

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 年 3 月
土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会
(日本森林学会・日本木材学会・(社)土木学会)
(社) 土木学会 木材工学特別委員会

はじめに

「土木」という言葉が示すように、かつて土木事業において最も重要な材料の一つが木材でした。しかし高度成長期、森林の荒廃や効率性重視の流れを背景に、木材からコンクリート等への転換が図られた結果、木材は今日の土木分野にとってもっとも馴染みのない材料となっています。

しかしその一方で、土木分野においても、木材の持つ、比強度が高い、適度な弾性がある、熱伝導率が低い等の素材としての長所、あるいは木材を利用することにより得られる、森林活性化効果、炭素貯蔵効果、省エネ効果、化石資源代替効果等、地球温暖化防止に資する効果といった効率性だけでは計れない価値が見直され、木材を土木事業に積極的に活用する動きがでてきました。また、木材の土木利用においては、大量の炭素固定効果も注目されています。

このような流れをうけ、木材の供給側である日本森林学会、木材を加工して供給する側の日本木材学会、ならびに木材の使用者側である土木学会は共に連携して、「土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会（横断的研究会）」を 2007 年の秋に立ち上げました。以来、研究会では、3 分野の専門家がほぼ 2 ヶ月に一度のペースで会合を持ち、土木分野において木材の利用拡大を阻む課題の抽出や、土木的利用技術の現状と今後の展開等に関する情報交換をおこなってきました。

2008 年度には、「土木における木材利用拡大に関する横断的研究」が土木学会重点課題研究に採択され、木材利用数量の推移と現状把握と土木における木材利用事例の整理、治山ダムにおける腐朽特性を考慮した設計方法や、地中・海洋での腐朽の少ない条件での利用による環境効果の評価と利用方法の提案、土木における木材利用におけるアンケート調査、シンポジウムの開催や研究成果の発表、等を行ないました。また、京都議定書以降の木材利用効果評価に対する COP15 へ向けた政府への提言書について、他の学会等と協力して助言にあたりました。その他特筆できることとして、外部研究助成金に積極的に応募し、3 件を獲得することができました。

引き続き 2009 年度においても土木学会重点課題研究として、「温暖化緩和策に向けた具体的な木材利用技術の研究」が採択され、①木材利用メリットの抽出と定量化による温暖化対策効果の「見える化」への取組み、②具体的な利用対象に対する温暖化対策効果を考慮した木材利用技術の研究、③木材利用とその環境効果に関する情報の公開、等を実施してきました。これらの目標に向って、より具体的な木材の土木利用についての解析と検討を深めるため、WG1：木材利用・課題抽出、WG2：木橋利用研究、WG3：治山・水利用研究、WG4：地中・洋利用研究、WG5：道路付帯利用研究のワーキング・グループを組織し活動を展開しています。

2009 年 5 月には、土木学会において、“環境に有利な木材を土木分野において利用拡大するために必要な調査、研究を行い、地球温暖化防止対策へ貢献する”ことを目的として、「木材工学特別委員会」が設置されました。この特別委員会は、横断的研究会の土木学会における受入窓口にあたるものであり、両者は連携して所期の目的達成に向けて活動を展開することになりました。

また、2009 年 5 月 23 日には、このような学会横断的な連携活動を紹介するとともに、土木分野における木材の利用技術の最先端を紹介する目的で、「土木分野における木材利用の復興」と題したシンポジウムを東京で開催し、160 名に達する多くの参加者が集い熱心な討議を行ないました。

2009 年度の主な活動としては以下の項目を上げることができます。

- ・土木分野における木材利用の普及活動（シンポジウムの開催や後援）
- ・土木における木材利用ポテンシャルの推計

- ・木材のカスケード利用に対応した災害復旧用木橋トラス橋の開発
- ・木製治山ダム・木材地中利用・斜面緑化による炭素貯蔵効果の検討
- ・木材の地中海洋使用事例および過去における設計方法の収集
- ・道路関連木材利用の調査

2009年度の土木学会重点課題研究の採択に対して、土木学会ならびに関係各位に感謝申し上げ、今後の活動にさらなるご協力をお願い申し上げます。

2010年3月

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

土木における木材の利用拡大に関する横断的研究成果報告書

も く じ

ページ

1. 土木における木材利用と学際的研究の進め（濱田）	1
1.1 はじめに	1
1.2 土木事業と木材の関わり	1
1.3 土木事業と地球環境問題	2
1.4 学際的研究の進め	3
1.5 まとめ	3
2. 土木における木材の利用の可能性	5
2.1 木材利用の環境的意義と地中への利用（沼田）	5
2.2 木材の特性と木橋への利用（渡辺）	15
2.3 木材利用の波及効果とさまざまな利用技術（今井）	25
3. 京都議定書への「伐採木材製品の取り扱い」の対応	35
3.1 伐採木材製品の取り扱いについて（外崎）	35
3.2 「伐採木材製品の取り扱い」に関する円卓会議の提言（外崎）	36
3.3 伐採木材製品の取り扱いに対する土木学会の検討結果（橋本）	40
4. 土木における木材利用に関する資源利用ビジョン	45
4.1 英国グリーンガイド及び CEI-bois の調査報告（山口，今村）	45
4.2 日本の森林資源と木材供給の長期的見通し（久保山）	47
4.3 炭素ストック変化を考慮した木材のエネルギー利用による実質炭素収支について（加用）	49
4.4 木造住宅を対象とした木質資源循環による CO2 削減効果の検討（村野）	51
4.5 土木における木材資源の利用拡大へ向けて（渡辺）	53
4.6 木材利用実績および土木における利用ポテンシャル（外崎）	63
5. 木橋への利用技術	75
5.1 ここまで来た近代木橋（佐々木）	75
5.2 木橋の維持管理の把握と課題（渡辺）	79
6. 木材の治山治水利用	85
6.1 昭和 30 年代に設置された木製治山ガムの腐朽度現地調査について（高奥）	85
6.2 木製治山における CO2 削減効果（高奥，佐々木）	90
6.3 防腐処理の有無による治山治水の腐朽速度の違い（石川，田次，前田，金岩）	95
6.4 腐朽速度を考慮した木製えん堤の設計法（石川）	100

7. 木材の地中海洋利用	111
7.1 地中海洋における歴史的な木材利用事例（三浦，吉田）	111
7.2 現存の地中海洋における木材利用例（中村，沼田，本山，三浦）	114
7.3 地中海洋での木材利用における設計法の変遷と現在の設計法（沼田，山田）	123
7.4 木材の腐朽および虫害（桃原，山口）	128
7.5 軟弱粘性土地盤対策（三浦，林）	134
7.6 丸太打設による軟弱地盤対策の炭素貯蔵効果（沼田）	139
8. 木材の道路関連への利用	141
8.1 木製車両用防護柵の開発概要と普及への課題（張）	142
8.2 樹木による法面緑化工の二酸化炭素固定効果（池田）	146
8.3 木材の保存処理方法における木材保存剤と安全性（山口）	153
8.4 エコバリューウツの土木における木材カスケード利用の可能性（郡）	156

付 録

（１）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名簿	付-1
（２）活動の記録	付-5
（３）シンポジウムなどの後援・協賛・参加など	付-15
（４）関連記事	付-16

1. 土木における木材利用と学際的研究の進め（濱田政則）

1.1 はじめに

「土木」というと、「土」と「木」を扱っている分野のように思われるが現在はほとんど木材は使用されなくなってしまった。この認識は、一般の方々も同様と考えられる。木材は、環境的には極めて有利な材料であり、地球温暖化が深刻になった現在、もう一度見直し、土木の分野においてもこれを復興させることが必要であると考ええる。本文では、土木事業と木材の歴史的な関わりと現在の土木技術者の木材利用への意識の現状を述べるとともに、土木分野での木材利用拡大のための学際的研究の必要性を示す。

1.2 土木事業と木材の関わり

土木事業で扱われる構造物は、ダム、トンネル、道路、鉄道、河川、上下水道、造成、処分場、電力施設、橋梁・・・などであり、建築以外の建設事業を対象にしている。

土木事業は、①大規模なものでは関西空港、東京湾横断道路、本四連絡橋のようなものから、小規模なものでは末端の上下水道工事や道路舗装などがある、②事業が展開される場所は、国内だけでも北は北海道から南は沖縄まで、また、山間部から、谷部、河川、平野部、海洋、地中など至るところに存在している、③工事の種類もダム、トンネル、橋梁・・・と多種多様であり、それぞれの要求に即した一品生産が基本となっている、④地形や植生など自然環境と直接的に向き合うことが多い、⑤使用期間が50年以上の長期におよぶものが多い、⑥公共性の高いものが多く、被害によってその機能が失われると社会的影響が大きい、などの特徴が挙げられる。

土木事業では近年、コンクリートや鉄が主な材料として使用されているが、土木と木材の歴史は、むしろこれらの材料よりも遥かに長い。「土木」の語源は、中国武帝（B.C.141-B.C.87）の時代の「淮南子（えなんじ）」という書物に記された「土を築き木を構えて・・・」にあるとされ¹⁾、古くから土木事業で木材が使用されていたことが想像できる。実際、1198年（建久9年）源頼朝の時代に相模川架けられた橋のヒノキの橋脚基礎が1923年関東地震による液状化で突如浮上して発見された事例²⁾や、城の石垣の基礎に胴木が使われていた事例³⁾や、江戸時代の石橋の基礎に木材が使われていた事例⁴⁾などが報告されており、土木工事の主要な材料として木材が用いられていたことが分る。

一方、近年において、土木工事の主要部材に木材が使用されることはほとんど皆無となり、2006年度の土木における木材使用量は103万m³程度であった⁵⁾と推計されている。この値は、建築部門における年間の木材使用量2,518万m³と比べ少なく、土木工事の規模の大きさから考えると、木材が土木工事にはほとんど利用されていないことが理解できる。このような木材利用の減少には、1955年に閣議決定された「木材資源利用合理化方策」の影響が考えられる。この閣議決定は、当時枯渇の危機にあった森林を保護する目的で木材の大量利用を抑制するために出されたものである。木杭はかつては建築および橋梁の基礎として使用されていたが、橋梁に関しては1976年、建築基礎に関しては1988年の設計法の改定から設計指針の中に設計法が記述されなくなった。現在では大学等の土木工学、建築学の教育においても木材に関する講義は行われていない。

しかしながら、木橋や河川構築物である木製ダム・沈床・水制工などでは量は少ないものの現在でも木材が活用されて来ている。これらに加えて、道路盛土、河川堤防、護岸などの軟弱地盤対策や道路の遮音壁、ガードレール、落石緩衝壁などの利用の可能性は大きく、一部実際の土木工事で用いられて来ている。これらの土木構造物のために要求される木材の品質、規格のグレードは様々である。本橋梁の場合には、使用木材に高い品質や高い精度の形状が要求され、また、ビジュアル的な良さも

要求される。ガードレールに用いた場合には、品質、形状、見た目の良さについては木橋ほど高いものは要求されないが取替の容易さが要求される。さらに、地盤改良材として用いた場合には、品質、形状、見た目の良さ、取替の容易さは重要ではなくなるが、大量に安定供給されることが要求される。森林は全国に分布しており、土木工事も全国に展開している。それぞれの品質・規格の要求に適合した木材を近隣地域より供給することは容易であると考えられる。さらに高品質や長尺物で利用した木材を低品質や短尺物で順次利用していくカスケード的な利用なども期待できる。

以上述べたように、木材は土木分野で利用できないのではなく、利用法を積極的に検討し、障害となっている腐朽などに対する技術を開発すれば、土木分野での利用は大幅に増大すると考えられる。

1.3 土木事業と地球環境問題

環境に対する産業イメージのアンケート調査⁶⁾によれば、CO₂を大量に放出し、かつエネルギーを消費している自動車、電力、ガス、石油産業などの環境への貢献イメージは逆に高い。これは、電気自動車の開発や風力発電などイメージ的な企業努力が社会にそれなりに評価されていることを示している。同じアンケートで、生物多様性や自然破壊に対する項目に対してもマイナスイメージの評価はあるもののプラスイメージの評価も多い。これに対し、建設産業ではマイナスイメージが高位ランキングされ、社会の評価は低い。

一方、大学の学科名の変遷を見ると、近年「土木」といった名称から環境をキーワードとする名称への移行が多くなっている⁷⁾。「土木」はどちらかと言うと「環境」を損う分野と一般に受け取られていたのに対し、「環境」と「社会基盤整備」の調和を計って行くことが新しい土木分野の方向性を打ち出しているものと考えられる。

土木学会が5年に一度作成している活動目標と行動計画に示される基本目標の5項目の一つは、「地球環境持続性に関する技術の確立」であり、この中で、1)環境目標・基準の設定、2)持続型社会の構築に資する技術の研究、3)地球温暖化緩和・適応技術の確立、4)環境評価技術の確立、を掲げている。土木分野にとって「環境」問題に積極的に貢献して行くことが21世紀での重要な課題となっている。

持続型社会の構築や地球温暖化緩和技術に対し、木材は大きな役割を果し得る材料だと考えられるが、土木分野の関係者の意識はまだ十分とはいえない。また、森林や木材関係者の多くは、土木分野で木材の活用が拡大するとは考えられていない現状がある。このような事が、「土木事業への間伐材利活用シンポジウム～日本森林学会、日本木材学会と共に森林保全と地球温暖化を考える～(2008.3.4)」におけるアンケート結果より伺い知ることができる。土木事業へ木材を利用すべきでないという回答した土木関係者がいたが、その理由は、「森林伐採に繋がり環境破壊となるから」、「木材は腐ったり虫に食われたりするから」、「材質、形状、寸法が均質でないから」、「設計法が不明確であるから」であった。森林・木材・環境分野からの参加者は、「木材利用は森林の活性化につながる」「木材は二酸化炭素を固定貯蔵する」「天然材料であり環境負荷の心配がない」など木材の土木分野での活用に肯定的な回答をした者が多かったが、土木分野の参加者でこのような回答を行った者は森林・木材・環境分野と比較し大幅に少なかった。このようなことから、木材活用に関し未だ土木技術者の意識の低さが理解できる。シンポジウムに参加後の意識の変化に対する問いでは、「木材利用が地球温暖化防止対策に貢献すること」「違法木材と合法木材があること」「国産木材を使用すべきであること」と回答した土木分野の参加者が多く、木材を土木分野に活用することの意義を土木分野に発信して行くことの重要性が示された。

1.4 学際的研究の進め

木材の土木分野での活用を拡大するためには、森林・木材・環境・土木分野の関係者の連携が不可欠であることは論をまたない。森林・林業分野からの供給能力と、土木分野で需要拡大および木材の流通サイクルによる環境評価などが調和的に行われなければならない。土木分野において木材利用を拡大するためには、軽量土木構造物への木杭基礎や地盤改良への活用、腐朽対策技術の開発、設計法の整備など多くの解決を要する課題がある。また、供給側においても大量の木材の安定供給や品質・規格の確保などの課題が数多く残されている。いかにして木材流通の好循環を生み出すかは森林・木材・土木・環境分野の関係者に課せられた課題で、今後分野横断的・学際的取り組みが必要である。

このような背景を受け、2007年9月より日本森林学会、日本木材学会、土木学会の3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 京都大学教授）」を発足させ研究を開始している。3分野の研究者が、環境貢献といった同一の視点を持ち、分野にまたがる課題を解決し、土木における木材の利用拡大を図るとというのが主たる目的である。さらに、2009年5月には、(社)土木学会に木材工学特別委員会が設置され先の横断的研究会と連携し研究を行っている。現在、構成員も80名程度の規模となり、資源ビジョンといった国の政策に関わるテーマから、それぞれ具体的な木材利用技術についての課題に取り組んでいる。研究に当たっては、種々の研究助成も受けて実施している。この横断的研究会および木材工学特別委員会が発展し、土木分野から、温室効果ガス排出削減など地球環境の回復に貢献が出来ることを期待している。

1.5 まとめ

以上、土木事業と木材との関わりを概観し、土木事業が今後進むべき一つの方向性を示した。これらを進めていくためには分野横断的・学際的取り組みが必要であり、現在進めている研究会を紹介した。今後このような活動がますます活発に行われることを期待したい。

参考文献

- 1) 日野幹夫：土を築き木を構えて，森北出版，pp.17-19，1994
- 2) 茅ヶ崎市教育委員会：国指定史跡旧相模川橋脚史跡整備に伴う確認調査概要報告書，2002.
- 3) 東京都教育文化財団・東京都埋蔵文化財センター：汐留遺跡，旧汐留貨物駅跡地内遺跡発掘調査概要 I，1995.3.31
- 4) 鹿児島県建設技術センター：石橋記念館，2000.8.
- 5) 外崎真理雄，今村祐嗣，石川芳治，平沢秀之，今泉裕治，熊本宏次，今井久，久保山裕史：土木における木材の利用－課題と展望－I，第114回生存圏シンポジウム，地球温暖化防止の観点からの土木における「木材」の利用，京都大学生存圏研究所，pp.30-36，2008.11.
- 6) 日経エコロジー：第9回消費者が抱く企業評価イメージ環境ブランド調査 2008，pp.115-121，2008.8.
- 7) 平野勝也：「土木工学科」はどこへいくのか，土木学会誌，Vol.90，No.7，pp.14-17，2005.

2. 土木における木材利用の可能性

2.1 木材利用の環境的意義と地中への利用（沼田淳紀）

2.1.1 はじめに

地球温暖化は地球規模で解決しなければならない最大の課題の一つと言え、あらゆる産業が英知を結集し、この課題の解決に取り組むべきである。「土木」は、「木」という字が含まれるが、現在では本体工事の材料としてはほとんど使用されていない。地球温暖化が深刻になった現在、地球温暖化防止といった観点から木材を建設材料として見直すべきだと考える。そこで、本章では、「土木における木材の利用の可能性」について、まず「木材利用の環境的意義と地中への利用」について述べ、次節で「木材の特性と木橋への利用」、最終節では「木材利用の波及効果と色々な利用技術」について述べる。

2.1.2 深刻な地球温暖化

IPCC 第 4 次評価報告書は、温暖化にはもはや疑う余地のないこと、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温上昇のほとんどは人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が非常に高い（90%以上）こと、世界平均気温を 2～3℃の上昇で安定化させるには今後 20～30 年の削減努力と投資が大きな影響を持つことなどを示している¹⁾。大気中の温室効果ガスの濃度は、産業革命以前は 280ppm 程度であったが現在は 380ppm 程度まで上昇し、温室効果ガスの人為的排出量（72 億 t-C）は、自然の吸収量（31 億 t-C）の約 2 倍であり、年間約 1.9ppm の増加をしているとされている²⁾。世界平均気温の上昇を 2℃程度に抑えるには温室効果ガスの濃度を 450ppm 程度に安定化させる必要がある。これには 2050 年における二酸化炭素排出量を 2000 年比 50～85%削減する必要がある。この排出量削減が少なければ世界平均気温の上昇はさらに大きくなり、動植物に甚大な影響を与える。2.2℃の上昇で、15～37%の生物種が絶滅すると予測されている。このように、地球温暖化は現在極めて深刻な状態にある。

一方、日本では 2050 年に想定されるサービス需要を満足しながら、二酸化炭素を 1990 年比で 70%削減できる技術的なポテンシャルが存在しているとも言われ³⁾、あらゆる産業で知恵を出し対策を進めることでこれを防止できる可能性がある。

地球温暖化防止対策を進める上で、地球温暖化の現状と将来予測とともに、地球温暖化による影響への適応策と、地球温暖化の緩和策が必要である。地球温暖化は既に進行しているものであり、自然災害の増加に対する影響の回避や低減といった適応策が必要であり、ここでの土木の役割は大きい。加えて、温室効果ガスの削減といった緩和策もそれ以上に重要である。適応策と緩和策は必ずしも二律背反するものではなく、両者を同時に行うことが理想的である。ここで述べる木材は、そのようなことを実現可能性にする材料の一つであると考えている。

2.1.3 地球温暖化防止策と木材利用の意義

(1) 京都議定書における森林の役割

初めに 2008 年より約束期間が開始された京都議定書における森林の位置付けを述べる。図-2.1.1 に日本の温室効果ガス排出量と削減策を示す。日本は、1990 年水準に対して 6%の温室効果ガス削減を約束している。しかしながら、1990 年以降の温室効果ガスはむしろ増加し、2007 年度では 9.0%の増加（2009.4.30 環境省発表、確定値）であった。これに対する目標達成方法の内訳は、排出削減 9.6%、森林吸収源対策 3.8%、京都メカニズム 1.6%となっている。

森林吸収源対策は、現存する森林による吸収を意味するのではなく、「新規植林」「再生林」「森林経営」された森林が対象であり、既に森林が造成されている日本では「森林経営」された森林が主な対象となる。「森林経営」とは、適切な森林施業（植栽、下刈、除伐・間伐などの行為）を意味している。しかしながら、現状では、手入れされない森林が多く、また、間伐によりせっかく長年育てた木材を得ても、運搬コスト、人手不足、手間の面で割にあわず間伐した木材が放置されるといった森林の荒廃が進んでいる。「森林・林業基本計画（2006年9月8日閣議決定）」によれば、2004年で1700万 m^3 である木材供給・利用量を2015年には2300万 m^3 に促進するとし、国産木材の新たな利用先を模索している。このような国産木材の利用拡大が森林吸収源対策ともなるわけである。

(2) 木材利用による地球温暖化防止対策効果

次に、地球温暖化防止対策に対する木材利用による効果を示す。木材利用は、省エネ効果と、エネルギー代替効果、炭素貯蔵効果が期待でき、更には森林の活性化による生物多様性の保全や、土砂災害防止、水源涵養、保健休養などの効果も期待できる⁴⁾。

省エネ効果とは、製造時に大量のエネルギーが必要な例えばセメントや鋼材に替えて、製造時にほとんどエネルギーを必要としない木材を使用することで、エネルギー消費の差分だけ温室効果ガス発生量を削減できる効果である。

エネルギー代替効果とは、化石燃料に替えて木材を利用することで、化石燃料消費を削減させる効果である。木材は、カーボンニュートラルな材料なので化石燃料に代替させる意義がある。この意味をもう少し詳しく述べる。図-2.1.2に炭素の循環と樹木の成長を模式的に示す。樹木は大気から二酸化炭素を吸収し、光合成により酸素を排出し炭素を樹木として体内に固定し成長する。樹種によっても様々だが、50年程度で樹木は大きく成長する。樹木が成長し大きくなった相当分大気から二酸化炭素を削減したこととなる。化石燃料を使わずに、このような固定化を可能にする方法は、植物や動物（珊瑚など）に頼るしかなく、特に、大きく成長する樹木の役割は大きい。この樹木は、そもそも大気中の二酸化炭素を吸収して成長したものであるため、燃焼し二酸化炭素を放出しても二酸化炭素が元の大気に戻るだけなので大気中の二酸化炭素の増加には結びつかない。このように排出される炭素量と吸収される炭素量が同じであることをカーボンニュートラルと言う。マクロ的には、健全な森林経営を続け、森林全体の炭素蓄積増分量以内で木材をエネルギーとして使用する限り、大気中の二酸

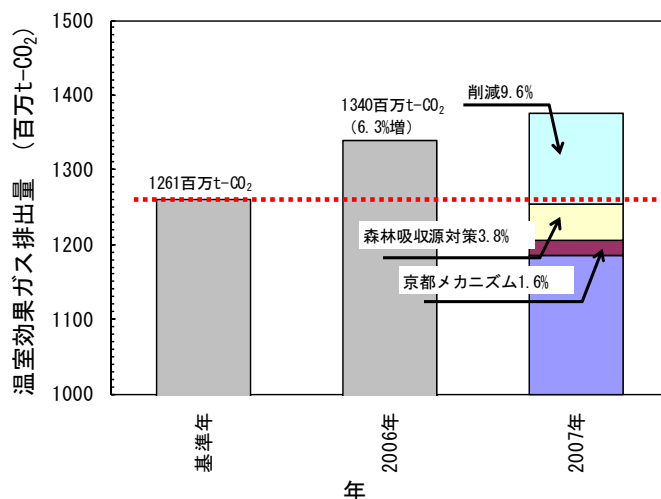


図-2.1.1 日本の温室効果ガス排出量と削減策 (2009.4.30 環境省発表、確定値より)

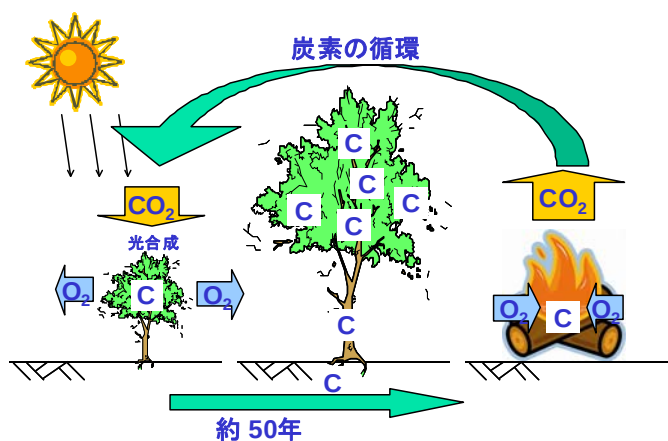


図-2.1.2 炭素の循環と樹木の成長

化炭素を増加させることなくほぼ無限にエネルギーを使用可能である。

炭素貯蔵効果とは、木材を長期利用するなどして、木材のまま貯蔵することにより、大気中の二酸化炭素を削減させる効果である。図-2.1.2に示したように、植林を増やせば樹木が成長しその分大気中から二酸化炭素を削減することができる。しかし、成長する樹木を放置し続ければ樹木の炭素固定量と枝葉が落ち朽ちて発生する二酸化炭素量は平衡してしまう。原生林やジャングルは二酸化炭素を大量に吸収しているように思われるが、このような平衡状態に

あり、大気中から二酸化炭素を削減することにはほとんど寄与していない。勿論これらの現存の森林やジャングルから、樹木を伐採し燃焼すれば二酸化炭素の排出となる。植林をしなければ、化石燃料を掘り出して燃焼させることと同じである。化石燃料も森林も大きな資源であることにはかわりはないが、森林は短期間にかつ繰返し再生できることがポイントである。したがって、現在の森林やジャングルを減らすことなく、新しく植林し樹木を成長させ、樹木全体の体積を増加させることが重要である。

(3) 人間生活の中への新規造林

さらに、図-2.1.2に示された炭素循環の系から、系外に木材を取り出し炭素を貯蔵固定すれば、地球全体の木材量がさらに増加したこととなり、その相当分大気から二酸化炭素を削減したこととなる。樹木から木材に変わり、これを使用すれば、人間生活の中で新たな森林が築かれることと同じである。日本のように既に国土の2/3が森林で覆われている国では、植林を継続しながらも、樹木を計画的に伐採し長期利用し、森林以外の人間生活の中における木材体積を増加させて行くことも有効な方法である。

エネルギー集約度の高い鉄やコンクリートに替えて木材を長期間使用し、使用後リサイクル利用し、最後に燃料として使用するといったカスケード利用を行えば、炭素貯蔵効果、省エネ効果、エネルギー代替効果を十分使い、相当量の二酸化炭素削減効果を得ることが期待できる。

しかしながら木材は、現在の土木本工事において積極的に使用することはほぼ皆無となってしまった。「土木」とは、中国の武帝の時代に表された書物「淮南子（えなんじ）」に示される「築土構木」という言葉がそもそも語源とされ⁵⁾、土木事業において木材との関わりの歴史が長かったことが窺われる。現在は、建設資材の主役は、コンクリートや鉄である。しかしながら、地球温暖化防止対策の視点から、過去に多く使われていた木材を将来に向けて見直すべき時であると考ええる。

このような観点に立ち、筆者は将来の土木における材料のあり方として図-2.1.3を考えている⁶⁾。江戸時代は、持続可能な循環型社会を考える上で示唆に富んでいた⁷⁾。土木においてもこの時代の材料は、土、石、木材といった天然材料が主体であったはずである。木材も1950年代頃まではよく使われていたようだが、その後、特に高度経済成長を通じ大量のセメント、鉄、人工化学材料が使用されるようになった。これにより大きな発展も遂げたが、見返りとして多くの環境問題が生じるようになり、特に、地球温暖化問題は深刻になった。これを踏まえ、将来は土、石、木材といった天然材料を

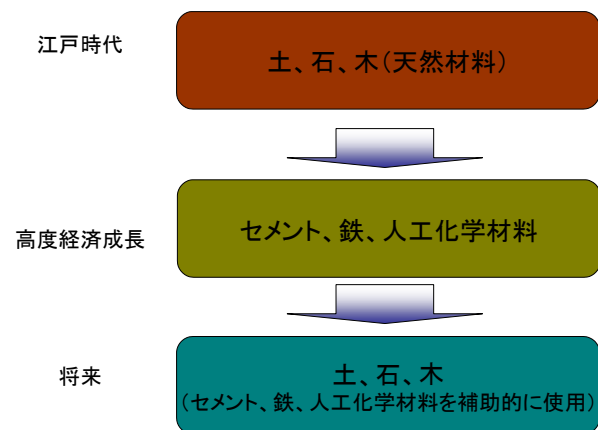


図-2.1.3 土木における将来における材料のあり方

再考し、可能な限りこれらを使用して行くと言った発想が必要であると考えている。勿論、全ての材料を土、石、木材といった天然材料に替えることは不可能であるが、このような天然材料を主に考え、使用できない場合や箇所に上手くセメント、鉄、人工化学材料などを使用してはどうかと考える。土木構造物には、このような考えが適用しにくいものが多いように思われるが、少なくともまず土俵に載せて考えてみる必要があるのではないだろうか。

2.1.4 木材に関する意識調査結果

(1) 調査の概要

このような土木における木材利用について、意識調査を行い興味ある結果が得られているので紹介する。

2008年3月4日に、土木学会にて「土木事業への間伐材利活用シンポジウム～日本森林学会、日本木材学会と共に森林保全と地球温暖化を考える～」が開催された⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。このシンポジウムでは、地球温暖化防止対策や森林機能の保全・回復のために国産木材の利用拡大が望まれることから、これに対する土木分野での可能性について議論を行ったもので、3学会の代表者から木材利用に関する基調講演が行われた後に、土木学会の委員会から間伐材利用に関する報告があり、最後に林野庁および国土交通省の行政担当者、研究機関、森林組合、NPO法人、および高等専門学校の方によるパネルディスカッションが行われた。意識調査は、このときの参加者を対象に実施されたものである。当シンポジウムは、講師を含め126名（内3名女性）が参加された。アンケートは、参加者のほぼ全員に配付され、75名からの回答があり、回収率は60%であった。ただし、シンポジウムの内容から分かるように、土木事業への木材利活用に感心の高いと考えられる方を母集団としている点を考慮する必要がある。回答者の内訳は、一般5%、環境関連7%、林業関連4%、木材関連17%、土木関連67%である。

(2) 土木事業への木材利用について

図-2.1.4と図-2.1.5は、「Q4：現在土木事業で木材がどのように使われていると考えますか？」と「Q5：土木事業への木材利用についてどのように考えていますか？」を尋ねたものである。それぞれは、環境・森林・木材関係者と、土木関係者に分けて示した。Q4の土木事業における現在の木材の利用状況に関する問いでは、①と②の「使用されていない」が、いずれも半分以上を占めた。「④稀に使用されている」は、環境・森林・木材関係者で42%、土木関係者では32%であった。一方、「⑤かなり利用されている」は、土木関係者は10%であるのに対し、環境・森林・木材関係者で0%といった相違があり、環境・森林・木材関係者には土木で木材が使用されているといった認識がな

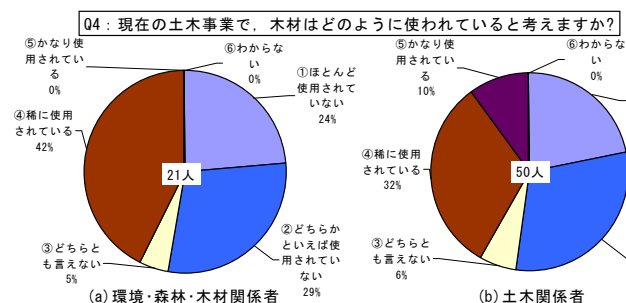


図-2.1.4 Q4：現在の土木事業で、木材はどのように使われていると考えますか？

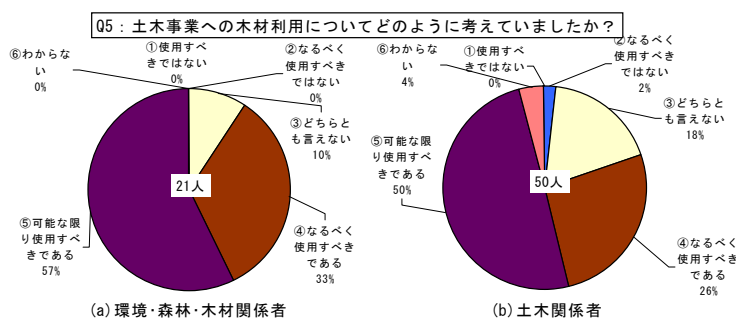


図-2.1.5 Q5：土木事業への木材利用についてどのように考えていましたか？

いことがわかる。

図-2.1.5 に示した土木事業への木材利用に対する考えでは、全体の81%が④または⑤の「使用すべきである」であり、②③⑥の「使用すべきではない」または「わからない」は19%で僅かであった。環境・森林・木材関係者では90%の方が、④⑤の「使用すべきである」であるのに対し、土木関係者ではこれが76%とやや低く、②③⑥は24%と多くなり、そもそも木材に対する意識の高い参加者が多かったことを考慮すると、一般的には「使用すべきである」はさらに低いものと推測される。

(3) 木材利用に対する否定的と肯定的な理由

図-2.1.6 は、Q5 で①②③と答えた土木事業における木材利用に否定的な考えを持つ回答者のその理由である。図は、環境・森林・木材関係者と土木関係者とを分けて示した。数は11人と少ないので一般性にはやや欠けるが、土木関係者が木材利用に否定的な理由として、「①森林伐採に繋がり環境破壊になるから」が50%以上を占め、「②木材は腐ったり、虫に食われたりするから」が約35%、「③材質、形状、寸法が均質でないから」と「⑩設計書類などに記述がないから」がそれぞれ約25%であった。前述したように、①については木材利用に対する誤解が多いと考えられ、木材利用を考える上で、今後このような誤解の払拭が課題の一つであると言える。また、木材の腐朽や品質に対する不信や設計

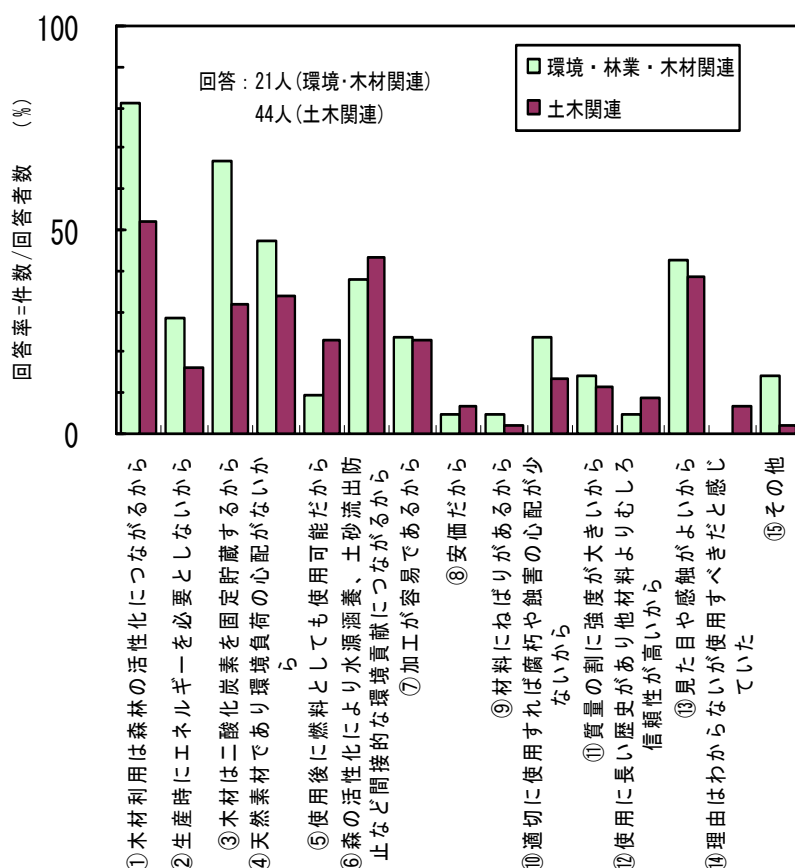


図-2.1.6 Q7 :「Q5 で③～⑤とお答えの方」にお伺いします。なぜ、土木事業に木材を使用すべきだとお考えでしたか（複数回答可）？

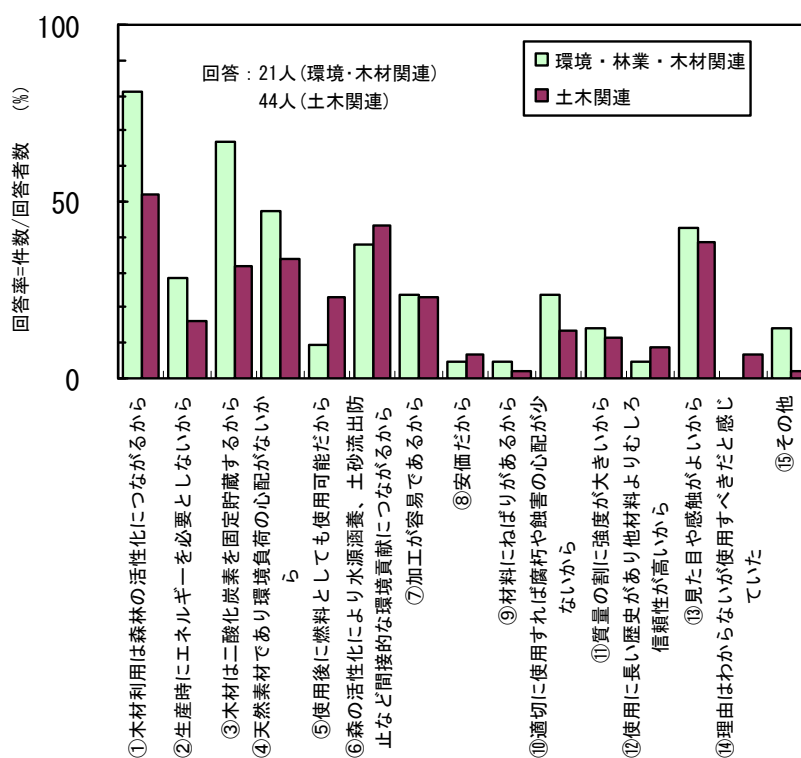


図-2.1.7 Q7 :「Q5 で③～⑤とお答えの方」にお伺いします。なぜ、土木事業に木材を使用すべきだとお考えでしたか（複数回答可）？

書の不足も多く、不信に対する具体的な解決策の提示や、木材利用に対する設計書などの整備も課題となっていることがわかる。

図-2.1.7 は逆に、Q5 で③④⑤と答えた土木事業における木材利用に積極的な考えを持つ回答者のその理由である。両関係者で、「⑥森の活性化により水源涵養、土砂流出防止など間接的な環境貢献につながるから」、「⑦加工が容易であるから」「⑬見た目や感触がよいから」ではほぼ同じ傾向を示したが、環境・森林・木材関係者は「①木材利用は森林の活性化につながるから」「②生産時にエネルギーを必要としないから」「③木材は二酸化炭素を固定貯蔵するから」「④天然素材であり環境負荷の心配がないから」を土木関係者より多く理由としてあげ、逆にこのような認識が土木関係者にはまだ十分には浸透していないことがわかり、一般の土木関係者ではさらにこの認識が低いと考えられる。

(4) 木材利用に関する教育の必要性について

図-2.1.8 は、シンポジウム参加による認識の変化を尋ねたものである。環境・森林・木材関係者は、

「③考え方が少し変わった」が 10%で、「①参加前と何らかわらない」「②以前と考え方は変わらないが新しい知識が増えた」が 90%であり、ほとんど認識は変化していないといえる。一方、土木関係者は、「③考えが少し変わった」「④考え方が全く変わった」が 36%であり、1/3 程度の土木関係者が、木材利用に関する話を聞いて認識が変わり、環境・森林・木材関係者の認識に一步近づいたものと考えられる。

図-2.1.9 は、認識のどのような点に変化があったかを知るために、Q8 で「②以前と考え方は変わらないが新しい知識が増えた」「③考えが少し変わった」「④考え方が全く変わった」と回答し認識に変化のあったと考えられる方にその内容を尋ねたものである。関係者間の違いが特徴的である。環境・森林・木材関係者は、「④土木事業においても昔は木材を利用していたこと」と、「⑩土木事業におい

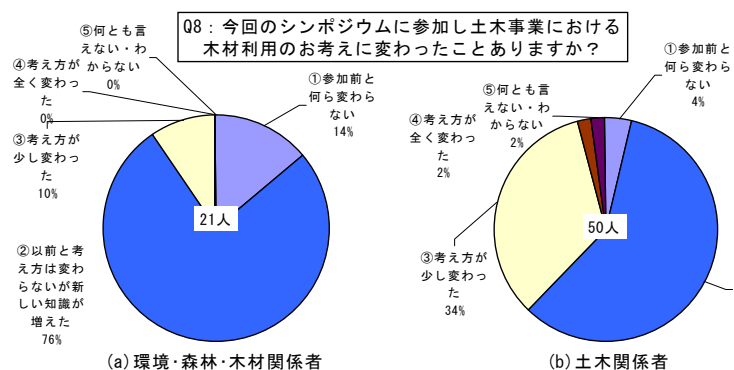


図-2.1.8 Q8: 今回のシンポジウムに参加し土木事業における木材利用のお考えに変わったことがありますか？

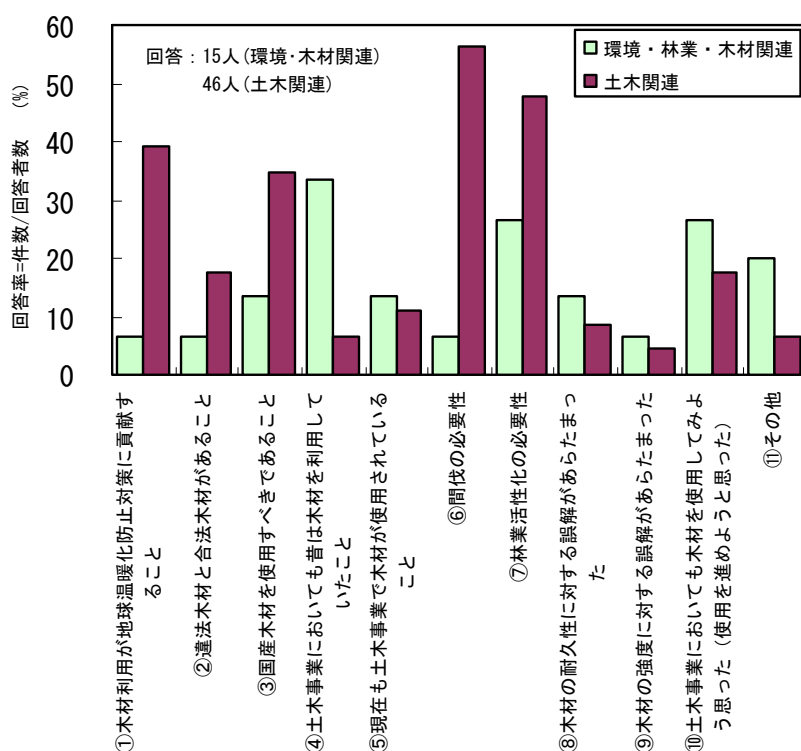


図-2.1.9 Q9: 「Q8 で②～④とお答えの方」にお伺いします。土木事業における木材利用についてどのような点が変わりましたか（複数回答可）？

でも木材を使用してみようと思った（使用を進めようと思った）」で土木関係者より多く、土木関係者との交流の中で、図-2.1.4に示した土木において木材を利用していないと思っていた認識が埋め合わされたものと考えられる。一方、土木関係者は、「①木材利用が地球温暖化防止対策に貢献すること」「②違法伐採と合法伐採があること」「③国産木材を使用すべきであること」「⑥間伐の必要性」「⑦林業活性化の必要性」が環境・森林・木材関係者よりも圧倒的に多く、このような林業や木材における基本的な認識が埋め合わされたことがわかる。

以上より、土木における木材利用を考える上で、①木材利用に対する理解不足による誤解の払拭、②木材の腐朽や品質に対する不信を解消する技術開発、③使用にあたっての具体的なマニュアルや設計書などの整備が必要であることがわかった。また、木材利用についての認識については、木材需要側である土木関係者と供給側の環境・森林・木材関係者では認識に違いが認められ、環境・森林・木材関係者へは土木で木材を使っているというアピールが必要であると考え。一方、土木関係者には、林業や木材の基本的な知識やその環境的意義の教育が必要であることがわかった。現在、大学の土木工学科関連学科（現在、「土木工学科」という名称はもはや絶滅危惧種となりつつあるそうである¹¹⁾）では、筆者自身もそうであるが、木材についてはほとんど学ばなくなっており、このような教育について見直すべきだと考える。さらに、関係者間の認識の差を少なくし、効率的な研究や技術開発、政策提言を進める上で、環境、森林、木材、土木といった学際的な研究が必要であると考え。

2.1.5 地中への木材利用の可能性と意義

(1) 1964年新潟地震における事例¹²⁾

ここでは具体的な木材利用の一例として地中への利用の可能性とその意義について述べる。

まず、1964年新潟地震における事例を紹介する¹²⁾。この地震は、1964年（昭和39年）6月16日13時01分に発生した。新潟県沖の深さ40kmを震源とし、マグニチュードは7.5、最大震度はVIであった¹³⁾。この地震による被害は、死者26名、住宅の被害は、全壊1,960棟、半壊6,640棟、床上浸水9,474棟、床下浸水5,823棟、一部損壊67,825棟である¹³⁾。この地震では液状化による地表変位に基づく被害がほとんどで、振動による被害が少なかったことが特徴である¹⁴⁾。

斉藤¹⁵⁾、鉄道技術研究報告¹⁶⁾、および、地震当時の国鉄職員へのヒアリング結果によれば、当時の新潟駅とその地震による被害は以下の通りである。

当時の新潟駅を図-2.1.10に示す。新潟駅は、主にRC造地下1階地上4階建ての本屋と、地上6階建ての支社からなる。これらの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口22.5cm長さ7.5m（杭間隔約1.5m、末口部での改良率（杭断面積/改良範囲面積）=17.7%）の松丸太基礎、コンコース上の連絡建屋および支社が直径30cm長さ6mのPCコンクリート杭（2本継ぎ、杭間隔不明）であった。基礎の木杭は1956～1957年（昭和32～33年）頃に打設され、新潟駅本屋は1958年（昭和33年）に開業した。地震当時の地下水位は、くみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったためちょうど規制ができ、GL-0.5m程度であった。

地震後新潟駅では、ホームへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には液状化による噴砂が

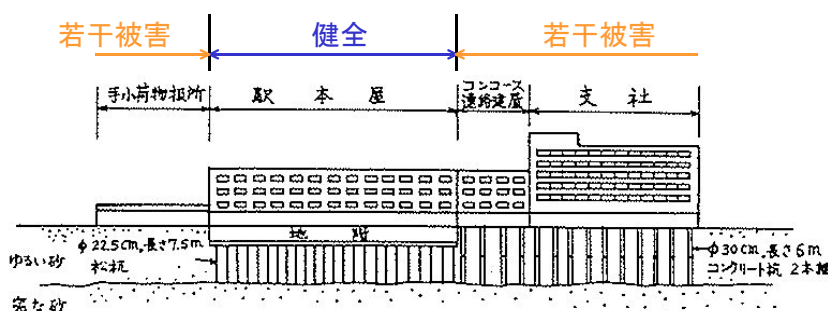


図-2.1.10 新潟駅正面建屋（文献15）に加筆

多数確認された。液状化により、車庫や事務室などは沈下傾斜し、ホームは約 45cm、駅前広場も全体的におおよそ 40～50cm 沈下した。さらに、支社は不同沈下が 10cm 程度生じ駅前広場側に 0.55 度、右側に 0.40 度傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、木杭で支えられた本屋は健全であった。

このように本屋が健全であったのは、当時では極めて珍しいことであるが、木杭により液状化対策を施した結果である。斉藤¹⁵⁾は、木杭基礎について次のように述べている、「・・・流砂現象（今で言う「液状化現象」）のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12m の支持層までゆるい砂層を締固めると共に、建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし、末口 22.5cm、長さ 7.5m の松丸太 745 本（1.5m 間隔程度）を打設した。・・・」なお、当時地盤を締固める適用実験も行われたが満足な結果が得られなかったもので、設計としては完全な支持杭基礎として設計し、実際には数多くの木杭が打設された¹⁶⁾。一方、支社側は、支持杭の本数としては設計上十分であったかもしれないが、本屋と比較すると杭本数は遥かに少なく杭間地盤の締固め効果が期待できなく、この差が本屋と支社の被害の差になったのであろうとされている¹⁶⁾。

本屋は、地震後被害がなかったことから、2009 年の現在もなお当時の木杭基礎のまま使用されている。1956 年頃に液状化対策として設計され打設された木杭が、1964 年新潟地震において液状化対策としての機能を果たし、杭打設後 50 年以上経過後も基礎としての機能を維持しているといえる。

ただし、木杭打設が液状化対策として設計の中で見込まれていたのであるが、木杭打設そのものが液状化発生を低減したのか、地盤は液状化したが杭としての機能が失われず建屋の被害がなかったのか、さらには、地下室があったため構造物としての安定性が高まり地盤が液状化し支持杭の機能も低下したが構造物が傾斜する被害を低減したのかなど、液状化対策としてのメカニズムは現段階では必ずしも明らかではなく、今後地盤工学的な検討が必要である。一方、木材の耐久性の観点から言えば、木材が液状化対策として構造物基礎に取り入れられ、それが液状化被害を免れ 50 年以上も機能していることから、少なくとも体積を保持することが重要である地盤を密にする液状化対策材料として、木材は十分使用可能だと言える。

(2) 地中における木材利用の意義

表-2.1.1 は、木材の長所と短所をまとめたものである。構造物を考えたときに短所で特に信頼性を低くしているのは、腐朽や虫害である。しかし、腐朽も虫害も地中の地下水位以下では進行しないとあってよい。そこで、1964 年新潟地震の事例のような液状化対策や軟弱粘性土地盤対策に木材を使用した場合には、地下水位が浅い地盤が対象となるので、腐朽や虫害の心配は基本的には無視できることとなる。これに加えて、木材を地中の地下水位以下で加工工程の少ない丸太のまま用いれば、短所であった強度が低いことや乾燥による変形、可燃性、加工工程が増えることによる使用エネルギーの増加も無視できるようになり、価格も低く抑えられる。さらに、支持力に期待せず、密度増加や地盤の強度増加のみを期待した液状化対策や地盤改良を想定すると、木材の強度や形状、品質のばらつきもほとんど無視でき、木材の短所をかなり少なくすることが可能に

表-2.1.1 木材の長所短所

	長所	短所
力学的特徴	・軽い割に強度がある ・弾性材料で粘りがある	・コンクリートや鉄に比べ強度が低い ・乾燥により変形する
一般的な特徴	・放置すれば自然に戻る ・燃料として利用できる ・見た目や感触がよい ・生産時のエネルギーが少ない ・炭素を貯蔵できる ・環境負荷の心配が少ない ・間接的な環境効果もある ・加工が容易である ・熱伝導率が低い ・利活用の歴史がある ・国内のほぼ全域で供給ができる	・腐朽や虫害がある ・可燃性である ・形状のばらつきが大きい ・品質のばらつきが大きい ・長大材を得にくい ・コンクリートや鉄のような均質で大きな構造物を作れない ・現在は供給が不安定である ・加工工程が増えれば高価になる

なると考えられる。一部地下水位以浅における腐朽対策などの若干の課題も残るが、現在これらに対する研究も進められており、このような地中における使用方法は木材の特性を活かした有効な使用方法の一つであると考ええる。

図-2.1.11 は、福井県足羽川に架けられていた旧幸橋の橋脚を撤去したときの木杭頭部を写したものである¹⁷⁾。地中の地下水位以下にあったこれらの木杭は極めて健全で、設置されていた 59 年間、1948 年福井地震 (M7.1) にも耐えて基礎としての機能を果たしてきたことが分かっている¹⁷⁾。このような事例は、東京の旧丸ビル



図-2.1.11 橋脚を取り除いた木杭頭部の様子¹⁷⁾

ルの木杭基礎が 76 年経過しているにもかかわらず健全であった事例¹⁸⁾など多数ある。このように、長期間健全性を保つのは前述の通り地中の特に地下水位以下では腐朽が進行しないからであるが、このように長期健全性を保つことにより、長期間炭素を固定していたことを意味する。ちなみに旧幸橋では木杭により約 24.3t-C (二酸化炭素 89.1t-CO₂ 相当, ガソリン 38.6kl 相当) の炭素貯蔵があったことが推計されている¹⁷⁾。エネルギー集約度の高い鋼管杭やセメントを用いたコンクリート杭から、製造時エネルギーの少ない木杭に替えることにより省エネ効果があるが、さらにこのような炭素貯蔵効果も大きく、工事そのものが環境対策として成り得る可能性もあることがわかる。

2.1.6 まとめ

以上、地球温暖化は危機的な状況で、あらゆる業界で知恵を絞る必要があること、二酸化炭素削減には木材を使用することが有効な手段であること、しかしながら土木関係者の中には木材利用に対する誤解や認識不足がみられこれを是正する必要があること、このような背景もあり学際的な研究も進みつつある、そして、具体的な木材利用の可能性として地中での木材利用の可能性と意義を示した。

謝辞：本稿作成にあたり、福井県雪対策・建設技術研究所の久保光氏、土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会の各位に御協力戴いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1)環境省：IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書概要，2007.12.17
- 2)環境省：STOP THE 温暖化 2008
- 3)国立環境研究所，京都大学，立命館大学，みずほ情報総研：2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討，2008.6（改訂）
- 4)外崎真理雄：木材資源循環と二酸化炭素削減，第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集，ST17-1，2008.3.
- 5)日野幹夫："土を築き木を構えて"，森北出版，pp.17-19，1994.
- 6)沼田淳紀，上杉章雄：地球温暖化対策のための木材利用の可能性について，第 14 回地球環境シンポジウム，土木学会，pp.97-102，2006.8.

- 7)環境省：平成 20 年版環境・循環型社会白書
- 8)沼田淳紀：3 学会（日本森林学会・日本木材学会・土木学会）連携によるシンポジウムを開催，土木学会誌，Vol.93，No.5，p.83，2008.5.
- 9)桃原郁夫：「土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会」の紹介，ウッドイエンス・メールマガジン，日本木材学会，No.008，<http://www.jwrs.org/woodience/mm008/momohara.pdf>，2008.7.14)
- 10)工藤康夫：土木事業への間伐材利活用シンポジウムに参加して，木材工業，Vol.63，No.8，pp.374-377，2008.
- 11)平野勝也：「土木工学科」はどこへいくのか，土木学会誌，Vol.90，No.7，pp.14-15，2005.7.
- 12)沼田淳紀，吉田雅穂，濱田政則：1964 年新潟地震における木材による液状化対策事例，木材学会誌，Vol.55，No.5，pp.305-315，2009.
- 13)宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，pp.350-356，1996.8.
- 14)土質工学会：土と基礎，Vol.12，No.8，pp.3-20，1964.
- 15)斉藤迪孝：新潟地震について，第 7 回地震工学研究発表会講演概要，pp.39-43，1964.10.
- 16)鉄道技術研究所：新潟地震調査報告，鉄道技術研究所報告，No.448，1964.11.
- 17)正田大輔，沼田淳紀，久保光，吉田雅穂，河端俊典，本山寛：足羽川幸橋木杭基礎の健全性評価と地球温暖化防止対策，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008 論文集，地盤工学会関西支部，pp.125-130，2008.12.
- 18)山田周平，稲田達夫，小川一郎，田口典生，永井香織，真島正人：丸ノ内ビルディング（旧丸ビル）の構造調査その 8 松杭の鉛直載荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1069-1070，2000.9.

2.2 木材の特性と木橋への利用（渡辺浩）

2.2.1 はじめに

2.1 では土木分野における木材の利用の可能性を検討する理由として下記を挙げている。

- ・地球温暖化は極めて深刻な状況にあり、早急な対策が求められている。
- ・その対策のひとつとして期待されている森林吸収源は、それが健全に森林経営なされているものでなければならない。
- ・樹木は大気中の二酸化炭素を固定することで成長するため生産時のエネルギー消費が少ない。またそれ自身に炭素が固定されるため実質の排出量はマイナスになる。
- ・その木材を構造物として利用すると炭素をその供用期間中固定し続けることができる。
- ・土木事業になるべく木材を利用するようにすればそれ自身で地球温暖化対策に貢献できる。

しかしながら、現状ではその利用は進んではいない。その理由として以下のような技術者の意識の問題を挙げている。

- ・土木関係者には木材を利用すると森林が破壊されると誤解されている。また強度性能やばらつき、耐久性に対する不安が根強く、これらに対する最新技術はほとんど知られていない。
- ・森林・木材関係者には木材利用の意義は認識されているが、土木分野が木材に対して何を求めているかがあまり知られていない。

本節は以上の観点から、土木関係者が木材をよりよく利用していくための基礎的知識と、それを活かした木橋の事例について紹介する。

2.2.2 天然材料であるということ

現在建設材料の主流となっている鋼材やコンクリートは人工材料である。当然のことながらその性質を自由に決められる上、ばらつきも小さい。これに対して木材は樹木をわずかな加工により利用する天然材料で、製造時の環境負荷が小さい反面、素材そのものの特徴も引き継いでいる。

木材よりも鋼材やコンクリートが好まれるようになったのは、この木材ならではの特徴が嫌われたことも大きかったと考えられる。例えば鋼材やコンクリートでは当然のことながら自ら設定した強度の材料を必要な分だけ入手することができる。これに対して原木に依存する木材の強度は一定ではない。加工に手間をかければ人工材料に近づけることは可能であるが、そのためには費用やエネルギーを必要とする。使用量が大量である土木分野では特に、低環境負荷である木材のメリットを弱めることになる。

以上のことから、木材の使い方の基本は、その特徴を活かすような使い方をするということであるといえる。

2.2.3 木材への不安を払拭するために

(1) ばらつきの原因と対策

土木分野では安価で大量に入手できるスギやヒノキ、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、近年では公共工事において地域産材、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。つまり〇〇県産のスギといっても様々な性質の原木が存在する。

表-2.2.1 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¹⁾ 機械等級製材 E70** 道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説²⁾, 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〕³⁾表-2.2.2 スギ機械等級製材の材料特性¹⁾

等級	E50	E70	E90	E110	E130	E150
圧縮許容応力度 (N/mm ²)	9.4	7.8	9.4	10.8	12.4	13.8
引張許容応力度 (N/mm ²)	4.8	5.8	7.0	8.2	9.2	10.4
曲げ許容応力度 (N/mm ²)	8.0	9.8	11.6	13.6	15.4	17.2
ヤング係数 (kN/mm ²)	4.9	6.9	8.8	10.8	12.7	14.7

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い。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とになる。

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。このことは生物由来の天然材料と考えれば不思議なことではないが、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。利用する側としてはばらつきは小さい方がよい。このため従来から目視による選別が行われてきたが、精度はあまり高くなかった。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と呼ばれる方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、性質が示された製材が大量に流通するようになっている。

このように、木材の個々の性質はばらついてはいるが、どの程度ばらついているか、その材の強度はどのくらいなのかはわかるようになっている。鋼材やコンクリートにもグレードがあるように、木材の利用においても適切なグレードを利用すると考えれば違和感なく利用できるはずである。

(2) 木材の強度

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-2.2.1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。

ここでスギは国産の構造用木材の代表格であるが、決して強い樹種ではない。にもかかわらず許容応力度はコンクリートの圧縮応力度とほぼ同等である。また引張力にも抵抗できることから鉄筋も不要で、曲げ部材でも有利である。さらに、非常に軽いため比強度レベルでは鋼材にも匹敵する性能を有している。すなわち木構造物は概して軽量である。このように木材は建設材料として決して遜色ない性能を有しているといえる。これに対してヤング係数は小さいため、単に応力設計のみではたわみや揺れやすい構造になる。またせん断力に比較的弱いという特徴も有している。

スギの機械等級区分は表-2.2.2のように規定されている。表-2.2.1の木材にはこのE70を例示し

ている。実測されたそれぞれのヤング係数をもとに、この表から強度を求めることができる。ここで重要なのは区分法や結果ではなく、「強度性能が保証されている」ことである。機械等級区分材や後述の集成材により、木構造物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ようになった。

ただし、以上で述べた木材の強度は材の長手方向のものである。詳細は割愛するが木材が軽くて強いのはほとんどの繊維が長手方向に配置されているためである。このため木材は極端な異方性を有しており、断面方向の強度は長手方向の 1/10 程度しかない⁴⁾。通常加力方向と長手方向は一致するので実用上はそれほど問題ではないが、設計においては留意が必要である。

以上のことから、木材は若干の留意点はあるが、軽くて強いという建設材料としてはすばらしい性質を有している。このような特徴を活かすような設計や施工が望まれている。

(3) 木材の劣化

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によるものであろう。木材を劣化させる主な要因のひとつはシロアリによる食害で、暗所を好むため住宅の床下で被害が多く見られる。もうひとつは木材腐朽菌によるもので、土木構造物のように屋外で使用される構造物ではこちらが問題になることが多い。これらはいずれも鋼やコンクリートにはない劣化で、生物劣化と呼ばれている⁵⁾。

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早い。その反面、使用環境が適切であれば伝統木造建築物の例を見てもわかるように 100 年のオーダーで使用し続けることができる。しかしながら、常に風雨に晒される土木構造物では、宿命的に腐朽に対する環境は厳しい。

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。構造物で工夫により避けることができるのは水分のみなので、木構造物の耐久性向上策は雨水対策であるといえる。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写真-2.2.1 のように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することができる。

腐朽しやすさは樹種により異なる。例えばヒノキは耐朽性が高い。スギも言われるほどに悪くはない。一方で誤解が多いがマツは耐朽性に劣る。またこれにも個体差や部位による差がある。

木材は本来ある程度の耐久性を有しているが、土木構造物としての使用環境は過酷であるため、耐久性向上策はこれらの工夫と合わせて後述の防腐処理が行われる。

2.2.4 さらに上手に活用するための知識

(1) 集成材とは

集成材とは一旦挽き板（ラミナ）に加工した上で接着剤を用いて積層・再構成した木部材のことである。ラミナの段階で欠点が除去されグレーディングがなされるため、製材より強度がアップし、ばらつきも抑えられる。また外層に強いラミナを配置して高性能な曲げ部材を製作することも可能である。割れや狂いが生じにくいという利点もある⁴⁾。

接着剤を使用しているため、その強度や耐久性に対する不安を耳にすることがあるが、破壊試験で接着層が破壊することはなく、屋外用の接着剤を使用すれば構造物の耐用年数以上の耐久性が保証できる。

集成材の最大のメリットは製材では不可能な長尺かつ大断面の部材を自由に製作できることである。小径材を活用できるため効率的な木材利用が可能であり、大断面部材による後述のような巨大な木橋も可能になっている。



写真-2.2.1 木口からの腐朽に配慮した例
(錦帯橋)



写真-2.2.2 機械等級区分材のヤング係数と
含水率の表示

(2) 乾燥の重要性

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 倍になっているものもある。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割れや反りが生じる。このため、割れや反りの生じ方には規則性がある。また、抑える方法もある。

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。

割れやそりはそれ自体好ましくないが、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。一般に機械等級区分材では写真-2.2.2 のようにヤング係数とともに出荷時の含水率が示されている。長く安心して使用するためにも、必ず乾燥材を利用したい。

(3) 素材の耐久性を活かす

スギの丸太の断面はどれも写真-2.2.3 のように真ん中が赤く、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⁶⁾。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。この性質は有効な防腐剤がなかった時代には主要部材には心材のみを用いる等上手に利用されてきた。丸太で表面に見えるのは必ず辺材である。このため相当に劣化しているような丸太でも内部は健全であることも少なからずある。

ただし、辺材が心材化するのは 10~15 年後であるため写真-2.2.4 のように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。以上のことから木材の屋外使用では防腐処理が不可欠である。



写真-2.2.3 スギ丸太の断面



写真-2.2.4 辺材部のみが腐朽した
大断面のスギ丸太

(4) 防腐処理

木材は元来ある程度の耐久性を備えているが、構造物として所定の耐用年数を確保するには、やはり防腐処理が必要になる。防腐剤には以前は強力なものが使用されてきたが、最近では環境面に配慮して低毒性のもの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塗布面付近に限られるため、主に表面保護と美装のためと考えた方がよい。屋外用としては、表面をコートする造膜型よりも内部に染みこむ含浸型のものが一般的である⁷⁾。これは、木材は使用中にも無数の割れが発生するため、この点は空気との接触の遮断が目的である鋼材の塗装とは全く異なる。

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一般的である。集成材ではラミナの時点で処理を行うことにより処理を確実なものにすることができる。

なお、加圧注入処理の前に材を十分に乾燥させなければ防腐剤は内部に浸透しない。これも乾燥材の利用が推奨される理由のひとつである。特に防腐剤は腐朽しやすい辺材部に浸透してほしいが、辺材は元の含水率も高いため注入不良が起こりやすい。確実な注入処理とそのための時間が確保されることが望まれる。

(5) 資源への配慮

天然材料である木材は入手性も鋼材やコンクリートと大きく異なる。例えばスギ製材の機械等級区分材には表-2.2.2のような規格があるが、実際には低強度のものが大半である。特に温暖な地域ではその傾向が強い。もし設計で高強度のものを大量に要求すると入手できないか利用できない材が大量に発生することになる。また短期間に大量を入手するのが困難であることもある。このため工期が不足して乾燥不良、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。これらも木材ならではの事情であるが、知らなければコストアップや早期の劣化の原因となる。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。

(6) 弱点を利点に

木材は樹木である頃の合理性から強くて軽いが、そのため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有効な接合法が存在しない。ボルトやドリフトピンによる接合が一般的であるが、接合の効率は半分程度でめりこみやがたつきが生じやすいためである。また接合部は部材が重なる上、木口部分にもあたるため、耐久性の弱点にもなりやすい。

このように木構造物にとって弱点ともいえる接合部であるが、有効に一体化できないという点を逆から見れば、供用中に点検や劣化部材のみを交換することが容易であることがわかる。これは何も新しい考えではなく、古来より木橋等の木構造物はこれを活用しながら最小限のコストと手間で守られてきた。

これは木構造物ならではの利点ともいえるが、維持管理そのものがおざなりになっている現在では部材レベルの交換がほとんど不可能な木構造物も多く見られるなど、活かされているとは言えない状況である。維持管理費を抑え長期に安心して供用するためにも、このことに留意いただきたい。

2.2.5 木橋の事例

(1) かつての木橋と今の木橋

日本では古来より多数の木橋が架けられてきた。これは、森林資源に恵まれた日本では木材は容易に入手でき、また性能と価格のバランスも良好な建設材料であったからに他ならない。それらの木橋はある時期を境にほぼ絶滅してしまっていたが、近年再び木橋がかけられるようになっている。そこには環境問題やアメニティといった現代ならではの背景もあるが、最大の理由は木材利用技術の向上であり、旧来の木橋とは一線を画する新しい概念の木橋が多数かけられてきている。

写真-2.2.5 はかつての木橋のイメージがよく現れている例である。昭和 28 年の架設であるが、先頃河川改修のために架け替えられた。**写真-2.2.6** は近代的な木橋の例である。平成 5 年の架設でサイクリングロードとして利用されている。これらはともに支間約 10m の道路橋であるが、細かい部材を組み合わせた**写真-2.2.5** に対して**写真-2.2.6** では大断面集成材の主桁を有するシンプルな構造と両者の外観は大きく異なる。後者では耐久性上の弱点となる接合部が大幅に減った上、防腐技術の進歩により長期の耐用年数が期待できるようになった。このように、最近の木橋は単に従来の木橋の復活ではなく、新しい技術の下での新しい木橋と考えることができる。



写真-2.2.5 旧来の木橋の例
(旧一新橋／新潟県)



写真-2.2.6 新しい木橋の例
(善入寺橋／広島県)



写真-2.2.7 部材交換により維持管理がなされている木橋（上津屋橋／京都府）



写真-2.2.8 ビハントサルミ橋（フィンランド）

(2) 木構造の利点が活かされた木橋

写真-2.2.7 の上津屋橋は木津川の流れ橋とも呼ばれる 74 径間約 260m の歩道橋である。時代劇にも登場する古風な橋であるが架設は昭和 28 年と意外に新しい。74 径間全長 356m というとんでもない規模の流れ橋は、最小限の機能を有する橋を最小限のコストでという地元の熱意と智恵によって架けられた。架設後 50 年間に洪水で 10 数回流出したが、その度に補修がなされ現在に至っている。

スギ材を組み合わせただけのシンプルな構造は流れ橋であるという宿命によるものでもあるが、このため部材の交換はきわめて容易である。木構造の利点を活かした好例といえる。

(3) 諸外国の木橋事情

日本で木材が建設材料としての地位を失っていた間も、諸外国では木橋はかけ続けられてきた。先進国も例外ではなく、各国の設計コードには木材に関する記述もある。

特に環境問題に対する意識の高い欧州では各国の事情に応じた木材利用の一環として木橋の整備が進められている。写真-2.2.8 のビハントサルミ橋はフィンランドの高規格道路が湖を跨ぐ位置に架けられている。また写真-2.2.9 のエッシングの木橋は風光明媚なドイツの溪谷に架けられた吊り床版形式の木橋である。いずれも集成材を活用した近代的な木橋であるが、決して特別な存在ではなく周囲の景観にもマッチしている。

(4) 近代的な木橋の例

ここでは国産材が活用された近代的な木橋の例を紹介する。数としては人とふれあう機会の多い遊歩道に位置するものが多いが、大型車の通行も可能な道路橋の例も多数存在する。なお、これらの木橋でも高温多湿な日本の気候風土においては雨水対策は重要である。これらの木橋の耐久性向上のための配慮もあわせてご覧いただきたい。

① 桁橋

橋の最も単純な形式である桁橋では、丸太や製材をそのまま桁材として活かすことができる。写真-2.2.10 の木橋は市街地に位置する橋長 6m の歩道橋で、製材を主桁に利用した標準的な木橋である。集成材による 10m を超える桁橋も架けられている。例えば写真-2.2.11 のいきいき橋は大断面集成材



写真-2.2.9 エッシングの木橋（ドイツ）



写真-2.2.10 大井手用水路の木橋（熊本県）



写真-2.2.11 いきいき橋（広島県）



写真-2.2.12 クルワドウ橋（長野県）

を用いた2主桁橋である。高欄と一体化された主桁はブラインド材と鋼板により完全に隠されており、主桁材の雨水や紫外線による劣化を防いでいる。

また、製材を橋軸直角方向に敷き並べてプレストレスにより一体化するプレストレス木床版は道路橋に多く架けられている。写真-2.2.12のクルワドウ橋はその一例であるが、20mを超える事例も見られる。

②トラス橋

通直材が基本となるトラス橋は木材には有利であり、古くから比較的大規模な木橋に見ることができた。最近では集成材を用いたトラス橋も多い。写真-2.2.13のかりこぼうず大橋は集成材トラス橋の例で、最大支間は48.5m、全長140mと車道橋としては日本一の規模である。

なお、トラス橋では多数のトラス節点が耐久性上の弱点となる。このため、耐久性向上を期して写真-2.2.14の御幸橋のように全体に屋根がかけられた例もある。

③アーチ橋

集成材では湾曲した部材も自在に造ることができるため、写真-2.2.15のようなアーチ橋も多く架けられている。金峰2000年橋は2車線の林道橋で支間は37mである。上路形式では路面が屋根の役割も果たすため、アーチ材の劣化に対して有利である。

写真-2.2.16の百目石橋は支間20mのタイドアーチ橋である。建築限界を確保するために上横構は省略されている。アーチ主部材上面は銅板により小屋根がかけられており、アーチ主部材の雨水による劣化防止が図られていることがわかる。



写真-2.2.13 かりこぼうず大橋 (宮崎県)



写真-2.2.14 御幸橋 (高知県)



写真-2.2.15 金峰 2000 年橋 (鹿児島県)



写真-2.2.16 百目石橋 (秋田県)

④その他の木橋

吊り形式の橋は主部材がケーブル材であるためそもそも木橋かどうか疑問もあるが、各地で多数の「木橋」が架設されている。

写真-2.2.17 は吊り床版橋の例である。PC 吊り床版橋のようにプレストレスが導入されるわけではないので揺れやすく、路面から下が見えるのでスリル満点であるが、軽量であるため下部工の施工コストを大幅に抑えることもできる。写真-2.2.18 は本格的な斜張橋の例である。吊り橋も含めて公園内や山間部の遊歩道の整備等で多数の実績がある。

写真-2.2.19 は鋼床版、写真-2.2.20 はコンクリート床版との合成桁橋の例である。このような他材料との合成構造の研究も進められ、実用化されている。

2.2.6 まとめ

日本に木橋が再び架けられるようになって 20 年あまりが経過している。このように技術的には完成しつつあるにもかかわらず、木橋はいまだ特殊な構造物の域を脱していない。その理由には多くが挙げられるが、誤解ならびにそもそも知られていないことが大きい。時代は低環境負荷を求めており、木橋に関する期待もますます大きくなってきている。いつの日か、木橋が決して珍しくない存在となることを願っている。

なお、本文で紹介した木橋の他、多数の木橋が下記のウェブサイトで紹介されている。

<http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/>



写真-2.2.17 黒滝吊橋（奈良県）



写真-2.2.18 緑のかけ橋（神奈川県）



写真-2.2.19 鋼床版との合成桁橋
(八丁平つなぎ橋／北海道)



写真-2.2.20 RC床版との合成桁橋
(さくら橋／長野県)

参考文献

- 1) 針葉樹の構造用製材の日本農林規格, 2001.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説, 2002.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002.
- 4) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック 改訂4版, 2004.
- 5) 日本木材保存協会：木材保存入門 改訂2版, 2005.
- 6) 古野 毅, 澤辺 攻：木材科学講座2 組織と材質, 1996.
- 7) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き 2005, 2005.

