



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	枝の材質に関する研究 1 : カラマツ枝材の曲げヤング係数
Author(s)	上田, 恒司; 田中, 康子
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 54(2), 253-266
Issue Date	1997-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21420
Type	departmental bulletin paper
File Information	54(2)_P253-266.pdf



枝の材質に関する研究 1

カラマツ枝材の曲げヤング係数

上 田 恒 司* 田 中 康 子**

Mechanical Properties of Branch Wood 1
Modulus of Elasticity in Branch Wood of Japanese Larch
by
Koji UEDA* and Yasuko TANAKA**

要 旨

13年生カラマツ造林木10本を試験木とし、これらより採取した枝の樹皮を除いた生材状態の木部でヤング係数 E 、容積密度数 BD および含水率 MC を測定した。 E は、節が少なく湾曲の小さい部分から試験体を採取し、片持ち梁形式の曲げ試験による20cm区間の中央矢高から算出した。 BD および MC は、各枝から連続的に切り出した長さ約5cmの小試片で測定した。枝の径は各小試片の縦径および横径を測定し、計算は断面を楕円と仮定して行った。

一本の枝の中で E は樹幹近くで一般に小さく、枝の元口から約50cmまではやや増加する。それ以後はさらに増加するもの、減少傾向のものもみられるが大部分の枝で著しい変動は見られなくなる。枝の E は全体で見ると30~70tf/cm²の範囲に分布しており、試験木の樹幹ヤング係数との関係は明らかではなかった。 BD は元口で600~750kg/m³と大きいのが、50cm前後までの間に急激に減少しその後は350~500kg/m³の間で変動が小さくなる。 MC の変動は BD とは対照的で、どの枝でも樹幹付近で50%程度であるが、枝先に向かって漸次増加し50cm以上では水分量は100~180%の間で安定する。樹冠内の位置による差が生じているものも見られた。

キーワード：枝材、曲げヤング係数、容積密度数、含水率、カラマツ

1997年3月31日受理。Received March 31, 1997

*北海道大学農学部森林科学科木材工学講座

Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060

e-mail: ueda@for. agr. hokudai. ac. jp

**新潟県小千谷林業事務所

Ojiya Forestry Administration Office, Niigata Prefectural Government, Ojiya 947

1. は じ め に

枝は樹木の生長にとっては不可欠の部位であるが、林木の一般的な利用法から見ると、無い方が都合が良いとされるほど用途の少ない部分である。そのためか、枝材そのものを対象とした材質に関する研究はあまり多くはない。これまでに発表されたものとしては、スギの枝と幹における仮道管長¹⁾あるいは、枝に生じたあて材の仮道管長に関する研究²⁾、などがあるほか、強度材質に関しては、樹木力学に関連したヤング係数の測定³⁾、枝折れや懸り木の接触抵抗に関連して枝の曲げ試験が行われている⁴⁾。

著者らはこれまでに、生立木の樹幹ヤング係数の非破壊的測定をもとに、将来その林木から生産される木材の強度性能の推定、樹幹ヤング係数の経年変化の追跡、林分単位の材質評価などを行ってきた^{5),6),7)}。その試験の際に測定区間内にある支障枝を切り落とすことが度々あったが、枝の着生本数や形状あるいは鋸引きの際の手応えなどが立木ごとに特徴を持つことがしばしば観察されていた。

この研究では、葉と幹をつなぐ樹液の流通経路である枝において形成された木部と、我々の主要な利用対象である樹幹木部との間にどのような材質的な関連性があるのかを明らかにすることを主たる目的としている。

本報では、採取直後のカラマツ枝について、樹皮を取り除いた枝材の曲げヤング係数を片持梁条件の曲げ試験から求め、一本の枝内の変動、個体内及び個体間の変動傾向を明らかにする事を主な目的としたが、同一試料で測定した容積密度数および含水率分布の結果も示した。

2. 試 験 材 料

2. 1 試験木および供試枝

北海道新冠町トキシベツ山林17林班内の13年生カラマツ立木A～Jの10本を試験木とし、これらより採取した枝を以下の測定に使用した。この林分は1983年植栽(2500本/ha)の造林地であるが、早い時期から枝打ちが行われており、13年生時で枝下高が1.5～2.5m程度であるため、この試験で使用した枝の年輪数は最大でも11箇までであった。

各試験木の樹皮付き周囲長からもとめた胸高直径(D)、樹高(H)、樹幹ヤング係数(E_s)、供試枝本数(n)、採取月日(SD)をTable 1に示す。

2. 2 枝の採取

枝の採取時期は生長期間の初期と年輪形成終了後とし、年輪形成の盛んな期間を避けた。これは、直径生長の旺盛な期間に測定される曲げヤング係数が見かけ上低めに算出されるためである⁸⁾。枝の採取高さは1.5～4.3mの間で2ないし3段階とし着生高さおよび方位を記録した。各枝は基部で枝軸に対してほぼ直角に切断した後、水分の減少を抑えるため直ちに小枝と葉を取り除き、樹皮付きのまま実験室へ搬入し、基部を水中に浸せきして保管した。この実験

Table 1. Test materials

Notation	Sample Trees			Tested Branches	
	D (cm)	H (m)	E_s (tf/cm ²)	n	SD
A	14.8	9.0	50	6	13. May
B	15.7	7.5	46	6	27. May
C	14.2	8.5	45	6	3. June
D	13.8	8.5	47	6	1. July
E	15.3	7.5	61	4	7. October
F	18.3	8.0	44	4	7. October
G	13.2	8.5	66	4	21. October
H	13.1	9.5	79	4	4. November
I	16.7	8.5	51	4	25. November
J	17.0	9.5	75	4	25. November

Note: D : Diameter at breast height, H : Tree height, E_s : Modulus of elasticity in stem, n : Number of tested branches, SD: Sampling date.

