

長期間使用された木橋床版の強度性能に関する検討

An investigation on aged deck elements of the pedestrian timber bridge

渡辺 浩*, 佐々木 貴信**

Hiroshi WATANABE and Takanobu SASAKI

* 博(工) 熊本大学助手 大学院自然科学研究科環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

** 博(工) 秋田県立大学講師 木材高度加工研究所 (〒016-0876 能代市海詠坂 11-1)

Lots of timbers are used for pedestrian decks and public halls in recent years. Generally, mechanical behavior and performance of timber elements are as good as steel and concrete. However, they should be used carefully with the decay because these are placed on severe outdoor circumstances and exposed to sunshine and rainwater.

An investigation on aged deterioration of deck elements which were used in the pedestrian timber bridge are carried out. As a result, it becomes clear that strength deterioration is less than the deterioration judged from visual observation.

Key Words : timber bridge, maintenance, decay, endurance strength, loading test

キーワード : 木橋, 維持管理, 腐朽, 残存強度, 載荷試験

1. まえがき

国土の2/3を森林が占める我が国は、先進国でも有数の森林大国でもある。古来より我が国の文化は木の文化とも称されるほど、人々の生活は豊富な森林資源と結びついてきた。このような風土の下それらを利用した木橋もかつては数多く見られた。そして例えば文献1)の例のように、木橋であることの理由を説明する必要もないほど、必然的な選択であり自然に調和した風景でもあった。

近代の技術革新の中でこのような旧来の木橋は次々に姿を消していったが、その理由には木橋の構造的な限界とその耐久性が問題とされたことが挙げられる。これらの木橋は支間長が小さく多数の橋脚が設けられていたため、大雨により流失したり治水上の問題となった。また木橋は木材にとっての使用環境が大変厳しいため腐朽等の不具合が生じやすく、点検や補修の労力が大きかった。そして高度成長期、これらの弱点を補うことができる形式として鋼橋やコンクリート橋への架け替えが進められ、数を減らしていったという経緯がある。

このような背景から、木材は構造材としての性能が劣っていると考えられているところもあるが、そのようなことはない。表-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²⁾³⁾。スギは国産の構造

用木材として最も多く利用されているが、強度面ではあまり優れた樹種ではない。にもかかわらず、圧縮等の許容応力度がコンクリートと同等であること、引張力にも耐えられること、軽い割には強いこと等を考えると、木材は構造材料として他材料と比較しても遜色ない性能を有しているといえることができる。それでもなお木材の性能が劣るとイメージされる理由には、建築構造物での耐火性、そして屋外で使用される木橋等での腐朽が挙げられる。

腐朽とは、木材が微生物により分解され物理的・化学的性質が大きく変化する劣化現象のことである⁴⁾。これは木材が天然材料、すなわち有機物であることに起因しており、鋼材やコンクリートの劣化とは本質的に異なる点であるが、それ自体は地球上の炭素循環の一部を構成するものであり、木材が環境に優しいといわれる理由のひとつでもある。

元来木材はある程度の耐朽性を備えてはいるが、それでも使用環境が厳しく腐朽の影響が懸念される場合には薬剤を用いた耐朽性能の向上が図られる⁵⁾。しかし、屋外で常時日光や風雨に暴露される使用環境は木材にとっては厳しいため、現状では最善の防腐処理がなされつつも腐朽に対する適切な配慮は必要不可欠である。

木材の腐朽に関しては生物的、また化学的な分野での

表-1 各構造材料の材料特性の一例 ^{2) 3) 4)}

	木材 (スギ)		鋼材 (SS400)		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	—
基準強度(MPa)	34	—	400	—	24	—
圧縮許容応力度(MPa)	7.4	1.9	140	1.8	6.5	0.3
引張許容応力度(MPa)	5.4	1.4	140	1.8	0.7	0.03
曲げ許容応力度(MPa)	9.3	2.3	140	1.8	8	0.4
せん断許容応力度(MPa)	0.7	0.2	80	1.0	1.0	0.04
ヤング係数(GPa)	6.8	—	200	—	25	—

比強度：単位重量あたりの強度 (MPa / (kN/m³))

表-2 試験体の概要

試験体	外観による劣化の程度評価	気乾比重	含水率	木取り・使い方
1	一部で断面欠損	0.51	14.0	板目取り・木表を上面
2	全体的にかなり腐朽	0.35	14.1	板目取り・木裏を上面
3	比較的良好	0.34	13.8	板目取り・木裏を上面

