

小林 恭一*・鈴木 淳一**・吉田 公一***・恒見 清孝****・上林山 博文*****・北野 大*****

Kyoichi KOBAYASHI, Jun-ichi SUZUKI, Koichi YOSHIDA, Kiyotaka TSUNEMI,
Hirofumi KAMIBAYASHIYAMA and Masaru KITANO

要旨: 難燃剤の持つ効果及び問題点を検証した。車両火災発生率は 2000 年以降大幅に減少し、これは明らかに自動車の内装の難燃化が効果を表したと結論できた。構造物や家具では、従来の不燃性の材料が軽量化や高断熱化により高分子材料に置換される可能性があり、被害拡大抑止の面からは可燃物のさらなる難燃化や消火設備の設置が必要である。難燃化の効果測定方法は複雑化する材料に合わせ新たな開発が必要であり、燃焼発熱量ばかりでなく発生ガスの分析など国際的に検討されている。難燃剤を用いたときと用いないときのリスクトレードオフに関して研究がおこなわれており、化学物質のリスクをはるかに上回る火災リスクの低減が認められている。今後は人や環境生物と調和した難燃剤の開発が必要である。

キーワード: RoHS 指令, スtockホルム条約, 臭素系難燃剤, 車両火災, 構造物火災

Abstract: The role and problems related to flame retardants is discussed. The number of vehicle fires was clearly decreased since 2000, due to the introduction of flame retardants to the vehicle interior decorations. As for constructions and furniture, conventional incombustible materials will be replaced to plastics for the purpose of weight reduction and higher insulation in future. In this case, further effective use of flame retardants and the installation of fire extinguisher are necessary to reduce the fire damage. New test method is necessary to evaluate the effectiveness of flame retardants for the newly developed complex materials. Test methods for the analysis of heat and toxic gases are being developed in international body. Existed risk tradeoff studies indicate that the chemical risk of flame retardants is far less than the fire risk. In future, the development of new flame retardants which are friendlier to human health and the environment is expected.

Key Words: RoHS Directive, Stockholm Convention, Bromine Flame Retardants, Vehicle Fire, Construction Fire

1. 難燃剤の効用, 果たしている役割の考察

1. 1 車両火災の面から

1) 火災統計からみた車両火災の実態

自動車は、近年、燃費改善の観点から軽量化が行われており、従来は金属で作られていた部分が急速にプラスチックに置き換わって来ている。このため、車両火災の危険が増加している可能性があるが、一方、難燃化されたプラスチックを用いるなど、火災の発生を防ぐ努力もなされており、規制強化も行われている。

ここでは、これらの動向が火災統計にどう反映されているか、消防庁火災報告データの分析により明らかにするとともに、その統計が示す傾向を解析する。

(1) 車両火災件数と車両火災発生率の推移

日本の車両火災件数の推移を図 1 に示す。車両火災には、放火や衝突による火災も含まれる。日本の車両火災件数は、1975 年頃から急増したが、2000 年頃をピークに急減し、現在ではピーク時の半分程度に減少していることがわかる。

自動車保有台数 1 万台当たりの車両火災件数¹⁾ (車両火災発生率) の推移を図 2 に示す。日本の車両火災発生率は、①1966 年から 1975 年までの 10 年間に 5 分の 1 に急減、②1975 年から 2000 年までの 25 年間はほぼ横ばいで推移、③2000 年以降再び急減に転じ、2013 年には 2000 年に比べ半減という、特徴的な変化を示していることがわかる。

1975 年から 2000 年まで、車両火災発生率がほぼ変わらなかったため、自動車数の増加に伴って車両火災件数も増加したが、2000 年以降は自動車数が依然として増加している (自動車数が減少又は横ばいになるのは 2008 年以降) にもかかわらず、車両火災件数は急減している (図 1 参照)。

図 2 で、①の時期に車両火災発生率が急減しているのは、この時期に日本の自動車の性能が急激に向上し、エンジンや燃料系統、電気系統などの安全対策が急速に進歩して、出火率も急減したためと推測される。②で車両火災発生率が横ばいになっているのは、1975 年頃にそのような安全対策の向上が一段落し、以後はしばらく一定

*東京理科大学大学院 国際火災科学研究所, **国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室, ***横浜国立大学 総合的海洋教育・研究センター, ****国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門, *****臭素科学・環境フォーラム日本, *****淑徳大学人文学部



図1 日本の車両火災件数の推移 (1965-2013)
(消防庁火災年報及び消防白書より作成)

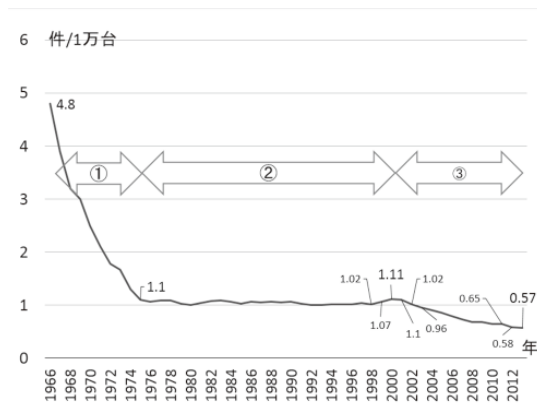


図2 日本の自動車1万台当り車両火災件数の推移
(1966-2013) (火災年報・消防白書及び自動車検査登録情報協会・自動車保有台数推移表より作成)

