プリント配線板上の箔状導体間における耐サージ特性

正員 山野 芳昭* 非会員 高岡 洋介*

Surge Endurance Characteristics between Foil Conductors on Printed Wiring Board

Yoshiaki Yamano*, Member, Yousuke Takaoka*, Non-member

Surge endurance characteristics between foil conductors on printed wiring boards with and without earthed backing metal foil were studied in air at 20°C and 40-45%RH. The gap distance between the conductors ranged from 0.05mm to 2mm. The thickness of the board was 0.8mm or 0.3mm. The impulse voltage (1.2/20μs) was applied between the conductors. The experimental results show that the flashover on the board without backing metal occurs when the electric field strength on the HV electrode edge is increased to a certain magnitude which is independent of the gap distance. For the board with backing electrode, the field strength at the flashover depends on the gap distance and increases with the gap distance except in the case that positive flashover for the board thickness of 0.8mm. The increase in the field strength may result from electric field stabilization at the conductor edge due to the large amount of homo-charge on the board surface near the electrode edge. The calculation of the static electric field revealed that, in the case of the board with backing foil, the strong vertical field component on the board surface is produced near the sharp conductor edge by the existence of the earthed backing foil. A large number of the homo-charge stays on the board surface near the HV electrode due to the strong vertical field component on the board surface near the conductor edge.

キーワード：耐サージ性，プリント配線板，低電圧絶縁協調，微小沿面距離

Keywords：surge endurance, printed wiring board, low voltage insulation coordination, flashover between small gap

1. まえがき

電子機器の縮小化や高機能化が進む中で，それにともなうプリント配線板のファインパターン化が促進している。現在，プリント配線板のパターン間隙（導体間の間隙）は数 10μm にまで狭くなっており，その結果，使用される電圧は低いにもかかわらず導体先端の電界強度は極めて高い状態となっている。そのため，プリント配線板における絶縁信頼性に関する諸問題の検討が議論されている⁽¹⁾。その諸問題の中に，プリント配線板導体間の耐サージ性がある。外来サージあるいは機器内部で生じるサージに対して，少なくとも導体間に絶縁破壊（フラッシュオーバー）が生じないような配慮を行うことは，機器の信頼性や安全性の確保の観点から必要である。

IEC60664-1⁽²⁾では，上述のような観点から，予想されるサージ電圧に対して確保すべき導体間距離が定められている。この規格においては，サージ電圧に対する清浄なプリント配線板の必要最小導体間距離に関して，空間におけるそれと同じ値を規定している。この規格における規定値が IEC 61010-1⁽³⁾や JIS C 1010-1⁽⁴⁾などにも引用されている。し

かし，プリント配線板の導体間のフラッシュオーバーは沿面フラッシュオーバーの形態をとるにもかかわらず，IEC60664-1 では空間における必要最小導体間距離の値をそのままプリント配線板へ適用していることに関する妥当性は示されていない。

一方，沿面フラッシュオーバーに関する従来からの研究では，高電圧機器における絶縁信頼性に焦点が当てられていたため，以下の述べるような特異性を有するプリント配線板の沿面絶縁特性についてほとんど検討がなされてこなかった。プリント配線板の導体間沿面絶縁の特異性としては，沿面導体間距離が極めて狭く（数 10μm～数 mm 程度），なおかつ導体が箔状であるため，Triple Junction（電極-絶縁物-気体の接触点）における電界歪みが極めて強いこと等が挙げられる。また，プリント配線板の裏面には導体箔が貼られている場合が多い。この裏面導体は高電圧沿面絶縁における背後電極として作用する。一般には，背後電極が存在する場合における沿面絶縁耐力は，存在しない場合と比べて著しく低下する⁽⁵⁾。つまり，極めて短い沿面距離と極めて薄い電極を有した絶縁構成における沿面フラッシュオーバー特性について，背後電極の影響も含めて検討を行った例は現在まで筆者の知る限りきわめて少ない。

