

火災時の居室避難におけるリスク評価に基づいた避難出口配置に関する研究

A Study on Exit arrangement based on Risk assessment in room evacuation in a fire

建築学専攻 原田研究室 山本舜也

1. はじめに

建築物の火災安全設計では、個々の建物の実況に応じた対策が施されるべきであり、こうした対策は、経験的なものや工学的予測に基づくものなど種々の「原則」が示されている。その1つに「2方向避難の確保」があり、これを実現するために建築基準法では、重複歩行距離が一定以上にならないように避難出口を配置することが仕様の規定されている。

これに対して田中ら²⁾は、火源により出口の一つが使用できなくなることを考慮して、火災時の居室避難安全を確保できる必要合計出口幅や出口数に関する評価方法を示した。

北堀³⁾は、出口間の離隔距離に着目し、火災拡大に伴い避難に使用できる出口幅が狭くなるものとして避難計算を行い、離隔距離と避難不能者数の関係を示した。この結果火災成長率が大きく、火源からの熱的影響が複数出口に及ぶと避難不能者が急増することを示した。

避難上有効な合計の避難出口幅に関しては室面積や在館者数に応じた必要幅が明らかになっているものの、配置については、火源からの出口への入射熱流束についてのみ着目しており、避難出口配置による在室者の避難行動の変化は着目されておらず、出口配置の評価に関しては不明な点が多い。

以上より、本研究では、建築物の避難安全性能の評価において、居室避難における「2方向避難の確保」に着目し、出口配置や幅の偏りを定量的に評価する手法を提案する。具体的には、避難リスクを指標として避難出口配置が避難安全に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、在室者数や室の大きさに対して各出口の幅や配置に偏りを生じさせることが居室からの避難においてリスクを増大させる要因となることを明らかにした上で、在室者数や設計火源に応じて求められる避難リスクを低減できる合理的な出口配置を示す。

2. 居室内火災時の避難リスク計算方法

本研究で述べる避難リスク R [人/件]とは、火災シナリオの生起確率とその火災シナリオでの避難不能者数の積の総和と定義する。ここでの火災シナリオとは、火災発生から単一火源の成長過程を想定し、火災成長率と火源位置に依存し、その他の条件は所与とする。つまり、火災シナリオの生起確率とは、火源位置、火災成長率を確率的に表し、これらを与えることで決定され、この火災シナリオにおける、避難不能者数とは、避難限界時間において居室から避難が完了していない残存在室者数とする。また、複数出口が存在する居室では、火源位置や火源の発熱速度に応じた避難出口選択を導入し、こ

れにより決定された避難出口へと避難し、避難行動中に出口を変更することはないものとする。よって、各出口に対して避難限界時点での残存在室者数を計算し、合計することで複数出口の居室の避難不能者数とする。

ある火源位置 (x_f, y_f) で火災が起きた時の避難不能者数の期待値 $r(x_f, y_f)$ [人/件]は、火災成長率の確率密度 $p(\alpha, x_f, y_f)$ [s^2/kW]と避難不能者数 $C_{cas}(\alpha, x_f, y_f)$ [人/件]より、

$$r(x_f, y_f) = \int_0^{\infty} p(\alpha, x_f, y_f) C_{cas}(\alpha, x_f, y_f) d\alpha \quad (2-1)$$

とし、避難リスク R [人/件]は、火源位置 (x, y) で火災が生じたときの避難不能者数の期待値 $r(x, y)$ [人/件]と、その火源位置で火災が生じる確率密度 $P_f(x, y)$ [$1/m^2$] (以降では火源発生確率密度とする)を用いて、

$$R = \iint r(x, y) P_f(x, y) dx dy \quad (2-2)$$

で表される。また、ここにおける x, y は居室内での火災発生場所の座標を表し、火災室で必ず火災が発生するものとする。

2. 1 避難不能要因

本研究の避難不能者の発生条件は、煙に曝露されることと放射熱によって出口が使用できないことの2条件とし、これらのうちより短い時間で避難限界に達するものを火災シナリオにおける避難不能要因とした。

2. 2 火災シナリオの生起確率

本研究では、 t^2 火源を想定し、火災成長率 α [kW/s^2]の確率密度 $p(\alpha, x_f, y_f)$ と火源発生確率密度 $P_f(x_f, y_f)$ より、火災シナリオが決定されるものとする。

