

低温域における木材の乾燥に関する研究

野原正人

目 次

I. 緒 言	2	1) 葉枯らしによる乾燥速度	38
A. 広葉樹材の乾燥	2	B. 丸太材の乾燥速度	42
B. 針葉樹材の乾燥	3	a. 実験方法	42
C. 除湿乾燥装置の発達	3	b. 実験結果と考察	43
D. 研究の経過と目的	4	1) 林内における丸太材の乾燥速度	43
II. 天然乾燥と除湿乾燥に関する既往の 研究とその問題点	6	2) 工場土場における丸太材の乾燥速度	43
A. 天然乾燥に関する既往の研究とその 問題点	6	3) 丸太材の含水率減少機構	48
B. 除湿乾燥に関する研究の概要とその 問題点	9	C. 製材品の乾燥速度	49
III. 立木および丸太材の含水率	11	a. 実験方法	49
A. 針葉樹の生材含水率	12	b. 実験結果と考察	50
a. 針葉樹立木の含水率	12	1) スギの材種別乾燥速度	50
b. 針葉樹丸太材の含水率	13	2) 樹種別乾燥速度	50
B. 広葉樹の生材含水率	14	3) スギの季節別乾燥速度	51
C. 要 約	15	D. 要 約	52
IV. 広葉樹材の天然乾燥速度	16	VI. 人為的手段による天然乾燥の促進	53
A. 一枚板の天然乾燥速度	17	A. 強制送風による天然乾燥の促進	54
a. 実験方法	17	a. 実験方法	54
b. 実験場所の気候条件	18	b. 実験結果と考察	56
c. 実験結果と考察	19	1) 送風による材間風速の変化	56
1) 40mm板心材の乾燥経過	19	2) 強制送風による天然乾燥経過	56
2) 辺、心材および板厚別の乾燥速度	21	3) 強制送風による乾燥むらの減少	59
3) 乾燥速度におよぼす気象条件の影響	23	4) 強制送風による乾燥速度の向上	60
B. 栈積みによる乾燥むらの発生	24	5) 送風による乾燥時間の短縮	61
a. 実験方法	24	B. 簡易加熱による天然乾燥の促進	62
b. 実験結果と考察	25	a. 実験方法	62
1) 板の横間隔と乾燥むら	25	b. 実験結果と考察	63
2) 被乾燥材の材種と乾燥むら	26	1) 簡易加熱による栈積み内部の温度変化	63
C. 天然乾燥による仕上げ含水率と 乾燥時間	28	2) 加熱による天然乾燥経過	64
a. 一枚板の仕上げ含水率	28	3) 加熱による乾燥むらの減少	65
b. 栈積み材の仕上げ含水率	30	4) 加熱による乾燥速度の向上	66
c. 天然乾燥の乾燥時間	31	5) 電熱線加熱の熱効率	67
D. 要 約	34	6) 加熱乾燥による収縮率	68
V. 針葉樹材の天然乾燥速度	36	C. 太陽熱利用による天然乾燥の促進	69
A. 林内における葉枯らし乾燥速度	36	a. 実験方法	69
a. 実験方法	37	b. 実験結果と考察	70
b. 実験結果と考察	38	1) 太陽熱利用乾燥装置内の温度変化	70
		2) 夏季における促進効果	71
		3) 冬季における促進効果	72
		4) 太陽熱利用乾燥による収縮率	73
		D. 天然乾燥促進方法の経済効果	74

a. 強制送風促進法の経済効果	75	C. 広葉樹材乾燥用の除湿乾燥装置の試作	89
b. 簡易加熱促進法の経済効果	77	a. 実験方法	89
c. 太陽熱利用乾燥法の経済効果	78	b. 実験結果と考察	90
E. 要 約	81	1) 風速分布	90
VII. 除湿式乾燥法による乾燥性能	83	2) 乾燥経過	91
A. 除湿式乾燥装置の乾燥性能	83	3) 収縮率	92
a. 試験に用いた乾燥装置の概要	83	4) 乾燥時間と仕上がり含水率	93
b. 試験方法	84	5) 消費電力量	93
c. 実験結果と考察	85	6) 乾燥経費	95
1) 乾燥室の風速分布	85	D. 要 約	95
2) 温度分布	85	VIII. 総 合 考 察	96
3) 乾燥経過および乾燥むら	86	謝 辞	100
4) 乾燥時間および乾燥速度	87	引 用 文 献	100
5) 除湿乾燥装置の消費エネルギー	87	Summary	105
B. 針葉樹柱材の除湿式乾燥方法	88		

I. 緒 言

A. 広葉樹材の乾燥

我が国の木材乾燥技術は、フローリング用材や家具用材など、一貫して広葉樹材を対象として発展して来た。そのため乾燥中に発生する各種の損傷を可能な限り防止するとともに、乾燥時間を少しでも短縮することを主目的として技術改良が実施されてきた。

被乾燥材は主として広葉樹の厚さ20～40mm程度の板材が対象であり、この材料を出来るだけ短時間に、しかも損傷なく乾燥させる必要がある。

このため、乾燥初期の乾球温度条件を45～50℃乾燥末期のそれを75～80℃とする、いわゆる中間温度条件による乾燥スケジュールが樹種、材種毎に確立された^{1,2,3,4)}。

また、欧米各国では、木材加工部門に從來から針葉樹材が主要な地位を占めており、早くから針葉樹材の乾燥技術が種々検討されてきた。

建築用材の中でも比較的断面積の小さい2×4部材などの人工乾燥には、乾球温度を90～120℃の条件で操作する、いわゆる高温乾燥がある。損傷も少なく、乾燥時間も著しく短縮できるとして米国ではすでに実用化されており、我が国においてもこうした高温乾燥の研究が実施されるとともに^{5,6,7,8,9)}、一部実際に用いられている。

これら、中間温、あるいは高温条件での乾燥操作は、乾燥時間を短縮する上で非常に効果的であるが、当然のことながら燃料費による乾燥経費の高騰が問題となるし、少しの誤操作が被乾燥材の損傷を大きくする危険がある。そのため、高含水率材を直接こうした中・高温の条件で乾燥することは種々の困難を伴うことになる。

生材から直接人工乾燥を実施するよりも、繊維飽和点近くまでを天然乾燥にゆだね、その後人工乾燥に移すことが、乾燥経費の節減あるいは乾燥による損傷の軽減にも効果的である。

我が国において、天然乾燥は“枯らし”といわれて古くから実施されており、家具用材なども板材に挽き材後天然乾燥が実施され、そのまま加工されるのが普通であった。

往時は、収納家具なども針葉樹材が主として使用されていたこと、あるいは木理が通直な良質材のみを使用していたことから、天然乾燥のみによる比較的高い仕上げ含水率のまま加工しても、その後の狂いや割れなど乾燥による損傷の発生が少なく、問題がなかったものと思われる。

しかし、戦後になって家具を主とする木材工業における原材料の主体が広葉樹材になるにしたがっ

て、天然乾燥のみでは十分な乾燥が期待できず、人工乾燥による低含水率までの乾燥が必要となり、人工乾燥装置の普及が進むとともに天然乾燥は人工乾燥の予備的な操作となり、天然乾燥の技術があまり重要視されなくなった。

天然乾燥は、人工乾燥のように温度、湿度などの乾燥条件を人為的に調節して、木材が乾燥しやすい条件を与えることができない。そのため、天然乾燥の積積み方法や管理方法が乾燥速度に大きな影響をおよぼすとともに、管理の不備が木口割れや表面割れ、および狂いなどの損傷や変色による材質劣化の原因となる。

また、天然乾燥が人工乾燥の予備操作であれば、どの時期（含水率）に人工乾燥に移行するのが経済的であるか、あるいはまた、気象条件に大きく影響される乾燥速度を把握して、計画的な木材乾燥を実施するために、季節や樹種、材種別の乾燥時間の検討なども必要である。

しかるに、こうした低温域での乾燥である天然乾燥については、あまりに普遍的であるためか、系統だった研究はほとんど行われていない。

B. 針葉樹材の乾燥 —東濃松の例—

ここ数年来、建築用針葉樹材に対する乾燥材の要求が強くなって、柱材や梁材などの比較的断面積の大きい針葉樹材の乾燥が実施されるようになった。

近年、岐阜県の東濃地方を中心に生産されるヒノキ材が、銘柄材『東濃松』として一般に流通し、高い評価を得ている。

この『東濃松』は、従来の建築用針葉樹材の生産工程にはなかった乾燥と云う工程をくみ込み、製材品の寸法精度の向上あるいは狂いの減少を図った加工技術により、銘柄材としての地位を得ることができた、いわゆる製品銘柄材である^{10, 11)}。

『東濃松』の素材は、雨量が少なく、比較的痩せ地に成育した材であるため、年輪幅が狭く、しかも均一であり、節も少なく、材色が淡いピンク色を呈するなど優れた材質を持つ。しかし、樹幹の曲りや偏心が多く、あて材の多い材質であるため¹²⁾、通常の製材方法ではひき材後に曲りなどの狂いが発生しやすく、製品の商品価値が低下する原因となりやすい。

そのため初期の『東濃松』は、所定の寸法より若干大きく“粗びき”した直後にもう一度所定の寸法に“仕上げびき”する“二度びき”あるいは“八面びき”と云う製材方法によって、あて材など成長応力による狂いを修正する方法が実施されていた。

しかし、この製材方法では使用するまでの放置期間中にまた狂いが発生するため、“粗びき”された製材品を平均含水率30%程度まで乾燥した後で“仕上げびき”する方法に改められた。

平均含水率30%程度の乾燥では完全とは云えないが、柱材など製材品の表面は15%以下まで乾燥しており、この時期にひき直すことによって成長応力に起因する狂いは十分除去できるし、表面割れの防止や寸法精度の向上には非常に大きな効果が認められた¹³⁾。

『東濃松』が銘柄材として現在の名声を得るには、こうした加工方法以外にも、厳しい格付け、豊富な品揃えなどの販売努力も見逃すことはできないが、少なくとも『東濃松』が製品銘柄材と云われる理由は、この優れた加工方法にある¹⁴⁾。

こうした『東濃松』の乾燥方法は天然乾燥を主流とし、一部除湿乾燥がとりいれられているが、最近の建築用針葉樹材にたいする乾燥材を要求する機運は、この『東濃松』の加工方法が大きな影響を与えていることを無視することができないであろう。

もちろん、建築用針葉樹材に対する乾燥材の要求はこうした東濃松の例とは別に、生活様式や建築工法の変化あるいは建築工期の短縮などにより強くなっている。

C. 除湿乾燥装置の発達

木材の人工乾燥技術は、前述したように広葉樹の家具用材などを対象として発展したため、主として建築用針葉樹材を取り扱う製材工場には人工乾燥の知識や技術がなく、家具工場などで一般に使用

されている蒸気式人工乾燥装置を導入することは困難であった。

そのため、乾燥技術もあまり高度なものは必要でなく、操作も比較的簡単であるという除湿式の乾燥装置が、針葉樹建築用材を取り扱う製材工場に導入されるようになり、急速にこの装置が普及された。

除湿式乾燥装置は、木材中より蒸発した水分を除湿機を用いて乾燥室内から除去する方法であり、この除湿機の冷媒にフロン系のガスを使用している機構上、乾燥室内の温度をあまり上昇させることが不可能であり、一般に乾燥温度は45℃前後の比較的低温度で操作する。

乾燥温度が低いため、乾燥による損傷の発生も少なく、乾燥技術の不足による若干の誤操作も、致命的な問題とならない利点があるが、乾燥速度が小さく、低含水率まで乾燥することが困難であるという、天然乾燥と同じような欠点を持っている。

また、除湿乾燥は比較的新しい乾燥方法であると同時に、この装置で乾燥される主な材料が針葉樹の大断面材であるため、これまでの乾燥技術をそのまま適用すれば種々の問題が発生することになり、その装置の構造あるいは乾燥操作など、検討を要する点が多く残されている。

D. 研究の経過と目的

以上のような背景から筆者は、重要でありながら研究成果が少なく、経験的なものにまかせられていた天然乾燥、あるいは除湿乾燥のように比較的低温度による木材の乾燥に関して種々の面から研究を重ねてきた。

昭和30年代の岐阜県の木材工業は、岐阜市を中心とする建築兼業の製材業と、高山市を中心とする家具製造業に大別することができる。

筆者の勤務した岐阜県林業試験場の所在地である高山市には、日本における三大家具工場の一つに数えられる飛騨産業株式会社（他の二つは秋田県の秋田木工KKと、広島県のマルニ木工KK）の他、2～3の大手家具工場が、曲げ木を主とする食堂用卓子あるいは椅子を製作しており、脚物家具の一大生産地を形成していた。

アメリカあるいは東南アジア向けの輸出家具が主製品であり、使用樹種はほとんどがブナ材であり、一部ナラ材が使用されていた。木材の乾燥は、蒸気式IF型乾燥室が主流であり、3～6ヶ月間天然乾燥を実施してから人工乾燥に移す方法が最も一般的に採用されていた。

IF型乾燥室の創生期でもあり、人工乾燥スケジュールの検討により乾燥時間の短縮が要求されるとともに、乾燥応力の除去方法など検討すべき問題点は多かったが、これらの問題点を整理すると天然乾燥の不備に起因することが多く、適正な人工乾燥を実施するためには適正な天然乾燥が必要であると結論された。

そのために、家具用材としてのブナ材を用いて、天然乾燥の積積み方法、季節別乾燥速度、あるいは天然乾燥の促進など広葉樹材の天然乾燥に関して研究を行ってきた。

また、昭和45年、岐阜県林業試験場が岐阜県林業センターに改組され、美濃市に移ったが、前述の通り美濃地方は建築用針葉樹材の製材工場あるいは集成材工場が多く、広葉樹を使用する工場は少ない。

そのため、集成材用ラミナの乾燥など、針葉樹材の乾燥を手がけるようになり、その後間伐材あるいは『東濃桧』など建築用針葉樹材の人工乾燥に関する研究が必要となった。

建築用材のように比較的断面が大きく、しかも心持ち材の乾燥と云うことになると、生材時の含水率分布を無視することができなくなり、立木の含水率や、丸太での放置による含水率分布の変化を検討する必要が生じた。

そのため、伐倒木の林内での乾燥（葉枯らし）、玉切り丸太の工場土場での乾燥など、丸太の天然乾燥について種々検討するとともに、製材品の天然乾燥やその促進方法など、針葉樹材の天然乾燥について研究を実施してきた。

その後、『東濃桧』の乾燥に除湿乾燥が取り入れられるようになり、導入される乾燥装置の性能に

関する検討や、除湿乾燥の方法に関しての指導が必要となり、乾燥スケジュールなどの研究を実施してきた。

本論文は、これら針葉樹および広葉樹の乾燥に関する一連の研究のうち、天然乾燥や除湿乾燥など、比較的低温での乾燥についてその研究成果をとりまとめたものである。

Ⅱ章では、天然乾燥の歴史的な考察と既往の研究の概要、および除湿式乾燥法の導入経過やその問題点と研究の概要について述べている。

Ⅲ章では、天然乾燥に大きな影響をおよぼす、広葉樹材および針葉樹材の立木含水率の樹幹内変動、あるいは季節変化と、伐倒後の丸太材の含水率分布について若干の検討を加えている。

Ⅳ章では、広葉樹の家具用材を主とした天然乾燥についてまとめている。季節別、地域別の乾燥速度、栈積みによる乾燥むらの発生と、栈積み全体の乾燥速度について述べるとともに、天然乾燥から人工乾燥に移行する時期を仕上げ含水率の観点から季節別、板厚別に検討した結果について述べている。

Ⅴ章では、主として建築用針葉樹材の天然乾燥を対象とした。林内でのいわゆる葉枯らし乾燥と玉切りされた丸太材の工場土場での乾燥が樹皮や径級によってどのように変化するかについて述べている。また、柱材や梁材など断面の大きい製材品の乾燥速度についても言及した。

Ⅵ章では、こうした広葉樹板材や針葉樹角材の天然乾燥速度を促進する方法についてまとめている。被乾燥材に強制的に送風した場合や、電熱線による簡易な加熱方法による促進効果、および太陽熱を有効に利用するソーラシステムによる天然乾燥の促進効果と、これら促進方法による経済効果について述べている。

Ⅶ章では、除湿式乾燥法について述べている。その装置の開発や性能の検討結果、割れ防止を考慮した初期条件など乾燥スケジュールの検討、および仕上がり含水率別の乾燥経費について述べるとともに、除湿乾燥法の今後の方向をその乾燥性能から考察している。

以上のように、この論文では低温域における広葉樹、針葉樹製材の乾燥速度と乾燥の促進法を主として検討した。しかし、それぞれの乾燥条件による損傷の問題については研究の対象から除外している。

木材乾燥の場合、損傷による乾燥歩止まりを無視すれば、乾燥時間を短縮することは比較的容易である。しかし、乾燥スケジュールなどの温・湿度条件を検討する場合には、当然のことながら損傷の発生を最小限におさえて、その上で最も乾燥時間を短縮するための適正な温・湿度条件を探すのが普通の方法である。

この論文の場合も、樹種・材種およびその用途に最も適した乾燥条件で試験を実施している。天然乾燥の場合でも、直射光線を受けるような状態に栈積みをすれば、材温が上昇して乾燥速度は大きくなると思われるが、割れが発生するなど当然乾燥歩止まりが低下する。そのため、栈積み上部には直射光線や雨水をさけるための屋根を設置して試験を実施した。

また、天然乾燥を促進するための電熱、あるいは太陽熱での加熱および除湿乾燥における乾燥条件も、すべて損傷の発生が最小となるような条件で試験を実施した。

本論文は、上述したように木材乾燥全般を目的としたものではない。

人工乾燥の主流である高・中温域における木材乾燥および乾燥による落ち込みなどの損傷については除外しているとともに、木材中の水分伝導係数などの理論的解析も行っていない。また、試験地も岐阜県の高山市と美濃市に限定している。

しかしながら、天然乾燥のような低温域における乾燥では、高・中温域における誤操作のような損傷の発生はほとんどなく、前述のような栈積みの注意を守ることにより、損傷の発生は無視することができる。

また、試験地の問題も山国気候区¹⁵⁾に属する高山市と、内陸的気候区に属する美濃市という、本州中央部の代表的な二つの気候区における試験結果であるため、日本全国をカバーできないにしても、本州のほとんどの地域において、この報告を参考にすることは可能であると思われる。

この論文が、広葉樹材の計画的な天然乾燥を可能にし、乾燥歩止まりの向上と乾燥コストの低下につながるとともに、建築用針葉樹材の乾燥に関する意識を向上し、適正な乾燥技術により低コストの乾燥を実施するために少しでも貢献することができれば望外の幸である。

II. 天然乾燥と除湿乾燥に関する既往の研究とその問題点

この研究において対象としている低温域での乾燥としては、人工乾燥の予備操作として実施される天然乾燥と、近時、主として建築用針葉樹材の乾燥に用いられている除湿乾燥である。

天然乾燥については、その乾燥速度、乾燥むら、およびその促進方法、除湿乾燥については、その乾燥装置の性能あるいは乾燥操作について論じているため、既往の研究とその問題点についても、この順序にしたがって述べることとする。

A. 天然乾燥に関する既往の研究とその問題点

明治40年頃になって、初めて我が国に人工乾燥装置が導入されているが、それまで木材はすべて天然乾燥あるいは簡易な燻煙乾燥程度で加工されるのが普通であったといわれている¹⁶⁾。

明治45年に刊行された名著“木材の工芸的利用”¹⁷⁾によれば「天然乾燥は木材利用上最も望ましくことなり」として天然乾燥を高く評価している。

なお、同書ではナラおよびケヤキの天然乾燥における所要時間を板の厚さ別に報じ、4～8 inch材でナラは6ヶ月、モミは3ヶ月の天然乾燥が必要であるとしている。

また、ケヤキあるいはマアテの漆器素地の乾燥は、一級品で1～2年、2級品で1年程度の天然乾燥が必要であると報じているが、これらは当時の一般的な天然乾燥の現状を報じているにすぎない。

本格的に天然乾燥の乾燥速度を検討したものに、森¹⁸⁾のアカマツ丸太を乾燥したものがある。直径5～13寸(15～40cm)長さ13尺(4m)の丸太を屋内に栈積みして乾燥したものであるが、直径15～18cmのものは1年余、20～24cmでは1年半、36～40cmでは2年余りで気乾状態に達すると報告している。

また、旧日本領を含めた4ヶ所において樹種別の天然乾燥速度を検討した結果が森¹⁹⁾により報告されている。

北海道(野幌)、東京(目黒)、朝鮮(京城)、および台湾(台北)において、エゾマツ、ヤチダモ、シラカンバ(野幌)、スギ、ヒノキ、ブナ(目黒)、チョウセンマツ、チョウセンマカマツ、コナラ(京城)、タイワンヒノキ、ベニヒ、アミガシ(台北)の10×10cm、長さ100cmの試験材を用いて屋内で各地同時に乾燥し樹種別の乾燥速度と天然乾燥による到達含水率を報告している。

生材から気乾状態になるまでの期間は、野幌で2年、目黒および京城で1年半、台北では1年を必要であるとし、京城は目黒や台北より乾燥速度は大きい、気乾含水率が低い、気乾状態になる期間は長くなるとしている。

また、広葉樹材は針葉樹材よりも乾燥速度は大きいが生材含水率が高いために乾燥期間は長くなると報告している。

続いて、麻生²⁰⁾が薪炭材を対象として小丸太材の天然乾燥速度を検討している。コナラ、クヌギおよびアカマツの直径1～8寸(3～25cm)、長さ2尺(65cm)の丸太を伐採月別に屋根下で乾燥したものである。各樹種とも3ヶ年で気乾状態となり、樹種別の乾燥速度はアカマツ、コナラ、クヌギの順であると報告している。

また、泉²¹⁾は、スギやブナなど数樹種の9cm角材を用い、これを立てかけて乾燥したときの末口の位置による乾燥速度を検討するとともに、遠心力を利用した場合の木材水分の除去効果について報告している。結果として、木材は元口を上にして立てかけた方が乾燥速度は大きくなる。

しかし、遠心力を利用して水分を除去する場合には末口、元口の位置は関係がない。よって、木材

中の水分が減少する速度は重力に関係なく、材の組織に関係があると報じている。

松本²²⁾は、大阪市内においてナラの板厚別の乾燥速度を、8月に乾燥を開始して測定している。厚さ30mmの場合は2ヶ月で生材から含水率20%までに乾燥し、48mm板では2ヶ月半で33%まで乾燥し、5ヶ月で25%まで乾燥した。しかし、90mm板は含水率30%まで乾燥するのに9ヶ月を要したと報告している。この他にも、天然乾燥材の含水率について検討したものに泉^{23,24)}の研究があるが、これらは天然乾燥材の使用場所別の含水率、あるいは日本各地の平衡含水率を検討したものである。

戦後になって人工乾燥が盛んになるにしたがい、木材乾燥の研究も人工乾燥装置あるいは乾燥スケジュール関係のものが多くなり、天然乾燥の問題はあまり取り上げられなくなった。

こうしたなかで、天然乾燥の乾燥速度に関する研究報告としては、樹種、板厚あるいは季節別の天然乾燥所要日数を検討した次の報告がある。

北村²⁵⁾は、北海道砂川においてナラの厚さ25~38mmを5月から74日間乾燥した場合、25mm板は含水率19.3%までに、32mm板は21.6%まで、38mm板は24.5%まで乾燥したと報告している。また、生材から含水率20%程度まで乾燥するに要する日数をナラ材で90日とした場合、マカンバ、アサダ、ブナなど12樹種がそれぞれどの程度の乾燥日数を必要とするかについて報告している。

谷淵²⁶⁾は、徳島市における天然乾燥の所要日数をブナの辺材、心材、ナラおよびカツラの心材を用いて季節別に測定し、ブナ20mm板心材が38日で22%まで乾燥し(11~12月)、ナラ25mm板心材は29日で21%まで乾燥し(7~8月)、カツラの14mm板は16日で19%まで乾燥すると報告している。

また、七沢²⁷⁾は横浜市においてシナノキを9月に乾燥した場合、生材(含水率110~125%)から30%までの乾燥所要日数は板厚33mmで30日、25mmで18日、17mmでは15日であると報告している。

もう少し詳しく天然乾燥速度を検討したものに、西尾²⁸⁾、中野²⁹⁾および野原³⁰⁾の研究がある。これは、ブナあるいはナラの20~40mm板を用いて、毎月、月始めに乾燥を開始して、月別の乾燥速度を1年間にわたって検討している。これらの結果はそれぞれ鳥取市、岩手県滝沢村、それに高山市および美濃市における天然乾燥速度の事例として評価されるべきであろう。

海外における天然乾燥の研究としては、まず丸太材の乾燥経過としてSchonauら³¹⁾が南アフリカ共和国のナタル地方において、4種類のユーカリの天然乾燥速度を検討し、乾燥速度は天候に支配されるが、末口径が小さいほど、初期含水率が高いほど大きくなると報告している。

また、板材の天然乾燥についてはPeck³²⁾がアメリカのウイスコンシン州においてRed oakの1 inch板の天然乾燥時間を測定し、生材から含水率20%までの所要日数は、5月に乾燥を開始したときが最も短くて65日、9月に開始したときは212日で最も長くなると報じている。

Donaldoら³³⁾はRed oakの1 inch板をマイアミで天然乾燥し、生材から含水率20%までの乾燥日数は、6月に栈積みしたものは61日であり、11月に栈積みしたものは138日を要したと報告している。

Ordinario³⁴⁾はフィリピンにおいてアピトンなど18樹種を天然乾燥し1および2 inchの板厚別に生材からshipping dry (30%)までの乾燥所要日数を報告している。

Deningら³⁵⁾は、アメリカのバージニア州において厚さ1 inchのRed oakとYellow poplarを天然乾燥し1日当たりの含水率減少量を、初期含水率、気温および関係湿度から求める式を提案し、これにより天然乾燥暦を作成している。

このように天然乾燥の乾燥速度あるいは乾燥所要日数については種々の報告がみられるが、天然乾燥の経過や速度が、その場所の気象条件に直接影響される訳であり、乾燥の実施場所が変われば当然乾燥経過も異なり、到達する含水率(仕上がり含水率)も異なる訳であるため、その変動に関する法則性が求められないかぎり、その結果はいずれも事例調査の域を出ないことになり、現在においてもこれらに関して適確な研究成果は報告されていない。

天然乾燥における乾燥速度は、このように気象条件によって変化するが、一枚の板の状態で乾燥する場合と、大量の材を栈積みした場合の乾燥速度はまた大きく変化することになる。

乾燥速度が、温度、湿度および風速によって支配される訳であれば、栈積みの位置によっては当然

これらの外周条件が変化し、棧積み位置により乾燥速度が異なり、その結果として乾燥むらが発生することになる。

天然乾燥による乾燥速度を論ずる場合、やはり一枚板の状態のそれと、棧積み全体のそれを論じなければならない訳であり、棧積み全体の乾燥速度は、その棧積みで最も乾燥の遅れた位置の含水率が所定の含水率まで低下する、いわゆる待時間を考慮することが必要であり、結果的には最も乾燥の遅い位置の乾燥速度がその棧積みの乾燥速度ということになる。

このような棧積みの乾燥むらは、樹種、材種あるいは気象条件によっても変化するが、それ以上に棧積みの方法が大きく影響する。

棧積み方法による乾燥むらについては、野原^{36,37)}が平積み、井桁積みおよび立てかけ積みの三種類の棧積み方法による乾燥むらの差について報告しているし、天然乾燥の仕上がり含水率のばらつきが、人工乾燥の乾燥むらにどのような影響を及ぼすかについて、西尾³⁸⁾が詳しく報告しているが、その他の報告はほとんどみることができない。

次に、天然乾燥が人工乾燥の予備乾燥であり、乾燥経費の節減を主目的として実施される操作であるとしても、人工乾燥に比較して非常に長期の乾燥時間を必要とすることは、やはり天然乾燥の欠点である。また、気象条件によって乾燥速度が変動し、所要時間があらかじめ決定できないことになれば、現在のように計画的な生産が必要な各企業にとっては、これも大きな欠点となる。

そのため、天然乾燥時間を少しでも短縮するとともに、気象条件の影響を小さくするために、天然乾燥に人為的な手段を加える促進方法が考えられるのは当然であろう。

人為的な手段を加える方法として、天然乾燥の棧積み強制的に送風する促進方法が欧米において種々試みられている。

棧積み側面に左右に移動できる送風機を設置する方法や、棧積みの下部からダクトを用いて送風する方法などがある³⁹⁾。また、凹凸のあるアルミニウムの棧木を用いて棧積みと平行方向に送風する方法や、棧積みと棧積みの中間に送風機を設置し、吸気、送風の二つの効果を利用して電力費を節約する方法なども報告されている³⁹⁾。

また、送風と同じように材間の風速を増加させる効果をねらった方法として、棧積み全体を振子式に運動させる方法や、棧積みを回転させる方法などが報告されており³⁹⁾、いずれの方法もそれなりの効果が認められているようであるが、我が国におけるこの種の報告は少なく、野原^{40,41)}がブナ材を用いて実施した送風効果の報告以外にはみることができない。

また、乾燥速度を支配する温度を人為的に高める方法として、棧積み内に温床用の電熱線を設置した、簡易加熱の効果について野原^{40,41)}が報告している。

太陽熱を利用した天然乾燥の促進方法は古くからあったようであるが、最近になって省エネルギーの立場から世界的に再認識され、この種の報告は非常に多くなっている。

透明な材料による簡易な乾燥装置での太陽熱利用による促進効果が、河原田⁴²⁾、野原^{40,41)}によって報告されており、太陽熱と他の熱源を併用した人工乾燥室に近い予備乾燥装置の効果が寺沢⁴³⁾によって報告されている。

海外におけるソーラシステムの乾燥効果としては、Troxellら⁴⁴⁾がアメリカのCentral Rocky Mountain地方において透明な材料によるソーラドライヤを用いて、Engelmann spruceとLodgepole pineの厚さ1 inch板を乾燥し、10, 12月における乾燥速度の短縮効果が大きいと報告している。

Peck⁴⁵⁾は、厚さ1 inchのRed oakが含水率20%まで乾燥するに要する時間はソーラシステムの場合、普通の天然乾燥の1/2に短縮されるとしている。また、Maldonado⁴⁶⁾はプエルトリコにソーラシステムの乾燥室を試作し、低コストの乾燥に成功している。

寺沢⁴⁷⁾によれば、我が国のように緯度の高い地域において太陽熱利用の効果を多く期待することは困難であるとしているが、装置の改良あるいは目的によっては充分効果が期待できる訳であり、こうした太陽熱の利用方法について検討することはやはり必要なことであると思われる。

B. 除湿乾燥に関する研究の概要とその問題点

除湿式乾燥装置が我が国に始めて導入されたのは昭和52年である。岐阜県加茂郡白川町の「東濃桧」材を専門に製材する工場に、柱材の乾燥用に導入されたのが日本の一号機であり、この装置はイタリアの「シーフ社」製である。

岐阜県の誇る銘柄材「東濃桧」は、前項でも述べたようにあて材が多く含まれる材質であるため、所定寸法より大きく粗びきした後天然乾燥により平均含水率30%程度まで乾燥してから、もう一度所定の寸法に仕上げびきする、いわゆる二度びきをするのが特徴である。しかし、粗びき後の天然乾燥に3～4週間を要するため、生産性の向上を目的としてこの除湿式乾燥装置が導入された訳である。

除湿式乾燥装置は電力による自動制御方式を採用しているため、蒸気式乾燥装置のようにボイラーマンを必要としないことと、低温で時間をかけてゆっくり乾燥するため、特に高度な乾燥技術を用いなくても一応の目的を達することができる。

初期の除湿式乾燥装置は冷媒に「フロンガス・R-22」を用いているため、操作温度の上限は比較的低い45℃程度であることから当時は「低温除湿式乾燥装置」と呼ばれることが多かった。

除湿式乾燥装置のこうした特徴は、当時の建築用針葉樹材を生産している製材工場に受け入れられ易い条件を具備していたため、針葉樹材の乾燥装置として急速に普及した。

ここ数年来、建築用針葉樹材の乾燥に対する要求が非常に強くなっているが、これは建築工法の変化や、冷暖房の普及による生活様式の変化が乾燥材を要求する気運を高めたことは言うまでもない。そのため、昭和52年に始めて我が国に導入された除湿式乾燥装置は、平成元年には全国で710室までに増加し、その内の350室は製材工場に設置されている⁴⁸⁾。

除湿にはいろいろな方法があるが、主として木材乾燥に用いられている方式は、水蒸気を含んだ空気を露点以下に冷却し、水蒸気を凝結させて除去する方法である。

蒸気式乾燥装置のような加熱空気式乾燥法は、乾燥室内の空気温度を上昇させることによって相対湿度を低下させて木材中の水分の蒸発を図り、加熱空気と一緒に水蒸気を排出して木材を乾燥する方法である。

相対湿度を下げるためには温度を高くする方が効果的であるため、乾燥が進行するにしたがって(被乾燥材の含水率が低下するにしたがって)、温度を上昇し、排気量を大きくするため、乾燥室から排出される空気中の熱エネルギーは非常に大きくなり、乾燥室の熱効率是非常に小さくなる。

これに対して除湿式乾燥法は、比較的低い温度を用いると同時に、乾燥室から排出される熱エネルギーは凝結水の潜熱のみであるために、乾燥室の熱効率は加熱空気式乾燥法に比較して大きくなる。

しかも、除湿時に発生する蒸発潜熱を回収して室温の上昇に利用する、いわゆるヒートポンプ方式が採用されているため、有効な熱利用が可能となる。

ヒートポンプとは、低い温度の物体から熱をとり、高い温度の物体にその熱を運ぶ熱の移送機関のことであり、低い温度の物体から熱をとるには、より低い温度の吸熱器部分が必要となり、高い温度の物体へ熱を送り込むには、より高い温度の放熱器部分が必要となる。

こうした温度変化を一つの場合の中に作るには、気体を加圧したり減圧すれば可能であるが、消費した動力以上の熱エネルギーを運ぶためには、加圧あるいは減圧をしたときに物質の状態変化(気体-液体)が発生するように設計して、そのときに発生する大量の潜熱を利用することが必要である。

木材乾燥に用いているヒートポンプ利用の除湿機は、棧積みを通して冷えた湿潤空気を吸熱器部分で露点以下に冷却して、水蒸気を水滴として回収し、そのときに発生する潜熱と空気温度が低下した分の顕熱とを取り込んで放熱器部分へ送り返し、水蒸気含量の減少した冷却空気をこの熱で再加熱する方式となっている。

このように、ヒートポンプの場合、消費した動力(W:熱エネルギー換算)と運ばれた熱量(Qc)との比率(COPc)を成績係数と呼び、木材乾燥に除湿機を使用している条件下ではこの成績係数は2.5から3.0程度が普通である⁴⁹⁾。

このようにヒートポンプ方式の除湿式乾燥法は次のような利点がある。

- (1) 乾燥温度が低いため、割れ、狂いあるいは変色などの損傷が少なく乾燥仕上がりが良好となる。
- (2) 蒸気式加熱乾燥室などに比較して、ボイラやその他の付属設備が少ないため設備費が安い。
- (3) ヒートポンプを用いているため、熱ロスが少なく、また、ボイラーマンを必要としないため乾燥経費が安い。
- (4) 電力を用いているため、乾燥操作が簡単であり、しかも低温を用いているため高度な乾燥技術を必要としない。

このような利点を有するために、前述のように針葉樹材を取り扱っている製材工場などを中心に除湿乾燥装置が普及した。

このように、現在我が国に設置されている乾燥装置の16%を占めている⁴⁹⁾除湿式乾燥装置であるが、この除湿乾燥に関する研究報告は比較的少ない。これは除湿乾燥の歴史がまだ浅いことと、研究よりも現場における普及の方が速く、研究が後追いするような形になっているためであろう。

除湿乾燥に関する研究報告としては、神長ら⁵⁰⁾が吸湿性薬剤を用いた乾式除湿機による広葉樹材の乾燥について報告している。

現在主流となっているヒートポンプ方式の除湿乾燥とは機構が異なるが、乾球温度を20～40℃の範囲で乾燥しているため乾燥時間や仕上がり状態など十分参考となる。

この装置による乾燥時間は、南洋材を主とする広葉樹の場合、蒸気式加熱乾燥に比較して20～30%長くなるが、低温であるため割れや狂いなどの損傷が少なく、乾燥仕上がり状態は良好であると報じている。

また、野原ら⁵¹⁾は我が国に始めて設置された大型の除湿式乾燥装置について、タモおよびツガの厚さ25～30mmの板材を乾燥したときの乾燥時間や乾燥装置の熱消費量について検討している。含水率60%から20%までの乾燥時間は、除湿乾燥の場合蒸気式加熱乾燥の2.3倍となるが、ヒートポンプ方式のため熱消費量は非常に少ないと報じている。

鳥居ら⁵²⁾は、ブナの厚さ24mmの板材を除湿式乾燥室と蒸気式I F型乾燥室とで乾燥して、除湿式乾燥室の乾燥時間は蒸気式I F型乾燥室の約1.7倍程になると報告している。

Cechら⁵³⁾は、スプールの間柱材を乾燥した場合、蒸気式I F型乾燥室の約1.3倍の乾燥時間を要すると報告している。

このように、除湿式乾燥装置の場合は乾燥温度が低いために、含水率20%以下の乾燥速度が著しく低下し、乾燥時間は蒸気式加熱乾燥装置に比較して1.3～2.3倍、平均1.5倍程度となる。

寺沢⁵⁴⁾は、こうした除湿式乾燥法について乾燥時間、収縮率、乾燥応力あるいは乾燥経費などを総合的にみて、含水率20%以下に乾燥することは経済的にあまり有効な乾燥方法ではなく、冬季間も温暖な関東以西の地域で仕上げ含水率を20%前後にとどめるような目的で使用するのが良いと報告している。

そのため、小野ら⁵⁵⁾はスギ、ヒノキの柱材などの製材品を含水率20%程度まで乾燥するときの乾燥条件について検討し、スギ柱材の場合、相対湿度は乾燥速度に影響するが、乾燥温度の影響は少なく、ヒノキ柱材は乾燥条件が乾燥経過にあまり関係しないと報告している。なお、スギの場合は初期含水率や材質の差異が乾燥経過に大きく影響するとしている。

また、小野ら⁵⁶⁾は、スギの磨き丸太の乾燥に従来実施されていた天然乾燥に代えて除湿乾燥を試み、除湿乾燥の乾燥速度は屋内における天然乾燥の3倍であるとし、乾燥温度が40℃の場合は30℃より割れの発生が大きいと報告している。

続いて、小野ら⁵⁷⁾はスギ、ヒノキの12cm角柱材を除湿乾燥し、樹種や初期含水率の違いが乾燥速度ならびに損傷におよぼす影響について検討するとともに、除湿乾燥の仕上がり含水率がその後の放置中の含水率や寸法変化におよぼす影響について報告している。

小林ら⁵⁸⁾は、除湿乾燥の低温による操作の安易さや乾燥時間の長さを容認した上で、製材品を保管中に乾燥させる考え方から製品倉庫と除湿乾燥室を併用した装置を試作し、スギ、ヒノキの製材品の

乾燥経過を検討しているが、柱材を含水率30%以下まで乾燥する場合は他の乾燥法を併用した方が良くないと報告している。

除湿式乾燥法による含水率20%以下の乾燥速度が小さく、乾燥時間が長くなることは、全て乾燥温度が低いことによるものであるため、乾燥温度を高くして乾燥時間を短縮する方法として、除湿機の冷媒をフロンガスR-22から高温用のR-12にした装置が開発されるなど、除湿乾燥の利点を生かしながら乾燥時間を少しでも短縮する方法が多く採用されるようになった。

それと同時に、除湿式乾燥法の利点である低温乾燥の仕上がり状態の良さや操作の簡易性を生かすとともに、乾燥経費の節減を図るために除湿式乾燥装置に太陽熱利用を取り入れた研究が見られるようになった。

・神長ら⁵⁹⁾は太陽熱をコレクタで集熱して温水とし、これを補助熱源とした除湿式乾燥室の性能について検討し、乾燥経費の節減を図ると同時に南洋材（広葉樹）を含水率8%まで容易に乾燥させることができると報告している。

小林⁶⁰⁾は、乾燥経費を軽減する方法として太陽熱を利用した除湿式乾燥装置を開発し、昼間は太陽熱を利用し夜間のみ除湿機を稼働する方法について検討しているが、生材から含水率15%までの直接経費が従来の除湿式乾燥装置の1/2～2/3程度に軽減できると報告している。

・除湿式乾燥装置は、このように建築用針葉樹材ことにスギ、ヒノキの柱材の乾燥装置としての地位を確立し、仕上げ含水率20～25%を目的として普及した。

しかし、広葉樹材の乾燥装置としては乾燥速度あるいは仕上がり含水率の点から若干問題があるとしてあまり利用されていない。

そのため、大冷工業株式会社⁶¹⁾が除湿式乾燥法と蒸気式加熱乾燥法を併用して低温と高温の切り替え可能な乾燥装置を開発して、広葉樹材あるいは針葉樹材の乾燥について検討し、乾燥初期は除湿機を稼働し、含水率25%程度からは蒸気加熱を併用した排気方式を採用した場合、針葉樹材はもちろん、ブナあるいはミズナラの板材の乾燥にもコスト的に十分利用が可能であると報告している。

この低温・高温切り替え式の除湿乾燥装置の開発試験には筆者も技術アドバイザーとして参画し、高山市の家具工場に試験装置を設置して試験を実施した。

除湿式乾燥装置はヒートポンプを利用しているため、乾燥室の断熱効果を完全にすることが必要であり、ことに高山市のような寒冷地においては壁面のみではなく床面の断熱をも十分考慮することが必要であると報告している。

以上、除湿式乾燥装置の現状とこれまでの研究の概要について述べたが、除湿式乾燥装置はまだ完成された装置とは言い難く、今後もその完成に向かって種々検討することが必要である。

Ⅲ. 立木および丸太材の含水率

生立木または伐採直後の樹幹内には多量の水分が含まれており、その含有水分の量は樹種、樹幹内の部位、立地あるいは季節によって変化する。こうした、立木あるいは丸太材の含有水分の量すなわち生材含水率は、木材の乾燥時間に大きな影響をおよぼす。

広葉樹の場合は辺材、心材の含水率に大きな差がなく、乾燥する場合（使用方法も同じ）にも、厚さ2～3cmの板材に挽材することが多く、若干の生材含水率の差は初期含水率のバラツキとして乾燥スケジュールなどの操作で対応することができるため、あまり大きな問題とはならない。

しかし、針葉樹材の場合には柱材などのように断面積が大きいと同時に、一本の丸太から一本の柱を製材したいいわゆる心持ち柱材などの乾燥が多いため、心材と辺材との含水率の差は直接乾燥時間に大きな影響を与えることになる。

そのため、この章では針葉樹および広葉樹の立木あるいは伐倒直後の丸太材の生材含水率について、既往の研究と若干の実験結果を基にして検討する。

A. 針葉樹の生材含水率

a. 針葉樹立木の含水率

樹木は幹、枝、根から構成されているが、それら各部の比重、年輪密度などには大きな差が認められ、生材含水率にもまた大きな差が認められる。

矢沢^{62, 63, 64, 65)}によれば、生材含水率は側根がもっとも高く、樹幹、枝条の順に低くなり、しかも枝条の場合は樹幹から遠くなるほど、すなわち枝の先の方ほど含水率が高くなるが、これは細胞の空隙率の大小に起因するためであると報告している。

樹高方向の含水率分布については、小原⁶⁶⁾が大枝産スギについて測定し、地上高が高くなるほど辺材部、心材部とも低い含水率を示すと報告している。

また、黒鳥⁶⁷⁾は、スギの移行材（白線帯）に関する研究の中で、スギ生材の移行材の含水率は辺材より極めて低く、心材と同じような含水率を示すと報告している。

このように、針葉樹の生材含水率はその部位によって著しい差があり、しかも辺材と心材の含水率の差が非常に大きいため、丸太あるいは心持ち柱材を乾燥する場合には、その影響を無視することができない。

そのため、筆者⁶⁸⁾は、スギを季節別に伐採して伐倒直後の含水率について、水平方向および垂直方向の含水率分布を測定した。

供試木は、岐阜県八幡町の30年生で、胸高直径約20cm、樹高約15mのスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) で、1月、6月、8月 および11月の4回、各2本ずつ伐採した。

この供試木より地上高1、3、5、および7mの位置から厚さ3cmの円盤を採材し、それぞれ樹心より樹皮に向かって1cm毎に幅3cmの試験片を連続的に採取し、全乾法により含水率を測定した。

Table 1 にその季節別の含水率を示す。これは円盤全体の含水率であり、辺材、心材を含めた平均含水率である。最も成長の旺盛な6月の含水率が低くなっているが、成長期には水の消費や蒸散が盛んなために、樹幹内の含水率が低くなっているものと考えられる。

また、Fig. 1 にその季節別の樹幹内含水率分布を示す。成長期である6月、8月の心材含水率は11月、1月の成長休止期よりも高くなっているが、辺材の含水率は逆に成長休止期の方が成長期より高い値を示している。

また、辺材と心材の含水率差は非常に大きく、心材含水率の平均が約100%であるのにたいして、辺材含水率の平均は約300%となっている。

なお、どの季節においても移行材（白線帯）の含水率が

Table 1 Mean moisture content in SUGI green logs

Month	Jan.	Jun.	Aug.	Nov.
Test logs	12	15	14	16
Maximum moisture content (%)	265	193	248	231
Mean moisture content (%)	216	157	205	196
Minimum moisture content (%)	166	117	165	158

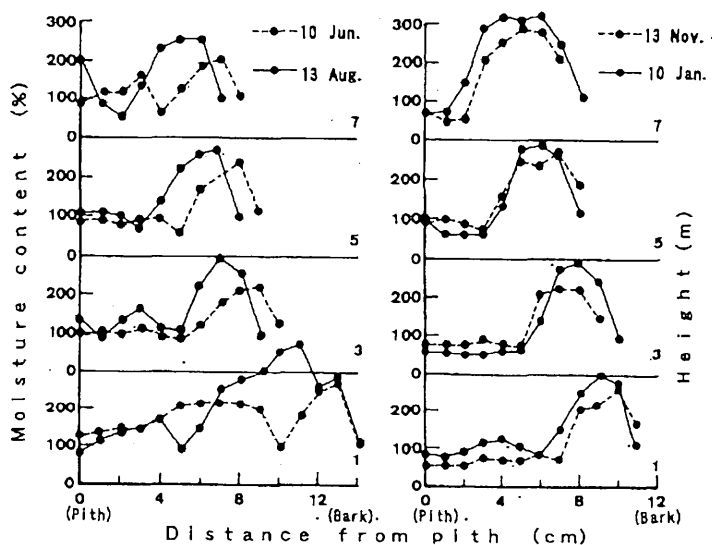


Fig. 1 Seasonal distribution of moisture content (SUGI 30 years old)

心材部より低い値を示し、辺材と心材の境界を明確に示している。

樹高方向の含水率分布にはあまり大きな差は認められないが、成長期においては樹高が高くなるほど含水率が若干低くなっている。次いで、東濃松を7月および11月に伐採したときの、生材含水率をTable 2¹²⁾に示す。それぞれ2本の供試木から厚さ3 cmの円盤を採取して辺材、心材別に含水率を測定したものであるが、7月、11月とも心材の含水率は非常に低い。しかし、辺材の含水率は心材の含水率の3～4倍となっている。

Table 3に矢沢⁶⁾による針葉樹材の生材含水率を示すが、一般に針葉樹の辺材は心材の3～5倍の含水率を示し、中には繊維飽和点に近い心材含水率を示す樹種(アスナロ)もあると報告している。

Table 2 Moisture content in green in HINOKI

Month	Jul.	Nov.
Moisture content in heart wood (%)	38.3	47.0
Moisture content in sap wood (%)	160.3	143.0

Note: Mean moisture content of two test boards

Table 3 Moisture content in green in softwood⁶⁾

Species	M.C. in green (%)		Species	M.C. in green (%)	
	Sapwood	Heartwood		Sapwood	Heartwood
HINOKI	153.3	33.5	NEZUKO	208.6	56.9
AKAMATSU	145.0	37.4	MOMI	170.3	60.1
SUGI	151.4	71.5	TODOMATSU	211.9	76.1
ASUNARO	154.9	30.5	EZOMATSU	169.1	40.6
SAWARA	154.5	38.3	KARAMATSU	127.5	40.8

b. 針葉樹丸太材の含水率

伐倒後の丸太材についても、容易に入手できた数樹種について、樹種別および伐倒後の貯木状態別に含水率分布を測定した⁷⁾。

樹種は、スギ(*Cryptomeria japonica* D.Don)の水中貯木材(約3ヶ月)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)およびアカマツ(*Pinus densiflora* Sieb.et Zucc.)の6月伐採直後の材、ベイスギ(*Thuja plicata* D.Don)の海水貯木材(約6ヶ月)、それにベイツガ(*Tsuga heterophylla* Sarg.)の陸積材と海水貯木材(約6ヶ月)である。

Fig. 2は、スギの水中貯木材の含水率分布を示すが、黒心材のため心材部の含水率は180 %程度と高いが、辺材部の含水率は平均250 %程度で立木時の例とあまり大きな差はない。

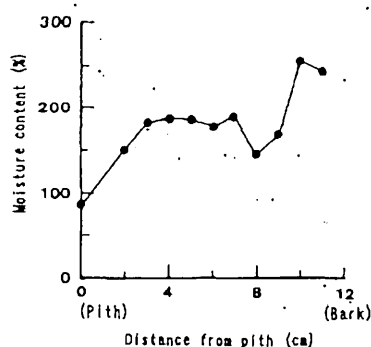


Fig. 2 Distribution of moisture content in floating SUGI

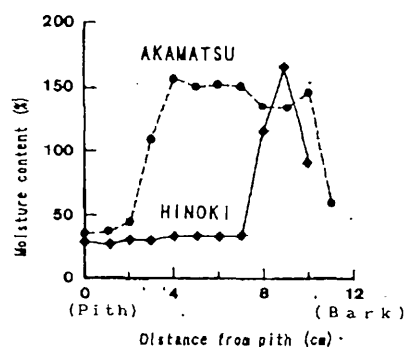


Fig. 3 Distribution of moisture content in HINOKI, AKAMATSU (cut in Jun.)

