区画火災における開口噴流の流量測定

MEASUREMENT FOR MASS FLOW RATE OF DOOR JET IN COMPARTMENT FIRES

山口 純一*, 山田 茂**, 田中 哮義***, 若松 孝旺****
Jun-ichi YAMAGUCHI, Shigeru YAMADA, Takeyoshi TANAKA
and Takao WAKAMATSU

Reduced scale experiments were conducted to measure the mass flow rate of door jet from a model fire compartment as the first step of the study on door jet plume and convective heat transfer in compartment fires.

As a results, the following findings have been obtained. ① The mass flow rates of door jet can be obtained based on measurements of O₂ concentration and CO₂ concentration. ② The mass flow rates of door jet calculated based on the gas analysis and the temperature measurement agreed well when 0.52 is used as the flow coefficient in the latter. ③ Heat release rates of fire source calculated based on gas concentration agreed in average with the heat release rate obtained from mass burning rate of fuel in the free space, but some of them differed significantly from the latter. The difference is thought to be caused by the change of fuel vaporization rate depending on ventilation factor of the compartment.

Keywords : *Flow Rate of Door Jet, Gas Analysis, Reduced Scale Test, Measurement Method*

開口噴流の流量、ガス分析、模型実験、測定手法

1. 研究の背景と目的

火災室等の室の開口部から噴出する高温ガスは、火災ブルームと同様噴出した先の空間の空気を巻き込みながら上昇する。この開口噴流ブルームが建物内の空間で生ずると、空気の巻き込みが煙の挙動に及ぼす影響は著しいと考えられる。

開口噴流ブルームに関連する既往の研究としては、横井の研究¹⁾がある。横井は窓からの噴出火災による上階延焼に関する研究において、開口噴流ブルームの温度分布を調べ、その予測手法を確立した。しかし、開口噴流ブルームへの巻き込み空気量については実験結果や予測結果を示していない。

開口噴流ブルームの流量の実用的な扱いとしては、例えば開口噴流ブルームを便宜的に火災ブルームと同じように垂直に上昇する熱ブルームと置き換えたモデル²⁾があるが、実験的裏付けはない。

本来、開口噴流の巻き込み空気量を、このモデルのように単純に垂直ブルームと類似させた手法で、精度良く見積もることは困難であると思われる。その理由としては、①開口噴流は最初水平に吹き出す、後に浮力により上方に変わること、②噴出断面の形状として横長、縦長等種々の場合が考えられること、③開口の上部には壁があることが多いが、その壁が存在することにより、自由空間のブルームに比較して巻き込みが制約されること等が挙げられる。

そこで、この開口噴流ブルームの巻き込み空気量を実験的に調べることとしたが、それにはその第一段階としてまず開口噴流の流量の把握が必要とされる。

一方、筆者等は別に区画火災における対流熱伝達の評価手法の確立を目的とする研究を行っている³⁾。この研究においては、火災の初期では火源の発熱に起因する流れが支配的と考えられるのに対し、盛期火災時では開口を介しての自然換気による流れも影響すると考えている。そして、盛期火災時の熱伝達性状を実験的に調べる際に、 $[\text{室内周壁への熱伝達速度}] = [\text{発熱速度}] - [\text{換気による失熱速度}]$ であることから、熱伝達の性状を調べるためには、まず換気による失熱速度を知ることが必要である。

すなわち盛期火災の熱伝達性状を調べる実験においても、やはり開口噴流の流量を把握することが必要であり、その際上述の実験と同じ装置及び実験手法が利用できると考えられたので、換気による開口流量の測定手法について共通の検討をすることとした。

2. 研究の方法

模型実験における開口噴流の流量を測定することが目的であるが、火災区画模型の小さな開口部を通る噴流の流速分布を測定することは技術的に極めて困難なので、以下の2通りの方法を考えた。

* 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 工修

** フジタ技術研究所 博士(工学)

*** 京都大学防災研究所 教授・工博

**** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Tech., Science Univ. of Tokyo, M. Eng.

Technical Research Institute, Fujita Corporation, Dr. Eng.

