

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310108

研究課題名(和文)天井流の流動性状に関する研究

研究課題名(英文)A study on ceiling jet flow behaviour

研究代表者

岡 泰資(OKA, YASUSHI)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号：10240764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：水平無限天井下を流れる天井流に注目し、正方火源から発生した天井流の半径方向への拡がりや温度および速度の減衰、厚みおよび分布の各性状の関係を表す実験式を、天井傾斜角度の影響を考慮した形で導いた。また、温度減衰および温度分布の比較から、天井流の流れ性状に対する火源形状の影響を検討し、温度減衰に特徴的な差異があることを確認した。さらに、トンネル状空間の天井に沿って流れる天井流に注目した実験から、天井流の流れ性状に対する側壁の効果を検討した。その結果、火源からの距離に依存して流れの性状の変化を記述する実験式を導くとともに、無限天井下を流れる天井流と異なる点を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A series of experiments that focused on the flow behavior of ceiling jet, which flows under an unconfined ceiling, were conducted. Based on the experimental results, empirical formula for temperature rise and velocity decreasing, thickness and distribution against radial distance were developed considering the effect of inclination angle.

To examine the effect of fire source shape on the ceiling jet flow, the rectangular fire source was employed. By comparing the temperature rise decreasing and temperature distribution with them obtained by a square fire source, typical difference for temperature rise decreasing against radial distance was confirmed. Detailed measurements of the temperature rise and velocity in a horizontal tunnel with a rectangular cross section were conducted to examine the effect of side wall on the ceiling jet. Empirical relationship to estimate the decrease in the ceiling jet temperature rise and velocity along the horizontal axis of the tunnel was developed.

研究分野：火災安全工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：火災感知 天井流 傾斜天井 煙層 垂れ壁 トンネル

### 1. 研究開始当初の背景

各種構造物あるいは製造施設における火災の早期感知は、延焼拡大を阻止する消火設備、防火設備の迅速な作動という観点から重要である。早期発見のための道具として火災感知器が設置されている。火災感知器は、その動作原理から、熱感知器、煙感知器および炎感知器に大別され、最近では、ガスセンサーが組み込まれた複合式感知器も開発されている。通常の建物あるいは一般住宅に広く使用されているスポット型感知器の場合、炎感知器以外は、火災により発生した熱・煙あるいは燃焼生成ガスが、ある気流速度を保持した状態で感知器に到達することが必須である。このため、天井下を流動する熱気流の流れ（以下、天井流と記す）に注目した研究が Alpert, R.L. [1972, 1975], Heskestad, G. [1975], Heskestad, G. and Delichatsios, M.A. [1978], Copper, L.Y. [1982], Heskestad, G. and Hamada, T. [1993], Yao and Marshall [2006]らにより実施され、滑らかに水平な天井下を流れる天井流の流動性状（特に火災ブルームが天井に衝突した点から半径方向への移動距離に対する温度・速度の減衰性状）は、工学的に利用しやすい関係式として整理され、天井流温度の時間変化および火災感知器の作動時間予測などに利用されている。

通常の用途あるいは区画形態の建物内での火災感知器の設置基準は、使用すべき火災感知器の種類と感度が空間用途と構造により仕様書的に示されているが、天井の形状（段差や傾斜）および水平な天井から張り出た梁あるいは垂れ壁などの存在が、天井流の流動性状に及ぼす影響が考慮されていない。

天井の形状は、天井流の流動性状に多大な影響を及ぼすことから、Motevalli and Marks [1991], Kung et al [1994], Sugawa et al [1999]らは、傾斜天井下の天井流性状に関する先行研究を実施している。これらの研究成果の殆どが模型実験を用いた実験的研究であることから、各研究者により導出された天井の傾斜角度に対する各種の物理量（天井流の移動距離に対する温度あるいは速度の減衰性状および厚み）変化を示す実験式の適用範囲が限定される、実大実験との比較が実施されていないことから相似則が確認されていないといった問題点がある。また、水平天井に取り付けられた垂れ壁あるいは梁などの突起物は、天井流の流動性状に影響を及ぼすため Alpert などの先人の研究での無限天井という仮定が成り立たなくなる。このため、何らかの修正あるいは新規モデルの提案が必要である。このように、天井流の流動性状や天井に取り付けられた各種の突起物の天井流への影響を把握することは、室内形状あるいは用途にふさわしい火災感知器の作動時間を性能的に考慮し、感知器の種類、感度および設置位置の検討を可能とする。