本研究では，上述のような観点から，汚損や湿潤のないプリント配線板の大気中における耐サージ特性(インパルス

* 千葉大学 教育学部
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Faculty of Education, Chiba University
1-33 Yayoichou, Ignage-ku, Chiba 263-8522

フラッシュオーバー特性)を明らかにすることを目的とした。具体的には、導体間の距離、背後電極の有無、および絶縁板の厚さがインパルスフラッシュオーバー電圧に及ぼす影響について測定を行った。そして、これら実験データと導体先端の電界の状態についての数値計算結果等とを対応させながらプリント配線板の耐サージ特性について検討を行った。

2. 実験方法

〈2・1〉 試験試料の種類および形状 図1に本実験で用いた背後電極が存在する場合の試料形状を示す。絶縁板(図のD; Glass- epoxy, (FR-4))の上に2本の平行な銅箔電極が存在するものである。この試料における絶縁板の厚さ(t)は0.8mmと0.3mmのものを使用した。背後電極(E)は、アース電位に接続されている。なお、背後電極が存在しない場合の試料では、図1のEは存在しない。

これらは、エタノールで洗浄後、デシケータ内(20℃, 40%RH)に24時間以上保存してから実験に使用した。

〈2・2〉 試料に関する実験パラメータとその範囲 図1の試料を用いて、50%インパルスフラッシュオーバー電圧(FOV)の測定を行った。印加したインパルス波形は(1.2/20) μ sである。FOVは補間法により求めた。1試料に対して、15秒おきに20回の電圧印加によりフラッシュオーバーの確率を求めた。同一条件の10組の試料についてそれぞれ50%フラッシュオーバー電圧を求め、それらを平均してデータとした。また、FOVを測定すると同時に、放電遅れ時間についても測定を行った。同一条件の試料につき200回のフラッシュオーバーを行い、放電遅れ時間を測定した。なお、インパルス電源と試料との間に保護抵抗(500 Ω)を挿入することにより、フラッシュオーバーに起因した電極損傷を極力防止した。

測定時には、試料にUV光(キセノンランプ)を照射した。UV光照射がフラッシュオーバー電圧に及ぼす影響については後述する。実験はすべて温度20℃, 湿度40RH%以下の室内大気中で行われた。

〈2・3〉 試料電極付近の電界の数値計算 試料の電極

d : ギャップ長, t : 絶縁板厚, C: 銅箔電極(0.018mm厚), D: 絶縁板, E: 背後電極(アースに接続), G: エポキシモールド, 寸法単位: mm

図1 試料形状(背後電極が存在する場合)

Fig. 1. Configuration of Test Sample (in the case of the sample with backside electrode).

d : ギャップ長, r : 0.002mm(曲率半径)

図2 電界計算における二次元試料形状

Fig. 2. 2D configuration of the board for the electric field calculation.

周辺の電界を電荷重畳法による数値計算によって求め、計算結果と測定したFOVとの関連性を検討した。試験試料の断面を図2に示す二次元形状で模擬して電界計算を行った。電子顕微鏡(SEM)にて観測した限りでは、絶縁板表面と導体箔角部とはほぼ直角に尖った状態で接触している。そこで電極の角部は曲率半径 $r=0.002$ mmの円弧で模擬した。ただし、計算による電極角部の電界は r の値により変化するので、計算結果は実験に使用したプリント配線板の端部の電界を忠実に再現しているわけではない。仮想電荷の数は合計で最大2800個にして計算を行った。また、絶縁板の比誘電率は3.5とした。導体表面の電位が一定であることおよび絶縁物-気相界面における電界の境界条件をもとに、配置した各仮想電荷の電荷量を求め、それらの値から、電極表面の最大電界強度等を算出した⁽⁶⁾。計算結果の誤差は、電極表面における電位で評価すると0.1%以内であった。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 FOVとギャップ長(d)との関係 図3にFOVとギャップ長(d)との関係について示す。図3(a)は背後電極が存在しない場合(以後、 $t=\infty$ と略称することもある。)の結果を示す。図3(b)および図3(c)は背後電極が存在する場合のFOVで、それぞれ印加電圧が正極性、負極性の場合を示す。各グラフとも、FOVのばらつきの範囲は、標準偏差にしてそれぞれのFOVの5%以内であり、図には、煩雑さを防ぐため、代表例のみを示してある。

