

燃焼時のポリウレタンフォームの融解による形状変化に関する検討

井戸 和彦

(技術研究所)

An Experimental Study on Shape Change of Polyurethane Foam by Melting During Combustion

Kazuhiko Ido

本論文は、燃焼時の高分子系材料の形状変化を把握するため、直方体のポリウレタンフォームの燃焼実験から融解面の変化を調べた。上面に点火した場合、火炎からの放射熱によって融解面は水平に拡大するとともに、融解面の位置が下方へ進行した。融解面が上面縁に到達後は、側面を下方に拡大するとともに、側面から内側へ進行した。火炎から融解面への入射熱及び実験により求めた融解面の拡大速度、側面の単位面積当たりの発熱速度を用いて、融解による形状変化を求めた。融解したポリウレタンが滴下しない場合、融解面の形状変化は実験と概ね一致した。

This work investigated the change of melting surface on the polyurethane foam in previous experiments for understanding the shape change of polymer foam during combustion. When igniting at the top surface of the foam, the melting surface spread horizontally and the position of the melting surface spread downward by heat flux from flame. After reached to the edge of the top surface, the melting surface spread downward on the side surfaces and the position spread from the side surfaces to inside. The shape change by melting was calculated with the analytical heat flux from flame to the melting surface and the experimental spread velocity and heat release rate per unit area at the side surfaces. The shape change was predicted well when the molten foam didn't spill.

1. はじめに

火災安全設計の方法は、建築基準法上、避難、耐火それぞれについて、仕様規定に基づく設計(ルート A)、性能規定に基づく避難安全検証法、耐火性能検証法を用いた設計(ルート B)、性能規定に基づく高度な検証手法を用いた設計(ルート C)の3つの方法があり、性能規定を用いることで設計の自由度の向上や合理化を図ることができる。性能規定に基づく火災安全設計では、入力条件として設計火源が用いられる。設計火源は、火災の強さや拡大していく速度を工学的に予測したモデルであり、発熱速度を用いることが多い。発熱速度とは、燃焼している材料(以降、可燃物)から単位時間当たりに放出される熱量のことで、火災時に可燃物がどれくらいの強さでどれくらいの時間燃えるかを把握することができる。そのため、可燃物に応じて発熱速度を予測することが重要である。発熱速度に関しては、家具等の実物可燃物について数多くの燃焼実験によりデータの蓄積が進んでいる。しかし、可燃物の形状や種類が変わった

場合、実験データを基にして発熱速度を予測する手法は十分に確立されておらず、設計時に実験を実施して発熱速度の確認が必要となる場合もある。

発熱速度は、可燃物表面が融解後、熱分解して気化する重量に依存するため、燃焼時に可燃物が融解によってどのように形状変化するかを把握することが重要となる。可燃物の種類によって燃焼性状は異なるが、クッション等、溶けながら燃える高分子系材料の融解による形状変化は、例えば、水平な面で燃焼する場合、融解している面が水平方向及び下方に広がることで生じる。前者は、火炎からの熱によって融解している面周囲の未燃焼部が加熱されて溶けることにより生じる。後者は、火炎からの熱によって火炎内側の融解している材料表面が加熱され、液体が熱分解して可燃性ガスが放出されるとともに、固体が融解して液化し、融解面の位置が下がることにより生じる。また、放出された可燃性ガスは空気と混ざり、火炎を着火源として燃焼するため、火炎が持続し、加熱、融解、燃焼のサイクルができる。そのため、高分子系材料は、形状を変化させながら全て燃え尽き

るまで燃焼が継続することが多い。

融解による形状変化を考慮した発熱速度の予測手法はいくつか提案されている。例えば、CBUFプロジェクト²⁾では、詰物家具を対象として、家具の形状、詰物、フレームの種類などに応じて実物可燃物の燃焼試験結果を基に定めた融解面の時間変化と可燃物の発熱性を調べるコーンカロリー試験の結果を用いて、最大発熱速度を計算するモデルを提案している。しかし、このモデルでの融解面の形状変化は、水平方向の平面的な拡がりのみを考慮しており、融解面の位置が下がることは考慮されていない。

既往の実験データより発熱速度を予測する手法の構築を目指し、本報では、単純な形状の高分子系材料の融解による形状変化の性状を把握することを目的として、直方体のポリウレタンフォームを用いた既往の燃焼実験より、形状変化、発熱速度について考察を行う。また、融解による形状変化の過程を、火炎から融解面への入射熱を用いて一部モデル化し、実験と比較した結果について述べる。

2. ポリウレタンフォームの燃焼実験

2.1 実験条件・測定項目

高分子系材料の融解による形状変化を把握するため、既往のポリウレタンフォームの燃焼実験^{3)・5)}から、形状変化、発熱速度について考察を行う。ポリウレタンフォームは、クッション材や断熱材等、建物内でよく使われる材料であり、高分子系材料の中でも燃焼性状の把握は重要であると考えられる。

実験装置を図-1に示す。実験は、集煙フード下方に設置された台上に試験体1個を設置して行われている。台は、ロードセルに厚さ25mmのケイ酸カルシウム板を置き、25mmのセラミックブランケット、アルミ箔を敷いている。図-2に点火位置を示す。点火位置は、上面中央に点火(予め点火しておいた着火剤を試験開始時に上面中央に置く)及び下端四辺に点火(メタノールを染み込ませた麻紐を試験体底部の周囲に設置し、試験開始時に麻紐に点火)の2通りがある。表-1に実験条件一覧を示す。Case1~6^{3)・4)}は上面中央に点火する場合について実施されている。Case7~26⁵⁾は同一寸法の試験体について、上面中央に点火する場合20ケースと下端四辺に点火する場合20ケースそれぞれを実施している。Case1~6は、Case1

の0.5m角を基本とし、寸法の違いが燃焼性状に与える影響を把握するため、Case3、4、5の試験体高さが大きい場合、Case6の試験体の幅と奥行きが大きい場合を実施している。Case7~26は、点火位置の違いが燃焼性状に与える影響を把握するため、点火位置、寸法を変えて実験を実施している。同じ種類のポリウレタンフォームを用いているが、試験体によって密度に差が見られる。

