

発泡断熱材の燃焼性の評価方法に関する研究

(定質量熱源を用いた燃焼実験)

齋藤 仁*, 山本 康弘**, 菅原 進一***

概要

本研究は、フェノールフォーム、フェノールウレタンフォーム、ポリウレタンフォームなどの建築で使われる発泡断熱材の燃焼性についての評価方法を検討し、あわせてこれらの発泡断熱材の性能評価を行うことを目的としたものである。

そこで、本実験は、これらの発泡断熱材に加熱した小球を落下させ、発泡断熱材の有炎燃焼時間、燃焼時間、発熱速度、炭化範囲などを測定し、定質量熱源による発泡断熱材の燃焼性を定量的に把握するための判断指標を得るようにしたものである。

1 はじめに

近年、建築材料について、防火・環境・衛生などを始め、様々な面での性能の問題が取り上げられている。断熱材もその例外ではなく、特に発泡断熱材は、自己消炎性のあるものが少なく、建設現場などにおいてこれを着火物とする火災が依然として後を絶たない。

この種の火災として注目を浴びたのは、爆燃火災が発生し、21名の負傷者がでた、昭和52年5月13日の東京都江東区新興海運倉庫火災である。この爆燃火災の大きな要因として考えられたのが、断熱材として使用されていたポリウレタンフォームである。同年、東京都では、「定温倉庫、冷凍倉庫等に対する内装表示マークの掲出指導について(東京消防庁予防部長依命通達)」が出され、昭和63年、平成3年に見直された。しかし、これに対して抜本的な対応工法の開発はあまり進んでいないようである。

このポリウレタンフォームは、安価であり、現場発泡での施工性もよく、ボード状製品も取り扱いやすいことから多く使用されているが、耐熱性等が劣っており、これに対して様々な改良がなされてきているが根本的な解決には至っていない。これに対し、フェノールフォームは、従来から耐熱性等が非常に良いことが指摘されているが、断熱性がやや劣り、現場発泡の吹付施工の面やや施工性が悪いなどの難点がある。ところが最近になっ

て、このフェノールフォームと同じように自己消炎性が強く、しかもポリウレタンフォームと同様の断熱性や施工性の良さを兼ね備えたフェノールウレタンフォームなどが開発されており、注目されている。

これらの発泡断熱材に関する実験研究において、ポリウレタンフォームなどに溶断溶滴や溶接火花などを実際に落下させる実験¹⁾がよく行われているが、溶滴等は実験ごとにその大きさなどが異なり、溶滴等の定質量熱源による燃焼性を正確に把握することが困難であった。また定質量熱源に対する評価方法については、岸谷、齋藤らによる研究^{2),3)}があるだけで、この研究の火源は5ml



写真1 回転式電気管状炉

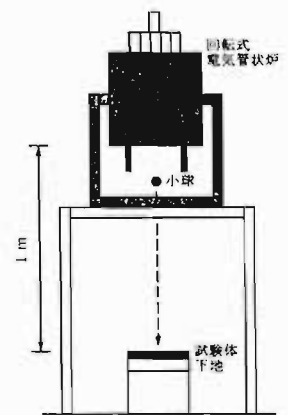


図1 小球落下実験装置

* 第一研究室 ** 東京工芸大学工学部 *** 東京大学大学院工学研究科

のアルコールであり、ほぼ垂直上方向にのみ放炎、放熱し、主に接炎によって断熱材を着火させるのに対して、溶断溶滴等は点熱源であり、ほぼ均等に全方向に放熱し、断熱材に接し主に熱伝導によって断熱材を着火させるが、火源となる溶断溶滴等は大きさ、形状、重さ等を均一にすることが困難で再現性にやや無理があるのではないかとと思われる。

本研究は、このような発泡断熱材等の燃焼性について、定質量熱源を使用した試験方法を提案してその評価方法を検討し、あわせてこれらの発泡断熱材の性能評価を行うことを目的としたものである。

2 実験方法

本実験は、加熱した所定の大きさの小球を落下させ、試験体である発泡断熱材を加熱、燃焼させた時の有炎燃焼時間、燃焼時間、発熱速度、損傷範囲等を測定し、定質量熱源による発泡断熱材の燃焼性を定量的に把握するための判断指標を得るようにしたもので、実験要因と水準、測定項目、使用材料及び試験体は次のとおりである。

(1) 実験要因と水準

実験要因は、表1のごとく、試験体である発泡断熱材の種類、落下させる小球の球径とその加熱温度および試験体の厚さとした。また、各実験要因に対する水準は、同じく表1に示したとおりであり、発泡断熱材としてはフェノールフォーム、フェノールウレタンフォーム、ポリウレタンフォームの3種類を取りあげ、小球の球径を10mm、12mm、14mmの3種類とし、小球の加熱温度を700℃、1,000℃、1,300℃の3種類とした。また試験体の厚さを30mm、50mmの2種類とした。

(2) 測定項目

測定は、加熱した小球を落下させ、これによって試験体が燃焼したときの有炎燃焼時間(発炎から消炎までの時間)と燃焼時間(発炎・発煙から消煙までの時間)、発熱速度、損傷範囲(試験体表面および試験体表面から深さ15mmの面における損傷口径および炭化径、試験体表面からの損傷深さおよび炭化深さ)などについて行った。

(3) 使用材料

ア 小球

熱源に使用した小球は、表2に示すように、高炭素クロム軸受鋼鋼材(JIS G 4805)の2種(SUJ 2)のもので、被覆アーク溶接棒用心線(JIS G 3523)の化学成分に比較的近く均一な球状であり、その球径は、石井、加藤による研究⁴⁾において実施したアーク溶接棒溶断時の最大溶滴球径約10mmを参考にして、10mm、12mmおよび14mmのものを適時使用した。また小球の加熱温度は、高炭素鋼の融点(1,327~1,447℃)⁵⁾に近い1,300℃および1,000℃、700℃とした。

イ 発泡断熱材

試験体に使用した発泡断熱材の種類および組成・物性は、表3に示したとおりである。

表1 実験要因と水準

| 実験要因 | 実験水準 |
|----------|------------------------------------|
| 発泡断熱材の種類 | フェノールフォーム、フェノールウレタンフォーム、ポリウレタンフォーム |
| 小球の球径 | 10mm、12mm、14mm |
| 小球の加熱温度 | 700℃、1,000℃、1,300℃ |
| 試験体の厚さ | 30mm、50mm |

表2 小球の材質

| | 内 容 |
|-------|--------------------------------------|
| 小球の材質 | 高炭素クロム軸受鋼鋼材(JIS G 4805)の2種(SUJ 2)適合品 |