本研究では、火源発生確率密度 $P_f(x_f, y_f)$ は、任意で与えられるものとし、火災成長率の確率密度 $p(\alpha, x_f, y_f)$ は、室内のどの火源位置でも、同様に示されるものとし、火災成長率 α [kW/s^2]の確率密度関数 $p(\alpha)$ [s^2/kW]は、出口⁴⁾によって示された対数正規分布に従うものとする。(2-3)

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L\alpha} \exp\left\{-\frac{(\ln\alpha - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right\} \quad (2-3)$$

ただし、 $\mu_L = \ln\mu - \frac{\sigma_L^2}{2}$ 、 $\sigma_L = \langle \ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right\} \rangle^{1/2}$ であり、平均値 μ 、標準偏差 σ は室用途ごとに分けてまとめられている。

3. 火災性状予測に基づく避難限界時間

居室での避難限界時間は①避難完了前に煙に曝露される、②避難出口への火源からの入射熱流束が怒限度に達する、のいずれかに達した時間とする。

3. 1 煙降下による避難限界

煙層下端高さが z [m]になる時間 $t_{sm}(z)$ [s]は、

$$t_{sm}(z, \alpha) = \left\{ \frac{5}{2} \frac{\rho_{sm} A}{0.076 \alpha^3} \left[(z)^{-\frac{2}{3}} - H^{-\frac{2}{3}} \right] \right\}^{\frac{3}{5}} \quad (3-1)$$

であり⁵⁾、 $z = 1.6 + 0.1H$ とすれば煙降下による避難限界時間を求めることができる。ここで、 ρ_{sm} 、 A 、 H はそれぞれ煙層密度[kg/m^3]、室面積[m^2]、天井高さ[m]である。

3. 2 火源からの入射熱流束による避難限界

火源からの入射熱流束が q [kW/m^2]となる時間 t_{inc} [s]

は、 t 秒後の発熱速度うち 1/3 が放射成分、また火源を点熱源とし、球面上に放射熱が広がると仮定すると、

$$t_{inc} = \sqrt{4\pi L^2 \cdot q \cdot 3/\alpha} \quad (3-2)$$

と表せる。ここで、 L は火源からの距離[m]である。よって出口までの距離を代入し、 q [kW/m²]が限度(=2.31kW/m²)⁶⁾に達する時間が避難限界時間となる。

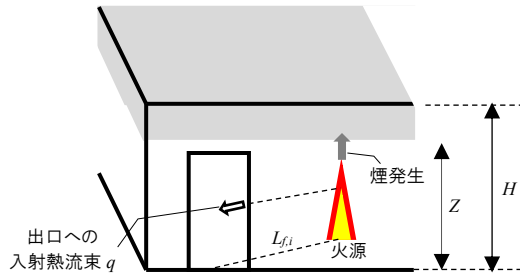


図 3-1 避難不能要因

4. 避難出口選択を用いた避難計算

避難開始時点で居室内の任意の点において避難出口を選択し、避難を開始するものとした。居室内の歩行時間および出口通過時間は「新・建築防災計画指針」⁷⁾に示された居室避難計算法を採用した。

4. 1 避難開始時間

避難開始時間は煙層が 10% 低下した時(式(3-1)の $z=0.9H$)もしくは、火源から在室者への入射熱が限度($q=2.31\text{kW/m}^2$)に達した時のうち早い時間で条件に達した時間とした。

4. 2 避難出口選択

Social Force Model⁸⁾に倣い、避難開始時点で避難者にかかる外力を、出口からの引力 F_E と火源からの斥力 F_f とし、これらのベクトル和 F_s で移動方向を決定した。

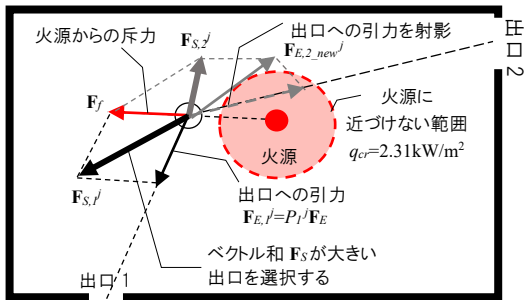


図 4-1 避難出口選択の方法

(1) 出口からの引力

複数出口が存在する居室において、避難開始後出口を変更しないとするため、在室者が歩行時にも行うと考えられる避難出口選択をこの時点で反復計算することで補った。よって、出口からの引力 $F_{E,i}^j$ ($i=1 \sim N_D$) は、反復回数 j 回目の出口の選択優先度 P_i^j と出口方向の単位ベクトル F_E より、式(4-1)で表した。

