

論 文

林道端と舗装土場における林地残材の自然乾燥

宮田大輔¹・鈴木保志^{*、2}・後藤純一²

宮田大輔・鈴木保志・後藤純一：林道端と舗装土場における林地残材の自然乾燥 日林誌 88：245～253, 2006 チップなどの木質バイオマス燃料として丸太形態の林地残材を利用する場合を想定し、丸太形状のヒノキ残材の自然乾燥実験を行った。場所を標高が高い林内の林道端（林道沿いの空き地）と標高の低い平地にある舗装土場とし、それぞれ日当たりの良いところと悪いところに残材を積み上げて約3カ月間自然乾燥させた。供試残材から採取した円盤の平均含水率は、林道端では乾燥期間中有意な変化は認められなかったが、舗装土場では3カ月間で82%から38%に低下した。日当たり別では有意な差はなく、地面と接触している状態の残材は上層に積まれたものより約10%含水率が高かった。9月から12月の実験期間中観測した温湿度は、林道端が舗装土場より約7℃気温が低く約20%湿度が高かった。土と舗装という地面の差は分散分析における交互作用の分析結果からは明確でなく、場所による温湿度の差が主要な乾燥条件の差であったと考えられる。

キーワード：含水率、乾燥場所、自然乾燥、木質バイオマス、林地残材丸太

Miyata, D., Suzuki, Y., and Gotou, J.: **Natural Drying of Logging Residue Stems along a Forest Road and on a Paved Landing.** *J. Jpn. For. Soc.* 88: 245~253, 2006 An experiment on the natural drying of *Chamaecyparis obtusa* logging residue stems was carried out to determine the potential for use of this material as woody biomass (e.g. wood chip bio-fuel). The experimental residue logs, i.e., unused stems left after logging, were placed along a forest road at high altitude and on a paved landing at low altitude. At each site, half the material was naturally dried in the sun and the other half in the shade for about three months. Moisture content of the logs (MCL; dry basis) was almost constant at the forest road site, while it decreased from 82% to 38% within three months at the paved landing site. There was no significant difference between MCL dried in the sun and in the shade, whereas the MCL placed directly on the ground was about 10% higher than the MC of elevated logs. Average air temperature at the forest road site and at the paved site differed by 7 degrees (higher at the paved site) and average humidity was also 20% higher there. There was no significant effect of substrate type, i.e. soil vs. pavement, as determined by ANOVA. Thus, differences in air temperature and humidity between the sites were the main determinants in natural drying of logging residue stems.

Key words: drying location, logging residue, moisture content, natural drying, woody biomass

I. はじめに

木質バイオマスは、二酸化炭素の排出削減のため化石燃料を代替するエネルギー源の一つとして近年注目されている。日本においては2002年1月に「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」の施行令が改正され（総務省行政管理局, 2005）、新たに「バイオマス」が新エネルギーとして明確に位置づけられた（谷, 2004）。さらに同年12月に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」（内閣府, 2002；小宮山ら, 2003）では、建設発生木材などの廃棄物系バイオマスを炭素量換算で80%以上、林地残材などの未利用バイオマスについては25%以上利活用するといった具体的な目標も掲げられている（谷, 2004）。木質バイオマスのうち現状で利用可能性が高いのは廃棄物系のものであるが（川島ら, 2004；久保山ら, 2004）、林地残材も今後の利用促進が見込まれている（後藤, 2003）。また、京都議定書の温室効果ガス排出削減目標を達成するためには、除間伐材をも積極的にエネルギー利用すべきと

いう意見もある（熊崎, 2004a）。

日本における木質バイオマスのエネルギー利用促進事業は、岩手（岩手県住田町, 2002；多田野, 2004）、山口（山口, 2004）、高知（森口ら, 2004b；鈴木, 2004）などの各県で取り組まれている。これらの事業での木質バイオマスの利用形態は、ペレットの事例もあるが、チップとしてボイラで燃焼させるというものが主である。ペレットは良質な木質バイオマス燃料であり、その原料となるおが屑は現在廃棄物として無償あるいはほぼ無償で提供されているため、経費的にも化石燃料に対抗しうるものになっている。しかし木質バイオマス燃料の需要が増えた場合、そのような背景を持つ木質ペレットの供給量には限界があると考えられるため、木質チップの利用および供給量を増やすことは重要な課題になってくることが予想される。なお、日本林業の現状からみて、丸太形態の林地残材がエネルギー以外の用途に利用される可能性は当分低いものと考えられる。

木質チップをボイラで燃焼させる場合、熱効率の面から

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: suzuki@fs.kochi-u.ac.jp

¹ 高知大学大学院農学研究科 (783-8502 南国市物部乙 200)

Graduate School of Agriculture, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku 783-8502, Japan.

² 高知大学農学部 (783-8502 南国市物部乙 200)

Faculty of Agriculture, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku 783-8502, Japan.

(2005年7月12日受付；2006年1月23日受理)

含水率を一定の値以下に保つことが重要である (Hakkila and Parikka, 2002; 熊崎, 2004b)。木質チップの原料となる生材の含水率は自然乾燥により低下させることが望ましいが、森口ら (2004a) や佐々木・多田野 (2005) の報告から、丸太形態の林地残材については発生場所である森林内あるいは林内土場や林道端等に放置しても自然乾燥の効果は期待できないと考えられる (本論では林道端は「りんどうばた」と読み、路肩や土場等の道沿いの空き地を指すものとする)。また、佐々木・多田野 (2005) は、含水率の高い状態でチップにしても自然乾燥は難しいと報告している。森口ら (2004a) は、残材をチップ化工場の土場等に運搬しそこに放置することで自然乾燥を期待するという方法を提案しており、丸太を舗装土場に露天保管した東北の事例ではその効果が認められている (佐々木・多田野, 2005)。

以降本研究での林地残材は丸太形態のもの、すなわち根元部や中幹部の端材丸太および枝葉の除去された末木 (梢端部) を対象とする。これは土場や林道あるいは作業道上でのプロセッサ造材で発生する枝葉以外の残材を想定している。林地残材の部位別割合は地域による差が大きいと考えられるが、高知での調査事例では造材作業で発生した丸太形態の林地残材は全体の 75% に及んでいる (森口ら, 2004b; 表-3. 木質バイオマス発生量の調査結果, 梢端と根元部)。なお、枝葉の付いた末木や枝条としての林地残材については、寺岡・合志 (2005) により林内でも特に堆積部の上層では自然乾燥がすすむことが報告されている。

