

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01315

研究課題名(和文)天井に沿って過渡的に広がる熱流動場の実用的予測モデルの開発

研究課題名(英文) Theoretical and Experimental Study on a Practical Model to Predict Flow Properties of a Ceiling jet  
Theoretical Model to

研究代表者

岡 秀行 (Oka, Hideyuki)

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

研究者番号：80399518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：火災時に煙を伴って上昇する熱気流が天井面で向きを変え、天井面に沿って流動する天井流は火災感知器の作動に影響する重要な流れである。本研究では、大型旅客船内の通路など縦長の矩形断面を有する細長い空間における天井流を予測することを目的に、天井面だけでなく通路側壁での摩擦及び熱損失の影響を考慮し、既存の簡易モデルを改良した。縦長断面の模型トンネルを用いた実験結果と比較したところ、天井面での摩擦及び熱損失のみを考慮した既存モデルに比べ、本提案モデルでは火源から離れた下流域における温度減衰性状についても良く再現することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、トンネルや廊下など細長い空間内の煙流動現象を簡便に予測できるようになった。非定常モデルへの拡張も容易であり、更に瞬時拡散を仮定した区画内煙流動予測モデルと組み合わせることにより、構造物全体を対象とした煙流動予測が可能となる。これは、現在実務で広く利用されている瞬時拡散モデルの問題点を補うことに繋がるため、本研究成果は実用面への波及効果が期待できる有意義なものと言える。また、火災に伴う熱気流の天井流は、水素の漏洩事故の際に想定される水素の天井流とも強い類似性が見られるため、水素社会の実現に向けたインフラ整備に伴う安全性評価のモデルとしても応用できる。

研究成果の概要(英文)：A simple model to simulate a ceiling jet is presented to predict a fire-induced flow in a cruise ship corridor. The ratio of height to width of a ship corridor is usually larger than one, so that in such corridors sidewall area in contact with a ceiling jet is larger than that in the case where the ratio is smaller than one. Hence, the effects of friction and heat loss on sidewalls are incorporated into one of existing ceiling-jet models. To evaluate this modified model, numerical results are compared with reduced-scale experiments of fire-induced ceiling jets in tunnels with two kinds of cross-sectional aspect ratios. Results show that the present model calculations can reasonably reproduce the experimental data in the tunnel, the aspect ratio of which is larger than one as in the case of a ship corridor. In contrast, the existing model underestimates the decay properties of temperature and velocity in the tranquil flow region.

研究分野：火災流体力学

キーワード：天井流 火災熱流動 簡易理論モデル

1. 研究開始当初の背景

火災時に煙を伴って上昇する熱気流が天井面で向きを変え、天井面に沿って流動する天井流は火災感知器やスプリンクラーの作動に影響を与えるため、これまで広く研究されてきている。とりわけトンネルや長い廊下で生じた天井流は、図 1 に示すように大きく 3 つの領域に分類される<sup>1,2)</sup>。領域 I では Alpert の理論解析<sup>3)</sup>と同様に同心円状に広がり、領域

II では側壁により通路長手方向に流れる射流域となり、密度不連続(c)を経て天井流の厚みが概ね一定となる常流域(領域 III)となる。これまで主に常流域を対象に密度不連続の生成位置を参照点  $x_c$ 、その点での温度を参照温度  $T_r$  として半理論的な温度減衰式がいくつか提案されているが、物理的に意味のある形で  $x_c$  及び  $T_r$  を求める方法は示されておらず、閉じた方程式系になっていない<sup>4,5)</sup>。

