



Title	あて材の力学的性質に関する研究：第2報 イチョウ，ヤマナラシおよびヤチダモ材の弾性定数
Author(s)	上田, 恒司; UEDA, Koji
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 30(2), 379-388
Issue Date	1973-12
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/20927">https://hdl.handle.net/2115/20927</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	30(2)_P379-388.pdf



# あて材の力学的性質に関する研究

第2報 イチョウ, ヤマナラシおよび  
ヤチダモ材の弾性定数

上 田 恒 司\*

## Studies on the Mechanical Properties of Reaction Woods

Report 2. The Elastic Constants of Ichô (*Ginkgo biloba*  
L.), Yamanarashi (*Populus sieboldii* MIQ.) and  
Yachidamo (*Fraxinus mandshurica*  
var. *japonica* MAXIM.)

By

Koji UEDA

### 目 次

まえがき	379
1. 実験方法	380
1.1 試料	380
1.2 曲げ試験	380
1.3 振り試験	380
2. 結果と考察	381
2.1 比重	381
2.2 ヤング係数 ( $E$ )	381
2.3 せん断弾性係数 ( $G$ )	382
2.4 あて材の弾性定数	384
2.5 $E/G$ および曲げ振り弾性係数 ( $\sqrt{EG}$ )	385
3. 要約	387
文献	387
Summary	388

### まえがき

前報<sup>1)</sup>では、あて材をもつトドマツ丸太のあて材部およびあて材のない部分からそれぞれ採取した気乾試験片について、比重、曲げヤング係数、せん断弾性係数などを測定し、あて材部においてヤング係数 ( $E$ ) が小さく、せん断弾性係数 ( $G$ ) が大きくなるという結果を得た。ま

\* 北海道大学農学部 林産学科 木材加工学教室

Laboratory of Wood and Wood Products Engineering, Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaidô University, Sapporo.

た、 $E/G$ を材質を表現するひとつの特性値と考えると、トドマツ正常材ではこの値が13~22の範囲にあり、あて材ではこれよりも小となって、典型的なあて材では約5まで低下することが知られた。

本報では以上のような結果が他の樹種についても見られるかどうか等についてさらに検討する目的で、あて材をもつイチョウ、ヤマナランおよびヤチダモの気乾材について前報と同様の試験をおこなった結果を報告する。

## 1. 実験方法

### 1.1 試料

供試材は、北海道大学演習林実験苗畑産のイチョウおよびヤマナラン材、札幌市北区篠路産のヤチダモ材各1本である。

イチョウ丸太は直径約25 cmで樹幹のまがりや偏心生長がほとんど見られなく、製材後にはじめて、特有の色調をもつ圧縮あて材の存在がみとめられたもので、通常のばあいのように、試験片の採取位置を傾斜樹幹の上側あるいは下側と区分することが困難であった。このため、イチョウ材では、赤褐色の圧縮あて材を含む試験片とこれを含まないものとを肉眼的に区分し、それぞれをあて材および正常材と称することとした。

ヤマナラン丸太は直径約30 cmで、ゆるいS字形に彎曲しており、傾斜の上側には色が淡く、引張あて材特有の絹糸状の光沢をもつ材部がみとめられた。

ヤチダモの試験片は直径約22 cmの傾斜木から採取したが、傾斜の上側にはヤマナランのばあいと同様の引張あて材と判断される材部がみとめられた。ヤマナランおよびヤチダモ材では、傾斜樹幹の上側で引張あて材特有の光沢のみられる材部を含む試験片をあて材、これ以外の部分からのものを正常材とした。

試験片は気乾状態に達した材から木取り、その寸法はイチョウおよびヤチダモでは $50 \times 2.5 \times 2.5$  ( $L \times T \times R$  cm)、ヤマナランでは $34 \times 2 \times 2$  ( $L \times T \times R$  cm)である。比重の測定はこの寸法の試験片についておこなった。試験時の含水率は10~14%の範囲であった。

