高層ボイド型建築空間での実物大模擬火災実験

大規模空間を有する建築物の煙流動性状に関する研究 (その1)

FULL SCALE EXPERIMENT IN A HIGH-RISE BUILDING WITH A VOID SPACE

Study on the heat and smoke behavior in buildings with large space Part 1

永井久也*, 正木 誉子**, 清水芳樹***, 湯谷孝夫****, 油野健志*****

*Hisaya NAGAI, Takako MASAKI, Yoshiki SHIMIZU,
Takao YUTANI and Kenji ABURANO*

This paper presents measurements of the full-scale field experiment in a high-rise building with a large void space to investigate heat and smoke behavior in fire stage. The large cavity space is 68.2m high and has a 174 m² floor. The major results are as follows.

- (1) The smaller the area of bottom opening is, the higher is temperature and concentration of smoke in the space.
- (2) The turbulence of fire plume in the space without the bottom opening is stronger than that with it.
- (3) The larger the area of bottom opening is, the larger is the air inflow rate from it into the space. However, the relationship between them is not linear

Keywords: full scale field experiment, heat and smoke behavior, void space, air inflow rate

実物大模擬火災実験, 熱・煙性状, ボイド空間, 流入空気量

1. はじめに

近年, 我国においてもアトリウム, ドーム等の大規模な空間を有する建築物が増加する傾向にある。この様な空間は, 開放的で意匠上の自由度が大きく, 魅力ある空間であると言える。しかしその一方で, 大規模空間の設計を行う際には, 種々の面からその安全性を保証しなければならず, その重要検討課題の一つとして火災時の安全性の検討が挙げられる。

建築物の火災安全性を考える場合に, 火災時の煙流動性状を把握することは, その建築空間を利用する利用者の避難安全を保証するために必要不可欠であり, また, このため建築設計時には, 十分な精度で火災物理性状を予測し, 建築計画に反映することが必要となる。

火災時の熱及び煙性状を予測する手法としては, 実験による方法と種々の数学モデルを用いて数値計算によって予測する手法に大別される。

実験によって火災時の物理性状を把握する手法は, その条件下での性状把握には有効であるが, 建築計画毎に実大実験を行うことは不可能である。そこで, 縮尺模型を用いた模型実験は有効な手段となる。しかし, その物理性状を記述する理論基礎方程式から導出される厳密な相似則を用いて実験を行うことは現実的には不可能であ

り, 種々の実行可能な相似則が提案され, これを用いた検討なされている。

一方, 数学モデルによる予測法は, ゾーンモデルとフィールドモデルの2つに大別される。ゾーンモデル²⁾はその建築空間の各物理量の平均値しか得られないので, 内部の温度・流れ場についての詳細な情報を得ることが出来ないが, 実際上の多くの火災対策上は, 大略の平均値が判れば十分なことも多く, また計算時間等の面においても実用性に優れており, 一般居室等の密閉型建築空間内の火災性状予測に広く用いられている。しかしながら, 本モデルは開口部の大きなアトリウムや開閉式ドーム, ボイド型建築といった半外部空間を有する建物では, 建物周辺の外気風等の影響が大きく, また密閉空間でも換気量が大きい場合には, その適用には限界がある³⁾。

そこで, 建物外部空間の影響等も考慮できるフィールドモデルの開発が今日の重要なテーマとなっている。フィールドモデルは, 解くべき基礎方程式が他の分野の流体解析とほぼ同様であるので, 火災時の煙流動解析も他の流体数値解析の発展と共に発展している。しかし, 火災現象では, 燃焼に伴うかなり大きな密度変化による高温浮力流れが全体の流れ場に与える影響が大きく, 例えば, 通常の室内温熱環境予測等に用いられる非圧縮粘性流体象としたモデルを火災ブルーム性状, 空間内温度分布等その詳細な現象予測に適用す

* 名古屋大学工学研究科地圏環境工学専攻
助手・博士(工学)

** 名古屋大学工学研究科地圏環境工学専攻 大学院生

*** ㈱鴻池組大阪本店設計部

**** ㈱鴻池組本社技術研究所 工修

Research Assoc., Dept. of Geotech. and Environ. Eng., School of Eng.,
Nagoya Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Geotech. and Environ. Eng., School of Eng.,
Nagoya Univ.

