# 低温除湿乾燥による柱材乾燥技術に関する研究

杉山正典　平岡厚雄　長谷川良一　臼井征雄　香川紘一郎　*永井文雄　**児玉守

目　次

はじめに……30
Ⅰ　製材工場における乾燥状況調査結果……30
1　試験方法……30
1．1．乾燥中の温湿度測定方法……30
1．2．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法……30
1．3．含水率測定方法……30
1．4．割れ及び曲りの測定方法……31
1．5．生材及び天乾材の乾燥方法……31
2．結果と考察……31
2．1．供試材の形質……31
2．2．乾燥日数……31
2．3．収縮率……31
2．4．含水率……33
2．5．曲り……33
2．6．割れ……33
Ⅱ　荷重の有無による除湿乾燥試験……33
1　試験方法……33
1．1．荷重の方法……33
1．2．乾燥方法……33
2　結果と考察……34
2．1．乾燥条件……34
2．2．曲り……35
2．3．含水率分布……35
Ⅲ　新型除湿乾燥機による乾燥試験……36
1　試験方法……36
1．1．乾燥装置……36
1．2．供試材……37
1．3．含水率測定方法……37
1．4．含水率分布測定方法……37
1．5．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法……37
1．6．割れ及び曲りの測定方法……37
1．7．乾燥方法……37
2　結果と考察……38
2．1．乾燥経過……38
2．2．収縮率……38
2．3．背割り……40
2．4．曲り……40
2．5．含水率分布……40
2．6．電力消費量……41
2．7．乾燥経費……41
Ⅳ　除湿乾燥後の品質及び損傷発生について……42
1　試験方法……42
1．1．供試材及び桟積み方法……42
1．2．測定方法……42
2　結果と考察……42
2．1．乾燥経過……42
2．2．含水率分布……42
2．3．収縮率……43
2．4．背割り巾……43
2．5．曲り……43
Ⅴ　ひき直し後の品質及び損傷発生について……44
1　試験方法……44
1．1．製材及び乾燥方法……44
1．2．含水率及び含水率分布測定方法……44
1．3．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法……44
2　結果と考察……44
2．1．除湿乾燥機……44
2．2．乾燥条件……44
2．3．乾燥経過……44
2．4．含水率分布変化……46
2．5．収縮率変化……46
2．6．背割り巾の変化……47
2．7．木口割れの変化……47
まとめ……47
謝辞……48
参考文献……48

*現林業振興課　**現林業短期大学校校長

## はじめに

最近の木造住宅は、冷暖房装置の普及及びアルミサッシの利用による屋内の気密性の向上などにより、室内がかなり低湿度条件になり、木材部に狂いが生じる可能性が高くなった。

そのため、これまでの木造住宅にありがちなすきま風、床のきしみ等の狂いのない高品質な住宅が要求される様になった。また、最近、プレカット工場等における墨付けの自動化、最新の加工機械の導入などにより建築工期が非常に短くなっており、製材直後の高含水率状態にある製材品をできるだけ早く、人工乾燥を行う必要が出てきた。

この様な背景の中で特に、ヒノキ柱材について県下の製材工場では、従来より天然乾燥後に挽直しを行うなどの技術により、割れ、狂い等損傷の発生が少ない部材を供給してきた。また、昭和50年代後半より針葉樹材の乾燥を行うに際して、装置が比較的安価で、操作が簡単な除湿乾燥装置を導入し、現在７工場がヒノキ材を乾燥材として供給している。

ところが、針葉樹材に関する乾燥の歴史は浅く、建築材として使用する場合の乾燥技術については、研究データが少なく、除湿乾燥を行う場合、乾燥途中で割れが発生したり、出荷後、曲り、割れ等の欠点が発生してクレームが出たりする場合も考えられる。

また、現在、ＡＱ基準として、針葉樹柱材は、含水率20％まで乾燥するとされているが、乾燥材の出荷から施工までの在庫時における曲り、割れ等の経時変化に関する研究データも少ない。

そこで、県内の針葉樹柱材を主に挽く製材工場において、除湿乾燥に関する調査・分析を行うとともに、乾燥材が平衡状態まで乾燥する間の品質変化に関する資料を蓄え、低温除湿乾燥によりヒノキ柱材を適正な含水率まで欠点の発生が少ない、乾燥技術を確立するために、本試験を行った。

また、ヒノキ柱材の除湿乾燥後あるいは、挽き直し後の在庫時における寸法・品質変化について測定及び分析を行ったのでその結果についても報告する。

本試験は、昭和62年度から平成元年度にかけて実施したものである。

## Ⅰ　製材工場における乾燥状況調査結果

### １．試験の方法

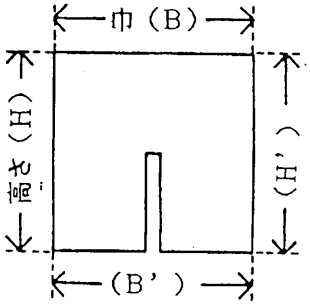
県内の除湿乾燥を行っている製材工場（Ａ～Ｆ）において、仕上がり寸法12cm正角（以下、「12cm正角材」という）のヒノキ柱材について除湿乾燥試験を行った。試験材は、各工場において、丸み及び腐れ等の欠点の少ない材を選び、材長、重量及び含水率等の測定を行った後、各々の工場で除湿乾燥を行った。各試験材とも乾燥終了後、試験材の重量、含水率、及び曲り、割れ等の欠点の測定を行った。

#### １．１．乾燥中の温湿度測定方法

各工場における除湿乾燥室の温湿度条件は、自記温湿度計により測定した。

#### １．２．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法

断面寸法については、図－１に示すように背割りに相対する面の厚さを巾、その面に垂直な面の厚さを高さとして乾燥前と乾燥後に測定した。材長の測定は、乾燥前に行った。重量の測定は、乾燥前と、乾燥後に行った。背割巾の測定は、試験材の材長方向の中央部において、乾燥前と乾燥後に行った。



図－１　厚さ測定方法

#### １．３．含水率測定方法

含水率測定については、Ｋ社製高周波含水率計により、試験材の材

長及び厚さ方向の中央部において乾燥前と乾燥後に４材面を測定した。また、中央部と１材面全体（両木口より60cmの部分は除いた）の含水率の比較を行うため測定を行い、その最大値を測定した。なお、測定時の高周波含水率計の比重等による補正値の設定は、測定器メーカーの指定しているヒノキの値（ 0.37）とした。

### １．４．割れ及び曲り測定方法

割れ及び曲りの測定は、乾燥前と乾燥後に行った。割れについては割れ１本毎の長さを測定し、曲りについては、ＪＡＳの測定方法により行い、材長に対する比が0.1%以上のものを測定した。

### １．５．生材及び天乾材の乾燥方法

Ａ工場においては、生材と天乾材の乾燥による形質変化及び欠点発生の違いを探るため、製材直後の材と２週間Ａ工場内で天乾を行った材を試験材とした

## ２．結果と考察

### ２．１．供試材の形質

供試材の形質を、表－１に示す。供試本数は、各工場とも20本以上について行った。材長測定の結果、Ｂ工場で３ｍ未満の材が１本みられた。Ｃ工場及びＥ工場では材長を所定の寸法に切りそろえた後、乾燥を行った。表中の厚さ寸法は、試験材の幅と高さの測定値を平均したものであるが、６工場とも乾燥終了後、修正挽きを行うため、厚さの平均値は、各工場とも130mm以上であった。

### ２．２．乾燥日数

Ａ～Ｆ工場における試験材の乾燥日数については、Ｄ及びＦ工場では、５日間、その他の工場では、６日間であった。又、各工場とも乾燥初期の半日間～１日間は、除湿機の除湿機能は、使用せず、温度上昇機能のみ働かせて乾燥室内の温度及び湿度が上昇してから除湿機能を利用して乾燥を行った。

### ２．３．収縮率

乾燥後の厚さの測定結果及び収縮率について表－２に示す。各工場における試験材の収縮率は0.78%～1.47%であり、1.0mm～2.0mm収縮した。Ｅ工場における厚さの最小値は、 126mmであったが、この寸法では４材面とも修正挽きを行い仕上がり寸法を123～125mmにするのは難しく、そのためには、最小値が130mmとなるように製材する必要があると思われる。

