防排煙時の室間圧力差予測のための中間的開放扉の基本特性

BASIC PROPERTIES OF INTERMEDIATE OPEN DOORS FOR PREDICTING PRESSURE DIFFERENCES BETWEEN ROOMS DURING A SMOKE CONTROL

広田正之^{*1,*2}, 松山 賢^{*3}, 山名俊男^{*4}, 若松孝旺^{*5}
Masayuki HIROTA, Ken MATSUYAMA, Toshio YAMANA
and Takao WAKAMATSU

The basic properties of intermediate open doors necessary for predicting pressure differences between rooms in a smoke control plan were determined. These were determined in the following manner. (1) An experimental system was proposed for determining the flow rate coefficient relative to the opening angle of an intermediate open door. (2) The relationship of door closing force, door shape and pressure difference between rooms with respect to the opening angle of a free-swinging door was proposed by introducing a pressure difference distribution coefficient. (3) The relationship between the opening angle of an arbitrary free-swinging door and the average pressure difference between rooms can be estimated from the door width and height by determining this relationship for a specific door. (4) The pressure difference between rooms immediately before opening a door can be estimated from the door surface area on which pressure is acting and the door closing force regardless of the magnitude of the door closing force.

Keywords : Intermediate Open Door, Door Opening Angle, Flow Rate Coefficient, Pressure Difference Distribution Coefficient, Pressure Difference between Rooms

中間的開放扉、扉開放角度、流量係数、圧力差分布係数、室間圧力差

1. はじめに

避難安全をはじめ消防活動に幅広く関わる扉開放条件は、室間圧力差を利用した煙制御を計画する上で支配的な要素である。これまで、扉の開閉については閉鎖か全開かの設定が主に行われてきた。閉鎖でも全開でもない、その中間の開放状態（以下、中間的開放という）にあたる設定は計画で殆どなかった。しかし、建築基準法による性能規定化が進み、消防法による性能規定化も推進される中、煙制御計画における幅広い火災シナリオに対応していくためには、中間的開放時の扉の基本特性が重要となってきた。

防火扉は、火災時に自動閉鎖し、防火防煙区画を形成し、煙伝播を抑制する。しかし、防火扉の設置場所によっては、閉鎖障害や経年劣化等による閉鎖性の低下により、火災時に閉鎖できない可能性が危惧される。この様な閉鎖不成立による防火扉の開放開度を考慮できる検討は、避難安全性の高い建物の実現にとって重要である。

また、消防隊は、火点に向けて進入し、消火活動を行う。この場合、活動拠点の防火扉は、通過に必要な幅を開放することになる。階段室の防火扉も消防ホース分を少なくとも開放し、ホースを通すようなことが考えられる。こうした消防活動に伴う防火扉の開放状態も考慮し、消防活動の安全性を検討することが必要である。

一方、防火扉を挟む室間の圧力差によって防火扉が微小角度で開

放する危険性も否定できない。火災圧や加圧防煙の圧力が防火扉の仕様によっては扉閉鎖に支障をきたすことになる。特に、設計意匠上、くぐり戸のようなラッチの無い防火扉が多くなり、圧力差に逆らって閉鎖の難しい扉が増加している。扉の大型化もあり、圧力差によってより大きな開放力が扉に作用し、開きやすい傾向にある。圧力差によって、扉が開放する限界や中間的開放にある扉が煙伝播に及ぼす影響をもとに、計画を見直せることが重要である。

以上のことから、本研究は、室間圧力差による煙制御計画に関わる中間的開放状態にある防火扉の基本特性を明らかにする。

2. 既往の研究と研究目的

煙制御計画時の室間圧力差の予測には式(1)が適用されている。

$$Q = \alpha A \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

式(1)の α は流量係数である。扉全開時の流量係数として0.64～0.7が報告されている¹⁾。扉全開時の流量係数は、扉高さ方向に圧力差がない様な場合（以下、等圧という）、及び扉高さ方向に圧力差がある場合¹⁾（以下、不等圧という）に適用性が把握されている。扉閉鎖時の流量係数は実測による隙間相当開口面積^{例えば2)}を

^{*1} 東京理科大学大学院(博士後期課程)
^{*2} 清水建設株式会社 プロジェクトリーダー・工修
^{*3} 東京理科大学火災科学研究センター 講師・博士(工学)

^{*4} 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官
^{*5} 東京理科大学火災科学研究センター 教授・工博

Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science
Project Leader, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Lecturer, Center for Fire Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Senior Researcher, National Institute for Land and Infrastructure Management
Prof., Center for Fire Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

基に単位面積あるいは単位長さ当たりの値に整理され、適用されている。しかし、中間的開放扉の流量係数は明らかにされていない。なお、式(1)の ΔP は、等圧の場合に、室間圧力差に相当する。不等圧の場合に、式(1)の ΔP は平均圧力差³⁾を示すことになるが、以下の ΔP は高さ方向の室間圧力差の平均とし、両者は異なる。

