

カラマツにおける横圧縮特性の樹幹半径方向変動

石倉 由紀子, 松本 和茂

Radial variation in transverse compression properties of Japanese larch (*Larix kaempferi*)

Yukiko ISHIKURA, Kazushige MATSUMOTO

The density, average width of annual rings and transverse compression properties of air-dried wood samples that were continuous in the radial direction from the pith were investigated to study the radial variation in the transverse compression properties of Japanese larch (*Larix kaempferi*). Compression strength in the tangential loading direction tended to increase with increasing distance from the pith and the air-dried wood density, and with decreasing average width of the annual rings. On the other hand, these tendencies were not observed in the radial loading direction. Annual ring structures determined by soft-X-ray analysis indicated the possibility that the radial variations in the annual ring structures of the wood such as increases in the latewood percentage contributed to an increase in the tangential compression properties. On the other hand, there is a possibility that variations in the properties of earlywood may contribute to the radial variation in the compression properties in the radial loading direction.

Keywords: *Larix kaempferi*, transverse compression properties, radial variation, density, annual ring structures

カラマツ, 圧縮特性, 半径方向変動, 密度, 年輪構造

カラマツ (*Larix kaempferi*) の髄から半径方向に連続した気乾状態の木材試験片を用いて、密度、平均年輪幅の測定と繊維直交方向の力学的性質を把握した。接線方向加力の圧縮強度は、髄からの距離と密度の増加、および平均年輪幅の減少に伴い増加した。他方、これらの傾向は半径方向加力では観察されなかった。軟X線デンストメトリー法により年輪構造を把握した結果、晩材率の増加等の年輪構造の半径方向変動が、接線方向加力の圧縮特性に寄与することが示唆された。一方、半径方向加力の圧縮特性の変化には、早材の性質の変化が、寄与する可能性が示唆された。

1. はじめに

木材は、森林から得られる再生可能な資源であり、比重の割に繊維方向のヤング率と強度が高い材料である。そのため、多くの森林を有する日本では古くから建築用材料として使用されてきた。しかしながら、樹木の木部の組織構造は、樹幹内で異なるため、これらの木部の構造の違いは、樹木から得られる木材の材料特性に影響を与える。

木材を梁の様な構造材料として使用する際に重要となる、木材の繊維方向の力学的性質は、針葉樹の場合、髄から約10から15年輪以内の木部である未成熟材と、髄から約10から15年輪以上の木部である成熟

材で異なることが報告されている¹⁻⁶⁾。未成熟材の繊維方向の曲げや引張等のヤング率や強度は、一般に、成熟材に比べて低いことが報告されている。

これらの性質の違いは、木部の密度やS2層のマイクロフィブリル傾角のような細胞壁構造の違いに起因するとされている。一方、木材を住宅用の土台用部材として使用する際に重要となる繊維直交方向の部分圧縮特性もまた、髄から樹皮に向かって変化することが報告されている。森田と荒武⁷⁾は、オビスギ (*Cryptomeria japonica*) において、心持ちラミナのみからなる積層材の繊維直交方向の部分圧縮特性 (めり込み性能) が、心去りラミナのみからなる積

層材に比べ優れることを報告した。また、永石ら⁸⁾は、スギにおいて、髓付近の未成熟材では、成熟材に比べて密度が高く、部分圧縮特性が高いことを報告した。他方、著者らは、前報⁹⁾において、カラマツの5%部分圧縮強さの樹幹半径方向変動が加力方向によって異なることを明らかにした。

すなわち、カラマツの接線方向加力の5%部分圧縮強さは、髓からの距離の増加と気乾密度の増加とともに増加する一方で、半径方向加力では、この傾向は観察されなかった。これらの結果は、カラマツにおける5%部分圧縮強さの樹幹半径方向変動に与える要因が、加力方向によって異なることを示唆した。また、繊維直交方向における圧縮特性の半径方向変動が、部分圧縮特性の半径方向変動に寄与している可能性が示唆された。しかしながら、カラマツにおける横圧縮特性の半径方向変動は、これまで、報告されている例が少ない。

