

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01593

研究課題名(和文) 質量保存流速モデルに基づく煙流動予測モデルの開発

研究課題名(英文) Smoke flow prediction based on mass consistent flow model

研究代表者

岡 泰資 (Oka, Yasushi)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：10240764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：質量保存流速モデルにもとづく煙流動予測ツール開発のための基礎研究を実施した。質量保存流速モデルでは、対象空間内に設定する一次推定速度の精度が、解析結果に影響を与える。本研究では、水平方向に細長い空間内で発生した火災により誘引される煙流動を予測するために、射流域と常流域の一次速度場を推定する予測式を、矩形断面アスペクト比の影響を組み込んだ形で構築した。これらの速度予測式は無次元変数で表現されている。有次元変数に変換するための主変数である、煙層の厚み、温度および速度の減衰性状を表す関係式も併せて導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物火災における避難計画の策定やリスク評価では、多数のシナリオを検討する必要がある。各シナリオにおける煙・燃焼生成ガスの拡散状況を予測するためのツールには、計算精度と計算コストのバランスが要求される。

本研究では、質量保存流速モデルにもとづく数値予測手法を建築火災安全工学分野への導入を試みる。このモデルにより、二層ゾーンモデルよりも詳細情報が、また数値流体力学モデルに基づく数値解析よりも高速で、同等の3次元情報を得られることから、新規の火災リスクアセスメントツールとして期待される。

研究成果の概要(英文)：Basic research was conducted to develop a smoke flow prediction tool based on the mass consistent flow model. In the mass consistent flow model, the accuracy of the primary velocity set in the target space as the first step in conducting the numerical calculation affects the analysis result.

In this study, in order to predict the smoke propagation phenomena induced by a fire that occurs in a horizontally elongated space, prediction formulae that estimate the primary velocity field in the shooting and tranquil regions were developed by incorporating the rectangular cross-sectional aspect ratio. These velocity prediction formulas are represented by dimensionless variables. We also developed the relational equations that represent the smoke layer thickness, temperature and velocity attenuations, which are the main variables for converting into dimensional variables.

研究分野：火災安全工学

キーワード：煙流動予測 質量保存流速モデル 火災リスク

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

建築物の火災安全性評価において、占有者の安全な避難を支援する煙制御および避難計画は重要な課題である。多数のシナリオ毎の火災の進展状況および避難安全性を評価するために、煙流動予測は必要不可欠である。このため、熱気流の流動性状に関わる理論的考察に基づく予測モデル、実大あるいは模型実験結果に基づく実験式、数値流体力学(CFD)にもとづく計算コードなどの各種のツールを用いて、さまざまな角度から、建物構造および使用用途に応じた最適解を見いだすための煙制御手法が設計段階において検討されてきた。

二層ゾーンモデルは、区画内上部に煙層が形成されることを前提に、区画内を上部高温層と下部低温層の二層に分割し、各層での瞬時一様拡散の仮定のもと、煙層の温度や降下速度などを予測する。計算時間が極めて短い評価手法であるが、多くの実験式に依存している。二層ゾーンモデルに係わる研究は、1980年代に日米において活発に実施され、火災室単室の過渡的な室内温度の予測から始まり、単室から複数室へ、さらに建物全体へと徐々に高度化され、煙拡散予測ツールとして位置づけられた。2000年に入り、二層ゾーンモデルに組み込まれたサブモデルの修正を除き、日米ともに基本的な開発は終了した。建築防災計画評定で活用されている二層ゾーンモデル(BRI2002)は、極短時間に出火室から建物全体への煙伝播状況を予測出来るが、各区画での詳細な煙性状、廊下あるいは階段室などでの煙流動、さらに自然排煙における外気風の影響による煙層の乱れ等は再現できないことが指摘されている。