で使用した枝は、樹幹から生じている1次枝のみとし2次以上の小枝に関しては対象にしない。

採取前のカラマツ枝は、基部が樹幹から水平ないしやや上向きに開出し、枝の主軸は先端に近づくほど上方に湾曲する形状を示す。樹幹から切断後に小枝や葉を除去し1次枝のみにすると、鉛直荷重の減少のために湾曲がさらに増加する。この状態で湾曲の内側を枝の上面とし、枝の基部から先端まで表皮にマークを付けた。

カラマツはモミ属やトウヒ属のような明瞭な輪生枝を生じることがなく、幹から生じている枝の着生は不規則と見られやすい。しかし、カラマツ丸太材の表面に現れる節の位置を計測した結果、節の数の多い区間が規則的に出現することが明らかになっている⁸⁾。1次枝から発生する2次枝にもこの規則性の反復が見られることと、枝の表皮上に頂芽の芽鱗の痕跡が残されていることを利用して、枝の1年の伸長ごとに境界線を記入した。

3. 試験方法

3.1 曲げ試験体の切り出し

採取した枝は全体的に湾曲しており、全長のままで曲げ試験を行うことは困難である。そこで、湾曲の程度が少なく2次枝の節が集中していない部分を含むように長さ約45cm以上の試験体を採取し実験に供した。このばあい、曲げ撓みの測定区間に上記の伸長の境界線が入らないように配慮した。

3.2 曲げヤング係数の測定

曲げ試験は剥皮した試験体の元口側をクランプで固定し、自由端に重錘を吊り下げる片持梁条件で行った。曲げ変形はMOG20 (注: 20cm 区間中央矢高測定ゲージ; Middle-ordinate

gage for 20cm length) を使用して測定した。この測定用具は、 22×8 cm の板に設定した20 cm 区間の一端に1本他端に2本の木ねじを埋め込んだ3本足の上乗せタイプの器具で、中央に1/1000mm 読みの変位センサーが固定されている。枝の曲げ変形を測定する区間の一端に「はたがね」を取り付けることにより3本の木ねじを載せるベースができあがる。重錘の負荷方向は1測点につき枝の上面、下面、両側面の4方向とし、各測定ごとに枝を軸周りに90度ずつ回転させて撓みを記録した。この測定から、枝の鉛直方向の変形に関わるヤング係数 E_1 と、水平方向の変形に関連する E_2 が求められることになる。

3. 3 容積密度数および含水率の測定

樹幹と枝の表面はなめらかな曲面で連続しているため、幹の表面に沿って切断した枝の断面には「節ばかま」が付いている。この部分から厚さ15mm 程度の円盤を切り落とした面を以下では枝の元口あるいは枝の基部と呼んでいる。

枝の元口から先端へ向かって約5 cm 長さの小試片を枝の直径が10mm 程度になるまで連続的に丸鋸で切り出した。枝の上面に付けたマークを木口面に転記してから樹皮を除去し、長さ、重量、3.4で述べる直径および元口側における年輪数を測定した。ヤング係数測定を終えた試験体からも同様に小試片を切り出し、同様の測定を行った。なお、2次枝の節が集中して存在する小試片に関しては断面が不整で曲がりも多いことから、密度の測定値は十分な精度を持たないと考えられるため、直径の測定を省いたものもある。引き続きすべての小試片を105°Cに設定した乾燥器で乾燥した後、重量を測定して容積密度数および含水率を求めた。

3. 4 枝径の測定

枝の径は、曲げ試験体では各測定区間の中央で、小試片では剥皮した後、それぞれの中央部で3.3で述べた上面のマークにしたがって、縦径 H (枝の上下方向の径) と横径 B (縦径に直角方向) を1/10mm 読みのノギスで測定した。計算では枝の断面を楕円として扱い、断面積 A 、鉛直方向 (H 方向) の曲げに関する断面2次モーメント I_1 および水平方向 (B 方向) の曲げに関する断面2次モーメント I_2 はそれぞれ次式から計算した。

$$A = \pi BH/4, I_1 = \pi BH^3/64, I_2 = \pi HB^3/64$$

4. 結果と考察

4. 1 枝の形状

使用した枝の基部の径は13.5~40.4mm、枝の長さは233~434cm である。枝全体を側方から見ると先へ行くほど上へ湾曲した形状を示すが、1年の伸長区間ごとに見ると1波長の波形がみとめられ、おわりの部分に2次枝が集中しているものが多く見られた。

枝の基部から先端に向かう枝径の変動を Fig. 1~Fig. 4 に示す。測定値が途切れている点は2次枝の節が集中していたため直径を測定しなかった小試片に当たっている。

カラマツ枝の下面には通常圧縮あて材が形成されているため、一般に縦径 H は横径 B よ

りも大きくなる。Fig. 1 は縦径と横径の差が最も大きな枝の例で、基部から 2 m 以上離れたところでもその差は 10% 以上に達している。Fig. 2 はこれとは対照的で、幹に近い 20 cm 区間と 60–80 cm 区間で縦径がやや大きい部分があるが、全長にわたって縦径と横径はほぼ等しく、枝先に向かって直線的に減少している (細りは 8.7 mm/m)。

