

建築防火工学

野口貴文

煙

煙

- 火災時に発生する煙
 - 流動・汚染しながら、
 - 見通し距離の低下をもたらす。
- 避難安全上重要な危機要因(hazard)
 - 煙に含まれる有毒ガス
- 煙の発生(production)と流動(movement)

煙

- 煙(smoke)
 - 火災時の不完全燃焼で生じた煤や低分子量燃焼生成ガスが縮合してできた微粒子
 - 固体(炭化水素粒子)、液滴(タール粒子)、表面を液体で覆われた固体微粒子の複合体
 - 燃焼や熱分解によるガス(CO₂、CO、HCN、HCl、炭化水素ガス)も共分散
- 粉塵(dust)
 - 固体の破碎によって生じた微粒子
- フューム(fume)
 - 熱分解や電気分解によって固相から気相へ噴出飛散した微粒子
- ミスト(mist)
 - 浮遊分散した液体微粒子

煙の性質

- 煙の組成
 - 可燃物の種類(木質系の家具、合成樹脂、暖房用燃料 etc.)、燃焼条件(温度、酸素濃度、気流の有無)によって異なる
 - 固体の煙粒子
 - 熱分解し炭化が進んだ高分子や煤の混合したもの
 - 液体の煙粒子
 - 炭化水素高分子の酸化で生じた水蒸気、それに溶け込んだ有機酸、アルデヒド、炭化水素、タールなどの凝縮体
- 煙粒子の粒径
 - 木質系材料 : 0.1~0.2 μ m
 - プラスチック系材料 : 0.7~1.5 μ m

煙濃度の評価

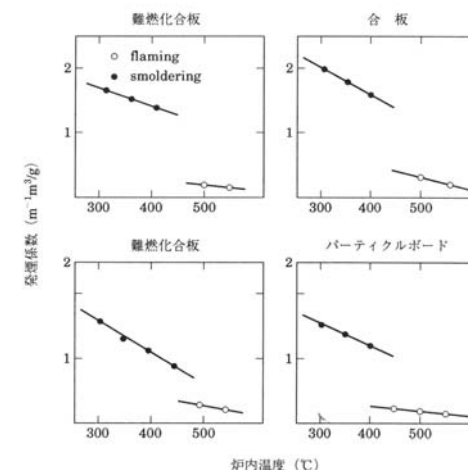
- 一定体積中の煙粒子の質量(フィルターで濾過し秤量)
- 一定体積中の粒径ごとの煙粒子の個数
- 単位距離当たりの光の減衰(濁度): C_s
 - $C_s = -1/L \cdot \ln(I/I_0)$ [1/m]
 - L: 光源から目までの距離(光路長さ)
 - I: 光路長さLにおける光の強度
 - I_0 : 光源における光の強度
- 煙濃度($C_s: m^{-1}$)と見通し距離($L_v: m$)の積は一定
 - 扉、反射型標識: $C_s \cdot L_v = 2 \sim 4$
 - 窓、発光型標識: $C_s \cdot L_v = 5 \sim 10$
- 見通し距離
 - 光の強さ、コントラストの強弱
 - 目の粘膜に対する刺激の強さ
 - セルロース系の燃焼 → アルデヒドを含む煙が発生
 - 塩化ビニルの燃焼 → 塩化水素を含む煙が発生
 - 石油系の燃焼 → 煙の刺激小

煙の発生

- 燃焼温度、高→煙発生能、小(一般)
- 塩化ビニルは逆
 - 塩素の分解→塩素ラジカル→燃焼反応を阻害・抑制 → 未燃の炭化水素増加
- 木材
 - 燻焼と有炎燃焼の境界温度(450 $^{\circ}$ C)で煙発生量の大幅な変化
- 煙量 = 工学的煙濃度(C_s) × 煙を含む気積(V)
- 燃焼量に比例して煙量が増加(早期燃焼状態)