### 1.2 曲げ試験

イチョウおよびヤチダモ材ではスパン $l=45$  cm、荷重は30 kgまで、ヤマナラン材ではスパン $l=32$  cm、荷重は12 kgまでで、いずれも中央集中荷重である。撓みは荷重点において精度 $1/100$  mmのダイヤルゲージをもちいて測定した。このばあいの曲げ応力はイチョウおよびヤチダモで約 $110 \text{ kg/cm}^2$ 、ヤマナランでは約 $70 \text{ kg/cm}^2$ である。

### 1.3 振り試験

曲げ剛性試験を終了した試験片をそのまま振り試験に使用した。捩れ角測定区間はイチョウおよびヤチダモで140 mm、加えたトルクは $60 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 、ヤマナランではそれぞれ160 mm、 $20 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ である。このばあいのせん断応力はイチョウおよびヤチダモで約 $17 \text{ kg/cm}^2$ 、ヤマナ

ランでは約  $12 \text{ kg/cm}^2$  となる。なおこの試験から算出されるせん断弾性係数は、板目面の  $G_{LR}$  および柁目面の  $G_{LR}$  の合成値としての見かけの  $G$  である。

## 2. 結果と考察

### 2.1 比 重

各樹種の正常材およびあて材の比重を Table 1 に示す。いずれの樹種においても、あて材の平均比重は正常材のそれに比較して大きくなっているが、参考を示した前報のトドマツ材のばあいほど差はない。これは本報でとりあげた樹種の比重の出現範囲がそれぞれあまり広くなかったこと、あての程度がトドマツ材のばあいほど顕著ではなかったこと、あるいは、試験片がかなり大形であるため、1 試片内であて材部と正常材部の混在が避けられなかったことなどが原因と考えられる。

Table 1. Specific gravity of specimens

Species	Type* of Wood	Specific Gravity**			Number of Specimen
		min.	av.	max.	
<i>Abies sachalinensis</i> <sup>1)</sup>	N	0.376	<b>0.396</b>	0.420	31
	C	0.423	<b>0.566</b>	0.705	31
<i>Ginkgo biloba</i>	N	0.407	<b>0.450</b>	0.490	25
	C	0.427	<b>0.489</b>	0.529	18
<i>Populus sieboldii</i>	N	0.372	<b>0.418</b>	0.542	27
	T	0.422	<b>0.491</b>	0.560	12
<i>Fraxinus mandshurica</i> var. <i>japonica</i>	N	0.614	<b>0.654</b>	0.708	22
	T	0.625	<b>0.689</b>	0.765	25

\* N=Normal Wood; C=Compression Wood; T=Tension Wood.

\*\* Moisture Content=10~14%

### 2.2 ヤング係数 ( $E$ )

Fig. 1(a) に示すように、イチョウの正常材のヤング係数は大部分のものが約  $80 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  の範囲にあり、比重にやや比例する傾向がみられる。これに対してあて材では、ヤング係数の低下が著しく、比重が 0.5 を超えるあての顕著な試験片のヤング係数は約  $40 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  となり、あてのみられない材の半分の値となっている。あて材ヤング係数のこのような低下の傾向は前報のトドマツ材のばあいと全く同様であり、これは次に示す広葉樹材のばあいに比較すると非常に興味深いものとなる。

ヤマナラシ材のヤング係数は Fig. 1(b) のように正常材で約  $50 \times 10^3 \sim 80 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  となり、かなり範囲は広いがほぼ一様なし比重の増加とともにやや減少する傾向がみられるのに対して、あて材では比重とともに増加し、 $110 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  を超えるものも現われた。この傾向

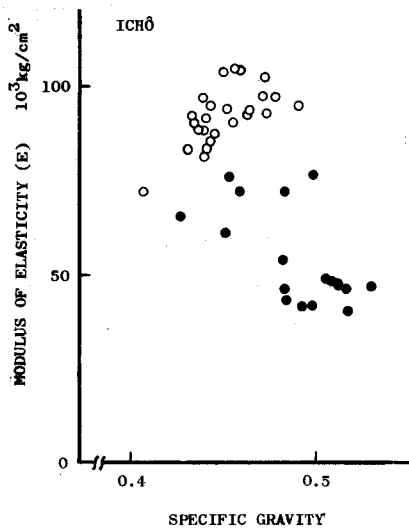


Fig. 1(a). Relation between specific gravity and modulus of elasticity ( $E$ )—*Ginkgo biloba*  
○ = Normal wood; ● = Compression wood

