

建築防火工学

野口貴文

燃焼と火炎性状(2)

火炎

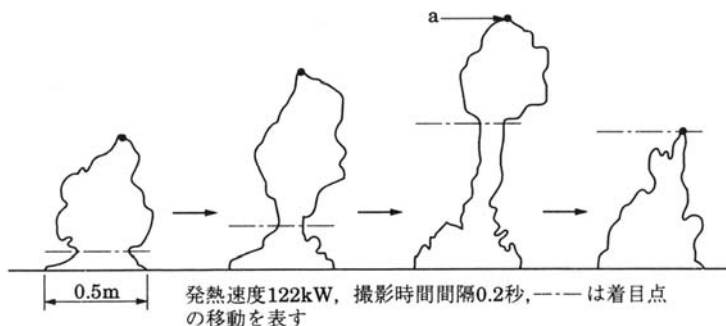
- 火災時:乱流状態の拡散火炎
 - 燃料気体と酸素の供給方法
 - 予混合火炎 (例:ガスレンジの炎)
 - 拡散火炎 (例:ろうそくの火炎)
 - 流れの乱れの有無
 - 乱流炎
 - 層流炎
- 発熱速度→火炎長さ、温度分布、煙発生量を予測
 - Thorntonの法則に基づく
 - 単位酸素量が燃焼に消費されたときの発熱量は、通常環境で扱われる可燃物ならば物質によらずほぼ一定: $13.1\text{MJ/kg(O}_2\text{)}$
 - 酸素消費法(酸素消費量から発熱速度を算出)の基礎原理
 - 課題:風の影響

火炎

- 火炎は「息」をする
 - 連続火炎
 - 常に火炎が存在する領域
 - 間歇火炎
 - 火炎が届いたり届かなかったりする領域
 - 火炎片高さ
 - 火炎の上端の高さの平均
 - 木材の引火点よりやや高温
 - 可燃物への着火の有無を判断する重要な指標
 - 連続火炎高さ
 - 放射熱源の形状を決定する指標
 - プルーム
 - 火炎片より上方の火炎によって形成された熱気流
 - 燃焼反応はない

火炎

■ 乱流火炎のストロボ映像



火炎

■ 発熱速度

– 無次元発熱速度: Q^*

$$Q^* = Q / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T \cdot L_1^{5/2})$$

Q : 発熱速度 ($= \rho C_p \theta U A \propto \rho C_p \theta U L^2$)

ρ : 空気の密度

C_p : 比熱

g : 重力加速度

β : 体積膨張係数

$\rho C_p g^{1/2} \beta = 1116$ (大気圧下)

T : 雰囲気絶対温度

L_1 : 火源の絶対長さ (円形: 直径, 正方形: 一辺の長さ)

θ : 代表温度

U : 代表流速

A : 噴出面積

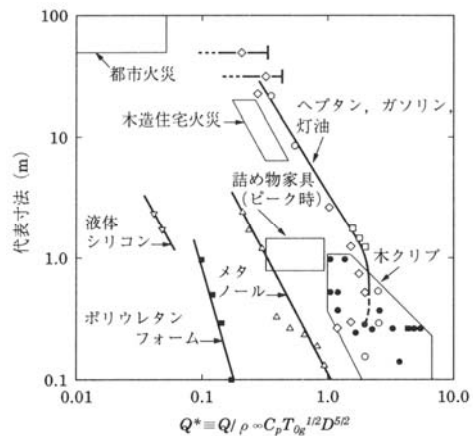
– 線火源の場合: Q_l^*

$$Q_l^* = Q_l / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T \cdot L_1^{3/2})$$

Q_l : 単位奥行き長さ当たりの発熱速度

火炎

■ 各種可燃物の代表長さとの無次元発熱速度との関係



火炎

■ 火炎長さ

$$- L_f = \gamma \cdot Q^{*n} \cdot L_1 = \gamma \cdot Q^n \cdot L_1 / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T \cdot L_1^{5/2})^n$$

▪ γ : 定数

▪ $L_f \gg L_1$ (火炎先端が火源本体から遠く離れる)

$$- L_f = \gamma \cdot Q^n \cdot L_1^{1-5n/2} / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T)^n$$