の性能が維持される状態が続いたと考えられる。

一方で、③の時期に再び車両火災発生率が急減した理由を探るため、消防庁火災報告データを分析した。

図3は1995年から2012年までに発生した自動車本体が着火物になった火災の自動車100万台当たり着火物別火災件数の推移と規制との関係を見たものであり、図4は着火物別火災件数が少ない火災だけ取り出して、その傾向を見たものである。件数の大きい「電気配線類」は2000年、「座席シート」は2001年をピークに急激に減少傾向に転じている。タイヤも2001年をピークに減少傾向に転じているが、その程度は小さい。

件数の少ない「エンジン」、「ボディ」、「バンパー」はいずれも2001年を境に、「車体塗装部」は1997年を境

に、それぞれ急激な減少に転じているが、「モーター」には顕著な変化は見られない。

(2) 自動車100万台当たり着火物別火災件数の推移と規制との関係

このように各種のデータが一斉に急変する事態が偶然生じるとは考えにくいので、最も影響しそうな規制強化について調べてみた。まず1993年4月13日付けで「道路運送車両の保安基準に係る技術基準」という運輸省(当時)自動車局長通達が発出されており、それまでなかった「内装材料の難燃性の技術基準」が定められている。

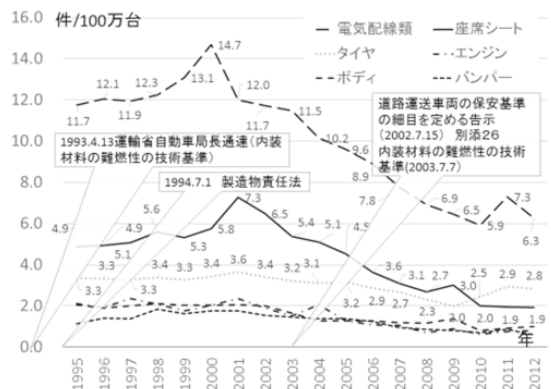


図3 自動車本体が着火物になった火災の100万台あたり着火物別火災件数の推移 (1995-2012) (消防庁火災報告データ及び自動車検査登録情報協会・自動車保有台数推移表から作成)

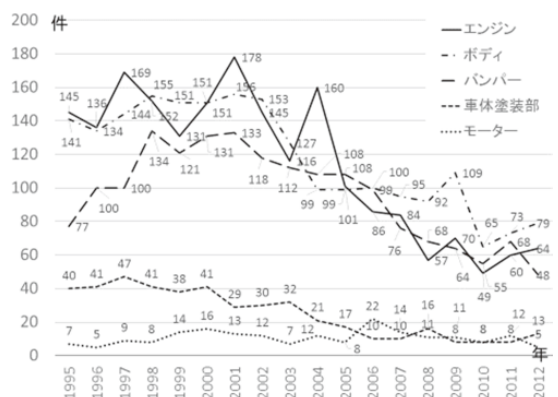


図4 自動車本体が着火物になった火災のうち着火物別火災件数が少ないものの出火件数の推移 (1995-2012)
(消防庁火災報告データから作成)

さらに、2002年7月15日付けで「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示」²⁾が定められ、その別添26として、翌2003年7月7日付けで「内装材料の難燃性の技術基準」³⁾が定められている。

自動車局長通達はいわゆる行政指導であり、法律上の強制力はないはずだが、当時の状況を考えれば、事実上強い強制力を持っており、自動車メーカーは法的強制力を持つ2002年の告示基準の制定を待たずに、一斉に内装材料の難燃化に舵を切ったものと考えられる。

新車の内装が全て新基準に適合するよう難燃化されても、火災統計上その効果が現れるのは、国内の自動車ストックの多くが新基準に適合するようになってからになる。その分岐点が2000年前後だったと考えれば、この時期を境に「ボディ」の一部や「座席シート」に着火する火災が急減した理由は説明できる。

しかし、これだけでは、それ以外のものを着火物とする火災や、エンジンなど難燃化との関係が薄いものを着火物とする火災もほぼ同時に急減していることの説明はできない。例えば、自動車の電気配線類の難燃化についての規制強化は見当たらないのに「電気配線類」に着火する火災が同時期に急減していることの説明にならない。

(3) 製造物責任法の影響

上記の説明として、自動車業界の関係者から、当時、製品の欠陥や事故に対して企業責任が強く求められるようになり、1994年に製造物責任法(PL法)が制定されたことが、この時期に各社が一斉に自動車の出火防止対策に取り組んだ大きな要因ではないか、という仮説が示唆された。

当時、アメリカなどでは既に自動車の内装について厳しい難燃化規制が行われており、日本のメーカーも輸出用のものは内装を難燃化していたが、国内向けのものは難燃化処理をしていない、という一種の二重構造が続いていたと聞く。そのような状況のまま、国内で発生した自動車火災について製造物責任法を根拠に訴えられたら勝ち目はない。各社がそう考えたとすれば、自動車局長通達で示された「内装」の範疇に入らない「電気配線類」などの難燃化も含めて、各社が一斉に難燃化対策を実施したことを説明できる。

