

# 生産工場における新防火区画システムの開発（その1）

——発泡性塗料を用いた天井面火炎伝播の防止対策——

村岡 宏 本間 正彦  
宮川 保之

## Development of New Fire Compartment System for Factories (Part 1)

——Measures for Preventing Fire Spreading on the Ceiling Using Intumescent Paint——

Ko Muraoka Masahiko Honma  
Yasuyuki Miyagawa

### Abstract

A fire compartment system for factories was designed. This system consists of a steel truss beam with steel bars attached at regular intervals, a steel mesh and a screen made of glass cloth with superior heat resistance. Steel bars attached to truss beams and meshes were painted with intumescent paint. The paint swells up in case of fire and forms fire walls, thus preventing the spread of flames on the ceiling while screens stop the spread of fire caused by radiant heat. To confirm the performance of this system, half-scale model experiments were conducted. The results of the experiments show that the temperature of the non-fire side near the trusses is about 200K lower than that of the fire side, and that heat flux to the ceiling surface of the non-fire side is less than half of that of the non-partition case. The results also show that heat flux to the non-fire side ceiling when there is no swelling does not cause fire to spread to the non-fire compartment.

### 概 要

生産工場を対象とした防火区画システムを考案した。このシステムは金属製の棒材を横方向に一定方向に取り付けた鉄骨トラス梁、および金属製メッシュに熱発泡性塗料を塗布したものと、耐熱ガラスクロス製スクリーンから成る。火災時には塗料が発泡し、防火壁を形成することで天井面の火炎伝播を防止し、スクリーン部は床付近の可燃物の水平延焼を防止する。このシステムの延焼防止性能を確認するために縮尺1/2の模型による燃焼実験を行った結果、天井面に沿って水平に移動する熱気流温度が非火災側では火災側に対して200℃程度降下することや、非火災側の天井面への入射熱量が、区画無しの場合の半分以下に抑えられることが判明した。また、塗料が発泡するまでに非火災側の天井面にある程度の熱流が入射するが、その加熱時間・強度から考えて、天井部材等が一般的に使われる建材であれば、延焼する可能性は少ないことが判明した。

#### 1. はじめに

生産工場の防火区画は建築基準法では用途上の理由から適用除外とされる場合が多い。しかし、近年の自動化された大規模生産工場では、一度火災が発生すると、生産ライン全体がストップし、当該工場のみならず関連する企業に多大な損害をもたらす。したがって、このような生産工場においては現状の生産機能を大きく妨げることなく火災の規模を最小限に食い止めるシステムの開発が急務である。この要件を満足するための主な手段としては火災を早期に感知し、消火するシステムのほか、区画を形成し、延焼を防止するシステムが考えられる。今回は、後者の延焼防止システムとして発泡性耐火塗料と耐火スクリーンを用いた簡易的な防火区画を形成するシステムを考案し、その性能確認実験を行った。

#### 2 新防火区画システムの概要

工場では様々な配管やケーブルが天井付近に設置されており、リニューアル工事として防火シャッター等を設置するためには、これらを避けて設置する必要がある。また、天井付近の区画手段として耐火ボード等を用いた場合、天井付近の見通し・空気の流動が阻害される。そこで、金属製の棒材を一定間隔で取り付けた鉄骨トラスや金属製のメッシュにより天井付近の区画を形成し、これに熱発泡性塗料を塗布したものを考案した。火災時にはこの塗料が発泡し、棒材間やメッシュの目が埋まり防火壁となり、天井面を伝播する火炎及び高温の熱気流を遮断することで、火災の延焼を阻止する。また、床面付近の区画としては火災時に感知器連動降下する延焼防止用スクリーンを設置する。このスクリーンは柔軟性があ

り、床面に置かれた生産ラインの機械類に対してはのれん状に切れ込みを入れること等によりこれらの障害物に追従して区画を形成できる。Fig. 1に新防火区画システムの概念図を示す。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験装置

丸鋼を一定間隔で設置した鉄骨トラス梁と金属製メッシュに発泡性耐火塗料を塗布したもの、さらに、その直下に設置されたスクリーンにより形成される防火区画の延焼防止性能を1/2スケールの模型を用いた燃焼実験により確認した。火源にはクリブ (スギ材: 30×40×900 9本×12段) を用いた。最大発熱速度は約1870kWである。実大スケールでは相似則 ( $nQ = nL^{5/2}$ ) を用いて換算すると約10,600kWに相当する。延焼防止性能の評価のため10カ所における温度計測 (K型熱電対 素線径0.3mm)、2カ所での熱流計測 (Gardon型熱流計)、および1カ所での放射熱計測 (Gardon型熱流計+サファイア窓付き) を行った。各計測はデータロガーにより10秒間隔で記録された。また、目視により受熱の程度が容易に把握できるように、段ボール紙 (100×200) に感熱紙を張り付け、一定間隔で設置した。そして、各感熱紙が黒変した時間 (表面温度約60℃で黒変) および各段ボール紙が着火した時間 (表面温度約260℃で着火) を記録した。試験体および測定位置をFig. 2に示す。なお、熱発泡性耐火塗料には英国ナリファイア社製のシステムS (屋内用) を用いた。

