日本産コナラ属木材の容積密度の放射方向変動*1

安部 久*2, 黒田克史*2, 山下香菜*2, 矢崎健一*2,
能城修一*2, 藤原 健*2

Radial Variation of Wood Density
of *Quercus* spp. (Fagaceae) in Japan*1

Hisashi ABE*2, Katsushi KURODA*2, Kana YAMASHITA*2,
Kenichi YAZAKI*2, Shuichi NOSHIO*2 and Takeshi FUJIWARA*2

In Japan, there are 15 native species belonging to the genus *Quercus* (Fagaceae). *Quercus* species make up approximately 13% of the total forest area in our country, second only to *Cryptomeria japonica* (21%). Therefore, effective utilization of *Quercus* wood can be expected to increase the self-sufficiency rate of domestic timber. The wood of *Quercus* species is generally hard, especially in the evergreen species which produce some of the hardest woods in our country. In this study, we analyzed the radial variation of the basic density of 35 wood samples from 14 species of *Quercus* in the xylarium of FFPRI, which were collected from all over Japan. In addition, in order to investigate the difference in the anatomical features of the inner and outer parts, transverse sections were observed by optical microscopy, and the vessel areas of both parts were measured. In most of the samples of ring-porous wood, basic densities showed highest values near the pith, and became lower toward the outer part. For radial-porous wood, mainly 2 kinds of patterns were observed in the radial variation of basic densities. One was a slight increase outward from the pith, which then decreased, and another was almost constant within the sample. These changing patterns from the inner to the outer parts in radial-porous wood could be explained with changes in vessel area. The average values of the difference between maximum and minimum densities within a radial series of a sample were 0.082 g/cm³ in ring-porous wood (deciduous species), and 0.041 g/cm³ in radial-porous wood (evergreen species). In the tree species used in this study, *Q. phillyraeoides* had the highest density.

Keywords : *Quercus*, oak, basic wood density, radial variation, vessel.

わが国の森林面積の約13%を占めるブナ科コナラ属樹木の木材を有効に利用することは国産材の自給率向上につながる事が期待できる。本研究では、森林総合研究所が所蔵する日本各地から採集されたコナラ属樹木14種35個体の木材標本を用いて、胸高部位における髄から1~10 cmの範囲内での容積密度、道管内こう面積の放射方向の変動を解析した。容積密度は、環孔材の樹種では髄付近で高く、外側に行くにしたがって低くなる傾向を示す個体が多く見られ、放射孔材の樹種は髄から外側にやや増加し、その後減少する個体、髄からほとんど変化のない個体が見られた。放射孔材の密度の変動は道管面積率の変動によるものと考えられた。1個体内での容積密度の変動幅の平均は環孔材を有する樹種では0.082 g/cm³、放射孔材を有する樹種では0.041 g/cm³であった。今回の研究に用いた樹種の中ではウバメガシの容積密度が最も高かった。

*1 Received May 28, 2012; accepted July 27, 2012.

*2 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

Corresponding author: H. Abe (abeq@affrc.go.jp)

1. 緒 言

日本の木材自給率を向上させるため、未利用の国産材を有効に活用することが求められている。これまでにスギやカラマツ等の針葉樹材については木材の材質研究が進められ、木材としての利用が促進されてきた¹⁻³⁾。特に、人工林から得られる間伐材の利用促進のため、小径木を有効に利用することが求められ、木材の材質変異についての研究が進められてきた。一方、国産の広葉樹の材質についてはこれまでにいくつかの樹種で事例的に研究されてきているが、個別の研究にとどまっており、まとまった研究はなされていない⁴⁻³³⁾。

日本の森林を見てみると、ブナ科 (Fagaceae) コナラ属 (*Quercus*) の樹木が優占する森林面積は全森林面積の約13%を占め、スギ (21%) に次いで広い面積をとなっている³⁴⁾。そのため、わが国の木材自給率を向上させるためには、コナラ属樹木の森林から得られる木材を有効に利用していくことが有効な手段であると考えられる。

コナラ属の樹木は日本に15種自生しており、植物学的にウバメガシ亜属 (*Sclerophyllodrys*)、コナラ亜属 (*Quercus*)、アカガシ亜属 (*Cyclobalanopsis*) に分類されている³⁵⁾。常緑性の樹木であるウバメガシ亜属とアカガシ亜属は一般に“カシ (櫟)”と総称され、木材は放射孔材となる。それに対し、コナラ亜属の樹木は落葉性で“ナラ (櫟)”と総称され、木材は環孔材となる。コナラ亜属はクヌギ節 (*Cerris*) とコナラ節 (*Prinus*) とに分類され³⁵⁾、木材の組織構造も異なっている³⁶⁾。また、放射孔材のカシ類についてもウバメガシ亜属とアカガシ亜属の木材とでは組織構造が異なっていることが分かっている³⁷⁾。コナラ属の木材は総じて密度が高く、堅いという認識が得られている³⁸⁾。中でも常緑性のカシ類はわが国で生産される木材の中でも最も堅いものの一つであり、縄文時代から現代まで農耕具や大工道具の柄、木刀、大八車の車輪など強靱さを必要とする用途に利用されてきている³⁹⁾。また、わが国のナラ類の中で個体として樹高、胸高直径ともに最大となるミズナラ (*Q. crispula*) は高級な家具やフローリング材などに利用されるほか、洋酒の樽材としても利用されている。しかしながら、コナラ (*Q. serrata*)、クヌギ (*Q. acutissima*) などの日本の平地林で普通に見かけられる樹種については、現在は薪炭材やほだ木といった利用が主である。また、カシ類についても現代の生活の中で利用する機会は少なくなっているのが現状である。コナラ属木材