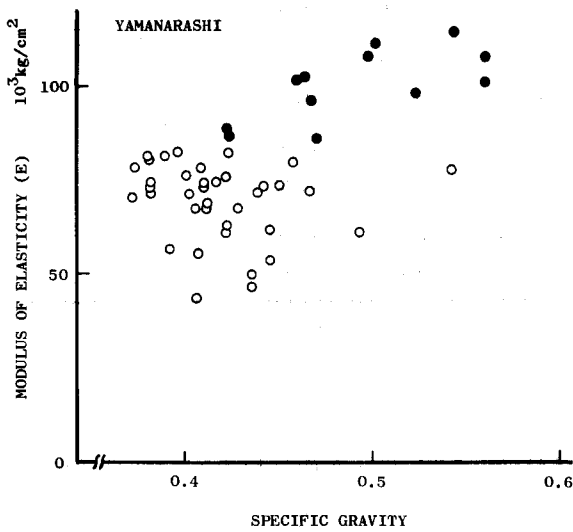


Fig. 1(b). Relation between specific gravity and modulus of elasticity ( $E$ )—*Populus sieboldii*  
○ = Normal wood; ● = Tension wood

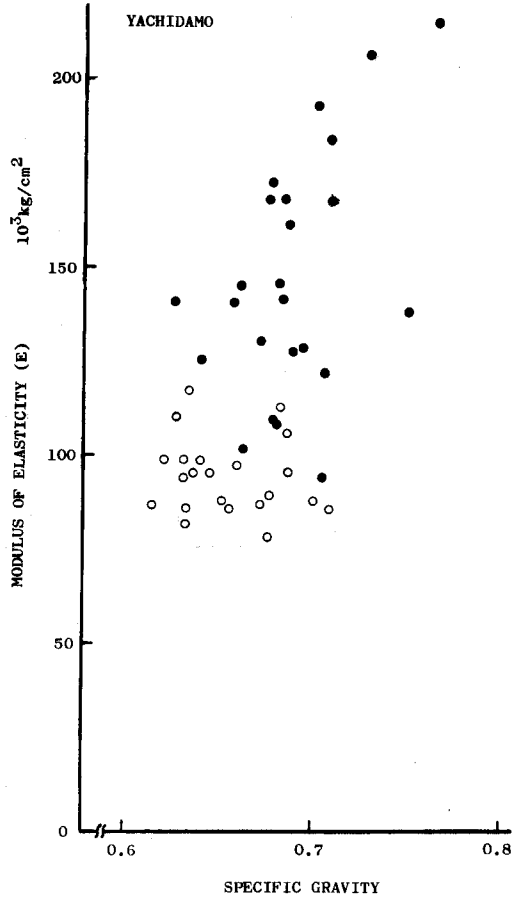


Fig. 1(c). Relation between specific gravity and modulus of elasticity ( $E$ )—*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*  
○ = Normal wood; ● = Tension wood

はヤチダモ材について示した Fig. 1(c)でさらに明瞭である。

ヤチダモでは、正常材のヤング係数が  $100 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  前後であるのに対してあて材のヤング係数は、比重がそれほど大きくはならないにもかかわらず、

はるかに大きな値を示し、 $200 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  を超えるものもみられた。このように、あて材でヤング係数が大きくなるのは、トドマツおよびイチョウ材のばあいと全く逆の現象である。

### 2.3 せん断弾性係数 ( $G$ )

イチョウ材のせん断弾性係数は、正常材で約  $8 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、あて材で約  $10 \times 10^3$

