

資料

過密人工林における樹幹細り形状の検討

An examination of the stem taper form in overpopulated artificial forests

野々田稔郎¹⁾

NONODA, Toshiro

要旨：過密人工林からヒノキ43本，スギ4本の試験木から円板を採取し，樹幹細り形状を検討した。採取した円板の樹皮内直径に対する樹皮厚の比は地際から梢端に向かって増加する傾向を示した。胸高樹皮内直径に対する細り比を高さ別に求めたところ，樹高の40%程度の高さまでの細り比は，試験木のサイズに関係なくほぼ一定の値を示し，平均的な細り形状を再現できる可能性が示唆された。幹曲線式として，多項式 ($y = a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$, $n=3, 4$) を用いて実測値の当てはめを行い，各試験木の樹幹形状を再現したところ，相関性が高く，実測値との整合性も良好であった。求めた幹曲線式によって，梢端からの距離が樹高の9/10となる位置の直径を推定した。これを規準直径として樹幹直径を相対化し，樹高を規準とした梢端からの相対距離とで各試験木の相対樹幹形を求めた。これらを統合することによって，過密人工林における平均的な相対幹曲線式の係数を決定した。

はじめに

樹幹の細り形状は，立木の丸太材積推定や採材のための径級推定等において有用な情報である。このため，実測値に基づいた樹幹の細り形状を調整し，細り表が各地で作成されている（例えば，後藤，1967；福島，1982；山根，1989など）。さらに，近年では伐期の延長傾向に対して，高齢級に対応した細り表の修正，作成も進められている（鈴木・野上，1999；佐渡，2005；豊田，2006）。

一方，三重県内の人工林では長伐期化の傾向とともに，間伐が適期に行われず過密状態となった林分が増加する現状にあり，過密人工林に対する間伐対策が県の課題として取り組まれている（三重県，2007）。これら過密人工林の間伐の実施に対しても，樹幹の細り形状の把握は，材積ベースでの間伐率の算定や間伐材利用のための径級予測等に対する重要な基礎資料となると考えられるが，現在まで三重県において細り表は作成されていないのが現状である。

このことから，本報告は過密状態となった県内人工林からヒノキ43本，スギ4本の試験木から円板を採取し，樹幹の細り形状について検討した。樹幹細り形状は，幹曲線式による適合性を検討し決定することが一般的であり，様々な幹曲線式が提案されている（梶原，1987；大友，1987）。ここでは，多項式 ($y = a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$) を用いて最小二乗法により当てはめを行い，まず，各試験木の形状を再現した。次いで，幹曲線式から得られる計算値と実測値（樹高，採取円板の径）とを用い，個体サ

¹⁾ 三重県林業研究所

Mie Prefecture Forestry Research Institute

E-mail: nonodt00@pref.mie.jp

イズの異なる幹曲線を1つに集約して表現可能な相対幹曲線(梶原,1987)を求めた。最後に得られた平均的な相対幹曲線から樹幹形状の特徴とその利用について考察を行った。

なお、前述したように今回の試験木の採取本数は、通常の細り表を作成する場合に比べて少なく、特にスギは4本程度である。また、「試験木採取林分の状況」で後述するように過密状態の林分のみから採取した試験木であり、林齢も30-40年と偏っている。その面で非常に限定的な樹幹の細り形状を検討している。これらは、今後様々な林分条件から試験木を採取し、データを加えていくことを前提として、早急に間伐が必要となっている過密人工林の樹幹形状の特徴として報告するものである。

材料と方法

1. 試験木採取林分の状況

試験木を採取した林分の状況は表-1に示すように、ヒノキ6林分、スギ2林分である。林分の所在地は、林分No.1-No.4は津市白山町地内、林分No.5-No.8は多気郡大台町地内にそれぞれ位置する。各林分の林齢を試験木の地際から(0.2-0.3m)採取した円板の年輪数より求め表に示した。林分No.2の林齢は17年と多少小さいが、他の林分はヒノキ林分で35年生前後、スギ林分で30年生程度である。

各林分の平均胸高直径、平均樹高、立木密度は、林分内にプロットを設定し、毎木調査を行って求めた値であり、平均胸高直径は12-17cm、平均樹高は10-17mの範囲である。なお、設定したプロット面積は林分によって異なり、林分No.1, No.2, No.3は400m²(20m×20m)、No.4は4700m²(小流域全域)、No.5は225m²(15m×15m)、No.6, No.7, No.8は144m²(12m×12m)である。

林分の立木密度は、林齢が異なるため約1700-3900本/haと様々であるが、平均樹高と平均胸高直径から形状比を求めると、77(林分No.5)~105(林分No.7)といずれも高く、密度が高い林分の特徴を示す。また、間伐は林分No.2において、切り株等から5~10年前に行われた形跡があるが、他の林分では切り株等が見られず、被圧による劣勢木や枯死木も見られることから10年以内に間伐は行われていないものと考えられる。毎木調査から得られた平均樹高と立木本数に劣勢木・枯死直後の木を加えて求めた密度から算出した収量比数 R_y は、林分No.2で0.73と間伐が実施された影響でやや低いが、他はいずれも0.8以上と高く、今回樹幹解析木を採取した林分は、間伐の実施が遅れた過密状態の林分であると言える。

2. 試験木の概要

試験木はヒノキ43本、スギ4本と多くがヒノキである。採取した試験木の状況を各林分の毎木調査から得られた平均胸高直径を基準として整理すると以下の①~④となる。また、試験木の胸高直径と樹高の関係は図-1に示すとおりであり、胸高直径は6.5-32.0cm、樹高は7.8-21.0mの範囲にある。

- ①平均より小さい、平均的、平均より大きいサイズをほぼ同数採取した林分がNo.1~No.4
- ②平均より小さい、平均的サイズを採取した林分がNo.5
- ③平均的より小さいサイズを採取した林分がNo.6, No.7
- ④平均的、平均より大きいサイズを採取した林分がNo.8

3. 樹幹解析の方法

毎木調査を実施した林分において立木を伐倒し、樹高、枝下高を測定した後、地際からの距離0.2mまたは0.3m, 1.2m, 2m, それ以上の距離にあつては、2m間隔(4m, 6m, 8m, ...)でそれぞれ厚さ

3~5cmの円板を採取した。梢端付近では、円板採取箇所から残りの梢端までの距離が1m未満の場合は円板を採取せず、1m以上、2m未満の場合は円板採取箇所から1mの距離で円板を採取した。採取した円板は室内に持ち帰り、立木時の斜面傾斜方向とその直交方向の樹皮内半径及び樹皮厚さを4箇所測定した。測定した4方向の半径を平均し、2倍することでその円板の直径を求めた。

