

火災加熱を受ける鋼構造部材の3次元熱流解析モデル

—屋外にある鋼構造部材が火災加熱を受ける場合の温度性状の予測法—

A THREE-DIMENSIONAL HEAT FLOW ANALYSIS MODEL OF STEEL STRUCTURAL MEMBERS UPON FIRE EXPOSURE

—Prediction of temperature of exterior steel structural members exposed to fire—

水野 佳世子*, 若松 孝旺**, 田中 辰明***

Kayoko MIZUNO, Takao WAKAMATSU and Tatsuaki TANAKA

Steel is often used as an assembly of main structure such as columns and beams on external walls of buildings. Such steel structural members lose their structural function when the temperature of the steel rises due to spouting hot gas or radiation heating via openings upon fire in a neighboring compartment. This paper presents a calculation model for predicting temperature of steel structural members upon fire heating and proposes it as a practical tool for evaluation of fire resistance. This model also helps the practical prediction of temperature properties of steel structural members that local heating brings about.

Keywords: steel structure, three-dimensional model, spouting hot gas

鋼構造部材, 3次元モデル, 噴出気流

1 はじめに

鋼構造部材が外壁面に設けられる外部構造の場合、一般に屋内の構造に用いられている耐火被覆材料を用いて被覆することはほとんどない。これは、そうした耐火被覆材料の吸水性、物性の安定性などの面から、被覆材料を露出状態で屋外に用いることが適さないためである。一方、意匠の面からも、鋼構造のダイナミックな構造美を強調するため、鋼材に被覆を施さず裸のまま仕上げるのが屋外の鋼構造に求められているといえる。しかし、そうした鋼構造部材は、火災が発生した場合に窓などの開口部からの噴出気流(火災)や放射熱による加熱を受けて温度が上昇し、その構造機能を損なう可能性がある。

本研究は、以上のような観点の下に、外部鋼構造が火災加熱を受けるときの鋼材の温度性状を予測するための計算モデルを提案し、これを外部鋼構造の耐火設計に資することを目的として行ったものである。なお、ここでは、加熱源として火災区画の窓から噴出する気流の性状と窓からの放射熱を部材温度計算モデルに取り込めるようにモデル化し、部材断面2方向と軸方向を含む3次元熱流場を対象とする計算モデルを提案し、実験との比較による検証(部材断面についての2次元熱流場が放射受熱を受ける場合)を行った。

2 窓開口からの噴出気流が部材へ及ぼす熱的影響

2.1 トラジェクトリの回帰式

窓開口からの噴出気流性状は、まず、トラジェクトリの幾何学特

性およびトラジェクトリに沿っての温度分布で代表される。トラジェクトリの幾何学特性は窓のアスペクト比 n 等によって異なる。トラジェクトリを表す数式を簡単に統一的な形で得ることは難しい。ここでは、トラジェクトリを、窓上端からの高さ z と窓面からの距離 x の関数として、横井による実測値¹⁾からトラジェクトリの回帰式(1)を近似的に求め、これをトラジェクトリの形状特性として計算モデルに導入した。なお、横井による実測値に沿ったより忠実な回帰式を導入する場合には、付録を参照されたい。

$$\left(\frac{z}{H''}\right) = m \left(\frac{x}{H''}\right)^3 \quad (1)$$

ここに、 $m = 2.2 + 0.61n^2$

n : アスペクト比(窓の縦(H)横(B)の比、 $n=2B/H$)

H'' : 窓の中性帯より上の高さ(図1参照)[m]

(1)式の近似的成立範囲は、 $n=6.4$ のとき $z/H'' \leq 0.2$, また、 $n \leq 3.4$ のとき $z/H'' \leq 1.0$ に限られるが、 z/H'' がこの範囲を超えた場合、

$$\left(\frac{z}{H''}\right) < m \left(\frac{x}{H''}\right)^3 \quad \text{すなわち、} \left(\frac{x}{H''}\right) > \left(\frac{z}{mH''}\right)^{1/3}$$

となり、(1)式から得られるトラジェクトリの壁面からの離隔距離は、横井¹⁾の実験値より大きくなる。このことは、トラジェクトリが壁面外にある構造部材により近くなるか、または、噴出気流が部材により高温で当たることを意味する。ゆえに、(1)式は、部材温度予測の実用上安全側の近似となる。しかし、(1)式の適用には、場合に応じて、その範囲や条件を考慮する必要がある。

* 東京理科大学総合研究機構 PD 研究員・博士(理学)

** 東京理科大学総合研究機構 教授・工博

*** お茶の水女子大学 教授・工博

PD, Tokyo University of Science, Ph. D.

Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Prof., Ochanomizu University, Dr. Eng.

2.2 トrajekトリと部材の位置関係と熱的影響

外部構造部材が火災区画の直近の窓開口(以下 窓)から受ける熱的影響は、部材と窓との位置関係、とりわけ、両者の離隔距離が支配的である。部材が窓からの至近距離で噴出気流に当たる場合は、その影響を支配的に受ける。一方、部材が窓から受ける放射熱は、常時、加熱源として支配的な要素となる場合が多い。

本項では、部材とトrajekトリの位置関係から、部材が噴出気流から受ける熱的影響を検討する。

図1は、噴出気流と外部構造部材の関係を略図で示したものである。ここで、トrajekトリの原点は、仮想熱源³⁾とし、窓面上端レベルで窓面から室内側に $x_0(=0.058H)$ 入った位置にあるものとする。部材の窓面からの離隔距離を“C”とし、トrajekトリの窓面からの離隔距離を x/H' で表すと図1より、 $n \geq 6.4$ で、 $C > 0.25H'$ のとき、また、 $n \geq 2.5$ で、 $C > 0.6H'$ のとき、部材はトrajekトリに当たらない。このように、部材とトrajekトリの位置的關係によって、噴出気流の部材への影響度合がおおよそ見当付けられる。

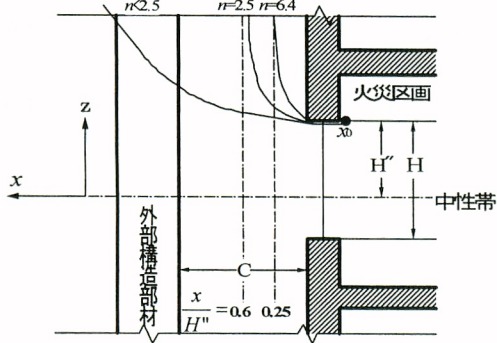


図1 噴出気流と外部構造部材

2.3 構造部材に当たる噴出気流の温度計算法

2.3.1 トrajekトリの長さ

$x/H' = X$ とおくと、原点(仮想熱源)から水平に X_T の距離までのトrajekトリに沿っての長さ Z は、(1)式を基に積分公式を用いて得られる次式によって求められる。

$$Z_0 = H'' \int_0^{X_T} (9m^2 X^4 + 1)^{1/2} dX \quad (2)$$

$$Z = Z_0 + x_0 \quad (3)$$

2.3.2 トrajekトリの温度上昇分

窓の上に壁がある場合のトrajekトリに沿っての温度分布は、横井の実験結果¹⁾に基づいて近似的に回帰式(4)で表される。

$$\Theta = 0.48 \times 0.88^{Z/r_0} \quad (4)$$

ここに、 Θ は、トrajekトリの無次元温度

r_0 : 開口の等価半径[m], $r_0 = \sqrt{BH/2\pi}$

$$\Theta = \Delta T_0 r_0^{5/3} / (TO \cdot Q^2 / c_p^2 \rho^2 g)^{1/3} \quad (5)$$

