

内装材料の燃え拡がり予測に関する研究

—燃え拡がり予測モデルの改良及び燃焼実験との比較検討—

A study on prediction of fire spread over interior lining materials

- improvement of a prediction model and comparison with experiments -

建築学専攻 原田研究室 池松由良

1. 研究の背景、目的

建築火災の初期拡大性状を考える上で、内装材料の燃え拡がりは重要な要素の一つである。内装材料の評価は主に、材料の着火時間と発熱速度を調べるコンカロリメーター試験（以下 CCM 試験）、燃え拡がり速度を調べる水平火炎伝播試験（以下 LIFT 試験）などの小規模試験による。しかし、材料を実際に室内装に用いたときの燃え拡がり性状を評価する必要がある。CCM 試験及び LIFT 試験から得られる内装材料の物性値を燃え拡がり予測モデルに入力すれば、室の燃え拡がりを予測できる。予測モデルの予測精度は実験によって確かめる必要があり、既往発表論文^{1) 2)}にて Quintiere モデル³⁾による燃え拡がり予測と実験結果との比較検討が行われた。本研究では、燃え拡がりモデルを改良し、隅角部燃焼実験（複数の実験、合板）と同じ条件で燃え拡がり予測を行い、予測精度やモデルの妥当性及び問題点を検討する。

2. 燃え拡がりモデル

2. 1 概要

燃え拡がりモデルでは、壁や天井の内装材料への着火、火炎の拡がり（下流方向と対向流方向の2つのモード）、発熱速度及び区画内温度を計算する。

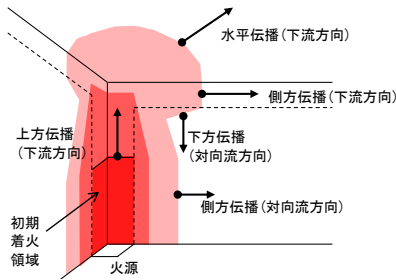


図 1 燃え拡がりモデルの概要

3. 2 火炎伝播

(1) 初期着火

バーナー火炎から直接加熱を受ける面が最初に着火し火炎伝播が開始する。初期着火領域への正味入射熱 $\dot{q}_{w,0}$ 及び材料表面温度 $T_{w,0}$ は次式で求める。

$$\dot{q}_{w,0}(\tau) = \dot{q}_{ig} + \sigma(T_s^4 - T_{w,0}^4) \quad (1)$$

$$T_{w,0}(t) - T_\infty = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho c}} \int_0^t \frac{\dot{q}_{w,0}''(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (2)$$

(2) 上方火炎伝播

未着火の内装材は下方のバーナー及び燃焼面の火炎及び煙層から加熱されることで表面温度が上昇し、着火する。上方火炎伝播速度は次式で計算する。

$$\frac{dy_p}{dt} = \frac{y_f - y_p}{t_{ig}} \quad (3)$$

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k \rho c \left[\frac{T_{ig} - T_{ws}}{\dot{q}_f''} \right]^2 \quad (4)$$

ここで、 T_{ws} は式(2)の $\dot{q}_{w,0}''$ を \dot{q}_{ws}'' として求める。

$$\dot{q}_{ws}''(\tau) = \dot{q}_{i,ws}'' + h_c(T_s - T_{ws}) \quad (5)$$

(3) 側方火炎伝播

壁面温度が火炎伝播最小温度 $T_{s,min}$ を上回ると側方火炎伝播が開始する。火炎伝播速度は

$$\frac{dx_p}{dt} = \frac{\Phi}{k \rho c (T_{ig} - T_{wa}(t))^2}, \text{ for } T_{wa}(t) \geq T_{s,min} \quad (6)$$

T_{wa} は式(2)の $\dot{q}_{w,0}''$ を \dot{q}_{wa}'' として求める。

$$\dot{q}_{wa}''(\tau) = \dot{q}_{i,wa}'' + h_c(T_a - T_{wa}) \quad (7)$$

(4) 消炎位置

燃え拡がりが止まる限界を知るためには、発炎燃焼の停止条件が必要になる。火炎伝播に影響のある発熱量を図 2 斜線部で示す範囲で想定する。CCM 試験によって消炎時間の発熱速度 $\dot{Q}_{ext,c}''$ とその時間までの累積発熱 $Q_{ext,c}''$ を分析して、消炎条件を次式で決める。

