火災区画内の対流熱伝達に及ぼす換気の影響

VENTILATION EFFECTS ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN COMPARTMENT FIRES

山田 茂*, 田中 哮義**, 吉野 博***
Shigeru YAMADA, Takeyoshi TANAKA and Hiroshi YOSHINO

The objective of this study is to develop a simple and practical model for predicting overall convective heat transfer coefficient in compartment fires. Experiments using a small scale (500mm cube) and a medium scale (1,500 mm cube) compartments were conducted to investigate the influence of ventilation on convective heat transfer coefficient. As a result, the following findings have been obtained. ① Convective heat transfer coefficients in case that there are both of the flow induced by heat release of origin and the one induced by ventilation are always larger than in case that there is no ventilation. ② The convective heat transfer coefficient can be divided into two components, i.e. one due to the flow induced by heat release of origin and the other due to the flow induced by ventilation. ③ The part of the convective heat transfer coefficient due to ventilation can be expressed as a function of the dimensionless opening mass flow rate.

Keywords : *compartment fire, convective heat transfer, dimensionless heat release rate, dimensionless heat transfer coefficient*

区画火災、対流熱伝達、無次元発熱速度、無次元熱伝達率

1. はじめに

本研究は対流熱伝達率の実用的な予測式を開発することによって区画火災性状の工学的予測精度の向上に寄与することを目的としている。ここで火災性状予測手法としてはゾーンモデルを念頭においているので、対流熱伝達の予測式は、局所の情報を必要とするものではなく、層の平均的物理量をもとに評価できる簡易なものとすることを目標とする。

一般に対流熱伝達速度を評価するには、気体と伝熱面の温度、及び対流熱伝達率の評価が必要である。火災区画の平均的な性状の予測を対象とする場合、気体と伝熱面の温度については、それぞれ区画内の気体の平均温度および周壁表面の平均温度を採るのが最も自然で、実用的であろう。すると、これに伴って対流熱伝達率も区画内の平均的な値を評価することが必要となる。

対流熱伝達率は一般に伝熱面が曝される気流の性状に影響される。火災区画内の気流性状は、天井下と垂直壁面近傍では異なり、また火源からの距離によっても差異がある。従って、対流熱伝達率は部位毎に異なり、火災区画内の平均対流熱伝達率は、これらが総合された値である。

既報^{1, 2)}では、火災のごく初期に見られるような、開口を通しての換気が室内への気流場に及ぼす影響が軽微な条件下を想定して、

立方形状の火災区画内の対流熱伝達を調べた。そして、このような条件では、火災区画内の気流の速度や方向は、火災区画内の位置毎に異なっても、全て火源の発熱が駆動する流れであり、従って流速も熱伝達率も火源の発熱速度と火災区画のスケールの関数となっているであろうとの考えから、寸法の異なる3つの相似の区画における熱伝達性状を、無次元発熱速度と無次元平均熱伝達率で整理した。この結果、これらのパラメーターが寸法の異なる相似の区画における熱伝達性状を説明するために有効であることが分かった。

一方、火災が更に進展して、火災区画の開口を介する換気が盛んになると、流入する空気が区画内の気流性状に影響を及ぼすことが考えられ、これが対流熱伝達率に関係する可能性が出てくる。そこで本研究では、2つの寸法の異なる相似の火災区画模型を用いた実験により、開口を介する換気がある時期における対流熱伝達率を調べることにした。

2. 研究の方法

2.1 熱伝達速度 Q_c 及び熱伝達率 h

室内周壁への熱伝達速度 Q_c 、火源の発熱速度 Q 、換気による失熱速度 Q_d の間には

$$Q_c = Q - Q_d \quad \text{----- (1)}$$

* フジタエンジニアリング本部 博士(工学)

** 京都大学防災研究所 教授・工博

*** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Engineering Dept., Fujita Corporation, Dr. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