材の自然乾燥に関する研究は、主にスギを対象にした葉枯らし乾燥についてはこれまでに多くの報告がある (岩田ら, 1981; 阪井・山本, 1985; 池田・大森, 1990, 1992; 岡部・中島, 1992; 岩手県住田町, 2002; 吉川, 2002)。これらにより、樹種、枝葉や剥皮の有無、部位などの条件による葉枯らし乾燥速度の違いが、地域性や個体差はあるものの程度明らかになっている。一方丸太の自然乾燥については、スギの玉切り材を製材工場内で自然乾燥させた野原ら (1977) の報告、葉枯らし乾燥の対照実験としてスギ・ヒノキ (岩田ら, 1981) あるいはスギ (阪井・山本, 1985) の玉切り材を林内乾燥させた報告があるが、さまざまな乾燥条件に関する系統的な比較検討は十分行われていない。

多くの森林は標高が高い場所に位置するため、森林内はチップ化など残材の加工や利用が行われる平地に比較して一般に気温が低く湿度が高い。また比熱や水はけなどの相違から、土の地面とアスファルトやコンクリートなどの舗装面とでは、後者の上に置かれた木材の方が乾燥しやすいと考えられる。したがって、残材等の自然乾燥を実施する場所としては、林内土場や林道端よりも標高の低い場所にある舗装された土場等の方が適していることは、定性的にはほぼ自明と思われる。しかし、そのような場所の違いによる自然乾燥への効果を定量的に明らかにし、また乾燥期間と含水率低下の関係、日当たりや温湿度などの環境的要

因、材の積まれた状態、などの諸条件の影響を明らかにしておくことは、木質バイオマスのエネルギー利用において残材等の自然乾燥を積極的に活用する上で重要な事項の一つである。そこで本研究では、丸太形態の林地残材の自然乾燥を森林内と舗装土場とで実施し、その結果を前述のような条件に関して分析することで、そうした条件の効果を明らかにし、定量的な評価のための基礎的な情報を得ることを試みた。

本研究で自然乾燥を行う場所は、残材を利用するための作業システムにおいて残材をチップ化前に一時ストックしておく場所に相当する。すなわち森林内はプロセッサ造材により発生した残材を林道や作業道の脇あるいは林内土場に貯め置く場合を、舗装土場はチップ化工場のストックヤードあるいは林地から残材をチップ化工場へ運ぶ過程で残材を一時貯め置く中間土場等を想定している。

II. 方 法

高知県長岡郡大豊町の民有林 (表-1) における 30~40 年生ヒノキ人工林の間伐で発生した残材のうち、材長 1 m 程度で末口径 10 cm 程度以上のものを必要本数収集して供試残材とした (表-2)。実験場所の森林で本格的に降雪が始まる時期までに 3 カ月程度以上の乾燥期間を確保できるように民有林の所有者と調整した結果、実験の開始時期は 9 月となった。収集時の 2003 年 9 月 19 日には伐採後 14 日が経過していたため、この時点での乾燥期間は 14 日間と考えることにする。同日から、これら残材を皮付きのまま、半数を同林内の作業道脇 (以下では「林道端」と称する) で、半数を高知大学農学部構内の舗装された空き地 (チップ工場等の舗装土場を想定し以下では「舗装土場」と称する; 表-1) で自然乾燥させる実験を開始した。それぞれの場所において、半数ずつを日当たりの良い所 (日向) と悪い所 (日陰) に分け、さらに半数ずつを上層と下層に分けて積み上げた。上層と下層の間には中間層としてスギあるいはヒノキの同程度の大きさの材を積むようにした。実験期間は約 3 カ月間とし、ほぼ 1 カ月ごとに各層から 2 本ずつを取り出して中央部から 2 cm 厚程度の円盤を採取した (平均径 21.4 ± 1.2 cm, $n=64$, 範囲 10.8~46.1 cm)。採取日は降雨の直後を避けるようにした。それら円盤の含水率を JIS Z 2101-1994 (高橋・中山, 1995; 含水率は乾燥重量を基準としている) に従って測定し、自然乾燥の指標とした。すなわち、要因として A: 場所 (林道端・舗装土場), B: 日当たり (日向・日陰), C: 層位 (上層・下層), D: 乾燥期間 (14 日間・48 日間・81 日間・104 日間) の 4 要因をとりあげ、繰り返し 2 回の 4 元配置法による実験を計画した。供試残材の総数は $2 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2 = 64$ 本である。

林道端は標高 840 m で斜面方位は東北東である。日向は谷側のり肩、日陰は山側のり尻に残材を積み上げた。山側のり面の高さは約 1.5 m, 周辺木の樹高は 20 m 程度であった。円盤採取時の昼間 (およそ 10~15 時の間) にお

表-1. 調査地概要

調査地	緯度・経度	標高 (m)	斜面方位	開空率 ¹⁾ [日照時間率 ²⁾]	残材含水率計測のための円盤 サンプル採取日 (伐採後経過日数)	期間降水量 ³⁾ (mm)
長岡郡大豊町民有林 (林道端)	N 33°48'14" E 133°38'32"	840	東北東	日向: 43.2% [28.6%] 日陰: 37.9% [26.8%]	2003年9月19日(14日), 10月23日(48日), 11月25日(81日), 12月18日(104日)	526
高知大学農学部構内 (舗装土場)	N 33°32'50" E 133°40'47"	5	—	日向: 77.8% [88.2%] 日陰: 49.9% [4.5%]		506
香美郡香北町民有林 (林内放置)	N 33°39'42" E 133°45'26"	560	南東	林内: 26.5% (17.8~34.6%) [32.1%] ([29.0~38.3%])	2003年10月31日(1日), 11月12日(13日), 12月10日(41日)	323

1) 全天空写真(図-1)より2003年11月に計測。大豊町および農学部は残材設置場所各1カ所、香北町は列状間伐された林内の残存、伐採列各2カ所合計4カ所の平均。農学部日向と日陰は鉄筋1階建建物の南側と北側。2) 全天空写真に描いた推定太陽軌道(図-1)から求めた日照時間の昼時間に対する割合。昼時間は林道端と舗装土場については9月5日, 10月27日, 12月18日の10月27日の重みを他の倍とする加重平均(671分), 林内放置は10月27日と12月18日の平均(629分)として求めた。3) 降水量は気象庁Web資料(気象庁, 2005)により, 大豊町は本山, 農学部は後免, 香北町は繁藤の各観測点における降水量を計測期間について集計した。