Fig. 3 はヒノキとアカマツを6月に伐倒したときの含水率分布であるが、ヒノキ、アカマツとも心材部の含水率は35~40%とスギより低い値を示している。また、心材と辺材との含水率には著しい差が認められるが、スギに比較してヒノキ、アカマツとも辺材部の含水率は低くなっている。

Fig. 4 は、ベイスギの海水貯木材の含水率分布であるが、辺材、心材とも低い含水率を示し、辺材と心材の含水率も日本のスギほど高くない。しかし、辺材部の含水率にバラツキが多く、これは高含水率の部分が局部的に散在するため、部分的には200~300%の含水率を示すことも珍しくない。

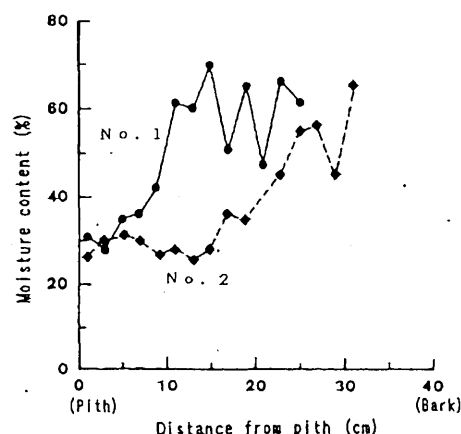


Fig. 4 Distribution of moisture content in BEISUGI floating in sea

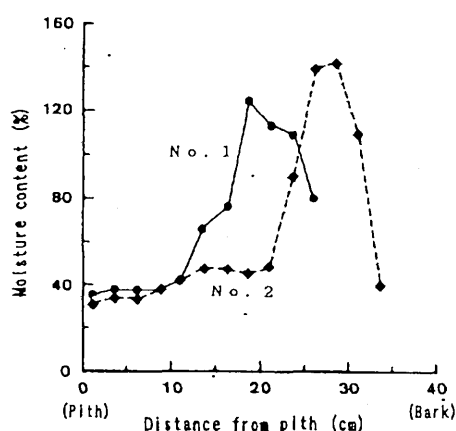


Fig. 5 Distribution of moisture content in BEITSUGA floating in sea

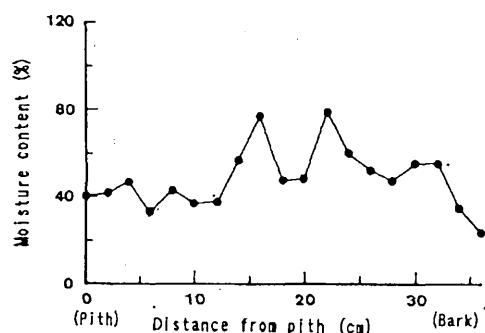


Fig. 6 Distribution of moisture content in BEITSUGA piled on the ground

次に、ベイツガの海水貯木材の含水率分布をFig. 5 に、陸積材の含水率分布をFig. 6 に示す。

海水貯木された場合は、辺材と心材の含水率に明確な差が認められ、辺材の含水率が高くなっている。しかし、陸積材の場合は辺材部が若干乾燥して低い含水率を示しているが、ベイスギと同じように局部的に高含水率の部分が現れている。肉眼的に高含水率と認められる部分の平均含水率は77%、通常部の平均含水率は44%となっている。

こうした局部的な高含水率の部分は、水の移動性が悪い場合人工乾燥の場合でも含水率の減少が遅く、いわゆるアンコ状態となつて残ることが多い。

B. 広葉樹の生材含水率

広葉樹の生材含水率は針葉樹に比較して低い値を示しているとともに、辺材と心材の含水率の差も針葉樹ほど大きくない。

IV章およびV章で用いた供試材の内、ブナ材の生材含水率をまとめてTable 4 に示す。

Table 4 Moisture content in BUNA green logs

Place	Measuring time	Test logs	M.C. in sapwood (%)			M.C. in heartwood (%)		
			Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Mean	Maximum
Takayama	Every month	48	70.8	91.7	120.8	60.1	76.6	93.2
Mino	Jan.	20	50.3	77.2	105.0	64.0	77.0	91.7
	Jul.	28	30.0	71.4	90.4	30.5	44.2	52.7
	Every month	48	78.9	114.3	146.2	48.0	64.4	100.8

辺材と心材の含水率を時期別に示しているが、心材より辺材の含水率の方が高くなっているが、その差は針葉樹材の差ほど大きくなく、測定時期による含水率の変動する傾向も明確ではない。

また、Table 5 はⅦ章で用いたナラ材の心材含水率であるが、測定時期による含水率の差もあまりなく、最高、最低の差も小さい。

Table 6 は矢沢⁶⁹⁾による主要広葉樹材の生材含水率を示すものである。辺材と心材の含水率の関係は広葉樹の場合も一般的に辺材の含水率の方が高いのが普通であるが、ヤマナラシ、ウダイカンバなどは心材の含水率が辺材より高いと報告している。

Table 5 Moisture content in NARA green logs (heartwood)

Measuring time	Test logs	M.C. (%)		
		Minimum	Mean	Maximum
Autumn	30	57.8	65.5	78.1
Winter	30	68.0	75.5	80.8

Table 6 Moisture content in green in hardwood⁶⁹⁾

Species	M.C. in green (%)		Species	M.C. in green (%)	
	Sapwood	Heartwood		Sapwood	Heartwood
KURI	102.7	91.3	SHIRAKANBA	95.0	89.7
SEN	101.5	77.1	UDAIKANBA	72.4	92.2
KIHADA	95.1	85.0	KEYAMAHANNOKI	126.9	105.3
MIZUNARA	78.9	71.5	HOONOKI	93.0	52.2
YAMANARASHI	75.4	96.1	BUNA	81.6	80.0

また、蕪木⁷⁰⁾はドロノキの心材含水率は辺材の3倍近い値を示すと報告している。藤田⁷¹⁾が奄美大島産広葉樹の生材含水率について半径方向の分布を調査しているが、タブノキ、オキナワウラジロガシなど数樹種が樹心部から樹皮に向かって曲線状あるいは直線状に含水率が減少していると報告している。

次いで樹種と含水率の関係は、一般に比重の小さい樹種は、細胞の内腔が大きく自由水の含まれる空間が大きく、しかも全乾重量が小さいために生材含水率は高い値を示すことが多い。

キリ（気乾比重0.30）の195%、ドロノキ（0.42）の205%、ジェルトン（0.37）の196%⁷²⁾のように比重の小さい樹種の生材含水率が高くなっている。

このように広葉樹材の生材含水率には、非常に高い含水率を示すもの、あるいは辺材より心材の含水率の方が高い樹種などさまざまである。しかし、ブナ、ミズナラなどのように家具用材などに使用されることの多い主要樹種では、辺材と心材の生材含水率に大きな差がなく、天然乾燥あるいは人工乾燥の場合でも、樹幹内におけるこの程度の含水率の差はあまり大きな問題とはならない。

C. 要 約

立木および伐倒直後の樹幹内含水率分布について、若干の実験結果と既往の研究報告から検討を加えた。

その結果を要約すると次のとおりである。

針葉樹の生材含水率

(1) スギの場合は、心材の含水率は成長期の方が成長休止期よりも高いが、辺材の含水率は逆に成長期の方が低くなる。

(2) スギの場合は、樹高方向の含水率にあまり大きな差がないが、成長期では樹高が高くなるほ

ど含水率が低くなる。

- (3) 一般に針葉樹材の場合は、辺材と心材の含水率が大きく異なり、辺材の含水率は心材の含水率の3～5倍近い値を示す。

針葉樹丸太材の含水率

- (1) スギの場合は、水中貯木をしても辺材の含水率はほとんど変化しない。
(2) ヒノキ、アカマツとも、辺材と心材との含水率には大きな差が認められるが、辺材、心材ともにスギより含水率は低く、心材の含水率は35～40%である。
(3) ベイスギの含水率は、日本のスギより低いが、局部的に高含水率の部分が散在する。
(4) ベイツガの海水貯木材では、辺材と心材の含水率に明確な差が認められるが、陸積材は辺材の含水率が低下して差がすくなくなる。しかし、局部的に高含水率を示す部分が現れる。
(5) 丸太の生材含水率はスギで200%、ヒノキで150%とみてよい。

広葉樹の生材含水率

- (1) 広葉樹の場合は、一部の例外的な樹種を除けば一般に辺材の含水率が心材の含水率より高いが、その差はあまり大きくない。
(2) ブナ・ナラの生材含水率は、80%とみてよい。

IV. 広葉樹材の天然乾燥速度

木材の天然乾燥速度は、季節（気候条件）樹種、板の厚さ、栈積みの方法あるいは場所によって著しく異なる。

また、広葉樹の家具用材などは、人工乾燥の予備操作として天然乾燥を実施する訳であるから、天然乾燥から人工乾燥に移行する時の含水率、いわゆる天然乾燥の仕上げ含水率を如何に設定するかが、乾燥経費や人工乾燥の操作上重要な問題となる。

木材の乾燥速度は、木材表面からの水分蒸発と内部水分の表面への移動などによって決定されるが、それぞれは外周空気条件の温度ならびに湿度によって影響される。

乾燥速度が表面蒸発に支配されるのは、木材表面が濡れている、いわゆる恒率乾燥期間であるが、この時の蒸発速度は関係湿度に逆比例し、風速の影響を若干受けるが、温度の影響はほとんどないといわれている。

しかし、一般に乾燥で対象とする板材などにおいて、この恒率乾燥の期間はごく短時間であり、木材の乾燥時間にしめる比率は、内部水分の表面への移動速度に支配される減率乾燥期間がほとんどである。

この内部水分の移動性を示す値として一般に拡散係数が考えられている。拡散係数を求める方法には、透過法および乾燥経過から算出する方法の2通りがある。透過法には鈴木ら⁷³⁾、小倉ら⁷⁴⁾あるいは福山ら⁷⁵⁾の研究があり、また、乾燥経過から拡散係数を求めたものには、満久^{76,77)}、小倉⁷⁸⁾の研究がある。

いずれの方法で拡散係数を求めたにしても蒸気圧傾斜で表示しない限り、拡散係数は乾燥温度の上昇とともに増大するといわれている。

また、板材の乾燥時間におよぼす温度の影響について、寺沢ら⁴⁷⁾はラワン材を用いて実験し、乾球温度 θ と乾燥時間 t との間に直線関係があるとして、

$$\log t = 3.52 - 0.017 \theta$$

の実験式を示している。

しかし、これらの研究は全て一定の温度・湿度条件下での実験結果であり、天然乾燥のように常時変化する温湿度条件下での乾燥速度を求めた研究は殆ど見当たらない。また、天然乾燥の仕上げ含水率についても一定期間天然乾燥を実施した場合の到達含水率について2～3の実験結果が報告されて

いるが、人工乾燥を前提とした天然乾燥の仕上げ含水率について系統的に論じた研究報告はない。

そのため、この章では、広葉樹板材の天然乾燥における季節別、実施場所別の乾燥速度を検討するとともに、棧積み方法による乾燥むらに乾燥時間におよぼす影響および乾燥速度からみた天然乾燥の仕上げ含水率と天然乾燥の所要時間について述べる。

A. 一枚板の天然乾燥速度

天然乾燥における乾燥速度は気象条件に支配されるため、人為的にこうした条件を設定して乾燥速度を求めることは不可能であり、例えば実験室的な測定により乾燥速度を求めても、その結果を実際に応用することができないため無意味である。

それぞれ、季節によって気象条件が異なる訳であるから、当然乾燥速度も異なり、一箇所である時期の乾燥速度を求めても再現性はなく、この結果から天然乾燥速度を論ずることはできない。

しかし、一年間を通じて一定の場所でそれぞれの季節別の乾燥速度を求めれば、気候条件の年間の周期性から、その場所における年間の大まかな乾燥速度を推定することは可能である。

また、乾燥の場所が異なれば同様に乾燥速度も異なる訳であるが、気候条件を大まかに分類した気候区の中では大差のない乾燥速度を示すものと考えられる。

このような考え方から、山国気候区に属する岐阜県高山市と、内陸的気候区に属する岐阜県美濃市において、家具用材として最も一般的に用いられるブナ材により、一年間の乾燥速度を測定した。

a. 実験方法

1) 実験場所及び実験期間

山国気候区としての実験場所は、高山市山田町石ヶ谷の旧岐阜県林業試験場（現岐阜県寒冷地林業試験場）場内の土場（海拔高620m）で、内陸的気候区の実験場所は岐阜県美濃市曾代の岐阜県林業センター場内の土場（海拔高120m）である。また、実験の実施期間は、高山市の場合が1965年3月から1966年5月であり、美濃市の場合は1971年5月から1972年6月である。

2) 供試材

供試材は岐阜県飛騨地方産のブナ材（*Fagus crenata* Blume:全乾比重、心材 0.61、辺材 0.55）であり、試験材の形状は、長さ600mm、幅100mm、厚さ20mm及び40mmの2通りに鉋削仕上げを行った。高山市で実施した場合は、毎月実験開始時に原木より採材して試験材としたが、美濃市で実施した場合は、同一原木より採材した材料を粗木取りのまま水槽内に貯蔵し、実験開始時にプレーナにより仕上げた。なお、両木口は銀ニス（アルミニウム粉末、シンナおよび速乾ニスを約2:2:10の重量比で混合したもの）によりエンドコーティングをした。

3) 実験方法および実験回数

試験材は、比較的風通しの良い場所を選んでFig. 7に示すような棚を設置し、板の間隔を10cm以上あけて並べた。

一回の実験には、厚さ40mmおよび20mmの板とも心材2枚、辺材2枚の計8枚の試験材を用い、原則として毎月始めに乾燥を開始し、週一回重量を測定するとともに、隔週毎に試験材中央部の寸法を測定した。

実験は、試験材の重量が平衡状態に達するまで継続し、その後試験材中央部より幅約2cmの試験片を採取し、絶乾法により含水率を求めそれより各測定時の含水率を算出した。

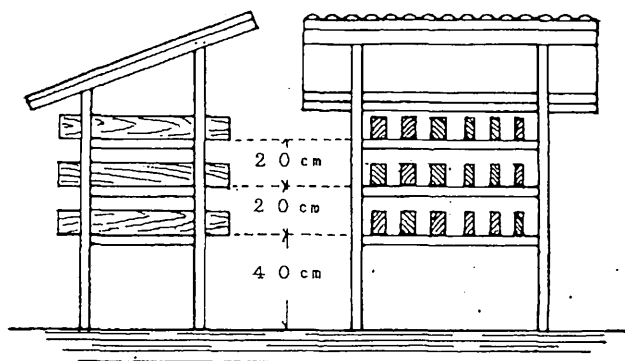


Fig. 7 Layout of test boards

b. 実験場所の気候条件

高山市および美濃市における実験期間中の気象と、気象条件によって最も乾燥経過の異なる40mm板心材の含水率減少経過をFig. 8～9に示す。

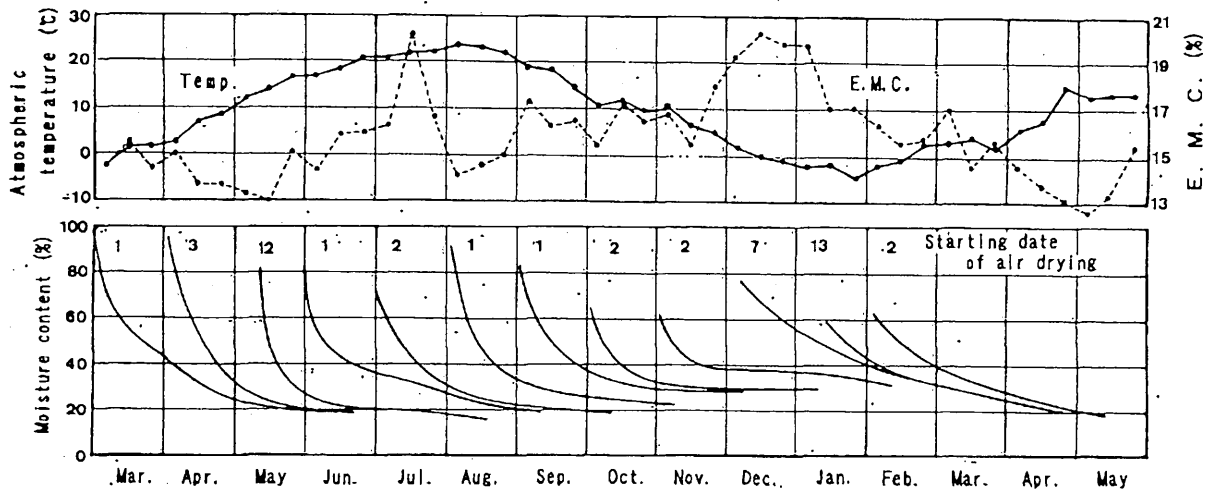


Fig. 8 Climate of Takayama and behavior of moisture content in heartwood 40 mm thick

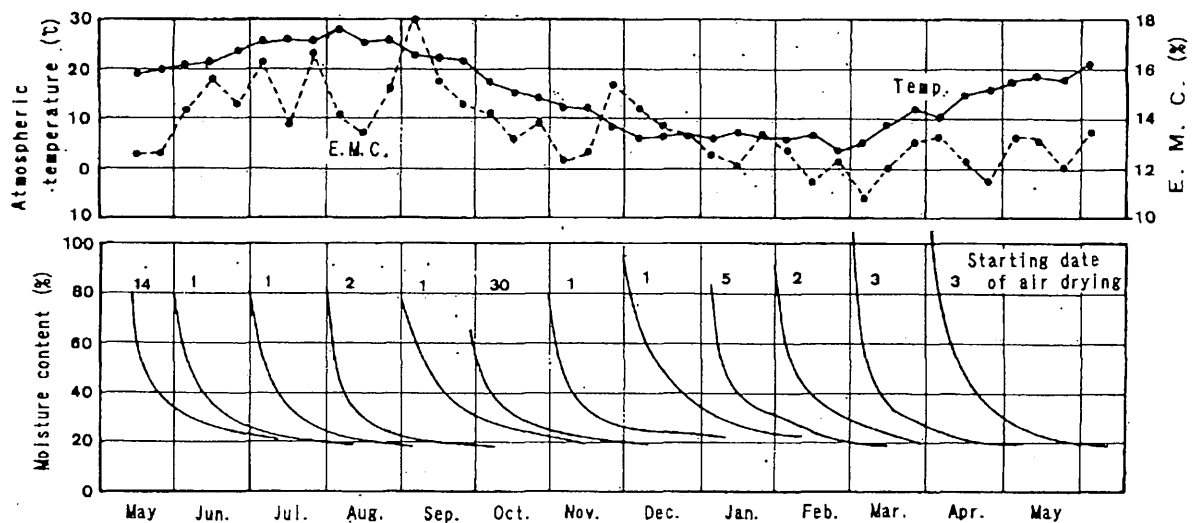


Fig. 9 Climate of Mino and behavior of moisture content in heartwood 40 mm thick

気候条件としては、乾燥速度に最も影響の大きい気温と、気温および関係湿度より求めた平衡含水率（気候値平衡含水率）を図に示しているが、これは高山測候所および岐阜気象台の測定値である。

高山測候所は実験場所との距離も近く同じ高山市内にあり、岐阜気象台は実験地の美濃市と若干離れた位置にあるが、平地のため気象条件に大きな差がなく、この測定値により天然乾燥経過を種々検討しても大きな問題はないものと考えられる。

なお、平衡含水率はKollmann⁷⁰⁾の関係湿度・温度—木材の平衡含水率図を用いて求めたが、この図は0～130℃についてのものであるため、高山市における気温0℃以下の平衡含水率は求められな

い。

Nikitin⁸⁰⁾は0℃において、関係湿度・温度と木材の平衡含水率曲線に特異な変化はないとして、-20℃までの曲線を与えている。また、Darlingら⁸¹⁾は、木材の吸脱湿性に類似する cotton, viscose rayon, cellulose acetate などのセルロース物質の低温における含水率の研究を行っているが、これによれば関係湿度50~80%の場合、温度0~20℃の領域においてこれらの平衡含水率は温度に関係なくほぼ一定であるとしている。

これらのことから、0℃以下の平衡含水率は、NikitinおよびDarlingの研究を参考にしてKollmannの平衡含水率図をFig. 10のように延長して求めた。

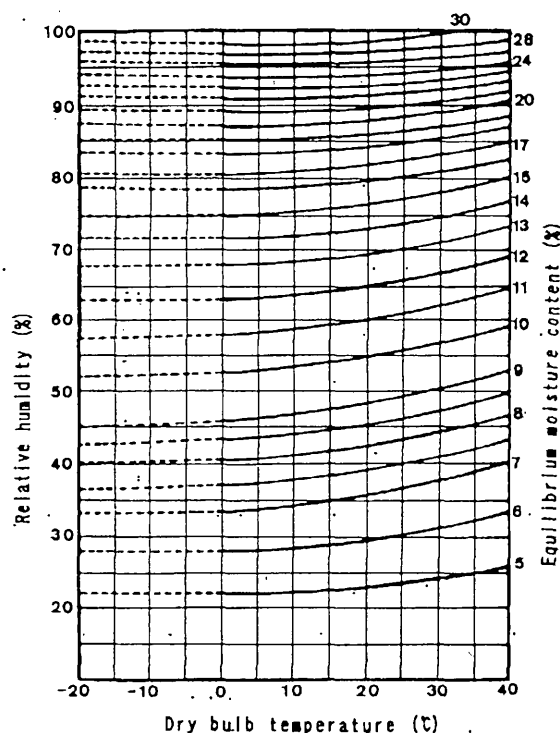


Fig. 10 Equilibrium moisture content of wood

Table 7~8に高山市および美濃市の実験期間中の月別気候条件と、平年の気候条件を示すが、あまり大きな差はなく、天然乾燥速度を求めた期間が、その場所におけるごく標準的な気候を示す年度であったことを示している。

高山市における気候の特徴として、12月下旬から2月中旬までの旬平均気温が0℃以下を示し、6月下旬から8月下旬までの旬平均気温が20℃以上を示し、年平均気温は9.4℃となっている。また、気候値平衡含水率は4月中旬から5月中旬が低く、12月上旬から1月上旬が高い値を示し、年平均の気候値平衡含水率は15.5%となっている。

これに対して美濃市の気候は、旬平均の最低気温が4℃程度であり、最高気温も28℃示し比較的変動が少なく、年平均気温は15.9℃となっている。気候値平衡含水率も3月上旬の10.8%から9月上旬の18%と変動は大きいが年平均の気候値平衡含水率は13.6%と高山市より低くなっている。

c. 実験結果と考察

1) 40mm板心材の乾燥経過

Fig. 8の高山市における40mm板心材の乾燥経過をみると、気温の高くなる5月から9月にかけては乾燥は速く、含水率が低下してほとんど乾燥しなくなる時(平衡状態になる)含水率も低い値を示している。

ただ、梅雨時である7月中旬は気温が高くて湿度も高いため、6月に乾燥を開始した材の含水率40%以下の乾燥は遅くなっているとともに、7月に乾燥を開始したときは全体に乾燥が遅くなっている。

9月から11月にかけて高含水率域の乾燥は比較的速いが、含水率40%以下になる時の気温が低くなるため、それ以下の乾燥は極端に遅くなる。

12月から2月にかけては、旬平均気温が0℃以下になるため高含水率域の乾燥は遅いが、含水率40%以下になる時期が気温の上昇および湿度の低下する時期となるため、低含水率域の乾燥速度もあまり低下せず全体にほぼ直線的に含水率が低下している。

Table 7 Monthly mean temp. and relative moisture content in test period and normal value (Takayama)

Year	Month	Monthly mean temp.		Monthly mean humidity	
		In test period $T_1(^{\circ}\text{C})$	Normal value $T_2(^{\circ}\text{C})$	In test period $H_1(\%)$	Normal value $H_2(\%)$
1965	3	0.1	1.7	74	76
	4	5.8	8.2	72	72
	5	14.3	13.9	72	73
	6	18.7	18.5	77	78
	7	21.6	22.5	84	81
	8	22.8	23.2	76	81
	9	17.2	18.7	82	83
	10	10.4	12.1	79	80
	11	7.1	6.1	80	82
	12	0.7	0.7	87	84
1966	1	-2.9	-2.7	83	83
	2	-0.4	-2.3	78	80
	3	2.8	1.7	78	76
	4	9.5	8.2	71	72
	5	13.3	13.9	61	73
Average		9.4	9.6	77	78

Table 8 Monthly mean temp. in test period and normal value (Mino)

Year	Month	Monthly mean temp.	
		In test period $T_1(^{\circ}\text{C})$	Normal value $T_2(^{\circ}\text{C})$
1971	5	18.1	17.9
	6	21.8	21.7
	7	25.9	25.8
	8	26.7	27.0
	9	22.2	22.9
	10	15.7	16.8
	11	11.1	11.3
	12	6.4	6.0
1972	1	6.5	3.3
	2	5.7	4.0
	3	8.6	7.3
	4	13.8	13.0
	5	17.7	17.9
	6	21.7	21.7
Average		15.9	15.5

また、Fig. 9 に示す美濃市における40mm板心材の乾燥経過をみると、年間を通じて高山市より速く乾燥している。ことに冬季間における乾燥速度の差が大きく、11月から2月にかけての高含水率域の乾燥の速さは、高山市の夏季の乾燥の速さとはほとんど差が認められない程である。

乾燥速度が低下して平衡状態になる含水率をみると、冬季でも夏季より若干高くなっている程度であり、年間を通じて含水率25%程度まで順調に乾燥している。これは、美濃市の冬季間の気温が比較的高く、湿度も夏季より低くなっているためである。

なお、高山市は盆地のために風が少なく、年平均風速が1.3m/secであるのに対して、美濃市の年平均風速は2.1m/secと大きくなっている。ことに美濃市の場合は冬季間の季節風が強いため気温、湿度とともに、乾燥速度および乾燥速度が低下して平衡状態になるときの含水率におよぼす影響が大きくなっているものと考えられる。

2) 辺、心材および板厚別の乾燥速度

Fig. 11 に高山市における40mm板辺材の乾燥経過を示す。Fig. 8 の40mm板心材の乾燥経過と比較すると、辺材の初期含水率は心材より高い値を示しているが、高含水率時の辺材は心材より非常に速く乾燥し、乾燥速度が低下して平衡状態になる含水率も辺材の方が心材より若干低くなっている。

また、板厚と乾燥速度の関係を見るため、Fig. 12 に高山市における20mm板心材の乾燥経過を示す。Fig. 8 の40mm板心材と比較すると、やはり高含水率時は板厚の小さい20mm板心材の方が速く乾燥している。

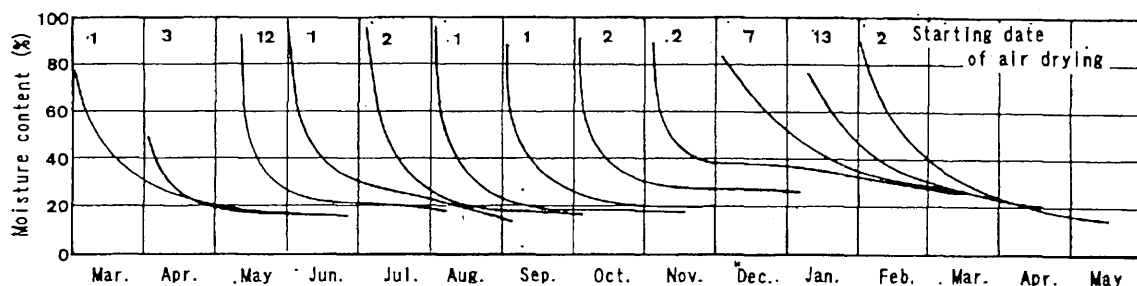


Fig. 11 Behavior of moisture content in sapwood 40 mm thick (Takayama)

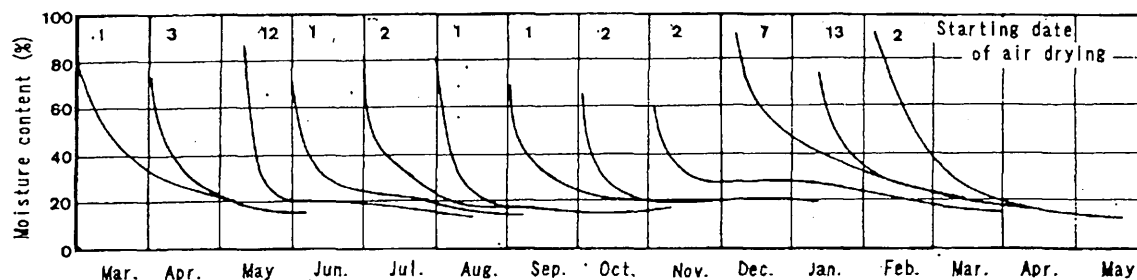


Fig. 12 Behavior of moisture content in heartwood 20 mm thick (Takayama)

40mm板辺材と20mm板心材の乾燥の速さは、40mm板辺材の方が若干速くなるが、乾燥速度が低下して平衡状態になるときの含水率は20mm板の心材の方が40mm板辺材より低くなっており、同じ気象条件であっても板の厚さが小さい程低含水率で平衡状態になることを示している。

このように、板の厚さおよび辺材、心材などの木取り方法によって含水率の減少経過は異なっており、高山市、美濃市とも40mm心材の乾燥が遅く、40mm板辺材、20mm板心材および20mm辺材の順に乾燥が速くなっている。

寺沢ら⁷⁾によれば、辺材の乾燥速度は人工乾燥による減率乾燥期間において、心材の約2倍としているが、天然乾燥の場合はそれ程の差は認められない。しかし、冬季間のように乾燥条件の悪いときより、夏季における乾燥条件の良い時の方が、辺材と心材の乾燥速度の差は大きくなる。

現場における木材乾燥の実態をみれば、樹種、板の厚さによって乾燥工程を分けているが、辺材、心材などの木取り方法によって乾燥方法を区分けすることなく、同一樹種、同一厚さであれば同じ操作によって乾燥するのが普通である。

木材の乾燥速度あるいは損傷の発生などからみて、樹種、板厚は当然のことながら、可能であれば辺材、心材、初期含水率または板目、柾目など、なるべく同一条件の材を揃えて乾燥することが理想であるが、木材工業界の現状からみてこれは不可能であるし、また将来的にみてもこうした乾燥方法を普及することも困難であろう。

このように、辺材および心材を同一方法で乾燥するとすれば、天然乾燥における乾燥方法も人工乾燥における乾燥操作（乾燥スケジュールの与え方）も、乾燥速度が小さく、しかも損傷の発生しやすい心材を基準に考えることが必要であり、辺材の乾燥経過は考えなくても良いことになる。

こうした考え方から、ここでは心材の乾燥速度についてのみ検討することとする。Fig. 13、Fig. 14に高山市および美濃市における40mm板および20mm板心材の乾燥速度を時期別に示す。

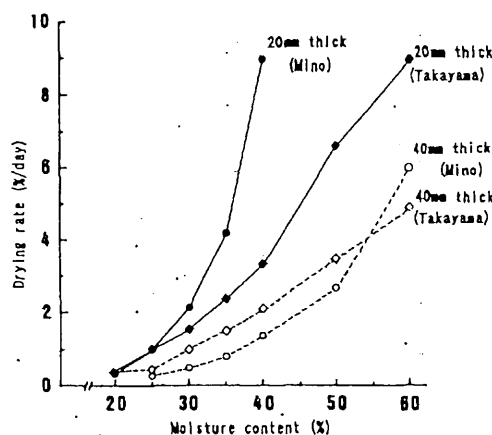


Fig. 13 Drying rate of heartwood dried from May

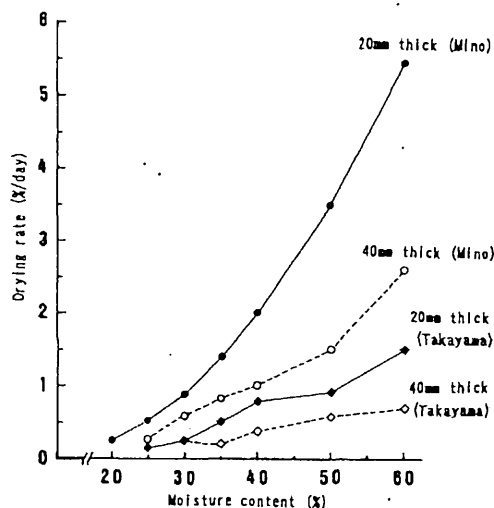


Fig. 14 Drying rate of heartwood dried from Dec.

それぞれの乾燥経過曲線（全て2枚の試験材の平均値）から同一含水率のときの乾燥速度を求めたものであるが、代表的な例として5月および12月に乾燥を開始したときの乾燥速度を示した。

5月に乾燥を開始した場合は、高山市および美濃市とも一年間の中でも乾燥速度が大きい例であるが、20mm板、40mm板とも、高含水率時の乾燥速度は非常に大きくなっている。

板の厚さと乾燥速度の関係をみると、美濃市の場合にその差が大きく、40mm板に対して20mm板の乾燥速度は3～5倍、平均して4倍程度となっている。高山市の場合は、美濃市より板の厚さによる乾燥速度の差が小さく、1.5～2倍程度となっている。

12月に乾燥を開始したときの乾燥速度をみると、板の厚さと乾燥速度の差は5月より小さく、高山市、美濃市とも約2倍程度となっている。

寺沢ら⁷⁾によれば、板の厚さと乾燥時間の関係が次式で表されるとしている。

$$t_2/t_1 = (d_2/d_1)^n$$

t_1 = 厚さ d_1 の板の乾燥時間

t_2 = 厚さ d_2 の板の乾燥時間

この指数 n の値は1～2の範囲内と考えられ、恒率乾燥期間は $n=1$ であり、減率乾燥期間では乾燥する含水率範囲が低いほど、 n の値が2に近づくとしている。

天然乾燥の場合は、恒率乾燥期間はごく短い期間であるにしても、木材表面の含水率が繊維飽和点からその時の外周空気条件における平衡含水率に近づくまでの減率乾燥第一段がほとんどであり、 n の値は人工乾燥のそれより小さくなるものと思われる。

Fig. 15～17に、高山市、美濃市の40mm板、20mm板心材の年間の乾燥速度を示すが、これらの結果からみて天然乾燥における指数 n の値は1.5程度とみるのが妥当であると思われる。

3) 乾燥速度におよぼす気象条件の影響

木材の乾燥速度は、前述のとおり温度、湿度、風速によって変化する。同一の関係湿度条件であっても温度が高くなれば、蒸気圧差および乾湿球温度差が大きくなり乾燥速度は増加する。

家具材などに用いられる一般的な板材の減率乾燥期間においても、温度が高くなるほど拡散抵抗が小さくなるため乾燥速度は大きくなる。また、関係湿度と乾燥速度の関係は、含水率が高い繊維飽和点以上の乾燥過程において、乾湿球温度差に比例して乾燥速度が大きくなるが、繊維飽和点以下の乾燥過程ではその影響が小さくなると言われている⁸²⁾。

乾燥速度におよぼす風速の影響は、高含水率材の乾燥過程あるいは低温度での乾燥ほど大きく、また、風速が大きいほど乾燥速度が大きくなる^{76, 83)}。

このように、温度が高く、湿度が低く、しかも風速が大きい程乾燥速度は大きくなる訳であるが、天然乾燥の場合はこうした乾燥条件が常に変化しているため、これらの因子が複雑にからみ合ってくる。

そのため、前出の乾燥経過曲線と気象条件の図から、ブナ40mm板心材の各乾燥過程における含水率別の乾燥速度と、その時点における気温、湿度（平衡含水率）および風速を求めてその関係を検討してみた。

しかし、美濃市における乾燥速度と気象条件の関係は、湿度（平衡含水率）、風速とも明確な関係を認めることができず、なかでも気温と乾燥速度とは全くその因果関係を認めることはできなかった。

高山市における乾燥速度と平衡含水率の関係は、Fig. 18に示すように各含水率とも平衡含水率が低くなるほど乾燥速度が大きくなり、片対数方眼紙において直線関係を認めることができ、含水率の低下にしたがってその直線が平行に下に移動している。

美濃市の場合、気温の年間の変化幅が高山市より小さいこととともに、気温の高い時期に湿度（平衡含水率）が高く、気温の低い時期には湿度（平衡含水率）も低い

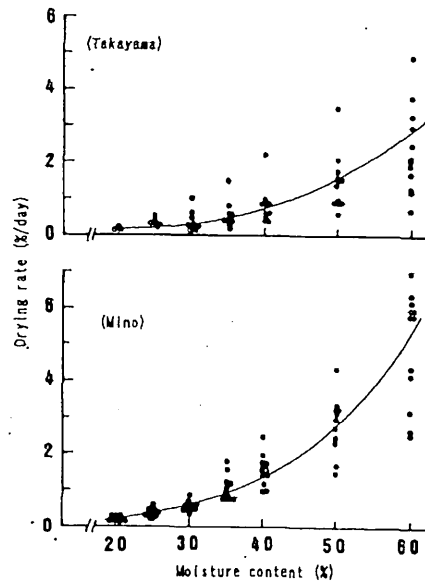


Fig. 15 Drying rate of heartwood 40 mm thick

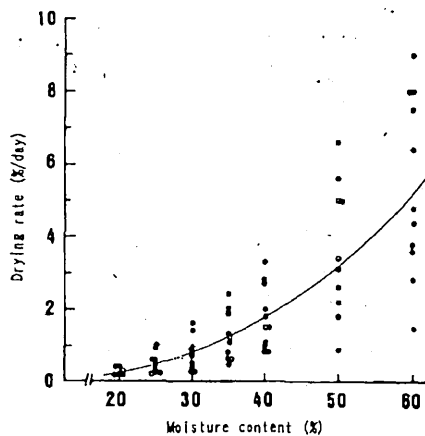


Fig. 16 Drying rate of heartwood 20 mm thick (Takayama)

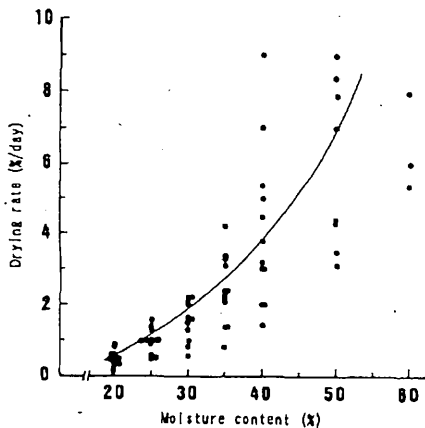


Fig. 17 Drying rate of heartwood 20 mm thick (Mino)

ため、温度と湿度の効果が相殺されるのに対して、高山市の場合は気温の高い時期は湿度が低く、気温の低い時期には湿度が高くなる。そのため、高山市における乾燥速度は平衡含水率との相関が非常に高くなるものと考えられる。

B. 棧積みによる乾燥むらの発生

一枚板の状態では天然乾燥を実施したときの乾燥速度は、前述のとおり板の厚さ、辺材、心材、初期含水率あるいは気象条件によって大きく変化する。

しかし、天然乾燥を実施する場合、ほとんどがある大きさの棧積み状態で乾燥するのが普通であり、当然のことながら一枚板の乾燥とは条件が異なることになる。

一枚板の場合には気象条件（気温、関係湿度および風速）が乾燥速度を決定するが、棧積みされた場合は板の間を風が通過する訳であり、上下の板間隔、言い換えれば棧木の厚さにより通過する風の強さが変化することになるし、風上側の板と風下側の板とに接する空気条件も変化する。

棧積みされた板の間を空気が通過していく場合には、木材からの水分蒸発により通過空気の温度が降下し関係湿度が上昇するため、風上側の乾燥速度は大きく風下側の乾燥速度は小さくなる。

このために風上側と風下側とに乾燥むらが発生するが、この乾燥むらの大きさは棧積み内で消費される蒸発潜熱に支配されることになる。

したがって、被乾燥材の含水率、棧木の厚さ、棧積みの幅、あるいは風速等の諸因子によって乾燥むらの大きさは変化することになる。被乾燥材の含水率からみて、乾燥むらの最も発生しやすいのは乾燥初期の恒率乾燥期間中であるが、小倉⁸⁴⁾は、この恒率乾燥における乾燥むらの発生源である温度降下について計算式を求めており、寺沢⁸⁵⁾は I F 型木材乾燥室における全乾燥期間の乾燥むらについて、風速および風向の切り替え等との関係を検討している。

しかし、天然乾燥の場合は人工乾燥に比較して板の間を通過する風速（材間風速）も小さく、しかも一定ではない。また、温度も低く常時変化するため、乾燥むらの発生も人工乾燥とは当然異なることになる。

そのため、ここでは天然乾燥における棧積み方法と乾燥むらの発生および棧積み材の乾燥速度について検討することとした。

a. 実験方法

1) 供試材

供試材には岐阜県飛騨地方産のブナ材を用い、試験材の形状は長さ210 cm、幅12 cm、厚さ23 mmで鋸断仕上げのままである。

2) 棧積み方法

棧積み場所は旧岐阜県林業試験場の土場であり、通風の良い高台を選んだ。

棧積みの大きさは Fig. 1.9 に示すように、幅180 cm、長さ210 cm、高さ180 cmとし、棧木の厚さは25 mm、棧木間隔は50 cmとし、その場所の主風と直角になるように棧積みをおこなった。

この場合、板の横方向の間隔と乾燥むらの大きさとの関係を検討するため、板と板の横方向の間隔を2通りとし、棧積み下部90 cmを板間隔3 cm、棧積み上部90 cmを板間隔6 cmとした。

含水率を測定する試験材は辺材を用い、長さ50 cmの試験材を3 cm間隔部には14枚、6 cm間隔部には10枚、それぞれ棧積み中段の中央部を横断して配置した。試験材の両木口は銀ニスによりエンドコーティングし、木口からの乾燥を防止した。

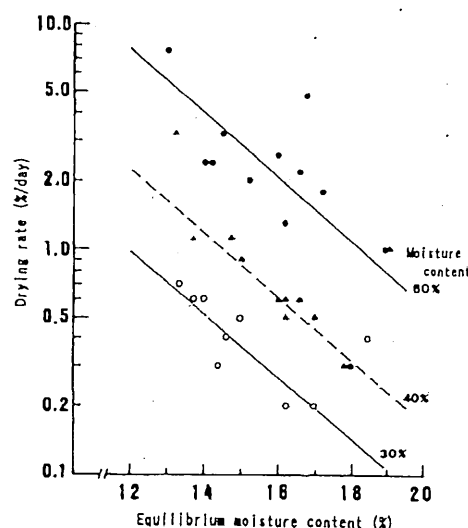


Fig. 18 Drying rate and E.M.C. of heartwood 40 mm thick (Takayama)

乾燥経過をみる含水率は、乾燥初期には隔日に、中期以降は4～5日ごとに試験材の重量を測定し、試験終了後に全乾法により各測定時の含水率を算出した。なお、試験の開始は7月31日であり、8月31日まで測定をおこなった。

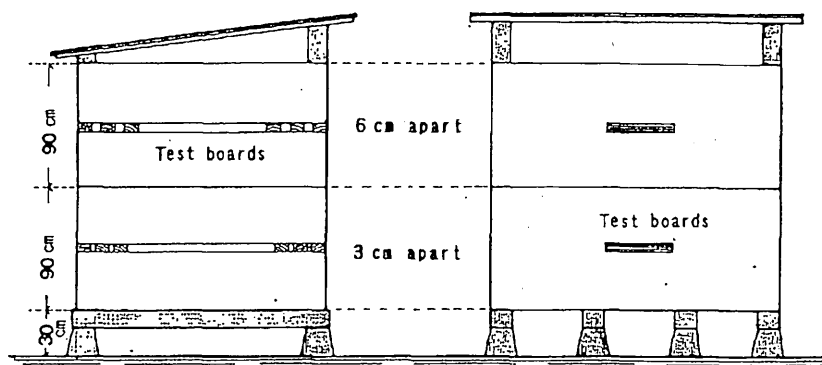


Fig. 19 Setting way of piling

b. 実験結果と考察

1) 板の横間隔と乾燥むら

試験期間中の気象条件として高山測候所の測定値をFig. 20に示すが、日平均気温は20～25℃であり大きな変動はなく安定している。また、平均気温、湿度から求めた気候値平衡含水率はおおむね15～18%で推移しているが、試験開始後5日および8日目に降雨があり、その日の平衡含水率は22、25%と高い値を示している。

風速は場所による差が大きく、測候所の測定値は目安でしかないが、試験期間中の平均は130cm/sec程度であり、乾燥初期に小さく、後期に大きくなっている。

栈積み内の含水率減少経過をFig. 21に示す。初期含水率のむらは大きいですが、乾燥が進むにつれて風上側の含水率が速く減少し風下側になる程含水率の減少が遅くなり、栈積み位置により乾燥むらが発生する経過をよく示している。

板の横方向の間隔と乾燥むらの関係をみると、3 cm間隔の場合は6 cm間隔に比較して中央部の遅れが非常に大きくなる。

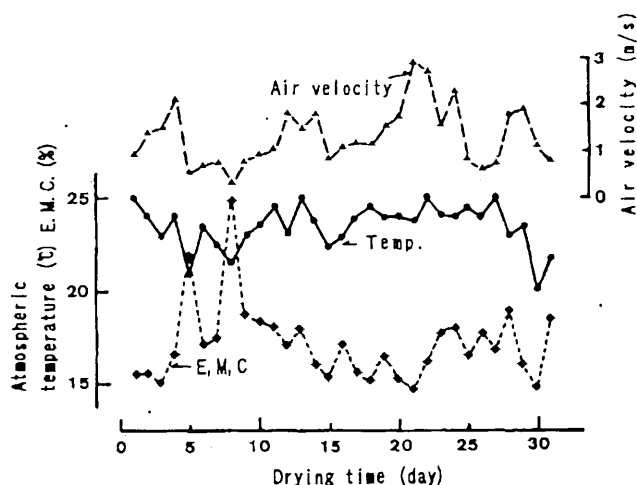


Fig. 20 Climate condition in test period

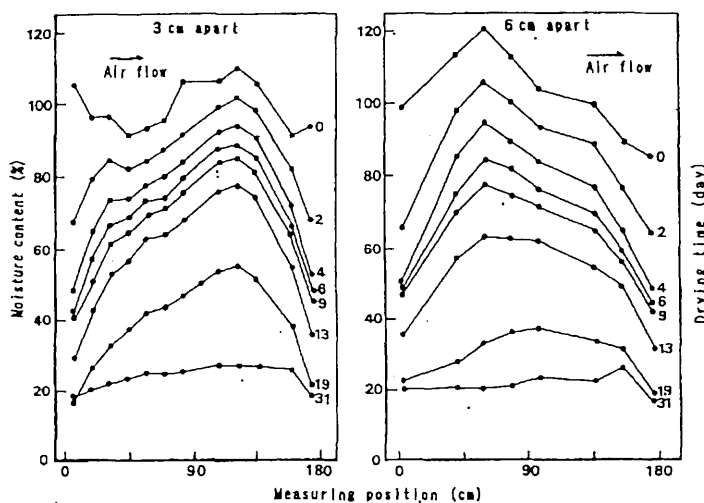


Fig. 21 Behavior of moisture content in pile

人工乾燥のように人為的に一方向から送風する場合は、乾燥中期以降の乾燥遅れが風下側になる程直線的に大きくなるが⁸⁵⁾、天然乾燥の場合は風向が常に一定でないため、主風下側の栈積み側面の乾燥速度は主風上側の栈積み側面の乾燥速度とほとんど変わらず、乾燥が遅れる位置は栈積み中央部付近となる。

Fig. 2 2 は、各測定時における最高含水率と最低含水率との差を乾燥むらの大きさとして、その経過を示したものである。

板間隔 3 cm のときは初期含水率のばらつきが比較的少ないにもかかわらず、乾燥開始と同時に乾燥むらが大きくなり、13日目には最大の50%を示し、その後は直線的に減少している。

また、板間隔 6 cm のときは初期含水率のばらつきが大きい、乾燥むらは4日目に最大となり、それ以降は直線的に減少している。

このように、栈積みにおける板と板との間隔が狭いほど乾燥むらは大きくなり、しかも乾燥末期まで大きなむらを示している。

また、Fig. 2 3 は、板間隔 3 cm と 6 cm のときの各試験材の平均含水率減少経過を示す。

乾燥むらの大きい 3 cm 間隔の平均含水率減少経過が、乾燥むらの小さい 6 cm 間隔よりおそくなり、平均含水率が 30% になるまでの乾燥日数は、6 cm 間隔のときが 20 日であるのに対して、3 cm 間隔では 28 日となり、1.4 倍ほど乾燥時間が長くなる。

寺沢ら⁸⁵⁾は、恒率乾燥期間において、栈積みの風上側と風下側との距離と蒸発速度との関係が、両対数方眼紙の上ではほぼ直線であり、風下側になる程蒸発速度が低下すると報告している。

この実験のように同じ栈積み幅でも板の横間隔が異なることは、同じ栈積み幅の中に占める板の量が異なることであり、板間隔が大きいと言うことは栈積み幅が狭いことと同様である。

栈積み幅が狭ければ、材間を通過する空気の水分蒸発による温度降下が少なくなり、風上側と風下側の乾燥速度の差も少なくなるため、当然のことながら板の横間隔が広いほど乾燥むらが小さくなる。また、板と板との横方向の間隔が広いと、その間隙で空気の乱流が起こり、板の側面も空気がよく通過することになり、空気の熱量がより有効に利用されることが考えられる。

しかし、板間隔を大きくすれば栈積みの収容量が少なくなり、現在のように天然乾燥の栈積みをそのまま人工乾燥室に移行する場合には種々問題がある。

乾燥むらが発生して若干天然乾燥時間が長くなっても、人工乾燥室の収容量を多くして人工乾燥の効率を向上させるために、現在では栈積みの板間隔をほとんど開けないのが普通である。

そのため、最も乾燥の遅れた板の含水率が乾燥の速い板の含水率に達するまでの待ち時間、即ち乾燥むらを解消するための時間が必要となり、栈積みしたときの乾燥時間は一枚板の乾燥時間より長くなる。

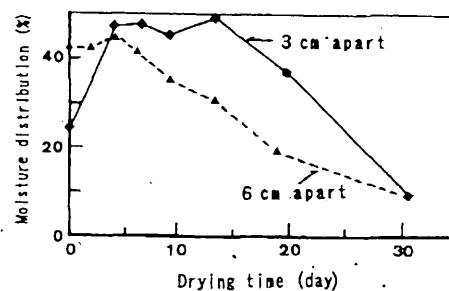


Fig. 22 Moisture distribution of piles of BUNA sapwood 23 mm thick

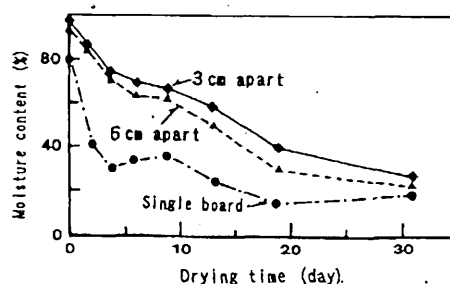


Fig. 23 Behavior of moisture content of piles of BUNA sapwood 23 mm thick

2) 被乾燥材の材種と乾燥むら

天然乾燥において発生する乾燥むらは、前述のように材間を通過する風に起因する問題として、栈

積み幅や板の横方向の間隔によってその大きさが異なるが、この他にも被乾燥材の初期含水率や板厚、板幅、辺材、心材などの材種によっても発生する乾燥むらの大きさが違ってくる。

乾燥初期の恒率乾燥期間あるいは減率乾燥の初期には乾燥速度が大きいので、当然のことながら積み幅内で消費される蒸発潜熱が大きくなる。そのため高含水率材ほど初期の乾燥むらは大きくなる。

乾燥速度の大きい薄板や辺材は、乾燥速度の小さい厚板あるいは心材より乾燥初期の乾燥むらが大きくなると考えられるため、前項で述べた積み方法による乾燥むらの実験に用いた試験材には辺材のみを用いている。

しかし、辺材と心材で発生する乾燥むらの差については従来ほとんど報告されたことがないため、ここで少し検討することとする。

Fig. 2 4 はブナ材の36mm板を2月に天然乾燥を開始したときの平均含水率減少経過を示したものである。

積み方法の手法は前述の実験とほとんど同様であり、設置した試験材は辺材と心材とを別々に積み置きを横断して配置し、含水率減少経過を測定したものである。平均含水率の減少速度は当然辺材の方が大きく、仕上がり含水率も辺材の方が低い値を示している。

Fig. 2 5 は、このときの乾燥むらの大きさを示したものである。初期含水率のむらは辺材の方が大きい、その後の乾燥むらも辺材の方が大きい値で推移している。しかし、平均含水率40%付近で逆転し、その後は心材の乾燥むらの方が大きくなっている。

Fig. 2 6 は、ブナ材の30mm板を5月に天然乾燥を開始したときの平均含水率減少経過であり、Fig. 2 7 はそのときの辺材と心材の乾燥むらを示したものである。36mm板に比較して板厚も薄く、乾燥条件も良い時期であるため、乾燥速度は大きく、乾燥むらも速く減少している。

しかし、平均含水率50%程度までは辺材の乾燥むらの方が大きく、その後は心材の乾燥むらが大きくなっている。

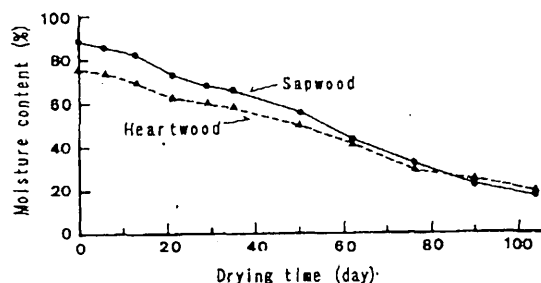


Fig. 24 Behavior of moisture content in BUNA 36 mm thick from 2 Feb.

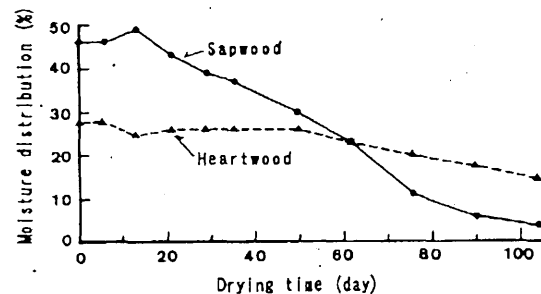


Fig. 25 Moisture distribution in BUNA 36 mm thick from 2 Feb.

