

## コウヨウザン植栽木の曲げ仕事量\*1

劉 元\*2, 中山義雄\*2, 金川 靖\*2, 藤原新二\*2

### Bending Work of Plantation Grown Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata* Hook.) \*1

Yuan LIU\*2, Yoshio NAKAYAMA\*2,  
Yasushi KANAGAWA\*2, Shinji FUJIWARA\*2

This study used small, clear samples from twenty trees of 23-year-old plantation Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* Hook.) grown on four sites in Guangdong Province, China. We investigated the radial variation in bending work properties and comparative parameters of work in bending with the site qualities, and discussed the effects of some basic wood properties on work before rupture ( $Wb$ ), work after rupture ( $Wa$ ), and Janka specific work ( $\alpha$ ) by static bending tests.

The bending work properties, Tetmajer's coefficient ( $\eta$ ), and  $\alpha$  increased from the pith towards the bark, when Janka plastic modulus ( $Z$ ) was not almost changed or decreased slightly. A significant difference in bending work properties and comparative parameters of work in bending was observed only between site quality A with fast growth and others, and the  $Wb$  in site quality A was 34~37% less than that of others. The percentage  $We$ (elastic work)/ $Wb$  was about 11%, and showed no significant difference between rings and between site qualities.

The effects of specific gravity and micro fibril angle on both  $Wb$  and  $\alpha$  became larger from the pith outward, whereas that of mean ring width of specimen became smaller.

Multiple regression analysis showed that the  $Wb$  and  $\alpha$  were decided obviously by specific gravity, while  $Wa$  was mainly affected by tracheid length.

*Keywords* : bending work, Chinese fir, plantation grown, site quality.

中国広東省にある23年生のコウヨウザン植栽林分の平均樹高の異なるA, B, C及びDの四つの地位から供試木を20本伐採した。これらの供試木を対象に、無欠点小試験体で静的曲げ試験を実施した。コウヨウザンの曲げによる各段階の仕事量の半径方向の変動及び地位による影響を明らかにし、さらに曲げ破壊仕事量と曲げ破壊後仕事量及びヤンカ比仕事量と比重、年輪幅などの関係について検討を行った。

曲げによる各段階の仕事量、テトマイヤー係数及びヤンカ比仕事量は髓から樹皮にむけて増加する傾向を示すが、塑性を表すヤンカじん性係数はほとんど変わらないか減少する傾向を示した。また、これらの値はほとんどの場合、成長良好のA地位と他の地位との間にのみ有意差が認められ、A地位の破壊仕事量は他の地位のそれより約34~37%小さかった。しかし、弾性域仕事量と破壊仕事量の比は年輪間にも地位間にも有意差が認められず、常に約11%であった。

破壊仕事量及びヤンカ比仕事量に及ぼす比重及びマイクロフィブリル傾角の影響は髓から樹皮に向けて強くなる一方、年輪幅のそれは弱くなる傾向を示した。

また、破壊仕事量及びヤンカ比仕事量は主として比重に左右されるが、破壊後仕事量は仮道管長に最も大きく影響された。

\*1 Received September 11, 1998; accepted March 29, 1999.

\*2 高知大学農学部 Faculty of Agriculture, Kochi University, Nankoku 783-8502

## 1. はじめに

曲げ仕事量は木材が荷重によって曲げ破壊されるまでの間に吸収されるエネルギーで, Fig. 1 の面積  $OP_m Y_m$  で示され, 構造材料としてはこの面積の大きいものがよいとされている<sup>1,2)</sup>。しかし, 弾性率が大きくて破壊変形が小さいものでも, 弾性率が小さくて破壊変形が大きいものでも, 等しい曲げ仕事量になることがあるので, これだけでは品質の標準にならない。したがって, 独, 仏では曲げ仕事量による材質評価法の一つとして, 曲げ仕事量/(曲げ破壊荷重  $P_m \times$  曲げ破壊時のたわみ  $Y_m$ ) の値であるテトマイヤー係数(完満度)  $\eta$  を用い,  $\eta$  は中等品の構造材料では0.70程度の値で, 欠陥, 節及び割れなどをもつ材では0.5ぐらいにまで低くなるといわれている<sup>3)</sup>。また, 他の評価方法に曲げ仕事量/ $Y_m$  の値であるヤンカ比仕事量  $\alpha$  及び ( $Y_m$ -比例限度におけるたわみ  $Y_p$ )/( $P_m$ -比例限度における荷重  $P_p$ ) の値であるヤンカじん性係数  $Z$  がある<sup>1,2,4)</sup>。

コウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata* Hook.)

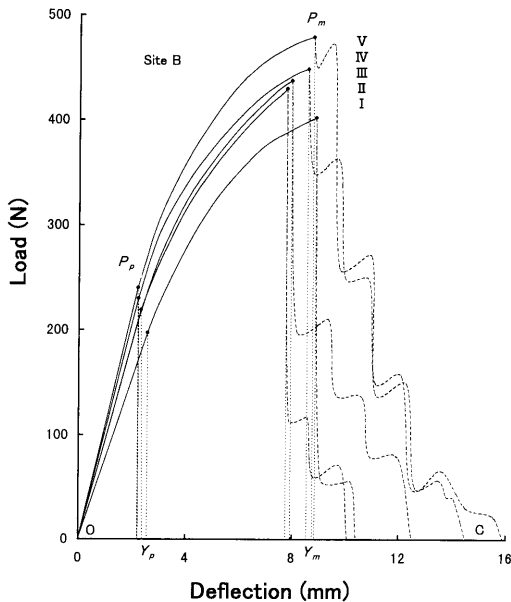


Fig. 1. Average load-deflection curves at different number of rings from the pith in the central position of specimens at site quality B.