大部分の枝はこれらの中間タイプであり、最初は $H > B$ で推移するが、次第にその差が減少し、1–2 m で $H \approx B$ に収束するものが多い (Fig. 3)。

Fig. 4 に示した枝の例では、全体として見た枝の細りは 8 mm/m 程度であるが、各節間での細りは 4 mm/m 程度となっており、枝径が階段状に変化していることが看取される。

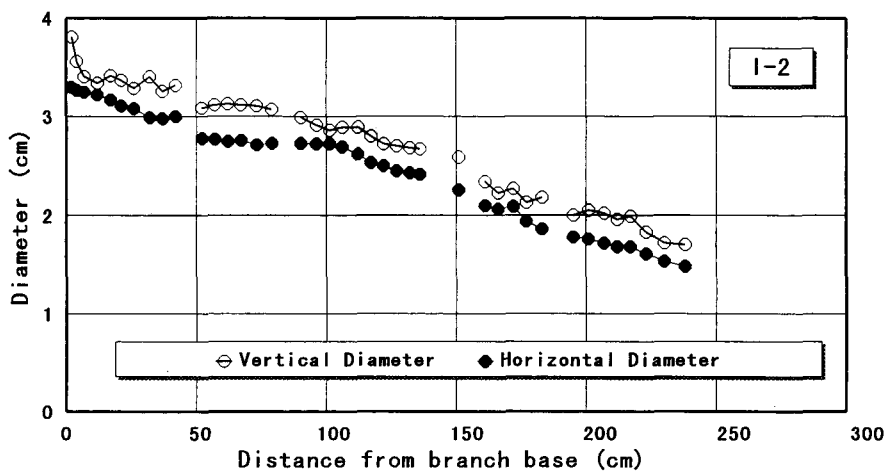


Fig. 1. Longitudinal variation of branch diameter. No. I-2.

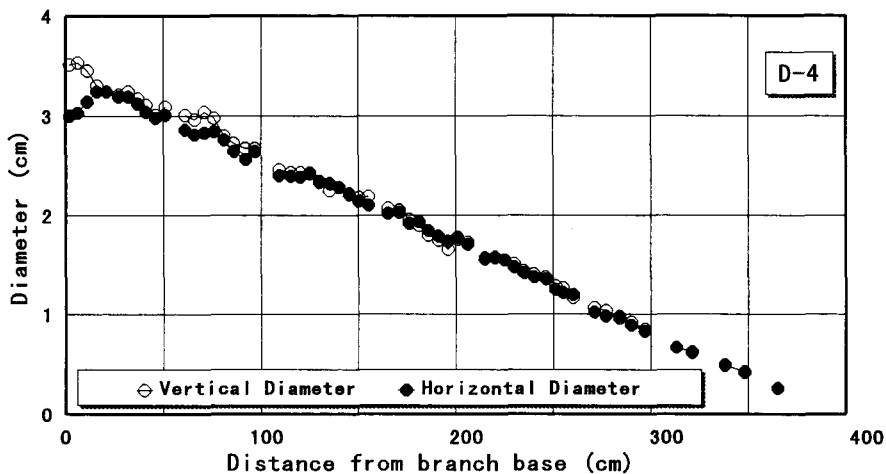


Fig. 2. Longitudinal variation of branch diameter. No. D-4.

このように、枝の断面径の長さ方向の変動には様々のタイプがあり、同一の個体に属する枝が必ずしも同じタイプを示すとは限らないようである。むしろ、それぞれの枝に許されている空間条件、例えば隣接木の枝との関係、立地の傾斜や枝の伸長方位などが大きな影響を与えていると考えられるが、系統的なデータ収集が行われていないため本報ではこれ以上の言及はできない。

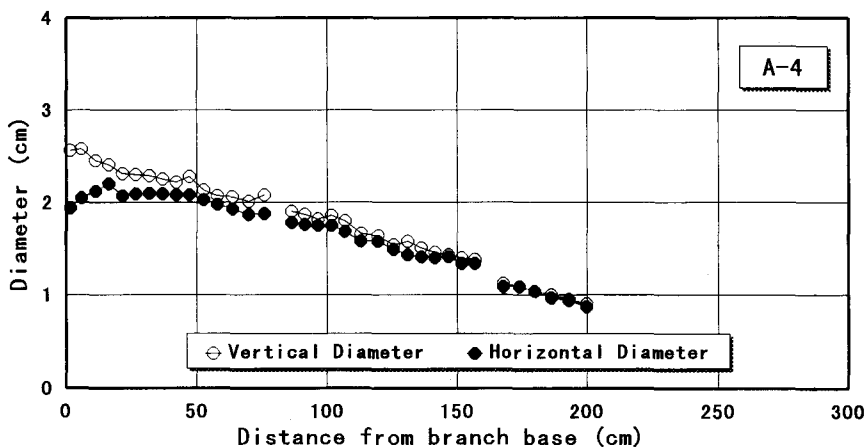


Fig. 3. Longitudinal variation of branch diameter. No. A-4.

