

マイクロ波加熱による木材の曲げ加工\*  
繊維方向曲げ加工材の水分回復

青 木 務\*\*, 則 元 京\*\*\*

Wood Bending Utilizing Microwave Heating\*  
Changes in Curvature of Bentwood due to Moisture Change

Tsutomu AOKI\*\* and Misato NORIMOTO\*\*\*

Abstract

After Water-saturated wood pieces were irradiated with microwaves, they were bent to various radii of curvature  $R_0$  and dried under restraint. They contracted on the concave side and elongated on the convex side. If the fixed strains on the extreme inner and outer surfaces of a bent piece were denoted by  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_0$ , respectively, the relationship between them was expressed by  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_0$ . The radius of bend  $R$  changed when the bent piece was subjected to moisture change. An increase in moisture content caused the radius to increase owing to the recovery of the fixed strains. Similarly a decrease caused the radius to decrease since the shrinkages of the bent piece occurred during drying and in such a case the shrinkages on the concave side were two times larger than those on the convex side. The increment of the chord  $2X$  shown in Fig. 4 for the bent piece per unit increase in moisture content,  $A$ , was almost the same among different wood species compared at the same  $R_0$ . There was a linear relationship in logarithmic scales between  $A$  and  $R_0$ .

概 要

水分変化に伴う曲げ加工材の曲率半径の変化を観察し、その予測法について検討した。得られた結果は次の通りである。

- 1) 曲げ加工材の引張側最大セット歪  $\varepsilon_0$  と圧縮側のそれ  $\varepsilon_1$  とは  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_0$  の関係にある。圧縮側で挫屈が生じているものはこの関係からずれる。また、中立軸は曲げ操作中に引張側に移動する。
- 2) 曲げ加工材の曲率半径は、吸湿により増大、放湿により減少する。これは、吸湿の場合、含水率の増加とともに外周のセット歪  $\varepsilon_0$  が回復して減少するのに対して、内周のセット歪  $\varepsilon_1$  が回復して増加するこ

\* 本報告は第32回日本木材学会大会（1982年4月、福岡）において発表した。

\*\* 神戸大学教育学部（Faculty of Education, Kobe University, Kobe）

\*\*\* 木材物理部門（Division of Wood Physics）

とに基づく。一方、放湿の場合、含水率の減少とともに  $\epsilon_0$  と  $\epsilon_1$  の両者とも減少し、歪の変化量  $\Delta\epsilon_0$  および  $\Delta\epsilon_1$  に  $\Delta\epsilon_0 < \Delta\epsilon_1$  の関係があるので、曲率半径は増加する。

3) 吸湿過程における含水率1%当りの矢高幅の変化と測定開始時の曲率半径とは、両対数目盛で直線関係を示し、また、この両者の関係は樹種に依存しない。したがって、曲げ加工材の吸湿による回復の程度は、初期の曲率半径から予測される。

## 1 緒 言

マイクロ波加熱を利用して、木材を容易に曲げ加工できることは既報<sup>1)</sup>の通りである。しかし、曲げ加工材の変形の固定状態および水分変化に伴う変形の回復についてはまだ明確になっていない。曲げ加工材を実際に使用する場合、所定の形状に固定した部材を、釘や接着剤で他の部材と固定し、さらに通常それに塗装