ここに、 ΔT_0 : トrajekトリの温度上昇分[K], TO : 外気温度[K], Q : 噴出気流の発熱速度[W/m²], c_p : 噴出気流の定圧比熱[kJ/kgK], ρ : 噴出気流の密度[kg/m³], g : 重力の加速度[m/s²]

仮想熱源から Z の位置におけるトrajekトリの温度上昇分 $\Delta T_0(Z)$ は、(4)、(5)式から、

$$\Delta T_0(Z) = \left[\frac{0.48 \times 0.88^{Z/r_0}}{r_0^{5/3}} \right] \left[\frac{TO \cdot Q^2}{c_p^2 \rho^2 g} \right]^{1/3} \quad (6)$$

ここで、噴出気流の発熱速度 Q は、その質量速度 q [kg/s]および火災室温度 TF と外気温度 TO の差 ΔT_{FO} などから次式で与えられる。

$$Q = cp \cdot q \cdot \Delta T_{FO} \quad (7)$$

$$q = \frac{2}{3} \phi BH^{n/3/2} \sqrt{2g\rho_f(\rho_0 - \rho_f)} \quad (8)$$

ここに、 ϕ : 窓の流量係数[-], ρ_0, ρ_f : 各々外気、火災室の空気密度[kg/m³], $\Delta T_{FO} = \alpha t^{1/6}$, α : 火災温度上昇係数[°C/min^{1/6}], t : 時間[min]以上から、トrajekトリに沿った長さ Z の位置の時間 t における温度上昇分 $\Delta T_0(Z, t)$ は、 TO, ϕ に諸値を代入して、(6)~(8)式より、

$$\Delta T_0(Z, t) = 6.68 \times \left(\frac{H}{B} \right)^{1/6} \left(\frac{\rho_f(\rho_0 - \rho_f)}{\rho^2} \right)^{1/3} \times 0.88^{Z/r_0} \times (\alpha t^{1/6})^{2/3} \quad (9)$$

「耐火性能検証法」などによって、火災区画の温度上昇係数 α が与えられれば、トrajekトリ温度 $\Delta T_0(Z, t)$ は、(9)式より時間の関数として求めることができる。

2.4 噴出気流の水平温度分布が部材温度に及ぼす影響

部材温度に及ぼす噴出気流の影響を検討する上で、トrajekトリに沿っての温度分布やトrajekトリに垂直方向の温度分布が重要な要素となる。これらの性状は、開口のアスペクト比(縦横比)などに依存し、多様である。一方、火災ブルームについては、その水平分布が正規分布に従うなど、性状はかなり明らかにされている。ここでは、トrajekトリに垂直方向の温度・流速の分布を水平分布と仮定し、さらに、これを正規分布と仮定してモデル化を行った。

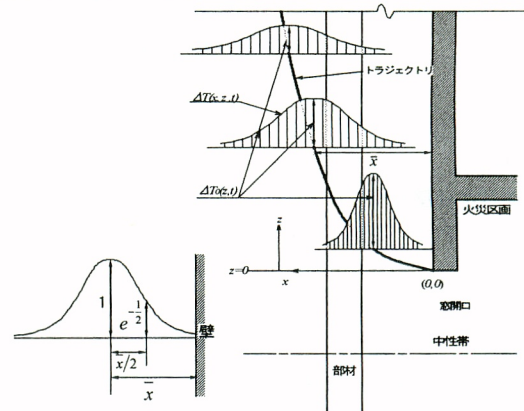


図2 噴出気流の温度分布

2.4.1 噴出気流の温度分布

窓開口からの噴出気流の温度および流速の水平分布については、図2に示す正規分布を仮定する。

また、トrajekトリと壁の離隔距離を \bar{x} [m]とすると、 $\bar{x}/2$ において気流軸上の値(=1)の $e^{-1/2}$ の値をとる分布を仮定する。このときの気流軸を中心とする水平方向の分布 $f(x)$ を次式(10)で定義する。

$$f(x) = \exp\left(-\frac{2(x-\bar{x})^2}{\bar{x}^2}\right) \quad (10)$$

トrajekトリに沿って Z の位置にあって、壁面からの水平距離 x における気流温度 $\Delta T(x, Z, t)$ は、(9)式および(10)式から、次式(11)で与えられる。

$$\Delta T(x, Z, t) = \Delta T_0(Z, t) \exp\left(-\frac{2(x-\bar{x})^2}{\bar{x}^2}\right) \quad (11)$$

\bar{x} は、 $H''=0.6H$ とすると、(1)式より、次式で与えられる。

$$\bar{x} = 0.71 \left[\frac{ZH^2}{2.2 + 0.61n^2} \right]^{1/3} \quad (12)$$

(12)式を(11)式に代入することによって、部材の各位置・面における任意の時間の噴出気流温度を求めることができる。

2.4.2 噴出気流の流速分布

火災ブルームについては、高さ z における気流軸上の流速 $w_0(z)$ は、無次元化した流速と発熱速度に関して、次の関係が得られる³⁾。

$$w_0(z) / \sqrt{gz} \propto Q_z^{1/3} \quad (13)$$

$$\text{ここに、} Q_z = \frac{Q}{\rho_\infty cp T_\infty \sqrt{gz}^{3/2}} \quad (14)$$

窓からの噴出気流についても、基本的に(13)式が適用できるものとする。

(13),(14)式の z は、噴出気流のトラジェクトリに沿っての長さ Z に対応するので、(15)式で、 Z における開口噴出気流の無次元気流速度を表すことができる。

$$w_0(Z) / \sqrt{gZ} \propto Q_z^{1/3} \quad \text{or} \quad W_0(Z) = K \times \sqrt{gZ} Q_z^{1/3} \quad (15)$$

ここに、 k : 比例定数、 $g=9.8\text{m/s}^2$ 、 $\rho_\infty=1.2\text{kg/m}^3$ 、 $T_\infty=293\text{K}$ 、 $cp=1.01\text{kJ/kgK}$ また、 $H''=0.6H$ とおくと、(7)、(8)式より、

$$Q = 0.98BH^{3/2} \sqrt{\rho_f(\rho_0 - \rho_f)} (\alpha^{1/6}) \quad (16)$$

ここに、 B, H : 窓の幅、高さ[m]、 α : 火災温度上昇係数 [$\text{K}m^{-1/6}$]

ρ_f, ρ_0 : 火災区画内空気密度、外気の密度 [kg/m^3]

これらを単位窓幅について整理すると、時間 t における窓上端から Z の位置における気流軸上の流速を $w_0(Z, t)$ は、次式(17)のように表せる。

$$w_0(Z, t) = k \times \left[\frac{H^{3/2} [\rho_f(\rho_0 - \rho_f)]^{1/2} (\alpha^{1/6})}{0.5(H^2 Z / (2.2 + 0.61n^2))^{2/3} + Z^2} \right]^{1/3} \quad (17)$$

