

シンポジウム

木質材料・木質構造の耐久性

とき 1995年5月27日

ところ 東京大学 山上会館

主催 日本学術会議 木材学研究連絡委員会

共催 日本木材学会 日本木材加工技術協会
繊維学会 紙パルプ技術協会
日本木材保存協会

シンポジウム「木質材料・木質構造の耐久性」

目 次

まえがき	-----	1
問題提起	-----	3
	佐々木 光 (秋田農業短期大学教授)	
防腐・防虫処理	-----	6
	檜垣 宮都 (東京農業大学農学部教授)	
接着耐久性	-----	14
	吉田 弥明 (静岡大学農学部教授)	
構 造	-----	27
	小松 幸平 (森林総合研究所接合研究室長)	
耐久設計	-----	43
	中島 正夫 (関東学院大学工学部助教授)	
司 会	今村 祐嗣 (木材学研究連絡委員会委員、 京都大学木質科学研究所助教授)	

まえがき

日本学術会議第6部会員
木材学研究連絡委員会委員長
大熊幹章

日本学術会議は、我が国の科学者の内外に対する代表機関として、科学の向上発達を図り、行政、産業および国民生活に科学を反映浸透させることを目的に設置されているもので科学に関する研究の領域ごとに研究連絡委員会を置き、活動の展開を図っております。

このような目的にそって、木材学に関する研究活動を各分野間で連絡しその能率を向上させるために木材学研究連絡委員会（略称木研連）が設置されています。木研連は、木材に関する学術の現状、長期的動向の把握、将来計画の立案、学術研究団体との連絡調整、国際学術団体への対応、その他必要な事項を職務として活動しておりますが、これらの活動の一つとして関係研究団体の御協賛の下に毎年シンポジウムを開催し毎回、多数の方のご参加を得てまいりました。

さて、本年（1995年）1月17日に発生した兵庫県南部地震は5000名を越える多くの尊い人名を奪い、建物にも甚大な被害を与えましたが木造建物倒壊の原因の一つとして腐朽、白蟻による材料・接合部の劣化が挙げられております。このような事態を受けて本年は『木質材料・木質構造の耐久性』というテーマを設定いたしました。実りあるシンポジウムが実現するものと期待しております。

本シンポジウムの開催にあたり、講師の先生方ならびに木研連委員をはじめ関係の皆様にご礼申し上げます。また共催者としてご協力いただきました日本木材学会、繊維学会、紙パルプ技術協会、日本木材保存協会および日本木材加工技術協会に対しまして深甚の謝意を表する次第であります。

木質材料・木質構造の耐久性を考える

秋田県立農業短期大学木材高度加工研究所

佐々木 光

1) 木材、木質材料の老化を考える

木材を構成する主成分であるセルロースやリグニンは生物劣化や火災にあわなければ重合過程を経て徐々に劣化し、恐らく条件が温和であれば数千年の半減期を持っているものと思われる。しかし、その経過は高圧水蒸気の中で木材を高温処理した場合の成分変化によって推測される。すなわち、まず、セルロース等の結晶領域、リグニンの高分子化が進むと同時に、リグニンの解重合、セルロース鎖の切断が徐々に生じ、また、それにより生じたフラクッションが他の成分に結合（再重合）する現象を繰り返し、全体として一つの山を作った後、緩やかに低下するものと考えられる。

一方、接着剤もまた、このような重合、解重合、再重合をおこし、物性で見ると一つの山を作った後、低下してゆくものと考えられる。このような現象は人間を含めた生物体にも共通しており、有機物の輪廻・流転として知られている。

木質材料の老化現象は、木材と接着剤の間の結合が十分であったとしても、木材の老化曲線と接着剤の老化曲線に支配され、両者の積の形で進展するものとするのが合理的かも知れない。両者間の結合の優れた形を持つ接着剤を望

むと同時に木材の老化曲線に対比できる寿命の長いものを選択する必要がある。
う。

2) 木材、木質材料の劣化を考える

劣化を生物劣化で代表させると、これを毒性を持つ薬剤で処理することは、やがてとり止めるべきであるが、現行の建築規準により施工された住宅の部材、例えば布基礎上にアンカーボルトで取りつける、などの施工をされた部材の腐朽やシロアリの害をのがれるためには、その使用はやむを得ないものかも知れない。これに対する低毒化、無毒化に対する努力は勿論であるが、それらの処理の有効期間が部材の老化速度（寿命）に見合うものであるかどうか重要なことと考えられる。このような考え方は、金属接合における、例えば二酸化鉄（赤錆）による木材の劣化などについても同様に、木材や木質材料の老化速度に見合う接合方法を開発すべきであろう。

なお、火に対するものについては、消火時間との関係でそのグレードが設定されるのであるが、地震等による耐火被覆の剥落については窯業系木質外壁材料の施工方法を化粧用に重点を置かずに、耐力壁としての性能が加算できるように改善することも考えてはどうであろうか？

3) 木材、木質材料の力学的刺激に対する耐久性を考える

木材の力学的耐久性のうち、クリープの問題は一般にその変形にまず問題が発生するので、破壊に至るまで放置されることは少ない。それは木材の組織構造と関係するところが大きい。つまり、木材の組織構造は繊維方向の力に対し

て、組織感性が低くできているように思われる。例えば、小さな孔を穿った試験片の強度は、孔の径が或る限度以下ならば孔の無い場合と統計的に同様である。このことは、孔を開けると単位断面当たりの耐力（強度）が増加する材料ともいえる。組織内での応力の分散による力学的安全性を持つ材料なのである。

これは繰り返し荷重の下でも見られる優れた特性である。欠点が拡大し始めるのは、荷重がかなり高い場合を除けば、荷重の静的継続か繰り返しの最終段階のところに集中する傾向がある。したがって、破壊する少し前に荷重を除いたものも、かなりの安全性で再使用に耐える性質があるように思われる。これがプルーフローディングテストを成り立たせているのである。

一般に木材と木質材料の耐久限度はクリープでも繰り返し荷重でも、それぞれの静的荷重の30～60%の範囲であることが多くの実験結果から知られている。

4) 木質構造の耐久性を考える

木質構造の耐久性は、生物劣化に関しては、水分に関する条件の良い風通しのよい構造をまず考える。構造に対する配慮80%、材料による改善20%のウェイトで考えるべきかと思う。

次に、木構造の耐久性は危険な部材をチェックできるシステムが必要である。

また、地震に対する理想の形態としては構造を固くすることは勿論であるが、その構造に地震のエネルギーが伝わらない工夫、つまり免震層の上に固い構造が乗っているような形が究極の構造かと思われる。モービルホームに学ぶところが大きいのではないだろうか？

防腐・防虫処理

東京農業大学農学部林学科

檜垣宮都

はじめに

世界の人口は今後30年間で82億に達すると推定される。人口の増加に伴って世界の森林面積は減少し、地球環境維持に重要な熱帯林の19億haは毎年1100万ha消失している。70%を外材に依存しているわが国が建築用材として使用しているものは約8000万 m^3 である。このように大量に使用されている木材は自然環境の苛酷な条件の中で、長い年月を経て造りだされた優れた有機材料であるが、一度不適な環境におかれると種々の生物の被害を受けて劣化する。優れた性能を長い間持続するためには、防腐・防虫（防蟻）などの木材保存処理をほどこす必要がある。

1990年のわが国の保存処理木材量は40.9万 m^3 、当年度の米国のそれは1696.8万 m^3 で、日本の40倍の生産量となっている。人口千人当りでも日本の3.3 m^3 に対して米国は68.9 m^3 で20倍となっている。世界の先進各国と比較しても極めて低い値で、森林資源を大切に保全し、木材資源の有効活用を図っているニュージーランド、オーストラリア、スウェーデンなどは米国と同様に木材の保存処理の意識は高い。

その様なことから木材保存処理は木質材料の寿命の延伸を目的とすることから健全な森林の保護の一助であり、また住宅という貴重な財産を守り、延いては住む人の生命にも係わる程に重要である。

1. 木材の生物劣化

木材の生物劣化（Biodeterioration）の主要な原因は、菌類による木材の腐朽と、シロアリによる木材の食害である。わが国が南北に長く（北緯23.5~66.5°）、日本列島の全体が温帯に位置しており、なかでも沖縄は亜熱帯に属する。年間の降水量も高いので、菌類やシロアリの生息には好適で、菌類の種類も豊富である。シロアリは北海道の一部を除いて、全国的に生息し、木材が食害を受け易い地理的条件下にある。

木材の菌害は、腐朽・辺材変色・表面汚染に分けられる。木材の腐朽は担子菌類（キノコ）が主原因であるが、腐朽過程からみると微生物遷移がみられ、細菌類、放線菌その他の微生物が大なり小なり関与している。イドタケ、ナミダタケは著名で、いずれも建築材の褐色腐朽をおこす菌でホシゲタケは白色腐朽をひきおこす。マツオウジ、イチョウタケは建築・土木用材の褐色腐朽、JISA 9201の供試菌であるオオウズラタケは褐色腐朽菌、カワラタケは白色腐朽菌であるが建築用材の腐朽はまれである。ケトミウム属などは軟腐朽をひきおこす菌で、冷却塔用材、橋桁、土台など高含水率の環境下で被害を与える。

木材の蟻害はイエシロアリやヤマトシロアリによるものが大きい最近では、アメリカカンザイシロアリやダイコクシロアリがわが国に上陸して住宅に大きな被害

をおよぼしている。シロアリによる被害の程度は、沖縄、九州、四国、本州の順で低くなるが、予防処理の必要のない地域は殆どない。

2. 木材腐朽・蟻害の条件

古建物の例を見れば、数百年～千年という長期間全く腐朽しない部材もある。腐朽菌はどこにでもいるので、何かが菌の生育を妨げている。その原因としては、木材中の抗菌性物質によるか、菌類の生育に不利な環境条件であったとも考えられる。菌類が生育するのに必要な環境因子としては水分、酸素、温度の三つが挙げられる。通常木材の含水率が50～150%の範囲を菌の生育至適水分域とされている。含水率15%以下の気乾状態になると菌の生育は停止する。しかしナミダタケは乾燥している木材に菌が生育し、乾腐をひきおこす。木材腐朽菌は好気性菌で酸素の欠乏したところでは生育できないし、生育温度も0℃以下及び50℃以上では生育を停止する。これら生育環境因子のうち、水分環境を制御することは或る程度可能であり、防雨、防水、通風、換気などで達成される。

湿潤材の害虫であるシロアリは日本では15種が認められている。ヤマトシロアリは札幌以北を除き全国的に分布、イエシロアリは関東以西に分布している。なかでもイエシロアリの被害は最も大きく、木材以外にプラスチック、グラスウール、コンクリートに孔を開けたり、樹木にも大きな被害を及ぼす。湿った木材が被害を受け易いのは腐朽と同じで、一般的には腐朽が先行して蟻害の順になるといわれている。しかしイエシロアリは水を運ぶ習性があるので乾材でも食害する。

3. 木材の耐朽性・耐蟻性

木材の菌類に対する耐朽性は、材の組織構造、比重、硬さなどの物理的性質及びその材の抽出成分によって左右される。各樹種の心材の耐朽性を杭試験で調査すると、9年以上（極大）－チーク、セランガンバツなど、7～8.5年（大）－ヒノキ、ヒバ、サクラ、クリ、ベイヒ、ベイスギ、マホガニーなど、5～6.5年（中）－カラマツ、スギ、シラカシなど、3～4.5年（小）－アカマツ、クロマツ、ベイツガ、ボンデローサパイン、レッドラワンなど、2.5年以下（極小）－トドマツ、エゾマツ、ブナ、ベイモミ、アガチスなどである。腐朽の速さは、繊維方向が最も大きく、他方の数十倍である。耐用年数は板の厚さ、正角材では長さ按比例する。

木材の耐蟻性については、大－ヒバ、イヌマキ、チークなど、中－ヒノキ、スギ、カラマツなど、小－エゾマツ、トドマツ、クリ、ベイツガなど。

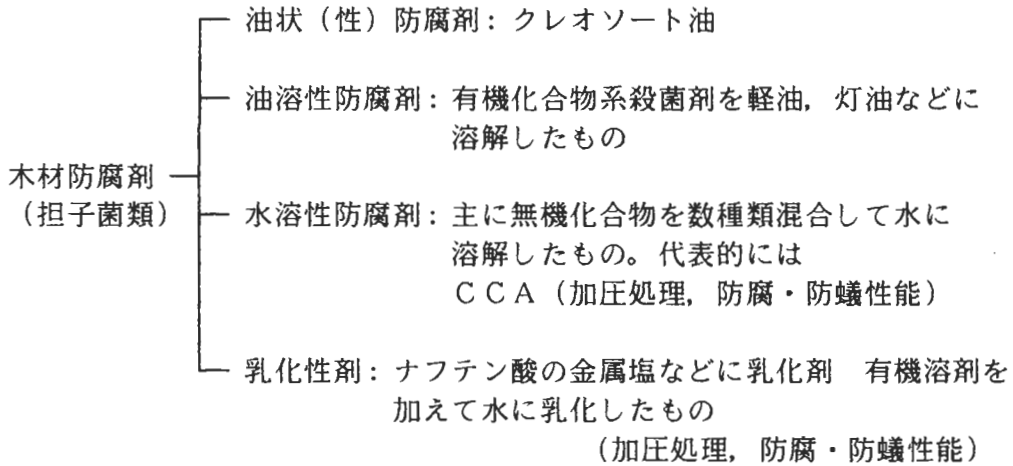
乾材害虫であるヒラタキクイムシに対して食害のない樹種（辺材）は針葉樹材と、アガチス、メルクシマツなど極小数で大半の樹種は被害をうける。

これらの性質は、材の用途区分や保存処理薬剤の処理量にも影響するとされている。

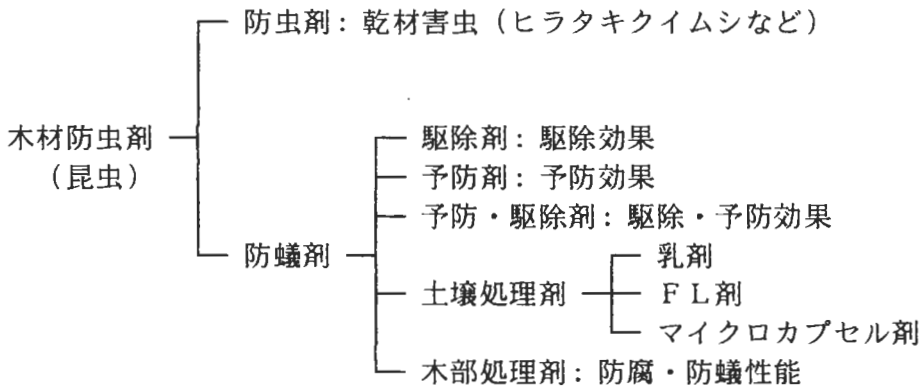
4. 木材保存剤

木材の劣化の要因を物理的・化学的手段によって取り除くか、軽減させて、木材の耐用年数を延伸することが木材保存の目的である。この目的を達成するには種々

の工夫がなされてきたが、薬剤を用いることは古くから行なわれており、このために用いられている薬剤を木材保存剤と呼んでいる。一般には木材の劣化原因となる生物の種類によって木材腐朽剤、木材防カビ剤、木材防虫剤、防蟻剤には土壌処理用と木部処理用などの区別もある。それぞれの薬剤を細別すると次のようになる。



木材防カビ剤 (カビ類)



5. 木材保存処理技術

木材の保存処理には防腐・防虫など、目的に適した薬剤を木材中の深層まで速やかにしかも均一に浸透させることが望ましい。しかし、木材組織では辺・心材、早材・晩材、繊維・放射・接線方向などそれぞれ浸透の度が異なる。また木材は乾燥した方が液の浸透はよい。30%以下の含水率範囲では含水率と浸潤長・吸収量とは反比例、30%以上になると吸収量は低い方が大きい、浸潤長はほとんど変化しない。さらに薬液の性状によっても異なる。難注入材などはインサイジング加工をほどこして注入を促進する。木材処理法には各種あるが、工場処理についてま

とめると以下のようなになる。

表面処理法 — 塗布：ゴムローラーなどによる 50～100g/m²
— 吹付け：トンネル内でスプレー 200～300g/m²
— 浸漬：薬槽の中に製材品・フローリングボードを浸漬

拡散法：含水率30%以上が必要で薬剤が木材中の水分に拡散

加圧注入法 — ベセル法（前排気→加圧→後排気） etc
— ダブル・バキューム法（乾式法、Vac-Vac法）

接着剤混入法：接着剤に薬剤を混入させて接着工程中に木質部分に薬剤を浸透させる。 防虫合板，防腐合板

* 集成材のラミナ処理（防腐・防蟻）

6. 処理木材の耐用年数

最近、使用環境区分あるいは用途によって期待耐用年数が検討されている。それによると、全ての使用条件下で20～30年、劣化現象があまり厳しくないところで50年といった長期の期待耐用年数が設けられる。しかし処理木材の性能は、薬剤の種類や処理法さらには対象とする木材によっても大きく左右される。森林総合研究所の試験地で28年間観察された各種の薬剤処理杭（スギ辺材杭，長さ60cm，断面3×3cm）の観察評価では、クレオソート油（原液）503Kg/m³処理で28年以上未定，CCA2号10.9Kg/m³25年間，ナフテン酸銅（Cuとして）0.8Kg/m³8年間以上未定となっている。耐久性が高いとされているベイヒ辺材の無処理杭は、ほぼ2.5年経過で縦圧縮強度は著しく低下し半減している。