一方、米国 National Institute of Standards and Technology で開発された Fire Dynamic Simulator (FDS)は、火災現象に特化した CFD コードとして、世界中の防火関係者に活用されている。FDSは、熱、運動量、化学種・エネルギーの各種の保存式を連立して解くことで、温度・速度・煙濃度などの空間的・時間的な変化に係わる詳細な情報を得ることができる。しかし精度の高い結果を得るには、計算領域を詳細に分割する必要がある、その結果として高性能計算機と膨大な計算時間を必要とする。さらに計算コード内に組み込まれたモデル係数の調整、空間の分割の検討が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、二層ゾーンモデル(BRI2002)よりも詳細な煙流動性状の情報が得られ、FDSによる数値解析よりも格段に計算負荷が少なく、かつ同等の詳細な煙流動性状を把握するための新たな煙流動予測ツールとして、質量保存則のみを満足するように対象空間内の速度場を予測する質量保存流速モデル(MASs CONSistent flow モデル、以降 MASCON モデルと記す)による実用的な煙流動予測手法の開発を目的とする。対象空間としては、二層ゾーンモデルが不得意とする廊下のような水平方向に細長い空間とする。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. 一次推定値として垂直速度分布予測式の導出

MASCONモデルによる速度場の予測は、まず対象空間内で発生した火災熱気流の流動に伴う空間内速度場の一次推定、次に空間内に梁、柱などの障害物がある場合には、気流と障害物の衝突により発生する渦による速度場への影響を考慮するための一次推定速度の修正、最後に質量保存則を満足するように滑らかな速度場の算出と、3つのステップで実施される。

廊下のような水平方向に細長い空間内で発生した火災により、火源上に立ち昇る煙を伴った熱気流は、空間天井に衝突後に同心円状に拡がり、側壁に達した熱気流はその流れの方向を空間長手軸へと変化させ、射流域を経て常流域では空間長手軸に沿った一次元流れへと変化する。

本研究では、射流域と常流域を対象とし、空間天井に沿って伝播する熱気流により誘引される空間内速度場の一次推定値を与える垂直速度分布予測式の構築を試みた。なお、予測式構築にあたり、矩形断面の縦横比の影響を考慮するために、断面積を一定に保持しつつ、幅と高さの比(幅/高さ= $A_p$ )を5段階( $A_p=0.6\sim 1.67$ )変化させ、FDS(ver. 6.5.1)に基づく空間中央の長手軸断面の計算結果を基礎データとした。

#### 3-2. 無次元化変数の読み替えのための煙層厚み、温度・速度の減衰性状予測式の導出

一次推定値として活用する垂直速度分布予測式は、煙層の厚みと気流速度の最大値で規格化された無次元数で記述される。そこで、煙層厚み、温度・速度の減衰性状予測式を導出するために、2種類の矩形断面および馬蹄形断面と、断面形状が異なる3種類の模型を用いた火災実験を実施した。Corridor Aは、高さ0.3 m、幅0.45 mの横長の矩形断面、Corridor Bは、高さ0.45 m、幅0.3 mの縦長の矩形断面、Corridor Cは、最高高さ0.275 m、床面幅0.41 mの馬蹄形断面であり、いずれも、厚さ40 mmあるいは50 mmのケイ酸カルシウムの平板あるいは円筒で構成した。測定項目は、煙層内の垂直温度と垂直速度であり、測定点を固定し火源を移動させることで、火源から測定点までの距離を変化させた。温度は、素線形0.2 mmのK型熱電対で、速度は粒子画像流速計測システム(2D-PIV)で測定した。いずれの実験においても、LPGを燃料とした0.1 m正方の拡散バーナーを基本の模擬火源とし、LPG供給量を変化させることで模型天井への火災の

非接炎から接炎までの状況を作り出した。なお Corridor B 実験では、燃料種類の影響を検討するために、メタノール、2-プロパノール、n-ヘプタンの液体燃料を用いた。液体燃料を使用する際の火皿の大きさは0.1 mの正方形とした。

## 4. 研究成果

### 4-1. 一次推定値として垂直速度分布予測式の導出

射流域および常流域の領域毎に、煙流動に由来する上部層、外部から床面に沿って流入する新鮮空気に由来する下部層、および上部層と下部層の中間領域の中間層の、計6領域に対して、一次推定値としての速度分布予測式を以下のように導出した。それぞれの分布予測式の導出にあたり、8カ所の境界条件（上部層と下部層における速度の最大値(2カ所)、速度がゼロとなる点(3カ所)、中間部にS字型の分布が現れるためS字の頂点(2カ所)と変曲点(1カ所)の計8カ所）と上部層と下部層の厚みを用いた。

