

木堰堤の密度に関する経年変化

誌名	日本森林学会誌
ISSN	13498509
著者名	秋田, 寛己
発行元	日本森林学会
巻/号	97巻2号
掲載ページ	p. 127-131
発行年月	2015年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



木堰堤の密度に関する経年変化 —長野県内における最大9年経過の調査結果より—

秋田 寛己^{*、1}

本研究は最大9年経過した木堰堤の腐朽実態を明らかにするため、長野県全域で成長錐による腐朽調査を実施し、密度 ρ と含水率を求めた。今回の ρ の調査結果より、中条や鍋久保では繊維飽和点未満で ρ が小さくなる部材が多いことから、含水率が低下するほど腐朽が遅くなる可能性があった。 ρ と経過年の間には袖部と本体ともに直線関係があり、年数を経過するほど ρ が減少し、標準偏差 σ と経過年の関係からばらつきが徐々に大きくなる。 ρ が消失するまでの年数を計算したところ、袖部で約20.0年、本体で約25.5年となった。袖部と本体には5年程度の差が生じ、部位による年数の違いが表れた。また、 σ と経過年の関係から示されるように、木堰堤は設置環境や施設の構造条件の影響を受けるため、 ρ が消失するまでの年数は施工地によって上下すると考えられた。

キーワード：木製治山堰堤、腐朽、経年変化、含水率、密度

Hiroimi Akita^{*、1} (2015) Change in the Density of Old Wooden Check Dams with Age: Results of an Investigation of Up to Nine-year-old Dams in Nagano Prefecture. J Jpn For Soc 97: 127-131 An investigation was carried out into the extent of decay of up to nine-year-old wooden check dams at several sites in the Nagano region by determining their density (ρ) and moisture content using an increment borer. The results indicated that at Nakajo and Tokikubo, the dams contained many components for which ρ had decreased to below the fiber saturation point. Accordingly, it was likely that decay had occurred recently, when the moisture content had decreased. For both the dam body and wings, ρ was found to decrease linearly with increasing age, whereas standard deviation (σ) gradually increased with age. It was calculated that 20.0 and 25.5 years were required for ρ to reach zero for the dam wings and body, respectively. This difference of approximately five years arose on the dam wings and the dam bodies, and the difference in the years by a part appeared in them. Moreover, it was found that the relationship between σ and age tend varied depending on the installation environment and the structural condition of the dam. In addition, ρ was found to fluctuate markedly depending on the location of the dam.

Key words: wooden check dam, decay, age, moisture content, density

I. はじめに

木製治山堰堤（以下、木堰堤と略述するが同義である）は水土保持機能の発揮と河川生態系の保全の両立が可能であり、間伐材の活用促進も後押ししてこれまで、日本全国で多数設置されてきた。今後は経過年が数十年単位と増大した施設が増えてくる中で、部材腐朽に対する維持管理が大きな課題である。長野県においても、平成13年頃から木堰堤の施工が急速に進み、現在は100基以上が設置されており、今後は施工後10年以上が経過した施設が大幅に増加してくると想定される。木堰堤をはじめとする木製土木構造物は、気候条件等の複合因子の影響を受けるため腐朽の予測が難しく、耐用年数や維持管理についての議論がなされているところである。

木製土木構造物の耐用年数に関するこれまでの研究史を整理すると（独）森林総合研究所と林業試験場による被害度評価法を用いた杭試験が最も古く（雨宮 1963, 1970 a, b; 松岡ら 1984）、樹種別や防腐剤の種別で耐用年数が検討されてきた。長谷川ら（1993）は富山県の山腹工を対象に、こちらも被害度評価法を使用し耐用年数を算出して

る。飯島（1999）は被害度とピロディンによる評価法を併用して丸太の耐用年数を求めている。津島ら（2005）は、大分県内の木製防護柵等の土木構造物に対し、被害度評価法とピロディン貫入量の腐朽調査から耐用年数を試算している。近年の木堰堤の耐用年数としては、Dangら（2007）や石川（2010）が京都府内のスギ材木堰堤を対象とし、レジストグラフから求めた腐朽速度と設計計算より部材直径別の耐朽年数を求めている。山内ら（2013）は木製土木構造物の耐用年数とは異なるが、長野県におけるカラマツ切り捨て間伐木の分解までの年数について、容積重から算出している。

