

# 超高層オフィスの加圧防排煙による煙制御計画

鈴木 圭一

(技術研究所)

## Design Method of Pressurized Smoke Control for Super-high-rise Office Buildings

Keichi Suzuki

超高層オフィスの付室の排煙設備では、その特異性を十分に考慮していない仕様規定どおりの第2種排煙や加圧防排煙は、安全性能と合理性について適したものとは必ずしも言いがたい。そこで加圧防排煙をベースに階全体に必要な要求性能を工学的に再検討し、仕様規定よりも合理的で安全な煙制御システムを開発した。また設計段階の超高層オフィスビルに大臣認定制度を使って本システムを採用したので、その設計方針について概要を紹介する。

If the smoke exhaust equipment in a super-high-rise office building is equipped with pushed smoke exhaust or pressurized smoke exhaust as specified in the specifications, the safety performance is mostly insufficient and excessive specifications. Therefore, we reexamined the required performance for the entire floor based on pressurized smoke prevention and developed a smoke control system that is more rational and safer than the specifications. In addition, since this system was adopted for an ultra-high-rise office building under design using the ministerial certification system, we will introduce the outline of its design policy.

### 1. はじめに

昨今のオフィスビルでは、超々高層化および階あたりの床面積拡大と開放的な利用、さらには商業施設や宿泊施設、集会施設といった複合用途化が進んでいる。そのため在館者数も多くなり、多様な人々が利用することから、ひとたび火災が発生すると避難が長期化し、救助・消火活動が困難になると予想され、大惨事を招くリスクが高くなっているといえる。また階段に入りきれない避難者が廊下で滞留を強いられる可能性が高く、とくに廊下への煙に対する安全性向上が重要になる。それに対し、排煙に係る法規制は中規模以下の建物と基本的に変わらず、超々高層や大規模建物の特異性を十分に考慮されていないため、設計の際には注意を払う必要がある。

付室(避難階段の前室)の設置が義務付けられる15階建て以上の建物では、付室に「第2種排煙」が設置されるケースが大半である。これは押出排煙とも呼ばれ、ファンにより外気を供給し、別の開口から屋外へ排気することで付室内を強制換気している。また廊下と居室(事務室等)にはそれぞれ機

械排煙が設置され、空気や煙が強制的に排出されるようになっている。このように居室や避難上重要な廊下と付室にそれぞれ煙対策がなされており、一見、安全な計画に見えるが、いくつか問題点を指摘できる。まず火災が発生すると出火室の排煙が起動して煙を屋外に排出するが、煙発生量は時間がたつほど増加していき、やがて排煙量が間に合わなくなり、さらに煙が高温(約270℃)になると排煙ダクト経路の延焼を防止するために機能停止して、煙が廊下に流出してしまう。廊下にも排煙が設置されているが、ここでも煙流入量が排煙量を超えると、付室や階段に煙が流入してしまう。排煙設備が発生した煙を排出することで安全を確保できるとの期待は、避難が短時間であれば成立するが、建物が大規模化して避難が長期化する場合には不十分といえる。また居室、廊下、付室では床面積などに応じて排煙風量が決められるが、扉が閉鎖されている場合には圧力差が大きくなり、扉が開きづらくなること(開放障害)が頻発している。したがって避難開始が遅くなった避難者が部屋から出られずに煙に巻かれるリスクが残る。

この押出排煙よりも安全かつ合理的な方式とし

て、「加圧防排煙」が挙げられる。この方式では、付室にはファンにより屋外から外気を供給し、屋外ではなく廊下に向かって圧力調整装置と呼ばれるリークパスを通して排気する。また廊下と居室(出火室)の間にも同様のリークパスを設置する。このリークパスの開口面積により圧力差を調整できるので、遮煙性能の維持と開放障害の防止を両立できる。

