木材乾燥用温室システムに設置した潜熱蓄熱板の 夜間保温効果および乾燥速度に及ぼす影響

Effect of Phase Change Heat Storage Board in Greenhouse for Wood Drying on Temperature Rise at Nighttime and Drying Rate

澤井 徹*・杉野航平*・藤井雅雄*・山裾伸浩**・森川陽平**・城戸杉生**

Toru SAWAI, Kohei SUGINO, Masao FUJII, Nobuhiro YAMASUSO, Yohei MORIKAWA and Sugio JYODO

(Received June 11, 2014)

To supply good quality domestic woods for house construction steadily, it is necessary to promote installation of wood drying system. In the case of kiln drying equipment, the energy consumption of drying becomes extremely high, while the drying period is short. To mitigate the global warming due to the exhaustion of CO₂ from fossil fuels, the passive solar system for wood drying in an agricultural green house has been experimentally investigated. The installation cost of green house is low, but the following two points have to be improved to make the solar drying system for practical use: (1) the promotion of drying rate at nighttime, (2) the reduction of cracks appearing in wood with dry shrinkage at daytime. In the present study, the placement of phase change materials (PCM) in green house is proposed, and effects of PCM on air temperature rise at nighttime and drying rate are examined. The following results are obtained. (1) The air temperature in green house at nighttime increases due to the heat storage of PCM at daytime. The heat transfer between the air and PCM board in green house is affected by the arrangement of PCM board, and it is found that the vertical arrangement induces the improvement of heat transfer, which increases the heat storage of PCM and air temperature at nighttime. (2) In the constant drying rate period, the placement of PCM causes the decrease in the drying rate due to the decrease in the highest air temperature at daytime. In the falling drying rate period, the drying rate is increased by the increase in the air temperature at nighttime due to the heat storage of PCM.

Key Words: Wood Drying, Phase Change Material, Green House, Drying Rate, Passive Solar System

1. 緒言

日本は国土面積の約 67 % (2500 万 ha) が森林であり、森林の持つ多面的・公益的な機能は我々の生活に種々の恩恵を与えている。森林は、再生可能資源である木材等の生産に関与するのみならず、二酸化炭素の固定による地球温暖化対策への貢献、水源涵養、土砂の流出防止といった国土保全にとっても重要な役割を果たす。しかしながら、木材の輸入自由化以後、木材自給率は低迷し平成 23 年の段階では 26.6 %¹⁾ となっており、森林の有する多面的機能を持続的に発揮させるために、健全な森林の整備・保全を図る必要性が高まってきている²⁾。

これを受けて、2009 年末には「森林・林業再生プラン」が作成され、2011 年 7 月に「森林・林業基本計画」が閣議決定された。「森林・林業基本計画」³⁾ では、10 年後に木材自給率 50 % 以上を目指す数値目標が謳われており、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策として、以下の 4 つを

挙げている。(1) 森林の有する多面的機能の発揮に関する施策、(2) 林業の持続的かつ健全な発展に関する施策、(3) 林産物の供給及び利用の確保に関する施策、(4) 国有林野の管理及び経営に関する施策。上記のうち、(3) の施策における“林産物の供給”の観点では、品質・性能の確かな製品の安定供給に必要な乾燥の推進や乾燥技術の開発が、“利用の確保”の観点では、木材利用の拡大として公共建築物や住宅等で国産木材を利用することに加えて木質バイオマスをエネルギー利用することが明記されている。

国内の用材需要に対する迅速な対応と安定供給のためには、適正含水率に到達した乾燥材を短期間で供給することが必須となる。このための方策として、人工乾燥機の導入促進が考えられるが、多くの製材工場では人工乾燥機導入による経済的負担が大きいこと、低炭素社会の構築に向けて自然エネルギーの活用が求められていることから、「化石燃料を必要としない低コスト乾燥促進システムの構築」が強く求められている。

* 近畿大学生物理工学部 (〒 649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930)

School of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University (930 Nishimitani, Kinokawa, Wakayama, 649-6493 Japan)

** 和歌山県林業試験場 (〒 649-2103 和歌山県西牟婁郡上富田町生馬 1504-1)

Forestry Experiment Station of Wakayama Prefecture (1504-1 Ikuma, Kamitonda, Wakayama, 649-2103 Japan)