ここまでの研究史を整理してみると、かつての主観的な被害度評価法から近年では定量的で客観性のあるピロディン貫入量調査やレジストグラフによる調査手法へとシフトしつつある。このような客観的な調査方法を活用した木堰堤の耐用年数の予測事例は少なく、かつ長期経過した施設における腐朽調査の事例はほとんどない。そこで本研究は、将来的な木堰堤の耐用年数や部材交換年数を検討するための基礎資料とすべく、長野県内における木堰堤の腐朽調査を行い、最大9年経過した木堰堤の腐朽の実態を解

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: a6638@n-koei.co.jp

¹ 日本工営株式会社大阪支店技術第二部 〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満 1-2-5 JA ビル 6F (Engineering Department II, Osaka Branch Office, Nippon Koei Corporation, 1-2-5 Nishitenma, Kita-ku, Osaka, Osaka 530-0047, Japan) (2014年10月14日受付, 2015年3月15日受理)

明することを目的とする。

II. 調 査 地

腐朽調査の対象地は、長野県全域の木堰堤施工地である。対象とした木堰堤は施工後5年から、最大で9年が経過した施設であり、筆者が平成18年から調査を継続している佐久市内山3、安曇野市中条、伊那市田原、伊那市高鳥谷、阿智村浪合の5基と、新規の小諸市鴫久保の1基の合計6基である。調査地の位置図をJ-STAGE電子付録付図-1に示す。腐朽調査時点の施工年数は、小諸市鴫久保が5年経過、安曇野市中条と伊那市高鳥谷が7年経過、その他の3基は施工後9年が経過している。また、腐朽の比較対象とするため、阿智村浪合の施工地近傍のカラマツ林から3本で健全材のサンプル調査を行った。健全材は $\phi=20$ cm程度の立木とし、条件は生木のため木堰堤部材と自然状態の水分条件が異なるが、乾燥状態での密度は比較基準になる。

対象とした木堰堤の構造および設置箇所の立地と気象条件をJ-STAGE電子付録付表-1に示す。年平均気温や降水量は、設置場所に近いアメダスデータより算出した。高鳥谷や田原、浪合は本体に常水がある。木堰堤の形状は全て台形型で、部材はカラマツ間伐材の丸太、もしくは太鼓材の使用という基準に統一して調査した。部材径は全て $\phi=20$ cm程度であり、部材の接合部が2 cmほどカットされた太鼓材であり、防腐処理は行われていない。長野県内の木堰堤は全て、林野庁(2012)の施工基準に則して施工されており、部材の形状に大きな違いはみられない。

III. 調 査 方 法

腐朽調査はスウェーデンHaglof社製の成長錐($\phi=5.0$ mm)を使用して円柱状の試験体コアを抜き取り、実験室に持ち帰ることで自然状態のコア重量を求めた。コア採取後は、現場の水分状態を維持するため、アルミ箔に包みポリ袋密封し、速やかに実験室へ持ち帰った。室内乾燥機でコアを絶乾させて部材の含水率を求め、全乾重量を算出した。成長錐コアは木堰堤部材の半径分となる $L=10$ cmの長さを実採取し、堤体を構成する部材各段で1試験体を実採取した。

1基当りの成長錐サンプル数は12前後である。コア重量の計測後は、全乾重量と湿潤時のコア体積から密度(g/cm^3)を算出した。木堰堤部材は秋田ら(2011)によって、流水方向と平行に配列した部材が縦部材、直交する部材が横部材と定義されており、本研究では部材曲げ応力に直接関与する横部材を測定対象とした。測定位置はJ-STAGE電子付録付図-2に丸印で示し、木堰堤袖部の最上段を1段目として、下部へ向かい2段目、3段目と順に設定した。

IV. 結 果 と 考 察

1. 成長錐コアからの腐朽の実態

J-STAGE電子付録付図-3には、9年経過の成長錐コア

の採取時の様子を写真で示す。いずれも外側の辺材部から腐朽が進んでいる様子が確認でき、内部は健全な状態を維持している部材が多かった。腐朽した部分は明らかな黒色を呈してコアの円柱形状を維持しておらず、袖部の部材については深い位置まで腐朽が進んでいる様子が確認できた。