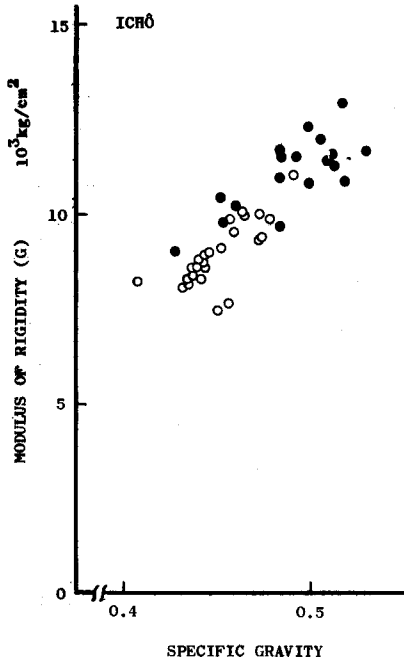


Fig. 2(a). Relation between specific gravity and modulus of rigidity ( $G$ )—*Ginkgo biloba*  
 ○ = Normal wood  
 ● = Compression wood

~ $12 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  となり、両方の材部を通じて比重に比例して大きくなる傾向が Fig. 2(a) で示されており、あて材が正常材をいくらか上まわっている。これはトドマツ材のばあいと全く同様の関係である。

これに対してヤマナラシ材のせん断弾性係数は、Fig. 2(b) に示すように、比重に比例してはいるが、このばあいはあて材が正常材を下まわっている。

ヤチダモ材のせん断弾性係数は Fig. 2(c) のように、正常材で約  $11 \times 10^3 \sim 13 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  の範囲に集中しているのに対してあて材では  $10 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  以下のものが多く現われてくる。このように、あて材のせん断弾性係数は針葉樹材で大となり、広葉

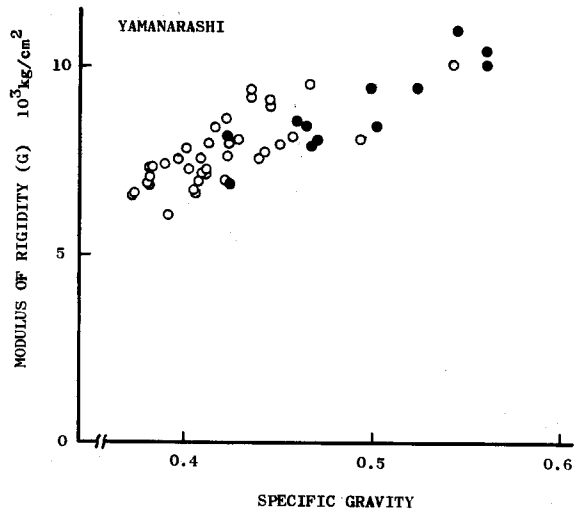


Fig. 2(b). Relation between specific gravity and modulus of rigidity ( $G$ )—*Populus sieboldii*  
 ○ = Normal wood; ● = Tension wood

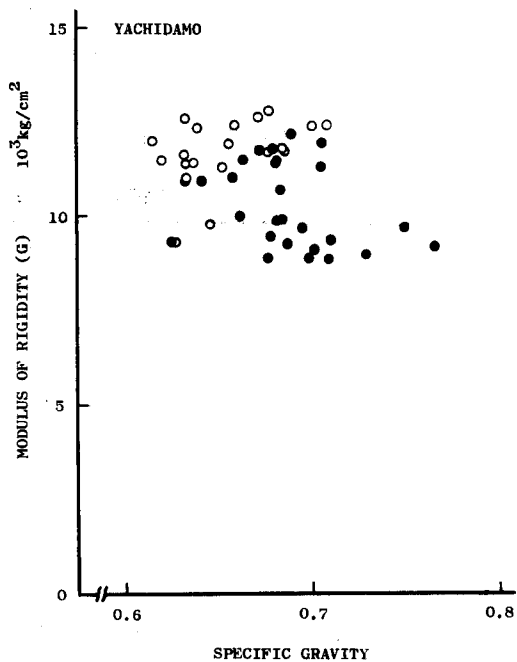


Fig. 2(c). Relation between specific gravity and modulus of rigidity ( $G$ )—*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*  
 ○ = Normal wood; ● = Tension wood

