

## 低圧多湿蒸気によるスギ材の人工乾燥

鈴木直之<sup>\*1</sup> 徳田迪夫<sup>\*1</sup> 村井利恵<sup>\*1,\*2</sup>

Kiln-Drying of Sugi with Steam of Low-pressure and High-humidity

Naoyuki SUZUKI<sup>\*1</sup>, Michio TOKUDA<sup>\*1</sup> and Rie MURAI<sup>\*1,\*2</sup>

Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu Mie, 514-8507

### 要 旨

低圧多湿蒸気を用いてスギ材の人工乾燥を行い、低圧多湿蒸気処理の有無および棧積み配置が仕上がり含水率および幅反りにおよぼす影響を調べた。その結果、低圧多湿蒸気による乾燥は幅反りをある程度抑制すること、蒸気が直接あたる位置に棧積みした試験体の幅反りの抑制効果が間接にあたる場所のそれより大きいこと、初期含水率の高低により低圧多湿蒸気の噴霧時期を調節することで幅反りを抑制できることがわかった。

**キーワード：**蒸気噴射, 人工乾燥, スギ材, 幅反り

---

\*1 三重大学生物資源学部 Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu Mie, 514-8507  
\*2 現在：OM ソーラー協会 OM SOLAR ASSOCIATION, Hamamatsu, Shizuoka, 435-0031

## ABSTRACT

Kiln drying of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) were done with steam of low-pressure and high-humidity. The influence which the existence of the treatment of the steam of low-pressure and high-humidity exerted on the finishing moisture content and on the degree of the cup, the influence which a position of piling exerted on those were examined.

Result obtained were as follows:

- 1) The cup was controlled to a certain extent by the use of the steam of low-pressure and high-humidity for the drying of sugi.
- 2) The repression effect to the cup of the specimen put on the position where steam hit it directly was bigger than that hit it indirectly.
- 3) It was found out that the cup could be controlled by adjusting the spraying time of steam of low-pressure and high-humidity corresponding to the height of initial moisture content of lumber.

**Key words :** *Steaming, Kiln drying, Sugi, Cup*

## 1. 緒 言

人工乾燥材の使用が施工後のトラブルの抑制に効果はあるが、その部材の乾燥材としての含水率レベルの認識が十分ではないために、トラブルの発生を完全には防止できていないという報告がなされている(1)。人工乾燥には熱気乾燥、高温乾燥、除湿乾燥、高周波乾燥など多くの方法がある。それぞれの方法には一長一短があり、また乾燥する材にも樹種特性があるため、最善の乾燥方法として特定できないのが現状である。例えば、ヒノキのような生材含水率が比較的低い樹種の乾燥には、割れや変色の少ない低温で長時間行う除湿乾燥が適しており、スギのような水分透過性の悪い乾燥の困難な樹種では、現在もいろいろ検討され、乾燥時間の短縮や乾燥コストを低減させるために、高温乾燥法(2)や高周波乾燥と減圧乾燥あるいは熱気乾燥との複合乾燥法の研究が多数なされている(3, 4, 5, 6)が、まだ確立されてはいない。

そこで、図1に示すように従来の通常蒸気に比べ短時間で設定温度に到着し、乾湿球温度差を安定した状態で保つことができる低圧多湿蒸気に注目し、スギ材の人工乾燥への応用を試みた。低圧多湿蒸気はボイラーで発生した高温高圧蒸気を湿式蒸気減圧装置(スチームチェンジャー)により変換させて得られ、低温であり、湿度も2倍ほど高いため(表1)材の表面の過乾燥を避けることができ、乾燥による反りを抑制できるものと思われる。本研究では、低圧多湿蒸気の人工乾燥適用への有効性と棧積位置が低圧多湿蒸気乾燥仕上がりにおよぼす影響の2点について検討した。

表1 通常蒸気と低圧多湿蒸気の比較

	通常蒸気	低圧多湿蒸気
温度 (°C)	158	100
比容積 (m <sup>3</sup> /kg)	0.320	1.67
潜熱量 (kcal/kg)	498	539
湿度 (%)	47.0	99.0

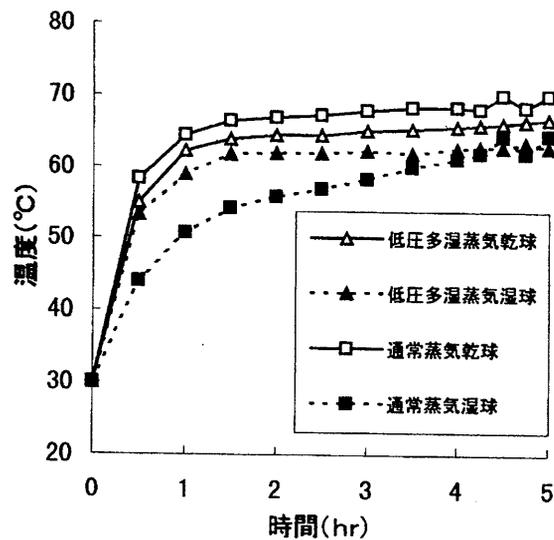


図1 人工乾燥室内における低圧多湿蒸気と通常蒸気の温度変化の比較

## 2. 実 験

乾燥試験には株式会社マルナカ所有の間口2.6m, 高さ3m, 奥行き6.5m, 処理能力30m<sup>3</sup>の内部送風 (IF) 型蒸気式加熱タイプ人工乾燥室2基を使用した。また, 低圧多湿蒸気の発生には湿式蒸気減圧装置スチームチェンジャー (丸高工業株式会社製 SC-500) を用いた。

### 2. 1 試験体

#### 1) 低圧多湿蒸気の人工乾燥適用への有効性 (試験1)

幅130mm, 厚さ15mm, 長さ2000mmの三重県産スギ平割材50枚をそれぞれ長さ950mmに2分割し, 1グループを通常蒸気に低圧多湿蒸気を併用した乾燥試験に, もう一方のグループを比較対照として低圧多湿蒸気を用いない通常の蒸気乾燥試験に供試した。

#### 2) 棧積位置が低圧多湿蒸気仕上がりにおよぼす影響 (試験2)

幅130mm, 長さ2000mm, 厚さが8mm, 15mm, 30mmの3種類の三重県産スギ平割材各20枚をそれぞれ長さ950mmに2分割し, 一方を低圧多湿蒸気吹き出し孔 (ノズル) 近辺に, もう一方をノズルから遠方の計2カ所に棧積み配置した。