表-2. 林道端と舗装土場の供試残材の寸法

	末口径 (cm)	元口径 (cm)	長さ (cm)	材積 (m ³)
平均	21.3	24.0	93.7	0.0401
標準偏差	11.0	13.1	21.1	0.0357
最大	51.5	67.5	138	0.1609
最小	9.0	11.0	37	0.0082

n=64。末口・元口径は長径と短径の平均値。材積はスマリアン法による。

ける目視による観測では、晴の場合日向はほぼ直射日光あるいは強い木洩れ日に照らされており、日陰は山側のり面に接しない側に弱い木洩れ日がかかる場合がある程度で明瞭な差が認められた。しかし客観的な指標として2003年11月に全天空写真から計測した開空率は日向が43%、日陰が38%と大きな差はなかった(図-1 a, b; 表-1)。また、日照時間を以下のようにして推定した。まず、白黒に2値化した全天空写真(図-1 a, b)上で日出没方位と南中高度を円弧で繋いだ線を描いてこれを太陽軌道とみなし、図上の全軌道長に対する白部分の軌道長の比を昼時間に掛けて推定日照時間とした。ただし太陽軌道は9月5日(乾燥期間0日間)、10月27日(52日間)、12月18日(104日間)の3日について描き、10月27日の重みを他の2日の2倍として加重平均することにより実験期間中の昼時間および推定日照時間の平均値を求めた。その結果、平均昼時間(671分)に対する推定日照時間の割合は、日向が29%、日陰が26%と開空率同様大きな差はなかった(表-1)。

舗装土場の標高は5mであり、日向はアスファルト舗装で鉄筋コンクリート1階建の建物の南側、日陰は同建物の北側でコンクリート舗装である。日陰の北側10mほど離れたところに温室がある他は、日向の東・南・西方面および日陰の東西方面30m程度の範囲に障害物はない。林道端と同様にして計測した開空率は日向が78%、日陰が50%であった(図-1 c, d; 表-1)。林道端と同様にして求めた推定日照時間割合は、日向が89%、日陰が5%であっ

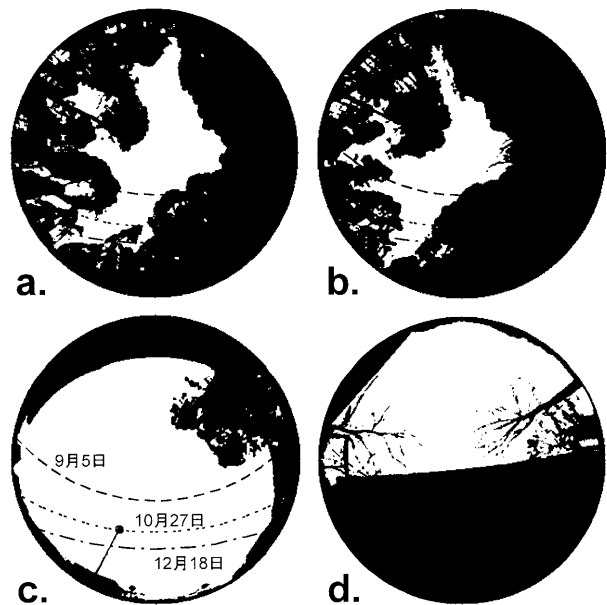


図-1. 自然乾燥実験用残材設置場所の全天空写真

画像処理により白黒に2値化したものを示す。a, 林道端日向; b, 林道端日陰; c, 舗装土場日向; d, 舗装土場日陰。上が北。破線, 点線, 一点鎖線はそれぞれ2003年9月5日(乾燥期間0日間), 10月27日(52日間), 12月18日(104日間)の推定太陽軌道。

た(表-1)。

このように日当たりの要因(B)は場所(要因A)によって条件が異なる相対的な性質のものである。すなわち日当たりという要因が温湿度や残材の乾燥に与える効果は、傾向としては場所に関わらず同様であるが、その程度は林道端では小さく舗装土場では大きいことが予想される。分散分析では日当たり単独の要因効果に加えて、場所との交互作用も考慮してその効果を検証することになる。

林道端の日向と日陰、舗装土場の日向と日陰の4カ所に積み上げた供試残材の脇に温湿度計(テイアンドデイ社製

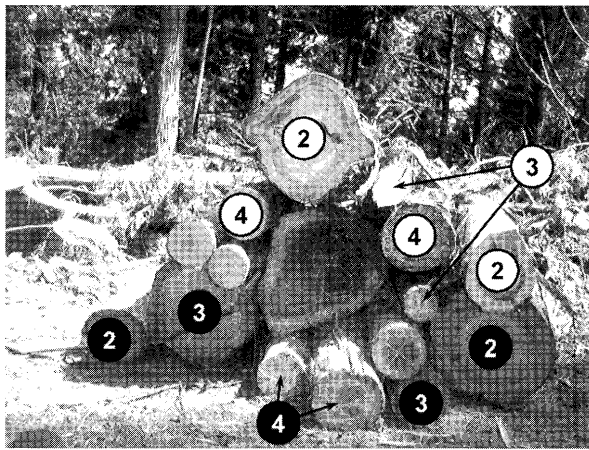


図-2. 自然乾燥実験用残材の配置

林道端、日向、1回目円盤サンプル採取後。○は上層、●は下層、番号は採取回を示す。無印は中間層用の予備材。

おんどり RH・TR-72S) を置き、記録間隔を10分として気温と相対湿度の観測を行った。センサー部はプラスチック製の下側を開放した容器で覆った。

層位の要因 (C) は、森口ら (2004a) の報告で林道端に放置された残材の山において特に底の部位にあったものの含水率が高かったことから、地面への接触の有無の効果をj知るために設けた。林道端と舗装土場とで地面の種類が異なるので、その直接的な効果は場所の要因 (A) に含まれることになる。ただし、中間層を設けていることもあり上層には地面の種類の影響は及ばないとすると、地面への接触の有無の効果は場所と層位の交互作用 (A×C) として現れると考えられる。また、円盤の採取時に山を崩さず残材を取り出せるよう、各層の残材は円盤を採取する順番が早いものが両外側になるように並べた。ただし残材の径が揃っていないため、上層についてはそのようにできない場合もあった (図-2)。