7. JAS，AQおよびJISの保存処理規格

JAS改正に係る保存処理関係の規程で（1）環境区分における薬剤吸収量の適合基準，（2）樹種の耐久性区分による薬剤の浸潤度の適合基準，（3）AQ認証の基準さらにJISA9108土台用加圧式防腐処理木材のそれぞれの規格適合基準を示す。

JAS改正に係る保存処理関係の規定

(1) 環境区分における薬剤吸収量の適合基準

性能区分	使用した薬剤	薬剤記号	吸収量の適合基準
K 1	ほう素化合物	B	ほう酸として 1.2 kg/m ³ 以上
K 2	クロム・銅・珪素化合物	CCA	CCAとして 1.8 kg/m ³ 以上 9.0kg/m ³ 以下
	7ルキル7ソモニウム化合物	AAC	DDACとして 2.3 kg/m ³ 以上
	銅・7ルキル7ソモニウム化合物	ACQ	ACQとして 1.3 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸銅	NCU	油剤は、銅として 0.4 kg/m ³ 以上 乳剤は、銅として 0.5 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸亜鉛	NZN	油剤は、亜鉛として 0.8 kg/m ³ 以上 乳剤は、亜鉛として 1.0 kg/m ³ 以上
K 3	クロム・銅・珪素化合物	CCA	CCAとして 3.5 kg/m ³ 以上 10.5kg/m ³ 以下
	7ルキル7ソモニウム化合物	AAC	DDACとして 4.5 kg/m ³ 以上
	銅・7ルキル7ソモニウム化合物	ACQ	ACQとして 2.6 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸銅	NCU	油剤は、銅として 0.8 kg/m ³ 以上 乳剤は、銅として 1.0 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸亜鉛	NZN	油剤は、亜鉛として 1.6 kg/m ³ 以上 乳剤は、亜鉛として 2.0 kg/m ³ 以上
K 4	クレオソート油	A	クレオソート油として 80 kg/m ³ 以上
	クロム・銅・珪素化合物	CCA	CCAとして 6.0 kg/m ³ 以上 18.0kg/m ³ 以下
	7ルキル7ソモニウム化合物	AAC	DDACとして 9.0 kg/m ³ 以上
	銅・7ルキル7ソモニウム化合物	ACQ	ACQとして 5.2 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸銅	NCU	油剤は、銅として 1.2 kg/m ³ 以上 乳剤は、銅として 1.5 kg/m ³ 以上
	ナフテン酸亜鉛	NZN	油剤は、亜鉛として 3.2 kg/m ³ 以上 乳剤は、亜鉛として 4.0 kg/m ³ 以上
K 5	クレオソート油	A	クレオソート油として 170 kg/m ³ 以上
	クロム・銅・珪素化合物	CCA	CCAとして 7.5 kg/m ³ 以上 22.5kg/m ³ 以下

K1 風雨に曝されず、湿潤の恐れがない K2 風雨に曝されないが常に湿潤

K3 土壤に接しないが常に風雨に曝される K4 常に土壤に接する

K5 常に海水・淡水に接する

(2) 耐久性区分による薬剤の浸潤度の基準

性能区分	薬剤名	樹種区分	浸潤度の適合基準
K 1	B	すべての樹種	辺材部の 90%以上
K 2	CCA AAC ACQ NCU NZN	耐久性 D 1 の樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、材面から10mm部分までの心材部分の 20%以上
		耐久性 D 2 の樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、材面から10mm部分までの心材部分の 80%以上
K 3	CCA AAC ACQ NCU NZN	すべての樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、材面から10mm部分までの心材部分の 80%以上
K 4	A CCA AAC ACQ NCU NZN	耐久性 D 1 の樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、材面から10mm部分までの心材部分の 80%以上
		耐久性 D 2 の樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、狭い材面が90mm以下の製材について、材面から15mmの部分までの心材部分の 80%以上 心材は、狭い材面が90mmを超える製材について材面から20mmの部分までの心材部分の 80%以上
K 5	A CCA	すべての樹種	辺材は、辺材部の 80%以上 心材は、狭い材面が90mm以下の製材について、材面から15mmの部分までの心材部分の 80%以上 心材は、狭い材面が90mmを超える製材について材面から20mmの部分までの心材部分の 80%以上

(3) 心材の耐久性区分

構造用製材	D ₁	ヒノキ、ヒバ、スギ、カラマツ、ベイヒ、ベイスギ、ベイヒバ、ベイツガ、ダフリカカラマツその他これらに類するもの
	D ₂	アカマツ、クロマツ、トドマツ、エゾマツ、モミ、ツガ、ベイモミ、ベイツガ、ラジアタバイン、ベニマツ、スブルース、ロジポールバイン、アガチスその他これらに類するもの

AQ保存処理処理材、屋外製品部材及び高耐久性機械ブレード部材に係る防錆・防蟻処理試験の薬剤収量

(単位: kg/m²)

薬剤名	商品名	有効成分	保存処理材		屋外製品部材	高耐久性 機械ブレード部材	AQ表示 薬剤名称
			1ヶ月	その後も			
ナフテン酸銅	ナフ-Acu	Cu			(1種) (2種) 1. 0以上 (1.5以上) (1.0以上)	1. 0以上 * 0.5以上	(NCU)
ナフテン酸亜鉛	ナフ-Zn	Zn			2. 0以上 (4.0以上) (2.0以上)	2. 0以上 * 1.0以上	(NZN)
アルキルアミンニウム化合物系-1 -2 -3	アルキルアミンニウム化合物系-1 -2 -3	DDAC			5. 0以上 (9.0以上) (4.5以上)	4. 5以上 * 2.3以上	(AAC)
銅・クロム・亜鉛化合物系	銅・クロム・亜鉛化合物系	CFK-2			8. 0以上		(CFK-2)
銅・アルキルアミンニウム化合物	銅・アルキルアミンニウム化合物	Cu AAC ACQ			0. 9以上 0. 9以上 (5.2以上) (2.6以上)	2. 6以上 * 1.3以上	(ACQ)
銅・アルキルアミンニウム化合物	銅・アルキルアミンニウム化合物	Zn			(2.6以上) (1.3以上)	2. 6以上 * 1.3以上	(VZN)
CCA1.2.3号	-	CCA			6. 0以上 (6.0以上) (3.5以上) 18.0以上) 10.5以上)	3. 5以上 1. 0. 5以下 * 1.8以上) 9.0以上)	(CCA)

注: 1 () の数値は、防錆・防蟻処理に係るJAS規格の改正に伴い、JASとの整合性を図り、屋外製品部材の1種は接地用、2種は非接地用とした。

2 * の数値は、使用部材が針葉樹の構造用材のJAS規格に定める心材の耐久性区分がD、で、シロアリの被害の恐れのない地域(比較的寒冷な地域)に使用する場合とした。

J I S A 9 1 0 8 土台用加圧式防腐処理木材

吸収量の規定

単位 kg/m³

木材防腐剤の種類	記号	吸収量
クロム・銅・ひ素化合物系木材防腐剤	1号	CCA-1 3.5以上
	2号	CCA-2 3.5以上
	3号	CCA-3 3.5以上
アルキルアンモニウム化合物系木材防腐剤-1	AAC-1	4.5以上(DDACとして)
アルキルアンモニウム化合物系木材防腐剤-2	AAC-2	4.5以上(DDACとして)
乳化性ナフテン酸銅系木材防腐剤	NCU	0.8以上(Cuとして)
乳化性ナフテン酸亜鉛系木材防腐剤	NZN	1.6以上(Znとして)
クロム・銅・亜鉛化合物系木材防腐剤	CFKZ	7.0以上(CFK-Zとして)
銅・アルキルアンモニウム化合物系防腐剤	ACQ	0.8以上(Cuとして) 0.8以上(BKCとして)

8. 防腐・防蟻の現場施工

わが国は古くから住宅の主体は木造で、シロアリや腐朽の被害からのがれることが出来ない。いかに木造住宅の部材に保存処理木材を使ってもシロアリの生態を考えると多少とも被害対象となる。阪神大震災の神戸の震災地における築30年以上の倒壊木造家屋の調査で、80%が構造耐力部材に腐朽・蟻害があったと報告されている。

わが国でシロアリの防除が現場施工として開始されたのは明治末期とのことである。しかし新築時の予防工事が始まったのは昭和30年代になってからである。社団法人日本しろあり対策協会の標準仕様書によれば、処理作業と地域別、建物別の処理区分は新築、既築に分けて規定している。木部処理剤は防腐・防蟻性能を持っており、油剤で300ml/m²の処理、土壌処理剤は防蟻性能のみの乳剤で帯状散布量(基礎の内側、束石の周囲など、20cm幅で長さ1m)は11、他土地の全面には31/m²の散布処理を行っている。しかし使用している薬剤は安全性、環境への負荷を考慮して半減期の短いものであるため、効果の持続は5年程度で5年経てば再度施工しなければならない。地域別にはシロアリの生息を配慮した施工が決められている。

9. 今後の問題点

防腐・防虫(蟻)木材の供給からいえば、素材管理をしっかり行って期待される耐用年数をもった処理木材の生産が重要であろう。それには、使用環境区分に合った処理木材が生産され、建築コードに積極的に取り入れられる必要がある。また種々の樹種に対して深層処理が出来る技術の開発も急務である。

木質材料・木質構造の接着耐久性

静岡大学農学部森林資源科学科
吉田 弥明

1. はじめに

接着されたものを剥がそうとしてもそうた易く剥がれるものではない。しかしながら、剥がれて中板がむき出しになった合板、接着層が剥離しバラバラ寸前の集成材などよく見かける風景である。一般には接着といえ剥がれるものという印象が強い。一方では、20数年経過し基材がボロボロになってもしっかりと形を保っている合板が依然として暴露されている。なぜ、このような極端な事例が生じるのであろうか。一方に、数十年経過しても全く剥離の生じない接着があると言うことは、適正に接着され、適正に使用されている限りにおいては、接着耐久性は問題にしないでよいということになる。しかしながら、これを使用する側は接着製品・工法については剥がれるものという一抹の不安を払拭できないし、全面的な信頼を得るまでには至っていない。ところが、同じ接着剤でもセメントを用いる工法については、すべてが現場施行で行われているにも関わらず、高い信頼性を得ており誰も不信を表明しない。木質材料・工法における接着については、なぜ接着耐久性が云々されるのであろうか。我々が今考えなければならないことは、この事実である。即ち、木材接着については現有の接着剤、接着技術を用いて問題のない接着性・耐久性を付与し、実用上その基材と同等の耐用年数を全うするような合理的なシステムが確立されていないということにある。

木質材料・木質構造にとって接着工法は現在も、また将来も必須の技術で

あり、これらの耐久性を考えると避けては通れない問題であり、なにか問題なのか整理しておく必要がある。

2. 木質材料及び工法に使用される接着剤とその性能劣化

木質複合材料と、接着工法及びその用途、それらに使用されている主要な接着剤をまとめると表-1のようなる。レゾルシノール樹脂(RF)、フェノール・レゾルシノール共縮合樹脂(PRF)、フェノール樹脂(PF)、メラミン樹脂(MF)、メラミン・ユリア共縮合樹脂(MUF)、ユリア樹脂(UF)、酢酸ビニル樹脂エマルジョン(PVAc)は古くから木質材料に使用されている。API(水性高分子イソシアネート接着剤)、変成酢ビ(C-PVAc)はごく最近開発されたハイブリッドな接着剤で使い勝手の良さから需要が伸びている。ディフェニルメタンディイソシアネート(MDI)はイソシアネート系接着剤で高い反応性を持ち、高含水率チップにも適用でき少量の添加で高い接着耐久性が得られるのでOSB等のボードの製造に需要が増えている接着剤である。エポキシ接着剤(EP)あるいはウレタン接着剤(UR)は最近集成材を用いた大規模構造物の接合部に金物と併用で使われるようになった接着剤である。

これらの接着剤の性能は図-1に示すようなパターンで経時的あるいは特性値の変動によって変化(低下)する。経時的あるいは特性値の変動によって性能が変化しない場合に耐久性、耐性があるということになる。逆に、低下していく場合には耐久性、耐性に欠けるということである。図-2に示したダグラスファー合板の屋外暴露による木破率の低下状況、図-3に示したAPIの接着強さの温度依存性試験結果がこの状況をよく表している。即ち、RF、PF、MFは一貫して暴露当初からほぼ100%の木破率を保持して

表一 木質材料・工法と使用接着剤

木質複合材・接着工法	エレメント、構成メンバー	用途	接着剤
集成材	挽き板	構造用／非構造用	RF, PRF, API/API, UF
たて継ぎ材	挽き板	構造用／非構造用	RF, PRF, MF, API, C-PVAc/UF, C-PVAc
LVL	単板	構造用／非構造用	PF/UF
PSL、OSL	ストランド	構造用	PF
合板	単板	構造用／非構造用	PF, MUF/MUF, UF
PB	パーテイクル	非構造用	MUF, UF
OSB	ストランド	構造用	PF, MDI
WB	ウエーファー	構造用	PF, MDI
フレックボード	フレーク	構造用	PF, MDI
FB (HB、MDF)	纖維束	構造用／非構造用	PF, MUF/MUF, UF
複合パネル	挽き板、LVL、PB 合板、PB、FB	構造用／非構造用	RF, API, UF, PVAc/API, UF, M-PVAc, PVAc
ボックスレール、レール等	挽き板、LVL 合板、OSB、WB、 フレークボード	構造用	RF, API
建築接合	製材、集成材、合板	構造用	RF, EP, UR/

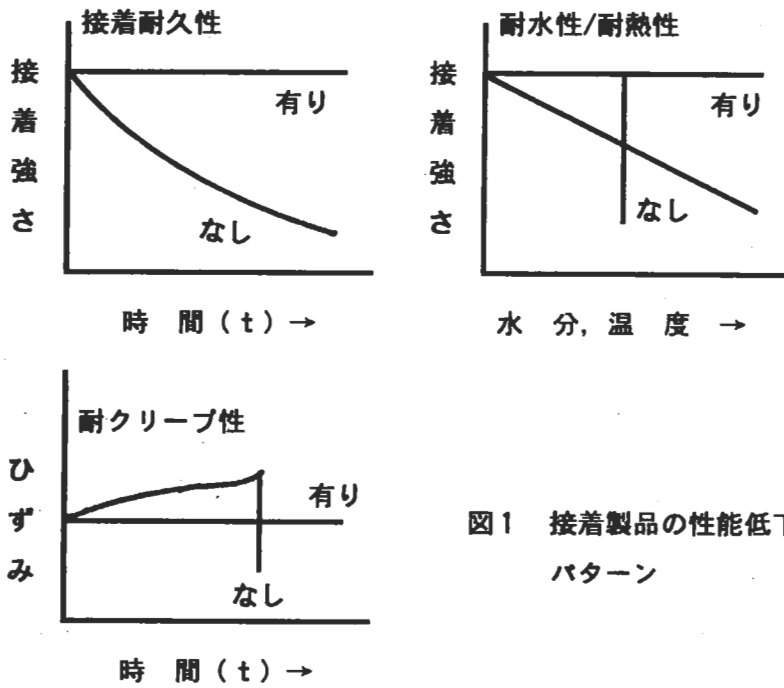


図1 接着製品の性能低下パターン

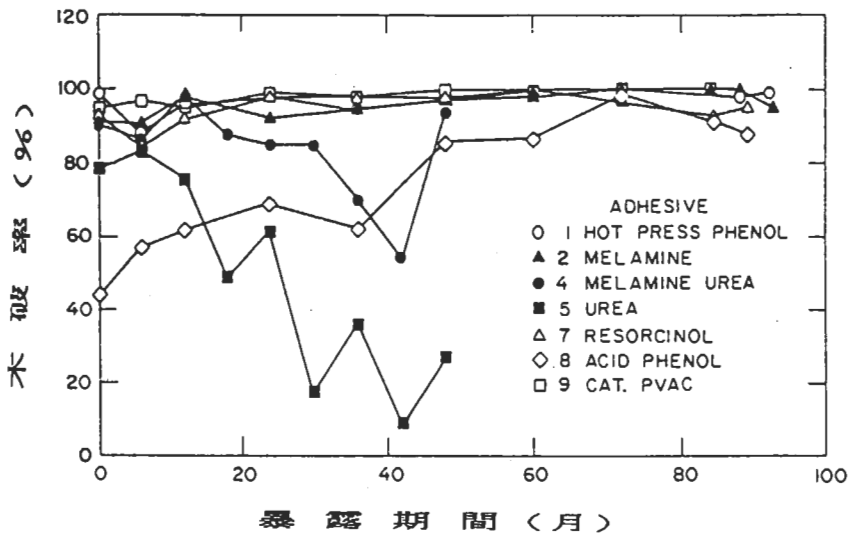


図2 各種接着剤で接着したダグラスファー合板の屋外暴露試験結果

いる。C-PVAcは経時的に木破率が上昇し70ヶ月後では100%を示している。これに対してMUF、UFは暴露期間の経過とともに木破率が低下しており、いずれはゼロになってしまうであろう。前者のグループに属する接着剤は耐久性に優れ、これらを用いた製品は実用に供されている期間内ではまず剥離等接着に関わる問題が生じないことは容易に理解できる。これに対して後者に属する接着剤は使用される条件を吟味しないといずれは問題が生じること