表2に供試材の生材密度と初期含水率を示した。

表2 供試材の生材密度、初期含水率、仕上がり含水率、寸法変化率、幅反り率

	板厚 (mm)	生材密度 (g/cm <sup>3</sup> )	初期含水率 (%)		仕上がり含 水率(%)	幅収縮率 (%)	厚さ収縮率 (%)	幅反り率 (%)
試験1	15	0.65±0.15	82.7±47.7	有	12.8±0.94	3.65±1.11	2.68±1.61	1.46±0.54
				無	14.6±0.98	3.17±1.26	2.77±1.00	1.46±0.60
試験2	8	0.72±0.22	116±70.2	近 遠	11.8±0.4	2.98±0.49	1.52±1.09	0.71±0.55
	15	0.68±0.19	102±56.1	近	10.6±0.7	3.39±0.51	1.83±1.29	0.94±0.75
				遠	12.8±0.3	3.33±1.95	1.48±1.09	0.55±0.42
	30	0.75±0.20	111±45.2	近	11.6±0.4	3.14±0.63	1.59±1.69	0.68±0.59
				遠	28.8±18.8	2.03±1.44	1.96±0.99	0.18±0.30
					遠	19.7±11.3	2.25±1.51	2.30±1.01

試験1 上段：低圧多湿蒸気処理有 下段：低圧多湿蒸気処理無 平均±標準偏差

試験2 上段：ノズル近く配置 下段：ノズル遠く配置

## 2.2 試験方法

試験1：乾燥試験実施前に試験体の質量および長さ、幅、厚さの各寸法の測定と反りおよび割れ等の欠点の調査を行った。図2に示す乾燥スケジュール（上図：通常蒸気乾燥に低圧多湿蒸気を併用した乾燥、下図：通常蒸気のみによる乾燥）に従って乾燥試験を行った。図中ON、OFFはそれぞれスチームチェンジャーを作動、停止したことを示している。乾燥試験終了後、高周波含水率計（MOCO-2）による含水率測定と質量および各寸法および反り等の測定を行った。さらに試験体の長さの中央部から全乾法含水率測定用試験体を採取し含水率を測定した。

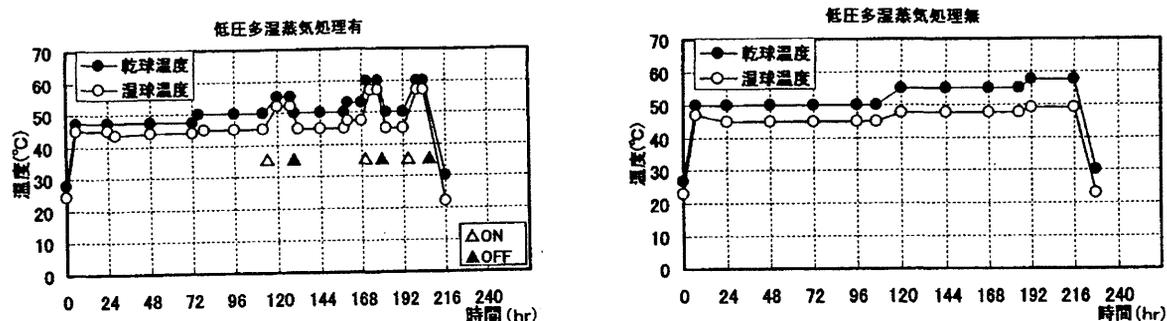


図2 試験1の乾燥スケジュール

約1ヶ月間温度および湿度が制御されていない木工工作室中に放置した後、質量および幅反りを測定した。

試験2：各板厚について試験体から採取した含水率測定用試験体20体全部をそれぞれ図3に示すように幅方向に5分割した。20体の中から5体を無作為抽出し、残り15体については幅方向含水率分布を全乾法により調べた。抽出した5体については5分割したブロックのうち両端と中央の3ブロックを厚さ方向に約3mm厚にスライスし、全乾法による含水率測定を行い、厚さ方向含水率分布を調べた。

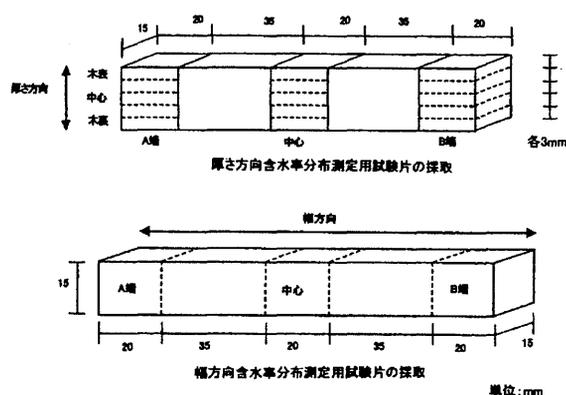


図3 含水率分布測定用試験体の作製方法

また、板の採取位置と乾燥の仕上がり状態との関連も調査の対象とし、図4に示すように、年輪の曲率より材の採取位置を髄からの距離として推定した。その他、赤身、黒心の区別も目視により調査記録した。

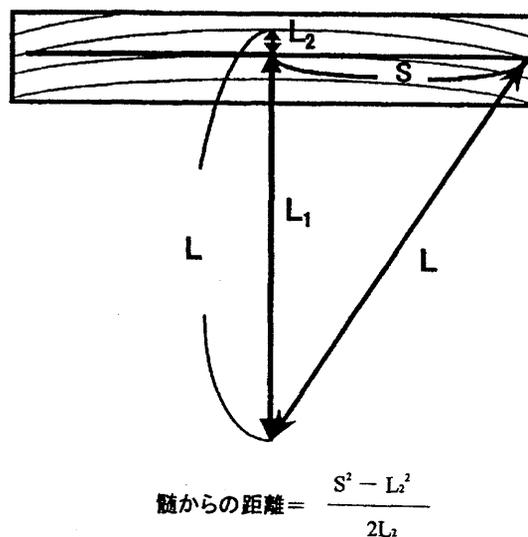


図4 髄から材の採取位置までの距離の算出方法

試験準備終了後、一方を低圧多湿蒸気噴出ノズル近辺に、もう一方をノズルから遠方に棧積み（図5）し、図6に示す乾燥スケジュールに従って乾燥試験を行った。なお、乾湿球温度差は5℃と試験1と同じであったが、乾球温度は5℃高く設定した。また、スチームチェンジャーの第1回目の作動時期を60hr.後と早くした。

