

木質チップボイラの燃料に用いる林地残材の平積み天然乾燥

市原孝志^{*1}・山口達也²・政岡尚志¹・板井拓司³・松岡良昭¹
宮田大輔⁴・小畑篤史⁵・鈴木保志⁶・藤原新二⁶

木質チップボイラの燃料に使用するスギ・ヒノキ林地残材の効率的な乾燥方法を明らかにするため、丸太形質（採取高、丸太長）や乾燥方法（乾燥日数、アスファルト舗装の有無、りん木の有無、屋根の有無）が乾燥速度（あるいは乾量基準含水率50%到達日数、含水率の低下傾向）に与える影響について検討した。目標含水率50%に到達する日数は、初期含水率80%のヒノキが83~151日、初期含水率130%のスギが93~187日であった。乾燥方法別にみると、ヒノキでは屋根+りん木1m長区、アスファルト1m長区、アスファルト2m長区の順で、スギではアスファルト+りん木2m長区、地面+りん木2m長区、アスファルト2m長区、地面2m長区の順に乾燥が速かった。アスファルト舗装上での乾燥は未舗装の地面よりも乾燥速度が速いが、未舗装でもりん木を敷くことにより、舗装でりん木を敷いた場合と同程度の速さで乾燥することから、平積み丸太の乾燥にはりん木の効果が大きいことが明らかになった。

キーワード：アスファルト舗装、含水率、天然乾燥、りん木、林地残材

Takashi Ichihara,^{*1} Tatuya Yamaguchi,² Hisashi Masaoka,¹ Takuji Itai,³ Yoshiaki Matsuoka,¹ Daisuke Miyata,⁴ Atushi Kobatake,⁵ Yasushi Suzuki,⁶ and Shinji Fujiwara⁶ (2009) Transpirational Drying of Flat Piled Logging Residues for Wood Fuel Chips. J. Jpn. For. Soc. 91: 192-200. We analyzed the influence of drying condition on drying speed (arrival day of moisture content 50% or decline trend of moisture content) under the condition that character of logs (height above ground, log length) or drying methods (days of drying, paved or unpaved, using or not using of crossbeam, presence or absence of roof) to develop efficient dry method of Japanese cypress and Japanese cedar for woody biomass boiler. The days required to reach 50% moisture content were that in case of Japanese cypress of 80% initial moisture content were 83~151 days and in case of Japanese cedar of 130% initial moisture content were 93~187 days. The drying rate of cypress were faster in order 1m log with roof and crossbeam, 1 m log on paved area and 2 m log on paved area. In case of cedars the drying rate were faster in order 2 m logs with crossbeams on paved area, 2 m logs with crossbeam on ground, 2 m logs on paved area, 2 m logs on ground. About paved and unpaved, drying speed of paved area was faster than unpaved area. The drying speed was faster in the case of using crossbeams and paved area. Drying speed in case of using crossbeams on unpaved place was as fast as that of using crossbeams on paved place.

Key words: crossbeams, logging residue, moisture content, paved, transpirational drying

I. はじめに

先進諸国のエネルギー利用は石油、石炭等の化石燃料の使用が主流を占めている。しかし化石燃料を使用することで温室効果ガスが増加し、地球温暖化が促進されることが問題となっている。温室効果ガス削減に取り組むために1997年京都で開かれた「気候変動枠組み条約第3回締約国会議」で採択されたいわゆる京都議定書が、2005年2月から正式に発効した。これに伴い日本では2008年から2012年までの5年間に基準年（1990年）の排出量に比べ6パーセントの温室効果ガス削減が義務付けられ、実効性のある取り組みが求められている。

日本は国土の大部分を森林に囲まれた森林資源に恵まれた国であり、古くから木材を燃料として利用してきた。ところが戦後の高度経済成長期以降急激に、燃料としての木材は取扱いやすい石油等の化石燃料にその地位を取って代わられた。しかし、木材はカーボンニュートラルで再生産可能な資源であるため、地球温暖化防止および循環型社会の形成を目指す今、再び脚光を浴びている。2006年3月13日に閣議決定された新たな「バイオマス・ニッポン総合戦略」においては、林地残材といった未利用バイオマスの利活用が期待されている。また、林地残材の利活用が健全な森林整備を進め、森林の荒廃を防止し、地球温暖化の防止、国土の保全、水源のかん養など森林の有する多面的機能の維

* 連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: takashi_ichihara@ken4.pref.kochi.jp

¹ 高知県立森林技術センター 〒782-0078 香美市土佐山田町犬平80 (Kochi Prefectural Forest Technology Center, 80 Oohira Tosayamada-cho, Kami 782-0078, Japan)

² 高知県中央東林業事務所 〒782-0012 香美市土佐山田町加茂777 (Chuuouhigashi Forestry Office, Kochi Prefecture, 777 Kamo, Tosayamada, Kami 782-0012, Japan)

³ 高知県幡多林業事務所 〒787-0028 四万十市市村山手通19 (Kochi-ken Hata Ringyou Jimusyo, 19 Yamatedouri, Nakamura, Shimanto 787-0028, Japan)

⁴ 仁淀消防組合消防本部 〒781-2110 高知県吾川郡いの町3229-2 (Niyodo Fire Department, 3229-2 Ino-cho, Agawa-gun, Kochi 781-2110, Japan)

⁵ キッセイ薬品工業株式会社 〒399-8710 松本市芳野19-48 (Kissei Pharmaceutical Co. Ltd., 19-48 Yoshino, Matsumoto 399-8710, Japan)

⁶ 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)

(2007年9月7日受付; 2009年2月26日受理)

持増進につながるものであることを国民にアピールする必要があるとされており、木質バイオマスの利活用は総合戦略において重要な位置を占めている（農林水産省，2006）。

現在、地球温暖化防止への取り組みとして、岩手（多田野，2004）、山形（山形県最上町，2007）、山口（石松ら，2005）、徳島、高知（高知県，2004；高知県森林局林業振興課，2006）において木質チップまたはペレットボイラの導入が進んでいる。高知県では、2004年度から2007年度まで園芸ハウス加温用ボイラの燃料を化石燃料である重油から木質チップに転換する「中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業」が行われた。この事業ではSCHMID社製の木質チップボイラ（Lignumat UTSL110T）が香南市の園芸ハウスに設置され、木質チップボイラを使用したハウスの温度制御等について研究が行われた（島本ら，2006）。

木質チップボイラの燃料となる木質チップの原料は、林地残材等の木質バイオマスであるが、一般に林地に放置されている木質バイオマスは、水分を多く含んでいる。森口ら（2004）は林地端に林地残材を長期間放置しても乾燥せず、林地残材の山の底部ではかえって含水率が高くなることを報告している。ボイラで木質チップを燃焼する場合、含水率が高くなるにしたがい発生熱量が低下するため（熊崎，2004）、ボイラの燃焼効率も低下する。