Legend:  $P_p$  and  $Y_p$ =load and deflection until proportional limit, respectively,  $P_m$  and  $Y_m$ =maximum load and deflection until failure, respectively. I, II, III, IV, and V represent 2 nd, 6 th, 9 th, 12 th, and 15 th rings from the pith in the central position of specimens, respectively.

の材質についての研究報告は数多く見受けられるが<sup>5)</sup>, 中国で構造材料としてよく使われているコウヨウザン材の曲げ仕事量及び  $\eta$  などの評価指標については, これまでほとんど検討されていない。

そこで本報告では, 中国広東省にあるコウヨウザン植栽林分の平均樹高の異なる四つの地位から伐採された23年生の供試木を対象に, 無欠点小試験体で静的曲げ試験を実施し, 曲げ仕事量及び  $\eta$ ,  $\alpha$  などの評価指標の半径方向における変動及び地位による影響, さらに曲げ仕事量及び  $\alpha$  などの評価指標と比重, 年輪幅, ミクロフィブリル傾角及び仮道管長との関係について検討を行った。

## 2. 試験体及び試験方法

### 2.1 試験体

曲げ試験体は既報<sup>6)</sup>と同じものである。すなわち, 平均樹高の異なる A, B, C 及び D (A, B, C 及び D の平均樹高はそれぞれ 17.5 m, 15.0 m, 11.5 m, 9.7 m, 平均胸高直径はそれぞれ 22.0 cm, 15.9 cm, 11.5 cm, 11.4 cm) の四つの地位において, それぞれのコウヨウザン植栽林分の平均胸高直径にあたる樹木(平均木) 3本, 優勢木 1本及び劣勢木 1本ずつ計20本の供試木(各地位及び各供試木の詳細については既報を<sup>6-8)</sup>参照されたい)を伐採し, 現地で各供試木の胸高部位から上へ長さ0.6 mの丸太を採取した。気乾後に, その丸太断面の大きさに応じて, 髓から樹皮側に, 順に寸法15(半径方向)×10(接線方向)×220(繊維方向) mm, 寸法精度±0.5 mmの無欠点曲げ試験体を A, B, C および D にある供試木からそれぞれ 89, 66, 48, 45個作成した。含水率12%に調湿した後, 試験体の比重(SG)及び平均年輪幅(MRW)を求め, 試験に供した。原則として1試験体に少なくとも1年輪全部を含むようにし, 1試験体に複数年輪を含む場合, その中央部に位置する年輪番号を試験体の年輪番号として取り扱った。

### 2.2 実験方法

最大能力約4.9 kN (500 kg) のオリエンテック社製 RTM シリーズ試験機を用い, スパン20 cm, まさ目面荷重, 変位制御方式で1 mm/min (平均荷重速度約7.8~9.8 MPa/min), 中央集中荷重法で静的曲げ試験を実施した。曲げ挙動を詳しく把握するために, 曲げ試験における荷重-たわみ曲線の走向にしたがって, 試験体が完全に破壊されるまでの全過程を弾性域 (Fig. 1 の  $OP_p$  部分, すなわち比例限度までの部分), 塑性域 (Fig. 1 の  $P_p P_m$  部分, すなわち比例限度から最大荷重までの部分), 曲げ破壊域 (Fig. 1 の  $OP_m$  部分, すなわち最大荷重までの部分=弾性

域+塑性域) および曲げ破壊後域 (Fig. 1 の  $P_mC$  部分, すなわち最大荷重から試験体が完全に破壊されるまでの部分) に分けた。それぞれの領域における荷重-たわみ曲線およびたわみ軸で囲まれる面積とスパン間の試験体体積 ( $V$ ) から, 単位体積当たりの曲げ弾性域仕事量 ( $We$ , Fig. 1 の面積  $OP_pY_p/V$ ), 曲げ塑性域仕事量 ( $Wp$ =塑性域における弾性仕事量と塑性仕事量, Fig. 1 の面積  $Y_pP_pP_mY_m/V$ ), 曲げ破壊仕事量 ( $Wb$ , Fig. 1 の面積  $OP_mY_m/V$ ), 曲げ破壊後仕事量 ( $Wa$ , Fig. 1 の面積  $Y_mP_mC/V$ ),  $\eta$ ,  $\alpha$  および  $Z$  を求めた。曲げ強さおよび曲げヤング係数は既報<sup>6)</sup> の Table 1 に示してある。また, 曲げ破壊後の試験体の両端から長さ 1 cm のブロックを取り, 試験体横断面の中央部に位置する年輪のマイクロフィブリル傾角 ( $MFA$ ) をヨウ素法<sup>9)</sup> で, 仮道管長 ( $TL$ ) を光学顕微鏡で測定し, それぞれの試験体の  $MFA$  及び  $TL$  として取り扱った。

3. 結果と考察

3.1 完全に曲げ破壊されるまでの各段階の仕事量及び  $\eta$  などの評価指標の半径方向における変動

3.1.1 弾性域仕事量 ( $We$ ), 塑性域仕事量 ( $Wp$ ), 破壊仕事量 ( $Wb$ ) 及び破壊後仕事量 ( $Wa$ )