#### 3.2 実験ケース

延焼防止策を何も施さない比較のための基準実験と鉄骨トラスの丸鋼ピッチ (Fig. 2参照)、メッシュ、耐火塗料の塗り厚、スクリーン材等の条件を変えた8ケースを行った。実験ケースをTable 1に、メッシュの寸法をTable 2に示す。ケース7は塩化ビニル樹脂コーティングガラスクロスを用い、それ以外はすべてシリコン樹脂コーティング耐熱ガラスクロス (厚さ0.6mm) を用いた。ケース5ではスクリーンを床1mまでとし、評価用可燃物Aの位置にキャブタイヤケーブル2本 (長さ300mm、径18mmおよび14mm) をトラスと平行に設置した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 実験結果

基準実験の状況をPhoto 1に示す。この実験では防火区画がないため自由空間に近い燃焼形態となり火炎および熱気流はほぼ垂直に立ち上った。燃焼継続時間は約12分であった。これに対してケース1以降では火源近傍にスクリーンが存在するため、火炎および熱気流はスクリーン側に傾斜しながら上昇した。ケース1ではトラス部分の耐火塗料は点火後6分より発泡を開始した。この時の

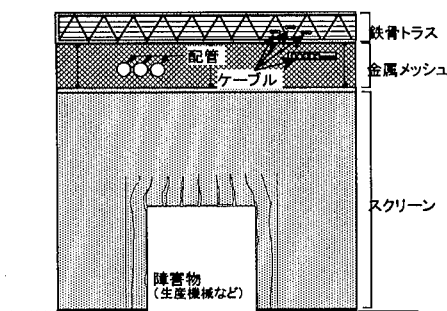


Fig. 1 システムの概念図  
Concept of System

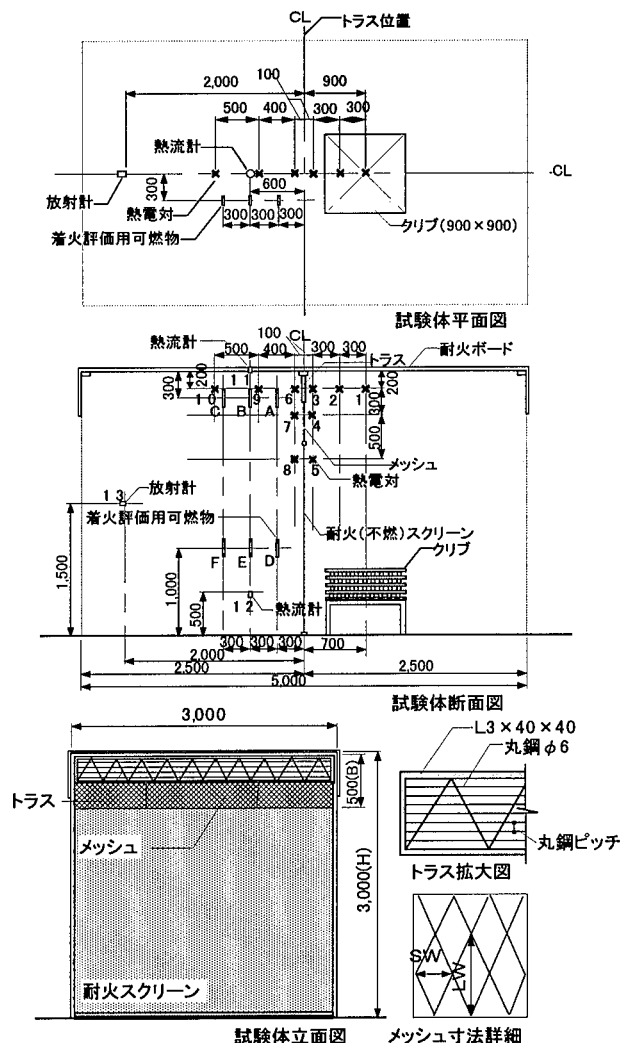


Fig. 2 試験体および測定位置図  
Apparatus and Measuring Points for Experiments

Table 1 実験ケース  
Condition of Experiments

| 実験ケース | B/H #1 | 丸鋼ピッチ (mm) | 金属メッシュ | 耐火塗料 #2 | スクリーン材種類 #3 | 備考        |
|-------|--------|------------|--------|---------|-------------|-----------|
| 基準    | -      | -          | -      | -       | -           | 防火区画なし    |
| 1     | 1/6    | 30         | 細      | 1mm厚    | A           |           |
| 2     | 1/6    | 40         | 粗      | 1mm厚    | A           |           |
| 3     | 1/6    | 50         | 粗      | 1mm厚    | A           |           |
| 4     | 1/6    | 50         | -      | -       | A           | メッシュ、塗料なし |
| 5     | 1/6    | 30         | 細      | 1mm厚    | A           | スクリーン下部開放 |
| 6     | 1/6    | 30         | -      | 1mm厚    | A           | メッシュなし    |
| 7     | 1/4    | 30         | -      | 1mm厚    | B           | メッシュなし    |
| 8     | 1/4    | 30         | -      | 2mm厚    | A           | メッシュなし    |