一方、近年の計算機能力の急速な向上と数値流体力学 (CFD; Computational Fluid

Dynamics)的手法の成熟に伴い、火災現象の研究にも適用されるようになってきた。主に用いられている解析モデルは、Reynolds 平均により定式化された RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)と、計算格子よりも大きなスケールの渦は直接解き計算格子よりも小さい渦に対しては SGS(Sub Grid Scale)モデルを用いて平均化する Large-Eddy Simulation (LES)である。非定常な変動を伴う火災現象には LES が適していると考えられ、LES を採用した CFD 解析コード(FDS; Fire Dynamics Simulator) [McGrattan, 2004]が米国商務省標準技術研究所において開発され、この FDS を応用した数値解析 [Qiang, 2002]および FDS の性能評価 [Zang et al., 2002, Ma et al., 2003, Zou et al., 2005]が報告されている。しかし基礎研究の観点からみれば、現状の CFD ツールを用いた火災現象の再現性は不十分で、実用工学的な観点からもその要求を満足させる水準にはいたっていない。また LES は計算負荷が大きいため、高速化のための数値計算アルゴリズムや並列処理に関する基礎的研究が盛んに実施されているとはいえ、未だ実用段階での普及には至っていない。このため、CFD モデルの改良と計算の高速化は今後の火災分野における CFD 解析の高度化に必要である。

### 2. 研究の目的

建築物、各種構造物あるいは製造施設における火災の早期感知は、消火活動あるいは避難開始を促進する観点から非常に重要である。このため、用途変更や改築等により初期の用途と異なる空間となった場合には、既設の火災感知器が新規空間に対しても十分な性能を有していることを評価・確認する必要がある。このためには、火災感知器の作動に影響を与える天井流の流動性状の詳細を把握しておく必要があるが、この流れは、火源形状、天井形状、梁や垂れ壁などの障害物あるいは空調流の有無など種々の影響を強く受ける。

そこで本研究では、これら諸要因と天井流の相互関係を模型実験、数値実験の両面から相互に検討することで、天井流の流れ性状を把握することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 【実験による検討】

燃料には n - ヘプタンあるいはメチルアルコールを用い、時間経過に依存せず発熱速度が一定の準定常燃焼により形成された天井流を対象とした。

天井流の流れ性状に影響を及ぼす要因として、天井の傾斜角度、天井下に蓄煙した煙層および側壁を取り上げ、それぞれ以下の条件で実験を実施した。

#### 3-1. 天井流への天井の傾斜角度の影響

幅 2.5m、長さ 3.0m の吊り天井の傾斜角度が 0 ~ 40 ° まで変更可能な模型天井を用いた。

天井流の温度は、素線径 0.2mm の K 型熱電対にて、また天井流内の垂直温度分布は天井面に対して垂直方向に rake 状に設置した同熱電対にて測定した。天井流の速度は、2 方向圧力プローブおよび 2 次元 3 成分 PIV システムにて測定した。また、天井流内の二酸化炭素濃度は、非分散型赤外線吸収法を採用した二酸化炭素濃度計にて測定した。注目した物理量は以下の(a) – (h)とした。

- (a) 火災プルームが傾斜天井に衝突した位置から斜面天井に沿って上昇する天井流の温度あるいは速度の減衰に対する天井傾斜角度の影響
- (b) 天井流の厚みと傾斜角度の関係
- (c) 傾斜天井に沿って上昇する天井流内の温度分布あるいは速度分布を表す関係式の導出と天井傾斜角度の影響
- (d) 斜面天井に沿って流れる天井流の主軸に対して水平方向への拡がり性状
- (e) 傾斜天井の下流側への天井流先端の限界到達距離と傾斜角度の関係
- (f) 天井流への火源形状の影響
- (g) 実大模型天井を用いた相似則の確認  
実大模型水平天井 (7m(L)×14m(D)×3m(H)) および実大傾斜天井 (傾斜角度 10°, 7m(L)×7m(D)×3m(H)) を用いた実験を行い、模型実験結果に基づき導出した関係式の妥当性の検証および適用範囲の確認
- (h) 実大模型天井を用いた二酸化炭素濃度の減衰性状から、天井流の流動に伴う周辺空気の巻き込み係数の算出

