電子部品に用いられる樹脂部品の形状と着火危険性に関する考察

遠藤 小太郎*, 水野 孝志郎*, 石川 朝之*, 武田 邦彦*

On the Ignition Risk Evaluation of Plastic Electronic Component by Its Shape

Kotaro ENDO*, Kohshiroh MIZUNO*, Tomoyuki ISHIKAWA* and Kunihiko TAKEDA*

* 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

*Department of Materials, Physics and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University (Furoh-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603)

概要 汎用プラスチックであるポリプロピレンとゴム補強ポリスチレン、エンジニアリングプラスチックであるポリカーボネートおよびアクリロニトリル・スチレン・ブタジエン重合体を用いて着火性について検討を行った。それらの試料について火源と試料の立体的関係を「平面位」と「側面位」としてバーナーによる着火を行った。その結果、平面着火においては臨界熱流束(H_c)は試料形状に依存し、過剰総熱量(Q)は高分子の種類によった。一方、側面着火では H_c は高分子の種類に依存し、 Q は試料形状によった。電子部品の火災危険性は、高分子の種類だけではなく材料形状にも影響を受ける。

Abstract

The ignition properties of PP (polypropylene) and HIPS (high impact polystyrene) as general use plastics, PC (polycarbonate) as an engineering plastic, and ABS (acrylonitril-styrene-butadiene copolymer) were studied. The specimens were placed at a plane view position (position in which the heat source irradiates a plane of the specimen: P-position) and at a side view position (S-position) and ignited by a burner. The critical heat flux (H_c) depended on the shape of the specimen and the excess heat (Q) depended on the kind of polymer at the P-position. On the other hand, at the S-position the H_c depended on the kind of polymer and Q depended on the shape. Thus, we see that fire risk in electrical parts is affected by not only by the kind of polymer but also by the shape of the specimen.

Key Words: Design, Risk, Combustion, Ignition, Polymer

1. 緒言

電子部品が火源となって火災に至る場合があることはよく知られており、かつ現代社会においては火災は生活の中の大きな危険の1つである。生活の安全性や工業製品の信頼性という立場からその防止は現代社会の重要な課題の1つである¹⁾。日本では火災による犠牲者が年間2000人を超え、火災による犠牲者が減りつつある先進国の中で日本が増加傾向にあることに注目する必要がある²⁾。

近年の工業製品の小型化に伴い、電子機器部品の小型化、軽量化が進み、電子部品の発火から可燃性を有する高分子材料への着火、延焼による火災の危険性が増大している³⁾。日本における発火燃焼事故を製品別に見ると、家電製品、燃焼器具、乗物・乗物用品の順に多く、これら3品で全体の約9割を占めており⁴⁾、電気製品の安全性を確保するための基準などが検討されている⁵⁾。これらの発火の主要な原因でもある製品内部の部品から発火が生じた場合、周辺部品への着火性はその部品の材質および形状に大きく影響されることが推測され、製品内部の着火・延焼に

対する安全性評価基準を構築する際に高分子材料の成形体形状と着火性および燃焼性の基礎的研究は極めて重要である。

これを材料や製品面で見ると、火災の危険性は継続的な燃焼が注目されるが、燃焼の継続に関する研究に対して着火についての基礎的な研究は少ない^{6)~8)}。その理由としては、高分子の燃焼の研究自体が少ないこと、また継続的な燃焼が平衡状態を扱うのに対して、着火は非平衡の状況下で起こり、熱バランスのほかに速度要因など多様な要因が複雑に関係するからと考えられる^{9),10)}。しかし、日常生活における安全・安心の意識の高まりとともに^{11)~13)}、着火に関する基礎的な研究も進んできている^{14),15)}。

著者らは上記の認識に基づき、先にポリカーボネート(PC)の着火に関する研究を進めてきたが、本報告ではポリプロピレン(PP)のほか、ゴム補強ポリスチレン(HIPS)、およびABS樹脂について特に部品形状と着火危険性について整理を行い、高分子材料の物理的特性を考慮することによって、より普遍的な危険性について解析を試みたものである。

