

木材の地産地消に関する研究 - 太陽熱利用木材乾燥施設における木材乾燥実験 -

F 1 0 E 0 3 7 G
指導教員

尾池孝太
赤林伸一教授

研究目的

近年、農産物を中心に安全性や地域農産物の多様性を確保する等の観点から地域生産地域消費（地産地消）という概念が定着している。国際化が進展する現代社会において、輸入農産物と国内の農産物を評価するため、フードマイレージ (food mileage) などの食料の輸送距離に関する概念が構築され、農産物における地球環境負荷を評価する試みが進められている。

建築分野ではフードマイレージと同様の概念として、ウッドマイルズ研究会が建築物の環境負荷を評価するため、木材の材積と輸送距離を掛け合わせたウッドマイレージという概念を整備している。ウッドマイレージは流通時の環境負荷に着目した概念であり、国内産材使用による環境負荷低減効果を評価して消費者の購買意欲を喚起し、環境に配慮した地球にやさしい住宅生産を誘導できる可能性がある。

新潟県では木材の地産地消を推奨しており、越後杉のブランド名で県内産材の利用を促している。既報^{文献 1)}では新潟県加茂市に位置する製材所を対象に、木材の輸送・製材工程及び住宅施工時におけるエネルギー消費量・CO₂ 排出量に関する調査結果を報告した。全工程では製材所での製材工程が全体の 73.5%、製材工程では木材乾燥工程が全体の 50%～62%と大部分を占めており、木材乾燥工程における人工乾燥機のエネルギー消費量・CO₂ 排出量が相対的に多いことを明らかにした。

本研究では木材の輸送・製材工程及び住宅施工時におけるエネルギー消費量の大部分を占めている人工乾燥機の省エネルギー化に着目し、太陽熱を利用した木材乾燥施設を作成して県内産材を使用した木材乾燥実験を行い、環境負荷低減効果のある木材乾燥方法について検討することを目的とする。

研究概要

2.1 木材乾燥実験概要

本研究では木材乾燥施設を 3 棟作成し、木材乾燥に最適な乾燥施設の仕様や木材の設置方法などの検討を行う。研究対象とする木材は、森林組合から入荷し、

製材所で製材された新潟県産杉材とする。又、木材乾燥の評価については木材含水率 20%を目安にし、20%以下となった木材を出荷可能な木材として評価する。

2.2 温熱環境測定概要

木材乾燥施設の温熱環境は、温湿度計により測定する。又、外部温熱環境及び全天日射量は気象観測装置により測定する。

2.3 木材含水率測定概要

木材含水率の算定には木材重量と杉の全乾比重から求める全乾法^{※1}を用いる。木材含水率は、全乾状態の木材重量に対する水分の重量の割合で表す。全乾重量は木材の容積と杉の全乾比重を乗じた値を使用する。

熱負荷シミュレーションソフト TRNSYS による太陽熱利用木材乾燥施設の温熱環境の解析

3.1 解析概要

本研究では木材乾燥実験前に熱負荷シミュレーションソフト TRNSYS により、太陽熱利用木材乾燥施設の温熱環境の解析を行う。表 1 に解析 case を示す。気象データには、日本建築学会拡張アメダス気象データ標準年（新潟市）を用いる。解析は壁材・コンクリートブロックの有無を変化させた全 4 ケースとする。

3.2 解析結果

表 2 に各 case の解析結果を示す。単層ガラスは夏季では温度は 33.7℃、相対湿度は 52.1%となり、冬季では温度は 5.3℃、相対湿度は 64.5%となる。複層ガラスは夏季では温度は 40℃、相対湿度は 39.7%となり、冬季では温度は 8.6℃、相対湿度は 55%となる。単層ガラスと複層ガラスを比較すると、夏季では複層ガラスの方が温度は 6.3℃高く、相対湿度は 12.4%低くなる。冬季では複層ガラスの方が温度は 3.3℃高く、相

表 1 解析 case

解析 case	case 1	case 2	case 3	case 4
対象の概要	太陽熱利用木材乾燥施設		断熱強化した 太陽熱利用木材乾燥施設	
壁材 (東・西・南)	単層ガラス		複層ガラス	
壁材(北)	木造			
換気回数 [回/h]	0.5			
コンクリートブロック (蓄熱体)の有無	無	有	無	有

はC棟の温度・相対湿度は外気の温度・相対湿度と等しいと仮定する。又、全天日射量は気象観測装置により測定する。A棟・B棟に設置した温湿度計は乾燥施設中央付近の測定点① (X=1950mm、Y=1200mm、Z=1500mm)、換気扇付近の測定点② (X=400mm、Y=500mm、Z=4500mm)、換気口付近の測定点③ (X=1450mm、Y=0mm、Z=200mm) の3か所に設置して測定を行う。本実験では木材含水率の算定に用いる全乾比重の値は、一般的な杉の全乾比重である $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ とする。