表3 発泡断熱材の種類と組成・物性

| | フェノールフォーム | | フェノールウレタンフォーム | | ポリウレタンフォーム | |
|---------------------------|------------|--------|---------------|--------|--------------|--------|
| | 標準 | 分厚 | 標準 | 分厚 | 標準 | 分厚 |
| 主 剤 | フェノール樹脂 | | フェノール樹脂 | | ポリエーテル系ポリオール | |
| 整泡剤 | ノニオン系界面活性剤 | | シリコーン系界面活性剤 | | シリコーン系界面活性剤 | |
| 触 媒 | - | | 有機金属塩、アミン | | 有機金属塩、アミン | |
| 発泡剤 | 塩化メチレン | | 代替フロン | | 代替フロン | |
| 硬化剤 | 有機スルホン酸 | | ポリメリックMDI | | ポリメリックMDI | |
| タイプ | 標準 | 分厚 | 標準 | 分厚 | 標準 | 分厚 |
| 平均密度(g/cm ³) | 0.042 | 0.045 | 0.038 | 0.037 | 0.036 | 0.036 |
| 平均厚さ(mm) | 29.02 | 50.48 | 30.31 | 48.65 | 29.01 | 50.15 |
| 独立気泡率(%) | 52 | 52 | 96 | 96 | 93 | 93 |
| 圧縮強度(kg/cm ²) | 1.39 | 1.39 | 1.62 | 1.62 | 1.84 | 1.84 |
| 熱伝導率(kcal/mh℃) | 0.0353 | 0.0353 | 0.0174 | 0.0174 | 0.0229 | 0.0229 |
| 備 考 | | | ノンホルマリン | | ノンホルマリン | |

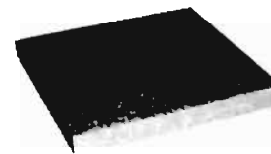
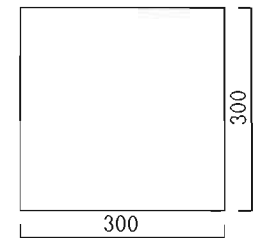
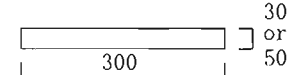


写真2 試験体



試験体平面図



試験体側面図

図2 試験体の大きさ

表4 試験体の種類と実験条件

| 試験体の種類 | | | 小球 | | 試験体の大きさ [W×D×T] (mm) |
|-----------|---------------|------------|--------|---------|----------------------------|
| フェノールフォーム | フェノールウレタンフォーム | ポリウレタンフォーム | 球径(mm) | 加熱温度(℃) | |
| PH1 | PHU1 | PUR1 | 10 | 1,300 | 300×300×30 |
| PH2 | PHU2 | PUR2 | 10 | 1,000 | 300×300×30 |
| PH3 | PHU3 | PUR3 | 10 | 700 | 300×300×30 |
| PH4 | PHU4 | PUR4 | 12 | 1,300 | 300×300×30 |
| PH5 | PHU5 | PUR5 | 14 | 1,300 | 300×300×30 |
| PH6 | PHU6 | PUR6 | 10 | 1,300 | 300×300×50 |

フェノールフォームは、主剤にフェノール樹脂、整泡剤にノニオン系界面活性剤、発泡剤に塩化メチレン、硬化剤に有機スルホン酸を使用して作成し、密度が0.042~0.045g/cm³のものを使用した。

フェノールウレタンフォームは、主剤にフェノール樹脂、整泡剤にシリコーン系界面活性剤、触媒に有機金属塩およびアミン、発泡剤に代替フロン、硬化剤にポリメ

リックMD Iを使用して作成したもので、密度が 0.037 ~0.039g/cm³のものを使用した。

ポリウレタンフォームは、主剤にポリエーテル系ポリオール、整泡剤にシリコン系界面活性剤、触媒に有機金属塩およびアミン、発泡剤に代替フロン、硬化剤にポリメリックMD Iを使用して作成したもので、密度が 0.035~0.037g/cm³のものを使用した。

(4) 試験体

試験体に使用した発泡断熱材は写真 2 に示したとおりである。その大きさは、図 2 に示すように、幅 300mm、奥行 300mm、厚さ 30mm あるいは 50mm である。下地は、コンクリート板(幅 300mm、奥行 300mm、厚さ 60mm)を使用し、その上部に試験体を静置した。試験体の個数は、1 実験ごとに各発泡断熱材 3 体とした。これらの各試験体の種類と実験条件は、表 4 に示したとおりである。

3 実験

実験は、図 3 に示すときフローに従って行った。

まず、写真 1 に示す回転式電気管状炉に小球を投入し、所定の加熱温度で 5 分間加熱したあと、回転式電気管状炉を 180 度回転させて下部の蓋を開放して小球を落下させた。小球は、図 1 のごとく、1 m 下に設置した試験体に落下し、試験体を燃焼させた。この時の燃焼性状を図 4 のごとく、8 mm ビデオカメラ、デジタルビデオカメラ、赤外線映像装置(インターバル: 約 1/50sec、測定レンジ: 363.0~1,233.5℃、放射率: 1.00)で撮影した。

実験後、8 mm ビデオ、デジタルビデオから試験体の有炎燃焼時間と燃焼時間の計測を行い、赤外線映像装置で計測したデータから試験体の発熱速度を算出した。また、試験体表面の損傷範囲として、図 5 のごとく、損傷の最大直径方向の損傷口径および炭化径を測定した。その後、この試験体表面から深さ 15mm 下層の試験体表面と平行の切断面における損傷範囲としての損傷口径および炭化径を測定した。また、試験体表面に直角にしかも損傷の最大直径方向に切断した面における損傷深さおよび炭化深さも測定した。

4 実験結果および考察

各試験体の測定項目ごとの平均値を表 5 に示した。

考察は、各測定項目において、実験要因ごとにこの平均値について行った。なお、発泡断熱材の種類については、各測定項目における発泡断熱材の種別ごとに表 5 に示した平均値を平均した値について考察し、発熱速度については、小球の試験体接触時を経過時間 0:00 とし、この時から 1 秒ごとの平均値について考察した。

