

## スギおよびヒノキ間伐材の曲げ加工\*

則 元      京\*\*・和 田      博\*\*\*

### Wood Bending of Sugi and Hinoki from the Thinning Operation\*

Misato NORIMOTO\*\* and Hiroshi WADA\*\*\*

#### 1. 緒 言

木材の曲げ加工の難易度は、樹種によって著しく異なるが<sup>1)</sup>、同一樹種でも、産地、樹齢、あるいは樹幹部位によって、かなり異なるようである。物理量と曲げ加工の難易度の関係については、たとえば、比重、強度、ヤング係数との間には、ほとんど相関は認められないが、飽水状態での曲げ破壊ひずみとの間には、比較的高い相関が認められる<sup>1)</sup>。しかし、加工現場では、非破壊的で且つ簡便に、個々の材の曲げ加工の難易度を知ることが必要であることから、破壊ひずみ以外の適当な選別指標を求めることが要求される。最近、針葉樹材の繊維方向について、曲げ破壊ひずみと比曲げヤング係数との間に、比較的高い相関のあることが明らかになってきた<sup>2)</sup>。比ヤング係数は、比較的に容易に現場で計測できる量であるので、曲げ加工の難易度を予測するための指標として望ましい。繊維方向の比ヤング係数には、細胞壁 S<sub>2</sub> 層のマイクロフィブリル傾向<sup>2)</sup>と S<sub>2</sub> 層の占める割合が著しく影響する<sup>3)</sup>。すなわち、S<sub>2</sub> 層のマイクロフィブリル傾角が大きくなるほど、また、S<sub>2</sub> 層の割合が少なくなるほど、比ヤング係数は小さくなる。

間伐材は、未成熟材を多く含んでいる。一般に、針葉樹の未成熟材では、成熟材に比べて、仮道管が短く、平均マイクロフィブリル傾角が大きいことが知られている。間伐材に含まれる未成熟材の量および質は、林木の状態、環境、樹種あるいは品種などによって、異なるものと考えられるが、一般に、間伐材の繊維方向の比曲げヤング係数は、大径木のそれに比べて、概して小さい傾向を示すものと予測される。したがって、間伐材は、上に述べたことから推測して、曲げ加工性能面で優れていると予測される。

本報では、スギおよびヒノキ間伐材の曲げ加工性能および比曲げヤング係数と曲げ加工の難易度との間の関係について検討している。

#### 2. 実 験

##### 2.1 試 料

試料として、スギ (*Cryptomeria japonica*) およびヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 間伐材を用いた。スギ材は、熊本県球磨郡錦町字鍋山、(株)住友林業社有林から間伐された20年生の25品種で、その品種名および原産地を表1に示す。なお、詳細については、本誌 No. 17 を参照されたい<sup>4)</sup>。試料は、丸太の主として心材

\* 本報告の一部は、第33回日本木材学会大会 (1983年4月、京都) において発表した。

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

\*\*\* 奈良県林業試験場 (Nara Prefectural Forest Experiment Station, Takatori, Nara 635-01)

表1 供試スギ間伐材の品種名と原産地<sup>4)</sup>

| 品 種 名     | 原 産 地               |
|-----------|---------------------|
| ア カ バ     | 福岡県八女地方             |
| ウ ラ セ バ ル | 大分県日田市小山町三春原（うらせばる） |
| オ オ ブ チ   | 福岡県八女郡黒木町大湊 関       |
| オ ド リ ス ギ | 鹿児島県始良郡牧園町 深川仁之助    |
| オ ビ ア カ   | 宮崎県飫肥地方             |
| カ ラ ツ キ   | 宮崎県飫肥地方             |
| ガ リ ン     | 宮崎県飫肥地方             |
| キ ウ ラ     | 福岡県八女郡星野村木浦 樋口峯吉    |
| ク ロ       | 宮崎県南部               |
| ゴ ガ ボ     | 福岡県八女郡上陽町古賀 井上虎平    |
| サ ン ブ ス ギ | 千葉県武郡山武町            |
| チ ズ ス ギ   | 鳥取県八頭郡智頭町           |
| ト サ ア カ   | 宮崎県飫肥地方             |
| トミスギ1号    | 兵庫県宍粟郡安富町 松下仙蔵      |
| トミスギ2号    | 兵庫県宍粟郡安富町 松下仙蔵      |
| ヒ ダ リ マ キ | 宮崎県飫肥地方             |
| ヒ ノ デ ス ギ | 大分県日田郡前津江村 梶原近利     |
| ボ カ ス ギ   | 富山県小矢部市石動（いするぎ）町    |
| ミ ゾ ロ ギ   | 宮崎県飫肥地方             |
| ヤ イ チ ス ギ | 福岡県八女郡星野村 江良弥一      |
| ヤ ク ス ギ   | 鹿児島県屋久島             |
| ヤ ナ セ ス ギ | 高知県安芸郡馬路村魚染瀬（やなせ）   |
| ヤ ブ ク グ リ | 大分県日田地方，熊本県小国地方     |
| ヤ マ ノ カ ミ | 鹿児島県川辺郡川辺町神殿字山神     |
| ヨシノスギ2号   | 奈良県吉野地方             |