4.2 温熱環境測定結果

図3に各乾燥施設の温熱環境^{※3}を示す。太陽熱利用木材乾燥施設A棟・B棟は、日射により施設内の温度は大幅に上昇する。断熱強化された乾燥施設A棟と断熱強化していない乾燥施設B棟では、熱貫流率は断熱強化されたA棟の方が小さいが、日射透過率はB棟の方が大きい。そのため、日射の多い時間帯ではB棟の方がA棟より温度は高くなり、相対湿度は低くなる。逆に日射のない時間帯ではA棟の方がB棟より温度は高くなり、相対湿度は低くなる。又、日中でも日射が少ない日は、A棟とB棟でほとんど差がなく、外気との差も日射の多い日と比べて小さくなる。

表2 各 case の解析結果

(1) 平均温度

平均温度 [°C]	春季 (5/1-5/31)	夏季 (8/1-8/31)	秋季 (10/1-10/31)	冬季 (1/1-1/31)
case 1	22.5	33.7	22.0	5.3
case 2	22.4	33.7	22.0	5.3
case 3	28.3	39.9	27.6	8.5
case 4	28.3	40.0	27.7	8.6
外気	16.6	26.4	16.1	2.5

(2) 平均相対湿度

平均相対湿度 [%]	春季 (5/1-5/31)	夏季 (8/1-8/31)	秋季 (10/1-10/31)	冬季 (1/1-1/31)
case 1	50.6	53.1	57.0	65.4
case 2	49.6	52.1	55.4	64.5
case 3	40.1	42.0	46.9	57.1
case 4	38.0	39.7	43.7	55.0
外気	65.2	72.6	71.4	73.4

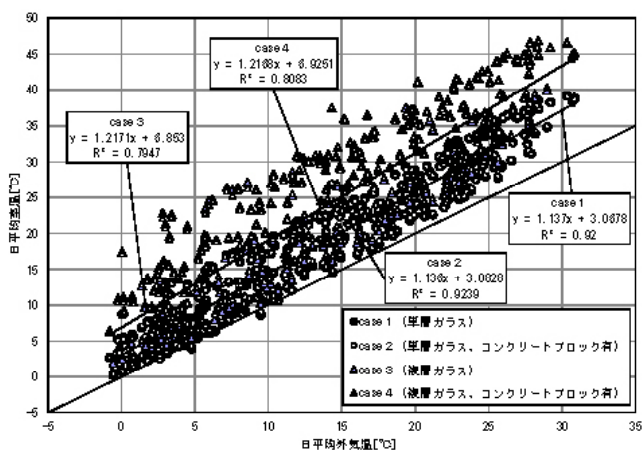


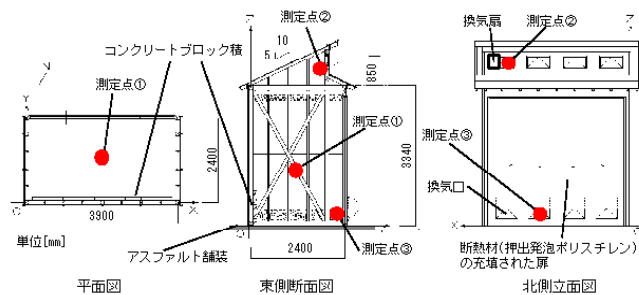
図1 シミュレーションによる各 case の日平均外気温と日平均室温の関係

表6に秋季・冬季における各測定点の平均温湿度を示す。A棟・B棟で測定点②の温度が比較的高くなり、A棟とB棟を比較すると、秋季・冬季ともに各測定点で温湿度差はほとんどない。A棟と外気を比較すると、秋季ではA棟の方が温度は 5.3°C 高く、相対湿度は20%低くなる。冬季ではA棟の方が温度は 2.1°C 高く、相対湿度は8.4%高くなる。冬季の乾燥施設内の相対湿度が外気より高いのは、搬入した木材からの水分放散の影響であると考えられる。

図4に日平均外気温と日平均室温^{※3}の関係を示す。A棟・B棟で日平均外気温と日平均室温の相関は高く、外気温の上昇に伴い室温も上昇する。又、日平均外気

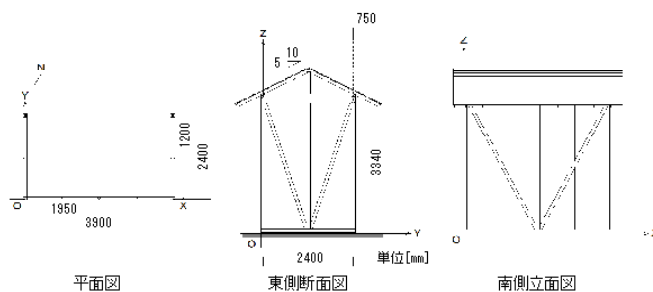
表3 木材乾燥施設の仕様 (実験①)

