

カラマツ壁試験体の燃焼による収縮・亀裂・脱落を考慮した炭化予測モデルに関する研究

A Study on carbonization prediction model considering shrinkage, cracking, and falling off due to combustion of larch wall test specimens

建築学専攻 原田・仁井研究室 牧野翔馬

1. 研究の背景

木材は他の建築材料と比較して軽く強度があり、断熱性や調湿機能にも優れ、環境にも良い材料であるが、木材は可燃性であり、火災時に材が燃えてしまう。

火災加熱を受ける木材では、材の収縮及び炭化層表面の亀裂、さらには炭化層の脱落が生じる。これらは、木材がどの程度燃焼し炭化するのかを解析する上で大きな影響を及ぼすことが予測される。しかし、木材の収縮・亀裂・脱落を考慮した熱伝導解析は未だ多くは行われていない。そこで本研究では、既存の熱伝導計算モデルに試験体の収縮・亀裂・脱落の影響を加えた炭化予測モデルを提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、耐火炉実験における壁試験体の炭化予測に、試験体の収縮及び炭化層表面の亀裂、炭化層の脱落を考慮することによって、試験体の炭化の進行をより正確に予測することである。この目的を達成するために、実際に小型耐火炉実験を行い、実験結果と計算結果を比較する。

試験体の炭化予測モデルについては、Parker による木材の燃焼における収縮と亀裂を考慮した熱伝導計算モデルをベースとして、熱伝導率や比熱といった物性値の精緻化、亀裂面から流入する熱流の考慮、炭化層表面での赤熱及び実験的に調べた炭化層の脱落性状等を考慮した。

3. 耐火炉実験の概要と実験結果

3.1 実験の概要

小型耐火炉を用いてカラマツ集成材の壁試験体を ISO834 の標準加熱曲線に沿って各種時間加熱し、その後給気によって放冷をする耐火炉実験を行った。加熱時間は 30 分、45 分、60 分、75 分、90 分、120 分の 6 種類、放冷時間は 0 分、60 分、180 分の 3 種類で実施し、加熱・放冷時間と炭化性状との関係を検討した。

また、加熱温度を ISO834 の標準加熱曲線の 0.8 倍及び 1.2 倍にした加熱実験を行い、加熱温度と炭化性状と



図 3.1 小型耐火炉の概要

の関係を検討した。

3.2 測定方法

試験体に熱電対と含水率センサーを取り付け、それぞれで表面・内部温度及び含水率を測定した。また、実験後の試験体の炭化層形状をレーザー変位計を使用して測定した。さらに、実験後の試験体を切断して試験体の焼失深さ・炭化深さ・変色深さを測定した。

3.3 加熱 60 分・放冷 180 分の実験結果

小型耐火炉実験は、加熱・放冷時間及び加熱温度を様々に変化させて計 16 回行ったが、このうち加熱 60 分・放冷 180 分の実験結果を示す。図 3.2 に、実験後の試験体の様子を表す。図 3.3 に実験後に切断した試験体の切断面を示す。図 3.4 に試験体の炭化層形状の測定結果を示す。点線で囲んだ部分で炭化層の脱落が発生している。



図 3.2 実験後の試験体の様子

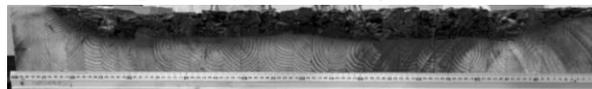


図 3.3 試験体の切断面

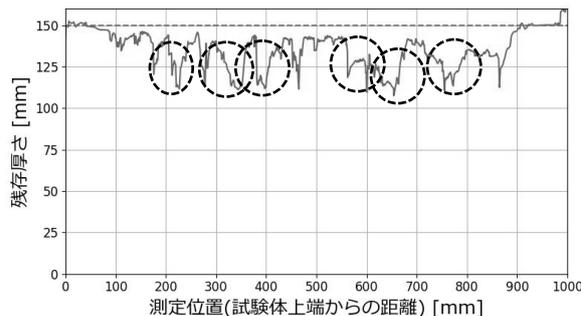


図 3.4 試験体の炭化層形状

4. 炭化予測モデルの計算方法と計算条件

4.1 計算モデルの流れ

本研究で構築した炭化予測モデルは、Parker による木質試験体の亀裂と収縮を考慮した熱伝導計算モデル¹⁾をもとに、これを改良したモデルである。炭化予測モデルの計算の流れは以下の通りである。

