

木材および木質材料に対する 耐火性能の付与－2, 3の試み－

京都大学教授 石原 茂久

はじめに

木材や木質材料のもつすぐれた居住環境特性が、最近、くわしく解明されつつあることに加えて、建築材料としての木材や木質材料の火災安全性が正当に評価されるようになり、平成2年には木製扉の耐火試験方法が新しく告示され、建築物の開口部における木材や木質材料の用途が一挙に拡大されました。また、内装制限も平成3年末に1,000平方メートル、平成5年には3,000平方メートルに緩和されます。建築材料としての木材や木質材料が正しく評価され、将来に明るい展開が期待できます。一方、火災による死者、特に建物火災による死者がおおむね90%を占め、建物火災の中でも木造での犠牲者が最も多くなっています。特に、近年高齢者の死者発生率が他の年齢層に比較して極めて高い現状にあることに加えて、高齢化がますます進展していることから、「可燃物」である木材や木質材料は一層きびしい防火対策が求められています。このような状況から、住宅の防火対策を推進し、火災による犠牲者の発生を抑えることが、建設行政、消防行政のみならず材料を供給する側にとっても重大な課題となってきました。建設省は総合技術開発プロジェクトにおいて、昭和57年度から61年度に「建築物の防火設計法の開発」、昭和61年度から平成2年にかけて「新木造建築技術の開発」の研究を実施し、その成果をふまえて、平成3年5月10日付、建設省住宅局長通達「住宅防火対策の推進について」により、住宅防火対策基本方針を定め、これにもとづいて住宅防火対策を推進することとしています。

材料を供給する側にあっても、日本木材学会では研究強化委員会第1期分科会において第2分科会で防・耐火に関するとりまとめ（木材の科学と利用技術、第2分冊『防・耐火性能』として日本木材学会より平成元年出版、発売）が行われ、また、平成元年から発足した『木材性能向上技術研究組合』においても最重要研究課題として薬剤や処理技術の開発が行われています。ここでは、木材や木質材料の防・耐火性能付与に関する筆者の2, 3の試みを紹介します。

なお、木材の燃焼とその制御については小論¹⁾を参照して下さい。

木材資源の特性

木材が資源として鉄、セメント、プラスチックなどと著しく異なる点は、①生産過程が公益的であり、かつ、省エネルギー的であること、②正しく扱えば資源量を増すことが可能であること、③廃棄に際しても無公害、公益的、省エネルギー的であること、④および生産と利用のバランスをうまくとれば永続的な循環系を形成できることです。すなわち、木材（樹木）は生産過程で太陽エネルギーと二酸化炭素を利用し、さらに水と大地により森林を形成します。森林は大気を浄化し、気象を緩和し、水源の涵養と水資源の保全に関わりつつ、陸地の崩壊を防ぎ、大地の砂漠化を抑え生態系に好ましい環境をもたらします。樹木は、自然の厳しい環境に耐え、それに適応するように形成されたきわめて完成度の高い素材である木材を提供します。その加工は容易で、省エネルギー的

あり、比強度にすぐれ、比熱が高く、熱伝導率が低く、しかも優れた風合いをもっています。さらに廃棄に際し、熱エネルギー源として、あるいは食用きのこ菌床や肥料、家畜の飼料として活用することが可能で、しかも公害をもたらしません。最終分解物である二酸化炭素と水は再び森林で公益的に木材資源に再生されます。このように、木材は人類の未来にとって理想的な資源で、育成と利用のバランスを維持し、いつまでも人類と共存させたい未来型の資源です。

木材は樹木の生命活動によって形成された生物資源であって、セルロース・フィラメントが螺旋状に紡がれた筒状の骨格をリグニン、ヘミセルロースなどで固めた、繊細で美しい細胞の配列構造を成しています。その性質は表1に示すように、繊維方向の単位重量当たりの力学的性質が一般構造材料の中で最も大きく、熱伝導率は最も小さく、比熱は最も大きい。つまり、元来、大架構用の材料として最適で、大きな断面で用いれば極めて耐火性もあります。