図5に衝突に起因して発火した車両火災の交通事故1万件当たりの件数の推移を示す。衝突しても車両火災が起らないようにするには、燃料系統の構造や位置などの技術的工夫が不可欠と考えられるが、図5は、そのような改善は難燃化対策に比べて少し早く始まり、少し早く定常状態に移行したことを示していると考えられる。

出火防止のためのエンジンや燃料系統の技術改良などは、製品欠陥による事故に対する企業責任の高まりの中

で、製造物責任法の制定を待たずに始まっており、自動車局長通達をきっかけに各社一斉に行うようになった難燃化対策に先行したのではないかと推測も成り立つ。

そして、2000年頃に、そのような各種の出火防止対策を講じた自動車の比率が火災統計上明らかになるほど大きくなり、その後もその比率が増大していると考えれば、この時期を境に運輸省の規制強化の範疇を超えて車両火災件数が急減し車両火災発生率も急減したことの理由が説明できる。

2) まとめ

車両火災発生率は、2000年頃を境に急減減少に転じている。その理由は、1993年に運輸省自動車局長通達が発出されて内装の難燃規制が事実上開始され、一方、ほぼ同時期に製造物責任法が制定されたため、各社はこの時期に、この通達の「内装」難燃化とともに、その範疇に入らない「電気配線類」などの難燃化や出火防止のためのエンジンや燃料系統の技術改良なども一斉に行うようになり、ちょうど2000年頃に各種の出火防止対策を講じた自動車のストックが火災統計上明らかになるほど大きくなり、その後もその比率が増大し続けているためではないかと推測される。

1. 2 構造物、家具等の火災の面から

1) 家具の燃焼性状

建築物の室内に設置される家具や可燃物の燃焼性状については、国内外問わず多くの実験が成されている(伊藤ら、2005⁴⁾; 織戸、2007; 城ら、2007)。城らが行った写真1, 2は室内に設置されることの多い市販のソファと座椅子(非防災製品)の燃焼状況を示したものである。ソファの燃焼実験では、座面の中央から火災を着火

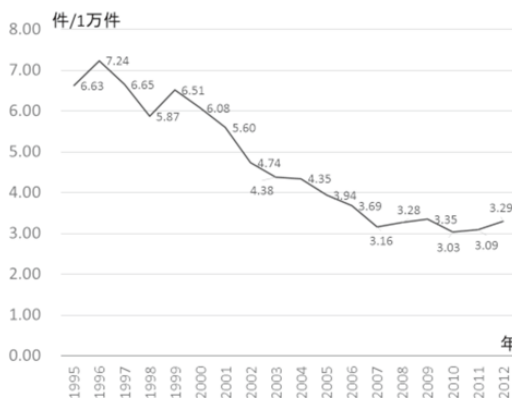


図5 衝突に起因して発火した火災の交通事故1万件当たりの件数の推移(1995~2012)(消防庁火災報告データ及び平成26年警察白書図表5-1より作成)

させてから約6分後(写真1b)に背もたれに燃え広がり、約8分(写真1c)にソファ全体が燃焼して、最大の発熱速度が測定された。また、座椅子では、座面に着火わずか2分後には、全面が燃焼した(写真2b)。これらソファなどのクッションの座面や背もたれ部分は、そのカバーには革製、塩化ビニル樹脂製、綿や化学繊維等、多様な素材が使用されるが、詰めものにはウレタンフォーム等の可燃物が用いられることが多い。これらの高分子材料は、難燃処理等がされていないと、写真に見るとおり、いったん着火すると容易に延焼が拡大する。

2) 建築物内の火災

建築物の内部火災の発生原因は様々であるが、火災統計からすると、こんろ、たばこ等から周囲の可燃物に着火して燃え広がっていくケースが多い。

火災発生時の可燃物周囲の温度や燃焼の状況は、屋外のような開放的な空間か一定の開口を有する建築物の室のような閉鎖的な空間かで大きく異なる。開放的な空間に比べると、一般に閉鎖的で熱がこもりやすい空間の方が、火災は激しく、長く継続しやすい傾向がある。

火災の初期消火に失敗し、室内でフラッシュオーバー(F.O.)が発生して火盛りに至ると、火災が発生した空間は火炎や燃焼ガスで充満し900℃を超える高温となるため、柱・梁、床、壁等の構造体は損傷する恐れがある(成瀬ら, 2015)。その一方、開放型空間で可燃物の燃焼が一定以下に留まれば、火災に高温ガスは拡散し、火源直上を除き構造体への被害は抑えられる可能性もある。



a) 着火1分後

b) 着火6分30秒後



c) 着火8分後

写真1 ソファの燃焼(実験: 東京理科大学)



a) 着火直後

b) 着火2分後

写真2 座椅子の燃焼(実験: 東京理科大学)

図6は実大火災実験における火災発生室の机上面に入射する熱流束(鈴木ら, 2012; 2014)の推移、図7はフラッシュオーバー後の火災温度を模擬した各種耐火性能試験の加熱温度を表している。室内の可燃性材料の条件によってもF.O.までの火災進展状況は大きく異なる。

図6のプロットは、内装可燃条件の実験 No.1(天井・壁・床: 木材仕上げ)および天井不燃条件 No.2(天井: セッコウボード, 壁・床: 木材仕上げ)の熱流束と周囲の温度から求めた放射熱流束が示されている。