樹材で小となって、ヤング係数のばあいと正反対の関係を示すのである。

#### 2.4 あて材の弾性定数

以上のように、あて材のヤング係数とせん断弾性係数の関係が針葉樹のトドマツおよびイチョウと広葉樹のヤマナラシおよびヤチダモとでは逆になることが実験から明らかになった。前報ではこの理由のひとつとして針葉樹あて材のフィブリル傾角をあげた。つまり、針葉樹あて材細胞においてS2層のフィブリル傾角が正常材のそれよりも大きくなる<sup>2)</sup>という事実から、圧縮あて材細胞のヤング係数の減少および隣接する細胞膜相互の拘束効果の増大によるせん断弾性係数の増加が、直交合板の実験<sup>3)</sup>との類似から、定性的に説明されるのである。今回の実験では、イチョウあて材がトドマツあて材と同様の挙動を示すことが明らかとなり、これに対しても上記の解釈があてはまる。さらに、引張あて材におけるゼラチン層のフィブリル傾角が小さいこと<sup>2)</sup>を考慮すれば、ヤマナラシおよびヤチダモあて材のヤング係数の増加とせん断弾性係数の減少が予想される。

また一方では、あて材の比重の増加が細胞膜厚の増加に由来すると考えると、これの寸法効果による剛性の増加も考えられる。この観点からみると、圧縮あて材におけるヤング係数の減少は、膜厚の寸法効果による剛性の増加よりも膜そのもののヤング係数の低下の方が大きいためであり、せん断弾性係数の増加は細胞膜の相互の拘束作用によるせん断性能の向上と寸法効果の相乗作用によるとみることができる。引張あて材においてヤング係数が逆に増加するのは、膜そのもののヤング係数の増加と寸法効果によるものであり、せん断弾性係数の減少は、膜相互の拘束効果の減少が寸法効果を上まわっているためと考えることができる。

実際に測定される素材のヤング係数およびせん断弾性係数の増減の程度は、各樹種のもつ

Table 2. Results of test

Species	Type* of Wood	Modulus of Elasticity (E) 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>			Modulus of Rigidity (G) 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>		
		min.	av.	max.	min.	av.	max.
<i>Abies sachalinensis</i> <sup>1)</sup>	N	89.2	104.3 (263)	120.0	4.8	6.2 (156)	7.5
	C	59.2	79.3 (140)	96.1	8.1	12.9 (228)	17.1
<i>Ginkgo biloba</i>	N	72.5	92.2 (205)	104.5	7.5	9.0 (199)	11.0
	C	40.3	54.6 (112)	76.7	9.0	11.1 (227)	12.9
<i>Populus sieboldii</i>	N	43.1	69.6 (167)	82.6	6.1	7.7 (184)	10.0
	T	85.9	99.8 (203)	114.3	6.9	8.9 (181)	10.9
<i>Fraxinus mandshurica</i> var. <i>japonica</i>	N	78.6	94.6 (145)	117.4	9.3	11.6 (177)	12.8
	T	95.2	149.1 (216)	215.4	8.9	10.2 (148)	12.2

Note: Values in parentheses are specific modulus ( $\times 10^6$  cm); E or G divided by average specific gravity in Table 1.

\* N=Normal wood; C=Compression wood; T=Tension wood.

