

機関番号：3 2 6 6 0

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：2 1 7 6 0 4 5 4

研究課題名 (和文) 大平面空間における煙流動性状に関する研究

研究課題名 (英文) Study on smoke movement characteristics in large area room

研究代表者

水野 雅之 (MIZUNO MASAYUKI)

東京理科大学 総合研究機構・講師

研究者番号：4 0 3 6 6 4 4 8

研究成果の概要 (和文)：大平面空間での火災時の煙流動性状は、煙先端部で空気を巻き込み、さらに天井流下部からの空気連行や天井面への失熱によって、煙の流動距離が長いほど温度が低下するため、その温度勾配による位置エネルギーを動力源とする水平方向への煙の移動が抑制され、結果として煙層が降下すると考えられる。本研究では、先端部での巻き込みを無視し、天井流の下面に連行されると考えられる空気量及び天井面への失熱を考慮した煙の流動性状モデルを作成した。

研究成果の概要 (英文)：A ceiling jet (Smoke movement under the ceiling of fire room expanding from fire origin) in large area room flows with combining the air at its front. It also losses the heat to the ceiling and additionally entrains cooler air from below the ceiling jet. And, the temperatures in ceiling jet will decrease as the radius (the distance of flow) increases. I think that the interface between upper smoke and lower air will descend as the radius increase because the smoke horizontal motion obtained by the potential energy based on the thermal gradient will be decreased. The thicknesses and temperatures in the ceiling jet were examined by creating the calculation model on the smoke movement considering the thermal losses to the ceiling and additional entrainments from below the ceiling jet without regard to combining the air at its front of the flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築環境・設備

キーワード：火災、煙流動、大空間、模型実験、相似則、連行

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ

近年、国内では田中哮義 (京都大学)、鈴木圭一 (清水建設) らのグループが従来の避難安全評価に多数適用されてきた二層ゾーンモデル¹⁾を拡張した多層ゾーン概念に基づく煙流動解析モデルを開発している²⁾。この

モデルは空間の平面的な広がりに対して一様分布を仮定し、鉛直方向の密度、濃度等の分布を陽に評価している。また、国外では米国 NIST (国立標準技術研究所) が開発した火災性状に関する CFD (数値流体力学) モデルである FDS³⁾ (Fire Dynamics Simulator) について、燃焼モデルや乱流モデルの提案と実験との比較検証が実施されている^{例えば 4)}。CFD モ

デルは国外では設計実務での適用例も比較的多いが、国内では個別建物への適用にあたっての計算手法の妥当性検証の煩雑さなどの理由から火災安全設計においては中心的役割を担っていない。

本研究では、火災初期の煙層の形成過程並びに煙層形成後の煙層が厚さを増大させる成長過程における天井面下の煙流動、並びにその流れが壁面に到達した壁近傍の煙流動を対象とし、将来的な予測計算技術の開発という点では多層ゾーンモデルを、平面的な密度分布も考慮した三次元モデル（CFD モデルのコントロールボリュームを粗くしたような簡易予測モデル）の開発を目指している。建築設計での実用性を考慮すると、CFD のような精緻計算は汎用的な煙流動計算手法としては適していないと考える。

(2) これまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯

地下鉄駅舎の避難安全を目的として階段遮煙を実現するために、日常換気システムであるソーラーチムニーを火災時の排煙シャフトとして利用するパッシブ煙制御システムを開発し、その実用性を地下鉄駅舎1/20 模型を用いて検証した⁵⁾。このシステムでは、階段を介して外気をホームに取り込み、チムニーから屋外へ循環させ、駅ホームでの火災に対して階段前に垂れ壁を設けることで、その下の開口部で遮煙するものである。この研究では、左下図に示すようにホーム火災によって生じる煙流動が垂れ壁に到達した後、下方に煙層厚さを増して火源側に戻る性状を実験調査における観察から明らかにし、これをモデル化することで、垂れ壁下部開口での外気の流入による圧力と、垂れ壁に到達した煙が厚さを増すことで生じる煙層の階段側への圧力を比較することで階段遮煙の是非を導出できることを示した。