$$F_{E,i}^j = \frac{P_i^j}{\max(P_k^j | k=1, 2, \dots, N_D)} F_E \quad (4-1)$$

各出口に対してベクトル和 $F_{s,i}^j = F_{E,i}^j + F_f$ を求め、そのうち最大の値を示す出口を選択するものとした。

出口の選択優先度 P_i^j は、歩行距離による出口の選択優先度 $P_{d,i}$ と出口付近の混雑具合の選択優先度 $P_{\rho,i}$ 及び火源が存在する場合、出口への入射熱流束による出口

の選択優先度 $P_{q,i}$ の積によって式(4-2)で表される。

$$P_i^j = P_{d,i} \times P_{\rho,i}^j \times P_{q,i} \quad (4-2)$$

各要因による出口の選択優先度は、式(4-3)、式(4-4)より確率のようにあらわす。

$$P_{d,i} = 1 - (N_D - 1) \frac{d_i}{\sum_{k=1}^{N_D} d_k} \quad (4-3)$$

$$P_{\rho,i}^j = \begin{cases} 1 - (N_D - 1) \frac{\frac{C_i^j}{NW_i}}{\sum_{k=1}^{N_D} \frac{C_k^j}{NW_k}} & \text{[滞留あり]} \\ 1 & \text{[滞留なし]} \end{cases} \quad (4-4)$$

ここで、 d_i , C_i^j , W_i は、出口までの歩行距離[m]、出口 i ($i=1 \sim N_D$) に対して自分よりも前方に所在する避難者数の見積もり[人]、出口幅[m]である。反復計算では前方避難者数の見積もりのみが増加し、一回前の出口選択結果で、出口 i を選択した在室者のうち、自分よりも前方の在室者を見積もってその人数を予測した。

(2) 出口選択への火源の影響

火災室での火源による避難出口選択に対する影響は、①出口への入射熱流束による優先度の低下、②火源の視覚的な障害物としての避難経路の迂回、③火源からの熱流束に応じた斥力の発生を3点を考慮する。

① 出口への入射熱流束による出口の選択優先度

火源からの放射の影響で、出口の危険度が増加し、選択優先度を低下することを考慮した。よって、出口への入射熱流束による出口の選択優先度 $P_{q,i}$ は、式(4-5)で表し、これを式(4-2)に代入した。

$$P_{q,i} = 1 - \frac{(N_D - 1) q_i^{\frac{4}{3}}}{\sum_{j=1}^{N_D} q_j^{\frac{4}{3}}} \quad (4-5)$$

q_i は出口への入射熱流束[kW/m²] ($i=1 \sim N_D$) を表す。

② 火源の障害物としての迂回

火源の放射影響範囲(入射熱流束が $q_{cr}=2.31\text{kW/m}^2$ ⁶⁾を超える範囲)に対して出口からの引力 $F_{E,i}^j$ が交差する場合、避難経路は迂回するため歩行距離が増加する。よってこの出口からの引力を接線方向へ射影した。

③ 熱流束に応じた斥力の発生

避難開始時の火源から在室者への直達入射熱流束によって火源からの斥力が生じる。向きは、火源方向と反対方向に、大きさは入射熱流束の 4/3 乗に比例とした。

$$F_f = (q/q_{cr})^{4/3} \|F_E\| f \quad (4-6)$$

4.3 残存在室者数

複数出口が存在する部屋での出口選択により避難開始時点の出口の選択者数 $C_{0,i}$ [人]が計算される。これより、残存在室者数 $C_{left,i}(t)$ [人]は、出口の選択者数と t 秒後の流出人数 $C_{out,i}(t)$ [人]より、式(4-7)とした。

$$C_{left,i}(t) = C_{0,i} - C_{out,i}(t) \quad (4-7)$$

また、避難は L 字型歩行を採用し、時間 t [s]までに出口へ集結している人数 $C_{in,i}(t)$ [人]を計算することができ、これから、流出速度 $U_{out,i}(t)$ は、式(4-7)で表される。

$$U_{in,i}(t) = \frac{C_{in,i}(t) - C_{in,i}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4-7)$$

