

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18201

研究課題名(和文)木材の有炎燃焼・赤熱燃焼に関わる熱物性値の解明と燃焼シミュレーション

研究課題名(英文)Thermophysical properties and combustion simulation related to flammable combustion and red heat combustion of wood

研究代表者

上川 大輔(Kamikawa, Daisuke)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：30409651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：コーンカロリメーターや恒温炉を用いたスギサンプルに対する加熱実験を実施し、木材内部での熱分解が発熱側であることを示した。また、熱分析により、温度ごとの各種材料(無処理スギ、薬剤処理スギ、それらの炭化物)の吸発熱性状を計測し「重量減少あたりの発熱量[W/g]」の値を検討した。さらに、コーンカロリメーターに送風装置を組み合わせた実験装置を用い、炭化物の赤熱燃焼による発熱速度と、強制対流風速や炭化物表面温度との関係性を明らかにした。これらの実験から得られた結果を改良差分法による熱伝導解析モデルに組み込み、コーンカロリ試験や恒温炉での実験を数値計算で再現し、モデルの検証・改良を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な研究機関やゼネコン等で取り組まれている、火災時の木質部材の耐火性能に関する数値解析にて、計算モデルの設置値や関数として組み込まれるべき重要な情報を与えるものであり、より正確な予測を行うために利用されることが見込まれる。

研究成果の概要(英文)：A heating experiments were conducted on a Japanese cedar samples using a corn calorimeter or a thermostatic oven, and it was shown that the thermal decomposition inside the wood was on the exothermic side. Moreover, the endothermic and exothermic properties of various materials (untreated cedar, chemical-treated cedar, and their carbides) were measured by thermal analysis, and the value of "calorific value per weight loss [W/g]" was examined. Furthermore, the relationship between the heat generation rate due to the red heat combustion of carbides, the forced convection wind speed and the surface temperature of carbides was clarified by using an experimental device that combined a corn calorimeter with an air blower. The results obtained from these experiments were incorporated into the heat conduction analysis model by the improved difference method, and the model was verified and improved by reproducing numerical analysis for these experiments.

研究分野：防火

キーワード：木材 赤熱燃焼 熱分解 有風下 難燃処理木材

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

当研究グループでは、難燃処理した木材を用いた耐火集成材の開発に取り組んでおり、2時間までの耐火性能を確保することに成功している。同様の木質耐火構造の開発は多くの企業・研究機関により進められており、実験のほかにも数値解析による燃焼予測なども試みられている。耐火性能を数値計算などで予測するためには、木材の有炎・無炎燃焼が継続する機構を明らかにし、例えば燃焼速度とその支配パラメータとの関係や、必要な物性値の温度依存性などの情報を把握する必要がある。しかし木材の燃焼には非常に複雑な現象が多く関連し未解明な部分も多く、未だ適切な計算モデルは得られていない。材の燃焼は、有炎燃焼と赤熱燃焼の状態に分けて考えることができ、数値解析によりこれら燃焼を計算するということは、熱の発生、移動を計算し、温度分布と熱分解を予測、ふたたびこれらから熱の発生等を計算する、ということになる。この計算に含まれる種々の熱的要素のうち、特に、熱分解に伴う吸発熱の値、および、炭化物の赤熱燃焼、の項目については、現状用いられている数値が適切ではないことが疑われたり、必要な数値が未整備となっている。

### 2. 研究の目的

火災安全工学において、可燃物の燃焼を数値解析により予測しようという試みがなされているが、木材の燃焼やその炭化物の燃焼を精度良く再現する計算モデル構築にはいまだ至っていない。この要因として、(1)木材の熱分解反応に伴う吸発熱の計算方法と数値が実際と異なること、(2)炭化物の赤熱燃焼による発熱とその支配要因との関係性が明らかになっていないこと、という2点が考えられる。本課題では、これらに関する情報を熱分析や加熱試験等により明らかにすることを第一の目的とし、さらに、得られた情報を数値解析モデルに組み込み、火災時の木材の燃焼及び燃え止まり現象の再現・予測を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) コーンカロリメーターや恒温炉を用いて板材や円柱状のスギサンプル(図1)に対して一定の加熱を加え、表面や内部の温度計測を行った。これにより実際に材中での発熱が確認できるか、寸法や加熱温度により内部温度の推移がどう変化するか検証するとともに詳細なデータ取りをおこなった。また、示差走査熱量測定(DSC)により、温度ごとの各種材料(無処理スギ、薬剤処理スギ、それらの炭化物)の吸発熱性状を計測。同条件で熱重量・示差熱同時測定(TG・DTA)も実施し、温度ごとの重量変化を計測した。それぞれの出力値から火災予測等に用いる「重量減少あたりの発熱量[W/g]」の値を検討した。