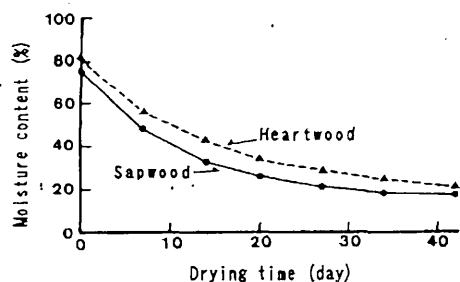


Fig. 26 Behavior of moisture content in BUNA 30 mm thick from 11 May

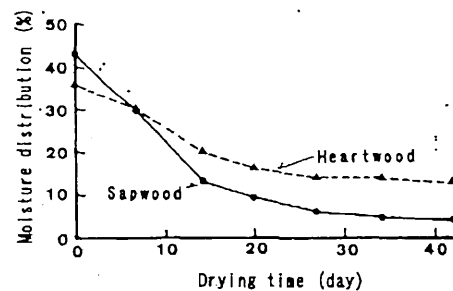


Fig. 27 Moisture distribution in BUNA 30 mm thick from 11 May

これは、乾燥速度の大きい辺材の場合、高含水率時には栈積みの風上側と風下側の空気条件の差によって、乾燥速度に大きな差がつき乾燥むらが大きくなるが、風上側の含水率が低くなると、風上側で消費される蒸発潜熱が小さくなり、風下側の乾燥速度が大きくなるため、比較的早い時期に風上側と風下側との乾燥むらが小さくなる。

これに対して、乾燥速度の小さい心材の場合は、風上側と風下側の空気条件の変化が辺材より小さく、しかも遅くなるため、風上側と風下側の乾燥速度の差が遅くまでそのまま継続し、乾燥むらの解消も辺材より遅れるものと考えられる。

このように、栈積み材の乾燥むらの大きさは、乾燥初期の高含水率時には辺材の乾燥むらに、乾燥中期以降の低含水率時には心材の乾燥むらに支配されることになる。

C. 天然乾燥による仕上げ含水率と乾燥時間

木材乾燥の目的は、その製品が使用される条件下で、含水率があまり変化せず、収縮、膨張による寸法変化が最小になるように、あらかじめ木材の含水率を、使用する場所の平衡含水率まで低下させておくことである。

そのため、人工乾燥のような乾燥の仕上げ工程における含水率の目標は、製品の種類、いかえれば使用する場所によって自ずから決定され、冷、暖房の実施される室内で使用する家具は8%程度、住宅に使用される内装材であれば8~12%程度というように、人工乾燥の仕上げ含水率は目標がはっきりしている⁷⁾。

しかし、天然乾燥の場合はどこまでも人工乾燥に先立つ予備乾燥であり、初期含水率の低下による乾燥経費の節減と、含水率の均一化が目的である。

天然乾燥であっても、長期間実施すれば最終的には15~16%程度まで乾燥することは可能であるが、昔から「一寸一年」といわれているように、板厚20mm前後の普通の広葉樹材でも半年~一年といった長い期間が必要であり、その間の資本の固定は企業にとって大きな損失となる。

天然乾燥の速度は、前述のように地域、季節、樹種、材種などによって大きく変化するが、含水率40%程度まではおおむね良好に乾燥する。その後、徐々に乾燥速度は低下し、ついには平衡状態に近くなり、ほとんど含水率が低下しなくなる。この平衡状態に近くなる含水率は、乾燥する地域や、その時の気象条件によって著しく異なり、40%から25%程度の範囲となる。

天然乾燥が人工乾燥の予備乾燥であり、天然乾燥によってある含水率まで乾燥してから人工乾燥に移行する訳であれば、この移行する時の含水率、即ち天然乾燥の仕上げ含水率は、乾燥経費から見て非常に重要な意味を持つことになる。

理論的には天然乾燥および人工乾燥に要する乾燥経費から、含水率1%を乾燥するに要する乾燥費を算出し、その損益分岐点を求めれば良いことになる。

しかし、天然乾燥に要する乾燥経費は、乾燥材の利息と維持管理費のみであるのに対して、人工乾燥の乾燥経費には、燃料費、光熱水費、設備償却費および人件費などがあるため、天然乾燥と人工乾燥の経費の差が大きすぎ、実用的な意味での損益分岐点を求めることは不可能である。

そのため、ここでは乾燥速度が低下して平衡状態に近づくときの含水率を、その板厚あるいは乾燥時期の仕上げ含水率とし、それにより一枚板の天然乾燥時間を求めるとともに、栈積みしたときの乾燥むらを考慮した天然乾燥時間を推定することとした。

a. 一枚板の仕上げ含水率

高山市および美濃市において実施したブナ40mm板と20mm板の心材の乾燥経過 (Fig. 8、Fig. 9) より、乾燥速度が低下してほとんど平衡状態になったときの含水率を天然乾燥終了時の含水率、即ち仕上がり含水率として検討することとする。

含水率が低下して平衡状態に近づき、これ以上天然乾燥を継続するより、人工乾燥に移行した方が経済的にみて有利であるとみられる乾燥速度は、前述の通り計算して求めることは不可能である。

そのため、ここでは乾燥速度が低下して一日あたり0.3%あるいは0.2%となったときを天然乾燥の仕上がり時期とした。求め方としては、Fig. 8、9、およびFig. 11、12の含水率減少経過の曲線より、1日あたりの乾燥速度が0.3%あるいは0.2%となるときの勾配を求め、その勾配を示すときの含水率を仕上げ含水率とした。

実際に天然乾燥材を通常のI F型乾燥室で人工乾燥する場合、含水率30%から10%まで乾燥するに要する時間は、ブナ20mm板心材では3～4日、40mm心材では10～12日であるが⁹⁰⁾、この時の含水率30%における乾燥速度は一日あたり20mm板心材で13～15%、40mm板心材では5～6%程度となる。

こうしたことからみて、天然乾燥を切り上げるときの乾燥速度を0.3%以下とすることは妥当であると思われる。

Fig. 28は、ブナ40mmおよび20mm板心材の高山市における乾燥終了月と乾燥速度が0.3%および0.2%になったときの含水率の関係を示すものである。

乾燥速度が0.3%あるいは0.2%に低下するときの含水率（仕上がり含水率）は、そのときの気候値平衡含水率と連動しており、気候値平衡含水率が高いときほど平衡状態になるときの含水率は高くなっている。

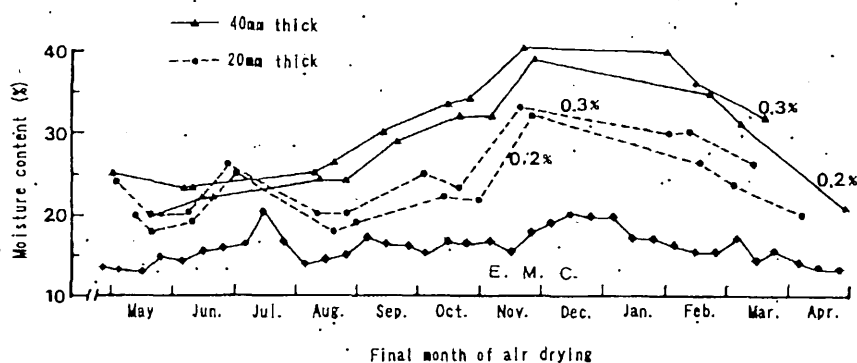


Fig. 28 Relation between final month of drying and moisture content in BUNA heartwood (Takayama)

しかし、季節により気候値平衡含水率と仕上がり含水率の差は変動し、大まかにみて、20mm板では夏季で5～10%仕上がり含水率の方が高くなっている。また、40mm板では夏季で10%、冬季では20%程度仕上がり含水率が高くなっている。

Fig. 29は、美濃市におけるブナ40mmおよび20mm板心材の乾燥終了月と仕上がり含水率の関係を示したものであるが、季節による仕上がり含水率の差はあまり認められない。

また、気候値平衡含水率と仕上がり含水率の差も少なく、20mm板で5～7%程度、40mm板では6～10%程度仕上がり含水率が高くなっているのみである。

このように、天然乾燥における仕上がり含水率は、天然乾燥の実施場所によって著しく変動する。

美濃市のような表日本型の気候区においては、季節による仕上がり含水率にあまり大きな差がなく、年間を通じて40mm板で25%、20mm板では20%を仕上がり目標含水率とすることができる。

高山市のように寒冷な山国気候区においては、40mm板の夏季の仕上がり含水率は25%、冬季では30～40%となり、20mm板では夏季で25%、冬季では30%が天然乾燥の目標仕上がり含水率となる。

しかし、これは乾燥終了時の季節別仕上がり含水率であり、この含水率にまで到達するに要する乾燥時間も当然季節によって異なることになる。

天然乾燥を計画的に実施するためには、乾燥開始時において仕上がり含水率、あるいは後述の乾燥所要時間を推定しなければならない。そのため、天然乾燥の開始時期と仕上がり含水率の関係を求めたものがFig. 30およびFig. 31である。

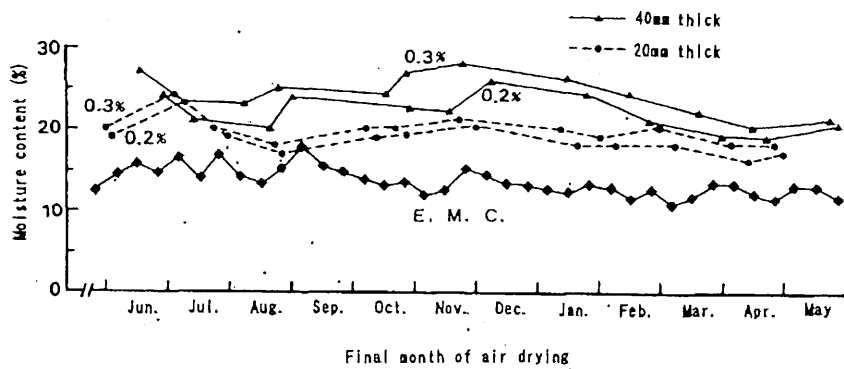


Fig. 29 Relation between final month of drying and moisture content in BUNA heartwood (Mino)

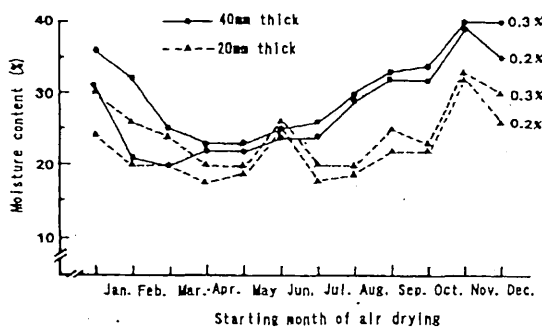


Fig. 30 Relation between starting month of drying and final moisture content in BUNA heartwood (Takayama)

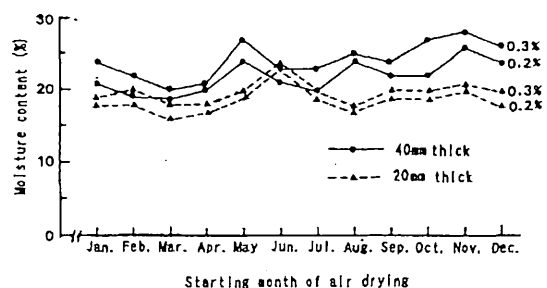


Fig. 31 Relation between starting month of drying and final moisture content in BUNA heartwood (Mino)

高山市の場合は、ブナ心材の40mm板を3月から7月の間に乾燥を開始すれば25%、8、9、10および1、2月に開始すれば30%、また11、12月に開始すれば40%、その他は全て25%を目標仕上げ含水率とすることができる。

美濃市の場合は、年間を通じてブナ心材の40mm板は25%、20mm板では20%を目標仕上げ含水率とすることができる。

b. 棧積み材の仕上げ含水率

一枚板の状態乾燥した場合は、前述の通り乾燥速度が低下してほとんど平衡状態となったときの含水率を天然乾燥の仕上がり含水率とすることができる。

しかし、棧積みしたときは乾燥むらが発生するため、乾燥のおくれる棧積み中央部の含水率が乾燥の速い棧積み外側の含水率に追いつく、いわゆる含水率の均一化を図るための時間が必要となる。

Table 9は、高山市においてブナ材を天然乾燥したときの板の厚さと乾燥時期、時間および仕上がり含水率のむらを示したものである³⁰⁾。

これは、実際に家具工場で実施している天然乾燥の仕上がり含水率を測定したものであり、棧積み内の上、中、下段とは地上高およそ5m、3m、1mの位置である。また、各段の含水率は10数枚の板の平均値で示している。

現場においては、このように4～6ヶ月の天然乾燥を実施しているため、仕上がり含水率は低くなっており、含水率のむらもやはり小さくなっている。

乾燥を実施する時期(季節)に関係なく、乾燥時間を長くした方が仕上がり含水率のむらは小さくなり、また、板の厚さが大きいほど仕上がり時の含水率むらは大きくなる。

しかし、長期間天然乾燥を実施して、ほとんど含水率が低下しなくなった時の仕上がり含水率は乾

Table 9 Behavior of moisture content in piles after air drying
(BUNA, Takayama)

Thickness (mm)	40	40	40	50	50	50
Drying time (day)	180	120	210	140	120	120
Date of beginning	9 Apr.	17 Jun.	9 Aug.	29 Aug.	24 Sep.	7 Oct.
Upper tier (%)	15.2	16.8	20.7	22.9	21.1	22.0
Middle tier (%)	17.1	17.9	20.6	22.8	25.0	38.1
Lower tier (%)	16.7	20.6	22.5	27.4	30.7	44.9
Average (%)	16.0	18.4	21.3	24.4	25.6	35.0

Note: Moisture content in each tier is an average of some points of that tier.

乾燥時間にあまり関係なく、乾燥仕上げ時の気象条件に影響されるため、平衡含水率の高い冬季に乾燥を終了したものほど仕上げ含水率は高くなる。

このように、乾燥時間を長くすれば仕上がり含水率均一化の目的は充分達成することができるが、栈積み全体の平均含水率はその時の平衡含水率に支配されて、一枚板の場合と同様に気候値平衡含水率より若干高い所で変動することになる。

Fig. 3 2 は高山市および美濃市においてブナ材を乾燥したときの、一枚板と栈積み板の乾燥経過を示したものである。

高山市における栈積み材の天然乾燥はおおむね 3～4 ケ月実施しているが、冬季の場合ほとんど直線的に含水率が減少しており、平衡状態に達する以前に天然乾燥を終了しているが、高山市あるいは美濃市の夏季においては、栈積み材もほとんど平衡状態に達してから乾燥を終了している。

栈積み材の仕上げ含水率と一枚板の仕上げ含水率の関係をみると、栈積み材の場合、中央部の乾燥おくれが影響するため、一枚板の仕上げ含水率より 5～10% 程度高い値を示している。

c. 天然乾燥の乾燥時間

天然乾燥における一枚板の仕上がり含水率は、乾燥する場所、季節あるいは板の厚さによって異なり、ブナ心材の場合、厚さ 40mm の板では 40～25%、厚さ 20mm の板では 30～20% となる。

この仕上がり含水率は、乾燥を終了するときの気候に影響されるため、乾燥時間の長短によって仕

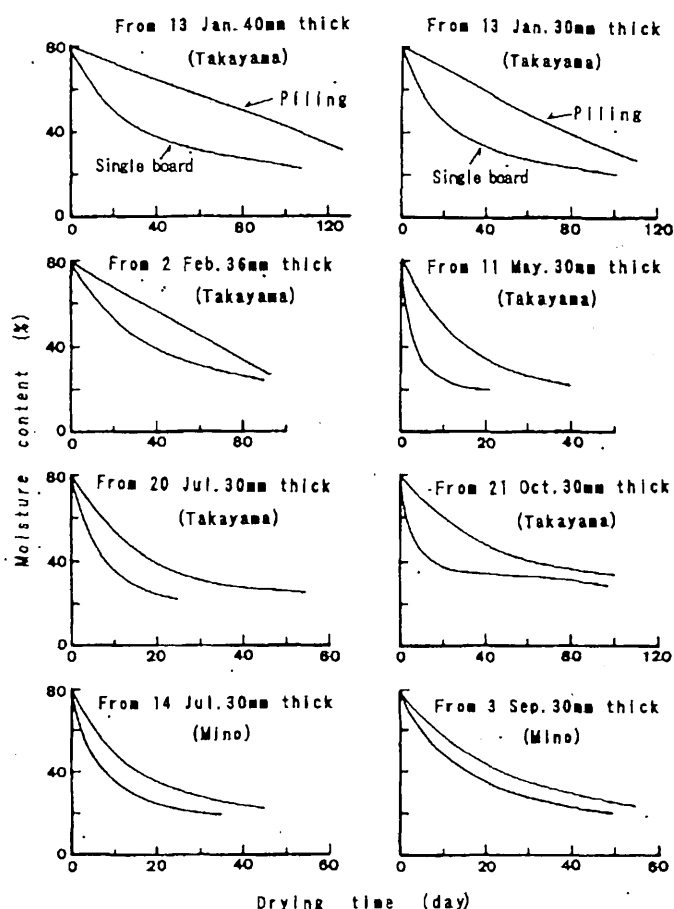


Fig. 32 Behavior of moisture content in BUNA heartwood by air drying

上がり含水率も変化することになる。
例えば、高山市においてブナ40mm板を天然乾燥した場合、10月に乾燥を開始すると約50日経過した11月には含水率30%まで低下するが、まだ乾燥を継続すると含水率は逆に増加する。

また、5月に乾燥を開始すると、約20日後には含水率20%でほぼ平衡状態になるが、その後も乾燥を継続すると、8月にはまだ若干含水率が低くなる。

そのため、IV章のCのaにおける一枚板の仕上がり含水率では、最初に平衡状態に達したときの含水率を、仕上がり含水率としている。この仕上がり含水率に到達するに要する時間が、一枚板の天然乾燥の所要時間となるが、当然のことながらこの乾燥時間も、乾燥する場所、季節あるいは板厚によって異なることになる。

Fig. 3 3およびFig. 3 4は、ブナ心材の40mm板と20mm板の高山市と美濃市における天然乾燥日数を示すものである。

これは一枚板の乾燥経過から含水率80%より30%および25%に到達するに要する時間を求めたものである。

また、Table 1 0は岐阜県における乾燥時間と、鳥取市²⁸⁾および岩手県²⁹⁾の乾燥時間を比較したものである。

鳥取市および岩手県の乾燥時間は、板の厚さが異なるため直接比較することはできないが、季節あるいは板厚による乾燥時間の変動傾向は類推することが可能である。

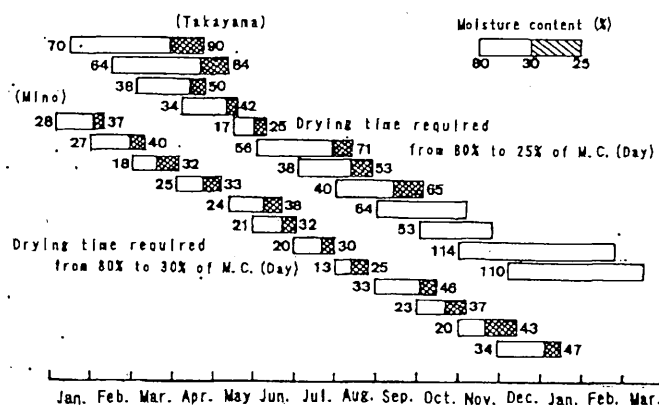


Fig. 33 Drying time of BUNA heartwood 40 mm thick

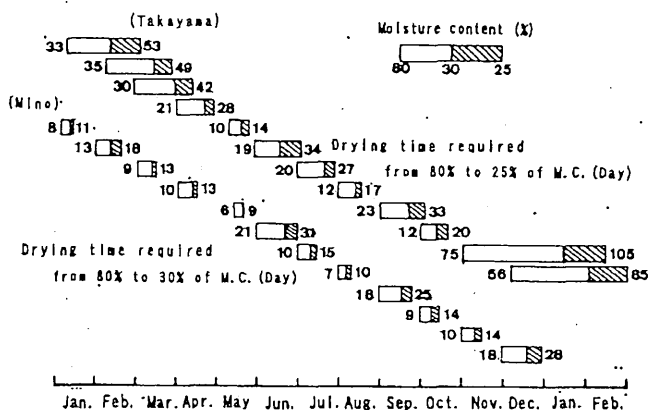


Fig. 34 Drying time of BUNA heartwood 20 mm thick

Table 10 Monthly drying time for air drying of single board
(BUNA heartwood, from M.C. 80% to M.C. 30 %)

Place	Thickness	Month											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Takayama,	40mm	70	64	38	34	17	56	38	40	64	53	114	110
Gifu pref.	20mm	33	35	30	21	10	19	20	12	23	12	75	56
Mino,	40mm	28	27	18	25	24	21	20	13	33	23	20	34
Gifu pref.	20mm	8	13	9	10	6	21	10	7	18	9	10	18
Tottori,	45mm	69	55	54	42	47	48	29	27	34	54	65	69
Tottori pref.	30mm	24	34	19	23	19	17	18	10	28	20	22	35
Iwate,	36mm				13		12			31			56
Iwate pref.	20mm				7		6			20			15

一枚板の乾燥時間は、地域別あるいは季節別にこうして求めることができるが、天然乾燥の所要時間ということになれば、当然のことながら棧積みしたときの乾燥時間を求めることが必要である。

棧積みした場合は、棧積み中央部の材間風速の低下により乾燥速度も一枚板より小さくなると同時に、乾燥むらが発生するためこれの均一化のために待時間が必要となり、当然のことながら棧積み材の乾燥時間は一枚板のそれより相当長くなることになる。

Table 11 は、高山市および美濃市においてブナ材を天然乾燥したときの、一枚板と棧積み材の乾燥時間の関係を示したものである。これは、棧積みと同一場所、同一時期に一枚板を乾燥したときの含水率80%から30%に到達するに要する時間を求めたものである。

Table 11 Drying time from M.C. 80% to M.C. 30 % (BUNA, heartwood)

Date of beginning	Thickness (mm)	Drying time (day)		Rate (B/A)	Place
		Single board (A)	Pile (B)		
8 Jan.	30	15	28	1.87	Mino
13 Jan.	30	15	27	1.80	Mino
13 Jan.	40	70	149	2.13	Takayama
13 Jan.	30	50	117	2.34	Takayama
1 Feb.	30	20	25	1.25	Mino
2 Feb.	36	64	87	1.36	Takayama
25 Apr.	30	28	36	1.29	Takayama
11 May	30	14	24	1.71	Takayama
13 Jul.	30	19	31	1.63	Mino
20 Jul.	30	27	42	1.56	Takayama
31 Jul.	23	12	18	1.50	Takayama
3 Sep.	30	25	40	1.60	Mino
21 Oct.	30	92	110	1.20	Takayama
Average				1.63	

棧積み材の乾燥時間が一枚板のそれと最も差がでるのは、高山市で1月から乾燥した場合であり、棧積み材の乾燥時間は一枚板のその2.34倍を示す。また、最も差が少ないのは、美濃市で2月から乾燥したときであり、1.25倍となっている。

一枚板と棧積み材の乾燥速度に差ができるのは風速の影響であり、風速が大きければ棧積み材の乾燥速度もそれほど低下しない筈である。

高山市に比較して美濃市の風速が大きいことは前述のとおりであるが、同一季節に乾燥を実施した高山市と美濃市の乾燥時間の比をみると、やはり高山市の方が棧積み材の乾燥時間の増加率は大きくなっている。

このように、一枚板と棧積み材の天然乾燥所要時間の関係は、そのときの風速に影響されるようであるが、乾燥する季節あるいは板の厚さによる影響はほとんど認めることができない。

理論的には、気温が高く湿度の低いとき、あるいは板の厚さが薄いとき、言い換えれば乾燥速度の大きい条件のときほど、棧積みによる乾燥むらが大きくなり、一枚板と棧積み材の乾燥時間の差は大きくなるはずである。

しかし、現場での天然乾燥時間をみると、季節あるいは板厚による差には一定の傾向を認めることができず、風速による差（高山市と美濃市の差）もそれほど大きくない。

こうしたことから、一枚板と棧積み材の乾燥時間の差は大まかにみて1.6倍程度とすることができると。そのため、棧積み材の天然乾燥の所要時間は、一枚板の天然乾燥所要時間の1.6倍程度とみても、現場的にはあまり大きな間違いはないと思われる。

Fig. 3 5 および Fig. 3 6 は、高山市および美濃市における一枚板の天然乾燥所要時間に1.6を乗じて、それぞれ棧積み材の天然乾燥所要時間を求めたものである。

高山市における天然乾燥の所要時間は、ブナ40mm板心材で、夏季は2ヶ月、春秋は3ヶ月、冬季では5ヶ月程度である。ブナ心材20mm板では、夏季で1ヶ月、春秋で2ヶ月、冬季で3ヶ月程度が適正とみることができる。

また、美濃市における天然乾燥の所要時間は、ブナ心材40mm板で夏季で1ヶ月、春秋で1ヶ月半、冬季で2ヶ月程度である。

ブナ心材20mm板では年間を通じて1ヶ月程度が適正な天然乾燥の所要時間とすることができる。

非常に大まかな区分であるが、気象条件の変動あるいは被乾燥材の乾燥に影響する材質の変動等を勘案すると、この程度の区分が妥当なものと考えられる。

D. 要 約

広葉樹材の天然乾燥において、目的とする仕上げ含水率をどのように設定するか、あるいは被乾燥材の板厚による乾燥時間をどのように推定するかは、人工乾燥の予備的な操作に位置づけられる天然乾燥にとって、非常に重要なことである。

天然乾燥から人工乾燥に移行する場合の含水率、すなわち天然乾燥の仕上げ含水率は、人工乾燥における乾燥の所要時間を左右するし、天然乾燥の所要時間は、原材料のストック量を左右する。

そのため、木材加工企業において計画的な原材料の購入および加工工程の管理を実施するには、天然乾燥の仕上げ含水率とその所要時間を正確に把握することが必要である。

この章では、天然乾燥において、樹種、板厚、あるいは乾燥する季節や場所によって仕上げ含水率や乾燥時間がどのように変化するかを検討するため、栈積みしなない一枚板の状態で1年間、月毎に天然乾燥を実施して、仕上がり含水率と乾燥時間を求めた。

次いで、栈積みした場合に発生する乾燥むら、仕上がり含水率や乾燥時間にどのような影響をおよぼすかを検討した。

これらの結果を総合して、栈積み材の板厚別、季節別の天然乾燥所要時間を岐阜県高山市および美濃市の両地域において推定した。

その結果を要約すると次のとおりである。

一枚板の天然乾燥速度

(1) ブナ材の辺材と心材の乾燥速度は、人工乾燥の場合辺材の方が心材の約2倍を必要とするといわれているが、天然乾燥における辺材と心材の乾燥速度の差はそれほど大きくない。

しかし、乾燥条件の悪い冬季間より、乾燥条件の良い夏季の方が辺材と心材の乾燥速度の差は大きくなる。

(2) 板厚と乾燥速度の関係は、

$$t_2/t_1 = (d_2/d_1)^n$$

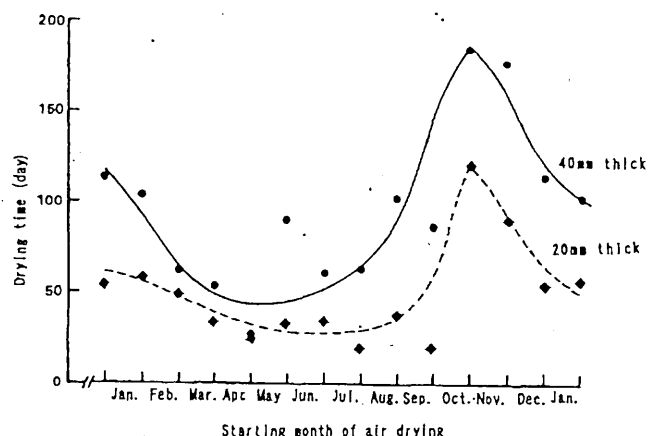


Fig. 35 Estimated drying time of piled BUNA heartwood by air drying (from M. C. 80% to M. C. 30%, Takayama)

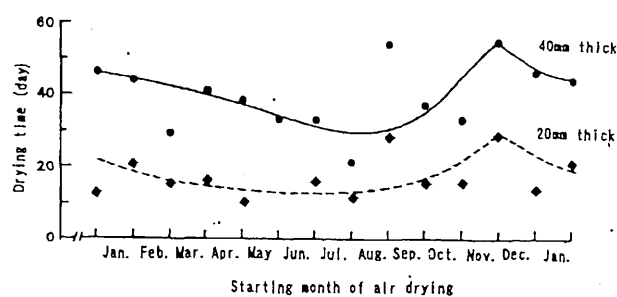


Fig. 36 Estimated drying time of piled BUNA heartwood by air drying (from M. C. 80% to M. C. 30%, Mino)

で表され人工乾燥の場合、減率乾燥期間の n の値は2に近づくといわれているが、天然乾燥での n の値は1.5程度と考えられる。

- (3) 天然乾燥の乾燥速度に影響をおよぼす気象条件は、気温、湿度および風速であるが、美濃市の場合にはこれらの気象因子と乾燥速度の間に明確な関係は認められなかった。

しかし、高山市においては湿度で代表される気候値平衡含水率と、乾燥速度の相関は高く、気候値平衡含水率が低くなるほど乾燥速度が大きくなり、片対数方眼紙において直線関係を認めることができる。

棧積みによる乾燥むらの発生

- (1) 棧積みするときの板の横方向の間隔を大きくするほど、棧積み中央部の乾燥おくれ、すなわち乾燥むらは小さくなる。そのため、平均含水率が30%までに達するに要する乾燥時間は、板の横間隔が3cmのときは6cmのときの1.4倍ほどとなる。
- (2) 棧積みしたときの乾燥むらの大きさは辺材と心材では異なり、高含水率時の乾燥むらは辺材の方が大きく、低含水率になったときの乾燥むらは心材の方が大きくなる。

天然乾燥による仕上げ含水率と乾燥時間

- (1) 一枚板の天然乾燥による仕上がり含水率は、乾燥を終了するときの季節によって大きく変動する。しかし、天然乾燥を計画的に実施するためには、乾燥開始季節と仕上がり含水率の関係を良く把握しなければならない。

高山市で天然乾燥を実施したときの乾燥開始月と仕上がり含水率の関係はFig. 3 0 に示すように、含水率40%から25%と季節による変動が大きい。しかし、美濃市の場合にはFig. 3 1 に示すように年間を通じて25%~20%を仕上がり含水率とすることができる。

- (2) 棧積み材の仕上げ含水率は、棧積み中央部の乾燥おくれが影響するため、一枚板の仕上げ含水率より5~10%程度高くなる。
- (3) 天然乾燥の所要時間は、当然のことながら棧積み材を基準に考えなければならないが、一枚板と棧積み材の乾燥時間は棧積み材の方が一枚板の1.6倍ほど長くなる。
- (4) ブナ心材の天然乾燥所要時間はFig. 3 5 およびFig. 3 6 に示すように、高山市では40mm板で夏季は2ヶ月、春秋は3ヶ月、冬季では5ヶ月程度であり、20mm板では夏季で1ヶ月、春秋で2ヶ月、冬季で3ヶ月が適正である。

また、美濃市では40mmで夏季で1ヶ月、春秋で1ヶ月半、冬季で2ヶ月であり、20mm板では年間を通じて1ヶ月程度が適正な天然乾燥の所要期間となる。

V. 針葉樹材の天然乾燥速度

針葉樹材の乾燥は、広葉樹材の乾燥とその考え方、あるいは方法が若干異なっている。

広葉樹材は一部ケヤキ、クリなどの建築用に使用されるものを除き、そのほとんどが家具用材、あるいはその他小木工用材としての使用が主であるため、乾燥時の断面積は比較的小さく、仕上げ含水率もおおむね10%程度を目的としている。

しかし、針葉樹材の場合はその用途のほとんどが建築用であるため、乾燥時の断面積は比較的大きく、目的とする仕上げ含水率も現在の所では広葉樹材に比較して相当に高く、20%前後を目的としている。

もちろん、針葉樹材であっても集成材のラミナなどは断面積も小さく(厚さ2~3cmの板材が多い)、目的とする仕上げ含水率も広葉樹材と同様10%以下とすることが多い。

こうしたラミナは、接着加工をするため含水率を低くしなければ接着性能あるいは加工性能の点からも問題となるし、建築用集成材といえども内装材としての用途が多いため、使用場所の平衡含水率も低く、その仕上げ含水率は低くしなければならない。しかも、ラミナのように断面積の小さい板材の場合は乾燥も容易であるため、その乾燥方法も広葉樹材の乾燥に準じて、蒸気式のI F型乾燥室による乾燥が多い。

これに対して建築用針葉樹材の場合は、前述のように断面積が大きいため、板材の乾燥と同じように考えることはできない。

針葉樹材は広葉樹材に比較して、一般に乾燥が容易であると云われているが、その乾燥特性をみると、比重が小さいため、乾燥速度が大きく、また、収縮率が小さく狂いや割れなど損傷の発生も少なく、そのために比較的高温で厳しい乾燥条件での乾燥操作が可能であると云われている。

こうした乾燥特性は、広葉樹材に比較して良い点ばかりであり、ラミナなど断面積の小さい材料を乾燥するときには、乾燥も容易であり乾燥時間も短くなる。

しかし、針葉樹材を乾燥する場合の問題点も多く、生材時の含水率が広葉樹材に比較して非常に高く、しかも辺材と心材との含水率差が大きいため、乾燥速度は大きくても乾燥時間は長くなり、仕上がり含水率の均一化を図ることもむづかしくなる。

建築用柱材などの場合は断面積が大きく、しかも心持ち材が多くなるため、乾燥時間が長くなるとともに、心持ち材に割れが発生する危険が多くなるという問題がある。

また、広葉樹材の場合は節などの欠点は加工時に取り除く、いわゆる切り使いが主であるが、建築用針葉樹材の場合は節や若干の欠点もそのまま使うことが多いため、乾燥による抜け節、あるいは節の周囲の異常収縮など問題点が多くなる。

カラマツやベイマツなど樹脂を多く含む材の脱脂処理や、ヒノキなど乾燥による変色が問題となることが多い。家具や木工品の場合は、着色あるいは艶出しなどのために塗装することが多いが、建築用材の場合は素地のまま使用することが多いため、樹脂の浸出や乾燥による変色は当然クレームの対象となる。

このように針葉樹材の場合、針葉樹材固有の乾燥特性よりも、被乾燥材の形状やその用途により乾燥上の問題が発生することが多くなる。

そのためこの章では、先ず初期含水率が非常に高い問題に対処する方法として、伐倒後の丸太材を林内において乾燥する、いわゆる葉枯らしの効果、あるいは工場土場における丸太材の乾燥速度について述べる。

次いで、IV章の広葉樹材の乾燥と同様に、針葉樹製材の樹種および材種別の天然乾燥速度を季節別に検討した結果について述べることにする。

A. 林内における葉枯らし乾燥速度

針葉樹材は、前述の通り初期含水率が非常に高いために、乾燥速度が大きい割には乾燥時間が長

くなり、しかも辺材と心材の含水率に大きな差があるため、仕上がり含水率を均一化することが困難となる。

そのため、丸太材の初期含水率を少しでも低くして、その後の乾燥時間を短縮するために、伐倒した丸太材を枝葉つきのまま林内に放置して、葉からの蒸散作用により丸太材の含水率を低下させる方法について検討した。

この葉枯らしは、吉野地方におけるスギの磨き丸太生産⁸⁷⁾や、岐阜県今須地方の択伐林で古くから実施されている⁸⁸⁾。

しかし、いずれもスギの黒心材など、心材色の改良を目的としているものであるため、含水率の減少経過や重量の変化を測定するなど、乾燥を目的とした葉枯らしの効果を検討した報告はみることができない。

a. 実験方法.

1). 実験場所と実験期間.

葉枯らしを実施したのは、美濃市曾代の岐阜県林業センター実験林である。

スギ (*Cryptomeria japonica* D.Don) は林齢15年、立木密度が2500本/haの林分で、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) は林齢19年、立木密度が2300本/haの林分である。この林分より、それぞれスギ、ヒノキの供試木を伐倒し、その場所で葉枯らしを実施した。なお、この実験は1977年8月から1980年12月にかけて、実施した。

Table 12 Outline of test logs (SUGI)

Place	Test period	No.	Age of wood (year)	B.H.D. (cm)	Hight of wood (m)	Crown hight (m)	Crown length (m)	Initial weight (kg)	Way of cutting
Mino	From 3 Aug. 1977 to 28 Feb. 1978	B-1	19	14.4	14.6	7.0	7.6	133.5	Cutting to mountain side Cutting to mountain side Cutting to mountain side Cutting to valley side Cutting to valley side
		B-2	19	14.0	13.1	4.7	8.4	117.5	
	From 26 Jun. 1979 to 26 Oct. 1979	B-6	15	9.6	8.0	4.0	4.0	50.0	
		B-7	15	8.8	8.0	4.0	4.0	56.0	
		B-8	15	9.5	8.0	4.0	4.0	57.0	
		B-9	15	9.4	8.0	4.0	4.0	50.0	
		B-10	15	8.7	8.0	4.0	4.0	52.5	
	From 20 Sep. 1979 to 10 Jan. 1980	D-1	15	9.2	8.0	8.0	0	34.0	Control
		B-11	15	10.7	9.6	5.1	4.5	63.0	
	From 13 Jun. 1980 to 17 Dec. 1980	B-12	18	11.8	11.0	5.0	6.0	100.5	Control
		B-13	18	11.1	11.0	5.0	6.0	107.0	
		B-14	18	10.8	11.0	5.0	6.0	87.0	
		B-15	18	9.6	11.0	8.0	3.0	59.5	
		B-16	18	10.3	11.0	8.0	3.0	74.5	
		D-2	18	10.5	11.0	11.0	0	59.0	
		D-3	18	10.3	11.0	11.0	0	55.5	

Table 13 Outline of test logs (HINOKI)

Place	Test period	No.	Age of wood (year)	B.H.D. (cm)	Hight of wood (m)	Crown hight (m)	Crown length (m)	Initial weight (kg)	Way of cutting
Mino	From 21 Sep. 1979 to 28 Feb. 1980	B-3	18	9.9	10.6	6.1	4.5	58.0	Cutting to mountain side
		B-4	18	11.8	10.8	5.8	5.0	62.0	Cutting to mountain side
		B-5	18	9.2	9.6	5.1	4.5	45.0	Cutting to mountain side
		B-6	18	9.2	9.0	4.0	5.0	41.0	Cutting to valley side
		B-7	18	9.3	10.4	5.9	4.5	47.0	Cutting to valley side
		B-8	18	10.0	10.3	5.8	4.5	58.0	Cutting to valley side
		D-1	18	11.8	10.1	10.1	0	61.0	Control
		D-2	18	9.3	10.0	10.0	0	40.0	Control
		B-9	18	7.5	9.0	5.0	4.0	34.0	
	From 13 Jun. 1980 to 17 Dec. 1980	B-10	18	10.5	11.0	5.0	6.0	76.5	Control
		B-11	18	9.0	11.0	5.0	6.0	57.5	
		B-12	18	9.8	11.0	5.0	6.0	74.0	
		B-13	18	10.0	11.0	8.0	3.0	63.5	
		B-14	18	10.5	11.0	8.0	3.0	69.0	
		D-3	18	11.0	11.0	11.0	0	62.0	
		D-4	18	9.3	11.0	11.0	0	44.5	

2) 供試木とその処理方法

葉枯らしを実施したスギ、ヒノキの供試木は、胸高直径8~16cm、樹高8~17mの大きさのものを選り、全部で約30本を用いた。

また、供試木の処理は、枝葉からの蒸散量の差をみるため、枝葉の着いた部分の長さを3mと6mにしたものと、対照区として梢頭まで枝を打ち落としたものとした。

葉枯らしの場合、伐倒した樹幹を山側に倒すか谷側に倒すかで乾燥速度が異なるとする俗説もあるため、この点を検討するため供試木の伐倒方向も、山側と谷側にした。

供試木の大きさ、処理方法および試験地はTable 1 2、およびTable 1 3に示すとおりである。

3) 測定方法

伐倒した供試木は、伐根の上に元口部を乗せ樹幹部が直接地面に接しないように設置した。

初期含水率は、樹高0.5m、3mおよび6mの位置において成長錐で試料を抜き取り、辺材、心材別に全乾法で含水率を測定した。成長錐であけた孔は雨水が侵入しないようにコーキング剤をうめ込んだ。

しかし、成長錐で試料を採取すると自由水が絞り出されるため、正確な含水率の把握が困難であり、その結果は参考程度にしか用いなかった。

そのため、乾燥経過の測定は、乾燥初期は1~2週間毎に、また乾燥後期は1ヶ月毎にスプリングバランスにより全乾重量を測定して、試験終了後、樹幹方向に1~2m毎に厚さ約3cmの円板を採取し(1部は辺材、心材別)、全乾法により含水率を求め、各重量測定時の含水率を算出した。

この場合、枝や葉の重量や含水率の変動は樹幹のそれと異なると思われるが、枝や葉の重量を樹幹部と分けて測定することが不可能なため、便宜的に枝や葉も樹幹部と同一とみなして計算した見掛けの含水率によった。

4) 試験期間中の気象条件

試験期間中の美濃市の平均気温および平均湿度はFig. 3 7に示すとおりである。

b. 実験結果と考察

1) 葉枯らしによる乾燥速度

Fig. 3 8に、スギの樹冠長別の含水率減少経過を、Fig. 3 9にヒノキの樹冠長別含水率減少経過を、

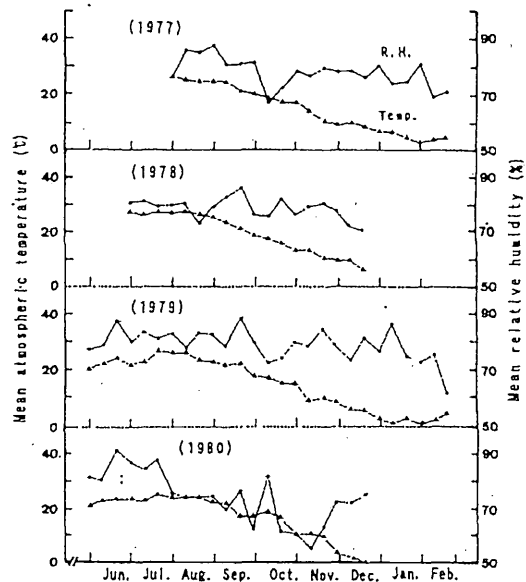


Fig. 37 Climate condition in test period (Mino)

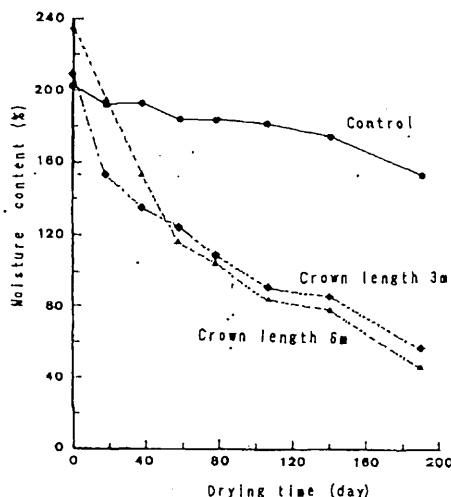


Fig. 38 Behavior of moisture content in SUGI (from 1980, 13 Jun. to 17 Dec.)

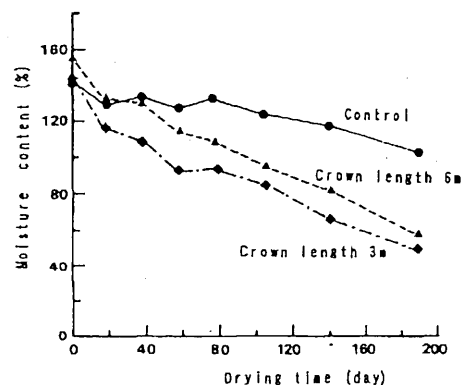


Fig. 39 Behavior of moisture content in HINOKI (from 1980, 13 Jun. to 17 Dec.)

を示す。

また、Fig. 40にこのときの重量減少経過を示す。スギは、樹冠長6mのもの3本（供試木No.B-12,13,14）、樹冠長3mのもの2本（供試木No.B-15,16）および枝葉を全て除去した対照木2本（供試木No.D-2,3）の含水率をそれぞれ平均して示したものである。ヒノキも、樹冠長6mのもの3本（供試木No.B-10,11,12）と、樹冠長3mのもの2本（供試木No.B-13,14）および枝葉のない対照木2本（供試木No.D-3,4）の含水率をそれぞれ平均して示している。

Fig. 40の重量減少率も同様にそれぞれの平均値で示している。

スギ、ヒノキとも枝葉を全て除去したものは含水率および重量もほとんど減少しない。ただ枝打ちによる木口面が多いため、この木口からの乾燥により若干ではあるが含水率が減少している。

これに対して、枝葉を残した葉枯らし材は含水率および重量の減少が大きく、葉からの蒸散効果を認めることができる。しかし、樹冠長による含水率および重量の減少率にはほとんど差が認められず、スギの樹冠長6mのものが樹冠長3mのものよりわずかに減少速度が大きい程度である。

次に、供試木の伐倒方向別の含水率減少経過としてFig. 41にスギを、Fig. 42にヒノキの試験結果を示す。また、そのときの重量減少率をFig. 43に示す。同図のスギは、山側に伐倒したもの3本（供試木No.B-6,7,8）と、谷側に伐倒した2本（供試木No.B-9,10）および対照木1本（供試木No.D-1）の含水率をそれぞれ平均したものである。

また、ヒノキは山側に伐倒した3本（供試木No.B-3,4,5）と、谷側に伐倒した3本（供試木No.B-6,7,8）および対照木2本（供試木No.D-1,2）の含水率をそれぞれ平均して示したものである。

スギ、ヒノキとも、初期含水率のバラツキが大きいため明確ではないが、伐倒方向による蒸散速度にはほとんど差を認めることができなかった。

立木は、土壤中の水分を根の柔細胞により吸収し、道管、仮道管を通過して葉より蒸散するが、その大部分は葉の気孔から蒸散し、幹の表皮あるいは葉のクチクラ層からも若干蒸散される。

気孔からの蒸散速度は気孔開度によって異なるが、直接の駆動力は水の物理的な蒸発と同様に、大気の絶対湿度差または水蒸気圧差に影響されるとともに、温度や風にも影響される。

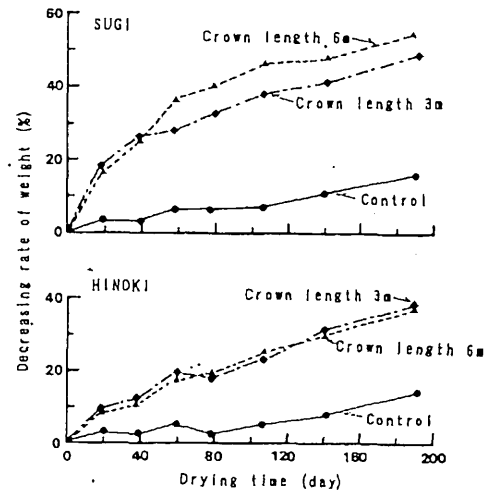


Fig. 40 Behavior of decreasing rate of weight

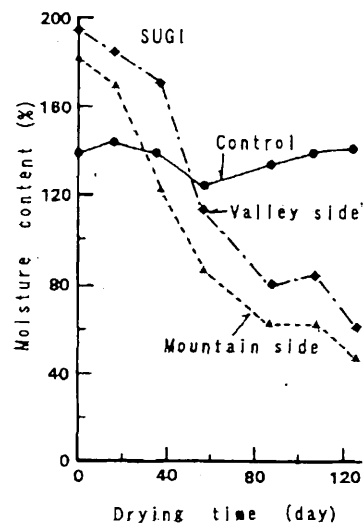


Fig. 41 Behavior of moisture content in SUGI
(from 1979, 21 Jun. to 25 Oct.)

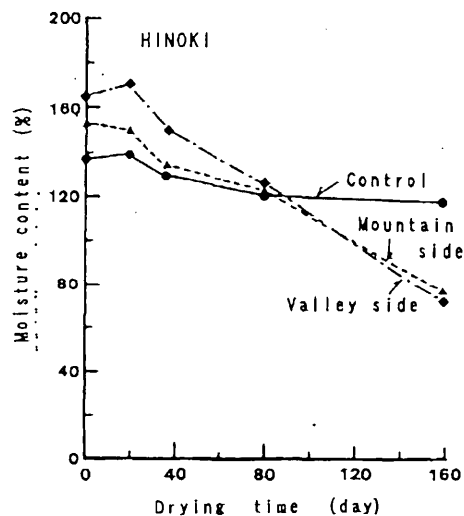


Fig. 42 Behavior of moisture content in HINOKI
(from 1979, 21 Sep. to 1980, 28 Feb.)

立木の蒸散量は、葉の付いた小枝を切りとり、気孔や浸透圧の状態が変化しない短時間における重量減少を求める迅速葉重量測定法や、樹冠内の樹液流速、あるいは樹冠部を箱の中に入れてその空気中の含水量の増加量によって測定される。

林分の蒸散量として、カラマツの12年生林分で1.1～3.8mm/日^{89,90)}、ヒノキの8～14年生林分で5.16～6.55mm/日⁹¹⁾と報告されている。また檜山⁹²⁾はマツで2.35mm/日、トウヒで4.3mm/日であると報告している。

ここでヒノキの胸高直径20cm、樹高20m、立木密度1100本/haの林分蒸散量を5mm/日とすると、立木一本当たりの蒸散量は約44.5kg/日となり、含水率100%の立木に含まれる水は約2.4日で全て蒸散することになり、一日当たりの蒸散量は含水率にして約41.7%/日となる。

しかし、これは気孔が全開しているときの蒸散量であり、伐倒された樹の場合は根からの水の供給がなくなり、水ポテンシャルの低下により気孔が閉じるとともに、しおれ現象を起こすことになる⁹³⁾。この場合は、クチクラ蒸散のみによって水分は蒸散するが、気孔蒸散に比較してクチクラ蒸散は1/10以下に低下するとされている⁹⁴⁾。

また、気孔が閉じてクチクラ蒸散になった場合、樹木の水分不足に対する防御機構として、クチクラ層の下にあるペクチン層あるいはセルロースペクチン層に含まれているワックスが蒸散を抑制するように組織的な変化を起こすと言われている⁹⁵⁾。

さらに水分が欠乏すると葉は枯死するが、その枯死に到る期間は季節によって異なり、センブラムツの場合7月で60時間、10月で168時間を要すると報告されている⁹²⁾。

本試験における供試木の葉の枯死は、伐倒した時期によっても異なるが、大略スギでは伐倒後1ヶ月程度で梢端部から黄色化が始まりその後徐々に黄色が強くなり、70～90日で全面的に黄褐色となる。

また、ヒノキでは伐倒後2ヶ月程度で梢頭が黄色化し始め、全面的に黄色化するの約5ヶ月後である。

立木の場合、葉からの蒸散によって失われた水は、蒸散による葉の水ポテンシャルの低下がただちに木部負圧として樹幹に伝わり、根から葉に至る凝集力によって水の上昇をもたらすことになる。

針葉樹の場合樹幹部の水の移動は仮道管によるが、仮道管から仮道管への移動は主に有縁壁孔を通じておこなわれる。

しかし、伐倒により根からの水の供給が断たれると、仮道管内に気泡が発生して水の連続性がこわされ、有縁壁孔が閉じて水の移動が停止することになる。

このように、伐倒木の樹幹における水の移動は、通常の木材乾燥における内部水分の移動と同様に、含水率の低下にしたがって移動速度も低下することになる。

Fig. 4 4 は、6月に伐倒したときのスギ、ヒノ

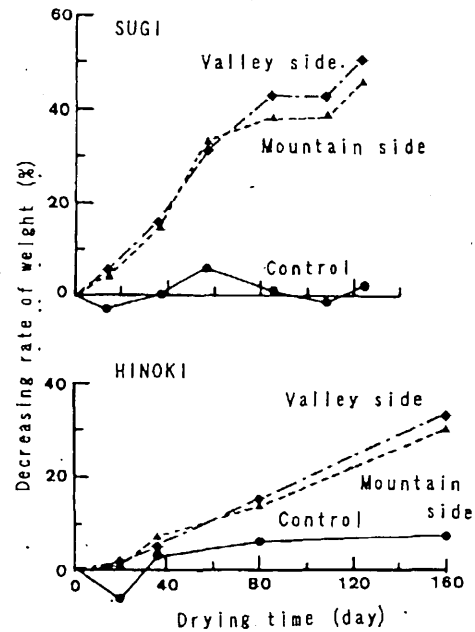


Fig. 43 Behavior of decreasing rate of weight (SUGI: from 1979, 26 Jun. to 26 Oct., HINOKI: from 1979, 21 Sep. to 1980, 28 Feb.)