表 -1. 樹幹解析木採取林分及び樹幹解析木の概要

林分 No.	樹幹解析木採取林分の概況						樹幹解析木の概要		
	樹種	林齢 (年)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高 (m)	立木密度 (本/ha)	収量比数 <i>R_v</i>	本数 (本)	平均胸高直径 (最小 - 最大) (cm)	平均樹高 (最小 - 最大) (m)
1	ヒノキ	34	14.7	11.9	2425	0.86	4	14.2 (9.6 - 18.6)	12.2 (9.1 - 14.1)
2	ヒノキ	17	12.2	10.0	2375	0.73	4	12.0 (8.8 - 14.7)	10.0 (8.8 - 11.7)
3	ヒノキ	38	15.9	12.9	2575	0.87	15	12.7 (6.5 - 20.8)	12.2 (7.8 - 16.3)
4	ヒノキ	38	17.0	14.6	1736	0.87	16	16.9 (10.2 - 31.5)	16.5 (11.8 - 21.0)
5	ヒノキ	40	13.5	10.4	3244	0.83	2	11.4 (9.0 - 13.8)	9.6 (8.3 - 10.8)
6	ヒノキ	37	16.5	16.1	3263	0.99	2	12.8 (12.1 - 13.6)	15.4 (14.5 - 16.2)
7	スギ	28	16.0	16.8	3888	1.00	2	11.2 (10.4 - 12.0)	15.4 (15.1 - 15.7)
8	スギ	29	17.1	16.1	3472	1.00	2	15.3 (10.3 - 20.3)	17.0 (15.3 - 18.8)

林分所在地：No.1-4 津市白山町地内, No.5-8 多気郡大台町地内

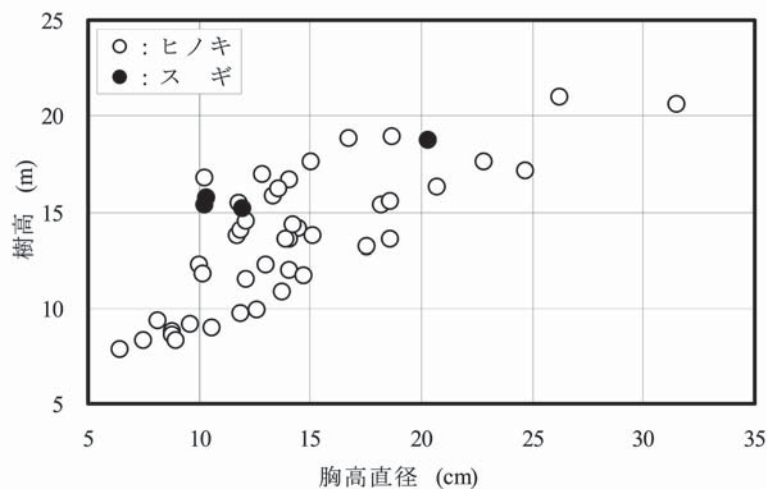


図 -1 採取試験木の胸高直径と樹高の関係

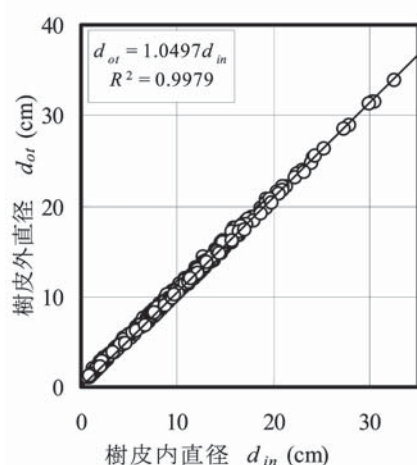
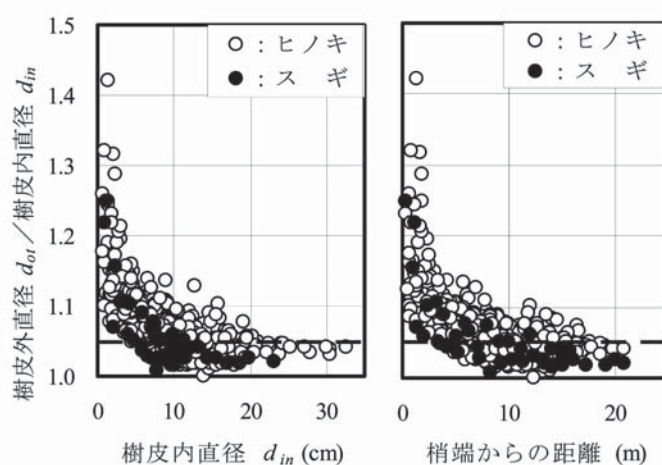
測定結果

1. 採取円板の樹皮厚比

通常、林分調査や立木幹材積は皮付き直径（樹皮外直径）が用いられるので、実際の樹皮内直径と樹皮外直径の関係を明らかにしておくことは重要であると考えられる。図-2は測定した円板の樹皮内直径 d_{in} と樹皮外直径 d_{ot} の関係を示している。同図に示すように両者の間には高い相関関係があり、 $d_{ot} = a \cdot d_{in}$ の関係が認められる。この式に従うと、係数 a は $a = d_{ot}/d_{in}$ となるので、 a は樹皮内直径 d_{in} に対する樹皮外直径 d_{ot} の比を表し、今回の場合 $a=1.0497$ が得られた。 $a \cdot d_{in}$ 直径の大きさや円板採取高さに関係なく、常に d_{ot}/d_{in} が一定であれば、樹皮外直径 d_{ot} （丸太皮付き直径）から樹皮内直径 d_{in} を簡便に推定できる可能性がある。

しかし、直径に対する樹皮の厚さは概して小さいので、 $d_{in} - d_{ot}$ 関係のみではその特徴が明確でないと考えられる。そこで図-3に示すように、樹皮内直径 d_{in} と樹皮厚比 d_{ot}/d_{in} の関係及び梢端から円板採取位置までの距離 l_x と d_{ot}/d_{in} の関係を検討した（梢端からの距離 l_x については後述する図-7を参照）。図中の破線は、図-2で得られた係数 a （ $d_{ot}/d_{in}, 1.0497$ ）を示している。先に述べたように、もし直径の大きさに関係なく常に d_{ot}/d_{in} が一定であれば、この破線を中心にデータがプロットされるはずである。図に示すように、 d_{in} が10cm程度以上、 l_x が7-8m程度以上の場合にその傾向が見られるが、それより小さい d_{in} 、 l_x では破線に比べてかなり大きい値を示している。また、樹種別には、スギがヒノキに比べ、やや低い d_{ot}/d_{in} 値を示すようであるが、 d_{in} 、 l_x との関係において同様の傾向を示している。