Building Design Div., Osaka Head Office, Konoike Construction Co., Ltd.
Technical Research Institute, Konoike Construction Co., Ltd., M. Eng.

るのは困難であり⁹⁾、これらを考慮したモデルの検討が多く行われている¹⁰⁻¹²⁾。しかしながら、これら種々のモデルの適用可能性を検証するための実大規模での実験例は非常に少ない。

そこで本研究では、高さ 68.2m (軒下高さ 67.2m)、面積 174 m² のポイド空間を有する実建物で模擬火災実験を実施し、ポイド空間を有する建築物の火災時熱・煙性状の測定を行い、これら得られた実測データを種々提案されている数値モデルによって数値解析を行いその妥当性および実用性の検討を目的としている。本報では、実大規模火災実験の実測結果を示し、ポイド空間を有する建築物の火災時の熱・煙性状についての報告を行う。

2. 建物概要

実験を行った建物は、地上 26 階、地下 3 階の複合用途建築物で、地上 4 階以下が商業施設及び駐車場、地上 5 階から 26 階までが集合住宅となっており、この部分に平面積約 174 m² のポイド空間を有している。また、その空間基底部である 5 階西側に面積 25.65 m² の開口部がある。実験はこの空間を対象に行った。本建築物の概要を表 1、図 1(a)、(b)に示す。

3. 実験概要

模擬火災実験は、ポイド空間基底部 (5 階床面) 中央地点及び高さ 3m 地点 (6 階床面高さに相当) の 2 箇所を火源位置としアルコールパンにてメタノールを燃焼させると同時に、パン周辺で発煙筒をたき、さらにトレーサーガス (SF₆) を定量的に放出させた。実験ケースは、ポイド基底階 5 階部にある開口部の開口率 (ポイド面積に対する基底部開口面積の割合: $\gamma = A_{\text{bottom}}/WD$) 及び火源高さをパラメータとして、表 2 に示す 6 ケースについて実施した。

想定火源は、スチール製アルコールパン (W980mm×D1990mm×H65mm×2 枚、総面積 3.9004 m²) にメタノール 108 l を投入し、燃焼させた。この投入量は、パンがメタノールの燃焼による熱応力を受け、底板が変形する恐れがあること及びその面の凹凸 (6mm 程度) があることから燃焼面積が着火から 10 分間ほぼ一定 (1.5MW 程度) となるよう、メタノール必要深さから決定した。

4. 計測項目及び計測方法

実験はいずれのケースもメタノールが完全に燃焼しきるまで行ったが、以下の各計測項目の測定時間は実験開始 (着火時) の 10 分前から着火後 10 分後までの 20 分間とした。

4.1 温度

ポイド空間内の空気温度分布及びその経時変化を把握するため、ポイド中央部(A)、東側(B)、南側(C)、西側 (下部開口側) (D)、北側(E)地点の水平面 5 ヵ所 (図 2) において、図 3 に示す高さ地点及び基底部開口部の温度計測を 2 秒間隔で 5 台のデータロガーを用いて測定した。さらに、火災から周辺躯体への放射熱量の推定を行うため、その影響が比較的大きいと考えられる 5 階から 8 階までの壁面温度 (各階壁面中央部) の測定も行った。なお、火源高さ 10m 以下の空気温度測定には K 熱電対 (0.6φ)、その他については、T 熱電対 (0.3φ) を用いた。また、火源位置から高さ 20m 以下の地点の熱電対には、火災からの放射による影響を低減するため、アルミ箔放射遮蔽板を取り付けた。

表 1 建築概要

階数	地上 26 階、地下 3 階、棟屋 1 階
軒高	88.3m
建築面積	4,863.4 m ²
延床面積	55,261.4 m ²
主要用途	商業施設、住宅
場所	名古屋市千種区
ポイド寸法	13.2m(W)×D13.2m(D)×68.2m(H)
H/D	68.2/13.2=5.17
下部開口(5F)	25.65 m ² (A _{bottom})