部から採取したもので，その寸法は，長さ 30 cm（繊維方向，L），幅 2 cm（接線方向，T），厚さ 1 cm（放射方向，R）で，合計113本である。ヒノキ材は，奈良県宇陀郡室生村育種園で間伐された6本で，A～Cは吉野ヒノキ，D～Fは坂下営林署から入手の木曽ヒノキである。試料は，主として丸太の辺材部から採取したもので，その寸法は，長さ 43.5 cm（L），幅 2 cm（T），厚さ 1 cm（R）である。47本について曲げヤング係数を測定し，その中から，曲げ加工を行う部分に節のないもの37本を曲げ加工に供した。

## 2.2 曲げヤング係数の測定

スギ材については，気乾状態で比重 $\gamma$ を求めた後，スパンを 20 cm として，中央に 10 mm/min のたわみ速度で，小荷重の範囲内で荷重とたわみの関係を求め，その勾配から，気乾，室温の条件におけるL方向の曲げヤング係数を計算した。その後，試料をガラスチューブに入れ，減圧して試料に水を注入した後，飽水，室温の条件で再び曲げヤング係数を求めた。

ヒノキ材については，気乾状態で $\gamma$ を求めた後，スギ材の場合と同様の方法で，気乾，室温の条件で曲げヤング係数を求めた。

## 2.3 曲げ加工

スギ材については，飽水状態の試料を塩化ビニリデンフィルム（CO-OP ラップ）で包み，それをマイク

微波加熱装置（東芝製 TMB-3210形，2450 MHz）に入れ，出力 1.6 kW のマイクロ波を 2 分間照射した。その後，試料を曲率半径  $r=15$  cm の木製の形枠に沿って，帯鉄を用いずに曲げ，続いて， $r=10$  cm のそれに沿って曲げた。変形を固定することなく，再び試料を装置に入れ，マイクロ波を 1 分間照射し， $r=7$  cm，続いて， $r=5$  cm の形枠に沿って曲げた。強度の損傷の生じなかったものについては，治具を用いて変形を固定した。これらの曲げ操作の過程で，試料の引張側（外周側）や圧縮側（内周側）に生じる損傷の程度を，肉眼的に観察した。損傷として，引張側では割れが，圧縮側では挫屈が生じる。割れについては，節以外の部位での割れ（T），節部位での強度の割れ（TK 2），節部位での弱度の割れ（TK 1）の 3 段階に分類した。挫屈については，加工材として使用が不可能な程度の強度の挫屈（C3），補修で使用可能な挫屈（C2），極く軽微なしわで，軽いサンディングで消失する程度のもの（C1）の 3 段階に分類した。

ヒノキ材については，飽水状態の試料を塩化ビニリデンフィルムで包み，それをマイクロ波加熱装置に入れ，出力 1.6 kW のマイクロ波を 2 分間照射した後，図 1 に示す曲げ用治具（帯鉄厚さ 0.5 mm）を用いて， $r=5$  cm の形枠に沿って曲げ加工し，試料に生じた損傷を肉眼的に観察した。損傷については，引張側の割れ（T），圧縮側の使用不可能な程度の挫屈（C3），補修で使用可能な程度のしわ（C2），極く軽微でサンディングで消失する程度のしわ（C1）に分類した。