また、実験水準ごとに発泡断熱材間の差の有無を検討するために実験計画法の 1 因子実験の分散分析を行った。

(1) 有炎燃焼時間

発炎から消炎までの時間である有炎燃焼時間を図 6 に示す。横軸に左から発泡断熱材の種類、小球の加熱温度、

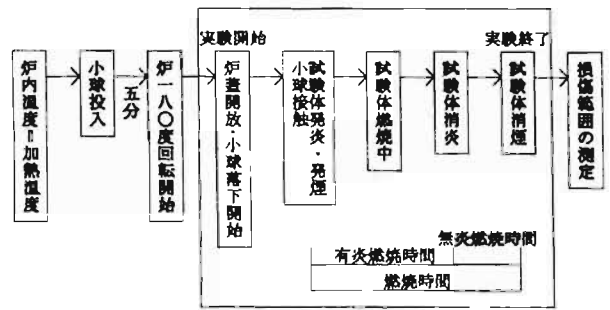


図 3 実験フロー

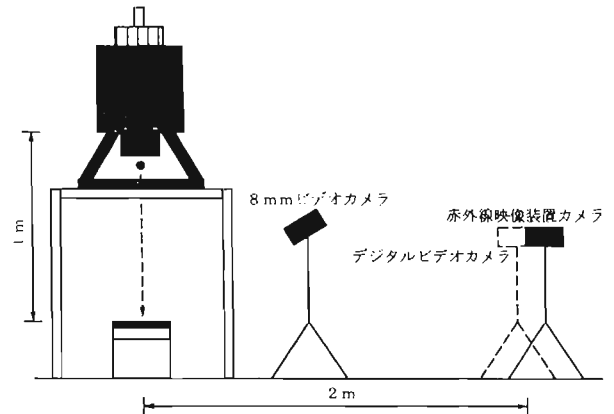
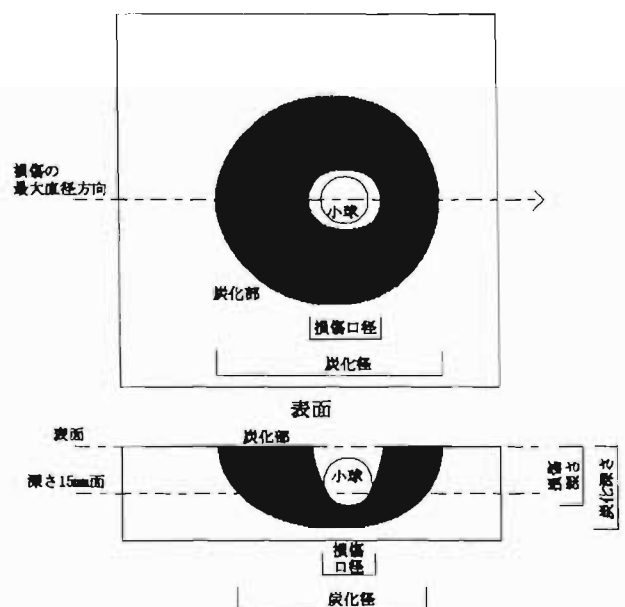


図 4 測定器配置



損傷の最大直径方向の断面
図 5 損傷範囲の測定位置

小球の球径および試験体の厚さをとり、縦軸に有炎燃焼時間を示した。この結果、有炎燃焼時間は、ポリウレタンフォームが最も長く、次にフェノールウレタンフォームとなり、フェノールフォームが最も短かった。

次に実験方法の要因ごとに有炎燃焼時間をみると、小球の加熱温度を変えた場合、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームは小球の加熱温度が 700℃から

表5 結果一覧(平均値)

| 試験体No. | 小球 | | | 試験体 厚さ (mm) | 有炎 燃焼時間 (分:秒) | 燃焼時間 (分:秒) | 最大 発熱速度 (J/sec) | 表面 | | 深さ15mm面 | | 断面 | | 貫通 有無 |
|--------|------------|--------------|-------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|----------|
| | 球径 (mm) | 加熱温度 (°C) | 熱量 (cal) | | | | | 損傷口径 (mm) | 炭化径 (mm) | 損傷口径 (mm) | 炭化径 (mm) | 損傷深さ (mm) | 炭化深さ (mm) | |
| PH1 | 10 | 1,300 | 470 | 30 | 0:09 | 0:09 | 17.35 | 7.60 | 19.18 | — | — | 3.32 | 7.50 | 無 |
| PH2 | 10 | 1,000 | 350 | 30 | 0:07 | 0:07 | 8.81 | 7.13 | 14.40 | — | — | 3.10 | 5.92 | 無 |
| PH3 | 10 | 700 | 230 | 30 | — | — | 2.77 | 8.15 | 11.75 | — | — | 1.60 | 3.02 | 無 |
| PH4 | 12 | 1,300 | 710 | 30 | 0:19 | 0:19 | 23.74 | 6.88 | 21.43 | — | — | 3.03 | 7.92 | 無 |
| PH5 | 14 | 1,300 | 980 | 30 | 0:25 | 0:25 | 34.27 | 7.85 | 25.20 | — | — | 3.22 | 8.57 | 無 |
| PH6 | 10 | 1,300 | 470 | 50 | 0:11 | 0:11 | 16.55 | 5.97 | 19.02 | — | — | 2.73 | 6.97 | 無 |
| PHU1 | 10 | 1,300 | 470 | 30 | 0:38 | 1:12 | 64.00 | 6.60 | 47.27 | — | — | 6.45 | 8.88 | 無 |
| PHU2 | 10 | 1,000 | 350 | 30 | 0:13 | 1:14 | 34.78 | 7.87 | 28.63 | — | — | 5.08 | 7.23 | 無 |
| PHU3 | 10 | 700 | 230 | 30 | — | 1:19 | 2.24 | 6.80 | 12.32 | — | — | 10.22 | 4.38 | 無 |
| PHU4 | 12 | 1,300 | 710 | 30 | 0:32 | 1:20 | 90.89 | 9.57 | 58.92 | — | — | 6.90 | 10.60 | 無 |
| PHU5 | 14 | 1,300 | 980 | 30 | 0:41 | 1:41 | 122.53 | 10.32 | 44.50 | — | — | 5.35 | 10.57 | 無 |
| PHU6 | 10 | 1,300 | 470 | 50 | 0:39 | 1:29 | 58.07 | 7.10 | 39.18 | — | — | 6.83 | 9.55 | 無 |
| PUR1 | 10 | 1,300 | 470 | 30 | 0:52 | 1:47 | 89.55 | 14.33 | 33.45 | 14.27 | 25.55 | 28.12 | 28.12 | 有 |
| PUR2 | 10 | 1,000 | 350 | 30 | 1:24 | 3:01 | 43.76 | 12.30 | 37.38 | 11.88 | 27.95 | 25.47 | 28.03 | 無 |
| PUR3 | 10 | 700 | 230 | 30 | — | 4:08 | 1.60 | 11.87 | 12.87 | 11.78 | 20.48 | 19.50 | 22.88 | 無 |
| PUR4 | 12 | 1,300 | 710 | 30 | 0:59 | 2:02 | 140.17 | 16.65 | 42.00 | 15.77 | 33.18 | 27.73 | 27.73 | 有 |
| PUR5 | 14 | 1,300 | 980 | 30 | 1:06 | 2:08 | 199.02 | 18.25 | 51.10 | 17.40 | 39.60 | 28.07 | 28.07 | 有 |
| PUR6 | 10 | 1,300 | 470 | 50 | 0:50 | 3:06 | 97.00 | 14.27 | 41.00 | 14.20 | 15.28 | 50.62 | 50.62 | 有 |

