

## フラッシュオーバー限界発熱速度の近似式の提案

正会員 ○李成璨\*1 同 原田和典\*2

### 4.環境工学－ 13. 空気流動応用

フラッシュオーバー, 盛期火災, 限界発熱速度, 熱吸収速度, 熱放出速度

#### 1. はじめに

区画火災では、初期には緩やかに成長する燃焼が、ある時点を境に区画全体に急激に拡大するフラッシュオーバー(F.O.)現象が発生する。F.O.が実際の火災で発生すると、避難や消火活動に大きな影響を与える危険な現象である。

最近、増加している超高層ビルの場合は火災時の避難と消火活動に長時間を要するので F.O.発生の可能性が大きい。そのため、建築物の火災安全設計や防火管理などの実務に使うことができる簡単な F.O.現象発生計算式が必要である。

F.O.を発生させる要因は様々であると予想されるが、本研究では特に重要な関係があると考えられる周壁の面積と熱特性、開口寸法等の条件を反映して F.O.限界発熱速度の簡易予測式を提案することが目的である。

#### 2. 計算条件

既報<sup>1)</sup>で改善した二層ゾーンモデル<sup>2)3)</sup>を使って図1の火災室を想定して計算する。火災室の高さは5m、開口は1個で高さは2mに固定し、開口の幅と発熱量密度を変更して計算する。室内外の初期温度は20℃、計算時間は2000秒まで行う。発熱速度は告示式<sup>4)</sup>にならい次式で与えた。

$$Q = \min(\alpha t^2, Q_{fuel}) \quad (1)$$

$$\alpha = 2.64 \times 10^{-6} q_l^{5/3} \quad (2)$$

$$Q_{fuel} = q_0 A_b \quad (3)$$

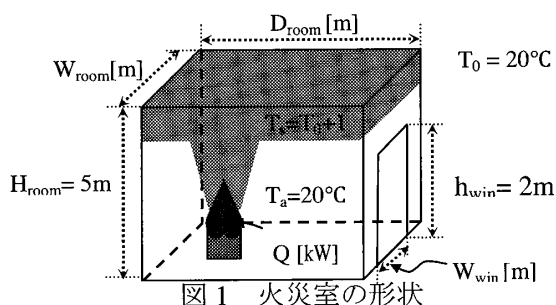


図1 火災室の形状

壁体構成材料と火災室の床面積は表1～3の組み合わせで与えた。ただし、床面積が大きい場合には発熱量密度が80MJ/m<sup>2</sup>よりも小さな場合も計算した。一方、発熱量密度が大きくF.O.発生が明白な場合は計算を省略した。

表1 室の壁体構成材料

壁の材料	床面積 [m <sup>2</sup> ]	発熱量密度 [MJ/m <sup>2</sup> ]	開口幅 [m]	計算回数 [回]
ALC (標準)	5×5	80~960	0.1~9	516
石膏ボード	5×5	80~960	0.1~9	330
コンクリート	5×5	80~960	0.1~9	370

表2 壁体構成材料の熱特性値

壁の材料	熱伝導率 [kW/(m·K)]	比熱 [kJ/(kg·K)]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	熱慣性 [kW·s/1/2/(m <sup>2</sup> K)]
ALC	0.00008	0.9218	1000	0.272
石膏ボード	0.00031	0.90	1208	0.581
コンクリート	0.0015	0.95	2400	1.849

表3 室の床面積

壁の材料	床面積 [m <sup>2</sup> ]	発熱量密度 [MJ/m <sup>2</sup> ]	開口の幅 [m]	計算回数 [回]
ALC	5×7	80~960	0.1~20	380
ALC	5×10	60~480	0.1~30	238
ALC	10×10	20~240	0.1~40	238

#### 3. 計算結果

図2、3はALC火災室(5m x 5m)で発熱量密度 $q_l$  [MJ/m<sup>2</sup>]が480MJ/m<sup>2</sup>時の煙層温度と発熱速度の結果である。F.O.が発生する条件を煙層温度が600℃以上になることとする。開口幅が0.6mより小さい場合は換気支配型火災に遷移するが、0.6m以上の場合は燃料支配型火災が維持される。また、開口幅が0.47~3.25mの範囲ではフラッシュオーバーが