- (1) 試験体を表面に平行な方向に、薄く温度の等しいスライスに分割し、各スライス内の温度が均一であると仮定する。
- (2) 熱伝導方程式を使用して微小時間後の各スライスの温度を計算する。
- (3) 各スライスの残量比とスライスの温度の関数として、質量減少速度を計算する。
- (4) 質量減少速度から、微小時間後の残量比を計算する。
- (5) 残量比から各スライスの収縮率及び試験体の焼失・炭化・変色深さを求める。
- (6) (2)~(5)の計算を実験終了時刻まで微小時間ごとに行う。

4.2 計算モデルの亀裂と収縮の扱い

揮発性成分が熱分解すると、木材内部の繊維の結合が変化して炭化が進み、試験体が収縮する。収縮した試験体の寸法残存率は、孫らがカラマツ材での測定によって得た回帰式²⁾により求める。

加熱側表面に垂直な方向の収縮により、表面は後退する。加熱側表面に平行な方向の収縮により、表面に引張応力が生じ、これによって加熱側表面に亀裂が生じる。本計算モデルでは、図 4.1 に示すように、亀裂の中心から表面上の両方向に一定の間隔をおいて均一に亀裂が分布していると仮定する。亀裂の間隔は実験による測定値を使用する。亀裂が生じることでスライスは、幅と奥行きがそれぞれの亀裂間隔、厚みがスライスの厚み dx [m]のコントロールボリューム(以下 CV と省略する)に分割される。図 4.2 に示すように、これらの CV が収縮して側面が階段状となる亀裂形状を仮定する。

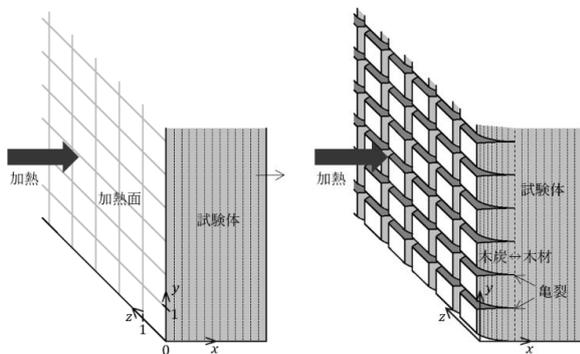


図 4.1 試験体表面における炭化構造

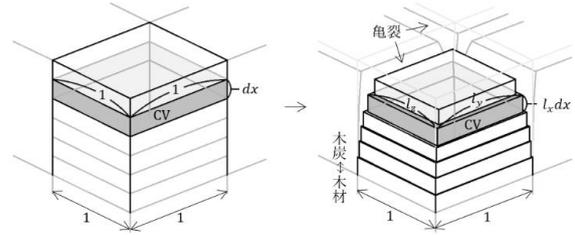


図 4.2 試験体の炭化構造の拡大図

4.3 計算モデルの熱伝導方程式

本計算モデルの熱伝導方程式を式(1)に示す。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \left(l_x \frac{\partial}{\partial x} (l_y l_z) \right) \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \left(\frac{\rho_0 h_p}{l_x l_y l_z} \right) \left(-\frac{\partial Z_1}{\partial t} \right) + \left(\frac{\rho_0 h_{glow}}{l_x l_y l_z} \right) \left(-\frac{\partial Z_2}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} C_g G T + \left(l_x \frac{\partial}{\partial x} (l_y l_z) \right) \phi \quad \dots (1)$$

ただし、

- Z_1 … 試験体の揮発成分の残量比[kg/kg]
- h_{glow} … 炭の酸化反応の発熱量 [kJ/kg]
- Z_2 … 試験体の不揮発成分の残量比[kg/kg]
- G … 試験体内部を加熱面側へ移動する揮発成分の質量流量[kg/m²・s]
- ϕ … 亀裂面から CV に流入する単位面積当たりの正味の熱流[kW/m²]
- l_x … 半径方向の寸法残存率[m/m]
- l_y … 接線方向の寸法残存率[m/m]
- l_z … 軸方向の寸法残存率[m/m]

とする。式(1)の右辺の第 1 項は隣接する CV へ流入する熱流を、第 2 項は亀裂面から流出する熱流を、第 3 項は揮発性成分の熱分解による吸熱を、第 4 項は炭化層表面の赤熱による発熱を、第 5 項は通過する揮発成分が運搬する熱流を、第 6 項は亀裂面から流入する熱流を表す。