\*1 B/H: 天井下端からスクリーン上端/天井下端から床面 (Fig. 2参照)  
\*2 耐火塗料: 1mm厚→塗布量2.3kg/m<sup>2</sup>, 2mm厚→塗布量4.6kg/m<sup>2</sup>  
\*3 A: シリコンコーティング耐熱ガラスクロス B: 塩化ビニルコーティングガラスクロス

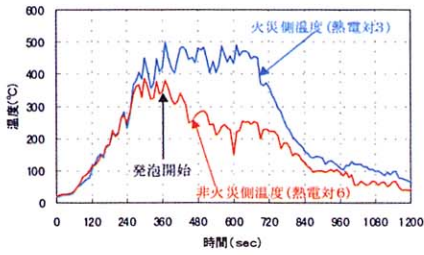


Fig. 3 トラス前後の温度推移 (ケース1)  
Temperatures before and behind the Truss (Case 1)

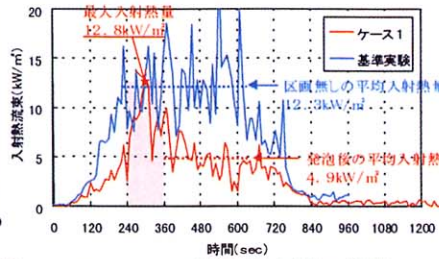


Fig. 4 天井面入射熱の推移  
Variation with Time of Heat Fluxes to the Ceiling Surface

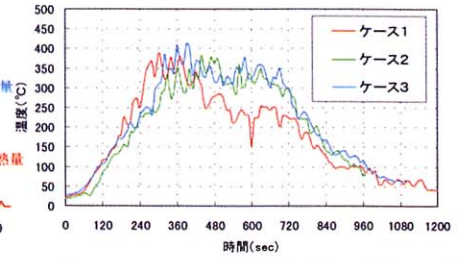


Fig. 5 トラス非火災側の温度の比較  
Comparison of the Non-fire Side Temperatures of Truss

Table 2 金属メッシュの寸法  
Size of Steel Mesh

| メッシュ種類 | LW(mm) | SW(mm) |
|--------|--------|--------|
| 細      | 50.8   | 22.0   |
| 粗      | 76.2   | 34.0   |



Photo 1 基準実験の状況  
Standard Experiment



Photo 2 耐火塗料の発泡状態 (ケース1)  
Swelling of Intumescent Paint (Case 1)



Photo 3 実験時の状況 (ケース2)  
Experiment of Case 2



Photo 4 トラスの発泡状況 (ケース5)  
Swelling of Paint on the Truss



Photo 5 スクリーンの燃焼 (ケース7)  
Combustion of Screen (Case 7)



Photo 6 トラス下部からの火炎噴出  
Blowing of Flames under the Truss

トラス前後の熱気流の温度変化をFig. 3に示す。非火災側の熱気流温度は発泡が始まる6分後より低下し始め、発泡が完了した時点では火災側と比べて約200℃の差が生じた。実験終了後のトラスおよびメッシュ部の塗料の発泡状況をPhoto 2に示す。また、ケース2における燃焼状況をPhoto 3に、ケース5のトラスの発泡状態をPhoto 4に示す。ケース7では、スクリーン表面が火炎に暴露されるにつれて、ビニルコーティングが黒変し、激しく黒煙を放出した。点火4分22秒後にスクリーン表面が着火し、スクリーン上方に火炎が伝播し始めた。黒煙の発生量もさらに増したため、実験継続は危険と判断し、点火5分後消火を行った。この時の状況をPhoto 5に示す。ケース8はトラス下端からスクリーン上端までの開口部分が大きく、金属メッシュがない。また、耐火塗料を2mm厚で塗布している。塗料の発泡状況は外見上は1mm厚と同様であったが、過度に発泡した塗料が、それ自体の重みで下に垂れ下がっているのが部分的に観察された。このケースでは非火災側の天井面への入射熱が発泡後も高い値をとった。これはトラス下部の開口からの火炎の噴出によるものと考えられる。(Photo 6参照)

