

新材料と伝統技術で安全安心な木材の建物をつくる

Safety and security of timber-based construction with new materials and technologies

五十田 博*

Hiroshi Isoda*

1. はじめに

地球環境の保護が叫ばれる昨今、建築材料も再利用、再生を繰り返すことが重要となる。木材は利用、植樹、再利用、そして材料を小割にして木質材料として再生しての利用など、環境負荷の少ない材料として知られている。鉄は原料である鉄鉱石が豊富にあり、再利用、電炉鋼としての再生をはかっている。コンクリートもフライアッシュなどの再生材料などによって再利用を図る。このように材料の循環はいずれも可能となっている。しかし、植樹、利用のサイクルによって資源を無限に供給可能な木材と、元資源が限られている鉄やコンクリートでは決定的に異なる。木材の循環サイクルは図1のように森林・林業白書などにも示されている。

平成22年には「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が成立し、建築分野での木材の利用促進が叫ばれている。これは前述した資源、材料の循環が可能な木材を有効利用することによって地球環境の保護に資するという目的に加え、利用可能な木材が多く、山に木が余った状態にあることも一因である。この状態は木を間引いて、山を健康な状態に保つことや、土砂災害を引き起こさないように森林を整備するという観点からも適切ではない。といったように、さまざまな観点・理由により、現在木材の利用促進が社会的に喫緊な課題となっている。

本資料では木材という材料の特徴をまず示し、その後、これまでの建築分野での木材の利用やあらたな材料によるこれからの展開について述べていくことにしたい。



図1 木材利用のサイクル 森林・林業白書¹⁾

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏構造機能分野。
E-mail: hisoda@rishi.kyoto-u.ac.jp

2. 木材の特性と他材料との比較

建築物を構成する材料には、木材に加え、鉄、コンクリートなどがある。そのほかにアルミニウム、ガラス、紙など特殊なものもあるが、一般的に木材、鉄、コンクリートが主たる構造材料である。「日本は木の文化、欧州は石の文化」といわれるように、木材は我々日本人にとってもっとも身近な建築用材として広く使用されてきた。燃える、腐るなどの欠点もあるが、重さの割には強度も高く、乾燥状態で使えば長期間の使用にも耐えることは7世紀後半の建物といわれる法隆寺がいまも建ち続ける、といった例を出すまでもなく、よく知られているところである。一方、鉄は産業革命以後、橋や塔などに使われはじめ、現在は大規模建築物、高層建築物に用いられている。錆びることや製造当初、強度は高いが“もろい”などの欠点があるとされたが、炭素含有量の少ない「鋼」（以下、鋼材と呼ぶ）がつくられるようになるとそれらの欠点も克服された。強さは木材の10倍程度あり、優れた構造材料である。このことは割り箸が人力で容易に曲げ壊すことができるのに対し、同寸法の鉄になると曲げ壊すのが容易でないことから想像が可能と思われる。一方、コンクリートは明治以降の欧米列強諸国と並ぶインフラ整備のためにポルトランドセメントの輸入が始まりであり、港湾、ダム、橋の構築、そして、現代では中層建築から大規模な構造の建築物まで広く用いられている。コンクリートとはセメントと水と砂と砂利などを混合した材料で、耐久性、耐火性、耐熱性などに優れ、圧縮したときの強さは木材と同じ程度のものから3～5倍程度までさまざまである。ただし、引っ張ったときの強さは圧縮時の1/10程度に過ぎず、引っ張りに優れた鉄と組み合わせる鉄筋コンクリートとして構造物には使用される。このように主たる建築用の構造材料にはそれぞれに長所短所があり、短所については欠点を克服すべく日々努力が重ねられている。

