

11. FDSシミュレーション結果を取り入れた避難シミュレーションの試み

中村栄治

1. はじめに

建物火災の場合、多種多様な有毒物質が発生するため、迅速に火災室のみならず最終的には建物外へと避難する必要がある。火災発生時において在館者が安全に避難できるように建物は建築基準法に基づいて設計・施工されているが、火災を想定した避難シミュレーションは、建物管理者や利用者の防災教育や防災訓練に提供することにより、人々の防災意識向上のための有効な手段であると言える。筆者は交通シミュレータVissim¹⁾を使い火災以外の災害種を想定した避難シミュレーションを研究してきたが²⁾～⁴⁾、火災の時間的変化をシミュレーションするFDS (Fire Dynamics Simulator)⁵⁾のシミュレーション結果を取り入れてシミュレーションを行うことができる機能がVissimに追加されたため、さっそく火災時における避難シミュレーションを試験的に行ってみた。以下、その内容と結果を報告する。

2. シミュレーション対象の建物と避難経路

1つの集会室と3つの事務室からなる仮想の建物⁽⁶⁾の50ページに掲載されている図を一部改変して作成)をシミュレーションの対象にした。建物の間取りと在館者数を図1に示す。在館者数は建設省告示1441号⁷⁾に基づき設定した。歩行速度も同告示に従い分速78mとした。会議室の東壁と西壁に1つずつ出口があり、各会議室に1つ出口がある。各廊下にも1つ出口があり、出口E1と出口E2は建物から屋外へと通じる出口である。図1の各出口の横に記されているのが出口幅であり、出口高は一律に2.2mとした。天井高は建物内すべて同じ3mとした。後述するFDSのメッシュ設定を考慮して壁厚を0.2mとした。

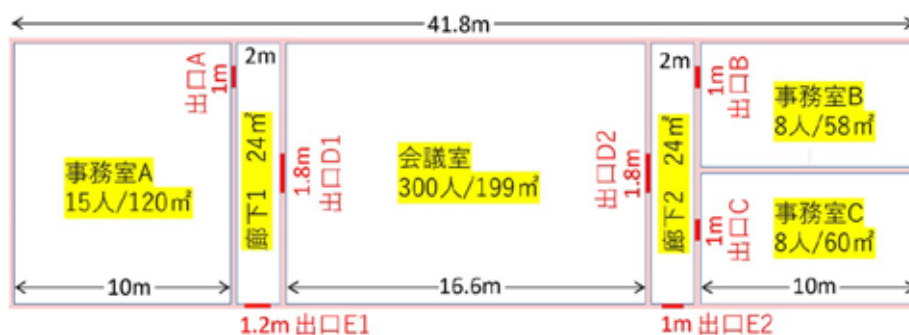


図1 建物の間取りと在館者数（上方が北）



図2 各部屋から廊下を経由した避難の様子

図2に示すように、火災が発生すると在館者全員が屋外を目指して避難することになる。会議室の在館者は出口D1もしくは出口D2から廊下1または廊下2へと進み、出口E1か出口E2を通過して屋外へと逃れ出る。事務室Aの在館者は出口Aから廊下1へと進み、出口E1から屋外へと退避する。事務室Bの在館者は出口Bから、事務室Cの在館者は出口Cから廊下2へと進み、出口E2を抜けて屋外へと出る。

3. FDSパラメータの設定

FDSにより火災をシミュレーションするには種々のパラメータを設定する必要がある。ここでは主な3つのパラメータの設定について述べる。

まずは、シミュレーションが実行される時間と火災や煙等の火災のダイナミックな変化を計算するためのメッシュの設定が必要である。シミュレーション時間を200秒に、1秒間あたりの計算回数（time step）を5回と設定した。すべてのメッシュを同じサイズとし、一辺が20cmの立方体とした。

次は建物の壁など物理条件を設定する必要がある。図1に基づいて壁（厚さ0.2m、高さ3m）と天井（大きさ41.8m×12.6m、厚さ0.2m）、そして床（大きさ41.8m×19.6m、厚さ0.2m）を設定した（図3）。床が天井より南北方向に大きくなっているのは、建物の床を屋外へと延長して避難先エリアを設けたからである。壁や床や天井は、これらの領域に含まれるすべてのメッシュを[OBST: Obstruction]パラメータで指定することにより作成することができる。出口は壁がくりぬかれた領域になるが、くりぬかれる領域に含まれるすべてのメッシュを[HOLE: Obstruction Cutout]パラメータで指定することにより壁をくりぬく形で出口を作成することができる。図3に示す建物を囲む黒枠で示された直方体は、メッシュが設定される範囲を表している。この直方体の内部領域がFDSのシミュレーション対象になる。むやみにメッシュ設定範囲を広げるとシミュレーションに要する時間が無駄に長くなってしまうため、メッシュの設定範囲は必要最小限にするのが望ましい。

