ボイド空間における煙流動性状

その3 空間底部に給気口がある場合

SMOKE BEHAVIOR IN CAVITY SPACES

Part 3 The case of a cavity space with an opening at the bottom

福田 晃久*, 田中 哮義**, 若松 孝旺***

Teruhisa FUKUDA, Takeyoshi TANAKA and Takao WAKAMATSU

It has been demonstrated by previous experiments within a cavity space having no bottom opening that the temperature rise of plume at the height of the cavity opening is well scaled by a nondimensional temperature defined as $\Theta \equiv (\overline{\Delta T} / T_\infty) / \dot{Q}^{*2/3}$ where $\dot{Q}^* \equiv \dot{Q} / \rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g D D^2}$, and the temperature is successfully correlated as $\Theta = \alpha (H/D)^\beta$, where $\beta = -5/3, -1$ and $-1/3$ for shallow, intermediate and deep cavity, respectively.

In this study, the smoke behavior in cavity spaces is further investigated by small scale experiments for a cavity space which has an opening at the bottom. It is shown that as the area of the bottom opening becomes larger, the fire plume becomes more stable, but the temperature is still well correlated in the same manner as for a cavity having no bottom opening. The effects of a bottom opening on the temperature and the pressure difference produced in the cavity are also analyzed.

Keywords: smoke behavior, fire plume, cavity space, bottom opening, air inflow rate

煙流動性状、火災プルーム、ボイド空間、底部給気口、流入空気量

1. はじめに

本論文では頂部が開放された井戸状の空間をボイド空間と呼ぶことにする。建築物にボイド空間が設けられるのは稀なことではない。

ボイド空間が火災安全上問題となるのは、火災時に煙や高温ガスの伝播経路となる潜在的危険性のためである。ボイド空間を有する建築物で有効な避難安全対策を図るためには、ボイド空間内に流入した火災時の煙の性状を予測する手段を有することが重要と考えられる。既報^{1,2)}までにおいて、給気口がない場合について模型実験により、空間の平面寸法、高さ、発熱速度といった、現象を支配すると考えられる因子とプルームの温度上昇の関係の把握を試み、温度上昇の予測式を提案した。

しかし、実際の建築物においては、共同住宅のように空間の底部あるいは側壁に給気経路を有する各種のボイド空間が存在する。また火災安全上、ボイド空間では底部給気口を設けることが煙の危険を緩和する上で、有効であることも想像されており、そのような行政的指導も行われている。しかし、どの程度有効であるかについてのデータは殆ど無いのが現状である。給気口のないボイド空間では、火災プルームに連行される空気は全て頂部開口から供給されるが、底部給気口のあるボイド空間では頂部および底部の両方の開口

から供給され、また給気口が大きくなるに従い、底部からの空気供給の比重が高まると思われる。上記のような給気口の存在はボイド内の煙性状を変化させることが考えられる。

そこで、本報では、底部に設けた給気口の大きさが空間内の温度および流入する空気量に及ぼす影響について検討し、さらにそれらの予測式を提案することを目的とする。

2. 実験方法

実験に用いたボイド空間模型は既報^{1,2)}と同じものであり、図1(a)に示す1辺0.8mの正方形平面を有する井戸状の空間で深さは床を上下させることにより0~3.0mまで変化できようになっている。測定も既報と同じく、空間頂部を85に分割して、各中心に熱電対を設置し、流入する気流温度の測定を行った。さらに空間内外の圧力差分布の測定のために圧力プローブを後壁面の中心線に沿って配置した。実験におけるデータ収録は5秒間隔で5分間、すなわち計60回である。

火源は床上中央部に位置する場合について実験を実施した。火源は直径7cmの円形メタンガス拡散バーナーで、発熱速度は0.5, 1.0, 2.0, 3.0および4.0kWとした。

* 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻

** 建設省建築研究所防煙研究室 室長・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

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

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

給気口は図1(b)に示すように給気口からの流入空気による火炎の吹き倒しによる影響を避けるため火源周辺に均等になるように0.03, 0.0672, 0.1632m²の3段階を設け、条件の組み合わせに対して、空間の深さ0.25～3.00mの間で0.25m毎に変化させて実験を実施した。