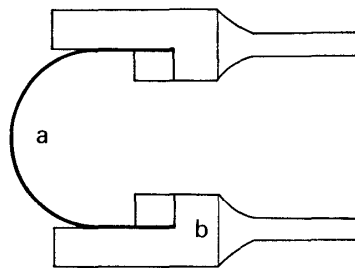


図 1 曲げ加工用治具  
a : 帯鉄厚さ (0.5 mm)  
b : 木製ハンドル

なお，曲げ加工に先立ち，試料を塩化ビニリデンフィルムで包むのは，マイクロ波照射中に，試料表面からの水分の蒸発による材表面温度の低下および曲げ加工中に材温が低下するのを少なくすることと，帯鉄を使用した場合の材の鉄汚損を防止するためである。

### 3. 結果と考察

木材の繊維方向のヤング係数  $E$ ，比重  $\gamma$ ，細胞壁の平均的なヤング係数  $\bar{E}_1$ ，平均的な比重  $\bar{\gamma}_1$  との間に，第一次近似として，次の関係がある<sup>2)</sup>。

$$E \approx \frac{\bar{E}_1}{\bar{\gamma}_1} \cdot \gamma, \text{ あるいは } \log_{10} E = \log_{10} \gamma + \log_{10} \frac{\bar{E}_1}{\bar{\gamma}_1}.$$

$\bar{\gamma}_1$  は，樹種によらずほぼ一定であることが示されているので，樹種によって  $\bar{E}_1$  が一定であれば， $\log_{10} E$  と  $\log_{10} \gamma$  の関係は，傾きが  $45^\circ$  の一本の直線となるはずである。もし，両者の関係がそのようになっていない場合は， $\bar{E}_1$  が試料によって異なっているものと考えることができる。

図 2 に，気乾，室温の条件でのスギ材の  $E$  と  $\gamma$  を両対数で目盛った結果を示す。 $\gamma$  は比較的狭い範囲に分布しているが， $E$  は広い範囲に分布している。したがって， $\log_{10} E$  と  $\log_{10} \gamma$  の関係は，傾き  $45^\circ$  の一本の直線で表わすことができない。この結果は，先に示した針葉樹材 22 種についての結果<sup>2)</sup>，角谷等がスギおよびヒノキ材について<sup>5)</sup>，佐々木等がスギ材について<sup>4)</sup> それぞれ報告している結果と一致している。図 2 の結果から，スギ間伐材の  $\bar{E}_1$  は，試料によって著しく異なっていると考えることができる。 $\bar{\gamma}_1$  を 1.43 とす