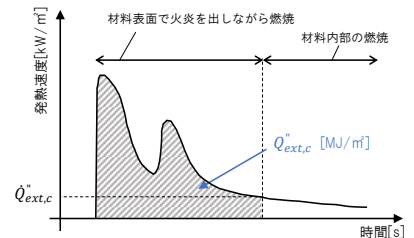


図 2 発炎燃焼の停止条件

$$\int_0^t \dot{Q}_j'' \geq Q_{ext,c}'' \text{ かつ } \dot{Q}_j''(t) \leq \dot{Q}_{ext,c}'' \quad (8)$$

3. 3 発熱速度

(1) 室の発熱速度

室の発熱速度は火源と内装材の燃焼の合計である。

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{ig} + \dot{Q}_{product}(t) \quad (8)$$

(2) 材料の発熱速度

種々の加熱強度での CCM 試験の発熱速度測定値を図-3 に示す。材料の発熱速度は、材料表面への加熱の強さ、着火後の経過時間によって変化する。Quintiere モデルでは、火災室温度の変化に伴う材料への入射熱の変化を考慮したが、CCM 試験での発熱速度の第1ピーク値を採用し、着火時間に関係なく燃焼面全体で均一の発熱速度とした。しかし、燃え広がる材料の発熱速度は、場所により着火時刻が異なるので均一ではない点、着火後や裏面の燃焼ピークの影響を計算できない点が問題である。従って場所ごと（着火時刻ごと）に材料の発熱速度を計算する方法を取り入れる。Mittler⁴⁾は CCM 試験の発熱速度測定値を実火災

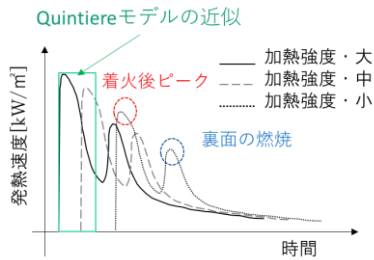


図3 種々の加熱強度における CCM 試験の発熱速度測定値

用に変換する方法を提案した。CCM 試験での材料への正味熱流束よりも大きい加熱を受ける場合、発熱速度は高くなるが熱分解が早く進み燃焼時間は短くなる(図4)。これに従い、領域jの材料の発熱速度を次式で求める。

$$\dot{Q}_j''(t) = \xi_j(t) \dot{Q}_{cone}''(t_{ig,c} + \tau_j(t)) \quad (9)$$

$$\xi_j(t) = \frac{\text{実火災で領域jが吸収する正味入射熱}}{\text{CCMで材料が吸収する正味入射熱}} \quad (10)$$

$$\tau_j(t) = \int_{t_j}^t \xi_j(t') dt' \quad (11)$$

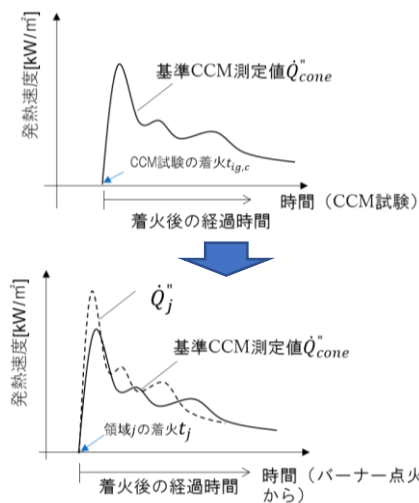


図4 発熱速度の変換方法

3. 5 区画内温度

従来モデルは MacCaffrey ら⁴⁾の区画火災温度の簡易予測により、材料の燃焼もバーナー位置で生じるとして計算していた。しかし壁面上部で材料が燃焼すると、煙層温度はさらに高くなる。本研究では、区画内温度を二層ゾーンモデルで計算し、壁面とゾーンについて放射交換を考慮、バーナー及び燃焼する材料火炎からの放射を燃焼の発生位置を考慮して計算する。

4. 燃え拡がり予測に必要な物性値

4. 1 CCM 試験

(1) 試験方法

CCM 試験は、円錐形の電熱ヒーターで10cm角の試験体を加熱して口火着火させ、着火時間と着火後の発熱速度を測定するものである。加熱強度は、50kW/m²を上限として徐々に小さくし、着火した加熱強度の最小と着火しなかった加熱強度の最小との平均を着火限界熱流束($q_{o,ig}$)とする。

