絶縁信頼性とその事例

高木 清***

The Insulation Reliability of PWB's and Their Failure Examples

Kiyoshi TAKAGI***

* NPO 法人サーキットネットワーク (〒 247-0008 横浜市栄区本郷台 4-12-10)
** 高木技術士事務所 (〒 247-0008 横浜市栄区本郷台 4-12-10)
* NPO Circuit Network (4-12-10, Hongodai, Sakae-ku, Yokohama 247-0008)
** TAKAGI Associates (4-12-10, Hongodai, Sakae-ku, Yokohama 247-0008)

1. はじめに

エレクトロニクス産業は限らない進展をしており、巨大なクラウドシステム、小型のスマートフォンを始め、ロボット、医療関連機器、その他、私どもの生活に深く浸入し、情報は巨大なネットワークを形成している。これらはすべて電気信号により処理され、その電気信号は集積化された半導体素子を中心に組み立てられた電子回路より成り立っている。電子回路はプリント配線板上に多くの部品を搭載、接続されることにより作られている。この接続を行っているプリント配線板の配線の絶縁不良によりシステムダウンが発生すると、想像出来ない事態を招きかねないという事で、絶縁の確保は非常に重要なことである。ここで扱う有機樹脂プリント配線板はベアチップの半導体チップを搭載するパッケージ基板とモジュールを構成する通常のプリント配線板がある。その絶縁信頼性を向上させるための試験法、不良事例を紹介する。

2. プリント配線板の配線ルール

絶縁特性に関係する因子の一つとして、絶縁間隙がある。プリント配線板は非常に多くの分野で使われているので、表 1 の如く、配線ルールも多くのものがあるが、先端の機器に使用される高密度配線のものは表の超々高密度レベルの微細間隙を持つものが多い。しかし、高電圧用の機器の導体パターン間には高電圧が印加され、正常な絶縁を

保つためには印加電圧に応じた間隙を必要とする。
間隙は外層、内層のパターンの面方向と厚さ方向の層間間隙とがあり、いずれも考慮する必要がある。

3. 絶縁体の構造と影響する因子

有機樹脂プリント配線板では主要の絶縁基板は銅張積層板と接着シートであるプリプレグ、および、ビルドアッププリント配線板用の絶縁層材料である。
銅張積層板は絶縁樹脂と基材のガラス布、および、フィラー粒子、銅箔より構成されている。樹脂としてはエポキシ樹脂が多いが、要求特性により、耐熱性の高いイミド樹脂や、低誘電率材であるテフロン樹脂や各種の変成樹脂などが用いられている。何れも樹脂自体は相当絶縁性の高いものである。絶縁性は接着状態が大きく影響するが、その箇所は接着界面で、樹脂と銅箔、樹脂とフィラー、樹脂とガラス布繊維間などである。
水分が存在しないとエレクトロケミカルマイグレーション（以下 ECM）による絶縁劣化は起きないと考えている。樹脂の絶縁性の低下に影響する因子である ECM は吸湿による水分、水溶性のイオン、イオンが移動する微細な間隙、および、イオンを駆動する電位（電界）の存在があることと考えている。さらに、樹脂が外部要因で、変質しているような場合にはこれらによる絶縁性は変化する。

4. 絶縁信頼性の試験法

通常環境であれば絶縁材料が加湿され、絶縁劣化が起こることは想定出来ないが、特殊な環境、例えば
高湿度の環境
海岸、海上などの塩分などのイオン性成分を含む環境
温泉地帯など硫化水素など腐食性成分を含む環境
などでは、保護コーティングされていないプリント配線板やプリント回路実装基板などは急速に腐食が進行し劣化する。ここではこのような環境については触れず、通常環境における絶縁を考える。

表 1. プリント配線板の配線ルール

項 目	一般レベル	高密度レベル	超高密度レベル	超々高密度レベル
ライン幅	150～100 μm	70～49 μm	30～10 μm	15～3 μm
ライン間隙	150～100 μm	80～50 μm	40～15 μm	15～3 μm
導体厚	25～15 μm	20～15 μm	20～10 μm	20～5 μm
ビア径	200～100 μm	120～60 μm	40～20 μm	40～20 μm
ランド径	400～200 μm	300～150 μm	100～60 μm	70～40 μm
層間間隙	200～40 μm	80～30 μm	50～15 μm	30～10 μm
全板厚	2,000～400 μm	1,200～300 μm	800～80 μm	800～50 μm
層数	4～10 層+	6～20 層+	6～40 層+	6～15 層+