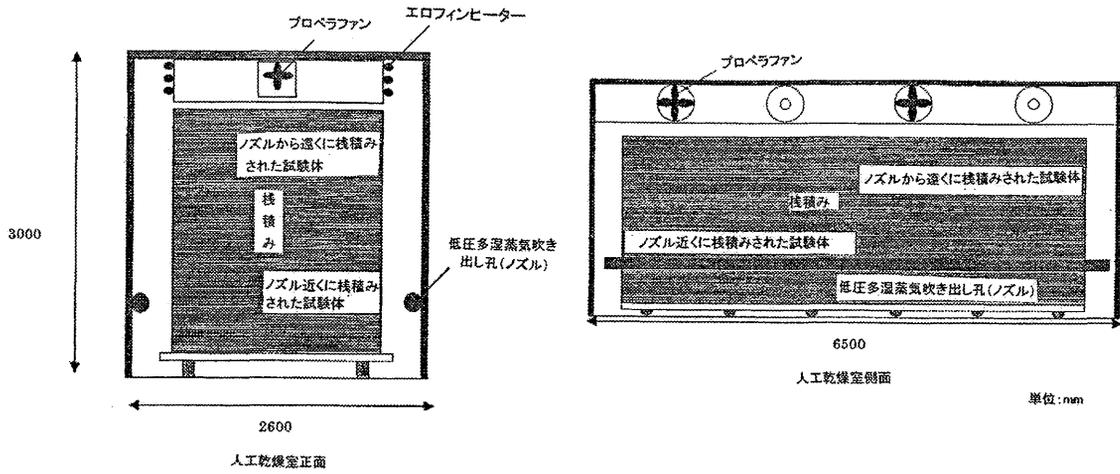


図5 試験2における乾燥試験体の積み配置

乾燥試験終了後、含水率、質量、各寸法および反り等を測定した。さらに、温度22℃、湿度24%に制御された室内に15日間放置し、質量と幅反りを測定した。

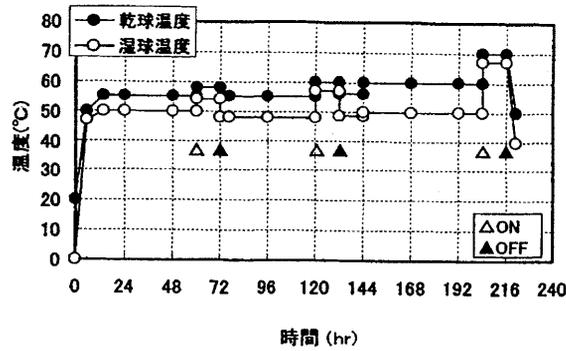


図6 試験2の乾燥スケジュール

### 3. 結果および考察

#### 3. 1 試験1

##### 3. 1. 1 低圧多湿蒸気処理の有無と仕上がり含水率

表2に供試材の乾燥試験後の仕上がり含水率，乾燥による寸法変化（幅および厚さ）および最大反り量（矢高）の試験体幅に対する百分率として定義した幅反り率を示す。

図7に乾燥直後および大気に1ヶ月間暴露後の試験体の含水率度数分布を示す。乾燥直後，低圧多湿蒸気処理試験体での含水率の最頻値は含水率12~14%の範囲であるのに対し，通常蒸気乾燥の試験体におけるそれは，14~16%の含水率範囲であることから，低圧多湿蒸気処理により乾燥が促進されるものと考えられた。

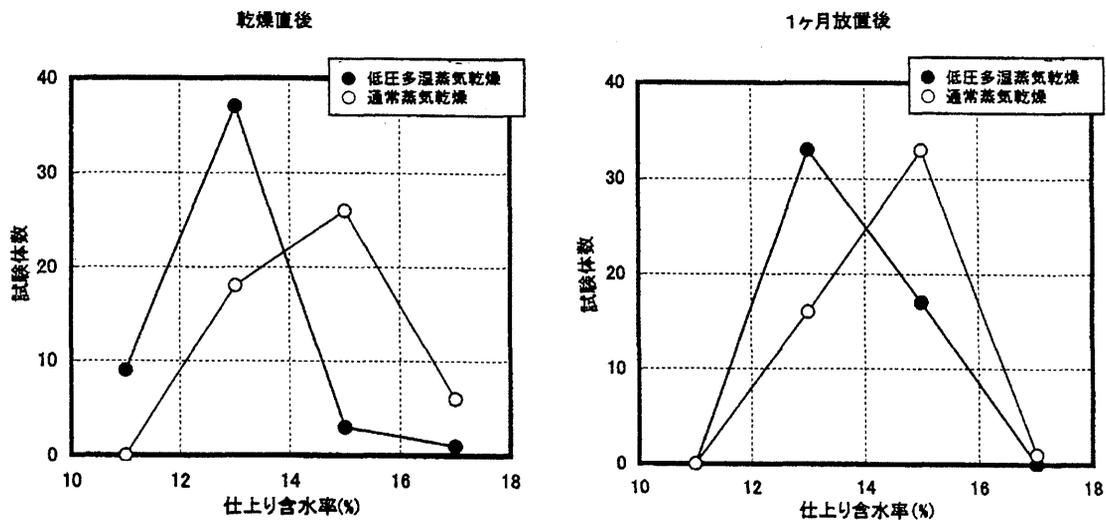


図7 乾燥直後と1ヶ月放置後の含水率度数分布

大気に1ヶ月暴露した後では，低圧多湿蒸気処理試験体の含水率の最頻値は12~14%の範囲で同じであり，乾燥直後10~12%の範囲にあった試験体がなくなり，全体的に吸湿しているのに対し，通常の蒸気乾燥された試験体では16~18%の高含水率のものが低含水率側へシフトしており脱湿の過程にあった。日本では，標準気乾含水率は15%とされており，概ね仕上がり含水率が15%になっていれば乾燥材を製品に加工した後の狂いを最小限に抑えることができると思われた。図8に示すように低圧多湿蒸気処理試験体の9割以上が仕上がり含水率15%以下になっており，低圧多湿蒸気の有効性が確認できた。図9に初期含水率と仕上がり含水率との関係を示す。低圧多湿蒸気処理の有無に関わらず両者にはほとんど相関はみられなかった。したがって，初期含水率の高い材でも15%近くまで含水率分布のばらつきの小さな状態で乾燥できることがわかった。