– 火炎長さ: $Q^{2/5}$ または $Q^{2/5}$ に比例

▪ $L_f \ll L_1$ (火炎先端から火源全体見渡せない、 Q^* が非常に小)

$$- L_f = \gamma \cdot (Q \cdot L_1^{-2})^n \cdot L_1^{1-n/2} / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T)^n$$

▪ Q/B (燃料気体の発生密度) $\propto Q \cdot L_1^{-2}$

– 火炎長さ: Q^2 または Q^2 に比例

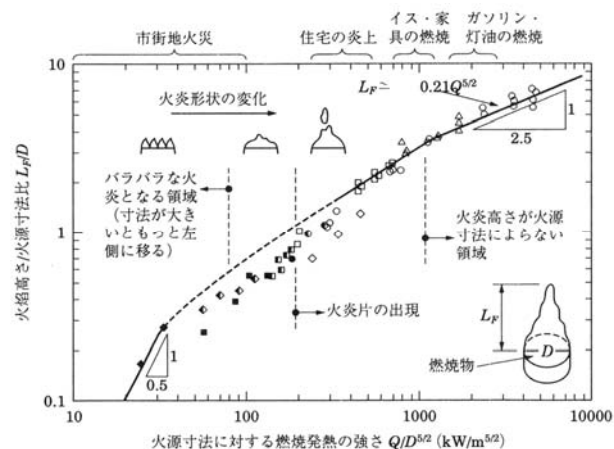
– 線火源の場合

$$- L_f = \gamma' \cdot Q_l^{*m} \cdot L_2$$

– Q_l^* 大: $m=2/3$, Q_l^* 小: $m=2$

火炎

■ $Q/D^{5/2}$ と火炎高さとの関係



火炎

■ 温度・流速分布

- 鉛直方向の温度・流速
 - 火源中心軸上で最大、中心軸から離れると減衰
- 軸上温度
 - 連続火炎域 : 高さによらずほぼ一定
 - 間歇火炎域 : 高さとともに減衰
 - 火炎プルーム : 高さに対する減衰率がいっそう顕著
- 軸上流速
 - 連続火炎域 : 高さとともに増加
 - 間歇火炎域 : 高さによらずほぼ一定
 - 火炎プルーム : 高さとともに減衰

火炎

■ 温度・流速分布(点熱源に対して成立)

- 連続火炎域

- 流速分布 $w(r,z) = a_1' \cdot z^{1/2} \cdot W_1(r^2/Q^{2/5})$
- 温度 $\theta(r,z) = b_1' \cdot \Theta_1(r^2/Q^{2/5})$

- 間歇火炎域

- 流速分布 $w(r,z) = a_2' \cdot Q^{1/5} \cdot W_2(r^2/Q^{2/5}z)$
- 温度 $\theta(r,z) = b_2' \cdot Q^{2/5} \cdot z^{-1} \cdot \Theta_2(r^2/Q^{2/5}z)$

- 火炎プルーム

- 流速分布 $w(r,z) = a_3' \cdot Q^{1/3} \cdot z^{-1/3} \cdot W_3(r^2/z^2)$
- 温度 $\theta(r,z) = b_3' \cdot Q^{2/3} \cdot z^{-5/3} \cdot \Theta_3(r^2/z^2)$

- $W_i(r,z)$ 、 $\Theta_i(r,z)$: 流速、温度の減衰係数、軸上=1

火炎

■ 火災時の火炎

- 水平・鉛直両方向に発熱源が分布

■ 仮想点源高さ

- 実際の火炎性状の予測・モデル化→高さの補正 ΔZ
- $\Delta Z = 1.02 - 0.08Q^{*2/5}$
- Q^* 大(細長い火炎)
 - 床面よりかなり高い部分で燃焼発熱、 $\Delta Z > 0$
- Q^* 小(水平方向に広がる火炎)
 - $\Delta Z < 0$

火炎

■ 煙流量(点火源、円形火源の場合)

- $M(z) = \int_{\text{水平面}} (\text{流速} \times \text{密度}) = \int_0^\infty 2 \cdot r \cdot \rho \cdot w(r, z) dr$

