

大断面集成材の火災後の燃え止まり予測に関する研究

—カラマツ炭化層の赤熱のモデル化および難燃薬剤処理スギ材の熱伝導率の定式化—

A Study on the Prediction of Self-fire-extinguishing Performance of Glue-laminated Timber during Post Fire Cooling Period

- Modeling of Glowing of Larch Char and Formulation of the Thermal Conductivity of Flame Retardant Japanese Cedar Timber -

建築学専攻 原田・上谷研究室 茶谷友希子

1. 研究の背景

木造の大規模耐火建築物を実現するためには、火災中だけでなく火災終了後にも自己燃焼を停止して常温に復帰するまで必要な耐力を保持し、崩壊しないような部材断面の設計が求められる。これを燃え止まり設計と呼ぶ。燃え止まりは様々な外的要因や木質材料の特性が相互に関係する複雑な現象であるが、その性能は個別に実験的な検討をせざるを得ない。多様な燃え止まり部材を開発するためには、解析により燃え止まり性能が予測できるようになることが期待されている。

本研究に先立って行われたカラマツの薄片の炭を用いた燃焼実験¹⁾では、赤熱反応速度が実大部材の値よりも大きく測定された。そのため、赤熱反応速度の測定には、ある程度の厚さの試験体を表面から赤熱させる必要がある。また、燃え止まり部材の一つである難燃薬剤を注入したスギ集成材は熱伝導率の値が明らかとなっていないため、その燃え止まり性能を解析的に評価することが現時点では難しい。

2. 研究の目的

本研究では、コーンカロリメータを用いて一定の放射強度でカラマツ集成材を加熱し赤熱反応を測定する。

測定値から赤熱反応速度を推定し、反応速度式を作成する。さらに、燃え止まりが発生する付近での測定を行い、燃え止まり条件を明らかにする。作成した赤熱反応速度式を既往の燃え止まり予測プログラムに適用し、実験結果を再現できるか検証を行う。

また、難燃薬剤を注入したスギ材の常温から高温域の熱伝導率を測定し、定式化する。

3. カラマツ集成材の長時間コーンカロリメータ加熱実験による赤熱反応速度式の作成

3.1 実験方法

図1に試験体の概要を示す。試験体は厚さ50mm³のカラマツ集成材である。密度は514~613kg/m³、含水率は0.094~0.166kg/kgである。試験体の側面をセラミックファイバーで覆って断熱し、上面のみを加熱した。表1に各試験体の初期密度と含水率を示す。

図2に実験装置の写真、図3に実験装置の概要を示す。一定の加熱強度で試験体を加熱し、発熱速度を酸素消費法で測定した。質量減少速度はロードセルで測定した。また、レーザー変位計で試験体の表面の焼失速度を、赤外線カメラで試験体の表面温度を、極細熱電対で試験体の裏面温度を測定した。同時に、ビデオ

表1 カラマツ試験体と実験条件

試験体	加熱条件		初期物性値		実験時間[s]				
	加熱面	加熱強度 [kW/m ²]	寸法[mm]	密度 [kg/m ³]	含水率 [kg/kg]	点火/着火	加熱強度変更	実験終了	
柎目-50	柎目	50	100×100×50	548.28	0.154	72	/	4050	
柎目-30(L)				552.32	0.148			3150	
柎目-30(S)		30		567.54	0.135	180		1560	
柎目-20(L)				567.12	0.121			3810	
柎目-20(S)		20		568.42	0.134	270		2400	
柎目-15(L)				584.64	0.135			3756	
柎目-15(S)		15	100×50×50	581.96	0.138	360		2790	
柎目-8.7(1)				572.84	0.139			1815	3570
柎目-8.7(2)		15 → 8.7	50	570.70	0.129	360		2687	4295
柎目-8.7(L)				594.56	0.105			1676	4616
柎目-8.7(S)		8.7	50×50×50	546.63	0.094	360		1757	3908
板目-50				563.88	0.114			86	1800
板目-30(L)		板目	50	100×100×50	557.82	0.164		180	2880
板目-30(S)					553.36	0.166			1940
板目-20(L)	30		513.78		0.143	270	3300		
板目-20(S)			544.70		0.121		2520		
板目-15(L)	20		100×50×50		559.04	0.129	360	3640	
板目-15(S)					531.52	0.114		2610	
板目-8.7(L)	15 → 8.7		50	612.91	0.118	360	2421	6050	
板目-8.7(S)				604.98	0.138		1796	4885	
板目-0	15 → 0		50×50×50	578.40	0.126	360	1990	2815	