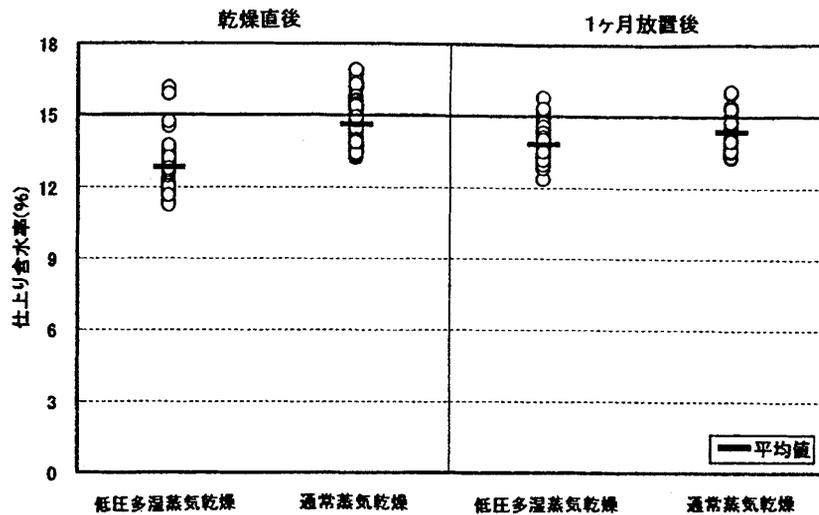


図8 低圧多湿蒸気処理の有無と仕上がり含有率との関係

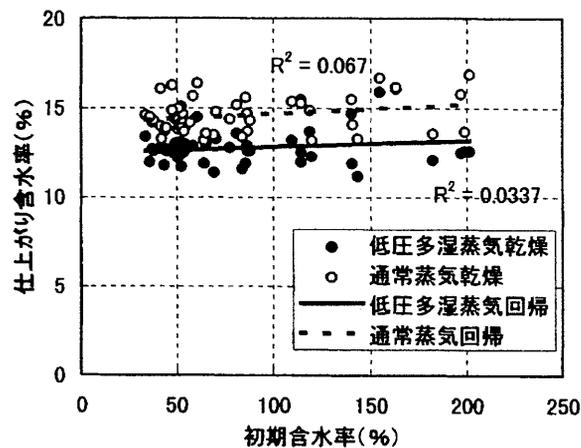


図9 初期含水率と仕上がり含水率との関係

### 3. 1. 2 低圧多湿蒸気処理の有無と幅反り率

図10に乾燥直後および大気に暴露後の幅反り率の分布を示す。最頻値は低圧多湿蒸気処理試験体では1.0~1.5%で全体の44%を占めているのに対し、通常蒸気乾燥試験体では1.5~2.0%であるが、低圧多湿蒸気処理の有無による幅反り率分布に明瞭な差はみられなかった。大気に暴露後の両者の幅反り率分布はほぼ同じになった。

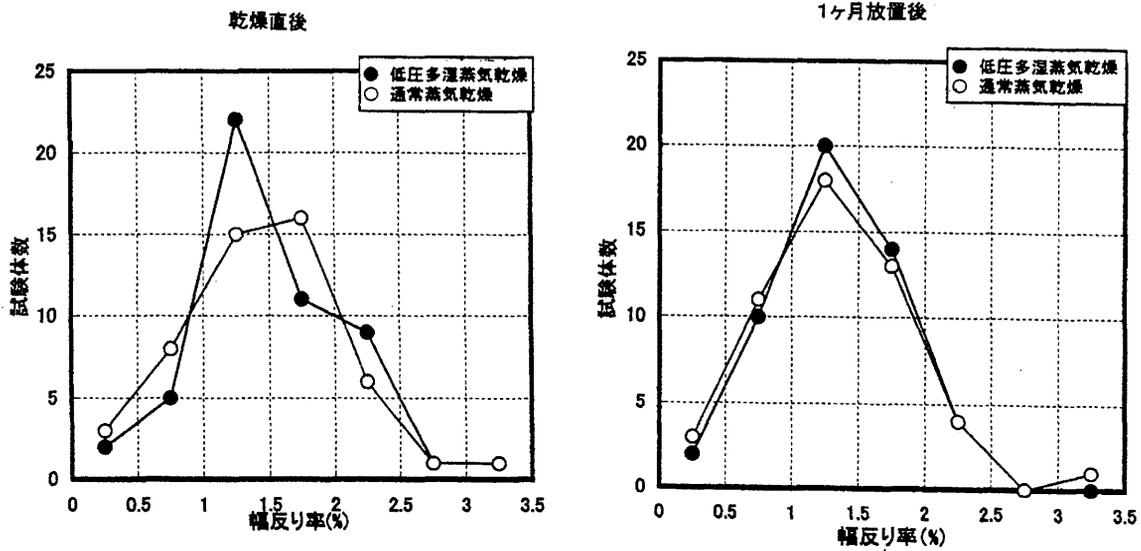


図10 乾燥直後と1ヶ月放置後の幅反り率度数分布

### 3. 2 試験2

#### 3. 2. 1 棧積みの位置と仕上がり含水率

図11および図12にそれぞれ乾燥直後および室内放置後の含水率分布を示す。8mm厚、15mm厚両試験体ともノズルより遠くに棧積みした試験体の含水率は、ノズルに近いそれより低く過乾燥の傾向にあった。室内放置後は、ノズル近くに配置した試験体の含水率が低下するのに対し、遠くに配置した試験体は吸湿し、平衡含水率へと収束していく様子がみられた。一方、30mm厚試験体では、含水率は広範囲に分布しており、この乾燥スケジュールでは、十分な乾燥が行われていなかった。

