
安全な製品設計のための安全技術開発

～プリント基板の発火・延焼リスク低減に向けた取り組み～

Safety Engineering—Approach to Reducing Risk of Fire for Printed Circuit Board

石原 慎司* 清水 雅己*
Shinji ISHIHARA Masami SHIMIZU

要 旨

当社は顧客に対して安全な製品を提供するため、安全に関する公的な国際・国内規格の遵守だけでなく、安全性向上の視点で構築した当社独自の製品安全基準への適合による製品の安全設計を行ってきている。更には、製品安全事故リスクを事前に低減させるために、製品のライフサイクル全般にわたるリスクアセスメントを実践し、未知のリスクを顕在化させ、対応の必要性を検討するプロセスを継続的に回している。

データが不十分な状況での未知のリスクへの対応については、危害の程度や発生頻度を見積もり、製品安全設計基準を適切に製品へ反映する必要がある。そのためには、現象と原因を正確に把握することを目的とした実験方法の開発やデータ蓄積、共有などを行う安全技術開発が重要になる。

本報告では、安全技術開発の一例として、電気・電子機器の重大製品事故の一つの原因であるプリント基板発火・延焼について、実験方法の検討と実験結果を示す。

ABSTRACT

In order to provide customers with safe products we must comply with public safety standards and as well as our own standards. We reduce the risk of accidents through risk assessments, which are continuously conducted throughout the life cycle of the product.

To estimate the frequency of accidents and degree of harm, and to reflect them in products as appropriate product safety design standards, it is necessary to accurately grasp the phenomena and causes. For this reason, it is important to safety engineering development for developing experimental methods and storing and sharing data.

In this report, we show the results of ignition and fire spread experiment on printed circuit board as an example of safety engineering development.

* 品質技術本部 安全・環境センター
Safety and Environmental Engineering Center, Quality Management Division

1. 背景と目的

1-1 リコーの安全に対する取り組み

当社は顧客に対して安全な製品を提供するため、安全品質向上を目的とした安全技術開発（実験・評価方法の開発、技術データ蓄積、製品安全基準化）プロセスを構築しており、事実（現場・現物）を重視して安全に関する様々な取り組みを行っている。Fig. 1に主な取り組み例を示す。国際規格や電気用品安全法などの公的な安全規格の遵守だけでなく、安全性向上の視点で構築した独自の製品安全基準を設け、製品設計を行っている。製品安全基準では、製品構造の特長（部品・ユニット、完成品）、顧客の利用シーン、カスタマーエンジニアの作業性など、設計・製造から修理・廃棄までの全てのライフサイクルを考えており、基準の制定には、設計部門、安全管理部署などの限られた部門だけでなく検討を行うのではなく、生産部門やサービス部門などの関連部署も含めて、検討を行っている。

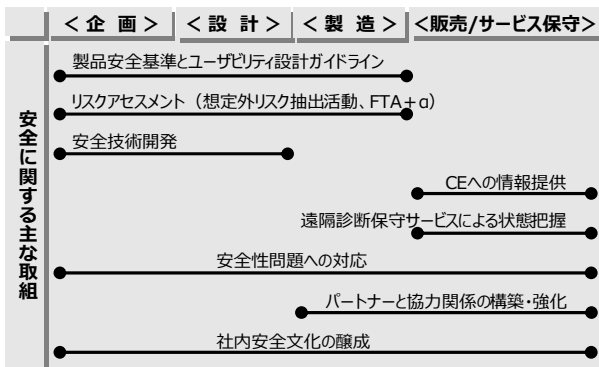


Fig. 1 Examples of our safety initiatives.

Fig. 2に安全技術開発プロセスのイメージを示す。複合機に限らず、社外の製品安全に関する情報収集や公的な安全規格・基準の変更、製品安全に対する世の中の要求の変化や、製品や部品の構造・構成・性能の変化に合わせて適切な製品の安全設計を行うための安全技術開発を実施している。安全技術開発で得られた技術は市場問題発生時の事故対応技術としても展開している。

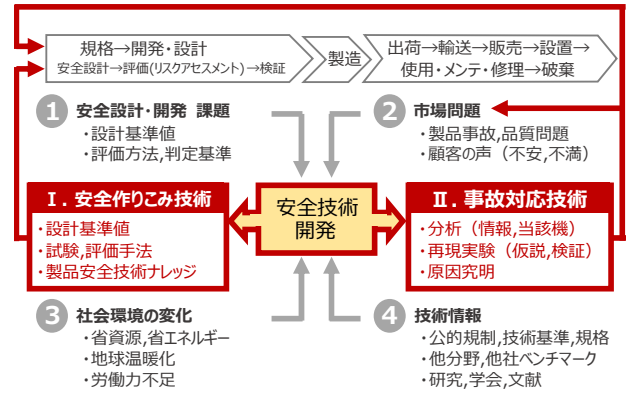


Fig. 2 Safety engineering development process.