さて、もう少し強さなどの建物の安全性や居住性にかかわる必要な性能、構造性能を比較していくことにしたい。ただ、木材とひとことでいっても、スギ、ヒノキ、マツといったように同じではなく、構造性能も異なる。鋼材も材種により強さは異なり、コンクリートも混合するセメント水や砂や砂利の割合により強さが違うが、ここでは一般的な材料として比較していく。木材の強さを1 (30N/mm^2) とすると、鋼は13 (400N/mm^2)、コンクリート0.8 (24N/mm^2) 程度である。この強さは、建物が倒壊したり破壊したりしないように作るために必要な性能であるが、変形が大きくなって壊れないまでも損傷が出たりしないようにはかたさ、専門用語では剛性が必要である。かたさの比は木材1 (10kN/mm^2) に対し、鋼24 (24kN/mm^2)、コンクリート2.1 (21kN/mm^2) である。もう一つ比較しておきたい材料の指標が比重である。比重は水を1.0とした時の重さを表す指標というのはなじみにあるところであるが、木材は0.5、鋼は7.8、コンクリートが2.3程度である。これは木材が水に浮いて、鋼やコンクリートは沈むことから比較的容易に想像ができる。ここで、それぞれの材料をどんどん大きくする、あるいは長くして、壊れないままどこまで大きくできるか、あるいは長くできるかを考える。たとえば橋をどんどん長くしていくという具合である。この性能は強さを比重で割った比強度と呼ばれる指標を比較すればよい。計算の結果、木材 60N/mm^2 、鋼材 51N/mm^2 、コンクリート 10N/mm^2 となる。強さでは鋼材に大きく引けをとる木材であるが、比強度にすると鋼材よりも優れた性能を示すことになる。また、地震の時は建物に加速度が作用するが、どの程度の力が建物に作用するかは、その建物の重量に加速度を乗じて計算ができる。つまり、重量が軽いということは、地震の時に作用する外力が小さいということである。絶対値として性能が低い木材であるが、その性能を軽さによって克服しているともいえる。しかし、ここまでの議論は素材だけであり、建物の中に本棚、家具といった重量物が別途積載され、その重量が大きくなるような場合には、強さの絶対値が重要な因子となる。このように比較的軽いものしか乗らず、面積もあまり大きくないような場合には木造が適しているだとか、ケースバイケースで材料の選択がされる。また、強度やかたさが足りなければその断面を大きくすればいいという考え方もある。例えば、鋼材がいくら強いとはいえ、針金程度の断面であれば人間のちからで曲がってしまう。木材も同様に割り箸を折ることはできるが、割り箸を何本も束ねれば割れにくくなる。このように性能を確保するためには断面を増せばよく、この辺は設計次第である。

さて、製材された木材をそのまま建築用材として利用していた時代は、部材の長さや断面の大きさは、樹木の長さ大きさに依存した。さらに、たとえ職人の手による高度な加工技術によって組み上げたとしても材料強度以上につなぎの部分である接合を構成することは難しいため、その結果として、おのずと利用できる建築物の大きさにも限界があった。ゆえに、主たる材料の供給先を小規模な住宅として、木材の利用は発展をしてきた。そのような状況下であっても、1950年に建物の規模や材料などを制限した建物の法律、つまり建築基準法、が整備される以前は、社寺建築や、書店、記念館などの比較的大規模な木造建築も建てられていた。近年では木材を接着して大きな材とした、図2に示すような集成材、LVLなど、集成板（集成パネル）、直交集成板（クロスラミネティドティンバー、以下 CLT）によって大規模な建築物が建てられる環境となった。このことについては後ほど詳しく述べる。