表1 各種構造材料の性質

材 料	全乾 比重	引張強度	ヤング率	熱伝導率	
		比重	比重	kcal/	比熱
		kgf/cm ²	tonf/cm ²	m ² h ⁻¹ °C	
木材(ヒノキ)	0.38	3,158	237	0.082	0.38
軟鋼	7.8	577	269	36	0.11
アルミニウム	2.7	703	269	160	0.25
ガラス	2.6	225	269	0.54	0.25
コンクリート	2.2	91	91	1.3	0.20
硬質塩ビ	1.4	425	25	0.14	0.35
FRP(ガラス/エポキシ)	1.9	2,081	123	0.54	0.25

木材の燃焼とその抑制

木材のような有機質系建築材料の燃焼の基本的形式は二つに分けられ、そのひとつは発炎燃焼(有炎燃焼ともいう。爆発を含む)であり、別のひとつは無炎の赤熱燃焼(表面燃焼、残じん、おき燃焼ともいう)であって、両者の反応、挙動は完全に異なります。また、燃焼を維持するためには、発炎燃焼では、可燃物、熱(エネルギー)、酸素および燃焼の連鎖分枝反応の四つの要素が不可欠であり、赤熱反応では、いわゆる燃焼の3要

素、すなわち、可燃物、熱および酸素を必要とします。

木材の燃焼を抑制あるいは防止するためには、発炎燃焼にあつては燃焼の4要素のうちいずれかのひとつを、赤熱燃焼では3要素のうちひとつを除くことによって可能となります。

木材や木質材料に対する防・耐火性能の付与は機構的にみて次の二つに大別することができます。

(1) 物理的方法：不燃性成分との併用によって、可燃性成分の割合を減少させたり、火炎からの熱や酸素の供給を遮断し、材料を被覆して耐火性能を付与する方法で、石こう、セメント、アスベスト、グラスファイバーなどの無機質との混和やアスベスト紙、石こう板、金属板によるオーバーレイ、水溶性無機化合物の木材中での不溶化、防火塗料によるものがこの方法の例です。

(2) 化学的方法：木材および木質材料の材質そのものを化学的に変化させたり、熱分解や燃焼過程に薬剤を介在させて、それらの過程を変化させ、燃焼を抑制する方法です。一般的には、Li, Na, Kのような周期律表I族の元素群, Mg, Ca, Sr, BaのII族の元素群, U, P, V, As, Sb, BiのV族の元素群, F, Cl, Br, IのVII族の元素群, ほかにS, Ti, B, Sn, Siなどの元素を含む化合物のうちかなりのものが燃焼抑制作用をもちます。

木材燃焼の化学的制御は、重量で50%以上を占め、発炎燃焼への寄与の大きいセルロースの熱分解のコントロールとその分解生成物の燃焼反応の制御によって大方は可能となります。

木材および木質材料に対する防・耐火性能付与-新しい2, 3の試み-

◎間伐材からの炭素材料の調製とそれによる複合化

木材を無酸素状態で加熱すると、軟化、熔融することなく細胞の空隙構造を残したままの木炭、すなわち無定形の炭素となり、これをさらに加熱するとグラファイト化します。このように炭素をベースとする素材は無定形の木炭から結晶構造を

もつグラファイトやダイヤモンドに至るまで多種多様です。これらを積層・複合した木質材料が炭素材料のもつ耐熱性、耐火性、耐酸化性などによって高度の耐火性能をもつことは当然ですが、複合する炭素材料の特性を活かすことによって多様のしかもすぐれた機能を設計し、発現させることができます。例えば、炭素材料は比重の高低によって物理的特性に顕著な相違をみせるので、これを応用し新しい材料の開発が期待できます。

細胞の空隙構造を保つ低密度の木炭粉末を木質材料にオーバーレイした材料は火炎下において、木炭のもつ低熱伝導性と耐炎性、耐酸化性にもとづくアブレーション効果によって高度の耐熱性能と耐火性能を獲得でき、さらに、低密度炭素材料のもつ絶縁性、断熱・保温性、吸着性、吸・放湿性、寸法安定性などの特性を付与することができます。一方、高密度の炭素材料では、その高い耐酸化性、高耐熱性、高耐熱衝撃性や耐炎性によってすぐれた耐火性能の付与が期待でき、同時にそのすぐれた導電性によって、木質材料に制電性や電磁波遮蔽性の機能を与えることができます。