このように優れた加圧防排煙ではあるが、これが今日の一般的な煙制御方式になっていない理由は法整備が間に合っていなかったことにある。実は1990年代には「38条認定」という制度のもと、いくつかの大規模オフィスビルで加圧防排煙が採用されていた(浜松町シーバンスなど)。ただし当時は技術的検討が充分とは言えず、風量や圧力差の設定や制御がうまくいかずに開放障害になることが多かったといわれている。その後、2000年に建築基準法から「38条認定」が削除され、加圧防排煙が採用できない状態であったが、2009年の告示改正(S44建設省告示第1728号およびS45建設省告示第1833号改正)と消防法の改正(総務省令第88号交付)により、加圧防排煙が法的には利用可能になった。だが内容が後述のようにやや合理性を欠いたものだったため、採用件数はごく限られた。その後、著者も関与した学協会からの働きかけもあってH28国交省告示696号の施行で大臣認定制度(ルートC申請)により高い自由度で付室の排煙方法を設計できるようになった。ただし評定委員会で総合的に安全性が保持されていることを工学的に説明する必要があり、また認可まで日数がかかるといった点から、一般の設計者にはハードルが高いと思われる。著者は以前より加圧防排煙について、海外案件を含めた情報収集や数値シミュレーションによる検討を進めており、折よく設計段階の超々高層オフィスビルで本制度により加圧防排煙を計画することとした。ちなみに本制度の適用第一号といわれている。

前置きが長くなってしまったが、本稿では仕様規定に従う場合の付室の排煙方法の課題と設計時の注意点、さらに大臣認定を使った合理的な加圧防排煙の設計思想と設計事例で採用したその具体的な方法について論じたい。

## 2. 従来の付室の排煙方法

今日では付室の排煙方式について H28 国交省告示 696 号に定められており、①排煙窓による自

然排煙、②スモークタワー(ボイド)による自然排煙、③排煙ファンによる機械排煙、④給気ファンによる押出排煙、⑤加圧防排煙の5種類の仕様規定と、それ以外の大臣認定による方法が選択可能である。本節では自然排煙の①、②については割愛し、ファンにより強制的に給気または排気する③、④、⑤について解説する。

### 2.1 機械排煙

付室内に排煙口を設置し、排煙ダクトを介して排煙ファンにより 4 m<sup>3</sup>/分(非常用 EV 乗降ロビーを兼ねる場合は 6 m<sup>3</sup>/分)の空気を排出する方式である。付室に煙が侵入したときに稼働するが、煙を排出することで流量バランスにより、廊下から煙をさらに吸い込んでしまうことになりかねない。そのため屋外からの給気口を追加するなどの対策が必要である。

### 2.2 第2種排煙(押出排煙)

本方式が今日では付室における最も一般的な排煙方法である。付室に設置された給気口にファンを使って外気を供給し、さらに排煙口(ファンなし)から屋外へ押し出して室内を強制換気する。計算上、付室はやや陽圧になって機械排煙をしている廊下側よりも圧力が高くなり、廊下からの煙の流入を若干抑えることができる。気を付けるべき点として、付室と廊下の間の扉が閉鎖された状態では、廊下と付室の間の圧力差が過大になり、開放しづらくなる開放障害が頻発している。この対策として、加圧防排煙のように廊下と付室の間にパスを設けて圧力差を低減すればいいが、法的解釈により認定機関によっては不可となる場合がある。また超々高層などの場合、外気風やドラフト(煙突効果)の影響により、屋外につながる排煙口からの流出量が大きく変動する。たとえば冬季には排煙口からの流出量がドラフトにより増加して給気量を大きく上回り、廊下からの煙流入を助長することも起こりうるので、本方式の採用は注意が必要になる。

### 2.3 加圧防排煙(仕様規定)<sup>1)</sup>

図-1 に示すように付室の給気口から給気ファンで外気を供給し、そこから廊下に向けて圧力調整装置を介して空気を流出し、さらに廊下もしくは居室の屋外開口(空気逃がし口)から排気させる加圧防排煙は、基本的に H28 国交省告示 696 号に定められた 5 種類の中で、もっとも安全性が高い