供試残材の収集時には梢端部・中幹部・根元部といった部位を区別せず、必要本数を確保することを優先した。また、枝葉付きで林内放置されていた梢端材から梢端部と中幹部に相当する部位を切断して供試残材としたものもある。部位区分により含水率が異なる可能性があり (岩田ら, 1981; 藤原・岩神, 1988; 岡部・中島, 1992; 岩手県住田町, 2002), 直径の大小に伴う心材と辺材の比率の相違も含水率に影響する可能性がある (野原ら, 1977; 藤原・岩神, 1988; 池田・大森, 1990, 1992; 高橋・中山, 1995; 吉川, 2002)。本実験では乱数により供試残材を無作為に各要因組み合わせに振り分けることで、結果に対するこれらの影響をできるだけ小さくすることとした。なお、末口・元口の平均径と材長の分布 (図-3) からこれら部位別の本数比率 (梢端部:中幹部:根元部) を推定すると、およそ3:1:2程度であったと考えられる。

供試残材は採取時すでに伐採後14日が経過していたため、伐採直後の含水率は不明である。そこで、伐採直後か

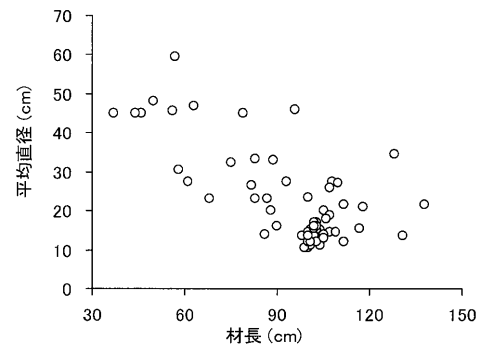


図-3. 供試残材の平均直径と材長の関係

平均直径は末口径と元口径の平均, $n=64$ 。

らの含水率変化を知るために、場所は異なるが高知県香美郡香北町内民有林の40年生ヒノキ人工林 (表-1) において、2003年10月30日の伐採直後から林内放置された切捨て間伐木を供試木として調査を行った (以下「林内放置」と称する)。調査地では3残1伐方式の列状間伐が行われ、スイングヤードで全木集材後、プロセッサにより林道上で造材が行われた。伐採直後として、伐採翌日の10月31日に造材後の残材から無作為に円盤サンプルを10個採取した (乾燥期間1日間)。その後、自然乾燥実験 (林道端と舗装土場) の乾燥期間にあわせ、11月12日および12月10日 (それぞれ乾燥期間13日間, 41日間) に全木状で林内放置された切捨て木を無作為に10本ずつ選び、根元部切口から上に1mの部分から厚さ約2cmの円盤を採取した。乾燥期間13日間は自然乾燥実験における伐倒直後からの含水率変化の推定を、41日間は自然乾燥実験との比較検討を目的として設定した。円盤の含水率は自然乾燥実験と同様にして計測した。温湿度については林道端の残材置き場で、自然乾燥実験と同様にして観測した。なお、列状間伐された林内の残存、伐採列各2カ所合計4カ所の開空率および推定日照時間割合の平均値はそれぞれ27%, 32%であった。ただし推定日照時間割合は、便宜上10月27日および12月18日の太陽軌道を用いこれら2日の平均として算出した (平均昼時間は629分)。

なお、林地残材の乾燥に伴い、特に長期にわたる乾燥では腐朽等により乾燥質量が減少する可能性がある。しかし本研究では乾燥期間は3カ月半程度であり、特に検証はしていないがそのような乾燥質量の低下は発生していないと考えられる。

III. 結果と考察

1. 自然乾燥実験における温湿度と降水量

温湿度の観測は11月14~25日は装置の不備のため欠測となった。温度を日平均温度としてその変化を見ると (図-4), 舗装土場では林道端よりも、ほぼ一定して6~8°C程度高かった。また林道端では日向と日陰でほとんど差がないのに対し、舗装土場では欠測となる11月中旬までは日向の方が平均して2°C程度高く、観測再開後の11月末以

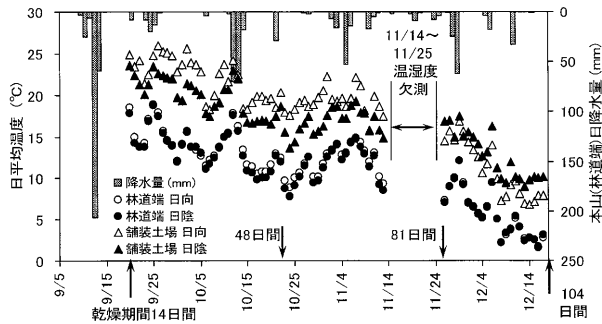


図-4. 林道端および舗装土場の日平均気温と林道端付近の降水量

2003年。11月14日～25日は欠測。矢印はサンプル採取日。降水量は林道端調査地に近い本山（気象庁，2005）。

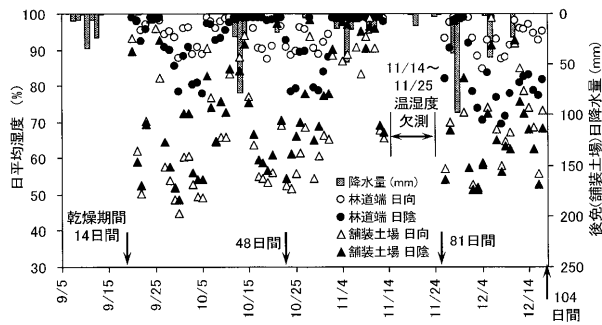


図-5. 林道端および舗装土場の日平均湿度と舗装土場付近の降水量

2003年。11月14日～25日は欠測。矢印はサンプル採取日。降水量は舗装土場に近い後免（気象庁，2005）。

降は有意な差ではないが日陰の方がやや高い傾向であった（11月26日～12月17日までの平均で日向 $11.0 \pm 0.7^\circ\text{C}$ ，日陰 $12.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$ ； $n=22$ ， t -test， $p=0.08$ ； \pm は標準誤差，以下同様）。風の観測はしていないが，舗装土場で月により日向・日陰間の温度の大小関係が異なることについては，日陰の残材の方が建物により近接していたことから，風向き・風速や風通しの具合などが影響したことが考えられる。