の関係がある。従って、換気による失熱速度 Q_d 、区画内の火源の発熱速度 Q を測定し、さらに層と表面の温度差 ΔT 及び伝熱面積 A が評価できれば、対流熱伝達率 h は

$$h = Q_c / (\Delta T \cdot A) \quad \text{----- (2)}$$

で算出できることになる。

2.2 換気による失熱速度 Q_d

開口から流出する空気質量速度 m_d 、流入する質量速度 m_i 及び火源からの可燃ガスの発生速度 m_p の間には

$$m_d = m_p + m_i$$

の関係があるが、 m_d 及び m_i に比較し、 m_p は通常無視できるので、

$$m_d \approx m_i$$

とみなせる。そこで、流入空気温度を T_i 、流出空気温度を T_d とすると、換気による失熱速度 Q_d は下式で求められる。

$$\begin{aligned} Q_d &= C_p T_d m_d - C_p T_i m_i \\ &= C_p (T_d - T_i) m_d \quad \text{----- (3)} \end{aligned}$$

なお、開口噴流の質量流速 m_d は、既報³⁾で報告しているガス分析に基づく手法により測定する。

3. 実験概要

規模の異なる2種類の区画模型を用いて、同じ手法で実験を行い、さらに発熱速度及び開口形状を変えることにより、これらの要素と熱伝達率との関係を調べた。

ここで、実験における測定は、定常状態とみなせる時期を前提としている。

火源の発熱速度の測定手法、並びに以下に示す区画模型2に関しては既報³⁾に詳述している。

3.1 区画模型及び捕集フード

燃焼箱は厚さ12mmのパーライト板に厚さ3mmのステンレス板を内貼りした内法500mm立方の区画模型(区画模型1とする)及び内法1500mm立方の区画模型(区画模型2とする)で、これらは相似形である。区画模型2の平面及び断面を図1に示す。

図2に示すように、内貼りのステンレス板は各面9分割し、板の裏面中央を切り欠き熱電対を埋め込んでいるが、これにより内表面温度が十分な精度で測定できる^{4, 5)}。区画下部の一つの壁ユニットには、形状の異なる開口を有するパネルを取付けることができ、これにより開口条件を変化させることができる。開口パネルに設けた開口寸法を表1中に示す。

また、開口の外部上方には開口から流出するガスを捕集するため、図1に示す大フードを設置した。大フードにはダクトを接続し、そ

(1) 平面図

(2) 断面図

□ ガス採取位置
● 温度測定位置

図1 区画模型2とガス捕集装置及び測定位置

(1) ステンレス板内貼り状況

(2) 周壁の断面

図2 ステンレス板及び熱電対設置状況

表1 開口寸法と火源の大きさ (○: 実験を実施した条件)

	実験 No.	区画模型1 (500mm 立方)						区画模型2 (1500mm 立方)							
		No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 21	No. 22	No. 23	No. 24	No. 25	No. 26	No. 27	No. 28
開口	幅 B (mm)	100		150		200		150		300		450			
	高さ H (mm)	150	200	150	200	150	200	300	450	150	300	450	150	300	450
	開口因子 ^{*1}	5.8	8.9	8.7	13.4	11.6	17.9	24.6	45.3	17.4	49.3	90.6	26.1	73.9	135.8
火源	^{*2} 70/0.9	○	○	○	○	○	○								
	100/1.8	○	○	○	○	○	○								
	150/4.0							○	○	○	○	○	○	○	○
	200/6.6							○	○	○	○	○	○	○	○
	250/10.6							○	○	○	○	○	○	○	○

*1 $BH^{3/2}$ ($\times 10^{-3} \text{ m}^{5/2}$)

*2 火源直径(mm)/自由空間中の発熱速度(kW)

の端部には捕集ガスを吸引するための排気ファンを設置した。ダクト内には流量測定のためのオリフィスを取り付けている。なお、大フードの下に高さを可変とした小フードを設置しているが、これは別に並行して行っている開口噴流ブルームの流量測定の際に巻き込み高さを明確にするため、本研究の目的では特に必要なく、また測定への影響もない。