梶原（1973b）はスギ樹幹における相対化した梢端距離（樹高に対する梢端距離の比）と樹皮厚率（樹皮外直径に占める樹皮厚の百分率）の関係を求め、樹幹上部（梢端からの距離が小さい箇所）では樹皮厚率が大きく、上部から中央部にかけて減少し、中央部から下部までは樹皮厚率がほぼ等しいことを報告している。図-3は梢端からの距離 l_x を相対化していないが、この報告と同様の傾向を示していると考えられる。このことは、樹皮厚が樹幹の細りとは同様の変化を示さず、樹幹上部ほど樹皮厚比が大きくなることを示している。このため、以後の樹幹細り形状の把握には、樹皮厚の影響を除いた樹皮内直径を対象とし、樹皮厚については別に検討することとした。

図-2. 樹皮内直径 d_{in} と樹皮外直径 d_{ot} の関係図-3. 樹皮内直径 d_{in} 、梢短距離と d_{ot}/d_{in} の関係

2. 胸高直径に対する樹幹の細り比

図-4は、胸高(1.2m)で採取した円板の樹皮内直径 d_b と高さ別の円板の樹皮内直径 d_i (高さ0.3mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{0.3}$ 、高さ2.0mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{2.0}$ 、高さ4.0mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{4.0}$ 、高さ6.0mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{6.0}$ 、高さ8.0mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{8.0}$ 、高さ10.0mで採取した円板の樹皮内直径： $d_{10.0}$)の関係を示している。いずれも高い相関関係が認められ、以下の(1)式によってその関係を表すことができる。また、(1)式は次の(2)式に変形できるので、 b_i は胸高樹皮内直径 d_b に対する細り比を表す。

$$d_i = b_i \cdot d_b \quad (1)$$

$$b_i = d_i / d_b \quad (2)$$

ここに、 b_i ：胸高直径 d_b に対する細り比、 i ：円板の採取高さによって変化する添え字である。

図-4では、 $d_{0.3}$ 、 $d_{2.0}$ 、 $d_{4.0}$ 、 \dots 、 $d_{10.0}$ と円板採取高 h が高くなるにつれて、 d_b に対する細り比 b_i の値が小さくなり、地際から梢端にかけての樹幹の細り状況を見て取れる。なお、この b_i 値はヒノキ、スギで傾向が変わらなかったため統合した値である。 d_b に対する細り比 b_i はおおよそ $b_{0.3}:1.15$ 、 $b_{2.0}:0.949$ 、 $b_{4.0}:0.851$ 、 $b_{6.0}:0.780$ 、 $b_{8.0}:0.629$ 、 $b_{10.0}:0.547$ となる。しかし、円板の採取高さ h が高くなるにつれて相関係数が低下し、回帰直線に対するばらつきも大きくなるように見える。このことをより詳細に検討するため、 h と $b_i(d_i/d_b)$ の関係を求め図-5に示した。図中の白丸(○)は図-4で得られた採取高さ別の細り比 b_i 、縦バーは最低値-最高値の範囲、白四角(□)は標準偏差 σ 、実線は実測データ(○)の多項式による回帰線をそれぞれ表す。図中の回帰線に示すように、 h と b_i の関係は、以下の多項式によって、表すことができる。

$$b_i = a_1 \cdot h^3 + a_2 \cdot h^2 + a_3 \cdot h + a_4 \quad (3)$$

(3)式は樹幹形状を表現する平均的な幹曲線式に類する式と考えることができるが、□で示した σ 、縦バーの傾向から h が高くなると、図-4と同様に b_i 値のばらつきが大きくなる傾向が認められる。前述した $b_{0.3} \sim b_{10.0}$ の細り比は、全試験木の採取高さ h 別の平均細り比 \bar{b}_i を表しているため、 b_i 値のばらつきの大小はこの平均細り比 \bar{b}_i に対する変動率によってその傾向を見ることができる。そこで、この変動率と樹高に対する円板採取高さ率の関係を図-6に示した。なお、変動率は $\{(b_i - \bar{b}_i) / \bar{b}_i\} \cdot 100$ 、円板採取高さ率は $(h/H) \cdot 100$ によってそれぞれ求めた。採取高さ0.3m-4mの円板の細り比は、変動率がほぼ $\pm 10\%$ 以内に収まっているが、採取高さ6m以上の円板では変動率はばらつきが大きくなっている。ただし、採取高さ6m以上でも樹高に対する円板採取高さ率が40%以下では、変動率が $\pm 10\%$ 以内となっている。したがって、 d_b を規準としたとした細り比 b_i は、樹高の40%程度までは試験木の個体サイズに関係なくある程度一定の値を示すが、それより高い箇所では細り比に変化が生じ、個体ごとに異なっているものと推察される。例えば、今回の試験木採取林分のうち、林分No.3であれば平均樹高は15m程度である。この場合高さ6m程度までの胸高直径に対する細り比($b_{0.3}:1.15$ 、 $b_{2.0}:0.949$ 、 $b_{4.0}:0.851$ 、 $b_{6.0}:0.780$)が利用できる可能性がある。また、図-5に示した縦軸は、胸高直径を規準直径として相対化したものであるが、データのばらつきに樹高の大きさが影響することから、円板採取高についても相対化した樹幹位置と相対直径とを関連づけ、細り形状を検討する必要がある。

