水平噴流式煙制御システムに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SMOKE CONTROL SYSTEM WITH HORIZONTAL AIR JETS

原 哲夫^{*1}, 中浜 慎司^{*2}, 嵐城 太郎^{*3}, 山名 俊男^{*4}Tetsuo HARA, Shinji NAKAHAMA, Taro ARAKI
and Toshio YAMANA

Horizontal air jets system was developed to keep smoke out of the safe area, which was designed to allow free access of people from escape routes. Full scale experiments were conducted to study the distribution of air velocity, temperature and CO₂ concentration in real pool fires. Smokeproof ratio and air change rate of the safe area were estimated by the air balance model from results of the experiment. Horizontal air jets were numerically simulated using the standard $k-\varepsilon$ model of turbulence. Computed results were compared with experimental data to assess the accuracy of prediction. The smokeproof effect of horizontal air jets in crowd movement was evaluated with dummy bodies arrayed in front of air nozzles.

Keywords : Smoke Control, Smokeproof, Horizontal Air Jets, Numerical Analysis, $k-\varepsilon$ Model, Evacuation
煙制御, 遮煙, 水平噴流, 数値解析, $k-\varepsilon$ モデル, 避難

1. はじめに

付室や階段室を煙から防護し避難者の安全を確保する煙制御システムとして、付室加圧防煙¹⁾ または平成12年 建設省告示 第1437号の第2種排煙²⁾ あるいは階段加圧防煙³⁾ が採用されてきた。これらの煙制御システムは、煙流動シミュレーション⁴⁾ を用いて計画され、実建物において安全性が検証されている。

しかし、廊下・付室間または階段室間の開口部（扉）における防煙または遮煙の有効性については、給気口の位置や吹出速度により遮煙開口部への動圧の影響が見受けられる等、検討すべき項目も多い。⁵⁾

筆者等は有効な遮煙効果を達成できる煙制御方式として、新たに水平噴流式煙制御システム（図1）を検討した。

本システムは、避難通路の両側の壁から気流を吹出し、噴流による空気膜を形成して防護空間の遮煙を行うものであり、病院等の災害弱者または地下通路等の大量の避難者が扉やシャッターに妨げられることなく安全に避難できる利点を有している。実規模実験⁶⁾⁷⁾ により本システムの遮煙効果を検討したので、本報ではその結果を報告する。

2. 水平噴流式煙制御システムの特長

本システムは、従来の加圧防煙の様に付室等の防護空間に給気して内圧を高め、扉開閉時の遮煙をはかるシステムとは異なり、以下に示す特長から建築物の安全性および機能性を向上できる。

①遮煙効果の確保

- ・開口部の遮煙効果を安定して確保できる。加圧防煙の様に給気方向、遮煙場所により気流が不安定となることはない。
- ・吹出し気流は避難者の通過に支障なく、遮煙効果も低減しない。

②通過障害の低減

- ・扉等が不要なので、加圧防煙の様に防護空間の圧力が上昇して開閉障害を生じることはない。
- ・扉やシャッターの省略により災害弱者や大量の避難者が通過する際の安全性を向上できる。（車椅子等の通過が容易）

③環境条件の維持

- ・避難者は遮煙空間を通過した後、気流の影響の小さい防護空間で救助を待つことが可能である。
- ・防護空間は換気効果により、空気温度、必要外気量等の環境条件を維持できる。

④作動システムの簡易化による高信頼性確保

- ・防護空間の圧力が上昇しないので、加圧防煙の様に圧力制御機構を設ける必要はなく、作動信頼性が高い。

図1 水平噴流式煙制御システムの概念

*1 大成建設設計本部 博士(工学)

*2 大成建設技術センター 修士(環境科学)

*3 大成建設技術センター

*4 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官

Taisei Corp. Design Division, Dr. Eng.

Taisei Corp. Technology Center, M. Environmental Sciences

Taisei Corp. Technology Center

Senior Researcher, National Institute for Land and Infrastructure Management

3. 検討課題

本システムは、両側壁の吹出口から遮煙空間（幅 W、長さ L、高さ H）に向けて斜めに給気し、遮煙空間の中央部分では給気が合成された気流の動圧によって、さらに、吹出口近傍では吹出気流により遮煙を行う。（図 1）これにより遮煙開口部に対し、信頼性の高い遮煙効果の達成を目的としている。

本研究では、発熱時におけるシステムの遮煙効果を定量的に把握することを目的に、以下の手順に従い検討を行った。

- (i)基礎実験として、発熱がない条件下における気流性状測定
- (ii)火災を想定した条件下での熱性状測定(防護空間への熱影響確認)
- (iii)遮煙効果の定量化を目的とした CO₂ 濃度測定
- (iv)模擬避難者による遮煙効果への影響測定

火源近傍では熱の影響が気流性状に及ぶと考えられるが、本研究では吹出口付近と防護空間の温度上昇測定から、防護空間側への遮煙効果をもたらす気流に対して、火源の熱による影響が小さいことを確認する。さらに、CO₂ 濃度測定を行うことで、遮煙効果の定量化を試みる。また、(i)と(ii)については、排気等の外乱条件をできる限り抑制した給気のみ作動(排気量 0 m³/h)のケースを対象に、CFD 解析と実験結果の比較を行う。なお、発熱の有無によって、気流性状は異なると考えられるが、発熱時の気流測定は困難であるため、遮煙効果については、(iii)の CO₂ 濃度測定により定量化を図った。