あて材と正常材のフィブリル傾角あるいは膜厚の相違により特徴があらわれると考えられる。Table 2 の括弧内の数値は、 $E$  および  $G$  の平均値をそれぞれの平均比重で除したもので、単位比重あたりの弾性率を示すものである。この比弾性率は、正常材とあて材の細胞膜そのものの力学的性質の相違をあるていど示すものと考えられる。この値でみると、針葉樹あて材のヤング係数の低下が最も大きく、ついで針葉樹あて材のせん断弾性係数と広葉樹あて材のヤング係数の増加がほぼ同程度で、広葉樹あて材のせん断弾性係数の低下はあまり大きくないことがわかる。

2.5  $E/G$  および曲げ捩り弾性係数 ( $\sqrt{EG}$ )

Fig. 3(a), (b) および (c) はそれぞれ、イチョウ、ヤマナランおよびヤチダモ材の  $E/G$  を比重を横軸にとって表わしたもので、2.2 および 2.3 で述べた結果がさらに明白に示されている。トドマツおよびイチョウのあて材では  $E$  は小、 $G$  は大となるために  $E/G$  は小となり、ヤマナランおよびヤチダモではこの逆になる。またごく大まかに見れば、これら 4 樹種のいずれについても、正常材とあて材の境界となる値は約 10 となっている。

$E/G$  の材料力学的な意味は、荷重を受ける曲げ材の全撓み量に占めるせん断付加撓み率の決定因子ということになる。この点からみると Table 3 に示すように針葉樹あて材ではせん断応力による付加撓み率が正常材の 1/2 以下に減少する。これに対して広葉樹あて材では付加撓み率がいくらか増加することになる。ただし実際面において、この因子による付加撓みの増加率は、深い梁のばあいをのぞいて、考慮に入れる必要はないであろうが、強度設計の面ではあて材の強度が問題になるであろう。

Table 3 の  $\sqrt{EG}$  は、ヤング係数とせん断弾性係数の相乗平均であり、深い梁の曲げにおい

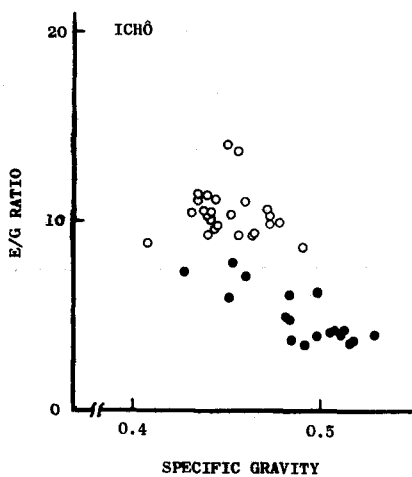


Fig. 3(a). Relation of  $E/G$  ratio to specific gravity—*Ginkgo biloba*  
 ○ = Normal wood  
 ● = Compression wood

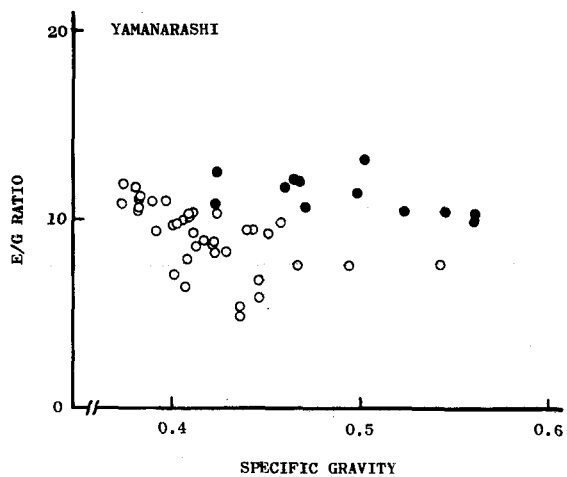


Fig. 3(b). Relation of  $E/G$  ratio to specific gravity—*Populus sieboldii*  
 ○ = Normal wood; ● = Tension wood

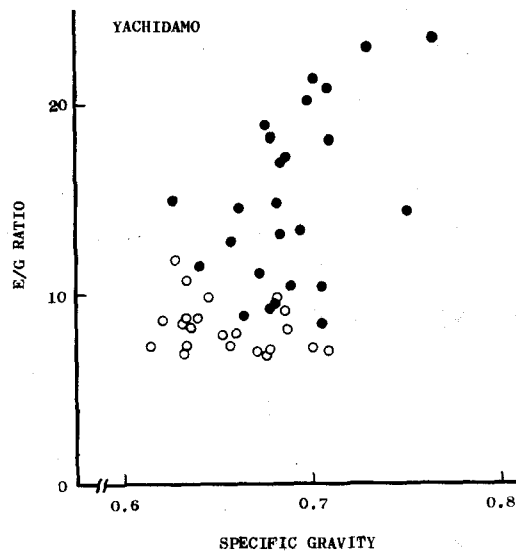


Fig. 3(c). Relation of  $E/G$  ratio to specific gravity—*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*  
○ = Normal wood; ● = Tension wood

