

木材乾燥装置に関する研究 第4報

インターナルファン型乾燥室における 棧積み内の乾燥むらについて

寺 沢 真⁽¹⁾
筒 本 卓 造⁽²⁾
小 玉 牧 夫⁽³⁾

緒 言

インターナルファン型乾燥室 (I. F. 型乾燥室) は、旧来の自然循環式乾燥室や小型送風機を用いた外部送風式乾燥室と異なり、強力な送風機を室内で駆動し、棧積みされた板の間に急速な気流を作り、棧積み内の乾燥むらを縮小しようとしたものである。

このような型式による乾燥法は、従来の乾燥室と比較してその乾燥むらがきわめて僅少なため、一つの画期的な進歩といえるが、その一步前進した観点に立つてみれば、I. F. 型乾燥室相互における乾燥むらの大小はきわめて重大な問題としてとりあげられはじめている。

I. F. 型乾燥室のごとく棧積みされた板の間を風が通過する際には、風上側と風下側とに乾燥むらが生じ、その値は棧積み内で消費される蒸発潜熱と通過空気熱量とによつて支配されている。したがつて乾燥される材の含水率、棧木厚、棧積み幅、風速等の諸因子が錯綜し、それらの最も合理的な組合せを実験的に探索し、I. F. 型乾燥室設計の基礎資料とすることがきわめて困難であつたため、いままでにこの種の研究を系統的におこなつた例は比較的少なく、恒率乾燥の条件について計算式を求めた小倉¹⁾、さらにこの式により具体的計算をおこなつた STEVENS²⁾ の研究、あるいは断片的な実験をおこなつた TORGESON³⁾、その他⁴⁾⁵⁾ が発表されているにすぎない。

本研究の目的は、具体的な I. F. 型乾燥室の設計資料をうるために乾燥むらについての総合的な試験をおこない、とりまとめようとしたものであるが、実験の特殊性により不完全な点もあつたため、末項に乾燥特性曲線⁷⁾ を利用した乾燥むら算出法を付記し、その点をおこなつたものである。

なお、この研究をおこなうに際しては、長期の徹夜実験、高熱の乾燥室内での試験材の取りだし作業等、幾多のおもてだたない苦難がともなつていたが、これらの作業にこころよくご協力くださった乾燥研究室員佐藤庄一技官をはじめ、各地の現場乾燥室担当者に深く感謝する。

1. 恒率乾燥状態の材料に発生する乾燥むら

I. F. 型乾燥室のごとく、棧積みされた板の間を風が通過してゆく場合には、棧積み内風が吹き込む側の乾燥は早く、吹きだす側の乾燥は遅れる。これは木材からの水分蒸発により通過空気の温度が降下し、

(1) 木材部加工科乾燥研究室長・農学博士

(2)(3) 木材部加工科乾燥研究室員

関係湿度が上昇するため、木材からの蒸発の多い乾燥初期の高含水率域、また棧木が薄く、棧積み幅が広く、風速の弱い場合には乾燥むらは大となる。したがって、材の含水率からみて乾燥むらの発生する最悪の条件としては、乾燥初期の恒率乾燥期間中であるため、この条件について棧木厚、材間風速等の関係を求めれば、一般の低含水率材について乾燥むらを取りまとめる際の基準となると考えられる。このような理由から、この実験では恒率乾燥の期間が長く続くテックスに水をしませ、これを厚さの異なつた棧木で棧積みし、横から種々の風速を与え、風上側からの各位置の蒸発速度を実験的に求めようとしたものである。

1.1 実験方法

実験装置は恒温・恒湿・恒風装置を用い、試料に厚さ約 0.9 cm のソフトボード(テックス)を選んだ。これは恒率乾燥期間が一般木材に比して長く、測定に便であり、ブナ辺材の恒率乾燥期間の蒸発と比較してその値がよく一致したからである。実験はまず Fig. 1 のごとく、試料を 1 段だけならべて乾燥し、一定時間ごとに各板の重量をはかり、これらからそれぞれの位置の蒸発速度を求めた。次に同一形式の試料

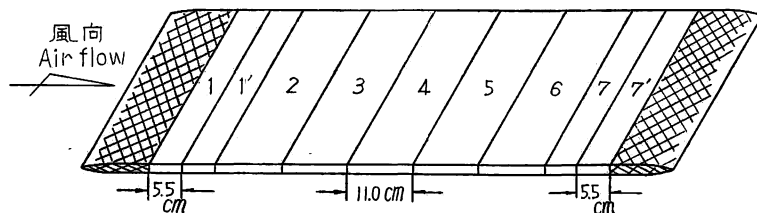


Fig. 1 テックスの幅とならべかた

Setting method and width of each test board in the single layer test.

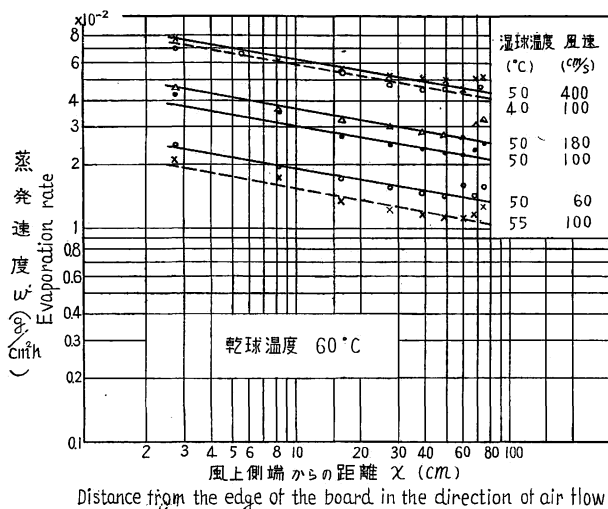


Fig. 2 板を 1 段だけならべた時の蒸発速度分布
Evaporation rate along the boards when the boards are placed in single layer with the different air conditions.

Dry bulb temperature 60°C (constant), wet bulb temperatures 40, 50, 55°C, air velocities 0.6, 1.0, 1.8, 4.0 m/s.

を 5 段棧積みし、その中央の段について前回同様の測定をおこなつた。なお実験に際しては、つねに Fig. 1 のように前後に整流板をおき、末端での渦流による乾燥速度の異常な上昇を防いだ。

1.2 実験結果および考察

1.2.1 棧積みしないときの蒸発速度分布

風方向に試料を 1 段だけならべ、乾球温度を 60°C 一定とし、湿球温度、風速を種々かえた場合の結果を Fig. 2 に示す。ここでは各板の平均蒸発速度 (W') をそれぞれの板の中心位置の蒸発速度とみなし、横軸に風上側端からの距離 (X) を、縦軸にその位置における蒸発速度 (W') を

とつた。これらをみるといずれも両対数
方眼紙ではほぼ直線で、かつ平行なため、
 X と W' は次式のごとき関係にあり、

$$W' = CX^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

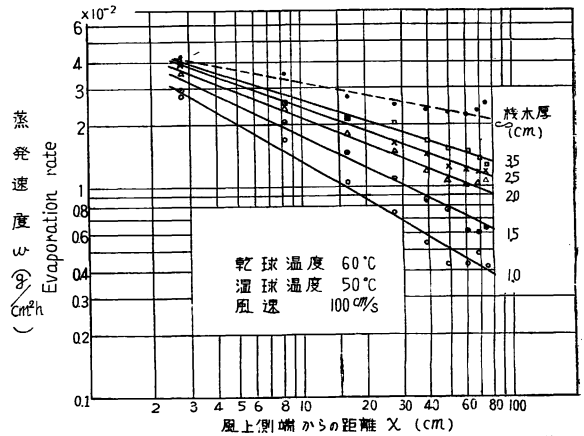
式中の C は温度差および風速の増加ととも
に大となり、 n は空気条件にかかわら
ず一定であることがわかる。また、 n の
値として 0.18~0.20 が得られた。これ
と関連した問題、すなわち水面に沿つて
風が吹いているときの蒸発についてはす
でに多くの報告があり、 n は境界層の状
態によつてかわるものとされているが、
前述の値は境界層が乱流である場合にっ
いて山本⁹⁾が求めたものとほぼ一致
している。

1.2.2 棧積みしたときの蒸発速度

風速を 1 m/s 一定とし、棧木厚さをか

えたときの結果を Fig. 3 に示す。
これを見ると前述の棧積みしないとき
と同様、各位置の蒸発量と風上側
からの距離との関係は両対数方眼紙
ではほぼ直線であり、直線の X 軸に対
する傾斜は棧木が薄くなるにつれ
て、しだいに大きくなっている。次
に棧木厚さを 2.5 cm 一定とし、風
速を種々かえた場合についてみれば、
Fig. 4 のように風速の増加にと
もなつて全体の板の蒸発速度は増
し、直線の傾斜角は小さくなつてい
る。さらに式 (1) における n を
Fig. 3, Fig. 4 に示す条件について
求めた結果は Fig. 5 のとおりで、
棧木厚、風速が小さいときほど n の
変化は顕著となり、逆にこれらが大き
くなるにつれて棧積みしないとき