出口幅で最大値が決まる流出速度 $U_{out,i}(t)$ [s]から、時間 t までの流出人数 $C_{out,i}(t)$ [人]で表すことができる。

5. 避難リスク計算結果に基づく出口配置の検討

今回の計算対象の居室は事務室とし、平均値 μ 、標準偏差 σ はそれぞれ 0.0236, 0.034 で与え、式(2-5)に代入することで、火災成長率 α の確率密度関数が得られる。火源発生確率密度は、室内すべてで一様であるとする。

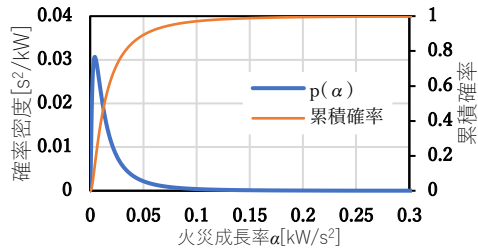


図 5-1 火災成長率の確率密度、累積確率(事務室)

5. 1 単一避難出口の場合

事務室用途の単一避難出口幅の居室(20m×10m)の長辺の中央に出口幅 0.8m の避難出口を設置し、在室者数を 40 人、また、火源発生確率は室内で均一とした。

火源から出口までの距離別の避難不能者数を火災成長率ごとにプロットした。(図 5-2)

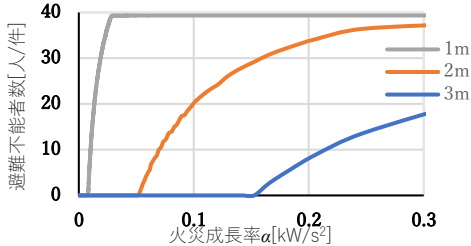


図 5-2 出口と火源の距離別の避難不能者数

室内における出口までの距離ごとの避難不能者の期待値は、1m の時、0.0120 人/件、2m の時、 9.01×10^{-4} 人/件、3m の時、 5.15×10^{-5} 人/件となり、火源位置ごとの避難不能者の期待値をプロットすると図 5-3 で表され、このときの避難リスク R は、0.414 人/件となり、出口付近の火災で避難リスクが大部分を占める。

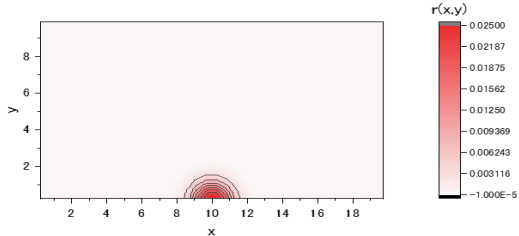


図 5-3 単一避難出口の火源位置ごとの避難不能者の期待値

1) 室面積の増加

室面積の増加に伴って煙降下時間が長くなることから、避難時間の猶予ができ、煙降下による避難リスクが減少し一定まで低減させられるが、出口前付近の火災時には、居室内のほとんどが死傷する火災となるので、放射による避難リスクを抑えることはできない。

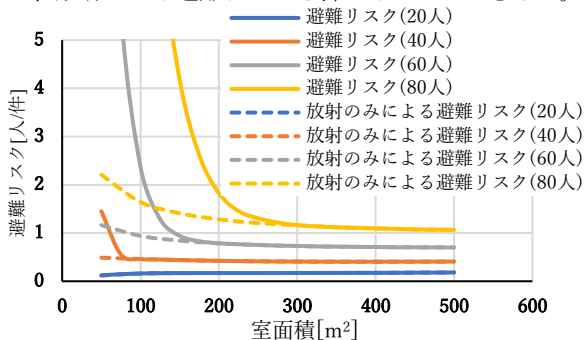


図 5-4 室面積の増加に伴う在室者数別避難リスク計算結果

2) 在室者 1 人当たりの出口幅の増加

避難出口幅を大きくしていくと、滞留時間が短くなるため、避難リスクは減少するが、出口近傍の火災が生じたとき、単一出口の場合、その出口がつかぶれることで、在室者のほとんどが死傷してしまうため、出口の幅の幅を増加させても在室者数に応じる避難リスクを低減させることができない。またこの時、滞留を生じない避難リスクでそれぞれの在室者数毎の割ったものを相対避難リスクとすると、これらは同一直線状に並び、在室者一人当たりの必要出口幅が、出口幅が 0.042m/人となった。