(a) 基準階平面図

(b) 断面図

図 1 建物概要

表 2 実験ケース

実験 番号	実 験 日 時	実験パラメータ 開口率 火源位置	火源 規模
CASE1	H9.6.12 10:30	14.7% 5F+3m	1.5MW
CASE2	H9.6.12 13:30	7.4% 5F+3m	1.5MW
CASE3	H9.6.12 15:30	0% 5F+3m	1.5MW
CASE4	H9.6.13 10:30	14.7% 5F	1.5MW
CASE5	H9.6.13 13:30	7.4% 5F	1.5MW
CASE6	H9.6.13 15:30	0% 5F	1.5MW

4.2 ガス濃度

煙の拡散・希釈状況を把握するため、トレーサーガス (SF_6) を火源中央部高さ 4m の位置から、10ℓ/min で放出し、火源中央部地点高さ 10~50m の 10m 毎の地点において空気採取し、ガス濃度の測定をガスクロマトグラフにより行った。採取間隔は 30 秒間とした。

4.3 煙性状

煙の可視化を行うため、発煙時間 5 分用の発煙筒 3 本 (合計 6 本) を使用し、5, 14, 20, 26 階において目視による煙性状の観察を行った。また、煙上昇速度を把握するために、光電分離型煙濃度計 (第 1 種消防型煙感知器) をボイド中央部高さ 10~60m に 10m 毎に設置した。

4.4 風速

火災時の高温浮力流れ及びボイド内気流分布を把握するため、ボイド空間内及び基底部開口部 (図 4) での風速の測定を行った。また、実験時の外気風状況を確認するため、屋上に外気風向・風速の測定も行った。風速測定機器は、主に熱線風速計 (無指向型) を用いたが、基底部開口部中央地点 1 ヲ所は超音波風速計により 3 次元方向の測定も行った。いずれも測定時間間隔は 1.0 秒とした。

4.5 燃焼速度

実験データの理論数値解析を行う上で、極めて重要な境界条件である火源燃焼発熱速度を把握するため、圧力変換器によりメタノールの体積減少量測定および温度計測を行った。

5. 実験結果と考察

実験日当日は、非常に穏やかな天候であり、建物屋上 (地上 90m 地点) で計測した風速は何れの実験中も平均で 2.0~3.0m/s と無風状態に近い状況であった。

5.1 ボイド内温度性状

CASE1~6 の火源からの高さ 20m 地点における上昇温度の経時変化を図 5 に、高さ 40m 地点における上昇温度経時変化を図 6 に示す。図に示すように、開口率 14.7% の CASE1, 4 では基底部開口正面の東側(B)での温度が他の位置よりもかなり高い温度となっており、基底部開口からの流入空気により、火炎が東側へ倒され、ブルームが東側へずれているのが判る。一方、開口率 7.4%, 0% の CASE2, 3, 5, 6 は中央部(A)が最も温度上昇が大きく、ブルームのずれは小さくなっている。また、上昇温度については、開口率 14.7%(CASE1, 4), 7.4%(CASE2, 5), 0%(CASE3, 6)の順に大きくなっており、開口率が小さくなるほど高い。また、CASE1, 2, 4, 5 の開口が有るケースでは、実験開始後 300 秒程度経過後は、まだ若干上昇傾向にあるがほぼ安定した状態となったが、開口の無

図 2 熱電対配置平面図

図 3 熱電対配置断面図

図 4 風速計設置位置図

図5 高さ 20m 地点の空気温度

図6 高さ 40m 地点の空気温度

い CASE3, 6 では、何れの高さ地点も 600 秒経過時でもまだかなり温度が上昇する傾向が見られた。

図 7 に、比較的その変動が安定した実験開始後 300 秒から 600 秒までの各 CASE10m 高さ地点の全 5 地点平均温度上昇および最高・最低温度上昇を示す。図に示すように、ポイド上層部を除いて開口率が小さいほど、上昇温度は高く、さらに火炎付近（ポイド低部）では水平方向温度差も大きい傾向が見られた。開口が無い場合のポイド上層部温度上昇が小さくなるのは、ポイド頂部から外気が流入するためである。

5.2 ガス温度性状

図 8 に各 CASE の SF₆ 濃度の経時変化を示す。図に示すように、濃度についても、温度と同様に、開口率が小さいほど高い値となっている。また、CASE2, 3, 5, 6 では低い地点ほど濃度が高くなっているのに対して、開口率 14.7% の CASE1, 4 では実験開始 200 秒程度経過後はどの高さ地点もほぼ一定の値となっている。これは、濃度計測地点が火源中央直上地点であり、火炎プルームのずれが起因しているものと考えられる。