ここで着目すべき点は、煙層は火源上方の火災プルームが天井流となって拡大し、垂れ壁に到達することで下方に煙層厚さを増し、天井流の下を火源方向に戻る循環流が生じ、これらが成層化されることである。ゾーンモデルによる煙降下（smoke filling）の概念は、平面的には性質が均一であることを仮定して、火災プルームの流入に基づく体積膨張に伴って煙層厚さを増大させるものであり、比較的小規模な空間であれば平面的な性質の不均一が無視できるレベルと考えられるかもしれないが、大空間になると天井流の温度減衰のみならず、天井流の壁面到達時の煙の挙動が大きく異なると予想される。すなわち、煙層の成長過程においては、天井流が火源直上から離れることによる温度減衰が大きいため壁面到達時に循環流を生じるだけの十分

な浮力を有しておらず結果的に下部空気層に煙が供給されると考えられる。空間の壁面に避難出口が配置されることを考えると、例えば事務室内の個室等の在館者が避難開始に遅れた場合、避難出口の確認に係る見通し距離の低下や煙そのものが与える恐怖心が避難安全上支障を来すことが懸念される。国内でも大平面の超高層オフィスビルが供給され続けており、百貨店においては売場の開放性を考慮して大平面で設計することが常套手段であり、建設ラッシュに沸く中国などのアジア諸国を見ても空間の大平面化の傾向が甚だしいため、大平面化に対応できる実用的な煙流動モデルの開発が急務である。

(3) これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容

前述の通り、地下鉄駅舎のホーム火災の模型実験から煙層の成長過程をモデル化している⁵⁾。ただし、このモデルでは、平面的に均一な性質として煙層上段と煙層下段、そして空気層の三層ゾーンを仮定し、垂れ壁近傍での煙層上段から下段への煙伝播を近似している。一方、本研究によって開発するモデルは、空間の周壁に到達する天井流の温度減衰を陽に扱った平面的な性質の不均一さを考慮するものであり、その点を改善する必要がある。また、壁面到達時の煙の挙動として循環流が生じない境界条件を明らかにすると共に、その結果として空気層に煙が混合することをモデル化しなければならない。

(4) 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

天井高さの低い大平面空間の1/10 模型による火源規模に応じた天井面下の煙拡大過程を実験的に究明する一方、若松ら⁶⁾が一次的な通路空間で適用性を確認した密度流を仮定したモデルを拡張し、放射状に煙が伝播する二次元的な拡がりや考慮したモデルを作成し、同モデルによる予測可能性を検討する。

(5) 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

ゾーンモデルの平面的な大きさの適用範囲を解明することは、建築火災安全工学の分野では長年の命題である。本研究では、フルード相似則に基づく模型レベルでの火災実験、密度流を仮定した予測モデルでの解析によって、天井面下の平面的な性質の不均一さを考慮した煙流動モデルを開発することに独創性を有し、また煙層の厚さや密度、さらに天井流の壁面到達時の煙挙動に着目してゾーンモデルの適用性を評価することに学術的な特色を有している。本研究によって、ゾーンモデルの適用範囲を明らかとし、大平面空間にお

ける天井流の壁面到達時の循環流及び下部空気層への煙の混合性状が解明されれば、新たな避難安全評価指標（避難出口近傍での下部空気層への煙の混合に対する見通し評価など）や排煙方式（壁面近傍天井面での機械排煙強化や天井開口設置による天井裏への煙の導入による下部空気層への煙混合の緩和など）の開発なども期待される点は意義深いと言える。

<参考文献>

- 1) 社団法人建築研究振興協会：BRI2002：二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム、(2003)
- 2) 鈴木圭一、田中哮義、原田和典、吉田治典：火災空間における垂直温度分布の予測モデル 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その1、日本建築学会環境系論文集、No.582 (2004)、pp.1-7
- 3) URL <http://fire.mist.gov/>
- 4) D. Rusch, L. Blum, A. Moser, T. Roesgen: Turbulence model validation for fire simulation by CFD and experimental investigation of a hot jet in crossflow, Fire Safety Journal, Vol.43, 2008, pp.429-441
- 5) 徳永英、天野賢志、内山聖士、水野雅之、大宮喜文、辻本誠：パッシブセイフティシステムによる火災時の地下鉄駅舎内煙流動制御に関する基礎的研究 その4 垂れ壁近傍での煙流動性状予測、日本建築学会大会学術講演概要集A-2、2008、pp.257-258
- 6) 若松高志、松下敬幸：慣性力および熱損失が煙速度におよぼす影響の検討 煙先端部の水平伝播性状に関する研究 その2、日本建築学会構造系論文集、第477号、pp.177-184、1995