研究が盛んである。しかし腐朽が強度性能に及ぼす影響については、治山分野での土中杭等に対する検討が主であり、木橋等の構造物を対象とした研究はあまりない⁹⁾⁷⁾。そこで本研究では、これらについての基礎資料を得るため、その一例として木橋の部材として使用されていた木材について強度試験を行い、腐朽した部材の残存強度への影響等について検討したものである。

2. 試験体の概要

2.1 試験体が使用されていた木橋

試験体とした木材は京都府南部の木津川にかけられている上津屋橋で床版として使用されていたものである。同橋は写真-1のような橋長 356.5m、74 径間の木歩道橋である⁹⁾⁹⁾。木津川の堤外に架けられており、洪水によりある程度以上水位が上昇すれば桁と床版が流され、それ以上の破壊を免れるという特殊な構造を有していることから、木津川の流れ橋として著名である。生活道路としての利用が多いほか、昔ながらの木橋の雰囲気が残されていることから、観光名所としても親しまれている。

その名のとおり、1953 年の架設以来 12 回の流出を記録しているが、各部材はロープにより繋がれているため、その都度流された部材を回収し、劣化が著しい部材を交換した後補修し復旧している。限られた予算内で必要最小限の機能を有する構造物を造るいうソフトな考え方は、今後の我が国の低成長下でのインフラ整備において参考に値するものと考えられる。

2.2 試験体の概要と目視評価

上津屋橋ではこれまで流出にあわせて補修がなされてきたが、平成 9 年以降流出しておらず傷みが見られるようになってきたため、平成 13 年度に一部の部材の交



写真-1 上津屋橋

換等の補修が行われた。本検討で使用した試験体はその時に交換された床版のうち、劣化の程度の違いを考慮して任意に抽出した 3 本である。

試験体は長さ 3300mm、板幅 200mm、板厚 70mm のスギ材である。表-2 はそれらの特徴をまとめたものである。ここで板目取りとは図-1 のように年輪の接線方向に採取される板材のことであり、このうち材心側の面を木裏、外周側の面を木表と呼ぶ。また写真-2 は各試験体の外観を示している。

なお、これまでの補修では個々の部材に関する交換の記録は残されていない。このため、各試験体の使用年数は不明であるが、外観や管理者の話から 5～10 年程度使用されたものと予想された。以下は各試験体の特徴ならびに劣化の状況である。

○スギ材の気乾比重は一般に 0.35～0.4 といわれているが、試験体 1 では 0.51 とかなり大きかった。これは試験体 1 の年輪間隔が写真-2(c)のように密であることに起因していると考えられる。専門家による鑑定で

もスギであることが確認されている。

○試験体2と3は気乾比重や断面の様子からほぼ同等な部材と推測された。このうち、試験体2では下面が全体的にスポンジ状を呈しており腐朽の進行がうかがわれたが、試験体3では比較的健全な状態であると考えられた。

○スギ材では図-1のように樹心に近い部分には赤く、その周囲には白い部分がある。このうち赤い部分は心材と呼ばれ、樹木としての生命活動を終え樹体支持の役目を担っている。また白い部分は辺材と呼ばれ、樹木の生命活動がなされている部分である。心材部は樹木の成長に従って中心部から周囲に広がっていく。このため両者では組織が異なるわけではなく、物理的な性能は同一である。しかし、心材化と同時に細胞内には化学成分が蓄積されるため耐朽性が向上すると言われている⁵⁾¹⁰⁾。