#### (1) 上部層について

射流域および常流域ともに、異なる断面形状をもつ空間天井下を流れる煙層により誘引される上部層の速度分布予測式を作成するにあたり、煙層速度の最大値( $V_{max}$ )で規格化した無次元速度( $V^*=V/V_{max}$ )を同位置での天井面からの距離を煙層厚み( $h_{V-upper}$ )で規格化した無次元距離( $L=z/h_{V-upper}$ )に対してプロットすると、矩形断面のアスペクト比に依存せず一つの曲線に各データが収束した。この曲線をプロファイル法にて近似し、天井面での速度、垂直速度分布の頂点高さの速度とその速度の一次微分値、煙層厚み高さでの速度とその高さでの速度の2次微分値の5条件を用いて、分布式中の係数を決定した。速度分布式は無次元表記であるため、各位置における煙層厚さと煙層速度の最大値を用いて、有次元速度に換算した。また、射流域および常流域に対して、煙層厚さと煙層速度の最大値の火源からの距離への依存性を示す関係式をそれぞれ求めた。

#### (2) 下部層について

射流域および常流域の下部層に対しても、流入空気の無次元速度( $V^*=V/V_{min}$ )を無次元距離( $L=z/h_{V-lower}$ )に対してプロットすると、上部層と同様にある一つの曲線に収束したことから、プロファイル法でこの曲線を近似した。式中の係数の値は、床面での速度、垂直速度分布の頂点高さの速度とその速度の一次微分値、流入空気層厚み高さでの速度とその高さでの速度の2次微分値の5条件から決定した。各位置における流入空気層厚さとその速度の最小値を用いて、有次元速度に換算した。なお、常流域における火源からの距離に対する流入空気層厚さの変化に、矩形断面アスペクト比の影響が認められた。そこで、矩形断面のアスペクト比 $Ap=1$ を境界として2条件に分割し、条件毎に流入空気層厚さと距離の関係を導くことで、規格化の精度を向上させた。さらに、射流域および常流域の流入速度は、上部層の速度と矩形断面アスペクト比から予測する変換手法を導入した。

#### (3) 中間層について

射流域における中間層の垂直速度分布は、矩形断面アスペクト比が1より大きい断面空間では、速度がゼロとなる高さ( $z_0$ )より天井側の領域にS字型の速度分布形状が認められた。そこで、中間層上部領域( $z_0 \leq z < h_{V-upper}$ )の速度分布を、アスペクト比が $Ap=1$ の空間に対しては、S字分布を上部層境界値( $V_{max}/2, h_{V-upper}$ )、S字の第1頂点( $V_{s1}, z_{s1}$ )、S字の変曲点( $V_s, z_s$ )を通る2次関数とS字の変曲点( $V_s, z_s$ )、S字の第2頂点( $V_{s2}, z_{s2}$ )、速度がゼロとなる高さ( $0, z_0$ )を通る2次関数で再現した。また、 $Ap < 1$ の空間に対しては、上部層境界値( $V_{max}/2, h_{V-upper}$ )から( $0.15V_{max}, 2h_{V-upper}$ )を經由して速度がゼロとなる高さ( $0, z_0$ )に至る2本の1次直線で速度分布形状を再現した。また中間層下部領域( $h_{V-lower} \leq z < z_0$ )の速度分布は、速度がゼロとなる高さ( $0, z_0$ )と下部層境界値( $V_{min}/2, H - h_{V-lower}$ )を結ぶ直線で表現した。

常流域における中間層上部領域の速度分布も、矩形断面アスペクト比に応じて変化させた。具体的には、 $Ap > 1$ の空間に対しては、上部層境界値( $V_{max}/2, h_{V-upper}$ )と下部層境界値( $V_{min}/2, H - h_{V-lower}$ )を結ぶ直線で、 $Ap \leq 1$ の空間に対しては、上部層境界値( $V_{max}/2, h_{V-upper}$ )から速度がゼロとなる高さ( $0, z_0$ )を經由して下部層境界値( $V_{min}/2, H - h_{V-lower}$ )に至る2本の1次直線で近似した。

以上、垂直速度分布予測式を一次推定値としたMASCONEモデルによる速度場の解析を行い、遷移領域内のある断面( $x = 0.6$  m)でのCFDコードによる解析結果との比較から、一次推定手法の妥当性を検証した。ただし、射流域から常流域への不自然な速度変化を回避するために、遷移領域を設定し二次関数を用いた重みづけによりデータを平滑化した。

