

総説

[木材学会誌 Vol. 55, No. 1, p. 1-9 (2009)]

日本における木質耐火構造開発のあゆみ*1

原田寿郎*2

Progress toward the Development of Fire-Resistant Wooden Structures in Japan*1

Toshiro HARADA*2

Since 1987, regulations for wood-based construction in Japan have been gradually reformed, and many wooden residences such as three-story houses and three-story apartment buildings, as well as large-scale wooden structures such as Izumo Dome and Ohdate Jukai Dome, have been constructed. Furthermore, the revision of the Building Standard Law of Japan in 2000 allows for the construction of high-rise wooden buildings when the fire safety of their structural wooden beams and columns has been verified. These innovations have been made possible by advancements in fire science and rigorous full-scale fire testing. This review examines the relationships between wood-based construction and fire science after World War II and recent progress in the development of fire-resistant wooden structures.

Keywords: wooden building, fire-resistant construction, Building Standard Law, full-scale fire test.

1987年以降、日本においては、木造建築物に関する規制が徐々に緩和され、木造3階建戸建住宅、木造3階建共同住宅、出雲ドームや大館樹海ドームといった大規模木造建築物が建設されるようになった。さらに2000年の建築基準法改正により、木質系の柱や梁の火災安全性が証明されれば、高層の木造建築物も建設可能となった。こうした変革は火災科学の進歩と数多行われた火災実験の賜物である。本稿では、戦後の日本における木造建築物と火災安全性の関わりについて概観するとともに、木質耐火構造開発の現状について概説する。

1. はじめに

防耐火の研究に携わるようになって16年になる。研究を始めた当初、木材と木造建築にとっての暗黒時代がほんの一昔前に存在し、日本建築学会が「木造禁止」まで決議していたと述べておられる杉山英男氏の論文^{1,2)}を目にし、大きな衝撃を受けた。

この16年間には、規制緩和や建築基準法（以下、基準法という）の大改正が行われ、かつては木材が使用できなかった場所にも木質材料が使用できるようになった。それは、一朝一夕に生まれたものではなく、大いなる時代の要請と技術開発に向けた努力

と情熱があっただけで成し遂げられた。

明治以降、防災に強い都市建設を標榜してきたわが国は、太平洋戦争での空襲による都市壊滅への反省から、戦後、不燃都市建設へ向け大きく舵を切った。一度大きく振れたベクトルを、再び木質構造復活に向けるのは並大抵のことではない。そこに求められる唯一の方策は、科学的な視点での火災と木材・木質構造との関係の再構築であろう。

本稿では、木造禁止に至る背景と、その後の木造復権にいたる技術開発の歴史について概観したい。

2. 木造禁止への道のり

木造主体の日本の建築物では、大火による被害は甚大で、江戸では、慶長から慶応に至る270年間に火元から焼け止まりまでの直線距離が15町（約1.6 km）以上の火事が93件あった³⁾。本郷丸山の本妙寺

*1 Received June 20, 2008; accepted August 4, 2008.

*2 独立行政法人森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

から出火し江戸の町の6割以上を焼いた1657年の振袖火事、大円寺から出火し長さ6里、幅1里を焼いた1772年の目黒行人坂の大火、芝車町から出火し京橋から浅草を焼いた1806年の丙寅火事は、江戸の3大火事といわれる⁴⁾。

明治以降、都市防災は政府の悲願であった。1872年2月に起こった銀座の大火を受け、東京府はわが国初の不燃化宣言となる府令を公布し、銀座煉瓦街建設に着手する⁴⁾。1879年12月の日本橋大火後には、東京府知事から屋上制限令が発せられるとともに、京橋・日本橋・神田の主要道路の両側に建設する家屋を煉瓦造・石造又は土蔵造の3種類のいずれかに制限することが布達されている⁵⁾。1919年には、都市計画法と市街地建築物法が制定され、都市に防火地区を設け、防火地区内における建築物の防火構造に関する規定が定められた⁴⁾。こうした法整備がなされたが、1923年9月1日に発生した関東大震災は、死者・行方不明14万人、焼失家屋45万戸を数える大惨事となった。この震災は区画整理事業や耐火建築物建設を大規模に行う千載一遇の機会ではあったが、あまりにも被害が甚大で法律に則った完全復興は財政的にも困難であった。

昭和に入っても、1934年3月の函館大火、1940年1月の静岡大火などの市街地火災が発生している。太平洋戦争では、全国115都市が空襲を受け、230万戸が焼失した⁵⁾。空襲による被害は、全国民に不燃都市建設を戦後復興の至上命題と肝に銘じさせるに足る大惨事であったといっても過言ではない。

都市不燃化のため、木造を抑制すべし。その決意は、田邊平学氏の論文⁶⁾に余すところなく吐露されている。田邊氏は、木造都市である我国の諸都市は火災によって脅かされ続け、大戦下、その脆弱性は遺憾なく暴露せられたとし、この機会に禍を転じて福となすべく、大火災発生への恐れを無くする策を講じなければならず、その方策として木造建築物を都市の主要部から完全に駆逐し去り、耐火建築の徹底的普及実現を図る必要性を説いておられる。そして、祖国を木造亡国から救うものはわれわれ建築家以外にないと結論されているのである。

