ー研究（Original Article）ー

木材の発熱性に対する密度，水分の影響

菊地　伸一　　　　　　河原﨑政行[*1]

Influence of Density and Moisture Content on Heat Release Properties of Wood

Shinichi KIKUCHI　　　　Masayuki KAWARASAKI

The building standard law of Japan was revised in 1998 and the test method for evaluating fire prevention materials was changed from the conventional surface flammability test to the heat release test. This is because the heat release property is the key factor in characterizing the flammability of building materials. To develop fire prevention materials corresponding to various wood materials, it is necessary to clarify the heat release properties of wood. To accomplish this, heat release tests were carried out on six species using the ISO cone calorimeter.

The species tested were *Pinus densiflora*, *Larix leptolepis*, *Chamaecyparis obtusa*, *Cryptomeria japonica*, *Abies sachalinensis* and *Fraxinus mandshurica*. The specimens were heated at an irradiance level of 50 kW/m^2, heat release rate, total heat release and effective heat of combustion were measured. Wood had a higher first peak heat release rate just after ignition and high second peak, when the back of the specimen began to burn. After flaming combustion ceased, glowing combustion of the carbonized layer continued for a long time. Heat release rate in the flaming period was related to the original moisture content of the wood. There were clear differences in the total heat release of specimens between the conifers and *F. mandshurica*, and these increased linearly with density. The effective heat of combustion on a dry basis was 14-16 MJ/kg in the flaming period, and 29-32 MJ/kg in the glowing one.

Key words:　heat release, effective heat of combustion, cone calorimeter
発熱性，有効燃焼熱，コーンカロリー計

建築基準法が1998年に改正され，防火材料の評価方法が表面燃焼試験から発熱性試験に変更された。これは，発熱性が火災における材料の重要な燃焼特性だからである。今後，多様な樹種や材料構成に対応した難燃材料の開発を進めていくには，木材の発熱性を詳細に明らかにしておくことが必要である。そこで，ISOコーンカロリー計を用いて6種類の木材に対する発熱性試験を行った。

試験体は入射熱50kW/m^{2}で加熱し，発熱速度，総発熱量および有効燃焼熱を求めた。木材は着火直後と裏面が燃焼する時に発熱速度のピークがあった。発炎燃焼終了後，炭化層の赤熱が長く続いた。発炎燃焼時の発熱速度は初期含水率と関係があった。また，総発熱量は針葉樹とヤチダモとで異なり，それぞれ密度とともに増加した。全乾重量ベースで求めた有効燃焼熱は，発炎燃焼では14～16MJ/kg，赤熱では29～33MJ/kgの範囲にあった。

1. はじめに

木材を内装材料として使用した場合，何らかの火源で加熱された部位に着火し，燃焼が始まることを確実に防ぐことは困難である。従って，防火対策上は着火しても急速に燃焼拡大させないことが重要となる。着火後の火災拡大の程度は，火炎が内装材表面を伝播（でんぱ）するのか，それとも着火部近傍のみの燃焼にとどまるのか，によって大きく左右される。この火炎伝播とは，材料が燃焼して生成する火炎によって加熱された着火部近傍の未燃焼表面の着火が連続して起きる現象である。火炎による加熱の強さは材料の発熱速度によって決まることから，内装材料の発熱性は室火災の拡大を支配する燃焼特性となる。また，内装材料の発熱性は，盛期火災期の火災室温度に大きく影響する燃焼特性でもある。このようなことから，火災においては発熱速度が最も重要な燃焼特性と言われている[1)]。

かつて，発熱速度は生成する燃焼ガスの温度や燃焼装置から失われる熱から計測され，FPLカロリー計[2)]，OSUカロリー計（ASTM E 906[3)]）などを用いた木質材料の発熱速度の評価が行われてきた[4-5)]。しかし，これらの装置は小規模な板状の試験体にしか対応せず，さらに密閉箱中に一定量の空気を供給して燃焼させるなどのため測定操作も煩雑なものであった。

