

速報

燃料に用いるヒノキ丸太のはえ積みによる天然乾燥*1

溝口哲生*2・森口直哉*2

溝口哲生・森口直哉：燃料に用いるヒノキ丸太のはえ積みによる天然乾燥 九州森林研究 73：125 - 128, 2020 はえ積みしたヒノキ丸太の剥皮処理や栈木による乾燥促進効果とはえ積みした丸太の含水率を推定する方法について検討を行った。丸太を速く乾燥させるためには、剥皮が有効な方法であった。また、栈木やはえ内の位置の違いによる乾燥促進効果も認められた。応力波伝播速度、固有振動数、含水率の測定開始時の値を基準（100）としたときの応力波伝播速度比ならびに固有振動数比と含水率比の関係には強い相関関係がみられた。この結果から、応力波伝播速度比や固有振動数比から含水率比を推定する関係式に加え、丸太の乾燥開始時の含水率と経時的に応力波伝播速度または固有振動数を測定することは、乾燥途中の丸太の含水率を推定するための有効な方法であると考えられる。

キーワード：ヒノキ、天然乾燥、含水率、応力波伝播速度、固有振動数

I. はじめに

近年、建築材料として利用できないスギやヒノキの多くは重油等の化石燃料に代わる再生可能なエネルギーである木質バイオマス燃料として利用が進められている。木質バイオマスを燃料として利用する場合、燃焼して得られるエネルギーは木質バイオマスの含水率に影響を受ける⁽⁵⁾。また、木質バイオマスボイラーには、燃焼可能な含水率の範囲がある。今回行った、長崎県内の温浴施設等に木質バイオマスボイラーを導入しているメーカーへの聞き取りでは、乾量基準による含水率が50%程度のものが求められていた。しかし、スギやヒノキでは、伐採直後の含水率が100%を超えるものも多い。そのため、木質バイオマスの含水率を燃焼に適した範囲まで効率的に低下させる必要がある。木質バイオマスを乾燥させる場合、丸太又はチップの状態乾燥させることになる。宮田等⁽²⁾や三好等⁽³⁾が行った木質チップの乾燥試験では、山積したチップは表層部分のみが乾燥するだけであり、均一に乾燥させるには攪拌する必要があるとしている。チップの攪拌には、攪拌する設備等の整備や労力が必要となる。そのため、今回は丸太の状態乾燥させることを検討した。県内のチップ生産工場は製紙用チップとして、丸太を剥皮した後、チップにしているところが多い。そこで、試験では、設備等の整備にコストはかからず、丸太の乾燥促進が期待される剥皮処理による乾燥促進効果を調査するとともに栈木による効果も調査した。また、含水率管理された木質バイオマスの安定供給を行っていくため、はえ積みしたときの丸太の含水率を推定する方法についても検討したので報告する。

II. 材料と方法

1. はえ積みした丸太の天然乾燥促進試験

試験には、4 mのヒノキ丸太を用いた。丸太の乾燥は、直径が大きいほど遅くなると片桐等⁽¹⁾や野原等⁽⁴⁾は報告している。そこで、今回の試験では、丸太の直径による乾燥への影響を除くた

め、丸太は全て末口直径が16 cm程度とした（表-1）。試験材の調製と試験区の設定は次の手順で行った。2018年12月4日に4 mの長さのヒノキ丸太を2 mに2つに切断し、84本の試験材を得た。試験区は表-1に示す組み合わせで、長崎県農林技術開発センター内の圃場に設定した。各試験区の試験材は21本とし、りん木の上に三角状にはえ積みした。栈木ありの試験区は、試験材2段毎に栈木を入れた（図-1）。剥皮処理は、試験区を設定した日にそれぞれ行った。はえ積みした試験材の元口は各試験区とも同じ方角を向くようにした。はえの中試験材の位置が乾燥に及ぼす影響を検討するため、図-1において、はえの南に面している試験材1, 2, 4, 7, 11, 16を南、北に面している試験材3, 6, 10, 15, 21を北、それ以外の試験材を内と区分した。さらに、内に区分した試験材のうち5, 8, 9を内・上、12, 13, 14, 17, 18, 19, 20を内・下として、はえの上部、下部による影響も検討した。試験材の含水率は次のようにして求めた。試験材の重量を月に1回から2回測定し、試験終了時に長さ方向の中心部分から厚さ5 cmの円板を切り出し、全乾法により試験材の含水率と推定全乾重量を算出した。次いで、各測定時点の試験材の重量からその時点の含水率を算出した。試験材は重量測定後、同じ位置に積み直した。