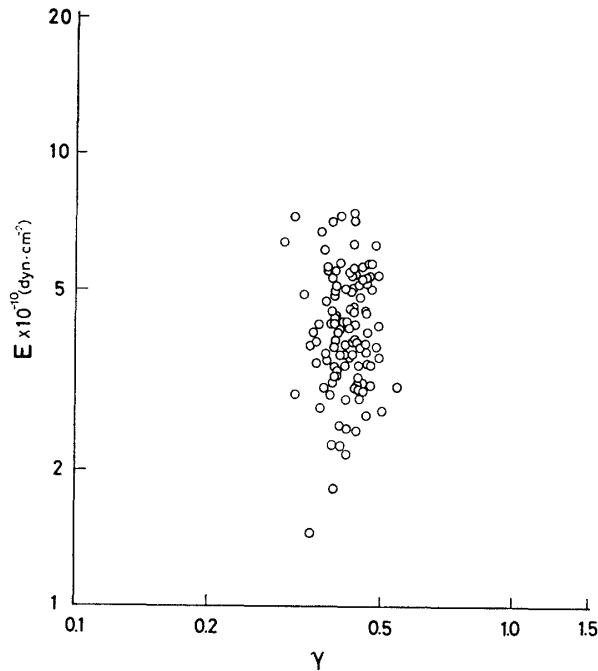


図2 スギ間伐材の曲げヤング係数と比重の関係

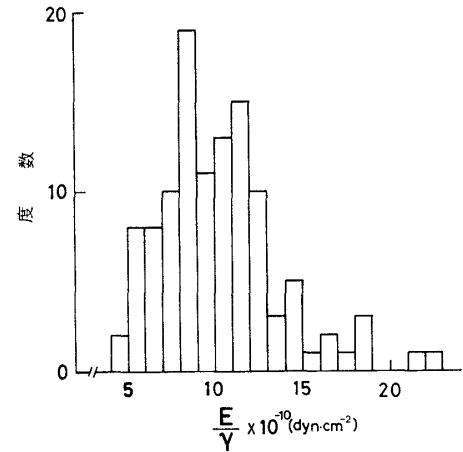


図3 スギ間伐材の比曲げヤング係数のヒストグラム

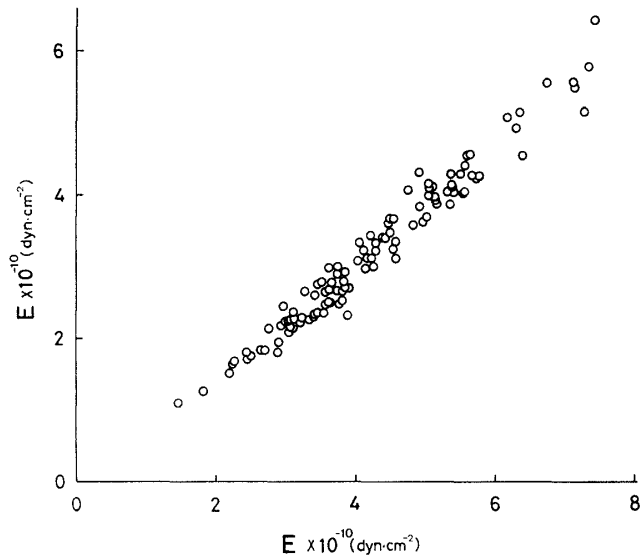


図4 スギ間伐材の気乾状態の曲げヤング係数(横軸)と飽水状態の曲げヤング係数(縦軸)の関係

ると、上式より  $\bar{E}_1$  は、 $6.01 \times 10^{10} \text{ dy/cm}^2$  から  $3.26 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$  の範囲に分布していることになる。

図3に、気乾、室温の条件での比重当りのヤング係数(比ヤング係数)  $E/\gamma$  のヒストグラムを示す。 $E/\gamma$  の階級の幅は  $1 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$  である。また、図4に、気乾状態と飽水状態における曲げヤング係数の関係を示す。両者の間に直線関係がある。相関係数は0.982であり、飽水状態のヤング係数は、気乾状態のその約0.87倍である。

