開口噴出気流温度の相似則としての無次元温度の適用性

APPLICABILITY OF NONDIMENSIONAL TEMPERATURE FOR SCALING THE TEMPERATURES OF WINDOW JET PLUME

山口 純一*, 岩井 裕子**, 田中 哮義***, 原田 和典****

大宮 喜文*****, 若松 孝旺*****

*Jun-ichi YAMAGUCHI, Yuko IWAI, Takeyoshi TANAKA,
Kazunori HARADA, Yoshihumi OMIYA and Takao WAKAMATSU*

In order to develop a means to assess the effectiveness of some design elements for preventing upper floor fire spread, such as window geometry and arrangement of eaves above windows, possibility of scaling of window jet plume temperature distribution by means of a nondimensional temperature was explored. Experiments were conducted using two geometrically similar setups having different sizes to investigate the applicability of the nondimensional temperature to various conditions.

It was found that the nondimensional temperature is independent of size and fire temperature but is uniquely determined only by geometrical conditions, that is, it is possible to predict real scale window jet plume temperatures based on the results of reduced scale experiments.

Keywords: Upper floor fire spread, Geometry, Window jet plume, similarity, Nondimensional temperature

上階延焼、形状、開口噴出気流、相似、無次元温度

1. はじめに

建物の一室で生じた火災が拡大して、窓ガラスが破れ、火炎・熱気流が噴出すると、これらは上階の窓ガラスを破って上階の空間に侵入し、上階延焼をもたらす危険を生じる。上階延焼の危険性や、種々の防止対策の効果を評価するためには、先ずこの窓からの噴出熱気流の性状の把握が必要となる。

火災室開口からの熱気流の性状に関する研究は横井により最も系統的に行われ、火炎・熱気流の気流軸（トラジェクトリ）上の温度分布を予測する無次元パラメータが提示され、それによる模型実験と実大火災実験との相似性も確認されている。¹⁾しかし、上階の窓ガラスの破損に直接つながるのは、気流軸に沿った温度よりも、むしろ窓が直接暴露される窓付近の温度である。噴出熱気流の温度は気流軸上に添って最も高いので、もし窓ガラスの破損を気流軸上の温度に基づいて評価すると、安全側ではあるが過剰な対策を強いられる恐れがある。また、開口の形状及びバルコニーの有無や寸法等は気流軸の形状に影響を与え、従って窓付近の温度にも影響するが、これらの様々な因子の上階延焼に及ぼす影響が評価できない。

一般に、窓開口の形状やバルコニー等上階延焼防止のための設計

的対策となり得る因子の条件は建物毎に異なるので、これらが噴出気流の性状に及ぼす影響は、各々の条件毎に実験的に検証するのが望ましいが、実大実験によって調べるのには費用、労力ともに過重である。しかし、開口噴出気流に関する適切な相似則が得られれば、模型実験の結果を用いてそれらの影響を評価することが可能になり、実験的手法に現実性が出てくる。

そこで、本研究では、上階の窓近傍の温度を含む開口噴出気流の温度分布一般に関する相似則を与えると考えられる無次元温度を考え、種々の条件に対するその適用可能性を実験的に調べた。

2. 無次元温度

横井は、噴出気流のトラジェクトリに沿った温度分布が、次式で定義される無次元温度 Θ により、相似になることを示した。¹⁾

$$\Theta = \Delta T_0 r_0^{5/3} / (T_\infty \dot{Q}_p^2 / c_p^2 \rho^2 g)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 ΔT_0 は気流軸上の任意の位置における開口噴出気流の上昇温度、 r_0 は開口噴流の等価半径、 T_∞ は外気温度、 $\dot{Q}_p$ は開口噴出気流の持ち出す熱量、 c_p は気体の定圧比熱、 ρ は気流軸上の任意の位置

* 株式会社大林組 工修

** 東京理科大学理工学部建築学科 研究補助員

*** 京都大学防災研究所 教授・工博

**** 建設省建築研究所防煙研究室 主任研究員・工博

***** 建設省建築研究所防火材料研究室 研究員・工博

***** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Obayashi Corporation, M. Eng.

Assistant Investigator, Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Tech., Sci. Univ. of Tokyo

Prof., DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.

Smoke Control Div., Building Research Institute, MOC., Dr. Eng.