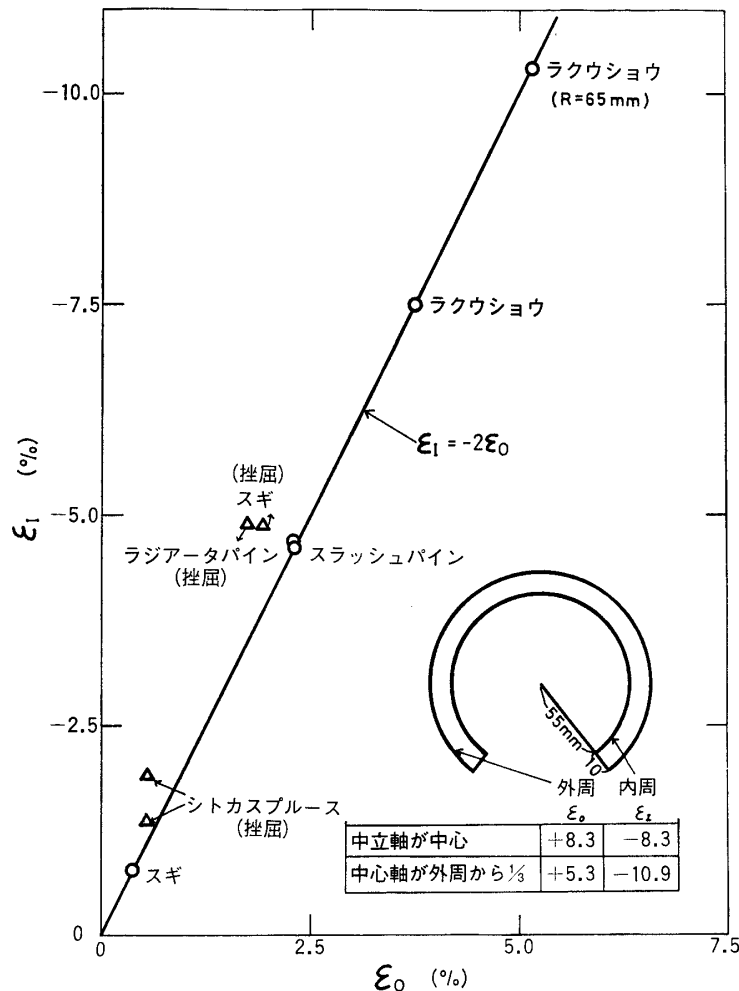


図1 曲げ加工材の引張側および圧縮側表層におけるセット歪 ( $\epsilon_1, \epsilon_0$ ) の関係

を施すため、吸放湿に基づく変形の回復は、あまり問題にならない場合が多い。しかし、製品に仕上げるまでの放置期間に吸放湿に伴って生じる形状の変化は、加工精度や歩止りに関係するので、その様子を十分に把握しておく必要がある。本報告では、曲げ加工材の変形の固定状態および吸放湿に伴う変形の回復について検討した。

## 2 実 験

供試材として、スギ (*Cryptomeria japonica* D. DON), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.), ツガ (*Tsuga Sieboldii* CARR.), スプルース (*Picea* Sp.), シトカスプルース (*Picea sitchensis* CARR.), スラッシュパイン (*Pinus elliottii*), ラクウシヨウ (*Taxodium distichum*), テーダーパイン (*Pinus taeda*), ラジアータパイン (*Pinus radiata*), イタリアヒノキ (*Chamaecyparis formosensis*) の針葉樹材10種と、アキニレ (*Ulmus pari-*

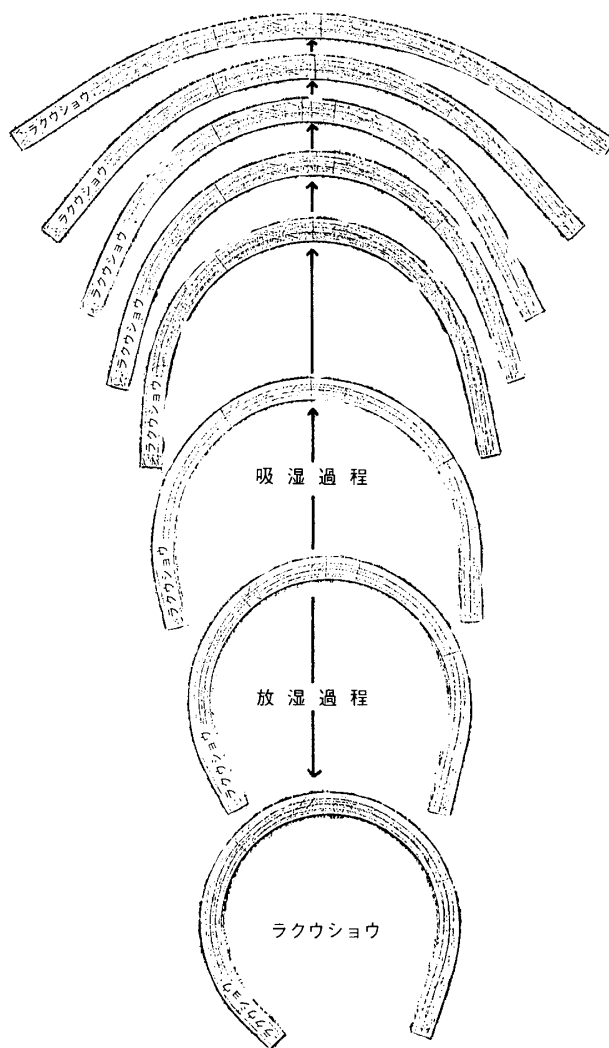


図2 ラクウシヨウ材の吸放湿過程における形状変化

*foria jacq.*), ホオノキ (*Magnolia obovata* THUNB.) の広葉樹材 2 種を用いた。なお, 寸法は繊維方向が 51 cm, 接線方向が 2 cm, 半径方向が 1 cm である。