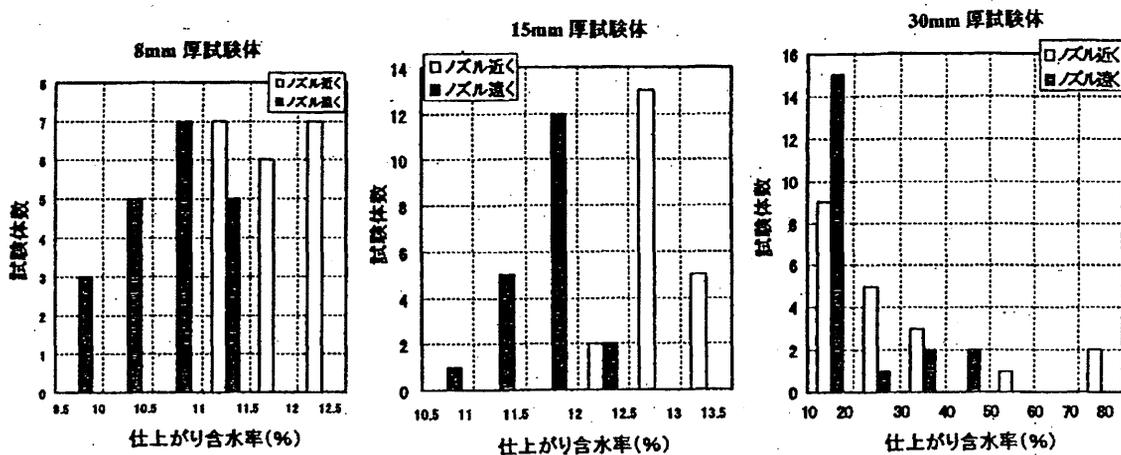


図11 乾燥直後における試験体厚さごとの仕上がり含水率度数分布

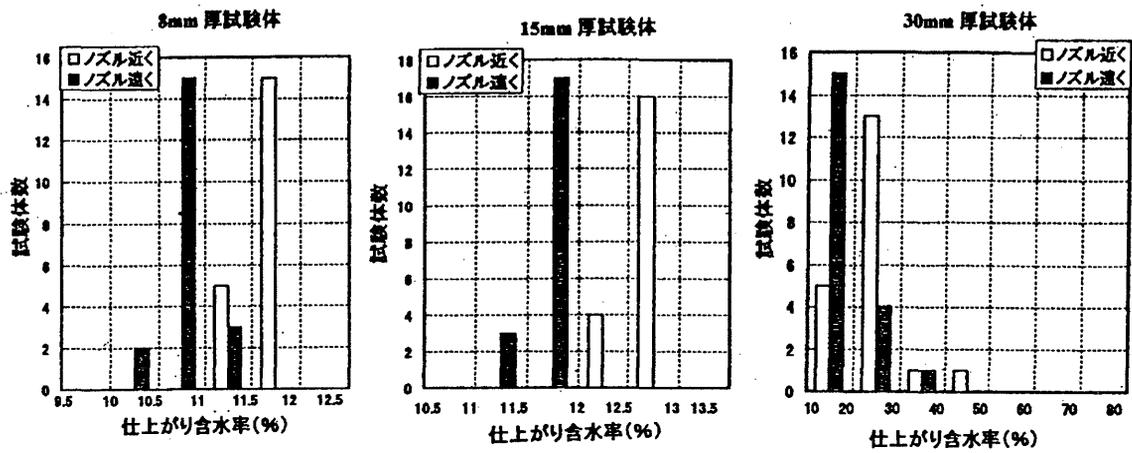


図12 温度・湿度制御室内放置後の仕上がり含水率度数分布

### 3. 2. 2 心材の状態と含水率

図13に心材の状態と初期含水率との関係を示した。すべての板厚に共通して150%を超える高含水率の材のほとんどは黒心であった。各板厚20体中、8mm厚試験体で11体、15mm厚試験体で6体、30mm厚試験体で13体の黒心があった。

図14に乾燥直後の仕上がり含水率の平均と最小値から最大値までの範囲を示す。8mm厚、15mm厚試験体では、初期含水率の高かった黒心も赤身と同程度の仕上がりに落ち着いていた。30mm厚試験体では赤身より黒心で仕上がり含水率が高かった。

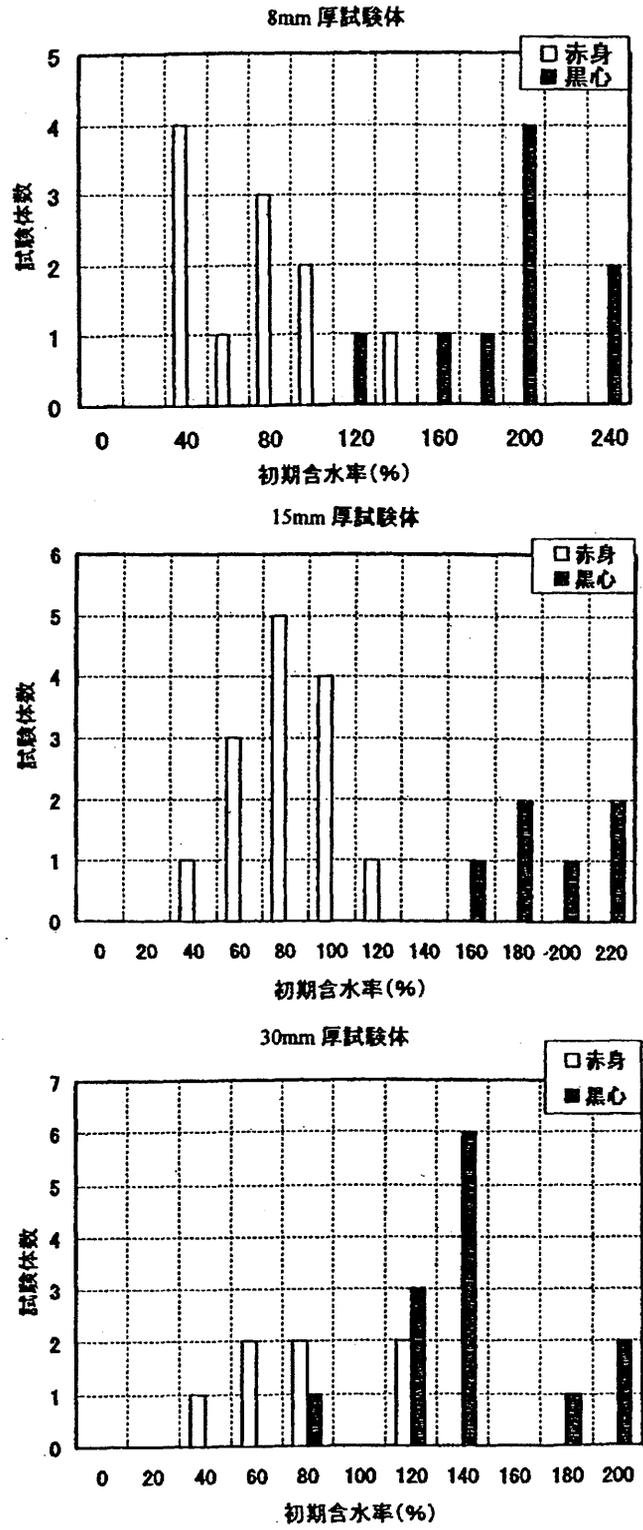


図13 心材の状態と初期含水率との関係

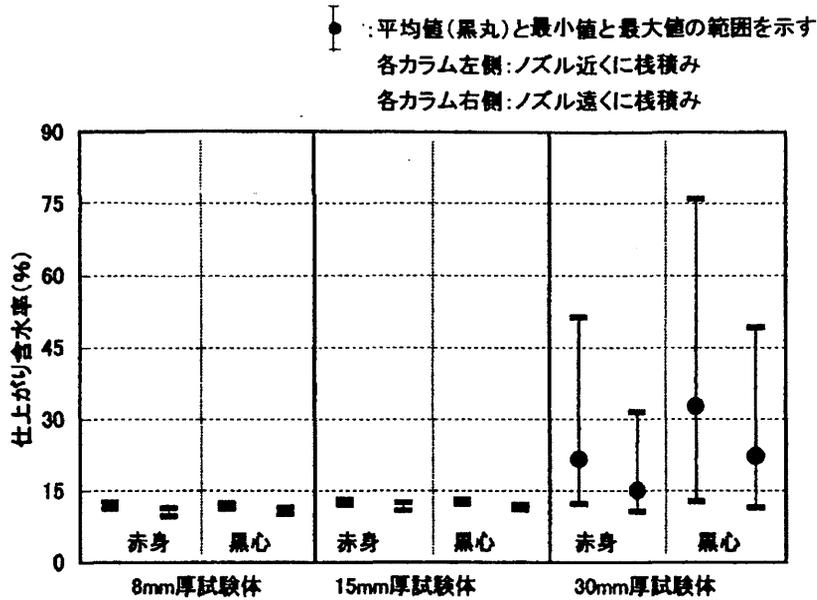


図14 試験体の心材の状態および板厚と仕上がり含水率との関係

### 3. 2. 3 材内含水率分布

図15に幅方向材内含水率分布（各板厚とも15体）を示す。8mm厚および15mm厚試験体においては、ノズルから遠くに棧積みした試験体の方が近いものより含水率が低かった。どちらの試験体グループも含水率傾斜の大きな材から小さな材まで種々あり、一定の傾向はみられなかった。一方、30mm厚試験体では、中央部の含水率がかなり高いのに対し木端表面の含水率がかなり低下しているため、幅方向の含水率傾斜が大きくなっていた。図16に厚さ方向の含水率分布を示す。8mm厚、15mm厚試験体のどちらも、ノズルより遠くに棧積みした試験体で含水率は低く乾燥が進んでいることが確認できたが、材内での含水率のばらつきが大きく棧積み位置による差異は明瞭ではなかった。