想定外の事故を未然に防ぐために、リコー独自の視点を加えたリスクアセスメント（※1）を実施している。独自の視点とは、これまでにリコーとして培ったリスク抽出視点のことで、例えば誤操作やカスタマーエンジニアの修理ミスなどの人的要因や製品の寿命を超えての継続使用などの製品仕様外を含めた視点である。リスクアセスメントは製品設計に連動させており、新規の本体・周辺機だけでなく、接続可能な既存の周辺機も対象として機能モジュール、および製品システム全体で行っている。

リスクアセスメントによって顕在化したリスクに対しては、危害の程度や発生頻度を見積もるために、実験方法の開発やデータ蓄積といった安全技術開発を実施し、対応が必要と判断した場合には低減策の検討などを行う。ここで重要となるのがデータの信頼性であり、安全技術開発に力を入れて取り組んでいる。

※1 リスクアセスメント：危険性、または有害性を特定し、それによる災害の重篤度（被災の程度）とその災害が発生する可能性の度合いを組み合わせてリスクを見積もり、そのリスクの大きさに基づいて対策の優先度を決めた上でリスクの除去、または低減の措置を検討し、その結果を記録する一連の手法。

1-2 プリント基板発火の知見と現状

電気・電子機器の重大製品事故の一つに電気・電子部品の発火があり、各社・各機関から各種報告がされている¹⁻¹²⁾。一般に発火に必要な条件として、発熱源・可燃物・空気（酸素）の三つがある。電

気・電子部品やそれらを実装しているプリント基板には樹脂が使用されており、異常発生時には電気エネルギーにより電気・電子部品（発熱源）が発熱し、その熱で樹脂が熱分解し、可燃性ガス（可燃物）が発生する。発生した可燃性ガスが大気中の空気（酸素）と混合し、そこに熱エネルギーが加わることで発火に至る。このサイクルが続けば燃焼が継続する。

最新の国際安全規格IEC 62368（AV機器関連および情報機器関連）¹³⁾では、エネルギーが15 W未満の部分・部品は発火リスクが極めて低いと分類している。また、“発火源から上方向に50 mm、その他方向に13 mmの炎サイズをファイアコーンとし、その範囲内に低難燃性樹脂を配置しない”と規定することで延焼リスクを低減させている。しかし、これまでの当社の知見から、15 Wより小さなエネルギーでも発火の可能性はあり、発火源から上方向に50 mmよりも大きな炎が出ると考えている技術者も少なくない。更に、独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）が公表している製品事故情報⁹⁾によると、公的な安全規格に適合した電気・電子機器の火災事故は毎年発生して報告されており、公的な安全規格の値だけでは発火リスクと延焼リスク低減のための安全基準としては十分とは言えない。

このようなリスクに対して、メーカーは公的な安全規格の遵守だけでなく各社独自の安全基準への適合によって (1) 電気・電子部品から発火させないための発火リスク低減と、(2) 何らかの異常が発生し、万が一、電気・電子部品から発火したとしても、近傍に難燃性樹脂を用いるなどの延焼を防ぐための延焼リスク低減を行い、火災事故リスクを低減している。とりわけ、近年、プリント基板の発火に関連するアプローチが他社からも多く報告⁶⁻¹²⁾されており、リスクがあることは学会等で共有されている。しかし、前述した他社の報告においては、いずれも発火に至るために必要なエネルギーと発火を防ぐための対策を検討している内容であり、燃焼中の炎サイズやプリント基板上をどの程度延焼するかといった発火源近傍の樹脂部品への延焼リスクは検討されていない。