- プルームを流れる煙流量の予測必要性

- $M(z) = C_m \cdot \{(\rho^2 \cdot g) / (C_p \cdot T)\}^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot z^{5/3}$
- $C_m = 0.21$
- 煙流量は高さとともに増大 ($\propto z^{5/3}$)
- 発熱速度にはあまり影響されない ($\propto Q^{1/3}$)

火炎

■ 実際の火源

- 軸対象火源(点火源・円火源)と線火源の間の中間的な形態

- 無次元発熱量

▪ $Q_{\text{mod}}^* = Q / (\rho \cdot C_p \cdot g^{1/2} \cdot \beta \cdot T \cdot A \cdot B^{3/2})$

- A: 短辺長さ, B: 長辺長さ

- 正方形火源: $Q_{\text{mod}}^* = Q^*$ 、線火源 (A/B → 0): $Q_{\text{mod}}^* = Q_l^*$

- 火炎高さ

▪ 縦横比に応じて、正方形火源 ($Q^{2/5}$ に比例) と線火源 ($Q^{2/3}$ に比例) の中間値

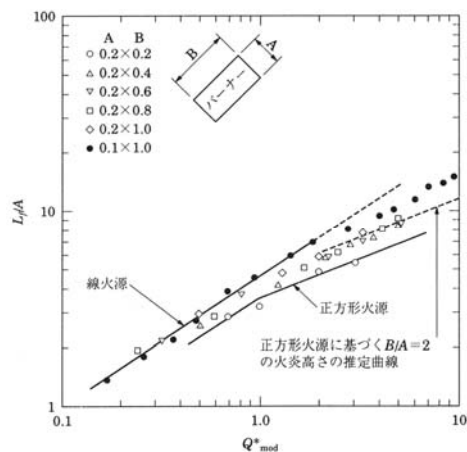
- 軸上温度、流速

▪ 線火源の関係式 : 縦横比 > 3

▪ 正方形火源の関係式 : 縦横比 < 3

火炎

■ 火源の縦横比と火炎高さとの関係



火炎

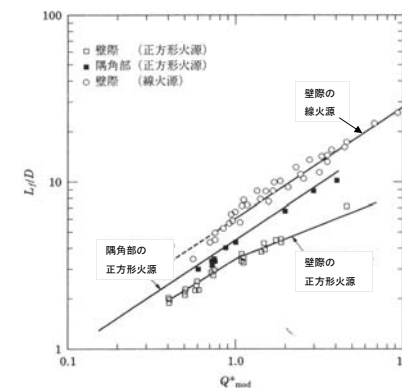
■ 壁面の影響

- 空気(酸素)の巻き込み
障害

→ 火炎高さ大、火炎の壁側への倒れ込み

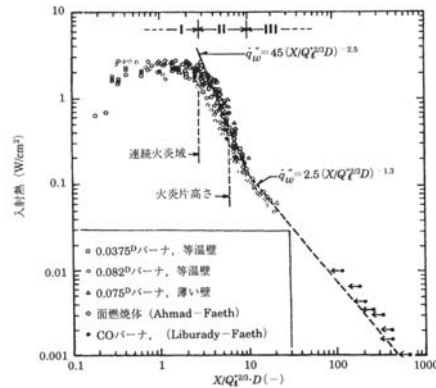
- 室の隅角部での出火

→ 急激な火災拡大



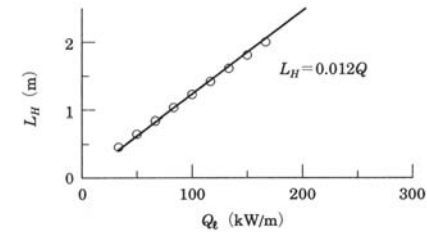
火炎

- 壁面の燃え拡がり
 - 未燃焼物(内装表面)への接炎→可燃物を加熱
- 壁面上の火炎の壁面への入射熱分布



火炎

- 天井面下の火炎
 - 火炎長さ∝発熱速度Q
 - 壁面の場合(火炎長さ∝Q^{2/3})よりも火炎が伸長
 - 単位面積当たりの発熱速度、酸素巻き込み量は一定