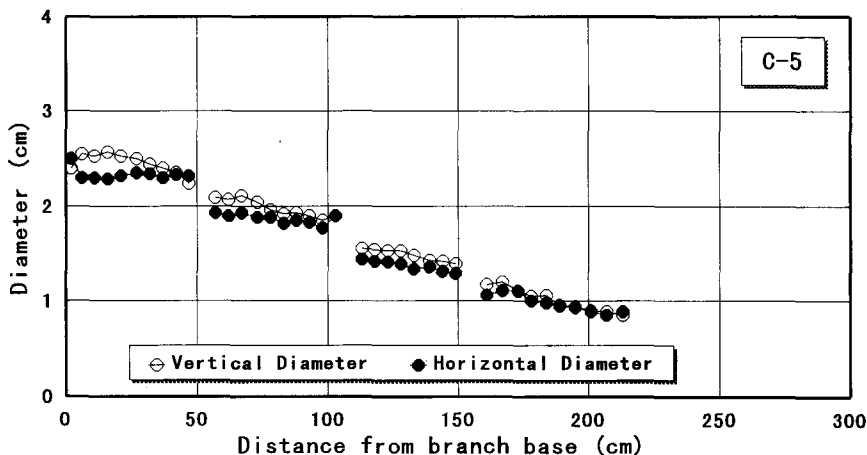


Fig. 4. Longitudinal variation of branch diameter. No. C-5.

4. 2 枝の曲げヤング係数

枝の形状は4.1で述べたように、テーパー（細り）を有する丸棒であるため、曲げの計算では一般にこれを考慮する必要がある。しかし、この試験に用いた枝のテーパーは最も大きいもので約10mm/m（1m 当たり直径が10mm 減少）である。撓みの測定区間を20cm にした場合この間の直径の差は2 mm となる。今回の曲げ試験に使用した部分の枝の径は10～38mm

であるため、テーパーを無視し測定区間の中央の径を用いてヤング係数を計算しても、その誤差は1.5%以内であると考えられる⁵⁾。そのため、本報においてはテーパーの影響を無視し、撓み測定区間の中央で測定された縦径および横径から3.4に示した断面2次モーメントを計算した。

枝元口からの距離と測定されたヤング係数 (E_1) の関係を作図すると、いずれの枝においても元口からの距離が50cm 程度まではヤング係数がやや増加する傾向が共通して見られた。次に、これより先のヤング係数の全体的な変動傾向を試験木ごとに概観すると、低減傾向を示すもの、増加傾向を示すもの、増減が殆ど見られないもの、に大別できる。

Fig. 5 は低減傾向を示した試験木 A の枝の測定結果である。ヤング係数は幹に近いとこ

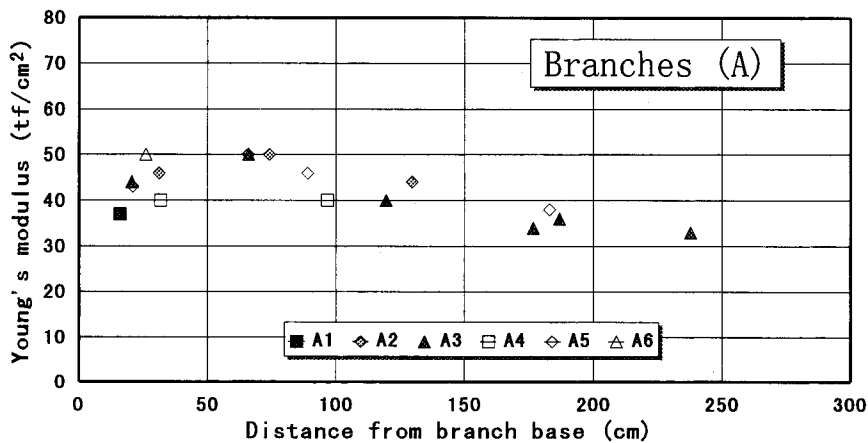


Fig. 5. Longitudinal variation of Young's modulus in branch sections.
Branches from Tree A.

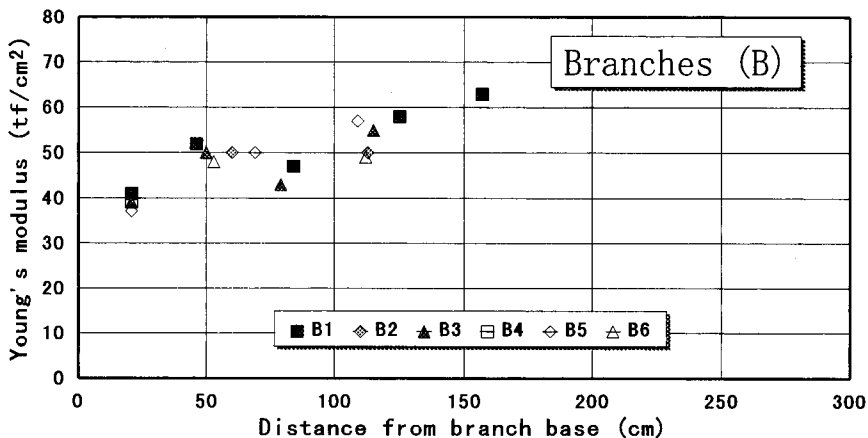


Fig. 6. Longitudinal variation of Young's modulus in branch sections.
Branches from Tree B.

