局部火災加熱される建築部材の温度応答予測

—有限要素法による梁部材の伝熱解析—

NUMERICAL PREDICTION OF THERMAL RESPONSE OF BUILDING COMPONENTS EXPOSED TO LOCALIZED FIRES

—FEM thermal analysis of a steel beam—

若松 高志*, アレキサンダー プチェリンツェヴ**, 長谷見 雄二***

Takashi WAKAMATSU, A. V. PCHELINTSEV and Yuji HASEMI

Three dimensional transient analysis of temperature field for a steel beam installed beneath a ceiling and exposed to a localized fire source has been done. A general-purpose finite element code ANSYS was used for the calculations. Experimental heat fluxes to the beam surface were applied as boundary conditions. A correction method is proposed to derive net heat flux from incident heat flux data. In order to verify the simulations, correspondence has been examined on the temperature field between the data of former experiments and the results of analysis. The satisfactory agreement between the experimental and the calculated results confirms the effectiveness of the finite element method for determining the temperature field in the structural members exposed to a localized fire.

Keywords : localized fire, steel structure, beam, finite element method, thermal analysis, fire resistance

局部火災、金属構造、梁、有限要素法、伝熱解析、耐火

1. はじめに

建築物の構造部材が火災時に受ける加熱は、火災が換気支配型燃焼に達する場合には、部材全体が加熱されるが、アトリウム、ドーム、開放型駐車場などの様に、空間や開口面積に対して可燃物量が小さい空間では、火災が換気支配型燃焼に達せずに燃料支配型燃焼に留まるため、火災時の構造部材の加熱は局部に留まることが予想される。さらに、構造部材が局部加熱される場合、熱伝導率の大きい金属構造部材では、熱伝導によって部材温度が平均化され、直接加熱される部分の温度上昇が抑制されると期待できる。この考え方に基いて、筆者らは、平坦な天井および天井面下の梁について部材の加熱条件を測定し、床上の火源強度と火源・部材の幾何学的条件との関係で整理した^{1),2)}。その結果を伝熱・応力に関する数値計算モデルに入力して部材の温度・熱応力を予測することができれば、局部火災加熱される構造部材の耐火設計の体系が完結することになるが、そのためには部材の温度応答予測に限っても、後述するように境界条件である入射熱について、実験値の補正が必要である。本研究は、天井面下の梁について、これらの補正・実験パラメータの推定法を検討したうえで有限要素法による温度応答の数値計算を行い、実験結果との比較を通じて、計算モデルの妥当性を検証しようとするものである。

計算対象とするのは、図-1 (a)に示す様な寸法 150×75×5×6(mm)、材長 3.6(m)の無被覆のH型普通鋼梁が天井下に設置され、この梁の中央部が床上火源から、局部的に加熱される場合である。筆者らは、この梁部材全体の入射熱および温度分布の測定を行った。実験の詳細は文献²⁾に示すが、入射熱の測定は、スパン中点から片側に、図-1 (b)に示す材軸方向の測定間隔で、それぞれ下フランジ上下面、ウェブ、上フランジ下面に対して行った。熱流計を設置していない片側に、スパン中央に対して熱流計と対称の位置になるように熱電対を配置して、試験体表面温度の測定を行った。本報では、表-1に示す実験条件について、実験より得られた入射熱データを用いて、有限要素法による部材の温度分布の予測を行い、これらの解析結果と実験による温度測定値の比較により解析方法の妥当性の検証を行ったものである。解析には汎用有限要素解析プログラムANSYSを用い、これをパソコン上で実行した。表-2に各実験条件における梁部材各部位への入射熱(単位 kW/m²)の測定値を示す。また、天井下面への入射熱は、平坦な天井を用いた実験¹⁾の測定値のうち、実験条件の最も近いものの測定値を代用したため、同表に代用した実験条件とその測定値を示す。これらの値は部材各部位への入射熱が定常状態に達し、値が安定していた間の測定値の平均であり、表中の距離とは火源直上点から測定点までの水平距離を表す。

* 熊谷組技術研究所 工修

** 全ロシア火災研究所 工博

*** 建設省建築研究所防火研究室 室長・工博

Kumagaigumi Co., Ltd. Institute of Construction Technology, M. Eng.
All-Russian Research Institute for Fire Protection, Ph. D.
Head, Fire Safety Division, Building Research Institute, Dr. Eng.

