

まえがき

地球環境問題への取り組みが進められる中、森林の役割と木材資源の活用がクローズアップされている。残念ながら土木分野ではその取り組みはいまだ低調であるが、その背景には木材に関する知識や情報不足に加え、数多くの誤解があるようである。本文では、より多くの技術者に木材とその活用法を知っていただくため、木材利用を進める意義とメリット、木材を活かすための材料学的知識、利用技術の現状と将来展望の3方向から、さらなる木材利用の可能性を探る。また、それらを通じて土木分野における環境貢献について共に考えることを目的にとりまとめる。

1. 木材利用のメリットを探る

1.1 地球環境問題と森林・木材

森林は、木材を生産する機能とともに、水源の涵養、土砂災害の防止、生物多様性の保全、炭素の吸収・貯蔵といった様々な機能を持ち、地球環境の保全に大きく関わっている。そこでまず、地球環境問題の中でも特に地球温暖化を取り上げ、森林や木材との関係を整理し、木材利用の環境優位性を探ることとする。

(1) 地球温暖化

地球の大気中には、水蒸気、二酸化炭素（CO₂）、メタン、一酸化二窒素等の温室効果ガス（GHG）が含まれている。これらは太陽から地球に届く熱で暖められた地表面からの熱放射を吸収し、大気と地表面を温める温室効果の機能を持つ。この温室効果の働きによって地球の気温は比較的温暖で生物が過ごしやすい環境に保たれている。しかし、産業革命以降、人間が石油や石炭等の化石資源を大量に使い燃やし続けていることにより、GHG、特にCO₂の大気中への排出が増大している。また、森林の減少に伴ってそこに貯蔵されていた炭素がCO₂として大気中に放出されることも原因のひとつとされている。大気中のGHGが増加し温室効果が強くなることで気温の上昇や気候の変化が生じ、自然生態系や人間社会へ及ぼす様々な悪影響が懸念されている。

(2) 森林・木材と大気との炭素循環

森林や木材は、主にCO₂の吸収、貯蔵、排出を通して地球の炭素循環に関わっており、地球温暖化

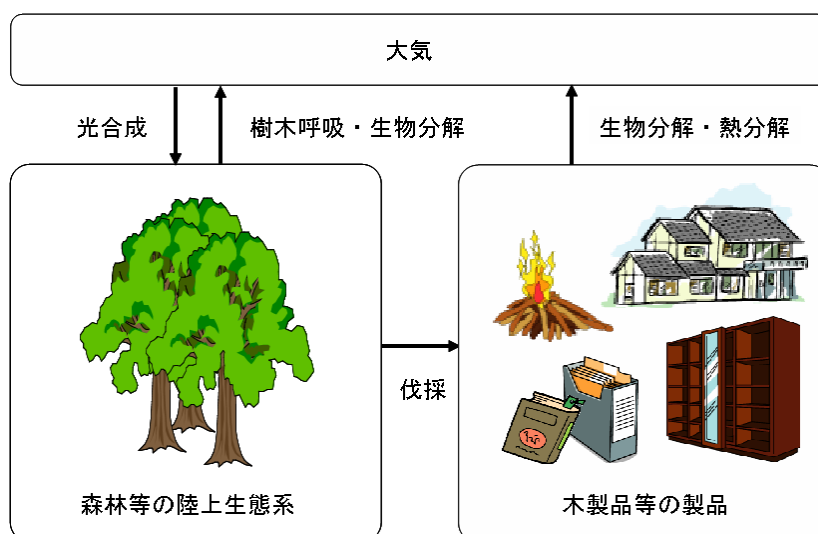


図-1 森林・木材と大気との炭素循環¹⁾

表-1 材料製造時の化石燃料消費量⁵⁾

	MJ/kg	MJ/m ³
天然乾燥木材	1.5	750
人工乾燥木材	2.8	1,390
合板	12.0	6,000
パーティクルボード	20.0	10,000
鋼材	35.0	266,000
アルミニウム	435.0	1,100,000
コンクリート	2.0	4,800

表-2 発電量当たり CO₂ 排出量⁶⁾

木質発電		kg-CO ₂ /GJ
	木材伐採～輸送	53.9
	発電 (効率 10%)	0.0
	合計	53.9
石炭発電		kg-CO ₂ /GJ
	木材伐採～輸送	5.3
	発電 (効率 41%)	220.9
	合計	226.2

を緩和する方策として重要な位置づけにある。森林・木材と大気との炭素循環の関係を図-1 に示す。森林は、光合成によって CO₂ を吸収する。呼吸による CO₂ の放出はあるが、その差分が炭素として樹木に貯蔵される。また、森林から伐採され人間社会で利用される木材製品も炭素を貯蔵し続けており、廃棄後の生物分解や熱分解によって大気中に CO₂ が放出されるまで炭素の貯蔵場所となる。

(3) 木材利用による地球温暖化緩和効果

地球温暖化の原因や森林・木材による炭素循環の関係を踏まえると、木材を利用することによる地球温暖化の緩和効果は、以下の3つの方策に整理できる。

①森林・木材の炭素貯蔵効果

新規の植林、森林の保全や適正な管理、木材製品の長期利用等によって、森林と木材利用の両方の場で炭素貯蔵量を増やし、大気中の CO₂ を除去する効果がある。人間社会の木材製品による炭素貯蔵量は、増加傾向にあることが確認されており、その年間増加量は、139 百万 t-C²⁾、117 百万 t-C³⁾、30～60 百万 t-C⁴⁾等の推定値が報告されている。

②木材の材料利用による材料製造時の化石燃料削減効果

木材を鋼材、アルミニウム等の他の材料と代替利用することにより、材料製造時の化石燃料の消費を削減する効果がある。各材料の製造時化石燃料消費量を表-1 に示す。鋼材やアルミニウムは、木材と比べて化石燃料消費量が大きいことがわかる。

③木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果

木材を電力や燃料といったエネルギー源として利用し、石油や石炭等と代替することによって、化石燃料の消費を削減する効果がある。木質発電と石炭発電の化石燃料消費による CO₂ 排出量（木材の熱分解による排出は計上していない）を表-2 に示す。石炭発電は、木質発電の4倍以上の CO₂ を排出していることがわかる。

1.2 木材の利用促進法や土木学会の取り組み

次に、日本の木材資源の蓄積と供給力について触れ、その有効利用を促進する政策として、京都議定書目標達成計画、森林・林業再生プラン、公共建築物等木材利用促進法を取り上げる。さらに、木材利用拡大に関わる土木学会の取り組みを紹介する。

