

完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥装置の研究開発(その3)

—木材の乾燥具合と材質—

Development on a Fully Passive Solar Lumber Drying Apparatus (Part 3)

— Drying Process and Wood Quality of Dried Lumber —

古賀 信也^{*1}

Shinya KOGA

金山 公夫^{*2}

Kimio KANAYAMA

馬場 弘^{*3}

Hiromu BABA

菅原 智美^{*3}

Tomoyoshi SUGAWARA

Abstract

Two fully passive type solar lumber-drying houses (East-West type, North-South type) were evaluated based on five experiments. The drying abilities of two houses were almost same. Both of the drying houses could decrease the moisture content of 30% for 14 days (2.2% per day) with floor heater and 23% for 14 days (1.7% per day) with no floor heater. The dried lumber showed little warp and checks, and the drying process of two houses did not significantly affect the wood colour and dynamic MOE of lumbars. However resin exudates occurred due to low temperature drying. This study indicated that the developed drying houses have good performance from viewpoint of drying process and wood quality except the resin exudates problem.

キーワード：太陽熱、透明温室、木材乾燥、材質、カラマツ

Keywords: Solar thermal, Transparent hot house, Wood drying, Wood quality, Japanese larch

1. はじめに

著者らは、地球温暖化防止に貢献する技術開発のひとつとして、平成 17 年度から太陽熱を利用した木材乾燥装置の開発に関する共同研究を進めている。前報^{(1),(2)}では、その開発コンセプト、採用した主要技術と要素技術、それらに基づき実際に設計・建設された完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥ハウスの概要、体積集熱量の計算法と予測および実測データに基づいて体積集熱量を計算等を行い、実証試験における熱性能の評価について述べた。本報告では、その試作された完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥における実証試験の結果の一部、すなわち製材品の乾燥経過および乾燥後の木材の材質を中心に述べる。

2. 木材乾燥装置の概要

開発された乾燥装置の基本構成は、CF シートを内張した三重透明フィルムで覆われた温室、床暖埋設のコンクリート床および断熱円筒のドラフトから構成され、パッシブに集熱された太陽熱と、ファンコンおよび床暖からの木質ペ

レット燃焼熱を熱源とする補助熱によって所定の室温を維持し、ファンコン内蔵のファンと小型ファンによって室内空気を循環させ、乾燥で生じた湿った空気を断熱円筒のドラフトを利用してパッシブに排気する仕組みとなっている。ここでは、北側面を不透明断熱壁とし、材を東西方向に入れ、室内空気を一方向にのみ循環させるタイプ(東西型)(図 1)と材を南北方向に入れ、室内空気を半日ごとに正逆反転させ循環させるタイプ(南北型)(図 2)を建設し、実証試験を行った。装置の詳細については、前報⁽¹⁾を参照されたい。

3. 実験材料と方法

東西型および南北型を対象に 2006 年 10 月から 2007 年 8 月にかけて計 5 回の乾燥試験を行った。すなわち第 1 回は 2006 年 10 月 31 日から 11 月 15 日まで、第 2 回は 2006 年 12 月 13 日から 12 月 28 日まで、第 3 回は 2007 年 2 月 19 日から 3 月 5 日まで、第 4 回は 2007 年 5 月 8 日から 5 月 22 日、第 5 回は 2007 年 8 月 16 日から 8 月 31 日までである。第 1 回～第 3 回では、生材状態のカラマツ製材(枠組壁工法構造用製材 204 材:厚さ 50 × 幅 100 × 長 3650 mm) 441 枚(8.0m³)を 21 段 21 列に積み重ね、両装置内ともに 2 週間乾燥させた。第 4 回、第 5 回では、板の枚数(材積)を若干増やし、550 枚(10.0m³)を 25 段 22 列となるように積み重ね、同様に 2 週間乾燥させた。第 1 回～第 4 回はファンコンおよび床暖による補助熱を使用し、第 5 回は補助熱なしで実施した。なお、板と板の間の積木の本数は 5 本で、厚さ 22mm で、期間中 1.2t の重しを最上段に載せ乾燥させた。乾燥期間中の室内外の気温・湿度等の環境計測を行う