3.2 火源及び発熱速度

底面中央部にアルコールパンを設置し、径の異なるパンを用いることにより発熱速度を変化させた。燃料はメタノールを使用した。パンの径は、燃焼速度と開口因子の大きさを考慮しながら、区画内で不完全燃焼を生じないと考えられる範囲で設定した。表1中に火源の大きさを示す。発熱速度は、区画内の伝熱性状によってメタノールの蒸発速度が変化するため、各実験毎にガス分析に基づき酸素消費法により算定するが、参考として自由空間中での測定結果²⁾も示している。

3.3 測定項目及び測定方法

測定項目を以下に示す。なお、区画模型2の測定位置を図1中に示しているが、区画模型1の箱内の温度測定位置は区画模型2の測定位置と相似の1/3の寸法の位置である。

- ・区画内空気温度：垂直方向11点×平面上の2ヶ所
- ・開口部温度：開口端から水平方向に30mm、開口上端から下端まで区画模型1は15mm、区画模型2は30mm間隔
- ・周辺空気温度
- ・ガス濃度 O₂、CO₂、CO（区画内、小フード内、排気ダクト内）
- ・排気ダクト内オリフィス板前後差圧、空気温度
- ・区画内壁表面温度：開口部のある面及び底面8点、他は9点

3.4 実験の手順

火源に着火後20分程度で各測定値がほぼ一定となり、定常と考えられる状態になるのが確認された。データの収録はこの定常状態とみなせる時期に30秒間、1秒間隔に行った。

計測を行った後、火源を鎮火させた。そして、開口パネル及びアルコールパンを変え、次の実験を行った。

3.5 ガス分析による開口噴流質量流速及び発熱速度の算定法

詳細は既報³⁾に示しているので、ここでは要点のみ記述する。

1) 開口噴流の質量流速の算定

各部の濃度 Y 及び排気ダクト内の質量流速 m_s から開口噴流の質量流速 md が下式で求められる。

$$md = \frac{Y_L^a - Y_L^s}{Y_L^a - Y_L^o} m_s \quad \text{----- (4)}$$

2) 区画内火源の発熱速度の算定

発熱速度はメタノールの燃焼による酸素の質量消費速度に、メタノールの単位酸素消費量当たり発熱速度13,220kJ/kg (O₂) を乗ずれば得られることから、酸素濃度から算出する速度 $Q_{(O_2)}$ は、雰囲気空気酸素質量分率 $Y_{O_2}^a$ 、排気ダクト内の酸素質量分率 $Y_{O_2}^s$ 、排気ダクト内の質量流速 m_s より下式で与えられる。

$$Q_{(O_2)} = 13,220 (Y_{O_2}^a - Y_{O_2}^s) m_s \quad \text{----- (5)}$$

また、CO₂濃度の変化を利用して、下式でも算出できる。

$$Q_{(CO_2)} = 13,220 \frac{3}{2} \left(\frac{32}{44} (Y_{CO_2}^s - Y_{CO_2}^a) \right) m_s \quad \text{----- (6)}$$

なお、上式の質量分率 Y_{O_2} 、 Y_{CO_2} を、ガス分析により測定される体積分率を基に算出する方法については既報³⁾を参照のこと。

4. 実験結果

4.1 区画内の火源の発熱速度 Q

図3に、式(5)により O₂ 濃度から算出した発熱速度及び式(6)により CO₂ 濃度から算出した発熱速度と、これらの平均とを比較した結果を示す。2つの区画ともやや差がある場合があるが、絶対量が微小であることを考慮すると、比較的精度よく測定されていると考えられる。O₂ 濃度と CO₂ 濃度を用いた算出値との間に若干の差があることを考慮し、本研究では発熱速度の値としては、O₂ 濃度からの算出値と CO₂ 濃度からの算出値との平均を用いることとする。

図4には、発熱速度と開口因子 $AH^{1/2}$ 及び自由空間で燃焼させて測定した発熱速度との比較を示す。区画内での発熱速度と自由空間中の発熱速度を比較すると、概ね一致しているが、最大25%程度の差も見られる。この原因としては以下のようなことが考えられる。