木質チップボイラには、大きく分けて高含水率チップボイラと低含水率チップボイラがある。高含水率チップボイラは、木質チップの乾燥機能が必要なため構造が複雑になり大型化し高価である。一方、低含水率チップボイラは、乾燥機能が不要なため構造が比較的単純で小型化でき、高含水率チップボイラと比べて安価である（高知県，2004）。園芸ハウス農家に木質チップボイラを普及させるためには安価であることが不可欠であり、低含水率チップボイラはその点有利といえる。しかし、燃料として使用する木質チップの含水率はメーカーによって50%以下（以下、含水率は乾量基準含水率とする）とするものもある（岡本，2007）。

一方ボイラの燃料として木質チップの利用拡大を目指すには重油との価格競争が避けられず、低コストでのチップ化および乾燥技術の確立が重要な課題となっている。林地残材のチップ化については、移動式チップパを使用した林地残材のチップ化試験において、山土場でチップ化せずに専用土場まで林地端材を運搬してチップ化する方法が、コスト的に有利で最も現実的な生産システムであると報告されている（佐々木，2006）。

また、林地残材の乾燥については、以下のような知見が確認されている。含水率の高い林地残材を生そのままチップにした後平積みして天然乾燥した場合、木質チップのごく表層部は乾燥するが表層部以外の木質チップの乾燥は進まないことから、木質チップを乾燥させるには定期的に攪拌を繰り返す必要がある（吉井・山口，2005；宮田ら，2008）。しかし、丸太の状態であれば、林地以外の標高が低い土場に放置することで、自然に丸太の含水率を低下させること

ができる（宮田ら，2006）。これらのことを考慮すると、林地残材を山元から丸太の状態でチップ化専用土場まで運搬し、数カ月間天然乾燥させ含水率を低下させた後にチップ化する方法が、生の林地残材をチップ化した後に定期的に攪拌しながら乾燥させるより効果的であり、コスト的にも有利と考えられる。

これまで丸太の天然乾燥については、建築用材としての利用を目的とし、運搬軽減、材の色だしおよび人工乾燥の前処理としての研究がおもに行われている。まず、池田・大森（1992）、岡部・中島（1992）、伊藤・池田（2004）は林内等での葉枯らし乾燥について報告している。しかし、現在木質バイオマス燃料の原料として経費的に見合うかたちで利用可能な林地残材は、架線または列状間伐等により林地端まで集材した全木材をプロセッサにより枝払い、玉切りして用材部分を取り除いた後の残材と考えられる。したがって、木質バイオマスとして利用するための残材に葉枯らし乾燥を適用できる可能性は低いであろう。林内での玉切り丸太の乾燥試験については、岩田ら（1981）および阪井・山本（1985）により、また室内の玉切り丸太の乾燥試験としては野原ら（1977）により、穂付、樹皮付き、はく皮等の条件の違いによる検討がされている。しかし、丸太の順置き、逆置き以外の設置方法については比較されていない。津島ら（1989）は陣掛乾燥として枕木を使用して乾燥しているが、枕木の有無についての比較はされていない。ボイラ燃料の製造を目的とした林地残材の乾燥としては、宮田ら（2006）および佐々木・多田野（2005）があるが、これらの研究でも丸太の設置場所におけるりん木の有無については比較されていない。すなわち、アスファルト舗装上で乾燥が行われているが、単独の要因としての土とアスファルト舗装の効果の違いについては比較検討されていない。

本研究は、スギおよびヒノキの皮付き丸太を土場において平積み状態で天然乾燥することを目的に行った。ヒノキの乾燥試験ではアスファルト舗装した場所に長さの異なる丸太（1mおよび2m）を設置し、長さの違いによる含水率の減少経過について観察した。1m長丸太は野外（アスファルト舗装した場所）と雨のかからない場所（屋根付りん木設置）に設置し、屋根とりん木の効果をみることにした。さらに、スギの乾燥試験ではヒノキの試験で明らかにならなかったりん木の効果やアスファルト舗装の効果について調べることにした。すなわち、アスファルト舗装の有無とりん木の有無の条件組み合わせごとに2m長の丸太を設置し、含水率の減少経過を観察した。また、その丸太の採取高が乾燥に与える影響や丸太内の水分分布について分析した。

II. 方 法

1. 供試丸太

1) ヒノキ

高知県立森林技術センター（以下「センター」という）内の35年生ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endl.）10本

(No.1~10) を2004年10月8日に伐採した。そのうちNo.1~4を元口から2mごとに玉切り(2m長丸太22本)し、No.5~10は1mごとに玉切った(1m長丸太67本)。No.1~10の各最小末口径は5.0~10.2cmであった(表-1)。玉切りを行うにあたって、各丸太の両端から厚さ約2~3cmの円盤を採取し、JIS Z2101-1994(高橋・中山, 1992)に従って含水率を測定した。この丸太両端の含水率を平均し、各丸太の試験開始時の含水率とした。また、この含水率から各供試丸太の全乾質量を算出した。

2) スギ

2005年7月27日にセンター内の29~33年生スギ(*Cryptomeria japonica* D.Don) 8本(No.1~8)を伐採した。8月9~11日に各立木を長さ2mごとに1番玉から7番玉または8番玉まで玉切りした(2m長丸太63本)。各スギ丸太の試験開始時の含水率および全乾質量は、ヒノキの場合と同様にして求めた。No.1~8の各最小末口径は2.0~6.4cmであった(表-1)。

表-1. 供試丸太の概要

樹種	試験区分		元口径 (cm)	末口径 (cm)	材積 (m ³)
ヒノキ	アスファルト2m長 (n=22)	平均	20.7	17.2	0.061
		標準偏差	5.2	5.5	0.031
	アスファルト1m長 (n=34)	平均	16.0	14.6	0.019
		標準偏差	4.5	4.5	0.010
	屋根+りん木1m長 (n=33)	平均	15.7	14.2	0.018
		標準偏差	4.1	3.9	0.009
スギ	アスファルト+りん木2m長 (n=16)	平均	15.4	12.7	0.035
		標準偏差	5.0	5.0	0.021
	アスファルト2m長 (n=16)	平均	17.1	14.5	0.043
		標準偏差	4.8	5.0	0.024
	地面+りん木2m長 (n=15)	平均	14.4	11.9	0.030
		標準偏差	4.4	4.1	0.018
	地面2m長 (n=16)	平均	17.1	14.6	0.043
		標準偏差	3.9	4.9	0.019