まず, あらかじめ減圧により吸水させた試料を加熱装置に入れ, 出力 200V, 2.4 kW のマイクロ波を照射後, 種々の曲率半径に曲げて固定し, その状態のまま室内に約 1 週間放置した。次に, ひもで両端を固定した状態で, 20°C, 65% R.H. の恒温室に約 2 週間放置した。その後曲げ加工材の外周と内周の長さを測定し, 引張側および圧縮側表面のセット歪を求めた。

最後に, この試料を 20°C の恒温室に設置したプラスチック製デシケーター (50 cm×30 cm×30 cm) 中に入れ, 吸湿過程 (蒸留水) および放湿過程 (シリカゲル) における曲げ加工材の曲率半径の変化を観測した。なお, 含水率と曲率半径, 矢高, 矢高幅の値は, それぞれ重量測定およびゼロックス複写図の寸法測定より求めた。

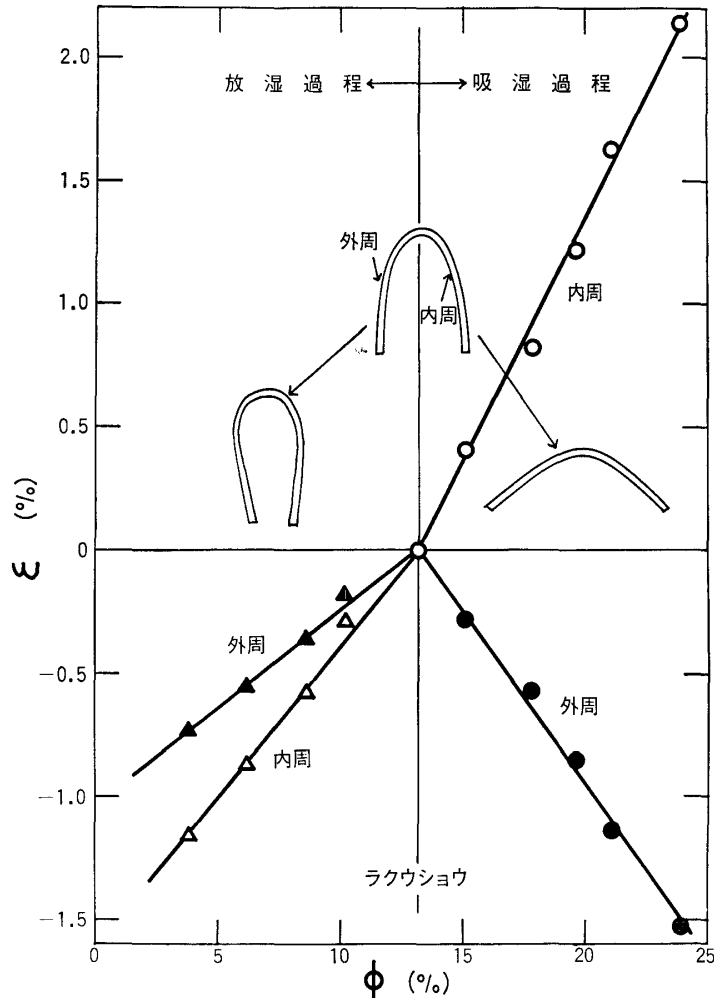


図3 ラクウショウ材の吸放湿過程における外周および内周のセット歪  $\epsilon$  と含水率  $\phi$  の関係

### 3 結果と考察

#### 3.1 曲げ加工材の表面セット歪

図1はマイクロ波加熱を用いて作製した曲げ加工材の引張側および圧縮側表層におけるセット歪の関係を示す。いま、引張側のセット歪を  $\varepsilon_0$ 、圧縮側のそれを  $\varepsilon_1$  とすると、外見上挫屈や割れが生じていないものでは、ほぼ  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_0$  の関係にあり、この関係からずれると、圧縮側では挫屈が、引張側では割れが発生する。なお、シトカスプルー材を例にとると、破壊に至るまで曲率半径を小さくしていった場合、引張側の歪はある値以上には変化しないのに対し、圧縮側の歪は増大する。そして、 $-2\varepsilon_0$  に比べて  $\varepsilon_1$  の値が大きくなればなるほど、圧縮側の挫屈の程度は増大する。このことは、引張側の最大セット歪を求めておけば、上式の関係から、各樹種の曲げ可能な曲率半径の限界を予測することができることを示唆する。