2.3 木材利用の波及効果とさまざまな利用技術（今井久）

2.3.1 はじめに

社会基盤整備を使命とする土木事業は、地球温暖化問題の対応や、持続可能な低炭素社会の実現、多種多様な生物との共生可能な社会形成など、将来を見据えた、市民に受け入れられる取り組みが望まれている。この一環として、国産木材の土木事業への積極的な利用は土木に望まれる具体的な取り組みである。国産材の利用は、林業の活性化や森林環境整備につながり、森林の公益的機能¹⁾²⁾が維持・向上される。これは、中山間地などの地域振興、国土保全、水資源確保などにつながり、社会基盤整備という土木の使命を果たすことになると考えられるからである。

ここでは、土木における国産木材の利用促進を念頭に、木材の利用状況、わが国の森林・林業の状況、木材利用方法促進のための考え方や具体的な利用事例を紹介する。

2.3.2 木材の利用状況

(1) 建設資材における木材利用量

建設資材としての木材利用量は、主要建設資材の国内需要量（利用量）実績として国土交通省によりとりまとめられ、この平成19年度の需要量実績を³⁾表-2.3.1に示す。ここでは、セメント、生コン（生コンクリート）、骨材、木材、普通鋼鋼材、アスファルトの統計値が示されている。統計値の単位は重量と体積が混在するため、体積に換算した値と各資材の占める割合（体積シェア、図-2.3.1）合わせて示す。生コンには骨材とセメントを含むため、骨材、セメントは補正した。また、建設資材は全体積で約3億5000万 m^3 （東京ドームおよそ280杯分）であり、その95%が骨材・生コンである。木材は3.4%と、体積では鋼材の使用量を上回っている。

木材は年間およそ1200万 m^3 利用されている。この木材利用量は建設資材として土木と建築合わせた値であり、土木での木材利用量を本データから抽出することは難しい。1991年度までの国土交通省による「建設資材・労働力需要実態調査」から、推定した土木での木材利用量はおよそ100万 m^3 との推算例¹⁶⁾が示されており、表

-2.3.1に示す木材利用量の10%弱が土木での利用と考えられる。

図-2.3.2には各資材の1993年度の利用量を100としたときの各資材の利用量（左軸）と、建設投資額（右軸）の変遷を合わせて示す。建設投資額の減少に伴い各資材とも利用量は減少している

表-2.3.1 主要建設資材の国内利用実績（2007年度・平成19年度）

	セメント	生コン	骨材	木材	普通鋼鋼材	アスファルト
統計値 (単位)	(千t)	(千 m^3)	(千 m^3)	(千 m^3)	(千t)	(千t)
統計値	55,510	111,880	292,000	11,910	24,980	2,320
体積換算値 (千 m^3)	6,378	111,880	213,684	11,910	3,203	2,109
体積シェア (%)	1.8	32.0	61.2	3.4	0.9	0.6

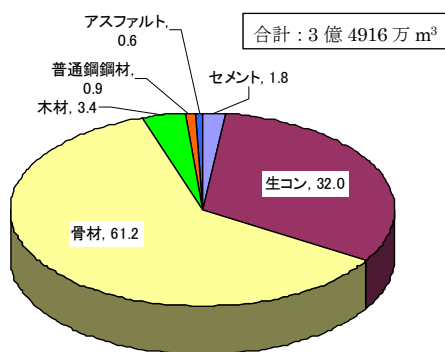


図-2.3.1 主要建設資材の体積シェア（2007年度）

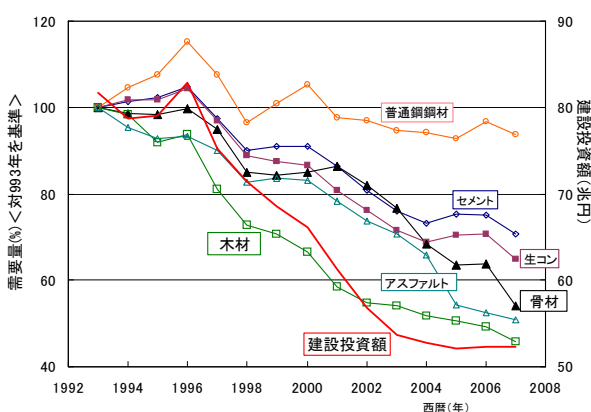


図-2.3.2 1993年度を基準とした各資材の変遷

が木材利用量の減少が最も大きい。図-2.3.3 には 1993 年度からの体積シェア（骨材と生コンの体積シェアは左軸、他の材料は右軸が対応）の変遷を示している。木材は 2001 年まで減少傾向を示し、2002 年以降増加の傾向を示している。これは、環境的側面からの木材利用の機運向上や木材価格の低下（図-2.3.8 参照）により他材料から木材利用への変換ながされたことなどが一因と考えられる。

図-2.3.4 には木材の総需要量（丸太換算）の変遷⁴⁾⁵⁾、用材（国産材、外材）量、用材の自給率を合わせて示す。1955 年頃の木材の総需要量と用材（国産材、外材の合計）量との差は、主に薪炭での木材利用量の差を示している。表-2.3.1 と図-2.3.4 の木材利用量の差は、図-2.3.4 は建設以外の木材需要も含んでいることや表-2.3.1 では用材として使用する木材の体積、図-2.3.4 では丸太換算値（丸太から用材にする製材等による体積ロスが発生、木材需要表⁵⁾ 参照）の違いが主な要因と考えられる。

1970 年以降、木材需要は 1 億 m^3 前後で推移し、外材の輸入が増え、国産材の利用が減少している。1955 年からの全体的傾向として国産材の利用量は減少、外材の利用量が増加、自給率は減少している。しかし、2002 年頃から自給率の上昇傾向が認められる。

以上のことから、木材利用の絶対量は減少したが、建設資材における木材の体積シェアの向上、木材自給率上昇の傾向が見られ、国産材利用の気運盛り上がり傾向も伺われる。

(2) 間伐材の利用

温暖化対策として必要性が叫ばれている間伐材の利用状況についても確認する。京都議定書の 6% 温室効果ガス削減目標のうち 3.8% は森林吸収効果が期待され、このため間伐による森林整備が必要とされる。図-2.3.5 に間伐材の利用、間伐面積、間伐面積当たりの間伐材利用材積⁶⁾を示す。間伐材利用材積は 1994 年以降増加し、間伐面積当たりの間伐材利用量も上昇し、 $10\text{m}^3/\text{ha}$ となっている。しかし、NEDO の報告⁷⁾によると間伐面積当たりの間伐材利用量およそ $20\text{m}^3/\text{ha}$ であり、間伐材の約 50% は利用されていないと考えられる。間伐材の利用は増えているが、さらなる利用の余地があるといえる。

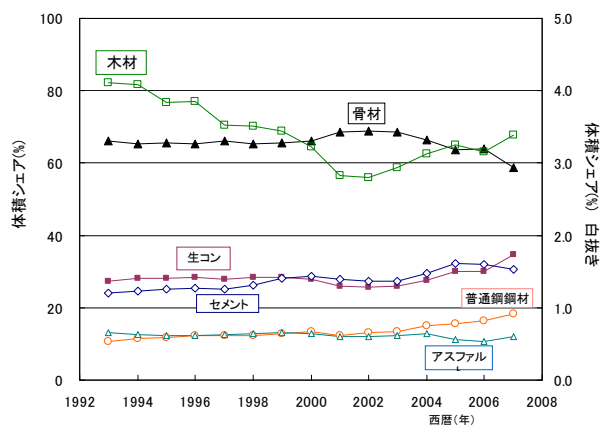


図-2.3.3 主要建設資材の体積シェア変遷

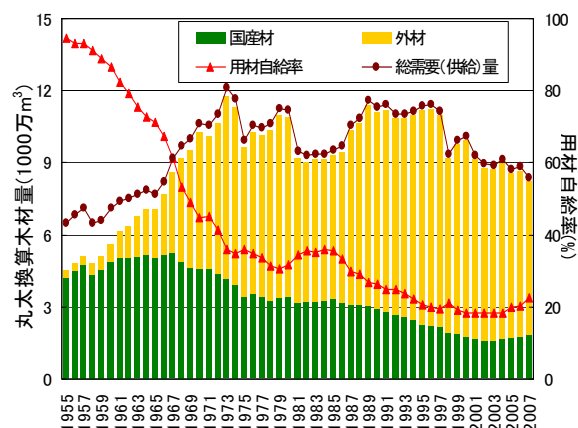


図-2.3.4 木材需要量、自給率の変遷⁴⁾⁵⁾

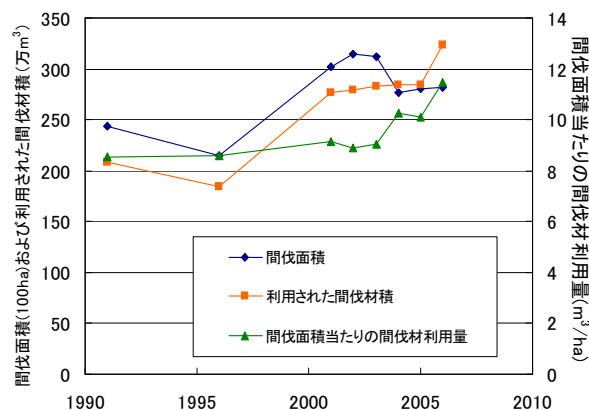


図-2.3.5 間伐材の利用状況（林野庁⁵⁾）

2.3.3 森林の現状

(1) わが国の森林資源

森林資源量として、森林面積の推移を図-2.3.6、森林蓄積量を図-2.3.7に示す。

わが国の森林面積はおよそ 2500 万 ha で国土総面積の 2/3 に相当する。この値は殆ど変化していない。天然林と人工的（人工林あるは育成林）では人工林がやや増加している。森林蓄積量は着実に増加し、5年間で4億 m³程度、年間8000万 m³の割合で増加している。これは図-2.3.4に示した丸太換算需給量に匹敵、国内の木材需要はほぼ自給可能と考えられる。

(2) 森林の状況

実際に森林を踏査し際に撮影した代表的な森林の状況を写真-2.3.1に示す。

写真-2.3.1 (a)は森林を外から撮影したもので、青々して健全な森林と見える。(b)(c)(d)は(a)の林内の状況である。(b)は枝打ちや間伐のなされていないヒノキ林で、林床に植生がなく根が地表に浮き出し、地表も露出している。(c)では雨滴により土粒子が飛散した痕跡が確認され降雨により土砂が容易に流出しうることを示唆している。(d)は森林内部（スギ林）の状況で、間伐後に伐採された材が放置された状況である。外から見た森林の生き生きした雰囲気と反し、殺伐として林外から抱くイメージとはかなり異なっている。

下草の生い茂る健全な森林では通常 200mm/h 程度の浸透量を示し、荒廃した森林では 14mm/h の浸透量に低下するというデータ⁸⁾⁹⁾が示されている。14mm/h を超える降雨は年間数度発生し、そのたびに地下に浸透できない降雨は地表面を流下し、土砂流出の原因となっている。

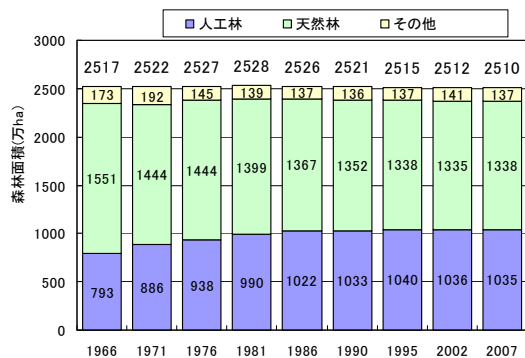


図-2.3.6 わが国の森林面積の変遷⁶⁾

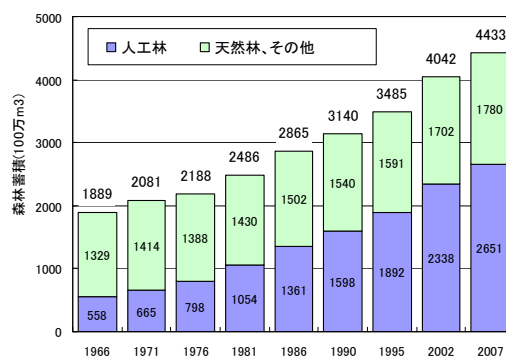


図-2.3.7 森林蓄積量の変遷⁶⁾

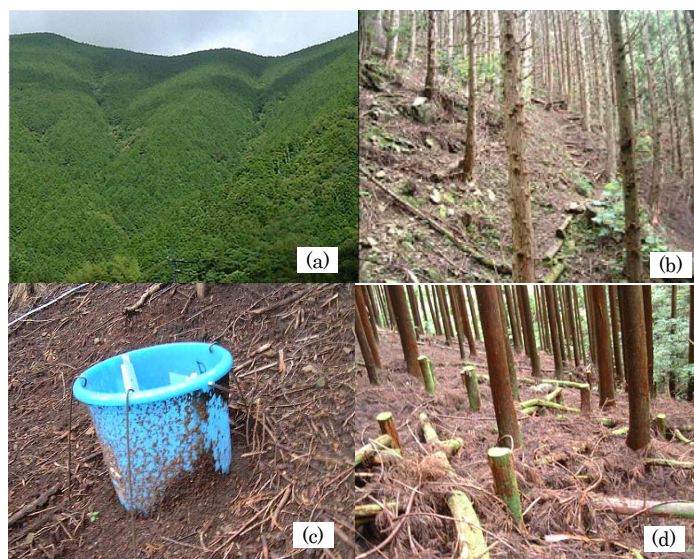


写真-2.3.1 森林の現状（高知県にて撮影）

(3) 林業経営の状況

森林整備に携わる林業経営の状況を木材価格、人件費により示す。

木材価格として山元立木価格の 2007 年までの推移を図-2.3.8 に示す。山元立木価格は立木の状態で樹木の販売価格であり、一般に、丸太の市場価格から、伐採・搬出等に必要な経費を控除して計算された幹の材積 m^3 当たりの価格である。山元立木価格は 1980 をピークに下がり続け、ピーク時の 1/4 余りに低下している。

図-2.3.9 はスギの山元立木価格、木材伐出賃金の推移、スギ $1m^3$ で雇用できる伐木作業員数の推移を示す。材価の著しい低下と賃金の上昇に伴い木材を伐出しても殆ど収入につながらない林業経営の厳しい状況が伺われる。(2) で示した森林の荒廃は木を切り出しても殆ど儲けにならない林業経営上の影響と考えられる。このような状況下では就業者数も減少、新規就業者も少なく林業従事者は高齢化するということが一因と考えられる。

(4) 森林の機能とその評価額

一見健康そうに見えるわが国の森林であるが、徐々に森林の健康状態が悪化している。このような状況が続くとどのような影響が出るであろうか。このことを確認するため、森林の機能やその価値について示す。

森林は木材供給産地としての機能以外に、二酸化炭素吸収機能、水源の涵養など、公益的機能を有し、私たちの生活と深くかかわっている。

林野庁では、森林の持つ公益的機能のうち、評価可能な機能に関して貨幣評価額（表-2.3.2）を算出¹²⁾¹³⁾している。例えば、水源涵養機能では、森林での雨水貯留量や降水を浄化し河川へ流出させる流量に対して利水ダムや雨水利用施設の年間減価償却費及び維持費などを考慮して評価額が算定されている。大気保全機能では、樹木の二酸化炭素吸収量や酸素放出量に対して火力発電所における二酸化炭素回収コスト、タンクローリー液体酸素取引価格を乗じて算出している。評価額の合計は年間 75 兆円と国の予算規模に匹敵する。算定方法には議論のあることと思われるが、国民は少なからず森林の恩恵を受けている。

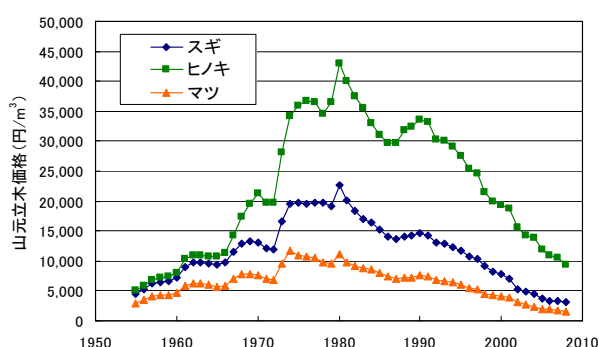


図-2.3.8 木材価格の推移¹⁰⁾¹¹⁾

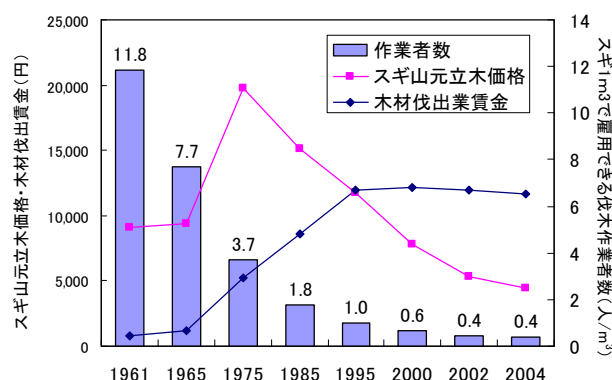


図-2.3.9 スギ $1m^3$ で雇用できる伐木作業員数の推移¹⁰⁾

表-2.3.2 森林の公益的機能の評価額（年間）

機能の種類	評価額 (円)	単位面積当たり (万円/ha)	備考
○水源涵養機能			
・降水の貯留	8兆7,400億	34.8	森林の土壌が、降水を貯留し、河川へ流れ込む水の量を平準化して洪水、濁水を防ぎ、さらにその過程で水質を浄化する役割
・洪水防止	5兆5,700億	22.2	
・水質浄化	12兆8,100億	51.0	
計	27兆1,200億	108.0	
○土砂流出防止機能	28兆2,600億	112.5	森林の下層植生や落葉落枝にが地表の浸食を抑制する役割
○土砂崩壊防止機能	8兆4,400億	33.6	森林が根系を張り巡らすことによって土砂の崩壊を防ぐ役割
○保健休養機能	2兆2,500億	9.0	森林が人にやすらぎを与え、余暇を過ごす場としての役割
○野生鳥獣保護機能	3兆7,800億	15.0	森林が果たしている野生鳥獣の生息の場としての役割
○大気保全機能			
・二酸化炭素吸収	1兆2,400億	4.9	森林がその成長の過程で二酸化炭素を吸収し、酸素を供給している役割
・酸素供給	3兆9,000億	15.5	
計	5兆1,400億	20.5	
合 計	74兆9,900億	298.5	

2.3.4 土木における木材利用

(1) 木材から他材料への移行と木材の特性

建設資材は木材からコンクリートや鋼材などへ移行していることが先述の統計結果から理解されるが、土木における具体的な用途で木材から他材料への移行状況と移行に関連する木材特性を表-2.3.3に整理した。ここでは、仮設材として型枠、足場、山留め、支保としての用途、永久構造物では鉄道の枕木、杭としての用途を取り上げた。用途により、木材の利用が継続する用途、木材の利用が終わると考えられる用途がある。

表-2.3.3 各用途における代替材料と木材のメリット・デメリット

No.	用途	木材利用	移行材料	木材利用のデメリット	木材利用のメリット
1	型枠	継続 コンパネなど	鋼製材料 樹脂系材料	材質のバラツキが大きい 大量なニーズへの対応難しい 転用回数少ない 転用に伴う劣化性が大きい	加工容易 複雑な形状に適用可能 (自由度が高い)
2	足場板、支柱 ハシゴ、階段	一部継続 足場板など	鋼製材料(単管パイプ、 建枠)、チェーン、アルミ	リサイクル性(産廃) ライフサイクルコスト 吸水による重量増や変形	軽い 購入単価が安い 調達が容易
3	山留め	一部継続 横矢板など	鋼製材料(シートパイル) セメント系材料	保管性(降雨対策必要) 腐朽・劣化による信頼性低下 燃えやすく、火災の懸念	焼却処分可能 腐朽して消滅 接触時の受傷が少ない
4	支保材	ほとんどなし	鋼製材、アルミ	材料が重く取り回し難しい 有効な利用には習熟・経験必要	吸水膨張性 緩衝作用あり 恒温・保温性
5	枕木	部分的に利用	PCコンクリート 合成樹脂	材と量の確保難しい 防腐剤の環境影響	コンクリートより軽い 加工の容易さ、変形・弾力性
6	杭	ほとんどなし	コンクリート 鋼材	長尺材料や数量の確保難しい 防腐剤の環境影響	調達の容易さ、炭素固定効果

- ・型枠としての利用はコンクリートを前提とした利用である。形状が一定な構造物に対しては鋼製材料への移行も進んでいるが、形状変化のある構造物に対しては合成木材の利用が便利であり継続する。

- ・足場材に関しては足場板としての利用は継続されているが、他の用途ではほとんどが鉄やアルミ製の材料に移行している。

- ・山留めとしての利用はシートパイルを代表とする鋼製材料や地中連続壁などのセメント系材料へと移行している。一方比較的小規模な掘削、地下水位の高くない箇所での掘削、予算の限られた民間建築物の基礎工事での掘削では親杭横矢板工法として木材が継続して利用されている。

- ・支保材では、大規模な利用ではほとんどが鋼製・アルミ製材料へ移行している。小規模な支保については木製、合成木材が利用される。小規模の場合、利用期間も短く木材の利用が適している場合もある。

- ・鉄道の枕木は、文字が示すように従来木製であったが、PCコンクリート、合成樹脂、枕木を使用しない道床へと変化している。鋼製橋梁やポイント部などでは現在も木製が利用されている。合成樹脂枕木¹⁴⁾とは硬質ウレタン樹脂をガラス長繊維で強化したもので、FFU (Fiber reinforced Foamed Urethane) とも呼ばれる。重さは木材並み、強度・耐久性は木材に優り、価格は高いが熱帯木材に依存しない点も環境保護の観点でも評価される。将来的には木製枕木はほとんど使用されなくなると考えられる。

- ・杭については、構造物の長大化に伴い大径・長尺のニーズに対して木材では対応できなくなるなどの理由と共に、強度、腐朽性の観点から木材から他材料へ移行したと考えられる。

(2) 木材利用促進のための考え方

a) デメリットをメリットに

木材は、品質（均質性、耐久性）、材の供給において劣る傾向が見られるが、取り扱いの容易さ、環境影響、材質特性（比強度が高い、適度な弾性がある、熱伝導率が低い等）において優る傾向がある。また、以下に示すように木材のデメリットと考えられる特性も視点を変えるとメリットとしても評価できる。

- 燃えやすく火災の懸念 → ○可燃性で燃料としても利用可能、焼却処分により処分費用不要
- 腐朽する → ○生分解性で廃棄物が発生しない、放置可能、処分費用不要
- 柔らかい → ○緩衝作用、接触に際して傷つけない
- 虫が付き劣化 → 生物の生息地を提供、虫が魚類の餌料、生物サイクル補助、漁場提供
- 異方性があり割れやすい → ○分割容易（割り箸）、加工性がよい

利用目的と木材の特性を適切な評価にすることにより木材利用の促進が可能性と考えられる。

b) 木材のリサイクル利用

木材はリサイクル利用が比較的容易であることも木材の大きなメリットである。また、素材の状態で大きな部材として使用し、ある耐用年数を経過した後には分割加工してより小さい製品として利用、最終的にはチップ化して、燃料やたい肥として利用するカスケード利用が有効と考えられる。

たとえば、「ほぼ丸太の未乾燥状態で防護柵などに利用→（木材の自然乾燥）→（製材）→板、柱、測量杭などに利用→（チップ化）→燃料・たい肥として利用」、という利用プロセスが考えられる。このプロセスでは木材は自然乾燥されるため乾燥のエネルギーやそのコストの節約にも寄与し、最終的にはカーボンニュートラルな燃料となる。

伊勢神宮では 20 年ごとに遷宮が行われ神宮の本殿などは同じものが立て替えられる。この際発生する解体された木材は鳥居などに再利用されるほか、みやげものとして加工され表札などとして販売されているそうである。これもカスケード利用であり、樹木の生長に 100 年、伐採後の加工から神宮での利用と再利用で 50 年、表札として 50 年の利用と考えると約 200 年間の炭素固定効果が発揮されたこととなる。

(3) 土木における木材の利用事例

土木における木材利用の具体的事例を、木材特性のそのメリット利用の観点から紹介する。

a) 治山ダム

治山ダムは山地河川に設置され、河川流速や土砂流出を抑制し斜面崩壊を防ぐなどの目的で設置される。従来コンクリート製のものが多かったが、木製治山ダムも採用されている。

写真-2.3.2 は京都市北区に施工されたもので、施工後数年経過し、周辺の景観になじんでいる。

○利用のポイント：治山ダムとしての木材利用は、施工箇所周辺森林からの木材を調達により運送コスト、運送に伴うエネルギー削減となる。また、治山ダムでは木材の乾燥が不要で乾燥エネルギーを



写真-2.3.2 木製治山ダム（京都府京都市）

節約, 丸太の状態で使用することで加工エネルギーや加工費用の削減となる。また, 将来には自然に帰り, 処分の必要も不要となる可能性がある。また周辺環境との調和・景観性も良好である。

b) のり面

木材をのり面緑化工の仮設山留め材として利用した事例を示す。本事例はつくばエクスプレス・駅前の高さ約 2m の斜面の緑化工（写真-2.3.3(a)）において, 緑化工初期の地山の安定のためにスギ板と木杭（写真-2.3.3 (b)）を利用している。

○利用のポイント: 植生が成長するまでの数年をスギ板と木杭でのり面を安定化, 植生の成長に伴い根系の発達により, 根系による地山補強効果により のり面を保護, 安定化が期待される。根系の成長・発達に対してスギ板と木杭は腐朽・分解し, 植生の養分となり無駄が無く成長する樹木に取り込まれ, のり面緑化工が安定した状態に遷移する。斜面の最終的安定状態に至るまでは時間は要するが木材特性, 植生特性を利用した環境調和型の土木技術といえる。

c) 吊り橋

長野県の桃介橋は, できるだけ原形に沿った復元工事が行われ, 文化財として 1993 年 9 月に復元工された木製補剛トラスを持った吊橋（写真-2.3.4）である。文化財という特殊事例ではあるが, 本事例に学ぶ点が多い。

主要諸元として表-2.3.4 に示されるように 3 基の主塔の下部は石積みで転石の衝突衝撃や河川侵食に強く, 上部はコンクリートで所定の形状に構築し易い材料構成となっている。引張部材である主索ケーブル, ハンガーは鋼製ロープが使用され, 細くて風力抵抗の少ない構造となっている。橋を渡る人が直接触れる手摺り, 床版, 桁材は木材を利用し, 緩衝的で軽量である。

地元産木材のサワラ, アスヒ, ヒノキ(図-2.3.10, 11, 表-2.3.5) が使用され, 耐朽性の期待される部材にはボンゴシという耐朽性にすぐれた外国産材を使用している。



(a) のり面緑化工全景



(b) 緑化工に使用されたスギ板と木杭

写真-2.3.3 のり面緑化工の仮設山留め材（茨城県）



(a) 主塔部遠景



(b) 木製床とトラス部分

写真-2.3.4 桃介橋の状況（長野県）

表-2.3.4 桃介橋の基本諸元

橋の種類	木製補剛トラスを持つ多径間吊橋		
橋長	247m	幅員	2.7m (全幅 4.4m)
主塔	3基 (石積み部分高さ 13.0m, コンクリート部分高さ 13.3m)		
主索ケーブル	8本 (片側4本, 径4cmのストランドロープ)		
主索ハンガー	204本 (片側102本, 径3.5mmの鉄線5本を束ねている)		
耐風索	4本 (径3.2cmのストランドロープ)		
補剛桁	木製/国内産材 (木曽材) 143.02m ³ , 外国産材 (ボンゴシ) 32.98m ³		

表-2.3.5 木製部に使用された木材の種類

床部分	復元時	現設計時	トラス部分	復元時	現設計時
吊桁	ボンゴシ	クリ	上弦材	サワラ	スギ
床梁	アスヒ	クリ	下弦材	サワラ	スギ
横桁	アスヒ	クリ	対角材	サワラ	スギ
敷板	ヒノキ	マツ	隅沓材	ボンゴシ	ヒノキ
レール跡	ボンゴシ	—	抗風材	ヒノキ	スギ
枕梁	ボンゴシ	クリ	親柱	ヒノキ	スギ

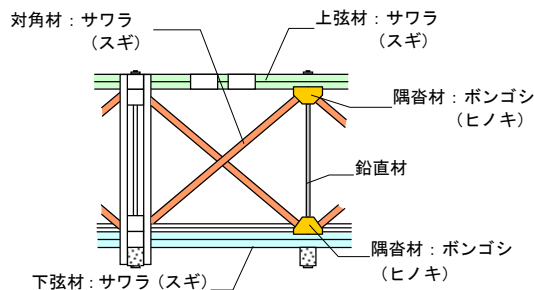


図-2.3.10 補剛桁側面図 (カッコ内は原設計時の使用材)

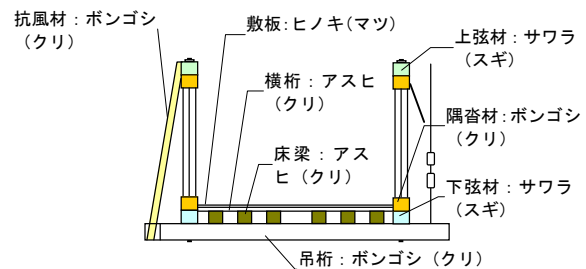


図-2.3.11 補剛桁断面図 (カッコ内は原設計時の使用材)

○利用のポイント：異なった材料の特性を活かした適材適所ハイブリッド利用がなされ、無理なく地元産材を利用するという点で参考になる事例と思われる。

d) 水路

木製水路（写真-2.3.5(a), 図-2.3.12¹⁵⁾）は、岩手県内の間伐材を活用した間伐材とコンクリートを組み合わせたハイブリッド水路である。本製品は、図-2.3.12に示すようにキット化されており、水路のベースは水に強いコンクリート、水辺で腐朽し易い木部はコンクリートブロック状に設置する方式となりメンテナンスが容易である。製造と販売は、異業種（森林組合、企業、市民、行政）が運営するNPO法人（循環資源デザインネットワーク）が行っている。市場性の観点からも従来の固定した専門市場から開放され、新たな市場を形成する取り組みである。

○利用のポイント：水路側壁と底部が木製であるため側壁と底部を通じた周辺地山との水の出入りが比較的容易であり、降雨時には排水、乾燥時には地下水涵養の役割を果たす。また、木部が腐朽することにより生物のすみかとなり、植生成長により木部の腐朽にともなう水路



(a) 植生に覆われた水路



(b) 水路脇の腐朽している木杭

写真-2.3.5 水路での木材利用

側壁、底部の劣化を補う働きも期待され、生物との共生可能な構造物といえる。水辺、水中での木材は腐朽し易く木材を分解する虫類の営巣地となり魚類の餌料提供の場となり、また植生の侵入（写真-2.3.5(b)）も容易にし、生物多様性の観点からも有効である。

2.3.5 まとめ

ここでは、土木における国産木材の利用促進を念頭に、建設資材としての木材の利用状況、木材利用とわが国の森林の状況、木材利用方法促進のための考え方や具体的な利用事例とその事例における木材利用の有効性を整理・紹介した。この結果、今後の土木における木材利用に関して、以下のことが確認され、考えられた。

- ・建設資材としての木材利用量、自給率は減少したが、ここ数年で利用量、自給率で回復・増加の兆しが見えてきた。
- ・間伐材の利用量は増加しているが、発生している間伐材の約 50%程度であり今後も間伐材の利用促進が望まれる。
- ・わが国の森林、木材資源は充実しており、国産材の利用が必要である。
- ・森林は大きな公益的機能を果たしているが、国産材利用とその価格低下から森林機能が損なわれ国土保全や水産資源、多方面の産業や市民生活の与える影響が懸念される。この問題に対処するためには国産木材を利用することが必要である。
- ・木材の有する、腐朽性、可燃性は木材の欠点でもあるが、利点にもなりうる。このことは、木材の特性を把握し、適材適所の木材利用を考えることで新たな木材利用方法が考案しうる可能性がある。
- ・木材の強み、弱みを踏まえ、他の材料との組み合わせ（ハイブリッド利用）により土木構造物の性能、付加価値を高める利用方法を考えることが必要である。
- ・環境調和型、生物との共生の観点からも土木構造物への木材利用は有効である。

わが国の地形・気象特性を考えると、山地部での森林経営は、わが国の特性を活かす有効な資源活用手段であり、国産木材の利用促進が不可欠である。

土木での国産材の利用は、林業の活性化、森林環境整備につながり、森林の持つ洪水抑制や水源涵養などの公益的機能が維持・向上され、中山間地などの地域振興にも寄与し、社会基盤整備という土木の使命を果たすことになると考えられる。

国産木材の利用促進のためには、木材特性や利用工法、木材利用による環境影響評価など土木を含め分野横断的な研究とその成果展開による木材利用への理解や利用気運の醸成が必要と考える。

2.3.6 あとがき

本稿は建設物価 2009 年 7 月に掲載した記事をもとに一部修正、図等加えたものである。本原稿を作成するにあたり、土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会¹⁷⁾の関係者に一部御協力戴いた、ここに記して感謝申し上げます。

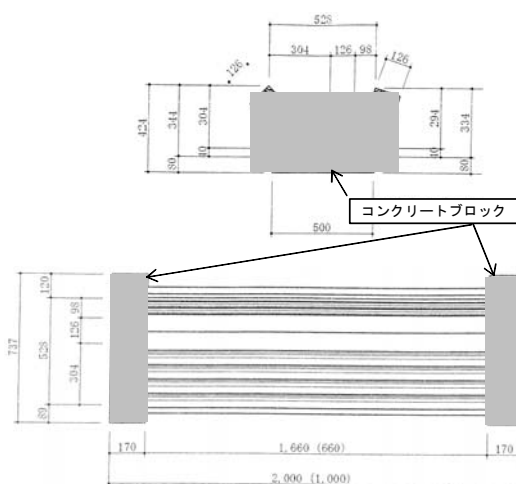


図-2.3.12 水路の形状（写真-2.3.5 (a)に対応）

参考文献

- 1) 林野庁：森林の有する多面的機能について，
<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/tamennteki/tamentekitop.html>
- 2) 今井久：ハザマ研究年報，Vol.38，2006
http://www.hazama.co.jp/trr/2006/pdf_file/06.PDF
- 3) 国土交通省：主要建設資材の国内需要量実績の推移，
<http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/chojou/h19syuyousizai.htm>
- 4) 林野庁：平成 15 年度版森林・林業白書，参考付表，pp.147-180，2004
- 5) 林野庁：平成 19 年 木材需給表，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001036695>
- 6) 林野庁：平成 19 年統計資料
<http://www.rinya.maff.go.jp/toukei/19toukei/si-10.html>
- 7) NEDO：林地残材賦存量，利用可能量の算出方法，
http://app1.infoc.nedo.go.jp/kinds/mo1_h18.pdf
- 8) 恩田裕一：森林の荒廃は河川にどんな影響があるのか，科学・岩波書店，Vol.73, No.12, pp.1381-1386, 2003
- 9) 辻村真貴，恩田裕一，原田大路：荒廃したヒノキ林における降雨流出に及ぼすホートン地表流の影響，水文・水資源学会誌，Vol.19, No.1, pp.17-24, 2006
- 10) 林野庁：<http://www.rinya.maff.go.jp/toukei/18toukei/40-yamamotomarutaseizaisanrinn.html>
- 11) (財)日本不動産研究所研究部：田畑価格及び山林価格調査，
http://www.reinet.or.jp/up_pdf/1222927158-20081006NEWS.pdf
- 12) 日本学術会議：「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について」
答申，2001.11
- 13) 林野庁：森林の公益的機能の評価額について，2000.9，
<http://www.rinya.maff.go.jp/puresu/9gatu/kinou.html>
- 14) 廣野郁夫：WEB サイト木のメモ帳，
http://www.geocities.jp/kinomemocho/zatu_sleeper.html
- 15) (社)土木学会自然素材活用技術研究小委員会：自然素材を利用した土木構造物・土木技術に関する調査研究報告書，2006
- 16) 外崎真理雄：土木における木材の利用—展望と課題—I，第 114 回生存圏シンポジウム要旨集，pp.30-36，2008
- 17) 沼田淳紀：土木における木材の利用の可能性—木材利用の環境的意義と地中への利用—，建設物価第 1065 号，記事 pp.30-37，2009

3. ポスト京都議定書への「伐採木材製品の取り扱い」の対応

3.1 伐採木材の取り扱いについて（外崎真理雄）

伐採量が生長量を上回らない持続的林業から生産された木材製品の蓄積量が増加すると、大気中の二酸化炭素は蓄積変化量の分だけ取り除かれたことになる。これを木材利用の炭素貯蔵効果と称し、木材利用による温暖化対策効果の根本となるものである。

現在の京都議定書第一約束期間(2008-2012)では、1996IPCC ガイドラインにより森林吸収源の評価が行われ、そこでは木材製品の蓄積は中期的には増減しないという仮定の下で、森林伐採炭素量と廃棄された木材からの排出炭素量が等しいとする暫定的なデフォルト法が用いられることになっている。従って木材製品蓄積増加による削減は評価されないことになる。

IPCC では 1996 年以降も、専門家による論議が進められ、木材製品中の炭素のグローバルな炭素収支を評価できる手法をいくつか提案した。1998 年のダカール専門家会合で示されたのが、後述の蓄積変化法・生産法・大気フロー法である。その後の国際的論議の中で、2013 年以降の次期約束期間では伐採木材製品の炭素貯蔵効果もきちんと森林吸収源評価の中に位置づけようとするフルカーボンアカウンティングへの流れが、主として先進諸国の間で共有されて来た。2007 年 COP13 のバリロードマップでは、次期約束期間の枠組みは 2009 年コペンハーゲンの COP15 で決定されることになっていた。

伐採木材製品評価手法の選択時期が迫る 2008 年、日本木材学会の地球環境委員会は、手法の選択は木材利用振興を大きく左右するものであるという問題意識の元、関連する日本森林学会、林業経済学会、(社)日本建築学会、(社)土木学会、(社)全国木材組合連合会、(社)日本木造住宅産業協会、日本繊維板工業会、日本合板工業組合連合会、日本製紙連合会、FoE Japan の 10 団体に伐採木材製品評価手法について論議する円卓会議の開催を呼びかけた。

全ての団体の参加と合意は得られなかったものの、円卓会議では後掲の提言書と補足説明を採択し、2008 年 12 月に交渉担当官庁である林野庁の長官に提言書を手交するに至った。

現時点では、日本を含む先進国の大勢は、上述の 3 手法ではないグローバルな炭素収支を正確に評価せず、木材生産国にのみメリットがある生産法をモディファイした限定国産材法あるいは大気排出法という流れになっており、途上国は伐採木材製品評価自体に反対しているという状況である。

地球温暖化対策は当然のことながらグローバル(地球的)なものである必要がある。木材利用の炭素貯蔵効果で言えば、地球上のどこの国であれ輸入材でも国産材でも木材製品の炭素蓄積量が増加すれば、評価されようがされまいが大気中の二酸化炭素が取り除かれたのである。評価手法の選択は単にインターナショナル(国家間)な問題である。結論は 2010 年メキシコの COP16 に持ち越されることになったが、結果がどうであれ、木材利用振興は温暖化対策に貢献できるとの信念を持ち、一層の努力を進めたいものである。

3.2 「伐採木材製品の取り扱い」に関する円卓会議の提言（外崎真理雄）

提言書

環境・経済・社会的に持続可能な木材利用の推進を目指して
ポスト京都議定書における「伐採木材製品の取り扱い」について

私たちは、気候変動枠組み条約における「伐採木材製品の取り扱い」に関する議論の進展に関心を持ち、円卓会議を開催してきました。その審議を踏まえ、座長の責任において、以下のように取りまとめました。

京都議定書第一約束期間(2008年～2012年)では、森林によって吸収された二酸化炭素は木材伐出と同時に排出されると見なすデフォルト法が採用されており、ここでは、伐採木材製品における炭素貯蔵効果が評価されていません。

大気中の二酸化炭素を減らすためには、健全な森林資源の蓄積を世界的に増やし、伐採された木材の長期使用や材料リサイクルの拡大によって、木造建築物、木質建材、紙など木材関連製品中の炭素蓄積量を増やすことが必要です。また、省エネルギー的な木材製品への代替、木質バイオマスエネルギー利用の適切な推進によって、化石燃料の消費を減らすことも有効です。

持続的林業からの木材はカーボンニュートラルであり非枯渇性資源です。しかし、森林資源は偏在しています。木材資源の循環を地球規模で大きくするためには、森林資源国における林業の経済的地位を高めることによって森林に資金を還流させることや、木材消費国における伐採木材製品の炭素貯蔵を評価することで、温暖化防止への意欲を持たせることが必要です。

そのため、次期約束期間(2013年～)の伐採木材製品評価手法として、地球益を優先しつつ、持続的林業ならびに木材資源の自立、循環利用を推進する立場から、現行の勘定方法は見直されるべきであると考えます。参加団体の多くは、環境、経済、社会的に持続可能な木材利用推進を図る上で、蓄積変化法を評価すべきという主張に理解を示しました。さらに、途上国において森林が過度に伐採されることを避けるため、輸出国における適正な森林管理が担保される仕組みが必要であることについて意見が一致しました。

これらの内容を国民の皆様にお知らせするとともに、気候変動枠組条約締約国会議の特別作業部会 AWG-KP および次期枠組み交渉担当者である政府機関に配慮いただくよう提言いたします。

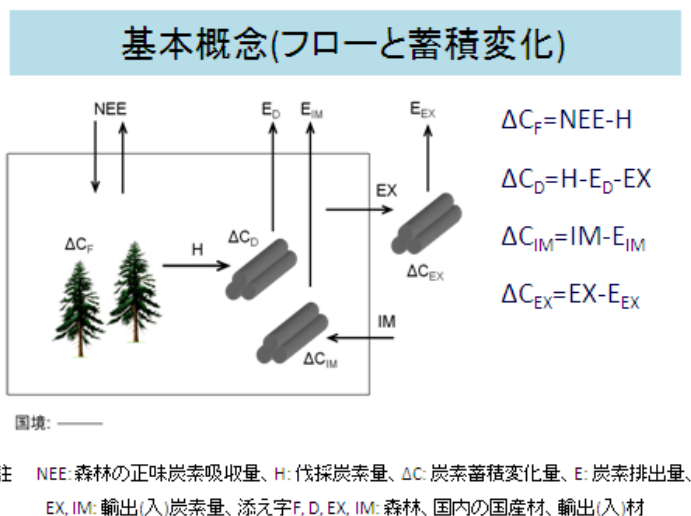
平成 20 年 11 月 26 日

「伐採木材製品の取り扱い」に関する円卓会議
座長 服部順昭

ポスト京都議定書における「伐採木材製品の取り扱い」に関する補足説明

2013 年以降の第二約束期間の削減枠組みについては、2007 年にバリで開催された締約国会議 COP13 で、2009 年コペンハーゲンでの COP15 までに決めるというバリ行動計画が採択された。

それに伴い、二つの特別作業部会が設立され、伐採木材製品評価を含む森林吸収源に関する議論が「京都議定書の下での附属書 I 国の更なる約束に関する特別作業部会 AWG-KP」で行われている。林野庁と環境省は AWG-KP へ担当者を派遣し、国際交渉に当たっている。科学技術補助機関 SBSTA は伐採木材製品評価についての技術的検討を行う予定である。



大気中に 0.04%しか含まれない二酸化炭素を削減するためには、森林面積の拡大や劣化した森林の回復などにより森林炭素蓄積量を増加させることが、実現可能性と経済性からも最も有効な手段である。

森林は、伐採(H)などを行わずに放置されると、二酸化炭素の吸収と排出が均衡するので、蓄積量が一定となり($\Delta C_F = 0$)、二酸化炭素を削減する働きが無くなる($NEE = 0$)。生長量を下回る伐採を行う持続的林業では、森林蓄積量は減少せず($\Delta C_F \geq 0$)、二酸化炭素削減が続けられると共に、持続的に木材が生産される($H > 0$)。このようにして生産された木材製品が増加すること($\Delta C_D + \Delta C_{IM} \text{ or } \Delta C_{EX} > 0$)は、生産林が大気中から吸収し続けている二酸化炭素を人間社会の領域に隔離することになり、削減となる。

以上のことから、二酸化炭素の最大の削減は、森林と木材製品の炭素貯蔵($C_F + C_D + C_{IM} \text{ or } C_{EX}$)を最大化することという図式が導き出される。ただし、森林の蓄積量増加と伐採木材製品の増加はバランスを持って行うことが重要である。樹木に固定された炭素の内、長寿命製品となる炭素量は 3 割程度であることから、伐採利用の拡大だけではなく、製品の長期利用と適切な材料リサイクルによっても行われるべきである。

持続的林業から生産される木材はカーボンニュートラルであり、化石燃料を代替することは排出削減となる。また、少ないエネルギーで製造できる木材製品により製造時に大量にエネルギーを使う他材料製品を代替することも排出削減に貢献する。これらの削減効果を最大化にするためには、世界的規模での木材資源の循環利用を促進すること、すなわち、伐採木材製品の需要の増加が不可欠である。木材製品の増加は他材料代替が進むことを意味し、需要の増加によりエネルギー利用すべき残廃材量も拡大するからである。

第一約束期間で適用されるデフォルト法は、ある年の伐採量と木材製品の廃棄による炭素排出が等しいという取り扱いがされる($H = E_D + E_{EX}$)ので、伐採木材製品の増加による炭素貯蔵効果を評価して

いない($\Delta C_D + \Delta C_{IM}$ or $\Delta C_{EX} = 0$)。従って、建築物など長寿命製品を増加させ伐採木材製品の炭素貯蔵量を拡大するインセンティブが生じない。しかも、木材のカーボンニュートラル性により、化石燃料代替が排出削減と評価されることから、木質系残廃材のエネルギー利用のみが促進され、省資源効果や炭素貯蔵の延長効果が大きい材料リサイクルは促進されない。さらに、持続的林業では、定常状態で森林蓄積変化がゼロ ($\Delta C_F = 0$) に近づき、木材生産が続けられているものの、その貢献が評価されない。

現在提案されている伐採木材製品の炭素貯蔵効果評価手法である蓄積変化法・生産法(シンプルディケイ法を含む)・大気フロー法は、デフォルト法と異なり、伐採木材製品の炭素貯蔵を評価している。手法による評価結果の差異は国境を越えて取引される輸出入材の炭素貯蔵をどの国の削減勘定に入れるかという点にある。国産材を国内利用する場合には手法による差はなく、世界全体で見ると、どの手法でも同じ評価結果になる。

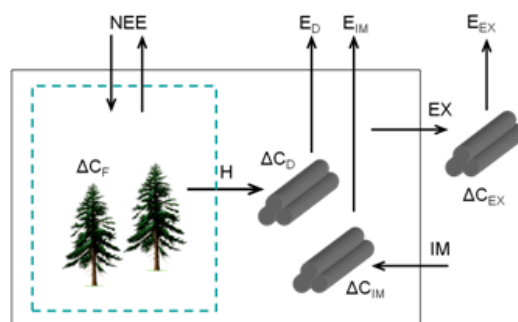
木材利用の炭素貯蔵効果が評価される

際、埋め立て地における木材炭素貯蔵を建築物など利用中の物と同じ取り扱いをすべきか否かが問題となる。埋め立ては、材料・エネルギーリサイクルに比べてコストや努力を要せず、森林における省資源・化石燃料の節約に貢献しないので、削減努力が正当に評価されるべきと言う京都議定書にそぐわないことから、埋め立てによる木材炭素の増加は、少なくとも削減と評価すべではないと考える。

大気フロー法では、吸収は常に森林を持つ輸出国に付けられることから、本来カーボンニュートラルである木材の利用による炭素排出はカーボンニュートラルでない化石燃料からの炭素排出と同じであると評価される。そのため、エネルギー効率が低い木質燃料を使うより化石燃料を使用した方が排出が少ないことになる。また輸入量以上の輸入材由来の蓄積変化はあり得ない ($IM > \Delta C_{IM}$) ため、輸入木材を使用するインセンティブが働かない。さらに、製材・紙など製品輸入をした方が残材・黒液からの排出を輸出国に負わせることができ、二酸化炭素排出を逃れられるので、有利となり、輸入素材を利用し残廃材を発生する国内木材産業は炭素排出産業となる。また、輸出時に炭素吸収の評価が得られるため、産出国の森林破壊による木材輸出に歯止めが掛からない可能性がある。

デフォルト法(Default Approach)

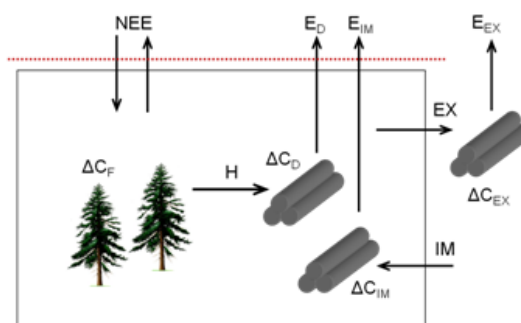
$$D = \Delta C_F = NEE - H$$



システム境界 D: - - - - - 国境: ———

大気フロー法(Atmospheric Flow Approach)

$$AF = \Delta C_F + \Delta C_D + \Delta C_{IM} - IM + EX = NEE - E_D - E_{IM}$$

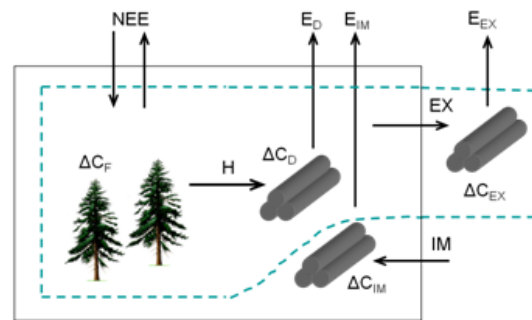


システム境界 AF: - - - - - 国境: ———

生産法では輸入材由来の蓄積変化は評価されないため、森林資源が乏しい国が木材利用を拡大しようとするインセンティブが働かない。従って、国際的に木材資源利用を拡大していくことには結びつかない。算定基準となる報告において国産材・輸入材の分離は困難であり、輸出家の用途は不明で、信頼性は低い。輸出国が輸出先国での木材利用を制御できず、国の政策責任と得られる評価の関係が断絶している。伐採木材製品の炭素貯蔵量の増加に最も寄与するのは、木材製品を選択した最終需要者であり、温暖化対策のために努力した者が正当な評価を受けるべきとの京都議定書の精神に反している。吸収自体は輸出国で生じているとの考え方もあるが、木材資源利用の特徴は木材消費が木材生産を促すことであり、木材生産が無い森林は、いずれ成熟して、二酸化炭素をそれ以上吸収しなくなるという因果関係を理解すべきであろう。また輸出先国における蓄積増加が輸出国で評価されるため森林破壊による木材輸出をあまり抑制しない。

生産法(Production Approach)

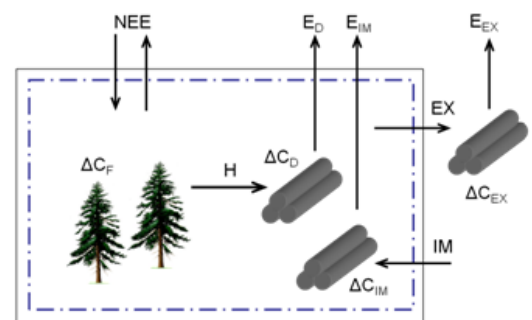
$$P = \Delta C_F + \Delta C_D + \Delta C_{EX} = NEE - E_D - E_{EX}$$



システム境界 P: - - - 国境: —

蓄積変化法(Stock Change Approach)

$$SC = \Delta C_F + \Delta C_D + \Delta C_{IM} = NEE + IM - EX - E_D - E_{IM}$$



システム境界 SC: - - - 国境: —

蓄積変化法は、森林資源が乏しく輸入木材に頼るしかない国でも積極的に木材利用を促進し、木材製品の炭素貯蔵を増加させることにインセンティブを与える。木材貿易が促進されることにより、豊かな森林資源を持つ輸出国は経済的利益を得ることになる。林業の経済的価値が上昇することにより、森林破壊の抑制や森林面積の増加を促し、持続的林業の拡大が保全すべき天然林への伐採圧力の低減にもつながる。一方、現在削減約束に加わっていない途上国で過度の伐採が進み、輸出に回されることが懸念されるので、輸出国において適正な森林管理が担保されるように、広義の森林認証制度や長期的利益に配慮した政策が必要である。提案されている3つの手法の中で評価結果の格差は最も小さく、世界の全ての国々の木材製品を選択する消費者・木材産業に温暖化対策に貢献しているというポジティブなメッセージを与えることになる。ここでも、評価結果は蓄積変化であるため、エネルギー利用におけるカーボンニュートラル性は保たれる。また、材料リサイクルによる省資源・炭素貯蔵と木質エネルギー利用の間に適切な競合関係が生じ、両者のバランスが取れていくことが期待される。

3.3 伐採木材の取り扱いに関する土木学会の検討結果（橋本征二）

3.3.1 検討の経緯

我々の経済社会に存在する伐採木材製品は、森林生態系とともに炭素の貯蔵庫としての役割を果たしている。国連気候変動枠組条約京都議定書では、特定の森林等吸収源活動（植林、再植林、森林減少、森林管理、耕作地管理、牧草地管理、植生回復）による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いる、もしくは用いることができるとしているが、伐採木材製品による炭素の固定はこれらの活動には含まれていない。現在、京都議定書の第1約束期間が終わる2012年以降のルールに関して議論が進められているところであるが、伐採木材製品の取り扱いも論点の一つとなっている。

このような中、持続可能な形で木材利用促進の立場から、伐採木材製品による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いることができるようにする提言を、複数の学協会（「伐採木材の取り扱い」に関する円卓会議。以下「円卓会議」）から政府に対して行うための協力要請が、日本木材学会から土木学会に対してなされた。土木学会では、本問題に関連を持つ専門家（本稿の執筆者ら）によって分野横断的な『土木学会「伐採木材の取り扱い」に関する検討会』を臨時に構成して検討を行い、検討会としての意見書を取りまとめた。本発表では、この意見書の概要について報告する。

3.3.2 判断基準

伐採木材製品に関わる炭素の勘定方法には、蓄積変化法、生産法、大気フロー法などいくつかの方法があることから、伐採木材製品による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いるためには、これらの勘定方法のいずれを採用すべきかを決める必要がある。このためには、各勘定方法を採用した場合の得失を明らかにしなければならない。

検討会では、まず、その得失を判断するための基準を明確にすることとした。我々が目指すべき方向は持続可能な森林管理と木質資源の利用であり、これらを促進することがその判断基準となるべきと考えた。これらを地球温暖化防止の観点から整理すると、以下の2つの判断基準及びその派生的な判断基準が設定できる。

- (1) 森林の炭素蓄積を、主に森林減少地域において減少させないこと、また、その他の地域においてはこれをできるだけ増加させること
 - (1a) 森林が豊富な国は、まず国内の森林をできるだけ使用し、輸入材を用いる場合は、輸出国の森林が保全されていること
 - (1b) 木製品のリサイクルと長期利用によって森林を保全すること
- (2) 森林の成長の範囲内で木材をできる限り利用し、エネルギー集約度の高い製品から木材に替えることによる省エネルギー効果と木材の炭素貯蔵効果、木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果によって二酸化炭素の排出量を削減すること
 - (2a) マテリアルとしての利用を促進すること
 - (2b) 廃木材のエネルギー利用を適切に促進すること

3.3.3 検討結果の概要

検討会では、各勘定方法（現状のまま勘定しない方法、蓄積変化法、生産法、大気フロー法）の特徴を取りまとめるとともに、上記の判断基準をもとに以下のような意見を取りまとめた。

・ 木材利用, 特にマテリアル利用を積極的に推進するという目的 (2a) には蓄積変化法が適切である。蓄積変化法は輸入材の積極的な利用を推進することから, 世界的な木材取引を活性化させ, 森林管理のための資金を森林にもたらす可能性がある (1)。

・ 一方, 輸出国において適切な森林管理が担保されるかどうかについての懸念が存在する (1)。特に, 排出抑制・削減義務を持たない途上国においては過剰伐採によって森林減少による排出増加の可能性もある。また, 日本が輸入材の利用をさらに促進し国内の森林を放置することが適当とは考えにくい (1a)。

・ 生産法は, 蓄積変化法とともに森林保全 (1) のインセンティブを現状より弱める可能性があり, 大気フロー法は森林保全 (1) を担保しない。

・ 現状でも木材利用のインセンティブはあるが, 現状のままではこれをさらに推進していくインセンティブとはならない。しかし, 森林保全 (1) のインセンティブを最も持つとともに, 上記の判断基準に対して負のインセンティブが最も少ない。

また, 意見書では以上のような検討を踏まえ, 仮に円卓会議が蓄積変化法を採用するよう提言する場合に留意すべき点を取りまとめている。

2008 年 11 月 20 日

伐採木材製品の炭素蓄積変化の勘定方法について検討する際には、その判断基準を明確にする必要がある。我々が目指すべき方向は持続可能な森林管理と木質資源の利用であり、これらを促進することがその判断基準となるべきである。これらを地球温暖化防止の観点から整理すると、以下の2つの判断基準及びその派生的な判断基準が設定できる。

(1)森林の炭素蓄積を、主に森林減少地域において減少させないこと、また、その他の地域においてはこれをできるだけ増加させること

(1a)森林が豊富な国は、まず国内の森林をできるだけ使って、国外の森林を保全すること

(1b)木製品のリサイクルと長期利用によって森林を保全すること

(2)森林の成長の範囲内で木材をできる限り利用し、エネルギー集約度の高い製品から木材に替えることによる省エネルギー効果と木材の炭素貯蔵効果、木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果によって二酸化炭素の排出量を削減すること

(2a)マテリアルとしての利用を促進すること

(2b)廃木材のエネルギーとしての利用を促進すること

現在の IPCC デフォルト法に加えて、現在提案されている「大気フロー法」、「生産法」、「蓄積変化法」の特徴をまとめると、以下の表ようになる。

木材利用（マテリアル利用）の積極的な推進（2b）という本円卓会議の目的から考えると、提言書（案）にあるように蓄積変化法が適切な方法であると考えられる。また、生産法や大気フロー法と比較すると、生産者ではなく、費用を払って木材を利用する最終需要者にインセンティブを与える方法である。

一方で、蓄積変化法は輸入材の積極的な利用を推進することから世界的な木材取引を活性化することが予想されるが、輸出国において適切な森林管理が担保されるかどうか（1）についての懸念が存在する。特に、京都議定書の枠組みでは途上国は削減（あるいは排出抑制）の義務を負っておらず、全世界で温室効果ガスの削減についての枠組みが共有されていない状況において木材取引を活性化することは、削減義務を持たない途上国における実質的な森林の減少をとまなう排出の増加につながる可能性も考えられる。また、日本のように森林の豊富な国が、国内の森林を維持しつつ輸入を促進することが適当とは考えにくい（1a）。さらには木材取引の活性化により木材価格の上昇が予想される。これは森林・木材産業の成長に貢献するが、一方で相対的に化石燃料の価格が安くなることで木材のエネルギー利用率（2a）が低くなり、その結果化石燃料の利用率を上げる可能性も指摘される。

なお、表に示すとおり、大気フロー法、生産法にもそれぞれ得失がある。上記の基準に照らしたとき、生産法は、森林保全（1）のインセンティブを現状より弱める可能性があり、大気フロー法は森林保全（1）を担保しない。これに対して現在用いられているデフォルト法は、木材資源の利用をさらに推進していくインセンティブとはならないが、森林保全（1）のインセンティブを最も持つとともに、上記の基準に対して負のインセンティブが最も少ない。

仮に円卓会議が蓄積変化法を採用するよう提言する場合には、以下に示す事項をその前提条件とすべきであると考えらる。

- 森林および木材製品全体での炭素蓄積の増加は、森林そのものの炭素蓄積の維持もしくは増加が前提であり、森林減少につながらないような制度設計がなされること。特に輸出国において適切な森林管理が担保されるような制度設計がなされること。具体的には森林認証制度などの活用が考えられる。
- 輸入材にのみ大きなインセンティブを与えるのではなく、国産材の利用にも適切なインセンティブが与えられること。具体的には、国産材の炭素蓄積変化のみを勘定することなどが考えられる。
- 木材価格の急激な上昇や下落を避け、木材利用が安定的に行われるような配慮がなされること。
- また、蓄積変化法に限らないが、伐採木材製品の蓄積は実際に利用されているものを計上し、埋立処分場などに廃棄されている木材製品への蓄積は含まないこと。

伐採木材における炭素吸収量の勘定方法とその特徴

		IPCC デフォルト法	大気フロー法	生産法	蓄積変化法
考え方	国産木材製品の国内利用における炭素貯留効果	考慮されない	考慮される	考慮される	考慮される
	外国産木材製品の国内利用あるいは国産木材製品の海外利用における炭素貯留効果	考慮されない	国産材と輸入材の両者について利用した国での利用後の排出が計上される	木材の生産国（輸出国）における蓄積となる	木材製品の利用国（輸入国）における蓄積となる
経済的な影響	木材輸出への影響	現状	輸出後の木材からの排出は輸入国へ計上されるため、輸出国では森林への炭素吸収のみが勘定されるので、輸出が現状より奨励される	輸出後の木材における蓄積は輸出国における蓄積となるため、輸出が現状より奨励される	輸出後の木材における蓄積は輸入国における蓄積となるため、現状と変わらない
	木材輸入への影響	現状	輸入木材の排出は輸入国へ計上されるため、輸入を現状より妨げる	輸入木材の蓄積は輸出国における蓄積となるため、現状と変わらない	輸入木材の蓄積は輸入国における蓄積となるため、輸入は現状より奨励される
	木材価格への影響	現状	生産国側へのインセンティブが強く、輸入はディスインセンティブとなるので、現状より大幅に下落する可能性がある。	生産国側へのインセンティブが強いので、現状より下落する可能性がある。	利用国側へのインセンティブが強いので、現状より上昇する可能性がある。
	木材産業への影響	現状	現状より木材価格の下落により衰退する可能性がある	現状より木材価格の下落により衰退する可能性がある	現状より木材価格の上昇により好影響が見込まれる
木材利用への影響	輸入木材の利用拡大	現状（木材製品のみを考えた場合に数式上はインセンティブを与えないが、エネルギー集約度の高い素材をエネルギー集約度の低い木材に置き換えること自体に省エネ効果があり、別途インセンティブを与えられている。）	生産国側への供給インセンティブは現状より強まるが、輸入はディスインセンティブとなるので利用の拡大は期待できない。	生産国側への供給インセンティブは現状より強まり、省エネ効果については別途インセンティブが既に与えられているので利用の拡大につながる可能性がある。	利用国側へのインセンティブが強いので、現状より積極的な木材利用が行われる。