注 熱量：所定の加熱温度で5分間加熱した時の概算熱量

1,300°Cと高くなるにつれて有炎燃焼時間は長くなる傾向がみられた。しかし、ポリウレタンフォームは小球の加熱温度 1,000°Cの場合、小球の加熱温度 700°Cと 1,300°Cに比べて極端に有炎燃焼時間が長くなった。これは、今回使用したポリウレタンフォームの自己消炎性が比較的強かったことから、小球の加熱温度 700°Cの場合は小球の熱量が小さいため有炎燃焼せず、また小球の加熱温度 1,300°Cの場合は小球の熱量が大きいため数秒で裏面まで貫通し燃焼する部分が短時間で燃焼してしまったが、小球の加熱温度 1,000°Cの場合は小球の熱量が小球の加熱温度 1,300°Cの場合に比べて小さく貫通するまでに時間を要したため燃焼する部分の燃焼が長くなったためと考えられる。なお、小球の加熱温度が 700°Cの場合は、どの発泡断熱材からも有炎燃焼は起こらず、また発泡断熱材間に有意差が認められなかった。

小球の球径を変えた場合は、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて、有炎燃焼時間は長くなる傾向がみられた。また、すべての小球の球径において、発泡断熱材の有炎燃焼時間の間には危険率 1%水準で有意差が認められ、ポリウレタンフォームが最も長く、次にフェノールウレタンフォームとなり、最も短かったのはフェノールフォームであった。

(2) 燃焼時間

発炎・発煙から消煙までの時間を表す燃焼時間を図7に示す。横軸に左から発泡断熱材の種類、小球の加熱温度、小球の球径および試験体の厚さをとり、縦軸に燃焼時間を示した。この結果、燃焼時間は、ポリウレタンフォームが最も長く、次にフェノールウレタンフォームが長かった。なお、フェノールフォームは発煙しなかった。

実験方法の要因ごとに燃焼時間をみると、小球の加熱温度を変えた場合、フェノールフォームは小球の加熱温度が 700°Cから 1,300°Cと高くなるにつれて燃焼時間が

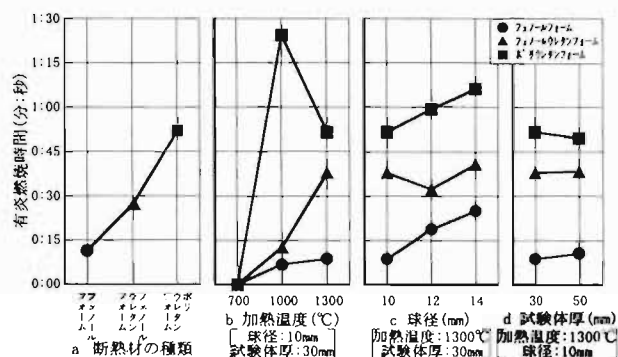


図6 有炎燃焼時間と実験要因

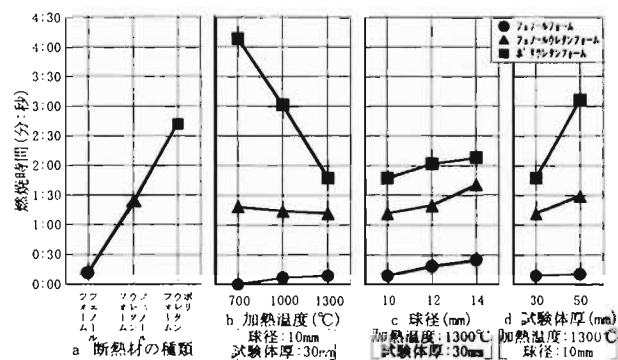


図7 燃焼時間と実験要因

やや長くなったが、フェノールウレタンフォームとポリウレタンフォームは小球の加熱温度が 700°Cから 1,300°Cと高くなるにつれて燃焼時間が短くなった。特にポリウレタンフォームの場合、小球の加熱温度 700°Cの燃焼時間は、小球の加熱温度 1,300°Cの燃焼時間に対して2倍強に達した。これは、小球の加熱温度 700°Cの場合は小球の熱量が小さいため裏面まで貫通せず終始断熱材に接しており小球の熱量が断熱材を燃焼させる熱量以下になるまで無炎燃焼したため燃焼時間は長くなった

が、小球の加熱温度 1,300℃ の場合は数秒で裏面まで貫通してしまい燃焼する部分との接触あるいは隣接する時間が短いため燃焼時間は短くなったと考えられる。また、すべての小球の加熱温度で、発泡断熱材間に危険率 1% 水準で有意差が認められ、特に小球の加熱温度が 700℃ の時に顕著であった。

次に小球の球径を変えた場合、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて、燃焼時間は長くなったがあまり大きい差はみられなかった。また、すべての小球の球径において、発泡断熱材間に危険率 1% 水準で有意差が認められた。

試験体の厚さを変えた場合、試験体の厚さが 30mm から 50mm になると燃焼時間は長くなった。試験体の厚さが 50mm の燃焼時間は、試験体の厚さが 30mm の燃焼時間に対して 2 倍弱であった。また、試験体のすべての厚さにおいて、発泡断熱材間に危険率 1% 水準で有意差が認められた。

(3) 発熱速度

加熱した小球が試験体に接してからの発熱速度の変化は、有炎燃焼時間の 7 秒間について経時的にみると図 8 のようになる。横軸に経過時間をとり、縦軸に発熱速度を示し、グラフは上から小球の加熱温度別、小球の球径別、試験体の厚さ別の順に並べた。この結果、フェノールフォームの発熱速度は、7 秒までほぼ一定であり、フェノールウレタンフォームは 1 秒で最大値に達しその後徐々に減少した。ポリウレタンフォームの発熱速度は、1、2 秒で最大値に達し、小球の加熱温度 1,000℃ 以下、試験体厚 30mm の場合は徐々に低下し、小球の加熱温度 1,300℃、試験体厚 30mm の場合は小球の球径に関係なく 3 秒で急激に低下し、小球の加熱温度 1,300℃、試験体厚 50mm の場合は 3 秒で低下せず 6 秒で急激に低下した。この発熱速度の急激な低下は、小球の熱量がある一定以上の場合、発熱速度の経緯は試験体厚に左右されと考えられ、小球の加熱温度 1,300℃、試験体厚 30mm の場合は、2 秒から 3 秒の間に小球は裏面まで貫通し、小球周囲の断熱材の燃焼する部分の大半が燃焼し、発熱速度は 3 秒で急激に低下したと考えられ、小球の加熱温度 1,300℃、試験体厚 50mm の場合も同様に考えられる。

