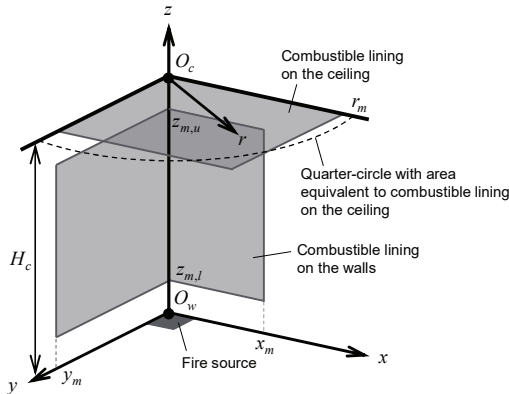


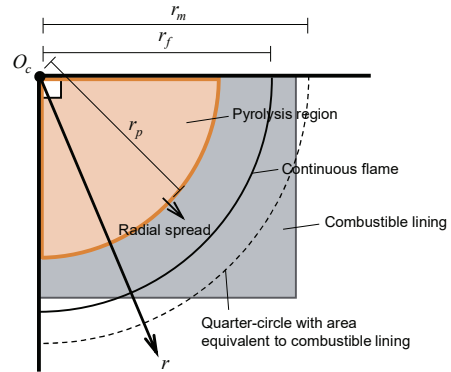
### 第3章 可燃性内装材の燃焼拡大モデル

図3に、本研究における可燃性内装材の燃焼拡大モデルの概念を示す。壁に貼られた可燃性内装材については、火源の背後または直上で着火が生じた後、壁面に沿って形成される火炎により、熱分解領域が上方と側方向に拡大する。その後、熱分解領域の先端が天井近傍に達すると、天井下に形成される火炎により、天井流の流れ方向と下方方向に拡大する。一方、天井に貼られた可燃性内装材については、火炎が天井下に形成された後、火源直上の角で着火が生じ、熱分解領域がそこから放射状に拡大する。ここでは、壁の一部に可燃性内装材が貼られた場合の燃焼拡大性状を記述するため、床面の隅角部を原点 $O_w$ 、両側の壁に沿った水平方向を $x$ 軸と $y$ 軸、高さ方向を $z$ 軸とする三次元座標系を導入し、 $x$ 軸と $y$ 軸については最大限界 $x_m$ と $y_m$ を、 $z$ 軸については最大限界 $z_{m,u}$ と最小限界 $z_{m,l}$ を設定する。また、天井の一部に可燃性内装材が貼られた場合の燃焼拡大性状を記述するため、天井面の隅角部を原点 $O_c$ 、半径方向を $r$ 軸とする平面の極座標系を導入し、 $r$ 軸について最大限界 $r_m$ を設定する。なお、可燃性内装材を貼る天井の範囲は矩形が多いと思われるが、

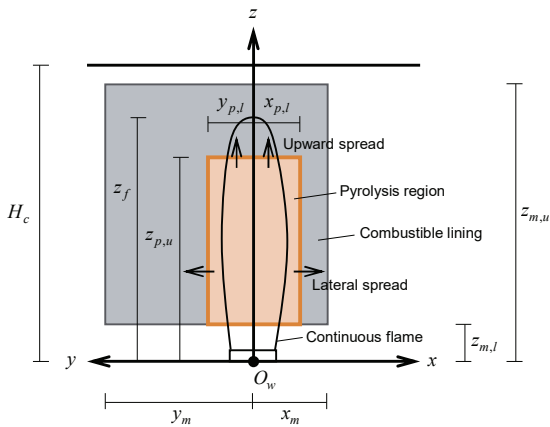
● Coordinate systems for rooms partially-lined with combustible materials



● Ceiling pyrolysis region



● Wall pyrolysis region (1)



● Wall pyrolysis region (2)