ろでやや小さく、50cm 前後でいくらか増加するものの、枝先端に向かって減少して行く。これとは逆に試験木 B の枝は、枝先に向かってヤング係数が増加する傾向をみせている (Fig. 6)。試験木 C から J までの枝では約50cm から先の部分ではヤング係数の増減が殆どみられずそれぞれの枝がほぼ一定の範囲の数値を保っている。Fig. 7 に試験木 C, Fig. 8 に試験木 G の例を示す。上に示した 4 本の試験木の例では元口に近い部分の E の数値はいずれも 40tf/cm² 程度であるが、元口から1.5m 離れた位置で見ると試験木 A, B, C, G でそれぞれ約40, 60, 50, 60tf/cm² と違いが生じていることが分かる。

このような差が生じる原因の一つは枝材の構造にあると考えられる。針葉樹の樹幹では正

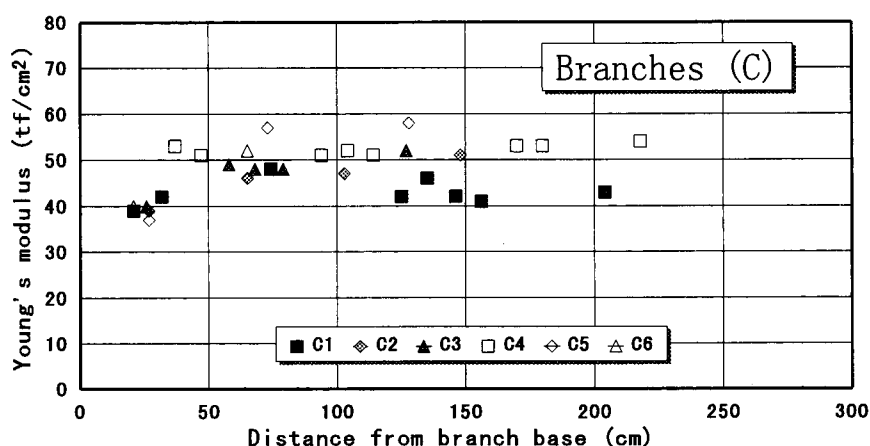


Fig. 7. Longitudinal variation of Young's modulus in branch sections.
Branches from Tree C.

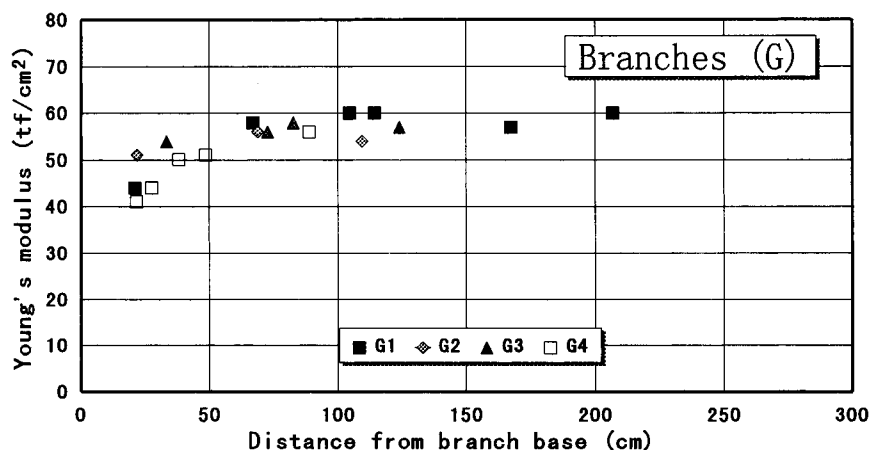


Fig. 8. Longitudinal variation of Young's modulus in branch sections.
Branches from Tree G.

常材に比べてあて材の密度は高く、ヤング係数は低いのが通例である。また、樹幹の中心部の材は未成熟材とされ、髄に近いほど材質が低下する。枝に形成されるあて材が樹幹内に生じるそれと同様の材質を持ち、枝材が未成熟材の性質を持つとすると、枝の材質はこれらの因子の複雑な組み合わせによって決まることになる。枝のヤング係数が単純な変動を示さないのは、それぞれの枝の生育条件によって年輪の構造や「あて」の程度に差が生じているためと考えられるが、この報告に示した実験結果からは解析的考察はできなかった。

定性的な傾向からみると、4.3で示すように容積密度数が枝の基部から50cmほどの間に急激に低下することがこの間のヤング係数の変化に対応するものと考えてよいであろう。密度の大きいあて材の割合が増加するほどヤング係数は低下することになるからである。ただし、これを実証するには枝材に形成されたあて材が、樹幹に生じたあて材と材質的に同等であるかどうか、また枝材における未成熟材の性質などを実験的に確認しておく必要がある。

曲げ試験では枝に加える荷重の方向を枝の上下面および両側面としそれぞれの撓みを測定し、枝の鉛直方向の曲げに関する E_1 と水平方向の曲げの E_2 を計算したが、 E_1 が E_2 よりもやや低い値を示した。この相違は枝の断面を楕円と仮定したことのほか、断面内にあて材が偏在する影響も無視できないと思われ、これらについて今後さらに検討を加える必要がある。

4. 3 容積密度数と含水率の変動

枝材における容積密度数 (Basic density) および含水率 (Moisture content) の変動状況を要約すれば、元口の部分で容積密度数がきわめて高く、含水率が低い。元口から約50cmまでの区間で容積密度数は急激に減少し、含水率はそれと対照的に増加し、その先は緩やかに推移しつつもほぼ一定の値をとる。2次枝の節が集中している部分では、一般に容積密度数が高く、含水率が低くなっている (Fig. 9~Fig. 12)。