表－１　供試材の形質

| 工場名 | | A 合計 | A 天乾材 | A 生材 | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 本数（本） | | ２０ | １０ | １０ | ３０ | ２０ | ２０ | ２０ | ２０ |
| 材長（cm） | 平均 | 308.0 | 310.2 | 305.8 | 310.4 | 300.5 | 307.7 | 300.0 | 319.5 |
| | 最少値～最大値 | 303.5 ～ 318.0 | 304.5 ～ 318.0 | 303.5 ～ 311.0 | 298.0 ～ 344.0 | 300.5 | 300.5 ～ 334.5 | 300.0 | 305.5 ～ 336.0 |
| 厚さ（mm） | 平均 | 135.60 | 137.15 | 135.85 | 136.08 | 135.35 | 133.68 | 132.00 | 135.44 |
| | 最少値～最大値 | 133.90～ 137.50 | 135.0～ 137.50 | 134.90～ 138.00 | 129.70～ 141.60 | 133.20～ 136.75 | 131.50～ 138.50 | 127.40～ 136.40 | 131.90～ 139.40 |
| 年輪巾（mm） | 平均 | 2.35 | 2.31 | 2.39 | 2.11 | 3.01 | 2.75 | 2.76 | 2.68 |
| | 最少値～最大値 | 1.58～ 3.08 | 1.58～ 3.08 | 1.89～ 2.95 | 1.18～ 3.33 | 1.52～ 5.56 | 1.76～ 5.44 | 1.73～ 4.33 | 1.21～ 4.12 |

表－2　収縮率測定結果

| 工場名 | | A 合計 | A 天乾材 | A 生材 | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 厚さ(mm) | 平均 | 133.84 | 134.68 | 133.01 | 135.36 | 133.36 | 132.42 | 130.58 | 134.39 |
| | 最少値～最大値 | 131.20～139.90 | 132.45～139.90 | 131.20～134.35 | 132.7～141.0 | 130.00～135.10 | 130.00～134.20 | 126.00～134.80 | 131.95～139.35 |
| 収縮率（%） | | 1.30 | 1.08 | 1.52 | 1.30 | 1.47 | 1.00 | 1.08 | 0.78 |

表－3　含水率測定結果　（%）

| 工場名 | | A 合計 | A 天乾材 | A 生材 | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 乾燥前 | 中心 | 41.86 | 39.01 | 44.71 | 36.90 | 38.81 | 37.81 | 38.29 | 47.81 |
| | 全材面 | 83.02 | 52.63 | 113.41 | 62.42 | 66.44 | 61.38 | 84.38 | 60.56 |
| 乾燥後 | 中心 | 21.72 | 22.05 | 21.33 | 20.06 | 21.80 | 23.19 | 24.28 | 26.70 |
| | 全材面 | 22.00 | 22.52 | 21.41 | 20.29 | 22.10 | 23.37 | 25.13 | 28.93 |

注）K社製高周波含水率計により測定、比重設定は0.37gr/cm²とした。

表－4　曲り発生率

| 工場名 | | A 合計 | A 天乾材 | A 生材 | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 試験材木数（本） | | 20 | 10 | 10 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 曲り率0.1%以上 | 本数割合（%） | 65.0 | 50.0 | 80.0 | 33.3 | 50.0 | 65.0 | 15.0 | 20.0 |
| 曲り率 | 平均（%） | 0.21 | 0.25 | 0.13 | 0.14 | 0.22 | 0.12 | 0.12 | 0.13 |
| | 最小～最大値（%） | 0.10～0.47 | 0.10～0.47 | 0.10～0.42 | 0.10～0.33 | 0.13～0.30 | 0.10～0.17 | 0.10～0.13 | 0.10～0.17 |
| 曲り率が0.2%を超えたものの本数割合（%） | | 15.0 | 20.0 | 10.0 | 3.3 | 30.0 | 0 | 0 | 0 |

表－5　割れ長さ

| 工場名 | | A 合計 | A 天乾材 | A 生材 | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 割れ発生本数割合(%) | | 45 | 10 | 80 | 30 | 35 | 55 | 35 | 0 |
| 割れ長さ | 平均(mm) | 94.6 | 95.0 | 94.5 | 148.3 | 61.7 | 54.9 | 113.6 | 0 |
| | 最小～最大値(mm) | 30～570 | 95 | 8～505 | 5～330 | 40～95 | 10～180 | 25～360 | 0 |
| 割れ長さが材長の10%を超えたものの割合(%) | | 5 | 0 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 割れ長さが材長の20%を超えたものの割合(%) | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

注）表中の割れ長さは材長を3mに換算した場合の値である。

２．４．含水率

乾燥前と乾燥後の含水率の測定結果を表－３に示す。乾燥前の含水率測定結果について、中央部の測定結果と最大値との差は、最低で13.6%、最大で68.7%であり、測定位置によって含水率計の示す値に差があることが分かった。乾燥後における中央部と最大値との差は 0.3%～2.2%であり、 乾燥前に比べその差は小さい。この原因は、ヒノキ材の場合、乾燥する前は辺材部と心材部の含水率の差が大きく、中心部で測定する場合は、心材部を測定する場合が多いため全体の含水率より低くなると考えられる。

２．５．曲り

各工場において曲りを測定した結果は、表－４に示す通りである。６工場中、半数の３工場において、曲り率0.1%以上の発生本数割合が50%を越えている。曲り率が0.2%（特等、及び１等材のＪＡＳの規定）を越えているものの本数割合は、Ａ工場及びＣ工場で、大きな値を示した。

２．６．割れ

割れの測定結果は、表－５に示す通りである。Ｆ工場では割れが発生しなかったが、他の５工場では、割れ発生率が30%以上を示し、割れ長さの平均値は、61.7mm～113.6mm であった。ＪＡＳの特等及び１等の規格では、木口割れは、それぞれ材長の10%及び20%以内となっている。本試験の場合、割れ長さが10%を越えるものの割合は、Ａ工場の生材が10%、Ｂ工場が、0.3 %を示し、その他の工場では、割れ発生率は、0%であった。又、割れ長さが材長の20%を越えるものの割合は、全工場において0%であり、全工場とも割れに関しては、１等以上の品質を有しているといえる。

Ａ工場において天乾材と生材の乾燥について比較してみると、生材の場合は10本中８本に割れが発生し、その平均値は94.5mmであった。それに比べ天乾材の場合は、10本中１本に割れが発生しその長さは、95.0mmであり、天乾を行った材の方が割れが発生しにくいことが分かる。

## Ⅱ．荷重の有無による除湿乾燥試験

１．試験方法

乾燥中に、乾燥材上部より、荷重をかけた場合の曲り防止効果を探るため、荷重をかけた場合とかけない場合の曲り率を測定し、比較分析を行った。

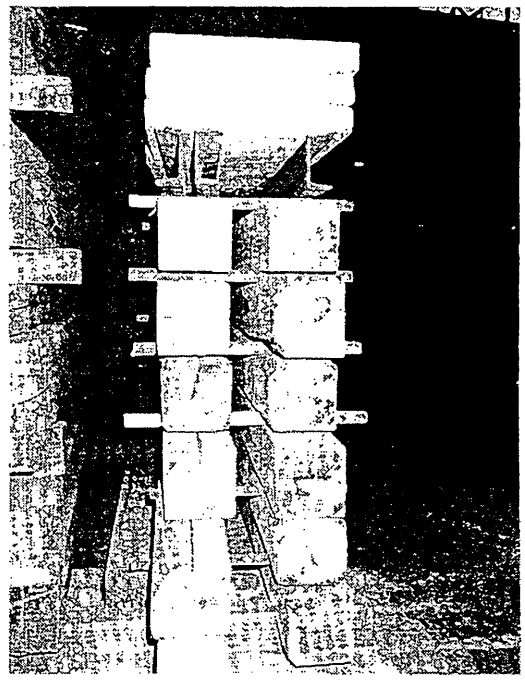
１．１．荷重の方法

Ａ工場において、試験材の桟積み上部より桟木面積１$cm^2$ 当たり.4 kgの荷重をかけ（写真－１）、乾燥を行った。

１．２．乾燥方法

試験Ｉと同様、仕上がり12.5cm正角のヒノキ製材品について除湿乾燥試験を行った。試験材は、曲りが発生しやすいと考えられる根曲り材21本を選び、12本に荷重をかけ乾燥を行った。残りの９本は、荷重をかけないで乾燥を行った。試験材は、材長、重量及び含水率等の測定を行った後、除湿乾燥を行い、乾燥終了後、試験材の重量、及び曲り等の欠点の測定を行った。