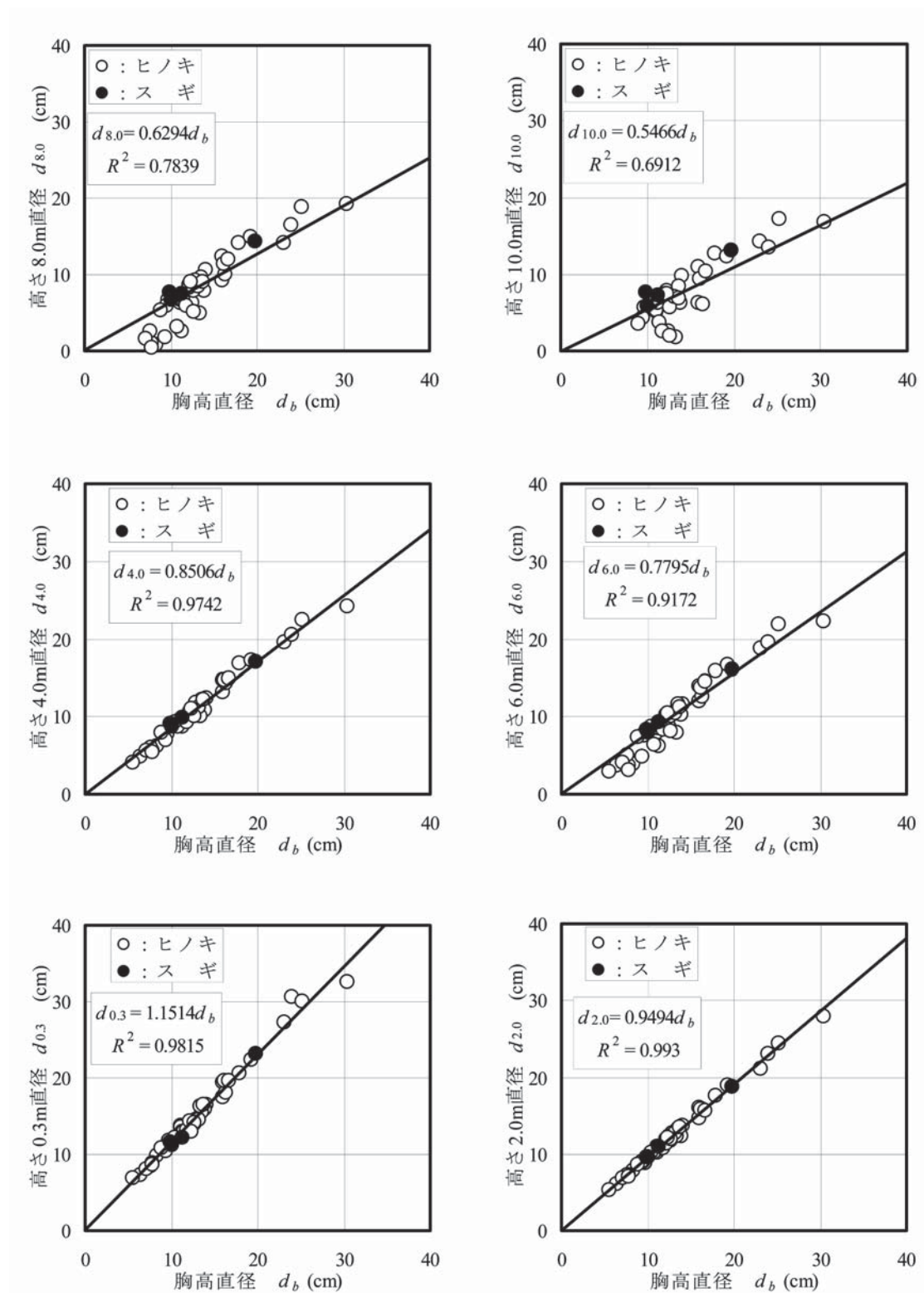


図-4. 胸高 (1.2m) で採取した円板直径 d_b と各高さにおいて採取した円板直径 d_i の関係

*1: 直径はいずれも樹皮内直径である。

*2: 円板直径 d_i における添え字 i は円板の採取高さを表す。

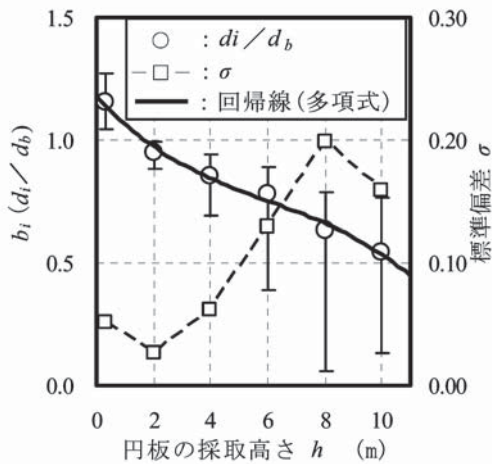


図-5. 円板採取高さ h と細り比 b_i の関係
*縦バーは最大値最小値の範囲

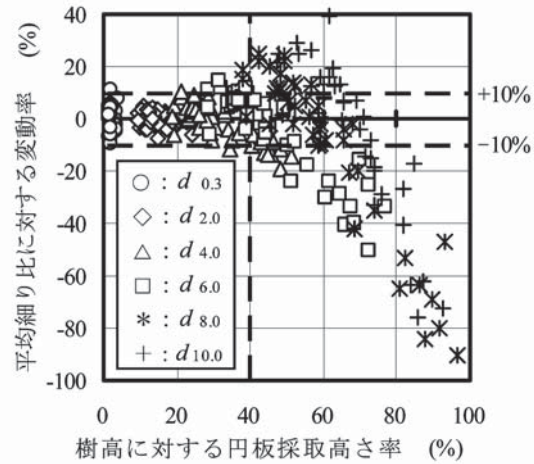


図-6. 円板採取高さ率と細り比の変動率

3. 各試験木への幹曲線式の当てはめ

樹幹の細り比は樹高の1/2程度を超える箇所では、ばらつきが大きくなることは前述したとおりであり、直径だけでなく高さも相対化して樹幹形状を表す必要がある。このため、まず各試験木の形状を幹曲線式により再現することとした。幹曲線は、幹軸を通る平面で樹幹を半分に縦割りしたとき、平面と幹表面が交わることによって得られる曲線と定義される（梶原, 1987）。通常、幹曲線はX-Y座標系において、梢端を原点として、幹軸に沿った梢端からの距離をX軸、幹の半径をY軸にとって表されるが、ここでは図-7に示すように、幹軸に沿った梢端からの距離 l をX軸、幹の直径 d_i をY軸にとって表すこととした。したがって、試験木の樹高 H は、梢端から地際円板採取位置までの距離に円板採取高さ（0.3または0.2m）を加えて求められる。図中白丸（○）は円板を測定した樹皮内直径の実測値の例であり、実線で描かれた曲線は、実測値に基づいて推定した幹曲線の例である。

幹曲線の推定には幹曲線式が用いられ、現在までクンツェ（KUNZE）式、ベーレ（BEHRE）式、多項式（3次式の場合は吉田式）など多くの式が提案されている（梶原,1987；大友,1987）が、ここでは下の(4)式に示すような多項式を用いることとした。この理由は、実測値に柔軟に適合させやすいこと、積分が容易で材積を求めやすいこと、データへの当てはめにあたって最小二乗法を用いる際に取り扱いが簡便である等の長所があり（梶原, 1987）、他の報告（鈴木・野上,1999；佐渡,2005；豊田,2006）においても利用され、実測値に良い適合性を示しているからである。図-7に示した推定曲線の多項式による幹曲線式は下式により与えられる。

$$d_i = a_1 \cdot l + a_2 \cdot l^2 + \dots + a_n \cdot l^n \quad (4)$$

ここに、 d_i : 樹皮内直径、 l : 梢端距離、 a_1 - a_n : 係数である。次数 n は通常3-5が用いられる（梶原, 1987）ので、 $n=3, 4, 5$ を用いて、実測値に対する当てはめを最小二乗法によりそれぞれ行った。