### 3-2. 蓄煙した煙層の天井流への影響

防煙垂れ壁で囲われた空間で火災が発生した場合、防煙垂れ壁で囲われた天井下には、その深さに応じた厚みを有する煙層が形成される。天井に蓄積した煙層内を流れる天井流の温度減衰性状は、蓄積した煙層がない無限天井下を流れる天井流のそれと異なると考えられる。そこで、防煙垂れ壁を設置した天井空間 (5.8m(L) × 8.5m(W) × 3.0m(H)) を用いて、発熱速度 (8.5, 22, 40, 98 kW) と防煙垂れ壁の深さ (0, 0.3, 0.5, 0.7 m) 天井高さ (0.94, 1.56, 2.78 m) を変数とした火災実験を行った。これらの実測結果を基に、既存の Watanabe [2000], Yamauchi [2008] により提案された煙層の蓄煙を考慮した天井流の温度性状予測モデルの検証、および天井下に比較的薄く滞留した煙層内を流れる天井流温度の予測手法について検討した。

### 3-3. 天井流への側壁の影響

天井流に関する研究の多くは、理想的な空間として側壁のない無限天井を対象に実施されてきた。しかし通常の執務空間や地下街などでは、側壁あるいは垂れ壁があることが一般的である。ここでは、廊下あるいはトンネル空間のように、区画天井に衝突後、同心円状に拡がる天井流に対して側壁の影響が

現れる状況を対象として、これら空間の長手方向への温度あるいは速度の減衰性状、天井流の厚みおよび分布形状に注目した実験を行った。実験はトンネル状空間 (10.0 m(L) × 0.75 m(W) × 0.45 m(H)) を用い、発熱速度は 3.6 kW および 8.9 kW の 2 段階 (実大トンネルにおける自家用車あるいはバスの発熱速度に相当) とした。温度は素線径 0.2 mm の K 型あるいは T 型熱電対で、速度は 2 次元 3 成分 PIV システムにて計測した。

### 【数値実験による検討】

数値実験からのアプローチとして、火災分野で頻繁に利用されている LES を採用した CFD 解析コード (FDS; Fire Dynamics Simulator) を採用した。このコードには SGS モデルとして Smagorinsky モデルが標準として組み込まれているが、このモデルでは、流れ性状に沿った渦粘性係数を設定する必要があること、非乱流域や壁際近傍で修正が必要などの欠点がある。そこで、FDS プログラムの一部を書き換え、SGS モデルとして、コヒーレント構造モデルを組み込み、性能評価を試みた。

## 4. 研究成果

4-1. 傾斜角度を変化させた無限傾斜天井下を流れる天井流に注目した実験結果から、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 模型実験結果を基に、天井流の温度、速度、厚みの各物理量と発熱速度および火源からの移動距離の関係を表す実験式を、天井傾斜角度の影響を加味した形で導いた。また、火源上に形成された火炎の天井への接炎の有無が、これらの物理量への影響についても検討し、接炎の要因を考慮した実験式を提案した。さらに、天井流内の温度および速度分布を正規関数あるいは 3 次関数と座標変換を組み合わせた手法にて近似し、天井傾斜角度を考慮した形で整理した。
- (2) 火炎が天井に接炎しない状態での天井流の温度あるいは速度の減衰、厚みおよび分布形状に関する実験式は、すべて模型実験結果に基づいている。そこで、実大実験結果と比較することで、導出した実験式の妥当性を検証した。
- (3) 傾斜天井に沿って上昇移動する天井流の主軸に対して、水平方向への拡がり性状を温度測定結果に基づき検討したところ、この拡がり性状は正規分布で近似でき、しかも拡がり幅を決定する係数を天井傾斜角度の関数で表現できることを示した。
- (4) 火源上に倒立円錐として形成される火災プルームが傾斜天井により切り取られる体積を考慮することで、傾斜天井の下流側へ伝播する天井流先端の限界到達距離と傾斜角度の関係を整理できた。
- (5) (1), (2) に示した天井流の温度、速度、厚