このように炭素材料を木質材料に対して容易に積層したり、成型性を高めるために粒径 $1\ \mu\text{m}$ ～ $2,000\ \mu\text{m}$ のグラファイト（グラファイト化木炭）・ホルムアルデヒド自硬性顆粒体（GPSと略記、樹脂の選択は任意）を開発しました²⁾。GPSは炭素原料、粒径、樹脂などの選択や成形条件によって成形材料の機能を特定でき、自己焼結性を有することから高温度焼結によって高純度炭素材料を得ることができます。GPSは易成形性で接着性を有し、軽量であって、これを木質材料に積層することによって軽量の耐火機能材料を製造できます。

GPSを表層において同時成型したパーティクルボード（比重0.6、厚さ40mm、幅900mm、長さ1,800mm、GPS複合率10%、GPS層厚さ約1mm）はJIS A 1304に定めた標準加熱による実大火災実験において1時間30分以上の耐火性能を示し、ガス気圧 $2\ \text{kgf}/\text{cm}^2$ 、火炎温度 $1,300^\circ\text{C}$ の高速火炎気流下において2時間以上の耐火炎貫

通性能をもち、さらに電磁波遮蔽性は60～70dBであって、厳しい米軍規格を容易にクリアします。また、厚さ20mmのGPS積層パーティクルボード（比重0.6、GPS複合率10%、GPS層厚さ0.8mm）の火炎下におけるクリープ破壊にいたる時間は同厚の準不燃材料である木毛セメント板や不燃材料の石こうボードに対してそれぞれ3倍以上と9倍以上となり、無機系建築材料に比べて高い耐火性能や高温耐力性能など高い火災安全性を示します。炭素材料は上述の特性のほか、化学安定性にすぐれ、生物劣化がなく、製造や使用の過程において毒性や有害性はありません。また、火炎

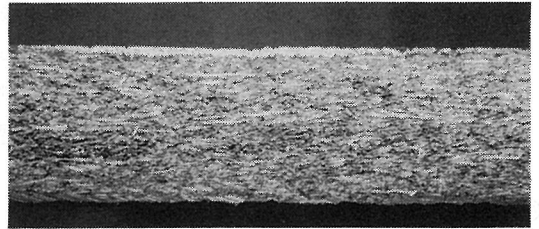


写真1 グラファイト・オーバーレイパーティクルボード
(GPS複合率10%、GPS層比重1.0、GPS層厚さ0.8mm、パーティクルボード厚さ20mm、パーティクルボード比重0.6)

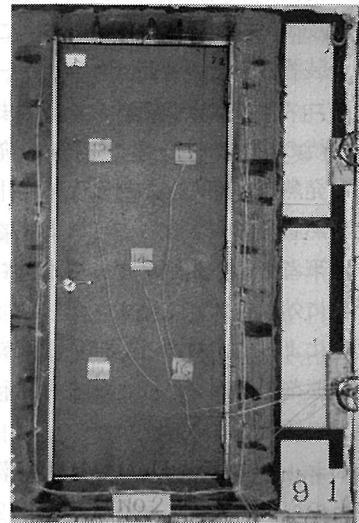


写真2 グラファイト・オーバーレイパーティクルボードで作製した耐火扉の実大燃焼試験
(JIS A 1304に準拠、91分経過した時点の状態。日本住宅・木材技術センターにおいて)

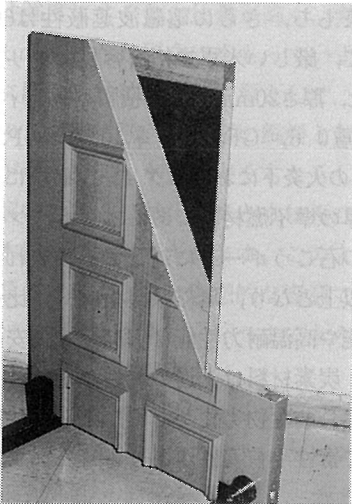


写真3 グラファイト・オーバーレイパーティクルボードで作製した耐火扉の内部構成

下においても有毒成分の生成もなく、その安全性はきわめて高いものです。

◎木材の表層反応による防・耐火性能の付与

従来、木材の難燃化処理の主流は難燃剤溶液を材中に注入、含浸する方法ですが、この方法は、薬剤を注入する場合には特別な注入装置と大量のエネルギーを必要とし、拡散法を採用する場合には含浸に長時間を必要とします。また、両者ともに注入、含浸後に乾燥工程が不可欠で、この工程でも特別な装置と多くの時間、エネルギーを必要とし製品のコストに大きな影響を及ぼします。