の新たな利用方法を検討する上でも、その材質を詳細に把握することが必要である。

コナラ属樹木の材質については、大径材から採取した木材のデータとしていくつかの文献で取り上げられてきている³⁸⁾。しかしながら、良質の大径材の供給が先細る傾向の現在にあつては、中・小径木を有効に利用していくことが必要であり、そのためには、これまでに明らかにされていない中・小径木を含めて個体内の材質の放射方向のばらつきを明らかにしていくことが重要な課題である。一般的に髓付近の部分の材は、いわゆる“未成熟材 (juvenile wood)”と呼ばれ、成熟した外側の部分とは材質が異なると考えられている⁴⁰⁾。これまで、国産のコナラ属の木材の髓から外側への放射方向の密度変動について、用材としての利用が見込まれてきたミズナラ以外には多く調べられていない^{4, 7, 9, 14, 17, 23, 25, 30)}。特に、カシ類についてはほとんど研究例がなく²⁸⁾、世界的に見ても常緑のコナラ属木材の放射方向の密度変動に関する研究は限られている⁴¹⁻⁴³⁾。また、それらほとんど研究が個別事例の報告にとどまり、樹種、採集地、樹齢、個体サイズ等を考慮し、他の研究例と比較したような研究は見あたらない。

本研究では、日本産コナラ属14種の木材の密度の放射方向の変動について明らかにし、これまでの研究例と比較し、それをもとに、木材解剖学的、樹木生理学的、植物分類学的な考察を行った。試料としては、樹種、産地、個体サイズ等の情報が確実な森林総合研究所の木材標本を用いた。

2. 試料と方法

2.1 試料

森林総合研究所が所蔵する木材標本のうち、我が国に生育しているコナラ属樹種から、髓を含む試料が得られるカシワ (*Q. dentata*) 以外の14種 (コナラ (*Q. serrata*)、ミズナラ (*Q. crispula*)、クヌギ (*Q. acutissima*)、アベマキ (*Q. variabilis*)、ナラガシワ (*Q. aliena*)、ウバメガシ (*Q. phylliraeoides*)、アカガシ (*Q. acuta*)、シラカシ (*Q. myrsinaefolia*)、イチイガシ (*Q. gilva*)、アラカシ (*Q. glauca*)、ツクバネガシ (*Q. sessilifolia*)、ハナガガシ (*Q. hondae*)、ウラジロガシ (*Q. salicina*)、オキナワウラジロガシ (*Q. miyagii*)) から、髓付近の放射方向の変動を分析できる35個体 (常緑性24個体、落葉13個体) を選別し、試料として用いた (Table 1)。このうち3標本は韓国で採集されたものである。

2.2 容積密度の測定方法

あて材が含まれないように、各木材標本の偏心成

Table 1. Information of samples used in this study (TWTw).

Common name	Species	Sample ID ^{a)}	Size	Ring numbers	Provenance	Vessel arrangement type
Konara	<i>Q. serrata</i>	94		43	Hachioji, Tokyo	Ring-porous
Konara	<i>Q. serrata</i>	15520	H = 11 m, DBH = 17 cm	20	Ago, Mie	Ring-porous
Konara	<i>Q. serrata</i>	20289	H = 7.5 m, DBH = 16 cm	14	Aki, Kochi	Ring-porous
Konara	<i>Q. serrata</i>	22831	H = 7.5 m, DBH = 14.2 cm	21	Hamyang-gun, Korea	Ring-porous
Konara	<i>Q. serrata</i>	24644	H = 8 m, DBH = 16 cm	15	Hitachiohta, Ibaraki	Ring-porous
Konara	<i>Q. serrata</i>	25625	H = 7 m, DBH = 12 cm	20	Yatsushiro, Kumamoto	Ring-porous
Mizunara	<i>Q. crispula</i>	21861	tall tree, DBH = 35 cm	50	Sapporo, Hokkaido	Ring-porous
Mizunara	<i>Q. crispula</i>	21976	H = 14 m, DBH = 17 cm	50	Gujo, Gifu	Ring-porous
Mizunara	<i>Q. crispula</i>	23715	H = 9.5 m, DBH = 16 cm	41	Miyama, Mie	Ring-porous
Mizunara	<i>Q. crispula</i>	23846	H = 8.5 m, DBH = 15 cm	35	Ulsan, Korea	Ring-porous
Kunugi	<i>Q. acutissima</i>	18440	H = 10 m, DBH = 15 × 16 cm	24	Osa, Okayama	Ring-porous
Kunugi	<i>Q. acutissima</i>	24765	H = 15 m, DBH = 20 cm	21	Hitachiohta, Ibaraki	Ring-porous
Naragashiwa	<i>Q. aliena</i>	21611	H = 11 m, DBH = 16.5 cm	15	Sakurae, Shimane	Ring-porous
Abemaki	<i>Q. variabilis</i>	23861	H = 10 m, DBH = 17 cm	40	Ulsan, Korea	Ring-porous
Ubamegashi	<i>Q. phillyraeoides</i>	6877	small tree, DBH = 8 cm	55	Kawazu, Shizuoka	Radial-porous
Ubamegashi	<i>Q. phillyraeoides</i>	9319		38	Ohnejime, Kagoshima	Radial-porous
Ubamegashi	<i>Q. phillyraeoides</i>	23697	H = 10 m, D = 17 cm	31	Miyama, Mie	Radial-porous
Ubamegashi	<i>Q. phillyraeoides</i>	23750	H = 8.5 m, DBH = 14 cm	37	Miyama, Mie	Radial-porous
Ubamegashi	<i>Q. phillyraeoides</i>	25432	H = 9 m, DBH = 19 cm	54	Tanabe, Wakayama	Radial-porous
Akagashi	<i>Q. acuta</i>	16951	H = 11 m, DBH = 12 cm	37	Shiiba, Miyazaki	Radial-porous
Akagashi	<i>Q. acuta</i>	17757		30	Aya, Miyazaki	Radial-porous
Akagashi	<i>Q. acuta</i>	23641	H = 9 m, DBH = 18 cm	31	Ohgaki, Gifu	Radial-porous
Akagashi	<i>Q. acuta</i>	24010	H = 13 m, DBH = 18 cm	36	Karatsu, Saga	Radial-porous
Arakashi	<i>Q. glauca</i>	19046	H = 7.5 m, DBH = 13 cm	21	Miyama, Mie	Radial-porous
Arakashi	<i>Q. glauca</i>	22546	H = 12 m, DBH = 17 cm	36	Izumi, Kagoshima	Radial-porous
Arakashi	<i>Q. glauca</i>	24035	H = 8 m, DBH = 13.5 × 12.5 cm	23	Tosu, Saga	Radial-porous
Urajirogashi	<i>Q. salicina</i>	21633	H = 8.5 m, DBH = 18 cm	34	Kawamoto, Shimane	Radial-porous
Urajirogashi	<i>Q. salicina</i>	25366	H = 11 m, DBH = 19 cm	30	Tanabe, Wakayama	Radial-porous
Tsukubanegashi	<i>Q. sessilifolia</i>	21709	H = 10 m, DBH = 17 × 14 cm	33	Misato, Shimane	Radial-porous
Tsukubanegashi	<i>Q. sessilifolia</i>	22632	H = 10 m, DBH = 12.5 × 14 cm	22	Ohguchi, Kagoshima	Radial-porous
Tsukubanegashi	<i>Q. sessilifolia</i>	23487	H = 9.5 m, DBH = 17 cm	25	Sukumo, Kochi	Radial-porous
Ichigashi	<i>Q. gilva</i>	17750	D = 24.5 cm	36	Aya, Miyazaki	Radial-porous
Okinawaurajirogashi	<i>Q. miyagii</i>	12867	tall tree ; D = 12.5 cm	33	Kunigami, Okinawa	Radial-porous
Hanagagashi	<i>Q. hondae</i>	17749		55	Aya, Miyazaki	Radial-porous
Shirakashi	<i>Q. myrsinaefolia</i>	19		32	Meguro, Tokyo	Radial-porous