また、9本の内1本を含水率分布測定用試験片として乾燥開始時より終了までに４回、3m柱を次々に50～



60cmおきに切断し、3cm厚の試験片を採取した。採取した試験片を図－２に示すように分割し、重量測定後、絶乾とし含水率を求めた。

なお、乾燥スケジュールについては、図－３に示す通りである。

## ２．結果と考察

### ２．１．乾燥条件

乾燥開始時の試験材の含水率は、39.7%であった。

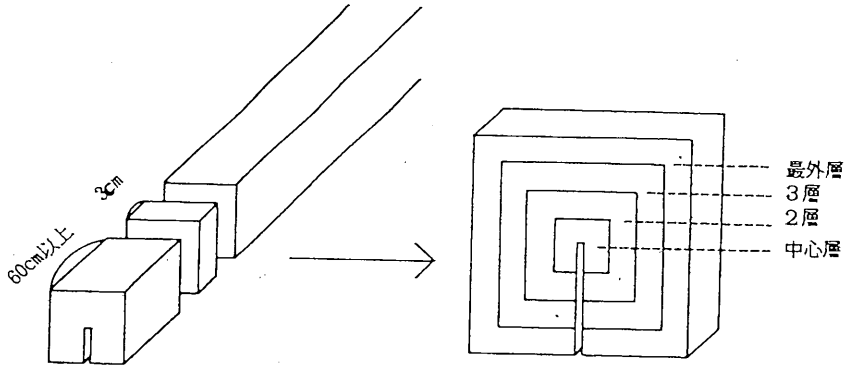
乾燥方法として、乾燥開始時から１日目までは、ヒーターによる加熱は行わず、試験材表面からの水分蒸発を促し、除湿機も動かさなかった。

乾燥開始後、１日目から電熱器により加熱を行ったが、、外気温が５℃と低かったため、２日後にようやく理想の乾燥条件である３５℃に上昇した。

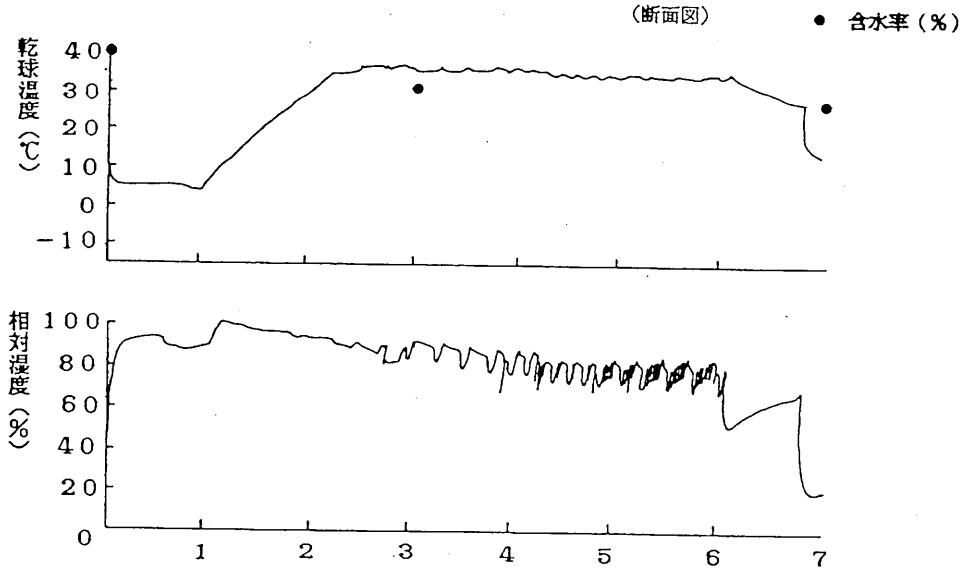
その後も加熱を行っているが、壁体等からの熱損失が大きいため、温度は上昇しなかった。

３日後より除湿機を稼働させ、６日後に除湿機を止め、約１日養生を行った。

冬季においては、乾燥初期の湿度条件を確保し、室内温度を高めて、乾燥初期の適正な条件とするまでのウォーミング・アップの期間は、約２日間必要であり、全乾燥時間の約1/4を占めていることになる。




試験材　　図－２　含水率分布測定用試験片（断面図）



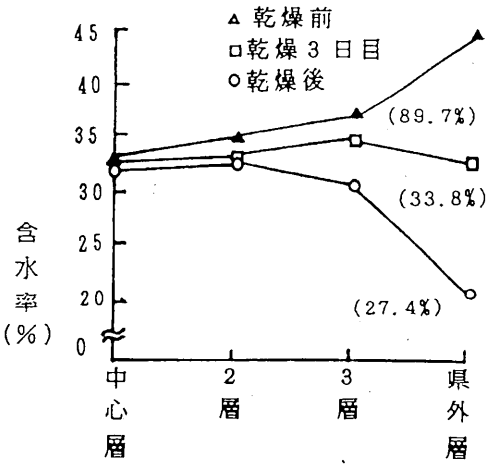

図－３　除湿乾燥の温湿度条件

## ２．２．曲り

荷重の有無による曲りの測定結果を表－６に示す。乾燥前の曲り率の測定結果は、荷重無しの場合は、8本中3本が曲り率0.13%であった。荷重をかけた場合の試験材の曲り率 0.1%以上の本数割合は、12本中2本であったが、その内の1本は、曲り率が0.4%と大きな値であった。乾燥後の曲りの測定結果については、荷重無しの場合は、8本の試験材全ての曲り率が0.1%以上となり、その平均値は、0.14%であった。荷重をかけた場合は、12本中8本の曲り率が0.1%以上となったが、曲り率の平均値は、0.11%であり、乾燥前の曲り率に比べ減少した。また、曲りの最大値についても0.40%から0.13%に減少し、荷重をかけた材はかけない材より曲りの増加が少ないことが分かる。

## ２．３．含水率分布

荷重をかけた試験材の含水率分布変化を図－４に示す。乾燥前の含水率分布状態について見てみると、最外層の含水率は、44.9% であり、中心層の含水率の33.0%より高い含水率を示している。乾燥開始から３日後の状態では、最外層の含水率は、33.3%に減少し、中心層～３層においては、ほとんど変化がみられない。乾燥終了時には、中心層の含水率には、変化がなく、３層は、31.2%まで減少し、最外層は、22.4%まで乾燥した。針葉樹柱材の除湿乾燥では、表層の含水率は、１週間程度で45%から20%程度まで乾燥するが、内層の含水率は、ほとんど減少しないと言える。




注：（）内は試験片全体の含水率

図－４　含水率分布変化

表－６　荷重の有無による曲り発生率

| 試験材本数(本) | | 8 | | 12 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 荷重の有無 | | 荷重無 | | 荷重有 | |
| 測定時期 | | 乾燥前 | 乾燥後 | 乾燥前 | 乾燥後 |
| 曲り率0.1%以上 | 本数割合(%) | 37.5 | 100.0 | 17.4 | 66.7 |
| | 平均(%) | 0.13 | 0.14 | 0.25 | 0.11 |
| | 最小値～最大値(%) | 0.13 | 0.10～0.17 | 0.10～0.40 | 0.10～0.13 |
| 曲り率0.2%を超えるもの | 本数割合(%) | 0 | 0 | 8.3 | 0 |
| | 平均(%) | 0 | 0 | 0.40 | 0 |
| | 最小値～最大値(%) | 0 | 0 | 0.40 | 0 |

## Ⅲ　新型除湿乾燥機による乾燥実施結果について

### 1．試験方法

針葉樹柱挽き製材工場に設置されている一般の、除湿乾燥装置は、十分な加熱装置及び加湿装置を備えていないため、温湿度コントロールが難しく、理想の温室度条件を設定することが難しいのが現状である。そこで、中部電力が高山市のＮ工場内に試験乾燥装置として設置した加湿器及び加熱器を備え、正確な温湿度制御が可能な乾燥室を用い、試験を行った。

その乾燥室で実際に乾燥を行い、仕上がり含水率を20％とした場合の針葉樹の品質及び損傷発生状況を測定及び分析し、損傷発生の少ない乾燥方法について検討した。

### 1．1．乾燥装置

図－５に示す。乾燥室寸法は、間口 3.15m, 奥行き 6.05m, 高さ 4.00m、収容材積は、最大約10m³である。

乾燥室は、壁体からの熱損失を少なくするため、上屋を設け、２重構造である。

ファンは、 0.75KWHのものを３台設置し、設定タイマーにより、風向きを逆にする仕組みである。また、風量を増減させるためのインバーターが回路に組み込んであり、乾燥初期には、回転数を速く、乾燥末期では、遅くすることが可能である。

除湿機には、フロンガスＲ－22を使用し、1.9KWHのコンプレッサーを２台設置した。除湿能力は、除湿機２台稼動時において、乾球温度40℃、相対湿度80％の条件で時間当り18kgである。

