

木材乾燥における太陽熱の利用（第1報）

野呂田 隆 史 千 葉 宗 昭
大 山 幸 夫

1. はじめに

寒冷地において、冬期間の天然乾燥を期待することはほとんどできない。天然乾燥を計画的に期待できるのは3月から9月までの約6ヵ月間である¹⁾。

A. Schneider²⁾、大石³⁾の報告によると、グリーンハウスタイプの太陽熱利用乾燥は乾燥初期に天然乾燥の促進効果を認めることができず、繊維飽和点以下において認められている。過去の試験結果によると、吸・排気、装置内温・湿度の制御が困難であり、乾燥初期から中期にかけて日射の強いときは湿度の低下による損傷のおそれがある⁴⁾。また寒冷地において、補助熱源として蒸気を使用した場合、一般の人工乾燥室以上に消費している⁵⁾。

木材乾燥に太陽熱を利用する場合の特徴は次の点である。

- 1) 熱源は事実上、無尽蔵であり、無公害である太陽エネルギーを利用するので、いずれの地域でもある程度得られる。
- 2) 木材乾燥の場合、穀物乾燥などと異なり一年を通して利用できる。
- 3) 天然乾燥の促進効果として、乾燥期間の短縮が期待できる。
- 4) 最終含水率の低下が期待できる。

太陽熱を木材乾燥に適用し、実用化する場合、乾燥を行う場所の地理的・気象条件を考慮し、乾燥装置の規模と材積の比率、適正吸・排気量を決定しなければならない。

本報では以上の点を吟味しつつ、簡易集熱器・太陽熱利用乾燥装置の特徴と冬期間の天然乾燥との比較試験について述べる。なお、この結果は工芸連合部会・第19回木工技術分科会（昭和55年6月、福山市）において発表した。

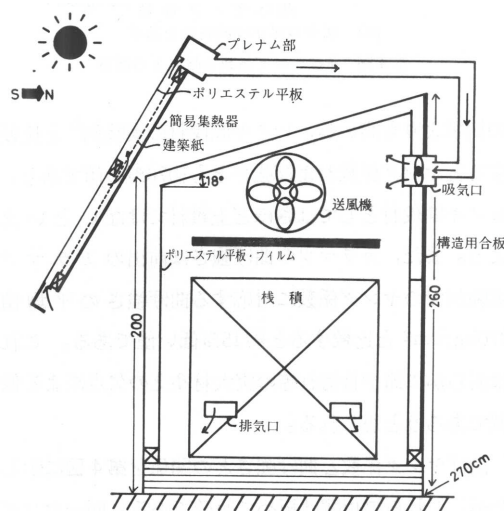
2. 装置

2.1 概要

第1図に太陽熱利用乾燥装置と簡易集熱器の概要を示す。写真1に試験装置を示す。

乾燥装置の設計に際して、次の点に考慮した。

- 1) 太陽熱のみ利用し、補助熱源を使用しない。



第1図 太陽熱利用乾燥装置の概要

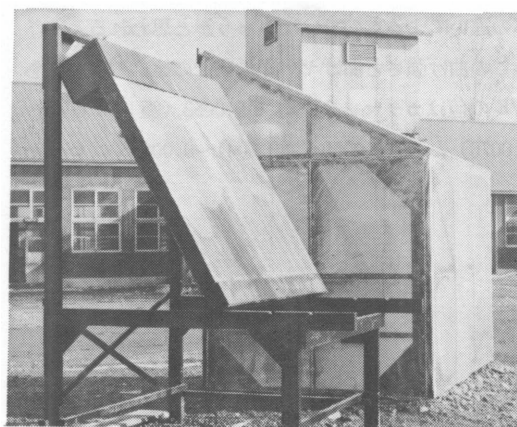


写真1 太陽熱利用乾燥装置

- 2) 壁体からの熱損失を防ぐために、壁体は10cmの空気層をもつ2重構造とし、密閉型にする。
- 3) 吸・排気による装置内温度の低下を防ぐため、簡易集熱器を利用した吸気システムを導入する。