Fire Preventive Materials Div., Building Research Institute, MOC., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Tech., Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

における気流密度、 g は重力加速度である。

さて式(1)は、現在、火災研究分野で広く用いられている無次元熱量 $\dot{Q}^*$ を用いると下式のように表現できる。

$$\Theta = \frac{\frac{\Delta T_0}{T_\infty}}{\dot{Q}_D^{2/3} \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{2/3}} \quad (2)$$

ただし、 T_0 は気流軸上の任意の位置における開口噴出気流の温度であり、 $\dot{Q}_D$ は下式で定義される開口噴出気流の無次元熱量である。

$$\dot{Q}_D = \frac{\dot{Q}_D}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g r_0} r_0^2} \quad (3)$$

ここに、 ρ_∞ は周囲空気密度である。

しかし、気流温度予測の便宜上は、式(2)の Θ が ΔT_0 と T_0 と共に含むのは不都合であるため、本研究では横井の無次元温度を変形した式(2)を幾分緩和し、式(2)における $(T_0/T_\infty)^{2/3}$ を無視する。また、無次元温度 Θ を気流軸上の上昇温度 ΔT_0 のみでなく、任意の位置 (x,y) の上昇温度 $\Delta T(x,y)$ に拡張して

$$\Theta = \frac{\frac{\Delta T(x,y)}{T_\infty}}{\dot{Q}_D^{2/3}} \quad (4)$$

のように定義する。

更に幾何学的相似が保たれている条件下の議論である限り、代表寸法は必ずしも等価半径 r_0 とする必要はないので、簡単のため代表寸法を開口高さ H とし、伴って $\dot{Q}_D$ を

$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}_D}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g H} H^2} \quad (5)$$

と定義する。因みに、式(4)及び(5)は、熱量や代表寸法は異なっているが、形態上は火源上の火災プルームの温度に対する相似を与え

る式と同じである。

横井によれば、気流軸上の温度に関する式(1)の無次元温度 Θ は寸法や温度に関係なく、開口の幾何学的形状のみに依存する量である。気流軸上の温度に関してこの関係があるならば、気流軸以外の部分でも一般的に同様の関係があると考えるのは自然であろう。ここでの目的は、上階のガラス窓近傍を含む開口噴出気流中の任意の位置の温度に関して新たに考えた式(4)の無次元温度が、実際の建築物で見られる開口や庇の形状的条件の下で、やはり幾何学的形状のみの関数になるか否かを実験的に調べることである。

3. 実験概要

本実験では異なるスケール間の相似性を検証するため、表1に示すような3倍のスケール差のある2つの立方体の火災区画模型を使用し実験を行った。なお、両者は開口及び庇の形状、設置位置を含め幾何学的に相似である。ただし、区画壁材は同一の厚さであり相似ではない。なお、以下では、模型1を使用して行った実験を小規模実験、模型2を使用して行った実験を中規模実験と呼ぶ。

表1 使用火災区画模型概要

模型	(規模)	形状	内法 (m)
1	(小)	立方体	0.5
2	(中)	立方体	1.5

3.1 実験装置

本実験で使用した実験模型と温度測定位置を図1に示す。

区画模型は、内法一辺1.5(m)の立方体(中規模模型)と、内法一辺0.5(m)の立方体(小規模模型)の2つを使用し、何れも厚さ12(mm)のパーティート板で作成した。なお、両者は当然相似であるので、図1では一辺の長さを $10h$ としている。ここで、中規模模型では $h=0.15$ (m)、小規模模型では $h=0.05$ (m)である。

(a) 断面図

●熱電対設置位置 単位m

(b) 平面図

中規模実験 $h=0.15$ (m) 小規模実験 $h=0.05$ (m)

A: 熱電対設置間隔、中規模実験は0.03(m)、小規模実験は0.015(m)

B: 開口端からの熱電対距離、中規模実験は0.03(m)、小規模実験は0.015(m)

図1 実験区画模型

区画側壁には開口を設置し、別に用意した開口パネルを取り付けることにより開口の形状及び寸法を変化できるようにした。

庇は、開口高さHを基準とし、開口上端からH/2上方と、2H上方の2ヶ所に設置した。ただし、図1に示した庇の設置位置は開口高さHを4hとした時の例である。

火源としてはアルコールパンを用い、模型室内の底面中央部に設置した。

3.2 温度測定位置

本実験では、開口噴出気流の温度、区画内温度及び開口部温度を図1に示す位置で測定した。なお、小、中規模実験における噴出気流温度及び区画内温度の測定位置は幾何学的に相似の位置である。

開口噴出気流の温度は区画模型の中心軸上で測定し、開口下端から2h(m) (中規模実験h=0.15、小規模実験h=0.05) 上方の位置を基準として水平方向にh(m)間隔で5点、垂直方向にh(m)間隔で11点測定した。