写真-2(c) (f)では部分的に激しい腐朽が生じているが、これらはいずれも辺材部分であり、スギ心材の耐

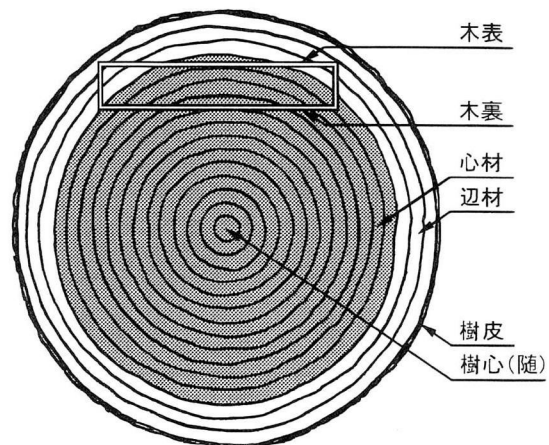
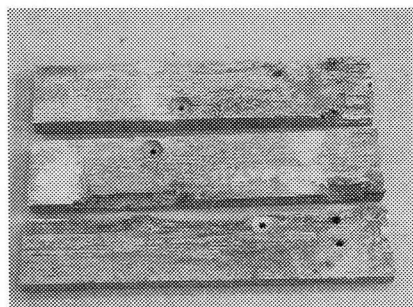
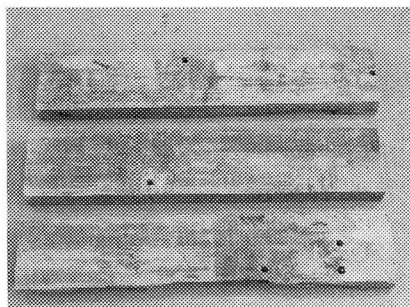


図-1 心材・辺材と木裏・木表



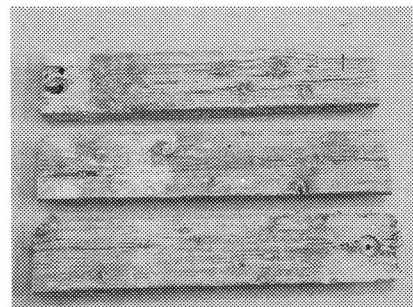
(a) 試験体1－上面



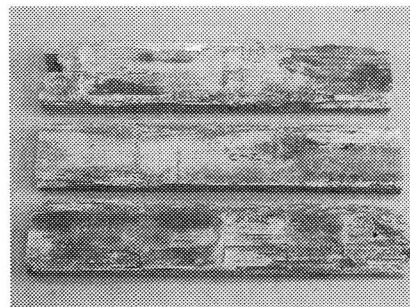
(b) 試験体1－下面



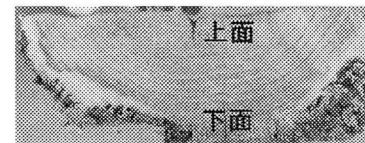
(c) 試験体1－断面



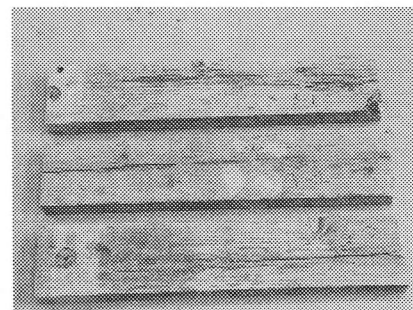
(d) 試験体2－上面



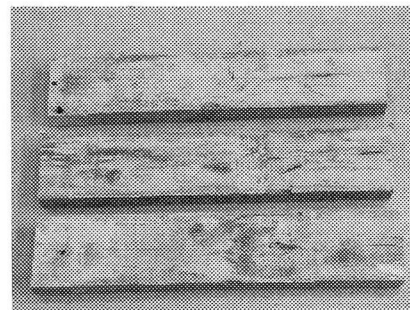
(e) 試験体2－下面



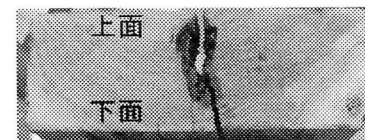
(f) 試験体2－断面



(g) 試験体3－上面



(h) 試験体3－下面



(i) 試験体3－断面

写真-2 各試験体の外観



写真-3 上津屋橋の上部構造

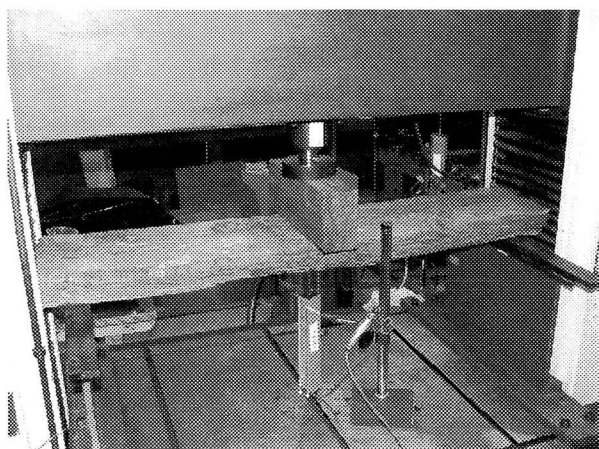


写真-4 静的曲げ荷重試験

朽性はこのように長期間屋外で使用された部材でも有効に発揮されていることがわかる。なお、これらの部材はいずれも当初にクレオソート油の塗布による防腐処理がなされている。