全ケースにおいて、酸素消費法により発熱速度を測定している。酸素消費法とは、燃焼によって生じたガスをダクトフードで収集し、測定されたO₂、CO、CO₂濃度から燃焼によって消費された酸素量を計算して、発熱速度を測定する方法である。Case1~6では、デジタルビデオカメラで撮影した画像から融解面の形状を10秒ごとに目視により読み取り、上面での水平方向への拡大速度及び側面での下方への拡大速度を測定している。なお、本研究では、ポリウレタンフォーム表面が融解している範囲を融解面、融解面が周囲の未燃焼部へ拡がることを融解面の拡大、上面の融解面の位置が下がること及び側面での融解面が側面から内側へ進むことを融解面の進行と呼ぶ。

Case1~6より融解による形状変化、発熱速度の考察、Case7~26より側面の単位面積当たりの発熱速度の考察を行う。

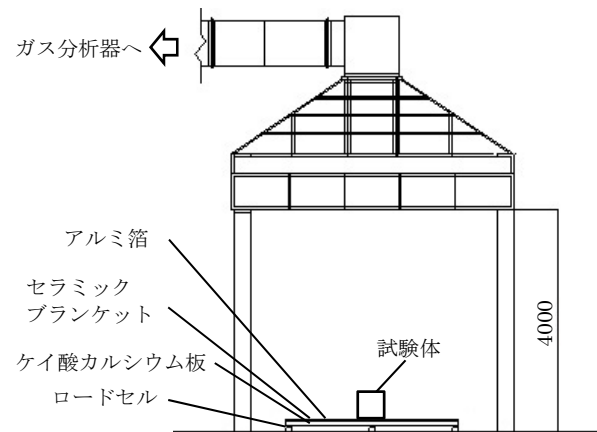


図-1 実験装置

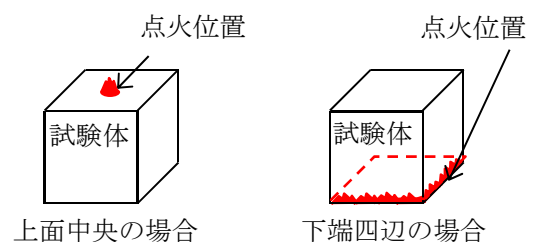


図-2 点火位置

表-1 実験条件一覧

Case	寸法			密度	
	幅 [m]	奥行 [m]	高さ [m]	[kg/m ³]	
				点火位置*	
				上面	下端
1	0.5	0.5	0.5	15.6	—
2	0.5	0.5	0.5	17.6	—
3	0.5	0.5	0.8	15.6	—
4	0.5	0.5	1.0	15.6	—
5	0.5	0.5	1.1	15.6	—
6	1.0	1.0	0.5	16.2	—
7	0.25	0.25	0.25	16.0	15.4
8			0.35	15.1	15.5
9			0.45	15.6	15.6
10			0.5	15.4	15.7
11	0.3	0.3	0.18	15.4	15.4
12			0.3	16.7	16.7
13			0.48	16.2	16.2
14			0.6	16.7	16.7
15	0.4	0.4	0.24	15.6	15.6
16			0.4	16.1	15.6
17			0.64	15.6	15.6
18			0.8	17.6	17.2
19	0.5	0.5	0.3	15.5	16.0
20			0.5	15.8	15.7
21			0.8	15.6	15.7
22			1.0	15.8	16.2
23	0.7	0.7	0.42	16.0	15.8
24			0.7	15.7	15.5
25			1.12	14.9	14.9
26			1.4	15.9	16.0

*Case7~26は同一寸法で、上面中央点火、下端四辺点火の2通りを実施

2.2 融解による形状変化

上面中央に点火した場合の融解による形状変化について考察を行う。

写真-1にCase1の上面における融解面の変化を30秒ごとに示す。30、60秒時点で融解面の形状は円形となっており、上面を同心円状に広がっている。90秒時点では融解面が上面縁に到達しており、側面に広がっている。

写真-2にCase1の点火後から融解面が床面に到達するまでの融解面の変化を60秒ごとに示す。融解面は、120、180、240秒時点に示すように、上面縁に到達後、側面を下方に広がっている。また、上面の融解面が下方に進むため、試験体の高さが小さくなっている。300秒時点で側面の融解面は床面近くまで到達しており、360秒時点では

側面全域が融解している。

図-3に観察された融解面の形状変化を整理して示す。上面中央に点火後、融解面は上面を水平に広がり、上面縁に到達後は側面を下方に広がっていく。融解面の位置は、上面から下方へ、側面から内側へ進行する。

寸法の違いによる融解面の変化を比較するため、写真-3にCase5、写真-4にCase6の点火後から融解面が床面に到達するまでの融解面の変化を、60秒ごとに示す。

試験体高さが大きい場合、写真-3に示すようにCase1と同様、融解面は上面縁に到達後、側面を下方に広がる。側面を融解面が拡大していくと、360、420秒時点の白丸部に示すように、融解したポリウレタンが床面に滴下することがある。滴下したポリウレタンが側面に付くと着火し、融解面が急激に上方へ拡大して、480秒時点に示すように側面での融解面が大きくなる。なお、融解したポリウレタンの滴下は、Case1でも見られたが、着火した時点で側面の融解面が床面近くまで到達しているため、滴下時の着火による融解面の増加はあまりない。

試験体の幅と奥行きが大きい場合、写真-4に示すように、60、120秒時点で融解面は上面を拡大しており、火炎が大きくなる。180秒時点では融解面が上面全域に拡大しており、側面に広がっている。240秒時点では側面における融解面は、Case1に比べあまり見られない。これは火炎が大きく、上面への入射熱が大きいため、上面から下方への融解面の進行が速く、側面での下方への融解面の拡大に追いついたためと考えられる。300秒時点の白丸部に示すように、Case6でも滴下によって側面下端に着火が生じている。

2.3 発熱速度

図-4にCase1~6の発熱速度の経時変化を示す。

Case1では、上面を融解面が拡大する80秒頃まで発熱速度は下に凸の形状で増加する。これは、上面の融解面の増加及び火炎が大きくなることによって、融解面への入射熱が増加するためと考えられる。融解面が上面縁に到達後、側面を拡大するとき発熱速度の増加は上面を拡大するときと比べて緩やかになる。これは、側面の融解面及び火炎から側面への入射熱が上面に比べて小さいためと考えられる。発熱速度は、上面及び側面全域に融解面が拡大した頃最大値に到達し、その後減少していく。