各試験体の最大発熱速度は、図 9 に示すように、ポリウレタンフォームが最も大きく、次にフェノールウレタンフォームが大きく、フェノールフォームが最も小さかった。

小球の加熱温度を変えた場合であるが、小球の加熱温度が 700℃ から 1,300℃ と高くなるにつれて最大発熱速度は大きくなった。また、小球の加熱温度のうち、小球の加熱温度が 700℃ の場合は、発熱速度がほとんど零に近く、従って発泡断熱材間に有意差が認められなかった。

小球の球径を変えた場合、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて最大発熱速度は大きくなった。また、すべての小球の球径において、発泡断

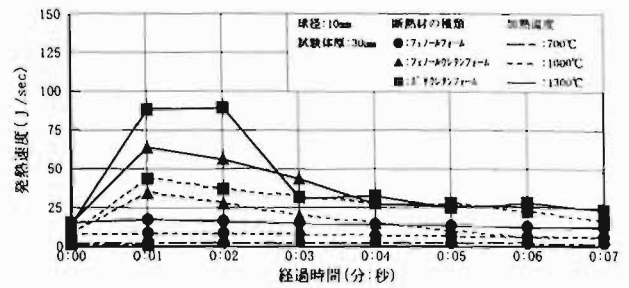


図 8(a) 発熱速度の経時変化(小球の加熱温度別)

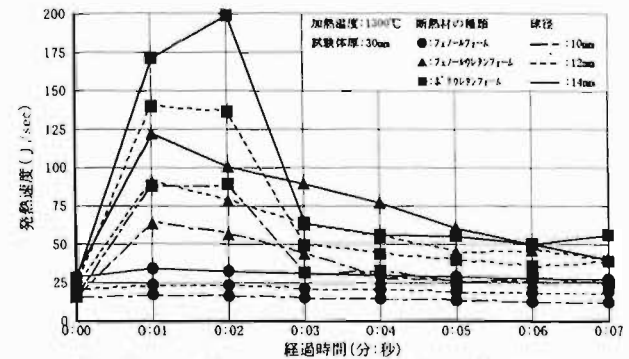


図 8(b) 発熱速度の経時変化(小球の球径別)

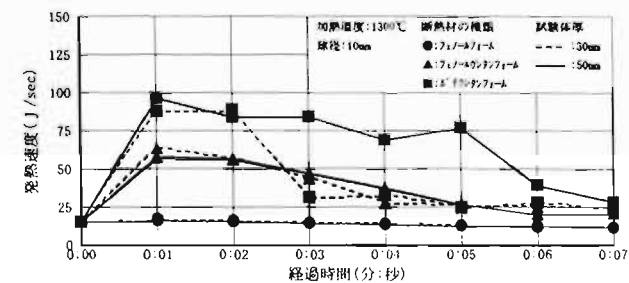


図 8(c) 発熱速度の経時変化(試験体の厚さ別)

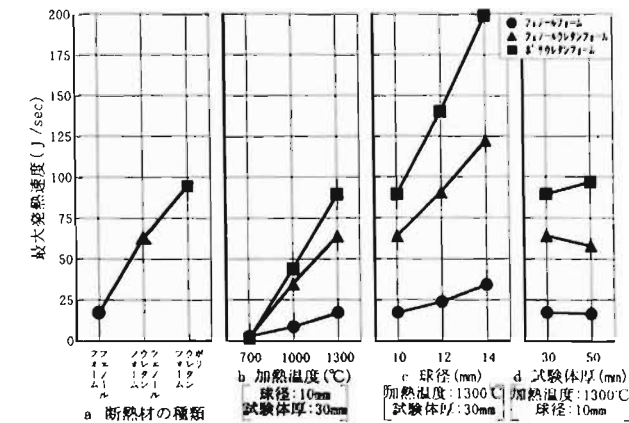


図 9 最大発熱速度と実験要因

熱材間に危険率 1% 水準で有意差が認められ、この差は小球の球径が大きくなるにつれて顕著にみられた。

また試験体の厚さを変えた場合、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームの最大発熱速度は試験体の厚さによる差はほとんどなかった。これは、フェノールフォームは厚さがそれほどないが密実で強固な炭化層

ができ、フェノールウレタンフォームは密実で強固でないが厚い炭化層ができるため、ともに自己消炎性が非常に強く、深さ 15mm 面よりも上部が損傷等を受けるだけであり、深さ 15mm 面より下部は影響しないためと考えられる。しかしポリウレタンフォームは、試験体の厚さが 30mm から 50mm になると最大発熱速度は大きくなった。そして試験体の全ての厚さにおいて、発泡断熱材間で最大発熱速度は危険率 1%水準で有意差が認められた。

(4) 試験体の損傷範囲

図 5 に示した試験体表面および試験体表面から深さ 15mm の面における損傷範囲は、欠損範囲を示す損傷口径と炭化範囲を示す炭化径を測定した。また試験体断面は、欠損深さを示す損傷深さおよび炭化深さを測定した。

ア 試験体表面の損傷範囲

(7) 試験体表面の損傷口径

試験体表面の欠損範囲を示す試験体表面の損傷口径の測定結果を図 10 に示す。横軸に左から発泡断熱材の種類、小球の加熱温度、小球の球径及び試験体の厚さをとり、縦軸に表面の損傷口径を示した。この結果、表面の損傷口径は、ポリウレタンフォームが最も大きい値を示した。

小球の加熱温度を変えた場合、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームの表面の損傷口径は小球の加熱温度による差はなかったが、ポリウレタンフォームの表面の損傷口径は小球の加熱温度が 700℃ から 1,300℃ と高くなるにつれてやや大きくなった。またすべての小球の加熱温度において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

次に小球の球径を変えた場合であるが、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて表面の損傷口径が大きくなる傾向があった。また全ての小球の球径において、小球の加熱温度と同様に発泡断熱材間の損傷口径は危険率 1%水準で有意差が認められた。

試験体の厚さを変えた場合、試験体の厚さ 30mm と 50mm の表面の損傷口径には差があまりなかった。これも小球の加熱温度と同様に、全ての試験体の厚さにおいて発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

(イ) 試験体表面の炭化径

試験体表面の炭化範囲を表わす試験体表面の炭化径は、図 11 に示したとおりである。横軸に左から発泡断熱材の種類、小球の加熱温度、小球の球径及び試験体の厚さをとり、縦軸に表面の炭化径を示した。この結果、表面の炭化径はフェノールフォームが最も小さい値を示した。