- これらの試験体の木取りはいずれも板目取りであったが、使い方は木裏、木表と異なっていた。ここで前述の辺材は部材の取り方によって図-1 のように木表側の一部分に含まれることになる。

木表が上面に使用されていた試験体 1 では、辺材部が路面に現れていたためその腐朽による断面欠損で路面に凹凸が生じていた。しかし、通常腐朽で問題となる下面の桁材と接する部分は健全であった。一方で木裏が路面に使用されていた例えば試験体 2 では、下面は全般的に腐朽しており桁材と接する部分ではめり込みも生じていたが、路面である上面は比較的健全であった。このように、床版材における木裏・木表の使い方は耐力性能の他にも利用者の視点による快適性にも大きな影響を及ぼすことがわかる。

- 試験体 3 では表面からは割れしか認識できないものの、写真-2(g) (i)のように内部で腐朽が進行している例が見られた。

表-3 静的曲げ荷重試験の結果

試験体	曲げ強度(MPa)		曲げヤング係数(GPa)	
		平均		平均
1-1	31.1	28.3	5.61	4.76
1-2	26.9		4.76	
1-3	27.0		3.91	
2-1	28.7	23.4	4.09*	3.95
2-2	22.7		4.77	
2-3	18.8		2.98*	
3-1	28.0	24.8	6.13	5.58
3-2	25.6		5.73	
3-3	20.8		4.88	
設計で利用 される値	7.4		6.8	

*: 支点のめり込みが大きかったがこの影響は考慮していない

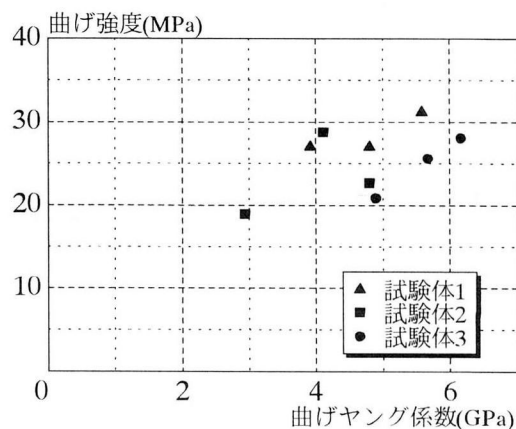


図-2 曲げ強度と曲げヤング係数との関係

3. 各種試験による性能の確認

3.1 静的曲げ荷重試験

これらの試験体について静的曲げ試験を実施した。ただし、上部構造が写真-3 のような 4 主桁構造であることから、各試験体を 3 分割し、それぞれを長さ 980mm の曲げ試験体とした。試験機の都合上支間は 872mm とし、支間が小さいことから中央 1 点荷重とした。写真-4 は荷重試験の様子である。また破壊荷重の 10%~40%の荷重範囲におけるたわみの値を用いて曲げヤング係数を求めた。破壊モードは何れも引張側の破断であった。

結果を表-3 に示している。予想どおり比重が大きい床版 1 で曲げ強度が最大であったが、曲げヤング係数は床版 3 が最大であった。最も腐朽していた床版 2 は曲げ強度・曲げヤング係数ともに最小であったが、その差はわずかであった。

図-2 は曲げ強度と曲げヤング係数との相関を示したものである。サンプル数は少ないものの健全材のようにこれらの相関はうかがわれる。ただし、同一の部材からの 3 試験体間のばらつきは大きかった。

曲げ強度の大きさは初期のデータがないため一般的

表-4 動的ヤング係数の測定結果

試験体	動的ヤング係数 (GPa)		曲げヤング 係数との比
	平均		
1-1	7.20	6.13	1.28
1-2	6.17		1.30
1-3	5.03		1.29
2-1	6.62	6.69	1.62
2-2	6.46		1.35
2-3	6.98		2.34
3-1	5.83	6.13	0.95
3-2	6.37		1.11
3-3	6.20		1.27

