

9. 火災時における階段施設が主避難路となる場合の避難シミュレーション

中村栄治

1. はじめに

建物の外部へと在館者のすべてが避難するような全館避難では、上層階から下層階へと階段を使った避難となる。火災対策として、煙が火源フロアから階段へと流れ込み階段を伝わって上層階のフロアへと広がって行かないようにするために、階段と各フロアとの接続部に防火扉が設置されている。火災時での防火扉が果たす役割は大きい。火源フロアと他のフロアとを防火扉で切り離すことができるため、無理に建物外へ逃れ出ようとするのではなく、煙の侵入から守られたフロアに火源フロアが鎮火するまで退避していることも可能である。しかし、何らかの理由で火源フロアと階段との間の防火扉が閉められなかった場合、煙が火源フロアから階段へと流れ込んで来る。それでも階段を使って下層階へと逃れなければならない場合は、煙が上り来るにもかかわらず階段を下っていく避難にならざるを得ない。

本研究では、このような極めて厳しい条件でしか避難できない場合、煙が避難者に影響を及ぼす程度をシミュレーションにより検証した。交通シミュレータVissim¹⁾により、火災により発生する有毒ガスが避難者に及ぼす影響をシミュレーションした。煙の拡散状況はFDS (Fire Dynamics Simulator)²⁾により求めた。以下、シミュレーションの内容と結果を述べる。

2. シミュレーション対象の建物

愛知工業大学八草キャンパスにある入学式や卒業式などに利用される講堂を兼ねた体育館をシミュレーションの対象にした。体育館は3階建てであり、一辺が70m四方の敷地に建つ高さ20mの建築物である。1階は複数のトレーニングルームや室内ランニング施設からなり、2階には2千人近くをパイプ椅子に着席した状態で収容できるアリーナが設けられている(図1)。アリーナを3方向から取り囲むように観客席(1,062名収容)が設置されている(図1)。観客席の最下段でもアリーナから3.6m高くなった位置にあり、観客席とアリーナを直接往来することはできない(図2)。観客席へは体育館の四隅に配置された階段(コア階段と呼ぶ)を使い、1階および2階からアクセスできる構造である(図1)。2つの異なる視点から見たコア階段の構造を図3に示す。



図1 観客席とコア階段の配置

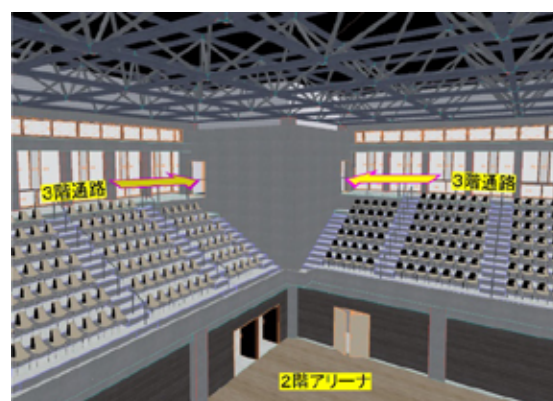


図2 アリーナと観客席との関係

3. 避難経路

本研究では、観客席から体育館外への避難を考える。避難経路は次の通りになる。(1) 座席から階段を登り3階通路へと向かう(図2)。(2) 3階通路から最寄りのコア階段へと向かう(図1)。(3) コア階段を2階まで下り2階エントランスへと進む(図1)。

避難者からの視点で見た避難経路を図4に示す。3階通路は幅が1.8mほどであり図中の矢印の方向へ進むことで(図4①)、コア階段の入口に到達する(図4②)。3階通路とコア階段入口の間には防火扉が設置されているが、扉は開いたままである(図4②)。コア階段の最上部では、矢印が示すように異なる2つの観客席エリアからの避難者が合流する(図4③)。コア階段を2階踊り場まで下る(図4④)。踊り場から2階フロアへの入口へと向かう(図4⑤)。踊り場と入口の間には防火扉が設置されているが、扉は開いたままである(図4⑤)。2階入口から2階エントランスへと向かう(図4⑥)。2階入口とエントランスの間に防火扉が設置されているが、扉は開いたままである(図4⑥)。2階エントランスを通り抜けて体育館から屋外へと出る。