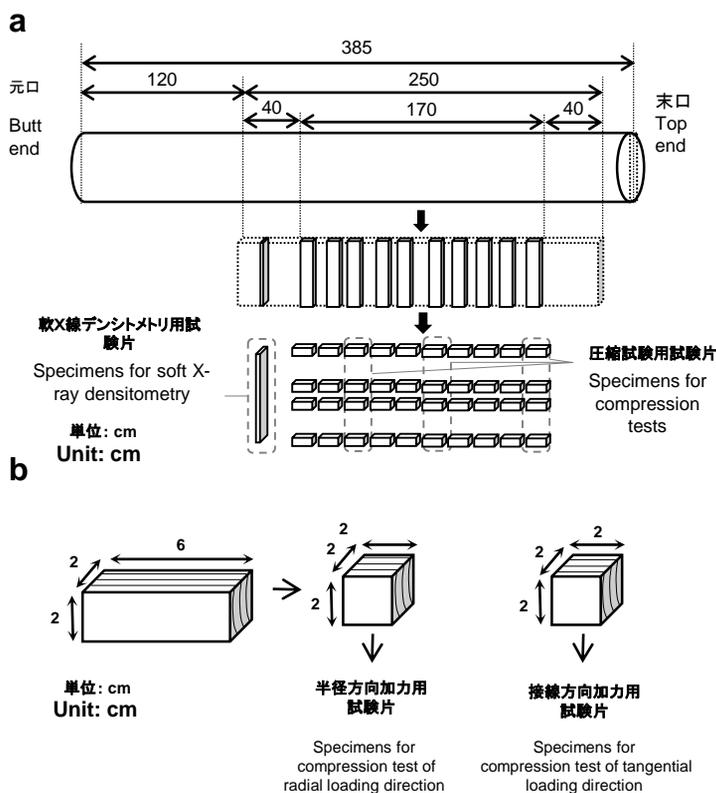
本研究では、カラマツにおける横圧縮特性の髓から樹皮に向かう半径方向変動を把握するため、カラマツから得られた気乾試験片を用いて、横方向の圧縮試験を行い、横圧縮特性を把握するとともに、密度、

平均年輪幅 (ARW) を把握した。また、軟X線デンストメトリ法により、試験木の年輪構造の変動を調べた。

2. 実験方法

2.1 試験材料

前報⁹⁾において部分圧縮試験に使用した9本の原木のうち、胸高直径の異なる3本の原木を使用した⁹⁾。それぞれの原木から、節の少ない半径方向に連続した試験片 (20 mm (接線 (T) 方向) × 20 mm (半径 (R) 方向) × 60 mm (繊維 (L) 方向)) を3セット選び、試験片の作製に供した (第1図a)。それぞれの試験片から、2つの立方体試験片を作製した (20 mm (T) × 20 mm (R) × 20 mm (L)) (第1図b)。すなわち、それぞれの原木から、6セットの半径方向に連続した試験片を採取し、横圧縮試験に使用した。また、それぞれの試験木の根元から120から160mmの部分からL方向の厚さが2mmの髓を含む樹皮から樹皮までのストリップを軟X線デンストメトリ測定用として採取した。これらの試験片はさらに20°C、65%RHで1ヶ月以上調湿した。



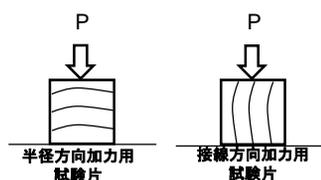
第1図 試験片の採取方法

Fig. 1. Sample preparation for the compression tests

2.2 試験方法

調湿後の試験片は圧縮試験前に重量、寸法、年輪幅の測定を行った。圧縮試験は荷重方向を接線方向と半径方向とし（第2図）、それぞれの原木において、半径方向に連続した試験片を、接線方向荷重試験、半径方向荷重試験に、それぞれ3セット使用した。

圧縮試験は以下のように行った。加力は、材料万能試験機 TENSILON RTD-2410（Orientic Corporation）を使用し、クロスヘッドスピードは0.1mm/minとした。変位は、加力板の両端に設置した変位計（ストローク10mm、分解能1/1000mm）を使用して測定し、両者の平均値とした。圧縮強度は、始めに試験片が破壊した時の応力、または、応力-ひずみ曲線の応力が一定となった値とした。試験片の気乾密度は、圧縮試験前の試験片の重量と寸法から算出した。また、ARWは、試験片の年輪幅から算出した。含水率は、試験前と絶乾後の重量から常法により算出した。



Radial loading direction Tangential loading direction

第2図 圧縮試験の方法

P: 荷重

Fig. 2. Schematic of the compressive test for wood specimens

P: load

第1表 気乾試験片の密度、ARW、含水率と横圧縮特性の結果

注：n: 試験片の数, Density: 気乾密度, ARW: 平均年輪幅, M. C.: 含水率, σ : 圧縮応力, T: 接線方向加力, R: 半径方向加力

Table 1. Results for density, ARW, moisture content, and transverse compression stress of air-dried wood samples.