窓上端部における噴出気流の流速に着目して、上式の比例定数 k を時間 t の関数 $k(t)$ として以下に求める。噴出気流の仮想熱源の位置 Z_0 は、窓上端より火災区画側へ $Z_0=0.056H''$ 中に入ったところとされている³⁾。この値は、本稿の中では、近似化のため一部において無視しているが、ここでは、重要な意味をもつ。 $H''=0.6H$ とすると、 $Z_0=0.034H$ 。一方、窓上端部における噴出気流の流出速度 v は、

$$v = \sqrt{2g \frac{(\rho_0 - \rho_f)}{\rho_f} H''} = 3.43 \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{\rho_f} - 1 \right) H} \quad (18)$$

窓上端部の窓面における流出速度についてみると、 $w_0(Z_0, t)=v$ であるから、(15)、(16)、(18)式より、窓単位幅について次式が成り立つ。

$$k(t) \times \left[\frac{H^{3/2} [\rho_f(\rho_0 - \rho_f)]^{1/2} (\alpha^{1/6})}{Z_0} \right]^{1/3} = 3.43 \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{\rho_f} - 1 \right) H} \quad (19)$$

$$k(t) = 1.11 \times \left[\frac{H(\rho_0 - \rho_f)}{\rho_f^2 (\alpha^{1/6})} \right]^{1/3}$$

ここに、 $\rho_f=353/(\alpha^{1/6}+273)$ 、 $\rho_0=353/(20+273)$ (気温 20°C) [kg/m^3]

ゆえに、(17)式に(19)式を代入して、

$$w_0(Z, t) = 1.11 \times \left[\frac{H^{5/2} \rho_f^{1/2} (\rho_0 - \rho_f)^{3/2}}{\rho_f^3 \left[0.5(H^2 Z / (2.2 + 0.61n^2))^{2/3} + Z^2 \right]^{1/2}} \right]^{1/3} \quad (20)$$

以上から、窓上端からの高さ Z 、時間 t における気流軸上の気流

速度を $w_0(z, t)$ で表すと、壁面からの水平距離 x における気流速度 $w(x, Z, t)$ は、(10)、(20)式より、次式(21)で与えられる。

$$w_0(x, Z, t) = w_0(Z, t) \cdot \exp \left(-\frac{2(x-\bar{x})^2}{x^2} \right) \quad (21)$$

この気流風速は、部材温度計算における強制対流熱伝達率を算出するときの要素となる。

以上から、噴出気流が部材に作用する任意の位置での気流温度および気流速度、すなわち、放射・対流熱伝達に関するひとつの支配要素を求めることができる。

3 外部構造部材(管状)の温度計算モデル

3.1 計算モデルの設定

外部構造部材は、前項の噴出気流の他、火災区画の窓(加熱面)からの放射熱によって加熱され、外気への放射熱伝達および部材の内外表面での対流熱伝達によって冷却される。本節では、こうした場合を設定した外部構造部材の温度計算モデルを導く。図 3-1 に温度計算モデルの概念図を示す。

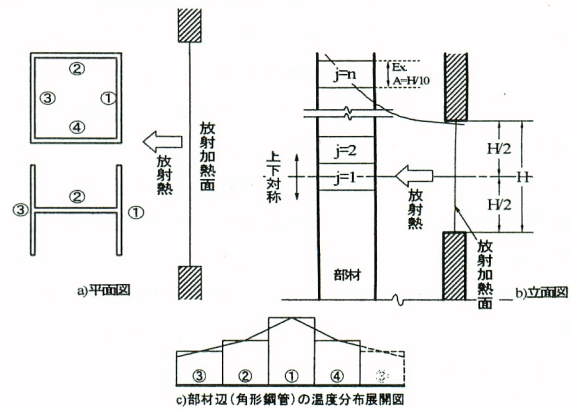


図 3-1 部材の 3 次元熱流解析 (温度計算) モデルの概念図

温度計算モデルは、次のような要素によって構成される。1) 噴出気流から部材への放射と対流による熱的影響：これは、前項で述べた噴出気流の温度および流速の分布性状に基づいて計算モデルに組み込まれる。2) 火災室窓から部材への放射加熱による熱的影響：これは、加熱面(窓面)の温度(火災区画の温度)、加熱面の寸法および加熱面と部材の位置関係(形態係数)を支配要素として計算モデルに組み込まれる。さらに、3) 部材が外気と接する外表面や管内空気と接する内表面での放射および対流熱伝達性状、および、4) 部材の断面および材軸方向での熱伝導性状などが計算モデルに組み込まれる。以上の伝熱要素を取り入れるために、ここで構築するモデルは、材軸方向を含む 3 次元熱流解析モデルとする。

平面的には、図 3-1 a) に示すように、部材断面(材軸に垂直)について、角型鋼管①～④の 4 辺、H 型鋼は①～③の 3 辺の中心温度を代表温度とし、同図 c) に示すように、放射計算では各辺の温度は一律とする。熱伝導計算では各中心温度を結んでえられる温度分布(図 3-1c)の折れ線)を設定する。また、高さ方向(材軸方向)については、同図 b) に示すように、差分長さ(数値計算上の長さの単位)を A で表し、本計算モデルの中では、 $A=H/10$ とする。なお、丸型鋼管については、熱的に等価な角型鋼管に置換して扱う。

図 3-2 に火災加熱面、噴出気流、外気と部材間の放射熱交換に關するモデルの概念図を示す。これは、加熱面からの放射のみを対象として示した図 3-1b) に噴出気流や外気との放射熱交換の影響を加え、同図 a) の部材面(辺)①を対象としてより詳しく示した図である。

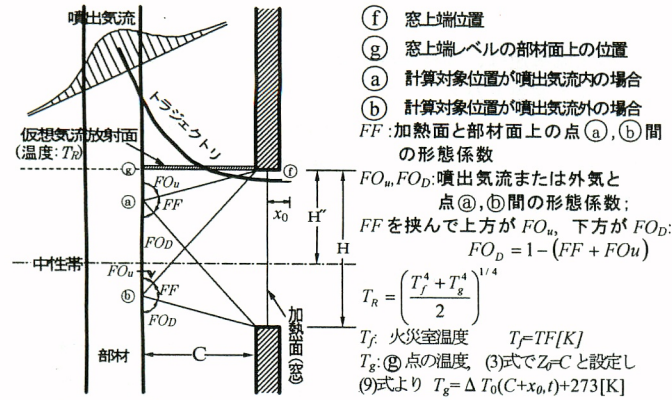


図 3-2 加熱面、噴出気流および外気と部材間の放射熱交換—加熱面に正対する部材面(図 3-1a) 辺①の場合—

3.2 計算モデルの要素と熱収支

部材についての座標を (m, j) で表す任意の部材要素について、時間 Δt における (m, j) の温度変化を求める熱収支式は、(22)、(23)式のように表される。ただし、 m は平面(断面)座標で、図 3-1a) の角形鋼管の場合①～④で $m=1\sim 4$ 、また、 j は高さ(材軸)方向の座標を表す。

$$[\Delta t \text{ 時間内の温度変化に要する熱量} : Q_{TOTAL}] =$$

$$[(A) \text{ 火災加熱面から部材表面への放射伝達熱量} : Q_{RF}] +$$

$$[(B) \text{ 噴出気流および外気と部材表面間の放射伝達熱量} : Q_{RO}] +$$

$$[(C) \text{ 部材表面間の放射伝達熱量} : Q_{RV}] +$$

$$[(D) \text{ 噴出気流および外気と部材外表面間の対流伝達熱量} : Q_{CO}] +$$

$$[(E) \text{ 部材内表面と部材内空気間の対流伝達熱量} : Q_{CV}] +$$

$$[(F) \text{ 部材内の熱伝導量} : Q_{CND}] \quad (22)$$

$$Q_{TOTAL}(m, j) = Q_{RF}(m, j) + Q_{RO}(m, j) + Q_{RV}(m, j) + Q_{CO}(m, j) + Q_{CV}(m, j) + Q_{CND}(m, j) \quad (23)$$