(a) 試験体寸法詳細図 (mm)

(b) 入射熱量測定位置 (mm)

図 - 1 梁寸法および測定位置

2. 熱解析

2.1 解析モデルの作成

表-2より、H型鋼梁各部位への入射熱を比較すると、入射熱は、火源直上点から材軸方向への距離が増すにしたがって減衰している。また、火源直上からの距離が同じであっても、部材の面の方により入射熱にかなりの差が生じているため、ここでは3次元過渡伝熱解析を行った。過渡伝熱解析は、熱荷重の時間変化や、それに伴う温度分布の変化等を計算するのに適しており、定常伝熱解析との主な違いは蓄熱等の時間の効果が含まれている点である。解析の対象は、天井およびその下面に位置するH型鋼の梁の中央が床上の火源に加熱される熱伝導形態であるため、対称性を利用して全体の1/4の部分の解析を行うこととした。図-2に解析に使用した有限要素モデルを示す。これらのモデルを構成する各要素は、それぞれ3次元の熱伝導機能を備え、定常および過渡伝熱解析に適用できる3次元伝熱要素を使用した。この要素は、要素に8つの節点を有し、各節点にそれぞれ1自由度(温度)をもつ。また、梁と天井面のうち火源に面する部分の要素(以後加熱面と呼ぶ)に対しては、部材から周囲空気への再放射を考慮し、さらに両部材には、実験により得られた入射熱(表-2参照)を荷重条件として与えた。天井裏面(以後非加熱面と呼ぶ)は、熱伝達率と雰囲気温度から熱損失を考慮した。熱伝達率の詳細等については後述する。

2.2 要素サイズの決定

解析モデルを構成する要素は、部材の位置等により加熱条件が異なるため、サイズを変化させる必要がある。一般的には高温になる部分の(重要度の高い)要素は細かくとる必要がある。本解析では火源直上部分が最も高温になるため、図-2に示すようにこの部分から離れるに従って、徐々に要素の大きさを大きくとる方法を用い、計算時間の短縮を図った。また、鋼材は熱伝導率が高く、また厚さが5~6mmと薄いため、図-3に示すように、厚さ方向は要素分割せずに、断面全体で12の要素を設けた。

2.3 材料特性の定義

温度解析における梁部材(普通鋼)および天井材(無機繊維板)

表-1 実験条件

火源寸法 (m)	発熱速度 Q (kW)	H_a (m)	Q^* (-)	L/H_a (-)
0.5 (円形バーナ直径)	100	1.0	0.51	1.111
	150	1.0	0.76	1.456
	200	1.0	1.01	1.754
	95	0.6	0.48	1.790
	130	0.6	0.66	2.201
	160	0.6	0.81	2.535

表-2 入射熱測定値 (単位kW/m²)

実験条件: 火源発熱速度-100kW 火源・梁下面間距離-1m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	15.5	10.8	6.9	5.1	3.3	1.7	1.2	0.6	0.7
下フランチ上面	6.0	4.7	4.0	3.1	0.8	1.3	1.1	0.7	0.5
ウェブ	5.1	5.3	1.2	4.5	1.1	2.5	2.0	0.8	0.8
上フランチ下面	4.7	3.3	2.5	1.7	0.8	0.9	0.4	0.5	0.4

天井実験の条件: 火源発熱速度-100kW 火源・天井間距離-1m									
天井下面	14.5	14.5	12.0	7.1	5.3	4.4	3.8	1.9	0.95*

(*天井下面1.5mは未測定のため、1.2m地点の値の1/2で近似する)

実験条件: 火源発熱速度-150kW 火源・梁下面間距離-1m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	14.5	9.7	6.0	4.4	2.8	1.4	1.0	0.5	0.5
下フランチ上面	5.1	3.6	3.1	2.4	0.3	1.0	0.9	0.6	0.4
ウェブ	4.8	4.2	3.2	1.6	1.3	1.9	1.6	0.6	0.6
上フランチ下面	4.1	2.4	1.5	1.0	0.2	0.5	0.2	0.3	0.2

天井実験の条件: 火源発熱速度-150kW 火源・天井間距離-1.2m									
天井下面	18.6	17.3	14.1	8.2	4.9	4.3	3.9	2.0	1.0*