なお、給気口がない場合についても既報^{1),2)}の実験結果を用い、併せて比較検討することにする。

3. 実験結果

3.1 頂部開口における気流温度分布

図2は火源の発熱速度2.0kW、空間深さ0.5mおよび3.0mの条件における1計測時点の温度測定結果を基に作成したもので、各給気口面積に対する頂部開口での典型的な温度（雰囲気温度からの上昇値）分布の比較を示している。

空間が浅い場合、給気口面積が大きくなるほど温度分布が鋭くなる。これは火災プルームの動揺が小さくなるためと思われる。

一方空間が深い場合には、給気口面積の増大に伴い温度分布が低くなだらかなる。

図1 実験模型概要図

図2 頂部開口における温度上昇分布

3.2 火災ブルーム軸の位置の変動

図3は、頂部開口部に設置した85の熱電対の各々が最高温度を指示した頻度（火災ブルームの軸の存在する位置）を例示している。例は、各給気口面積について空間深さが1.0, 2.0m、火源の発熱速度が2.0kWの条件の場合の結果を示している。

空間深さが空間が1.0mと浅いときは、給気口面積の相違によら

ず、火災ブルーム軸は火源の直上付近に存在し変移の幅は大きくない。一方空間が深くなると、気流軸の変移性状に面積による違いが明白になってくる。給気口面積が小さいとき気流軸が火源上方から離れ、周壁または隅角部の方向に変移することが多くなり、領域が面的に広がるのに対し、給気口面積が大きいと、変移の幅は比較的小さい。

図3 火災ブルーム軸の位置の変動

3.3 空間内圧力差の垂直分布

図4は空間深さ3mの場合の空間内外の圧力差分布を、頂部開口からの垂直距離に対してプロットしたものである。値は60回の計測の平均値である。いずれの圧力差分布においても空間頂部において殆ど0であるが、空間内は外部に対して負圧であり、圧力差はほぼ深

さに比例して増大している。しかし空間の低い部分では圧力差の勾配が小さくなっている傾向が伺われる。給気口面積が同一の場合について見れば、発熱速度の増加とともに圧力差は大きくなる。また発熱速度が同一なら給気口面積が大きくなるのに伴って圧力差は小さくなっている。

図4 空間内外の圧力差分布

3.4 火災プルームのプルーム面積率

図5は、開口部において火災プルームの水平断面積 A が空間水平断面積 D^2 に占める割合（プルーム面積率）を空間深さ H に対してプロットしたものである。なお本論文では開口部で測定された温度の最高値の25%以上の温度上昇がある範囲（ $k=0.25$ ）を火災プルームの範囲と定義した。

このとき、ボイド空間が浅い領域、中間的領域、深い領域でそれぞれ H/D の2乗、1乗および0乗に比例するような増加傾向を示す。これは給気口がない場合にも観察された同様の傾向^{1),2)}であると言える。また、給気口面積の増大に伴い空間深さが大きいときのプルーム面積率が1になる傾向があり、各領域の境界は H の大きい方へ移行する。さらに、いずれの場合もプルームの広がり範囲は発熱速度に殆どよらないのが特徴的傾向である。

図5 プルーム面積率

3.5 火災プルームの平均温度上昇

定義した火災プルームの範囲における平均温度と空間深さ H および発熱速度の関係を図6に示す。値は5秒間隔の各計測ごとに、平均温度を求めた上、60回の測定について平均したものである。

図6から、給気口面積の相違によらず、温度上昇は空間が浅い領域では深さとともに速やかに低下し、深くなるに従い殆ど変化しなくなる。これも給気口がない場合に観察されたものと同様の傾向であり、ボイド空間に特有の性状と考えられる。また、温度が一定に近くなる深さは、給気口面積の増大に伴い相対的に大きくなっている。さらに、温度の絶対値自体は空間が浅い領域では、給気口面積の大きさに伴って大きくなる反面、深い領域では、逆に小さくなる。