次は火災条件の設定である。可燃物の材質を決める必要があるが、これは[SPEC: Species]パラメータで設定する。ポリエチレンとポリ塩化ビニルでできたソファを可燃物として想定した。ソファが空気と反応してどのような化学物質やどれほどの熱が生成されるかといった燃焼化学式は、[REAC: Reaction]パラメータで定義することができる。ソファが燃焼して炎に包まれガスが発生している様子を図4に示す。

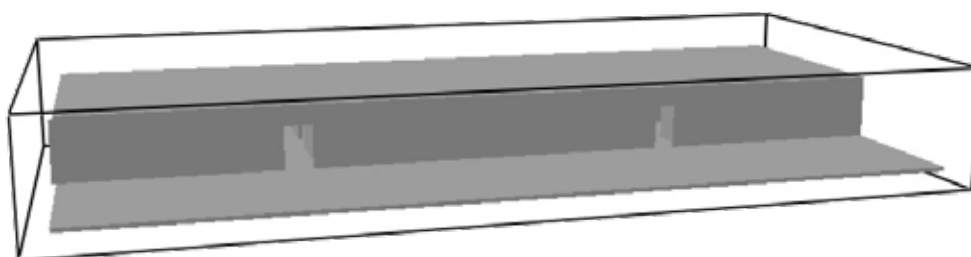


図3 FDSで作成した建物とシミュレーション範囲



図4 ソファの燃焼の様子

4. シミュレーション結果

4.1 一酸化炭素とシアン化水素の拡散

建物火災においては火源から様々な燃焼によるガスが発生する。中でも一酸化炭素（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、微量でも呼吸により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陥れる。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⁸⁾。

図5にFDSのシミュレーション結果をVissimに取り込んで得られたHCNが拡散する様子を示す。HCNは無色の気体であるが、拡散状態を可視化するためにHCNの濃度が高いほど濃く表示されるように設定してある。火災発生とともにHCNが発生し、火災発生から15秒ほどで会議室の壁に沿った天井付近からHCNが広がって行くことがわかる。これは火源から会議室の両側に設けられた出口へと燃焼ガスが流れる経路が形成されるためであると考えられる。30秒後には会議室の天井全体にHCNが広がり、60秒後には廊下へとHCNが広がっていることがわかる。COもHCNと同様に時間経過とともに拡散していくことを確認した。

4.2 FEDとFIC

FDSの機能は、可燃物の燃焼により発生するガスや熱の空間分布の時間変化を算出することであり、FDSには発生するガスや熱が避難者にどのような影響を与えるかを求める機能は備わっていない。しかし、FDSのシミュレーション結果をVissimに取り込むことにより、避難者がどのように燃焼ガスや熱により影響を受けるかを把握することができる。この報告では、有毒な燃焼ガスに焦点を絞ってシミュレーション結果を述べる。

有毒ガスが避難に与える影響はFED（Fractional Effective Dose）およびFIC（Fractional Irritant Concentration）と呼ばれる指標で表すことができる⁹⁾。これらの指標は分数で計算される。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。したがって、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、瞬時の取り込み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。

図6はFEDの時間変化を示している。FEDの値は避難者の色で表されており、色とFED値との関係を図7に示す。避難開始後（火災発生と同時に避難開始とした）60秒になると、会議室に残っている避難者の半数ほどの