1-3 焼損のリスクアセスメント実施

これまでも電気・電子部品やプリント基板の発火リスクや近傍に使用している樹脂部品への延焼リスクに対して安全技術開発を行い、得られたデータを総合的に判断し、製品の安全性を確保してきた。しかし、当社の今後の事業展開（再生プラスチック材の積極的な使用）や環境問題対応（樹脂の難燃剤使用量の減少）、製品小型化への対応（製品内部の電気・電子部品と近傍の樹脂部品との空間距離減少）を考慮すると、延焼防止だけで安全性を確保することは難しく、発火自体も抑制する必要があると考えた。このような視点でリスクアセスメントを再度実施し、今後のリスク対象として抽出されたプリント基板の発火リスクと延焼リスクに対する詳細なデータ取得を実施することとした。プリント基板は電気・電子部品に比べて使用している樹脂の量が多いため、発生する可燃性ガスの量も多く、燃焼が継続し易い。そのため、周囲への延焼リスクも高いと考えられ、プリント基板の発火条件と延焼条件を改めて詳細に見積もることは、安全な製品設計をする上で有効である。

1-4 本報告の目的

我々は、リスクアセスメントの実施により抽出したプリント基板発火リスクと延焼リスクを見積もるために、プリント基板の発火を確認する実験を実施した。具体的には発火エネルギーや燃焼持続時間、燃焼中の炎サイズ、プリント基板上の延焼距離を把握し、発火リスクと延焼リスクを低減するための技術データを得たので、その内容と結果を報告する。

2. 実験方法

2-1 実験試料

2-1-1 プリント基板

プリント基板の発火（有炎）・延焼確認のためにプリント基板を作製して実験を行った。プリント基

板の作製は、当社製品で実際に使用しているプリント基板を作製しているプリント基板メーカーに依頼した。Fig. 3に作製したプリント基板を示す。これまでに、電源ライン・グラウンド（GND）ラインのパターンが平行に配線された基板や、パターンの間隔が異なる複数の基板で実験を行ってきたが、本実験では片面基板で電源ライン・GNDラインのパターンを一直線に配線し、パターン中央に部品実装パッドを設けるシンプルな形とした。これは、実際の製品で多く使用されている配線とは異なるが、プリント基板上の延焼が電源ライン・GNDラインのどちらに進んでいくかといった基本的な挙動を確認するためである。実験に用いたプリント基板は、当社製品で使用しており、一般的にも多く用いられているガラスエポキシ基板（FR-4）、および紙フェノール基板（FR-1）の2種類とした。難燃性は当社製品に使用しているプリント基板と同じく、国際規格で規定されているUL94 V-1¹⁴⁾より燃え難いUL94 V-0とし、部品実装面にソルダレジストを施した。

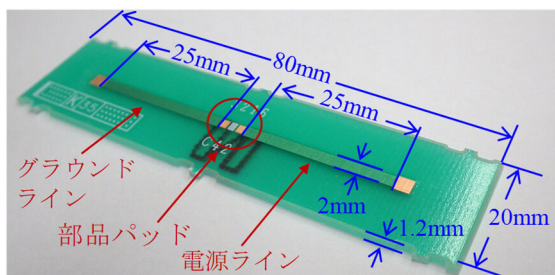


Fig. 3 Layout of printed circuit board.

2-1-2 発熱源

プリント基板を発火させるためには、発熱源となる電気・電子部品が必要となる。本実験では、発熱源として予め過電圧を印加することにより内部ショート状態（抵抗値は数Ω程度）にしたセラミックチップコンデンサを用いた。セラミックチップコンデンサは、全てが無機材料で構成されており、発熱はするがそれ自体は発火しないため、実験中の発火はプリント基板の発火と判断できる。加えて、部品自体の発熱を長い時間持続可能である。セラミッ

クチップコンデンサは、サイズの異なる4種類（サイズの小さい順に1005, 1608, 2012, 3216）とした。

2-2 実験装置・実験構成

Fig. 4に実験構成を、Table 1に各使用装置の用途をそれぞれ示す。当社で扱う複合機では、プリント基板を床面と垂直となるように設置する機会が多いため、本実験でもプリント基板を床面に対して垂直に設置して実験を行った。

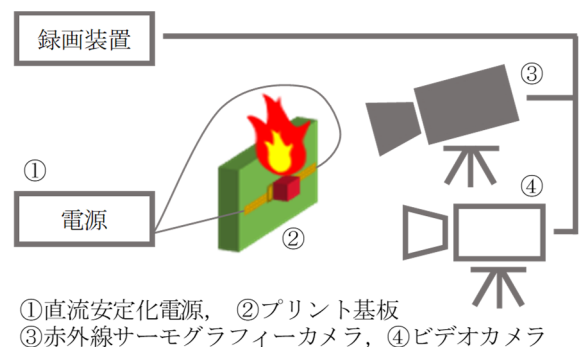


Fig. 4 Image of experimental configuration.