1948年、基準法が公布され、防火地域内や準防火地域内での木造建築物の建設や木質材料の使用が著しく制限を受ける法制度が確立し、木質材料は耐火構造や不燃材料からは排除された。さらに1952年、耐火建築促進法が公布され、都市の枢要部に防火建築帯が指定され、この区域内に建つ耐火建築物に、都道府県と市町村が補助金を交付する制度が設けられた⁵⁾。また、1961年には防・耐火建築物を面的に

拡充するため、防災建築街区造成法が制定された。

1950年代から1960年代にかけては、木造抑制一色となった感があるが、こうした中、日本建築学会は、1959年9月26日に発生した伊勢湾台風を契機に沸き起こった災害対策への取組みとして、「防火、耐風水害のための木造禁止」を含む「建築防災に関する決議」を可決したのである²⁾。さらに1959年には基準法が改正され、第2条に「簡易耐火建築物」の概念が導入された。簡易耐火建築物は、外壁耐火構造としてのコンクリートブロック造を想定した「イ簡耐」と、主要構造部を不燃材料で造ることを目指し、梁や柱を軽量鉄骨造とすることを想定した「ロ簡耐」に区分されるが、これにより木造建築物は、法的に軽量鉄骨やコンクリートブロック造よりも耐火性能において劣位とみなされ、住宅金融公庫の融資等の上で差別されることとなった⁷⁾。

3. 木造復権への道

1970年代後半に入り、国民のニーズ、地域振興の観点から、建設省も木造住宅と不燃化施策の融合に乗り出し、住宅金融公庫も不燃構造の定義を改正し(1977年)、木質系プレハブや枠組壁工法など耐火性能の高い木造に対しては融資条件が改善された。

しかし、法改正に踏み込んで木造建築物排除から転換する兆しが見えたのは、1987年以降である。1987年から始まる一連の基準法等の緩和措置は、皮肉にもMOSS協議や日米林産物協議といった、所謂、外圧によるものであった。

MOSS協議では、林産物が対象4分野のひとつとして取り上げられた。1986年1月発表の日米共同報告で、木材及び木製パネル製品の一層の使用が可能となるよう防火・建築基準の見直しが盛り込まれ⁸⁾、1987年、基準法が改正された⁹⁾。防火規制にかかわる主な改正点は以下のとおりである。

- ・技術的基準に適合すれば、高さ13mまたは軒の高さ9mという高さ制限を超える木造建築物が建築できることとなり、その技術基準として大断面集成材(小径が15cm以上で断面の面積が300cm²以上)等を使用する大断面木造建築物の基準が示された。

- ・大断面木造建築物であるスポーツ施設等で防火上の基準に適合する場合は、1000m²以内ごとの防火壁の設置を要しないこととされた。この中で、通常の火災で建物全体が容易に倒壊するおそれのない構造を大断面集成材で実現する方法として、表面から2.5cmを燃えしろとして除いた残りの断面積で構造計算する、「燃えしろ設計」の考え方が示された。

- ・準防火地域でも防火上必要な技術的基準に適合す

れば、木造3階建戸建住宅（500 m²以下で高さは13 m以内）が建築可能となった。

これ以降、数々の大規模木造建築物や木造3階建戸建住宅が建設されることとなった。

また、1990年6月の日米林産物協議では、以下の内容が合意された¹⁰⁾。

- ・防火・準防火地域以外で木造3階建共同住宅（以下、木三共という）の建設を可能とする基準の整備
- ・木三共についての高さ制限の見直し
- ・木造による簡易耐火建築物の建設を可能とする基準の整備
- ・枠組壁工法の基準に構造計算規定を追加することによる設計自由度の拡大
- ・内装制限（難燃材料の使用）を受ける居室の壁への木材の使用を可能とする基準の整備
- ・防火地域及び準防火地域以外の区域で耐火建築物及び簡易耐火建築物の外装に木材の使用を許可する基準の策定

この協議を受け、それまでの簡易耐火建築物に代えて、木造を含めた準耐火建築物の概念が創設され、1時間の準耐火性能を確保すれば、防火・準防火地域を除く地域において木三共の建設が可能となるなどの法令の整備が行われた¹¹⁾。一連の対応は、門戸が開かれたというだけでなく、科学的な視点で木質構造、木質材料の防耐火性能を捕らえる機運が醸成された点が大きな成果と言える。

2000年には、性能規定化を目指した基準法の大改正が行われた。その経緯は、改正作業に関わった方々の総説^{12, 13)}に詳しいが、辻本氏¹⁴⁾は、改正の推進力となったのは、木造住宅の防火規制に対するアメリカ・カナダの強い反発にあったと指摘している。これにより、門前払いをされていた分野にも、性能基準を満たせば木質系材料が使用できるようになり、木質系の不燃材料や耐火構造が誕生することとなった。要求性能やその検証方法が明確にされ、木質系材料の耐火建築物への利用に道が開かれたことは、防火地域での木質材料を用いた建築物建設を可能とする画期的な改正といえる。銀座や丸の内にも木造のインテリジェントビルが建ち並ぶのも夢物語ではなくなったのである。改正から8年が経過し、鋼材と集成材を組合せた木質ハイブリッドなど1時間耐火構造の認定を受けた木質系の梁や柱も現れ、実際の建物も建築されているが^{15, 16)}、これで、何処にでも、どんなものでも木質構造で建築できるようになったわけではない。ようやく、長い暗黒時代に終止符が打たれたにすぎない。防火地域内に木質構造の中高層ビルが建つようになるには、克服しなければ