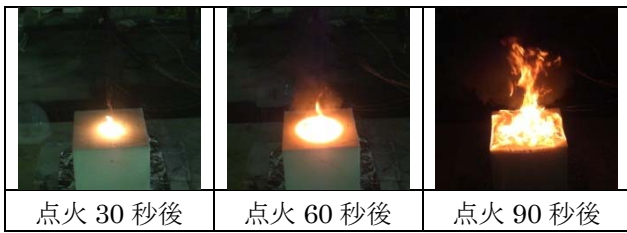


写真-1 Case1 上面における融解面の時間変化

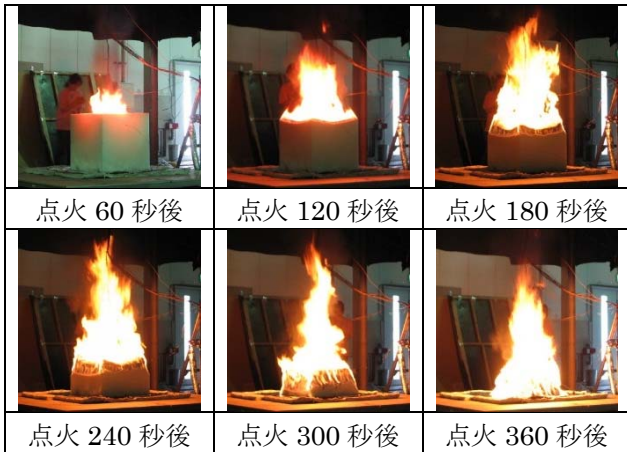


写真-2 Case1 融解面の時間変化

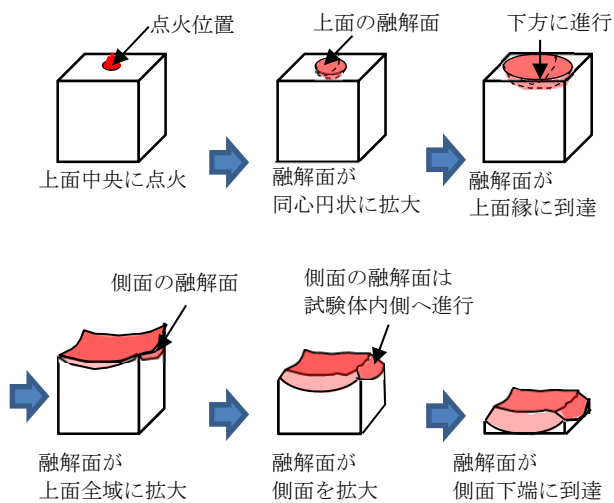


図-3 融解面の拡がりの概要

同一寸法で高密度の Case2 は、100 秒頃までは、Case1 と概ね一致しているが、100 秒過ぎから Case1 より発熱速度が大きく、最大発熱速度が 4 割程度大きくなっている。

試験体高さが大きい Case3、4、5 は、Case1 と同じ幅、奥行きのため 350 秒頃まで発熱速度の時間変化は同じ傾向を示している。しかし、350 秒過ぎから発熱速度が増加している。これは、融解したポリウレタンが床面に滴下し、側面下端で着火して融解面が急増したためと考えられる。

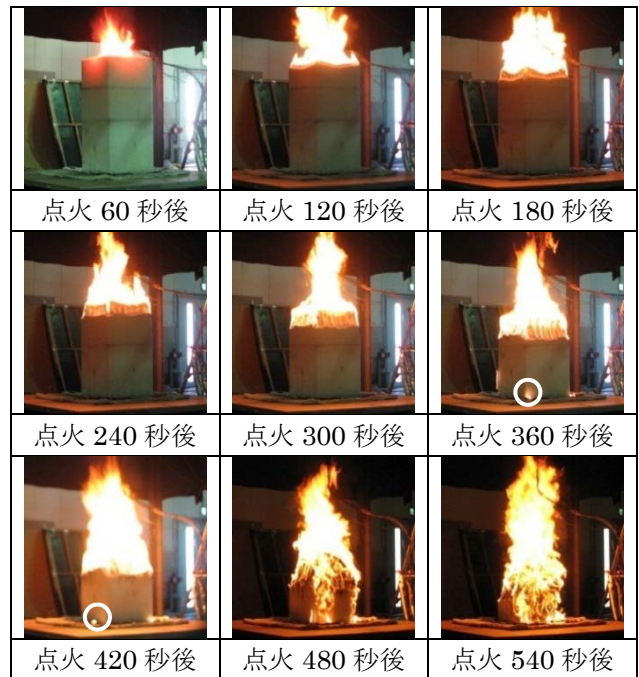


写真-3 Case5 融解面の時間変化(点火 360、420 秒後の白丸は滴下したポリウレタンを示す)

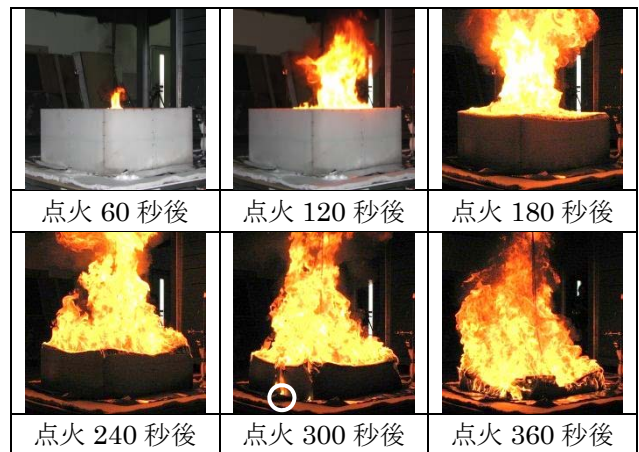


写真-4 Case6 融解面の時間変化(点火 300 秒後の白丸は滴下したポリウレタンを示す)