扉開放角度に対する流量係数の値が明らかになると、扉の回転が固定されている中間的開放扉の場合、これまでのようにして室間圧力差を算定できる。すなわち、扉開放角度を決め、流量係数を求めて、室内圧力を仮定し、保存関係から室内圧力を修正する。

一方、扉の回転が固定されていないと、室間圧力差によっては扉が開放するため、室間圧力差に対する扉開放角度の大きさが適当か否かを室内圧力とあわせて検討することになる。扉開放角度が当初の設定と異なる場合には扉開放角度を修正する。山名⁴⁾は、付室に給気し、階段室の防火扉の開放状態と給気量及び付室階段室間の圧力差について実測を行った。しかし、扉開放角度の見直しが可能な室間圧力差や扉閉鎖力等を考慮した関係は明らかにされていない。

以上のことから、本研究では、性能的防煙設計に資するために、室間圧力差を利用した煙制御計画に関わる中間的開放扉について基本特性を捉えることを目的とする。以下の点を明らかにする。

- ・扉開放角度に対する流量係数
- ・回転を固定していない扉の挙動のモデル化
- ・不等圧における扉挙動モデルの適用性
- ・扉開放開始の要因

なお、中間的開放扉の流量係数について、消防隊活動を対象に $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の開放範囲で阿部ら⁵⁾によっても検討されているが、本研究は、扉の開放範囲を $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ までとり、さらに開放角度の大きさをより細かく設定し、実験式を求めようとした点で異なる^{注1)}。

3. 実験概要

3.1 実験装置

3.1.1 防火扉

防火扉の断面を図1に、立面を図2に示す。防火扉は、扉本体、内枠、外枠の大きく3つの部位から構成されている。扉幅は片側で0.8m、扉高さは2.581mである。主に扉上端と内枠間、扉下端と床面との間に数mmの隙間がある。これら以外に隙間は殆どみられない。

扉の閉鎖力は、パネの巻数を選択することによって、既存の閉鎖力を広くカバーできるように12段階の調整を可能とした。扉開閉時の挙動を確認すると、扉の前後に圧力差がない状態でも、パネ巻数4以下は、扉の全閉までに時間を要した。このため、パネ巻数が4以下の閉鎖力は、室間圧力差による煙制御に適用が難しいと判断した。従って、パネ巻数が5～12の8段階を実験では対象とした。

3.1.2 実験施設

実験は、旧建設省建築研究所の実大火災実験棟で実施した。施設概要を図3に示す。施設は、廊下1、廊下2(燃焼空間)、排煙空間を中心に、前室1、エレベーターホール、計測空間から主に構成されている。廊下部分の天井高は2.70mである。

廊下1と燃焼空間の境界部分に防火扉を設置した。排煙空間には排煙口がある。ここで機械排煙を行い、扉前後に室間圧力差を生じさせる。インバーターによるファン回転数で排煙風量を制御する。

ファン回転数と常温時の排気風量の関係を図5に示す。回転数と排気風量はほぼ比例関係にある。前室1と廊下1の間、燃焼空間と排煙空間の間に開口部があり、排煙ファン稼働時の主な流路となる。

空間の廻りは目張りをした。リーク経路は、図3の出入口及び床面に接して壁に設けた計測コード類を通す計測用開口に限定した。

3.1.3 扉開度測定装置

扉開放による開放角度は、微小角度まで把握するために、扉開放開度をデジタル値に変換できる角度センサーを設け、記録した。

角度センサーはブリッジ回路を中心に構成されている。角度センサーには、アームを2箇所取り付けしている。扉回転角度が扉開放開度となるように、開閉する扉と枠にアームを固定した(図1)。

3.2 実験方法

3.2.1 実験タイプと実験ケース

実験は4つのタイプに分け、タイプ毎の実験ケースで実施した。実験ケースを表1に示す。防火扉A、Bの中、開放に関与しない方の扉は、あらかじめ閉鎖し、固定した。

実験タイプ1は、防火扉のパネ巻数に応じた扉閉鎖力を捉えるために扉開放角度、集中荷重を計測した。ケース毎にパネ巻数をパラメータに、扉Bの開放角度を変えた。開放した扉Bを動かない様に固定し、所定の位置にロードセルを扉面に垂直に設置した。扉Bの固定を解除してもロードセルが動かないことを確認し、計測した。

実験タイプ2は、中間的開放扉の開放角度に対し、流量係数、扉前後の圧力差分布を明らかにする実験である。扉開放角度、室間圧力差と扉前後圧力差、空間温度、排気風量を主に計測した。扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向での流量係数、併せて扉前後の圧力差分布を求める各ケースは、扉Bを対象とし、開放角度をパラメータとした。また、扉の開放方向と扉通過気流の流れが逆方向の場合に流量係数を求めるケースでは、扉Aを対象とした。対象とした扉の開放角度を設定した後に、その扉の回転も固定した。機械排煙ファンの回転数を制御し、扉通過風量はケース毎に変えた。

実験タイプ3では、室間圧力差により、扉が開放する直前および扉が少ない角度で開放した段階での扉開放角度・扉閉鎖力・室間圧力差の関係を明らかにするために、扉開放角度、室間圧力差、空間温度、排気風量を主に計測した。扉Bの閉鎖力をパラメータとし、扉通過風量もケース毎に変えた。扉Bの回転は自由である。