(2) 試験体

試験体は厚さ12mmの構造用合板と厚さの異なるラワン合板4種類とした。試験体の概要を表に示す。

表-1 試験体の厚さ及び密度

	記号	厚さ (mm)	密度 (kg/m ³)
構造用合板	PWS	12	598
ラワン合板	PW5.5	5.5	460
	PW9	9	522
	PW12	12	602
	PW30	30	574

(3) 試験結果から得た物性値

表-2 CCM 試験結果から得られたパラメータ

記号	$\dot{q}_{o,ig}''$ kW/m ²	T_{ig} °C	$\sqrt{k\rho c}$ kW·s ^{1/2} /(m ² ·K)	$\Delta H/L$ -	Q^2 (MJ/m ²)
PWS12	13.5	366	0.743	2.11	93.6
PW5.5	13.5	366	0.743	2.21	52.8
PW9	13.5	366	0.735	0.62	82.3
PW12	16.5	404	0.625	2.30	118.2
PW30	15.5	392	0.706	1.57	277.7

消炎時までの累積発熱量は75.1(MJ/m²)、消炎発熱速度は45.5kW/m²である。

4. 2 LIFT 試験

(1) 試験方法

LIFT 試験は、横長の試験体に2~50kW/m²の分布を付けて加熱した状態で、その一端に着火して燃え拡がり速度を測定するものである。試験体は CCM 試験と同じものである。

(2) 試験結果から得られた物性値

LIFT で得られた物性値を表-3 に示す。

表-3 火炎伝播パラメータと火炎伝播最小温度

記号 No	PWS12		PW5.5		PW9		PW12		PW30	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Φ ((kW) ² /m ³)	9.5	9.5	13.5	8.8	18.8					
Ts,min(°C)	187	233.8	286.4	118.7	198.4					

5. 隅角部燃焼実験

合板を室の隅角部に貼って燃焼させた実験を行い、その燃焼性状を調べた。室形状及び内装材の条件の異なる2つの実験について述べる。

5. 1 合板燃焼実験 (部分内装)

鍵屋らは図5の室の隅角部の壁に構造用合板12mmを幅0.91m×高さ2.7mの範囲に貼りつけ手燃焼させる実験を行った。室周壁(天井、床面含む)はケイ酸カルシウム板である。隅角部の内装材には厚さ12mmの構造用合板(PWS12)を用いた。隅角部の火源はプロパンガスバーナーでサイズは30cm角、発熱速度は50kWとした。

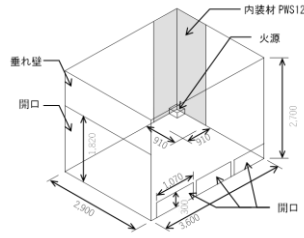


図5 合板燃焼実験の室概要

5. 2 中規模区画実験

小宮らは、図6に示す模型室で燃え拡がり実験を行った¹⁾。隅角を挟む壁の内装を試験体とし、室周壁(天井、床面含む)はケイ酸カルシウム板である。内装材には厚さ5.5,9,12,30mmのラワン合(PW5.5,9,12,30)を用いた。隅角部の火源はプロパンガスバーナーでサイズは17cm角、発熱速度は50kWとした。

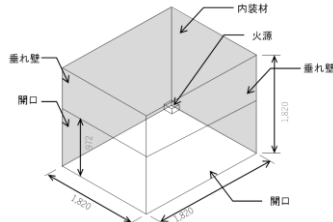


図6 中規模区画実験の室概要

6. 合板燃焼実験の燃え拡がり予測

6. 1 予測条件

予測条件(室及び内装材)は合板燃焼実験と同じとした。構造用合板(厚12mm)の物性値には表-2、表-3の値を使用した。

6. 2 予測結果と考察

計算結果を図7~図9に示す。燃え拡がり位置及び区画内温度について、計算結果はわずかに実験より燃え拡がりが遅いが、実験値と良好に一致している。また、図の発熱速度より、着火後の第1ピークの後一度室全体としての燃焼が弱くなり、その後裏面の燃焼により再度発熱速度が増大する様子を計算できている。この推移は上部層温度の計算結果にも表れており、実験結果においても同様の傾向が見られる。