ならない課題が、まだまだ、山積している。

4. 火災実験と準耐火構造に至るまでの技術開発

4.1 木造建築物の火災実験

防・耐火性能を検証するためには、材料自体の性能評価に加え、実大家屋の火災実験も不可欠である。木造復権の歴史は、火災実験の歴史でもある。

欧米では、煉瓦造や石造のような耐火建築物の火災時の温度変化が標準時間温度曲線として規格化されていたが、日本の木造建築物にこれをそのまま適用することはできない。日本の木造家屋の火災温度と継続時間に関するデータを得ることを目的とした火災実験は、1933年と1934年に東京帝国大学で実施された。第1回の実験¹⁷⁾では瓦葺木造平屋（建坪30 m²、棟高3.5 m、軒高2.7 m）1棟が、第2回の実験¹⁸⁾では3 mの間隔で建てられた木造平屋2戸建（58 m²）と木造平屋1戸建（35 m²）の2棟が実験に供された。二度の火災実験で、火災時の温度は点火後わずか数分で1100～1200℃の高温に達するが、高温を持続する時間は極めて短く、800℃以上の高温が続くのは5～6分という木造の特徴が明らかとなった。さらに、1938年には、木造2階建て瓦葺大壁造2棟（同規模で1、2階とも91 m²、棟高12 m）の第3回東大実験^{19, 20)}が行われた。その後、50戸に及ぶ火災実験が行われ、旧陸軍が水戸で行った木造2階建の小屋内モルタル塗防火壁面温度の時間的変化が試験用火事温度時間曲線（1級曲線）、各時間の温度がその3/4及び1/2の曲線がそれぞれ2級曲線、3級曲線と定められた⁵⁾。

4.2 木造住宅の防火性能向上技術の開発

戦後、木造建築物は暗黒時代に突入し、火災実験どころではなかったが、枠組壁工法を住宅金融公庫の融資対象にしようとする動きがおこる中で、公営住宅型（2階建（延面積40 m²））と一般住宅型（2階建（延面積80 m²））の火災実験が1976年7月に行われた^{19, 21)}。この結果、木造であっても内装に石膏ボードを張り、密閉中空を構成すれば、耐火建築に近い火災性状となることが明らかとなった。続いて、1978年12月には枠組壁工法3階建連続住宅（4戸が連続し、火災実験において点火した2戸はいずれも1階：38 m²、2階：37 m²、3階：14 m²、合計89 m²）の火災実験が行われ^{19, 22)}、壁、天井、床などの界壁がある程度の防火性能を有する場合は、防火力のある建具を用い、開口部からの延焼を抑えることができれば、より高い区画防火の効果が期待できることが明らかにされた。

在来構法木造住宅の防火性向上を図るための火災

実験は、1979年1月^{19, 23)}と1980年1月に実施^{19, 24-28)}され、内装等の不燃化と網入りガラスの有効性が検証された。さらに、1981年3月には、在来構法既存木造住宅(戸建木造2階建住宅(各階床面積40m², 計80m²)の火災実験が行われた^{29, 30)}。この実験により、既存の在来木造住宅であっても簡易な防火改修で防火性能を向上できることが明らかとなった。

木質系プレハブ住宅の火災実験は、1981年8月に行われている^{19, 31-35)}。小屋裏利用3階建2戸連建物(延床面積115m²)が試験に供されたが、防火ドアや内装の防火被覆等により区画を強固にすれば、延焼拡大が遅くなること、内装に防火被覆を張り、不燃性の断熱材をパネル内に充填することで外周壁の耐火性が向上することなどが報告されている。

在来構法木造住宅の防耐火性向上を目指した技術開発では、1984年9月に木造2階建住宅(延床面積60m²)の火災実験が行われた³⁶⁾。外装を硬質木片セメント板等で被覆し、内装も壁や天井を石膏ボード等で仕上げるなど全て不燃化し、内部開口を閉鎖した条件にすれば、在来木造であっても倒壊するまで80分を要することが示された。また、1986年1月には区画防火をした大壁型(2階建, 延面積109m², 通柱120×120mm, 管柱105×105mm)と真壁型(2階建, 延面積109m², 通柱150×150mm, 管柱120×120mm)の火災実験^{19, 37-40)}が実施され、部屋毎に防火的に独立した区画が成り立つようにすれば、従来の在来木造よりも著しく火の回りを遅らせることが可能であることが示された。

4.3 大断面集成材の耐火性能検証

大断面集成材が一定の耐火性能を有するとの行政判断は、1982年建設省東住指定第316-3号により示され、基準法第38条に基づく建設大臣の特認による特典が集成材建築物に与えられた。用途や面積、階数は限られるが、表面から2.5cmの「燃えしろ」を設けることで、小径15cm以上、断面積300cm²以上の大断面集成材の梁や柱を高さ13m又は軒高9mを超える建築物に使用することが可能となった。

この背景には、火災を想定した加熱試験における構造用集成材の炭化速度は0.5~0.7mm/分で、炭化境界面より内側の木材は健全で、内部温度も鋼材のように急激には上昇しないことから、たとえ火災にあったとしても、未炭化部分の断面の大きさに基づく設計を行えば、構造耐力を保持できることが明らかにされていたことがあげられる⁴¹⁻⁴³⁾。大断面集成材の火災安全上有効な接合方法についても詳細な検討が行われている^{41, 44)}。木材の炭化速度に影響を及

ぼす因子には、加熱温度、樹種、密度、含水率等が挙げられているが⁴⁵⁻⁵²⁾、火災時の大断面集成材の炭化速度を議論する上では、0.5~0.7mm/分として差し支えない。この通達以降、各地に大断面集成材を用いた建物が多数建設されることとなった。