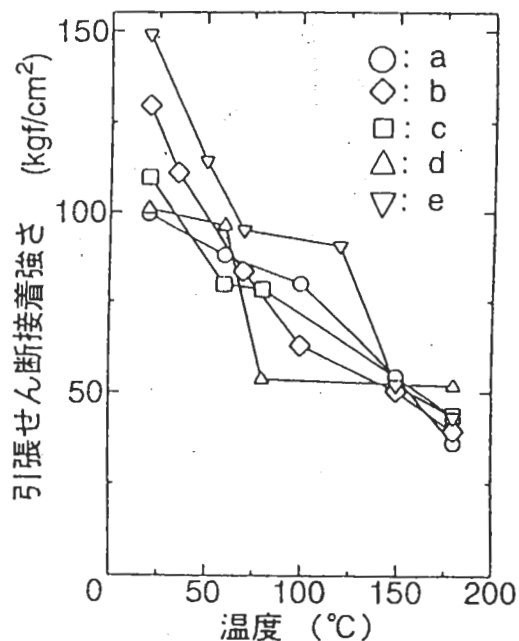


図3 APIの接着強さの温度依存性

は必定である。また、APIの接着強さは環境温度の上昇に伴い直線的に低下し、150°Cにおける着強さは常温のその約1/3にまで低下しており、これもその使用にあたっては慎重な配慮がなさなければならないことを示している。

3. 接着耐久性の試験と評価

前項で述べたように、各接着剤の諸要因による性能変化(低下)の状況を踏まえて使用すれば、接着耐久性に問題は生じない。しかし、現実には接着製品や工法についてはいろいろな問題点が指摘され、不安を覚えながら使っているのが現状であろう。一方では、木材よりもはるかに優れた耐久性を持

つ接着剤を用いながら、製品・工法が信頼されていない最大の原因は、様々な使用環境・用途に応じた適切な試験と評価、およびそれをバックアップする体制が接着剤を提供する側も使用する側も十分ではなく、最終需要者の要求に適切に対応できていないことによるものと考えられる。

表一 2 は現行日本農林規格にある接着製品の接着性能区分と試験法及び対応性能と使用部位をまとめたものである。わが国に流通している木質系接着製品の接着性能(耐久性)はこれによって担保されている。例えば、合板を例にとると接着性能(耐久性)の区分に応じて特類から3類まであり、これに対応する接着性能及び使用部位・環境の記述を見ると

特類：屋外又は常時湿潤状態の場所で使用される

1類：長期の外気・湿潤露出に耐え、完全耐水性を有する

2類：通常の外気・湿潤露出に耐え、高度の耐水性を有する

3類：通常耐湿性を有する

となっている。そしてそれぞれに試験法が規定され、評価基準が設けられている。現在、これらに使用されている代表的な接着剤をあげれば特類：RF, PRF, PF、1類：MUF、2類：UF、3類：増量UFである。ところが、MUFで接着された1類合板は屋外で使用されればほぼ3～5年で剥離が認められるし、過去床下地に使用されたものは、住宅の建て替え現場の最近の例を見ると剥離してベコベコななっている。カバヤナラの集成材の装飾用インテリアの接着層に明らか剥離が認められる。これが長期の外気・湿潤露出に耐える完全耐水性と呼称できるのか。また、通常の外気・湿潤露出に耐える高度の耐水性を持つとされる2類合板を使用した製図板(1973年購入)は、完全に表板が剥離している。

表一 2 日本農林規格製品品質区分に応じた接着性能試験法と接着性能

対象製品	製品品質区分	接着性能試験法	接着性能・環境
普通合板	特類	・沸騰水中 72hr → 室溫水中にて冷却 → 接着強さ試験 ・室溫水中 2hr 以上 → スチーミング 130 ± 2 °C , 3hr → 室溫水中 1hr → スチーミング 130 ± 3 °C , 2hr → 室溫水中にて冷却 → 接着強さ試験	屋外又は常時湿潤常態の場所
	1 類	・沸騰水中 4hr → 60 ± 3 °C , 20hr 乾燥 → 沸騰水中 4hr → 室溫水中にて冷却 → 接着強さ試験 ・沸騰水中 4hr → 60 ± 3 °C , 20hr 乾燥 → 沸騰水中 4hr → 60 ± 3 °C , 20hr 乾燥 → はくり率測定 ・室溫水中 2hr 以上 → スチーミング 120 ± 2 °C , 3hr → 室溫水中にて冷却 → 接着強さ試験	長期の外気・湿潤露出 完全耐水性
	2 類	・60 ± 3 °C , 温水中 3hr → 室溫水中にて冷却 → 接着強さ試験 ・70 ± 3 °C , 温水中 2hr → 60 ± 3 °C , 3hr 乾燥 → はくり率測定	通常の外気・湿潤露出 高度の耐水性
	3 類	・常態の接着強さ 35 ± 3 °C , 温水中 2hr → 60 ± 3 °C , 3hr 乾燥 → はくり率測定	通常の耐湿性
単板積層材	構造用	・室溫水中 24hr → 60 ± 3 °C , 24hr 乾燥 → はくり率測定 ・沸騰水中 5hr → 室溫水中 1hr → 60 ± 3 °C , 24hr 乾燥 → はくり率測定 ・常態で水平せん断試験	構造物の耐力部材
	造作用	・70 ± 3 °C , 温水中 2hr → 60 ± 3 °C にて含水率 8 % 以下まで乾燥 → はくり率測定	一般材
集成材	造作用	・室溫水中 6hr → 40 ± 3 °C , 18hr 乾燥 → はくり率測定	構造物の内部造作
	構造用	・沸騰水中 5hr → 室溫水中 1hr → 60 ± 3 °C , 18hr 乾燥 → はくり率測定	構造物の耐力部材
	大断面構造用	・室溫水中 24hr → 60 ± 3 °C , 24 乾燥 → はくり率測定 ・沸騰水中 5hr → 室溫水中 1hr → 60 ± 3 °C , 24hr 乾燥 → はくり率測定 ・常態で圧縮せん断接着強さ試験	大型構造物の耐力部材
2 × 4 たて継ぎ材		・沸騰水中 5hr → 室溫水中 1hr → 60 ± 3 °C , 18hr 以上乾燥 → はくり率測定 ・508 ~ 635mmHg, 30min 減圧 → 5.2 ± 0.3 kgf/cm ² , 2hr 加圧 → 70 ± 3 °C , 18hr 以上乾燥 (MC19 % 以下) → はくり率測定	2 × 4 のたて枠材

規格試験をパスして性能が担保されているはずの合板や集成材になぜこのような状況が発生するのであろうか。これは、現在規格試験として採用されている評価方法が実際の使用状況にマッチしていないということに他ならない。しかしながら、これに替わるものがないために使わざるを得ないといった状況であろう。このようなことは既に接着剤に携わっている方々には周知のことである。これらの試験法はRF、PFとかUFといった既存の接着剤のどれに該当するのか区分けすることに重点がおかれており、それらの接着

表-3 英国規格における接着剤の使用環境と接着剤 (BS 4169)

暴露等級	典型的な暴露条件	接着剤	BS 1204:Part 1
屋外使用 /高耐久	常時屋外暴露 船舶構造物 接着層が直接外気に 曝される屋外構造物	RF PF PRF	WBP
屋外使用 /低耐久	日光、雨水からは保守 外気には曝される屋根 コンクリート型枠作業のような 仮設構造物	RF PF PRF MUF* modUF*	WBP BR BR
屋内使用 /高耐久	MCが18%、接着層温度が 50℃を越える湿熱条件下の 建造物 ランドリー、換気のない 屋根裏、屋根裏部屋、 化学的に汚染されている条件下、 化学工場、染色工場、プール こけら張り壁	RF PF PRF	WBP
屋内使用 /低耐久	MCが18%、接着層温度が 50℃以下の温湿度条件下の 建造物 インテリア類	RF PF PRF MUF* modUF* purUF	WBP BR BR MR

*一部のものが使用条件によっては使用できる(表3)。

剤の大まかな使用実績に基づいて性能・用途・使用部位が割り当てられたものと見た方がよく、明確な使用環境・用途に応じて決められているわけではない。即ち、製品仕様であって性能使用ではない。

表-4 使用部位別木材MC (BS 4169)

使用部位	平均含水率
屋外使用、常時暴露	18%以上
覆いあり、暖房無し	18%
覆いあり、暖房あり	14%
屋内、常時暖房建物	11%

ここに混乱があって、使用接着剤の区分けができればその接着剤の最も理想的な性能が担保されているように誤解され、製品として使用に共されているのである。しかも、表現は極めて定性的であり、定量的な表現は避けられている。このため使用現場ではどのように判定してよいのか分からず、耐久性を定量的に把握することができない。

因みに、諸外国ではどのようになっているのか。表-3、4にBS(英国)、表-5にEN(EU)の構造用集成材の例を示した。BSでは典型的な暴露環

表-5 EN204における集成材の耐久性区分とその使用環境

耐久性区分	気候条件と適用分野の例
D1	・気温が短時間の間50℃を時おりこえ、木材の含水率が15%である屋内環境
D2	・時おり短期間水がかかるとか浸かるとか、木材含水率が18%をこえない範囲で時おり高湿度状態となるか、その双方に見舞われる屋内環境
D3	・たびたび短期間の水がかかるとか浸かるとか、高い湿度にたっぶりさらされるか、その双方に見舞われる屋内環境 ・風雨にさらされない屋内環境
D4	・たびたび長い期間水がかかるとか浸かる屋内環境 ・適切な表面カバーで適切な保護をしたも状態で風雨にさらされるもの

境条件・用途、対応接着剤、試験法、さらには使用部位の温度、含水率も指定している。EUの場合も数値は異なるが同様である。これら数字まで具体的に指定しているということは、ここに規定された環境条件・用途においては、それが使用に供されている間は接着性に問題は生じないということを保証しようということである。したがって、接着製品に対してユーザーからよく受ける「これは何年もちますか」という質問に対しては「使っている間は大丈夫です」という答えになる。少なくとも規定された条件内では、材は劣化しても接着層に関連しては性能の低下につながるような劣化は生じないことを前提としているのである。EUも同様である。これらの規格にはまだ製品仕様の部分も多いが、少なくとも性能使用に重点がおかれ、使用に当たってより信頼性を得るような規定となっている。わが国でも、表一六にその骨格を示すように集成材の新しい規格はこの方向で検討されている。

4. 接着剤の性能と製品の性能

先に示した表一三と表一六の構造用集成材の規格を見比べていただきたい。BSでは使用環境に応じて接着剤を指定し、その接着剤については別途規格(BS 1204)でその性能を確認・評価するようになっている。勿論、製品そのものについても接着性の評価試験を実施しているが、これはその接着剤を使い適正に接着がなされているか否かをチェックする品質管理に重点が置かれている。一方、JASでは使用環境・用途に応じて同様に接着剤を指定する製品仕様になっているが、試験法はかなり詳細に規定されている。これは、接着工程の品質管理と共に、接着性をも評価しようとする意図しているからである。しかしながら、製品の接着耐久性と接着剤のそれとは全く別である。接着剤

表一6 集成材の使用区分と使用例、対応接着剤・試験法

区分	定義 ¹⁾	具体的な使用例・箇所	接着剤 (積層/縦継ぎ)	試験法と評価
使用環境 1	①構造物における使用中に、集成材の含水率が長期にわたって継続的にまたはしばしば19%をこえる状態に至る環境、②外気に直に接する環境、③太陽熱等により長期にわたったりしばしば高温になる環境、④構造物の火災時でも高度の接着性能を要求される環境など、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性の面で高度な性能が要求される使用環境。	木造橋、屋内プール、浴室・水回り、集成材（燃え代設計）、電柱腕木、屋外用材、船舶材、マリーナ用材、処理材	RF PRF	<input type="checkbox"/> 積層 △浸せき剥離 3-(1)室温水浸せき乾燥2回繰り返し 3-(2)煮沸水浸せき乾燥3回繰り返し 3-(3)減圧加水乾燥2回繰り返し △ブロッケンせん断試験 3-(4)常態 <input type="checkbox"/> 縦継ぎ ⁴⁾ △浸せき剥離 3-(2)煮沸水浸せき乾燥3回繰り返し 3-(3)減圧加水乾燥2回繰り返し
使用環境 2	構造物における使用中に、集成材の含水率が19%をこえることは希である環境など、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性の面で構造物として通常の性能が要求される使用環境。	上記以外の構造用集成材	RF PRF PF API ²⁾	<input type="checkbox"/> 積層 △浸せき剥離 3-(1)室温水浸せき乾燥1回繰り返し 3-(2)煮沸水浸せき乾燥1回繰り返し 3-(3)減圧加水乾燥1回繰り返し △ブロッケンせん断試験 3-(4)常態 <input type="checkbox"/> 縦継ぎ ⁴⁾ △浸せき剥離 3-(2)煮沸水浸せき乾燥2回繰り返し 3-(3)減圧加水乾燥1回繰り返し

1) ③でいう高温とは50℃を越える温度条件をいう。

2) 現在、構造用として認定されている6種類に限る（試験：森林総研、認定：合板検査会）。

接着操作、接着条件等も含めて認定。用途→限定使用。

3) メラミン比が60%以上のMUFであること。

4) 縦継ぎFJに使用されているMF、MUFの差別方法。①接着剤を試験して特定する。②製品からFJ部を切り出し試験する（FJ材のJAS）。

5) 大断面等における2次接着（現場接着、工場接着）などもあり、今後の検討課題とするが、今回は省く。

がどのように優れた性能を持っていようと、それを適正な接着操作で製品に転化できなければその性能は発揮されない。BSではこれを明確に分けて評価しようとしているのに対し、JASではひっくるめて評価しようとしている。これは接着剤の性能評価が明確な性能仕様に則って行われず、単なる製品区分によって行われていたためであろう。

しかしながら、先にも触れたようにAPIやC-PVAcのような熱可塑性とも熱硬化性ともつかないようなハイブリッドな接着剤が今後とも出現してくることは必定で、それらの接着剤の性能(耐久性)をまず的確に把握することが求められ、従来のような品種区分では対応できず、性能に応じた明確な接着性能(耐久性)の評価システム(試験法)が必要となる。また、従来の接着剤についてもあらためて性能をチェックしておくことが必要であろう。そして、それらの接着剤を用いて作られた製品についてはその性能が十分に発揮されているか否かをチェックする。このようなシステムが構築されれば、接着剤メーカーとそれを用いた製品メーカーとの責任の在処も明確になり、接着工法にも高い評価がなされるものと期待される。幸い、日本木材加工技術協会には現場と密着した接着士という制度があり、これらの方々の活用を場を提供すると同時に接着工法のますますの発展に寄与するものとする。

5. おわりに

一旦接着が完了した接着製品や工法において接着に問題が生じ、耐久性が云々されること自体、接着に携わる者にとっては全く恥ずかしいことである。検査の段階で接着不良が生じるのは、被着材の調整をも含めて接着工程を改善すれば解決できる技術的問題である。しかしながら、実際に使用に供され

ているものについてもいろいろ問題が指摘されている。これには技術以前のシステムの問題が大きく関与しているように思われる。接着製品で剥がれたものはごみにしかならないのである。木質資源を持続的に使うためにも接着はなくてはならない手法である。例えば、型枠用合板にPFを使えば、面材として材が朽ちるまで使用することができる。繰り返し使用することも一つの方法であろうが、新たな用途で炭素のストック材として利用される方に期待したい。

文献

- 1) Gillespie, R. H., and B. H. River; FPJ, **26**(10), 21-25(1976)
- 2) 前田豊, 秦野恭典, 上杉三郎; 木材工業, **49**(9), 413-417(1994)

接合研究の立場から木質構造の耐久性を考える

森林総合研究所木材利用部構造利用科

小松幸平

1. なぜこうなったか（はじめに代えて）

この度の兵庫県南部地震による阪神地区の被害調査に参加し、木造住宅（あえて木造と呼ぶ）の惨憺たる被害を目の当たりにして、大変大きなショックを受けた。自らのこれまでの偏った研究態度を反省すると同時に、力学的アプローチに加えて耐久性に関する最低限度の知識を有することと、その方面にも積極的に関わってゆく姿勢が必要なことを自覚しつつあった。

そんな折、木研連（前）幹事の平嶋義彦氏より、今回のシンポジウムでパネラーの代打を引受けるよう打診があった。筆者は17、8年程度の研究経験のなかで、耐久性という面で何らかの言及、アプローチをしたことは一度もなかった。しかも、問題提起をされる方は「佐々木 光先生である」という。どうしたものか悩み考えたけれど、結局、人間は何事もゼロから出発するものだという妙な納得のしかたでパネラーを引受けてしまった。誠に無謀なことと深く反省している。

2. 耐朽性の基礎（既往の研究成果から）

初心者のオーソドックスなアプローチとして、既往の文献を読むことから始めた。最初に手にしたのは昭和56年に住木センターから発行された木造建築物の耐久性に関する研究報告書である（住木センター：1981）。

表1は木材がなぜ腐るのか、その要因を同報告書並びに最近出版された本から抜粋したものである。

表1 腐朽菌の生育に必要な条件（住木センター：1981）

要因	生育条件
①酸素	空気（水面下での木材は腐朽せず）*1
②水分	大気中の湿度 85%以上 最小 好適 最大 木材の含水率 25%*2 - 80% - 200%
③温度	最小 好適 最大 3°C 24~36°C 45°C
④栄養分	糖分、窒素化合物、繊維系、リグニン系？*3
⑤空間*4	微生物の生育に必要な適当な空間

注*1：細菌類による腐朽は酸素不足でも起こる（高橋旨象：1994）

注*2：繊維飽和点以上の自由水が必要（高橋旨象：1994）

注*3：リグニンは天然の防腐剤（高橋旨象：1989）と言われているが？

注*4：空間（高橋旨象：1994）は住木センターの表には載っていない

表2は同報告書による「昔」の住宅と「今」の住宅の相違点をまとめたものである。最近の状況からはやや適合しない部分もあるが、住宅の耐久性に関する基本的な問題点が的確に抽出され、少ない言葉で見事に要約されている。