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

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

1) ガス分析に基づく測定法

図1にガス分析に基づく流量測定システムの概念を示す。

開口噴流はブルームとなって上昇する過程で周囲空気を巻き込むことにより希釈される。ブルームに含まれる O_2 や CO_2 の濃度はその希釈の程度により変化するが、燃焼が区画内で完結し、外での燃焼がないような条件では、各位置で測定されたガスの濃度を比較することにより、それぞれの位置における流量が算出できるというのが基本的考え方である⁴⁾。

図1 ガス分析に基づく測定システムの概念図

2) 温度計測による測定法

区画内温度を一様と仮定すると、開口部における圧力差及び流速分布は図2のようになり、この時開口からの流出速度は一般に下式で表される。

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

これは、必要とされる測定量が温度のみであり、簡便に求められるのが利点である。しかし、開口の流量係数 α が不確かなことが難点である。

図2 開口における圧力差及び流速分布

3. 実験概要

図3に火災区画模型とガス捕集装置及び測定位置を示す。

3.1 火災区画模型

火災区画模型は、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一辺1,500mmの立方体である。ただし、ステンレス板の内貼りは熱伝達性状を調べる際に必要となる内表面温度を測定するためのもので、本論文には直接関係しない。

区画の開口条件は、形状の異なる開口パネルを取付けることにより、変化させることができるようにした。

底面中央部にはアルコールパンを設置した。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ることができる。燃料としてはメタノールを使用した。

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、大フード (1,000×1,000×650^h mm) を設置した。大フードにはダクトを接続し、そ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、この下に、高さを可変としたパーライト板製の小フード (800×800×400^h mm) を設置しているが、これは開口噴流ブルームの流量の測定において巻き込み高さを明確にするため Zukoski 等³⁾ の手法にならったもので、開口噴流の流量を測定する目的だけでは特に必要はない。しかし、開口噴流ブルームの測定では合わせて開口噴流の流量測定が必要であり、従って開口噴流流量は、このフードの存在及び高さの如何に関わらず測定できる必要がある。

3.2 測定項目及び測定方法

本実験における測定項目は次の通りである。なお、これらの測定位置は図3中に示している。

1) 測定項目

- ・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：開口上端から下端まで30mm 間隔、開口端から30mm^{注1)}
- ・小フード内温度：垂直方向6点 (80mm 間隔)
- ・周辺空気温度
- ・ガス濃度 (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

2) 測定装置、センサー

- ・温度：ガラス被覆 CA 熱電対、直径0.65 mm
- ・ O_2 濃度：Beckman 社製酸素分析計 Model755 (0～25%)
- ・ CO_2 濃度：富士電機社製赤外線ガス分析器 ZRG (0～10%)

(1) 平面図

(2) 断面図

- ガス採取位置
- 温度測定位置

図3 火災区画模型とガス捕集装置及び測定位置

- ・CO 濃度：富士電機社製赤外線ガス分析器 ZRG (0～2%)
- ・差 圧：Validyne 社製差圧計

測定間隔は2秒とし、データはデータロガー、パソコンにより自動計測・収録した。

3.3 実験条件

開口寸法、パン径、小フード高さを変化させ、全ての組み合わせについて測定を行った。以下にそれぞれの条件を示す。

1) 開口形状

開口は表1に示す8種類である。なお、開口の下端は全ての条件において床面から50mmである。

表1 開口形状

幅 B (mm)	150	150	300	300	300	450	450	450
高さ H (mm)	300	450	150	300	450	150	300	450

2) パン径と発熱速度

パン径を表2に示す。深さは20mmである。パンは床に接して設置した。なお表中の発熱速度は参考のため示したが、自由空間での燃焼における重量減少速度から算出したものである⁹⁾。

表2 パン径と発熱速度

パン 径 (mm)	150	200	250
発熱速度 (kW)	4.0	6.6	10.6

3) 小フード高さ

小フードのたれ壁下端高さと区画開口上端の距離を500、400、300、200、100、50、0 mmの7段階とした。高さを変えたのは開口噴流プルームの流量と空気巻き込み高さについて調べるためである。

3.4 実験の手順

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。その後、火源を燃焼させたまま、小フード高さを変化させて連続的に実験を行った。高さを変化させてからは2～3分程度でほぼ定常状態になった。データの収録はこの定常状態とみなせる時期に行った。燃料は小フードの高さを変えた直後に供給した。