Abbreviations: n: number of specimens; Density: air-dried wood density; ARW: average width of annual rings; M.C.: moisture content; σ : compression stress; T: tangential loading direction; R: radial loading direction.

Log No.	Loading direction	n	Density (g/cm^3)		ARW (mm)		M.C. (%)		σ (N/mm^2)	
			Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.
S	T	18	0.47	0.05	3.88	1.37	12.06	1.39	4.19	0.72
	R	18	0.46	0.05	3.80	1.33	11.31	1.26	3.15	0.72
M	T	27	0.52	0.09	4.18	2.00	12.45	0.28	7.11	2.16
	R	27	0.52	0.09	4.39	2.21	12.41	0.29	4.75	1.37
L	T	46	0.51	0.05	5.29	1.77	12.51	0.30	6.42	1.34
	R	46	0.51	0.05	5.40	1.77	12.58	0.30	4.35	0.81

2.3 軟X線デンストメトリ法による年輪構造測定

年輪パラメータは、X線デンストメトリ法により得た10-12)。密度0.55g/cm³以上の部分を晩材とした。辺材と心材は、色の違いにより目視で判断した。

3. 結果と考察

3.1 試験片の特性

第1表は、接線方向加力、半径方向加力の圧縮試験に使用した試験片の気乾密度、ARW、圧縮応力 (σ) の平均値を示す。異なる径の原木から採取した試験片のARWと気乾密度の平均値は、前報⁹⁾と同様の傾向を示した。それぞれの原木で、接線方向加力の σ の平均値は、半径方向加力より大きかった。

横方向の圧縮特性について、針葉樹では、半径方向加力より接線方向加力で比例限度が高い一方で、幅が広く多くの放射組織を有する広葉樹では、接線方向より半径方向加力の比例限度が高い傾向があることが報告されている¹³⁾。本研究における σ の傾向は、これまでに報告されている針葉樹の比例限度の傾向と類似していた¹³⁾。すなわち、カラマツの圧縮特性は、加力方向によって異なる傾向があった。

3.2 気乾試験片の密度、ARW、横圧縮特性

第3図は、異なる直径の原木から採取した気乾試験片の密度とARWにおける半径方向変動を示す。試験片の気乾密度は、髄からの距離の増加に伴って増加する傾向があった。対照的に、試験片のARWは、髄からの距離の増加に伴って減少する傾向があった。

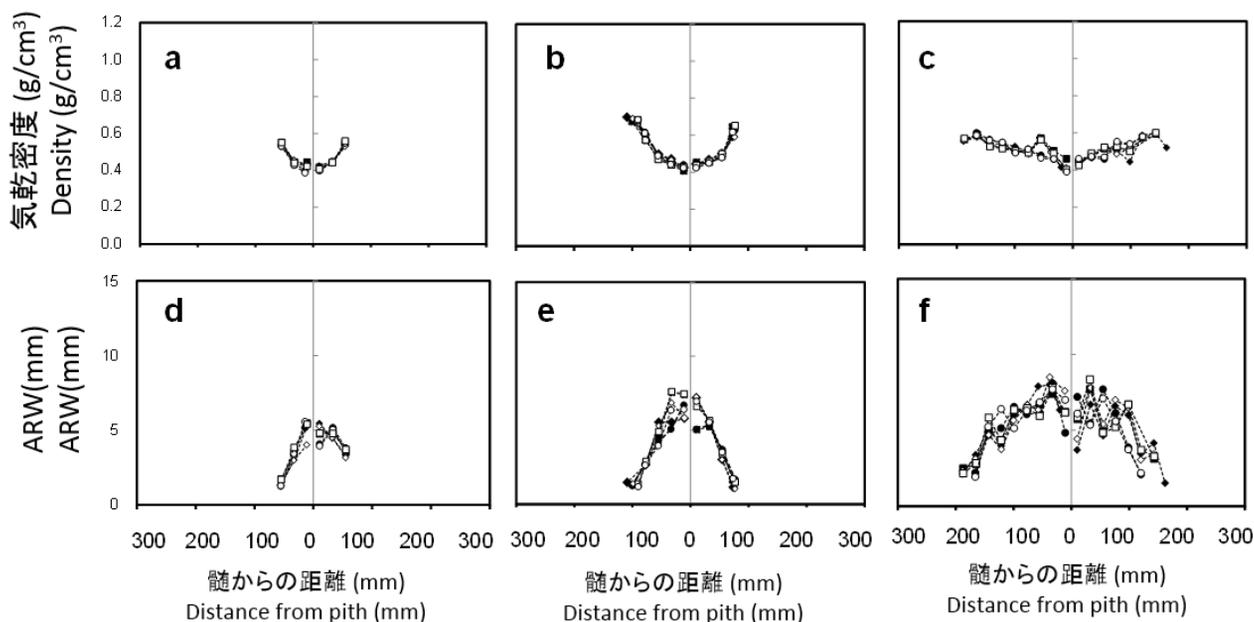
第4図は、本研究で試験した原木の軟X線デンシトメトリの結果を示す。髄からの年輪数の増加に伴う年輪構造の変化の傾向は、Koizumiら⁵⁾の報告と類似していた。すなわち、髄からの距離の増加に伴って、年輪幅が減少する間、晩材率と晩材密度は増加する傾向にあった。一方、心材における髄からの距離の増加に伴う早材密度の変化は、晩材率や晩材密度の変化に比べて小さかった。また、辺材の早材密度は、心材よりも低い傾向にあった。これらの結果は、第3図における髄からの距離の増加に伴う密度の増加が、主に、晩材率や晩材密度の増加の様な年輪構造の変化に起因することを示唆した。