(2) さらに、炭化物の赤熱燃焼による発熱速度と、強制対流風速や炭化物表面温度との関係性を解明するためにコーンカロリメーターに送風装置を組み合わせた実験装置を用い、難燃処理の有無や風速と発熱速度・表面温度の推移を計測した。これらの実験から得られた熱分解性状および赤熱燃焼に関する計算を改良差分法による熱伝導解析モデルに組み込み、コーンカロリメーター試験や恒温炉での実験を数値計算で再現し、モデルの検証・改良を行った。

### 4. 研究成果

(1) 木材の熱分解反応に伴う吸発熱に関して、スギの板状のサンプルに対するコーンカロリメーター加熱燃焼実験および円柱状サンプルに対する恒温炉による加熱実験により、木材の有炎・赤熱燃焼時それぞれの熱収支検証データを取得するとともに、木材の熱分解時の吸発熱性状を材内温度の推移より検証した。図2は円柱状スギサンプルを窒素雰囲気のもと300の恒温炉内で定温加熱した場合のサンプル温度の推移であるが、サンプルの中央ほど最高温度が高く、かつ周囲温度や表面以上となっていることが分かる。これらより、低酸素雰囲気においても木材内部での熱分解が発熱側であることが示唆された。



写真1 円柱状スギサンプル加熱実験の試験終了後のサンプルの様子  
(直径50mm、窒素雰囲気下、300一定)

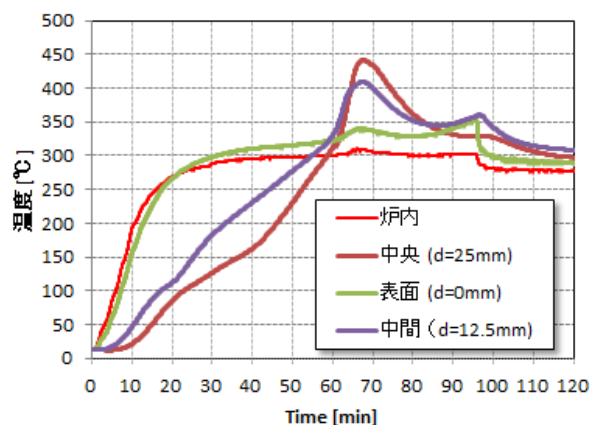


図1 円柱状スギサンプル加熱実験での炉内・サンプル表面・サンプル内部の温度推移の例

また、無処理スギ、薬剤処理スギ、それらの炭化物を粉末としたサンプルに対して、DSC および熱重量・示差熱同時測定 (TG・DTA) を同じ昇温速度・サンプル量の条件で実施し、温度の推移に対するサンプルの熱分解・酸化に伴う発熱量や重量変化を計測した。これら2種の熱分析の結果を合成し、「重量減少あたりの発熱量[W/g]」の値の温度に対する推移を明らかにした。

## (2) 木材炭化物の赤熱燃焼と風速の関係

炭化物の燃焼性状と風速や加熱条件との関係に関して、送風ファンの付いたステンレス製ダクトをコーンカロリメーター燃焼室内に設置した実験装置での計測を行った(写真 2)。サンプルとして無処理スギおよび薬剤処理したスギそれぞれをマッフル炉にて窒素雰囲気中で炭化させたものを用い、表面温度・発熱速度・サンプル重量の推移を計測した。その結果、5m までの有風下における、無処理及び難燃薬剤処理スギ炭化物の赤熱燃焼性状と風速等との関係(図 2 など)を明らかにし、それらより、風速による対流熱伝達率の変化と、酸素との接触機会の増大による発熱速度の上昇との関係を検討した。また、難燃処理スギの炭化物においてある程度以上の風速の場合、表面の温度が送風により一時的に低下するものの、炭化物の収縮に伴う非常に細かい亀裂内での赤熱燃焼が顕著になる現象が見られ、これは耐火集材材での燃え止まりが阻害される原因と考えられた。