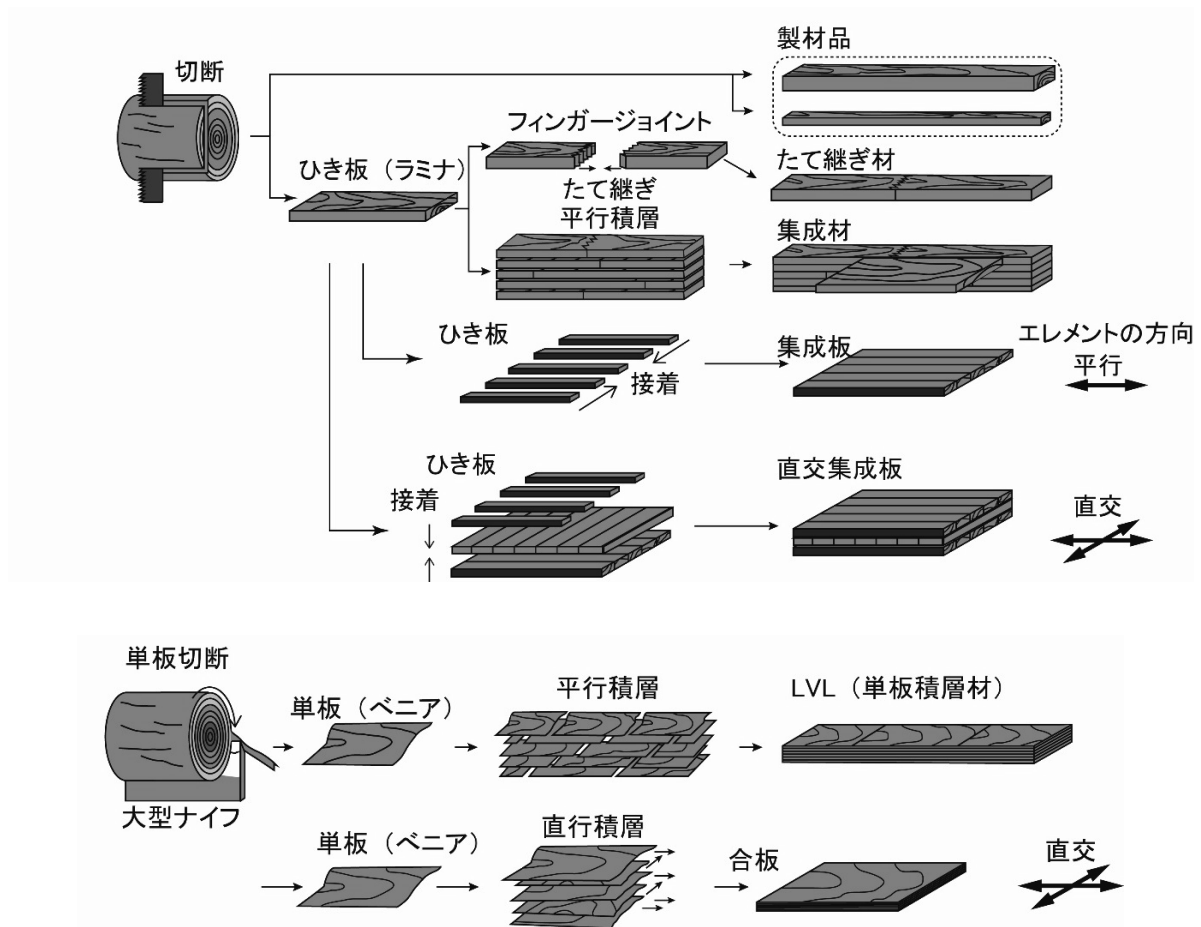


図2 さまざまな木材をベースとする材料²⁾

3. 建築物に求められる性能と木材でつくる建物

建築物に求められる性能としては、遮音性や断熱・遮熱性、遮蔽性のほかに、日常的な振動に対する機能性や地震や台風に対する安全性がある。これまで材料レベルで説明してきたが、ここでは木造建築について、それぞれの性能をみていくことにしたい。

遮音性は上下の階と、部屋と部屋の間の界壁部分での音の伝搬が考えられる。集合住宅では特に遮音性に気を配らなければならないところである。上下階の音について考えると人間などが飛び跳ねた