a) Sample ID is the ID number in the xylarium of FFPRI (TWTw). The number is internationally authorized.

長が見られない部分を選び、部分接線方向の幅が約 2 cm、繊維方向に約 2~3 cm 厚さの髄を含むストリップを 2 方向（不可能な場合は 1 方向）から採取し、放射方向に 1 cm 毎に分割し、それぞれのブロックに含まれている年輪数を計測した。1 年輪の途中で分割されたものは 0.5 年輪としてカウントした。

その後、著しい腐朽が認められる部分を取り除いた。分割されたブロックを飽水状態にした後、天秤で質量 (W_s , g) を測定し、水中での質量 (W_w , g) を測定し、105℃ に設定したファン付の乾燥機 (DN 600, 大和光機) 中で 2~3 日乾燥させた後、全乾質量 (W_0) を測定し、容積密度 (BD, g/cm³) を $BD = W_0 / (W_s - W_w)$ によって算出した。容積密度の変動については、放射方向の変動が著しいと思わ

れる髄から 1~10 cm までの範囲に限定して測定した。

2.3 顕微鏡観察と道管の内こう面積計測

容積密度の測定に用いた試料から、典型的な容積密度の放射方向の変動パターンを示した計 5 個体をミズナラ、クヌギ、ウバメガシ、シラカシから選び、髄から 1~2 cm の部位と 7~8 cm の部位のブロックから厚さ 10 μm 厚の木口面切片を滑走式マイクロームを用いて作製し、サフラニン-ゲンチアナバイオレットの二重染色を施した後、定法に従って脱水し、カナダバルサムを用いて封入し、永久プレパラートとした。堅い材が多かったため、切片作製が困難な場合にはグリセリンを用いて 120℃ で煮沸し、軟化処理を行った。

選別した各部位の切片を光学顕微鏡 (Eclipse 80i Nikon 社) を用いて対物レンズ4倍で CCD カメラ (DXM 1200c Nikon 社) を用いて撮影し、写真を画像解析ソフト (Image J アメリカ国立衛生研究所) を用いて、広放射組織と年輪境界に囲まれた部分を任意に5年輪分選択し、含まれる道管の内こう面積を計測した。道管の判別は顕微鏡画像をもとに目視で行った。測定精度は1画素あたり0.9 μm であった。それを元に平均の1個あたりの道管面積、単位面積あたりの道管数、道管面積率を計算し、髓付近と外側との違いについて分析した。環孔材では早材の孔圏部に大径の道管が集中して存在するため、早材部と晩材部の道管を区別するために便宜的に1年輪の内側部分20%を早材、外側部分20%を晩材とした。また、木繊維壁厚を測定するために、年輪中央部の木繊維50個を任意で選択し、隣接する木繊維の内こう表面間の距離を2個分の木繊維の壁厚として測定した。道管面積等の計測と同様のシステムを用いたが、顕微鏡の対物レンズを40倍に設定し、測定精度は1画素あたり0.09 μm であった。

3. 結 果

3.1 容積密度

樹種ごとの容積密度の放射方向の変動を Figs. 1, 2 に示す。ウバメガシ以外の樹種では容積密度が0.80 g/cm^3 未満であり、最も高いコナラの髓付近でも0.78 g/cm^3 であった (Fig. 1a)。一方、ウバメガシの容積密度は0.8 g/cm^3 以上の部分が多く、最も低い部分でも0.78であった (Fig. 2a)。すべての樹種において容積密度の変動幅は0.3 g/cm^3 の範囲に収まっていた。