(1) 木材資源の蓄積と供給力

森林資源に恵まれた日本では、木材は古来より容易に入手でき、また性能と価格のバランスも良好な建設材料だった。木材を活用した生活ぶりは木の文化とも称されるほどで、その様子は今日でも多くの文化財でうかがい知ることができる。しかしながら高度成長期を境に木材は急激に活躍の場を失い今日に至っている。その原因のひとつに資源の蓄積と供給力がある。図-2 は木材（用材）の供給量

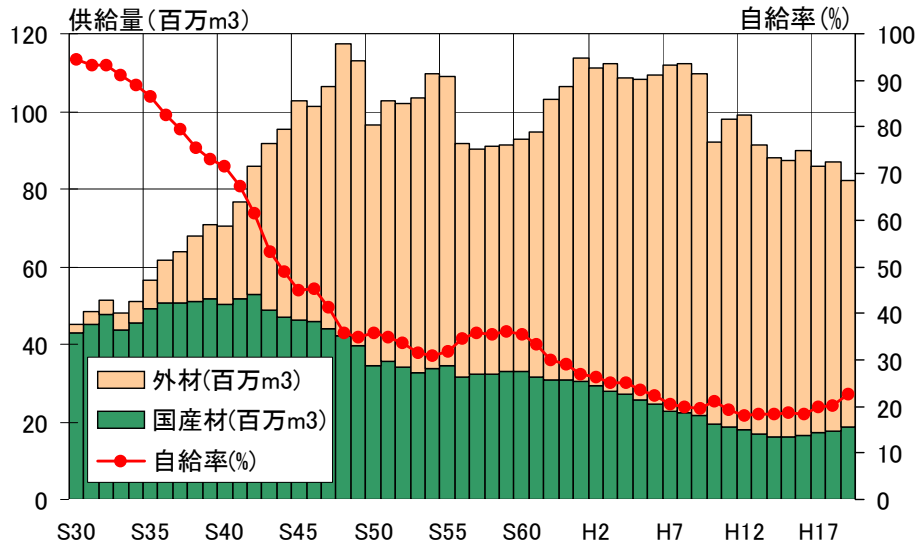


図-2 木材（用材）の供給量と自給率の推移⁷⁾

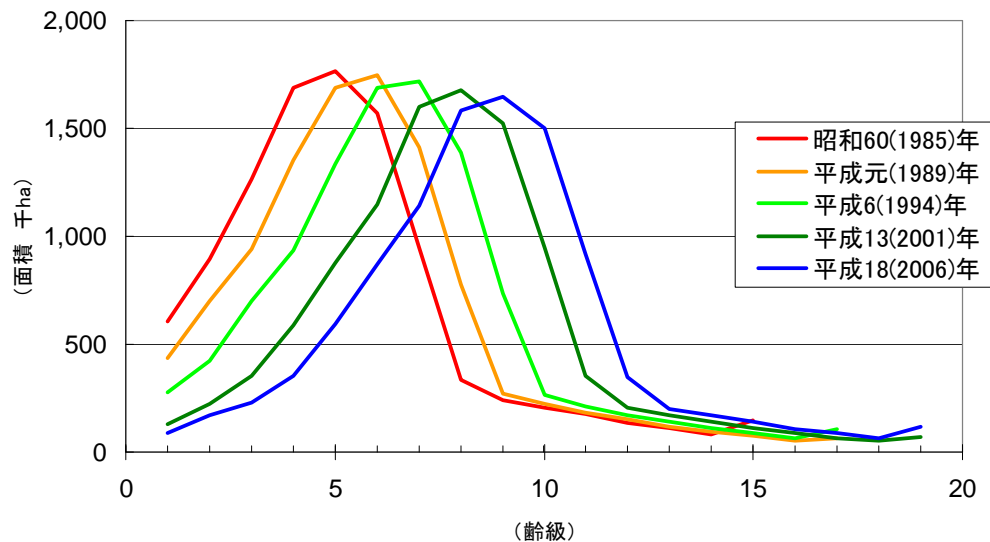


図-3 人工林の齢級別面積（齢級×5で樹齢となる）⁷⁾

と自給率の推移を示したものである。日本は国土の 2/3 を森林が占める森林大国であり、そこでは木材資源が国内の総需要量にほぼ等しい約 8000 万 m^3 ずつ増加している。一見すると木材資源を全く減らすことなく木材を自給することも可能であるが、現実には木材自給率は 20%程度に低迷している。高度成長期に急増した木材需要は外材で補われ、その後も国産材の供給が低迷しているためである。図-3からは、過去の乱伐とその後の積極的な植林により著しく偏った樹齢構成になっていることがわかる。すなわち、かつては利用できる径の丸太が著しく不足してきたが、現在では潤沢に供給できる状況にある。しかしながら、木材価格の低迷も相まって林業はすでに危機的状況にあり、その結果として多くの森林で手入れが行き届かず過密による荒廃が進んでいる。このことは木材利用のみならず、水源涵養能力の低下、大雨の際の土壌流出や流木の発生、風倒木等、地域環境保全の観点からも大きな影響を及ぼしている。図-3からは、資源利用が進まないため樹齢構成がそのまま右へ移動していることもわかる。長期的な資源の安定供給という観点からも、木材資源の活用による蓄積資源の平準化が急務であると言える。

(2) 京都議定書目標達成計画（2005 年閣議決定・2008 年改定）

1997 年に第 3 回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）が京都で開催され、京都議定書が採択された。京都議定書では、先進国の各国が 2008 年から 2012 年までの 5 年間に GHG 排出量を削減することが法的拘束力のある約束として決められた。その中で、この削減目標を達成するために、新規に植林した森林や適正な管理が行われている森林の CO₂ 吸収量を活用することが可能になった。日本は、京都議定書に基づく温室効果ガス排出量の 1990 年比 6%削減の目標値を達成する必要がある。そこで、2008 年に「京都議定書目標達成計画」が改定され、目標達成に向けた各種取り組みが進められることになった。森林については、削減目標 6%のうちの 3.8%に相当する 4767 万 t-CO₂/年（1300 万 t-C/年）の CO₂ 吸収量を活用できることとなった。そこで、日本政府は、CO₂ 吸収量の確保に向けて適正に管理された森林を確保するために、間伐・枝打ち等の森林整備を進め、木材・木質バイオマスの積極的利用を推奨している。

(3) 森林・林業再生プラン（2009 年閣議決定）

日本の木材需給は、1955 年頃からの高度経済成長とエネルギー革命により、工業用材の急激な拡大と薪炭材の激減があった。また、1955 年に「木材資源利用合理化方策」が出され、枯渇の危機にあった森林の保護を目的として木材の大量利用の抑制が推進された。続く 1959 年には、日本建築学会が「建築防災に関する決議」を行い、建築物の火災や風水害の防止を目的として木造建築物を禁止した。さらに、1960 年以降、木材輸入の段階的な自由化が始まり、1964 年には、丸太の輸入関税がゼロになる等の完全自由化が行われた。このような背景によって、国産材供給は 1960 年代の約 5,000 万 m³ をピークに減少し始め、2000 年には、木材自給率が 20%を下回った。近年の自給率の増加は、総需要の減退によるもので、国産材供給は 2,000 万 m³を下回る状況が続いている。