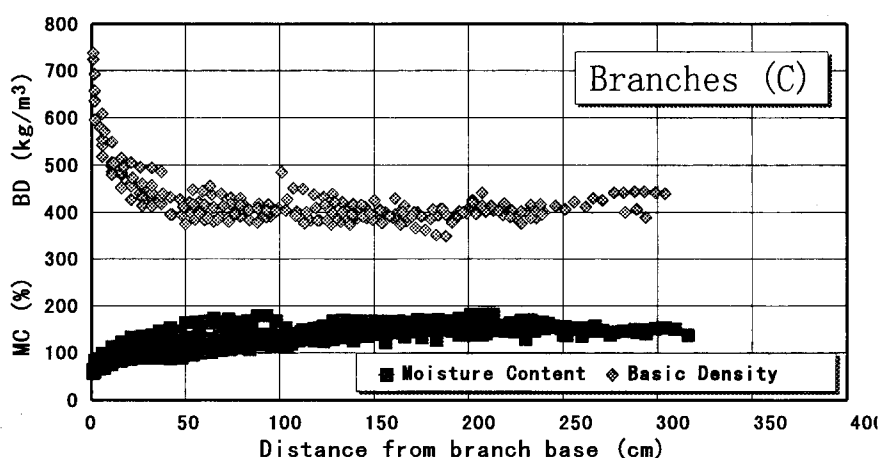


Fig. 9. Basic density and moisture content in branches.
Branches from Tree C.

具体的には、元口に近い小試片の容積密度数は $600\sim 750\text{kg/m}^3$ の範囲にほぼ全数が入っており、元口から50cmの位置から採取した小試片では殆どが $400\sim 500\text{kg/m}^3$ まで減少している。このことは、すでにふれたようにヤング係数の値が元口から50cm 前後まで増加傾向を示し、これより先は変動の傾向が変わる事実と関係があると見られる。肉眼的に観察すると枝の下面にはほぼ全長にわたってあて材特有の色調を持つ材部が形成されているが、容積密度数とヤング係数の変動からみるとあて材の占める割合あるいはあて材そのものの密度が枝の軸方向で変化していることも考慮に入れる必要がある。

含水率の変動に関しては、試験木CおよびEにおいて特徴が見られた。Cの枝は3段階

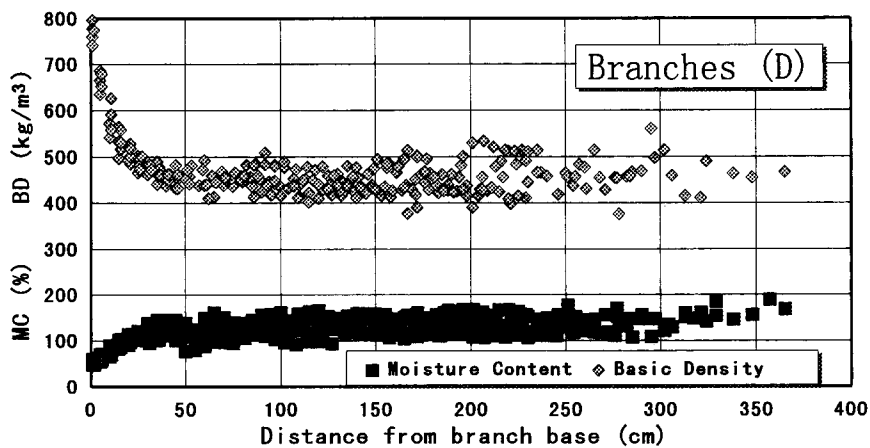


Fig. 10. Basic density and moisture content in branches.
Branches from Tree D.

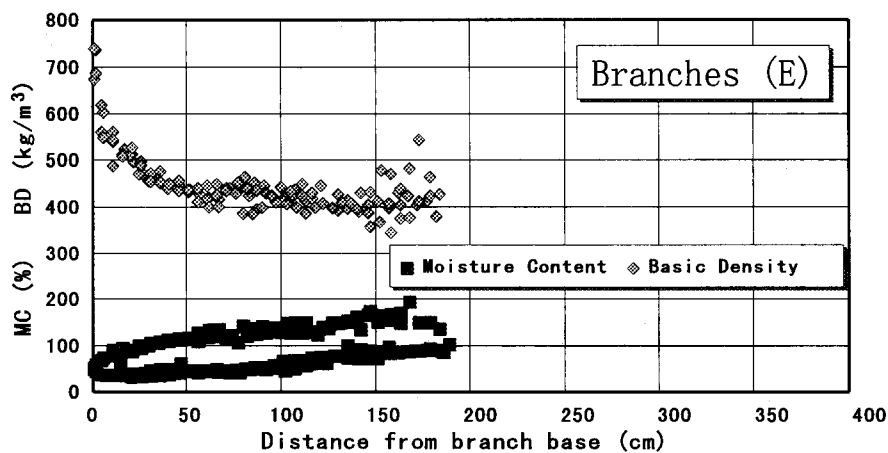


Fig. 11. Basic density and moisture content in branches.
Branches from Tree E.