4. 気流性状・熱性状の実験

4.1 実験施設

実験室および測定点を図 2, 3 に示す。実験室は幅 2000 mm、高さ 2530 mm であり、廊下(火災室)(長さ 6150 mm)、遮煙空間(1100 mm)、防護空間(3950 mm)からなる廊下状空間を想定した。なお、今回の実験では、防護空間および遮煙空間の前面空間を廊下と称した。避難者の通過空間である廊下は、通常は非火災室として扱われるが、遮煙効果に対する火源条件を厳しくするために、吹出口近傍に火源を設置した。遮煙空間の両側壁にスリット状の吹出口(幅 80 mm×高さ 2500 mm)を片側に 2 個ずつ合計 4 個を壁に埋め込み設置した。吹出角度は各片側において、壁に対して鉛直方向から 40° および 10° 水平に廊下側に傾け、廊下の長手方向中心線を両側壁からの吹出方向の合流点とした。垂直方向の吹出しは、下部を-40°、中央部を 0°、上部を+40° に漸次変化させ、床面、天井面に気流を吹き付けて遮煙効果を高めた。

なお、予備実験として、吹出口数や吹出角度を変化させたケースを数例実施したが、発煙筒(図 2、火源着火直前に発煙)の煙により遮煙効果を確認できたのは上述のケースであった。よって、この吹出し条件により、本実験を行うこととした。

実験室の開口条件は、廊下側については下流端側面の両側壁に開口(幅 0.85m×高さ 2.53m×2ヶ所=4.3 m²)を設けた。4.3m²の開口面積を開口率 100%とする。防護空間側の上流端は、階段室等への経路として設置される扉の隙間から防護空間外へ漏気が発生することを想定し、上流端の壁面積(約 5.0 m²)の 1%(0.05 m²)のスリット状開口(幅 50 mm×高さ 1000 mm)を設けた。給気空気を強制排出する排煙口(900 mm×900 mm)を廊下の天井面に設置した。以下、排気量は排煙口からの強制排出量を示し、排気未作動(排気量 0 m³/h)は、強制排出を行わず下流端側面の開口からの流出を示す。

図 2 実験室および風速、圧力測定点

図 3 火源および温度測定点

表 1 気流・熱性状の実験ケース

実験 No.	検討内容	測定項目	吹出角度(°)		給気量 Q _a (m³/h)	排気量 Q _{sm} (m³/h)	開口面積(m²)	
			水平方向				廊下 下流端 側面	防護 空間 (上流端)
			下流	上流				
A0'	蓄煙	温度			0	0	4.3 (100%)	0.05 (1%)
A1	気流性状 (A1～A4)	風速 (X 方向)	40	10	15,000	0		
A2 A2'						15,000		
A3 A3'	熱性状 (A2'～A4')	温度			+40 ～ -40	0		
A4 A4'						18,000		
A5	各空間の 圧力差	差圧、風速 (X,Y,Z 方向 の合成値)			15,000	0		
A6					18,000	0		
							(%)は開口率	

表 2 測定機器

測定項目	機器名	測定 方法	間隔 (秒)	測定時間 (秒)
温度	T 型、K 型熱電対(φ=0.32 mm)	固定	1.0	—
風速 (指向性)	三次元超音波風速計 KAIJYO WAT-395 型	移動	0.1	60.0
風速(無指向性)	KANOMAX MODEL 6542	固定	0.1	60.0
圧力差	日本特殊測器 KPD2001	固定	0.1	60.0
記録計	横河電機 DC100	—	1.0	—
CO ₂ 濃度計 (非分散型赤外線式)	富士電機 ZRG 型(測定点 Ysm, Yd) 光明理化学工業 UM-280L(測定点 Yc)	固定	1.0	—

4.2 実験内容

実験ケース (A1~A6, A0', A2'~A4') を表 1、測定機器を表 2 に示す。気流性状の実験 (A1~A4, 図 2) では、指向性がある三次元超音波風速計を用い、移動測定によって実測を行った。各空間の圧力差の実験 (A5, A6, 図 2) では、無指向性の風速計と各空間に圧力計を設置し、測定を行った。圧力差を測定する際、動圧を測定しない様に、測定点チューブの先端に風圧板を設置した。熱性状の実験 (A0', A2'~A4', 図 3) では、実験の安全上、設置可能な 1000mm×1000mm のアルコールバーンに火源 (図 3, 燃料 : メタノール 12L, 発熱速度 400kW) を焚き、火災室および遮煙空間、防護空間の温度上昇 (温度差 ΔT (K)) を測定した。火源からの放射および壁や床面からの再放射による温度上昇を防ぐため、アルミ箔の傘を防護空間前面 (図 3, 測定点⑧~⑩)、防護空間内 (⑪~⑬) の熱電対 (T 型, K 型) に設置した。なお、気流性状に影響が及ぶことを防ぐため、火源に近い遮煙空間の測定点③~⑦にはアルミ箔の傘は設置しなかった。

4.3 等温下での気流性状測定

合成気流の測定結果を図 4(a)~(d) (A1~A4) に示す。(測定点 A~D 列および L~R 行の位置を図 2 に示す。) 風速は三次元超音波風速計の 60 秒平均測定値から、X 方向 (防護空間から廊下方向) 成分のみの流れを抽出し、防護空間から廊下方向の流れを正值とした。A 列および B 列より、排気の作動、未作動に関係なく、正值方向の気流を確認した。この気流により、防護空間への煙の侵入を防ぐ遮煙効果が得られている。

吹出口イ、ハ (図 2) より下流側に位置する廊下壁に近い測定点 L 行と R 行 (A 列, B 列の (a)~(d) 全て) において、負値方向の気流がみられるが、これは吹出気流の誘引による。発煙筒の煙による目視観察から、この誘引気流は、水平方向 40° の吹出口の気流軸と A, B 列の廊下 (火災室) 壁の間で留まり、さらに、C, D 列中央部への逆方向の流れは見られず、遮煙効果には影響を及ぼしていない。吹出口近傍では、吹出気流による誘引を生じ、本システムに特有な気流性状を呈している。

