

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04815

研究課題名(和文) 縦穴区画を利用した新たな煙制御手法の確立

研究課題名(英文) A Study on Smoke Exhaust Effect using Smoke Tower

研究代表者

松山 賢 (Matsuyama, Ken)

東京理科大学・理工学研究科国際火災科学専攻・教授

研究者番号：10307704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、EVシャフト等の縦穴空間を煙突と見立て、煙の浮力を利用したスモークタワーをEVシャフトに適用し、排気・給気ファンに頼らず、長時間にわたる火災に対応すべく、効率の良い排煙手法の確立を目的としている。具体には、シャフトおよび接続する火災室の縮小模型を用いてシャフト頂部からの排煙能力を定量化、さらに排煙の効率化に向け、シャフトから他階への新たな漏煙防止方法として電界による煙制御の実用可能性についても基礎的な実験的検討を行ったものである。模型を用いた実験、さらには理論的考察と明解な論述により、EVシャフトを利用した排煙効果に関する工学的に有益な知見を提示することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで排煙設備は、初期火災を主な関心の対象にしているが、建築物の超高層化による避難時間の長時間化や火災階に突入する消防隊の支援の観点から火災初期から鎮火までの長期にわたり煙を建物外へ排出する方法が求められている。本研究では、火災継続期間に対応可能なシステムであることはユニークであり、また排煙ファンのような動力に頼らない方式であるため、信頼性の高いものになると考えられる。さらに、本研究を通じて得られる知見は、新しいコンセプトに基づいた縦穴の有効利用および電界による煙流動の制御等、盛期火災時においても煙の排出効果が有効なツールとなり得る。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish an effective smoke control system to deal with a fire over a long period of time without relying on exhaust/air supply fans by applying a smoke tower that uses the buoyancy of smoke to an EV shaft.

Specifically, a reduce scaled model of the shaft and the connected fire room was used to quantify the smoke exhaust capacity from the top of the shaft, and a fundamental experimental study was conducted on the practical feasibility of smoke control using an electric field as a new method to prevent smoke leakage from the shaft to other floors in order to improve the efficiency of smoke exhaust.

As a result, the experiments using a reduce scaled model and the theoretical discussion have provided useful engineering knowledge on the smoke control effect using EV shafts.

研究分野：火災安全工学

キーワード：縦穴区画 EVシャフト 煙制御 電界

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高層建築物の火災では、避難時間及び消火活動の長時間化や火災階に突入する消防隊の支援の観点から火災初期から鎮火までの長期にわたり煙を効率的かつ継続的に建物外へ排出する方法が求められている。現在、高層建築物では機械式排煙方式が多く使用されている。一般的な吸引による機械式排煙は、初期火災においては定常的に煙を屋外に排出できるが、煙温度が高温になると排煙ファンの故障により排煙が停止する恐れがある。一方で、加圧防排煙方式は、火災が終了するまで竪穴への煙の侵入を防止することが可能であるが、発生した煙を屋外に排出するものではないことから、新しい概念による煙制御の開発が望まれる。

2. 研究の目的

このような背景から、初期火災だけでなく盛期火災においても煙の浮力による煙突効果により屋外に煙を排出することが可能なスモークタワー方式に着目した。この方式は、専用の竪穴空間を設ける必要があるため、スペース的な問題から現在では採用されることは極めて少ない。一方で、火災時に停止している乗用エレベーターシャフト (EV シャフト) 等の竪穴空間をスモークタワーとして流用することができれば、煙が高温になると停止してしまう機械排煙方式と異なり、火災終了まで継続して屋外に煙を排出することが可能となる。具体的な EV シャフト利用方法は、屋上階まで貫通した EV シャフトの頂部に、火災時に外部に開放する開口部を設けるとともに、火災と同時にシャフト内の空気の流動を妨げる乗りかごを最下階まで降ろし、火災階の扉を開放することにより、扉から煙を侵入させ頂部から排出するシステムである。さらに、シャフトから EV 扉の隙間等による途中階への新たな煙流入防止方法として“電界”に着目した煙誘導との併用により、非常に効率の良い煙制御が可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、EV シャフトを火災時の排煙設備に活用する技術的可能性の検討に資することを目的として、縮小模型を用いた竪穴空間内の煙流動に関する実験的な解明と解析を行った。さらに、電界に着目した煙誘導の可能性について実験的な検討を行った。