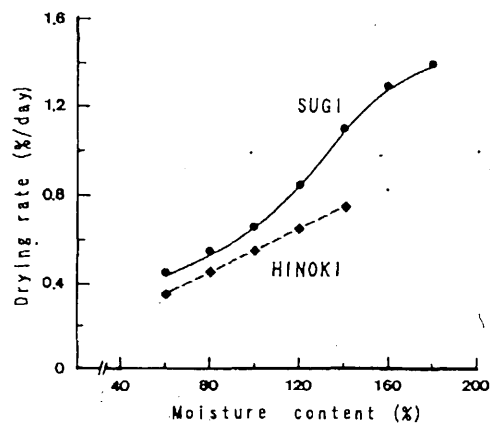


Fig. 44 Drying rate of stems without limbing (cut in Jun.)

キの乾燥速度を示したものである。

これはFig. 3 9およびFig. 4 0より、樹冠長3 m、6 mを混みにするとともに、微気象による乾燥速度の変動を除いて指数曲線を求め、これより標準的な乾燥速度を算出したものである。

スギは初期含水率が200%と高いが、含水率100%までの乾燥速度は非常に大きく、それ以後は急激に乾燥速度が低下する。

ヒノキの場合は、スギに比較して初期含水率は低い乾燥速度も小さく、含水率の減少にともなって直線的に乾燥速度が低下している。ヒノキの立木時における気孔からの蒸散速度41.7%/日と比較して、葉枯らしによる乾燥速度は1/55~1/119と非常に小さくなる。

クチクラ蒸散による蒸散速度の低下、あるいは樹幹内の水分移動速度の低下により、葉枯らしの乾燥速度がこのような低下するのは当然であろう。

これらのことからみて、葉枯らしの乾燥期間は3~4ヶ月程度が妥当であり、スギを6月に伐倒して3ヶ月の葉枯らしを実施すれば含水率約80%まで、また、ヒノキを6月に伐倒すれば3ヶ月で約90%、9月に伐倒すれば4ヶ月で約100%まで含水率を低下することができる。

なお、伐倒方向による蒸散速度は、本試験のように間伐方式で実施した場合はその差を認めることはできなかったが、皆伐方式の場合に谷側に伐倒すると、枝葉が重なり下になった葉からの蒸散が抑制されると報告されている例もある⁹⁵⁾。

次に、葉枯らしによる樹幹内含水率の経時変化をFig. 4 5に示す。スギの地上高0.5 mと3 mおよび6 mの位置における含水率を辺材、心材別に経時的に測定したもので、供試木No.B-3,4,5を平均して示したものである。

この供試木は黒心の多湿心材であるため、心材の含水率が辺材の含水率より高くなっている。また、辺材の含水率は樹高方向の差がすくなくないのに対して、心材の含水率は樹高が高くなるほど低くなっている。

葉枯らしによる樹幹内の含水率減少は、辺材の場合樹高方向の乾燥速度にはほとんど差がなくほぼ一様に含水率が減少しているのに対して、心材の含水率はほとんど減少せず、地上高6 mの位置の含水率が若干減少している程度である。

また、Fig. 4 6は、葉枯らし試験終了時(190日間)の樹高方向の含水率分布を示したものである(供試木は、スギNo.B-10~14およびD-3,4、ヒノキNo.12~16およびD-2,3の平均値)。

スギ、ヒノキとも対照木では元口の含水率が低くなっているが、これは木口からの乾燥によるものであり、樹幹中央部の含水率は非常に高くなっている。また、樹高

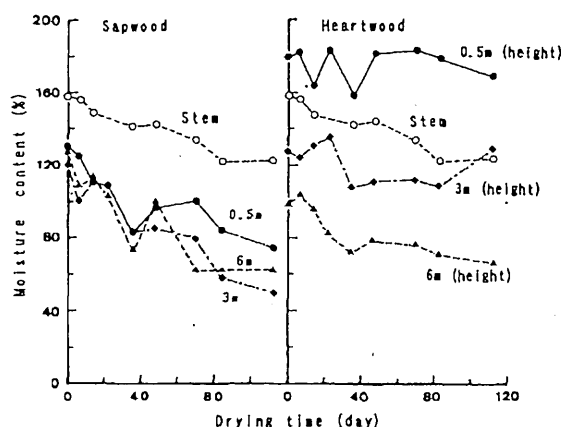


Fig. 45 Behavior of moisture content in SUGI (from 1977, 3 Aug. to 1978, 28 Feb.).

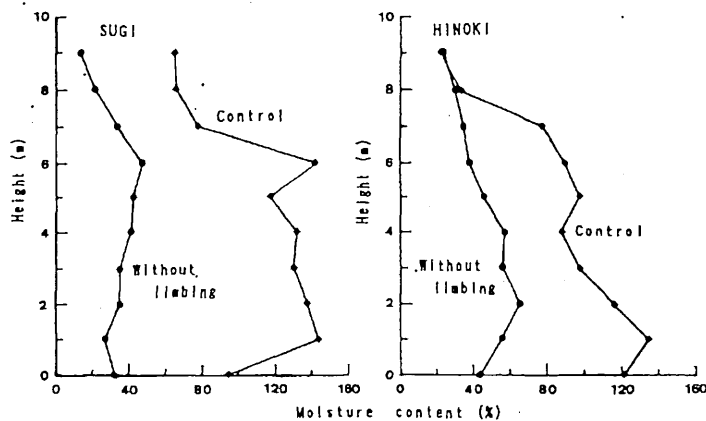


Fig. 46 Distribution of moisture content at the end of test period (1980)

が高くなるほど含水率が低くなっているのは、枝打ち跡の木口から乾燥するためと思われる。

これに対して、葉枯らし材では樹高方向の含水率の差が少なく、梢頭部の含水率が若干低くなっている程度である。

いずれにしても、これは約190日間葉枯らしを実施した後の含水率分布であり、この結果から樹幹内含水率の変動経過を推定することはできないが、Fig. 4 5 の経過と合わせて考察すれば、葉枯らしにより辺材の水分は樹高方向の移動が比較的良好であり、大きなむらもなく含水率が減少するが、心材の水分はほとんど変化しない。

そのため、葉枯らし材の含水率は、樹幹の径が大きく、心材率の多い樹高の低い部分ほど、高い値を示すものと思われる。

B. 丸太材の乾燥速度

Ⅲ章において、針葉樹材の立木の季節別含水率変動あるいは樹幹内含水率の変動について述べたが、こうした樹幹内の含水率分布が挽き材後の製品の乾燥におよぼす影響は非常に大きい。

最近の建築用針葉樹材の生産行程は、索道など集運材技術の向上および林道網の整備により能率化が進み、伐採から挽き材までの期間が大幅に短縮されている。

しかし、山土場での桎積（はいずみ）、市場土場での桎積あるいは工場土場での桎積など、丸太の状態での放置期間は相当長く、この期間の長さが製材品の含水率に大きく影響する。

しかるに、こうした丸太材の含水率の変動については従来ほとんど検討されたことがなく、その報告をみることができない。そのため、山土場および工場土場での丸太の状態における含水率の変化を、単に放置中の含水率の変動としてではなく、積極的な丸太材の乾燥としてとらえるため、樹皮付き丸太（以下、皮付き丸太とする）、および樹皮を除去したいわゆる剥皮丸太の乾燥速度を検討した。

a. 実験方法

1) 実験場所と実験期間

山土場としての実験場所は、前記の葉枯らしを実施した岐阜県林業センターの実験林内であり、実験期間は1977年8月から1978年2月である。

また、工場土場での実験は、おなじく岐阜県林業センターの加工工場内であり、実験期間は1973年6月から1974年5月である。

2) 供試木と処理方法

山土場における実験の供試木は、岐阜県林業センター実験林より胸高直径15～16cmの19年生スギ2本を伐倒し、それぞれ長さ2mの供試丸太を3～4本採取した。

1番玉と3番玉は樹皮をそのまま、2番玉と4番玉は樹皮を全て除去して、林内の地面に直接一列に設置した。

また工場土場における実験の供試木は、郡上郡八幡町の民有林より、胸高直径約20cm、樹高約15m、30年生のスギ8本を選び、1973年6月、8月、11月および1974年1月にそれぞれ2本ずつを伐倒した。伐倒した供試木は長さ1mに玉切りして、1番玉、2番玉と交互に樹皮付き丸太と剥皮丸太に区分した。

この供試丸太は、長さ1mと一般的な丸太より短くしたため、木口からの乾燥の影響がなるべくなくなるように、両木口を銀ニス（アルミニウム粉末、シンナおよび速乾ニスを2：2：10の重量比で混合したもの）によりエンドコーティングをし、加工工場のコンクリート土間上10cmのところの一列に桎積した。

3) 測定方法

各供試木の含水率減少経過は、原則として週一回重量を測定し、試験終了後両木口より10cmおよび中央部の3箇所から厚さ3cmの円板を採取し、全乾法により含水率を求め、これより各測定時の含水率を算出した。

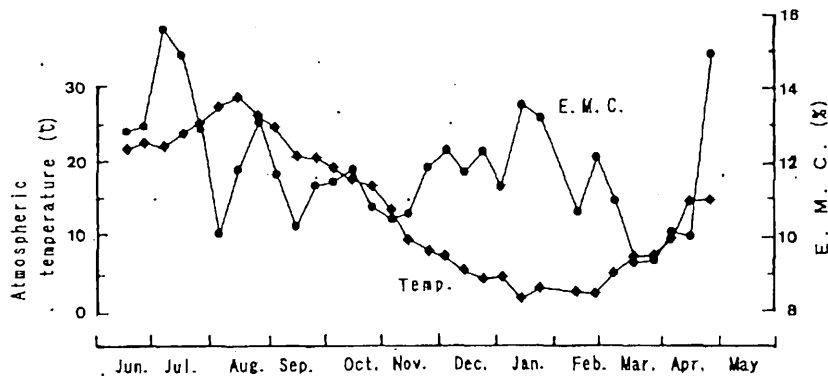


Fig. 47 Climate condition in the factory where green logs were piled
(from 1974 to 1975)

4) 試験期間中の気象条件

山土場における試験期間中の気象条件は前項のFig. 3 7に示すとおりである。また、工場土場の気象条件は、一週間巻きの自記温湿度計を用いて測定したが、その結果はFig. 4 7に示すとおりである。

b. 実験結果と考察

1.) 林内における丸太材の乾燥速度

山土場としての林内における丸太材の乾燥経過をFig. 4 8に示す。天然乾燥としては比較的条件の良い8月に伐倒、玉切りしたものであるが、樹皮付き丸太はほとんど含水率が変化せず、160日経過後も初期含水率と同様である。

これに対して、樹皮をすべて除去した剥皮丸太の場合はほぼ直線的に含水率が減少し、初期含水率180%のものが160日後には60%まで低下している。

樹皮付き丸太の場合、当然のことながら樹皮が材からの水分蒸発を抑制している訳であり、また、樹皮表面のクチクラ層からの蒸散は小さく、しかも雨水や露などにより樹皮が濡れるとともに地面からの湿気により乾燥が抑制されるものと思われる。

しかし、樹皮を除くことにより表面蒸発が活発化し、剥皮丸太の含水率は大きく減少する。この場合、図では表示していないが1番玉より2番玉の方が乾燥速度は大きく、丸太の太さが乾燥速度に影響することを示している。

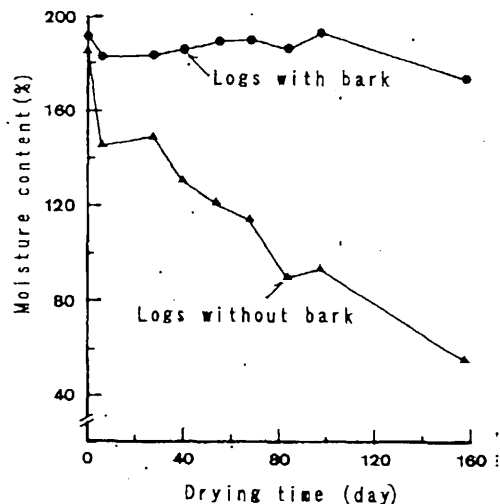


Fig. 48 Behavior of moisture content in green logs
on forest (SUGI 14 ~ 16 cm in diameter
at top, from 1977 Aug. to 1978 Feb.)

2) 工場土場における丸太材の乾燥速度

a) 皮付き丸太の乾燥速度

工場土場における皮付き丸太の伐期別乾燥経過として、末口径14~15cmの丸太材の乾燥経過をFig. 4 9に、末口径19~20cmの丸太材の乾燥経過をFig. 5 0に示す。

末口径14~15cmの丸太材は、Ⅲ章で述べたように伐期により初期含水率が異なり、6月に伐倒した場合が最も含水率が低く、11月および1月に伐倒した場合の含水率は非常に高くなっている。

季節別の乾燥速度は、6月に乾燥を開始した場合、乾燥初期が梅雨期であるため若干乾燥速度は小さいが、7月下旬からは気温の上昇とともに乾燥速度が大きくなる。8月に乾燥を始めた場合は、全期間を通じて良好な乾燥経過を示すが、乾燥末期が冬季になるため、含水率の減少にともなって乾燥速度が低下する。

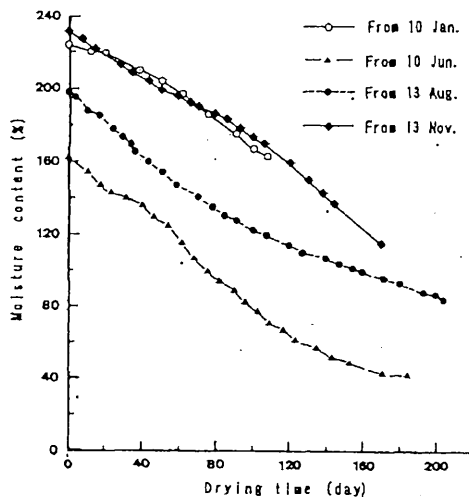


Fig. 49 Behavior of moisture content in logs with bark
(SUGI 14.1 ~ 14.8 cm in diameter at top)

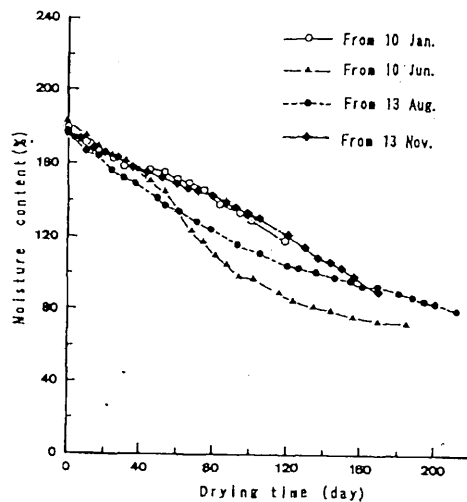


Fig. 50 Behavior of moisture content in logs with bark
(SUGI 18.8 ~ 19.7 cm in diameter at top)

11月、1月に乾燥した場合は、冬季間である乾燥初期の速度は小さいが、3月頃より最も大きい乾燥速度を示すことになる。

末口径19~20cmの丸太材の初期含水率は、立木時の含水率の変動が少ない心材率が大きいため伐期による差がほとんどない。

そのため、季節別の乾燥速度の差が明確に判るが、傾向としては末口径14~15cmの材と同様である。しかし、末口径が大きいため、全体として乾燥速度は末口径14~15cmの丸太材より小さくなっている。

このように、皮付き丸太をそのまま乾燥した場合、その乾燥速度は気象条件に影響されるため、季節による乾燥速度の差を明確に把握することは困難である。

しかし、3、4、5月を春、6、7、8月を夏、9、10、11月を秋、12、1、2月を冬として、季節別の含水率と乾燥速度の関係をFig. 51のようにみるとおおよそ次のようになる。

春、夏の場合、含水率が低くなるほど乾燥速度が大きくなっているが、これは測定数が少ない上に4月あるいは8月の乾燥速度が大きいためである。これに対して、秋および冬は含水率が低下するほど乾燥速度も小さくなる。

なお、季節別の乾燥速度は、夏、春、秋、冬の順に小さくなり、丸太の径が大きくなるほど乾燥速度が小さくなる。

次に、皮付き丸太の末口径別の乾燥経過をFig. 52に示す。6月19日に伐倒してすぐに乾燥を開始したものであるが、乾燥期間中の気象条件をみると、7月上、中旬の湿度が高く気候値平衡含水率も高くなっているが、8月上、中旬は気温も高く気候値平衡含水率も低くなっている。また、気候値平衡含水率は8月下旬に一時的に高くなるがその後11月まではあまり大きな変化はない。

皮付き丸太の乾燥経過をみると、この気象との関係が明確に現れ乾燥初期には良好な乾燥を示すが、

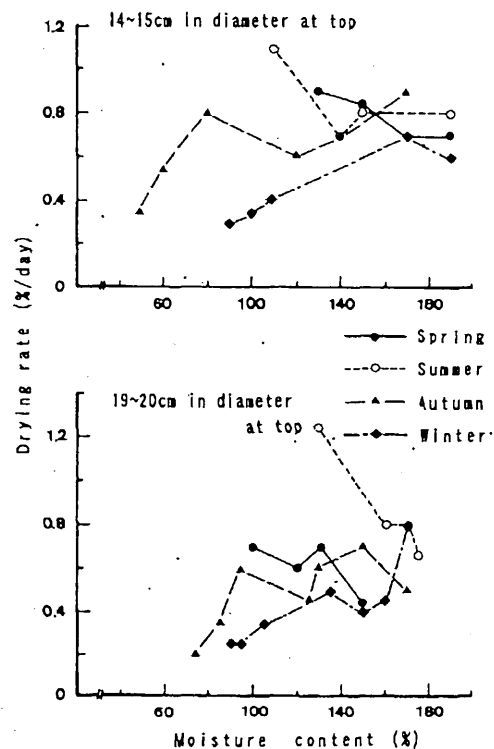


Fig. 51 Drying rate of logs with bark

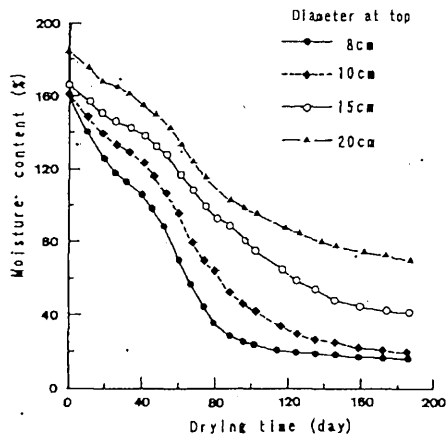


Fig. 52 Behavior of moisture content in logs with bark (SUGI from 10 Jun. to 11 Dec.)

7月に入って急激に乾燥速度が低下する。

Fig. 53は皮付き丸太の末口径別乾燥速度を示したものであるが、径の小さい丸太ほど気候の影響を受けやすく、含水率120%前後（7月上、下旬）の乾燥速度が小さくなっている。しかし、乾

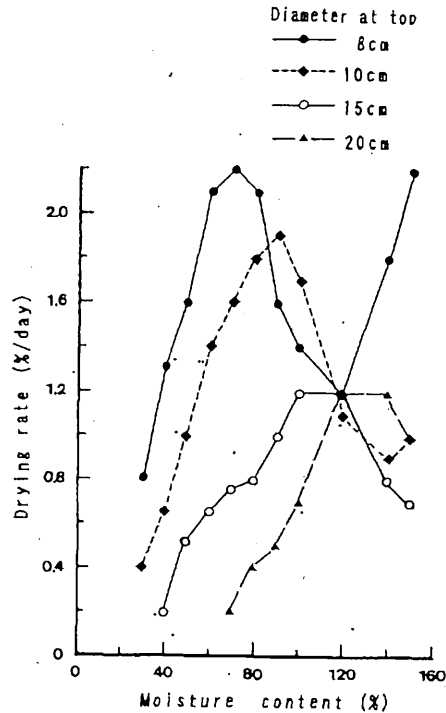


Fig. 53 Drying rate of SUGI logs with bark

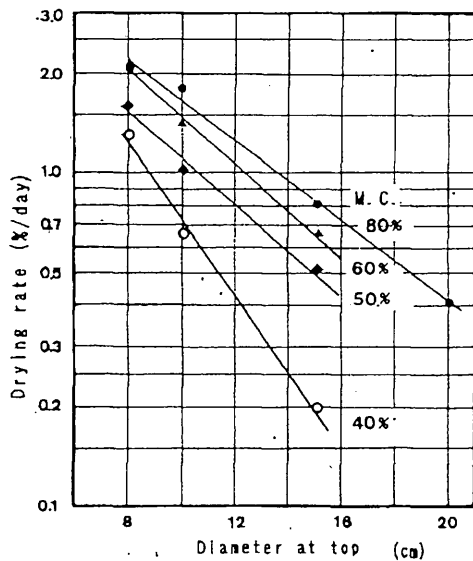


Fig. 54 Relation between diameter at top and drying rate of SUGI logs with bark

径が大きくなるほど含水率が低下したときの乾燥速度が小さくなることを示している。

b) 剥皮丸太の乾燥速度

次いで、工場土場における剥皮丸太の乾燥として末口径15~16cmの材の乾燥経過をFig. 55に、また末口径18~19cmの材の乾燥経過をFig. 56に示す。

皮付き丸太に比較して両径級材とも良好な乾燥を示すが、1月に乾燥を開始した場合は初期含水率が高いことと、乾燥初期が冬季で気温も低いいため特異な経過を示し、6月に乾燥を開始した場合は梅雨により乾燥中期の乾燥が悪くなっている。

乾燥末期になると丸太の径による乾燥速度の差が明確に表れている。

Fig. 54は、含水率80%以下における末口径と乾燥速度の関係を示すものであるが、末口径が大きくなるにしたがって乾燥速度が小さくなることは明らかであり、両者の関係は乾燥速度を対数でとったとき、

$$\log V_{m1} = a_1 - b_1 \cdot D_1$$

ここで V_{m1} = 皮付き丸太の乾燥速度

D_1 = 皮付き丸太の末口径

の直線で表される。直線の係数 a_1 、 b_1 を含水率別に整理するとTable 14 になる。含水率が低くなるほど直線の係数 b_1 の値が大きくなり、末口

Table 14 Values (a_1, b_1) in relation between diameter at top of the end (D) and drying rate (V_{m1}); $\log V_{m1} = a_1 - b_1 \cdot D$

M.C.	a_1	b_1
80 %	0.84	0.062
60 %	0.88	0.072
50 %	0.74	0.070
40 %	0.99	0.114

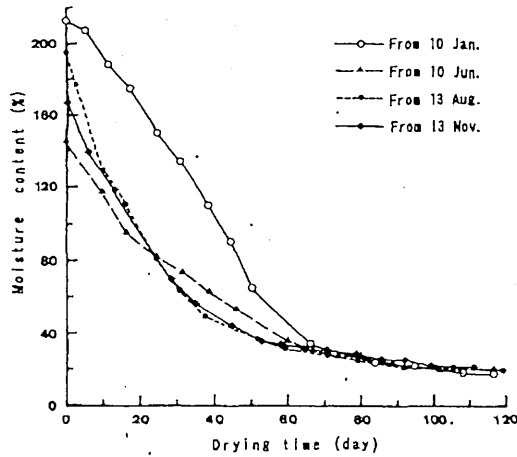


Fig. 55 Behavior of moisture content in logs without bark 15~16 cm in diameter at top (SUGI)

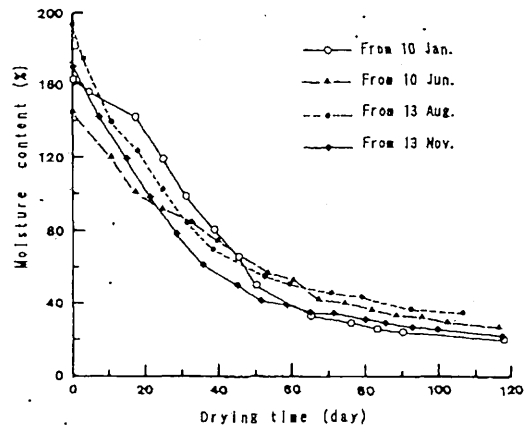


Fig. 56 Behavior of moisture content in logs without bark 18~19 cm in diameter at top (SUGI)

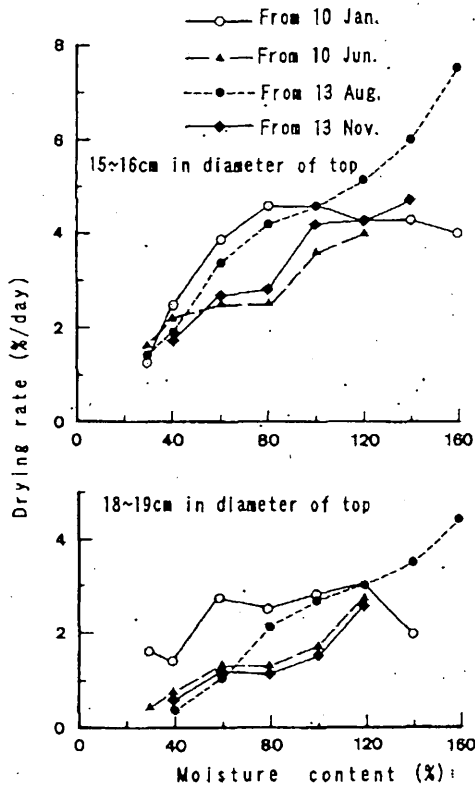


Fig. 57 Drying rate of SUGI logs without bark

しかし、末口径15~16cmの丸太材では、乾燥する季節に関係なく約70日で含水率30%に達している。また、末口径18~19cmの丸太材では乾燥末期の平衡状態に近づく含水率が8月、6月、11月および1月の順に低くなるが、これは冬季間の低温と気候値平衡含水率が比較的高いことに影響されている。

Fig. 57 は、剥皮丸太の伐期別の乾燥速度であるが、6月および11月に乾燥を始めた場合は、全期間を通じて両者ともほとんど同じような乾燥速度を示し、含水率の減少に伴って乾燥速度は低下する。しかし、1月に開始した場合には乾燥開

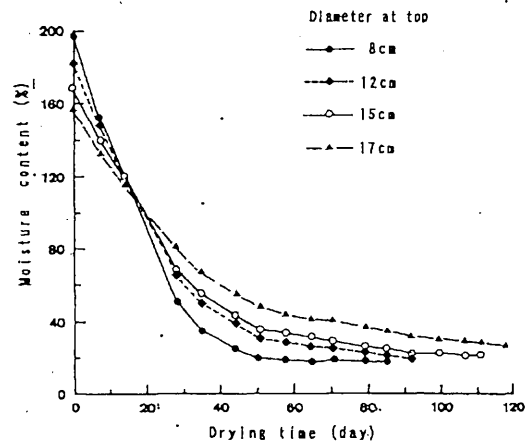


Fig. 58 Behavior of moisture content in logs without bark (SUGI from 13 Nov. to 15 Mar.)

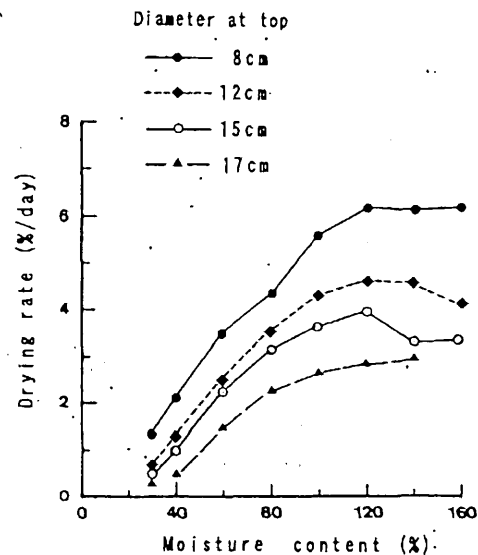


Fig. 59 Drying rate of SUGI logs without bark

始時から含水率60%程度まではほとんど同じような速度で乾燥しており、その後乾燥速度は低下する。

また、末口径15~16cmの丸太材の乾燥速度は、末口径18~19cmの丸太材の乾燥速度に比較しておおよそ2倍程度の速度となる。

続いて、剥皮丸太の末口径別の乾燥経過をFig. 5 8に、その乾燥速度をFig. 5 9に示すが、これは11月に乾燥を開始したものである。

初期含水率は、末口径が小さいほど高くなっているが、乾燥速度は末口径が大きいほど小さくなる。また、乾燥末期の平衡状態に近づく含水率も末口径の小さいものほど低い値を示している。

Fig. 6 0は、剥皮丸太における含水率120%以下の末口径と乾燥速度の関係を示したものであるが、皮付き丸太と同様に末口径が大きくなる程乾燥速度が小さくなり、乾燥速度を対数にとると両者の関係は

$$\log Vm_2 = a_2 - b_2 \cdot D_2$$

ここで Vm_2 = 剥皮丸太の乾燥速度

D_2 = 剥皮丸太の末口径

の直線式であらわされる。このときの直線の係数 a_2 、 b_2 はTable 1 5になる。

Table 15 Values (a_1, b_1) in relation between diameter at top of the end (D) and drying rate (Vm_2); $\log Vm_2 = a_1 - b_2 \cdot D$

M.C.	a_2	b_2
120 %	1.00	0.027
100 %	0.96	0.026
80 %	0.83	0.023
60 %	0.78	0.030
40 %	0.74	0.051
30 %	0.51	0.053

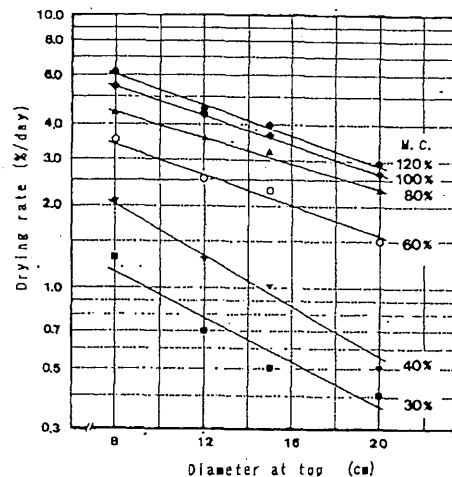


Fig. 60 Relation between diameter at top and drying rate of Sugi logs without bark

係数 b_2 は含水率の低下にしたがって大きくなり、末口径が大きくなるほど含水率が低下したときの乾燥速度が小さくなる。

ここで、皮付き丸太と剥皮丸太の末口径と乾燥速度の関係を比較してみると、係数 a_1 と a_2 には大きな差が認められないが、係数 b_1 と b_2 では b_1 の方が大きく、剥皮丸太より皮付き丸太の方が末口径の増加による乾燥速度の低下が大きいことを示している。

このように、皮付き丸太の場合は末口径が大きくなるほど乾燥速度の低下が著しいが、これは樹皮の厚さが影響するものと考えられる。

スギの場合、一般的に径が大きくなるほど樹皮が厚くなるため、末口径が大きいほど乾燥が抑制されるものであろう。

重松⁶⁰⁾によれば、樹令26年生、胸高直径約12cmのスギの樹皮は地上高が増加するにつれて次第に減少し、地際部で約3.5mmの厚さを有する樹皮も、地上高11mでは1.2mm程度の厚さとなる。しかし、内樹皮の厚さは地上高8m付近までは変化がなく、それ以上になると急激に薄くなると報告している。

地上高の増加によって直径は小さくなる訳であり、末口径が小さくなれば樹皮の厚さは当然薄くなることになる。

ただ、水分蒸発を抑制する効果は内樹皮の方が大きい筈であるため、地上高の高い、末口径の小さい部位ほど樹皮による乾燥抑制効果が少なくなり、乾燥速度がより大きくなることになる。

次に、剥皮丸太の場合も末口径に逆比例して乾燥速度が低下するが、その低下率は一般の板材に比較して相当大きくなっている。

板の厚さと乾燥時間の関係⁶¹⁾と同じように末口径と乾燥時間の関係を次式によりあらわしてみた。

$$t_2 / t_1 = (d_2 / d_1)^n$$

ここで、 t_1 = 末口径 d_1 の丸太の乾燥時間

t_2 = 末口径 d_2 の丸太の乾燥時間

Table 16 Drying time of logs without bark
(from M.C. 100% to M.C. 40 %)

Diameter at top of the end (cm)	8	12	15	17
Percentage of heartwood (%)	0	29	20	29
Drying time (day)	14	26	29	60

Table 17 Index n of logs without bark

Diameter at top of the end (cm)	12	15	17
8	1.53	1.16	1.93
12	—	0.49	2.40
15	—	—	5.81

いま、Fig. 5 8 の剥皮丸太材の末口径別乾燥経過より含水率がほぼ等しくなる100%を基にして、含水率40%までの乾燥時間をTable 1 6 のように求め、指数nの値を計算してみるとTable 1 7 となる。

針葉樹板材のnの値は、一般的に1.3~1.6の範囲であるといわれているのに対して、剥皮丸太の場合はこれより大きい値を示し、末口径と乾燥速度の関係は、板材の厚さと乾燥速度の関係よりその低下率が大きくなることを示している。

末口径15cmの丸太材と他の径級の丸太材とのnが特異な値を示すが、これは15cm材の心材率が12cm、17cm材より小さく末口径の割に乾燥時間が短いためであり、丸太材の場合は末口径の大きさと同時に心材の占める割合が乾燥速度におよぼす影響の大きいことを示しているものと考えられる。

3) 丸太材の含水率減少機構

Fig. 6 1 およびFig. 6 2 に、丸太材の乾燥による含水率分布の変化を示した。

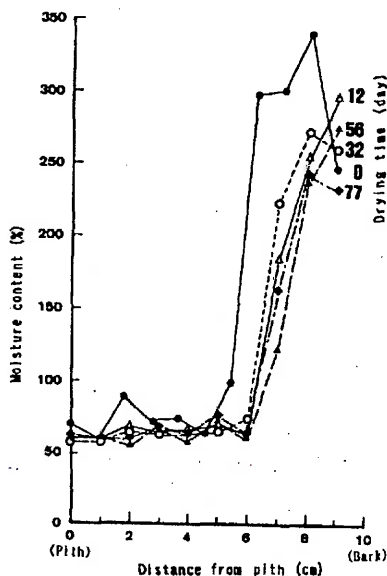


Fig. 61 Behavior of moisture content in SUGI logs with bark
(drying from 10 Jan., 20 cm in diameter at top)

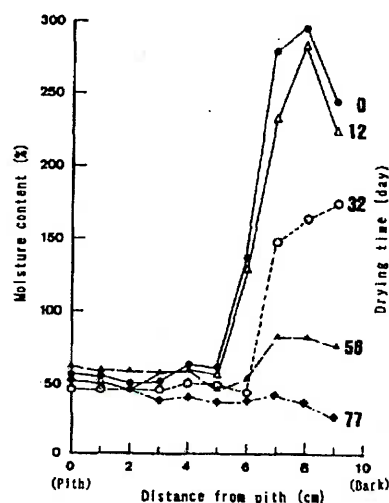


Fig. 62 Behavior of moisture content in SUGI logs without bark
(drying from 10 Jan., 20 cm in diameter at top)

これは、乾燥経過を測定する供試木とは別に、末口径約20cmの皮付き丸太および剥皮丸太を一本ずつ1月10日から乾燥し、2週間ごとに木口より20cmのところから厚さ2cmの円板を採取し、樹心より1cmごとに全乾法による含水率を測定したものである。このとき、供試丸太の新しい木口はその都度銀ニスによりエンドコーティングをして木口からの乾燥を抑制した。

Fig. 6 1の皮付き丸太では乾燥時間の経過にしたがって辺材中央部の含水率は減少するが、表層部の含水率はあまり減少せず、樹皮により乾燥が抑制されることをよく示している。

これに対して、剥皮丸太では辺材部の含水率の減少が非常に大きく、剥皮の効果が顕著にあらわれている。しかし、心材部の含水率はほとんど変化せず、辺材部の水分が心材部より低くなった時点から移動を開始する。

このように丸太材の場合は、乾燥中期までは辺材部の水分のみが乾燥し、乾燥末期になって心材部の水が乾燥を始めるため、これが乾燥末期の乾燥速度を著しく低下させる原因となっていることが判る。

C. 製材品の乾燥速度

針葉樹材の天然乾燥として、伐倒木の林内における葉枯らし、および丸太材の林内あるいは工場土場における乾燥について述べてきたが、これらはいずれも製材品の乾燥を前提としたいいわゆる前処理としての乾燥であり、本来の乾燥としては製材品が対象となるべきである。

しかも、建築用針葉樹材の乾燥材としての含水率はできるだけ平衡含水率に近付けることが理想であり、日本農林規格でも、針葉樹の構造用製材（乾燥材）として、25%以下（D25）、20%以下（D20）、15%以下（D15）の表示が規定されている。このため、天然乾燥のみでは乾燥時間あるいは仕上げ含水率の点からみて種々問題があり、やはり人工乾燥が必要となる。

建築用針葉樹材の人工乾燥として現在最も一般化している方法は除湿乾燥であるが、この除湿乾燥の場合でも生材から直接人工乾燥を実施すると乾燥経費が増加するため、予備乾燥として天然乾燥を実施する場合が多い。

しかるに、建築用針葉樹材の天然乾燥に関する研究報告は非常に少なく、東濃松の二度挽きを前提とした天然乾燥で、内部応力を主に検討した報告¹³⁾、カラマツ材の乾燥試験の一部として天然乾燥を実施した報告¹⁴⁾、あるいはスギ、ヒノキの除湿乾燥の比較として天然乾燥を実施した報告¹⁵⁾がみられる程度である。そのため、ここではスギ、ヒノキ、およびアカマツの柱材などについて、天然乾燥速度を検討している。

a. 実験方法

1) 供試木

供試木は岐阜県産のスギ（*Cryptomeria japonica* D.Don, 気乾比重0.41~0.45）、ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endl., 気乾比重0.54~0.55）およびアカマツ（*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc., 気乾比重0.49~0.53）の末口径16~20cmの丸太材を購入し、次の4材種に挽き材した。

正角 10.5cm × 10.5cm （心持ち）

平角 15.0cm × 10.5cm （心持ち）

平割 10.5cm × 4.5cm （心去り）

正割 4.5cm × 4.5cm （心去り）

2) 乾燥方法

それぞれの大きさに挽き材した供試木は、全て上記の寸法に鉋削の上、長さを1mに切断して、両木口を銀ニスによりエンドコーティングして試験材とした。

乾燥場所は、岐阜県林業センター（美濃市）の屋外土場と加工工場の屋内である。屋外には地上高30cmの高さから5~6段の棚を設け、その棚に試験材を設置し、上部には屋根を設置した。また、屋内には地上高50~100cmの棚を設けてこの上に試験材を設置した。なお、試験材の横間隔は10cmとした。

3) 実験期間と測定方法

スギ材の乾燥は、1973年から1974年にわたって8回、ヒノキおよびアカマツ材の乾燥は1973年に3回実施した。

一回の試験には1材種2～5本の試験材を用い、含水率の減少経過は週一回試験材の重量を測定し、試験の終了後全乾法により各測定時の含水率を算出した。

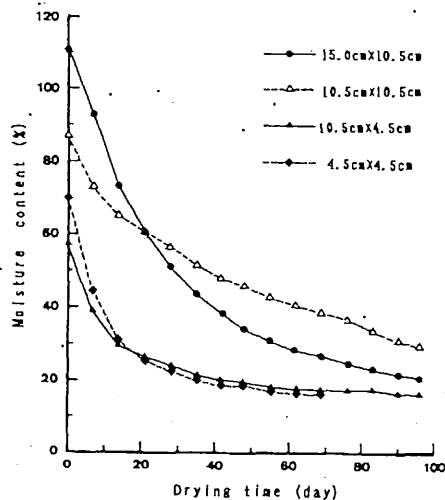


Fig. 63 Behavior of moisture content in SUGI (drying from 1973, 18 Jan.)

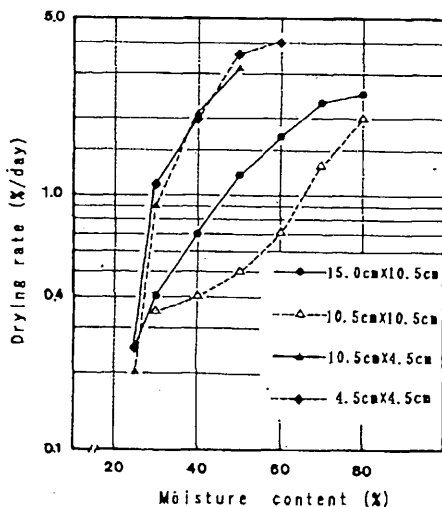


Fig. 64 Drying rate of SUGI

2) 樹種別の乾燥速度

スギ、ヒノキおよびアカマツの10.5cm正角材の乾燥経過をFig. 6 5に示す。スギの材種別と同じく1月に屋内で乾燥を開始したものである。また、そのときの乾燥速度をFig. 6 6に示す。

スギの正角材は、前述のように初期含水率が高いため、乾燥初期の乾燥速度は大きくても、含水率60%以下の乾燥速度が低下するため、乾燥時間は長くなり、含水率30%まで達するのに約90日を要している。

これに対して、ヒノキ、アカマツは初期含水率が低く、しかも含水率40%までの乾燥速度が大きいので、約20日間で含水率30%に達している。また、アカマツは含水率30%以下でも若干含水率は減少

b. 実験結果と考察

1) スギの材種別乾燥速度

Fig. 6 3に、屋内において1月から乾燥を開始したスギの材種別乾燥経過を示す。

このときの気象条件として、気温は乾燥を開始した1月下旬が約2℃、試験を終了した4月下旬が約15℃で、1月から4月にかけてほぼ直線的に上昇している。また、気候値平衡含水率は変動はあるものの平均12.5%を示し、4月に入って若干低い値を示している。

材種別の乾燥経過をみると、断面積が小さく、樹心を持たない平割り材および正割り材の乾燥が非常に速く、約40日で含水率20%まで乾燥している。これに対して、断面積が大きく樹心を含む平割り材および正割り材の乾燥は非常に長時間を要している。

この材種別乾燥速度をFig. 6 4に示すが、平割り材および正割り材はほとんど同じような乾燥速度を示す。これに対して、断面積の大きい平角および正角の乾燥速度は小さく、しかも正角の乾燥速度が最も小さくなっている。

これは板の厚さが同じでも、平角の場合は辺材の占める率が大きいためであり、心材部の含水率およびその乾燥速度にはあまり差がなくても、辺材部の少ない正角に比較して初期含水率も高くなり、辺、心材を含めた全体の乾燥速度は大きくなる。また、乾燥終了後の含水率も辺材の含水率が低くなるだけ平均含水率が低くなる。

このように、建築用針葉樹材では材種による板の厚さも乾燥速度におよぼす影響は大きい、それ以上に心材の影響が大きく、同じ板厚であっても心材率が大きいほど乾燥速度は小さくなる。

するが、ヒノキは30%で平衡状態に達し、試験終了時の含水率はアカマツの方がヒノキより5%程度低くなる。

一般に、比重が小さいほど乾燥速度が大きくなるが⁷⁾、スギの場合は心材の乾燥速度の影響が大きいため、比重の小さいスギの乾燥速度が最も小さくなっている。

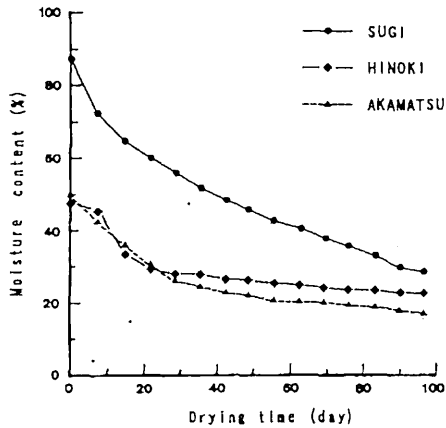


Fig. 65 Behavior of moisture content in lumber 10.5 cm square

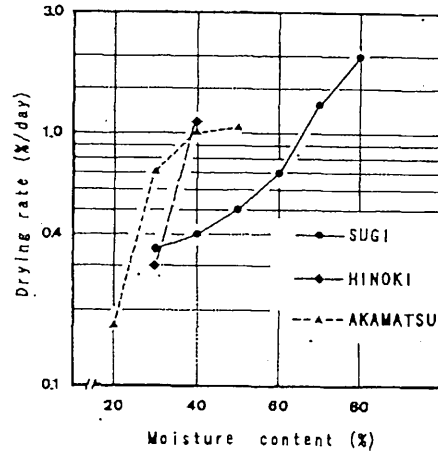


Fig. 66 Drying rate of lumber 10.5 cm square

3) スギの季節別乾燥速度

スギの10.5cm正角材を季節別に乾燥したときの乾燥経過をFig. 67に示す。まず、屋内における乾燥経過をみると、5月に乾燥を開始した場合は6月の梅雨による影響で全体に乾燥速度が小さくなるが、8月、11月に乾燥を開始した場合は乾燥速度も非常に大きくなる。

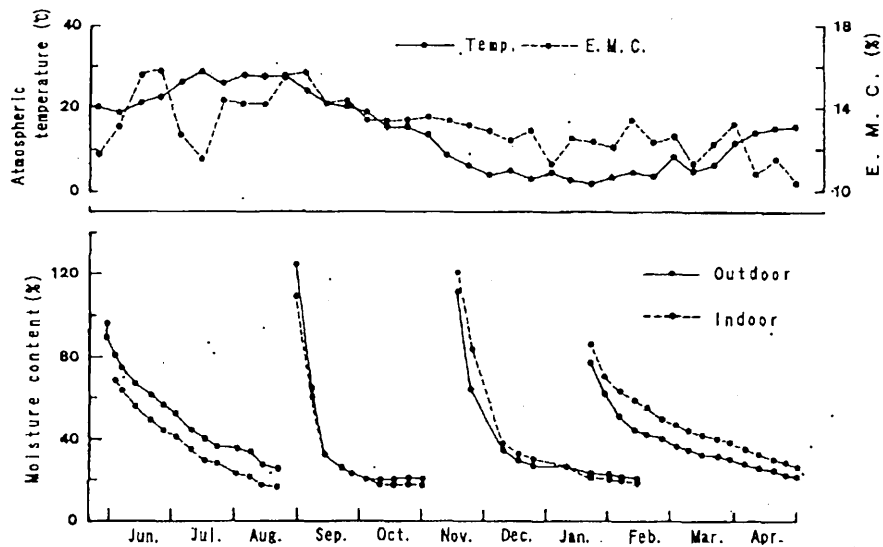


Fig. 67 Behavior of moisture content in SUGI lumber 10.5 cm square and climate condition at that time (Mino)

10.5cm正角材の乾燥経過は、末口径15~16cmの剥皮丸太材とあまり大きな差はないようであるが、1月に乾燥を開始した場合は全期間を通じて乾燥速度が低下している。

このように、製材品の場合は剥皮丸太に比較して高含水率である辺材部の占める率が少なくなり初期含水率は低くなるが、乾燥速度の小さい心材部が多くなるため、断面積が小さくなる割には乾燥速度も小さく、心材率が乾燥速度におよぼす影響の大きいことを示している。

次に、正角材の屋外における乾燥経過をみると、5月に乾燥を開始した場合は屋内より乾燥がおく

れ、梅雨の影響が屋外ほど大きいことを示している。

また、8月、11月に乾燥した場合は屋内とほとんど同様な乾燥経過を示すが、1月に開始した場合は屋内より乾燥速度が非常に大きくなる。これは、冬季間のように気温の低い場合は屋外の風により乾燥が促進されるものと思われる。

なお、スギ製材品の天然乾燥による目標含水率を30%として、その所要日数は心持ちの10.5cm正角材あるいは平角材の場合、夏季で1ヶ月、梅雨期および晩秋では2ヶ月、冬季では3ヶ月程度が必要となるようである。

しかし、心去り材の4.5cm 正割りおよび平割り材の場合は年間を通じて2週間程度で含水率30%まで乾燥するものと思われる。

D. 要 約

建築用針葉樹材の天然乾燥として、前処理としての林内における葉枯らし、あるいは工場土場における丸太材の乾燥速度、および製材品の天然乾燥速度について検討したが、その結果を要約すると次のとおりである。

葉枯らし

- (1) 伐倒木の枝葉を全て除去して林内に放置しても含水率はほとんど減少しないが、枝葉を残し、葉からの蒸散を利用した葉枯らしを実施すれば、スギでは3ヶ月で重量は40%減少し、含水率は80%程度まで乾燥する。また、ヒノキでは3ヶ月で重量が約20%減少し、含水率は90%まで乾燥する。
- (2) 枝葉の量と乾燥速度との関係は、樹冠の長さが3mおよび6mではほとんど差が認められなかった。
- (3) 葉枯らし材の伐倒方向と乾燥速度との関係として、山側あるいは谷側では乾燥速度に差が認められなかった。
- (4) 葉枯らしにより、辺材の含水率は樹高方向に関係なく一様に減少するが、心材の含水率はほとんど変化せず、地上高6mの位置の心材含水率が若干減少する程度である。そのため、葉枯らし材の含水率は、樹幹の径が大きく、心材率の大きい地上高の低い部分ほど高い含水率を示す。

丸太材の乾燥速度

- (1) 林内土場に丸太材を桎積した場合、皮付きの丸太材はほとんど含水率が変化しないが、剥皮した丸太材の含水率はほぼ直線的に減少し、160日で60%まで減少する。
- (2) 皮付き丸太材を工場土場に桎積した場合、その乾燥速度は気象条件に影響されるため、季節による差は明確ではないが、おおまかにいって夏、春、秋、冬の順に小さくなる。
- (3) 工場土場における皮付き丸太材の末口径 (D_1) の大きさと乾燥速度 (V_{m_1}) の関係は、乾燥速度を対数でとったとき、

$$\log V_{m_1} = a_1 - b_1 \cdot D_1$$

の直線であらわされ、含水率が低くなるほど末口径の大きさが乾燥速度におよぼす影響は強くなる。

- (4) 工場土場で丸太材を桎積したとき、皮付き丸太に比較して剥皮丸太の乾燥速度は非常に大きく、また、仕上がり含水率も低くなる。季節別の乾燥速度は皮付き丸太と同じく、夏、春、秋、冬の順に小さくなる。

- (5) 工場土場における剥皮丸太の末口径と乾燥速度の関係は、乾燥速度を対数でとると

$$\log V_{m_2} = a_2 - b_2 \cdot D_2$$

の直線であらわされるが、末口径が大きくなることによる乾燥速度の低下は皮付き丸太ほど大きくない。

- (6) 剥皮丸太の末口径と乾燥速度の関係は、

$$t_2 / t_1 = (d_2 / d_1)^n$$

であらわされるが、指数 n の値は末口径が大きくなるほど一般の板材より大きくなる。また、丸太材の乾燥速度は末口径の大きさと同時に心材率の大きさが強く影響する。

- (7) 丸太材の乾燥は、辺材部の含水率が高いために一般の板材とは逆に、中心部が低く外側部の含水率が高い形で進行し、辺材部の含水率が心材部の含水率より低くなると心材部の含水率が減少するようになる。

製材品の乾燥速度

- (1) スギの正角、正割り材など材種別の乾燥速度は断面積が小さくなるほど大きくなるが、同じ厚さの場合は心材率が小さいほど乾燥速度が大きくなるため、心持ち材では断面積が大きい平角の方が心材率が小さく、乾燥速度は大きくなる。
- (2) スギ、ヒノキおよびアカマツの10.5cm正角材を1月から乾燥したとき、含水率30%に達する乾燥日数は、スギで約90日、ヒノキ、アカマツでは20日間となる。これは、スギは初期含水率が高いことと、心材部の乾燥速度が小さいためであり、含水率40%のときの乾燥速度はヒノキ、アカマツの約1/2となる。
- (3) スギ10.5cm正角材の季節別乾燥速度は、末口径15~16cmの剥皮丸太材と同じような乾燥速度を示す。また、屋内と屋外の乾燥速度は、8月および11月から乾燥する場合は差が少なく、5月から乾燥すると屋内の方が、1月から乾燥すると屋外の方が乾燥速度が大きくなる。
- (4) スギ製材品の目標含水率を30%とすると、心持ちの10.5cm正角材および平角材は夏で1ヶ月、梅雨期および晩秋では2ヶ月、冬季では3ヶ月程度が必要であり、心去りの4.5cm正割り、平割り材は年間を通じて2週間程度である。