廊下中央部（図2，測定点C行）のC列およびD列において、負値方向の気流を確認した。発煙筒の煙による目視観察結果によれば、吹出口イ、ハおよびロ、ニからの合成気流は、遮煙空間の下流側（A列，B列）の廊下中央部では、正值方向であり遮煙効果をもたらしているが、吹出口ロ，ニからの合成気流は遮煙空間の上流側（C列，D列）の廊下中央部においては、上述の負値方向の気流も発生させている。この負値方向の気流は、防護空間に対して新鮮空気を供給する副次的な換気効果をもたらすと考えられる。

4.4 システム作動時の風速と圧力差

遮煙空間内と、遮煙空間に接する廊下開口部および防護空間の入口部における5点の風速（図2，測定点①～⑤）の測定結果（A5，A6）を図5に、各空間の圧力差を図6に示す。各空間の圧力は、実験室外-防護空間（⑥-⑦）では防護空間側を正值、防護空間-廊下（⑧-⑨）では、防護空間側を正值、廊下-実験室外（⑩-⑪）では、廊下側を正值として設定した。

図5より、気流軸が交わる廊下開口部（②）の風速が約3.3～4.1m/sと最も大きく、防護空間の入口部（⑤）は約0.3m/sと最も小さい。なお、図5の測定値は、X，Y，Z方向の合成値であるため、図4のX方向のみの測定結果と差がある。これより、遮煙空間から廊下側では煙の侵入を防ぐ速い気流が、また、防護空間内では滞留者に影響を及ぼさない微風速が確認された。

図6より、防護空間-廊下間（図2，測定点⑧-⑨）の圧力差は、給気量の変化にかかわらず、ごくわずかに防護空間が大きい。よって、給気した空気が下流側から排出されるように設計することで、本システム作動が各空間に過大な圧力差を生じさせることはない。

4.5 熱性状測定

実験A0'（蓄煙）の各測定点の温度上昇（最大値）を図7(a)に示す。火源前面（中央④）では、天井面近傍（床上2510mm）において約200K上昇した。火災室（下流①）では、周壁への失熱および下流端側面開口からの流入空気の影響により、約140Kの上昇となった。防護空間内（⑬）では、床上1500～2510mmまで約100～125K上昇した。

実験A2'（給排気量15,000m³/h），A4'（18,000m³/h）の各点の温度上昇（火災室の温度上昇がほぼ定常となった300秒時点）を図7(b)，(c)に示す。火災室では、特に下流（①）においてケース毎にほぼ一定の温度勾配が形成された。中央（②）では、天井面近傍でA2'が約140K、A4'が約100K上昇した。火源前面（③～⑤）の床上2000mmでは、A2'のL側で約80K、A4'のL側で約50K上昇した。L側の温度が高いのは、吹出口からの気流により、高温空気が吹出口側へ誘引されたためと考えられる。吹出口間（⑥，⑦）では、A2'で約4～15K、A4'で約2～8Kの上昇に留まった。さらに、防護空間前面（⑧～⑩）では、A2'で約3～8K、A4'で約2～6Kの上昇に抑制されている。

防護空間内（⑪～⑬）の温度上昇を図8に示す。実験A2'（給排気量15,000m³/h）は約2～6K上昇し、若干の温度勾配を生じた。A4'（18,000m³/h）は約3K以下となり、高さ方向の温度差は小さい。

以上より、A2'，A4'の吹出口間と防護空間の温度上昇は小さく、また、両者の比較から、給排気量の増加に従い温度上昇も抑制されることが確認された。特にA4'（給排気量18,000m³/h）は、上述の様に吹出口間の温度上昇は約2～8K、防護空間前面は約2～6Kであり、火源からの熱の影響は小さい。さらに、防護空間内は約2～3Kでほぼ一様な温度上昇分布となっていることから、火源の熱放射の影響はあるが、

図5 遮煙空間内外における風速

図6 各空間の圧力差

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

(イ) 火災室(測定点: 図3)

図7 温度上昇の実測値（火源400kW）

(a) 実験A2': 給排気量15,000 m³/h

(b) 実験A4': 給排気量18,000 m³/h

図8 防護空間内の温度上昇（測定点: 図3 火源400kW）

対流によるものは小さいと考えられる。従って、A4'の防護空間側の気流性状において、発熱のない条件下との差は僅少と考えられる。

5. 気流性状・熱性状のCFD解析

5.1 解析条件

実験A3，A3'（給気量18,000m³/h，排気未作動）について、CFD解析を行い、予測精度を検証した。解析では実験室内を、約26万の構造格子（メッシュ⁸⁾⁹⁾で再現した。

4ヶ所の吹出口は、各々高さ方向に15分割、合計60分割し、実験条件と同じ吹出角度を再現した。吹出口の風量は合計18,000m³/hで、4ヶ所の吹出口は同風量の4500m³/hとし、吹出風速の初速分布は測定値を基に設定した。熱性状解析は簡易圧縮により密度変化を考慮した。⁹⁾

両側壁からの吹出し気流は、実験に際しては同風量を設定しても、わずかな差があるため、廊下中心線では合成されず、片側に偏流して安定した状態になることが観察された。吹出口から下流の境界条件は、廊下等の閉鎖空間や開放空間の設定で異なり、CFD 解析等により流れの詳細を予測する必要がある。解析モデル、計算条件を注1)に示す。