一方、30mm厚試験体では、棧積み位置の違いによる差異はみられなかった。

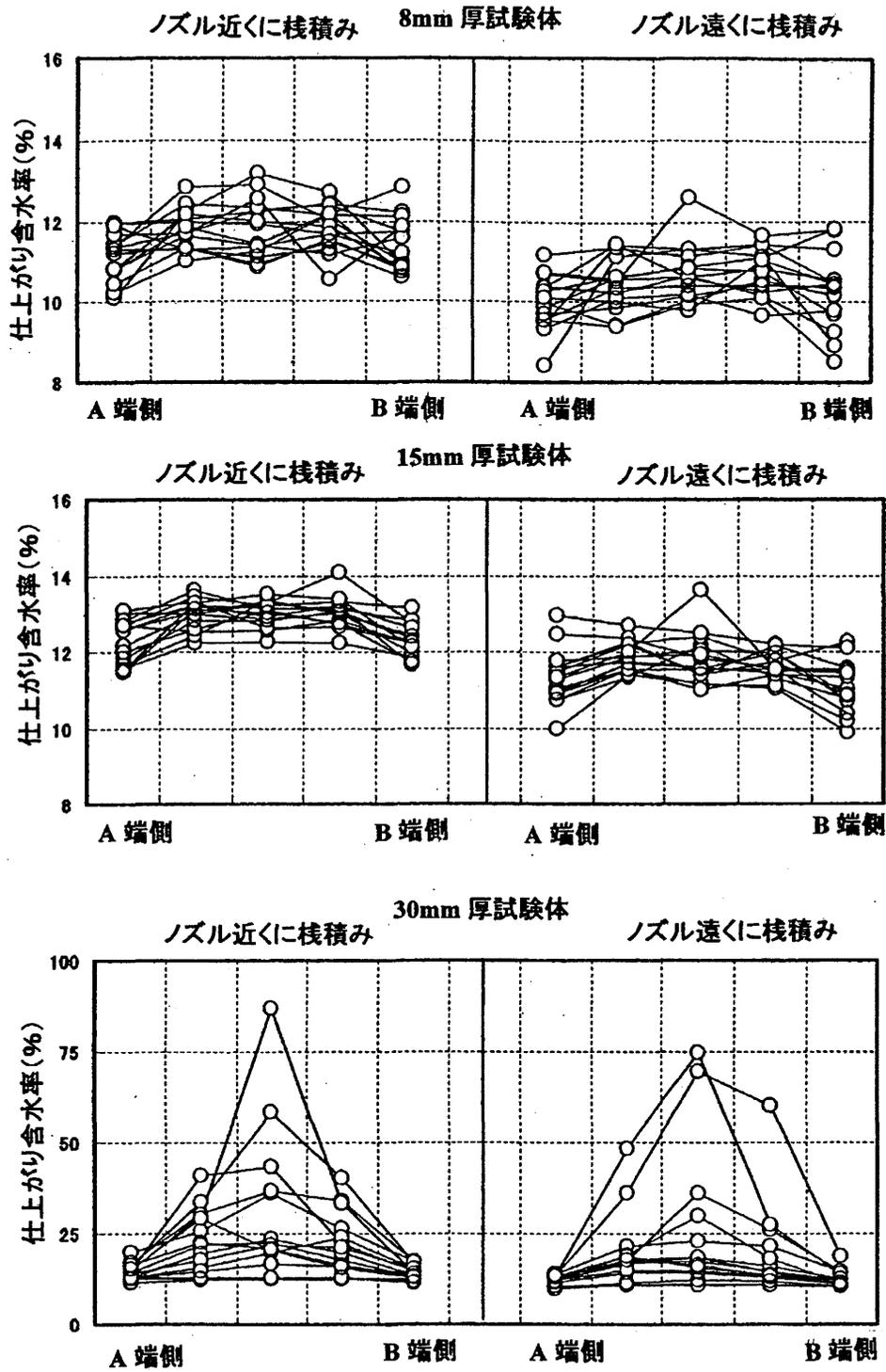


図15 乾燥直後の試験体の幅方向含水率分布

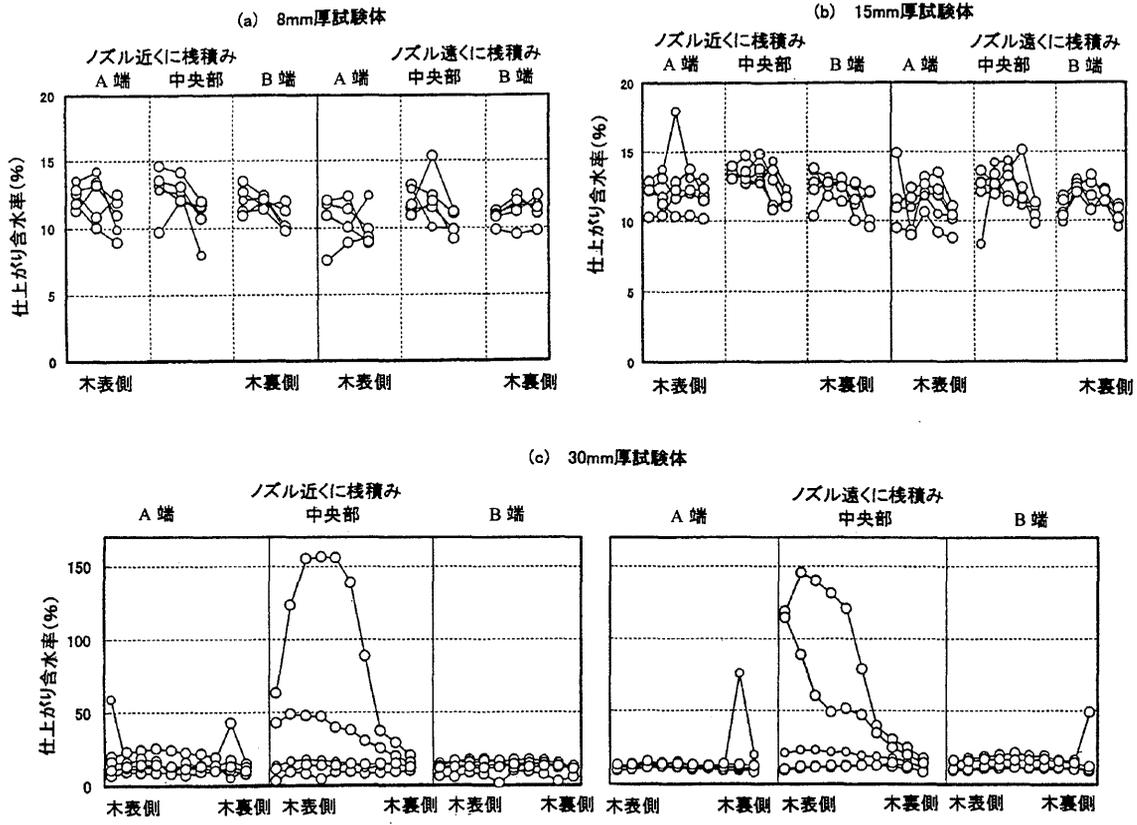


図16 乾燥直後の試験体の厚さ方向含水率分布

### 3. 2. 4 試験体厚さと幅反り率

図17に各厚試験体の乾燥直後の幅反り率の度数分布を示す。8mm厚試験体, 15mm厚試験体いずれもノズル近くに積積みした試験体の方が幅反りが小さい傾向にあった。また, 30mm厚試験体では, まだ十分に乾燥が進行しておらず, 繊維飽和点以上の含水率のものが多数あり幅反りは小さかった。