Table 3.  $E/G$  ratio and flexural-torsional modulus  $\sqrt{EG}$

Species	Type* of Wood	$E/G$ Ratio			$\sqrt{EG}$ $10^3$ kg/cm <sup>2</sup>		
		min.	av.	max.	min.	av.	max.
<i>Abies sachalinensis</i> <sup>1)</sup>	N	12.9	17.2	22.2	20.7	25.3 (64)	28.4
	C	4.1	6.6	11.9	27.3	31.6 (56)	35.9
<i>Ginkgo biloba</i>	N	8.6	10.4	14.0	24.4	28.7 (64)	32.3
	C	3.6	5.0	7.8	21.0	24.4 (50)	30.7
<i>Populus sieboldii</i>	N	4.9	9.2	11.8	16.9	23.0 (55)	28.0
	T	10.0	11.3	13.2	24.4	29.7 (61)	35.3
<i>Fraxinus mandshurica</i> var. <i>japonica</i>	N	6.8	8.3	11.9	30.3	33.0 (51)	36.0
	T	8.4	15.1	23.5	34.2	38.5 (56)	44.4

Note: Values in parentheses are specific flexural-torsional modulus ( $\times 10^6$  cm) or  $\sqrt{EG}$  divided by average specific gravity in Table 1.

\* N=Normal wood; C=Compression wood; T=Tension wood.

て横倒れ座屈荷重を決定する値である。これは木構造の計算において最近問題にされるようになったもので、比較できるデータはほとんどないが、この実験で得た各材の平均値でみるとその範囲は、ヤマナラシ正常材の  $23.0 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup> からヤチダモあて材の  $38.5 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup> までとかなり広いものである。また、イチョウ材をのぞき、あて材の  $\sqrt{EG}$  は正常材のそれよりも大となっている。しかしこれらの値をそれぞれの平均比重で除した、単位比重あたりの数値は、

針葉樹あて材と広葉樹正常材で  $50 \times 10^6 \sim 56 \times 10^6$  cm, 針葉樹正常材と広葉樹あて材では  $56 \times 10^6 \sim 64 \times 10^6$  cm の範囲に入っており, 樹種と材質により一定の傾向をもつように思われる。

### 3. 要 約

あて材をもつイチョウ, ヤマナランおよびヤチダモの丸太から採取した試験片を, 傾斜樹幹における位置および材色などを基準に, 肉眼的にあて材と正常材に区分し, これらの試験片について比重, 曲げヤング係数および振りによる見かけのせん断弾性係数を測定した。結果は次のように要約される。

1. あて材の比重は, いずれの樹種においても, 正常材の比重よりも平均で大きい (Table 1)。

2. ヤング係数は, イチョウあて材で減少するのに対し, ヤマナランおよびヤチダモの広葉樹あて材においては逆に正常材よりも大きな値を示す (Fig. 1(a), (b), (c))。イチョウあて材のヤング係数の現われ方は, 前報で示したトドマツあて材のばあいと同様である (Table 2)。

3. せん断弾性係数は, ヤング係数のばあいとは逆に, トドマツおよびイチョウあて材で正常材よりも大きくなり, ヤマナランおよびヤチダモあて材では小となる (Fig. 2(a), (b), (c); Table 2)。

4. あて材の弾性係数は, この実験でとりあげた針葉樹と広葉樹とは反対の傾向を示すことが明らかになったが, この理由は主として, 圧縮あて材細胞の S2 層におけるフィブリル傾角, 引張りあて材細胞におけるゼラチン層の存在およびあて材細胞の膜厚の増大などの, 細胞の構造的な相違によるものと考えられる。また, 圧縮あて材の力学的性質は圧縮強度をのぞいていずれも低下するという通説は, せん断弾性係数についてはあてはまらない。