「森林・林業再生プラン」は、このような状況の下、日本林業の再生を図り、2020 年に木材自給率 50%、国産材供給量を 4,000 から 5,000 万 m³とすることを目標にしている。そのための施策として、森林計画制度の見直しにより、将来的な持続可能性を担保するとともに森林施業の集約化や路網整備と機械化により低コスト化を図り、民間事業者の参入を促して担い手を確保し、効率的な加工・流通体制の確立により、資材の安定供給を目指すとしている。国産材需要拡大の目標として製材用材を 1,900 万 m³、パルプ・チップ用材を 1,500 万 m³、合板用材を 500 万 m³にすると試算しており、その中で土木用材需要を 300 万 m³と見込んでいる。

(4) 公共建築物等木材利用促進法（2010 年制定・施行）

「公共建築物等木材利用促進法」が成立した背景には、地球温暖化の防止、循環型社会の形成、森林の多面的機能の発揮と地域経済の活性化があるとされている。

日本の建築物は、世界的に見ても厳しい防耐火規制等により、木造で建築できるのは戸建て住宅と集合住宅の一部という状況が長く続いてきた。今後の人口減少社会の流れの中、建築ストックの拡大は期待できず、建築部門における木材利用の拡大のためには、これまで木造でほとんど建てられなかった非居住用建築への適用を図るしかない。公共建築物は、全建築着工床面積の 10%程度であるが、木造率は 7.5%と非常に低く、ここでの木造の拡大により、その他の非居住用建築物へ波及することが期待される。

公共建築物とは、国・地方公共団体の建築物の他、学校・福祉施設・病院等、民間の公的な建築物を含むとされる。木造を義務づけるのは、現在の建築基準法等により建築可能な庁舎・宿舍等の 3 階建て、その他の特殊建築物の 2 階建て以下で、防火・準防火区域外では、延べ床面積 3,000m²以下等のものとなるが、法律には防耐火規制の見直しも謳われている。また、非木造で建てる場合も内装等に木材を積極的に利用することとされている。

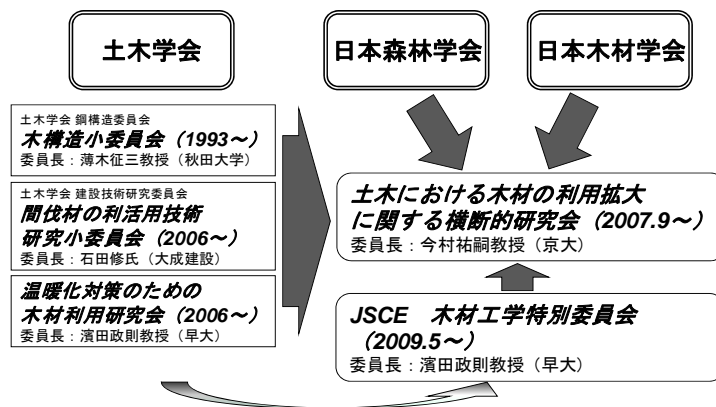


図-4 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会の発足の経緯

本法律が主として国産材の需要拡大に関して実効性のあるものとなるためには、防耐火技術の開発と共に、木造のコスト競争力が問題となる。事例解析では、木造の床面積当たりのコストは RC 造や S 造と大きく変わらないとの試算もある。しかし、前述のように日本の木材加工・流通は、主として戸建て住宅のためという状況の下にあり、大スパンの公共建築物用の大断面部材の供給は特注となり、市場流通品と比べてコスト高になるという事実も否定できない。森林・林業再生プランにより国産材の低コスト安定供給がなされたとして、その加工を行うための施設整備を助成する木材製造高度化計画が法律には盛り込まれている。

法律名の「等」に示されるように、公共建築物以外にも、住宅、公共施設に係る工作物、木質バイオマスの製品・エネルギー利用等による木材利用拡大も含まれ、土木利用に関しては、ガードレール、高速道路の遮音壁、公園の柵等への木材利用が記載されている。

(5) 土木学会の取り組み

土木分野における木材利用拡大の取り組みとして、日本森林学会、日本木材学会、土木学会による「土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会（委員長：今村祐嗣京都大学名誉教授）」があげられる。この取り組みについて概要を示す。

最初に、横断的研究会の発足の経緯（図-4）を紹介する。土木学会内には、現在 29 委員会（土木学会論文集編集委員会を含む）が設置されている。土木学会には、かつて木材を取り扱っている主要な委員会はなく、木材を扱っていたのは、鋼構造委員会内に 1993 年に設置された「木構造小委員会（委員長：薄木征三 秋田大学教授、小委員会名はその後更新）」と、建設技術研究委員会内に 2006 年に設置された「間伐材の利活用技術研究小委員会（委員長：石田修氏（大成建設）」のみであった。これと併行して、2006 年に「温暖化対策のための木材利用研究会（委員長：濱田政則 早稲田大学教授）」が発足し、主に地盤対策等の土木分野での木材利用について、土木分野ばかりではなく、森林、木材、環境の専門家が集まり勉強会が行われるようになった。これを機会に、土木学会、日本森林学会、日本木材学会の 3 学会による横断的研究会が 2007 年 9 月に発足した。その後、土木学会内にこの横断的研究会の窓口となる「木材工学特別委員会」が 2009 年 5 月に設置された。

横断的研究会発足後、委員会は 2 ヶ月に一回程度開催されている。木材利用といっても対象範囲が広いことから、資源ビジョン、木橋、治山治水、地中海域、道路関連その他、論文集編集といった各 WG に分かれて具体的な活動が行われるようになった。さらに、佐賀県、福井県、北海道、九州では、横断的研究会の委員等が中心となり各地域における木材利用研究会が発足され、横断的研究会とも連携を図りながら活動が拡大されつつある。