(1) 竪穴区画を利用した煙流動に関する模型実験

実験概要

高層建築物では、火災室と EV シャフトの間に廊下等の空間が設置されていることが一般的であるが、本研究では単純化するため、EV シャフトと火災室が直接面する場合を想定した。縮小模型は、建物高さ 40m (12 階)、EV 乗降口は一般乗用 15 人乗り両開きドアの高層建物を想定し、1/20 スケールで作製した。縮小模型の概要は図 1 に示す通りである。EV シャフトの頂部および底部にそれぞれ排気口および給気口、さらに火災室とシャフト間および火災室と屋外間にそれぞれ開閉可能な開口 (以下、屋内開口および屋外開口) を設けた。火災室の中央には火源となるガスバーナー (燃料: プロパン) を設置した。火災室はケイ酸カルシウム板 (床・側面: 厚み 5mm, 天井: 厚み 10mm) に外周をステンレス鋼板で補強した。また、シャフトは内部の観察が可能ないように、耐熱アクリル (厚み 15mm) で作製した。

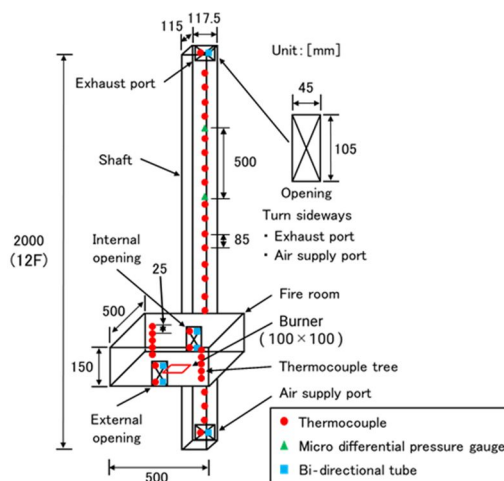


図 1 模型実験の概要

測定は、シャフト内および火災室内等の温度、さらに、排気口・給気口の各中央部および屋内・外開口の各頂部・底部における風速を計測した。

実験条件

実験は各開口の開閉条件、火災階の位置、および火源発熱速度をパラメータとした。火源の発熱速度は 0.5kW、0.74kW、1.0kW とし、着火から 15 分間測定を行った。

質量流量の算出方法

質量流量 m は、動圧 ΔP 、気体密度 ρ および開口面積 A より式(1)および(2)より算出した。

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

$$\rho T = \text{const.} (353) \quad (2)$$

屋外開口および屋内開口の流量 m_o および m_i はそれぞれ、開口の頂部及び底部に配置した二方向管の測定動圧を開口の垂直高さ方向に対し近似し、上部層及び下部層に対し、それぞれ質量流量を式(1)より算出した。なお、気体密度は上部層温度 T_s および下部層温度 T_a を用いて、式(2)より

算出した。なお、図 2 に示すように、開口条件により火災室の各開口部における流れが異なることが確認された。したがって、火災室の各開口部における流量は次のように算出した。なお、添字は屋外開口を o 、屋内開口を i とし、シャフト方向の流れを i 、屋外方向の流れを o で示す。

1) 開口全域で流れ方向が同一の場合

$$m_{o,i} = \alpha A_{o,s} \sqrt{2\rho_\infty \Delta P_{o,s}} + \alpha A_{o,a} \sqrt{2\rho_\infty \Delta P_{o,a}} \quad (3)$$

$$m_{i,i} = \alpha A_{i,s} \sqrt{2\rho_s \Delta P_{i,s}} + \alpha A_{i,a} \sqrt{2\rho_a \Delta P_{i,a}} \quad (4)$$

1) 開口全域で流れ方向が異なる場合

$$m_{o,i} = \alpha A_{o,a} \sqrt{2\rho_\infty \Delta P_{o,a}} \quad m_{o,o} = \alpha A_{o,s} \sqrt{2\rho_s \Delta P_{o,s}} \quad (5)$$

$$m_{i,i} = \alpha A_{i,s} \sqrt{2\rho_s \Delta P_{i,s}} \quad m_{i,o} = \alpha A_{i,a} \sqrt{2\rho_{sha} \Delta P_{i,a}} \quad (6)$$