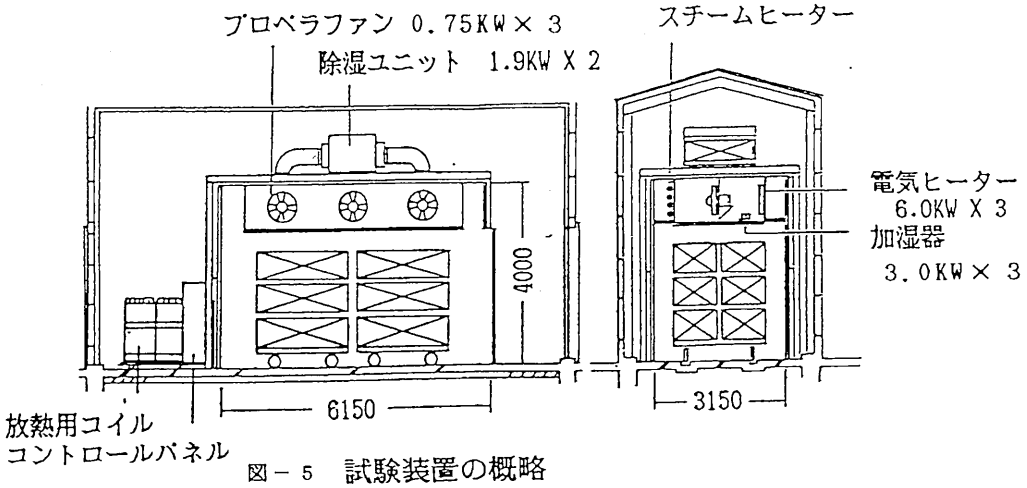
スチームヒーターは、長さ５mのアルミパイプフィンヒーターを４本設置している。

電気ヒーターは、６KWHのものを３台設置している。

加湿装置は、パン型で、3KWHのものを３台設置し、加湿能力は、時間当り11.7KWHである。

ファン、除湿機、スチームヒーター、電気ヒーター、加湿器を設置し、除湿式、蒸気式の両方の乾燥試験が実施できるようになっている。

各種機器の使用量と動力量は、積算電力計に別々に積算される仕組みである。




図－５　試験装置の概略

１．２．供試材

供試材には、七宗産（下呂営林署産）のヒノキ原木を２度据き前の寸法に製材したものを用いた。供試本数は、仕上がり寸法10.5cm正角（以下、「10.5cm正角材」という）を75本、ならびに、仕上がり寸法12cm正角（以下「12cm正角材」という）を95本で、合計170本とし、材積合計は、約8.846m³であった。

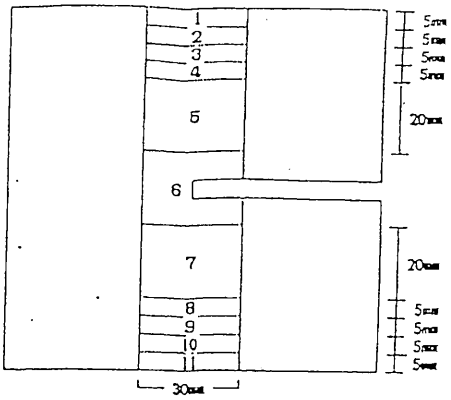
供試材の内、丸み及び腐れ等欠点の少ない20本を選び、試験材とした。材長、重量及び含水率の測定を行った後、除湿乾燥試験を実施した。各試験材とも乾燥終了後、重量、含水率及び曲り、割れ等の測定を行った。

なお、この乾燥試験は、８月22日に開始し、８月31日に終了した。この間の外気温度は平均23.9℃、湿度は平均77.9%であった。

乾燥スケジュールを決定するため、10.5cm正角材２本と12cm正角材２本をスケジュール試験材とした。この試験材の末端（木口より30cm）から試験片を採取し、初期含水率を推定した。４本の試験材は、乾燥経過中に重量測定し、含水率減少経過を求めた。

１．３．含水率測定方法

供試材60本について、高周波含水率計により材長及び厚さ方向の中央部において、４材面の含水率測定を行った。なお、含水率計の比重等による補正値は0.39とした。




図－６　含水率分布測定用小試験片採取方法

１．４．含水率分布測定方法

スケジュール試験材４本のうち12cm正角材１本を含水率分布測定用試験材とした。試験材の初期の含水率を含め、乾燥経過中に４回３m柱を次々に50～60cmおきに切断し、その部分から３cm厚の試験片を採取した。採取した試験片を図－６に示すように分割し、採取した小試験片No.１～11を重量測定後、絶乾にし、含水率を求めた。なお、他の３本のスケジュール試験材についても、乾燥前と乾燥後に含水率推定用試験片と共に含水率分布測定用試験片を採取し、水分分布を求めた。

１．５．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法

断面寸法については、背割り面と相対する面の厚さを巾、これらの面と垂直な面の厚さを高さとして乾燥前と乾燥後に材長方向の中央部でノギスにより測定した。

背割り巾は、材長方向の中央部でノギスにより測定した。

材長の測定は、乾燥前に行った。重量の測定は、乾燥前と乾燥後に行った。

１．６．割れ及び曲りの測定方法

割れ及び曲りの測定は、乾燥前と乾燥後に行った。割れについては、割れ１本毎の長さを測定し、曲りについては、ＪＡＳの測定方法により行い、材長の0.1%を超えたものについて測定した。

１．７．乾燥方法

表－７に供試材の性状を示す。

乾燥に供した試験材は、一般材が主体であったが、良材を若干含み、アテ等の欠点を有する材も含まれていた。また、半天乾材のため、スケジュール試験材の初期含水率は、10.5cm正角材が、絶乾法で38.9%、12cm正角材が35.8%であった。そのため、設定した乾燥スケジュールは、初期温度35℃、相対湿度85%、９日目に最終温度40℃、相対湿度60%とし、非常に緩やかな条件とした。

また、外気温が平均23.9%と十分高く、除湿式乾燥法としては電気加熱をほとんど必要としない好条件下であったので、蒸気による室温加熱を一切止め、従来の除湿乾燥室の操作方法のみで運転し、乾燥末期には、排気も行わなかった。

## 2．1．乾燥経過

乾燥条件及び試験材の乾燥経過を図－7に示した。

試験材は、半天然乾燥材のため初期含水率は、10.5cm正角材が絶乾法で約39%、12cm角が、約36%であった。

この設定条件により乾燥試験を実施した結果、9日後の乾燥終了時に、絶乾法で10.5cm正角材が、絶乾法で22%、12cm正角材が24.5%まで乾燥した。（表－8）

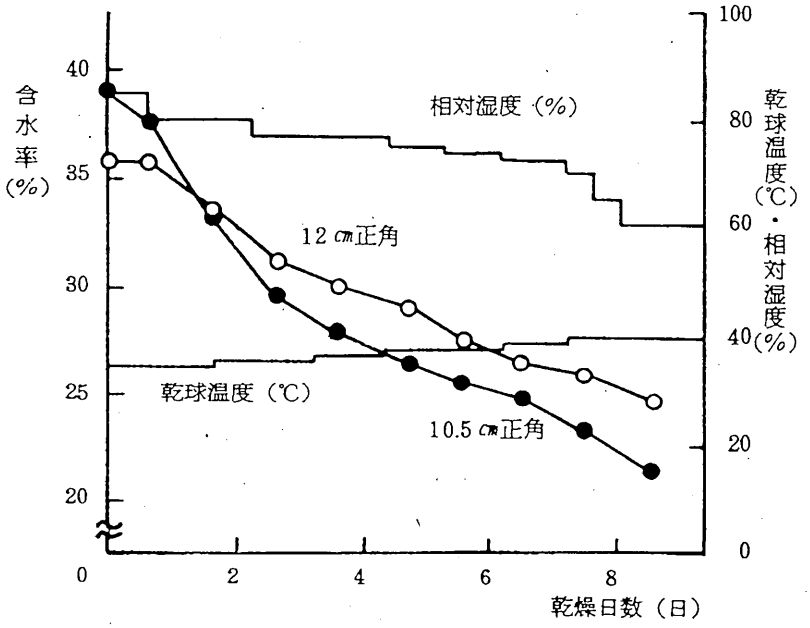
一方、含水率計による測定値は、16.3%であり、絶乾法による含水率測定結果と比較して、約8%低い値を示した。