1) 密度と含水率の算出

J-STAGE電子付録付表-2には、腐朽した木堰堤の密度 ρ と含水率の算出結果を示し、J-STAGE電子付録付表-3に健全材の算出結果を示す。ここで ρ と含水率は、以下の(1)式と(2)式による。含水率の数値は、調査当日や前日までの天候や成長錐サンプルの採取時間によっても変動すると想定されるが、今回の調査では降雨前後を避けているため、含水率の数値は極力平時に近付けている。木材の腐朽条件は一般的に栄養、温度、水分、酸素の4条件が不可欠であり、どれか一つでも欠けると腐朽は進行しない。本研究で測定した含水率は、水分条件に該当する。

$$\text{密度 } \rho(\text{g}/\text{cm}^3) = \text{全乾重量}(\text{g}) / \text{湿潤時のコア体積}(\text{cm}^3) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{湿潤時のコア体積}(\text{cm}^3) &= \pi r^2 \times \text{コア長} \\ \text{含水率}(\%) &= (\text{自然時のコア重量} - \text{全乾時のコア重量}) \\ &\quad / \text{全乾時のコア重量} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

健全材の ρ は三つのサンプルを平均すると $0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ となり、含水率は40%程度である。木材の ρ について、津島(2002)の報告ではスギ材で $0.27 \sim 0.42 \text{ g}/\text{cm}^3$ であり、北原ら(1998)によるヒバ材で $0.34 \sim 0.43 \text{ g}/\text{cm}^3$ であり、今回のカラマツ材はスギ材やヒバ材と比較し ρ が大きいといえる。カラマツ健全材の ρ は海老原(2003)の報告と比較しても $0.48 \text{ g}/\text{cm}^3$ とほぼ同値となる。

腐朽した木堰堤の ρ は、健全材の数値からいずれも減少していることがわかる。9年経過の田原と浪合ではともに、左岸袖部の上部から3段目の部材で ρ が 0.07 、 $0.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ と $0.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 未満が出現しており、健全時から大きく減少していることがわかる。7年経過の木堰堤では、中条の本体水通しの位置で $0.18 \text{ g}/\text{cm}^3$ と小さい値が確認されるが、他の部材では $0.4 \sim 0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 程度の範囲であり、9年経過の ρ と比較すると腐朽が小さいことがわかる。5年経過の鴫久保では $0.4 \sim 0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 程度の範囲であり、7年経過や9年経過の木堰堤と比較して腐朽が小さく、成長錐コアも健全な状態を維持しているのを確認している。

含水率の分布には全体的に、袖部の上部で高く、下部ほど低くなる傾向がある。上段の部材ほど水が滞留しやすい条件下にあると考えられ、降雨の際には上段の部材が屋根のような効果があることが影響している。田原の左岸袖部や浪合の右岸袖部では、逆に下部ほど含水率が高い傾向にある。田原や浪合では水通しを渓流水が流下しており、渓流水からの水分供給が影響していると推察される。本体では中条や田原において、最上段の水通し位置での部材で含水率が高くなる。また、内山3や田原、浪合では部材の下

部へ向かうほど、含水率が上昇している傾向がみられる。木堰堤が設置された環境は谷地形を呈しており、常水がない施工地でも伏流水による影響や、降雨で地面に浸透した水が蒸発する際に本体下部の部材へ水分を供給することが考えられる。一般的に繊維飽和点以下では腐朽菌の活動が阻害されることが知られており、既往の鈴木ら(2008)の報告では含水率20~30%の間で腐朽が進行しない可能性が示唆されている。林業試験所木材部・木材利用部(1982)により、カラマツ材の繊維飽和点は約28%と報告されており、この数値以下に含水率を抑えた場合には腐朽が進行しないと考えられる。今回の ρ の調査結果より、中条や鍋久保では繊維飽和点未満の含水率であり、 ρ の減少が小さい部材が多いことから、含水率が低下するほど腐朽が遅くなる可能性がある。

2) ρ と含水率および、含水率と経過年の関係

J-STAGE電子付録付図-4に ρ と含水率の関係を示す。データは1カ所でのサンプル数がやや少ないこともあり、鍋久保以外で統計的な有意性が認められなかった。データにはばらつきがみられるが、全体傾向として ρ が低いほど、含水率が高くなる。また、田原や高鳥谷の本体は常水有の条件下であるため、袖部よりも含水率が高い傾向がある。中条では ρ が 0.4 g/cm^3 周辺に分布しており、含水率20%程度の部位が多くなっている。同じ7年経過の高鳥谷と比較して中条では腐朽の進行が遅く、含水率も低い範囲に分布している。木堰堤部材における含水率の差は木材密度が関係していると考えられ、一般的に密度が減少すると内部の空隙が多くなり含水率が高くなる。