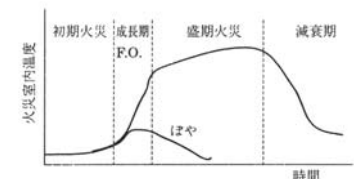
- 庇・バルコニー
 - 開口噴出火炎長さの抑制効果なし
 - 火炎を上階の壁面・開口部から隔離→延焼抑制

区画火災

- 区画火災
 - 囲われた空間で進展する火災
 - 影響因子
 - 区画の開口部の大きさ
 - 区画の大きさ
 - 区画を構成する壁・床・天井の材質
 - 区画へ持ち込まれる可燃物の量・表面積
 - 火災の成長過程

区画火災

- 初期火災
 - 限定範囲の燃焼、十分な酸素の供給、区画上方に煙の高温層形成
- 火災成長期
 - 極少量の可燃物量、限定された可燃物位置
 - 局所火災→鎮火
 - 通常
 - 燃え拡がり→フラッシュオーバー(爆発的な燃焼拡大)→火災室温度の急上昇
- 盛期火災
 - 燃料支配型火災 (ventilation controlled fire)
 - 火災性状が可燃物量に依存
 - 換気支配型火災 (fuel controlled fire)
 - 火災性状が開口部を介して火災室へ流入する空気量に依存
 - 長時間の盛期火災→構造体への熱的影響
 - 構造部材の保護(耐火被覆)の必要性
- 減衰期
 - 火災温度降下→鎮火



区画火災

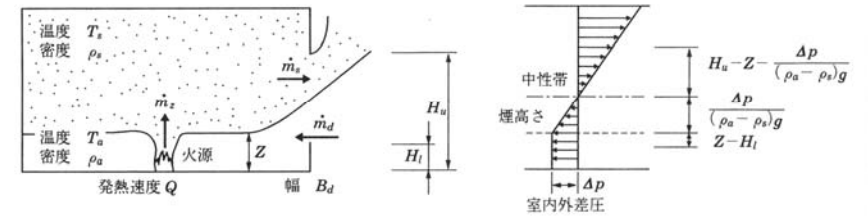
■ 初期火災

- 乱流拡散火災(連続火炎域、間歇火炎域、火災プルーム)の形成
- 2層の形成
 - 上部の高温煙層
 - 下部の空気層
- 継続的な煙の供給
 - 高温煙層の降下
 - 開口部を介して隣接空間に煙の伝播

区画火災

■ 初期火災

- 側壁に開口がある場合の煙層定常高さ予測



区画火災

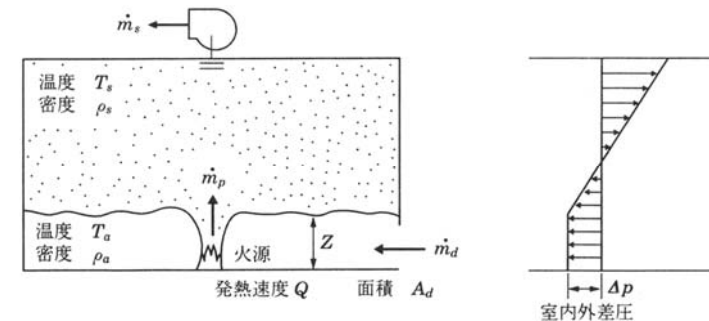
■ 初期火災

- 火災火源で発生する熱煙気流質量 (m_z)
- = 開口部から流出する気流質量 (m_s)
- = 開口部から流入する気流質量 (m_d)
- $m_s = 2 \cdot \alpha \cdot B_d \cdot (2 \cdot g \cdot \rho_s \cdot \Delta p)^{1/2} (H_u - Z - \Delta p / \Delta \rho \cdot g)^{3/2} / 3$
- $m_d = \alpha \cdot B_d \cdot (Z - H_l) \cdot (2 \cdot \rho_a \cdot \Delta p)^{1/2} + 2 \cdot \alpha \cdot B_d \cdot (2 \cdot g \cdot \rho_a \cdot \Delta p)^{1/2} (\Delta p / \Delta \rho \cdot g)^{3/2} / 3$
- ρ_a : 雰囲気空気の密度
- ρ_s : 熱煙気層の密度
- $\Delta \rho = \rho_a - \rho_s$
- H_u : 開口部上部高さ
- H_l : 開口部下部高さ
- B_d : 開口部幅
- $m_s = m_d$ となるまで数値計算