ガス分析器は同一のものを使用し、採取位置(区画内、開口部上部、小フード内、排気ダクト内)を切り替えながら各位置からの採取ガスのO₂、CO₂及びCO濃度を交互に測定した。1台の分析器を使用したのは、分析計の指示差による誤差を避けるため、この際に定常状態における測定のために濃度の時間的変化がないことを利用している。なお、周辺空気中のガス濃度は火源への着火以前の値をもって換えた。

小フード高さを7段階変化させ、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。

4. ガス分析による流量の算定法

4.1 開口噴流の流量算定

本実験における各流量とガスの質量分率の関係を図4に示す。

1) 質量及びガスの保存と質量流速

図4の系において、小フードに流入する量は、開口からの流出量 m_D と開口噴流プルームに巻き込まれる空気量 m_a の合計であり、

これはまた小フードから流出する量 m_P に等しいので、小フードの質量の保存から

$$m_D + m_a = m_P \quad \text{----- (2)}$$

また大フードでは、小フードからの流出量 m_P と、新たに巻き込まれる空気量 m_a' の合計が排煙される量 m_E に等しいから

$$m_P + m_a' = m_E \quad \text{----- (3)}$$

次いで小フードのガスの質量保存から

$$Y_L^D m_D + Y_L^a m_a = Y_L^P m_P \quad \text{----- (4)}$$

また、大フードのガスの質量保存から

$$Y_L^P m_P + Y_L^a m_a' = Y_L^E m_E \quad \text{----- (5)}$$

ただし、Lはガスの種類、すなわちO₂またはCO₂を表す。また、Y_Lはガスの質量分率、添字D、P、E及びaはそれぞれ開口噴流、小フード、大フード(排気ダクト)及び周辺空気を表す。

式(2)～式(5)より、 m_D 及び m_P はそれぞれ下式で表される。

$$m_D = \frac{Y_L^a - Y_L^E}{Y_L^a - Y_L^P} m_E \quad \text{----- (6)}$$

及び

$$m_P = \frac{Y_L^a - Y_L^E}{Y_L^a - Y_L^P} m_E \quad \text{----- (7)}$$

従って各位置におけるガスの質量分率、及びダクト内におけるガスの質量流速を測定すれば、開口噴流の質量流速が得られることになる。なお、式(6)は小フードがない場合でも成立する。

2) 採取ガスの質量分率

式(6)または式(7)から、 m_D または m_P を求めるためには、ガスの質量分率が知らなければならない。しかし、ガス分析器で測定されるのは体積分率である。また、各位置での採取ガス中には水分(H₂O)が含まれるが、ガス分析器に入る前にこの水分を除去するため、分析されるガス中に占めるO₂、CO₂の体積分率の測定値は、採取ガス中の実際のO₂、CO₂の体積分率とは異なることになる。

そこで、これら2つの問題を考慮しながら、各ガスの質量分率を求める手順を以下に示す。

2.1) 採取ガスの体積分率と質量分率

採取ガス中のガスLの体積分率 X_L と質量分率 Y_L の関係は

$$Y_L = \frac{M_L X_L}{M_{O_2} X_{O_2} + M_{CO_2} X_{CO_2} + M_{N_2} X_{N_2} + M_{H_2O} X_{H_2O}} \quad \text{--- (8)}$$

となる。ここで、M_LはガスLの分子量である。また微量ガスは無視し、COは検出されなかったので、採取ガス中にはO₂、CO₂、N₂及びH₂Oしか存在しないと仮定した。

さらに、上記の任意の採取位置における気体中の各ガスの体積分率の間には

図4 各流量とガスの質量分率

$X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{N_2} + X_{H_2O} = 1$ ----- (9)
の関係がある。

一方、分析器に入るガスからは水分(H₂O)が除去されているため、ガス分析器による O₂、CO₂ 濃度測定値 $X_{O_2}^a$ と採取ガス中のガス体積分率 X_L との間にはそれぞれ

$$X_{O_2}^a = \frac{X_{O_2}}{X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{N_2}} \quad \text{----- (10)}$$

及び

$$X_{CO_2}^a = \frac{X_{CO_2}}{X_{O_2} + X_{CO_2} + X_{N_2}} \quad \text{----- (11)}$$