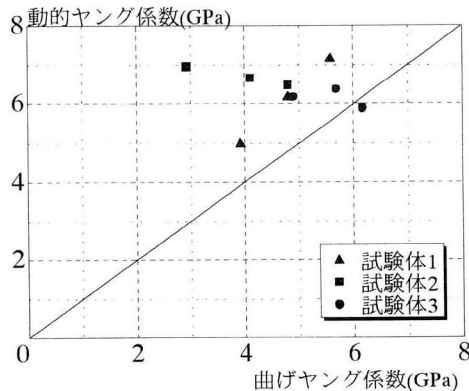


図-3 動的ヤング係数と曲げヤング係数との関係

な値で評価せざるを得ないが、健全材の一般的な値と比較しても遜色がなく、設計応力と比較しても十分な残存強度を有しているといえる。一方で曲げヤング係数は若干の低下の傾向が見られたが、これによる床版としてのたわみの増加はわずかであり、使用性が問題となるレベルではない。

なお、試験体によっては断面欠損が曲げ性能に影響を及ぼすほど大きいものがあったが、断面欠損分の計測や評価が難しいことや残存耐力の議論は元の断面を基準とすべきであることから、これを無視している。このため、断面の欠損が大きいものでは曲げ強度・曲げヤング係数ともにその固有の特性値より小さい値が得られている可能性がある。

3.2 動的ヤング係数の測定

木材のヤング係数を測定する方法として、曲げたわみ法と並んでよく利用される方法に打撃音法（縦振動法）がある。これは木材の端部を打撃して発生する振動をFFT解析し、その共振周波数からヤング係数を得るものである。ここでは9本の曲げ試験体ごとに測定を行い、表-4のような結果を得た。1次共振周波数を利用したが、部材が短くピークがあまり明瞭ではなかった。

一般に木材の動的ヤング係数は曲げヤング係数に比べて1割程度大きい値が得られるとされているが、これらの結果でも同様に動的ヤング係数の方が大きかった。

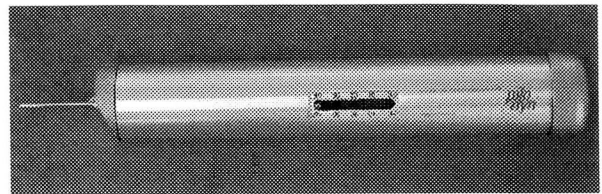
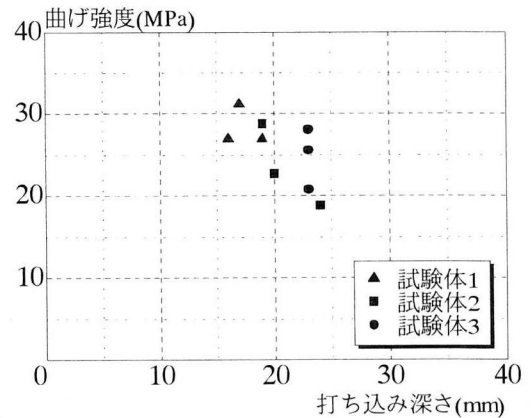
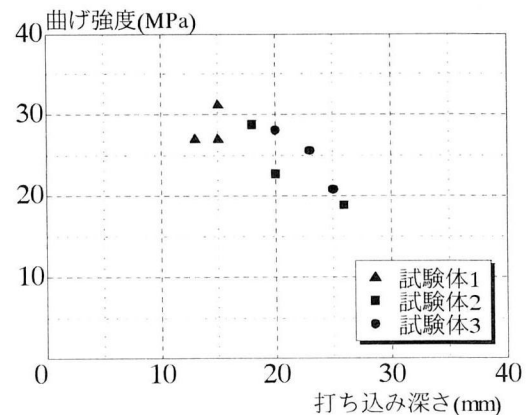


写真-5 ピロディン



(a) 上面



(b) 下面

図-4 曲げ強度とピロディン試験との関係

このうち2-1と2-3は特に大きかったが、このことから曲げヤング係数の測定において支点のめり込みの影響を受けていたものと考えられることができる。これらを除くと動的ヤング係数は曲げヤング係数の1.1~1.3倍であり、既往の事例¹⁰⁾と同様に腐朽材では曲げヤング係数が小さくなる傾向があることがわかった。

3.3 ピロディン試験

ピロディンとは写真-5のような一定エネルギーでピンを打ち込むことができる器具で、打ち込み深さから密度を求めたり、腐朽の部位や程度を求めるのに利用されている。ここでは9本の曲げ試験体の表裏ごとに節や割れ等を避けて9か所で測定した。