実験タイプ4は、タイプ3で明らかにする少ない角度で開放させた扉の挙動を支配する関係式が扉前後に温度差がある不等圧の場合に適用可能か否かを確認する実験である。扉開放角度、室間圧力差、空間温度、排煙風量の計測を主に行った。メタノール(0.375m^2)を燃焼させ、扉前後に温度差をつくる。扉Bの回転は固定しない。ケース毎に、扉Bの閉鎖力と扉通過風量も変えて実施した。

また、燃焼空間と排煙空間廻り、防火扉の各部位のリーク量を把握する実測を行った。実測ケースを、対象部位別に表2に示す。対象部位はシールで各々目張りした。ケース毎に、目張りを外し、機械排煙ファンの回転数を変化させ、実測した。排煙空間および燃焼空間の周囲の空間は、開口部を開放し、外気同等とした。

3.2.2 計測項目および計測方法

主な計測点の位置を図3に示す。計測項目は、扉閉鎖力、扉開放角度、ダクト内流速、室間圧力差、空間及び開口部の温度である。

図1 防火扉の概要 (平面図) (単位 mm)

図2 防火扉の概要 (立面図) (単位 mm)

図3 実験施設概要と計測点 (単位 mm)

図4 扉B前後の圧力差分布の計測点J (P4) (単位 mm)

表1a 実験ケース (実験タイプ1)

実験ケース	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
パネ巻数	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
扉開放角度[°]	1.5° ~ 15°	以下で1.5°、18° ~ 90°	で6°のピッチで設定					
扉回転	固定							
ファン回転数 [Hz]	-							
燃焼	無し							

表1b 実験ケース (実験タイプ2)

実験ケース	2-1 ^{*1}	2-2 ^{*2}	2-3 ^{*3}	2-4 ^{*2}	2-5 ^{*3}	2-6 ^{*2}	2-7 ^{*3}	2-8 ^{*2}
パネ巻数	-							
扉開放角度[°]	0.75	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5
扉回転	固定							
ファン回転数 [HZ]	10~30	10~40	10~55	10~60				
燃焼	無し							
実験ケース	2-9 ^{*3}	2-10 ^{*2}	2-11 ^{*2}	2-12 ^{*3}	2-13 ^{*3}	2-14 ^{*3}	2-15 ^{*2}	2-16 ^{*3}
パネ巻数	-							
扉開放角度[°]	12.0	13.5	15.0	18.0	24.0	30.0	36.0	42.0
扉回転	固定							
ファン回転数 [HZ]	10~60				20~60			
燃焼	無し							
実験ケース	2-17 ^{*2}	2-18 ^{*3}	2-19 ^{*2}	2-20 ^{*3}	2-21 ^{*2}	2-22 ^{*3}	2-23 ^{*2}	2-24 ^{*2}
パネ巻数	-							
扉開放角度[°]	48.0	54.0	60.0	66.0	72.0	78.0	84.0	90.0
扉回転	固定							
ファン回転数 [HZ]	20~60				25~60			
燃焼	無し							

*1: 扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向で流量係数を捉える実験
 *2: 扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向及び逆方向で流量係数を捉える実験
 *3: 扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向及び逆方向で流量係数、更に、扉B前後の圧力差分布を捉える実験

表1c 実験ケース (実験タイプ3)

実験ケース	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8
パネ巻数	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
扉開放角度[°]	-							
扉回転	自由 (固定なし)							
ファン回転数 [Hz]	4~60							
燃焼	無し							

表1d 実験ケース (実験タイプ4)

実験ケース	4-1	4-2
パネ巻数	6	9
扉開放角度[°]	-	
扉回転	自由 (固定なし)	
ファン回転数 [Hz]	60	40
燃焼	有り (メタノール・0.375m ²)

図5 排煙ファン回転数と排気風量

表2 隙間の実測ケース

対象部位	実測ケース									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
燃焼空間と 計測空間の間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
排煙空間と 大空間の間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
防火扉	目張	目張	目張	目張	目張	目張	目張	目張	目張	目張
	外枠とコン クリート間	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	内枠・床 と扉間	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	内枠と外枠間	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	閉鎖力調整口	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	扉Aと扉B間	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表3 主な部位の隙間相当開口面積

排煙空間と大空間との間	燃焼空間と計測空間との間	防火扉(片側)
0.010[m ²]	0.010[m ²]	0.012[m ²]

扉閉鎖力(1点)は、ロードセルにより所定の位置で集中荷重を計測した。扉の開放角度(1点)は、開放角度の測定装置を防火扉に設置し、計測した。排煙ダクト内の流速(1点)の計測は、ダクトに組み込んだエアログラフに微差圧計(岡野製作所製差圧計 DMP201N・レンジ0~200Pa・精度±0.2%FS)を設置して行った。防火扉を挟む室間圧力差(4点)は、微差圧計(Validyne 社製圧力トランスデューサー DP45-14・レンジ0~100Pa・精度±0.25%FS)、これ以外の室間圧力差(各1点)は、微差圧計(岡野製作所製 DMP201N・レンジ0~200Pa・精度±0.2%FS)によって計測した。温度は、ダクト内(1点)、空間内(各14点)、計測用開口部(各1点)でT型熱電対(φ0.32mm)により計測した。