末口径・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。

2. 設置方法

1) ヒノキ

ヒノキ丸太は以下の方法で、2004年10月8日から2005年7月28日までの約10カ月間、自然状態で乾燥を行った。2mに玉切ったNo.1~4の供試丸太22本(以下これを「アスファルト2m長区」という、図-1B)と1mに玉切ったNo.5~7の供試丸太34本(以下「アスファルト1m長区」、図-1B)は、センター内の材料環境関係試験棟(以下「試験棟」)前のアスファルト舗装した空地(標高約100m)に元口と末口の向きを揃えてアスファルトに直接接するようにして並列に設置した。1mに玉切ったNo.8~10の供試丸太33本は、試験棟の軒下に高さ3cmのりん木を敷いて、直接地面(石が敷いてある)に接しないようりん木上に供試丸太を並列に設置した(以下「屋根+りん木1m長区」、図-1A)。なお、試験期間中の平均気温は14.5℃(最高気温32.9℃, 最低気温-4.5℃), 平均相対湿度は81.2%, 平均月積算雨量は156.9mmで、平年並みであった。

2) スギ

スギ丸太は、以下の四つの試験区分に分け、2005年8月12日から2006年3月27日までの約8カ月間、自然状態で乾燥を行った。一つ目はアスファルト上に丸太のりん木(平均直径11cm)を敷き、その上にNo.1, 2のスギ丸太計16本を設置した(以下「アスファルト+りん木2m長区」、図-1C)。二つ目はアスファルト上にりん木を敷かずじかにアスファルトに接するようにNo.3, 4のスギ丸太計16本を設置した(以下「アスファルト2m長区」、図-1B)。三つ目はアスファルト舗装していない地面の上に丸太のりん木(平均直径14cm)を敷き、その上にNo.5, 6のスギ丸太計15本を設置した(以下「地面+りん木2m長区」、図-1E)。四つ目はアスファルト舗装していない地面の上にりん木を敷かずじかに地面に接するようにNo.7, 8のスギ丸太16本を設置した(以下「地面2m長区」、図-1D)。

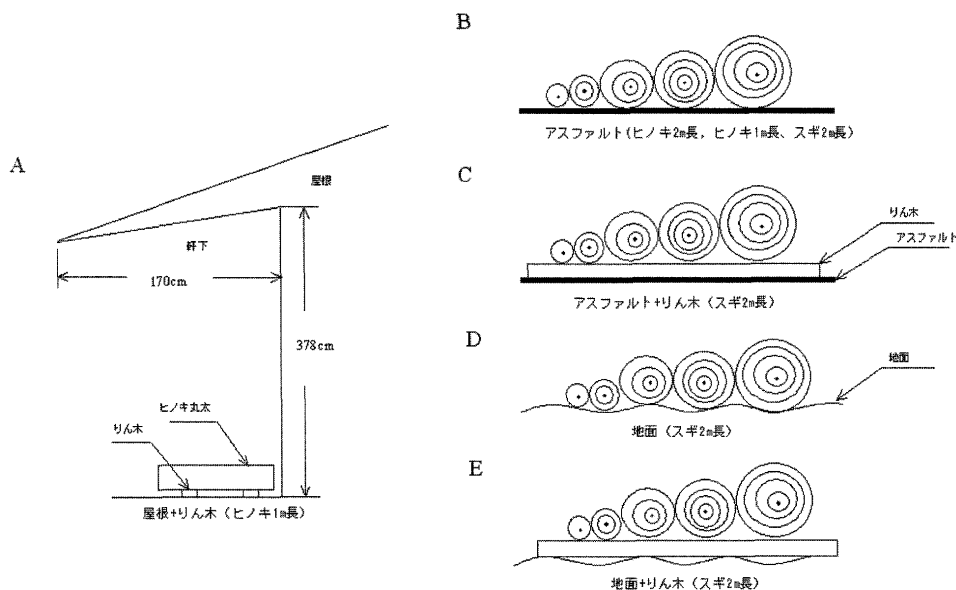


図-1. スギ・ヒノキ丸太の設置状況

スギ丸太の設置場所として、試験棟前のアスファルト舗装した空地（標高約 100 m）にアスファルト+りん木 2 m 長区、アスファルト 2 m 長区の二つの試験区を設けた。そして同じくセンター内で、上記の空地から西に 200 m 程度離れたアスファルト舗装していない空地に地面+りん木 2 m 長区、地面 2 m 長区の試験区を設定した。供試丸太は元口と末口の向きを揃えて並べた。なお、試験期間中の平均気温は 13.8℃（最高気温 35.6℃，最低気温 -3.6℃），平均相対湿度は 79.5%，平均月積算雨量は 147.4 mm で、平年並みであった。

3. 丸太含水率の測定方法

月に 1 回程度、各丸太を 1 本ずつ電子台はかり（A & D HW-200KGL）に載せ、質量を測定した。そして、当初求めた各丸太の全乾質量と測定質量より丸太の含水率を算定した。なお、丸太の質量測定は降雨直後を避けて行った。

スギ丸太は、丸太内の部位による乾燥度合いの違いを知るために、試験終了後（アスファルトとアスファルト+りん木は 227 日目に、地面と地面+りん木は作業の都合上 241 日目に行った）に各丸太の木口面から長さ 40 cm 間隔で厚さ 2~3 cm の円盤を採取し（各 6 枚）、JIS Z2101-1994 に従って丸太内部の含水率を測定した。

III. 結 果

1. ヒノキ

アスファルト 2 m 長区、アスファルト 1 m 長区、屋根+りん木 1 m 長区の試験開始時の平均含水率と標準偏差は、それぞれ 76.2±7.2%（ $n=22$ ），75.7±6.6%（ $n=34$ ），76.8±8.2%（ $n=33$ ）であった。屋根+りん木 1 m 長区は 2 カ月で、アスファルト 1 m と 2 m 長区は 3~4 カ月で 50% を割り込み、試験終了時にはアスファルト 2 m 長区 16.0±4.4%，アスファルト 1 m 長区 15.3±3.2%，屋根+りん木 1 m 長区 13.9±2.9% であった（図-2）。

これらヒノキ丸太の含水率を目的変数として、二つの要因すなわち「A：試験区」（アスファルト 2 m 長区、アスファルト 1 m 長区、屋根+りん木 1 m 長区の 3 水準）、「B：経過

日数」（0 日目，39 日目，67 日目，104 日目，151 日目，189 日目，224 日目，245 日目，293 日目の 9 水準）について分散分析を行った（Zar, 1999）。

分散分析の結果、単要因は「A：試験区」（ $p<0.01$ ，寄与率 $\rho=3.3\%$ ）、「B：経過日数」（ $p<0.01$ ， $\rho=87.5\%$ ）が有意であった。一方、交互作用では「A：試験区」×「B：経過日数」（ $p<0.01$ ， $\rho=2.0\%$ ）が有意であった。B の寄与率が大きいのは自明なので、以下特に乾燥に影響する要因として A について詳述する。

要因「A：試験区」の各水準間における多重比較の結果、アスファルト 2 m 長区（45.3±1.5%；水準平均±標準誤差 SE， $n=198$ ，a），アスファルト 1 m 長区（43.3±1.3%， $n=306$ ，b），屋根+りん木 1 m 長区（35.7±1.4%， $n=297$ ，c）の 3 水準すべての間に有意差が認められた（Tukey-test， $p<0.01$ ）。なお、多重比較の各比較対における同じアルファベットは平均値間に有意差のないことを意味する。