5.2 解析結果

(1) 気流性状

X 方向(防護空間から廊下方向)の風速実測値 (A3) と解析値の比較を図9に示す。比較対象の測定点は、吹出口近傍以外のA～D列のCL、C、CR行(図2)とした。解析結果を以下にまとめる。

(i) A列(図9)およびB列において、防護空間から廊下方向への遮煙効果をもたらす気流(平均風速が正值)が確認された。なお、A列CL行とCR行およびB列CR行は、解析値と測定値との間に一部差が認められるが、これは実験時の給気量の左右バランスや施工精度によるものと考えられる。

A列CL行の実測値は、気流の誘引作用が大きいため中間高さで風速が

減少したと考えられ、負値となっている。

(ii) C列およびD列それぞれの廊下中央部(C行)において、副次的な換気効果をもたらす気流(平均風速が負値)が確認された。なお、C列CR行において、解析値と測定値の間に差が認められるが、この測定点は吹出口ロ、ニからの気流が衝突する複雑な気流性状の領域であり、さらに、B列のCR行の影響を受けたためと考えられる。

(iii) B、C、D列のCL行、A、B、D列のC行、D列のCR行では、概ね解析値は測定値に近い分布形が示された。

(2) 熱性状

火災室および防護空間内の温度上昇実測値(A3')と解析値の比較を図10に示す。比較対象の測定点は、火災室の下流①、下流①と中央②の中間点、中央②および防護空間内の⑬とした。火源の発熱速度は、400kWを入力した。

⑬では解析値の温度は、ほとんど上昇せず、実測値と同様に遮煙が再現された。②では、解析値の熱気流は火源から発生したプルームの影響を受け、床上1500mm近辺での温度上昇が大きい。これに対して実測値は、ほぼ上下一定勾配の温度分布となっている。①と②の中間点では、熱気流は②より下流に位置するため拡散し、解析値の温度分布はなだらかとなっている。①では、解析値はほぼ上下一定勾配の温度分布となり実測値に近い。

6. 遮煙効果・換気効果の実験

6.1 実験内容

本実験では、(i)火災室でのメソール燃焼でCO₂を発生させ、防護空間のCO₂濃度の上昇から遮煙効果を確認、(ii)防護空間に供給したCO₂濃度の減衰から防護空間の換気効果の確認、を目的とした。防火防煙シャッターの遮煙性能試験¹⁰⁾では、片側を加圧した状態の漏気量を求めることが規定されているが、本システムでは片側を加圧した状態での試験は不可なので、上述の方法を採用した。

6.2 実験方法

実験室の開口条件は、廊下側については下流端側面の開口を開放(開口率100%)した。防護空間側の上流端は、階段室扉等の漏気(開口率1%)を想定して、吸引ファンによる一定量の排気(Qd)を行った。なお、吸引ファンの吸引量は、上流端の壁にスリット状開口(図2)を設置した上で、下流端側面の開口を開放(開口率100%)し、給気量および排気量は実験時と同様(12,000m³/h, 15,000m³/h, 18,000m³/hの3種類)として、給気ファン、排気ファンの運転を行い、防護空間からこのスリット状開口を通じて外部へ流出する漏気量と同量とした。実験は、給気ファン、排気ファン、吸引ファンを運転し、吹出口から給気して排煙口から排気した状態で行った。

(1) 遮煙効果実験(図11)

前出の火源を焚き(図3、発熱速度400kW)、火災室の代表的なCO₂濃度を示すと想定される排煙口内(Ysm)、防護空間中央(Yc)、吸引空気(Yd)の3点のCO₂濃度の変化を測定した。火災室から防護空間への漏気に伴うCO₂濃度の変化を測定して、遮煙効果を判定した。

(2) 換気効果実験(図12)

CO₂が室内に十分にかくはんするよう、防護空間で扇風機を運転しながら、防護空間の天井面からCO₂を1分間当たり約28.5L供給した。防護空間のCO₂濃度が定常状態になった後、CO₂の供給を停止し、CO₂濃度の減衰を測定して、換気効果を判定した。なお、扇風機は防護空間

図9 X方向(防護空間から廊下方向)の風速実測値(実験A3: 給気量18,000m³/h)と解析値

図10 温度上昇実測値(実験A3': 火源400kW, 給気量18,000m³/h)と解析値

図 11 遮煙効果実験

図 12 換気効果実験

の上流端に設置しており、給排気を行った状態での測定点④ (図 2) の風速値 (無指向性) は、扇風機の未作動時に対して、作動時は 0.1m/s 程度の増加であり、気流や遮煙性状への影響はほとんどないと考えられる。

(3) 給気未作動時との比較

給気および排気の効果判定するために、給気未作動かつ排気作動時、給気および排気とも未作動時の遮煙効果および換気効果を、(1) (2) と同様の方法で判定した。

6.3 実験ケース

遮煙効果・換気効果の実験ケース(B1~B6)を表 3 に示す。遮煙効果・換気効果を給排気量で比較するため、4 章の実験 (表 1) と同様の 15,000m³/h、18,000m³/h に加え、12,000m³/h の 3 通りの給排気量で実験を行った。給気未作動時との比較の実験ケース(B7~B12)を表 4 に示す。

7. 遮煙効果・換気効果の実験結果と考察

7.1 実験結果

(1) 遮煙効果実験 (給排気作動時)

図 13(a)に CO₂ 濃度上昇値の変化を、表 5 に各測定点でのピーク 3 分間の平均の CO₂ 濃度上昇値を示す。いずれの場合も、火災室 (排煙口内) の CO₂ 濃度 (Ysm) の上昇に比べ、防護空間中央 (Yc)、防護空間の吸引空気 (Yd) の上昇は小さい。