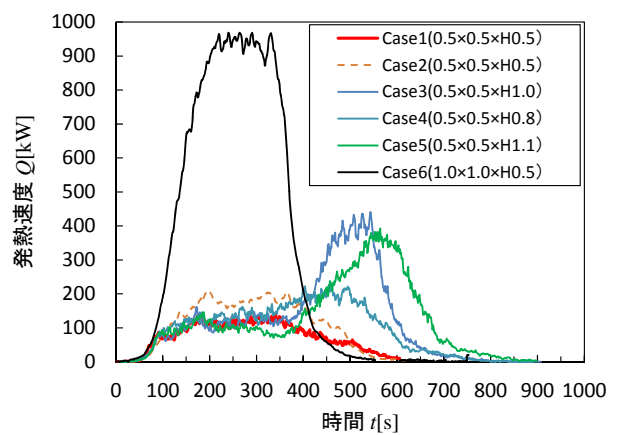


図-4 発熱速度の経時変化

試験体の幅と奥行きが大きい Case6 は、80 秒頃まで Case1 と同じように発熱速度が増加している。Case1 では 80 秒頃に融解面が上面全域に広がって側面へと拡大するのに対し、Case6 では 80 秒以降も融解面が上面を拡がるため、発熱速度が増加する。200 秒頃から発熱速度はあまり変化しない。これは、写真-4 の 240 秒時点に示すように側面での融解がほとんどなく、上面の融解面の大きさがあまり変わらないためと考えられる。最大発熱速度は 8 倍程度大きくなっている。これは、上面の面積が Case1 に比べて 4 倍になっていること、火炎が大きくなることで融解面への入射熱が増加し、単位面積当たりの発熱速度が増加したことによるためと考えられる。

2.4 融解面の拡大速度

Case1~6 について、上面の水平方向及び側面の下方への融解面の拡大速度の測定結果を述べる。

上面での水平方向への融解面の拡大速度を図-5 に示す。データは、点火後から融解面が上面縁に到達するまでの範囲で、デジタルビデオカメラの画像から 10 秒ごとに目視で測定された結果である。ケースによって拡大速度はばらついている。

側面での下方への融解面の拡大速度を図-6 に示す。データは、点火してから火炎が床面に到達するまでの範囲でデジタルビデオカメラの画像から 10 秒ごとに測定された結果である。Case6 は側面での融解面があまり見られないため、融解面の下方への拡大速度は測定されていない。融解面が側面に拡大し始めた 80 秒頃は小さい値となっているが、100 秒以降では試験体高さによらず概ね一定である。全測定データの平均値は 0.00187m/s となる。

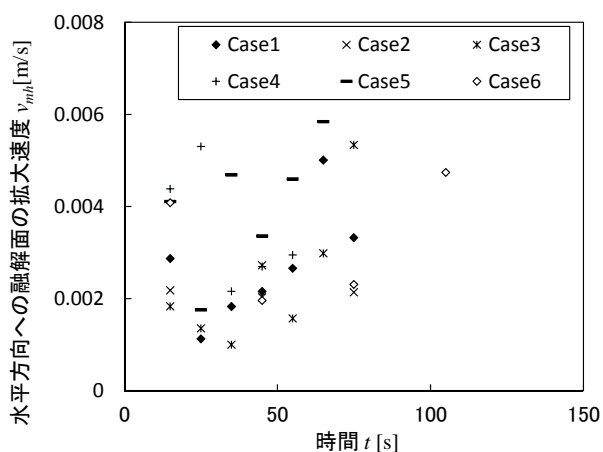


図-5 上面における水平方向への融解面の拡大速度

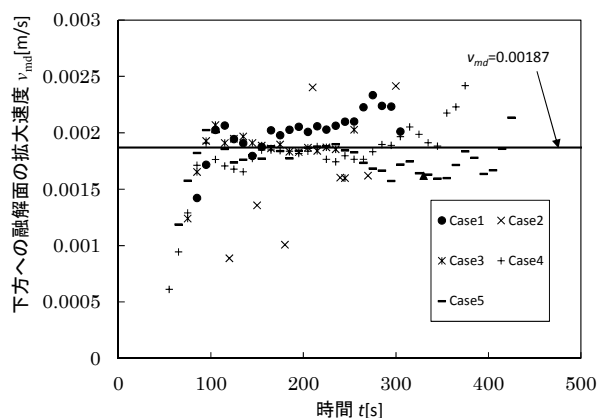


図-6 側面における下方への融解面の拡大速度

2.5 側面の単位面積当たりの発熱速度

側面における単位面積当たりの発熱速度は、全体の発熱速度から上面の燃焼によって生じる発熱速度を引き、側面の融解面積で割った値とする。Case1~6 の上面中央に点火した実験では、上面の融解面が火炎で隠れるため読み取れず、上面の燃焼における発熱速度と側面の燃焼における発熱速度を分けることが難しい。そのため、同一寸法の試験体について、上面中央に点火する場合及び下端四辺に点火する場合を実施した Case7~26 の発熱速度の測定結果を用いて、側面における単位面積当たりの発熱速度を求める。なお、Case7~26 の試験体は Case1~6 のポリウレタンフォームと同じメーカー、配合で製造しているため、Case1~6 の側面の単位面積当たりの発熱速度は概ね同じと考えられる。

図-7 に側面の発熱速度の算出方法を示す。側面の発熱速度は、下端四辺に点火した実験の最大発熱速度から、同一寸法の試験体で上面中央に点火した実験において融解面が上面全域に広がった時点の発熱速度を引いて求める。これを側面全体の面積で割ることで、側面における単位面積当たりの発熱速度を求める。

図-8 に実験より求めた側面の単位面積当たりの発熱速度を示す。側面の単位面積当たりの発熱速度は、融解面が増加するにつれて増加する傾向がある。これは、融解面が増加すると火炎が大きくなり、火炎から融解面への入射熱が増加するためと考えられる。側面の単位面積当たりの発熱速度 q_v [kW/m²] が側面の融解面積 A_v [m²] に比例するとし、最小二乗法により整理した結果、式(1)となる。