2. 実験

2.1 使用した高分子材料と基礎物性

対象高分子材料としてポリプロピレン (PP: 新神戸電機製のコウベポリシート PP の標準品), ゴム補強ポリスチレン (HIPS; rubber=10 mol% : 東洋スチレン製のトーヨスチロール HI (E640)), アクリロニトリル・スチレン・ブタジエン重合体 (ABS, butadiene=25 mol%, acrylonitril=25 mol%, styrene=50 mol% : 新神戸電機製のコウベポリシート ABS-NWN), ポリカーボネート (PC: 筒中プラスチック工業製のポリカエース ECK100) を用いた。

2.2 熱重量分析方法

熱重量分析(TGA)は加熱時の反応による重量変化を連続的に測定する方法であり^{16),17)}, 原理が簡単で測定も容易にできることから簡便な熱分析法として利用されている¹⁶⁾。本研究では島津製作所製, DTG-60を使用し, フローコントローラーとしてFC-60Aを, コントロールユニットとしてTA-60WSをそれぞれ使用した。測定条件は試料を5mg秤量して白金製の皿に入れ, 不活性ガス(窒素ガス)雰囲気下で, ガス流量を50 mL/min, 昇温速度を90°C/minで室温から800°Cまで測定した。

2.3 熱流束測定方法

熱流束の測定は, コーンカロリメーター(東洋精機製作所製, コーンカロリメーター3, C3タイプ)を一部改造して使用した。試料を均一に加熱するために円錐型のヒーターを使用し, 試料は試験中その質量を常時測定するロードセル上に置いた。高電圧スパークを使って加熱された試料に点火し, 点火後燃焼ガスは密閉システム内をある特定速度

で流れ, 分析のために収集した。試料形状は50×50×3.2 mm, 試料が熱の輻射により膨張して試料形状が変形しないように輻射面以外をアルミホイルで包んだ。

2.4 燃焼性の測定方法

燃焼試験方法としては, 世界の安全規格(SAFETY STANDARDS)を代表するものとしてUL規格のうち高分子材料の燃焼試験の規格として“94V垂直試験方法”に準じて燃焼試験を行った。試験片の形状は幅12.7 mm (0.5 inch), 長さ127 mm (5 inch), 厚さ3.2 mmの短冊試験片とした。試験の詳細はすでに規格に詳細に記載されているので割愛した。

2.5 着火性の実験方法

試料に対する着火時間の測定にはバーナーによる拡散火炎熱を用いる方法を採用した。すなわち口径9.5 mmでメタンガス流量160 mL/min (0.05 MPa)のバーナーを下方に置き, バーナーの口面から上方57 mmのところの間に直径15 mmの開口部を有する熱遮蔽板を設置した。熱遮蔽板の開口部の中心にバーナーの火力がくるようにし, 遮蔽板の上方3 mmに試料を置いた。また火炎による試料の受熱位置における照射熱流束は熱流計を用いて測定した。なお本論文では火炎が試料の平面部に照射される場合を「平面位」, 試料の側面の場合を「側面位」と呼称した。

3. 結果

3.1 試料形状と着火時間の関係

試料を平面に置き, 熱流束を変えて着火までの時間を測定し, その結果を, 横軸に試料に与えた熱量, 縦軸に着火時間の逆数でプロットしFig. 1に示した。

Fig. 1は平面着火のデータを整理したが4種類の高分子材

Fig. 1 Ignition test of four kinds of polymer at plane position (clockwise; upper left: PP, HIPS, PC and ABS)

Fig. 2 Ignition test of four kinds of polymer at side position (clockwise; upper left: PP, HIPS, PC and ABS)

料はともに試料に与えた熱流束と着火時間の逆数のプロットはほぼ直線になった。また高分子の種類によって傾きが異なり、PPはもっとも傾きが急であり、PCが緩やかでHIPSとABSはそれらの中間であった。

また、PPの場合は厚みが1mmの試料と2mm, 3mmおよび5mmの試料との間のデータの差が小さかった。また直線と横軸との交点は「無限時間の間、加熱しても着火しない熱流束」を意味し「臨界熱流束(critical heat flux)」と呼ばれるが、PPでは約50kW/m²であった。

HIPSでは直線の傾きはやや緩やかで、試料の厚みの依存性が見られた。厚い試料で臨界熱流束が約40kW/m²であるのに対して、厚みが1mmでは30kW/m²と小さかった。このことは臨界熱流束が低く着火の危険性が高いこと、部品の形状が小さいか、材料の厚みが薄い場合にはさらに弱い火源でも延焼する危険性があることを示している。また5mmと10mmの厚みの試料ではほとんど差が見られなかった。