前述の(4)式（3次式、4次式、5次式）を用いて幹曲線を当てはめた例（ヒノキ3本、スギ2本）を表-2及び図-8に示す。表-2は実測した直径に対する幹曲線式による予測値を示しており、図-8は梢端からの距離 l と直径 d_i の関係に推定した幹曲線を加えて実線で図示している。表-2、図-8に示すように、①3次式～5次式のいずれも重相関係数 R^2 は0.99程度と高く、②全体的な樹幹形状の再現性に幹曲線式

の次数によって大きな差は認められなかった。③ただし、ヒノキNo.533, スギNo.2のように、根張り（表-2では高さ0.3m）が大きい試験木の地際直径が3次式においてやや過小に評価されるようである。①-③の傾向は全試験木に共通していた。これらから、今回の試験木に対して、3次式で精度良く樹幹形状の再現が行えるが、根張りの大きい試験木には4次式による推定も同時に行い適合性を見ながら幹曲線の当てはめを行う必要があると考えられる。ここでは、簡便性等から幹曲線として3次式と4次式を用い、後述する方法により相対幹曲線を求め、5次式は用いないこととした。

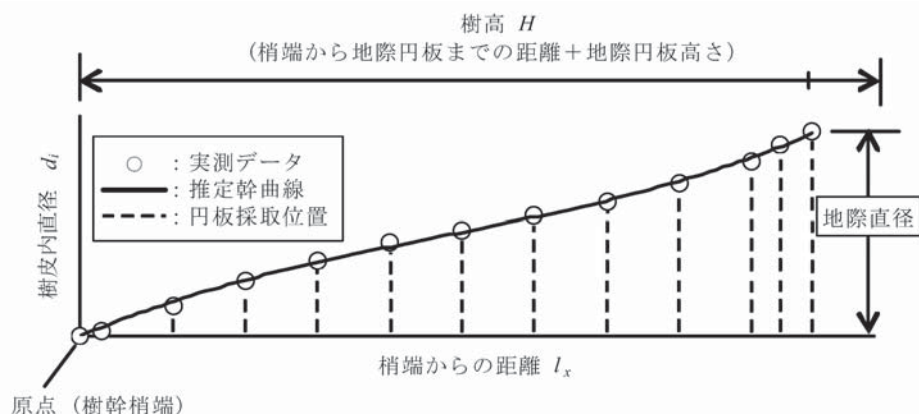


図-7. 幹曲線の模式図

表-2. 実測した樹皮内直径と幹曲線式により推定した幹直径の例

樹種	試験木 No.	樹高 (m)	相関係数 R^2	地際高さ(m)															
				0.3	1.2	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0				
ヒノキ	533	21.0	0.996	高さ別直径(cm)															
				実測値	30	25	24	23	21	19	17	15	13	9	5	1			
				推定値 3次式	28	27	25	23	21	19	17	14	12	9	6	2			
				4次式	29	26	25	22	20	19	17	15	12	9	5	1			
				5次式	29	26	25	22	20	19	17	15	12	9	5	2			
ヒノキ	934	16.6	0.997	実測値	15	14	13	12	11	10	8	7	5						
				推定値 3次式	15	14	13	12	11	10	9	7	5						
				4次式	15	14	13	12	11	10	9	7	5						
				5次式	15	14	13	12	11	10	8	7	5						
				実測値	7	6	6	5	3	2									
ヒノキ	11	8.3	0.999	推定値 3次式	7	6	6	5	3	2									
				4次式	7	7	6	5	3	2									
				5次式	7	6	6	5	3	2									
				実測値	11	10	10	9	8	7	6	5	2						
				スギ	1	15.3	0.999	推定値 3次式	11	10	10	9	8	7	6	4	2		
4次式	11	10	10					9	8	7	6	4	2						
5次式	11	10	10					9	8	7	6	4	2						
実測値	23	20	19					17	16	14	13	11	10	8	3	1			
スギ	2	21.2	0.999					推定値 3次式	22	21	20	17	16	14	13	11	9	7	5
				4次式	23	20	19	17	15	14	13	12	10	7	4	1			
				5次式	23	20	19	17	15	14	13	12	10	7	4	1			
				実測値	23	20	19	17	16	14	13	11	10	8	3	1			
				推定値 3次式	22	21	20	17	16	14	13	11	9	7	5	2			
4次式	23	20	19	17	15	14	13	12	10	7	4	1							
5次式	23	20	19	17	15	14	13	12	10	7	4	1							