Fig. 2 は各林分の平均木から得た各段階の仕事量を平均した値の半径方向における変化を示すものである。この図に示すように,  $Wb$  と  $Wp$  とともに地位によって多少異なるが, 2 年輪目からおよそ 7~10 年輪まで減少し, その後, 樹皮側に向けて増加する傾向を示した。 $We$  も類似した傾向を示すが,  $Wb$  及び  $Wp$  と比べ, 半径方向における変動は小さかった。Valenzuela H ら<sup>10)</sup> は *Pinus radiata* について,  $Wb$ ,  $Wp$  及び  $We$  とともに 5 年輪までやや減少し, その後樹皮側に向けて増加する傾向があるとし, ほぼ本研究の結果と類似している。しかし, *Pinus radiata* の場合<sup>10)</sup>,  $Wb$ ,  $Wp$  及び  $We$  とともに 5 年輪における最小値から, 15 年輪までにはほぼ倍に増加したのに対し, コウヨウザンでは, それぞれ 16.2%~35.7% ( $Wb$ ), 18.1%~38.7% ( $Wp$ ), 4.9%~22.9% ( $We$ ) しか増加しなかった。この原因としては, Fig. 3 に示すように, コウヨウザンの場合, たとえば, 最大荷重は 6 年輪から 15 年輪までつねに増加するが, *Pinus radiata*<sup>10)</sup> と比べ, 小幅な増加にとどまったためである。最大荷重が 15 年までそれほど増加しないのは既報<sup>6)</sup> に指摘したように, 最大荷重は比重に最も影響され, 比重が 6 年輪から 15 年輪までになわず 4.6~17.7% しか増加しなかったためと考えられる。一方,  $Wa$  はつねに 2 年輪目から樹皮側に向けて増

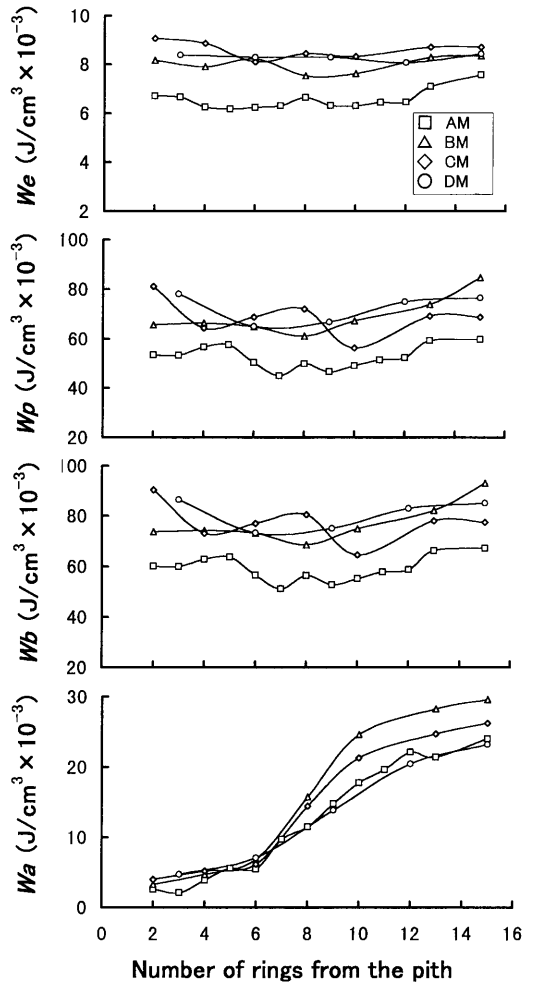


Fig. 2. Variation in  $We$  (elastic work),  $Wp$  (plastic work),  $Wb$  (work before rupture), and  $Wa$  (work after rupture) of specimens with the number of rings from the pith in the central position of specimens.

Legend: AM, BM, CM, and DM represent average of mean trees (approximately equate the average diameter at breast height of trees within a site quality) at site qualities A, B, C, and D, respectively.

加した。これは最大荷重に至った後から完全に破壊されるまで, つねに仮道管相互間及びミセル相互間のすべりや一部の破断を伴うので, 主として髄から樹皮側に向かう仮道管の急激な伸長による仮道管相互接触面の増加,  $MFA$  の減少などが影響したためと考えられる。ただし, Fig. 2 に示すように,  $Wa$  は 6 年輪まで小幅に, そこから 10~13 年輪まで著しく, その後緩やかに増加し, 成長段階によって増加するパターンが異なることが明らかになった。この原因

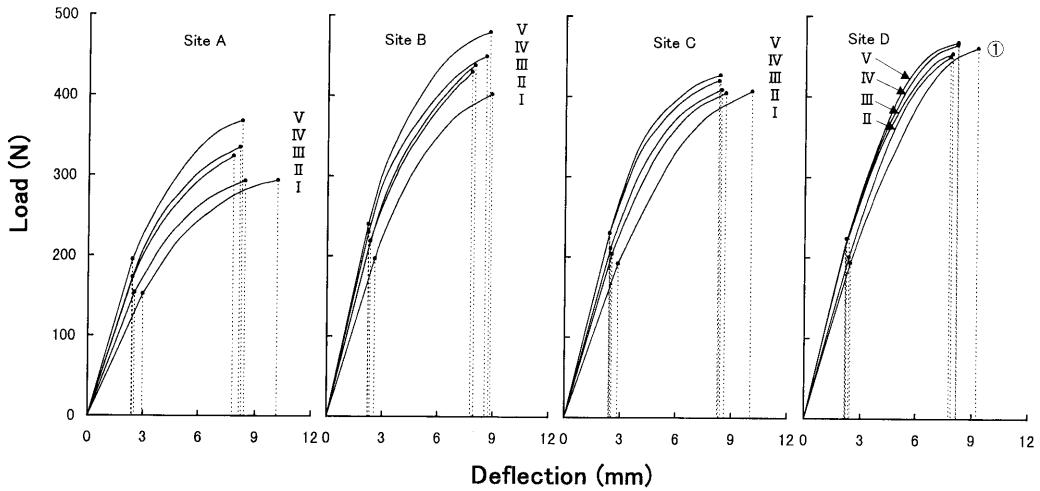


Fig. 3. Average load-deflection curves at different number of rings from the pith in the central position of specimens at site qualities A, B, C, and D, respectively.