日平均湿度は温度と比較してばらつきが大きく季節性は明確でなかった（図-5）。値の範囲は林道端では70～100%，舗装土場はおおむね40～90%の間であった。林道端では11月中旬までは日向・日陰の差は明確でなくとも100%近くなる日も多かったが，11月末以降湿度は低下し日陰の方が湿度の低い日が多くなった（日向 $94.2 \pm 0.9\%$ ，日陰 $83.5 \pm 2.0\%$ ； $n=22$ ， t -test， $p<0.01$ ）。舗装土場では11月末以降日陰の方が湿度の高い日が多かったが，一貫して日向と日陰の湿度差は小さかった。林道端で特に11月末以降日向の方が高湿度であったことについては，風のほかに地面の水捌けの具合などが影響したことが考えられる。

欠測期間を除いた77日間の日平均温湿度を，場所（A）

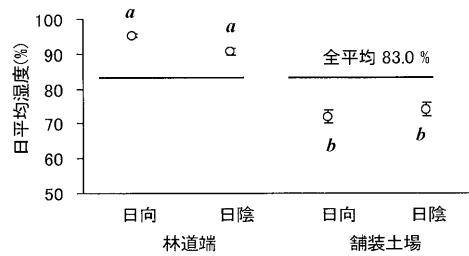


図-6. 林道端および舗装土場の日平均湿度

縦棒は \pm SE，異なるアルファベットは日平均湿度の平均値間に有意差があることを示す（Tukey-test， $p<0.05$ ； $n=77$ ）。

と日当たり（B）により繰り返し77回の2元配置として分散分析すると，温度については場所のみが有意（ $p<0.01$ ，寄与率 $\rho=36.2\%$ ）であり，湿度については場所および場所と日当たりの交互作用（ $A \times B$ ）が有意であった（それぞれ $p<0.01$ ， $\rho=38.3\%$ ； $p<0.05$ ， $\rho=0.9\%$ ）。

場所と日当たりの組み合わせごとの平均値を比較すると，日平均湿度については林道端の日向が $95.3 \pm 0.5\%$ (a)，日陰が $90.7 \pm 1.0\%$ (a)，舗装土場は日向 $71.9 \pm 1.9\%$ (b)，日陰 $74.1 \pm 1.8\%$ (b) と前者では日向の方が，後者では日陰の方がやや高い傾向を示した（図-6）。ただし，この場所による日向と日陰の大小関係の相違については，分散分析の交互作用としては有意であったが，水準間の多重比較の結果としては有意ではなかった（ $n=77$ ，Tukey-test， $p<0.05$ ）。すなわち全観測期間を通じた傾向として，林道端は舗装土場より日平均気温は 6.5°C 低く，日平均湿度は20%高かった。日向と日陰とで日平均の温湿度に有意な差はなかった。なお，林道端と舗装土場の温湿度に対する平衡含水率（高橋・中山，1995）は，観測期間の平均値（林道端 10.9°C ，93.0%；舗装土場 17.5°C ，73.0%）に関しては林道端で約22%，舗装土場で約14%となる。観測期間末期（林道端 3°C ，日向95%，日陰80%；舗装土場 8°C ，70%）に関してはそれぞれ約17～25%，14%となり，林道端と舗装土場の温湿度条件には平衡含水率にしておよそ10%の差があったといえる。

実験期間中の降水量として気象庁による最寄りの観測地点，すなわち林道端は本山，舗装土場は後免の値を集計すると，それぞれ526 mm および 506 mm とほぼ同程度であった（表-1；気象庁，2005）。日降水量についても観測期間中は両観測地点間に大きな相違はなかった（図-4，図-5）。ただし林道端は標高が840 m と高いため，本山の観

表-3. 円盤サンプル含水率の分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	F値	p値	寄与率ρ
A: 場所	11748.8	1	11748.8	30.64	0.0%	24.0%
B: 日あたり	510.9	1	510.9	1.33	25.3%	0.3%
C: 層位	1785.8	1	1785.8	4.66	3.5%	3.0%
D: 乾燥期間	2088.7	3	696.2	1.82	15.5%	2.0%
A×D	10483.2	3	3494.4	9.11	0.0%	19.7%
誤差	20705.6	54	383.4			51.0%
計	47322.9	63				100.0%

全平均 72.0%。有意でない 2 因子以上の交互作用は誤差にプールした。

測地点 (標高 252 m) よりも幾分か多くの降水があったと考えられる。なお、本山では供試残材収集日直前の 9 月 12~13 日に 265 mm (うち 12 日が 206 mm) の降水量が観測されている。

2. 自然乾燥実験における含水率

II. で挙げた 4 要因について供試残材の円盤サンプルから計測した含水率を分散分析した結果、単要因については場所 (A; $p < 0.01$, $\rho = 24.0\%$) と層位 (C; $p < 0.05$, $\rho = 3.0\%$) が、交互作用については場所と乾燥期間 (A×D; $p < 0.01$, $\rho = 19.7\%$) が有意であった (表-3; 永田, 2000, に従い単要因は有意でなくても誤差にプールしていない)。場所と乾燥期間の組み合わせについて水準平均を多重比較すると、林道端の乾燥期間 14~104 日間の平均含水率は 74.8~102.0% で各乾燥期間の間に有意差はないが、舗装土場では乾燥期間 14~104 日間で平均含水率 82.1% から 38.0% へと有意な減少傾向が認められる (Tukey-test, $p < 0.05$; 図-7)。これは残材を燃焼したときに得られる有効熱量 (生重量あたり) にすると約 10 GJ/t から 16 GJ/t へとおよそ 6 割の増加に相当する (Hakkila and Parikka, 2002; ただし樹皮を除く)。単位材積あたり重量は 0.746 t/m³ から 0.566 t/m³ へと約 25% の減少, したがって単位材積あたりの有効熱量は 7.46 GJ/m³ から 9.06 GJ/m³ へと約 21% の増加となる。すなわち残材の運搬等にかかる経費を重量あたりで考える場合, この含水率減少による有効熱量あたりの経費削減は約 4 割 ($1 - 1.6^{-1} = 0.38$) と見込まれる。運搬経費を材積あたりで考えると, 有効熱量あたり約 2 割の経費削減となる ($1 - 1.21^{-1} = 0.17$)。

