

火災安全設計におけるフロートガラスの適用

Application of Float Glass in Fire Safety Design

抱 憲 誓

要 約

建築物の避難安全検証において階避難を検討する場合、間仕切りに用いられるフロートガラスは、火災発生とともに割れ、隣接室への煙伝播時間が短くなるように存在しないものとして扱われている。そのため、事務所の会議室フロアなど、比較的狭い廊下に面した間仕切りへのフロートガラスの適用は、避難安全検証上、実現困難であり、網入りガラスや耐熱ガラスなどの高価な対策が必要である。施主や設計者は、会議室フロアを開放的に見せることを望んでいるため、避難経路に面する廊下などでも安価なフロートガラス間仕切りを利用できれば有用である。そこで本研究では、初期火災時におけるガラスの煙伝播防止性能を避難安全性能評価に組み込むことを目的として、ガラスのクラック発生時間を算定する手法を構築した。本手法により、会議室および事務室を対象としたケーススタディを行い、会議室であれば、ガラス間仕切りを用いた計画が可能であることを示した。

目 次

- I. はじめに
- II. ガラス表面温度およびクラック発生時間の予測
- III. 会議室を対象としたケーススタディ
- IV. 事務室を対象としたケーススタディ
- V. まとめ

I. はじめに

建築基準法における避難安全検証には、想定火災に対する部屋からの避難、当該階での廊下から附室への避難、建物からの避難の3段階があり、それぞれ居室避難、階避難、全館避難と呼ばれている。階避難行動の概略図を Fig.1 に示す。火災室から廊下に避難し、廊下から附室に避難した段階で階避難が完了する。階避難を検討する場合、間仕切りに用いられるフロートガラスは、火災発生とともに割れ、隣接室への煙伝播時間が短くなるよう存在しないものとして扱われている。そのため、事務所の会議室フロアなど、比較的狭い廊下に面した間仕切りへのフロートガラスの適用は、避難安全検証上、実現困難であり、網入りガラスや耐熱ガラスなどの高価な対策が必要である。しかし、施主や設計者は、会議室フロアを開放的に見せることを望んでいるため、廊下などでもフロートガラス間仕切りが利用をできると有用である。

既往の研究^{1),2)}において、網入りガラスや耐熱ガラス、飛散防止フィルム貼りガラスを用いた燃焼実験が実施され、クラックの発生に伴う漏気量に関して報告されているが、火災発生からガラスにクラックが入るまでの時間に着目した研究は少ない。そこで本研究では、初期火災時におけるフロートガラス（以降、ガラスという。）の

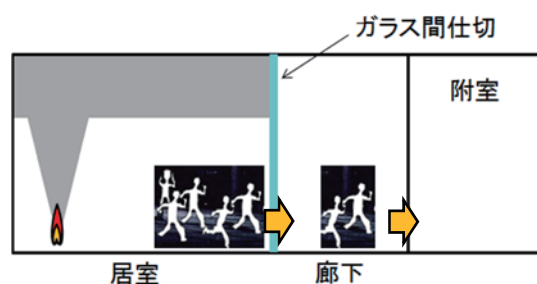


Fig.1 避難行動の概略図
(Conceptual Diagram of Evacuation)

煙伝播防止性能を評価に組み込むことを目的として、ガラスのクラック発生時間を算定する手法を構築した。

II. ガラス表面温度およびクラック発生時間の予測

1. 計算法の構成

ガラスのクラック発生時間は、Fig.2 に示す3段階で各物理量を算定して予測する。

①火災拡大モデルによる発熱速度履歴の算定

火災で発生する熱量の経時変化を算定するために、火災拡大モデル³⁾を用いる。火災拡大モデルでは、燃焼発熱速度 $Q(t)$ [kW] を燃焼面積 $A_s(t)$ [m²] と単位面積あたりの発熱速度 q_0 [kW/m²] の積で求める。

$$Q(t) = A_s(t) \times q_0 \quad (1)$$

キーワード: フロートガラス, 避難, クラック, 火災拡大モデル, 二層ゾーンモデル, 火災安全設計

Keywords: float plate glass, evacuation, crack, fire spread model, two layers zone model, fire safety design

②二層ゾーンモデルによる煙層温度の算定

火災で発生する煙層の温度は、二層ゾーンモデル⁴⁾を用いて求める。二層ゾーンモデルは、質量保存式、エネルギー保存式、ガスの状態方程式を連立させ、火災室での煙の状態を煙層と空気層の二つに分離することを仮定したモデルである。①の発熱速度を入力することで、煙層高さや煙層温度の経時変化が求まる。