2. 研究の目的

昨今、二層ゾーン煙流動解析モデルの適用範囲が問題となる大平面空間が出現している。こうした中、建築設計における避難安全評価ではCFDモデルほどの精緻な手法では煩雑であるため、大平面空間での平面的な煙の性質の不均一さを評価できる煙流動予測手法の開発が求められている。本研究ではこうしたモデル開発に取り組み、またゾーンモデルの適用範囲を検討することを目標とし、煙の水平伝播を考慮したモデルを作成することを目的とする。

3. 研究の方法

天井面下の煙流動に関する計算モデルを作成し、その流動性状に関する無次元数を算定し、考察する。また、模型実験によって煙流動性状を観察する。

(1) 煙流動モデルの作成

① モデルの基本構造

火源から生じたプルームが天井に衝突し、

天井流を形成するが、その後の煙の天井面下の水平方向の煙伝播過程を、厚さ方向に均質な計算ボリュームを仮定して伝播する質量流量とその温度から煙層厚さを算定する計算モデルを構築する。図1に本検討に用いる計算モデルの概念図を示す。

類似の既往研究として、松下と若松は、密度流を仮定した煙の水平伝播過程の予測モデルを構築し、廊下のような細長い空間を対象として煙先端部の水平伝播性状を分析している^{1) 2)}。本検討で対象とする煙流動は、煙が平面的に広がる空間を対象とするため、天井面への失熱や下部空気の連行の影響が、1次元的な流れとなる細長い空間と比較すると大きくなることが予想される。従って、本検討においては図2に示すように各時間ステップで同心円状に広がる範囲について、均質な性質を持つ煙を仮定したラグランジェ型の計算モデルを採用する。

予測対象範囲としては、煙の水平伝播過程を、火源を中心とする軸対称を仮定し、図2の i) に示すように四分円の円弧が半径 r に対して順次拡大するモデルとする。また、矩形の室内での現象を仮定し、火源から距離が短い方の壁に煙が到達した後は、図2の ii) に示すように円弧が平行移動するような計算ボリュームを仮定する。

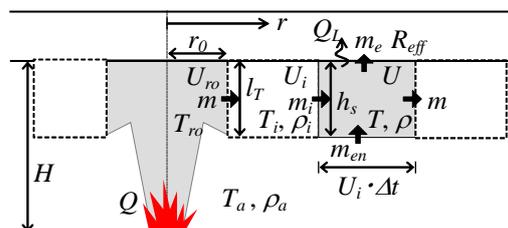


図1 煙の水平伝播過程の計算モデルの概念

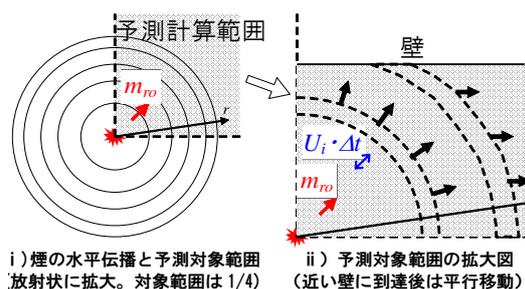


図2 計算モデルの煙水平伝播過程イメージ

② 煙の水平伝播の発生

煙の水平伝播の発生には天井流モデルで知られるAlpertの式³⁾を用いてモデル化する。すなわち、煙の水平伝播の発生位置を半径 r_0 [m] によって設定し、その位置における温度 T_{ro} [K]、流速 U_{ro} [m/s] を次式により算定する。

$$T_{ro} - T_a = \begin{cases} 16.9Q^{2/3}/H^{5/3} & (r/H \leq 0.18) \\ 5.38(Q^{2/3}/H^{5/3})(r/H)^{-2/3} & (r/H > 0.18) \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{ro} = \begin{cases} 0.96(Q/H)^{1/3} & (r/H \leq 0.15) \\ 0.195(Q/H)^{1/3}(r/H)^{-5/6} & (r/H > 0.15) \end{cases} \quad (2)$$