5. 材質評価の指標となる  $E/G$  値は, 針葉樹ではあて材で約 4~11, 正常材で約 9~22 となり, 広葉樹ではあて材で約 10~22, 正常材では約 5~12 となり, ごく大まかにみれば,  $E/G=10$  が正常材とあて材の境界値となる (Fig. 3(a), (b), (c))。

6. 横倒れ座屈荷重を決定する  $\sqrt{EG}$  値は, 比重により変動するが, 単位比重あたりに換算すると, 針葉樹ではあて材で小となり広葉樹ではあて材で大となる。またこの値は, 針葉樹あて材と広葉樹正常材では  $50 \times 10^6 \sim 56 \times 10^6$  cm, 針葉樹正常材と広葉樹あて材では  $56 \times 10^6 \sim 64 \times 10^6$  cm の範囲に入っている (Table 3)。

### 文 献

- 1) 上田恒司・飯島泰男・横山 隆: あて材の力学的性質に関する研究. 第1報, トドマツ材の弾性定数. 北大演報, Vol. 29, No. 2, 1972.
- 2) PANSIN, A. J. and C. H. DEZEEUW,: Textbook of wood technology. Vol. 1, 3rd ed. McGraw-Hill, 1970.
- 3) 上田恒司: 木質平面材料の弾性定数に関する研究. 第1報, ラワン合板の弾性定数. 北大演報, Vol. 26, No. 1, 1968.

### Summary

In this paper, the elastic constants of normal woods and reaction woods in three species were investigated. The test specimens were cut out from Ichô (*Ginkgo biloba* L.), Yamanarashi (*Populus sieboldii* MIQ.) and Yachidamo (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica* MAXIM.) in air-dry condition. Specimens were then divided visually into two groups, normal wood and reaction wood, considering the position of specimens in the trunks as well as reddish-brown color in compression wood and silvery sheen in tension wood. The size of the specimen from Yamanarashi is 2×2 cm in cross section and 34 cm long in grain direction. As for Ichô and Yachidamo specimen, the dimension is 2.5×2.5 cm in cross section and of 50 cm in grain direction. The modulus of elasticity ( $E$ ) and modulus of rigidity ( $G$ ) were obtained from bending test and torsion test, respectively.

The results of tests are summarized as follows:

1. Specific gravity of reaction woods is on the average greater than normal wood in all species tested (Table 1).
2. The compression wood in Ichô showed comparatively low modulus of elasticity, while the tension wood in Yamanarashi and Yachidamo showed greater value of  $E$  than in normal wood (Fig. 1 (a), (b), (c)). This tendency of  $E$  in Ichô is similar to that of Todomatsu fir reported in the previous paper (Table 2).
3. The compression wood in Ichô indicated a considerable increase in modulus of rigidity in contrast with modulus of elasticity. Such property of  $G$  in Ichô also compares with that of Todomatsu fir. On the other hand, the modulus of rigidity in hardwoods becomes smaller in tension wood (Fig. 2(a), (b), (c); Table 2).
4. The remarkable contrast in elastic constants of reaction woods between conifers and hardwoods is likely due to the difference of cell wall structure, such as the microfibrillar angle in the S2 layer of compression woods and the development of gelatinous layer in tension woods.
5. The range of  $E/G$  ratios in compression woods is roughly 4 to 11; normal wood of conifers, 9 to 22; tension wood, 10 to 22 and normal hardwood, 5 to 12.  $E/G$  value of 10 may be an approximate index for distinguishing reaction wood from normal wood (Fig. 3(a), (b), (c); Table 3).
6. The value  $\sqrt{EG}$ , which determines the lateral buckling loads of deep beams, is greater in reaction woods except ginkgo. Divided by specific gravity, however, it becomes greater in tension woods than in compression woods (Table 3).