Legend: I, II, III, IV, and V are the same as those shown in Fig. 1, and ① represent 3rd rings from the pith in the central position of specimens at site quality D.

Table 1. Averages of bending work and comparative parameters of work in bending at each site quality and analyses of variances of them among site qualities.

| Properties   | Site qualities |             |             |             | F. values         |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
|  | A              | B           | C           | D           |                   |
| $We$ (Elastic work, $J/cm^3 \times 10^{-3}$ )        | 6.5 (19.7)     | 8.1 (13.5)  | 8.5 (26.0)  | 8.4 (17.1)  | 29.6**            |
| $Wp$ (Plastic work, $J/cm^3 \times 10^{-3}$ )        | 50.6 (34.3)    | 68.4 (24.2) | 68.7 (32.9) | 69.8 (22.6) | 19.5**            |
| $Wb$ (Work before rupture, $J/cm^3 \times 10^{-3}$ ) | 57.1 (31.6)    | 76.5 (22.0) | 77.2 (31.5) | 78.2 (20.6) | 21.6**            |
| $Wa$ (Work after rupture, $J/cm^3 \times 10^{-3}$ )  | 12.4 (40.8)    | 16.3 (33.1) | 14.9 (42.7) | 13.3 (31.6) | 2.93*             |
| $\eta$ (Tetmarjer's coefficient)                     | 0.660 (3.9)    | 0.664 (4.5) | 0.655 (4.0) | 0.644 (4.6) | 5.2**             |
| $Z$ (Janka plastic modulus, $cm/N \times 10^{-3}$ )  | 4.11 (30.6)    | 2.72 (15.3) | 3.00 (16.8) | 2.48 (21.6) | 52.7**            |
| $\alpha$ (Janka specific work, N)                    | 207 (19.0)     | 290 (12.4)  | 273 (18.3)  | 292 (14.4)  | 70.8**            |
| $We/Wb$ (%)  | 11.9 (21.7)    | 11.0 (21.2) | 11.3 (18.6) | 11.1 (24.6) | 2.0 <sup>ns</sup> |

Legend: Values in ( ) are coefficients of variations (%); \*\*: Significant at 1% level; \*: Significant at 5% level; <sup>ns</sup>: Not significant.  $\eta$ ,  $Z$ , and  $\alpha^{1-4}$  were determined by the following equations:

$\eta = A / (P_m Y_m)$ ,  $Z = (Y_m - Y_p) / (P_m - P_p)$ , and  $\alpha = A / Y_m$ , respectively, where:  $A$  represents area under load-deflection curve until failure,  $P_p$  and  $Y_p$  represent load and deflection until proportional limit, respectively,  $P_m$  and  $Y_m$  represent maximum load and deflection until failure, respectively.

Note: The number of specimens at site qualities A, B, C, and D were 89, 66, 48, and 45, respectively; sources of the variations derived from among site qualities and within them, and the degrees of freedom were 3 and 244, respectively.

として、たとえば、髓から6年輪までの木部では、 $TL$ が短いこと、 $MFA$ が大きいこと、マイクロフィブリルの骨格を構成するセルロースの結晶化度が低いことなど<sup>11)</sup>によるマイクロフィブリルの質的な差が生じる<sup>12)</sup>こと、及び細胞壁 $S_2$ 層の木化度が低いこと<sup>11)</sup>などによる細胞壁の複合構成成分の凝集力がより小さいことなどによって、 $Wa$ は小幅な増加にとどまったものと考えられる。したがって、髓付近の木部では、 $TL$ がある程度長くなり、 $MFA$ がある程度小さくなくなっても、 $Wa$ はそれほど大きくならな

いことが予測される。

また、 $We$ はTable 1に示すように $Wb$ の約11%しか占めていない。これに対して、*Pinus radiata*<sup>10)</sup>の場合、 $We$ は $Wb$ の約19%を占めている。したがって、コウヨウザンを*Pinus radiata*と比べると、コウヨウザンの曲げ破壊までの仕事量は弾性域の占める割合が小さく、ほとんど塑性域の仕事量に左右されることが分かった。なお、Fig. 4は各林分の平均木から得た $We/Wb$ を平均した値の半径方向における変化を示すものである。この図に示すように、

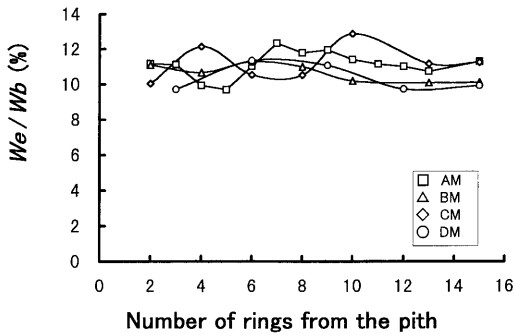


Fig. 4. Variation in percentage of  $We$  to  $Wb$  of specimens with the number of rings from the pith in the central position of specimens. Legend: AM, BM, CM, and DM as well as  $We$  and  $Wb$  are the same as those shown in Fig. 2.