5.3 ポイド内気流性状

図 9 に各 CASE 実験開始 300 秒から 600 秒の平均風速分布を示す。図に示すように、開口率 14.7% の CASE1, 4 では全ての地点でその傾向および値がほぼ一致している。一方、開口率 7.4%(CASE2, 5), 0%(CASE3, 6)では低い地点での値がかなり異なっており、先に述べた温度性状と併せて考えれば、開口率が低くなるほど、火源付近でのプルームの乱れが大きくなる傾向にあると言える。

5.4 基底部開口流入風速

図 10, 11 に開口率 14.7% 時の CASE1, 4 の開口部流入風速の経時変化を示す。なお、ここで示す値は 30 秒毎の移動平均値である。両図に示すように、CASE1 では実験開始前でも開口部の風速は平均で 1m/s 以上と比較的大きな風速が計測されたが、両 CASE とも実験開始後 100 秒間程度は何れの計測値もほぼ直線的に加速し、それ以降は、乱れは強いがほぼ定常的な状態となった。また、実験開始後 300 秒から 600 秒後の両 CASE の開口部北側、中央部地点の平均風速 (CASE4 では、開口南側地点のデータが欠測して

図7 10m高さ地点毎の平均・最高・最低温度

図9 10m高さ地点毎の平均風速

図8 SF6濃度経時変化

図10 基底部開口流入風速 (CASE1)

図11 基底部開口流入風速 (CASE4)

図12 5階壁面温度

いるため)はそれぞれ 3.16, 3.12m/s とほぼ等しく, 両 CASE 間での外気風の影響による差は比較的小さいものと考えられる。

5.5 火源燃焼発熱速度

圧力変換器により, 燃焼時のメタノール体積減少量の測定を行ったが, 配管への空気混入および熱応力によるアルコールパンの歪等により十分な精度での燃焼速度測定は行えなかった。しかし, CASE1~6 全ての実験において, アルコールパン内のメタノール 108 l は約 20 分で全て燃焼した。したがって, 本実験における平均燃焼発熱速度は 1.335MW (メタノール燃焼熱=19.83kJ/kg, 密度=748kg/m³) と推定された。

6. 底部開口部からの流入空気量

上記実験結果からボイド底部開口面積は, 火災時のボイド空間内熱・煙性状に大きく影響することが明らかとなった。そこでここでは, 実験実測値からボイド内流入空気量, すなわち, ボイド空間火災時の換気量^{①)}の推定を行った。また, 田中らによって提案されている模型実験から得られた火災時ボイド内無次元圧力予測式^{②)}~^{③)}(表3)によって得られる流入空気量との比較も併せて行った。

6.1 実測データからの推定

本実験実測データによる底部開口からの流入空気量の推定は①底部開口部 3 地点での風速から算出する方法, ②レーザース濃度から算出する方法の 2 通りによって行ったが, ②により推定された値は, 濃度計測地点がボイド空間中央部の 5 高さ地点のみであること, さらに, 開口部を有する場合には, 火災ブルームが東側にずれることと等により, 実測 3 地点の最大風速と開口部断面積の積から得られる流量の 2 倍以上の値となったため, ここでは②による推定値は破棄し, ①により算出した値を推定値とした。

表4に開口率 14.7%時 (CASE1) と開口率 7.4%時 (CASE2) の実測風速より算出した流入空気量を示す。なお, これらの推定値は, 実測風速の変動が比較的小さくなった実験開始後 300 秒から 600 秒後までの平均値である。また, この値は実測 3 地点の値をその付近の代表値 (平均値) として, 単純にその断面積を掛けた値である。

表4に示すように, 実測風速による推定値は, 開口率 14.7%時で 76.7m³/s, 開口率が半分の 7.4%時で 65.0m³/s となり, 発熱量が等しい場合でも開口面積と流入空気量の関係は線形ではなかった (CASE1 流量/CASE2 流量=1.2)。なお, この時の流入空気量を換気回数に換算すれば 14.7%時が約 14 回/h, 7.4%時が約 12 回/h となる。