表 2. 加湿試験法

(1)

温湿度定常試験		温度 (°C)	湿度 (%RH)	試験時間 (h)				初期および 中間、最終時に 外観検査、絶縁抵抗 測定
	JPCA-ETO2	40	93	168	500	1,000	(2,000)	
	JPCA-ETO3	60	90	168	500	1,000	(2,000)	
	JPCA-ETO4	85	85	168	500	1,000	(2,000)	

(2)

<div> <div>温湿度組合せ (サイクル、低温なし) 試験</div> <div>JPCA-ETO7</div> </div>	<div> <div>条件</div> </div>	<div> <div>試験中の絶縁抵抗 取り出して 耐電圧 外観検査 試験中、電圧を 印加することもある</div> </div>
--	---	---

(3)

高温・高湿・定常 (不飽和加圧水蒸気) 試験 (HAST)	JPCA-ETO8	温度 (°C)	湿度 (%RH)	試験時間 (h)			外観検査、絶縁検査 など
		110	85	96	192	408	
		120		48	96	192	
		130		24	48	96	

IEC 60749 Amendment1: Semiconductor devices - Mechanical and climatic test methods SC: Dampheat, Steady-State-highly accelerated

JIS C 60068-2-66:2001「環境試験方法—電気・電子—高温高湿、定常（不飽和加圧水蒸気）」(IEC60068-2-66)

IEC 60068-2-66 Environmental testing-Part2: Test methods- Cx: Damp heat, steady state (unsaturated pressurized vapor)

絶縁劣化の発生する条件として、①電極間に電位がある、②その間にイオンが移動する微細な間隙がある（表面も間隙の一つ）、③イオン化する溶媒（水分）がある、④イオン性物質があると考えられる。これは電気化学現象として捉えられる。ここで、電位は外部よりの印加電圧、あるいは、自然電極電位の金属イオン溶出の電位である。

絶縁信頼性を評価する場合には加速加湿環境での絶縁劣化を評価する。その試験環境は表2のようなものがある。この表はJPCA規格¹⁾より編集したものである。

大気下で使用される試験法ではこの表のうち、

85°C, 85%RH（必要に応じ電圧を印加する）

の条件で試験されることが多い。時間は500～1,000時間程度を指定する仕様が多数だが、寿命の尽きるまで長時間の試験を行うこともある。この条件は実際の環境での条件より厳しいが大気中で出来る試験条件である。したがって、非常に多くの過去のデータがあり、比較することが可能であるが、この条件でも結果がでるまで長時間を要する。

この加速環境での試験が実際の装置の何年分になるかを推定する加速率を求めることは非常に難しい。公表されている値として、和嶋の膨大な研究の報告がある²⁾。この試験に於いてガラスエポキシプリント配線板の試料の劣化について、長時間にわたり調査を行ない、膨大なデータより寿命推定式を導びいている。これより実使用環境（35°C, 75%RH 5 V 印加）のものを寿命15年とすると、加速試験（85°C, 85%RH 100 V 印加）での寿命試験は90時間でよいことを示している。

それでも、結果を早く知るために、不飽和加圧水蒸気試験（通常、HAST (Highly Accelerated humidity and temperature Stress Test) という）が用いられている。その条件は

130°C, 85%RH（必要に応じ電圧を印加する）

を使用することが多くなっている。この条件では比較的短時間で結果を得ることは出来るが、多くの問題がある。この点については後述する。

5. 絶縁劣化の事例

プリント配線板の絶縁不良は加湿環境でのECMである。絶縁材料の不具合、製造での汚染その他の種々な原因で発生する絶縁不良は機器の動作不良を引き起こすことになる。大きな損害になるので発性の原因を追及することは重要である。このような絶縁障害は実際に遭遇したものについての原因を追及することは難しいが、出来る限り試料を採集、解析し発生の原因を知り、対策することが有用である。以下に事例を紹介する。