これ等各項は、以下で単位時間・単位面積について詳述しているが、(22)、(23)式は、 Δt 時間内の部材要素単位を対象としている。

3.2.1 部材表面における放射熱伝達(22式(A)~(C))

部材は、その外表面に火災区画から窓面を火災加熱面とする放射加熱を受ける。また、部材は、その外表面において、噴出気流および外気との間で放射熱交換を行う。これら放射による伝熱は、火災加熱面と部材表面間の幾何学的関係がひとつの支配要素となる。この要素は、形態係数として表される。

ここでは、図 3-1a) の辺①、図 3-2 の場合を対象とする。図 3-1a) の辺②～④については、辺①と同様であるので、説明を省略する。

(A) 火災加熱面から部材表面への放射伝達熱量 : Q_{RF}

任意の部材面 (m, j) と火災加熱面間の形態係数を $FF(m, j)$ とすると、火災加熱面から同面への単位面積・単位時間当たりの放射伝達熱量 Q_{RF} は、計算対象位置が噴出気流内にある場合(図 3-2 a) に代表される位置の場合)、次の(24)式で与えられる。

$$Q_{RF} = \sigma \varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) FF(m, j) [TF(NT)^4 - T(m, j)^4] \quad (24)$$

σ : ステファンボルツマン定数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]

ε_s : 部材表面の放射率

ε_g : 加熱面と部材間の噴出気流(ガス)の放射率, $\varepsilon_g = 1 - e^{-k_f L}$

k_f : 噴出気流の放射吸収係数, L : 気流(ガス)の光路長[m]

ここでは、 L は、加熱面と部材間にある気流部分を通る平均距離。

$TF(NT)$: 火災加熱面(火災区画内)の時間 NT における温度[K]

計算対象位置が噴出気流外にある場合(図 3-2 b) に代表される位置の場合)、 Q_{RF} は、(24)式で $\varepsilon_g = 0$ と安全側に仮定して求められる。

(B) 噴出気流および外気と部材表面間の放射伝達熱量 : Q_{RO}

任意の部材面 (m, j) 近傍の噴出気流の温度を(11)式から求め、これを $T_g(m, j)$ 、また、図 3-2 に示す窓と部材間の窓上端レベルに仮想気流放射面を仮定してその平均温度を T_R 、外気温度を T_O と表す。

また、b) 点のように、計算対象位置が噴出気流外にあって、上方に噴出気流を臨む立体角についての形態係数を $FO_U(m, j)$ 、その他の外気に対する立体角についての形態係数を $FO_D(m, j)$ と表す。

$$\text{ここに、} FO_U(m, j) + FO_D(m, j) = 1 - FF(m, j)$$

噴出気流または外気と部材面 (m, j) 間の単位面積・単位時間当たりの放射伝達熱量 Q_{RO} は、以下のようにして求まる。

噴出気流内に計算対象位置がある場合 (EX. 図 3-1 a) :

計算対象位置は、噴出気流に覆われるので、これに臨む形態係数は、

$$FO_U + FO_D + FF(m, j) = 1$$

また、噴出気流は、 k_f が大きいガスとみなし、 $\varepsilon_g = 1$ と仮定して、

$$Q_{RO} = \sigma \varepsilon_s [T_g(m, j)^4 - T(m, j)^4] \quad (25-1)$$

噴出気流外に計算対象位置がある場合 (図 3-1 b) :

計算対象位置で噴出気流および外気との間で放射熱交換が行われる。

$$Q_{RO} = \sigma \varepsilon_s \{ \varepsilon_g FO_U(m, j) [T_R^4 - T(m, j)^4] + FO_D(m, j) [T_O^4 - T(m, j)^4] \} \quad (25-2)$$

ここに、 $\varepsilon_g = 1 - e^{-k_f H}$ とする。なお、当モデルでは、 $k_f = 0.8$ としている³⁾。

部材と窓間の離隔距離が大きい場合や図 4 c) の場合のように部材が高温の噴出気流に直撃されない場合、窓上部に形成される噴出気流からの放射をそれに等価な放射面を仮定する等して、モデルに入れる必要があるが、この点は、今後のモデル改善の中で実施する。

加熱面と部材間の形態係数について

ここで、火災加熱面に対する部材表面の形態係数 $FF(m, j)$ を計算するための説明図を図 4 に示す。

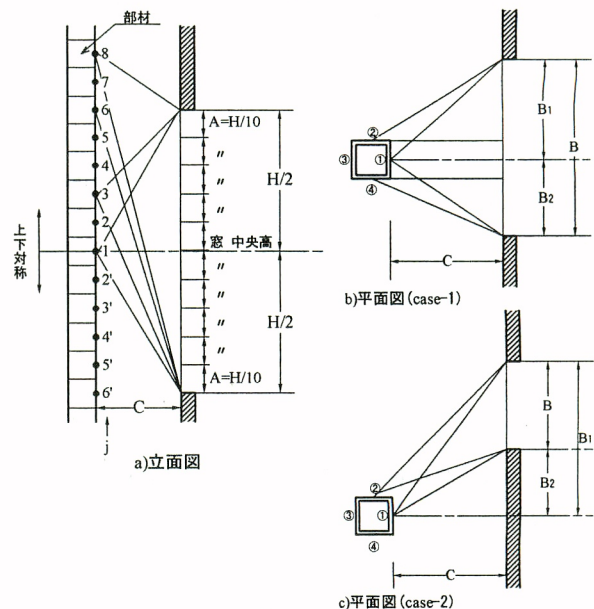


図 4 火災加熱面に対する部材表面の形態係数の計算用モデル(角型鋼管の場合)

このモデルでは、形態係数の計算の簡便化のため、材軸方向の高さ(長さ)の単位を $A=H/10$ とし、高さの座標を窓中央高さ位置から、順次、 $j=1, 2, 3, \dots, n$ とする。この場合、 $j=6$ で窓上端のレベルと一致する。また、平面的にみて、同図 b) に示すように部材正面の法線が窓幅 B の中に入る場合 (CASE-1) と、同図 c) に示すように同法線が B の中に入らない場合 (CASE-2) に分けて扱う。

ア) 部材面が加熱面に平行して対向している場合 (例えば、図 4 b), c) で示す部材断面の辺①)

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \quad (26)$$

イ) 部材面が加熱面に対して直角をなす場合 (例えば、図 4 b), c) で示す部材断面の辺②, ④の場合)

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{Y} - \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2}} \right) \quad (27)$$

(26)、(27)式は、こうした系に一般的に用いられる基本式であるが、これらの式において、 X, Y は辺と加熱面の幾何学的位置関係で定まる長さの比を表す。以下に各辺①~④について述べる。

i) 角型鋼管の場合

辺①) (26)式に、下記の X, Y を代入して、部分形態係数 $F_1(j) \sim F_4(j)$ を求め、(28)~(31)式より、辺①の高さ j における形態係数 $FF(1, j)$ を求める。ここで、部分形態係数とは、 $FF(m, j)$ を構成する部分的形態係数を意味する。