	A棟	B棟	C棟
壁材 (東・西・南)	ポリカーボネート板 + 透明断熱シート	ポリカーボネート板	木造 屋根のみ
壁材 (北)	断熱材 (押出発泡ポリスチレン20mm) の充填された扉		
熱損失係数 $[W/(m^2 \cdot K)]$	18.0	27.5	
熱貫流率 $[W/(m^2 \cdot K)]$	3.4	6.1	
日射透過率 [%]	48.6	81.0	
換気風量 $[m^3/h]$	588		



(1) A棟・B棟

※換気扇は 11/30 から稼働。



(2) C棟

図2 木材乾燥施設の概要 (実験①)

表4 各乾燥施設における木材の設置条件 (実験①)

木材	正角材 (130mm × 130mm × 2000mm)			平板材 (210mm × 40mm × 2000mm)		
	置き方	横置き	縦置き	横置き	縦置き	縦置き
置き方	8.9cm	3.5cm	15cm	8.9cm	3.5cm	なし
間隔	10本	10本	20本	6枚	6枚	6枚
搬入数	40本	40本	40本	36枚	36枚	36枚
合計	40本 36枚					

表5 各乾燥施設の測定概要 (実験①)

	A棟	B棟	C棟
測定期間	2010年9月27日～2011年1月16日		
木材搬入日	2010年11月4日		
測定方法	温度	温湿度計	気象観測装置
	相対湿度		
	全天日射量	気象観測装置	

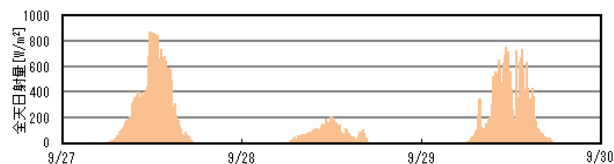
対湿度は9.5%低くなる。コンクリートブロックの有無による影響は、単層ガラス・複層ガラスで温度・相対湿度の差はほとんどない。

図1にシミュレーションによる各 case の日平均外気温と日平均室温の関係を示す。各 case で外気温と室温の相関は高く、外気温の上昇に伴い室温は上昇する。日平均外気温が15℃のとき、日平均室温は単層ガラスでは約20℃、複層ガラスでは約25℃となる。日平均外気温が30℃のとき、日平均室温は単層ガラスでは約37℃、複層ガラスでは約43℃となる。

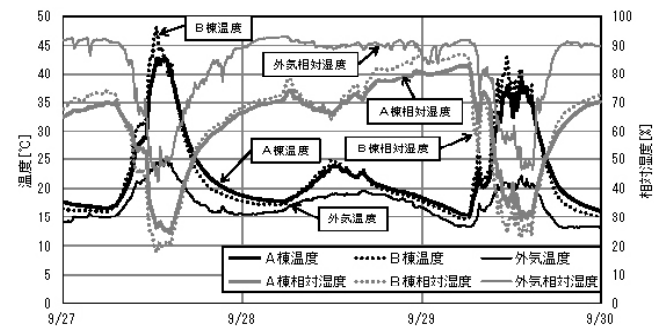
太陽熱を利用した木材乾燥実験（実験①）

4.1 実験概要

4.1.1 木材乾燥施設の概要：表3に木材乾燥施設の仕様を、図2に木材乾燥施設の概要を示す。A棟はポリカーボネート板（厚さ2mm）と透明断熱シート^{※2}を使用して断熱強化した木材乾燥施設、B棟はポリカーボネート板のみを使用した木材乾燥施設、C棟は木造で壁のない屋根のみとする。A棟・B棟の北側は断熱材（押出発泡ポリスチレン20mm）の充填された扉となっており、南側に3600mm×100mm×1000mmのコンクリ



(1) 全天日射量



(2) 温度・相対湿度

図3 各乾燥施設の温熱環境（実験①）

表6 秋季・冬季における各測定点の平均温湿度

(1) 秋季 (9/27-10/31)

9/27-10/31	A棟		B棟		外気	
	温度 [°C]	相対湿度 [%]	温度 [°C]	相対湿度 [%]	温度 [°C]	相対湿度 [%]
測定点①	20.4	62.9	20.4	62.7	15.2	83.1
測定点②	20.8	63.4	21.1	63.4		
測定点③	20.2	63.1	20.9	64.5		

(2) 冬季 (11/1-1/16)