区画火災

■ 初期火災

- 天井に開口がある場合の煙層定常高さ予測



区画火災

■ 初期火災

- 天井面: 排気口、床面近傍: 給気口

$$m_s = \alpha \cdot A_e \cdot \{2 \cdot \rho_s \cdot (-\Delta p + \Delta \rho \cdot g(H_e - Z))\}^{1/2}$$

$$m_d = \alpha \cdot A_d \cdot (2 \cdot \rho_a \cdot \Delta p)^{1/2}$$

- 機械排煙(風量 V_s)の場合

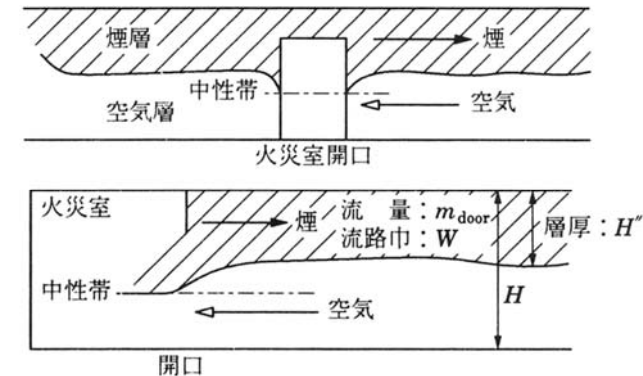
$$m_s = \rho_s \cdot V_s$$

- $m_s = m_d$ となるまで数値計算

区画火災

■ 初期火災

- 廊下での煙層の形成概念



区画火災

■ 初期火災

- 廊下の天井に沿った煙流動
 - 流動速度: 1m/s (=人の通常歩行速度)

- 階段室

- 3~5m/s (=1階/1秒)

- 廊下での煙層厚さ H''

$$H'' = 0.56 \cdot [m_{door} / \{W^2 \cdot \rho_s (\rho_a - \rho_s)\}]^{1/3}$$

ρ_a : 空気密度

ρ_s : 煙密度

W: 廊下幅

m_{door} : ドアからの熱煙気流の流出質量速度

区画火災

■ 火災成長期

- 不燃化内装の場合

- 家具などの可燃物の燃焼→火災の拡大
- 可燃物密度小: 緩慢な燃焼拡大
- 可燃物密度大: 燃焼拡大速度大

- 可燃性内装の場合

- 急激な燃焼拡大→区画内全体→フラッシュオーバー
(O_2 濃度の急激な減少、 CO_2 濃度の急増・10%、CO濃度・数%)

区画火災

■ 盛期火災

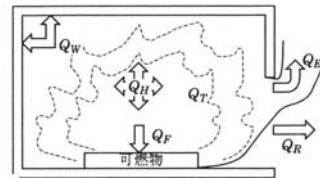
- 火災区画内の温度性状の予測

■ 熱収支ゾーンモデルによる整理

- 区画内の可燃物燃焼に伴う燃焼発熱量 : Q_H
- 壁・床・天井への失熱量 : Q_W
- 可燃物への伝熱量 : Q_F
- 開口からの噴出熱気流が持ち去る熱量 : Q_E
- 開口からの輻射失熱量 : Q_R
- 火災区画温度上昇に寄与する熱量 : Q_T
- 熱収支バランス ($Q_H = Q_W + Q_F + Q_E + Q_R + Q_T$) → 火災区画内の温度推定

■ 簡便式: $T_f = 1280 \cdot (q_b / \sqrt{f_{op}} \cdot \sum(A_c \cdot I_h))^{2/3} \cdot t^{1/6} + T_0$