また、初期含水率を 80% としてヒノキ丸太が含水率 50% に到達するまでの日数を推定するため、個々のヒノキ丸太の試験開始時から含水率 50% に最も近い測定日までの日あたりの含水率減少量（以下「平均乾燥速度」とする）を求めた。この乾燥速度を用い含水率が 50% に到達する日数を算出し、この日数を目的変数として「試験区」（アスファルト 2 m 長区、アスファルト 1 m 長区、屋根+りん木 1 m 長区の 3 水準）を要因とした分散分析を行った結果は有意で、各水準平均はアスファルト 2 m 長区 150.7 日（平均乾燥速度=0.23%/日， $n=22$ ，a），アスファルト 1 m 長区 130.7 日（0.24%/日， $n=34$ ，a），屋根+りん木 1 m 長区 83.1 日（0.38%/日， $n=33$ ，b）であった（Tukey-test， $p<0.01$ ，図-3）。

2. スギ

1) 設置場所，経過日数，りん木および採取高との関係
試験開始時の平均含水率と標準偏差は、アスファルト 2 m 長区 131.0±8.4%（ $n=16$ ），地面+りん木 2 m 長区 128.3±11.7%（ $n=15$ ），地面 2 m 長区 126.0±15.2%（ $n=16$ ），アスファルト+りん木 2 m 長区 108.0±8.1%（ $n=16$ ）であり、

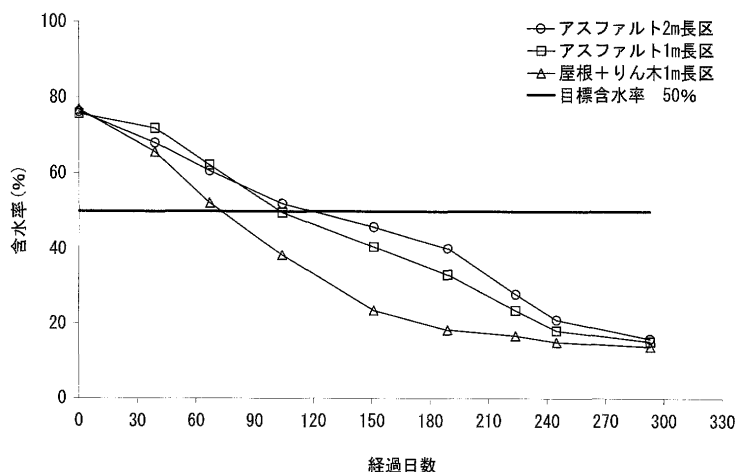


図-2. ヒノキ丸太の乾燥経過

アスファルト+りん木 2m 長区の平均含水率がほかの試験区と比べて約 20% 低かった。アスファルト+りん木 2m 長区は 2 カ月で、地面+りん木 2m 長区とアスファルト 2m 長区は 3 カ月で、地面 2m 長区は 4~5 カ月で含水率 50% を割り込み、試験終了時には含水率の高い順から地面 2m 長区 $44.3 \pm 11.9\%$ (227 日目までの平均乾燥速度: $0.36\%/日$)、アスファルト 2m 長区 $36.4 \pm 13.4\%$ ($0.42\%/日$)、地面+りん木 2m 長区 $30.5 \pm 7.5\%$ ($0.43\%/日$)、アスファルト+りん

木 2m 長区 $24.3 \pm 5.5\%$ ($0.37\%/日$) であった (図-4)。

これらスギ丸太の含水率を目的変数として四つの要因すなわち「A: 設置場所」(アスファルト, 地面の 2 水準), 「B: 経過日数」(0, 33, 62, 96, 124, 152, 185, 227 日目の 8 水準), 「C: りん木」(りん木有, りん木無の 2 水準), 「D: 採取高」(0~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10, 10~12, 12~14, 14~16m の 8 水準) について分散分析を行った (Zar, 1999)。

分散分析の結果, 要因「A: 設置場所」($p < 0.01, \rho = 1.9\%$), 「B: 経過日数」($p < 0.01, \rho = 75.1\%$), 「C: りん木」($p < 0.01, \rho = 4.6\%$), 「D: 採取高」($p < 0.01, \rho = 7.6\%$) と単要因のすべてについて, また交互作用では「A: 設置場

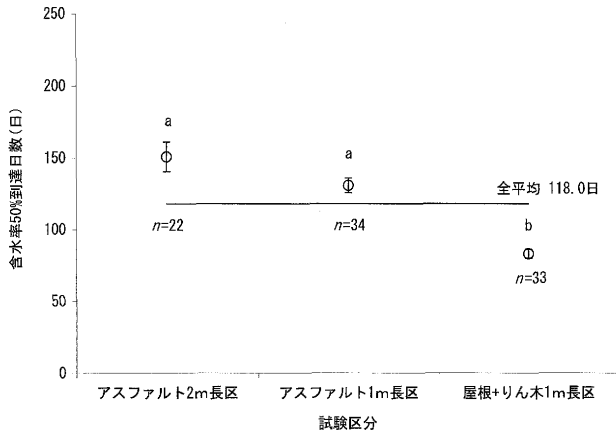


図-3. ヒノキ丸太の目標含水率 (50%) 到達日数を目的変数に, 試験区分を要因とした分散分析における多重比較の結果

初期含水率を 80% とし, 50% に到達するまでの日数を縦軸に示した。縦棒は標準誤差を示す。アルファベットは多重比較の結果を示し, 各比較対間と同じアルファベットが含まれると, 到達日数の平均値間に有意差がないことを示す (Tukey-test, $p < 0.01$)。