発生する。

図4はALC火災室(5m x 5m)の計算で得られた開口因子と発熱速度の関係である。 $q_l$ が80MJ/m<sup>2</sup>の場合はF.O.が発生せず、160MJ/m<sup>2</sup>以上の場合F.O.が発生する。発熱量密度と開口因子が大きくなるほどF.O.限界発熱速度 $Q_{FO}$ [kW]は大きくなる。

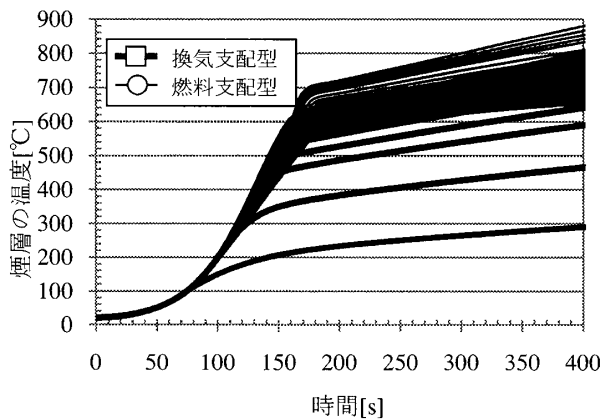


図2 ALC火災室で $q_l$ が480MJ/m<sup>2</sup>の場合の煙層温度

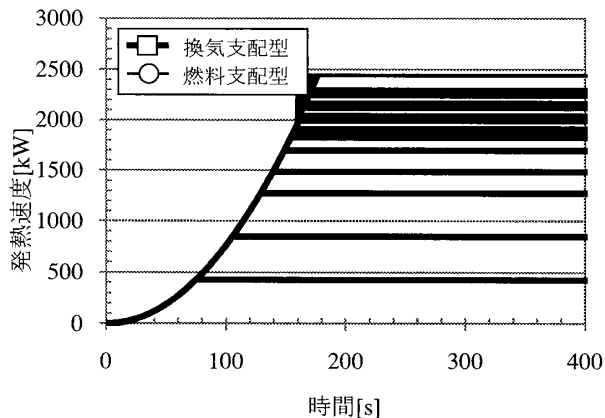


図3 ALC火災室で $q_l$ が480MJ/m<sup>2</sup>の場合の発熱速度

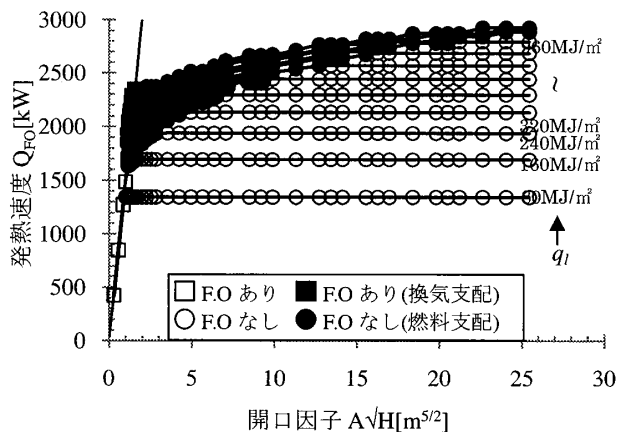


図4 開口因子と発熱速度の関係 (ALC -5x5m<sup>2</sup>)

図5に示すように、F.O.が発生する条件での発熱

速度とF.O.が発生しない場合の最大発熱速度 $Q_{max}$ [kW]との境目をF.O.限界発熱速度と呼ぶ。発熱量密度一定の計算値を結ぶ線において、 $Q_{FO}$ と $Q_{max}$ の計算値の midpoint の値に対応する開口因子 $(A\sqrt{H})_{FO}$ [m<sup>5/2</sup>]の値をF.O.限界開口因子と呼ぶ。