*1 九州大学農学部附属演習林北海道演習林准教授

(〒089-3705 足寄町北5条1-85)

e-mail: kogafor@mbox.nc.kyusyu-u.ac.jp

*2 北見工業大学名誉教授

(〒006-0023 札幌市手稲区手稲本町3条4丁目1-14-203)

e-mail: kmkana@bridge.ocn.ne.jp

*3 ~*4 マルショウ技研株式会社

(〒089-3705 足寄町西町6丁目1番地3)

(原稿受付: 2008年4月8日)

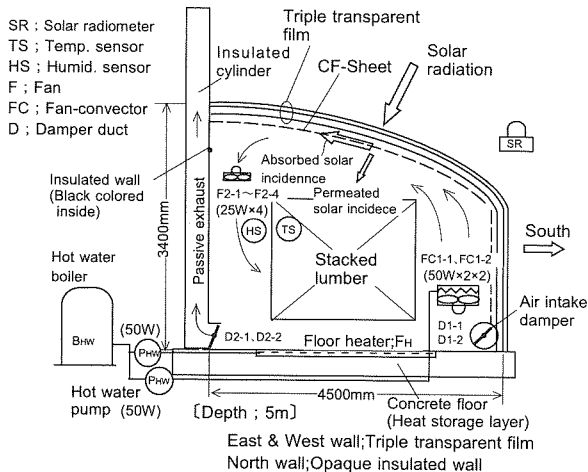


Fig. 1 Fully passive solar lumber drying house (East-West type)

とともに、栈積材の各位置（第1回～第3回は上段から1, 6, 11, 16, 21段目の各段の南北タイプでは東側、東西タイプでは南側から1, 6, 11, 16, 21列目；第4回、第5回は上段から1, 6, 11, 16, 21段目の各段の南北タイプでは東側、東西タイプでは南側から1, 6, 11, 16, 22列目）の製材を対象に含水率の変化を重量変化により観察した。また同じ材を対象に建築用材として利用する際に重要で乾燥方法の影響をうけると考えられる以下の材質指標を測定し乾燥前後の評価を行った。

(1) 材の狂い

木材は乾燥するにつれ収縮するが、収縮量が方向および部位によって異なるために狂いを生じる⁽³⁾。狂いの指標として図3に示す曲がり(crook)、縦ぞり(bow)、ねじれ(twist)を乾燥前後に測定した。曲がりとは最大の变形を示す部位の矢高を実測し、ねじれについては、材の一端を水平面に密着した際に生じる他端両隅の水平面からの高さと同材幅を測定し、両隅の高さの差と材幅にもとづく逆正弦からねじれ角度を求めた。

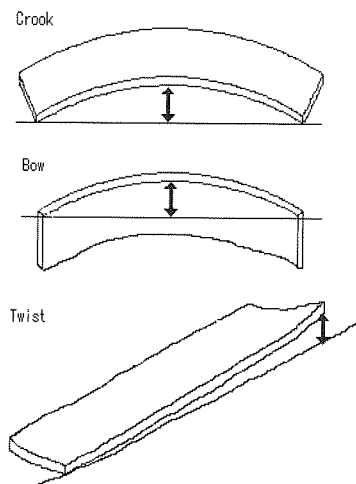


Fig. 3 The type of warp measured.

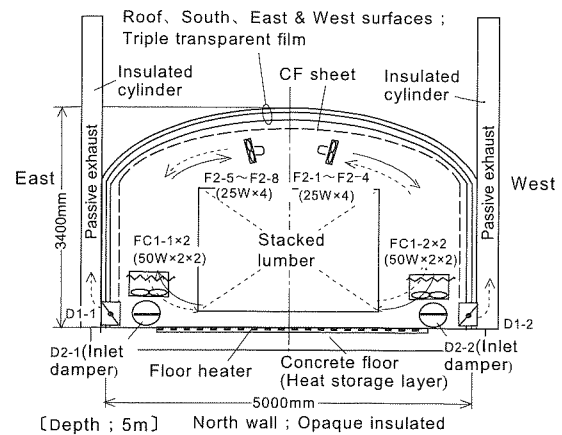


Fig. 2 Fully passive solar lumber drying house (South-North type; North side view)