また、一例として外周の曲率半径が 65 mm であるラクウシヨウ材を図中に示すようにモデル化して、引

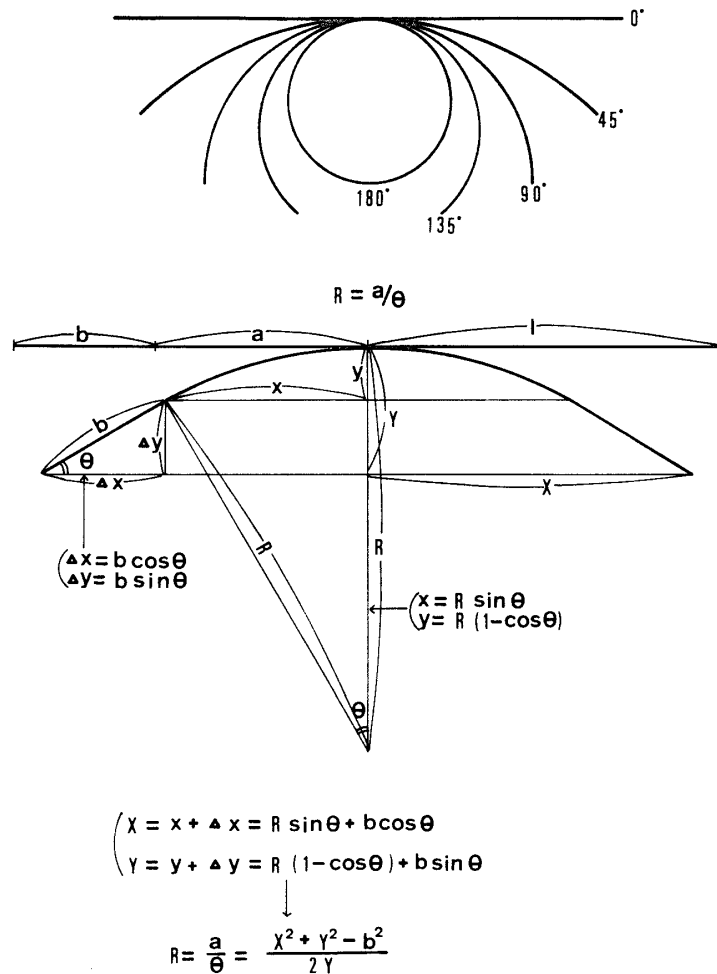


図4 曲げ加工材モデル

張側表層と圧縮側表層のセット歪を求めた。いま、中立軸が中心にあると仮定すると、 $\epsilon_0 = +8.3\%$ 、 $\epsilon_1 = -8.3\%$  となるが、中立軸が外周から  $1/3$  の所にあると仮定し、また、曲げ加工材のセット歪は水分および熱処理を施すことにより完全に回復する<sup>2)</sup> ので、中立軸から表層までの歪分布が直線的であると推定すると、 $\epsilon_0 = +5.3\%$ 、 $\epsilon_1 = -10.9\%$  となる。このラクウシヨウ材の実測したセット歪の値は  $\epsilon_0 = +5.2\%$ 、 $\epsilon_1 = -10.3\%$  であり、このことから、曲げ加工の操作中に、中立軸が引張側に移動したことがわかる。

### 3.2 吸放湿過程における曲げ加工材の曲率半径の変化

測定結果の一例として、ラクウシヨウ材の吸放湿過程における形状変化のゼロックス複写図を図2に示す。図から明らかなように、曲げ加工材の曲率半径は、吸湿により増大し、放湿により減少する。なお、この吸湿による回復は、さらに吸水および熱水処理を施すと、ほぼ完全に回復する<sup>2)</sup>。

そこで、この吸放湿に基づく曲率半径の変化を検討することにした。図3はラクウシヨウ材の吸放湿過程における外周および内周のセット歪  $\epsilon$  と含水率  $\phi$  の関係を示す。吸湿の場合、含水率の増加とともに外周のセット歪  $\epsilon_0$  は減少（収縮）し、内周のそれ  $\epsilon_1$  は増加（膨張）するため、曲率半径は増大する。一