VI. 人為的手段による天然乾燥の促進

木材の天然乾燥は、比較的乾燥速度の大きい高含水率域の乾燥を自然の気象条件に依存することにより、乾燥経費の節減を図るとともに、低温乾燥のため落ち込みや収縮率の減少による乾燥歩止まりの向上などを目的として実施されている。

また、天然乾燥によって初期含水率を均一化することにより人工乾燥の操作を容易にするなど、天然乾燥の効果は非常に大きいものがある。

しかし、天然乾燥は、気温、風といった自然のエネルギーのみに依存しているため、いかにそれらをうまく利用しても、乾燥速度にはおのずから限界がある。

天然乾燥における乾燥時間は、IV章、およびV章において述べたように、気象条件や、乾燥する場所、あるいは乾燥する方法によって著しく変動するとともに、長期間を必要とする。

乾燥時間が種々の因子によって変動することは、計画生産をめざす木材加工業にとって致命的な欠点となるし、最近のように木材価格も高く、土地代も急騰すると、天然乾燥による長期間の資本の固定や土地の占拠は大きな問題となる。

そのため、天然乾燥に人為的な手段を加えて気象の影響を軽減するとともに、乾燥時間を短縮しようとする要求が強くなる。

しかし、天然乾燥を人工乾燥の予備操作として位置づけた場合、人為的に加える促進手段は経済的に自ずから限界があり、天然乾燥の長所であるゆるやかな乾燥条件と少ない乾燥経費を生かした上で、欠点である乾燥時間の長さを補うことが必要である。

木材の乾燥に必要な因子としては、温度、湿度および風速であり、これを木材乾燥の三要素と呼んでいる。

木材の乾燥速度は、恒率乾燥期間を別にして温度が高いほど大きくなり、通常の乾燥条件の場合、乾燥温度が20℃上昇することにより乾燥時間は約1/2に短縮される¹⁷⁾。

また、乾燥速度におよぼす湿度の影響は恒率乾燥期間において著しく、乾湿球温度差（湿度）に比例して乾燥速度も増加する。

しかし、除湿乾燥のように機械的に湿度を除去する場合は別にして、通常の木材乾燥の場合は、温度を上昇させることにより相対的に湿度を下げる方法を採用しているため、湿度の影響は温度の上昇による影響と同様に理解することができる。

また、乾燥速度におよぼす風速の影響は恒率乾燥期間において湿度について大きく、風速が大きいほど乾燥速度は大きくなる。また、含水率が低下するにしたがって風速の影響は小さくなり、乾燥末期にはほとんど風速の影響がなくなるといわれている⁹⁾。

しかし、木材乾燥における風速の影響は乾燥速度のみではなく、栈積みしたときの乾燥むらの発生も風速が大きいほど少なくなるため、風速が大きければ栈積み全体の乾燥時間は短縮されることになる。

このように、天然乾燥の促進を図るためには、乾燥温度の上昇、および風速の増加が効果的であるため、この章では、あまり設備費を必要とせず比較的安価な手段として、天然乾燥の栈積みに強制的に送風する方法、および簡易な加熱あるいは太陽熱の利用効果、およびそれらの経済効果について述べる。

A. 強制送風による天然乾燥の促進

天然乾燥における風は、乾燥むらの発生を抑制するためには非常に大きな因子である。乾燥むらが少なくなれば含水率均一化のための待ち時間が減少するため、栈積み全体の乾燥時間は一枚板の乾燥時間に近ずき、大きく短縮されることになる。

天然乾燥において、栈積みに送風する方法は人為的な天然乾燥の促進方法としては最も簡易でしかも安価な方法である。

そのため、II章で述べたように欧米では古くからいろいろな試みがなされ、それなりの効果を上げているようであるが、通常の天然乾燥との比較がされていないため効果の程度は明確ではない。そこで、ブナ材およびダフリカカラマツ材を用いて栈積みに送風したときの効果を検討した。

なお、送風したときの天然乾燥の促進効果は、実施場所によっても異なると考えられるため、高山市と美濃市の両地区において季節別にその効果を測定した。

a. 実験方法

1) 実験場所および実験期間

高山市における実験場所は、高山市山田町の旧岐阜県林業試験場（現岐阜県寒冷地林業試験場）場内の土場であり、美濃市における試験地は、美濃市曾代の岐阜県林業センター場内の土場である。

また、実験の実施期間は、高山市の場合が1967年5月から1968年12月までであり、美濃市の場合は1970年7月から1971年11月までである。

2) 供試材

供試材は、岐阜県飛騨地方産のブナ材（*Fagus crenata* Blume：全乾比重0.58）と、ソ連産のダフリカカラマツ（*Larix dahurica* Turcz.：全乾比重0.56）である。

供試材の形状は、ブナ材の場合、長さ210cm、幅7～10cmで厚さは30mmと40mmのだら挽き板とした。またカラマツ材は長さ400cm、幅10～20cmで厚さは18mmと45mmのだら挽き板とした。

3) 栈積み方法および送風機の設置方法

栈積みは厚さ25mmの栈木を用い、幅190cm（美濃市では180cm）高さ200cmの大きさとした。送風する栈積みと対照区である自然状態の栈積みとの間隔は、Fig. 6 8 に示すように250cmとした。

また、美濃市における送風実験では、一台の送風機で二つの栈積みに送風する方法も検討したが、そのときの栈積みの配置はFig. 6 9 の通りとした。

使用した送風機は、径60cmの6枚羽プロペラファンで1 HPのモータに直結してFig. 7 0 の通り設

置した。なお、美濃市において一台の送風機で二つの栈積みを送風したときの送風機は、径60cmの4枚羽のプロペラファンで首振り式のものをを用いた。

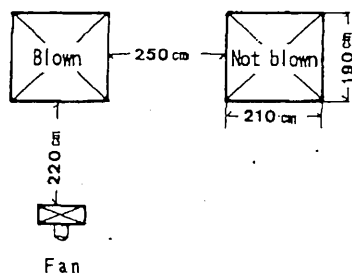


Fig. 68 Layout of piles and fan (Takayama, Mino)

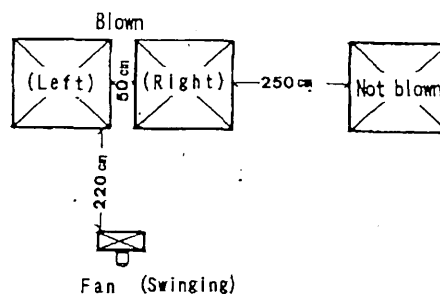


Fig. 69 Layout of piles and fan (Mino)

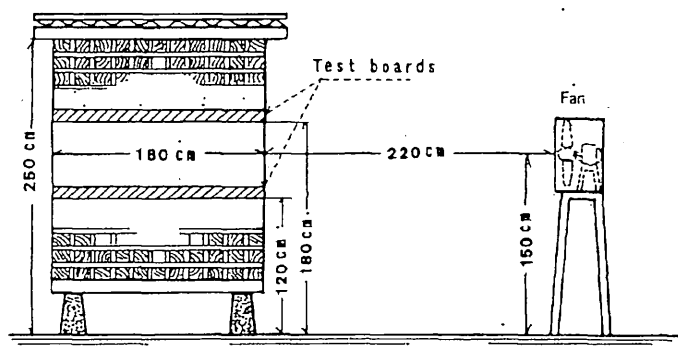


Fig. 70 Layout of fan and test boards

4) 測定方法と試験回数

含水率を測定する試験材は、幅10cm、長さ60cmとし、両木口は銀ニスによりエンドコーティングをした。

試験材は、栈積みの地上高120cmと180cmの2ヶ所を横断して、辺材、心材を交互に7～8枚、横方向の間隔を1.5cmにして設置した。(カラマツの場合は地上高150cm、心材のみ)

試験材の含水率減少経過は、原則として週1回重量を測定し、試験終了後に試験材の中央部より幅2cmにとった試験片から絶乾法で含水率をもとめ、それより各測定時の含水率を算出した。

また、実施した試験回数と試験期間はTable 18の通りである。なお、試験期間中の送風は午前9時から午後5時までとし、雨天の場合および日曜、休日は送風を中止した。

Table 18 Test times and period

Place	Species	Thickness	Date of beginning	Date of ending	Note
Takayama	BUNA	30mm	11 May 1967	10 Jul. 1967	
	BUNA	30mm	20 Jul. 1967	24 Nov. 1967	
	BUNA	30mm	4 Dec. 1967	25 Apr. 1968	
	BUNA	30mm	13 Jan. 1968	9 May 1968	
	BUNA	30mm	25 Apr. 1968	29 Aug. 1968	
	BUNA	40mm	13 Jan. 1968	9 May 1968	
Mino	BUNA	40mm	8 Jul. 1968	16 Dec. 1968	
	BUNA	30mm	14 Jul. 1970	7 Oct. 1970	
	BUNA	30mm	3 Sep. 1971	15 Nov. 1971	1 Fan : 2 Piles
	KARAMATSU	45mm	12 Aug. 1970	7 Oct. 1970	
	KARAMATSU	18mm	12 Aug. 1970	7 Oct. 1970	

風速分布の測定位置は、送風の場合は栈積みの長さ（板の長さ＝210cm）方向の両木口から70cm入った位置、2箇所の吹き出し側（風下側）について、また、自然の場合は栈積みの中央部の吹き出し側について上から下まで、それぞれ板と板の空間部で測定した。

b. 実験結果と考察

1) 送風による材間風速の変化

高山市における自然状態の栈積みと送風したときの栈積みの材間風速分布をFig. 7 1に示す。

比較的風の弱い日に測定したものであるが、自然状態の栈積みにおける材間風速は平均して50cm/sec程度であり、栈積み内の位置による風速のむらはなく、ほとんど均一な分布を示している。

それに比較して、送風している栈積みの材間風速は30cm/secから250cm/secと、栈積みの上下方向に大きな風速のむらが認められる。しかし、平均すれば1 m/sec以上の風速となり、自然状態の栈積みの材間風速と比較すると送風した場合は2倍以上の材間風速を示している。

送風機の位置が地上高150cmであり、栈積みの高さの割りに少し高すぎたため、栈積み下部の方の風速が小さくなっている。

天然乾燥の場合は、栈積み上部より栈積み下部の乾燥がおくれることから、送風機の位置をなるべく低くして、栈積み下部の風速を強くした方がより送風の効果を増すことになると考えられる。

栈積み内の材間風速は自然の風速に影響されるため、送風による材間風速が常に自然状態の材間風速の2倍以上になるとは考えられないが、試験期間中を平均すれば送風した場合の材間風速は相当大きくなるものと考えられる。

2) 強制送風による天然乾燥経過

高山市において、ブナの30mm板を7月から乾燥したときの心材の乾燥経過をFig. 7 2に示す。

30%以上の高含水率域における乾燥経過をみると、送風した場合は自然状態に比較して非常に速く乾燥している。また、含水率が25%程度になるとほとんど乾燥が進行せず平衡状態になるが、このときの含水率は自然状態に比較して送風した方が5～7%低い値を示している。

Fig. 7 3は、高山市においてブナ30mm板を5月から乾燥したときの辺材および心材の乾燥経過を示したものであるが、これは栈積みの上、下段に設置した14枚の試験材の乾燥経過を平均して示している。

5月の場合は気温も比較的高く、平衡含水率も低く、天然乾燥としては条件の最もよい時期であるため、自然のままでも速く乾燥し送風の効果はあまり目立たないが、辺材、心材ともに含水率40%程度までの乾燥は、送風した方が相当速くなっている。

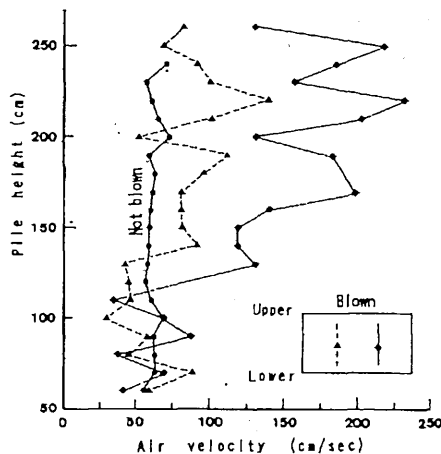


Fig. 71 Distribution of air velocity in pile

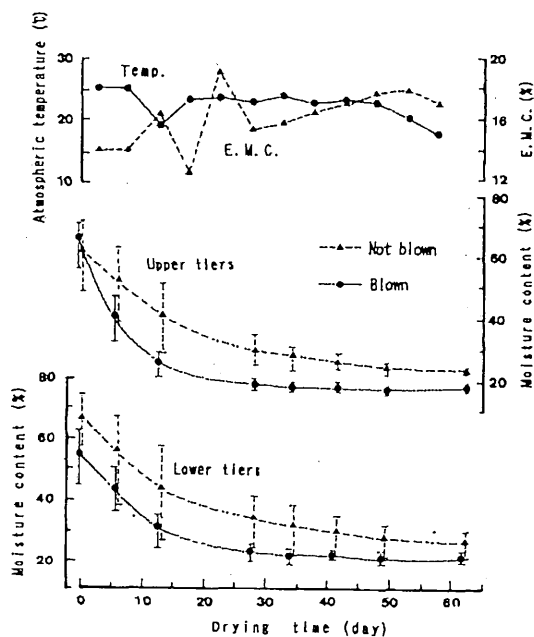


Fig. 72 Behavior of moisture content in BUNA heartwood 30 mm thick (drying from 20 Jul., Takayama)

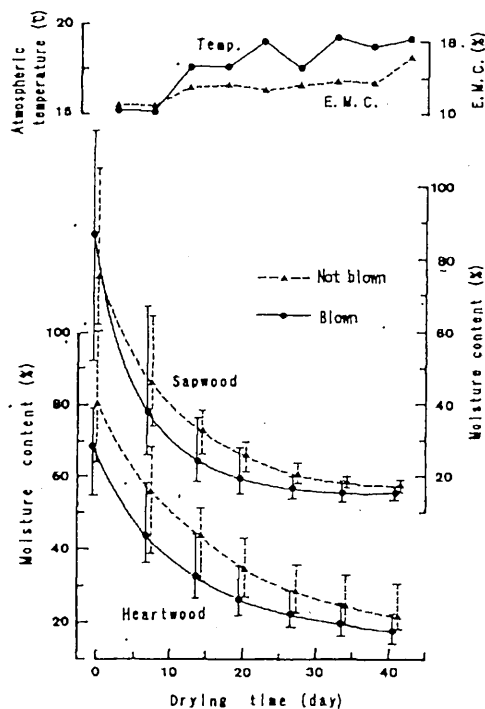


Fig. 73 Behavior of moisture content in BUNA 30 mm thick (drying from 11 May, Takayama)

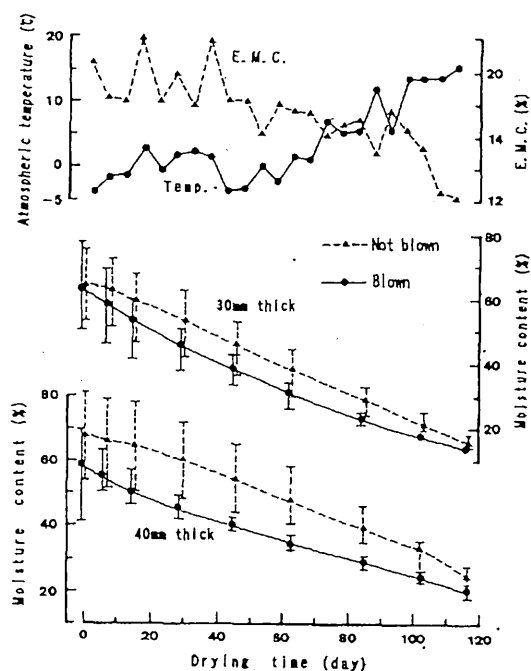


Fig. 74 Behavior of moisture content in BUNA heartwood (drying from 13 Jan., Takayama)

また、辺材と心材を比較すると、送風の効果は辺材の方が大きく、その効果も心材より低い含水率まで認められる。なお、平衡状態に達する含水率も送風した方が低くなるのは7月の場合と同様である。Fig. 7 4 は、天然乾燥の条件としては最も悪い1月に、高山市で乾燥を開始したブナ30mm板と40mm板心材の乾燥経過を示したものである。

送風の効果は、30mm板、40mm板ともに夏季に乾燥したときほど顕著ではないが、高含水率域の送風効果が低含水率まで継続されるため、乾燥終了時の含水率は自然状態に比較して送風した方が5%程度低くなっている。

次に、高山市に比較して天然乾燥の条件がよい美濃市での送風効果を検討したが、Fig. 7 5 は美濃市において7月から乾燥したブナ30mm板の辺材および心材の乾燥経過を示したものである。この図には一枚板の乾燥経過を並記しているが、これは栈積みをしな一枚板の状態と同時に乾燥したときの乾燥経過である。

辺材、心材ともに送風の効果は大きく、ことに心材の場合は一枚板の乾燥経過とほとんど同じように乾燥している。

また、乾燥末期において平衡状態となる含水率も送風した方が低く、高山市における試験結果とよく一致している。

Fig. 7 6 は、美濃市においてカラマツの18mm板および45mm板を8月に乾燥したときの乾燥経過である。

初期含水率が低くしかも乾燥速度が大きいために、ブナ材のときほど送風の効果は顕著ではないが、18mm板および45mm板ともに送風した方が自然状態より速く

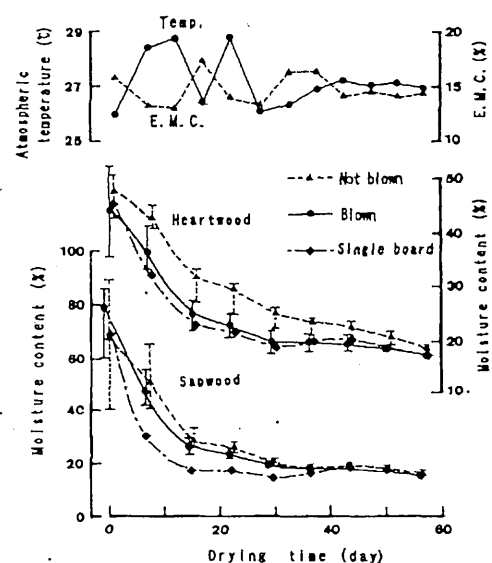


Fig. 75 Behavior of moisture content in BUNA 30 mm thick (drying from 1 Jul., upper tiers, Mino)

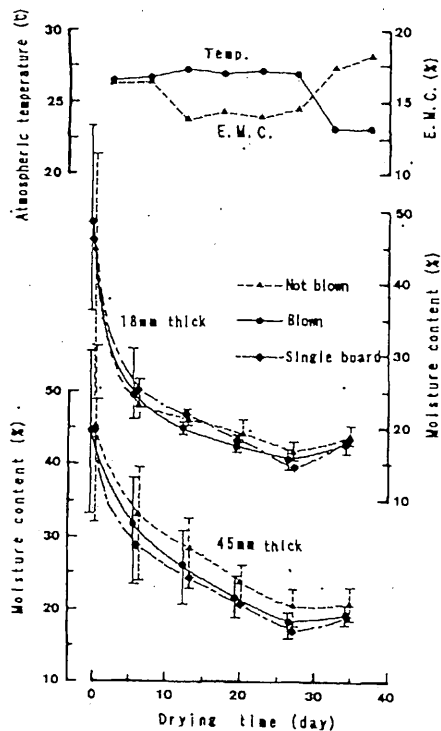


Fig. 76 Behavior of moisture content in KARAMATSU (drying from 12 Aug, Mino)

乾燥している。

とくに18mm板では、一枚板より送風した栈積み材の方が乾燥が速いが、一枚板の場合は気象条件の影響を直接受けるのに比較して、栈積み材の場合は栈積み全体の平均値であるため、気象の影響が直接現れないものと考えられる。

このように、栈積み側面に送風機を設置して強制的に送風することにより、自然状態に比較して速く乾燥するとともに、乾燥末期において平衡状態に達する含水率も送風することにより数%低くなる。

以上は一つの栈積み一台の送風機で送風した場合の結果であるが、経済効果をより大きくするために、一台の首振り式送風機により二つの栈積みを送風した場合の効果を、ブナ30mm板を用いて美濃市で検討したが、その乾燥経過をFig. 77に示す。

一台の送風機で一つの栈積みを送風する方法と比較すれば、送風する時間は半減する訳であるが、左右二つの栈積みとも自然状態よりは速く乾燥し、送風の効果を十分認めることができる。

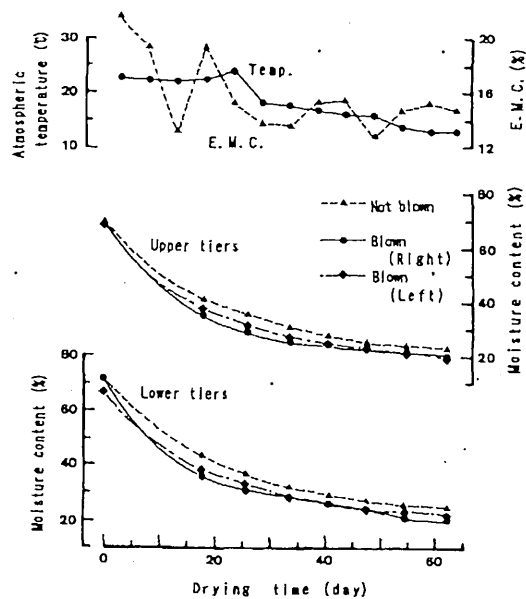


Fig. 77 Behavior of moisture content in BUNA heartwood 30 mm thick using a fan for two piles (drying from 3 Sep., Mino)

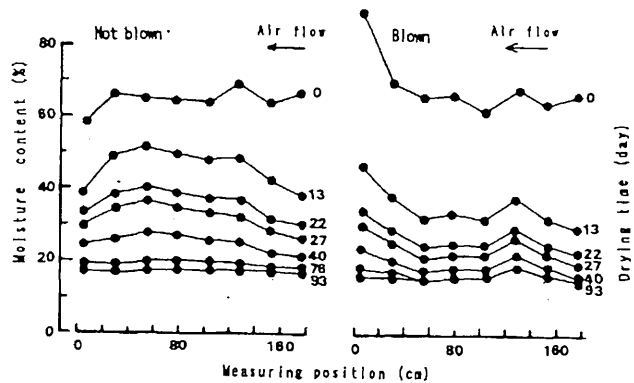


Fig. 78 Behavior of moisture content in piles (BUNA heartwood 30 mm thick, drying from 25 Apr.)

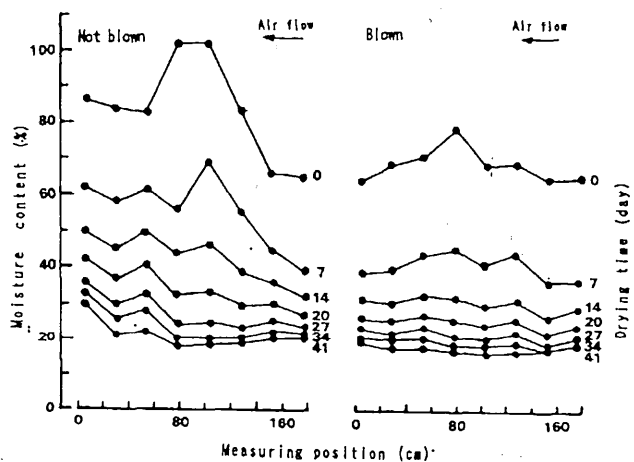


Fig. 79 Behavior of moisture content in piles (BUNA heartwood 30 mm thick, drying from 11 May)

3) 強制送風による乾燥むらの減少

棧積み材の乾燥において風上側と風下側に含水率の差が現れて、いわゆる乾燥むらが発生することはIV章の2項で述べたが、棧積み強制的に送風することにより、風上側と風下側との乾燥むらが小さくなる。

Fig. 7 8 は、ブナ30mm板心材を4月に乾燥を始めたときの含水率減少経過であり、Fig. 7 9 は同じくブナ30mm板心材を5月に乾燥したときの含水率減少経過である。

IV章において、棧積み内の乾燥むらの大きさは、乾燥初期の高含水率時には辺材が、低含水率となった乾燥中期以降は心材が支配することを述べているが、ここでは心材のみについて乾燥むらを考察する。

初期含水率の差が大きいため明確ではないが、4月および5月に乾燥を開始した両者とも自然状態の風下側の乾燥がおこなわれているのに対して、送風した場合はほとんどおこなわなくなり均一な乾燥を示している。

また、Fig. 8 0 およびFig. 8 1 は、ブナ30mm板および40mm板の心材を乾燥したときの棧積み内の乾燥むらを示したものである。

これは、乾燥経過を測定した試験材の同一測定時における含水率の最大と最小の差を、その棧積みにおける乾燥むらとして表したものであるが、いずれの場合も自然状態より送風をした方が乾燥むらは少なくなっている。

自然状態の場合は、5月に乾燥を開始した場合を除き、乾燥開始時における初期含水率のむらより、乾燥開始後数日を経過したときの方が乾燥むらが大きく、その後徐々にむらが小さくなるのに対して、送風した場合は初期含水率のむらが最も大きく、乾燥の経過にしたがって乾燥むらは減少している。

棧積みされた板材は、乾燥初期の高含水率時には恒率乾燥あるいはそれに近い状態で乾燥するため、風上側の乾燥速度は非常に大きく、蒸発水分が多くなる。そのため風下側ほど湿度が高くなり、乾燥速度が低下して風上側と風下側の乾燥むらが大きくなる。

しかし、風上側の材の含水率が低下して減率乾燥期間になると乾燥速度は低下して、この部分の蒸発熱の消費量が減少すると同時に水分蒸発量が低下すると、風下側の空気温度が上昇するとともに湿度も低くなるため、風下側の乾燥速度が増加して風上側と風下側の乾燥むらは小さくなる。

棧積み強制的に送風して材間風速が大きくなることは、単位時間当たりの熱供給量が増加すると同時に、蒸発した水蒸気を速やかに棧積み外に排出して、棧積み内の湿度を低くすることになるため、材間風速が大きくなるほど乾燥むらは減少することになる。

前述(IVのAのbの1))したように、自然状態の棧積み内材間風速は平均50cm/secであるのに対して、送風したときの棧積み内材間風速は平均1m/secと約2倍となるため、送風したときの乾燥むらが著しく少なくなるのは当然の結果であると考えられる。

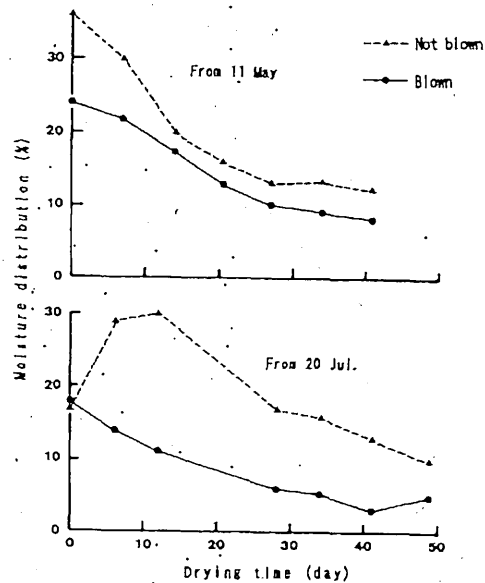


Fig. 80 Moisture distribution in BUNA heartwood 30 mm thick (Takayama)

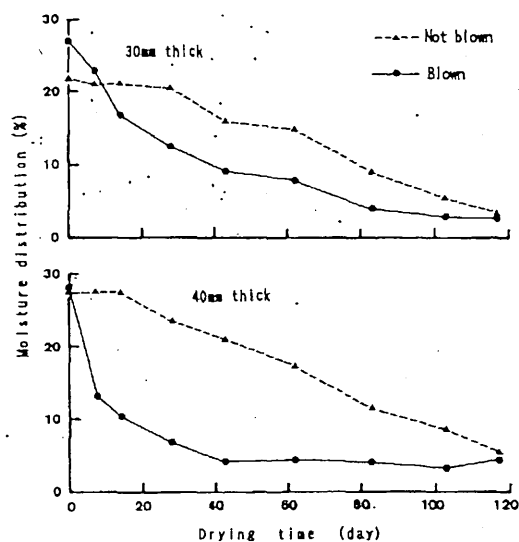


Fig. 81 Moisture distribution in BUNA heartwood (drying from 13 Jan., Takayama)

4) 強制送風による乾燥速度の向上

Fig. 8 2 は、高山市においてブナ30mm板心材を乾燥したときの乾燥速度を示したものである。これは、それぞれの栈積みに設置した全ての試験材の平均含水率減少曲線から同一含水率のときの乾燥速度を求め、それを栈積み全体の乾燥速度としたものである。

また、図中の一枚板の乾燥速度はIV章で検討したブナ40mm心材の一枚板の月別乾燥曲線から求めたものであり、試験の実施年度は異なるが送風したときの乾燥速度と比較するために示したものである。

5月に乾燥を開始した場合は、乾燥初期の高含水率域において送風の効果が非常に大きく、自然状態の2倍近い乾燥速度を示している。

4月開始の場合は、自然状態および送風とも5月開始に比較して乾燥速度は小さいが、送風の効果は大きく、送風した方が自然状態の1.5倍程度の乾燥速度を示している。

含水率が減少するにしたがって乾燥速度は低下するが、送風の効果は低含水率域まで継続している。

送風したときの乾燥速度と一枚板の乾燥速度を比較すると、5月に乾燥した場合、両者はほとんど同程度の乾燥速度を示しており、送風することにより栈積み内の乾燥むらが減少して栈積み全体の乾燥速度が一枚板の乾燥速度に近づくことを示している。

寺沢⁴⁷⁾らの報告によれば、恒率乾燥期間における乾燥速度は温度にはほとんど影響されず、風速が大きくなるほど乾燥速度も大きくなり、風速が2倍になると乾燥速度は30%程度大きくなるとしている。

また、寺沢⁸⁶⁾がI F型乾燥室の乾燥むらについて検討した報告によれば、恒率期間の乾燥むらは、風速をいくら大きくしても風上側と風下側の温度降下による蒸発量の差は除くことができず、ある量の乾燥むらはさけられないとしている。

強制的に送風すれば、栈積み内の風速は一枚板の風速より大きくなり、恒率乾燥期間における栈積み内の乾燥速度自体は向上することになる。しかし、風速が大きくなっても栈積み内の乾燥むらを全て除去することができないため、栈積み全体の乾燥速度は互いに相殺されて一枚板より若干小さくなるものと思われる。

また、減率乾燥期間になれば乾燥速度は風速にほとんど影響されないため、乾燥むらが減少する分だけが自然状態より乾燥速度が向上することになり、一枚板の乾燥速度よりはどうしても小さいことになる。

Fig. 8 3 は、ブナ30mm板および40mm板心材を高山市で1月に乾燥したときの乾燥速度である。

気温が低いために乾燥速度は非常に小さいが、30mm、40mm板ともに乾燥初期の速度は送風することにより

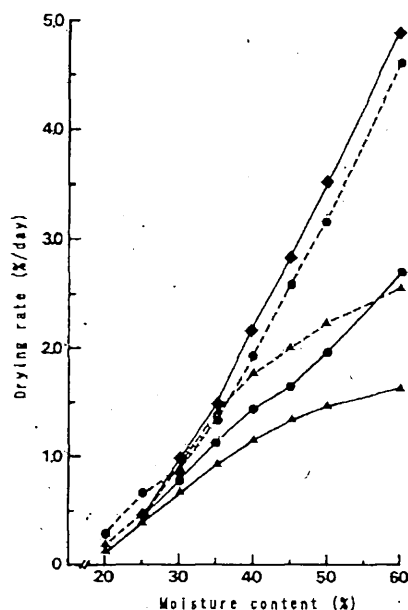


Fig. 82 Drying rate of BUNA heartwood 30 mm thick (Takayama)
 —○—12 May, single board (40 mm thick)
 ---●---11 May, blown (30 mm thick)
 —●—11 May, not blown (30 mm thick)
 ---■---25 Apr., blown (30 mm thick)
 —■—25 Apr., not blown (30 mm thick)

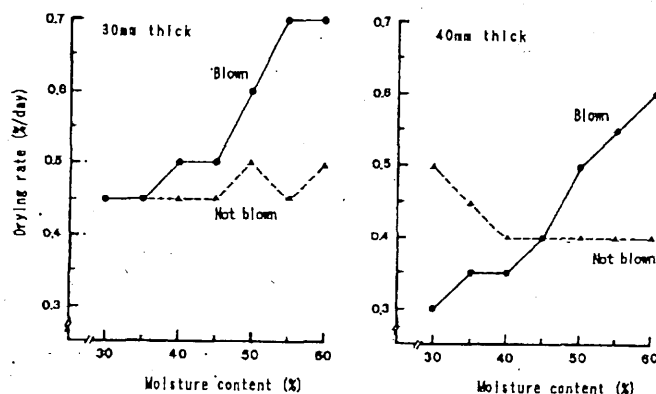


Fig. 83 Drying rate of BUNA (drying from 13 Jan., Takayama)

自然状態と比較して大きくなっている。低含水率域の乾燥速度は、あまり差がないかあるいは自然状態の方が大きくなっている。

これは、平均含水率が40%以下になる時期が自然状態の場合は送風したときより20~40日遅くなり、3月上旬から4月上旬の気温が上昇する時期であるために、低含水率域の乾燥速度が大きくなる訳である。

次に、Fig. 8 4 はブナ30mm板心材の高山市と美濃市における乾燥速度を比較したものである。

初期含水率が異なるため明確ではないが、送風したときの含水率40%以下の乾燥速度は高山市、美濃市ともほとんど同じような値を示している。しかし、前述のように美濃市の風速は高山市の風速より大きいため、自然状態でも乾燥速度が比較的大きくなり、そのために送風効果は高山市より美濃市の方が小さくなっている。

また、Fig. 8 5 は美濃市において乾燥したカラマツ45mm板の乾燥速度であるが、やはり送風することにより乾燥速度は大きくなっている。

このように、強制送風の効果を乾燥速度からみると、乾燥の時期あるいは場所によって差はあるものの、含水率40%以上の高含水率域における送風効果が大きく、自然状態の1.5 倍程度の乾燥速度を示している。

これは、送風により乾燥むらが減少するため、棧積み全体の平均乾燥速度が大きくなる訳であり、美濃市のように自然の風速が大きい場所での送風効果は、高山市のように風の少ないところよりは若干小さくなる。

5) 送風による乾燥時間の短縮

Table 1 9 は、生材から含水率30%および25%まで乾燥するに要する乾燥時間と、送風による短縮率を示したものである。

この場合、試験毎に初期含水率が異なるため、便宜上心材の平均含水率減少曲線を80%まで延長し、それより含水率30%および25%までの乾燥時間を求めることにした（カラマツの生材含水率は50%とした）。

送風によって最も乾燥時間が短縮されるのは、高山市で7月から乾燥したブナ材の30mm板で、生材から25%までの乾燥時間は約1/3 になっている。また、効果が最も小さいのは同じく高山市でブナ40mm板を乾燥したときであるが、それでも2割り程度の短縮率を示している。

平均すれば送風による乾燥時間の短縮率はおおむね2/3 となるが、冬季より夏季が、天然乾燥の条件が良い美濃市より条件の悪い高山市の方が送風効果は大きくなっている。

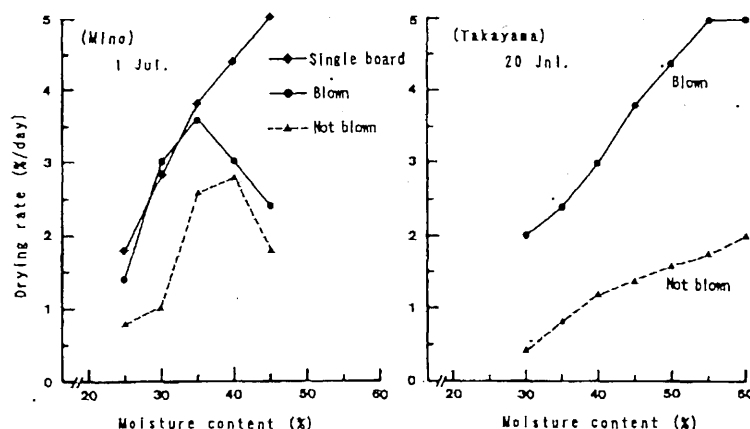


Fig. 84 Drying rate of BUNA 30 mm thick

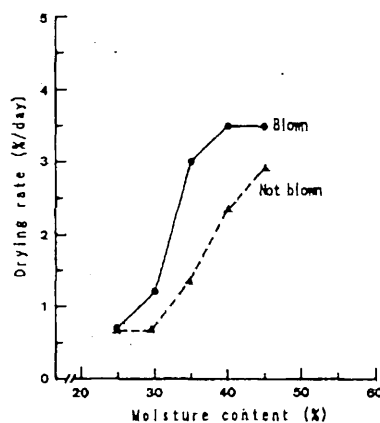


Fig. 85 Drying rate of KARAMATSU 45 mm thick (drying from 12 Aug., Mino)

Table 19 Drying time (from green logs to M.C. 30% or M.C. 25 %)

Place	Species thickness	Date of beginning	Way of drying	To M.C. 30%		To M.C. 25%		Note
				Drying time(day)	Rate(%)	Drying time(day)	Rate(%)	
Takeyama	BUNA	25 Apr.	not blown blown	36 22	100.0 61.1	46 28	100.0 60.9	
				24 19	100.0 79.2	32 24	100.0 75.0	
		11 May	not blown blown	42 17	100.0 40.5	68 22	100.0 32.4	
				117 80	100.0 68.4	130 91	100.0 70.0	
	30mm	20 Jul.	not blown blown	45 29	100.0 64.4	58 37	100.0 63.8	
				149 98	100.0 65.8	156 125	100.0 80.1	
		13 Jan.	not blown blown	40 34	100.0 85.0	49 38	100.0 77.6	
				41 28	100.0 68.3	59 43	100.0 72.9	
	BUNA	8 Jul.	not blown blown	7 5	100.0 71.4	9 7	100.0 77.8	
				13 10	100.0 76.9	21 16	100.0 76.2	
Mino	KARAMATSU 18mm	12 Aug.	not blown blown	13 10	100.0 76.9	21 16	100.0 76.2	1 Fan : 2 Piles
				13 10	100.0 76.9	21 16	100.0 76.2	
	KARAMATSU 45mm	12 Aug.	not blown blown	13 10	100.0 76.9	21 16	100.0 76.2	
				13 10	100.0 76.9	21 16	100.0 76.2	

Note: Moisture content in green is assumed 80 % (BUNA) and 50% (KARAMATSU).

B. 簡易加熱による天然乾燥の促進

天然乾燥を促進するための人為的な手段として、最も簡易で安価に実施できる方法は、棧積み強制的に送風する方法であり、前述のとおり乾燥時間を約2/3に短縮させる効果が得られた。

しかし、送風効果は乾燥むらを少なくすることにより、棧積み全体の乾燥速度が向上する効果しか期待できないため、木材の乾燥速度自体を向上する効果は少なく、棧積みをしていない一枚板の乾燥速度以上の効果は得られないことになる。

そのため、天然乾燥としての条件の悪い時期、換言すれば一枚板の乾燥速度の低い時期である梅雨季あるいは冬季間は、どうしても強制送風の効果は少なくなる。

こうした時期の天然乾燥速度を高めるためには、乾燥温度を高くすることが最も効果的であるが、乾燥温度の上昇を図るためには、どうしても乾燥材を密閉された装置の中に収容して、人為的に加熱しなければ熱効率の低下により乾燥費が増加することになる。

このような手段を用いるとすれば、予備乾燥的な方法を採用しなければならないために多額の設備費が必要となり、本来の意味の天然乾燥としてのメリットが損なわれることになる。

そのため、ここでは最も簡易でしかも安価に加熱できる方法として、棧積みの中に農業で使用する温床用の電熱線を配置して、その加熱効果を検討した。

a. 実験方法

1) 実験場所および実験期間

実験の実施場所は、高山市山田町の旧岐阜県林業試験場および美濃市曾代の岐阜県林業センターの土場である。

また実施期間は高山市の場合が1969年10月から1970年5月までであり、美濃市の場合が1971年1月から1972年4月までである。

2) 供試材

供試材は、VIのAと同じく岐阜県飛騨地方産のブナ材を用いたが、その形状は長さ210cm、幅7～15cmで、厚さは30mmおよび36mmのだら挽き板である。

3) 棧積み方法および電熱線の設置方法

栈積みに用いた栈木は厚さ25mmであり、栈積みの大きさは幅190cm（美濃市では180cm）、高さ200cmとした。また、自然状態の栈積みと加熱する栈積みとの間隔は250cmである。加熱に用いた電熱線は、容量500W、長さ20m、太さ10mmの温床用ゴム被覆線2本（美濃市では1本）であり、栈積みの下部1/3の高さまでFig. 8 6に示すように板と板の間に設置して碍子で固定した。

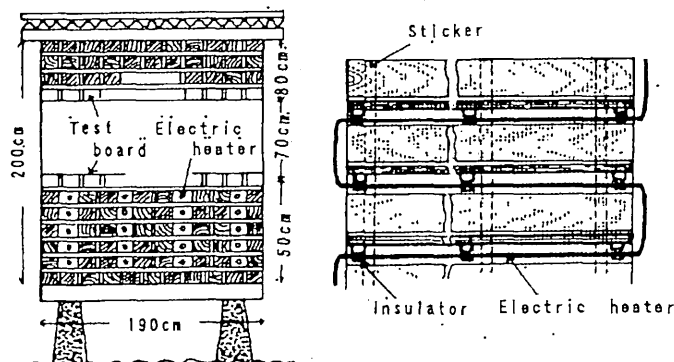


Fig. 86 Layout of electric heaters and test boards (Takayama)

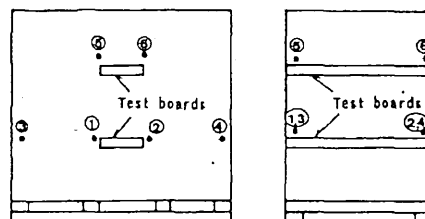


Fig. 87 Layout of test boards and thermometers (Takayama)

4) 測定方法および試験回数

含水率の減少経過および収縮率を測定する試験材は、幅10cm、長さ60cmとし、Fig. 8 6あるいはFig. 8 7に示すように、栈積み上下段2ヶ所に辺材、心材を交互に板の横間隔を1.5cmとして設置した。

含水率の減少経過は原則として週1回試験材の重量を測定し、試験終了後に試験材の中央部より幅2cmの試験片を採取し全乾法で含水率を求め、それより各測定時の含水率を算出した。

また、収縮率の測定は、含水率を測定した試験材の中央1ヶ所について幅方向および厚さ方向の寸法を測定して、気乾までの収縮率と全収縮率を求めた。

試験の実施回数と実施期間はTable 2 0の通りであり、電熱線での加熱はそれぞれ全乾燥期間を通じて実施した。なお、加熱による栈積み内の温度変化は、Fig. 8 7に示す位置に電気抵抗式温度計を設置して、記録計に記録した。

Table 20 Test times and period of electric drying

Place	Species	Thickness	Date of beginning	Date of ending
Takayama	BUNA	30mm	21 Oct. 1969	19 Feb. 1970
	BUNA	36mm	2 Feb. 1970	18 May 1970
Mino	BUNA	30mm	8 Jan. 1971	24 Feb. 1971
	BUNA	30mm	13 Jan. 1972	19 Apr. 1972

b. 実験結果と考察

1) 簡易加熱による栈積み内部の温度変化

電熱線加熱による栈積み内の温度変化をFig. 8 8に示す。これは、各測定位置における日平均温度を示したものであるが、栈積みの位置により温度差が認められる。

電熱線を設置した下段の試験材位置の温度は、気温より10℃程高い値を示しているが、上段の試験材位置では気温とあまり差がないが、風の弱いときには加熱による若干の温度上昇が認められる。

また、栈積み下段の加熱部の温度と気温との関係を見ると、気温の変動にしたがって加熱部の温度も

同じように変動し、その温度差はほとんど変化しないようである。しかし、風による影響が若干認められ、気温が高くて風強い日は加熱部との温度差が小さくなり、電熱線による熱が風によって棧積み外部に排熱されていることを示している。

なお、棧積み内部で温度の変化する幅は、気温のそれより2~3℃ほど小さくなっており、最高、最低を示す時間は気温より2時間ほどおくれで現れることが認められた。

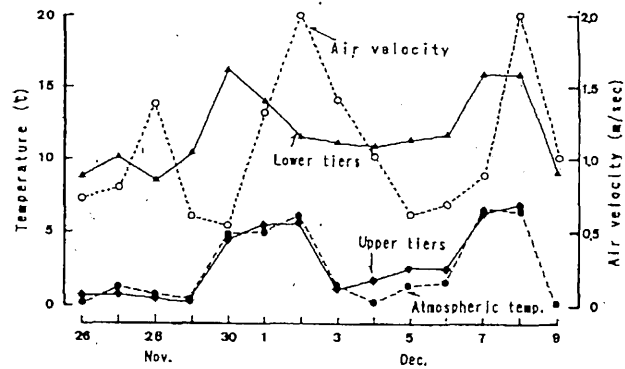


Fig. 88 Behavior of temperature in pile (Takayama)

Note lower tiers : mean temperature of point ①, ②
upper tiers : mean temperature of point ③, ④

2) 加熱による天然乾燥経過

高山市において、ブナの30mm板を10月21日から乾燥を開始したときの心材の乾燥経過をFig. 89に示す。

加熱の効果は非常に大きく、ことに下段においては乾燥速度および含水率が低下して平衡状態に達する含水率にも、加熱したときと自然状態の間に大きな差が認められる。

特に、乾燥初期の高含水率域における効果が大きく、上、下段とも含水率35%程度までの乾燥速度が非常に大きくなっている。

また、含水率が低下して平衡状態になるのは、自然状態の場合含水率40%程度からであるが、加熱した場合は上段で30%、下段で20%となり、自然状態に比較して10~20%低い値で平衡状態となっている。

棧積み上部の温度は、加熱してもあまり気温より高くないと述べたが、無風時あるいは風の弱いときは電熱線の熱が外に逃げないために棧積み上部の温度が上昇するため、乾燥速度が自然状態よ

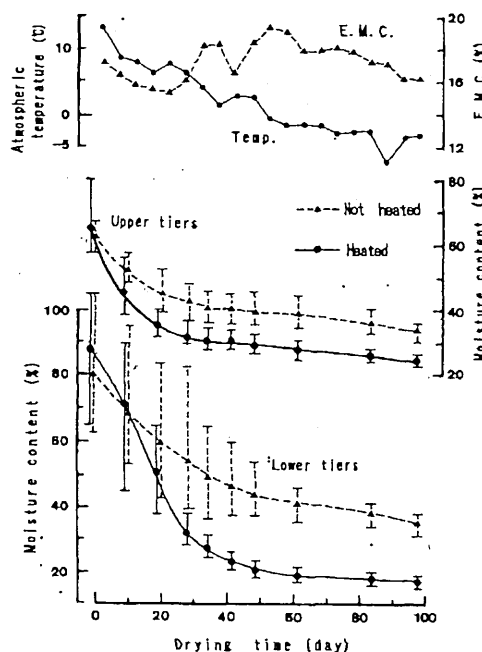


Fig. 89 Behavior of moisture content in BUNA heartwood 30 mm thick by electric drying (drying from 21 Oct., Takayama)

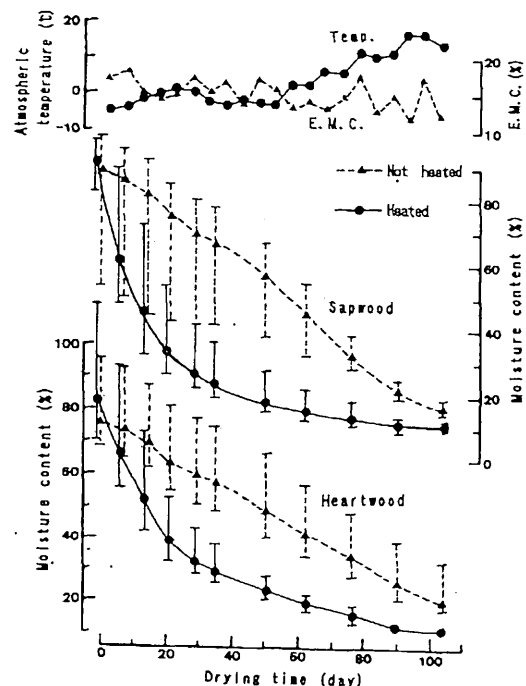


Fig. 90 Behavior of moisture content in BUNA heartwood 36 mm thick by electric drying (drying from 2 Feb., lower tiers, Takayama)

りも大きくなるものと考えられる。

Fig. 9 0 は、高山市においてブナ36mm板を2月2日から乾燥したときの棧積み下段の乾燥経過を示したものであるが、乾燥初期の高含水率時の気温が低いため、加熱の効果がより顕著に現れている。

しかし、乾燥が進むにつれて気温が上昇するため、自然状態の乾燥速度も大きくなり、試験終了時の含水率の差は10月に乾燥したときより少なくなるが、それでも加熱の方が自然状態より7～10%低い含水率となる。

また、辺材と心材の加熱効果をみると、辺材の方が加熱による乾燥速度の促進効果は大きくなっている。

次いで、美濃市においてブナ30mm板を1月に乾燥したときの乾燥経過を、Fig. 9 1 および Fig. 9 2 に示す。

高山市において簡易加熱を実施した場合には、前述の通り非常に大きな効果が認められたが、美濃市においては加熱の効果をほとんど認めることができなかった。

これは、高山市における加熱には500Wの電熱線2本を用いたのに対して、美濃市においては500Wの電熱線を1本しか用いなかったことも大きく影響しているが、それ以上に高山市と美濃市の気象条件の違いが影響しているものと思われる。

試験期間中の気温をみると、高山市の場合は約1/2の期間が0℃以下を記録しているのに対して、美濃市では0℃以下の気温は全く記録されておらず、試験期間中の美濃市の平均気温は4℃(1971年)と7℃(1972年)となっている。

そのため、試験期間中の気候値平衡含水率も美濃市の場合は高山市より3～4%低くなっているし、1月の平均風速も高山市の1.2m/secに対して美濃市では2.5m/secと大きくなっている。

このように、美濃市の気象条件が高山市に比較して天然乾燥にとって非常に恵まれた条件であるため、美濃市では自然状態の乾燥速度が大きく、加熱による効果があまり認められなかったものと考えられる。

また、風速の大きいことも、電熱線による熱を棧積みの外に逃がす率が大きくなり、より加熱の効果が失われることになる。

3) 加熱による乾燥むらの減少

棧積み材の乾燥むらは、棧積み強制的に送風することにより大きく減少することは前項で述べたが、棧積み内に電熱線を配置して加熱すると、乾燥むらを減少させる効果も期待することができる。

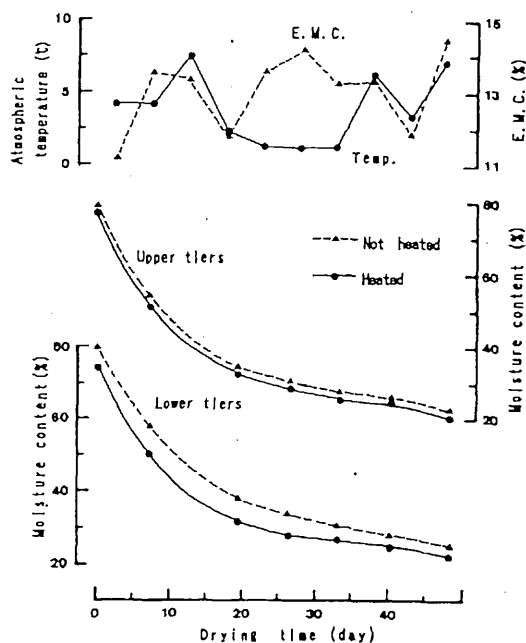


Fig. 91 Behavior of moisture content in BUNA heartwood 30 mm thick by electric drying (drying from 1971, 8 Jan., Mino)