(2) 材表面割れ

乾燥後に製材品の板目面において目視で確認できる表面割れの数とその長さを実測した。

(3) 動的ヤング係数

材料のたわみにくさを示すヤング係数は強度とも密接な関係にあり、しかも非破壊的に測定できることから製材品の力学的性質を表す重要な指標である⁽⁴⁾。本研究では、縦振動法によって材長方向の動的ヤング係数を乾燥前後に測定した。すなわち、製材品を自由に振動できる状態にし、一方の木口面をハンマーで打撃した際に発生する音を他方の木口面付近に置いたマイクロフォンでキャッチし、FFTアナライザー（エーアンドディ、AD3527）で基本振動周波数を計測した。試験体の材長と密度を測定し、以下の式から動的ヤング係数を求めた。

$$Ed = 4 f^2 L^2 \rho$$

ここで、 Ed は動的ヤング係数(Pa)、 f は基本振動周波数(Hz)、 L は材長(m)、 ρ は密度(kg/m^3)である。

(4) 材色

乾燥前後の製材品の板目面の材色の変化を色彩色差計（コニカミノルタ、CR-400、測定径8mm）を用い測定した。測定箇所は、板の端部から20cm～30cmの部位の板目面上の10箇所平均値を各板の代表値とした。材色は、 $L^*a^*b^*$ 表色系で表示した。 L^* は明度を示し、数値が大きいくほど明るくなる。 a^* と b^* は色度で、 a^* は赤み、 b^* は黄色みを示し、数値が大きくなるほど色あざやかになり、逆に数値が小さくなるほどくすんだ色になる。

3. 結果と考察

3.1 乾燥経過

図4に両装置で実施した5回の試験における乾燥経過を栈積材の平均含水率値で示す。補助熱源を使用した第1回から第3回までの乾燥経過については、第1回の南北型を除いては、両装置に大きな違いはみられず、いずれの回も時間の経過にともなう含水率の低下量、すなわち乾燥速度はほぼ同じであった。乾燥前に約39%であった含水率は

14 日間で平均 8% まで、31% 近く低下した。なお、第 1 回の南北型の 5 日目以降の含水率の低下が少なかったのは自動運転の空気排出用ダンパーがうまく作動しなかったことが原因と思われる。材積が 1.25 倍の 10m^3 となった第 4 回は、第 1 回～第 3 回に比べ途中の乾燥速度はわずかに遅くなったが（とくに東西型の 7 日目）、最終的には 14 日間で含水率は 41% から 11% まで 30% 低下した。このように栈積材全体でみれば東西型と南北型の乾燥能力に大きな違いは認められず、ファンコンおよび床暖からの木質ペレット燃焼熱を熱源とする補助熱を使用した状態で、初冬から厳冬期、さらには初夏にかけて季節によらず 10m^3 程度の枠組壁工法構造用製材（204 材）を本装置で 2 週間程度で安定的かつ十分に乾燥できることが実証された。一方、補助熱源なしでは、言うまでもなく補助熱源ありに比べ、乾燥速度は遅くなり（図 4）、乾燥前に約 41% であった含水率は 14 日間で 18% まで、23% 近く低下した。

本試験で得られた乾燥速度を 1 日あたりに換算すると補助熱源を用いた場合は 2.2% となり、用いない場合は 1.7% となる。乾燥仕上げの含水率である目標含水率は製材規格によって異なるが、JAS の枠組壁工法用構造用製材の含水率基準⁽⁵⁾である 19% を目標値とした場合、乾燥前の含水率が 40% である製材は、本装置で補助熱源を用いた場合は約 10 日、用いない場合は約 13 日でその目標値に到達することができると考えられる。

ここで、一例として厳冬期にあたる第 3 回（2007 年 2 月 13 日～2 月 28 日）の乾燥開始から 7 日目および 14 日目における栈積み位置内の含水率の分布を図 5 に示す。乾燥 7 日