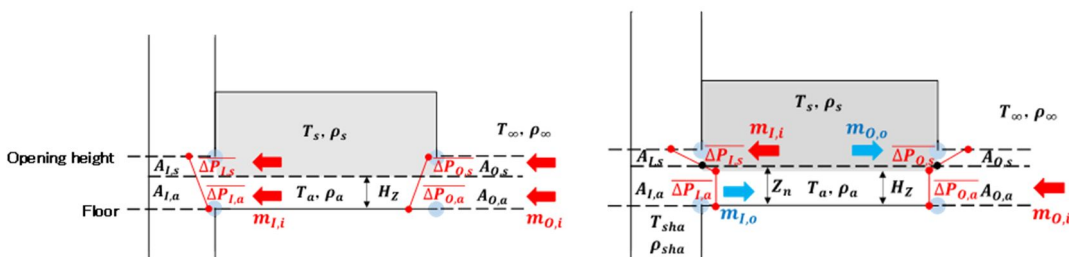


図 2 開口部における流れ

(2) 煙の耐電性能に関する実験

火災時に発生する煙は人体に有害なガスを含み、視界を遮ることから、火災による人的被害を増大させる大きな要因となる。本研究では新たな煙を制御する方法として、電場を活用した煙誘導方法について検討を行う。最初のステップとして、燃焼時に発生する煙の帯電挙動について実験を行い、分析を行う。写真 1 に示すように、非常に小さな模型を用いて、電場下での煙粒子の移動挙動について計測することで、帯電量の分布を求める。

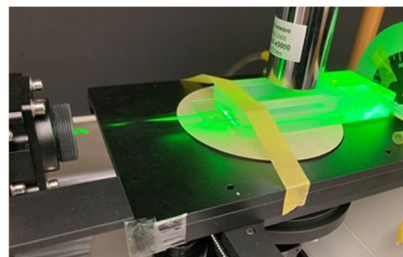


写真 1 煙の耐電性能確認実験

4. 研究成果

(1) 縦穴区画を利用した煙流動に関する模型実験の結果および解析

実験結果：給気開口閉鎖・その他の開口部を開放した場合

図 3 に代表例として火災室を 6 階とした場合における屋内開口側の温度測定結果を示す。また、図 4 に近似動圧直線および各開口の流れの概念図、および火災階毎の排気口からの排気量 m_E を示す。

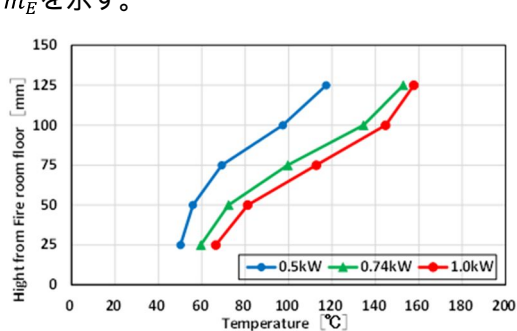


図 3 屋内開口側の温度(火災階 6 階)

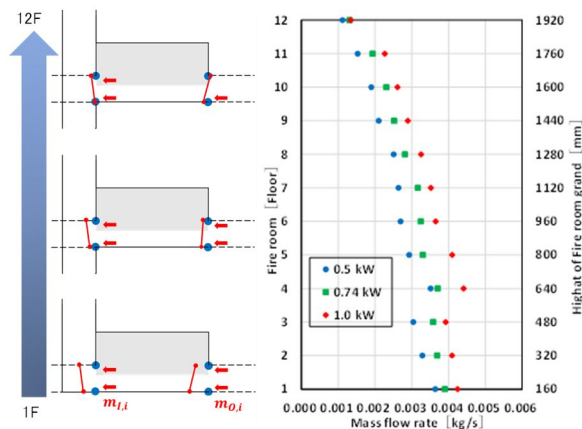


図 4 火災階別の頂部排気風量

図 3 より発熱速度が大きいほど火災室内温度が高くなること分かる。また、床面から 75mm から 100mm の間で温度差が大きくなっており、この間に上下層の境界があると推察される。図 4 より同一火災室の階において発熱速度が大きいほど排気量は多くなること分かる。また、同一発熱速度に対し、火災室の階が低いほど排気量 m_E は多くなる。この傾向は、屋外から火災室への流量 $m_{o,i}$ および火災室からシャフトへの流量 $m_{i,i}$ についても同様の傾向である。これは、火災室の階が低いほど内部開口とシャフト内の中性帯までの距離が長くなり、火災室とシャフト

内の圧力差が大きくなるためと考えられる。また、発熱速度が大きいほど火災室内部の温度上昇により火災室内とシャフト内での圧力差が大きくなるためと考えられる。

実験結果：全ての開口部を開放した場合

図5に6階における屋内開口側の温度測定結果を示す。また図6に近似動圧直線および各開口の流れの概念図、火災室の階における排気口からの排気量 m_E を示す。

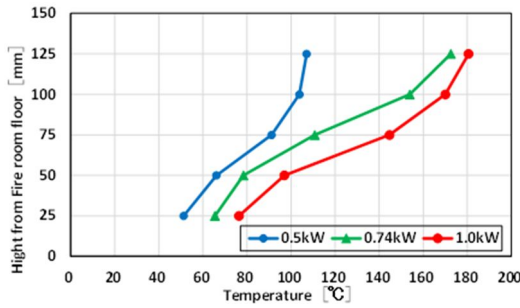


図5 屋内開口側の温度(火災階6階)