実験条件: 火源発熱速度-200kW 火源・梁下面間距離-1m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	37.3	32.7	15.9	7.3	3.0	2.9	1.8	1.1	0.6
下フランチ上面	12.5	11.7	8.6	6.3	2.9	4.9	7.1	0.6	0.3
ウェブ	16.0	18.4	10.6	5.3	4.7	5.7	0.1	0.5	0.3
上フランチ下面	12.8	8.1	5.0	3.0	1.1	1.2	0.7	1.1	0.4

天井実験の条件: 火源発熱速度-200kW 火源・天井間距離-1.2m									
天井下面	40.3	37.1	30.1	16.4	10.8	6.2	2.7	1.6	0.8*

実験条件: 火源発熱速度-95kW 火源・梁下面間距離-0.6m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	34.2	33.3	13.3	8.2	1.6	1.0	0.5	0.3	0.1
下フランチ上面	26.1	17.4	15.8	7.3	4.7	1.6	0.8	0.4	0.2
ウェブ	16.5	14.3	7.2	5.2	2.1	1.3	0.5	0.2	0.1
上フランチ下面	7.9	4.8	2.0	1.3	0.7	0.8	0.1	0.1	0.0

天井実験の条件: 火源発熱速度-100kW 火源・天井間距離-0.8m									
天井下面	25.9	24.9	19.5	9.8	5.9	4.7	3.8	1.4	0.7*

実験条件: 火源発熱速度-130kW 火源・梁下面間距離-0.6m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	51.1	42.0	19.2	10.1	3.3	2.0	1.4	0.9	0.1
下フランチ上面	26.7	26.6	15.7	11.1	4.5	2.8	2.9	1.4	1.0
ウェブ	29.5	28.7	15.5	12.0	5.8	5.1	4.4	2.7	0.9
上フランチ下面	19.4	16.3	13.1	11.2	6.9	4.1	2.0	1.8	0.9

天井実験の条件: 火源発熱速度-130kW 火源・天井間距離-0.8m									
天井下面	43.6	40.6	34.9	17.4	10.7	5.5	2.3	2.2	1.1*

実験条件: 火源発熱速度-160kW 火源・梁下面間距離-0.6m									
距離(m)	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5
下フランチ下面	50.3	40.4	15.6	8.9	2.6	1.8	1.1	0.9	0.3
下フランチ上面	29.7	27.0	22.5	11.5	7.5	3.1	1.1	0.7	0.3
ウェブ	33.1	35.5	25.9	12.9	8.4	3.7	1.7	1.0	0.5
上フランチ下面	20.4	17.3	9.9	6.7	4.2	3.3	2.3	1.8	0.9

天井実験の条件: 火源発熱速度-160kW 火源・天井間距離-0.8m									
天井下面	55.4	47.8	43.5	22.3	13.2	6.8	2.4	1.2	0.6*

図-2 解析に使用した有限要素法モデル

図-3 梁部材断面の要素分割

の材料特性については、図-4、5に示す温度依存性を考慮した。また、材料の密度は鋼材が 7850kg/m^3 一定、無機繊維板が 789kg/m^3 一定と仮定した。

2.4 境界条件の定義

熱解析を行うため境界条件として、自由度の固定、節点に対する面荷重を定義した。

・自由度の固定

温度が収束されていない全ての節点に対して、解析の最初のサブステップに、温度の初期条件として 16°C を定義した。

・荷重の設定

面荷重として、熱伝達境界面・熱流束を定義した。加熱面は熱流束および周囲空気への再放射を考慮するための熱伝達境界面を与え、非加熱面には熱伝達境界面のみを与えた。

2.5 計算における仮定条件

有限要素法による解析を行うにあたり次の3つの仮定をおいた。

- ①解析に用いるモデルの対称軸の断面の部分は、断熱境界とする。
- ②試験体（梁）に入射する熱流束は、表-2に示した実験データに対して、後述する誤差補正を行い、さらに図-6に示すように、材軸方向に対して測定点の間を直線で補間した値を各要素に与えた。
- ③天井下面に入射する熱流束は、前述のように平坦な天井を用いた実験¹⁾の測定値に対して後述する補正を行い、これらの値を、火源直上を中心として、この点から測定点までの距離を半径とする円周上に代入する。また、測定点の間に位置する要素へは、図-6に示すように両端の値を直線で補間した値を代入するものとする。