の関係がある。なお、N₂ 濃度は測定できないが、ガス分析器に入る N₂ の濃度を $X_{N_2}^a$ とすると

$$X_{O_2}^a + X_{CO_2}^a + X_{N_2}^a = 1 \quad \text{----- (12)}$$

の関係がある。

2.2) 水分に関する近似扱い

実験では水分は測定しないので、以下のような近似的扱いをする。燃料として用いたメタノールの燃焼化学式は

であり、O₂ 3モルの消費に対し H₂O が4モル発生することになるので、採取ガスに含まれる水分の体積分率 X_{H_2O} は、

$$X_{H_2O} = \frac{4}{3} (X_{O_2}^a - X_{O_2}) \quad \text{----- (14)}$$

となる。ここで、 $X_{O_2}^a$ は周辺空気中の O₂ の体積分率である。なお、雰囲気空気の H₂O は、希釈された後の燃焼生成ガスと比較しても十分に小さいと考え無視した。

また、CO₂ 1モル発生に対し、H₂O が2モル発生するとも考えられるので、水分の体積分率 X_{H_2O} は

$$X_{H_2O} = 2 (X_{CO_2} - X_{CO_2}^a) \quad \text{----- (15)}$$

とも替ける。

次に、式(14)を式(9)に代入すると

$$X_{N_2} = 1 + \frac{1}{3} X_{O_2} - \frac{4}{3} X_{O_2}^a - X_{CO_2} \quad \text{----- (16)}$$

また、式(15)を式(9)に代入すると

$$X_{N_2} = 1 - X_{O_2} - 3X_{CO_2} + 2X_{CO_2}^a \quad \text{----- (17)}$$

となる。従って、式(14)及び式(16)を式(8)に代入することにより、測定にのらない X_{H_2O} と X_{N_2} を消去すると、採取ガス中の O₂ の質量分率 Y_{O_2} は

$$Y_{O_2} = \frac{24 X_{O_2}}{21 + 13X_{O_2} + 12X_{CO_2} - 10X_{O_2}^a} \quad \text{----- (18)}$$

また式(15)と式(17)を式(8)に代入すると CO₂ の質量分率 Y_{CO_2} は

$$Y_{CO_2} = \frac{11 X_{CO_2}}{7 + X_{O_2} - X_{CO_2} + 5X_{CO_2}^a} \quad \text{----- (19)}$$

一方で式(16)を式(10)に代入すると採取ガス中の O₂ の測定値(体積分率)は

$$X_{O_2}^a = \frac{X_{O_2}}{\frac{4}{3} (X_{O_2} - X_{O_2}^a) + 1} \quad \text{----- (20)}$$

また、式(17)を式(11)に代入すると、採取ガス中の CO₂ の測定値は

$$X_{CO_2}^a = \frac{X_{CO_2}}{2 (X_{CO_2} - X_{CO_2}^a) + 1} \quad \text{----- (21)}$$

式(20)を採取ガス中の O₂ の実際の体積分率 X_{O_2} について解くと

$$X_{O_2} = \left(\frac{4X_{O_2}^a - 3}{4X_{O_2}^a - 3} \right) X_{O_2}^a \quad \text{----- (22)}$$

式(21)を CO₂ の実際の体積分率 X_{CO_2} について解くと

$$X_{CO_2} = \left(\frac{2X_{CO_2}^a + 1}{2X_{CO_2}^a + 1} \right) X_{CO_2}^a \quad \text{----- (23)}$$

2.3) 採取ガスの質量分率

式(22)及び式(23)を式(18)に代入すれば採取ガスの O₂ 質量分率 Y_{O_2} は

$$Y_{O_2} = \frac{24 (4X_{O_2}^a - 3) X_{O_2}^a}{(21 - 10X_{O_2}^a) (4X_{O_2}^a - 3) + (13X_{O_2}^a + 12X_{CO_2}^a) (4X_{O_2}^a - 3)} \quad \text{----- (24)}$$

また、式(22)及び式(23)を式(19)に代入すれば、採取ガスの CO₂ 質量分率 Y_{CO_2} は

$$Y_{CO_2} = \frac{11 (2X_{CO_2}^a + 1) X_{CO_2}^a}{(7 + 5X_{CO_2}^a) (2X_{CO_2}^a + 1) + (X_{O_2}^a - X_{CO_2}^a) (2X_{CO_2}^a + 1)} \quad \text{----- (25)}$$