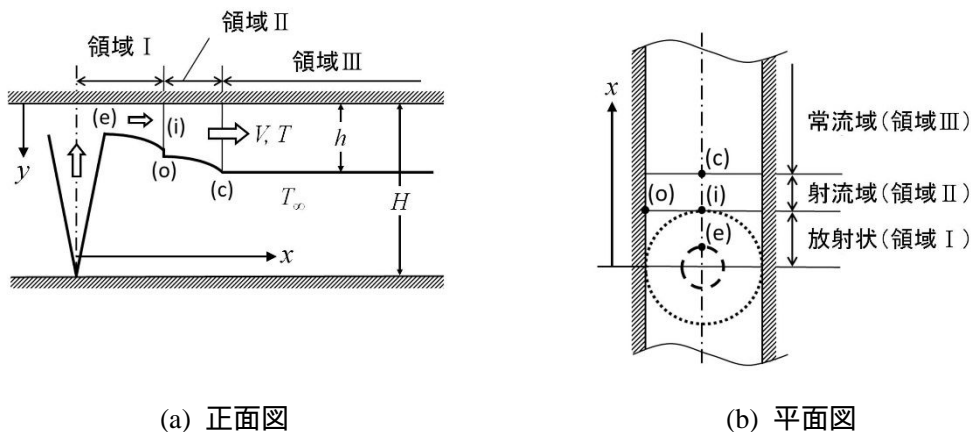


図 1 通路内天井流の概念図<sup>3)</sup>

これに対し, Li ら<sup>6)</sup>は Alpert のモデル<sup>3)</sup>を基に領域 I から領域 III までを順次系統的に求めていく簡易的な理論モデルを提案している。それゆえ, Li らのモデルは閉じた方程式系となっている。しかし, 天井面における摩擦及び熱損失を考慮しているものの, 天井流と接している通路側壁部分の影響についてはモデル化されていない。

2. 研究の目的

大型旅客船には細長い通廊が存在し, その断面は自動車用トンネルとは異なり, アスペクト比(幅/高さ)が 1 より小さい場合が多い。それゆえ, 船舶火災時の天井流では側壁との接触面が大きくなるため, 摩擦及び熱損失の影響を無視できないと思われる。そこで, 本研究では側壁での摩擦及び熱損失の影響を Li らのモデル<sup>6)</sup>に組み込み, 断面のアスペクト比が 1 より小さな模型トンネルを用いた実験結果<sup>7)</sup>と比較した。

3. 研究の方法

(1) 簡易理論モデル

領域 I には既に良く知られた Alpert のモデル<sup>3)</sup>を適用するため, ここでは領域 II 及び III のモデルを示す。天井流は質量保存式, 運動量保存式, エネルギー保存式及び状態方程式で表され, Alpert<sup>3)</sup>と同様の変数変換を行うと, 通路に沿って一方向に流れる天井流は次の 4 つの式で表される。

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = \frac{1}{1-2SRi} \left[ (2-SRi)E - SRi \left( 1 + \frac{\bar{h}}{\bar{l}_b} \right) \times \right. \\ \left. (1-\eta)St + \left( 1 + \frac{\bar{h}}{\bar{l}_b} \right) StPr^{2/3} \right], \quad (1)$$

$$\frac{dRi}{d\bar{x}} = \frac{\left( 1 + \frac{\bar{h}}{\bar{l}_b} \right) StPr^{2/3}}{\left( \frac{\bar{h}}{3Ri} \right) (1-2SRi)} + \frac{(1+SRi)}{\left( \frac{\bar{h}}{3Ri} \right) (1-2SRi)} \times \\ \left[ -1/3 \left( 1 + \frac{\bar{h}}{\bar{l}_b} \right) (1-\eta)St + E \right], \quad (2)$$

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_o} = \left( \frac{Ri_o}{Ri} \right)^{1/3} \exp \left[ -\frac{1}{3} (1-\eta) St \int_{\bar{x}_o}^{\bar{x}} \left( \frac{1}{\bar{h}} + \frac{1}{\bar{l}_b} \right) d\bar{x} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\nabla}}{\bar{\nabla}_o} = \frac{\bar{h}_o}{\bar{h}} \left( \frac{Ri}{Ri_o} \right)^{1/3} \exp \left[ -\frac{2}{3} (1-\eta) St \int_{\bar{x}_o}^{\bar{x}} \left( \frac{1}{\bar{h}} + \frac{1}{\bar{l}_b} \right) d\bar{x} \right]. \quad (4)$$