J-STAGE電子付録付図-5には、含水率と経過年の関係を示す。含水率と経過年の間には危険率1%で相関関係が示され、腐朽して年数を経過するほど含水率が上昇することになる。また、9年経過の木堰堤では5年経過や7年経過と比較し含水率が高いことに加えて、ばらつきも大きくなっている。腐朽した部材では密度が減少することで木材内部の空隙が多くなり、代わりに水分が充填されることで含水率が高く、腐朽がさらに進みやすい条件へと変わっていくと推察される。袖部と本体で含水率を比較した場合、本体で高い傾向となっている。ただし、これは常水有の高鳥谷や田原、浪合の影響を受けているためであり、本体に常水がある場合、酸素供給が遮断されるため、繊維飽和点以上の含水率状態であっても腐朽の進行は遅くなると推察される。

2. 密度の経年変化

1) ρ と経過年の関係

健全材の密度に対して、腐朽した部材の密度の比の分布推移を明らかにする。ここで健全密度比は、以下の(3)式によって求める。

$$\text{健全密度比} = \frac{\text{腐朽した木堰堤の密度}(\text{g/cm}^3)}{\text{健全材の密度}(\text{g/cm}^3)} \quad (3)$$

J-STAGE電子付録付図-6には、健全密度比の分布推移

を示す。健全密度比は、施工後5年から9年経過するにつれて、比の分布はゼロに近付いていくことがわかる。5年経過の木堰堤までは、健全材の密度と比較し、袖部と本体ともに0.7以上の密度範囲に入っており、腐朽が小さいと考えられる。7年経過の木堰堤では、本体の一部で0.4未満の密度範囲に入る部材が出現しており、経年変化により腐朽が進行している様子が読み取れる。9年経過の木堰堤では一部の部材で0.2未満まで腐朽が進行しており、袖部として田原で0.14、浪合で0.3、内山3で0.47までの比となる。本体では田原で0.64、浪合で0.49、内山3で0.45までの比となっている。9年経過した木堰堤では、健全材の密度に対し、当初の0.59~0.65程度まで減少していることになる。健全密度比の低下傾向より、腐朽した木堰堤は部材強度も合わせて減少している可能性が高く、部材曲げ強度の低下につながると推察される。木堰堤における密度と部材強度の関係性は定量的に明らかにされておらず、腐朽による密度低下は構造物の安定性を阻害する主因になると考えられるため、今後の継続調査が必要である。

袖部および本体の ρ と経過年の関係について、図-1に示す。両者の関係から以下の(4)式と(5)式が得られ、ここで ρ は密度、 x は経過年である。

$$\begin{aligned} \text{(袖部)} \quad & \rho = -0.0282x + 0.5628 \\ & R = 0.65^{**} \quad P = 0.00001 (P < 0.01) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{(本体)} \quad & \rho = -0.0198x + 0.5046 \\ & R = 0.61^{**} \quad P = 0.002 (P < 0.01) \end{aligned} \quad (5)$$

ρ と経過年との間には、袖部と本体ともに危険率1%で有意性があることから直線関係が認められ、 ρ は年数を経過するほど減少するといえる。 ρ にはばらつきがみられるが、これは施工地の気候条件や構造条件の影響を受けているためと推察される。木堰堤の腐朽に影響を与える構造条件は、Akita *et al.* (2014)で堤高や比流量が示されている。袖部と本体の回帰係数には差がみられ、本体の-0.0198と比較し、袖部は-0.0282と単年度当りの ρ の減少量が大きいことがわかる。このことから、9年経過した木堰堤の腐朽は、袖部の腐朽進行が速いといえる。この結果は、秋田ら(2011)による腐朽初期のピロディン貫入量調査からの報告と同様の結果である。これまでは、木堰堤の施工後6年経過までの腐朽初期における経年変化が明らかにされていたが、最大9年経過した木堰堤で ρ を指標とした場合でも、腐朽と経過年との間には関係性が示される。