第5図は、試験木Lにおいて髄からの距離が異なる部位から採取した試験片の接線方向と半径方向加力の圧縮応力-ひずみ曲線を示す。髄からの距離の増加に伴う応力-ひずみ曲線の形の変化は、加力方向によって異なる傾向を示した。接線方向加力における比例限度は、髄からの距離の増加に伴って増加する傾向があった。対照的に、これらの傾向は半径方向加力では観察されなかった。

第6図は、髄からの距離と接線方向と半径方向加力

の σ の関係を示す。接線方向加力では、 σ は髄からの距離の増加に伴って増加する傾向があった。しかしながら、半径方向加力では、髄からの距離の増加に伴う σ の増加は観察されなかった。半径方向加力の σ は、髄の近くと辺材を含む試験片において、低い傾向があった。これは、 σ の半径方向変動が、加力方向によって異なることを示している。さらに、接線方向加力と半径方向加力の異方性は、髄から樹皮に向かって増加した。

第7図は、異なる径の原木から得られた試験片の接線方向加力と半径方向加力の σ と気乾密度、ARWの関係を示す。接線方向加力の σ の値は、気乾密度の増加に伴い増加した。一方、半径方向加力の σ の値は、気乾密度と明確な相関はなかった。 σ は、ARWとの相関が低いものの、ARWの減少に伴い、接線方向加力の σ は増加し、半径方向加力の σ は、ARWが小さい試験片で低い傾向が観察された。これは、5%部分圧縮強さ⁹⁾と類似した傾向であった。これらの結果は、 σ に影響を与える要因が、加力方向によって異なることを示唆している。