- q_b : 燃焼発熱量 (MW)
- A_c : 周壁面積 (m^2)
- I_h : 熱慣性 ($kWs^{1/2}/m^2 \cdot K$)
- f_{op} : 有効開口因子 ($m^{5/2}$)
- t : 火災継続時間 (min)
- T_f : 火災室内温度 (K)
- T_0 : 外気温度 (K)



区画火災

■ 盛期火災

- 燃焼速度 $m_b =$ 可燃物の重量減少速度

- 換気支配型火災

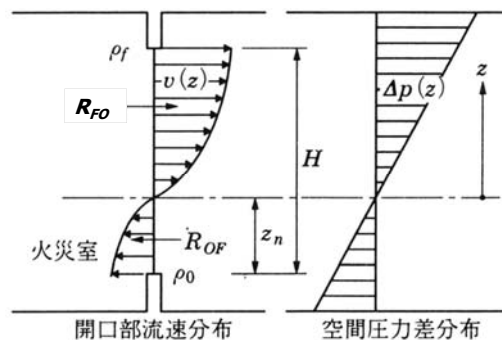
- 耐火建築物、区画内に可燃物が多量にある場合
- 燃焼速度 \propto 換気因子に依存
 - 換気因子: 開口の大きさで決定される換気量の大きさを表すパラメータ
- $m_b = (5.6 \sim 6.0) A \sqrt{H}$ (kg/min)
 - $A \sqrt{H}$: 換気因子 (開口因子)
 - A : 開口面積 (m^2)
 - H : 開口高さ (m)

区画火災

■ 盛期火災

- 換気支配型火災

■ 火災室の開口部における流速・圧力差分布



区画火災

■ 盛期火災

- 換気支配型火災 - 流出・流入空気量

- 中性帯からの高さ z (m) における流速 $v(z)$ (m/s)

$$v(z) = \{2\Delta p(z) / \rho_f\}^{1/2} = (2g\Delta p / \rho_f)^{1/2} z^{1/2}$$
 - $\Delta p(z)$: 中性帯から上方での圧力差 (Pa)
 - ρ_f : 火災室内の空気密度 (kg/m^3)
 - ρ_0 : 外気密度 (kg/m^3)
 - Δp : 気体密度差 ($= |\rho_0 - \rho_f|$) (kg/m^3)
 - g : 重力加速度 (m/s^2)
- 流出空気量

$$R_{FO} = a \cdot B \cdot \int_0^{H-z_n} \rho_f \cdot v(z) dz = 2 \cdot a \cdot B \cdot (2 \cdot g \cdot \rho_f \cdot \Delta p)^{1/2} \cdot (H - z_n)^{3/2} / 3$$
- 流入空気量

$$R_{OF} = 2 \cdot a \cdot B \cdot (2 \cdot g \cdot \rho_0 \cdot \Delta p)^{1/2} \cdot z_n^{3/2} / 3$$
 - a : 開口係数
 - B : 開口幅 (m)
 - H : 開口高さ (m)
 - z_n : 中性帯高さ (m)

区画火災

■ 盛期火災

－ 換気支配型火災

－ 流出・流入空気量

▪ $R_{FO} = R_{OF}$ (熱分解ガスの発生量無視)

$$R_{OF} = (2/3) \cdot \alpha \cdot B \cdot H^{3/2} \cdot (2g)^{1/2} \cdot \rho_o [(1 - T_o/T_f) / \{1 + (T_f/T_o)^{1/3}\}^3]^{1/2}$$

T_f : 火災室内温度 (K)

T_o : 外気温度 (K)

▪ $T_f = 500^\circ\text{C}$ 前後 $\rightarrow [] = \text{const.}$

$$R_{OF} = (0.5 \sim 0.52) \cdot A \cdot \sqrt{H}$$

▪ 流入空気量 + 化学量論的空気燃料費 \rightarrow 区画内での可燃性ガスの消費速度 (m_c)