木材乾燥用温室システムに設置した潜熱蓄熱板の夜間保温効果および乾燥速度に及ぼす影響（澤井・杉野・藤井・山裾・森川・城戸）

用材利用のみならずエネルギー利用においても、乾燥処理は不可欠となる。とりわけ木質バイオマスを固体燃料として利用する場合には、固体燃料の価格が用材に比べて低いこと、バイオマス燃料製造時の投入エネルギーを極力抑えバイオ燃料の持続可能性を確保する必要があることから、化石燃料に依存しない乾燥システムの構築は重要となる。

自然エネルギーである太陽熱を利用した木材乾燥に関する研究は、国内の公設試験場等でこれまで検討が行われているが、これらは専用の乾燥室を用いた実験と汎用的な農業用ビニールハウスを用いた実験に大別できる。前者では、北海道⁴⁾や長野県⁵⁾⁶⁾の事例が、後者では、和歌山県⁷⁻⁹⁾や長野県¹⁰⁾の事例がある。後者の農業用ビニールハウスによる簡易な乾燥システムは、低コストで汎用的であることに大きな意義を有し、天然乾燥に比べて乾燥期間を短縮できることが報告されているが、普及を図るためには下記2点に関して検討の余地が残されている。

・夜間では、ビニールハウス内温度が外気温まで低下し、夜間の乾燥促進を期待できない点

・昼間では、高温状態で木材乾燥が進行するため、天然乾燥に比べて割れの発生が増加する点

上記の課題を解決する一つの方策として、農業用ビニールハウス内に蓄熱体を設置することで、昼夜のビニールハウス内温度の平準化を行うことが考えられる。

本研究では、農業用ビニールハウスによる実機の実験を行う前の基礎実験として、簡易温室ガーデンハウス（以下、ミニハウス）に潜熱蓄熱板を設置し、木材の乾燥実験を行った。潜熱蓄熱板を選定した理由は2.1節でも示す通り、蓄熱に要する体積を極力小さくし、コンパクトなシステムとするためである。本研究は、木材乾燥用のミニハウスに設置した潜熱蓄熱板が夜間の保温効果および木材乾燥速度に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置・方法

2.1 実験装置

Fig.1 に実験で用いたミニハウスを示す。ミニハウスの寸法は床面 800 × 800 mm、最大高さ 950 mm、内容積は約 0.5 m³ である。ミニハウスの断熱効果を高めるために、同一のハウスを2重に重ね側面および上面に空気層を設けると共に、床面にはゴムシートと断熱シートを設置している。

潜熱蓄熱のための相変化材（Phase Change Material、以下 PCM）は融解時に潜熱を蓄熱し、凝固時に潜熱を放熱して利用する。実験で使用した潜熱蓄熱板（以下、PCM 板）は住化プラスチック社製であり、Table 1 に2種類の PCM 板（PCM32d25t と PCM25d9t）の主要諸元を示す。いずれの PCM 板も充填されている PCM は硫酸ナトリウム・10 水塩であるが、濃度調整により融点・凝固点、蓄熱量が異なる。Table 2 に PCM32d25t と PCM25d9t に充填されている

Fig.1 Greenhouse

Table 1 Various Quantities of Heat Storage Board

	Board of heat storage				
	Model specification	Dimensions	Mass per unit board	Volume per unit board	Storage of heat per unit board
		mm	kg	m ³	kJ
PCM32d25t	32P25BS	250×550×25	3.7	3.4×10 ⁻³	482
PCM25d9t	25P9BX	270×840×9	2.22	2.0×10 ⁻³	125

Table 2 Properties of Phase Change Material

	Phase Change Material (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O)						
	Melting point	Freezing point	Density	Specific heat for Liquid	Specific heat for Solid	Storage of heat	Mass
	°C	°C	kg/m ³	kJ/kgK	kJ/kgK	kJ/kg	kg
PCM32d25t	32	30	1400	3.5	3.6	155 (25-35°C)	3.11
PCM25d9t	25	21	1200	3.6	4.9	82 (18-28°C)	1.52