国産木材の利用拡大	現状（輸入木材と同様にエネルギー集約度の高い素材の代替効果によるインセンティブはあるが、国内の森林伐採は妨げる。）	木材の伐出後ではなく、製品としての利用後に排出として勘定されるため、現状より奨励される。	木材製品への蓄積が勘定されるため、現状より利用拡大が奨励される。	木材製品への蓄積が勘定されるため、現状より利用拡大が奨励される。
木材の長期利用	現状（伐出は排出なのでなるべく長期利用させるインセンティブにはなっている。）	国産材、輸入材ともに廃棄は利用者側へのディスインセンティブとなるため、現状より長期利用が行われる。	輸入材については利用者側へのインセンティブがないが、国産材はインセンティブがあるので現状より長期利用が行われる。	国産材、輸入材ともに利用者側へのインセンティブがあるため、現状より長期利用が行われる。
再生木材製品による他素材製品の代替（例：鉄製品から木材製品へ）	現状（エネルギー集約度の高い素材の代替効果によるインセンティブはある）	使用後木材からのCO ₂ 排出が計上されるため、マテリアルリサイクルを現状より奨励する	使用後木材からのCO ₂ 排出が計上されるため（ただし、国産材からの排出のみ）、マテリアルリサイクルを現状より奨励する	使用後木材からのCO ₂ 排出が計上されるため、マテリアルリサイクルを現状より奨励する
再生木材製品による新規木材製品の代替（例：新紙から再生紙へ）	製品蓄積量が変わらない状況において、マテリアルリサイクルは、新規木材の伐出を抑制するため、森林の炭素蓄積を増加させる。一方、通常マテリアルリサイクルは化石燃料消費を増加させるため、化石燃料起源の排出量が増加する。両者の関係によってマテリアルリサイクルを促進するかどうかが決まる。			
自給率の向上	現状	輸入材と国産材ともに利用後に排出となるので、国産材の利用を現状より奨励する	国産材は蓄積を勘定するので、輸入材より国産材の利用を現状より奨励する	国内の森林を切らずに木材を輸入した方が有利なため、現状より妨げる
植林や適切な管理による森林への炭素貯留（蓄積）	現状（森林蓄積のみを考えるため、森林を適切に保全して炭素貯留を推進することを最も奨励する。）	輸出した場合に使用後に輸入国での排出として計上されるため、森林への蓄積を減らしても輸出しようとすることを奨励する	現状より弱いインセンティブはある。	現状より弱いインセンティブはある。

※この表における木材製品への蓄積には、使用後埋立処分場等へ廃棄されている木材への蓄積は含まない。

4. 土木における木材利用に関する資源利用ビジョン

4.1 英国グリーンガイド及び CEI-bois の調査報告（山口秋生，今村祐嗣）

4.1.1 はじめに

平成 20 年 12 月に英国のグリーンガイド及び欧州木材連合 CEI-bois の木材使用促進の活発な活動実態を把握するために、日本木材防腐工業組合、日本木材保存協会及び木材関係諸機関、諸団体とともに、欧州へ調査団(※1)を派遣した。グリーンガイドを作成した BRE（Building Research Establishment：建築研究所）を訪問し、グリーンガイド成立の背景、そのメカニズムなどについて調査し、また、モデル棟、分譲住宅の施工現場、自治体の施設などを訪問して実際の運用面を確認した。また、欧州木材連合 CEI-bois においては、森林由来の製品（forest based products）を扱う全ての業界が大同団結して、二酸化炭素削減につながる木材利用推進のために、具体的な数値目標をもって取り組んでいる活動が確認できた。

4.1.2 英国グリーンガイド

建物の環境評価をするスキームはわが国を始め世界各国にあるが、英国のグリーンガイドのユニークなところは建築部位ごとにライフ・サイクル・アセスメント（以下、LCA）に基づいて材料間の比較をしていることである。その結果、木材はサステイナブル性において、鉄はリサイクル性において、コンクリートは断熱性において、各々有利な評価となっているが、特に木造住宅を建てることや、木材製品を使うことが材料の環境側面から相対的に有利になっている。

このグリーンガイドの効果をさらに推し進めるしくみが 2008 年 5 月より施行された「サステイナブル住宅基準法」（以下、「基準法」）であり、この基準法の中では建築物をエネルギーの節約、自然エネルギーの利用、廃棄物の削減など環境負荷に応じて 6 段階に区分して評価する。建築材料についてはグリーンガイドを利用して点数評価する。現在、公営住宅など政府資本による建築物には基準法の適用が義務付けられておりレベル 3 を達成することが要求される。基準法はさらに各自治体において具体的な年度目標を設定して取り組んでいる。BRE の敷地内にはイノベーション・パークと称して各レベルのモデル棟を建築しデータ取りを実施している。コンクリート造、鉄骨造に混じって木造のレベル 6 のモデル棟もあった。よりレベルの高い住宅をより経済的に提供することを目指している。

4.1.3 CEI-bois

EU25 カ国の森林資源をベースにした製品を扱う業界が大同団結して結成された CEI-bois(European Confederation of Woodworking Industries)は、サステイナブル社会の形成、木材関連製品の競争力のアップ、その為の技術革新を理念に活動している。この理念を各国で落とし込み、国単位で、技術革新を実現するためのアクションプランを持っている。

また、2010 年バンクーバーオリンピック、2012 年ロンドンオリンピックに向けて、木造建築物の推進と一般消費者への啓蒙活動をキャンペーンとして行っている。具体的な数値目標としては、“ロードマップ 2010”と称して、EU における全木材産業の年間成長率が 2003 年は 1 %であったが、これを 2010 年に 4 %まで上昇させる。この成長率は、年間 1.5 億トンの二酸化炭素削減効果相当と言われている。

4.1.4 土木分野における木材利用促進

EU では、高速道路における木製遮音壁、木橋など道路施設への木材利用が普通に見られる。また、

公共施設での広場における木製デッキなど、建築分野だけでなく土木分野における木材利用が進んでいる。今回の欧州調査において、英国が 2050 年までに二酸化炭素を 80%削減することを閣議決定し、グリーンガイドの成立、サステナブル住宅法を成立させ、目標達成の施策がおこなわれていることを確認した。日本においても、日本版グリーンガイド成立に向け行動を起こす必要性を感じたが、建築分野だけでなく、道路施設、河川関係などの土木分野においても、グリーンガイドを参考にした、土木分野における材料の評価方法が導入されれば、土木分野における木材利用促進に結びつくと考え

※1: 調査団: 越井潤(日本木材防腐工業組合)、松本義勝(〃)、中谷博(〃)、神谷直秀(〃)、前田恵史(〃)、今村祐嗣(JWPA)、宮俊輔(林野庁)、平岡昇((財)日本住宅・木材技術センター)、平野陽子(㈱ドットコーポレーション)、以上 9 名

4.2 日本の森林資源と木材供給の長期的見通し（久保山裕史）

4.2.1 はじめに

1980年代の米国において、林産物市場の需給に関する長期推計を行うための近代的なシミュレーションモデル TAMM が開発された。これは、森林資源モデル ATLAS と連動する形となっており、資源状況と市場動向とを見通すことによって長期的な政策立案に役立てられてきた。その後、IIASA-GTM や GFPM といった世界の木材貿易と森林資源を包括的に取り扱うモデルが開発され、関税や違法伐採材の影響を経済分析するために用いられてきた。

一方、日本においては、天野・野田（1987）による減反率モデルが森林計画の策定等に用いられてきた。しかし、このモデルは伐採率を経済変数を入れずに決定するため、木材価格が低下するにもかかわらず、一定の伐採率の下で丸太供給が増えてしまうという問題があった。これに対して筆者ら（2006）は、林種、伐採方法、林齢階別の伐採率を、立木価格や林齢、利子率等の説明変数を用いて推計し、それに基づいて伐採面積や丸太供給量等を分析する林齢分布評価システム（FADAS：Forest Age Distribution Assessment System）を開発した。そこで本論では、FADAS を用いて将来の丸太生産量、森林の林齢分布、炭素貯留量について検討を行ったのでその概要について述べる。

4.2.2 データとシナリオ

(1) データ

伐採率は、林野庁の業務資料である伐採照査結果を森林資源現況の森林面積で割った値を用いた。立木価格には不動産研究所「山林素地及び山元立木価格調（2008）」のスギ全国平均実質価格を用いた。利子率には 10 年物国債の年平均利率、林地開発面積は森林・林業統計要覧（林野庁，2008）、気象災害実損面積は森林国営保険事業統計書（林野庁，2008）をそれぞれ用いた。なお、林齢ごとの ha 当たり平均蓄積は森林資源現況等から導いた図-4.2.1 の値を用いた。

(2) シナリオ

a) 現状維持

素材生産費等調査報告書（林野庁，2008）によれば、図-4.2.2 のように伐出の生産性は年率 5% で上昇していたにもかかわらず、伐出・運材費は 2002 年まで漸増してきた。これは、労賃もほぼ同率で上昇してきたためであり、近年においては上昇が止まったために伐出・運材費は低下してきている。ここでは、この傾向は今後も続く、すなわち伐出・運材費は低下することを前提とした。他方、現状の林産業の競争力はそれほど高くなく、それが今後も継続し、伐出・運材費の低下とともに丸太価格も低下する、すなわち立木価格は一定とした。なお、林業意欲の向上は考えにくいことから、再造林率は 50% とした。

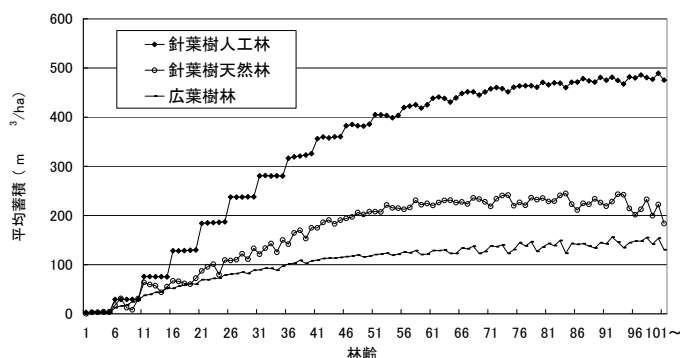


図-4.2.1 林種ごとの林齢と平均蓄積との関係

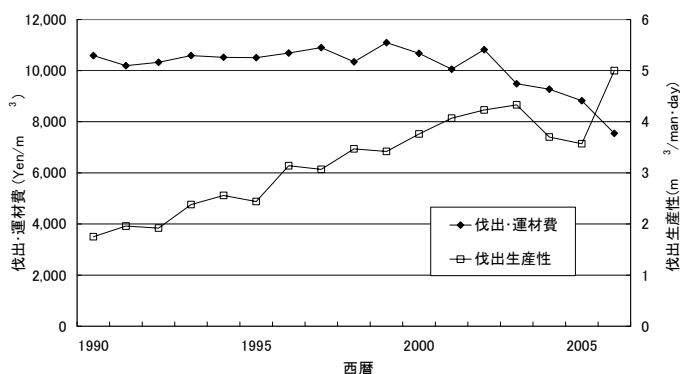


図-4.2.2 伐出のコストと生産性の推移

b) 活性化

林産業の競争力が向上するシナリオとした。すなわち、丸太価格は現状を維持するので、伐出・運材費の低下とともに立木価格が上昇するものとした。収入拡大を通じて再造林率は80%になるものとした。

4.2.3 シミュレーション結果

(1) 丸太供給量

現状維持の場合でも丸太供給量は1000万 m^3 増加した。活性化の場合、5千万 m^3 弱まで供給量が増加した（針葉樹3500万 m^3 、広葉樹1400万 m^3 ）。

(2) 林齢分布

民有人工林は、いずれのシナリオでもそれほど皆伐が進まず、図-4.2.4に示したように70年生以上へと大きく偏り、若い林が極端に少ない構成となった。他方、民有広葉樹林では、現状維持の場合には、人工林と同様に高林齢へと大きく偏る結果となったが、活性化の場合には、伐採更新が進んだ結果、若い林が増えた。

(3) 森林の炭素貯留量

現在、人工林の林齢はまだ若いため成長（炭素貯留量）は旺盛である一方で主伐量はわずかなことから、森林は CO_2 の大きな吸収源となっている。しかし、図-4.2.1のように高林齢の成長量が低い仮定の下では、伐採量が増加すれば炭素貯留量は急激に減少することになる（図-4.2.6）。現状維持の場合、2050年頃に森林は CO_2 排出源となったが、活性化ではそれが2030年に早まった。

4.2.4 まとめ

今後、伐採量を拡大すると森林の CO_2 吸収量は大きく減少する可能性が高い。しかし、伐採木材の利用拡大による炭素貯留、省エネ、代替効果や林地残材および製材残材のエネルギー利用による代替効果を総合すれば、森林セクター全体としては超長期にわたって吸収源となる可能性があると考えられる。

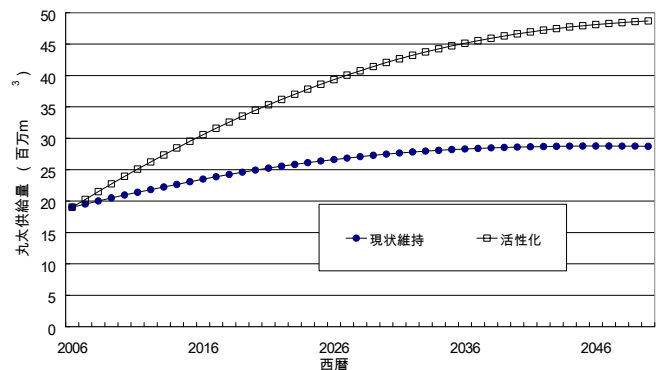


図-4.2.3 丸太供給量の推計結果

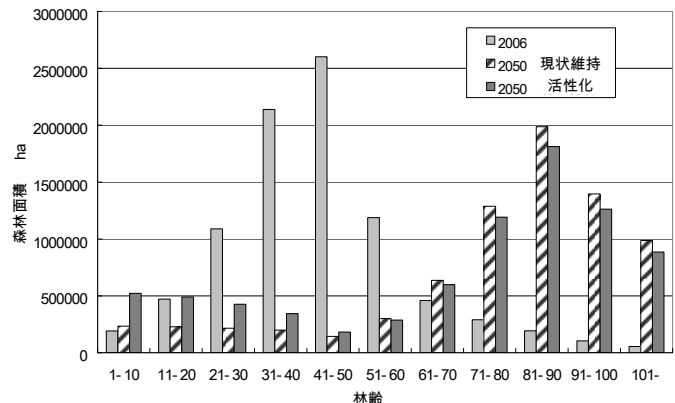


図-4.2.4 民有針葉樹人工林の林齢構成

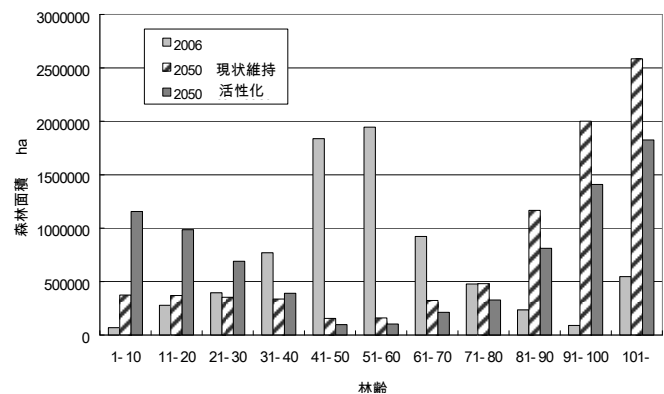


図-4.2.5 民有広葉樹林の林齢構成

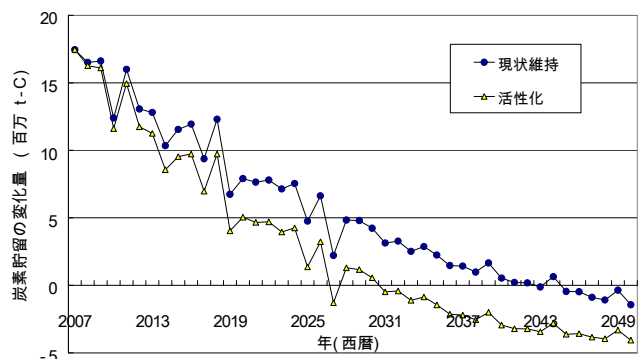


図-4.2.6 森林における炭素貯留量の変化

4.3 炭素ストック変化を考慮した木材のエネルギー利用による実質炭素収支について（加用千裕）

(1) はじめに

地球温暖化対策のひとつとして木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果が注目されている。しかしその一方で、木材の伐採によって森林における炭素ストックは長期的に変化することが予想され、その影響を考慮しながら今後どのように木材利用を図っていくかを戦略的に検討していく必要がある。そこで本研究では、木材の発電やバイオエタノールへの利用に着目し、化石燃料代替に伴う CO₂ 排出削減と森林における炭素ストック変化の双方を考慮した実質的な炭素収支を 2050 年まで推計した。ここでは、日本国内の森林面積全体の約 20% に相当する約 512 万 ha を積極的な資源利用を図る利用対象森林とした。

(2) 推計方法

2050 年までの人口と世帯数の推定値に基づいて住宅用・製紙用木材の需要を予測し、利用対象森林においてそれら木材の生産面積を推定した上で、残りの森林をエネルギー用木材として利用することを想定した。その際、エネルギー利用を行わず既存の森林を保全する(FP)、従来樹種を 45 年や 30 年の周期で植林・伐採しながらエネルギー利用を行う (CT-45, CT-30)、既存の森林を段階的に初期成長の早い早生樹種へ転換し、10 年の周期で植林・伐採しながらエネルギー利用を行う (FT-10)、といったシナリオを設定し、エネルギー用木材生産量（図-4.3.1）と利用対象森林における炭素ストック量（図-4.3.2）を推計した。また、木材の発電やバイオエタノールへの利用のライフサイクルにおける化石燃料消費由来の CO₂ 排出量を算定し、天然ガス発電やガソリンとの代替による CO₂ 排出削減量を評価した。

(3) 推計結果

利用対象森林における炭素ストック量の推移（図-4.3.2）を見ると、エネルギー用木材の生産を行わない FP シナリオでは、炭素ストック量が徐々に増加し 2050 年に 2005 年の約 1.4 倍になるが、エネルギー用木材の生産を行う CT-45, CT-30, FT-10 シナリオでは、炭素ストック量が長期的に減少した。エネルギー用木

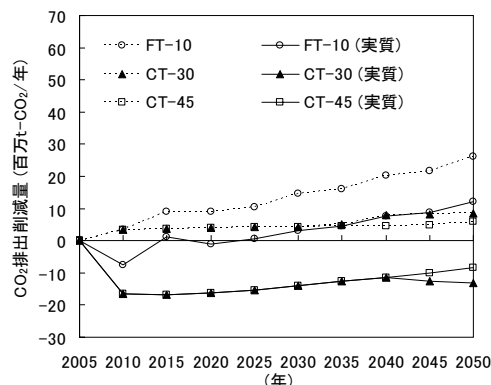


図-4.3.1 エネルギー用木材生産量の推移

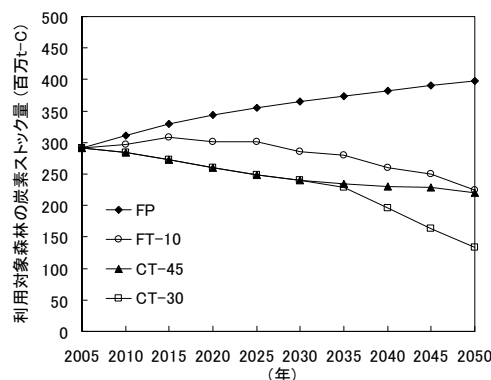


図-4.3.2 利用対象森林における炭素ストック量の推移

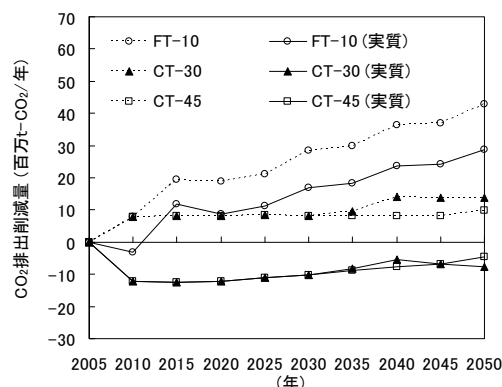


図-4.3.3 バイオエタノール利用による実質的な CO₂ 排出削減効果
(+ : CO₂ 排出削減, - : CO₂ 排出増加)

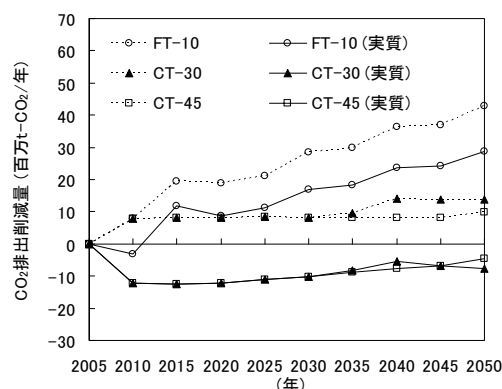


図-4.3.4 木質発電利用による実質的な CO₂ 排出削減効果

材のバイオエタノール利用による CO₂ 排出削減効果（図-4.3.3）において、ガソリン代替による化石燃料削減に伴う CO₂ 排出削減量（図-4.3.3 の点線）に、森林における炭素ストック量の減少(FP シナリオ基準)を考慮すると、実質的な CO₂ 排出削減量（図-4.3.3 の実線）は大幅に小さくなった。特に、従来樹種の植林・伐採を行う CT-45 や CT-30 シナリオでは、実質 CO₂ 排出削減量は 2050 年まで常にマイナスとなった。一方、早生樹種の植林・伐採を行う FT-10 シナリオでは、2025 年以降に実質 CO₂ 排出削減量が見込まれ、森林を保全するよりも効果が期待できることが分かった。また、発電利用による CO₂ 排出削減効果（図-4.3.4）においても、実質的な CO₂ 排出削減量（図-4.3.4 の実線）は大幅に小さくなったが、FT-10 シナリオでは、2010 年以降に実質的な削減が期待でき、バイオエタノール利用よりも削減効果は大きくなった。これらの結果から、木材利用による実質的な CO₂ 排出削減に向けて、炭素ストックの変化が与える影響を考慮することの重要性が示された。

4.4 木造住宅を対象とした木質資源循環による CO₂ 削減効果の検討（村野昭人）

(1) 木質資源循環による CO₂ 排出量の算定システム

a) 木質資源のライフサイクル CO₂ の評価対象

木造住宅に投入される木材のライフサイクル CO₂ を評価する上では、炭素固定効果、炭素吸収効果の取り扱いや、算定期間の設定等が大きく影響する。木材のライフサイクル CO₂ の評価対象のイメージを図-4.4.1 に示す。本研究では、木造住宅に用いられる木材が植林された時点から、住宅の解体直前までを評価対象とする。図中の①は、樹木の成長により炭素が吸収され、伐採されて建材となることで炭素が固定されることを示す。図中の②は、伐採と同時に、新たな植林を行うことによって、再び炭素吸収が始まることを示す。図中の③は、建材として固定された炭素が、構造物の運用期間中は固定されることを示す。図中の④は、建材として固定された炭素が、解体された後の焼却処理によって放出されるが、エネルギー回収を行うことによって、新規エネルギー代替効果が生じることを示す。この中で、①、③、④を合わせて評価することはダブルカウントとなるため、②、④を評価対象とする。

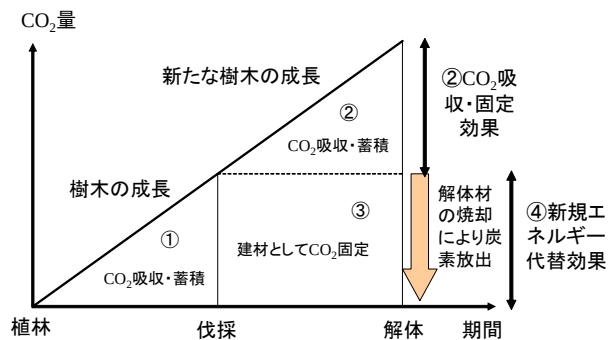


図-4.4.1 木材のライフサイクル CO₂ の評価対象

b) CO₂ 吸収による炭素固定効果・代替効果を含めた評価

木造住宅に投入される木材量を対象として、吸収期間別の平均炭素吸収量を算出する。その際、植林面積あたりの木材量として、林齢 60 年の人工林における幹材の蓄積量 378m³/ha を用いて、植林が必要な面積を算出した。植林面積の値に、面積当たりの CO₂ 吸収量推移のデータを乗じて、CO₂ 吸収量を求めた。なお、植林に必要なエネルギー量は考慮しない。

次に、木造住宅の運用期間を、30 年間と 60 年間に变化させた場合の、木材に由来するライフサイクル CO₂ を評価する。木材に吸収・蓄積された CO₂ は、建材として利用されることで炭素固定効果が発生するか、木材チップとして燃焼利用されることで重油代替効果が発生する。重油ボイラと木材チップボイラの熱効率は同じと仮定し、木材チップと同熱量を有する重油を代替するとして、代替効果を算出する。

(2) 木造住宅に投入される木材由来の CO₂ 排出量の評価

本研究では、部材として必要な太さに成長するまでに必要な期間を考慮して、植林から伐採

表-4.4.1 木材由来の CO₂ 評価におけるケース設定

	木質構造物の運用期間	部材別の植林から伐採までの期間		
		太	中	細
ケースA	30年	30年	30年	30年
ケースB	30年	30年	30年	10年
ケースC	60年	60年	60年	60年
ケースD	60年	30年	20年	10年

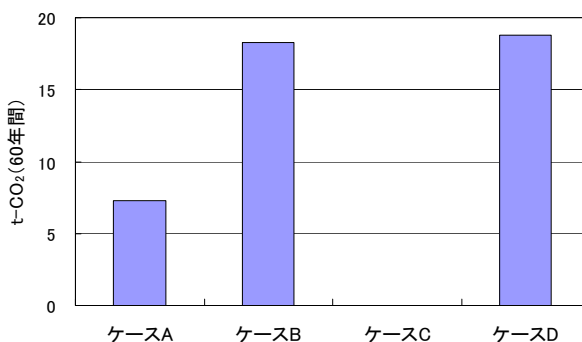


図-4.4.2 木造住宅における燃料代替効果 (60 年間, t-CO₂)

までの期間を表-4.4.1のように設定する。運用期間よりも吸収期間が短い場合には、吸収期間が終了すると伐採して燃料代替として利用し、再度植林を行うとした。

木造住宅に投入される木材量を対象として、各ケースにおける60年間のエネルギー回収に伴う重油代替効果を算出した結果を図-4.4.2に示す。ケースB、ケースDはケースAと比較して約2.8倍の代替効果が得られた。これは、植林から伐採までの期間が短いことによりエネルギー回収の対象となった木材量が増えたことによる。特に、細い部材については、短期間で伐採・植林を繰り返すため、代替効果が大きくなった。

(3) まとめ

本研究では、木造住宅を対象として、木質資源循環によるCO₂削減効果を、炭素固定効果・燃料代替効果を含めて評価した。その結果、細い部材を対象として、短期間で伐採・植林を繰り返すことにより、約2.8倍の代替効果が得られることが分かった。

4.5 土木における木材資源の利用拡大へ向けて（渡辺浩）

4.5.1 はじめに

「土木」という名前とは裏腹に、かつて建設材料の主役であった木材は今や完全に脇役であり、木橋のような木の構造物の数も激減しました。ところが近年木製の土木構造物を多く見かけるようになりました。なかには、従来のイメージを凌駕するようなものも建設されるようになっていきます。これらの背景には木材利用技術の飛躍的向上はもとより、地球環境問題という現代ならではの背景が大きく影響しています。

先の京都議定書にもあるように、我が国は 1990 年比で 6%の二酸化炭素排出量の削減を約束しています。このため、「チーム・マイナス 6%」などの国民的な運動が展開されてきています。ところが、6%のうち森林による二酸化炭素の吸収量は 3.8%と見込まれています。このため、「木づかい運動」などの木材利用を拡大するための運動も合わせて展開されてきています。木製の土木構造物を多く見かけるようになった理由にはこのような背景もあります。

このように、土木分野での木質資源の利用拡大は時代の要請でもあります。本稿では、このような観点から、土木分野での木質資源の有効活用について検討するために、木材と木質材料の可能性について探ってみたいと思います。

4.5.2 木構造物の盛衰

森林資源に恵まれた日本では、古来より木材は容易に入手でき、また性能と価格のバランスも良好な建設材料でした。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ます。

しかしながら木材は、戦後の構造物に対する要求水準の変化と性能の限界を理由に急激に活躍の場を失っていきます。一方で鋼材やコンクリートが安定して供給されるようになり、それらに主役が交代して今日に至っています。

このような変化は比較的木材に明るいと言われる建築分野でも同様であったようです。戦後には防災を理由に住宅の非木造化が強力に推し進められ、研究者の関心も鉄骨や RC 構造に移っていきました。最近でこそ木造建築ブームとも言える活況ですが、それらは 1987 年の建築基準法改正以降の取り組みの成果であり、それまでの約 30 年間は少数の気鋭の研究者により細々と研究が進められている状況でした。近年では集成材による大型木造建築、海外の工法を取り入れた新しい木造住宅の工法や耐震性能評価等に加え、伝統木造建築の再評価に関する研究も盛んになっているようです。

4.5.3 なぜ復活してきたのか

それでは最近なぜ木の構造物が復活してきたのでしょうか。それには多くの理由がありますが、おおよそ以下の 3 つに分類することができます。

① 木を使わなければならなくなってきたこと

人類に未曾有の繁栄をもたらした 20 世紀型社会は大量消費型社会でもありました。そして人類が今後も発展を続けるためには低環境負荷社会への転換が急務とされています。減少する一方の化石燃料とは異なり、木材は自然界で日々生産・蓄積される循環型資源です。環境負荷を減らすためにも、今木材資源の一層の活用が求められています。

② 木が使えるようになってきたこと

例えば、かつての木橋は河川流下阻害物の除去や橋梁保全のための長支間化、自動車交通の増加に

伴う断面の大型化，そして点検や補修労力の削減という要求に応えることができず，姿を消していきました。しかしながらその後の木材利用技術の進歩により，これらの要求をクリアすることが可能になってきました。新しい技術を用いた木橋は近代木橋とも呼ばれ，一般の橋と同様に設計されています。また，その姿も変化しており，旧来の木橋とは隔世の感があります。このように，木質構造物の可能性は従来では不可能と考えられていた領域まで広がってきています。

③ 木を使いたくなってきたこと

従来土木構造物には一定レベルの質のものを安価，安全に供用することが求められてきました。これに対して，近年では景観・デザインやアメニティ等の全く異なる要素も求められるようになってきています。天然素材である木材はアメニティの観点からも注目されており，木橋等が採用される理由には，程度の差はあれ，この要素が含まれているようです。

4.5.4 森林は本当に CO₂ を吸収するのか

地球温暖化の主原因は大気中の二酸化炭素（以下 CO₂）濃度の上昇と言われています。このため，いわゆる京都会議で葉，国別に排出量の削減目標が割り当てられ，各国で具体的な取り組みが始まっています。その主な対策は排出量抑制ですが，産業活動の制限を伴うため実行には困難が予想されます。そして，もうひとつの対策として CO₂ 吸収源としての森林がクローズアップされています。

光合成により CO₂ を吸収し自らに蓄えることができる樹木は CO₂ の缶詰であると考えられます。つまり樹木が集積する森林には大量の炭素が蓄えられていることになります。すると，木を伐って木を伐ってはいけない，木材は使わない方がいいという意見も聞こえてきそうですが，果たしてそうでしょうか。

そもそも単位面積の森林に生育できる樹木には自ずと限界があります。ですから成熟した森林ではどれかが枯死して余裕ができない限り次世代の木は育ちません。そして枯死した樹木は分解され，CO₂ となって大気中に還っていきます。このことから，成熟した森林の CO₂ 収支は±0 であることがわかります。どうしても CO₂ を吸収させたいなら，森林面積を増やせばいいのですが，日本では容易なことではありません。

4.5.5 都市にもうひとつの森林

ところで，森林面積を増やさずに CO₂ を確実に吸収させる方法があります。それは，木を伐って使うことです。これによって森林にはその分の CO₂ を吸収する余裕ができます。と同時に我々は木材資源を手に入れることができます。これを上手に使えば他の資源を節約することができますし，またその木製品を長く使い続ければ CO₂ を引き続き固定しておくことができます。例えば都市に木造住宅等の木質構造物が増えれば，そこにはもうひとつの森林ができたのと同じ効果が得られるわけです。

4.5.6 CO₂ の吸収を期待するなら

もし森林により多くの CO₂ の吸収を期待するなら，天然林よりも人工林の存在が重要です。というのも，50 年間に固定される CO₂ は，ブナ等を主体とする天然林の 90t-C/ha に対して，スギ人工林では 170t-C/ha とかなり大きいからです。これは人工林では成長の早い木が適切な環境で育てられていることによります。

また人工林でも利用できる樹齢に達したら速やかに伐採して新たに植林する方が CO₂ の固定速度は速くなります。樹木の代謝機能にもピークがあり，老木では CO₂ の固定速度が遅くなる上に自らが吸

収量に匹敵するほどの CO₂ を放出するようになるからです。

このように、自然としての森林と CO₂ の吸収源としての森林では、同じ保護でもその方法は大きく異なります。

4.5.7 伐って使えば森林は守れる

日本は国土の 2/3 を森林が占める森林大国です。そしてそこでは木材資源の蓄積が毎年約 1 億 m³ ほど増加しているといわれています。これは国内の木材総需要量にほぼ等しい量です。この数字だけを見ると、日本では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ということになります。

ところが図-4.5.1 を見ると、木材自給率は 20% を割り込む水準にまで低下していることがわかります。高度成長期に急増した木材需要は主に外材で補われ、その後も国産材の供給は減少傾向が続いているためです。

また図-4.5.2 より、過去の乱伐と積極的な植林により、人工林では著しく偏った樹齢構成になっていることがわかります。このため、これまでは利用価値の高い樹齢 40 年以上のものが著しく不足してきました。あわせて木材価格の低迷により、林業はすでに産業として成立できない状況に追い込まれています。その結果、それらの手入れが行き届かず、多くの人工林で過密による荒廃が進んできています。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好ましくない影響を及ぼしています。

また図-4.5.2 からは、この 15 年間に樹齢構成がほぼ同じ形を保ったまま右へ移動していることも

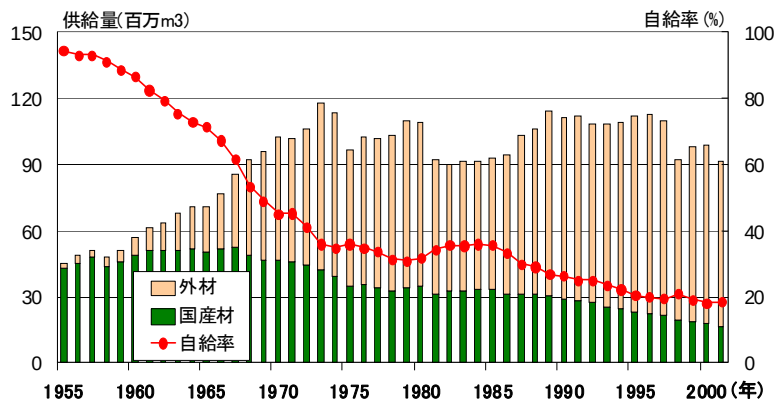


図-4.5.1 木材（用材）の供給量と自給率の推移（平成 14 年度 森林・林業白書）

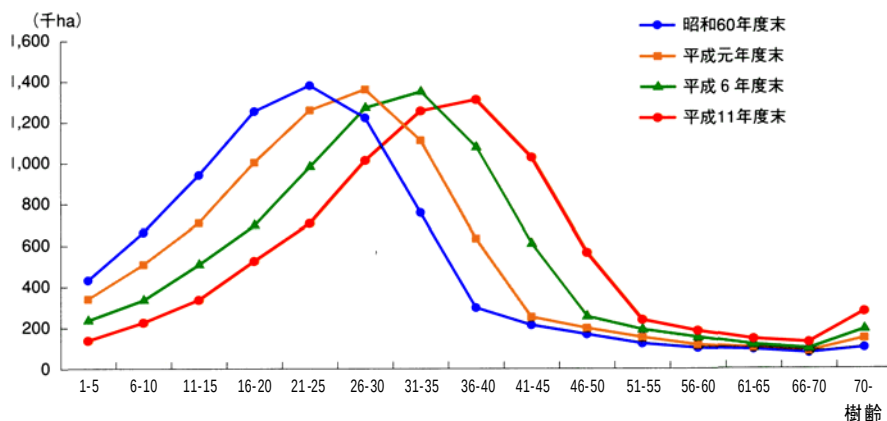


図-4.5.2 民有林の森林資源構成（平成 14 年度 森林・林業白書）

わかります。森林資源の利用が低調かつ、それゆえに新たに植林される面積がないからです。しかしながら資源の安定供給という長期的な視点からも、伐採と植林による樹齢構成の平準化が必要です。このように日本には豊富な森林資源を有するにも関わらずその利用は低位にとどまってきました。しかし今後は森林の育成のためにも積極的な利用が望まれます。また木材資源の蓄積状況を見ても、その態勢は整いつつあります。

4.5.8 九州はスギの供給拠点

日本の人工林は森林面積の約40%を占めています。そこでは主にスギ、ヒノキ、マツ類、カラマツ等の、成長が早くて用材としての価値が高い針葉樹が育てられています。このうちスギはヒノキと並ぶ日本の代表的な造林樹種です。その面積は人工林の約45%を占めていますが、九州、とりわけ南九州ではスギの割合が非常に高くなっています（図-4.5.3）。またスギ素材生産量の上位5県には南九州4県が名を連ねており、生産量の約3割を供給していることがわかります（図-4.5.4）。

このため、これらの地域では、森林環境の保全はすなわちスギの需要拡大であり、官民を挙げてさまざまな取り組みがなされてきています。

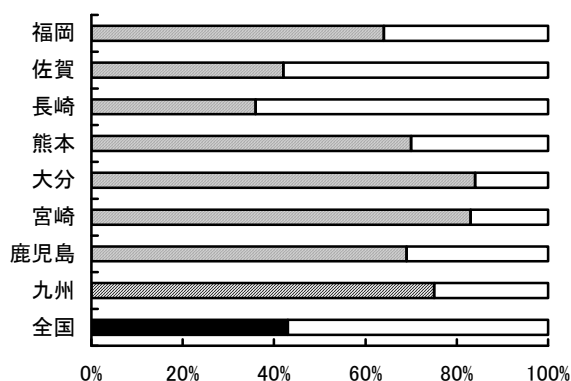


図-4.5.3 九州各県の素材生産に占めるスギの割合（平成14年）

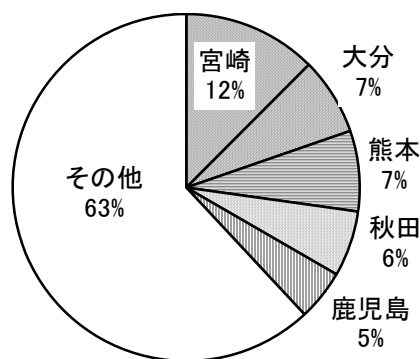


図-4.5.4 上位5県のスギ素材生産量（平成14年）

4.5.9 木材は天然材料

以上では木材利用の必要性を述べてきましたが、木材を上手に利用するためには、その特徴を知っておくことも重要です。以下、土木分野で木材を利用する上でのポイントをまとめてみます。

木材は樹木をわずかな加工により素材として利用するもので、製造時の環境負荷が小さいというメリットがある反面、素材そのものの特徴、いわば「癖」も引き継いでいます。

ところで、そもそも木材よりも鋼材やコンクリートが好まれるようになったのは、この木材ならではの癖が嫌われたことも大きかったと考えられます。例えば鋼材やコンクリートでは当然のことながら強度を自ら設定することができます。これに対して木材ではそのものの強度にあわせた設計がなされなければなりません。樹種や産地は当然のことながら同じ山の木でも強度は異なりまし、癖は強度だけではなくあります。とても一筋縄にはいきません。

勿論、加工に手間をかければかける程、その癖を消すことができます。しかしながらそのためにはエネルギーを必要としますので、木材のメリットを弱めることにもなります。以上のことから、木材の使い方の基本は、無理をさせずその特徴を活かすような使い方をする事と心得る必要があります。

4.5.10 エン지니어ドウッド

木材（製材）の基準強度はいくつかの樹種群ごとに決められています。この基準強度は数百～数千の試験結果を基に決められますが、産地等の要因はとりあえず考慮されません。

ところで、基準強度は弱いものに合わせて決められますので、ばらつきが大きいと実際と大きくかけ離れることになります。そこで、それらを強度等級毎に分類できれば、強いものは強く、弱いものは弱くと合理的に利用できるようになります。

このことに対して、従来は目視等級区分が行われてきました。ただし、簡易である反面、強度との相関はあまり高いとは言えませんでした。そこで最近では、ヤング係数により区分する機械等級区分が主流になっています。写真-4.5.1のように製材品に E70 等という表示がされていれば、機械等級区分（MSR）材です。この場合、スギであれば基準圧縮強度が 7.8kN/mm^2 以上に相当することを意味しています。

なお、ここで重要なのは区分法や結果ではなく、「強度性能が保証されている」ことです。これに該当する機械等級区分材や後述の集成材はエンジニアードウッドとも呼ばれます。エンジニアードウッドの登場により、木質構造物も鋼やコンクリート構造物と同じように設計したり、安全性を保証することができるようになりました。そしてこの概念が今日の木質構造ブームを支えていると言っても過言ではないでしょう。



写真-4.5.1 機械等級区分材の表記の例



写真-4.5.2 集成材を利用した大規模木質構造の例
かりこぼうず大橋（宮崎県）

4.5.11 集成材とは

集成材とは一旦挽き板（ラミナ）に加工した上で接着剤を用いて積層・再構成した木部材のことです。ラミナの段階で欠点が除去され、グレーディングがなされます。このため、製材より強度がアップし、ばらつきも抑えられます。またラミナの構成を工夫する、例えば外層に強いラミナを配置して高性能な曲げ部材を製作することも可能です。狂いが生じにくいことも利点です。このため、多少高価ではあるものの、一般の住宅でも使用されるようになっていきます。

しかしながらその最大のメリットは長尺かつ大断面部材を自由に製作できることです。小径材を活用できるため、効率的な木材利用が可能ですし、従来では考えられなかったような木橋や木製ドームのような巨大な木質構造物も可能になりました（写真-4.5.2）。エンジニアードウッドが木質構造ブームの影の立て役者なら、集成材はまさに表の立て役者と言えます。

表-4.5.1 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)	6.8	—	200	—	25	—

* 針葉樹の構造用製材の日本農林規格 機械等級製材 E70

** 道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説，日本道路協会，2002. 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〕，土木学会，2002.

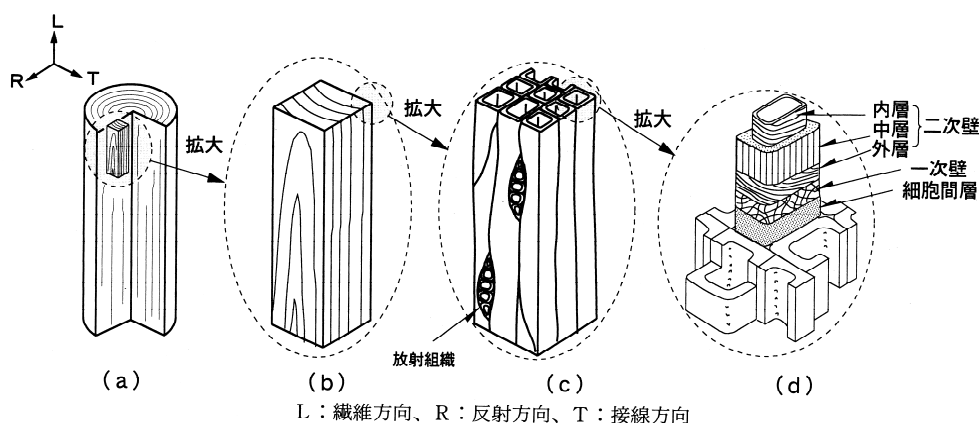


図-4.5.5 木材の構造の模式図

(林知行：ここまで変わった木材・木造建築より)

4.5.12 木材は弱い？

歴史的な経緯から、木材の性能は鋼材やコンクリートよりも劣っていると考えられがちですが、実際はどうなのでしょう。表-4.5.1 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す。

ここでスギは国産の構造用木材の代表的樹種ですが、木材として利用される樹種の中ではどちらかというと弱い方の部類に属します。にもかかわらずその許容応力度はコンクリートの圧縮応力度とほぼ同等であり、引張力にも抵抗できることがわかります。また非常に軽いため、比強度レベルでは鋼材にも匹敵する性能を有しています。このように木材は建設材料としても決して遜色ない性能を有していることがわかります。

これに対してヤング係数は小さいため、木質構造は単に応力設計のみではたわみやすく揺れやすい構造になります。またせん断力に比較的弱いことから、床組等では断面が大きくなりがちです。

なお、このように軽くて強い木材ですが、例えば木橋の最大支間は今のところ 50m（写真-4.5.2）である等、木材の性能の割にその規模は控えめです。これには木材同士を接合することの難しさが大きく影響しています。

4.5.13 木が軽くて丈夫なわけ

木が軽くて丈夫な理由を見てみましょう。図-4.5.5 は木材の一般的な組織構造を示したものです。この図より、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ることがわかります。細胞壁の比重は樹種に関わらず約 1.5 です。従って、軽い木（例えばスギは比重 0.35）ではほとんどが空隙ということになります。

また、図-4.5.5 のように細胞（繊維）のほとんどは長手方向に向いているため、強度はこの方向に強くなります。これが木材の軽くて丈夫な理由です。ただし、一方向にのみ合理的な構造であり、長手（繊維）方向と放射方向、接線方向の強度の比は 10 : 1 : 0.5 程度と極端な異方性を示す材料でもあります。

4.5.14 木材は乾燥させてから使います

木材は乾燥すると割れたり反ったりしますが、それはなぜでしょうか。

生きている樹木には大量の水分が含まれています。これが伐採されると乾燥が始まり、まず細胞の空隙に存在する水分（自由水）が、続いて細胞壁中に化学結合する形で取り込まれていた水分（結合水）が蒸発します。このうち結合水の蒸発により細胞壁は収縮しますが、細胞が図-4.5.5 のように並んでいるため、収縮率にも異方性が存在することになります。収縮率の繊維方向、放射方向、接線方向の比はおおよそ 1 : 5 : 10 と、強度とほぼ逆の関係になります。ここで収縮率が最大なのは接線方向ですが、強度は最小です。そこで乾燥すると放射方向に割れが生じることになります。反りが生じる理由も同様です。一般に、自由水が全て蒸発したときの含水率は約 28%（繊維飽和点）、含水率が気乾状態で安定する含水率は約 15%（平衡含水率）と言われています。すなわち、収縮やそれに伴う割れや反りは含水率約 28%から始まり約 15%で収まることになります。

そこで、割れや反りを完全に抑えるためには含水率 15%程度のものを利用すればいいこととなりますが、乾燥コスト等の面から実際には 20%程度のものが多く利用されているようです。逆に 25%はこれから収縮が始まるあたりの含水率で、生材から見れば乾燥していますが、割れや反りを抑えるという目的から見るとほとんど未乾燥であるとも言えます。

ちなみに写真-4.5.1 には E70 等とともに D20 という表示があります。これは人工乾燥されており含水率が 20%以下であることを示しています。

4.5.15 天然材料ならではの木材の劣化

木材には鋼材やコンクリートには存在しない、天然材料ならではの劣化が存在します。ひとつはシロアリによるもので、暗所を好むため住宅で被害が多く見られます。もうひとつは木材腐朽菌、いわゆる「きのこ」によるもので、土木構造物のように屋外で 사용되는場合はこの腐朽が問題になります。いずれも鋼やコンクリートにはない劣化スタイルです。

腐朽しにくさは樹種によって異なります。例えばヒノキは寺社仏閣に使用する木とされているだけあって耐久性が高い樹種です。一方でマツは強いものの耐久性はあまり高くないため、古民家では耐久性が問題になりにくく強度が必要な梁に利用されているのが見られます。

ところで土木技術者にはマツは腐りにくい木であると誤解されているようです。これは古くからマツ杭が使われ、それらがあまり腐朽しない場合があるからかもしれません。（例えば、地下水位以下に埋められた木材は腐りません。）そしてスギはというと、耐久性が低いとして土木技術者にはあまり人気がないようです。しかしこれにはかなりの誤解も含まれており、また使い方次第で解決するものも

多いようです。

4.5.16 腐りやすい部分と腐りにくい部分

スギの丸太の断面を見ると写真-4.5.3 のように真ん中が赤く、周囲が白いことがわかります。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、辺材と呼ばれます。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、心材と呼ばれます。両者はどの樹種にも存在しますが、ヒノキのように色差が不明瞭なものもあります。辺材は樹木の成長により心材の外縁部から心材に変化します。このとき防腐



写真-4.5.3 スギの丸太の断面

効果がある成分が合成され、着色されます。ですから、心材は辺材に比べて耐久性に優れます。この性質は有効な防腐剤がなかった時代には重要視されており、例えば錦帯橋では桁材に心材のみが使用される等、上手に利用されてきました。

4.5.17 木材防腐剤の利用

このように木材は元来ある程度の耐久性を備えていますが、構造物として所定の耐用年数を確保するには、やはり木材防腐剤の利用が必要になります。防腐剤には以前は重金属元素の含まれた強力なものが使用されてきましたが、最近では環境面に配慮して有機系の低毒性のものが主流になってきました。

防腐剤は一般に塗布または加圧注入されます。塗布は施工が容易であるのが利点ですが、効果が得られる部分は塗布面付近に限られるため、主に表面保護と美装のためと考えた方がいいようです。種類としては、表面をコートする造膜型よりも内部に染みこむ含浸型のものが一般に利用されます。木材は使用中にも無数の割れが発生するため、この点は空気との接触の遮断が目的である鋼材の塗装とは全く異なります。

もう一方の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ます。木材の屋外での利用に際してはこちらを利用するのが一般的です。特に集成材ではラミナの時点で処理を行うことにより処理を確実なものにすることができます。

なお、加圧注入処理の前にも材を十分に乾燥させておくことが必要です。内部に水分があれば防腐剤が浸透しないからです。特に防腐剤が浸透してほしいのは辺材部分ですが、ここは元々の含水率も高いため、製材品等では注意が必要です。

4.5.18 素材の耐久性を利用する工夫

このように耐久性向上策は防腐剤の効果に期待するのが一般的ですが、加えて素材の耐久性を上手く利用すれば、さらに耐久性を向上させることも可能になります。

例えば写真-4.5.4 は辺材部分のみが腐朽した木橋床版の例です。木表側が上面に使用されているため上面が割れたり凸になる等の耐久性上好ましくない変形が生じていますが、加えて辺材部の断面欠損が生じています。通常この程度の欠損であれば構造上の問題は生じませんが、欠損が見えることは利用者にとっては不快でしょう。もし表裏が逆に使われていたらこの床版は今でも使われていたかも

しれません。

また丸太は自然の雰囲気が演出できる素材ですが、表面の辺材部が傷むと実際以上に劣化しているように見えてしまいます。これもある意味で丸太の特徴ですが、例えば心材部分のみで断面設計がなされていれば慌てて交換する必要もありません。このような、ちょっとした工夫で耐久性を大きく改善することができる場合もあります。

ところで細胞が心材化するまでの期間は10～15年と言われています。すると、高齢の木の場合は心材率が高くなりますが、逆に若い木の場合にはほとんどが辺材と言うことにもなります。近年の森林資源の状況を考えるとこのような小径の若い木も大量に使わざるを得ず、この状況下ではやはり防腐処理が重要になります。



写真-4 辺材のみが腐朽したスギ床版

4.5.19 耐久性向上策は雨水対策

水分、温度、酸素を腐朽の3要素といいます。

このうち水分については工夫次第である程度コントロールすることができます。ですから木質構造物の耐久性向上策は水分、すなわち雨水対策ということになります。このことは古くから認識されており、伝統木造建築でも軒の張り出し等に工夫が見られます。

屋根のある建築物に対し、屋外で使用される木橋等の構造物はさらに不利な状況にあります。古来の木橋でも腐朽に悩まされていましたが、有効な対策をとることは不可能な状況でした。そこで、これらの木橋は10～20年という比較的短い周期で架け替えが必要になっていました。これに対して現代の木橋は防腐技術の進歩に加え、集成材の使用等により構造がシンプルとなって耐久性上の弱点となる接合部が大幅に減ったため、長期の耐用年数が期待できるようになっています。

しかし新しい木橋でもやはり雨水対策は重要です。高温多湿な日本の気候風土においては木質構造物は腐朽の面で不利であると言わざるをえません。そこで写真-4.5.2のかりこぼうず大橋ではトラス部材上面に銅板による屋根が掛けられており、主要部材を雨水から守ろうとする意図が読みとれます。また、万一雨に濡れても速やかに乾けば腐朽は進行しません。ですから、雨水が滞留しないような工夫も必要になります。

また、木質構造物を長く安全に使用するためには、重要な部材や交換しにくい部材は徹底的に保護すること、逆にそうでない部材は交換が容易にしておくことといった、維持管理を見越した設計のメリハリも重要になります。

4.5.20 木材資源にも配慮が必要

エンジニアードウッド化により、木材は設計者からも身近な存在になりました。しかしながら、設計者が意図する性能のものが必ずしも簡単に手にはいるわけではありません。

例えばスギ製材の機械等級区分ではE50 E70 E90 E110 E130 E150と規格があります。しかし、実際にはE70が最も多く、E110以上はほとんど出てきません。特に温暖な九州ではその傾向が強くなります。このような状況で設計がE90ばかりを大量に要求すれば、無駄になる木材が大量に発生してしま

います。これも工業材料にはあり得ない木材の特徴ですが、コストダウンのためには是非ともこのような配慮が望まれます。

また木材資源は短期間に大量に集めるのに困難が伴います。その結果、工期が不足して防腐剤の注入不良による耐久性不信が生じている例もあるようです。公共工事ではこうした状況を踏まえて余裕を持った発注がなされれば、より良い木質構造物を造ることが可能になります。

4.5.21 まとめ

公園で木装した施設を見かけることがあります。木装ならまだいい方で、コンクリートを見事に化粧した擬木であることもあります。著名な木橋が実はコンクリート橋だったりもします。これらからは「本当は木にしたいんだけど…」という本音も聞こえてきそうです。

確かに木を使うには気を遣うことが多いのは事実です。しかし、木材は資源量が豊富で環境負荷が小さく、軽くてほどほどの強度を有する優秀な建設材料です。このような古くて新しい建設材料・木材を活用することによって土木構造物に新しい可能性が広がっていきます。日本の各地で地域産材を公共事業に活用するさまざまな取り組みも行われてきています。積極的な木質資源の利活用が求められています。

参考文献

- 1)環境省 チーム・マイナス 6% : <http://www.team-6.jp/>
- 2)林野庁 木づかい運動 : <http://www.rinya.maff.go.jp/kizukai.html>
- 3)有馬孝禮：木材の住科学 木造建築を考える，東京大学出版会，2003.
- 4)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.
- 5)秋田県立大学木材高度加工研究所：コンサイス木材百科，2002.
- 6)農林統計協会：図説 森林・林業白書，平成 14 年度，2002.
- 7)田中淳夫：伐って燃やせば「森は守れる」，洋泉社，1999.
- 8)木橋資料館 : <http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/>

4.6 木材利用実績および土木における利用ポテンシャル（外崎真理雄）

4.6.1 土木木材利用実績の推計

土木における木材利用を拡大していくためには、これまで土木部門においてどのように木材利用が行われてきたのかの理解が必須である。また将来ポテンシャルの推計においてもこれまでの土木投資の推移を知っておくことが重要である。

土木木材利用の推計のために、旧建設省、現国土交通省が3年ごとに行っている「建設資材・労働力需要実態調査報告(土木部門)」の工事種別毎の木材投入量原単位を用いた。この原単位は総工事費評価額百万円あたりの木材資材の投入量である。調査対象の木材資材は、素材・製材・合板(6mm未満)・合板(6mm以上)・損料対象材(合板)・損料対象材(その他木材)の6種類であるが、今回の推計では木材合計による解析を行った。なお損料対象を含む合板の投入量は木材合計の15%程度であり、素材・製材の投入が多いことが分かった。また工事種類としては、公共土木工事が、治山治水・農林水産・道路・港湾空港・下水道公園・土地造成・鉄道軌道・電信電話郵政・電気ガス・上工業用水道・災害復旧・維持補修・その他の13分類、民間土木工事は、えん堤水力発電・鉄道・土地造成埋立・埠頭港湾・道路・送配電線・その他で、91年調査よりその他が、管・ゴルフ場建設・構内環境整備・その他と分けられ、10分類となった。

得られたデータは79、82、85、88、91年調査の5データである。94年調査から木材資材は全て調査対象資材から除外されたため、データは無い。国土交通省には再び木材資材を調査対象にするよう強く要望したい。

図-4.6.1.1と図-4.6.1.2に工事種別毎・調査年次毎の木材投入量原単位を示す。バラツキは大きい、「合計」の値を見ると公共・民間とも年と共に木材投入量原単位が減少しているように見える。94年以降、更に減少を続けたのか、下げ止まったのか興味があるところであるが、如何ともしがたい。

平均値で見ると公共工事では、電気ガス・農林水産・治山治水の木材投入量原単位が大きく、港湾空港・電信電話郵政が小さい。ただし電気ガスの82年は異常値の可能性もある。民間工事では、その他・鉄道・土地造成が大きく、管・ゴルフ場建設・埠頭港湾が小さい。公共と民間を比較すると、公共の原単位がやや大きい、同じ道路でもかなり異なっているのが興味深い。

工事種別毎の総工事費評価額については70から07年までのデータを公共工事着工統計年度報・民間土木工事着工統計報告より得た。2000年より調査体系が変わり建設工事受注動態統計調査報告となった。この調査では請負契約額が調べられているが、総工事費評価額は請負契約額と無償支給材料評価額の和であり、後者は小さいので解析には影響しないと見なした。

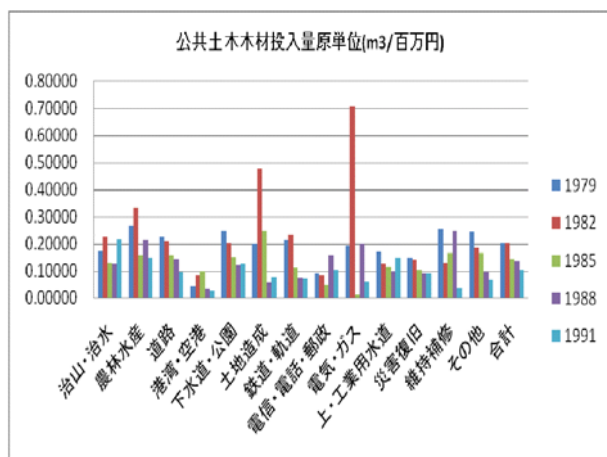


図-4.6.1.1 公共工事種別毎・調査年次毎

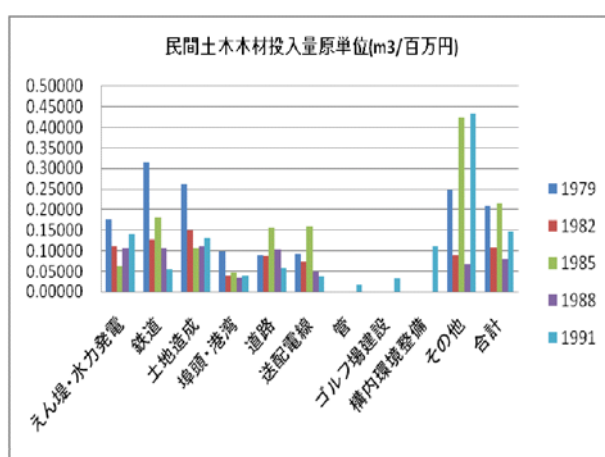


図-4.6.1.2 民間工事種別毎・調査年次毎

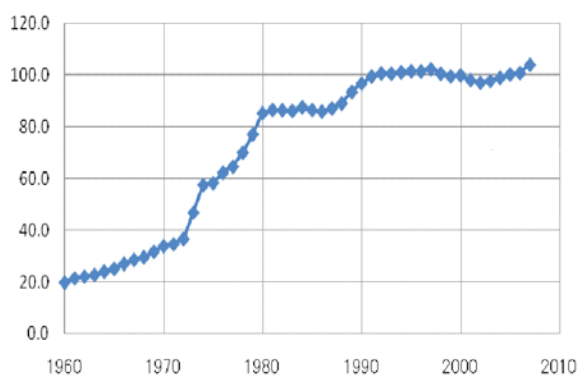


図-4.6.1.3 土木総合デフレーター(2000年基準)

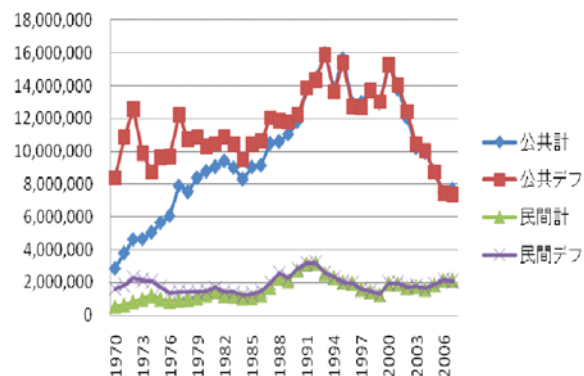


図-4.6.1.4 土木総工事費評価額(百万円)

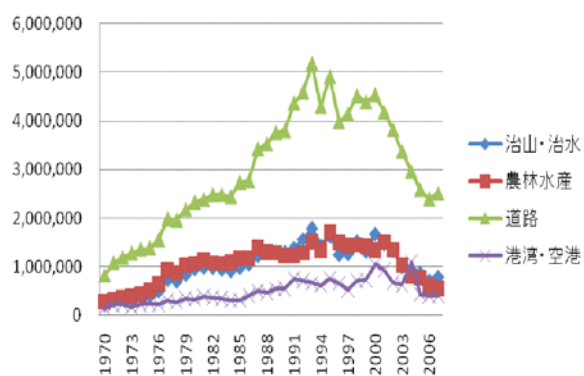


図-4.6.1.5 公共土木総工事費評価額 1(百万円)

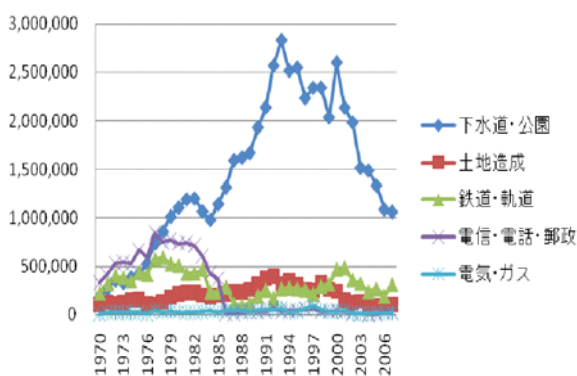


図-4.6.1.6 公共土木総工事費評価額 2(百万円)

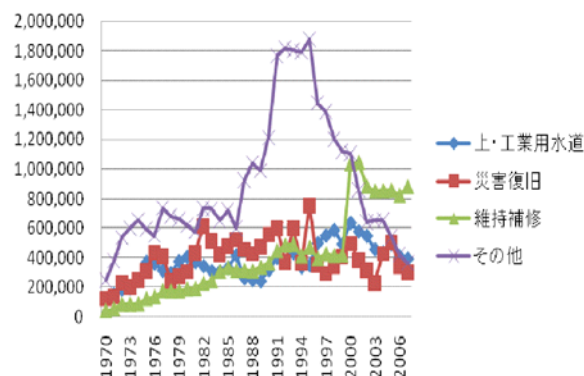


図-4.6.1.7 公共土木総工事費評価額 3(百万円)

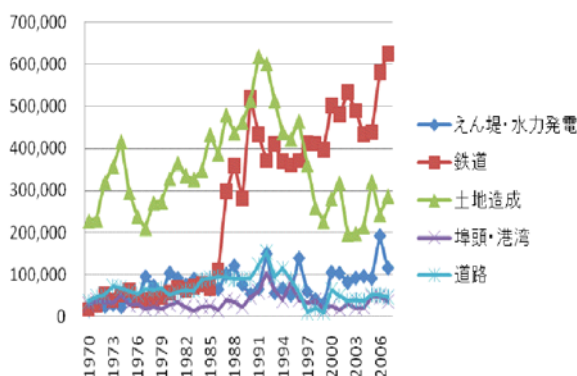


図-4.6.1.8 民間土木総工事費評価額 1(百万円)

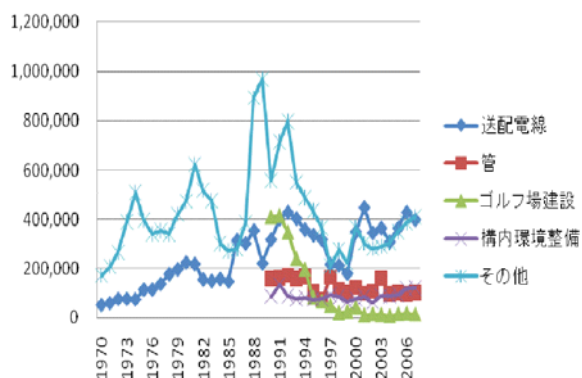


図-4.6.1.9 民間土木材総工事費評価額 2(百万円)

木材投入量原単位を使って木材投入量推計を行うには調査時点での物価と推計年の物価指数で総工事費評価額の補正を行う必要がある。図-4.6.1.3に2000年基準の土木総合デフレーターを示す。デフレーターには工事区分のものがあるが、対象年や工事種類との対応ができないため土木総合のデータを用いた。

図-4.6.1.4に公共・民間の土木総工事費評価額の推移と2000年基準でデフレートしたものを示す。

90年頃より平成不況の元で、経済成長があれば起こるはずの緩やかなインフレが止まり、デフレ経済に突入していることが見て取れる。また公共工事の比率は8割から9割の間で推移している。

図-4.6.1.5～図-4.6.1.9に工事種別毎の総工事費評価額を示す。これらはデフレートしていない原データである。

累積投資額を見ると、公共工事では道路への投資が大きく下水道公園が次いでいる。民間工事ではその他が多く土地造成・鉄道・送配電線が次いでいるが、公共工事の電気ガス・土地造成以外はそれらを上回っている。電電公社と国鉄民営化により、対応する投資額が大きく変化している。2000年の

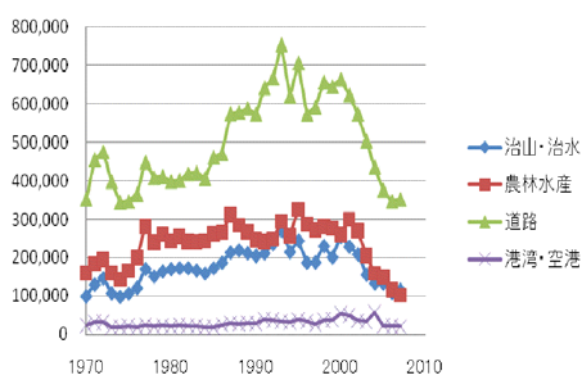


図-4.6.1.10 公共土木木材投入量 1(m³)