給排気量 12,000m³/h (B1)、15,000m³/h (B2)、18,000m³/h (B3) の CO₂ 濃度上昇比は、給排気量 18,000m³/h の場合を 1.0 としたとき、防護空間中央では 9.9、1.7、1.0 であり、吸引空気では 4.1、1.3、1.0 となっている。12,000m³/h の場合は、CO₂ 濃度上昇比が大きい。

(2) 換気効果実験 (給排気作動時)

図 13(b)に CO₂ 濃度が定常となった後、CO₂ の供給を停止した状態での防護空間の CO₂ 濃度上昇値の変化を示す。給排気量 15,000m³/h (B5)、

表 3 遮煙効果・換気効果 (給排気作動時) の実験ケース

実験 No.	検討内容	測定項目	給気量 Qa (m ³ /h)	排気量 Qsm (m ³ /h)	吸引量 Qd (m ³ /h)
B1	遮煙効果	CO ₂ 濃度	12,000	12,000	108
B2			15,000	15,000	132
B3			18,000	18,000	162
B4	換気効果	CO ₂ 濃度	12,000	12,000	108
B5			15,000	15,000	132
B6			18,000	18,000	162

表 4 遮煙効果・換気効果 (給気未作動時) の実験ケース

実験 No.	検討内容	測定項目	給気量 Qa (m ³ /h)	排気量 Qsm (m ³ /h)	吸引量 Qd (m ³ /h)
B7	遮煙効果	CO ₂ 濃度	0	0	0
B8				15,000	
B9				18,000	
B10	換気効果	CO ₂ 濃度	0	0	0
B11				15,000	
B12				18,000

* 12, 15, 18 は給排気量各 12,000, 15,000, 18,000 m³/h
 * * B1~B6 の排煙口内 Ysm, 防護空間吸引空気 Yd, 防護空間中央 Yc の CO₂ 濃度上昇値は外気 Ya (380ppm) との差

図 13 CO₂ 濃度上昇値の変化 (給排気作動時)

* 排気作動 15, 18 は排気量各 15,000, 18,000 m³/h
 * * ① B7~B12 の排煙口内 Ysm, 防護空間中央 Yc の CO₂ 濃度上昇値は外気 Ya (380ppm) との差 ② Yc は ZRG 型により測定 ③ 上流端は閉鎖 (開口率: 0%)

図 14 CO₂ 濃度上昇値の変化 (給気未作動時)

表5 各測定点のピーク3分間平均のCO₂濃度上昇値

給排気量 Qa, Qsm (m ³ /h)	排煙口内 $Ysm-380^*$ (ppm)	防護空間中央 $Yc-380^*$ (ppm)	吸引空気 $Yd-380^*$ (ppm)
12,000 (B1)	3994	437 (9.9)**	376 (4.1)**
15,000 (B2)	3365	76 (1.7)**	119 (1.3)**
18,000 (B3)	2950	44 (1.0)**	92 (1.0)**

*380ppm: 外気CO₂濃度 **18,000 m³/hの場合を1としたCO₂濃度上昇比

18,000m³/h (B6) のいずれの場合も、2分以内で100ppm以下に減衰した。JIS A1406 (屋内換気量測定方法) のCO₂濃度減少から換気量を求める(1)式を用いて、吸引空気のCO₂濃度(Yd)の減衰から防護空間の換気量 Q を求めた。(7.2 参照)

$$Q(m^3/h) = 2.303 \frac{V}{t} \log_{10} \frac{C_t - C_0}{C_t - C_0} \dots\dots\dots (1)$$

(3) 給気未作動時との比較

遮煙効果については、図14(a)に示すように、防護空間中央のCO₂濃度上昇値は、排気量15,000m³/h (B8) または18,000m³/h (B9) で約7000~8000ppmであった。排気未作動のケース(B7)は13,000ppm以上となり、本システム作動時に比べ大幅に高い。

換気効果は、図14(b) (B11, B12) に示すように、排気を作動してもCO₂濃度の減衰時間は長く、換気効果は低減する。防護空間中央のCO₂濃度の減少から求めた防護空間の換気量は、排気未作動のB10は約80m³/h、排気作動15,000m³/hのB11は約800m³/h、排気作動18,000m³/hのB12は約1000m³/hである。本システム作動時と給気未作動時の比較により、遮煙効果・換気効果が明確となった。

7.2 遮煙効果・換気効果の算定

(1) 計算モデル

図15に火災室、防護空間廻りの空気の流入出を基にした遮煙・換気の計算モデルおよび計算式(2)~(5)を示す。火災室から防護空間へは Qin が流入し、給気ファンからの給気量 Qa の一部 Qa' が防護空間に流入して、 $Qout$ が火災室へ流出する。 Qin のCO₂濃度 Yin は排煙口内の Ysm とする。

(2) 算定結果 (表6)

給気量 Qa と Qin の比を侵入率 S (Qin/Qa)とする。開口率を下流端側面を100%、上流端を1%相当とした場合に、 S は給排気量15,000m³/hで0.46%、18,000m³/hで0.38%である。(表6, No.①)

開口率を下流端1%、上流端1%相当とした場合は、それぞれ0.41%、0.13% (②)。下流端1%、上流端40% (扉1枚の面積相当)とした場合は、0.75%、0.41% (③)。①②で Yd の代わりに防護空間中央の Yc を用いると、 S は①' 0.29%、0.18%、②' 0.47%、0.18%である。

Qa' による防護空間の換気回数 ($Qa'/20$ m³) は、給排気量15,000m³/hで約76~96回/h、18,000m³/hで約98~115回/hである。