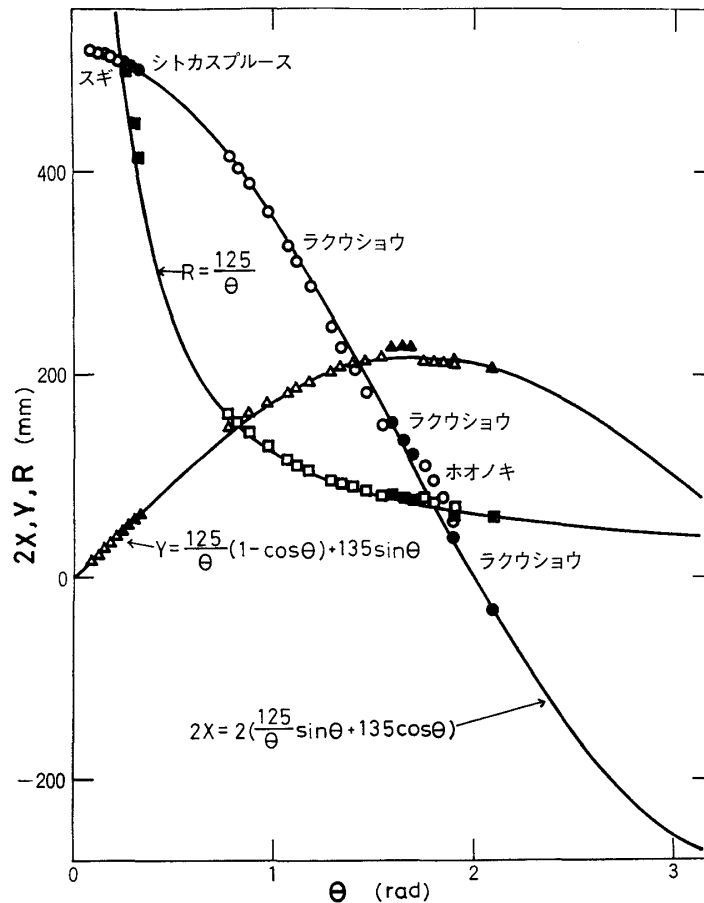


図5 曲げ加工材の曲率半径  $R$ 、矢高  $Y$ 、矢高幅  $2X$ 、と  $\theta$  (図4参照) の関係

方、放湿の場合、含水率の減少とともに  $\epsilon_0$  と  $\epsilon_1$  の両者はともに減少するが、歪の変化量  $\Delta\epsilon_0$  と  $\Delta\epsilon_1$  の間に  $|\Delta\epsilon_0| < |\Delta\epsilon_1|$  の関係があるので、曲率半径は減少する。

なお、吸湿過程におけるセット歪の回復のメカニズムは次のように考えられる。曲げ加工処理が施されて、乾燥過程で水素結合の再生により、ある曲率をもって固定された材が、水分子により再び水素結合が切断され、本来の長さより伸ばされていた外周が収縮するのに対して、本来の長さより縮められていた内周が膨張して、曲げ加工材の曲率半径が増大する。

### 3.3 吸放湿による曲げ加工材の曲率半径の変化の予測

曲率半径の変化についての解析に当たり、図4に示す曲げ加工材モデルを設定した。モデルで、繊維方向の長さを  $2l$ 、曲率半径  $R$  に曲げた部分の長さを  $a$ 、直線部分の長さを  $b$  とした。この  $b$  は、マイクロ波加熱した材を曲率  $R$  にそえ木にそって曲げる場合、そえ木にそっていない部分である。図に示すように、円弧  $2a$  が作る矢高を  $y$ 、矢高幅を  $2x$ 、 $a$  がなす角を  $\theta$ 、また、 $2a+2b$  が作る矢高を  $Y$ 、矢高幅を  $2X$  と