図-4 梁部材の材料特性³⁾ 図-5 天井部材の材料特性³⁾

3. 熱収支パラメータの推定

3.1 入射熱データの補正

試験体表面への正味熱伝達は、試験体表面温度自体に依存する。しかし実験に使用した熱流計は水冷式であるため、位置が同じでも試験体表面温度 (T_s) と、熱流計測定面の温度 (T_g) にはかなりの温度差が生じている。このことから実験により測定した入射熱データをそのまま入力データとして計算に使用すると、この温度差に起因する誤差が生じると考えられる。試験体表面の熱収支を図-7のようにモデル化すると、試験体表面への正味の入射熱 (q) は次式により表せる。

$$q = q_{\text{EXP}} - h(T_s - T_a) - \varepsilon_1 \sigma(T_s^4 - T_a^4) \dots (1)$$

ただし、 q_{EXP} : 放射強度、 h : 対流熱伝達率、 T_a : 試験体周囲の空気温度、 ε_1 : 試験体表面の放射率、 σ : ステファン・ボルツマン定数。

また、熱流計と試験体表面の温度差による熱伝達率 h の違いが無視できると仮定すると、熱流計が示す入射熱 (q_g) は、

$$q_g = q_{\text{EXP}} - h(T_g - T_a) - \varepsilon_2 \sigma(T_g^4 - T_a^4) \dots (2)$$

ただし ε_2 : 熱流計表面の放射率。

で表すことができる。(1)、(2)式より、試験体表面への正味の入射熱 (q) は熱流計が示す入射熱 (q_g) を用いて、次式により推測することが可能である。

図-6 梁への入射熱分布

$$q = q_g - h(T_s - T_g) - \varepsilon_1 \sigma (T_s^4 - T_a^4) + \varepsilon_2 \sigma (T_g^4 - T_a^4) \quad \dots (3)$$

本解析プログラムでは、輻射の取り扱いに優れた2次元要素 (SUR F22) が用意されているため、全ての要素表面に対してこの要素を張り付け、輻射成分については独立した取り扱いを行った。したがって、解析に使用する入力データは、上式 (3) の右辺第2項により対流成分に対する補正を行い、右辺第3、4項で表される輻射成分のうち、第4項については、 T_g と T_a の差が全体の熱量に対して無視できるほど小さいので、右辺第3項のみで梁部材からの再輻射熱 H_R (kW/m²) を考慮することとした。さらに、(3) 式の右辺第2項における熱流計と試験体の表面温度差に関する誤差補正に関しては、対流熱伝達係数 h を仮定しなければならない。ここで、梁のない平坦な天井面¹⁾が局部加熱を受ける場合について、 q_g の実測値を使って有限要素法による天井平板の温度解析と実験結果を比較し、試行錯誤を繰り返した結果、熱伝達率の値として $h = 0.01 \text{ kW/m}^2\text{K}$ とした場合に計算値と実験値が良く一致した。そこで、条件は多少異なるが、この値を梁の解析にも使用した。この値は、室火災初期の実験等で得られた全熱伝達率の値 $0.03 \sim 0.04 \text{ kW/m}^2\text{K}^{(4)}$ の値に比べると、輻射成分を含んでいないため、低い値となっている。また、今回のような火災実験において、測定する試験体面の温度が高い場合 (例えば 300°C 以上) は、冷却水温を熱流計表面温度と読み替えてもさほど著しい誤差は生じないため⁵⁾、熱流計測定面の温度 (T_g) および周囲空気温度 (T_a) の値には、熱流計を通過した冷却水温度として測定された 303 (K) を代入した。さらに、(3) 式における試験体表面から周囲空気への輻射率 ε_1 は、今回の場合 0.9 とした。

3.2 非加熱面からの対流による熱損失

非加熱面 (天井裏面、温度 T_c) から周囲空気 (T_a) への対流に

図-7 試験体梁表面の熱収支

よる熱損失 H_{Loss} (kW/m²) は、対流熱伝達率を h_c (kW/m²K) とすると下式のように表せる。

$$H_{Loss} = h_c (T_c - T_a) \quad \dots (4)$$

$T_a = 289 \text{ K}$ のときの周囲空気の物性値は、動粘度 $\nu = 0.152 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 、体膨張係数 $\beta = 1/289$ であるから、代表長さ $x = 1.8 \text{ m}$ とすると、局所グラスホフ数 $Gr_x = 7.17 \times 10^{10}$ となる。