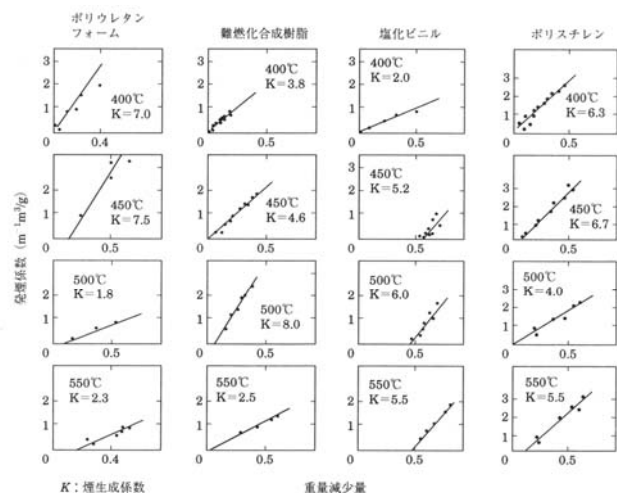
煙の発生

- 発煙量の温度依存性



様々な可燃物からの単位質量当たりの発煙量 (=煙濃度×煙による汚染された気積)の温度依存性 その2
 一般に高い温度で燃焼するほど単位質量当たりの煙発生量は小さい。

煙の発生



K: 煙生成係数
 様々な可燃物からの単位質量当たりの発煙量 (=煙濃度×煙による汚染された気積) の温度依存性 その1
 一般に高い温度で燃焼するほど単位質量当たりの煙発生量は小さい。

煙濃度の予測

■ 煙濃度の予測 (C_{sm}^* : 無次元化した煙濃度)

■ $C_{sm}^* = 1 / (0.035 + 0.15 \cdot r/H)^{2/3}$

■ $r/H \geq 0.2$ (天井面下に沿った分布の場合)

■ r: 火源中心からの水平距離

■ H: 火源から天井面までの高さ

■ 天井流の温度

■ r/Hの-4/3乗で減衰、伝導・放射による熱損失の影響

■ 煙濃度

■ r/Hの-2/3乗で減衰、熱よりも遠方まで到達

煙の影響

■ 煙中の歩行速度

■ 見通し距離の影響

■ 目に対する刺激の有無・大小の影響

■ 視覚情報の低下

■ 天井下への煙の滞留・成層→照明遮断→光量低下→心理的圧迫

■ 生理機能の低下

■ 目・喉・鼻の粘膜に刺激→生理的負荷→判断力・行動力の低下

■ セルロース系可燃物

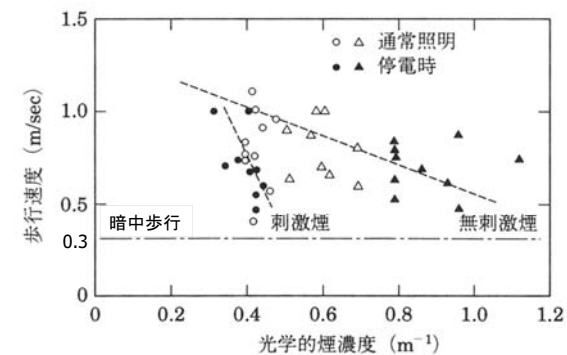
■ 高温の煙→呼吸器系に強い刺激→咳き込み→呼吸数増加→吸引有毒ガス量の増加

■ 不適切な避難誘導、避難経路情報の不備

■ 不安感、心理的ストレス→判断力・行動力の低下→集団行動

煙の影響

■ 煙中の歩行速度



煙中の歩行速度

目に強い刺激のある場合は、歩行速度の低下が著しい。

煙の影響

■ 刺激を与える煙濃度

	目		鼻		喉		息苦しい		
	煙いと感 じ始める	チクチク した痛み	かなりの 痛感	涙が止ま らない	鼻汁が出 る	かなりの 痛感		ヒリヒリす る	かなりの 痛感
杉 燻焼						0.09	0.02		
杉 有炎燃焼	2.28	0.44	0.37- 0.47			0.28		0.36	
麻 燻焼	0.02- 0.07	0.025- 0.07	0.06	0.06	0.08		0.07	0.095	
綿 燻焼		0.016	0.06	0.14	0.14	0.016	0.016	0.06	0.22
新聞紙 有炎燃焼	0.23			0.3					
ガソリン 有炎燃焼									0.72