目についてみると、東西型では栈積み中段中央の含水率がやや高い傾向を示し、南北型では栈積み中上段の材の含水率がやや高い傾向を示した。すなわち栈積み内の位置によって材の乾燥速度に若干違いが認められるとともに、乾燥が遅れる位置は東西型と南北型では若干異なった。しかし、乾燥 14 日目になると各材の含水率は 5～12% の範囲内に収まり、栈積位置による各板間の含水率の差（乾燥むら）はきわめて小さくなった。この乾燥初期に発生した乾燥むらに関しては、室内空気の流れを薄板を配置し制御するなど室内環境の微調整によって今後改善をはかる予定にしている。

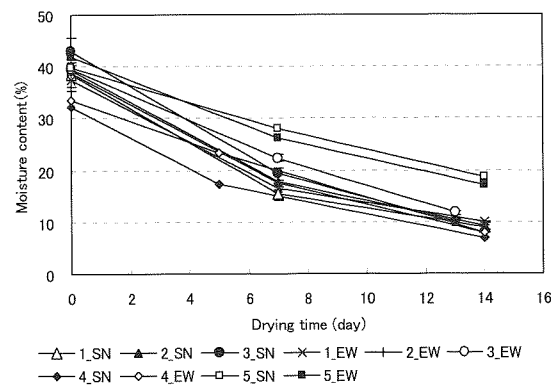


Fig.4 The changes in average moisture content of lumber with drying time at five experiments. South-North (SN) type and East-West (EW) type.

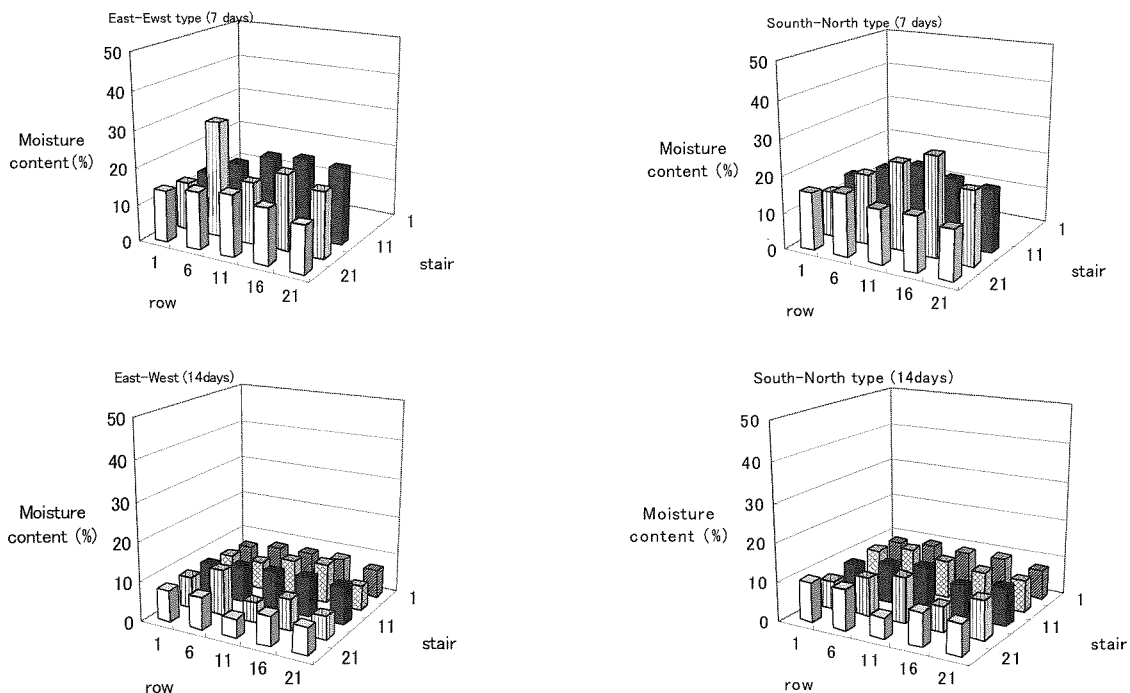


Fig.5 Variation in moisture content within a stack of lumbars after 7 and 14 days in the South-North (SN) type and East-West (EW) type drying house.