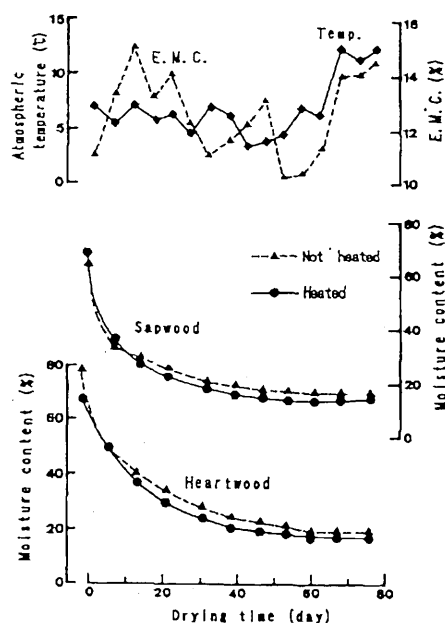


Fig. 92 Behavior of moisture content in BUNA 30 mm thick by electric drying (drying from 1972, 13 Jan., lower tiers, Mino)

Fig. 9 3は、高山市においてブナ30mm板を加熱乾燥したときの棧積み下段の含水率減少経過を示したものである。

自然状態の場合は、棧積み中央部から風下側にかけて乾燥がおくれ、乾燥開始後34日目では外側と中央部の含水率差は28%、60日目でも12%の差が認められる。それに対して加熱した場合は、棧積み中央部の方が速く乾燥し、外側の方がおくられて乾燥する。

天然乾燥であっても人工乾燥であっても、通常の乾燥方法の場合は、加熱された空気を外から棧積み内に供給する方法であるため、風下側の方が温度が低くなり、当然風下側の乾燥はおくれることになる。

しかし、このように電熱線を棧積み内部に配置すると、棧積みの外側より中央部の方が温度が高くなるため、棧積み中央部の方が速く乾燥して、通常の乾燥むらとは逆の型となる。

棧積み内を通る風が少ないと、中央部と外側との乾燥むらは相当大きくなると思われるが、前項のFig. 7 1に示すように、自然状態の場合でも平均50cm/sec程度の材間風速を示すため、加熱した場合の乾燥むらはそれ程大きくなり、自然状態の乾燥むらより小さくなっている。

なお、加熱による棧積み内の乾燥むら減少の効果は、加熱効果の少ない美濃市の場合でも認めることができる。

4) 加熱による乾燥速度の向上

Fig. 9 4は、ブナ30mmおよび36mm板心材を高山市および美濃市で乾燥したときの乾燥速度を示したものである。

高山市において加熱したときと自然状態の乾燥速度には非常に大きな差が認められ、ことに10月21日に乾燥を開始した場合は、自然状態では含水率35%以下には乾燥しないのに対して、加熱した場合は含水率20%程度まで乾燥しているため、全乾燥時間を通じて加熱の効果が大きく認められる。

これは、乾燥開始後ほとんど直線的に気温が低下し、自然状態の含水率が40%を切る時期の平均気温は0℃以下となるため、加熱の効果がより高くなるものと思われる。

これに対して、2月に乾燥を開始した場合は、乾燥末期ほど気温が上昇するため、加熱により乾燥初期の乾燥速度は大きくなるが、含水率30%以下になると自然状態と加熱したものとの乾燥速度はほとんど差が認められなくなる。

また、美濃市において乾燥した場合は気温が比較的高いため、自然状態の乾燥速度が大きく、全乾燥期間を通じて加熱した方が若干乾燥速度は大きくなるがその差はあまり大きくない。

次に、加熱したときと自然状態のときとの乾燥時間の比較をTable 2 1に示す。

高山市において30mm板を乾燥した場合、自然状態では含水率40%までしか乾燥しなかったため、それ以下の乾燥時間は比較できないが、生材(含水率80%)から含水率40%までの乾燥時間は加熱する

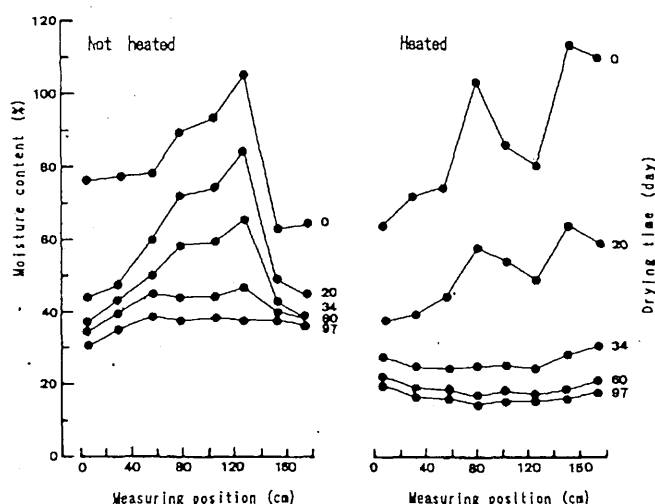


Fig. 93 Behavior of moisture content in piles
(BUNA heartwood 30 mm thick, lower tiers, Takayama)

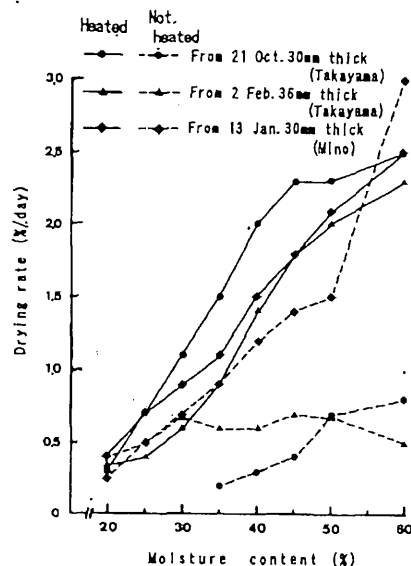


Fig. 94 Drying rate of BUNA heartwood

ことにより自然状態の約1/4に短縮できる。

同じく、高山市においてブナ36mm板を乾燥した場合は、生材から含水率30%までの乾燥時間が加熱したときは自然状態の約1/3、含水率20%までの乾燥時間は約1/2に短縮される。

また、美濃市において加熱乾燥した場合は電熱線の容量不足や、気象条件の影響によりほとんど乾燥時間の差は認められないが、加熱した場合は、自然のままより低含水率まで乾燥するために、生材から含水率25%までの乾燥時間は若干ではあるが加熱した方が短くなる。

乾燥時間におよぼす乾燥温度の影響は、VI章において述べているように非常に大きく、その関係は $\log t = 3.52 - 0.017 \theta$ で表されるとともに、温度が約20℃上昇することにより乾燥時間は1/2程に短縮されると報告されている¹¹⁾。

高山市において1kWの電熱線を用いて加熱した場合、温度が10℃程度高くなることは前述の通りであるが、高山市のように冬季の気温が0℃以下になる場合は自然状態の乾燥速度が極端に低下するため、加熱により栈積み内の温度が10℃上昇することは非常に大きな効果である。

美濃市の場合は、電熱線の容量不足もさることながら、風速が大きいために電熱線による熱が栈積み外に排熱される率が高く、それだけ加熱の効果が少なくなるものと考えられる。

こうした結果からみて、加熱による天然乾燥の促進効果は、含水率35%以上の高含水率域における乾燥速度が1%/日以下の条件で顕著に現れることになる。そのため、高山市のように気温が低く、風も少ない場所では加熱効果も著しいが、美濃市のような所での加熱は、天然乾燥の促進方法としてあまり適正ではないと考えられる。

Table 21 Drying time of BUNA heartwood by air drying and electric drying
(from green logs to M.C. 40%, M.C. 30% or M.C. 25%)

Place	Thickness	Date of beginning	Way of drying	To M.C. 40%		To M.C. 30%		To M.C. 25%	
				Drying time (day)	Rate (%)	Drying time (day)	Rate (%)	Drying time (day)	Rate (%)
Takayama	30mm	21 Oct.	Air drying	76	100.0	—	—	—	—
			Electric drying	18	23.7	25	—	34	—
	36mm	2 Feb.	Air drying	69	100.0	87	100.0	97	100.0
			Electric drying	19	27.5	32	36.7	43	44.3
Mino	30mm	8 Jan.	Air drying	18	100.0	34	100.0	48	100.0
			Electric drying	14	77.8	23	67.6	42	87.5
		13 Jan.	Air drying	14	100.0	28	100.0	40	100.0
			Electric drying	16	114.3	27	96.4	36	90.0

5) 電熱線加熱の熱効率

天然乾燥における電熱線での簡易な加熱の効果は、高山市のように冬季の気温が低く、自然のままでの乾燥速度が低い所では、乾燥期間の短縮、乾燥むらの減少あるいは仕上がり含水率の低下など、種々の点でその効果を認めることができる。

しかし、本実験では栈積みの下半分だけに電熱線を配置しているため、栈積みの上段では温度もあまり上昇せず、加熱の効果も少なくなっている。

栈積み全体に均一な加熱効果を期待するためには、この大きさの栈積み（材積約3m³）の場合、更に500Wの電熱線2本、計2kWを設置することが必要であると思われる。

こうした考え方から、1kWの電熱線によって1.5m³のブナ材を乾燥したときの電熱加熱の熱効率（消費電力の熱量と木材中の水分蒸発に要した熱量の比）を算出した。

この場合の熱量計算は

電 力 860kcal / kWh

蒸発潜熱 597kcal / kg （外気温0℃）とし、乾燥により蒸発した水分量は、加熱およ

び自然状態の棧積みで設置した試験材の材積と重量減少量より、それぞれ材積1.5m³の水分減少量を求め、同一期間内における両者の差を加熱による蒸発水分量として算出した。

その結果をFig. 9 5に示す。含水率の高い乾燥初期の熱効率は比較的高く30～45%を示すが、含水率が減少するにしたがって熱効率も低下し、含水率が30%以下となる30日目以降の熱効率は20%を下回るようになる。

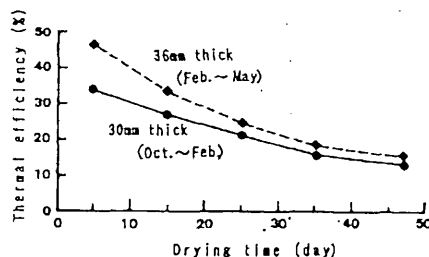


Fig. 95 Thermal efficiency of electric heating BUNA (1 kWh/1.5 m³)

また、板の厚さが30mmのときと36mmのときの熱効率をみると、板厚の大きい36mm板の方が熱効率は大きくなっているが、これは36mm板の場合、乾燥初期の気温が低く自然状態の乾燥速度が小さいために、加熱の効果がより大きくなっていることに起因するものと思われる。

このように電熱加熱による熱効率は、板の厚さより乾燥する季節に影響され、気温が低く、風が少なく、しかも含水率の高い時の方が大きくなるようである。

6) 加熱乾燥による収縮率

高山市のように、冬季間の気温が低く、風の少ない地方における電熱加熱の天然乾燥促進効果は非常に大きいものがある。

本研究の場合、緒言でも述べているように乾燥速度に主眼をおいているため、乾燥による損傷等については研究の対象から除外している。

しかし、加熱乾燥の場合は、木材の狂いなど損傷の発生に最も影響の大きい乾燥温度を人為的に高めているため、乾燥速度が促進されても、そのために損傷が増加して乾燥歩止まりが低下すれば、あまり意味がないことになる。

この加熱乾燥の場合も被乾燥材の仕上がり状態などからみて、乾燥歩止まりは良好であると思われるが、その指標の一つとして、含水率測定用の試験材を用いてその収縮率を測定し、加熱した場合と自然状態の場合とを比較した。

もちろん、収縮率の大きさのみで乾燥による損傷の程度を判断することは不可能であるが、実用上問題となる幅そり、ねじれなどの狂いの大きさは収縮率に比例する。そのために、収縮率を乾燥材の仕上がり状態の指標の一つとすることは可能であると考え、両者の全収縮率を比較してみたものである。

Table 2 2は、高山市で加熱乾燥したブナ30mmおよび36mm板の全収縮率を示したものである。これは、各試験材の中央部の寸法を測定し、試験終了後幅2cmの試験片を採取して直ちに100℃で全乾にしたものである。

Table 22 Shrinkage by electric drying (area rate)

Species	Thickness	Date of beginning	Way of drying	Shrinkage (%)	
				Heartwood	Sapwood
BUNA	30mm	21 Oct.	Air drying	16.8	15.1
			Electric drying	15.6	14.6
	36mm	2 Feb.	Air drying	15.8	14.5
			Electric drying	15.4	13.6

この場合、試験材の木取りが追証などを含み一定でなかったため、面積収縮率で示すこととした。辺材、心材ともに、加熱した方が自然状態より若干ではあるが収縮率が少なくなっている。これは、

乾燥終了時の含水率が自然状態の場合は相当高かったが、含水率の低い加熱したものと一緒に絶乾にしたため、自然状態の収縮率が大きくなったものと思われる。

こうした結果からみて、加熱による収縮率の増加はほとんどないものとみることができる。

C. 太陽熱利用による天然乾燥の促進

天然乾燥を促進する方法として、太陽熱をより有効に利用する方法がある。これは、天然乾燥の促進と同時に省エネルギー的な考え方から、近時種々検討されている方法であるが、前述までの促進方法と異なりある程度の施設を必要とすることから、天然乾燥と人工乾燥の中間的な乾燥法、すなわち予備乾燥装置として評価される場合が多い。

この装置は、透明な材料としてガラス、ビニルシートあるいは塩化ビニル板などを用いて所定の大きさの室を作り、太陽熱によって室温の上昇を図るものである。

しかし、このまま室内に被乾燥材を設置すれば室温は上昇するが、木材中の水分蒸発により室内の湿度も上昇して乾燥が進行しないため、当然排気孔を設けて室内湿度の低下を図ることになる。

また、室内の空気循環を図らなければ棧積み内の乾燥むらが大きくなるため、通常の人工乾燥室のように空気循環用送風機の設置も必要となる。

基本となる熱エネルギーは、太陽熱であるため、夜間や曇天時あるいは日照時間の短い冬季間には補助的な熱源を必要とすることになる。

そのため太陽熱利用の乾燥室としては、比較的簡易な装置による天然乾燥の促進を目的としたものから、人工乾燥室に近い装置を備えて仕上げ乾燥までを目的とした装置まで、幅広く検討されており、後者の場合は特に太陽熱の利用度の高い低緯度の地域で開発されている⁹⁹⁾。

ここでは、前者である比較的簡易な装置を試作して、天然乾燥期間を短縮する促進方法としての効果を検討した。

a. 実験方法

1) 実験装置

太陽熱利用による簡易乾燥装置としてFig. 9 6 に示すような実験装置を、美濃市の岐阜県林業センター構内に試作設置した。

間口2 m、奥行2 m、高さ2 mの木枠を組み、屋根および東、南、西側の壁には塩化ビニル波板を、北側の壁には合板を張った。室内の空気循環は北壁側に設置した径20cmの3枚羽の送風機により実施し、排気は北壁側の上部に20×20cmの排気孔を設け、ここに径20cmの送風機を設置して常時強制的に排気を行った。

また、冬季間は太陽熱のみでは室温上昇があまり期待できないため、補助的な加熱として棧積み内に温床用の電熱線を設置して、全乾燥期間にわたって加熱した。

用いた電熱線は前項と同様の容量500W、長さ20m、太さ10mmのものである。

2) 供試材

県内産のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) と北米産のベイツガ (*Tsuga heterophylla* Sarg.) を用い、次の大きさに挽き材した。

正角 10.5cm×10.5cm×100cm

(スギは心持ち、ベイツガは心去り)

正割り 4.5cm×4.5cm×100cm

板 2.5cm×2.5cm×100cm

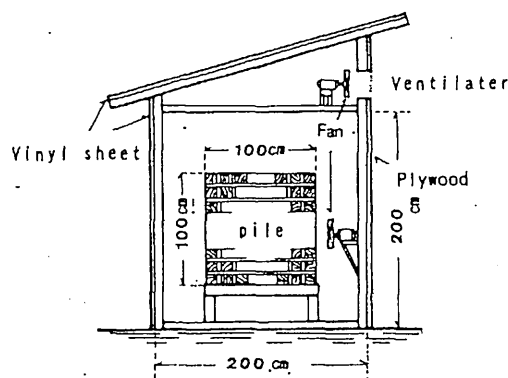


Fig. 96 Equipment for solar drying

なお、これらの供試材は上記の寸法に鉋削仕上げをし、両木口には銀ニスによりエンドコーティングを実施して試験材とした。

3) 棧積みおよび測定方法

乾燥試験における棧積み方法は、装置の中央部に幅、高さ、長さとも1mの大きさに棧積みし、棧木は厚さ2.5cm、試験材の横方向の間隔は5cmとした。また、対象とした自然状態の棧積みの大きさおよび方法は、装置内の棧積みと同様として屋外に設置した。

乾燥試験は、7月および2月に実施したが試験期間および供試材の使用量はTable 23に示す通りである。

含水率減少経過は、週一回試験材の重量を測定し、試験終了後に試験材の中央部および両木口より10cmの所から厚さ2cmの試験片を採取し、全乾法により求めた含水率から各測定時の試験材含水率を算出した。

また、収縮率の測定は試験材の両木口より30cmの2箇所の寸法を測定して、その平均値を収縮率とした。

Table 23 Test period and number of test boards by solar drying

Species	Test period	Way of drying	Kind of lumbers		
			10.5cm square	4.5cm square	2.5 cm board
SUGI	From 22 Jul. to 10 Sep.	Air drying	8	8	8
		Solar drying	8	8	8
	From 29 Jan. to 27 Apr.	Air drying	7	10	10
		Solar drying	7	10	10
BEITSUGA	From 22 Jul. to 10 Sep.	Air drying	6	7	8
		Solar drying	6	7	8
	From 29 Jan. to 27 Apr.	Air drying	5	7	8
		Solar drying	5	7	8

b. 実験結果と考察

1) 太陽熱利用乾燥装置内の温度変化

Fig. 97は、夏季試験時の気象条件および装置内の温度変化を示したものである。

これは、日平均気温および日最高気温の5日間の平均値で示したものであるが、屋外の最高気温の5日間平均は約32℃であるのに対して、装置内の最高気温の5日間平均は約49℃となり、太陽熱による温度上昇は著しい。

しかし、装置内の最高温度の変化は屋外の最高気温の変化に追従するものの、その変化幅は非常に大きくなる。

また、Fig. 98は晴天時の1日間の屋外と装置内の温湿度変化を示すものであるが、15時の屋外温度は34℃であるのに対して装置内の温度は55℃と21℃程高くなっているし、夜間の温度も装置内の方が5℃程度高い値を示している。

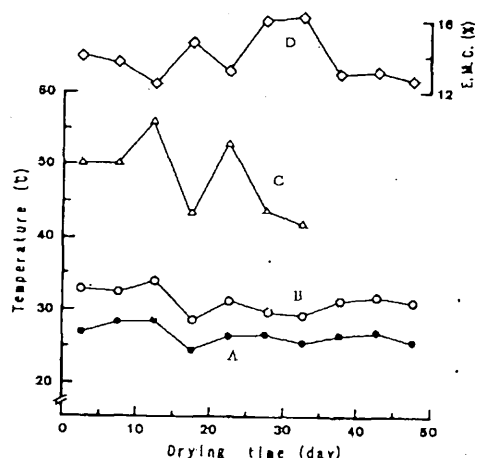


Fig. 97 Behavior of temperature outdoor and indoor in summer
A average of 5 days of daily mean temp.
B average of 5 days of daily max. temp.
C average of 5 days of max. temp. in equipment
D average of 5 days of daily mean E.M.C.

なお、雨天あるいは曇天の場合は装置内と屋外の温度にほとんど差が認められなかったが、強制的な排気を実施しているため湿度は低くなり、全乾燥期間を通じて装置内の平衡含水率は屋外より4～8%低くなった。

緯度にあまり差のない奈良市において夏季に同様の実験を行った場合⁶⁰⁾、装置内の最高温度は約60℃まで上昇し、夜間においても外気温より10～12℃高くなったと報告している。

また、北海道旭川市での実験結果¹⁰⁰⁾によれば、8月の場合、装置内の最高温度は約55℃まで上昇し、外気温との差は30℃近くになり、夜間においても外気温より15℃程度高くなったと報告している。太陽熱利用装置の場合、湿度の上昇をさけるために排気が必要であるが、装置の収容量と排気量とのバランスがとれば、装置内の温度上昇および湿度低下を十分期待することが可能である。

次に、Fig. 9 9 は、冬季における外気温と装置内の温度を5日間の平均値で示すものであるが、装置内の最高温度は外気温より約20℃高くなっている。

また、夜間あるいは曇天の場合でも装置内に設置した電熱加熱の効果によって、外気温より2～3℃高い値を示している。

乾燥初期における最高温度の制御、あるいは冬季における集熱方法など、検討しなければならない問題はあるが、天然乾燥を促進する目的からすれば、本実験のような簡易な装置でも十分目的を達することができる。

2) 夏季における促進効果

Fig. 100 は、夏季(7月22日～9月10日)における太陽熱利用促進装置内と屋外のスギの乾燥経過を、材種毎に全試験材を平均して示したものである。

いずれの材種も、屋外での天然乾燥と比較して太陽熱利用装置内の方が速く乾燥しているが、断面積の大きい10.5cm角材の場合は他の材種より乾燥がおけるとともに、太陽熱利用による促進効果もあまり大きくない。

10.5cm角材の場合は心持ち材であり、断面積に占める心材率が非常に大きいため、乾燥速度も小さくなると同時に促進の効果も少なくなるものと思われる。

これは、広葉樹のブナ材の場合の送風あるいは簡易加熱による促進効果が、心材よりも辺材の方が大きかったことと同様である。

しかし、4.5cm角材および板材の場合は心材率が小さいために太陽熱利用による促進効果は大きく、4.5cm角材では生材から含水率20%までに要する乾燥時間が、また、板材の場合は生材から含水率15%までに要する乾燥時間が、屋外における自然状態の天然乾燥時間の約2/3に短縮されている。

また、いずれの材種においても太陽熱の利用効果は乾燥時間の短縮ばかりでなく、ブナ材による送風、加熱効果と同様に、含水率が低下して平衡状態になるときの含水率は、屋外での天然乾燥に比較

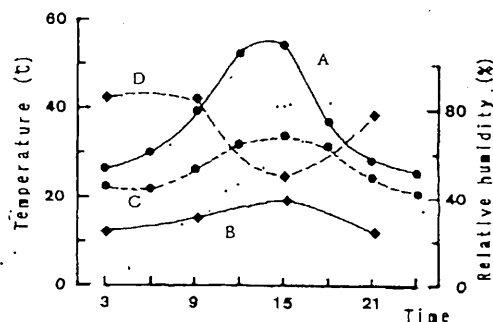


Fig. 98 Behavior of temperature outdoor and indoor

- A temperature in equipment
- B relative humidity in equipment
- C outdoor temperature
- D outdoor relative humidity

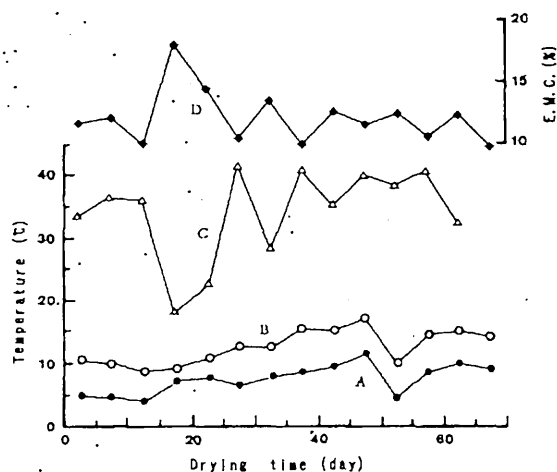


Fig. 99 Behavior of temperature outdoor and indoor (winter)

- A average of 5 days of daily mean temp.
- B average of 5 days of daily max. temp.
- C average of 5 days of max. temp. in equipment
- D average of 5 days of daily mean E.M.C.

して、4～6%低い含水率を示している。

次にベイツガの乾燥経過をFig. 101に示す。ベイツガの場合は初期含水率が約40%でありスギに比較して低いことと、心去り材であるために、断面積の大きい10.5cm角材でも太陽熱の利用効果は大きく、生材から含水率20%までの乾燥時間は、屋外の天然乾燥が39日を要するのに対して、太陽熱利用装置内では22日となり、約2/3に短縮される。

また、4.5cm角材では生材から含水率15%までの乾燥時間が1/2に、板材では同じく2/3以下に短縮されると同時に、平衡状態となる含水率もスギの場合と同様に3～4%低い値を示している。

このように、透明材料を用いて試作した太陽熱利用促進装置は、室内温度が上昇するとともに、強制排気の実施により室内湿度も低くなるため、装置内の乾燥速度が大きくなると同時に、天然乾燥の仕上げ含水率も屋外における天然乾燥より数%低くなり、太陽熱利用の効果を充分認めることができる。

3) 冬季における促進効果

冬季のように日照時間が短く日射量の少ない場合には、太陽熱のみで装置内の温度を上昇させることが困難なため、装置内の栈積みに1kWの温床用電熱線を設置して全乾燥期間を通じて加熱したが、そのときのスギの材種別乾燥経過をFig. 102に示す。

外気温および装置内の最高温度が夏季に比較して10～20℃低くなっているため、各材種とも乾燥速度は若干小さくなるが、促進の効果は夏季より大きくなっている。

生材から含水率20%までの乾燥時間をみると、4.5

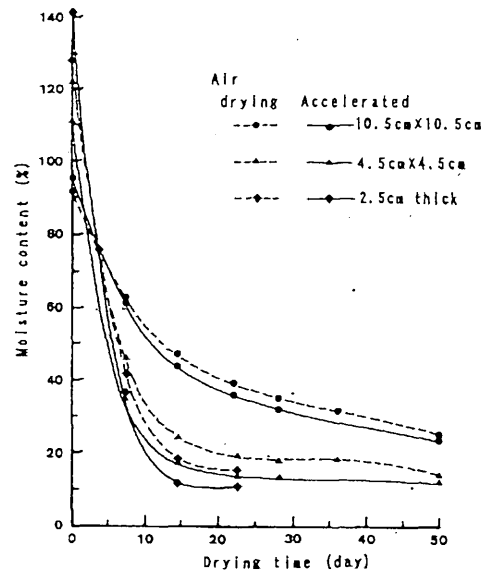


Fig. 100 Behavior of moisture content in SUGI (summer)

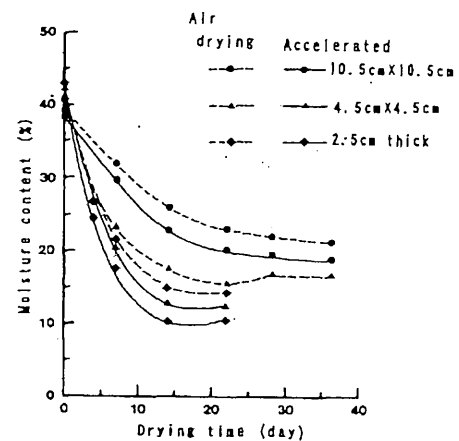


Fig. 101 Behavior of moisture content in BEITSUGA (summer)

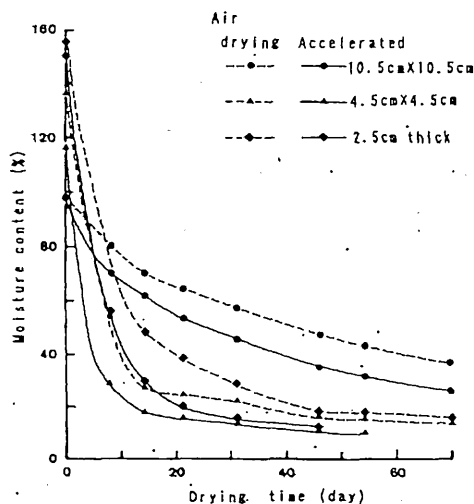


Fig. 102 Behavior of moisture content in SUGI (winter).

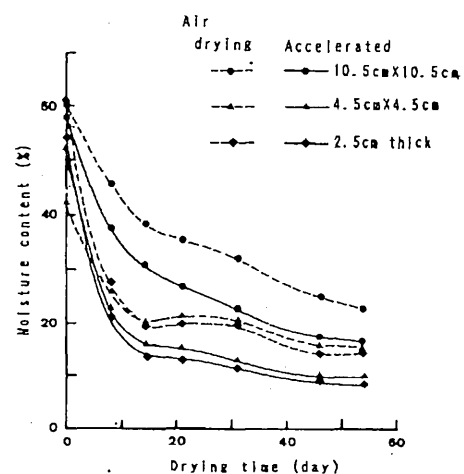


Fig. 103 Behavior of moisture content in BEITSUGA (winter)

cm角材の場合、屋外での天然乾燥は36日を要するのに対して、装置内では12日となり、 $1/3$ に短縮されている。また、板材の場合では屋外が42日に対して装置内では20日となり約 $1/2$ に短縮されている。

また、10.5cm角材の乾燥速度は他の材種に比較して小さいが、70日経過後の含水率は屋外では36%であるのに対して、装置内では26%となり促進の効果は非常に大きい。

次に、Fig. 103はベイツガの乾燥経過であるが、スギと同様に各材種とも装置による促進効果を大きく認めることができる。

ことに、断面積の小さい4.5cm角材および板材は、屋外での天然乾燥の場合含水率20%からはほとんど含水率が低下しないが、装置内では含水率10%近くまで乾燥し、装置利用による促進効果は非常に大きくなっている。

冬季の場合、太陽熱のみではあまり促進効果を期待できないが、簡易な加熱を併用することにより、その乾燥時間を大きく短縮できると同時に、屋外での天然乾燥より低含水率まで乾燥することができ

る。これらの結果からみて、7～9月の夏季においては太陽熱だけの利用で充分促進効果を期待することができるが、11～2月の冬季あるいは梅雨期においては日射も弱く日照時間も短いため、太陽熱の利用方法についても充分考慮するとともに、補助加熱の必要性も検討しなければならない。

装置の外壁は、太陽光線に対して透過率が良く、耐候性に優れたポリエステル板などを二重張りとし、北側の壁面は合板表面に黒色塗装を施して集熱効果を向上するなどの考慮が必要となる。

また、このように壁面を二重構造とすることにより、補助加熱を実施した場合の壁体からの熱損失を少なくすることができるため、冬季間の利用が有利になる。

4) 太陽熱利用乾燥による収縮率

夏季の太陽熱利用および冬季の太陽熱と簡易加熱の併用は、いずれも乾燥温度の上昇により乾燥速度を向上させようとするものである。

乾燥温度が高くなると収縮率が増加して、幅そりなどの狂いが大きくなることは前項で述べた通りであるが、本項でも、自然状態の天然乾燥と装置利用による乾燥とは乾燥温度が異なるため、乾燥温度の差が収縮率におよぼす影響について検討した。

Table 24 および Table 25 に、夏季および冬季の乾燥方法別収縮率を示す。

Table 24 Shrinkage by solar drying (Summer)

Species	Kind of lumbers	Way of drying	At the end of air drying			Perfectly dried	
			M.C. (%)	Shrinkage (wide %)	Shrinkage (thick %)	Shrinkage (wide %)	Shrinkage (thick %)
SUGI	10.5cm square	Air drying	25.3	1.2	1.0		
		Solar drying	24.2	1.2	1.2		
	4.5cm square	Air drying	14.7	1.7	1.9	4.3	4.8
		Solar drying	13.2	2.1	2.4	4.8	5.8
	Simple board	Air drying	13.6	2.8	1.8	6.1	4.2
		Solar drying	12.7	3.5	2.6	6.7	5.4
BEITSUGA	10.5cm square	Air drying	17.8	2.6	2.1	7.3	6.2
		Solar drying	17.0	2.8	1.7	8.6	5.6
	4.5cm square	Air drying	14.4	3.0	2.6	7.2	6.8
		Solar drying	13.1	3.4	3.0	7.4	6.7
	Simple board	Air drying	13.7	3.5	2.7	7.7	6.5
		Solar drying	12.3	4.5	3.4	8.4	7.4

Table 25 Shrinkage by solar drying (Winter)

Species	Kind of lumbers	Way of drying	At the end of air drying			Perfectly dried	
			M.C. (%)	Shrinkage (wide %)	Shrinkage (thick %)	Shrinkage (wide %)	Shrinkage (thick %)
SUGI	10.5cm square	Air drying	36.8	0.6	0.5	4.3	4.4
		Solar drying	25.7	1.0	1.3	4.3	4.3
	4.5cm square	Air drying	14.9	2.7	1.8	5.7	3.7
		Solar drying	9.9	3.9	2.4	6.0	3.7
	Simple board	Air drying	15.3	2.2	1.6	4.9	3.4
		Solar drying	10.3	3.3	2.5	4.8	3.9
BEITSUGA	10.5cm square	Air drying	20.3	2.4	2.1	7.3	6.0
		Solar drying	14.2	3.0	3.8	7.3	5.6
	4.5cm square	Air drying	14.2	3.6	2.8	6.7	5.6
		Solar drying	9.2	4.8	4.3	6.7	6.1
	Simple board	Air drying	13.7	3.7	3.3	6.8	5.8
		Solar drying	8.4	5.0	4.0	6.8	6.3

夏季、および冬季とも天然乾燥終了時の収縮率は、屋外よりも装置内の方が若干大きくなっている。これは、装置内の場合の仕上がり含水率が屋外より低くなるため、当然収縮率も大きくなる訳である。

天然乾燥終了時に幅2cmに採取した試験片を、100℃で全乾にしたときの収縮率をみると、屋外および装置内の収縮率にはほとんど差を認めることができず、太陽熱利用あるいは簡易加熱併用程度の乾燥温度の上昇は、収縮率にはほとんど影響をおよぼさないとみることができる。

D. 天然乾燥促進方法の経済効果

天然乾燥の欠点である乾燥時間の長さを補うために人為的な乾燥促進手段を加えることになれば、当然のことながら乾燥経費は自然状態の天然乾燥より増加することになる。

人為的な手段によって乾燥時間が短縮されて、しかも自然状態の天然乾燥に比較して乾燥経費が安くなれば問題はない。

しかし、天然乾燥の乾燥経費は被乾燥材を長期間固定するための金利、あるいは天然乾燥期間中の管理費（屋根、土台の材料および棧木の損耗費等）のみで非常に安価であるのに対して、促進のために送風、加熱などの手段を加えるとすれば、電力費あるいは設備償却費など、一日当たりの乾燥経費は自然状態の天然乾燥に比較して数倍あるいは十数倍となる。

人為的な手段を加えることによって、例えば乾燥時間が1/2に短縮されたとしても、そのために乾燥経費が2倍になれば経済効果としては0になる。

しかし、乾燥時間が短くなれば、同一材積を乾燥するための土場面積が少なくなることや、材料の回転が速くなるために資金繰りが楽になるなど、直接の乾燥経費以外の利点も生ずるため、計算以外の経済効果も期待できることになる。

また、天然乾燥の大きな目的の一つに人工乾燥経費の節減があるが、こうした見方をすれば促進手段を加えた天然乾燥の経費が人工乾燥経費より安くなれば良いことになる。

そのため、ここでは天然乾燥の促進による経済効果として、自然状態と促進方法での天然乾燥経費の比較、および天然乾燥（自然状態と送風乾燥）と人工乾燥における含水率1%を乾燥するに要する乾燥経費の両面から検討することとする。

a. 強制送風促進法の経済効果

天然乾燥の棧積みには強制的に送風することによって、乾燥初期の高含水率域における乾燥速度が大きくなるとともに、乾燥むらの減少によって、棧積み全体の乾燥時間は自然状態の天然乾燥に比較して大きく短縮される。

こうした強制送風乾燥に要する経費は、送風機の消費電力および送風機の償却費であるが、種々の促進方法の中では最も安価な方法である。

Table 2-6 は、自然状態の天然乾燥と強制送風による天然乾燥経費を比較したものである。自然状態の天然乾燥による乾燥経費は、被乾燥材の材料費とそれに棧積み経費を加えたものの金利と管理費であり、送風乾燥の場合は、これに送風機の消費電力費および送風機の償却費を加えたものである（乾燥土場の地代等は考慮していない）。

ブナの30mm板、心材を含水率80%から25%まで乾燥するのに要する日数にこれらの経費を乗じたものであるが、高山市において7月に乾燥したとき以外は全て送風したときの方が乾燥経費は高くなっている。

Table 2-6 Cost of air drying (from M.C. 80% to M.C. 25 %)

Place	Species Thickness	Date of beginning	Way of drying	Drying time (day)	Interest on money (yen)	Cost for management (yen)	Cost for electric consumption (yen)	Cost for depreciation(yen)	Total (yen)	Rate
Takayama	BUNA 30mm	25 Apr.	Not blown	46	690	368	—	—	1,058	100
			Blown	28	420	224	868	140	1,652	156
		11 May	Not blown	32	480	256	—	—	736	100
			Blown	24	360	192	744	120	1,416	192
	30mm	20 Jul.	Not blown	68	1,020	554	—	—	1,564	100
			Blown	22	330	176	682	110	1,298	83
Hino	BUNA 40mm	13 Jan.	Not blown	130	1,950	1,046	—	—	2,990	100
			Blown	91	1,365	728	2,821	455	5,369	180
		13 Jan.	Not blown	156	2,340	1,248	—	—	3,588	100
			Blown	125	1,875	1,000	3,875	625	7,375	206
	BUNA 30mm	14 Jul.	Not blown	49	735	392	—	—	1,127	100
			Blown	38	570	304	1,178	190	2,242	199
KARAMATSU 45mm	45mm	12 Aug.	Not blown	21	315	168	—	—	483	100
			Blown	16	240	128	496	80	904	187

Note : Interest on money : 7 % per year for price of lumber; 75,000 yen/m³ and cost for piling; 3,000 yen/m³, 15 yen/m³ per day
 Cost for management : 3,000 yen/m³ per year for roof, base and pile, 8 yen/m³ per day
 Cost for electric consumption : Fan 1 HP 8 hrs 18 yen/kwh (3.5m³), 31 yen/m³ per day
 Cost for instrument : Fan 50,000 yen for 7 years using (3.5m³), 5 yen/m³ per day

自然状態の天然乾燥に要する乾燥経費は一日当たり23円/m³であるのに対して、送風したときの乾燥経費は一日当たり59円/m³で、その比は2.57倍となるため、送風による乾燥時間の短縮率が39%以下にならないと送風による経済効果は現われないことになる。

しかし、送風による乾燥経費の増額分の絶対値は比較的小額であるため、前述のように乾燥用土場面積の縮小化、あるいは資金の回転率向上など計算以外の効果を考えれば十分採算に乗る額であると考えられる。

次に、天然乾燥における自然と送風、および人工乾燥において1 m³の材の含水率を1%低下させるに要する経費をFig. 104に示す。

ここで、人工乾燥の乾燥経費は、収容量14m³の蒸気式 I F 型乾燥室 4 室を持つ中規模の工場において、ブナ、30mm板の天然乾燥材（含水率35%）を10%まで6日間で乾燥する場合を想定して、Table 2.7 のように算出した。厳密には、乾燥初期と乾燥末期では乾燥に要する消費蒸気量が異なるため、一日当たりの乾燥経費も異なる訳であるが、ここでは便宜上変わらないものとして一日当たり497円/m³とした。

また、天然乾燥および人工乾燥における含水率1%当たりの乾燥経費は次式により求めた。

$$C_1 = C_2 / \mu$$

但し、 $C_1 = 1 \text{ m}^3$ の材の含水率を
1%減少するに要す
る経費

$C_2 = 1 \text{ m}^3$ 、一日当たりの
乾燥経費

μ = 一日当たりの含水率
減少量

このようにして求めた、 1 m^3 の
材を含水率1%乾燥させるために
要する乾燥経費をみると、
Fig. 104のように含水率が低く
なる程乾燥経費は高くなり、こと
に、乾燥速度が低下して平衡状態
に近くなる含水率30%以下で急激
に乾燥経費が増大する。

天然乾燥における自然状態と送
風乾燥を比較すると、高山市にお
いて7月に乾燥を開始したときを
除き、送風乾燥の方が自然状態よ
り乾燥経費が高くなり、ことに高
山市で1月に乾燥したときは送風
の方が自然状態の数倍の乾燥経費
を示している。

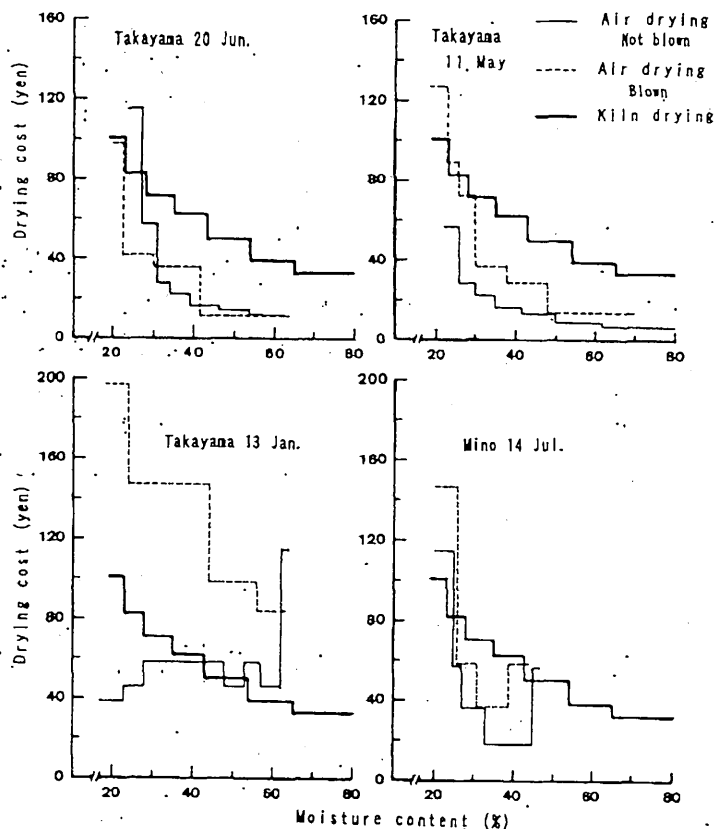


Fig. 104 Cost for drying 1 m^3 of board to M.C. 1 %
(BUNA heart wood 30 mm thick)

Table 27 Cost for kiln drying
(I.F. type, BUNA 30 mm thick, from M.C. 35 % to M.C. 10 %, 6 days,
5 times per month, 14 m^3 at once, 4 rooms, drying 280 m^3 board per month)

Count	Cost(yen)	Cost (yen/month)	Cost (yen/ m^3)	Note
Personnel expenses				
Engineer	1 person 417,000 yen	417,000		5,000,000 yen/year
Boiler man	3 persons 333,333 yen	1,000,000		4,000,000 yen/year $\times$ 3 persons = 12,000,000 yen/year
Worker for piling	4 persons 10,000 yen	800,000		10,000 yen/day $\times$ 4 persons $\times$ 5 times $\times$ 4 rooms
Sub total		2,217,000	7,918	
Direct cost				
Electric consumption	13,440 kWh 18 yen/kWh	242,000		1HP 6 fans $\times$ 4 rooms
Water consumption	120 t 50 yen/t	6,000		0.5 t/hr $\times$ 1/3 (returning 1/3 of water)
Energy consumption	9 t 36,000 yen/t	324,000		0.05 t/hr, oil 6 hrs at midnight
Others		30,000		Papers etc.
Sub total		602,000	2,150	
Cost for maintenance		208,000		Cost for all instrument 50,000,000 yen $\times$ 5 %/year = 2,500,000 yen/year $\times$ 1/12 = 208,000 yen
Cost for depreciation		506,000		
Sub total		714,000	2,550	
Total		3,533,000	12,618	
Cost for management		353,000	1,261	10% of total cost
Interest for money		292,000	1,043	7% of cost for all instruments (per year)
TOTAL		4,178,000	14,921	$14,921 \times 1/30 = 497 \text{ yen}/\text{m}^3 \text{ - day}$

これは、一日当たりの乾燥経費が送風したときは自然状態の2.59倍になるのに対して、乾燥速度はそれだけ大きくならないために含水率1%当たりの乾燥経費が自然状態に比較して送風乾燥の方が大きくなる訳である。

しかし、送風による天然乾燥と人工乾燥の経費を比較してみると含水率30%以上では高山市で1月に乾燥した場合を除き、全て送風乾燥の方が安くなっている。ただし、いずれも含水率30%付近で逆転し、含水率30%以下の乾燥経費は人工乾燥の方が安くなる。

こうした点からみて、送風による経済効果は含水率30%程度までにおいて認められることになり、それ以後は人工乾燥に切り替えた方が良いことになる。

送風による天然乾燥経費と人工乾燥経費を比較すると1m³の材を1%乾燥するのに人工乾燥は送風乾燥の8.4倍となる。送風による天然乾燥速度が人工乾燥速度の1/8.4になるまでは送風した方が経済的であるが、乾燥速度がそれ以下になれば人工乾燥の方が有利になる。

しかし、両者の乾燥速度の下が1/8.4になる時期は、乾燥時期(季節)、板厚あるいは含水率によって異なるため、一概に含水率何%から人工乾燥に切り替えるのが良いとはいえず、送風による乾燥期間の短縮率(乾燥速度)等から適宜決定しなければならない。

いずれにしても、天然乾燥における送風効果は前述したように乾燥むらの減少により棧積み全体の乾燥速度が向上することであり、低含水率域における乾燥速度の向上効果は少ないため、送風による経済効果は含水率30%~35%程度までしか認められないことになろう。

ただし、送風による仕上がり含水率は自然状態に比較して数%低くなるため、曲げ木材料のように比較的高含水率のまま加工に移すような場合は、送風乾燥により目的含水率まで乾燥することができ等の効果期待できよう。

b. 簡易加熱促進法の経済効果

乾燥速度に最も影響の大きい温度上昇を図るために、棧積み内に温床用の電熱線を配置する方法は、設備費が少なく乾燥時間の短縮効果は大きい。熱源に電力を用いるため乾燥経費は大きくなる。

自然状態の乾燥経費は前項の場合と同様一日当たり23円/m³であるのに対して、加熱する場合は乾燥材1.5m³に1kWの電熱線を配置(美濃市の場合は1.5m³に0.5kW)して、連続的に加熱しているため一日当たりの経費は311円/m³(美濃市の場合は167円/m³)となる。

Table 28に、自然および加熱による天然乾燥経費を示す。高山市のように加熱乾燥による時間短縮率の非常に大きい場合でも、乾燥経費は加熱した方が大幅に増加するとともに、美濃市のように時間短縮率が小さいときは約6倍近い乾燥経費となる。

Table 28 Cost for air drying and electric drying
(BUNA heartwood, from M.C. 80 % to M.C. 40 %)

Place	Thickness	Date of beginning	Way of drying	Drying time (day)	Interest on money (yen)	Cost for management (yen)	Cost for electric consumption (yen)	Total (yen)	Rate
Takayama	30mm	21 Oct.	Air drying	76	1,140	608	—	1,748	100
			Electric drying	18	270	144	5,184	5,598	320
	36mm	2 Feb.	Air drying	69	1,035	552	—	1,587	100
			Electric drying	19	285	152	5,472	5,909	372
Mino	30mm	8 Jan.	Air drying	18	270	144	—	414	100
			Electric drying	14	210	112	2,016	2,338	565

Note : Interest on money : 7% per year about cost for lumbers; 75,000 yen/m³ and cost for piling 3,000 yen/m³, 15 yen/m³ per day
Cost for management : 3,000 yen/m³ per year for roof, base and pile, 8 yen/m³ per day
Cost for electric consumption : In Takayama, using 1 kW electric heating for 1.5 m³, 18 yen per kWh, 288 yen/m³ per day
In Mino, using 1 kW electric heating for 1.5 m³, 18 yen per kWh, 144 yen/m³ per day

また、Fig. 105は送風した場合と同様に1m³の材の含水率を1%乾燥するに要する経費を、天然乾燥における自然と加熱、および人工乾燥別に求めたものである。

加熱効果の大きい高山市での10月および2月の乾燥経費を示したものであるが、いずれも加熱乾燥

の方が天然乾燥あるいは人工乾燥に比較して非常に高くなっている。

一日当たりの乾燥経費は、加熱の場合311円/㎡であるのに対して、人工乾燥の場合は497円/㎡と約1.6倍であるため、加熱による乾燥時間が人工乾燥時間の1.6倍以下に短縮されて初めて加熱乾燥の経済効果が認められることになる。

しかし、含水率80%から25%までの人工乾燥日数は、30mm板で約5.6日、36mm板で約7日であり、それに対して加熱乾燥の場合は30mm板で34日、36mm板で43日を要し、乾燥時間は5.4~6.1倍となるため、当然加熱乾燥の経費が人工乾燥の経費より高くなることになる。

本試験の場合、簡易な加熱法という

ことで電熱線を用いているが、乾燥用の熱源として電熱は最も高価となることと、その熱が全て乾燥に用いられず、栈積みの外に逃げるものが乾燥経費の増大につながるものと考えられる。

前出のFig. 9 5 に示す加熱乾燥の熱効率をみても、乾燥時間の経過にしたがって熱効率は小さくなり、含水率が低下するほど熱効率が悪くなるため、Fig. 1 0 5 のように含水率40%以下の乾燥経費が急増することになる。

こうした結果からみて、簡易加熱による天然乾燥の促進方法は、経済的には不利な方法ということになる。

しかし、加熱による促進効果あるいは操作の簡易性などの利点は捨て難く、乾燥設備の不備な工場における少量の材の乾燥などには十分利用できる方法と考えられる。

ただし、高含水率材の乾燥初期、あるいは風の少ない時期に実施するのが経済的にみて有利であるのはいうまでもない。

c. 太陽熱利用乾燥法の経済効果

太陽熱を有効に利用して天然乾燥を促進する方法として、本実験では簡易な装置を試作してその効果を検討したが、夏季の場合その乾燥時間は天然乾燥に比較して1/2あるいは2/3に短縮された。

しかし、冬季においては太陽熱のみで室温を上昇させることが困難であるため、電熱線による補助加熱を併用して乾燥時間の短縮を図った。

このように太陽熱を利用した乾燥法は、雨天あるいは冬季のように日射量の少ないときには効果が期待できないため、他の熱源による補助加熱が必要となる。

また、太陽の日射量に直接影響をうけるため、実施場所による効果にも大きな差が現れることになる。

プエルトリコのような低緯度（北緯18°）の場所では、1 inch厚さのマホガニを含水率48%から22%まで乾燥するのに天然乾燥では12日、太陽熱利用では7日と約1/2に乾燥時間が短縮すると同時に、仕上がり含水率は天然乾燥の方が22%であるのに対して太陽熱利用では13%まで乾燥するなど、その効果は非常に大きくなっている⁹⁹⁾。

また、アメリカのマジソン付近では夏季の効果が大きい割りには冬季の効果が少なく季節による差が大きくなっている⁴⁵⁾。

鹿児島県におけるスギの10.5cm心持ち柱材の太陽熱利用乾燥では、夏季11日、冬季24日で含水率60

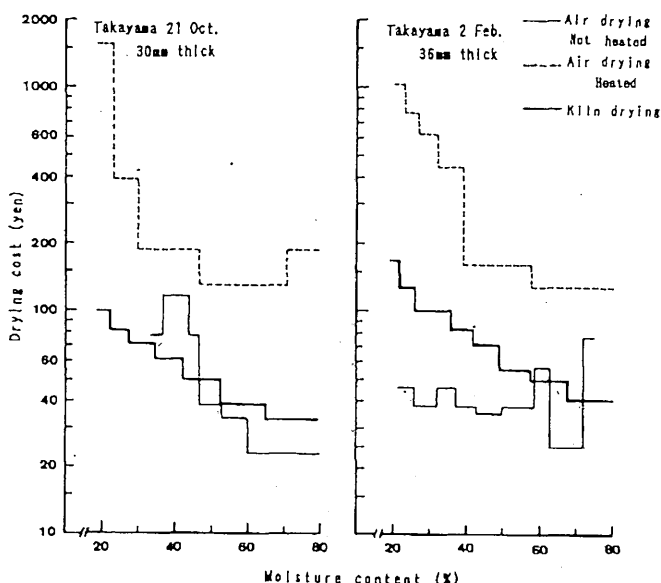


Fig. 105 Cost for drying 1 m³ of board to M.C. 1% (BUNA heartwood)

%から30%まで乾燥できるとしているが¹⁰¹⁾、岩手県においてスギの11.5cm心持ち柱材を含水率70%から30%まで乾燥するのに冬季で38日を要している^{102,103)}。

太陽熱利用乾燥法は、このように実施場所や実施季節により、促進効果が異なるとともに、冬季の効果は小さくなる。

太陽熱利用乾燥を実用化するためには、装置内に蒸気ヒータを配置する方法¹⁰⁴⁾や、除湿乾燥機と併用する方法⁶⁰⁾、あるいは太陽熱をより有効に集めるために集熱器を別に設置する方法¹⁰⁰⁾などが検討されている。