Table 1 List of used devices.

使用装置	用途
直流安定化電源	発熱源にエネルギーを供給する。
赤外線サーモグラフィカメラ	発熱源の温度を測定する。
ビデオカメラ	実験後に炎サイズの変化や燃焼持続時間を測定する。

2-3 実験条件

プリント基板の発火は製品内部で発生する。そのため、本来であればプリント基板周囲の雰囲気温度や風量・風向き等の諸条件を製品内部と合わせて実験する必要があるが、これらの条件は製品や製品動作状態によって異なるため、一意に決めることはできない。そこで本実験では、基本的なデータを得るために、雰囲気温度を室温、風量・風向きを自然排気とし実験を行った。実験日による偏りを減らすため、プリント基板（2種類）とセラミックチップコンデンササイズ（4種類）の各組合せ（計8種類）内での実験は、実験日を2日間以上に分けて実施した。

2-4 実験手順

本実験の手順を(1)～(6)に示す。

- (1) 直流安定化電源の設定電圧値を24 Vに固定し、設定電流値は数Aに設定する。
- (2) 直流安定化電源の出力をONにし、セラミックチップコンデンサを発熱させる。
- (3) 赤外線サーモグラフィカメラでセラミックチップコンデンサの温度を測定する。
- (4) セラミックチップコンデンサの温度が飽和した時点で設定電流値を0.1 A増加する。
- (5) 上記(3)と(4)をプリント基板が発火、もしくはオープン状態となり実験続行不可能となるまで繰り返す。発火した場合は、炎が自然に消えるまで直流安定化電源の出力はいじらない。
- (6) 直流安定化電源の出力をOFFにし、実験終了とする。

本実験では、実験中に電流を増加させる条件を発熱部品の温度飽和とした。これは、このタイミングで電流を増加した場合に、より小さなエネルギーで発火する可能性があるというこれまでの当社の知見、および被実験部品にエネルギーが供給され、抵抗成分によって発熱し、発熱により抵抗成分が変化し、更にエネルギーが加わり発熱するといったサイクルを想定したからである。実験終了後、録画した映像から発火エネルギー、燃焼持続時間、燃焼中の炎サイズを、実験後のプリント基板から延焼距離をそれぞれ測定した。尚、それぞれの値の測定方法については、各実験結果内に記載する。

3. プリント基板発火エネルギー

3-1 発火エネルギーの判断方法

この系では発火した瞬間のエネルギーは精緻に計測できないので、発火直前の直流安定化電源の電圧値 (V) , 電流値 (A) から導かれた電力値 (W) を発火エネルギーとして示している。

3-2 実験結果

Fig. 5, Fig. 6にガラスエポキシ基板、紙フェノール基板の発火エネルギーと発熱源としたセラミックチップコンデンサの温度の関係をそれぞれ示す。いずれの基板も発火エネルギーは最小3 W程度、温度は最低400°C程度で発火に至り、ガラスエポキシ基板と紙フェノール基板に大きな差は見られなかった。しかし、Table 2に示すように、プリント基板発火回数については、1608サイズ以上のチップコンデンサの場合、ガラスエポキシ基板の方が明らかに多いという結果であった。これは報告されている実験結果⁶⁾とは異なる傾向である。また、実験日の違いによる発火回数増減の明らかな傾向は見られなかった。

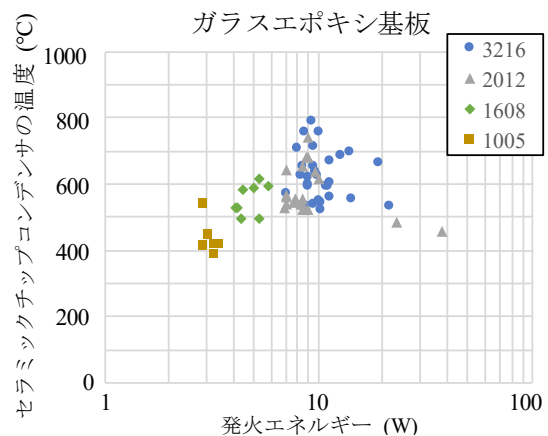


Fig. 5 Ignition energy and temperature of ceramic chip capacitor on glass epoxy board.