表2 耐久性向上の面からみた「昔」と「今」の木造住宅の相違点（住木センター：1981）

	「昔」の木造住宅	「今」の木造住宅
住宅の考え方	開放型 風通しの良い家 夏向きの家 注：非耐震的	密閉型 防火・断熱構造 冬向きの家 注：耐震的
材 料	耐朽性のある樹種が容易に選べた。土台にクリ、ヒバ、ヒノキ、心持ち材等 注：心材という意味？	耐朽性のある樹種が容易に選べない。例えば、ベイツガ、ベイモミ、スプルースが多い
生活様式	内湯は少ない 水周りは土間か、下屋部分に多く置かれた	浴室、台所、便所全てが一体になり、同一平面上にある
建築様式	和風・真壁造 土台、柱は露出し、乾燥が可能 注：木材には化粧的価値が要求され、未乾燥材も使用可	洋風・大壁造 土台、柱は被覆され、防水と雨仕舞に頼る 注：他に防腐剤に頼る傾向強い。要乾燥材
構造形式*1	軒の出があり、足固めを用いたため、床下通風がよく、主屋が廊下等で囲まれている	主構造部分が外周壁に置かれ、軒の出が少ない。
点検検査	容易である 構造材が露出している	困難である 構造材が被覆されている

注) については筆者がコメントを加えたもの。 *1: 構造形式は図1参照

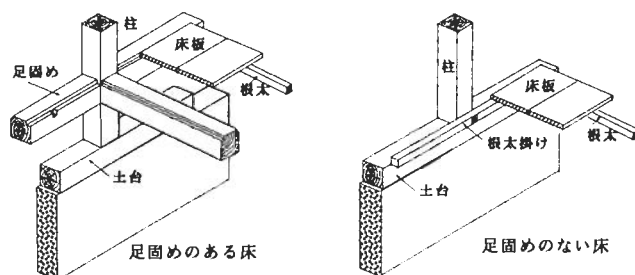


図1 床組の例
(建築学会：1978)

建設サイドのプロジェクト研究としては、昭和55年～昭和60年（1980年～1985年）にかけて「建築物の耐久性向上技術の開発」と題する総合技術開発プロジェクト（俗にいう‘総プロ’）が実施された。このビッグプロジェクトには、木造分科会（分科会長：神山幸弘）も含まれており、昭和61年には、「木造建築物の耐久性向上技術」と題する立派なマニュアルが発行されている（国土開発センター：1986年）。

この報告書には、木造住宅を定量的に耐久設計する推定計算法が詳細に示されている。ここで採用された耐用年数の推定方法は基本的には肘黒先生の研究グループによる（肘黒弘三ら：1985a-1985c、肘黒弘三ら：1986a-1986b、神山幸弘ら：1986a-1986b、神山幸弘ら：1987a-1987b）もので、その概略は式1)で示される。

$$PSL \text{（一時推定耐用年数*）} = [P] \cdot [B] \cdot [C] \cdot [D] \quad \dots\dots 1)$$

*：維持管理条件を考えないという意味

ここで、

[P]：部材の生物劣化に対する抵抗指標（樹種、部材断面、薬剤処理に関係）

[B]：工法に拘わる係数（軸組、床組、壁種類、換気、大壁造の防水紙等に関係）

[C]：施工検査の係数（施工検査の回数）

[D]：劣化外力の係数（シロアリの分布、年間温度に関係）

実際の推定計算では、個々の住宅を有限の領域（910mmモジュール）に分割して各係数を詳細に割り出し、かなり複雑な計算を繰り返す必要がある。一般の設計事務所でこの手法を常時使用しているかどうかは不明であるが、住宅の耐用年数を向上させる試みとして、大手ホームビルダーでこの計算法が利用されている例も報告されている（相原庸夫：1992）。

総プロ方式の算定式は住宅全体の耐久性を推定するものであるが、住宅内に使われている梁一本、柱一本の耐久性を推定する式として、林試時代の雨宮さんが以下の算定式2)を提案されているという（神山幸弘：1981）。

$$X = A + a + c \cdot d / V \quad \dots\dots 2)$$

ここで、

X：耐用年数、

A：腐朽可能な環境になるまでの年数（建物の外壁、土台、構法に関係）

a：木材が菌の侵入を阻止している年数（樹種、薬剤処理に関係）

c：環境条件（腐朽速度を規制する要素；温度、湿度、含水率、空隙率等のこと？）

d : 部材の短辺(mm)

V : 腐朽速度 (mm/年)

式2)の第3項目 $c \cdot d / V$ は、最近の大断面木造建築物における「燃え代設計」と同じ考え方であり、筆者のような防腐の素人にも大変分かりやすい概念である。

式2)を構成する幾つかの係数のうち、 A は建築構造・構法に拘わるもので、一義的には決まらない。一方、 a と V は樹種特性、防腐薬剤の効力に関係するものと考えられ、既往の文献からおおよその傾向を知ることができる。

一例として表3に日本で使用されている代表的木材の心材の耐朽性を示す。また、表4は林業試験場(現森林総研)防腐研究室が今日まで継続してきたステークテストの結果の一部を示す。

これらのデータから推定される係数を式2)に適用することによって、部材1本の耐用年数のある程度は推定できるように思える。

表3 各樹種の心材の耐朽性(住木センター編著:1995)

耐朽性の区分	日本材	北米材・ロシア材	南洋材
極大			ボンゴシ(アゾベ、エッキ)、ドゥーシェ
大	ヒノキ、ヒバ、クリケヤキ	ベイヒ、レッドウッド ベイスギ、ベイヒバ	チーク、マホガニー
中	カラマツ、スギ、ナラ、カシ類	シベリアカラマツ ベイマツ	クルイン、ケンパス
小	アカマツ、クロマツ モミ、ツガ	ベイツガ、ベニマツ サザンパイン(SPF) ヨーロッパアカマツ	アトワ、ユカリ、ト レッドラツ、タウン ジョンコン
極小	エゾマツ、トドマツ	ベイマツ、スプルース ラジアタパイン	アガチス、ジエルト アルストニア

表4 加圧注入用防腐剤によって処理されたスギ辺材杭(3cmx3cmx60cm)の野外における耐用年数(東京都八王子市における試験結果)(住木センター編著:1995)

薬 剤	平均吸収量 (kg/m ³)	耐用年数*
クレオソート油	503	35年以上
	52	19年
	27	17年
クレオソート油75:重油25	564	35年以上
クレオソート油50:重油50	517	35年以上
クレオソート油75:コaltar-ル25	271	35年以上
クレオソート油50:コaltar-ル50	389	35年以上
CCA (JIS K 1554 Type 1)	12.0	30年以上
	2.2	18年
CCA (JIS K 1554 Type 2)	10.9	27年
	1.8	13年
硫酸銅	18.7	17年
蟻酸銅	6.8	20年
ホウフッ化銅	13.0	18年
ケイフッ化銅	14.0	15年
ZMA	7.2	15年
CZC	7.7	10年
CFK	14.4	16年以上
ナフテン酸銅	4.5(銅として)	16年以上
ナフテン酸亜鉛	5.6(亜鉛として)	16年以上
8-オキシキノリン銅	3.6	16年以上
フェノール樹脂	144	20年
	77	17年
	49	15年
無処理		3年

*:これらの数値は最も厳しく見積もった場合の下限値で、土と接していない状態ではこの数値の2倍程度、直接風雨に曝されていないければ4倍程度の耐用年数が見込めるとされている。

建設サイドにおけるその他の耐久（朽）性関連研究として、木造住宅の劣化被害状況の調査（神山ら：1983b、吉岡ら：1983、南ら：1985）、劣化診断技術の開発（神山ら：1983a、神山ら：1986c）、腐朽の定量化（林ら：1985a、佐藤、宮村：1985）がある。なお、木質材料の耐久（朽）、防腐関連研究に関する専門的報告類は木材学会誌、木材保存、木材学会大会要旨集等に詳しいので省略した。

3. 問題提起に対するコメント

予め配布された佐々木先生の問題提起文から、これなら筆者にも覚えがあるという幾つかのキーフレーズを抽出し、以下にコメントを加えた。

3. 1 低毒化された防腐剤の利用に関して

住木センターの木橋分科会では、1992年から3年計画で図2に示すアーチ型木橋の設計・施工管理を受け持った。

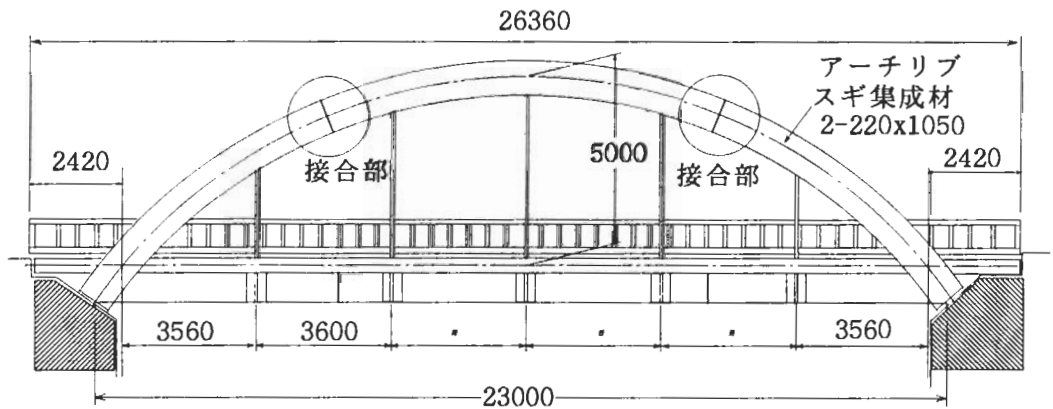


図2 愛媛県広田村に架設されたスギ集成材アーチによる神の森大橋
（住木センター編著：1995）

施主側からの主たる要求条件は；

- ①大型（20トン）の工事用トラックが通行可能なこと（この橋を入り口として村が計画している地域再開発事業を進める）。
- ②愛媛県広田村産のスギを使用する。
- ③30年以上は持たせること。

というものであった。橋の設計で最も注意が払われた点は、木材（スギ集成材）をいかに長持ちさせるかという問題であった。

選択肢としては；

- ①完成した大断面集成材をインサイジング処理してCCAやPCP（日本では使わない）といった強力な防腐剤を注入する（アメリカ方式）。
- ②橋に完璧な屋根を付ける（スイス、ドイツ方式）。
- ③ラミナの段階で防腐処理してから集成材とする（新しい方式）。

①は集成材の美しい表面に無数の傷を付け、さらに傷口に水が貯まるので長期的にみた場合は不適との理由で見送られた。最終的に採用したのは、②と③を併用する方法であった。

③の方法は海外でも製造基準等には採用されていたが、実際にこの方法で集成材が製造されたという事例は少なかった。そのため、防腐薬剤処理が積層接着の耐久性に及ぼす影響を実験的に確認する必要が生じた。すでに、森林総研、奈良県林試、薬剤メーカー等で防腐処理ラミナの接着耐久性に関する予備的な実験が行われていた。ここでは、それらの結果を総合して、表3に示すAAC系防腐剤を選択した。

表3 神の森大橋で採用されたAAC系防腐剤の特徴（長野行紘：1993.）

名 称	(1)一般名：アルキルアンモニウム化合物系木材防腐・防蟻剤 (2)商品名：ペンタキュアーニューBM (3)略 号：DDAC
薬剤形態	水溶性、液状
標準組成	ジデシルジメチルアンモニウム塩 40 ポリアルキレングリコール 20 安定剤 11 水 残（計100）
認定・公的規格	JWPA認定（A-5056）
使用量	9.0kg/m ³ （神の森大橋の場合）
効力	屋外ステーク試験で無処理スギ辺材が1年の耐久性を示した条件において処理したスギ辺材は5年以上の耐久性を有する
その他の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品自体は無色、無臭。処理材は無着色、無臭 ・薬品自体毒性ほとんどなし ・処理材焼却時に有毒ガス発生しない ・作業者の皮膚障害なし ・処理材中での薬剤の定着性良好 ・処理材の着色性良好

図3、図4に各種薬剤で処理された集成材ラミナの接着性能等の比較を示す。ただし、ラミナは注入が難しいカラマツで、インサイジング処理を行っている。

薬剤処理ラミナの常態接着力

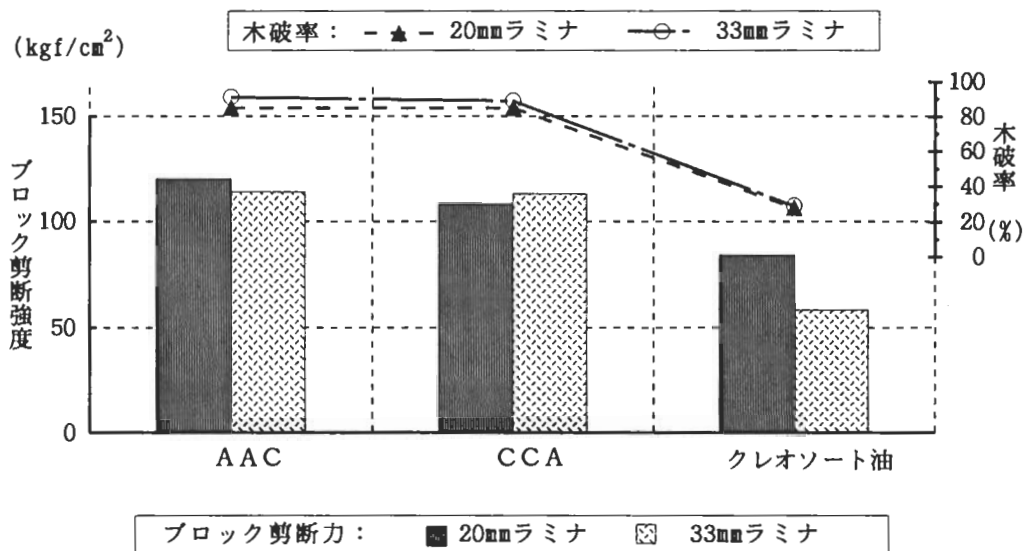
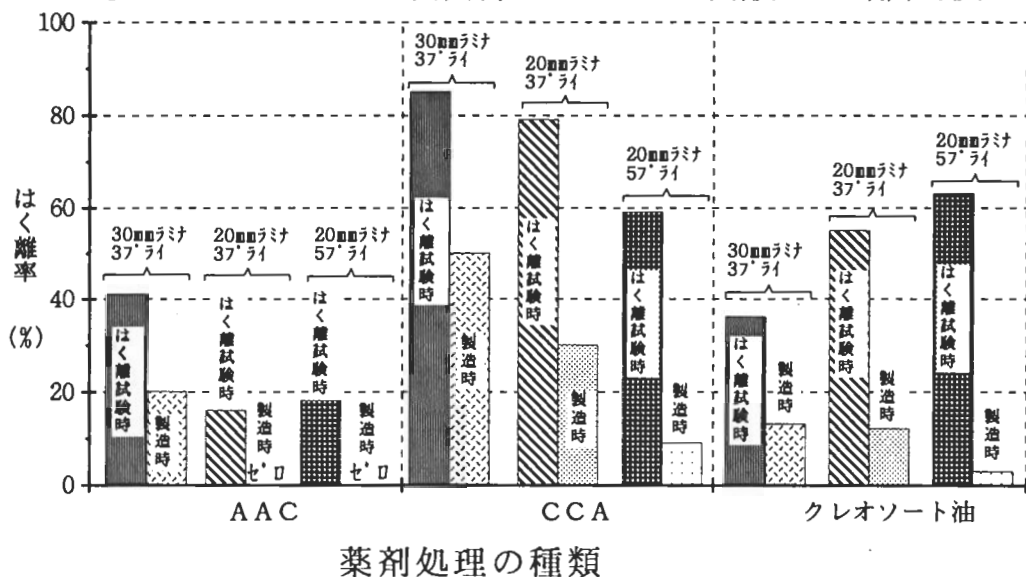


図3 レゾルシノール樹脂接着剤で接着された薬剤処理ラミナの常態接着力 (森林総研：1995のデータを引用して作成)

処理ラミナによる集成材ブロックの煮沸はく離試験



薬剤処理の種類

図4 薬剤処理ラミナで積層された集成ブロックの煮沸はく離試験 (森林総研：1995のデータを引用して作成)