11/1-1/16	A棟		B棟		外気	
	温度 [°C]	相対湿度 [%]	温度 [°C]	相対湿度 [%]	温度 [°C]	相対湿度 [%]
測定点①	6.0	95.5	6.4	94.4	4.2	86.5
測定点②	6.6	94.4	6.7	93.6		
測定点③	6.3	94.8	6.4	94.2		

トブロックを、北側下部に換気口を、上部に換気扇を設置する。

4.1.2 木材乾燥実験の概要：本実験では各乾燥施設に正角材と平板材の2種類の木材を設置する。表4に各乾燥施設における木材の設置条件を示す。正角材は横置き間隔8.9cmが10本、横置き間隔3.5cmが10本、縦置き間隔15cmが20本の合計40本を設置する。平板材は横置き間隔8.9cmが6本、横置き間隔3.5cmが6本、横置き間隔なしが6本、縦置き間隔5cmが18本の合計36本を設置する。

表5に各乾燥施設の測定概要を示す。測定期間は2010年9月27日から2011年1月16日で、11月4日に木材を搬入し、定期的に木材重量を測定する。A棟とB棟の温度・相対湿度は温湿度計により測定し、C棟の温度・相対湿度は気象観測装置により測定する。C棟は壁のない屋根のみの乾燥施設のため、本実験で

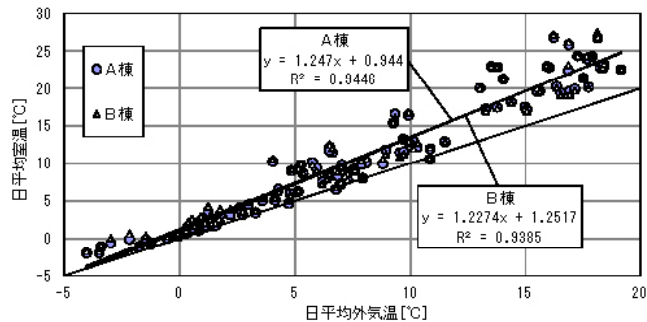
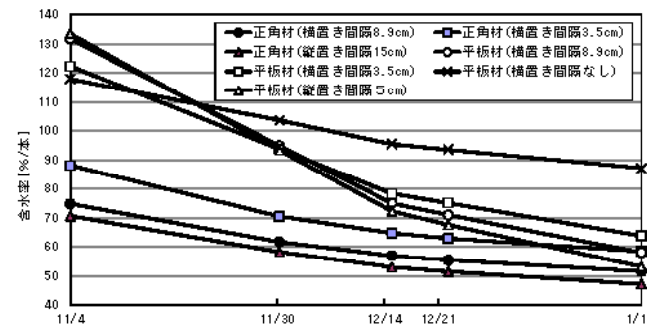
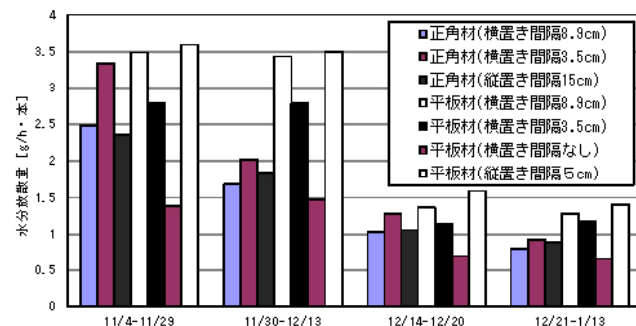


図4 日平均外気温と日平均室温の関係（実験①）



(1) 含水率



(2) 1時間当たりの水分放熱量

図5 木材設置条件による木材乾燥状況（実験①）

※図中の数値は正角材・平板材の各設置条件ごとの全木材の平均値。

するため、乾燥施設内に扇風機を設置する。気流の有無による乾燥性能を比較するため、A棟は扇風機なし、B棟は扇風機ありとして木材乾燥実験を行う。扇風機はB棟の東側と西側に2台設置して室中央に向けて送風し、平均風速1.2m/sの室内気流を与える。又、A棟・B棟の北側下部の換気口を閉じ、上部には熱交換換気扇を4台ずつ設置する。C棟は前実験と同様に木造で壁のない屋根のみとする。

5.1.2 木材乾燥実験の概要：本実験では各乾燥施設及び外部に正角材を設置する。表8に各乾燥施設における木材の設置条件を示す。A棟・B棟・C棟には横置きと斜め置きを各10本、外部には横置きを10本設置する。横置きは上下2段で十分に間隔を空けて設置し、斜め置きは60°の角度で設置する。