2. はえ積みした丸太の乾燥中の含水率推定方法の開発

はえ積みした丸太の含水率を簡易な方法で推定する一つの方法として、動的ヤング率を算出する式を利用した。動的ヤング率は応力波伝播速度で表すと $E = \rho v^2$ （ ρ ：密度、 v ：応力波伝播速度）であり、固有振動数で表すと $E = (2fL)^2 \rho$ （ f ：固有振動数、 L ：木材の長さ、 ρ ：密度）となる。動的ヤング率は、木材の含水率が繊維飽和点以上であれば一定であるとされている。また、丸太の乾燥中、丸太の体積はほとんど変化しない。そこで本研究では、乾燥中の試験材の重量変化すなわち試験材内水分の重量変化と応力波伝播速度、固有振動数を測定することにより、試験材の含水率の推定を試みた。応力波伝播速度は、ファコップ（エフティーエス株式会社）を用いて、応力波の伝播時間を測定し、その値と測定センサー間の距離から算出される。今回の試験

*1 Mizoguchi, T. and Moriguchi, N.: Air Seasoning of Piling Hinoki Log for Woody Biomass Fuel.

*2 長崎県農林技術開発センター森林研究部門 Nagasaki Agri. & Forestry Tech. Dev. Center, Isahaya Nagasaki 854-0063, Japan

では、測定センサー間の距離と試験材の長さはほとんど同じであると考えられるため、応力波伝播速度は、試験材の長さから算出した。測定センサーは、試験材の中心部を挟んで対角線上の位置になるように両木口近くの試験材の側面に挿入した(図-2)。応力波伝播時間は1本あたり5回測定した値の平均値とした。固有振動数の測定はFFTアナライザー(SA-A1VA リオン社)を用いて行った。測定した値は、1次固有振動数であり、1本あたり3回測定した値の平均値とした。応力波伝播時間と固有振動数の測定は、はえ積みしたままで同じ試験材を用いて行った。測定した試験材の位置は図-1において、試験区①では4,5,6,19,20,試験区②では2,4,12,16,17,試験区③では1,10,19,20,21,試験区④では3,7,9,10,21であった。測定は試験材の重量を測定した日に合わせて行った。

表-1. 試験材と試験区の概要

試験区	樹皮	棧木	本数 (本)	長さ (m)	末口 直径 (cm)	初期 含水率 (%)	初期 重量 (kg)	認定日
①	あり	なし	21	2	16.8	84.2	39.5	2018年12月5日
②	あり	あり	21	2	16.5	79.4	38.3	2018年12月5日
③	なし	なし	21	2	16.4	80.3	38.0	2018年12月5日
④	なし	あり	21	2	16.3	77.6	36.1	2018年12月7日

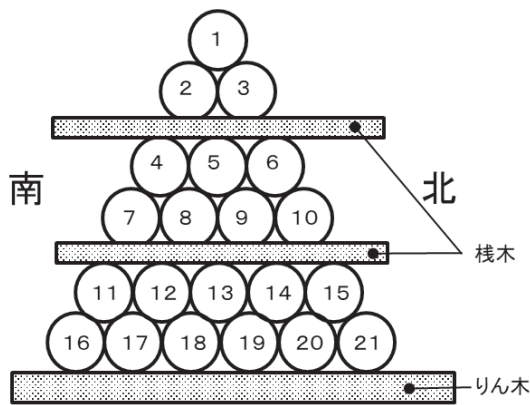


図-1. 棧木を入れた試験区のはえ積み状況とはえ内の位置による区分

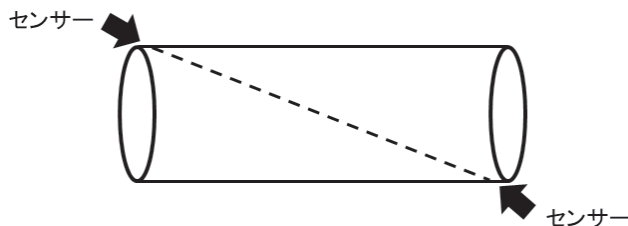


図-2. 試験材に挿入したファコップのセンサーの位置

Ⅲ. 結果と考察

1. 含水率の推移と含水率が50%になるまでの日数

処理別の試験材の乾量基準含水率の推移を図-3に示す。試験開始時の試験材の含水率は試験区①は84.2%,試験区②は79.4%,試験区③は80.3%,試験区④は77.6%であった(表