図5に集成材アーチの製造工程を模式的に示す。図に示すように、一度人工乾燥したラミナに水溶性防腐剤を注入したため、再度人工乾燥が必要である。

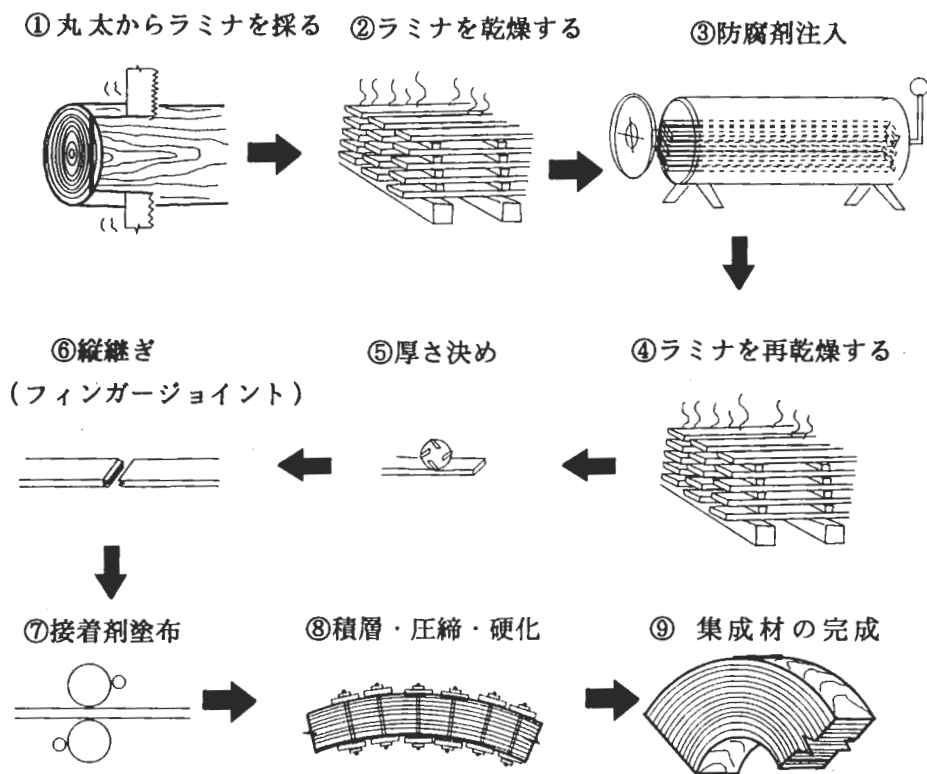


図5 薬剤処理ラミナを用いた湾曲集成材の製造工程

写真1
神の森
大橋の
全景



写真1は、完成した神の森大橋の全景を示す。木橋の耐久性を確実にするため、集成材の防腐に加えて、集成材の塗装（アルキッド樹脂系浸透性木材保護塗料2回塗り）、更に集成材アーチ上に小屋根（銅葺き屋根）を設けている。また、橋中央部には対傾構、横構類の金物保護を目的とした大屋根（銅葺き屋根）を設けた。

3. 2 木構造接合部における金属接合の問題

3. 2. 1 木構造接合部に要求される性能とは

最近の大規模木構造の接合部には鋼板ガセットと金属接合具を多用した接合法が盛んであるが、建築家を中心として、木材を金属で接合することへの反発、拒絶反応が強い。木構造の接合部として理想的なものとはどういうものなのかを見極めるために、まず木構造の接合部に要求される性能を幾つかピックアップし、代表的な接合法6種類について6段階評価（極めて悪い、かなり悪い、悪い、普通、良い、かなりよい、極めてよい）で採点して図6にレーダーグラフの形で表示した。

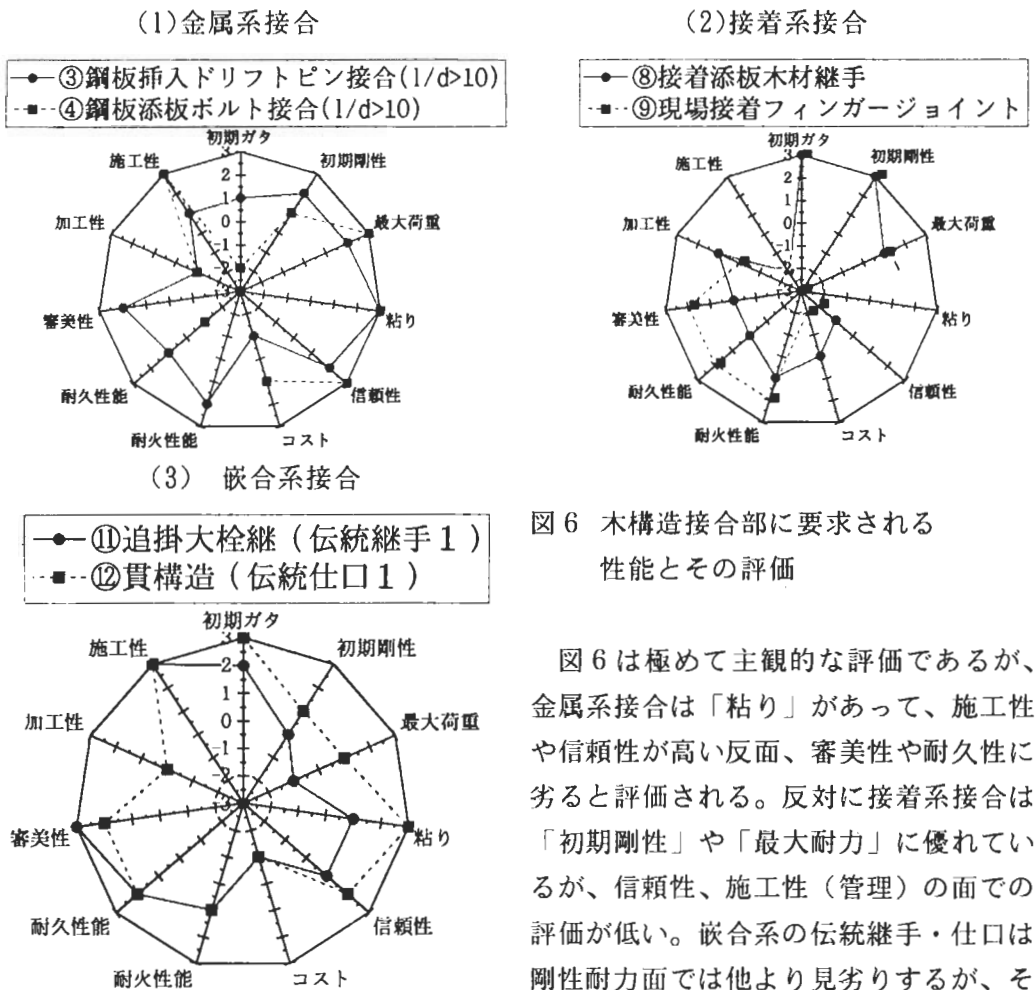


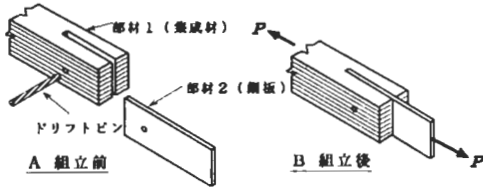
図6 木構造接合部に要求される性能とその評価

図6は極めて主観的な評価であるが、金属系接合は「粘り」があって、施工性や信頼性が高い反面、審美性や耐久性に劣ると評価される。反対に接着系接合は「初期剛性」や「最大耐力」に優れているが、信頼性、施工性（管理）の面での評価が低い。嵌合系の伝統継手・仕口は剛性耐力面では他より見劣りするが、そ

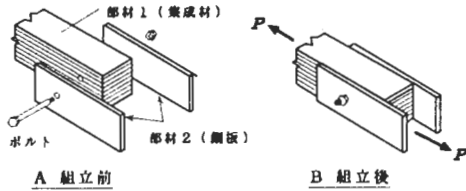
の他の面ではむしろバランスがとれている接合法である。全体的にみれば、最善とは言えないものの、金属系接合が次善の策として多用されている様子が伺える。

図7にそれぞれの接合法のスケッチを示す。

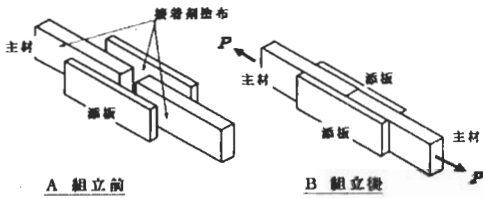
③ 鋼板挿入ドリフトピン接合



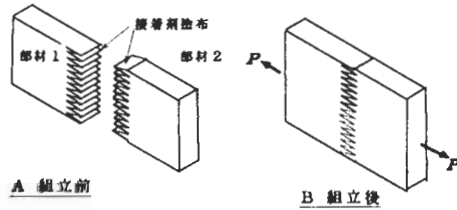
④ 鋼板添板ボルト接合



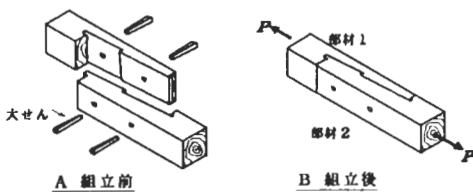
⑧ 接着添板木材継手



⑨ 現場接着フィンガージョイント



⑪ 追掛け大せん継ぎ



⑫ 貫構造 (伝統仕口)

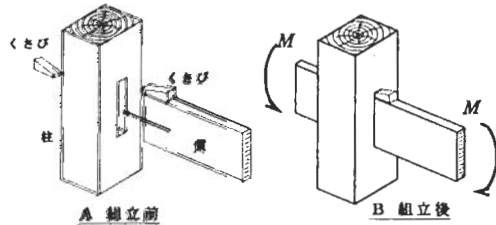


図7 図6に含まれる接合部の外観

3. 2. 2 金属接合における問題点と現状

我が国では金属系接合が積極的に評価されない風潮にあるが、その内容には大きく分けて2つの種類があるように思える。

一つは「釘を一本も使っていない建物」という表現に見られるように、接合というものは伝統的に木材に精巧な加工を施して、寸分の狂いもない2つの部材をピタリとはめ合わせる所に神髄があるとする我が国古来の伝統的大工技術を好しとする評価である。

いま一つは、木材という有機物を接合するのに、金属という無機物を用いること自体が好くないとする考え方である。本論では、後者の問題について、林業試験場の今村らの論文から金属接合における問題点を抽出する。

今村らのグループは、数多くの木造家屋の外壁の劣化状態を調査した結果から、外壁に使われている釘の劣化度を図8に示す5段階表示で定量化した。

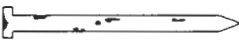




劣化度	基準	例
1	微小さび	
2	表面部分的さび 肉眼的損傷なし	
3	表面全面さび 内部健全	
4	部分的損傷 原長維持	
5	原形不明	

図8 釘の劣化度評価基準（今村、木口、大黒：1987）

図9は3年～34年経過した住宅のモルタル塗り壁の釘の平均劣化度と住宅の経年変化の関係を示す。住宅が30年経過すると、釘の劣化度は4となる。この劣化度4という指標は、釘の初期剪断耐力が1/2に低下する劣化度であり、かつ多くの場合図10に示すように木材側にも腐朽が生じている状態であると報告されている。

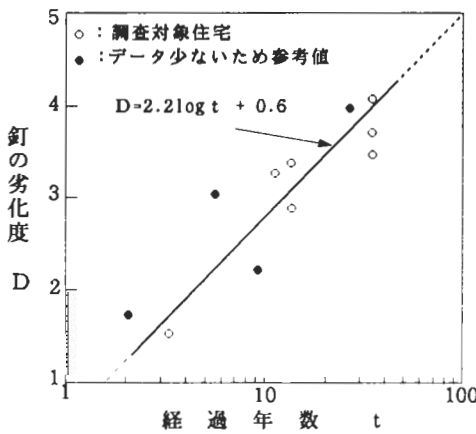


図9 モルタル塗り壁における釘の劣化度と住宅の経年変化（今村、木口、大黒：1987）

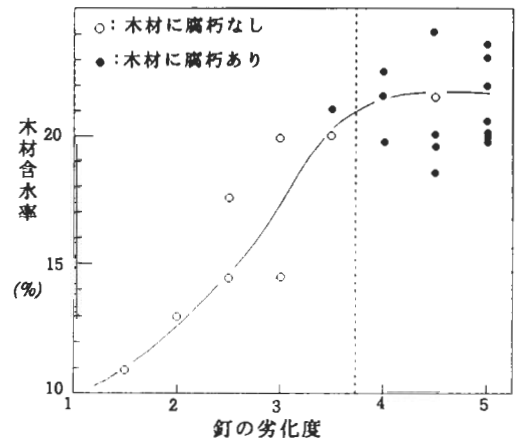


図10 木材の含水率と釘の劣化度（今村、木口、大黒：1987）

図10から、釘の劣化は木材の含水率が繊維飽和点以下の比較的低い含水率状態において既に始まっている点が注目される。今村らの報告を筆者なりに解釈すると、釘の存在が木材に悪影響を及ぼす経過は以下のように表現できるかもしれない：

- ①釘が冷媒となって釘頭部に結露を生じる。
- ②釘（一般に鉄と置き換えてよいだろう）は少量の水分でもさびを生じる。
- ③鉄さびの存在は木材を熱分解しやすくする（図11参照）とともに、空間に露出している釘頭が陰極となり、酸素の供給の悪い木材内部が陽極となる一種の電池作用（これを「すきま腐食」と呼ぶそうである）によって釘と木材の双方を徐々に劣化させる。
- ④釘の劣化が進行して、釘が細りだし、木材と釘との間のすき間が拡大して、水のたまり易い状態となる。
- ⑤釘近傍の木材含水率が上昇して、釘の劣化が加速されると同時に、木材に腐朽が発生する。

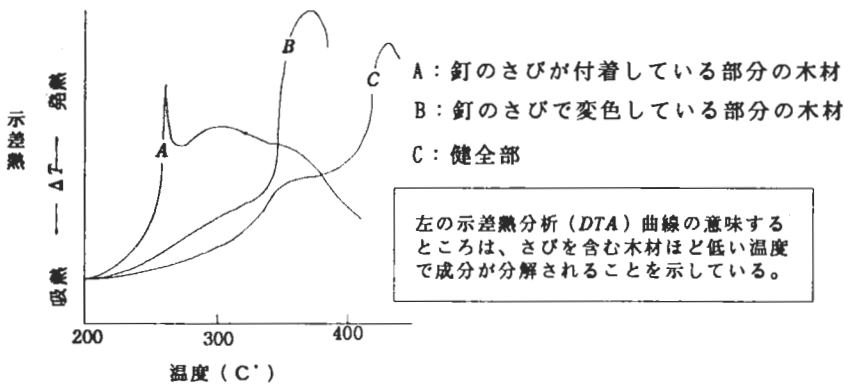


図11 さびを含む木材、さびで変色した木材、そして健全な木材の示差熱分析曲線の違い（今村、木口、大黒：1987）

上述した鉄と木材との相互作用が、今盛んに使われている鋼板挿入ドリフトピン接合やボルト接合においても生じ得ると考えると、確かに金属接合というものを再考する必要がある。次善の策として、上述した経過を辿らないように、高耐久化の方策をとることも大切である。

すなわち；

- ①金属接合具が冷媒とならないように、（図12参考）接合具の頭は必ず木材中に25mm～30mm埋め込む。この施工法はすでに、燃え代設計として大規模な集成材構造建築物では普通に行われている。

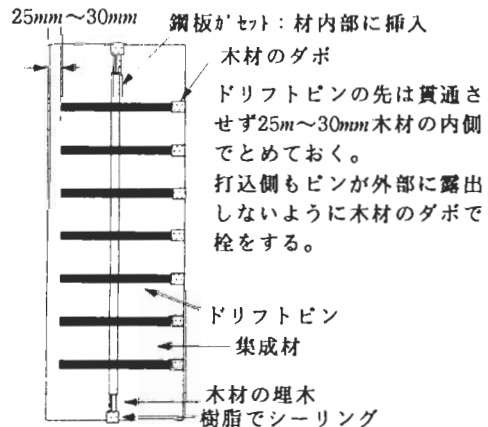


図12 接合部の燃え代設計

- ②金属接合具（ボルトやドリフトピン）には必ず効果的なメッキ処理を施す。現在集成材構造に多用されているドリフトピンはクロームメッキされている。
- ③同様に、鋼板ガセットも防錆処理し、図12に示すように、木材中に埋め込み、空気と直接触れないように、また雨水が入らないように木材等でスリット部分を埋木し、コーキング剤でシールドする。

3. 2. 3 金属接合を越える新しい接合

現在、金属系接合を反面教師として、そこで指摘されている欠点をなるべく持たない新しい接合法もしくは接合材料の開発が進められている。有望な例として；

- ①鋼板ガセット板の代わりにスギの強化LVLを用いる方法（中田欣作：1992）
- ②鋼板挿入ドリフトピンの代わりにFRP板を挿入してエポキシ系接着剤で接合する方法（宮武 敦、藤井 毅：1995.）

①は耐火性、審美性、耐久性の悪い鋼板ガセットに代わるものとして、スギ単板にフェノール樹脂を含浸させた強化LVLで造ろうとするものである。アイデアとしてはヨーロッパの Lignostone と類似している（J.M.Leijten:1991.）が、日本の場合は密度が低く、付加価値の低いスギの特徴を逆手にとった点が興味深い。

強化LVLの「曲げ強度、注：フラットワイズ曲げ強度」は2000kgf/cm²を越えろといわれ、木質系としては驚異的な値であるが、果たして木材本来の性質（結露しにくい、熱伝導性が悪い、etc.）をどこまで伝承しているのか不明である。注目点は、集成材とガセットを同時に孔開け加工ができるので接合部に初期ガタが生じない点である。

②は木材に似たヤング係数を有する強化FRP板を多数枚集成材に挿入して、エポキシ系接着剤で剛接合するものである。ガセット板の枚数が多いので、確率論的にみても接着の強度信頼性は高いと考えられる。剛性、強度に関しては卓越しているが、金属系の特徴である「粘り」に関しては期待できない。橋梁のような全強度を期待する接合に向いているのかもしれない。

4. おわりに

佐々木先生からは他にも、1)地震時における窯業系耐火被覆材の剥離問題、2)木材のクリープ、破壊と組織敏感性、3)欠点の拡大、プルーフローディング、4)危険な部材の常時チェック法、5)地震に対する理想の形態—“免震層の上に固い構造が載る形が究極か”、といった筆者にとってわくわくするキーフレーズが提供されているが、紙面の関係でそれらについてはもし機会があれば別途アタックしてみたい。

5. 引用・参考文献

- ・住木センター編集：「耐朽性の向上」、木造住宅在来工法合理化促進開発業務報告書（神山弘幸委員長）、全126頁、1981.
- ・国土開発センター編集：「木造建築物の耐久性向上技術」、建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編Ⅲ、全135頁、1986.
- ・肘黒弘三：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その1 耐久設計の構成、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、1199-1200、1985a.
- ・肘黒弘三、竹内孝雄、上田 進：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その2 劣化環境の発生時期のシミュレーション分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、1201-1202、1985b.
- ・肘黒弘三、竹内孝雄、佐藤栄一：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その3 耐久設計の試算と検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、1203-1204、1985c.
- ・肘黒弘三、竹内孝雄、上田 進：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その4 劣化環境発生時期とバックアップ材の影響に関するシミュレーション分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、1277-1278、1986a.
- ・肘黒弘三、竹内孝雄、上田 進：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その5 劣化環境発生時期と部材・部品の耐用年数の影響に関するシミュレーション分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、1279-1280、1986b.
- ・神山幸弘、有馬考禮、加藤裕久、鈴木憲太郎、肘黒弘三、中島正夫：木造住宅構造部材の耐久性向上技術に関する研究 構造部材の耐用年数の推定方法、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、1281-1282、1986a.
- ・神山幸弘、有馬考禮、加藤裕久、鈴木憲太郎、肘黒弘三、中島正夫：木造住宅構造部材の耐久性向上技術に関する研究 耐用年数の試算と検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、1283-1284、1986b.
- ・神山幸弘、肘黒弘三、竹内孝雄、後藤龍幸：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その14 耐朽性評価システムの構成、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、1435-1436、1987a.
- ・神山幸弘、肘黒弘三、竹内孝雄、後藤龍幸：木造住宅構造部材の耐久設計に関する研究 その15 部材耐朽性の評価方法の構成、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、1437-1438、1987b.
- ・神山幸弘、肘黒弘三、中島正夫、佐野浩一：非破壊試験法による木造住宅の老朽度診断技術の開発 第6法 木造モルタル外壁の老朽度診断のための振動波形解析法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、431-432、1986c.
- ・高橋旨象（日本木材学会編集）：「木はどうして腐るか」、もくざいと科学、80-85、海青社、1989.
- ・高橋旨象（京都大学木質科学研究所創立50周年記念事業会編集）：「木はなぜ腐るか」、木のひみつ、201-209、東京書籍（株）、1994.
- ・日本建築学会：構造用教材 Ⅰ、38、技法堂、1978.
- ・相原庸夫：地球環境問題と木材保存技術、木材保存、18(1)、51-52、1992.
- ・神山幸弘（所収）：木質住宅及び部材の耐用年数に関する研究、（文部省科学研究費総合研究A昭和54～55年度報告：代表佐々木 光）、53-57、1981.