その後，1980年代に入り，酸素消費法に基づくベンチスケールの発熱速度測定装置が開発され[6)]，ASTM E 1354[7)] やISO 5660[8)] として規格化されたコーンカロリー計が材料の発熱速度を評価するための標準的な試験装置として用いられるようになった。

木材についてもコーンカロリー計による発熱データの収集が行われ，入射熱の強さや加熱方向など試験条件の影響，密度，樹種，含水率と発熱速度との関係等が検討されている[9-11)]。しかし，例えば，発熱性に対する密度の影響について，ないとする結果[9-10)]と，あるとする結果[11)]が報告されているなど，不明確な点が多く残されている。

1998年の建築基準法改正に伴い防火材料の性能評価方法が発熱性試験に変更されて以降，難燃処理木材の開発が活発に行われているが，今後，多様な樹種や材料構成・形状等に対応した難燃処理技術の開発を進めていくためには，処理対象となる木材の基本的な発熱性データの蓄積が必要である。

そこで，内装材料として広く用いられている針葉樹5樹種，広葉樹1樹種について，その発熱性データを収集するとともに，発熱性と木材の密度，水分との関係についての検討を行った。

2. 実験

2.1 試験体

試験には，アカマツ（*Pinus densiflora*），カラマツ（*Larix leptolepis*），ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*），スギ（*Cryptomeria japonica*），トドマツ（*Abies sachalinensis*），ヤチダモ（*Fraxinus mandshurica*）の針葉樹材5種類，広葉樹材1種類を用いた。これらから，表面を平滑に仕上げた100（T）×100（L）×15（R）mmの板目材の試験体を作成し，23℃，50%RHで3か月間調湿（養生条件Iとする）した後，発熱性試験に供した。また，発熱性に対する水分の影響を把握するため，JIS A 1321[12)] に準じて45℃の乾燥器中で48時間乾燥（養生条件IIとする）したヒノキ，スギ，ヤチダモについても発熱性試験に供した。各養生条件による試験体の平均含水率は，それぞれ約9%と約5%であった。

各条件の試験体数および養生後の試験体密度を**第1表**に示した。

第1表　発熱性試験に用いた木材

Table 1. Materials used for heat release experiments.

養生条件 Seasoning condition	樹種 Species	試験体数 Number of specimens	密度 Density (g/cm^3)	記号 Mark
I (23℃ 50%RH)	アカマツ *P. densiflora*	9	0.46～0.62	×
	カラマツ *L. leptolepis*	9	0.41～0.59	＋
	ヒノキ *C. obtusa*	12	0.41～0.58	○
	スギ *C. japonica*	11	0.27～0.39	□
	トドマツ *A. sachalinensis*	8	0.34～0.48	◇
	ヤチダモ *F. mandshurica*	14	0.43～0.71	△
II (45℃ 48 hr)	ヒノキ *C. obtusa*	8	0.40～0.56	●
	スギ *C. japonica*	8	0.26～0.36	■
	ヤチダモ *F. mandshurica*	9	0.40～0.67	▲