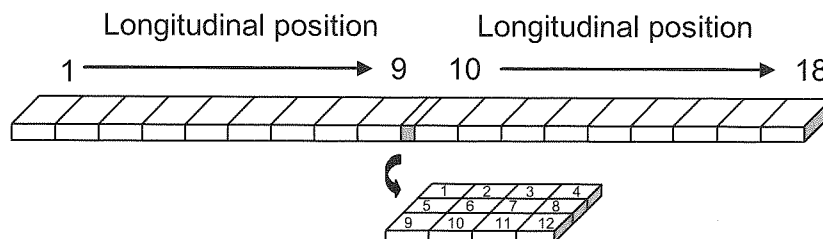


Fig.6 Sampling method for evaluating the longitudinal and transversal variations in moisture content.

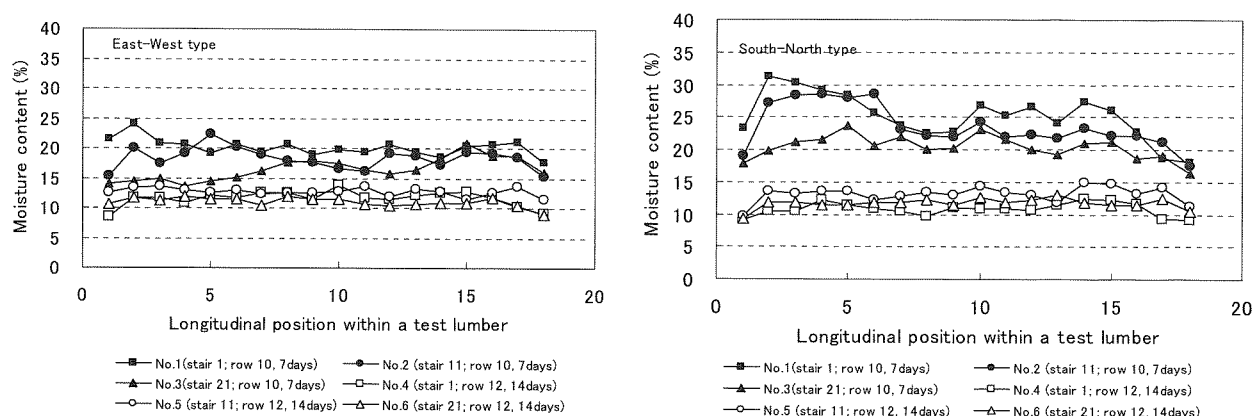


Fig.7 Longitudinal variation in moisture content of lumber after 7 and 14 days (Experimental No. 3).