表-5は試験の結果を、また図-4は曲げ強度と打ち込み

表-5 ピロディン試験の結果

供試体	上面の打ち込み深さ (mm)			下面の打ち込み深さ (mm)		
	測定値9ヶ所の平均	総平均	最大値	測定値9ヶ所の平均	総平均	最大値
1-1	17	17	23	15	14	17
1-2	16		17	15		19
1-3	19		32	13		15
2-1	19	21	25	18	21	24
2-2	20		22	20		26
2-3	24		30	26		40*
3-1	23	23	25	20	23	26
3-2	23		31	23		27
3-3	23		27	25		31

*: 器具の仕様上これが最大値

深さとの関係を示している。最も腐朽していると予想された試験体2の裏面の一部で大きな打ち込み深さが得られたが、全般的にスギ材の一般的な値である15~20mmと比較して大差ない結果であった。打ち込み深さは強度と相関があるとされているが、サンプル数は少ないものの同様な傾向をうかがうことができた。

4. まとめ

本論文では、木橋に使用されていたスギ材を対象として、長期間屋外で使用されていた木材の強度性能や腐朽の影響について検討した。得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

- 本論文で対象とした試験体はいずれも交換がなされた部材ではあるが、機能的には未だ十分な性能を有していた。例えば目視によりかなり腐朽していると判断された部材（試験体2）でも、見かけの割には強度的な劣化はわずかであった。
- 以上から、部材の交換は機能性以外の理由でなされる場合も多いことがわかる。このことから、維持管理コストを抑えるためには、長期使用下での使用性や美観の面からの検討も重要となる。
- スギ心材の優れた耐朽性を認識することができた。これに対して辺材については重要な部位については、より確実な方法での防腐処理が必要であるといえる。
- 木裏、木表は一般に反りを考慮して決められるが、木裏を路面側に使用すれば腐朽が路面に現れにくいいため、利用者の快適性も向上するという効果も得られる。
- これらの試験体では、曲げヤング係数は若干低下していたが動的ヤング係数の低下は見られなかった。またこの程度の腐朽による曲げヤング係数の低下は部材の使用性が問題とされるレベルではない。
- ピロディン試験により残存強度が推定できることが示唆された。ただし試験結果が少ないため、強度相関式を得るためにはさらに多くの試験結果が必要である。

以上、本検討では既存の1橋からの少数の試験体を対象としてではあるが、長期使用された木橋部材の残存強度、および点検器具による評価との相関についての一例

が示された。これは木橋の耐久性診断のためには不可欠な基礎資料であるものの、普遍的な診断を行うためには資料が大きく不足している。今後は、このような検討が多数行われ、総合的な検討がなされることが必要とされている。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金の一部により実施したものです。本研究で用いた試験材については京都府田辺土木事務所よりご提供いただきました。また試験実施にあたっては熊本県林業研究指導所にご協力いただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 林野庁監修、薄木征三編集指導：近代木橋の時代、龍源社、1995。
- 2) 木質構造設計基準・同解説、日本建築学会、1995。
- 3) 道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説、日本道路協会、2002。
- 4) コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、土木学会、2002。
- 5) 木材保存学入門 改訂版、日本木材保存協会、1998。
- 6) 飯島泰男：土木用木質構造物の耐用年数評価について、木材保存、Vol.25, No.5, pp.209-218, 1999。
- 7) 長谷川 益夫、中谷 浩、飯島 泰男、安田 洋、嘉戸 昭夫、長谷川 幹夫、相浦 英春、石田 仁、上林 徳久：富山県における治山木杭の耐久性（第1報）柵工におけるスギ及びカラマツ木杭の耐用年数について、木材保存 Vol.19-1, pp.13-21, 1993。
- 8) 上津屋橋<木津川の流れ橋>、京都府田辺土木事務所、1993。
- 9) 上津屋橋/資料集、京都府田辺土木事務所、1993。
- 10) 古野 毅、澤辺 攻：木材科学講座2 組織と材質、海青社、1994。
- 11) 津島 俊治、河津 渉、城井 秀幸：大分県における土木用木製構造物の耐久性(Ⅱ)、第9回日本木材学会九州支部大会講演集、pp.37-38, 2002。

(2002年9月13日受付)