背後電極が存在しない場合、図3(a)に示すように、FOVはギャップ長(d)の増加に伴い、緩やかな飽和傾向を伴って上昇している。FOVは、印加電圧の極性に依存しない。また、絶縁板の厚さ(t)にも依存しない。一方、背後電極が存在する場合は、印加電圧の極性によって、FOVの特性が異なる傾向を示す。正極性インパルス印加した場合(図3(b)), d の増加にともなうFOVの増加は著しい飽和傾向を示している。 $t=0.8$ mmおよび $t=0.3$ mmの両方でその傾向が見られるが、飽和特性自体は $t=0.8$ mmのときの方が強い。それに対して負極性インパルス印加した場合(図3(c)), d が長い領域では、FOVは d の増加にともない急激に上昇する。たとえば、 $t=0.8$ mmでは、 $d>1.2$ mmでFOVが急激に上昇する。ただし、実験を行った d の範囲においては、背後

t : 絶縁板の厚さ
IEC: IEC 60664-1(2000)で規定されている清浄状態における
最小必要沿面距離

図3 FOVとギャップ長(d)との関係
Fig. 3. Relation between FOV and gap distance (d).

電極が存在する場合のFOVは、背後電極が存在しない場合のFOVを上回ることはいない。

図3(b)および図3(c)中にIECとして示した曲線は、IEC60664-1(2000)で規定されている値であり、プリント配線板表面に汚損がなくかつ乾燥状態にある場合において必要とされる最小導体間距離を示している。たとえば、2kVのインパルス電圧の進入が予測されるプリント配線板では、0.9mm以上の導体間距離が必要となる。図3(b)において、IECの規定値とFOV特性とを比較してみると、3kVの正インパルス電圧に対して、データのバラツキを考慮すると、 $t=0.8\text{mm}$ および $t=0.3\text{mm}$ の両方とも、IECの規定値では十分なギャップ長を有しているとは判断できない。

図4にUV照射がFOVに及ぼす影響について示す。図には、ギャップ長(d)が0.2mmと1mmの場合について示している。背後電極の有無、および背後電極試料における印加電圧の極性にかかわらず、ギャップ長 $d=0.2\text{mm}$ の場合はUV照射によりFOVが低下している。一方 $d=1\text{mm}$ では、UV

t : 絶縁板の厚さ, d : ギャップ長

図4 UV照射がFOVに及ぼす影響

Fig. 4. Influence of UV radiation upon FOV.

照射の影響は、 $d=0.2\text{mm}$ の場合と比べると少ない。図には代表例として $d=0.2\text{mm}$ と $d=1\text{mm}$ の場合について示したが、実験を行ったすべての試料において、ギャップ長 d が長くなるにつれUV照射がFOVに及ぼす影響は少なくなる傾向にある。

〈3・2〉 高電圧側電極先端における電界強度とフラッシュオーバーとの関係 フラッシュオーバー特性に影響を及ぼす高電圧側電極の電界に関連した因子の中で、フラッシュオーバーに最も大きく影響を及ぼすと考えられる因子は、高電圧側電極先端における電界強度であろう。そこで、フラッシュオーバー時の高電圧側電極における最大電界強度（以下、単に“電極の最大電界強度”と呼ぶこともある。）について、図3に示したFOVの測定結果と電界計算結果をもとにグラフにした結果を図5に示す。

背後電極が存在しない場合、図5(a)に示すように、FOVにおける電極の最大電界強度は約100kV/mmである。この値は、実験を行った範囲のギャップ長(d)に依存していない。言い換えれば、背後電極の存在しない場合は、ギャップ長に係わらず電極先端の電界強度が約100kV/mmになればフラッシュオーバーが発生するということになる。