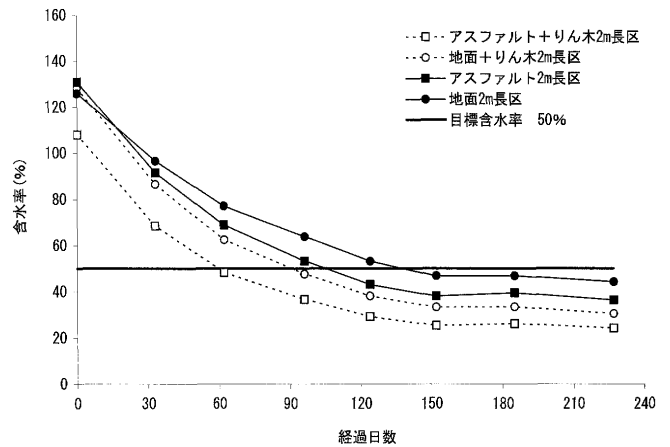


図-4. スギ丸太の乾燥経過

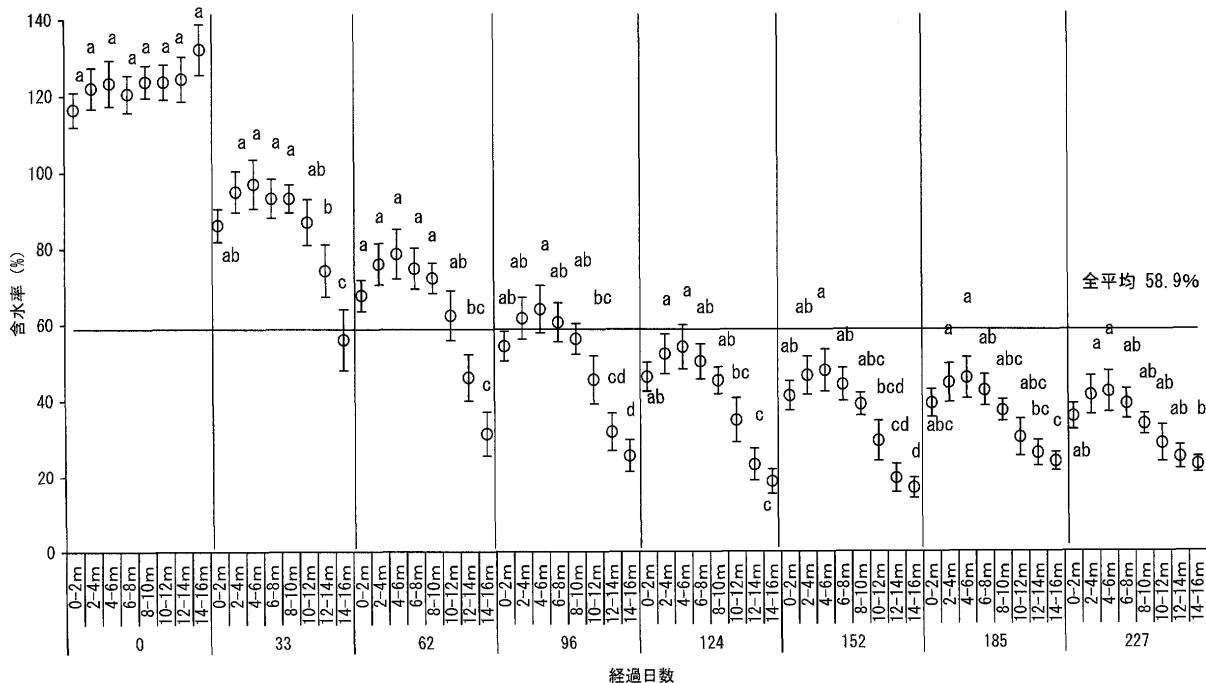


図-5. スギ丸太の含水率を目的変数に, 設置場所, 経過日数, りん木および採取高を要因とした分散分析における交互作用, 経過日数×採取高の多重比較の結果

縦棒は標準誤差を示す。アルファベットは多重比較の結果を示し, 各比較対間と同じアルファベットが含まれると, 含水率の平均値間に有意差がないことを意味する (Tukey-test, $p < 0.05$, 各水準の $n = 8$, ただし 14~16m の $n = 7$)。ただし多重比較の結果は煩雑さを避けるため同じ経過日数内におけるものに限定して示した。

所)×「C:りん木」($p<0.05$, $\rho=0.0\%$), 「B:経過日数」×「D:採取高」($p<0.01$, $\rho=2.3\%$), 「C:りん木」×「D:採取高」($p<0.01$, $\rho=2.1\%$), 「A:設置場所」×「B:経過日数」×「C:りん木」($p<0.01$, $\rho=0.4\%$), 「A:設置場所」×「C:りん木」×「D:採取高」($p<0.01$, $\rho=1.0\%$)について有意であった。以下、寄与率の高い要因のうち、効果が自明なBを除いたA, C, D, B×D, C×Dについて詳述する。

まず2水準の要因について、「A:設置場所」および「C:りん木」の各水準平均は、それぞれアスファルト $54.3\pm 2.1\%$ (水準平均±SE, $n=256$, b), 地面 $63.6\pm 2.1\%$ ($n=248$, a) および、りん木有 $51.5\pm 2.1\%$ (水準平均±SE) ($n=248$, b), りん木無 $66.0\pm 2.1\%$ ($n=256$, a) であった (Tukey-test, いずれも $p<0.01$)。

また、要因「D:採取高」については、0~2m: $60.9\pm 3.6\%$ (水準平均±SE) ($n=64$, c), 2~4m: $67.5\pm 3.8\%$ ($n=64$, a), 4~6m: $69.2\pm 3.9\%$ ($n=64$, a), 6~8m: $65.7\pm 3.7\%$ ($n=64$, ab), 8~10m: $62.7\pm 3.9\%$ ($n=64$, bc), 10~12m: $55.3\pm 4.5\%$ ($n=64$, d), 12~14m: $46.4\pm 4.6\%$ ($n=64$, e), 14~16m: $41.0\pm 5.2\%$ ($n=56$, f) となった。すなわち株元からみて0~6mまでは採取高が高くなるにつれて丸太の含水率も高くなるが、6~16mにかけては低くなる傾向が認められた (Tukey-test, $p<0.05$)。

交互作用「B:経過日数」×「D:採取高」の各水準組み合わせ間における多重比較の結果、同じ経過日数内で比較すると0日目では各採取高の間に有意差が認められなかったが、33日目には2~10mと12~16mの間で、62, 96および124日目には0~10mと12~16mの間で、152日目には0~8mと12~16mの間で、185日目には2~8mと14~16mの間で、227日目には2~6mと14~16mの間で含水率に有意差が認められた (Tukey-test, $p<0.05$, 図-5; ただし多重比較の結果は、全体で示すとアルファベットが同時に11個並ぶ頻度となるため同じ経過日数内に限定して示している)。同じ経過日数内における最大と最小の水準平均含水率の差は、0日目から227日目まで順に16, 41, 47, 39, 36, 31, 22, 19%となり、62日目に最大となるが、それ以降227日目にかけてその差が小さくなった。

交互作用「C:りん木」×「D:採取高」の各水準間における多重比較の結果、りん木有では0~2m: $61.0\pm 5.2\%$ ($n=32$, bcd), 2~4m: $55.0\pm 5.1\%$ ($n=32$, de), 4~6m: $56.0\pm 5.1\%$ ($n=32$, de), 6~8m: $55.6\pm 5.1\%$ ($n=32$, de), 8~10m: $59.1\pm 5.6\%$ ($n=32$, cde) と10~12m: $45.0\pm 6.1\%$ ($n=32$, f), 12~14m: $39.2\pm 6.1\%$ ($n=32$, f), 14~16m: $37.4\pm 8.0\%$ ($n=24$, f) の間に有意差が認められた。りん木無では2~4m: $80.0\pm 4.8\%$ ($n=32$, a), 4~6m: $82.5\pm 5.0\%$ ($n=32$, a), 6~8m: $75.9\pm 4.9\%$ ($n=32$, a) と0~2m: $60.8\pm 4.9\%$ ($n=32$, bcd), 8~10m: $66.3\pm 5.6\%$ ($n=32$, b), 10~12m: $65.5\pm 6.1\%$ ($n=32$, bc), 12~14m: $53.5\pm 6.7\%$ ($n=32$, e), 14~16m: $43.7\pm 6.8\%$ ($n=32$, f) の間において有意差が認められた。りん木の有無の間で同じ採取