2.2　発熱性試験

発熱性試験は，コーンカロリー計（東洋精機製作所（株）製）を用い，ISO 5660に準じて行った。

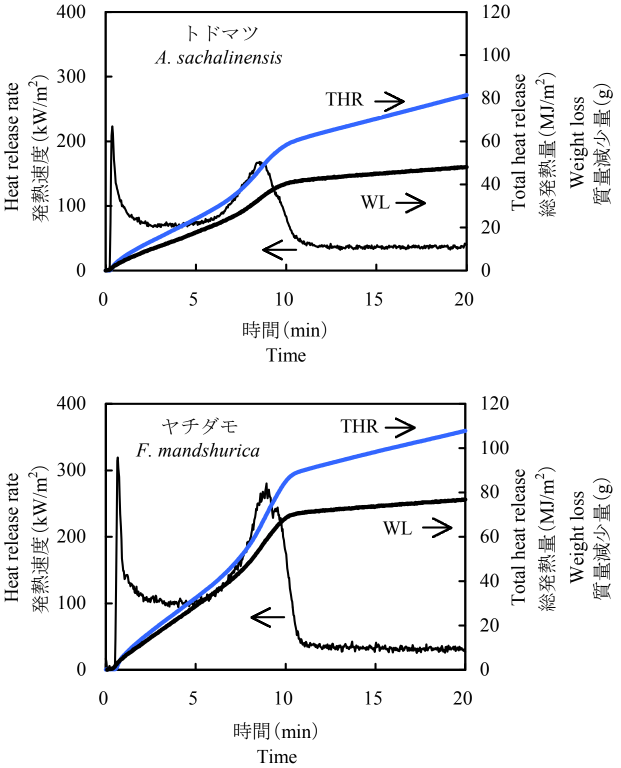
試験体は裏面および側面を厚さ25μmのアルミニウム箔で包み，厚さ12mm，密度65kg/m^{3}のセラミックファイバーを数枚重ねた試験体ホルダーの上にのせ，その上から94×94mmの開口を持つステンレスフレームをかぶせて試験体側面を覆った。水平に置いた試験体に対する上方向からの入射熱は50kW/m^{2}とし，入射熱はシュミット・ボルダー型の熱流計（Medtherm製，Model. GTW-10-32-485A）で測定した。加熱時間は20分間とし，排気ガス中の酸素濃度，試験体質量などを2秒間隔で測定した。酸素濃度は磁気力式酸素分析計（富士電機（株）製，ZAJ型，測定レンジ21-16%）で測定し，発熱速度を算出した。得られた発熱速度から，着火後一定時間経過後までの総発熱量を求めた。また，発熱量および質量減少量から有効燃焼熱を算出した。

3.　結果と考察

3.1　発熱性

養生条件Iのトドマツ，ヤチダモの発熱速度，総発熱量および質量減少量の一例を**第1図**に示した。木材の発熱速度は，着火直後に急上昇して第1のピークを形成し，定常状態を経て第2のピークを形成後，再度定常状態で推移する。第1ピーク後の発熱速度の減衰は，木材表面に形成される炭化層が遮熱層として作用するためであり，第2ピークの形成は試験体裏面が燃焼し始めることによるものである。第2ピーク減衰と共に発炎燃焼が収束し，赤熱や残じん，グローイングと称される炭化材料表面の無炎燃焼状態が長く続き，20分間の加熱終了時においても試験体は無炎燃焼状態にあった。このような発熱速度の変化は，他の樹種および養生条件が異なる試験体でも同様であった。

発炎燃焼の終了点は，無機材料の表面に薄い有機材料を積層した材料のようには明瞭ではないが，発炎燃焼から無炎燃焼となって発熱速度がほぼ一定となる変曲点は多くの試験体で40～60kW/m^{2}の範囲にあった。そこで，発熱速度が60kW/m^{2}を下回った時点を，便宜的に発炎燃焼から無炎燃焼への移行点



第1図　50kW/m^{2}における発熱速度，総発熱量および質量減少量の一例（養生条件I）

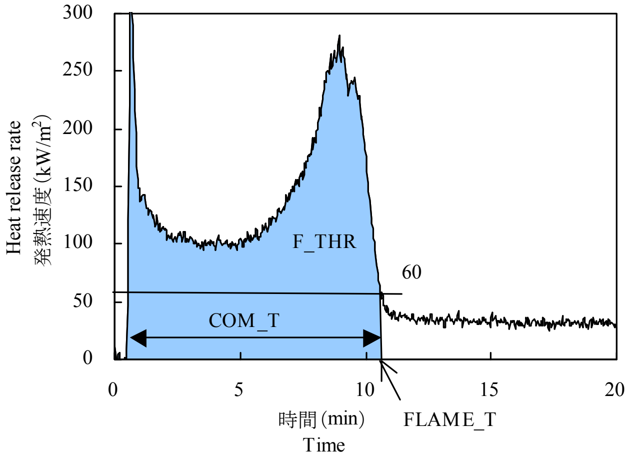
Fig. 1. Heat release rate, total heat release and weight loss of *A. sachalinensis* and *F. mandshurica* at 50 kW/m^2 irradiance (Condition I).

