プリント基板絶縁層内部の空間電荷の観測

正員 福永 香 (通信総研)

正員 前野 恭 (通信総研)

正員 岡本 健次 (富士電機総研)

正員 芳賀 弘二 (富士電機総研)

Space charge observation of a metal base printed wiring board

K. Fukunaga, Member, T. Maeno, Member (Communications Research Laboratory)

K. Okamoto, Member and K. Haga, Member (Fuji Electric Corporate Research and Development Ltd.)

Since a metal-base printed wiring board (PWB) with superior thermal conductivity has been widely used in power electronics products, high reliability is required at high electric field. Many reports have already covered 'surface' copper ionic migrations on PWBs which occur short-circuits on the board. The migration growing into the depth direction of a insulation layer has been clearly observed recently, and it is revealed that the growth depends on the ionic impurities of the resin.

We measured space charge behaviour in the insulation layer to know the relationship between the internal space charge and the ionic migration. The results suggest that internal negative charges are generated at high temperature with high humidity, and that a conductive region is formed near a copper electrode under dc electric field.

キーワード：金属ベースプリント基板，銅イオンマイグレーション，空間電荷，パルス静電応力法

1. 概要

パワーエレクトロニクス分野の機器では，放熱効果の高い金属ベースプリント配線板（以下プリント基板と略記）が多く用いられている。この基板はアルミニウム等のベース金属，無機充填剤入りエポキシ樹脂等の絶縁層，銅箔電極の3層で構成されている。近年，各種電子部品の小型化，高性能化が進み，プリント基板の絶縁層には1～3 kV/mmという比較的高い電界が加わるようになり，その絶縁信頼性が重要視されている⁽¹⁾。

従来より配線間の短絡を引き起こす絶縁層表面での銅イオンマイグレーション劣化については精力的に検討されてきたが，最近では絶縁層の厚さ方向にも銅イオンマイグレーション（以下マイグレーションと略記）が発生し，絶縁破壊の原因となることが明らかになってきた。直流課電時の絶縁層内部への銅マイグレーションの進展には樹脂内部の不純物イオンが関与していると考えられ，化学的な分析に基づき検討が進んでいる^(2,3)。

一方，空間電荷分布測定技術の向上により，厚さ150 μm程度の薄い樹脂内部の不純物イオンの直流課電時における挙動が観測できるようになった^(4,5)。そこで，パルス静電応力法⁽⁶⁾を用いて，プリント基板絶縁層内部の空間電荷挙動

を観測し，絶縁性能の評価に適用できるかについて検討した。その結果，試料内部の構造が空間電荷分布に影響を及ぼすこと，加湿によりプリント基板絶縁層内部に負電荷が生成されること，直流電圧を課電することによりanode近傍に導電性の高い領域が形成されることなどが明らかになった。プリント基板絶縁層の空間電荷分布の観測例は従来実施されたことがないため，本論文では観測時の問題点等について述べた後，劣化前，および加速劣化試験後の空間電荷分布の変化について観測結果を中心に報告する。

2. 試料および実験方法

プリント基板試料は図1に示すようにアルミニウム，無機充填剤入りエポキシ樹脂，銅箔電極の3層構造で，銅箔電極以外の部分にはソルダーレジスト層が形成されている。観測対象である絶縁層内部の空間電荷挙動を観測するのに適した試料を選択するため，銅箔，ソルダーレジスト層等が空間電荷測定に与える影響について検討した。

絶縁層のエポキシ樹脂には組成，製造工程の異なる2種類の試料（試料①：充填材シリカ， $\epsilon_r=4.8$ ， $\tan\delta=2.9\%$ ，試料②：充填材アルミナ， $\epsilon_r=7.6$ ， $\tan\delta=0.47\%$ ）を用いた。

また課電条件は、全ての実験において銅電極側に正の高電圧、アルミベース側が接地となるように印加した。測定結果の空間電荷分布波形を示す図中には銅電極側をanode、アルミベース電極側をcathodeと記した。

図1 一般的なプリント基板の構造

Fig. 1 An example of a metal-base printed wiring board.