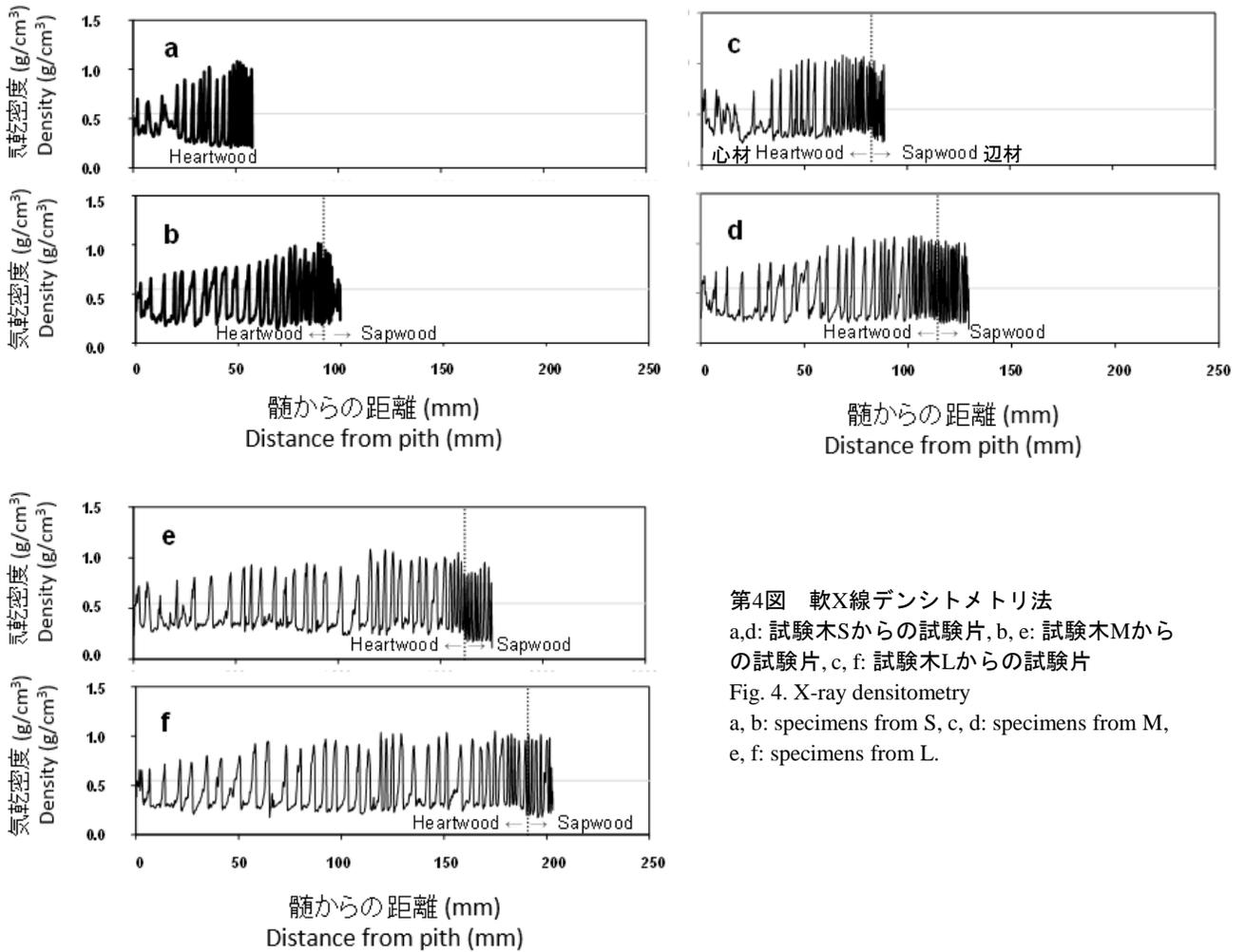


第3図 気乾密度 (a, b, c) とARW (d, e, f) , 髄からの距離の関係

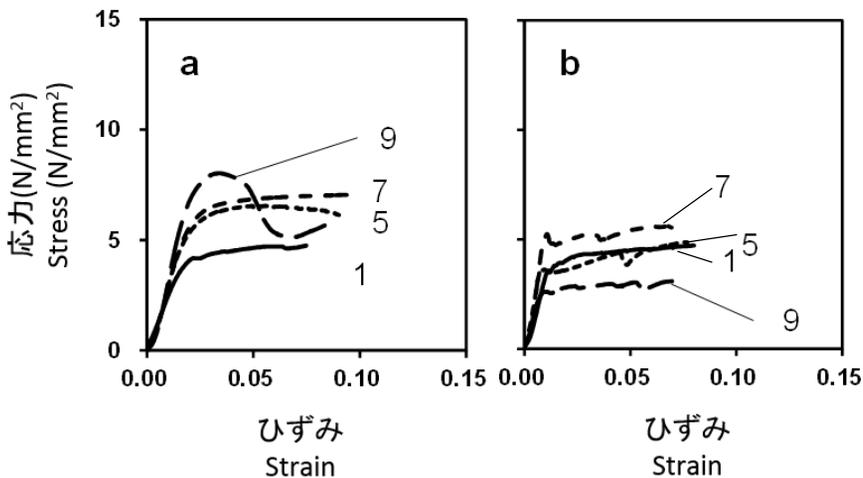
a, d: 試験木Sからの試験片, b, e: 試験木Mからの試験片, c, f: 試験木Lからの試験片

Fig. 3. Relationships among the air-dried wood density (a, b, c), ARW (d, e, f), and distance from the pith