PCM の特性を示す。使用環境や季節により潜熱蓄熱が可能となるように最適な融点の PCM を選択する必要がある。本研究でミニハウスを設置した環境下において潜熱蓄熱を実現するためには、冬季（12 月から 2 月頃）では融点が低く PCM 板容器の厚さが薄い PCM25d9t が、冬季以外では PCM32d25t が有効であることを確認した。しかしながら、本研究では、ミニハウス内に PCM 板を2枚設置する条件の下で、年間を通して融点 30 °C の PCM32d25t を用いて実験を行うこととした。これは、18-28 °C の温度変化に対する PCM 板一枚当たりの蓄熱量を比較した場合、PCM25d9t の潜熱蓄熱量 125 kJ に対して、PCM32d25t の顕熱蓄熱量が 109 kJ であり、冬季間において PCM32d25t が融解しなくとも同程度の蓄熱量が得られること、また 1 種類の PCM 板

Table 3 Comparison of Latent Heat Storage with Sensible Heat Storage

Heat storage	Material	Density	Specific heat	Storage of heat (25-35°C)		
		kg/m ³		kJ/kg	kJ/m ³	ratio
Latent heat storage	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	1340	3.5	155	207700	1
Sensible heat storage	Water	1000	4.2	42	42000	4.9
	Concrete	2300	0.88	8.8	20240	10.3
	Japanese cedar (absolute dry-condition)	300	1.3	13	3900	53.3

のみを利用した方が経済的に有利となることを考慮したためである。**Table 3**に潜熱蓄熱体と顕熱蓄熱体の比較を示す。PCM32d25tに充填されている硫酸ナトリウム・10水塩を一般的な顕熱蓄熱体と比較すると、潜熱蓄熱が行われた場合には単位体積当たりの蓄熱量が極めて大きく、水の約5倍、コンクリートの約10倍、杉（全乾状態）の約50倍の蓄熱量を有する。

木材乾燥時において、含水率の分布が不均一になるのを防ぐために空気循環が有効となる。本研究ではミニハウス内の空気循環を行うため、小型のサーキュレーター（MORITA 製 18 cm パーソナル扇 MF-DC18D 19.0 [W]）を使用した。サーキュレーターは、質量 1.45 [kg]、回転数 2350 [r/min]、風速 105 [m/min]、風量 11.5 [m³/min] である。

乾燥実験で使用した試料はスギ板目材であり、寸法は 100 × 300 × 10 mm である。実験試料の初期含水率は浸水により約 40 %（湿量基準）に調整した。含水率調整後、木口面および側面からの乾燥を防ぐために木工用ボンドを塗布した。浸水による含水率調整は試料の板材が薄いほど容易となるが、一方で薄い板材では減率乾燥期間が短くなる（あるいは、減率乾燥期間がほとんど検知できない場合が生じる）。このため、含水率調整後に 2 枚の板を重ねてボルトで固定することで厚さ 20 mm 相当の板材を 2 組作製し、乾燥実験に使用した。2 組の板材は 20 mm 間隔で水平に積み重ね、ミニハウス内に設置した。

2.2 計測方法

ミニハウス内の温湿度、PCM 板の表面温度は、温湿度ロガー（HIOKI 製 温湿度ロガー 3670）とコミュニケーションベース（HIOKI 製 コミュニケーションベース 3913）を用いてデータの採取を行った。ミニハウス内の温湿度計測は床面上方 50 mm の位置で行った。木材乾燥実験では、電子天秤とデータロガーを RS232C ケーブルで接続することで木材の質量変化を計測した。いずれも、データのサンプリング時間間隔は 1 分とした。

2.3 保温効果の解析方法

ミニハウス内の温度に及ぼす PCM 板設置の影響を検討するために、degree-hours を算出した。degree-hours は、

Fig.2 Arrangement of PCM Boards

PCM 板を設置したミニハウス内温度と PCM 板を設置していないミニハウス（コントロールハウス）内温度との温度差を時間に対して積分することで求めた。

0 時から 24 時までの 24 時間における degree-hours を 24 時間で除すことで 1 日の平均温度差 ΔT_{0-24} を算出した。また、昼夜ごとの平均温度差を検討するために、16 時から翌朝 6 時までの 14 時間における degree-hours を 14 時間で除して夜間の平均温度差 ΔT_{16-6} を、6 時から 16 時までの 10 時間における degree-hours を 10 時間で除して昼間の平均温度差 ΔT_{6-16} を求めた。