$We/Wb$  は髄から樹皮側に向けて、どの地位でもつねに9~12%の範囲で変動していた。分散分析の結果、年輪部位の間には有意差が存在せず、さらにTable 1に示すように、地位の間にも有意差がなく、すべて約11%である。Valenzuela Hら<sup>10)</sup>は *Pinus radiata* について、 $We/Wb$  は異なる年輪部位の間に有意差が存在せず、つねに19%であると報告している。このことから、成長段階または地位の違いによって、 $We$  と  $Wb$  が変動するのにも関わらず、 $We/Wb$  はコウヨウザンかまたは *Pinus radiata* によってその値が異なるが、つねにある一定値を保つことがいえそうである。ただし、一般論とすれば、さらに樹種を増やして検討しなければならない。

### 3.1.2 テトマイヤー係数( $\eta$ ), ヤンカじん性係数( $Z$ )及びヤンカ比仕事量( $\alpha$ )

Fig. 5は各林分の平均木から得た $\eta$ ,  $Z$ 及び $\alpha$ を平均した値の半径方向における変化を示すものである。Fig. 5に示すように、 $\eta$ はFig. 1に示す荷重-たわみ曲線の完満度で、9年輪までは上下にうねりながらもほとんど変わらないかやや増加し、その後、構造用木材の中等品の $\eta$ 値<sup>3)</sup>にあたる0.70ぐらいまで増加する傾向を示した。これは、樹皮側においては、主に既報<sup>9)</sup>に指摘したMFAの減少及び比重の増加などによる曲げヤング率の上昇、すなわちFig. 1に示す曲線 $OP_pP_m$ の直線部分 $OP_p$ の勾配度が大きくなることと、また、材の粘り強さの増加で樹皮側における試験体が塑性域後期に最大に近い荷重をよりながく受けられるようになり、すなわち塑性域後期の曲線がより緩やかになることによるものと考えられる。また、 $Wb$ と $\eta$ の正の相関は高く、ホンシュウアカマツでは決定係数 $R^2=0.55$ であると報

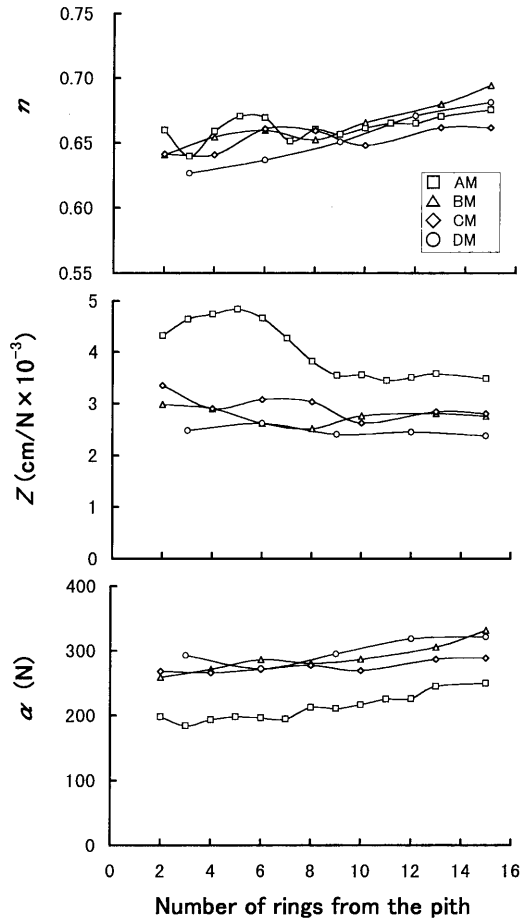


Fig. 5. Variation in  $\eta$  (tetmajer's coefficient),  $Z$  (janka plastic modulus),  $\alpha$  (janka specific work) of specimens with the number of rings from the pith in the central position of specimens.

Legend: AM, BM, CM, and DM are the same as those shown in Fig. 2.

告されているが<sup>4)</sup>, コウヨウザンの場合、6年輪までは $R^2=0.25$ , 7~11年輪の間は $R^2=0.33$ , その後 $R^2=0.61$ で、 $Wb$ と $\eta$ の正の相関は髄付近の木部においては低く、樹皮側に向けて高くなった。この結果から、コウヨウザンの構造材の強度的品質指標としては、髄付近の未成熟材においては、 $Wb$ と $\eta$ を同時に考慮しなければならないが、成熟材においては、 $Wb$ のみでもさしつかえないであろう。

一方、塑性を表す $Z$ は9年輪まではより大きく、変化しながらも減少し、その後ほとんど変わらないかやや減少する傾向で推移した。これは樹皮側における試験体と比較すれば、髄付近の試験体においては、より低い比重と最も大きいMFAによって、材

の荷重に対する抵抗が弱く, Fig. 1 に示すように, より小さい荷重の増加 (最大荷重  $P_m$ -比例限度荷重  $P_p$ ) でより大きな塑性たわみ (最大たわみ  $Y_m$ -比例限度たわみ  $Y_p$ ) が生じたためである。

また,  $\alpha$  は曲げ破壊仕事量と最大たわみとの比を表すもので, 髓から樹皮に向けてやや増加する傾向を示した。これは髓から樹皮に向けての比重の増加及び  $MFA$  の減少などによって, 樹皮側の試験体は荷重に対する抵抗が強くなり, Fig. 1 で分かるように,  $P_m$  は樹皮側の方が髓側より常に大きくなるのに対し,  $Y_m$  は  $P_m$  に比例して増大せず,  $P_m/Y_m$  が大きくなったためである。