③フロートガラスの表面温度の算定

火災で発生する煙や火炎により、ガラスの表面温度が上昇する。ガラスの温度上昇は、高温の煙層からの対流熱伝達に起因する場合と、ガラス近傍の火炎からの放射熱伝達に起因する場合の2ケースが考えられる。次項にそれぞれの算定方法を示す。

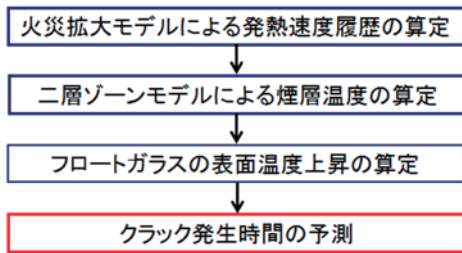


Fig. 2 計算フロー
(Calculation Flow)

2. クラック発生時間に関する実験結果

火災で生じた煙の温度上昇に伴い、ガラスの表面温度が上昇する。火災時にはガラス平面内の温度分布により生じる熱応力が許容値に達した段階でガラスにクラックが生じる。

Harada⁵⁾は、Fig.3 に示す一定の放射熱を供給できる放射パネルを用いたガラスの加熱試験を実施した。500mm (W) ×500mm (H) ×3mm (D) のガラス板を用い、ガラス表面への放射熱流束、ガラス表面温度およびクラック発生時間を測定した。ガラス表面への放射熱流束は 3~10[kW/m²]に変化させた。クラックの発生時間は、Table 1 に示すように、ガラス表面への放射熱流束が大きいほど早く、またクラック発生時のガラス表面温度は概ね 80℃~100℃であったと報告されている。

Table 1 クラック発生時間に関する実験結果⁵⁾
(List of Experimental Results)

試験番号	放射熱流束 [kW/m ²]	クラック発生時間[s]	ガラス表面温度[℃]
1	5.43	172	80.3
2	5.50	214	86.6
3	5.50	234	90.9
7	6.41	170	92.9
8	6.73	124	83.0
9	6.92	138	88.8
10	7.03	160	93.7
15	9.63	88	94.2
16	8.72	74	82.9
17	8.99	108	102.9

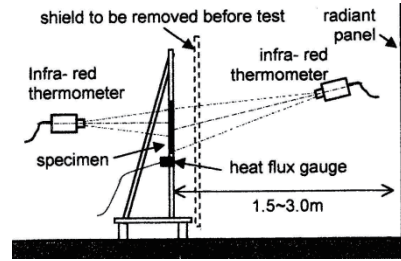


Fig. 3 実験装置の概略図⁵⁾
(Experimental Apparatus)

3. ガラス表面温度変化のモデル化

固体表面の温度上昇には、半無限固体という概念が熱伝導理論の分野で用いられている。初期温度 T_0 の半無限固体において、固体表面が一定の放射熱流束 q_0 [kW/m²] を受ける場合には、一次元の熱伝導方程式は式(2)となり、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

以下の式(3)の境界条件で解くことで、式(4)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 & (t = 0, 0 \leq x < \infty) \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} &= q_0'' & (0 \leq t < \infty, x = 0) \\ T &= T_0 & (0 \leq t < \infty, x = \infty) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$T_s(t) - T_0 = \frac{2q_0''}{k} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} = 2q_0'' \sqrt{\frac{t}{\pi k \rho c}} \quad (4)$$

ここで、 T_s は固体の表面温度[℃]、 T_0 は初期温度[℃]、 k は熱伝導率[kW/m/K]、 ρ は密度[kg/m³]、 c は比熱[kJ/kg/K]、 α は熱拡散率[m²/s]、 t は時間[s]を示す。

Table 1 の放射熱流束およびクラック発生時間の値を式(4)に代入し、ガラス表面温度を求めた。ただし、ガラスの熱伝導率には 0.0008[kW/m/K]、密度には 2500[kg/m³]、比熱には 0.92[kJ/kg/K]を用いた。Fig. 4 に計算結果と実験結果の比較を示す。Fig. 4 より、計算結果と実験結果には高い相関が見られた。このことから、一次元の熱伝導を仮定した式(4)でもガラスの表面温度を予測できることが確認できた。また、Table 1 よりガラスの表面温度が 80℃に達するとクラックが発生し始めることがわかる。