図6 プルーム平均温度上昇

4. 火災プルームの温度予測式

火災プルームの温度について本研究の実験的結果と理論的考察を併せて検討した結果、ボイド空間内の火災プルームの温度は、

$$\Theta \equiv (\Delta T / T_{\infty}) / \dot{Q}^{*2/3} \quad (1)$$

で定義される無次元温度を用いれば、

$$\Theta = \alpha (H/D)^{\beta} \quad (2)$$

と表され、 β の値はボイド空間が浅い領域、中間領域、深い領域でそれぞれ $-5/3$ 、 -1 、 $-1/3$ に近い値となることが分かっている。但し $\dot{Q}^*$ は $\dot{Q}^* \equiv \dot{Q} / \rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}$ で定義される無次元発熱速度である。

この理論的考察を再考して見れば、この理論自体に給気口の有無に関する制約はないため、給気口を設けた場合にも同様の関係が成立するであろうと予想できる。そこで、給気口がない場合と同一の手法により火災プルームの温度予測式を求めてみた。

4.1 火災プルームの平均温度予測式

図6の $k=0.25$ で定義した火災プルームの範囲の平均温度上昇を式(1)で定義される無次元温度 Θ を用いて無次元化し、 H/D に対してプロットしたものを図7に示す。なお図中の実線および破線は、それぞれ式(2)の β の値に理論値および実験値を用いた場合の回帰曲線である。式(2)の α および β の実験値および理論値は表1にまとめている。但し、 α は理論からは求められないので、表1の理論値欄の α は、 β に理論値を用いた場合実験データを最も良く近似する係数値の意味である。表1より実験値 β の値は理論値と少し差があるものの概ね近似した値であることが分かる。 α の値が大きいくことから、浅い領域で給気口面積の増大に伴って温度上昇が高いことが知られる。図7から発熱速度毎に差のあった実験データが無次元表示では互いに近接していることから Θ が良い相似則を与えていると言える。また予測式と実験式の一一致は概ね良好と言える。

また適用範囲の比較より全体的には、給気口面積の増大とともに、浅い領域、中間領域が広がる傾向にある。但し、給気口面積 0.03m^2 と 0.0672m^2 のケースではあまり差がない。これは、頂部開口に対する底部給気口面積が $1/20$ 、 $1/10$ と微小であるために大きな変化を生じなかったものと思われる。

表1 実験結果と理論の比較 ($k=0.25$)

給気口 面積[m ²]	適用範囲	実験値		理論値	
		α	β	α^{*}	β
0.00	$H/D \leq 0.78$	1.74	-1.55	1.86	-5/3
	$0.78 < H/D \leq 1.77$	2.09	-0.90	2.19	-1
	$1.77 < H/D$	1.48	-0.28	1.48	-1/3
0.03	$H/D \leq 1.09$	2.07	-1.53	2.23	-5/3
	$1.09 < H/D \leq 1.56$	1.93	-0.81	2.09	-1
	$1.56 < H/D$	1.51	-0.26	1.56	-1/3
0.0672	$H/D \leq 1.25$	2.23	-1.56	2.33	-5/3
	$1.25 < H/D \leq 1.56$	1.91	-0.86	2.01	-1
	$1.56 < H/D$	1.45	-0.26	1.49	-1/3
0.1632	$H/D \leq 1.56$	2.60	-1.45	3.08	-5/3
	$1.56 < H/D \leq 2.50$	2.07	-0.93	2.29	-1
	$2.50 < H/D$	1.16	-0.30	1.24	-1/3

*) β に理論値を用いた場合実験データと良く一致する値

図7 プルームの無次元温度 ($k=0.25$)

4.2 火災プルームの最高温度予測式

ボイド空間を有する建築物の火災安全対策等、実務的な応用の場面においては、火災プルームの平均温度と同時に、最高温度の情報が有用になる場合も生じうると考えられる。但し、ここで言う火災プルームの最高温度とは、測定された温度の最高値の90%以上の温度上昇がある範囲 ($k=0.9$) での平均温度のことである。また予測式の適用範囲については $k=0.25$ で定義した平均温度の予測式と同様のものを用いた。これは既報^{1,2)}同様、3つの領域の境界は厳密には特定しがたいが、範囲を少々変えても予測式の精度はそれ程目立って変化しないこと、および予測式を使用する便宜上同じ範囲である方が便利であることを考慮したものである。表2に、最高温度の予測式の係数 α および β を提案しておく。