防火扉を挟む室間圧力差の計測点は床上0.2m、1.0m、1.8m、2.6mの高さに設置した。廊下1と燃焼空間の垂直温度計測点は床上0.2mから0.2m間隔で設けた。最高高さは2.68mとした。

計測間隔は2秒とした。計測時間は、バネ巻数および扉開放角度(実験タイプ1)、扉開放角度および機械排煙ファン回転数(実験タイプ2)、バネ巻数および排煙ファン回転数(実験タイプ3)を設定し各実験ケースで2分間を基本とした。燃焼実験(実験タイプ4)は、空間温度が上昇から下降に向かうまで継続して計測した。

これらの実験値は、計測時間内の平均値を代表値として用いる。

4. 実験結果、分析および考察

4.1 扉開放角度と扉閉鎖力

扉開放角度と閉鎖力の関係を図6に示す。扉閉鎖力は、ロードセルの位置と扉回転軸との距離(0.692m)を集中荷重に乗じて求めた。

図6より、扉開放角度 θ の増大に対し、バネ巻数 I に依らず、扉閉鎖力 M はほぼ同じ傾きで上昇している。図の直線は、各バネ巻数共に同じ傾きとした回帰直線である。回帰直線と実験値の相関性は高い。また、バネ巻数の増加によって扉閉鎖力は、ほぼ等間隔で増大している。従って、扉開放角度と扉閉鎖力の関係は、扉閉鎖時のバネ巻数毎の扉閉鎖力をまとめて $M_{0,i}$ で表すと、式(2)となる。

$$M = 0.165\theta + M_{0,i} \quad (2)$$

図7は、式(2)の $M_{0,i}$ とバネ巻数の関係を示したものである。扉閉鎖時の扉閉鎖力である $M_{0,i}$ とバネ巻数には、非常に高い相関性があることがわかる。この回帰直線は、式(3)で表せる。

図6 扉開放角度と扉閉鎖力

図7 バネ巻数と扉閉鎖力

$$M_{0,i} = 4.43I - 19.58 (5 \leq I \leq 12) \quad (3)$$

以上のことから、標準的なバネの巻数に対する扉閉鎖力が把握された。式(2)、(3)を用い、閉鎖力の推定が可能と考えられる。

4.2 扉開放角度と流量係数

中間的開放角度の扉について流量係数 α を捉える。

扉開放部分を単純開口と仮定し、計測した扉開放角度 θ について $(2\rho\Delta P)^{0.5}$ に対する扉通過風量を図8に示す。式(1)を基本とし、実用的な煙制御計画が行われていることから、 $(2\rho\Delta P)^{0.5}$ を基準に整理した。 ΔP は、廊下1と燃焼空間との間にある4点の室間圧力差の平均値である。扉通過風量は排煙空間と燃焼空間を一体の空間とし、この一体とした空間へ隙間を通して流入する流量を機械排煙

(a) 扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向の場合

(b) 扉の開放方向と扉通過気流の流れが逆方向の場合

図8 $(2\rho\Delta P)^{0.5}$ と扉通過風量

風量から差し引いたものとした。排煙空間および燃焼空間廻りの主な隙間相当開口面積の大きさは、実測で得られた表3の実測値を用いている。図中の直線は、プロットした点毎の回帰直線である。

図8から、扉開放角度毎にみて、プロットした点と回帰直線との相関性は高いことがわかる。これより、 $(2\rho\Delta P)^{0.5}$ と扉通過風量の関係は直線近似できる。傾きが有効開口面積 αA である。

図9には、扉開放角度に対する流量係数 $\alpha (= \alpha A/A)$ を示す。有効開口面積 αA は、防火扉の隙間相当開口面積 0.012m^2 を差し引いたものである。隙間相当開口面積を除いた閉鎖時の流量係数は零とした。また、開口形状が類似しているはね出し窓の値⁷⁾、および扉全開時の流量係数に今回の実験値を用いて自然排煙窓の有効面積を求める方法⁸⁾を適用した流量係数の算定値も併せて示す。なお、扉面積 A は、開放端側から回転軸までの長さ (0.765m) をとり、これと扉高さを乗じたものとした。 αA を基準にすると、実用上で扉幅を用いる場合は図の α を $0.96 (= 0.765\text{m}/0.8\text{m})$ 倍、あるいは、全開時の開口幅を用いる場合は $1.08 (= 0.765\text{m}/0.71\text{m})$ 倍の調整が考えられる。