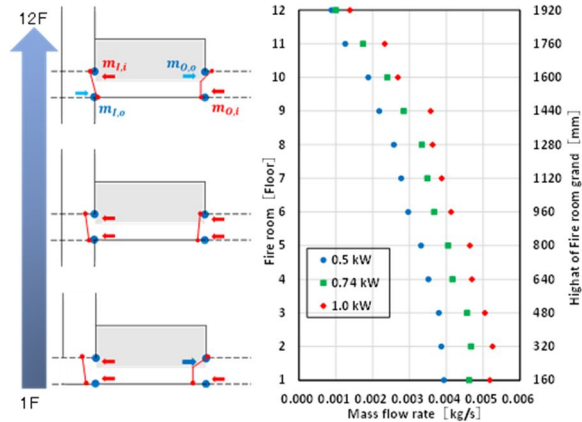


図6 火災階別の頂部排気風量

図5より発熱速度が大きいほど火災室内温度が高くなることから、また50mmから75mmの間で温度差が大きくなることから、この間に上下層の境界があると推察される。さらに、図3と比較して下部と上部の温度差が大きいことが分かる。図6より同一火災室の階において発熱速度が大きいほど排気量は多くなる。また、同一発熱速度に対し、火災室の階が低いほど排気量 m_E は多くなる。この傾向は、給気量 m_A 、屋外から火災室への流量 $m_{O,i}$ および火災室からシャフトへの流量 $m_{I,i}$ についても同様の傾向である。

一方で、火災室から屋外への流量 $m_{O,o}$ およびシャフトから火災室への流量 $m_{I,o}$ は火災室の階が高いほど流量は多くなる傾向にある。このことから、火災室から屋外への煙排出において高層階ほど給気口の影響を強くうけることが分かる。また、両条件における排気量 m_E を比較すると、後者の方が火災室の階が低いほど流量が多くなり、高層階ほどあまり変わらない結果となった。これは、火災室階が低いほど給気口からの給気量 m_A が多くなる影響を受けているためと考えられる。これらのことから、屋外開口が開放されている条件において、給気口の有無を考えると、シャフト内の煙を排気口から押し出すには給気口がある方が効率的になることを示唆している。

実験結果の考察

実験における縦穴空間に関連する煙流動現象を理解するため、理論的にシャフト内中性帯位置を推測するとともに、本実験より得られた排気量 m_E （実験値）との比較を行い本実験値の有効性を確認する。本研究で対象とした空間構成では、シャフトに対し屋外開口と屋内開口は火災室を通じて直列に配置されており、一方で開口部を通る流量はいずれの開口部においても等しいと考えられる。そのため、シャフトに対する火災室の屋外開口を介した開口を合成開口 $A_{O,i}$ とすると、流量 $m_{I,i}$ および排気口からの排気量 m_E は次の式で表すことができる。

$$m_E = \alpha A_E \sqrt{2\rho_{sha} \Delta\rho g (H_{sha} - Z_{sha})} \quad (7)$$

$$m_{I,i} = \alpha A_{O,i} \sqrt{2\rho_{\infty} \Delta\rho g Z_{sha}} \quad (8)$$

ここで、 Z_{sha} は火災室内開口からシャフト内中性帯までの高さ(以下、シャフト内中性帯位置)であり、 H_{sha} は火災室屋内開口からシャフト頂部までの高さである。 $\Delta\rho$ は $\rho_{\infty} - \rho_{sha}$ であり ρ_{sha} はシャフト内気体密度である。ここで、 ρ_{sha} は火災室よりも上のシャフト内平均温度を用いて計算する。

実験において、 $m_E \cong m_{I,i}$ となるため式(7)および(8)より、シャフト内中性帯位置は式(9)のように表すことができる。

$$Z_{sha} = \frac{H_{sha}}{1 + \rho_{\infty} / \rho_{sha} (A_{O,i} / A_E)^2} \quad (9)$$

なお、屋外開口と屋内開口の等価開口面積 $A_{O,i}$ は次式(10)を用いて計算する。

$$A_{O,i} \sqrt{\rho_{\infty}} = \frac{1}{\sqrt{1/(\rho_{\infty} A_O^2) + 1/(\rho_I A_I^2)}} \quad (10)$$