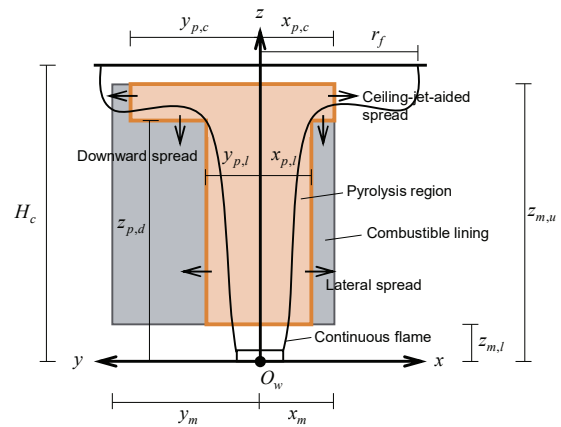


図3 可燃性内装材の燃焼拡大モデルの概念図

計算にあたっては面積が等価な四分円の半径を指定する。

### 3.1 熱分解領域先端の進行速度

壁に貼られた可燃性の内装材のように、鉛直に設置された可燃性平板が着火すると、火炎は浮力のため平板に沿って上方に伸びる。火炎は伸長方向に対し横方向や逆方向にも伝播するが、火炎からの強い加熱により伸長方向への伝播は著しく促進される。Quintiere et al.<sup>6)</sup> は、熱分解領域上方の未燃部分が火炎や煙層によって予熱され、その部分（予熱領域と言う）の表面が着火温度に達すると、熱分解領域の先端が進行して火炎伝播が生じると仮定し、半無限固体の一次元熱伝導方程式を特定の境界条件の下で解くことによって、熱分解領域先端の進行速度を材料の熱物性から計算できる形で定式化している<sup>注3)</sup>。

本モデルでは、①壁に貼られた可燃性内装材の上方火炎伝播速度、②壁に貼られた可燃性内装材の天井流の流れ方向への火炎伝播速度、③天井に貼られた可燃性内装材の半径方向への火炎伝播速度を Quintiere et al.<sup>6)</sup> の予測式を用いて計算する。 $z_{p,u}$  を上方に進行する熱分解領域先端の高さ、 $x_{p,c}$  と  $y_{p,c}$  を天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離、 $r_p$  を半径方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離とすると、それぞれの熱分解領域先端の進行速度は次式で与えられる。

$$\frac{\partial z_{p,u}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,w}''^2 (z_f - z_{p,u})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{p,u})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (50)$$

$$\frac{\partial x_{p,c}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - x_{p,c})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,u})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (51)$$

$$\frac{\partial y_{p,c}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - y_{p,c})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,u})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (52)$$

$$\frac{\partial r_p}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - r_p)}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(H_{c,i})]^2} \quad (t \geq t_{ig,c}) \quad (53)$$

ここに、 $z_f$  は壁面に沿った連続火炎の長さ、 $r_f$  は天井面に沿った連続火炎の長さ、 $\dot{q}_{f,w}''$  は壁面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束、 $\dot{q}_{f,c}''$  は天井面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束、 $T_{m,ig}$  は可燃性内装材の着火温度、 $T_{m,s}(Z)$  は床面からの高さ  $Z$  における可燃性内装材の表面温度、 $z_{m,u}$  は壁に貼られた可燃性内装材の上端高さ、 $t_{ig,w}$  は壁に貼られた可燃性内装材の着火時間、 $t_{ig,c}$  は天井に貼られた可燃性内装材の着火時間である。ただし、上方に進行する熱分解領域先端の高さ  $z_{p,u}$  が天井流の中心軸高さ（天井高さ  $H_c$  の 95% とする）に達するまで、天井流の流れ方向への火炎伝播は生じないものとする。

火炎の伸長方向に対し横方向への火炎伝播については、式(50)～式(53)の右辺の分子を一種の熱物性（火炎伝播パラメータと呼ぶ）と捉え、LIFT 試験で測定される側方向の火炎伝

表 1 代表的な木質材料の火炎伝播パラメータ  $\Phi_m$  の推定値

材料	厚さ	$T_{ig}$	$k\rho c^*$	$\Phi_m$
	mm	°C	(kW/m <sup>2</sup> K) <sup>2</sup> s	(kW) <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
硬質繊維板 <sup>27)</sup>	6.35	298	1.87	4.51
硬質繊維板 <sup>27)</sup>	3.18	365	0.88	10.97
パーティクルボード <sup>27)</sup>	12.7	382	0.94	12.75
合板 <sup>27)</sup>	12.7	390	0.54	12.91
合板 <sup>27)</sup>	6.35	390	0.46	7.49
ラワン合板 <sup>28)29)</sup>	5.50	357	0.61	9.41
シナ合板 <sup>28)29)</sup>	12.0	404	0.30	4.99
単板積層材 (LVL) <sup>28)29)</sup>	15.0	386	0.26	9.94

※本表の  $k\rho c$  の値は半無限固体の熱着火理論に基づいて推定されたもので、常温時の熱伝導率、密度、比熱を代入して得られる値よりもかなり大きい。本表の値は水平火炎伝播や下方火炎伝播には適用できるが、火災成長において支配的な上方火炎伝播や天井流方向への火炎伝播にも適用できるかは不明であり、本表の値を用いると火炎伝播速度が過小評価される恐れがある。そこで、 $k\rho c$  の値には常温時の熱伝導率、密度、比熱を代入して得られる値を用いること。