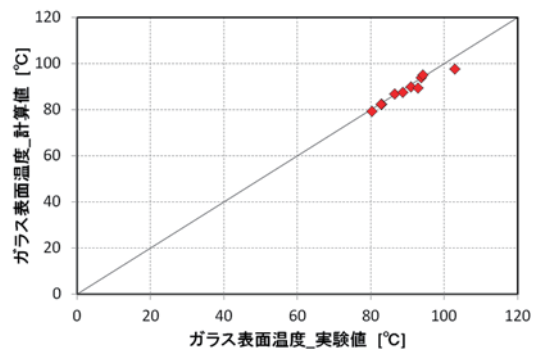


Fig. 4 ガラス表面温度の比較
(Comparison of Glass Temperature between Experiment and Calculation)

4. 煙層からガラスへの対流熱伝達

前節において、ガラス表面温度の変化は一次元の熱伝導を仮定することで算出できることを確認した。そこで、火災時に発生する煙層の温度が二層ゾーンモデル⁴⁾で算定できると仮定し、ガラスの表面温度変化を予測する。

固体の熱伝導方程式は式(2)で表記できるが、ガラスが煙層温度 T_{smoke} に曝される場合の表面温度変化は、境界条件を式(5)として解くことで、式(6)で表現される。

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 & (t = 0, 0 \leq x < \infty) \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T_{smoke} - T) & (0 \leq t < \infty, x = 0) \\ T &= T_0 & (0 \leq t < \infty, x = \infty) \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\frac{T_s(t) - T_0}{T_{smoke} - T_0} = 1 - \exp\left(\frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}\right) \quad (6)$$

$$\alpha = k / (c\rho)$$

ここで、 h は対流熱伝達率 [kW/m²/K] を示し、本研究では 0.05 [kW/m²/K] を用いる。

5. 火炎からガラスへの放射熱伝達

ガラスに面して可燃物が配置される場合も想定される。この条件では、火災で発生する煙の温度上昇に伴いガラスの表面温度が上昇するより早く、火炎からの放射熱伝達でガラス表面が熱せられて温度上昇する。火炎からの放射熱伝達に関しては、Fig.5 に示すように火炎面を平板⁶⁾で近似して、式(7)で算定する。

$$q_0'' = F_f \times \sigma \times T_f^4 \quad (7)$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 係数 (5.67×10⁻¹¹) [kW/m²/K⁴]、 T_f は火炎温度 (連続火炎温度 800°C=1073) [K] を示し、 F_f は火炎の形態係数で式(8)より算定する。

$$F_f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \quad (8)$$

$$X = \frac{D/2}{R}, \quad Y = \frac{L_m}{R}$$

ここで、 D は火炎幅[m]、 L_m は連続火炎高さ[m]、 R は火炎と受熱面の離隔距離[m]を示す。連続火炎高さ L_m は、発熱速度を入力として式(9)より求める⁷⁾。

$$L_m/D = 1.8 \begin{cases} Q^{*2/3} & (Q^* < 1) \\ Q^{*2/5} & (1 \leq Q^*) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 Q^* は無次元発熱速度 [-] を示す。

III. 会議室を対象としたケーススタディ

1. 解析対象

Photo 1 に示すように、会議室には主に机や椅子が配されるものの、その他の可燃物は少ない。避難安全検証法告示 (平 12 建告第

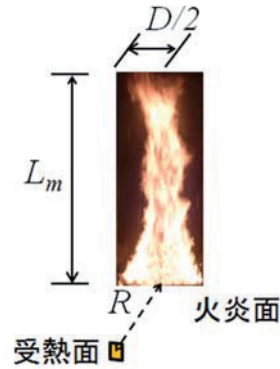


Fig. 5 放射熱伝達概念図

(Conceptual Diagram of Radiation Heat Transfer)



Photo 1 可燃物レイアウトと火源位置

(Furniture Layout and Location of Fire Source)

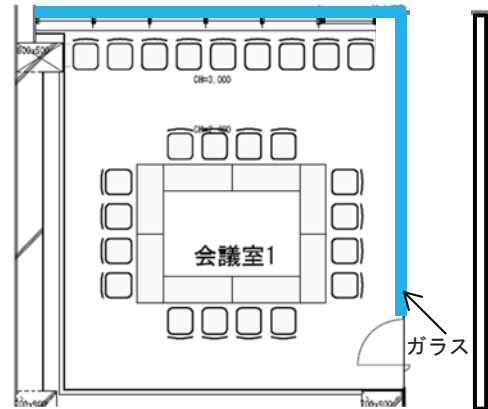


Fig. 6 平面図 (会議室)