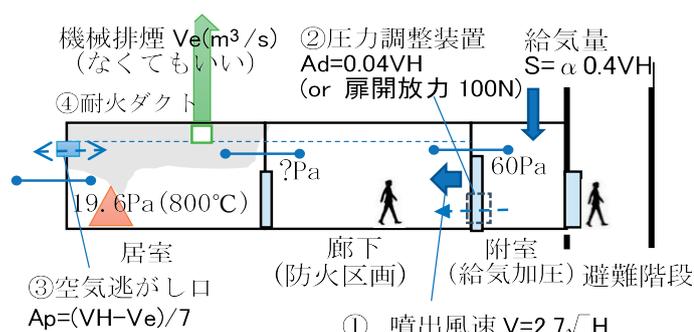


図-1 仕様規定による加圧防排煙例

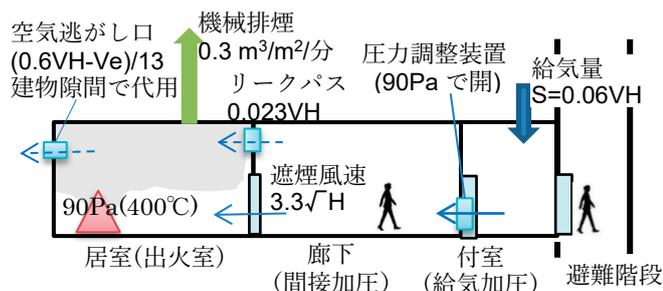


図-2 本設計法による合理的な加圧防排煙例

方式である。海外の超高層建物でも採用が多い方式とされる。付室と廊下を合わせて煙制御することで、煙の付室への流入を抑制しつつ、扉の開放障害を防ぐように圧力差も調整されている。

しかし設計仕様の算出根拠にはやや合理性を欠いたものや現実的ではない想定が含まれていることもあり、その通りに設計することは難しい場合が多々あり、多くの建物でその採用が困難になっている。

まず付室への給気風量について、付室扉を60 cmの幅で開いた状態で廊下から付室に煙が逆流しない圧力差がつくようになかなか大きな風量になっている。これは消防士が付室から扉を半開きにして放水する状態で煙を浴びない想定にしているとされるが、前提があまり現実的ではない。防火区画された廊下は、可燃物が少ないので何かが炎上している可能性は少なく、付室から廊下に向けて放水することはレアケースであろう。また付室のすぐ隣が居室(出火室)だった場合、その煙温度を800°Cとして給気風量を計算しているが、訓練された消防士は反対側が800°Cの扉を開くことはあり得ない。扉やノブが熱で赤化しており容易に判断でき、もし開いた場合、煙が逆流しなくても放射熱により一瞬で重度のやけどを負ってしまう<sup>2)</sup>。したがって給気風量はそもそもの想定に疑問が残る。

また出火室で高温になり膨張して圧力上昇し、その煙が他の室に流出しやすくなることを防ぐため、屋外に向けて空気を放出する空気逃がし口を

設置することも要求されている。その有効面積は付室1つにつき1 m<sup>2</sup>以上となり、とくに超々高層などの気密性が重視される建物では設置が難しい。出火室の圧力上昇は19.6 Pa以内に抑制されるが、仮にこの圧力差で上階への漏れ量を考えると、天井スラブの隙間率 $5.2 \times 10^{-5}$  (NFPA92A: 米国の設計基準)として単純計算で約2時間でようやく室内に煙が充満するレベルでしかなく、この圧力差の設定がかなり安全側である。

一方で、この仕様規定では付室と廊下までの規定にとどまっており、例えば居室と廊下の圧力差やパスについての基準はなく、その間の圧力差の設定や開放障害の対策はされていないため、設計者が状況に応じて処置をする必要がある。以上のことから早期の法改正が望まれる。

### 3. 合理的な加圧防排煙の提案

防火設計を難しくさせる要因として、出火室が不確定であること、避難中は常閉扉(自動的に閉まる扉)が開放されること、煙発生量と発熱量は時間とともに大きくなる可能性があること、火災拡大や煙拡散を食い止める防火設備(スプリンクラーやシャッター、排煙など)は百発百中で作動するわけでもなく、また加熱を受けるものについては長時間機能するわけでないことが挙げられる。そのようなことを念頭に、長時間にわたり圧力フローが維持されること、火災拡大や煙伝播を多重のバリアで抑制できることなどをふまえ、図-2に示すような仕様規定を改善した合理的な加圧防排煙を提案する。

#### 3.1 圧力フロー

従来のように付室や個々の室で排煙風量を設定し、起動ボタンにより別々に作動させる方式では室間の圧力差を適切に調整できないため、加圧防排煙に比べて室間の遮煙性能が低く、開放障害も生じやすい。

煙制御計画で重要なことは、個々の室ごとに排煙を考えるのではなく、階全体の圧力フローを整えることを意識し、給気と排煙、そして給気経路を設計することであろう。その圧力フローとは、圧力が付室>廊下>居室(出火室)の順に低下している状態で、その圧力差により出火室の煙が廊下や階段への流出を抑制することで、避難者にとって安全な状態を維持できる。この実現には、加圧防排煙により付室に給気して陽圧にし、それを廊下に流

し、さらに出火室にも流して機械排煙により煙を排出すれば達成できる。そのため付室の給気と居室の機械排煙は火災感知器の感知と連動して同時に作動させる。また扉が閉鎖しているときにもリークパスを介して空気を流通し、扉の開放障害が生じないように圧力差を調整する。そのためどのような火災や避難のフェーズにおいても、安定的に安全性を維持できる計画である。

