炎、白煙ともに消える。

(h) 基材が炎上
した部分

プリント配線板の形状：1mm—1本 印加電流値：13A/mm

図5. 直流電流印加による導体箔の溶断過程

ストコーティングを施したモデルプリント配線板に、13 A/mmの直流電流を印加した場合である。

電流印加後30秒程度でプリント配線板導体箔は、赤熱し熱による変形が始まる(図5(a))。

電流印加後60秒経過すると、導体箔が赤熱した部分よりコーティング膜を破り白煙を発する。

白煙は、時間の経過とともに激しさを増し、導体箔の多数の部分が赤熱し、激しく白煙を発する(図5(b), (c), (d))。

プリント配線板導体箔は電流印加後1分30秒程度で溶断する(図5(e))。

導体箔が溶断した後も、基材の炭化した部分を電流は流れ、電流印加後1分40秒程度経過すると、基材は炎上し、この状態が数秒続く(図5(f))。

図5(h)は、電流印加後のプリント配線板であるが、導体箔部分のソルダレジストコーティングは変質し、プリント配線板基材は、炭化黒変している。

導体箔が溶断した後も、炭化した基材部分を電流が流れ、炎上に至った例も観察されたが、このことは、実際のプリント配線板では、条件によっては装置の炎上につながる場合がある可能性を示唆している。

4. インパルス電流による溶断との差異

インパルス電流によるプリント配線板導体箔の溶断過程は、印加インパルス電流値により異なるが、50%破断電流値、すなわち、多数の試料に同一の電流を印加した場合、その半数が破断する電流値は、

印加電流波形が、JEC-212-1981(電気学会 電気規格調査会標準規格)²⁾で規定している標準インパルス電流、すなわち、立ち上がり時間が $8\mu\text{sec}$ 、電流の値が、最大値の半分に減衰するまでの電流継続時間が $20\mu\text{sec}$ であるインパルス電流の場合は、 3.2 kA/mm である^{1), 3), 4)}。

インパルス電流印加による破断過程は、印加電流値が50%溶断電流値の場合、電流印加による温度上昇により、導体箔は基材より剥離し、ジュール熱により温度上昇し、印加電流が減少するとともに、導体箔の温度は下がり、温度降下による収縮による機械的作用により破断に至ると考えられ、その破断面は図6(a)に示すように、粒界破断面を示す場合が多い¹⁾。印加電流値が50%破断電流値より大きい場合、電流値が大きくなるにしたがい、破断は、熔融破断となり、印加電流値が非常に大きい場合には、導体箔は気化霧散する。

一方、直流電流を印加した場合は、図6(b)に示すように、破断は、熔融破断であり、電流印加によるジュール熱によってプリント配線板導体箔は温度上昇し溶断に至る。この場合、導体箔の温度上昇は、不均一であり、導体箔の一部分の温度上昇が激しい。このことは、導体箔は、微視的に見た場合、均一ではなく、電流印加によるジュール熱により、長さ方向における抵抗の大きい部分がより早く温度上昇し、温度が上昇することにより、この部分の抵抗値が高くなることを示している。このためこの部分の温度は、なおいっそう上昇し、この部分より溶断に至る。すなわち、直流電流印加による導体箔の破断は、

印加電流値：16.5kA

(a) インパルス電流による破断面

印加電流値：15 A/mm

(b) 直流電流による破断面

図6. 導体箔破断面の電子顕微鏡写真

印加電流の大小にかかわらず、すべて溶融破断である。

上記のようにインパルス電流を印加した場合と直流電流を印加した場合とでは、プリント配線板導体箔の溶断過程はまったく異なり、インパルス電流を印加した場合、印加電流値が50%破断電流値前後では、機械的作用による破断であるのに対し、直流電流を印加した場合は、ジュール熱による溶断である。

これらのことより、大電流の流入によりプリント配線板導体箔が損傷した場合、その流入電流値の推定ならびに、電流の流入経路の検討にあたっては、導体箔の損傷の状況の観察を十分に行うことが重要である。

5. む す び

プリント配線板の導体箔に直流電流を印加し、その溶断特性を検討した本実験では、次の結果が得られた。

(1) 銅箔の厚さ $35\mu\text{m}$ のプリント配線板導体箔は、幅1mmあたり10A程度の直流電流では溶断に至らない。しかし、この場合導体箔の温度は、 100°C 以上となる。

(2) 直流電流印加による導体箔の溶断過程は、インパルス電流による場合と大きな差異がある。

直流電流を印加した場合は、ジュール熱による溶断であるのに対し、インパルス電流を印加した場合は、機械的作用による破断である。

(3) ソルダレジストコーティングの有無による溶断特性には、わずかな差異がある。

ソルダレジストコーティングを施したモデルプリ

ント配線板は、コーティングを施していないプリント配線板に比較すると、電流印加時間が短時間の場合、直流耐電流値はわずかに高い値となる。

(4) ソルダレジストコーティングを施したモデルプリント配線板については、プリント配線板の基材が炎上した例が多数観察された。

(5) ソルダレジストコーティングを施していないモデルプリント配線板においては、導体箔が赤熱した例が観察されたが、炎上した例はなかった。

謝 辞

本研究において、実験試料として用いたモデルプリント配線板の製作にあたっては、京三製作所に多大な便宜を頂いた。ここに記して深く感謝する。

また、本研究を遂行するにあたり、実験を行った元本学大学院生 今野理洋君(現・NTT)ならびに卒業研究生諸君に感謝する。

(1988. 2. 3 受理)

文 献

- 1) 首藤, 鶴見: インパルス電流によるプリント配線板導体箔の破断過程, サーキットテクノロジー, Vol. 2, No. 1, pp. 8~16, 1987
- 2) 電気学会: 電気規格調査会標準規格, JEC-212-1981, インパルス電圧電流試験一般
- 3) 今野, 首藤, 鶴見: プリント配線板導体箔の耐電流特性, プリント回路学会第1回講演大会論文集
- 4) 今野, 首藤, 鶴見: インパルス電流による金属箔の溶断(その2), 昭和62年電気学会全国大会論文集, No. 200