り、歩いたりするときに生じる重量床衝撃音と、テーブルの上などにあるものが床に落ちた際に生じる軽量床衝撃音にわけて評価がされている。木造の床は比較的軽いため、重量床衝撃音に対しての性能が低く、今後木造でも集合住宅への展開を考えると重量床衝撃音に対しての対策が必要である。場合によっては、柱は木材だが、床などの仕上げにコンクリートを使うということもあり得る。遮熱性については木材自体優れた断熱性能を持つものであるが、過剰な期待は禁物であり、さらに材同士の接合に注意を払わないと隙間風によって断熱性が損なわれる危険がある。先ほど述べたように木材は他の主要な構造材料に比べると剛性が小さく変形が大きくなりがちである。よって、日常的な振動についても十分な注意が必要である。また、重量物を長期間載せたままにしておくと荷重が増えずとも変形が増加する。これはクリープ現象と呼ばれるもので、多かれ少なかれすべての材料において起こる現象であるが、木材では特に注意を要する。設計時に変形を十分に配慮したとしてもクレームにつながることであり、音の問題も含め床に関しては課題がいくつか残されている。また、木造住宅はこれまで度重なる大地震によって、多くが倒壊したこともあり、地震に弱いと思われていた。しかし、現在ではすでにその問題は解決しており、他の構造と耐震性能の差はなくなっている。台風に対する性能も屋根瓦などの飛散の問題も含め、設計行為により安全性が確保できる環境が整っている。

4. 伝統的な木造建物の安全性

伝統的な木造建築のなかには、歴史的価値、文化的価値のあるもの、さらに地域の象徴的な施設もある。地域遺産の保存や景観継承という観点から未来に残そうとするものの、耐震性能が現代の評価体系によって不足するような場合には、文化的な価値を損なわないための耐震補強にかなりの困難が伴う場合がある。また、地域の学校などでは親しみや郷愁といった観点で保存運動がおこるが、居住性、機能性などにおいて質的な向上も必要なため、老朽化がひどく、大規模な改修となる場合には、建て替えを余儀なくされることもある。伝統的な建物の特徴、技法といえば、大きな断面の柱やはり、土壁や接着剤が使われていない板壁、金物を極力使わない木組の接合、などである。過去から使われてきた技法であり、大地震などを経験し、その方法も古来の技法と比べれば、変化してきているものと予想される。このような技術を単に強さやかたさの観点から現在の技術と比較するとやや劣るが、前述したように量を増すことにより、断面を増やすことにより、構造用合板などの現代的なものと強さやかたさにおいて同等の性能とすることもできる。ただし、量を増やすという意味は建物の中に壁が多くなることを、さらには柱の断面を増やすことになり、建物の居住性や機能性に支障をきたす場合もある。また、地震に耐える伝統的に継承されている技術のひとつに、建物を地盤とは固く結合せず、滑ることを許したり、部分的に浮き上がらせたりする技術がある（図3）。これらの技術は現代において免震構造やロッキング構造と呼ばれるものに活かされ、大地震時にも大きな損傷をしないよう設計が可能である。しかしながら、伝統的な技術のままでは現在の設計には活かしきれないこともある。一例をあげよう、図4は3階建ての建物を地盤の揺れを再現できる震動台に乗せ実験をした結果である。左は建築基準法を守って建てた建物、右は接合部の浮き上がりを許容した建物である。左は建築基準法で想定している大地震に対して、1.8倍の入力をした際に倒壊した。同じ地震で右は建物が浮き上がって倒壊を免れた。1.8倍で倒壊することはその後の計算によってその挙動を追跡できるが、浮き上がる方についてはどこがどのようにどの程度浮き上がるかの計算が極めて難しいことがわかった。挙動を追跡できることは技術であるが、挙動を追跡できない以上、浮き上がる構造はなりゆきや結果論となる。なりゆきに人命を任せることは難しく現在では設計できる技術を選択せざるを得ない。そこで、滑らせることを前提に、あるいは浮き上がらせることを前提に設計するのが免震構造やロッキング構造である。