煙の流動

■ 煙の流動

- ①火災室での天井側から充満してくる煙層降下
 - Smoke Filling
 - 在館者の避難余裕時間に関係
- ②廊下階段など建物内の流動
 - Smoke Movement
 - 在館者の避難余裕時間に関係
- ③開口部からの噴出
 - Flow-out, Ejection



煙の流動

■ 煙層の降下

■ 降下速度

- 火炎・プルームへの雰囲気空気の巻き込み量の影響
- 火災室の規模(床面積、天井高さ)の影響

■ 熱煙気流の質量 m_z

$$m_z = 0.21 \cdot Q_D^{*1/3} \cdot (Z/D + Z_0/D)^{5/3}$$

$$Q_D^* = Q/\rho_\infty \cdot C_p \cdot T_\infty \cdot (g \cdot D)^{1/2} \cdot D^2$$

■ Z: 仮想点源からの垂直上方距離

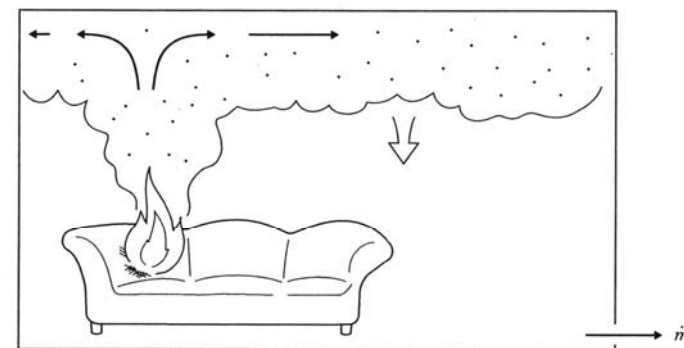
- Zukoski : $Z_0/D = 0.5 - 0.33L_f/D$ (床面上の火源)
- Heskestad : $Z_0/D = 0.8 - 0.33L_f/D$ (床から浮いた状態の火源)
- Thomas : $Z_0 = 1.02 - 0.083Q^{2/5}$
- Thomas : $Z_0 = 1.5\sqrt{A_f}$
- D: 火源の代表径、 L_f : 火炎長さ、 A_f : 火源面積

■ 実火災時(長崎屋火災)

- 100kgの吊り下げカーテンの燃焼→2分間で床面積約800m²、高さ2.7mの空間に煙充満

煙の流動

■ 煙層の降下



煙層降下

- ①天井下に熱煙気層が形成され、②煙層降下を開始され、
- ③ドアなどの隙間から下層の空気が押し出される。

煙の流動速度・濃度

- 区画天井流の気流温度・速度、煙濃度
 - 火災感知器の作動、スプリンクラーの作動の予測に重要
 - 天井に達する熱煙気流
 - 熱流量 Q_c と上昇温度 ΔT_s の関係
 - $Q_c \propto \rho_s \cdot C_{p_s} \cdot v \cdot \Delta T_s \cdot A \propto \rho_s \cdot C_{p_s} \cdot \sqrt{\Delta T_s} \cdot \Delta T_s \cdot A = \rho_s \cdot C_{p_s} \cdot \Delta T_s^{3/2} \cdot A$
 - $\rho_s \cdot C_{p_s}$ の变化小(C_{p_s} :熱煙気流の比熱)
 - $Q_c / (\rho_s \cdot C_{p_s} \cdot A) \equiv Q \propto \Delta T_s^{3/2}$
 - 熱流量 Q_c と気流速度 v_c の関係 (ランキン則: $v \propto \sqrt{\Delta T}$)
 - $v_c \propto \sqrt{\Delta T_s} = \sqrt{Q_c^{2/3}} = Q_c^{1/3}$
 - $\Delta T_s \propto H^{-5/3}$ 、 $v \propto H^{-1/3}$ の減衰性状を呈して天井に衝突