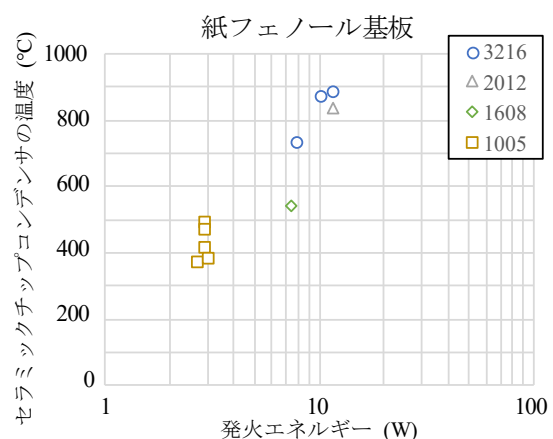


Fig. 6 Ignition energy and temperature of ceramic chip capacitor on paper phenol board.

Table 2 Number of printed circuit board fires under each condition.

チップ コンデンサ	発火回数／実験回数	
	ガラスエポキシ 基板	紙フェノール 基板
1005サイズ	7／10	5／10
1608サイズ	8／10	1／10
2012サイズ	14／15	1／10
3216サイズ	20／20	3／10

3-3 考察

本実験手順に則り、電流値をある程度まで増加すると、供給している電圧値とセラミックチップコンデンサの温度が自然に上昇し、発火に至った。これは想定した通り、温度上昇によって抵抗成分が変化したことによるものと考えられる。

プリント基板からの発火は、プリント基板の基材に使用されている樹脂が熱分解を起こし、それによって生じた可燃性ガスに着火することにより起こることが知られている。400℃はプリント基板から可燃性ガスが発生する温度⁶⁾と概ね一致しており、その影響と思われる。また、例えば2 Wのエネルギー供給時、部品温度は3216サイズで最大約200℃まで上昇したのに対し、1005サイズでは最大約300℃であった。その他のエネルギーを供給した際も傾向は同じで、小さいセラミックチップコンデンサの方がより小さなエネルギーで温度が上昇し、プリント基板発火に至ることがわかった。この結果はこれまでに報告されている結果⁶⁾と一致している。プリント基板とセラミックチップコンデンサが接している面積は3216サイズが5.12 mm²なのに対し、1005サイズでは0.5 mm²であり、同量のエネルギーを供給した時、セラミックチップコンデンサが小さくなるほど単位面積あたりに供給されるエネルギー量が大きくなり、温度が上昇し易くなるため、発火エネルギーが小さくなったと考えられる。このことから、小さいセラミックチップコンデンサを実装したプリント基板の方が発火リスクは高いと言える。

紙フェノール基板に比べて、ガラスエポキシ基板の発火回数が多いが、今回、実験を進めるにあたっては、同じ組合せでの実験を複数の日に分け、1日当たりの実験回数を異なる回数にし、また、実験順を「ガラスエポキシ基板→紙フェノール基板→ガラスエポキシ基板」の順で実施し、初めのガラスエポキシ基板の発火割合（85%）と後のガラスエポキシ基板の発火割合（100%）がそれぞれ高い割合ということから、実験の偏りは無いと考えられる。

発火回数だけでなく、後述の炎サイズ、延焼距離においても、ガラスエポキシ基板 > 紙フェノール基板の結果となっており、これは、5-3項で後述する基板構造の影響と考えられる。

4. プリント基板燃焼中の炎サイズ

4-1 炎サイズ測定方法

Fig. 7に示すように、各実験を録画した映像から燃焼持続時間とプリント基板の上方向への炎サイズをそれぞれ目視で測定した。

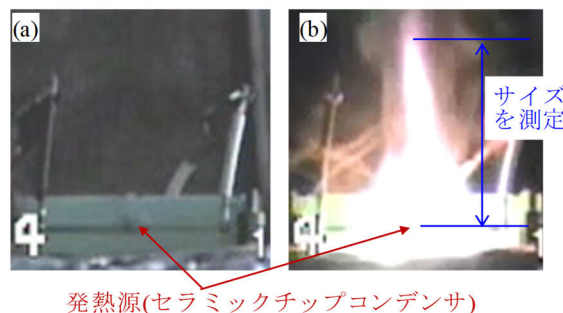


Fig. 7 Measurement of fire (a) before ignition, (b) after ignition.