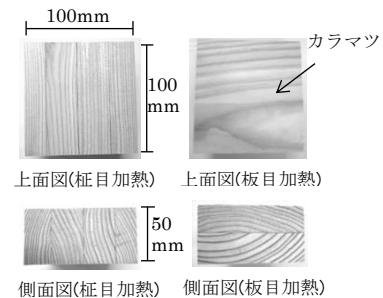


図1 試験体の概要

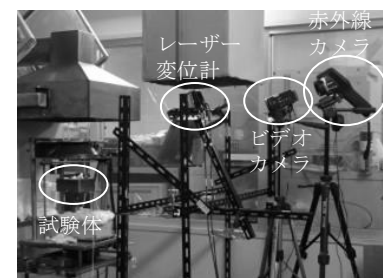


図2 実験装置の写真

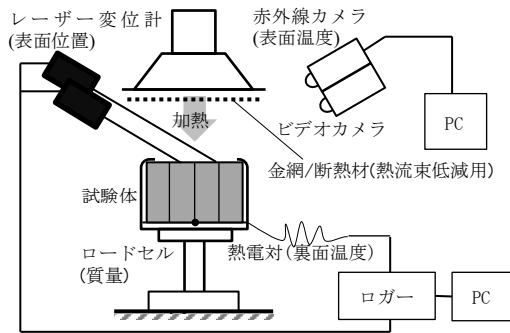


図3 実験装置の概要

カメラで燃焼性状を記録した。加熱強度 8.7 および 0kW/m²では、カラマツの着火限界熱流束を下回るため、15kW/m²で着火・燃焼させた後に試験体とヒーターの間に金網(断熱材)を挿入し、加熱強度を低減させた。試験体の加熱面は板目面を加熱するものと柃目面を加熱するものの2種類とした。コーンヒーターの加熱強度は0~50 kW/m²の6種類である。また、実験終了後の試験体切断面における赤熱反応による燃え進みを比較するために、同じ加熱面と加熱強度で赤熱反応継続時間が長(L)と短(S)の2回の実験を行った。

3.2 実験結果

板目-8.7(L)の結果を例として示す。

図4に実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を示す。加熱強度 15kW/m²では点火、消炎した後、すぐには赤熱が開始しない。消炎後も加熱を続け、一定時間が経過して表面温度が上昇すると赤熱が開始する。赤熱が安定したことを確認して、試験体とヒーターの間に金網を挿入した。これにより、試験体に入射する熱流は約 8.7kW/m²となる。金網を挿入すると一旦赤熱は停止するが、そのまま加熱し続けると赤熱が再開した。

図5に質量減少速度と表面温度、裏面温度を示す。質量は、それぞれの加熱強度で赤熱反応が起こっている期間は一定の速度で減少している。質量減少速度は、加熱強度 15kW/m²では 0.002818kg/(m²s)、加熱強度 8.7kW/m²では 0.001500kg/(m²s)の値である。表面温度は、消炎後、約 390℃まで下がるがその後上昇し、480℃を超えると赤熱が発生し、580℃程度まで上昇する。金網を挿入すると急激に表面温度が低下し、380℃程度まで下がりいったん赤熱が停止するが、400℃を超えると再び赤熱が発生し 480℃程度まで上昇する。裏面温度は単調に上昇するが、金網を挿入すると停滞する。赤熱が再開すると再び裏面温度が上昇する。

図6に試験体表面の焼失深さを示す。赤熱中は表面は一定速度で焼失する。金網を挿入し赤熱が停止すると焼失は停止する。赤熱が再開すると焼失も再開する。

3.3 加熱強度と燃焼性状の関係(赤熱中)