この原因としては、含水率計は、試験材の中央部まで測定することができず、深さ2cm程度の含水率を測定するためと考えられる。

除湿乾燥を行っている製材工場での乾燥日数は、絶乾法で25～30%まで乾燥するのに、乾燥日数は約6～7日を要しているので、それと比較して、今回は緩やかな条件を設定したが、時間的な差はないと考えられる。

## 2．2．収縮率

12cm正角材における幅方向の収縮率測定結果は、1.16%であり、製材工場での調査結果、1.30%に近い値を示した。




図－7　ヒノキ柱材除湿乾燥経過

表－7　供試材の品質測定結果

| 項目 | | 10.5cm正角材 | 12cm正角材 |
|---|---|---|---|
| 本数（本） | | 78本 | 95本 |
| 材積（m²） | | 3.375 | 5.471 |
| 材長（cm） | | 307.8 | 310.3 |
| 中央巾（mm） | | 118.56 | 136.23 |
| 平均年輪巾（mm） | | ―― | 355 |
| 心材率（%） | | ―― | 末口 88　元口 94 |
| 偏心（mm） | | ―― | 末口 13　元口 3.1 |
| 重量（kg） | | 26.18 | 31.68 |
| 含水率（%） | 絶乾法（スケジュール試験材） | 38.9 | 35.8 |
| | 含水率計（C社製）による測定値（補正値4.5） | 51.2 | 34.4 |
| | 含水率計（K社製）による測定値（補正値0.37） | 38.2 | ―― |
| 背割り巾（mm） | | 2.85 | 3.11 |
| 曲り | 曲り率が0.07%を超えたものの本数割合（%） | 0 | 4 |
| | 曲り率（%）平均値 | | 0.11 |
| | 曲り率（%）最小値～最大値 | | 0.11～0.13 |

表－8　除湿乾燥材の品質測定結果

| 項目 | | 10.5cm正角材 | 12cm正角材 |
|---|---|---|---|
| 重量（kg） | | 21.90 | 28.90 |
| 含水率（%） | 絶乾法（スケジュール試験材） | 22.2 | 23.3 |
| | 含水率計（C社製）による測定値（補正値4.5） | 17.6 | 16.0 |
| | 含水率計（K社製）による測定値（補正値4.40） | 19.0 | 17.2 |
| 中央巾（mm） | | 117.40 | 134.88 |
| 巾方向収縮率（%） | | 0.98 | 1.16 |
| 背割り巾（mm） | | 5.58 | 7.33 |
| 比：乾燥後の背割り巾／乾燥前の背割り巾 | | 1.96 | 2.38 |
| 曲り | 曲り率が0.1%を超えたものの本数割合（%） | 22.2 | 5.19 |
| | 曲り率（%）平均 | 0.16 | 0.13 |
| | 曲り率（%）最小～最大 | 0.15～0.17 | 0.10～0.28 |
| | 曲り率が0.2%を超えたものの本数割合（%） | 0 | 3.7 |
| | 曲り率（%）平均 | | 0.23 |
| | 曲り率（%）最小～最大 | | |
| 割れ | 30cm以上の木口割れが発生した本数割合（%） | 0 | 7.1 |
| | 割れの最大値（mm）平均 | | 1096 |
| | 割れの最大値（mm）最小～最大 | | 650～1541 |

## 2．3．背割り

12cm正角材において乾燥前と乾燥後の背割り巾の比を測定した結果、2.38倍であり、製材工場での調査結果である2.43倍に近い値を示した。

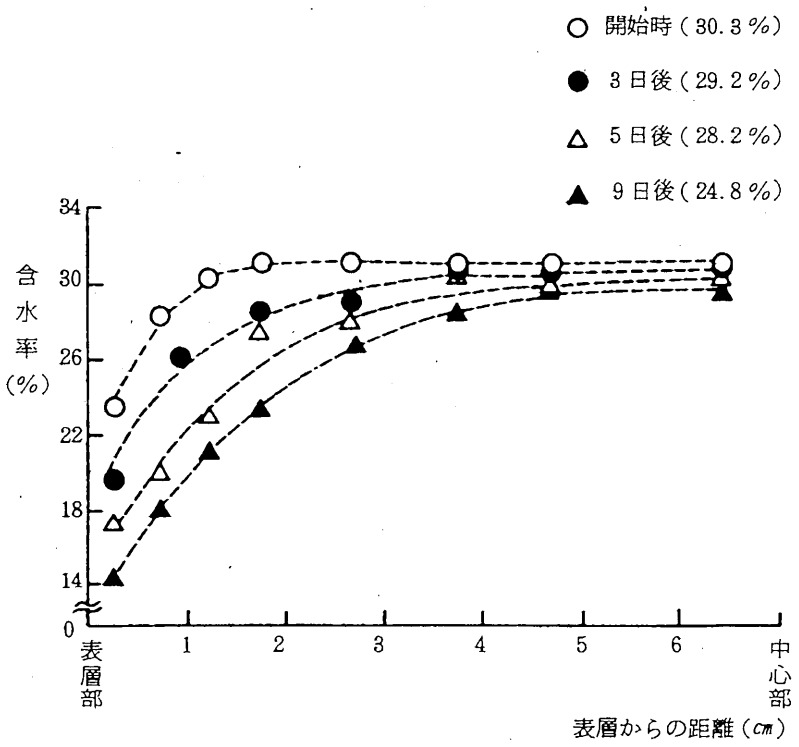
## 2．4．曲り

乾燥終了時に、曲りを測定した結果、材長の0.2%以上の曲りが発生した本数は12cm正角材で27本中１本のみであり、製材工場での測定結果では、20本中 3本に曲りが発生しており狂い発生本数は少ない。

## 2．5．含水率分布

12cm正角材の含水率分布測定結果を図－８に示す。乾燥開始時における試験材の含水率は、30.3%であった。半天乾材であったため、この時点での表層の含水率は23.5%と低く、表層から２cm以上内側の部分の含水率は、約30%であった。乾燥終了時の９日後には、全体の含水率は24.8%となった。この時、表層部は約14%まで乾燥したが、中心部の含水率は、乾燥前と比較してほとんど変化が見られない。乾燥前後に他のスケジュール試験材について含水率分布を測定した結果も、同様に中心部含水率の減少は少ない。除湿乾燥による９日程度の乾燥では、中心部の含水率減少はなく、表層数cmの乾燥しか期待できないといえる。

今回の試験では、良材あるいはアテ等の欠点を持つ乾燥しにくい材を含んでいたために、乾燥条件を緩やかなものとしたが一般材を主体に乾燥する場合は、乾燥温湿度条件をもっと厳しくしてより早く乾燥することが可能と考えられる。




図－８　含水率分布変化（ヒノキ12cm正角材）

## 2．6．電力消費量

乾燥経過中に各機器の電力消費量を調べ、乾燥材の重量減少量と含水率減少経過から算出した各種機器の水分1kgを乾燥するための消費電力量を算出した結果を図－9に示した。

なお、水分1kgを蒸発するのに要する消費電力量は、重量減少量と、含水率減少経過及び消費電力量測定結果より算出した。

乾燥開始直後に各機器の消費電力量が増加しているが、これは、乾燥初期のウォーミング・アップのためである。

ファンの消費電力量については、回転数を60サイクルから45サイクルに落としており、ファンの回転数と消費電力量の関係は、回転数の比の3乗に比例し、そのため、全体的に低い値を示した。

今回の乾燥では桟木厚が25mmであったが、針葉樹柱材製材工場等で、25mm～45mmの厚さの桟木を使用しており、もっと厚い桟木を使用する場合は回転数をもっと低くしても良いと思われる。

除湿機の消費電力量と含水率の関係では、含水率30％あたりから消費電力量が増加した。

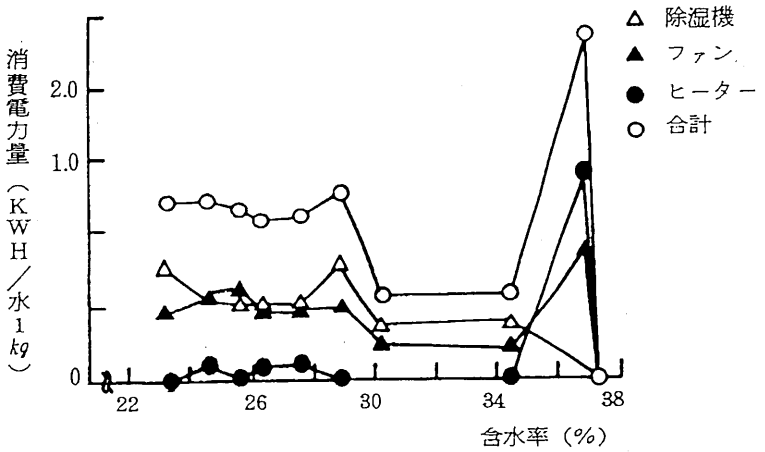
ヒーターの消費電力量については、乾燥初期に昇温のために増加した後は、消費量が少なくなった。