1)。樹皮なしの試験区③,④は、樹皮ありの試験区①,②と比較して、試験開始後から含水率は大きく低下し、2月27日には試験区③は28.5%,試験区④は27.0%であった。それ以降は、ほとんど含水率の変化はみられなかったが、7月12日と9月6日の測定では、梅雨や雨の日が続いた影響により、含水率はわずかに増加していた。試験終了時の含水率は、試験区③は21.2%,試験区④は20.2%であった。樹皮ありの試験区①,②の含水率は、試験開始から6月末まで低下を続け、6月25日には試験区①は27.5%,試験区②は25.8%であった。その後、含水率は樹皮なしの試験区③,④と同様に増加したが、試験終了時の含水率は両試験区とも26.3%であった。含水率が50%になるまでの日数は試験区①は110日、試験区②は69日、試験区③は30日、試験区④は20日であった。野原等(4)は丸太を乾燥させる時期によっても乾燥速度が異なるとしている。今回の試験は冬季から始めたが、夏季に丸太の乾燥を始めることにより、乾燥期間は今回の結果より短くできると推察される。次に各試験区におけるはえ内の位置別の試験材の乾量基準含水率の推移を図-4に示す。各試験区において、試験開始時の含水率は、はえ内の位置により異なっていたが、全試験区とも含水率が50%になるまでの日数は南が短く、試験区①では64日、試験区②では46日、試験区③では25日、試験区④では16日であった。また、各試験区において日数が長かったのは、試験区①では北が121日、試験区②では北が89日、試験区③では内・上が44日、試験区④では内・下が23日であり、南との差は試験区①,②,③,④の順に57日、43日、17日、7日であった。樹皮なしの試験区は、樹皮ありの試験区と比べてその差は小さかった。また、棧木を入れることにより、樹皮あり、樹皮なしの試験区とも棧木なしと比べて差はわずかに小さくなった。樹皮なしの試験区③,④では2月末の測定時には全ての位置で含水率が30%以下になり、はえ内の位置による含水率の差がなくなった。その後、含水率は全ての位置において、梅雨時期にわずかに増加したが、試験終了時には20%程度であった。樹皮ありの試験区①,②では試験開始から6月末の測定時まで含水率は低下しており、その後は試験区③,④と同様にわずかに増加していたが、大きな変化はみられなかった。試験終了時の含水率は、試験区①では南が22.5%,北が27.0%,内・上が28.0%,内・下が28.2%であった。試験区②では南が23.6%,北が28.1%,内・上が27.0%,内・下が27.2%であった。

2. 乾燥速度

各試験区の含水率が50%になるまでの乾燥速度(1日あたりの含水率の減少量)を算出した。その乾燥速度を目的変数とし、樹皮、棧木、位置を説明変数とした3元配置の分散分析を行った。その結果は、各説明変数とも主効果は有意であった(表-2)。また、樹皮×棧木、樹皮×位置の交互作用が有意であった。交互作用が認められたため単純主効果の検定を行った。交互作用「樹皮×棧木」では、乾燥速度は棧木なしの試験区では、樹皮なしが1.04%/日、樹皮ありが0.31%/日であり、棧木ありの試験区では、樹皮なしが1.40%/日、樹皮ありが0.43%/日であり、両試験区ともに樹皮の有無により有意な差がみられた(図-5)。乾燥速度は、棧木の有無にかかわらず、剥皮することにより3倍程度となった。この結果から、乾燥速度を速めるためには、

樹皮を剥ぐことは有効な方法であることが明らかになった。また、樹皮の有無にかかわらず、椀木による乾燥促進効果もわずかにみとめられた。しかし、含水率が50%になるまでの日数は試験区④が③より10日短くだけであった。そのため、チップ生産の現場では、剥皮した場合の椀木の有無は、椀木を入れる労力と時間を考慮して決める必要があると考える。次に交互作用「樹皮×位置」について単純主効果検定を行った(図-6)。乾燥速度は、はえ内の位置により異なった。樹皮なしの試験区では、乾燥速度