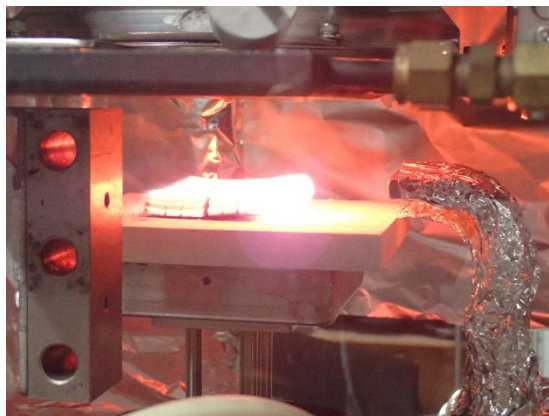


写真 2 有風下での炭化物の燃焼実験の様子 (中央が赤熱燃焼中のサンプル、右の銀色のダクトより送風)

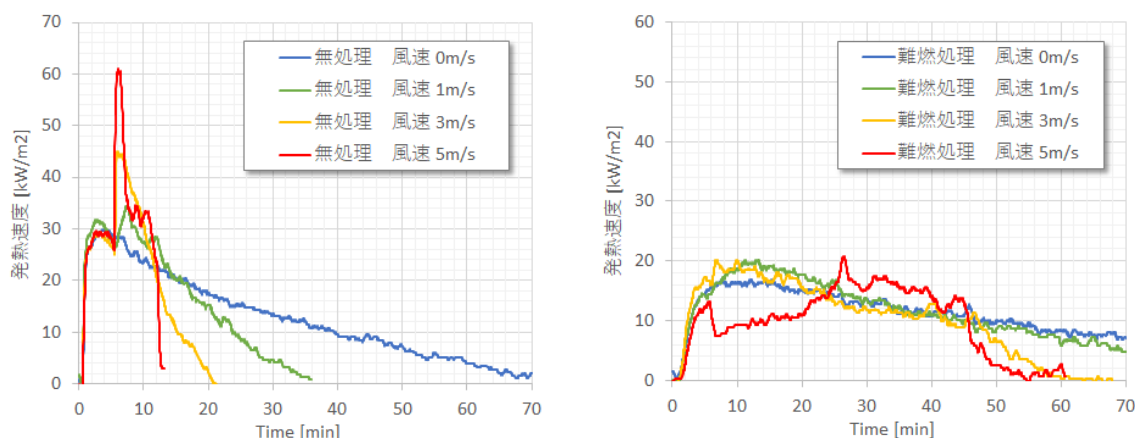


図 2 有風下での炭化物の燃焼試験での、発熱速度の推移の例 (左: 無処理スギの炭化物サンプル、右: 難燃処理スギの炭化物サンプル) 赤熱燃焼が安定する、試験開始 5 分経過時点より送風を開始した。

コーンカロリメーター試験での燃焼の再現・予測を目的として、炭化物が加熱を受けた状態で赤熱燃焼する状況を熱伝導解析により計算する厚さ方向の一次元計算モデルを構築した。モデルでは、炭化物を厚さ方向に細分化し、微小時間での境界領域での外部との熱移動と酸化発熱、各領域間での熱伝導を計算している。無処理木材の炭化物についてはおおむね数値計算による再現ができたものの、難燃処理木材の炭化物の有風下の赤熱燃焼では、割れ内部での赤熱を考慮しない一次元モデルでの燃焼シミュレーションそのままでは、表面温度や試験体全体の発熱速度の推移の再現が難しいことが示唆された。これら検証から得られた情報は、火災時の木質部材の耐火性能に関する数値解析にて、計算モデルの設置値や関数として組み込まれるべき重要な情報に繋がるものであり、今後より正確な予測を行うために利用されることが見込まれる。

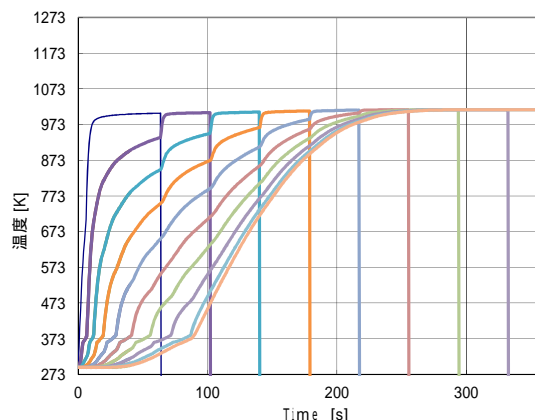


図 3 炭化物の赤熱燃焼の数値計算モデルによる計算結果例 (表面からの深さごとの温度推移。制御上、燃え尽きると 0[K] となる設定としてある)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上川大輔
2. 発表標題 有風下の炭化物の赤熱燃焼性状に関する研究
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----