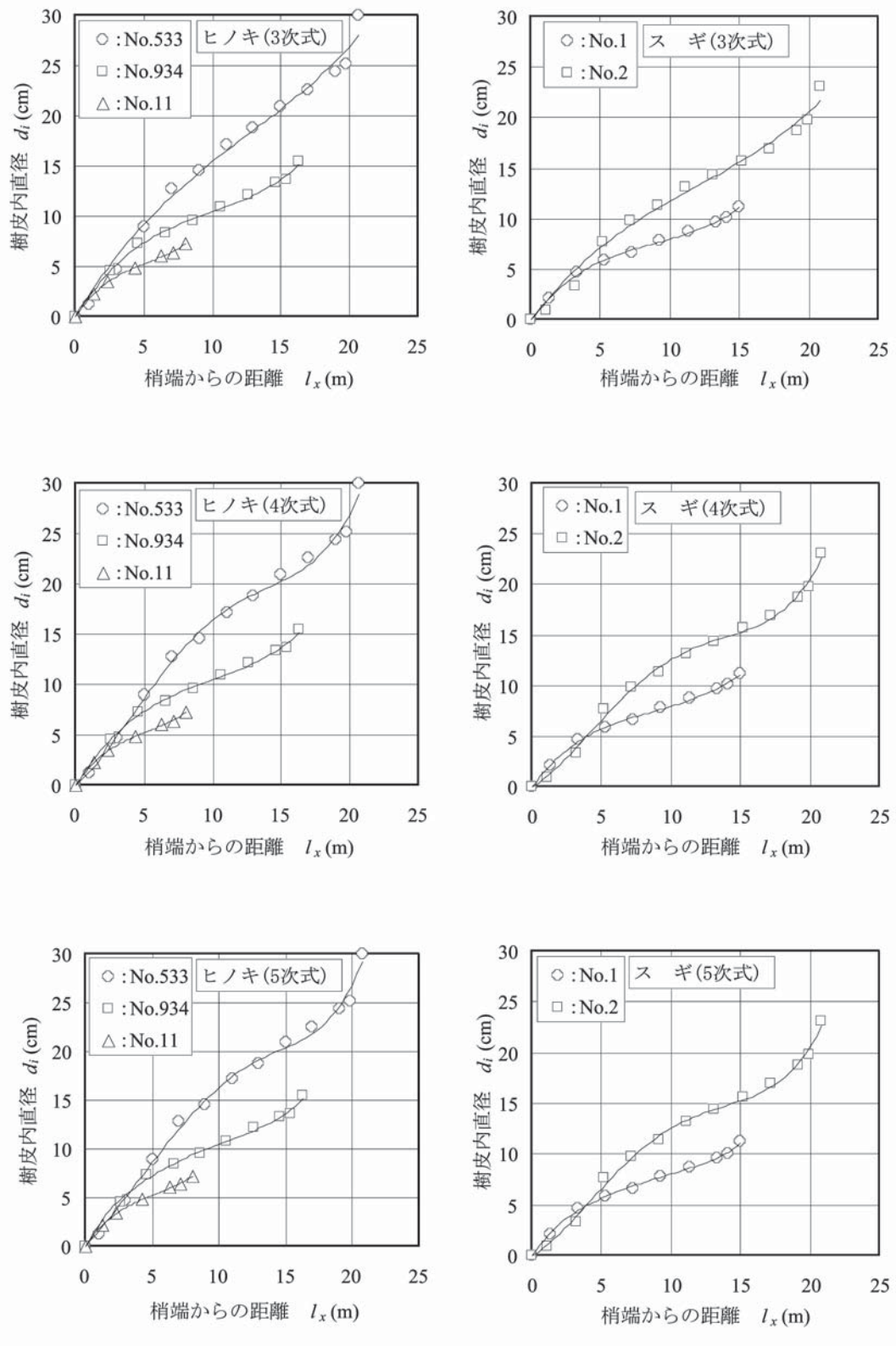


図-8. 試験木への幹曲線当てはめ例

考 察

1. 各試験木の相対幹曲線

相対幹曲線は、図-8に示した梢端からの距離 l_x と各高さ別の直径 d_i をそれぞれ相対化して樹幹形状を描くものであり（梶原,1987），以下の(5)式, (6)式により相対化ができる。

$$L_x = l_x / H \quad (5)$$

ここに、 L_x は梢端からの相対距離で x は相対距離に応じて変化する添え字である。例えば $l_x/H=0.6$ の時の相対距離は $L_{0.6}$ と表す。

$$D_i = d_i / d_s \quad (6)$$

ここに、 D_i は相対直径で i は相対距離 L_x に応じて変化する添え字である。例えば $L_{0.6}$ の箇所における相対直径は $D_{0.6}$ と表す。また d_s は相対直径 D_i を求める基準直径である。

ここで、基準直径 d_s は、梢端からの距離が樹高の9/10となる箇所、すなわち $l_x = 0.9H$ の位置における直径 $d_{0.9H}$ を基準直径 d_s として、通常の相対直径 D_i が計算されている（梶原, 1972）。しかし $l_x=0.9H$ なる位置は樹高によって変化し、例えば樹高10mであれば地上1mの高さ、樹高30mであれば地上3mの高さの $d_{0.9H}$ を知る必要があり少々煩雑である。このため、実用的に直径情報を得やすい胸高直径 d_b を d_s として相対直径 D_i を求めている報告も見られる（鈴木・野上,1999；佐渡,2005；豊田, 2006）。これらの報告では、 $d_{0.9H}$ と d_b のそれぞれを基準直径 d_s として相対直径 D_i を計算し、同様に相対化した梢端距離とから相対幹曲線求め適合性の比較を行っている。その結果、危険率5%で有意差は認められなかった（鈴木・野上, 1999），危険率1%で有意差が認められたが実用上問題ない（佐渡,2005）として、いずれも $d_s = d_b$ を採用して相対幹曲線を求めている。一方、梶原（1972, 1987, 2006）は樹幹サイズの異なる場合に d_s を d_b に固定すると、樹幹における d_b の相対距離 L_x が単木ごとに異なるため、それぞれの相対幹曲線にずれが生じるとし、 $d_s = d_{0.9H}$ とした場合を正常相対幹曲線、 d_b 等のそれ以外の直径を d_s とした場合を非正常相対幹曲線として区別している。

ここでは、全試験木の相対幹曲線を統合し、平均的な相対幹曲線を求める際に、なるべくばらつきが小さくなることを目的として、基準直径を $d_s = d_{0.9H}$ とした梶原（1987, 2006）の正常相対幹曲線を求めることとした。この場合、 $l_x = 0.9H$ における直径情報が必要になるが、ほとんどの試験木で円板を採取していない。そこで、(4)式によって基準直径 d_s を推定した。図-8に示したように、(4)式により各試験木に当てはめた幹曲線が精度よく樹幹形状を再現しているため、推定可能と考えたからである。したがって、相対直径 D_i は、前述の(4)式の l_x に $0.9H$ を代入して各試験木の d_s をそれぞれ決定し、(6)式によって計算することとなる。また、相対距離 L_x は、(5)式によって求められるので、これにより試験木ごとの相対幹形が求められる。よって相対幹曲線式は以下となる。

$$D_i = a_1 \cdot L_x + a_2 \cdot L_x^2 + \dots + a_n \cdot L_x^n \quad (7)$$

図-9は、図-8に示した試験木について(5)式, (6)式によって、 l_x と d_i をそれぞれ相対化して図示した相対幹形である。図中実線は(7)式 ($n=4$) によって当てはめを行った各試験木の相対幹曲線である。図に示すように、梢端部でやや不揃いが見られるが、樹幹の主要部分である $0.5 < L_x$ においては、ほぼ重なっており、樹体サイズの異なる樹幹が相対化することによって、ほぼ一つの樹幹形として表すことができるものと考えられる。