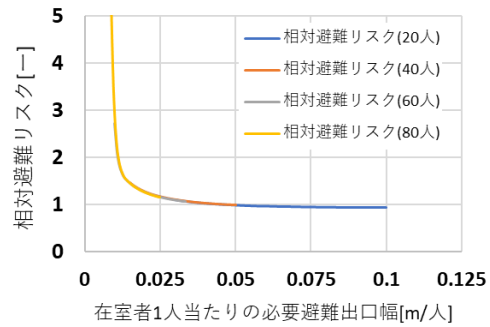


図 5-3 在室者 1 人当たりの出口幅毎の相対避難リスク

5. 2 複数避難出口が存在する場合

単一の避難出口では、出口近傍の火災で放射による避難出口が使用不可になった時の避難リスクを出口幅や室面積で提言するには限界がある。よって複数避難出口の居室での避難リスクを計算する居室条件は、40m×10m の室に室角からともに 10m 離れた位置に出口幅 0.8m の避難出口を 2 つ設けた。

(1) 出口選択結果

火災成長率 0.2 kW/s^2 の火災がそれぞれの火源位置で生じた場合、居室内の在室者は出口から火源が近い場合、その出口の使用率は減少し、遠い出口への引力が放射影響範囲を横切るような位置に所在する避難者は、火源を迂回する必要があるため、出口からの引力が低減し、火源から近い出口を使用する結果となった。また火源が、出口から遠いと、左の出口を選択する避難者が多くなり、これは火源の影響が出口付近の所在する人にとってほとんど火源に影響されない。



図 5-6.a) 出火点が出口近傍

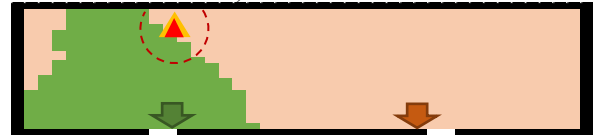


図 5-6.b) 出火点が出口から遠いとき

図 5-6 避難出口選択結果

(2) 避難限界要因と避難時間

図 5-7 が示すように出火点が出口から近い時、火源から近い出口は、放射熱で使用不可になる時間が早く、この出口で避難不能者が発生している。対して出火点が出口から遠い時、煙降下が避難限界要因となるが、それまでに避難が完了しているため、この条件では避難不

能者は発生しない。

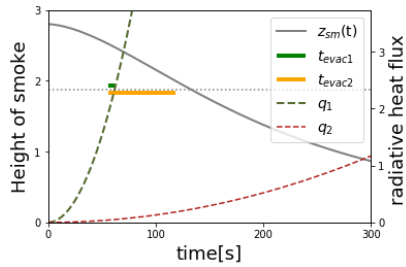


図 5-7.a) 出火点が出口近傍

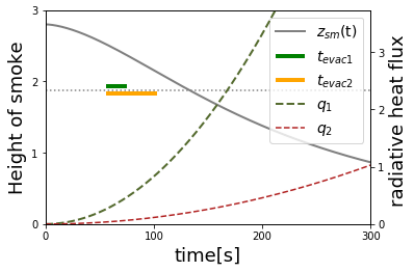


図 5-7.b) 出火点が出口から遠いとき

図 5-7 煙層高さ及び出口への入射熱流束と避難時間

(3) 避難リスク計算結果

このときの避難リスク R [人/件]は、0.0173 人/件となり、図 5-8 で表すように火源位置ごとに避難不能者の期待値 $r(x,y)$ は分布する。単一避難出口の時と比較して、片方の出口に火源が近くても、もう一方の出口を選択することで避難が可能となり避難リスクが小さい。

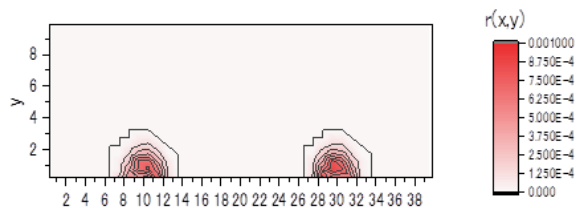


図 5-8 複数出口の火源位置ごとの避難不能者の期待値

5.3 出口配置と在室者数

避難出口の配置、及び幅の偏りを変化させたときの避難リスク結果を示す。また計算条件は、40m×10m で長辺に避難出口 2 つ(合計出口幅 1.6m)の居室で在室者数が 160 人と 80 人の避難リスクを計算する。またこの時の基準避難リスクを出口 1 つが許容される 200m² で 50 人の居室が 2 つ存在する場合のリスクと比較する。