赤熱反応発生期間における質量減少速度、表面温度

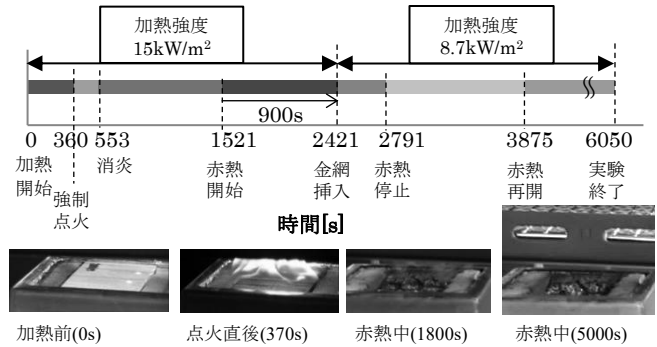


図4 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子

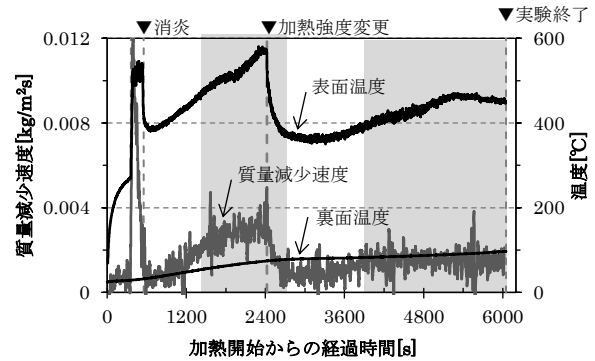


図5 質量減少速度、表面温度、裏面温度

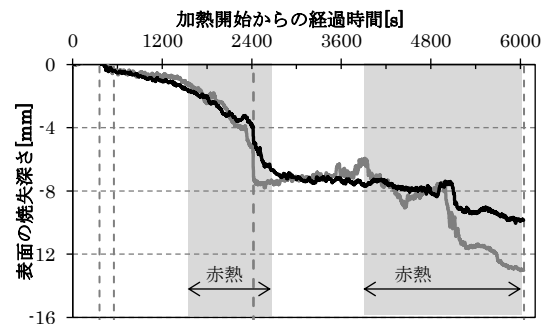


図6 試験体表面の焼失深さ

試験体表面の焼失速度と加熱強度の関係をそれぞれ図7,8,9に示す。いずれも加熱強度が大きいほど、値は小さい。図7から、加熱強度 8.7kW/m²ではゆっくりではあるが赤熱が続いているが、加熱強度 0kW/m²では赤熱が完全に停止する。この時の平均表面温度は加熱強度 8.7kW/m²で約 400℃である。よって、試験体の表面温度が 400℃では燃え止まらない。

3.4 発熱速度の推定

酸素消費法による発熱速度の測定値は、本実験では試験体の燃焼が小さく燃焼生成ガスを完全に捕集できないため、測定精度が低いと考えられる。そこで、測定した質量減少速度と表面・裏面温度を用いて赤熱反応の発熱速度を推定した。試験体表面の熱収支、試験体切断面の熱収支、試験体全体の質量減少速度からそれぞれ求めた発熱速度を図10に示す。各方法による値の違いは小さく、発熱速度は温度が低いほど小さい。