2.2 簡易集熱器

吸気システムに簡易集熱器を利用する。熱媒体が熱容量の小さい空気であるので、単純構造で安価な材料であることが必要である。

簡易集熱器の大きさは長さ 1640mm, 高さ 1510mm 厚さ 100mmで、上部には 300×240×1600mm のプレナム部を設けている。有効集熱面積は 2.296m²である。集熱効率を高め、太陽光線の吸収率を高めるために集熱板には黒塗り建築紙を波状に張った。カバーには太陽光線に対して透過率が良く、集熱板からの長波放射に対して有効なポリエステル平板(1mm厚、可視光線透過率: 85%)を用いた。ケーシング材としてカラマツ平割と構造用合板(9mm厚)を用いた。簡易集熱器内の空気温度上昇を図るため、3カ所に仕切り板を設けた。

2.2 太陽熱利用乾燥装置

骨組み材料はカラマツ材で、ガセット接合で組み立てた。基準部分は軽量H型鋼で組み、アンカーボルトで直接地面に打ちつけた。天井部に9mm厚の構造用合板を使用し、その上に送風機として 0.75kWの軸流ファン(風量: 114m³/min, 静風圧: 10mmAq, ファン径: 50cm, 回転数: 1420rpm)を置き、天井、北面を黒く塗ることによって、ボックスタイプの集熱器の役割をもたせている。吸気口には40Wの換気扇(21m³/min, 890rpm)を取り付けた。

乾燥装置の大きさは南面高さ2.0m北面高さ2.6m床面積4.86m²である。夏期の日中に屋根から日射を得るため、南向きに18°の傾斜をつけた。各壁体は密閉性にし、ポリエステルフィルムにより10cmの空気層を設けた。6cmの空気層は10cm厚のレンガ壁に相当する²⁾。また2重壁による熱損失係数は最も良い条件であっても9.8~11.0kcal/m²h⁶⁾である。北面外側には構造用合板を張った。東西面に10×20cmの排気口を4カ所設けた。

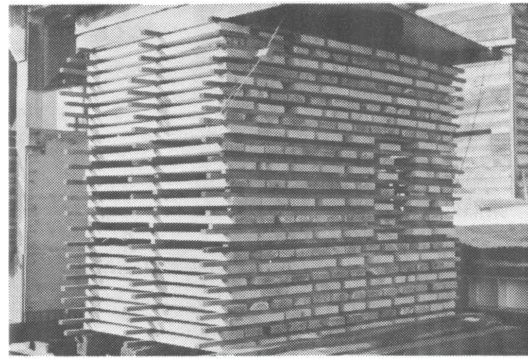


写真2 天然乾燥

2.4 天然乾燥

天然乾燥は写真2のように棧積し、その大きさは太陽熱利用乾燥装置と同様である。直射日光、雨雪をさえぎるため覆いを設けた。

3. 装置の性能試験

簡易集熱器の性能試験のため、集熱器の出・入口の温度と出口の風速を測定した。日照時間と水平面全天日射量については旭川地方農業気象月報(日照時間: ジョルダン日照計による1日の合計, 日射量: 熱電堆式全天日射計による1日の合計)を参照した。集熱効率の測定には最も条件の良い快晴の日を選んだ。時刻別水平面全天日射量は次式により推定した。

$$J_H = \frac{\pi Q}{2 T_o} \cos \frac{\pi}{T_o} (T - 12) \dots\dots\dots 1)$$

Q: 日積算日射量 (kcal/m²day) ,

T_o: 可照時間

T: 時刻(太陽時)

簡易集熱器は水平面より約60°の傾斜で南に向けて固定してるので、集熱器に供給される太陽エネルギーはIEA方式⁷⁾で「直散分離」し、受熱面全天日射量の推定を行った。

$$J = \cos i \cdot J_{ND} + \frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot J_{HS} + \rho \frac{1 - \cos \theta}{2} \cdot J_H \dots\dots\dots 2)$$

J_H: 水平面全天日射量 (kcal/m²day)

J_D : 法線面直達日射量 (")
 J_{HS} : 水平面天空日射量 (")
 i : 傾斜面への入射角
 ρ : 地面の反射率

: 傾斜面の傾斜角度

集熱効率 η は次式で求めた。

$$\eta = \frac{G \cdot C_a \cdot \Delta T}{J \cdot A} \dots\dots\dots 3)$$

G : 平均重量速度 (kg/sec)