の異なる高さから採取したが、Fig. 13 から見ると明らかに下位の枝の含水率が低下している。E の枝においてはこの傾向がさらに顕著で、高さの差が1 m 以内であっても下位の枝の含水率は半分以下に下がっている (Fig. 14)。なお、これらと同じ高さに着生していた他の2本の枝は次年度には枯死していた。今回の試験では枝の採取時期と含水率の関係を検討することはできなかったが、適期に含水率を測定することで枝の枯れ上がりの予測が可能になるかも知れない。

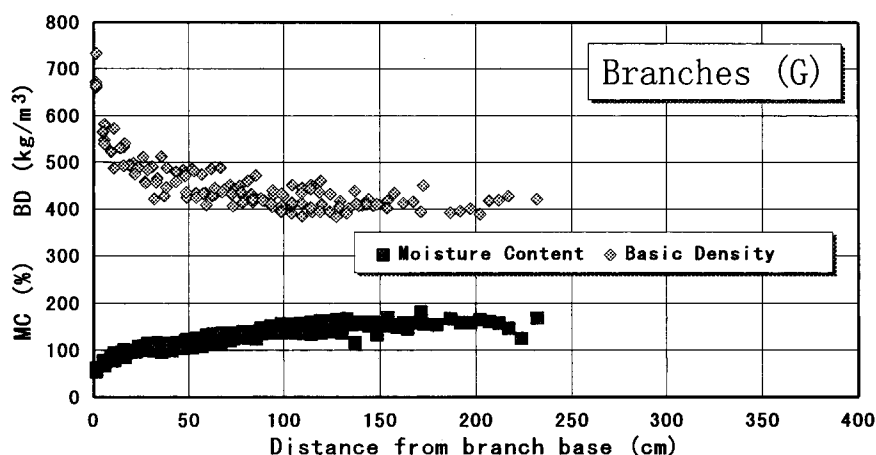


Fig. 12. Basic density and moisture content in branches.
Branches from Tree G.

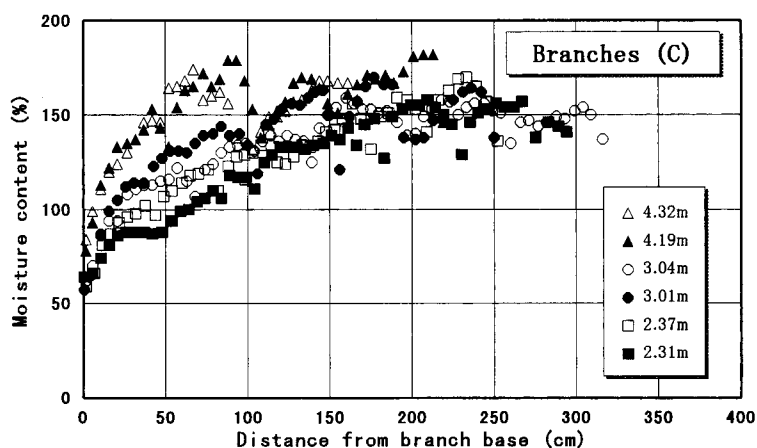


Fig. 13. Moisture content in branches from different height levels.
Branches from Tree C.

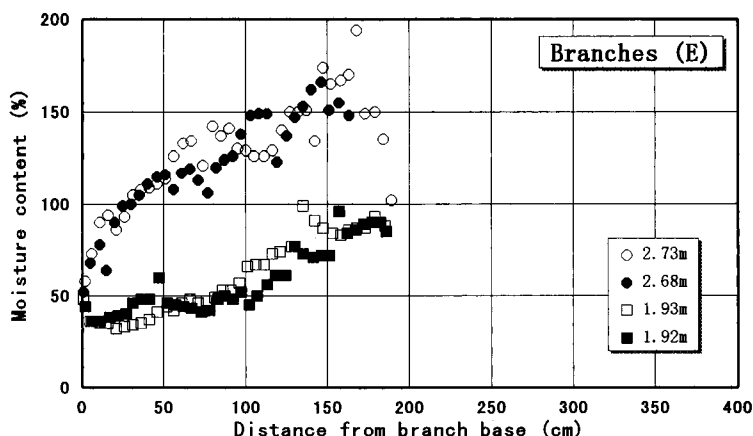


Fig. 14. Moisture content in branches from different height levels.
Branches from Tree E.

4. 4 枝ヤング係数と樹幹ヤング係数の関連性

著者らの行ってきた立木のヤング係数測定は、地上70~170cmの1m区間に関する樹幹の曲げ撓みを測定する方法で、その数値についてはこれまでの実験から信頼性は十分に確かめられてきている^{5), 6), 7)}。一方、枝ヤング係数は4.2で述べたように同一立木から採取したものであっても数値のばらつきの範囲はかなり大きい。そのため、樹幹ヤング係数との関連性を検討するには何らかの方法で枝の代表値を決める必要がある。

ここでは、すでに述べたように枝ヤング係数、容積密度数および含水率はいずれも枝の元口から50cmまでは変化率が大きいこと、枝の直径は大きいほどヤング係数の測定が安定的に行えることなどを考慮して、各枝の元口から50~100cmの間で測定されたヤング係数の平均をその立木の枝ヤング係数の代表値と規定した。

試験木に関して測定されている樹幹ヤング係数 E_s (Table 1) とそれぞれの枝ヤング係数 E_b の代表値の関係を Fig. 15 に掲げた。試験木 B, C, F では枝が幹よりも高いヤング係数を示す一方、他の試験木では E_s が E_b の約1.2倍の線にあるかに見えるが、全体としては枝ヤング係数による樹幹ヤング係数の推定は現段階では困難と言わざるを得ない。

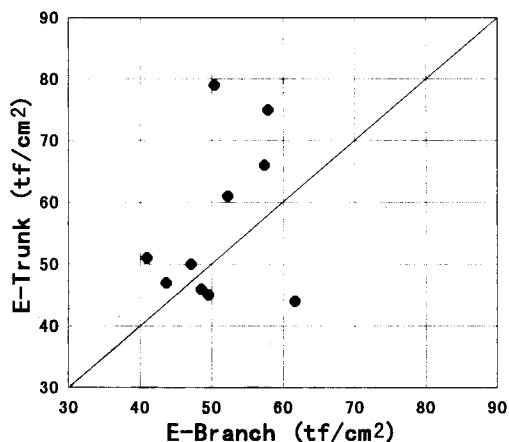


Fig. 15. Young's modulus in branches and in trunks.