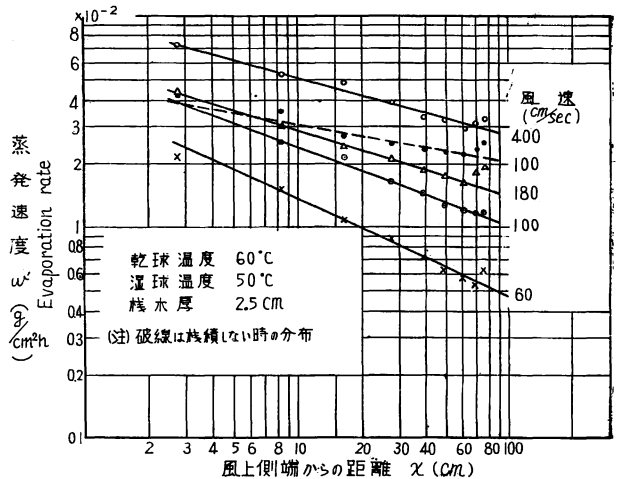
の n の値 0.18~0.20 に近づく。いいかえれば、風方向における蒸発速度の差は棧木を厚くするか風速を
大きくすれば減少するが、ある大きさ以上になると顕著でなくなり、棧木厚、風速をどのように大きくし



Distance from the edge of the board in the direction of air flow

Fig. 3 板を棧積みした時の蒸発速度分布
棧木厚さを变化した場合

Evaporation rate along the boards when the boards are in lamination with the different sticker thickness. Dry bulb temperature 60°C, wet bulb temperature 50°C, air velocity 1 m/s. Dotted line is the value of one layer.



Distance from the edge of the board in the direction of air flow

Fig. 4 板を棧積みしたときの蒸発速度分布
棧木厚さを 2.5 cm とし風速を变化した場合

Evaporation rate with different air velocities along the boards, when the boards are in lamination.

Dry bulb temperature 60°C, wet bulb temperature 50°C, stickers thickness 2.5 cm. Dotted line is the value of one layer.

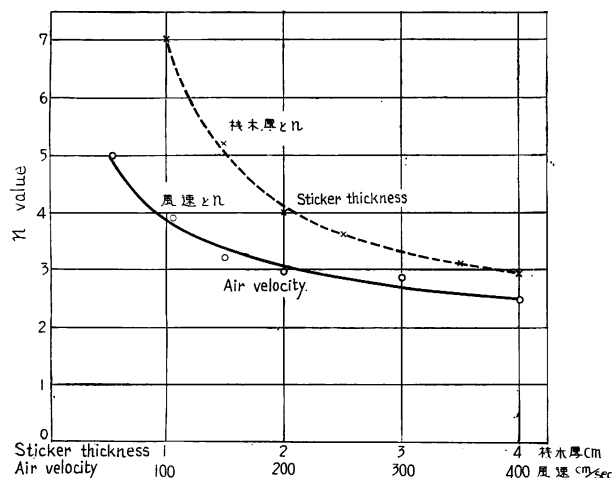


Fig. 5 風速および棧木厚の変化と n ($\times 10$) の関係
Relation between n value and stickers thickness and air velocity.

In the air velocity test the stickers thickness kept always constant value (2.5cm) and in the other test air velocity at 1 m/s.

ても棧積みしないときにみられた蒸発量の差だけはとりのぞくことができない。

以上の結果から、ただちに経済的問題を含む乾燥室における棧木厚、風速を結論づけることはできないが、Fig. 5 における n の変化から推定して、棧木厚については現行の 2 ～ 3 cm はほぼ妥当なものであると思われ、棧積み内の風速については現在 1 m/s 前後のものが多く、さらに高くすることが望ましいのではないかと考えられるが、どのように高い風速を与え、棧木厚を大としても Fig. 2 にみられるような乾燥むらは除去できないことは明白である。

2. 板材の乾燥経過中に生ずる乾燥むら

板材を I.F. 型乾燥室で乾燥した場合は、その材の含水率の低下にしたがい乾燥速度が変化するため、恒率乾燥期間を長期に保つ材料とは異なつた乾燥むらが棧積み内に発生する。恒率乾燥期間にあつては、その蒸発量も多く、乾湿球温度差に対する蒸発量の変化はほぼ直線的となつてゐるため、棧積みの吹き込み側と吹き出し側に生ずる乾燥むらは大きくあらわれるが、減率乾燥期間になると蒸発量も減少し、乾湿球温度差に対する蒸発量変化は、乾燥特性曲線⁷⁾からも明らかなように、曲線関係となるため風下側の蒸

Table 1. 試験に使用
Test boards and dry kilns

乾燥室所在地 Location of dry kiln	乾燥室型式 Type and size of test dry kiln					
	型式 Type	熱源 Heater	収容材積 Capacity m^3	寸法 Size		
				奥行 Length m	幅 Width m	高さ Height m
福島県田島町県立広葉樹利用事業所 Woodworking factory of hard wood, Tazima, Fukushima	I.F. 型 Internal fan type	蒸気 Steam	13.0	10.0	3.7	3.3
東京都目黒区 林業試験場 Government forest experiment station, Meguro, Tokyo.	I.F. 型 Internal fan type	蒸気 Steam	5.0	4.5	2.3	3.0
	I.F. 型 Internal fan type	電熱 Electric	1.2	2.0	2.0	2.0

発量は吹き込み側に比較してそれほど低下しなくなり、乾燥むらの発生は減少するものと考えられる。したがって棧木厚、風速等が同一の場合、乾燥むらは被乾燥材の初期含水率、板厚等に支配されることは十分に推察される。本試験においてはこのような被乾燥材の条件と棧木厚、材間風速等の条件を組み合わせ、乾燥経過中に発生する乾燥むらの変化、材間温度変化について測定し、とりまとめたものである。

2.1 実験方法の概略

実験に供した乾燥室は Table

1に示す小型実験用 I.F. 型乾燥室、あるいは実用規模の I.F. 型乾燥室で、棧積み内のある段を試験箇所とし、この部分の板を Fig. 6 のように1 棧木間隔だけ切りとり、この切りとられた空間に別に用意した同樹種、寸法の試験材を挿入し、適当な時間間隔に重量を測定し、ふたたび元どおりに押し込み乾燥を継続した。乾燥終了後、各試験材を中央で切断して試験片をとり、全乾法で含水率補正をおこない、棧積み内の各位置の乾燥経過図としてとりまとめた。試験材の長さは1 棧木間隔としたため 40 cm 前後とし、木口は十分にペンキ、あるいは尿素樹脂等で end coating をした。試験材はブナ、スギの生材を主体とし (Table 1 参照)、ブナは板幅 12~13 cm、板厚 2.2~2.4 cm の床板、スギは板幅 24 cm、板厚 1.4 cm、ヒノキは板幅 24 cm、板厚 1.3 cm のものを用いた。

した乾燥室と試験材
which were used in this test.

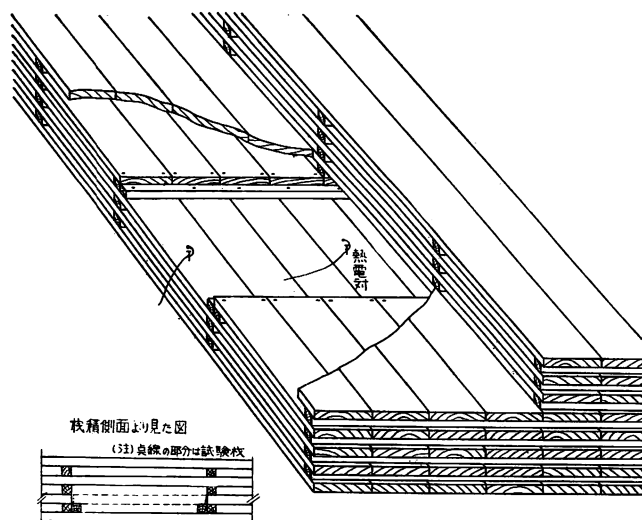


Fig. 6 棧積み内試験材の置きかた
Setting of test boards. Each test boards was fixed in the pile by cutting the pile boards as shown in figure.