となる。式(24)及び式(25)において、測定値 $X_{O_2}^a$ として、それぞれの位置の測定値 X_L^a 、 X_L^b 及び X_L^c を用いれば、各位置における質量分率が求められる。

2.4) 周辺空気の質量分率

周辺空気中の H₂O は無視するので、式(8)及び式(9)で $X_{H_2O} = 0$ とし、 X_{N_2} を消去すると、周辺空気のガスLの質量分率 Y_L^a は

$$Y_L^a = \frac{M_L X_L^a}{28 + 4X_{O_2}^a + 16X_{CO_2}^a} \quad \text{----- (26)}$$

従って、周辺空気の O₂ 及び CO₂ 質量分率 $Y_{O_2}^a$ 及び $Y_{CO_2}^a$ は

$$Y_{O_2}^a = \frac{8 X_{O_2}^a}{7 + X_{O_2}^a + 4X_{CO_2}^a} \quad \text{----- (27)}$$

及び

$$Y_{CO_2}^a = \frac{11 X_{CO_2}^a}{7 + X_{O_2}^a + 4X_{CO_2}^a} \quad \text{----- (28)}$$

以上から、式(24)、式(25)、式(27)及び式(28)を、式(6)及び式(7)に代入すれば m_D 及び m_F が得られることとなる。

4.2 火源の発熱速度の算定

火源の発熱速度の値は、熱伝達の性状を調べる際に必要である。また、今回のガス分析による開口噴流の流量測定システムの精度の検証に利用できる可能性もある。この発熱速度は図4の系での O₂ 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。

まず、図4の系全体の酸素の消費量から発熱速度 $Q_{(O_2)}$ を算定するには、

$$Q_{(O_2)} = 13,220 \{ Y_{O_2}^a (m_i + m_a + m_a') - Y_{O_2}^b m_F \} \quad \text{----- (29)}$$

となる。一方、質量保存から

$$m_D = m_i + m_f$$

及び

$$m_F = m_D + m_a + m_a' \quad \text{----- (30)}$$

すなわち

図5 測定値の経時変化

$$m_E = m_i + m_f + m_a + m_a' \quad (31)$$

であるが、開口からの流入量 m_i 及び空気の巻き込み量 m_a 及び m_a' に比較し、メタノールの蒸発速度 m_f は無視できる^(注2)から

$$m_E \approx m_i + m_a + m_a' \quad (32)$$

従って

$$\begin{aligned} Q_{(O_2)} &= 13,220 (Y_{O_2}^a (m_i + m_a + m_a') - Y_{O_2}^E m_E) \\ &= 13,220 (Y_{O_2}^a - Y_{O_2}^E) m_E \quad (33) \end{aligned}$$

つまり、雰囲気空気とダクト内の O_2 の質量分率、及びダクト内の流量速度から発熱速度が算出できることになる。

一方、燃料メタノールの燃焼反応の化学式(13)から、 CO_2 2モルの発生に対して O_2 が3モル消費されていることから、 CO_2 濃度の変化を利用して、下式でも算出できる。

$$Q_{(CO_2)} = 13,220 \frac{3}{2} \left[\frac{32}{44} (Y_{CO_2}^E - Y_{CO_2}^a) \right] m_E \quad (34)$$

5. 実験結果と考察

5.1 測定値の経時変化

区画内、開口部、小フード内、ダクト内及び外気の空気温度、並びに O_2 及び CO_2 の体積分率（分析器指示値）の計測中の経時変化の様子を、パン径20mm、開口 30×30^h mmの場合について、図5に例示する。なお、いずれの実験でも区画内での CO 発生は認められなかったことから、メタノールは区画内で完全燃焼していたと考えられる。

着火後、約20分を経過してからデータの収録を開始しているため、区画内及びダクト内の温度はほぼ定常と見なせる状態になっている。

ガス濃度は1台のガス分析器を用いて各ガス採取位置を切り替えて測定しているが、切り替え後20～30秒程度で指示値はほぼ定常に達している。開口噴流と開口噴流プルームの流量、及び発熱速度等の算定のデータとしては、この約1分後から30秒間の平均値を用いているが、図ではこの部分を網掛けで示している。