2) 木堰堤部材の密度消失までの年数

ρ と経過年の関係より、木堰堤部材の密度消失までの年数を考察する。密度消失年数は ρ と経過年の関係からの回帰式を使用することで、部材密度が消失するまでの年数を計算したところ、袖部で約20.0年、本体で約25.5年となる。袖部と本体には5年程度の差が生じており、部位による年数の違いが表れている。 ρ がゼロになった場合には、部材密度が消失することになり、密度を失うことで部材応力が限りなくゼロへ近付いているものと推察される。

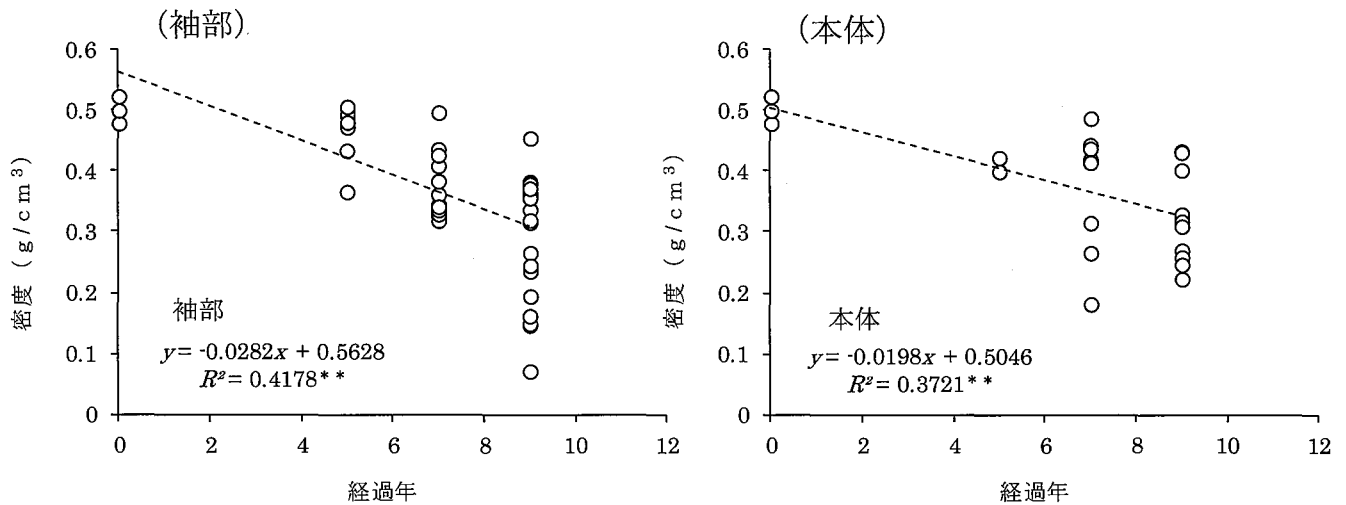


図-1. 密度の経年変化

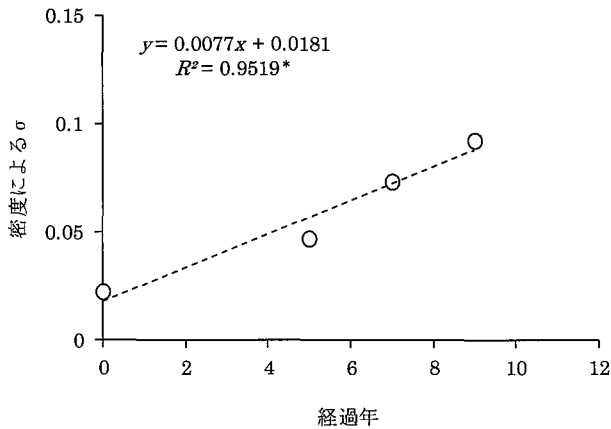


図-2. 密度による標準偏差σと経過年の関係

また、木堰堤の腐朽は設置された地域の気候条件の影響を強く受けるため、腐朽の進行には施工地によるばらつきが生じることが想定される。Akita *et al.* (2014) では Climate index と標高が気候条件の因子として示されている。腐朽のばらつき程度は、図-1 から読み取れるように、年数を経過するほど徐々に大きくなる。これは設置環境によって木堰堤の密度消失年数が異なることを示唆している。

図-2 には、密度から計算した標準偏差 σ と経過年の関係を示す。 ρ の調査結果より、 σ は各経過年別に(6)式を用いることで計算した。ここで σ は標準偏差であり、 ρ は密度、 μ は密度の平均値、 N はデータの個数である。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\rho - \mu)^2}{N}} \quad (6)$$