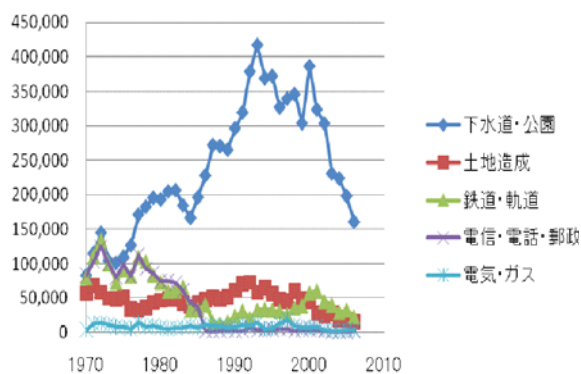


図-4.6.1.11 公共土木木材投入量 2(m³)

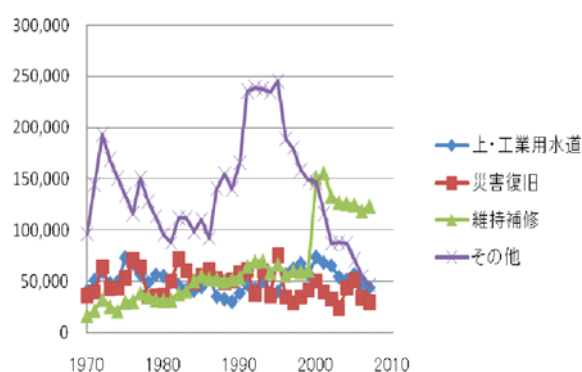


図-4.6.1.12 公共土木木材投入量 3(m³)

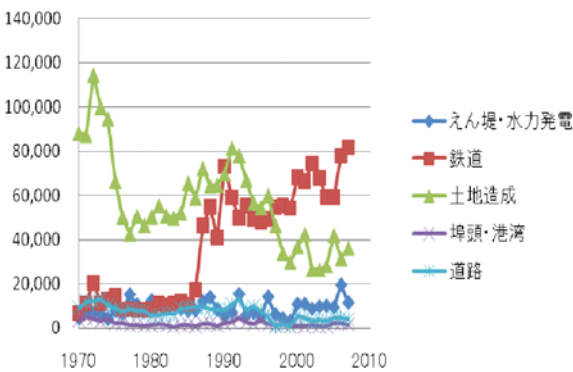


図-4.6.1.13 民間土木木材投入量 1(m³)

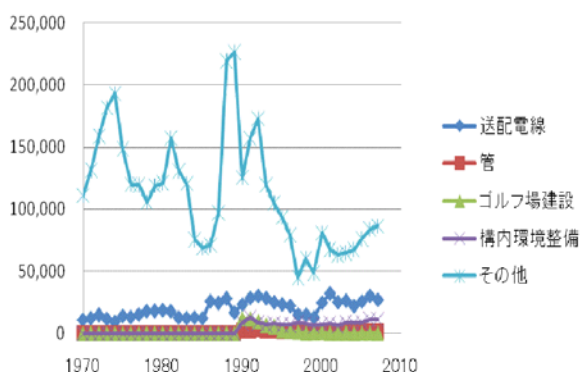


図-4.6.1.14 民間土木木材投入量 1(m³)

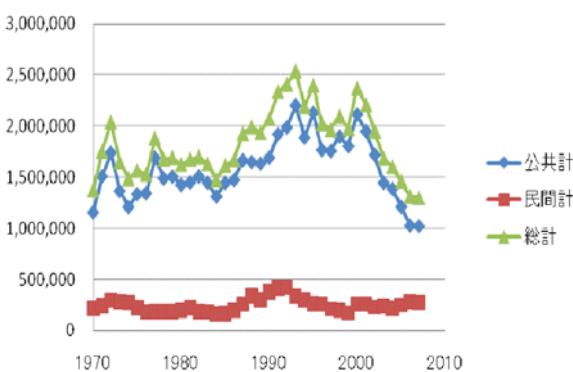


図-4.6.1.15 土木木材投入量(m³)

調査体系の変更に伴い維持補修が激増しているが理由は不明である。

工事種別毎のデフレートした総工事費評価額に木材投入量原単位を掛け合わせることで木材投入量が推計できる。木材投入量原単位は5データの単純平均とし、85年のものと見なした。それ以前において木材投入量原単位がもっと大きかったとすれば推計は過小評価となり、それ以降に木材投入量原単位が小さくなったのであれば過大評価となる。デフレートは85年の値を基準として行った。

図-4.6.1.10～図-4.6.1.15に推計された木材投入量を示す。

最近年2007年では道路が圧倒的に多く、下水道公園・維持補修・治山治水・農林水産の順になっている。公共・民間・総計の全体的な推移では、年間150から250万 m^3 の間にあったが、2000年を一つのピークに単調減少し2007年では130万 m^3 程度になっている。さらに歩留まりを67% (1/3) とすると、丸太換算で195万 m^3 となる。繰り返すが94年以降調査されなくなった木材投入量原単位である。1985年前後の平均的な原単位を用いると以上のように195万 m^3 程度となるが、部分的な数値ではあるが、他機関における推計値はかなり小さいこと、1985年前後の原単位の推移は明らかに減少傾向にあり、仮に下げ止まりがなければ、1985年比の1/2程度まで減少したとも捉えられることを考慮し、下限値として1/2の100万 m^3 と推計した。

4.6.2 木橋における木材利用ポテンシャルの推計

(1) 橋長別橋梁数

土木構造物の中でも橋梁は高い性能が要求され、特に強度と耐久性が供用期間中に保持されている必要がある。したがって、大規模な長支間橋梁には、木橋は妥当なコストで性能を確保することは困難であり、鋼橋やコンクリート橋を採用すべきであろう。木橋が採用されるのに適した支間長は、大まかに言えば30[m]程度以下と考えられる。20[m]を超えると単径間桁橋では設計がやや困難となり、アーチ橋やトラス橋が適していると言える。低コストなシンプルな桁橋がターゲットとなる支間長は、2～15[m]であろうと考えられる。

表-4.6.2.1は道路統計年報2006¹⁾に記載されているデータを基に作成した平成17年度の我が国における橋長別橋梁数を表している。橋長2[m]以上の全橋梁数は約68万橋であり、この数は使用される材料(鋼、コンクリート、その他)や橋梁形式を問わず全て含んだ値である。全体の中で、支間長2～15[m]が78%を占めていることが図-4.6.2.1のグラフより分かる。木橋が適した支間長が8割近くとなり、非常に多数の橋梁が対象となり得る。しかし、大型車交通量が多い橋梁には強度と耐久性が要求されるので、交通量の少ない路線に限定するなら、木橋の対象になり得る橋梁数は、これより少ないと考えられる。

表-4.6.2.1 橋長別橋梁数 (平成17年度)

橋長[m]	橋梁数	割合[%]
2 ～ 15	527,872	78.1
15 ～ 20	35,913	5.3
20 ～ 30	38,862	5.7
30 ～ 50	32,784	4.8
50 ～ 100	23,021	3.4
100 ～ 200	10,555	1.6
200 ～	7,088	1.0
合計	676,095	100.0

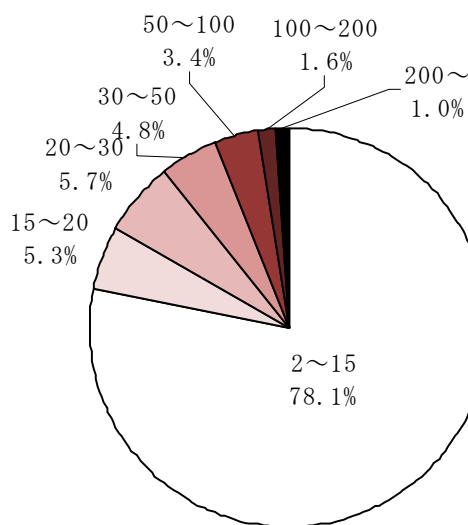


図-4.6.2.1 橋長別橋梁数(平成 17 年度)

(2) 道路種別橋梁数

橋梁の建設・管理はその路線を管轄する国または自治体であり、高速道路の場合はその管理会社となる。表-4.6.2.2および図-4.6.2.2は、管理者の異なるそれぞれの路線毎の橋梁数と割合を表している。これらより、木橋が適する支間長2～15[m]の小規模橋梁は、約8割が市町村道に存在する。したがって、このクラスに木橋を架けるとすると、管理者は殆どが市町村になる。

橋梁のユーザーにとって管理者が誰であるかは、あまり重要なことではなく、また木材利用のポテンシャルを推定することに影響を与える訳ではないが、木橋の架設件数を積極的に増加させるためには、市町村の理解が重要である。

(3) 材料別橋梁数

表-4.6.2.3および図-4.6.2.3は、橋梁の構造部材に使用される材料により分類した橋梁数を表している。コンクリート(RC、PC)橋と鋼橋が9割以上を占めており、木橋はわずかに0.9%にすぎない。なお、これらの数値は参考文献1)に基づいており、橋長が15[m]以上の橋のデータである。橋長を2[m]以上に範囲を広げると、木橋数は確実に増えるが、全体の中での割合も増えるかどうかは不明である。しかし、橋長2～15[m]の範囲の橋においても、コンクリート橋と鋼橋がかなりの割合を占めることは間違いないと考えられる。

木材以外の材料(ほとんどがコンクリートまたは鋼材)で架けられた橋梁が、今後寿命を迎え、新しく架け替えられるとき、その橋を木橋にすれば、二酸化炭素排出削減が期待できる。どれくらいの橋梁数が木橋にとって代わることができるかの推定が参考文献2)により行われている。この推定方法の概略を以下に示す。

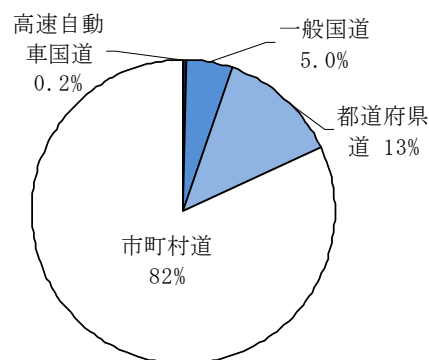


図-4.6.2.2 橋長別橋梁数(平成17年度)

表-4.6.2.2 道路種別橋梁数 (平成17年度)

種 類	橋梁数 2[m]以上	橋梁数 15[m]以上	橋梁数 2～15[m]
高速自動車国道	7,385	6,402	983
一般国道	49,772	23,572	26,200
都道府県道	100,044	32,516	67,528
市町村道	518,894	85,733	433,161
合計	676,095	148,223	527,872

表-4.6.2.3 材料別橋梁数 (平成17年度)(橋長＝15[m]以上)

材 料	橋梁数	割合
鋼橋	57,583	38.8
RC 橋	25,978	17.5
PC 橋	59,206	39.9
石橋	346	0.2
木橋	1,264	0.9
混合橋	3,240	2.2
その他	606	0.4
合計	148,223	100.0

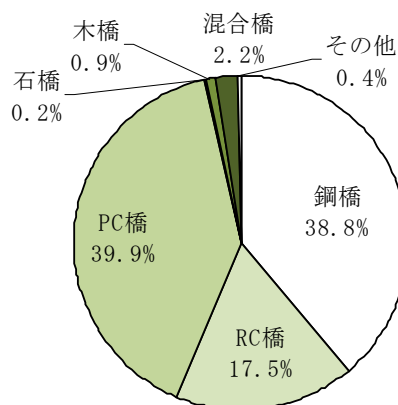
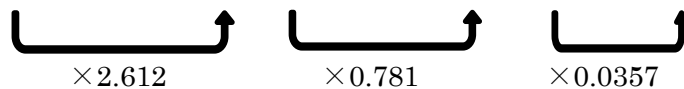


図-4.6.2.3 材料別橋梁数(橋長 15[m]以上)

表-4.6.2.4 架け替え橋梁数の推定

年	国道+都道府県道の橋梁数 (木橋を除く) (2[m]以上)	国道+都道府県道+市町村道の橋梁数 (木橋を除く) (2[m]以上)	国道+都道府県道+市町村道の橋梁数 (木橋を除く) (2[m]～15[m])	国道+都道府県道+市町村道の架け替え橋梁数 (木橋を除く) (2[m]～15[m])
1958(S33)	80,076	209,159	163,353	5,832 (2008)
1959(S34)	84,002	219,413	171,362	6,118 (2009)
1960(S35)	86,981	227,194	177,439	6,335 (2010)
1961(S36)	91,128	238,026	185,899	6,637 (2011)
1962(S37)	95,319	248,973	194,448	6,942 (2012)
1963(S38)	99,523	259,954	203,024	7,248 (2013)
1964(S39)	102,192	266,926	208,469	7,442 (2014)
1965(S40)	106,168	277,311	216,580	7,732 (2015)
1966(S41)	108,950	284,577	222,255	7,935 (2016)
1967(S42)	112,999	295,153	230,515	8,229 (2017)
1968(S43)	115,236	300,996	235,078	8,392 (2018)



(4) 寿命による架け替え橋梁数の推定²⁾

橋梁の建設には、新規路線の開発に伴う橋梁の新設と、現存する橋梁が寿命のために架け替える場合がある。我が国では高度成長期に建設された多くの橋梁が、寿命を迎える時期にきており、橋梁の架け替え件数が増大するものと見込まれる。ここでは鋼橋とコンクリート橋の架け替え橋梁数を推定するために、以下のような仮定を設ける。

- 1) 橋の寿命を50年とする。
- 2) 50年前のデータが、(国道+都道府県道)の橋梁数であるため、市町村道を考慮した橋梁数を算出するために、係数(=2.612)を用いる。
- 3) 50年前のデータが、橋長2[m]以上の橋梁数であるため、2～15[m]の橋梁数を算出するために、係数(=0.781)を用いる。
- 4) 架け替えが行われる橋梁数は、現存する橋梁数に係数(=0.0357)を掛けて算出する。

なお、これらの仮定に用いられる係数については、参考文献2)を参照。

表-4.6.2.4 は現在から 50 年前の約 10 年間の橋梁数から、現在～約 10 年間の架け替え橋梁数を推定した結果を表している(表の右端の欄)。この表より、今後の架け替え橋梁数は、年間約 6,000～8,000 橋であることが分かる。

これらの架け替え橋梁数のうち、40～50%を木橋とするならば、年間約3,000橋の木橋が架けられることになる。しかし、支間長2[m]～15[m]の小規模橋梁は、全て木橋に架け替えられる可能性を有しているものと考え、木橋のポテンシャルは100%と見なして、年間6,000～8,000橋と見積もることができる。

(5) 木橋建設による使用木材量の推定²⁾

上記の推定方法により、木橋架設件数を年間3,000橋とすると、使用木材量は以下のような計算により算出することができる。

1)橋長2[m]～15[m]の橋梁数	= 527,872
2)橋長2[m]～15[m]の橋梁の総延長	= 2,812,008[m]
3)橋長2[m]～15[m]の橋梁の1橋当たりの橋長	= 2,812,008[m]/527,872 = 5.3[m]
4)橋長5.3[m]の橋梁1橋当たりの木材使用材積	= 30.37[m ³]
5)3,000橋に使用される木材の体積	= 30.37×3000 = 91,110[m ³]
6)3,000橋に使用される木材の重量	= 91110×0.503 = 45,828[tf]

したがって、橋梁に使用される木材のポテンシャルは、体積で約9.1万[m³]、重量で約4.6万[tf]と推定することができる。さらにこれを丸太換算するために2倍すると、概ね18万[m³]となる。

参考文献

- 1)国土交通省道路局監修 全国道路利用者会議：道路統計年報2006，平成18年8月．
- 2)戸嶋英，中嶋学夫，堀江保：プレストレス木床版橋による木材需要と環境性能について，第8回木橋技術に関する論文報告集，pp.109-114，2009．

4. 6. 3 治山治水構造物におけるポテンシャル

治山治水関係の構造物としては多くの種類があるが、主なものは次のとおりである。

- a)溪流治山施設（木材が主材料），溪流治山施設（残置型枠として木材を用いる）
- b)沈床工，根固工
- c)護岸工，水制工
- d)流路工，帯工
- e)柵工，筋工
- f)間詰工
- g)土留工（木材が主材料），土留工（残置型枠として木材を用いる）
- h)落石防止工
- i)ウッドブロック工
- j)防風工
- k)歩道工
- l)植栽工

これらの構造物の中には、現在でも主として木材が用いられているもの（柵工，筋工，ウッドブロック工，植栽工）がある。そこで、ここでは、これらの構造物のうち、比較的大型で耐久性が要求され、現在では主として材料としてコンクリートが用いられている、溪流治山施設（主材料として木材を使用）と沈床工・根固工について木材利用ポテンシャル値の推定結果と推定根拠を示す。

(1) 溪流治山施設（主材料として木材を使用）

木製の溪流治山施設は基本的には高さが 5m 未満の施設に用いられる。現状で、高さ 5m 未満の溪流治山施設の年間当たりの設置基数は、石川の推定では約 980 基と考えられる。現在はほとんどがコンクリートで建設されているが、これらのうちの約半数（480 基）を木製に転換することを想定した。

木製溪流治山施設の1基当たりの標準的な木材立積は約 30m³ であるが、この部材を作るためには、丸太に換算するとその約 4 倍の約 120m³が必要となると推定される。

従って、溪流治山施設の年間木材利用ポテンシャルは次の式から求めることができる。

$$480(\text{基}) \times 120(\text{m}^3/\text{基}) = 57600 (\text{m}^3) \div 60 (\text{千 m}^3)$$

(2) 沈床工、根固工

沈床工、根固工は河川工事において、護岸工（のり覆工）の下部の基礎部（のり留工）の直近に設置して基礎部および河床の洗掘を防止するために用いられる構造物であり、一般にはコンクリートの枠材やコンクリートブロックで製作される。栗原委員は、平成 20 年度の国土交通省の入札公告案件から、案件名称に護岸工事及び自然再生工事が含まれている案件を抽出した。全体では 428 件の案件があったが、これらの内の約 20%にあたる 92 件について工事内容を調査し、沈床工、根固工の施工量を求めた。この量をもとに全体の 428 件での沈床工、根固工の施工量を推定した結果、沈床工では木製にした場合の使用量は製品材積で 7,300m³、丸太換算で約 11,000m³と推定した。また根固工では木製にした場合の使用量は製品材積で 35,000m³、丸太換算で約 55,000m³と推定した。従って沈床工と根固工を合計すると丸太換算で 66,000m³となる。現在でも 10%程度は木材を用いて建設されていると仮定すると、90%に当たる約 60,000m³が今後の年間木材利用ポテンシャルとして考えられる。

以上より、年間木材利用ポテンシャルは高さ 5m 未満の溪流治山施設の半数代替で約 60（千 m³）、沈床工・根固工の全面木製化で約 60（千 m³）、合計 120（千 m³）（丸太換算）となった。これらの数値は多くの仮定と推定を含んでおり、また実際にこれらの構造物を推定どおりに木製化することには乗り越えるべき技術的な課題も多いと考えられる。

4.6.4 地中海利用におけるポテンシャル

地中海における木材利用ポテンシャルは、現状ではほとんど実績はおろか可能分野についても明確なものはない。そこでここでは、まず、木材を利用する上での木材の特徴を示し、それらに基づき委員各位から地中海において将来木材を利用できる可能性のある使用方法についてアイデアを出し合い、相当に大雑把ではあるが利用ポテンシャルを試算した。

表-4.6.4.1 に、木材を利用する際の長所と短所をまとめた。木材を土木分野で使用することを考えたときに、特に大きな短所となり信頼性を低くしているのは、腐朽や虫害である。しかし、腐朽も虫害も、地中の地下水位以下では進行しないといってよい。この詳細

表-4.6.4.1 木材を利用する際の長所と短所

	長所	短所
力学的特徴	・軽い割に強度がある ・弾性材料で粘りがある	・コンクリートや鉄に比べ強度が低い ・乾燥により変形する
一般的特徴	・放置すれば自然に戻る ・燃料として利用できる ・見た目や感触がよい ・生産時のエネルギーが少ない ・炭素を貯蔵できる ・環境負荷の心配が少ない ・間接的な環境効果もある ・加工が容易である ・熱伝導率が低い ・利活用の歴史がある ・国内のほぼ全域で供給ができる	・腐朽や虫害がある ・可燃性である ・形状のばらつきが大きい ・品質のばらつきが大きい ・長大材を得にくい ・コンクリートや鉄のような均質で大きな構造物を作れない ・現在は供給が不安定である ・加工工程が増えれば高価になる

表-4.6.4.2 地中海における木材利用の可能性

分類	項目	備考
小型軽量土木構造物	小規模ボックスカルバート	木杭-底盤系基礎設計マニュアル（佐賀県，2009）
	低いL型擁壁	木杭-底盤系基礎設計マニュアル（佐賀県，2008）
	下水道	現在も稀に使用されている
	農業用水路	現在も稀に使用されている
	道路関連施設	現在も補助的に使用される場合がある
建物基礎	戸建て住宅	現在も一部で使用されている
	中低層建物	
地盤改良	軟弱地盤対策	現在も一部で使用されている
	クレーク補強	
	構造物周辺段差緩和	
	ため池補強	
その他海洋利用	桟橋デッキ	
	海浜浸食防止	
その他	その他	

は、7 章に詳しく記載した。そこで、軟弱地盤における杭基礎や液状化対策を含めた軟弱地盤対策関連工事に木材を使用することが考えられる。このような軟弱な地盤では、地下水位が浅いので、ここに打設された木材は腐朽や虫害の心配は基本的には無視できることとなる。また、木材を杭基礎や地盤改良材に用いた場合には、丸太のまま用いることができる。このように、木材を地中の地下水位以下で加工工程の少ない丸太のまま用いれば、乾燥による変形、可燃性、加工工程が増えることによる使用エネルギーの増加も無視でき、価格も低く抑えられることとなる。さらに、支持力に期待せず、密度増加や地盤の強度増加に期待した液状化対策や地盤改良を想定すると、木材の強度や形状、品質のばらつきもほとんど無視できることとなり、木材の短所をかなり少なくできる可能性が考えられる。海域の地中であっても、これらの特性は基本的に同じである。これら地中における利用については、数は決して多くはないが現在も実施されているものがあるとともに、過去においては多用され現在も残っているものが少なくなく、古いが将来の新しい木材利用の方法としてはかなり現実的なものである。

表-4.6.4.2 に、地中海域における木材利用方法として上げられた項目を示す。それぞれの項目についての推定ポテンシャルを表-4.6.4.3 に、また、全体に対する割合を図-4.6.4.1 に示す。表中「0」記されているのは、可能性としては考えられるが、今回集計ができなかったものである。それぞれの推計方法の概要は以下の通りである。

a) 農業用水路

北海道におけるある業者からの農業用水路基礎における 4 月～10 月における出荷数量に 47 都道府県分を乗じた。我が国の農業水路の総延長は、40 万 km あると言われ、軟弱地盤地帯にも多く巡らされていると考えられるので、相当量の可能性が考えられるが、現状では詳細は不明である。

b) 戸建て住宅

2008 年度の戸建て住宅着工件数 42 万戸の内、34.5%が何らかの地盤補強を行っている。この内の 2 割が木材に代替されると仮定し試算した。

c) 中低層建物

2008 年度のコンクリートパイルの内の節杭（摩擦杭）の出荷総量 268 千 t の内 2 割と、2006 年度の鋼管杭の民間土木建築需要における出荷総量 228 千 t の 1 割がそれぞれ同重量の木杭に代替されると考えて試算した。

d) 軟弱地盤対策

2000 年前後 5 年間におけるある地盤改良専門業者の完成工事高などを参考に、年間の液状化対策

表-4.6.4.2 地中海域における木材利用ポテンシャルの集計結果

分 類	対 象	ポテンシャル(千m ³)	備 考
小型軽量土木構造物	小規模ボックスカルバート	0	未集計
	低いL型擁壁	0	未集計
	下水道	0	未集計
	農業用水路	244	
	道路関連施設	0	未集計
建物基礎	戸建て住宅	110	
	中低層建物	200	
地盤改良	軟弱地盤対策	856	
	クリーク補強	31	
	構造物周辺段差緩和	11	
	ため池補強	0	未集計
その他海洋利用	栈橋デッキ	0	未集計
	海浜浸食防止	0	未集計
その他	その他	48	

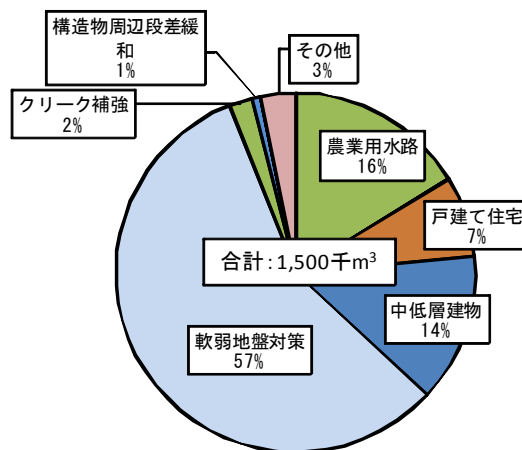


図-4.6.4.1 地中海域における木材利用ポテンシャルの割合

が 600～800 億円規模であると仮定し、液状化を含めた大小地盤改良工事の規模を 1,000 億円とし、これより地盤改良総面積を 400ha とした。その半分程度が木材による改良に代替されると仮定して試算した。また、軟弱地盤対策として、筏基礎も考えられ、これによる使用量を 56 千 m³ として加算した。

e) クリーク補強

ある県のクリーク 1km 当たりに要する木柵工の木材使用量試算値 124m³ を参考にした。その県のクリークの総延長は 1,500km 程度であり、未整備の延長は 800km であると言われている。年間の整備量を 25km 程度と仮定すると、3,100m³/年となり、このような県が 10 県程度あるとして試算した。

f) 構造物周辺段差緩和

2008 年度のコンクリートパイル出荷量は 3,968t 千 t, 2006 年度の鋼管杭の出荷量は 599 千 t である。これらの周辺には段差ができやすく、このような杭基礎構造物の 1 割で周囲に段差防止用の緩和措置がとられるものと考え、その量は杭基礎使用重量の 1 割と等しい木材量として試算した。

g) その他

ここでは、相当量のポテンシャルがあると考えられる海洋における利用や、下水道基礎、道路関連の標識や防護策の基礎などにおける数値が未集計のため、僅かに数値を入れた。

以上より地中海域における利用ポテンシャルは、1,500 千 m³/年と試算された。ただし、この値は、上記に示したように、かなり大胆な仮定に基づくもので、大凡の目安と捉えるべきである。今後、さらに調査を進めていきたい。

4. 6. 5 道路関連構造物におけるポテンシャル

道路関連構造物というと多岐にわたるが、現時点で下記 6 種類の構造物を抽出し、①木材利用の適用対象の把握、②適用対象の潜在的木材利用量の調査・推定、③新たな木材利用の提案に取り組んでいる。

- a) 遮音壁、防風、防雪柵など
- b) のり面
- c) 標識類、工事看板
- d) 舗装、路盤、舗道など
- e) 路肩、防護柵、視線誘導など
- f) ガードレール

ここでは潜在的木材利用量の調査・推定結果として、下記 5 種類の構造物に関して算定された木材利用ポテンシャル値の算定結果と産出根拠を示す。

- ①歩道チップ舗装
- ②高速道のり面
- ③ガードレール
- ④遮音壁
- ⑤落石防護柵

木材利用ポテンシャル値の算定結果を表-4. 6. 5. 1 に示す。これら 5 種類の構造物で年間約 120 万

表-4.6.5.1 道路関連構造物におけるポテンシャル算定結果総括表

用途	数量		単位量		利用量 (万m ³)	サイクル (年)	年利用量 (万m ³ /y)	備考
歩道チップ舗装	800	万m ²	0.0375	m ³ /m ²	30.0	1	30.0	歩道10%, 林道100%を木質化
高速道のり面	7,444	km	108	m ³ /km	67	10	6.7	50%木質化
ガードレール	200,000	km	50.8	m ³ /km	726	10	72.6	50%木質化
遮音壁	2,988	km	300.0	m ³ /km	89.6	10	9.0	50%木質化
落石防護柵	666	km	153.0	m ³ /km	14.6	10	1.5	100%木質化
					合計(万m ³ /y)		120	

m³の木材利用が見込まれる。これらの数値は幾つかの仮定の下に算定されている。以下、各構造物の木材利用ポテンシャルについて算定概要を示す。

(1) 歩道チップ舗装

歩道を木質チップ舗装とした場合の木材利用量は、年間適用面積 800 万 m²、面積当たり木材利用量を 0.0375m³/m²として、30 万 m³/年と算定される。

$$800 \text{ 万 m}^2/\text{年} \times 0.0375 \text{ m}^3/\text{m}^2 = 30 \text{ 万 m}^3/\text{年}$$

ここで、年間適用面積は、年間の細粒アスファルト混合物の使用量（3,688 千 t，平成 16 年度）より面積換算して約 4,000 万 m²/年をもとに算定した。このうち、舗装部は保水性や衝撃吸収、美観などの点で都市部の歩道で優位に使用されると仮定し代替率が 10%，また、林道などの交通量の少ないところへも適用可能なので林道部の面積は約 400 万 m²/年，合計 800 万 m²/年とした。

単位面積当たりの木材使用量は、木質チップ舗装（ここでは桜材が使用された）の事例，600m²で舗装材料 30t，そのうち 30%が木質チップを参考とする。木材の全乾密度（全乾比重）0.35t/m³，含水率 15%とすると，気乾密度 0.4t/m³となり，単位面積当たりの木質チップ使用量は，以下のように算定される。

$$30\text{t} \times 0.3 / 0.4\text{t} / 600\text{m}^2 = 0.0375 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

(2) 高速道のり面

高速道路のり面における木材利用量は、道路総延長当たりの“のり面”面積と面積当たりの木材利用量に道路延長を乗じて算定した。

ある地区の道路総延長 251.6km のうち 202.4 km が土構造物であるとの実績から，土構造物比率を 80%とし，土構造物は盛土や切土ののり面であると仮定した。のり面面積は，のり面の高さを 5.0m，勾配を 1.5 とし，森林土木木材製構造物施工マニュアル¹⁾に示される丸太法枠工(B) (1.5m³/100m²)を適用し，次式より延長当たりの木材利用量を設定した。

$$5.0\text{m} \times 1.5 \times 1.5 / 100 \times 0.8 \times 1000 / 10 = 108 \text{ m}^3/\text{km}$$

延長は有料供用区間長²⁾を適用し，木質化率を 50%，丸太換算率を 60%とした。

(3) ガードレール

ガードレールは直径 18cm の丸太 2 本で構成されるとし，その木材量は 1km 当たり次式に示すように 50.8m³と算定される。

$$\pi (18/100/4)^2 \times 2 \times 1000 = 50.8 \text{ m}^3/\text{km}$$

道路延長は，ガードレールの設置総延長は，17 万 km（道路法対象道路），その他道路での設置延長

を 3 万 km とし、合わせて 20 万 km とした。また、木質化率を 50%，丸太換算率を 70%とした。

(4) 遮音壁

厚さを 15cm，高さを 2.0m として施工延長あたりに木材利用量を $300\text{m}^3/\text{km}$ とした。施工延長は 3,000km，施工実績 12km として今後の施工延長を 2,988km としている。また，木質化率を 50%，丸太換算率を 50%とした。

(5) 落石防護柵

1 スパンにつき，直径 14cm×長さ 3m の丸太を 10 本使用するとして，1km 当たり 153m^3 とした。

また，施工延長は実延長に整備率，改良率等を加味して可能施工延長の最長 1,478km，最短 115km を算定，平均 666km を適用することとした。また，木質化率を 100%，丸太換算率を 70%とした。

参考文献

- 1) 森林土木木材製構造物施工マニュアル 平成 20 年 p178-179
- 2) 全国高速道路建設協議会WEBサイト：<http://www.zenkousoku.com/seibi/index.html>

5. 木橋への利用技術

5.1 ここまで来た近代木橋（佐々木貴信）

5.1.1 はじめに

かつては歩道橋や車道橋に関わらず多くの木橋が利用されていたが、道路交通や流通など社会情勢の変化によりそれらは当時永久橋と呼ばれた鋼橋やコンクリート橋に架け替えられていった。こうして一旦は消滅したわが国の木橋であるが、昭和 60 年代に入り、我が国の大規模木造建築の建設が盛んになると同時に、集成材を使用したいわゆる近代木橋が登場し、この 20 年あまりの間に、全国各地に多数の木橋が建設されている。集成材の製造・加工技術の革新や、接合効率の高い継ぎ手構造の開発により、かつての木橋では不可能であった部材の長尺化、大断面化、長支間化が可能となり、大型車でさえも不自由なく走行できるまでに進歩している。

木橋は、木材の土木利用の中でもアピール効果の高い施設の一つであり、環境問題や景観生の観点からも近年注目を浴びているが、ニーズに応える技術が整ってきた。

5.1.2 近代木橋の先駆け

昭和 62 年（1987 年）に秋田県鷹巣町に完成した「坊川林道 2 号橋」（写真-5.1.1）は近代木橋の草分け的存在であり、秋田大学や旧秋田営林局との連携により国有林道に架設された国内ではじめてのスギ集成材を用いた車道橋（橋長 6.0m、幅員 4m）である。同じ年に長野県軽井沢に建設された「矢ヶ崎大橋」（写真-5.1.2）はカラマツ集成材を使用した橋長 168.5m（最大支間 59.5m）、幅員 3m の歩道橋である。これらの橋は、架設後 20 年以上を経過して今なお供用されており、近代木橋の耐用年数を裏付ける事例といえる。



写真-5.1.1 坊川林道 2 号橋（北秋田市）



写真-5.1.2 矢ヶ崎大橋（軽井沢町）

5.1.3 国土交通省モデル木橋

国土交通省の「モデル木橋事業」は平成 6 年から実施され、木橋の技術資料¹⁾を策定するために、旧建設省と林野庁の共同で設置された木橋の技術基準検討委員会のもとで実験による安全性の確認や、実橋の設計、施工、維持管理のデータ収集を行い木橋の課題解決を進めるためのモデル橋の建設が行われた。5 橋のモデル木橋の一つは鹿児島県に最初に架けられたアーチ形式の木橋（写真-5.1.3）であり、4 種類の樹種（スギ、ベイマツ、サザンイエローパイン、ボンゴシ）の木材を使用して耐久性を比較する等の取り組みがなされている。写真-5.1.4 は高知県内の屋根付き木橋であるが、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水の影響を抑え耐久性を向上させようとする



写真-5.1.3 仙人橋・徐福橋（鹿児島県いちき串木野市）



写真-5.1.4 御幸橋（高知県梺原町）



写真-5.1.5 いきいき橋（広島県尾道市）



写真-5.1.6 坊中橋（秋田県藤里町）

工夫が見られる。5 橋目のモデル木橋として平成 15 年に広島県に架設された「いきいき橋」（写真-5.1.5）はこれまでに蓄積された近代木橋の耐久性付与技術の推移を集めた木橋であり、桁隠しや銅板による木口等の保護など細部に亘って配慮が施されている。

モデル木橋事業の成果は平成 15 年に財団法人国土技術研究センターが「木歩道橋設計・施工に関する技術資料」¹⁾として取りまとめ国土交通省から配付されている。成果を集約したもので、木橋の設計・施工、実験、点検・管理の 3 編から構成されている。

5.1.4 車道橋の普及と近代木橋の発展

木材利用の拡大や林業振興を目的に、平成 15 年ころまでに各地の民有林道内に大規模な木橋が多数建設されている。大型車の通行に対応した現行の設計荷重に耐えられる木橋を実現するために、コンクリート橋や鋼橋の橋梁技術や、建築分野の集成材構造の技術を応用したハイブリッド化の技術開発が盛んに行われ、この時期に近代木橋の技術が急速に発展したと言える。

平成 13 年秋田県藤里町に完成した「坊中橋」（写真-5.1.6）は集成材と鋼製床組（鋼床版）を組み合わせてハイブリッド橋であり、橋長 55m、車道幅員 7m、歩道幅員 2m の大型車道橋である。写真-5.1.7 に示した「八幡橋」は、平成 14 年に新潟県山北町（現村上市）の町道に完成した橋長 42.4m の 2 連のスギ集成材のアーチ橋であるが、床版にプレキャストコンクリートが用いられている。平成 15 年に長野県箕輪町の林道に架設された「さくら橋」（写真-5.1.8）もカラマツ集成材の主桁に同様の RC 床版が合成されている集成材とコンクリートのハイブリッド構造である。この橋の橋長は 20m であるが、



写真-5.1.7 八幡橋（新潟県村上市）



写真-5.1.8 さくら橋（長野県箕輪町）

現場への部材搬入の都合上3分割された主桁を現地で縦接合するために、PC鋼材を緊張する工法（NSP工法）で一体化されている。このようなコンクリート橋の技術が活かされたハイブリッド木橋は長野県の林道橋の標準設計にも組み入れられ同種の木橋が普及している。平成15年には宮崎県内の林道にスギ集成材による橋長140mのわが国最大の車道橋「かりこぼうず大橋」が建設されるなど、わが国の近代木橋の技術は世界的にもトップレベルに達したといえる。

5.1.5 近代木橋の維持管理技術の進歩

高耐久性の木橋として海外で実績のあったボンゴシ橋が、日本の気象条件下では長持ちせずにトラブルを生じたように、高温多湿の我が国において近代木橋の耐久性を向上させるには、建設後の点検や維持・補修といったメンテナンスが不可欠である。ボンゴシ橋の事故²⁾をきっかけに耐久設計や点検、補修の重要性が強く認識されることとなり、健全度調査や補修事例などの貴重な情報や耐久性に関する研究資料が多数蓄積され、メンテナンスのノウハウがマニュアルとして整備されつつある。前述の「木歩道橋設計・施工に関する技術資料」¹⁾や、平成17年に土木学会・木橋技術小委員会が発刊した「木橋技術の手引き 2005」³⁾、財団法人林業土木コンサルタンツから同年に発刊された「実務者のための設計と施工」⁴⁾など近代木橋に関する技術指針では何れも耐久性向上策や維持管理の方法について解説しており、構造保全性を維持しながら目標耐用年数を確保していくことが共通の認識となっている。維持管理に特化したマニュアルもいくつか整備されている。木橋技術協会では「木橋の点検マニュアル」⁵⁾を作成し、点検、維持管理の技術を備えた木橋点検士の認定も行っている。また、日本木材保存協会では「木製外構施設のメンテナンスマニュアル」⁶⁾を刊行しており、木橋や木製ガードレールなどの道路施設を対象にした点検、補修の方法を解説している。

近代木橋の維持管理に関する技術的指針が整備され始めた背景には木橋に携わる技術者や研究者の長年の調査、研究の成果があることは言うまでもない。ボンゴシ橋の健全度調査（写真-5.1.9）と診断手法の開発、完成直後の静的および動的試験（写真-5.1.10）による初期性能データの収集⁷⁾、供用を終えた木橋の破壊試験（写真-5.1.11）による耐荷力の評価⁸⁾など、世界的にも例がなく、また、一般橋と呼ばれる鋼やコンクリート橋の分野でも行われなような高度な試験や調査が行われている。

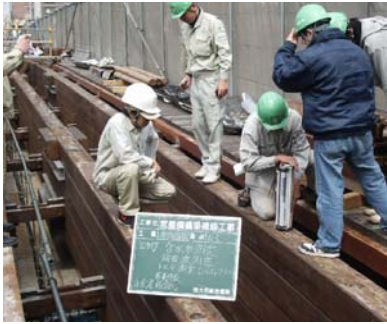


写真-5.1.9 木橋の健全度調査



写真-5.1.10 八幡橋の振動試験



写真-5.1.11 木橋の耐荷力試験

5.1.6 おわりに

近年、土木構造物にもさまざまな表現と価値観が求められるようになり、景観との調和、あるいは木材使用による炭素貯蔵効果といった環境保全の観点からも木材の土木利用が注目されている。なかでも木橋は身近な構造物であり、アピール効果が高く公共施設としてのニーズが高い。土木学会ではこれまで木橋技術に関する課題解決のための調査研究に長年取り組んできたが、今後は日本木材学会、日本森林学会と連携しあらゆる角度から残された近代木橋の課題を解決し、木橋の復興を目指していきたい。

なお、ここで紹介した木橋は近代木橋の一例であるが、福岡大学工学部社会デザイン工学科（渡辺浩准教授）が管理するホームページ「木橋資料館」⁹⁾では、近代木橋をはじめとして国内外の木橋の事例が詳細に解説されている。また、土木学会木橋技術小委員会（H14～H17）でとりまとめた約 40 橋の近代木橋の事例¹⁰⁾も公開されているので併せて紹介しておきたい。

参考文献

- 1) 社団法人国土技術研究センター：木歩道橋設計・施工に関する技術指針，2003.
- 2) 鈴木憲太郎，軽部正彦，宮武敦，加藤英雄：木材工業，55(2)，pp.78-81，2000.
- 3) (社)土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き 2005，2005.
- 4) (財)林業土木コンサルタンツ：実務者のための設計と施工，2005.
- 5) 木橋技術協会：木橋の点検マニュアル（第1版），1999.
- 6) (社)日本木材保存協会：木製外構施設のメンテナンスマニュアル改訂版，2008.
- 7) たとえば，吉川彰彦，本田秀行，三品吉彦，瀬戸繁樹：実験と解析による2連アーチ木車道橋の構造特性評価，木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，Vol.2，pp51-58，土木学会，2003.
- 8) 軽部正彦，林知行，加藤英雄，宮武敦，新藤健太，青木謙治，藤田和彦：“13年の供用履歴を持つ既存木橋の載荷破壊実験”木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，Vol.7，pp129-134，土木学会，2008.
- 9) 木橋資料館：<http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/index.shtml> 福岡大学工学部社会デザイン工学科
- 10) (社)土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，2001.7.
<http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/jsce-mokkyo02/act.htm>

5.2 木橋の維持管理の把握と課題（渡辺 浩）

5.2.1 はじめに

木橋は必要かつ十分な維持管理を行えば、コンクリート橋や鋼橋と同等の耐用年数を期待することができる。しかしながら、現状では予算等の問題から維持管理は決して十分とは言えない状況にある。木橋では、その材料的特徴から維持管理の有無によるダメージや耐用年数の差は極めて大きい。ここでは、全国の木橋の維持管理の現状を把握することを目的として、管理者にアンケート調査を行うとともに、今後の課題を検討した。

対象とする木橋は、土木学会木橋技術小委員会が、2001年にまとめた木橋事例集¹⁾で紹介された木橋と、その後整備された木橋の43橋であり、他の模範となるような比較的大規模な木橋である。回答は表-5.2.1の31の木橋の管理者から得られた。表-5.2.2は質問の項目である。

表-5.2.1 対象の木橋一覧

橋名	架設場所	竣工年	用途	用途
やすらか橋	北海道滝川市	1993年	歩道橋	林道
梅の香橋	北海道札幌市	1993年	歩道橋	公園
千樹橋	北海道岩見沢市	1994年	歩道橋	公園
なかよし橋	北海道岩見沢市	1999年	歩道橋	通学路
坊川林道2号線	秋田県北秋田市	1987年	車道橋	林道
揚の沢橋	秋田県北秋田市	1993年	車道橋	林道
深沢橋歩道橋	秋田県大館市	1998年	歩道橋	通学路
百目石橋	秋田県大仙市	1999年	車道橋	林道
大猿橋	群馬県前橋市	2000年	車道橋	林道
あいあい橋	埼玉県日高市	1996年	歩道橋	通学路
東山ふれあい橋	神奈川県横浜市	1996年	歩道橋	道路
桃介橋	長野県南木曽町	1993年修復	歩道橋	公園
矢ヶ崎大橋	長野県軽井沢町	1987年	歩道橋	公園
木のかけはし	長野県上松町	1996年	車道橋	林道
かじか橋	石川県加賀市	1987年	歩道橋	公園
こおろぎ橋	石川県加賀市	1990年	車道橋	道路
蓬莱橋	静岡県島田市	1965年架替	歩道橋	河川道
裁断橋	愛知県大口町	1995年	歩道橋	公園
近江富士2号橋	滋賀県野洲市	1995年	歩道橋	公園
錦帯橋	山口県岩国市	1673年	歩道橋	河川道
神の森大橋	愛媛県砥部町	1994年	車道橋	公園
六根の橋	高知県禰原町	1996年	歩道橋	道路
御幸橋	高知県禰原町	2002年	歩道橋	道路
禰原橋	高知県禰原町	2007年	車道橋	道路
三日月橋	大分県大分市	1998年	歩道橋	公園
神馬橋太郎	大分県竹田市	1998年	歩道橋	通学路
阿蘇望橋	熊本県阿蘇市	2000年	車道橋	道路
仙人橋・徐福橋	鹿児島県いちき串木野市	1997年	歩道橋	公園
すぎの木橋	宮崎県小林市	1997年	車道橋	公園
かりこぼうず大橋	宮崎県西米良村	2003年	車道橋	林道
夢見橋	宮崎県日南市	2007年	歩道橋	歩道路

表-5.2.2 アンケート質問内容

1	木橋を選択した時に期待した効果
2	管理者として実施する点検の頻度
3	外部に委託した点検の頻度
4	再塗装の頻度
5	保守工事の頻度
6	点検マニュアルの利用状況
7	架け替えの予定
8	木材利用にあたっての課題点
9	伐採後の森林の状態
10	地場産業や林業・木材産業活性化に必要と考えられる研究課題や政策

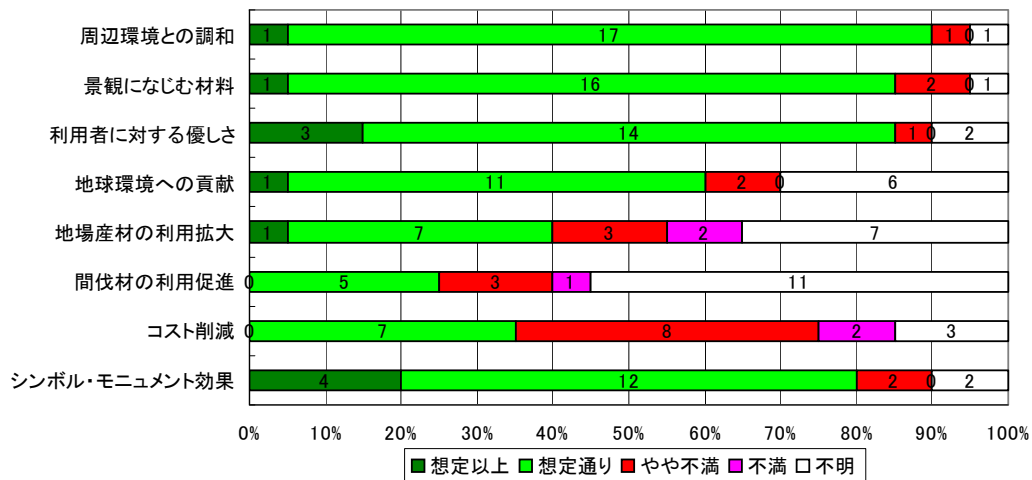


図-5.2.1 木橋を選択した時に期待された効果（歩道橋）

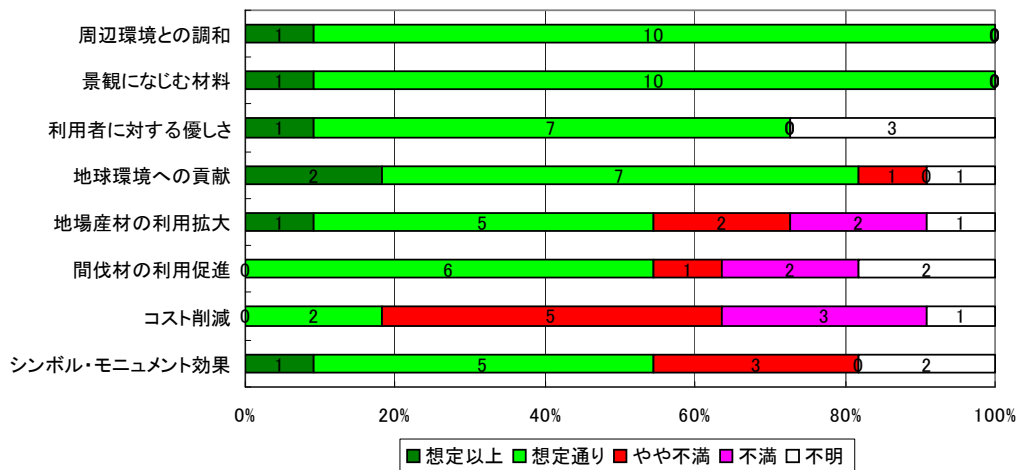


図-5.2.2 木橋を選択した時に期待された効果（車道橋）

5.2.2 木橋を選択した時に期待された効果

鋼橋やコンクリート橋が一般的な時代に木橋を架設したということは、木橋に何らかの効果を期待しているからである。アンケートでは8つの項目を挙げてそれぞれの期待度との差を質問した。以下、歩道橋と車道橋に分けて考察する。その結果を図-5.2.1、図-5.2.2に示す。

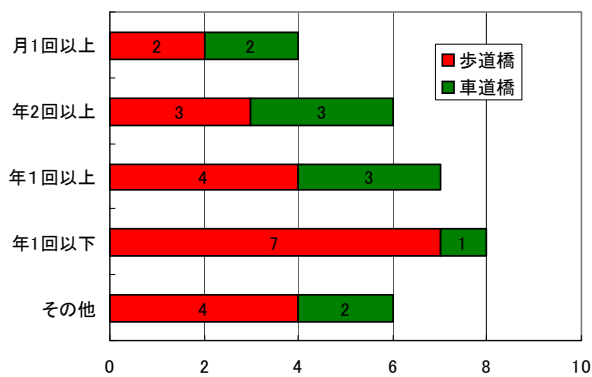


図-5.2.3 管理者が行った点検の頻度

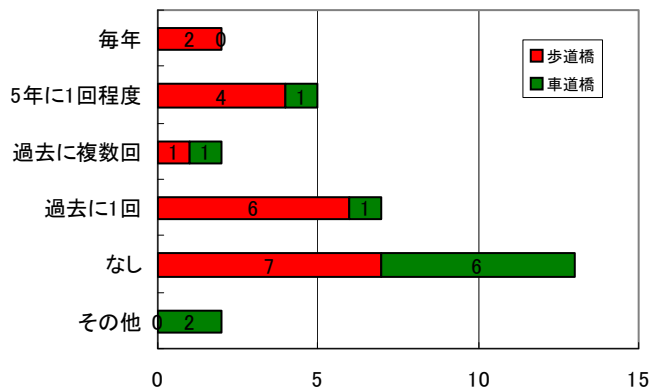


図-5.2.4 外部に委託した点検の頻度

歩道橋、車道橋ともに、「周辺環境との調和」「景観になじむ材料」「利用者に対する優しさ」「地球環境への貢献」「シンボル・モニュメント効果」の5項目については半数以上で期待した効果が得られていることがわかる。このことから、管理者は現在の木橋に比較的満足しているといえる。一方でコストについては、双方ともに不満が大きい。

歩道橋と車道橋で大きく異なるのが、「地場産材の利用拡大」「間伐材の利用促進」の2項目である。車道橋では満足度が高いが、歩道橋では不満が大きい。これは、車道橋には林道が多いことからその目的が明確であったこと、一方で公園に多いためそのような観点がない管理者が多いためと考えられる。また「シンボル・モニュメント効果」については歩道橋の満足度が高いが、これは歩道橋にデザインを重視して木橋を選択された例が多いためと考えられる。

5.2.3 保守点検の状況

(1) 管理者が行った点検の頻度

図-5.2.3は管理者が行った点検の頻度を示したものである。月1回以上から年1回以下と大きな差があるが、これは管理者によって日常的な点検を含めるか、外部委託による点検のみを点検とするかと、点検そのものの定義が違うであろうことが考えられる。いずれの場合でも、点検の目的を明確にし、それに則った点検が各日に実施されることが重要である。

(2) 外部に委託した点検の頻度

点検を効果的、効率的に実施するために、外部に点検を委託する場合がある。図-5.2.4はその頻度を示している。歩道橋も車道橋も「なし」の記述が最も多いが、これは点検費用に余裕がないという理由も多いと考えられる。また、車道橋で実施例が少ないのが、これは管理者によるいわゆるインハウス点検のノウハウがある場合もあるためと考えられる。いずれの場合でも、適切な頻度での適切な点検によりその後の保守コストや耐用年数は大きく異なる場合もあることを知っておきたい。

(3) 再塗装の頻度

再塗装は美観維持の効果も大きいですが、耐久性向上の面でのメリットも大きい。その頻度が図-5.2.5である。これより、かなりの橋が架設後15年近く経過しているにも関わらず、実施されていないことから、今後改善が望まれる。

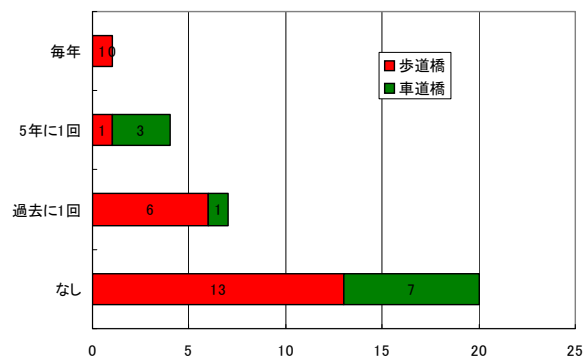


図-5.2.5 再塗装の頻度

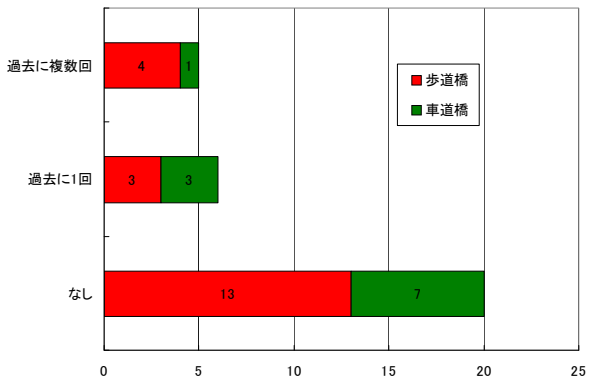


図-5.2.6 保守工事の頻度

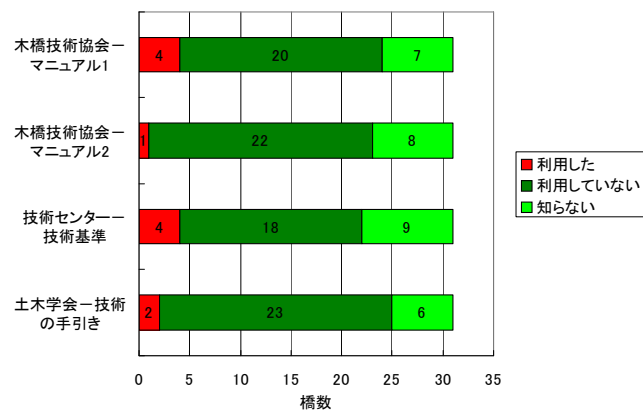


図-5.2.7 点検マニュアルの利用状況

(4) 保守工事の頻度

図-5.2.6 は保守工事の頻度を示したものである。このように「なし」が最も多い。これは実際に必要がないものもあるであろうが、適切な点検が行われていないためその必要性が把握できていないものや、把握できていても実施していないものも少なからず含まれると考えられる。保守工事のむやみな先延ばしは今後のコストや耐用年数に大きく影響することを強調しておきたい。1)

(5) 点検マニュアルの利用状況

木橋技術協会による「木橋点検マニュアル（第1版）²⁾」と「木橋点検マニュアル 第2版³⁾」、国土技術研究センターによる「木歩道橋設計・施工に関する技術基準⁴⁾」、土木学会による「木橋技術の手引き 2005⁵⁾」を挙げ、これらを知っているか、点検等を実施するにあたって利用しているか質問した。図-5.2.7 はその結果である。

図のようにいずれも利用されていないことがわかる。また、「利用していない」とは知っていても利用していないという意味であるが、それは各自でマニュアルを有しているためか、これらの内容が不十分であるためか、あるいは内容が理解できないのか、各マニュアルの編集サイドはその理由も調べる必要がありそうである。

5.2.4 架け替えの予定

図-5.2.8 は今後架け替えの予定があるかを質問したものである。大半の橋で架け替えの予定がないのは当然ともいえるが、興味深いのは、架け替えの予定がある8件のうち「木橋以外にする」という

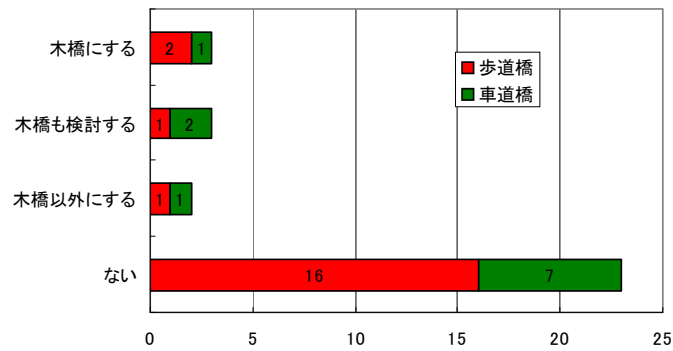


図-5.2.8 架け替えの予定

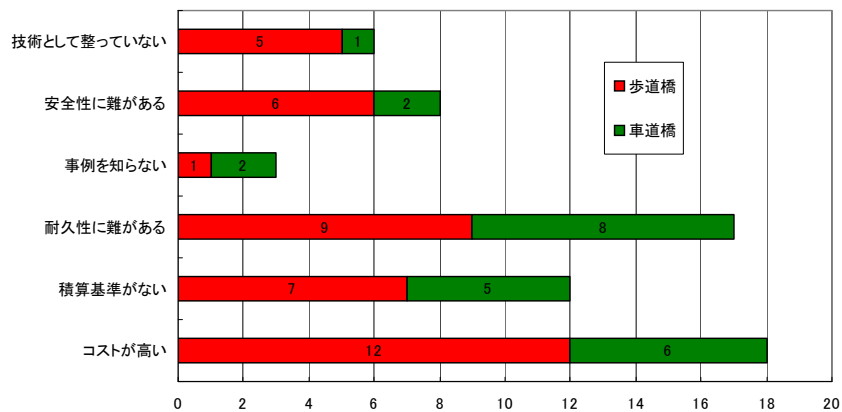


図-5.2.9 木材を利用するにあたっての課題

回答が2件と少なかったことである。このことから、木橋管理者はそれが木橋であることに満足しているということもできるようである。

5.2.5 木材を利用するにあたっての課題

土木構造物へ木材をさらに活用するにあたっての課題は何か、6つの項目を挙げて複数回答で質問した。その結果が図-5.2.9である。特に多かったのが、「耐久性に難がある」「積算基準がない」「コストが高い」であった。コストが高いのは事例が少ないからでもあるが、実際にはどうすればコストが小さくなるのか、逆に大きくなるのかもわからないまま設計されている例も多いようであり、そのためには設計者が木材に関して学習することも必要である。また耐久性に難があるについては、ある意味でそれは事実であるが、実際には木材の耐久性の過小評価も背景にあるようである。今後は管理者の不安や精神的な負担を軽減するためにも、点検・診断法の高度化とそれをわかりやすく説明することが求められているといえる。

参考文献

- 1) 木橋事例集，土木学会木橋技術小委員会，2001. <http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/jsce-mokkyo02/act.htm>
- 2) 木橋の点検マニュアル(第1版)，木橋技術協会，1999.
- 3) 木橋の点検マニュアル第2版，木橋技術協会，2009.
- 4) 木橋歩道設計・施工に関する技術資料，財団法人国土技術研究センター，2003.
- 5) 木橋技術の手引き 2005，土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会，2005.