横断的研究会では、毎年春には研究会の活動報告等を中心とした木材利用シンポジウムを、また、

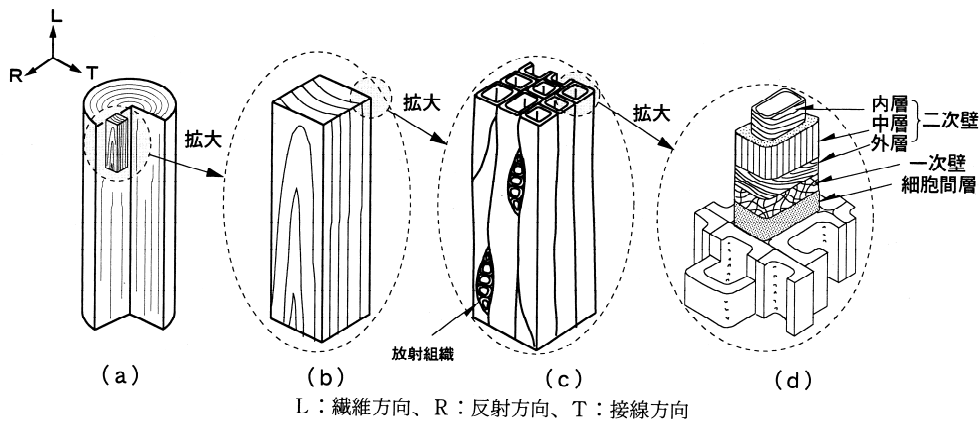


図-5 木材（針葉樹）の組織構造⁸⁾

夏には各研究者が研究成果を発表する木材利用研究発表会を開催している。また、日本森林学会、日本木材学会、他団体とも共催または後援し、シンポジウム等を開催しながら土木分野における木材利用拡大を図っている。さらに、日本木材学会の呼びかけで行われた「伐採木材の取り扱いに関する円卓会議（座長：服部順昭 東京農工大学教授）」への参画や、社団法人日本プロジェクト産業協議会（JAPIC）の「森林再生事業化研究会（主査：米田雅子 慶応大学教授）」への委員の参画と情報交換等、幅広い取り組みが行われている。まだまだ、土木分野における木材利用の意識は低く、関係者も少ないが、時代の流れにも後押しされ、着実に木材利用の輪が広がってきている。

2. 木材の性質を知る

2.1 生物資源としての木材利用

ここまで木材の環境性能とそれを活かすための取り組みについて述べたが、木材利用が進められている背景には利用技術の進歩も大きい。しかしながら木材が他の建設材料と大きく異なるのは、木材は良くも悪くも生物資源であるということである。生物資源であることで前述のような環境性能を発揮できるが、一方で個性的な性質もあわせ持つ。ここではまず、生物資源であることに由来する木材の特徴について考えてみる。

(1) 木材が軽くて強いわけ

図-5は木材の組織構造を示したものである。図より、木材はストロー状の細長い細胞が整然と並んだ集合体であり、細胞中の繊維のほとんどは繊維方向と呼ばれる材長方向にのみ向いていることがわかる。このため、構造材としてはありがたいことに材長方向の強度が大きい。ただし、繊維方向と直交する放射方向、接線方向の強度は繊維方向の1/10～1/20程度しかなく、めりこみやすい等の特徴もあわせ持つ異方性材料であることも忘れてはいけない。

後述するように、木材は軽いにもかかわらずコンクリートと同等の強度を有し、比強度では鋼材に匹敵するという特徴を有するが、これは生物としての合理的構造に由来するものである。

(2) 乾燥と割れ

木材は使っていると割れたり反ったりすることがある。これには材に含まれる水分が関係している。生きている樹木には大量の水分が含まれている。スギでは含水率が200%、すなわち水分により重さが3倍になるものもある。伐採されると乾燥収縮が始まるが、収縮率には強度と同様に異方性があるため、これが割れや反り、図-6のような変形の原因になる⁹⁾。

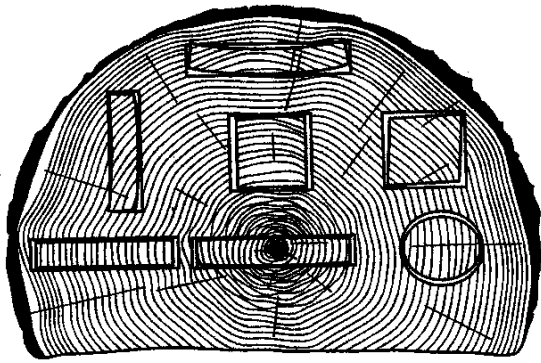


図-6 乾燥による変形



写真-1 スギの丸太の断面

乾燥収縮が始まる含水率は28%程度、気乾状態で安定する含水率は15%程度である。このため、割れや反りを抑えるには含水率15%程度のものを加工して利用すればよい。乾燥コストを勘案して20%程度のものも利用されているが、それ以上のものの使用は避けた方がよい。

割れやそり、変形はそれ自体が好ましくないが、水が溜り、また割れから雨水が材内部に浸入する原因にもなるため、耐久性上も好ましくない。長く安心して使用するためにも、乾燥材の利用を心がけたい。

(3) 木材の劣化と対策

土木分野における木材利用に対する最大の不安は耐久性であろう。木材を劣化させる要因には住宅で多く見られるシロアリによる食害と、木材腐朽菌による腐朽が挙げられる。いずれも鋼やコンクリートにはない劣化で、生物劣化と呼ばれる¹⁰⁾が、外構材では後者が問題となることが多い。

生物劣化では、原因となる生物の活動が活発となるような環境下では劣化は爆発的に早い。その反面、使用環境が適切であれば100年のオーダーで使用し続けることができることは伝統木造建築物の例を見ても明らかである。ただし、常に風雨に晒される外構材は宿命的に腐朽に対する環境は厳しく、所要の供用期間を満足するためにはそれなりの対策が求められる。

水分、温度、酸素を腐朽の3要素といい、いずれかひとつでも避けられれば腐朽はしない。このうち工夫により対処できるのは水分のみである。そのため、外構材の耐久性向上策は雨水対策であると言ってもよい。全体を屋根で覆うのが第一であるが、それができなくても劣化しやすい木口部や接合部を守る、勾配をつけて雨水を溜めない等の工夫により耐久性を向上させることができる。

(4) 素材の耐久性と防腐剤の活用

素材の耐久性は樹種により異なる。例えばヒノキは耐久性が高い。スギも言われるほどに悪くはない。一方でマツは劣る。これは土木技術者にはかなり誤解されているようであるが、マツ杭として利用されてきたこと、それが健全な状態で掘り出されることがあるためであろう。

部位による差もある。スギの丸太の断面はどれも写真-1のように中心部が赤く、周囲が白い。白い部分は木材が生きていく上での活動がなされている部分で辺材と呼ばれる。一方で赤い部分は樹体を支えるのに専念している部分で心材と呼ばれる。これらはどの樹種にも存在するが、樹種によっては色差が不明瞭なものもある。最初は断面のどの部分も辺材であるが、樹木の成長により中心部から外縁部に向かって心材に変化する。このとき防腐効果がある成分が合成され蓄積されるため、心材は耐久性に優れる。ただし、辺材が心材化するのは10~15年後であるため大径のものほど心材の占める割合は大きい。逆に小径のものはすべてが辺材の場合もある。丸太で表面に見えるのは必ず辺材であ