- ・住木センター編著：木橋設計施工の手引き「木橋づくり新時代」、全241頁、(株)ぎょうせい、1995.
- ・神山幸弘、肘黒弘三、中島正夫、吉岡伸明：非破壊試験法による木造住宅の老朽度診断技術の開発 第3報 木材に開けた穴が超音波の伝搬時間に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、437-438、1983a.
- ・神山幸弘、肘黒弘三、小野 泰：木造住宅構造部材の耐久性に関する研究 その10 在来軸組モルタル塗り住宅外壁部の劣化状況、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、2227-2228、1983a.
- ・吉岡 丹、小西敏正、篠原道正、伊藤 晃：木造建物の耐久性に関する研究 -床下木材の腐朽に対する床下換気口の有効性について-、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、435-436、1983.
- ・林 勝朗、南 慎一、西川 忠、中尾隆平：木造住宅の耐久性向上に関する研究その1 耐久性と劣化に関する概念と研究概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、1205-1206、1985a.
- ・南 慎一、林 勝朗、西川 忠、中尾隆平：木造住宅の耐久性向上に関する研究その2 約20年経過した建物の劣化要因調査、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、1207-1208、1985.
- ・佐藤雅俊、宮村雅史：木造建築物の生物劣化に関する研究 温度と腐朽について、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、1197-1198、1985.
- ・長野行紘：「保存処理木材を使用した公園部材等について」、木のエクステリアへの利活用のために -スギ一般材の利活用をめざして- 講演会資料、住木センター、3月、1993.
- ・森林総合研究所特別研究プロジェクトチーム：「木質系新素材による高強度・高耐久環境調和型架構技術の開発」、農林水産技術会議事務局研究成果296号、36-48、1995.
- ・今村浩人、木口 実、大黒昭夫：木造家屋の外壁における釘の劣化からみた木材の劣化環境、林業試験場研究報告、第345号、1987.
- ・中田欣作：集成材の接合板としてのスギ強化LVLの製造、木材強度・木質構造研究会第13回木材接着研究会合同シンポジウム講演要旨集、31-38、1992.
- ・宮武 敦、藤井 毅：FRP板挿入ガセット接着接合の強度特性(第1報) 曲げ強度に及ぼすガセット形状の影響、木材学会誌、41(4)、380-386、1995.
- ・J.M.Leijten：Development of Reinforced Joints with Densified Veneer Wood, 1991 International Timber Engineering Conference, 3, 3.36-3.42, 1991.

木質構造の耐久設計をめぐる課題

関東学院大学 工学部
建築学科 中島 正夫

1. はじめに

木質構造の耐久設計手法は1984年度に終了した建設省総合技術開発プロジェクト「木造建築物の耐久性向上技術の開発」において一応の提案をみている。しかし、その後の木造建築物に関する状況の変化は目まぐるしく、新しい木質材料、接合法、防耐火設計法などの技術開発を背景として、従来の戸建て住宅分野にとどまらない各種建築分野への木質構造の積極的進出には目を見張るものがある。大断面木材を用いた大規模木造建築物、あるいは面材を多用した防耐火仕様の木質共同住宅などその枚挙にはいとまがない。

このような木材、建築側の状況変化に加えて、社会の耐久性に関するニーズにも近年大きな変化が生まれている。すなわち、国内的にはバブルの崩壊による経済のゼロ成長、そして世界的、地球的には環境保全、改善のための耐用年数の延伸化ニーズなどがその例であり、木造建築物の目標耐用年数の長期化は避けて通れない命題となりつつある。

このように従来、耐震設計や防耐火設計などに比べれば、その重要性を軽視されていたきらいなとしない耐久性をコントロールする技術手法は、現在そのさらなる体系化を極めて強く求められている時代と言える。特に阪神・淡路大震災以降は耐震設計の重要性とともに人命に基本的に係わる性能としての耐久性が再認識されつつある状況であり、木造建築の耐久性を所要の期間確保する技術体系である耐久設計に対する社会の期待は益々高まっていると言えよう。

本稿では以上のような状況を踏まえ、先に提案された「耐久設計法」を木質構造を取り巻く「今」の視点から検証するとともに、耐久性に関する社会的ニーズに答えていくための今後の技術課題について私見をまとめてみたい。

2. 現状における木質構造の耐久設計手法の概要

2. 1 耐久設計とは何か

耐久設計については、先の総プロの成果物である「木造建築物の耐久性向上技術」のなかで、「建物またはその部分の性能をある水準以上の状態で継続して維持させるための設計」と定義されている。この実行行為者は普通、建築設計者であり、設計者が施主、施工者などと協議の上、意匠設計、構造設計などと同様に様々な条件を勘案したうえで、設定した目標耐用年数を満足するように、材料、構法などの内容、さらに施工レベル、維持管理レベルを定めることと言える。

このような耐久設計は、図1に示す手順により実施される。すなわち、1) まずその建物が目標とすべき耐用年数を決める。これは施主の個人的考え方のほか、資源・エネルギーの有効利用などの社会的要因も考慮して決定する。2) その建物が建つ地域におけるシロアリ、腐朽菌などの地域劣化外力ならびに建物部位別の劣化外力を算定する。3) 設計案として設定した部材の樹種、断面寸法、薬剤処理方法にもとづき各構造部材の耐久性能値を算定する。4) マイクロクライメートとしての構法による劣化環境の差を考慮する。5) 耐久性に関連する施工の良否を算定する。6) 以上の一連の項目を考慮して、設計、施工内容・程度から得られる推定耐用年数（1次推定耐用年数）を算出し、目標耐用年数を満たしていれば設計終了。満たさなければ設計、施工内容を変更するか次の7へ進む。7) 建物の使用段階における維持管理の如何によっても耐用年数は延びるので、それを維持保全係数として算定し、2次推定耐用年数を算出し、目標耐用年数と比較し、満たせば終了、満たさなければ設計、施工、維持管理の内容を変更する。

2. 2 総プロ方式の耐久設計法の課題

以上の一連の作業が総プロにおける耐久設計の手順、内容の概略である。それまで得られていた知見を総合して、可能な範囲での体系化、手法化を初めて図ったものとして評価される。しかし、より普遍的で精度の高い耐久設計を考えた場合、この方法

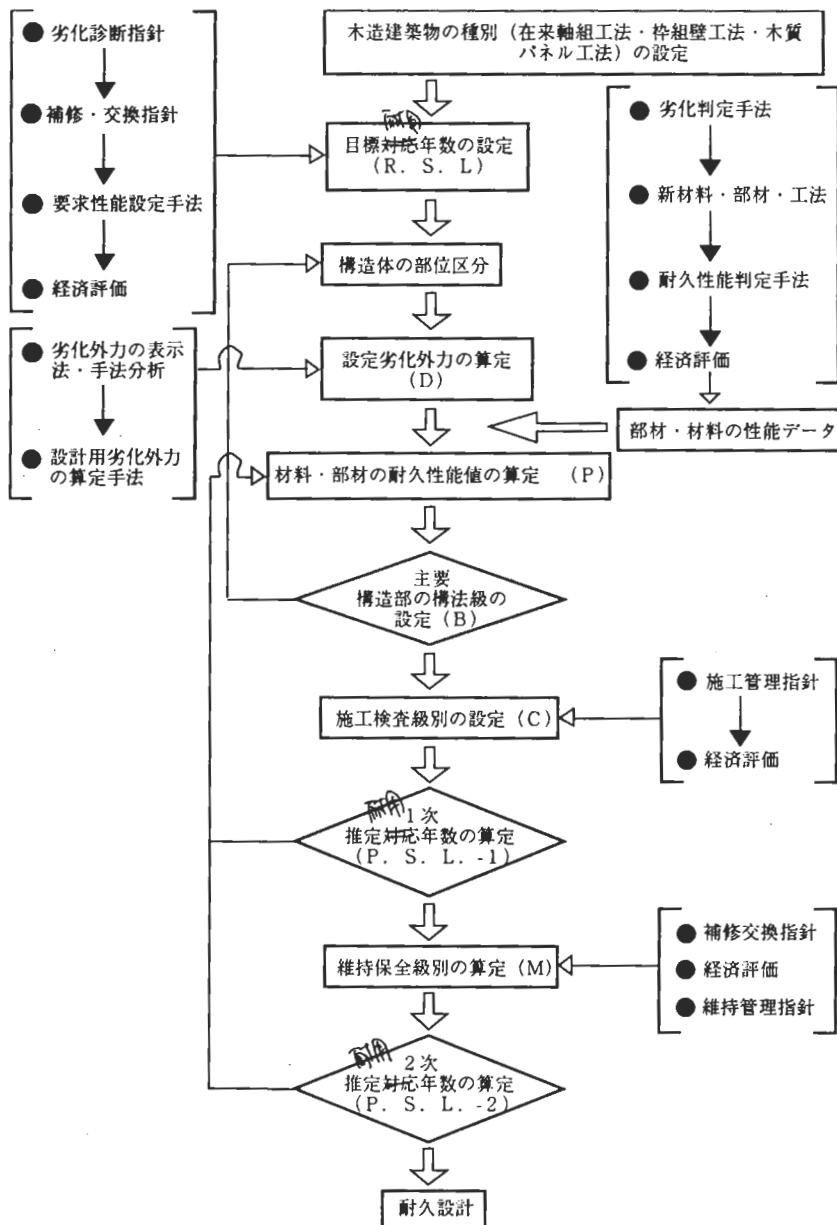


図1 総プロにおける木質構造建物の耐久設計の手順

には次のような改善課題があると考えられる。すなわち、1) 木質構造の耐用年数に影響する要因は数多く、厳密な耐久設計のためには耐用年数とそれを左右する要因と

の関係の緻密な定量化が不可欠であるが、そのための調査研究データがいまだ十分整備されていない。2) 壁内結露の問題あるいは接合金物の耐久性、接着耐久性など木質構造として今後増えると予想される問題が必ずしも十分考慮されていない。3) 新木質材料、新構法等についてはその実績値としての耐久性能データを逐次追加して、より広範な構造に対応できる普遍性を持たせる必要がある。

このように総プロにおいて提案されたの耐久設計法は、木質構造における耐用年数推定手法の考え方の確立を中心に、基本的な部分での整備がなされたものと評価すべきであり、今後ともより普遍的かつ厳密な体系化に向けて努力すべき余地を多く残している。そのため、建築学会では現在、維持管理係数を中心とした耐久設計手法の再検討作業等を実施中である。

3. 耐久設計上目指すべき目標耐用年数

木質構造の耐久設計を行う上では、2で述べたとおり、まず基本的与条件となる目標耐用年数を適切に決定する必要がある。この目標耐用年数は、基本的には、施主個人の事情によって決定されるものであるが、近年は各種の社会的、経済的要因によりその長期化を求める声が大きな社会的力になってきていると思われる。ここでは、目標耐用年数をめぐる近年の動向について筆者らによる研究事例を含めながら紹介し、今後の木質構造の耐久設計が目指すべき耐用年数について検討したい。

3. 1 目標耐用年数に影響する要因の動向

近年の社会、経済の動きから、建築物の耐用年数に特に影響を及ぼすと考えられる要因を挙げれば、1) 高齢化社会の到来、2) バブル崩壊による経済の停滞ならびにそれにとまなう土地神話の崩壊による建設意欲の停滞、3) 資源論、環境論からくる省資源、省エネルギー指向の強化、などであろう。これらの動きは建築全体の耐用年数に関係する動きであるが、特に1)、3)の要因は住宅、なかでも木造住宅に直接影響する要因と言える。これらの要因の意味するところは、従来の木造住宅の平均寿命38年では十分でなく、より長期にわたる耐用年数が求められる時代になりつつある

ということである。このうち、3)の資源論、環境論からの耐用年数の延長は木造建築物に特に求められていることであり、次の節ではこの点に関して筆者らが実施した資源論的目標耐用年数の推定に関する研究を紹介する。

3.2 木造住宅の資源論的目標耐用年数の推定

1) 資源論的目標耐用年数の推定目的と概念定義

木材資源をめぐる環境、エネルギー問題をより良い方向に導く最も有効な方法は、木造建築、なかでも我が国の場合は量的に9割という圧倒的多数を占める木造住宅の耐用年数を延ばすことである。そこでここでは供給システムとして、国産材のみでの自給という前提を設け、その場合の我が国の木造住宅の目標耐用年数を推定することとする。ところで、ここでいう資源論的目標耐用年数とは、木造住宅の耐用年数を t

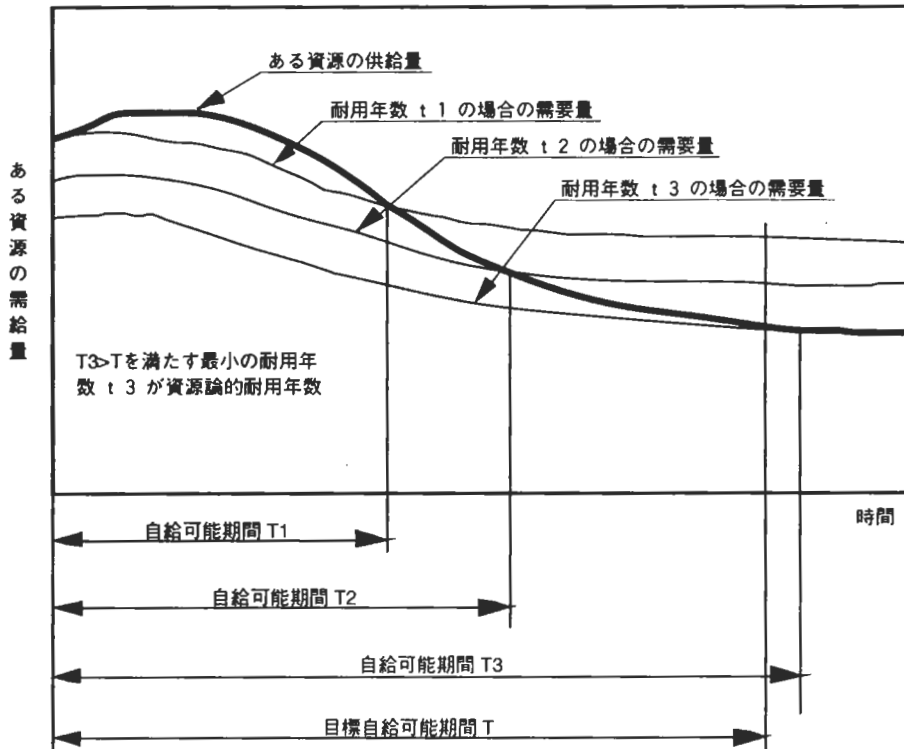


図2 資源論的目標耐用年数の概念図

年としたとき、毎年発生するであろう木材需要量の全てを、ある一定期間、ある限定された供給システムが自給し続けられるような最小の t を言うこととする（図 2 参照）。