実験方法の要因ごとに表面の炭化径をみると、小球の加熱温度を変えた場合、小球の加熱温度が 700℃ から 1,300℃ と高くなるにつれて、表面の炭化径は大きくなる傾向があり、フェノールウレタンフォームで特に顕著であった。これは、フェノールフォームとポリウレタンフォームの火炎が、試験体表面に対して垂直上方向にだけ立ち上がったのに対し、フェノールウレタンフォーム

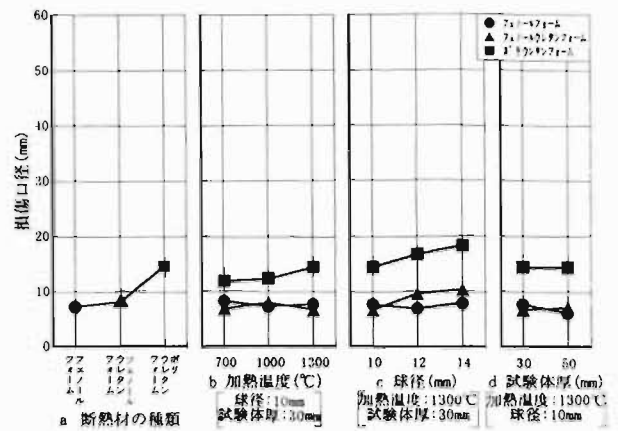


図 10 試験体表面の損傷口径と実験要因

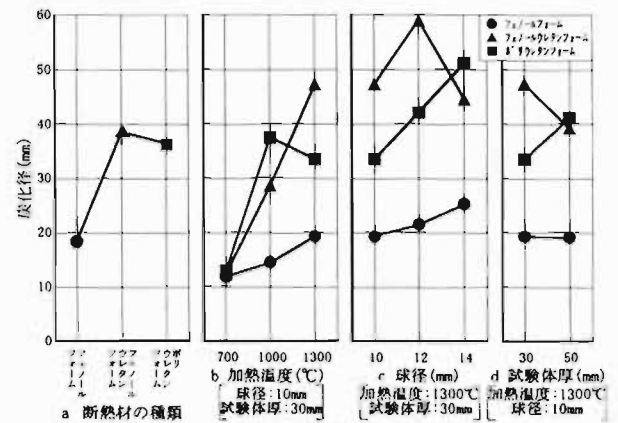


図 11 試験体表面の炭化径と実験要因

の火炎は、初期時垂直上方向に立ち上がり、途中からこの垂直上方向の火炎は弱まり、小球の熱によって試験体表面から隆起した炭化部分の表面の亀裂や空隙などから試験体表面に対して水平方向等に火炎が噴出した。この水平方向等の火炎は、垂直上方向の火炎と同様に小球の加熱温度が高くなるにつれて大きくなるため、フェノールウレタンフォームの試験体表面の炭化径は、小球の加熱温度が高くなるにつれて顕著に大きくなったと考えられる。また、小球の加熱温度のうち、小球の加熱温度が 700℃ の場合は、発泡断熱材間に有意差が認められなかった。

次に小球の球径を変えた場合、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて、表面の炭化径は大きくなる傾向があった。またすべての小球の球径において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められ、特に小球の球径が 12mm の場合に顕著であった。

試験体の厚さを変えた場合、表面の炭化径は発泡断熱材ごとに異なり、フェノールフォームは厚さによる表面の炭化径の差はなく、フェノールウレタンフォームは厚さが厚くなるにしたがって表面の炭化径は小さくなり、これに対してポリウレタンフォームは厚さが厚くなるにしたがって表面の炭化径は大きくなった。また試験体の厚さが 30 mm の場合に、発泡断熱材間に危険率 1%水準

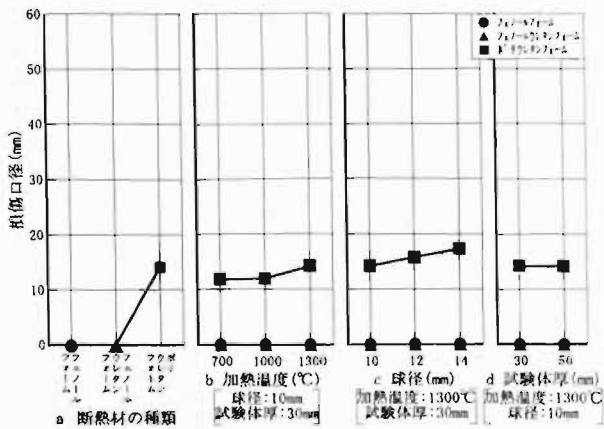


図 12 深さ 15mm 面の損傷口径と実験要因

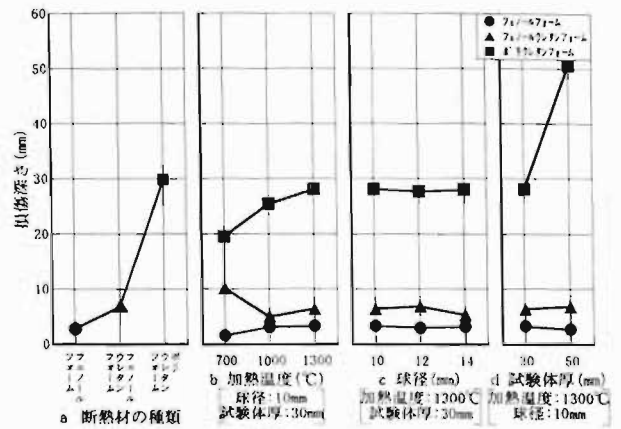


図 14 損傷深さと実験要因

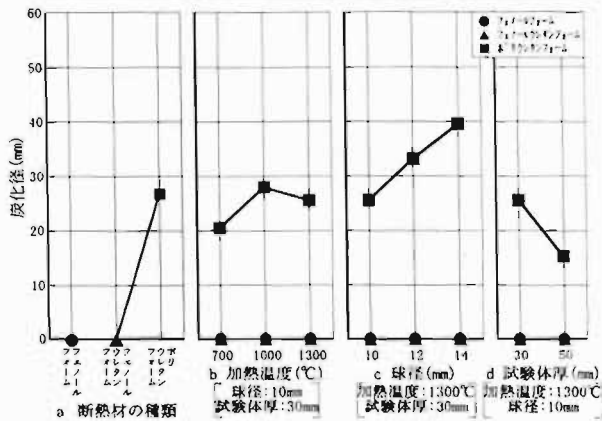


図 13 深さ 15mm 面の炭化径と実験要因

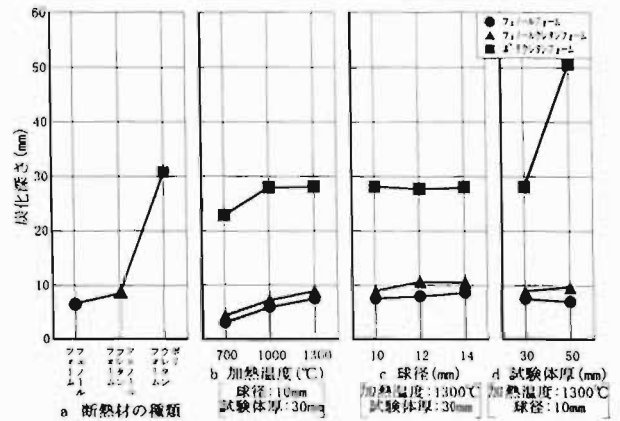


図 15 炭化深さと実験要因

で有意差が認められ、試験体の厚さが 50 mm の場合には、発泡断熱材間に危険率 5% 水準で有意差が認められた。

イ 試験体の深さ 15mm 面の損傷範囲

試験体表面から深さ 15mm の面における穴および炭化部は、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームには存在しなかった。