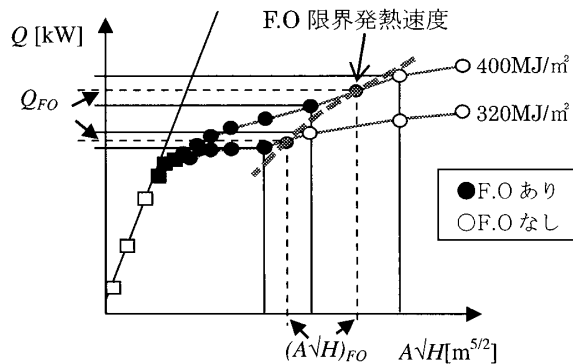


図5 F.O.限界発熱速度を求める方法

#### 4. 回帰式の導出

既存の予測式であるMQH式<sup>5)</sup>の導出にならない、F.O.限界発熱速度は壁の熱吸収速度 $Q_W$ [kW]と開口からの熱放出速度 $Q_L$ [kW]の和であると考える。

$$Q_{FO} = Q_W + Q_L \quad (4)$$

以下では、 $Q_W$ と $Q_L$ の近似式を導出し、各変数が発熱速度に及ぼす影響を調べる。

##### 4.1 熱吸収速度の近似式

式(5)はMQH式で仮定している熱吸収速度の計算式である。

$$Q_W/A_T = \frac{\sqrt{k\rho c}(T_s - T_o)}{t_{FO}^{0.5}} \quad (5)$$

式(5)から各壁体構成材料の数値計算結果と一致が最も良くなるように係数と指数値を探索して次の近似式(6)~(8)を得た。

$$[ALC] \quad \frac{Q_W}{A_T} = \frac{0.35\sqrt{k\rho c}(T_s - T_o)}{t_{FO}^{0.35}} \quad (6)$$

$$[石膏ボード] \quad \frac{Q_W}{A_T} = \frac{0.15\sqrt{k\rho c}(T_s - T_o)}{t_{FO}^{0.35}} \quad (7)$$

$$[コンクリート] \quad \frac{Q_W}{A_T} = \frac{0.055\sqrt{k\rho c}(T_s - T_o)}{t_{FO}^{0.35}} \quad (8)$$

式(6)~(8)の $\sqrt{k\rho c}$ に各材料の熱特性値を、 $T_s$ に600°Cを代入した結果を図6に示す。 $Q_W/A_T$ の床面積による変化は小さい。発熱量密度が小さくなる

と火災成長率が小さくなるので $t_{FO}$ が大きくなり、その結果として $Q_w/A_T$ は小さくなる。

また、コンクリート、石膏ボード、ALCの順番に単位面積あたりの熱吸収速度が大きい。MQH式は数値計算結果よりもかなり大きな値となる。

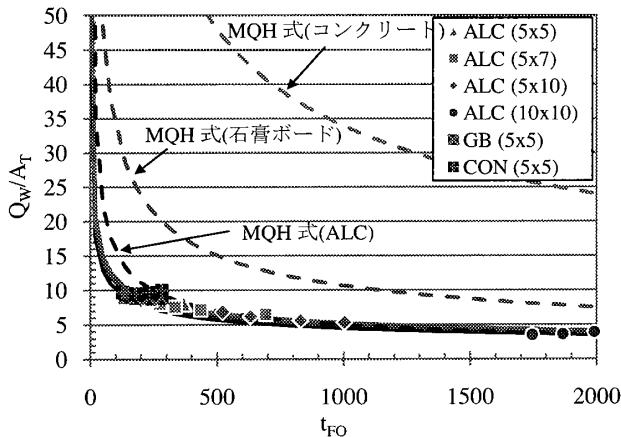


図6 壁体構成材料による熱吸収速度の変化

#### 4.2 熱放出速度の近似式

式(9)はMQH式で仮定している熱放出速度の計算式である。

$$Q_L = 0.53A\sqrt{H}(T_s - T_o) \quad (9)$$

材料ごとに数値計算結果との一致が最も良くなるように係数と指数値を探索し、次式を得た。

$$[\text{ALC}] \quad Q_L = 425(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (10)$$

$$[\text{石膏ボード}] \quad Q_L = 405(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (11)$$

$$[\text{コンクリート}] \quad Q_L = 400(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (12)$$

式(10)~(12)と数値計算結果との比較を図7に示す。開口因子が大きくなれば $Q_L$ も大きくなるが、火災室の床面積と壁体構成材料による影響はほとんどない。MQH式と数値計算結果を比べると、図7に示すように、MQH式は開口因子と熱放出速度が比例すると仮定しているが、回帰式は緩やかに上昇する右上りの曲線で示す。開口因子が小さい場合には両者はほとんど一致するが、開口因子が大きくなるとMQH式は過大な値になる。