図3 すべりと浮き上がり

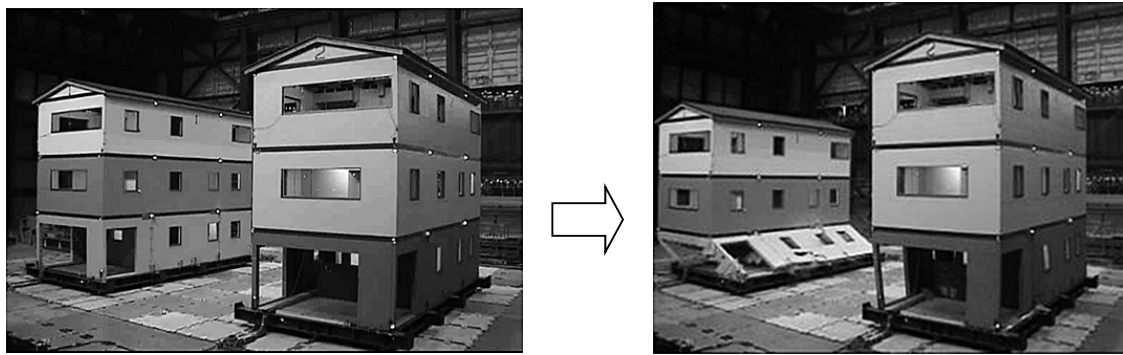


図4 3階建て震動台実験 倒壊現象（右が浮き上がりを許す建物）³⁾

5. これからの木造建築

今後の木造建築の新たな可能性として、2000年に建築基準法が改正されたことによって実現が可能となった4階建て以上の建築物の更なる発展や、最近新たに開発がなされている集成パネルやCLTなどを用いた構造、さらには大規模木造で耐火危険性を最小限に抑え、かつ開放的な木造建築を実現するための他の構造との併用構造がある。それらの現状と今後の展望を以下に示しておく。

<耐火木造>

2000年建築基準法の改正により、木材を主要構造材として用いた構造であっても火に強い耐火部材とすれば4階建て以上の建築物を建てられるようになった。この改正を背景に、木材を使った耐火部材の開発が盛んにおこなわれている。現在までに開発をされている木材を用いた耐火部材は大きく2つに区分され、「被覆型」と「燃えどまり型」である。「被覆型」は、燃えないせっこうボードやコンクリートの版などで木材を被覆し、木材への着火を避けたものである。「燃えどまり型」は、まだ学術用語としてはなじみのないもので最近新たに開発された技術である。木材は可燃物であり着火後無限時間放置すると燃え尽きる。しかし、「燃えどまり型」では木材の内部に燃えどまり層と称する燃焼をにくい層をつくる、あるいは木材だけでは無限時間放置すると燃え尽きるので、こもった熱を放出することにより木材の燃焼を留める、のである。最初に開発された「燃えどまり型」の耐火部材は、木材にHの形をした鋼材を内蔵したものであった。同じような組み合わせで作った柱を燃やした後の状

況を示したものが図5で木材が燃え尽きることなく、途中で燃焼が停止していることがみてとれる。最近では、セメントと水を混ぜたモルタルを木材内部に配した部材が開発されている。鋼材を内蔵したような部材では、耐火上必要な鋼材を、構造の強さやかたさにも活かす方法によって、より低コストとした部材の開発が期待されている。図6は耐火実験により耐火性能を確認して建てることのできた建物の一例である。