3. 実験結果

3.1 夜間の保温効果に及ぼす PCM 板設置の影響

3.1.1 ミニハウス内の潜熱蓄熱板配置図

PCM32d25t を用いて、PCM 板の配置方法が夜間の保温効果に及ぼす影響を検討した。**Fig.2**に PCM 板の配置方法を示す。コントロールハウス GH-C には、PCM 板を設置しない。ミニハウス GH-H、GH-V、GH-L は、PCM32d25t を床面上 60 mm の位置に 2 枚水平置き、400 mm 間隔で 2 枚垂直置き（潜熱蓄熱板の短辺を鉛直方向に配置）、積層配置で 4 枚水平置き（床面と接触させて 2 枚水平置き + 床面上 85 mm の位置に 2 枚水平置き）とした。各ミニハウスは手前の側面が北向きとなるように設置した。

3.1.2 ミニハウス内空気および PCM 板の温度変化

Fig.3に、2012 年 9 月 19 日～9 月 20 日の晴天時で得られたミニハウス内空気、外気、PCM 板における各温度の時系列データを示す。**Fig.3(a)**は、ミニハウス GH-V におけるハウス内空気温度 T と PCM 板温度 T_{PCM} を実線と破線で示したものである。7 時頃から T および T_{PCM} いずれも上昇を開始し、 T は 12 時頃に、 T_{PCM} は 15 時頃に最高温度に到達する。昼間における 8 時～14 時頃の温度差 $T - T_{PCM}$ による対流伝熱、さらには直達日射による加熱によって PCM 板が潜熱・顕熱を蓄熱する。14 時付近で T と T_{PCM} の大きさが逆転し、夜間から翌朝にかけて $T_{PCM} - T$ の温度差による対流伝熱によって PCM 板からハウス内空気への加熱が行われる。なお、 T_{PCM} が 20 時頃に過冷却を示し、24 時頃にかけ T_{PCM} がほぼ一定となっていることから、20 時～

(a) Temperatures of Air and PCM in GH-V

(b) Temperatures in GH-C, GH-V and Outdoor

Fig.3 Variation of Temperature with Time

24 時付近で相変化による潜熱放熱が行われていることが分かる。Fig.3(b) は、ミニハウス GH-C と GH-V におけるハウス内空気温度、外気温度を比較したものである。いずれの温度も 7 時頃に最低温度となり、7 時以降に上昇に転じる。PCM 板が蓄熱している時間（7 時以降 14 時頃まで）では、実線で示す GH-C に比べて破線で示す GH-V のハウス温度は低いが、PCM 板が放熱をしている時間（14 時頃から翌朝 7 時まで）では、GH-V のハウス温度が高くなり、ハウスが保温されていることがわかる。

3.1.3 夜間の保温効果に対する PCM 板の最適な配置方法

Table 4 に 2012 年 8 月 9 日から 9 月 23 日において計測した各ミニハウスの平均温度差を示す。いずれのハウスも昼間の平均温度差 ΔT_{6-16} は負値、夜間の平均温度差 ΔT_{16-6} は正値となっており、24 時間の平均値 ΔT_{0-24} ではわずかながら正値となっている。これより、PCM 板設置により昼間には主として対流伝熱によりハウス内空気から PCM へ蓄熱が行われ、夜間には PCM に蓄熱された潜熱・顕熱がハウス内空気に伝達され夜間に保温効果をもたらすことが確認できる。

Table 5 に各ミニハウスの ΔT_{16-6} と各ミニハウスの ΔT_{16-6} の比を示す。GH-V の $\Delta T_{16-6} = 2.05$ °C であり、PCM 板を 2 枚設置したミニハウスでは最大の保温効果が確認できた。これは、水平配置 (GH-H) と比べ垂直配置 (GH-V) では、自然対流熱伝達率が約 1.6 倍になり、ミニハウス内の空気と PCM 板との伝熱促進により、蓄熱・放熱量を増加させたことに起因するものと考えられる。PCM 板の温度を見た場合、