図9 扉開放角度と流量係数

図9をみると、扉の開放方向が扉通過気流の流れと同方向の場合防火扉の流量係数は、扉開放角度が約 $20^\circ \sim 80^\circ$ の範囲内で、はね出し窓および全開時の流量係数 0.66 から求めた自然排煙窓の値より小さくなっている。その範囲以外では、防火扉の流量係数の方が大きくなる傾向にある。また、扉開放角度の増大に対し、防火扉の流量係数は、扉開放角度が 15° 未満でやや曲線的に、 15° 以上で直線的に増加している。これらの関係を示す回帰式は式(4)である。

$$\alpha = -0.0003\theta^2 + 0.017\theta + 0.0071 \quad (0^\circ \leq \theta < 15^\circ) \quad (4a)$$

$$\alpha = 0.0061\theta + 0.11 \quad (15^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (4b)$$

一方、扉の開放方向が扉通過気流の流れと逆方向の場合、防火扉の流量係数は、扉開放角度の増大に対し、曲線的に増加していることがわかる。この流量係数は、式(5)の回帰式で示される。扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向の場合と比較すると、流量係数は、同じ扉開放角度に対し、約 20° 近くから大きくなり、その違いが顕著となる。また、開放角度の全体にわたり、はね出し窓のものよりも大きい。全開時の流量係数を 0.66 として求めた自然排煙窓のものに対して、流量係数は、開放角度が約 45° より小さいと、大きく、開放角度が約 45° を越えると、わずかながら、小さくなる。

$$\alpha = 0.023 + 0.0125\theta - 0.000060\theta^2 \quad (0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (5)$$

さらに、本実験とやや形状の異なる防火扉で、扉開放角度を $0 \sim 60^\circ$ まで12段階で変えて行われた実験⁵⁾と、本実験による流量係数は、類似の傾向を示している。数値も大きくは異なっていない。

以上のことから、任意の扉開放角度に対する流量係数の算定には式(4)、式(5)を適用することが可能である。

4.3 扉開放角度と圧力差分布係数および室間圧力差

扉の回転が固定されず、室間圧力差によって扉が自由に動くような場合である。このときの扉開放角度 θ と室間圧力差 ΔP の関係を検討する。室間に温度差がない等圧の場合に関係を把握し、温度差があり、不等圧となる場合にも関係が成立するかを確認する。

4.3.1 回転を固定していない扉の挙動の考え方

回転を固定されていない扉が微小な角度で開放され、室間圧力差と扉閉鎖力が釣り合っている場合、扉前後の圧力差分布について、扉開放に関わる圧力差分布の有効範囲を考え、モデル化する。

図10は、中間的開放状態にある扉Bの前後(図4)の圧力差分布を表したものである。横軸は、計測点Jを示す。縦軸は、各計測点の圧力差 ΔP_J を室間圧力差 ΔP で除した値である。

図10 扉B前後の圧力差分布

図10から、各計測点の圧力差と室間圧力差の比 $\Delta P_J / \Delta P$ は、扉閉鎖時に、各計測点共にほぼ1である。室間圧力差と扉前後圧力差が等しいことがわかる。これに対し、扉が開放されると、開放端側に近い圧力差の比が1より小さくなる。扉開放角度が大きくなるに従って、圧力差の比が1より小さくなる範囲が回転軸側に拡大していることがわかる。このとき、同じ計測点では、圧力差の比の値はより小さくなる方向にある。扉開放角度がさらに増すと、回転軸に最も近い計測位置の圧力差の比も1より小さくなる。

つまり、中間的開放扉の圧力差分布の大きさは、開放端側に近いほど、室間圧力差に対し、低減が著しく、小さなものとなる。

図11は、開放角度 θ である中間的開放扉の室間圧力差 ΔP と扉閉鎖力 M との水平断面での釣合の概念図である。中間的開放扉を通して1方向に流れがある場合である。室内圧力は水平方向に一樣としている。室間圧力差 ΔP は、扉高さ方向の圧力差の平均とする。

中間的開放時には、扉閉鎖時のような扉全体にわたって ΔP に等しい圧力差の分布がない(図10)。中間的開放の開口を通る流れは開放された開口の端部側で剥離し、圧力差が生じにくくなる⁹⁾。一方、煙制御計画に適用する上で室間圧力差 ΔP を使えると、実用的

である。これらのことをもとに、圧力差分布を簡便化した。すなわち、図11に示す幅 a の部分まで $\Delta P \cos \theta$ の圧力差が一樣に生じるものとした。この範囲までの一樣な圧力差分布によって扉が開放するものと仮定する。幅 a の部分を扉開放に関わる圧力差分布の有効範囲とした。この圧力差分布の有効範囲を無次元化し、 a/L とした。無次元化した有効範囲 a/L を圧力差分布係数 β とした。

図11 中間的開放扉の前後圧力差 $\Delta P \cos \theta$ と閉鎖力 M の釣合の概念

図11より、回転軸におけるモーメントの釣合から式(6)が得られる。式(6)から、圧力差分布係数 β は式(7)で表される。

$$aH \Delta P \cos \theta \times 1/2a = M \quad (6)$$

$$\beta = a/L = \sqrt{\frac{2M/L}{HL \Delta P \cos \theta}} \quad (7)$$

4.3.2 等圧の場合

(1) 扉開放角度と圧力差分布係数

式(7)は、次式のように変形される。

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{HL^2}} \sqrt{\frac{M}{\Delta P}} \sqrt{\frac{1}{\cos \theta}} \quad (8)$$