C_a : 空気比熱 (kcal/kg)

T : 空気上昇温度 ()

A : 有効集熱面積 (m²)

J : 受熱面全天日射量 (kcal/m²day)

太陽熱利用乾燥装置の性能試験のため、東西南北面の層間温度は熱電対温度計、装置内・外気の湿度は熱電対温度計と自記湿度計(温度範囲: -15~40, 湿度範囲: 0~100%, 7日巻)で連続的に測定した。風速は熱線風速計を用いた。吸気システムの効果をみるため、初期含水率において天然乾燥(A.D.)と太陽熱利用乾燥(S.D.)の乾燥速度比を吸気システム別(a: 自然吸気, b: 強制吸気, c: 簡易集熱器利用)に求めた。太陽熱利用乾燥装置における乾燥効率は次式により求めた。

$$P = \frac{\alpha \cdot W}{E_T + E_C + E_M} \times 100 (\%) \dots\dots\dots 4)$$

W : 材中水分蒸発量 (kg)

E_T : 各壁面からの入射エネルギー量

E_C : 簡易集熱器からの入射エネルギー量

E_M : モータの排熱量

: 水分1kg蒸発に必要なエネルギー量⁸⁾(木材のときは585kcal/kgH₂O)

4. 性能試験結果

4.1 簡易集熱器

第1表に簡易集熱器の性能試験結果を示す。測定日は昭和54年11月9日、日射時間8.8時間、日射量: 2090kcal/m²dayの快晴の日である。旭川市の緯度 $L = 43.77^\circ$, 日赤緯 $= 16.69^\circ$, 傾斜角 $= 60^\circ$, 方位 $= 0^\circ$, 地面の反射率 $\rho = 0.1$ である。ダクト平均風速 $v = 1.2\text{m/sec}$, ダクト径 $D = 10\text{cm}$, 比体積 $V = 0.78\text{m}^3/\text{kg}$, 空気重量速度 $G = 0.012\text{kg/sec}$, である。9時から15時までの平均集熱効率は25%であった。入口温度に比べて出口温度は最高で34程高くなっている。吸気空気の相対湿度はかなり低くなっているものと思われる。

4.2 太陽熱利用乾燥装置

太陽熱利用乾燥装置の乾燥効率は乾燥初期におけるコントロール材8枚の水分蒸発量の平均より棧積全体の蒸発量を推定して求めた。11月9日における入射エネルギー量は東西面: 4861kcal, 南面: 12380kcal, 屋根: 12713kcal, モータの排熱: 1161kcal(日中9時間, モータ効率0.85), 簡易集熱器: 3466kcal, である。総エネルギー量は35742kcalである。日中におけるトドマツ, ミズナラの重量減少は平均で30g/枚であるので, 水分蒸発量: 8.58kg, 蒸発熱量: 5019kcalである。乾燥効率は14.0%となり, Wengert, E.M.⁹⁾による15.4%と同様な値になった。

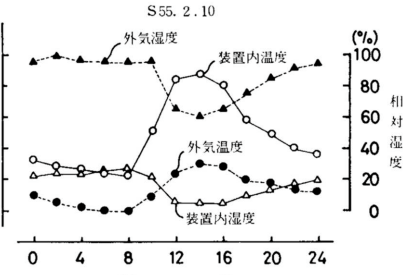
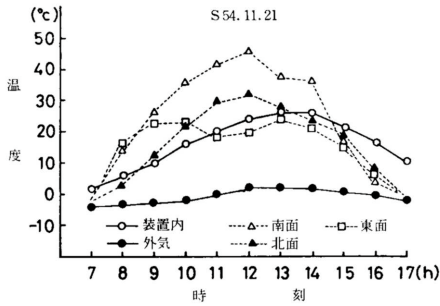
第2図に装置内・外気の温度分布と温・湿度変化を示す。天気の良い日の一般的变化である。夜間に外気より温度が高いのはモータの排熱と棧積・土壌の蓄熱効果によるものと思われる。