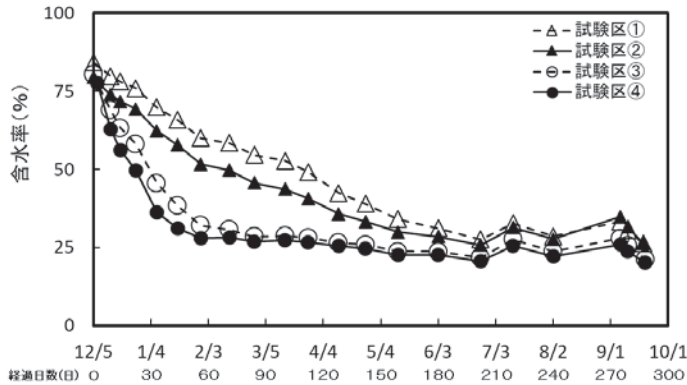


図-3. 処理別の試験材の乾量基準含水率の推移

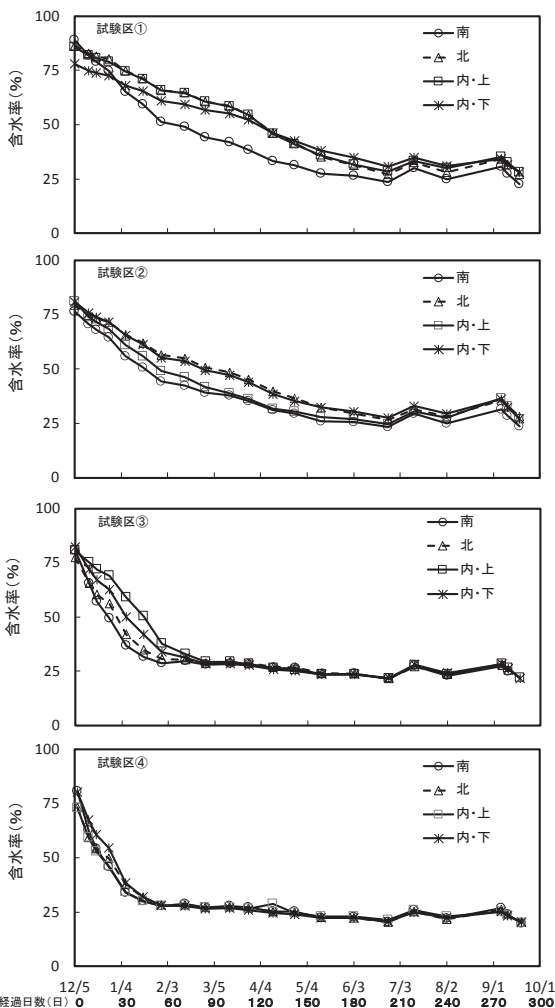


図-4. 各試験区におけるはえ内の位置別の乾量基準含水率の推移

表-2. 乾燥速度について樹皮、椀木、位置を要因とした3元配置分散分析の結果

要因	平均平方和	自由度	F値	p値
樹皮	12.632	1	332.730	2.2E-16 **
椀木	1.238	1	32.620	2.7E-07 **
位置	1.495	3	13.126	7.4E-07 **
樹皮×椀木	0.328	1	8.630	0.00451 **
樹皮×位置	0.525	3	4.611	0.00538 **
椀木×位置	0.254	3	2.234	0.09211 ns
樹皮×椀木×位置	0.112	3	0.983	0.4062 ns
残差	2.582	68		