次に背後電極が存在する場合について説明する。正極性インパルス印加時において（図5(b)）、絶縁板の厚さ t が0.8mmの時には、電極の最大電界強度がほぼ115kV/mm～145kV/mmの間の値でフラッシュオーバーが発生する。しかし絶縁板の厚さが0.3mmの時には、フラッシュオーバー時の電極の最大電界強度は一定とはならず、ギャップ長(d)が長くなるにつれて増加する傾向を示す。負極性インパルス印加時に

おいては(図5(c)), 絶縁板の厚さ(t)が0.8mmと0.3mmの両方の場合とも, FOVにおける電極の最大電界強度はギャップ長(d)が長くなるにつれて増加する。なお, すべての場合において, 電極の最大電界強度は, 高電圧側電極と絶縁板とが接触する近傍のくさび形空間を形成する場所(図2のP点)に存在する。なお, 図5に示す最大電界強度の値は, 電極端部の曲率半径 r が0.002mmの時の計算結果である。しかし, $r=0.009$ mm(導体箔端部全体を一樣な円弧で模擬)とした場合であっても, フラッシュオーバー電圧における最大電界強度は約50kV/mmとなる。いずれにしてもこの程度の値の電界強度になると電極端部から電子の電界放出が生じるものと考えられる⁽⁷⁾。

以上のことから, 背後電極が存在しない試料の場合, および背後電極が存在し絶縁板の厚さが $t=0.8$ mmの試料における正極性インパルス印加時の場合, フラッシュオーバーはギャップ長 d の値にかかわらず, 電極の最大電界強度がほぼ一定の範囲の値となることがわかった。

t : 絶縁板の厚さ

図5 フラッシュオーバー時の高電圧電極における最大電界強度

Fig. 5. Maximum electric field strength on the HV electrode at flashover.

〈3・3〉 FOVにおける電極の最大電界強度がギャップ長に依存する場合 図5に示したように, 背後電極が存在する場合にあって, 絶縁板の厚さ $t=0.8$ mmの負極性フラッシュオーバー, および $t=0.3$ mmの正負両極性のフラッシュオーバーにおいては, ギャップ長 d が長くなるにしたがい, FOVにおける最大電界強度が増加している。このことは, ギャップ長 d が長くなるにしたがい, フラッシュオーバーを阻止する何らかの作用が働いてFOVが上昇するものと考えられる。以下ではそのことについて検討を行う。

まず, 代表例としてギャップ長 $d=1.2$ mmにおける高電圧印加電極先端近傍の電気力線の状態を図6に示す。絶縁板表面を進展する放電の伸びに影響を与える要因として, 先に検討した電極先端の電界強度の他に, 絶縁板の表面における電界強度および絶縁板表面と電気力線のなす角度が考えられる。これらの要因は, 絶縁板表面における電荷の運動や放電路の進展に影響を与えるものと考えられる。そこで, 各試料の絶縁板表面における電界強度および電気力線と絶縁物表面とのなす角度(図6の θ)についての計算を行った。(以後, 電気力線と絶縁物表面とのなす角度を“角度 θ ”と略称することもある。)

図7は上述した絶縁物板表面における電界強度と角度 θ の計算結果である。図7の結果について, 絶縁物の厚さ(t)の影響およびギャップ長(d)の影響を検討する。なおここでは, 背後電極のない試料を“ $t=\infty$ ”と略記する。電界強度について比較すると(図7(a-1), 図7(b-1)および図7(c-1)), d が1.5mmの場合, 電極先端から0.4mm程度の距離までは, 電界強度は($t=\infty$) < ($t=0.8$ mm) < ($t=0.3$ mm)の順に高い値を示

ギャップ長 $d=1.2$ mm,

背後電極の散在する場合 $t=0.3$ mm

(黒く塗りつぶしてある箇所が高電圧電極)

図6 高電圧電極先端近傍の電気力線の様子
Fig. 6. Electric force line around HV electrode edge.

d : ギャップ長, t : 絶縁板の厚さ, $t=\infty$: 背後電極のない試料

図7 絶縁板表面の電界強度および電気力線と絶縁板表面とのなす角度
(高電圧電極に10Vを印加したと仮定した場合)

Fig. 7. Electric field strength along insulating board, and Angle formed by insulating board surface and electric force line.