注）THR：総発熱量，WL：質量減少量

note) THR: Total heat release, WL: Weight loss.

（FLAME_T）と定め，着火からFLAME_Tまでを発炎燃焼時間（COM_T），その間の総発熱量を発炎燃焼総発熱量（F_THR）とした（**第2図**）。

養生条件Iの試験体について，密度とCOM_Tの関係を**第3図**に，密度とF_THRとの関係を**第4図**に示した。COM_T，F_THRとも密度との相関が高いが，5種類の針葉樹材とヤチダモとでその傾向が異なり，ヤチダモは針葉樹材よりもCOM_Tが顕著に短く，F_THRはやや小さかった。このため，発炎燃焼におけるヤチダモの平均発熱速度は同程度の密度を持つ針葉樹材よりも大きくなった。また，COM_TはF_THRに比べて個体差が大きくバラツキが生じている。COM_Tと関係の深い第2ピーク出現時間について，密度の大きな樹種ほど長くなると報告されているが[11]，ばらつきが大きいことも併せて指摘されており，密度以外の要因があることが推察される。この要因は本試験だけでは明らかにならないが，組織

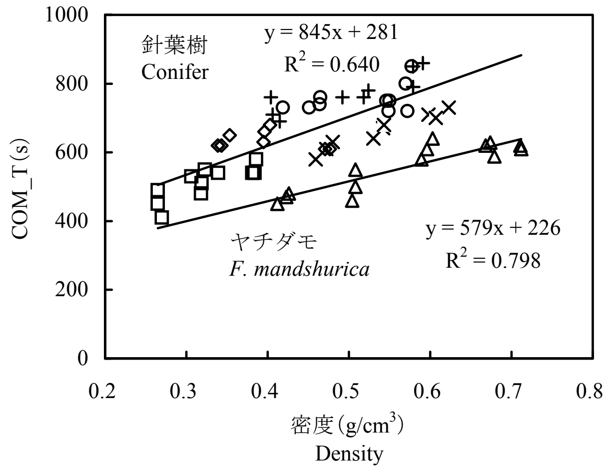


第２図　発炎燃焼時間および発炎燃焼総発熱量

Fig. 2. Flaming period and total heat release in the flaming period.

注) FLAME_T : 発炎燃焼終了時間，COM_T : 発炎燃焼時間，F_THR : 発炎燃焼総発熱量

Note) FLAME_T: End time of flaming combustion, COM_T: Flaming period, F_THR: Total heat release in the flaming period.



第３図　密度と発炎燃焼時間の関係

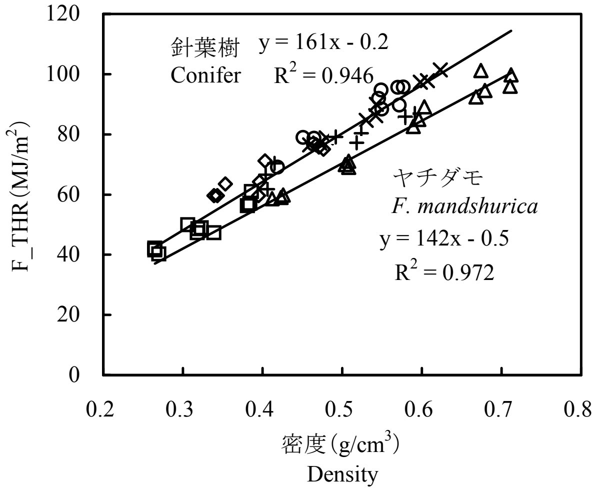
Fig. 3. Relation between density and flaming period.

凡例) ×，＋，○，□，◇，△ : 第1表参照

注) COM_T : 第２図参照

Legend) × , + , ○ , □ , ◇ , △: See Table 1.

Note) COM_T: See Fig. 2.