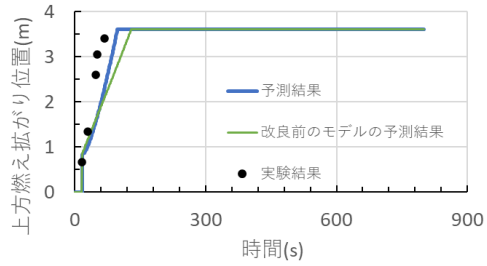


図7 上方燃え拡がり位置

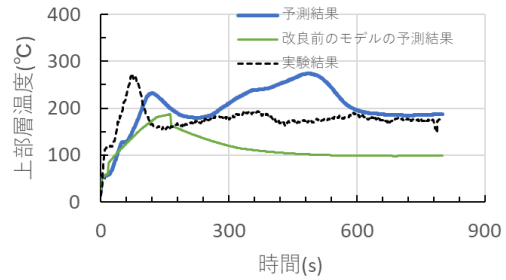


図8 区画内温度

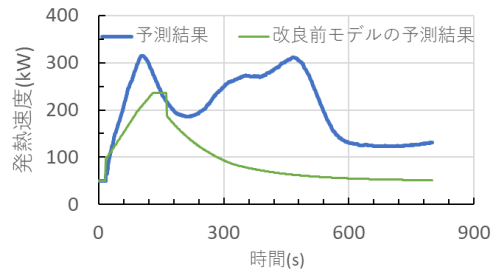


図9 発熱速度

7. 中規模区画実験の燃え拡がり予測

7. 1 予測条件

予測条件(室及び内装材)は中規模区画実験と同じとした。ラワン合板(厚5.5,9,12,30mm)の物性値には章のCCM及びLIFTから得た値を使用した。

7. 2 予測結果と考察

改良前モデル²⁾の計算結果を図10~11に示す。燃え尽きの発生の有無によって燃焼拡大が決まり、薄い材料は早く燃え尽きてフラッシュオーバーしないが厚い材料は燃焼しつづけるのでフラッシュオーバーするという傾向が得られた。また、燃え拡がりの推移は早い。

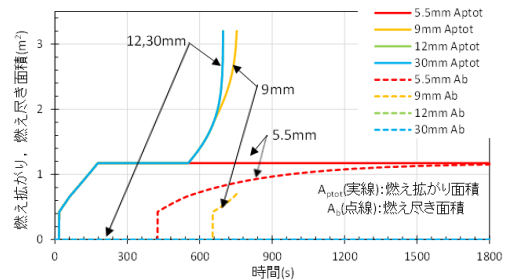


図10 燃え拡がり面積

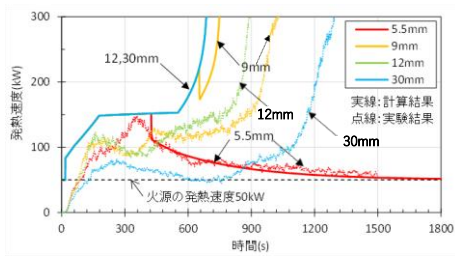


図 11 発熱速度

また、図 12~14 に本研究で改良した計算モデルによる結果を示す。燃焼面積より 5.5mm 以外では側方火炎伝播の開始の直後、急激に燃え広がりが進み、フラッシュオーバーに至る。また、9mm 以外の材料について、燃え広がり初期の発熱速度が過大に計算されている。燃焼拡大は 12mm→9mm→30mm→5.5mm の順で起こりやすい傾向が実験と一致した。