(ア) 試験体の深さ 15mm 面の損傷口径

図 12 に示すように、深さ 15mm 面においては、ポリウレタンフォームに唯一穴が存在した。ポリウレタンフォームは、小球の加熱温度が 700°C から 1,300°C と高くなるにつれ、また小球の球径が 10mm から 14mm と大きくなるにつれて、損傷口径が大きくなった。また試験体の厚さによる深さ 15mm 面の損傷口径の差はみられなかった。

(イ) 試験体の深さ 15mm 面の炭化径

試験体表面から深さ 15mm の面の炭化径は、図 13 に示すとおりであり、深さ 15mm 面の損傷口径と同様にポリウレタンフォームに唯一炭化部が存在した。ポリウレタンフォームは、小球の加熱温度が 700°C から 1,300°C と高くなるにつれて深さ 15mm 面の炭化径は大きくなる傾向を示した。また、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて炭化径は深さ 15mm 面の損傷口径よりも急激に大きくなった。これは、ポリウレタンフォームの自己消炎性が比較的強く、小球が深さ 15mm 面を

数秒で通過したため、損傷口径はそれほど大きくならなかったが、小球の球径が大きいほど小球が下地面に到達したときの小球上端部と深さ 15mm 面までの距離が短いため下地面に到達した小球からの放熱が急激に大きくなるためと考えられる。また、試験体の厚さが厚くなるに従い炭化径は小さくなった。これは、試験体厚 50mm の場合は深さ 15mm 面通過時の熱伝導による損傷等が主であるのに対し、試験体厚 30mm の場合はこれに加えて下地面に到達した小球の上端部と深さ 15mm 面までの距離が短い下地面に到達した小球からの放熱も受けるためと考えられる。

ウ 試験体断面の損傷範囲

(ア) 試験体断面の損傷深さ

試験体断面の欠損深さを示す損傷深さは、図 14 に示したとおりであり、ポリウレタンフォームの最小損傷深さが 19.50mm と深く、フェノールウレタンフォーム、フェノールフォームの最大損傷深さがそれぞれ 10.22mm、3.32mm であり、ポリウレタンフォームが最も深かった。また損傷深さが最も浅かったのは、フェノールフォームであった。なお、小球の加熱温度 1,300°C のポリウレタンフォームは、結果一覧の表 3 に示すように、試験体の厚さに関係なく、すべて試験体裏面まで貫通していた。

次に実験方法の要因ごとにもみると、小球の加熱温度を

変えた場合、小球の加熱温度が 700℃から 1,300℃と高くなるにつれて損傷深さは大きくなる傾向がみられた。この傾向は、特にポリウレタンフォームで顕著であった。また、すべての小球の加熱温度において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

小球の球径を変えた場合、小球の球径による損傷深さの差はあまりみられなかった。また、すべての小球の球径において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

試験体の厚さの場合、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームは厚さが厚くなるにつれて損傷深さは小さくなったが、これらに対してポリウレタンフォームは厚さが厚くなるにつれて損傷深さは大きくなった。また、すべての小球の球径において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められ、特に試験体の厚さが 50mm の場合が顕著であった。

(イ) 試験体断面の炭化深さ

試験体断面の炭化深さは、図 15 に示したとおりである。ポリウレタンフォームの最小炭化深さが 22.88mm と深く、フェノールウレタンフォーム、フェノールフォームの最大炭化深さがそれぞれ 10.60mm、8.57mm であることから、損傷深さと同様に、ポリウレタンフォームが最も深かった。また、炭化深さが最も浅かったのも、損傷深さと同様にフェノールフォームであった。なお、小球の加熱温度 700℃以外のポリウレタンフォームは、試験体裏面まで炭化がすべて達していた。

実験方法の要因別にみると、小球の加熱温度を変えた場合、小球の加熱温度が 700℃から 1,300℃と高くなるにつれて炭化深さは大きくなる傾向がみられた。特にこの傾向は、ポリウレタンフォームで顕著であった。また、すべての小球の加熱温度において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

次に小球の球径を変えた場合であるが、小球の球径が 10mm から 12mm、14mm と大きくなるにつれて炭化深さは大きくなる傾向がみられた。また、すべての小球の球径においても、小球の加熱温度と同様に、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。

試験体の厚さを変えた場合、フェノールフォームとフェノールウレタンフォームは、試験体の厚さが 30mm から 50mm と厚くなるにつれて炭化深さが小さくなった。これに対して、ポリウレタンフォームは、試験体の厚さが厚くなるにつれて炭化深さは大きくなった。また試験体の全ての厚さにおいても、小球の加熱温度や球径と同様に、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。特に試験体の厚さが 50mm の場合に顕著であった。