5. お わ り に

枝の材質を考えるに当たって、その手掛かりとして最初にヤング係数、密度および水分を測定してみたが、一般に使用されている木材、正確には樹幹からの木材、とはかなり異なった性質を持つことが観察された。通常密度の大きい材は材質的に優れているが、枝材に関してはそれが当てはまらない。樹木が雪や風の力を受けるとき、どのようにしてそれを「しのぐ」のかについては、基礎的なデータが少ないために十分な説明がなされていない。

ヤング係数の測定は通常単純梁に集中荷重を加える方法が用いられてきたが、枝のように本来曲がりを有し、断面形状が不整な材料に対しては適用が限定される。この報告では片持梁条件の曲げによる結果を示したが、得られた数値は十分に安定したものと考えられた。さらに、曲げ変形の測定には区間撓みを求める方法を採用したため、支点におけるめりこみの影響を考慮する必要がないなど、今後の測定における試験条件として推奨できるものとする。

今回は樹皮を除いた生の枝材に関する試験のみについて報告したが、枝曲げにおける樹皮の影響は予備的な実験から無視できないことが分かっており、これらの乾燥後の材質とともに順次取り上げる予定である。

これからの検討課題は本文中でもふれたが、枝断面の組織構造と材質との関連を調べることが最も重要であろう。そこから得られる知見は単に材質研究の分野のみならず、樹木の一部分としての枝の挙動の解析さらに林木・森林の樹冠層の研究にまで波及するものと考えられるからである。

参 考 文 献

- 1) 藤崎謙次郎(1975): スギ枝条材に関する研究 (第1報) 36年生スギの枝条内部位による仮道管長の変動。愛媛大演報 12, 37-46
- 2) PARK, S., SAIKI, H. and HARADA, H. (1979): アカマツ枝材の構造 (第1報) あて材の分布, 年輪構造および仮道管寸法。木材学会誌 25(5), 311-317
- 3) CANNELL, M. G. R. and MORGAN, J. (1987): Young's modulus of sections of living branches and tree trunks. Tree Physiology 3, 355-364
- 4) ONWONA-AGYEMAN, S., MORIOKA, N., KITAGAWA, K. and KONDO, M. (1994): A quicker and non-destructive field method for estimating the strength of living branches in a plantation forest. J. Jpn. For. Soc. 76(4), 321-328
- 5) 小泉章夫・上田恒司(1986): 立木の曲げ試験による材質評価 (第1報) 樹幹曲げ剛性の測定。木材学会誌 32(2), 669-676
- 6) 小泉章夫・上田恒司(1986): 立木の曲げ試験による材質評価 (第2報) 半径生長に伴う樹幹曲げ剛性の変動。木材学会誌 32(11), 860-867
- 7) 小泉章夫・上田恒司(1987): 立木の曲げ試験による材質評価 (第3報) 造林木の樹幹ヤング係数。木材学会誌 33(6), 450-456
- 8) 小泉章夫・上田恒司(1987): 丸太材の曲げおよび振り性能。北大演研報 44(1), 355-380

Summary

Young's modulus (E) along the grain, basic density (BD) and moisture content (MC) of debarked Japanese larch (*Larix leptolepis*) were measured on sections of green branches.

Test materials

The study was done on 5-11-year-old branches cut from 10 trees of 13-year-old Japanese larch grown in plantation at Nikapp, Hokkaido. The total number of branches was 48 (Table 1). Four to six branches were cut at different height levels toward the crown of each tree, of which the E value in the bole had been already determined by tree bending test proposed by the authors⁵⁾.

Test conditions

The E values of the branch sections were measured by bending in cantilever mode; the debarked sections were fixed at thick ends and a concentrated load was applied at thin ends. The deflections were measured at possibly knot-free portions, using a hand-made MOG20 (Middle-ordinate gage for 20 cm length mounted in place with a linear deformation sensor at the center).

Owing to an oval cross section of the branches, the diameter measurements were made in two perpendicular axes, namely in vertical and lateral.

After the bending tests, basic density and moisture content were determined for pieces cut successively at an interval of 5 cm.

Results

The E values for branch sections were generally low near the base of the branch (40 tf/cm²; 3.9GPa). The E values for branch sections farther than 50 cm from the base of the branch differed between trees (30-70 tf/cm²) (Fig. 5-Fig. 8). The lower values may be attributed to the variable amount of compression wood. The well known fact that E increases with density can not be applied to compression wood in which E values decrease with increase in density. The relationship of E values between branches and tree trunks were not significant enough to predict qualitative characteristics of standing trees (Fig. 15).

The basic densities at the base of branches fall in ranges of 600-750 kg/m³ and drop rapidly to 350-500 kg/m³ with increase in distance to the top (Fig. 9-Fig. 12).

The longitudinal distribution of basic density provides a means for estimation of the proportion of compression wood in test pieces cut from the branch.

The moisture contents of test pieces adjacent to the stems are apparently constant ($MC=50\%$). The MC of a branch seems to increase gradually to become constant toward the top of the branch. The constant level of MC seems to differ according to heights in a tree (Figs. 13 and 14).