図6ではF.O.発生後に机面に入射する熱流束は急激に増加し、瞬間的に250kW/m²を超える。ただし、No.1とNo.2の実験で大きく異なるのは、F.O.の発生時間である。天井を木材で仕上げるか否かによって、室内での火災の成長が大きく異なる。火炎は浮力により、上方へ伝播するため、火炎の長さが大きくなると天井面を這う。そのため、天井面が可燃物で仕上げられていると、加速度的に燃焼速度が増加し、短時間でF.O.が発生する。

3) 車両関連の火災

構造体に対する車両火災による影響も、空間の条件によって大きくことなる。図7は国際規格等³⁾の標準火災温度曲線を示しているが、トンネル等の空間での車両火災では、それとは別の加熱曲線を規定している。

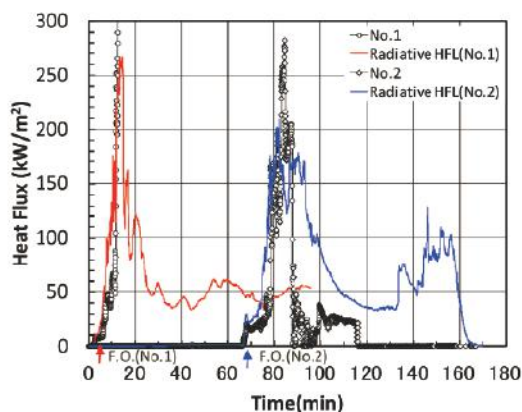


図6 火災時の入射熱流束

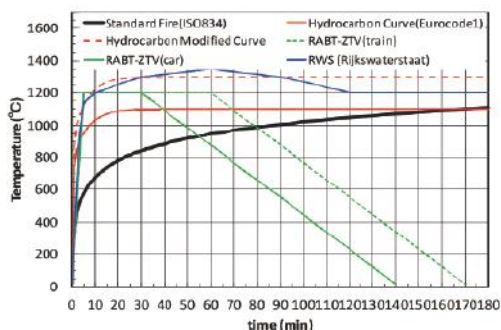


図7 様々な耐火試験の加熱温度

特に、欧州圏では表1に示す過去のトンネル火災(岡, 2001; 公益社団法人日本コンクリート工学会, 2012)の教訓を受け、ドイツでは Eureka プロジェクト等⁹⁾の結果から RABT curve が規定されている。RABT curve では加熱開始 5 分で加熱温度が 1200°Cに達し、その温度が一定時間保持される。保持時間は自動車、列車など、想定される火源によって変化する。オランダでは最高加熱温度が 1350°Cに達する RWS curve も規定されている。このような温度の火災を被ると、構造体に用いられる高強度のコンクリート等は爆裂現象を生じる可能性がある。火災時における構造体の損傷を抑制するために、ポリプロピレン等の微細な有機繊維の混入や、コンクリートの表面を耐火材料で被覆するなどの対策がとられる。

一方、国内のショッピングモールや集合住宅で見られる屋外に開放された様式の自走式立体駐車場(自走式駐車場と呼ぶ)で発生する火災は、上記のトンネル火災とは異なった様相を呈する。従来、駐車場の火災時の安全性については、一般的な建築物と同様の防耐火性能が求められてきた。しかし、自走式駐車場の空間構成と可燃物の条件は特有であり、可燃物が駐車車両に限られ、かつ開放性が高い。また、走行車路と歩道等の可燃物が配置されないことから、車輛の燃焼特性および延焼拡大の特性が把握できれば、設計上の条件と実態が乖離しにくい等の特徴がある。図8に示す車輛単体の燃焼状況や周囲への燃え広がり、構造体への影響について、写真3、4に示す実験的検討がなされている(橋本ら, 2000; 北野ら, 2000)。

自走式駐車場は、1 層 2 段から始まり現時点では、6 層 7 段規模までの大規模化が進んでいる。1999 年には、4 層 3 段型の実大火災実験が実施され、その後の検討を経て実用化されている。3 層 4 段型の実験[17]では、写真4に示すように、駐車された車両の火災は隣接の車両へ徐々に延焼拡大するドミノ火災を呈した。実験の結果、

火元の車両から両脇の車両へは約 10~15 分、後ろの車両へは約 25 分で延焼することが確認されている。また構造体の受熱温度は、大梁が約 570°C、着火車両の直上部の小梁が 720°C及び柱で 430°Cに達することが報告されている。構造体の変形量は、部材は塑性域にいたっていたが、耐震設計された架構であること、局所的な火災であること等から崩壊には至っていない。

これらの実験結果や車両単体の燃焼実験結果に基づき、車両火災発生時に F.O.が発生せず、限定された車両が燃焼し火災の規模が限られること、それにより構造体の構造安定性が損なわれないことなどを検証することの重要性が認識された。

4) まとめ

構造物の耐火設計では、火災の外力(燃焼の激しさ、火災の継続時間)がわかれば、深刻な損傷や崩壊、倒壊を抑制することは可能である。しかし、社会情勢や技術革新によって、可燃物の構成材料や成分の構成比率が既存の設計情報や技術資料と異なると、設計で想定する火災の状況を予期せずに超えることが起こりうる。