まず、本実験中の発熱速度の方が大きくなっているのは、区画内高温ガスからの対流及び輻射熱伝達、周壁からの輻射熱伝達によりメタノールが加熱されて、自由空間中での燃焼に比較し蒸発速度が大きくなっていることが原因と考えられる。また、区画模型2では、本実験中の発熱速度の方が小さくなっている場合もあるが、これは開口が小さいときで、この場合換気量が少ないために区画内部での発熱が抑えられ、その結果メタノールの蒸発速度が低下していることが原因と考えられる。

4.2 換気による失熱速度 Q_d

換気による失熱速度を算出する式(3)の開口噴流の温度 T_d には、開口部における中性帯高さから開口上端高さまでの平均値を用いることとする。ここで図5に、区画内及び開口部の垂直温度分布の一

図3 O₂濃度及びCO₂濃度からの発熱速度算出値

(1)区画模型1 (2)区画模型2
図4 区画内及び自由空間における発熱速度と開口因子

図5 区画内及び開口部の垂直温度分布

例を示す。

さて、中性帯高さについては、空気の流入と流出の境界の高さが中性帯の高さであることから、以下に示すように、開口部の温度計測値から中性帯の高さを推定した。

まず開口部の温度測定値の最高値を T_{max} 、最低値を T_{min} と表し、参照温度 T_n を

$$T_n = N(T_{max} - T_{min}) + T_{min} \quad \text{----- (7)}$$

とした。そして測定値を直線補間して、 T_n を示す高さを算出し、これを中性帯高さとした。ここで、 $N=0.1$ とした³⁾。

図6に、換気による失熱速度を開口形状を表すパラメータ $AH^{1/2}$ に対してプロットした結果を、また図7に失熱速度の発熱速度に占める割合の、開口因子に対する依存関係を示す。

図6から区画1の一部を除き、 $AH^{1/2}$ が大きくなるに従って換気による失熱速度は大きくなり、パン径が大きくなると失熱速度も大きくなるのがわかる。しかし、図7に示すように、失熱速度の発熱速度に対する割合を見ると、発熱速度による差はあまり見られな

くなる。

4.3 伝熱面積A、及び区画内空気と表面の温度差 ΔT

式(2)により区画全体の対流熱伝達率を算出するには、伝熱面積A、及び区画内空気と表面の温度差 ΔT が得られなければならない。そのためにまず、区画内の温度性状を調べた。

図8及び図9に、区画内空気及び周壁表面の垂直温度分布を示す。空気温度は同じ高さの2点の平均である。表面温度は、各面共9分割して内貼りしたステンレス板の中央部で測定している^{1, 2)}が、天井はこの9点の平均、壁の上段は4面の平均、中段及び下段は開口部のある面を除く3面の平均、床は火源を設置した中央を除く8点の平均としている。

図8を見ると、開口の形状が異なると温度に差が生じるが、いずれの場合も開口上端より上部ではほぼ均一に高温となり、一方下部では低温を示し、2層を形成していることがわかる。

そして、それらの層の境界面の高さを推定する手法としては、CooperのN%法⁴⁾に準じた手法として、区画内の最高温度と最低温度から推定するか、あるいは、中性帯の高さを算出し、層の境界面高さもこれにほぼ一致すると考えて推定することが考えられる。

そこで、これらの手法で模型区画2について計算した結果、前者の手法で求めた境界面の高さは実験条件によって異なるが、その値は122～158mm、後者の手法で求めた中性帯高さは60～260mmであった。区画の高さが1500mmであるので、上方90%程度が上部高温層で、下部層はわずかであると言える。そこで、本研究では下部層は無視し、区画全体を1層(高温層)とみなすこととした。

その理由は、全体の90%程度が高温層となっているので、残り10%程度下部層は無視できると考えたことと、2層を仮定した場

(1)区画模型1 (2)区画模型2

図6 開口からの失熱速度

(1)区画模型1 (2)区画模型2

図7 発熱速度に対する失熱速度の割合

(1)区画模型1 (パン径 70mm) (2)区画模型2 (パン径 200mm)

図8 区画内空気の垂直温度分布

(1)区画模型1 (パン径 70mm) (2)区画模型2 (パン径 200mm)