ここでプラントル数を $Pr = 0.7$ とすると、(4) 式における平板周りの自然対流熱伝達率 h_c は、 $Ra = Gr \cdot Pr$ で表されるラーリー数 $Ra = 5.016 \times 10^{10}$ となるため、ここでは乱流熱伝達を考えればよい。長方形の板の周辺が開いている場合の板からその上方の空気への上向き方向の乱流熱伝達に対応する経験式⁶⁾としては、次式が提案されている。

$$Nu = (0.13 \sim 0.16) \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad \dots (5)$$

(5) 式において係数は、加熱面の代表長さが小さいほど大きくなる傾向があるが、ここでは平均的な値として 0.145 とした。また、グラスホフ数 $Gr = 7.17 \times 10^{10}$ 、プラントル数 $Pr = 0.7$ を代入するとヌッセルト数は、 $Nu = 534$ となるため、下式

$$h_c = \lambda Nu/L \quad \dots (6)$$

において 16°C のときの周囲空気の熱伝導率 $\lambda = 2.53 \times 10^{-5} \text{ kW/mK}$ 、代表長さ L に天井の短辺長さ 1.8 (m) を代入して対流熱伝達率 h_c を求めると、 $h_c = 0.0072 \text{ kW/m}^2\text{K}$ となる。非加熱面から周囲空気への対流による熱損失は、この値を (4) 式に用いて算出した。

4 計算結果および考察

以上に示した計算条件・境界条件・実験データを基に、6 種類の実験条件について行った解析結果と、実験データの比較を図-8 から 13 に示す。各図において四角いポイントの入った破線は実験値

図-8 材軸方向の温度分布 ($Q: 100\text{kW}$, $H_b: 1\text{m}$)

図-9 材軸方向の温度分布 ($Q: 150\text{kW}$, $H_b: 1\text{m}$)

図-10 材軸方向の温度分布 ($Q: 200\text{kW}$, $H_b: 1\text{m}$)

図-14 梁温度の時間変化 ($Q: 100\text{kW}$, $H_b: 1\text{m}$)

図-11 材軸方向の温度分布 ($Q: 95\text{kW}$, $H_b: 0.6\text{m}$)

図-12 材軸方向の温度分布 ($Q: 130\text{kW}$, $H_b: 0.6\text{m}$)

図-13 材軸方向の温度分布 ($Q: 160\text{kW}$, $H_b: 0.6\text{m}$)

図-15 梁温度の時間変化 ($Q: 200\text{kW}$, $H_b: 1\text{m}$)

を、実線と破線のカーブは解析結果を表しており、また、実験値および計算値は、実験開始7分または20分後に対応する値を示している。各図を比較すると、実験および計算値は比較的良好一致を示しており、誤差の最大値は、図-13に示した発熱速度160kW、火源と部材の距離が0.6mの実験条件で約20%であった。実験条件のうち発熱速度100kWと200kW、高さ1.0mの場合の、火源直上から0.075, 1.5mの位置の下部フランジ・ウェブ・上部フランジの温度の時間変化を解析した計算結果を図-14, 15に示す。発熱速度100kW・高さ1.0mについては、実験において開始25分後にほぼ火源直上の温度が定常に達したが、計算結果においても概ね25分までに火源直上の温度の値はどの部位においても定常に達していることが分かる。しかし火源直上以外の部材各部位の温度は、実験を開始して30分経過しても、依然上昇していることが計算結果より推測できる。発熱速度200kW・高さ1.0mについても、火源直上温度は概ね20分までに定常に達しており、同様の結果が得られた。

5 結論

梁部材の温度分布を有限要素法により解析する手法を検討した結果、次のような知見を得た。

- ①梁の材軸方向の温度分布について、実験で得られた各測定点での入射熱の平均値から、測定点の間を直線で補間した値を各要素ごとに与えた場合、火源直上の温度上昇に対して50%の温度上昇を示した部材の範囲で実験値の約15%、それ以外の範囲でも約20%以内の誤差範囲で解析が可能となった。このことから本報で定めた仮定や境界条件が、この種の局所的な加熱を受ける部材の熱応答予測の実用に即すると考えられる。
- ②入射熱の測定値を数値計算の境界条件として使用する場合、試験体と熱流計の表面温度の差を補正する必要がある、今回の系については換算式において、対流熱伝達率 h の値に、局部加熱を受ける平坦な天井面に関する推定値 $0.01\text{kW/m}^2\text{K}$ をそのまま用いて補正しても、梁温度の計算値と実験値が良く一致することを明らかにした。
- ③天井裏面から周囲空気への対流熱伝達率 h_c は、長方形の板の周辺が開いている場合の、板からその上方の空気への上向き方向の乱流熱伝達に関する経験式による推定値 $0.0072\text{kW/m}^2\text{K}$ とした場合、梁温度の計算値と実験値が良く一致することを明らかにした。
- ④火災加熱による入射熱は部材温度より先に定常に達するので、長時間加熱すれば試験体の破壊が予想される条件でも、入射熱が定常に達した段階で加熱を中止し、そのデータに基づいて定常状態の温度分布を予測することができる。