4. FDSパラメータと火源の設定

FDSにより有毒ガス拡散の計算を行うためには種々のパラメータを設定する必要がある。主な3つのパラメータの設定について述べる。1つめのパラメータは有毒ガスの拡散をどの程度の空間粒度で計算するかを決めるメッシュサイズである。すべてのメッシュサイズを同じ大きさの立方体とした。メッシュサイズが細くなれば、より細やかに有毒ガスの拡散を追うことができる反面、シミュレーション時間が長くなってしまふ。このトレードオフを考慮して、メッシュは辺の長さが0.2mの立方体と決めた。2つめのパラメータは1秒間当たりの計算回数(time step: 時間粒度)である。メッシュサイズと同様、計算回数を増やせばより細かい時間粒度で有毒ガスの拡散を追うことができる反面、シミュレーション時間が長くなってしまふ。このトレードオフを考慮してtime stepを5回とした。3つ目のパラメータは有毒ガス拡散の計算対象となる3次元空間の範囲である。体育館をすべて包み込むような3次元空間(例えば70m×70m×20mの空間)全体を対象とすることが望ましいが、膨大な時間が計算にかかってしまふ。よって、避難経路をすべて含んでいるとともに、体育館の天井まで有毒ガスの拡散が評価できる範囲とした。具体的には、コア階段を1つ含む40m×34m×20mの範囲とした。

次に、火源について述べる。発火すると呼吸困難をたらし避難行動を阻害するような有毒ガスを発生させる化学物質を含む立方体を火源とした。火源はコア階段横の1階トイレ内に配置した(図3内の立方体)。トイレはコア階段とドアを挟んで隣接している。火源が燃焼している間はドアが開いた状態であり、火源からの有毒ガスが連続してコア階段へと流れ込む状態で有毒ガスの拡散をFDSにより計算した。



図3 コア階段の構造

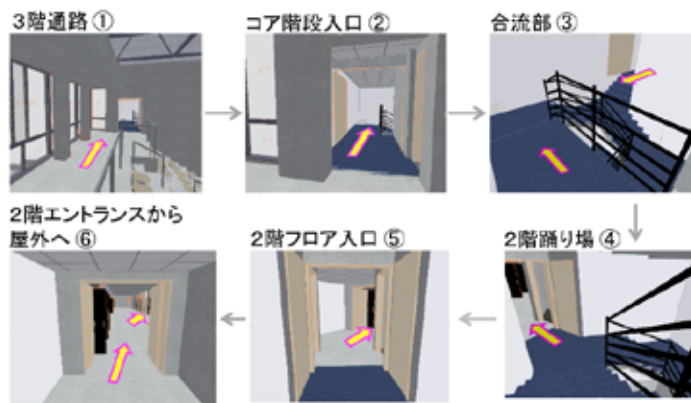


図4 避難者視点での避難経路

5. シミュレーション結果

5.1 有毒ガスの種類と危険性指標

火源から燃焼により発生する有毒ガスの中で、一酸化炭素（CO）とシアン化水素（HCN）はToxic Twinsとも呼ばれるほど毒性が高く、微量でも呼吸で体内へと取り込まれることにより避難者を危険な状態へと導く。特にHCNはCOに比べ毒性が最大35倍ほど高いことがわかっている³⁾。

有毒ガスが避難に与える影響はFED（Fractional Effective Dose）とFIC（Fractional Irritant Concentration）と呼ばれる指標で表し分数で算出する⁴⁾。FEDでは、分母はガスに暴露することで避難動作が困難になるまでに避難者が体内に取り込んだガスの総量（ガス濃度と時間の積）、分子はガスへの暴露開始から現時点までの経過時間とガス平均濃度の積である。FICでは、分母は避難動作を困難にさせるほどのガスの濃度であり、分子は現時点でのガス濃度である。COなどのように酸素の体内への取り込みを阻害するような窒息性ガスの場合には、体内への取り込み総量が避難行動へ直接影響することになるため、FED指標を使うことになる。一方、HCNやHClなどのように刺激性があり、瞬時の取り込により肺機能などが影響を受け避難行動を困難にする気体の場合にはFIC指標が使われることになる。FEDやFICが1以上の値になると、有毒ガスへの暴露が原因で避難行動が困難になる。