高を比較すると、2~14mにおいて、りん木有の平均含水率がりん木無の平均含水率より有意に低かった (Tukey-test, $p<0.05$)。

また、ヒノキと同様に初期含水率を130%としてスギ丸太が含水率50%に到達するまでの日数を推定するため、個々のスギ丸太の試験開始時から含水率50%に最も近い測定日までの平均乾燥速度を算出した。この日数を目的変数として「A:設置場所」(2水準), 「B:採取高」(含水率の分析のDと同じ8水準), 「C:りん木」(有, 無の2水準)の3要因で分散分析を行った。なお、繰返し数が異なる(地面+りん木2m長区のみ $n=15$)ため、田口・横山(1979)の方法に従った。その結果、単要因「A:設置場所」($p<0.01$, $\rho=4.4\%$), 「B:採取高」($p<0.01$, $\rho=42.7\%$), 「C:りん木」($p<0.01$, $\rho=21.6\%$)のすべてが、交互作用では「A:設置場所」×「C:りん木」($p<0.01$, $\rho=4.2\%$)が有意であった。以下、これら有意であったA, B, C, およびA×Cについて詳述する。

要因「A:設置場所」の水準平均はアスファルトが 110.7 ± 10.1 日 ($n=32$, b), 地面が 144.1 ± 13.4 日 ($n=31$, a) であった (Tukey-test, $p<0.01$)。要因「B:採取高」の各水準平均は、0~2m: 140.6 ± 15.7 日 ($n=8$, ab), 2~4m: 176.9 ± 21.8 日 ($n=8$, a), 4~6m: 175.3 ± 23.0 日 ($n=8$, a), 6~8m: 162.2 ± 23.4 日 ($n=8$, ab), 8~10m: 129.5 ± 14.8 日 ($n=8$, ab), 10~12m: 108.4 ± 25.2 日 ($n=8$, bc), 12~14m: 69.1 ± 9.5 日 ($n=8$, cd), 14~16m: 45.2 ± 11.9 日 ($n=7$, d) であった (Tukey-test, $p<0.05$)。要因「C:りん木」の各水準平均は、りん木有 95.7 ± 6.4 日 ($n=31$, b), りん木無 157.6 ± 13.8 日 ($n=32$, a) であった (Tukey-test, $p<0.01$)。

交互作用「A:設置場所」×「C:りん木」については、アスファルト+りん木 93.3 ± 9.1 日 ($n=16$, c), アスファルト 128.1 ± 17.4 日 ($n=16$, b), 地面+りん木 98.3 ± 9.1 日 ($n=15$, bc), 地面 187.1 ± 19.1 日 ($n=16$, a) であった (Tukey-test, $p<0.05$, 図-6)。

2) 丸太内の水分分布

アスファルト+りん木2m長区, およびアスファルト2m長区については、試験終了後の227日目に丸太内の水分分布を測定するため円盤を採取した。ただし、地面+りん木2m長区および地面2m長区については、241日目に採取したため、測定期間に14日間の開きができた。しかし、地面+りん木2m長区, 地面2m長区の227日目に測定した各丸太質量と241日目に測定した丸太質量の差は平均0.9%の減少であったため、比較可能であると考えた。そこで、スギ丸太の木口からの距離による含水率の違いについて要因を「A:試験区」(アスファルト+りん木2m長区, アスファルト2m長区, 地面+りん木2m長区, 地面2m長区の4水準)と「B:木口からの距離」(元口, 元口から40cm, 元口から80cm, 末口から80cm, 末口から40cm, 末口の6水準)の二つとして分散分析を行った。ただし、繰返し数が異なる(地面+りん木2m長区の14-16m末口のデータが欠測)ため、田口・横山(1979)の方法に従った。

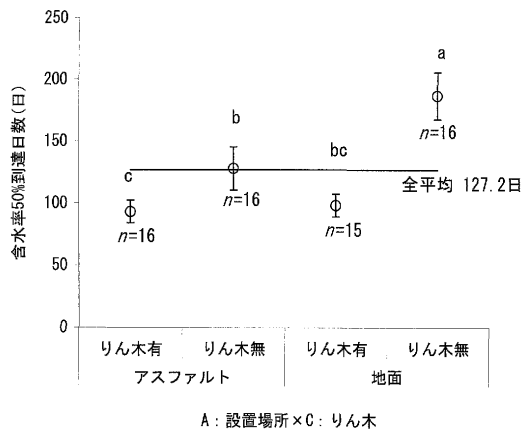


図-6. スギ丸太の目標含水率(50%)到達日数を目的変数に、設置場所、採取高、およびりん木を要因とした分散分析における交互作用、設置場所×りん木の多重比較の結果

初期含水率を130%とし、50%に到達するまでの日数を縦軸に示した。縦棒は標準誤差を示す。アルファベットは多重比較の結果を示し、各比較対間と同じアルファベットが含まれると、到達日数の平均値間に有意差がないことを示す(Tukey-test, $p < 0.05$)。

分散分析の結果、要因「A: 試験区」($p < 0.01$, $\rho = 15.4\%$)、「B: 木口からの距離」($p < 0.01$, $\rho = 44.3\%$)、および交互作用「A: 試験区」×「B: 木口からの距離」($p < 0.01$, $\rho = 2.7\%$)のいずれも有意であった。

要因「A: 試験区」の各水準間における多重比較の結果、地面2m長区(水準平均±SE; $42.2 \pm 1.8\%$, $n = 96$, a)とアスファルト+りん木2m長区($26.1 \pm 0.9\%$, $n = 96$, c)、アスファルト2m長区($33.9 \pm 1.8\%$, $n = 96$, b)、地面+りん木2m長区($28.7 \pm 1.1\%$, $n = 89$, c)の間に、アスファルト2m長区とアスファルト+りん木2m長区、地面+りん木2m長区の間有意差が認められた(Tukey-test, $p < 0.01$)。

要因「B: 木口からの距離」の各水準間における多重比較の結果、元口(水準平均±SE; $19.3 \pm 0.7\%$, $n = 63$, b)、元口から40cm($38.3 \pm 1.6\%$, $n = 63$, a)、元口から80cm($42.0 \pm 1.9\%$, $n = 63$, a)、末口から80cm($42.0 \pm 1.9\%$, $n = 63$, a)、末口から40cm($37.9 \pm 1.7\%$, $n = 63$, a)、末口($17.1 \pm 0.4\%$, $n = 62$, b)となり、両木口から40cm、80cmの含水率と両木口の含水率間に有意差が認められたが、両木口から40cmと80cmの間に有意差は認められなかった(Tukey-test, $p < 0.01$)。