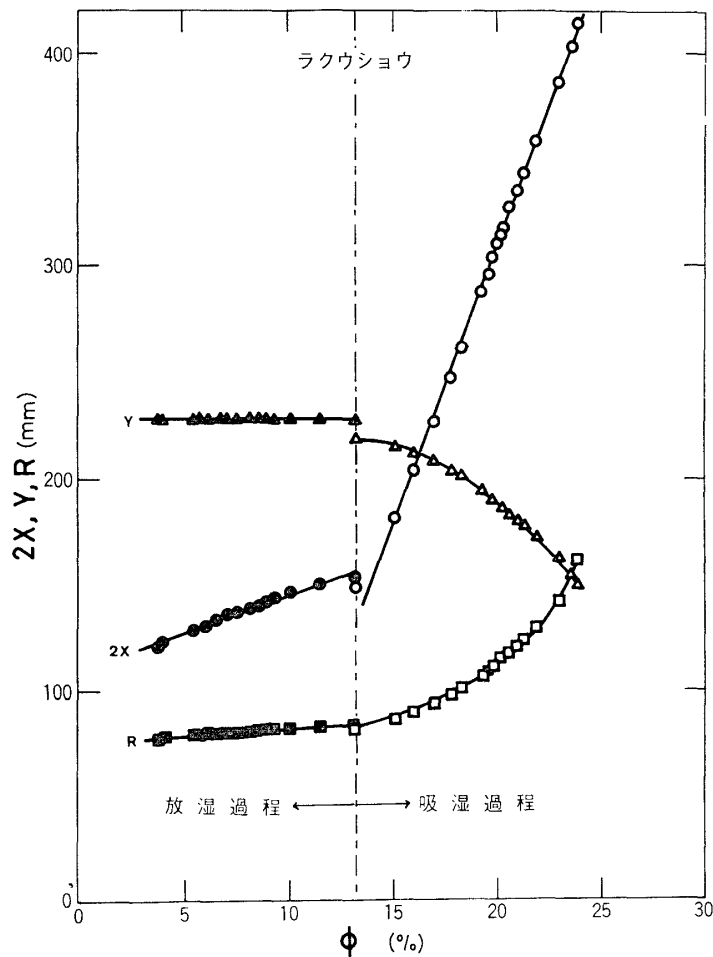


図6 ラクウショウ材の吸放湿過程における  $2X$ ,  $Y$ ,  $R$  と含水率  $\phi$  の関係

すると、 $x, y, \Delta x, \Delta y$  は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \theta \\ y &= R(1 - \cos \theta) \\ \Delta x &= b \cos \theta \\ \Delta y &= b \sin \theta \end{aligned} \right\} (1)$$

この(1)式から  $X$  と  $Y$  を求めると

$$\left. \begin{aligned} X &= x + \Delta x = R \sin \theta + b \cos \theta \\ Y &= y + \Delta y = R(1 - \cos \theta) + b \sin \theta \end{aligned} \right\} (2)$$

となるが、(2)式から  $\theta$  を消去すると、曲率半径  $R$  は次のようになる。

$$R = \frac{a}{\theta} = \frac{X^2 + Y^2 - b^2}{2Y} \quad (3)$$

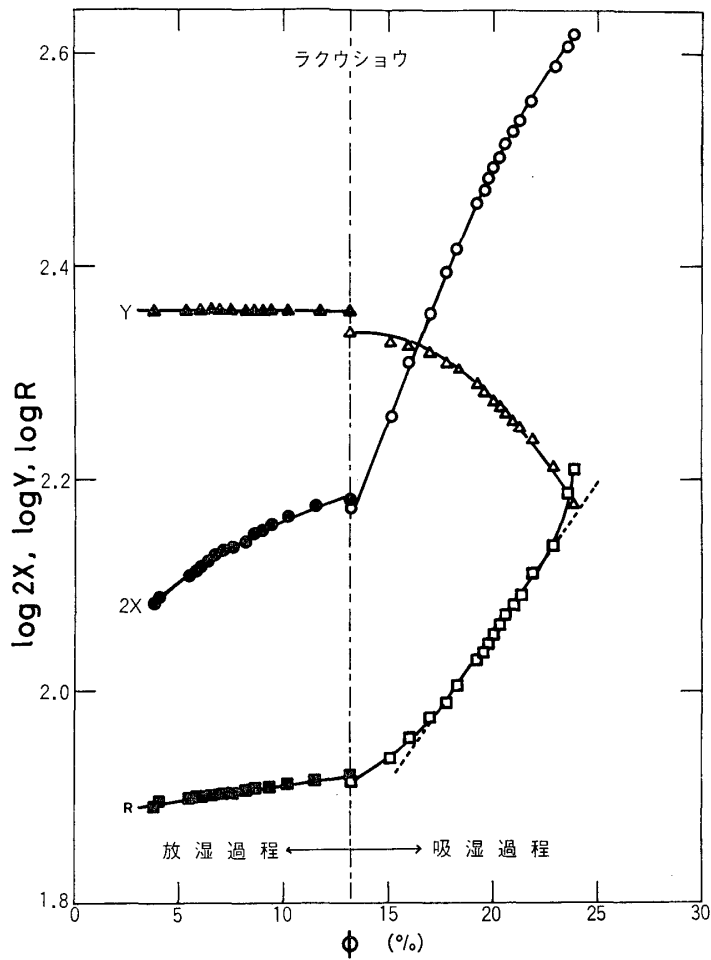


図7 7ラクウシヨウ材の吸放湿過程における  $\log 2X, \log Y, \log R$  と  $\phi$  の関係



実際の測定では、曲率半径  $R$  が大きくなると、それを厳密に決定することは困難となるが、このモデルを用いると、 $R$  は (3) 式より簡単に求められる。