特に軽量化や高断熱化などを目的として、従来の不燃性の材料が高分子材料等に置換されると火災初期および火盛り期の燃焼が異なってくる可能性がある。火災被害の抑制は、可燃物の難燃化やスプリンクラー等の消火設備の設置によって、初期の延焼拡大をできるだけ遅くすることの効果も大きいと考えられる。

表1 トンネル等での火災事例

年	発生場所	火災被害等の概要
1995	アゼルバイジャン バクー市営地下鉄	死者約 300, 負傷者約 270, 走行中の地下鉄車両で出火
1996	ユーロトンネル	負傷者 8, 貨物シャトル列車 上のトラックから出火
1999	モンブラントンネル	死者 39 名, 負傷者 27 名 貨 物トラックから出荷
1999	タウエルントンネル	死者 12 名, 負傷者 42 名 追 突事故により炎上
2000	オーストリア カプ ルン山岳鉄道	死者 155, ケーブルカーのト ンネル内火災
2002	エジプト カイロ郊 外	死者約 370, 車内給湯用ガス 器具爆発, 出火後の列車停車 の遅れ
2003	韓国 大邱市地下鉄 (中央路駅)	死者 133, 放火による火災, 対向列車へも延焼
2008	ユーロトンネル	負傷者 14, 貨物シャトル列 車上のトラックから出火

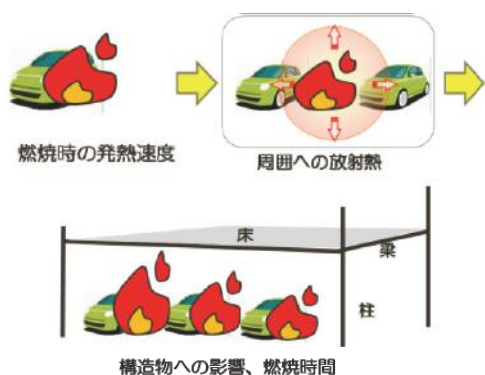


図8 車両の燃焼状況と燃え広がりの概要



a) 外観 b) 車両上部の損傷

写真3 3層4段自走式駐車場 試験体



a) 出火車両の燃焼 b) 隣接車両への燃え広がり



c) 複数車両の同時延焼

写真4 車両の延焼拡大

2. 材料の試験・評価方法と難燃化

2.1 新たな素材への新規な試験法開発の必要性

材料を難燃化することによって、火災の発生や発達の防止にどの程度寄与できるかを、材料レベルで把握する試みはすでに多くなされて来ている。具体的には、材料に与えられる加熱強度（伝熱と熱放射の合計としての熱流束： kW/m^2 ）をパラメータにして、材料の反応を調べ

る方法が取られている。この条件の下で、材料がどの程度燃焼するかは、発生する熱量を測定することで求められる。このための試験方法として、コーンカロリメータ（ISO5660）の規格が開発され、日本でも十分普及しており、これらの試験データは建築物の火災に対する性能を設計するときにも使われている。試験装置と得られるデータの一例を図9に示す。材料に与える熱流束は、試験装置のヒータ温度を一定値に保つことで制御する。難燃剤の効果は、着火時間の遅延及び燃焼発熱量の減少として捉えられる。

難燃化された材料に対しては、分解ガスの発生が問題となる場合もあり、分解ガスを赤外線吸光度で定量的に把握する試験法も開発されている（ISO5659-2 及び ISO/CD 19021）。ここでは、熱流束を制御した状況で発生する煙及びガスを集煙箱に貯め、その煙の量を透過光の減少に依って測定し、ガスを定期的にガスセルに送って分析する。試験装置の概要を図10に示す。

電線については、実際の電線の敷設状況を模擬して垂直に束ねて敷設した電線を規定の熱量の火炎で加熱し、発生するガスを測定・分析して燃焼発熱量及びガス発生量を求める試験方法が、欧州で開発されている（EN50399：図11及び図12）。これらのデータによって、電線の難燃性の効果を把握するとともに、欧州では難燃電線の使用を推進している。与えられた加熱条件における材料の燃焼性状及び燃焼ガスの発生性状を把握する技術はすでに実用化に達している。

問題は、材料の試験と実際の火災との関連性をどのように把握するか、言い換えれば、実際の火災状況をどのように定量化して把握するかにある。建物等の実際の空間には一般的に多くの可燃物があり、その火災発達の性状は、一概には規定できない。そこで、ある一定の燃焼物がある空間を想定して、代表的な火災シナリオを抽出し、その状況における空間構成材料の燃焼挙動を把握する試みがなされている。この代表的なものが、火災室試験規格（ISO 9705）である（図13）。

これらに加えて、今後新たに開発される新しい素材、たとえばサンドイッチパネルのような大型の部材に対する試験方法の開発がISOで行われている。これらの試験設備は高価であり、これらの設備を有する試験機関が限られているという問題点がある。

2.2 まとめ

難燃化の成果をどのように定量的に検証するために、考えられる火災を想定してモデル化し、その火災状況において、難燃化がどの程度寄与するかを、燃焼発熱量及び発生するガスの分析で把握する方法の開発が進んでいる。また、それらの手法の国際標準化も進められている。