大断面集成材を用いた体育館などの火災実験は行われていないが、火災事例研究としては、2000年10月、広島県の中学校体育館で発生した火災の調査⁵³⁾がある。火の手が体育館全体に広がり、消火まで30分を要したが、躯体は倒壊せず、火源近くの集成材の炭化深さも平均炭化速度を0.6mm/分として計算される値とよく一致し、大断面集成材の耐火性能と耐火加熱試験の有効性が裏付けられている。

1987年の基準法の改正により、木造建築物の高さ制限や防火壁の設置基準が緩和されるとともに「燃えしろ設計」の考え方が示され、より大きな木造建築物を建設したいという熱望は、出雲ドーム^{54, 55)}、やまびこドーム(信州カラマツドーム)⁵⁶⁾、大館樹海ドーム⁵⁷⁾といった木質ドームや、エムウェーブ⁵⁴⁾のような巨大施設の建設へと向かう。

4.4 木造3階建住宅

木造3階建住宅についても、1987年の基準法の改正により、準防火地域での戸建住宅(延面積は500m²以下)の建設が可能となった。火災実験については、1987年1月に木造3階建(3戸連続長屋, 第1及び第3住戸の延面積99m², 第2住戸の延面積83m²)住宅の⁵⁸⁻⁶³⁾、11月には3階建枠組壁工法住宅の火災実験⁶⁴⁻⁶⁹⁾が行われている。これらにより、木造3階建住宅でも防火性の高い各室防火区画を形成するように設計・施工を行えば、耐火性能を向上できることが実証された。

木三共の火災実験は1991年12月に実施された^{19, 70-80)}。3階建以上の共同住宅は、耐火建築物とされていたが、日米林産物協議での合意を受け、木三共を可能とする技術の検討が必要となったためである。実験には各階同一平面の2住戸(点火住戸は約60m², これに隣接する非点火側住戸は部分的平面で30m²)からなる3階建の枠組壁工法による共同住宅が実験に供された。大地震直後に火災が発生した場合の耐火性能を検証するため、大地震を想定した加力実験(層間変形が1/100radになるよう加力)を行った後に火災実験が行われた。壁は耐力壁、間仕切壁、界壁とも12mm厚石膏ボードの二重張り防火被覆された。出火室の外部に面した開口部が1/4開放されている他は内外の開口部は全て閉鎖という条件で、60分までに火盛り性状を示したのは出火室と隣接する和室のみで、地震力を受けたとして

も、部材実験で確認された防耐火性能はほぼ満足する結果が得られている。この実験を踏まえ、1992年に基準法が改正され、準耐火構造、準耐火建築物という概念が導入されるとともに、防火地域、準防火地域以外の地域での木三共の建設が可能となった。

さらに準防火地域での可能性を検証するため、1996年3月、市街地における木三共の火災実験が実施された⁸¹⁻⁹¹⁾。市街地に建設できる建物と同等以上の性能の確認が必要となることから、木三共を市街地火災相当の大規模な火災に暴露させ、その延焼性状と隣接建物への延焼を把握する実験が行われた。実験では、木三共(延床面積335 m²)と2階建て木造住宅2棟を配置し、木三共を市街地火災シミュレータで加熱、その後、木三共屋内に点火された。準耐火1時間で設計した外壁は、シミュレータからの100 kW/m²を超える強い加熱を受けたが、地震を想定したクラックがあったにもかかわらず類焼や外壁の燃え抜けはほとんどなく、噴出火炎は開口部からのものに限られた。また、隣棟建物への火害も軽微なものに止まり、木三共は耐火建築物に近い区画火災型燃焼を維持することが明らかとなった。この結果に基づき、1988年、基準法が改正され、準防火地域においても木三共の建設が可能となった。

4.5 準耐火構造と燃えしろ設計

準耐火構造の性能には、30分、45分、1時間があり、柱、床、梁、耐力壁などに45分の性能(屋根、階段などは30分)を持たせた建築物を45分準耐火建築物、1時間のものを1時間準耐火建築物と呼ぶが、軒高9 m、棟高13 m未満で500 m²を超える木造建築物は45分、軒高9 m、棟高13 mを超える木造建築物や木三共は1時間の性能が求められる。

準耐火構造の仕様には、告示に示されたものと大臣認定を受けたものがあり、告示に示されたものには、石膏ボードなどによって構造材を防火被覆するものと、木材の柱・梁に関して燃えしろ設計することで防火被覆を設けず木材を露出して使用するものがある。燃えしろは、集成材⁹²⁾やLVL⁹³⁾では、実験結果を踏まえ、45分準耐火構造で35 mm、1時間準耐火構造では45 mmとなっている。さらに製材についても検討が行われ、耐火加熱試験の結果、炭化速度はスギ0.79 mm/分、カラマツ0.74 mm/分(20%の安全率を見込むとスギ0.95 mm/分、カラマツ0.89 mm/分)と、集成材よりも若干高くなる傾向が示された⁹⁴⁻⁹⁶⁾。これを踏まえ、2004年、製材については45分準耐火で45 mm、1時間準耐火で60 mmの燃えしろ設計が認められた。