容積密度の放射方向の変動パターンは環孔材と放射孔材で異なっていた。環孔材では、多くの個体で髓付近で高く、樹皮側にいくに従って低下する傾向を示した (Fig. 1)。ミズナラの1個体 (21861) では髓付近と外側で変化がないか、やや上昇する傾向を示した (Fig. 1b)。また、クヌギやアベマキでは放射方向の減少の変動幅が少なかった (Figs. 2c, d)。放射孔材では、髓から外側に向かってほとんど変化がない個体がほとんどであったが、髓付近または髓から少し外側で高く、その後低下する個体がウバメガシとアカガシで見られた (Figs. 2a, b)。

Table 2 は1ストリップ内の容積密度の最大値と最小値との差を環孔材と放射孔材ごとにまとめた結果である。平均値は環孔材で0.082 g/cm^3 、放射孔材で0.041 g/cm^3 であり、放射方向の容積密度のばらつきは放射孔材では小さいことが分かる。

Fig. 1. Radial variation of basic densities of ring-porous wood of *Quercus* spp. Number of each sample represents the ID number in the xylarium of FFPRI (TWTw). a: *Q. serrata*, b: *Q. crispula*, c: *Q. acutissima*, d: *Q. variabilis* and *Q. aliena*

Fig. 2. Radial variation of basic densities of radial-porous wood of *Quercus* spp. Number of each sample represents the ID number in the xylarium of FFPRI (TWTw). a: *Q. phyllaryaeoides*, b: *Q. acuta*, c: *Q. glauca*, d: *Q. salicina*, e: *Q. sessilifolia*, f: *Q. myrsinaefolia*, *Q. gilva*, *Q. hondae* and *Q. miyagii*

Table 2. Differences between maximum and minimum densities in a sample.

Vessel arrangement type	Average (g/cm ³)	S.D. (g/cm ³)
Ring-porous (<i>n</i> = 27)	0.082	0.037
Radial-porous (<i>n</i> = 39)	0.041	0.024

S.D. means standard deviation.

1 cm 幅の試料に含まれる年輪数と容積密度との間に明確な関係は見られなかったが、ミズナラにおいて年輪数が増加すると容積密度が高くなる傾向が見られた (Fig. 3)。特に標本番号21976の個体は、髄付近の比重が高い部分において年輪数が多かった。

3.2 外側と内側の道管の面積の変化

Table 3 に、容積密度の放射方向の変動パターンのタイプ毎に、髄付近と外側の道管の平均面積、道管頻度、道管面積率の変化を示す。調べた全5個体

Fig. 3. Relationship between basic density and number of annual rings included within the sample of *Q. crispula*. Number of each sample represents the ID number in the xylarium of FFPRI (TWTw).

Table 3. Differences in vessel area, vessel frequency and total vessel area between the inner part (1-2 cm apart from the pith) and the outer part (7-8 cm from the pith) of *Quercus* spp..

Vessel arrangement type	Tendency from the pith to bark	Species	Sample ID ^{a)}	Mean vessel area in earlywood ^{b)} (μm^2)		Mean vessel area in latewood ^{c)} (μm^2)		Vessel frequency (number/ mm^2)		Total vessel area (%)		Thickness of fiber wall ^{d)} (μm)	
				Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer
Ring-porous	decrease	<i>Q. crispula</i>	21976	13592.0	32808.5	425.0	645.0	35.2	28.0	7.4	8.0	7.3	7.5
				10939.6	21163.8	196.1	468.4	5.6	2.1	1.3	1.0	0.2	0.2
	slight decrease	<i>Q. acutissima</i>	24765	37321.6	82523.1	1465.8	2351.1	6.5	4.1	8.4	10.3	10.0	8.2
				21572.4	27901.1	572.3	752.6	2.0	0.5	0.8	2.5	0.2	1.4
Radial-porous	constant	<i>Q. crispula</i>	21861	18594.9	42943.1	395.1	798.9	24.0	27.5	8.3	12.9	6.3	7.4
				8445.2	24538.4	235.8	569.4	1.7	1.2	0.7	0.7	0.4	0.5
	decrease	<i>Q. phylliraeoides</i>	25432	5738.3	11247.5	3421.8	4485.1	15.0	14.4	7.2	11.1	10.4	12.8
				3338.9	5106.1	1467.3	1993.6	3.0	1.4	0.8	0.8	0.2	0.2
	constant	<i>Q. myrsinaefolia</i>	19	6611.4	8498.7	2764.4	3626.9	11.0	7.5	4.5	4.4	7.8	8.2
				3060.5	3320.2	1172.2	1733.8	0.6	0.8	0.1	0.8	0.2	0.2

Upper and lower values in each column are mean value and value of standard deviation, respectively.

a) Sample ID is the ID number in the xylarium of FFPRI (TWTw).

b) Earlywood means the initial region occupying 20% of the annual ring.

c) Latewood means the terminal region occupying 20% of the annual ring.

d) Thickness of double wall of wood fibers.