4-2 実験結果

Fig. 8にプリント基板の燃焼持続時間と燃焼中の最大炎サイズの関係を示す。炎の高さはガラスエポキシ基板では発熱源から最大で約130 mmにまで達することが確認できた。一方、紙フェノール基板では約50 mmであった。燃焼持続時間が長くなるほど最大炎サイズも大きくなる傾向が見られた。

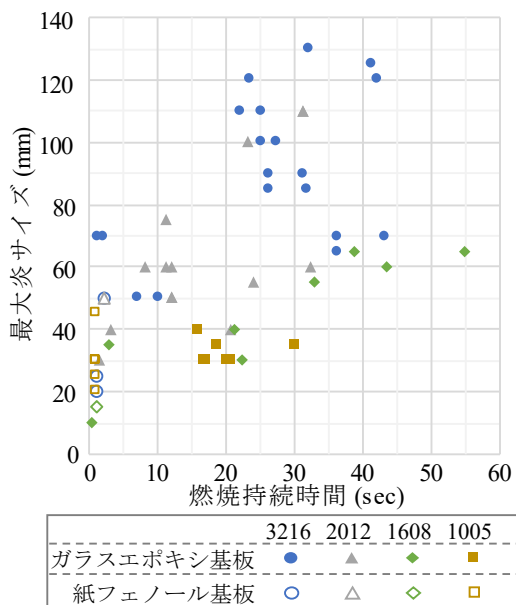


Fig. 8 Duration of combustion and maximum fire size of printed circuit board.

4-3 考察

発熱源となるセラミックチップコンデンサが大きいほど最大炎サイズは大きくなった。これは供給しているエネルギー量とプリント基板から発生するガス量の差によるものと考えられる。

本実験では、設定した電流値以上の電流が発火後に流れることは無い。3-3項で述べたように、大きいセラミックチップコンデンサの場合、単位面積当たりのエネルギー量が小さいため、プリント基板を熱分解させるのに大きなエネルギーが必要になり、発火エネルギーも大きくなったため燃焼が継続し易く、燃焼が継続したことで、可燃性ガスが多く発生し、炎サイズが大きくなったと考えられる。

5. プリント基板上の延焼距離

5-1 延焼距離測定方法

Fig. 9に示すように、各実験後の基板からプリント基板上の電源ライン・GNDラインの延焼距離をそれぞれ測定した。

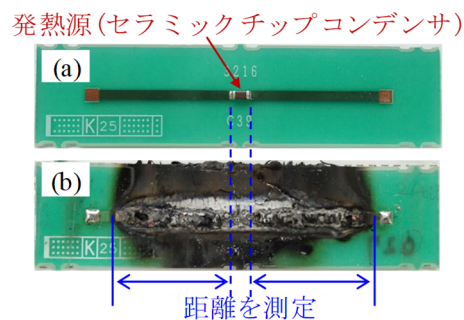


Fig. 9 Measurement of fire spread distance (a) before combustion, (b) after combustion.

5-2 実験結果

Fig. 10に燃焼持続時間と最大延焼距離の関係を示す。ガラスエポキシ基板では電源ライン・GNDライン問わずパターンに沿って本実験プリント基板での最大値(25 mm)まで延焼した。一方、紙フェノール基板は最大で5 mm程度であった。燃焼持続時間が長くなるほどプリント基板上の延焼距離も長くなる傾向が見られた。プリント基板発火後、電源ライン・GNDラインの延焼方向に偏りは見いだせず、電源ライン・GNDラインどちらに延焼し易いということは確認できなかった。