また、 $b=0$  の場合、 $\theta$  を  $0^\circ \sim 180^\circ$  まで変化させると図4の上図に示すような形状変化を示すことになるが、これは図2の結果とよく対応している。

図5は  $l=260$  mm,  $a=125$  mm,  $b=135$  mm とした時の  $2X$ ,  $Y$ ,  $R$  と  $\theta$  の関係を示す。プロットは種々の樹種の吸放湿過程より求めた実測値を、また、実線は(2)と(3)式により求めた計算値を示す。両者がよく一致しており、モデルが妥当であることがわかる。なお、 $0 \leq \theta \leq 2\pi$  の領域において、上記の三つのパラメーターの一つで曲げ加工材の変形の回復を調べる場合、 $\theta$  が0あるいは  $2\pi$  付近では矢高  $Y$  を、それ以外では変形量に大きな差が生じ、測定が容易である矢高幅  $2X$  を、また、供試材の長さに関係しない量としては曲率半径  $R$  を用いればよい。

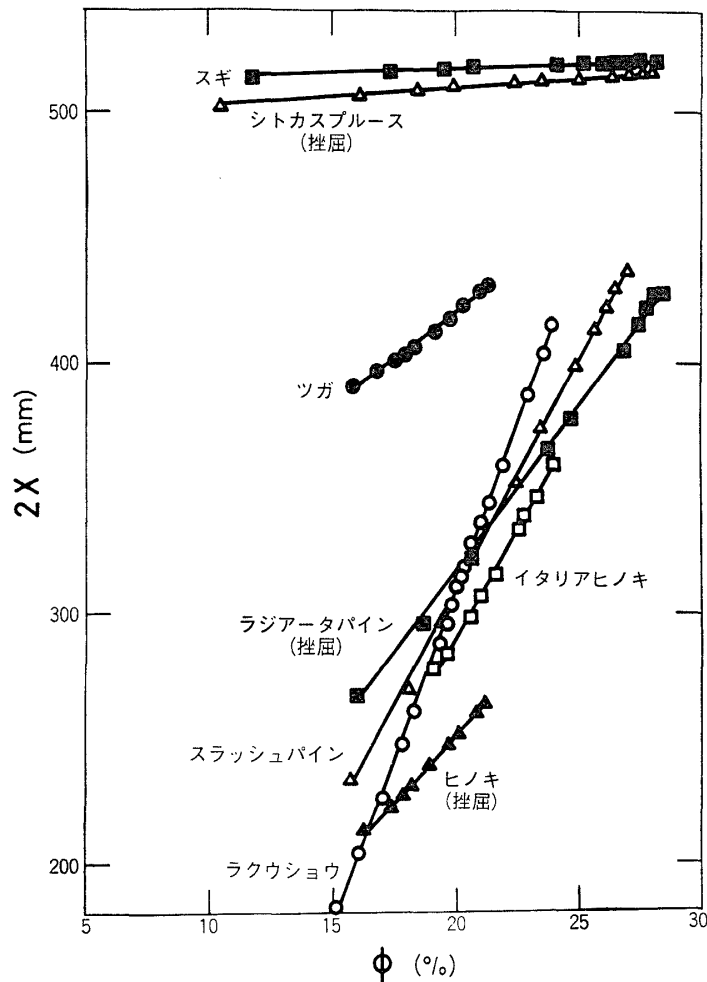


図8 各種針葉樹材の矢高幅  $2X$  と含水率  $\phi$  の関係

図6はラクウショウ材の吸放湿過程における  $2X$ ,  $Y$ ,  $R$  と含水率  $\phi$  の関係を示す。放湿過程における  $Y$  と  $R$  は  $\phi$  によってあまり変化しないが、 $2X$  は  $\phi$  の減少とともにほぼ直線的に変化する。一方、吸湿過程における  $2X$  は  $\phi$  の増加とともに直線的に増大し、 $R$  は曲線的に増大、 $Y$  は曲線的に減少する。なお、 $2X$  の場合の直線の勾配は、吸湿と放湿の両過程で異なる。

図7は図6の縦軸を対数目盛で表示したものである。 $R$  と  $\phi$  の関係はほぼ直線で示されるが、吸湿過程の測定開始直後と修了前では曲線となる。また、 $2X$ ,  $Y$  とともに  $\phi$  とともに曲線的に変化する。