### 3.1.3 地位の影響

分散分析の結果, Table 1 に示すように,  $We/Wb$  を除き, 各段階の仕事量及び  $\eta$  などの評価指標のいずれにおいても地位間の差はすべて 5% レベルかまたはそれ以上で有意である。しかし, さらに地位相互間のそれぞれの平均値の有意差の  $t$  検定の結果は Table 2 に示すように,  $Wa$  と  $\eta$  を除き, ほとんどの場合, 成長良好の A 地位と他の地位との間のみ有意差が存在し, たとえば A 地位の  $Wb$  は他の地位のそれより約 34~37% 小さいことが明らかになった (Fig. 2, Fig. 5 参照)。これは, 主に Fig. 3 に示す各地位の荷重-たわみ曲線から分かるように, 地位間のたわみにそれほど差がないのに対して, A 地位と他の地位との間に生じた明らかな最大荷重の差に起因すると見られる。最大荷重の差はコウヨウザンの曲げ強さの変動の 75% 以上を比重で説明できる<sup>9)</sup> ことから, 主として A 地位と他の地位との間に存在する比重の大きな差<sup>9)</sup> によるものと考えられる。肥大成長率と晩材率との間に負の相関が存在し, かつ地位の土壤の水分含有量が早材・晩材密度に負の影響を与える<sup>8)</sup> ので, 他の地位との間に大きな肥大成長率及び土壤の水分の差が存在する成長の良い A 地位<sup>7,8)</sup> は他の地位との間に大きな比重の差が生じたことによるものである。

中国の南方の農村地帯においては, これまでに樹齢約 10 年の若令のコウヨウザン間伐木は一般的に住宅の母屋, 直径が大きいものは梁などの構造材として利用されている。しかし, 以上の  $Wb$  及び  $\eta$  などの半径方向の変動から見れば,  $Wb$  がそれほど小さくならなくても,  $\eta$  が 0.63~0.65<0.70 である。また, Fig. 1 に示すように, 破壊後の荷重は樹皮側ではたわみが進むにつれて多段階に分けて次第に消失するのに対し, 髓付近では急に消失し,  $Wa$  はほとんど存在せず, 瞬間的に完全に破壊する恐れがある。これらのことから, 若令の間伐木は欠点材として取り扱うべきであろう。さらに, 成長良好な水分含有量高い湿型の土壤である A 地位は  $\eta$  を除いて,  $Wb$  及び  $\alpha$  などは他の地位と比べ最も小さく,  $Wb$  及び  $\eta$  などを同時に考慮すると, 材の強度的品質指標が最も低く, 成長率及び土壤の水分含有量が強度的品質指標に負の影響を与えることから, 適当な成長率 (たとえば, 既報<sup>9)</sup> に指摘したように, 年輪幅を 5 mm 以内) と水分含有量の中庸な潤型の土壤の地位が望ましいことが明らかになった。

### 3.2 $Wb, Wa, \alpha$ に及ぼす $SG, MRW, MFA$ 及び $TL$ の影響について

木材のじん性は木材の多くの力学特性に依存し, 外力による破壊に対する抵抗の強さを表す重要な性質である。 $\alpha$  は試験体が破壊するまでに外力によってなされた仕事量を表しており,  $\alpha$  が大きければ試験体が外力の破壊に対する抵抗も強い, すなわち材料のじん性が大きいことを意味する。したがって,  $Wb, Wa$  及び  $\alpha$  を目的変数,  $SG, MRW, MFA$  及び  $TL$  を説明変数として, 重回帰分析を, さらに変数増減法で重回帰分析を行い, それらの結果をそれぞれ Table 3 と Table 4 に示した。

まず,  $SG$  は  $Wb$  及び  $\alpha$  との間に正の相関が認められ, かつこれらの相関係数の変動から,  $SG$  の影響は髓から樹皮側に向けて大きくなることが明らかになった。これは主に未成熟材における早材の比重,

Table 2. Results of  $t$  test between site qualities for bending work and comparative parameters of work in bending.

| Properties | A-B                 | A-C                 | A-D                 | B-C                 | B-D                 | C-D                 |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $We$       | -8.54**             | -6.84**             | -7.83**             | -1.18 <sup>ns</sup> | -1.01 <sup>ns</sup> | 0.33 <sup>ns</sup>  |
| $Wp$       | -6.38**             | -5.25**             | -6.23**             | -0.08 <sup>ns</sup> | -0.44 <sup>ns</sup> | -0.27 <sup>ns</sup> |
| $Wb$       | -6.74**             | -5.51**             | -6.61**             | -0.18 <sup>ns</sup> | -0.52 <sup>ns</sup> | -0.23 <sup>ns</sup> |
| $Wa$       | -2.75*              | -1.78 <sup>ns</sup> | -0.70 <sup>ns</sup> | 0.74 <sup>ns</sup>  | 1.71 <sup>ns</sup>  | 0.95 <sup>ns</sup>  |
| $\eta$     | -0.78 <sup>ns</sup> | 1.21 <sup>ns</sup>  | 3.33**              | 1.67 <sup>ns</sup>  | 3.43**              | 1.90 <sup>ns</sup>  |
| $Z$        | 8.53**              | 5.92**              | 8.32**              | -3.26**             | 2.61*               | 4.85**              |
| $\alpha$   | -13.39**            | -8.64**             | -11.55**            | 2.06*               | -0.24 <sup>ns</sup> | -1.93 <sup>ns</sup> |

Note:  $We, Wp, Wb, Wa, \eta, Z, \alpha, *$ , \*\*, and <sup>ns</sup> are described in Table 1.

Table 3. Correlation coefficient  $R$  by liner regression for  $Wb$ ,  $Wa$ , and  $\alpha$  versus basic wood properties.