6.2 田中らの圧力予測式による推定

予測式による計算を行うにあたって, 実測データにより火源から周辺への放射熱量の推定を行った。図12にCASE6 (開口率 0%, 火源位置 5F) の 5F 南側ボイド内壁中央部表面温度上昇とここから水平方向 1.0m 地点の空気温度上昇の経時変化を示す。また, 図中には, この近傍空気温度 (対流熱伝達率=6.16W/m²K) と放射量 q を境界条件として与えた場合の壁体一次元単純熱伝導計算による壁体表面温度計算値も示した^{④)}。図に示すように, 実験開始 300 秒の壁面温度上昇は 4℃程度であり, この時の火災からの放射量 q は 380W/m² と推定された。また, 同様の計算を火源付近の 6F から 8F までの各面に対しても行い, 得られた q を各階の平均放射熱量

表3 田中らの予測式

開口部流入量予測式 (ボイド底部圧力式)

$$\pi = (\Delta P_{bottom} / \rho_{\infty} g H) / Q^{*2/3}$$

で定義される無次元圧力を用いれば,

$$\pi = 2.3(\gamma + 1)^{-10/3} \quad (H/D \geq 2.5, 0 < \gamma < 0.25)$$

ここで,

$$Q^* \equiv Q / \rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}$$

$$m_{bottom} = \alpha' \rho_{\infty} A_{bottom} \sqrt{2 g H \pi} Q^{*1/3}$$

表4 底部開口部からの流入空気量

開口率	実測値	予測値(Q1)	予測値(Q2)
CASE1(14.7%)	76.7	99.2	92.8
CASE2(7.4%)	64.5	55.4	51.8

(単位: m³/s)

として全放射熱量を算出した結果, 0.24MW となった。この値は全燃焼発熱量の 18%の値であり, メタノール燃焼時に指向性なく一様に放射される場合の放射熱量比 0.17~0.20 の範囲内の値であった^{⑤)}。したがって, ここでは, 火源熱量として, 実験時メタノール燃焼発熱速度 1.335×10⁶W(=Q1)と放射成分推定値 18%を減じた 1.095×10⁶W(=Q2)の 2 つの熱量により流量算定を行った (表4)。

田中らの予測式による予測値^{⑥)}はオーダー的には実測値による推定値と近い値となったが, CASE 間での流量比 (CASE1 流量/CASE2 流量=1.8) では異なる値となった。

底部開口部からの流入空気量は, ボイド空間火災時の内部性状予測を行う際には, 極めて重要な境界条件となる。しかしながら, ここで推定を行った開口部流量は, 実測点の数, 開口部の形状による抵抗等を考慮するとその絶対量の精度については, 十分ではないものと考ええる。これらの精度およびその予測法については, さらに検討を行う必要があるものと考ええる。

7. 結論と今後の課題

高さ 68.2m, 面積 174 m²のボイド空間を有する実建築物で, その底部開口率を変化させて模擬火災実験を行い, その煙および熱性状の測定を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ボイド空間底部に設置した約 4.0 m²のアルコールパン内のメタノール燃焼発熱速度は, ボイド底部の開口率によらずほぼ一定で約 1.335MW (0.334MW/m²) であった。
- 2) ボイド空間内の温度および煙濃度上昇は, 開口率が大きいほど小さくなった。また, 底部に開口が無い場合は, 開口部を有する場合に比して, 内部温度性状が定常に達するまでの時間が長くなる。
- 3) ボイド底部開口面積が大きいほど, そのブルームは安定し, 開口が無い場合には, 火源付近での乱れが大きくなる。
- 4) ボイド底部開口率 14.7%の場合の流入空気量は, 開口率 7.4%

の場合の 1.2 倍程度で、開口面積と流入空気量の関係は線形ではない。

- 5) 今後は、種々のモデルを用いて得られた実測結果の解析を行い、それらの適用可能性の検討を行いたいと考えている。また、これと並行して、本報で得られた結果を基に、ボイド内の大略の火災時熱性状を簡易に予測する手法の検討も行いたいと考える。