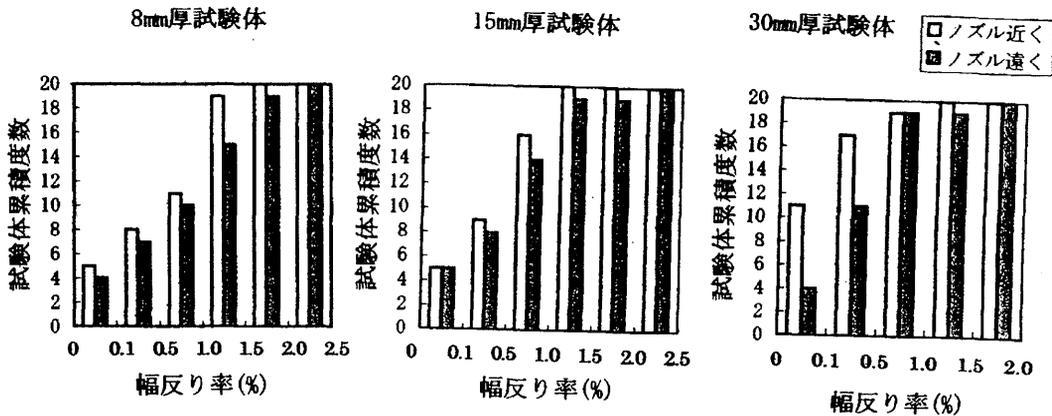


図17 乾燥直後の幅反り率累積度数分布

図18に板厚ごとの幅反り率の平均値および標準偏差を示す。t検定では棧積み配置による幅反り率の差はみられなかったが、どの厚さの試験体においても全体的にノズル近くの試験体の方の幅反り率は小さい傾向にあり、低圧多湿蒸気処理の幅反り抑制効果がみられたものと考えられる。

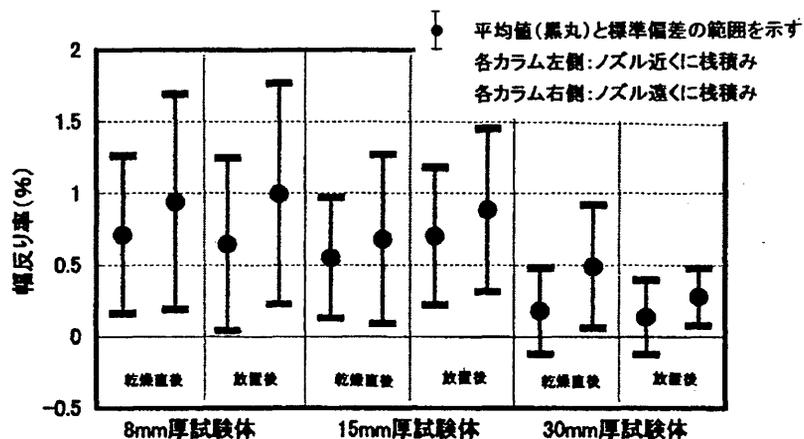


図18 試験体の板厚と幅反り率との関係

図19に、赤身、黒心に分類した各試験体における幅反り率の平均率と標準偏差を示す。8mm厚および15mm厚試験体において黒心をもつもので大きな反りが発生したが、ノズル近くに棧積みすることにより幅反りの割合の低下がみられ、低圧多湿蒸気処理の幅反り抑制効果があるものと思われる。30mm厚試験体では上述の原因で反りが小さいため赤身と黒心の相違はみられないが、低圧多湿蒸気処理の幅反り抑制効果はみられた。

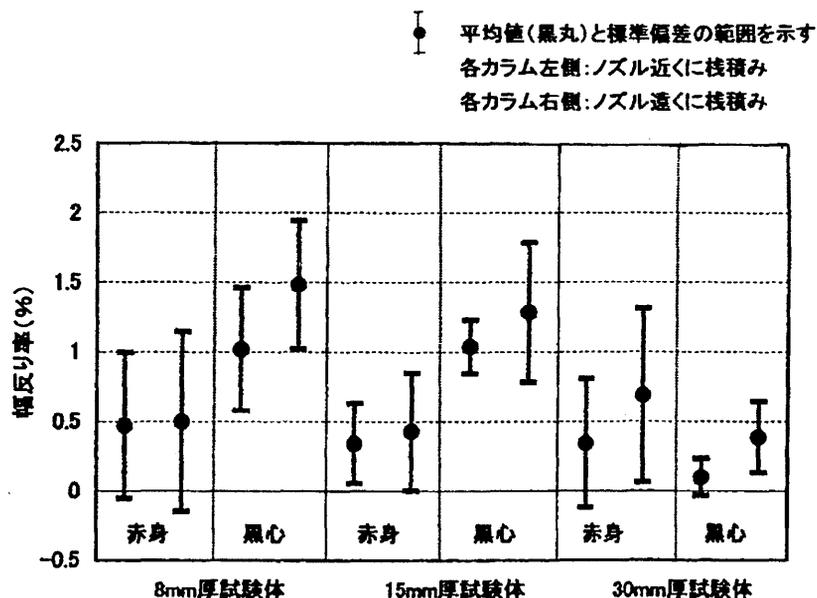


図19 心材の状態と幅反り率との関係

### 3. 2. 5 材の採取位置と幅反り率

図20に髄からの距離と幅反り率との関係を示す。髄からの距離が大きいほど幅反り率は小さかった。これは、年輪の曲率と収縮率との関係から説明できる。つまり、髄からの距離が大きいほど年輪の曲率の木表側と木裏側での差が小さくなり、収縮率の差が少なくなるため幅反りが小さくなったものと考えられる。また、髄に近い試験体ほどノズルから遠い所に栈積みした試験体では幅反りが大きくなる傾向にあった。