ABSはHIPSとほぼ同様の傾向を示し、厚みが1mmの試料の臨界熱流束は30kW/m²、2mmから3mmの試料では約40kW/m²であった。ただしABSの場合は2mm以上の厚みの試料でも厚さによって若干の違いがあり、5mmの試料では約49kW/m²と高かった。

PCでは傾きが緩やかであった。臨界熱流束は20kW/m²であり弱い火源で着火する可能性があるが、着火する領域では必要な熱量は大きいと考えられ、後に解析を加えた。

次に側面着火について整理した結果をFig. 2に示す。

側面位の実験でも着火温度の逆数と加熱流束の関係は平面位と同様に直線が得られたが、平面位の着火実験結果に

比較して、第一に直線の傾きが試料の厚みに依存すること、第二に臨界熱流束が試料の厚みによらないという特徴が見られた。すなわち平面着火では直線の傾きは厚みに依存せず、臨界熱流束は厚み依存性が見られたのに対して、側面着火では厚みによって直線の傾きが変化し、臨界熱流束は厚みによらなかった。

PPの側面着火の場合、加熱中に試料の変形が見られ、特に薄い試料で熱流束が小さいものについてはデータがとれなかったが、臨界熱流束は63kW/m²程度であった。

HIPSでは試料厚みが厚くなると傾きは緩やかになる傾向を示した。臨界熱流束は約55kW/m²程度であり、PPより若干低かった。なお試料厚みが1mmの場合、熱流束が小さくなると試料が変形し、着火時間が直線からずれる傾向が見られた。ABSは臨界熱流束が62kW/m²程度であり、PCの場合もほぼ同様であった。PCは側面着火でも試料の変形が少ないので、良好な直線関係が得られ、臨界熱流束は試料の形状に依存せず60kW/m²であった。

3.2 継続燃焼時の発熱速度

着火および継続的燃焼のデータを参考にするためにコーンカロリメーターを用いて着火時間、燃焼時の発熱速度、最大発熱速度などを測定し、Fig. 3に示した。

コーンカロリメーターではPP, HIPS, ABSは共に40~50sec程度、PCは100sec程度で着火した。PP, HIPSおよびABSについては着火後は急速に燃焼が拡大し、90sec前後で発熱速度が最高に達し、試料が燃え尽きることによって消炎した¹⁸⁾。HIPS, ABSにおいてもほぼ類似の傾向が見られたが、PPより発熱速度の上昇は小さかった。PCは熱重

Fig. 3 Heat release rate of PP, HIPS, ABS and PC by a cone calorimeter

Fig. 4 Ignition and flaming combustion time of polymers

量分析の結果から予想されたように着火時間が遅く、着火後も燃焼による発熱速度は 500 kW/m^2 と低かった。

PCは加熱開始後、約110sec程度で着火し、発熱速度は急激に 800 kW/m^2 まで上昇するが、発熱は抑制され、いったん 500 kW/m^2 まで低下し、再び 560 kW/m^2 程度に上昇した後、急速に炎は小さくなった。これはPC構造中の酸素と水素が結合して脱水反応を起こし、それによって発生する炭化層が表面に形成されることによって燃焼が抑制されたためと考えられる。さらに炭化層が内部から連続的に噴出する分解生成物によって破壊され再び燃焼が促進された¹⁹⁾。

次に、UL規格による燃焼実験の結果をFig. 4に示す。図では高分子の種類によって着火時間と消炎時間を1本の横棒で示した。着火時間が長い場合は左に、消炎時間が短い場合も左になるので「着火しにくく燃焼しにくい」材料のデータは棒が左にシフトする。

着火時間はPP, HIPSおよびABSは約6~9sec程度で着火し、PCは20sec程度を要した。また自己消炎時間はPCが20sec程度であり、PP, HIPSおよびABSは160~350secで試料全体が燃え尽きた。特にPPは燃焼が始まるとともに溶