3. プリント基板試料の構造と空間電荷分布

<3・1> 箔電極の影響 劣化前の試料①に直流電圧1.25 kVを印加した時の空間電荷分布を図2に示す。銅電極を蒸着で形成した場合にはアルミ電極 (cathode) 側、銅電極 (anode) 側とも信号が得られた。しかし、箔電極の場合にはanode側の信号が観測できない。この原因は、樹脂と箔電極の音響インピーダンスの不整合による弾性波の反射が影響したためと考えられる。

<3・2> ソルダーレジスト層の影響 劣化前の試料①を用い、箔電極の無い部分に直流電圧1.25 kVを印加すると、図3のようにソルダーレジスト層の部分に大きな負電荷があらわれ、ほとんどの電界がソルダーレジスト層にかかるような分布を示す。この結果も興味深い、エポキシ樹脂絶縁層内部の電荷挙動には直接関係しないと考えられる。

<3・3> 絶縁層内部の界面の影響 絶縁層が複数の層から形成された試料②では図4(a)のSEM画像にみられるように絶縁層内部に界面が存在する。この試料に直流電圧1.25 kVを印加すると界面の位置に信号が現れる。界面部分は、局所的に誘電率、抵抗率が異なっている可能性が高く、エポキシ内部の層構造を非破壊で知るという点では有効であるが、空間電荷分布も複雑となる。

4. 絶縁層内部の不純物イオンと空間電荷分布

<4・1> 初期状態での絶縁層内部の空間電荷挙動

劣化前の試料①に直流電圧を印加した場合の空間電荷分布を図5に示す。(a)は0.4, 0.8, 1.0, 1.25 kVにおいて、各電圧に昇圧後約15秒で観測した結果であり、(b)は(a)の特性を測定後に接地し、約10秒後および60秒後において観測した結果である。cathode近傍に正、anode近傍に負の電荷が見られ、接地後の波形からもわかるように、正電荷の方が多い。このcathode近傍の正電荷は課電中の時間経過とともに徐々に増加した。そこで、各電圧で空間電荷分布に変化が見られなく

図2 箔電極が空間電荷分布に与える影響 (試料①, 未劣化, at 1.25 kV)

Fig. 2 Influence of thin metal electrode on the space charge distribution. (Sample 1, before ageing, at 1.25 kV)

図3 ソルダーレジスト層で形成される電荷分布 (試料①, 未劣化, at 1.25 kV)

Fig. 3 Influence of thin solder regit on the space charge distribution. (Sample 1, before ageing, at 1.25 kV)

図4 絶縁層内部界面の空間電荷形成への影響

Fig. 4 Influence of internal layers on the space charge formation. (Sample No.2, before ageing, at 1.25 kV)

なるまで一定電圧に保持した後に昇圧するという条件で観測したところ、各電圧で図6(a)のような空間電荷分布が得られた。図6(b)は、図6(a)の特性を測定後に接地し、約10秒後および60秒後において観測した結果である。この結果から劣化前の樹脂中には主に正の電荷が存在し、1 kV以上の直流課電時に負電極側へ移動することが明らかになった。図6(a)の空間電荷分布をもとに、課電中の両電極近傍の蓄積電荷量を算出したところ、図7のようにcathode側の正の電荷量(○)が0.8 kVと1.0 kVの間で急増していることが明らかになった。直流電界下で逆極性の電極に向かって移動する電荷は内部のイオンによるものと考えられ、それが移動可能となる電界にはしきい値が存在すると考えると、今回の実験条件では、その値が約1 kV (6.7 kV/mm)であると推測される。しかし、そのしきい値はイオンの種類、材料の種類、温度、湿度等の影響をうけると考えられるため、詳細はさらに条件を変えた実験を行い明らかにしていく予定である。ここで、プリント基板の絶縁性能の評価には一般に実際の使用条件より高い電圧を印加する加速劣化試験が行なわれているが、この実験結果からは内部電荷の挙動は印加されている電界によって異なっている。この現象は劣化試験の電圧加速の等価性を検討する上でも重要な意味を持つと考えられる。