ここで、亀裂面から CV に流入する単位面積当たりの正味の熱流 ϕ は、

$$\phi = \begin{cases} h(T_f - T_x) + F\varepsilon\sigma(T_f^4 - T_x^4) & (\text{発炎燃焼していないとき}) \\ h(T_f - T_x) + F\varepsilon\sigma(T_f^4 - T_x^4) + Fq''_{fr} & (\text{発炎燃焼しているとき}) \end{cases} \quad \dots (2)$$

によって求める。ただし、

- h … 試験体加熱面への対流熱伝達率[kW/m²・K]
- T_f … 炉内温度[°C]
- T_x … CV の温度[°C]
- F … 亀裂面から見た亀裂開口の形態係数[-]
- ε … 試験体表面の放射率[-]
- σ … ステファン・ボルツマン定数[kW/m²・K⁴]
- q''_{fr} … 試験体表面への火炎の放射熱[kW/m²]

とする。試験体表面への火炎の放射熱は、Tewarson による測定結果³⁾から 10 kW/m² とする。

4. 4 炭化層の脱落の考慮

図 4. 3 のように、炭化層の脱落が生じた断面を想定する。脱落は亀裂の横に起こるものと仮定した。脱落の割合は炭化層厚さが厚くなるとともに大きくなるものとする。また、脱落が起きた CV は脱落の割合に応じて残量比及び寸法残存率を小さくする。

脱落の深さと脱落の割合は耐火炉試験の結果から炭化層厚さとの関係を調べ、炭化層厚さの計算結果から脱落深さ及び割合を計算する。

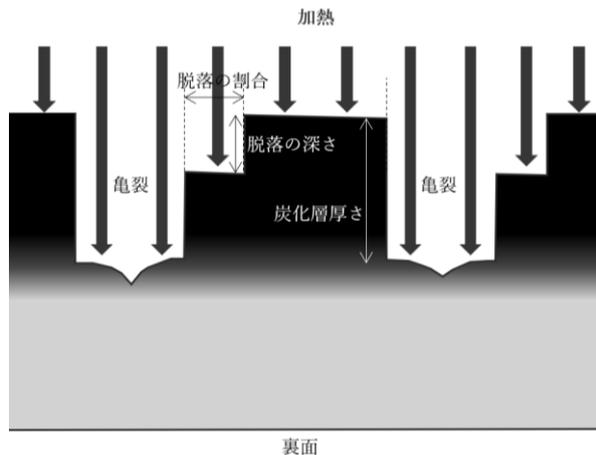


図 4. 3 炭化層の脱落が起きた断面

4. 5 炭化位置の判断

図 4. 4 に示すように、試験体の加熱表面が収縮して後退した深さを焼失深さとする。また、CV の残量比が 0.4 となる CV の位置を炭化深さとする。さらに、CV の残量比が 0.9 となる CV の位置を変色深さとする。

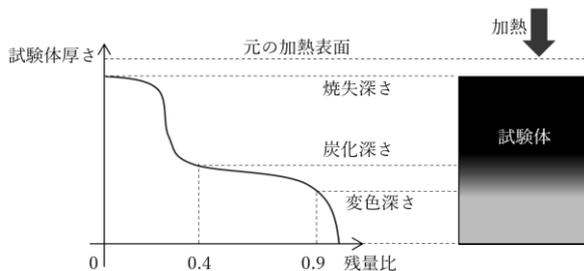


図 4. 4 焼失深さ、炭化深さ、変色深さの判断

4. 6 計算条件

試験体の比熱と熱伝導率は、それぞれ広範囲な文献調査によって作成した木材と木炭の比熱と熱伝導率の回帰式を使用して求め、部分的に炭化している場合には木材の値と木炭の値を比例配分して試験体の比熱と熱伝導率を求めた。これらの回帰式と、その他の物性値等の計算条件を表 1 に示す。

表 1 計算条件

木材の比熱 $c = 1182 + 2.957T$

木炭の比熱 $c = 778.7 + 2.476T - 2.195 \times 10^{-3}T^2 + 8.933 \times 10^{-7}T^3$

木材の熱伝導率 $\frac{k(T)}{k_{20}} = \begin{cases} 0.001671T + 0.967 & (0 \leq T \leq 100) \\ -0.000706T + 1.204 & (100 \leq T \leq 200) \end{cases}$

木炭の熱伝導率 $k = 4.236 \times 10^{-11}T^3 + 0.0801$

揮発性成分の熱分解による残量比減少速度⁴⁾

$$\frac{dZ_1}{dt} = (Z_{char} - Z_0) \times \left(\frac{Z - Z_{char}}{Z_0 - Z_{char}} \right)^{0.03} \times e^{3.34 \frac{5.244 \times 10^4}{RT}}$$