Fig. 5 TGA curves of PP, HIPS, ABS and PC

融して落下し160sec程度で燃え尽きた。

3.3 熱重量変化の結果

高分子材料の燃焼性は熱分解に強く依存する²⁰⁾。すなわち高分子材料は材料が酸素と接して燃焼するのではなく、外部からの熱で加熱された高分子材料が熱分解し気相に出た揮発性成分が酸素と反応して発熱し、この熱が再び材料を加熱して燃焼が継続される。Lyonらは熱分解炉と燃焼炉を分けて熱分解と燃焼の関係を調べている^{21),22)}。本研究で用いた高分子の熱重量曲線をFig. 5に示す。

PCは550°C付近から熱分解が始まり、50%重量減少温度は約600°Cと高い。一方、PP, HIPS, ABSは400°C付近で分解が始まり、50%重量減少温度は約480~500°でありPCに対して100~120°C程度低い。またPCは700°C以上の高温領域で熱分解残渣が観測され、800°Cにおいて約21%の残渣が見られた²³⁾。燃焼残渣は炭化した構造をしており、それが材料表面に残ることによって燃焼を阻害するとされている²⁴⁾。一方、PP, HIPS, ABSでは重量減少開始温度が低く、熱分解残渣が少ないので材料を加熱するとより低温で分解生成物が発生することが予想される。

4. 考察

4.1 臨界熱流束の解析

臨界熱流束はFig. 1およびFig. 2のグラフで直線を x 軸上に外挿して得られる。グラフの縦軸は着火時間の逆数であるから、 $y=0$ は着火時間が無限大を示し、したがって外挿して得られる熱流束は仮想的に無限時間、加熱しても試料は着火しないことを示す。これを部品設計上の安全という視点から、仮に高分子材料でできた部品の近傍に火源が存在した場合、その火源の本来有する火力とそこからの立体角などの立体的条件を考慮し、高分子材料を加熱する熱流束が臨界熱流束を下回ることができれば「火災に対して安全な設計」を意味すると考えられる。

したがって、臨界熱流束は電気電子製品の安全設計上、重要な値と考えられるのでTable 1に本実験で得られた臨

Table 1. Critical heat flux at plane and side positions

Polymer	Plane position					Side position
	kW·m ⁻²					kW·m ⁻²
	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	10 mm	1~10 mm
PP	48.5	51.6	52.0	52.5	—	63.0
HIPS	28.9	40.4	42.4	43.8	44.2	54.9
ABS	29.4	40.5	42.9	47.7	—	62.0
PC	14.4	35.8	43.4	50.0	—	59.8

界熱流束を整理して示した。

平面着火においては、各高分子ともに厚みが増大すると若干ではあるが臨界熱流束が増大しているが、2mmから10mmの厚みの範囲ではおおよそ50kW/m²程度であった。すなわち近くに火源があった場合、火源からの熱流束が50kW/m²以下であって材料の厚みが2mm以上の場合着火の危険性は低い。これに対して1mmの試料はHIPS, ABSともに30kW/m²と低いので材料の厚みが薄い場合には設計に注意を要することがわかった。

臨界熱流束は無限時間の間、加熱しても着火しない条件であることから、次の要因が熱流束の値に関係していると考えられる。

1) 試料からの放熱量

2) 熱分解によって発生した揮発分の濃度とその爆発限界

すなわち一定の形状の高分子成形物に対して熱を加えた場合、成形物の温度が上がり、熱重量変化が起こる温度に達すると可燃性の揮発物を発生し、それが爆発限界に達すると火源からの火で着火する。したがって、試料の体積を一定とすると、放熱量を支配する熱伝導率、体積当たりの材料の加熱に要する比熱と比重、それに加熱を開始する室温から熱分解温度までの温度差(ΔK)が関係すると考えられる。また熱分解で生成する分解生成物の種類やその爆発限界は分解生成物の種類などによって異なり、主として炭素数が6程度から40程度の炭化水素であり爆発限界は大きくは変化しない。したがって単純な物理的定数の影響が大きいと考え、熱伝導率などを使用して解析した²⁵⁾。PPとPCの熱伝導率をそれぞれ0.18, 0.19 Wm⁻¹K⁻¹、比熱を2.05, 1.26 Jg⁻¹K⁻¹、比重を0.9, 1.2 g/mL、室温から分解温度までの温度差を365, 575 Kとした。なおHIPSとABSは混合組成物であるので熱的特性は一定ではないが、比熱と比重について、HIPSは1.4 Jg⁻¹K⁻¹と1.1 g/mL、ABSは1.6 Jg⁻¹K⁻¹と1.1 g/mLとした。