表-3 各構造材料の材料特性の一例

	木材 (スギ) *		鋼材**		コンクリート***	
		比強度		比強度		比強度
単位重量 (kN/m ³)	4	—	77	—	23	—
圧縮許容応力度 (N/mm ²)	7.8	2.0	140	1.8	6.5	0.3
引張許容応力度 (N/mm ²)	5.8	1.5	140	1.8	0.7	0.03
曲げ許容応力度 (N/mm ²)	9.8	2.5	140	1.8	8	0.4
せん断許容応力度 (N/mm ²)	0.6	0.2	80	1.0	1.0	0.04
ヤング係数 (kN/mm ²)	6.9	—	200	—	25	—

* 針葉樹の構造用製材の日本農林規格¹¹⁾ 機械等級製材 E70

** 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説¹²⁾, SS400 材板厚 40mm 以下

*** コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]¹³⁾

るため、かなり劣化しているように見える丸太でも内部は健全なこともあることを知っておくとよい。

木材は本来ある程度の耐久性を備えているが、所要の耐久性を確保するために防腐剤が使用される。最近では環境配慮型の薬剤が主流になっている。防腐剤は塗布または加圧注入される。塗布は施工が容易であるが、効果が得られる部分は表面付近に限られるため、表面保護と美装のためと考えた方がよい。加圧注入を利用すると防腐剤を材内部にも浸透させることができるため、屋外での使用に際してはこちらが推奨される。ただし、加圧注入処理の前に材を十分に乾燥させなければならない。特に防腐剤の効果を期待したい辺材部は、元の含水率も高いため注入不良が起りやすいためである。

2.2 建設材料としての木材利用

(1) 木質材料の進化

従来、木材は製材もしくは丸太として利用されてきた。これに対して近年では集成材、LVL、合板、木質ボード類等、多様な木質材料が実用に供されている。いずれも加工することで木材固有の寸法安定性や異方性、ばらつき等の解消を狙ったもので、加工すればするほどエネルギーやコストを必要とするが、工業製品としての性質に近づく。

このうち集成材は長尺かつ大断面の部材を自由に製作できるため、小径材を活用しながら大規模構造物を作ることができることが大きなメリットであるが、挽き板の積層方法を工夫することで性能と信頼度をアップさせ、割れや狂いを抑えられる等のメリットもある。製材や丸太を活用する取り組みも進められている。いわゆる地産地消の取り組みの中では、加工も含め地域で生産できる製材の活用は大きなメリットであり、難しい課題をクリアしながら取り組まれている。

(2) 強度性能にも優れる木材

木材は鋼材やコンクリートより弱いと考えられがちであるが、実際はどうか。表-3 は木材と鋼材、コンクリートの一般的な材料特性を示したものである。強度は樹種によって大きく異なることが木材のおもしろい点であるが、ここでは国産の構造用木材の代表格であるが強い樹種ではないスギを木材の代表例として挙げておく。これを見ると、許容応力度はコンクリートの圧縮許容応力度とほぼ同等であること、引張力にも抵抗できることから鉄筋も不要で曲げにも有利であることがわかる。また鋼材と比較すると比強度は同等であり、軽い割には強いことがわかる。

このように木材は建設材料としてはむしろすばらしい性能を有しているが、付け加えれば木材は強い割にはヤング係数が小さい、すなわち強さと堅さのバランスが鋼材やコンクリートとはかなり違う材料でもある。このため、単に鋼材やコンクリートの係数を変えて置き換えただけの設計では、木材を活かした設計はできない。

(3) ばらつきをどう考えるか

建設用材には安価で入手性のよいスギやヒノキ、カラマツ等の国産材が多く使用されている。かつては供給不足から輸入材が大量に使用されていたが、近年では地域産材、国産材の利用が推奨されるようになってきている。これらはいずれも針葉樹ではあるが、強度や耐久性等の性質はそれぞれ異なる。また同一の樹種でも産地により性質は異なる。同一の産地でも生育する場所により性質は異なる。同一の場所であっても個々の性質はやはり異なる。つまり同じ産地であっても様々な性質の原木が存在する。さらに、1本の樹木でも長さ方向や断面の位置によって性質は異なる。例えば根元よりも少し上の部分が強く、断面方向では中心部より周辺部の方が強い。すると1本の原木からも様々な性質の製材が得られる。これらを全体的に見ると性質がばらついているということになる。木材であれば当たり前前のことが、人工材料に慣れた技術者には煩わしく思われるかもしれない。

このばらつきに対して、従来は目視による等級区分により適材適所の利用が図られてきた。これに対して現在では非破壊でヤング係数を測定することで強度を推定する機械等級区分法が確立されている。これは製材工場のラインにも組み込まれており、性能が保証された製材が生産されている。このため、木製構造物でも鋼やコンクリート構造物と同様に設計し、安全性を保証することができる。

なお、このばらつきは人工材料のばらつきとは本質的に異なるものである。選別すれば抑えることはできるがコストに跳ね返る。ただし、人工材料の製造や施工の不良を考えれば、そのばらつきは木材どころではない。このように、木材のばらつきはネガティブに考えるものではなく、鋼材やコンクリートの規格のように性能に合わせた適材適所の利用を考えるとよい。

(4) 上手に活用するための知恵

木材を活用するためには、木材ならではの様々な知識があるとさらによりよく活用できる。

例えば木材は入手性に注意が必要である。JASに規格があっても、そのグレードのものが入手できかどうかは資源の蓄積に依存するためである。設計上無理な要求をすればコストにも跳ね返る。また短期間に大量に利用するなら注意が必要である。工期不足により乾燥不良、防腐剤の注入不良が発生し、期待どおりの耐久性が発揮されなかった例も多数あるからである。資源の状況を踏まえた設計、早めの発注等、適切な配慮が望まれるところである。

また合理的な組織構造のため軽くて強い木材ではあるが、反面鋼構造物の溶接や高力ボルト接合、コンクリート構造物のPCや現場打設のような効率的な接合法は存在しない。ボルトやドリフトピンによる接合が一般的であるが、接合効率は半分程度でめりこみやがたつきが生じやすいのが難点である。また耐久性上も問題となりやすい。この弱点ともいえる接合部であるが、逆から見れば劣化部材のみを交換することが容易でもある。維持管理が軽視されている現在ではこのメリットが活かされている設計はほとんど見かけないが、上手に利用できれば長期に安心して使用することができる。