5.2 有毒ガスの拡散と危険性指標の可視化

図5は観客席から354人が一斉に3階通路へと上がり、コア階段を使って2階エントランス（図5内の破線矩形領域）を経て体育館外へと避難する様子を示している。無色透明なCOガスを可視化するためにCOガスを青色に着色するとともに、ガス密度を5千倍に強調してある。発災から30秒でCOガスは階段の3階天井まで到達することがわかる。1分経過した時点で、3階通路までにCOガスが到達し、3階通路路上の避難者の一部はFEDが0.05に達することがわかる。4分経過するとFEDが0.16を超える避難者も現れる（コア階段の3階）。体育館から外への出口となる2階エントランスに着目すると、1分経過時には避難者のFEDは0.05未満であるが、4分経過時には最大で0.16前後、5分経過となるとFEDが0.21を超えてしまう避難者もいる。窒息性のCOガスから逃れるために、いち早い避難が求められることがわかる。

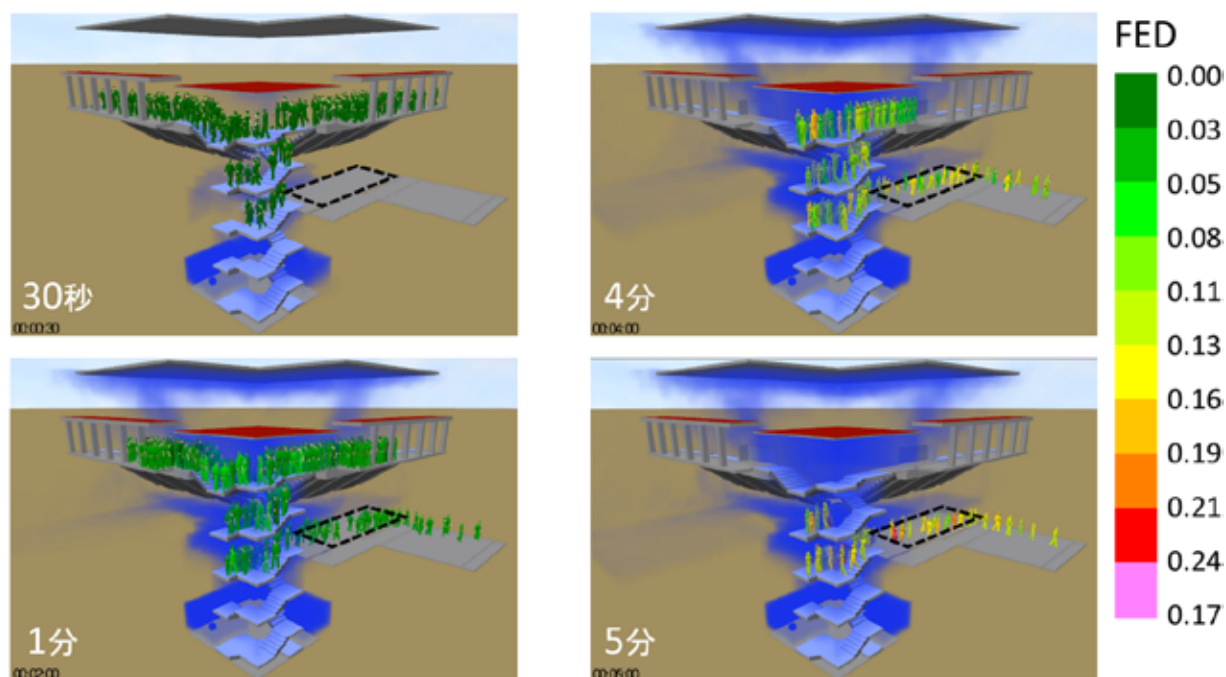


図5 COガスの拡散とFEDの可視化

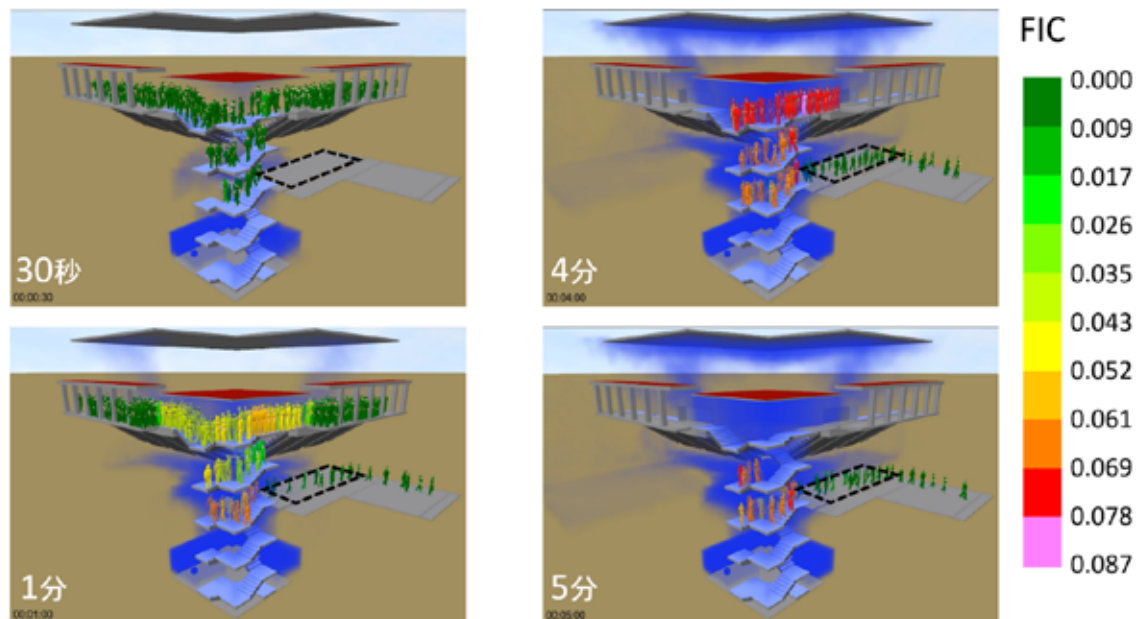


図6 HCNガスの拡散とFICの可視化

図6は図5と同じ避難の様子であるが、刺激性有毒ガスHCNの拡散とFICを可視化した点が図5と異なっている。HCNガスはガス密度を2万倍に強調して表示してある。30秒ほどでHCNガスがコア階段の3階天井まで到達することがわかる。1分経過すると3階通路から体育館天井までHCNガスが拡散することがわかる。HCNガスの避難者への影響は1分経過時から見て取れる。3階通路の避難者の多くがFICが0.06となっている。コア階段を下るにしたがいFICの値が大きくなっているため、火源に近くなるほどコア階段内のHCNの濃度が高くなっていることがわかる。4分経過時においては、3階通路にいる避難者のFICの値が最も高くなっており、0.078を超える避難者も1名確認できる。