$$q_v = 200A_v + 188 \quad (1)$$

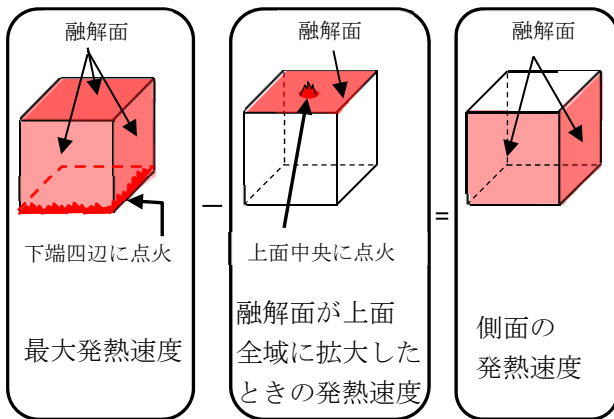


図-7 側面の発熱速度の算出方法

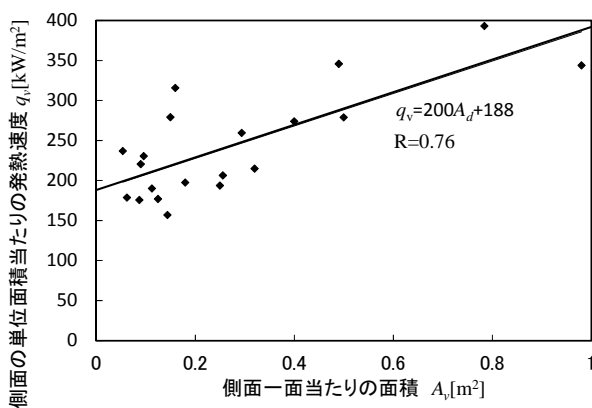


図-8 側面の単位面積当たりの発熱速度

3. 燃焼による形状変化の計算

3.1 燃焼による形状変化

図-9に燃焼による形状変化の過程を示す。高分子系材料の形状変化は、融解面の未燃焼部への拡がりや融解面の位置が動くことによって生じる。前者は、火炎から融解面周囲の未燃焼部への入射熱により未燃焼部が融解することで生じる。後者は、火炎から火炎内側の融解面への入射熱によって、固体が融解して液化し、さらに液体が熱分解して可燃性ガスになることで生じる。

本章では、火炎から融解面への入射熱によって融解面が広がる過程をモデル化し、2章の実験結果より得た上面における融解面の水平方向への拡大速度、側面における融解面の下方への拡大速度及び側面の単位面積当たりの発熱速度を合わせて、融解による形状変化を計算する方法を述べる。

図-10に点火してから融解面が上面縁に到達するまでの融解面を近似した形状を示す。融解面の縁は、実験で観察された形状(写真-1)より円形で近似する。

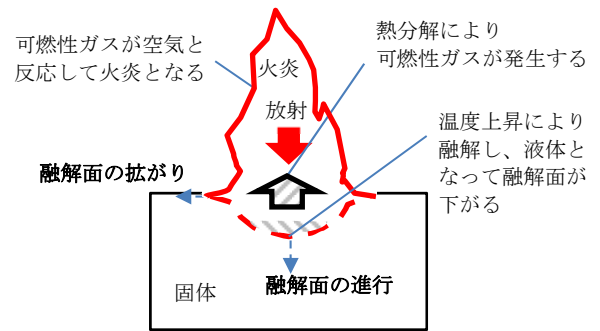


図-9 融解による形状変化の過程

融解面の鉛直方向の形状は写真で示していないが、実験画像を観察したところ、融解面の中心部付近は端部付近に比べて大きく窪んでいた。そのため、図-10の断面図に示すように融解面の中央部は楕円で、周辺部は直線で近似する。楕円と直線の交点を融解面弧端部と呼ぶ。

融解面の水平方向への拡大速度 v_{mh} は、火炎から融解面周囲の未燃焼部への入射熱 q_f より求める。融解面中央部の楕円で近似した範囲は、火炎から融解面底部への入射熱 q_{bd} から下方への進行速度 v_{bd} 、融解面弧端部への入射熱 q_{bh} から水平方向への進行速度 v_{bh} を求める。

図-11に融解面が上面縁に到達後の融解面を近似した形状を示す。上面の融解面は上面縁に到達するまでと同様、楕円で近似する。側面における融解面の縁は実験で観察された形状より曲線で近似する。曲線は二次関数とし、図-12に示すように融解面が上面縁を超えて拡大したとして、上面の融解面縁Aと側面の融解面縁Bより求める。融解面の鉛直方向の形状は直線で近似する。側面における融解面の拡大速度 v_{md} 及び内側への進行速度 v_{bl} は実験値を用いる。

