



Title	カラマツ間伐材の力学的性質
Author(s)	小泉, 章夫; KOIZUMI, Akio; 上田, 恒司 他
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 44(1), 327-354
Issue Date	1987-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21206
Type	departmental bulletin paper
File Information	44(1)_P327-354.pdf



カラマツ間伐材の力学的性質

小泉章夫* 上田恒司* 片寄 謙**

Mechanical Properties of the Thinning Crops of Plantation-grown Japanese Larch

By

Akio KOIZUMI*, Koji UEDA*
and Takashi KATAYOSE**

摘 要

道内5箇所(北見, 士別, 木古内, 浦河, 静内), 6林分のカラマツ間伐材の基礎材質試験を行なった。試験項目は供試木の年輪幅, 容積密度数および繊維傾斜ならびに心持正角材および無欠点小試験片の機械的性質である。年輪幅と容積密度数の検討結果は従来から言われているように施業による容積密度数の管理の可能性を示唆するものであった。ただし同一年輪幅における平均容積密度数は林分間で大きな差が認められた。正角材の試験では繊維傾斜, 節, 材面割れの影響や諸性質の相互関係を調べ, 強度推定の方法を探った。また無欠点小試験片の試験では実大材の強度比を求めたほか, 試片の髄からの年輪数および距離との関係から未成熟材・成熟材の境界についても考察した。

キーワード: カラマツ, 間伐材, 未成熟材, 材質, 強度。

1. 緒 言

カラマツは初期生長が良いことから道内ではトドマツに次ぐ主要造林樹種となっている。昭和30年台の大規模な植栽が行なわれた当時は短伐期施業が考えられていたのであるが, 小・中径材の需要構造が変わった現在では長伐期で大径材を育成する方向に転換しつつある。本来カラマツは成熟材の性質が優れているのであり, 今後, 少ない手入れで大きな材積を収穫できるように施業方法の確立が必要となろう。

カラマツ間伐材は未成熟材部を多く含むことから強度性能が劣り, また乾燥に伴って振れ狂いが生じやすいなど, 利用にあたっては留意すべき点が多い。乾燥方法の改良や集成加工材,

1986年8月19日受理 Received August 19, 1986.

* 北海道大学農学部木材加工学講座
Laboratory of Wood Engineering, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

** 北海道林木育種場育種研究室
Hokkaido Forest Tree Breeding Institute.

単板積層材、円柱材といった用途の開発も進められているが、さらに利用を促進して間伐の実施を進め、将来の優良材の生産を期待したいところである。

さて道産カラマツ類の材質についてはこれまでに数多くの研究がなされてきているが^{1)~11)}本研究は未成熟材部が大半を占める間伐木からの製材について、生立時の性質を含めた諸性質の相互関係や欠点が機械的性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的として行なったものである。ここで取上げたのは、供試木の年輪幅、容積密度数、繊維傾斜と心持正角材の曲げ、振り、圧縮性能および無欠点小試験片の曲げ、圧縮、剪断性能である。また一部の供試木については、正角材製材時の背板から採材した板材の曲げ、振り試験も行なった。

なお、これらの供試木は、からまつ材質育種事業実施要領(55林野造第197号)に基づいて北海道林木育種場が実施した材質優良木の選抜事業における選抜木の一部である。この選抜は生長量と繊維傾斜に着目して行なわれたものであるが、その詳細については片寄ら^{14)~17)}の報告を参照されたい。

2. 材料と試験方法

2.1 供試木

供試林分および供試木の概要を Table 1 に示す。所在地は北見、士別、木古内、浦河、静内の5箇所であり、気候的に広範囲の環境から選ばれている (Fig. 1)。植栽密度はいずれも3,000本/haである。静内のみ昭和47年と53年の2回、本数割合で20%の間伐を行なっているが、他の林分では今回が初回の間伐である。特に士別の供試林は間伐遅れであったことがわかる。

これらの林分の間伐木から比較的生長の良いもの(総計525本)を選び供試木とした。

2.2 木取り方法

供試木の木取り方法を Fig. 2 に示す。地上高80-100 cm 部位から採取した2枚の円板は

Table 1. Outline of sample plots

Location (Cpt. No.)	Age	Area (ha)	Direction of slope	Type of soil	Number of trees per ha	Height (m)	D.B.H. (cm)	Clear length (m)	Number of specimens	
									tree	lumber
Kitami 北見事業区 90-つ、れ	20-21	24.2	S	BD	900	Av. 15.2 S.D. 2.6	13.8 4.3	6.8	112	112
Shibetsu 私有林	37-42	5.0	S	BD (d)	800	Av. 18.5 S.D. 2.5	22.2 2.5	12.5	100	55
Kikonai 木古内事業区 1265-い、	24	16.9	E	BD	600	Av. 13.7 S.D. 2.5	18.7 4.4	4.8	81	15
Urakawa 浦河事業区 59-と	24	9.0	E	BD	700	Av. 18.5 S.D. 3.3	16.5 4.0	8.7	98	19
Shizunai 静内町有林 泉団地6林班	26-30	16.1	N	BD	700	Av. 19.2 S.D. 3.7	17.5 4.2	7.0	134	30



Fig. 1. Location of sample plots.

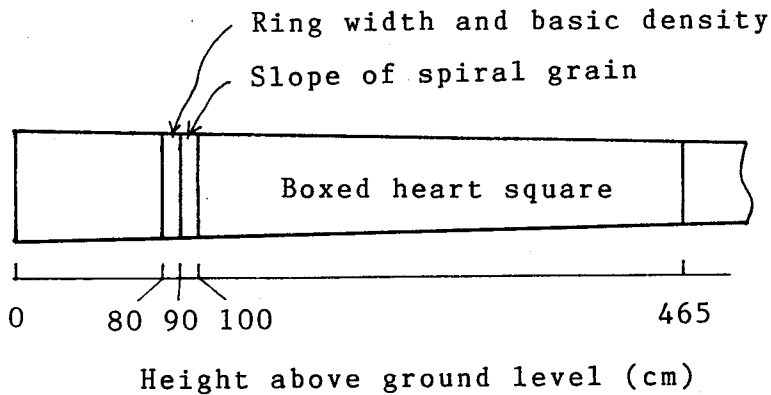


Fig. 2. Sampling scheme for specimens.

年輪幅と容積密度数の測定および割裂法による繊維傾斜の測定に供した。これより上部、地上高1.0-4.65 mの素材から10.5 cm角の心持正角材を製材し、天然乾燥後、狂いの測定を行ってから強度試験に供した。Table 1で北見を除く4林分の製材の試験体数が供試木の数を大きく下回っているのは、これらの林分については最大繊維傾斜が5%以下の供試木を選別し試験体を製材したためである。

2.3 心持正角材の試験

1) 振り剛性試験

Fig. 3に示すように正角材の一端を固定し他端に900 kg cmのトルクを分銅载荷によって加え、3つの区間の振り角を測定し、見かけの剪断弾性係数(G)を以下の式から求めた。

$$G = \frac{M_t}{J\theta}$$

ここに M_t : 振りモーメント, θ : 単位区間長当たりの振り角,

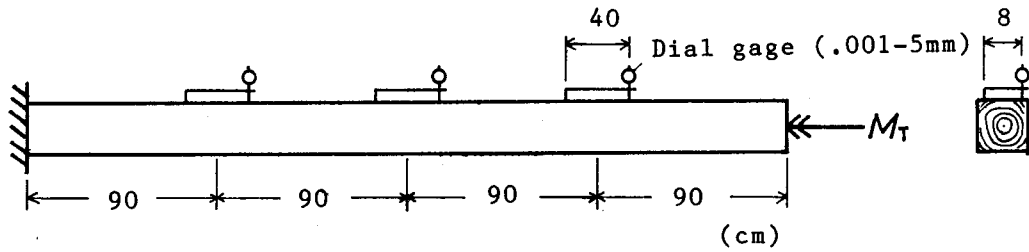


Fig. 3. Test method to measure torsional rigidity.

$$J = \frac{a^3 b}{3} \left\{ 1 - \frac{192a}{\pi^5 b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^5} \tanh \frac{(2n-1)\pi b}{2a} \right\},$$

a, b : 試験体の辺長, ただし $a < b$.

また3カ所の振り角測定区間周辺の材面割れ, 節径および節数を4材面について記録した。

2) 曲げ破壊試験

正角材を180 cm ずつ2本に分割し各々について Fig. 4 に示す方法で曲げ試験を行ない, ヤング係数, 比例限度および曲げ強さを求めた。ここで荷重点間の最大モーメント区間は振り剛性を測定した40 cm 区間に対応させた。

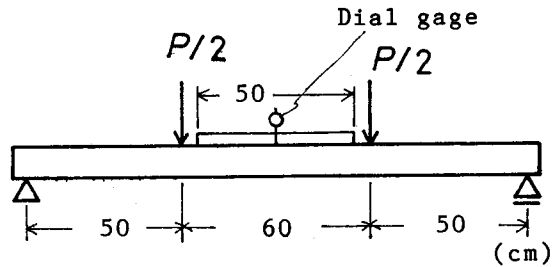


Fig. 4. Method of bending test.

3) 縦圧縮試験

曲げ破壊試験後, 試験体の一端から一体ずつ長さ25 cm の圧縮試験片を採材し, 縦圧縮強さを求めた。

2.4 無欠点小試験片の試験

曲げ破壊後の正角材の非破壊部の無欠点部分からできる限り多くの試験体 (2.5 × 2.5 × 40 cm) を採材した。その際, 髓から試験片の断面中央までの年輪数と距離を記録した。試験片は JIS 2111, 2113, 2114 に拠って曲げ破壊, 縦圧縮, ブロック剪断試験に供した。

2.5 板材の試験

一部の産地のものについては正角材製材後の背板より板目板を採材し, 実験に供した (北見産3本, 士別産10本)。板材は120 cm ずつ3体に切断し, 各々を振り剛性試験の後, 曲げ破壊試験に供した。試験体の断面寸法はおよそ3 × 12 cm である。振り試験は無節部18 cm 区間の振り角を測定し, 見かけの剪断弾性係数を求めた。曲げ試験は2点荷重方式 (110 cm スパン, 荷重点間50 cm) で行ない, 荷重点間内40 cm 区間の撓みによるヤング係数, 比例限度および曲げ強さを求めた。

2.6 含水率について

各々の試験体について測定した含水率の平均値と変動係数を Table 2 に一括して示す。曲げ試験時の平均含水率が 18% 程度とやや高いが、表面含水率は約 10% であったので、含水率による曲げ、振り性能の低下は殆んどないと考えられる。したがって今回の強度試験では材料は全て気乾材と見做すこととした。

Table 2. Average moisture contents of specimens

Plot	Boxed heart squares		Small clear specimens	Boards
	bending sp.	compression sp.		
Kitami	18.8 (13.8)	14.6 (3.1)	13.6 (3.3)	13.5 (10.6)
Shibetsu	18.8 (12.0)	15.0 (5.4)	12.9 (5.3)	12.9 (8.9)
Kikonai	18.1 (7.3)	15.7 (3.7)	14.5 (5.4)	—
Urakawa	18.7 (7.3)	15.9 (4.2)	14.6 (4.6)	—
Shizunai	18.7 (8.5)	16.0 (4.7)	13.4 (7.4)	—

Note: Coefficients of variation are shown in parentheses.