試料の温度を上げることを抑制する方向という意味で整理をすると、比熱と比重が大きく熱伝導率が高い方が材料を温めにくく冷めやすいので、これらの積は「材料を温めにくい指標」になることからRelative index of heating (RIH)とした。このRIHはPPが0.33, PCが0.29となった。ただし比熱は温度によってかなり変化するが400℃ではPPが3.0 Jg⁻¹K⁻¹、PCが2.0 Jg⁻¹K⁻¹程度であり、その比率は1.5で

あった。一方、25℃での比率は1.57であることから相対的な差を問題にする場合には温度による比熱の変化は大きな影響を及ぼさない。

着火実験で得られた臨界熱流束は試料の形状に拘わらず、また平面着火においても側面着火においてもPCの方が熱流束が小さかった。このことはRIHの方が支配的であると考えられる。試料を加熱し始めて試料温度が上がり、放熱を伴いながらある温度に達する。このような状態で長い時間加熱した場合、主として材料の熱容量に比例して臨界熱流束が決定されることを示している。

4.2 過剰総熱量の解析

着火時間を T_i 、加熱流束を H_{iz} 、および臨界熱流束を H_c とすると、Fig. 1およびFig. 2に示した直線はその傾きの逆数を Q として、式(1)で示される。

$$\frac{1}{T_i} = \left(\frac{1}{Q} \right) \cdot (H_i - H_c) \quad (1)$$

よって、 b は式(2)で示される。

$$Q = (H_i - H_c) \cdot T_i \quad (2)$$

着火実験のデータを横軸を加熱流束、縦軸を着火温度の逆数を取った場合、傾きの逆数(Q)は、「臨界熱流束より高い熱流束で、高分子を加熱した場合、その材料が着火するまでの過剰総熱量」である。ここで過剰総熱量とは試料に与えた総熱量の内、臨界熱流束の強さで与えた熱を差し引いた量を意味する。すなわち、グラフのプロットが直線になるということは上記の Q が加熱する熱流束を変化させても一定であることを示している。したがって特定の試料を対象として着火危険性を考慮した設計をする場合、その部品を加熱する熱源が少なくとも臨界熱流束を上回る熱流束をもっている限り、着火危険性は熱流束、すなわち熱の強さには無関係で試料を加熱する総熱量だけで支配されることが考えられる。

また平面着火では高分子の種類によって傾きが変わるが試料の厚みによっては変化しない。すなわち平面着火の場合は厚みによって臨界熱流束のような「熱の強さ」は着火に影響を与えるが、過剰総熱量のような「熱の量」には支配されないことを示している。

一方、側面着火においては平面着火と異なり、試料の厚みによって臨界熱流束のような強さによっては変化がなく、熱の量が着火を支配していることがわかる。平面着火、側面着火の両方について過剰総熱量を整理した結果をTable 2に示した。

平面着火の場合には過剰総熱量は試料の厚みに依存しないのでPPが300 kJ/m²と低く、HIPSおよびABSは約600 kJ/m²程度であり、PCは最も大きく1460 kJ/m²である。PCとPPとを比較すると、過剰総熱量は4.9倍異なる。またPCはHIPSとABSに対してもそれぞれ2.3倍と2.5倍異なる。なお過剰総熱量は臨界熱流束で試料に与える熱は除いてあ

Table 2. Excess heat of polymers at plane and side positions

Polymer	Plane position	Side position				
	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$				
	1~10 mm	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	10 mm
PP	300	25.6	47.6	55.0	—	—
HIPS	640	23.3	50.2	73.3	136.8	178.6
ABS	580	23.7	43.8	65.9	113.8	—
PC	1460	28.4	52.9	96.2	128.9	—

ることから、試料の放熱などによって実質的に試料を着火するために使用されない熱は算入されない。

このことから平面着火のような立体的位置で高分子材料の部品を設計する場合、PCを基準にとるとPPは約5分の1の熱量で着火し、HIPSとABSは約2.5分の1の熱量で着火する危険性のある材料であると言える。また火源から見て成形体形状が平面的であれば、その成形体の厚みに依存せず、高分子の種類のみによって依存する。