本実験のように簡易な装置の場合でも天然乾燥に比較すれば十分効果は認められるが、実用化するにあたっては使用する壁材料の太陽光線の透過性や耐久性、あるいは室内空気の循環や吸、排気など十分考慮しなければならないため設備費も大きくなり、その装置は人工乾燥装置に近い予備乾燥装置ということになる。

乾燥経費も、設備の償却費や人件費あるいは電力費など、補助加熱を実施しなくても相当大きくなるため、経済効果を検討する場合は天然乾燥と比較することは困難となる。

そこで、ここでは太陽熱利用乾燥法と人工乾燥法の比較によってその経済効果を検討することとする。また、本実験においても供試材には針葉樹の建築用材を用いているが、経済性の検討もスギ、ヒノキの柱材で検討することとする。

これは建築用針葉樹材の場合、日本農林規格としては製材品の人工乾燥材は含水率15%以下に規制されているが、この規制は現状では少し厳しすぎるということから、暫定的に20%（スギは25%）以下で良いということになっている¹⁰⁵⁾。

しかも、これは電気式の含水率計による測定値で良いとされているが、この程度の含水率までの乾燥ならば太陽熱利用乾燥で十分目的が達せられると考えられるため、針葉樹材を乾燥したときの経済性を検討したものである。

人工乾燥としては、針葉樹柱材の乾燥に最も多く用いられている除湿式乾燥法と、従来から一般的に用いられている蒸気式IF型乾燥法との二つの方法を比較の対象とした。

除湿式および蒸気式の乾燥経費の試算はいずれも収容量50石の乾燥室2室(38m³)を有する工場を想定して久田¹⁰⁶⁾が試算したものであるが、蒸気式の場合は貫流ボイラによる重油だきを前提としている。

Table 29 Base for drying cost

Way of drying (volume of wood)	Dehumidified drying 50 koku, 2 rooms (38m ³)	Steamed drying 50 koku, 2 rooms (38m ³)	Solar drying 50 koku, 2 rooms (38m ³)
Cost for instruments			
Room for drying	18,000,000 yen	18,000,000 yen	8,000,000 yen
Boiler		5,000,000 yen	
For depreciation	182,000 yen/month	233,000 yen/month	81,000 yen/month
For maintenance	36,000 yen/month	47,000 yen/month	14,000 yen/month
Personnel expenses			
For cargo working	40,000 yen/time, 2 persons×2 day/time	40,000 yen/time, same to the left	40,000 yen/time, same to the left
For operator	90,000yen/month, 300,000 yen/month × 0.3 person	90,000 yen/month per person	60,000 yen/month for 0.2 person
Cost for	(kW/month)	(kW/month)	(kW/month)
Electric consumption	For fan 3,000 For dehumidification 5,500(SUGI) 3,200(HINOKI) For heating 5,800(SUGI) 2,900(HINOKI)	For fan 5,800 For boiler 2,200	For fan 3,180 For circulation 0.75×6 fans×2 rooms For draw and exhaust 0.4×2 fans×2 rooms Using fan for 10 hrs. per day
Fuel		Oil (ton/month) SUGI 7.0 HINOKI 4.9	

Note: Way of calculation about dehumidified and steamed drying are based on Hisada(1988).¹⁰⁷⁾
Time for depreciation ; 7 years remaining 15%, cost for maintenance is calculated by 2.4 %/year.
Cost for electric consumption ; 18 yen/kWh, cost for oil ; 30 yen/l

Table 30 Cost for kiln drying and brake-even point of solar drying

Species	Way of drying	Extent of H.C. (%)	Drying time (day)	Monthly production (m ³)	Cost for drying (yen/month)				Brake-even point of solar drying (day)
					Direct cost	Personnel expenses	Cost for instruments	Total	
SUGI	Dehumidified drying(35-45°C)	100-35	18	63	4,100	2,500	3,500	10,100	46
		100-20	28	41	6,400	3,300	5,400	15,100	68
	Steamed drying (60-70°C)	100-35	12	95	4,000	2,000	2,900	8,900	40
		100-20	19	60	6,200	2,600	4,600	13,400	61
HINOKI	Dehumidified drying(35-45°C)	35-25	9	127	1,400	1,800	1,700	4,900	22
		35-20	12	95	1,800	2,000	2,300	6,100	28
	Steamed drying (45-55°C)	35-25	7	163	1,900	1,600	1,700	5,200	24
		35-20	9	127	2,400	1,800	2,200	6,400	29

Note: Way of calculation about dehumidified and steamed drying are based on Hisada(1988).¹⁸⁾
Back cut lumbers, quality of products is JAS first

また、太陽熱利用乾燥装置は北海道林産試験場型を基礎として製造され、現在市販されている型式のものを想定して試算した。

この装置は、受光壁面にはハニカム構造のダブルカーボネイトを用い、室内空気の循環には1 Hpのファン6台、吸、排気用ファン各1台(1/2Hp)を備えている。

乾燥経費のそれぞれの算定基礎は、Table 2 9に示すが、太陽熱利用乾燥装置も50石入り(14m³)2室を有する場合を想定している。

これらの装置を用いて乾燥した場合の乾燥経費として、除湿式および蒸気式の乾燥経費はTable 3 0¹⁰⁾のように算出される。

また、太陽熱利用の乾燥費はTable 2 9より、1日、1 m³当たり設備費87円、人件費83円、電力費50円の計220円となる。

Fig. 1 0 6は、これらの乾燥経費より、太陽熱利用乾燥の損益分岐点を求めたものである。Table 3 0で試算されたように、スギの12cm角心持ち柱材の除湿乾燥経費は、35%までが10,100円/m³、20%までが15,100円/m³であり、太陽熱利用乾燥の場合に乾燥経費がそれと同額になる乾燥日数はそれぞれ46日、68日となる。

すなわち、太陽熱利用乾燥によって35%まで乾燥するに要する日数が46日以下であれば太陽熱利用乾燥の方が有利であり、それ以上の乾燥日数を必要とする場合は除湿乾燥の方が有利であることになる。このようにして太陽熱利用乾燥法と人工乾燥法との損益分岐点を求めるとTable 3 0の右欄のようになる。

人工乾燥の場合は、乾燥時期あるいは乾燥場所による乾燥時間の変動は少ないが(除湿乾燥の場合は、外気温による影響が大きいため、冬季の低温時には若干乾燥時間が長くなる)、太陽熱利用乾燥の場合は、季節や場所によって著しく乾燥時間が変動する。

日照時間の短い裏日本や緯度の高い所で太陽熱利用乾燥を実施する場合は、前述の損益分岐点以上の乾燥日数を要することが多くなると思われるため、太陽熱利用のみでは不利となる。

寺沢ら¹⁷⁾によれば、赤道近くの晴天の多い場所では含水率15%までの乾燥には太陽熱利用が有利であるが、日本では、夏季の乾燥初期(80%から50%)にのみ有効であり、それ以外の時期における乾燥には補助加熱が必要であるとしている。

太陽熱利用乾燥装置は、前述のように人工

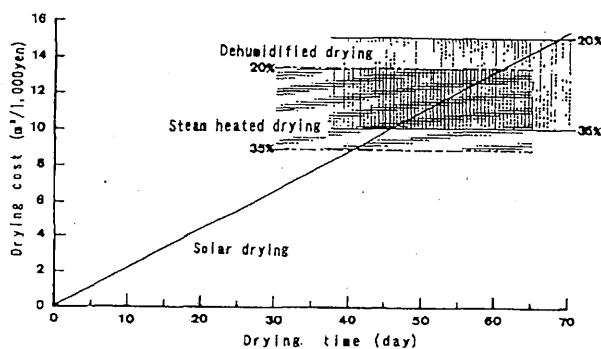


Fig. 106 Brake-even point of solar drying (SUGI lumber 12 cm square)

乾燥装置に近い設備費を必要とするが、これに補助加熱装置を追加してもそれ程高額にはならない。

設置当初から補助加熱装置を設置して、日射量の少ない時には補助加熱が実施できるようにした方が有効な利用方法となろう。

もちろん、補助加熱装置も蒸気など比較的運転経費の少ない方法を選ぶ必要があると同時に、装置全体の断熱性を高めることが重要となる。

要するに、太陽熱利用乾燥装置を使用する場合は、装置の性能あるいは耐久性など万全なものを選び、太陽熱の有効な利用と補助加熱の適切な併用により、乾燥経費の軽減を図ることが必要である。

E. 要 約

木材の天然乾燥は、乾燥経費の節減あるいは乾燥歩止まりの向上を図る上から重要かつ適正な方法であるが、乾燥速度が気象条件に支配されることから、長期間を必要とすると同時に季節により乾燥時間が変動し、計画的な加工が実施できない欠点を有する。

そのため、天然乾燥に人為的な手段を加えて乾燥時間の短縮を図るとともに、計画的な原材料の確保を容易にする方法として、各種の天然乾燥促進方法について検討した。

棧積み側面に送風機を設置して強制的に送風する方法、棧積み内に温床用の電熱線を配置して加熱する方法、あるいは透明な材料により乾燥装置を試作して太陽熱を有効に利用することにより天然乾燥を促進する方法などについて、その促進効果や経済効果を検討した。

その結果を要約すると次のとおりである。

強制送風による天然乾燥の促進

- (1) 1つの棧積み(3.5㎡)に1Hpの送風機で強制的に送風すると、棧積み内の材間風速は自然状態の2倍以上となる。
- (2) 強制的に送風することにより、天然乾燥の仕上がり含水率は自然状態よりも数%低くなる。
- (3) 送風することにより、棧積み内の乾燥むらが少なくなり、仕上がり含水率は比較的均一になる。
- (4) 送風することにより、棧積み全体の乾燥速度は一枚板の乾燥速度に近くなる。また、送風が乾燥速度におよぼす影響は心材よりも辺材の方が大きくなる。
- (5) 送風による乾燥速度の向上は、自然状態の風速が小さい高山市の方が、自然状態の風速の大きい美濃市より大きくなる。
- (6) 送風することにより、生材から含水率25%までの乾燥時間は、高山市で7月にブナ30mm板を乾燥した場合は自然状態の1/3になる。しかし、平均してみると送風により乾燥時間は2/3程度に短縮される。

簡易加熱による天然乾燥の促進

- (1) 棧積み内に温床用電熱線(500W 2本)を配置して加熱することにより、棧積み内の温度は気温より10℃以上高くなる。
しかし、棧積み全体(3㎡)を均一に10℃上昇させるためには500Wの電熱線4本が必要となる。
また、風の強いときには熱が棧積み外に逃がされて温度上昇率は低くなる。
- (2) 加熱することにより、乾燥初期の乾燥速度は非常に大きくなるとともに、天然乾燥の仕上がり含水率は自然状態に比較して7~10%低くなる。また、こうした加熱の効果は心材より辺材の方が大きく現れる。
- (3) 棧積み内部に電熱線を配置しているため、棧積み中央部の方が速く乾燥し、自然状態に比較して棧積み全体の乾燥むらは非常に小さくなる。
- (4) 高山市でブナ30mm板を10月に乾燥した場合、生材から含水率40%まで乾燥する時間は自然状態の1/4に短縮された。また、高山市でブナ36mm板を2月に乾燥したときは、生材から含水率20%までの乾燥時間は自然状態の1/2に短縮された。

- (5) 高山市および美濃市における加熱効果を比較すると、気温が低く風の少ない高山市の方が効果は大きく、気温が高く風の強い美濃市の方が加熱効果は小さくなる。これは、美濃市の場合には自然状態のままで乾燥速度が比較的大きいことと、風により熱が棧積み外に逃がされるためである。
- (6) 電熱線により加熱したときの熱効率をみると、乾燥初期の高含水率時には30～45%程度であり、含水率の減少にともなって熱効率も低くなり、乾燥末期には20%以下となる。このように、気温が低く、風が少なく、高含水率の時の方が熱効率は高い値を示す。
- (7) 乾燥速度は自然状態に比較して非常に大きくなるが、加熱乾燥による収縮率をみるとほとんど差がなく、乾燥歩止まりも良好である。

太陽熱利用乾燥による天然乾燥の促進

- (1) 北側を除く壁面および屋根に塩化ビニル波板を用いて、太陽熱利用乾燥装置を試作したが、装置内の温度は外気温より最高21℃、夜間でも5℃程度高い値を示した。また、装置内の平衡含水率は屋外より4～8%低い値となった。
- (2) 太陽熱利用乾燥装置による夏季の実験では、スギの建築用材の場合、生材から含水率20～15%までの乾燥時間は屋外の2/3に短縮されるとともに、仕上がり含水率は4～6%低い値となった。また、ベイツガの建築用材でも同様の結果を得た。
- (3) 冬季においては、太陽熱のみでは室温の上昇が期待できないため電熱線の加熱と併用したが、生材から含水率20%までの乾燥時間は1/2または1/3に短縮された。ベイツガにおいても同様の結果を得た。
- (4) 太陽熱利用乾燥と屋外における天然乾燥との乾燥材の収縮率には差が認められなかった。

天然乾燥促進法の経済効果

- (1) 棧積みで強制的に送風する方法は、電力費を必要とするため1日1㎡当たりの乾燥経費は自然状態の2.57倍高くなる。そのため、高山市で7月にブナ30mm板を乾燥したとき以外は全て送風乾燥の方が乾燥経費は高くなる。
- (2) 送風乾燥により1㎡の材の含水率を1%乾燥するに要する乾燥経費は、人工乾燥のそれと比較して1/8.4となる。送風乾燥の乾燥速度が人工乾燥の1/8.4以下になるまでは送風乾燥の方が人工乾燥より有利であり、その時の含水率はおおむね30%程度である。
- (3) 電熱線による加熱乾燥は、電力費が非常に大きくなるため、自然状態の天然乾燥に比較して加熱乾燥の乾燥経費は3～6倍となる。
- (4) 1㎡の材の含水率を1%乾燥するに要する乾燥経費は、人工乾燥の場合加熱乾燥の1.6倍となるが、加熱乾燥の乾燥時間は人工乾燥時間の5.4～6.1倍であるため、乾燥経費は人工乾燥より加熱乾燥の方が高額となる。

しかし、加熱による促進効果は非常に大きいため、乾燥設備を持たない工場が少量の乾燥材を必要とするときには十分考慮に値する乾燥方法と考えられる。

- (5) 太陽熱利用の乾燥装置は、設備費も相当高額となるため、天然乾燥の促進方法というよりも予備乾燥装置としての考え方が必要であり、室内空気の循環あるいは補助加熱装置など、万全の装置を備えたものが必要である。
- (6) 太陽熱のみを利用して乾燥する場合の人工乾燥との損益分岐点は、スギの12cm角柱材では、生材から含水率35%までは50日、含水率20%までが68日となり、それ以上の乾燥日数を必要とする場合は人工乾燥の方が有利となる。

VII. 除湿式乾燥法による乾燥性能

除湿乾燥は、低温で稼動するために乾燥操作が容易であると同時に、乾燥による変色や損傷の発生が少ないなど、あまり高度な乾燥技術を必要とせず、しかも電力による自動制御方法を採用しているためボイラやボイラーマンが不要といった利点のために急速に普及し、製材工場などにおける建築用針葉樹材の乾燥の主流となっている。

木材工業の進展にともなう乾燥材の必要性や、一般建築用材に対する乾燥材の要求と含水率規制の強化など、多くの難問を抱えた時期にタイミングよく現れたのが除湿式乾燥法である。

除湿式乾燥法は、乾燥室内に冷却管を設置して水蒸気を凝結除去する方法や、吸湿性の薬剤を吸着させた蜂巢状の装置を乾燥室内に設置して除湿する乾式除湿方法などが試みられたが、乾燥性能あるいはコストの面から実用化されるまでには至っていない。

現在普及している除湿式乾燥法は、ヒートポンプ方式による除湿機で室内の水分を除去すると同時に、その時に冷却された空気の前熱と水蒸気凝縮の潜熱を再利用する構造のため、非常に省エネルギー的な乾燥方法である。

こうした省エネルギー効果とともに低温で操作するための利点は大きいですが、そのための欠点も多く、低含水率域の乾燥速度が小さく含水率10%程度まで乾燥する場合は乾燥経費が非常に高くなる。

また、除湿能力が小さいと乾燥初期にカビが発生する危険がある。あるいは乾燥応力の除去が困難であるため、応力が問題となる用途には利用できない、などの問題がある。

この章では、我が国に始めて設置された、大型の除湿式乾燥装置の乾燥性能について述べ、また建築用針葉樹材の乾燥方法および乾燥経費について述べる。

また、除湿式乾燥装置の持つ特徴を生かしながらその欠点をカバーするために、蒸気式加熱乾燥装置との組み合わせ方法の検討や、樹種、材種あるいは含水率範囲の利用適性について述べる。

A. 除湿式乾燥装置の乾燥性能

岐阜県内の工場に我が国で始めて大型の除湿式乾燥装置が設置されたのを機会に、その装置を使って針葉樹および広葉樹板材の乾燥試験を実施し、乾燥むら、乾燥時間および熱消費量などについて検討した。

a. 試験に用いた乾燥装置の概要

試験に用いた除湿式乾燥装置はFig. 107に示すような木造の乾燥室と、イタリアのシーフ社製、ADS-9型の除湿・加熱装置からなっている。

乾燥室の大きさは、間口15m、奥行10m、高さ4.5mであり、最大収容量は大约200 m^3 である。建物の軸組は木造であり、壁面および天井は厚さ120mmの発泡スチロール（YBボード）を2枚重ねとし、その中間には厚さ15mmのモルタルをはさみ、表裏両面は厚さ25mmの防水モルタルで被覆している。扉は幅5mの観音開き3組よりなり、厚さ120mmの発泡スチロールを合板で挟んだものである。

除湿・加熱装置は乾燥室の裏側に設置

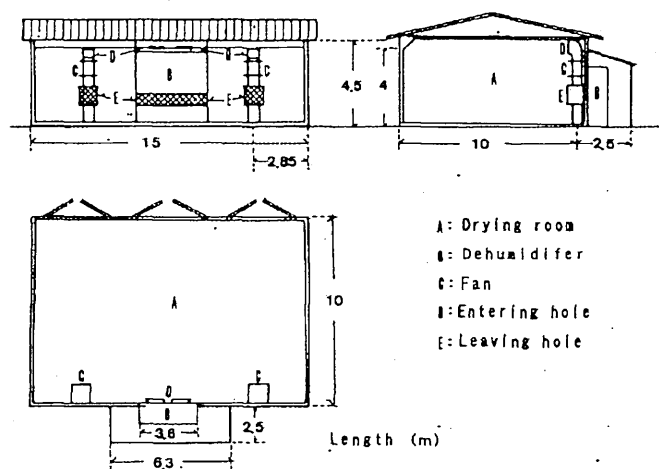


Fig. 107 Equipment of dehumidified drying

されており、コンプレッサとフロンガスR-22による冷却除湿および加熱装置と、外気温が18℃以下のときのみ稼動する補助ヒータ、それに室内空氣の循環をはかる送風装置の3機構より構成されている。

乾燥室内の空氣循環は、高さ4mの位置にある30×90cmの吹出口2個と、その両側に設置された補助ファン（シロッコ型・5Hp）2基によりまかなわれている。また、乾燥操作はおおむね次のように行われている。

乾燥開始時の室温上昇は補助ヒータによって実施し、設定された温度条件（45℃、80%）に達すると除湿回路の運転に切り替えられる。除湿回路の稼働中の加熱は、冷却装置の放熱だけによってまかなわれている。

除湿回路の稼働中の温度は40～45℃、相対湿度は60～80%であり、それぞれ指示計にしたがって自動制御されている。

またこの期間における乾燥室内の空氣は室内を循環するのみで、原則として吸・排気は行われず、凝結水のみが室外に排出されるように設計されている。

乾燥が進行して蒸発量が低下すると（含水率25%以下）、除湿回路からヒートポンプ回路に切り替えられ、温度は50～60℃に保たれる。相対湿度は50～60%に指示されるているが、除湿されないためこの期間は排気によって湿度が調節されている。

全乾燥期間を通じて、乾燥室内の空氣はなるべく排気せず、排気する場合でも熱交換器を通し、エネルギーロスを可能なかぎりおさえるように設計されている。

b. 試験方法

1) 供試材および積方法

試験に用いた樹種は、ロシア産のタモ (*Fraxinus mandshurica* Rupr.: 全乾比重0.51～0.59、平均0.56)、および国産のツガ (*Tsuga sieboldii* Carr.: 全乾比重0.44～0.51、平均0.48) の2樹種で、タモは厚さ30mm、幅30～50cmの耳付き板、ツガは厚さ25mm、幅20～30cmの幅決め板で、長さは310cmあるいは180cmであり全て生材である。

使用した積木は厚さ20mm、積木間隔は60cmである。1パッケージの大きさは幅180cm、高さ85cm、長さは180～310cmであり、高さ方向に3あるいは4パッケージを重ねて一つの積みを構成している。

積みの配置はFig. 108に示すとおりであり、収容量はタモ90m³、ツガ50m³、計140m³である。

2) 試験材の設置方法

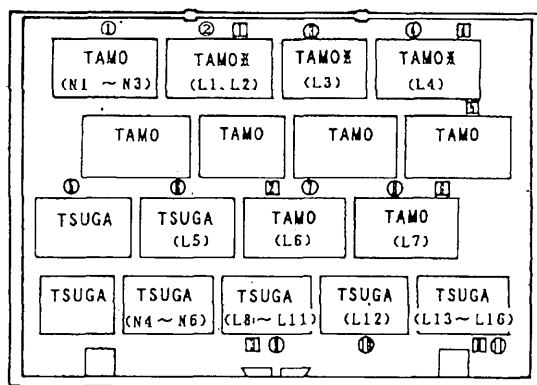
乾燥経過および乾燥室の乾燥むらを測定する試験材は幅18cm、長さ60cmで、タモは板目板（一部追付材を含む）を16枚、ツガは板目板6枚を用いた。

試験材の両木口は銀ニスによりエンドコーティングして、Fig. 108に示す位置に設置した。含水率は一日おきに試験材の重量を測定し、試験終了後に全乾法により含水率を求めた。また、それにより各測定時の含水率を算出した。

3) 温度分布および風速分布の測定方法

乾燥室内の温度分布は、Fig. 108のように吸込口直前の積み側面に白金抵抗式の温度記録計を設置するとともに、各積みの側面に8個の水銀温度計を設置し、試験材の重量測定と並行して温湿度を測定した。

また、乾燥室内の風速分布は、乾燥開始前に



- (): Test boards No.
- : Measuring point of temp. and R.H.
- : Measuring point of air velocity
- ※ : 3 tiers others: 4 tiers

Fig. 108 Layout of test boards and measuring points of temperature and air velocity

最前列の棧積み風の風上側、中央列および最後列の棧積み風の風下側において、上下方向および横方向に熱線風速計を用いて測定した。

c. 実験結果と考察

1) 乾燥室の風速分布

乾燥室内の各測定位置における風速分布をFig. 109に示す。扉側より最前列の吹込み側は平均150cm/sec、中央列は平均130cm/sec、最後列の吹出し側は平均70cm/secと、風下側になるほど風速が低下している。

また、各位置とも棧積みの高さ方向では風速のむらはあまりないようであるが、横方向の風速分布では両端の棧積み内の風速が若干少ないように思われる。

送風機から吹出されて扉側で吹下ろしている風速は250~300cm/secであり、この風量からみれば材間風速が150cm/sec程度は見込まれることになる。

しかし、実際の材間風速はその約1/2となり、棧積み間の空間あるいはパッケージの空間(約10cm)を逃げる風が大きいことを示している。

室内空気の循環用送風機は、装置内の主送風機が10Hp、補助送風機が5Hp2台で計20Hpであるが、従来のIF型乾燥室の場合は、収容量1m³当たり約0.5Hpの送風機を設置していることからみれば約1/5程度であることと、シロッコファンを用いているために風速不足は当然であろう。

生材からの乾燥を実施する場合、はなはだしい乾燥むらを生じさせないための標準的な材間風速は150cm/secが必要であるとされているが⁴⁷⁾、この乾燥装置の場合、送風機の増設による能力の向上と棧積み適正な配置、あるいはバッフルの設置などによって空間部を逃げる風を減少させ、材間風速の増加をはかることが必要である。

2) 温度分布

乾燥時期別の乾燥室内の温度分布をTable 31に示す。乾燥初期(乾燥開始後17時間)の補助ヒータによる加熱時には、最高40℃、最低35℃を示し、温度が低く蒸発量が小さい割りには大きな温度むらを示している。

Table 31 Behavior of temperature in drying room

Measuring time		Measuring point						Maximum distribution of temperature
		Front	Center	Behind	Front	Right Center	Behind	
Initial (17 hrs)	θ (°C)	40.0	35.5	36.0	37.5	36.0	35.0	5.0
	$\Delta \theta$ (°C)	5.5	1.0	2.0	3.0	2.0	1.0	4.5
Middle (144 hrs)	θ (°C)	47.0	42.5	42.0	44.0	43.5	40.0	7.0
	$\Delta \theta$ (°C)	13.5	9.5	9.5	11.0	11.0	7.5	6.0
Final (240 hrs)	θ (°C)	56.5	57.5	57.0	56.5	58.0	57.5	1.5
	$\Delta \theta$ (°C)	17.5	17.5	17.5	17.5	19.0	17.5	1.5

Note: θ ; Dry bulb temp. $\Delta \theta$; Depilation of dry and wet bulb temp.

しかし、乾燥室内の湿球温度は場所による差がほとんど認められなかった。そのため、乾球温度のむらがそのまま乾湿球温度差、すなわち相対湿度のむらにつながり、乾燥むらの原因となる。

乾燥速度の最も大きい乾燥中期(乾燥開始後144時間)は、最高47℃、最低40℃と、温度のむらは

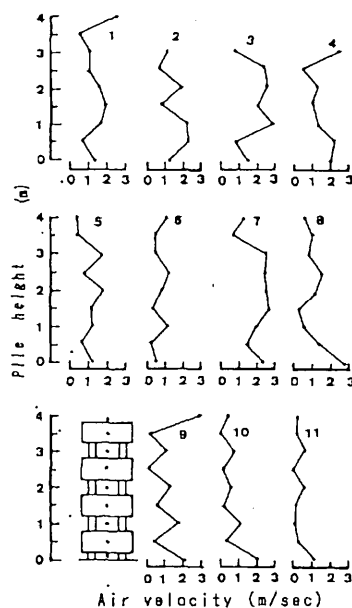


Fig. 109 Air velocity distribution in drying kiln

7℃となり、乾湿球温度差も最高13.5℃、最低7.5℃と大きなむらを示している。乾燥末期（開始後240時間）は含水率が低下して蒸発量が少なくなるため、温度、乾湿球温度差ともむらは少なくなり、平均化してくる。

このように乾燥室内の温度むらは大きく、各乾燥時期を通じて風上側中央部の温度が最も高く、風下側右隅が最も低い温度を示している。

この乾燥室の大きさおよび風速分布からみて、この程度の温度むらが現れるのは当然と考えられるため、前項で述べたとおり配風方法の改善によって材間風速の向上をはかるとともに、補助ヒータを中央部に設置するなどの方法によって乾燥室内の温度むらを減少させることが必要である。

3) 乾燥経過および乾燥むら

Fig. 110 に乾燥室の設定温湿度（指示）とその経過および含水率減少経過を示す。

温湿度経過をみると設定温度と室内温度には5～10℃の差が認められるが、温湿度のコントロールは装置内の吹出し口近くで実施しているのに対して、室内温度を記録したのは風下側であるため、風上側の温度は設定温度にほぼ近いものと思われる。

主として除湿回路が稼動している乾燥開始後120時間の乾燥経過をみると、初期含水率および位置により若干の差はあるが、平均してほぼ直線的に含水率が減少している。

この乾燥装置の場合は除湿能力が乾燥速度を決定しているため、これ以上の乾燥速度を期待することは無理であろう。

乾燥開始120時間以後は、ヒートポンプによる加熱のみが行われて除湿機は働いていないため、湿度の調節は排気により実施されている。

しかし、排気を頻繁に実施すると室温が低下するため、排気は短時間に比較的湿度の高い条件で操作しており、この時期の乾燥速度も比較的小さくなっている。

Fig. 111 に栈積みの位置および樹種別の乾燥経過を示す。

栈積みの上下方向、あるいは横方向における乾燥速度は温度むらが大きいわりにはあまり差が認められなかったため、風上側と風下側との乾燥むらについてのみ示すが、風上側と風下側の乾燥速度には大きな差があり、上下方向および横方向のどの位置においても風下側の乾燥が遅れている。

しかし、こうした風下側の乾燥遅れも含水率の減少とともに少なくなり、乾燥終了時の乾燥むらはほとんど解消されている。

このように、乾燥初期において栈積み位置の上下方向や横方向の乾燥むらが少なく、風上側と風下

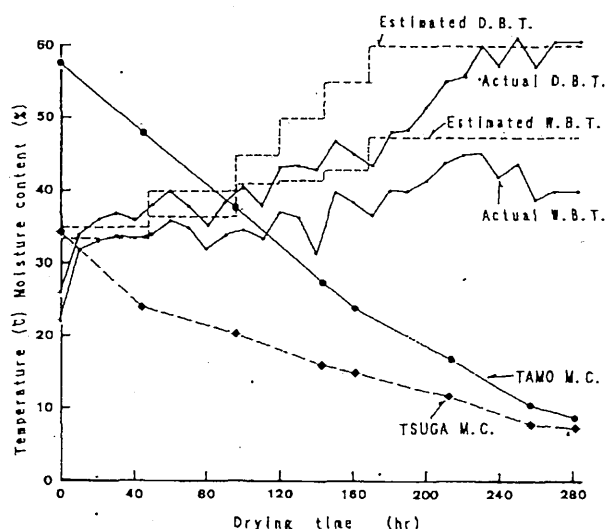


Fig. 110 Behavior of temperature and moisture content by dehumidified drying

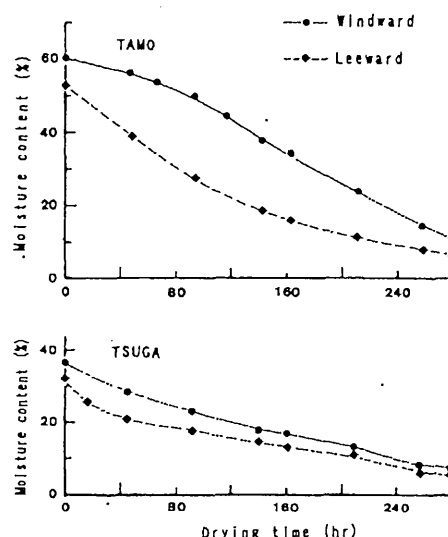


Fig. 111 Behavior of moisture content by dehumidified drying

側の乾燥むらが大きくなる理由としては、乾燥室内の温度むらが乾燥初期で5℃、乾燥中期で7℃であるのに対して、風下側の風速は風上側の1/2以下であるため、温度むらより風速むらの方が乾燥速度におよぼす影響が大きいものと考えられる。

4) 乾燥時間および乾燥速度

除湿乾燥試験で含水率を測定した試験材と隣接した箇所から採取した試験材6枚(タモ材)を用いて、一般的な加熱乾燥による乾燥試験を行った。

加熱乾燥に用いた試験装置は電熱式のIF型乾燥試験装置であり、そのときの温度、湿度経過および試験材の含水率減少経過をFig. 112に示す。乾燥開始11時間後に約9時間の停電があったが、これを含めて約120時間で平均含水率10%まで乾燥している。

これに対して、除湿乾燥の場合は平均含水率10%までの乾燥時間が約280時間であり、一般的な加熱乾燥の約2.3倍の時間を要している。

この加熱乾燥試験は、試験装置により栈積みをしないう状態で実施しているため、実際の乾燥室における乾燥むらによる乾燥時間の延びを見込む必要があるが、IV章のCのcで述べたように、一枚板と栈積みした時との乾燥速度比を1:1.6として計算すると、除湿乾燥は加熱乾燥の1.45倍の乾燥時間を要することになる。

次に、加熱乾燥および除湿乾燥における各含水率時の乾燥速度をFig. 113に示す。

加熱乾燥の場合は、高含水率時の乾燥速度が非常に大きく、含水率15%以下の乾燥速度が著しく小さくなっている。それに対して除湿乾燥の場合は高含水率時の乾燥速度も小さく、含水率20%以下の乾燥速度は加熱乾燥の36%まで低下している。

5) 除湿乾燥装置の消費エネルギー

この除湿式乾燥装置の熱消費量を求めるため、乾燥開始後17時間目における時間当たりの消費エネルギーと、そのときの除湿機より排出される凝結水の量を測定した。

この乾燥装置の消費エネルギーは電力だけであるが、除湿機あるいは加熱装置や室内空気循環用のモータなど個々の消費電力は測定できないため、工場の積算電力計により乾燥装置全体の消費電力を求めた。

乾燥開始後17時間目の時間当たりの消費電力は44.5kWhであり、このときに排出された凝結水は85

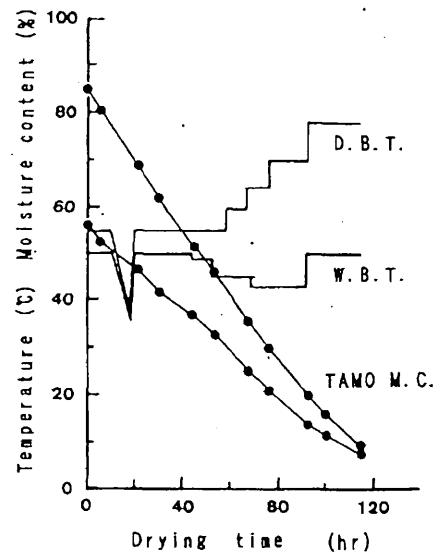


Fig. 112 Behavior of moisture content by electric drying (TAMO 30 mm thick)

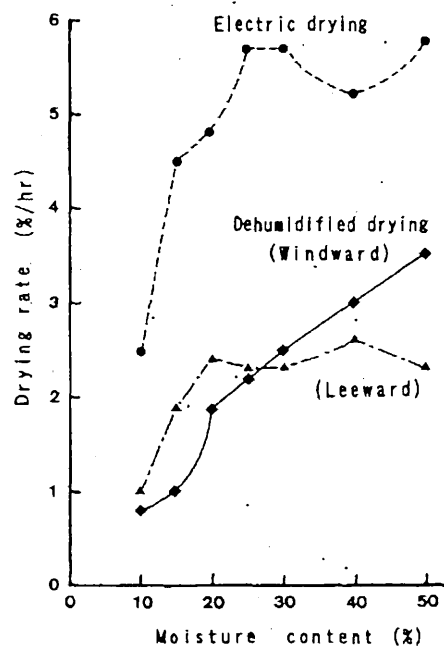


Fig. 113 Behavior of moisture content by dehumidified drying and electric drying (TAMO 30 mm thick)

kgであるため、両者の熱量比を求めてみると次のようになる。

$$85\text{kg} \times 560\text{kcal} / 44.5\text{kW} \times 860\text{kcal} = 1.24$$

すなわち、乾燥装置の消費エネルギーに対して1.24倍の仕事をしていることになる。この値は除湿機から排出された凝結水のみを乾燥により除去された水分量として計算したものであるが、乾燥室全体の含水率減少量からみればもっと高くなる。

試験材の含水率減少量から全収容材積の水分減少量を推定すると、乾燥開始から17時間の間に減少した水分量は約2900kgとなり、時間当たりの蒸発量は約170kgとなるため、除湿機より凝結水として排出される以外に乾燥室からの排気により蒸気の形で同量程度の水分が除去されていることになる。

このように含水率減少量から考えれば、この除湿式乾燥装置における水分除去に用いられた熱エネルギーは、電力の消費エネルギーの約2.5倍となり、非常に高い成績係数を示すことになる。

この除湿式乾燥装置はヒートポンプ利用の除湿機を用いているため、このように省エネルギー効果が非常に大きくなっている。

B. 針葉樹柱材の除湿式乾燥方法

ヒートポンプ方式の除湿式乾燥法は、前項で述べたように省エネルギー型の乾燥方法であると同時に、電力を用いているため操作が比較的容易であり、しかも低温で操作するため高度な技術を必要としないことと、温度による変色（乾燥ヤケ）が発生しないなどの利点がある。

そのため、東濃桧のように材色をセールスポイントにしている銘柄材の乾燥には最も適していることから、ヒノキの生産工場において急速に普及した。

1988年度において、中部電力株式会社管内には136基の除湿式乾燥装置が設置されている。これは、前述のイタリアのシーフ社製など外国で開発された除湿式乾燥装置の他に、国産の除湿式乾燥装置が多く開発されたことも大きく影響している。

木材乾燥には全く無縁であった冷凍機会社などが、除湿乾燥ブームに便乗したこともあり、除湿式乾燥装置を製造販売している会社は1989年4月現在で30社を数えることが出来る。

Fig. 114は、岐阜県内の東濃桧生産工場におけるヒノキ柱材の除湿式乾燥経過の一例である。ヒノキ12cm角の心持ち柱材の乾燥経過であるが背割りを入れたものである。

乾燥装置は国産のヒートポンプ方式の除湿式乾燥装置であり、収容量は約14m³である。乾燥温度は40℃以下で操作しており、含水率50%程度から30%程度までの乾燥時間は約175時間となっている。これは、粗挽き後の乾燥であり、大略この程度まで乾燥した後、二度挽きとして正量寸法に挽き直す訳である。乾燥温度をこれ以上上昇させると材色が悪くなることから40℃を限度としている。また含水率もほとんど測定することなく背割り幅の開く程度で含水率を推定している。

建築用針葉樹材の乾燥材としての含水率基準は、日本農林規格によって柱材の場合は15%以下と定められているが、V章のCでも述べているように、暫定的な基準として柱材の含水率は20%以下であれば乾燥材として認めることとし、更にスギ、ベイツガについては含水率が25%以下でも良いこととしている。

そのため、建築用柱材の場合には除湿式乾燥法で十分対応できるということから、一般的な柱材の仕上げ乾燥にも東濃桧の場合と大略同様な乾燥スケジュールによる除湿乾燥が実施されている。

久田¹⁰⁶⁾によれば、12cm角の心持ち柱材の乾燥日数は、除湿式乾燥法の場合、スギで含水率100%か

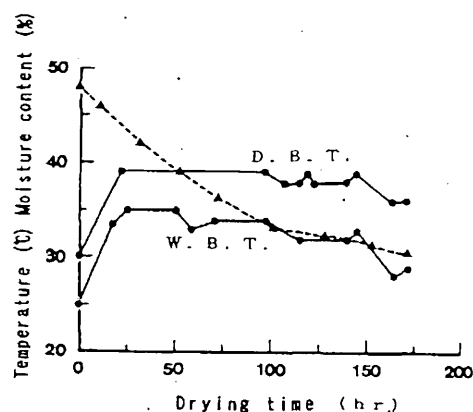


Fig. 114 Behavior of temperature and moisture content in HINOKI 12 cm square (with center, back cut lumber)

ら30%までの乾燥日数は18日、100%から20%までで28日であり、ヒノキでは含水率35%から20%までの乾燥日数は12日であると報告している。

また、その除湿式乾燥法による1㎡当たりの乾燥経費は、スギが含水率100%から20%までで15,100円となり、ヒノキの含水率35%から20%までが6,100円を必要とし、蒸気式乾燥法による乾燥経費とほぼ同様であるとしている。

C. 広葉樹材乾燥用の除湿乾燥装置の試作

ヒノキのように初期含水率が比較的低い場合は、こうした低温による除湿式乾燥装置で乾燥した方が、材色の点からみても良い訳である。しかし、スギのように初期含水率が非常に高い場合には乾燥時間も長く乾燥経費も高価となるため、やはりもっと高温で操作して乾燥時間を短縮することが必要となる。

また、建築用針葉樹材のように仕上がり含水率が20~25%のときは良いが、集成材のラミナあるいは広葉樹材の乾燥の場合は、10%以下の仕上がり含水率が要求される。

この場合、45℃以下の温度で操作する低温型の除湿式乾燥装置では、含水率20%以下の乾燥速度が著しく低下することになり、このままの性能では要求に応えることができないことになる。

このように、除湿式乾燥装置による乾燥対象が広くなると、より高温での乾燥条件が要求されることになり、乾燥温度の限界が45℃程度のフロンガスR-22の冷媒を用いた装置の他に、70℃の温度に耐え得るフロンガスR-12を使用した除湿式乾燥装置や、乾燥末期の温度上昇のために電熱器や蒸気による加熱を組み合わせた装置が開発されている。

しかし、これらの改良型除湿式乾燥装置は一応の成果を得ているものの、高温型のものは耐久性の点で、広葉樹材対象のものは乾燥経費の面からみてまだ成果を得るには到っていない。

そのため、ここではフロンガスR-22を使用した除湿式乾燥装置に電熱および蒸気による加熱装置を併設して、乾燥末期に高温に切り替えて広葉樹材でも乾燥できる装置を試作した。

なお、この試験の目的は、除湿式乾燥装置を従来からある蒸気加熱式乾燥室と同じような、万能型の乾燥装置に改良しようとするものではなく、除湿式乾燥装置が発足した当時の最適使用条件にあった範囲内で、これを有効に生かして、利用できる樹・材種および乾燥できる含水率範囲などを乾燥スケジュールの面から明らかにし、更にそのときの消費電力量を最小に抑えるなど、装置設計上の諸問題も併せて明らかにしようとした。

a. 実験方法

1) 実験装置の概要

試作した実験装置の大きさは、間口3,150mm、奥行6,150mm、高さは4,000mmであり、収容材積は約7㎡である(Fig. 115)。また、装置の仕様は次のとおりである。

炉 体：内面ステンレス張り外
面塩ビカラー鋼板張り
内部75mm発泡ウレタン
保温材入り

除湿機：フロンガスR-22使用
コンプレッサ：200V 1.9kW×2台
循環ファン：200V 0.22kW×2台
除湿能力：18kg/hr (40℃、80%)

室内循環ファン：200V 0.75kW×3台 (インバータ付)

180㎡/min×3台=540㎡/min

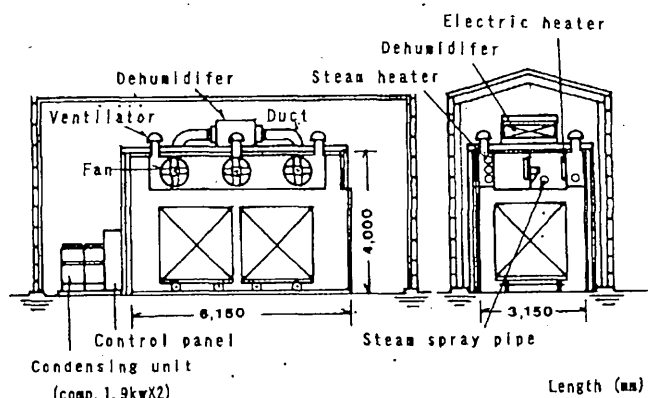


Fig. 115 Equipment of dehumidified drying

電気加熱器：200V 6.0kW × 3台 発熱量 15,480kcal/hr

蒸気加熱器：アルミパイプフィン ヒータ 5.0×4本 放熱面積 20.2㎡

発熱量 31,644kcal/hr

加湿装置：パン型 200V 3kW × 3台 加湿量 3.9kg/hr × 3台

試験の実施場所は、試験装置の断熱効果を検討するために年間の気温変動の大きい岐阜県高山市を選び、同市の家具工場に試作した除湿式乾燥装置を設した。

なお、この除湿式乾燥装置は外気温の影響を直接受けないよう鉄骨スレート造の建物の中に設置した二重構造となっている。

2) 供試材および試験回数

試験に用いた樹種は、ブナ材 (*Fagus crenata* Blume : 全乾比重0.58) の厚さ27mmだら挽き板、ナラ材 (*Quercus mongolica* Fischer var. *grosseserrata* Rehd.et Wils.) の厚さ30mmだら挽き板などが主体であり(針葉樹材2回を含む)、試験回数は外気温の影響も検討するため季節別に7回実施した。

3) 栈積み方法および試験材の設置方法

栈積みを使用した栈木の厚さは21mm、栈木間隔は30cmとし、1パッケージの大きさは幅100cm、高さ100cm、長さ210cmとし、1台車に横方向に2パッケージ、高さ方向に2パッケージを積み、計4パッケージとした。

これを奥行方向に2台並べたため1室の収容量は8パッケージである。

試験材は、幅15~20cm、長さ60cmとし、上下パッケージの中間にFig. 116のように16枚並べた(心材8枚、辺材8枚)。

なお、試験材の枚数は全て同じではなく、試験によって異なることがある。

4) 測定方法

風速の測定は、栈積みを収容した後に送風機の真下とその中央の3ヶ所について、栈積みの風下側の上下方向の風速分布を熱線風速計を用いて測定した。

乾燥室内の温度の測定は、乾燥室内8ヶ所と、除湿ユニット部の吸込み側と吹出し側の2ヶ所の計10ヶ所とし、湿度の測定は4ヶ所として(Fig. 116)、それぞれ温湿度自動記録計を用いて測定した。

また、消費動力量を稼働機械ごとに求めるため、送風機、除湿機、加熱器、および加湿器別に積算電力計を設置した。

なお、送風機は乾燥の後半で回転数を落とすことができるようにインバータを組み込んで、各機器の消費動力は深夜電力(PM10:00 ~ AM 6:00)と昼間電力とに使用区分するため、使用時刻により自動切替えを行い、それぞれの積算電力計で測定した。

また、蒸気の消費量は蒸気流量計により求めた。乾燥経過を求めるための含水率の測定は、1日1~2回試験材の重量を測定し、乾燥終了後に全乾法により含水率を算出して、それにより各測定時の含水率を求めた。

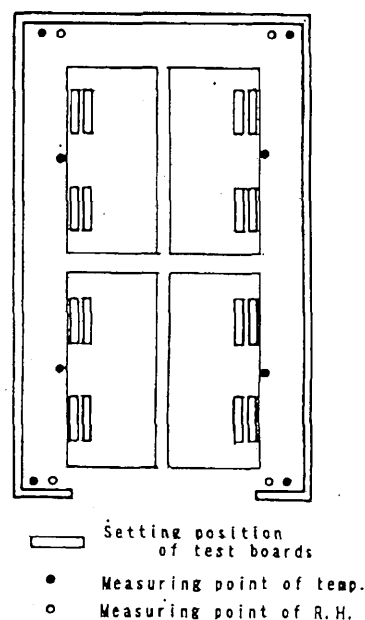


Fig. 116 Layout of test boards and measuring points of temperature and moisture content

b. 実験結果と考察

1) 風速分布

棧積み内の風速分布をFig. 117に示す。

これは、60サイクルの時の風速分布であるが、送風機の正・逆転による風速の差はほとんどなく、平均風速は150cm/sec程度となっている。

送風機の真下では平均163cm/sec、180cm/secであるのに対して中央部の平均風速は120cm/secと若干小さく、また送風機の真下の上段部分の風速は中央部の上段部分より逆に小さくなっているが、これは一般のIF型乾燥室の例とよく似た傾向である。

2) 乾燥経過

Fig. 118に秋季(9月16日～10月3日)に実施したブナの厚さ27mm板の乾燥経過を示す。

これは試験回数としては通算6回目、秋季の試験としては前年に続き第2回目である。これまでの5回の試験において、この乾燥装置の問題点を種々改良してきた。例えば床面からの放熱が大きかったため、床面に厚さ75mmの発泡ウレタンを敷き詰め、その上に厚さ10mmの合板を置き、歩行可能な床面とした。

また、天井の上に設置してある除湿ユニットやダクトは厚さ20mmのグラスウールで保温されていたが、まだ、この部分の放熱が大きいためその上に厚さ30mmのグラスウールを被覆して、断熱効果を高めた。

この試験に用いたブナ材は、20日間程度の天然乾燥を実施したものであり、試験期間中の外気温は平均15℃である。図の含水率減少経過は、心材5枚、辺材6枚の試験材の平均値で示している。

乾燥操作としては、乾燥開始後260時間目(辺材、心材の平均含水率15%)に除湿を始め、それ以後は排気方式(電熱加熱)に切り替えている。乾燥開始時の温度は35℃とし、除湿方式の間の温度は40℃以下に抑えているが、これは室温を40℃以上にすると除湿機の回路が排熱をするように切り替わり、熱の消費が多くなるためである。

乾燥に要した時間は384時間(16日)で試験材の平均含水率は、心材で11.5%、辺材で7.2%とあまり大きな開きはない。心材の平均含水率を10%以下にするには更に2日間を要し、初期含水率が60%程の完全な生材であれば心材の含水率を10%以下まで乾燥するには22日程を要するものと推定される。

これらの推定値は、夏季に実施したブナ材の試験と比較してやや乾燥時間が長くなっている。これは夏季の試験では乾燥末期の温度を50℃まで上昇させているのに対して、秋季の試験では全乾燥時間を通じて排熱しないように乾燥温度を40℃以下の低い状態で操作したためである。

Fig. 119に夏季試験と秋季試験の心材の乾燥速度を示すが、秋季の方が乾燥速度は小さくなって

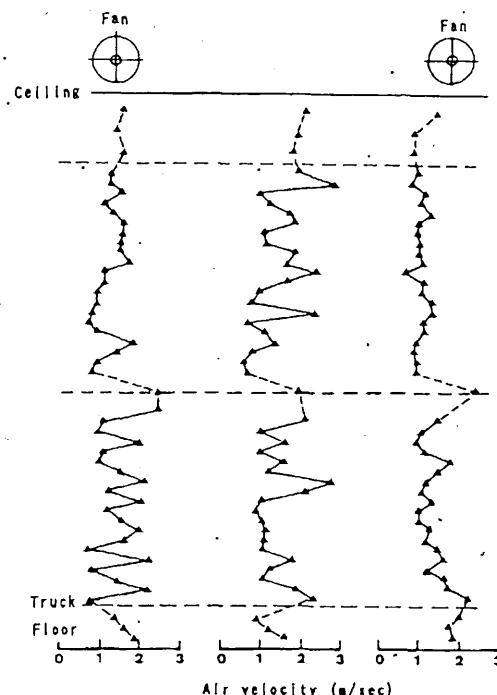


Fig. 117 Air velocity distribution in equipment of dehumidified drying

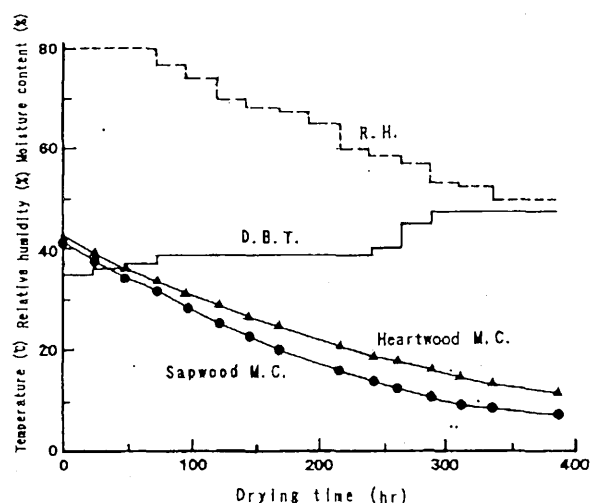


Fig. 118 Behavior of temperature and moisture content in BUNA 27 mm thick (autumn, mean outdoor temp. 15 °C)

いる。

次に、Fig. 120は第2回の冬季(11月8日～11月24日)試験における乾燥経過を示すものである。

試験に用いた材料は、第2回の秋季試験と同じブナ材の27mm板であり、図の含水率減少経過は、辺材8枚、心材6枚の試験材の平均値で示している。

乾燥開始時の温度は秋と同じ35℃であり、平均含水率15%までを除湿し、それ以降を排気しているのも同様である。しかし、この試験期間中の平均外気温は5℃である。

乾燥開始より407時間で、平均含水率は辺材で7%、心材で8%まで乾燥しており、心材の平均含水率が10%に達するのは350時間である。第2回の秋季の試験では、心材含水率10%までの乾燥時間を約18日(432時間)と推定しているのと比較すると、この場合は3日程短縮されており、初期含水率が5%程度低いことを考慮しても2日間程短くなっている。

これは、心材の試験材の中に乾燥速度の大きいものが含まれていたためであるが、その他の試験材の中に乾燥速度の小さいものもあり、これらの材は350時間頃にはまだかなり高含水率の状態であり、こうしたことを考慮すれば秋と冬の乾燥時間はあまり差がないものと思われる。