表9に各乾燥施設の測定概要を示す。測定期間は2011年6月16日から2011年9月1日で、6月17日に木材を搬入し、定期的に木材重量を測定する。A棟とB棟の温度・相対湿度は温湿度計により測定し、C棟の温度・相対湿度は百葉箱内に設置した温湿度計により測定する。全天日射量は気象観測装置により測定する。A棟・B棟に設置した温湿度計は乾燥施設中央付近(X=1950mm、Y=1200mm、Z=1500mm)に設置する。C棟百葉箱はX=-200mm、Y=200mm、Z=1500mmの位置に設置する。本実験では木材含水率の算定に用いる全乾比重の値は、各木材の両端から2cm角の試験材を6個採取し、105℃の恒温器に入れて全乾状態まで乾燥させて求めた各試験材の全乾比重の平均値を木材1本の全

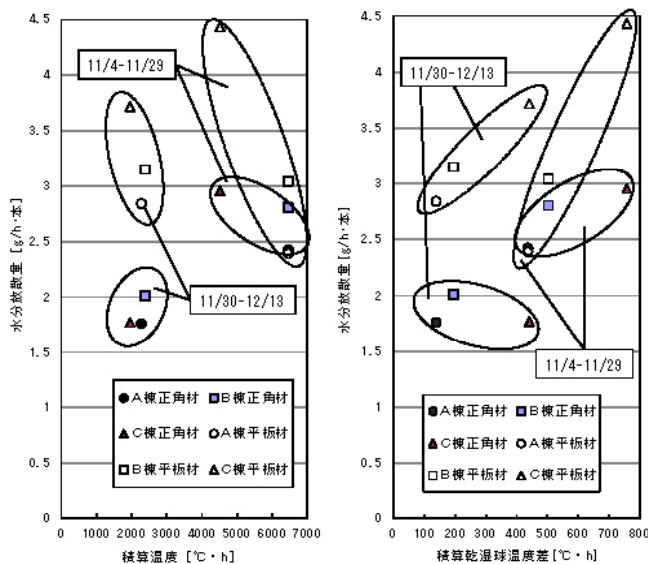


図6 乾燥開始から約1か月半(11/4-12/13)の期間における積算温度と木材の水分放散量
図7 乾燥開始から約1か月半(11/4-12/13)の期間における積算乾球温度差と木材の

乾比重とする。

5.2 温熱環境測定結果

図9に各乾燥施設の温熱環境を示す。A棟とB棟の温度・相対湿度はほぼ等しく、日射の多い時間帯では温度は55℃前後まで上昇し、相対湿度は15%前後まで下降する。外気とは温度は約23℃、相対湿度は約20%の差がある。

図10に日平均外気温と日平均室温の関係を示す。A棟・B棟で日平均外気温と日平均室温の相関は高く、外気温の上昇に伴い室温も上昇する。又、日平均外気温が高いほど、A棟・B棟と外気温の温度差は大きくなる。日平均外気温が20℃のとき日平均室温は約23℃となり、日平均外気温が30℃のとき日平均室温は約

表7 木材乾燥施設の仕様(実験②)

	A棟	B棟	C棟
壁材(東・西・南)	ポリカーボネート板		木造 屋根のみ
壁材(北)	断熱材(押出発泡ポリスチレン20mm)の充填された扉		
概要	扇風機なし	扇風機あり	
熱損失係数[W/(m ² ·K)]	27.5		
熱貫流率[W/(m ² ·K)]	6.1		
日射透過率[%]	81.0		
換気風量[m ³ /h]	288		

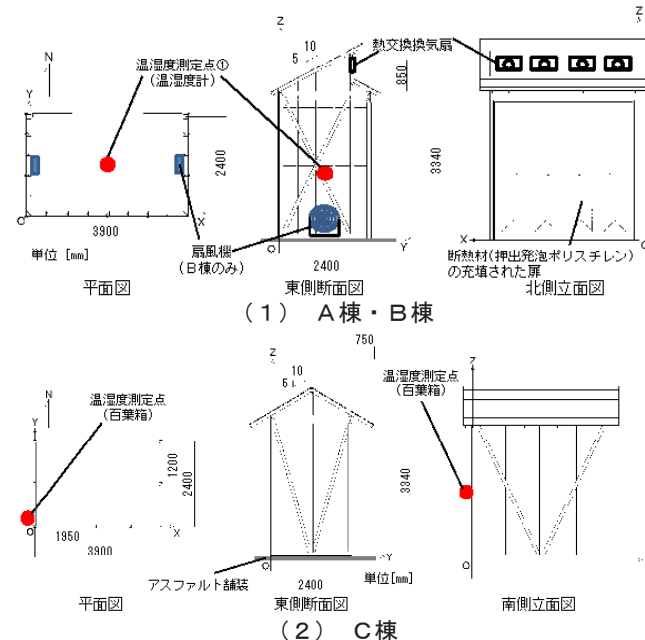


図8 木材乾燥施設の概要(実験②)