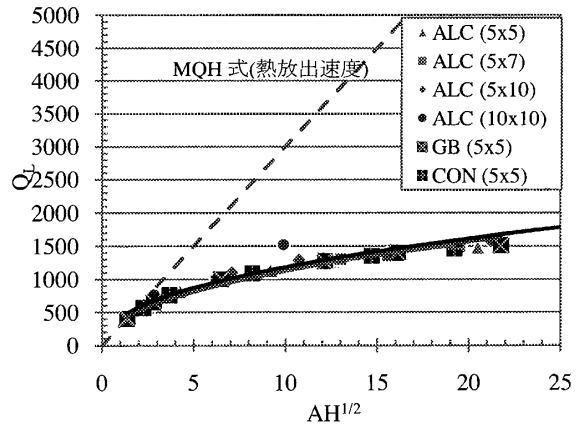


図7 壁体構成材料による熱放出速度の影響

#### 4.3 近似式のまとめ

各材料の熱吸収速度の近似式に熱慣性を代入し、熱放出速度と合算すると、(13)~(15)となる。

$$[\text{ALC}] \quad Q_{FO} = \frac{54.8A_T}{t_{FO}^{0.35}} + 425(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (13)$$

$$[\text{石膏ボード}] \quad Q_{FO} = \frac{50.5A_T}{t_{FO}^{0.35}} + 405(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (14)$$

$$[\text{コンクリート}] \quad Q_{FO} = \frac{59.2A_T}{t_{FO}^{0.35}} + 400(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (15)$$

式(13)~(15)の係数の差は小さいので、係数を平均して一つの式(16)で整理できる。

$$Q_{FO} = \frac{55A_T}{t_{FO}^{0.35}} + 410(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (16)$$

式(16)と数値計算の $Q_{FO}$ を比較して図8に示す。 $Q_{FO}$ が2500kW以下では近似式が少し大きい、3000kW以上ではほぼ一致している。

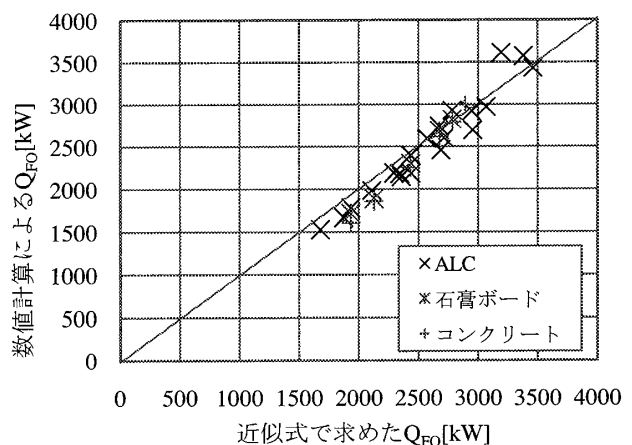


図8 式(16)で求めた $Q_{FO}$ と数値計算の $Q_{FO}$ の関係

#### 4.4 フラッシュオーバー限界時間の近似

式(16)には F.O. 発生時間  $t_{FO}$  が含まれているので、防火設計にそのまま利用するのは難しい。そこで、 $t_{FO}$  を適切に見積ることが必要である。式(16)の  $t_{FO}$  に 1000 秒、50 秒、120 秒をそれぞれ代入し、数値計算結果との比較を行った。

$t_{FO}$  を 1000 秒にすると、数値計算による  $Q_{FO}$  が、近似式で求めた  $Q_{FO}$  よりも 20~60% 大きくなった。 $t_{FO}$  を 50 秒にすると、数値計算による  $Q_{FO}$  と、近似式で求めた  $Q_{FO}$  は平均的には一致したが、20~30% 誤差があった。図 9 に示すように  $t_{FO}$  を 120 秒にすると、数値計算による  $Q_{FO}$  が、近似式で求めた  $Q_{FO}$  より全て大きくなる。