表2 実験結果と理論の比較 ($k=0.9$)

給気口面積[m ²]	適用範囲	実験値		理論値	
		α	β	$\alpha^{*})$	β
0.00	$H/D \leq 0.78$	2.63	-1.68	3.09	-5/3
	$0.78 < H/D \leq 1.77$	3.47	-0.89	3.72	-1
	$1.77 < H/D$	2.51	-0.35	2.63	-1/3
0.03	$H/D \leq 1.09$	3.24	-1.45	3.50	-5/3
	$1.09 < H/D \leq 1.56$	3.04	-0.80	3.29	-1
	$1.56 < H/D$	2.39	-0.26	2.44	-1/3
0.0672	$H/D \leq 1.25$	3.69	-1.38	3.96	-5/3
	$1.25 < H/D \leq 1.56$	3.24	-0.80	3.41	-1
	$1.56 < H/D$	2.68	-0.38	2.54	-1/3
0.1632	$H/D \leq 1.56$	4.30	-1.47	4.96	-5/3
	$1.56 < H/D \leq 2.50$	3.41	-0.95	3.69	-1
	$2.50 < H/D$	2.04	-0.39	2.00	-1/3

*) β に理論値を用いた場合実験データと良く一致する値

4.3 深いボイド空間における予測式の係数 α と給気口面積の関係

ボイド空間における煙の危険は空間が深い場合に著しいと考えられる。すなわち、 H/D が小さい場合、プルームの広がり小さく、煙の部分はボイド空間の一部に限定され、避難路等が全体的に汚染されてしまう可能性は低い。しかし、 H/D が大きくなると、空間が全体的に煙の影響下に入ってしまうと考えられる。 H/D が大きいときの温度上昇は、表1の α の値から明らかなように給気口面積の増大に伴い、減少する傾向を示す。

そこでボイド頂部の開口面積 D^2 に対する底部給気口面積 A_{bottom} の比を給気口率 γ 、すなわち

$$\gamma \equiv A_{bottom} / D^2 \quad (3)$$

とし、 γ と α の関係を調べてみることにする。

H/D の大きいボイド空間の上方部分の温度が給気口面積の増加とともに低下するのは、火災プルームに連行される総空気量に占める、給気口から流入する新鮮空気の割合が増加するためと思われる。

一般には火災プルームに連行される空気は底部給気口と頂部開口の両方から供給され、一方が増加すれば他方が減少するという関係にあると考えられるが、たとえ $A_{bottom} = 0$ であっても、頂部から外気が流入し、火災プルームを希釈すると考えられるで、図8では単純に γ ではなく

$$\frac{A_{bottom} + D^2}{D^2} = \gamma + 1 \quad (4)$$

と α との関係を両対数軸にプロットした。なお、図中 $\gamma=0$ のときの値は既報^{1),2)}の実験結果に基づくものである。

図8によれば、 $\gamma+1$ と α との間には

$$\alpha = 1.67(\gamma + 1)^{-4/3} \quad (5)$$

の実験的關係が見出される。但し、 $\gamma=0$ に対する値は実験誤差によるものとして無視した。この点については今後更に検討する必要がある。

この関係から、空間が深い領域における温度上昇の予測式は給気口率 γ を用いて、

$$\Theta = 1.67(\gamma + 1)^{-4/3} (H/D)^{-1/3} \quad (6)$$

と提案される。この式は給気口面積（または給気口率）の増大が温度上昇に与える影響を加味したもので深い領域に対する予測式の一般化と言える。但し、 γ のどの範囲までが適用可能かは明らかではないので、一応今回の実験範囲である $0 < \gamma < 0.25$ に限定しておく。