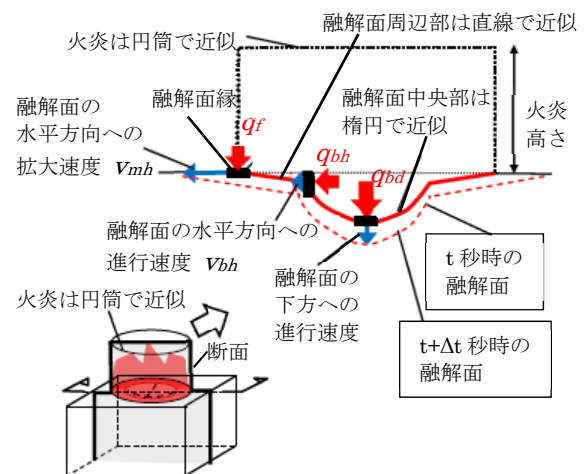


図-10 上面縁に到達するまでの融解面

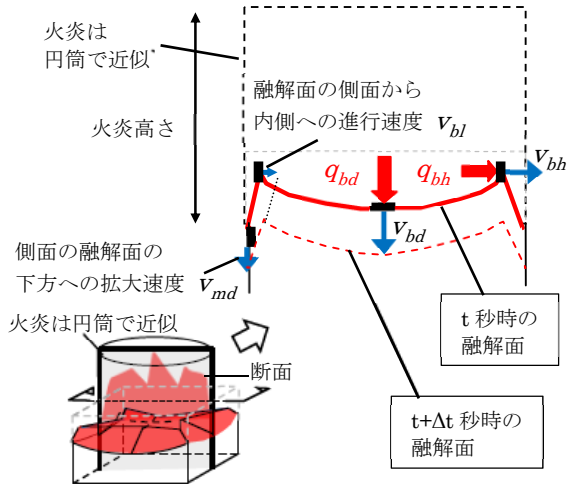


図-11 上面縁に到達後の融解面

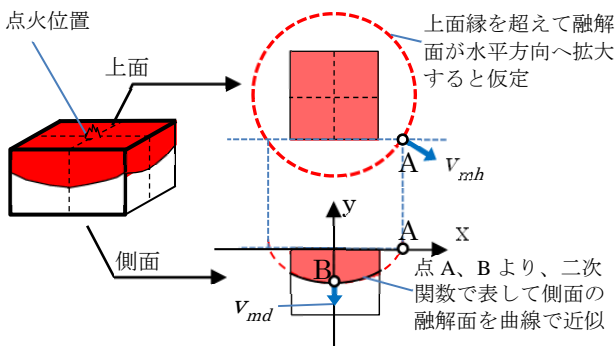


図-12 側面の融解面縁の近似方法

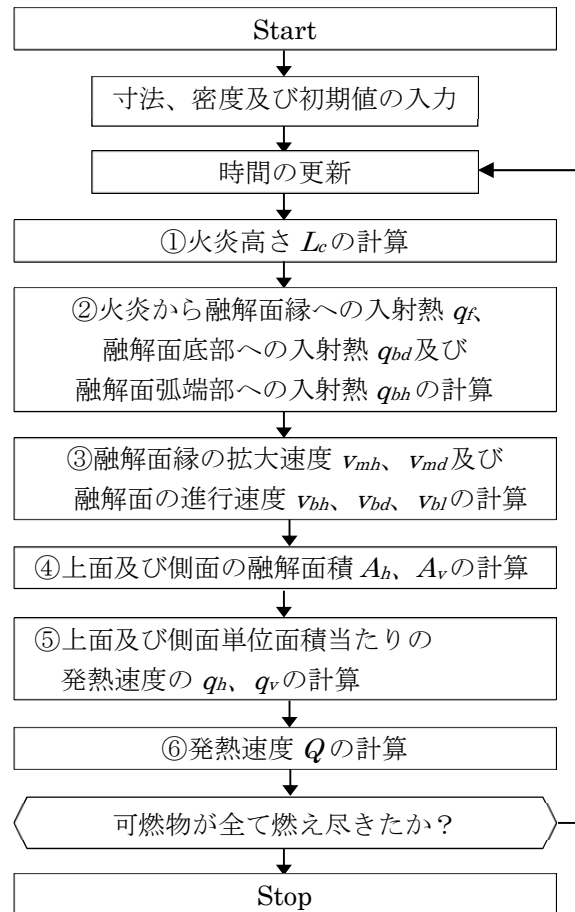


図-13 計算フローチャート

図-13 に計算のフローチャートを示す。火炎から各融解面への入射熱により融解面が広がる速度を求め、燃焼による形状変化を簡易な図形に近似して、上面、側面の融解面積を求める。これに単位面積当たりの発熱速度を掛け合わせることで発熱速度を計算する。

3.2 火炎形状及び融解面の入射熱(図-13①、②)

火炎高さ L_c [m] は、長谷見ら⁶⁾により提案された式(2)より求める。

$$L_c = 1.8D \times \begin{cases} Q_D^{*2/3} & (Q_D^* \leq 1) \\ Q_D^{*2/5} & (1 \leq Q_D^*) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 D は火源径 [m]、 Q_D^* は無次元発熱速度 [-] である。火源径は、融解面が上面縁に到達するまで融解面の直径、上面縁に到達後は試験体幅⁵⁾とする。無次元発熱速度は、式(3)より求める。

$$Q_D^* = \frac{Q}{c_p \rho_a T_a \sqrt{g} D^{5/2}} = \frac{Q}{1116 D^{5/2}} \quad (3)$$

ここで、 T_a は空気温度 [K]、 c_p は定圧比熱 [kJ/kgK]、 g は重力加速 [m/s²]、 ρ_a は空気密度 [kg/m³] である。

火炎の放射熱は、火炎を 800℃ で一様とした円筒で近似⁷⁾し、火炎の放射率、ステファンボルツマン係数を用いて求める。火炎の放射率⁸⁾は、平均行路長と火炎の放射吸収係数より求める。火炎から融解面底部への入射熱 q_{bd} 、火炎から融解面弧端部への入射熱 q_{bh} 、火炎から融解面縁への入射熱 q_r は、各入射面から円筒で近似した火炎を見たときの形態係数より求める。

3.3 融解面の拡がり(図-13③)

融解面の水平方向への拡大速度 v_{mh} [m/s] は、Quintiere ら⁹⁾により式(4)が提案されている。

$$v_{mh} = \frac{4\delta_f}{\pi(k\rho c)(T_{ig} - T_0)^2} q_f^2 \quad (4)$$

ここで、 δ_f は融解面縁から予熱面までの距離 [m]、 k は熱伝導率 [kW/mK]、 ρ は密度 [kg/m³]、 c は比熱 [kJ/kgK]、 T_{ig} は着火温度 [K]、 q_f は火炎から予熱面

への入射熱[kW/m²]である。入射熱以外は、可燃物の材料によって決まる物性値である。物性値を定数とすれば、水平方向への火炎の燃え広がり速度は、火炎から予熱面への入射熱の二乗に比例する。

図-14に横軸を火炎から融解面縁への入射熱 q_f として整理した融解面の水平方向への拡大速度を示す。火炎から融解面縁への入射熱は実験で測定された火源径より3.2節で述べた方法で求めている。入射熱が小さい場合、測定された範囲では、融解面の拡大速度が0に近づいていない。融解面の水平方向の拡大速度 v_{mh} [m/s]を、式(4)を基に $v_{mh}=aq_f^2+b$ と表し最小二乗法で整理した結果、式(5)となる。

$$v_{mh} = 0.000017q_f^2 + 0.00262 \quad (0 < q_f \leq 11.8) \quad (5)$$

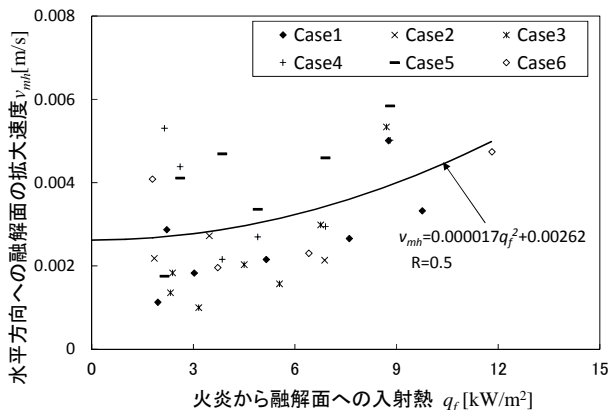


図-14 融解面縁への入射熱と水平方向への融解面の拡大速度

側面における融解面の下方への拡大速度 v_{md} は、火炎から側面の融解面縁への入射熱の変化が小さいため一定とし、図-6に示す実験結果の平均値を用いる。

上面における融解面の下方への進行速度 v_{bd} は、図-10、11に示す融解面底部での熱収支から式(7)を用いて計算する。式(6)の左辺の第1項は Δt 秒間に熱分解する単位面積当たりの重量を初期温度 T_0 から融点 T_m まで温度上昇させるのに必要な熱量、第2項は Δt 秒間に熱分解する単位面積当たりの重量を固体から熱分解させるのに必要な熱量である。右辺は融解面底部における正味の熱量である。なお、ポリウレタンは、融解して液体となった後、温度が上昇して熱分解し気化するが、本計算では、融解してすぐに気化すると仮定している。

$$c(T_m - T_0)\rho v_{md}\Delta t + L_v\rho v_{md}\Delta t = (q_{bd} - q_r)\Delta t \quad (6)$$

$$v_{bd} = \frac{q_{bd} - q_r}{\rho c(T_m - T_0) + L_v} \quad (7)$$

ここで、 q_r は融解面における失熱[kW/m²]、 c はポリウレタンの比熱[kJ/kgK]、 L_v は気化熱[kJ/kg]、 ρ はポリウレタンの密度[kg/m³]である。