《記号》

A_{bottom} : ボイド底部開口面積 (m^2), C_p : 空気 の 定 圧 比 熱 (J/kgK),
 $D(=W)$: ボイド空間の辺長 (m), g : 重力加速度 (m/s^2), H : ボイド空間の高さ (m), m_{bottom} : 底部開口からの流入空気量 (kg/s),
 P : 圧力 (Pa), Q : 火源発熱速度 (W), Q^* : 式(3)で定義される無次元発熱速度, T_{∞} : 周囲空気温度 (K), α' : 給気口の流量係数 ($=0.7$),
 γ : 開口率, π : 式(1)で定義される無次元圧力, ρ_{∞} : 周囲空気密度 (kg/m^3)

《注》

注1) 文献 12)によれば、その発熱速度の大きさによらず、開口率 10% 程度以上の場合には、ボイド頂部面でのプルーム占有面積率はほぼ 100%となっている。したがって、ボイド基底部に開口を有している場合には、ボイド基底部開口からの流入空気量が判れば、ボイド空間内の換気量が推定できるものと考えられる。

注2) 一般的には、対流熱伝達率も壁面近傍風速の関数として与えられるため、対流熱伝達量も未知量となる。しかし、ここでは、壁近傍での風速は十分小さいものと仮定して、無風時の対流熱伝達率を用いた。

注3) CASE1, 2 は火源位置が、ボイド基底部+3m 地点であるが、ここでは、基底部にあるものとした。また、流量係数 α' については、文献 12) では $\alpha'=0.7$ と単純開口の値としており、複雑な形状を有する実建築物の開口部にこの値が適切であるかは検討を要するが、ここでは $\alpha'=0.7$ とした。

《本報に関する主な既発表論文》

- 1) 油野健志, 清水芳樹, 湯谷孝夫, 正木誉子, 永井久也 : ボイド空間における初期火災性状に関する研究, (その 1) 実大火災模擬実験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2 防火, pp.133-134, 1998.9
- 2) 清水芳樹, 油野健志, 湯谷孝夫, 正木誉子, 永井久也 : ボイド空間に初期火災性状に関する研究, (その 2) 実大火災模擬実験の実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2 防火, pp.135-136, 1998.9

《参考文献》

- 1) 辻本誠, 奥宮正哉, 長岡勉, 梶山隆史 : 大規模空間での初期火災時における煙流動に関する研究 第一報, 一部に開口のある空間での煙流動に関する模型実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 488 号, pp.153-160, 1996.10
- 2) 田中哮義 : 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, pp.149-160, pp.138-141, 1993.7
- 3) Chow, W.K. : Use of Zone Models on Simulating Compartmental Fire with Forced Ventilation, Fire and Materials, Vol.19, pp.101-108, 1995
- 4) 正木誉子, 永井久也, 湯谷孝夫, 清水芳樹, 油野健志 : ボイド空間における初期火災性状に関する研究, (その 3) 実測結果の数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2 防火, pp.137-138, 1998.9
- 5) To, W.M. and Humphrey, J.A. : Numerical simulation of buoyant, turbulent flow-I, Free convection along a heated vertical, flat plate, Int.J.Heat Mass Transfer Vol.29 No.4, pp.573-592, 1986
- 6) 加藤信介, 村上周三, 義江龍一郎 : 密度変化を伴う高温浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 第 1 報, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 449 号, pp.19-27, 1993.7
- 7) 義江龍一郎, 村上周三, 加藤信介 : 密度変化を伴う高温浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 第 2 報, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 461 号, pp.61-68, 1994.7
- 8) 村上周三, 加藤信介, 義江龍一郎 : 密度変化を伴う高温浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 第 3 報, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 472 号, pp.45-54, 1995.6
- 9) 近本智行, 村上周三, 加藤信介 : 温度成層化した室内気流の数値解析に関する研究 (その 2) 浮力ダンピング下の低 Re 数流れに対応可能な新しい $k-\epsilon$ モデル, 日本建築学会計画系論文集, 第 481 号, pp.67-74, 1996.3
- 10) 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, 第 469 号, pp.1-8, 1995.3
- 11) 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, 第 478 号, pp.1-8, 1995.12
- 12) 福田晃久, 田中哮義, 若松孝旺 : 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, 日本建築学会計画系論文集, 第 491 号, pp.9-16, 1997.1
- 13) 寺井俊夫, 新田勝通 : 燃焼面熱源より上昇する PLUME について(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, 環境工学, pp.257-258, 1978.9

(1998年12月10日原稿受理, 1999年4月23日採用決定)