各変数は次に示すように無次元化されており、また添え字  $o$  は領域  $\Omega$  が始まる位置( $o$ )での値であることを意味している。

$$\bar{h} = \frac{h}{H}, \quad \bar{x} = \frac{x}{H}, \quad \bar{l}_b = \frac{B}{2H}, \quad Ri = \frac{h\nabla}{V^2}, \\ \bar{V} = \frac{V}{(Qg/\rho_\infty C_p T_\infty)^{1/3} H^{-1/3}}, \quad \bar{\nabla} = \frac{\nabla}{(Qg/\rho_\infty C_p T_\infty)^{2/3} H^{-5/3}}.$$

ここで、 $B$  は通路幅、 $H$  は通路高さ、 $V$  は速度、 $h$  は天井流の厚み、 $\nabla$  は密度欠損、 $S$  は形状パラメーター、 $St$  はスタントン数、 $Ri$  はリチャードソン数、 $Pr$  はプラントル数、 $E$  は連行係数、 $Q$  は発熱速度、 $\rho$  は密度、 $T$  は温度、 $C_p$  は比熱、 $g$  は重力加速度である。また、添え字  $\infty$  は周囲空気を表している。

領域  $\Omega$  の常流域では Delichatsios<sup>2)</sup> に従い、天井流の厚みが概ね一定で、かつ  $Ri \approx 1$  を仮定するので、モデル方程式は次の二式となる。

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_c} = \exp \left[ -\frac{1}{3} (1-\eta) St \left( \frac{1}{\bar{h}_c} + \frac{1}{\bar{l}_b} \right) (\bar{x} - \bar{x}_c) \right], \quad (5)$$

$$\frac{\bar{\nabla}}{\bar{\nabla}_c} = \exp \left[ -\frac{2}{3} (1-\eta) St \left( \frac{1}{\bar{h}_c} + \frac{1}{\bar{l}_b} \right) (\bar{x} - \bar{x}_c) \right]. \quad (6)$$

ここで、添え字  $c$  は領域  $\Omega$  が始まる位置( $c$ )での値を意味している。

## (2) 計算対象

既報の模型実験<sup>7)</sup>を対象に本モデルによる解析を行った。実験で用いられた模型トンネルの概略を図2に示す。断面の幅 0.45 m、高さ 0.75 m、長さ 10 m の模型トンネルを用いて中央断面上の天井流の温度及び速度が計測されている。火源の大きさは 0.15 m × 0.15 m、燃料はメタノールで発熱速度は約 7.8 kW である。天井流の温度及び速度は鉛直分布形状が十分解像されるように、それぞれ熱電対及び 2 次元粒子画像流速測定法 (Particle Image Verocimetry) システムを用いて詳細なデータが計測されている。得られたデータの時間平均値から天井流の速度、温度及び厚みについてトンネル長手方向の変化の様子が示されている。

計算に必要なモデル定数ならびに位置( $e$ )における境界値については、壁面摩擦係数  $\bar{f}$  及び壁面温度係数  $\zeta$  を除き、Li ら<sup>9)</sup>の計算条件に従っている。なお、壁面温度係数については Wei ら<sup>8)</sup>の実験結果から推定し、 $\zeta = 0.25$  とした。