第４図　密度と発炎燃焼における総発熱量との関係

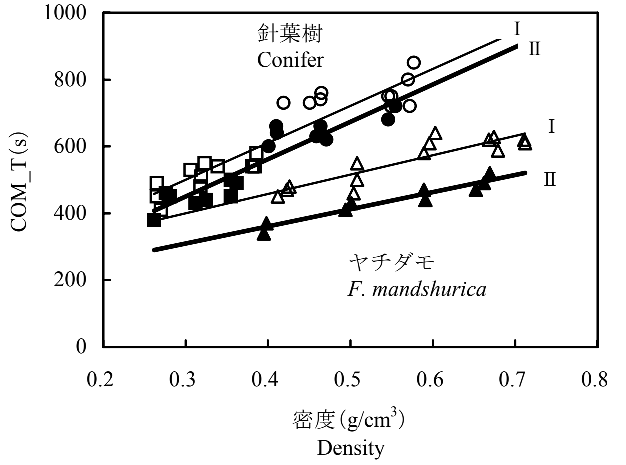
Fig. 4. Relation between density and total heat release in the flaming period.

凡例) ×，＋，○，□，◇，△ : 第1表参照

注) F_THR : 第２図参照

Legend) × , + , ○ , □ , ◇ , △: See Table 1.

Note) F_THR: See Fig. 2.



第５図　養生条件の異なる試験体の密度と発炎燃焼時間の関係

Fig. 5. Relation between density and flaming period of specimens conditioned at I or II.

凡例) I，II，○，□，△，●，■，▲ : 第1表参照

注) COM_T : 第２図参照

Legend) I, II, ○ , □ , △ , ● , ■ , ▲: See Table 1.

Note) COM_T: See Fig. 2.

構造の違いが影響する可能性がある。また，木材の炭化速度に対する酸素透過率の関与が明らかにされているが[13)]，この酸素透過率が影響している可能性も考えられる。なお，ISO 5660に規定されている着火後３分間，５分間，10分間の総発熱量と密度との関係を求めたところ，同様の傾向が得られたものの，F_THRよりも分散が大きい結果となった。

第５図に示したようにCOM_Tは養生条件すなわち初期含水率の影響を大きく受け，木材の含水率が4%程度異なると，COM_Tには針葉樹材で10%程度，ヤチダモで20%程度の差が見られた。一方，針葉樹材，ヤチダモそれぞれのF_THRは，密度が同じであれば含水率が異なってもほぼ同程度であった。このため，含水率が9%から5%まで数パーセント変化することで発炎燃焼の発熱速度が大きく増加することとなった。

3.2　有効燃焼熱

針葉樹材とヤチダモの発熱性を単位質量当たりの発熱量である有効燃焼熱で比較した。

発炎燃焼における有効燃焼熱（hc_wet），hc_wetを含水率で補正した全乾質量ベースの有効燃焼熱（hc_dry）および赤熱における有効燃焼熱（hc_glow）を下式で求め**第2表**に示した。

$$\text{hc_wet} = \frac{\text{F_THR}}{\text{FLAME_Tまでの質量減少量}}$$

$$\text{hc_dry} = \frac{\text{hc_wet}}{\text{0.91または0.95}}$$

$$\text{hc_glow} = \frac{\text{20_THR} - \text{F_THR}}{\text{20分間の質量減少量} - \text{FLAME_Tまでの質量減少量}}$$

ここで，

0.91：養生条件Iの補正係数

0.95：養生条件IIの補正係数

20_THR：20分間の総発熱量

同一樹種でも含水率が異なるhc_wetとhc_dryは当然異なるが，全乾質量ベースに補正したhc_dryは初期含水率によらずほぼ同一の値を示し，針葉樹材は14～16MJ/kg，平均15.2MJ/kg，ヤチダモは14MJ/kg程度であった。木材を完全に燃焼させた場合，木材の有効燃焼熱はリグニン含有量と比例関係にあり，針葉樹材の燃焼熱が広葉樹材よりも大きいことがボンブ熱量計を用いた燃焼試験によって明らかにされている[14]。一方，発炎燃焼段階では，その燃焼熱はリグニン含有量に影響されないことが示唆されている[15]。しかし，本試験結果から発炎燃焼段階においても針葉樹材の有効燃焼熱はヤチダモよりも大きくなることが示されたことから，木材成分と発熱量との関係を明らかにするためには，今後樹種を増やすなどして試験データを蓄積する必要がある。

hc_glowはアカマツを除き29～33MJ/kgの範囲にあった。これは，600～900℃で加熱処理した木炭の発熱量31.8～33.5MJ/kg[16]にほぼ一致し，FLAME_T以降の赤熱が炭素の酸化燃焼であることを裏付けるものと考えられる。

第2表　有効燃焼熱
Table 2. Effective heat of combustion.