棧積み幅 Pile width m	試 験 材 Test board				
	材 種 Species	産 地 Locality	初期の条件 Initial condition	寸 法 Size	
				厚 さ Thickness cm	幅 Width cm
2.0	ブナ, 心材, 柾目 Beech, Heart wood, Edge grain	福島県 Fukushima	生材および天乾材 Green and Air dried	2.2~2.4	12~13
1.6	ブナ辺材および心材追柾 Beech, Sapwood and Heart wood, Bastard grain	秋田県 生保内 Obonai, Akita	生 材 Green	2.2~2.4	12~13
1.2	ヒノキ, スギ 追 柾 Hinoki, Sugi, Bastard grain	スギ: 秋田 Sugi Akita ヒノキ: 木曾 Hinoki Kiso	生 材 Green	スギ 1.4 Sugi ヒノキ 1.3 Hinoki	24

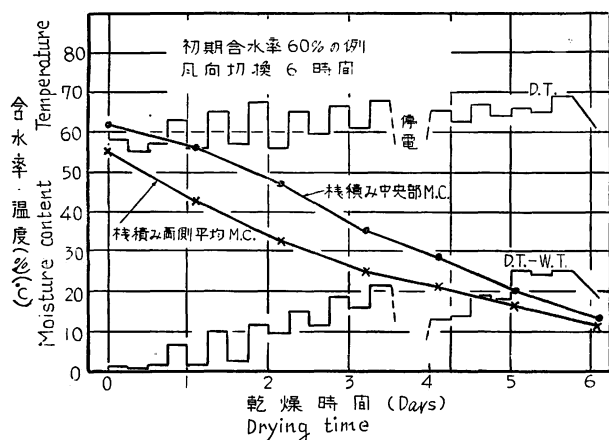


Fig. 7 初期含水率のちがいと乾燥むらの関係を試験したスケジュールの一例 ブナ床板
One of the schedules used the uneven drying test. Fan is reversible. Beech strips, 2.2 cm thickness, air velocity 0.9 m/s, pile width 2 m, sticker thickness 2.5 cm.

- × Average moisture content of both side boards.
- Moisture content in the middle part of the pile.

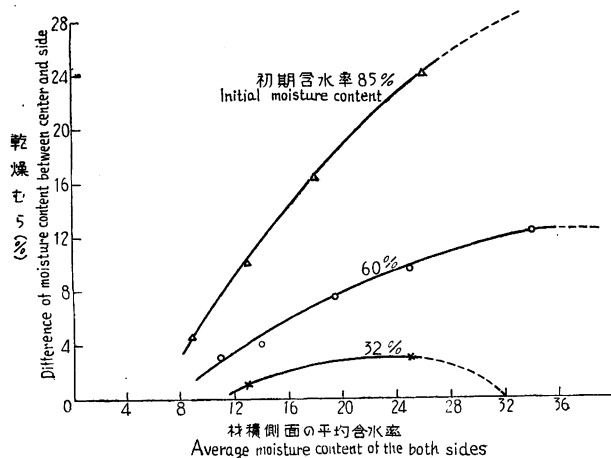


Fig. 8 初期含水率と仕上含水率の差による乾燥むらのちがい
ブナ床板 棧積み幅 2 m, 棧木厚 2.5 cm, 風速 0.9 m/s
Difference of moisture content between center and sides of pile with different initial moisture content.
Beech strips, air velocity 0.9 m/s, pile width 2 m, sticker thickness 2.5 cm.

をとつてまとめたものが Fig. 8 であり、初期含水率の低いほど乾燥経過中および仕上り時の乾燥むらは少なくなっている。

2.2.2 棧木厚および風速を変化させた場合の乾燥むら

林業試験場乾燥研究室にある蒸気式 I.F. 型乾燥室を用い、棧積み幅を 1.6 cm とし、試験材はブナ床板心材および辺材、棧木厚は 2.5 cm および 1.9 cm の 2 種、風向一定、風速は 0.7~1 m/s の範囲とし、乾

湿度の測定は棧積み両側 (2~3 cm 棧積み内にはいつたところ) および棧積み中央 (温度のみ) でおこない、熱電対または棒状温度計を使用し、風速は棧積み中央部で熱線風速計を用いて測定した。乾燥条件は大略その板に対する常識的なスケジュールでおこない、棧木厚は 2~4 cm、棧積み幅 1~2 m、風速 0.5~6 m/s の範囲でおこなった。また風向の切換え (両循環) 試験や初期含水率のちがいなどについても試験をおこなった。

2.2 実験の進めかたと結果

2.2.1 初期含水率のちがいによる乾燥むら

福島県立広葉樹利用事業所の I.F. 型乾燥室 (Table 1 参照) を用い、乾燥室入口部にある台車の中央部に測定部を設け、棧積み幅 2 m、棧木厚 2.5 cm、材間風速 0.9 m/s とし、試験材はブナ心材床板原板の柃目板を用い、初期含水率は 85%、60%、32% の 3 種につき各 1 回ずつ実験をおこなった。風向の切換えは 2~6 時間おきとし、乾燥スケジュールは大略 Fig. 7 に準じた。

乾燥終了後、棧積み両側の早く乾燥する場所の含水率と棧積み中央の一番おくれる場所の含水率を求め、その差額を乾燥むらとして縦軸にとり、横軸に棧積み両側の平均含水率

乾燥条件は Fig. 9 のスケジュールにしたがつた。乾燥経過中の棧積み横断部の、それぞれの含水率経過は Fig. 10 となった。

乾燥初期、吹き込み側の乾燥がよく、含水率の分布はパラボラ状をなしているが中期以後はほぼ直線的となり、その傾斜が順次少なくなっている。辺材のように乾燥速度が早く初期の含水率の高いものは前述の恒率乾燥の結果と類似し、乾燥経過中の乾燥むらも大きい。辺材、心材とも薄い棧木の 1.9 cm 厚は 2.5 cm のものと比較して仕上り含水率むらにかなりの差異が認められ、辺材の方がむらが大きくなっている。また Fig. 10-5 に書き入れたものはヒルデブランド HD 74 型乾燥機¹⁰⁾で 6 m/s の風速を与えた乾燥経過を参考にしたもので、棧木は 1.9 cm、試験材はブナ床板辺材で棧積み幅は 0.9 m である。この場合乾燥 1 日経過後の乾燥むらは風速が高いわりに大きく、辺材を 0.95 m/s の風速で乾燥した場合とほぼ似ているが、それ以後の乾燥むらの減少のしかたがきわめて早いこと

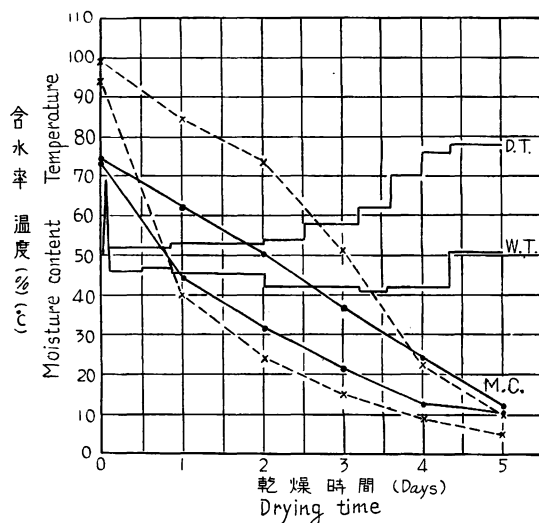


Fig. 9 片循環試験を行なったスケジュール
ブナ 2.2 cm 厚、点線は辺材、実線は心材、棧木 2.5 cm、風速：心材部 1 m/s、辺材部 0.8 m/s、棧積み幅 1.6 m

Schedule and 2 groups of drying curves on both sides of the pile for Beech boards when the test was done with several sticker thickness and air velocity at the same time. In this figure the air velocity was 1 m/s for the heart wood board layer and 0.8 m/s for the sap wood board layer.

The air direction always same, Beech strips 2.2 cm thickness, pile width 1.6 m.