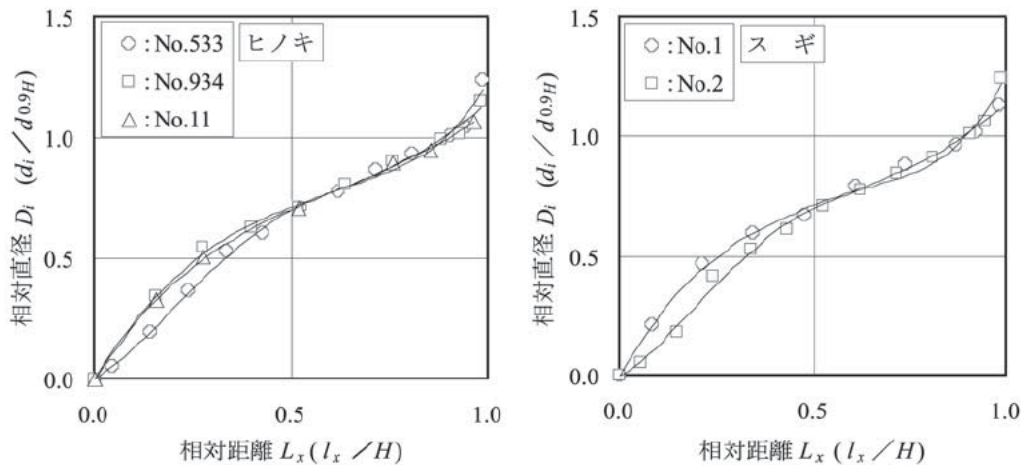


図-9. 相対化した樹幹形の例

2. 相対距離と樹皮厚比の関係

図-3における樹皮厚比（樹皮外直径／樹皮内直径）の梢端距離に対する変化は、梶原(197b)の報告と同様の傾向を示したが、梢端距離が相対化されていなかった。そこで、相対距離 L_x と樹皮厚比の関係を図-10に示した。樹皮厚比は樹種により異なることが考えられるので、ここではヒノキとスギを分けて図示した。同図のデータは、図-3に比較して梢端距離が相対化されたことにより $0 < L_x < 1.0$ の範囲に、よりばらつきが小さく、平均的にプロットされているようである。樹皮厚比の減少傾向は図-3と同様に、樹幹上部から中央部にかけて急激に減少している。一方、樹幹中央部から下部において、減少率は低下するが L_x の増加にともない斬減する傾向を示し、図-3の傾向とやや異なるが、スギ、ヒノキともほぼ同様の減少傾向を示し、次のべき乗式で表すことができる。

$$K_h = K_s = a \cdot L_x^b \quad (8)$$

$$0 < L_x < 1.0$$

ここに、 K_h ：ヒノキ樹皮厚比、 K_s ：スギ樹皮厚比、 a 、 b ：定数である。スギは試験木の採取本数が少ないので参考程度であるが、今回の結果から(8)式中のヒノキ、スギ別の係数をそれぞれ示すと以下となる。下の係数を見る限りでは、スギに比べヒノキはやや樹皮が厚い傾向のようであり、佐渡(2005)の報告とも一致する。

$$\text{ヒノキ} : a = 1.03982, b = -0.04113 \quad (R^2 = 0.559)$$

$$\text{スギ} : a = 1.01461, b = -0.04260 \quad (R^2 = 0.770)$$

前述の(7)式と上の(8)式はともに L_x の関数であるので、(7)式を(9)式、(8)式を(10)式でそれぞれ表せば、次の(11)式に示す樹皮外(皮付き)樹幹の相対幹曲線式が得られる。

$$D_i = f_D(L_x) \quad (9)$$

$$K_h = K_s = f_K(L_x) \quad (10)$$

$$D_{or} = f_D(L_x) \cdot f_K(L_x) \quad (11)$$

ここに、 D_{or} ：樹皮外（皮付き）相対直径である。(11)式により、樹皮内と樹皮外の相対幹形を関連づけることが可能であると考えられる。図-11にその例を示す。同図は樹皮内と樹皮外（皮付き）の相対幹形を(7)式によってそれぞれ回帰式を求めている。樹皮内相対幹曲線を点線、樹皮外相対幹曲線を破線でそれぞれ図示したものに加えて、(11)式により求めた樹皮外相対幹曲線を実線で図示している。

前述したとおりヒノキの樹皮がスギに比べて厚い傾向を示していることがわかる。(11)式による推定線である実線と実測値である破線の間を見ると、ヒノキでは実線と破線はほとんど重なっており、スギではややずれが見られるが、おおよそその傾向を再現している。他の試験木においても同図に示した傾向とほぼ同様であったことから、樹皮内の相対幹曲線から樹皮外の相対幹曲線を推定する(11)式は妥当なものであると判断できる。