B_1 面について：

$$X = B_1/C, \quad Y = (j+4)A/C \rightarrow F_1(1, j)$$

$$X = B_1/C, \quad Y = |6-j|A/C \rightarrow F_2(1, j)$$

B_2 面について：

$$X = B_2/C, \quad Y = (j+4)A/C \rightarrow F_3(1, j)$$

$$X = B_2/C, \quad Y = |6-j|A/C \rightarrow F_4(1, j)$$

CASE-1 の場合

$1 \leq j \leq 6$ のとき：

$$FF(1, j) = F_1(1, j) + F_2(1, j) + F_3(1, j) + F_4(1, j) \quad (28)$$

ここで、 $j > 6$ のとき：

$$FF(1, j) = F_1(1, j) - F_2(1, j) + F_3(1, j) + F_4(1, j) \quad (29)$$

CASE-2 の場合

$1 \leq j \leq 6$ のとき：

$$FF(1, j) = F_1(1, j) + F_2(1, j) - F_3(1, j) - F_4(1, j) \quad (30)$$

ここで、 $j > 6$ のとき：

$$FF(1, j) = F_1(1, j) - F_2(1, j) - F_3(1, j) + F_4(1, j) \quad (31)$$

辺②, ④) 辺①と同様に(27)式に下記の X, Y を代入して、辺②または④の高さ j における形態係数 $FF(2, j)$ 、 $FF(4, j)$ を求める。

B_1 面について：

$$X = B_1/(j+4)A, \quad Y = C/(j+4)A \rightarrow F_1(2, j)$$

$$X = B_1/|6-j|A, \quad Y = C/|6-j|A \rightarrow F_2(2, j)$$

B_2 面について：

$$X = B_2/(j+4)A, \quad Y = C/(j+4)A \rightarrow F_3(4, j)$$

$$X = B_2/|6-j|A, \quad Y = C/|6-j|A \rightarrow F_4(4, j)$$

図 4 b), c) より、CASE-1 の場合、辺②は B_1 面、辺④は B_2 面に、また、CASE-2 の場合は、辺②は B 面でのみ、火災加熱面に対向する。したがって、

CASE-1 の場合、辺②について、

$$1 \leq j < 6 \text{ のとき: } FF(2, j) = F_1(2, j) + F_2(2, j) \quad (32)$$

$$j=6 \text{ のとき: } FF(2, 6) = F_1(2, j) \quad (33)$$

$$j>6 \text{ のとき: } FF(2, j) = F_1(2, j) - F_2(2, j) \quad (34)$$

同、辺④については、

$$1 \leq j < 6 \text{ のとき: } FF(4, j) = F_1(4, j) + F_2(4, j) \quad (35)$$

$$j=6 \text{ のとき: } FF(4, 6) = F_1(4, j) \quad (36)$$

$$j>6 \text{ のとき: } FF(4, j) = F_1(4, j) - F_2(4, j) \quad (37)$$

CASE-2 の場合、辺②については、

$$j \neq 6 \text{ のとき: } FF(2, j) = F_1(2, j) - F_2(2, j) - F_1(4, j) + F_2(4, j) \quad (38)$$

$$j=6 \text{ のとき: } FF(2, j) = F_1(2, j) - F_1(4, j) \quad (39)$$

同、辺③・辺④については、加熱面に対向していないので、

$$FF(3, j) = 0, \quad FF(4, j) = 0 \quad (40)$$

ii) H 型鋼の場合

図 5 に示すように、フランジ幅 LA 、ウェブ幅 LB の H 型鋼が、加熱面にフランジが正対面している場合を対象とする。なお、加熱面に対する H 型鋼の向きがこれと直角をなす場合 (90° 回転させた場合) については、省略する。

H 型鋼と加熱面の幾何学的条件(各長さの記号)は図 5 中に示す。H 型鋼の放射の授受に関する部材断面における各面を同図に示すように①~⑧で表す。なお、個々の面の形態係数 $FF(m, j)$ の計算式は角形鋼管と同様の方法で求められるので、ここでは省略する。

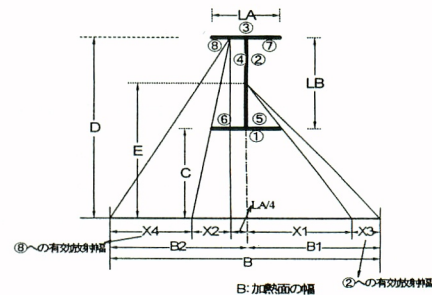


図 5 H 型鋼の加熱面に対する形態係数算出説明図 (図 4 Case-1 の場合)

(C) 部材表面(管内)間の放射伝達熱流: Q_{RV} および形態係数

任意の部材内表面 (m, j) とこれと対面(平行、垂直)する面 (\bar{m}, \bar{j}) の形態係数を $FV(\bar{m}, \bar{j})$ と表すと、面 (\bar{m}, \bar{j}) から面 (m, j) への単位面積・単位時間当たりの放射伝達熱流 $Q_{RV}(m, j)$ は、次式で与えられる。

$$Q_{RV}(m, j) = \sigma \epsilon_s \sum_{\bar{m}} \sum_{\bar{j}} FV(\bar{m}, \bar{j}) \left[T(\bar{m}, \bar{j})^4 - T(m, j)^4 \right] \quad (41)$$

図 6 b) に示すように、各面①~④間の放射熱伝達は、①⇌③、②⇌④、①⇌②、②⇌③、③⇌④、④⇌① のように分けられる。ここで、①→③と③→①の放射熱交換を考えると、両者の形態係数が等しいので、 $F_{13}=F_{31}$ となる。同様に、 $F_{24}=F_{42}$ 。一方、①→②と②→①の熱交換を考えると、 $LA \neq LB$ のとき、 $F_{12} \neq F_{21}$ 、同様に、 $F_{23} \neq F_{32}$ 、 $F_{34} \neq F_{43}$ 、 $F_{41} \neq F_{14}$ 。また、高さの異なる面との放射による熱交換を考え、図 6 a) に示すように、上下方向の対象となる面を計算対象位置から上下方向対称に任意の高さまで選び、計算対象位置に対する各高さ面についての形態係数を求める。ここでは、計算対象とする高さ方向の面レベルは、近似的に、上下、 $5A=H/2$ (H: 窓高、 $A=H/10$ (要素の高さ単位) と設定する。

図 6 a) のように、計算対象の任意の高さ位置を $i=1$ で表すと、高さ方向についての単位(長さ A) を上下に $i=6$ までとする。例えば、部材断面

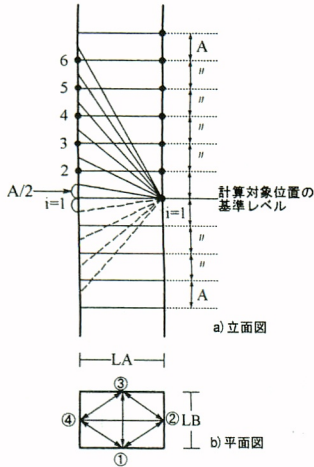


図6 部材内形態係数算出説明図

$$Q_{RV}(m, j) = \sigma \varepsilon_s \sum_m FV(\bar{m}, j) [T(\bar{m}, j)^4 - T(m, j)^4] \quad (42)$$

この式は、当該面 (m, j) からの放射が高さ方向に広く拡散せず、同レベルの3面 (\bar{m}, j) に集約されて伝達されるものとしている。なお、(42)式で、 $FV(\bar{m}, j)$ は、当該面と同じ高さレベルの3面についての形態係数を表している。