小フード高さを変えると小フード内の温度及びガス濃度が変化するのは、巻き込み空気が変化するためである。一方、小フードの高さを変えても区画内の濃度に変化がないのは当然であるが、ダク

ト内の濃度もほとんど変化しない。

5.2 開口噴流及び開口噴流プルームの質量流速

パン径20mm、開口 30×30^h mmの場合の、開口噴流の質量流速 m_D 及び開口噴流プルームの質量流速 m_P と、小フード高さとの関係の一例を図6に示す。

小フード高さが高くなるほど、開口噴流プルームの量は増加しており、巻き込み空気が増加しているのがわかる。一方、開口噴流の量は小フード高さには依存しないのは当然である。

なお、それぞれの流量は O_2 濃度及び CO_2 濃度のいずれからも算出できるが、両者は良く一致している。

表3には、全ての条件における開口噴流の質量流速を示す。 O_2 濃度から算出した開口噴流の質量流速を $m_D(O_2)$ 、 CO_2 濃度から算出した値を $m_D(CO_2)$ とし、このそれぞれの値とこれら2つの平均値を示している。なお小フード高さは7段階に変化させて、その都度測定を行っているが、図6に例示したように小フード高さは開口噴流の質量流速には関係しないことがわかっているため、表にはこの7回の測定値の平均を示した。

図7には O_2 及び CO_2 濃度から算出した開口噴流の質量流量と、これらの平均値との関係を示した。

表3及び図7から、開口噴流の流量が小さい場合には O_2 濃度から算出した値と CO_2 濃度から算出した値は良く一致しているのがわかる。一方、流量が大きくなると O_2 濃度から算出した値が CO_2

図6 小フード高さと、開口噴流及び開口噴流プルームの質量流速 (パン径20mm、開口 30×30^h mm)

表3 パン径、開口形状と開口噴流の質量流速

パン径 (mm)	開口		開口噴流 質量流速		
	幅 (mm)	高さ (mm)	$m_o(O_2)$ (g/s)	$m_o(CO_2)$ (g/s)	平均 (g/s)
0.15	0.15	0.30	4.6	4.3	4.5
	0.15	0.45	10.6	9.3	10.0
	0.30	0.15	4.9	4.5	4.7
	0.30	0.30	11.6	9.7	10.6
	0.30	0.45	23.0	16.1	19.6
	0.45	0.15	6.8	5.9	6.4
	0.45	0.30	17.1	13.0	15.0
	0.45	0.45	31.9	22.2	27.0
0.20	0.15	0.30	6.4	6.7	6.6
	0.15	0.45	13.2	12.3	12.8
	0.30	0.15	4.9	5.5	5.2
	0.30	0.30	14.3	13.8	14.1
	0.30	0.45	23.5	21.4	22.4
	0.45	0.15	6.1	6.8	6.4
	0.45	0.30	20.6	16.1	18.4
	0.45	0.45	33.1	26.1	29.6
0.25	0.15	0.30	5.7	6.4	6.1
	0.15	0.45	11.5	11.4	11.4
	0.30	0.15	4.3	5.3	4.8
	0.30	0.30	14.9	15.1	15.0
	0.30	0.45	28.7	26.6	27.7
	0.45	0.15	6.5	7.9	7.2
	0.45	0.30	20.7	21.0	20.8
	0.45	0.45	43.3	35.5	39.4

濃度から算出した値よりもやや大きくなる傾向が見られるが、平均との差はそれぞれ最大約15%程度であり、質量流速の絶対量が微量であることを考慮すると、比較的精度良く測定されていると考えられる。

$m_o(O_2)$ と $m_o(CO_2)$ とで若干の差がある場合を考慮し、本研究では、開口噴流と開口噴流プルームの流量及び発熱速度の値としては、 O_2 濃度及び CO_2 濃度から算出した2つの値の平均値を用いることとする。また、小フード高さが開口噴流の質量流速には関係しないことから、発熱速度、開口噴流の質量速度及び開口噴流により持ち出される熱量の算定の際にも小フードの7段階の高さにおける測定値の平均を使用する。