## 4.2 考察

4.2.1 天井面火炎伝播の防止効果 基準実験とケース1において非火災区画の天井面に入射する熱流束を比較すると (Fig. 4参照), 基準実験では燃焼が最盛期となる点火200秒後から630秒後の平均入射熱が12.3kW/m<sup>2</sup>であるのに対して, ケース1では耐火塗料の発泡が始まる点火360秒後から660秒後までの平均入射熱は半分以下の4.9kW/m<sup>2</sup>となった。ただし, 燃焼が発達する点火240秒後から発泡開始360秒までの入射熱流束は最大12.8kW/m<sup>2</sup>となった。これは, 耐火塗料が発泡して鉄骨トラスが防火壁を形成するまでにある程度の熱が非火災区画へ流入することを意味する。したがって, 着火しやすい可燃物がトラス近傍にある場合は延焼の恐れがあり, 区画近傍での出火拡大を初期の段階で有効に阻止するためには, 天井の鉄骨トラス近傍の可燃物を制御する必要がある。

4.2.2 丸鋼間隔の比較 Fig. 5に実験ケース1, 2, 3における鉄骨トラスの非火災側の気流温度の推移を示す。丸鋼間隔が30mmのケース1では耐火塗料が発泡

Table 3 各種建築材料の着火性試験データ  
Ignition Test Data of Construction Materials

| 材料名          | 材厚(mm) | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s) | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s) | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s)  | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s) | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s) | kW/m <sup>2</sup> | 時間(s) |
|--------------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| PMMA         | 5.0    | 49.2              | 34.3  | 38.0              | 53.2  | 30.2              | 90.5   | 21.0              | 203.6 | 15.6              | 474.9 | 11.0              | N. I  |
| FRP          | 1.1    | 49.2              | 23.2  | 36.8              | 30.4  | 29.4              | 58.2   | 20.5              | 176.7 |                   |       | 13.7              | N. I  |
| PVC板         | 2.0    | 48.1              | 30.4  | 36.8              | 40.4  | 29.4              | 92.7   | 20.5              | 272.5 |                   |       | 13.7              | N. I  |
| ハードボード ρ=0.6 | 5.0    | 59.0              | 19.5  | 47.4              | 26.0  | 35.4              | 44.7   | 24.2              | 88.3  | 16.0              | 199.8 | 11.0              | N. I  |
| インシュレーションボード | 12.0   | 49.8              | 8.5   | 38.8              | 14.4  | 29.3              | 26.9   |                   |       | 17.2              | 110.8 |                   |       |
| パーティクルボード    | 15.5   | 49.8              | 44.0  | 38.8              | 84.2  | 29.3              | 147.0  |                   |       |                   | 491.3 |                   |       |
| 普通合板         | 4.0    | 49.2              | 24.6  | 42.0              | 36.0  | 29.5              | 100.0  | 20.5              | 197.3 | 17.1              | 583.8 |                   |       |
| 難燃合板 S40     | 3.8    | 50.1              | 33.6  | 39.2              | 64.6  | 29.1              | 185.2  | 20.5              | 505.4 |                   |       |                   |       |
| ポリエステル化粧板    | 2.8    | 55.0              | 16.1  | 44.0              | 29.4  | 35.0              | 46.5   | 25.5              | 80.3  |                   |       |                   |       |
| 塩ビ鋼板 8-2     | 1.0    | 48.0              | 31.2  | 44.2              | 34.2  | 33.0              | 51.3   | 23.0              | 70.6  | 21.0              | 101.1 | 14.0              | N. I  |
| 断熱垂鉛鉄板       | 6.0    | 52.5              | 54.1  | 43.7              | 74.3  | 35.0              | 138.5  |                   |       |                   |       |                   |       |
| 化粧石膏ボード      | 8.8    | 50.8              | 55.2  | 40.0              | 99.8  | 29.3              | (N. I) |                   |       |                   |       |                   |       |
| ロックウール板      | 9.4    | 50.8              | 18.0  | 41.3              | N. I  |                   |        |                   |       |                   |       |                   |       |