で、道管の平均面積は早材部、晩材部ともに外側の方が髄付近よりも大きくなっている。一方、道管頻度、木繊維壁厚には一定の傾向は見られない。1年輪内の道管の総面積率は、環孔材においては容積密度の放射方向の変動パターンに関わらず外側の方が高くなる傾向を示した。一方、放射孔材においては、ウバメガシとアカガシで見られた、容積密度が髄よりやや外側で高くなりその後減少するパターンを示す個体では、道管面積率は内側よりも外側の方が高くなっており、容積密度が放射方向に一定の値を示すパターンの個体では、道管面積率も内側と外側でほとんど差がなかった。また環孔材では放射孔材に比べて、早材道管は大きく、晩材道管は小さくなる傾向が見られた。

Fig. 4 に、画像解析に供したミズナラとシラカシの髄付近と外側の木口面切片の顕微鏡写真を示す。環孔材では放射孔材に比べて孔圏外の軸方向柔細胞を含む周囲仮道管・小道管群が発達していることが確認できる。

4. 考 察

4.1 コナラ属木材の容積密度

本研究で使用した試料の容積密度はナラ類が 0.66 g/cm^3 、ウバメガシを除くカシ類が 0.68 g/cm^3 であった。Fujiwara ら⁴⁴⁾ は、日本各地の国有林から得られたコナラ属の胸高部位付近の木材の容積密度を測定し、落葉性のコナラとミズナラの平均は 0.62 g/cm^3 、常緑性のカシ類（アラカシ、ウラジロガシ、イチイガシ、シラカシ）の平均が 0.64 g/cm^3 であっ

Fig. 4. Microphotographs of the inner part (1-2 cm from the pith) and outer part (7-8 cm from the pith) of *Quercus* spp. Arrows indicate groups of small vessels and axial parenchyma. bars = 500 μm a: *Q. crispula* (inner), b: *Q. crispula* (outer), c: *Q. myrsinaefolia* (inner), d: *Q. myrsinaefolia* (outer)

たと報告しており, 今回の結果とおおむね一致する。一方, 今回の研究ではウバメガシの容積密度は他の樹種よりも明らかに高かった (Fig. 2a)。ウバメガシはカシ類でも最も重い部類に入る樹種であると言われてきたが⁴⁵⁾, 今回の研究では採集履歴の確かな木材標本を複数個体調べ, 比較したことで, ウバメガシが最も密度の高いカシであることが科学的に検証された。また, ウバメガシの髄付近の材の容積密度が高いという特性から, 小径のウバメガシ材が良質の炭材の原料として利用されてきたと考えられる。

4.2 コナラ属木材密度の放射方向の変動パターン

これまでに報告されているコナラ属木材密度の放射方向の変動パターンに関する報告を Table 4 に示す。研究に用いた木の大きさ, 樹齢, 測定方法などは様々であるが, ほとんどが環孔材であり, 国産ではミズナラを用いた研究が多い。環孔材樹種の結果を見ると, 髄付近で高く, 樹皮側に向かうに従って低下する傾向が見られる例が多い。また, 外側に向かってやや増加した後減少する例や, 髄からほと

んど変化がない例も報告されている。今回の研究で見られたコナラ属木材密度の放射方向の変動パターンは, これらの報告と一致している。

これまでに報告されている広葉樹材密度の一般的な放射方向変動パターンについては, 1) 髄から外側に向かって密度が増加するもの, 2) 髄付近で高く, 外側に向かって数年輪減少後, 増加するもの, 3) 髄から外側にやや増加した後, 一定となるか減少するもの, 4) 髄から外側に向かって減少するものがある⁵¹⁾。しかし, 今回のコナラ属木材の密度変動の結果では, 髄から外側に著しい変化がなく, 特に放射孔材については, 放射方向の容積密度の変動幅が 0.041 g/cm^3 とかなり小さく均質であることが分かった (Table 2)。このようなコナラ属木材の特性を利用することで, これまでに強度特性や木目の意匠性から家具やフローリングとして幅広く用いられていた大径のミズナラ材と同様に, 小径の他のコナラ属木材もミズナラ同様に利用できるのではないかと考えられる⁵²⁾。また, その中でも常緑性のカシ類

Table 4. Density variation of *Quercus* spp. in the literature.

Scientific name (<i>Quercus</i>)	Common name	Vessel arrangement type	Range of density (g/cm^3)	Radial pattern of variation	Measured density	Age (number of rings)	DBH (cm)	Height (m)	Provenance	Reference
<i>Q. crispula</i>	Mizunara	Ring-porous	0.527-0.654, 0.488-0.619, 0.424-0.654	Decrease to the outer	Basic density	125, 127, 135	28, 29, 33.5	26.63, 20.70, 20.77	Kyusyu Univ. Forest, Ashoro, Hokkaido	4)
<i>Q. crispula</i>	Mizunara	Ring-porous	0.606-0.741	Decrease to the outer	Oven dry weight/Air dry volume	116	21.4		Kyusyu Univ. Forest, Ashoro, Hokkaido	7)
<i>Q. crispula</i>	Mizunara	Ring-porous	0.45-0.65	Decrease to the outer	Basic density	180, 200, 190	53, 52, 65	29.4, 28.3, 23.9	Hokkaido Univ. Forest, Horokanai, Hokkaido	9, 17)
<i>Q. crispula</i>	Mizunara	Ring-porous	0.55-0.60	Constant	Basic density	60, 70	14.0, 14.7		Aizan, Asahikawa, Hokkaido	26)
<i>Q. crispula</i>	Mizunara	Ring-porous	0.4-0.6	Decrease to the outer, or, Increase to the outer, and decrease	Basic density	141-273 (14 trees)	32-50 (logs)		Hokkaido	30)
<i>Q. serrata</i>	Konara	Ring-porous	0.5-0.7	Increase to the outer, and decrease	Basic density	56-57, (5 trees)	21-24	20.7-22.5	Iwate Univ. Forest, Takizawa, Iwate	14)
<i>Q. acutissima</i>	Kunugi	Ring-porous	0.7-0.95	Decrease to the outer	Air dry density	around 40			Hiruzen, Okayama	25)
<i>Q. variabilis</i>	Abemaki	Ring-porous	around 0.9	Constant	Air dry density	59 (3 trees)	26, 26, 24	16.3, 17.9, 18.4	Kagoshima Univ. Forest, Tarumi, Kagoshima	23)
<i>Q. falcata</i>	Southern red oak	Ring-porous	0.59-0.61	Decrease to the outer	Basic density		over 30		North Carolina	46)
<i>Q. falcata</i>	Southern red oak	Ring-porous	0.75-0.82	Decrease to the outer	Oven dry density	60-			Central Massachusetts	47)
<i>Q. liaotungensis</i>	East-Liaoning oak	Ring-porous	0.55-0.70	Increase to the outer, and decrease	Basic density	70 (5 trees)			Northern China	48)
<i>Q. nigra</i>	Water oak	Ring-porous	0.58-0.59	Increase to the outer, and decrease	Basic density					49)
<i>Q. rubra</i>	Northern red oak	Ring-porous	0.55-0.62	Decrease to the outer	Basic density	51-135 (5 trees)	33-55		Central Massachusetts	47)
<i>Q. stellata</i>	Post oak	Ring-porous	0.62-0.73	Decrease to the outer	Basic density					49)
<i>Q. robur</i>	European oak	Ring-porous	0.6-0.5	Decrease to the outer	Air dry density	87 (5 trees)			Göttengen, Germany	50)
<i>Q. suber</i>	Cork oak	Semi-Ring or Radial	0.75-0.95	Decrease to the outer and constant	Air dry density	25 (7 trees)	27-43		Southwestern Portugal	42)
<i>Q. salicina</i>	Okinawaurajirogashi or Urajirogashi	Radial-porous	0.7-0.9	Decrease to the outer	Air dry density	148	30		Yamato, Amami Isl. Kagoshima	28)
<i>Q. sp.</i>	Mempening	Radial-porous	0.7-0.8	Increase to the outer, and decrease	Basic density		62		Kalimantan, Indonesia	41)

は木材の密度の放射方向の変動がきわめて小さく、堅くて均質な材料としての利用が期待できる。

今回の研究では、全樹種において早材、晩材の道管面積は外側では髄付近に比べて大きくなることが認められた。これは、Tsuchiya と Furukawa によるコナラの早材道管は髄から外側に行くに従って大きくなるという報告と一致する⁵³⁾。一方、深澤と大谷はミズナラの容積密度の放射方向変動を調べ、髄付近（半径10 cm）までは容積密度は年輪幅に関係なく高い値を示し、その原因は孔圏外部の軸方向柔細胞を含む周囲仮道管・小道管群の割合が外側で高くなることが一因であると報告している⁹⁾。本研究におけるミズナラの年輪幅は狭くても髄付近の容積密度は高くなるという結果（Fig. 3）は、深澤と大谷の報告と一致する。また、環孔材樹種の道管面積率と容積密度の変動に関係が認められないと言う結果は（Table 3）、環孔材の髄付近での容積密度の変動は道管だけでなく他の構成要素の変異が関係していることを示唆している。特に深澤と大谷⁹⁾が報告したように、孔圏外の軸方向柔細胞を含む周囲仮道管・小道管群の割合の変異については、今後、調べていく必要があると考えられる。

それに対し、放射孔材においては容積密度変動パターンが外側に向かって減少する個体では道管面積率は増加し、一定の値を示す個体では道管面積率もほとんど変化がなかった。Knapic ら⁴²⁾、Leal ら⁴³⁾は、コルクガシの材密度は髄付近で高く、外側に向かって減少するコナラ亜属やウバメガシのようなパターンとなり、減少する要因としては道管率の上昇がもっとも寄与していると報告している。放射孔材となる常緑性のコナラ属においては道管周辺に周囲柔組織が発達しないため、道管が占める空隙率がそのまま容積密度に反映される可能性がある（Figs. 3c, d）。

また、コナラ属樹種は広放射組織を有することが知られている^{36, 54, 55)}。Shimaji は、広放射組織は形態発生の面から、集合型、複合型、両者の中間型に分けられ、集合型の樹種としてウバメガシは集合型、コナラ亜属は複合型、アカガシ亜属は中間型になり、コナラ亜属の中でもコナラ節とクスギ節では発達の形態が異なると報告している^{54, 55)}。このように、広放射組織の髄からの発達形態も樹種群毎に異なっていると報告されているため、木材の放射方向の密度変動に影響を及ぼす可能性があり、今後、容積密度の変動を解析するための要因の一つとして分析していく必要がある。