5.3 開口噴流速度に関する実測と温度計測値からの予測との比較

1) 区画内及び開口部の垂直温度分布

区画内及び開口部の垂直温度分布の一例(パン径20mm、開口30×30mm)を図8に示す。開口上端より上部では区画内の温度は高温でほぼ均一となっており、一方、床上150mmの位置では低温を示していることから、上部高温層及び下部低温層という二層を形成していることが窺われる。さらに、開口部における温度は、上部では区画内の同じ高さの温度とほぼ等しく下部では低くなっていることから、上部から開口噴流が流出し下部では外部空気が流入してい

図7 O_2 及び CO_2 濃度から算出した開口噴流の質量流速

図8 区画内及び開口部の垂直温度分布

図9 開口噴流の質量流速の温度分布からの計算値とガス分析による実測値の比較

ることがわかる。

2) 中性帯高さと開口噴流温度及び上部高温層温度

式(1)により、温度計測値を用いて開口噴流の流速を推定する場合には中性帯高さを知ることが必要となるが、流入と流出の境界の高さが中性帯の高さであるから、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。

中性帯高さを定義する際に、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

$$T_n = N(T_{max} - T_{min}) + T_{min} \quad \text{----- (35)}$$

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、図8に例示した開口部の垂直温度分布をみると、外部から空気が流入していると考えられる開口下部ではその温度はほぼ外部温度に等しく、ある位置から急勾配で上昇する。中性帯はこの温度が急に上昇している高さ付近にあると考えられる。一般に $N = 0.10 \sim 0.15$ とされる⁹⁾が、急勾配の温度分布からみて、この範囲の N の値では中性帯高さに大差は生じないと推察されるため、 $N = 0.1$ とした。また、上部高温層の温度としては、中性帯から開口上端までの高さの区画内温度の平均値を用いた。

3) 流量係数の推定

開口噴流の質量流速の予測式(1)における流量係数は不明である。そこで、流量係数を考慮しないで($\alpha = 1$ として) m_o を算出し、ガス分析による実測値と比較したものを図9に示す。

ややデータに散らばりはあるが、 $\alpha \approx 0.52$ とすると式(1)で比較的良く近似できると考えられる。単純開口の場合、既往の測定値は0.65前後である^{8,9)}ので本実験での値はやや小さいが、理論的に導かれている $0.5 \leq \alpha \leq 1$ の範囲¹⁰⁾には入っている。

なお、式(35)の N の値を大きくすると α は小さくなることになり、例えば $N = 0.3$ とすると $\alpha \approx 0.60$ となる。

5.4 火源の発熱速度

自由空間で燃焼させて測定したメタノールの重量減少速度と単位発熱量(19.83MJ/kg)を乗じて求めた発熱速度と、ガス分析の結果から算出した値とを比較した結果を図10(1)に示す。さらに、発熱速度と開口の大きさ及び形状との影響を調べるために、開口因子 $AH^{1/2}$ を横軸に取ってプロットした結果を図10(2)に示す。

図10(1)を見ると、両者は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。

図10 自由空間と区画内における火源の発熱速度に関する比較

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と比較し、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、本実験中の発熱速度の方が小さくなっているのは、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。このことは図10(2)で、 $AH^{1/2}$ によって発熱速度が変化していることから窺える。

5.5 開口噴流により運ばれる熱量

熱伝達性状を調べる際には開口噴流により持ち出される熱量 Q_o を把握することが必要となる。そこで、開口噴流により持ち出される熱量の発熱速度に対する割合を、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図11に示す。ここで、開口噴流により持ち出される熱量を算出する際に必要な開口噴流の温度には、中性帯高さから開口上端高さまでの平均値を用いた。この場合も式(35)中の N の値は0.1を用いたが、0.3としても開口噴流の温度の変化は2~3 Kで、熱量の値への影響は微小であった。

図11では、開口噴流により持ち出される熱量の割合が、開口因子 $AH^{1/2}$ が大きくなるに従って増加する傾向が見られる。

6. まとめと今後の課題

区画火災における開口噴流ブルームと対流熱伝達の性状を調べる研究の第一段階として、模型区画内の開口噴流の流量をガス分析に基づいて測定した。その結果次のような知見が得られた。