※ **は1%水準で有意であることを示す。
nsは有意差がないことを示す。

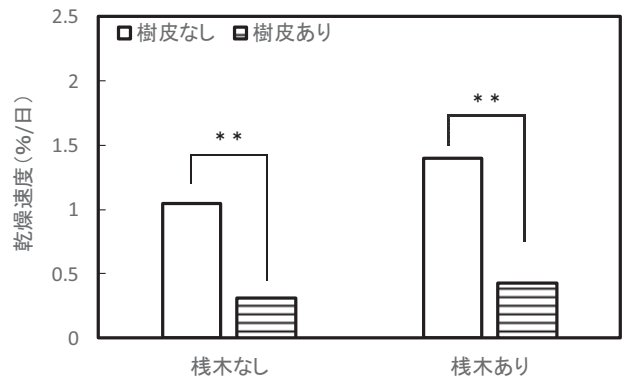


図-5. 椀木の有無における樹皮の効果

※ t検定 **は1%水準で有意であることを示す。

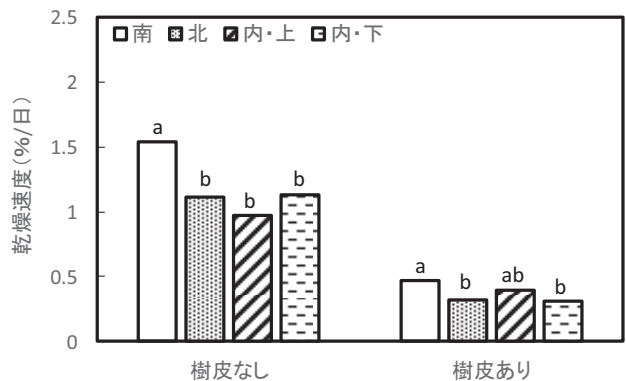


図-6. 樹皮の有無におけるはえ内の位置の効果

※ Tukey - Kramer法 異なる文字間に5%で有意差あり

は内・上、内・下、北、南の順に速くなっており、それぞれ0.97%/日、1.13%/日、1.16%/日、1.54%/日であった。樹皮ありの試験区では、乾燥速度は内・下、北、内・上、南の順に速くなっており、それぞれ0.31%/日、0.32%/日、0.39%/日、0.47%/日であった。はえの内部の上下による乾燥速度の差はみられなかった。樹皮の有無にかかわらず、南が最も乾燥速度が速くなっていたのは、直射日光が試験材にあたるため、温度が高くなっていること、また、はえの外側に位置していることにより、通気もよくなっているためと考えられる。

3. 応力波伝播速度ならびに固有振動数からの丸太含水率の推定

応力波伝播速度と含水率の関係を図-7, 固有振動数と含水率の関係を図-8に示す。応力波伝播速度と含水率の関係, 固有振動数と含水率の関係には, ともに負の相関関係がみられた。しかし, 応力波伝播速度と含水率の関係をみると応力波伝播速度が4,000 m/s のとき, 含水率は30%から80%程度の値となるため, 今回の結果において, 応力波伝播速度の値から含水率を推定すると精度は低くなる。固有振動数から含水率を推定する場合においても同様であった。そこで, 応力波伝播速度, 固有振動数, 含水