図9 周壁表面温度の垂直温度分布

合、上部層からの対流熱伝達量と下部層からの対流熱伝達量の割合が不明なこと、前報^{1, 2)}で火災初期における熱伝達率の推定においても1層とみなしており、同じ扱いをした方が比較の際に便利であると考えたためである。

模型区画1でも、模型区画2の場合と同じように上部高温層と下部低温層の2層を形成していることが窺える。模型区画2の場合と比較して、区画の高さに対する開口の高さの割合が大きいので、層の境界面はやや高い。しかし、上記したように2層に分割して考えることは本研究手法では不都合なため、ここでも区画内は1層と考えることとした。

従って、伝熱面積は床を除く周壁全体とする。これも既報^{1, 2)}と同じ扱いである。図9から床の温度上昇は小さいことがわかるので、床を除くことは妥当と考える。

区画内空気と表面の温度差を、開口因子を横軸にとって図10に示す。2つの区画共に、パン径が大きいほど温度差は大きく、開口因子が大きいほど温度差は小さくなっている。

4.4 輻射熱伝達

既報¹⁾に示したものと同一方法で、輻射熱伝達速度を推定した。

そして、上記した区画全体の熱伝達速度の大きさと比較した結果、輻射熱伝達速度は全体の5～25%程度であった。従って、本研究では対流熱伝達率という語を用いるが、これには上記の程度の輻射熱伝達を含む可能性があることになる。なお、これも既報の火災初期の状態を調べた場合と同様の扱いである。

4.5 対流熱伝達率と発熱速度、区画規模及び開口因子との関係

区画全体の対流熱伝達率 h の算出結果を、発熱速度 Q 、開口因子 $AH^{1/2}$ 、開口噴流の質量流量 m_d に対してプロットしたものを、区画の規模別にそれぞれ図11及び図12に示す。

発熱速度、開口因子及び開口噴流の質量流量が増大すると、対流熱伝達率が増大する傾向が見られる。熱伝達率に対して、発熱速度の影響が見られるのは、既報^{1, 2)}に示した火災初期の性状と類似している。

5. 考察

5.1 対流熱伝達率と発熱速度及び区画規模との関係

既報²⁾では、火災初期における対流熱伝達率は、発熱速度と区画の規模をパラメータとし、無次元発熱速度、無次元熱伝達率を用いるとよく整理できることがわかった。そこで、ここでも同じ方法で整理を試み、火災初期の値と併せてプロットした。図13には無次元発熱速度と対流熱伝達率、図14には無次元発熱速度と無次元対流熱伝達率の関係を示す。なお、無次元発熱速度、無次元熱伝達率はそれぞれ下式で定義する。ここで、 H は区画の高さ(代表寸法)である。

$$Q^* = \frac{Q}{C_p \rho_w T_w g^{1/2} H^{5/2}} \quad \text{----- (8)}$$

図11 熱伝達率と発熱速度、開口因子及び失熱速度 (区画模型 1)

図12 熱伝達率と発熱速度、開口因子及び失熱速度 (区画模型 2)

図13 無次元発熱速度と熱伝達率

$$h^* = \frac{h}{C_p \rho_m g^{1/2} H^{1/2}} \quad (9)$$

5.2 熱伝達率の発熱成分と換気成分への分割

図13から、換気が生じている時期と火災初期の対流熱伝達率の値を比較すると、無次元発熱速度の値が同じ場合、前者の値は後者の値よりも大きくなっていることがわかる。この傾向は対流熱伝達率を無次元化した図14でも同様である。これは対流熱伝達率に影響する区画内の流れが、火災初期には外部からの空気の流れがなく発熱に起因するものが支配的となっているのに対し、換気が生じている時期には、発熱に起因する流れに加えて、外部からの流入空気による流れが加わることが主な原因と思われる。