3.2.2 部材内外表面における対流熱伝達(22式(D),(E))

噴出気流や外気と接する部材外表面および管内空気と接する部材内表面で対流熱伝達が生じる。ここでは、これらの対流伝達熱量について述べる。

(D) 噴出気流および外気と部材外表面間の対流熱伝達熱量: Q_{CO}

部材の任意の外表面 (m, j) とそれを囲む温度 $T_g(m, j)$ の噴出気流や温度 TO の外気との間に一般的に強制対流熱伝達が生じる。その熱伝達率を h_{CO} で表すと、噴出気流および外気と部材表面 (m, j) 間の単位面積・単位時間当たりの対流伝達熱量 $Q_{CO}(m, j)$ は、噴出気流および外気に関して、各々、次の(43-1)式および(43-2)式で与えられる。

$$Q_{CO}(m, j) = h_{CO} [T_g(m, j) - T(m, j)] \quad (43-1)$$

$$Q_{CO}(m, j) = h_{CO} [TO - T(m, j)] \quad (43-2)$$

熱伝達率 h_{CO} は、 $h_{CO} = (\lambda/L)Nu$ (Nu : ヌセルト数)

$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ (層流), $Nu = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3}$ (乱流), Pr = プラントル数
例えば、噴出気流に関して、高温(800K)の空気の動粘性係数 $\nu = 84.5 \times 10^{-6} [m^2/s]$ 、熱伝導率 $\lambda = 56.9 \times 10^{-6} [kW/(mK)]$ の場合、 $Re = w_0 L / \nu < 3 \times 10^5$ のとき層流、 $Re > 3 \times 10^5$ のとき乱流として、

$$h_{CO} = 3.68(w_0/L)^{1/2} [W/m^2K] \quad (\text{層流の場合}) \quad (44-1)$$

$$h_{CO} = 3.42(U_\infty/L)^{1/5} [W/m^2K] \quad (\text{乱流の場合}) \quad (44-2)$$

ここに、 w_0 : 気流速度[m/s], L : 噴出気流を考慮した部材辺の長さ[m]

なお、無風時の外気を設定する場合については、下記の(46)式で表される自然対流熱伝達率を用いて、これを(43-2)式に適用すればよい。

(E) 部材内表面と部材内空気間の対流熱伝達量: Q_{COV}

部材の内表面 (m, j) とそれに接する温度 TV の管内空気間に自然対流熱伝達が生じる。その熱伝達率を h_{COV} とすると、面 (m, j) と管内空気間で伝達される単位面積・単位時間当たりの対流伝達熱量 $Q_{COV}(m, j)$ は、次の式で与えられる。

$$Q_{COV}(m, j) = h_{COV} [TV - T(m, j)] \quad (45)$$

上式における自然対流熱伝達率 h_{COV} は、 TV を常温と仮定した場合、

$$h_{COV} = 0.62 [TV - T(m, j)]^{2/5} [W/m^2K] \quad (46)$$

寸法が、 $LA, LB \approx 50cm$ で、 $A=20cm$ とすると、この i が対象とする範囲で、その位置の形態係数の総和は $0.98 \approx 1$ となり、形態係数算出上適用する高さ範囲として、実用上十分な精度が期待できることがわかる。

以上を、部材温度計算モデル内に部材内(管内)の放射熱伝達に関する要素として組み込む。ただし、现阶段のコンピュータモデルでは、(41)式を簡略化した(42)式の形をとっている。

3.2.3 部材内部の熱伝導(22式(F))

部材内部の熱伝導は、材軸方向と材軸に直角な断面について考える。部材の寸法は、角型鋼管、H型鋼ともに、断面寸法を $L_A \times L_B \times t_A \times t_B$ (L_A, L_B : 外側寸法、 t_A, t_B : 厚さ)とし、高さ方向の単位(差分)を A とする。鋼材の物性値として、熱伝導率を λ_s 、比熱を c_s 、密度を ρ_s で表す。

(1) 材軸方向の熱伝導は、角型鋼管については各面①~④、 $m=1 \sim 4$ 、H型鋼については各面①~③、 $m=1 \sim 3$ 、それぞれについて、高さ方向の差分単位 $j=1 \sim n$ ごとに、各単位の中心点間の温度差によって生じる伝導による熱移動として扱う。

座標を (m, j) とし、その温度を $T(m, j)$ とする任意の点について、材軸方向(単位長さ: A)の熱伝導による単位時間・単位面積当たりの熱の移動量 $Q_{CND}(m, j)$ は、次式で与えられる。

$$Q_{CND}(m, j) = \frac{\lambda_s}{A} [T(m, j-1) + T(m, j+1) - 2T(m, j)] \quad (47)$$

(2) 材軸に直角な断面内の熱伝導は、角型鋼管に関しては: 面①—②、②—③、③—④、④—①、H型鋼に関しては: フランジ①—ウェーブ②—フランジ③ について、当該座標 (m, j) とそれに隣り合う $(m-1, j)$ および $(m+1, j)$ の伝導による熱移動として扱う。前項(1)と同様に、部材軸に直角な断面内の熱伝導による単位時間・単位面積当たりの熱の移動量 $Q_{CND}(m, j)$ は、 $t_A \approx t_B$ と仮定して、近似的に次式(48)で与えられる。

$$Q_{CND}(m, j) = \frac{\lambda_s}{(L_A + L_B)} [T(m-1, j) + T(m+1, j) - 2T(m, j)] \quad (48)$$

4 計算モデルの実験による検証

以上のように作成した3次元熱流解析モデルによる計算結果を、実験結果と比較することによって、その妥当性の検討を行った。ここでは、若松によって行われた実験²⁾を比較の対象とした。

4.1 若松による鋼管放射加熱実験

若松は、断面 $100 \times 100 \times 3 \times 3mm$ 、長さ $2.4m$ の角型鋼管を放射加熱装置で加熱して、鋼管各部の温度を測定した。実験装置の概要を図7に示す。加熱装置は、赤外線シュバंकバーナーを組み合わせた高さ $1.32m$ 、巾 $1.11m$ の加熱面を有し、その放射率を1とした場合の有効放射温度は $TF=835K$ であった。供試体の角型鋼管の放射率

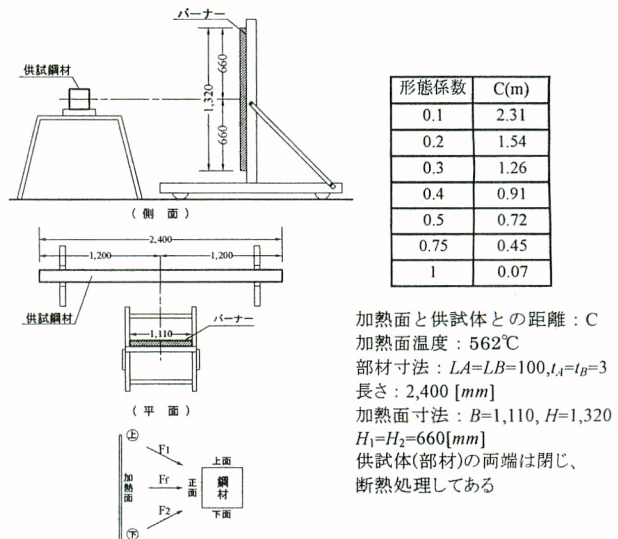


図7 実験装置

ϵ はあらかじめ測定された。その結果、表面無処理のものが $\epsilon=0.75$ 、遮熱を目的とするアルミペイントを塗布したものが $\epsilon=0.35$ であった。形態係数 FF は、供試体と加熱面の距離を変え図 7 に示す 7 ケースとし、さらに放射率 2 種類の計 14 ケースの実験が行われた。