\*N.Iは着火せず、( )は試験回数2個以下の平均値

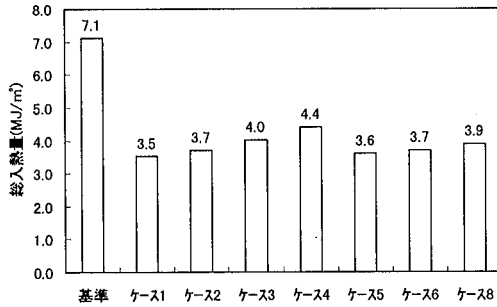


Fig. 6 天井面総入熱量の比較  
Comparison of Total Heat Fluxes to the Ceiling Surface

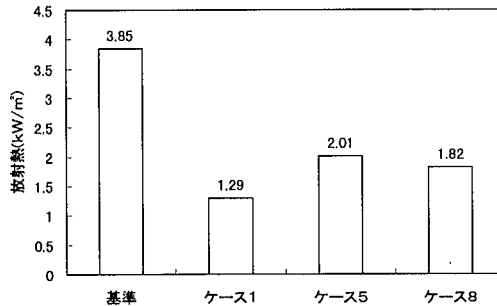


Fig. 7 スクリーン正面の放射受熱量の比較  
Comparison of Radiant Heat Fluxes in front of the Screens

を開始する点火6分後より温度が低下し、250℃程度で定常となる。これに対して、丸鋼間隔が40mmのケース2、50mmのケース3では気流温度の低下がほとんど見られない。非火災区画天井面への総入熱量 (Fig. 6参照) ではこの違いが明らかであり、ケース1、2、3の順に総入熱量が大きくなった。つまり、丸鋼間隔が小さい程延焼防止効果が大きいと言える。

4.2.3 スクリーンの効果 基準実験では、火源近傍の延焼評価用可燃物が実験開始7分40秒後に着火した。スクリーンの有無による横方向の放射熱の違いを比較すると (Fig. 7参照) 基準実験では放射受熱量の最大値が3.85kW/m<sup>2</sup>と最も大きい。一方、スクリーンの防護面積が最も大きいケース1の放射受熱量は最大1.29kW/m<sup>2</sup>であり、基準実験の約1/3である。スクリーン下部を開放したケース5、スクリーンの上端がケース1よりも低いケース8ではそれぞれ、ケース1よりも放射受熱量が大きい。放射受熱量は火災域の見かけの面積に依存するため、スクリーンの防護面積が大きい程放射受熱量を低く抑えられ、延焼防止に有効である。

## 5. 生産工場に対する今後の展開と課題

耐火塗料の発泡の時間遅れについて考えた場合、流出する熱流は実大レベルでは13kW/m<sup>2</sup>で170秒間である。(加熱時間については相似則  $nt = nL^{1/2}$  を考慮) この時間以内にこの熱流に暴露されても着火しない材料を選択すればよい。Table 3は一般的な建築材料の着火性試験データを示しているが、加熱強度13kW/m<sup>2</sup>、加熱時間170秒ではどの材料でも着火に至らないことがわかる。但し、これは想定する火災の発熱速度が10,600kW以下である場合に限る。今回の実験で最も効果があったのはケース1のシステムであり、実際の工場に採用する際にもこのシステムを基本仕様とするのが望ましい。発泡性耐火塗料については施工後のメンテナンスフリー化や発泡性能の向上が今後の課題である。前者は高湿度環境における発泡層の劣化の問題が対象となる。また、後者は塗布部材の熱容量が最小となる断面形状 (例えば、うすい平板) の検討も一つの方法である。その他、床面付近に設置された生産機械類の形状に追従して区画を形成するスクリーンシステムの検討も必要となる。

## 6. まとめ

生産工場を対象とした防火区画を考案し、延焼防止性能を確認するための実験を行った。実験の結果、火災時には天井トラス付近の耐火塗料が加熱され、発泡することで防火壁を形成し、隣接ゾーンへの延焼防止に効果を発揮することが確認された。また、耐火塗料が発泡するまでに時間がかかり、発泡が完了するまでにある程度の熱流が非火災区画側の天井面に入射するが、一般的な建築材料を使用すれば、入射する加熱強度・加熱時間から考えて延焼拡大の危険性は少ないことが判明した。ただし、これは実験で想定した火源が実火災の上限と仮定する場合に限る。耐火塗料の塗り厚、塗布部材間隔、スクリーンの材質については最適設計に有用な知見が得られた。塗布部材の形状、床面付近の延焼防止技術については今後さらに実験を行い、検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 日本建築センター：建築物の総合防火設計法、第2巻、出火拡大防止設計法