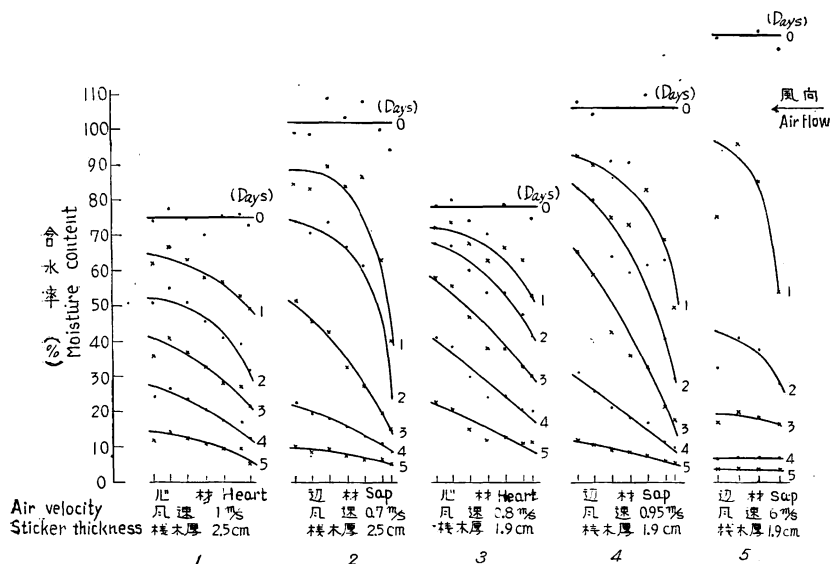


Fig. 10 片循環送風における棧積み内の乾燥むら ブナ床板材 2.2 cm 厚
Moisture distribution along the board layer with on different days of drying.
Beech strips, pile width No. 1~4: 1.6 m, No. 5: 0.9 m

Fig. 11 両循環試験におけるスケジュール

ブナ心材 2.2 cm 厚, 実線は棧木厚 3.8 cm, 風速 1 m/s, 点線は棧木厚 1.3 cm, 風速 0.5 m/s の棧積み中央部
Schedule and 3 drying curves for the test done with several sticker thickness and air velocity of Beech strips (heart wood) at the same time. One of the heavy line is the drying curve for moisture content of average value on both side of the boards and the other line is middle part of the pile when the stickers thickness in 3.8 cm, air velocity 1 m/s. The dotted line is the center part of drying curve when the boards were laminated by 1.3 cm stickers, and air velocity 0.5 m/s, pile width 1.6 m, fan is reversible.

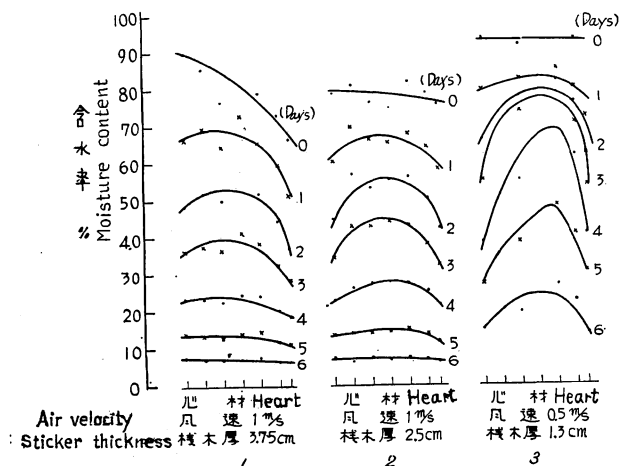
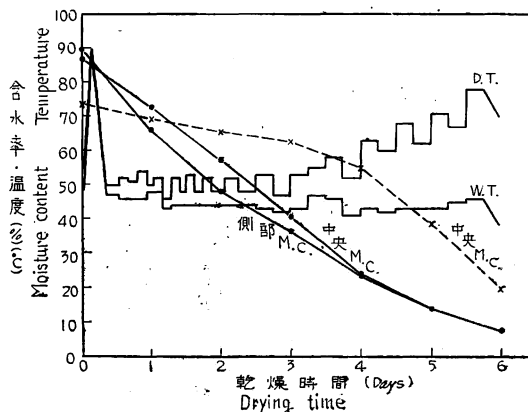


Fig. 12 両循環送風における棧積み内の乾燥むら
ブナ床板心材 2.2 cm 厚

Moisture distribution along the board layer with on different days of drying.

Beech strips, heart wood, pile width 1.6 m, fan is reversible.

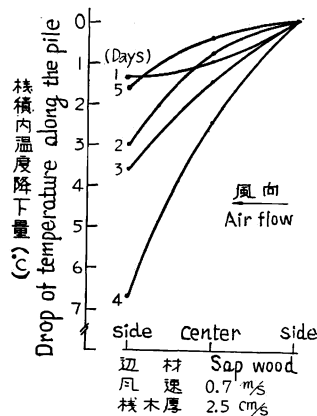


Fig. 13 乾燥経過中の棧積み内の温度降下

Fig. 10-2 のブナ辺材についてのもの

The drop of temperature along the board layer with on different days of drying.

Beech strips, sap wood (see Fig. 10-2).

が相違点と思われる。

また、前記の研究室にある I.F. 型乾燥室で風向の切換えをおこない、Fig. 11 のスケジュールによりブナ心材のみを 1.3 cm, 2.5 cm, 3.8 cm の各棧木で乾燥した結果は Fig. 12 である。風速 1 m/s では棧木厚が 2.5 cm でも 3.8 cm でも差が認められないが、風速が 0.5 m/s におち、棧木を 1.3 cm 厚にするとかなり乾燥むらが多くなっている。

Fig. 13 は Fig. 10 の 2 に示した辺材を乾燥した際の棧積み内の温度降下量を示したもので、乾燥初期の第 1 日目は乾湿球温度差が少ないため全体の温度降下は少なく吹込み側近くの温度降下だけがあらわれ、乾燥末期には風下側の未乾燥部分に温度降下が多くなっている。

2.2.3 板間隔をあけた場合の乾燥むら

乾燥研究室にある I.F. 型乾燥室を用い、Fig. 14 のスケジュールにより風向の切換えをおこない、ブ

ナ床板心材を 2.5 cm 厚桧木で乾燥した際、板の横間隔を 4.5 cm ずつあけた場合とあけない場合とでは、風速がかなり低くとも（あけたもの 0.5 m/s, あけないもの 0.9 m/s）、板間隔をあけたものの方がむらが少なくなっている (Fig. 15-1, 2 参照)。この原因は通過する空気が板と板の間で乱流となり、風下の材の蒸発速度の上昇や通過空気を混和して熱の利用度をたかめているためかと考えられる。

2.2.4 風向の切換えと乾燥むら

風向を一定（片循環）として乾燥したブナ心材および辺材 (Fig. 10) と、風向を切換え（両循環）、スケジュール Fig. 14 で乾燥した結果、Fig. 15 の 1 および 3 とをそれぞれ比較してみると、風向の切換えをおこなったものが明らかに乾燥むらが少なくなっており、乾燥むらの多いものの方が風向切換えの効果が大である。

風向をかえたものの棧積み中央部含水率と棧積み両側の含水率との関係(差額)は、低含水率域においては風向を一定としたものの棧積み中央部含水率と、吹込み側含水率との関係に似た結果となっており、風向を一定にしたものの含水率むらは棧積み幅に対しほぼ直線的に増大しているため、両循環で操作すれば乾燥むらは片循環の 1/2 近くになるといえる。ただし以上の比較は乾燥むらだけについて風向をかえる効果を試験したものであるから、これから直ちに乾燥時間が同じように短縮されるとは考えられない。たとえば、Fig. 9 と Fig. 14 のスケジュールを比較すると、両循環に用いた Fig. 14 のスケジュールは乾燥第 1 日目にかなりゆるすぎたため、全体の乾燥時間はむらの多い片循環の方が早くなっている。なお風向切換え時間の長短による乾燥むら

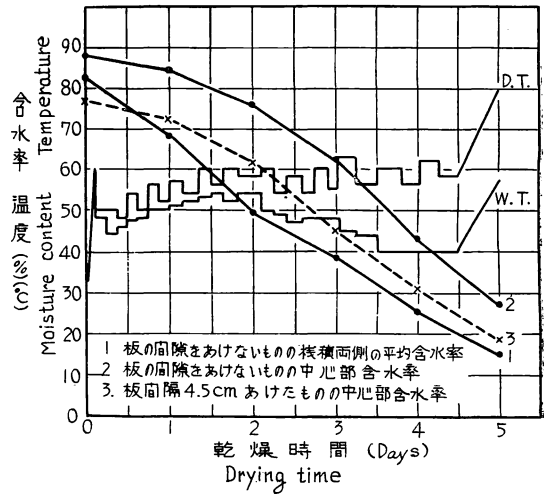


Fig. 14 間隔をあけたものと密接させた場合の乾燥経過およびそのスケジュール

Two types of drying course for Beech boards with and without gaps in between boards.

Fan is reversible.

1. The decrease of average moisture content in both side of the pile without gap.
2. The decrease of moisture content in the middle part of the pile without any gap.
3. The decrease of moisture content in the middle part of the pile with gap of 4.5 cm.