これに対して側面着火においては過剰総熱量が形状によって異なる。例えば1mmの試料においては着火までの過剰総熱量は、高分子の種類による影響は少なく23~28 kJ/m^2 であり、その値は平面着火のPPの300 kJ/m^2 、PCの1460 kJ/m^2 と大きく異なる。PCについては51分の1であり、総熱量という尺度からの危険性は約50倍も大きい。

側面着火で、3mmの試料の場合、PPが55 kJ/m^2 に対して、HIPSとABSはそれぞれ73 kJ/m^2 、66 kJ/m^2 であり、PCは最も過剰総熱量が大きく96 kJ/m^2 である。試料の厚みが厚くなると高分子の種類による影響が見られるようになり、序列も平面着火と類似の傾向になった。

4.3 試料形状と着火と燃焼についての考察

平面位の着火実験における、試料厚さに対する着火に要する臨界熱流束は全体としては試料厚みが厚くなると大きくなる傾向であった。これは、試料の厚みが厚くなると外部からの加熱により試料温度が着火温度に至るための時間が長くなるためと考えられるが、臨界熱流束は概念としては無限時間加熱した場合に着火する熱量であるので現実には加熱による試料の変形、劣化や変質を考慮しなければならない。特に材料の厚さが薄い場合、劣化や変形の影響が大きく、また材料全体が加熱されるので分解生成物が発生する面積が2倍近くになると考えられる。HIPSやABSの1mmの厚みの試料の臨界熱流束が5mmの試料に対して2分の1近いのはその影響の可能性もある。また高分子の熱的性質を考慮して整理した結果から、比熱と比重で臨界熱流束を補正した結果をFig. 6に示した。

補正前の数値は試料厚みが1mmの場合には高分子の種類によって大きく変化し、厚みが厚くなるにつれて徐々に高分子の種類に依存しなくなる。このことは高分子の化学的構造や熱分解の温度、熱分解によって生成する個別の分

Fig. 6 Relative critical heat flux in the case of plane position **Fig. 7** Excess heat required of ignition as a function of specimen thickness

解生成物などの化学的な差異ではなく、より物理的で統一的な着火危険性の尺度が存在している可能性を示している。

従来からの研究では高分子の種類に着目した研究や整理は行われているものの、成形品の形状の研究は少ない。しかし、Fig. 6は着火危険性が高分子の化学構造のような要因で支配されず比熱などの物理的性質でも着火危険性が整理しうる可能性を示している。また部品設計などにおいて設計担当者が特定の高分子の種類ではなく、より普遍的な物理的性質を考慮することによって安全な設計が可能となることを意味している。

さらに、側面着火の場合、試料の側面の幅が広い場合には、立体的には平面着火と同様になる。そこで臨界熱流束と過剰総熱量について試料の横幅を横軸にとって整理を行った結果をFig. 7に示す。

着火に必要な過剰総熱量は、試料厚みが3~10mmを境界として材料形状に依存する領域と、樹脂の種類に依存する領域の2つに分類できることが認められた。試料が薄く

その形状が着火に大きな影響を与える場合は高分子の種類ではなく形状に支配され、試料の形状が大きくなると高分子本来の着火性によって支配される。これは、臨界熱流束が比熱などで補正することによって高分子の化学的構造の影響が少ないことと同様である。

本報告で従来から汎用的に使用されているコーンカロリメーターやUL規格による実験値を示したが、コーンカロリメーターで標準とされる熱流束は 50 kW/m^2 であり臨界熱流束より若干高く、立体的にヒーターが試料を包み込むようになっているので分解ガスが蓄積して着火する。その結果、熱重量変化と着火時間が単純な関係になる。しかし着火現象は高分子材料の種類によって異なる場合と、試料形状に依存する場合があることは火災安全性の研究において試料の形状を重視する必要性を示している。

電気機器などが火災に至る過程を考えると、高分子材料そのものが加熱されて着火する危険性より、近くにバーナーや電気配線があり、不意に火勢が大きくなるか、またはショートなどによって火源が発生し、それによる加熱によって高分子材料が着火することが多い。その点では工業製品の安全性を重視する意味では継続的な燃焼より着火の方向がより重要であるとも考えられる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)、産業環境管理協会ならびに樹脂を御提供いただいた多数の企業のご支援をいただいた。この場を借りて深く感謝申し上げる。

(2006.5.17-受理)