赤熱による質量減少速度⁵⁾

$$m''_{glow} = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314T}\right)$$

試験体の密度 463 kg/m³

試験体の放射率 0.90

木材の燃焼熱 13500 kJ/kg

不揮発成分の残量比 0.25

揮発成分の熱分解潜熱 3590 kJ/kg

炭の酸化反応の発熱量 23410 kJ/kg

y 方向の亀裂の間隔 0.040 m

z 方向の亀裂の間隔 0.029 m

5. 実験結果と計算結果の比較

5. 1 加熱 60 分・放冷 180 分の結果の比較

加熱・放冷時間及び加熱温度を様々に変化させた実験結果のそれぞれと計算結果とを比較した。このうち加熱 60 分・放冷 180 分の結果を表す。図 5. 1 に試験体の内部温度変化の比較を示す。加熱時の内部温度変化は実験結果との一致が良好である。放冷時には、実験結果より内部温度が高く計算された。図 5. 2 に試験体の焼失・炭化・変色深さの比較を示す。焼失深さは実験結果よりもやや深く計算された。炭化深さと変色深さは実験結果との一致が良好である。

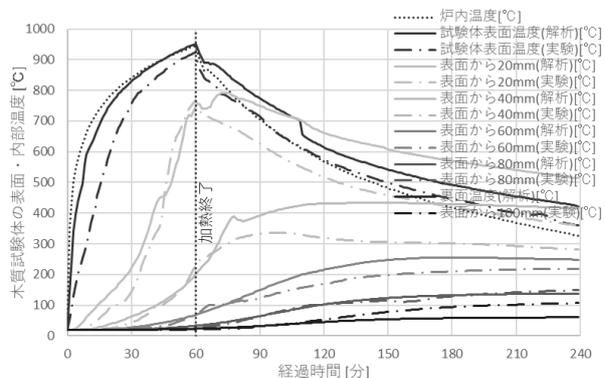


図 5. 1 内部温度変化の比較

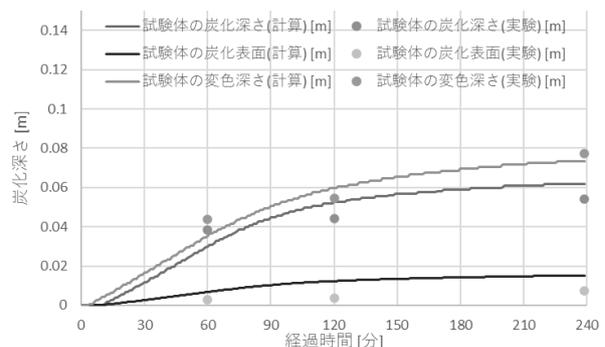


図 5. 2 焼失・炭化・変色深さの比較

5. 2 加熱・放冷時間を変化させた場合

加熱・放冷時間を様々に変化させた場合の焼失深さの比較を図 5. 3 に示す。焼失深さは全体として実験結果よりも深く計算された。図 5. 4 に炭化深さの比較を示す。放冷 0 分では実験結果よりも炭化深さが浅く計算された。これは、加熱中に炉内の酸素濃度が 0 であることから計算上では加熱中の赤熱の強さを 0 としたが、実際には加熱中にも赤熱が起こっていた可能性を示唆している。放冷 180 分では実験結果よりも炭化深さが深く計算された。これは、計算において放冷中の赤熱速度を過大に評価してしまったためと考えられる。しかし、炭化深さの実験結果と計算結果との差は