図5 HCNの拡散する様子（左15秒後、中30秒後、右60秒後）

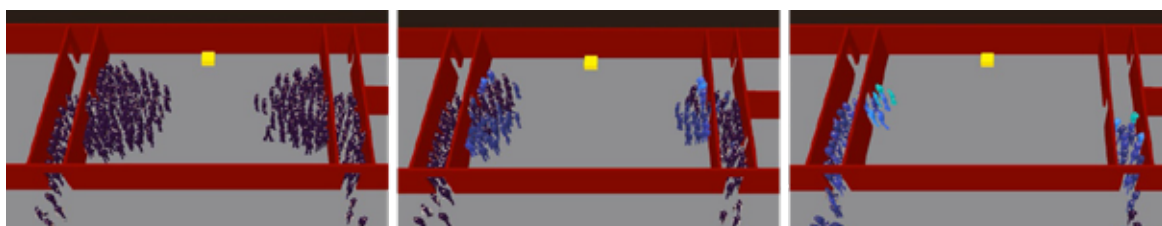


図6 FEDの時間変化（左30秒後 中60秒後 右90秒後）

FED値が0.1程度になっていることがわかる。90秒後においては7名が会議室に取り残されているが、うち3名のFED値が0.25程度に上昇している。図8はFICの時間変化を示しており、避難者の色がFIC値を表している（図7）。上述したが、HCNはCOの35倍ほど毒性が高い。これを反映するかのようになり、避難開始後30秒で会議室に残っている避難者の大多数のFIC値が0.2以上であり、1名が0.7程度のFIC値を示している。60秒後には会議室に残っている避難者の多くのFIC値が0.3以上となっている。90秒後では7名の会議室内の避難者のFIC値が0.5以上となっている。これらの指標はそれぞれ1以上の値になると、ガスへの暴露が原因で避難行動が困難になる。2つの指標が1を大きく下回っているからと言って安心できるわけではない。窒息性ガスと刺激性ガスは混合して室内に拡散するため、ガス単体による毒性よりも遥かに毒性が高くなる。したがって、火災時には一刻も早く建物外へ避難することが何よりも求められる。

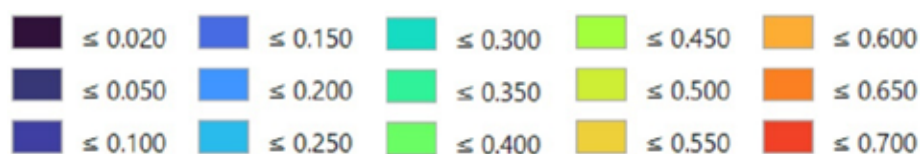


図7 FEDとFICの可視化のためのカラーチャート

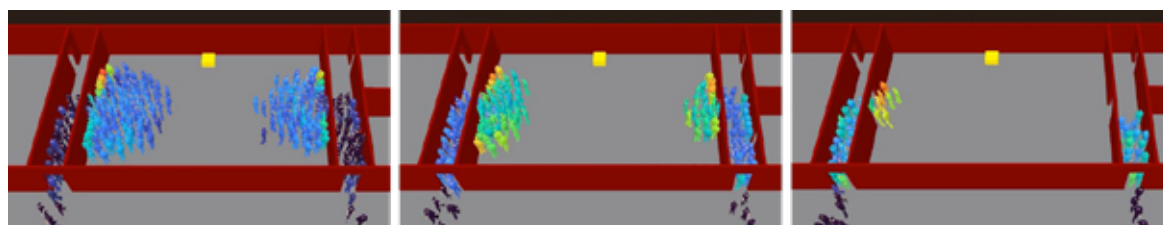


図8 FICの時間変化（左30秒後 中60秒後 右90秒後）

5. まとめ

FDSのシミュレーション結果をVissimに取り込んだ避難シミュレーションを試験的に行った。火災により発生する燃焼ガスが避難に与える影響をFEDおよびFICと呼ばれる指標により量的に評価できることを確認した。今後、実際の建物を対象にしてシミュレーションを行い、火災時での避難許容時間の算出を行う計画である。

参考文献

- 1) PTV Group: Vissim, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/jp/製品/ptv-vissim/>（アクセス2021.3）
- 2) 中村栄治, 小池則満, 地下駅や地下街との往來を考慮した百貨店における避難シミュレーション, 土木学会論文集F6（安全問題）, Vol.76, No.2, I_175-I_183, 2020.
- 3) 中村栄治, 小池則満, 店舗内什器配置や出入口階段地上接続部の周辺環境を考慮した地下街における避難シミュレーション, 土木学会論文集F6（安全問題）, Vol.75, No.2, I_185-I_192, 2019.
- 4) 中村栄治, 小池則満, 地下街での来街者調査に基づいた避難シミュレーションからの滞留者予測と避難誘導の提案～名古屋・セントラルパークを例として～, 土木学会論文集F6（安全問題）, Vol.74, No.2, I_93-I_100, 2018.
- 5) 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2021.3）。
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課他編集, 2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説 第3版, 海文堂出版, 2006.
- 7) 国土交通省, 平成12年建設省告示1441号（階避難安全検証法に関する算出方法等を定める件）, 2000.
- 8) 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2021.3）
- 9) 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.