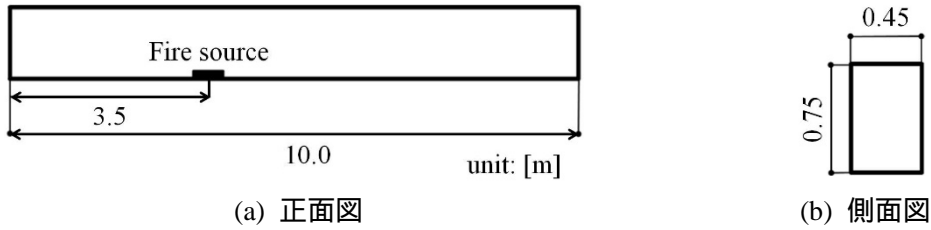


図2 模型トンネルの概略図<sup>7)</sup>

#### 4. 研究成果

##### (1) 計算結果

天井流の最高温度が通路長手方向に変化する様子を図3に示す。縦軸には雰囲気温度からの上昇分 ( $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\infty}$ ) を示している。側壁での摩擦及び熱損失を考慮した本モデルは実験結果を良く再現しているが、天井面での影響のみを考慮している Li らのモデル<sup>6)</sup>では領域 での温度減衰を幾分小さく評価している。

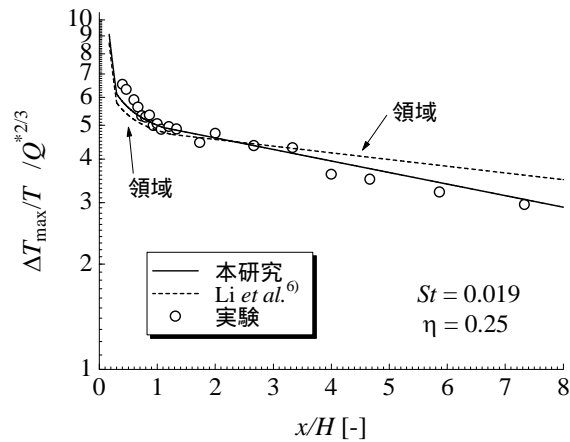


図3 天井流の温度減衰の比較結果 .

次に、天井流の最高速度について実験値と比較した結果を図4に示す。速度減衰については、本モデル及び Li らのモデル共に過大評価した結果となっている。これは、領域 から領域 に遷移した直後から  $Ri = 1$  を仮定していることに起因していると考えられる。

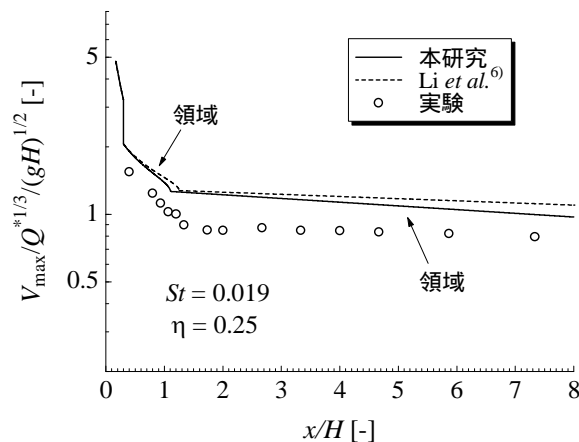


図4 天井流の速度減衰の比較結果 .

最後に、天井流の厚みの変化を図5に示す。実験値については、温度及び速度の鉛直分布からそれぞれ求めた厚みを示している。領域Ⅰでは本モデルとLiらのモデルの間で厚みの変化に僅かな差が見られるが、領域Ⅱでは有意な差は見られず、両モデルとも速度由来の実験値に概ね一致している。