表8 各乾燥施設における木材の設置条件(実験②)

	A棟	B棟	C棟	外部
概要	ポリカーボネート板(扇風機なし)	ポリカーボネート板(扇風機あり)	木造 屋根のみ	雨ざらし
木材	正角材(120mm×120mm×1500mm)			
置き方	横置き(上下2段)	横置き(上下2段)	横置き(上下2段)	横置き(上下2段)
斜め置き	10本	10本	10本	10本
搬入数	10本	10本	10本	10本
合計	20本	20本	20本	10本

表9 各乾燥施設の測定概要(実験②)

	A棟	B棟	C棟
測定期間	2011年6月16日~2011年9月1日		
木材搬入日	2011年6月17日		
測定方法	温度	温湿度計	温湿度計(百葉箱)
	相対湿度		
	全天日射量		

温が高いほど、A棟・B棟と外気温の温度差は大きくなる。日平均外気温が5℃のとき日平均室温は約7℃となり、日平均外気温が15℃のとき日平均室温は約20℃となる。

4.3 木材乾燥実験測定結果

図5に木材設置条件による木材乾燥状況を示す。正角材では横置き間隔3.5cmが最も良く乾燥し、含水率の平均値は88.1%から58.4%と29.7ポイント減少する。平板材では縦置き間隔5cmが最も良く乾燥し、含水率の平均値は133.5%から53.1%と80.4ポイント減少する。外気温の低い冬季において、正角材は乾燥速度が遅いため含水率を20%以下にすることは難しい。平板材は実験開始時の含水率が高かったため、含水率は20%以下とならなかったが、冬季の間でもある程度乾燥させることは可能である。又、1時間当たりの水分放散量は木材乾燥開始当初の期間に多く、その後は徐々に少なくなる。平板材の横置き間隔なしは他の設置条件に比べて極端に乾燥速度が遅いため、木材乾燥には間隔を空けて風通しを良くし、水分放散量を増やすことが重要であると考えられる。

図6に乾燥開始から約1か月半(11/4-12/13)の期間

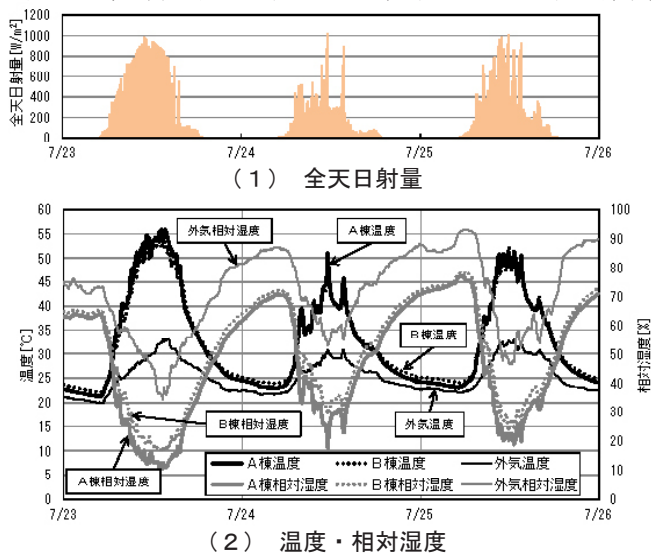
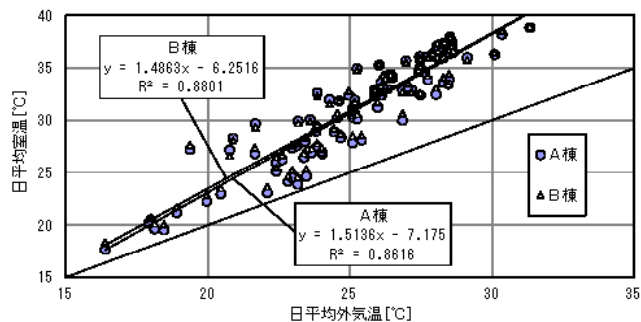


図9 各乾燥施設の温熱環境(実験②)



における積算温度^{※5}と木材の水分放散量^{※4}の関係を示す。乾燥開始から約1か月(11/4-11/29)では、正角材・平板材の場合C棟はA棟・B棟よりも積算温度は低い、水分放散量は多い。これは湿度・気流による影響が大きいことが考えられる。

図7に乾燥開始から約1か月半(11/4-12/13)の期間における積算乾湿球温度差^{※6}と木材の水分放散量^{※4}の関係を示す。乾燥開始から約1か月半(11/4-12/13)では、積算乾湿球温度差と水分放散量には相関関係があり、積算乾湿球温度差が大きいほど水分放散量が多くなる傾向がある。乾燥開始から約1か月(11/4-11/29)では、正角材・平板材の場合C棟が最も積算乾湿球温度差が大きく水分放散量が多くなり、次にB棟、A棟の順である。