### 3.2 空気逃がし口

給気経路を確保し、階のなかで給気と排気を同じ風量にして風量バランスを保てば、圧力は大気圧から大きく変化せず、開放障害も起こりづらい。しかし火災が拡大するにつれ煙が高温となり密度が下がるので、質量保存則より排煙風量を徐々に増加させなければ圧力の過度な上昇を招いてしまう。状況に応じて機械排煙の風量を変化することは難しいので、屋外に向けて適度な開口(空気逃がし口)をつくり、上昇した圧力を逃がして調整することになる。

仕様規定の加圧防排煙では空気逃がし口の面積は、室温を 800°C と仮定した場合に大気圧との差を 19.6 Pa に抑えるものとして数 m<sup>2</sup> にもなるが、超高層建物では設置が難しいことから、ここでは最小限の面積を検討する。居室(出火室)と防火区画された廊下に設置するのであれば、圧力フローによって遮煙されるので、廊下の温度はほとんど上昇しないが、安全側に 200°C とし、圧力差については開放障害の防止に目的を絞ると、100 Pa 以内としておけば、扉の開放力は約 150 N になり、一般男性なら容易に開けられる<sup>4)</sup>。以上により、想定温度 200°C、圧力差 100 Pa として算出式を導出することで空気逃がし口面積を 1/3 程度に縮小できる。

ところで建物内には屋外や上下階との隙間が少なからず存在する。既往の高層オフィスビルにおける実測<sup>3)</sup>によると、床面積比で約 0.5 × 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> の隙間があるとされる。この隙間も実質的に空気逃がし口と同じ作用をもたらすため、これを含めて考える。

### 3.3 給気風量と排煙風量

まず仕様規定に定められている一般的な機械排煙の風量は室の床面積に 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/分を掛けたものになっている。また大規模な建物ではルート B(避難検証法)やルート C(大臣認定)の申請をして 0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/分に低減することも多い。私感となるが煙

発生量が床面積に比例するわけではないので、このような規定は合理的とはいえない。また煙発生量は時間とともに変化し、そもそも何がどのように燃えるかなどは予測不能なため、煙を排出するのに適切な排煙風量の設定方法などは存在しえない。また加圧防排煙の告示で定める付室の給気風量については、その根拠が現実的でないことを前述した。

そこで排煙風量および給気風量をどのように決めるかについて再考する。まず出火室から避難している段階では、その床面積が大きいほど煙が天井に沿って水平方向に広がり続けることができるので、煙が降下するのに時間が稼げることになり、避難が完了するまでの間、無排煙でも問題ないことが多い。しかし間仕切りにより小部屋に分割される場合、煙の降下が早くなり、仮に出火室からの避難時間を 3 分とすれば、床面積 300 m<sup>2</sup> 以下では排煙が必要となる。そのためテナント貸しが想定される多くのオフィスの専有部では、天井チャンバー方式として一律 0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/分の機械排煙を設置すると計算上、間仕切りの制約がほぼ生じない。廊下については、付室から供給される空気があり、さらに居室に流出するので強制換気の形になるので、機械排煙を追加する必要はない。

付室への給気風量と居室の排煙風量を同じにしておけば、煙温度がまだ低い火災初期には風量バランスが釣り合うので過度な圧力上昇は生じない。煙が高温になって膨張しても、建物隙間を含めた空気逃がし口から空気が流出するため、出火室等の圧力上昇はわずかな範囲で抑えられる。そのため圧力フローも維持され、廊下への煙の流出は生じない。したがって長時間にわたり避難安全性は確保される。

つぎに消防活動支援についても検討する。仕様規定で想定しているような防火区画された廊下に放水することはまずないので、廊下から出火室(居室)の扉を半開きにして活動する想定を考える。安全を考慮し、出火室が上限 400°C として扉を半開きにしたときに煙が廊下に流れてこない圧力差(計算上は約 14 Pa)が必要になる。これは床面積 1,000 m<sup>2</sup> 以上の居室で先ほどの排煙風量(0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/分)があれば、十分に達しえる。