①出口間の離隔距離

図 5-9 に示すように出口幅 0.8m で均一とし、出口間の離隔距離を小さくすると、80 人の場合の避難リスクは、10m まではほとんど変化しないが、10m を切ると、放射による避難リスクがどちらの出口に対しても生じることで、避難リスクが増加する。在室者数 160 人の場合、離隔距離が 36m の時が最大で、8m までは避難リスクが減少するが、放射の影響が両方の出口でみられる場合、避難リスクが上昇し始める。基準避難リスクと比較して 3m から 16m の間は基準避難リスクより小さくなり、在室者数が多くても出口配置が 2 方向避難の確保がされているといえる。

②出口幅の偏り

図 5-10 に示すように出口間の離隔距離は 20m、合計出口幅が 1.6m の時、出口幅を均一から出口幅の差を変化させると、80 人の場合、ほとんど避難リスクに影響しないが、160 人の場合、一方の避難出口の幅が小さくなることで避難時間が、より長い時間生じることで、避難リスクが増大する。

6. 結論

火源位置や火源の入射熱流束に応じた避難出口選択の方法を提案し、これを用いて避難リスクを計算した。

単一避難出口では、煙による避難リスクを低減するには、室面積や出口幅を増加させることが有用である。

出口配置が近接すると、両方の出口への放射の影響が無視できなくなり「2 方向避難の確保」が満たされない。また、出口間の離隔距離を話しすぎると、歩行時間の増加により、避難時間が増加し避難リスクが上昇する。出口幅に対して在室者が多すぎると煙降下による避難リスクを生じるが、離隔距離によって一部低減できる。

出口幅の偏りにより小さい出口に避難が集中するような火災が生じた時、避難時間が増加し、それに伴い、煙降下による避難リスクが増加する

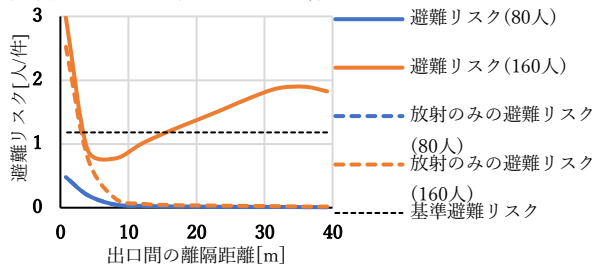


図 5-9 離隔距離による在室者数別の避難リスク

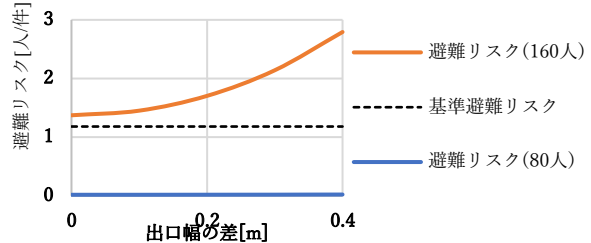


図 5-10 出口幅の差による在室者数別の避難リスク

[参考文献]

- 1) 一般社団法人日本建築学会、建築火災安全設計の考え方と基礎知識、丸善出版、2019
- 2) 田中他：居室における 2 以上の避難出口の要求、日本建築学会計画系論文集 第 491 号、1997、p17-22
- 3) 北堀他、避難出口の離隔距離に着目した避難安全性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2012、p111-112
- 4) 出口他：リスクの概念に基づく避難安全設計法の開発 その 1～その 4、日本建築学会学術講演梗概集 A-2、オーガナイズドセッション、331-346、2011
- 5) 田中喙義、第 3 版建築火災安全工学入門、(一財)日本建築センター、2020
- 6) 水野他：出火室での火災回避行動に関する実験的研究 -ポテンシャル法に基づいた避難シミュレーションの開発(その 2)-、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2 防火、289-290、2006
- 7) 建設省住宅協建築指導課：新・建築防災計画指針、日本建築センター、1995
- 8) Helbing, D. & Mulnár, P., Social force model for pedestrian dynamics. Phys. Rev. E 51, 4282-4286, 1995