4.3 広葉樹材密度の放射方向変動の多様性

近年、木材の密度と樹木の生理学的特性との関係

に関する研究が進められてきており⁵⁶⁾、放射方向の密度変動が樹木の成長戦略と関係があると指摘されている⁴⁷⁾。それによると、成長が早いパイオニア的な樹種では、髄付近を低密度にすることで樹幹の伸長生長に養分を振り分け、樹幹が十分に成長した後に、樹幹を支えるために高密度の材を外側に形成するという成長をする。そのため、髄付近の密度が低く、外側に向かって高くなる傾向があるとしている。これまでに髄から外側に向かって密度が高くなると報告されている温帯性の樹種として、*Populus canescens*⁵⁷⁾、*Populus sertina*⁵⁷⁾、*Alnus glutinosa*⁵⁷⁾、*Betula alba*⁵⁷⁾、*Betula maximowicziana*（ウダイカンバ）¹⁷⁾、*Betula papyrifera*⁴⁷⁾、*Betula pubescens*⁵⁷⁾、*Liriodendron tulipifera*（ユリノキ）⁵⁸⁾、*Machilus thunbergii*（タブノキ）²⁹⁾、*Platanus occidentalis*（アメリカスズカケノキ）^{59, 60)}、*Robinia pseudoacacia*（ニセアカシア）²²⁾、*Melia azedarach*（センダン）³¹⁾、*Chorospodias axillaris*（チャンチンモドキ）³²⁾、*Acer pictum*（イタヤカエデ）²⁶⁾、*Acer pseudoplatanus*（シカモアカエデ）⁵⁷⁾、*Tilia japonica*（シナノキ）^{11, 17)}、*Swida controversa*（ミズキ）¹⁸⁾、*Scleffelra octophylla*（フカノキ）²⁹⁾ などがある。一方、髄から外側に向かって密度が低くなる樹種として、*Populus nigra*⁷⁾、*Populus sieboldii*（ヤマナラシ）⁶⁾、*Castanopsis sieboldii*（スダジイ）²¹⁾、*Fagus grandifolia*⁴⁷⁾、*Kalopanax septemlobus*（ハリギリ）^{17, 26)}、*Cercidiphyllum japonicum*（カツラ）^{10, 17)}、*Idesia polycarpa*（イイギリ）²⁸⁾、*Nyssa sylvatica*（スミミズキ）⁴⁸⁾、*Schima wallichii*（イジュ）²¹⁾ など報告されている。どちらのタイプも散孔材・環孔材といった材の構造や光合成能力といった樹木の生理学的特性で一元的に説明できるものではなく⁶¹⁾、今後さらなる検証が必要と考えられる。また、コナラ属樹木は全体に中程度の光合成能力を有するとされており⁶¹⁾、今後の日本における広葉樹の造林樹種を選択していく上でも、木材特性と樹木生理の両面から研究していく必要があると思われる。

一方、植物の分類学的な視点で見ると、カバノキ科やカエデ科では髄から外側に向かって密度が増加するパターンのみが見られるほか、マメ科の樹木については、熱帯産の *Paraserianthes falcataria*、*Pericopsis moniana*、*Baikiaea plurijuga*、*Acacia* spp. でも髄から外側にむかって密度が増加することが報告されており^{57, 62-66)}、分類群の科の単位で材密度の変動パターンが一定している場合もあると考えられる。髄から樹皮側への木繊維と道管の伸長パターンは植物の科レベルで同一であることが示されてお

り¹⁵⁾、形態形成に伴う解剖学的な特徴が密度変動に影響を及ぼすことは大いに考えられ、今後、さらに幅広い方向の視点からの研究が必要であると考えられる。

5. 結 論

わが国の広葉樹材を有効に活用するため、森林面積の約13%を占めるブナ科コナラ属木材14種の容積密度の放射方向変動を調べた。落葉性でナラと称される環孔材を有する樹種では、容積密度が髓付近で高く、外側に行くにしたがって低くなる傾向を示す個体が多かった。常緑性でカシと称される放射孔材を有する樹種では、容積密度は髓から外側にやや増加し、その後減少するパターンを示す個体、髓からほとんど変化のない個体があった。1個体内での容積密度の放射方向の変動幅の平均は落葉性である環孔材を有する樹種では0.082 g/cm³、常緑性である放射孔材を有する樹種では0.041 g/cm³であり、環孔材の方が変動幅は大きかった。容積密度の放射方向の変動パターンについて、放射孔材では道管の面積率で説明できたが、環孔材においては関係があるとは言えなかった。これまで包括的に調べられてこなかった広葉樹木材の密度変動について、本研究では日本各地から広葉樹の1属の複数種の試料について調べ、樹種間での比較・分析を行った。これは初めての試みであり、広葉樹造林や材利用の促進を考慮すると、樹木生理、植物分類、産地間による比較など、今後の多方面からの分析の必要性が示唆された。

文 献

- 堤 壽一：木材工業 39, 3-8 (1984).
- 上田恒司：木材工業 47, 54-58 (1992).
- 平川泰彦, 藤澤義武, 中田了五, 山下香菜：森林総合研究所研究報告 No. 2, 31-41 (2003).
- 堤 壽一, 渡辺治人：九大演研報 No. 15, 167-186 (1961).
- 平井信二：東大演研報 No. 56, 189-201 (1962).
- 猪熊泰三, 島地 謙, 古谷正人：東大演研報 No. 56, 315-332 (1962).
- 渡辺治人, 松本 昂, 林 弘也：木材学会誌 12, 259-265 (1966).
- 矢沢亀吉, 宮島 寛, 丹 貞雄：木材学会誌 9, 66-72 (1968).
- 深澤和三, 大谷 諄：北大演研報 No. 29, 171-188 (1972).
- 大谷 諄, 深澤和三, 金野滋典：北大演研報 No. 31, 467-480 (1974).
- 深澤和三, 大谷 諄：北大演研報 No. 36, 609-622 (1979).
- 古川郁夫, 松本恵美子, 作野友康, 岸本 潤：木材学会誌 27, 507-511 (1981).
- 藤田晋輔：鹿児島大演研報 No. 10, 15-28 (1982).
- 沢辺 攻, 鈴木 寧：岩手大演研報 No. 14, 1-22 (1983).
- 古川郁夫, 世古口昌子, 松田雅子, 作野友康, 岸本 潤：広葉樹研究 2, 103-134 (1983).
- 藤田晋輔：日本林学会九州支部研究論文集 36, 243-244 (1983).
- Fukazawa, K.: IAWA Bull. n. s. 5, 65-73 (1984).
- 沢辺 攻, 大石 剛：岩手大演研報 No. 16, 133-144 (1985).
- 藤田晋輔：鹿児島大演研報 No. 13, 103-122 (1985).
- 藤田晋輔：鹿児島大農学部学術報告 No. 35, 195-204 (1985).
- 遠矢良太郎：日本林学会九州支部研究論文集 38, 279-280 (1985).
- 山田希仁, 作野友康, 古川郁夫, 岸本 潤：広葉樹研究 3, 107-120 (1985).
- 藤田晋輔：鹿児島大演研報 No. 14, 1-11 (1986).
- 藤田晋輔：鹿児島大学農学部学術報告 No. 36, 205-214 (1986).
- 古川郁夫, 橋詰隼人：木材学会誌 33, 443-449 (1987).
- 高橋政治, 滝沢忠昭：林産試験場報/北海道立林産試験場 No. 3, 13-17 (1989).
- 藤田晋輔：鹿児島大演習研報 No. 18, 11-19 (1990).
- 藤田晋輔：鹿児島大農学部学術報告 No. 40, 193-199 (1990).
- 藤田晋輔：鹿児島大演習研報 No. 18, 21-28 (1990).
- 佐藤真由美, 高橋政治, 安久津久, 森泉 周, 滝沢忠昭：林産試験場報告 No. 7, 16-21 (1993).
- 松村順司, 井上真由美, 横尾謙一郎, 小田一幸：木材学会誌 52, 77-82 (2006).
- 松村順司, 田上美里, 緒方利恵, 玉泉幸一郎, 牟田信次, 上脇憲治, 長谷川益己, 小田一幸：木材学会誌 53, 127-133 (2007).
- 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄：木材学会誌 58, 144-152 (2012).