5.1 プリント回路実装基板の焼損事故の例

図1はプリント回路実装基板の破損した例である。(a)は絶縁不良によりショートし、高温で絶縁基板が炭化したもので、焼損直前の状態である。(b)は実際に焼損したもので、事故に直結するものである。

このような状態では解析は不可能であるが、絶縁基板内での絶縁劣化によると推定できる。実際に発生すると機器のシステムの不具合に通じ重大な欠陥である。

5.2 CAF (Conductive Anodic Filament)

図2に模式図を示したが、銅張積層板基材のガラス布の繊維に沿って発生するエレクトロケミカルマイグレーションの一種である³⁾。機械的ドリルで穴あけするので、図3(a)のように穴壁より25～30μmのガラス繊維にほつれが生じ、この程度の長さまでの処理液の浸透は容認されている。しかし、初期には図3(b)のように繊維に沿って相当の長さに浸透するものが観測された。樹脂をガラス布の繊維束の中まで含浸させることは難しく、樹脂を含浸したプリ

図 1. プリント回路実装基板の焼損事故例

図 2. CAF の発生状況の模式図

図 3. めっき液のガラス布への液の浸透

プレグで図 4 (a) のように空気の混入したものが多く、ここに液が浸透するので、絶縁低下は避けられないものであった。その後、開繊技術の進展で図 4 (b) のように均一な含浸が可能になり、カップリング材の開発とともに飛躍的に絶縁性能は向上した⁴⁾。このような開発は日本で進められたもので、国産品は非常に安定したものとなっている。海外産はこの点不明確で、使用に当って十分な調査が必要である。しかし、高密度化、微細化により、ごく僅かの繊維に沿った CAF が発生することがある。図 5 にその例を示した⁵⁾。これに対処したガラス布繊維や積層板について国内では高度化の研究が進められている。

図 4. ガラス布繊維と樹脂の含浸状態

図5. スルーホール間をショートしたCAFの例

FR-4 基材故障部の表面方向からの観察写真 (汎用レジスト使用; L/S=0.080mm)

図6. 加湿により顕在化した欠陥・絶縁体表面のマイグレーション

(a) 内層のマイグレーション (b) 内層のマイグレーションの断面

図7. 内層パターン間のマイグレーション

5.3 面内のパターン間ショート

図6は加湿試験によりプリント配線板の表面に発生したマイグレーションによるショートの例である。原因として、絶縁基板表面に残留した汚染物質、基板内の不純物などによると推定される。パターン間隙がより小さくなっているため、絶縁基板の選択、プリント配線板の処理法、取り扱い法など厳しい管理が必要になる。

5.4 内層パターン間のショート

図7は加湿試験によりショートしたことで故障を起こしたプリント配線板を調査したものである。内層がショートしており、解析の結果、銅箔の最終表面処理のクロメート被膜により樹脂との密着性が小さくなって微小な剥離ができ、吸湿によりこの空間にめっきスルーホールのめっき残渣よりカリウムイオンのマイグレーションがあり、クロメートよりのクロムイオン、および、樹脂中に残留し、溶出した塩素イオンにより銅箔が浸食され、対極に析出、短絡に至ったものである⁶⁾。その後、クロメートの被膜は非常に薄くなり、樹脂中の残留塩素も極力抑えられ、また、

銅めっきはピロリン酸銅浴に代わり、より優れた硫酸銅浴を使用することにより、発生は防止された。この例は絶縁劣化段階で故障箇所を発見することができ、解析したので原因の追求が出来たものである。

この例は古いデータであるが、使用する材料、処理法などの組み合わせで考えられない故障が発生することも考えられるので、今後の参考として例示したものである。

6. HASTの問題

ここ十数年、有機樹脂プリント配線板のユーザは加速絶縁劣化試験の条件として、HASTによる、130°C、85%RH（必要に応じ電圧を印加する）を指定することが多い。短い試験時間で結果がでるということで、この試験が好まれている。しかし、この試験は半導体パッケージの封止材を通しての半導体チップの試験法として用いられたもので、有機樹脂の封止材その物を対象にしたものではない⁷⁾。それが、いつの間にか有機樹脂製品の試験に転用されたもので、加速劣化試験として適当なものであるかの検討は殆んど行なわれていない。