6. 木材の治山治水利用

6.1 昭和 30 年代に設置された木製治山ダムの腐朽度現地調査について（高奥 信也）

6.1.1 はじめに

近年、景観や生態系に優しい循環型資源で CO₂ 削減効果のある木材を利用した構造物が、各地で建設されるようになってきている。特に木材を主要部材として利用した木製治山ダムは全国で 200 基以上設置されるなど、森林土木の分野において積極的に建設されている。しかし、木製治山ダムの普及を進めるためには、耐朽性能を明らかにして耐用年数を計画的明示することが重要であるため、その指標となる過去に設置された木製構造物の腐朽度調査を行った。

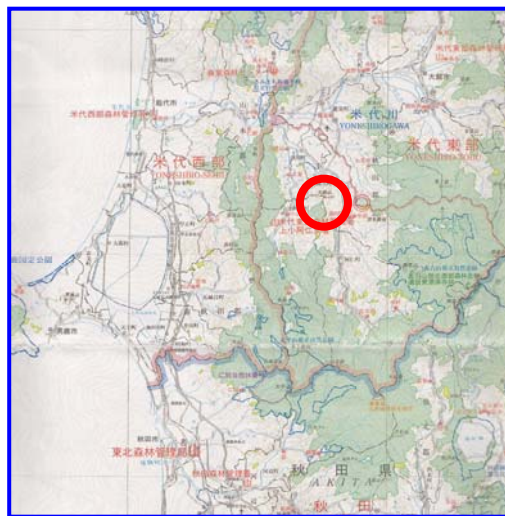


図-6.1.2.1 調査地

6.1.2 調査地の概要

調査地は秋田県北東部の内陸に位置し米代川上流域（米代東部地区）北秋田市鷹巣町七日市地区の森林地域であり、東北森林管理局米代東部森林管理署が管轄する国有林である（図-6.1.2.1）。当該地域は優良な天然秋田スギの産地であり、豊富な森林資源を背景に木材産業が発達し林業活動が非常に活発な地域である。

国有林内では昭和 30 年代に周辺のスギ間伐材（φ 10cm 程度）を用いて、溪流の安定を目的に木製治山施設（写真-6.1.2.1）を設置しており、これらの木製施設は、現存するスギ材による木製土木施設としては国内最古級の施設であり、土木分野における木材利用の施工例として非常に重要な施設である。構造は、スギ材を横断方向に並べ、縦断方向に枠組したもの、栗石等を中詰した重力式の治山ダムである（図-6.1.2.2）。



写真-6.1.2.1 現地状況

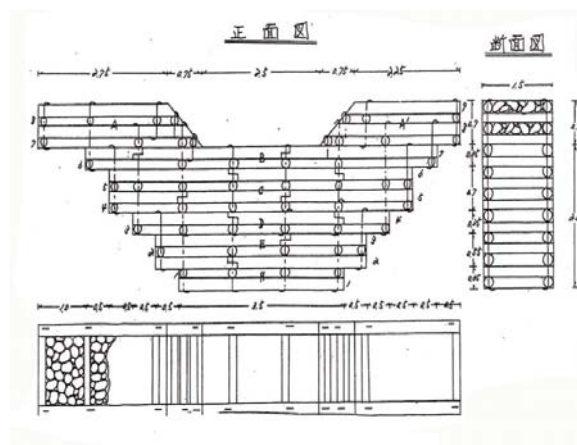


図-6.1.2.2 構造図

6.1.3 調査内容

調査は 2 溪流（揚沢・小舟木沢）に設置された、50 年以上経過した 3 基の施設を対象に腐朽状況を調査した。

また、木製治山ダムは、部材を連結させ堤体内に石材等を詰め、中詰材の重量により安定させるため、構造物の形状を維持することが重要である。そのため構造物に重要な接合部の破損状況について調査し、治山ダムの機能を確認した。

あわせて、周辺の植生等について調査し、自然環境の回復状況や、木製構造物の生態系に対する影

響等についても調査を行った。

(1) 腐朽度調査

部材の腐朽状況については、5段階区分（表-6.1.3.1）による目視調査、およびピロディン（写真-6.1.3.1）及びレジストグラフ（写真-6.1.3.2）による非破壊試験器による調査を行った。

ピロディンは圧縮されたバネの力でピンを打ち込んだ際の貫入量を測定するもので、一定の力でリリースするため、その数値は材の密度と相関があるため、腐朽や劣化を測定することができる。

レジストグラフは、樹木の年輪計測に用いる抵抗値測定機器で、木材に電動ドリルでニードルをせん孔させ、穴を開けた時の抵抗値をデータで表示するもので直径30cmまでの木材を計測することが可能である。その抵抗値から腐朽状態を推定するもので、腐朽した材は抵抗値が小さくなる傾向にある。この機材による調査は、目視できない裏側や内側の腐朽状況を計測することが可能であり、木製治山ダムのような現地に設置されている構造物の調査に適している。

(2) 接合部の調査

木製治山ダムは、部材を連結させ堤体内に石材等を詰め、中詰材の重量により安定させるため、構造物の形状を維持することが重要である。そのため構造物の形状を維持するために重要な連結部分および連結材の破損状況について調査した。

(3) 渓流調査

木製治山ダムの上流域を中心に植生および土砂の安定状況を中心に調査した。

6.1.4 腐朽度調査結果

(1) 目視調査

3 基の治山ダムとも重度の腐朽や接合部の破損が見られるなど、目視による腐朽度ランクでは4以上の腐朽状況（写真-6.1.4.1）であった。

特に放水路部分は、上部の部材が0.7m～1.0m程度流失し、中詰材が流出するなど腐朽度5と判断される。原形をとどめている部材は非常に少なく、設置時に17cm程度あった部材の直径が、腐朽により10cm程度まで減少していた。流失部材の断面を確認したところ、心材部分まで腐朽していた（写

表-6.1.3.1 目視による腐朽度ランク

ランク	状 況
1	腐朽がほとんど見られない（健全）
2	部分的に軽度の腐朽が見られる 部分的に摩耗が見られる ひび割れが確認できる
3	全体的に軽度の腐朽が見られる 破損が見られる 連結部がゆるむ
4	部分的に重度の腐朽が見られる 連結部が破壊している 中詰材が部分的に流出している
5	全体的に重度の腐朽が見られる 連結部や部材が崩れている 中詰材が大量に流出し施設が崩壊している



写真-6.1.3.1 ピロディン



写真-6.1.3.2 レジストグラフ



写真-6.1.4.1 腐朽状況



写真-6.1.4.2 部材断面状況

真-6.1.4.2)。

また、袖部は天端付近の破損は激しいものの、中詰材は、ほぼ堤体断面形状を維持していた。

(2) ピロディンによる調査

原形を留めている袖部の材も含めて、ほとんどの部材について、計測限界値の4cmを示した。小舟木沢の流水内にある部材については、貫入値が35mmであったが、直径が10cm程度になっているため、腐朽部分については摩耗により流失したものと判断される。

(3) レジストグラフによる調査

袖部の部材については、ほとんど抵抗値を示さず、腐朽が心材まで達していることが判明した。また、流水内の横木については、0.4～1.1 目盛の抵抗を示したが(図-6.1.4.1)、どの部材も直径が10cm程度であることから、全体的に腐朽が進んでいるものと判断される。

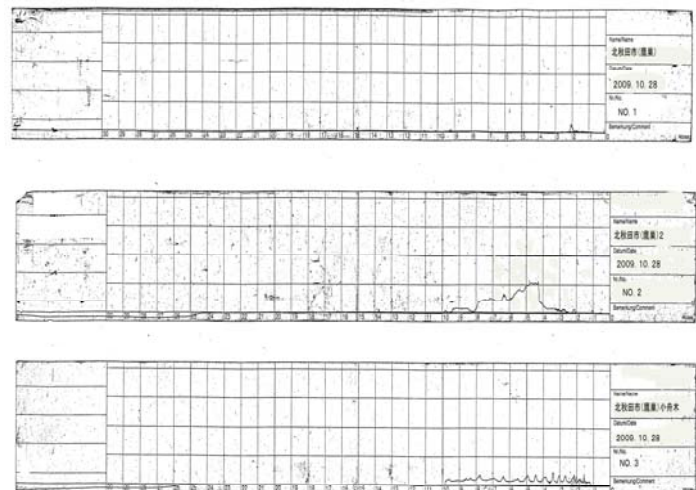


図-6.1.4.1 レジストグラフ

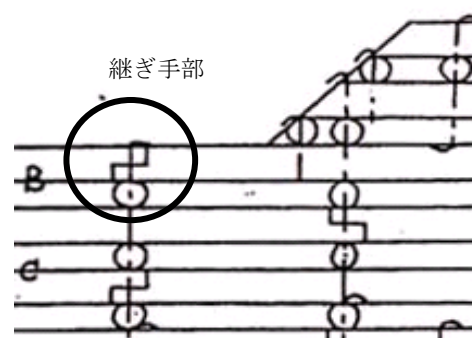


図-6.1.5.1 接合部詳細図

6.1.5 接合部調査結果

接合方法は、部材の継ぎ手箇所連結用の穴を開け、そこに連結用の鉄筋を通し、縦木と横木を同一箇所固定するものである。部材の継ぎ手方法は「相欠け継ぎ」という手法でおこなわれている(図-6.1.5.1)。

接合部の連結用鉄筋は著しく錆びているが、木材を連結する強度は十分に有しており、ほぼ全数が残存していると思われる。しかし、継ぎ手箇所の断面が小さくなることから腐朽が進行した際、この

部分が弱点となり中詰材等が流失したものと思われる。

連結部を詳細に観察すると、連結用鉄筋は部材の腐朽が進み、部材が外れた際に下流側への力でねじ曲げられている（写真-6.1.5.1）。

6.1.6 溪流調査結果

(1) 揚沢上流域

ダム上流側の堆砂区域においては、直径 30cm を越えるヤナギやブナ・スギなど、比較的大径の樹木が生育しており、長期間にわたり安定した（土砂移動の少ない）状況が保存されたことが推察される（写真-6.1.6.1）。

堆砂礫径についても数 cm のものが多く見受けられるため、上流部からの大規模な土砂流出もなかったものと思われる。

木製ダムの破損の影響で、堆砂区域の土砂は浸食された形跡があるが、植生の影響もあり急激な土砂流出はおこっていない。

(2) 揚沢下流域

上流側のダムとはちがいで、堆砂区域には小径木しか生育していない（写真-6.1.6.2）。また、流路が左岸側に偏っていることから、上流からの土砂供給が頻繁に行われ、植生の生育を阻害してきたことが推察される。ただし、周辺には間伐作業による伐倒木や枝条が重なりあっているため、出材作業に係る人為的なかく乱の可能性も高い。

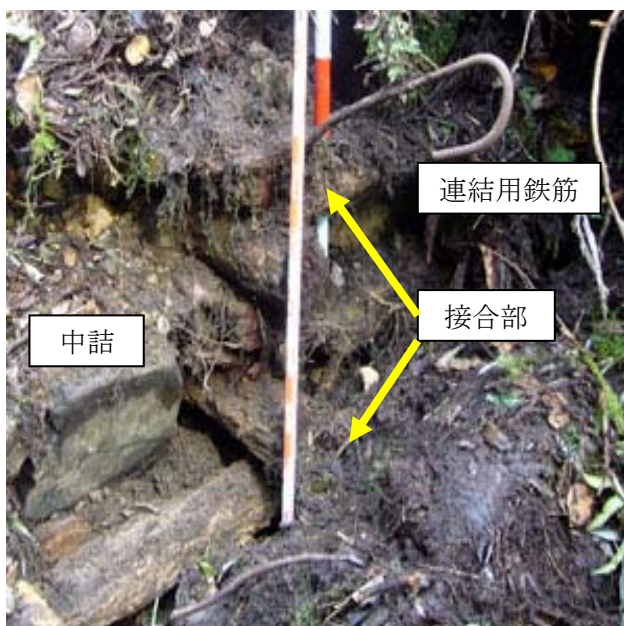


写真-6.1.5.1 接合部破損状況

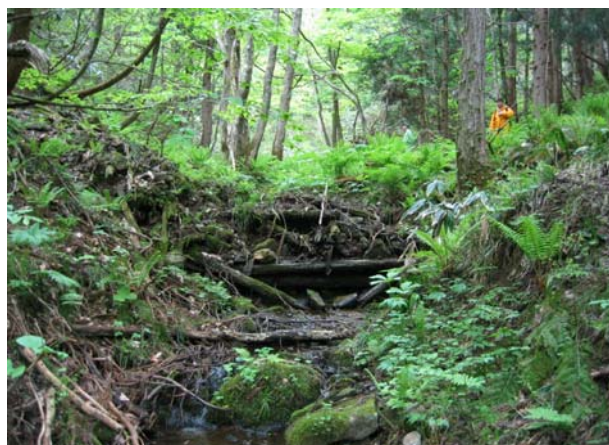


写真-6.1.6.1 溪流状況



写真-6.1.6.2 溪流状況

(3) 小船木沢流域

堆積区域において大径木は見あたらず，土石の移動が頻繁であることが推察される。直上流部に山腹崩壊跡地もあり，堆積石礫径も 20～30cm と大きいことから断続的に一定規模の土砂流出が起こっている可能性が高い。

6.1.7 その他の調査結果

破損部材を輪切りにして秋田県立大学木材高度研究所において，木材含水率を測ったところ，当初質量 369g であったものが全乾質量 75.1g となり，含水率は 391%であった(写真-6.1.7.1)。これは腐朽部分が空隙となって水分を多量に含んでいたと考えられる。



写真-6.1.7.1 含水率

6.1.8 まとめ

50 年以上経過した木製ダムの現地調査を行ったところ，①接合部が弱点となり連結用部が破損②放水路部分や袖部の上部が破損しているが，堤体下部については残存している。③部材の腐朽が非常に進んでいるにもかかわらず，治山ダムとしての機能は維持されている。④連結用の鉄筋が残存している。という共通点が判明した。また，これらの木製治山ダムは維持管理や修繕が行われたことがないにもかかわらず，現存し機能を有していることから，適正な維持管理を行うことで構造物としての長寿命化が可能であると考ええる。

6.2 木製治山ダムにおける CO₂削減効果（高奥 信也，佐々木 貴信）

6.2.1 はじめに

治山治水利用分野では、河川区域や森林地域など自然環境・生物多様性が豊かな区域での工事を対象としており、木製構造物の環境に対する影響を調査することが重要である。環境負荷の中で、特に木製土木構造物の二酸化炭素（以下「CO₂」という。）削減効果について定量的に評価するため、治山治水利用分野で比較的木材使用量が多く、今後各地での設置が期待できる木製治山ダムを事例に、CO₂排出量を客観的に算出した。また、コンクリート構造物と比較することで木製構造物のCO₂削減効果について確認を行った。

6.2.2 評価手法

木製治山ダムの CO₂削減効果を検討するうえでは、部分的に排出される CO₂を把握するだけでなく、ライフサイクル全体で排出量をとらえる必要があるため定量的、客観的に分析し、評価できるライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment:以下「LCA」という。）を用いた。

LCAは主に製品や構造物などについて、資源の採取から輸送、製造、利用、廃棄まで、すべての段階における環境への影響を総合的に評価する手法で、国際標準化機構（ISO）により国際的なガイドラインが策定されている。

今回はLCAをISO規格（ISO14040シリーズ：日本工業規格JISQ14040シリーズ）に定められた積み上げ方式で行った。

ライフサイクルは①資源採取②資源輸送③部品製造④部品輸送⑤建設⑥管理⑦廃棄の7段階に区分し、CO₂の算出方法にはガソリン、軽油、電力の各消費量を、温室効果ガス排出量算定方法

ガイドライン（試案 ver1.6）（環境省地球環境局，2003）¹⁾による排出原単位（表-6.2.2.1）を用い算出した。LCAの対象は間接的なもの、不確定要素の大きなものでかつ影響の少ないものは対象から除外し、図-6.2.2.1に示す部分に限定した。

評価対象は秋田県内に設置されたオールウッドタイプと変形入型の各1基と京都府内に設置された台形型2基との合計4基を対象とした。コンクリート治山ダム4基を比較対象とし、耐用年数は秋田県に現存するスギ製木製治山ダムを参考に木製治山ダムは50年、コンクリート治山ダムは100年とした。コンクリート治山ダムの廃棄に関しては不確定要素が大きく、木製治山ダムと比較し、廃棄に伴うCO₂排出量は小さいと見込まれるので、考慮しないこととした。

6.2.3 分析方法

(1) 資源採取

主要材料である原木や石材等の採取の際に排出されるCO₂を算出した。木材はスギ人工林を対象とし、植栽，下刈り，雪起こし，枝打ち，除伐，間伐という一般的な育林作業におけるhaあたりの作業日数から機械等の使用時間を算出し、その燃料消費量からCO₂排出量を算出した。なお、使用木材は全乾密度0.35のスギ間伐材とし、成長による炭素の吸収・固定量をCO₂に換算しマイナスで表示した。セメント製造に必要な石灰石の採掘は、セメント製造と一体的な作業として分離す

表-6.2.2.1 各燃料におけるCO₂排出量

ガソリン	排出量(kg-CO ₂ /ℓ)	2.32
	排出係数(kg-CO ₂ /MJ)	0.07
	平均高位発熱量(MJ/ℓ)	34.60
軽油	排出量(kg-CO ₂ /ℓ)	2.62
	排出係数(kg-CO ₂ /MJ)	0.07
	平均高位発熱量(MJ/ℓ)	34.60
電気	排出量(kg-CO ₂ /kwh)	0.378

ることが困難であるため「③部品製造」で計上することとした。

(2) 資源輸送

採取した資源を工場等への運搬に必要な機械類の燃料（軽油）消費量から算出した。原木は製材工場までの一般的なトラック運搬，石材は生コンプラント工場までの積み込み（ホイールローダー）と運搬（ダンプトラック 11t 車）をそれぞれ対象とした。なお、木製ダムの場合は石材が採石場から直接工事現場に運搬（ダンプトラック 11t 車）されるため、「④部品輸送」においては計上しないこととした。

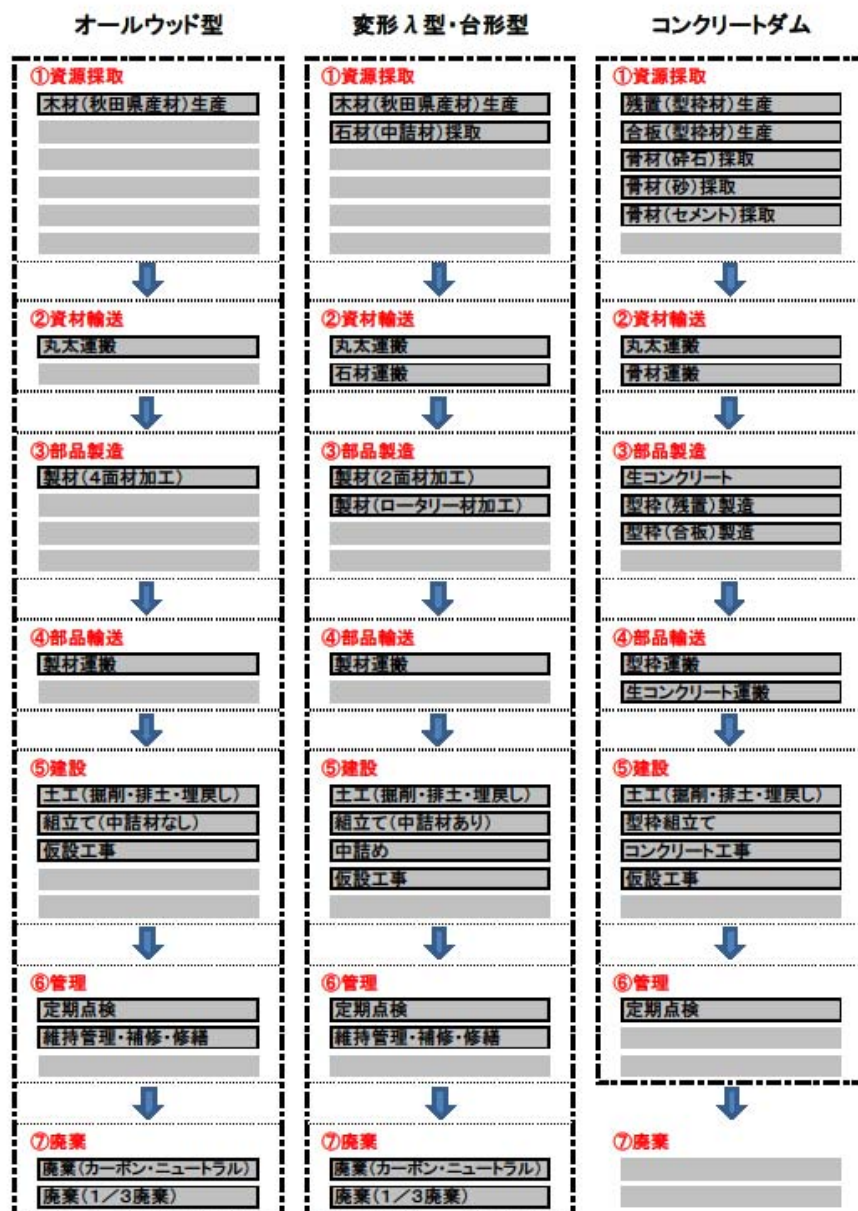


図-6.2.2.1 LCA 対象範囲

(3) 部品製造

製材工場，セメント工場，合板工場等における使用機械についてカタログ値（機関出力，最大仕事量）を用いて算出した。セメント生産については（社）セメント協会が公表している CO₂ 排出量（積み上げ方式による算出数値）を用いることとし，セメント工場から生コンプラントまでの搬送につい

ても、この段階で計上した。製材により排出される木製廃棄物（不要材、木片、チップ等）については、焼却・腐朽等により CO₂ が排出されるものとして計上した。

(4) 備品輸送

工場等から建設現場までの各資材の運搬について、実際の運搬距離をもとに消費燃料から排出量を計算した。

(5) 建設

標準設計に基づく建設機械（0.80 m³級クローラ型バックホウ、コンクリートポンプ車、排水ポンプ等）を使用したものとし、標準歩掛により燃料消費量を算出するとともに、建設に必要な仮設工事等についても計上することとした。

(6) 管理

木製治山ダムは、毎年の点検を 50 年間行い、また維持管理が必要であるため補修・修繕を 10 年に 1 回、ダム材料の 5% の木材を交換することとした。コンクリート治山ダムは 50 年後に 1 度点検することとし、補修・修繕については行わないこととした。

(7) 廃棄

木製治山ダムのみを対象とし、コンクリート治山ダムについてはダムを破碎撤去することはないため、除外した。

6.2.4 分析結果

木製治山ダムの建設に伴う各段階の燃料消費量に対する CO₂ 排出量をそれぞれ求め、表-6.2.4.1 に、またコンクリート治山ダムの CO₂ 排出量を表-6.2.4.2 に示す。

木製治山ダム建設に係る全工程の平均 CO₂ 排出量は 1 基あたり 10,733.5kg-co₂/基となり、ダム体積あたりに換算すると 101.7kg-co₂/m³となる。コンクリートダム建設に係る全工程の平均 CO₂ 排出量は 1 基あたり 20,547.2kg-co₂/基となり、ダム体積あたりに換算すると 198.6kg-co₂/m³となる。

CO₂ 総排出量で比較すると木製治山ダムは 10,900.5kg-co₂ となりコンクリートダムの約 53% の排出となった。

各段階における CO₂ 排出量を比較すると、木製治山ダムは比較的単純な構造であるにもかかわらず、建設段階での CO₂ 排出割合が高く、資材や部品の輸送においても CO₂ 排出量が最も多いことから、資材の運搬距離低減を目的とした現地発生材の利用やより効率的な作業方法による建設段階での改善が効果的であると考えられる。

6.2.5 まとめ

この LCA による環境影響評価により、コンクリート及び木製治山ダムの CO₂ 排出量を定量的、客観的に把握することができ、環境負荷として CO₂ の総排出量を比較すると、木製治山ダムの環境負荷が少なくコンクリート治山ダムに比べて環境に優しい構造物であることが確認できた。

表-6.2.4.1 木製ダムの CO₂ 排出量

工 程	項 目	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)				平 均
		オールウッド型	変形入型	台形型①	台形型②	
①資源採取	木材採取 (スギ) 生 産	610.1	670.1	157.1	165.2	-93,615
	吸 収	-145,530.8	-159,840.0	-35,083.3	-36,896.0	
	石材採取 中 詰 材		322.6	371.8	298.4	
	砕 石		71.6	135.2	86.9	
	計	-144,920.7	-158,775.7	-34,419.1	-36,345.5	
②資源輸送	丸太運搬 トラッククレーン 4t車	2,933.4	3,170.0	700.2	721.5	3,339.2
	石材運搬 ダンプトラック 10t車		1,782.8	2,253.8	1,795.1	
	計	2,933.4	4,952.8	2,954.0	2,516.6	
③部品製造	製 材 製 材	2,154.6	1,877.2	1,370.4	1,441.2	58,313.4
	廃棄木材 腐 朽	87,318.5	95,904.0	21,050.0	22,137.6	
	計	89,473.1	97,781.2	22,420.4	23,578.8	
④部品輸送	製材運搬 トラッククレーン 4t車	1,593.9	1,693.5	395.8	377.9	1,015.3
	計	1,593.9	1,693.5	395.8	377.9	
⑤建 設	掘 削	大型ブレーカ(軟岩IB)		67.1		2,018.6
		バックホウ(軟岩IA)	36.0	13.6		
		バックホウ(レキ質土)	257.1	359.9		
		バックホウ(砂質土)			158.1	
	小 計			238.7	140.4	
	排 土	バックホウ(軟岩IA)		14.5		
		バックホウ(砂質土)		154.8	137.9	
		小 計		169.3	137.9	
	基礎碎石投入	バックホウ(レキ質土)		3.4		
		タンバ		0.3		
		小 計		3.7		
	組 立	トラッククレーン 4t車	1,506.3	2,556.9	257.2	
		小 計	1,506.3	2,556.9	257.2	
	中 詰 め	バックホウ		134.1	146.6	
		小 計		134.1	146.6	
	埋 戻 し	バックホウ(軟岩IA)		5.8		
		バックホウ(レキ質土)	136.7	42.6		
		バックホウ(砂質土)			55.7	
		小 計	136.7	42.6	61.4	
	仮 設	ポンプ据付・撤去	47.4	47.4	47.4	
		発動発電機	474.6	542.4	128.8	
		小 計	522.0	589.8	176.3	
	計	2,458.1	3,683.3	1,053.2	879.6	
⑥管 理	点 検	年 1 回	305.5	305.5	305.5	1,967.4
		資源採取(木材)	30.5	33.5	7.9	
	補 修	資源輸送(トラック)	191.3	191.3	63.7	
		部品製造(製材)	107.8	93.8	68.6	
	修 繕	部品輸送(トラック)	99.6	99.6	98.9	
		小 計	429.2	418.2	239.1	
	50年間のCO ₂ 排出量	2,146.0	2,091.0	1,195.5	1,215.0	
	計	2,451.5	2,396.5	1,501.0	1,520.5	
⑦廃 棄	廃棄木材 使用量を廃棄	58,212.2	63,936.0	14,033.3	14,758.4	37,735.0
	計	58,212.2	63,936.0	14,033.3	14,758.4	
①～⑦ 合 計 (kg-CO ₂ /基)		12,201.5	15,667.6	7,938.6	7,286.3	10,773.5
木製ダム体積当たりの排出量		121.7	99.7	100.2	85.2	101.7

今後は集約化や集中化による木材生産システムの確立や大型林業機械化による効率のよい伐出・搬出、各地と連携した木材ストックヤードの確保による大量輸送システムの構築、そして現地製材システムの確立などにより各段階での環境負荷を低減できるとものとする。

また、木製ダムに比べて CO₂ の排出量が多く環境への負荷が大きいコンクリートダムであるが、建設段階における CO₂ 排出割合は木製ダムに比べて少なく、非常に効率の良いものであることが LCA の実施により判明した。また、コンクリートはセメント用原料として高炉スラグやフライアッシュ、シリカフェームなどの産業副産物を利用し、さらにはセメント製造用燃料として産業廃棄物（古タイヤ等）を活用し、廃コンクリートからの再生骨材の利用を図るなど、資源のリサイクルを中心として、環境負荷低減への取り組みも積極的に行われている資材であり、耐久年度など今後木製構造物が課題とする分野において、非常に優れた構造物である。

今回の LCA に用いたデータは、従来、各都道府県単位で実施している構造物のデータを、WG3 の活動を通じ共有することで可能となった。今後も多くのデータを共有し木材利用の拡大につなげていく必要がある。

表-6.2.4.2 コンクリートダムの CO₂ 排出量

工 程	項 目	CO ² 排出量(kg-CO ²)				平 均	
		その①	その②	その③	その④		
①資源採取	木材(スギ)生産	-9,508.0	-8,019.2	11.9	12.1	-3,816.5	
	石材採取	細骨材(砂)	193.3	171.1	180.0		185.4
		骨材(碎石)	146.6	129.7	44.2		78.1
		粗骨材(碎石)	219.8	194.6	338.3		356.1
	計	-8,948.3	-7,523.8	574.3	631.8		
②資源輸送	丸太運搬	127.5	127.5	120.3	120.3	4,301.9	
	コンクリート用	細骨材(砂)	1,069.7	950.8	1,346.3		1,879.0
		骨材(碎石)	665.6	570.5	448.8		939.5
		粗骨材(碎石)	998.3	855.7	2,916.9		4,071.1
	計	2,861.1	2,504.5	4,832.2	7,009.8		
③部品製造	コンクリート	12,389.2	11,798.0	12,366.0	14,161.0	15,459.9	
	型 枠	5,842.2	4,926.4	176.5	180.1		
	計	18,231.4	16,724.4	12,542.6	14,341.1		
④部品輸送	型枠運搬	98.8	83.4	67.0	67.0	1,317.3	
	コンクリート運搬	1,212.3	1,077.6	1,261.4	1,401.6		
	計	1,311.1	1,161.0	1,328.5	1,468.6		
⑤施 設	掘 削	164.1	160.3	192.4	184.1	1,526.2	
	排 土			187.0	178.1		
	コンクリート打設	コンクリートポンプ車	272.6	246.5	267.5		299.6
		バイブレーター運転	52.6	47.6	53.1		59.5
	型枠組立	打設面清掃			50.0		56.0
		ラスレーンクレーン	26.9	22.7	506.1		516.4
	埋戻し	電気溶接機			256.5		261.7
		バックホウ	68.8	97.0	62.7		59.4
	仮 設	トラッククレーン	47.4	47.4	47.4		47.4
		発動発電機	610.2	542.4	196.6		217.0
計	1,242.6	1,163.9	1,819.4	1,879.0			
⑥管 理	点 検	1回	6.1	6.1	6.1	6.1	
	計		6.1	6.1	6.1		
⑦廃 棄			3,801.8	3,207.7		7,009.5	
	計		3,801.8	3,207.7	0.0		0.0
①～⑦ 合 計 (kg-CO ² /基)		18,505.8	17,243.8	21,103.0	25,336.3	20,547.2	
コンクリートダム体積当たりの排出量		174.3	183.4	210.8	226.0	198.6	

参考文献

- 1) 温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン（試案 ver1.6），p.108，2003

6.3 防腐処理の有無による治山治水施設の腐朽速度の違い

(石川芳治, 田次慶久, 前田恵史, 金岩岳彦)

6.3.1 はじめに

治山・治水施設のうちでも比較的大型で長期間機能を発揮することが期待される谷止工, 護岸工, 土留工等の構造物に木材を用いる場合には, 施設の耐朽性を考慮して設計および維持管理を行うことが重要である。すなわち設計においては木材の腐朽速度を予測して腐朽が生じても安全なように設計するとともに, 適切な維持管理を行うために許容できる腐朽厚を予め設定しておくことが重要である。腐朽速度に関しては穿孔抵抗試験機(レジストグラフ)を用いて施工後約5~7年経過した京都府に設置された木製谷止工について調査した結果¹⁾²⁾が報告されている。しかしながらこれらの木製谷止工は木材保存剤を使用しておらず, 木材保存剤を使用した木製施設の腐朽速度についてその実態を調査した事例が少なく不明な点が多い。そこで, 施工後約6~10年経過した校倉式木製谷止工・護岸工・土留工について腐朽速度の実態調査を実施した。

6.3.2 調査箇所と調査方法

調査対象としたのは, 平成14年度に愛媛県北宇和郡鬼北町奈良奥山に設置された校倉式木製谷止工(写真-6.3.2.1, 高さ5m, 長さ32m), 平成11年度に大阪府交野市私市に設置された校倉式木製護岸工(写真-6.3.2.2, 高さ2.5~3.7m, 長さ23m)および和歌山県岩出市根来山に設置された校倉式土留工(写真-6.3.2.3~4, 高さ2.5m, 長さ35m), 平成11年に愛知県豊橋市に設置された校倉式木製護岸工(写真-6.3.2.5~6, 高さ1.3m, 長さ141m)であり, 部材にはスギを用いている。現地調査は全て, 平成21年に実施した。



写真-6.3.2.1 校倉式木製谷止工 (奈良奥山)



写真-6.3.2.2 校倉式木製護岸工 (私市)



写真-6.3.2.3 校倉式木製土留工 (根来山)



写真-6.3.2.4 校倉式木製土留工 (根来山)



写真-6.3.2.5 校倉式木製護岸工（豊川放水路）



写真-6.3.2.6 校倉式木製護岸工（豊川放水路）

部材の腐朽厚の調査は穿孔抵抗試験機（レジストグラフ、写真-6.3.2.7～10）により実施し、さらに携帯型含水率測定器により含水率も測定した。腐朽速度は腐朽厚（mm）を設置後の経過年数で除することにより求めた。調査対象とした木製施設の部材はスギ丸太を丸棒加工した木材を機械的に圧縮した後に木材保存剤（ACQ）を加圧注入したもので、均一に木材保存剤を注入できることが特徴である。また、校倉式とは、部材の接合部を切欠いて、その切欠きを利用して部材を固定するものであり、ボルト等の金具を用いていないことに特徴がある。このため、ボルト等で接合する場合に比べて施工性が良く、施工費の節減が可能となる。



写真-6.3.2.7 穿孔抵抗試験機による計測（奈良奥山）



写真-6.3.2.8 穿孔抵抗試験機による計測（私市）



写真-6.3.2.9 穿孔抵抗試験機による計測（根来山）



写真-6.3.2.10 穿孔抵抗試験機による計測（豊川放水路）

腐朽厚の調査に用いた穿孔抵抗試験器（レジストグラフ；WALESCH ELECTRONIC GMBH 社製，RESISTGRAPH F300，写真-6.3.2.7～10）は持ち運び可能な簡便な穿孔抵抗測定器械である。細い針（ニードル）を一定の速度，一定の回転数で貫入させ，木材を穿孔する時に作用する抵抗を測定する器械である。針（ニードル）の先端部は直径 3mm で軸部は 1.5mm である。針の長さは全長 30cm で回転数は 1,500 回／分である。穿孔する木材の強度は穿孔抵抗により表される。穿孔抵抗は深さごとに，消費した電力により測定される。

一般的な測定方法は次のとおりである。レジストグラフの針の先端を調査する部材の表面（手前）に当て，部材の中央（中心）を通るように，針が部材の反対側の表面に出るまで穿孔を行う。針の先端部の穿孔抵抗は機器のチャート紙上に，針の先端部の深さに対応した位置に波形で表される（穿孔抵抗チャート；図-6.3.2.1）。記録紙上に記録された波形の高さから深さ毎の穿孔抵抗値を読みとる。一般的に穿孔抵抗は各深度における木材の強さあるいは腐朽の程度を表し，一般的に穿孔抵抗値が大きい程強度が大きく健全な材と判断され，抵抗値が小さい程強度が小さく腐朽が進んでいる材と判断される。また，木材の表層部（辺材）では小さく，中心部（心材）にいくほど穿孔抵抗は増加する。これまでの測定結果³⁾から穿孔抵抗値の平均が 1mm 未満の部分は腐朽が進んでおり強度が著しく低下していると判断される。このことから平均穿孔抵抗値が 1mm 未満の部分の厚さを腐朽部の厚さと判断した。

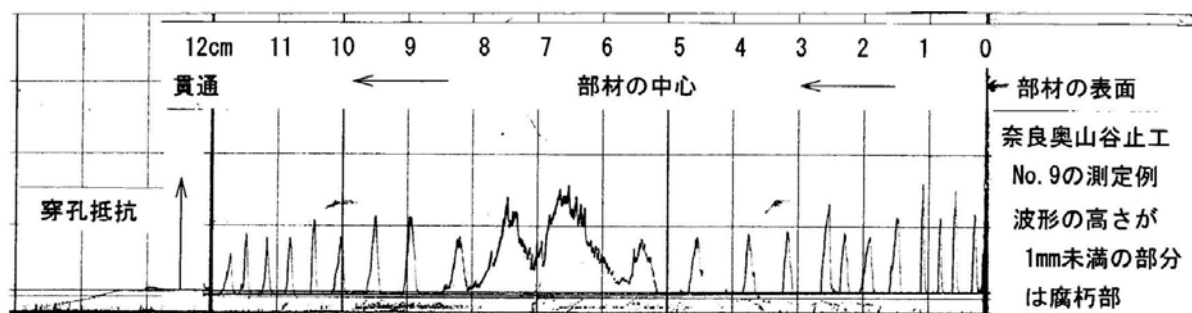


図-6.3.2.1 穿孔抵抗試験器(レジストグラフ) による穿孔抵抗チャートの例
(奈良奥山谷止工 No.9 の例) (この場合は腐朽厚は 0mm と判断した)

6.3.3 調査結果

各施設の部位毎の建設後の経過年数と腐朽厚の関係を図-6.3.3.1 に示す。全体として腐朽厚はわずかであり，一部の部材を除いてほとんど腐朽していないと判断される。木材保存剤の浸透していない部材の中心部においても特に腐朽は認められなかった。なお，測定された木材の含水率と腐朽厚の間には明確な関係は認められなかった。

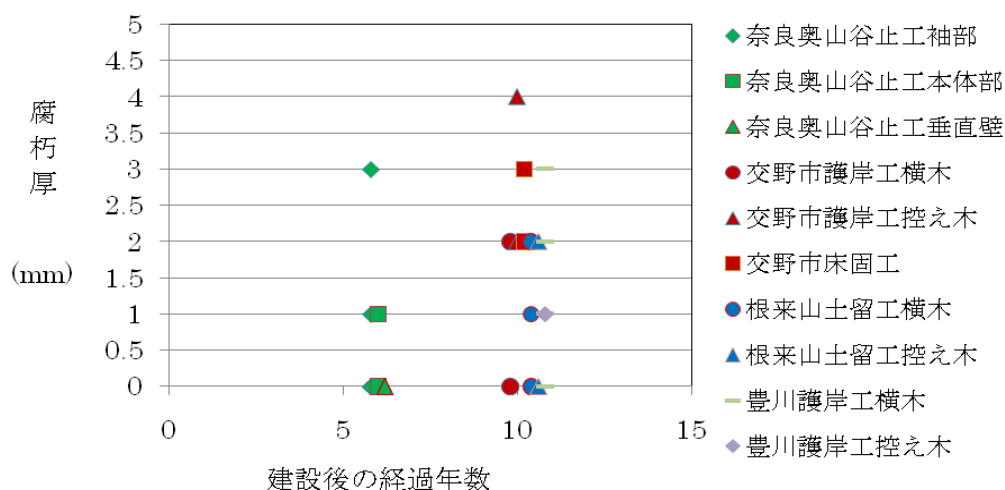


図-6.3.3.1 木材の部位毎の経過年数と腐朽厚の関係

各施設の部位毎の腐朽速度の平均値を表-6.3.3.1に示す。施設種類，設置場所による平均腐朽速度の差は大きくないことが分かる。図-6.3.3.2には，京都府に設置された木製谷止工の設置後5～7年間の平均腐朽速度^{1), 2)}と比較した結果を示す。京都府の木製谷止工の部材はスギを用いており，木材保存剤は使用していない。校倉式の谷止工・護岸工・土留工の部材の腐朽速度は木材保存剤を使用していない京都府の谷止工の部材の約1/20～1/70と小さく，校倉式木製施設の部材は耐朽性が極めて高いことが分かる。

表-6.3.3.1 校倉式木製施設部材の平均腐朽速度 (mm/年)

場所	施設種類	部位	腐朽速度 (mm/年)	建設後経過 年数(年)	測定部材数
奈良奥山 (愛媛県)	谷止工	袖部	0.13	6	n=5
		本体部	0.03	6	n=5
		垂直壁	0.00	6	n=3
交野市 (大阪府)	護岸工	横木	0.10	10	n=12
		控え木	0.30	10	n=2
	床固工		0.25	10	n=2
根来山 (和歌山県)	土留工	横木	0.06	10	n=12
		控え木	0.05	10	n=4
豊川放水路 (愛知県)	護岸工	横木	0.15	10	n=19
		控え木	0.10	10	n=1

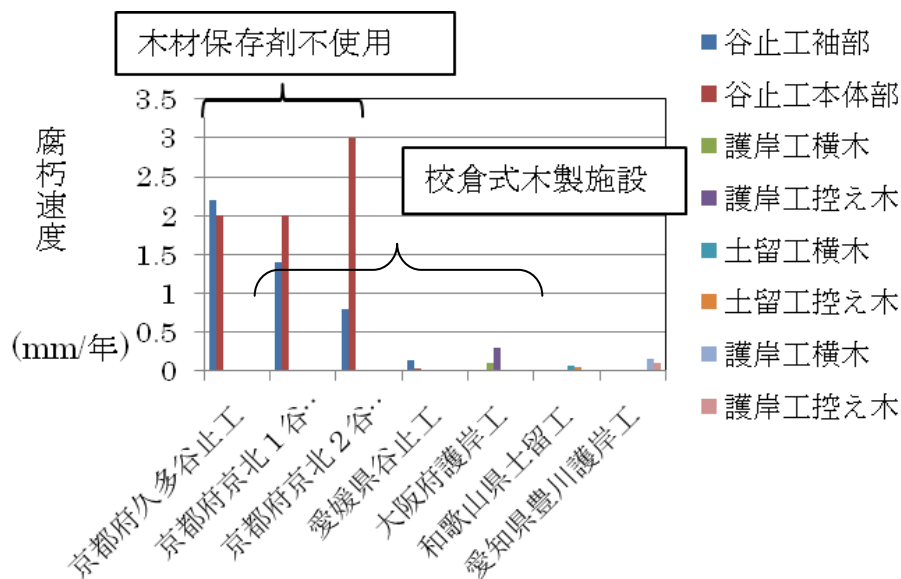


図-6.3.3.2 京都府木製谷止工（木材保存剤不使用）と校倉式谷止工との腐朽速度の比較

6.3.4 おわりに

今回の現地調査により、校倉式の木製施設の部材の腐朽速度に関する貴重なデータを得ることができた。その結果、木材保存剤の効果によるとみられる腐朽速度の著しい低下が認められ、校倉式木製施設の部材の耐久性は木材保存剤を用いていない部材と比較して非常に高いと判断される。

しかしながら木材の腐朽速度は使用されている環境（流水がかかるかどうか、気温、湿度、日射等）により異なると考えられるため、信頼性の高い腐朽速度を得るためには実態調査をさらに広く行う必要がある。また、腐朽速度は今後変わることも考えられるので、5年に1度位の間隔で追跡調査をすることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) Dang, Q.D., Ishikawa, Y., Nakamura, H., and Shiraki K. : Evaluating method of durability of small wooden crib dams with considering the deterioration rate, 砂防学会誌, Vol.60, No.2, pp.13-24, 2007
- 2) Dang, Q.D., Ishikawa, Y., and Shiraki K. : Influence of design high water level, warm index, and maximum snow depth on deterioration rate of wooden crib dams, 砂防学会誌, Vol.61, No.4, pp.39-45, 2008
- 3) 石川芳治, 内藤洋司, 落合博貴, 上原勇 : 各種試験に基づく木製施設の耐久性, 腐朽度および曲げ強度評価法, 砂防学会誌, Vol.56, No.4, pp.21-31, 2003

6.4 腐朽速度を考慮した木製えん堤の設計法（石川芳治）

6.4.1 はじめに

近年、生態系になじみやすく再生産可能で環境に対する負荷の少ない木材がこれまでのコンクリートや鋼材の代わりに森林土木構造物に積極的に用いられるようになってきている。森林土木構造物に木材を用いることは間伐材の有効利用、木材資源の有効利用、二酸化炭素の排出削減、森林整備の推進、森林の多目的機能の維持・増進の面からも重要である。

野外に置いた木材の耐用年数についてはこれまでいくつかの調査・研究が行われているが、最も有名なのは松岡ら（1970,1984）による浅川実験林における $3 \times 3 \times 60\text{cm}$ の杭を用いた腐朽試験である。調査結果では耐用年数はスギ、ヒノキの場合では辺材で 4～5 年、心材で 6～7 年とされている。しかしながら木材の腐朽の速さは設置される場所の水分条件や気温、土壌との接触条件等により大きく異なり一様ではなく、また、えん堤に用いるような大きな（太い）木材では全体の強度低下の速度も異なると考えられる。

実際、青森県坪毛沢に設置されている木製えん堤にはヒバが用いられているが、大正 5 年（1916）に建設された木製えん堤が現存しており、1950 年代に設置されたものはほとんど腐朽せずに現在も十分にえん堤の機能を保持している（田中ら 1999）。一方、スイスやオーストリアでは現在でもカラマツ、モミ、トウヒ等により多くの木製えん堤が建設されており、木製えん堤の一般的な耐用年数は 30～50 年とされている。木製施設の耐用年数に関しては、常時水分が多い箇所に設置すれば我が国でも数十年程度は十分にあると考えられる。しかしながら、木材である以上、腐朽等に対する点検・維持管理は重要であり、維持管理の良否が耐用年数を決めることにもなる。

森林土木構造物のうちでも比較的大型で長期間機能を発揮することが期待される擁壁工、えん堤、橋梁等の構造物に木材を用いる場合には、施設の耐朽性を考慮して設計することが重要である。さらに、このような木製施設の機能が保持されるように適切な維持管理を行うことも重要である。適切な設計を行うためには木材の腐朽速度を予測して、想定された腐朽が生じて安全なように設計するとともに、耐朽性を予め設定しておくことが重要である。さらに木製施設の維持管理を適切に行うためには腐朽度を簡便にかつ的確に調査し、腐朽しつつある木材の強度を精度良く判定して安全性をチェックしたり、必要な場合には補修・補強や更新を行うことが重要である。このように、木製施設を普及させるために木製構造物の設計法、腐朽速度の予測、耐朽性の検討手法、腐朽度の測定法、点検手法、補修・補強法、更新手法を確立することが重要である。

木製えん堤の設計に関しては石川ら（2000）はいくつかの木製えん堤について水平載荷試験を実施しており、さらに木製えん堤に作用する土圧や水圧を測定している。これらの試験結果を基に、木材の腐朽を考慮しない場合の木製えん堤の設計法を提案している(Ishikawa *et al.*,2002)。しかしながら、木材はコンクリートや鋼材とは異なり、木材の健全部（腐朽していない部分）の直径や断面積は腐朽とともに減少していく。したがって、木材の腐朽速度が大きいほどえん堤の耐朽年数、すなわちえん堤が安全に機能する年数は減少することとなる。ここでは腐朽を考慮した木製えん堤の新しい設計法(Dang *et al.* 2007,2008)について述べるとともに、腐朽速度に基づく木製えん堤の耐朽年数の評価法について述べる。

6.4.2 設計に用いる用語と許容応力度

小型木製枠構造えん堤の構造を図-6.4.2.1 に示す。以下で使用する用語および許容応力度を次に示す（石川ら、2000）。

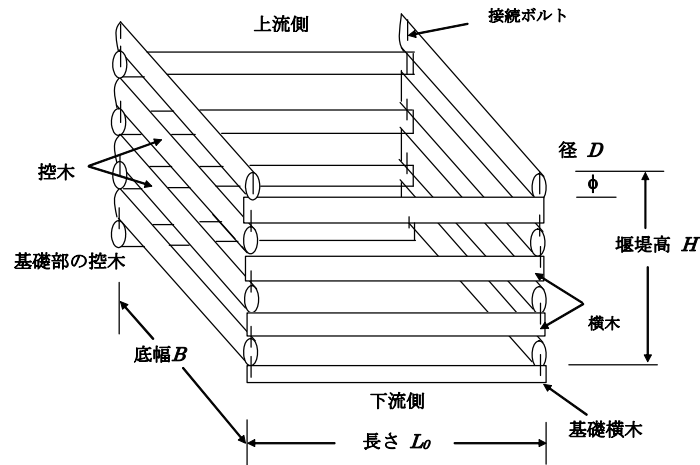


図-6.4.2.1 二重壁式木製枠構造えん堤の模式図

γ_w : 水の単位体積重量 (土砂を含む: 11.8 kN/m^3)

γ_s : 中詰材料の単位体積重量 (標準: 17.65 kN/m^3)

γ_T : 本体部の平均単位体積重量 ($= 16.5 \text{ kN/m}^3$)

D : 使用している木材 (丸太) の直径 (m)

D_s : ボルトの直径 ($= 1.6 \times 10^{-2} \text{ m}$)

L_0 : 控木間の距離 (m)

L_a : 有効控木長(m) (= ボルト間の長さ = 有効えん堤幅 = B)

μ : えん堤と基礎地盤との摩擦係数 (礫混じり土: 0.7)

F_t : 転倒に対する安全率 ($= 1.2$)

F_s : 滑動に対する安全率($= 1.2$)

F_d : 中詰材料のせん断変形に対する安全率 ($= 1.2$)

ϕ : 中詰材料の内部摩擦角 ($= 40$ 度)

K_L : 中詰材料の主働土圧係数 (0.22) (長期: 平常時)

q : 許容地盤支持力(kN/m^2)

H : えん堤の高さ (m) (基礎丸太を除いた高さ)

B : 本体部と水通し部の幅 = えん堤基礎部の有効幅 = L_a (m)

h : 越流水深 (洪水時) (m)

A_s : ボルトの断面積 = $(\pi D_s^2 / 4)$

f_{wba} : 木材の許容曲げ応力 (繊維方向, 湿潤状態) (N/mm^2)

f_{wsa} : 木材の許容せん断応力(繊維方向と直角, 湿潤状態) (N/mm^2)

f_{wta} : 木材の許容引張応力 (繊維方向, 湿潤状態) (N/mm^2)

σ_{sta} : 鋼材の許容引張応力 (SS400 bolt: 137 N/mm^2)

j_a : 鋼材の許容引張力 = $\sigma_{sta} \times A_s$ (ボルト直径 $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}$, $j_a = 27 \text{ kN/1 ボルト}$)

ここでは, 耐朽性を評価するのに簡便なように木材の断面は円形とし, 次のように用語を定義した。

Δd : 腐朽速度 (mm/年)

w_1 : 基礎横木に作用する土圧による力(kN/m)

w_2 : 基礎横木の直上の横木に作用する土圧による力 (kN/m)

u_1 : 基礎の控木に作用する土圧による力 (kN)

u_2 : 基礎の控木の直上の控木に作用する土圧による力(kN)
 M_{y1} : 基礎横木に作用する最大曲げモーメント (kN・m)
 M_{y2} : 基礎横木の直上の横木に作用する最大曲げモーメント(kN・m)
 σ_1 : 基礎の控木に作用する最大曲げモーメント (kN/m²)
 σ_2 : 基礎の控木の直上の控木に作用する最大曲げモーメント(kN/m²)
 S_1 : 基礎横木に作用するせん断力 (kN)
 S_2 : 基礎横木の直上の横木に作用するせん断力(kN)
 τ_1 : 基礎横木に作用する最大せん断応力(kN/m²)
 τ_2 : 基礎横木の直上の横木に作用する最大せん断応力(kN/m²)
 t : 建設後の経過年数 (年)
 T_b : 最大曲げ応力から算出した木製えん堤の耐朽年数(年)
 T_s : 最大せん断応力から算出した木製えん堤の耐朽年数(年)
 T_t : 最大引張応力から算出した木製えん堤の耐朽年数(年)
 T : えん堤の実際の耐朽年数 (年)
 $2t\Delta d$: t 年経過後の部材の腐朽厚さの計 (m)
 A_L : 腐朽を考慮しない場合の部材の有効断面積(ボルト孔部が有る場合) = $(pD^2/4) - D_s \times D$ (m²)
 A_{Lb} : ボルト孔部が有る場合の木材の健全部の有効断面積 = $\{p(D-2t\Delta d)^2/4\} - D_s \times (D-2t\Delta d)$ (m²)
 Z : 部材の断面係数

6.4.3 木製えん堤の安定計算法

えん堤に作用する外力としては上流面に作用する土圧($E_1 + E_2$) および水通しの越流水による鉛直方向の静水圧(W_w) が考えられる (図-6.4.3.1 参照)。石川ら(2002)は木製えん堤の底部の上流側に引張応力が発生することを許す場合の木製えん堤の安定条件として次の4条件を示した。

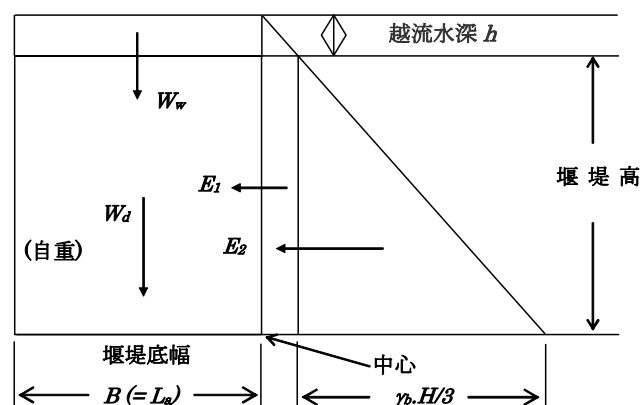


図-6.4.3.1 木製えん堤に作用する力 (石川ら, 2002)

1) 転倒に対する安定

鋼製の枠構造のえん堤と同様にえん堤底部に引張応力が作用する条件で転倒に対する安全率は 1.2 とする (鋼製砂防構造物設計便覧, 2001)

$$F_t = M_v / M_d \geq 1.2, \dots \dots \dots (1)$$

ここで M_v : 鉛直合力によるモーメント; M_d : 水平合力によるモーメント

2) 地盤の許容応力を考慮した内部応力に対する安定

えん堤底部の下流端に作用する応力 (σ_d) が地盤の許容応力以下である。

$$|\sigma_d| = |-(\Sigma V_F / B)(1+6e/B)| \leq q \text{ (kN/m}^2\text{)}, \dots \dots \dots (2)$$

えん堤底部の上流端に作用する引張応力(σ_u) が許容引張応力以下である。

$$|\sigma_u| = |-(\Sigma V_F / B)(1-6e/B)| \leq j_a \text{ (kN/m}^2\text{)}, \dots \dots \dots (3)$$

ここで $e = X - B/2$ (m); ΣV_F : 鉛直方向の合力, X:えん堤底部と合力の交点からえん堤底部の上流端までの距離

3) 滑動に対する安定

滑動に対する安全率 F_s , は 1.2 である (河川砂防技術基準案, 1997)。

$$F_s = (\mu \Sigma V_F) / \Sigma H_F = 0.7 \Sigma V_F / \Sigma H_F \geq 1.2, \dots \dots \dots (4)$$

ここで ΣH_F : 水平方向の合力

4) 中詰材料のせん断変形に対する安定

中詰材料のせん断変形に対する安全率 F_d は 1.2 である(鋼製砂防構造物設計便覧, 2001).

$$F_d = M_r / M_d \geq 1.2, \dots \dots \dots (5)$$

ここで M_r : 北島の式 (1962)による中詰材料のせん断変形抵抗モーメントである。

$$M_r = (1/6) \gamma_r B^2 H \{3-(B/H) \cos \phi\} \sin \phi \text{ (kN} \cdot \text{m/m)}, \dots \dots \dots (6)$$

図-6. 4. 3. 2 に条件 1),3)および 4)を満足する場合の異なる越流水深 (h) およびえん堤高さ (H)に対応するえん堤底幅(B)を示す。△□○は底敷において許容応力内の引張応力を許す場合で, ▲■●は引張応力が作用しない場合である。 最大引張応力はえん堤の高さ 2m,3m,および 4m についてそれぞれ 13kN/m², 20 kN/m² および 26 kN/m² である。これらの値は鋼製ボルト 1 本当たりの許容引張力 j_a (27kN/1 本)よりも小さく木製えん堤は安全である。

6. 4. 4 部材に作用する土圧

えん堤の下部に行くほど作用する土圧は大きくなる。従って基礎横木とその直上の横木および基礎部の控木とその直上の控木についてのみ安全性を検討する (図-6. 4. 4. 1)。

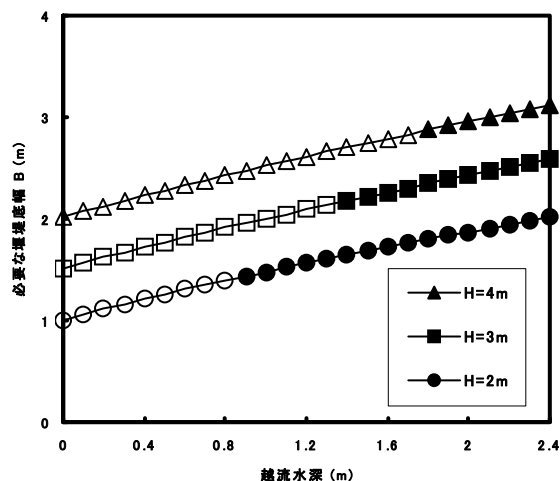


図-6. 4. 3. 2 木製えん堤に必要な底幅, △□○は堰堤底部上流側に引張応力が作用する場合, ▲■●は引張応力が作用しない場合。(Dang et al.2007)

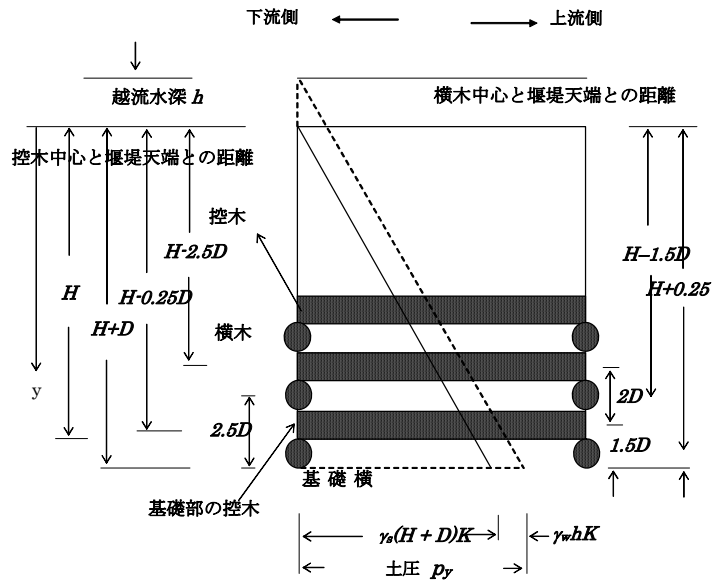


図-6. 4. 4. 1 木製えん堤の下流側に作用する土圧の分布（石川ら，2002）

作用する土圧 (p_y) は下記のように算定される（石川ら., 2002）：

木製えん堤下流側の深さ y (m)の位置において作用する主働土圧 p_{yL} (長期) は次のとおりである。

$$p_{yL} = \gamma_s y K_L + \gamma_w h K_L = 3.88y + 2.60h \text{ (kN/m}^2\text{)}, \quad \dots \dots \dots (7)$$

基礎横木と直上の横木(それぞれ長さ 1.0m)に作用する土圧による力 (長期) w_1 , w_2 は次式のとおりである。

基礎横木{受圧高さ = 1.5D (m), 平均深さ $y = H + 0.25D$ (m)}

$$w_1 = 1.5D p_{yL} = 1.5D \{3.88 (H + 0.25D) + 2.60h\} \text{ (kN/m)}, \quad \dots \dots \dots (8)$$

基礎横木直上の横木 {受圧高さ = 2.0D (m), 平均深さ $y = H - 1.5D$ (m)}

$$w_2 = 2D p_{yL} = 2D \{3.88 (H - 1.5D) + 2.60h\} \text{ (kN/m)}, \quad \dots \dots \dots (9)$$

長さ L_a (m)の控木に作用する土圧 u_1 および u_2 (長期) は次のとおりである。

基礎部の控木 {受圧高さは 2.5D (m), 平均深 $y = H - 0.25D$ (m)}

$$u_1 = 2.5D p_{yL} \times L_a = 2.5D \{3.88(H - 0.25D) + 2.60h\} L_a \text{ (kN)}, \quad \dots \dots \dots (10)$$

基礎部控木直上の控木 {受圧高さは 2D (m), 平均深 $y = H - 2.5D$ (m)}

$$u_2 = 2D p_{yL} \times L_a = 2.0D \{3.88(H - 2.5D) + 2.60h\} L_a \text{ (kN)}, \quad \dots \dots \dots (11)$$

6. 4. 5 小型木製えん堤の耐朽性の評価

(1) 曲げおよびせん断に対する横木の設計

一般的にえん堤上流側に作用する中詰材からの土圧と上流側の埋め戻し土から作用する土圧の方向は互いに逆であり大きさもほぼ等しいので上流側の横木の安定は考慮しなくても良い。また、横木と控木はボルトで接続されているので下流側の横木に作用する土圧は控木を下流側に引き抜く力として作用し、さらに横木に対しては曲げとせん断の力として作用する。結果的に下流側の横木にはせん断力と曲げが作用し、控木には引張力が作用する。なお、木製えん堤の耐朽性の評価に当たっては次の2つの仮定を行う。

部材（丸太）の材質は均一であり断面は円形である。腐朽速度(Δd)は一定で腐朽厚は建設後の経過年数(t)に応じて直線的に増加する。腐朽速度は実測値の95%確率値を用いることとする。したがって、

t 年後の腐朽厚は $t\Delta d$ で表され、部材の両側合計では $2t\Delta d$ で表される。健全部の直径は $D-2t\Delta d$ (m) で表される。ボルト孔がある場合の健全部の断面積は $A_{Lb} = \{p(D-2t\Delta d)^2/4\} - D_s \times (D-2t\Delta d)$ (m²) である。したがって、作用するモーメント、応力、力は次のようになる。

作用する最大曲げモーメント M_y

基礎横木

$$M_{y1} = w_1 L_0^2 / 8 \text{ (kN}\cdot\text{m)}, \dots \dots \dots (12)$$

基礎横木直上の横木:

$$M_{y2} = w_2 L_0^2 / 8 \text{ (kN}\cdot\text{m)}, \dots \dots \dots (13)$$

作用する最大曲げ応力 $\sigma = M_y / Z$

基礎横木:

$$\sigma_1 = 32 M_{y1} / \pi (D-2t\Delta d)^3 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wba}, \dots \dots \dots (14)$$

基礎横木直上の横木:

$$\sigma_2 = 32 M_{y2} / \pi (D-2t\Delta d)^3 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wba}, \dots \dots \dots (15)$$

作用する最大せん断力 S

基礎横木:

$$S_1 = w_1 L_0 / 2 \text{ (kN)}, \dots \dots \dots (16)$$

基礎横木直上の横木:

$$S_2 = w_2 L_0 / 2 \text{ (kN)}, \dots \dots \dots (17)$$

作用する最大せん断応力 $\tau = 4S/3A_{Lb}$:

基礎横木:

$$\tau_1 = 4S_1 / 3 A_{Lb} \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wsa}, \dots \dots \dots (18)$$

基礎横木直上の横木:

$$\tau_2 = 4S_2 / 3 A_{Lb} \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wsa}, \dots \dots \dots (19)$$

(2) 引張力に対する控木の設計

作用する最大引張応力:

基礎部の控木:

$$u_1 / A_{Lb} \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wta}, \dots \dots \dots (20)$$

基礎部の控木直上の控木:

$$u_2 / A_{Lb} \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq f_{wta}, \dots \dots \dots (21)$$

(3) 耐朽性の評価方法と最大せん断強度と曲げ強度の比

腐朽が生じた時の木製えん堤の耐朽年数は部材に作用する最大の曲げ、せん断、引張応力が部材の許容応力と等しくなった場合（経過年数）として評価できる。さらに、基礎部の横木に作用する応力よりも、その直上の横木に作用する応力の方が大きい。一方、控木に関しては基礎部の控木に作用する応力が最大となる。したがって、式(15), 式(19), 式(20)を用いると木製えん堤の耐朽年数を算定する次式を得ることができる。

$$T_b = \frac{D - \sqrt[3]{\frac{4 w_2 L_0^2}{\pi f_{wba}}}}{2 \Delta d} \text{ (年)}, \dots \dots \dots (22)$$

$$T_s = \frac{\frac{\pi}{2}D - D_s - \sqrt{D_s^2 + \frac{2\pi w_2 L_0}{3f_{wsa}}}}{\pi \Delta d} \quad (\text{年}), \quad \dots \dots \dots (23)$$

$$T_t = \frac{\frac{\pi}{2}D - D_s - \sqrt{D_s^2 + \frac{\pi u_1}{f_{wta}}}}{\pi \Delta d} \quad (\text{年}), \quad \dots \dots \dots (24)$$

実際の木製えん堤の耐朽年数 (T) は上の 3 式から得られる T_b , T_s , および T_t の内で最小のものとなる。

一般的にせん断強度と曲げ強度が耐朽年数に影響する。腐朽に伴うせん断強度と曲げ強度の低下は S_p/S_t および M_p/M_t によって表され、おのおのは次式により計算される(式 (25) は石川ら 2003 による):

$$S_p/S_t = A_{Lb}/A_L, \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$M_p / M_t = \left\{1 - \frac{d_r}{D}\right\}^3, \quad \dots \dots \dots (26)$$

ここで S_p : 断面積 A_{Lb} を用いて計算した最大せん断強度, S_t : 断面積 A_L を用いて計算した最大せん断強度, d_r : 合計腐朽厚(ここでは $d_r = 2t\Delta d$), M_p : 健全部の直径($D-d_r$)を用いて計算した最大曲げモーメント, M_t : 腐朽前の直径 D を用いて計算した最大曲げモーメントである。

6. 4. 6 スギ材を用いて建設された木製えん堤の耐朽性 (年数) の算定

実際には横木と控木の直径が異なる場合があるが、ここでは計算を簡略化するために横木と控木の直径は同じで、それぞれの長さも同じと仮定する。スギ材を用いた場合には f_{wba} , f_{wsa} および f_{wta} はそれぞれ 5698 kN/m^2 , 462 kN/m^2 および 3460 kN/m^2 である (建築基準法, 2001)。これらの値を式 (22), 式 (23) および式 (24) に代入すると、引張応力よりも曲げ応力あるいはせん断応力により耐朽年数が決まることが分かる。したがって 耐朽年数の評価には式 (22) および式 (23) を用いれば良い。式 (22) および式 (23) を計算するためにはえん堤高(H), 横木の長さ (L_0), 部材の直径 (D), および越流水深 (h) の値を与える必要がある。表-6. 4. 6. 1 において左側は横木長さ $L_0 = 1.0\text{m}$ の場合であり、右側は横木長さ $L_0 = 0.5\text{m}$ の場合の結果を示す。ここでは部材の直径は 0.15m , 0.2m , 0.25m , 0.3m を用いた。えん堤高は 2m , 3m , 4m を用いた。表-6. 4. 6. 1 の左側において越流水深が特定の範囲にある 3 ケースの場合には T_b および T_s の両方が影響するが、それらを除くと、残りの全てのケースでは、越流水深 h が $0 \sim 2.4\text{m}$ の全ての場合で T_b あるいは T_s の一方により耐朽年数が決定される。大部分のケースでは耐朽年数 はせん断強度により左右され、 T_s により決定される。

図-6. 4. 6. 1 には $D = 0.2\text{m}$, $D_s = 1.6 \times 10^{-2}\text{m}$, $L_0 = 1.0\text{m}$ および $\Delta d = 2.7\text{mm/年}$ の条件で越流水深およびえん堤高を変えた場合の T_b , T_s および T_t による木製えん堤の耐朽年数を示す。 T_s による木製えん堤の耐朽年数は大部分の場合で最低値を示しており、実際の耐朽年数を示すことが分かる。

式 (22) および式 (23) と式 (25) および式 (26) を組み合わせることで、木製えん堤の耐朽年数 (T), S_p/S_b , および M_p/M_t について腐朽速度 1.0mm/year , 1.5mm/year , 2.7mm/year および 4.3mm/year の条

件下で計算した。この時、越流水深 $h = 1.0\text{m}$ およびボルトの直径 $D_s = 1.6 \times 10^{-2}\text{m}$ とし、えん堤高、横木の長さ、部材の直径を変化させた（図-6.4.6.2）。腐朽速度 $1.5\text{mm}/\text{年}$, $2.7\text{mm}/\text{年}$ および $4.3\text{mm}/\text{年}$ はそれぞれ京北2の本体部、湿潤本体部（京北1, 2）および乾燥袖部（久多、大枝）の腐朽速度の95%確率値に対応している(Dang et al. 2008)。曲線の交点はそれぞれの条件での耐朽年数と、 S_p/S_t および M_p/M_t の関係を示す。図-6.4.6.2 を用いて耐朽年数を求める場合の例を次に示す。図中の点 Q は曲線 “ $D=0.3\text{m}$ ” と曲線 “ $L_0=0.5\text{m}$, $H=2\text{m}$ ” の交点である。従って点 Q は次のような条件を持つえん堤を表す。部材直径 0.3m , 横木の長さ 0.5m , えん堤高 2.0m , 越流水深 1.0m , ボルト直径 $1.6 \times 10^{-2}\text{m}$ である。点 Q の横軸の目盛は、腐朽速度 $\Delta d = 1.0\text{mm}/\text{year}$, $1.5\text{mm}/\text{year}$, $2.7\text{mm}/\text{year}$, および $4.3\text{mm}/\text{year}$ のそれぞれに対応する耐朽年数(T) = 110 年, 73 年, 41 年および 26 年を示す。表-6.4.6.1 を見ると、これらの条件での耐朽年数はせん断強度により左右されていることが分かる。従って、許容できる(S_p/S_t) の値は縦軸の点 Q に対応する 7 % である。同様にしてある条件下での木製えん堤の耐朽年数を算定できる。図-6.4.6.2 から木製えん堤の耐朽年数はえん堤高および部材の直径の増大により増加することが分かる。

表-6.4.6.1 堰堤高 (H), 控木の間隔 (L_0), および部材の直径(D)毎の耐朽年数の算定を左右する T_b および T_s の分布, ただし, ボルト孔の直径が $1.6 \times 10^{-2}\text{m}$ の場合 (Dang et al. 2007)

$L_0 = 1\text{ m, h: } 0\text{ m} - 2.4\text{ m}$						$L_0 = 0.5\text{ m, h: } 0\text{ m} - 2.4\text{ m}$				
D (m) H (m)	0.15	0.2	0.25	0.3	D (m) H (m)	0.15	0.2	0.25	0.3	
2	T_b	$h \leq 1.1\text{ m}$	$h \leq 0.5\text{ m}$		2	T_s				
		$h > 1.1\text{ m}$	$h > 0.5\text{ m}$							
3	$h \leq 0.8\text{ m}$	T_s			3					
	$h > 0.8\text{ m}$				4					

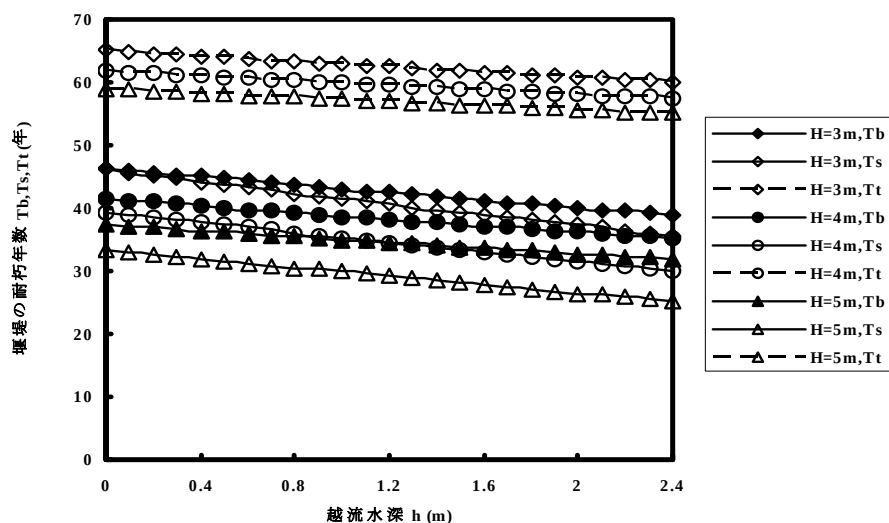


図-6.4.6.1 T_b , T_s および T_t によるスギを用いた木製えん堤の耐朽年数の比較 (Dang et al., 2007)

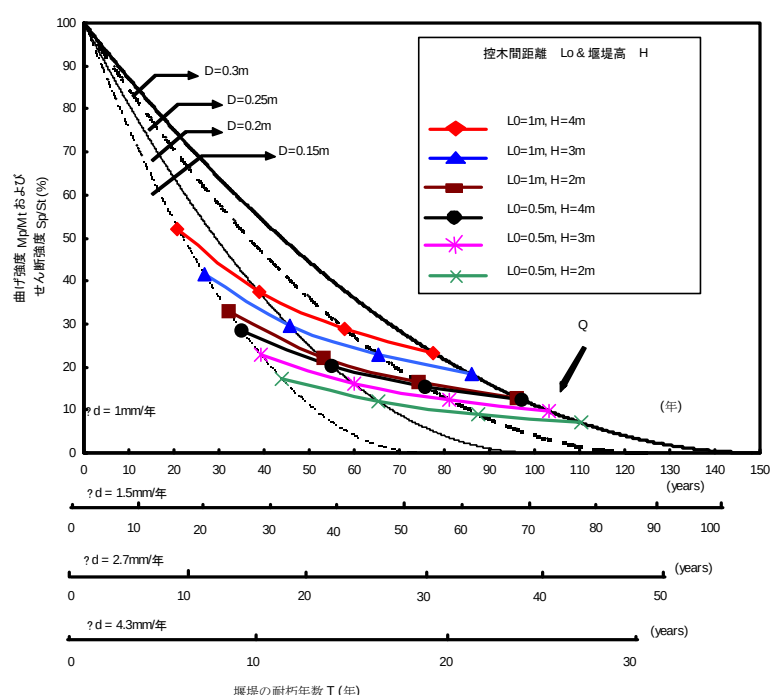


図-6.4.6.2 S_p/S_b , M_p/M_t およびスギ材で作られた木製えん堤の耐朽年数の関係(Dang et al., 2007)

6.4.7 おわりに

小型の枠構造の木製えん堤を対象に腐朽速度を考慮した設計法を提案した。さらに腐朽速度を基に木製えん堤の耐朽年数を算定する手法を提案した。

ここで提案した腐朽を考慮した木製えん堤の設計手法を用いることにより木製えん堤の耐朽年数を増大させるために必要な部材やえん堤の大きさ（部材の直径，横木の長さ，えん堤高，えん堤敷幅，越流水深）を適切に決めることができ，さらに木製えん堤の耐朽年数を設計時に予測することができる。木製えん堤の耐朽年数を増大させるためには部材の直径を増大させるとともに，横木の長さ，えん堤高，越流水深を減少させれば良い。さらに，部材に作用する土圧の分布から，下部の部材ほど大きな直径の部材（例えば 0.25m あるいは 0.3m）を用いて，反対に上部では小さな直径の部材（例えば 0.1m あるいは 0.15m）を用いることが合理的であることが分かった。このようにすれば，小径の間伐材も有効に利用することができる。新しく提案した設計手法に基づいて，スギを用いた木製えん堤の耐朽年数を簡便に算定するための図を提示した。

本研究で提案した腐朽を考慮した枠構造の木製えん堤の設計法は実際の設計に当たって有効である。しかしながら，異なるタイプの木製えん堤に関する土圧や作用力に関する情報は少なく，今後は異なるタイプの木製えん堤についても本研究で提案した手法の適用性を検討する必要がある。さらに，腐朽速度を適切に推定するためには現地調査により部材の腐朽速度に関する多くのデータを収集して解析する必要がある。

木材は設置される環境（降雨，流水，湿度，気温，土壌，日射等）や施設の構造により腐朽のすすみ具合が異なるとともに，木材の樹種や産地，大きさ，加工法等によっても異なる。木製施設の耐朽性を向上させるためには，計画，設計，施工，維持管理の全ての段階で綿密な検討を行う必要がある。それらのうちでも特に維持管理が重要であることは言うまでもない。適切な維持管理を行うことで木

製施設の耐朽性は向上するものであり、それが結局は経済的となることは木造建築物やコンクリートや鋼製の施設と同様である。

参考文献

- 1)Dang, Q.D., Ishikawa,Y., Nakamura, H., and Shiraki K. : Evaluating method of durability of small wooden crib dams with considering the deterioration rate, 砂防学会誌, Vol.60, No.2, pp.13-24, 2007
- 2)Dang, Q.D., Ishikawa,Y., and Shiraki K. : Influence of design high water level, warm index, and maximum snow depth on deterioration rate of wooden crib dams, 砂防学会誌, Vol.61, No.4, pp.39-45, 2008
- 3)石川芳治, 岩館知哉, 水原邦夫: 小型木製枠構造堰堤の水平載荷試験と安定性の検討, 砂防学会誌, Vol.52, No.5, pp.16-23, 2000
- 4)Ishikawa, Y., Asada, M., and Mizuhara, K.: A design method for small wooden dams based on field tests, Proceedings of the International Symposium Interpraevent 2002 in the Pacific Rim/Matsumoto/Japan, Vol.2, pp.773-784, 2002
- 5)石川芳治, 内藤洋司, 落合博貴, 上原勇: 各種試験に基づく木製施設の耐久性, 腐朽度および曲げ強度評価法, 砂防学会誌, Vol.56, No.4, pp.21-31, 2003
- 6)建設省河川局監修: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説法(設計編Ⅱ), pp.4-19, 1997
- 7)建築基準法施行令および建設省告示(平成 12 年告示), 建設省関係法令集平成 14 年度版, 技報堂出版, p.228, 229, 871, 941, 942, 2001
- 8)北島昭一: セル岩盤の安定性に関する研究, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.12, No.3, 88pp., 1962
- 9)鋼製砂防構造物委員会・(財)砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧, 161pp., 2001
- 10)松岡昭四郎, 雨宮昭二, 庄司要作, 井上衛, 阿部寛, 内藤三夫: 各樹種の野外試験による耐久性調査結果, 林業試験場研究報告第 232 号, pp.109-135, 1970
- 11)松岡昭四郎, 井上衛, 庄司要作, 鈴木憲太郎, 山元幸一: 浅川実験林苗畑の杭試験(第 7 報), 日本産, および南洋産材の野外に設置した杭の腐朽経過と耐用年数, 林業試験場報告, No.329, pp.73-106, 1984
- 12)田中俊成, 山本幸一, 北原曜: 大正から昭和にかけて施工された木製ダムの耐久性調査, 第 15 回日本木材保存協会年次大会論文集, pp.1-9, 1999

7. 木材の地中海利用

7.1 地中海における歴史的な木材利用事例

7.1.1 佐賀平野の遺跡に見る木材利用（三浦哲彦）

洪水調整のために巨勢川調整池（佐賀市金立町）が造成されている中で、2002年5月、縄文時代の貝塚が発見された¹⁾。7000年前の遺跡では人骨、土器、木製器、鹿角製装飾品などの他に、木杭状のものが原形に近い状態で発見された（写真-7.1.1）。

図-7.1.1は木の実などを保存するために作られたと思われる精巧な木製編みかごである。保存状態が良かったのは、地下水以下の地盤中において還元状態であったためである²⁾。



写真-7.1.1 7千年前の木杭状の棒¹⁾

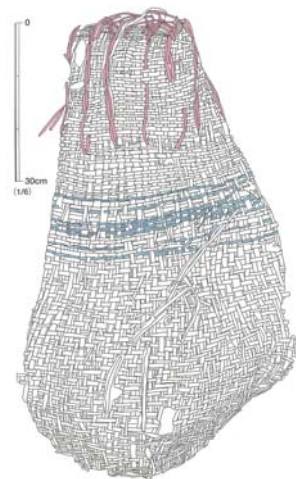


図-7.1.1 木製編みかご（寸法約60cm）¹⁾

2000年前の弥生時代遺跡としては、掘立て柱小屋の柱基礎が発見されている。基礎部では巧みに木材を組んで基礎を作っており、いわば軟弱地盤への対策工を意識したものと考えられる（図-7.1.2）。江戸時代の佐賀城本丸の基礎には様々な形で木材が利用されていた。地下水以下の桐木基礎や水樋などが発掘されている。それらの写真は佐賀城本丸歴史館のホームページで見ることができる。

図-7.1.3は石垣基礎を復元した模型である。桐木基礎には丸太を使っているが、擁壁が前面に倒れるのを防ぐ変位抑制杭には角材を使用している。なぜ断面四角の杭を使ったのだろう、先端を鋭く尖らせた意図は何だろう、などの疑問を抱いたのがきっかけとなって木杭研究を始めた。杭の先端を鋭

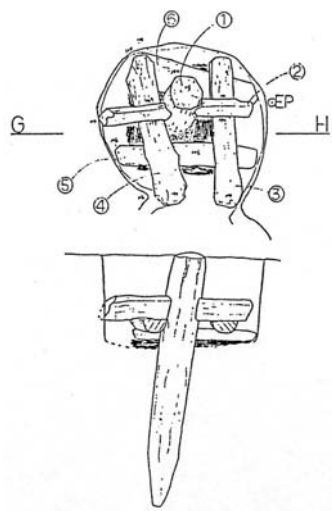


図-7.1.2 掘立柱小屋の基礎（山本輝雄氏³⁾）

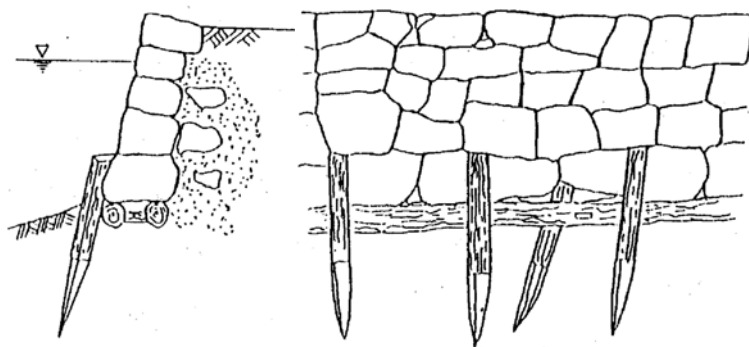


図-7.1.3 佐賀南堀の石垣基礎モデル⁴⁾



写真-7.1.2 三重津軍港のドック跡に沿って確認された木杭護岸の構造

く尖らせたのは粘土地盤への打ち込みで粘土の乱れが少なくなるように配慮したものか。留杭を四角にしたのは変位した後でも地盤との接触面積が 75%は確保され则认为したものか⁴⁾。

佐賀県三重津海軍所は 1858 年（安政五年）に佐賀（鍋島）藩の「御船手稽古所」として鍋島直正により設置された施設である。最近、そのドック跡の遺構とみられる木杭護岸（写真-7.1.2）が確認された。

佐賀市によれば、護岸跡は地表から約 1.6m 掘り下げた地点で確認され、長さ約 3m の間に、約 20 本の木杭（長さ約 80cm、直径約 15cm）が直線に並べられている。護岸とともに、船を固定し作業のため橋をかける胴木 2 本も見つかり、木杭は横木を渡し縄で固定されていた。詳細は佐賀市ホームページ⁵⁾に紹介されている。

木杭を設計に取り入れようとするとき技術者が躊躇することの一つは、土中において腐食することへの懸念である。しかし、本文で紹介した遺跡に見るように、地下水以下の還元環境で使用されている限りは、木杭は数 100 年以上も健全に保たれていることがわかる。また、土木建築材料として木材を盛んに利用していた明治時代の書物には、「水に近いところで十分に湿っていれば腐食はかなり抑えられる」⁶⁾と記述されていることも指摘しておきたい。

7.1.2 旧相模川橋脚跡⁷⁾（吉田雅穂）

1923 年 9 月 1 日発生した関東地震および 1924 年 1 月 15 日の地震により、当時水田であった地盤が液状化し突然木杭が出現した。この地点は、現在の相模川左岸の茅ヶ崎市国道 1 号線付近に位置し、国史跡「旧相模川橋脚」となっている。出現した木杭は、直径 60cm のヒノキであり、橋脚は 3 本を 1 列とした 4 列で、列の幅は約 7m、1 列目から 4 列目までの長さは約 23m である。水面から 0.8～1.2m 突出した。この橋脚は、「源頼朝の御家人、稲毛三郎重成が亡妻の追善供養のため、1198 年（建久 9 年）相模川に架けた橋のものである」と考証されている。

これから計算すると関東地震までの間 725 年間地中に存在していたことになる。この橋脚は、日本

最古の橋脚として 1924 年（大正 13 年）に史跡保存の指定がなされ、池の中に保存されていた。しかし、近年腐朽の進行が激しく保存作業が行われた。このことから、浮上りを生じた直後の木杭はほぼ健全な状態であったと推察され、少なくとも腐朽し体積が失われるような状態ではなかったことが明らかである。

参考文献

- 1) 国土交通省佐賀河川総合開発工事事務所 他：東名遺跡群発掘調査概要報告書 2，2008.
- 2) 三浦哲彦・宮崎寛章：縄文遺跡の覆土保存技術について，土木学会誌，Vol.94，No.9，pp.44-47，2009.
- 3) 山本輝雄：掘立柱について－佐賀県土生遺跡の調査－，未公表，昭和 51 年 10 月 12 日了.
- 4) 三浦哲彦・呉文経・中村六史・一瀬智郎：軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察，土木学会論文集，No.517/III-31，pp.63-72，1995.
- 5) 佐賀市 HP：<http://www.city.saga.lg.jp/contents.jsp?id=21320>
- 6) 瀧大吉：建築学講義録，東京建築書院，p.90,1899
- 7) 高久達将：日本最古橋杭”旧相模川橋脚跡”，土と基礎，40-3(410)，p.58，1992.3.