第3図に吸気システム別乾燥速度比を示す。これは第1回試験(昭和54年10月

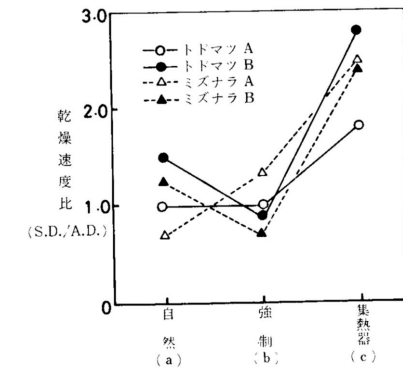
第1表 簡易集熱器の性能結果(昭54.11.9, Q=2090kcal/m²day)

項目	時刻							備考
	9	10	11	12	13	14	15	
水平面日射量: J_H [Kcal·m ⁻² ·h ⁻¹]	183	280	343	365	343	280	183	
受熱面日射量: J ["]	322	467	561	592	561	467	322	$\theta = 60^\circ$
受熱面有効日射量: J_e ["]	274	397	477	503	477	397	274	$J_e = 0.85J$
入口温度: T_a [°C]	-2	0	2	4	6	6	6	
出口温度: T_b [°C]	20	30	34	38	38	30	16	
$\Delta T = T_b - T_a$ [°C]	22	30	32	34	32	24	10	
集熱量: q_c [Kcal·m ⁻² ·h ⁻¹]	101	138	148	157	148	111	46	
集熱効率: η [%]	31	30	26	25	26	24	16	$\bar{\eta} = 25$

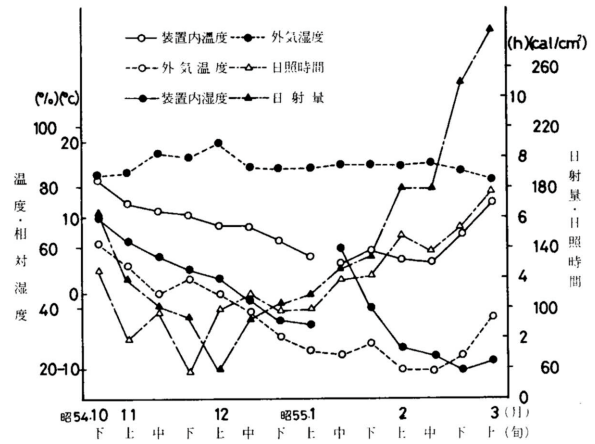
注) 平均風速 $v = 1.2(\text{m/sec})$, ダクト径 $D = 10(\text{cm})$, 比体積 $V = 0.78(\text{m}^3/\text{kg})$, 平均重量速度 $G = 0.012(\text{kg/sec})$, 空気比熱 $C_a = 0.245(\text{Kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C})$



第2図 装置内と外気の温・湿度



第3図 吸気システム別乾燥速度比 (S.D./A.D.)



第4図 冬期間の旭川地方気象条件

と高く、天然乾燥に比べて約2倍の乾燥速度を示している。以上のことを検討すると3条件のうちシステムcの簡易集熱器を利用した吸気が有効であると思われる。

5. 乾燥試験結果及び考察

5.1 気象条件

第4図に旭川地方の冬期間の気象条件を示す。その特徴として、12月上旬に日射量が平均610kcal / m²dayと最低となる。気温の最低は2月中旬で平均 - 10.4

であるが、日射量は1780kcal / m²dayと12月上旬の約3倍になる。太陽熱を利用する場合、日照時間・日射量の影響が大きい。最低日射量と最低気温のピークがずれていることにより、2月中にも平均装置内温度をプラスにすることが可能であり、木材乾燥も十分可能であると思われる。日射量・日照時間の推移をみると、第1回試験が一年間で最も気象条件の悪い時期といえる。外気の相対湿度がほぼ一定であるため、気温の低下に伴い絶対湿度はかなり低いと思われる。この期間の乾燥は低温・低湿により乾燥しているものと思われる。

5.2 第1回乾燥試験 (昭54.10.26開始)

太陽熱利用乾燥 (S.D.) と天然乾燥 (A.D.) の供試材はトドマツ (厚さ3.0cm, 幅15.0cm, 長さ100cm) 117枚とミズナラ心持ち材 (厚さ3.0cm, 幅10.0