3. 木材利用の可能性を探る

3.1 土木分野での木材の利用拡大に関するロードマップ

横断的研究会では、先に述べたように土木分野における木材利用による環境貢献を目指し、木橋、治山治水、地中海洋、道路関連その他の各WGに分かれてそれぞれの分野での木材用途拡大を目的とした調査研究活動を行っている。活動のひとつとして各WGが対象とする構造物において木材利用の現状や潜在的な木材利用ポテンシャルを調査し、これを資源ビジョンWGが評価した結果、年間400万 m^3 程度になることを推計した¹⁴⁾。これは「森林・林業再生プラン」で2020年までの目標としている国産材供給量の1/10に匹敵し、同プランで目標としている土木用材需要の300万 m^3 を上回るもの

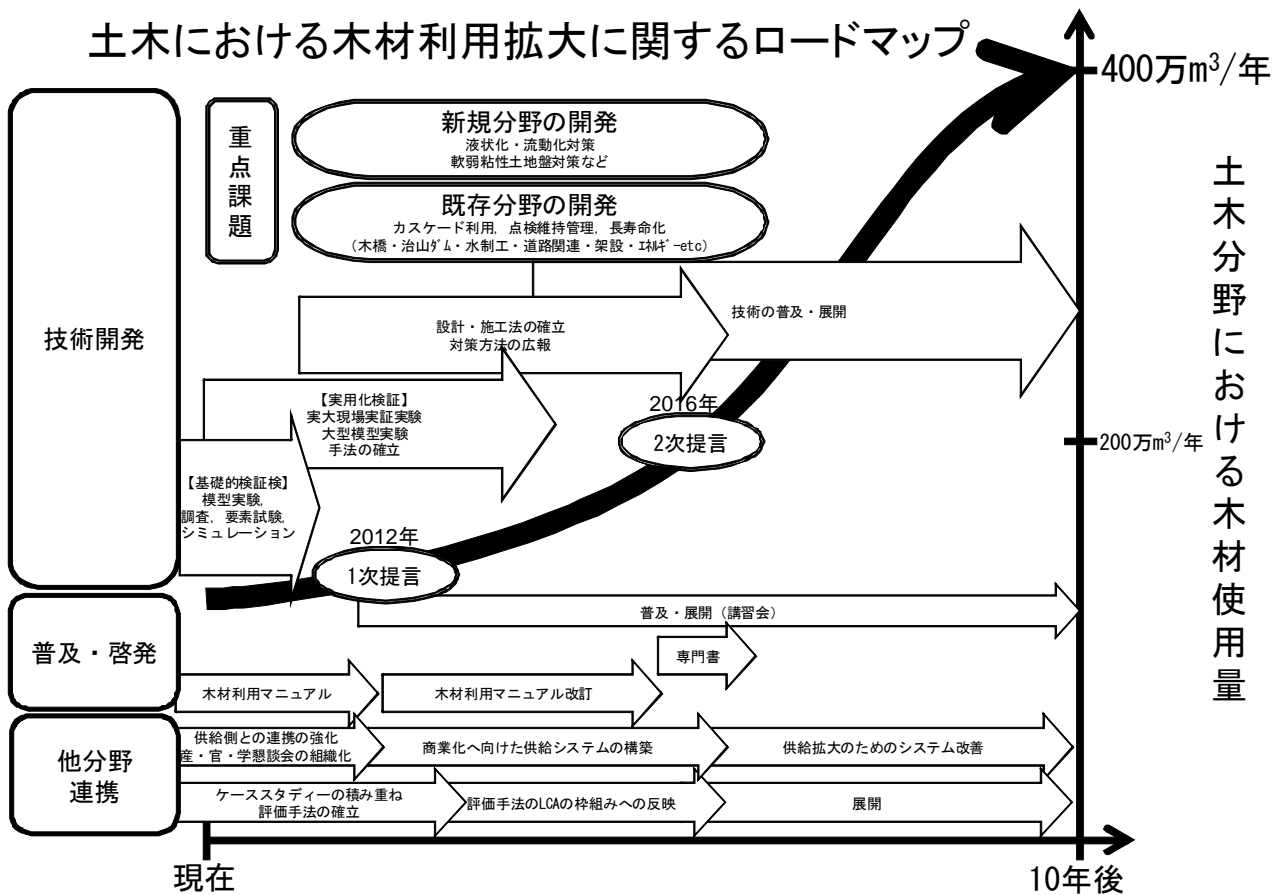


図-7 土木における木材利用拡大に関するロードマップ

である。横断的研究会ではさらにこの 400 万 m^3 /年の利用量を 10 年後の 2020 年までに実現するためのロードマップ (図-7) を作成している¹⁵⁾。このロードマップを達成するための柱として、技術開発、普及・展開、他分野連携の 3 つをあげている。以下にそれぞれの対策を紹介する。

(1) 技術開発

技術開発では、液状化・流動化対策や軟弱粘性土地盤対策等、これまでほとんど木材が使用されていない新規分野での技術開発を行うことで新たな需要が望まれる。また、木橋や木製治山ダム、河川における水制工、ガードレールや遮音壁等の道路関連施設、既にある程度木材利用の取り組みが行われている既存分野でのさらなる利用拡大へむけた技術開発を行うことでの需要拡大が期待される。具体的には、カスケード利用やその後のエネルギー利用を実施可能とするシステムやハードの開発、点検維持管理法や長寿命化技術の開発である。これらの実施に当たっては、基礎的な検証の後、土木技術者に納得してもらうために、実用化に向けた大規模実験の実施し、設計・施工方法を確立することで技術の普及展開を図る。

(2) 普及・展開

土木分野では木材について学ぶ機会もなく、学びたくても専門書も少ないという現状から、結果的に技術者の中で木材の利用について誤った認識を持たれている場合が少なくない。そこで、正しい知識の提供や最新技術を含めた利用技術の紹介といった活動により普及展開をはかる必要がある。木材は、土木分野で使用できないのではなく、使用しようと考えていないのが現状であり、土木技術者に対するこのような意識改革を促すことが重要である。このため、まずは本テキストのような木材利用についての入門書を作成しこれを土木技術者に広め、徐々に木材の土木利用の専門書を充実させていく。また、これと併行し、講習会等を各地で実施し、普及展開を図っていく。



写真-2 かりこぼうず大橋（宮崎県）



写真-3 御幸橋（高知県）

(3) 他分野連携

木材利用は木材供給側の林業や木材加工等の分野、さらには環境分野との連携が必要であり、本研究会も日本森林学会、日本木材学会、土木学会の3学会による横断的な研究を進めてきた。今後もより一層の連携が必要であるが、木材利用の拡大を現実に進めていくためには、研究者を中心とした現在の研究会から今後は行政や産業を含めた連携により、木材利用についての供給から需要に関わる産業が自立し持続性のある産業へと導く必要がある。このための産学官による懇談会の実施、これに基づいたシステムの構築を目指す。また、一方で二酸化炭素の排出量や貯蔵量等、主に環境的な貢献について定量的な評価が必要であり、これについても他分野との連携を図りながら評価手法の確立、実際のLCAへの反映を目指していく。