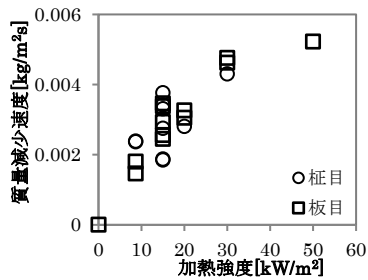


図7 質量減少速度と加熱強度

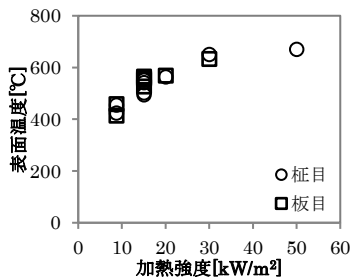


図8 表面温度と加熱強度

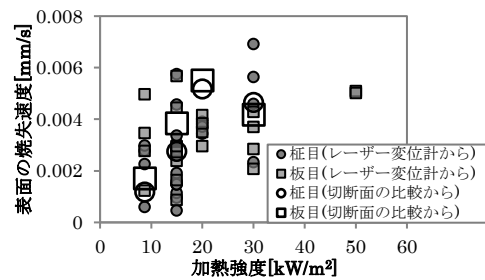


図9 試験体表面の焼失速度と加熱強度

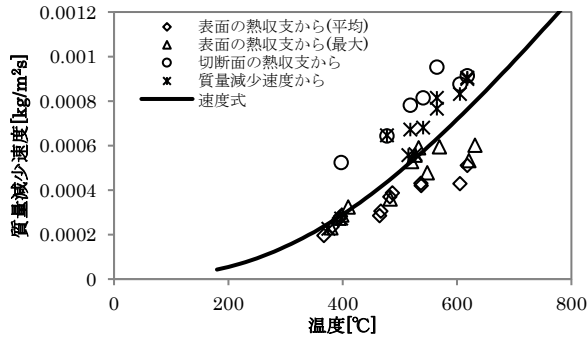


図10 赤熱反応の発熱速度の推定値

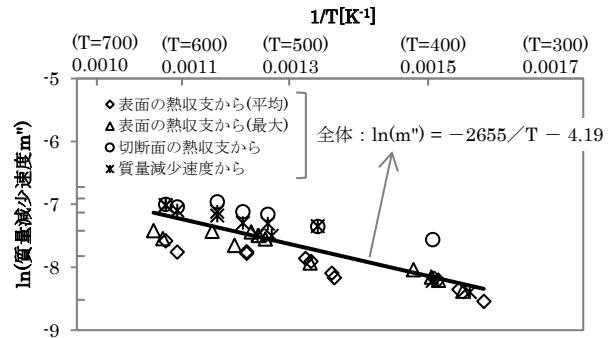


図11 アレニウスプロット

3. 5 赤熱反応速度式の作成

3. 4で求めた発熱速度[kW/m²]を炭の単位燃焼発熱量[kJ/kg]で割ることにより、質量減少速度 \dot{m}''_{glow} [kg/m²s]に変換した。赤熱反応速度はアレニウス式に従うとしてアレニウスプロットを作成し、活性化エネルギー E_{glow} と頻度因子 \dot{m}''_0 を求めると次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{m}''_{glow} &= \dot{m}''_0 \times \exp\left(-\frac{E_{glow}}{RT}\right) \\ &= 0.015 \times \exp\left(-\frac{22.075 \times 10^3}{8.314 \times T}\right) \quad (1) \end{aligned}$$

3. 6 燃え止まり予測プログラムへの適用

作成した赤熱反応速度式(1)を既往の燃え止まり予測プログラム³⁾へ適用し、実験結果を再現できるかを検証した。図12に板目-8.7(L)の表面温度と裏面温度の計算結果と実験値の比較を示す。温度変化の傾向は良い一致を示している。加熱強度変更後、実験では赤熱が再開して温度が上昇するが、計算では3600秒頃に赤熱が停止し表面温度が下がっている。図13に試験体表面の焼失深さの計算値と実験値の比較を示す。表面の焼失速度は計算値の方が実験値よりも少し小さい。

4. 難燃薬剤処理スギ材の熱伝導率の測定と定式化

4. 1 測定方法

熱伝導率の測定には、非定常細線比較法を用いた。図14に測定装置の概要を示す。熱線には直径0.35mmのニクロム線を、基準試料にはセラミックファイバーボードを用いた。電気炉内を20,50,80,100,130,150°Cの設定温度で一定に保ち、試験体の温度変化が十分に小さくなった状態でニクロム線に通電し、ニクロム線中心温度[°C]とニクロム線に加わる単位長さ当たりの電

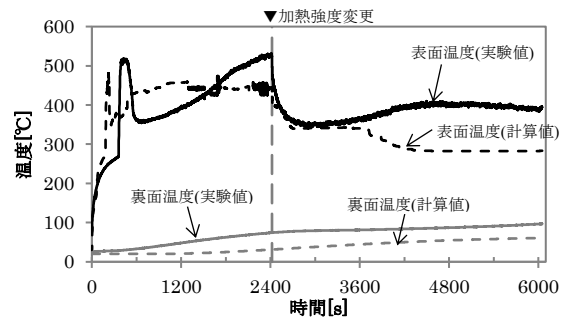


図12 計算値と実験値の比較(表面,裏面温度)