室内気流を与えた木材乾燥実験(実験②)

5.1 実験概要

5.1.1 木材乾燥施設の概要: 表7に木材乾燥施設の仕様を、図8に木材乾燥施設の概要を示す。前実験では作成した木材乾燥施設A棟の透明断熱シートによる断熱効果が十分に得られなかったため、本実験ではA棟の透明断熱シートを取り除き、B棟と同じポリカーボネート板のみの仕様とする。又、A棟・B棟内に設置したコンクリートブロックによる蓄熱効果も十分に得られなかったため、本実験では取り除いた。本実験では木材に気流を与えた場合の木材乾燥性能を明らかに

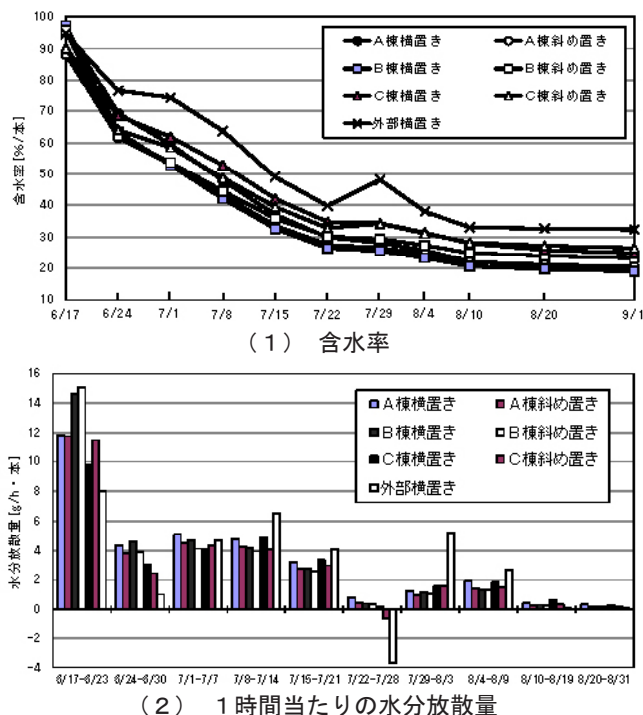


図11 木材設置条件による木材乾燥状況(実験②)

※図中の数値は各乾燥施設の設置条件ごとの全木材の平均値。

38℃となる。

5.3 木材乾燥実験測定結果

図 11 に木材設置条件による木材乾燥状況を示す。各乾燥施設に設置した木材では、室内気流を与えた B 棟の横置きが最も良く乾燥し、含水率の平均値は 97.2% から 19% と 78.2 ポイント減少する。同様に A 棟の横置きでは、含水率の平均値は 96.2% から 19.5% と 76.7 ポイント減少する。外気温の高い夏季において、太陽熱利用木材乾燥施設 A 棟・B 棟では約 2 か月半で含水率を 100% から 20% 以下にすることが可能である。又、1 時間当たりの水分放散量は最初の 1 週間 (6/17-6/23) が極端に多く、その後は徐々に少なくなる。設置条件では水分放散量の差は少ないが、乾燥施設では最初の 1 週間 (6/17-6/23) で室内気流を与えた B 棟の水分放散量が多く、他の乾燥施設との差も大きい。C 棟及び外部に設置した木材は屋外に設置しているため、雨などの天候の影響を受けて水分放散量がマイナスの値になることがある。

図 12 に乾燥開始から 2 週間 (6/17-6/30) の期間における積算温度^{※5}と木材の水分放散量^{※4}の関係を示す。水分放散量が最も多い最初の 1 週間 (6/17-6/23) では、A 棟・B 棟の積算温度は等しいが、水分放散量は B 棟の方が多。これは B 棟内に設置した扇風機による気流が木材乾燥に有効であることを示している。又、屋外に木材を設置した C 棟と外部では温度は等しいが、屋根により雨などの天候の影響を受けにくいいため、水分放散量は C 棟の方が多。次の 1 週間 (6/24-6/30)