26日開始) において、乾燥初期に各システム別に温・湿度変化と乾燥速度比と比較検討した。システムaは装置内の温度は外気に比べて8.8~9.6 高くなるが相対湿度にほとんど差がなく、日射の強い日は外気より高い相対湿度となり、カビの発生の恐れがある。乾燥速度比 (S.D./A.D.) は0.7~1.5である。システムbは外気より5.9~6.2 高い温度となる。相対湿度は外気より平均で20%程低くなる。乾燥速度比は0.7~1.4とシステムaとほとんど同じである。システムcは温度上昇が10.5 と最も高く、相対湿度についても30%程低くなる。乾燥速度比についても1.8~2.5

cm,長さ100cm)169枚である。コントロール材として、各樹種4枚で、含水率経過と収縮率経過を測定した。

S.D.の乾燥初期に吸気システムに関する試験を行ったので多少含水率経過に変化があると思われる。送風機は正・逆転を繰り返し連続運転をした。

太陽熱利用乾燥の乾燥日数と最終含水率の比較を第2表に示す。含水率経過については第5図に示す。吸気システム試験のため、乾燥初期において、S.D.とA.D.の差は認められない。含水率20%までの日数で

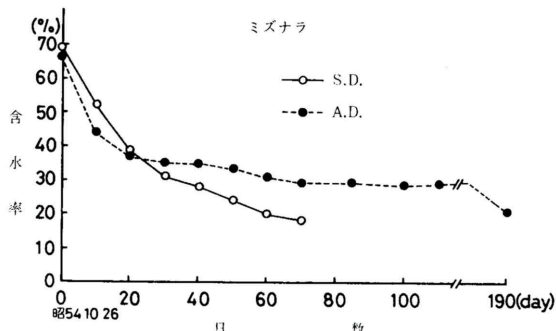
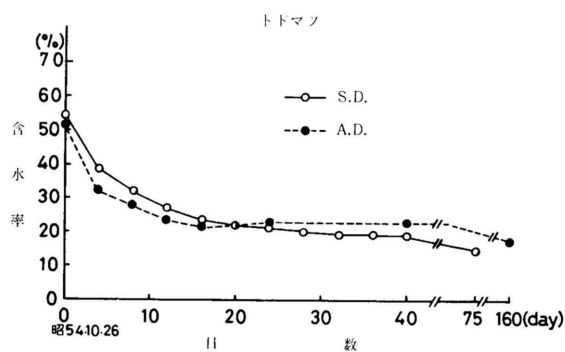
比較するとS.D.のトドマツは約1/5の日数で乾燥している(S.D.:30日,A.D.:162日)。S.D.の最終含水率は73日で14.3%であった(その時のA.D.:22.7%)。ミズナラ(S.D.:60日,A.D.:193日)は約1/3である。S.D.の最終含水率は74日で17.1%であった(その時のA.D.:30.7%)。

乾燥初期・中期・末期の装置内と外気との平均温度差と平均相対湿度差は8.6, 9.5, 13.5と14%, 45%, 52%であった。装置内の材間風速は約1.0m/secであり、温度ムラもほとんどなかった。棧積上中下段

の各3枚,合計9枚による含水率ムラは、トドマツの12.8~15.0(平均13.8)%,ミズナラの14.6~17.5(平均16.2%)と小さい。水分傾斜を表層と中心部の含水率差で表すとトドマツで3.0%,ミズナラで4.4%と天然乾燥と変わらない。

第2表 太陽熱利用乾燥(S.D.)と天然乾燥(A.D.)の比較

樹種・厚さ	開始日	初期含水率(%)	最終含水率(%)	30%までの日数(日)	20%までの日数(日)	最終含水率までの日数(日)	乾燥方法
ミズナラ・30mm	S54.10.26	68.4	17.1	30	60	74	S.D.
ミズナラ・30mm	S54.10.26	66.5	20.6	98	-	193	A.D.
トドマツ・30mm	S54.10.26	54.5	14.3	11	30	73	S.D.
トドマツ・30mm	S54.10.26	58.4	18.0	12	162	193	A.D.
ミズナラ・30mm	S55.1.10	71.9	14.5	25	44	60	S.D.
ミズナラ・30mm	S55.1.10	66.8	19.3	85	125	126	A.D.
トドマツ・30mm	S55.1.10	49.3	10.3	7	18	58	S.D.
トドマツ・30mm	S55.1.10	62.3	16.8	58	104	126	A.D.