含水率28％あたりでヒーターが動いている原因としては、このあたりから被乾燥材の水分蒸発量が減少するため、除湿機の稼働が少なくなり、室温維持が困難になったからと考えられる。また、ファンの回転数を落としたことによる発熱量の減少も影響していると考えられる。今回は、試験実施が9月であり、外気温が23.9℃と高かったため、ヒーターの消費電力量は少なかった。

冬期に乾燥を行う場合は、外気温が低いため、今回実施した試験よりヒーターの使用量が増加すると考えられる。その場合は深夜電力を利用するか、あるいは、蒸気式と併用する事により効率の良い乾燥を行うことが可能と考えられる。

## 2．7．乾燥経費

消費した電力量は、総計581KWH、乾燥材積は、8.846m³ であった。現在の電力料金を18円/KWHとすれば、乾燥に要する電力経費は、1,182円/m³ となる。




図－9　含水率と消費電力量の関係

## Ⅳ　除湿乾燥後の品質及び損傷発生について

### 1．試験方法

#### 1．1．供試材及び桟積み方法

試験Ⅲで乾燥を行った試験材より12cm正角材９本を選び、乾燥後に当試験場実験室内に桟積みし、約半年間、天乾し、経時、形質変化測定を行った。（以下、この試験を「試験１」という）

また、試験Ⅱで除湿乾燥を実施した材についても、乾燥終了時の３月より、試験Ⅲと同様に桟積みし、測定した。（以下、この試験を「試験２」という）

#### 1．2．測定方法

断面寸法、重量、背割巾、含水率及び曲りの測定方法は、試験Ⅰと同様である。なお、曲りについては、材長に対し、0.07%を越えたものを測定した。

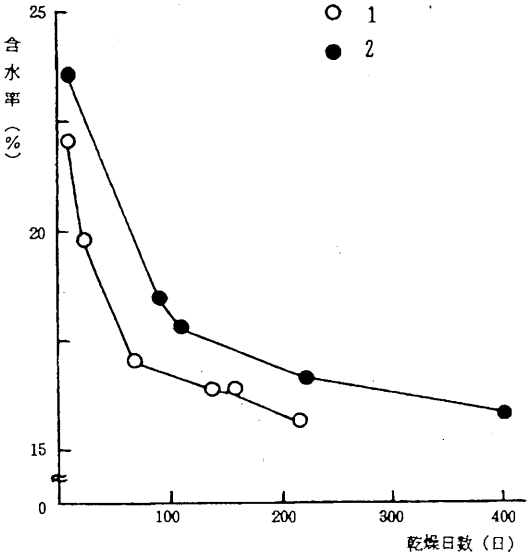
### 2．結果と考察

#### 2．1．乾燥経過

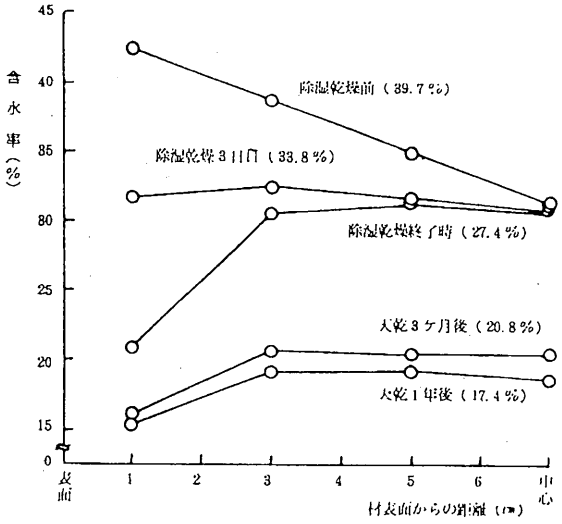
試験１及び２における乾燥経過を図－10に示す。試験１における乾燥終了時の含水率は、24.5%であった。これから、２日目における乾燥速度は速く、含水率は、22%まで減少した。天乾２ヶ月後には、含水率約17%となり、半年後には、約16%となった。試験２における除湿乾燥終了後の含水率は、23.5%であり、天乾３ヶ月後に含水率18.5%まで減少した。その後、徐々に乾燥し、半年後に、16.7%、１年後に約16%に減少した。試験１での初期の乾燥速度が試験２に比べ速いのは、外気温度が前者は平均19.4℃と高く、後者が平均4.0℃低かったためと、考えられる。

#### 2．2．含水率分布

試験２における含水率分布変化を図－11に示す。除湿乾燥終了時の含水率は27.4%であり、３ヶ月の天乾後、含水率20.8%まで減少した。また、除湿乾燥後における表層部と中心部の含水率の差は約10%であったが天乾３ヶ月後には、５%となり、水分傾斜は少なくなった。天乾12ヶ月後における含水率は、17.4%であり、水分蒸発量は少ない。




図－10　ヒノキ材の乾燥経過（除湿乾燥後）




図－11
ヒノキ柱材（12.5cm正角材）の含水率分布変化
注：（）内の数字は試験材の含水率

## 2．3．収縮率

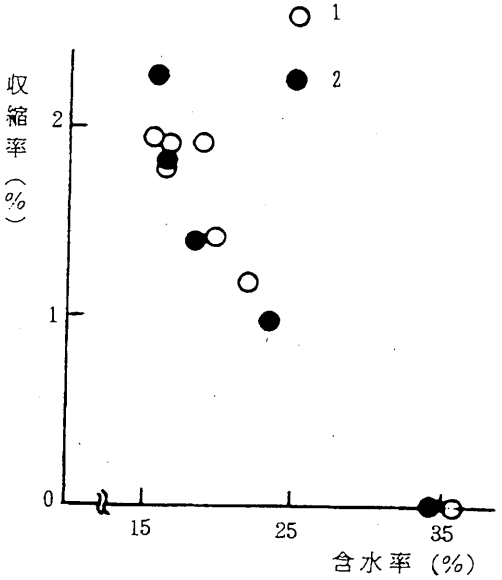
試験１及び２における巾方向収縮率測定結果を図－12に示す。試験１では、乾燥終了時より１ヶ月後（含水率18.9%)に、収縮率が1.92%となった。その後の収縮率の増加は少なく、７ヶ月後（含水率16%）の時1.95%であった。試験２では、乾燥が進むにつれて収縮率は増大し、１年２ヶ月後（含水率15.8%）に、収縮率は2.28%となった。

## 2．4．背割巾

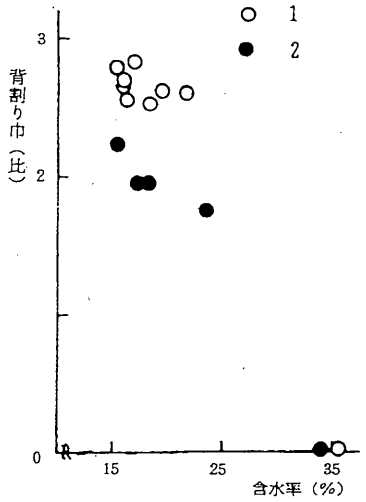
含水率と背割巾（比）との関係を図－13に示す。試験１では、除湿乾燥終了後に背割巾の比は、2.62倍である。含水率が減少しても背割巾の開きは少なく、含水率が16%の時、背割巾の比は、2.80倍であった。それに比べ試験２では、除湿乾燥終了時における背割り巾の比は、1.76倍であったが、その後、乾燥するにつれ、徐々に増加し、含水率16%の時、2.28倍となった。試験１の背割り巾の開きが大きい原因としては、試験１では、試験２に比べ、除湿乾燥時に、35℃以上で処理している時間が３日程長く、そのため、背割巾が十分に開いたためと考えられる。