### 3.4 リークパス(圧力調整装置)の有効面積

付室と廊下の間および廊下と居室の間に設置するリークパスは、オモリがついたダンパーが組み込まれている。通常時および加圧防排煙が稼働し

ているが避難により扉が開放されているときには、オモリの自重でダンパーが閉鎖し、空気は流れない。一方、加圧防排煙が稼働し、かつ扉が閉鎖されると、室間の圧力差が大きくなるので、空気圧がオモリを押し上げてダンパーが開き、空気が流れる。それにより給気経路が確保され、圧力差がその設定値に維持される仕組みである。仕様規定では付室と廊下のみを設置し、維持される圧力差が 60 Pa になるように有効面積を設定する。これは扉の開放力を 100 N 以下にするための値であるが、一般男性であれば 150 N で扉を容易に開放できるといわれており<sup>4)</sup>、オフィス用途に限れば 150 N でもよいと思われる。

仕様規定では付室と廊下のみを設置が必要とあるが、扉閉鎖時にも居室までの給気経路を確保するため、廊下と居室の間にも同様のリークパスを設置することを基本とする。

## 4. 設計事例

### 4.1 建物概要

H28 国交省告示 696 号に示された大臣認定制度を用いて、付室(特別避難階段付室兼非常用エレベータ乗降ロビー)を加圧防排煙として設計した事例を紹介する。本建物は地上 43 階建の超々高層ビルで、主用途は商業(低層)、事務所(中層)と宿泊施設(高層)のコンプレックスである。階あたりの床面積は中層で 10,000 m<sup>2</sup> 以上であり、想定している在館者数は約 26,000 人である。

国内有数の大規模建物であり、とくに廊下の安全性確保が重要となり、そのために廊下の遮煙性能が高い加圧防排煙が最適と判断した。以下には事務所用途の中層階における加圧防排煙の仕様規定から変更したおもな内容について紹介する。

### 4.2 仕様規定からの変更内容

#### ①給気風量

仕様規定では付室への給気風量  $S$  [m<sup>3</sup>/s] は排出風速(付室扉を 0.4 m 開放したときの流速)を  $V$  [m/s]、付室扉の高さを  $H$  [m] として、 $S=0.28HV$  から算出する。しかし、付室内の隙間や付室扉開放時の面積の導出方法に問題があり、このままでは想定排出風速が得られないため、本建物では給気風量は  $S=0.4HV$  とした。なお 3 か所の付室(高層階は 2 か所)の給気風量の合計は、一度に作動させる居室の排煙風量の合計とほぼ同じにし、煙が低温の場合における風量バランスを合わせている。

#### ②リークパス(圧力調整装置)の開口面積

付室と廊下との間のリークパスの開口面積  $A_a$  [m<sup>2</sup>] は  $A_a=0.04VH$  としているが、給気風量を大きくしているため、 $0.06VH$  に拡大した。付室の開放力を 100 N にするためであるが、これを 150 N でよいことにすれば  $0.04VH$  のままでよかったが、現状では不確定な要素もあり余裕をもって設計した。竣工時の結果をもとに今後の検討課題としたい。なお廊下と居室の間のリークパスについては開放力 130 N になるように面積を設定しており、設置スペースの制限もあり付室のものより緩めている。

#### ③空気逃がし口の面積

仕様規定では空気逃がし口の面積  $A_p$  [m<sup>2</sup>] を  $A_p=(VH-V_e)/7$  から算出する( $V_e$  は機械排煙の風量 [m<sup>3</sup>/s])。これは排出する温度 800°C、圧力差 19.6 Pa として導いており、やや過大な想定と思われる。圧力差は開放障害の観点から 100 Pa とし、煙温度は天井チャンバー内で煙とリークパスから流入する低温の空気が混合すると考え 200°C を上限値として設定することで、仕様規定の空気逃がし口面積から約 1/3 に低減した。この面積であればスラブや PS(設備系の堅ダクト)の扉などの隙間面積の合計でまかなえるため、専用の空気逃がし口は設置しない計画とした。なお火災や避難の進展状況ごとに、付室、廊下、出火室の圧力をシミュレーションで予測し、圧力フローにより遮煙性能が有効に機能していることを確認している。

#### ④排煙の耐火ダクト仕様

仕様規定では加圧防排煙を長時間稼働しつづけるため、空気逃がし口と兼用する機械排煙の排煙ダクトは耐火ダクトにすることとされている。一般の排煙ダクトに比べると板厚を 0.6 mm から 1.6 mm に厚くし、さらにその周りにグラスウールなどで被覆する必要があるが、施工性が著しく低下する。そのため本事例では耐火ダクトの必要性についても検討し、周囲への延焼危険性のないボイド内に含まれる排煙ダクトについては被覆を省略できるようにした。また通常は排煙口の直近に設置する SD(スモークダンパー)について、盛期火災時に排煙ダクトの吊り材が不安定になり機能停止しないように居室とボイドの境界部分に移動することで長時間の信頼性を高めた。