播速度から、火炎伝播パラメータを推定する方法が提案されている<sup>7)</sup>。ここでは、この考え方に基づいて、①壁に貼られた可燃性内装材の側方火炎伝播速度、②壁に貼られた可燃性内装材の下方火炎伝播速度を計算する。 $x_{p,l}$  と  $y_{p,l}$  を側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離、 $z_{p,d}$  を下方に進行する熱分解領域先端の高さとする、それぞれの熱分解領域先端の進行速度は次式で与えられる。

$$\frac{\partial x_{p,l}}{\partial t} = \frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,l})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (54)$$

$$\frac{\partial y_{p,l}}{\partial t} = \frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,l})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (55)$$

$$\frac{\partial z_{p,d}}{\partial t} = -\frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{p,d})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (56)$$

ここに、 $\Phi_m$  は可燃性内装材の火炎伝播パラメータ、 $z_{m,l}$  は壁に貼られた可燃性内装材の下端高さである。ただし、上方に進行する熱分解領域先端の高さ  $z_{p,u}$  が天井流の中心軸高さ(天井高さ  $H_c$  の 95%とする)に達するまで、下方への火炎伝播は生じないものとする。Quintiere and Harkleroad<sup>27)</sup> や小宮ら<sup>28)</sup> による LIFT 試験の結果によると、代表的な木質材料の火炎伝播パラメータ  $\Phi_m$  の値は 4.5~12.9 程度である(表 1)。

任意の時刻における熱分解領域先端の位置は、オイラー法を用いて上記の微分方程式を数値的に解くことによって求める。

### 3.2 壁面や天井面に沿って形成される火炎

壁面や天井面に沿った連続火炎の長さ、 $z_f$  と  $r_f$  は、バーナーを用いて隅角部火源上の

火炎長さを調べた火災実験の結果<sup>30)31)</sup>から、次式で与えられる。

$$z_f = \min\left(3.0Q_1^{*2/3}D + z_b, H_c\right) \quad (57)$$

$$r_f = \min\left(3.9Q_2^{*1/2}D + z_b - H_c, \sqrt{4A_F/\pi}\right) \quad \left(3.0Q_1^{*2/3}D + z_b > H_c\right) \quad (58)$$

ここに、 $Q_1^*$ と $Q_2^*$ は無次元発熱速度であり、

$$Q_1^* = \frac{\dot{Q}_s + \dot{Q}_{mw}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}} \quad (59)$$

$$Q_2^* = \frac{\dot{Q}_s + \dot{Q}_{mw} + \dot{Q}_{mc}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}} \quad (60)$$

ここに、 $\dot{Q}_{mw}$ は壁に貼られた可燃性内装材の発熱速度、 $\dot{Q}_{mc}$ は天井に貼られた可燃性内装材の発熱速度である。ただし、無次元発熱速度の計算では、壁面や天井面に沿って拡大する火災を実際の火源と同じ幅の床面に置かれた単一火源として扱うことによって、壁や天井の可燃性内装材に着火した後も火炎長さの予測式<sup>30)31)</sup>が適用できると仮定している。この扱いは火炎長さを計算するために行ったもので、今後改善が必要である。

連続火炎からの入射熱流束、 $\dot{q}_{f,w}''$ と $\dot{q}_{f,c}''$ は、バーナーを用いて壁面や天井面に沿った火炎からの表面入射熱流束を調べた火災実験の結果<sup>6)32)</sup>から、次式で与えられる。

$$\dot{q}_{f,w}'' \approx 25, \quad \dot{q}_{f,c}'' \approx 20 \quad (61)$$

### 3.3 可燃性内装材の着火時間

壁に貼られた可燃性内装材の着火時間 $t_{ig,w}$ は、一定の放射加熱を受ける半無限固体の一次元熱伝導方程式の解から、次式で与えられる。

$$t_{ig,w} = \max\left(t_{f,w}, t_{Q,100}\right) + \frac{\pi}{4} k_m \rho_m c_m \left(\frac{T_{m,ig} - T_0}{\dot{q}_0''}\right)^2 \quad (62)$$