一方、試料②の場合には一定電圧をかけた場合の経時変化は見られず、図8に示すように印加電界にはほぼ比例して変化している。前述のように内部構造に依存した信号が観測されるが、不純物イオンによると思われる電荷の蓄積、増加は見られなかった。

図5 劣化前の試料①における空間電荷分布-1
(a) dc 課電中 (b) 接地後

Fig. 5 Space charge distribution in sample 1 before ageing-1.
(a) under dc bias voltage (b) after the short-circuits

図6 劣化前の試料①における空間電荷分布-2
(a) dc 課電中 (b) 接地後

Fig. 6 Space charge distribution in sample 1 before ageing-2.
(a) under dc bias voltage (b) after the short-circuits

図7 電極近傍に蓄積した電荷量の印加電圧特性

Fig. 7 Accumulated internal space charge quantity
at each applied voltage.

図8 劣化前の試料②における空間電荷分布
各電圧に昇圧後15秒において観測

Fig. 8 Space charge distribution in sample 2 before ageing
observed under dc bias voltage applied for about 15
sec.

<4.2> 加湿処理による空間電荷分布の変化 課電劣化試験に先立ち、85℃、70%で18時間予備加湿を行った試料①に1.25 kVを印加した場合の空間電荷分布を図9(a)に示す。同図中に示した前述の初期状態での結果と比較するとcathode側の正電荷は減少し、anode側に蓄積する負電荷が顕著に増加した。この結果から、加湿処理を行うことにより絶縁層内部に直流電界下で移動できる負イオンが生成されと考えられる。一方、試料②の場合には図9(b)に示すように加湿処理後も電荷分布に変化は見られなかった。

ここで、試料に含まれるイオン性成分を85℃の水中で抽出しイオンクロマトグラフで分析した結果試料①は SO_4^{2-} (509 ppm), Cl^- (11.5 ppm), NH_4^+ (27.6 ppm)が検出され、試料②では NH_4^+ (9 ppm)のみとなっている(2)。従って試料①において観測された、初期にcathode近傍に蓄積する正電荷、加湿劣化後に生成される負電荷は試料①に含まれる内部の不純物イオンの存在に依るものと考えられる。

5. 銅イオンマイグレーションと空間電荷分布

以上の実験結果から、絶縁層内部の空間電荷分布と銅イオンマイグレーションとの関係を検討するための試料には内部構造が均一な試料①で、ソルダーレジスト層の無いものを用い、銅蒸着で電極を作製した。この試料①6個で劣化前の空間電荷分布を測定したところ全く同一の分布が得られており、試料作製にともなうばらつきはない。

上述の加湿処理後連続して85℃・70%・1.25 kVで課電加速劣化試験を行った。20時間後に試験を中断し、室温において直流電圧を印加した場合の空間電荷分布を図10(a)に示す。同図中の初期、および図9(a)に示した加湿処理後の場合の電荷分布と比べてanode側（銅の蒸着電極側）から約40 μmまで正電荷が存在し、見掛け上anodeが試料側へ移動したような空間電荷分布となっている。この現象はanode近傍に導電性の高い領域が形成されたことが原因と推察される。

図9 加湿劣化による空間電荷分布の変化
 ((a)試料①, (b)試料②)

Fig. 9 Space charge distributions after aged without voltage application ((a)sample 1, (b)sample 2)

一方、同一組成の試料（anode側は銅箔電極）を用いて同一条件で課電劣化試験を行い試料断面の銅元素分布を波長分散形X線分析装置付き走査電子顕微鏡で観察した結果(3)、図10(b)のようにanode側から厚さ方向に約40 μmのマイグレーションが発生しており、空間電荷分布に現れた導電性の高い領域と一致することが明らかになった。