融解面弧端部の水平方向への進行速度 v_{bh} は、下方と同様に、図-10、11の融解面弧端部での熱収支より式(8)で求める。

$$v_{bh} = \frac{q_{bh} - q_r}{\rho c(T_m - T_0) + L_v} \quad (8)$$

側面の融解面の進行速度 v_{bl} は式(9)で求める。

$$v_{bl} = \frac{q_v}{\rho\Delta H} \quad (9)$$

ここで、 ΔH は発熱量[kJ/kg]である。

3.4 融解面積の計算(図-13④)

上面及び側面における融解面積は、簡易な図形で近似した融解面を未点火時の上面及び側面に投影した範囲をとする。

上面縁に融解面が到達するまでは、図-10で示す融解面を図-15の(1)に示すように、上面を拡大する融解面の形状を円形で、上面から下方へ進行する融解面を楕円球で近似し、未点火時の上面に投影して上面の融解面積 A_h を求める。

上面縁に融解面が到達後は、図-11で示す融解面を図-15の(2)に示すように、側面を拡大する融解面の形状を曲線で、上面から下方へ進行する融解面を楕円球で、側面から内側へ進行する融解面を三角形で近似し、未点火時の上面及び側面に投影して、上面の融解面積 A_h 、側面の融解面積 A_v を求める。

3.5 単位面積当たりの発熱速度の計算(図-13⑤)

上面における単位面積当たりの発熱速度 q_h [kW/m²]は、上面における融解面の範囲によらず一定として、式(7)の融解面底部が融解により下方に進む速度 v_{bd} と発熱量 ΔH を用いて求める。

$$q_h = \rho v_{bd}\Delta H \quad (10)$$

側面における単位面積当たりの発熱速度 q_v は、2章の実験で求めた値とし、式(1)とする。

3.6 発熱速度(図-13⑥)

発熱速度 Q は、上面、側面それぞれについて融解面積に単位面積当たりの発熱速度を掛け合わせることで求める。

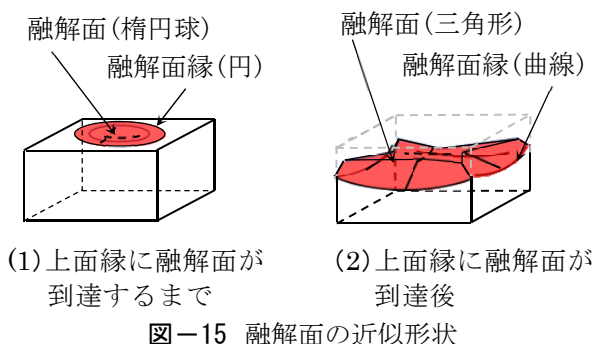


図-15 融解面の近似形状

4. 計算結果と実験結果の比較

3章で述べた融解面の形状変化の計算方法が、実験の形状変化を再現できるかどうかを確認をする。確認する実験は、基本寸法の Case1 と試験体幅、奥行きの大い Case6 とする。

図-16 に Case1(寸法: 0.5m×0.5m×0.5m)の上面及び側面に投影した融解面の形状を120秒ごとに示す。写真に示す破線は未点火時の試験体形状である。上面及び側面の図の赤く塗りつぶした範囲は融解面である。側面の赤い破線は中央部における鉛直断面の融解面の形状である。計算で求めた融解面について述べる。120秒時点では上面全域が融解しており、側面の上端付近が融解している。240秒時点では側面の融解面が点火前の試験体高さの半分程度まで到達している。360秒時点では側面全域が融解している。実験の写真と比べて、側面の融解面の形状は概ね一致している。

図-17 に発熱速度の計算結果を示す。○は融解面が上面全域に拡大した時点、△は融解面が側面全域に拡大した時点を示す。融解面が上面全域、側面全域に拡大した時間は実験とほぼ一致している。融解面が実験結果と概ね一致しているため、発熱速度も一致している。

図-18 に Case6(寸法: 1.0m×1.0m×0.5m)の上面及び側面に投影した融解面の形状を120秒ごとに示す。写真に示す破線は未点火時の試験体形状である。上面及び側面の図の赤く塗りつぶした範囲は融解面である。側面の赤い破線は中央部における鉛直断面の融解面の形状である。上面の360秒の中央の白抜きの円は融解面が底面に到達したことで上面が燃え尽きた範囲である。計算で求めた