3. 結果と考察

3.1 年輪幅と容積密度数

供試木の地上高 80-90 cm から採取した円板の分割試片による平均年輪幅と平均容積密度数の関係を Fig. 5 に、また産地別の平均値と標準偏差を Table 3 に示す。ここで髓より 5 cm 以内の部分をコア材、その外側をアウター材と定義し、各々の領域に含まれる試片についての平均値で示した。コア材とアウター材はそれぞれ未成熟材、成熟材を多く含む領域に対応していると考えられる。両者の平均年輪幅はそれぞれ 4-9 mm, および 2-6 mm の間に分布している。

平均年輪幅と容積密度数の関係はバラツキが大きいものの負の相関を示しており、コア材、アウター材の区別なく同一直線上にあるようである。例えば静内のもものではコア材とアウター材であまり年輪幅に差がないのであるが、両者の平均年輪幅と容積密度数の関係は重なって見える。そこで両者を区別せず、各年輪幅における容積密度数の平均値を求めて Fig. 6 に示した。これを見ると年輪幅 2-7 mm で密度は直線的に減少し、7 mm 以上ではほぼ一定値をとるようである。この減少の傾きは林分間で差がなく、5 産地の平均で 1 mm あたり約 16 kg/m³ であった。比較のために既往の報告による年輪幅と容積密度数の関係も同図 (b) に示した。北海道産のものはいずれも供試木数が 3-10 本と少ないが、同様の傾向が見てとれる。さらに信州産カラマツについても年輪幅 2-7 mm で容積密度数は 1 mm あたり約 16 kg/m³ の割合で減少するという全く同様の傾向が見られる。

千葉ら¹⁸⁾ はカラマツの晩材率と容積密度数の間に大きな相関を認めており、密度の大小は晩材率によるところが大きいと考えられる。一方、久保ら¹⁹⁾ はアカマツ、スギ、ヒノキについ

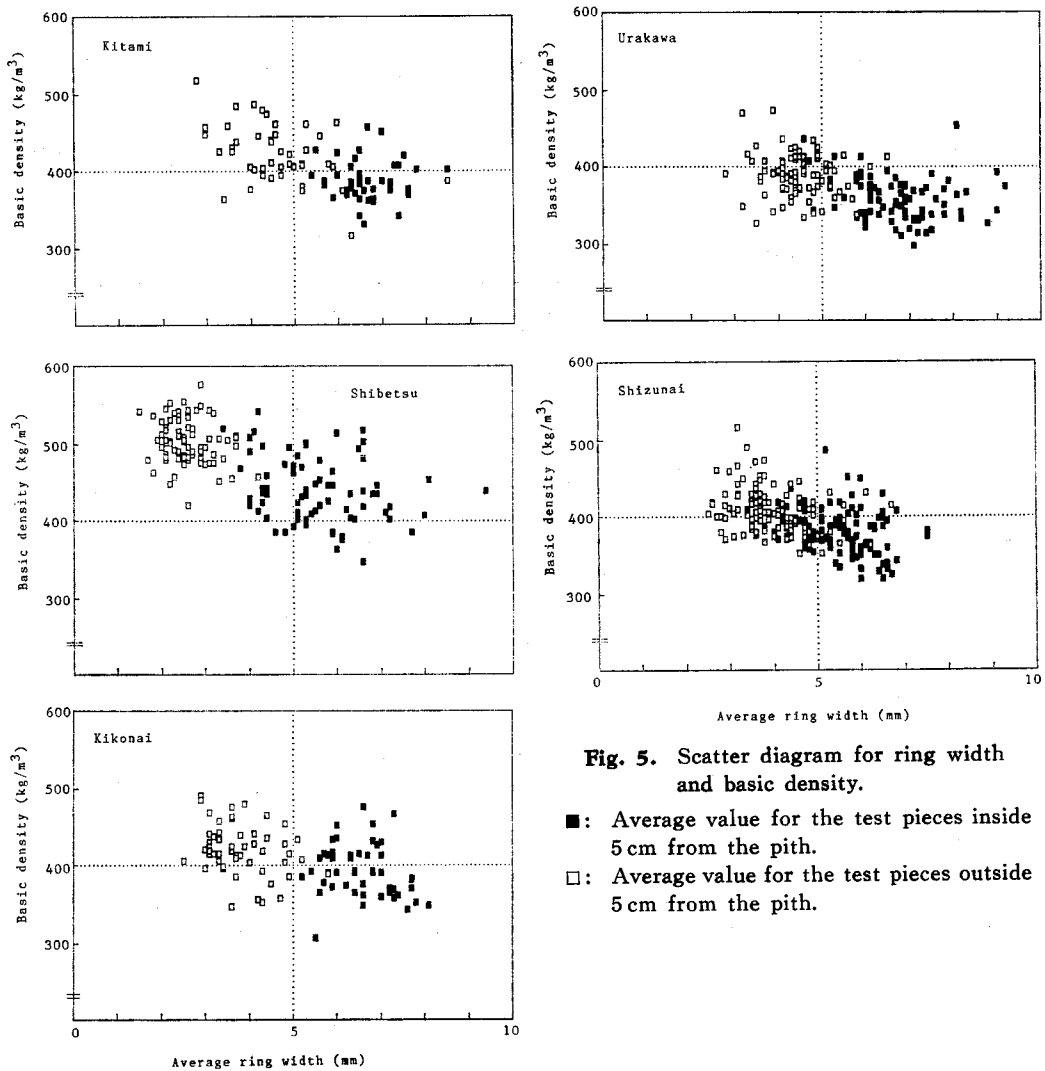


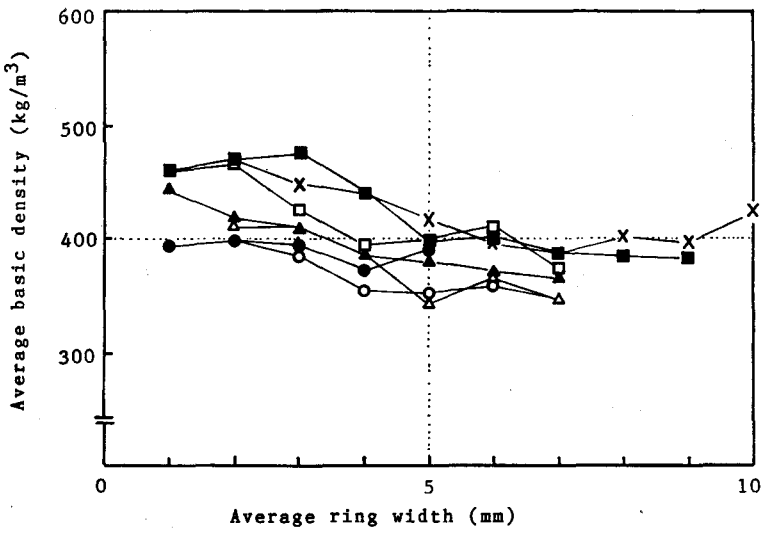
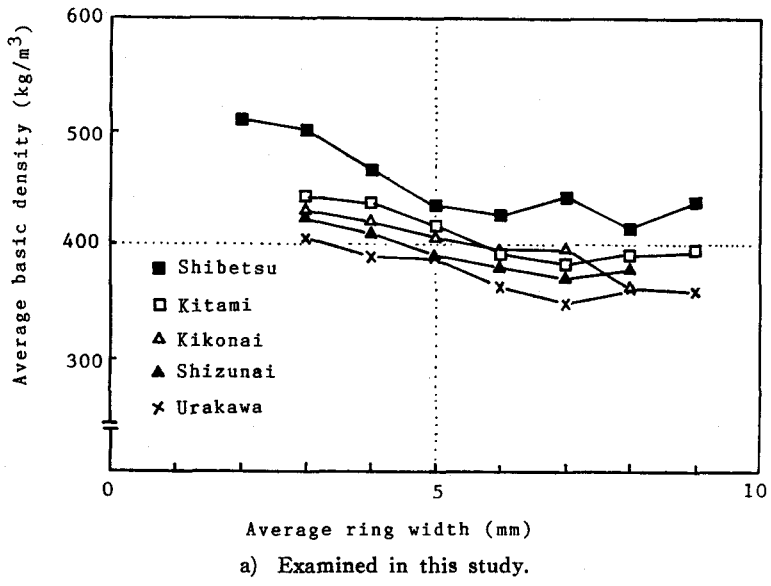
Fig. 5. Scatter diagram for ring width and basic density.

- : Average value for the test pieces inside 5 cm from the pith.
□: Average value for the test pieces outside 5 cm from the pith.

Table 3. Average ring width and average basic density

Plot	Number of sample trees		Ring width (mm)		Basic density (kg/m ³)	
			core*1)	outer*2)	core	outer
Kitami	43	Av.	6.6	4.6	387	424
		S.D.	0.7	1.0	27	38
Shibetsu	77	Av.	5.5	2.6	440	504
		S.D.	1.1	0.5	42	30
Kikonai	53	Av.	6.6	3.8	392	420
		S.D.	0.7	0.7	33	32
Urakawa	86	Av.	6.7	4.5	358	389
		S.D.	1.0	0.6	29	28
Shizunai	109	Av.	5.5	4.0	382	410
		S.D.	0.8	0.8	29	29

Note*1),*2): Average values for test pieces inside and outside 5 cm from the pith, respectively.



- b) Reported in other studies.
- : 虻田 Abuta, n=6, MIYAJIMA (1970)⁹⁾
 - : 札幌 Sapporo, n=3, KOIZUMI & UEDA (1987)³²⁾
 - ▲: 恵庭 Eniwa, n=8, MIYAJIMA (1979)⁹⁾
 - △: 天塩 Teshio, n=10, KOIZUMI & UEDA (1987)³²⁾
 - : 苫小牧 Tomakomai, n=3, KOIZUMI & UEDA (1987)³²⁾
 - : 苫小牧 Tomakomai, n=5, MIYAJIMA (1985)¹¹⁾
 - ×: 本州 Honshu, n=22, NAKAGAWA (1963)¹³⁾
- n: Number of sample trees.

Fig. 6. Relationship between ring width and basic density.

て年輪幅と晩材率の関係を調べた結果、年輪幅が2 mm 以上ではその増加に伴って、晩材率は平均値・バラツキともに漸減し、一定値に近づくことを示した。樹種は異なるが、本研究で得られた年輪幅と容積密度数の関係によく対応していることがわかる。

同一年輪幅における容積密度数は林分間で100 kg/m³ 近くも異なり、例えば土別のカラマツは「重く」浦河のものは「軽い」と言うことができる。これは晩材率の違いなど、環境あるいは遺伝的要因によると考えられる。このように年輪幅と容積密度数の関係を求め、一定の年輪幅(例えば4 mm)における容積密度数を比較することで、林分単位の材質評価がある程度可能である。

今回の主たる実験対象である心持正角材は、その大部分がコア材である。そこで、この部分の半径生長の推移を詳しく調べるため、実大圧縮試験片の木口で髓から材縁までの1年輪毎の年輪幅を測定した。ただし髓を含む年輪の幅は樹高生長との兼合いで不明であるので除外し、その外側の年輪を第1年輪と数えた。圧縮試片の採材位置より3グループ(地上高約1.1 m, 2.8 m, 4.5 m)に分けて各年次における年輪幅の平均値を求め Fig. 7 に示した。このうち地上高1.1 m のものを見ると初年次の年輪幅は林分間で差がなく6 mm 台である。その後、年輪幅は増加し2, 3年輪目で最大値をとったのち漸減する傾向が見られる。2-5年輪目の生長量は林分間で大きく異なり立地の影響が考えられる。

静内の林分では10年次目、土別、浦河の林分では9年次目に生長量の増加が認められ、人為あるいは天然の間引き効果と考えられる。この効果は供試木のより高い位置でも確認することができ(Fig. 7)、樹幹の全体で肥大生長が促進されていることがわかる。特に促進効果が顕著な静内の林分については除・間伐の影響とみられ、適正な間伐を行えば、かなりの期間、年輪幅を4-5 mm 台に保つことができることを示している。

地上高約4.5 m では初年次の年輪幅に2 mm の開きが出ており静内、土別の林分ではこの高さで早くも隣接木の影響が現れていると考えられる。生長量に関して言えば、環境的に北見、浦河の林分が優れ、土別、静内の林分が劣っていたとみられる。

3.2 繊維傾斜について

地上高90-100 cm の円板について割裂法によって測定した繊維傾斜の最大値と平均値を Table 4 に示す。繊維傾斜の変動傾向は殆んどのが初めに大きなS旋回を示し、比較的早い年輪数で最大値をとったのち減少し、一部のものはZ旋回に転じるといった一般的傾向^{20), 21)}を示した。林分別の平均で40-77%の供試木が2-5年の形成層年齢で最大繊維傾斜を示した。

3.3 乾燥による狂いと割れについて

正角材の天然乾燥による捩れと反りを Table 5 に掲げた。ここで言う捩れとは3 m スパンで測定した4材面についての最大矢高を単位長さ当たりの百分率に換算したもので、例えば0.5%の捩れは材端の3つの隅が一平面に接したとき残りの隅で1.5 cm の浮上がりが生じた場合である。

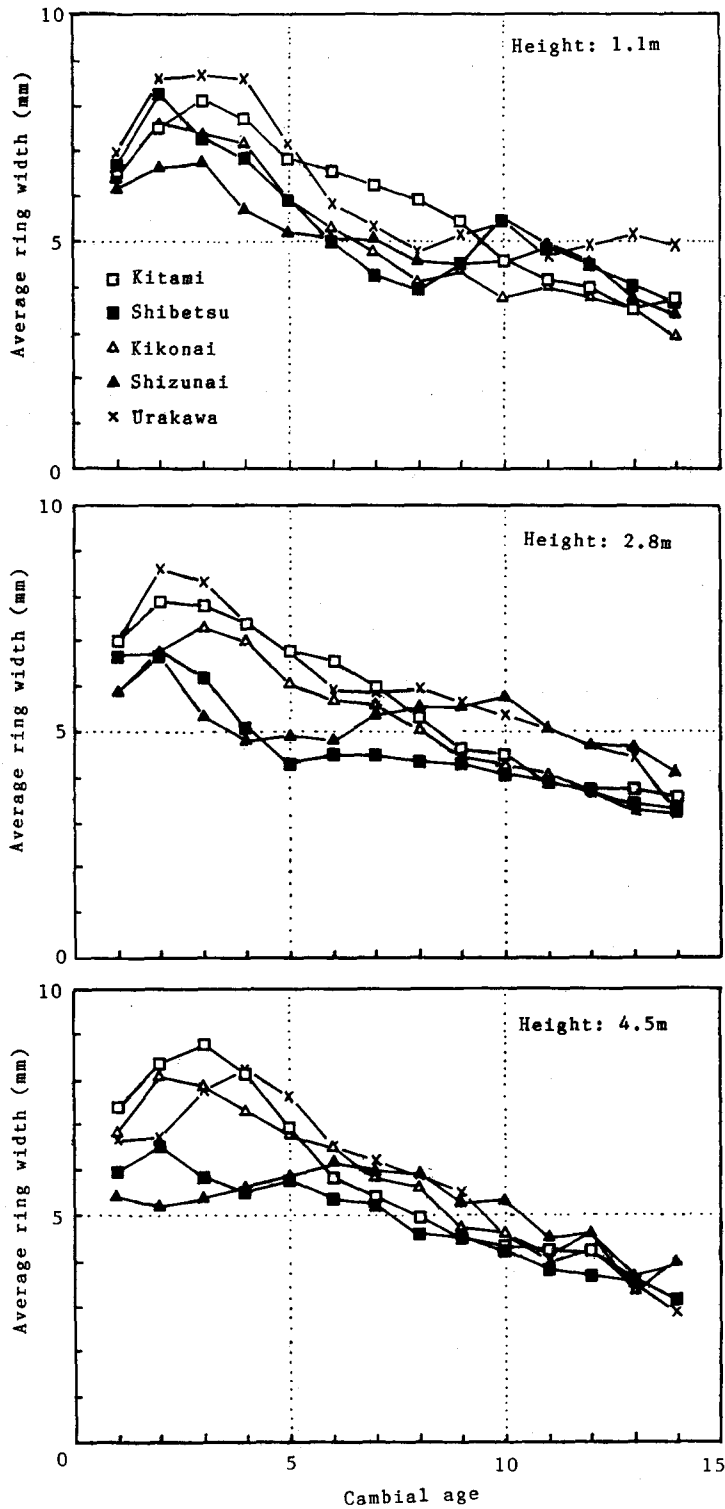


Fig. 7. Relationship between cambial age and ring width.

Table 4. Slope of spiral grain of sample trees

Plot	Number of sample trees	Maximum slope of grain (%)				Average slope of grain (%)			
		Av.	S.D.	min.	max.	Av.	S.D.	min.	max.
Kitami	111	6.94	1.74	2.5	11.8	3.64	1.45	1.2	9.8
Shibetsu	100	7.89	2.70	3.5	19.3	3.92	1.78	1.5	10.7
Kikonai	81	7.16	1.90	3.6	16.9	4.15	1.62	1.2	9.1
Urakawa	98	7.73	1.82	3.6	13.8	4.91	1.66	1.3	9.6
Shizunai	134	7.44	2.15	3.3	16.9	4.20	1.73	1.3	9.2

Table 5. Seasoning defects of boxed-heart squares

Plot	Number of specimens	Twist (%)				Bow (%)				Checks (%)
		Av.	S.D.	min.	max.	Av.	S.D.	min.	max.	
Kitami	112	0.36	0.13	0.06	0.69	0.27	0.18	0.00	1.13	83.0
Shibetsu	55	0.26	0.15	0.03	0.69	0.23	0.13	0.00	0.58	81.8
Kikonai	34	0.25	0.09	0.06	0.45	0.19	0.13	0.00	0.58	93.3
Urakawa	55	0.25	0.08	0.07	0.50	0.21	0.10	0.00	0.42	68.4
Shizunai	71	0.26	0.10	0.06	0.54	0.21	0.13	0.00	0.62	76.7

心持正角材で特に問題とされる捩れ狂いは材幅中央付近の繊維傾斜の影響を大きく受けていると考えられる²²⁾。前節にも述べたようにカラマツの繊維傾斜は髓から樹皮側に向かって大きく変動し、最大繊維傾斜の出現位置も一定しない上、髓からの方向によっても変化傾向が異なることが報告されている²³⁾。したがって、正角材の捩れを供試木の最大繊維傾斜から精度良く予測することは難しいが、両者の間には僅かながら相関が認められた (Fig. 8)。また北見以外の4林分の材の狂いが少ないのは、これらにおいては最大繊維傾斜が5%以下の素材から製材したためと考えられる。ただし2.6節で述べたように狂いの測定時点で平均含水率は20%程度あったとみられ、狂いの量は、まだ気乾状態の平衡値には達していなかったと考えられる。

Table 5に割れとして示したのは正角材の材面で顕著な乾燥割れが生じたものの割合である。平均で約8割の材に乾燥割れが生じたことがわかる。殆どの割れは髓付近にまで達するものであったが、髓の位置に偏りがあるので深さは一定していない。ただし、一般的に割れは髓

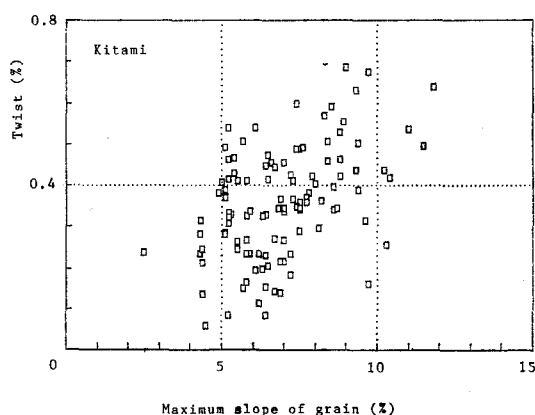


Fig. 8. Relationship between maximum slope of grain and twist of boxed heart squares.

から最も近い材面に生じるので、最大でも 5 cm 以内の深さであると言える。

このようにカラマツ心持正角材では乾燥に伴う狂いと材面割れを避けられないため、製材の JAS による等級付けでは殆どのものが格外になるようである。

3.4 節について

正角材の 4 材面に現れた直径 10 mm 以上の節の数と径を Table 6 に示す。材幅がほぼ 10 cm なので節径はそのまま節径比を表している。節数は 3 箇所測定区間の合計 150 cm の材面に現れた総数である。最大径比はあまり大きくなく林分による差も見られない。これは髓から材面までの距離が最大でも 10 cm 程度しかないためである。既往の研究では節の 7-8 割が 15 mm 以下の大きさであることが報告されている³⁾。今回の結果をまとめればカラマツの 10.5 cm

Table 6. Description of the knots appeared on the surfaces of boxed heart squares

Plot	Number of specimens	Number of knots*		ϕ_{max} (mm)		ϕ_{15} (mm)	
		Av.	max.	Av.	max.	Av.	max.
Kitami	112	10	21	18	47	24	62
Shibetsu	55	10	25	19	58	25	61
Kikonai	15	9	18	17	40	20	46
Urakawa	19	13	31	18	40	24	62
Shiznuai	30	11	21	17	33	21	54

Notes *Knots in 150 cm section; Knots less than 10 mm diameter are not counted.

ϕ_{max} : The diameter of the maximum knot;

ϕ_{15} : Sum of knot diameters within 15 cm section.

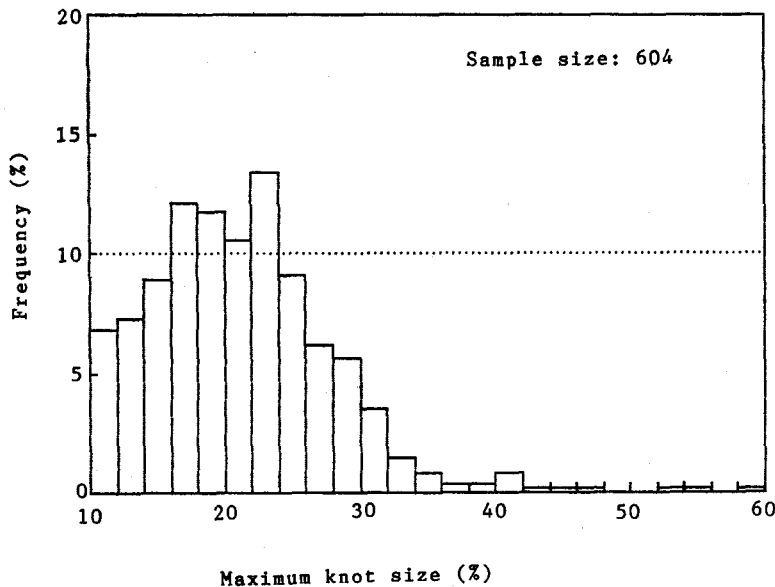


Fig. 9. Histogram of maximum knot size.

Table 7. Mechanical properties of tested lumber

Plot (n)		Boxed-heart beam							Boxed-heart column			Small clear specimen								
		R.W. (mm)	S.G.	MOE (t/cm ²)	σ_{bp} (kg/cm ²)	MOR (kg/cm ²)	G (t/cm ²)	E/G	R.W. (mm)	S.G.	σ_c (kg/cm ²)	C.A.	r (cm)	R.W. (mm)	S.G.	MOE (t/cm ²)	σ_{bp} (kg/cm ²)	MOR (kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)	τ_s
Kitami (112)	Av.	6.4	.454	69.3	171	347	6.2	11.5	6.8	.440	271	8.1	5.7	5.5	.442	73.7	302	653	368	84
	S.D.	1.2	.035	12.2	34	49	0.8	2.7	0.8	.034	30	1.7	1.2	1.3	.040	14.8	50	92	46	11
	Max.	11.0	.548	95.7	289	466	8.5	18.3	9.5	.540	351	14.0	9.3	10.0	.544	111.9	470	850	467	114
	Min.	4.2	.380	37.3	82	228	4.4	4.4	5.1	.357	214	4.0	2.8	3.3	.340	30.2	202	386	227	56
Shibetsu (55)	Av.	4.9	.543	88.1	228	404	7.2	12.4	5.0	.528	338	11.7	6.0	3.7	.557	99.9	450	847	500	110
	S.D.	1.2	.040	16.6	56	67	1.0	2.4	0.8	.040	38	3.3	1.4	1.3	.055	20.2	81	115	79	15
	Max.	8.8	.624	134.8	376	575	10.5	18.0	7.6	.633	435	18.0	10.0	7.7	.644	132.8	622	998	635	146
	Min.	3.0	.451	53.9	114	250	5.5	7.3	3.5	.433	258	4.0	2.2	1.6	.440	54.0	269	450	305	65
Kikonai (15)	Av.	6.3	.483	92.0	216	399	6.3	14.6	5.3	.475	302	9.6	5.7	5.4	.472	81.4	341	704	394	94
	S.D.	1.2	.034	14.5	54	57	0.7	2.4	1.2	.039	35	4.1	1.0	1.2	.056	17.6	61	129	70	14
	Max.	8.5	.558	122.1	330	502	7.7	19.7	7.1	.570	373	20.0	8.4	7.5	.600	113.2	446	985	574	125
	Min.	4.2	.436	68.4	127	313	5.1	10.9	3.5	.422	251	6.0	4.1	3.4	.393	55.8	243	533	318	76
Urakawa (19)	Av.	6.9	.437	68.5	137	328	6.7	10.3	6.5	.429	256	9.8	6.2	5.3	.432	72.4	305	633	346	82
	S.D.	0.8	.027	8.1	27	32	0.7	1.9	1.0	.024	23	1.8	1.3	0.8	.028	11.4	62	60	35	7
	Max.	9.0	.492	81.7	178	379	8.4	14.7	8.1	.469	311	12.0	8.0	7.3	.480	92.5	421	726	414	92
	Min.	5.4	.393	49.1	100	267	5.4	7.5	3.4	.386	226	4.0	3.2	3.8	.383	52.2	218	528	275	61
Shizunai (30)	Av.	5.3	.468	80.0	180	374	6.6	12.4	5.0	.458	283	10.6	5.8	5.1	.459	77.6	323	672	379	89
	S.D.	0.9	.027	6.6	35	42	0.7	2.4	1.2	.030	19	2.3	1.0	0.9	.036	13.1	52	108	49	10
	Max.	7.4	.535	99.2	249	461	7.6	17.7	6.5	.530	325	15.0	7.7	7.3	.551	102.9	403	877	483	112
	Min.	4.1	.426	63.2	124	281	5.0	9.2	2.2	.409	237	7.0	3.7	2.9	.384	55.3	218	393	294	71

Remarks n: Number of sample trees, R.W.: Average ring width, S.G.: Specific gravity, σ_{bp} : Bending stress at the proportional limit, G: Torsional modulus, σ_c : Compressive strength, C.A.: Cambial age of the test pieces, r: Distance from the pith, τ_s : Shear strength.

心持正角材の場合、最大径比は 20% 程度 (Fig. 9), 集中径比は 60% 以下の値をとり直径 10 mm 以上の節はおよそ 15 cm 間隔で見れると言える。

3.5 心持正角材の力学的性質

強度試験の結果を一括して Table 7 に示す。ここで曲げ性能と圧縮強さは個々の供試木の 2 つの試験体について得られた結果の平均値によった。2 つの試験体は採材高さが異なるのであるが、材質の変化傾向は認められなかった。また剪断弾性係数は 3 箇所測定した値の平均値によった。

Fig. 10 は正角材の気乾比重と同一供試木のコア材の容積密度数の関係を示す散布図である。気乾比重は容積密度数のほぼ 18% 増しと見ることができる。

曲げ破壊は未成熟材特有の粘りのない破壊形態を示すものが多かった。また Fig. 11 の断面で斜線を施した引張側の稜角の部分は、最大荷重に達する前に年輪界で剝離するような破壊形態が多く見られ、この比較的成熟度の高い材部の曲げ強さへの寄与は小さいと考えられる。

3.5.1 諸性質の頻度分布

最も試験体数の多かった北見のものについて比重、ヤング係数および曲げ強さの頻度分布を Fig. 12 に示した。先に述べたように、供試木は間伐対象木のうち比較的生長の良かったものから選別されたのであるが、比重、ヤング係数はともにほぼ正規分布に従っている。また試験体は種々の欠点を持つ実大材なので、曲げ強さは極限分布に従うものと考えられたが、ワイブル分布を当てはめてみると密度関数は負の歪みを示しており、この場合も正規分布を仮定した方が良いことがわかる。

正規分布仮定による強度的性質の 5% 下限値とカラマツ材の許容応力度²⁹⁾ から求めた下限値³⁰⁾ を Table 8 に示す。北見のもの曲げ強さを除いて、曲げ、縦圧縮強さは普通構造材の規

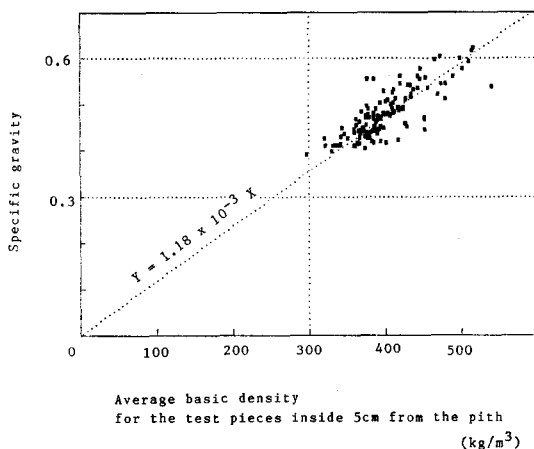


Fig. 10. Relationship between basic density of the original trees and specific gravity of the squares.

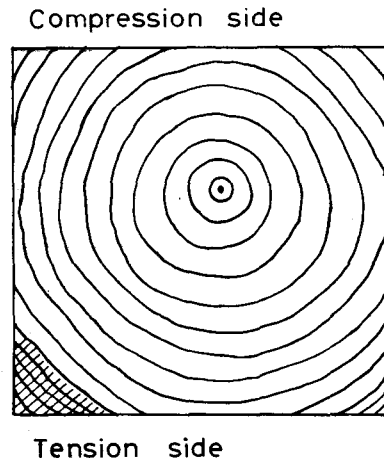


Fig. 11. Cross section of a bending specimen.

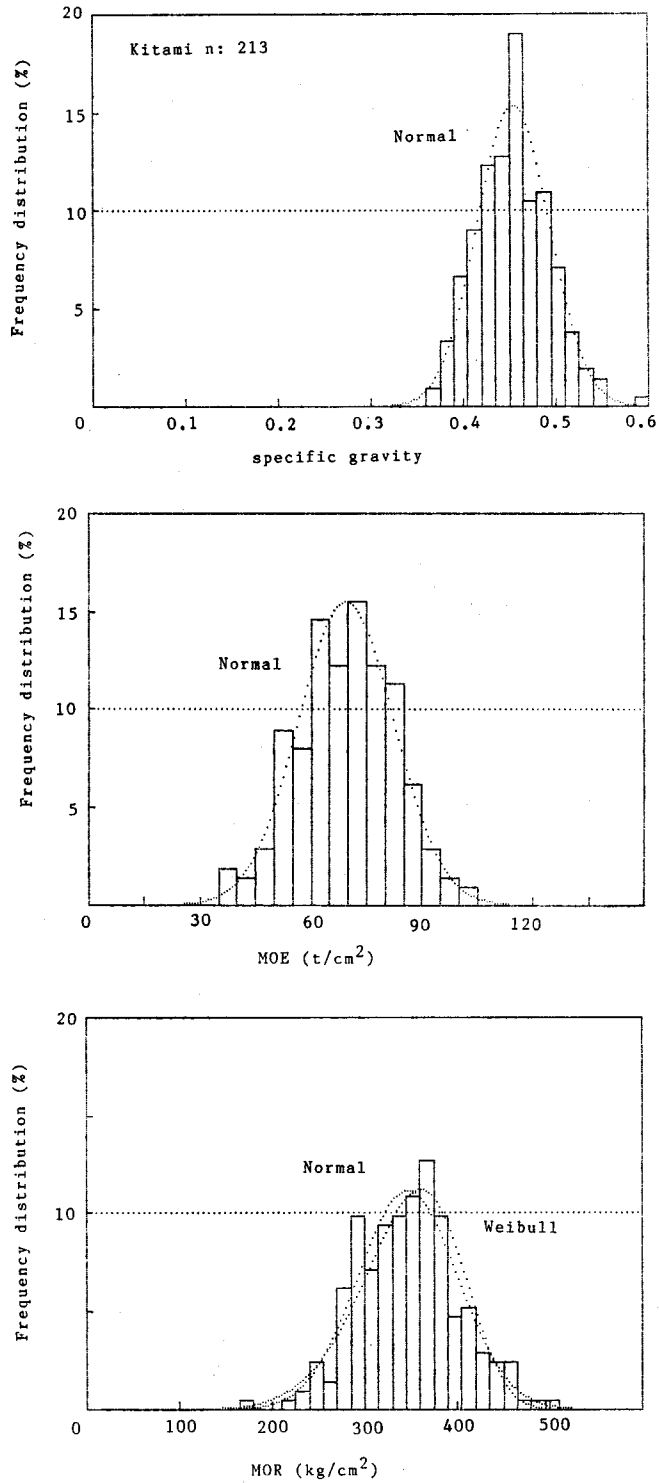


Fig. 12. Frequency distribution of mechanical properties of the squares.

準値を充たしていた。ただしヤング係数に関しては、殆どのものが規準値 (90 t/cm²) を下回った³⁰⁾。林分別では浦河、北見のものが比重が小さく強度的性質も小さかった。

3.5.2 節が強度性能に及ぼす影響

実大材の曲げ性能に関する節の影響については畑山²⁴⁾、上田²⁵⁾の研究等があり、節による断面欠損より節周辺の繊維の乱れが強度低下に関与することが指摘されている。このような観点から一般的に節径比と強度比の関係が論じられているが、髓を含む心持材では

節の定量化はやや困難である。3.4節に述べたように最大径比は20%前後で、あまりバラツキはない。そこで集中径比(ϕ_{15})と曲げ強さの関係を調べたが、節による強度低下は明らかではなかった (Fig. 13)。これは節以外の欠点の存在や未成熟材の強度自体が小さいことのために節の影響が支配的にならないためと考えられる (曲げ強さの大きい土別のものでは節径比と曲げ強さの間に僅かながら負の相関関係が見られる)。Fig. 14 は全試験体に関する節径比と曲げ強さの散布図であるが、節径比と曲げ強さの下限値との間に関係は認められない。即ち、カラマツの心持正角材では節による曲げ強度区分はできないと言える。

縦圧縮強さへの影響については、節を断面欠損と見なした場合の強度に近い値を示すことが言われている^{24),27)}。カラマツの場合、枝の輪生は少ないので最大節一個の投影面積比を考え

Table 8. Fifth percentiles of mechanical properties of boxed heart squares

Plot	MOR (kg/cm ²)	Compressive strength (kg/cm ²)
Kitami	267	222
Shibetsu	294	276
Kikonai	306	245
Urakawa	276	218
Shizunai	305	252
Lower limits*	270	210

Note *Derived from allowable properties for structural use²⁹⁾.

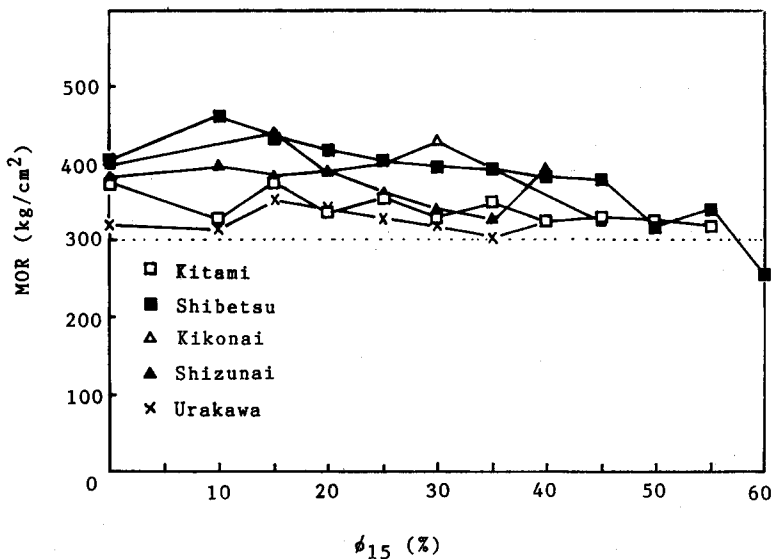


Fig. 13. Relationship between ϕ_{15} knot size and bending strength.

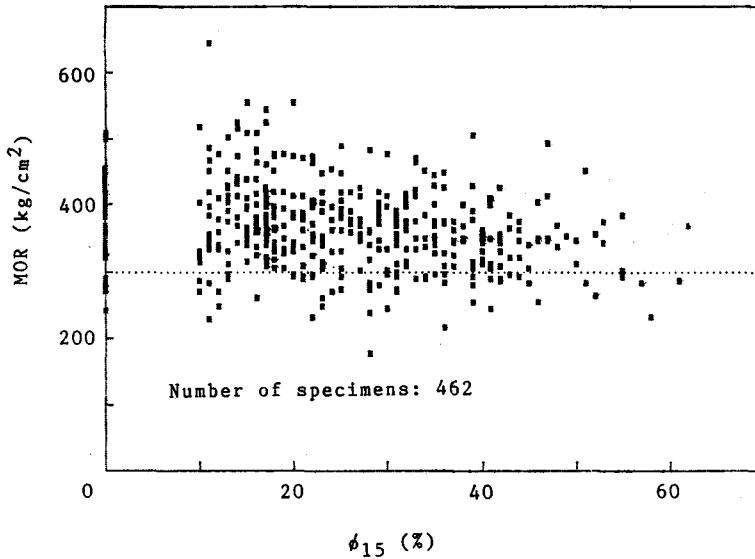


Fig. 14. Scatter daigram of knot size and MOR.

ると、節径比20%で木口断面の5-10%程度であり、節による強度低下は10%以下であると考えられる。

節径比と剪断弾性係数の間に相互関係は認められなかった。

3.5.3 繊維傾斜の影響

旋回木理による繊維傾斜は髓から樹皮側に向かって変動するため、心持正角材の材面上で繊維の走向方向が一定とならず、傾斜角の定量化は困難である。繊維傾斜による選別を行っていない北見の供試木について、供試木の最大繊維傾斜と正角材の曲げ、振り性能の関係を調べてみたが、相互関係は認められなかった。

3.5.4 材面割れの影響

心持材に顕著な乾燥による材面割れの曲げ、振り性能に及ぼす影響を調べてみた。その結果、割れによるヤング係数、曲げ強さの低減は見られなかったが、振り剛性への影響が大きいことがわかった。これらの割れは材幅の中央に生じることが多いので振り剛性を著しく低下させることが予想される。Fig 15に割れの数と見かけの剪断弾性係数(G)の関係を林分別の平均値で示した。ここで殆どの場合、割れの数は割れの生じた材面の数を表している。割れの数が増してもGはあまり低下しないが、割れの有無によるGの差は大きいことがわかる。平均で比較すると割れが生じた場合、Gは10%程度減少すると言える(Table 9)。

3.5.5 材質指標による強度性能の予測

強度を推定するパラメータとして平均年輪幅、気乾比重、曲げヤング係数を取り上げた。ここで年輪幅は髓から引張側材面に下ろした垂線上の年輪について測定した。

Table 10は全試験体231体についての諸性質の相関表である。ここでGは割れのある部

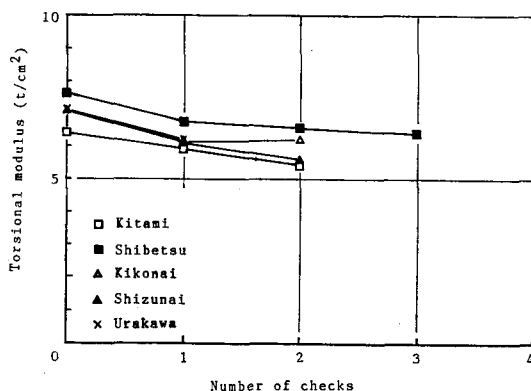


Fig. 15. Effect of checks on torsional rigidity.

Table 9. Effect of surface check on torsional modulus (G)

Plot	Surface check				G+/G- (%)	
	G	-	n	+		
Kitami	6.43		194	5.86	137	91.1
Shibetsu	7.60		83	6.72	77	88.4
Kikonai	7.04		11	6.18	34	87.8
Urakawa	7.04		39	6.09	18	86.5
Shizunai	7.00		54	5.89	36	84.1
Av.	6.84		381	6.13	302	89.6

n: Number of specimens.

Table 10. Correlation table

	MOE	MOR	σ_c	G
R.W.	-.385	-.483	-.620	-.203
S.G.	.598	.630	.775	.545
MOE	1.00	.818	.741	.281

R.W.: Average ring width, S.G.: Specific gravity, σ_c : Compressive strength, G: Torsional modulus.