本実験(実験, 0.74kW)により算出した排気量 m_E と式(7)~(10)より算出した排気量 m_E の結果を図7に示す。図7より、排気量 m_E の理論値と実験値はおおむね一致する結果となった。また、理論値により算出したシャフト内中性帯位置 Z_{sha} は火災室の階が低いほど高くなる結果となった。このことは、実験において火災室階が低い階ほど火災室からシャフトへの流量が多くなっ

た理由であると考えられる。実験 の実験値から式(7)により、シャフト内中性帯位置 z_{sha} を算出した結果、給気口がある実験 の方が開口条件Cより低い位置に形成される結果となった。

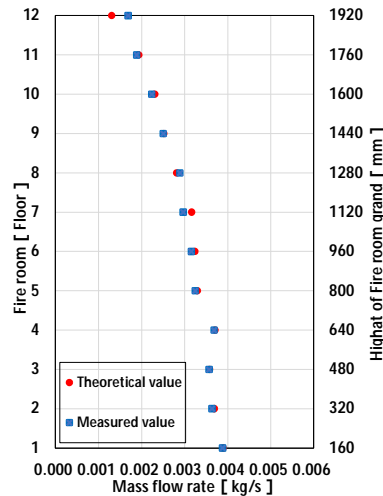


図7 実験値と理論値の比較(実験条件 (全開口開放)・0.74kW)

(2) 煙の耐電性能に関する実験

写真1に示す実験装置を用いて、線香の燃焼で生成される煙の粒子径分布および、電位差を与えた際の煙の挙動について計測した、結果を図8および図9にそれぞれ示す。

図8より、ストークスの理論を用いて換算された線香の煙の粒径分布は、平均的には $0.3\mu\text{m}$ となり、文献値と同様の結果が得られたことから本研究で用いた実験装置の有効性が確認できた。併せて、図9より電位差を与えた場合の線香(くん焼)を対象とした煙粒子の挙動は、電位差が無い状態と比較して両電極に移動していることが分かる。ただし、極性に大きな差は見られず、均等に耐電していることが示唆された。

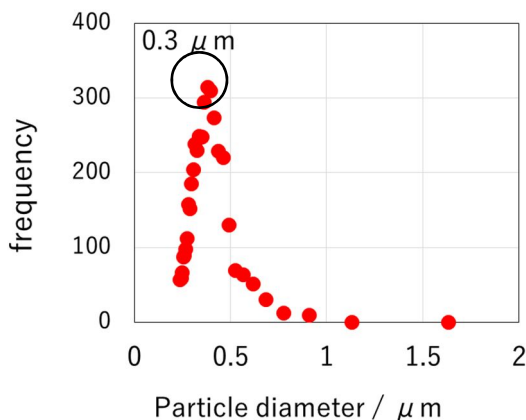


図8 煙粒子の粒径分布

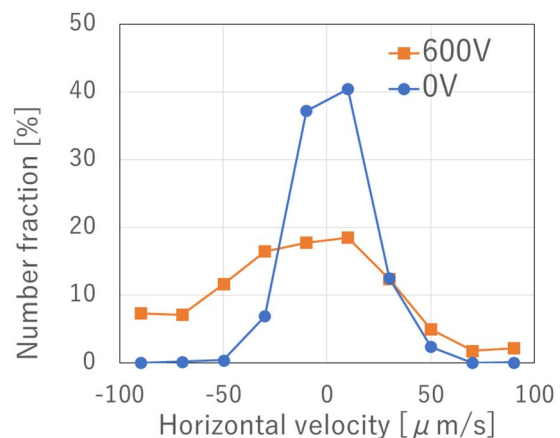


図9 印加時の煙流動

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、模型実験により、開口条件における煙流動性の把握および、シャフトからの排気量を実験的に算出することができた。また、理論式から、実験の有用性を確認するとともに、シャフト内中性帯位置の算出を行った。シャフトを活用した排気は火災が発生する火災階が低い階ほどシャフト内中性帯位置が高くなるため効果的であり、火災規模が大きくなるほど多量の煙を排気することができることが確認できた。また、電位差を与えた場合の煙粒子の挙動については、対象とした線香の煙粒子は極性に大きな差は見られなかったが、明らかに耐電していることが示唆された。今後は、今回の実験結果を踏まえ、両者を組み合わせることで、より効率的な煙制御を模索していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 戸田博章, 松山 賢
2. 発表標題 エレベーターシャフトを活用した排煙効果に関する研究
3. 学会等名 第54回安全工学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------