| Range of annual rings | Basic wood properties | $Wb$           | $Wa$           | $\alpha$       |
|-----------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2-6 th ring           | SG                    | $R=0.73^{**}$  | $R=0.33^{**}$  | $R=0.84^{**}$  |
|                       | MRW                   | $R=-0.57^{**}$ | $R=-0.47^{**}$ | $R=-0.73^{**}$ |
|                       | MFA                   | $R=-0.04^{ns}$ | $R=-0.64^{**}$ | $R=-0.31^{**}$ |
|                       | TL                    | $R=0.05^{ns}$  | $R=0.68^{**}$  | $R=0.20^*$     |
| 7-11 th ring          | SG                    | $R=0.77^{**}$  | $R=0.29^{**}$  | $R=0.83^{**}$  |
|                       | MRW                   | $R=-0.54^{**}$ | $R=-0.64^{**}$ | $R=-0.68^{**}$ |
|                       | MFA                   | $R=-0.30^{**}$ | $R=-0.79^{**}$ | $R=-0.48^{**}$ |
|                       | TL                    | $R=0.03^{ns}$  | $R=0.85^{**}$  | $R=0.14^{ns}$  |
| 12-15 th ring         | SG                    | $R=0.84^{**}$  | $R=0.36^{**}$  | $R=0.91^{**}$  |
|                       | MRW                   | $R=-0.50^{**}$ | $R=-0.31^{**}$ | $R=-0.61^{**}$ |
|                       | MFA                   | $R=-0.49^{**}$ | $R=-0.74^{**}$ | $R=-0.60^{**}$ |
|                       | TL                    | $R=0.24^*$     | $R=0.79^{**}$  | $R=0.28^{**}$  |
| Total                 | SG                    | $R=0.77^{**}$  | $R=0.33^{**}$  | $R=0.84^{**}$  |
|                       | MRW                   | $R=-0.49^{**}$ | $R=-0.44^{**}$ | $R=-0.65^{**}$ |
|                       | MFA                   | $R=-0.13^{ns}$ | $R=-0.73^{**}$ | $R=-0.41^{**}$ |
|                       | TL                    | $R=0.06^{ns}$  | $R=0.77^{**}$  | $R=0.30^{**}$  |

Note: The SG, MRW, TL, and MFA represent specific gravity, mean ring width, tracheid length, and microfibril angle, respectively.  $Wb$ ,  $Wa$ ,  $\alpha$ , \*, \*\*, and <sup>ns</sup> are described in Table 1.

Table 4. Multiple correlation coefficient squared ( $R^2$ ) for the best one-, two-, and three-variable models as well as for four-variable models.

| Dependent variables | Independent variables in models and associated $R^2$ |                          |                            |                                |
|---------------------|--|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|                     | Best one-variables model                             | Best two-variables model | Best three-variables model | Four-variables model           |
|                     | 2-6 th ring  |                          |                            |                                |
| $Wb$                | SG, $R^2=0.54$                                       | SG, MRW; $R^2=0.55$      | SG, MRW, MFA; $R^2=0.55^a$ | SG, MRW, MFA, TL; $R^2=0.55^a$ |
| $\alpha$            | SG, $R^2=0.70$                                       | SG, MFA; $R^2=0.77$      | SG, MFA, MRW; $R^2=0.79$   | SG, MFA, MRW, TL; $R^2=0.79^a$ |
| $Wa$                | TL, $R^2=0.47$                                       | TL, MRW; $R^2=0.50$      | TL, MRW, SG; $R^2=0.51$    | TL, MRW, SG, MFA; $R^2=0.51^a$ |
|                     | 7-11 th ring   |                          |                            |                                |
| $Wb$                | SG, $R^2=0.59$                                       | SG, MRW; $R^2=0.60$      | SG, MRW, MFA; $R^2=0.60^a$ | SG, MRW, MFA, TL; $R^2=0.60^a$ |
| $\alpha$            | SG, $R^2=0.68$                                       | SG, MFA; $R^2=0.72$      | SG, MFA, MRW; $R^2=0.74$   | SG, MFA, MRW, TL; $R^2=0.74^a$ |
| $Wa$                | TL, $R^2=0.73$                                       | TL, MRW; $R^2=0.76$      | TL, MRW, SG; $R^2=0.77$    | TL, MRW, SG, MFA; $R^2=0.77^a$ |
|                     | 12-15 th ring  |                          |                            |                                |
| $Wb$                | SG, $R^2=0.71$                                       | SG, MRW; $R^2=0.72$      | SG, MRW, MFA; $R^2=0.73$   | SG, MRW, MFA, TL; $R^2=0.74$   |
| $\alpha$            | SG, $R^2=0.82$                                       | SG, MFA; $R^2=0.87$      | SG, MFA, MRW; $R^2=0.88$   | SG, MFA, MRW, TL; $R^2=0.88^a$ |
| $Wa$                | TL, $R^2=0.62$                                       | TL, MRW; $R^2=0.64$      | TL, MRW, SG; $R^2=0.65$    | TL, MRW, SG, MFA; $R^2=0.66$   |
|                     | Total  |                          |                            |                                |
| $Wb$                | SG, $R^2=0.59$                                       | SG, MRW; $R^2=0.60$      | SG, MRW, MFA; $R^2=0.60^a$ | SG, MRW, MFA, TL; $R^2=0.60^a$ |
| $\alpha$            | SG, $R^2=0.70$                                       | SG, MFA; $R^2=0.77$      | SG, MFA, MRW; $R^2=0.78$   | SG, MFA, MRW, TL; $R^2=0.78^a$ |
| $Wa$                | TL, $R^2=0.59$                                       | TL, MRW; $R^2=0.62$      | TL, MRW, SG; $R^2=0.63$    | TL, MRW, SG, MFA; $R^2=0.64$   |

Note:  $Wa$ ,  $Wb$ ,  $\eta$ , and  $\alpha$  are described in Table 1. SG, MRW, MFA, and TL are described in Table 3.

<sup>a</sup>Addition of this variable not significant ( $P>0.05$ ).