## 2．5．曲り

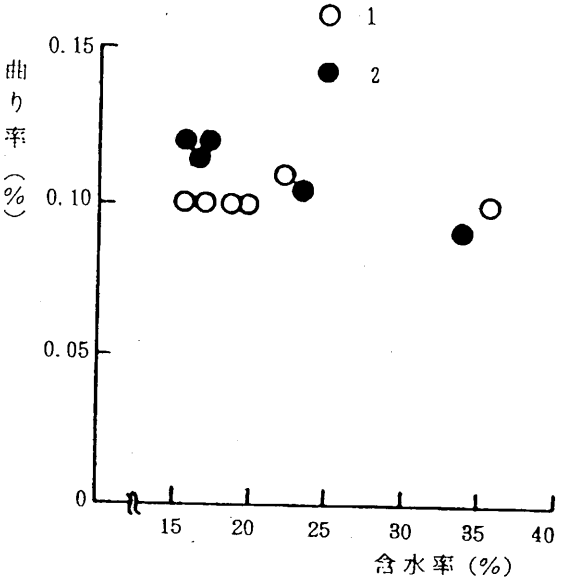
含水率と曲り発生量（材長に対して0.07%を越えたもの）との関係を図－14に示す。試験１では、乾燥終了後に曲りの増加はみられなかった。試験２では、乾燥後、徐々に曲りが増加し、10本中４本に平均0.16%の曲りが発生した。




図－12　含水率と巾方向収縮率の関係




図－13　含水率と背割り巾（比）の関係




図－14　含水率と曲り発生量との関係
注：曲りは0.07%を超えたものの平均値

## Ⅴ　ひき直し後の品質及び損傷発生について

### 1．試験の方法

#### 1．1．製材及び乾燥

七宗産（下呂営林署材）のヒノキ原木８本(平均年輪巾2.5mm)を供試木とした。

県内のM製材工場において、２度挽きを考慮して仕上り12cm正角(約135mm)に製材後、背割りを行ったものを試験材とした。１～２ヵ月間屋内に桟積みし、天然乾燥を行った。各試験材とも材長、断面寸法、含水率、含水率分布及び割れ、曲り等欠点の測定を行った後、同工場において一週間除湿乾燥を実施した。

除湿乾燥後、当センター製材棟内において約３ヵ月間養生を行い、上述の測定を行った後、12cm正角（約124mm）に挽き直しを行った。挽き直しの際の使用帯鋸には、仕上げ精度のよい帯鋸を使用した。

#### 1．2．含水率及び含水率分布測定方法

含水率測定は、前述と同様の方法で行ったが、含水率計による測定においては、比重等による補正値は、1.5とした。

#### 1．3．断面寸法、材長、重量及び背割り巾の測定方法

断面寸法の測定は、除湿乾燥前後、１ヵ月後、挽き直し前後及びそれより３ヵ月後に実施した。測定位置は、試験材の両木口より材長方向に約30cm入った部分及び中央部の３ヵ所とした。重量及び背割り巾の測定は材長方向の中央部で行い、断面寸法の測定時に実施した。

### 2．結果と考察

#### 2．1．除湿乾燥機

使用した乾燥機は、T社製除湿乾燥機であり、湿度制御は、除湿機の湿度上限を設定し、乾燥室内湿度が設定値より高くなった場合に除湿を行う方法である。また、過稼働を防ぐため、タイマーにより、連続稼働時間を設定する方法となっている。即ち、乾燥室内の湿度が上限設定値より高くなった場合に除湿機が作動し、設定した連続稼働時間が過ぎるまで、蒸発水分の除去を行うものである。

#### 2．2．乾燥条件

除湿乾燥における乾燥条件を図－15に示す。

乾燥開始時の外気温は22℃であったので、約半日間、ヒーターにより35℃まで徐々に昇温を行い、その後、ヒーターによる加熱は行わず、除湿機を作動させた。

乾燥開始より１日目には、温度33℃～35℃、湿度77～80％とした。乾燥開始より５日目には温度36℃～38℃、湿度36％～59％となった。最終日には、除湿機及びヒーターの電源を切り、材温が外気温とほぼ同じになってから出炉した。

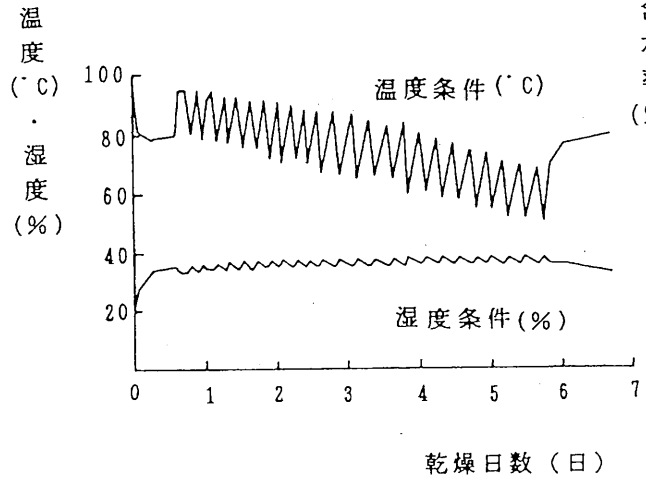
#### 2．3．乾燥経過

絶乾法及び高周波含水率計による全試験材の含水率減少経過を図－16に示す。

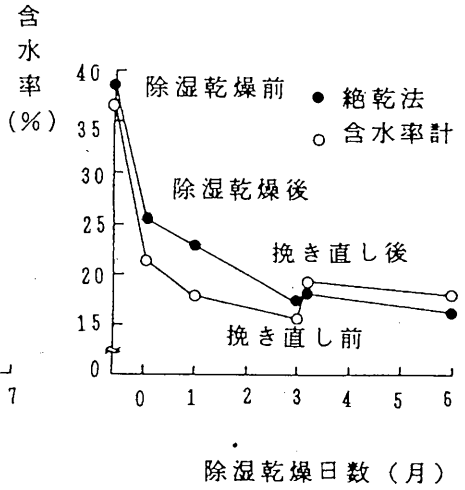
絶乾法による含水率については、１週間の除湿乾燥実施により、38.0％から25.7％まで減少した。高周波含水率計による乾燥前後の測定値は、それぞれ36.5％、21.4％であり、除湿乾燥後の含水率が絶乾法による含水率と比較して各々1.5％、4.3％低い値を示した。除湿乾燥終了時より１ヵ月後における測定値も含水率計による測定値が絶乾法による含水率と比較して５.0％低い値を示した。

３ヶ月後の挽き直し前後における含水率については、絶乾法による含水率は、挽き直し前17.6％、挽き直し後18.1％と0.5％高い値を示した。含水率計による挽き直し前後の測定値はそれぞれ約16.0、19.3％と挽き直し後が3.3％高い値を示した。この原因としては、含水率計は、表層より約２cmの深さの含水率を測定していると考えられるが、乾燥が早く、含水率が若干低い表層部を挽き直しにより切り取るため、より中心部の含水率を測定し、高い値を示したと考えられる。

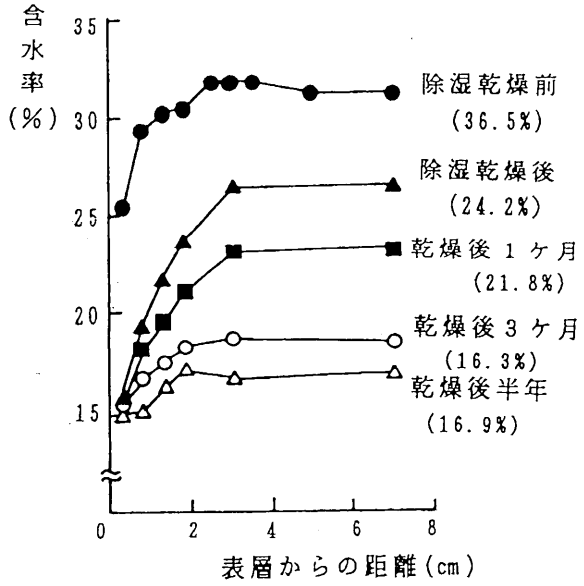
挽き直しより半年後には、絶乾法による含水率が約16.3％、含水率計による測定値は、約18.0％と



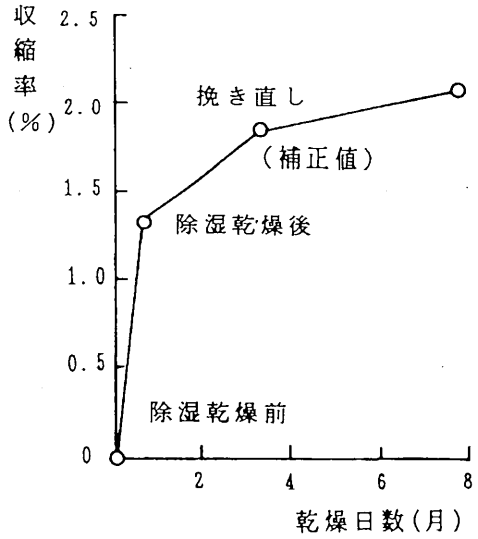

図－15　乾燥条件（除湿乾燥）




図－16　ヒノキ材の除湿乾燥後における乾燥経過




図－17　含水率分布変化




図－18　収縮率変化

なった。

２．４．含水率分布変化

含水率分布試験材の含水率分布変化を図－17に示す。

除湿乾燥を行う直前の含水率分布試験材全体の含水率は、31.2%であったが、表層部の含水率は、25.3%、表層部より約２cmにおける含水率は、30.3%であり、中心部の含水率は31.1%であった。この時の高周波含水率計による測定値は、30.1%と若干低い値を示した。