2) 木造住宅の資源論的目標耐用年数推定のためのモデル

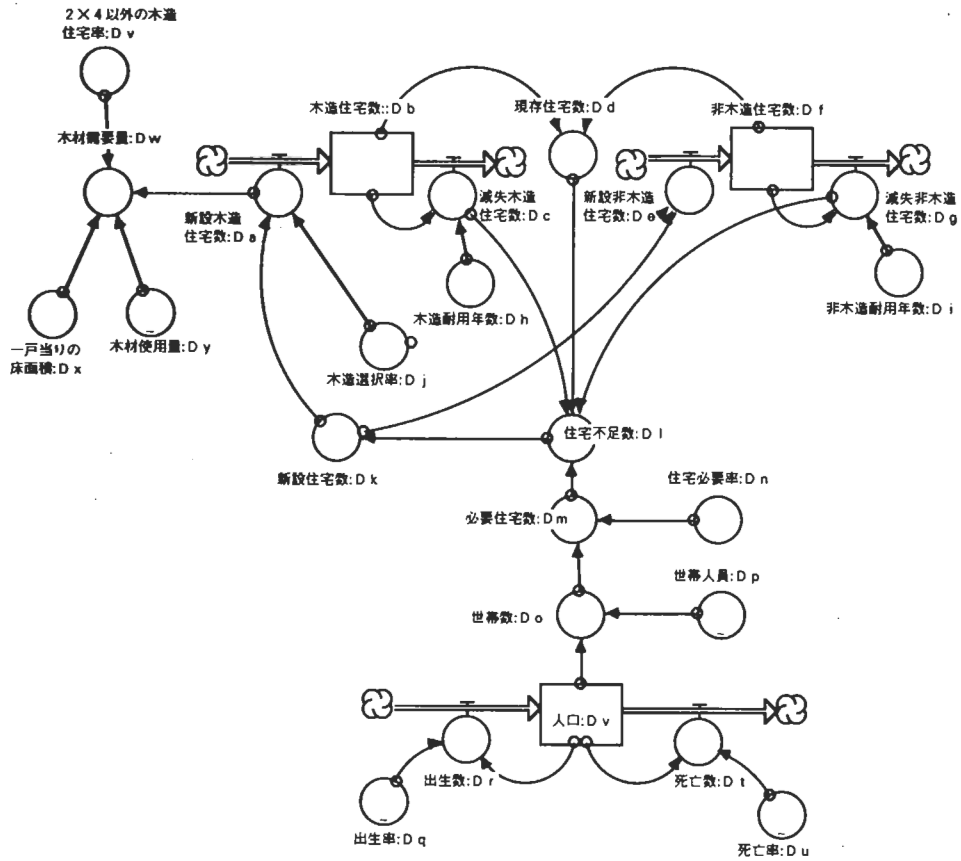
以上の定義にもとづく推定は、図 3 に示すようなシステムダイナミクスモデルを木材の需要と供給側についてそれぞれ構築し、そのシミュレーションをとおして行った。

3) 木造住宅の資源論的目標耐用年数の推定値

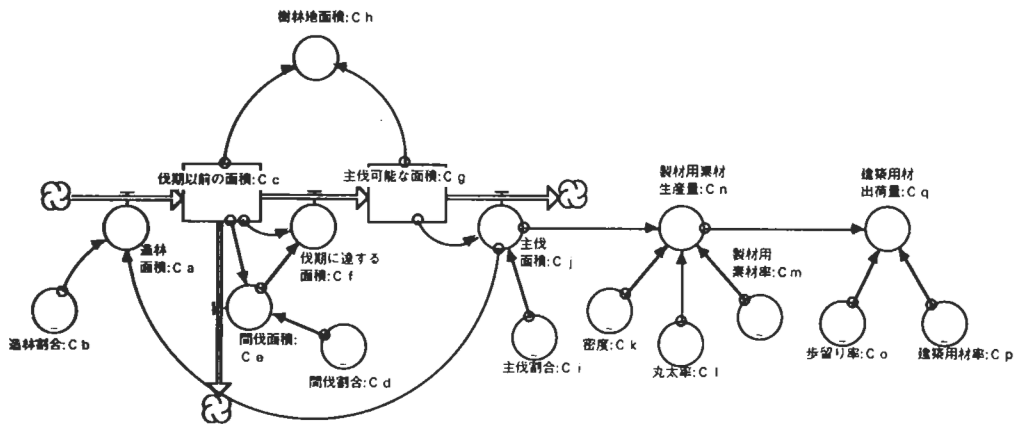
表 1 に様々なケースについて実施したシミュレーションの結果から得られた目標耐用年数の一覧を示す。ここでケース 1 は住宅の床面積のみが増加の方向に変化した場合、ケース 2 は木材の需給バランスにより主伐割合、建築用材率などを調整するように改めた場合、ケース 3 は造林割合を減少させた場合、ケース 4 は世帯人員を減少させた場合、ケース 5 は造林割合、世帯人員を減少させた場合、ケース 6 から 10 は需給調節機能を効かせた上で造林割合、主伐限度、世帯人員などの要因を変化させた場合、ケース 11 は樹種の代替（通常マツ材を使うところをスギにするなど）をしない場合などである。

値はそれぞれのケースで様々であるが、仮に自給期間を 150 年とすれば、その時の目標耐用年数はおよそ 60 年から 90 年であり、建築学会が建物の目標耐用年数の級として定めている区分の Y 60 ないしは Y 100 に該当することになる。また、自給期間をより長期に設定すれば、当然目標耐用年数も長くなるし、逆の場合は短くなる。したがって、自給期間をどう設定するかがこの問題の最適解を得る鍵になるが、いずれにしても、現状の木造住宅の耐用年数の 2 倍以上の耐用年数が目標となるであろうことは想像に難くない。

以上のように、現在における木質構造の目標耐用年数については、長期化の方向に向かいこそすれ、決して現状維持あるいは短期化はあり得ないと理解すべきであり、この方向で耐久設計の今後を考えるのが妥当と言える。



(需要側)



(供給側 (一部))

図3 木造住宅の資源論的目標耐用年数推定のためのシステムダイナミクスモデル

表1 木造住宅の資源論的目標耐用年数と国産材による自給可能期間

ケース	耐用年数 (年)	国産材のみでの供給可能期間 (年)
1	30	75
	60	150
	90	300
2	30	100
	60	225
	90	300
3	30	75
	60	115
	90	160
4	30	75
	60	115
	90	250
5	30	50
	60	80
	90	100
6	30	170
	60	300
7	30	170
	60	300
8	30	100
	60	300
9	30	75
	60	150
	90	300
10	30	0
	60	0
	90	300
11	30	0
	60	15
	90	60

4. 木質構造の耐久性をめぐる近年の動向

前節では、耐久設計上目指すべき今後の目標耐用年数が長期化することを指摘したが、近年の木質構造の耐久性をめぐる動向は、必ずしも耐用年数を長くする方向には動いていない。材料的には新しい木質材料が次々に出現し、そのような材料を用いた場合の耐久設計を可能とするデータが不足しており、耐久設計行為を不明確なものにしている。また、構法的には、大規模木造の多くが部材露出型構法であるのに対して、住宅では各部位内に木質材料を密閉する構法に主流が移りつつあり、この点についても耐久性関連のデータ不足から耐久設計を成り立ちにくいものになっている。本節では、

このような近年の木質構造の耐久性を取り巻く主な動向について概観し、今後の耐久設計上の課題を探る糸口としたい。

4. 1 新しい木質材料の出現

近年とみに新しい木質材料の出現が著しい。OSB、PSL、LVL、WBなど、多くは北米を中心とした外国で開発された材料である。これらは接着剤により、それぞれの木材エレメントがある寸法に一定の方法で集積されている点が共通の特徴であり、面材または軸材として建築用構造、下地部材に利用される。パーティクルボード、繊維板などの木質材料は、使用実績があり、耐久性関連のデータも得られているところから、素材としての固有の耐久性能値もおおよそ推定がつく。しかし、その後出てきた上記のような木質材料については、そのような建築部材としての実績データが十分ではないために、直ちには耐久設計にのせにくい面をもつ。このように耐久性関連データは強度、物性などのデータに比べてはるかに蓄積に時間がかかるとともに、各種の条件の違いとの関連を踏まえた正確なデータの収集が難しく、これが耐久設計を普遍化しにくく、また普及させていない一因と言える。

4. 2 接合法の変化

我が国の木造建築の世界は、今ようやく木構造から木質構造に変化してきた。これは接合法からみれば、木組を主体として金物、接着剤で補う従来の方法から、金物、接着剤を主体とした接合法への変化として捉えることが可能である。構造耐久性的観点から別の言い方をすれば、木部の耐久性と接合法の耐久性とで、耐久設計上の重要性のバランスが変化しつつあることを意味する。特に、面材を耐力壁として用いている場合の釘の耐久性、あるいは大規模木造建築における金物の耐久性などでは、接合部の耐久性が構造安全性を左右する重要な要因になりつつある。

4. 3 構法の変化

新しい材料と接合法の出現を背景とし、より高い機能、性能の建築を求めて、住宅を中心とした木質構造の構法は近年、木質構造部材の隠蔽化へ向けて変化し続けてい

る。しかし考えてみれば、我が国の木造建築構法の歴史は、木材の露出使用から木質材料の隠蔽使用の歴史として捉えることが可能である。その第一段階は、延焼防止のための外面壁の防火被覆化であり、第二段階は、高断熱、高气密化のための外壁の両面大壁化であり、第三段階は、準耐火仕様にとまなう防耐火設計のための木部の隠蔽化、そして第四段階は、今後一般化するであろうと予測される耐震性向上のための全耐力壁の面材による大壁化であり、床下地の面材化である。このように今後の木質構造は、大断面集成材を用いた大規模木造を除いて、多くは各種の面材を用いた木部密閉型構法へとますます変化していくことが予想される。このような密閉型構法で予測される劣化環境は、主に部位内結露によってもたらされることになると思われるが、先の総プロによる耐久設計手法では結露は考慮されていない。

ところで、このような密閉型構法は我が国では全く未経験かと言えばそうではなく、伝統的な民家などにその事例を見ることができる。例えば和歌山の沿岸に近い民家の床や小屋構法には、台風時の強風による建物の吹き上げを防止するために床下、小屋裏に換気口を設けず完全に密閉する構法が存在するが、これらの耐久性は年に2回の大掃除を兼ねた定期点検を前提とした予防保全的維持管理活動によって保たれている。ここには耐風性と耐久性という相成り立ちにくい2つの性能を、維持管理によって両立させている知恵がみられる。

部材露出型構法では確立していた部材補修技術も、密閉型構法では未確立であるが、密閉型構法には耐久性上、民家の例に見られるような広い意味での日本の風土に適応した構法に変質していく現代の知恵が求められていると言える。

4. 4 防腐・防蟻薬剤処理の変化

周知のとおり、住宅金融公庫仕様では昨年度から防腐・防蟻措置として必ずしも薬剤処理をしなくてもよくなった。耐久性ある樹種の心材を用いる、というもう一つの選択肢が用意されたのである。これはとりもなおさず、薬剤による環境汚染に対する社会的要請に答えたものであり、この流れは今後ますます大きく早くなっていくもの

と思われる。薬剤処理は防腐・防蟻手段として残るとしても、薬剤の効力が弱く効果の持続期間も短いものが主体になるとも言われている。しかしその場合、フェイルセーフの考え方が基本となるべき耐久設計の信頼性を向上させる方策は、どのようにして可能となるのであろうか。環境や生体に害がなくて、しかも効力の大きい薬剤が開発されれば別であろうが、そうでないとすれば建築的には密閉型構法に代表されるように木材の耐久性にとって不利な方向に向かっている状況が一方にある中で、木質構造の耐久性はどのように確保されるのであろうか。

以上、近年の木質構造の耐久性に関連する動きを4項目に分けて述べたが、3章で指摘した目標耐用年数の長期化の要請に対して、現実の木質構造のもつ耐久性は必ずしもそれに同期していない。むしろ、ある面では短期化の方向に動いている。この二律背反の状況の中で、高耐用性を確保するための耐久設計を成り立たせる技術課題とは何か、それが今後問われなければならない命題であろう。

5. 高耐用性確保のための耐久設計上の課題

高耐用性を確保しなければならない時代の耐久設計を成立させるための課題は何か。ここでは、設計・施工によって決まる「1次耐用年数」に係わる課題とこれに維持管理が加わって決まる「2次耐用年数」に係わる課題との2つに分けて論じてみたい。

5. 1 設計・施工との関連でみた課題

まず、第一に新しい木質材料の耐久性、耐用性に関するデータの収集と検証が必要であろう。特に実験室における耐久性能試験結果と実使用における耐久性との関連を示すデータの整備が望まれる。

次に、接合法に関しては、金物、接着剤については必ずしも耐久性の実態が十分解明されているとは言えない状況である。現在の防錆措置はどのような条件下で何年の耐用性を持つのか、鋼構造の例を準用することで十分なのか、確認をする必要がある。金物に対する劣化外力は主に塩分であるが、これは海岸からの距離と遮蔽物の有無、風速積算値などにより大きく異なる。図4は、筆者が三浦半島における大気中の塩分

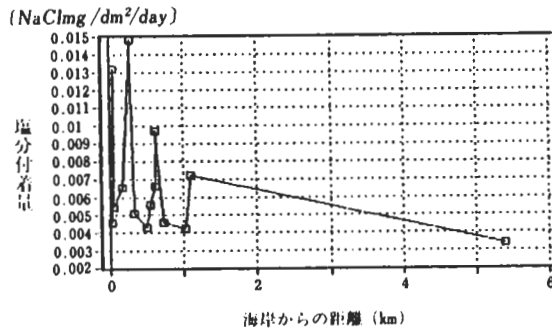


図4 三浦半島における大気中の塩分濃度と海岸からの距離との関係

濃度と海岸からの距離との関係を調査した結果であるが、海岸から数百メートルの範囲内では塩分濃度は急激に高くなり、露出した金物の劣化危険度が増大する可能性がある。今後の金物の重要性を考えると、より詳細な劣化外力の設定が必要になるとともに、そのような環境下での金物類の適切な使用方法を示す必要がある。

部位内結露の問題は、構法に関する課題として重要である。この問題は、もっと広く言えば温湿度が非定常な状態における密閉空間内の木質材料の耐久性の問題であり、その発生条件の予測手法はようやく先の「新木造総プロ」で提案された段階である。これを検証して耐久設計の体系の中に位置づけるのは今後の重要な課題である。また、これと同時に部位内の湿分を外に逃がす通気構法を積極的に取り入れていく必要があるが、その具体的構法ディテール（吸入口面積と排気口面積との関係における湿分除去効率の評価、あるいは下地面通気における面材の透湿抵抗と壁内湿分除去効率の評価など）と耐久性向上への寄与率などのデータは十分ではないので、その整備を急ぐ必要がある。

最後に薬剤処理については、現在、高耐久プレカット部材やラミナ処理集成材などの新しい薬剤処理材料が現れており、それらの固有耐久性能面からの位置づけが必要であろう。

1次耐用年数に関連する課題は、以上のように主として設計に関するものを中心に取り上げたが、施工に関しては、資材管理、精度管理などの品質管理面の向上をどう

実現するかが最も大きな問題であろう。

目標耐用年数は、まず設計と施工により確保するのが原則とするが、Y 60以上の年数の確保をより確実にするには、維持保全による耐用年数の引き延ばしが必要不可欠になる。が、維持保全に関しては次に述べるような様々な課題があるのが現状である。

5. 2 維持保全との関連でみた課題

大規模木造などの部材露出型構法の維持保全は比較的し易い。したがって、維持保全からみた課題のうち最も重要な点は、いかに面材、釘、金物、接着剤を用いた密閉型構法の維持保全技術を確立できるかにあると言えよう。これによって初めて、信頼性ある維持保全計画、しいては耐久設計が可能になると言える。このような維持保全技術の重要な要素技術としては、1) 密閉型構法内部の非破壊劣化診断技術、2) 密閉型構法における部材の補修交換技術、3) 材料別サービスライフコーディネーション技術、そして最後に4) 可変空間構築技術の4つがあると思われる。

1) 密閉型構法内部の非破壊劣化診断技術

予防保全を確実にを行うために必要不可欠な技術であるが、現在までのところ有効な手法は開発されていない。大規模木造などでは、構造部材が露出して用いられていることが多いから超音波、あるいは衝撃波などの既存の非破壊手法を応用して比較的容易に検査できると思われるが、各種の面材で被覆された内部木質材料の劣化程度を簡易かつ確実に診断できる手法の開発が待たれる。

2) 密閉型構法における部材の補修交換技術

非破壊試験によって劣化の存在が確認されても、それを効率よく確実に補修交換できる技術がなければ、その意味は半減する。しかし、その具体的な方法は未だほとんど体系化されていないのが実状である。もしこの技術が確立されれば、薬剤の再処理を前提とした、あるいは薬剤を用いない密閉型構法の長寿命化が可能となるであろう。

3) 材料別サービスライフコーディネーション技術

ある木質部材が寿命に達したとき、他の木質材料を傷めずに交換できることが理想

である。そのためには、各種の木質材料の耐用年数を明確にした上で、それらの調整をして建築内に利用することが必要である。このような技術を材料のサービスライフコーディネーション技術と言う。次々に新しい木質材料が現れるが、これらのサービスライフコーディネーションを図っていくことは、今後長い目で見れば必要になる技術であろう。

4) 可変空間構築技術

長い耐用年数を維持することは、利用の側からみればライフステージの変化、空間用途の変化をきたすことを意味し、それに応じた空間構造の変更ができることが求められる。これは3)の技術が一つの基礎になるが、より基本的には躯体の所要耐用年数の確保策が確立されていることが前提である。それが成り立った上で、建築構法的に内部空間の変更技術が開発されることになる。

以上、木質構造が高耐用性を確保しなければならないとしたときの、耐久設計上の課題について概観してみた。現在はまだ、耐久設計の考え方がようやく合意を得られつつある段階であり、この考え方にもとづく具体的な耐久設計事例の蓄積と評価は今後を待たねばならないが、しかしそれと同時に木質構造の近年における変質の早さを考えるとき、ここで掲げた課題についても早急に合わせて検討していく必要があると考える。