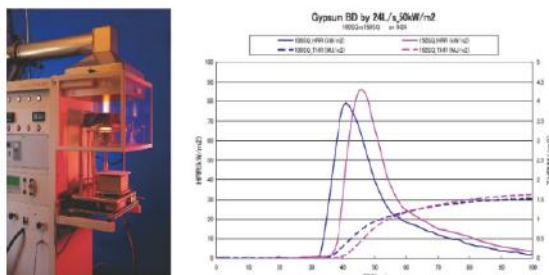
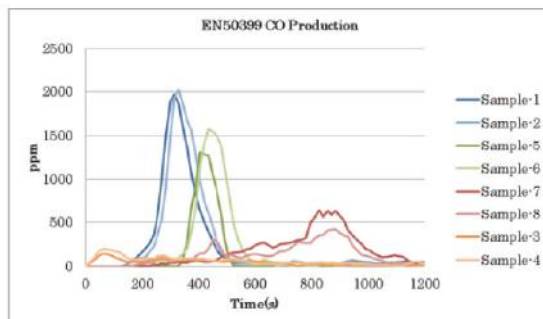
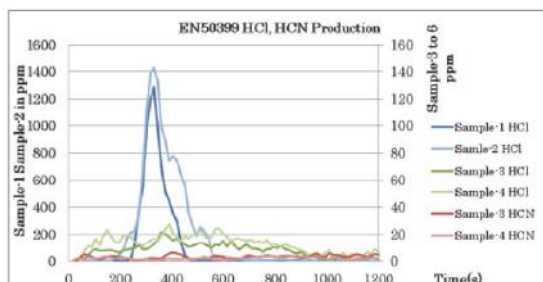


図9 ISO 5660の試験装置とデータ



a)CO 測定例



b)HCl 及び HCN 測定例

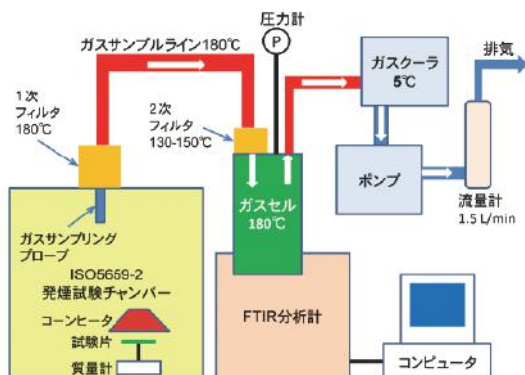


図10 ISO/CD19021 の概要

図12 EN50399 による燃焼ガス発生測定例



図11 EN50399 による電線の燃焼性試験

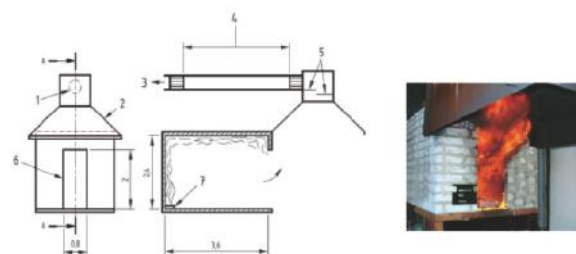


図13 ISO9705 火災室試験

3. 火災と化学物質のリスク便益の解析事例

3. 1 火災リスクと難燃剤リスクのトレードオフの枠組み

難燃剤が使用されることで製品の火災リスクの低減が期待される一方、難燃剤がもたらすヒトや環境へのリスク（以下、化学物質リスクと呼ぶ）の増加が懸念されて

いる。

火災リスク低減を難燃剤による防火安全上の便益とし、化学物質リスク上昇を難燃剤によるリスクとして、リスク便益の議論について既存の解析事例を紹介する。火災リスクと化学物質リスクの評価にあたり、評価の枠組みを検討する。まず、火災を含む災害のリスクは、重大性の大きさと発生確率の積で計算でき、重大性の大きさは災害事象のハザードと脆弱性の積で計算できる（多々納裕一，2005，）。ここで、ハザードについては、製品の難燃性能でその変化を見る必要がある。脆弱性については、過去の被害事例から、ハザードの大きさと重大性の大き

さの関係を推定する必要がある。また、発生確率については、既存の火災事故事例等から推定したり、難燃剤のあり／なしで火災事故数の変化をもとに推定したりする必要がある。

一方、化学物質リスクは有害性と暴露の積で計算できる (Kolluru *et al.*, 1995)。有害性については、動物への毒性試験から無影響量を推定する。暴露については、製品からの物質の排出量推定、室内や食品経路のヒト摂取量推定や環境経路の二次捕食動物の摂取量推定を行う。また、家電製品などの発生源から少しずつ物質が排出されると仮定するので、定常状態として発生確率を考慮しないのが通常である。また、リスクを比較する際には様々な指標が使用される。その例として、死亡件数、損失余命、質調整生存年数 (QALY: Quality Adjusted Life Years)、支払意思額 (WTP: Willingness To Pay) などがある。

以上が、リスクトレードオフ評価の枠組みであるが、上記の項目をすべて検討することは非常に困難である。そこで、既存研究では、難燃剤の規制前後の火災統計データや疾病データ等を用いてリスク便益解析を実施しているの、以下に紹介する。