そこで対流熱伝達率 h を、火源の発熱に起因する成分 h_q と、換気による流れに起因する成分 h_d に分割して整理することを試みる。換気による流れがブルーム性状に影響を与えることにより発熱に起因する成分にも作用することも考えられるが、ここではこれを無視し、発熱に起因する成分と、換気による流れに起因する成分はそれぞれ独立であると仮定する。そして、発熱に起因する成分は既報²⁾に示したように無次元発熱速度の関数で表すこととする。また、換気による流れに起因する成分は、開口噴流の質量流速 md の関数として整理するが、この値も下式で無次元化することとする。

$$md^* = \frac{md}{\rho_m g^{1/2} H^{5/2}} \quad (10)$$

ここで、代表長さ H は区画の高さである。

さらに、式(9)による対流熱伝達率の無次元化も行う。

以上から、対流熱伝達率 h または無次元対流熱伝達率 h^* と、無次元発熱速度 Q^* 及び無次元化した開口噴流の質量流速 md^* の関係は下式のように表される。

$$h = f(Q^*) + g(md^*) \quad (11)$$

及び

$$h^* = f'(Q^*) + g'(md^*) \quad (12)$$

ここで、対流熱伝達率の発熱に起因する成分 h_q またはこれを無次元化した h_q^* と、無次元発熱速度 Q^* の関係は火災初期の性状と同じであると仮定する。つまり、既報²⁾で提案した

$$h_q = 0.1(Q^*)^{2/5} \quad (13)$$

及び

$$h_q^* = 2.0 \times 10^{-3} \quad (Q^* \leq 4 \times 10^{-3}) \quad (14.1)$$

$$h_q^* = 0.08(Q^*)^{2/3} \quad (Q^* > 4 \times 10^{-3}) \quad (14.2)$$

で表わされると仮定する。

図14 無次元発熱速度と無次元熱伝達率

以上から、対流熱伝達率の換気に起因する流れによる成分は

$$h_d = h - h_q \quad (15)$$

及び

$$h_d^* = h^* - h_q^* \quad (16)$$

で算出されることになる。式(15)に式(13)を、式(16)に式(14)を代入して h_d 及び h_d^* を算出し、 md^* に対してプロットしたものを図15及び図16に示す。

やや散らばりはあるが、各データは比較的まとまり、その近似式はそれぞれ以下のようになる。

$$h_d = 0.27(md^*)^{2/3} \quad (17)$$

及び

$$h_d^* = 5.1(md^*)^{4/3} \quad (18)$$

5.3 熱伝達率の予測値と実測値

熱伝達率を、火源の発熱に起因する成分と、換気による流れに起因する成分に分割することを試みた結果、それぞれの予測式が、式(13)と式(14)、式(17)と式(18)のように得られた。そこで、両方の成分を加算した熱伝達率の予測式は下式のようになる。

$$h = f(Q^*) + g(md^*) \\ = 0.1(Q^*)^{2/5} + 0.27(md^*)^{2/3} \quad (19)$$

また、無次元熱伝達率 h^* を用いて

$$h^* = f'(Q^*) + g'(md^*)$$

とする場合の具体的な回帰式は

$Q^* \leq 4 \times 10^{-3}$ の場合

$$h^* = 2.0 \times 10^{-3} + 5.1(md^*)^{4/3} \quad (20.1)$$

図15 無次元開口噴流質量流速と熱伝達率の換気成分

図16 無次元開口噴流質量流速と無次元熱伝達率の換気成分

図17 熱伝達率の予測値と実測値

図18 無次元熱伝達率の予測値と実測値

$Q^* > 4 \times 10^{-3}$ の場合

$$h^* = 0.08(Q^*)^{2/3} + 5.1(md^*)^{1/3} \quad \text{-----} (20.2)$$

となる。

そこで、これらの式から予測値を算出して、実測値と比較した結果を図17及び図18に示す。

図17から、対流熱伝達率の値は比較的良く予測されていると考えられる。図18は、対流熱伝達率を無次元化した場合の比較であるが、区画1の場合にやや差が見られる。しかし、いずれもデータは比較的良くまとまっていると考えられる。