図5 耐火木造柱の耐火実験⁴⁾

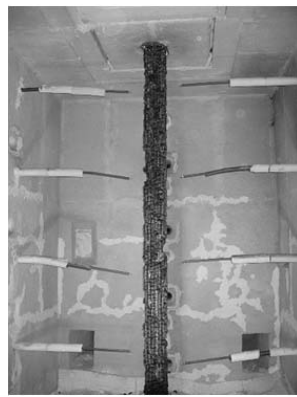


図6 耐火木造の例

<CLT などのパネル>

38mm×89mm の材料によって構成される枠組壁工法やひき板と呼ばれる 30mm 厚程度の集成材に使われていた比較的小さな材料を接着することにより一体の大きな版、パネルとして用いる構造が開発されている。ヨーロッパではすでにこのようなパネルを用いた9階建ての集合住宅が実現した。カナダなどでも15階建てといったこれまでの木造では考えられないような構造のスタディがおこなわれている。この部材の魅力は比較的小断面の部材により構成されるため、小径木を有効利用でき、さらに比較的抵抗力が小さくて済むパネル内部に低い強さの材を利用できるなど、木材の有効利用が図れる点である。また、一体の版、パネルであるがゆえに、これまで柱とかはりといった線材で抵抗していた要素が面で抵抗でき、高性能な部材が作れるところにも利点がある。例えば、床として利用すれば前述したとおり中央部は比較的低強度材で構成でき、しかし2次元的な広がりを持った版であるため、床版としての性能の確保が可能となる。壁として用いれば高強度の壁の構成が可能である。このようなパネル材は木造のパネル構造としてだけではなく、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の壁や床版としての利用の展開も今後十分考えられる。

<木造と他の構造との併用構造>

下の階を鉄筋コンクリート造として上の階を木造とした例は数多い。小規模な例では積雪地域の住宅である。これを一般の建築物にまで拡大した例が最近いくつか建てられ始めている。そして、最近になって3,000㎡まで、つまり1階を鉄筋コンクリート造として1,500㎡、2階を木造として1,500㎡の建築物の設計を容易にするような環境が整い、今後建築数が増えていくことも予想される。この建築物の利点は、遮音性に難はあるが軽い木造を上階に使うことにより音の問題をクリアしたうえで地震に対する安全性を上げるものである。海外でもこの事例は多く、米国西海岸地域では大半の木造のアパートがこの形式といっても過言でないほど、普及している。それらの建物の地震時の安全性を確認するために日本で実施した7階建ての実験の写真を図7に示す。このような上の階と下の階の構造材

料が異なる立面的な併用構造に加え、木造と鉄筋コンクリート造などの他構造を同じ階で併用した平面的混構造も今後開発が期待されている。図8はその例を示したものである。木造は鉛直方向に生じる荷重を主に負担し地震力は鉄筋コンクリート構造によっている。その結果として木造の壁は不要で、柱断面も小さくでき、開放的で魅力的な木造空間が実現されている。この地震力の伝達を可能にするためにはかたくて強い床と、床と鉄筋コンクリートの接合が要となる。実際にどの程度の床や接合が必要になるかを、現在ケースバイケースで事例を重ねている段階である。今後一般の設計者でも容易に安全な建築物を設計できるような方法の確立が期待される。



図7 7階建ての震動台実験⁵⁾



図8 平面的混構造の⁶⁾
(手前が木造で奥が鉄筋コンクリート造)

6. おわりに

木造住宅は大工棟梁の手によるいわば経験工学に基づいて発展を遂げてきた。新しい材料であるCLTや集成材などを用いた建築物は、性能本位の設計体系に基づいて建てる。これは木造以外の鋼材やコンクリートの構造と同じである。1995年の阪神・淡路大震災以降、住宅であっても経験や勘といった建て方ではなく、大地震時に必要な性能を実験データに裏付けされた抵抗能力によって確保した性能本位の建物が建てられるようになりつつある。外見上の流行とは別に、設計によって中身も変化し、日々進化、新たな展開がなされている。伝統的な建物であってもよいものを活かし、現代に見合った性能を確保するための変化が求められている。このような展開に対して対応可能な技術者集団も今後必要となろう。

参考文献

- 1) 森林・林業白書平成25年度版第1部 第I章 第3節 今後の課題 (1)
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo_h/all/a12.html
- 2) 国産材・木の家づくりセミナー資料(木材・材料編)、2010を参考に編集、追加
- 3) 河合直人、榎本敬大、五十田博ほか：木造3階建て軸組構法住宅の設計法と震動台実験 その1～14；日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、229～254、2010年
- 4) 日本集成材工業協同組合提供
- 5) John W. Van De Lindt, Hiroshi Isoda and et al. : Experimental Seismic Response of a Full-Scale Six-Story Light-Frame Wood Building; Journal of Structural Engineering ASCE, (Volume 136, Issue 10), 1262-1272, 2010.
- 6) ベッターリビング つくば建築研究試験センター の案内より