している。一方、図7(a-2)、図7(b-2)および図7(c-2)に示してある角度 θ については、 $(t=\infty) < (t=0.8\text{mm}) < (t=0.3\text{mm})$ の順に大きな値を示している。ただし、図中 $d=0.3\text{mm}$ における曲線で示されているように、対向電極に近い領域では角度 θ が負の値となる。これは、絶縁板内部から気相に向かって電界が発生しているためである。

図7において、 $t=0.3\text{mm}$ の場合と $t=0.8\text{mm}$ の場合と比較すると、対向電極の近くを除いて、 $t=0.3\text{mm}$ の場合の方が電界強度が強く、絶縁板の表面に対して垂直な電界の成分が大きいことがわかる。たとえば $t=0.3\text{mm}, d=1.5\text{mm}$ における負極性フラッシュオーバーが発生する時の最大電界強度は図5を見ると100kV/mmを大きく上回っているため、実際の電極先端部においても多量の電子が放出されると考えられる。放出された電子は電界の方向へ移動するが、 $t=0.3\text{mm}$ の場合は絶縁板表面に対して垂直な電界成分が大きいため、電子は対向電極へ移動しにくくなり、電極先端近傍の絶縁板表面に残留しやすくなる。この残留電子が多くなると、電極先端の電界は多量の残留電子により緩和され、フラッシュオーバーのトリガとなる放電が発生しにくい状態となるであろう。結果として、フラッシュオーバーが発生するには、さらに高い電界が必要となる。電界計算結果によると、ギャップ長が長い領域($d>1\text{mm}$)では電極先端近傍の電界の垂直成分が大きくなるため、電界緩和効果もギャップ長が長い領域で顕著になるものと考えられる。図5(c)において電極の最大電界強度がギャップ長が長い領域で増加しているのはこのためと考えられる。正極性フラッシュオーバーの場合は、電極近傍の電子が電極に移動して吸収される結果、正イオンが絶縁物表面に存在することになり、負極性の場合と同

様に電極先端の電界が緩和されることになる。

$t=0.8\text{mm}$ において、負極性のみフラッシュオーバー時の電界強度がギャップ長に依存して増加する。これは負極性の場合における電極先端の電界緩和効果の方が、正極性における電界緩和効果よりも大きく現れているものと考えられる。つまり、電極の先端が極めて薄いため、負極性電圧印加の場合は電子が多量に放出される結果、強い電界緩和が生じやすいものと考えられる。

図8は、フラッシュオーバーにおける放電遅れ時間を測定した結果である。これらの遅れ時間は、それぞれの条件におけるFOVに対して1.05倍の電圧を試料に印加したときに測定した値である。図を見ると、 $t=\infty$ および $t=0.8\text{mm}$ の正極性の場合と比べ、 $t=0.8\text{mm}$ の負極性および $t=0.3\text{mm}$ の正負両極性のフラッシュオーバーの方が、統計的遅れ時間(T_s)が長い。このことは、フラッシュオーバーのトリガとなる放電の発生に必要な初期電子が適当な配置につくまでの時間が長いことを示している。つまり、背後電極が存在すると絶縁板に垂直な電界成分が強いため、上述した電極先端におけるホモ電荷による電界緩和効果が顕著に作用するため、フラッシュオーバーのトリガとなる放電の発生に必要な配置に電子が付きにくいことを間接的に示しているものと考えられる。

形成遅れ時間(T_f)については、図8において同一の絶縁物厚さ(t)では、正極性よりも負極性フラッシュオーバーの方が短い傾向にある。これは、負極性フラッシュオーバー時の印加電圧が正極性と比べて高い値であるため、フラッシュオーバー路が対向電極にまで進展する時間が短くなるためと考えられる。なお、正極性電圧印加において、負極性FOVと同じ値

d : ギャップ長, t : 絶縁物の厚さ
 $t=\infty$: 背後電極なしの場合を示す

図8 フラッシュオーバー時の時間遅れ
 Fig. 8. Time lag at flashover.