3) 収縮率

このような乾燥スケジュールで乾燥したときの仕上がり状態は、目視による観察では非常に良好であり、従来家具工場で実施している含水率30%程度までを天然乾燥で、その後を蒸気式乾燥室により人工乾燥で仕上げたものと比較して、ほぼ同じような状態であると思われる。

しかし、仕上がり状態をこのような目視による観察のみで比較することはあまり適正ではないため、収縮率による比較をした。

含水率測定用の試験材と隣接した位置から幅3cmの試験片を採取して、含水率15%までを室温で天然乾燥し、それ以降を100℃で全乾まで乾燥したときの標準収縮率と、含水率測定用試験材から試験終了後に幅3cmの試験片を採取して、それを全乾まで100℃で乾燥したときの収縮率と比較した。

その結果をTable 3'2に示すが、除湿乾燥をしたときの全収縮率の方が標準収縮率より若干大きくなっている。

しかし、この除湿乾燥をした供試材を工場で鉋削したときに削り残りが生ずることもなく、製材時の挽材寸法の余裕の範囲内であることから、この程度の収縮率の増加は実用上問題がないと思われる。

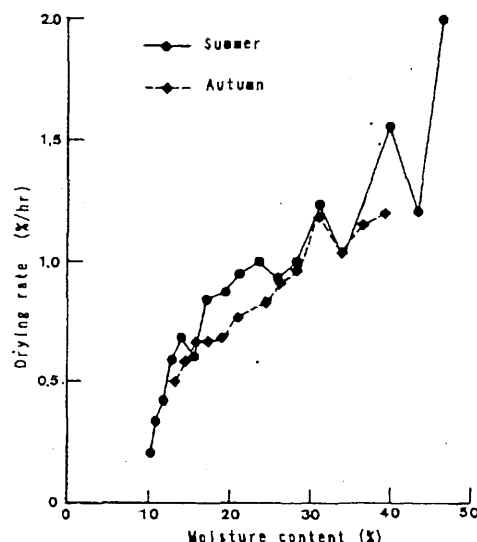


Fig. 119 Drying-rate of BUNA heartwood 27 mm thick by dehumidified drying

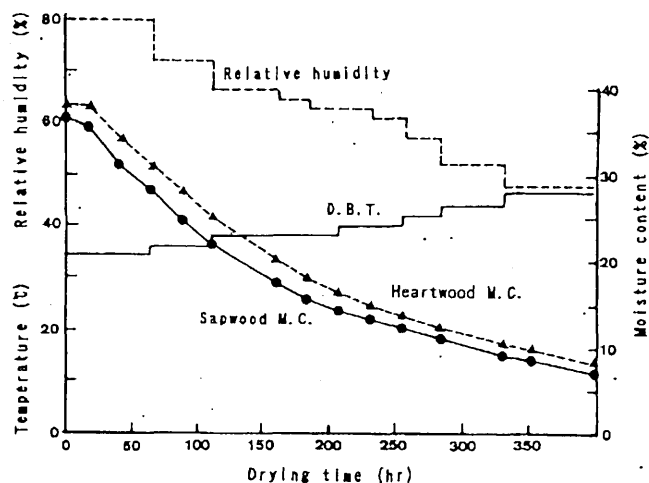


Fig. 120 Behavior of temperature and moisture content in BUNA 27 mm thick (winter, mean outdoor temp. 5°C)

4) 乾燥時間と仕上がり含水率

Table 3 3 に、この除湿式乾燥装置で試験を実施したブナおよびナラ材の乾燥時間と仕上がり含水率を示す。

この結果からみて、ブナの27mm板の乾燥時間は、半天然乾燥材である含水率40%から10%までは約17日となり、また、生材の含水率60%から10%までの乾燥時間は約22日を要すると推定される。

また、ナラ材の30mm板は、生材（含水率70%）から含水率10%までの乾燥時間が約35日を要することになり、従来の蒸気式乾燥室と比較して乾燥時間は若干長くなる。

一般に家具工場などにおけるブナ材27mm板の乾燥時間は15日程度が普通であり、この除湿式乾燥装置による乾燥時間は許容される限界に近いものと思われる。

しかし、除湿乾燥の場合はボイラあるいはボイラーマンが不要であり、管理も容易であることと、乾燥室を大型にして収容量を大きくすれば、この程度の乾燥時間は今後も問題にはならないと思われる。

Table 32 Shrinkage (BUNA heartwood, 27 mm thick)

Way of cutting	Measuring direction	Shrinkage (%)	
		Woods by dehumidified drying	Control
Edge grain	Thickness	12.44	9.74
	Width	3.94	3.31
Edge grain	Thickness	10.21	9.95
	Width	3.56	2.69
Edge grain	Thickness	11.87	11.19
	Width	3.69	3.00
Flat grain	Thickness	5.79	5.27
	Width	8.25	8.13

Table 33 Final moisture content by dehumidified drying

Species	Test boards	Initial mean M.C. (%)	Final M.C. (%)				Drying time	
			Maximum	Minimum	Mean	Average	Hour	Day
BUNA heartwood 27 mm thick	13	49.9	12.8	8.6	10.4			
BUNA sapwood 27 mm thick	7	41.8	8.0	6.5	7.0	9.2	431	17.9
BUNA heartwood 27 mm thick	5	42.1	12.6	9.2	11.5			
BUNA sapwood 27 mm thick	6	42.2	9.1	4.0	7.2	9.4	384	16.0
BUNA heartwood 27 mm thick	6	38.4	10.8	6.3	8.4			
BUNA heart- & sapwood 27 mm thick	3	38.8	9.2	8.7	8.9	8.2	407	16.9
BUNA sapwood 27 mm thick	8	36.4	9.0	5.8	7.2			
NARA heartwood 30 mm thick	15	65.5	15.1	9.1	10.3	10.3	765	31.8
NARA heartwood 30 mm thick	15	75.1	13.3	7.8	9.5	9.5	814	33.9

5) 消費電力量

秋にブナ27mm板材を乾燥したときの機器別の消費電力量をFig. 1 2 1 に示す。試験期間中の平均外気温は15℃と比較的高いため、乾燥開始後の 240時間までは電気ヒータは使わず除湿機のみで運転している。したがって、この直前の消費電力量4.31 kWhは乾燥室全体から放出された熱量であり、乾燥室内外の温度差 (38-15)℃から乾燥室壁体の平均熱貫流率は、

$$(4.31\text{kWh} \times 860\text{kcal/kWh}) / (38 - 15)^\circ\text{C} \times 130\text{m}^2 = 1.23\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C} \text{ となる。}$$

前述したように、乾燥室の断熱効果を高めるために、床面や除湿ユニットなどを保温しており、壁面の熱貫流率を0.7kcal/m²hr℃程度と予想したが、その差は非常に大きい。

この原因は、排気筒からの漏湿による排熱と、除湿機のコンプレッサのコンデンス回路からの放熱と思われる。しかし、この装置の場合はこうした設計によってエバポレータ部の温度が低下し、相対

湿度57~60%で良い除湿能力が得られていることになる。

次に、乾燥開始後262時間の平均含水率15%から除湿を止め、電熱加熱による排気方式とし同時に室温を上昇(40~45℃)しているため、時間当たりの消費電力量は急騰している。

また、排気に切替える直前の消費電力量(室温40℃)は4.93kWh/hr程度であり、切替え後の消費電力量、5.54kWh/hrよりは少なく、もう少し除湿乾燥を続けても良かったと思われる。

ただし、この除湿方式の場合に室温を40℃以上に上昇させると、排熱回路が働き、熱ロスが大きくなるので室温を40℃以下に抑えざるを得なく、乾燥速度は排気方式より小さくなる。次に、乾燥経過と消費電力量から木材中の水分1kgを除去するために必要な電力量を計算したのが、Fig. 122である。

送風機の消費電力量がほぼ一定となっているのは、含水率低下による蒸発量の低下にともなって送風機の回転数を低下させているためである。

総消費電力量が含水率15%から急増しているのに対して、除湿機の消費電力量があまり増加していないのは、排熱によりエバポレータの温度が下がり、室内の湿度低下の割には除湿能率が良いためと思われる。

本試験における総消費電力量は1560.2 kWhであることから、電力費を18円/kWhとすれば、 $18\text{円} \times 1560.2\text{kWh} / 7.3\text{m}^3 = 3,847\text{円/m}^3$ となり、回路中の排熱や、操作上で排気開始時期が若干早かったことなどの問題点はあるにせよ、広葉樹の低温乾燥としてはまずは良好な結果と言うことができよう。

冬にブナ27mm板材を乾燥したときの消費電力量をFig. 123に示し、同じく木材中の水1kgを除去するに必要な電力量をFig. 124に示す。

乾燥開始後233時間、含水率15%以降は除湿機から排気に切替えている。初期含水率は秋の試験材よりも5%ほど低いが、外気温が5℃と秋の15℃より低いいため、総電力消費量は2203.14kWhで秋の1.4倍となり1m³当たりの乾燥費は、 $18\text{円} \times 2,203.14\text{kWh} / 7.3\text{m}^3 = 5,432\text{円/m}^3$ となる。

これは外気温が低いためであり、壁体からの放熱量の増加と、排気方式中の交換空気の加熱のために電気ヒータの稼働が大きくなったものと思われる。

水分1kgを除去するのに必要な電力消費量は、秋の1.5倍程となり、しかも、これは含水率37%から10%までの値であり、初期含水率60%からの乾燥であればこの値はもっと大きくなるとと思われる。

このように、壁体からの放熱は非常に大きな熱ロスとなり、広葉樹材のように乾燥時間の長い場合はより放熱量が大きくなるため、断熱材を厚くすることが必要であり、秋季と同じような結果を得る

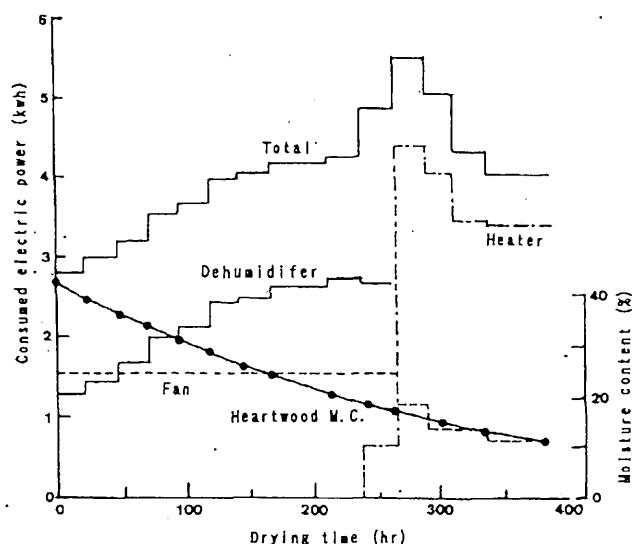


Fig. 121 Behavior of consumed electric power
(BUNA 27 mm thick, outdoor temp. 15℃)

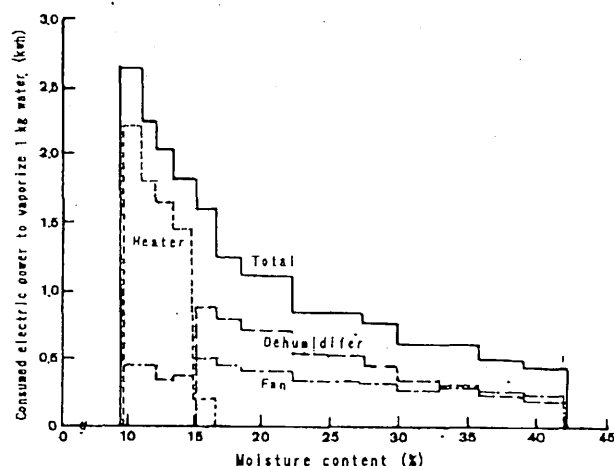


Fig. 122 Relation between consumed electric power and moisture content
(BUNA 27 mm thick, autumn)

ためには壁体および床面の発泡スチロールの厚さを150mm程度にすることが必要であろう。

6) 乾燥経費

この試験に用いた除湿式乾燥装置と、一般に使用されている蒸気式加熱乾燥装置との乾燥経費を比較してみる。

蒸気式加熱乾燥装置の蒸気消費量は、木材中の水分1kgを蒸発させるのに2.5kgの蒸気を必要としており、5,000円/ton（東京深川新木場の蒸気集中配給価格）程度の蒸気価格であれば、木材中の水分1kgを乾燥させるのに12.5円が必要となる。これに木材中の水分1kgを乾燥するに要する室内空気循環用送風機の電力0.34kWh（18円/kWhとして6.12円）を加算すれば18.62円となる。

一方除湿式乾燥装置では、秋季のブナ材乾燥における木材中の水分1kgを蒸発させるのに1kWh、冬季では2kWhとなり、金額にして18～36円であるが、前述のように断熱を完全にすれば秋季の値に近づけることができ、蒸気式とあまり差がなくなる。小規模の蒸気式乾燥装置と比較すればもっと優位になる。

どのような乾燥方法であっても、壁体からの放熱量を小さくすることは乾燥経費を節約する上で重要な問題である。特に除湿式乾燥法では除湿機の発熱を利用して室温を保持するため、乾燥中期以降の乾燥速度が低下した時点では除湿機の稼働時間が短く、冬季間は特に室温保持が困難となる。

そのため、除湿式乾燥装置の壁体あるいは床面の断熱を良好にすることは極めて重要である。

D. 要 約

乾燥による損傷が少なく、乾燥操作も容易であることから急速に普及した除湿式乾燥法は、低温で操作するための利点があるが、乾燥時間が長い、あるいは低含水率までの乾燥が困難といった短所もある。

この章では、我が国で初めて設置されたヒートポンプ方式の除湿式乾燥装置の性能と、ヒノキなどの建築用柱材の乾燥方法、あるいは広葉樹材を乾燥するために試作した除湿式乾燥装置などについて種々検討した。

その結果を要約すると次のとおりである。

除湿式乾燥法による乾燥性能

- (1) 乾燥室内に設置されている送風機的能力不足、および送風機の数不足から、材間の風速は若干少なく、風速分布のむらも認められる。そのため、蒸発量の大きい乾燥中期の温度むらが

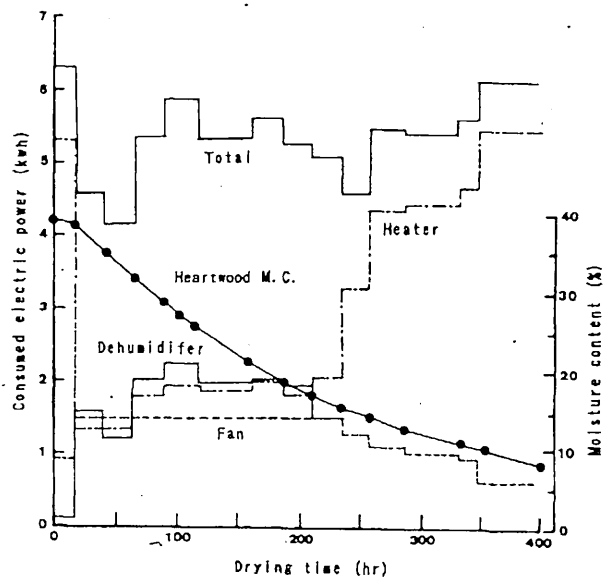


Fig. 123 Behavior of consumed electric power in winter
(BUNA 27 mm thick, outdoor temp. 5 °C)

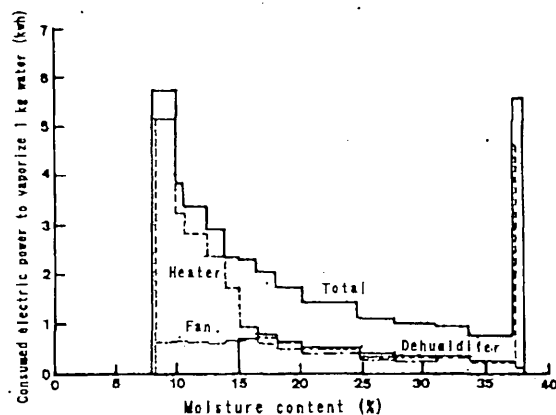


Fig. 124 Relation between consumed electric power and moisture content
(BUNA 27 mm thick, winter)

大きく、乾燥むらの原因となる。

- (2) 棧積みのおける乾燥むらは比較的小さいが、風上側と風下側の乾燥むらが大きくなっている。これは風速の不足が大きな原因となっている。
- (3) タモの厚さ30mm板の乾燥時間は、含水率58%から10%までに280時間を要しており、加熱乾燥の1.45倍となっている。また、このときの乾燥速度は平均して加熱乾燥の1/2以下であり、含水率20%以下の乾燥速度は加熱乾燥の36%まで低下している。
- (4) ヒートポンプを用いているため、乾燥に要する消費エネルギーは非常に少なく、除去された水分量にみあう消費エネルギーと消費電力量との比率は約2.5倍となり、除湿式乾燥装置は省エネルギー型の乾燥装置である。

針葉樹柱材の除湿式乾燥方法

- (1) 針葉樹の建築用柱材の場合、日本農林規格の暫定基準として、含水率20%を乾燥材と認めているため、ヒノキ柱材などの乾燥にはこの除湿乾燥が主流となっている。
- (2) ヒノキの場合は、低温のため乾燥による変色が少なく除湿乾燥が適している。しかし、スギのように高含水率材は乾燥時間が長くなり、除湿式乾燥法の利用には若干問題がある。
- (3) 生材から含水率20%までの乾燥経費は、ヒノキ（生材含水率35%）では約6,100円/m³、スギ（生材含水率100%）では約15,100円/m³となっている。

広葉樹材乾燥用の除湿式乾燥装置の試作

- (1) ブナおよびナラの板材を除湿乾燥した場合の収縮率は、標準材に比較して若干大きくなるが、実用上問題になる程ではない。
- (2) 含水率15%程度から除湿乾燥を止め加熱排気乾燥に切替えた場合、ブナの27mm板の含水率60%から10%までの乾燥時間は約22日、ナラの30mm板の含水率70%から10%までは約35日を要する。これは蒸気加熱乾燥装置より若干乾燥時間が長く、実用上許容される限界に近いものと思われる。
- (3) ブナの27mm板を秋と冬に乾燥した場合、その総消費電力量は秋が1560.2kWh、冬が2203.14kWhとなり、冬は秋の1.5倍の電力を必要とする。これは、外気温が低いために壁体からの放熱を補うための電気ヒータ用の電力が大きくなるものである。
- (4) 木材中の水1kgを除去するのに必要な経費は、蒸気加熱乾燥の場合18.62円であるのに対して、除湿乾燥の場合は秋で18円、冬で36円となる。しかし、乾燥室の断熱効果を高めることによって蒸気加熱乾燥の経費に近ずけることは可能である。
- (5) 除湿乾燥から加熱乾燥に切替える時期は、ブナなどの広葉樹材の場合、乾燥速度および消費電力からみて含水率15%程度が適当であり、その後は50℃以上で操作することが良いと思われる。
- (6) 除湿式乾燥装置は、除湿機の発熱を利用して室温を保持するため、乾燥装置の断熱性を良好にすることが重要であり、断熱材の厚さは150mmを必要とする。ことに寒冷地においては、床面の断熱を無視することはできない。

VIII 総 合 考 察

木材乾燥の目的は、その製品を使用する場所の平衡含水率まであらかじめ木材を乾燥しておき、使用中における狂いなどの発生を防止することにある。

一般に乾燥温度が高いほど乾燥時間を短縮することができるが、高温を用いることは、乾燥経費の増大を招くことになるとともに、被乾燥材に損傷を発生させる危険が大きくなる。

天然乾燥のように比較的低温条件による乾燥は、乾燥経費はあまり大きくないが、乾燥時間が長くなるとともに、目的とする含水率まで乾燥することが困難な場合が多い。

そのため、低温でも乾燥速度の大きい、高含水率域のみを天然乾燥にゆだね、乾燥速度の低下する繊維飽和点前後から、人工乾燥に移行する方法が一般に採用されている。

しかし、天然乾燥は長時間を要すると同時に気象条件によって乾燥速度が異なるため、計画的な乾燥材の供給が困難であるなどの問題点が多く、天然乾燥から人工乾燥に移行する時期なども、乾燥経費に大きな影響をおよぼすことが多い。

また、長期間の天然乾燥は材料の停滞となり、企業経営上の資金繰りなどの問題から、天然乾燥期間の短縮を求める声も多い。

本研究は、こうした天然乾燥における乾燥時間に主眼を置き、適正な天然乾燥時間の決定と、その促進方法について検討した。また、低温で操作する除湿式乾燥装置の特性や、その利用方法についても検討した。

まず、天然乾燥速度に大きな影響を与えられ、広葉樹および針葉樹の立木、あるいは丸太材などのいわゆる生材含水率について調査した。

家具などに使われる主要樹種である、ブナあるいはミズナラなどの場合は、辺材と心材との生材含水率に問題となるような大きな差がなく、また、広葉樹材の場合は厚さ20mm～30mmに挽材後、板材として乾燥するため、辺材、心材の含水率に差があっても初期含水率のバラツキとして処理できる。

しかし、針葉樹材の場合は柱材など心持ち材としての乾燥が多く、辺材、心材の含水率の差は乾燥時間に大きく影響をおよぼすことになり、ことにスギ材の場合には、心材と辺材の含水率に大きな差があるため、乾燥時間におよぼす影響が大きい。

広葉樹材を天然乾燥する場合、辺材と心材との乾燥速度には、人工乾燥ほどの差はないが、乾燥条件が良い夏季ほどその差が大きくなる。また、板の厚さによる乾燥速度の違いも人工乾燥ほどの差はなく、板厚と乾燥速度の関係式である

$$t_2/t_1 = (d_2/d_1)^n$$

の n の値はほぼ1.5であることが判った。

次に、一枚板の乾燥時間より、栈積みしたときの乾燥時間は1.6倍が必要であり、仕上げ含水率も栈積みしたときの方が若干高くなることが判った。

また、ブナ材の場合、天然乾燥の仕上げ含水率は高山市のように寒冷な山国気候区では季節による変動が大きく、40%から25%であり、表日本の内陸的気候区に属する美濃市では25%から20%が仕上げ含水率となる。

なお、高山市における天然乾燥時間は、40mm板が夏で2ヶ月、春、秋で3ヶ月、冬で5ヶ月となり、20mm板は夏が1ヶ月、春、秋が2ヶ月、冬は3ヶ月となる。美濃市では、40mm板が春、夏、秋が1ヶ月、冬が2ヶ月、20mm板は年間を通じて1ヶ月が適正な天然乾燥の所要時間である。

天然乾燥の場合、気象条件の変動、あるいは被乾燥材の乾燥に影響する材質などを勘案すると、このような大まかな区分が妥当であり、これを一つの目安とすることができる。

また、こうした大まかな区分の場合、高山市の例は山国あるいは裏日本の目安となり、美濃市の例は表日本の目安としても、実用上は差し支えないものと思われる。

針葉樹材の場合は生材含水率が非常に高いため、初期含水率を下げるために、林内において伐倒した材をそのまま放置して、枝葉からの水分の蒸散を利用した、いわゆる葉枯らしについて検討した。

伐倒木の枝葉の部分を3mと6mの2通りに分けて葉枯らしの蒸散速度を測定したが、枝葉の長さの差はほとんど認められず、また伐倒方向を山側および谷側に分けたが、この伐倒方向と蒸散速度にもほとんど差が認められなかった。

いずれにしる伐倒してから4ヶ月程度までは順調に含水率が減少し、その後は徐々に乾燥速度が低下する。

あまり長期間林内に伐倒木を放置すれば、虫菌害により材質が低下する危険もあり、またヒノキの場合には葉枯らしにより枝が硬くなるため造材時の枝打ちが困難となる。

これらの点を勘案すれば、葉枯らしの実施期間は3ヶ月程度が妥当であり、スギでは含水率80%程

度、ヒノキでは含水率90%程度まで乾燥させることができる。

また、このときの重量減少率は、スギが40%、ヒノキが20%程度となる。しかし葉枯らしにより心材の含水率はほとんど変化せず、辺材の含水率だけが減少するため、葉枯らし材は辺材と心材の含水率の差が少なくなる。

このように、針葉樹材の葉枯らしは、林内に放置するだけで含水率を下げるができるため、針葉樹材乾燥の予備操作として非常に有効な方法である。

本研究では対象としなかったが、葉枯らしにより、スギの黒心など材色が改善される効果も報告されているし、実際に葉枯らし材は木材市場においても1割程度高価で取引されている。

ヒノキのように比較的含水率が低く、人工乾燥でもあまり問題のない樹種はさておき、スギのように含水率が高く人工乾燥経費の高くつく樹種は、たとえ短時間であっても葉枯らしを実施すべきであり、それだけの効果を期待することができる。

現在、スギの生産地では産地間競争に打ち勝つ手段として銘柄材造りが盛んであるが、葉枯らしの実施はそれだけでは銘柄材とはならないまでも、他の材との差別化が可能となり、それなりに高価な取引が期待できる。

岐阜県においても、県産のスギ材を「長良杉」と命名しブランド化を図っているが、その条件の一つに葉枯らしが含まれている。

また、平成6年5月に改正された道路交通法によって、車輛の積載制限が強化されたことにより、木材運搬費の高騰が懸念されているが、葉枯らし材の場合は乾燥費の節減以外にも重量の減少により搬出運搬を容易にするメリットがある。

今後はこの面からも葉枯らし材生産を見直すことが必要であろう。

林内土場における丸太材の乾燥について、皮付きおよび剥皮の状態で検討したが、皮付きのままではほとんど丸太の含水率は減少せず、剥皮した場合は非常に速く含水率が減少することが判った。

また、工場土場における丸太材の乾燥をみると、やはり、剥皮材は非常に速く乾燥するが、柱材など製材品の乾燥と比較すると乾燥速度も若干遅く、仕上げ含水率も若干高いため、これを仕上げ乾燥とすることはできず、やはり人工乾燥の前処理と理解すべきであろう。

しかし、大量の材を購入して土場に桟積みする場合は、なるべく早く剥皮することが、より人工乾燥の時間を短縮することになるため、剥皮の効果を十分考慮すべきであろう。また、天然乾燥の促進方法として、強制送風および簡易加熱による促進効果を検討したが、比較的容易に実施でき、しかも効果の大きいのは強制送風による促進方法である。

強制送風は、桟積み内の乾燥むらを少なくするため、乾燥時間は自然状態の2/3以下に短縮することができる。

板厚が小さく乾燥速度の大きい材ほど、桟積み内の乾燥むらが発生しやすいため、こうした材を天然乾燥する場合には、強制送風による促進効果を期待すべきである。

簡易加熱による促進効果は、桟積み中央部の乾燥速度が大きくなり、乾燥むらの抑制には効果が大いだが、風により熱が外部に逃がされる欠点がある。

風力センサの設置などにより、風の強いときには加熱を中止するような方法を採用すれば、それなりの効果が期待できるが、この促進方法は太陽熱利用乾燥法と組み合わせることにより、小規模の木工工場における仕上げ乾燥にも利用することができる。

太陽熱利用乾燥法は、単に太陽熱のみの利用では種々問題もあり、大きな効果を期待することはできないが、他の方法との組合せにより今後の期待の大きい乾燥法ということができる。

簡易加熱、送風加熱との組合せ、あるいは除湿乾燥との組合せなど種々の報告例もあるが、これもあまり設備投資を大きくすれば、通常の人工乾燥装置と変わらないことにもなり、予備乾燥としての利用か、あるいは、仕上げまでこの方法で実施するかは十分検討することが必要となる。

ただ、筆者が指導した例として、岐阜県美濃市でナイフの柄を生産している工場で、室内に送風機を設置して強制循環を実施できる大型の太陽熱利用乾燥装置を造り、南洋産のコクタンあるいはゼブ

ラウッドなどの硬材の予備乾燥として利用し大きな効果を上げている所がある。

倉庫での貯蔵と、天然乾燥とを併用したような方法で、2～3ヶ月間をかけて含水率20～30%まで乾燥してから粗加工し、その後人工乾燥で仕上げているが、乾燥経費も少なく良い仕上がりを示している。

次に除湿乾燥であるが、ヒートポンプによる熱の有効利用と、低温による操作などは、ヒノキ柱材の乾燥には最も適した方法ということができよう。

しかし、スギのような高含水率材を直接この装置で乾燥することは問題があり、葉枯らしなどの予備乾燥を実施して、初期含水率を下げてから除湿乾燥することが必要である。

ただし、スギの並材のようにあまり材価の低い材の乾燥は、蒸気式乾燥装置による中、高温で乾燥した方が経済的である場合が多く、現在はこうしたスギ材の乾燥方法が種々検討されている。

また、広葉樹材の乾燥も、除湿式乾燥装置を乾燥末期に加熱排気式操作ができるようにすれば十分利用が可能であるが、そのためには、床を含む壁体の断熱構造を完全にするとともに、収容材積に対して乾燥室の表面積がなるべく少なくなるような、大型の乾燥室にすることが必要である。

しかし、乾燥操作が容易であり高度な乾燥技術を必要とせず、人件費が少なくなるなどの利点を除けば、広葉樹材を除湿乾燥する必要性はあまりないことになる。

除湿式乾燥装置の場合は、あまり多くの性能を期待することなく、この装置が出現した当時のように、低温でゆっくり乾燥する方法が最も適しており、針葉樹材の柱材、ことにヒノキのように高温で乾燥すると、変色が問題となるような材の乾燥に用いるのが良いと考えられる。

以上、本研究を総合的に考察しこれをまとめると、広葉樹材および針葉樹材ことにスギ材、ヒノキ材の天然乾燥と人工乾燥の組合せはFig. 125、Fig. 126およびFig. 127のようになる。

すなわち、広葉樹の板材の場合は、生材から直接人工乾燥することはさけ、天然乾燥によって予備乾燥してから、人工乾燥に移すべきであり、その天然乾燥は人為的な促進方法によって少しでも乾燥時間を短縮すべきである。なお、広葉樹板材の中でも曲げ木用材の場合は、含水率が14%～15%の比較的高い状態で曲げ加工を実施した方が歩留りがよいため、簡易加熱あるいは太陽熱利用乾燥でも十分仕上げ乾燥が可能である。

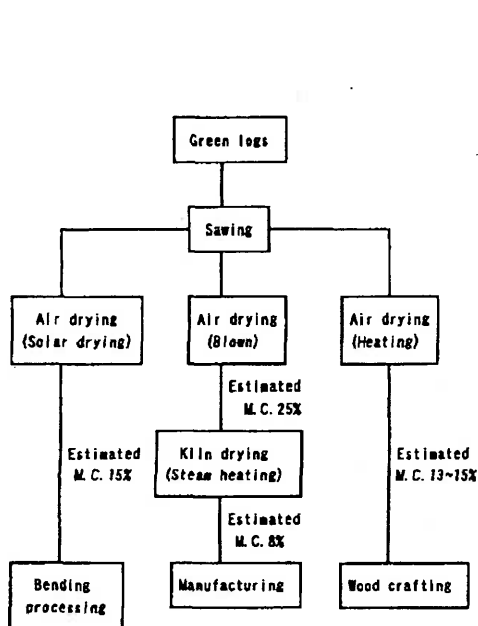


Fig. 125 Drying system and estimated M.C. of hardwood

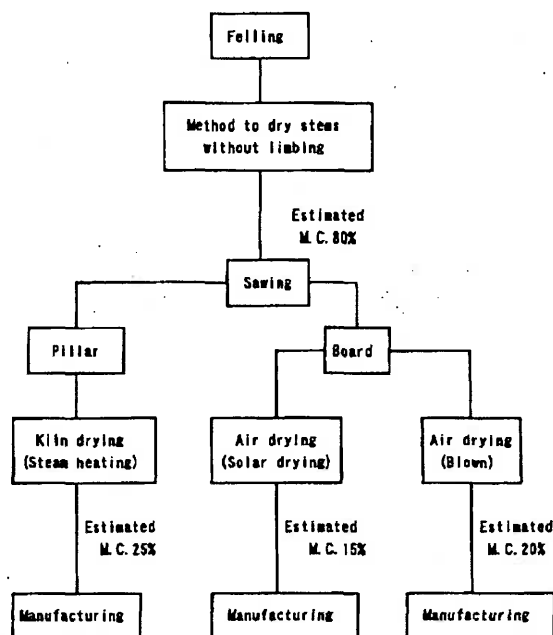


Fig. 126 Drying system and estimated M.C. of SUGI

また、針葉樹材の場合は、スギとヒノキに分けて考えることが必要であり、スギの場合は、伐倒後葉枯らしにより初期含水率を上げてから製材し、柱材は蒸気式加熱乾燥により仕上げ乾燥をした方が良く、板材は送風による天然乾燥、あるいは太陽熱利用乾燥でも仕上げ乾燥が可能である。

ヒノキは、葉枯らし乾燥を実施しても良いが、良質材は生材のまま製材し、柱材、板材とも除湿乾燥あるいは太陽熱利用乾燥で仕上げるのが望ましい。

こうした低温域における木材の乾燥は、いままで断片的な研究はあってもこのように系統立った研究はほとんどなく、しかも、天然乾燥の促進方法と樹種あるいは材種との組合せや、天然乾燥から人工乾燥に移行する時期を経済的に検討したのは本研究が初めてである。

本研究が、木材の乾燥技術の向上、あるいは乾燥経費の節減に少しでも貢献することができれば望外の喜びである。

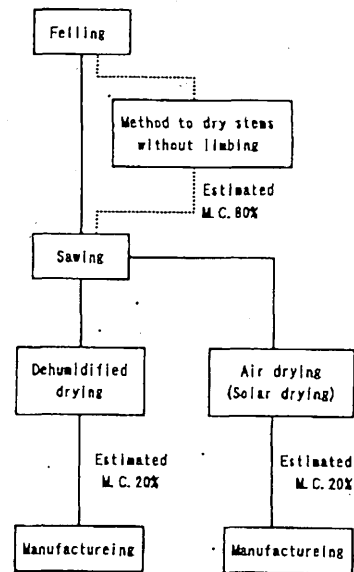


Fig. 127 Drying system and estimated M.C. of HINOKI

謝

辞

本研究の遂行、ならびに論文の作成にあたり、終始変わらぬ激励とご指導を賜った農学博士 深沢和三北海道大学名誉教授、論文のとりまとめに際して多くのご教授とご指導を賜った農学博士 平井卓郎北海道大学教授、農学博士 堀口郁夫北海道大学教授、農学博士 大谷 諄北海道大学教授に対して衷心より感謝の意を表します。

また、これまでの実験に対して多くのご援助とご指導を賜った農学博士 寺沢 真名古屋大学名誉教授、農学博士 筒本卓造木の相談室長、農学博士 鷺見博史森林総合研究所木材部長、農学博士 久田卓興森林総合研究所乾燥研究室長にたいして心から深く感謝します。

さらに、本研究を遂行するにあたり、直接ご援助とご協力を頂いた熊谷洋二恵那県事務所林業調整監、岩田隆昭岐阜県林政部林産振興課総括課長補佐、香川紘一郎揖斐県事務所林業調整監、富田守泰岐阜県林業センター木材加工科長ならびに岐阜県林業センター木材加工科杉山正典主任技師の各位に対し謝意を表します。

なお、本論文の印刷にあたり種々ご配慮頂いた戸田清佐岐阜県林業センター場長に心から感謝いたします。

引用 文 献

1. 寺沢 真：木材の人工乾燥スケジュールについて（1），木材工業，16（8），372-377，1961
2. 寺沢 真：木材の人工乾燥スケジュールについて（2），木材工業，16（9），419-423，1961
3. 岩下 睦・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（第1報），徳島林指報告，No. 1，59-75，1955
4. Torgeso, O.W. : U.S.F.P.L.Rept., No.R1265, Forest Serv., U.S.D.A., 1941

5. 鷺見博史：木材の高温乾燥（１），乾燥末期の乾燥速度に及ぼす温度の影響，木材学会誌，24（6），385-390，1978
6. 鷺見博史：木材の高温乾燥（２），ベイツ材の強度的性質及び加熱処理条件の影響，木材学会誌，24（6），391-399，1978
7. 鷺見博史：木材の高温乾燥（３），加熱処理条件が曲げ破壊形態に及ぼす影響，木材学会誌，28（8），489-494，1982
8. 鷺見博史：木材の高温乾燥（４），ダグラスファー材における脱脂処理条件とその効果，木材学会誌，28（12），750-755，1982
9. 鷺見博史：木材の高温乾燥（５），室内ばく露中のダグラスファー高温処理材内の樹脂の移動，木材学会誌，29（2），105-110，1983
10. 大内幸雄：林業の産地形成に関する研究－「東濃松」産地を中心として－，岐阜大農森林経営学教室，1982
11. 岩水 豊他：銘柄材づくりへの道，林業改良普及双書，73，全国林業改良普及協会，1980
12. 野原正人：東濃松の特性，岩水 豊他「銘柄材づくりへの道」，林業改良普及双書，73，204-213，全国林業改良普及協会，1980
13. 熊谷洋二：ヒノキ柱材のひき直しに関する研究，岐阜林セ研究報告，No.4，49-59，1976
14. 野原正人：東濃松とその生産技術，木材工業，38（7），313-317，1983
15. 寺沢 真・鷺見博史：わが国における木材の平衡含水率に関する研究，林試研究報告，No.227，1-81，1970
16. 筒本卓造：林業技術史，No.5，木材加工編，乾燥，日本林業技術協会，82-99，1975
17. 農商務省山林局編纂：木材の工芸的利用，大日本山林会，1912
18. 森 三郎：屋内乾燥に因るアカマツ丸太の重量減失調査，林業試験彙報，No.13，45-63，1924
19. 森 三郎他：邦領各地方における木材乾燥の経過および含水率の調査，林業試験彙報，No.26，49-96，1929
20. 麻生 誠：屋内乾燥による薪材丸太の重量減失について，林業試験報告，No.30，99-173，1930
21. 泉 岩太：立て掛け置たる木材の乾燥速度及び遠心力応用による木材水分の除去について，林業試験彙報，No.48，29-67，1940
22. 松本文三：木材乾燥法，産業図書，1948
23. 泉 岩太：本邦における木材の乾燥程度ならびに気候の変化が人工乾燥材および天然乾燥材におよぼす影響，林業試験彙報，No.21，87-108，1927
24. 泉 岩太：我が国各地における気候の相違と木材の乾燥程度，日本林学会誌，17（9），717-724，1935
25. 北村義重：吋材の天然乾燥，北海道林産試月報，No.45，5-8，1955
26. 谷淵正弘：天然乾燥における栈積内部の含水率分布について，徳島林指報告，No.1，77-82，1955
27. 七澤善男：人工乾燥を前提としてのシナ材の天然乾燥について，木材工業，12（12），564-566，1957
28. 西尾 茂・花田好正・中村昭二：月別天然乾燥日数の実測，昭和48年度鳥取工試年報，103-108，1973
29. 中野正志：ブナ，ナラ材の天然乾燥経過について，岩手林試成果報告，No.5，75-81，1973
30. 野原正人：岐阜県におけるブナ材の月別天然乾燥速度，岐阜林セ研究報告，No.3，1-10，1975
31. Schonau, A.P.G. & R.V. Themaat : Preliminary results of investigations into the air-drying of debarked logs of four eucalyptus species in the Natal Midlands, Suid afrikaanse bosbou tydskrif nr., 107(12), 15-21, 1978
32. Peck, E.C. : Air drying 4/4 red oak in southern Wisconsin, Forest Prod. J. 9(7), 236-242, 1959

33. Donald, G.C. & E.P. Craft : Low temperature drying of 4/4 Appalachian Red oak, Forest Prod.J., 21(1), 34-38, 1971
34. Ordinario, E.B. : Air drying of some dipterocarp lumber, The philippine lumberman, 16 (1) , 56-61, 1970
35. Dening, J. & E.M. Wengert : Estimating air-drying moisture content losses for red oak and yellow-poplar timber Forest Prod.J., 32 (2), 26-31, 1982
36. 野原正人 : 天然乾燥の棧積み方法について, 岐阜林試研究報告, No.3, 88-94, 1958
37. 野原正人 : 天然乾燥における諸問題, 木工生産, 13(10,11)合併号, 16-21, 1969
38. 西尾 茂他 : 乾燥仕上がり含水率の均一化について (第3報), 昭和46年度鳥取工試年報, 69-76, 1971
39. 満久崇磨 : 木材の乾燥, 森北出版, 1962
40. 野原正人 : 天然乾燥促進試験, (1) 岐阜林試研究報告, No.1, 57-67, 1972
41. 野原正人 : 天然乾燥促進試験, (2) 岐阜林試研究報告, No.2, 42-49, 1974
42. 河原田洋三ら : 予備乾燥としての簡易乾燥装置について, 北海道林産試月報, No.173, 14-19, 1966
43. 寺沢 真 : 木材の予備乾燥装置, 木工生産, 7 (10), 28-31, 1963
44. Toroxell, H.E. & L.A. Mueller : Solar lumber drying in the central Rocky Mountain region, Forest Prod.J., 18 (1), 19-24, 1968
45. Peck, E.C. : Drying 4/4 red oak by solar heat, Forest Prod.J., 12(3), 103-107, 1962
46. Maldonado, E.D. et al : Drying by solar radiation in Puerto Rico, Forest Prod.J., 2 (10), 487-488, 1962
47. 寺沢 真・筒本卓造 : 木材の乾燥, 日本木加技協会, 1976
48. 筒本卓造 : 針葉樹材の乾燥方法—設備とコストのハード面から—, 日本木加技術協会中国支部講演会資料, 1989
49. 寺沢 真 : 昭和における木材乾燥, —除湿式乾燥室—, ウッドミック, 別刷版33-37, 1984
50. 神長邦雄 : 除湿方式による木材の乾燥法の研究 (第1報), 静岡工試研究報告No.22, 13-20, 1978
51. 野原正人・岩田隆昭・寺沢真・奥山剛 : 低温除湿乾燥装置の性能について, 木材工業, 36 (8), 381-386, 1981
52. 鳥居平吉・矢沢秀男 : プナ材の除湿乾燥, 木材工業, 36 (10), 481-485, 1981
53. Cech, M.Y. & E. Pfaff : Dehumidification Drying of Spruce Studs, Forest Prod.J. 28 (3), 22-26, 1978
54. 寺沢 真 : 除湿式木材人工乾燥室について, 木材工業, 38(3), 118-125, 1983
55. 小野広治・小林好紀 : 製材品の除湿乾燥, 奈良林試研究報告, No.15, 29-35, 1985
56. 小野広治・小林好紀 : スギ磨丸太の除湿乾燥, 奈良林試研究報告, No.16, 13-17, 1986
57. 小野広治・小林好紀・久保健 : スギ、ヒノキ柱材の除湿乾燥特性と寸法変化, 奈良林試研究報告, No.20, 32-38, 1990
58. 小林好紀・小野広治 : 製材品の除湿乾燥とその装置, 奈良林試研究報告, No.14, 19~25, 1984
59. 神長邦雄・伊藤久志・大石健次・野橋健三 : 太陽熱を利用した木材の除湿乾燥について, 木材工業, 36 (5), 217-223, 1981
60. 小林好紀 : 太陽熱を利用した除湿乾燥 装置, 木材工業, 43(6), 262-267, 1988
61. 大冷工業株式会社 : 高温・低温切替除湿木材乾燥装置の研究開発, 大冷工業株式会社, 1991
62. 矢沢亀吉 : ヒノキ、サハラ樹体各部における生材比重、含水率、絶乾比重、収縮率、及び辺、心材等について, 岐阜農 専学報, No.52, 37-54, 1944
63. 矢沢亀吉 : スギの樹幹および枝条における辺材、心材別の生材比重、絶乾比重生材含水率ならびに体積収縮率等について, 岐阜農専学報, No.68, 145-158, 1950

64. 矢沢亀吉・楯 茂・岩田広俊：アカマツの樹幹、枝条における生材含水率、比重、体積収縮率及び春秋材別の比重、生材含水率について、日本林学会誌，33(1), 34-39, 1951
65. 矢沢亀吉：広葉樹とくにブナ立木の季節別ならびに辺心材別の生材含水率，木材学会誌，6 (4), 170-175, 1960
66. 小原二郎・江見理一：大枝産スギの材質試験，西京大学農学部研報，No.4, 110-115, 1953
67. 黒鳥四郎：スギの所謂白線帯についての研究（第1報），日本林学会誌，36 (1), 15-19, 1953
68. 野原正人・岩田隆昭・山本和雄：針葉樹材の天然乾燥速度について，岐阜林セ研究報告，No.5, 31-48, 1977
69. 矢沢亀吉：比重、年輪および含水率などの不均一性，材料，No.121, 677-683, 1963
70. 野原正人：天然乾燥の促進方法，集成材工場の技術向上のための講習会テキスト，日本木材加工技術協会，1-15, 1975
71. 蕪木自輔：木材材質の森林生物学的研究（12）北海道野幌地方における造林木の生材含水率について，林試研究報告No.90, 77-144, 1956
72. 藤田晋輔：南九州地域における広葉樹資源の材質と利用開発，鹿児島大学農学部林学科昭和62年度特定研究，81-97, 1988
73. 鈴木 寧・青山経雄：竹材の研究（10）竹材中の湿気拡散について，東大農演習林報告，No.46, 211-223, 1954
74. 小倉武夫・梅原 誠：木材の水分拡散係数の温度、木取り、厚さによる影響，木材学会誌，3 (2), 51-56, 1957
75. 福山万次郎・竹村富男：板材の乾燥について，島根農科大研究報告，No.7, 189-195, 1959
76. 満久崇麿：木材乾燥に関する研究，木材研究，No.6, 51-70, 1951
77. Maku T.: Studies on drying of wood, Wood Research, No.13, 81-120, 1954
78. 小倉武夫：木材の乾燥機構に関する研究（1），水分伝導度と拡散係数について，林試研究報告，No.45, 55-69, 1950
79. Kollmann.F.: Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe, Bd. Auff.2. Springer Verlag, Berlin, 1951
80. Nikitin N.I.: Die Chemie des Holzes Akademie-Verlag, Berlin, 1955
81. Darling R.C. & H.S. Belding : Ind, Eng, Chem, No.38, 1946
82. 寺沢 真・岩下 睦：木材乾燥操作に関する基礎的研究（1），林試研究報告No.81, 81-93, 1955
83. 寺沢 真：木材乾燥技術の諸問題，木材工業，11 (10), 519-526, 1956
84. 小倉武夫：木材の水分移動性および乾燥中に生ずる歪みの温度による影響，林試研究報告，No.77, 35-64, 1955
85. 寺沢 真・筒本卓造・小玉牧夫：木材乾燥装置に関する研究（4）インターナルファン型乾燥室における栈積み内の乾燥むらについて，林試研究報告，No.143 157-175, 1962
86. 日本木材加工技術協会編：木材工業ハンドブック，1958
87. 岩水 豊：一磨き丸太のすべて—新しい商品生産林業と磨き丸太の商品流通，大日本山林会，1975
88. 大内幸雄：今須林業，岐阜県，1977
89. 東京都水道局水源林事務所：森林水文調査報告，蒸散量の測定（1），1968
90. 東京都水道局水源林事務所：森林水文調査報告，蒸散量の測定（2），1971
91. 森川 靖：ヒノキ樹液の流れ，林木の水分収支と関連して，東大演習林報告，No.66, 251-297, 1974
92. 桎山徳治・高橋啓二ら：林木の気象被害，日本林業技術協会，1974
93. 畑野健一，佐々木恵彦：樹木の生長と環境，養賢堂，1987
94. 中野秀章：森林水文学，共立出版，1976
95. 全国林業改良普及協会：山元乾燥は有利なのか” 葉枯らし乾燥の取り組み” 林業新知識 No.420, 2-7, 1988

96. 重松頼生：樹皮の構造に関する研究（第5報），スギ樹皮要素の配列について，京都府立大学術報告，No.12, 106-112, 1960
97. 三村典彦・吉田孝久ら：カラマツ材の乾燥，長野林指研究報告，No.1, 19-43, 1986
98. 寺沢 真・筒本卓造：乾燥むらに関する2, 3の実験，第64回日本林学会大会講演集，365-366, 1955
99. Chudnoff M., E. D. Maidonado & E. Goytia : Solar drying of tropical hardwood, Institute of Tropical Forestry Rio Pie-dras, Puerto Rico, 1964
100. 野呂田隆史・千葉宗昭・大山幸夫：木材乾燥における太陽熱の利用（第1報），北海道林産試月報，No.345, 6-12, 1980
101. 山之内清竜：太陽熱利用乾燥法による製材品の乾燥，昭和59年度鹿児島木工試業務報告，72-82, 1984
102. 中野正志・東野正・佐々木通光：太陽熱を利用した針葉樹建築材の天然乾燥の促進（第1報），岩手林試成果報告，No.22, 63-68, 1989
103. 中野正志・東野正：太陽熱を利用した針葉樹建築材の天然乾燥の促進（第2報），岩手林試成果報告，No.23, 27-36 1989
104. 寺沢 真：天然乾燥の促進法と予備乾燥装置，木材工業，22 (2), 72-75, 1967
105. 鷺見博史：建築用針葉樹材の乾燥に関する暫定指針－含水率等の指針の策定について－，日本住宅・木材技術センター62年度調査事業報告書，92-101, 1987
106. 久田卓興・斉藤周逸：スギ・ヒノキ柱材の乾燥方式と所要経費，日本木加技協会，第5回年次大会講演要旨集，63-64, 1987
107. 日本住宅・木材技術センター：建築用針葉樹乾燥技術研修会テキスト，日本住宅・木材技術センター，1990

Summary

Temperature influences the drying time of wood, and drying at high temperatures is effective. However, heating can be costly, and damages wood frequently. On the other hand, air drying works at low temperatures and seldom causes damage, and its costs are lower. However, air drying also has problems : it requires a longer time, and as it depends on weather conditions, it may not be used uninterruptedly for lumber, and sometimes the wood is not dried to the expected moisture content. In this research, the author tried to determine the appropriate duration of air drying and tested several methods of accelerating the drying. Also tested was the dehumidified drying equipment, which is now widely adopted in the drying of softwood, for its characteristics and appropriate use.

The second chapter describes a historical review of studies on air drying. Also explained is the method of dehumidified drying, its problems and researches on it.

The third chapter discusses the variation of green moisture content within the tree and its seasonal change. These are believed to influence the drying time. Generally speaking, green moisture content in logs can be considered to be ca. 200% in sugi (Japanese cedar), ca. 150% in hinoki (Japanese cypress) and ca. 80% in buna (Japanese beech) and nara (oak).

In the fourth chapter, in order to determine the time required to dry hardwood, the author measured monthly drying time of non-piled boards in Takayama city, which has a mountainous climate, and in Mino city, a locality having an inland climate, and compared boards and piles in the drying time. For buna, the final moisture content after air drying was found to be 25-40% in Takayama city and 20-25% in Mino city. For buna 40 mm thick, the appropriate drying time was found to be 2 months in summer, 3 months in spring and autumn, and 5 months in winter in Takayama city.

In the fifth chapter, air drying of softwood building timber was tested and the time of transpirational drying was surveyed for drying of log and lumber. In softwood, green moisture content is high, and there is a remarkable difference in the moisture content between sap and heartwood. However, moisture content was greatly decreased by transpirational drying. Wood easily dried like hinoki does not require transpirational drying, while for sugi, which has high moisture content in both sap and heartwood, transpirational drying is recommended, even if just for a short time. For logs, barking shortens drying time. Barking is especially recommended when logs are to be stocked on the ground in the factory.

In the sixth chapter, several ways of air drying were tested, and drying time and the economical efficiency of blowing, heating and using solar energy are described. Blowing piles shortened the drying time to two-thirds of that in piles without blowing, and slightly decreased the final moisture content because of the decrease of inequality of moisture content on drying. Heating piles electrically speeded the drying of the center of piles and decreased the inequality of moisture content on drying. This method was especially useful for drying small piles. Although solar drying alone was less efficient, it was useful when combined with blowing and heating. However, it may be too costly when the equipment is set up in a large scale.

The seventh chapter explains the performance of dehumidified drying and its adapta-

bility for using. Dehumidified drying with a heat pump system was an energy-efficient method of drying though it required high heat insulation, and it was suitable for drying hinoki lumber because of low temperatures. In general, dehumidified drying is suitable for drying slowly at low temperatures.

The eight chapter gives general discussion and conclusions. Hardwood requires special air drying with artificial acceleration methods to shorten the drying time. Softwood, however, cannot be treated uniformly. Sugi requires transpirational drying, and lumber should be steam dried. On the other hand, hinoki requires dehumidified drying at low temperatures.