(Floor Plane (Meeting Room))

1441 号) に示されているように、会議室の火災荷重は 160MJ/m² と事務室の火災荷重 560MJ/m² に比べて小さい。Photo1 や Fig.6 に示す、7000mm (W) ×6400mm (D) ×2700mm (H) の会議室を解析対象とした。

2. 室中央火災の想定

(1) 火源設定

Photo 1 に示すように、会議室において火源となり得る可燃物は椅子と机である。椅子と机を可燃物と想定した場合、着火のし易さから椅子の座面(クッション部)を出火位置として想定することが妥当である。そこで、椅子の座面中央から出火したと考え、式(1)を用いて発熱速度を算定する。火炎伝播速度は、椅子では 0.003[m/s]、

机では 0.01[m/s]とし、単位面積あたりの発熱速度は椅子では 600[kW/m²]、机では 450[kW/m²]とする³⁾。

着火位置は、可燃物寸法の幾何学的な関係から、Photo 1 に示す 3 つの位置（机短辺中央：火源Ⅰ，机長辺中央：火源Ⅱ，机短辺端部：火源Ⅲ）を設定する。また、椅子から机への延焼は、椅子から生じる連続火炎高さが机との離隔距離と等しくなり接炎する時刻と考える。Fig.7 に発熱速度の経時変化を示す。Fig.7 より、初期は椅子の燃焼により発熱速度が上昇し、机に延焼後は机の燃焼面積の増加に伴い発熱速度が上昇していることがわかる。また、火災伝播速度の違いにより、机の発熱速度の増加勾配は椅子の増加勾配より小さくなっていることがわかる。

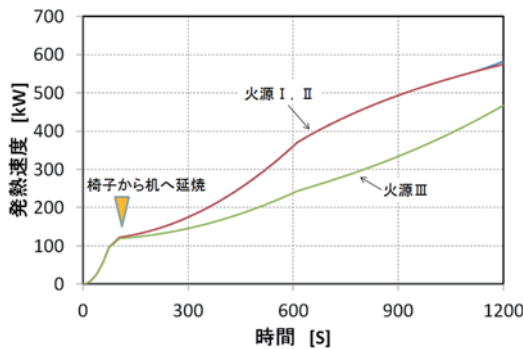


Fig. 7 発熱速度の経時変化
(Time Histories of Heat Release Rate)

(2) クラック発生時間の算定

室条件として解析対象で述べた室寸法および開口寸法、内装材には準不燃材料を設定し、火源の発熱速度に関しては Fig. 7 の関係を入力する。二層ゾーンモデルから求める煙層温度を式(6)に代入して、ガラス表面温度を算定し、発熱速度が最も大きくなる火源Ⅰの結果を Fig.8 に、発熱速度が小さくなる火源Ⅲの結果を Fig.9 に示す。Fig.8, Fig.9 ともに、煙層温度の上昇に伴いガラス表面温度が上昇していることが確認できる。

火源Ⅰと火源Ⅲを比較すると、発熱速度の増加が早い火源Ⅰでは 540秒で煙層温度が 180℃に達しているのに対し、火源Ⅲでは 150℃程度となった。煙層温度の上昇に対応してガラスの表面温度も上昇し、クラックが入ると仮定するガラス表面温度 80℃には、火源Ⅰでは 350秒、火源Ⅲでは 420秒で到達することがわかる。火源設定により、ガラスにクラックが入る時間が 1分程度は変動することがわかる。

3. 壁際局所火災の想定

(1) 火源設定

一般的な会議室では、Photo 1 に示すような可燃物レイアウトとなるが、ガラス際に椅子が配置される場合も想定される。そこで、Fig.6 の椅子燃焼分の発熱速度を式(9)に入力して火炎高さを求め、火炎からの放射熱流束を算定する。

連続火炎高さおよび、火炎からガラス表面への放射熱流束の経時変化を Fig.10 に示す。火炎高さは、着火から火源面積が増加するのに対応して増加しており、約 110秒で座面全体が燃焼して一定火炎高さに達している。