また、今後の展望として、次の様な事柄があげられる。

- ①実験により部材各部位への入射熱の分布状況が得られているので、これらのデータを使用すれば、解析方法の大きな変更を伴わずに異なる材料（ステンレスやアルミ等）の解析が行える。
- ②試験体端部の拘束条件と材の力学的特性を入力すれば、温度解析と応力解析が連成で行えるようになる。
- ③方法的には、本手法を適用する事により噴出火炎等の部材への影響も計算による解析が可能となる。

但し、今回の実験に使用した梁の寸法比は、一般的な梁部材として使用される頻度の高いものを選択したが、ウェブとフランジの寸法比が大幅に異なるような場合等は、部材各部位への入射熱分布について新たに情報を得る必要があると考える。

付記

本研究は(社)鋼材倶楽部の支援のもとに建設省建築研究所と(株)熊谷組技術研究所の共同研究として実施した。

使用記号一覧

- Gr : グラスホフ数, Gr_x : 局所グラスホフ数,
- h : 対流熱伝達率($\text{kW/m}^2\text{K}$), h_c : 天井裏面の対流熱伝達率($\text{kW/m}^2\text{K}$),
- H_b : 火源と梁下面までの距離(m), H_R : 周囲空気への再放射(kW/m^2),
- H_{Loss} : 天井裏面からの対流熱損失(kW/m^2),
- L : 天井の短辺長さ(m), L_f : 火炎の長さ(m),
- Nu : ヌッセルト数, Pr : プラントル数,
- Q : 火源の発熱速度(kW), Q^* : 無次元発熱速度,
- q : 試験体表面への正味の入射熱(kW/m^2), q_{exp} : 放射強度(kW/m^2),
- q_g : 熱流計が示す入射熱(kW/m^2),
- Ra : レーリー数,
- t_1 : ウェブ厚さ(mm), t_2 : フランジ厚さ(mm),
- T_a : 空気温度(K), T_c : 天井裏面温度(K),
- T_s : 試験体表面温度(K), T_g : 熱流計測定面の温度(K),
- v : 非加熱面付近の空気の流れ速度(m/s),
- β : 周囲空気の体膨張係数代表長さ,
- ϵ_1 : 試験体表面の放射率,
- ϵ_2 : 熱流計表面の放射率,
- λ : 周囲空気の熱伝導率(kW/mK),
- ν : 周囲空気の動粘度(m^2/s),
- σ : ステファン・ボルツマン定数

参考文献

- 1) 横林, 長谷見, 若松, 若松 : 局部火災加熱に暴露される平坦な天井面の加熱性状 局部火災加熱に暴露される構造部材の火災安全設計に関する研究・序説、日本建築学会構造系論文報告集、第484号・1996年6月
- 2) 若松, 長谷見, 横林, 若松 : 局部火災加熱に暴露される建築部材の加熱性状 その2. 天井下面に位置する梁に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(1995, 北海道)
- 3) 財団法人 国土開発技術研究センター 編集、財団法人 日本建築センター 発行 : 建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法 1988年4月
- 4) 長谷見, 吉田, 中林 : 木造内装居室における天井不燃化の防火安全効果「天井不燃・木造壁工法」に基づく内装防火設計に関する研究・I 日本建築学会構造系論文報告集 第446号・1993年4月
- 5) 日本建築学会防火委員会燃焼性小委員会熱流測定マニュアル編集 WG : 火災実験・防火試験における熱流測定マニュアル、社団法人日本建築学会、1995年11月
- 6) 日本機械学会 : 伝熱工学資料(改訂第4版)、丸善、1986

(1996年8月1日原稿受理、1997年3月6日採用決定)