構造用集成材に使用できる接着剤は、現在、レゾ

ルシノール系樹脂接着剤のみである。VOC問題への対応等から水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤についても同等に扱えるようにしようとの動きが見られる。過去の耐火加熱試験等の結果⁹⁷⁻¹⁰¹⁾から耐火性能上、問題がないと判断される接着剤もあったことから、耐火加熱試験を実施し、同等の性能があると認められるものについては、取り入れる方向での日本農林規格改正が2007年に行われた。

また、最近需要が伸びている厚物合板の耐火性能に関する研究¹⁰²⁾も行われ、厚さ28 mm、かさ密度0.4~0.7 g/cm³の厚物合板を用いた床構造に45分の準耐火性能があることが示され¹⁰³⁾、国土交通大臣の認定を取得するなどの事例も出てきている。

5. 木質耐火構造の開発

2000年の基準法改正により、いよいよ木質耐火構造の幕開けとなる。木質耐火構造は、告示による例示仕様はないので、耐火性能の証明が必要となる。方法としては、以下の3つのルートがある。

- ・ルートA：従来どおり「大臣が定めた、または認定した」仕様規定に基づく方法
- ・ルートB：「耐火性能検証法」に基づき、告示に示される計算方法を用いて検証を行う方法(建築主事の確認で設計が可能)
- ・ルートC：「耐火性能検証法」以外の方法で耐火性を検証し、その妥当性について指定性能評価機関で評価を受け大臣の認定を受ける方法(実験や解析など、より高度な専門知識により検証する方法)

ルートBやCにより耐火性能を検証するためには、木質構造部材の周囲の温度が260℃以下であることを示さなくてはならず、木材が使用可能となるのは、体育館など比較的開放性の高い空間で火災の影響をほとんど受けない場所に限定される。ルートBにより建設された木質構造建築物には、あけのペドーム、一戸コミュニティセンター、サンドーム日向、綾てるはドームなどがあり¹⁰⁴⁾、いずれも屋根架構に木材が採用されている。これは、耐火性能検証法では部材近傍の火災温度上昇係数の規定から床面からの鉛直距離が5.6 m必要となるためである。また、ルートCによるものには、愛媛武道館、所沢市民体育館、大館樹海アリーナ¹⁰⁵⁾、木の花ドーム、高知学芸高等学校体育館、JR四国高知駅舎などがある¹⁰⁴⁾。ルートCも基本的には木材近傍が260℃以上にならないことを前提に検証が行われるので、体育館等の屋根架構に使用されている事例が多い。ルートB、Cとも設計の自由度はかなり低い。従って、耐火構造の住宅やオフィスビルを建てるためには、

ルート A による耐火構造認定を受ける必要がある。

耐火構造には、1 時間、2 時間、3 時間の 3 種類がある。認定に際しては、試験体に所定の荷重を付加した状態で、ISO834 に示された標準温度曲線に従った耐火加熱試験を行うが、日本での 1 時間耐火構造は、梁や柱が 1 時間の加熱に耐えられることと同義ではない。基準法で耐火構造は、「通常の火災が終了するまでの間当該火災による建築物の倒壊及び延焼を防止するために当該建築物の部分に必要とされる性能」を有する構造とされ、認定試験では、試験体である構造体を要求耐火時間加熱し、加熱終了後もその 3 倍時間載荷を継続したまま試験体を耐火炉に放置しても規定値を超えてたわず、座屈しないことが求められる。さらに木質系材料の場合は、加熱終了後に自然に消炎し、燃え止まらなければならない。集成材は、断面を大きくすることで、要求耐火時間+3 倍時間の耐火加熱試験で座屈しない材料とすることは可能だが、自然消炎は期待できない。このため、準耐火構造で認められている燃えしろ設計は適用できない。木質系の梁や柱を耐火構造にする方法としては、以下の 3 つが検討されている。

(1) 無機材料による集成材の被覆

木材を燃焼させない有効な方法だが、木材を現わして使えない。1 時間の耐火性能を有するものには、30×30 cm の断面寸法のスギ集成材柱に厚さ 15 mm の石膏ボード+厚さ 12.5 mm の石膏ボード 2 枚の計 3 枚の石膏ボードで被覆したもの¹⁰⁶⁾、30×30 cm の断面寸法のベイマツ集成材柱に発泡黒鉛シート（厚さ 1.5 mm×2 枚）を張ったもの¹⁰⁷⁾がある。また、1 時間耐火構造の認定を取得しているものには、石膏ボード等で木質構造体を被覆した枠組壁工法がある。

(2) H 型鋼や角型鋼と集成材が一体の複合材料

木材を現わして使える長所があるが、木造といえないもどかしさが残る。

H 型鋼を厚さ 60 mm のカラマツやベイマツの集成材で被覆した複合材料¹⁰⁸⁾は、1 時間の耐火加熱試験において集成材の燃焼・炭化が表層から 30~50 mm の深さで止まる。これを燃え止まり型と呼ぶ。鋼材が集成材の温度上昇を吸収して燃焼を抑制し、また集成材が鋼材を直火に曝すことを防止する効果で、1 時間の耐火性能を実現した。しかし、樹種によって燃え止まりに差があり、カラマツやベイマツは燃え止まるがスギは燃え止まらないためスギは使用できない。燃え止まりに関しては、炉内の熱収支、炉壁・火炎・木材表面間の放射熱伝達、炉壁及び木材の 1 次元熱伝導による解析等¹⁰⁹⁾が行われている