層位については, 上層 66.7±5.0% (b), 下層 77.3±4.5% (a) と地面に接触していない上層の方が約 10% 含水率が低い結果となった。地面が土であるか舗装であるかの影響は場所と層位の交互作用 (A×C) に現れると考えられるが, この交互作用は有意でなかった。すなわち, 分析結果から判断すると, 土か舗装かという地面の状態の違いによる影響は明確でなかったことになる。ただし, 水準平均にすると林道端の上層は 79.5±6.8%, 下層は 91.6±6.3%, 舗装土場では上層 53.9±6.0%, 下層 63.0±4.3% と, 有意な傾向ではないが林道端の方が層位による含水率の差が大きかった。

林道端で材の乾燥がすすまない点については, 岩田ら (1981) による岐阜県美濃市でスギ玉切り丸太を林内乾燥した報告, 森口ら (2004a) による林道端に集積されたス

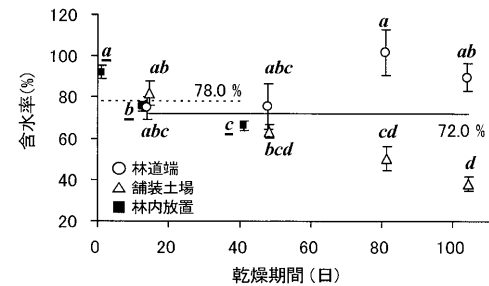


図-7. 残材含水率と乾燥期間の関係

縦棒は±SE, 実線は自然乾燥実験 (林道端と舗装土場) の, 点線は林内放置実験の全平均。異なるアルファベットは自然乾燥実験における A: 場所×B: 乾燥期間の 8 水準の平均含水率間に有意差があることを示す (Tukey-test, $p < 0.05$; $n = 8$)。異なる下線付きアルファベットは林内放置実験の 3 水準の平均含水率間に有意差があることを示す (Tukey-test, $p < 0.05$; $n = 10$)。

ギ残材の含水率に関する報告, 佐々木・多田野 (2005) によるスギ・ヒノキ・アカマツの丸太を林内乾燥した報告でも確認されている。舗装土場での乾燥については, 佐々木・多田野 (2005) によるスギ・ヒノキ・アカマツ丸太の実験では初期含水率 70~190% が 2~8 カ月で 30~110% 低下し 40~100% となっている。野原ら (1977) によるスギ丸太を工場内のコンクリート土間上で乾燥させた実験では, 開始時 160~220% の含水率が 100 日間で 70~170% と 50~90% の低下を示しており, 径級や季節により異なるが乾燥期間を延長すればおおむね平衡含水率よりやや高い 20% に落ち着くことが示唆されている。本研究ではヒノキを対象としており野原ら (1977) とは樹種が異なりまた初期含水率も低いが, 舗装土場での乾燥開始後 90 日間で含水率は 82% から 38% へとほぼ乾燥日数に比例して 44% 低下している。この後乾燥を継続した場合, 40~50 日程度で 20% 程度となり定常状態に移行したものと考えられる。

含水率への影響が考えられる部位と材の径については, 各要因組み合わせに無作為に供試残材を割り当てることでその影響をなくすことを試みた。こうした条件と要因組み合わせとの交絡の有無を確認するために, 供試残材の平均径と材長を自然乾燥実験の 4 要因を用いて繰り返し 2 回の 4 元配置として分散分析した結果, どちらについても有意な要因および交互作用はなかった。すなわち, 分析に影響するような偏りはなかったものと考えられる。ただし, 同様に供試残材の材積を分析すると, 場所と日当たりと乾燥期間の交互作用 (A×B×D) が有意であった ($p < 0.05$; $\rho = 12.0\%$)。場所と日当たりの組み合わせごとに乾燥期間別平均材積を比較すると, 舗装土場の日陰において, 乾燥期間 48 日で円盤サンプルを採取した供試残材 (平均 0.0954±0.0295 m³; a) が乾燥期間 81 日間で円盤サンプルを採取したもの (平均 0.0296±0.0113 m³; b) よりも有意に平均材積が大きいというものであった。また, 乾燥期間 48 日間の 4 水準間では, 舗装土場の日陰 (平均 0.0954±0.0295 m³; a) は日向 (平均 0.0156±0.032 m³; b) よりも有意に材積が大きい ($n = 4$, Tukey-test, $p < 0.05$; 図-8)。

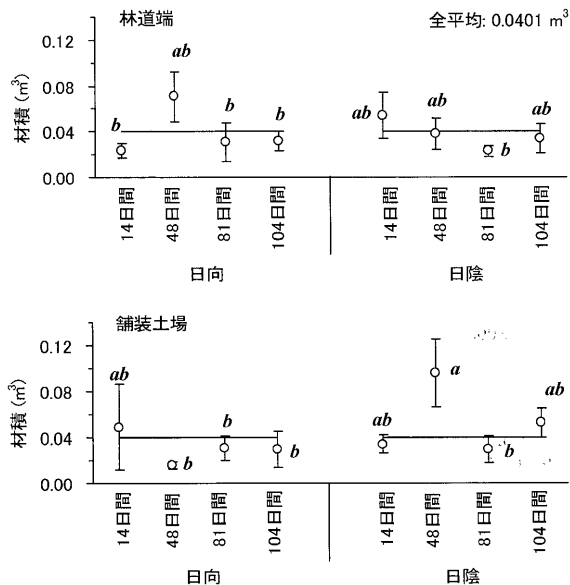


図-8. 供試残材の材積に関する場所と日当たりと乾燥期間の交互作用

縦棒は±SE, 異なるアルファベットは材積の平均値間に有意差があることを示す (Tukey-test, $p < 0.05$; $n = 4$)。

なお、有意な傾向ではないが、林道端、舗装土場どちらにおいても日向の残材の方がやや材積が小さい。供試残材の径と材長との関係 (図-3) から、材積が大きいということは材長が短く径の大きな材であったことを意味する。すなわち、これらの残材の部位は根元部である可能性が高く、径が大きいことから含水率の低い心材部の割合が高かったことが考えられる。逆に材積が小さい供試残材は梢端部からのもので心材部の割合が低かった可能性が高い。しかし、含水率の分析結果で $A \times B \times D$ は有意でなかったことから、こうした材積の偏りは自然乾燥の実験結果には大きく影響しなかったものと考えられる。