扉開放角度 θ と圧力差分布係数 β の式(8)による関係をバネ巻数 I 毎に図12に示す。図中のプロットした点は、扉閉鎖力 M に式(2)を、廊下1と燃焼空間の室間圧力差の平均値(図13のプロット)を ΔP に用いたものである。

図12から、バネ巻数が多く、扉閉鎖力が大きいと、同じ扉開放角度に対して圧力差分布係数は大きくなるのがわかる。また、圧力差分布係数は、扉開放角度が約 6° まで開放角度の増大に対して、バネ巻数5でやや変動があるが、各バネ巻数共に減少している。一方、扉開放角度が約 6° を越えて増大すると、バネ巻数5の場合、圧力差分布係数も増大することがわかる。バネ巻数6の場合、圧力差分布係数は、大きく変動せず、ほぼ一定に近い傾向がみられる。バネ巻数が7以上になると、圧力差分布係数は、減少が緩やかになり、そのまま減少していく傾向が伺える。

また、扉閉鎖力 M のように、扉開放角度 θ に対して室間圧力差 ΔP をプロットしたものが図13である。図中の直線は、扉開放角度の 6° を境界とし、バネ巻数毎に求めた回帰直線である。回帰直線と

図12 扉開放角度と圧力差分布係数

図13 扉開放角度と室間圧力差

図14 バネ巻数 I と室間圧力差 $\Delta P_{o,i}$, $\Delta P_{o,i}'$

プロットした点との相関性は高いことがわかる。各回帰直線をまとめて、式(9)に示す。

$$\Delta P = 0.66\theta + \Delta P_{o,i} \quad (0^\circ \leq \theta < 6^\circ) \quad (9a)$$

$$\Delta P = 0.37\theta + \Delta P_{o,i}' \quad (6^\circ \leq \theta) \quad (9b)$$

バネ巻数 I に対する室間圧力差 $\Delta P_{o,i}$ と $\Delta P_{o,i}'$ を、図14に整理した。プロットした $\Delta P_{o,i}$ の点は、式(9a)で、扉開放角度を零と設定したときのバネ巻数毎の値である。同様に、 $\Delta P_{o,i}'$ の点は、式(9b)によるものである。 $\Delta P_{o,i}$ と $\Delta P_{o,i}'$ のプロットに対して求めた各回帰直線の回帰式は、式(10)である

$$\Delta P_{o,i} = 6.18I - 24.78 \quad (5 \leq I \leq 12, 0^\circ \leq \theta < 6^\circ) \quad (10a)$$

$$\Delta P_{o,i}' = 6.45I - 25.36 \quad (5 \leq I \leq 10, 6^\circ \leq \theta) \quad (10b)$$

このように、本実験では、 M と ΔP が扉開放角度 θ の一次式で表せる。式(8)の $(M/\Delta P)^{0.5}$ は、 a_1 を M 、 a_2 を ΔP の傾きとし、 b_1 を M 、 b_2 を ΔP の y 切片とすると、 $\{(a_1\theta + b_1)/(a_2\theta + b_2)\}^{0.5}$ で整理される。 $(a_1\theta + b_1)/(a_2\theta + b_2)$ の微分係数を求めると、 $(a_1b_2 - a_2b_1)/(a_2\theta + b_2)^2$ となる。これより、 $(M/\Delta P)^{0.5}$ は、 $a_1b_2 - a_2b_1$ が正なら単純増加、負なら単純減少となる。そこで、バネ巻数毎に式(2)の 0.165 を a_1 に、式(3)の $M_{o,i}$ を b_1 に、扉開放角度 6° を境界に式(9)の 0.66 あるいは 0.37 を a_2 に、式(10)の $\Delta P_{o,i}$ あるいは $\Delta P_{o,i}'$ を b_2 に代入した。バネ巻数が5で、扉開放角度が 6° 以上の場

合に、 $a_1 b_2 - a_2 b_1$ が正となり、単純増加する。それ以外は、 $a_1 b_2 - a_2 b_1$ の値が負となり、単純減少の傾向がある。また、 $(1/\cos \theta)^{0.5}$ の $1/\cos \theta$ の微分係数は $\sin \theta / \cos^2 \theta$ で正となる。 $(1/\cos \theta)^{0.5}$ は、単純増加するが、 θ が小さいと、1 から大きく増加しない。

これより、バネ巻数 5 で、 $(M/\Delta P)^{0.5}$ が概ね単純減少から単純増加に変わる図12にみられる状況が生じたものと考えられる。

図12に示す圧力差分布係数は、無次元量である。扉形状に依らず扉閉鎖力毎に扉開放角度に応じて用いることが可能と推察される。

(2) 扉形状が異なる場合の室間圧力差の推定

異なる形状で同じ閉鎖力 M を有している二つの扉が同じ扉開放角度 θ だけ開放されている場合、二つの圧力差分布係数の関係から室間圧力差の関係を捉える。圧力差分布係数を β 、 β' とする。