また、 σ と経過年の間には、以下の(7)式が得られた。ここで σ は標準偏差、 x は経過年である。

$$\sigma = -0.0077x + 0.181 \quad (7)$$

$$R = 0.98^* \quad P = 0.024 \quad (P < 0.05)$$

σ と経過年は危険率 5% で有意となり、両者の間で関係

性が得られたことから、年数を経過し腐朽が進行するにつれてばらつきが大きくなると考えられる。そのため、木堰堤の腐朽は長期経過した施設ほど、気候条件や構造条件の影響を大きく受けることになり、腐朽の進行程度には徐々に差が付いていく。木堰堤の密度消失年数は σ と経過年の関係から示されるように、設置環境や施設の構造条件の影響を受けることになるため、施工地によって上下することになる。(7)式はあくまで現時点での標準偏差と経過年の関係性を示したものである。今後の継続調査により、腐朽がさらに進行した場合には部材間のばらつきが小さくなり、木材密度の分布は変化していくと考えられる。

V. おわりに

本研究は、長野県内のカラマツ材木堰堤を対象とした結果を報告した。本調査結果からの考察より、木堰堤の耐用年数は今回計算した密度の消失年数よりも早い期間で設定することになると推察される。木材腐朽はばらつきが重要な要素となるため、周辺環境や使用樹種を考慮し一定の地域ごとに予測式を提案していく必要がある。腐朽のばらつきを適切に評価した上で、今後は地域別の妥当な耐用年数の研究を進めていきたい。

末尾ではあるが、長野県林務部(当時)の正条直太氏からは木堰堤の設計図面や施工資料関係を提供いただいた。ここに記して、心から感謝を表す。

引用文献

- 秋田寛己・北原 曜・小野 裕 (2011) 長野県内における木製治山堰堤の腐朽の進行過程と経年変化。日林誌 93: 253-261
- Akita H, Kitahara H, Ono H (2014) Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay. J For Res 19: 450-460
- 雨宮昭二 (1963) 浅川実験林苗畑の杭試験 (1) 杭の被害程度を評価する方法。林試研報 150: 143-156
- 雨宮昭二 (1970 a) 浅川実験林苗畑の杭試験 (2) 防腐処理杭の10年間の被害経過。林試研報 230: 105-142
- 雨宮昭二 (1970 b) 浅川実験林苗畑の杭試験 (3) 各樹種の野外試験

- による耐久性調査結果. 林試研報 232: 109-135
- Dang QD, Ishikawa Y, Nakamura H, Shiraki K (2007) Evaluating method of durability of small wooden crib dams with considering the deterioration rate. 砂防学会誌 60(2): 7-15
- 海老原伸子 (2003) カラマツ間伐材を用いた山腹工の腐朽過程. 砂防学会研究発表会概要集 2003: 130-131
- 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 (1993) 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 19: 13-22
- 飯島泰男 (1999) 土木用木質構造物の耐用年数評価について. 木材保存 25(5): 3-12
- 石川芳治 (2010) 砂防・治山分野における木材利用の課題と展望. 砂防学会誌 62(6): 52-58
- 北原 曜・田中俊成・山本幸一 (1998) 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: 1-9
- 松岡昭四郎・井上 衛・庄司要作・鈴木憲太郎・山元幸一 (1984) 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. 林業試験場研究報告 329: 73-106
- 林業試験所木材部・木材利用部 (1982) 日本産主要樹種の性質 木材の性質一覧表. 林業試験場研究報告 319: 85-126
- 林野庁 (2012) 森林土木木製構造物施工マニュアル. 図書
- 鈴木大隆・北谷幸恵・岩前 篤・永井久也・小南和也・坂本雄三 (2008) 定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係 木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究 (第1報). 日本建築学会環境系論文集 73: 591-597
- 津島俊治 (2002) ピロディン打込み深さに影響を与える諸要因. 九州森林研究 55: 192-195
- 津島俊治・栗崎 宏・長谷川益夫 (2005) 大分県における土木用木製構造物の劣化原因と耐用年数. 木材保存 31: 199-206
- 山内仁人 (2013) カラマツ切り捨て間伐木の分解速度. 中部森林研究 55: 35-36