3. 林内放置材の含水率

林内放置材から採取した円盤は、平均径 17.4 ± 0.9 cm ($n = 30$, 範囲 9.1~30.3 cm) と自然乾燥実験で採取した 64 個の円盤の平均径 21.4 ± 1.2 cm よりも幾分小さいものとなった。平均全乾比重は 0.407 ± 0.008 ($n = 30$, 範囲 0.286~0.494) であり、自然乾燥実験の円盤サンプル ($n = 64$, 平均 0.410 ± 0.006 , 範囲 0.263~0.487) との間に有意差は認められなかった (t -test, $p = 0.80$)。

採取円盤の平均含水率は、放置期間 1 日間で $92.1 \pm 3.3\%$ (a), 13 日間で $75.6 \pm 2.2\%$ (b), 41 日間で $66.3 \pm 2.3\%$ (c) と明確な減少傾向を示した ($n = 10$, Tukey-test, $p < 0.05$; 図-7)。乾燥期間 13 日間の平均含水率の値は、自然乾燥実験における乾燥期間 14 日間の平均値 ($78.4 \pm 19.6\%$, $n = 16$) に近い。林内放置材の含水率測定用円盤サンプルは根元部から採取したが、この結果には葉枯らしの効果も含まれていると考えられる。ヒノキの葉枯らし乾燥について、岩田ら (1981) が岐阜県美並村で 28 年生 2 m 高直径 14~

16 cm の材を葉枯らし乾燥させた実験結果では、乾燥日数 40 日で伐倒時含水率 125~145% が 80~120% へとほぼ乾燥日数に比例して低下している。岡部・中島 (1992) が広島県庄原市で 30 年生胸高直径 18~22 cm の材を実験した結果では、乾燥日数 30~40 日で伐倒時含水率 100~110% が 60~80% に低下している。ヒノキ伐倒時の含水率については、藤原・岩神 (1988) が高知県土佐山田町で約 50 年生胸高直径 16~24 cm の 12 本を調査した結果によると、辺材と心材の比率に関する記述はないが、辺材は樹高 8 m 以下まではほぼ一定で 100~200%、心材は高さに関わらず 30~40% となっている。すなわち、本研究の林内放置材は、伐倒時含水率が他の研究事例に比べてやや低いものの、葉枯らしによる 40 日間程度までの含水率低下量は他の研究事例と大きく変わらない結果となった。なお、林内放置実験における乾燥期間 13 日間から 41 日間までの日あたり含水率低下は 0.3% である。自然乾燥実験の舗装土場における乾燥期間 14 日間から 48 日間までの日あたり含水率低下は、0.5% とこれより大きな値となっている。林道端ではこの期間ではほとんど含水率は変化していない (平均値では 0.7% の増加)。

放置期間 41 日間の日平均温湿度の平均値はそれぞれ 13.4°C , 82.4% であり、林道端と舗装土場の実験期間中にわたる日平均温湿度の平均値 (14.3°C , 83.0%) とほぼ同じであった。ただし温湿度は林道端で計測されたため、林内放置材付近の実際の温湿度はこれよりもやや林道端の実験地に近かったものと思われる。放置期間中の降水量として最寄りの気象庁観測地点 (繁藤) での観測値を集計すると、その値は 323 mm である (気象庁, 2005)。林道端 (本山) の伐採日以降 10 月 23 日まで (乾燥期間 48 日間) の降水量は 539 mm, 舗装土場 (後免) の同期間降水量は 242 mm であり (気象庁, 2005), 323 mm はこれら両地点の中間的な値となっている。

以上から、自然乾燥実験の場所 2 カ所と林内放置の調査地との間で気象条件に大きな差はなかったものと考えられる。林分条件としてもほぼ同年生のヒノキであり大きな相違はないものとする。自然乾燥実験の残材のうち枝葉付きで放置されていたものについては、伐採直後の含水率は林内放置材の放置期間 1 日間と同程度、すなわち 90% 程度だったものと考えられる。また、林内放置材の乾燥期間 41 日間の平均含水率 66.3% と自然乾燥実験における林道端での乾燥期間 48 日間の平均値 75.5% との差は、約 30 日間の葉枯らし乾燥の効果を示しているものと考えられる。ただし実際の作業では、列状間伐のように伐倒木が積み重なる場合には葉枯らし乾燥は適用しにくい。定性間伐や皆伐時に有用な方法であろう。

IV. おわりに

自然乾燥実験の気象条件に関して、実験期間中の最寄りの気象庁観測地点の降水量には場所による大きな差はなかった。ただし、林道端では伐採後実験開始までにまと

まった降雨があり、さらに標高を考えると林道端の方が舗装土場よりも降水量は幾分多かったと考えられる。温湿度については、林道端で温度が低く湿度が高いことが場所による自然乾燥の効果のおもな原因と考えられる。なお、日当たりによる温湿度の差は認められなかったが、季節性も含めて風通しや地面の水捌けなどの違いが影響していることが考えられる。

供試残材から採取した円盤サンプルの含水率は、林道端では放置期間に関わらずほぼ一定(約80~100%)であり、従来の知見を確認する結果となった。舗装土場では乾燥期間が長くなるにつれて含水率は明確に低下する傾向を示した。一部の供試残材には伐採後から実験開始までの14日間に葉枯らしの効果があつた可能性を考慮すると、ヒノキの場合、伐採直後から本実験と同等の条件の舗装土場で自然乾燥させることにより、3カ月程度で含水率を50%程度以下にできるものと思われる。また、地面に接触している材はそうでない材よりも含水率の低下が遅く、その差は10%程度である。

以上から、チップ化工場等の敷地に舗装土場に相当する条件の十分広い場所がある場合には、林地で発生した丸太形態の残材は舗装土場で自然乾燥させるよう早めにチップ化工場に運ぶことが有利である。工場の敷地に十分な余裕がない場合には、舗装土場に相当する条件の中間土場を標高が低い場所に設ける方法が考えられる。その場合、乾燥による残材の重量減少は中間土場とチップ化工場間の運搬経費削減にも効果がある。