図8 無次元温度の予測式における α と給気口率の関係

5. 空間内外圧力差

ボイド空間内と外気との間に発達する圧力差は、実際の建築物でボイド空間に接する居住部の煙からの保護の問題に関係する。

深さ3mのボイドの圧力差分布を示した図4によれば、頂部開口の高さでは圧力差は殆ど0であるが、底部の圧力差は条件により差がある。この圧力差を支配する量は明白ではないが、中間高さ付近までは頂部からの距離に比例して増大していることから、少なくとも深い空間では、底部での圧力差は概ね

$$\Delta P_{bottom} \propto \Delta \rho g H \quad (7)$$

と考えて良いであろう。この両辺を $\rho_{\infty} g H$ で除して無次元化すると

$$\frac{\Delta P_{bottom}}{\rho_{\infty} g H} \propto \frac{\Delta \rho}{\rho_{\infty}} \approx \frac{\Delta T}{T_{\infty}} \quad (8)$$

温度予測について既に見たように深い領域では

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} \propto \dot{Q}^{2/3} \left(\frac{H}{D} \right)^{-1/3} \quad (9)$$

なので、これからは式(8)の左辺の値も $(H/D)^{-1/3}$ に比例することになる。

しかし、実際には、深いボイド空間でも領域下方は空間全体が火災プルームで占められるわけではなく、火災プルームの温度が空間の温度を代表しなくなるため、この予測は適切とは言えない。そこで上記の考察を参考に無次元圧力 π を

$$\pi \equiv (\Delta P_{bottom} / \rho_{\infty} g H) / \dot{Q}^{2/3} \quad (10)$$

と定義して、ボイド深さとの関係を調べてみる。

図9は空間の最下部での圧力差の実験データを式(10)を用いて無次元化し、 H/D に対してプロットしたものである。この図によれば2.03.0および4.0kWの火源では、各深さのボイドの底部圧力が1つの線に収斂しており、 π が圧力差の相似パラメータとして適切であることが示されている。0.5および1.0kWの一致は満足ではないが、これは気流が弱いことから圧力の測定に誤差が出易いためと考えられる。

図9によれば、ボイド空間が深いときには π は $(H/D)^{-1/3}$ に比例するというよりは殆ど一定と考えて良いように思われる。また中間的深さでは H/D に比例するよう見える。ただし、深さが小さいときには一貫して傾向は見出せない。

そこで、空間が深いときの無次元圧力 π を火源が2.0, 3.0および4.0kWについて、温度上昇の場合と同様に給気口率の関数としてプロットすると、図10に示すように $\gamma+1$ の-10/3乗に比例しており、帰納式として、

$$\pi = 2.3(\gamma+1)^{-10/3} \quad (11)$$

の関係をj得る。ただし図10で $\gamma=0$ のときの値は既報^{10,2)}からのデータである。

深い空間と中間的な空間の境界は $H/D=2.5$ の付近であるから、ここでは式(11)の適用範囲を $H/D \geq 2.5$ とする。すると中間的な深さでは π は H/D に比例して $H/D=2.5$ まで増加するのであるから

$$\pi = 0.92(\gamma+1)^{-10/3} (H/D) \quad (12)$$

となる。図11は式(11)、(12)と実験値を比較している。 H/D の小

い部分で式(12)の線から外れるデータが幾つかあるが、その殆どは給気口がないケースのデータである。これを除けば式(12)は $H/D < 2.5$ の領域の無次元圧力をよく説明していると考えられる。なお、この式(11)、(12)の給気口率に関する適用範囲は、やはり実験で確認されている $0 < \gamma < 0.25$ としておくのが安全であろう。

6. 底部給気口からの流入空気量

ここで、底部給気口を介して流入する空気量 m_{bottom} は

$$m_{bottom} = \alpha' A_{bottom} \sqrt{2\rho_{\infty} \Delta P_{bottom}} \quad (13)$$

として算出されるが、これに式(10)を用いると、

$$m_{bottom} = \alpha' \rho_{\infty} A_{bottom} \sqrt{2gH\pi \dot{Q}^{*1/3}} \quad (14)$$

となる。

今、無次元流量 μ を

$$\mu \equiv (m_{bottom} / \rho_{\infty} \sqrt{gD^5}) / \dot{Q}^{*1/3} \quad (15)$$