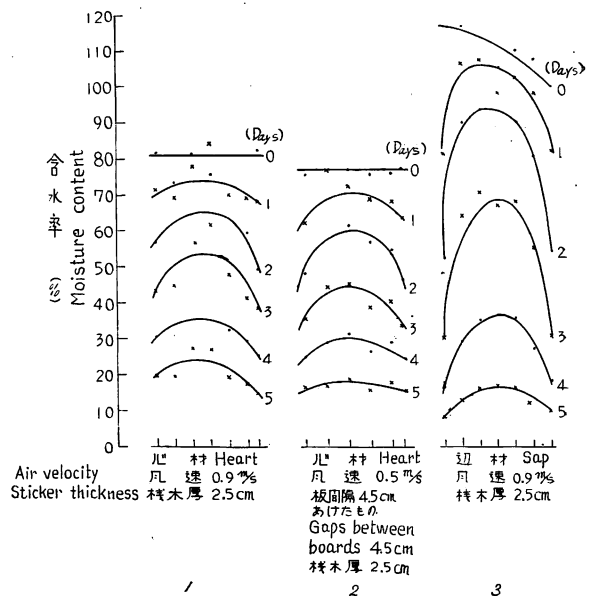


Fig. 15 板の横間隔をあけた場合とあけない場合の乾燥むらの比較および辺材の乾燥むら

Moisture distribution along the board layer with on different days of drying.

Beech strips, pile width 1.6 m, fan is reversible.

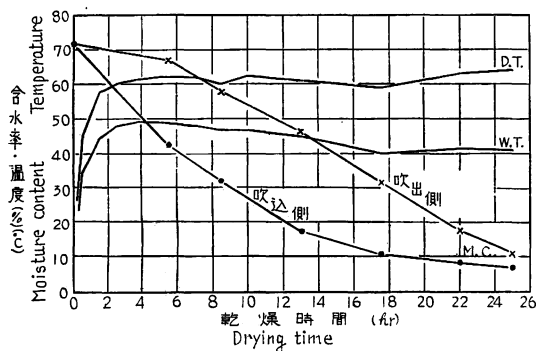


Fig. 16 ヒノキ 1.3 cm 厚板のスケジュールと乾燥経過

Schedule and drying curves for entering and leaving side of the Hinoki boards.

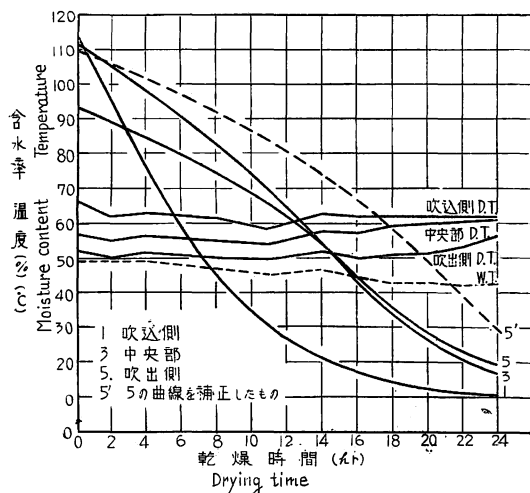
Air velocity 0.5 m/s, sticker thickness 2.5 cm, pile width 1.2 m, board thickness 1.3 cm, air direction constant.

乾燥に先だち乾燥初期の条件を整えるため約 1 時間の蒸煮をし、80°C まで室温を上昇した。一定風向で乾燥したものは初期含水率の差がはなはだしく、経過の比較が困難なため Fig. 17 の 5' の線を 5' のように仮想してえがいてみた。また乾燥経過中の棧積み内の空気温度経過を付加したが、湿球温度については吹込み、吹出し側ともほとんど差がないため、吹込み側の温度のみを示した。両循環の Fig. 18 を棧積み内各位置の乾燥経過に書きかえれば Fig. 19 となる。

両循環の方は前項の場合と同様仕上り含水率むらが片循環より少なくなっており、全体の乾燥時間は先の項で述べた Fig. 14 とは逆にスケジュールが多少強かつたこともあつて、かなり短縮されている。

2.2.6 スケジュールの遅速と乾燥むら

前出の福島県広葉樹利用事業所の乾燥室において、ブナ床板心材生材を 4 種の条件で乾燥した際の乾燥むらの比較を Table 2. に示す。表中最大むらとあるのは、乾燥経過中における棧積み両側平均含水率と



の差異は少ないようであつた。

2.2.5 薄板の乾燥むら

小型実験乾燥室 (Table 1. 参照) を用い、ヒノキ 1.3 cm 厚、幅 24 cm の板を 5 枚ならべとし、棧積み幅 120 cm、棧木厚 2.5 cm、風速 0.5 m/s、風向を一定とした場合の吹込み側および吹出し側含水率の経過を Fig. 16 に示す。棧積み幅が狭いわりにかなりの乾燥むらが発生している。

また同一装置を用い、スギ 1.4 cm 厚の板を上記と同じ条件で棧積みし、材間風速を 0.8 m/s とし、風向を一定としたものおよび風向をかえたものにつき、その結果を Fig. 17 および Fig. 18 に示す。なおこの場合は、乾

Fig. 17 スギ 1.4 cm 厚の板による乾燥むら試験

Schedule and drying curves for Sugi boards. Dry bulb temperatures are measured at entering side, middle part and leaving side of the load. Wet bulb temperature is only for the entering side. No. 1 line is for the entering side board moisture content, No. 3 is middle part, No. 5 is the leaving side. (Leaving side boards were about 20% lower than the other boards so draw the No. 5 line like No. 5' from our experience.)

Board thickness 1.4 cm, pile width 1.2 m, air velocity 0.8 m/s, sticker thickness 2.5 cm.

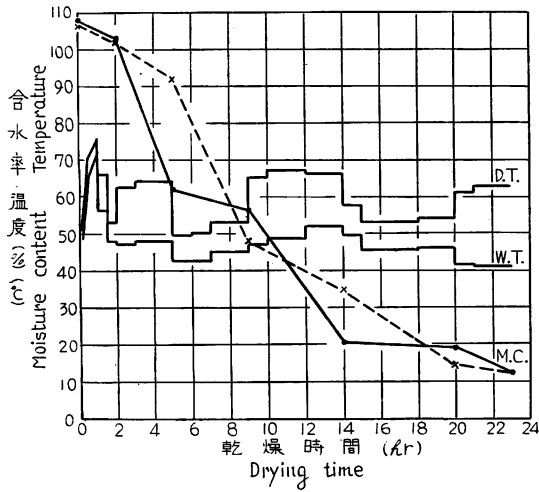


Fig. 18 スギ 1.4 cm 厚板の両循環試験による含水率と温度経過

棧積幅 1.2 cm, 棧木 2.5 cm

Schedule for Sugi test. Temperature and drying curve for both sides of the load which are strongly changed by the reverse of air flow.

Air velocity 0.8 m/s, sticker thickness 2.5 cm, board thickness 1.4 cm, pile width 1.2 m, fan reversible.

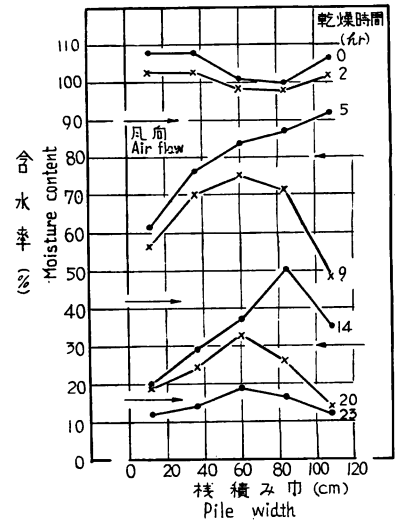


Fig. 19 スギによる乾燥むらの経過
板厚 1.4 cm, 棧木厚 2.5 cm,
風速 0.8 m/s

Moisture distribution along the board layer with on different hours of drying.

Sugi, board thickness 1.4 cm, sticker thickness 2.5 cm, air velocity 0.8 m/s.

Table 2. 乾燥操作の遅速と乾燥むら

Maximum uneven moisture content values along the board layer in different drying times.

ブナ心材床板, 両循環, 風向換え 2~6 h

材間風速 1 m/s, 棧積み幅 2 m

Beech strips, heart wood, fan reversible,

air velocity 1 m/s, pile width 2 m.