また、天井流の厚み l_T [m]はAlpertにより次式で与えられている。

$$l_T = 0.112[1 - \exp(-2.24r/H)] \quad (0.26 \leq r/H \leq 2.0) \quad (3)$$

ここで、火源に近く半径が短い範囲では密度噴流の様相を呈していると予想され、火源からの距離が離れているほどフルード数が1に近づき、安定した流れになっていると考えられる。そこで、上式の適用範囲の半径が最大となる天井高 H [m]の2倍を仮定する。また、(1)(2)式の温度、流速は最大値を対象としたモデル式であるが、ここでは(3)式で算定される厚さに同等であることと仮定し、煙の水平伝播過程の最初の計算ボリュームに流入する質量流量 m_{ro} [kg/s]を次式で定義する。

$$m_{ro} = \rho_{ro} U_{ro} l_T (2\pi r / 4) \quad (4)$$

③煙の水平伝播の基礎式の展開

煙の水平伝播過程を対象として、図1に示すパラメータについて、質量保存とエネルギー保存から次式が得られる。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = m_i - m - m_e + m_{en} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho V T) = c_p m_i T_i - c_p m T - c_p m_e T + c_p m_{en} T_a - Q_L \quad (6)$$

ここで(6)式の左辺を展開し、(5)式と連立することで次式を得る。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p \rho V} \{c_p m_i (T_i - T) + c_p m_{en} (T_a - T) - Q_L\} \quad (7)$$

また、(5)式の左辺は、状態式 $P = (\rho_a / M_a) R T_a$ を考慮し、さらに本検討では圧力変化項を無視($dP/dt = 0$)することを仮定すれば次式を得る。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \rho \frac{dV}{dt} - \frac{\rho V}{T} \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

ここで上式に(5)式と(7)式の関係代入し、両辺に $c_p T$ をかけて整理することで次式が得られる。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{c_p \rho T} (c_p m_i T_i - c_p m T - c_p m_e T + c_p m_{en} T_a - Q_L) \quad (9)$$

(2)煙の水平伝播の予測方法

①煙層温度 T と質量流量 m

時間ステップ毎に計算ボリュームで定常状態を仮定し、温度と次のステップへの質量流量を算定する。具体的には(7)式と(9)式で $dT/dt = 0$ 、 $dV/dt = 0$ を仮定し、 $Q_L = hA_w(T - T_w)$ を代入し、次式を得る。

$$T = \frac{c_p m_i T_i + c_p m_{en} T_a + hA_w T_w}{c_p m_i + c_p m_{en} + hA_w} \quad (10)$$

$$m = \frac{c_p m_i T_i - c_p m_e T + c_p m_{en} T_a - hA_w (T - T_w)}{c_p T} \quad (11)$$

②天井への失熱量 Q_t

前項の A_w [m²]、 T_w [K]は計算ボリュームが面する天井の面積と絶対温度、 h [kW/m².K]は次式の総合熱伝達率である。

$$h = \varepsilon_s \varepsilon_w \sigma (T_s^2 + T_w^2)(T_s + T_w) + h_c \quad (12)$$

ε [-]は放射率、 σ はステファンボルツマン定数 (5.67×10^{-11} kW/m².K⁴)、 T [K]は絶対温度であり、添え字 s は煙層、 w は天井面を表す。 h_c [kW/m².K]は対流熱伝達率であり、平行な平板に沿う流れの強制対流の平均ヌッセルト数 Nu に基づいて与える。

$$h_c = Nu \cdot \lambda / L \quad (13)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} & (20 < Re < 3 \times 10^5) \\ 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & (3 \times 10^5 < Re < 10^8) \end{cases} \quad (14)$$

ここに λ は空気熱伝導率 ($\lambda = 3.7 \times 10^{-7} T_s^{3/4}$)、 L [m]は代表長さ(火源からの距離 r)である。また、レイノルズ数は $Re = U_s L / \nu$ で与えられ、 U_s は煙の平均移動速度、 ν は空気動粘性係数 $7.2 \times 10^{-10} T_s^{7/4}$ 、そしてプラントル数は熱拡散率に対する動粘性係数の比 $Pr = \nu / \alpha = 0.72$ で与えられる。

③排煙量 m_e

排煙量 m_e は、天井チャンバー方式を仮定し、単位床面積当たりの排煙量 W [m³/分/m²]に計算ボリュームが面する天井面積 A_w 、煙密度 ρ_s 、限界排煙量 M_{ex} と煙厚さ h_s の関係から求められる排煙効率 R_{eff} を掛け合わせた次式により与えられる。

$$m_e = R_{eff} M_{ex} = R_{eff} W A_w \rho_s \quad (15)$$

ここに R_{eff} は、次式に示す限界煙層厚さ $Z_{s,min}$ に対する煙層厚さ h_s の比として与えられ、煙厚さ h_s が $Z_{s,min}$ を上回る場合は1となる。

$$Z_{s,min} = \left\{ M_{ex} T_s / (1.33 \rho_a) \right\}^2 / g T_a (T_s - T_a)^{1/5} \quad (16)$$