Table 4 Average Temperature Difference for GH-H, GH-V and GH-L

	GH-H	GH-V	GH-L
ΔT_{0-24} [°C]	0.26	0.39	1.26
ΔT_{6-16} [°C]	-0.85	-1.94	-0.16
ΔT_{16-6} [°C]	1.04	2.05	2.27

Table 5 Effect of PCM Arrangement on Average Temperature Difference at Nighttime

	GH-H	GH-V	GH-L
ΔT_{16-6} [°C]	1.04	2.05	2.27
Arrangement of PCM	1.00	1.97	
Heating surface area	1.00		2.18

Fig.4 Schematic Diagram of Greenhouse in Experiments of Wood Drying

GH-V は GH-H に比べて 16 時における温度が高く、昼間において GH-H よりも蓄熱量が多くなっており、これが夜間の保温効果に寄与しているとみなせる。また、ミニハウス GH-L では、積層配置で 4 枚水平置きしているが、 $\Delta T_{16-6} = 2.27$ °C であり保温効果はミニハウス GH-V とほぼ同じである。したがって、少ない枚数で効率よく蓄熱・放熱させるためには、垂直配置が望ましいことが分かった。

3.2 木材乾燥速度に及ぼす PCM 板と空気循環の影響

3.2.1 ミニハウス模式図

Fig.4 にミニハウス内の乾燥用木材、PCM 板、サーキュレーターの設置状態を模式的に示す。GH-P、GH-Pc は PCM 板 (PCM32d25t) を 2 枚垂直に配置した。GH-C は PCM 板を設置しないコントロールハウスである。GH-Pc では 9-16 時の昼間にサーキュレーターによる空気循環を行う。夜間の空気循環を行わなかったのは、空気循環によってミニハウスから外気へ放熱量が増大し、保温効果が低下する可能性があるためである。GH-C および GH-P では、GH-Pc におけるサーキュレーターのモーターからの発熱量を同じ条件とするため、空気循環をさせずにモーターのみを回転

Table 6 Average Temperature Difference for GH-P and GH-Pc

	GH-P	GH-Pc
ΔT_{0-24} [°C]	0.42	-0.49
ΔT_{6-16} [°C]	-0.37	-2.00
ΔT_{16-6} [°C]	0.98	0.59

Fig.5 Variation of Temperature of PCM with Time

させた。いずれのミニハウスも16時に15分間、外気との換気を行う。ただし、外気の絶対湿度がミニハウス内空気の絶対湿度を上回る場合には換気を実施しない。ミニハウスでの木材乾燥と比較を行うため、ミニハウスに隣接した位置で天然乾燥実験もあわせて実施した。ミニハウス内の木材質量は2.2節に示した方法で質量計測を行った。天然乾燥の木材は毎日9時、13時、16時の3回質量の計測を行った。

3.2.2 木材乾燥時における夜間の保温効果

Table 6 に2013年11月19日～12月10日に実施した木材乾燥実験で得られた各ミニハウスの平均温度差を示す。いずれのミニハウスも ΔT_{16-6} は正值となり、保温効果が認められる。GH-P と GH-Pc を比べた場合、GH-Pc の ΔT_{16-6} が小さくなっている。これは、昼間の空気循環によって、ハウス内から外気への熱通過率が大きくなり放熱量増大のためミニハウス温度が低下し、PCM への蓄熱量が減少したことが原因と考えられる。

Fig.5 に同期間における GH-P に設置した PCM 板の温度変化を示す。図中の水平線は PCM の融点である。晴天時には PCM の融点を超えることもあるが、最大の温度でも35℃程度であることから、冬季間の大部分の日では潜熱蓄熱は行うことができず固体の顕熱蓄熱のみとなっていることが分かる。

3.2.3 木材の乾燥速度

Fig.6(a) に、2013年11月19日～12月10日に計測した各ミニハウス内に設置した木材と天然乾燥木材の含水率変化を示す。含水率は湿量基準である。11月27日頃まで、天然乾燥の木材はミニハウス内の木材に比べて含水率が低くなっているが、11月28日以降では含水率変化はほとん