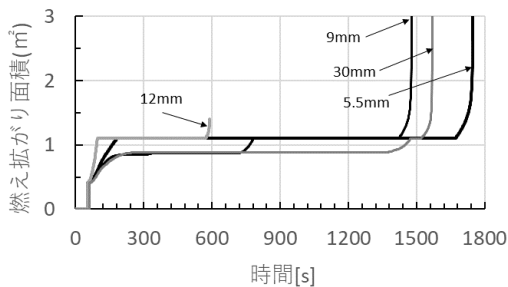


図 12 燃え広がり位置

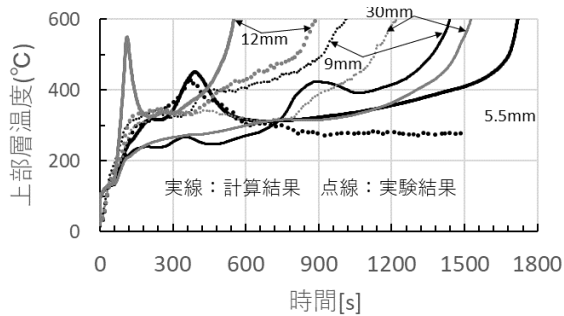


図 13 上部層温度

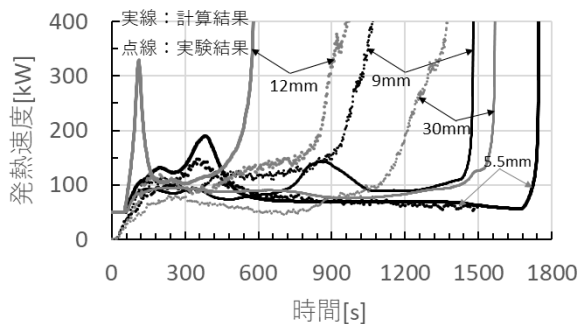


図 14 発熱速度

8. フラッシュオーバー時刻と厚さの関係

改良前モデルでは材料が厚いほどフラッシュオーバーしやすい。一方、今回の予測では厚い材料と薄い材料はフラッシュオーバーが起こりにくく、中間の厚さの材

料はフラッシュオーバーが早い。これは実験結果の傾向と一致した。

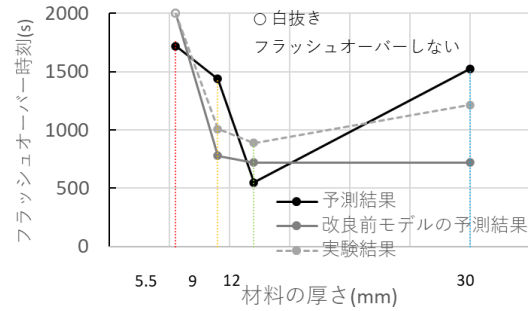


図 15 フラッシュオーバー時刻と厚さの関係

9. まとめ

既往の燃え広がりモデルを改良し、実験と同じ条件で燃え広がり予測を行い、実験結果と比較した。発熱速度や上部層温度の推移（着火後や裏面の燃焼のピーク）を計算でき、改良前モデルよりも実験と良い一致が見られた。また、中規模区画実験の予測では厚さとフラッシュオーバーの関係が実験結果と一致した。

記号

q_{ig}'' :バーナー火炎からの熱流束(kW/m^2), T_s :煙層温度($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} :雰囲気温度($^{\circ}\text{C}$), σ :シュテファンボルツマン定数, h_c :対流熱伝達率, $\dot{q}_{i,ws}''$, $\dot{q}_{i,wa}''$:壁面への放射熱(kW/m^2), y_p :燃焼面先端位置(m), y_f :火炎先端位置(m), T_{ws} , T_{wa} :未着火の壁面温度($^{\circ}\text{C}$), T_{ig} :着火温度($^{\circ}\text{C}$), $\sqrt{k\rho c}$:熱慣性, Φ :火炎伝播パラメータ, $T_{s,min}$:火炎伝播最小温度($^{\circ}\text{C}$)

参考文献

- 1) 小宮祐人, 原田和典, 池松由良, 仁井大策, “初期火災における内装の燃焼拡大性状に関する研究 小規模試験結果を用いた燃え広がり予測と中規模区画火災実験の比較,” 日本建築学会大会(北海道) 学術講演梗概集, 防火(選抜梗概), pp. 313-316, 2022年9月.
- 2) 池松由良ほか, “Quintiere モデルによる内装材料の燃え広がり予測,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp. 759-760, 2021年9月.
- 3) J. G. Quintiere, "A Simulation Model for Fire Growth on Materials Subject to a Room-Corner Test," Fire Safety J., vol. 20, pp. 313-339, 1993.
- 4) H. E. Mitler, "Predicting the Spread Rates of Fires on Vertical Surfaces," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, pp. 1715-1721, 1990.
- 5) McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., and Harkleroad, M.F., Estimating Room temperature and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, Fire Technology, Vol.17, No2, 98-119, 1981