④連行量 m_{en}

下部空気の上部煙への連行量について、鈴木はAlpertの天井流モデルにおけるよどみ領域と天井流の上昇温度の比率に着目し、熱量の釣り合いから天井流に連行される流量を定式化している⁴⁾。

一方、水理学では密度界面 i あるいは零流速面 j を定義し、これら界面での連行係数 α を上層の流速 U_s [m/s]に対する連行速度 w_e [kg/s]の比率として定義し、実験結果から分析している。比較的簡易なモデル式では上層流れの密度フルード数 $F_{d,s} = U_s / \sqrt{g' h_s}$ による次式が提案されている⁵⁾。

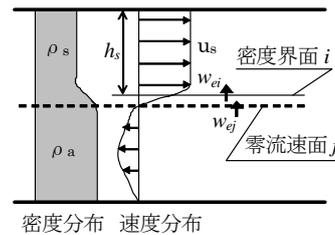


図3 密度界面と零流速面での連行現象の概念⁵⁾

$$\alpha = w_e / U_s = 2 \times 10^{-3} F_{d,s}^3 \quad (0.1 < F_{d,s} < 3) \quad (17)$$

上式は、 α_i と α_j の区別がないが、 α_i の場合は $F_{d,s} < 1$ が推奨されている。本検討では流体の特性値が異なるものの、まずは流れの大きな傾向を調べることに着目し、上層流れの密度フルード数に基づく(17)式により連行量を求めることとする。

⑤煙の水平移動速度 U_s

質量流量 m を移動断面(円弧長さ B [m] と上層煙厚さ h_s [m] の積) と密度 ρ_s との積で除することで、平均速度を次式により算定する。

$$U_s = m / (\rho_s B h_s) \quad (18)$$

⑥上層煙の厚さ h_s

煙の水平伝播の質量流量 m が、上層煙の下端位置を基準とした場合の圧力勾配に基づく流量と等しくなることを仮定し、次式により求める。

$$h_s = \left(\frac{3m}{2\alpha B} \right)^{2/3} (2g\rho_s \Delta\rho)^{-1/3} \quad (19)$$

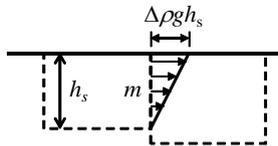


図4 上層煙の厚さ h_s の算定概念

(3)煙層の安定性に関する評価方法

水理学においては密度界面の不安定性を評価する方法としてKelvin-Helmholze不安定性に関する条件式が提案されている⁵⁾。まず評価対象の流れについて、非粘性、非圧縮性を仮定し、密度境界面が不連続に変化することを仮定すると、内部波の波速 C (長波) は次式によって得られる。

$$C = \frac{u_1 h_2 + u_2 h_1}{h_1 + h_2} \pm \sqrt{-\frac{(U_1 - U_2)^2 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2} + \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g} \quad (20)$$

上式の右辺第2項の平方根内が負となり、虚数となると内部波が不安定となる。したがって、内部波が安定する条件としては次式の通り展開される。

$$-\frac{(U_1 - U_2)^2 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2} + \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g \geq 0 \quad (21)$$

$$|U_1 - U_2| \leq \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g (h_1 + h_2)}$$

(4)模型実験による観察

1/10 縮尺模型(主にケイ酸カルシウム版で構成)を作成し、火源(ブンゼンバーナー)の発熱速度をフルード相似則に基づいて設定し、煙流動性状を観察する。

<参考文献>

- 1) 松下敬幸, 若松高志: 煙先端部の水平伝播性状に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp. 193-198,

1995.

- 2) 若松高志, 松下敬幸: 煙先端部の水平伝播性状に関する研究 その2, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp. 177-184, 1995.

- 3) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, p. 2-19, 2002.

- 4) 鈴木圭一: 広い空間での天井下気流の非定常予測手法の考察, 日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 116-117, 2009.

- 5) 須賀堯三: 感潮河川における塩水楔の水理に関する研究, 土木研究所資料1537号, 1979.