区画内空気温度は、図1中に示す平面上の2ヶ所の点で、それぞれ垂直方向に11点測定した。

開口部における温度測定のための熱電対は、中規模実験においては開口左端から30(mm)の位置で開口下端から垂直方向に30(mm)間隔で熱電対を設置し、小規模実験においては開口左端から15(mm)の位置で開口下端から垂直方向に15(mm)間隔で設置した。なお、熱電対の開口左端からの位置は、温度が開口端部の縮流の影響を受けないことを確認して定めた。³⁾

3.3 実験条件

小規模及び中規模実験における実験条件を、それぞれ表2及び3に示す。

開口形状は、縦長（幅：高さ=1：2）、正方形（幅：高さ=2：2）、及び横長（幅：高さ=2：1）の3種類とした。

庇を設置する場合は、奥行きを開口高さHの1/2とし、幅を開口幅（以下、短い庇）及び区画幅（以下、長い庇）の2通りに変化させた条件と、庇を設置しない条件（以下、庇無し）の3種類とした。

火源はメタノールを燃料として用い、アルコールパンの径を変化させることにより開口部における噴出気流の熱量を変化させた。また、パン径は換気支配となって噴出火炎の発生することがないような大きさの範囲内で設定した。

実験は、開口、庇及びパン径の条件全ての組み合わせに対して行った。

表2 小規模実験

開口			庇の形状		パン径 (m)
形状	幅B(m)	高さH(m)	奥行き(m)	幅(m)	
縦長	0.1	0.2	なし		0.10
正方形	0.2	0.2	H/2	開口幅	0.15
横長	0.2	0.1	H/2	0.5	0.20

表3 中規模実験

開口			庇の形状		パン径 (m)
形状	幅B(m)	高さH(m)	奥行き(m)	幅(m)	
縦長	0.3	0.6	なし		0.3
正方形	0.6	0.6	H/2	開口幅	0.4
横長	0.6	0.3	H/2	1.5	0.6

3.4 測定方法

実験は火源に着火後約15分待ち、火災区画内温度の定常が確認された後計測を開始した。測定は2秒間隔で2分間計測した。また、後に示す実験結果はこの2分間のデータの平均値を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 開口噴出気流温度と開口噴流熱量及び空間規模の関係

図2は、小規模及び中規模実験で得られた実験結果の中で、開口形状が長方形（B：H=1：2）、庇無しの条件における開口噴出気流の等温度分布 $\Delta T(x,y)$ を火源のパン径別に示したものである。なお、図中にはパン径と共に開口噴出気流の熱量 $\dot{Q}_D$ も同時に示しているが、これは、火源規模を表すパン径よりもこの開口噴出気流の熱量 $\dot{Q}_D$ の方が開口噴出気流温度に直接的に影響を与える物理量であるからである。なお、開口部における噴出気流の熱量 $\dot{Q}_D$ は、開口から火炎が発生していないことから、下式より算出した。

$$\dot{Q}_D = c_p m_D \Delta \bar{T}_D \quad (6)$$

ここで、 $\Delta \bar{T}_D$ は開口噴出気流の平均上昇温度であり、中性帯から開口上端までの開口噴出気流温度の平均値を用いた。なお、中性帯高さは開口部における噴出気流の温度分布よりN%法²⁾を用いて算定し、N値は10とした。³⁾ また、 m_D は開口部における噴出気流の質量流量であり、下式より算出した。

$$m_D = \frac{2}{3} \alpha B \{2g\rho_s(\rho_\infty - \rho_s)\}^{1/2} (H - Z_n)^{3/2} \quad (7)$$

ここで、 α は流量係数、 B は開口幅、 g は重力加速度、 ρ_s 及び ρ_∞ はそれぞれ区画内空気密度及び周囲空気密度、 H は開口高さ、 Z_n は中性帯高さである。なお、流量係数 α は開口噴流の流量測定の結果³⁾に基づき0.52を使用し、 ρ_s は中性帯高さから開口上端高さにおける区画内温度の平均値より算出した。また、横軸は開口からの距離(m)、縦軸は高さ(m)である。等温線の間隔は20(K)であり、色の濃いほど温度が高いことを示している。

図2によれば、開口噴出気流の等温度分布の形状は開口噴出気流の熱量 $\dot{Q}_D$ の大小に関わらず似通っている。しかし、噴出気流温度は小規模、中規模実験のそれぞれにおいて、開口噴出気流の熱量 $\dot{Q}_D$ の違いにより当然異なっている。