Table 11. Results of simple regression analysis

Independent variables		Dependent variables		Regression equations	Standard error
Item	Range	Item	S.D.		
Average ring width	3.0-11.0 (mm)	σ_c (kg/cm ²)	43.9	Y = -22.5X + 427	34.4
		MOE (t/cm ²)	16.1	Y = 166X - 2.8	12.6
Specific gravity	.380-.624	MOR (kg/cm ²)	63.1	Y = 682X + 40	46.0
		σ_c (kg/cm ²)	43.9	Y = 586X + 16	27.0
		G (t/cm ²)	1.06	Y = 10.9X + 1.7	.889
MOE	37.3-134.8 (t/cm ²)	MOR (kg/cm ²)	63.1	Y = 3.00X + 137	34.1
		σ_c (kg/cm ²)	43.9	Y = 1.86X + 146	28.7

Remarks σ_c : Compressive strength, G: Torsional modulus.

分についての結果を除外したものである。試験体数が多いため、これらの相関はいずれも統計上は有意となったが、相関係数が0.5以上であったものについて Table 11 に回帰式を、Fig. 16 には林分別の関係を示した。

年輪幅と強度的性質の相関が大きくないのは林分によって同じ年輪幅でも密度が異なるためと考えられる。年輪幅と縦圧縮強さの関係 (Fig. 16) を見ると 3.1 節に述べたように土別の材は重く、浦河、静内の材は軽いという傾向を見ることができる。

曲げ強さの指標としては従来から言われているように曲げヤング係数が最も優れており、

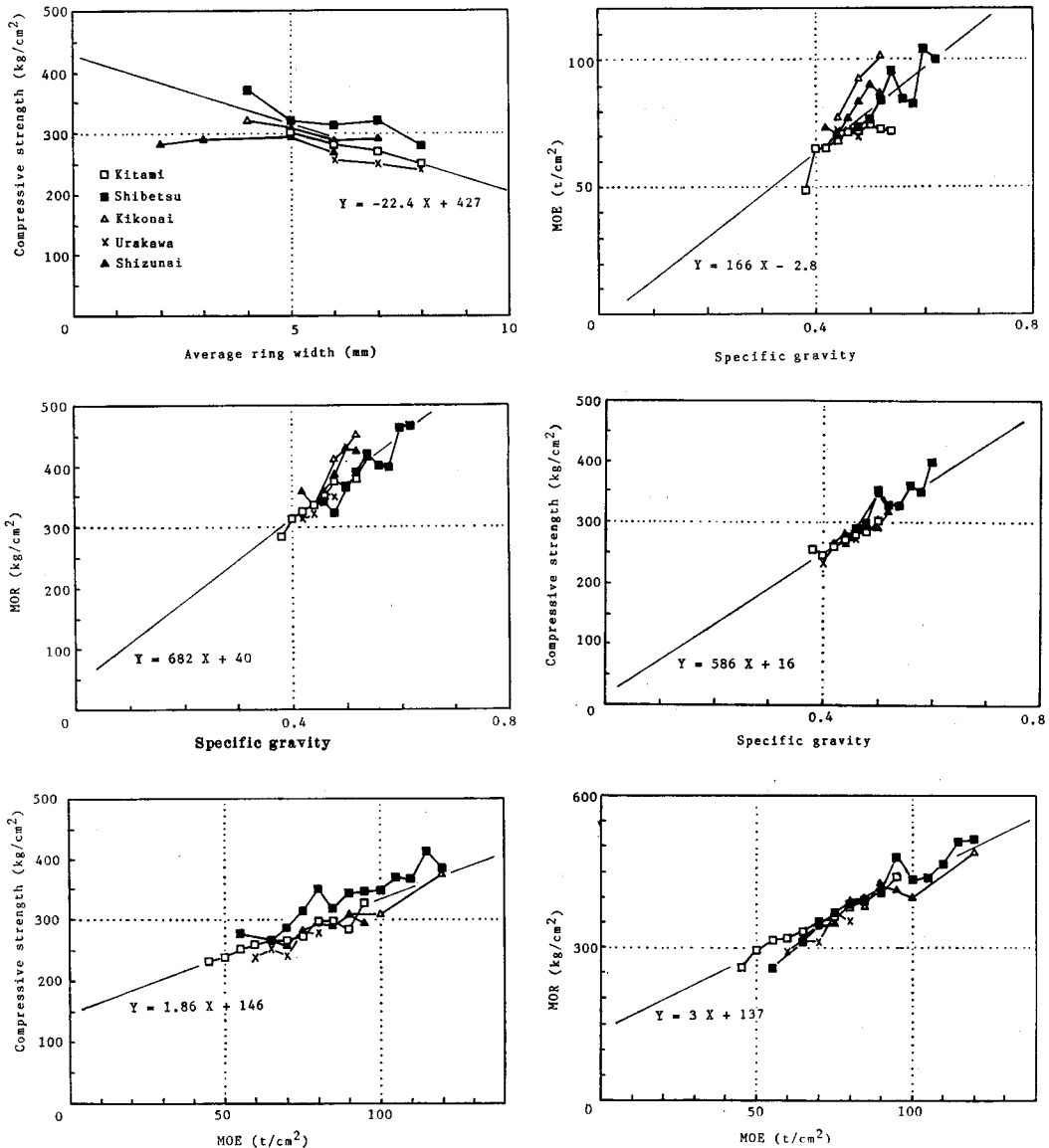


Fig. 16. Relationship between mechanical properties for squares.

Table 12. Results of multiple regression analysis

Regression equations	Multiple correlation coefficients	Standard error
MOR = 246 SG + 2.58 MOE + 51	.835	32.7
$\sigma_c = 429 SG + 1.17 MOE - 6$.849	22.6

縦圧縮強さは気乾比重との相関が大きかった。Table 12 に示したのは比重、ヤング係数の両者を説明変数とした場合の曲げ、縦圧縮強さの重回帰式である。曲げ強さの推定は曲げヤング係数のみで十分であるが、縦圧縮強さの推定には2変数による重回帰式を用いた方が精度が増すことがわかる。

剪断弾性係数 (G) は比重との相関が大きかったが、 G の範囲は狭く、林分別の平均で 6-7 t/cm² であった。したがって梁の撓みに関与する特性値 E/G は特にヤング係数が高い場合を除いて一律に 12 として差支えないと考える。

3.6 無欠点小試験片の強度性能

心持正角材の曲げ破壊後、非破壊部から採取した無欠点試験片について行なった材質試験の結果は Table 7 右側に示した。試験片の数は北見 130, 士別 104, 木古内 16, 浦河 19, 静内 45 の計 314 である。

3.6.1 髄からの年輪数、距離と強度の関係

試験片は未成熟材部からの採材が多いと見られたので、試験片の髄からの年輪数、距離と強度性能の関係を調べてみた。ここで、強度値をそのまま用いると年輪幅の広狭による密度の変動影響を除去できないので、各強度の気乾比重に対する比(比強度)を採った。3.1 節の考察より年輪幅と密度の関係は成熟材、未成熟材で差がないとみられるので、比強度はこれまでも用いられているように成熟材、未成熟材の判定基準にできると考えられる²⁶⁾。

Figs. 17, 18 に髄からの年輪数、距離と比ヤング係数、比圧縮強さの関係を示した。図中に横線で示した値は長野産カラマツ成熟材について報告されている値²⁶⁾ である。髄からの年輪数と比強度の間には直線的比例関係が見られ、成熟材に達する形成層年齢は約 15 年とみることができる。これに対し髄からの距離の効果は明らかではない (Fig. 18)。成熟材への移行については従来から年齢効果と距離効果の関与が言われてきたが、太田²⁸⁾ はスギについて生長を促進した個体でも材が成熟する年齢は変わらないと報告しており、今回の結果も材の成熟には年齢効果が支配的であることを示すものとする。

Table 13 は髄から 15 年輪目までの平均距離を 3.1 節の結果を用いて推定したものである。便宜上、髄からの距離で成熟材、未成熟材を区分するのであれば、カラマツの場合、髄から半径 8 cm の円柱を未成熟材領域とするのが適当と考えられる。

剪断弾性係数は未成熟材部で大きいと考えられるが³¹⁾、剪断強さと髄からの年輪数、距離との間に関係は認められなかった。

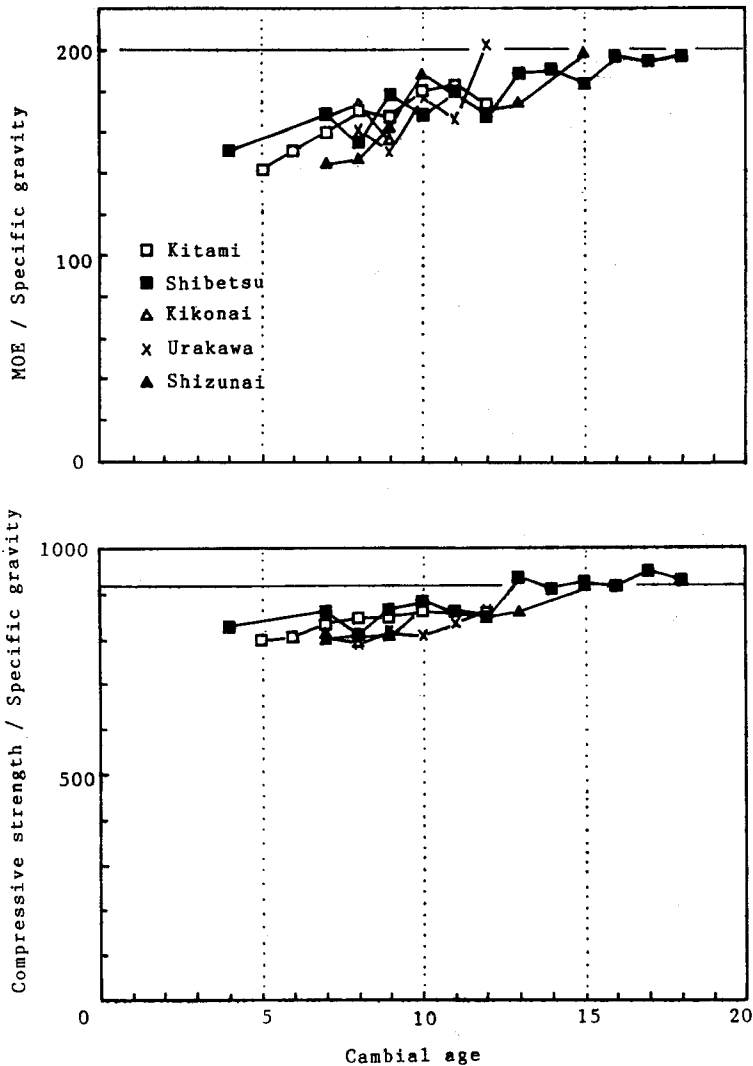


Fig. 17. Relationship between cambial age and mechanical properties.

3.6.2 階性質の相互関係

Table 14 は平均年輪幅, 気乾比重, ヤング係数と強度性能の相関表である。

1例として曲げヤング係数と曲げ強さの関係の散布図を Fig. 19 に示す。ここで, 大きな四角で表したものは, 「からまつ材質育種実施要領」による材質優良木(最大繊維傾斜, 平均繊維傾斜および捩れが, 各々 5.0%, 2.5% および 0.17% 以下の個体)であるが, 繊維傾斜や捩れなどの選抜基準と曲げ性能との間に相互関係は認められなかった。

年輪幅と比重が強度性能と大きな相関を示したのは年輪幅の狭い試片(比重の大なる試片)が髓から離れた位置, 即ち相対的に成熟度の高い材部から採取されたものに多いことにもよると考えられる。

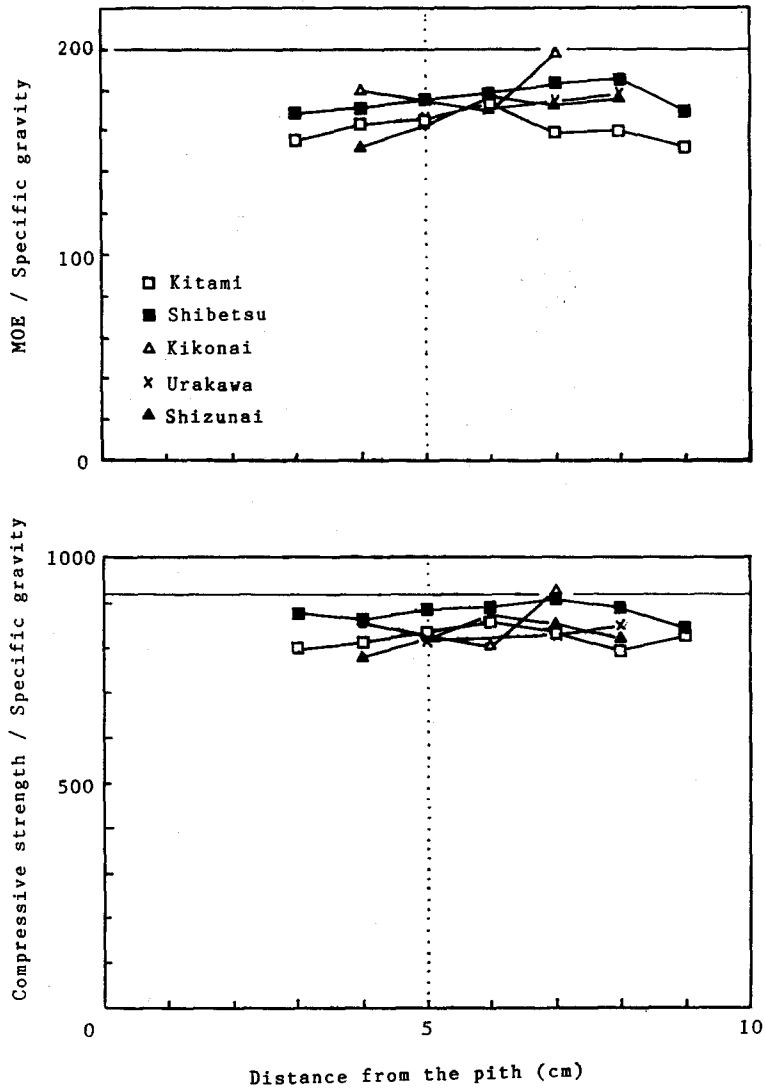


Fig. 18. Relationship between distance from the pith and mechanical properties.

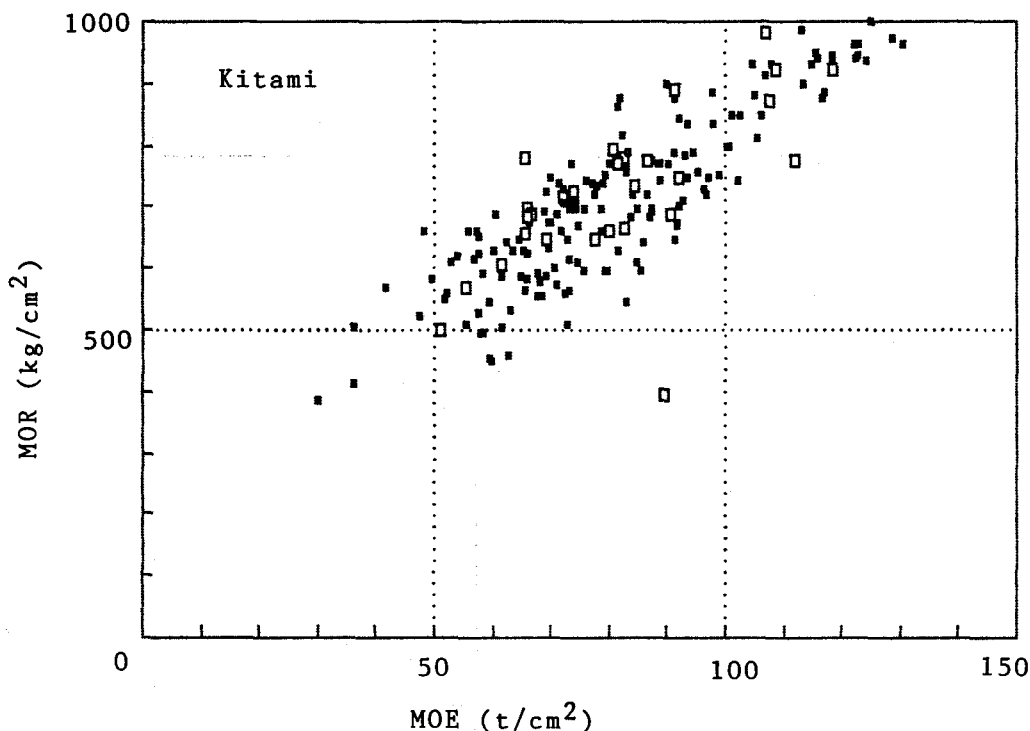
Table 13. Average radius at 15 years of cambial age (cm)

Plot	Approximate height (m)		
	1.1	2.8	4.5
Kitami	8.09	8.23	8.28
Shibetsu	7.42	6.82	7.04
Kikonai	7.09	7.09	—
Urakawa	8.60	8.75	8.22
Shizunai	7.16	7.64	7.59

Table 14. Correlation table for mechanical properties of small clear specimens

	S.G.	MOE	MOR	σ_c	τ_s
R.W.	-.677	-.728	-.667	-.725	-.548
S.G.	1	.794	.887	.932	.893
MOE		1	.856	.880	.626

Remarks R.W.: Average ring width, S.G.: Specific gravity, σ_c : Compressive strength, τ_s : Shear strength.

**Fig. 19.** Relationship between MOE and MOR.

□: Specimen whose maximum slope of grain, average slope of grain and twist are 5.0%, 2.5% and 0.17% or less, respectively.

剪断強さは比重との相関が大きかった。

3.7 板材の試験結果

試験結果を Table 15 に示す。北見産の全数と土別産の 18 体は曲げ試験の最大モーメント区間に節があったが、節径比は最大でも 30% 程度と小さく、節径比と曲げ強さの間に関係は認められなかった。比ヤング係数 (ヤング係数の気乾比重に対する比) は平均で北見が 195, 土別が 222 と長野産カラマツについての値, 200²⁶⁾ に匹敵し、特に土別のものは E/G も大きく成熟材の性質を示すものである。

Table 15. Mechanical properties of flat-sawn boards

Plot (n)		R.W. (mm)	S.G.	MOE (t/cm ²)	σ_{bp} (kg/cm ²)	MOR (kg/cm ²)	G (t/cm ²)	E/G
Kitami (9)	Av.	5.1	.463	89.8	214	518	7.1	12.9
	Max.	5.7	.49	100.5	264	555	8.2	16.5
	Min.	4.5	.43	82.6	188	487	6.1	10.5
Shibetsu (30)	Av.	3.3	.601	133.1	357	700	8.7	15.6
	Max.	5.6	.67	143.0	413	806	11.7	18.2
	Min.	2.3	.55	127.0	318	544	7.2	11.2

Remarks n: Number of specimens, R.W.: Average ring width, S.G.: Specific gravity, σ_{bp} : Bending stress at the proportional limit, G: Torsional modulus.

3.8 実大材と無欠点材における諸性質の比較

Table 16 は心持正角材と板材の機械的性質を同一試験体の無欠点小試験片について得た測定値に対する比で示したものである。正角材の無欠点材に対する強度比は曲げ強さで0.48-0.57, 縦圧縮強さで0.69-0.77であった。士別産のもの強度比が特に小さいのは, 3.5節に述べたように, 士別のものの基準強度が大きかったために節などの欠点による強度低減が支配的になったためと考えられる。曲げヤング係数についてはバラツキが大きい, 平均値で比較すると正角材と無欠点材で殆ど差がなかった(ただし無欠点試片の曲げ撓みは E/G を12とした場合, 約7%の剪断撓みを含んでいる)。

Fig. 20 は正角材の剪断弾性係数と無欠点材の剪断強さを比較したものである。バラツキは大きい, 有意な相関関係 ($r=.502$) が認められた。

Table 16. Ratios for mechanical properties of tested lumber to clear specimens

Plot		Specific gravity		MOE		MOR		σ_c
		B.H.S.	F.S.B.	B.H.S.	F.S.B.	B.H.S.	F.S.B.	B.H.S.
Kitami	Av.	1.023	1.032	0.966	1.349	0.532	0.783	0.741
	S.D.	.077	.015	.224	.116	.088	.065	.095
Shibetsu	Av.	0.972	1.124	0.915	1.443	0.482	0.861	0.685
	S.D.	.073	.119	.181	.268	.078	.114	.096
Kikonai	A.v.	1.018	—	1.091	—	0.564	—	0.769
	S.D.	.063	—	.217	—	0.58	—	.066
Urakawa	Av.	1.008	—	1.006	—	0.535	—	0.752
	S.D.	0.39	—	.187	—	.060	—	.067
Shizunai	Av.	1.018	—	1.061	—	0.569	—	0.749
	S.D.	0.59	—	.166	—	.126	—	0.71

Remarks B.H.S.: Boxed heart square, F.S.B: Flat-sawn board, σ_c : Compressive strength.