この試験法は加圧をするオートクレーブ内で水蒸気を加圧して、高温にて相対湿度を制御し不飽和環境を実現している。100°C以上の高温高圧領域において湿度を直接測定する標準的な方法はまだ確立されていないので、実際の湿度の測定は出来ていない。したがって、加圧下の試験が実際の使用状況を考えた加速になっているかは不明である。本来、オートクレーブは化学反応を促進するためのもので、この条件で積層板が変質することもあるが、考慮されていない。このような問題があり、本研究会で検討を行った。

本試験で重量変化に注目した。本来、加湿試験で重量は減少すること無く、加湿により増加し、その後飽和して一定値になる。しかし、実際には図8(a)⁸⁾では積層板の種類により著しく減少するものがある。減少の原因を広く検討し、要因を分離、解析したものが図8(b)⁹⁾で、重量変化が樹脂の熱分解によることがわかる。図8(c)⁹⁾は過剰のHASTによる樹脂の分解した状況を示したものである。

これより、この試験の有効時間は樹脂の分解までの時間より短い時間となり、この間のデータは参考となり得るが、これを超えた時間のデータは意味がない。この時間は樹脂の耐熱性に依存すると考えられており、指標としてガラス転移点(Tg)があるが、個々の積層板についての確認が必要である。

銅張積層板メーカーよりHASTの試験結果が公表されているが、その結果については保証されていない。プリント配線板は材料依存性の大きな部品で、保証しない材料で作るプリント配線板がHASTの結果を保証することが不可能なことがわかる。

100°C以下の大気中の環境に近似するために空気を導入

図 8. HAST による重量減少

するものとして Air-HAST の試験法も検討されているが、プリント配線板のような樹脂材料系材料は高温での酸素雰囲気での Air-HAST は樹脂や銅の酸化を促進する恐れがあり、劣化のメカニズムが定かではないため、適用については確立されていない。

7. 終わりに

広く使われているプリント配線板の絶縁性は高密度化で重要性がより増していることを説明した。現行の試験法、加速寿命による加速率の算定の困難さ、試験法の選択の一つとしての HAST のプリント配線板への適用の問題点についての説明を行った。

本稿の作成に当って、新光電気中村氏に資料の提供、コメントなどの協力を頂いた。

(2018.5.7- 受理)

文 献

- 1) 日本電子回路工業会：“プリント配線板環境試験方法,” JPCA-ET01~09, 2007
- 2) 和嶋元世：“信頼性試験の加速率,” プリント回路ジャーナル, 2017.09.20 号, p. 4
- 3) J. P. Mitchel and T. L. Welsher: Conductive Anodic Filament

Growth in Printed Circuit Materials, Proc. PCWC II, Munich, p. 80, 1981

- 4) 高木 清：“よくわかるプリント配線板のできるまで (3 版),” p. 236, 日刊工業新聞, 2011
- 5) ECM 研究会：研究会資料 CAF 評価事例, 2008
- 6) T. Awano, T. Ishikawa, T. Yoshimitsu, and K. Takagi : “Insulation Reliability of Glass Cloth Material Based Copper Clad Laminates,” Printed Circuit World Convention IV (Tokyo), WC IV - 47, June 2-5, 1987
- 7) EIAJ ED-4701/100
- 8) JIEP：“エレクトロケミカルマイグレーション評価方法研究会資料,” 高密度プリント配線板絶縁性の加速試験法の研究, p. 41, 2009 年 6 月
- 9) 中村和裕：私信 2018

著者紹介

高木 清 (たかぎ きよし)
1955 年横浜国立大学工学部卒, 同年富士通入社, 1989 年古河電工 (株), (株) ADEKA 顧問, この間各種電子材料の開発, 多層プリント配線板の技術開発に従事, 1994 年高木技術士事務所開設, プリント配線板のコンサルタントに従事, 現在に至る。
エレクトロニクス実装学会名誉会員, JIEP 前 ECM 研究会幹事, NPO-C-NET 監事, 技術士, 著書「よくわかるプリント配線板の出来るまで」(日刊工業新聞社), 他。