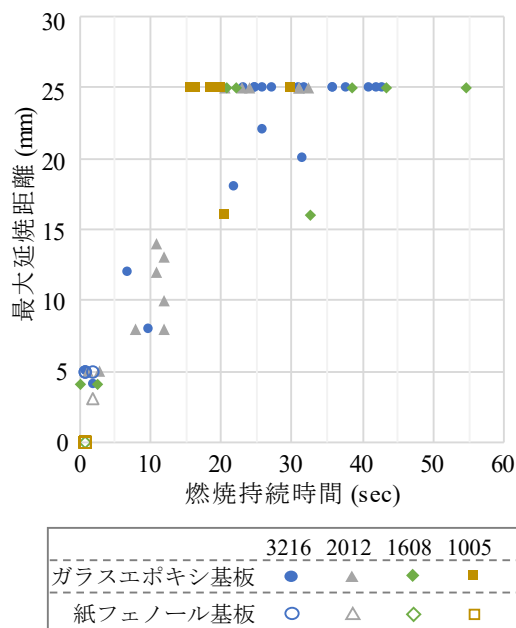


Fig. 10 Duration of combustion and maximum fire spread distance of printed circuit board.

5-3 考察

ガラスエポキシ基板は紙フェノール基板に比べ、延焼距離が長い結果となった。これは各々のプリント基板の構造の違いによるものと推察される。プリント基板が延焼していくには、樹脂が炭化して電気が流れる状態になる（炭化導電路が形成される）必要があり、プリント基板上で炭化導電路が形成され続ければ燃焼が続く。紙フェノール基板は紙にフェノール樹脂を含浸した構造になっているため、強度が低く、プリント基板の発火前もしくは発火直後に炭化部が崩壊してしまう。そのため、すぐにオープン状態になってしまい、発火し難く、かつ燃焼が続かないと考えられる。一方、ガラスエポキシ基板はガラス布と呼ばれるガラス繊維の織物にエポキシ樹脂を含浸した構造になっており、紙フェノール基板に比べて強度が高く、燃焼により炭化部が崩れ難いため、炭化導電路の形成が持続し、燃焼が継続すると考えられる。

6. まとめ

より安全な製品を作るために、これまでに実施してきた安全技術開発の一例として、プリント基板の発火を確認する実験で得られた結果の要点を報告した。今後も当社独自の製品安全基準やリスクアセスメントのプロセスなどを継続的に見直し、引き続き当社製品の安全性向上に向けて取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 渡部利範, 藤原義親, 竹内学: アルミ電解コンデンサの発火メカニズムと対策, 日本信頼性学会誌, Vol. 25, No. 8, pp. 797-809 (2003).
- 2) 井原惇: 製品事故の原因究明における可視化技術, 第4回横幹連合コンファレンス (2011).
- 3) 浅井希編: 電子機器・製品における故障・発火原因解析と対策技術, 第2版, 技術情報協会 (2014).
- 4) 渡部利範: 電気製品における製品寿命の設計思想, 安全工学, Vol. 55, No. 2, pp. 93-100 (2016).
- 5) 独立行政法人製品評価技術基盤機構: 最新事故情報, <https://www.nite.go.jp/jiko/jikojohou/information/index.html> (参照2019-09-24).
- 6) 岩谷康次郎, 小松泰之: チップセラミックコンデンサによる基板発火延焼の一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112, No. 284, pp. 23-26 (2012).
- 7) 池本裕, 小松泰之: 基板焼損実験, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112, No. 284, pp. 31-35 (2012).
- 8) 安達健二: プリント基板の焼損と対策, 第43回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, pp. 115-119, 日本科学技術連盟 (2013).
- 9) 下村尚也, 真鍋里美: 基板焼損による製品発火のメカニズムと対策, 第44回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, pp. 298-303, 日本科学技術連盟 (2014).
- 10) 久永光司: プリント基板の絶縁性能劣化による発火の未然防止に関する基礎実験, 第45回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, pp. 424-428, 日本科学技術連盟 (2015).
- 11) 今田修二: 基板母材・絶縁材のトラッキング痕跡解析技術データの取得・蓄積 <第一報>, 23年度製品センター製品安全業務報告会 (2011).
- 12) 今田修二: 基板母材・絶縁材のトラッキング痕跡解析技術データの取得・蓄積 <第二報>, 24年度製品センター製品安全業務報告会 (2012).
- 13) IEC 62368, AV機器関連および情報機器関連.
- 14) UL 94, Standard for Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances.