

カラマツの材質向上のための施業技術に関する研究

- ① カラマツの樹幹に沿った連年成長量や、辺材部量の垂直的分布を示す「ものさし」があることを明らかにしました。
- ② この「ものさし」を利用して、「目標とする心材材積率および年輪幅を得るための管理モデル図」を作成しました。
- ③ 材のねじれの主要原因であるらせん木理角を小さくするためには、成長初期の肥大成長を裾枝払いなどにより抑制することが重要であることを明らかにしました。
- ④ 長野と北海道林分間について心持角での材質比較では、北海道林分の年輪幅が比較的大きなこと、および大きな年輪幅のために強度性能が小さなことなどが明らかになりました。しかし、同じ年輪幅ならば、両地域林分間に違いが認められませんでした。

1 はじめに

かつては土木用材が主であったカラマツ材の用途も、最近では当センターによるカラマツ材の人工乾燥技術の開発によって、集成材や柱材、壁材などの建築用材のほか家具材や工芸材まで、材の利用拡大が図られるようになってきました。このような利用状況の中で、カラマツ材は他の樹種にみられない優れた特徴を持っていることから、利用者に好まれておりますが、その代表的なものに心材部の独特の色調や木目の美しさ、あるいは強度性能の高さ、などがあげられています。

本研究は、これらの特徴ある材質を十分に得られるような施業技術の開発を目指して進められたもので、ここで検討された項目をあげますと、①幹の中に占める心材部分を増大させる施業技術の開発、②目的とする年輪幅の材を得る施業技術の開発、③材のねじれの原因となるらせん木理角を低減させる施業技術の開発、および④長野県内の産地間や、さらに長野県と北海道間など、生育環境によるカラマツ材質の違いの有無の解明、など4項目ですが、ここではこれらの研究成果を要約して述べてみたいと思います。

2 材質向上のための施業技術の開発

(1)幹の肥大成長や心材材積率調節の考え方

1)樹幹に沿った連年成長量の垂直的分布の考え方

幹の肥大成長は、葉で生産された同化物質が幹

の樹皮に近い師部を下降する際に、生きた細胞である辺材部の生活のために呼吸により消費されながら、幹の各部に配分されていくことによって生ずると考えられています。このことから、葉で生産された同化物質の幹での配分状況は、幹における辺材部量の分布状況によって異なったものになるものと考えられますし、また逆に、幹における同化物質の配分状況によって、辺材部量の分布状況も異なったものになるものと考えられます。

本研究ではこのような考え方に立って、連年成長量の樹幹における垂直的配分状況を解析できれば、辺材部量の分布状況（当然、心材部量の分布状況も）も明らかにすることができると考えて検討しました。その検討過程を次に示します。

2)樹幹における連年成長量の垂直的配分状況の表し方

ここでの資料は、長野県内のカラマツ人工林21林分から190本の標本木を選び、樹幹解析した資料を用いました。林齢は15年生から75年生までの林分でした。

一般に、高密度林分や強度の枝打ち林分における林木にみられるような、樹冠が小さく、かつ枝下高の高いもの、あるいは被圧木などでは、樹幹における年輪幅が上部から下部に向かって小さくなること、その反対に、枝下高が低く根際まで樹冠がよく発達した孤立木や、疎開した林内にみられる林木などでは、下部に向かって年輪幅が大き

くることが知られています(図-1)。

このように、林木のおかれた状況によって様々な異なった配分の形をとる連年成長量の垂直的配分状況を統一的に表現することができないかを検討し、次に示す「ものさし」を考えました。

図-2は1本の標本木での相対高(樹高の1割

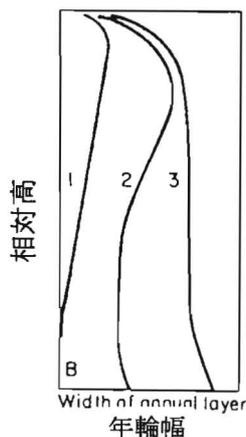


図-1 樹幹内年輪幅の垂直分布(Farrar 1961)
1 被圧木、2 中間木
3 孤立木

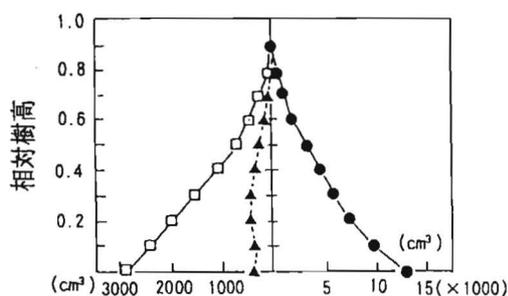


図-2 幹材積連年成長量、積算幹材積連年成長量および幹材積の垂直的分布
(▲)連年成長量、(□)積算連年成長量
(●)幹材積

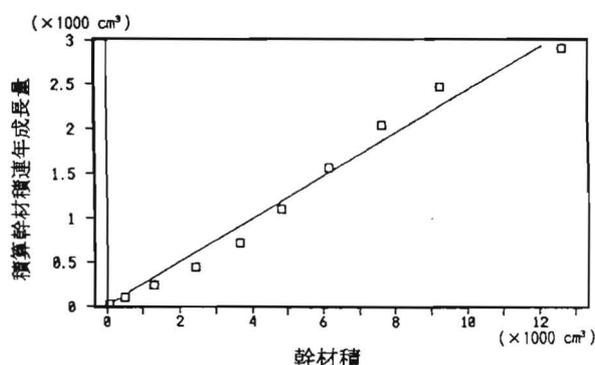


図-3 幹材積と積算幹材積連年成長量との直線回帰

高さ、2割高さ・・・)ごとに区分して求めた幹材積と最近1年間の幹材積連年成長量との関係を示しています。図に示すように、最近1年間の幹材積成長量の分布状況は大変不規則な分布状況を示しています。そこで、最近1年間の幹材積連年成長量を梢端部から下に向かって、各相対高区分ごとの値を積算し、各相対高ごとにその値を図の中に落とすと、図の左に示すような凹凸の少ない規則正しい分布の形をとりました。この分布の形は、図の右に示す各相対高ごとに落とされた幹材積と同じような分布の形となっていることに気づきます。

そこで、各相対高における幹材積と幹材積連年成長量の積算値とを図示しますと、図-3に示すように、両者間にはほぼ直線関係が得られました。計算の結果、この傾向はすべての標本木に共通していることがわかりましたので、各標本木について直線回帰式の勾配(回帰係数)を計算しました(回帰係数を Lvi で示す)。また、各相対高位置での幹断面積および断面積連年成長量を計算し、幹材積の代わりに幹断面積を、幹材積連年成長量の代わりに断面積連年成長量を入れ替え、両者の関係を求めても同じ傾向が得られました(回帰係数を Lgi で示す)。

このようにして計算された回帰係数の値について考えてみますと、樹幹上部から下部に向かって年輪幅が小さくなる林木では、梢端部からの積算幹材積連年成長量の値も小さくなることから、回帰係数は小さな値をとることが予想されます。これとは反対に、樹幹下部ほど大きな年輪幅をとる林木では、回帰係数の値は大きくなるものと推察されます。これらのことから、この回帰係数の値は、林木のおかれた状態によって様々な変化する幹材積連年成長量の樹幹内分布状況をよく表現する「ものさし」として考えてよいようです。

3) 枝下高、枝下高率、葉量の違いと回帰係数の値

前に述べました回帰係数の値と幹材積連年成長量の配分状況との関係をもう少し詳しく考えてみます。林木は、そのおかれた状態によって、同化器官としての葉量の大きさや、その葉の樹幹での

着生状態（枝下高、枝下高率）などが異なりますので、樹幹での幹材積連年成長量の配分状況も異なったものになることが予想されます。そこで、具体的に葉量や枝下高あるいは枝下高率の違いと回帰係数との関係を検討してみました。

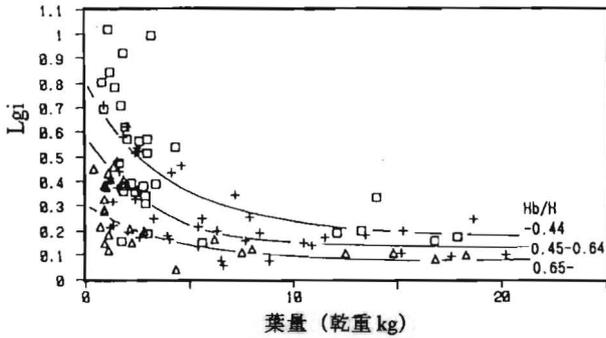


図-4 枝下高率の違いによる葉量とLgiとの関係
(□)枝下高率0.44以下、(+)0.45～0.64
(△)0.65以上

図-4はこれらの検討結果を示し、葉量と枝下高率および回帰係数との関係をよく表現しています。この図から、同じ葉量をもつ林木間では枝下高率が大きな林木ほど回帰係数は小さな値をとること、すなわち、幹の下部に向かって幹材積連年成長量の配分が小さくなっていることがわかります。また、葉量の小さな林木では、枝下高率の違いによって回帰係数は大きく変動し、枝下高率が小さな林木（樹冠が根元近くまである林木）では回帰係数は大きな値となることがわかります。このような林木は根元付近への肥大成長が大きい林木であることがうかがえます。