防護空間の火災室に対するCO₂濃度上昇値の比率 $R1$ は、給排気量15,000m³/hで3.5% (①), 2.3% (①'), 18,000m³/hで3.1% (①), 1.5% (①')。火災室のCO₂濃度上昇値を蓄煙時 (給排気未作動、13,137ppm) とした比率 $R2$ は、それぞれ0.9% (①), 0.6% (①')および0.7% (①), 0.3% (①')であり、本システムによる遮煙効果・換気効果が示されている。

火源が今回の実験より大きい場合でも、風量を増せば遮煙効果・換気効果が得られると考えられるが、必要な風量との関係は今後の課題である。

$$Qoa' = Qa' + Qin = Qout + Qd \dots\dots\dots (2)$$

$$(Ya' \times Qa') + (Yin \times Qin) = (Yout \times Qout) + (Yd \times Qd) \dots\dots\dots (3)$$

$$Qa' = (Yout \times (Qoa' - Qd) + (Yd \times Qd) - (Yin \times Qoa')) / (Ya' - Yin) \dots\dots\dots (4)$$

* $Yin = Ysm$ 、 $Yout = Yc$ or Yd としてCO₂流出量は(5)式による。

$$(380 \times Qa') + (Ysm \times Qin) = (Yc \text{ or } Yd) \times (Qa' + Qin) \text{ (表6)} \dots\dots\dots (5)$$

図15 遮煙・換気の計算モデル

表6 遮煙効果・換気効果 (防護空間のCO₂濃度、換気回数等)

No.	開口率(%)		Qa		換気 回数 (回/h)	Qd (m ³ /h)	Qin (m ³ /h)	S (Qin/Qa) (%)	CO ₂			
	下流端側面 *1	上流端 *2	Qsm	Qa' (m ³ /h)					火災室 *6,*7	防護 空間 *8,*9	$R1$ (%)	$R2$ (%)
①	100	*3	12	965	48.3	108	100	0.83	3994	376	9.4	2.9
			15	1893	94.7	132	69	0.46	3365	119	3.5	0.9
			18	2120	106.0	162	68	0.38	2950	92	3.1	0.7
②	1	*3	12	1245	62.3	108	220	1.83	4633	695	15.0	5.3
			15	1537	76.9	118	62	0.41	3991	154	3.9	1.2
			18	2290	114.5	130	24	0.13	3526	37	1.0	0.3
③	1	40	12	1409	70.5	118	259	2.16	5227	812	15.5	6.2
			15	1655	82.8		112	0.75	4386	277	6.3	2.1
			18	1961	98.1		73	0.41	4222	151	3.6	1.1
①'	100	*3	12	948	47.4	108	117	0.98	3994	437	10.9	3.3
			15	1918	95.9	132	44	0.29	3365	76	2.3	0.6
			18	2155	107.8	162	33	0.18	2950	44	1.5	0.3
②'	1	*3	12	1253	62.7	108	212	1.77	4633	671	14.5	5.1
			15	1528	76.4	118	71	0.47	3991	176	4.4	1.3
			18	2282	114.1	130	32	0.18	3526	48	1.4	0.4

- *1 開口率100% (4.3m²): 下流端側面の両側壁開口 0.85mW×2.53mH×2ヶ所=4.3m²
開口率 1% (0.05m²): 下流端側面の両側壁開口を閉鎖して下流端に壁面積5m²の1%を開口 0.05mW×1.0mH=0.05m²
*2 開口率40% (1.97m²): 上流端に壁面積5m²の約40%の扉面積相当を廊下中心線に対称に開口 1.08mW×1.82mH=1.97m² Yd 測定なし
*3 開口率1%の漏気量相当の Qd を吸引して Yd を測定
*4 給排気量は実験開始前に設定、12, 15, 18は給排気量各12000, 15000, 18000m³/h
*5 $Qa'/20$: 防護空間容積 2mW×4mL×2.5mH=20m³
*6 CO₂濃度上昇値: ピーク3分間の平均CO₂濃度上昇値[ppm]
*7 $Ysm-380$ [ppm]
*8 (Yc or $Yd-380$ [ppm])、①②: Yd 、①'②'③: Yc
*9 $R1: ((Yc \text{ or } Yd)-380)/(Ysm-380)$ 、防護空間の火災室に対するCO₂濃度上昇値比率
*10 $R2: ((Yc \text{ or } Yd)-380)/13,137$ 、蓄煙時 (給排気未作動、 $Qd=0$) のCO₂濃度上昇値 (=13,137ppm, Yc : ZRG型により測定) に対する防護空間の値の比率

7.3 防護空間のCO₂濃度上昇予測

防護空間のCO₂濃度上昇について、昭和48年建設省告示第2564号の遮煙性能を有する防火防煙シャッターの区画と本システムを予測して比較した。算定は(6)式による。

$$Ct(m^3/m^3) - C_0 = (k/(Qin + Qa')) \times (1 - \exp(-(Qin + Qa') \frac{t}{V})) \dots\dots\dots (6)$$

本実験の防護空間 (容積: 20m³) は、防火防煙シャッターの区画では、時間経過に従いCO₂濃度が上昇し、69分後には約10,000ppmを超える。本システムで給排気を作動した場合は、約4分後には定常値に達し15,000m³/hで119ppm (①), 76ppm (①'), 18,000m³/hで92ppm (①), 44ppm (①') となり、遮煙効果・換気効果の有効性が示されている。(図16) なお、告示第2564号で定められている遮煙性能試験方法によれば、試験体の両面における圧力差19.6Paにおいて0.2 m³/m²・min以下とす

る必要がある。この値から求めたシャッターの単位面積あたりの隙間面積は、 $0.0008 \text{ m}^2/\text{m}^2$ となる。これより、火災室の平均温度を本実験時の 100°C とすると、平均圧力差は 2.7 Pa となり、シャッターの単位面積漏気量は、 $0.084 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ となる。

図 18 避難者影響実験

Figure 1 consists of 12 sub-diagrams, numbered 1 through 12, arranged in a 3x4 grid. Each diagram illustrates a magnetic field configuration within a rectangular frame defined by two horizontal lines. A central dashed horizontal line serves as a reference. Arrows indicate the direction of the magnetic field lines. Various symbols are used to represent different components or regions: squares with an 'x' inside, triangles, and solid squares. The diagrams show a sequence of configurations, likely representing the evolution of a magnetic field over time or under different conditions. The symbols are distributed in a way that suggests a specific pattern or relationship between the different components.