以上を踏まえ、土木における木材利用の拡大へ向けて2012年には第1次提言、2016年には第2次提言をまとめ、日本森林学会、日本木材学会、土木学会の3学会から、行政機関や関連機関へ向けて発信して行く予定である。

3.2 土木分野における木材の具体的な利用例

ロードマップの目標達成に向けて木材利用の用途開発や需要拡大を考えていくために、ここでは既に木材が使われている分野での具体的な事例を紹介する。

(1) 木橋

我が国では社会情勢の変化により木橋は一度姿を消したが、集成材等の木質材料の製造技術や加工技術の革新により、1980年代後半から登場した木橋は大型車も自在に走行できる全く新しい近代木橋として生まれ変わっている。橋長140mの日本一の規模を誇る木橋（写真-2）は、スギの大断面集成材を使用した2車線の車道橋である。こうした大規模な木橋の場合、集成材の大断面ブロック部材の製作、加工および接合部の取り付けまでを工場で行い、現場で鋼製の接合部をボルト締めして組み立てられる鋼橋と同じ架設スタイルである。2.2節で紹介した木材固有の寸法安定性や異方性、ばらつき等の影響を少なくした木質材料を使用することで、鋼橋と同様の品質管理、施工管理も可能となった。かつては、これほど長い木橋を架けるためには、河川にいくつもの橋脚を立て、多数の製材を細かく組み合わせることが当たり前であったが、最近の木橋では集成材による大断面、長尺化によりシンプルな作りとなっていることがわかる。このことにより腐朽の弱点となる木材同士の接合箇所を減らすことができ、耐久性の向上も期待できる。こうした近年の木橋では、風雨に曝される部材や木口面は銅板で覆う等、細部まで気を配った耐久性向上のための工夫も施されている。

木橋は木材の土木利用の中でもアピール効果の高い構造物であるが、なかでも歩道橋は利用者との



写真-4 木製ダム (秋田県)



写真-5 木製ダムと流路工 (京都府)

距離が近く、木の質感を見て、触れて楽しむことができるため、公園のアプリケーションのひとつとして人気が高い。また設計条件等の制約も少ないため、デザイン性等の自由度も高い。写真-3は国土交通省のモデル木橋事業で架けられた歩道橋のひとつであり、屋根付きの木橋となっている。高温多雨な日本では耐久性向上に対する屋根の効果は大きい。ただし風荷重が大きくなるという欠点もあるが、トラス構造を用いることで風荷重の軽減を図りながら雨の影響を抑えようとする工夫が見られる。こうした木橋には2.1節で外構材の耐久性向上策として紹介した、全体を屋根で覆う、木口部や接合部を守る、雨水を滞留させない等の工夫が適切に施されているのがわかる。

(2) 治山治水利用

山地および溪流では浸食にともなう災害を防止するために設置される施設が治山ダム(写真-4)である。この治山ダムの材料に木材を用いる研究が1998年頃から京都府立大学と京都府農林水産部によって進められた。実際に同大学の演習林や京都府管内に施工された木製ダムについて安全性や耐久性に関する多くの調査が行われ、その結果、基本的な設計指針が示されたことによって、木製ダムの取り組みは京都府を始めとして静岡県や長野県、秋田県等の林業県を中心に全国的に広がっている。一般に木製ダムと呼ばれている施設の多くは、緩勾配の溪流の不安定土砂の移動を防止する目的で設置されるものであり、土石流対策として施工されるような大規模で強固な砂防ダムとしての性能を求められるものではない。また、木製ダムは溪流に沿って複数基配置されることが多いが、写真-5のように上下流の木製ダム工の間には溪流の乱流防止のために木製の流路工を設置し、山腹斜面には同じく木製の土留工を設置する等、木製ダムの前後の構造物にも木材を積極的に利用する試みが行われている。

(3) 地中・海洋利用

腐朽の条件のひとつである酸素が供給されないため、地中の木材は腐朽しないという性質を利用して、軟弱地盤を対象として木杭による地盤改良や杭基礎としての利用方法が考えられる。堤防盛土等の底部軟弱地盤(図-8)に杭を打設することにより地盤が補強され、垂直支持力を増す。また、杭打設による締め固め効果等により杭体周辺の地盤が強化されることも期待される。具体的な工法としてはパイルネット工法がある。この工法は、軟弱地盤に木杭を適切な深さに打ち込んだ後、杭頭部同士を鉄筋やロープ等の連結材で連結し、その上部に土木用シート等を敷設して盛土を行う工法である。写真-6は道路盛土基礎地盤でのパイルネット工法の適用状況である。

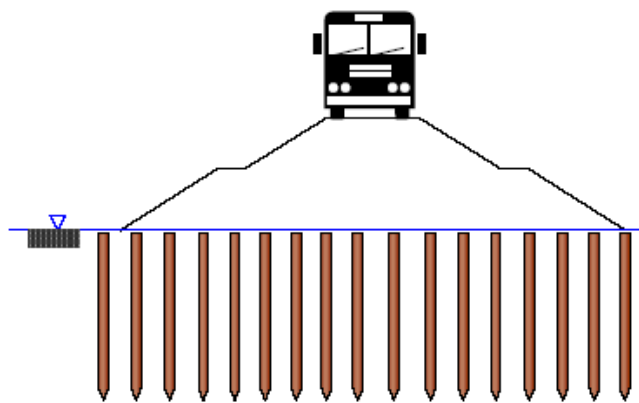


図-8 堤防盛土等の底部軟弱地盤



写真-6 パイルネット工法



写真-7 実車衝突試験（左：1.0t 乗用車，右：20t 大型貨物車）



写真-8 国道の木製防護柵

(4) 道路関連利用

スギやカラマツ等の間伐材を活用した車両用防護柵（ガードレール）が全国各地で増え始めている。1998年に「防護柵の設置基準」が改定され、改定以前は構造や材料（金属またはコンクリートに限られていた）等の仕様が具体的に規定されていたが、改定後は必要とする性能が規定される「性能規定化」によって、要求性能（強度や耐久性）を満たせば木材を用いたガードレールの採用も可能になった。ガードレールに要求される性能には、車両の逸脱防止、乗員の安全性、車両の誘導性能、構成部材の飛散防止等があるが、これらの要求性能を確認するために、大型貨物車と乗用車を用いた2種類の衝突実験（写真-7）を実施することが求められる。宮崎県や長野県のメーカーが中心となって開発され、この厳しい試験に合格したいくつかのタイプの木製ガードレールが林道を中心に設置延長を延ばし一部の国道でも設置されている（写真-8）。