a, d: specimens from S, b, e: specimens from M, c, f: specimens from L

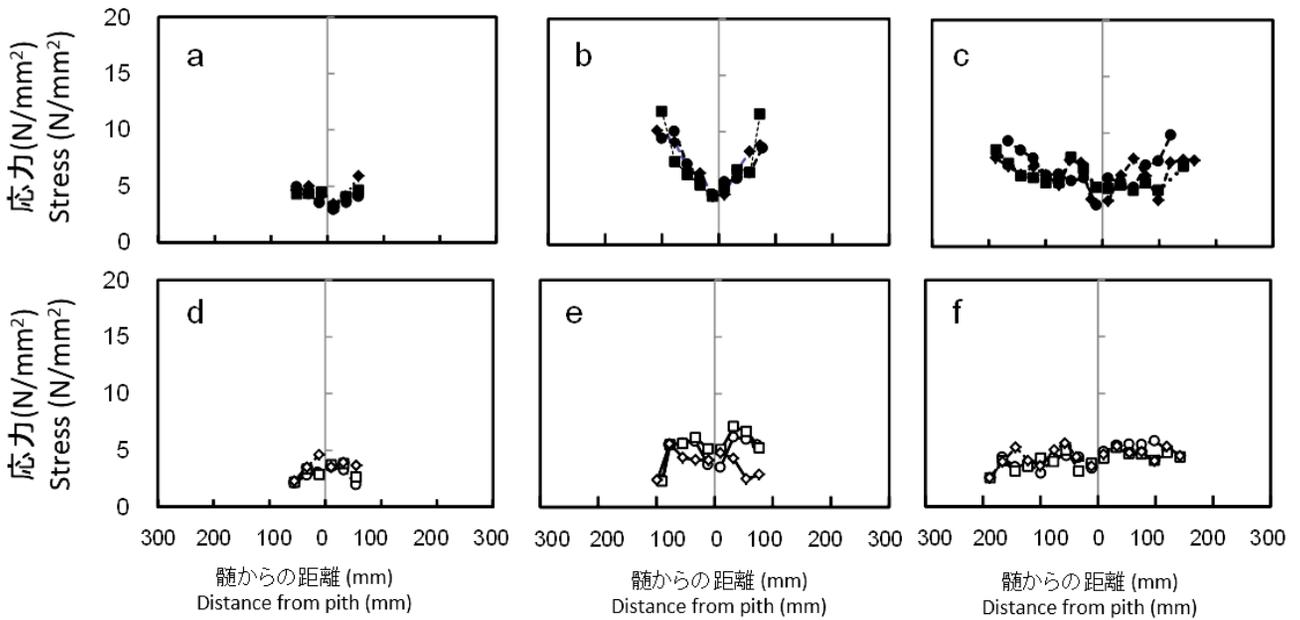


第4図 軟X線デンストメトリ法
 a,d: 試験木Sからの試験片, b, e: 試験木Mからの試験片, c, f: 試験木Lからの試験片
 Fig. 4. X-ray densitometry
 a, b: specimens from S, c, d: specimens from M, e, f: specimens from L.



第5図 代表的な応力-ひずみ曲線
 接線方向加力 (試験木Lからの試験片), b.半径方向加力 (試験木Lからの試験片),
 1, 5, 7, 9: 髄から樹皮へ向かう試験片番号

Fig. 5. Typical stress-strain curves of wood samples
 a: tangential loading direction of specimens from L; b: radial loading direction of specimens from L,
 1, 5, 7 and 9: samples numbered from the pith to the bark

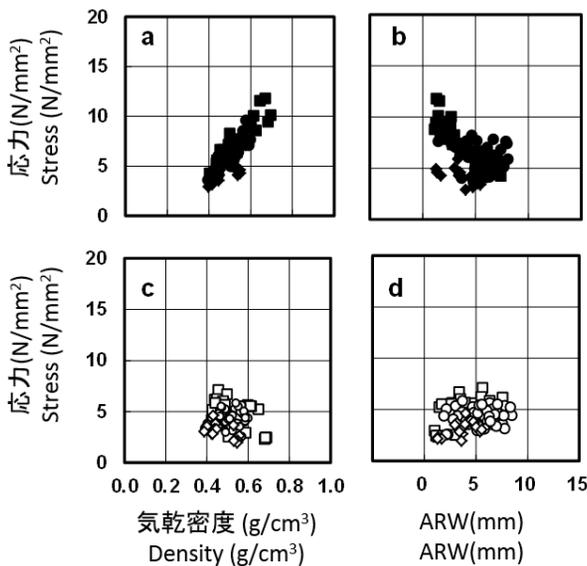


第6図 接線方向加力 (a, b, c) と半径方向加力 (d, e, f) の σ と髄からの距離の関係

a, d: 試験木Sからの試験片, b, e: 試験木Mからの試験片, c, f: 試験木Lからの試験片

Fig. 6. Relationship between σ in tangential (a, b, c) and radial (d, e, f) loading directions and distance from the pith

a, d: specimens from S, b, e: specimens from M, c, f: specimens from L



第7図 σ と気乾密度 (a, c) とARW (b, d) の関係

a, b: 接線方向加力, c, d: 半径方向加力, ダイヤモンド: 試験木Sからの試験片, 四角: 試験木Mからの試験片, 丸: 試験木Lからの試験片

Fig. 7. Relationship between σ and air-dried wood densities

(a, c) and the ARW (b, d)

a, b: tangential loading direction, c, d: radial loading direction diamonds: specimens from S, squares: specimens from M, circles: specimens from L.