(a) Water Content

(b) Drying Rate

Fig.6 Variation of Water Content and Drying Rate of Wood with Time

ど見られなくなる。12月10日における到達含水率は、ミニハウスの木材の方が天然乾燥の木材に比べて低い値となる。JAS で規定されている用材の適切な含水率として、D15 (湿量基準含水率13%) 程度を目標とするならば、ミニハウスでの乾燥が有利となる。

Fig.6 (b) に **Fig.6(a)** から算出した各日の平均乾燥速度の変化を示す。平均乾燥速度は、6時から翌日6時の含水率の減少量を24時間で除して求めた。乾燥速度が約5%/day でほぼ一定である11月20日から11月27日までは恒率乾燥期間、11月28日以降を減率乾燥期間と見なすことができる。

Table 7 に各ミニハウスで得られた乾燥速度およびコントロールハウスの乾燥速度 v_c を基準とした乾燥速度比を示す。**Table 8** は **Table 7** の恒率乾燥期間、減率乾燥期間における乾燥速度の平均値と乾燥速度比である。恒率乾燥期間では、GH-P、GH-Pc いずれも乾燥速度比が1を下回る。また、GH-P の乾燥速度比0.9に比べてGH-Pc の乾燥速度比0.86が小さくなっている。これらは、PCM 設置あるいは空気循環により昼間のミニハウス温度が低下したことが関係すると考えられるが、昼間のミニハウス温度と乾燥速度との関係については次節で考察を行う。一方、減率乾燥期間ではGH-P、GH-Pc いずれも乾燥速度比が1を上回る。平均乾燥速度から求めた乾燥速度比は、GH-P で1.37、GH-Pc で1.35となる。

これらより、ミニハウスを用いた木材乾燥を行う場合には、含水率が約25%になるまでの恒率乾燥期間を天然乾燥で実施した後に、減率乾燥期間短縮を目的にミニハウス

Table 7 Drying Rate and Comparison of Drying Rate

		Drying rate v_{6-6} [%/day]			Ratio of drying rate	
		GH-C	GH-P	GH-PC	$(v_P/v_C)_{6-6}$	$(v_{PC}/v_C)_{6-6}$
Constant drying rate	20-Nov	2.45	1.88	2.22	0.77	0.91
	21-Nov	4.50	3.88	3.86	0.86	0.86
	22-Nov	4.00	3.50	3.11	0.88	0.78
	23-Nov	7.00	6.34	5.43	0.91	0.77
	24-Nov	4.52	4.28	3.94	0.95	0.87
	25-Nov	2.21	1.35	2.04	0.61	0.92
	26-Nov	4.61	4.13	3.50	0.90	0.76
	27-Nov	3.99	4.18	3.81	1.05	0.95
	28-Nov	1.09	1.57	1.56	1.44	1.44
Falling drying rate	29-Nov	0.50	0.91	0.95	1.83	1.92
	30-Nov	1.82	2.36	2.17	1.30	1.19
	1-Dec	0.79	1.19	1.18	1.51	1.49
	2-Dec	0.70	1.00	1.01	1.43	1.45
	3-Dec	1.02	1.31	1.26	1.28	1.23
	4-Dec	0.30	0.49	0.43	1.65	1.45
	5-Dec	0.32	0.35	0.40	1.09	1.26
	6-Dec	0.07	0.18	0.19	2.45	2.56
	7-Dec	0.47	0.55	0.54	1.18	1.16
	8-Dec	0.61	0.65	0.64	1.07	1.05
	9-Dec	-0.63	-0.41	-0.34	0.66	0.54

(a) Drying Rate at Daytime

(b) Drying Rate at Nighttime

Fig.7 Drying Rates at Daytime and Nighttime

Table 8 Comparison between Constant and Falling Drying Rates

		GH-C	GH-P	GH-PC
Constant drying rate	Average drying rate v_{6-6} [%/day]	4.36	3.93	3.74
	Ratio of drying rate	1	0.90	0.86
Falling drying rate	Average drying rate v_{6-6} [%/day]	0.71	0.98	0.96
	Ratio of drying rate	1	1.37	1.35

を利用することが効果的であると見なせる。この時、ミニハウスにPCM板を設置することで、夜間の保温効果が得られ、乾燥促進が期待できる。ただし、空気循環は放熱量が大きくなり乾燥速度を低下させる可能性がある。