同様に加湿処理後連続して85℃・70%・1.25 kVで課電加速劣化試験を行い、50時間後に試験を中断した場合の空間電荷分布と銅元素分布を比較すると図10(c),(d)に示すようにanode近傍の導電性の高い領域、銅元素の分布している領域ともanode側（銅の蒸着電極側）から約70 μmとなり、マイグレーションの進展にともなって、空間電荷分布が変化していることが明らかになった。

図10 課電劣化による空間電荷分布と銅イオン分布の変化
 ((a)(b)20hr, (c)(d)50hr 課電後)

Fig. 10 Space charge and Copper ion observations
 ((a)(b) 20 hr and (c)(d) 50 hr aged)

パルス静電応力法は正・負の電荷の偏在を観測することに適しており、化学的に活性であるが電気的に中性な励起原子等は検出しないため元素分析結果と全く同一と考えることはできない。しかしながらマイグレーションの進展、その反応過程を推測する上でイオンの挙動は重要であり、空間電荷分布の観測と、他の化学的な分析等の手法と併用することにより詳細な検討が可能になるものと考えられる。また実用的な面からも絶縁層内部に製造時に含まれるイオン性不純物の電界下での挙動、絶縁層内部の構造的な均一性の評価、厚さ方向に進展するマイグレーションの簡易な非破壊観測等に有効であると考えられる。

6. 結 論

プリント回路基板絶縁層内部の空間電荷分布をパルス静電応力法を用いて測定した。劣化前の試料を用いた測定結果から、プリント基板の空間電荷分布の観測には、蒸着電極を用いることが望ましいこと、ソルダーレジスト層には内部電荷が存在するが明らかになった。また、高温加湿のみによる劣化で負の内部電荷が生成されること、課電劣化試験にともない、正電極（銅電極）側に導電性の高い領域が形成され、その分布が銅元素分布の観察結果と一致すること等が明らかになった。以上の結果から、空間電荷分布観測はプリント基板絶縁層の評価、開発に有効であると考えられる。

（平成9年10月24日受付、平成10年2月27日再受付）

文 献

- (1) 津久井：「プリント回路基板の絶縁信頼性評価の必要性和問題点」，回路実装学会誌，Vol. 10, No. 2 (1995) pp. 71-73
- (2) 岡本，前田，芳賀：「金属ベースプリント配線板における銅イオンマイグレーションの検討」，回路実装学会誌，Vol. 10, No. 2 (1995) pp. 108-112
- (3) 岡本，前田，芳賀：「金属ベースプリント配線板における銅イオンマイグレーションと誘電特性の関係」，回路実装学会誌，Vol. 12, No. 6 (1997) pp. 418-424
- (4) 高田：「空間電荷計測技術の最前線」，電学論A，Vol. 117-A, No. 6 (1997) pp. 545-551
- (5) T. Maeno and K. Fukunaga, "High-resolution PEA Charge Distribution Measurement System", IEEE Trans. Dielectrics and EI, Vol. 3, No. 6 (1996) pp. 754-757

福永 香

（正員） 1963年12月14日生。1989年東京電機大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、郵政省通信総合研究所電磁環境研究室勤務。固体誘電体表面および内部の電荷挙動に関する研究に従事。工学博士。静電気学会、IEEE 会員。

前野 恭

（正員） 1957年8月28日生。1989年武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在、郵政省通信総合研究所光計測研究室勤務。誘電体中の空間電荷、電界分布の計測およびレーザー応用研究に従事。工学博士。1990年電気学会論文賞1995年電気学会進歩賞受賞。

岡本健次

（正員） 1963年5月21日生。1982年高知県立高知工業高等学校電気科卒業。同年(株)富士電機総合研究所入社。1989年関東学院大学工学部電気工学科卒業。主として電子機器、電力機器の絶縁材料・絶縁技術の研究開発に従事。1991年電気学会論文発表賞受賞。回路実装学会会員。

芳賀弘二

（正員） 1952年10月18日生。1971年福島県立平工業高等学校電気科卒業。同年富士電機製造(株)中央研究所入社。現在(株)富士電機総合研究所主任研究員。主として絶縁材料の研究開発に従事。