3. 2 リスク便益解析事例

Simonson *et al.* (2006)は、スウェーデン、ドイツ、米国のTV火災統計データを用いて、90年代後半の欧州で、TV メーカーが筐体を非難燃化したことにより増大したTV火災数、死者数、負傷者数を推定し、そのデータを用いたコスト便益解析を行った。比較指標にはWTPによる金銭価値化を行っている。その結果、難燃剤の使用によって、年間1050～1490百万ドル相当の火災リスク低減が図られた一方、decaBDEの使用コストが年間110～393百万ドル増加したと評価している。ただし、decaBDEのヒト健康影響を考慮していない。

井上ら(2009・2010)は欧州事例 (RPA, 2002) をもとに難燃剤の有無によるTV火災の被害差を推定し、欧州において年間540～630億円の火災リスク低減が図られたと評価した。また、decaBDEのワーストケースシナリオのヒト健康影響 (Washington State, 2006)として、より毒性の強い低臭素化合物のpentaBDE, octaBDEやポリ塩化ビフェニルの毒性データを援用して、年間30～120億円の化学物質リスクの増加を評価した。

Ni (2006) は、リン酸エステル難燃剤を対象に、その最適添加量を求めるためのリスク便益解析を実施している。まず、英国における家具用建材の難燃規制前後差 (規制前死者数5,127人/火災10万件、規制後4,102人/火災10万件) のデータをもとに、通常の添加量10%の場合での日本国内での試算で、年間14,000百万ドルの火災

リスク低減を評価した。また、すべてのリン酸エステルが、リン酸トリス(2-クロロエチル)と同じ発がん性を持つと仮定し、壁紙への添加量10%の場合での試算で、室内での吸入経路暴露により年間5,300百万ドルの化学物質リスク増加を評価した。

これらの結果から、いずれの事例でも、火災リスク低減が化学物質リスク増加よりも大きくなり、難燃剤使用によるメリットが確認できた。

3. 3 まとめ

リスク便益解析の既存3事例からは、難燃剤を使用することで、化学物質リスクをはるかに上回る火災リスクの低減効果が得られることが明らかとなった。

以下の課題が挙げられる。

まず、火災リスクについては、製品による火災事故データの信頼性や、難燃基準、難燃剤使用の有／無によるデータ分類の信頼性を上げることである。また、TV火災数の推定方法については、家電製品火災中のTV火災の比率はどこでも同じと仮定するか、TV火災発生率はTV所有数に比例すると仮定するかで推定結果も変わるため、条件設定による結果の変動幅などを考慮する必要がある。

しかし、リスクについては安全、健康、環境など多様な側面からみるとともに、経済や社会への影響について、一般の人の心理面も配慮する必要がある。すなわち、社会リスクの視点からの評価が重要性を増している。そのために、業界や企業と研究機関が共同で研究するなど新たな枠組みでの取り組みが必要である。

4. 終わりに―全体討論

4. 1 難燃化の取り組みの必要性

1) 自動車

自動車メーカーは規制のみでなく製造物責任の観点からも難燃化を行っているが、難燃化の規制は基本的にはキャビン内が対象であり、外装については難燃化していない。その理由としてバンパーのような肉厚な樹脂は燃焼速度が遅いためであるが、この考え方に対し、大地震の際などでは道路が延焼を食い止める役割を行っているが、交通渋滞が起きたときの渋滞車両の延焼に対する懸念が提起された。また船による自動車輸送の際にバンパーなどが燃える可能性を定量化することが必要である。なお、将来の燃料電池車の船による輸送時の火災対策については議論が開始されている。

2) 建築火災

公共の施設や高層ビルに持ち込む家具類やカーテンなどについて防災製品を使用するよう法律で求めているが、

罰則はなく、またマンション室内には査察には入れないなどの実効性を担保する上での問題点が存在している。

4. 2 新たな臭素系難燃剤の開発

ストックホルム条約は化学物質の環境残留性、生物蓄積性、長距離移動性及び人や環境生物への有害性を基に評価し、必要な規制を行っている。初めにで既述したようにいくつかの臭素系難燃剤はこの条約の対象物質になっている。これらの物質の最も懸念される性状が生物蓄積性である。したがって、今後新たに開発される臭素系難燃剤は高分子化し、生物蓄積性を減らすか無くしていくことが一つの開発方向であろう。

4. 3 火災と化学物質のリスクトレードオフ研究

火災リスクについては、業界・企業が所有する TV 火災数や被害の既存データ収集と分類を行うとともに、信頼性ある火災事故データにもとづき発生確率を求めて、火災リスクを算出する。化学物質リスクについては、環境経由の高次捕食動物への蓄積量の推定や低臭素化合物・臭素化ダイオキシン生成も考慮した累積リスク評価を行う。そして、ヒトと二次捕食生物のそれぞれのリスクの比較手法を開発して、リスク比較結果にもとづくリスク管理やコミュニケーションを推進する。

補 注

¹⁾ 火災には自動車火災以外に鉄道車両等の火災も含まれているが、自動車保有台数に比べて鉄道車両保有台数が十分小さい（国土交通省「陸運統計要覧」（2005 年最終版）では、自動車保有台数 78,992,060 台に対し、鉄道車両保有台数 136,412 台となっており、鉄道車両数は自動車車両数の 0.17%）ため、今回の分析では、鉄道車両火災は無視しうるものとした。