一方、燃焼の抑制は材表面での着火、発炎燃焼を阻止して発熱量を抑え、木材表面の炭化を促進して炭化断熱層を形成させることによって可能となります。筆者らは塗装法によって木材や木質材料の難燃化に効果をあげていますが^{3, 4)}、ここでは化学反応によって木材あるいは木質材料表面に耐溶脱性の薬剤処理層を形成させる防・耐火性複合化について紹介します。

木材などセルロース系材料は塩基性窒素化合物とリン酸との塩によって、反応温度100~200℃、圧力5~20kgf/cm²、反応時間1~30分でエステル化します⁵⁾。

従来の木材や木質材料の化学的手法による難燃

化は材中全体に薬剤の注入、含浸をはかるものですが、同様の手法でこのエステル化を行おうとすれば、反応条件を設定することがきわめて困難です。木質材料の製造工程のうち最も一般的でかつ最も重要な熱圧縮（ホットプレス）を用いることによって材料表面においてエステル化に必要な反応条件を設定することができます⁵⁾。

アミン、アミドなど塩基性窒素化合物は、特定の反応条件下でエステル化の触媒として作用するとともに、熱圧縮の木材表面圧潰などに可塑化作用を発現して木材表層に高密度の燃焼抑制バリアーを形成することができます^{6~8)}。この場合、窒素化合物のホルマリン樹脂を用いるか、あるいは上記反応温度域においてホルムアルデヒドを生成する化合物を併用すれば材表層の樹脂加工が可能となります^{6~8)}。反応素材である薬剤の添加は被処理材料表面の薬剤散布、塗布、室温においての薬剤溶液への材料の浸せきなど特別な手法や装置は必要としません。尿素・リン酸、ジシアンジアミド・リン酸系の塩あるいはそれにホルムアルデヒドを加えて処理したスギ材やトウダイグサ科ニューギニアバスウッド板の耐火性能（JIS A 1304に準拠した木製耐火扉試験）は無処理のそれらに比べてほぼ2倍に達します^{7, 8)}。この処理で同時に寸法安定性を付与することもできます。

熱圧縮下における熱媒体としての過熱蒸気の移動、拡散、材表層から内層に向けてのエステル化度の傾斜低減など、いくつかの問題の解明は本処理の展開の鍵を握っています⁸⁾。

◎金属アルコキシドによる無機質と木材の複合化

木材の難燃化に対する無機質の利用は、従来より難燃剤としての利用が主流でした。これはそのほとんどが水溶性、吸湿性で経時変化が著しく、被処理材の劣化、難燃性能の低減もあり、そのほか、建築材料として不利な点を含んでいます。

木材中に安定した形で無機化合物を沈着固定させて、無機質と木材との複合化に成功した例はきわめて少ないのです。二液を順次木材に拡散させて、木材中に不溶、不融の化合物を生成させる方