晩材の比重と力学的性能との間のそれぞれの関係に差異があるためと考えられる。太田ら<sup>12)</sup>はスギ、ヒノキについて、未成熟材の範囲では、晩材の比重と動的ヤング率との間には直線的な正の相関があるが、早材の比重と動的ヤング率との間には必ずしも正の相関が認め難いと報告している。つまり、コウヨウザンにおいては、髄付近の木部では、既報<sup>9)</sup>に示

したように、晩材率が最も小さく、早材の性質は試験体全体の性質に大きな影響を及ぼし、その後晩材率の上昇に伴って、晩材の影響が次第に大きくなることによって、力学的特性への比重の影響も大きくなることが予測される。

MRWは $Wb$ 及び $\alpha$ との間に負の相関が認められ、かつこれらの相関係数の半径方向における変動

から,  $MRW$  の影響は髄から樹皮側に向けて小さくなると考えられる。これは Table 3 に示す各相関係数を比較すれば, 分かるように,  $Wb$  及び  $\alpha$  への影響は比重が最も大きく, 比重は既報<sup>9)</sup> で報告したように, 年輪幅との負の相関性が髄からの年輪数の増加に伴って低下するためである。

$MFA$  は  $Wb$  及び  $\alpha$  に負の影響を及ぼすが, それぞれの相関係数の変動からすれば, これらの影響は髄付近の木部では小さく, その後より大きくなると見られる。この影響の差異は異なる成長段階での  $MFA$  の大きさとマイクロフィブリルの骨格を構成するセルロースの結晶構造などの差異に関係があると考えられる。たとえば, 髄付近の木部では, コウヨウザンのセルロースの結晶化度が最も低い<sup>11)</sup> ため, 構成しているマイクロフィブリルの質がわるく, かつ  $MFA$  が大きいことから,  $MFA$  がある程度小さくなくても, 力学的性能はそれほど変わらないと予想される。その後, 結晶化度の向上によるマイクロフィブリルの質的向上と  $MFA$  がさらに小さくなることにより, 力学的性能への  $MFA$  の影響は次第に強くなる。

$TL$  は Table 3 に示したように, 他の変数と比べると,  $Wb$  及び  $\alpha$  への影響はほとんどないか最も小さい。しかし,  $Wa$  については,  $TL$  の影響は最も大きく, かつこの影響は7年輪から11年輪までの範囲で特に大きかった。異なる成長段階で  $Wa$  への  $TL$  の影響が変わる原因は明確ではないが, 恐らく仮道管長の量的な変化と仮道管の質的な変化及び化学成分の変動による仮道管間層の凝集力の変化などによるものと考えられる。

さらに, 重回帰分析の結果から見れば,  $Wb$  及び  $\alpha$  のいずれに対しても, 四つの説明変数の中では,  $SG$  の影響が最も大きく,  $TL$  はほとんど影響を与えなかった。 $MRW$  及び  $MFA$  の影響は目的変数又は成長段階によって異なり,  $Wb$  については,  $MRW > MFA$  となるのに対して,  $\alpha$  については,  $MFA > MRW$  となった。一方,  $Wa$  については,  $TL$  の影響が最も大きく, ついで  $MRW > SG > MFA$  の順となった。

#### 4. 結 論

コウヨウザンの植栽木の曲げ仕事量の挙動を明らかにするために, 試験体が完全に破壊されるまでの各段階の仕事量,  $\eta$  及び  $\alpha$  などの評価指標の半径方向の変動及び地位による影響, さらに  $Wb$  と  $Wa$  及び  $\alpha$  と  $SG$ ,  $MRW$ ,  $MFA$  及び  $TL$  の関係について

検討し, 次の結論を得た。

1) 曲げによる各段階の仕事量,  $\eta$  及び  $\alpha$  は髄付近のある年輪部位から樹皮にむけて増加する傾向を示すが,  $Z$  はほとんど変わらないか減少する傾向を示した。また, これらの値はほとんどの場合, 成長良好のA地位と他の地位との間にのみ有意差が存在し, A地位の  $Wb$  は他の地位のそれより, 約34~37%小さいことが明らかになった。しかし,  $We/Wb$  は年輪間にも地位間にも有意差が存在せず, 常に約11%であった。

2)  $Wb$  及び  $\alpha$  に及ぼす  $SG$  及び  $MFA$  の影響は髄から樹皮に向けて強くなる一方,  $MRW$  のそれは弱くなる傾向を示した。

3) 重回帰分析の結果,  $Wb$  及び  $\alpha$  は主として  $SG$  に左右されるが,  $Wa$  は  $TL$  に最も大きく影響された。

#### 文 献

- 1) 小野和雄：“木材物理実験書”，農業図書株式会社，1973，pp. 150-154.
- 2) 北原覚一：“木材物理”，森北出版株式会社，1970，pp. 151-152.
- 3) Kollmann, Franz F. P., Cote, W. A.: “Principles of Wood Science and Technology I-Solid Wood”, Springer-Verlag, 1968, pp. 364-365.
- 4) 日本材料学会木質材料部門委員会：“木材工学辞典”，工業出版株式会社，1982，pp. 600-601.
- 5) 成俊卿, 楊家駒, 劉 鵬：“中国木材誌”，中国林業出版社，1992，pp. 86-88.
- 6) 劉元, 中山義雄：木材学会誌 44(6), 387-394 (1998).
- 7) Liu, Y., Nakayama, Y., Fujiwara, S.: Proceeding of the CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec, Canada, 1997, pp. V41-48.
- 8) 劉元, 中山義雄, 平川泰彦：木材学会誌 44(3), 153-161 (1998).
- 9) 小野和雄：“木材物理実験書”，農業図書株式会社，1973，pp. 121-122.
- 10) Valenzuela H. L. A., Nakayama, Y.: *Mokuzai Gakkaishi* 37, 396-404 (1991).
- 11) Qin, T. F., Lu, X. X.: *World Forest Research*, 7 (Special Issue), 65-81 (1994).
- 12) 太田貞明：九州大演習林報 No. 45, 1-80 (1972).