交互作用「A: 試験区」×「B: 木口からの距離」の各水準間における多重比較の結果、すべての両木口間間の含水率に有意差は認められなかった。一方、アスファルト+りん木2m長区とアスファルト2m長区の両木口から80cm間、および地面+りん木2m長区と地面2m長区の両木口から40cm、両木口から80cm間においては有意差が認められた。しかし、アスファルト+りん木2m長区と地面+りん木2m長区の間、また同様にアスファルト2m長区と地面2m長区の間においては、すべての部位について有意差が認められなかった(Tukey-test, $p < 0.05$)。

IV. 考 察

1. ヒノキ

天然乾燥では、含水率45%まで急速に乾燥するが、それ以降の乾燥は遅くなり、最終的な含水率も17%から25%とされている(寺澤, 1994a)。屋根+りん木1m長区の含水率は、151日目に21%と平衡含水率(平均気温14.5℃, 平均相対湿度81.2%での平衡含水率は16%; 寺澤, 1994b)に近づいたため、それ以降、含水率の低下が小さくなった。このため、試験期間後半245日目以降に他の試験区がこれに追いついたと考えられる。すなわち、約7カ月目まで屋根+りん木1m長区の含水率の低下は大きい、約10カ月以上の長期間にわたって乾燥すると、2m長か1m長か、野外のアスファルトか、屋根の下でりん木を敷いているかの違いによる含水率の差はほとんどなくなる。

これを平均乾燥速度で比較すると、試験開始から151日目までの平均乾燥速度はアスファルト2m長区0.20%/日、アスファルト1m長区0.23%/日、屋根+りん木1m長区0.35%/日となる。しかし、151日目から293日目まででは、アスファルト2m長区0.21%/日、アスファルト1m長区0.18%/日、屋根+りん木1m長区0.07%/日である。つまりアスファルト2m長区と1m長区の平均乾燥速度は0~151日目と151~293日目ではほとんど変化していないが、屋根+りん木1m長区は、0~151日目まで大きく減少するものの151日目以降は減少速度が低下していたことが確かめられた。したがって、短期間に丸太を乾燥するには屋根の下でりん木を敷いた乾燥が有効と考えられる。

含水率を目的変数とした分散分析の結果から、屋根+りん木1m長区が最もよく乾燥し、アスファルト2m長区よりアスファルト1m長区の丸太の乾燥が進むといえる。含水率50%到達日数を目的変数とした分散分析の結果でも、屋根+りん木1m長区の乾燥が最も速く83.1日で、つづいてアスファルト1m長区が130.7日、アスファルト2m長区は最も遅く150.7日である。2m長丸太と1m長丸太の50%到達日数に有意な差は認められなかったが、50%よりさらに乾燥させようとすると1m長丸太の方が2m長丸太よりも早く乾燥すると考えられる。一般に林地残材の含水率は高いが、長さの短いものが多いと考えられるため、本研究の結果を考慮すると短期間で乾燥できる可能性がある。

同じヒノキについて、宮田ら(2006)の報告では舗装土場における乾燥開始14日から104日目まで含水率が82%から38%に低下しており、平均乾燥速度は0.49%/日であった。これは本研究で最も条件に近いアスファルト1m長区の約2倍であるが、この相違の原因として、丸太の長さの平均は94cmとほぼ同じだが、宮田ら(2006)ではばらつきが37~138cmと大きく、さらに丸太径についても末口径が本研究では5~23cmであるが宮田らでは9~52cmとばらつきが大きかったこと、また、乾燥開始時期が9月からと約1カ月早かったことが影響していると考えられる。

2. スギ

1) 設置場所、経過日数、りん木、および採取高の関係
各試験区で試験開始時の含水率が異なるため、試験開始時から50%に最も近い測定日の期間について平均乾燥速度を比較してみる。平均乾燥速度は大きい順にアスファルト+りん木2m長区1.07%/日、地面+りん木2m長区1.00%/日、アスファルト2m長区0.93%/日、地面2m長区0.55%/日であった。岩田ら(1981)は丸太のはえ積み乾燥ではあるが、スギ2m長皮付き丸太(樹高2mの直径約15cm)の林内乾燥について8月から160日経過しても含水率にほとんど変化はないが、2m長はく皮丸太では100日間で平均含水率が160%から60%に低下し平均乾燥速度が1.00%/日であったと報告している。この事例では平衡含水率に達していないため、本研究の試験開始時から50%に最も近い測定日間の平均乾燥速度と比較可能と考えられる。すなわち、林内ではえ積みされたはく皮丸太の乾燥は地面2m長区(0.55%/日)より乾燥速度が速いが、アスファルト2m長区(0.93%/日)、地面+りん木2m長区(1.00%/日)、およびアスファルト+りん木2m長区(1.07%/日)と同程度といえる。

津島ら(1989)はスギ丸太を直接地面に接しないよう枕木を敷いて丸太を1列に並べた陣掛乾燥を行っているが、そのうち本研究と最も条件に近い10月から乾燥が行われた2m長皮付き丸太(末口平均16.7cm)の屋外乾燥では約110日間で140%から90%程度に含水率が低下しており、平均乾燥速度は0.45%/日程度であった。これも本研究の試験開始時から50%の平均乾燥速度と比較可能と考えられるが、その速度は地面+りん木2m長区(1.00%/日)より遅い。一方同時期の2m長はく皮丸太は屋外でも130%から20%程度に含水率が低下しており、平均乾燥速度は1.00%/日程度であった。これらは平衡含水率に近いため、本研究の地面+りん木2m長区における試験開始時から終了時までの値0.43%/日、アスファルト+りん木2m長区の0.37%/日と比較可能と考えられる。すなわち、屋外のはく皮丸太の陣掛乾燥に比べて地面+りん木2m長区、アスファルト+りん木2m長区の平均乾燥速度はともに遅く、屋外はく皮丸太陣掛乾燥の約1/2~1/3といえよう。

交互作用「C:りん木」×「D:採取高」の結果から、0~2mと14~16mを除いてりん木を設置すると丸太の含水率の低下が大きかった。0~2mの丸太についてりん木の有無に有意な差がなかった原因については不明であるが、幹の直径と心材直径は、1次の直線関係で表せ(深澤, 1997)、さらに辺材は心材に比べて乾燥が速い(寺澤, 1994c)。つまり、径が大きいと乾燥が遅く、径が小さいと乾燥が速いといえる。そのため、林地残材を乾燥させる場合、径の大きな丸太と心材がほとんどない径の小さな丸太を仕分け、径の大きな丸太はりん木を敷いた上で乾燥することで乾燥が促進でき、心材がほとんどない径の小さな丸太はりん木を敷かずに乾燥しても短期間で乾燥できると考えられる。