4. 研究成果

作成した計算モデルを用いて次図に示す条件において煙流動性状に関するケーススタディを実施した。

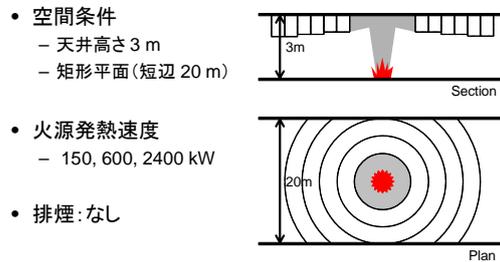


図5 ケーススタディの条件

一例として火源発熱速度が600kWの場合の結果を図6に示す。下部空気の連行を考慮することで上部煙がより火源に近い位置で降下する傾向が見て取れる。一方、連行による温度減衰への影響はそれほど大きくない結果となった。図7に火源発熱速度が150, 600, 2400kWの場合の結果を3つ並べた。第一縦軸はいずれも温度であるが、火源直上から天井流に切り替わるところの温度を各グラフの縦軸の最高値として表現している。この結果から温度減衰傾向は火源の発熱速度の差に対してほぼ等しい結果となったが、厳密には発熱速度が小さい方が早い段階で温度が相対的に低い。煙層降下高さは火源発熱速度が小さいほど、火源から近い距離において煙層厚さが増す傾向にある結果となった。こうした煙の挙動は、実験から定性的には確認されているが、詳細には垂直方向の分布が見て取れる。

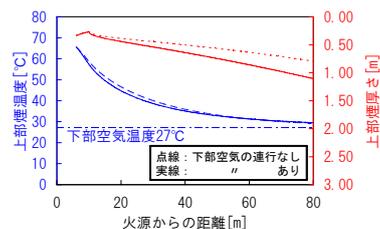


図6 上部煙の温度と厚さの計算結果一例 (CH=3m、Q=600kW、無排煙、近い壁までの距離10m)

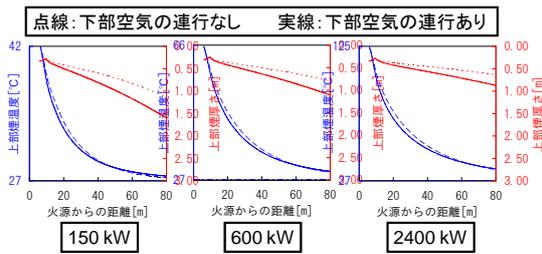


図7 上部煙の温度と厚さの計算結果の比較（図6の条件のうち火源発熱速度Q=150、600、2400kW）

こうした予測計算によって得られた煙流動性状の計算値に基づいて、式(21)を展開して得られる図8中に記載の式の値を算定した。この値が1以下となれば内部波が安定となる。火源が150kWの場合には下部層からの空気連行を考慮すると火源からの距離が約60mを超えると不安定となる結果を得た。一方、実験では、詳細な定量的評価ができるように流速の測定と可視化の面で改善を図る必要がある。

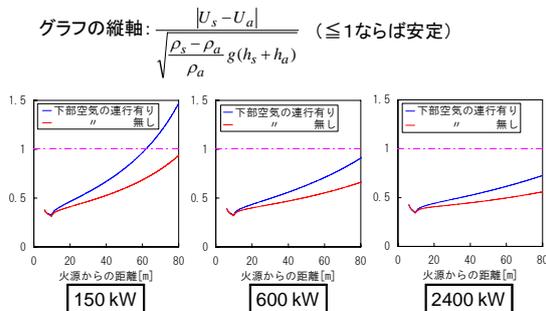


図8 ケルビンヘルムホルツの不安定性の評価

以上、空間上部の天井面下を流れる煙の流動現象について、下部空気の連行を考慮した計算モデルを構築し、大平面空間における煙流動性状を把握した。煙の挙動は実験と定性的には似通っていることが確認できたが、今後定量的な評価によって上部煙層の安定性について詳細に検討する必要がある。また、縮小模型でなく、実規模での再現実験も検討しなければならない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 水野雅之、広田正之、大規模平面空間を拓がる天井面下の煙流動に関する一考察、平成22年度日本火災学会研究発表会概要集、査読無、2010、328-329

〔学会発表〕（計1件）

- ① 水野雅之、大規模平面空間を拓がる天井面下の煙流動に関する一考察、社団法人日本火災学会、2010年5月18日、北海道大学学術交流会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 雅之 (MIZUNO MASAYUKI)
東京理科大学 総合研究機構・講師
研究者番号：40366448

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：