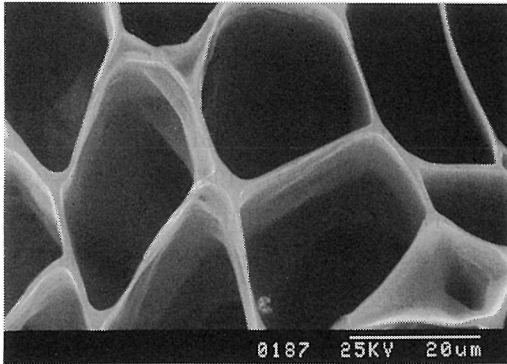


写真4 無処理ヒノキ材の木口面〔倍率×850〕

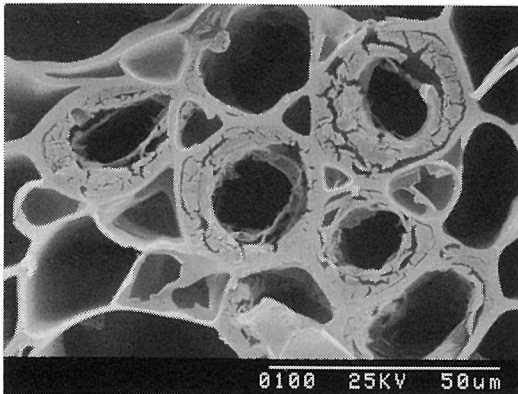


写真5 ホウ素アルコキシド複合ヒノキ材木口面〔倍率×620〕

法は新しい複合化の方法⁹⁾として注目されましたが、拡散法には処理上重大な問題が残されています。

ここでは、ガラス、セラミックスなどの製造に用いられるゾルーゲル法を応用した金属アルコキシドによる木材の無機質複合化についてふれます。この詳細は木材性能向上技術研究組合の成果の発表(1992年)まで待たねばなりません、この方法は無機質と木材との複合化に新しい可能性を示しています^{10,11)}。

ゾルーゲル法の特徴は、目的とする無機物を特別な装置を必要とせず、常温、常圧下で設定濃度に容易に含浸させ得ることや、処理後の特別な装置や大量のエネルギーを必要とせず、また、加水分解や熱分解によって容易に不溶化できることです^{10,11)}。木材固有の多孔質を維持しながら新しい

ウッドイエジ 1991年11月号

無機質複合化木質材料の開発が可能^{10,11)}であることも注目に値することと思われます。

例えば、ハロゲンと併用して燃焼抑制作用に顕著な相乗効果を発現するアンチモンの酸化物は、従来、木材中にそれを生成させることがきわめて困難でしたが、これを容易に生成し得ること、また、別の例として、難燃剤はもとより防腐剤、防虫剤として重要なホウ酸は、従来、木材に対して最大10%前後の量を注入するのが限度でしたが、これも高濃度の設定量を木材中に容易に生成することが可能となりました¹¹⁾。

このように、ゾルーゲル法による無機質と木材との複合化は防・耐火性能の付与、寸法安定性、対生物劣化性などにすぐれた無機系木質複合材料の開発のみならず、これまで未踏の分野であった無機質とくに金属と木材との複合材料の開発や木質新素材開発の可能性を示唆しています。

おわりに

木材は自然が創生し、育んだきわめてすぐれた多機能性材料です。とくに、人類にとってかけがえない生活環境を作りだす見事な材料ですが、未だ人類が覚知していない数々のすぐれた特性を秘めているものと考えられます。われわれは、木材のもつ人知をこえた機能、特性を活かし、発展させ得よう努力しています。防・耐火性の付与に対する努力はそのきわめて小さな部分です。各位の御協力と御指導をお願いする次第です。

参考資料

- 1) 石原茂久, 木材学会誌, 35, 775—785 (1989)
- 2) 特願昭61—191083ほか30件, US Patent 561645 (1990.8.1), Canada Patent. 2022548. 3 (1990.8.2), EC Patent 90114671.2 (1990.7.31).
- 3) S., Ishihara, Proceedings of International Conf. on Wood Burning, Vysoke Tatry, CSSR, 11—13 May, 1988, p. 128—138, 特許公報53—6018 (1978).
- 4) N. Kobayashi and S. Ishihara, Proceeding

of S5. 03-04 Session, The 18th IUFRO World Congress, 7-13 Sept., Ljubljana, Yugoslavia, 1986, p. 31-38, US. Patent 4585703 (Apr. 1986).

5) 石原茂久, 池田純一, 月東秀夫, 第41回日本木材学会大会研究発表要旨, 1991年, 松江, P. 395.

6) 石原茂久, 月東秀夫, 住田厚弘, *ibid*, P. 396.

7) S. Ishihara, H. Getto and A. Sumida, Proceedings of International Symp. on Chemical Modification of Wood, Kyoto,

17-18 May, 1991, p. 178-183.

8) 石原茂久, 月東秀夫, 住田厚弘, 第4回傾斜機能材料シンポジウム (FGM'91) 研究発表要旨, 10月8-9日, 1991, 川崎.

9) 西本孝一, 科学朝日, 1987 (10), 38-43.

10) 石井治, 花輪倉一, 田中実, 石原茂久, 第41回日本木材学会大会研究発表要旨, 1991年4月, 松江. p. 284.

11) 田中実, 花輪倉一, 石井治, 石原茂久, 第21回日本木材学会, 木材の化学加工研究会シンポジウム講演要旨, 1991年10月17-18日, 塩尻. p. 21-26.