図 19 擬似人体(□ 抵抗力)の配置パターン 1~12

の配置は⁶ ターンとし、①廊下中心線に対称かつ気流軸上（ハターン 1～3）、②L または R 側どちらかに寄せて気流軸上（4～7）、③L または R 側の壁際に 2 人ずつ（8～10）、④遮煙空間に多人数（11、12）とした。実験は、15,000m³/h と 18,000m³/h の 2 種類の給排気量で行った。実験ケース（B13、B14）を表 7 に示す。

8.3 実験結果

表 8 に全ての擬似人体の配置^h・ターンにおける^b・ーク 3 分間平均の吸引空気の CO₂ 濃度上昇値 (Yd-380) を示す。また、図 20 に CO₂ 濃度上昇値が表 5 の吸引空気 (Yd-380) の値 (実験 B2: 給排気量 15,000m³/h の場合 119ppm、実験 B3: 給排気量 18,000 m³/h の場合 92ppm) より大きい^h・ターン (1, 2, 4, 5, 9) における防護空間の吸引空気の CO₂ 濃度上昇値 (Yd-380) の変化を示す。

給排気量 15,000 m³/h (表 8) では、擬似人体を配置していない場合の上昇値 (119ppm) より大きい値を示したパターン 1, 4, 5, 9 の内、L, R の片側または両側の吹出口の直前に擬似人体を配置した 4, 5, 9 は、それぞれ 351, 361, 214ppm であり、約 100~140ppm の差となった。4, 5 の上昇値の方が 9 より 140ppm 程度大きい、擬似人体を L または R の片側の吹出口直前に配置したので、風速分布が片寄ったためと考えられる。40° の気流軸上に配置のパターン 1 の差は 20ppm で小さい。その他のパターンでは、L または R 側の吹出口から 500mm 離れた位置に配置した 3, 6, 7 や高密度に配置した 11, 12 は、上昇値が小さい。給排気量 18,000m³/h (表 8) では、4, 5 で上昇値はやや大きい、15,000m³/h にくらべて小さい。10° の気流軸上に配置の 2 は 3ppm の差である。

実際の避難時における人体の移動を考慮すると、遮煙効果への影響は小さいと考えられる。

表 7 遮煙効果（抵抗体有）の実験ケース

実験 No.	検討 内容	測定 項目	給気量 Qa (m^3/h)	排気量 Qsm (m^3/h)	吸引量 Qd^* (m^3/h)
B13	遮煙	CO ₂	15,000	15,000	132
B14	効果	濃度	18,000	18,000	162

* Qd は上流端より吸引、下流端側面の開口は開放（開口率 100%）

表 8 ヒーク 3 分間平均の吸引空気 CO₂ 濃度上昇値 ($Yd-380^*$)

給排気量 Qa, Qsm (m^3/h)	CO ₂ 濃度 上昇値 (ppm)	配置パターン											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15,000(B13)	$Yd-380^*$	139	105	32	351	361	26	70	111	214	91	85	115
18,000(B14)		63	95	87	123	112	55	73	90	71	80	70	68

* 380ppm : 外気 CO₂ 濃度

図 20 CO₂ 濃度上昇値 ($Yd-380^*$) の変化

9. まとめ

- ① 基礎実験として、発熱がない条件下における気流性状測定により、遮煙効果と副次的な換気効果をもたらす気流を確認した。
- ② 400kW 火源の熱性状測定では、廊下（火災室）の天井面の温度上昇に対し、防護空間の温度上昇は抑えられ、発熱の影響が小さいことを確認した。
- ③ CO₂ 濃度測定結果から侵入率、換気回数等の性能値を算定した。
- ④ 避難者の遮煙効果への影響が小さいことを明らかにした。また、防護空間入口部の風速は静穏状態であり、気流による避難者への影響は小さいことを確認した。

謝辞

本実験は、独立行政法人建築研究所の施設を賃借して行った。実験にあたっては、同研究所の萩原一郎氏、林 吉彦氏、仁井大策氏の協力を、CO₂ 濃度の測定にあたっては、同研究所の吉田正志氏の協力を得た。また、本研究の実施に際しては、大成建設技術センターの小林 裕氏、樋渡 潔氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