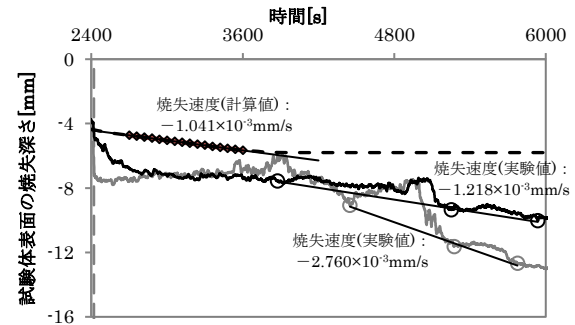


図13 計算値と実験値の比較(表面の焼失速度)

力[W/m]から熱伝導率を計算した。測定終了後、炉から試験体を取り出し、電子天秤で質量を測定した。熱線を当てる位置は、図15に示すように熱線が材軸と直交する方向と熱線が材軸と平行となる方向(以下、直交方向・平行方向と呼ぶ)の2種類であり、各温度で両方向の測定を行った。

試験体は、100×100×25mmのスギ板であり、CO₂レーザーによるインサイジング処理を行い、減圧・加圧法により、窒素りん酸系の難燃薬剤を注入したもの

である²⁾。各試験体の物性値を表2に、試験体の写真を図15に示す。薬剤注入前の初期密度は362~548kg/m³、薬剤注入量は0~191kg/m³である。含水率は静電容量型含水率計で測定したところ0.10~0.28kg/kgであった。

4. 2 測定結果

実験 C-70-2 の測定結果を図17に示す。密度は、温度が上昇するほど水分の蒸発と薬剤の分解により小さくなっている。熱伝導率は、温度が高いほど少し大きくなっている。直交方向の熱伝導率は平行方向の熱伝導率よりも1.2~1.5倍大きい値となっている。

4. 3 熱伝導率式の作成

常温の熱伝導率 $\lambda(\rho_{20}, 20)$ [W/(m·K)]は密度 ρ [kg/m³]の関数として表されるとして次式で近似した。図16に熱伝導率と密度の関係を示す。難燃処理木材の熱伝導率は、無処理材の熱伝導率⁴⁾の1.5~1.9倍となった。

$$\lambda_{\parallel}(\rho_{20}, 20) = 2.851 \times 10^{-4} \rho_{20} + 0.0257 \quad (2)$$

$$\lambda_{\perp}(\rho_{20}, 20) = 3.804 \times 10^{-4} \rho_{20} + 0.0257 \quad (3)$$

高温域の熱伝導率 $\lambda(\rho_{20}, T)$ [W/(m·K)]は常温の熱伝導率に対する比率として表されるとして次式で近似した。図17に式(4)~(6)の値を併せて示す。温度に対する熱伝導率の変化の傾向は無処理木材⁵⁾とは異なった。

$$\frac{\lambda(\rho, T)}{\lambda(\rho, 20)} = f(\rho, T) \quad (4)$$

$$f_{\parallel}(T) = \begin{cases} 1.855 \times 10^{-4} T + 0.996 & (T \leq 100) \\ 2.440 \times 10^{-3} T + 0.771 & (100 \leq T \leq 150) \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{\perp}(T) = \begin{cases} 1.536 \times 10^{-3} T + 0.969 & (T \leq 100) \\ 1.669 \times 10^{-4} T + 1.106 & (100 \leq T \leq 150) \end{cases} \quad (6)$$

5. 結論

本研究では、カラマツ集成材のCCM長時間加熱実験を行い、赤熱反応速度と表面温度、表面の焼失速度を同時に測定した。燃え止まりは加熱強度が0~8.7kW/m²の範囲で発生し、そのときの表面温度は166°C~408°Cであった。