図3はそれぞれ、図2に示した実験結果を式(4)により無次元化した無次元温度を相似の位置に対する空間分布 $\Theta(\xi, \eta)$ で示したものである。ただし、 ξ 、 η はそれぞれ $\xi = x/H$ 、 $\eta = y/H$ で定義される無次元位置である。また、無次元温度の等温線の間隔は0.5(-)である。

これより、図2においては小規模、中規模実験共に開口噴出気流の温度分布は熱量 $\dot{Q}_D$ の変化に伴い大きく変化していたが、図3の無次元温度分布は開口噴流の熱量 $\dot{Q}_D$ に関わらず互いに良く一致していることがわかる。また、小規模と中規模のスケールの違う空間における温度分布を比較しても、若干の差異は見られるが、大差がないといえる。若干の差異は、区画壁の厚さが小、中規模模型で等しく、相似になっていないこと、及び開口噴流の熱量の算定誤差により生ずると思われる。これより、式(4)で定義される無次元温度 Θ の分布は開口の寸法や噴出気流温度に拘わらず殆ど一定になると言

図2 開口噴出気流温度分布 (等温線: 20(K)間隔)

図3 開口噴出気流無次元温度分布 (等温線: 0.5(-)間隔)

える。

4.2 開口噴出気流温度と開口形状の関係

(1) 底を設置しない場合

図4は、小規模及び中規模実験の底を設置しない条件における開口噴出気流の等温度分布 $\Delta T(x, y)$ を開口形状別に示した一例である。ただし、図4では小、中規模実験で温度差が最も大きくなり、従って無次元温度分布が最も一致しづらいと考えられる条件、すなわち、小規模実験は火災区画内温度が最も高くなるパン径0.2(m)、中規模実験は温度が最も低くなるパン径0.3(m)の実験データの例を比較した。

既に横井により明らかにされているように、縦長開口(a)、(d)の噴出気流は外壁から離れて上昇するのに対し、正方形開口(b)、(e)では外壁側に近寄り、更に横長開口(c)、(f)では外壁に沿って上昇し

ている。また、開口形状が同一である場合の噴出気流の形状は小規模実験、中規模実験で類似している。

図5はそれぞれ、図4に示した実験結果を式(4)により無次元化した無次元温度の空間分布 $\Theta(\xi, \eta)$ で示したものである。

図4に示す例では、小規模実験では開口噴出気流の温度は一般に高く、最も高い部分は約400℃にまで達しているのに対し、中規模実験では開口噴出気流の温度は一般に低く、最も高い部分でも100℃程度となり、双方の開口噴出気流温度には大きな差が生じている。しかし、図5に示されるように、無次元温度に変換すると何れの開口形状においても小規模と中規模実験における無次元温度は互いに良く一致している。よって、開口噴出気流の無次元温度 Θ は、気流軸以外の任意の位置においても温度、寸法によらず、開口の幾何学的形状のみに依存すると言える。

図4 開口噴出気流温度分布 (等温線: 20(K)間隔)

図5 開口噴出気流無次元温度分布 (等温線: 0.5(-)間隔)

(2) 底を設置した場合

図6は、小規模及び中規模実験の長い底（区画と同じ幅の底）を設置した条件における開口噴出気流の等温度分布 $\Delta T(x, y)$ を開口形状別に示した一例である。ただし、底の条件以外は図4に例示した実験条件と同じである。なお、横長開口の場合に2つの底の間隔が小さくなっているのは、底間の無次元距離（開口高さに対する底の距離）の比を他のものと同一にしたためである。

図7はそれぞれ、図6に示した実験結果を式(4)により無次元化した無次元温度の空間分布 $\Theta(\xi, \eta)$ で示したものである。

底が存在することにより開口噴出気流の形状は底の無い場合とは異なるが、同一の開口形状における小規模及び中規模実験それぞれ

の無次元温度分布は互いに良く一致している。よって、底が設置されている場合においても、開口噴出気流の無次元温度 Θ の分布は開口及び底の幾何学的な形状のみに依存すると言える。

4.3 開口噴出気流と底の関係

以上により、開口噴出気流の無次元温度は寸法や熱量に関係なく、形状のみで定まることが知られたので、以下では小規模実験の結果から底の効果を考察してみる。

図8は、小規模実験の各開口形状における実験結果を式(4)により無次元化した無次元温度の空間分布 $\Theta(\xi, \eta)$ を底の設置条件別に示した一例である。ただし、図はパン径0.2(m)の実験データを例示したものである。

図6 開口噴出気流温度分布 (等温線: 20(K)間隔)

図7 開口噴出気流無次元温度分布 (等温線: 0.5(-)間隔)