みおよび分布形状の結果は、正方火源から発生した天井流の性状に注目した結果であるが、異なる火源形状(矩形火源)から発生した天井流との違いを温度測定結果から検討した。その結果、火源の極近傍領域では、矩形火源の長手方向あるいは短手方向へと、天井流の流れ方向により温度減衰に特徴的な違いがあることを確認した。しかし、矩形火源から遠ざかるにつれて流れの方向性の影響も徐々に小さくなり、天井高さの5倍以上離れると、正方火源からの天井流に類似した減衰性状を示した。

- (6) 実大実験における天井流内の二酸化炭素濃度の測定結果をもとに、二酸化炭素濃度の移動距離に対する減衰性状を示す実験式を提案した。さらに、(1)で提案した温度、速度および厚みの実験式を用いて、無限水平天井に沿って同心円状に広がる天井流の任意の半径距離を通過する質量流量を算出し、これから質量流量の変化量およびその位置における巻き込み係数を算出した。また Froude 数および Richardson 数と移動距離の関係を示した。

4-2. 防煙垂れ壁で囲われた空間内に蓄煙した煙層内を伝播する天井流に注目した実験結果から、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 天井流の温度は、防煙垂れ壁の深さと天井高さに依存して変化した。
- (2) 防煙垂れ壁が深くなるほど、天井流の移動距離に対する温度の減衰率が緩慢になった。
- (3) 比較的厚い煙層内を水平方向に伝播する天井流は、その伝播課程で煙層を巻き込むが、煙層の厚みが薄い場合には、滞留した煙層と新鮮空気の双方を巻き込むため、従来の厚い煙層内を伝播する温度予測式では実験値よりも高い温度を示した。そこで、天井流の巻き込みの影響を考慮した煙層温度を用いた天井流温度を予測する手法(薄煙層流モデル)を提案した。

4-3. 天井流の流れ性状に対する側壁の効果を検討するために、空間断面の縦横比が1:1.67であるトンネル状空間の天井に沿って流れる天井流に注目した実験結果から、以下の事項が明らかとなった。

- (1) トンネル状空間の長手方向に沿った温度減衰は、火源から上昇した火災プルームが天井に衝突後、水平天井に沿って同心円状に側壁まで広がる領域(領域Ⅰ)、流れの性状が変化する遷移領域(領域Ⅱ)および空間の長手方向に沿って一次元的な流れを示す領域(領域Ⅲ)の3領域で、それぞれ異なる性状を示すことを実験的に明らかにするとともに、各領域における温度および速度の減衰性状を示す関係