図5に、気乾、室温の条件でのヒノキ材の  $E$  と  $\gamma$  の関係を両対数で目盛った結果を示す。スギ材の場合

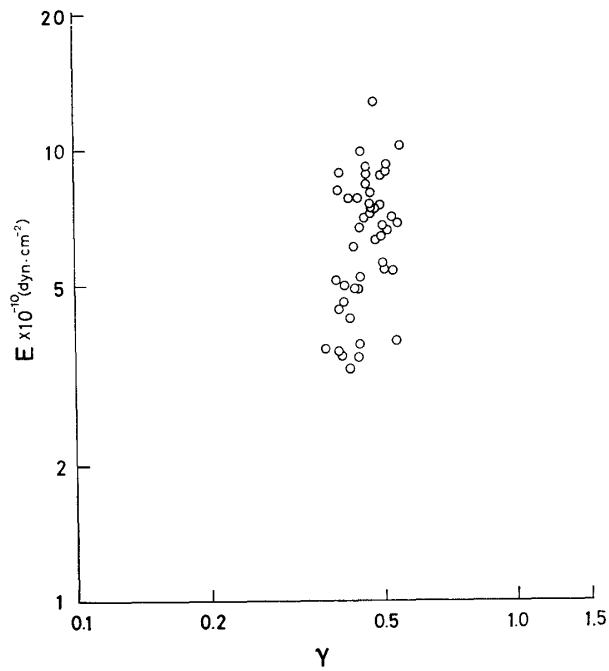


図5 ヒノキ間伐材の曲げヤング係数と比重の関係

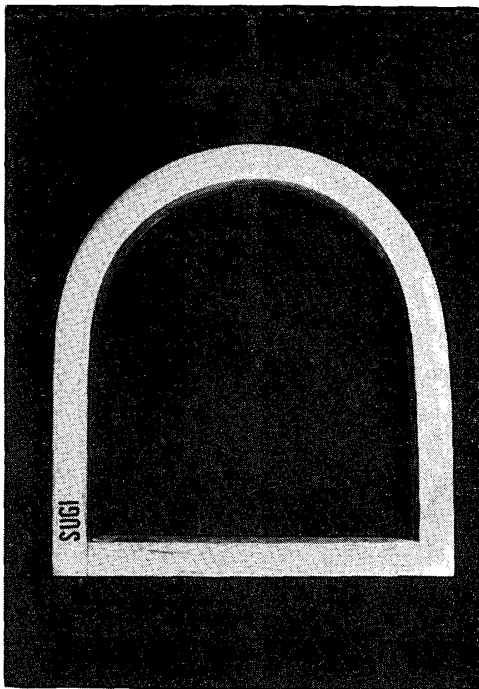


写真1 スギ間伐材，試料厚さ 1 cm，  
曲率半径 5 cm

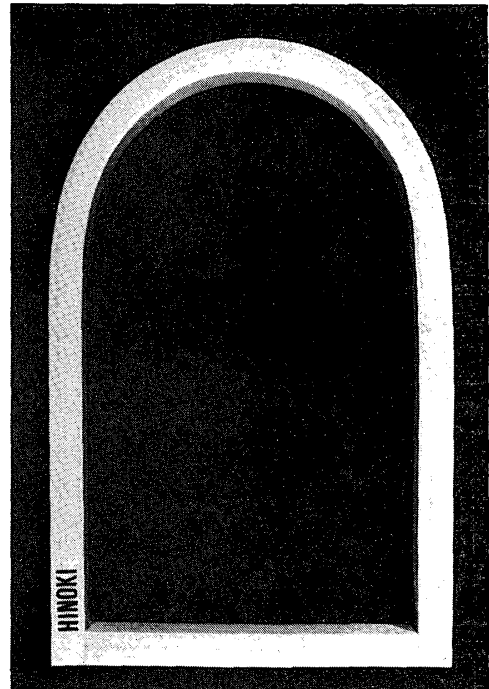


写真2 ヒノキ間伐材，試料厚さ 1 cm，  
曲率半径 5 cm

と同様， $\gamma$ は比較的狭い範囲に分布しているのに対し， $E$ は広い範囲に分布している。したがって，ヒノキ材においても， $\bar{E}_1$ は試料によって著しく異なっていると考えることができる。 $\bar{E}_1$ は， $9.82 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ から  $3.75 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$  の範囲に分布していることになる。

表2 スギ間伐材の曲げ加工性能

| 品 種 名                                                                                                                   | $E/\gamma \times 10^{-10}$<br>(dyn/cm <sup>2</sup> ) | 損 傷 の 程 度 |      |        |                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------|------|--------|----------------------------------------------------|
|                                                                                                                         |                                                      | r=15      | r=10 | r=7    | r=5                                                |
| ボカスギ<br>ボカスギ                                                                                                            | 4                                                    |           |      |        | Cl<br>TK1                                          |
| オビアカ<br>トミススギ1号<br>トミススギ1号<br>トミススギ1号<br>トミススギ1号<br>ボカスギ<br>ボカスギ<br>ヤブクグリ                                               | 5                                                    |           |      |        | TK2<br><br><br>TK2<br>Cl,TK2<br>TK1<br>TK1         |
| オビアカ<br>ク           ロ<br>ク           ロ<br>ヤイチスギ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ                                     | 6                                                    |           |      |        | TK1<br>C2<br>T<br>C2,TK2<br><br>Cl<br>TK2          |
| アカバ<br>ゴ   ガ   ボ<br>トミススギ2号<br>ヒノデスギ<br>ボカスギ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ<br>ヤブクグリ<br>ヨシノスギ2号                             | 7                                                    |           |      | T      | TK2<br>—<br>TK2<br>TK2<br><br>TK1<br>TK1<br>Cl,TK2 |
| アカバ<br>アカバ<br>アカバ<br>ウラセバル<br>オビアカ<br>カラツキ<br>キ   ウ   ラ<br>キ   ウ   ラ<br>ク           ロ<br>ク           ロ<br>ク           ロ | 8                                                    |           |      | Cl,TK2 | C2<br>—<br><br>Cl<br>C2,TK2<br><br>Cl<br><br>C2    |