煙の流動速度・濃度

- 区画天井流の気流温度・速度、煙濃度
 - 天井流(天井面に沿う流れ)
 - 天井流の上昇温度 ΔT_s に対する主支配則
 - $\Delta T_s \propto Q^{2/3} / H^{5/3} = Q^{2/3} / (H^{3/3} \cdot r^{2/3}) = (Q/r)^{2/3} / H$ の性質で流動を開始
 - A: 熱煙気流の流動断面積
 - ρ_s : 熱煙気流の密度
 - C_{p_s} : 熱煙気流の比熱
 - ΔT_s : 熱煙気流の雰囲気からの上昇温度
 - H: 床近傍の火災火源からの高さ(天井高さ、代表長さ)
 - r: 天井面に沿った流動長
 - 天井流の速度 v_c に対する主支配則
 - $v_c \propto Q^{1/3} / H^{1/3} = Q^{1/3} \cdot H^{1/2} / r^{5/6}$ の性質で流動を開始

煙の流動速度・濃度

- 区画天井流の気流温度・速度、煙濃度
 - 天井流(天井面に沿う流れ)
 - Alpertの提案
 - 天井流上昇温度 ΔT_s
 - $= 5.38 \cdot (Q/r)^{2/3} / H$ ($r/H \geq 0.18$)
 - $= 16.9 \cdot Q^{2/3} / H^{5/3}$ ($r/H \leq 0.18$)
 - 天井流速度 v_s
 - $= 0.195 \cdot (Q/H)^{1/3} \cdot (r/H)^{-5/6}$ ($r/H \geq 0.15$)
 - $= 0.96 \cdot (Q/H)^{1/3}$ ($r/H \leq 0.15$)
 - Heskestad-Delichatsiosの提案
 - $\Delta T^* = (\Delta T_s / T_\infty) / Q^{*2/3} = (0.188 + 0.313 \cdot r/H)^{-4/3}$
 - $Q^* = Q / (\rho_\infty \cdot C_{p_\infty} \cdot T_\infty \cdot \sqrt{gH \cdot H^2})$
 - $v = 0.68 \cdot (\Delta T^*)^{1/2} \cdot (r/H)^{-0.63}$ ($r/H \geq 0.3$)

煙の流動速度・濃度

- 区画天井流の気流温度・速度、煙濃度
 - 須川の予測式(上昇温度 ΔT 、気流速度 v 、煙濃度 C_s)
 - $\Delta T = k \cdot \{(H+r)/Q^{2/5}\}^{-5/3}$
 - $v = H / (H+2r) \cdot \sqrt{(\Delta T_s / T_\infty) \cdot g \cdot H}$
 - $C_s = k_s \cdot \{(H+2r)/Q^{2/3}\}^{-1}$
 - $k = 20 \sim 22$
 - k_s : 10~15(% $\cdot kW^{3/2}$) (ウレタンフォーム、有炎燃焼)
 - : 35 (ポリスチレンフォーム、有炎燃焼)
 - : 2.5 (n-ヘプタン・プロパンガス、有炎燃焼)
 - : 4.5~5 (木クリブ、有炎燃焼)
 - : 1200~1800 (綿シャツ、燻焼)
 - $Q = a \cdot (t - t_0)^2$
 - 熱煙気流は4~5秒天井に到達→天井下流れは火源での変化と同期