式を導出した。なお、これらの関係式中に変数として含まれる Stanton 数は、PIV測定により取得した速度分布から算出した。

- (2) 領域Ⅱと領域Ⅲの境界位置は、跳水現象が生じる位置とほぼ一致することを、跳水発生位置に関する理論式との比較から確認した。
- (3) 本研究で対象としたトンネル状空間に沿って流れる天井流の厚みは、無限天井下を流れる天井流の厚みに比べ約2.5倍の厚さが、また理論的に導出された厚みに比べ1.7倍の厚みがあった。また、(1)に記載した領域Ⅱおよび領域Ⅲにおける天井流の厚みと移動距離の関係を示す関係式を、トンネル断面の縦横比を変数とした形で提案した。
- (4) 温度および速度分布とともに、領域Ⅱの分布と領域Ⅲの分布が異なるが、各測定位置での最高値および厚みで規格化すると、領域毎に相似な分布形状を示した。
- (5) 領域Ⅲの温度分布は、無限天井下を流れる天井流の温度分布よりも膨らんだ(最高位置からの減衰が緩慢)形状と示した。
- (6) 模型実験での温度分布結果をもとに3次関数と座標変換で構成した分布式を導出するとともに、実大実験結果(文献値)との比較から、提案式の妥当性を検証した。
- (7) 実験的にトンネル状空間の断面形状あるいは傾斜の影響を検討することは容易ではない。そこで数値計算に基づく検討が期待されるが、採用する乱流モデルあるいは境界条件の設定は計算結果に大きな影響を及ぼす。そこで、トンネル状空間内を伝播する天井流の流れ性状を数値予測する場合には、Sub-Grid Scale モデルとしてコヒーレント構造モデルを、壁面では局所毎に算出される渦粘性係数を取り込んだ熱伝達モデルを採用することで、精度の高い計算結果を得られることを、実験結果との比較から確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. Oka, Y., Oka, H., and Imazeki, O., "Experimental study on temperature property along a tunnel axis with flat ceiling in natural ventilation", Fire Safety and Science, Proceedings of the 11th International Symposium, International Association for Fire Safety Science, 2014.02, in press. 査読有
2. Oka, Y. and Imazeki, O., "Temperature and Velocity Distributions of Ceiling Jet along an Inclined Ceiling - Part 1: approximation

- with exponential function –”, Fire Safety Journal, Vol.65, pp.41-52, 2014.04. 査読有
3. Oka, Y. and Imazeki, O., “Temperature and Velocity Distributions of Ceiling Jet along an Inclined Ceiling - Part 2 : approximation based on cubic function and coordinate transformation –”, Fire Safety Journal, Vol.65, pp.53-61, 2014.04. 査読有
  4. Oka, Y., Yamaguchi, J. and Muraoka, K., “Decrease of Carbon Dioxide Concentration and Entrainment of Horizontally Spreading Ceiling Jet”, Fire Safety Journal, Vol.63, pp.37-42, 2014. 査読有
  5. Oka, Y., Kakae, N., Imazeki, O., and Inagaki, K., “Temperature Property of Ceiling Jet in An Inclined Tunnel”, Procedia Engineering – Special issue, Proceedings of 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Hefei, China, Vol.62, pp.234-241, 2013.10. 査読有
  6. Oka, Y. and Matsuyama, K., “Scale Similarity on Ceiling Jet Flow”, Fire Safety Journal, Vol.61, pp.289-297, 2013.10. 査読有
  7. Oka, Y., Oka, H., and Matsuyama, K., “Temperature properties of ceiling jet in an inclined tunnel”, Proceedings of 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering (Interflam 2013), pp.73-83, 2013.06. 査読有
  8. Oka, Y. and Ando, M., “Temperature and Velocity Decreasing Property of Ceiling jet Impinged on an Unconfined Inclined Ceiling”, Fire Safety Journal, Vol.55, pp.97-105, 2013.01. 査読有

〔学会発表〕(計 2件)

1. 野澤孝甫, 岡 泰資, 今関 修, 岡 秀行: トンネル火災時の熱気流の温度性状に関する実験的研究, 第 46 回安全工学研究発表会, pp.167-170, 2013.11.
2. 藤井 健, 岡 泰資, 岡 秀行: トンネル火災時の温度性状予測, 第 46 回安全工学研究発表会, pp.171-174, 2013.11.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 取得年月日:  
 国内外の別:

〔その他〕  
 ホームページ等  
 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡 泰資・OKA YASUSHI  
 横浜国立大学・環境情報研究院・准教授  
 研究者番号: 10240764

(2)研究分担者

岡 秀行・OKA HIDEYUKI  
 海上技術安全研究所・海洋リスク評価系システム安全技術研究グループ・主任研究員  
 研究者番号: 80399518

(3)研究協力者

今関 修・IMAZEKI OSAMU  
 鹿島建設・ITソリューション部・次長  
 研究者番号: なし  
 村岡 宏 MURAOKA KO  
 大林組・技術研究所・主任研究員  
 研究者番号: なし  
 山口淳一・YAMAGUCHI JYUNICHI  
 大林組・技術研究所・主任研究員  
 研究者番号: なし