### 4-2. 煙層厚み

煙層内の測定結果をもとに、温度および速度由来の煙層界面高さを、N percentage rule法（以下N%法と記す）、中心差分法、浮力振動数法、および変曲点法の4手法にて決定し、目視結果と比較した。その結果、温度由来の煙層界面高さの場合、Corridor Aでは変曲点法、Corridor BおよびCorridor Cでは、浮力振動数法を、速度由来の煙層界面高さの場合、Corridor AではN%法( $N = 50$ )、Corridor BおよびCorridor CではN%法( $N = 37$ )を適用することで、目視結果と一致することが明らかとなった。

以上の各手法の適用による煙層界面高さの算出は、煙層内の垂直分布データの入手が前提となっている。様々な火災シナリオにおける避難計画の策定時など、煙層内の垂直温度あるいは垂直速度が取得できない状況下でも、断面形状に依存せずに煙層厚みを予測できることは重要で

ある。そこで、煙層厚みに関する既存関係式に、対象空間の断面形状を加味した新規の空間代表長さ  $\hat{H} = H(l_b/H)^{-1/3}$  を導入することで、断面形状に依存せず、温度、速度とその由来に依存しない煙層厚み( $h_0$ )が  $h_0 = \hat{H}/b$  ( $b = 4.6$ ) で予測できることを示した。

#### 4-3. 煙層の温度・速度の減衰性状予測式

常流域の煙層温度を予測する代表例として、Delichatsios と Li らの関係式がある。Delichatsios の提案式は、火源直上の天井近傍のよどみ領域の温度を代表温度に採用することで閉じているが、天井面からの熱伝達のみを考慮した温度減衰式である。一方、Li らの提案式は、煙層が接触する天井面と側壁からの熱伝達を考慮しているが、代表温度とした常流域の開始温度とその位置が定式化されていないため温度減衰式として閉じていない。

そこで、常流域の開始位置を、その近似理論解の代入により係数として組み込み、かつ、よどみ領域の出口近傍の温度上昇を常流域の開始温度に採用することで閉じた温度減衰式とした。さらに、煙層と接触する固体面の熱特性に関連する表面温度変数の導入により、天井面と側壁からの熱伝達を考慮するとともに、対象空間の矩形断面の縦横比の影響を考慮した変数を代表長さとして組み込んだ、実用的な温度減衰式を導出した。模型実験との比較から、温度減衰式の妥当性を確認した。

導出した常流域の温度減衰式をもとに算出した任意の位置の温度と、空間長手方向への  $Ri$  数の変化を組み合わせることで得られる速度と模型実験での実測値との比較から、速度の算出方法の妥当性を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oka Yasushi, Oka Hideyuki	4. 巻 112
2. 論文標題 Temperature and velocity distributions of a ceiling-jet along a flat-ceilinged tunnel with natural ventilation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fire Safety Journal	6. 最初と最後の頁 102969 ~ 102969
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.firesaf.2020.102969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Oka, Y. and Oka, H.
2. 発表標題 Temperature and Velocity Distributions within a Ceiling-jet along a Flat-ceilinged Horizontal Tunnel with Natural Ventilation
3. 学会等名 9th International Seminar on Fire and Explosion Hazards (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanno, A., Oka, H., and Oka, Y.
2. 発表標題 Simple Prediction Model for Temperature Attenuation of Fire-Induced Ceiling Flow in Consideration of the Side Wall Effects along a Flat-ceilinged Tunnel
3. 学会等名 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須賀龍之介, 岡 泰資, 岡 秀行
2. 発表標題 数値計算に基づく水平方向に細長い空間内の火災熱気流挙動
3. 学会等名 平成31年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹野 碧, 岡 秀行, 岡 泰資
2. 発表標題 矩形通路の断面形状を考慮した天井流の温度減衰簡易予測式の提案
3. 学会等名 平成31年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹野 碧, 岡 秀行, 岡 泰資
2. 発表標題 矩形通路の側壁の影響を考慮した天井流の温度減衰簡易予測式の提案
3. 学会等名 第51回安全工学研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松山 賢 (Matsuyama Ken)  (10307704)	東京理科大学・理工学研究科国際火災科学専攻・教授  (32660)	
研究分担者	上矢 恭子 (Kamiya Kyoko)  (10803356)	公立諏訪東京理科大学・工学部・講師  (23604)	
研究分担者	岡 秀行 (Oka Hideyuki)  (80399518)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------