7.2 現存の地中海域における木材利用例

7.2.1 80 年前に施工された高架橋基礎木杭の健全性調査事例(中村裕昭)

(1) 事例の概要

本事例¹⁾は、図-7.2.1.1の地形区分図に示した位置に、1927年以前に施工された高架橋基礎から発掘された木杭の健全性評価結果で、杭打設後82年以上経過しているが、腐朽試験の結果は、部分的には腐朽が見られたものの、全体的には想定していた以上に木杭は健全であった。

木杭の樹種は、安部久博士((独)森林総合研究所)の鑑定の結果、1本(Ttx1)のみがマツ属(ヨーロッパアカマツ節)、その他はカラマツ属であった。

木杭の発掘箇所は、武蔵野台地下末吉面に刻まれた小規模の谷沿いに位置し、木杭打設地盤は砂分が優勢だが深度方向かつ杭位置ごとに層相の変化は著しかった。地下水位は発掘時点では確認できなかったが、地盤の色調が褐色系を帯びていることから地下水位低下で酸化履歴があることが窺えた。

(2) 健全性評価試験のための試験内容と結果の概要

採取木杭の健全性評価のために実施した試験項目とその内容は、表-7.2.1.1に示した。

写真-7.2.1.1に杭頭付近の状況を示したが、Ttx4>Ttx1>Ttx2>Ttx3の順に腐朽が目立つ。Ttx3の周辺地盤には層理が残ることから自然地山、その他は埋戻し土層である。

図-7.2.1.2に杭頭付近の粒度特性を示した。砂分を20～35%含む細粒土を一部挟むが、概ね砂分主体数～15%程度細礫分の混じる細粒分質砂である。

図-7.2.1.3には、各木杭の深度ごとの健全性評価指標として腐朽度、ピロディン貫入量、縦圧縮試験、並びに、参考値として含水比を対比して示した。

目視による腐朽度評価によると、杭頭から深度方向40cm程度の間で「5：腐朽によって形が崩れる」～「2：全面的に軽度の腐朽」が見られる。この範囲で地下水位が変動しているものと見られる。地盤との関連でみると自然堆積地盤(層理面等堆積構造が残る)に打ち込まれている部分は健

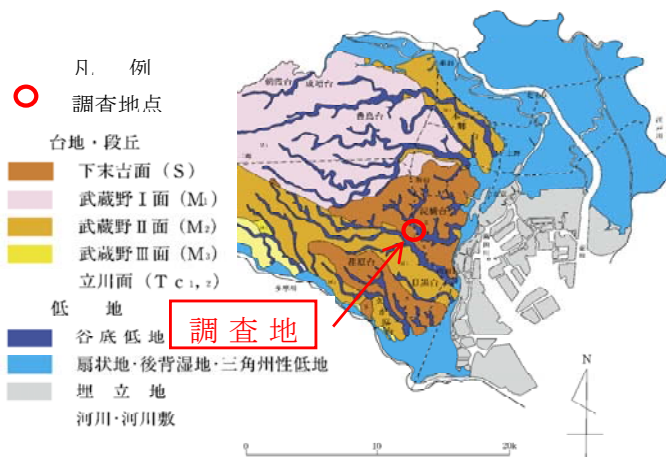


図-7.2.1.1 地形区分図²⁾および調査位置図



写真-7.2.1.1 杭頭付近の状況(2009.1.13.採取杭)

表-7.2.1.1 採取木杭の健全性評価のための試験内容

試験項目	試験の内容
① 目視による評価	木杭を軸方向 50cm ごとに区切り、各部の表面について「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準 (JIS K 1571 : 2004)」に準じて腐朽度を 6 段階に評価した。評価は 3 名で行い、平均値を求めた。
② ピロディン試験	木杭から深度方向 50cm 毎に厚さ 10cm の円盤状に供試体を切り出し、これについて半径方向に (表面から中心へ) 24 点のピロディン試験を実施した。なお円盤は、気乾状態と飽和状態の 2 通りの水分状態のものを作成し試験に供した。
③ 縦圧縮試験	ピロディン試験後の円盤から試験体を切り出し、JIS (JIS Z 2101 : 1994) に準じて縦圧縮試験 (荷重を繊維方向に与える) を実施した。試験体は年輪の中心から 90° ごとの 4 方向の 4 点/円盤を基本とし、ほぼ同一深度の 2 つの円盤で気乾と飽和とで実施した。

全で、相対的に腐朽が見られるのは、埋め戻し部分で顕著ある。杭頭から深度方向 40cm 以深では健全で一部に「1：部分的に軽度の腐朽」が見られる程度であった。

ピロディン試験では、杭頭部付近で腐朽の目安となる 30mm を超えた結果が見られたが、それ以深では概ね 20mm 程度であった。飽和と気乾の 2 条件では、有意な差は見られなかった。

縦圧縮試験結果では、飽和・気乾の試験条件での有意な差は見られず、何れも許容応力と標準値の概ね中程の値が得られた。深度方向に強さが低下しているように見えるが、杭材の含水比の変化に対応した結果と考えられる。図には比較のために、アカマツの気乾状態における許容応力度³⁾、湿潤状態における許容応力度（気乾状態の 70%）³⁾、標準的な圧縮強度⁴⁾を併記した。杭材の含水比は杭頭部で 80～170% のバラツキ、かつ低下が見られる。

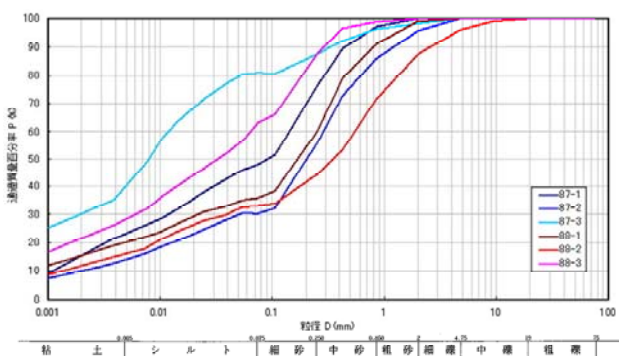


図-7.2.1.2 杭頭付近地山の粒度特性

(3) 打設後 80 年以上経過した木杭の健全性調査結果から得られた知見の要旨

- ① 樹種はマツ属(ヨーロッパアカマツ節)とカラマツ属の 2 種混在していたが、樹種による健全性の有意な差異は認められなかった。
- ② 地盤の色調から地下水位低下履歴が想定され、かつ、埋戻し土で囲まれた杭頭付近(最大で 40cm 程度)に腐朽が見られる木杭を一部確認したが、下部工の変状は認められなかった。
- ③ 地盤の色調から地下水位低下履歴は想定されても、層理面が残る地山に囲まれた杭頭は、目視およびピロディン試験、縦圧縮試験結果においても健全であることを確認した。

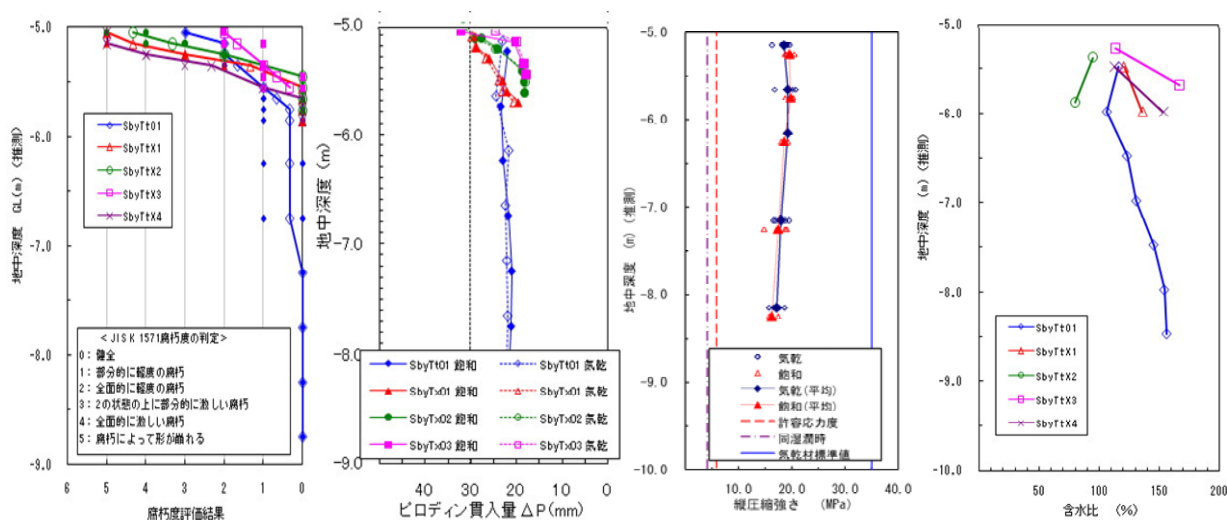


図-7.2.1.3 各木杭の深度ごとの健全度評価結果および含水比

参考文献

- 1) 中村裕昭・濱田政則・本山 寛・沼田淳紀：80 年前に施工された木杭の健全性調査，第 44 回地盤工学研究発表会(横浜)，pp.1791-1792，2009.8.
- 2) 東京都地質調査業協会編：特集「東京を知る」，技術ノート，No.41，p.8，2008.10.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，丸善，667p，1974.11.
- 4) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック改訂 4 版，丸善，pp.194-195，2004.

7.2.2 1964 新潟地震における新潟駅の事例¹⁾ (沼田淳紀)

地盤の液状化現象は、1964 年新潟地震以来広く知られるようになり、この地震以降多くの研究が行われ、現在ではこれに対する設計法も確立されている。しかしながら、1964 年新潟地震の時に、既に液状化対策を意図して木杭を打設した新潟駅の事例があるので、これを紹介する。

新潟地震は 1964 年（昭和 39 年）6 月 16 日 13 時 01 分に発生し、そのマグニチュードは 7.5、最大震度は VI（ただし、旧震度階）、震源は新潟県沖深さ 40km であった²⁾。この地震の特徴は、液状化による地表変位に基づく被害がほとんどで、振動による被害が少なかったことである³⁾。広い範囲でこのような表層地盤の変状や地盤の不安定化による構造物被害が認められたことから、この地震による被害の特徴を表現するために、地盤災害という言葉もよく用いられる⁴⁾。

斉藤⁵⁾、鉄道技術研究報告⁶⁾、および、地震当時の国鉄職員へのヒアリング結果によれば、当時の新潟駅と地震による被害は以下の通りである。当時の新潟駅を図-7.2.2.1 に示す。新潟駅は、主に RC 造地下 1 階地上 4 階建ての本屋と、地上 6 階建ての支社からなる。これらの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口 22.5cm 長さ 7.5m（杭間隔約 1.5m、末口部での改良率（杭断面積/改良範囲面積）=1.8%）の松丸太基礎、コンコース上の連絡建屋および支社が直径 30cm 長さ 6m の PC コンクリート杭（2 本継ぎ、杭間隔不明）であった。基礎の木杭は 1956～1957 年（昭和 32～33 年）頃に打設され、新潟駅本屋は 1958 年（昭和 33 年）に開業した。地震当時の地下水位は、くみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったためちょうど規制ができ、GL-0.5m 程度であった。

地震後新潟駅では、ホームへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には液状化による噴砂が多数確認され、地震直後の新潟駅周辺を撮影した写真⁷⁾においても噴砂を確認することができる。これらの事実より、新潟駅では明らかに液状化が生じたと言える。これにより、車庫や事務室などは沈下傾斜し、ホームは約 45cm、駅前広場も全体的におおよそ 40～50cm 沈下した。さらに、支社は不同沈下が 10cm 程度生じ駅前広場側に 0.55 度、右側に 0.40 度傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、木杭で支えられた本屋は健全であった。

このように本屋が健全であったのは、当時では極めて珍しいことであるが、液状化対策を施した結果である。斉藤⁵⁾は、当時木杭基礎について次のように述べている、「・・・流砂現象のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12m の支持層までゆるい砂層を締固めると共に、建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし、末口 22.5cm、長さ 7.5m の松丸太 745 本（1.5m 間隔程度）を打設した。・・・」なお、当時地盤を締固める適用実験も行われたが満足な結果が得られなかったもので、設計としては完全な支持杭基礎として設計し、実際には数多くの木杭が打設された⁶⁾。一方、支社側は、支持杭の本数としては設計上十分であったかもしれないが、本屋と比較すると杭本数は遥かに少なく杭間地盤の締固め効果が期待できなく、この差が本屋と支社の被害の差になったのであろうとされている⁶⁾。

写真-7.2.2.1 に、地震後と現在の新潟駅の様子を示す。現在の新潟駅が、当時のままであることがわかる。本屋は、地震後被害がなかったことから、現在もなお当時の木杭基礎のまま使用されている。1956 年頃に液状化対策として設計され打設された木杭が、1964 年

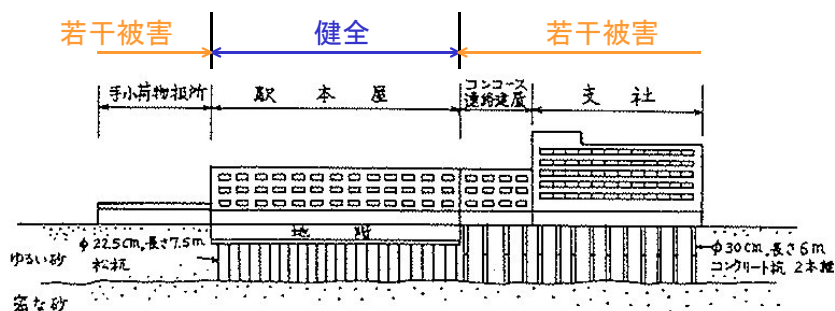


図-7.2.2.1 新潟駅正面建屋（文献 6）に加筆

新潟地震において液状化対策としての機能を果たし、杭打設後 50 年以上経過後も基礎としての機能を維持しているといえる。

ただし、木杭打設が液状化対策として設計の中で見込まれていたのであるが、木杭打設そのものが液状化発生を低減したのか、地盤は液状化したが杭としての機能が失われず建屋の被害がなかったのか、さらには、地下室があったため構造物としての安定性が高まり地盤が液状化し支持杭の機能も低下したが構造物が傾斜する被害を低減したのかなど、液状化対策としてのメカニズムは現段階では必ずしも明らかではなく、今後地盤工学的な検討が必要である。一方、木材の耐久性の視点から言えば、木材が液状化対策として構造物基礎に取り入れられ、それが液状化被害を免れ 50 年以上も機能していることから、少なくとも体積を保持することが重要である地盤を密にする液状化対策材料として、木材は十分使用可能だと言える。さらに、この事例は木材により地盤を密にすることで液状化発生を防いだ実事例となる可能性があることがわかった。



(a) 地震直後の新潟駅の様子（土木学会土木図書館所蔵，撮影：倉西茂・高橋達夫）



(b) 現在の新潟駅の様子

写真-7.2.2.1 新潟駅正面の写真

参考文献

- 1) 沼田淳紀，吉田雅穂，濱田政則：木材による 1964 年新潟地震における液状化対策事例，木材学会誌，Vol.55，No.5，pp.305-315，2009.
- 2) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，pp.350-356，1996
- 3) 土質工学会：土と基礎，Vol.12，No.8，pp.3-20，1964.
- 4) 土木学会新潟地震災害調査委員会編：昭和 39 年新潟地震災害調査報告書，土木学会，pp.29-32，1966
- 5) 斉藤迪孝：新潟地震について，第 7 回地震工学研究発表会講演概要，pp.39-43，1964.10
- 6) 鉄道技術研究所：新潟地震調査報告，鉄道技術研究所報告，No.448，1964.11.
- 7) 地盤工学会：液状化災害発生直後の新潟市街地航空写真集，液状化災害発生直後の新潟市市街地航空写真集編集委員会，地盤工学会，1999

7.2.3 足羽川^{あすわがわ}における木杭調査(本山 寛)

平成16年7月福井豪雨は、福井市内を流れる足羽川^{あすわがわ}の堤防決壊等により甚大な被害をもたらし、その後、福井県では5ヶ年で足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業による河床掘削や橋梁架替等の工事（一部は福井縦貫線幸橋整備事業）が進められた。この工事の最中に河床より昔の橋梁の基礎や護岸の基礎である丸太杭が多数発見され、これらを採用しその健全性についての調査を実施した。

図-7.2.3.1に、木杭採取位置を示す。それぞれ足羽川に架かる水越橋、幸橋、木田橋付近の工事現場であり、計22本の木杭を採取した。これらの木杭の設置環境、採取状況、ピロディン試験や圧縮試験などによる腐朽の評価結果について示す。

(1) 各木杭採取地点の概要

各地点で採取された木杭の調査結果を表-7.2.3.1、採取地点および木杭の状態を写真-7.2.3.1、採取地点付近の地盤柱状図を図-7.2.3.2に示す¹⁾。

(2) 水越橋上流付近の概要

水越橋の約100m上流側の地点より、直径約30cm長さ約5mの木杭3本と直径約10cm長さ1～2mの木杭9本が採取された。現場付近在住の技術者より、1958（昭和33）年の橋梁拡張工事の際に設置された仮設歩道用の木橋の基礎杭との証言を得ており、設置期間は48年と推定できる。今回、採取された木杭の中では杭径、杭長ともに最も大きく、樹齢も100年以上と古かった。図-7.2.3.2(a)の柱状図に示す木杭の深度は、杭の観察より河川内の地盤表面位置を推定したものであり、杭頭は約1m河床より突出し、杭の大部分は砂層に貫入されていたと考えられる。

(3) 幸橋付近の概要

幸橋からは直径約20cm長さ約2mの木杭2本が採取された。幸橋は1932（昭和7）年に木橋から鉄筋コンクリート橋に架け替えられたが、採取された木杭はそのP7橋脚基礎として使用されていたものであり、設置期間は74年と推定できる。採取作業は鋼矢板で川を締切り行われ、写真-7.2.3.1(b)に示すように河床には多数の木杭が0.9～1.0mの間隔で打設されており、杭長は1.4m～5.7mとばらついていた。図-7.2.3.2(b)の柱状図に示すように、表層付近に礫質土と礫混じり砂層があり、比較的N値も大きいこ



図-7.2.3.1 足羽川における木杭採取位置(国土地理院2万5千分の1地形図「福井」に加筆)

表-7.2.3.1 掘り出した木杭の調査結果一覧

項 目	内 容																							
採取位置	水越橋上流												幸橋付近		木田橋付近									
木杭丸太No.	AswMk01	AswMk02	AswMk03	AswMk04	AswMk05	AswMk06	AswMk07	AswMk08	AswMk09	AswMk10	AswMk11	AswMk12	AswSw01	AswSw02	AswKd00	AswKd01	AswKd02	AswKd03	AswKd04	AswKd05	AswKd06	AswKd07		
対象構造物	橋脚基礎												橋脚(P7)基礎		旧線とり橋脚基礎									
施工時期	1958年(S33年)と推測												1932年(S7年)		1949年(S24年)									
調査(採取)時期	2006年												2006年		2006年		2008年							
設置期間(年)	48年と推測												74年		57年		59年							
樹 齢*	114	150	116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37	33	43	28	35	29	30	41	31	43		
樹種判定	実施	実施	—	—	—	実施	—	—	—	—	—	—	実施	実施	実施	—	—	—	—	—	—	—		
樹 種	マツ科カラマツ属			マツ科カラマツ属(樹種判定非実施のものも同種と推定)										マツ科マツ属		スギ科スギ属								
全長(m)	4.8	4.9	4.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	2.7	2.2	3.5	3.3	3.7	4.0	4.2	4.1	4.7	3.6		
うち地中部(m)**	3.7	3.6	3.9	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	2.4	2.4	2.6	2.7	4.2	3.7	3.3	2.1		
末口直径(m)	0.31	0.27	0.31	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.17	0.17	0.30	0.3	0.32	0.32	0.3	0.31	0.3	0.28		
元口直径(m)	0.32	0.28	0.31	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.18	0.18	—	0.28	0.27	0.28	0.34	0.32	0.28	0.23		
地盤との関係	砂層												砂層		礫質土		多くは粘性土							
地下水位置	杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る												杭頭部は地盤より突出一部河川水位より上に出る		杭先端部は礫混じり砂層		杭先端部は砂質シルト層							
水の種別	淡水												淡水		淡水		淡水							
その他													先端に金属製キャップが付属											

* 樹齢の計測結果の平均値 ** 地中部の長さを木杭が埋め込めたる長さで推定

*:複数の計測結果の平均値。**:地中部の長さは土砂付着状況や流水による浸食痕などにより推定



(a) 水越橋上流付近



(b) 幸橋付近



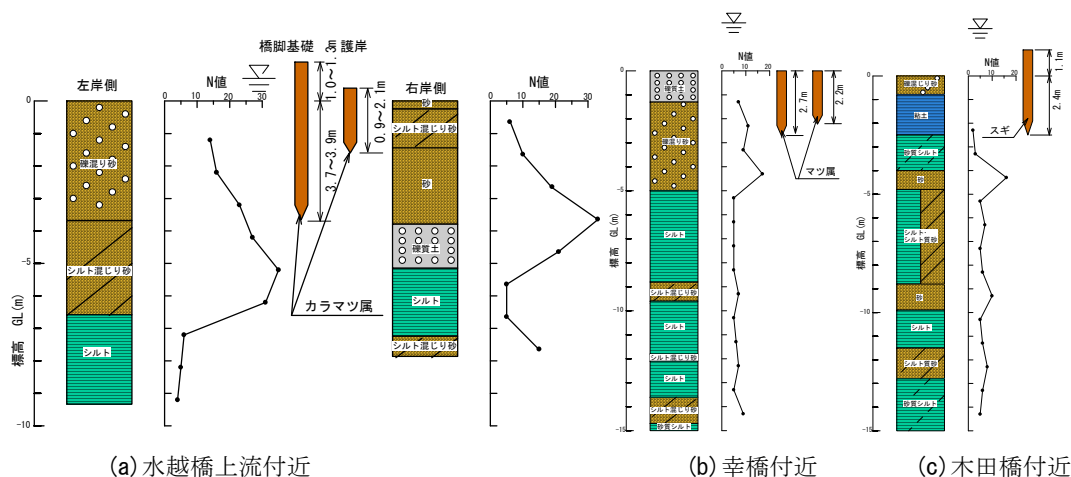
(c) 木田橋付近

写真-7.2.3.1 掘り出し地点および木杭の状況

杭設置期間：推定1958年～2006年（推定48年）

杭設置期間：1932年～2006年（74年間）

杭設置期間：1928年～2006年（78年間）



(a) 水越橋上流付近

(b) 幸橋付近

(c) 木田橋付近

図-7.2.3.2 木杭掘り出し地点付近の地盤柱状図

とから、これらの層を支持層としていたと考えられる。

(4) 木田橋付近の概要

木田橋からは2006年に直径30cm長さ3.5mの木杭1本が採取され、2008年に直径約30cm長さ3.3m～4.7mの木杭が7本採取された。採取位置は現在の木田橋近くに架かっていた1949（昭和24）年施工の銭とり橋の橋脚基礎であり、設置期間は2006年に採取したものは57年、2008年に採取したものは59年と推定できる。2006年に採取された木杭は川のほぼ中央にあり、河川を鋼矢板で締切り河床面まで水位を下げて採取された。採取時には杭頭部約1.4mが地盤より上に出ていたが、試験室に搬入された木杭を観察

すると、杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり、その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。

写真-7.2.3.1(c)に示すように杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたとする

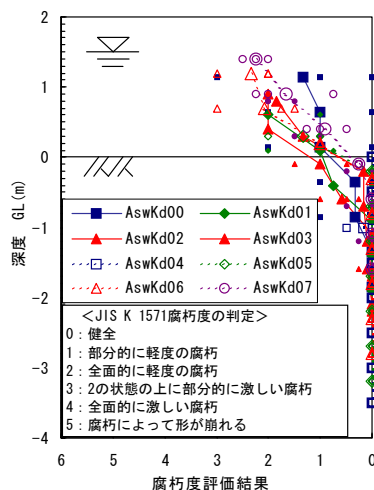
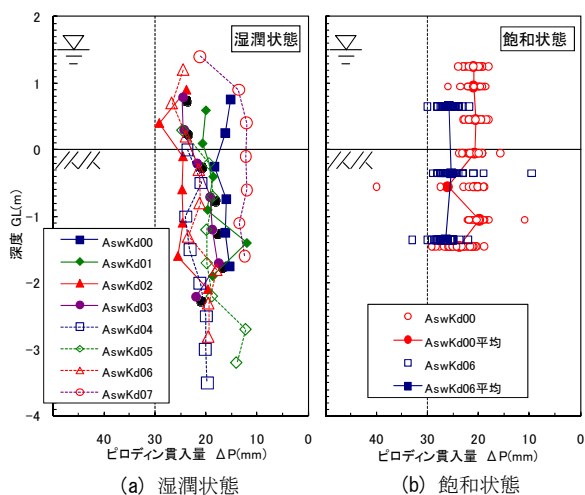


図-7.2.3.3 木田橋腐蝕度評価



(a) 湿潤状態

(b) 飽和状態

図-7.2.3.4 木田橋ピロディン貫入試験結果

と、粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり、杭の大部分は粘土層内にあったと考えられる。杭頭部は水中に没していたと考えられるが、渇水期には水位面より上に存在していたと推測できる。

(5) 採取した木杭の調査結果

採取した木杭の大きさ、樹齢、樹種、設置期間等の調査結果は、表-7.2.3.1 にまとめて示した。足羽川の3地点より旧橋梁や護岸基礎と考えられる木杭は、48年～74年経過したものであり、その樹種は、マツ科カラマツ属、マツ科マツ属とスギ科スギ属であった²⁾。また、木杭の健全性は、①腐朽度評価、②ピロディン貫入試験、③縦圧縮試験の3種類の試験により評価した³⁾。図-7.2.3.3

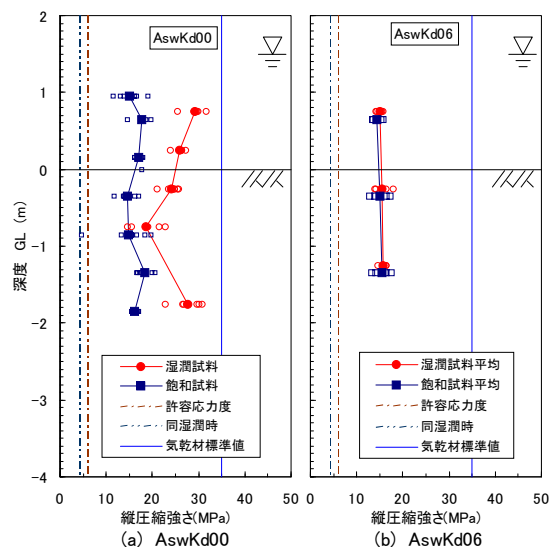


図-7.2.3.5 木田橋縦圧縮試験結果

～図-7.2.3.5 に、木田橋付近で採取された木杭の試験結果を示す³⁾。木杭表面の観察による腐朽度評価では、河床より突出した部分では若干の損傷が確認されたものの、地中に埋まっていた部分に関しては極めて健全な状態であった。図-7.2.3.4 のピロディン貫入試験結果では、(a) が木田橋付近で採取された8本の木杭の湿潤状態におけるそれぞれの平均値、(b) が AswKd00 と AswKd06 の飽和状態の試験結果を示した。(a) の湿潤状態では、各木杭によりばらつきはあるものの、貫入量の平均は10mmから30mmの間に収まっており、木杭全体としては健全であるといえる。また、深度が浅くなるに従いわずかに貫入量が大きくなる傾向を示している。これは、水流などの影響を受けることによる物理的損傷と考えられる。また、(b) の飽和状態でも、ほとんどの点で貫入量が20mmから30mmの間にあり、湿潤状態に比べ若干貫入量が大きいが、全体的には健全であった。図-7.2.3.5 の縦圧縮試験では、AswKd00 は、縦圧縮強さが湿潤状態で約25MPa、飽和状態で約16MPaであり、気乾材の標準値に比べ小さい値であるが、許容応力度に比べ約4倍と十分大きな値であった。AswKd06 は、湿潤状態、飽和状態共に縦圧縮強さが約15MPaであり、いずれも気乾材の標準値より小さい値を示しているが、許容応力度に比べ十分大きな値を示していた。これらの健全性評価を水越橋上流付近や幸橋付近で採取された木杭でも実施したが、木田橋付近の木杭と同様であることが確認された。

(6) まとめ

- 福井県足羽川から橋脚基礎などに利用されていた木杭は、カラマツ属、マツ属、スギであった。
- 採取された木杭は、48年～74年もの間、土中もしくは河川水位以下にあり、いずれの樹種においても腐朽についてはほとんど健全であった。

参考文献

- 吉田雅穂・沼田淳紀・上杉章雄・久保 光：足羽川における木杭の掘出し調査，第42回地盤工学研究発表会，pp.2213-2214，2007.7.
- 上杉章雄・沼田淳紀・久保 光・吉田雅穂：足羽川で採取された木杭の樹種評価，第42回地盤工学研究発表会，pp.2215-2216，2007.7.
- 本山 寛・沼田淳紀・吉田雅穂・久保 光・野村 崇・直井義政：足羽川木田橋橋脚基礎に使用された杭丸太の健全性調査，第44回地盤工学研究発表会，pp.1789-1790，2009.8.

7.2.4 建築基礎(三浦哲彦)

佐賀平野の軟弱地盤地帯では、住宅の不同沈下対策として従来の木杭基礎のほかに幾つかの工法が使われているようである。しかし、どの工法がどの程度使用されているのか、また各工法の問題点、工費などの実態はよくわかっていない。平成17年3月に軟弱地盤研究会の住宅基礎部会により代表的な軟弱地盤地域である佐賀市の諸富・東与賀・川副・久保田の4町1千戸を対象に、住宅建築前の地盤調査の有無や、基礎の型式、地盤改良の方法、住宅に関する問題の有無などについてアンケート調査を実施し、基礎の型式と住宅に関する問題の関係などの分析を行なった¹⁾。分析の結果については文献にゆずり、ここでは調査でわかった4つの代表的な工法の施工割合、施工費について紹介する。

(1) 松杭工法

工費が安く、長年の経験があるために現在も広く使われている。地盤調査に基づき、木杭の打設長さを適切に設計すること、地下水面より上部への対策（地下水面以深では十分な耐久性がある）を講じること、などが重要になってくる。木杭による浮き基礎形式では、住宅と外構との間の不同沈下の問題は少ないと考えられる。

(2) 深い地盤改良工法

一般的には松杭工法より工費は高くなる。工費は改良体の長さによって異なる。住宅の不同沈下の問題は少なくなるようだが、住宅と外構の間の不同沈下は生じやすくなる。

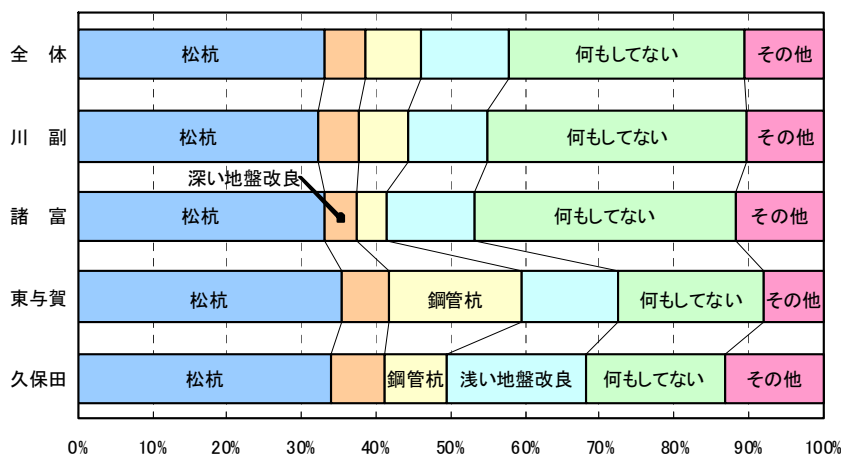


図-7.2.4.1 佐賀平野における戸建住宅の基礎工法¹⁾

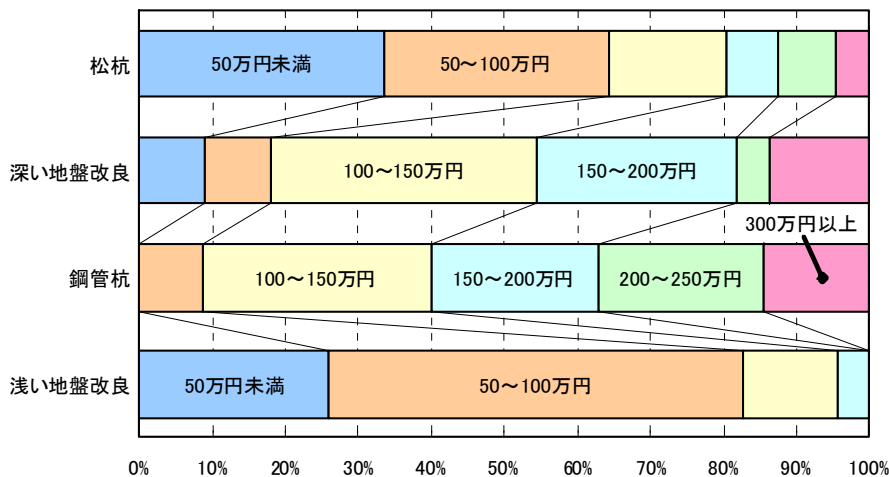


図-7.2.4.2 基礎の補強費用¹⁾



写真-7.2.4.1 トップコンクリート施工状況

(3) 鋼管杭工法

基礎補強にかかる工費はかなり高くなる。杭先端を支持層につけた場合には、住宅の不同沈下の問題は生じ難くなる。この工法では、住宅の不同沈下は生じないと考えられる反面、外構との間の不同沈下の問題が顕著に現れる場合が少なくない。

(4) 浅い地盤改良工法

工費が安価である反面、住宅の不同沈下の問題が生じやすいといえる。地盤が安定している敷地に対して適用する場合、長く使用した住宅を建て替える場合に新築建物の規模や重さが古い建物と余り変わらない場合、などでは問題が生じることは少ないと思われる。

調査結果より、佐賀平野においては住宅基礎の 30 数%は木杭基礎が使われていることが判明した(図-7.2.4.1)¹⁾。費用については、木杭基礎は 100 万円以下の回答が 6 割以上を占める結果となった(図-7.2.4.2)¹⁾。最近では、木杭が地下水位以下に設置されるように頭部に 1m のコンクリート杭(トップコンクリート)を継ぎ足す工夫も取り入れられている(写真-7.2.4.1)。また木杭を継いで長尺杭とする古来の方式も復活しつつある。

戸建住宅を建設した後に生じる不同沈下の問題をできるだけ回避するためには、事前に地盤調査を行うことが重要である。調査方法としては、スウェーデン式サウンディング調査が普及している。地盤調査により、敷地内の地盤中にクリーク跡や旧施設跡などの不均一な地盤状況が確認された場合には、何等かの対策を講じることが必要となる。昔から使われてきた道路に接する敷地に新たに盛土を施工する場合、住宅のそばに新たに道路を設けた場合、などでは地盤の不均一性や道路・交通荷重による引き込み沈下により不同沈下を招くことがある。調査箇所数は費用の高いボーリング調査を 1 本行うより、低廉なサウンディング調査を 5 点実施するのが得られる情報量は多いことが少なくない。できれば 5 点とも支持層まで調査を行うことが望ましい。

参考文献

1)喜連川聰容，三浦哲彦，松本秀次郎：佐賀平野軟弱地盤地域の戸建住宅基礎に関するアンケート調査結果，軟弱地盤，No.3，pp.59-65，2006.

7.3 地中海域での木材利用における設計法の変遷と現在の設計法

7.3.1 木杭

(1) 土木と建築における木杭設計の変遷（沼田淳紀）

表-7.3.1.1 に土木と建築の木杭基礎についての設計の変遷を示す。土木と建築における構造物基礎の設計書の代表として、それぞれ現在の道路橋示方書¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾と、建築基礎構造設計指針⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾に示される木杭に関する記述を示した。経過年数が視覚的に分かるように、1 年を 1 行として示した。表には、1955 年（昭和 30 年）1 月 21 日に閣議決定された「木材資源利用合理化方策」も併せて示した。この方策は、国内の森林の過伐により木材資源の枯渇が懸念されたことから、建築物の木造禁止の範囲を拡大することや、橋梁、その他土木施設土木建築仮設材料、杭、柱等は、鉄鋼、軽金属、コンクリート等の耐久製品につとめて切替えるよう必要な措置を講ずることを謳ったものである。

その後、道路橋示方書と建築基礎構造設計指針では、次のような変遷を辿る。

道路橋示方書

1964 年版（昭和 39 年版）：これまで道路橋の下部構造を設計するのによりどころとなる指針がなく、構造物を設計する技術者に一任されていたが、新しい設計法が開発されてくるとこれに応じた指針の作成が望まれ、これにこたえて初めて道路橋下部構造設計指針が作成された。ここで取り上げられている杭は、木ぐい、既製コンクリートぐい、場所打ちコンクリートぐい、鋼ぐいであった。

丸太杭については、「1.総則 1.2 定義」、「5.くい本体の設計 5.1 完成後の荷重に対する設計」、「5.くい本体の設計 5.3 くい頭部とフーチングの結合部」にそれぞれ記述があり、「6.構造細目 6.1 木ぐい」では木杭の項目を設け説明されている。

1966 年版（昭和 41 年版）：まえがきに以下のような記述があり、木ぐいについて許容応力度などについて明確にしようとしていることがわかり、「第 3 篇設計 3 章材料 3.4 条木ぐい」と「第 3 篇設計 4 章許容応力度および許容支持力 4.5 条木ぐい」の項目がある。

「・・・また在来、木ぐいについての規程が、明確でなかったので、その規程を明らかにした。・・・また鋼材の現場溶接部の許容応力度、木ぐいの許容応力度についても、明確に規定した。・・・」

1968 年版（昭和 43 年版）：まえがきに以下のような記述があり、「3.既製ぐいの打ち込み 3.1 製作、運搬、貯蔵、検査 3.1.1 木ぐい」「5.くい頭の仕上げ 5.1 木ぐい」の項目がある。

「・・・くい頭の仕上げを、木ぐい、RC ぐい、PC ぐい、綱ぐいについて規定し重要な作業であることを注意喚起した。・・・」

1976 年版（昭和 51 年版）：まえがきに「・・・この指針で取り上げたくいは既製コンクリートぐい、鋼ぐい、場所打ちコンクリートぐいである。木ぐいについては現在使用実績がほとんどないため本指針から除外した。・・・」と記述されており、これ以降本指針で丸太杭が取り扱われなくなった。

1980 年版（昭和 55 年版）：木杭についての記述は完全に姿を消す。

建築基礎構造設計指針

1960 年版（昭和 35 年版）：「4 章基礎の設計、3 節くい基礎の設計、27 条くい基礎設計の基本事項」「4 章基礎の設計、3 節くい基礎の設計、28 条くい材料の許容応力度」「4 章基礎の設計、3 節

くい基礎の設計，30 条木ぐい」「4 章基礎の設計，3 節くい基礎の設計，35 条くいの継手」の項目があり，「地下水位の変化が予想される場所においては，木ぐいはその耐久性が十分保証される場合のほかは用いてはならない。」「木ぐいの長期許容圧縮応力度は，すぎ・もみ・えぞまつ・とどまつ・べいすぎおよびべいまつにあつては 40kg/cm^2 (4MN/m^2)，その他は樹種にかかわらず 50kg/cm^2 (5MN/m^2) 以下とする。なお，この場合許容支持力は木ぐいの最小断面について求めるものとする。」「くい材の長期許容引張応力度についてはそれぞれの材種によって，「木構造設計基準・同解説」，・・・に示された長期許容引張応力度を適用する。」「木ぐいは割れなどの欠陥のない生丸太の樹皮を除いたもので，元口から末口までおよそ一様に径が変化し，樹皮を除いた末口の径は 12cm 以上とする。」「木ぐいの両端中心線を結ぶ直線はくい外に出てはならない。」「木ぐいの菌害による腐朽または虫害に対しては，実状に応じて適切な処置をほどこさなければならない。」「木ぐいは常にその全長が地下水位下にあるように基礎の深さを定めなければならない。」「木ぐいの打込み中心間隔は元口の 2.5 倍以上，かつ 60cm 以上とする。」「木ぐいの継手は上ぐいと下ぐいがある程度回転することがで，かつ曲げに抵抗しうる構造としなければならない。」などの記述がある。

表-7.3.1.1 道路橋示方書および建築基礎構造設計指針に見られる木杭設計の変遷

	道路橋示方書	建築基礎構造設計指針
1955年	木材資源利用合理化方策閣議決定	
1955年		
1956年		
1958年		
1960年		建築基礎構造設計基準・同解説 「くい基礎設計の基本事項」の項で記述 「くい材料の許容応力度」の項で記述 くい基礎の設計「木ぐい」の項あり 「くいの継手」の項で記述
1961年		
1962年		
1964年	道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇 「杭の分類」の項で記述 「くいの材料のヤング係数」の項で記述 「くい頭とフーチングの結合」の項で記述 構造細目「木ぐい」の項あり	
1965年		
1966年	道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇 材料「木ぐい」の項あり 許容応力度および許容支持力「木ぐい」の項あり	
1967年		
1968年	道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇 製作，運搬，貯蔵，検査「木ぐい」の項あり くい頭の仕上げ「木ぐい」の項あり	
1968年		
1973年		
1974年		建築基礎構造設計基準・同解説 「杭材料の許容応力度」の項で記述 くい基礎の設計「木ぐい」の項あり
1975年		
1976年	道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇 指針から木ぐいが除外される	
1977年		
1978年		
1979年		
1982年		
1983年		
1984年		
1985年		
1988年		建築基礎構造設計指針 指針からは除外され，小規模建築については別の手引きを参照
1989年		
1990年		
1992年		
1994年		
1995年		
1996年		
1997年		
1998年		
2001年		建築基礎構造設計指針 指針で扱わないことが明記された

1974 年版（昭和 49 年版）：「4 章基礎の設計，3 節くい基礎の設計，28 条くい材料の許容応力度」「4 章基礎の設計，3 節くい基礎の設計，31 条木ぐい」の項目があり，「木ぐいの長期許容圧縮応力度は，まつ，からまつ，べいまつにあっては 50kg/cm^2 (5MN/m^2)，その他の樹種にあっては日本建築学会「木構造設計基準・同解説」に示された常時湿潤状態にある場合の値と 50kg/cm^2 (5MN/m^2) のうち小なるほうをとる。短期許容圧縮応力度は長期許容圧縮応力度の 2 倍とする。なお，許容支持力は，木ぐいの最小断面について求めるものとする。」「くい材の許容引張応力度については，それぞれの材種によって，日本建築学会「木構造設計基準・同解説」，……に示された許容引張応力度を適用する。」などの記述がある。

1988 年版（昭和 64 年版）：「第 6 章杭基礎，6.2 節杭の種類と性能，2.既製杭の種類と性能」に「木杭は，軽微な建物や小規模の建物においては，これまでの実績はもち論，今後の使用も考えられ，その使用にあたっては，日本建築学会「小規模建築物基礎設計の手引き」を参照されたい。」と記述され，建築構造物に対して，木杭は小規模な建物のみ限定された。

2001 年版（平成 13 年版）：「第 6 章杭基礎，6.2 節杭の種類と性能，2.既製杭の種類と性能」の項に，「木杭については，最近ではまれに擁壁の基礎や軟弱地盤の改良のため等に用いられる程度であるため，本指針では扱わない。」と記述されるのみであり，実状，建築構造物の基礎としては用いられなくなった。

以上のように，それぞれの設計書が改訂される度に，木杭に関する記述量も減り，道路橋示方書では 1976 年に，建築基礎構造設計指針では 1988 年に木杭に関する記述は遂に姿を消した。この背景に「木材資源利用合理化方策」のような政策的な要因も考えられるが，この方策が設計法にどのように波及していったかは明確ではない。この方策が設計法にどのように影響をおよぼしたのかは今後検討すべき事項だと考えられる。

(2) 水路用ボックスカルバート及び L 型擁壁の木杭基礎設計マニュアル(佐賀県) (三浦哲彦)

佐賀平野では，かつては水路用ボックスカルバートなどの軽量構造物の基礎は木杭を用いるのが普通であった。それらの一部は，フローティング形式で施工されたが日交通量が 1 万台を越える国道の構造物として現在も機能している。30 年ほど前から木杭に代えて先端支持方式の RC 杭が主に使われるようになった。その結果，道路との間に段差が発生し，走行障害や騒音振動障害の原因となった。佐賀県からの要請を受けて，佐賀大学では木杭-底盤系基礎の基礎的研究を行った^{10), 11)}。それらの成果をベースとして，木材利用研究会で現場調査・試験などを実施して，次のマニュアルを発刊するにいった。

a) 水路用ボックスカルバートの木杭-底盤系基礎設計マニュアル¹²⁾

木杭-底盤系基礎は作用荷重を木杭の周面支持力と構造物底面に作用する地盤反力とが協働して支えるのを特徴とする。また，フローティング形式であるので構造物と道路面との段差発生が緩和される。その支持機構を概念的に示したのが図-7.3.1.1 である。作用外力はまず杭群により支えられる。杭群の周面支持力は作用荷重のおよそ半分程度に設定する。その結果，構造物は杭を押込み，底盤は確実に地盤に接触して地盤反力を受けもつようになる。

実際の設計では，杭群と底盤支持力の各概算値を推定しておき，まず安全率 3 で底盤支持力を求め，残りの荷重を安全率 1.5 で杭に支持させるように計算を進める。この考え方を基礎として，木材利用

研究会では 2005 年に設計マニュアル（第 1 版）を発行し実用化した。

2009 年には、これまでの現場試験等の成果や設計の考え方について深めた議論の結果を取り入れて、マニュアル（改訂版）を発行した。改訂版では、次のような事項についても考慮した。

- ①基礎設計に用いる自重のうち第 1 版では考慮していたボックスカルバート内水重は考慮しない。
- ②施工中の安全性照査においては木杭の周面支持力（安全率 1.0）に加えて底盤の支持力を安全率 2.0 で考慮して良いこととした。

- ③木杭の末口径および長さの考え方を整理し、生産・流通の実態に整合するように改めた。

最近の傾向として、軟弱地盤上に設けるボックスカルバート基礎は、深層混合処理工法によるコラムで支持する考え方が広まりつつある。しかし、小規模のボックスカルバートの場合には、地盤改良のためのプラント設置などを必要とする DMM 工法はコスト高になる。その意味で、木杭－底盤系基礎の優位性が見直されてきている。

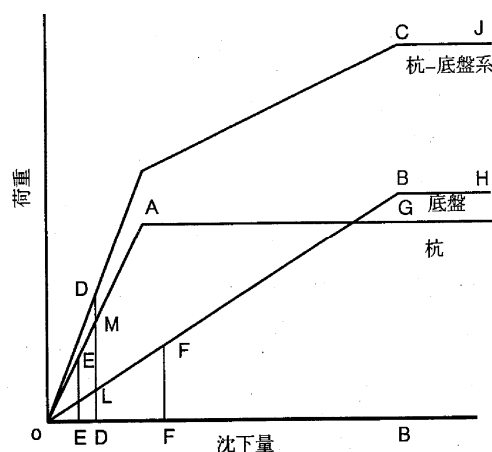


図-7.3.1.1 杭－底盤系基礎の荷重～沈下概念図

b) 佐賀県における L 型擁壁基礎¹³⁾

2008 年には「プレキャスト L 型擁壁 ($H \leq 2\text{m}$) の木杭－底盤系基礎～設計マニュアル（第 1 版）を纏めた。本設計マニュアルで対象とするプレキャスト L 型擁壁は次の 2 種類である。

- ・歩道幅員 2m 以上の歩道に設置の壁高 1.2m 以下の擁壁
- ・上記以外の壁高 2m 以下の擁壁

佐賀県から発注されるプレキャスト L 型擁壁の 98%は壁高 2m 以下であり、その多くは歩道を対象としている。小型の L 型擁壁の設計では、土圧による水平力をどのように評価するかが問題となる。従来の設計法で計算すると擁壁前面側に大きな荷重強度が作用することになり、この荷重に適合させるために長い木杭が必要となる。

2m 以下の L 型擁壁では、裏込め土に建設発生土を石灰改良して用いることが少なくない。これらの材料の粘着力を計算に用いると擁壁に掛かる土圧はマイナスとなる¹⁴⁾。これらのことを考慮して、本マニュアルの設計においては、歩道を対象とする 1.2m 以下の L 型擁壁に限っては土圧計算は行わず、裏込め土荷重および群集荷重のみを考慮して杭の末口径・長さを決定することとした。

一般部擁壁（車道部）の場合は土圧計算を行って杭の寸法を決定する。土圧による水平力の影響を考慮するとき是一般の計算法に基づいて行うが、過去の実績から判断できる木杭長さに比べて、計算によって求めた杭長さは過大であると思われる。このような問題を解決するために、L 型擁壁の背面に埋め戻す土に 2～3 枚のジオグリッドを敷設して、擁壁底面に作用する鉛直圧力を均等化することを検討している。この方法に関する現場試験の成果は文献¹⁵⁾に紹介している。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編，1980.5.

- 2)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇，1976.8.
- 3)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇，1968.10.
- 4)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇，1966.11.
- 5)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇，1964.3.
- 6)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.485，2001.10.
- 7)日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.430，1988.1.
- 8)日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，pp.667，1974.11.
- 9)日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，pp.474，1960.11.
- 10)三浦哲彦・呉文経・中村六史・一瀬智郎：軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察，土木学会論文集，No.517/III-31，pp.63-72，1995.
- 11)呉文経・三浦哲彦：粘土地盤における木杭の周面支持力評価のための鉛直載荷試験，土と基礎，Vol.43,No.5,pp.40-42,1995.
- 12)佐賀県県土づくり本部・(社)佐賀県県土づくりコンサルタンツ協会・(財)佐賀県土木建築技術協会：「水路用ボックスカルバートの木杭ー底盤系基礎～設計マニュアル（改訂版）」，2009.12.
- 13)佐賀県県土づくり本部・(社)佐賀県県土づくりコンサルタンツ協会・(財)佐賀県土木建築技術協会：「プレキャスト L 型擁壁（2m 以下）の木杭ー底盤系基礎～設計マニュアル（第 1 版）」，2008.9.
- 14)宮副一之・福岡仁・竜田尚希・日野剛徳：木杭ー底盤系基礎を用いたプレキャスト L 型擁壁の現場載荷試験（速報），低平地研究，No.17，pp.41-48，2008.
- 15)福岡仁・宮副一之・竜田尚希・日野剛徳：佐賀平野における L 型擁壁の長期静的荷重下での木杭・補強土-底盤系基礎の挙動，木材利用シンポジウム in 佐賀，pp.39-40,2009.

7.3.2 港湾施設（山田昌郎）

港湾施設の技術基準がなかった明治～戦前は，広井勇博士の「築港」¹⁾や，鈴木雅次博士の「港工学」²⁾が，港湾技術者の参考書として活用されていた。両者ともに木材が海水中でフナクイムシ(Teredo)やキクイムシ(Limnoria)などの海虫類に著しく^{さんしよく}蚕食されること，地中に埋設される木材には海虫害が少ないこと，海虫害防止法としてクレオソート注入や銅板等による被覆があること，国産材では^{はしばみ}櫟，楠，^{くすのき}楠などが海虫害を比較的受けにくいこと，等を記述している。

初めての港湾施設技術基準である「港湾工事設計示方要覧」が昭和 25 年に発行され，その後約 8 年ごとに改訂・増補されて，高度成長期の大量の港湾工事に活用されてきたが，木材についての記述は改訂ごとに減少する傾向にあった。しかし平成 19 年の改訂時に，環境面など木材の長所を生かして利用する観点から木材についての記述が全面的に更新され，強度性能・耐久性等に関して木材の海洋利用の際に重要な事項について解説が記述されて現在に到っている³⁾。

参考文献

- 1)広井勇：築港，1913.（土木学会ホームページ＞デジタルアーカイブスに pdf ファイルあり）
- 2)鈴木雅次：港工学，1932.（同上）
- 3)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，第 3 編第 11 章 6.木材，pp.459-462，2007.