#### ⑤排煙の作動トリガー

一般に排煙設備は居室や付室内に設置された起動ボタンを押すことで稼働するが、実際のところ、火災が発生したときに避難者が起動ボタンを押してくれるかは不確実である。本事例では火災感知

器の覚知と連動して自動的に稼働するシステムを採用し、付室の給気および感知器が作動したエリア(階あたり居室部分を2分割ないしは3分割している)の排煙を同時稼働させ、システム稼働の信頼性を向上した。また通常の機械排煙では煙温度が270℃以上になると停止してしまうが、本計画では稼働し続け圧力フローが維持され、廊下や階段の遮煙性能が長時間保たれる。

#### 4.3 シミュレーションによる安全性の予測

付室加圧防排煙の大臣認定には、性能評価が義務付けられており、とくに付室を通じて階段室に煙が流入しないことの確認が必要となっている。本事例では著者らが開発した多層ゾーン煙流動解析プログラム<sup>5)</sup>により、空間の圧力や温度の時間変化を予測した。扉の開閉やダンパーの開閉は避難状況に応じて変化させている。図-3は出火室からの避難終了直前における断面上の温度分布を示しており、左端の出火室の最上部(天井チャンバー内)は123℃になるものの、床面から1.8m付近は30℃なので、避難上支障はなく、その右隣の廊下には圧力フローにより煙流入がないことが確認できた。図-4は廊下からの避難終了直前における温度分布を示しており、出火室の扉が閉鎖して代わりにリークパスが開放され、圧力フローが適切に維持されている状態で、やはり廊下には煙流入がなく、廊下の避難者も安全上支障がないことが確認された。当然のことながら、避難階段への煙流入もなく、大臣認定の評価基準を満たしている。

#### 5. まとめ

在館者数が多い超々高層や大規模建築について

は、その特異性を考慮しているといえない建築基準法や告示に従った防火設計では一部の安全性に疑問が残る。とくに付室で用いられていることの多い第2種排煙(押出排煙)や仕様規定どおりの加圧防排煙は、安全性と合理性の両面から適した煙制御方式とはいえない。したがって現状では大臣認定による加圧防排煙を採用し、廊下の長期的な遮煙性能など必要な要求性能を工学的に検討し、安全な煙制御システムを計画するのが最善といえる。紹介した事例では、付室の排煙に関する大臣認定取得の第一号であり、認可のハードルを少し下げたため、一部に疑問のある告示の考え方を踏襲したり、安全率を大きめに設定している部分があった。今後も開発を進め、安全性とのバランスを取りながらより合理性を高め、設備負担の縮小も視野に入れて、適用を広げていきたい。

#### <参考文献>

- 1) 加圧防排煙設計マニュアル：全国官報販売協同組合，2011。
- 2) 佐藤 良行，徳永 敦司，町井 雄一郎：防火衣の受熱に関する検証，消防技術安全所報 50号，pp.2-7，2013。
- 3) 安藤正夫，明野徳夫，三上泰幸：城山 JT 森ビルに於ける加圧防排煙システムの性能に関する実証実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.1237-1238，1992。
- 4) 阿部伸之，山田常圭，山田茂，川村成彦：加圧防排煙時の消防活動拠点における扉の流量係数および開放力に関する実験研究，平成 16 年度日本火災学会研究発表梗概集，pp.262-265，2004。
- 5) 鈴木圭一，田中孝義，原田和典，吉田治典：火災空間における垂直温度分布の予測モデル 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その 1，日本建築学会環境系論文集，69 巻，582 号，pp.1-7，2004。



図-3 出火室からの避難終了直前の温度分布

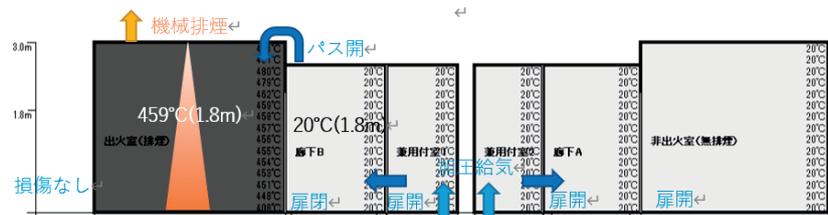


図-4 廊下からの避難終了直前の温度分布