横井によれば、開口が縦長の場合は、庇を設置しても開口噴出気流の気流軸上の温度の変化はほとんどなく、庇を設置したことによる効果は少ないと言われるが¹⁾、図8(a)~(c)からも気流軸付近の温度に関しては確かにその傾向は見られる。しかし、延焼防止上重要な外壁近傍の温度分布に着目するば、やはり庇設置の効果は出ていると考えられる。しかも、長い庇の方が効果はより顕著である。また、図8(a)~(c)の結果を見ると、もし庇の奥行きが今回の実験のものより大きくなれば、気流の形状自体も庇のある場合と無い場合でかなり異なったものになるように思える。一方、正方形開口の図8(d)~(f)、及び横長開口の図8(g)~(i)においては、今回の実験で用いた庇の奥行きでも庇を設置したことにより、明らかに開口噴出気流

軸が壁から離れることがわかる。特に、正方形開口の図8(e)、(f)の気流温度分布はそれぞれ縦長開口の図8(b)、(c)と類似している。また、勿論壁近傍の気流温度も減衰している。さらに、長い庇の方が短い庇（開口と同じ幅の庇）を設置した場合より気流軸を壁面から遠ざげる傾向がある。これは、庇を設置した場合は、開口噴出気流に巻き込まれる空気が庇の上方で外壁側からも供給されるため、縦長開口の場合と類似した空気巻き込み条件となるためと考えられる。以上より、上階延焼防止対策として、庇を設置することは常に有効であると言える。また、特に長い庇の場合は、開口形状の違いによる噴出気流の分布形状の差を小さくする働きがあると考えられる。

図8 開口噴出気流無次元温度分布 (等温線: 0.5(-)間隔)

5. まとめ

本研究では、開口形状、バルコニー等の設計的要素が上階延焼防止に果たす効果を評価する手法を開発することを目的として、開口噴出気流の温度性状を模型実験により調べた。

実験は式(4)の開口噴出気流の無次元温度が、気流軸上のみならず、上階ガラス面の近傍を含む気流全体の温度に対して、開口噴出気流の熱量、模型寸法に関わらない相似則を与えるのか否かを調べるために、スケールの異なる2つの模型を使って行った。その結果以下のことが明らかになった。

- ① 開口噴出気流の気流軸を含む全ての領域において、式(4)で定義される無次元温度 θ の分布は、寸法、温度に関わらず、また底の設置の有無に関わらず、開口及び底の幾何学的形状のみに依存する。すなわち、幾何学的に相似な模型実験の結果に基づいて実大スケールの噴出気流の温度を予測することが可能である。
- ② 底を設置することは上階延焼防止上常に有効である。また特に、底の奥行きが同じ場合には幅の広い底ほどその効果は大きくなる。

<使用記号>

B	開口幅(m)
c_p	定圧比熱(kJ/kgK)
g	重力加速度(m/s ²)
H	開口高さ(m)
m_D	開口噴出気流の流量(kg/s)
$\dot{Q}_D$	式(6)で定義される開口噴出気流熱量(kW)
$\dot{Q}_D'$	式(5)で定義される開口噴出気流の無次元熱量(-)
r_e	等価半径(m)
T_0	気流軸上の任意の位置における開口噴出気流の温度(K)
T_∞	周囲空気温度(K)
ΔT	任意の位置における開口噴出気流の上昇温度(K)
ΔT_0	気流軸上の任意の位置における開口噴出気流の上昇温度(K)
ΔT_D	開口噴出気流の平均上昇温度(K)
x	開口下端中央からの水平距離(m)
y	開口下端中央からの垂直高さ(m)
Z_n	中性帯高さ(m)
θ	開口噴出気流の無次元温度(-)
α	開口係数(-)
η	開口下端中央からの無次元垂直高さ ($=y/H$) (-)
ξ	開口下端中央からの無次元水平距離 ($=x/H$) (-)
ρ	気流軸上の任意の位置における気流密度(kg/m ³)
ρ_∞	周囲空気密度(kg/m ³)
ρ_s	区画内空気密度(kg/m ³)

<参考文献>

- 1) 横井鎮男：建築物の火災気流による延焼とその防止に関する研究, 学位論文
- 2) L.Y.Cooper, M.Harkeroad, J.Quintiere, W.Rinkinen: An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios, Journal of Heat Transfer, Vol.104, pp.741-749, 1982.11
- 3) 山口純一、山田茂、田中孝義、若松孝旺：区画火災における開口噴流の流量測定, 日本建築学会計画系論文集 第501号, pp.1-7, 1997.11

(1997年11月10日原稿受理, 1998年6月10日採用決定)