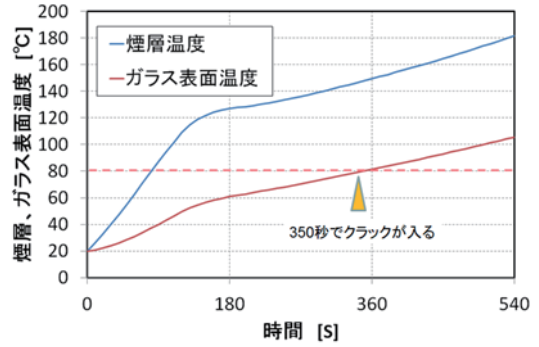


Fig. 8 ガラス表面・煙層温度の変化 (火源Ⅰ)
(Temperature Histories of Smoke and Glass)

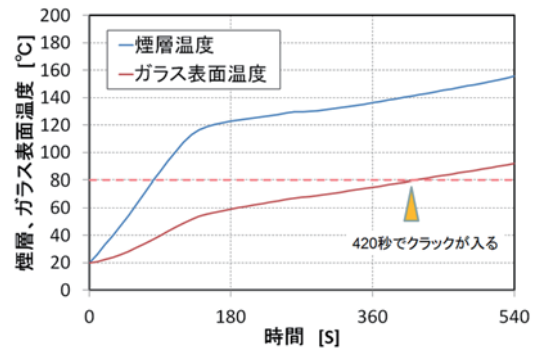


Fig. 9 ガラス表面・煙層温度の変化 (火源Ⅲ)
(Temperature Histories of Smoke and Glass)

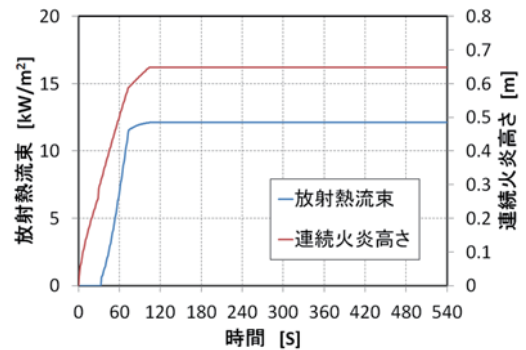


Fig. 10 連続火炎高さおよび放射熱流束の経時変化
(Time Histories of Flame Height and Radiation Heat Flux)

一方ガラス表面への放射熱流束は、約 30秒間 0となり、以降増加して同じく約 110秒で一定となっている。放射熱流束が着火 30秒間 0となっているのは、背もたれの存在により形態係数が 0となるためである。火炎高さが背もたれを超える時間より放射熱流束がガラスに影響を及ぼすことになる。

(2) クラック発生時間の算定

ガラス間仕切りに面した位置に椅子が配された条件において、式(4)に Fig.10 の放射熱流束の関係を代入して表面温度を算定する。

Fig.11 に、ガラスと椅子の離隔距離を変数としたガラス表面温度の経時変化を示す。Fig.9 に示すように火炎高さが背もたれを超えない着火後 30秒間は、ガラスへの放射熱流束が 0でガラスの表面

温度は常温である。一方 30 秒以降には、火炎が背もたれ (0.5m) を超えることで表面温度が上昇し始める。隔離距離がない (R=0) 場合には、火炎からの放射伝熱により 80 秒でガラス表面温度は 80°C に達し、隔離距離を 20cm とした場合には 80°C に上昇するのに 340 秒要することがわかる。ガラスと椅子との隔離距離により、ガラスが健全な時間帯が大きく変化することが確認された。

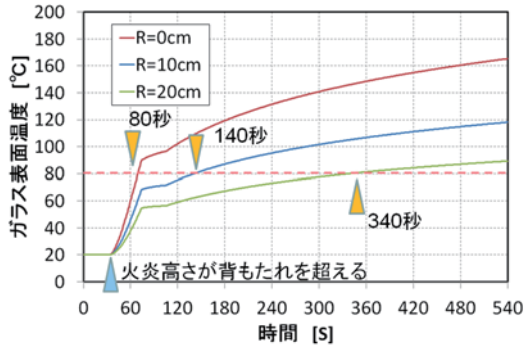


Fig. 11 ガラス表面温度の経時変化
(Temperature Histories of Glass)

IV. 事務室を対象としたケーススタディ

室用途が事務室の場合には、可燃物が多く火災の進展が速くなるため、ガラス間仕切りが健全である時間は短くなると推測される。そこで、事務室を対象として室中央火災におけるガラスのクラック発生時間を予測する。