の電圧を印加した場合の T_f は, 図8の負極性 T_f とほぼ同じ値になった。

4. まとめ

プリント配線板を模擬した箔状導体間における大気中沿面インパルスフラッシュオーバー特性について, 背後電極の有無, ギャップ長, 絶縁板の厚さの影響を調べた。実験を行ったギャップ長(d)の範囲は $0.05mm < d < 2mm$, 絶縁板の厚さ(t)は $0.8mm$ と $0.3mm$ である。以下に本実験で得られた事項をまとめる。

(1) 背後電極が存在しない場合は, FOV は d の増加に伴い緩やかな飽和傾向を示しながら上昇する。

背後電極が存在する場合は, 正極性インパルス印加時には, d の増加に伴う FOV の上昇は強い飽和傾向を示す。一方, 負極性インパルス印加時の FOV は, d が長い領域では, 飽和傾向を示さない。

(2) FOV における電極先端の電界強度を計算した結果, 背後電極が存在しない場合は, FOV における電極先端の電界強度はギャップ長にかかわらずほぼ一定となる。背後電極が存在する場合は, 絶縁板の厚さ(t)が $0.8mm$ における正極性フラッシュオーバーを除いて, ギャップ長の増加に伴い, FOV における電極先端の電界強度は上昇する。

(3) 背後電極が存在する基板の FOV における電極先端の電界強度がギャップ長に依存して上昇する原因は, 電極先端に残留する多量の高モチャージに起因した電界緩和の効果によるものと考えられる。プリント配線板における導体は箔状であるため電極先端の電界強度が強く, 電極先端近傍には多量の高モチャージが発生しやすい。背後電極が存在すると絶縁物表面に対して垂直な電界成分が強く, 発生した高モチャージが絶縁物表面に残留しやすいので電極先端の電界緩和効果が顕著になるものと考えられる。

最後に, 本実験の結果についてご討論・ご検討頂いた電気学会調査専門委員会「電子機器の絶縁信頼性に関する諸問題調査専門委員会(委員長:津久井勤)」に感謝の意を表します。

(平成15年2月25日受付, 平成15年6月27日再受付)

文 献

- (1) 電子機器の絶縁信頼性に関する諸問題調査専門委員会編:「電子機器の絶縁信頼性に関する諸問題」, 電気学会技術報告, No.915 (2003)
- (2) “Insulation coordination for equipment within low-voltage systems—Part 1: Principles, requirements and tests”, IEC 60664-1 (2000)
- (3) “Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use—Part 1: General requirements”, IEC 61010-1 (2000)
- (4) 「測定, 制御及び研究室用電気機器の安全性 第1部: 一般要求事項」, JIS C 1010-1 (1998)
- (5) 大木正路: 高電圧工学, pp.232-239, 榎書店 (1982)
- (6) 河野照哉・宅間 薫: 数値電界計算法, pp.38-49, pp.111-114, コロナ社 (1980)
- (7) J.M.Meek and J.D.Craggs: Electrical Breakdown of Gases, p.140, John Wiley & Sons (1978)

山 野 芳 昭

(正員) 1951年3月17日生まれ。1976年3月東京農工大学大学院工学研究科修了。同年4月東洋紡績(株)入社。80年6月東京農工大学工学部助手。88年4月千葉大学教育学部講師。同助教を経て, 現在同教授。工学博士。主として電気絶縁工学, 静電気工学の研究に従事。平成2年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会, 静電気学会, IEEE 会員。

高 岡 洋 介

(非会員) 1977年7月30日生まれ。2001年3月千葉大学教育学部卒業。現在千葉県職員(教員)。