自然乾燥における土と舗装の効果の違いについては、本研究では単独の要因として分析することはできなかった。これを明らかにするためには、地面との接触の有無の要因との関係も考慮したうえで、単独の要因として実験を計画する必要がある。また、本研究では残材の山は3層のみで材長も1m程度であり、含水率測定の際に残材を取り出したため乾燥期間が進むにつれて山は小さくなっていった。しかし、実際の残材の山はより高く積み上げた状態で、さらに大きな材が含まれている場合も多いと思われる。より現実に即した乾燥状態での調査も必要であろう。部位や材の大きさについては、含水率など自然乾燥への影響のみならず、チップ化の際に使用するチップの機種選択にも関係する重要な事項であり、運搬やチップ化など木質バイオマス利用システム計画と関連付けて研究を進めていくべきである。なお利用システムでは、季節的な残材の需給調整や適切な乾燥期間の設定、中間土場を利用した貯留量調整などを考慮する必要があると考えられる。樹種については、特にヒノキ以外の主要な樹種としてスギの場合についての更なる調査が必要と考えられる。

本研究の一部は第115回日本林学会大会でポスター形式により口頭発表した(宮田ら, 2004)。試験用残材および林道端における乾燥実験の試験地提供では山本森林(株)の、林内放置残材の乾燥実験では香美森林組合および高知

県立森林技術センター山口達也主任研究員(当時)の、研究の実行の全般では高知大学農学研究科(当時)兼松敬史氏および森口敬太氏の協力を得た。特に森口氏には研究の計画時から全般にわたり大きな支援をいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 藤原新二・岩神正朗(1988) スギおよびヒノキ材の生材含水率. 高知大学学術研究報告 農学 37: 171-178.
- 後藤純一(2003) 木質系未利用資源とその利用. 機械化林業 591: 4-9.
- Hakkila, P. and Parikka, M. (2002) Fuel resources from the forest. In *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T., and Smith, C.T. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 19-48.
- 池田潔彦・大森昭尋(1990) 針葉樹の林内乾燥に関する研究 (I) —スギの林内葉枯らし効果—. 静岡県林技セ研報 18: 47-52.
- 池田潔彦・大森昭尋(1992) 針葉樹の林内乾燥に関する研究 (II) —ヒノキの伐倒時における含水率及び林内葉枯らし効果—. 静岡県林技セ研報 20: 11-17.
- 岩田隆昭・野原正人・大塚和典(1981) スギ, ヒノキ丸太の林内乾燥について. 岐阜県林セ研報 9: 49-59.
- 岩手県住田町(2002) 住田町木質エネルギー利用検討調査報告書. 85 pp, 岩手県住田町, 住田.
- 川島義紀・岩岡正博・峰松浩彦(2004) 製材工程で発生する木質バイオマスのエネルギー利用と二酸化炭素削減の可能性. 森林学誌 19: 43-48.
- 気象庁(2005) 気象庁 Web 資料: 気象観測 (電子閲覧室) (<http://www.data.kishou.go.jp/>).
- 小宮山宏・迫田章義・松村幸彦(2003) バイオマス・ニッポン 日本再生に向けて. 252 pp, 日刊工業新聞社, 東京.
- 久保山裕史・西園朋広・家原敏郎・奥田浩規(2004) 林業・林産バイオマスのエネルギー利用の可能性について—岩手県遠野市を事例として—. 日林誌 86: 112-120.
- 熊崎 実(2004a) 日本の森林が[京都議定書の]炭素吸収源になるためには除間伐材のエネルギー利用が欠かせない. 木質エネルギー 2: 1-2.
- 熊崎 実(2004b) 木質バイオマスの含水率と発熱量. 木質エネルギー 2: 22-23.
- 宮田大輔・鈴木保志・森口敬太・後藤純一(2004) 林地残材バイオマスの乾燥実験. 115 回日林学術講: 647.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・白石祐治・山口達也・小原 忠(2004a) 林道端に集積されたスギ残材の含水率の経年変化. 日林誌 86: 93-97.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・山口達也・白石祐治・小原 忠(2004b) 林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト. 日林誌 86: 121-128.
- 永田 靖(2000) 入門 実験計画法. 386 pp, 日科技連, 東京.
- 内閣府(2002) バイオマス・ニッポン総合戦略(平成14年12月27日閣議決定). 29 pp, 内閣府, 東京. (<http://www.maff.go.jp/biomass/senryaku/senryaku.pdf>).
- 野原正人・岩田隆昭・山本和雄(1977) 針葉樹材の天然乾燥について. 岐阜県林セ研報 5: 31-48.
- 岡部 茂・中島泰公(1992) スギ・ヒノキ材の林内乾燥試験. 広島県林試研報 26: 113-122.
- 阪井茂美・山本雅彦(1985) スギ丸太の林内乾燥試験. 徳島県林技セ研報 23: 2-8.
- 佐々木誠一・多田野修(2005) チップボイラーによる木材チップ燃料利用技術の開発 (II)—燃料用チップ材等の保管方法の違いによる含水率変化—. 116 回日林学術講: 396.
- 総務省行政管理局(2005) 新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法施行令(平成九年六月二十日政令第288号, 最終改正平成一四年一月二五日政令第一五号). 総務省行政管理局 (Web 資料「電子政府の総合窓口」<http://www.e-gov.go.jp/>).

- 鈴木保志 (2004) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用に向けて—第 11 回森林生産システム研究会報告—. 森林学誌 19: 171-174.
- 多田野修 (2004) 木質バイオマスの地域利用の現状—岩手県での取り組み—. 森林科学 40: 39-44.
- 高橋 徹・中山義雄 (1995) 木材科学講座 3 物理. 174 pp, 海青社, 大津.
- 谷 秀治 (2004) 日本のバイオマス政策. 森林科学 40: 4-9.
- 寺岡行雄・合志知浩 (2005) スギ末木枝条の乾燥過程について. 九州森林研究 58: 38-41.
- 山田隆信 (2004) 山口県における森林バイオマス低コスト燃料化システムへの取り組み—人工林残渣及び竹材搬出のコストシミュレーションによる低コスト搬出への検討—. 機械化林業 609: 5-8.
- 吉川正純 (2002) 葉の重なりの有無が葉枯らし乾燥の効果に与える影響. 森林学誌 17: 67-74.
- Zar, J.H. (1999) Biostatistical analysis, 4th ed. 663 pp, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.