5 まとめ

以上の結果を実験方法の要因ごとに述べると以下のようになった。

(1) 発泡断熱材の種類

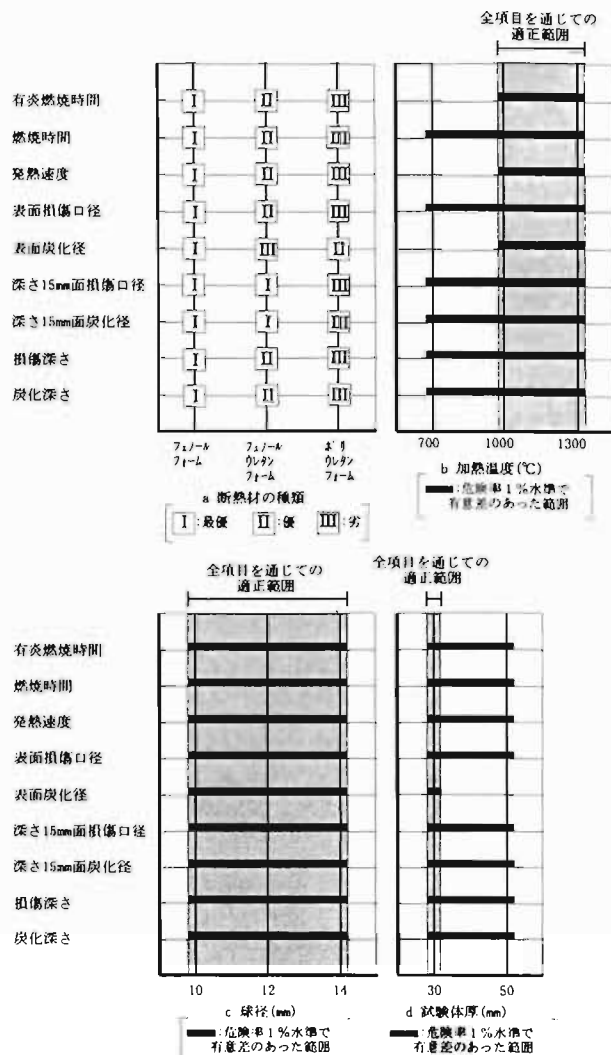


図 16 各要因における有意差の認められた水準の範囲 (危険率 1%水準)

発泡断熱材の種類については、図 16a に示すように、測定項目ごとに 3 段階に分類した。なお、「I」が建築防火的に最も優れており、「II」が優れており、「III」が劣っているとした。

フェノールフォームは、すべての測定項目において建築防火的に最も優れていた。そして、フェノールウレタンフォームは、試験体表面から深さ 15mm 面の損傷口径と炭化径において建築防火的に最も優れており、試験体表面の炭化径において劣っていたが、これ以外は優れていた。ポリウレタンフォームは、試験体表面の炭化径においては建築防火的に優れた性質を示したが、その他の測定項目では劣っていた。

以上のことから今回の実験結果を総合的に判断すると、フェノールフォームが建築防火的に最も優れ、次にフェノールウレタンフォームが優れており、ポリウレタンフォームが劣っていたといえる。

(2) 小球の加熱温度

小球の加熱温度については、図 16b に示すように、測

定項目ごとに発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められたこれらの区間を横棒で示した。

小球の加熱温度が 1,000℃および 1,300℃の場合は、すべての測定項目で、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。次に、小球の加熱温度 700℃の場合は、有炎燃焼時間、発熱速度および試験体表面の炭化径の測定項目において発泡断熱材間に有意差が認められなかったが、その他の測定項目では危険率 1%水準で有意差が認められた。

以上のことから今回の実験結果を総合的に判断すると、小球の加熱温度は、すべての測定項目において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた図の着色部分の 1,000℃および 1,300℃が適しており、特に 1,300℃は高炭素鋼の融点(1,327~1,447℃)に近いことから最も適しているといえる。

(3) 小球の球径

図 16c に示すように、小球の球径も、小球の加熱温度と同様に、測定項目ごとに発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められたこれらの区間を横棒で示した。

その結果、すべての小球の球径 10mm、12mm、14mm において、すべての測定項目で、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められ、図に示すようにどれもが適しており、溶断溶滴の最大球径約 10mm を考慮すると、小球の球径は 10mm が最も適しているといえる。

(4) 試験体の厚さ

図 16d に示すように、試験体の厚さについても、小球の加熱温度と同様に、測定項目ごとに発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められたこれらの区間を横棒で示した。

試験体の厚さが 30mm の場合は、すべての測定項目において、発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた。次に、試験体の厚さが 50mm の場合は、試験体表面の炭化径において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められなかった。

以上のことから今回の実験結果を総合的に判断すると、試験体の厚さは、すべての測定項目で発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差が認められた図の着色部分の 30mm が最も適しているといえる。

6 結論

以上のことを要約すると次のとおりである。

(1) 発泡断熱材の燃焼性

本実験に使用した 3 種類の発泡断熱材の燃焼性を評価した結果、フェノールフォームが建築防火的に最も優れ、次にフェノールウレタンフォームが優れており、ポリウレタンフォームが劣っていた。

(2) 小球の加熱温度

本実験に採用した小球の加熱温度 700℃、1,000℃、1,300℃のうち、すべての測定項目において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差があり高炭素鋼の融点に近い 1,300℃が、発泡断熱材の燃焼性を評価する上で、小球の加熱温度として最も適していた。

(3) 小球の球径

本実験に採用した小球の球径 10mm、12mm および 14mm のすべてが、すべての測定項目において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差があり、溶断溶滴の最大球径約 10mm を考慮すると、発泡断熱材の燃焼性を評価する上で、小球の球径は 10mm が最も適していた。

(4) 試験体の厚さ

本実験に採用した試験体の厚さ 30mm、50mm のうち、すべての測定項目において発泡断熱材間に危険率 1%水準で有意差のあった厚さ 30mm が、発泡断熱材の燃焼性を評価する上で、試験体の厚さとして最も適していた。

[参考文献]

- 1) 荻原隆一、山野寛治、西田佳嗣：溶接火花による可燃物の着火危険性、火災、Vol. 32、No. 5、pp. 8~12、1982 年
- 2) 岸谷孝一ほか 4 名：倉庫に使用する断熱材の燃焼性試験方法の開発に関する研究(その 1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1799、1800、昭和 54 年 9 月
- 3) 岸谷孝一ほか 4 名：倉庫に使用する断熱材の燃焼性試験方法の開発に関する研究(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1801、1802、昭和 54 年 9 月
- 4) 石井勇五郎、加藤昇：アーク溶接による火災について、火災、Vol. 32、No. 5、pp. 1~7、1982 年
- 5) 日本機械学会：機械工学便覧(新版) 応用編 B4 材料学・工業材料、丸善、1990 年

STUDY ON EVALUATING METHOD OF COMBUSTIBILITY
OF THERMAL INSULATION MATERIALS
(FLAMMABILITY EXPERIMENT USING A CONSTANT VOLUME HEAT SOURCE OF STEEL BALL)

Hitoshi SAITO*, Yasuhiro YAMAMOTO**, Shinichi SUGAWARA***

Abstract

This paper is intended to study the evaluating method of combustibility of thermal insulation materials such as phenolic foam, phenol modified polyurethane foam (phenol-urethane foam) or polyurethane foam, etc., comparing the combustibility of these thermal insulation materials. It was tried to measure the flaming time, burning time, rate of heat release, carbonized extent, etc., immediately after a heat steel ball was dropped on thermal insulation materials. We discussed about the test results of evaluating method with a constant volume heat source of steel ball by which the combustibility of the thermal insulation materials of the several kind of foams was estimated.

*First Laboratory **Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics
*** Graduate School of Engineering, Tokyo Univ.