6. まとめ

区画模型を用いて、発熱速度、開口形状、区画の規模を変えて実験を行い、区画内温度がそれほど高温とはなっていないが換気は生じている時期の対流熱伝達について調べた。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) 無次元発熱速度を用いて対流熱伝達率の値を整理した結果、無次元発熱速度が同じ場合、換気が生じている時期の対流熱伝達率は、換気のない火災初期の値に比較して常に大きい。(図13、図14)
- (2) 換気が生じている時期の対流熱伝達率を、火源の発熱に起因する流れに影響される成分と、開口を介して行なわれる換気に起因する流れに影響される成分に分割して整理することができた。(式(13)、式(14)、式(17)、式(18)、図15、図16)
- (3) 対流熱伝達率の換気に影響される成分は、無次元化した開口噴流質量流速(式(10))をパラメータとすると良く整理できた。(図15、図16) ただし、開口噴流の質量流速の無次元化に関する理論的検討を行っていないので、今後これを行う必要がある。
- (4) 2つの成分に分割した対流熱伝達率のそれぞれの予測式を加算して算出した対流熱伝達率の予測値と、実測値を比較した結果、比較的良好一致した。(式(19)、式(20)、図17、図18)

なお今回の実験では開口が比較的小さく、かつ、その位置は下部である。そのため流入空気ほとんどは火源に巻き込まれた後、ブルームとして上部層に貫入しており、そのため、外部から区画内に流入する空気が直接、上部空気層内の流れに与える影響が小さくなっていることも考えられる。従って、例えば開口の位置がより上部であれば、換気による成分が今回の実験値よりも大きくなることも考えられる。

また、本実験は区画が立方体で、開口が一面の壁下部に存在する条件のみで行っているため、区画及び開口の形状が異なる場合には、ここで提案した予測式がそのまま適用できるものではない。形状に対する依存は今後の検討課題である。

【謝辞】

実験に際しては東京理科大学大学院 山口純一君のご協力をいただいた。ここに記して感謝いたします。

【記号】

- A : 伝熱面積 (m^2)
- C_p : 定圧比熱 ($kJ/kg \cdot K$)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- H : 天井高さ (m)
- h : 対流熱伝達率 ($kW/m^2 \cdot K$)
- h_d : 対流熱伝達率のうち換気に起因する流れによる成分 ($kW/m^2 \cdot K$)
- h_d^* : h_d を無次元化した値
- h_q : 対流熱伝達率のうち火源の発熱に起因する流れによる成分 ($kW/m^2 \cdot K$)
- h_q^* : h_q を無次元化した値
- h^* : 無次元対流熱伝達率 (式(9))
- md : 区画からの流出空気の質量流速 (kg/s)
- me : 排気ダクト内の空気の質量流速 (kg/s)
- mi : 区画への流入空気の質量流速 (kg/s)
- mp : 火源からの可燃ガスの発生速度 (kg/s)
- Q : 発熱速度 (kW)
- Q^* : 無次元発熱速度 (式(8))
- Q_c : 対流熱伝達速度 (kW)
- Q_d : 換気による失熱速度 (kW)
- T : 温度 (K)
- T_d : 開口からの流出空気の温度 (K)
- T_i : 開口からの流入空気の温度 (K)
- T_n : 参照温度 (K) (式(7))
- T_∞ : 周辺空気の温度 (K)
- ΔT : 区画内空気と周壁表面の温度差 (K)
- Y_i : 化学種の質量分率 (添字の a は雰囲気空気、D は開口噴流、E 排気ダクト内を表す)
- ρ_∞ : 周辺空気の密度 (kg/m^3)

【参考文献】

- 1) 山田茂、田中孝義、吉野博：小規模区画における火災初期の対流熱伝達、日本建築学会計画系論文集 第491号、pp.1-8、1997.01
- 2) 山田茂、田中孝義、吉野博：熱伝達率と発熱速度及び区画規模との関係—小規模区画における火災初期の対流熱伝達 その2—、日本建築学会計画系論文集 第495号、pp.1-8、1997.05
- 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、1997.11 (掲載予定)
- 4) L.Y.Cooper, M.Harkeroad, J.Quintiere, W.Rinkinen : An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multi-room Fire Scenarios, Journal of Heat Transfer, Vol.104, pp.741-749, 1982.11

(1997年7月8日原稿受理、1998年7月31日採用決定)