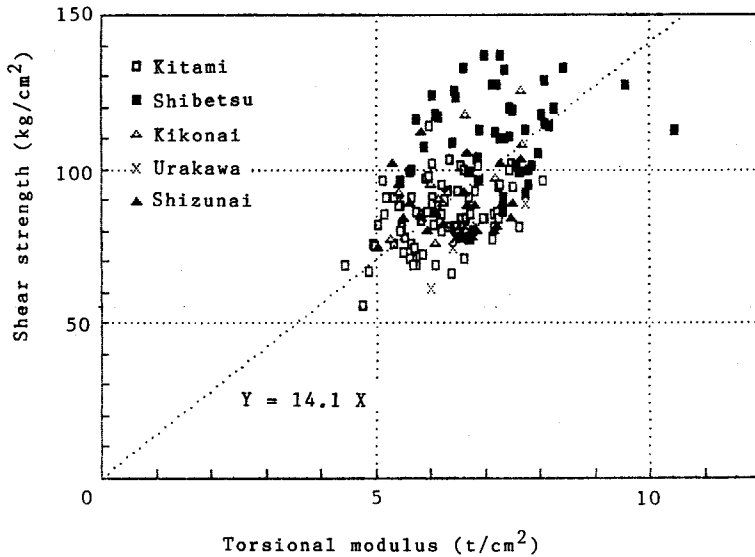


Fig. 20. Relationship between torsional moduli of squares and shear strength of small clear specimens.

4. 結 言

道内5箇所のカラマツの間伐材の基礎材質を調べた。主たる試験項目は供試木の年輪幅と容積密度数, 10.5 cm 心持正角材の曲げ, 捩り, 縦圧縮性能, および無欠点小試験片の曲げ, 縦圧縮, 剪断性能である。以下に結果を要約して記す。

1) 供試木の平均年輪幅と容積密度数の関係は髓より5 cm の範囲の内側と外側で特に差は認められなかった。

2) 平均年輪幅の範囲2-7 mm で1 mm 増加あたり容積密度数は約16 kg/m³の減少傾向を示した。この傾きは林分間で差がなかったが, 同一年輪幅における容積密度数の差は約100 kg/m³と大きく, 例えば士別の材は重く, 浦河のものは軽かった。このように, 一定の年輪幅(例えば4 mm)における容積密度数を比較することで林分単位の材質評価がある程度可能である。

3) 胸高部位における初期半径生長は初年次に6 mm 台の生長を示した後, 2, 3年輪目で最大値をとり, その後, 漸減する傾向が見られた。2-5年輪目の生長量は林分間の差が大きく, 環境的な影響が考えられる。北見, 浦河の林分の生長が良く, 士別, 静内の生長が悪かった。

4) 一部の林分においては間引き効果と考えられる年輪幅の増加が認められた。特に静内の林分では間伐による半径生長の促進が持続的であり, 効果的な間伐を行なえば, かなりの期間, 年輪幅を4-5 mm 台に保つことができると考えられる。

5) 正角材の気乾比重は供試木の髓から5 cm 以内の部分についての容積密度数の約18%増であった。

6) 供試木の最大繊維傾斜と正角材の乾燥による捩れの間には僅かながら相関が認められ

た。しかし最大繊維傾斜と正角材および無欠点小試験片の力学的性質との間に関係は認められなかった。

7) 正角材の約8割に乾燥による顕著な割れが生じた。割れのあるものはないものに比べて振り剛性が10%程度小さかった。

8) 正角材の最大節径比は20%程度、集中節径比は60%以下であり、直径10mm以上の節はおよそ15cm間隔で現れた。節径比による曲げ強さの強度区分はできないことがわかった。節による縦圧縮強さの低減は10%以下と考えられる。

9) 正角材の曲げおよび縦圧縮強さの5%下限値を求めたところ、北見、浦河についてはカラマツの許容応力度から算出される下限値前後の値、残り3林分はこれを充たすものであった。曲げヤング係数については殆どのが規準値を下回った。

10) 曲げ強さの指標としては曲げヤング係数が優れており、縦圧縮強さは比重、曲げヤング係数との相関が大きかった。振り試験による見かけの剪断弾性係数(G)は比重との相関が認められたが、Gの範囲は狭く、平均で $6-7t/cm^2$ であった。

11) 力学的性質に関して言えば、成熟材に達する形成層年齢は15年程度と考えられる。髄からの距離による材の成熟効果は認められないが、便宜上、距離で区分するのであれば髄から8cm以内の部分の未成熟領域とするのが適当と考える。

12) 正角材の無欠点小試験片に対する強度比は、曲げ強さで0.48-0.57、縦圧縮強さでは0.69-0.77であった。

謝 辞

強度試験を行なうまでの供試材の準備、生長量の測定などについては北海道林木育種場の職員の方々に御助力いただいた。また製材後の各種の強度試験では当講座専攻生であった水谷潤、千田秀明氏の協力を得た。さらに研究のとりまとめにあたっては当講座の宮島 寛教授に御助言いただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 高橋政治, 川口信隆: 林産試月報, 251, 1-6 (1972).
- 2) 山本 宏, 高橋政治, 川口信隆: 日本木材学会北海道支部講演集, 6号, 24-27 (1974).
- 3) 小野寺重男ほか15名: 林産試研報, 64, 1-115 (1976).
- 4) 小野寺重男, 高橋政治, 川口信隆: 林産試研報, 66, 30-110 (1977).
- 5) 高橋政治, 大久保勲, 川口信隆: 日本木材学会北海道支部講演集, 16号, 9-12 (1984).
- 6) 高橋政治, 川口信隆, 大久保勲: 林産試月報, 411, 12-17 (1986).
- 7) 宮島 寛: 北大演研報, 19 (3) 99-216 (1954).
- 8) 宮島 寛, 長谷川賢司: 北大演研報, 35 (1), 139-156 (1978).
- 9) 宮島 寛: 日本木材学会北海道支部講演集, 11号, 35-39 (1979).
- 10) 宮島 寛: 北大演研報, 37 (3), 789-816 (1980).
- 11) 宮島 寛: 北大演研報, 42 (4), 1089-1116 (1985).

- 12) 飯島泰男： 富山木試研報，1，1-40 (1983).
- 13) 中川伸策： 林試研報，148，93-106 (1963).
- 14) 片寄 麟，織田春紀： 北海道の林木育種，25 (2)，14-21 (1982).
- 15) 片寄 麟，織田春紀： 北海道の林木育種，27 (1)，7-11 (1984).
- 16) 織田春紀，片寄 麟： 北海道の林木育種，28 (2)，30-36 (1985).
- 17) 織田春紀，片寄 麟： 林木育種場研報，4，29-46 (1986).
- 18) 千葉 茂，永田義明，幸田秀穂： 北海道の林木育種，23 (2)，13-16 (1980).
- 19) 久保隆文，藤田正三，蕪木自輔： 東京農工大演報，14，11-16 (1978).
- 20) 川口信隆ほか3名： 日本木材学会北海道支部講演集，10号，4-7 (1978).
- 21) 中川伸策： 林試研報，248，97-120 (1972).
- 22) 滝沢忠昭，川口信隆，高橋政治： 林産試月報，358，1-6 (1981).
- 23) 千葉 茂，永田義明，幸田秀穂： 北海道の林木育種，23 (2)，8-12 (1980).
- 24) 畑山燦男： 林試研報，326，69-168 (1984).
- 25) 上田恒司： 北大演研報，40 (3)，627-708 (1983).
- 26) 中井 孝，山井良三郎： 林試研報，319，13-46 (1982).
- 27) American National Standards Institute： ASTM D 245-74 (1974).
- 28) 太田貞明： 九大農演報，45，1-80 (1972).
- 29) 日本建築学会： 建築基準法令集 (1986).
- 30) 日本建築学会： 木構造設計規準・同解説 (1973).
- 31) 小泉章夫，上田恒司： 日本木材学会北海道支部講演集，15号，1-4 (1983).
- 32) 小泉章夫，上田恒司： 北大演研報，44 (1)，355-380 (1987).

Summary

Growth, density and mechanical properties of plantation-grown Japanese larch (*Larix kaempferi*) were investigated. The materials were selected from thinning crops of five sites in Hokkaido. Details of the sample plots and the number of specimens are shown in Table 1.

Two disks were cut from the stems for measuring ring width, basic density and slope of spiral grain (Fig. 2). The remaining timber were sawn into boxed heart squares (10.5×10.5 cm) and seasoned to provide materials for testing mechanical properties. Small clear specimens (2.5×2.5×40 cm) were cut from the squares after bending fracture test and used for determining basic mechanical properties following JIS 2111, 2113 and 2114. Obtained results are summarized as follows:

- 1) The relationship between average ring width and basic density of the core wood within 5 cm from the pith was similar to that of the outer wood.
- 2) Basic density was found to decrease about 16 kg/m³ with every 1 mm increase of ring width in its range of 2~7 mm. Although this gradient was common to all plots, the basic density at the same ring width differed nearly 100 kg/m³ between the plots.
- 3) The ring width at the breast height shows 6 mm at the start, reaches the maximum growth at the second or third ring and decreases gradually afterward. The environmental effects were thought to be dominant on the second to fifth rings in which the difference of ring width were large between the plots (Fig. 7).
- 4) Effects of previous thinnings were observed as the retained growth in several rings (Fig. 7).
- 5) The ratio of the specific gravity of tested lumber to the basic density of the core wood of the corresponding tree was 1.18 on the average.

6) No correlation was found between the maximum slope of grain of the corresponding tree and mechanical properties of the squares.

7) Distinct surface checks due to seasoning occurred in 80% of the squares and induced to decrease torsional rigidity by 10%.

8) The average diameter of the maximum knots, the sum of knot diameters within 15 cm section and the average distance between knots ($\phi \geq 10$ mm) were found to be 2 cm, 6 cm and 15 cm, respectively. No correlation was found between knot size and lower 5th percentile of the modulus of rupture.

9) Test results of mechanical properties are shown in Table 7. Though Young's modulus was found to be the best quality index for modulus of rupture, it is recommended to combine specific gravity with the predicting parameter for more accurate estimation of compressive strength parallel to the grain.

10) The mechanical properties of small clear specimens were discussed in relation with cambial age and distance from the pith. As a result, the transition zone between juvenile and mature wood was found in the vicinity of 15th ring from the pith (Fig. 17). The average distance from the pith to the boundary was about 8 cm, though it had a large amount of dispersion.

11) The strength ratios of the squares to the small clear specimens were 0.48~0.57 in bending and 0.69~0.77 in compression.