養生条件 Seasoning condition	樹種 Species	有効燃焼熱 Effective heat of combustion (MJ/kg) hc_wet 1)	hc_dry 2)	hc_glow 3)
I (23℃ 50%RH)	アカマツ *P. densiflora*	13.4	14.7	37.9
	カラマツ *L. leptolepis*	13.3	14.6	31.4
	ヒノキ *C. obtusa*	14.4	15.8	33.4
	スギ *C. japonica*	13.7	15.0	30.9
	トドマツ *A. sachalinensis*	14.0	15.4	32.9
	ヤチダモ *F. mandshurica*	12.4	13.6	31.7
II (45℃ 48hr)	ヒノキ *C. obtusa*	15.0	15.8	32.6
	スギ *C. japonica*	14.2	14.9	28.7
	ヤチダモ *F. mandshurica*	13.3	14.0	30.0

注）1）発炎燃焼の燃焼熱（気乾ベース），
2）発炎燃焼の燃焼熱（全乾ベース），
3）赤熱における燃焼熱
note) 1) Effective heat of combustion in the flaming period (wet base),
2) Effective heat of combustion in the flaming period (dry base),
3) Effective heat of combustion in the glowing period.

4.　まとめ

針葉樹5樹種と広葉樹1樹種についてコーンカロリー計による発熱性試験を行い，発熱性に対する密度および水分の影響を検討した。その結果，発炎燃焼における総発熱量は針葉樹とヤチダモ（広葉樹）とに大別され，それぞれの密度の増加とともに増加すること，初期含水率は発炎燃焼時間およびその間の発熱速度に影響することがわかった。また，単位質量当たりの発熱量である有効燃焼熱は，全乾質量ベースで，発炎燃焼では14～16MJ/kg，赤熱では29～33MJ/kgの範囲にあった。

文　　献

1) Babrauskas, V., Peacock, R. D.: *Fire Safety Journal* **18** (3), 255-272 (1992).
2) Brenden, J. J.: *Journal of Fire and Flammability* **6** (1), 50-64 (1975).
3) ASTM E 906-83: "Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products.", 1983.
4) Brenden, J. J.: *Journal of Fire and Flammability* **6** (3), 274-293 (1975).

5) Smith, E. E.: *Journal of Fire and Flammability* **8** (3), 309-323 (1977).

6) Babrauskas, V.: *Fire and Materials* **8** (2), 81-95 (1984).

7) ASTM E 1354-90: "Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter.", 1990.

8) ISO 5660-1: "Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)", 2002.

9) Janssens, M.: *Fire Safety Journal* **17** (3), 217-238 (1991).

10) Tran, H. C.: "Heat Release in Fires", Babrauskas, V., Grayson, S. K. ed., Elsevier Science Publishers LTD, London, 1992, pp.357-372.

11) 原田寿郎：木材工業 **59**(10), 454-457(2004).

12) JIS A 1321："建築物の内装材料及び工法の難燃性試験方法", 1994.

13) Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., Wakiki, K. G.: *J. Wood Science* **53**, 71-75 (2007).

14) White, R. H.: *Wood and Fiber Science* **19** (4), 446-452 (1987).

15) Fangrat, J., Hasemi, Y., Yoshida, M., Kikuchi, S.: *Fire and Materials* **22** (1), 1-6 (1998).

16) 里中聖一：北海道大学農学部演習林研究報告 **22** (12), 609-814(1963).

－利用部長－

－*1：性能部　防火性能科－

（原稿受理：08.3.24）