測定した表面温度と質量減少速度から赤熱反応速度を推定し、360~640°Cの温度範囲における、赤熱反応速度式を作成した。作成した赤熱反応速度式を既往の燃え止まり予測プログラムに適用して、カラマツCCM加熱実験の解析を行い、計算により実験結果を再現できるかを検証した。その結果、試験体表面温度と焼失速度の実験値と計算値は良い一致となった。

また、難燃薬剤を注入したスギ材の常温から高温域までの熱伝導率を測定した。薬剤注入後密度が大きいほど熱伝導率の値は大きい。熱線を材軸に平行に当てた場合よりも材軸に直交に当てた場合の方が熱伝導率の値は1.2~1.5倍大きかった。

測定結果を用いて、常温の熱伝導率を密度の関数で表した。その結果、熱伝導率の値は無処理木材の1.5~1.9倍となった。高温域(~150°C)の熱伝導率は、常温の

表2 難燃薬剤処理スギ材試験体

実験	薬剤注入量 [kg/m ³]	注入後密度 [kg/m ³]	初期含水率 [kg/kg]	
1	C-0	0	362.35	0.10
2	C-54	54	602.34	0.28
3	C-70-1	70	444.78	0.18
4	C-70-2	70	447.93	0.27
5	C-80-1	80	444.73	0.20
6	C-80-2	80	467.71	0.26
7	C-100-1	100	485.25	0.24
8	C-100-2	100	487.25	0.19
9	C-115	115	549.24	0.25
10	C-120	120	499.89	0.25
11	C-122	122	552.35	0.15
12	C-127	127	624.23	0.14
13	C-191	191	608.29	0.15

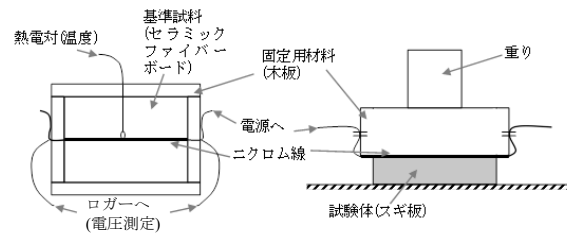


図14 測定装置概要

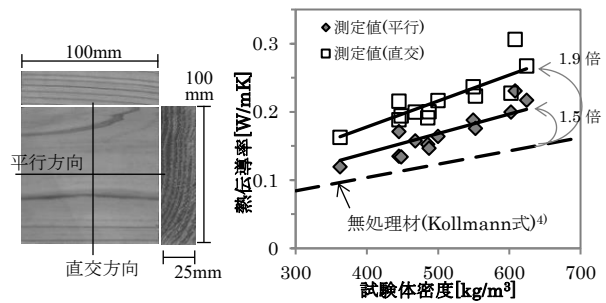


図15 試験体

図16 常温の熱伝導率

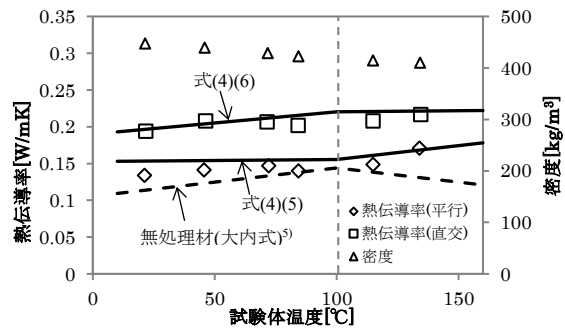


図17 高温域の熱伝導率と密度(C-70-2)

熱伝導率に対する比率として表した。温度に対する熱伝導率の変化の傾向は無処理木材とは異なった。

<参考文献>

- 1) 茶谷友希子ら, :カラマツ集成材の燃え止まり予測のための炭化層焼失速度の測定と感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.241-244, 2014
- 2) 服部順昭ら, :レーザーインサイジング難燃処理ラミナを用いたスギ耐火壁の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.353-354, 2012
- 3) 性能基準推進協会, 木造耐火燃え止まり WG, :木質耐火構造部材の燃え止まり解析とその利用法に関する報告書, 2014
- 4) F.P.Kollmann, W.A.Cote, :Principles of wood Science and Technology I, Springer-Verlag, 1968
- 5) 大内富夫, :木材の高温時の熱伝導率, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.785-786, 1987