3.2.4 乾燥速度に及ぼすPCM板設置の影響に関する考察

前節で示した恒率乾燥期間および減率乾燥期間における乾燥速度とPCM板設置の関係を考察するため、GH-CとGH-Pの乾燥速度を昼間と夜間に分けてFig.7に示す。Fig.7(a)、(b)は、昼間（6時から16時）の乾燥速度 v_{6-16} 、夜間（16時から翌6時）の乾燥速度 v_{16-6} に対応し、図中の実線と破線はGH-PとGH-Cの結果である。

(1) 恒率乾燥期間（11月20日～11月27日）

恒率乾燥期間では、PCM板設置の有無に関係なく昼間の乾燥速度 v_{6-16} 、夜間の乾燥速度 v_{16-6} いずれも正值であり、24時間を通じて乾燥が進行している。PCM板設置の影響を見ると、昼間ではGH-Pの乾燥速度が低くなり、夜間ではGH-Pの乾燥速度が高くなっている。

恒率乾燥期間は木材表層が自由水で覆われた状態での乾燥であり、乾燥速度は木材表層の水膜と木材周囲空気の大気湿度差が関係する。表層の水膜と周囲空気の大気湿度を X_s 、 X_a とする。 X_s が近似的に周囲空気温度に対する飽和状態の大気湿度で与えられ、 X_a が一定であるとすれば、 X_s の大小により乾燥速度の大小が決まる。Table 6に示したPCM板設置による昼間と夜間の平均温度差から、昼間ではハウス温度減少により X_s が低くなり、夜間ではハウス温度増加により X_s が高くなったことに起因して乾燥速度が変化したと考えられる。

(2) 減率乾燥期間（11月28日以降）

PCM板設置の有無に関係なく、昼間の乾燥速度 v_{6-16} は正值となる一方、夜間の乾燥速度 v_{16-6} は負値となる。すなわち、減率乾燥期間では昼間に乾燥が進行するのに対して、夜間には木材が吸湿していることを示している。PCM板設置の影響を見ると、昼間では恒率乾燥期間でみられた顕著な乾燥速度の低下は認められず、PCM板設置の影響は小さい。夜間ではPCM板設置により乾燥速度が上昇して0に近付いており吸湿抑制の効果が認められる。

減率乾燥期間における木材表層は繊維飽和点以下となり、周囲空気の大気湿度条件によって決まると平衡含水率に近い状態となっている。水分蒸発は木材内部の自由水が木材表層に移動することではじめて進行する。木材内部における水分移動は、木材内部と木材表層の大気湿度の変化割合が関与する¹¹⁾。木材内部と表層の大気湿度を X_{ws} 、 X_s とする。 X_{ws} は木材内部の温度に対する飽和状態の大気湿度

で与えられるとする。PCM 板設置により昼間にミニハウス温度が減少しても、木材の熱容量があるため木材内部温度はミニハウス内温度の影響を受けない。このため、 X_{ws} は PCM 板設置の影響をほとんど受けず、昼間の乾燥速度に及ぼす PCM 板設置の影響は小さいものと考えられる。一方、夜間では木材内部からの水分移動量に比べて、周囲空気からの吸湿量が上回るため乾燥速度は負値となる。木材表層は昼間において周囲空気の温湿度条件に対応した平衡含水率 EMC_d に近い状況になっている。ところが、夜間には周囲空気の温湿度条件で決まる平衡含水率 EMC_n が EMC_d よりも高くなることで、木材表層での吸湿が進行すると考えられる。PCM 板を設置した場合の夜間の平衡含水率 (EMC_n)_p は、保温効果により $EMC_n > (EMC_n)_p$ となり EMC_d との差が小さくなることで吸湿量低減に結びついていると見なせる。参考として、GH-P における 12 月 3 日 12 時の温湿度から得られる平衡含水率 (湿量基準) は約 5.0 % であるのに対して、GH-C と GH-P における夜間 16-6 時の温湿度平均値から算出される平衡含水率は、 $EMC_n = 10.2 \%$ 、 $(EMC_n)_p = 9.8 \%$ である。PCM 板設置による夜間の保温効果により $EMC_n > (EMC_n)_p$ であることがわかる。