- 34) 林野庁 : <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/monitar/pdf/tayousei.pdf>. Accessed May 1, 2012 (2009).
- 35) Ohba, H.: "Flora of Japan Ila", Iwatsuki, K., Boufford, D. E., Ohba, H. eds., Kodansha, Tokyo, 2006, pp. 42-60.
- 36) 島地 謙, 伊東隆夫: "図説木材組織", 地球社, 東京, 1982, pp. 1-176.
- 37) Noshiro, S., Sasaki, Y.: *IAWA J.* **32**, 383-393 (2011).
- 38) "改訂第4版 木材工業ハンドブック", 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, pp. 1-1221.
- 39) 能城修一, 佐々木由香, 鈴木三男, 村上由美子: 植生史研究 **21**, 29-40 (2011).
- 40) Zobel, B. J., Sprague, J. R.: "Juvenile Wood in Forest Trees", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, pp. 1-300.
- 41) 林業試験場木材部, 林産化学部: 林業試験場研究報告 No. 218, 99-325 (1968).
- 42) Knapic, S., Louzada, J. L., Leala, S., Pereira, H.: *Ann. For. Sci.* **64**, 211-218 (2007).
- 43) Leal, S., Sousa, V. B., Knapic, S., Louzada, J. L., Pereira H.: *Eur. J. For. Res.* **130**, 1023-1029 (2011).
- 44) Fujiwara, T., Yamashita, K., Kuroda, K.: *Bull. For. For. Prod. Res. Inst.* No. 6, 115-226 (2007).
- 45) 緒方 健: 熱帯林業 **24**, 1-14 (1972).
- 46) Hamilton, J. R.: *For. Prod. J.* **11**(6), 267-271 (1961).
- 47) Woodcock, D. W., Shier, A. D.: *Trees* **16**, 437-443 (2002).
- 48) Zhang, S. Y., Zhong, Y.: *Canadian J. For. Res.* **21**, 255-260 (1991).
- 49) Taylor, F. W.: *Wood Sci.* **11**, 193-199 (1979).
- 50) Rao, R. V., Aebischer, D. P., Denne, M. P.: *IAWA J.* **18**, 127-138 (1997).
- 51) Panshin, A. J., De Zeeuw, C.: "Textbook of Wood Technology vol. 1 3rd edition", McGraw-Hill Book Inc., New York, 1980, pp. 1-705.
- 52) 日本住宅・木材技術センター: 森林資源有効活用促進調査事業, 1987, pp. 1-392.
- 53) Tsuchiya, R., Furukawa, I.: *IAWA J.* **30**, 15-26 (2009).
- 54) Shimaji, K.: *Bull. Tokyo Uni. For.* No. 46, 193-210 (1954).
- 55) Shimaji, K.: *Bull. Tokyo Uni. For.* No. 47, 125-143 (1954).
- 56) Hacke, U. G., Sperry, J. S.: *Evolution and Systematics* **4**, 97-115 (2001).
- 57) Desch, H. F.: *New Phytologist* **31**, 6-118 (1932).
- 58) Taylor, F. W.: *For. Prod. J.* **18**(3), 75-81 (1968).
- 59) Foster, G. S., Thor, E.: *Wood Sci.* **11**, 188-192 (1979).
- 60) Land, S. B. Jr., Lee, J. C.: *Wood Sci.* **13**, 166-170 (1981).
- 61) Niinemets, U., Valladares, F.: *Ecological Monographs* **76**, 521-547 (2006).
- 62) 北海道立林産試験場: 林産試験場研究報告 No. 86, 1-74 (1998).
- 63) Ishiguri, F., Eizawa, J., Saito, Y., Iizuka, K., Yokota, S., Priadi, D., Sumisasri, N., Yoshizawa, N.: *IAWA J.* **28**, 339-348 (2007).
- 64) Kim, N. T., Ochiishi, M., Matsumura, J., Oda, K.: *J. Wood Sci.* **54**, 436-442 (2008).
- 65) Ishiguri, F., Hiraiwa, T., Iizuka, K., Yokota, S., Priadi, D., Sumisasri, N., Yoshizawa, N.: *IAWA J.* **30**, 343-352 (2009).
- 66) Ishiguri, F., Wahyudi, I., Takeuchi, M., Takashima, Y., Iizuka, K., Yokota, S., Yoshizawa, N.: *J. Wood Sci.* **57**, 241-246 (2011).