1. 室条件および火源設定

伊藤ら⁸⁾は、Fig.12 に示す事務室を対象とした燃焼実験の結果を報告している。室条件は、7000mm (W) ×4230mm (D) ×2700mm (H) であり、一面に 4000mm (W) ×2000mm (H) の開口が存在する。室内には、火災荷重 560MJ/m² を満たすように、壁際に書籍の詰まった棚、中央にパソコンやプリンターを配した机等を設置している。室隅角に置いたゴミ箱から出火したことを想定し、火災で発生する発熱速度や煙層温度 (天井直下温度) を測定している。Fig.13 に、発熱速度および煙層温度の経時変化を示す。Fig.13 より、発熱速度は 120 秒で約 1000kW に達し、180 秒で安定したものの、240 秒から再度増加している。着火後 120 秒時ではゴミ箱から棚へ延焼した後に棚を上方に向かって火炎が伝播している。240 秒以降は室内に存在する棚がほぼ全体的に火炎に包まれている時間帯となる。煙層温度は、発熱速度の増加にほぼ対応して昇温しており、180 秒で 300°C、480 秒で 600°C に達している。300 秒以降で発熱速度の上昇に比べて煙層温度の上昇が緩やかになっているのは、開口から外部へ煙が流出していることに起因している。

2. 事務室におけるクラック発生時間の算定

Fig.13 に示す発熱速度の経時変化を二層ゾーンモデルに代入して煙層温度を求め、煙層温度の経時変化を式(6)に代入してガラス表面温度の経時変化を算定する。Fig.14 に、ガラス表面温度の経時変化を示す。Fig.14 から、煙層温度の急激な上昇に伴いガラス表面温度も上昇し、80°Cには 90 秒で達していることがわかる。

室用途の違いを確認するため、Fig.15 に会議室と事務室を想定した火災に対するガラス表面温度の比較を示す。Fig.15 より、会議室

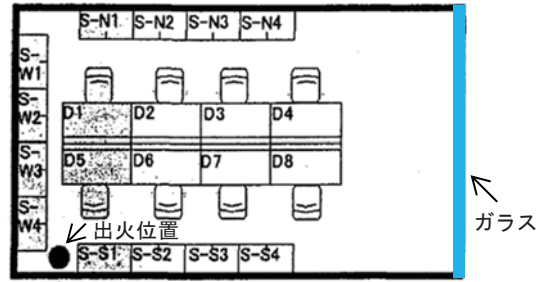


Fig. 12 可燃物レイアウト⁸⁾
(Furniture Layout)

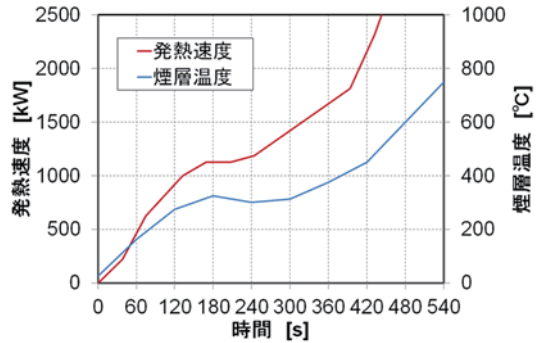


Fig. 13 発熱速度および煙層温度の経時変化⁸⁾
(Time Histories of Heat Release Rate and Smoke Temperature)

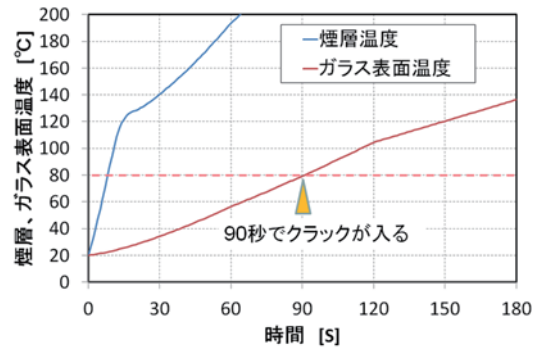


Fig. 14 ガラス表面温度の経時変化
(Time Histories of Glass Temperature)