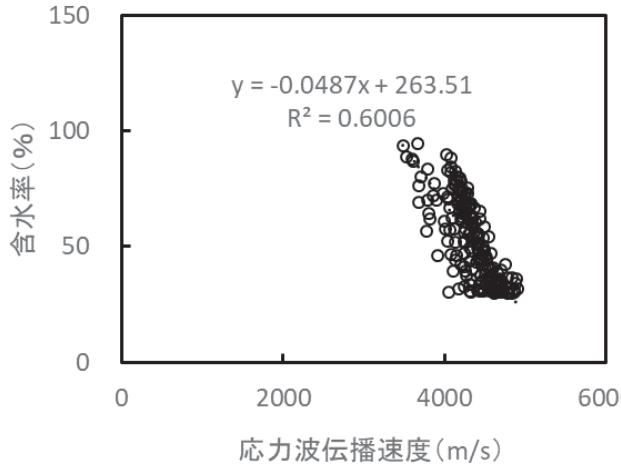


図-7. 応力波伝播速度と乾量基準含水率の関係

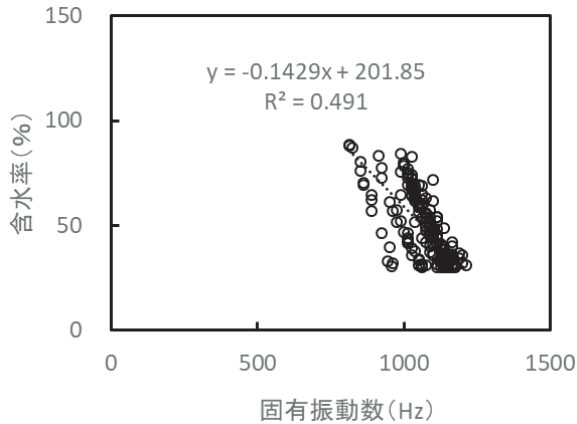


図-8. 固有振動数と乾量基準含水率の関係

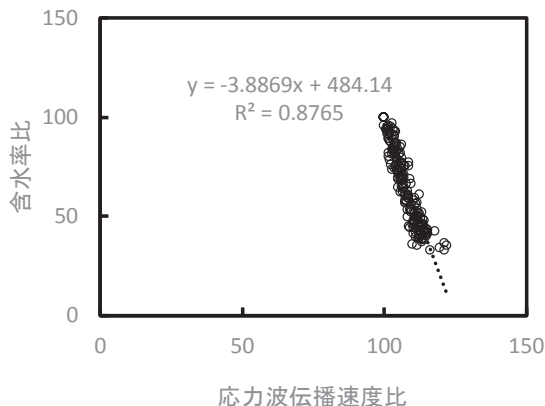


図-9. 測定開始時を基準としたときの応力波伝播速度比と含水率比の関係

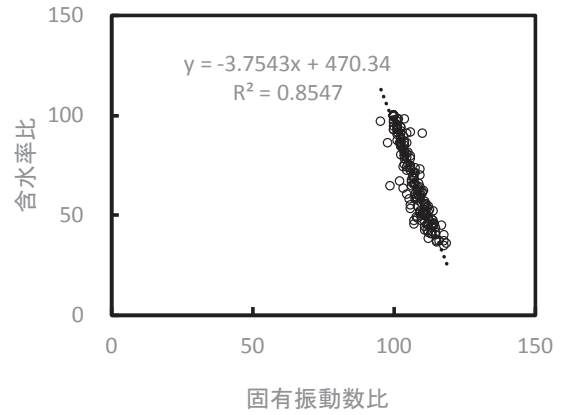


図-10. 測定開始時を基準としたときの固有振動数比と含水率比の関係

率の測定開始時の値を基準(100)としたときの応力波伝播速度比, 固有振動数比, 含水率比から試験材の含水率の推定を試みた。応力波伝播速度比と含水率比の関係を図-9, 固有振動数比と含水率比の関係を図-10に示す。応力波伝播速度比ならびに固有振動数比と含水率比の関係は, 両関係ともに強い負の相関関係がみられた。この結果から, 応力波伝播速度比や固有振動数比から含水率比を推定する両式に加え, 乾燥開始時の含水率と経時的に応力波伝播速度または固有振動数を測定することにより, 乾燥途中の丸太の含水率が推定できると考えられる。

IV. おわりに

燃料に用いるヒノキ丸太の含水率を50%まで速く低下させるためには, 丸太を剥皮する方法が有効であり, 栈木による乾燥促進効果も認められた。また, はえ内の位置により乾燥速度が異なることも明らかになった。応力波伝播速度, 固有振動数, 含水率の測定開始時の値を基準としたときの応力波伝播速度比ならびに固有振動数比と含水率比の関係には強い相関関係がみられた。この結果により, 応力波伝播速度比や固有振動数比から含水率比を推定する関係式に加え, 丸太の乾燥開始時の含水率と応力波伝播速度または固有振動数を経時的に測定することは, 乾燥中の丸太の含水率を推定するための有効な方法であることが示された。今回の試験では, 丸太の含水率は丸太から円板を採取して全乾法により求めた。しかし, 実際には, 丸太を乾燥させる直前に円板を採取して含水率を測定することは労力と時間が必要となるため, 今後, 乾燥開始時の丸太の含水率を簡易に推定する方法についても検討が必要である。

引用文献

- (1) 片桐幸彦ほか (2000) 日林九支研論 53: 183-184
- (2) 宮田大輔ほか (2008) 日本森林学会誌 90 (2): 75-83
- (3) 三好和広ほか (2009) 高知県森林セ研報 34: 1-30
- (4) 野原正人ほか (1977) 岐阜県林セ研報 5: 31-48
- (5) 森林総合研究所監修 (2004) 木材工業ハンドブック改訂第4版, pp 1042, 丸善

(2019年11月10日受付; 2019年12月28日受理)