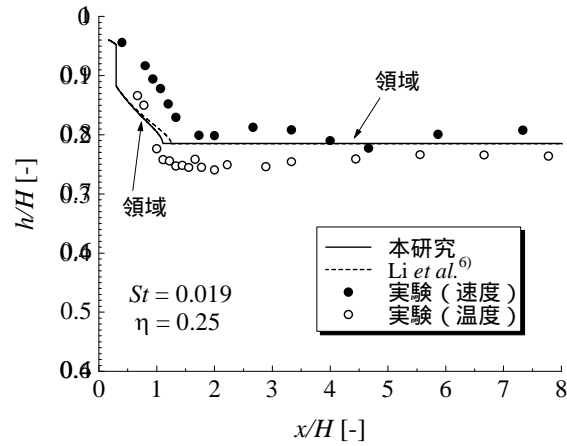


図5 天井流の厚みの比較結果。

## (2) まとめ

大型旅客船内で見られる、断面アスペクト比(幅/高さ)が1より小さな通路での天井流を想定し、天井だけでなく側壁での摩擦及び熱損失の影響を考慮した簡易理論モデルを提案した。模型実験の結果と比較したところ、領域Ⅰにおいては側壁の影響の有無による結果の差異は大きくないものの、領域Ⅱでは温度及び速度共に減衰傾向が異なり、特に温度減衰については側壁の影響を考慮した本モデルの方が実験結果を良く再現することが分かった。

## <引用文献>

- Y. Oka, H. Oka, Tunneling Underground Space Technol., 56, (2016), 79–89.
- M.A. Delichatsios, Combust. Flame, 43, (1981), 1–10.
- R.L. Alpert, Combust. Sci. Technol., 11, (1975), 197–213.
- L. Li, et al., Journal of Fire Sciences, 30, (2012), 122–137.
- F. Liu, et al., Tunneling Underground Space Technol., 54, (2016), 49–60.
- S. Li, et al., Tunneling Underground Space Technol., 26, (2011), 651–658.
- K. Hinata, et al., Proc. Asia Pacific Symp. on Safety 2017, Kitakyushu, Japan, 30 Nov. to 1 Dec., 2017.
- T. Wei, et al., Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 171, (2017), 196–201.

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasushi Oka, Hideyuki Oka	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
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yasushi OKA, Hideyuki OKA
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 The 9th International Seminar on Fire and Explosion Hazards (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aoi Tanno, Hideyuki Oka, Yasushi Oka
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 The 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 天井流の簡易理論モデルにおける壁面摩擦係数の影響
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹野碧、岡泰資、岡秀行
2. 発表標題 矩形通路の側壁影響を考慮した天井流の簡易モデル
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村新太、岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 浅層モデルに基づく高密度ガス拡散簡易評価モデルに関する研究
3. 学会等名 第51回安全工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村新太、岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 高密度ガス拡散評価のための数値解析に関する研究
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡泰資、岡秀行、日向賢也、松山賢
2. 発表標題 トンネル火災時に形成される天井流内の分布性状
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新谷祐介、岡秀行
2. 発表標題 ゼロ方程式乱流モデルを用いた単室内の煙流動解析
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀龍之介、岡泰資、岡秀行
2. 発表標題 軸方向に細長い空間で火災が発生した場合の熱気流挙動に関する数値解析
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018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 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 Hideyuki OKA, Yasushi OKA
2. 発表標題 Simplified Analysis of the Effect of Cross-Sectional Aspect Ratio on Fire-Induced Ceiling Flow in Rectangular Corridors
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenya HINATA, Hideyuki OKA, Yasushi OKA
2. 発表標題 Study on ceiling-jet property considering the difference of rectangular cross-section shape
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi KUDO, Hideyuki OKA, Arata KIMURA, Susumu OTA
2. 発表標題 Numerical investigation of ventilation effect for denser-than-air gas leakage in enclosed space
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 矩形通路の側壁影響を考慮した天井流の簡易モデル
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀龍之介、岡泰資、岡秀行
2. 発表標題 軸方向に細長い空間で火災が発生した場合の熱気流挙動に関する数値解析
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡泰資、岡秀行、日向賢也、松山賢
2. 発表標題 トンネル火災時に形成される天井流内の分布性状
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新谷祐介、岡秀行
2. 発表標題 ゼロ方程式乱流モデルを用いた単室内の煙流動解析
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 天井流の簡易理論モデルにおける壁面摩擦係数の影響
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村新太、岡秀行、岡泰資
2. 発表標題 高密度ガス拡散評価ための数値解析に関する研究
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2018
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	岡 泰資  (Oka Yasushi)  (10240764)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授    (12701)	