以上の結果は、密度管理や枝打ちなどによって枝下高率を調節することができれば、ある葉量をもつ林木の樹幹に沿った幹材積連年成長量の配分の仕方を自由に調節することができることを示しています。

4) 樹幹内辺材部量の垂直的分布と幹材積連年成長量配分状況との関連性

先の仮定では、葉で生産された同化物質の樹幹内での配分状況は、同化物質の一部が樹幹内辺材部量の生活のために消費されながら配分されとしたことから、配分状況は辺材部量の樹幹内分布状況によって左右され、両者の分布状況は互いに関連性があるものと考えられました。

そこで、図-2と同じように、すべての標本木について樹幹解析によって、各相対高さ区分ごとに樹幹内の辺材部材積を計算し、その垂直的分布状況を示しました（図-5）。

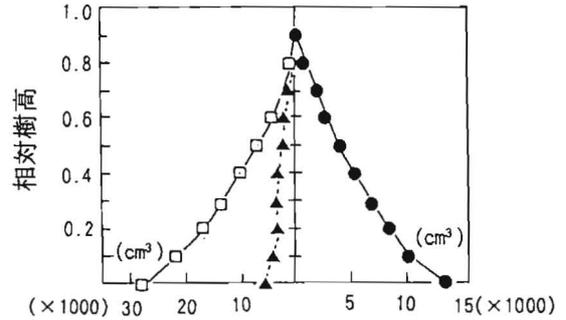


図-5 辺材部材積、積算辺材部材積
および幹材積の垂直分布
(▲)辺材部材積、(□)積算辺材部材積
(●)幹材積

辺材部材積の分布は、図-2の幹材積連年成長量の垂直的分布状況の場合と、ほぼ同じような形をしていることがわかります。同じように、梢端から各区分ごとに辺材部材積の積算値を求め図示

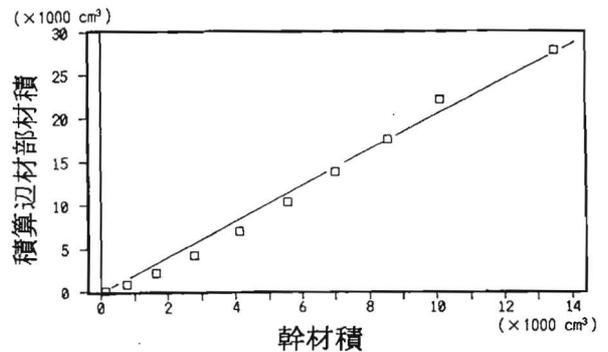


図-6 幹材積と積算辺材部材積との直線回帰

しますと、図-5の左側に示すとおりになり、各相対高区分ごとに求めた幹材積と積算辺材部材積との関係を図-6に示したところ直線関係が得られました（回帰係数をLvsで示す）。また、同じように、各相対高位置で辺材部断面積と幹断面積を計算し、幹材積の代わりに幹断面積を、梢端からの積算辺材部材積の代わりに積算辺材部断面積を入れ替え図示しても同じ傾向が得られることがわかっています（回帰係数をLgsで示す）。以上から、仮定どおり樹幹内での辺材部量の垂直的分布状況と幹材積連年成長量の垂直的配分状況とは

互いに密接な関係があることがわかります。たとえば幹材積連年成長量の配分が少ないところでは辺材部材積は小さくなっています。

5) 樹幹の辺材部量分布状況を示す「ものさし」と樹幹内心材材積率との関係

各標本木の樹幹に沿った辺材部量の垂直的分布状況を示す「ものさし」として求めた回帰係数Lgsと、樹幹内における心材材積率（心材部材積/全幹材積）との関係を求めてみました。

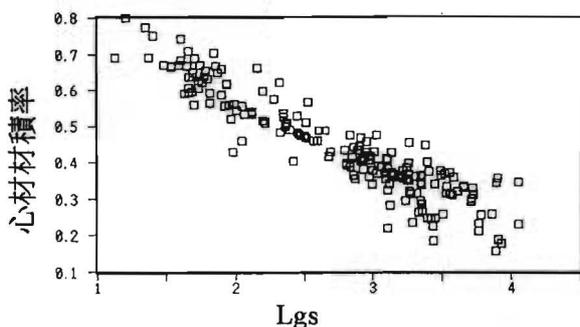


図-7 Lgs と心材材積率との関係

前項で示したように、このLgsが小さい値をとる場合は、幹全体で辺材部量が小さいと推察されますので、幹に占める心材部量の割合は大きくなることが予想されます。図-7は両者の関係を示しますが、予想通り非常に高い相関関係($r=-0.931$)が得られました。なお、心材材積率(Hvp)とLgsとの回帰式は次式で示されます。

$$Hvp = -0.18Lgs + 0.94$$

以上、1)~6)までの検討結果は、与えられた林木の葉量や枝下高率などを調節することによって、目的とする幹材積連年成長量の樹幹に沿った配分（幹の肥大成長）や、樹幹内の心材材積率などを人為的に制御できることを示しています。

(2) 心材形成調節および年輪幅調節のための施業技術

1) 枝下高の推定

長野県内カラマツ林分から抽出した78林分の資料を用いました。

心材形成調節のための施業技術の開発の場合は、前述の資料を用いて、樹高成長とともに林分密度の変化と枝下高の変化との関係を明らかにして、次式により枝下高を推定しました。

$$1/R = 1/(cS_R^d) + 1$$

ここに、枝下高相対幹距($R=S_B$)= S/H_b 、

相対幹距(S_R)= S/H

H: 林分上層木平均樹高(m)、 H_b : 林分平均枝下高(m) S: 林木間平均距離(m) = $100/\sqrt{N}$ 、
N: haあたり本数、c, d: 定数

この式を用いて林分密度と上層樹高から枝下高を推定した場合の推定誤差率は、絶対値での平均誤差率で12.2%および平均誤差量で1.3mとなり、枝下高推定はほぼ良好でした。

年輪幅調節のための施業技術の開発の場合には、心材形成の項での式で、相対幹距として胸高直径を用いた胸高直径相対幹距(S_D)= S/D を用いて推定（他は同じ）を試みました。なお、推定式は次式の通りです。

$$1/R = 1/(fS_D^e) + 1$$

ただし、D: 胸高直径、R: 枝下高相対幹距(S_B)、
f, e: 定数

同じように、林分密度と胸高直径から枝下高を推定した場合の推定誤差率は、絶対値での平均誤差率13.8%および平均誤差量は1.4mでした。この方法での推定もほぼ良好と考えられました。

2) 樹冠長と樹高から葉量の推定

ある生育段階（樹高で示す）での葉量の推定には、幹材積連年成長量解析での葉量と樹高、枝下高の資料を用いて、次式により推定しました。

$$\log WL = 1.2910 \log (H \cdot C_L) - 2.1845$$

($r=0.931$) ただし、WL: 葉量(乾重kg)、H: 樹高、樹冠長(C_L)= $H-H_b$

3) 目標とする心材材積率管理モデル図

以上の結果に、さらに心材材積率と樹幹に沿った肥大成長を示す「ものさし」としてのLgiとの関係式が成立することを利用して、図-8に示す「目標とする心材材積率管理モデル図」を作成しました。

この図には、心材材積率と上層木樹高、枝下高(率)および林分密度との関係を一括して示してあります。たとえば、与えられた林分の心材材積率を0.7かそれ以上にするためには、心材材積率曲線の0.7に沿って樹高成長とともに林分密度を調節することになります。この場合、枝打ちによ

でも可能で、与えられた上層樹高曲線に沿って心材材積率曲線が交叉するところまで枝下高が得られるよう枝打ちします。

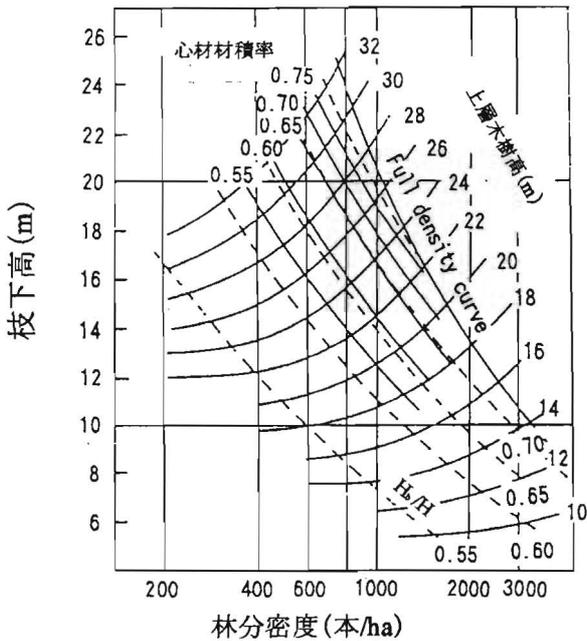


図-8 目標とする心材材積率管理モデル図

4) 目標とする年輪幅管理モデル図

前項と同じように、胸高位置(1.2m)での年輪幅とLgiとの関係式が成立することなどを利用して、図-9に示す「目標とする年輪幅管理モデル図」を作成しました。

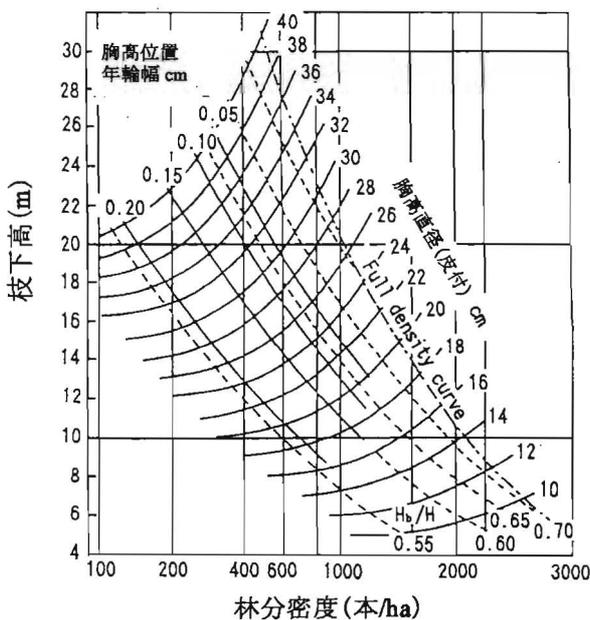


図-9 目標とする年輪幅管理モデル図

この図は、胸高位置での年輪幅と林分平均胸高直径、枝下高(率)および林分密度との関係を示しています。たとえば、同じ林分密度のまま間伐などによる本数調節を行わずに放置しますと、林分の成長(胸高直径の増大)と共に枝下高および枝下高率の上昇と、その反対に年輪幅の減少がこの図から読みとれます。また、同じ林分平均胸高直径をもつ林分に対し、目標とする枝下高率になるよう枝打ちを実施しますと、新しい枝下高率の位置は「等胸高直径線」に沿って右上方向に移動するため、見かけ上林分密度が増したことになるようになります。さらに、年輪幅を一定に保つよう管理する場合は、「等年輪幅曲線」に沿って、林分平均胸高直径と林分密度、林分平均枝下高との関係をうまく保つよう間伐を繰り返し行うことによって可能となります。

(3) 樹幹における肥大成長とらせん木理との関係

カラマツ材は強度性能や硬度などにおいて、他の樹種よりも高い特性をもっていますが、木理の回旋性(らせん木理)が他の樹種に比べ強いために、これが原因となって製材品のねじれ狂いが生じやすいと考えられています。

らせん木理の発生原因は、主として次ぎに示す2点が上げられます。その一つは、形成層での紡錘形原始細胞の偽横分裂で左右頻度の違いにより生ずる、とする考え方と、もう一方は、前記細胞の先端部伸長方向の偏りが原因、とする考え方です。現在でも、この分裂面の偏りを決定するのが環境要因なのか遺伝的要因なのかは簡単には決めがたい、とされていますが、一般的には遺伝的要因の影響が大きいようです。

なかには、らせん木理の遺伝的な原因は認めながらも、環境要因の影響もあることを認め、肥大成長の大きなものほどらせん木理角も大きい傾向があること、さらには、「ねじれ返し」年齢なども肥大成長と関係がある、とする研究者もいます。