²⁾ 道路運送車両の保安基準第 20 条（乗車装置）

第 4 項 自動車（二輪自動車、側車付二輪自動車、カタピラ及びそれを有する軽自動車、大型特殊自動車並びに小型特殊自動車を除く。）の座席、座席ベルト、頭部後傾抑止装置、年少者用補助乗車装置、天井張り、内張りその他の運転者室及び客室の内装（次項において単に「内装」という。）には、告示で定める基準に適合する難燃性の材料を使用しなければならない。

³⁾ 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示第 18 条（乗車装置）

第 2 項 保安基準第 20 条第 4 項の告示で定める基準は、別添 26「内装材料の難燃性の技術基準」に定める基準とする。

この規定に基づき「内装材料の難燃性の技術基準」が定められ、難燃性の試験方法等の技術基準が定められている。

⁴⁾ 例えば、Fire Safety for the Holidays:

http://www.nist.gov/fire/tree_fire.cfm, 2015.11.12 参照。

⁵⁾ ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests - Elements of building construction -Part 1:General requirements, International

Organization for Standardization

⁶⁾ Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, EN 1991-1-2, CEN

⁷⁾ EN 1363-2:1999: Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures

⁸⁾ EUREKA - PROJECT EU 499: FIRES IN TRANSPORT TUNNELS REPORT ON FULL-SCALE TESTS, Editor: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1995.11

引用文献

橋本秀知・常世田昌寿・北野貴之・王雲峰・須川修身・増田秀昭・安部武雄・上杉英樹（2000）3 層 4 段型自走式プレハブ駐車場の実大火災実験。日本建築学会関東支部研究報告集, 161～176。

井上知也・益永茂樹・大谷英雄（2009）臭素系難燃剤 decaBDE をめぐるリスクトレードオフ論争に関する考察。日本リスク研究学会誌, 19(4), 21～31。

井上知也・真名垣聡・益永茂樹（2010）化学物質ベネフィットの定量～臭素系難燃剤の火災リスクとヒト健康リスク～ケミカルエンジニアリング, 55(6), 8～13。

伊藤 彩子・出口 嘉一・河野 守・五頭 辰紀（2005）可燃物の置かれ方が火災の進展に及ぼす影響：その 1～その 3。日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術, 153～154。

城明秀・織戸貴之・抱憲誓・大宮喜文・若月薫（2007）区画内及び自由空間における実大可燃物の燃焼性状：その 2 最大発熱速度と火災成長率。日本建築学会学術講演梗概集, 201-202。

北野貴之・須川修身・増田秀昭・安部武雄・上杉英樹（2000）3 層 4 段型自走式プレハブ駐車場の実大火災実験その 1: 1 階最深部火災を受ける架構骨組の挙動。構造工学論文集, B 46B, 747～757。

Kolluru, R., Bartell, S., Pitblado, R. and Stricoff, S. (1995) Risk Assessment and Management Handbook: For Environmental, Health, and Safety Professionals. McGraw-Hill, 688 pp.

公益社団法人日本コンクリート工学会（2012）コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書。

成瀬友宏・萩原一郎・茂木武（2015）多様な加熱強度を被る鋼部材の耐火性能と耐火試験結果の工学的評価に関する研究。平成 26 年度 独立行政法人 建築研究所年報 第 49 号, 9～10。

Ni（2006）リン酸エステル難燃剤最適添加量に関する研究—二律背反型環境問題へのリスク最小化手法の適用。学位論文, 東京大学, 1～10。

岡 泰資（2001）最近のヨーロッパにおける道路トンネル火災：, 日本火災学会誌, 第 51 巻, 18-22。

織戸 貴之・城 明秀・抱 憲誓・大宮 喜文・若月 薫（2007）自由空間及び区画内における可燃物の燃焼性状：その 1 実験概要及び熱流束・煙層に関する実験結果。日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術, 199-200。

RPA (2002) Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and

- Drawbacks for Octabromodiphenyl Ether, Final Report, Risk & Policy Analysts Limited, Norfolk, 88 pp.
- Simonson, S., Andersson, P. and Berg, M. (2006) Cost benefit analysis model for fire safety, Methodology and TV (decaBDE) case study. SP Swedish National Testing and Research Institute., 65 pp.
- 鈴木淳一・鍵屋浩司・成瀬友宏・吉岡英樹・安井昇・仁井大策・長谷見雄二 (2012) 木造 3 階建て学校の実大火災実験 (予備実験) その 10 建物内及び周辺の熱流束. 日本建築学会学術講演梗概, 305～306.
- 鈴木淳一・鍵屋浩司・成瀬友宏・仁井大策・吉岡英樹・安井昇・泉潤一・小松弘昭・蛇石貴宏・板垣直行・萩原一郎・長谷見雄二 (2014) 木造 3 階建て学校の実大火災実験 (本実験) その 16 建物内及び周辺の熱流束. 日本建築学会学術講演梗概, 315～316.
- 多々納裕一 (2005) 災害リスクマネジメント分野の研究動向. 日本リスク研究学会誌, 15(2), 19～30.
- Washington State (2006) Polybrominated diphenyl ether (PBDE) chemical action plan: final plan.
- この報告は, 2015 年 4 月 15 日に臭素科学・環境フォーラムが主催したシンポジウム「火災安全と化学物質 (難燃剤)」での報告及び議論をまとめたものである。

(2015 年 9 月 4 日受付, 2016 年 1 月 28 日受理)