－ 木材 1kg の完全燃焼の所要空気量 5.7kg

$$m_c = 0.09 \cdot A \cdot \sqrt{H} \quad (\text{kg/s})$$

区画火災

■ 盛期火災

－ 燃料支配型火災

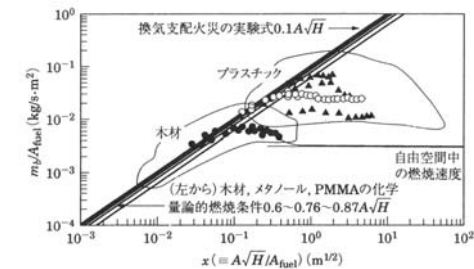
▪ 開口の大きさに対して可燃物量が少ない場合

▪ 可燃物の表面積が火災性状支配

▪ 燃焼型支配因子 = 換気因子 / 可燃物表面積 (A_{fuel})

－ 燃焼型支配因子小 \rightarrow 換気支配型火災

－ 燃焼型支配因子大 \rightarrow 燃料支配型火災 (自由空間中での燃焼速度)



区画火災

■ 盛期火災

－ 燃料支配型火災

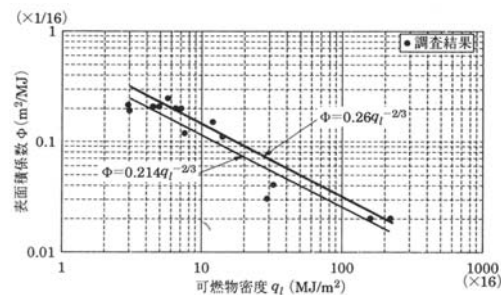
▪ $A_{\text{fuel}} = \Phi \cdot q_l \cdot A_r$

q_l : 可燃物密度

Φ : 表面積係数

A_r : 区画床面積

▪ 可燃物実態調査による収納可燃物と表面積係数の関係



区画火災

■ 盛期火災

－ 開口からの噴出熱気流の中心軸

▪ 縦長の開口部

－ 上方に向かうに従い壁から離れる

▪ 横長の開口部

－ コアング効果

▪ 一旦壁から離れるが、再び壁沿いに吸い寄せられる

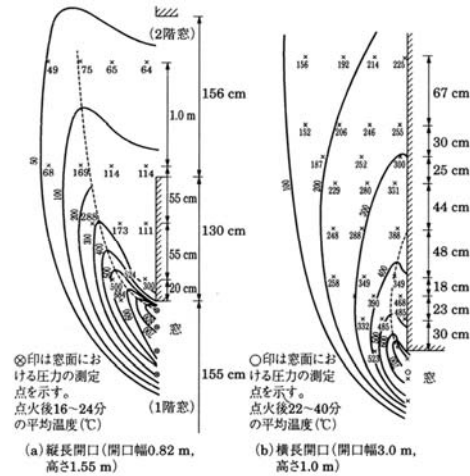
－ 上方階への延焼拡大の危険性大

▪ 十分高いスパンドレル、庇の設置による上方階への壁面付近への入射熱低減

区画火災

■ 盛期火災

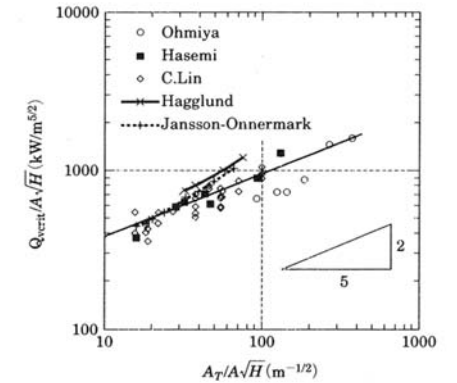
- 開口からの噴出熱気流の温度分布と中心軸



区画火災

■ 盛期火災

- 噴出熱気流の発生条件
 - 噴出火炎の最小発熱量を換気因子で除した値 ($Q_{\text{verit}}/A\sqrt{H}$)
 - 区画内の周壁面積を換気因子で除した値 ($A_T/A\sqrt{H}$)



区画火災

■ 盛期火災

- 建築物に持ち込まれる可燃物量の増加
- 高分子系材料(高発熱量)を用いた家具
 - 噴出熱気流の高温域(火炎領域)の伸長
 - 未燃焼のまま火災区画外へ噴出した可燃性ガス量を考慮
- 高層建築物
 - 外気風の影響を考慮