同時刻において、コア階段の2階付近においてはFICが3階にいる避難者のFICよりも低くなっていることから、コア階段の2階付近の方が3階通路よりもHCNガスの濃度が低いとわかる。2階エントランスに着目すると、いずれの経過時間においても避難者のFICは0.017未満であることから、HCNガスの濃度が極めて低いことがわかる。FICのような刺激性有毒ガスが高濃度であるような領域を素早く通過することで、そのガスからの影響を逃れることが必要である。

6. まとめ

実在する建物を研究対象にして有毒ガスが発生する状況での避難シミュレーションを行った。実際に火災が発生した場合には防火扉を閉めることにより、この報告書で示したような危険状況は防止することができる。防火扉が閉まらず毒性ガスの拡散を止めることができないという厳しい条件下での避難シミュレーション結果を示した。

参考文献

- 1) PTV Group : Vissim, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/jp/製品/ptv-vissim/> (アクセス2022.3)
- 2) National Institute of Standards and Technology, Fire Dynamics Simulator User's Guide, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019> (アクセス2022.3)
- 3) ドレーゲル, Toxic Twinsとは, <https://www.draeger.com/Library/Content/toxic-twin-1t-8178-ja-jp.pdf> (アクセス2022.3)
- 4) D. Purser and J. McAllister, Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat, SFPE Handbook of fire protection engineering, pp.2308-2428, Springer-Verlag, 2016.