式(11)より、 β' を β で除したものは、以下のように表される。

$$\beta'/\beta = \sqrt{\frac{2M/L'}{H'L'\Delta P'\cos\theta}} \times \sqrt{\frac{HL\Delta P\cos\theta}{2M/L}} = \sqrt{\frac{HL\Delta P \times L/2}{H'L'\Delta P' \times L'/2}} \quad (11)$$

$HL\Delta P \times L/2$ は、扉閉鎖時に、扉の重心にかかる圧力差により生じる扉開放力である。これは、扉開放前の扉閉鎖力 M_o に等しい。 $H'L'\Delta P' \times L'/2$ も同様である。更に、ここでは、 M_o と M_o' が等しい。したがって、式(11)は式(12)のように整理される。これより、扉閉鎖力が同じ場合に、圧力差分布係数は、扉形状に依らず、同じ扉開放角度に対して同じ値をとることが確認される。

$$\beta'/\beta = \sqrt{\frac{HL\Delta P \times L/2}{H'L'\Delta P' \times L'/2}} = \sqrt{\frac{M_o}{M_o'}} = 1 \quad (12)$$

室間圧力差について式(12)を整理し、式(13)が得られる。

$$\Delta P' = \Delta P \frac{HL^2}{H'L'^2} \quad (13)$$

式(13)から、形状の異なる扉の室間圧力差 $\Delta P'$ を、同じ扉開放角度に対し、推定することが可能となる。すなわち、扉開放角度と室間圧力差 ΔP との関係、特定の扉で捉えておくことにより、任意の形状の扉についても、式(13)を適用し、扉開放角度と室間圧力差 $\Delta P'$ との関係を具体化することができる。

以上のことから、扉の回転を固定しない場合、形状が異なる扉の扉開放角度と室間圧力差の関係は、式(9)、(13)から求められる。

4.3.3 不等圧の場合

燃焼に伴う温度差が扉前後にあり、室間圧力差が不等圧となっている場合にも、扉の回転を固定しない状態で、式(7)で示される基本関係が成立するか否かを把握する。

図15には、扉の回転を固定していない燃焼実験ケースについて、室間圧力差 P_1 および燃焼空間の温度 T_2 の時間変化を示す。

図をみると、室間圧力差が着火後に大きく変化を始めている。すなわち、最上部の室間圧力差は、温度上昇に伴い、徐々に低下している。これに対し、最下部の室間圧力差は、着火直後に増加し、その後、ほぼ一定で推移している。これより、扉の高さ方向には、圧

(a) 実験ケース 4-1

(b) 実験ケース 4-2

図15 高さ別の室間圧力差と空間温度の時間変化

$$\Delta P = \frac{2M/L}{\beta^2 HL \cos \theta} \quad (14)$$

(a) 実験ケース 4-1

(b) 実験ケース 4-2

図16 室間圧力差の比較（不等圧の場合）

力差が確認される。なお、室間圧力差は最上部でも零を下回らず、廊下1側から燃焼空間へ1方向の流れが維持されている。

このように、燃焼空間の温度上昇によって室間圧力差が不等圧にある状態で、式(7)による室間圧力差の計算値と実験値を比較し、式(7)の適用性を検討した。計算値は、式(7)を変形した式(14)によって求めた。式(2)による扉閉鎖力 M を、および図12による圧力差分布係数 β の値をもとに実験ケース 4-1、実験ケース 4-2 の扉開放角度 θ に対応させて補間して求めた β を式(14)に与えた。式(14)による室間圧力差の計算値は平均値である。実験値も、高さ方向にある4点の室間圧力差の平均値である。室間圧力差の計算値と実験値を図16に示す。実験値には多少の変動がみられるが、計算値と実験値は概ね一致していることが伺える。

これより、室間圧力差が不等圧の場合も、中間的開放扉の開放角度に対する圧力差分布係数 β は適用可能であることが確認される。室間温度差が大きくなり、不等圧が変化しても、扉通過の流れが1方向の場合には、式(14)の関係を適用できるものと考えられる。

4.4 扉開放直前の室間圧力差

回転が固定でない扉の開放直前の圧力差に関わる要素を捉える。

実験タイプ3の各ケースの扉通過風量と室間圧力差の関係を図17に示す。扉通過風量は一体空間廻りの隙間（表3）の流入量をダクト風量から引いたものである。図の実線は式(10a)の ΔP_{a1} を示す。

室間圧力差は、図17より、各パネ巻数ともに、扉が開放される直前まで扉通過風量の増加に伴い、ほぼ一直線上を上昇している。その後、室間圧力差の増大が急激に緩やかになる。これは、扉開放の開始点である。開始点の室間圧力差は、各パネ巻数ともに巻数に応じた $\Delta P_{o,i}$ とほぼ一致することがわかる。