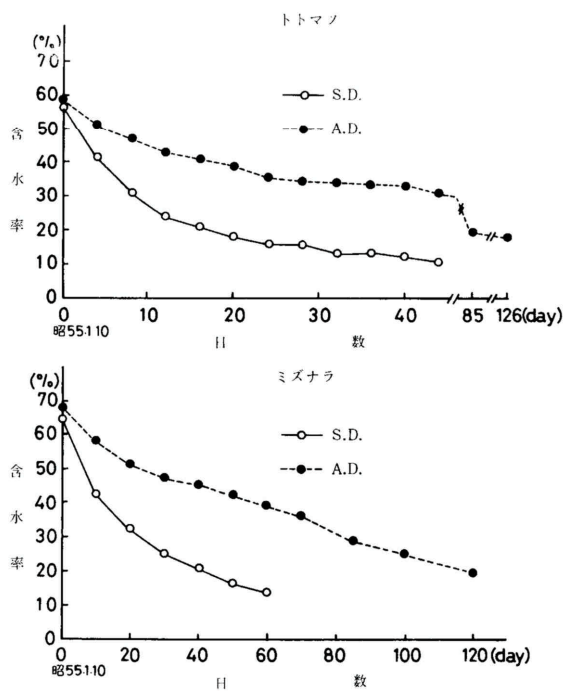


第5図 太陽熱利用乾燥(S.D.)と天然乾燥(A.D.)の含水率経過(第1回)

5.3 第2回乾燥試験(昭55.1.10開始)

供試材はトドマツ・ミズナラ各60枚である。寸法は第1回と同じである。天然乾燥はコントロール材だけであり、第1回天然乾燥棧積の中に入れた。

太陽熱利用乾燥は簡易集熱器を用いた吸気システムcで行った。乾燥初期の乾燥速度比(S.D./A.D.)はトドマツ:2.6,ミズナラ:2.7とS.D.の促進効果があった。含水率経過は第6図に示す。乾燥日数と最終含水率の比較は第2表に示す。含水率20%までの乾燥日数で比較すると、S.D.のトドマツ(S.D.:18日,A.D.:104日)は約1/5で、ミズナラ(S.D.:44日,A.D.:125日)は約1/3と第1回試験と同じ比率で乾燥している。しかしS.D.の最終含水率において、トドマツが58日で10.3%(その時のA.D.:29.6%),ミズナラが60日で14.5%(その時のA.D.:38%)と第1回試験より3~4%低い含水



第6図 太陽熱利用乾燥(S.D.)と天然乾燥(A.D.)の含水率経過(第2回)

率になっている。装置内と外気の温・湿度差は初期：12.1，27%，中期：14.4，60%，末期：15.8，67%と第1回より乾燥条件が良くなっている。

5.4 損傷

太陽熱利用乾燥(S.D.)と天然乾燥(A.D.)の割れと狂いの比較を第3表に示す。

割れのうちで、木口割れがA.D.に多く、表面割れがS.D.に多いようである。割れ幅・割れ長さは測定時の含水率の違いを考慮すると大きな差は認められない。狂いについてもS.D.の方が大きくなっているが、含水率補正によって差は出ないと思われる。

5.5 収縮率

第1・2回乾燥試験の収縮率を乾燥終了時と全乾時に分けて第4表に示す。含水率の違いによって乾燥終了時ではS.D.の方がA.D.より大きくなっている。全乾時の比較では差を認めることはできない。

第3表 太陽熱利用乾燥(S.D.)と天然乾燥(A.D.)の損傷比較(10月26日開始)

測定項目	トドマツ(心去り)		ミズナラ(心持ち)	
	(S.D.)n=104		(A.D.)n=148	
	平均	範囲	平均	範囲
割れ発生率(%)		29	35	45
木口割れ発生率(%)	28		24	43
割れ本数(本/枚)	1.4	3.5	1.5	2.0
幅(mm)	0.1(0.1~0.2)	0.2(0.1~0.8)	0.8(0.1~9.8)	0.4(0.1~4.2)
長さ(mm)	73(16~210)	31(10~100)	62(14~255)	31(12~115)
表面割れ発生率(%)	18	4	20	6
割れ本数(本/枚)	2.5	2.5	1.9	2.7
幅(mm)	0.1(0.1~0.2)	0.1(0.1~0.2)	0.4(0.1~1.2)	0.2(0.1~0.8)
長さ(mm)	122(17~750)	143(22~445)	72(10~235)	43(20~100)
含水率(%)	13.8(12.8~15.0)	18.9(17.8~20.5)	16.2(14.6~17.5)	21.9(19.4~23.9)