初期含水率 Initial moisture content	棧積み両側の材が乾燥する日数 含水率 60% から 10% まで Drying days from 60% to 10% at the both sides of pile	最大含水率むら Maximum uneven moisture content values in drying course
%	Days	%
65~80	4 ³ / ₄	30
75~90	5.0	25
75~85	5 ¹ / ₂	23
70~95	6.0	25

中央部含水率との含水率差の最大値を示すものである。

この表だけについてみると乾燥時間の長い、ゆるいスケジュールは、乾燥経過中多少むらの発生が少ないようである。ただし、さきにブナ心材を 2.5 cm 厚棧木で乾燥した例では (Fig. 11, Fig. 14), 乾燥初期の操作がゆるすぎた Fig. 14 の方がむらが多くなり (Fig. 12 の 2 および Fig. 15 の 1 を比較), ここではそれと逆の結果となつているが, Fig. 15 の 1 の値は経験的に少し大きすぎるように感ぜられる。こ

の原因は乾燥初期のむらの出やすいときにゆるいスケジュールで操作し、恒率乾燥に似た期間を長くしたことにあるのではないかと考えられ、乾燥条件が強いときにむらの量が多少増加するのは、主として乾燥中ごろでの操作によるものではないかと推察される。

2.3 考 察

以上の板材についての試験結果を、先に 1 項でおこなった恒率乾燥の例、Fig. 13 に示した棧積み内温度分布図および乾燥特性曲線⁷⁾とを参考にして考察してみる。

棧積みされた高含水率の生材を乾燥すると、まず乾燥初期には各板の乾燥状態が恒率乾燥か、またはそれに近い状態であるため恒率乾燥のところで得たような乾燥速度の差異が棧積み内に生じ、乾燥むらは急速に増大するが、短時間のうちに風上側の材は減率第 1 段乾燥の状態となり、乾燥速度は低下し、この部分の消費熱量が減少する。したがって、風下側の空気温度は上昇し乾湿球温度差が大となるため、この部分の乾燥速度は増加し、風上、風下側での乾燥速度の差はやや縮小される。この状態がさらに進み、風上側の材の含水率が減少し、乾燥速度が低下すれば、風下側の材は順次乾燥速度を上昇し、ついに棧積みの全体が同じような速度で乾燥しはじめ、乾燥むらの増大は停止する。この間乾燥スケジュールについてみると、乾燥の進行につれ当然乾湿球温度差が増加されるため、吹込み側の板の乾燥速度は終始してあまり低下していないから、吹込み側で消費される熱量は大略一定しており、この部分で低下する空気温度は常に同じようなものであるが、順次乾湿球温度差が増大しているため、風下側に与えられる乾湿球温度差はしだいに増加し、風下側の高含水率材の乾燥速度は急速に上昇してくる（後出の Fig. 20 乾燥特性曲線参照）。したがって、この間の操作に多少の緩急の差があつても、あらわれるむらの形は類似になるものと想像される。

乾燥末期にいたり、風上側の材が仕上がり含水率に近づけば乾燥速度が小さくなり、風下側のおくれた材は急速に追いついて乾燥むらは減少する。以上の乾燥経過中の棧積み内温度分布をみれば（Fig. 13）、蒸発量の多い場所に温度降下がみられ、乾燥中ごろの棧積み全体がさかんに乾燥しているときの温度降下量は最大となり直線に近くなっている。したがって乾燥むらの減少に関する問題は、棧積み内を単位時間に通過する熱量と被乾燥材の乾燥特性できまり、棧木厚、風速が大となれば、単位時間の通過熱量が大となり、乾燥むらは減少するが、恒率乾燥の試験にみられるようにある量を越せば効率が減り、あまり効果はなくなるものと考えられる。

被乾燥材の乾燥特性によるむらの影響は、乾燥特性曲線の温度差に対する蒸発量曲線がねているものほど、いいかえれば低含水率材、あるいは厚材のように一定の乾湿球温度差に対する蒸発量が恒率乾燥と比較して減少しているものほど、風下側に与える吹込み側空気の温度差条件の減少割合が小さくなり、乾燥むらが発生しにくく、この逆に恒率乾燥に似て乾湿球温度差に対し蒸発速度の関係が直線的になつている乾燥期間（全乾燥行程に対する恒率乾燥期間の比率）の多い高含水率材、または薄板ほど乾燥むらが発生しやすい。これらの関係は恒率的な乾燥状態を示す絶対時間の長短でなく、その板の全乾燥期間に対する恒率的乾燥状態を示す割合の大小である。したがって、高含水率材の乾燥初期にはいくら風速を上昇しても、Fig. 2, 3, 4 にみられるような一定量の乾燥むらは避けられないことになる。このような理由から、Fig. 10 の 5 に示した風速 6 m/s の例のように、乾燥初期の乾燥むらは 1 m/s 程度のものとあまりかわらない結果となつたものと考えられる。しかし、その後の乾燥むらの減少状態が風速 1 m/s のものに比較して急速だつたことは、風下側の高含水率材に対する風速の乾燥速度に及ぼす影響が風上側の低含水率材に

対するよりも有効に効いたことに原因があると想像される。

また2.2.6項で乾燥初期に極端にゆるいスケジュールで操作したためにあらわれたと思われる乾燥むらの増大は、緩慢な乾燥により恒率乾燥に類似した乾燥状態を比較的低含水率まで持続したことに原因すると考えられる。また、さらに乾燥中期以後に極端に緩慢な乾燥操作をおこなえば吹込み側の低含水率材の乾燥はほとんど中止し、風下側の材の乾燥のみ進み、あたかもイコライジングをおこなったような結果となり、仕上り時の乾燥むらは減少するものと思われるが、通常の操作範囲内においては、乾燥特性曲線の形状からみて乾燥むらの増減には操作の緩急はあまり影響がないものと考えられる。

2.2.3項で述べた板間隔をあげる条件が好結果を得たのは、空間を設けたため棧積みされた材積が少ないことにも影響されているが、板と板の間隙で通過空気の混合が良くおこなわれ、空気熱量の利用率が高まったためと考えられ、TORGESON³⁾の実験結果も大略似たような効果を示している。

風向切換えによる乾燥むらの減少と乾燥時間との関係は、切り離して考えるべき問題であろう。棧積み側面(風上側)に与えるスケジュールが片循環と両循環に対し同一であれば、風向の切換えをおこなう場合は風上側にあつた材が

Table 3. 3種の風速に対し乾燥むらが同一程度に発生する条件のおおの1条件だけについての関係で、1つの条件を比較する際は他の条件は同一と考えたもの

Relation between air velocity and each one of the conditions (initial moisture content, board thickness, etc.) and other conditions are same when the uneven drying value was nearly same.

This table was obtained from actual test.

	風 速 Air velocity m/s		
	1.0	1.5	2.0
初期含水率 Initial moisture content %	40	50	60
板の厚さ Board thickness cm	2.5	2.0	1.3
樹 種 Species	重い広葉樹 Hard hard-wood	中程度の広葉樹 Common hard-wood	軽い広葉樹 Soft hard-wood
棧 木 厚 Sticker thickness cm	2.8	2.2	1.8
棧 積 み 幅 Pile width m	1.5	2.0	2.5
風向の切換え Air circulation	両 循 環 Reversible	—	No reversible 片 循 環

Table 4. 3種の風速に対し企業的にみて適当と思われる諸条件主として1インチ生材広葉樹に適用。天乾材に対しては風速を1段低くするか棧積幅を1段幅広としてもよい。

時間延長の%: 乾燥むらのための乾燥時間の延長割合を示す。
The suitable combination values with air velocity, pile width, sticker thickness, and etc. for the normal Internal fan type dry kilns with 1 inch green hard board and the percent of the excess time taken during the uneven drying for 3 different air velocities.

		風 速 Air velocity m/s		
		1.0	1.5	2.0
棧 積 み 幅 Pile width m		1.5	1.5~2.0	2.0~2.5
棧 木 厚 Sticker thickness cm		2.5	2.5	2.0~2.3
風向の切換え Air circulation		Reversible	Reversible	Reversible
乾燥時間の延長 Percent of the excess time taken during the uneven drying %	生 材 Green lumber	15~20	15~20	15~20
	天 乾 材 Air seasoned lumber	5	5	5

風下側になつている期間乾燥がおくれ、片循環の風上側の材より乾燥期間が延長される。この際乾燥むらだけについてみると、両者の棧積み中央部の含水率と、片循環の吹込み側または両循環の平均含水率との差は等しくなつてゐるが、両循環では基本となる棧積み両側の乾燥時間が延長されているため、片循環の中央部が乾燥する時間では両循環の中央部は乾燥しない。したがつて、同一の含水率スケジュールで操作すれば、乾燥時間としては両者であまりかわらぬことになると考えられる。しかし風向を切り換える場合は、風上側の材が一定期間風下側になりゆるやかに乾燥されるので、多少片循環よりも強いスケジュールを風上側の材に与えることが可能であり、それが常識となつてゐる。したがつて両循環の場合、棧積み両側の乾燥時間を片循環の風上側の乾燥時間に一致はさせられないが、乾燥スケジュールを適当に強くして風向切替時間を短縮すれば、乾燥むらから生ずる時間延長は片循環と比較しかなり短縮でき、乾燥後の調湿処理（イコライジング）などに際しても仕上りの乾燥むらの少ない両循環方式の方が、むらの発生しやすい生材乾燥に対して特に有利であると想像される。