4. 結言

(1) ミニハウスに設置した潜熱蓄熱板が夜間の保温効果に及ぼす影響

- ・ PCM 板の設置により昼間には主として対流伝熱によりハウス内空気から PCM へ蓄熱が行われ、夜間には PCM に蓄熱された潜熱・顕熱がハウス内空気に伝達され夜間に保温効果をもたらすことが確認できた。
- ・ 少ない枚数で効率よく蓄熱・放熱させるためには、垂直配置が望ましいことが分かった。

(2) ミニハウスに設置した潜熱蓄熱板が木材乾燥速度に及ぼす影響

- ・ 到達含水率は、ミニハウス内の木材が天然乾燥の木材に比べて低い値となる。JAS で規定されている含水率 D15 (湿量基準含水率 13 %) 程度を目標とするならば、ミニハウスでの乾燥が有利となる。
- ・ 恒率乾燥期間では、PCM 板の設置により平均乾燥速度は減少する。これは、PCM 板を設置したことでミニハウス内の昼間の最高温度が低くなり、昼間の乾燥速度が大きく低下したことが原因と考えられる。
- ・ 減率乾燥期間では、PCM の設置により夜間の保温効果がもたらされ、平均乾燥速度は増加する。
- ・ ミニハウスを用いた木材乾燥を行う場合には、含水率が約 25 % になるまでの恒率乾燥期間を天然乾燥で実施した後に、減率乾燥期間の短縮を目的にミニハウス

を利用することが効果的であると考えられる。この時、ミニハウスに PCM 板を設置することで、夜間の保温効果が得られ、乾燥促進が期待できる。ただし、空気循環は放熱量が大きくなり乾燥速度を低下させる可能性がある。

- ・ 実機の農業用ビニールハウスにおける木材乾燥実験にスケールアップする場合には、乾燥させる木材自身が蓄熱体として作用するため、PCM 板の設置枚数を減らすことが可能となる。設置する PCM 板の枚数については、乾燥促進効果に加えてコスト面の評価もあわせて検討していくことが必要となる。

謝辞

本研究の一部は、平成 24、25 年度和歌山県農林水産業競争力アップ技術開発事業の助成により行われたものである。

参考文献

- 1) 林野庁、平成 23 年木材需給表 (用材部門)、(2013).
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/pdf/120620-01.pdf>
- 2) 林野庁、平成 23 年度森林・林業白書、第 1 部 第Ⅲ章 第 1 節 多様で健全な森林の整備、(2012) 68-86.
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/23hakusyo/zenbun.html>
- 3) 林野庁、森林・林業基本計画.
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/>
- 4) 野呂田隆史、千葉宗昭、奈良直哉、太陽熱利用木材乾燥に関する研究、北海道立林産試験場研究報告、**72** (1983) 97-125.
- 5) 坂田良二、植木芳茂、永井隆、上田友彦、大工原伍郎、太陽熱を利用した簡易木材乾燥技術の開発に関する研究 (第 1 報)、長野工試業務報告書、(1979) 12-16.
- 6) 坂田良二、植木芳茂、永井隆、上田友彦、太陽熱を利用した簡易木材乾燥法 (第 2 報)、長野工試業務報告書、(1980) 7.
- 7) 岸本勇樹、井戸聖富、自然エネルギーを生かした木材乾燥技術の開発 (第 1 報)、和歌山県農林水産総合技術センター林業試験場、業務報告、**66** (2008) 25-27.
- 8) 岸本勇樹、山裾伸浩、自然エネルギーを生かした木材乾燥技術の開発 (第 2 報)、和歌山県農林水産総合技術センター林業試験場、業務報告、**67** (2009) 11-16.
- 9) 岸本勇樹、山裾伸浩、井戸聖富、ビニールハウスを利用した太陽熱利用木材乾燥、和歌山県農林水産総合技術センター研究報告、**13** (2012) 97-104.
- 10) 吉田孝久、伊東嘉文、高温セット処理を行った柱・桁材の太陽熱乾燥－農業用ビニールハウスの利用－、長野県林業総合センター研究報告、**25** (2011).
- 11) 高橋徹、中山義雄、木材科学講座 3、物理、海青社、(1995) 35-36.