この実験では、鋼管の断面 4 辺の各中央位置で熱電対による温度計測が行われた。加熱面の高さ中央に水平に置かれた供試体の上面と下面は、加熱面に対する形態係数が等しいので、測定温度も上面の温度で代表させた。

4.2 計算結果と実験結果の比較

実験結果と計算結果の比較を 14 ケースについて行ったが、そのうち 6 ケースについての比較を図 8 に示す。計算値は実験値と比べて、全般的によく合っている。アルミペイント塗布 ($\epsilon=0.35$) の場合は、形態係数が大きいときに ($FF=0.5\sim 1.0$)、実験値と計算値に差が見られる。この差は、供試体の裏面（非加熱面）において顕著である。

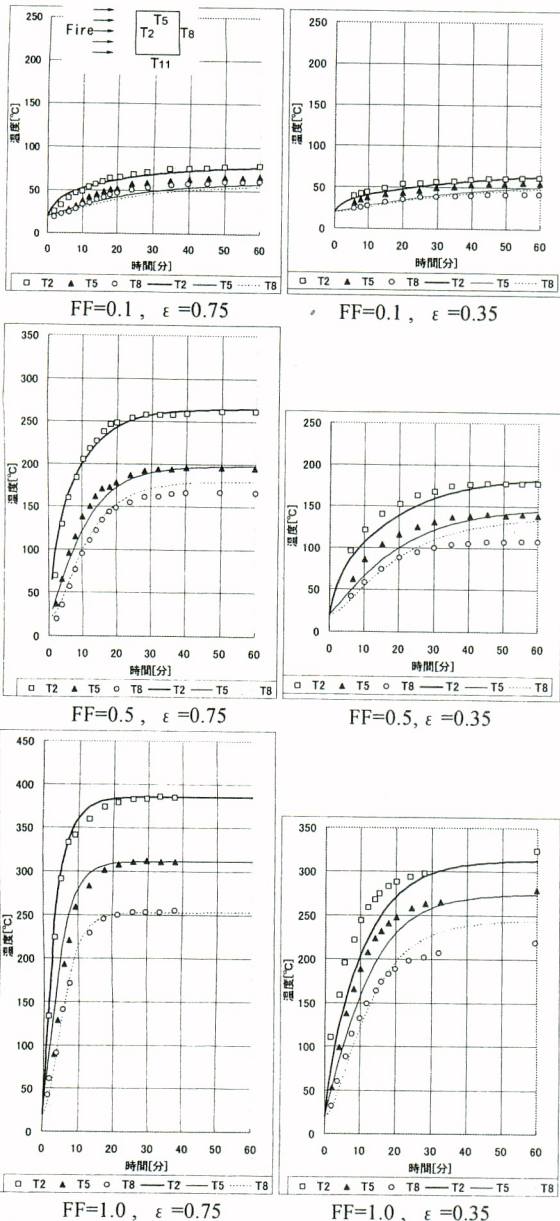


図 8 実験結果と計算結果の比較

こうした差を生じた原因については、以下に示すような実験条件計と算入力条件の不一致が考えられる。

1) 加熱面温度の安定性：この実験に用いた加熱装置は、都市ガスを燃料としており、バーナーへのガス供給量が一定していなかった可能性が高い。つまり、加熱面の温度は、当初測定した温度を一定に保持しなかった可能性がある。本来、実験毎に実験中の加熱面温度の計測が必要であるが、この実験では行われていない。

2) 対流熱伝達の影響：本実験に関する計算では、原則として無風時の自然対流熱伝達率を採用した。しかし、実際には、外気風の流入や、バーナーの燃焼のためバーナーへ向う空気の流れなどによって、加熱装置近傍で無視できない気流が発生した可能性が高く、これによる対流熱伝達のため、供試体が加熱面に近い場合に強制対流熱伝達による熱的影響を強く受けたものと考えられる。こうした観点から、表面無処理の供試体と加熱面の距離約 7cm、形態係数 $FF=1$ で、風速 1 m/s の風が供試体に当たると仮定して計算したところ、計算値と実験値は非常によい一致をみた(図 8 $FF=1.0, \epsilon=0.75$)。

以上から、計算モデルは、実用上十分な信頼性があることが検証されたと考察することができる。また、理論や計算モデルを検証する際、比較の前提となる諸条件が十分一致していないと、当然、実験結果が十分確かな検証の根拠とならないことが明らかにされた。

5 計算モデルを用いたケーススタディ

今回構築した計算モデルを用いて、外部架構の柱部材と梁部材について、噴出気流と放射熱による加熱を受ける場合の温度性状についてのケーススタディを行った。

火災区画および部材に関する条件：火災区画は、開口×奥行×高さ = $10 \times 10 \times 3.5$ [m]、総発熱量 = $61,100$ [MJ]、温度上昇係数 = 546 [$^{\circ}\text{C}/\text{min}^{1/6}$]、火災継続時間 = 37 [min]、開口形状は、高さ = 2 [m]、幅 = 2 [m] ($n=2$)、 6 ($n=6$) [m] の 2 ケースとした。部材寸法 = $400 \times 400 \times 20 \times 20$ [mm]。なお、梁部材の場合は、材厚 $20,40$ [mm] の 2 ケースとした。

5.1 柱部材についてのケーススタディ

計算結果のうち、 $t=37$ min における材軸方向の温度分布を図 9, 図 10 に示す。

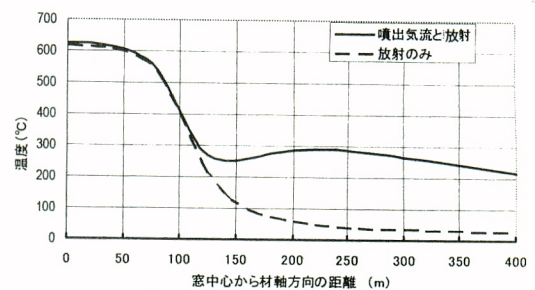


図 9 噴出気流の影響が少ない場合の噴出気流と放射 ($n=6 : C=0.3\text{m}$)

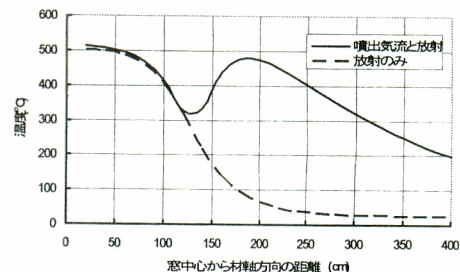


図 10 噴出気流の影響が大きい場合の噴出気流と放射 ($n=2 : C=0.5\text{m}$)