曲げ加工材の回復を観察する場合、 $X$  と  $Y$  は供試材の長さによって変化するため、長さの効果を考えなくてよいパラメーターとして  $R$  を使用するのが良いと考えられる。しかし、図6と図7の結果から判断して、測定が簡単であり、変形量が大きく、また、含水率と直線関係を示す矢高幅  $2X$  を使用するのが便利と考えられる。

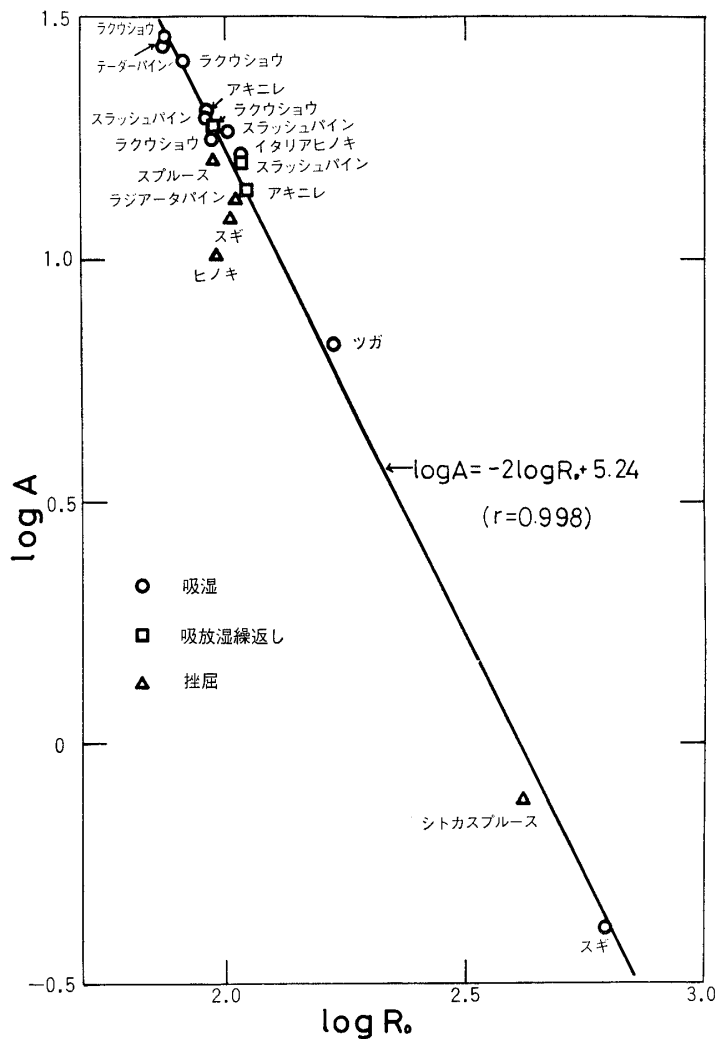


図9 含水率1%当りの矢高幅  $2X$  の変化  $\log A$  と測定開始時の曲率半径  $\log R_0$  の関係

図8は吸湿過程における種々の針葉樹材の矢高幅の変化と含水率の関係を示す。どの樹種とも両者が直線関係にあることがわかる。この図から明らかなことは、試片に多量の挫屈が生じているヒノキ材を除き、測定開始時の $2X$ が小さいほど、すなわち、曲率半径が小さいほど、直線の勾配が急であることである。

そこで、 $2X$ と $\phi$ の直線の勾配、すなわち、含水率1%の矢高幅 $2X$ の変化 $A$ を求め、それと測定開始時の曲率半径 $R_0$ の関係を求めることにした。結果を図9に示す。○は吸湿過程の結果、□は吸放湿繰返し実験での吸湿過程の結果、△は挫屈が生じている供試材の吸湿過程の結果より求めた $A$ 値を示す。○と□の結果から $\log A$ と $\log R_0$ は直線関係となり、その相関係数は0.998である。なお、挫屈が生じている試料は、その挫屈度に比例して、この直線からのずれが大きくなる。これは、試片に挫屈が生じているため、吸湿しても正常材のように回復しないことを示す。

以上より、樹種により変形挙動にあまり差異が認められないため、曲げ加工材の回復量は、初期の曲率半径が求まれば決定できると言えよう。

#### 4 文 献

- 1) 例えば、則元 京：マイクロ波による木材の塑性曲げ加工，木材研究資料，No 14，13～26（1979），則元 京ら他3名：マイクロ波加熱による木材の曲げ加工，日本レオロジー学会誌，8巻4号，166～171（1980）
- 2) 飯田生穂，則元 京：マイクロ波による木材の曲げ加工，横方向曲げ処理材の水分および熱回復，第32回日本木材学会大会要旨集，60（1982）