則元・和田：間伐材の曲げ加工

|                                                                                                                                                     |    |    |                                  |                                                                                      |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ク<br>ク<br>ゴ ガ ボ<br>チ ズ ス ギ<br>ヤ イ チ ス ギ<br>ヤ イ チ ス ギ<br>ヤ ナ セ ス ギ<br>ヨ シ ノ ス ギ 2 号                                                                  |    |    |                                  | C1<br>T<br><br>C3                                                                    | T<br>C3<br>—<br>TK2<br><br>—<br>C1, TK1<br>C2, TK2                                    |
| ク<br>ク<br>ゴ ガ ボ<br>サ ン ブ ス ギ<br>サ ン ブ ス ギ<br>ボ カ ス ギ<br>ヤ ナ セ ス ギ<br>ヤ ナ セ ス ギ<br>ヤ マ ノ カ ミ<br>ヤ マ ノ カ ミ<br>ヨ シ ノ ス ギ 2 号                           | 9  |    |                                  | C3<br>C1, T<br>TK1<br>C2, TK1<br><br>TK1<br><br>C2, T<br>C2, T                       | C2, T<br>—<br>—<br>C1<br>C3<br>C1<br>C2, TK1<br>C1, TK2<br>C1<br>—<br>—               |
| ア カ バ<br>オ オ ブ チ<br>オ ビ ア カ<br>カ ラ ツ キ<br>キ ウ ラ<br>ク ロ<br>サ ン ブ ス ギ<br>ヒ ダ リ マ キ<br>ヒ ノ デ ス ギ<br>ボ カ ス ギ<br>ヤ ブ ク グ リ<br>ヤ マ ノ カ ミ<br>ヨ シ ノ ス ギ 2 号 | 10 |    | C1                               | C3<br>T<br><br>C3, TK2<br><br>C1<br><br>C1<br>C3<br>C1, T<br>C1<br>C2<br>C3<br>C2, T | —<br>—<br>C1, T<br>—<br>C1<br>C2, T<br>C1, T<br>C3<br>C1, T<br>C1<br>C2<br>—<br>—     |
| オ オ ブ チ<br>オ オ ブ チ<br>オ ビ ア カ<br>ガ リ ン<br>ガ リ ン<br>キ ウ ラ<br>サ ン ブ ス ギ<br>チ ズ ス ギ<br>ボ カ ス ギ<br>ミ ゾ ロ ギ<br>ミ ゾ ロ ギ<br>ヤ チ イ ス ギ                      | 11 | C1 | C1<br><br>C1<br><br>C1<br><br>C3 | C1<br>C2<br><br>TK1<br>C1, T<br>C2<br>C2, T<br>C1<br>C1<br><br>C1<br>—               | C3<br>C3, T<br>C1, T<br>C3, T<br>C2, T<br>C3, T<br>—<br>C2, T<br>C3, T<br><br>C3<br>— |

|         |    |      |      |        |        |
|---------|----|------|------|--------|--------|
| ヨシノスギ2号 |    |      |      | C1     | C2,T   |
| ヨシノスギ2号 |    |      |      | C1     | C3,T   |
| ヨシノスギ2号 |    |      | C1   | C1     | C2,T   |
| ウラセバル   |    |      |      | C1     | C2     |
| クロ      |    |      |      |        |        |
| クロ      |    |      |      | C1     | C3,T   |
| ゴガボ     |    |      | C1   | C2,T   | —      |
| ミゾロギ    | 12 | C1,T | —    | —      | —      |
| ヤイチスギ   |    |      | C1   | C2     | C3,TK1 |
| ヤクスギ    |    |      | C1   | C2     | C3     |
| ヨシノスギ2号 |    |      |      | C1,TK1 | T      |
| ヨシノスギ2号 |    | C1,T | —    | —      | —      |
| オドリスギ   |    | T    | —    | —      | —      |
| カラツキ    | 13 | C1   | C2   | C3,T   | —      |
| サンプスギ   |    |      |      | C1,TK1 | C3,T   |
| ウラセバル   |    |      | C1   | C1,T   | —      |
| オオブチ    |    |      |      | C1     | C2,T   |
| オビアカ    | 14 |      | C1   | C2     | C3     |
| トサアカ    |    |      | C1   | C1     | C2,T   |
| ヤクスギ    |    | C1   | C2   | C3     | —      |
| ヨシノスギ2号 | 15 | C1   | C3   | —      | —      |
| オドリスギ   |    |      | C3   | T      | —      |
| ゴガボ     | 16 | C1   | C3   | T      | —      |
| アカバ     | 17 | C1   | C3   | —      | —      |
| ウラセバル   |    | C1   | C1,T | C3,T   | —      |
| ヤマノカミ   | 18 | C3   | —    | —      | —      |
| ヨシノスギ2号 |    |      | C1   | C3,T   | —      |
| ヤクスギ    | 21 | C1   | C1   | C3,T   | —      |
| ヤクスギ    | 22 | C1   | C1   | C3     | T      |