近似式で求めた  $Q_{FO}$  が数値計算による  $Q_{FO}$  より小さければ、近似式を使って設計すると安全性を確保ができる。したがって、全ての条件の  $Q_{FO}$  が数値計算の値より近似式の値が小さくなるように  $t_{FO}$  を求めれば良い。従って、F.O. 限界時間を 120 秒として、次式(17)を用いることができる。

$$Q_{FO} = 10.3A_T + 410(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (17)$$

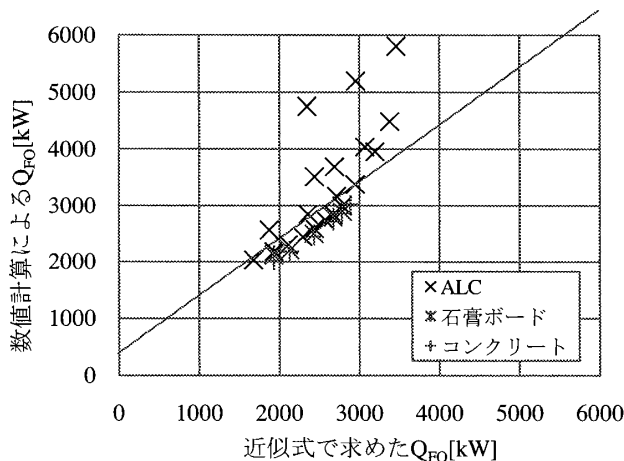


図 9 式(17)で求めた  $Q_{FO}$  と数値計算の  $Q_{FO}$  の関係

#### 5. 結論

本研究では、二層ゾーンモデルを使って、F.O. 発生的重要な変数になる火災室の壁体構成材料や床面積、発熱量の密度及び開口部の大きさを変更させながら、F.O. が発生の有無を予測し、その発

生に影響を与えられる条件を検討した。

各条件の数値計算結果から F.O. 限界発熱速度に対する回帰式を導出して、次のような結果を得ることができた。

- ・開口寸法が大きくなれば熱放出速度も大きくなるが、床面積と壁体材料による影響は小さい。
- ・壁体構成材料の熱特性が大きくなるほど単位面積当たりの熱吸収速度は大きくなる。

また、それぞれの近似式を整理して、室内表面積と開口寸法を変数にする簡易な F.O. 限界発熱速度の近似式を作成・提案した。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成 22 年度文部科学省科学研究費「超高層住宅プロジェクトのリスク・危険度評価手法の開発(基盤研究 B、研究代表者:金多隆)」の補助を受けた

#### 記号

$Q$ : 発熱速度[kW]  $A$ : 開口面積[m<sup>2</sup>]  $H_{win}$ : 開口高さ[m]  $T_s$ : 煙層温度[°C]  $T_a$ : 空気層温度[°C]  $t$ : 時間[s]  $Q_{fuel}$ : 燃料支配型の発熱速度[kW]  $Q_{vent}$ : 換気支配型の発熱速度[kW]  $q_i$ : 可燃物の発熱量密度[MJ/m<sup>2</sup>]  $q_0$ : 単位面積あたりの発熱速度[kW/m<sup>2</sup>]  $A_{fuel}$ : 積載可燃物の燃焼表面積の最大値[m<sup>2</sup>]  $A_{room}$ : 室の床面積[m<sup>2</sup>]  $A_b$ : 積載可燃物の燃焼表面積[m<sup>2</sup>]  $Q_{FO}$ : F.O. 限界発熱速度[kW]  $Q_w$ : 熱吸収速度[kW]  $Q_L$ : 熱放出速度[kW]  $t_{FO}$ : F.O. 発生時間[s]

#### 参考文献

- [1] 李成塚, 原田和典: “盛期火災への遷移を考慮した二層ゾーンモデルの改善方法に関する研究”, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.221-222, 2010
- [2] 田中孝義, 中村和人: <二層ゾーンの概念に基づく> 建物内煙流動予測計算モデル, NO.123, 建設省建築研究所, 1989
- [3] 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
- [4] 避難安全検証法の解説および計算例とその解説, 井上書院, 201
- [5] McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G. and Harkleroad, M.F.: Estimating Room temperatures and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, Fire Technology, Vol. 17, No.2, 98-119, 1981

\*1 京都大学工学研究科 博士課程

Graduate student, Kyoto University

\*2 京都大学工学研究科 教授・博士(工学)

Prof., Kyoto University, Dr. Eng.