種類(狂い量)	トドマツ		ミズナラ	
	(S.D.)n=9		(A.D.)n=9	
	平均	範囲	平均	範囲
幅ぞり(mm/10cm)	0.49(0.31~0.66)	0.26(0.11~0.48)	0.99 ^{a)} (0.54~1.70)	0.65 ^{a)} (0.37~1.05)
縦ぞり(mm/100cm)	0.38(0~1.0)	0.70(0~1.5)	1.70(0.5~3.0)	2.00(0~3.0)
曲がり(mm/100cm)	0.56(0~1.0)	0.40(0~1.0)	1.10(0~3.0)	1.10(0~2.0)
ねじれ(度/100cm)	1.10(0.20~2.31)	0.50(0.20~1.17)	0.92(0~1.80)	0.43(0.15~1.22)

注) a)(mm/9cm)

第4表 収 縮 率

樹 種	乾燥方法	乾燥終了時			全 乾 時		備考
		含水率 (%)	幅方 向 (%)	厚さ 方 向 (%)	幅方 向 (%)	厚さ 方 向 (%)	
トドマツ	S.D.	13.8	3.8	2.7	7.8	5.6	10開 月始 26 日
	A.D.	21.6	1.4	0.8	7.1	3.4	
ミズナラ	S.D.	17.5	2.6	2.8	6.2	6.2	
	A.D.	20.7	1.2	3.2	4.6	8.0	
トドマツ	S.D.	10.3	5.2	3.3	8.3	5.0	1開 月始 10 日
	A.D.	18.2	2.7	1.2	6.0	6.1	
ミズナラ	S.D.	13.6	2.5	5.8	5.4	7.6	
	A.D.	20.8	1.3	2.6	4.1	8.6	

6. 今後の課題

本報では傾斜角度 60° の簡易集熱器の性能と吸気システム別太陽熱利用乾燥装置の性能を調べた。今後は傾斜角度の夏期の適正化, 吸・排気量の調節を行う。乾燥装置容量と積材積の関係を乾燥速度比と乾燥効率の両面から検討する。冬期間の低温のため壁体材料ポリエステル平板の破損が激しかった。これは施工法によって解決できると思われる。更に雪の対策も必要である。

7. おわりに

一般的なグリーンハウスタイプの乾燥装置に, 簡易集熱器を吸気システムとして導入した太陽熱利用乾燥の試験を行った。結果は次の通りである。

- 1) 簡易集熱器を利用した吸気システムに効果がある。
- 2) 簡易集熱器の集熱効率は9時から15時までの平均で25%である。

- 3) 太陽熱利用乾燥装置の乾燥効率は14.0%である。
- 4) 冬期間の天然乾燥促進装置として十分可能である。乾燥日数を比較すると, S.D.はA.D.に比べてドマツで約1/5, ミズナラで約1/3の日数で含水率20%まで乾燥している。
- 5) 冬期間でも10~15%の最終含水率を期待することができる。

文 献

- 1) 中川 宏: 製材と加工, No.2, P.P.101~106(1967)
- 2) A. Schneider et al: Holz als Roh-und Werkstoff 37. P. P. 427~433 (1979)
- 3) 大石 尚: 木材工業, Vol.20, No.9 (1965)
- 4) 寺沢 真: 木材工業, Vol.22, No.2 (1967)
- 5) 河原田洋三ほか2名: 林産試月報, 173. 6 (1966)
- 6) Timothy G. Lumley: F. P. J. Vol.29, No.7 (1979)
- 7) 太陽エネルギー学会編: 太陽エネルギーの基礎と応用, 東京, オーム社, P.P.30~31 (1978)
- 8) Skaar, Christen: Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. P.P.29~32 (1977)
- 9) Wengert, E. M.: F. P. L.-0212 (1971)

—木材部 乾燥科—
(原稿受理 昭和55.8.1)