$\Delta P_{o,i}$ を求めるための $M_{o,i}$ との関係を表式(15)に表す。式中の $M_{o,i}$ は式(3)によるものである。扉閉鎖時に圧力を受ける部分を A'' とする。図18に、実測値とみなせる式(10a) による $\Delta P_{o,i}$ と式(15) による $\Delta P_{o,i}$ を示す。両者はほぼ一致していることが図よりわかる。

扉仕様の $M_{o,i}$ がわかると、圧力が加わる扉面を適切に設定することによって、式(15)を適用し、 $\Delta P_{o,i}$ の推定が可能となる。

$$\Delta P_{o,i} = \frac{M_{o,i}}{A'' L''} \quad (15)$$

図17 扉開放直前の圧力差

図18 $\Delta P_{o,i}$ の比較

5. おわりに

煙制御計画で室間圧力差の予測に必要な中間的開放扉を用いた実験を行い、基本特性について以下の点を明らかにした。

- ・中間的開放扉の開放角度に対する流量係数は、式(4)、(5)を適用し、求められる。
- ・回転を固定していない扉の開放角度に対する扉閉鎖力、形状、室間圧力差の関係を式(7)の圧力差分布係数を導入し、提案した。圧力差分布係数を適用し、一例であるが、圧力差分布係数の妥当性を確認した(図16)。
- ・回転を固定していない扉について、扉閉鎖力が同じで扉形状が異なる場合、任意の扉の開放角度と室間圧力差の関係は、この関係を特定の扉で求めておくことにより、二つの扉の扉幅と高さをもとに式(13)より推定可能である。
- ・固定していない扉について、圧力差分布係数を考慮した式(14)による室間圧力差の平均の算定は、扉を通過する流れが一方方向で、扉高さ方向に圧力差がある不等圧の場合も適用性が確認された。
- ・扉開放直前の室間圧力差は、扉閉鎖力の大きさに関わらず、圧力が作用している扉面積と閉鎖力から式(15)で推定可能である。

今後は、回転を固定していない扉についても、中間的開放角度が大きい場合、また扉高さ方向の圧力差分布による流れが一方方向でない場合に、基本特性を明らかにする。

記号(凡例)

a	: 扉開放に関わる圧力差分布の有効範囲 [m]
A	: 扉面積 [m ²]
A''	: 扉閉鎖時に圧力がかかる部分の扉面積 [m ²]
h	: 室間圧力差の計測高さ [m]
H, H'	: 扉の高さ [m]
I	: 扉のパネ巻数 [巻]
J	: 扉前後の圧力差分布の計測点 [-]
L, L'	: 扉の回転軸から扉端部までの長さ [m]
L''	: 扉閉鎖時に圧力がかかる部分の重心から回転軸までの長さ [m]
M	: 扉開放時の扉閉鎖力 [Nm]
M_o, M_o'	: 扉開放前の扉閉鎖力 [Nm]
$M_{o,i}$	: 扉開放前のパネ巻数毎の扉閉鎖力 [Nm]
$\Delta P, \Delta P'$	: 室間圧力差 (不等圧の場合、高さ方向の室間圧力差の平均、式(1)では平均圧力差 ³⁾) [Pa]
$\Delta P_{o,i}, \Delta P_{o,i}'$	: 扉開放前のパネ巻数毎の室間圧力差 [Pa]
ΔP_j	: 扉前後の圧力差 [Pa]
Q	: 開口部流量 [kg/s]
r, r'	: 相関係数 [-]
α	: 開放扉の流量係数 [-]
β, β'	: 圧力差分布係数 [-]
θ	: 扉開放角度 [°]
ρ	: 密度 [kg/m ³]

注) 中間的開放扉の流量係数の部分は、扉の開放方向と扉通過気流の流れが同方向の場合の流量係数に関する報告⁶⁾に、加筆したものである。

参考文献

- 1) Nakaya, I., Tanaka, T. and Yoshida, M.: Doorway Flow Induced by a Propane Fire, Fire Safety Journal, Vol. 10, pp. 185-195, 1986
- 2) 建設省大臣官房技術調査室監修: 建築物の総合防火設計法の開発 第1巻 総合防火設計法、平成元年4月
- 3) 金谷靖、高野恭輔、久次米真美子、松下敬幸、田中晴義: 事務所ビルの付室加圧煙制御システムにおける給気量の算定方法 (その2 平均圧力差を用いた流量の計算)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 165-166, 1998年9月
- 4) 山名俊男: 防火扉開閉装置の力に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 963-964, 1990年10月
- 5) 阿部伸之、川村成彦、山田茂、山田常圭: 加圧排煙時の消防活動における扉の流量係数及び開放力に関する実験研究、日本火災学会研究発表会概要集, pp. 262-265, 2004年5月
- 6) 広田正之、山名俊男: 加圧防煙計画のための水平避難用防火扉の基本的特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 159-160, 1999年9月
- 7) 日本建築学会編: 建築資料集成1 環境、1978年6月
- 8) 建設省住宅局指導課監修: 新・排煙設備技術指針1987年版、平成元年5月
- 9) 有田正光: 流れの科学、東京電機大学出版局、1998

(2005年7月10日原稿受理, 2005年12月15日採用決定)