Bodig¹³⁾ は、ダグラスファーの様な針葉樹を用いて横圧縮による初期の応力-ひずみ曲線に対する組織構造の影響を調べ、早材部分の最も弱い層が半径方向加力の圧縮に影響を与えることを報告するとともに、接線方向加力の圧縮では、晩材が座屈することを観察した。

仮に、木材が早材部分と晩材部分が積層された構造を持つ材料であるとする、木材の圧縮特性は、早材部分と晩材部分のそれぞれの性質と、両者の木材の断面積に占める割合の影響を受けることが予測される。このことは、試験片における早材部分と晩材部分の性質と両者の割合の樹幹半径方向変動が、圧縮特性の半径方向変動に影響を与える可能性を示唆する。

前述のように、本研究で用いた原木の年輪構造の変化は、晩材率と晩材密度が、髄からの距離の増加に伴い増加する傾向がある一方で、早材密度の心材部分における髄からの距離の増加に伴う変化は、晩材率や晩材密度に比べて小さかった (第4図)。これらの結果は、第3図における髄からの距離に伴う密度の増加が、主に、年輪内において密度の高い部分である晩材の密度と、晩材部分の木材に占める割合 (晩材率) の増加といった年輪構造の変化に起因す

ることを示す。接線方向加力の圧縮特性は、早材部分と晩材部分のそれぞれの強度やそれぞれが試験片の割合の影響を受けることから、髄からの距離の増加（第6図）と試験片の密度の増加（第7図）に伴って σ が増加すると考えられた。

一方、半径方向加力では、圧縮による破壊が年輪近くの早材仮道管で生じることが報告されている¹³⁻¹⁹⁾。いくつかの研究は、半径方向加力の圧縮による初めの破壊が、前年度の晩材近くの早材部分の細胞内腔径が大きく壁厚が薄い（密度が低い）仮道管で観察されることを報告している^{14, 16, 17)}。これは、半径方向加力の圧縮特性が早材の性質の影響を受けることを示唆する。しかしながら、第4図の心材部分の早材密度、年輪内最低密度の髄から樹皮に向かう変化は、晩材密度と晩材率のそれに比べ小さい傾向にあった。これは、半径方向加力の圧縮特性が髄からの距離（第6図）と試験片の密度（第7図）に相関がないことを説明する可能性を示す。

第4図における辺材部分の早材密度と年輪内最低密度は、心材部分よりも低い傾向にあった。カラマツ属では、心材に比べ辺材部分の早材密度が低く、これらの違いはアラビノガラクトランのような仮道管の内腔を埋める抽出成分量の違いに起因することが報告されている^{5, 18, 19)}。また、カラマツ属において、抽出処理後に心材部分の半径方向加力の圧縮強度とヤング率が減少することから、カラマツ属の心材抽出成分は、横方向の力学的性質を高める効果を持つことが報告されている¹⁹⁾。これらの報告を基にすると、第4図の樹皮近くの辺材の早材密度が低いことは、心材に比べて辺材で木部の抽出成分量が少ないことに起因する可能性を示す。このことは、第6図において、樹皮近くの辺材を含む気乾試験片において、半径方向加力の強度が低いことの要因となる可能性を示唆する。

このように、カラマツにおける、横方向の圧縮特性の半径方向変動には、年輪構造の半径方向変動が影響を与えることが示唆された。すなわち、接線方向加力の圧縮特性には、主に晩材率や晩材密度の増加のような年輪構造の半径方向が寄与するため、髄からの距離の増加や密度の増加に伴って、圧縮特性が増加すると考えられた。また、半径方向加力の圧縮特性には、早材の性質の変動が重要な役割を果たすため、接線方向加力の圧縮特性のような、髄からの距離の増加や試験片の気乾密度の増加に伴う増加が生

じない可能性が示唆された。これらは、前報⁹⁾における部分圧縮特性の変化に年輪構造の半径方向変動が寄与する可能性を示す。しかしながら、横方向の圧縮特性には、細胞の配列²¹⁾や形状^{16, 17, 22-24)}、放射組織量²⁵⁾等の要因が影響を与えることが報告されているため、横方向の力学的性質の髄から樹皮に向かう変化と木材の組織構造の関係を明らかにするためには、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