7.4 腐朽および虫害（桃原郁夫）

多くの生物は木材を分解・代謝し、そこから栄養を得ることができない。

その理由の一つは、木材が死んだ細胞によって構成されていることによる。一般的な動物や植物は、その体の全ての部分が生きた細胞からできていて、体内に細胞が生きていくのに必要な多量の栄養分を蓄えている。これに対し、木材の大部分は死んだ細胞からできているため、他の生物に含まれているような栄養分をほとんど含まない。このため、セルロースやヘミセルロースをエネルギー源として代謝することができるごく一部の生物によってしか木材は分解されない。

もう一つの理由は、木材の細胞壁構成成分であるリグニンにある。樹木は二次代謝成分として芳香環に炭素が3つ付いた側鎖を持つ構造（フェニルプロパン構造）を持つ化合物を合成し、それをラジカル重合させてフェニルプロパンがランダムに重合した三次元構造をもつ化合物（リグニン）を細胞壁に沈着させる。このリグニンがセルロース・ヘミセルロースを覆い、微生物による攻撃からガードしている。

このような理由から多くの生物は木材を食物として利用できない。しかし、生物の中にはリグニンを含む木材からエネルギー等を取り出す手段を獲得し、食物として利用できるように進化してきたものもある。このような生物が腐朽菌でありシロアリである。

7.4.1 腐朽（桃原郁夫）

(1) 腐朽菌が木材を分解する仕組み

腐朽とは、微生物が木材細胞壁を構成するセルロース・ヘミセルロース・リグニンのいずれか又は全てを分解することにより、木材の強度低下や形態変化を生ずる減少をいう。そして、その腐朽を引き起こすのが木材腐朽菌である。

木材腐朽菌はリグニンに守られたセルロース・ヘミセルロースを分解する仕組みを進化の過程で達させたことにより、他の微生物が利用できない木質バイオマスという膨大な基質を資化することができるという特権的な地位を手に入れている。

木材腐朽菌がリグニンに守られたセルロースやヘミセルロースを分解するために獲得した2つの戦略が現在わかっている。その1つは、リグニンを変質・分解させる酵素を分泌してセルロース・ヘミセルロースの周りのリグニンを取り除いてしまう戦略である。木材腐朽菌の中の白色腐朽菌と呼ばれる一群の菌は、リグニネルオキシダーゼ・マンガンペルオキシダーゼ等のリグニン分解酵素を分泌し、セルロース・ヘミセルロースの周りにあるリグニンを改質・低分子化することで糖分解酵素がセルロースやヘミセルロースにアクセスできるようにすることで、木材中の多糖を分解することに成功している（図-7.4.1）。一方、褐色腐

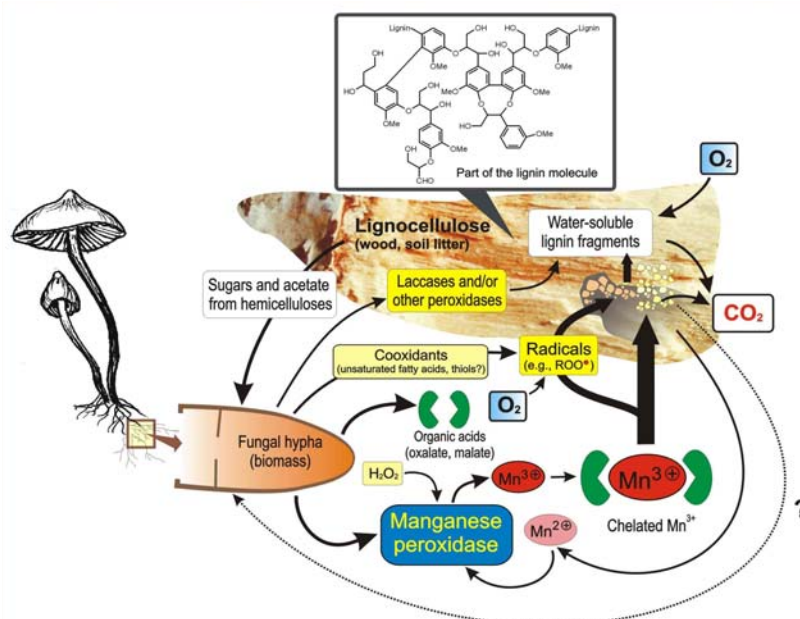


図-7.4.1 リグニン分解酵素によるリグニンの可溶化¹⁾

朽菌と呼ばれる一群の菌は低分子の有機酸やラジカルを用いる戦略で木材中の多糖を分解することに成功した。その方法は、低分子の有機酸やラジカルをリグニン分子の隙間を通してセルロース・ヘミセルロースへと送り込み、それによって分解・可溶化された低分子の糖を利用する。

(2) 木材腐朽菌の生育条件

木材劣化微生物の生育には、温度・水分・酸素・栄養などが影響を与える。以下、それぞれの影響について説明する。

a) 水分：木材変色菌や木材腐朽菌が生育していくためには水分が欠かせない。木材含水率が繊維飽和点以下の木材では、木材中の水分が全て木材成分と結合しているため腐朽が起こらないとされている²⁾。しかし、含水率 15%程度までは変色や腐朽が起こるという報告もある³⁾ことから、劣化防止のためには含水率を出来る限り低く保つ必要がある。また、腐朽菌の中にはナミダタケのように土壤中などから菌糸束を通して水を木材まで吸い上げ、低含水率材を腐らせる菌も存在する⁴⁾。材の含水率が上昇し菌の活動が活発化すると腐朽の被害も激しくなるが、含水率が高すぎても菌の活性は低下する。腐朽菌の場合には菌や腐朽する樹種によって異なるが、75%から 150%程度の値で腐朽が最大になる⁵⁾。このように最適含水率が樹種によって違うのには以下に述べる空気が関係している。

b) 空気：木材変色菌や木材腐朽菌はエネルギーを得るために酸素を用いた有機呼吸をおこなう⁵⁾。そこで菌が活発に生育するためには酸素が必要となる。飽水状態に近い高含水率材では十分な酸素が供給されなくなるため、腐朽が抑えられる⁶⁾。この時の含水率はその木材の空隙率によって異なり、空隙率の小さい材(=比重の大きい材)ほど低含水率で飽水状態になるため腐朽が起こりにくくなる⁶⁾。また、同様の理由により地下水位よりも低い位置に埋められた木材や淡水中に沈設されていた木材の腐朽が押さえられることが認められている^{7,8)}。

c) 温度：木材変色菌や木材腐朽菌の活動には最も適した温度があり、そこから温度が離れるにつれて菌の活動は低下する⁹⁾。しかし至適温度と異なっても腐朽の進行が止まるわけではない。至適温度の違いによりそれぞれ好低温菌(24℃以下)、好中温菌(24~32℃)、好高温菌(32℃以上)と呼ぶ¹⁰⁾。菌が至適温度よりさらに高い温度に一定時間以上さらされると、菌は最終的に死滅する。この温度は乾燥状態より湿潤状態にある方が低く、湿潤状態では 60~70℃程度に数十分晒されることで菌は死滅する¹¹⁾。

d) 栄養：一般に生物が生息するためには、エネルギーを得るための炭素源や生体を構成するための窒素や無機成分等が必要である。木材腐朽菌はこれらの栄養源をセルロース・ヘミセルロース等木材細胞壁を構成する成分を分解し得ている¹²⁾。このため、変色菌が低分子の糖やアミノ酸に富む辺材部でしか生育できず、それらの栄養源を消費してしまうとそれ以上繁殖できなくなるのに対し、木材腐朽菌はそのような成分を消費し尽くした後も木材主要構成成分のセルロースやヘミセルロースを分解しそこからエネルギーを得ることができるため繁殖を続けることができる。さらに、変色菌はこのような成分に乏しい心材部で生育できないのに対し、腐朽菌は心材部にあるセルロースやヘミセルロースを分解することでエネルギーを得ることができるため、心材部でも繁殖できる。

e) その他の条件：木材劣化微生物の生育は上記条件以外にもさまざまな環境要因に影響される。その一つが光の影響であり、子実体（きのこ）の発生が光の影響を受けることが知られている¹³⁾。

(3) 腐朽材の性質

a) 形態の変化：腐朽材は腐朽の進行とともに特徴的な形態を示すようになる。また、帯線と呼ばれる木材が帯状に漂白された部分¹⁴⁾や、酸化マンガンを沈着することによる黒点が現れることがある¹⁵⁾。子実体（きのこ）の発生も腐朽材の特徴である。子実体の形は、シイタケやヒラタケの様な形をしたものだけでなく、キクラゲの様な形をしたものあるいはシイサルノコシカケの様に木材にベッタリとくっついた形のものなど様々である¹⁶⁾。

b) 化学的な変化：腐朽材の化学組成も腐朽形態に応じた変化を示す。特徴的なのは褐色腐朽材や軟腐朽材でリグニンがほとんど分解されず残っているのに対し、白色腐朽材ではリグニンも分解されていくことである¹⁷⁾。さらに褐色腐朽材では腐朽初期にアルカリ可溶成分が急激に増加することが知られており¹⁸⁾、褐色腐朽初期に木材構成多糖の急速な低分子化が起こること¹⁹⁾とあわせ、褐色腐朽材内部では表向きの重量減少以上に劣化が進んでいると考えられる。これらの化学的变化は腐朽菌が分泌する酵素や低分子化合物によって進行する²⁰⁻²³⁾。

c) 物理的な変化：腐朽菌による攻撃を受けた木材は、セルロースを始めとする細胞壁構成成分を失い内部の空隙が増加する。その結果、腐朽材では比重が小さくなり、ヤング係数や最大荷重が低下する。曲げ破壊係数も腐朽の進行に伴い急速に減少するが、腐朽が内部に進行していく樹種（例えばスプルース）ほどその減少度合いも激しい²⁴⁾。一方、腐朽による強度低下が折損率と関係することから、治山木杭の折損率と被害度との比較もなされている²⁵⁾。

参考文献

- 1) <http://www.kolumbus.fi/ilona.barlund/ilona.barlund/MartinsProjects.html>
- 2) 原口隆英：木材保存学，文教出版，pp.34-35，1982
- 3) W.Barvendamm, H.Reichelt：Arch. Mikrobiol., 9, pp.486-544，1938
- 4) 高橋旨象：きのこ木材，築地書館，pp.77-78，1989
- 5) R.A.Zabel, J.J.Morrell：Wood Microbiology, Academic Press. Inc., pp.94-96，1992
- 6) R.A.Zabel, J.J.Morrell:ibid, pp.96-102，1992
- 7) 山田周平，小川一郎，永井香織，他：日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 構造 III, 1069，2000
- 8) 川上敬介，大原明伸：木材工業，55，pp.165-169，2000
- 9) 逸見武雄，赤井重恭：木材腐朽菌学，朝倉書店，pp.68-73，1945
- 10) 原口隆英：木材保存学，文教出版，pp.35-36，1982
- 11) 逸見武雄，赤井重恭：木材腐朽菌学，朝倉書店，pp.157-168，1945
- 12) 逸見武雄，赤井重恭：木材腐朽菌学，朝倉書店，pp.8-14，1945
- 13) T.C.Scheffer: Wood deterioration and its prevention by preservative, Syracuse University Press, pp.45-46, 1973
- 14) 逸見武雄，赤井重恭：木材腐朽菌学，朝倉書店，pp.26-32，1945
- 15) K.-E.L.Eriksson, R.A.Blanchette, P.Ander, (ed.) T.E.Timell：Microbial and Enzymatic Degradation of Wood

and Wood Components, Springer-Verlag, pp.16-17, 1990

16)今関六也 編著：日本のきのこ，山と溪谷社，pp.398-399，1990

17)T.K.Kirk, (ed) N.D.Darrel: Wood deterioration and its prevention by preservative, Syracuse University Press, pp.149-181, 1973

18)原口隆英：木材保存学，文教出版，pp.54-58，1982

19)石原光朗，志水一允：林試研報，330，pp.141-152，1984

20)鮫島正浩：木材保存，21，pp.52-60，1995

21)石原光朗：木材保存，21，pp.278-289，1995

22)桃原郁夫：木材保存，21，pp.163-170，1995

23)田中裕美：木材保存，24，pp.2-15，1998

24)藤平眞紀子，中村嘉明，磯田憲生，他：木材学会誌，43，pp.589-594，1997

25)長谷川益夫，中谷浩，飯島泰男，他：木材保存，19，pp.13-22，1993

7.4.2 シロアリ被害（山口秋生）

(1) シロアリの生態

a) シロアリの種類

シロアリは、分類学的に、等翅目¹⁾に属する昆虫の総称である。現在、シロアリは世界で、7科 2600種類の存在が知られている²⁾。日本には、22種が生息している³⁾。

この中で、木材に経済的に深刻な被害を与えているのは、イエシロアリ、ヤマトシロアリ、ダイコクシロアリ、アメリカカンザイシロアリである。イエシロアリは、神奈川以西の温暖な海岸地域と南西諸島及び小笠原諸島に生息している。乾燥した材にも激しい被害を与え、加害速度は早い。ヤマトシロアリは、北海道南部を含む、日本全体に生息している。湿潤で腐朽した木材を好む。加害速度は早くはないが、全国的に生息しているので、被害件数は最も多い。外来種である、アメリカカンザイシロアリの建築物に対する被害調査も報告されている³⁾。

b) シロアリとアリの比較

シロアリ被害を正しく調査する為には、シロアリとアリの識別は重要である。シロアリは、膜翅目に属しているアリとは、系統的にも違う種類である。シロアリとア리를形態的に見分けるポイントは、触覚、翅、腰である。シロアリは、数珠状の触覚、4枚とも同じ大きさの翅、寸胴の腰を持ち、アリは、“く”の字状の触覚、後翅よりも大きい前翅、くびれている胴を持っている。

c) シロアリの階級社会と生活環

シロアリは社会生活を営む昆虫で、その社会は、子孫を増やす生殖階級である女王、王と、非生殖階級の職蟻と兵蟻から構成されている。職蟻は、全固体数の90-95%を占め、採餌、育児などを受け持つ。兵蟻は、主に外的から守る役割であるが、非常時には、職蟻を助け、雑役の一部を手伝うこともある⁴⁾。

ヤマトシロアリの生活環と階級分化は明らかになっている⁵⁾。すなわち、王と女王の生殖活動からの卵が孵化した幼虫の中で、翅芽がのびてきた個体はニンフと呼ばれ、有翅虫へと成長する。ある時期に有翅虫は、集団で巣から飛び出し、群飛を行い、営巣場所にたどりつくと、雌雄1対が生殖活動を行い、新しいコロニーを作っていく。そして、新しい巣において、王と女王の生殖活動が行なわれ、

卵が孵化して、有羽虫が発生して、生活環を形成する。

(2) シロアリ^{せっしゃく}摂食活動

a) シロアリの生育条件

シロアリの生育条件は、食物、温度、水、空気の4条件である。

シロアリは、食物として、木材を摂食する。炭素源として、木材成分のセルロースをおもな栄養源としている。それを、体内で分解し栄養となる糖類を得ている⁶⁾。イエシロアリの最適温度は、30-35°Cで、1月の平均気温4°Cがで、最低気温0°C以上の地域に分布している。ヤマトシロアリは、6°C内外で活動をはじめ、12°Cを越すと活発になり、最適温度は28°C前後と考えられる⁷⁾。アメリカカンザイシロアリのような乾材シロアリは、乾燥に強いが、その他のシロアリは乾燥に弱く、多湿な木材を好む。シロアリの活動のために、水分が必要なヤマトシロアリは水を運ぶ能力はないので、多湿な木材を好む。一方、イエシロアリは、水を蟻道から取り入れられるので、摂食する木材の含水率は、幅広い。最近では、木材の含水率とシロアリの摂食活性に焦点をあてた報告もある⁸⁾。

また、シロアリの生育条件としては、酸素は必要である。ただ、シロアリは空気の動きに敏感で、これを嫌う傾向がある。

b) シロアリと木材

シロアリは、木材の成分である、セルロース、ヘミセルロースを栄養源とし、また木材中の水分を利用することで活動が活発になるので、シロアリの生息地域では、シロアリの被害が発生する。木材は、シロアリにとっては、格好の生存する材料である。ただ、木材のシロアリに対する抵抗性は、差があり、硬い材>やわらかい材、心材>辺材、晩材>早材、広葉樹>針葉樹といわれている。樹種別に心材の耐蟻性を比較すると、ヒバ、アオモリヒバ、クルインなどが大きい⁹⁾。しかし、辺材部分の耐蟻性は、いずれも弱い。

(3) シロアリと土木資材

土木資材に木材を利用した場合、利用される地理的な場所、利用される部位によってシロアリ被害は異なってくる。すなわち、シロアリの生息地域であるか、どうか。使用される場所が、地中か、海洋かがポイントとなる。シロアリが生息する地域の、地中、陸上で使用される土木資材は、被害を受ける可能性がある。森林土木木製構造物施工マニュアルでは、施工場所の事前調査に“シロアリの生息の有無”の項目が設けられている¹⁰⁾。

また、地中使用でも、地中で完全に水中に使用される部位は、シロアリは活動できないが、地際周辺部分と地上部分には、被害が予想される。

a) 土木資材におけるシロアリ対策

シロアリ対策としては、樹種の選定だけでなく、設計的アプローチ、保存処理剤による防蟻処理が行なわれている。地域産材の利用促進のため、土木資材としての木材の利用における、仕様書の作成が各県で行なわれている。岩手県では、材料の耐用年数が長期間必要な場合は、保存処理剤による処理をおこなっている¹¹⁾。北海道では、耐久性を考慮した設計方法を設計マニュアルに追加している¹²⁾。また、宮崎県では、原則として保存処理を前提に性能維持期間を10年としたガイドブックを作成している¹³⁾。

b) アメリカカンザイシロアリ

日本でも、アメリカカンザイシロアリによる建築物に対する、被害が発生している。しかし、現在は、建築材や、家具材などの屋内使用材が被害調査が主で、土木資材についての調査はまだ行なわれていない。しかし、カリフォルニアでは、屋外に広く分布し、電柱の害虫として知られている¹⁴⁾。

耐用年数を要求される土木資材の性能を維持するためには、今後、日本においても、土木資材における、アメリカカンザイシロアリの被害調査も必要になってくると考えられる。

参考文献

- 1) Kambhampati S. and Eggleton, P.: Termites, Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology, Abe, T. et al. eds, Kluwer Academic Publishers, pp.1-23, 2000
- 2) 日本木材保存協会：木材保存学入門, p.58, 1995
- 3) 森村桂：乾材シロアリと防除対策の現状, しろあり, 136, pp.13-18, 2004
- 4) 日本シロアリ対策協会：シロアリ防除ダイジェスト, p.18, 1978
- 5) 松本忠夫：社会性昆虫の生態, 培風館, p.51, 1983
- 6) 大村和歌子：シロアリの味覚活動と摂食行動, 木材保存 34, pp.102-106, 2008
- 7) 日本シロアリ対策協会：シロアリ防除ダイジェスト, p.28, 1978
- 8) 中山友栄：木材含水率とシロアリの摂食活性との関係, 木材工業 60, pp.388-391, 2005
- 9) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック・改定4版, 丸善, p.795, 2004
- 10) 林野庁監修：平成18年版・森林土木製構造物施工マニュアル, 日本治山治水協会 13, 2006
- 11) 三宅真佐子等：土木資材としてのカラマツ木杭の製造と防腐処理の現状, 木材保存, 30, pp.165-167, 2004
- 12) 森満範等：道産間伐材を利用した土木構築物の仕様基準の開発, 木材保存, 31, pp.74-77, 2004
- 13) 飯村豊：スギを土木用途に利用する宮崎県のシステムづくり, 木材保存, 32, pp.145-150, 2004
- 14) 森本桂：アメリカカンザイシロアリの生態と防除法, 木材保存, 35, pp.44-51, 2009

7.5 軟弱粘性土地盤対策

7.5.1 軟弱粘性土地盤対策としての木杭利用（三浦哲彦）

(1) 木杭の支持力特性

これまでの研究¹⁾²⁾³⁾で明らかにできた木杭の特徴を纏めると次のようである。

- ① 杭打設時に発生した周辺粘土中の過剰間隙水圧は杭周面に水膜をもたすが、木杭に吸収されるので密着性が損なわれることは少ない。
- ② テーパー効果により打設時や水平変位を受けたとき杭周面間隙が発生する可能性が低く周辺粘土との密着性は高い。
- ③ 末口径に基づいて計算した木杭周面積に比べて実面積は大きいので、これに地盤せん断力(粘着力)を乗じて求めた木杭周面支持力は安全側となる。
- ④ 木杭は軽量であるので、コンクリート杭などに比べて支持力の面で有利となる。
- ⑤ 大型打設機械を必要としないので軟弱地盤での施工に有利である。
- ⑥ 間伐材が利用でき、森林保全に寄与できる。また CO₂ 削減に寄与できる。

また木杭の短所は次のようである。

- ① 材料の寸法、形状にばらつきがあり、品質確保と品質管理の面で注意が必要である。
- ② 地下水より上、特に地際部分で腐食しやすいので防腐・防虫・防蟻対策が必要である。

軟弱粘土地盤においてフローティング形式で木杭基礎を設計する場合には、杭の周面支持力はその周面積に粘土せん断力を乗じて求めるのが普通である¹⁾。この考え方は鋼管杭などには適用できない。

図-7.5.1に見られるように周面支持力係数 α （粘土のせん断強度 c_u と杭周面支持力度 τ_{max} の比）は、鋼管杭では1.0より小さいことがその理由である。鋼管杭の α が小さい原因としては、杭表面に発生する水膜の影響、打設時に発生する杭表面と周辺粘土との不接触部分の影響などが考えられる。

木杭では上に纏めたいくつかの特徴から周面支持力係数 $\alpha=1.0$ で設計しても問題ないが、特に末口径は元口径に比べて先細り（テーパー）となっていることを指摘しておきたい。木杭の周面支持力を計算する場合には一般に末口径を用いるので、実際の杭周面積は計算値より25%~50%大きくなる。その分だけ木杭の周面支持力の計算結果は安全側となっているのである。テーパーは、杭と粘土地盤の密着性にもプラスの効果を発揮する。杭を打設する際には、中心のブレによって杭と周辺粘土との間には隙間が発生しやすくコンクリート杭など直杭では隙間は水で満たされ粘土との接触を妨げることになりかねない。一方テーパーのついた木杭ではその心配は少ない。

(2) 杭一底盤系の支持力実験

ボックスカルバート基礎、戸建住宅のベタ基礎、などにフローティング形式で木杭を利用する場合には、木杭の周面支持力のみならず構造物底面の支持力も期待することができよう。底面支持力を有効に働かせるためには杭周面支持力の大きさを鉛直荷重の半分程度以下に抑えておく必要がある。つまり、杭の周面支持力だけで余裕をもって荷重を支えると

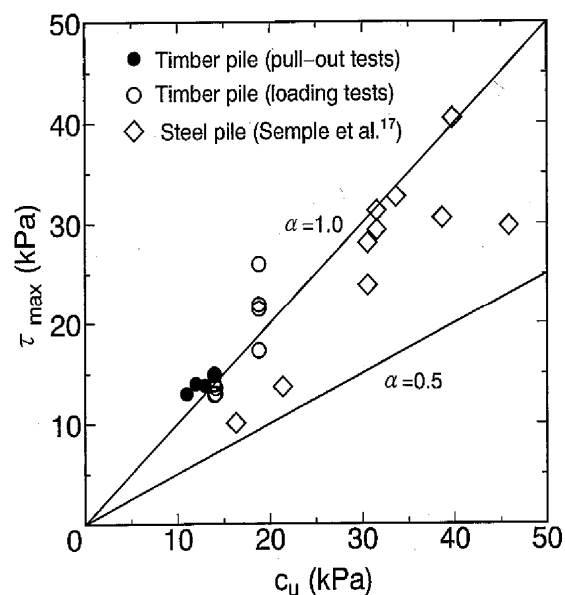


図-7.5.1 実杭における周面支持力係数 α の違い¹⁾

底面が地盤面に接しない場合が生じるからである。図-7.5.2は模型実験の結果を示している。これらの結果から、杭-底盤系基礎の極限支持力の概略値を求めるには、杭周面支持力と底盤の極限支持力の和に、干渉係数 0.8 程度を掛けることで推測できるとの見通しを得た。干渉係数を求めるための理論的研究の結果は文献³⁾に示している。

(3) 単杭の鉛直載荷試験

木杭の現場における特性を把握するために、建設省武雄工事事務所（当時）の協力を得て鉛直載荷試験および引き抜き試験を行った。実験結果を纏めたのが図-7.5.3である。杭の打設に伴って周辺粘土は乱れを生じて強度低下を生じる。試験後の経過日数と支持力回復率の関係をまとめたのが図-7.5.4である。打設して1週間後には、4週間経過時の周面支持力の80%程度までは回復する。このような回復が生じるのは、杭周辺粘土の乱れによる強度低下が回復する現象（シキソトロピー）と関連がある。佐賀平野の沖積粘土の中には鋭敏性の高いものが堆積しているが、このような地盤に木杭を打ち込んだときは軽い木杭は浮き上がってくることもある。杭頭を暫く抑えておくと周辺粘土は落ち着いて杭に吸い付くように作用する。現場において木杭を打設する場合はこのことも念頭においておきたい。

(4) 木材利用研究会による現場実験

木材利用研究会（宮副一之会長）により、2007年2月に樋管基礎として45年間使用されてきた木杭に対する載荷試験、ならびに木杭の材料試験が実施された⁴⁾。白石地区の樋門管渠(1.6m×1.7m:3連)の基礎に末口径18cm、長さ8mの木杭が用いられていた。機能改善のため取り壊しが予定されていたので、工事前に次の現場実験が行われたものである。試験は旧函渠頂版を反力とした多サイクル方式により $\log(P) \sim S$ 曲線が得られた。これより極限支持力は135kNと判定、降伏荷重は $\log(P) \sim \log(S)$ 曲線により110kNと判定された。水路用ボックスカルバート設計マニュアル⁵⁾に従って算出した木杭の支持力は98kNであった。

木材の試験方法（JIS Z2101）等に準じて強度試験が行われた。試験結果を建築基準法施行令第89条第1項に規定する基準強度と比較すると次のようである。

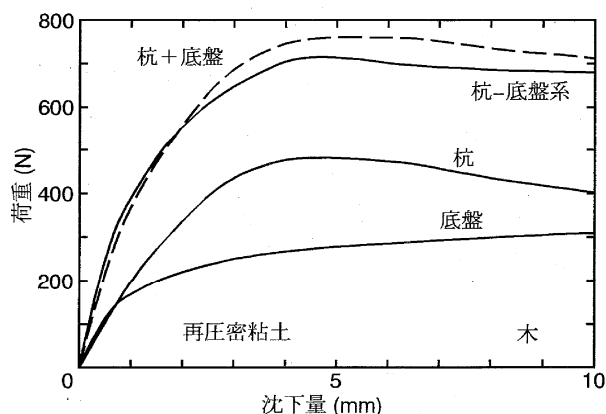


図-7.5.2 木杭-底盤系基礎の模型実験結果¹⁾

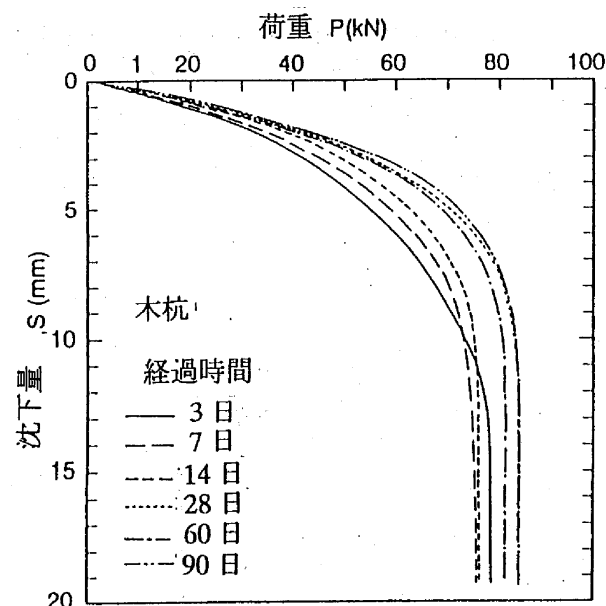


図-7.5.3 木杭打設後の経過時間に伴う荷重～沈下特性の変化¹⁾

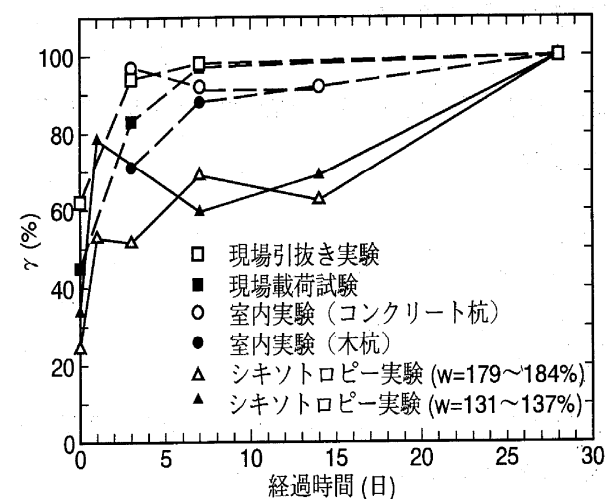


図-7.5.4 現場試験の結果のまとめ¹⁾

曲げ強度：アカマツ 118～274(%), スギ 225～270(%), ヒノキ 79～103(%)。

圧縮強度：アカマツ 49～116(%), スギ 84～101(%), ヒノキ 48～62(%)。

以上より 45 年間地下水位以下に埋設されていた木杭の強度は、アカマツおよびスギにおいては基準強度に近い値であることが確認できた。ヒノキについてはふしが多く、強度への影響があったことが考えられる。

参考文献

- 1)三浦哲彦, 呉文経, 中村六史, 一瀬智郎: 軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.517/III-31, pp.63-72, 1995.
- 2)呉文経, 三浦哲彦: 粘土地盤における木杭の周面支持力評価のための鉛直載荷試験, 土と基礎 43(5), pp.40-42, 1995.
- 3)呉文経: 粘土地盤における周面支持杭一底盤系の支持機構に関する研究, 佐賀大学学位論文, p.84, 1996.
- 4)宮副一之, 大塚祥譽, 福岡仁, 三浦哲彦: 施工後 45 年の樋時門基礎の木杭調査速報ー鉛直載荷試験・杭体強度試験, 軟弱地盤, No.4, pp.65-70, 2007.
- 5)佐賀県県土づくり本部, (社) 佐賀県県土づくりコンサルタンツ協会, (財) 佐賀県土木建築技術協会: 「水路用ボックスカルバートの木杭ー底盤系基礎ー設計マニュアル (改訂版)」, 2009.12

7.5.2 最近の軟弱地盤対策工法に関する課題 (林 重徳)

(1) 軟弱地盤対策工法の主な種類と特徴

軟弱地盤対策工法は極めて多岐にわたり, それぞれ適用の目的や地盤条件ならびに期待する効果が異なると同時に, 工法の原理や使用する材料, 更には地球・地域の環境問題への影響と貢献等にも大きな差がある。従って, 7.5.1 で述べられている軟弱地盤対策としての木材利用を検討する際には, 他の主な工法についての比較が必要となる。ここでは, 我が国有数の軟弱地盤地帯である有明海沿岸に整備が進められ, 既に建設・供用されている福岡県区間の「有明海沿岸道路」において, 検討された代表的な軟弱地盤対策工法¹⁾の概要とその特徴等を以下にまとめる。

- ①**緩速盛土**: 圧密の進行による基礎地盤の強度増加を利用し, 安定が確保できる速度で盛土等を行う方法。工期に余裕が必要であるが, 耐久性の信頼性は高い。
- ②**プレロード**: 予め荷重を載荷して地盤沈下を生じさせ, 本体構造物を構築した際の沈下の影響を軽減する工法。工期に余裕が必要であるが, 耐久性の信頼性は大きい。
- ③**ドレーン**: 圧密沈下・強度の増加に必要な時間を短縮するために用いる工法。耐久性は大きい。
- ④**グラベルコンパクションパイル**: 大径の良く締め固めた礫杭を地中に造成し, 地盤を締め固め・改良する工法。工期を短縮できるとともに耐震対策にもなり, 耐久性の信頼性は大きい。
- ⑤**深層混合処理工法**: 石灰やセメントなどの固化材を軟弱な地盤土と攪拌・混合して, 地盤中に改良体を構築する工法。約 40 年前に我が国で開発された工法で, 施工機械と制御技術等の目覚ましい進展に伴い, 施工と品質管理の精度は格段に向上している。最近, 耐久性についての課題が一部で指摘されている((2)項参照)が, 一般的には, 適用範囲が広く信頼性も高い工法である。なお, 石灰およびセメントは製造過程等において, それぞれ $1.2(t\text{-CO}_2/\text{材料}(t))$ および $0.77(t\text{-CO}_2/\text{材料}(t))$ の CO_2 排出となる。
- ⑥**低改良率深層混合処理工法**: 深層混合処理工法が従来改良率 30%～40%以上の着底型で施工され

ていたのに対し、より低い改良率（約 10%～20%程度）で状況に応じて非着底型にして経済性を高めると言われ、設計方法等が提案されている。課題については、深層混合処理工法と同様である。

⑦浅層混合処理工法：地表から 3 m 程度までを対象として、石灰やセメント等の固化材を地盤土と混合し、強度・変形特性を改善する工法。課題については、深層混合処理工法と同様である。

⑧補強土（主にジオテキスタイル敷設）：盛土等構造物の基礎部にジオテキスタイルを敷設する工法と、本体にジオテキスタイルを敷設しながら盛り立てる補強盛土工法がある。古代の敷粗朶工法等を原型とし、耐震性等にも優れている。

⑨軽量盛土：気泡混合土工法や EPS 工法、ソイル・サンドイッチ工法などが提案されているが、工法上の歴史は浅い。

⑩対策工法の組合せ：上記の対策工法を地盤条件や制約条件を考慮し、必要に応じ組み合わせられるもので、②(プレロード)+③(ドレーン)、⑦(浅層混合処理)+⑥(低改良率深層混合処理)、⑧(ジオテキスタイル)+④(グラベコンパクションパイル)、ならびに⑧(補強盛土)+⑥(低改良率深層混合処理)、などが考えられている。

⑪その他：真空圧密工法やパイルネット工法等が紹介されている。

(2) 締固めを伴わない固化処理土の長期特性変化

前項で紹介した工法の内、①～④は地盤が時間経過とともに密になることで、強度を増す特性を用いたもので耐久性については信頼性が高いといえる。また、⑧と⑨については、比較的新しい工法であり、経費的にも限定的に使用される工法である。従って、軟弱地盤対策工法としては、一般的に、⑤～⑦を基本とした⑩(対策工法の組合せ)が採用される場合が多い。⑤～⑦の工法は"締固めを伴わない固化処理土"の範疇にあるもので、一般的には信頼性も高いが、最近になって以下のような課題が指摘されている。

a) 締固めを伴わない固化処理土の長期特性変化等に関する既往の研究報告

1960 年代の後半に、建設機械の大型化と掘削混合技術の進展などに後押しされて開発された "浅層混合処理工法"や"深層混合処理工法"は、軟弱な地盤を対象にして石灰やセメントなどと混合し、締固めを伴わないで、地盤の中で生じる化学的な固化効果に依存するものである。化学的固化効果の発現過程等については多くの研究がある一方で、その長期的な性状変化と耐久性についての検証とデータなどは必ずしも十分ではなく、次のような研究報告等もある。

①セメントおよびセメント系固化材を用いた固化処理土の調査研究委員会・W 報告²⁾に、『現実には、特定の層で改良体の強度が低下する場合も多い。』との記述があるが、その原因については記載されていない。②Kamon et al.³⁾は、石灰処理土の室内試験により、模擬酸性雨を浸透させた処理土は中性化し、一軸圧縮強さが著しく低下することを示した。③北詰ら⁴⁾は、研究所構内の土槽に埋設した石灰処理土塊から、施工後 11 年と 27 年経過した供試体の力学的・化学的特性の変化を調べている。一軸圧縮強度は、施工後 11 年間で約 3 倍に増加し、11 年後から 27 年後の 16 年間では殆ど変化がなかったことから『石灰安定処理土は安定した土木材料である。』と結論づけている。一方で、11 年～27 年後の 16 年間で、変形係数が $1,772\text{MN/m}^2$ から $1,416\text{MN/m}^2$ に約 20%減少し、処理土内の CaO 含有率は約 14.4%から約 9.1%へと約 5.3%も低下した実験結果を報告している。

b) 海水に浸漬した固化処理土の軟化現象⁵⁾とそのメカニズムに関する実験

感潮河川域の堤防において約 20 年前に、浚渫土や現地発生土に生石灰 30~40kg/m³ を添加混合して構築された基礎部の石灰処理土層で、軟質化・泥濘化や漏水が確認されている。問題の発生箇所は河口に近い程多く、海水による影響が推察された。海水環境下における固化処理土に関する既往研究のほとんどが、海水=塩水 (NaCl 溶液) として実験研究されている。

そこで、海水環境下にある固化処理土の特性変化を調べるために、市販の海水粉末を純水で溶解して作製する人工海水 (NaCl 溶液ではなく) を用いた浸漬-軟化実験が行われた。その結果、海水に浸漬した固化処理土は相当早い速度で軟化し、軟化深度は海水濃度ならびに浸漬時間が大きい程深くなること、軟化した部分の Ca 濃度は大きく減少し、他方で Mg 濃度の増加がみられること、その範囲はほぼ一致していること等が明らかになった。

さらに、浸漬溶液を人工海水、NaCl 溶液、MgCl₂ 溶液に替え、破碎した石灰固化処理土からの Ca の溶出試験を行った結果、固化処理土からの Ca の溶出には、Mg が大きく影響していることなどが明らかになった。

(3) 温暖化時代の軟弱地盤対策工法について

以上のように、軟弱地盤対策としての⑤~⑦や⑩の工法は、施工と品質管理上の信頼性も高く極めて有力な工法ではあることは明らかであるが、必ずしも万能ではなく、地盤環境条件や特に長期 (100 年以上) の耐久性についてはなお検証される必要がある。一方、一般的には耐久性が低いと考えられている木材が、地下水や海水の影響を受ける地下水位以下の地盤中では寧ろ有利な場合があること示しており、材料としての温暖化防止への貢献 (CO₂ の排出・ストック) を加味すれば、地下水位以下で使用する木材基礎が温暖化時代の軟弱地盤対策工法として、非常に有望であることは明らかである。

参考文献

- 1)国土交通省・九州整備局福岡国道事務所：有明海沿岸道路軟弱地盤対策技術基準（案），2003.7.
- 2)地盤工学会：セメント及びセメント系固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム，2 章 施工時の物性調査・管理試験方法について(WG 1 報告)，p79，2005.
- 3)Kamon. M, Ying. G, Katsumi. T: EFFECT OF ACID RAIN ON LIME AND CEMENT STABILIZED SOILS, SOILS AND FOUNDATIONS, VoL.36, No.4, pp.91-99, 1996.
- 4)北詰昌樹, 高橋英樹: 現地石灰安定処理土の長期特性調査, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.144-156, 2008.
- 5)原弘行, 林重徳, 末次大輔, 水城正博: 海水環境下における石灰処理土の性状変化に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.21-30, 2010.1.

7.6 丸太打設による軟弱地盤対策の炭素貯蔵効果（沼田淳紀）¹⁾²⁾

丸太を軟弱地盤対策として用いた場合の効果、および、工事による二酸化炭素排出と丸太による炭素貯蔵の収支についての検討を行うために、人工の軟弱地盤を作製しそこに実物大の丸太を打設する実験を行った。ここでは、この結果の内工事による二酸化炭素収支について述べる。

(1) 実験概要

図-7.6.1に、実験ヤードの概要を示す。実験は、深さ4m、底面が縦5m横20mのトレンチを掘り、そこに人工の軟弱地盤を作製し、丸太を打設した。実験ヤードは、4つの区画に分け、丸太を0.5m間隔で打設、丸太を1.0m間隔で打設、無対策、土木シートをそれぞれに施した。丸太は、長さ3m末口0.15mである。軟弱地盤の上には厚さ0.5mのサンドマットと厚さ1.5mの盛土を施工した。丸太の径と丸太間隔は、丸太を摩擦杭と考え既往の設計法による支持力の計算に基づき決めた。丸太間隔0.5mでは安全率が2を超えるが、丸太間隔1.0mでは安全率が1を下回るように設定した。二酸化炭素の収支の算出では、丸太産出にかかわる林業における地拵え植林から盛土施工に至るまでの二酸化炭素排出量を求めた。

(2) 炭素貯蔵効果

図-7.6.2に、0.5m間隔で丸太を打設した場合の丸太による炭素貯蔵量と各作業による二酸化炭素排出量を示す。本工事の場合、工事による二酸化炭素排出量よりも丸太に固定された炭素貯蔵量の方が大きく上回り、工事自体が二酸化炭素削減に寄与することがわかる。全工程では、伐採搬出、丸太打設、サンドマット、盛土の作業工程で二酸化炭素排出量が多く、この内訳では伐採搬出においては通勤における排出が多く、サンドマットと盛土施工においてはダンプによる運搬による排出が多い。伐採搬出においては、通勤距離を短くし作業人工数を減らすこと、サンドマットと盛土施工においては、材料を可能な限り現場近くから調達するいわゆる地産地消とすることが二酸化炭素排出削減に大きく貢献することがわかった。

図-7.6.3に、各地盤対策方法に対する二酸化炭素貯蔵量を示す。無対策は、最も工事による二酸化炭素排出量が少ないと考えられるプレローディング工法に対応するので、ここではそのように記した。各実線は、盛土材の運搬距離を実際の片道2kmに加え、片道25km, 50km, 100kmと想定したときの値である。プレローディング工法では、当然のことながら炭素貯蔵効果を期待できないので、工事による二酸化炭素は排出側となる。一般の工事は、このように常に排出側にある。盛土材料の運搬距離が伸びると二酸化炭素排出量はさらに多くなる。一方、丸太打設を行った場合には、炭素貯蔵効果により、工事を行うことが二酸化炭素削減に寄与していることがわかる。丸太0.5mピッチの打設では、盛土材料を片道100kmの地点から運搬しても炭素貯蔵量

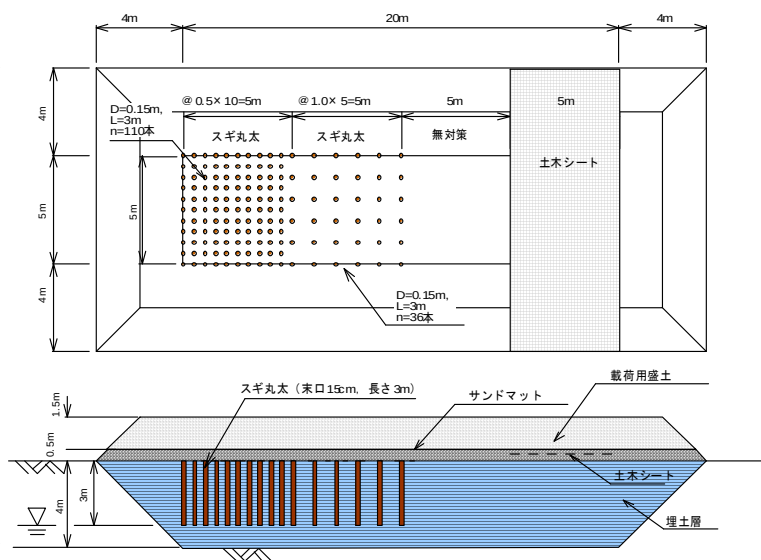


図-7.6.1 現場実験ヤードの概要

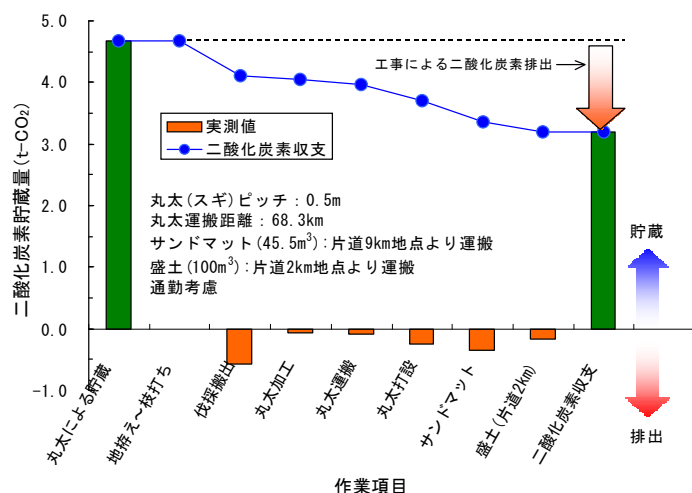


図-7.6.2 丸太による炭素貯蔵量と各作業における二酸化炭素排出量

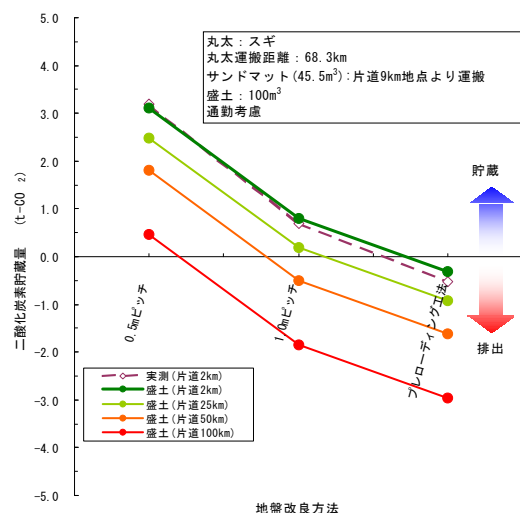


図-7.6.3 各地盤改良方法における二酸化炭素貯蔵量

が工事による二酸化炭素排出量を上回っている。丸太の打設ピッチが 1.0m の場合は、盛土材料運搬距離が片道 25km 程度までは工事による二酸化炭素削減効果があるが、片道 50km となると二酸化炭素排出側となる。以上のように、一般に工事を行うことで二酸化炭素排出となる工事が、このような方法を取ることににより逆に二酸化炭素削減に寄与できる。

以上より、丸太を地中に打設して軟弱地盤対策を行った場合には、丸太による炭素貯蔵量が工事による二酸化炭素排出量を上回り、工事自体が環境対策となり得ることを示した。その効果を得るためには二酸化炭素排出の多くを占める運搬距離を減らす地産地消とするとよいことがわかった。

参考文献

- 1) 沼田淳紀, 本山寛, 直井義政, 久保光, 吉田雅穂, 野村崇: 丸太打設地盤改良実験の工事概要, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp.355-356, 2009.9.
- 2) 沼田淳紀, 外崎真理雄, 濱田政則, 久保光, 吉田雅穂, 野村崇, 本山寛: 丸太打設地盤改良による地球温暖化対策の可能性, 第 8 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.399-404, 2009.7.

8. 木材の道路関連への利用

木材の道路関連への利用への検討として、道路関連構造物を中心に

- 1) 具体的な木材利用の現状調査
- 2) 将来的な木材利用ポテンシャルの推定と温暖化対策への貢献検討
- 3) 木材をより有効に活用する観点から木材カスケード利用の現状調査および可能性の提案

を主な課題として、関連する情報の収集および情報の相互提供、現地調査、木材利用に係わる課題抽出と対策の検討、木材利用拡大に向けた技術提案および提案に対する意見交換、などの活動を実施している。これら活動の成果として、ここでは下記4件を報告する。

- 1) 木製車両用防護柵の開発概要と普及への課題
- 2) 樹木による法面緑化工の二酸化炭素固定効果
- 3) 木材の保存処理方法における木材保存剤と安全性
- 4) エコバリューウッドの土木における木材カスケード利用の可能性

8.1 木製車両用防護柵の開発概要と普及への課題（張 日紅）

8.1.1 はじめに

車両用防護柵は、道路の路側や歩車道境界などに設置し、進行方向を誤った車両が路外などへ逸脱するのを防止し、逸脱に伴う当事者の人的被害、車両の物的損害、逸脱した車両により生じる第三者への人的被害、物的損害の発生を防止しようとするものである。特に乗員の傷害軽減や衝突車両を正常な進行方向に復元させることは防護柵の重要な役割である。防護柵に用いる材料が金属や鉄筋コンクリートに制限された(仕様規定)が、平成 10 年に防護柵の設置に関する基準が性能規定に変更され、実車衝突試験により性能が確認されれば、防護柵への木材の応用が可能となった。国産材の有効利用や景観配慮などを目的として、民間や産学官による木製車両用防護柵(以下：木製防護柵と略記)の開発を積極的に取り組み、実車衝突試験により数種類の国産材を使用した防護柵を開発した。

木製防護柵の開発において、比較的の高い引張強度と伸びを有する金属材料に比べて、木材は伸びが少ないうえ、せん断破壊しやすいので、防護柵への適用に際して金属と異なったアプローチが必要になってくる。木製防護柵の開発にあたって、大型車の衝突に耐える強度要求と乗用車衝突時の加速度を抑えることによる乗員保護という矛盾を解決するため、民間会社が新しい設置基準に定めた大型貨物車と乗用車による実車衝突実験を数十回繰り返した。その結果、平成 14 年に国内で初めての設置基準の要求を満たしたスギ材を使用する木製防護柵の開発に成功した。

また、木製車両用防護柵は、従来の防護柵に使用されてきた鋼材、アルミニウム合金や鉄筋コンクリート材料と異なり、天然の有機物である木材を使用しているため、木材の腐朽特性の経年変化と防護柵としての機能維持との関連を明らかにする必要がある。そのため、設置後約 10 年間を経過した木製車両用防護柵から横梁を取り外し、木材横梁の腐朽状況の調査を行ったうえ、実車衝突試験による性能評価を実施した。

8.1.2 開発概要

丸太円柱加工材は昔から柵などに使われてきたが、防護柵の基準に合致する本格的な木製防護柵は、1980 年代末頃からアメリカ国内で開発した横梁に角材製材を用いたもので、景観に配慮する地域などで設置されている。日本国内では、1994 年から民間企業によって国産スギ材を用いた木製防護柵の開発が着手された。

防護柵は車両が衝突したときに突破されない衝撃度の大きさ、および設置区間などに応じて種別が設定されているが、木製防護柵は一般道路に使用する B、C 種として開発されている。表-8.1.1 に B、C 種車両用防護柵の性能確認衝突試験の内容と性能要求を示す。新しい「防護柵の設置基準・同解説」では、防護柵が持つべき衝突車両の誘導性や乗員の安全性に関する規定が充実された。特に車両の受ける加速度評価手法が、衝突全体の平均加速度評価から瞬間(10ms 移動平均)加速度評価へと変更され、より安全で厳格な評価が行われることとなった。

木製防護柵開発の初期は、参考になる資料が少ないうえ、強度要求と乗員保護とのバランスをどのよ

表-8.1.1 衝突試験の内容と要求

衝突条件	A (大型貨物車)		B (乗用車)
種別	C	B	B, C 共通
車両重量 (m)	25 t	25 t	1 t
衝突速度 (V)	26 km/h	30 km/h	60 km/h
衝突角度 (θ)	15°		20°
衝撃度*1 (Is)	45kJ	60kJ	
車両の加速度			<90 m/s ² *2
進入行程	1.1m 以下*3		
離脱速度	衝突速度の 6 割以上		
離脱角度	衝突角度の 6 割以下		
部材の飛散	部材が大きく飛散しないこと		

*1 衝撃度の計算: $I_s = m / 2 \cdot (V / 3.6 \cdot \sin \theta)^2$

*2 土中設置, 10ms 移動平均 *3 土中設置

うに解決するのが不明であった。そこで、和光コンクリート工業(株)は、自社で長さ 350m、幅 25m の衝突実験用コースを作り、防護柵の設置基準の規定を満足するまで繰り返して試設計および予備実車衝突試験を実施した。平成 14 年に国内で初めて(財)土木研究センターが行った公的性能確認試験に合格するまで、このコースで数十回の大型貨物車・乗用車による予備実車衝突試験を実施した。写真-8.1.1 に質量 1 トンの乗用車と 20 トンの大型貨物車による予備実車衝突実験と公的確認試験の衝突瞬間の状況を示す。



写真-8.1.1 実車衝突試験実施状況(上：予備試験，下：公的試験)

木製防護柵に適用する円柱加工体の寸法は、橋梁用鋼製高欄の設計資料や実車衝突試験結果などから選定している。大型貨物車実車衝突試験で計測したスギ円柱加工体横梁に発生するひずみの測定結果より推算した衝突時の最大応力とスギ円柱加工体の静的曲げ試験結果から、支柱スパン 2m の種別 C 木製防護柵の横梁に、直径 180mm のスギ円柱加工体を使用することとした。なお、ここでいう静的曲げ試験は、衝突時の防護柵横梁に作用する荷重の実状を考慮し、スパン 1.8m での中央集中荷重載荷方式とした。種別 C の木製防護柵に用いる直径 180mm 円柱加工体の最大曲げ荷重値は、この試験方法で確認する場合 40kN 以上が必要と規定されている。また、衝突試験などに用いた横梁の縦振動ヤング係数の測定結果などから、木製防護柵に用いる円柱加工体の機械等級区分は E50 とした。

木製防護柵は、防護柵の塑性変形などにより車両の衝突エネルギーを吸収するたわみ性防護柵として開発されている。木材の変形特性から車両衝突時に木製横梁のたわみによる衝突エネルギー吸収は、鋼製防護柵の横梁ほど期待できないため、横梁と支柱との接合部に衝突エネルギー吸収機能を有する継ぎ手構造が木製防護柵の開発上で重要なポイントである。防護柵全体の強度があまり高過ぎると大型貨物車の衝突に耐えられる反面、乗用車の衝突時には大きな加速度を発生する可能性が高くなる。

この問題を解決するには、上述の衝突エネルギー吸収可能な継ぎ手構造は重要な役割を果たしている。

また、横梁の地面からの高さや、上下横梁の張り出し量が加速度などの試験結果に大きな影響を与えることがわかった。特に横梁の地面からの高さによって、試験結果が大きく変わっていく。上段横梁の高さがあまり低すぎると大型貨物車の衝突試験では、車輪が防護柵を乗り越えてしまう恐れがある。一方下段横梁の高さは、衝突車両の加速度に大きな影響を与えている。図-8.1.1 に下段横梁の中心高さが 410mm と 300mm での乗用車衝突試験時で計測した車両の 10ms 移動平均加速度を示している。高さが 410mm の場合、衝突時の車両進行方向（X 方向）の最大加速度は、車輪が支柱に接触したため基準の 90m/s^2 を超えていった。横梁の高さや上下横梁の張り出し量を適切に組み合わせて衝突時に車輪と支柱との直接接触を避けることで、ある程度の加速度の低減を図ることができる。

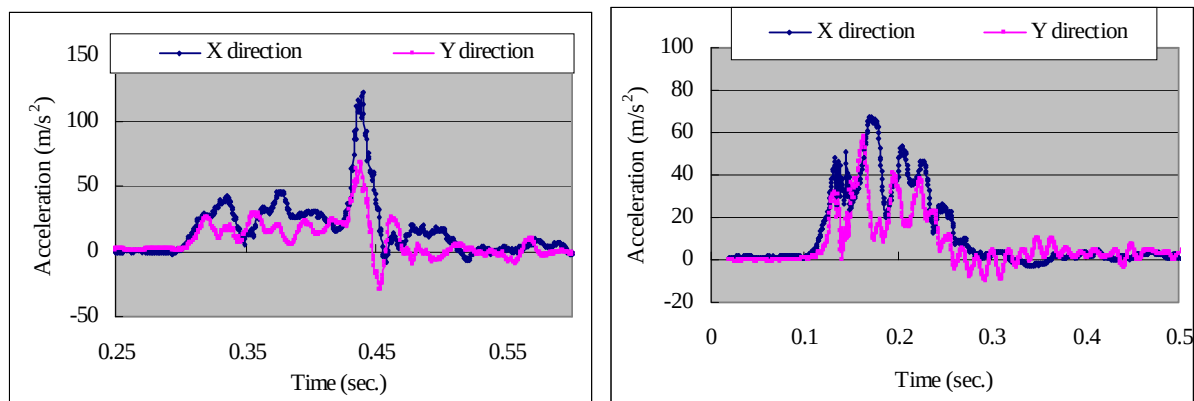


図-8.1.1 10ms 移動平均加速度の計測結果 (右：下段横梁高さ 410mm, 左：下段横梁高さ 300mm)

国内では、平成 14 年以後に民間企業、(社)日本木材加工技術協会の開発事業、長野県の「信州型木製ガードレール開発事業」などにより数タイプの木製防護柵が開発された。これに伴って、木製防護柵の設置総延長は、平成 19 年度末に 120km を越えたと推計している。写真-8.1.2 に宮崎県および長野県で設置した現場を示す。

8.1.3 経年木製防護柵の性能確認試験

木製防護柵の維持管理において、木材の腐朽特性の経年変化と防護柵としての機能維持との関連を明らかにする必要がある。そのため、設置後約十年間を経過した木製防護柵から横梁を取外し、横梁の腐朽状況の調査を行ったうえ、実車衝突試験による性能評価を実施した。本試験は、木材の腐朽による強度低下が懸念されるため、大型貨物車による衝突試験のみを行った。

本試験は、平成 7 年に宮崎県ひなもり台県民ふれあいの森に設置した木製防護柵の 19 ヶ所から、延長 24 スパンの一区間内の直径 180mm スギ材横梁全数 48 本およびその区間の前後区間の各 3 本計 54 本を対象に性能確認試験を実施した。スギ材横梁は、直径 180mm、長さ 1970mm の円柱加工体で、加圧注入保存処理には DAAC を用いた。これらの横梁の腐朽状



写真-8.1.2 木製防護柵設置現場
(上：宮崎県, 下：長野県)

況を把握するため、横梁の被害度を調査した。その後、54本の横梁を防護柵から取外し、ピロティンによる貫入深さおよび横梁の縦振動ヤング係数の測定を実施した。54本うちの34本は、静的曲げ試験に用い、残りの20本は実車衝突試験用試験体として再度試験場に設置し、大型貨物車による実車衝突性能確認試験を行った。

実車衝突試験において、被害度1又は2と評価された横梁を衝突試験場に新たに設置した支柱に取付けた。試験では、車両用防護柵C種の規定衝撃度相当以上となるように衝突条件を設定した。大型貨物車の走行は、無人運転で、別の車によるロープ牽引方式で行われた。

表-8.1.2に大型貨物車の実車衝突試験の実施結果を示す。衝突車両の衝撃度54.6 kJは、車両用防護柵C種の衝撃度規定値45.0 kJを上回った。衝突瞬間の車両の挙動から衝突車両の安全誘導が確認され、木製防護柵の構成部材は、横梁の割れが数本をあったものの、飛散しなかった。設置後十年を経過し、被害度が1又は2と評価された横梁は、車両用防護柵としての強度性能を有していることが確認された。

表-8.1.2 衝突実験実施結果

項目	条件	実施結果	備考
車両総重量(t)	25	20.1	実測
衝突速度(km/h)	26	31.6	計測
衝突角度	15°	15.4°	軌跡計測
最大進入行程(m)	<1.1	0	軌跡計測
車両の挙動	安全に誘導	安全に誘導	目視確認
離脱速度(km/h)	>31.6×60%	27.5	画像解析
離脱角度	<15.4×60%	0°	軌跡確認

8.1.4 普及への課題

木製防護柵は、国産材の利用促進や景観に優しく、通行者に親しみを与えるなどの面から設置実績を増えているものの、同じ時期から開発をスタートしたEUの状況と大きく異なっている。EUでの年間設置延長は300kmを達し、フランスでの総設置総延長は2000kmを超えている。日本とEUとの普及状況に差を生じた原因は、政策的な配慮を別として、経済性や日本の気候条件での屋外木材使用時の耐久性問題などが挙げられる。

これまでの木製防護柵は、参考となる資料が少ないうえ、考慮すべき影響要因として防護柵自体のほかに地盤、車両などの条件が複雑であるため、十分な安全性を見込んで研究開発を実施した傾向にある。木製防護柵の価格は、従来の鋼製防護柵（ガードパイプ）の2～5倍であり、財政事情が厳しい昨今では、この価格差が木製防護柵の普及を妨げる主な原因となっている。木製防護柵の大半は、支柱間スパンが2mとなっており、支柱間隔を広げて木製防護柵の経済性を高めることが可能と思われる。その際、横梁の強度確保には、より強度の高い木製部材の利用、或いは鋼製部材との複合によって十分な強度と変形特性を持つ複合横梁の開発が必要である。複合横梁の開発において、単なる鋼製部材との組み合わせでは、木材の強度特性が有効に生かせないため、優れた接合方法によって高いエネルギー吸収能力を有するハイブリッド化構造が望まれる。

屋外で使用する木製防護柵の耐久性調査において、適切な処理を施した木製防護柵は、設置後10年以上経過しても干割れ程度の劣化しか見受けられず、十分な強度を保持していることが確認できた。しかし、処理工場、使用薬剤および乾燥手段などによって、木製防護柵の耐久性経年変化に大きな差を生じていることも事実である。これらの原因を分析し、木製防護柵の特徴を配慮した耐久処理法の改善と、新しい保存技術の開発が木製防護柵の普及促進に不可欠である。

参考文献

- 1)神谷文夫：木製防護柵開発の動向，材保存，Vol.2，No.29，pp.53-57，2003
- 2)(社)日本木材加工技術協会：木製道路施設普及促進のための技術開発事業成果報告書，2009

8.2 樹木による法面緑化工の二酸化炭素固定効果（池田 穰）

8.2.1 はじめに

神奈川県相模川水系の宮ヶ瀬ダムの骨材製造工事で生じた原石山法面は、急傾斜の長大岩盤法面である。この法面に周辺の景観や環境と調和した緑化を行うため、現地自然植生に近い中高木等を植栽する工法で緑化した。施工は、1994年4月から1995年3月にかけて行われた。写真-8.2.1に見られるように施工後10年以上の期間、樹木は順調に生育しているように見られる。急斜面の長大岩盤法面という樹木にとって厳しい条件での成長状況を確認するため、これまで施工6年後の2001年に樹木の生存率、成長率等に関して標本調査を行った¹⁾²⁾。それから更に6年後の2007年に再度調査を行い、2001年に調査した一部樹木の成長率を調べ、成長状況を確認した。また樹木の炭素量の概算から、法面緑化による二酸化炭素の固定速度を評価した。

8.2.2 法面緑化の方法、現場概要および調査方法

(1) 法面緑化の方法

法面緑化に用いたハザマ式法面緑化工法とは、硬岩質法面や急傾斜地等において木本植物等の育成と継続的な緑化を図る工法である。鉄筋により樹脂ネットを垂直に固定し、客土を投入することにより柵状の苗木直植え工（ポット工）を生育基盤として確保する。斜面緑地の緑化工法「ハザマ式法面緑化工法」として平成8年に建設技術評価（第95210号）を受けている³⁾。図-8.2.1に植栽用柵を示す。

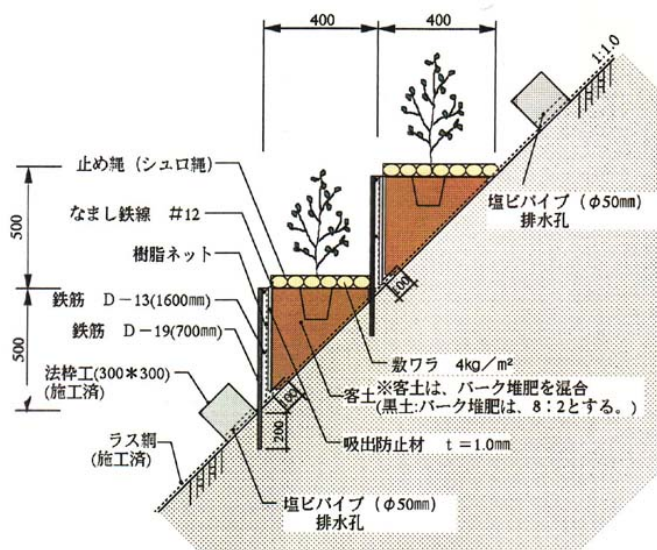


図-8.2.1 植栽用柵

当該法面は、標高295m～400mの勾配1:0.8の法面下部および標高400mの平坦部をはさみ、標高400m～490mの勾配1:1の法面上部に分かれる（図-8.2.2）。法面下部は高度15m毎に幅4mの7個の小段、法面上部は高度7.5m毎に幅2mの12個の小段をそれぞれ持つ。法面、小段に植栽した樹木は、周辺環境の樹木構成にも配慮し、落葉樹、常緑樹等総計7万本である（表-8.2.1）。法面全体は、横方向の小段と縦方向の排水路により、ブロックに区分けでき、全体の5%にあたる3500本ほどの樹

木が含まれるように、任意の4つのブロック（A, B, C, D）を選択し2001年3月に生存率、成長率等に関して標本調査を行った。それから6年後の2007年12月に4つのブロック内の任意の樹木について樹高、根元周囲長を測定し、導入時の規格高および2001年の調査時の値と比較した。写真-8.2.1に施工時および調査時の法面の状況を示す。

表-8.2.1 植栽樹木の種類と導入数

分類	樹木名	導入数（本）	各分類内の比率（％）	全体に対する比率（％）
落葉樹	コナラ	6,870	30.0	32.9
	クリ	6,180	27.0	
	ヤマボウシ	1,371	6.0	
	イヌシデ	4,574	20.0	
	イタヤカエデ	688	3.0	
	エゴノキ	3,203	14.0	
	小計	22,886	100.0	
常緑樹	アラカシ	13,731	33.7	58.5
	シラカシ	12,351	30.3	
	タブノキ	3,203	7.9	
	ウラジロガシ	3,922	9.6	
	アカガシ	7,554	18.5	
	小計	40,761	100.0	
低木	タニウツギ	369	10.0	5.3
	ウツギ	369	10.0	
	ツルグミ	369	10.0	
	トベラ	1,293	35.0	
	サツキツツジ	1,293	35.0	
	小計	3,693	100.0	
紅葉樹・花木	ナナカマド	1,120	48.7	3.3
	イロハモミジ	561	24.4	
	ヤマザクラ	280	12.2	
	ミツデカエデ	340	14.8	
	小計	2,301	100.0	
	計	69,641		100.0

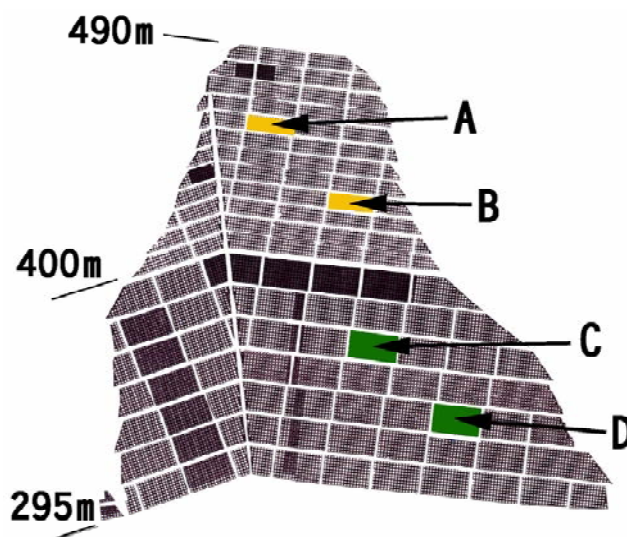


図-8.2.2 調査したブロック（A, B, C, D）の位置



施工直後



2001年3月調査時



2007年12月調査時

写真-8.2.1 施工時および調査時の法面の状況

8.2.3 結果と考察

(1) 樹木の成長

表-8.2.2 に4つのブロックにおける施工時1995年の想定導入数, 2001年の調査樹木数および2007年の調査樹木数を示す。枯死や移入により樹木の種類や数は変動する。2001年の調査においては, 各ブロック内の全樹木について調査を行なったが, 2007年の調査では各ブロックで2001年調査時の状況から同一と考えられる樹木について, 法面・小段計255本の樹木を選択し樹高と根元周囲長を測定した。

樹高の変化の一例として, 図-8.2.3 に法面の常緑樹ウラジロガシの導入時の規格高と2001年およ

び2007年各調査時の樹高, 図-8.2.4に小段の常緑樹シラカシの導入時の規格高と2001年および2007年各調査時の樹高をそれぞれ示す。法面A, B, Cの順で樹高は増加し法面Dで減少するという傾向は2001年と2007年調査時において変わらなかった。小段についても同様な傾向であった。

また法面・小段それぞれ樹木別にみた2001年から2007年にかけての成長率を図-8.2.5および図-8.2.6に示す。比較的調査した樹木数の多い法面Bにおいては, 2001年調査時と同様に落葉樹の方が常緑樹に比較して成長率が高い傾向にあった。法面Dは他と比較して成長率が小さい傾向も同様に見られた。常緑樹アカガシの法面Cでの調査樹木数は, 2本しかなかったものの2本とも突出して成長率が高かった。2001年調査では, 法面より小段の成長率が高かったものの, 2007年の調査では, 小段について落葉樹と常緑樹に大きな差は見られなかった。移入種のアカマツの成長率400%は, 法面・小段を通して最も高い値であった。

表-8.2.2 法面・小段各ブロックの樹木数

法面	1995年の想定導入数(本)					2001年の調査樹木数(本)					2007年の調査樹木数(本)				
	A	B	C	D	計	A	B	C	D	計	A	B	C	D	計
落葉樹(ヤマボウシ、クリ、イヌシデ、エゴノキ)	90	90	210	210	600	28	38	113	93	272	3	10	0	3	16
常緑樹(アラカシ、アカガシ、シラカシ、ウラジロガシ、タブノキ)	300	300	600	600	1800	210	228	490	511	1439	36	53	21	25	135
移入種(ヌルデ、ウツキ)	-	-	-	-	-	33	18	7	2	60	1	1	0	0	2
計	390	390	810	810	2400	271	284	610	606	1771	40	64	21	28	153

小段	1995年の想定導入数(本)					2001年の調査樹木数(本)					2007年の調査樹木数(本)				
	A	B	C	D	計	A	B	C	D	計	A	B	C	D	計
落葉樹(コナラ、クリ、ヤマボウシ、イヌシデ、イタヤカエデ、エゴノキ)	15	15	54	45	129	10	10	34	26	80	7	4	12	10	33
常緑樹(アラカシ、シラカシ、タブノキ、ウラジロガシ、アカガシ)	30	30	88	88	236	28	32	77	83	220	21	3	21	23	68
移入種(ウツキ、アカマツ、ナワシログミ、ヤマボウシ、イタヤカエデ、クロマツ)	-	-	-	-	0	0	3	5	4	12	-	1	-	-	1
計	45	45	142	133	365	38	45	116	113	312	28	8	33	33	102

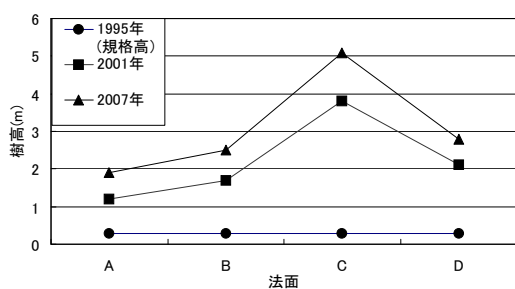


図-8.2.3 法面の常緑樹ウラジロガシの樹高変化

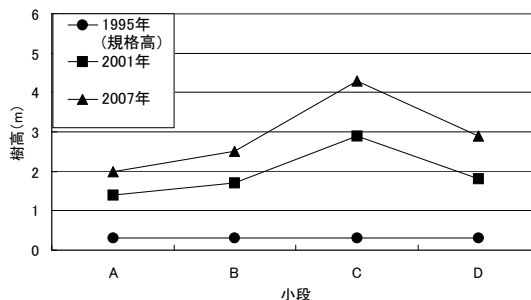


図-8.2.4 小段の常緑樹シラカシの樹高変化

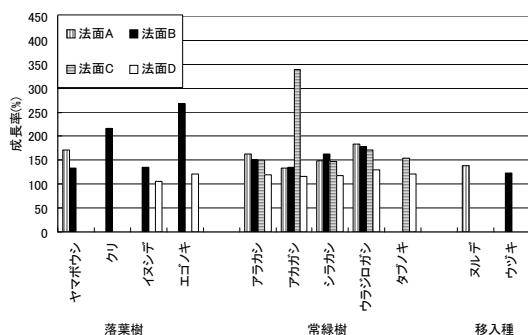


図-8.2.5 法面の樹木別の成長率

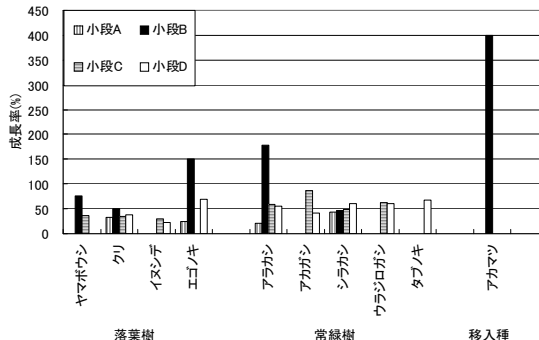


図-8.2.6 小段の樹木別の成長率

樹木の生育には水分が最も重要であり A ブロックの樹木の成長が比較的低いのは、A ブロックの位置する標高が最も高くかつ勾配も大きいいため、上部からの降雨由来の浸透水が少ないためと考えられる。また D ブロックの樹木の成長が勾配の等しい C ブロックより劣るのは、C ブロックより D ブロックの方がそれより上部のブロックの数が少なく、上部からの降雨由来の浸透水が少ないことによると考えられる。

落葉樹の方が常緑樹に比較して成長率が高い傾向がみられたが、2007 年の調査では、小段について落葉樹と常緑樹に大きな差は見られなかった。小段は法面に比較して保水性が高い。そのため小段の樹木は法面のそれに比べて 1995 年～2001 年の初期の成長は早かった。しかしある程度成長後の 2001 年～2007 年は、法面・小段の樹木の成長に大きな差は見られなくなったと考えられる。

(2) 樹木の二酸化炭素固定量

樹木の二酸化炭素固定量は、樹木の炭素量から評価される。そのためには幹だけでなく、枝葉や根も含めたバイオマスを推定する必要がある。また幹材積から幹の重量を求めるためには、容積密度（材比重）が必要となる。ここでは、独立行政法人森林総合研究所で使われている計算方法⁴⁾に従って、木ごとの容積密度、幹と枝葉・根の乾燥重量の関係からもとめられる拡大係数、および地下部・地上部比から式（8.2.1）に従い樹木の炭素量をもとめた。

$$\text{樹木の炭素量} = \text{幹材積} \times \text{容積密度} \times \text{拡大係数} \times (1 + \text{地下部・地上部比}) \times \text{炭素含有率} (0.5) \quad (8.2.1)$$

上式の幹材積は、各樹木の胸高直径と樹高から材積式⁵⁾を用いてもとめられる。ここでは 2001 年と 2007 年の調査対象とした樹木について、測定した根元周囲長から根元直径をもとめ、それを胸高直径とみなした。さらに、別に測定した樹高とあわせて材積式から幹材積を評価した。また容積密度、拡大係数、地下部・地上部比および炭素含有率は、独立行政法人森林総合研究所の資料⁴⁾を各樹木についてあてはめた。

図-8.2.7、図-8.2.8 に法面・小段それぞれの樹木 1 本あたりの平均炭素量を示す。成長率と同様落葉樹の方が全体として常緑樹に比較して炭素量が多い。また小段の方が法面に比較して樹木 1 本あたりの平均炭素量が大きい。このことは 1995 年～2001 年の初期の成長率において、法面よりも小段が高いことを反映している。

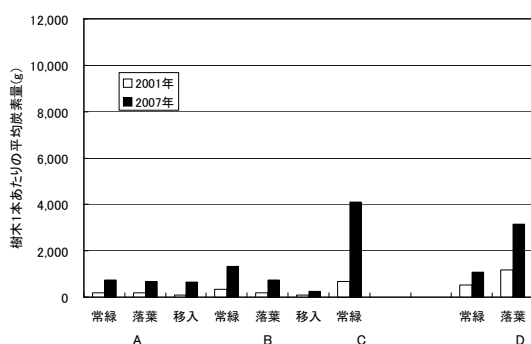


図-8.2.7 法面の樹木 1 本あたりの平均炭素量

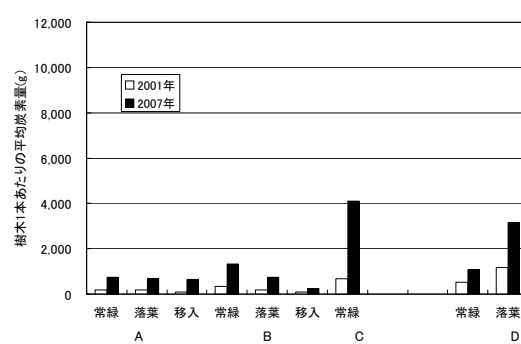


図-8.2.8 小段の樹木 1 本あたりの平均炭素量

表-8.2.3 に常緑樹，落葉樹の平均炭素量と法面全体での二酸化炭素固定量を示す。二酸化炭素固定量は，2001 年の調査結果²⁾から各樹木の当初導入本数に対する生存率を 50%と仮定してもとめた。これより樹木 1 本当たりの二酸化炭素固定速度を計算した。その結果，常緑樹では 1995 年～2001 年の 6 年間で 0.29kg CO₂/本/年，1995 年から 2007 年までの 12 年間では，0.58kg CO₂/本/年となった。一方，落葉樹 1 本あたりの二酸化炭素固定速度は 1995 年～2001 年の 6 年間で，0.48kg CO₂/本/年，1995 年から 2007 年までの 12 年間では，0.82kg CO₂/本/年であった。成長率の相違を反映して二酸化炭素固定速度は，常緑樹より落葉樹の方が大きかった。

さらに法面の全面積 48,000 m²から植栽面積あたりの二酸化炭素固定速度をもとめると 1995 年～2001 年の 6 年間では 0.23kg CO₂/m²/年，1995 年から 2007 年までの 12 年間では，0.43kg CO₂/m²/年となった。

表-8.2.3 常緑樹，落葉樹の平均炭素含有量と法面全体での二酸化炭素固定量

樹木名		本数	サンプル数	樹木1本の平均炭素含有量(g)		法面全体でのCO ₂ 固定量(t)*	
				2001年	2007年	2001年	2007年
常緑樹	アラカシ	13731	42	553.7	2012.1	14.0	50.7
	アカガシ	7554	32	385.9	2534.7	5.3	35.1
	シラカシ	12351	85	496.0	1586.5	11.2	36.0
	ウラジロガシ	3922	36	377.8	2053.0	2.7	14.8
	タブノキ	3203	8	324.6	844.2	1.9	5.0
	小計	40761	203	-		35.2	141.5
落葉樹	ヤマボウシ	1371	6	810.1	3211.2	2.0	8.1
	コナラ	6870	1	454.3	1792.9	5.7	22.6
	クリ	6180	15	1202.5	3603.4	13.6	40.9
	イヌシデ	4574	16	952.7	3177.6	8.0	26.7
	エゴノキ	3203	11	462.4	1818.4	2.7	10.7
	小計	22198	49	-		32.1	108.9

*当初導入本数からの生存率を 50%とする。

8.2.4 おわりに

これまでの調査により以下のことが示された。

- ・降雨由来の浸透水が，斜面上部より比較的多く供給される斜面下部において，樹木の成長率がよい。具体的には，法面・小段それぞれにおいて A，B，C ブロックの順で樹高は増加し，D ブロックで減少した。
- ・落葉樹よりも常緑樹の方が，成長率が高く樹木 1 本当たりの二酸化炭素固定速度も落葉樹の方が大きかった。
- ・1995 年から 2007 年までの 12 年間の法面全体での単位面積あたりの二酸化炭素固定速度は，0.43kg CO₂/m²/年と推定された。

2007 年の調査では，樹木と岩盤法面との安定性を評価するために樹木根系調査を併行して行なった⁶⁾。根系調査の結果は，樹木根系が地山である岩盤にも一部侵入しており，樹木の根が地山に定着しつつあることを示唆している。

法面の一部では，従来の種子吹き付け緑化工法で緑化した部分もある。樹木で緑化した部分と比べると緑被率も高く（写真-8.2.2），本緑化工法による樹木の良い成長が確認できる。これらの調査結果から樹木による法面緑化工の有効性と温暖化対策としての二酸化炭素の固定効果が確認された。

謝辞：本調査を行うにあたり，国土交通省相模川水系広域ダム管理事務所の方々には大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表す。



写真-8.2.2 従来の種子吹き付け緑化工法による法面（左）と本緑化工法による法面（右）の状況

参考文献

- 1)池田穰，山口修一，谷村大三郎：ポット苗樹木による法面緑化の経時変化，土木学会第 58 回年次学術講演会，VII-206，pp.409-410，2003.
- 2)池田穰，山口修一：樹木ポット苗による緑化法面の経時変化，日本緑化工学会誌，29(4)，pp.472-476，2004.
- 3)建設省：斜面緑地の緑化工法「ハザマ式法面緑化工法」評価書，建設技術評価第 95210 号，1996.
- 4)独立行政法人森林総合研究所：温暖化対応推進拠点 ホームページ，
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/ryoiki/new/22climate/new22-2.html>,2003
- 5)林野庁計画課編：立木幹材積表 東日本編，日本林業調査会，2007.
- 6)今井久，山口修一，池田穰：樹木ポット苗による緑化のり面樹木根系調査，平成 20 年度砂防学会研究発表会，pp.122-123，2008.