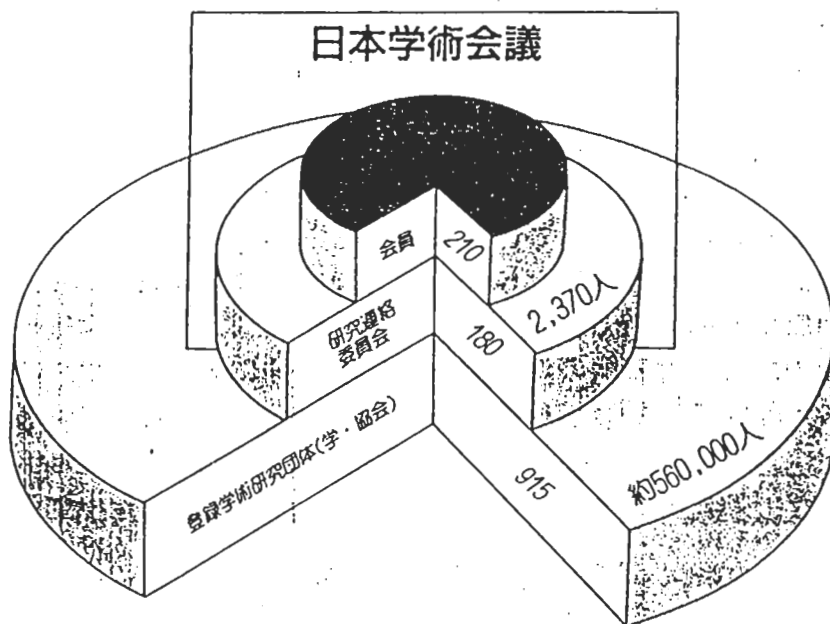
<参考文献>

- 1) 建設省大臣官房技術調査室監修：木造建築物の耐久性向上技術、1986、技報堂
- 2) 日本建築学会編：建築物の耐久計画に関する考え方、1988、丸善
- 3) 酒井訓子：木造住宅の資源論的耐用年数に関する研究、1994、関東学院大学
- 4) 日本建築学会編：木質構造設計基準・同解説、1995、丸善

日本学術会議

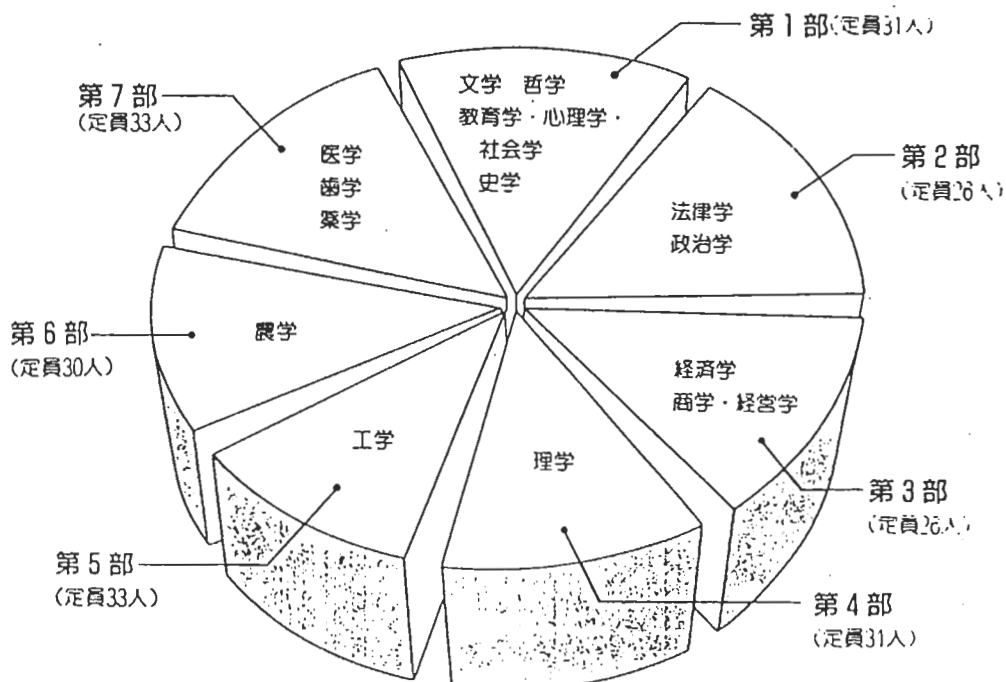
SCIENCE COUNCIL of JAPAN

科学者の代表機関としての日本学術会議



日本学術会議の構成

【人文・社会科学部門と自然科学部門】



定員：210人

日本学術会議の活動

日本学術会議は、①独立して科学に関する重要事項を審議し、その実現をはかること、②科学に関する研究の連絡をはかり、その能率を向上させることを職務としています。

また、政府からの諮問に応じて答申し、または進んで政府に対して勧告する権限をもっています。

さらに、国際的な活動として、国際学術団体への加入、世界各地で開催される学術上重要な国際会議への代表派遣、二国間の学術交流のための代表団の派遣、およびわが国において開催される重要な学術関係国際会議の共同主催、後援などをおこなっています。

国内活動

■科学のあり方についての審議

- 政府からの諮問に応じて、科学に関する研究・研究費のあり方、専門科学者の検討を要する重要施策、研究機関の設置等について審議し、答申しています。
- 科学の振興および技術の発達、科学に関する研究成果の活用、科学研究者の養成に関する方策、ならびに科学を行政に反映させるとともに産業および国民生活に浸透させるための方策について審議し、その結果を政府に勧告し、申入れや要望をおこなっています。
- 学術の動向をふまえ、各学問分野の将来の研究体制や研究計画、境界領域科学の問題、および多くの専門分野に関連する研究課題などについて審議し、関係の学術研究団体（学・協会）と協力して学術の発展に寄与しています。

■研究連絡委員会活動

研究連絡委員会は、関係する学術研究領域または重要課題について、学術の動向を把握し、将来計画の立案および研究条件の整備などについて検討するとともに、関係する研究機関および学・協会との連絡調整をおこなっています。また、対外的には関係する国際学術団体に対し国内委員会としての資格で、これらの団体との密接な連携に当たっています。

■学・協会との結びつき

学・協会のうち一定の基準を備えたものを「広報協力学術団体」に指定し、これらの学・協会との間の連絡活動の強化につとめています。これらの学・協会には、「日本学術会議月報」などの広報紙を送付するとともに、「日本学術会議だより」の学・協会の機関誌等への掲載依頼などをおこない、また、学・協

会との連絡協議会を開催するなどして学・協会の意見のくみ上げにも努力しています。

■公開講演会・シンポジウムの開催

学術の成果を国民に還元するための活動として、本会議主催の公開講演会を開催しています。また、研究連絡委員会等が中心となり、学・協会との連携のもとに、各種の学術上の問題をとらえて、積極的にシンポジウムなどを開催しています。

国際活動

■国際学術団体との連携

日本学術会議は、多くの国際学術団体との密接な連携のもとに、国際的な学術の発展につとめています。平成3年末現在、本会議が加入している国際学術団体は、「国際学術連合会議」(ICSU)、「国際社会科学団体連盟」(IFSSO)など46団体です。

■国際会議の主催、後援

世界の代表的な科学者が一堂に会し、最新の研究成果や動向を検討し交換する学術関係の国際会議が、わが国でも数多く開催されています。本会議では、これらのうち毎年おおむね6件について、学・協会と共同主催しているほか、毎年30件前後について後援しています。

■代表派遣

世界の学界との連携、国際的な学術動向の把握、研究の連絡、情報・資料の収集・交換などを目的として、世界各地で開催される学術関係国際会議に毎年80人程度の代表を派遣しています。

■二国間学術交流事業

昭和58年度から、毎年いくつかの国および国際機関に会員から成る代表団を派遣し、アカデミーや政策担当者などとの意見交換を通して、わが国と相手国および国際機関との学術面での相互理解を深めています。

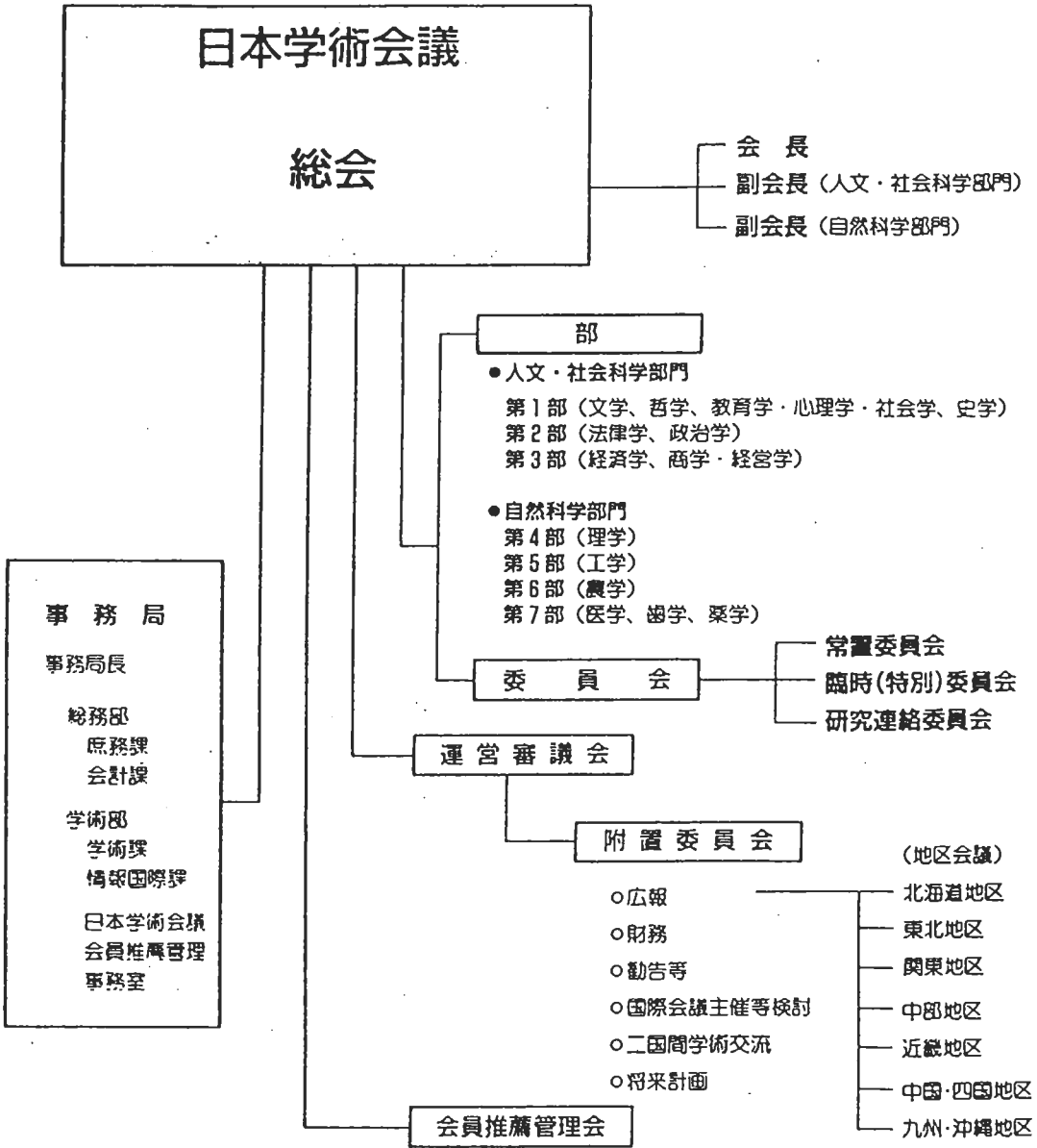
■学術文献交流

わが国の学術文献を世界の各国に紹介し、また、世界各国の学術動向を日本の科学者に紹介するため、海外の諸機関(1,000以上)と学術文献を交換しています。

■国際学術協力事業

気候の変化や環境問題など全地球的規模にかかわる問題についての国際学術協力事業等がふえてきていますが、本会議は、これらの国際学術協力事業について、国内での実施計画の立案、調整をおこなうとともに、関係研究者間の研究連絡などをはかっています。

日本学術会議の組織等



総会 ----- 最高議決機関として通常毎年2回（春、秋）開催します。

運営審議会 ----- 日本学術会議の運営に関する事項を審議するため会長（委員長）、副会長、各部の部長、副部長、幹事によって構成し、通常毎月開催します。

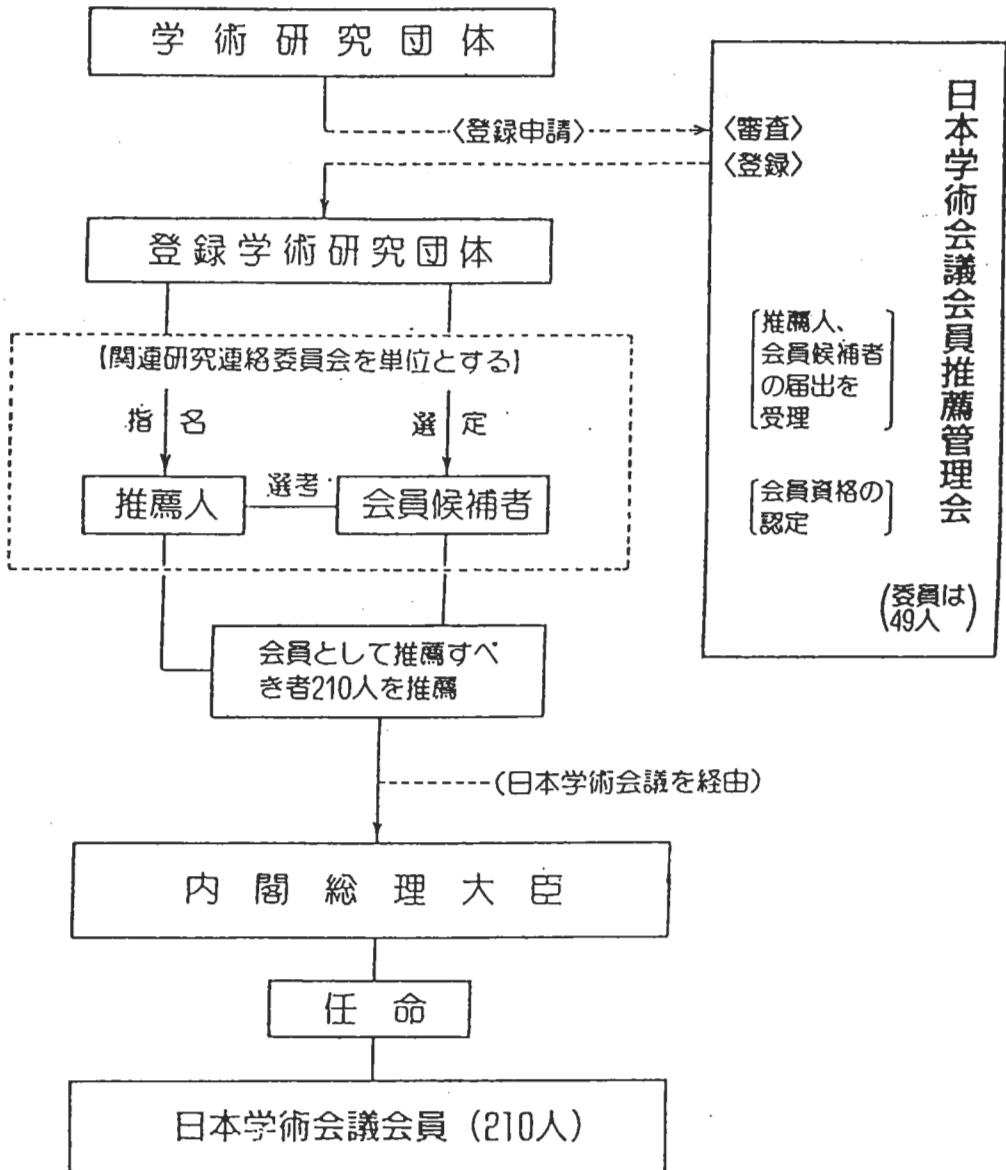
なお、運営審議会は、その任務の遂行上附置委員会を設置しています。このうち広報委員会のもとに全国7つの地区会議がおかれ、地域の学術振興活動および日本学術会議の地域の広報活動をおこなっています。

- 部————— 会員は、第1～7部のいずれかに分属します。部長(1人)、副部長(1人)、幹事(2人)の役員がおかれています。
- 常置委員会————— 本会議の目的、職務、権限を果たすため、恒常的に審議をおこなうために設置されています。
- 臨時(特別)委員会— 速やかに処理すべき課題を検討するため、各期ごとに特別委員会として設置されています。
- 研究連絡委員会—— 科学に関する研究の連絡をはかることを目的として学問分野や研究課題にもとづいて設置され、会員と専門的学識を有する者で構成されています。委員会数は180、委員総数は2,370人です。
- 会員推薦管理会—— 会員の選出に関する事務(学術研究団体の登録、会員候補者の資格の認定その他)をおこなうため設置され、日本学士院会員など49人の委員で構成されています。

会員推薦制度

会員の選出制度は、第12期までは有権者による公選制でしたが、第13期からは学術研究団体(学・協会)を基盤とする推薦制に変わりました。

この仕組みは、登録された学術研究団体に、会員候補者の選定とともに推薦人の指名を依頼し、最終的には、関連研究連絡委員会を単位とする推薦人が共同して会員として推薦すべき者を選考・決定し、それにもとづいて内閣総理大臣が任命するものです。



学術行政関連機構図