表2に、スギ材の品種名、気乾、室温の条件での  $E/\gamma$ 、および曲げ加工を行った場合に曲率半径  $r=5, 7, 10, 15$  cm においてそれぞれ現われる損傷の程度を記号で示す。表から明らかなように、 $E/\gamma$  が大きくなるにしたがって、一般に、損傷の現われる  $r$  が大きくなっている。品種別にみると、ボカスギ、トミスギ1号、ヤブクグリ、クロなどが曲げ性能に優れており、ヤクスギ、ヨシノスギ2号などが劣っているようである。 $E/\gamma$  が  $4\sim6\times10^{10}$  dyn/cm<sup>2</sup> のものは、 $r=7$  cm まで、 $7\sim9\times10^{10}$  dyn/cm<sup>2</sup> のものは、 $r=10$  cm まで、 $10\times10^{10}$  dyn/cm<sup>2</sup> のものは、 $r=15$  cm まで無傷で曲げ加工することができる。写真1に、曲げ加工の容易であったものを、 $r=5$  cm に曲げた一例を示す。節の部位での割れは、そのほとんどが曲げ加工中に生じたものではなく、試料を飽水状態にする以前にすでに存在していたものが、曲げ加工の過程で開いて生じたものである。圧縮側にある節部位での損傷は、ほとんど認められなかった。節の存在は、曲げ加工する  $r$  が大きい場合には、ほとんど問題にはならない。

表 3 ヒノキ間伐材の曲げ加工性能

| 試                                                  | 料 | $E/\gamma \times 10^{-10}$<br>(dyn/cm <sup>2</sup> ) | 損傷の程度                                                                         |
|----------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>2<br>3<br>4                                   | A | 13.4                                                 | C2                                                                            |
| 5<br>6<br>7<br>8<br>9<br>10<br>11<br>12            | B | 11.1                                                 | C1<br><br><br>C2<br>C2                                                        |
| 13<br>14<br>15<br>16<br>17<br>18<br>19             | C | 10.7                                                 |                                                                               |
| 20<br>21<br>22                                     | D | 18.6                                                 | C2, T<br>C3, T<br>C3, T                                                       |
| 23<br>24<br>25<br>26<br>27<br>28                   | E | 11.0                                                 | C1                                                                            |
| 29<br>30<br>31<br>32<br>33<br>34<br>35<br>36<br>37 | F | 16.7                                                 | C3, T<br>C3, T<br>C3, T<br>C3, T<br>C3, T<br>C3, T<br>C3, T<br>C1, T<br>C1, T |

表3に、ヒノキ丸太A～Fの  $E/\gamma$  の平均値および  $r=5\text{ cm}$  での損傷の程度を示す。表から明らかなように、丸太によって曲げ加工性能が明確に異なっている。すなわち、A、B、C、Eは曲げ性能に優れ、DとFは劣っている。前者は後者に比べ明らかに  $E/\gamma$  が小さい。特に、曲げ性能の最も優れているCでは、 $E/\gamma$  は最も小さい。写真2に、曲げ加工の容易であったヒノキ材について、 $r=5\text{ cm}$  に曲げ加工した一例を示す。

以上のスギおよびヒノキ間伐材についての曲げ加工の結果から、 $E/\gamma$  と曲げ加工の難易度との間には相関の存在することが明らかになった。また、スギおよびヒノキ間伐材には、他の大径木の針葉樹材に比べ、曲げ加工に適したものが多いことが明らかになった。 $E/\gamma$  は、縦波の音速を測定することによって、容易に求めることができるので、加工現場において、曲げ加工に適している材を、非破壊的に選別する指標として使用できるものと思われる。

## 謝 辞

スギ間伐材を提供して下さった(株)住友林業ならびに当研究所佐々木光教授、角谷和男助教授に感謝いたします。なお、本研究は、農林水産特別試験研究費補助金「マイクロ波加熱を用いた木材の曲げ加工に関する研究」によって行ったものである。

## 文 献

- 1) 則元 京ほか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**，166（1980）
- 2) 則元 京ほか3名：針葉樹細胞壁のヤング率，日本レオロジー学会誌，**9**，169（1981）
- 3) 大釜敏正，則元 京：投稿準備中
- 4) 佐々木光ほか2名：スギ36品種の力学的性質，木材研究・資料，No. 17，192（1983）
- 5) 角谷和男ほか3名：異なった密度で植栽されたスギ，ヒノキ材の物性に関する一考察，木材誌，**28**，255（1982）