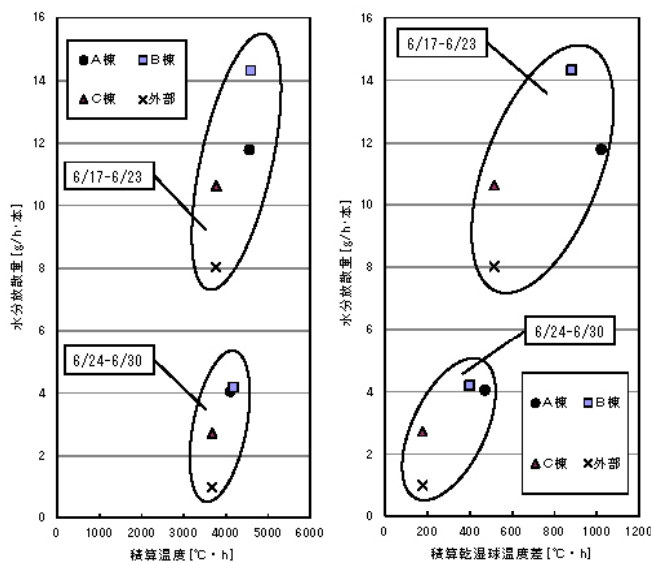


図 12 乾燥開始から 2 週間 (6/17-6/30) の期間における積算温度と木材の水分放散量の関係 (実験②)

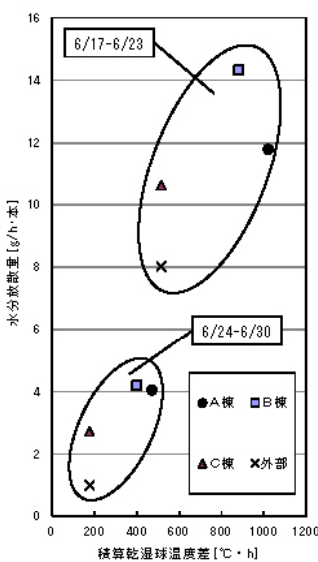


図 13 乾燥開始から 2 週間 (6/17-6/30) の期間における積算乾湿球温度差と木材の水分放散量の関係 (実験②)

では、最初の 1 週間 (6/17-6/23) と積算温度の違いは少ないが、水分放散量は極端に減少している。又、B 棟内に設置した扇風機による気流の影響は 6/17-6/23 の期間より少なく、A 棟の水分放散量とほぼ等しい。

図 13 に乾燥開始から 2 週間 (6/17-6/30) の期間における積算乾湿球温度差^{※6}と木材の水分放散量^{※4}の関係を示す。最初の 1 週間 (6/17-6/23) では、積算乾湿球温度差は B 棟より A 棟の方が大きいため、温熱環境では A 棟の方が木材乾燥に適しているが、水分放散量は B 棟の方が多。これは木材乾燥には気流の影響が大きいことを示している。しかし、次の 1 週間 (6/24-6/30) では、A 棟と B 棟で水分放散量の差が少ないことから、木材乾燥において気流の影響は木材乾燥開始当初の期間では有効であるが、その後は気流の影響は小さいと考えられる。

結論

6.1 太陽熱を利用した木材乾燥実験

6.1.1 温熱環境測定結果

①日射の多い時間帯では B 棟 (ポリカーボネート板) の方が A 棟 (ポリカーボネート板+透明断熱シート) より温度は高くなり、逆に日射のない時間帯では A 棟の方が B 棟より温度は高くなる。

②作成した木材乾燥施設の透明断熱シートとコンクリートブロックによる断熱・蓄熱効果は得られない。

6.1.2 木材乾燥実験測定結果

①外気温の低い冬季において太陽熱利用木材乾燥施設では正角材は乾燥させることが難しいが、平板材は乾燥させることが可能である。

②1 時間当たりの水分放散量は木材乾燥開始当初の期間に多く、時間が経つにつれて徐々に少なくなる。

③木材乾燥には湿度及び気流の影響が大きい。

6.2 室内気流を与えた木材乾燥実験

6.2.1 温熱環境測定結果

①A 棟・B 棟 (ともにポリカーボネート板) の温度・相対湿度はほぼ等しく、日射の多い時間帯では温度

※1 全乾法: $U = \frac{W_u - W_0}{W_0} \times 100$ U:含水率[%] W_u:木材重量[g] W₀:全乾重量[g]
W₀=V₀γ₀ γ₀:全乾比重[g/cm³] V₀:木材容積[cm³] γ₀:杉の全乾比重[g/cm³]

※2 エアサンドイッチ: <http://www.sekisui.co.jp/minase/airsand/>

※3 温湿度計測定点①の値。

※4 水分放散量は各乾燥施設に設置した全木材の平均値。但し、平板材は横置き間隔なしの木材を除外した全木材の平均値。

※5 積算温度: 1 時間当たりの温度の積算値。

※6 積算乾湿球温度差: 1 時間当たりの乾球温度と湿球温度の差の積算値。空気が乾燥していれば値は大きくなり、空気中の水分が飽和すれば値は 0 となる。木材は空気が乾燥しているほど乾燥速度が速くなるため、積算乾湿球温度差が大きいほど木材乾燥性能は高いと考えられる。

文献 1) 赤林・坂口他 「木材の地産地消に関する研究その 1~5」日本建築学会大会学術講演梗概集 2009、2010 年