以上の試験結果をもとにし、工場における実際の乾燥操作から得た資料にもとづき I. F. 型乾燥室の棧木厚、材間風速、棧積み幅等の適切な値、組合せ等を取りまとめると Table 3, 4 となる。

3. 乾燥特性曲線を利用した乾燥むらの推定

棧積み内の乾燥むらに関し樹種、棧木幅、棧木厚、材間風速等あらゆる条件を実験的に求めてゆくことは非常に困難な仕事である。さればといつて、さきの恒率乾燥時における乾燥むらの結果では棧木厚、風速等の傾向的なものはつかめても、実際の板材とは条件が全く異なつてゐるため仕上り時の乾燥むら等を推定する資料にはならない。したがつて、必要とする条件につき適当な図表でこれが求められるならば、きわめて便利といえよう。こうした意味から、乾燥特性曲線を利用して棧積み内の乾燥むらの算出を試みた。

3.1 作図の方法

作図の大略の方法は乾燥特性曲線を用い与えられた条件に応じた乾燥速度を棧積み入口部にある第 1 枚目の板につき求め、この板の蒸発量から 1 枚目の板を通過したときの空気の湿度降下量を求め、次の板に与えられる条件を定め、乾燥特性曲線により 2 枚目の板の乾燥速度を求めようとしたものである。この際棧積み内にはいつた空気は完全に混和して板からの蒸発量に比例して湿度が降下するとし、また棧積み内での湿球湿度の降下は 2 項での試験から無いものと判断して計算したものである。

3.2 作図の実例およびその考察

作図の実例としてスギ 1.4 cm 厚の板を用い、条件を次のように定めた。

棧積み幅 120 cm, 板の枚数 8 枚, 初期含水率 100%

スケジュール

風上側第 1 枚目の板目の板の含水率降下曲線が指数曲線⁷⁾になるように Fig. 20 の乾燥特性曲線から乾湿球温度差の条件を求めた。

室温 65°C 一定

棧木厚 $h=0.025\text{ m}$, 板厚 $d=0.014\text{ m}$, 板幅 $x=0.15\text{ m}$,

被乾燥材の容積重 $\rho=370\text{ kg/m}^3$, 空気比熱 $S=0.24\text{ kcal/kg}$,

材間風速 $v=2520\text{ m/h}$ (0.7 m/s), 水の蒸発潜熱 $L_w=585\text{ kcal/kg}$,

棧積みされたスギ板の相対する上下の板のおおのが 1 時間に 1% ずつ含水率を低下した場合、そこを

通過する空気温度降下量 $[\Delta\theta]$ は
次式により求められる。

$$\Delta\theta = \frac{Lw \frac{x \cdot d \cdot \rho}{100}}{h \cdot v \cdot s} \dots\dots\dots (2)$$

$$= \frac{585 \times 0.15 \times 0.014 \times 370}{100}$$

$$= \frac{4.54}{15.11}$$

$$\approx 0.3$$

$$\Delta\theta = 0.3^\circ\text{C}$$

この値にある位置の乾湿球温度差条件と Fig. 20 の乾燥特性曲線とから求めた乾燥速度 $(\%/h)$ を乗ずれば、その位置の温度降下量が算出される。

まず、1枚目の板の含水率が100%であり、与えられたスケジュールの温度差が 15°C であるから、この板の乾燥速度は Fig. 20 により $16.7\%/h$ となり、1時間後の乾燥経過の図上に含水率83.3%の位置が得られ、同時に温度降下量 5.01°C (16.7×0.3) が算出され、棧積み内温度経過図に2枚目の板に与えられる温度 60°C が記入される。よつて2枚目の板は温度差 10°C が与えられたことになるため、乾燥特性曲線により2枚目の板の蒸発量は $11\%/h$ となり、温度降下量は 3.3°C となる。したがって、1時間後の2枚目の板の含水率は89%、3枚目の板に与えられる温度は 60°C から 3.3°C 下がって 56.7°C となる。以下の板については同様に求め、1時間後の各板の含水率と棧積み内温度分布が得られる。次の条件の求め方は前と同様第1枚目の板につき含水率83%、温度差 15°C の乾燥速度13.2

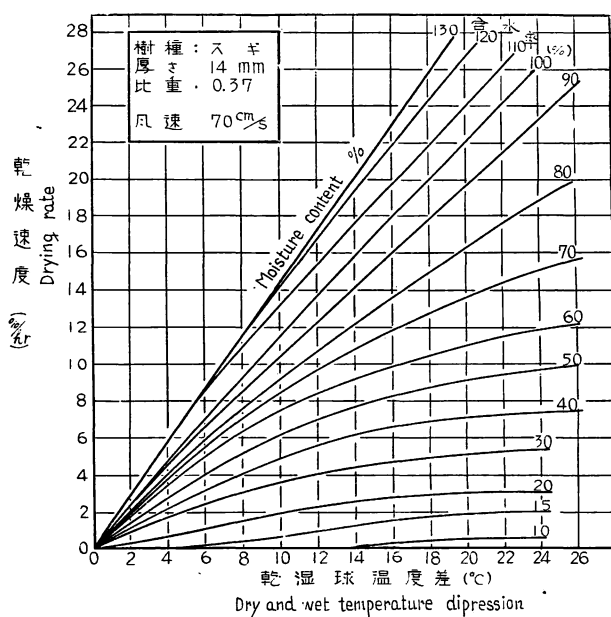


Fig. 20 スギ板 (1.4 cm 厚) の乾燥特性曲線
The drying characteristic curve of Sugi. Board thickness 1.4 cm, density 0.37, air velocity 0.7 m/s.

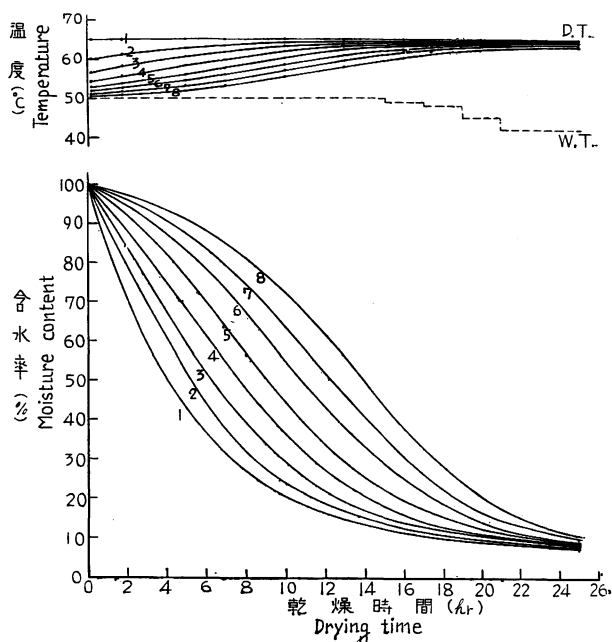


Fig. 21 乾燥特性曲線から計算により求めた棧積み内の含水率および温度経過
スギ 1.4 cm 厚、板幅 15 cm、棧木厚 2.5 cm、風速 0.7 m/s、番号は風上側よりの位置を示す。
Change of temperature and distribution of moisture in the pile by calculate.

%/h が得られ、さきの含水率 83% より 13.2% 下がった 69.8% の位置が定まる。温度降下量は 3.96°C となり、2 枚目の板には 61°C の条件が与えられる。以下同様にして求めたのが Fig. 21 である。なお、この作図に際しては作図の正確を期するため時間を 30 分ごとに区切って計算したものである。

このようにして得られた結果については、計算上において通過する空気が完全に混和しながら通過するとし、乾燥中の材温上昇のための熱量、蒸発潜熱の含水率低下にともなう増加などを見込んでおらず、乾燥特性曲線も温度 65°C のものから各温度条件の値を引用しており、さらに乾燥経過を一定時間ごとに区切って考える等の無理があり、理論的には難点もあるが、この得られた結果を同様条件で実測した Fig. 17 に照合してみると、比較的類似の結果が得られ、一つの目安をたてるためには実用的価値があるものと推察された。

4. 摘 要

以上の、I.F. 型乾燥室の棧積み内乾燥むらについての試験結果を要約すれば、次のようになる。

1. 棧積み内の乾燥むらは、棧積み通過風量の増加にともない減少する傾向があるが、恒率乾燥期間だけについてみれば、どのように風量を増加しても一定量の乾燥速度のむらはさけられない (Fig. 2~4)。