ここに、 $T_0$ は可燃性内装材の初期温度、 $\dot{q}_0''$ は火源からの入射熱流束、 $t_{f,w}$ は火源上の連続火炎の先端が壁に貼られた可燃性内装材の下端高さに達するまでの時間、 $t_{Q,100}$ は火源が可燃性内装材の着火に必要な熱流束を放射する程度（火源の発熱速度が100kW以上を仮定）に成長するまでの時間である。火源からの入射熱流束 $\dot{q}_0''$ は、

$$\dot{q}_0'' \approx \begin{cases} 50 & (z_{m,l} \leq z_b + D) \\ 25 & (z_{m,l} > z_b + D) \end{cases} \quad (63)$$

と仮定する。ここでは、火源面に近い高さでは火炎が厚いため、火炎からの入射熱流束が薄い火炎についての値<sup>6)</sup>よりも大きくなることを考慮している。

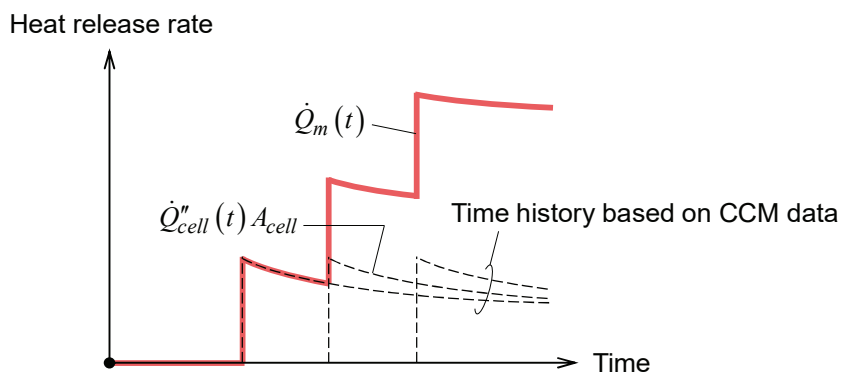


図4 セルの発熱速度の足し合わせによる可燃性内装材の発熱速度の計算

天井に貼られた可燃性内装材の着火時間 $t_{ig,c}$ は、連続火炎が天井に接触するまでの時間を $t_{f,c}$ として、次式で与えられる。

$$t_{ig,c} = t_{f,c} + \frac{\pi}{4} k_m \rho_m c_m \left( \frac{T_{m,ig} - T_0}{\dot{q}_{f,c}''} \right)^2 \quad (64)$$

### 3.4 可燃性内装材の燃焼に伴う発熱速度

可燃性内装材の発熱速度 $\dot{Q}_m$ は、壁や天井に貼られた可燃性内装材の表面を正方格子で分割されたセルの集合とみなし、任意の時刻における各セルの単位面積あたりの発熱速度を $\dot{Q}_{cell}''(t)$ として、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_m = \sum \dot{Q}_{cell}''(t) A_{cell} \quad (65)$$

ここに、 $A_{cell}$ はセルの面積である。ここでは、セルの辺長を0.005mとして分割する。

セルの単位面積あたりの発熱速度 $\dot{Q}_{cell}''(t)$ の計算には、コーンカロリメータを用いて一定の加熱強度の下で測定される材料の発熱速度の時刻歴を使用する(図4)。ここでは、①壁面や天井面に沿って形成される連続火炎からの入射熱流束が20~25kW/m<sup>2</sup>程度<sup>6)32)</sup>であること、②煙層をフラッシュオーバーの発生条件として知られる温度500°Cの黒体とみなした時に、煙層からの放射熱流束が約20kW/m<sup>2</sup>となることを考慮し、加熱強度40kW/m<sup>2</sup>の下で測定された発熱速度の時刻歴から、各セルの着火からの経過時間に対応する発熱速度を読み取る。ただし、可燃性内装材を加熱する火炎や煙層の性状は時々刻々と変化するため、可燃性内装材の発熱速度は一定の加熱強度の下での測定結果とは異なる性状を示すと考えられる。また、壁の上部や天井に貼られた可燃性内装材は、煙層の存在によって、コーンカロリメータのように十分に換気された条件下で燃焼する訳ではない。ここでの扱いは可燃性内装材の発熱速度を過大評価すると考えられるため、今後改善が必要である。なお、可燃性内装材の発熱速度の経時的な変化を考慮するため、条件によっては、それまで成長

していた火災が一旦減衰に転じることもあり，それに伴って火災の長さも縮むことになる．そこで，連続火災の長さが熱分解領域の先端よりも短くなる場合，すなわち式(50)～式(53)の右辺の分子がマイナスになる場合については，熱分解領域先端の位置を連続火災先端の位置に修正し，その進行速度をゼロとすることによって，熱分解領域の縮小を記述する．