と定義し、式(14)に代入すると

$$\mu = \alpha' \sqrt{2\pi}^{1/2} (H/D)^{1/2} \quad (16)$$

を得る。これに式(11)および式(12)を用い、 $\alpha'=0.7$ とすると

$$\mu = \begin{cases} 0.95 \frac{\gamma}{(\gamma+1)^{5/3}} \left(\frac{H}{D} \right) & (H/D < 2.5) \\ 1.50 \frac{\gamma}{(\gamma+1)^{5/3}} \left(\frac{H}{D} \right)^{1/2} & (2.5 \leq H/D) \end{cases} \quad (17)$$

を得る。

図12は式(13)により算出した底部給気口からの流量を式(15)を用いて無次元化した結果と、式(17)の予測式を H/D の関数として同一グラフ上にプロットしたものである。図12の流入空気量の実験値も圧力差の測定値を用いて算出したものであるから、式(16)との比較

も本質的に図11の比較の別の表現に過ぎないが、給気量の予測が目的であるから、給気口がない場合のデータは除いてある。式(17)は流入空気量を直接求めたときに便利であると言える。

図12 無次元流量とその予測式

7. 結論および今後の課題

空間基底部に給気口を有するボイド空間における煙流動性状について、火源が中央部にある場合の模型実験を行い、給気口が及ぼす影響を調べた。

空間基底部に給気口を有するボイド空間では、空間が浅いとき、その面積の増大に伴って火災プルームの広がり小さくなる。また火災プルームの軸の位置はより安定し、火源直上から殆ど変動しなくなる。また、浅い領域および中間領域の範囲が広がり、かつ温度上昇も大きくなる。しかしその反面、深い領域では温度上昇は小さくなる。

火災プルームの空間頂部における温度上昇については給気口がない場合と同様、式(1)で定義される無次元温度 Θ により良好な相似が得られる。火災安全上問題とされる深い領域での温度に対する給気口面積の影響に関する一般式と、給気口率を用いた実験式(6)が得られた。

底部給気口の空間内の圧力差および流入空気量に対する影響はそれぞれ式(11)、(12)および式(16)の実験的關係により一般化できることが見出された。

実際の建築物に存在するボイド空間の多様性を考慮すると、煙流動性状解明のための今後の研究課題としてはさらに次のようなものが残されていると考えられる。

- 頂部に限定されない空間内部における煙性状の解明
- 煙温度、空間圧力および流入空気量の式の実大実験による検証

記号

A	火災プルームの水平断面積 (m^2)
A_{bottom}	底部給気口面積 (m^2)
C_p	気体の定圧比熱 (kJ/kgK)
D	ボイド空間の辺長 (m)
g	重力加速度 (m/s^2)
H	ボイド空間の深さ (m)
m_{bottom}	底部給気口からの流入空気量 (kg/s)
ΔP	空間内外圧力差 (Pa)
ΔP_{bottom}	空間底部での空間内外圧力差 (Pa)
$\dot{Q}$	火源の発熱速度 (kW)
$\dot{Q}^*$	無次元発熱速度
T_∞	周囲温度 (K)
ΔT	温度上昇 (K)
$\overline{\Delta T}$	平均温度上昇 (K)
α	式(2)の定数
α'	給気口の流量係数 (≈ 0.7)
β	式(2)の定数
γ	給気口率
μ	式(15)で定義される無次元流量
π	式(10)で定義される無次元圧力
ρ_∞	周囲気体密度 (kg/m^3)
$\Delta \rho$	空間内外密度差 ($= \rho_\infty - \rho$)
Θ	式(1)で定義される無次元温度

参考文献

- 田中哮義、熊井直、福田晃久、吉澤昭彦、石野修、若松孝旺：ボイド空間における煙流動性状、その1火源がボイド空間の床中央にある場合、日本建築学会計画系論文集 No.469
- 福田晃久、吉澤昭彦、熊井直、石野修、田中哮義、若松孝旺：ボイド空間における煙流動性状、その2火源がボイド空間の壁際または隅角部にある場合、日本建築学会計画系論文集 No.478

(1996年2月26日原稿受理、1996年9月6日採用決定)