含水率50%到達日数を目的変数とした分散分析に関する要因「A:設置場所」から、アスファルト上で乾燥させる

と、地面で乾燥させるより33日短く、また、要因「C:りん木」から、りん木を敷くと、敷かない場合より62日短く50%に到達する。交互作用「A:設置場所」×「C:りん木」から、地面にりん木を敷くと、地面に直接丸太を設置する場合よりは89日短く含水率50%に到達し、また、アスファルトにりん木を敷いた場合との差は著しく小さくなる。そのため、アスファルト舗装されていない場所で丸太を乾燥させる場合、りん木を敷くことでアスファルトにりん木を敷いて乾燥するのと同様の効果があるといえる。

2) 丸太内の水分分布

要因「B:木口からの距離」の多重比較の結果において、木口から中心に向かうに従い含水率が高くなっていったが、これはおもに丸太の水分の蒸散は木口から進むためと考えられる。交互作用「A:試験区」×「B:木口からの距離」の多重比較の結果から、木口はりん木の有無や地面の種別に関わらず、一様に乾燥が進み、そのため、りん木は丸太中央部の含水率低下に効果があるといえる。

これらの分析で明らかになったように、木口と中央部には含水率の偏りができる。ただし1m長弱程度の長さならば偏りの問題は少ないと考えられるため、長い残材については乾燥に先立ち短く玉切ることができれば、乾燥を促進させることが可能である。なお、丸太内部に含水率の偏りがあっても、攪拌後のチップの平均含水率は丸太の平均含水率となるため、チップ加工後に攪拌工程を加えることにより含水率の均一化が図れると考えられる。

V. おわりに

本研究ではりん木の高さについて検討することができなかつたため、今後はりん木の高さが与える効果、経費や手間を考慮した適当な高さについても検討する必要がある。また、丸太の乾燥は、スギ、ヒノキともに個体差や生育環境によって含水率にばらつきがあるためその後の乾燥期間に大きな影響を与える。今後、これらの点について検討する必要がある。

今回の試験は丸太を平積み状態で天然乾燥したが、平積みで端材を乾燥させるには広大な土場が必要となるため、都市部では実用的には困難と考えられる。そのため、土場で効率的に乾燥ができるように丸太を積上げたはえ積み状態での天然乾燥についても今後研究が必要である。

本研究の一部は第116回および第117回日本森林学会大会で口頭発表した(宮田ら, 2005; 鈴木ら, 2006)。また、本研究は高知県による「中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業」の2004年度から2007年度事業の一部として実施し、データの一部を高知県立森林技術センター研究報告第34号に発表した。

最後に、匿名の審査者からは有用なご意見をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

引用文献

- 深澤和三(1997) 樹体の解剖. 199pp, 海青社, 大津.
- 池田潔彦・大森昭壽(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.
- 石松晶子・井上善夫・平国俊昭(2005) 木質ペレットボイラー冷暖房システムについて. 日本木材学会中国四国支部 17 回研究発表会要旨集: 54.
- 伊藤憲吾・池田潔彦(2004) スギ葉枯らしによる乾燥効果の季節間変動. 静岡県林技セ研報 32: 37-42.
- 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. 岐阜県林業セ研報 9: 49-59.
- 高知県(2004) 平成 15 年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業調査 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術実証試験事業調査. 86pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 高知県森林局林業振興課(2006) 高知県木質バイオマス活用プラン. 47pp, 高知県森林局林業振興課, 高知.
- 熊崎 実(2004) 木質バイオマスの含水率と発熱量. 季刊・木質エネルギー 2: 22-23.
- 宮田大輔・鈴木保志・後藤純一(2006) 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.
- 宮田大輔・鈴木保志・秦野瑤子・後藤純一・山口達也・吉井二郎(2005) 林地残材バイオマスの乾燥とチップ形状. 日林学術講 116: 171.
- 宮田大輔・鈴木保志・小畑篤史・後藤純一・板井拓司・政岡尚志・吉井二郎(2008) 木質チップの自然乾燥における攪拌の効果. 日林誌 90: 75-83.
- 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(2004) 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.
- 野原正人・岩田隆昭・山本和雄(1977) 針葉樹林の天然乾燥速度について. 岐阜県林業セ研報 5: 31-48.
- 農林水産省(2006) 農林水産省 Web 資料: バイオマス・ニッポンの総合戦略 (<http://www.maff.go.jp/biomass/index.htm>).
- 岡部 茂・中島泰公(1992) スギ・ヒノキ林の林内乾燥試験. 広島県林試研報 26: 113-122.
- 岡本利彦(2007) 木質焚きボイラー特有の設置後に起こりうる諸問題と対応. 季刊・木質エネルギー 17: 19-21.
- 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(2006) 燃料用チップはどれくらいで供給できるのか(その 1). 機械化林業 630: 7-12.
- 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) —燃料用チップ等の保管方法の違いによる含水率変化—. 日林学術講 116: 396.
- 島本 悟・刈谷 学・本川高男(2006) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術—園芸ハウスに適した加温システムの開発—. 高知県工業技術センター 2005 研究開発&企業支援成果報告書 1: 14-15.
- 鈴木保志・宮田大輔・小畑篤史・後藤純一・吉井二郎・政岡尚志・板井拓司(2006) 丸太形状とチップ形状でのスギ残材の自然乾燥. 日林学術講 117: 123.
- 多田野修(2004) 木質バイオマスの地域利用の現状—岩手県での取組み—. 森林科学 40: 39-44.
- 田口玄一・横山巽子(1979) 実験計画法(経済工学シリーズ 18). 370pp, 日本規格協会, 東京.
- 高橋 徹・中山義雄(1992) 木材科学講座 3. 174pp, 海青社, 大津.
- 寺澤 眞(1994a) 天然乾燥. (木材乾燥のすべて. 寺澤 眞編, 海青社, 大津). 433-447.
- 寺澤 眞(1994b) 木材人工乾燥の基礎用語. (木材乾燥のすべて. 寺澤 眞編, 海青社, 大津). 144-149.
- 寺澤 眞(1994c) 挽材面の呼び名. (木材乾燥のすべて. 寺澤 眞編, 海青社, 大津). 651-652.
- 津島俊治・神田哲夫・後藤康次(1989) スギ丸太の効率的乾燥方法に関する研究. 大分県林試研時報 14: 9-29.
- 山形県最上町(2007) 平成 18 年度成果報告書 バイオマスエネルギー地域システム化実験事業「ウェルネスタウン最上」木質バイオマスエネルギー地域冷暖房システム実験事業実績報告書. 130pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 吉井二郎・山口達也(2005) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術. 平成 16 年度高知県森技セ試験研究実績報告書: 22-23.
- Zar, J.H. (1999) Biostatistical analysis, 4th ed. 663pp, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.