文 献

- 1) D. J. Barillo and R. Goode: "Fire Fatality Study: Demographics of Fire Victims", *Burns*, Vol. **22**, pp. 85–88, 1996
- 2) 武田邦彦: "ものづくりと資源・環境・エネルギー", 科学技術週間・科学技術講演会, 2006.04.19
- 3) 武田邦彦: "高分子の難燃の科学", *高分子*, Vol. **94**, No. 4, pp. 242–247, 2000
- 4) 製品評価技術基盤機構: "平成14年度事故情報収集制度報告書, 製品区分別事故情報", 2004
- 5) J. Troitzsch: "Fire Safety of E&E Equipment Standards, Tests and Studies", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. **64**, pp. 557–560, 1999
- 6) T. Ishikawa, I. Maki and K. Takeda: "Flame Retardancy of Poly(butylene terephthalate) Blended with Phosphorous Compounds", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. **92**, No. 4, pp. 2326–2333, 2004
- 7) C. P. Fenimore and F. J. Martin: "Flammability of Polymers", *Combustion Flame*, Vol. **10**, pp. 135–139, 1966
- 8) A. Factor: "Fire and Polymers", American Chemical Society, p. 285, 1990
- 9) 岩沢昭一, 石川 潤, 塩川芳徳: "携帯電話によるガソリン等の爆発混合気への着火危険の実証について(都民生活の安全に関する研究開発)", *消防科学研究所報*, Vol. **37**, pp. 151–154, 2000
- 10) 池田武弘, 中川泰征: "高電圧領域におけるメタンの着火限界", *安全工学*, Vol. **27**, No. 5, pp. 268–273, 1988
- 11) 小室 修, 鳥谷 淳, 荻野恭久: "ガステーブル類を原因とする着衣着火火災の統計分析(平成13年度消防科学研究所の研究開発——都民生活の安全に関する研究開発)", *消防科学研究所報*, Vol. **39**, pp. 70–74, 2002
- 12) 東京消防庁消防科学研究所第二研究室: "研究・開発 ガステーブルに起因する着衣着火に関する研究", *月刊フェスク*, Vol. **253**, pp. 69–72, 2002
- 13) 武田邦彦: "安全安心な都市生活のための社会技術", 第8回社会技術研究フォーラム, 2005.01.29
- 14) R. K. Eckhoff: "Minimum Ignition Energy (MIE)——A Basic Ignition Sensitivity Parameter in Design of Intrinsically Safe Electrical Apparatus for Explosive Dust Clouds", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. **15**, pp. 305–310, 2002
- 15) 若生彦治: "チタン箔の着火エネルギーとその形状効果", *安全工学*, Vol. **22**, No. 5, pp. 270–276, 1983
- 16) 神戸博太郎: "熱分析", 講談社, 1992
- 17) C. K. Keattch: "熱測定", Vol. **17**, p. 101, 1990
- 18) L. Morice, S. Bourbigot and J. M. Leroy: "Heat Transfer Study of Polypropylene-Based Intumescent Systems during Combustion", *Journal of Fire Science*, Vol. **15**, pp. 358–374, 1997
- 19) T. Ishikawa, I. Maki, T. Koshizuka, T. Ohkawa and K. Takeda: "Effect of Perfluoroalkane Sulfonic Acid on the Flame Retardancy of Polycarbonate", *Journal of Macromolecular Science—Pure and Applied Chemistry—*, Vol. **41**, No. 5, pp. 523–535, 2004
- 20) 武田邦彦: "高分子材料難燃化の将来技術", *化学工業*, Vol. **50**, No. 8, pp. 577–585, 1999
- 21) R. E. Lyon and R. N. Walters: "Pyrolysis Combustion Flow Calorimetry", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. **71**, pp. 27–46, 2004
- 22) R. N. Walters and R. E. Lyon: "Molar Group Contributions to Polymer Flammability", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. **87**, pp. 548–563, 2003
- 23) 武田邦彦監修: "電子・電気機器材料の難燃化への科学的アプローチ", 技術情報協会, 2004
- 24) 石川朝之, 牧 育広, 越塚朋和, 武田邦彦: "難燃性高分子材料としてのポリカーボネートの熱分解と燃焼特性", *日本材料学会誌*, Vol. **53**, No. 12, pp. 1301–1308, 2004
- 25) 産業技術総合研究所がネット上で公表している数値を参照した。<http://www.aist.go.jp/RIODB/ptdb/index.htm>