木製遮音壁は設置距離当りの木材使用量が多く、木材に求められる強度性能等は高くないので、安心して大量に使える木製道路施設である。木製遮音壁の性能については、旧日本道路公団が「木製遮音壁技術指針（案）」を作成し、遮音性能（400Hzで25dB以上、1,000Hzで30dB以上）や強度性能（風荷重150kgf/m²に耐える）等を定めている。これらの性能を満たす木製遮音壁は、1980年代半ばに長野県で開発され、1985年度末には中央自動車道 飯田 IC 南に200mに渡って試験施工された（写真-9(a)）。この遮音壁はカラマツ製で、現在も使われている（写真-9(b)）。約25年の使用に耐えている理由としては、次のようなことが考えられる。1)木製部材は雨水の滞留しにくい断面形状とし（写真-9(c)、20年経過時の調査写真）、防腐剤の加圧注入をした。2)支柱はH形鋼、地面に接する下部2～3段は通常のコンクリート製遮音板とし、その上に木製遮音板5枚を落とし込んだ。3)日当たり・風通しのよい設置環境であった。

他にも群馬県ではスギ製遮音壁（防腐剤加圧注入、支柱間隔4m）を4タイプ開発し、2001年以降、北関東道 高崎 JCT～伊勢崎 IC 間の計 約5.4kmに設置されている¹⁶⁾。



(a) 試験施工

(b) 2009年の状況

(c) 鋸断面

写真-9 長野県におけるカラマツ製遮音壁

3.3 木材利用の展望・将来技術

これまでほとんど木材が使用されていない新規分野での技術開発を行うことで、新たな木材需要が期待されている。ここでは、一例として液状化・流動化対策や軟弱粘性土地盤対策等、実用化に向けての研究が進む将来技術を紹介する。

(1) 軟弱粘性土地盤対策への木材利用

かつては、杭と言えば洋の東西を問わず木杭であった。国内においても、1950年代までは木杭はよく使用されていた。一方、今日では、建築や土木の設計書から木杭は姿を消し、木杭を構造物基礎として使用することはほぼ皆無となった。

写真-10は、福井県の足羽川に架かっていた旧幸橋の橋脚撤去時の様子である。橋脚を支えていた木杭が健全な状態で見つかった。この橋は、車道と路面電車が通る鉄筋コンクリート橋であり、木杭が74年間腐ることなく機能したことがわかる。木材は、地下水位以下では酸素がないので腐朽や虫害が進行せず、極めて長期の耐久性が期待できる。したがって、このような環境下で木材を使用すれば、木材の最大の欠点である腐朽や虫害等の生物劣化を考える必要がなくなり、加えて、乾燥による変形や、燃えるといった心配もなくなる。これらの利点を活かし、木材を主に地中の地下水位以下で積極的に使おうという取り組みが横断的研究会に所属するメンバーを中心に行われている。また、1948年の福井地震や1964年の新潟地震で発生した液状化に対して、木杭基礎が有効である可能性を示す歴史的事実に基づき、液状化対策として木材を地中で積極的に使用しようという研究も現在進められている。

こうした地中利用においては地下水位以下では木材は半永久的に腐朽しないことから、炭素貯蔵効果も期待でき、このような利用法は地中に新しい森林を作ることと捉えることができる。写真-11は、地中に丸太を打設して地盤改良する工法による地中カーボンストック技術の実物大実験の様子であり、実験の結果、工事による排出量を上回るCO₂貯蔵効果が確認されている。

(2) 木材のカスケード利用

本節で紹介した事例のほかにも従来技術として河川内で川の流れを制御する水制工、斜面を安定させる法面保護工、斜面表土の土砂流出を防ぎ植生を安定させる筋工、防風柵工、落石防護工等や、ウッドチップ舗装、木製側溝蓋、木柵、看板、胴木基礎等でも木材が使われる等、建設事業では多様な木材利用方法がある。このように数多くの工種がある土木工事では、軽量で加工が容易であるという木材の特徴を活かして一度使用した材料を他の工種へ利用し、最終的にはエネルギー利用するといったいわゆるカスケード利用を実施しやすい。例えば、劣化して取り替えられた木橋の床版を同じ公園内の遊歩道の路面材に使用するという利用の仕方が考えられる。一般に、カスケード利用をするた



写真-10 福井県足羽川に架かる旧幸橋の橋脚の74年前に打設された木杭基礎



写真-11 地中カーボンストック技術によるCO₂削減効果の確認試験

めには、工種を超えた連携が必要であるが、横断的研究会ではいくつかのシナリオを設定し検討を始めている。

参考文献

- 1) 橋本征二, 森口祐一, 日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック, 独立行政法人 国立環境研究所, 2004.
- 2) Winjum J. K., Brown S., Schlamadinger B., Forest harvests and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxides, *Forest Science* 44, pp. 272-284, 1998.
- 3) Hashimoto S., Nose M., Obara T., Moriguchi Y. Wood products: potential carbon sequestration and impact on net carbon emissions of industrialized countries, *Environmental Science and Policy* 5, pp. 183-193, 2002.
- 4) UNFCCC, FCCC/TP/2003/7, pp. 10-11, 2003.
- 5) 有馬孝礼, 木材の住科学—木造建築を考える, 東京大学出版会, 2003.
- 6) Kayo C., Aramaki T., Hanaki K., Effect of Change of Forest Carbon Storage on Net Carbon Dioxide Balance of Wood Use for Energy in Japan, *Journal of Industrial Ecology* 15(1), pp. 122-136, 2011.
- 7) 林野庁編, 平成 22 年度 森林・林業白書, 2010.
- 8) 林知行, ここまで変わった木材・木造建築, 丸善ライブラリ, 2003.
- 9) 森林総合研究所監修, 木材工業ハンドブック 改訂 4 版, 2004.
- 10) 日本木材保存協会: 木材保存入門 改訂 2 版, 2005.
- 11) 針葉樹の構造用製材の日本農林規格, 2001.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 2002.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
- 14) 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会, 土木学会木材工学特別委員会: 2010 年度 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書, 2011.
- 15) 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会, 土木学会木材工学特別委員会: 2009 年度 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書, 2010.
- 16) 日経コンストラクション, 2009.6.12 号

執筆担当責任者

第 1 章: 加用 千裕(東京農工大学), 第 2 章: 渡辺 浩(福岡大学), 第 3 章: 佐々木 貴信(秋田県立大学)