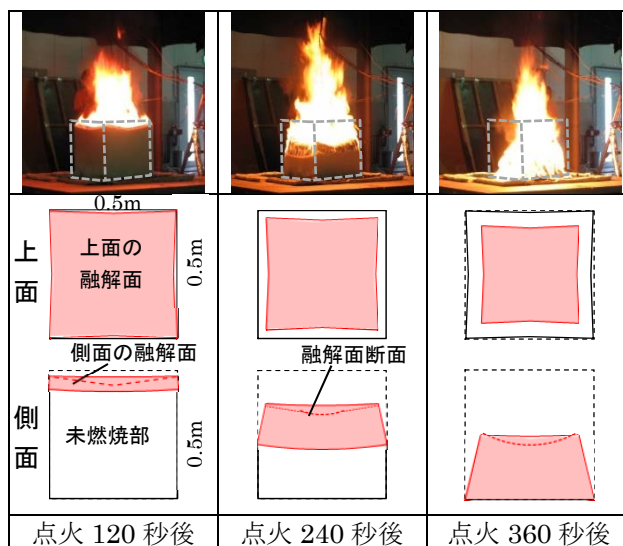


図-16 Case1の融解面の変化

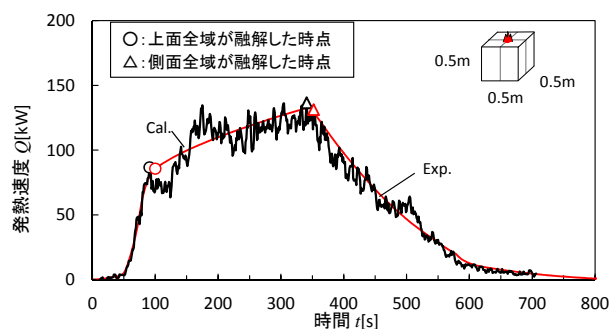


図-17 発熱速度の計算値と実験値の比較

融解面について述べる。120秒時点では上面の融解面が上面縁付近まで到達している。240秒時点では試験体高さが点火前の6割程度になっており、側面の融解面は小さい。360秒時点では側面の融解面が下端付近まで到達しているが、側面全域は融解していない。上面から下方へ進む融解面は床面まで到達して上面の中央が燃え尽きている。実験の写真と比較すると、240秒時点では側面の融解面の形状が概ね一致している。360秒時点では写真右側の側面の融解面の形状と概ね一致している。左側の側面は滴下によって着火したため、側面全域が融解しており、計算で求めた融解面より大きい。

図-19 に発熱速度の計算結果を示す。○は融解面が上面全域に拡大した時点、△は融解面が側面全域に拡大した時点を示す。融解面が上面全域に拡大した時間はほぼ一致したが、発熱速度は過大に計算されている。また、融解面が上面全域に拡大後、計算による発熱速度はほぼ一定となるが、実験は200秒頃まで増加している。これは融解面積を上面及び側面に投影した面積とし、実際の融

解面より小さく計算しているためと考えられる。Case1の発熱速度が一致するのは上面の幅と奥行きが小さく、投影したことによる面積の減少の影響が少なかったためではないかと考えられる。融解面が側面全域に到達する時間は計算の方が遅く、発熱速度が減衰している時間帯になっている。側面全域が融解するより先に発熱速度が減衰するのは、上面の融解面が床面に到達し、上面の融解面積が減衰しているためである。

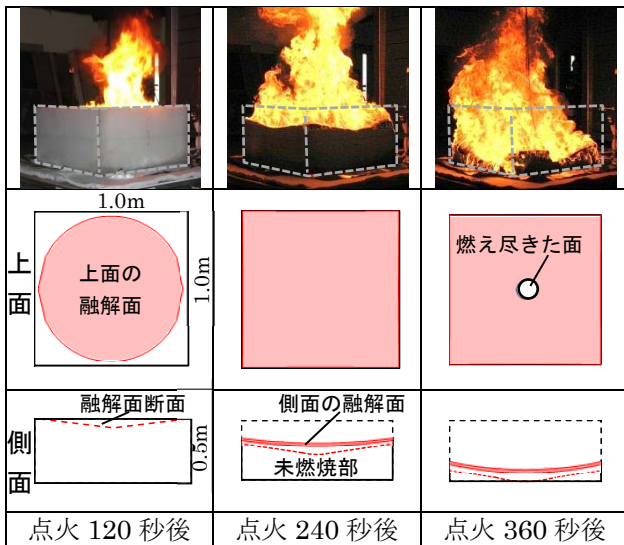


図-18 Case6の融解面の変化

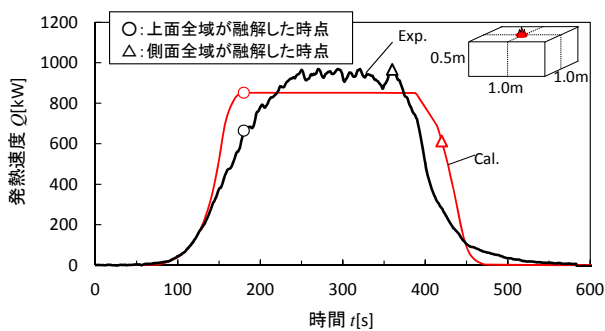


図-19 発熱速度の計算値と実験値の比較

5. まとめ

直方体のポリウレタンフォームを用いた燃焼実験から、融解による形状変化について以下のことを把握した。

- ・融解面が上面を水平方向へ拡大するとき、融解面は水平方向へ拡大するとともに、融解面の位置が下方へ進み窪みが生じる。
- ・融解面が側面を拡大するとき、融解面は側面表面を下方に拡大するとともに、側面から内側に進行する。

- ・融解して滴下した融解物によって側面の下端から着火し、側面の融解面が急増する場合、発熱速度も大きくなる。

また、融解による形状変化の過程を火炎から融解面への入射熱を用いてモデル化し、実験結果における融解面の周囲への拡大を用いて、融解による形状変化を計算した。融解したポリウレタンが滴下しない場合、融解面の形状変化は実験と概ね一致した。

今後は、融解したポリウレタンフォームの滴下及び融解面の形状変化の計算時に用いた実験結果をモデル化して計算方法を改良し、ポリウレタンフォーム以外的高分子系材料への適用や椅子のような直方体でない形状や、煙層など周囲から放射熱を受ける場合への適用拡大が課題である。

<参考文献>

- 1) NFPA : “The SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering 4th Edition”, 2008.
- 2) CBUF : “Fire Safety of Upholstered Furniture - the final report on the CBUF research programme, European Commission Measurements and Testing Report”, EUR 16477 EN
- 3) 抱憲誓, 城明秀, 佃めぐみ, 松山賢, 大宮喜文, 原田和典 : “立体的に燃焼する可燃物の発熱速度および火炎高さに関して”, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.219-222, 2008.
- 4) 小山陽一朗, 伊東俊介, 松山賢, 原田和典, 佃めぐみ, 抱憲誓, 新谷祐介, 大宮喜文 : “区画内外におけるウレタンフォームの燃焼性状に関する実験的研究 その1 実験結果”, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.343-344, 2009.
- 5) 山田信太郎, 大宮喜文, 野秋政希 : “立体的に燃焼するウレタンブロックの火炎高さ・実験結果と既往の提案式の適用可能性に関する検討”, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.169-170, 2012.
- 6) Y.Hasemi, T.Tokunaga : “Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames”, Fire Science and Technology, Vol.40, No.1, pp.15-26, 1984.
- 7) 日本建築学会編 : “建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案)”, 2013.
- 8) 日本火災学会編 : “火災と建築”, 共立出版, 2002.
- 9) J.Quintiere, M.Harkleroad, D.Walton : “Measurement of Material Flame Spread Properties”, Combustion Science and Technology, Vol.32, pp.67-89, 1983.