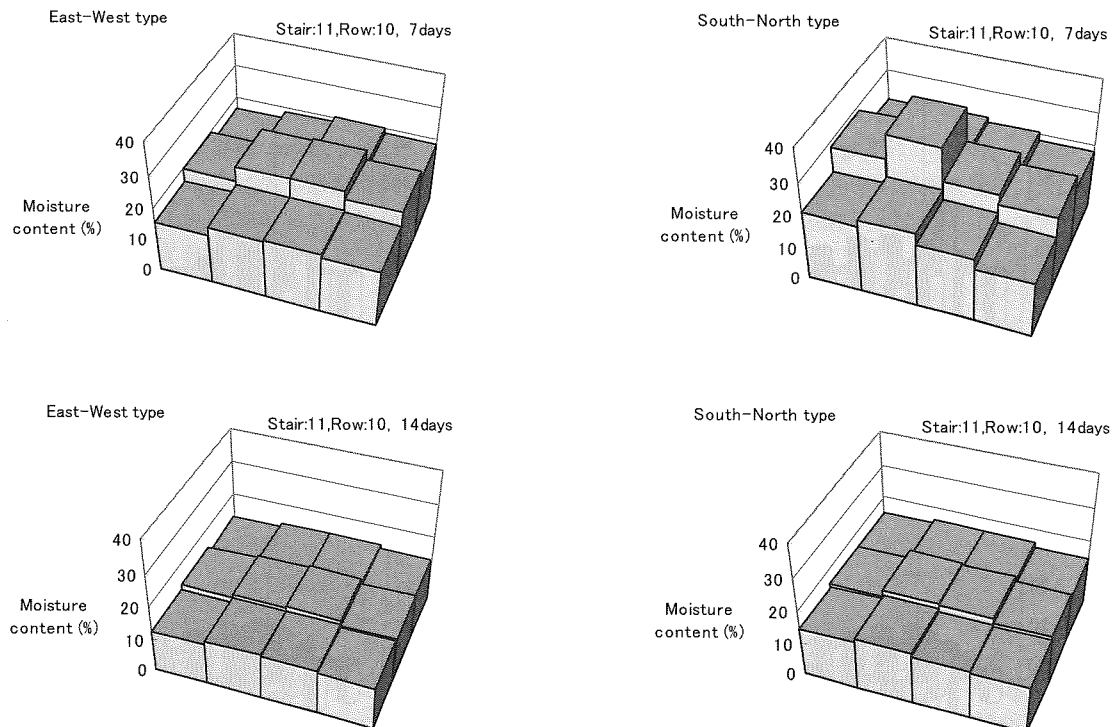


Fig.8 Transversal variations in moisture content of drying lumber after 7 and 14 days (Experimental No. 3).

各試験の際、両装置ともに7日目および14日目に栈済み上段中央、中段中央、下段中央付近にある板3枚を選び、図6に示すように材長方向に中央部3cmを残し18等分し、それぞれの材長方向への含水率の分布を調べた。また中央部の厚さ3cmの板は、木口面内を12等分し、板横断面内の含水率の分布を調べた(図6)。その一例として第3回の結果を図7および図8に示す。材長方向の含水率の分布については、両装置ともに7日目には5%程度の差を生じているが、14日目にはすべて5%以下となり、変動はきわめて小さくなった(図7)。一方、板の横断面内の含水率分布については、最も乾燥が進まなかった栈積中段中央部の材で7日目に約10%以上の材内部と材外部の含水率の差があり、横断面内に乾燥むらが認められた(図8)。しかし14日目には、含水率の差は3%以下と小さくなり、横断面内の乾燥むらはほぼ無くなっていた(図8)。以上のような材長方向および木口面内の含水率の分布状況から、今回試験対象にした204材は、材の厚さが薄いこともありかなり均一に乾燥されていると判断されるが、より狂いの少ない優れた乾燥材を生産するためには乾燥途中(7日目)に見られた含水率のむらを減じる対策を講じる必要があると思われる。

3.2 乾燥後の材の狂い

表1に第3回(2007年2月19日～3月5日)における乾燥後の材の狂い(ねじれ、曲がり、縦ぞり; 図3参照)に関する測定結果を示す。南北型の装置で乾燥された板材のねじれと縦ぞりは東西型の装置で乾燥された板材のそれに比べ若干大きい。統計的には両者間に有意な差は認められなかった。両装置で乾燥されたほとんどの板材の狂いに関する値は、枠組壁工法用構造材の甲種枠組材の特級および乙種枠組材のコンストラクションの基準⁽⁵⁾を満たしていた。また今回の狂いに関するデータを過去に高温人工乾燥された同寸法のカラマツ材で得られた狂いに関するデータ⁽⁶⁾と比較したところ、ほぼ同程度の狂いであった(表1)。乾燥による材の大きな狂いは、カラマツ材の特徴であり、材料そのものの生物学的・物理的特性や乾燥時の圧縮力等に影響を受けることから乾燥装置そのものによる狂いへの影響はきわめて小さいと判断された。

Table 1 Warp of lumber after drying

	East-West type	South-North type	High temperature Kiln-Drying
n	25	25	383
Twist (degree)	3.3(-3~15.7)*	6.6(0-28)	3.5(-14.9~18.2)
Crook (mm)	1.8(0-27)	1.6(0-12)	4.6(0-42)
Bow (mm)	7.3(0-39)*	10.8(0-39)	3.9(0-35.5)

n: Number of test lumber.