が、樹種による差異を説明するには至っていない。木材の炭化は、密度には支配されず、酸素透過率に支配されるとの報告¹¹⁰⁾もあり、燃え止まりメカニズムの解明が待たれる。この手法は 1 時間耐火構造認定を取得しており、小規模の火災実験（2005 年 6 月）¹¹¹⁾を経て、5 階建ての建築物（1 階部分は RC 造）が建設されている。

集成材部分が荷重を負担しなければ、その部分が燃え尽きても不都合は生じない。そのような発想（燃え尽き型）の耐火構造材料についても検討され、スギと強化石膏ボード等からなる被覆を施した梁に 2 時間耐火の性能があることが示されている^{16,112)}。

(3) 木材のみで構成される耐火構造

木材だけで構成される耐火構造の梁や柱では、燃え止まりを期待する部分にジャラ等の高密度材や難燃処理木材を配置する方法が検討されている。

高密度の木材は熱容量が大きく、鋼材と同様に燃え止まりに寄与すると発想から、ジャラ等の高密度材を集成材内部に燃え止まり層として配置する方法が提案され¹¹³⁾、1 時間耐火構造の認定を取得している。無処理の木材のみで燃え止まりを実現させた点がユニークである。ここでも表層や中心部分の集成材がカラマツの場合は燃え止まるがスギでは燃え止まらない。そこで、この研究グループでは、スギ集成材で 1 時間の耐火性能を付与する方法として、高密度木材に代え、モルタル層を断続的に挿入する方法を考案している^{114,115)}。

燃え止まり部分に選択的に難燃薬剤を注入したラミナを配置することで集成材を燃え止ませる方法も検討されている。燃え止まり部分への難燃処理には斑の無い確実な薬剤注入が不可欠で、レーザー等を用いたインサイジング加工が必要となるが、同一樹種のラミナを使用し、従来の集成材製造ラインで耐火性能を有する集成材が製造可能である。この方法によるスギ、カラマツ集成材での 1 時間加熱+3 倍時間以上放置での燃え止まりが確認されており^{116,117)}、認定取得に向けた開発が進められている。

木質系材料を用いた耐火構造の開発は精力的に進められており、1 時間耐火構造の手法が出揃い、さらに 2 時間耐火構造に向けた技術開発が進められている段階にある。1 時間耐火構造であれば、建築物の最上階からの 4 階部分まで、2 時間耐火構造になると最上階からの 14 階部分まで、3 時間耐火構造ともなれば如何なる高層建築物の建設も可能となる。

6. 今後の課題

ようやく木質系の耐火構造、耐火建築物が認めら

れ、木質系構造材料を用いた住宅やオフィスビルが建設され始めたが、既に8階建までの木造建築物が認められているスウェーデンや6階建が認められているスイスなどのEU諸国などから比べ^{118,119)}、わが国では、依然として木質耐火構造のハードルは高い。

技術的な検討は1993年に始まり、新たな概念や検証法、評価手法の導入に反映されたが、1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災の影響は大きく、建築物の耐火性能に、大地震に伴いライフラインが寸断された状況で発生する大規模市街地火災や消防活動が行われないことをも想定した場合の性能が少なからず求められる結果となったことは否めない。

文化や気候風土、地震発生の危険度等が異なり、諸外国との差異は一律に論じられないが、「木造禁止」の底流に流れる思想は払拭されておらず、耐火構造認定の判断においては、木材を扱う者にとって時に理不尽と思えることも少なくない。理不尽さの原因は、煎じ詰めれば、耐火建築物の火災時の構造安全性をどう解釈するかということに帰結する。耐火建築物は、地震後に発生する火災に対しても安全でなければならないか¹²⁰⁾。この問いに対し、前川喜寛氏（元建設省建築指導課長）は、地震と火災とは全く違った観点を根拠にしており、基準法は火災終了後も倒壊せず建ち続ける構造安全性は求めておらず、地震後の火災安全性の担保は不要とした上で、法規は最低基準であるにも関わらず、その最低基準が必要かつ十分な最低基準と思ひ込みがちで、防火では法規が設計基準化しているようだと言っておられる。そして、科学的な資料も不十分な状況で、日本人の過敏とまでいえる素朴な火災恐怖心に支えられて積み上がってきた内容は論理的に曖昧なものが多いと述べておられる¹²¹⁾。

論理的に曖昧な部分にメスをいれ、これを明らかにするのが科学の力である。製造過程でCO₂排出量の少ない木材の利用促進や、CO₂ストックとしての都市空間の活用が求められる昨今、都市部での建築構造材料としての木材利用はますます重要性を帯びてこよう。現行の法規や認定手続きに則った耐火構造材料の開発はもとより、より一層、科学的な視点で材料や構造の火災安全性を論じ、建築構造材料としての木材の使用範囲を拡大できるような更なる技術開発と基準の整備が求められている。

文 献

- 1) 杉山英男：住宅と木材 17(4), 8-9 (1994).
- 2) 杉山英男：住宅と木材 17(6), 8-9 (1994).
- 3) 秋田一雄：“火のはなし I”，技報堂出版，東京，

1985, pp. 1-184.