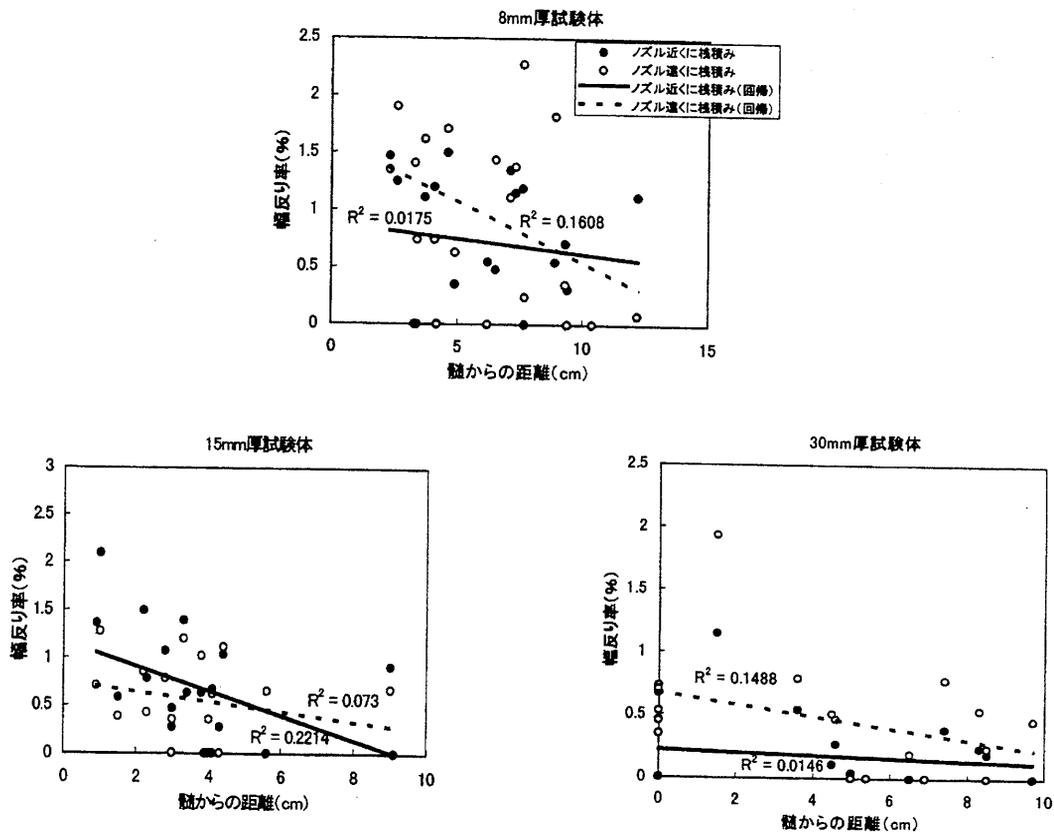


図20 髄からの距離と幅反り率との関係

### 3. 2. 6 スチームチェンジャーの作動時期と幅反り率

図21に初期含水率と幅反り率との関係を試験の種類別に示した。初期含水率の高い場合には試験1，試験2ともほとんど差はなかったが，初期含水率が低下するにしたがって，試験1では幅反り率が大きくなるのに対して，試験2では逆に小さくなっていった。この原因は，初期含水率が低いほど乾燥のために材の表層の含水率が繊維飽和点に達するのが早く，試験1ではスチームチェンジャーの作動時期が遅いため収縮が始まり幅反りが発生するのに対し，試験2では，試験1より早期にスチームチェンジャーを作動させたため材表面に水分が与えられ，収縮がほとんど起こらず幅反りの発生を抑制できたものと考えられた。

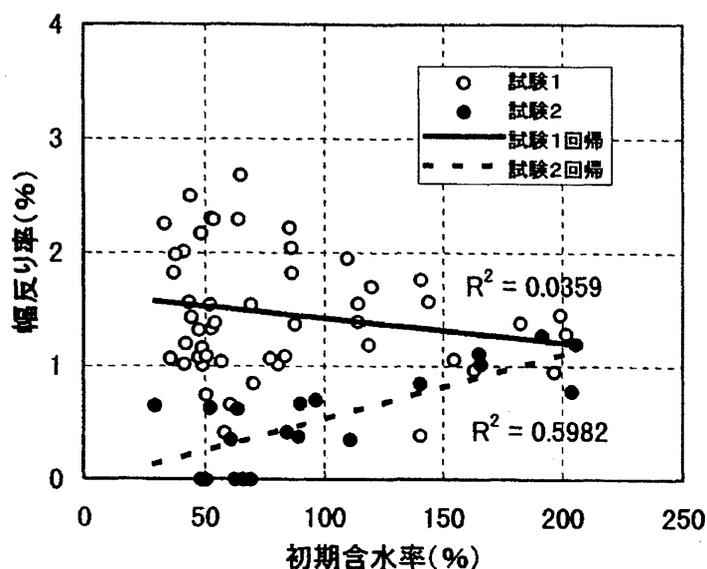


図21 試験1 および試験2における初期含水率と幅反り率との関係

## 4. 結 論

乾燥の困難なスギ材の乾燥時間の短縮と乾燥による欠点の発生を抑制することを目的として低圧多湿蒸気を用いた乾燥を試み、以下の結論を得た。

- 1) 人工乾燥に低圧多湿蒸気を用いることで、幅反りがある程度抑制することができた。
- 2) 蒸気が直接あたる場所に積み上げた材の含水率は間接的にあたる所に置いた材に比べて仕上がり含水率は少し高いが、幅反りの抑制効果が大きかった。
- 3) 初期含水率によりスチームチェンジャーの作動時期を調節することで反りの少ない乾燥を行うことができた。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、株式会社マルナカ代表取締役山本勝氏には人工乾燥室の使用を快諾していただいた。ここに記して謝意を表す。

## 引用文献

- (1) 河崎弥生, 古川郁夫, 作野友康, 中尾哲也(2000) ” 木造住宅建築において材料としての乾燥材指定が竣工後のトラブル発生の抑制に及ぼす効果” 第50回日本木材学会大会研究発表要旨集 154 京都
- (2) 鷺見博史(1978) ” 木材の高温乾燥(第1報) - 乾燥末期の乾燥速度に及ぼす温度の影響 - ” 木材学会誌 **24** 385-390
- (3) 谷口義昭, 西尾茂(1993) ” 木材の高周波減圧乾燥法(第4報) - 乾燥法別の材質比較 - ” 木材学会誌 **37** 405-414
- (4) 河辺純一, 坂本和幸, 藤本登留, 又木義博(1993) ” スギ丸太の高周波加熱減圧乾燥 - 赤心材および黒心材の内部応力変化 - ” 木材学会誌 **39** 284-292
- (5) 小林好紀, 川井安生, 三浦泉(2000) ” 高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第1報) - スギ正角材の材内圧力と水分状態 - ” 木材学会誌 **46** 282-290
- (6) 川井安生, 小林好紀, 則元京(2001) ” 高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第2報) - 高周波加熱下におけるスギ正角材内部の温度と圧力 - ” 木材学会誌 **47** 7-13

Received February 28 , 2002