*: Number in the parenthesis is the range of measured value.

3.3 乾燥後の材の割れ

表2に第4回(2007年5月8日～5月22日)における乾燥後の表面割れに関する測定結果を示す。1つ以上の表面割れを生じた板の割合は、東西型で75%、南北型で36%であり、東西型の方が表面割れを生じた板の割合が高いという結果になった。しかし、各板の割れの状態についてみると東西型に比べ南北型のほうが割れが大きく、割れの発生数も多いという結果になった。この両装置間で表面割れの発生に違いが生じた理由については、材料そのものによるのかどうか現在のところ不明であり、今後検討を要するが、両装置ともに乾燥後に割れを生じた板材の割れに関する値は、枠組壁工法用構造材の甲種枠組材の特級および乙種枠組材のコンストラクションの基準⁽⁵⁾を満たしていた。

Table 2 Surface check of lumber after drying

	East-West type	South-North type
n	25	25
Percentage of the checked lumber %	75.0	36.4
Length (mm)	29(4~92)*	38(6~250)
Width (mm)	0.10(0.1-0.25)	0.15(0.1-0.50)
Number of check	11(2-28)	14(1-30)

n: Number of test lumber.

*: Number in the parenthesis is the range of measured value.

3.4 乾燥による材色の変化

第4回(2007年5月8日～5月22日)の試験において乾燥前後の試験材の材色を測定し比較した。表3から明らかなように、どちらの装置で乾燥された材も乾燥前後の材色には大差がなく、また両装置間にも材色の違いは認められなかった。高温乾燥の場合、材色の変化(色やけ)が問題となることがある⁽³⁾が、本装置の場合、35℃前後の低温乾燥であることや室内にCFシートが貼られていて材に到達する太陽光のほとんどが遮断されることから、材色への影響はないと判断された。

Table 3 Clour of lumber before and after drying.

	East-West type			South-North type		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Before	73.6	7.2	24.7	73.6	7.1	25.0
After	74.1	6.6	24.6	73.7	6.6	25.2

3.5 乾燥後の材の力学的性質

表4に第4回(2007年5月8日～5月22日)の乾燥材を対象に測定した動的ヤング係数の結果を示す。南北型の平均値は8.1GPaであり、一方、東西型のそれは8.8GPaであった。両者に統計的に有意な差は認められなかった。過去に高温人工乾燥された同寸法のカラマツ材で得られた動的ヤング率に関するデータ⁽⁶⁾では、その平均値は11.1GPaであり、今回の結果は両装置ともにそれよりもやや低い値を示したが、

統計的に有意な差は認められず、通常のカラマツ材の動的ヤング率の変動の範囲内であると判断された。乾燥温度と材の強度との間には関係があるとする報告⁽²⁾やない⁽⁷⁾とする報告があり、不明な点が多いが、少なくとも低温乾燥の場合には強度は影響を受けないと考えられる。本装置における材温は35℃前後の低温であること、また14日間の短期間に乾燥が行われていることから判断すると本乾燥装置による力学的性質への影響はないといえる。

Table 4 Dynamic modulus of elasticity (DMOE) of the lumber after drying.

	East-West type	South-North type	High temperature Kiln-Drying
n	25	25	618
DMOE(GPa)	8.8(6.6-13.3)*	8.1(5.6-10.2)	11.0(5.5 17.6)

n: Number of test lumber.

*: Number in the parenthesis is the range of measured value.

3.6 その他の乾燥後の材の特徴

我々が先に開発した第1世代の装置「アクティブ・パッシブ太陽熱木材乾燥装置⁽⁶⁾」での実証試験において乾燥過程における樹脂(やに)滲出の問題を報告⁽⁹⁾したが、今回の試験においても、図9に示すようにやにつぼ(白抜き矢印)あるいは表面割れが発生した部位(黒塗り矢印)から樹脂(やに)の滲出が多数確認された。樹脂(やに)は高温処理によって固化できることが知られている⁽³⁾が、本装置の場合、乾燥中の室内温度は約35℃の低温であるために固化されなかったと判断される。本装置を用いカラマツのようなやにを滲出しやすい樹種を乾燥する場合には、やに滲出への対策が必要である。