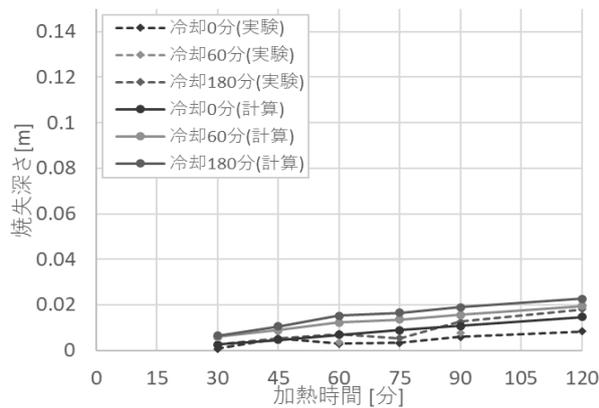


図 5. 3 焼失深さの比較

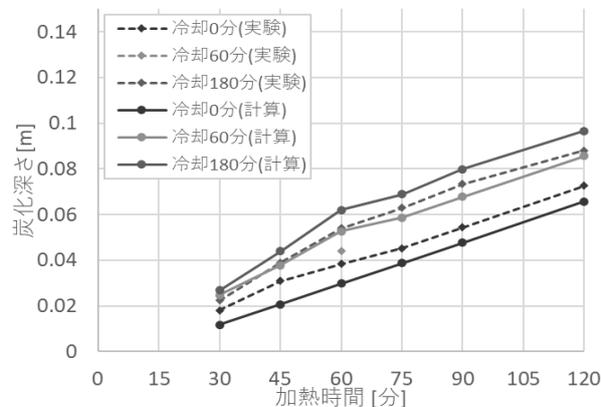


図 5. 4 炭化深さの比較

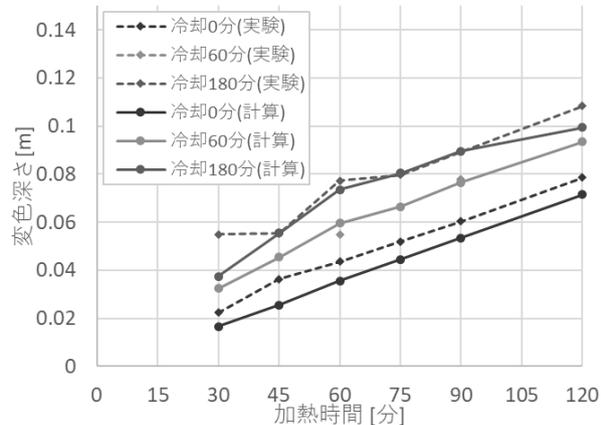


図 5. 5 変色深さの比較

最大でも 1cm 以内であった。図 5. 5 に変色深さの比較を示す。変色深さは実験結果との一致が良好である。

5. 3 加熱温度を変化させた場合

加熱温度を様々に変化させた場合の焼失・炭化・変色深さの比較を図 5. 6 に示す。炭化深さは全体として実験結果よりも深く計算された。一方、焼失深さ・炭化深さ・変色深さが加熱温度を変化させてもあまり変化しないという点においては実験結果と計算結果が一致した。

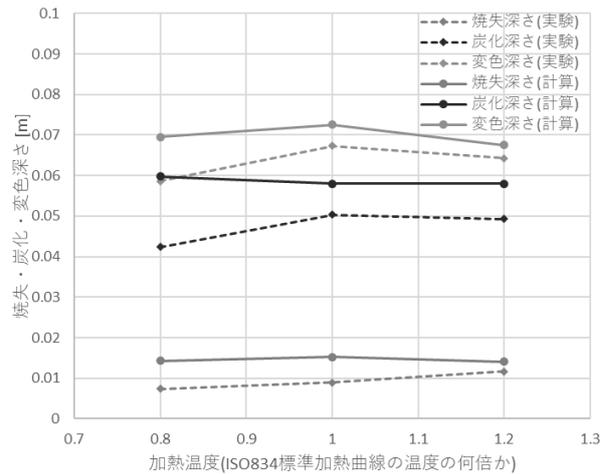


図 5. 6 焼失・炭化・変色深さの比較

6. 結論

本研究では、試験体の収縮及び炭化層表面の亀裂、炭化層の脱落を考慮した炭化予測モデルを提案した。さらにこのモデルを用いた計算結果と小型耐火炉による実験結果を比較したところ、加熱・放冷時間を様々に変化させた場合には試験体の炭化深さを誤差 1cm 以内の精度で予測することができた。また、加熱温度を変化させた場合には炭化深さがあまり変わらないという点が実験結果と計算結果で一致した。

本研究の今後の課題は、亀裂内での赤熱速度などの物性値や計算条件をより精緻化し、より精度の高い炭化予測をできるようにすることである。

参考文献

- 1) Parker, W. J.: Prediction of the Heat Release Rate from Basic Measurements, Heat Release in Fires, 1992, p333-355
- 2) 孫安陽, 原田和典, 仁井大策, 黒田瑛一, 茶谷友希子 : カラマツの高温加熱による質量と寸法変化関係の定式化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021
- 3) Tewarson, A.: Physico-Chemical and Combustion, Pyrolysis Properties of Polymeric Materials, NBS-GCR-80-295, Nat. Bur. Stand. (U.S.), 1980
- 4) 孫安陽, 原田和典, 仁井大策, 山口純一: 各種木材の熱分解速度の測定と反応速度パラメータの推定, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering Vol. 71. No. 2, 2021
- 5) 茶谷友希子 (私信)