- 4) 菅原進一：“都市の防火と防火計画”，共立出版，東京，2003, pp. 1-235.
- 5) “新訂建築学大系21 建築防火論”，建築学大系編集委員会編，彰国社，東京，1970, pp. 22-34.
- 6) 田邊平学：建築雑誌 60(717), 1-9 (1946).
- 7) 杉山英男：住宅と木材 17(7), 8-9 (1994).
- 8) 渡辺廣士：住宅と木材 9(100), 30-33 (1986).
- 9) 西脇 清：建築知識 30(359), 82-84 (1988).
- 10) 建設省住宅局建築指導課：住宅と木材 15(117), 12-19 (1992).
- 11) 安藤恒次：住宅と木材 16(188), 12-15 (1993).
- 12) 原田和典：火災 48(1), 1-6 (1998).
- 13) 辻本 誠，萩原一郎，原田和典，高橋 済，竹市尚広：火災 49(1), 7-15 (1992).
- 14) 辻本 誠：建築技術 609, 94-97 (2000).
- 15) 原田寿郎：農林水産技術研究ジャーナル 31(1), 16-18 (2008).
- 16) 上川大輔：木材工業 62(12), 596-601 (2007).
- 17) 内田祥三：建築雑誌 47(579), 1649 - 1722 (1933).
- 18) 内田祥三：建築雑誌 49(597), 405-469 (1935).
- 19) “火災便覧第3版”，日本火災学会編，共立出版，東京，1997, pp. 368-447.
- 20) 岸田日出刀：建築学会大会論文集 13, 437-487 (1939).
- 21) 川越邦雄，今泉勝吉：日本建築学会大会学術講演概要集，中国，1977, pp. 2143-2146.
- 22) 岸谷孝一：日本建築学会大会学術講演梗概集，関東，1979, pp. 1831-1840.
- 23) 菅原進一，佐藤 寛，遊佐秀逸，塚越 功，岩河信文，最上滋二，吉田正志，山名俊男：日本建築学会関東支部研究報告集，東京，1979, pp. 319-356.
- 24) 菅原進一：日本建築学会学術講演概要集，九州，1981, pp. 2377-2378.
- 25) 熊谷敏男：日本建築学会学術講演概要集，九州，1981, pp. 2379-2380.
- 26) 最上滋二：日本建築学会学術講演概要集，九州，1981, pp. 2381-2382.
- 27) 小國勝男：日本建築学会学術講演概要集，九州，1981, pp. 2383-2384.
- 28) 菅原進一：日本建築学会学術講演概要集，九州，1981, pp. 2385-2386.
- 29) 上杉三郎：林業試験場研究報告 322, 1-30 (1983).
- 30) 中村賢一：日本建築学会大会学術講演梗概集，

- 九州, 1981, pp. 2375-2376.
- 31) 佐藤 寛：日本建築学会大会学術講演梗概集，東北，1982, pp. 2307-2308.
- 32) 菅原進一：日本建築学会大会学術講演梗概集，東北，1982, pp. 2309-2310.
- 33) 小國勝男：日本建築学会大会学術講演梗概集，東北，1982, pp. 2311-2312.
- 34) 遊佐秀逸：日本建築学会大会学術講演梗概集，東北，1982, pp. 2313-2314.
- 35) 岸谷孝一：日本建築学会大会学術講演梗概集，東北，1982, pp. 2315-2316.
- 36) 火災研究委員会：建築研究資料 **54**, 1-51 (1985).
- 37) 佐藤 寛：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，北海道，1986, pp. 769-770.
- 38) 山田 誠：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，北海道，1986, pp. 771-772.
- 39) 昆 文雄：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，北海道，1986, pp. 773-774.
- 40) 岸谷孝一：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，北海道，1986, pp. 775-776.
- 41) 中村賢一，最上法二：建築研究資料 **56**, 1-55 (1985).
- 42) 今泉勝吉：木材工業 **31** (11), 502-504 (1976).
- 43) 中村賢一，宮林正幸：木材工業 **40** (12), 563-567 (1985).
- 44) 建築研究所，建築業協会，日本建築センター：大規模木造建築技術研究報告書 No. 2 防火分科会，1990, pp. 1-191.
- 45) White, R., Nordheim, E. : *Fire Technology* **28** (1), 5-30 (1966).
- 46) 上杉三郎：木材学会誌 **40** (4), 424-428 (1994).
- 47) Tran, H. C., White, R. : *Fire and Materials* **16** (4), 197-206 (1992).
- 48) Nussbaum, R. H. : *J. Fire Sci.* **6** (4), 290-307 (1988).
- 49) Ohuchi, T., Miyamoto, K. : International Timber Engineering Conference, Tokyo, 1990, pp. 87-91.
- 50) König, J. : *Trätekt Rapport* I 9210062, 1-8 (1992).
- 51) Schaffer, E. L. : *Research Paper FPL* **69**, 1-22 (1967).
- 52) Harada, T. : *Mokuzai Gakkaiishi* **42** (2), 194-201 (1996).
- 53) 原田寿郎，上杉三郎，宮武 敦，平松 靖：木材工業 **58** (1), 14-18 (2003).
- 54) “日本の構造技術を変えた建築100選”，日本建築構造技術者協会編，彰国社，東京，2003, pp. 1-454.
- 55) 丸山則義：木材工業 **47** (7), 328-331 (1992).
- 56) 斎藤 健：木材工業 **47** (11), 576-579 (1992).
- 57) “ドーム構造の技術レビュー 事例をとおして最新構造設計技術をみる”，日本建築学会編，丸善，東京，2004, pp. 90-103.
- 58) 佐藤 寛：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，近畿，1987, pp. 833-834.
- 59) 山田 誠：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，近畿，1987, pp. 835-836.
- 60) 上杉三郎：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，近畿，1987, pp. 837-838.
- 61) 岸谷孝一：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，近畿，1987, pp. 839-840.
- 62) 西根彦一：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，近畿，1987, pp. 841-842.
- 63) 岸谷孝一：住宅と木材 **10** (111), 1-19 (1987).
- 64) 建設省建築研究所，(社)日本ツーバイフォー建築協会：総 3 階建 2×4 住宅実大火災実験共同研究報告書，1-176 (1988).
- 65) 鈴木弘昭：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，関東，1988, pp. 759-760.
- 66) 中村賢一：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，関東，1988, pp. 761-762.
- 67) 上杉三郎：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，関東，1988, pp. 763-764.
- 68) 山田 誠：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，関東，1988, pp. 765-766.
- 69) 塚越 功：日本建築学会大会学術講演梗概集 A，関東，1988, pp. 767-768.
- 70) 佐藤 寛：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1287-1288.
- 71) 鈴木孝明：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1289-1290.
- 72) 柴澤徳朗：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1291-1292.
- 73) 山田 誠：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1293-1294.
- 74) 高橋幸郎：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1295-1296.
- 75) 成瀬友宏：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1297-1298.
- 76) 斉藤勇造：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1299-1300.
- 77) 小國勝男：日本建築学会学術講演梗概集 A，北陸，1992, pp. 1301-1302.
- 78) 棚池 裕：日本建築学会学術講演梗概集 A，北