本研究ではこれらの点をふまえ、施業的な視点から、らせん木理角調節の可能性を検討したものです。

- 1) 回旋角の変動タイプと各タイプの出現状況
長野県内のカラマツ主伐6林分から、標本木49

本を抽出したものを資料としました。回旋角の測定は各丸太の末口での円板を割裂法(図-10参照)で行い、各年輪ごとに回旋角を測定しました。

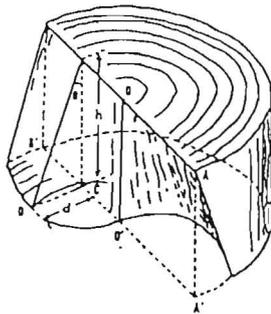


図-10 割裂法による回旋角測定
模式図(三上1988)

各年輪での回旋角(繊維傾斜度)は次式により計算しました。

$$\theta = \tan^{-1}(CD/h)$$

回旋角は樹齢と共に変化し、その変化の状況は様々ですが、一般的には成長初期に最大値がみられ、次第に回旋角は小さくなる傾向を示します。ここでは、そのような変動状況を小沢(1984)の示した3タイプに分類して、各タイプの出現頻度を検討しました。

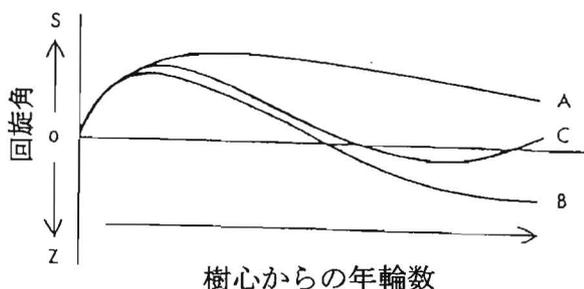


図-11 回旋角の樹心から外への変動タイプ(小沢1984)

変動タイプの区分は、図-11に示すA、B、Cの3タイプとし、各タイプの出現状況をみました。結果は全標本木でのAタイプの出現割合が約59%、次いでBタイプの約27%、Cタイプは最も少なく約14%でした。樹齢と共に回旋角が減少し、しかも「ねじれ返し」のみられるCタイプを好ましいものとするれば、Cタイプの出現は極めて少ないことがわかります。

2) 肥大成長と回旋角

各変動タイプ別に年輪幅と回旋角との関係を、

樹心から1年ごとに調べてみました(表-1)。

表-1 樹心からの一定年輪における年輪幅と回旋角との相関係数

回旋角 変動タイプ	樹心からの年輪数						
	2	3	4	5	10	20	30
A	0.204	0.608*	0.313	0.155	0.058	0.143	0.132
B	0.166	0.088	0.006	0.045	0.161	0.103	0.236
C	0.385	0.260	0.133	0.373	0.128	0.803*	0.624
全タイプ	0.068	0.427**	0.069	0.081	0.040	0.188	0.090

* 5%有意水準 ** 1%有意水準

結果はAタイプの3年輪とCタイプの20年輪で高い相関値が得られました。また、Aタイプのものは2年輪および4年輪でもやや相関係数が高くなっていました。しかし、Cタイプの20年輪での相関係数の高い理由は、標本数が少ないこと以外はっきりしませんでした。

樹心から1~2年輪のところでは年輪幅と回旋角とに相関関係のみられる報告も数多くみられますが、ここでの結果もこれらと合致しているようです。また、Aタイプのものは、成長初期の回旋角が大きいと、その後の回旋角も大きく推移することがわかっています。

したがって、最も出現率の高いAタイプの回旋角変動をもつ林木では、比較的早期での肥大成長が大きいと回旋角も大きくなり、この大きな回旋角はその後の回旋角にも影響して、比較的大きな回旋角で推移することが明らかです。

以上の結果から、カラマツ林施業にとって、らせん木理角を小さくした材を生産するためには、裾枝払いなど人為的な作業により、成長初期での肥大成長を抑制することが重要です。

(4) カラマツの成長が強度性能などの材質に及ぼす影響

本来の生育環境である本州中部の天然分布域を離れて、遠く北海道や東北地方などの高緯度地方に植栽されたカラマツは、同じような気候とはいえ、本来の生育環境とは異なり温度や日長などが異なる地域の生育であることから、気温の低下にもかかわらず限界日長の変化によって遅くまで成長を続けることなど、生育期間や冬芽形成時期などに差異がみられ、このことが、本来の生育地の材質と異なったものとなることが考えられます。そこで、成長が材密度や曲げ強度などの材質に及