いずれのケースも、放射のみを受ける場合と、それに噴出気流の影響が加わった場合とを比較して示している。

図9は、窓幅が6mで、部材を窓面にC=30cm(C:部材と壁の離隔距離)となるまで近づけた場合の計算結果を示す。窓からの放射加熱をもつら受ける範囲(窓中心部; $x < 50\text{cm}$: x =窓中心からの材軸方向の距離)では、部材温度は600°Cを超える。それから窓上端から離れるにしたがって、部材温度は急速に低下する。そのうち、噴出気流が部材に当たる辺り($x=120\text{cm}$: 窓中心から約120cm、窓上端から約20cm)から、噴出気流の影響が部材温度に現れる。この影響は、窓面からの放射の影響を受けない窓から離れた位置ではっきり現れる。この例では、部材温度は噴出気流の影響を強く受けにくいという結果をえた。この大きな理由は、この例のような横長窓の噴出気流は、気流の高温範囲が狭く、加熱面に近い部材面と裏側に当たる部材面で大きな温度差が生じる。このため、主に部材内部の放射熱伝達等によって、高温面側から低温面側へ多量の熱が流れ、温度が平均化され、平均温度の上昇が抑えられるものと考えられる。

図10は、前例で窓の幅を2mに縮小し、C=50cmとした場合の計算結果を示している。噴出気流の影響を強く受ける例である。窓面積が縮小されたため、放射の影響を最も受ける範囲($x < 50\text{cm}$)で、部材温度は前例に比べ100°C程度低い。全体の傾向をみると、窓上端より離れるにしたがって放射受熱量の低下とともに、部材温度は急速に降下する。一方、窓上端から30cm離れたあたりから噴出気流の影響を受け、窓上端から約1m($x=200\text{cm}$)でその影響はピークを示す。しかし、この場合も部材の最高温度は、噴出気流を受ける部分でなく、放射加熱を強く受ける部分である。これらの例から、外部構造が受ける火災加熱は、放射が支配的に影響することがわかる。

5. 2 梁部材についてのケーススタディ

以上は、理論や具体例において、柱部材を対象として述べてきた。梁についても、基本的には柱部材と変わるところはない。特に、放射については、部材と加熱面の位置関係を90度回転するだけの単純な変換ですむ。噴出気流についても、温度や流速の垂直・水平分布と部材の位置関係だけの問題である。梁は、放射と気流による複合的な影響の関係で、柱に比べ材軸方向に大きな熱的变化や温度分布が生じない。このケーススタディは、今回開発したモデルが梁部材にも容易に適用できることを具体的に示すことを目的として行った。

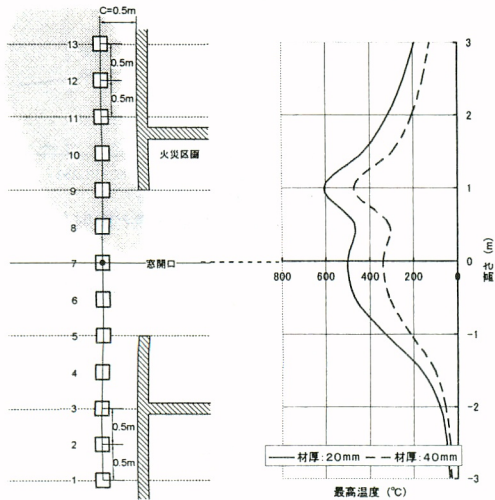


図1 a)窓開口と梁部材の位置関係 b)各レベルでの部材の最高温度

当ケーススタディの火災条件等の一般条件は、前項と同様とした。ここでは、部材の壁(窓)との離隔距離Cは、C=50cm一定とした。また、部材厚は20mmと40mmの2種類を対象とした。

図11a)は、ここで扱うケーススタディにおける窓開口と梁部材の位置関係を一括して示している。つまり、開口を中心に50cm間隔に上下13の位置について、梁部材の最高温度を計算した。

図11b)は、梁部材のそれぞれの位置における最高温度を示している。縦軸は、窓の中心位置を基準にした高さ方向の距離を示す。なお、計算結果の考察は、紙面の関係で省略する。

6 あとがき

今回、外部鋼構造部材が火災区画の窓からの放射加熱と噴出気流による加熱を同時に受ける場合の温度性状を予測するための3次元熱流解析モデルを構築した。このモデルの検証は、既往の実験結果と比較することによって行われ、少なくとも放射加熱を受ける場合について、その妥当性が確かめられた。

さらに、今回構築した計算モデルを用いたケーススタディを示し、これによって、本モデルが放射と噴出気流の影響を同時に組み込める計算モデルとしての有意性を備えていることを具体的に示した。

今後、今回計算モデルの実用上の理由から近似・簡便処理した、例えば、噴出気流の放射や管内放射熱伝達等の物理現象について、より高精度な形で計算モデルに組み込むなどの様々な改善が必要である。また、このモデルの信頼性を総合的に確認し、必要な改善を行うため、模型あるいは実大規模の実験を行う予定である。

なお、本論文に関連する最近の研究として、若松(高)、上川による局部加熱を受ける鋼構造部材の熱的性状に関する研究⁴⁾⁵⁾や、樋本による噴出気流性状に関する詳細な最近の研究⁶⁾がある。

付録

2.1項で導いた(1)式よりも横井の実測値に忠実な回帰式を、以下のように整理した。 n および z/H^n の範囲によって、付一表1, 2に従って式(1)または(2)を適用する。式(2)については付一表3より対応する α, β を代入して用いる。

$$\frac{z}{H^n} = m \left(\frac{x}{H^n} \right)^3 \quad (\text{但し、} m=2.2+0.61n^2) \quad (1)$$

$$\frac{z}{H^n} = \alpha \left(\frac{x}{H^n} \right) + \beta \quad (2)$$

付一表1

	$\frac{z}{H^n} \leq 1.0$	$1.0 < \frac{z}{H^n}$
$1.0 < n \leq 1.5$	(1)式	
$2.0 < n \leq 5.0$	(1)式	(2)式

付一表2

	$\frac{z}{H^n} \leq 0.4$	$0.4 < \frac{z}{H^n} \leq 1.0$	$1.0 < \frac{z}{H^n} \leq 1.65$	$1.65 < \frac{z}{H^n}$
$5.0 < n < 6.4$	(1)式	$\frac{x}{H^n} = 0.269$	(2)式	
$n=5.5$ で代表	$m=20.7$			
$n=6.4$	(1)式	$\frac{x}{H^n} = 0.247$	(2)式	$\frac{x}{H^n} = 0$

付一表3

n	α	β
2	+14.6	-7.78
2.5	+48.0	-25.4
3	-46.2	+24.4
3.5	-17.3	+9.10
4	-15.8	+7.90
4.5	-11.4	+5.69
5	-8.39	+4.24
$5 < n < 6.4$	-5.49	+3.00
6.4	-26.5	+1.65

注) $4 < n < 6.4$ については、図4.5に基づいた推定値

参考文献

- 横井鎮男:耐火構造火災実験報告(横に長い形の窓から噴出する火災の形状)日本火災学会論文集: Vol.9, No.1, 1959, 他
- 若松孝旺:近隣火災時における架橋鋼材の温度分布の予測(計算理論と計算例):災害科学研究会, 災害の研究, No.8, pp 253-270, 1974, 他
- 田中孝義:改訂版 建築火災安全工学入門:日本建築センター, 2002
- 若松高志:局部加熱される鉄骨梁部材の熱的性状予測に関する研究(博士論文):2000.2
- 上川・長谷見・鍵屋・若松:局部火災加熱を受ける金属角柱の温度応答とその予測:日本建築学会環境系論文集No.583, pp 1-6, 2004.9
- 樋本圭佑:都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発(博士論文):2005.3