- 陸, 1992, pp. 1303-1304.
- 79) 増田秀昭：日本建築学会学術講演梗概集 A, 北陸, 1992, pp. 1305-1306.
- 80) 笹原邦夫：日本建築学会学術講演梗概集 A, 北陸, 1992, pp. 1307-1308.
- 81) 林 吉彦, 吉田正志, 茂木 武, 萩原一郎, 山名俊男, 五頭辰紀, 増田秀昭, 長谷見雄二, 北後明彦, 安村 基, 中村賢一, 三村由夫, 阿部市郎, 泉潤一, 福本雅嗣, 齋藤 一, 山田 誠：建築研究資料 **93**, 1-352 (1999).
- 82) 長谷見雄二：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 187-188.
- 83) 泉 潤一：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 189-190.
- 84) 北後明彦：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 191-192.
- 85) 林 吉彦：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 193-194.
- 86) 五頭辰紀：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 195-196.
- 87) 赤羽根信行：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 197-198.
- 88) 吉田正志：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 199-200.
- 89) 山名俊男：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 201-202.
- 90) 木寺 康：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 203-204.
- 91) 内山貴広：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 1992, pp. 205-206.
- 92) 上杉三郎：木材工業 **51**(2), 50-54 (1996).
- 93) 上杉三郎, 原田寿郎, 前田 豊, 山田 誠：木材学会誌 **45**(1), 57-61 (1999).
- 94) 成瀬友宏：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 北海道, 2004, pp. 11-12.
- 95) 斉藤春重：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 北海道, 2004, pp. 13-14.
- 96) 山田 誠：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 北海道, 2004, pp. 15-16.
- 97) 上杉三郎, 宮武 敦, 川元紀雄：木材学会誌 **39**(10), 1201-1207 (1993).
- 98) 上杉三郎, 宮武 敦, 原田寿郎：森林総合研究所研究報告 **367**, 155-165 (1994).
- 99) 山田 誠：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 2005, pp. 21-22.
- 100) 西田一郎：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 2005, pp. 23-24.
- 101) 須藤昌照：日本建築学会学術講演梗概集 A-2, 近畿, 2005, pp. 25-26.
- 102) Harada, T., Uesugi, S., Masuda, H. : *J. Wood Sci.* **52**(6), 544-551 (2006).
- 103) 原田寿郎, 神谷文夫, 井上国雄：木材工業 **62**(4), 163-167 (2007).
- 104) 日本住宅・木材技術センター：“防・耐火性技術調査・開発事業報告書”, 2007, pp. 96-125.
- 105) 川鍋重衣子：木材工業 **61**(4), 163-166 (2006).
- 106) 遊佐秀逸：日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 北海道, 2004, pp. 133-134.
- 107) 遊佐秀逸：日本火災学会研究発表会概要集, 2003, pp. 106-109.
- 108) 川合孝明：日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 東海, 2003, pp. 333-336.
- 109) 齋藤悠輔, 原田和典, 山口純一：日本火災学会研究発表概要集, 神戸, 2008, pp. 114-115.
- 110) Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., Wakili, K.G. : *J. Wood Sci.* **53**(1), 71-75 (2007).
- 111) 増田秀昭：火災 **55**(4), 53-57 (2005).
- 112) 並木勝義：日本建築学会大会学術講演概要集 A-2, 関東, 2006, pp. 65-66.
- 113) 大橋宏和：日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 関東, 2006, pp. 89-90.
- 114) 大橋宏和：日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 九州, 2007, pp. 93-94.
- 115) 岡日出夫, 大橋宏和, 山口純一, 堀 長生：日本火災学会論文集 **58**(1), 13-20 (2008).
- 116) 原田寿郎：日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 関東, 2006, pp. 85-86.
- 117) 原田寿郎, 安藤恵介, 宮林正幸, 大内富夫, 宮本圭一, 上川大輔, 服部順昭：木材学会誌 **54**(3), 139-146 (2008).
- 118) 大内富夫, 常世田昌寿：火災 **55**(4), 43-48 (2005).
- 119) 河野 守：火災 **56**(2), 9-14 (2006).
- 120) 堀 長生：建築防災 **309**, 1 (2003).
- 121) 前川喜寛：建築防災 **314**, 67-69 (2004).