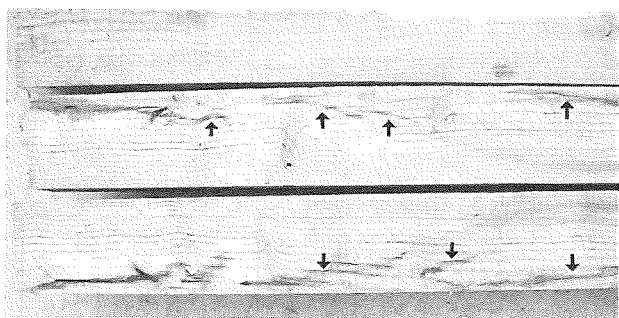


Fig.9 Resin exudates from the surface checks (black arrows) and resin pockets (white arrows) of drying lumbars.

4. おわりに

北海道十勝地方において農業用ビニールハウスを改良した完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥装置を2タイプ(南北型および東西型)試作し、冬期から初夏にかけて数回実証試験を行った。その結果、材の乾燥経過では棧積内の位置による乾燥速度が両タイプでわずかに異なるが、全体では

大きな違いは認められず、両装置ともに10m³の製材を約2週間で含水率30%程度安定的に低減させることができた。また材質面では、両装置間で表面割れに違いが認められるが、それ以外については大きな違いは認められなかった。両装置ともに樹脂(やに)滲出の問題を除いては、狂い、表面割れ、材色、力学的性質に関しとくに問題となる点は見あたらなかった。このように気象条件面では厳しい冬期から初夏にかけての試験であったにもかかわらず、短期間で安定的に顕著な質の低下を招くことなく乾燥が行えたことは評価に値する。今後は、乾燥期間中の棧積内の乾燥むらの軽減、樹脂(やに)滲出に対する対策等の装置の改善・改良をはかり、より品質のすぐれた乾燥材を低コストでしかも安定的に生産できるような乾燥装置へと改良をすすめていく必要がある。

5. 謝辞

本研究を行うにあたりマルシウ技研株式会社、とかちペレット協同組合、九州大学北海道演習林及び北海道立林産試験場の多くのスタッフの協力を得た。心から感謝申し上げる。

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO技術開発機構)による「太陽エネルギー新利用システム技術研究開発事業」に採択されたテーマ「太陽熱木材乾燥装置の研究開発(平成17~19年度)」の一環として実施された。

参考文献

- (1) 金山公夫・馬場 弘・古賀信也・瀬戸英彦・菅原智美, 完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥装置の研究開発(第1報) —新しい概念の創出とソフト技術の構築—, 太陽エネルギー, (2008) 投稿中。
- (2) 馬場 弘・金山公夫・古賀信也・菅原智美, 完全パッシブ太陽熱利用木材乾燥装置の研究開発(第2報) —体積集熱量のもとでの装置性能の計算と実測—, 太陽エネルギー, (2008) 投稿中。
- (3) 寺沢真, 木材乾燥のすべて[改訂増補版], 海青社, 東京, 737p., (2004)
- (4) 高橋 徹・中山義雄編, 木材科学講座3 物理, 海青社, 東京, p.86, (1992)
- (5) 農林水産省, 枠組壁工法構造用製材の日本農林規格, 農林省第600号 (1974)
- (6) 古賀信也, 画像情報に基づいたカラマツの高付加価値製材技術の開発研究成果報告書, (2005) (未公表)。
- (7) 鷲見博史, 木材は乾かして使う。産調出版, 東京, 171p. (1998)
- (8) Kanayama, K., Baba, H., Koga, S., Seto, H. and Sugawara, T., Developing Research on a Active-Passive type Solar lumber Drying House, Renewable Energy 2006 Proceedings, 0-T-2-2:509-512 (2006)
- (9) 古賀信也ら, 太陽熱利用木材乾燥装置によるカラマツ製材品の乾燥, 太陽/風力エネルギー講演論文集2006: 317-320 (2006)