<記号>

Q : 換気量 (m^3/h) Qd : 吸引量 (m^3/h) T : 温度 (K)
 Qin : 防護空間への火災室からの流入量 (m^3/h)
 $Qout$: 防護空間から火災室への流出量 (m^3/h)
 Qa : (外気) 給気量 (m^3/h) Qa' : 防護空間への外気流入量 (m^3/h)
 Qoa' : 防護空間への流入量合計 (相当換気量) (m^3/h)
 Qsm : 排気量 (m^3/h) Yd : 防護空間の吸引空気 CO₂ 濃度 (ppm)
 Yin : 火災室 CO₂ 濃度 (ppm) Yc : 防護空間中央 CO₂ 濃度 (ppm)
 $Yout$: 防護空間 CO₂ 濃度 (ppm) Ysm : 排煙口内 CO₂ 濃度 (ppm)
 Ya : 外気 CO₂ 濃度 (380ppm) Ya' : 流入外気 CO₂ 濃度 (380ppm)
 S : 侵入率 (Qin/Qa) Ri : CO₂ 濃度上昇比率 (%) ($i=1, 2$)
 C_i : 第 1 回目の測定時刻 ($t=0$) における室内 CO₂ 濃度 (m^3/m^3)
 C_t : t 時間後における室内 CO₂ 濃度 (m^3/m^3) k : CO₂ 増加量 (m^3/h)
 Co : 給気 CO₂ 濃度 (m^3/m^3) V : 室気積 (m^3)
 t : 第 1 回目の測定時刻からの経過時間 (h)

注

注 1) 気流・熱性状の CFD 解析

補表 1 水平噴流計算条件⁸⁾⁹⁾

補表 1 水平噴流計算条件 ⁸⁾⁹⁾	
解析 メッシュ	非圧縮、簡易圧縮 (図 2) 全領域: 11,200 mm (X) × 2000 (Y) × 2530 (Z), X: 長辺, Y: 短辺, Z: 床面からの高さ 全領域分割数 / 123 (X) × 44 (Y) × 48 (Z) 格子幅 0.06m ~ 0.18 (X), 0.02 ~ 0.06 (Y), 0.05 ~ 0.07 (Z) 遮煙空間: 1100 mm (X) × 2000 (Y) × 2530 (Z) 遮煙空間分割数 / 17 (X) × 44 (Y) × 48 (Z) 格子幅 0.06m ~ 0.08 (X), 0.02 ~ 0.06 (Y), 0.05 ~ 0.07 (Z) 火源分割数 ⁸⁾⁹⁾ / 16 (X) × 18 (Y) 開口率 / 下流端側面 100%, 上流端 1%
	解析 条件
	乱流モデル / 標準 $k-\epsilon$ (非圧縮、簡易圧縮: 等圧密度変化), STAR-CD ver.3.15 解析法 / SIMPLE 法に基づく有限体積法、差分スキーム / 風上差分
	境界 条件
流入 / $k_{in} = (U_{in}/10)^2$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} k_{in}^2 / L_{in}$, L_{in} = 吹出幅 (0.08m), $C_{\mu} = 0.09$ 火源 (簡易圧縮) ⁹⁾ / $w = 1.38m/s$, $k = 0.114 m^2/s^2$, $\epsilon = 0.00346 m^3/s^3$ w : z 方向速度 (m/s), $w = Qc / (\rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot L_f^2)$ Qc : 火源発熱速度 (400kW), ρ : 空気密度 (0.323 kg/m ³ , 820°C, $\Delta T = 800K$) C_p : 空気の比熱 (1125 J/kg·K), L_f : 正方形の火源幅 (1.0m) k : 乱流エネルギー (m^2/s^2) 変動速度は w の 20% ϵ : 乱流エネルギー消失率 (m^3/s^3), $\epsilon = (0.09 \times k^{3/2}) / L_f$ L_f : 乱れの長さスケール, $L_i = L_f = 1.0m$ 発熱速度の変化 : 0 ~ 60sec, $w = 0 \sim 1.38m/s$ まで直線的に増加 60sec ~ 300sec, $w = 1.38m/s$ で一定 流出 / 排気量等配分、温度 / 等温 (20°C), 非等温、速度 / 一般化対数則	

参考文献

- 1) 原 哲夫, 高橋一郎, 寺尾良雄, 塙 正司, 笠原 勲: 附室加圧煙制御システムの作動特性実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp. 47 ~ 48, 1997. 9
- 2) 原 哲夫: 高層集合住宅の付室加圧排煙システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp. 123 ~ 124, 2002. 8
- 3) 中浜慎司, 笠原 勲, 森川泰成: 階段加圧防煙システムの研究 システムの概要と性能検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp. 79 ~ 82, 2003. 9
- 4) 原 哲夫: ギョームデルによる煙流動特性予測の基礎的考察に基づく CFD 解析の性能設定, 日本火災学会論文集, Vol.49, No.2, pp.43 ~ 55, 1999. 12
- 5) 中野美奈, 油野健志, 林 吉彦, 永野紳一郎, 山名俊男, 若松孝旺: 給気位置が遮煙開口部の流量分布形成に与える影響に関する実験的考察 (その 5 追加実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp.203 ~ 204, 2004. 8
- 6) 中浜慎司, 原 哲夫, 嵐城太郎, 山名俊男, 樋渡 潔: 水平噴流式煙制御システムに関する実験的研究 (その 3) 気流性状の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp.259 ~ 262, 2007. 8
- 7) 嵐城太郎, 原 哲夫, 中浜慎司, 山名俊男, 小林 裕: 水平噴流式煙制御システムに関する実験的研究 (その 4) 遮煙効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp. 263 ~ 266, 2007. 8
- 8) Hara, T. and Kato, S.: Numerical simulation of thermal plumes in free space using the standard $k-\epsilon$ model, *Fire Safety Journal*, Vol.39, pp.105 ~ 129, 2004
- 9) Hara, T. and Kato, S.: Numerical Simulation of Fire Plume-Induced Ceiling Jets Using the Standard $k-\epsilon$ Model, *Fire Technology*, Vol.42, pp.131 ~ 160, 2006
- 10) 山名俊男, 須藤昌照: 遮煙性試験装置を用いた区画部材の性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (防火) pp. 153 ~ 154, 1998. 9

(2007年 9 月 10 日原稿受理, 2008年 3 月 17 日採用決定)