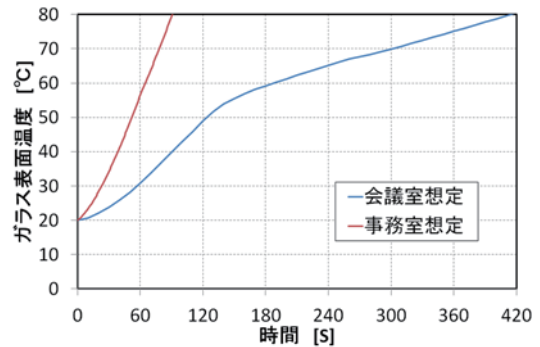


Fig. 15 クラック発生時間の比較
(Time Histories of Glass Temperature)

を想定した場合に比べ事務室を想定した場合の方が、約 1/4 の時間でガラス表面温度が 80°C に達していることがわかる。ガラス表面温度の上昇速さは煙層温度の上昇速さに依存しており、室用途が変わ

ることで配される可燃物量等が大きく変わり、火災の危険度も変化することが確認された。

V. まとめ

本論文では、避難経路に面する廊下等でもガラス間仕切りの利用を可能とするため、フロートガラスのクラック発生時間を予測する手法を構築し、以下の知見を得た。

- ①ガラスのクラック発生時間およびガラス表面温度に関する既往の研究を整理した。クラックはガラスへの放射熱流束が大きいほど早く入り、ガラス表面温度が 80℃を超えるとクラックが発生し始めることを確認した。
- ②既往の実験結果を再現するため、放射熱伝達による一次元の熱伝導方程式を用いた解析を行い、実験値と計算値が良好に一致することを確認した。
- ③煙層温度を変数としたガラス表面温度の予測式を提示した。また、ガラス表面温度が 80℃に達する時間をクラック発生時間として定義した。
- ④会議室を対象とした可燃物配置に基づき、想定火災におけるクラック発生時間を算定した。出火位置の違いにより若干の時間差が有るものの、ガラス間仕切りは 6 分程度健全であることを確認した。局所火災の場合には、ガラスと可燃物（椅子）の位置関係によりクラック発生時間が異なるが、20cm 程度の離隔が確保できれば 6 分弱健全であることを確認した。
- ⑤事務室を対象とした既往の試験結果に基づき、室中央火災におけるクラック発生時間を算定した。その結果、クラック発生時間は約 90 秒であり、階避難の実現は困難であると推測された。

以上より、可燃物量が多い事務室に対してガラス間仕切りを使用することは難しいと考えられるが、会議室であれば可燃物量が少ないことにより、ガラス間仕切りを用いた設計の可能性が確認できた。この結果を、開放的な会議室フロアの実現に向けた一助として活用していきたい。

参考文献

- 1) 池島由華ほか；初期火災時のフロートガラスの挙動に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.667, 2011.9, pp.751-760.
- 2) 長岡勉ほか；フィルム貼りガラスパーティションの評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, 2009.8, pp.267-268.
- 3) 抱憲誓ほか；火災拡大予測手法の提案, 日本火災学会研究発表会概要集, 2014.5, pp.50-51.
- 4) 日本建築センター；煙流動及び避難性状予測のための実用計算プログラム, 1990.
- 5) Harada, "An Experimental Study on Glass Cracking and Fallout by Radiant Heat Exposure", Proceedings of the sixth international symposium on FIRE SAFETY SCIENCE, 1999, pp.1063-1074.
- 6) 日本建築学会；鋼構造耐火設計指針, 1999, pp.60-61.
- 7) Hasemi, "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames", Fire Science and Technology, Vol.4, 1984, pp.15-26.
- 8) 伊藤彩子ほか；可燃物の置かれ方が火災進展に及ぼす影響 その 2 可燃物が乱雑に配置された室の例と考察, 日本火災学会研究発表会概要集, 2005.5, pp.422-425.

Application of Float Glass in Fire Safety Design

Norichika Kakae

In fire safety design, given that glass breaks when heated by fire, it is inappropriate to use float glass for any wall which lines an evacuation route, and therefore wired glass or another type of glass that does not scatter must be used. However, because float glass is capable of resisting fire for several minutes and is also favored by designers in planning open spaces, the author researched a method for predicting the crack occurrence time in float glass. In a meeting room fire, the glass cracks after about 6 minutes, whereas the corresponding time in an office fire is only about 90 seconds. This disparity can be explained by the difference in the amount of flammables in each type of room, so it was determined that designs using glazed partitions should be restricted to meeting rooms. Knowledge gained from this research is being applied in the design of open meeting room floors.