カラマツにおける横圧縮特性の樹幹半径方向変動を調べるため、髄から半径方向に連続した気乾試験片を用いて、密度、ARWと横方向の圧縮特性を把握した結果、次の結論が得られた。

- 1) 接線方向加力の σ は、髄からの距離の増加と気乾密度の増加、ARWの減少に伴い増加した。一方、この傾向は半径方向加力では、観察されなかった。半径方向加力の σ は、樹皮近くで低い傾向があり、密度と相関がなかった。これらの結果は、髄からの距離の増加に伴う σ の変化が、加力方向によって異なることを示した。
- 2) 軟X線ゲンシトメトリ法による年輪構造の半径方向変動を把握した結果、晩材率と晩材密度は髄から樹皮に向かい増加する傾向があった。一方、心材部分における髄からの距離の増加に伴う早材密度、年輪内最低密度の変化は、晩材密度や晩材率の変化に比べ小さかった。これらの結果は、晩材率や晩材密度の増加のような木材の年輪構造の半径方向変動が、接線方向加力の圧縮特性の増加に寄与する一方で、半径方向加力では、早材の性質の半径方向変動が寄与する可能性を示した。

本研究の一部は、「平成22-24年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」（農林水産省、2010～2012年度、課題番号22070）の助成により行われた。また、本研究の一部は、第62回日本木材学会札幌大会（2012）で発表された。

文 献

- 1) 渡辺治人, 堤 寿一, 小島敬吾 (1963) 木材学会誌 9: 225-230.
- 2) 太田貞明, 渡辺治人, 松本 勲, 堤 寿一 (1968) 九州大学農学部附属演習林集報 22: 105-116.

- 3) 平川泰彦, 藤沢義武 (1995) 木材学会誌 41: 123-131.
- 4) Zhu J, Tadooka N, Tanaka K, Koizumi A (2005) *J. Wood Sci.* 51: 95-101.
- 5) Koizumi A, Kitagawa M, Hirai T (2005) *Eurasian Journal of Forest Research* 8: 85-90.
- 6) 井城泰一, 福士達央, 反保早代, 田村明, 石栗太, 飯塚和也 (2010) 木材学会誌56: 265-273.
- 7) 森田秀樹、荒武志朗 (2010) *J. Timber Eng.* 23: 137-143.
- 8) 永石達也, 小林義裕, 雉子谷佳男, 森田秀樹, 藤元嘉安 (2011) 第61回日本木材学会大会研究発表要旨集 (京都), p115, 2011. 3.
- 9) Ishikura Y, Matsumoto K, Ohashi Y (2012) *J. Wood Sci.* 58: 399-407.
- 10) 太田貞明 (1970) 木材工業 25: 27-29.
- 11) Polge H, Nicholls JWP (1972) *Wood Sci.* 5:51-59.
- 12) Fujimoto T, Koga S (2010) *J. Wood Sci.* 56:7-14.
- 13) Bodig J (1965) *Forest Products Journal* 15: 197-202.
- 14) 王 松永 (1974) 木材学会誌 20: 172-174.
- 15) 相内泰三, 石田茂雄 (1981) 北海道大学農学部演習林研究報告38: 73-82.
- 16) Ando K, Onda H (1999) *J. Wood Sci* 45: 120-126.
- 17) Ando K, Onda H (1999) *J. Wood Sci.* 45: 250-253.
- 18) Tabarsa T, Chui Y H (2000) *Wood and Fiber Science* 32: 144-152.
- 19) 村田功二, 増田 稔 (2003) 材料 52: 347-352.
- 20) Grabner M, Wimmer R, Gierlinger N, Evans R, Downes G (2005) *Can. J. For. Res.* 35: 2781-2586.
- 21) Grabner M, Müller U, Gierlinger N, Wimmer R (2005) *IAWA J.* 26: 211-220.
- 22) 大釜敏正, 山田 正 (1974) 木材学会誌 20: 166-171.
- 23) Watanabe U, Norimoto M, Odegama T., Fujita M (1999) *Holzforschung* 53: 209-214.
- 24) Watanabe U., Fujita M., Norimoto M, Morooka T (2000) *J. Wood Sci.* 46: 109-114.
- 25) Watanabe U, Fujita M, Norimoto M (2002) *Holzforschung* 56: 1-6.
- 26) Kennedy RW (1968) *Forest Products Journal* 18: 36-40.

一性能部 構造・環境グループ
(原稿受理: 15. 2. 10)