- ① 開口噴流の流量を、 O_2 濃度及び CO_2 濃度からそれぞれ算出した結果はほぼ一致した。一部に一致の十分でない測定値も見られるが、模型区画の開口を通る流量が微小であることを考慮すれば、本論文の測定手法は有力であると考えられる。
- ② 開口噴流の流量について、ガス濃度による算出値と温度による算定式(1)による予測値とを比較した結果、開口の流量係数 α を0.52とすると、両者が比較的良く一致した。この開口の流量係数に値は既往の測定値に比較して若干小さめであるが、それ程大きくはずれものではない。
- ③ ガス分析の結果から算出した発熱速度と、自由空間における重量減少速度から算出した発熱速度の実測値と比較した結果、前者は平均的には後者とはほぼ一致したが、個別に見ると前者の値は後者とはかなり差が見られるものもあった。これはメタノールの蒸発速度が開口因子により変化するためと考えられる。

今後は、本研究における開口噴流の実験結果を用い、開口噴流ブルーム及び対流熱伝達の性状に関する分析を行う予定である。

図11 開口噴流により持ち出される熱量の発熱速度に対する割合と開口条件

【謝辞】

実験に際しては神田浩徳君、細沢貴史君（当時東京理科大学理工学部卒論生）のご協力をいただいた。ここに記して感謝いたします。

注1) 開口端では、開口噴流の縮流と周辺空気の誘引のため、噴出気流の温度が正確に測定できない。そこで、熱電対の開口端からの距離を変化させながら、指示温度を区画内の同じ高さにおける温度と比較した結果、開口端から30mmの位置で、区画内とほぼ同じ温度を示したので、この位置の温度で噴出気流の温度を代表できると考えた。

注2) 表3から開口噴流の流量 m_o は4.5~39.4g/sとなっている。また、メタノールの蒸発速度 m_f は、自由空間における燃焼速度が、パン径150mmの時0.18g/s、200mmの時0.33g/s、250mmの時0.50g/s程度であり、図10(2)から区画内における燃焼速度の最大値もこれと大差はないと推定される。一方、 m_e は図6の例に示すように m_o より常に大であるので、 m_f は m_o に比べて十分に小さいことがわかる。

【記号】

A : 開口面積 (m ²)	α : 流量係数
B : 開口幅 (m)	ρ : 空気密度 (kg/m ³)
C_p : 定圧比熱 (kJ/kg K)	添字
g : 重力加速度 (=9.8m/s ²)	A : ガス分析器による指示値
H : 開口高さ (m)	a : 周辺空気
M : モル分子量 (kg/mol)	D : 開口噴流
m : 質量流速 (kg/s)	E : 大フードに捕集されたガス
Q : 発熱速度またはエンタルピー量 (kW)	f : 火源からの蒸発
T : 温度 (K)	i : 開口からの流入空気
X : 体積分率 (m ³ /m ³)	L : ガスの種類 (O_2, CO_2, N_2, H_2O)
Y : 質量分率 (kg/kg)	P : 開口噴流ブルーム
Zn : 中性帯高さ (m)	= 小フードから流出するガス
	s : 火災区画

【参考文献】

- 1) 横井鎮男：Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current, 建築研究報告 No.34, 1960
- 2) 田中睦義：小規模建築物の火災のモデル化に関する研究(3)－火災時の流れに関するモデル化－, 日本火災学会論文集 Vol.30, No.1, pp.7-18, 1980
- 3) 山田茂、田中睦義、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、p.1-8, 1997.01
- 4) 石野修、田中睦義：アトリウム空間の自然排煙効果に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集 第451号、pp.137-144, 1993.09
- 5) B.M.Cetegen, E.E.Zukoski, T.Kubota : Entrainment in the Near and Far Field of Fire Plumes, Combustion Science and Technology, Vol.39, pp.305-33, 1984
- 6) 山田茂、田中睦義、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、p.1-8, 1997.05
- 7) Cooper, M.Harkleroad, 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
- 8) J.Prahl and H.W.Emmons : Fire Induced Flow through an Opening, Combustion and Flames, Vol.25, pp.369-385, 1975
- 9) I.Nakaya, T.Tanaka, M.Yoshida : Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol.10, pp.185-195, 1986
- 10) 今井功：流体力学（前編）、裳華房、p.51

(1996年12月10日原稿受理, 1997年6月13日採用決定)