除湿乾燥終了時において試験材の含水率は、22.7%であったが、表層部の含水率は、約15.6%まで減少し、３cmにおける含水率は、26.3%、中心部は、約26.4%と若干高い値を示した。高周波含水率計による測定値は、21.4%であり、絶乾法による含水率測定値より低い値を示した。

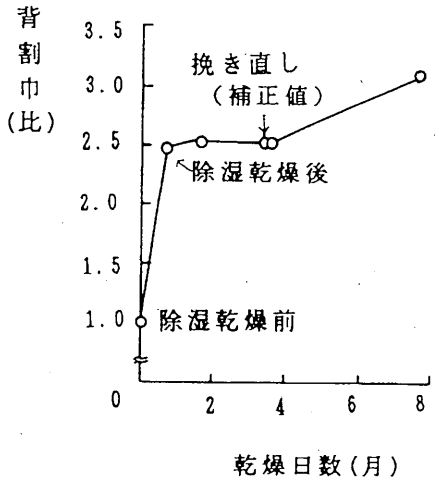
除湿乾燥終了時より１ヵ月後には、試験材全体の含水率は、20.5%であったが、表層部の含水率は、15.5%と変化がなく、中心部の含水率は、23.3%まで減少した。

３ヵ月後においては、表層部の含水率は、15.4%であり、表層より２cm中心よりの部分の含水率は、約18.4%であり、中心部の含水率は18.6%と高い値を示した。

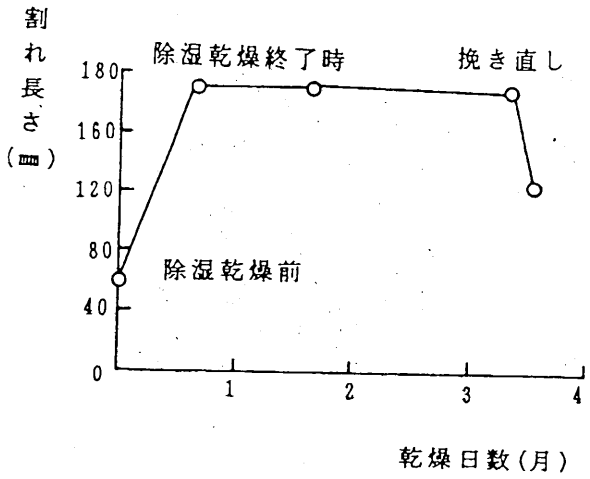
半年後においては、表層部15.0%、表層より深さ２cmから中心よりの部分の含水率は約17%を示した。

２．５．収縮率変化

巾方向の収縮率変化を図－18に示す。除湿乾燥前の測定寸法を基準とすると、除湿乾燥後の収縮率は、1.32%であり、挽き直し時における収縮率は1.83%、その３ヵ月後における収縮率は2.08%となった。




図－19　背割り巾（比）の変化




図－20　木口割れ発生量の変化

2．6．背割り巾の変化

背割り巾の比(除湿乾燥開始時の背割り巾に対する比)の変化を図－19に示す。

除湿乾燥終了時における背割り巾の比は、2.48倍と大きく、その後挽き直しまでの期間の背割り巾の開きの増加は少ない。挽き直しより３ヵ月後には、3.1倍となり、その増加率は挽き直し以前の増加率より大きな値を示した。

2．7．木口割れの変化

１本当たりの木口割れの総延長の変化を図－20に示す。

除湿乾燥前の木口割れ長さは57mmであったが、除湿乾燥後には、189mmに増加した。しかし、その後の養生期間においては、変化は少なく、挽き直しにより割れは188mmから124mmまで減少した。

なお、材面割れの発生はなかった。

## ま と め

1）高周波含水率計により、ヒノキ生材等、高含水率材の含水率を測定する場合、測定する位置の違いによる含水率計の読みの差は大きく、最大で約70%の差があった。また、除湿乾燥材においても測定位置をかえると2.2%の差が現れた。

2）４材面とも修正挽きを行い仕上がり寸法を123～125mmにするためには、乾燥による収縮及び背割りの開き等を考慮し、原木を製材する時の最小値が130mmとなるように製材する必要がある。

3）桟積み上部より４kg/cm$^2$ の荷重をかけて乾燥を行った結果、無荷重で乾燥を行った場合に比べて、曲り率の平均値が0.14%から0.11%に減少、最大値が0.40%から0.13%に減少し、曲りを小さくできた。

4）ヒノキ柱材を初期温度35℃、相対湿度85%、最終温度40℃、相対湿度60%とし、９日間除湿乾燥を行った結果、12cm正角材は初期含水率36.5%から24.2%まで減少した。高周波含水率計による含水率測定値は、乾燥後の値が21.4%と低い値を示した。

5）10.5cm正角材は、９日間の除湿乾燥で含水率39%から22%に乾燥したのと比較し、12cm正角材の乾燥は遅く、９日間乾燥後に含水率36%から24.5%となった。

6）挽き直しを行った結果、高周波含水率計による挽き直し後の測定値は、挽き直し前と比較し、約３%高い値を示した。含水率計による測定値は、水分傾斜が大きい場合、表層部を測定するため、絶乾法と異なった値を示す場合があると考えられる。

7）ヒノキ柱材について除湿乾燥スケジュールを設定し、乾燥試験を行った結果、９日間で含水率20%以下(含水率計による測定値)まで狂い、割れ等の損傷少なく乾燥できた。乾燥に伴う電力経費は電気料金を18円/KWHとして、1,182円/m$^3$ となった。

8）除湿乾燥による12cm正角材における９日間の乾燥では、表層部は含水率約16%まで減少するが、中心部の含水率の減少は少なく、約25%と高い。

9）ヒノキ柱材の巾方向の収縮率を測定した結果、初期温度35℃、最終温度40℃除湿乾燥を行った結果、12cm正角材の収縮率は、1.32%であった。乾燥終了時から挽き直しまでの３ヶ月の間の収縮率は、0.51%、挽き直し後４ヶ月の収縮率は0.25%であった。乾燥前から挽き直し後４ヶ月における収縮率は、約2%であった。

10）除湿乾燥後の背割り巾の測定を行った結果、除湿乾燥終了時より約３ヵ月の養生期間においては、背割り巾はほとんど変化しなかった。しかし、挽き直しを行った後においては、約４ヶ月後に約0.5%増加した。

11）木口割れの測定を行った結果、除湿乾燥により、割れが発生した材においても、養生期間においては割れの増加はなかった。また、挽き直しにより割れ長さは約2/3に減少した。

## 謝　　辞

試験実施にあたりご協力いただいた中部電力、日進木工、大冷工業に、また、種々のご助言をいただいた名古屋大学名誉教授寺澤真氏、日本電化工機株式会社小玉牧夫氏、林業センター場長野原正人氏に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

( 1) 熊谷洋二：ヒノキ柱材のひき直しに関する研究、岐阜林セ研報第４号、49～59、1976
( 2) 寺澤　真、筒本卓造：木材の人工乾燥、日本木材加工技術協会、131～134, 141～143、1976
( 3) 西尾　茂：木材乾燥の実際、(株)日刊木材新聞社、95～101、1983
( 4) 熊谷洋二：木材乾燥施設の実態、ぎふ県木連情報22、14、1985
( 5) 野原正人：除湿式木材乾燥について、ぎふ県木連情報14、9～11
( 6) 寺澤　真：新しい木材乾燥装置の選び方、木工機械111、10～15
( 7) 寺澤　真：除湿式木材乾燥室について、木材工業38、118～125、1983
( 8) 寺澤　真：木材乾燥講習会テキスト、日本木材加工技術協会中部支部、1982
( 9) 寺澤　真：木材乾燥の概説ーその特殊性・歴史・現況ー、ＷＯＯＤＭＩＣ、35～39、1989
(10) 富田守泰：低温除湿乾燥によるヒノキ柱材の含水率調査について、岐阜県の林業（S61.10）、11～12、1986