ばす影響について検討することにより施業を考えてみました。ここでは平均年輪幅と曲げヤング係数について、主として両地域間に違いがみられるかどうかについて述べてみたいと思います。

1)平均年輪幅の比較

長野県内のカラマツ資料については、前項のらせん木理解析で用いた林分から、材長3mの丸太を採取し、各丸太から10.5cmの心持正角材を製材し、天然乾燥した111本を用いました。北海道の資料については、すでに小泉ら(1987)が報告した資料で、これらは、すべて調査林分の間伐材から丸太を採取し、10.5cm心持正角材に製材し天然乾燥した231本を用いました。

両地域林分間の平均年輪幅の比較には、林分密度など施業条件の違いの影響を受けずに、立地環境や気象環境による影響が大きいと考えられる心持正角材木口面での、ごく限られた成長初期の平均年輪幅を用いました。

表-2 心持正角での平均年輪幅(mm)の北海道と長野林分間比較

(長野)	年輪幅	(北海道)				
		北見	士別	木古内	浦河	静内
		6.4	4.9	6.3	6.9	5.3
		t-値				
黒姫	3.9	10.23**	3.89**	7.50**	11.94**	6.00**
稲核	4.4	7.53**	1.72	5.78**	9.96**	3.66**
長谷	4.4	7.89**	1.97	6.93**	12.73**	4.42**
北相木	4.7	4.72**	0.60	3.43**	6.05**	1.82
白田	3.0	9.19**	5.03**	7.95**	12.98**	7.49**
望月	4.4	6.25**	1.47	5.47**	10.14**	3.42*

*5%有意水準 ** 1%有意水準

検討結果は、表-2に示すように、長野林分と比べ北海道林分の平均年輪幅は大きいようで、統計的にも1%有意水準で両地域間に差が認められました。このことは、先の推測がほぼ該当しているものと思われました。

2)曲げヤング係数

材の強度性能を示す指標として曲げヤング係数と曲げ強度があります。曲げ強度は材の破壊が節などの欠点によって影響を受ける場合があるのに対し、曲げヤング係数は材のたわみにくさを示すもので、材の欠点の影響を受けにくいとされています。

曲げヤング係数の両地域林分間の比較では、表-3に示すようにほぼ北海道と長野間に差がみられるようでしたが、曲げヤング係数の単なる比較で

表-3 心持正角の曲げヤング係数の北海道と長野林分間比較

(長野)	ヤング係数	(北海道)				
		北見	士別	木古内	浦河	静内
		69.3	88.1	92.0	68.5	80.0
		t-値				
黒姫	92.6	7.96**	1.11	0.11	5.28**	3.48**
稲核	77.9	3.06*	2.66	3.22*	2.84	0.81
長谷	90.2	7.50**	0.54	0.43	6.75**	3.96*
北相木	98.6	5.47**	0.30	0.45	5.70**	3.25**
白田	104.6	8.71**	2.96*	1.95	7.44**	6.38**
望月	99.9	9.06**	2.54	1.57	8.71**	6.90**

*5%有意水準 ** 1%有意水準

結論づけるのは危険が多いようです。そこで、平均年輪幅と曲げヤング係数との関係を直線回帰式として両地域で求め、両地域間の比較をしたところ、同じ平均年輪幅を持つ林分では両地域間に差が認められませんでした。一般的には北海道林分は長野林分に比べ平均年輪幅が大きいので、曲げヤング係数も小さいことがわかります。

3 まとめ

以上の結果をまとめますと、

- ①カラマツの樹幹に沿った連年成長量や、辺材部量の垂直的分布を示す「ものさし」があることを明らかにしました。
- ②この「ものさし」を利用して、「目標とする心材材積率および年輪幅を得るための管理モデル図」を作成しました。
- ③材のねじれの主要原因であるらせん木理角を小さくするためには、成長初期の肥大成長を裾枝払いなどにより抑制することが重要であることを明らかにしました。
- ④長野と北海道林分間について心持角での材質比較では、北海道林分の年輪幅が比較的大きなこと、および大きな年輪幅のために強度性能が小さなことなどが明らかになりました。しかし、同じ年輪幅ならば、両地域林分間に違いが認められませんでした。

(所長 武井)

参考文献

小泉章夫・上田恒司・片寄謙(1987):カラマツ間伐材の力学的性質. 北大演報 44. 327~354.
 小沢勝治(1984):針葉樹の回旋木理と乾燥ねじれ. 33~34.