2. 恒率乾燥期間だけについての試験では、有効適切な棧木厚は 2.5 cm 、風速は $1.5\sim 2\text{ m/s}$ と推定された (Fig. 5)。

3. 一般の板材乾燥についてみれば、乾燥初期に乾燥むらは増大し、乾燥なかごろに最大となるが、その後乾燥末期に向かい乾燥むらは減少する。

4. 棧積み幅が 1 m 程度の狭い場合も、 0.5 m/s 前後の低風速では乾燥終末時の乾燥むらはかなり残存する。また 1.5 cm 厚以下の棧木の場合も、乾燥むらの増大が激しい。

5. 乾燥なかごろの乾燥むらおよび仕上り時の乾燥むらは、高含水率材、あるいは薄板のように全乾燥期間に対し比較的恒率乾燥の様相を示す期間の多い材ほど生じやすく、低含水率材、あるいは厚板ほど少ない。したがって、材間風速は前者に対し高くすべきである。

6. 棧積みの際し、板の間隔を $2\sim 3\text{ cm}$ 設ければ乾燥むらの減少に効果的である。

7. 風速を 6 m/s 程度に高くした場合、乾燥なかごろの乾燥むらは 1 m/s のものとあまりかわらないが、その後の乾燥むらの減少のしかたが後者より早く、仕上り時の乾燥むらは少ない。

8. 棧積み内の乾燥むらは乾燥操作 (乾燥スケジュール) の緩急によつてはほとんど変化がないように思われる。

9. 風向の切り換えをおこなつて操作した場合は (両循環)、片循環より仕上り時の乾燥むらは少なく、その乾燥むらは約 $1/2$ 程度となるが、乾燥時間の短縮とこの価とは直接の関係がない。

10. 両循環の場合は、風向の切り換えを適当に短時間とすれば、風上側の板に与えるスケジュール (含水率スケジュール) を片循環と比較して強くして操作できるから、全乾燥時間を短縮することが可能となり、乾燥むらの大きい場合ほどこの効果があらわれるものと考えられる。

11. 両循環は片循環と比較して、仕上り時の乾燥むらが少ないため過乾燥される材が少なく、乾燥後のイコライジングを容易にし、材の歩止り向上に有効であり、適当な操作法により乾燥むらによる時間延長も短縮できるため、特にむらの多い乾燥室には有効な操作方式といえよう。

12. 棧積み幅、棧木厚、材間風速等につき、適当と思われる値および組合せ等をこの試験結果および一

般工場調査を主にして整理すると、Table 3, 4 となる。

13. 棧積み内の乾燥むらの経過と量は、被乾燥材の乾燥特性曲線を用い推定することが可能である。

文 献

- 1) 小倉武夫：恒率乾燥における乾球温度の低下について，木材学会，1，2 (1955)
- 2) STEVENS, W.C. : Temperature Drop across a Pile of Green Timber and its Effects on Drying Rates. F.P.R.L. Risbor, (1957)
- 3) TORGESON, O.W. : Why the Drying Time of a Kiln Load of Lumber is Affected by Air Velocity. Southern Lumberman, (1941)
- 4) LODELL, J.L. : High-Temperature Drying of Lumber. Timber of Canada, July, (1955)
- 5) 岩下 陸・谷淵正弘：インターナルファンタイプ乾燥室に関する研究，徳島県林業指導所報告，1, (1955)
- 6) 長岐義蔵・根田 懋：自然換気を I.F. 型に改造，木材工業，11，10，(1956)
- 7) 寺沢 真・岩下 陸：木材乾燥操作に関する基礎的研究 第1報，乾燥特性曲線，林業試験場研究報告，81，(1955) p. 81~93
- 8) 押田勇雄：蒸発乾燥，河出書房，(1948)
- 9) 山本義一：有限な容器からの蒸発の研究，気象集報，19，8，(1941)
- 10) 寺沢 真・佐藤庄一・野原正人：ヒルデブランド HD 75 型小型直熱式乾燥機の性能について，林業試験場研究報告，93，(1957) p. 131~146

Studies on the Drying Equipment for Wood (IV).

On the un-uniform drying along the air flow in the Internal fan type dry kiln.

Shin TERAZAWA, Takuzô TSUTSUMOTO and Makio KODAMA

(Résumé)

The purpose of this study is to decide the suitable air velocity and sticker thickness in internal fan type dry kilns. In the test we measured the un-uniformity of drying rate, along the air flow, with stickers of varying thickness and change in air velocity and pile width. In the first test we used the perfect wet soft board. These boards are placed as shown in Fig. 1 and air velocity was changed for each test; measurements of weight loss for each board was taken only during their constant drying rate. Next we put the board in lamination and the thickness of the stickers was changed for each test. Measurement of the weight loss was taken as above in several air flow conditions. These results were plotted as in Fig. 2~4.

The relationship between evaporation and air flow for each board was found to be parabolic, when the evaporation values were determined in the direction of the air flow.

As such this was included in the following formula.

$$W = CX^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

The n value is always constant for the single layer boards in all air conditions (see Fig. 2). But for the laid boards n value increases with the decrease of sticker thickness and air velocity (see Fig. 3, 4).

The n value increases as in Fig. 5 by the decrease of air velocity and sticker thickness. n lines also change their form with 2 cm stickers thickness and 1.5 m/s air velocity. So we

can suppose that the economically suitable values are sticker thickness from 2 to 2.5 cm, and air velocity from 1.5 to 2.0 m/s, only in this constant drying rate test, with high moisture content.

In the second test we used the strips of Beech (2.2 cm thickness), Sugi (*Cryptomeria* sp., 1.4 cm thickness), and Hinoki (*Chamaecyparis* sp., 1.3 cm thickness) for the test board and placed these test boards as in Fig. 6 in the normal dry kilns or in a small test dry kiln (Table 1). These were dried with normal schedules in several conditions e.g. different initial moisture content (only Beech strips), different air velocity, sticker thickness and pile width. These test boards were weighed several times for their loss of weight, by taking them out of the pile and then resetting them in the pile. These decreasing moisture content values are shown in Fig. 7~19.

From these figures it is seen.

(1) Low initial moisture content decreases the un-uniformity of drying (Fig. 8).

(2) With the high moisture content, even an air velocity of 6 m/s passing through the pile does not decrease the unevenness of moisture content along the air flow (see Fig. 10-5). But the unevenness of moisture content rapidly decreases during the second part of drying time, with high air velocity (6 m/s), comparing with low air velocity (0.95 m/s) (see Fig. 10-4).

(3) The unevenness of moisture content is much decreased by keeping some gaps between each board for air circulation, as compared with laying them together with sides touching each other (see Fig. 15-2), when all other conditions are the same except the air velocity.

(4) By non-reversible air flow test, the unevenness of moisture content along the direction of the air flow shows a parabolic relationship in the beginning and then it gradually changes up to a straight line towards the last part of drying. And in the reversible type test the unevenness decreases its value about half that of the former, during the last part of drying, when other conditions are the same. But it is a mistake to suppose that the drying time can be decreased to half of its value in reversible type dry kiln (Fig 10, 12, 15).

(5) The ununiformity of drying processes does not change its type and value by the difference in drying time, with the usual schedule.

(6) By the 1st and 2nd test we decided the air velocity, sticker thickness and load width on the internal fan type dry kiln as Table 4.

In the 3rd test, we estimated the un-uniformity of moisture content along the air flow by the drying characteristic curves.⁷⁾

By No. 2 formula¹⁾ we can get the decrease of temperature in some decided length along the air flow if the drying rate of each lumber is known. The drying rate of each board can be found from Fig. 20 by getting depression of dry and wet bulb temperature. At first, we can get the drying rate for the first board, on the entering side, by the temperature and depression fixed for schedule, drying characteristic curves and initial moisture content, so we can calculate the decreasing temperature value of this part by the board width, thickness and density of wood.

At the second step we can find the drying rate value on the 2nd board from the drying characteristic curves by the calculated temperature depression caused by the decrease of temperature while the air is passing through the first boards.

In this manner, we can get the average evaporation value of each board along the air flow during the first one hour, so we can easily calculate the moisture content of each board

after 1 hour.

The moisture contents of each board after two hours may be similarly calculated by the same method, by paying attention to the difference of moisture content on each board. Like this, by finding out the values, after an interval of each hour of the drying time and separating the distance of air flow direction by each board width, we can get the average evaporating value and temperature decrease for each board.

Fig. 21 is drawn by taking into consideration the followings factors,

species Sugi, density 0.37, board width 15 cm, board thickness 1.4 cm, air velocity 0.7 m/s, load width 1.2 m, sticker thickness 2.5 cm, initial moisture content 100 %, schedule Fig. 21.

And this figure fairly resembled the measured values in Fig. 17.