8.3 木材の保存処理方法における木材保存剤と安全性（山口秋生）

8.3.1 加圧式保存処理木材

木材の主成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンの高分子化合物である。木材の生物劣化とは、木材腐朽菌、シロアリにより、木材の主成分が分解され、強度などの力学的性質が低下することを示す。生物劣化を防止するための薬剤を、木材保存剤と称し、その対象により、木材防腐剤、木材防かび材、木材防虫剤、木材防蟻剤、木材防火剤に類別^りされている。

木材の保存処理方法は、塗布方法、浸漬方法、加圧処理方法がある。それぞれ、木材の使用される部位、設計耐用年数、木製品の種類により選別されて処理されている。加圧式処理方法は、3処理方法中で、最も保存効果が高い方法である。“木材保存剤の加圧注入処理方法”として、JIS A 9002に規定されている。木材を大きな圧力容器（注薬缶）の中に入れ、最初に減圧することで、木材内部の空気を抜き、次に木材保存剤を10気圧以上の高い圧力をかけながら、木材内部に木材保存剤を注入含浸する。高い圧力で注入含浸するため、耐久性の低い、辺材部分に木材保存剤が十分に浸透し、長期の耐久性が期待できる処理方法（図-8.3.1）である。

土木資材としての木材利用を考えた場合、その主な使用場所は、屋外であり、生物劣化を受けやすい場所である。保存性能は、防腐、防蟻性能が要求され、処理方法も、長期間の定着性、持続効果の期待できる、加圧式処理方法が最適である。本項では、加圧式処理方法と防腐、防蟻性能を持つ木材保存剤を対象とした。

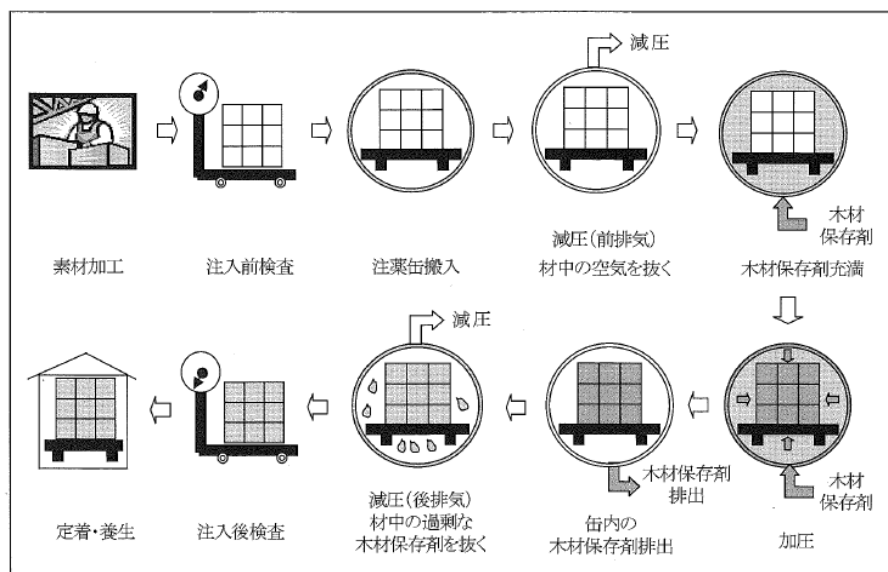


図-8.3.1 木材保存剤の加圧注入処理方法の行程

（“日本木材防腐工業組合：加圧式保存処理木材の手引き”から）

8.3.2 加圧式保存処理木材の耐久性

加圧式保存処理木材の耐久性（防腐・防蟻性能）の評価方法は、木材保存剤の性能が、JIS K 1570に、木材保存剤の種類が、JIS K 1571に規定されている。

試験は3種類で評価する。木材腐朽菌、シロアリを人為的に直接接触させ、保存処理木材の効果を評価する室内試験の防腐防蟻性能試験。腐朽菌が活性化した土壌を入れた層を、屋外より厳しい腐朽環境に調節した恒温恒湿の室内に入れて、試験片を地中に埋設し、経時的に劣化状況を測定して耐用年数を評価する、ファンガスセラー試験。屋外で実際に使用されることを想定し、試験片を地中に半

分埋設し、経時的に劣化状況を観察する屋外試験である。

銅系水溶性防腐剤を加圧注入処理した木材を 11 年間非接地の屋外暴露を行い、力学的耐久性を評価し、曲げ性能が 70-80%の残存性能を示した報告もある²⁾。

8.3.3 加圧式保存処理木材の安全性

(1) 木材保存剤

木材保存剤は、(社)日本木材保存協会が保存性能、安全性を確認し、認定業務を行なっている。認定された、木材保存剤は、いずれも毒物劇物取締法に指定されない普通物である。

(2) 生産時の安全性

加圧式保存処理木材は、木材保存剤の保管、取扱い、環境への配慮、処理木材の養生・保管など、JAS の工場認証規定に基づいて認められた JAS 工場で生産されている。

(3) 使用時の安全性

加圧式処理木材は、河川護岸、水辺デッキで使用される。この場合、水棲生物への影響がないかが重要である。水棲生物への影響を示す指標としての魚毒性がある。独立行政法人農薬検査所の農薬の魚毒性分類では、加圧式保存処理剤は、通常の使用方法で毒性に問題がないとされる A 類に該当している。また、木材に注入された薬剤のほとんどが、木材の組織内に定着あるいは、吸着され、水に溶けない状態になっている。従い、短期間に環境へ流れ出る量は極めて少ない³⁾。

加圧式保存処理剤は、建築基準法で規定されている、規制対象化学物質のクロロピリホス、ホルムアルデヒドは含んでいない。また、厚生労働省の室内濃度指針値が示されている、揮発性有機化合物も含んでいない。

(4) 廃棄時

現在、JAS に規定されている木材保存剤で処理された木材は、その廃棄時には、通常は無処理木材と同様に廃棄物処理法に従い処理できる。保存処理されているのでと、特別に分別する必要はない。

しかし、かつて、クロム・銅・ヒ素化合物系木材防腐材（CCA 保存剤）が JIS に規定され、我が国加圧式保存処理木材の主流の時代があった。1963 年から 1995 年まで保存処理木材の 80%以上が処理されていた⁴⁾。CCA 保存剤は、防腐効力だけでなく、定着性にも優れた保存剤であったが、CCA 処理廃材の廃材処理技術が明確でなかった為、使用についての懸念が示され、現在はほとんど使用されていない。CCA 保存剤の歴史、盛衰の技術的背景から、負の遺産として先送りされてきた CCA 処理材のリサイクル、再資源化の重要性が指摘されている⁵⁾。現在は、ほとんど使用されていないが、かつて生産された CCA 処理材の廃棄物としての排出は、現在も続いている。国土交通省は、CCA 処理木材の保管、運搬、処分方法について、具体的に決めている⁶⁾。しかし、現状を、把握している報告は見当たらない。この中で、CCA 処理木材を処理できるガス化発電装置も開発されたことは、CCA 処理材の受け入れ施設のひとつとして注目される⁷⁾。

8.3.4 加圧式保存処理木材の性能区分と使用

加圧式保存処理木材の性能は、製材の JAS 規格として、その基準（表-8.3.1）が定められている⁸⁾。本規格では、木材の使用状態すなわち環境条件と性能区分を明確にし、性能区分ごとに使用薬剤とそ

の処理基準が規定されている。具体的に、薬剤ごとに辺材部分への薬剤の浸透性を示す浸潤度と有効成分の吸収量が規定⁹⁾されている。

土木資材は、K3, K4, K5 の性能区分が要求される。外気または湿潤環境に曝露されている場合での接地、非接地条件での耐用を期待される性能である。土木資材として、どのような環境下で使用するか、どれくらいの期間の耐用を期待するかで、性能区分を選択して、その性能区分に対応した、薬剤を選択することになる。

土木資材として木材を使用する場合、木柵の横木、木製デッキの床板などの屋外非接地条件、標識などの支柱の屋外接地条件があり、それぞれ使用環境に応じた加圧式保存処理木材を使用することが大事である。

表-8.3.1 JAS 規格における性能区分¹⁰⁾

性能区分	加圧式保存処理木材の使用状態	具体的内容
K 1	屋内の乾燥した条件で腐朽・蟻害の恐れのない場所で、乾燥害虫に対して防虫性能のみを必要とするもの	ヒラタキクイムシを対象
K 2	低音で腐朽や蟻害の恐れのない条件下で高度の耐久性の期待できるもの	比較的寒冷地域での建築部材
K 3	通常の腐朽・蟻害の恐れのある条件下で高度の耐久性の期待できるもの	土台等建築部材用
K 4	通常より激しい腐朽・蟻害の恐れのある条件下で高度の耐久性の期待できるもの	屋外で風雨にさらされる場所
K 5	極度に腐朽・蟻害の恐れのある条件下で高度の耐久性の期待できるもの	電柱、枕木、海中使用等、極めて高い耐久性を要するもの

8.3.5 まとめ

木材がその CO₂ 吸収能力から、地球温暖化防止に貢献する材料であることは、言うまでもない。木材利用を推進することで、森林整備が進む。さらに木材の保存処理をすることで、耐久性が付与され、耐用年数が延長されると、木材中の CO₂ の固定貯蔵期間も延長されることを意味しているので、保存処理木材の使用は、2 重の意味で、地球温暖化防止に役立っている。

土木資材では、使用部位、使用場所、設計上の耐用年数など様々な条件がある。屋外で風雨にさらされ、一定期間の耐用を期待する場合には、加圧式保存処理木材の使用が必要となる。

参考文献

- 1) 日本木材保存協会：木材保存学入門，87，2005
- 2) 小淵義照ほか：長期野外試験をした加圧注入処理木材の残存曲げ強度，第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨，77，2009
- 3) 日本木材防腐工業組合：加圧式保存処理木材の手引き，12，2007
- 4) 日本木材防腐工業組合：平成 20 年度事業報告書，2008
- 5) 岩崎克己：我が国における CCA 木材保存剤の開発とその処理木材市場の盛衰の技術的背景，木材保存 29，pp.192-216，2003
- 6) 国土交通省大臣官房官庁保全部：建築物解体公示共通仕様書・同解説，117，2006
- 7) 山口秋生：バイオマス利用の発電施設，木材工業，64，pp.273-276，2009
- 8) 農水省消費安全局表示規格課：製材及び枠組壁工法構造用製材の日本農林規格について，木材保存，34，pp.218-222，2008
- 9) 全国木材組合連合会：J A S 製材品の生産・利用マニュアル，22，2007
- 10) 日本木材防腐工業組合：加圧式保存処理木材の手引き，19，2007

8.4 エコバリューウツの土木における木材カスケード利用の可能性（郡 悌之）

8.4.1 エコバリューウツとは

エコバリューウツ（配向性チップランバー、積水化学工業株）は住宅解体材や製材所の端材、未利用間伐材などの木材チップを原料とし、住宅用の造作材・構造材レベルまでに再生された木質材料（再生エンジニアードウツ）である。原料木質チップを独自の成形技術で一体化することで、木材のもつ繊維の強さを最大限に発揮し、構造材としての強度、木の加工性を併せ持った再生エンジニアードウツである。



図-8.4.1 エコバリューウツ

8.4.2 エコバリューウツの特徴

独自の成形技術（チップ配向・接着・蒸気プレス）で、以下の特徴を発現させている。

(1) 高い品質安定性

蒸気で木材チップを柔らかくし、圧縮成型することで木材のクセを大きく低減させている。そのため、数種の樹種が混在した住宅解体材でも強度のばらつきが少なく、寸法安定性の優れた材料である。（反り、曲がりなどはスギ製材品の 1/7）

(2) 高強度と硬質性

木材チップの繊維方向をそろえて圧縮成形すること（密度 0.7~0.8）で住宅用構造材としても使える高強度と樫の木の約 2 倍の硬質性を実現。接合強度はベイマツースギ材の 1.5 倍。釘引き抜き抵抗や圧縮硬さはスギ材の約 2 倍となっている。ただし、無垢の木材と比べて耐衝撃性はやや劣るため、圧縮強度が必要とされる基礎部分の下地材等での使用が本来の特徴を有効に生かせる。

(3) 大断面

事業化検証プラントでは最大厚み 155mm×幅 720mm×長さ 4,300mm まで製造可能で、さらに集成加工等により大断面の材料提供が可能である。

(4) 健康・安全・環境

非ホルムアルデヒド接着剤を使用し、シックハウス対策に対応可能。さらに独自開発の天然（タンニン）系接着剤により、石油資源への依存度を減少させている。

8.4.3 使用木質原料とカスケード利用

エコバリューウツは原料として木材ピンチップ（主として長さ 20~150mm, 1~

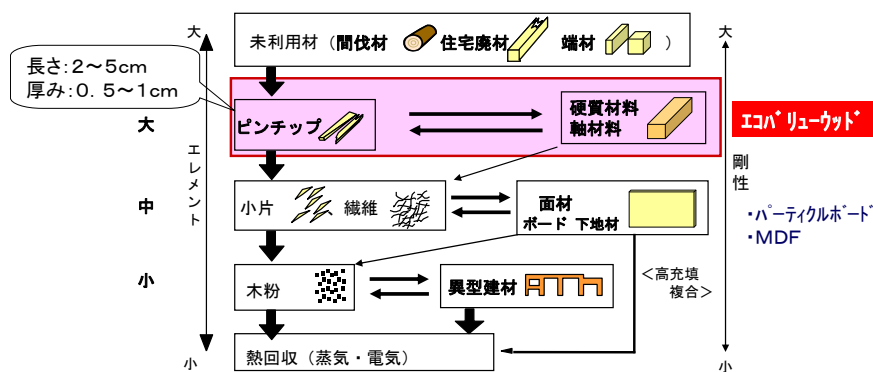


図-8.4.2 木質原料のカスケード利用

10mm) を使用。そのため、これまで材料として使用できなかった廃木材、切り捨て間伐材等の未利用材が利用可能である。既に、大手ハウスメーカーの新築現場で発生する木端材をエコバリューウッドに再生し、自社住宅の2階部下地木に利用する資源循環の試みが住宅分野の木材カスケード利用の例として実証されている。今後は、合板やLVLにも利用できない間伐材(小径木、節入り材、曲がり材)、末木の利用が林業分野から期待されている。さらには本技術の利用により、土木用構造材として長期使用した木材も破砕処理・ピンチップ化とすることで住宅解体材と同様に木質資材としてカスケード利用可能と考えられる。特に、土木分野で大量に使用された木材を再利用する場合、現場加工・廃棄物処理の時間とコストを考えると、発生した廃木材はエコバリューウッド工場にて短時間に再生利用することが経済的に成立し易いと考ええる。

8.4.4 製造プロセス

原料の破砕木材チップは特定形状の木材ピンチップが選別され接着剤が塗布される。接着剤塗布された木材ピンチップは一軸方向に並べられながらマット状に積層される。積層マットは蒸気プレスにより、加熱圧縮成型される。得られた圧縮原板は必要に応じて適当なサイズに製材加工される。

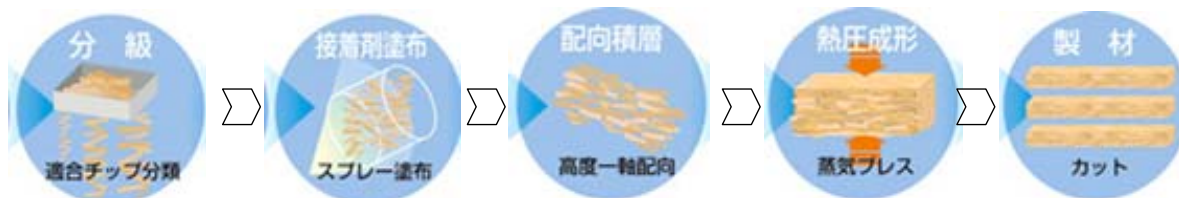


図-8.4.3 製造プロセス

8.4.5 用途

主要な用途はドア用芯材、壁用芯材等の住宅内装用の軸材であるが、家具、机、パーティション等の什器分野にも利用されている。また、産業用の資材、梱包材にも利用可能であり、公園看板や踏み板等の屋外資材としても利用されている。

8.4.6 土木分野への適応例と可能性

土木分野への適応は今後の課題であるが、写真に示すような熊野古道鉄塔巡視路の踏み板として既に3年の実績があり、防腐処理を施していないにもかかわらず、実用性を維持している。また、長期自然分解型のエコバリューウッド製木質受圧板による斜面安定工法が開発されている(ナチュスロープ工法、東亜グラウト工業社)。今後は、エコバリューウッドの特徴である大断面、高比重(0.8)という観点から、施工性やメンテナンス性に優れ、遮音性能が石膏ボード並みとなる木製遮音壁への展開も期待できる。

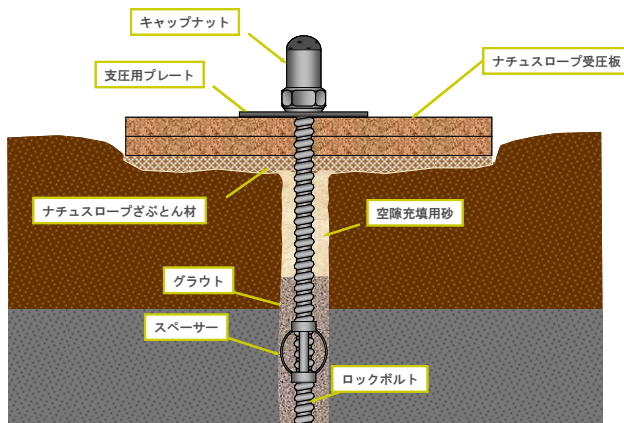


図-8.4.4 木質受圧板

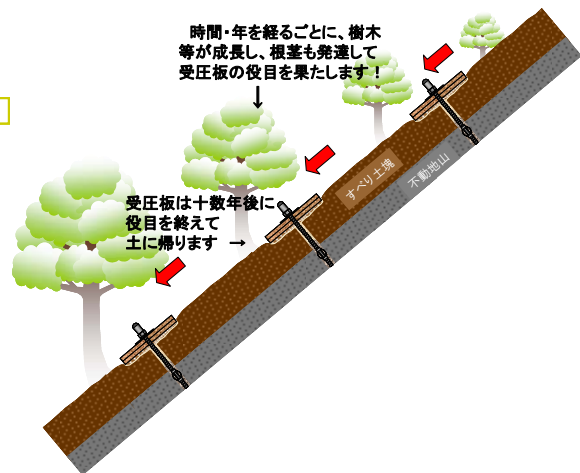


図-8.4.5 ナチュスロープ工法



写真-8.4.1 送電線鉄塔巡視路踏み板（熊野古道）

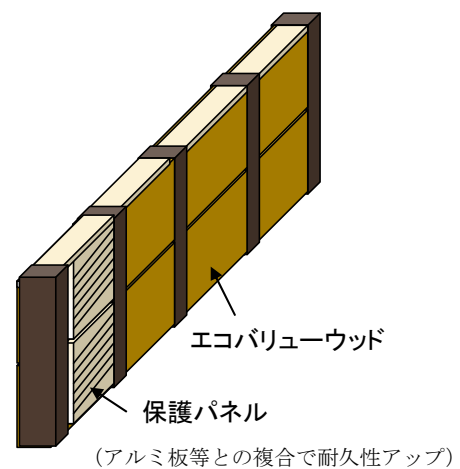


図-8.4.6 エコバリューウッド製遮音壁イメージ

8.4.7 まとめ

エコバリューウッドはこれまで資材として利用できなかった木質資源を住宅分野、産業分野そして土木分野への利用を可能とする技術である。本技術の活用により、従来の木質系資材に加えてさらに、木質原料の利用効率と需要を高める可能性が期待できる。すなわち、国内の未利用木材を炭素資源として長期固定化が可能であり、将来のエネルギー源または木質資源不足対策、炭酸ガス固定としての地球温暖化対策に有効に寄与すると考えられる。

付 録

(1) 木材工学特別委員会委員会名簿

役割およびWG	氏名	所属機関	所属学会		
			日本 森林 学会	日本 木材 学会	土木 学会
(横)委員長，運，WG1，WG6	今村 祐嗣	京都大学		○	
(横)副委員長，運，WG6	白石 則彦	東京大学	○		
(横)副委員長，(特)委員長，運，WG4，WG6	濱田 政則	早稲田大学			○
(特)副委員長，WG2，WG6	本田 秀行	金沢工業大学			○
運代表幹事，WG1，WG4主査，WG5，WG6	沼田 淳紀	飛島建設(株)		○	○
運幹事，WG1幹事，WG6	久保山 裕史	(独)森林総合研究所	○		
運幹事，WG4副主査，WG6副主査	桃原 郁夫	(独)森林総合研究所		○	
運事務，WG1，WG5幹事，WG6	今井 久	(株)間組			○
運，WG1主査，WG6	外崎 真理雄	(独)森林総合研究所		○	
運，(特)WG1主査，WG6	橋本 征二	(独)国立環境研究所			○
運，WG1，WG2主査，WG6	平沢 秀之	函館工業高等専門学校			○
運，WG1，WG3主査，WG6副主査	石川 芳治	東京農工大学	○		○
運，WG1，WG6	今泉 裕治	林野庁			
運，WG1，WG6	熊本 宏次	林野庁			
運，WG2幹事・分科会主査，WG6	渡辺 浩	福岡大学		○	○
運，WG2，WG3，WG6主査	佐々木 貴信	秋田県立大学		○	○
運，WG3幹事，WG6	高奥 信也	京都府			
運，WG4，WG5，WG6	仁多見 俊夫	東京大学	○		
運，WG5主査，WG6	田代 晃一	日本国土開発(株)			○
運，WG6	勢田 昌功	国土交通省			
WG1	荒巻 俊也	東洋大学			○
WG1	池田 穰	㈱間組			○
WG1	井上 雅文	東京大学		○	
WG1	加用 千裕	(独)国立環境研究所			○

役割およびWG	氏名	所属機関	所属学会		
			日本 森林 学会	日本 木材 学会	土 木 学 会
WG1	花木 啓祐	東京大学			○
WG1	宮本 善和	中央開発株式会社			○
WG1	村野 昭人	東洋大学			○
WG2幹事長	三上 卓	群馬工業高等専門学校			○
WG2幹事・分科会主査	荒木 昇吾	服部エンジニア(株)			○
WG2幹事・分科会主査	原田 浩司	ウッドストック			
WG2	今井 富士夫	宮崎大学			
WG2	植野 芳彦	富山検査(株)			
WG2	薄木 征三	秋田大学			○
WG2	軽部 正彦	(独)森林総合研究所		○	○
WG2	北條 哲男	ものづくり大学	○		○
WG2	後藤 文彦	秋田大学			○
WG2	佐々木 康寿	名古屋大学			
WG2	高橋 晃一	(株)アーバン設計			
WG2	中村 昇	秋田県立大学		○	○
WG2	原田 真樹	(独)森林総合研究所		○	○
WG2	宮武 敦	(独)森林総合研究所		○	○
WG2, WG4	森 満範	北海道立林産試験場		○	
WG3	秋田 寛己	日本工営株式会社	○		
WG3	岡田 康彦	(独)森林総合研究所	○		
WG3	落合 博貴	林野庁	○		
WG3	北原 曜	信州大学	○		
WG3	栗原 敦司	(株)ナチュレックス			
WG3	清水 賀之	東海大学			
WG3	田次 慶久	(株)コシイプレザー ビング			○
WG3	戸田 堅一郎	長野県林業総合センター	○	○	
WG3	内藤 洋司	(株)森林テクニクス	○		○
WG3	野田 龍	(株)森林土木施設研 究所	○		

役割およびWG	氏名	所属機関	所属学会		
			日本 森林 学会	日本 木材 学会	土木 学会
WG3	原田 紹臣	三井共同建設コンサル タント株式会社			○
WG3	吉野 安里	長野県林業総合センター		○	
WG3	若森 敦裕	中央開発株式会社			
WG4幹事	本山 寛	飛島建設(株)			○
WG4	中村 裕昭	(株)地域環境研究所			○
WG4	山田 昌郎	(独)港湾空港技術研 究所	○	○	○
WG4	吉田 雅穂	福井工業高等専門学 校			○
WG4	久保 光	福井県雪対策・建設技 術研究所			○
WG4, WG5	山口 秋生	越井木材工業(株)		○	
WG4	辻井 修	(株)間組			○
WG4	五十嵐 誠	昭和マテリアル(株)			○
WG4	松島 健一	(独)農業・食品産業技 術総合研究機構			○
WG4	三浦 哲彦	(株)軟弱地盤研究所			○
WG4	梅田 修史	(独)森林総合研究所	○		
WG4	林 重徳	佐賀大学			○
WG4	末次 大輔	佐賀大学			○
WG4	内山 雅紀	ジャパンホームシー ルド(株)			
WG4	辻 浩平	ジャパンホームシー ルド(株)			
WG4	水谷 羊介	兼松日産農林(株)		○	○
WG4	手塚 大介	兼松日産農林(株)		○	○
WG4	正田 大輔	(独)農業・食品産業技 術総合研究機構			○
WG5副主査	石田 修	大成建設(株)			○
WG5副主査	加藤 英雄	(独)森林総合研究所		○	
WG5	福田 淳	東急建設(株)			○

役割およびWG	氏名	所属機関	所属学会		
			日本 森林 学会	日本 木材 学会	土木 学会
WG5	林原 茂	(株)創建			○
WG5	平間 昭信	飛島建設(株)			○
WG5	柴田 直明	長野県林業総合セン ター		○	
WG5	張 日紅	和光コンクリート株 式会社			○
WG5	新藤 健太	(独)森林総合研究所		○	
WG5	郡 悌之	積水化学工業			

(横)：土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会

(特)：土木学会木材工学特別委員会

運：運営委員会

WG1：資源ビジョン

WG2：木橋研究

WG3：治山治水利用

WG4：地中海洋利用

WG5：道路関連利用

WG6：木材利用論文集編集

(2) 活動の記録

a) 運営委員会

① 第 1 回（通算第 10 回）

開催日時：2009 年 4 月 15 日 15：00 ～17：00

参加者：白石，仁多見，久保山，外崎，桃原，濱田，佐々木，渡辺，沼田，熊本，今井

議題：

1. 委員長挨拶
2. 前回議事録確認
3. 木材学会シンポジウム（桃原，今井）
4. JAPIC への対応について（沼田）
5. 各WG（WG1～WG5）からの活動報告（各主査）
土木学会地球環境シンポジウム（WG1）
6. 外部資金応募結果と今後の対応
7. その他（メーリングリスト，URL，委嘱状，その他）

② 第 1a 回（通算第 10a 回）

開催日時：2009 年 5 月 23 日（土） 12：30 ～13：30

参加者：濱田，本田，沼田，石川，平沢，佐々木，渡辺，村野，橋本，宮本，加用，
軽部，原田，田次，中村，吉田，久保，辻井，本山，石田，今井，張，池田

議題：

土木学会「木材工学特別委員会」発足について

1. 自己紹介
2. 土木学会「木材工学特別委員会」における役員の選任
3. 運営委員会について
4. 委員の選任と公募について
5. 各小委員会（WG）の分野について
6. 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会との位置付けと進め方
7. 研究助成制度への応募について
8. 2009 年度成果目標
9. 内規について
10. シンポジウム、論文集、論文集小委員会について
- 11 その他

③ 第 2 回（通算第 11 回）

開催日時：2009 年 6 月 17 日（水） 15：15 ～17：45

参加者：今村，白石，仁多見，外崎，桃原，濱田，石川，佐々木，渡辺，平沢，沼田，今泉，熊本，高奥，
今井

議題：

1. 委員長挨拶

2. 各 WG からの報告
3. 土木学会特別委員会報告
4. 第 4 回木質科学シンポジウム報告
5. 外部資金
6. その他
7. 講演：太田猛彦先生
タイトル「低炭素社会における木材利用の意味を考える」
8. 閉会挨拶

④第 3 回（通算第 12 回）

開催日時：2009 年 8 月 25 日（水） 15：00～18：30

参加者：今村,外崎,桃原,石川,渡辺,平沢,田代,沼田,熊本,高奥,今井

議題：

1. 委員長挨拶
2. 前回議事録の確認
3. 各 WG 活動報告
4. 第 4 回木質科学シンポジウム報告
5. 研究助成実施概要説明
6. シンポジウム開催に向けて
7. その他

⑤第 4 回（通算第 13 回）

開催日時：2009 年 10 月 21 日（水） 15：00～18：10

参加者：今村,仁多見,久保山,外崎,濱田,石川,佐々木,渡辺,沼田,熊本,高奥,今井

議題：

1. 委員長挨拶
2. 話題提供：「韓国の土木における木材利用状況」
3. 各 WG の活動報告および新規委員の承認
4. シンポジウム後援の承認
ウッド・ニューディール
木材利用シンポジウム in 佐賀
5. 成果報告シンポジウムの開催について
6. 論文集の発行およびシンポジウムの開催について
7. 橋脚基礎の木杭調査について
8. その他
土木学会サーバーの利用方法, 委員会ホームページについてなど

⑤第 5 回（通算第 14 回）

開催日時：2009 年 12 月 16 日（水） 15：30～18：50

参加者：今村,外崎,桃原,石川,佐々木,渡辺,平沢,沼田,熊本,高奥,今井

議題：

1. 委員長挨拶
2. 前回議事録確認
3. WG 活動報告および委員入退会
4. 第 1 回木材利用シンポジウム（2010 年 3 月 8 日）
 - （1）AM 拡大運営委員会（沼田）
 - （2）PM シンポジウム（佐々木）
 - （3）報告書作成（沼田）
5. 第 9 回木材利用研究発表会（木橋技術に関するシンポジウム）
6. J S C E 大会
 - （1）研究討論会（平沢）
 - （2）共通セッション（沼田）
7. その他
次回予定，サーバーについてなど

b)WG1：資源利用ビジョン小委員会

①第 1 回 WG

開催日時：2009 年 4 月 13 日 15:00～17:30

参加者：今村、熊本、村野、今井、池田、沼田、外崎、久保山、オブザーバー：松本、梅木

議題：

1. 話題提供
 - ・松本義勝氏（（株）越井木材）「英国に於けるグリーンガイド」
2. 国交省プロジェクトについて
3. 木材学会シンポジウムについて
4. 委員について
5. 今後の活動内容に関する討議

②第 2 回 WG

開催日時：2009 年 7 月 3 日 15：00～17：30

参加者：石川芳治、今井久、池田穰、熊本宏次、村野昭人、橋本征二、沼田淳紀、宮本義和、井上雅文、外崎真理雄、久保山裕史

議題：

1. 話題提供
 - ・久保山委員「森林資源と木材供給の長期推計結果について」
2. 国交省プロジェクトの進め方について
3. 今後の活動内容に関する討議

③第 3 回 WG

開催日時：2009 年 9 月 18 日（金）15:00～17:00

参加者：加用、石川、池田、今井、沼田、宮本、平沢、熊本、外崎、久保山

議題：

1. 資料，議事録確認
2. 話題提供
 - ・加用委員「木質資源利用がそのフローおよびストックの変化を通じてCO₂排出削減に及ぼす影響」
3. 木橋の橋梁への利用ポテンシャル推定について
4. 国交省対応について
5. 今後の活動内容に関する討議

④第4回 WG

開催日時：2009年1月8日 15:00～17:30

参加者：今井、沼田、村野、熊本、加用、外崎、久保山

議題：

1. 外崎委員「統計データを用いた土木における木材利用量の推計結果について」
2. 加用委員「地盤液状化対策への木材利用による二酸化炭素排出削減の評価」
3. 報告書について
4. その他

⑤第5回 WG

開催日時：2009年3月23日

議題：各WGの木材利用ポテンシャルとのすりあわせについて

c)WG2：木橋研究小委員会

①第1回

開催日時：2009年7月27日（月） 13:00～14:30

参加者：平沢，三上，荒木，原田(浩)，渡辺，佐々木(貴)，今井，植野，薄木，軽部，後藤，佐々木(康)，高橋，中村，原田(真)，北條，本田，宮武，森

議題：

1. 自己紹介
2. これまでの委員会活動と成果
3. 委員会の新しい体制について
4. 今後の活動計画
5. 分科会への担当割り当て案
6. その他

②第2回

開催日時：2009年11月7日（水） 14:00～17:00

参加者：平沢，三上，荒木，原田，渡辺，佐々木(貴)，薄木，軽部，高橋，中村，原田(真)，北條，森

議題：

1. 木材の橋梁への利用ポテンシャル推定について
2. 設計研究分科会の活動について
3. 新技術分科会の活動について
4. 事例研究分科会の活動について
5. その他

③第3回

開催日時：2009年12月3日（木） 14:00～17:00

参加者：平沢，三上，原田(浩)，佐々木(貴)，植野，薄木，軽部，佐々木(康)，高橋，中村，宮武，森

議題：

1. 設計研究分科会の活動について
2. 木橋のアンケート調査結果について
3. 木橋の現地調査結果
4. 新技術分科会のテーマと役割分担について
5. 函館高専での実証実験について
6. 秋田県立大での実証実験について
7. 木材利用シンポジウム（木材利用研究発表会）について
8. その他

d)WG3：治山治水利用小委員会

①準備会

開催日時：2009年5月23日（土）10:30～12:00

参加者：石川、高奥、落合、田次、内藤、戸田、岡田、吉野、野田

議題：

1. 自己紹介
2. 横断的研究会、土木学会特別委員会について
3. 競争的資金に関する申請について
4. 全国的な木製治山治水施設の腐朽度実態調査について
5. 新型木製治山えん堤について

②第1回

開催日時：2009年9月17日（木）14:00～17:00

参加者：石川、高奥、落合、田次、内藤、戸田、岡田、吉野、野田、秋田、栗原、
原田

議題：

1. 自己紹介
2. 活動方針、活動計画について
3. 全国的な木製治山治水施設の腐朽度実態調査について
4. 新型木製治山えん堤について

③現地検討会（京都府京丹後市）

開催日時：2009年11月10日（火）13:00～14:00

参加者：石川、高奥、栗原、田次

内容：新型木製治山えん堤（校倉式木製えん堤）の建設現場見学

④第2回

開催日時：2009年12月21日（火）15:00～17:30

参加者：石川、高奥、田次、内藤、戸田、吉野、野田、佐々木、栗原、原田、若森

議題：

1. WG3の活動概要について
2. 今年度の報告書目次について
3. 今後のシンポジウム、発表会の予定について
4. 話題提供（各委員の活動報告）
5. その他

e)WG4：地中海洋利用小委員会

①第1回

開催日時：2009年1月21日（水） 16:00～17:30

参加者：濱田，中村，山田，吉田，桃原，久保，神谷，辻井，正田，沼田，本山

議題：

1. 自己紹介（名簿確認）
2. 主査・幹事の選任
3. WG名（地中海洋利用研究WG）
4. シンポジウムの話題提供について
5. 今後の委員の推薦について
6. メーリングリストについて（温木研のMLを移行？）
7. WGの運営と方向性について
8. 3年間の概略計画
9. その他

②第2回

開催日時：2009年3月24日（火） 16:00～17:30

参加者：濱田，中村，山田，桃原，神谷，辻井，沼田，本山

議題：

1. 運営委員会および他WGの活動報告(沼田)
2. 今までの活動経緯について(沼田)
3. 今後の活動計画について
4. 「地下」と「地中」の違いについて(中村)
5. WG4名称について(沼田)
6. その他（助成制度の応募など）

③第3回

開催日時：2009年5月22日（金） 14:00～15:30

参加者：中村，山田，森，久保，山口，辻井，五十嵐，仁多見，松島，沼田，正田，
本山

議題：

1. 新規委員会の紹介
2. 運営委員会および他 WG の活動報告(沼田)
3. 話題提供／「木材による地中カーボンストック技術 ～丸太による地盤改良工法～」，
「地盤改良工事での木材需要予測」(本山)
4. 各テーマの実施項目について
5. 研究助成「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」申請の結果報告
6. その他：拡大運営委員会（2009/6/17），話題提供発表順

④第4回

開催日時：2009年7月14日（火） 16:00～17:30

参加者：中村，山田，吉田，桃原，森，久保，山口，五十嵐，松島，三浦，沼田，正田，本山

議題：

1. 話題提供／「粘土地盤における木杭の周面支持力特性と利用促進の取り組み」(三浦先生)
2. WG4 調査研究実施項目および工程
3. その他

⑤第5回

開催日時：2009年9月17日（火） 16:00～17:30

参加者：中村，山田，桃原，森，久保，山口，辻井，五十嵐，松島，三浦，梅田，林，
末次，辻，沼田，正田，本山

議題：

1. 話題提供／「木材の腐朽」(桃原副査)
2. 運営委員会および各 WG の活動報告
3. 年度報告書へ向けて
4. 各実施テーマの実施状況
 - ・腐朽土槽実験の途中経過報告
5. その他
 - ・WG1 からの依頼事項
 - ・その他

⑥第6回

開催日時：2009年11月9日（月） 16:00～17:30

参加者：中村，山田，森，山口，五十嵐，林，末次，柳田，手塚，水谷，沼田，正田
議題：

- 1．話題提供／「佐賀低平地の特徴と固化処理土の耐久性について」（林先生）
- 2．運営委員会および各 WG の活動報告
- 3．木材地中利用ポテンシャル推定について
- 4．年度報告書へ向けて
- 5．その他
 - ・WG1 からの依頼事項
 - ・その他

⑦第 7 回

開催日時：2010 年 1 月 28 日（水） 16:00～17:30

参加者：中村，山田，吉田，桃原，森，辻井，五十嵐，三浦，林，手塚，水谷，深谷，
正田，沼田，本山

議題：

- 1．福井県木材利用研究会（仮称）の立ち上げ
- 2．土木における木材利用ポテンシャルの集計結果
- 3．2009 年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会報告書の内容確認
- 4．第 1 回木材利用シンポジウムでの WG4 報告発表内容
- 5．新潟県燕市の木杭現地調査について
- 6．その他

f)WG5：道路関連利用小委員会

①第 1 回 WG

開催日時：2009 年 5 月 22 日 16:00～18:00

参加者：田代，石田，今井，福田，沼田

議題：

- 1．自己紹介
- 2．これまでの経緯と組織の仕組みについて
- 3．活動スケジュールについて
- 4．WG の役割分担について
- 5．今後の活動内容に関する討議

②第 2 回 WG

開催日時：2009 年 5 月 22 日 16:00～18:00

参加者：石田，加藤，今井，福田，林原，沼田，山口，柴田，張

議題：WG

- 1．諸連絡
- 2．委員について
- 3．木質科学シンポジウム発表内容の紹介

4. 話題提供
5. 討議
保存処理木材について
6. 次回の議事内容

③第3回 WG

開催日時：2009年7月24日 16:00～18:00

参加者：石田，加藤，今井，福田，沼田，山口，柴田，張

議題：

1. 資料，議事録確認
2. 話題提供
 - ・木材の処理方法における防腐剤と安全性について
3. 土木事業における木材のカスケード的利用技術の開発について

④第4回 WG

開催日時：2009年9月25日 16:00～18:00

参加者：石田，加藤，今井，福田，沼田，平間，柴田，新藤，郡

議題：

1. 資料及び前第3回議事録確認
2. 話題提供
 - ・エコバリューウッドの土木分野への利用可能性について
3. 「木材のカスケード利用事例」、「木材のカスケード利用提案」、「木材利用可能エネルギー」について
4. その他
5. 木材利用状況現地調査

⑤第5回 WG

開催日時：2009年11月26-27日

参加者：石田，加藤，今井，柴田，新藤，郡

議題：長野県内木材利用現地調査

g)WG6：木材利用論文集編集小委員会

①第1回 WG

開催日時：2009年10月21日（水） 16:00～17:00

参加者：今村,仁多見,久保山,外崎,濱田,石川,佐々木,渡辺,沼田,熊本,高奥,今井

議題：1. 成果報告シンポジウムの開催およびスケジュールについて

2. 論文集の発行および研究発表会の開催について

②第2回 WG

開催日時：2009年12月16日（水） 16:00～17:00

参加者：今村,外崎,桃原,石川,佐々木,渡辺,平沢,沼田,熊本,高奥,今井

- 議題： 1． 第 1 回木材利用シンポジウム（2010 年 3 月 8 日）のプログラムについて
2． 第 9 回木材利用研究発表会（木橋技術に関するシンポジウム）の開催と論文の募集について

(3) シンポジウムなどの後援・協賛・参加など

(a)共催：第4回木質科学シンポジウム

主催：日本木材学会

「土木分野における木材利用の復興」

2009年5月23日（土）東京大学農学部1号館8番教室にて

参加者：159名

(b)参加：第8回木橋技術に関するシンポジウム

主催：(社)土木学会鋼構造委員会木橋技術に関するシンポジウム運営小委員会

特別講演：土木における木材の利用拡大に関する取り組み

2009年8月20-21日（木-金）土木学会講堂にて

参加者：約60名

(c)参加：第17回地球環境シンポジウム

主催：(社)土木学会地球環境委員会

企画セッション：地球温暖化対策における土木木材利用の課題と展望

2009年9月11日（金）沖縄大学305教室にて

参加者：約50名

(d)協賛：国土緑化推進機構助成シンポジウム

主催：(財)林業経済研究所シンポジウム実行委員会

「ウッド・ニューディールで木材需要を拡大するには何が必要か」

2009年11月7日（土）東京大学農学部1号館8番教室にて

参加者：90名

(e)参加：Philippine Institute of Civil Engineers 35th National Convention

主催：Philippine Institute of Civil Engineers

「PICE:Leading the way to green buildings and infrastructure, International round table discussion」

2009年11月27日（金）Philippine Baguio市 Cap-John Hay Trade and Cultural Centerにて

参加者：10名

(f)後援：木材利用シンポジウム in 佐賀

主催：木材利用シンポジウム in 佐賀実行委員会

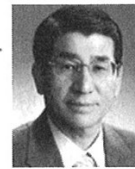
2009年12月4日（金）佐賀市アバンセ大ホールにて

参加者：約220名

(4) 関連記事:

a) 濱田政則: 土木学会誌, Vol. 94, p. 39, 2009. 10.

論説委員会の頁

土木工事での木材活用による
温暖化防止への貢献濱田 政則
HAMADA Masanori論説委員会委員
早稲田大学理工学術院 教授

2008年4月の土木学会理事会において「木材工学特別委員会」の設置が承認された。土木分野における木材の利用技術に関しては、鋼構造委員会の「木橋の高度化技術研究小委員会」と建設技術研究委員会の「間伐材の利活用技術研究小委員会」がこれまで調査・研究活動を行ってきたが、この2つの小委員会の活動を統合・発展させ、さらに、木材の土木工事での利用を拡大するために必要な技術開発と研究を行うことが特別委員会の目標である。

この特別委員会設置の前の2007年、土木学会は日本森林学会、日本木材学会と共同で「土木における木材利用拡大に関する横断的研究会(委員長・今村祐嗣 京都大学教授)」を組織し、土木でより広く木材を活用して行くための技術課題や、高品質な木材を土木工事に安定的かつ大量供給するための木材の伐採と流通システムなどについて分野横断的な検討を行ってきた。

温暖化など地球規模の気候変動に起因していると考えられる風水害が過去20年間で急激に増大しており、この傾向は21世紀中も続くと考えられている。温暖化の最大の要因である大気中のCO₂をいかに削減するかが国際的課題となっており、わが国

にも相応の貢献が求められている。大気中のCO₂を削減するためには、CO₂を吸収する森林の健全化と育成が不可欠であるが、外国産木材との価格競争や森林事業の人員不足などもあって、わが国の森林は衰退の一途をたどっていると言われている。土木分野において大量の木材が使用されることになれば、木材の流通サイクルが復活し、森林の健全化にも寄与し、ひいては大気中のCO₂削減にも大きく貢献することになるのではないかと考えている。

木材は古来、土木工事の主要な材料であった。しかし、近年において、土木工事の主要部材での木材の利用は急激に減少し、2006年度の統計によれば土木における木材使用量は103万m³程度であったと推計されている。この値は、建築部門における年間の木材使用量2,518万m³と比べ少なく、土木工事にはほとんど利用されていないことが理解できる。このような木材利用の減少には、1955年に閣議決定された「木材資源利用合理化方策」の影響が考えられる。この閣議決定は、当時枯渇の危機にあった森林を保護する目的で木材の大量利用を抑制するために出されたものである。木杭はかつては建築および橋梁の基礎として使用されていたが、橋梁に関しては1976年、建築基礎に関しては1988年の設計法の改定から設計指針の中に設計法が記述されなくなった。現在では大学等の土木工学、建築学の教育においても木材に関する講義はほとんど行われておらず、木材に関する知識をもった若手技術者は皆無に近い状態である。

木材工学特別委員会や3学会の横断的研究会の目標は土木分野での木材利用を増やし、環境にも貢献しようとするものであるが、土木に対する環境のイメージは現状では芳しくない。環境に対する産業イメージのアンケート調査^①によれば、環境に好イメージの企業はという問いに対し、自動車・電力・ガス・石油産業を上位に挙げた人が多い。逆に環境に悪いイメージの企業はという問いに対しては

建設業が上位を占めた。電気自動車の開発や風力発電などの宣伝が効いているのかと考えられるが、CO₂を大量に排出している産業が高評価を得ているというのは何とも納得のいかないアンケート結果である。しかし、建設産業が環境に悪影響を与えているというのが一般社会の受け取り方で、これは是非とも改善して行く必要がある。その意味でも特別委員会や3学協会共同研究会の活動を進展させていく必要がある。

特別委員会や横断的研究会は、従来からの治山・治水工や道路施設での木材の活用の拡大とその他の技術指針等の整備を目指しているが、地中の木材利用にも重点を置いている。軟弱地盤上の軽量構造物の基礎や、道路・鉄道盛土や河川堤防の軟弱地盤対策と液状化対策に木材の活用を目指すものである。大量の木杭を地中に打設すれば、木材が大気中より吸収したCO₂を地中に封じ込めることになる。木材を最終的にチップにしてエネルギー利用する場合は木材中のCO₂が大気中に還元され、CO₂そのものの総量は一定で循環していることになるが、木材の地中利用の場合は絶対量を長期にわたって低減することが可能であり、地球温暖化防止に大きく貢献する可能性を有していると考えられる。

しかしながら、木材の土木事業での利用に関しては、腐朽の問題や寸法・材質・規格のばらつきなど解決を要する課題が山積されている。これらの課題を解決することが特別委員会や横断的研究会の役割である。

(1) 外崎真理雄 他「土木における木材の利用―課題と展望―」, 第114回生存圏シボジウム「地球温暖化防止の観点からの土木における木材の利用」, 京都大学生存圏研究所, 30頁, 2008年11月

(2) 日経エコロジー「第9回消費者が抱く企業評価イメージ環境ブランド調査2008」, 115〜121頁, 2008年8月

b) 柴田寛：木材工業，Vol. 64，pp. 476-479，2009. 10.

第4回木質科学シンポジウムに参加して

柴田 寛*

1. はじめに

平成 21 年 5 月 23 日（土）東京大学において日本木材学会が主催し，日本森林学会，(社)土木学会が共催，(社)日本木材加工技術協会，(社)日本木材保存協会が後援した第 4 回木質科学シンポジウムが開催された。シンポジウムでは，土木分野における木材利用の復興へ向けて産学官の実務者が，川上から川下までのそれぞれの立場で発表を行った。当日は全国から民間 48 名，大学・高専 47 名，公設試験場 35 名，団体 10 名，その他 9 名の合計 159 名という大勢の参加があり，この分野の関心の高さが感じられた。

本稿ではこのシンポジウムの概要を紹介する。

2. 企画講演

2.1 土木における木材利用と学際的研究の勧め 濱田政則（早稲田大学理工学術院）

現在，土木事業では木材があまり使われなくなっている。この原因は，木材を構造物に使用する場合の使用基準が無いためである。これは過去に，森林資源保護や建材の高耐久化等により，木材から金属やコンクリートを使うよう促進した政策の影響が現在に及んでいる為である。しかし近年，ダムや橋等の土木事業で木材を使う動きがあり，木材の耐朽性向上技術の開発によって，この動きを促進できると考えられる。

土木分野の関係者が木材を使うことをどう考えているのか，平成 20 年に行われた「土木事業への間伐材活用シンポジウム」の事前アンケートで意見を募ったところ，木を使うべきではないという意見が出た。理由は，木を使うと環境破壊になる，木は腐る，材質や寸法の安定性が悪い，設計法が不明確ということであった。同じアンケー



写真 1 濱田政則氏

トで森林・木材分野関係者は，山側の活性化に繋がる，二酸化炭素を貯蔵できる，環境負荷が少ない，という意見であった。シンポジウム後には土木関係者からも，木を使うことは温暖化防止に貢献する，国産材を使うべきだという意見が出るようになった。このことから，木材を土木事業で使う意義を土木分野に発信していくことの重要性が示された。

土木学会は現在，木材利用の促進を図るために，横断的研究会や，学会内部に設立した委員会等を通して，治山治水・木橋等での木材利用を検討している。また，事業での木材使用ガイドライン作成や政策提案も行い，土木事業全体で年間 300 万 m^3 の新たな木材利用の創出を目標にしている。

2.2 土木工事における木材の地中利用の可能性と課題

沼田淳紀（飛鳥建設株式会社 技術研究所）

土木事業で木材利用を進めることは温暖化防止に貢献する一手段である。今回，基礎杭や地盤改良材等の地中利用の可能性と課題を述べる。

基礎杭について，1964 年新潟地震の事例を紹介する。この地震の被害は液状化現象による被害

* 鳥取県農林水産部農林総合研究所林業試験場



写真2 基調講演風景（写真提供 本山 寛氏）

が多く、新潟駅もこの時被災した。新潟駅の基礎は、駅本屋が末口22.5cm長さ7.5m（杭間隔約1.5m）の松丸太基礎。支社が直径30cm長さ6mのPCコンクリート杭であった。この本屋と支社の地震被害を比較すると、支社は不同沈下を10cm程度生じ、本屋は健全であった。この被害の差は、本屋は木杭が多く打設され、支社は支持杭の数は設計上十分であったが、本屋に較べると本数が少なかったためと考えられる。

次に地盤中の木材腐朽について、河川構造物や構造物基礎の事例を紹介する。調査した木材の位置を、地下水位の変動域以浅、変動域、変動域以深に分けると、変動域以深ではどの樹種も腐朽は見られず、他の条件は腐朽が生じた事例と生じない事例が見られた。

以上の結果から、軟弱地盤対策として杭打設と地盤改良への木材利用の可能性を考える。杭打設は古くから行われており、地盤中の地下水位以深では長期耐久性を示し、今後推進すべきだと考える。地盤改良材としての木材は、打設による杭間の地盤密度増加や地盤内水平土圧の増加を期待する場合には、強度より体積維持が重要なので、杭に要求される性能より低位の木材が良い。

この軟弱地盤対策について、温暖化対策としてのCO₂貯蔵効果の調査を行った。その結果、幅20m×奥行き5m×深さ4mの人工軟弱地盤に、末口0.15m、長さ3mの丸太を0.5mピッチで打設し、盛り土2mを行う条件では盛土を100km運搬しても、植林準備からのCO₂収支で貯蔵の

方が多い結果となった。

今後の課題について示す。

1. 地下水位変動域から地表側の腐朽条件の原因解明と対策
2. 長期健全性が確認された条件は、過去の設計方法に新たな知見を加え、設計図書やマニュアルへ復活させる
3. 地盤改良材等の新規用途の技術開発
4. 土木関係者へ、木材の知識や情報の普及

2.3 木製車両用防護柵の開発概況と普及への課題

張日紅（和光コンクリート工業株式会社）

日本での防護柵の基準に合致する木製車両用防護柵（以下木製防護柵）は、民間企業によって1994年から開発が始められた。現在、木製防護柵は一般道に使用されるB種、C種の開発がされている。防護柵に要求される性能は「防護柵設置基準・同解説」に示されていて、大型貨物車の衝突に耐える強度と、乗用車の衝突時に衝撃で加速度が増加しないようにして乗員を保護するという矛盾する性能が求められている。この点を解決するため、専用の試験コースを作り衝突試験と設計を繰り返し、平成14年に日本で初めて設置基準を満たした木製防護柵の開発に成功した。木製防護柵に使う円柱加工体の寸法や強度は、橋梁用鋼製高欄の設計資料や実車衝突試験結果などから選定した。スパン2mの種別C種木製防護柵の横梁には、直径180mmで静的曲げ試験で40kN以上の最大曲げ荷重値以上が必要と規定し、機械等級区分はE50とした。木材は鋼ほどたわみによるエネルギー吸収は期待できないため、開発に当たっては衝突エネルギー吸収機能を有する継ぎ手構造が重要になっている。また、横梁の地面からの高さや、上下横梁の支柱からの張り出し方が防護柵の性能に大きく関わることがわかった。

普及にむけての課題は、経済性や日本の気象条件下での屋外木材使用時の耐久性の問題があると考えられる。木製防護柵は開発されて間もなく、参考となる資料が少ないために、十分な安全性能を見込んでおり、力学的効率は決して高くない。また樹種が異なると性能評価の資料が少なく、他樹種の性能評価を転用するということが難しい。

平成 19 年に(財)日本木材加工技術協会が実施した「木製道路施設普及促進のための技術開発事業」において木材の衝撃強度や車両衝突時のひずみ分布、スギやカラマツを用いた場合の強度特性が研究され今後の防護柵の開発に役立つものと思われる。

次に木製防護柵は従来のガードパイプに比べて価格が 2～5 倍であり、普及を妨げる主な要因となっている。経済性の向上のため、現在の木製防護柵の支柱間はだいたい 2 m であり、これを伸ばすことが考えられる。このためには、現在の規格より強度の高い木材を使用したり、木材の強度特性を生かせるような鉄鋼部材とのハイブリッド化が必要である。また、野外で使用する木製防護柵はシロアリや腐朽菌による生物劣化や紫外線による退色・カビなどによる外観変化を生じるが、安全性の面から、強度性能の劣化は許容されない。これまでの調査の結果、保存処理区分 K4 で適切な処理を施した木製防護柵は、設置後 10 年以上経過しても干割れ程度の劣化しか見られないことが確認できた。しかし、処理工場や使用薬剤、乾燥手段によって経年劣化の程度に差が生じている。この原因を分析し、耐久処理方法の改善や新規開発を行うことが、木製防護柵の普及促進に不可欠である。

2.4 ここまで来た近代木橋

佐々木貴信(秋田県立大学木材高度加工研究所)

かつては歩道橋や車道橋にかかわらず多くの橋が木で造られていたが、社会情勢の変化により鋼やコンクリートによる橋に架け替えられた。しかし、昭和 60 年代に大規模木構造の建設が盛になると、集成材を用いた近代木橋が登場し、この 20 年で全国に多数の木橋が建設された。近代木橋は集成材を使い、部材の長尺化、大断面化、長支間化が可能となり大型車でさえも走行出来るようになっている。木橋は木材の土木利用の中でもアピール効果が高い施設であり、維持管理も含めニーズに応える技術が整ってきた。

近代木橋の草分け的存在なのが昭和 62 年に完成した秋田県鷹巣町にあるスギ集成材製の坊川林道 2 号橋や長野県軽井沢のカラマツ集成材製の矢ヶ崎大橋で、架設後 20 年を経過しても共用され



写真 3 佐々木貴信氏（写真提供 今井 久氏）

ており、近代木橋の耐久性の高さを裏付けている。

平成 6 年からは旧建設省と林野庁がモデル木橋事業を行い、木橋の設計・施工・管理について実橋で試験が行われた。この成果は平成 15 年に財団法人国土技術研究センターが「木歩道橋設計・施工に関する技術資料」として取りまとめている。

木材利用や林業振興を目的に平成 15 年頃までに各地の民有林道内に大規模な木橋が多数建設された。この時期に建築分野の集成材構造やコンクリートや鋼橋の橋梁技術を応用したハイブリッド化の技術開発が盛んに行われ、近代木橋の技術が急速に発展した。

管理技術も、海外で高耐久性実績のあるボンゴシ橋が日本の気象条件下で短期間でトラブルを起こしたことを契機に、高温多湿のわが国における建設後の維持・管理に関する研究資料が蓄積され、マニュアルとして整備されつつある。

3. ポスター発表

ポスター発表は全 27 の発表があり、交流会も兼ねた中、意見交換が活発に行われた。この中から、いくつかを紹介する。

3.1 海中に設置した保存処理木材の海中抵抗性

森 満範、宮内輝久

スギとブナについて CuAz-1 と AAC を加圧注入した試験体と無処理の試験体を海中に設置し 52 ヶ月の間、所定期間ごとに試験体の外観観察等を行った。

無処理条件は 2 樹種とも 24 ヶ月で崩壊した。

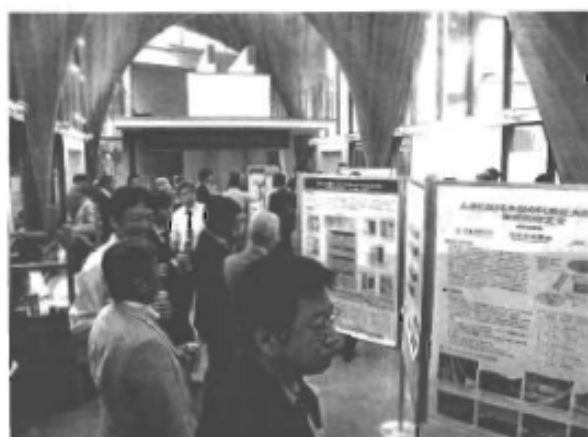


写真4 ポスター発表会場（写真提供 本山 寛氏）

また、スギでCuAz-1を初期吸収量 11.4 kg/m^3 注入したものは無被害だったが、他の条件は被害を受け、7月から10月の海中類が活発に活動する期間に被害が増加した。

3.2 木製落石防護柵の開発

井戸聖富、糸川隆康、原 克巳、別府哲夫、小川内良人、長尾博文、加藤英雄、井道裕史
直径14 cmの背割り加工した和歌山県産スギ円柱11本を結合してパネル化した木製落石防護柵を開発した。これについて、重さ305 kgの鉄球を用いて垂直落下式試験と振り子試験を行い、木製パネルの安全性を検証した。

垂直落下試験の結果、高さ0.55 mから鉄球を落下させると、パネル内の1本の円柱の下面表面に亀裂が生じた。高さ2.73 mから鉄球を落下させると円柱が3本破断したが、鉄球は貫通しなかった。

振り子試験について、衝突加重を計算すると、鉄球を0.55 m振り上げたときは約34 kN、2.73 mでは約43 kNとなった。0.55 m条件では、衝突した一本の円柱の背面に亀裂が発生した。2.73 m条件では3本の円柱が破断したが、鉄球は跳ね返された。

3.3 足羽川から掘り出されたスギ杭丸太の健全度調査

久保 光

福井県足羽川の河床から掘り出された、約60年前に打設されたスギ杭丸太について、木杭の腐朽程度を目視調査とビロディン試験で調査した。

杭丸太は設置後河川水位以下に存在し、地盤はほとんどがN値10以下の軟弱層だった。

目視による劣化診断の結果、河床1 m以深では健全であり、それ以上の位置では腐朽がやや進行していた。これは河床より上では河川の水流の影響によって表面が物理的に劣化したものと考えた。

ビロディン試験の結果、湿潤状態の杭の貫入深さは10 mmから30 mmと杭丸太全体で腐朽程度は低かった。

3.4 13年の供用履歴を持つ既存木橋の載荷破壊実験

軽部正彦、青木謙治、新藤健太、藤田和彦
安全性を問題視され撤去された、13年の供用期間のある木橋について、再組立して非破壊検査によって劣化の内容及びその評価法を検討し、実大の載荷破壊実験を行い残存耐力を測定した。

木橋は集成材ベイマツ1級に天然系防腐塗料を塗布した全長36.3 m、有効幅員2.3 m、主橋高さ2.7 mのものである。

載荷実験は、再組立した木橋に約320 kgの土嚢を、橋長の中央部に均等になるようにクレーンで床版に積載していった。その結果、土嚢26袋(94.4 kN)を積載したところで上流側下弦材が破断し、土嚢53袋(187.7 kN)で下流側の上弦材が圧縮破壊し、最終破壊に至った。最初に破断した位置は供用中に腐朽が生じていると指摘された箇所、最終破壊した部位も乾燥割れがV溝状の腐朽に進展していた箇所であった。しかし、破壊が起きた部材であっても、全体が腐朽していたわけではなく、中には健全部も存在していた。

4. おわりに

本シンポジウムは、育林、木材加工、建築土木分野の技術者が一堂に会することができる数少ない交流の場であり、大変意義深い取り組みである。この会をきっかけに三者で新たな取り組みが進むことで、よりよい木材利用の体制が整って欲しいと願っている。

最後に、写真を提供していただいた今井 久氏と本山 寛氏に対し感謝申し上げます。