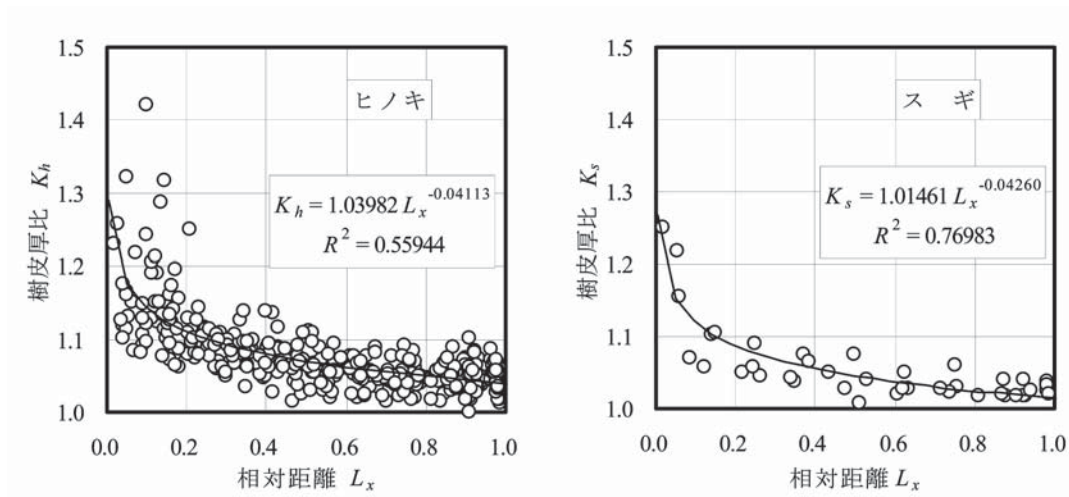


図-10. 相対距離 L_x と樹皮厚皮 K_h, K_s の関係

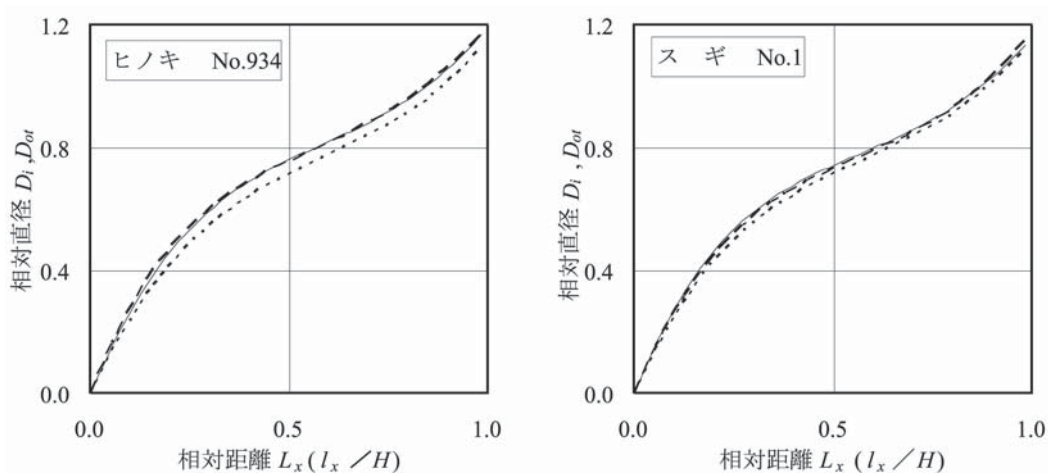


図-11. 樹皮内相対幹形と樹皮外相対幹形の例

- *1: 点線は実測値に基づき (7) 式によって求めた樹皮内相対幹形
- *2: 破線は実測値に基づき (7) 式によって求めた樹皮外相対幹形
- *3: 実線は点線で示した実測値と (11) 式により推定した樹皮外相対幹形

3. 相対幹曲線の統合

図-9に示したように、相対幹曲線は直径、樹高等のサイズが異なる樹幹を1つに集約して表現したい場合に有効な方法である。梶原 (1972, 1973a) は、スギ人工林において同一林分内では各樹木の相対幹曲線が樹幹のサイズと無関係に近似していること、林分、地域が異なれば相対幹曲線は差異を示すことを報告している一方、正形状商である $\eta_{0.5}$ ($d_{0.5H}/d_{0.9H}$) の値が既知であれば相対幹曲線を決定できることを述べている。このことは、各試験木の $\eta_{0.5}$ ($d_{0.5H}/d_{0.9H}$) の値がほぼ等しければ、各試験木の幹曲線もほぼ近似し、平均的な幹曲線が試験木に共通する線形として考えても良いことを示唆している。図-12は各試験木の $d_{0.9H}$ と $d_{0.5H}$ の関係を示している。同図によれば(○)で示したヒノキの1点を除けばスギ、ヒノキとも $\eta_{0.5}$ はいずれも0.7程度を示している。この理由は、今回の試験木を採取した林分は、ヒノキ6林分、スギ2林分と林分は異なっているが、全て過密状態の人工林であり、林齢も大部分が30-40年生と林分条件が揃っているためであろう。このことから、各試験木の相対幹曲線も近似していると考えても良さそうであり、試験木に共通する平均的な幹曲線を求めることとした。

図-13は、ヒノキ、スギ別に全試験木の相対距離 L_x と相対直径 D_i の関係をプロットした図である。実線は、全試験木に共通する平均的な幹曲線として、前述の(7)式によって求めた4次の回帰線である。3次式の場合も4次式と差異はなく、以下に今回求めた3次、4次の幹曲線式を示す。なお、データの少ないスギは参考値である。

ヒノキ

$$D_i = 2.46431 \cdot L_x^4 - 3.41923 \cdot L_x^3 + 0.37326 \cdot L_x^2 + 1.76023 \cdot L_x \quad (R^2 = 0.9828) \quad (12)$$

$$D_i = 1.30800 \cdot L_x^3 - 2.39398 \cdot L_x^2 + 2.23272 \cdot L_x \quad (R^2 = 0.9813) \quad (13)$$

スギ

$$D_i = 0.63409 \cdot L_x^4 + 1.07898 \cdot L_x^3 - 3.28449 \cdot L_x^2 + 2.74763 \cdot L_x \quad (R^2 = 0.9777) \quad (14)$$

$$D_i = 2.28997 \cdot L_x^3 - 3.98841 \cdot L_x^2 + 2.86662 \cdot L_x \quad (R^2 = 0.9776) \quad (15)$$

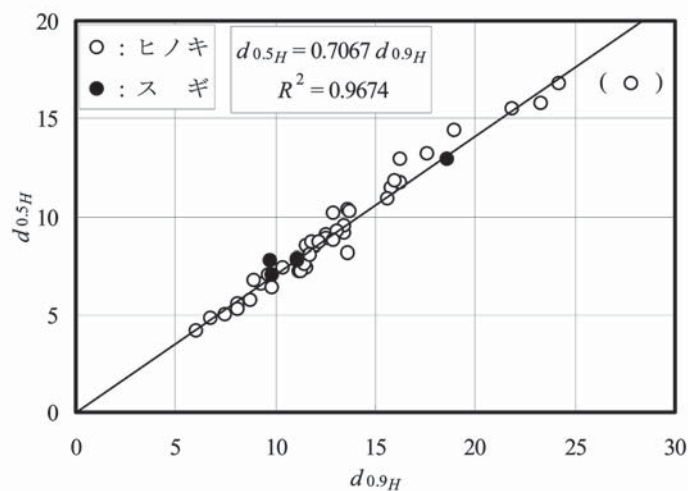


図-12. 各試験木の $d_{0.9H}$ と $d_{0.5H}$

図-14は今回得られた相対幹曲線と過去報告されている相対幹曲線を合わせて図示した。○（太実線）は今回得られた相対幹曲線であり、□（破線）は山口県（佐渡，2005），△（点線）は静岡県（鈴木・野上，1999；胸高直径基準）でそれぞれ報告されている幹曲線である。ヒノキはほぼ同様の傾向を示しているが、 $L_x=0.3$ 付近で他の相対幹曲線よりやや膨らんで（凸形）いるようである。この傾向はスギでより顕著である。このことは、今回測定した試験木の樹幹形状が他の報告より完満であることを意味している。佐渡（2005），鈴木・野上（1999）の報告はいずれも林齢20年生程度の林分から100年生を超える林分を合わせて相対幹曲線として表したものである。これに対して今回測定した試験木は林齢が30から40年生程度で、収量比数がほとんど0.8を超える過密林分で採取している。したがって、図-14に示した樹幹形状は過密林分を反映したものであり、その特徴を表していると言えよう。

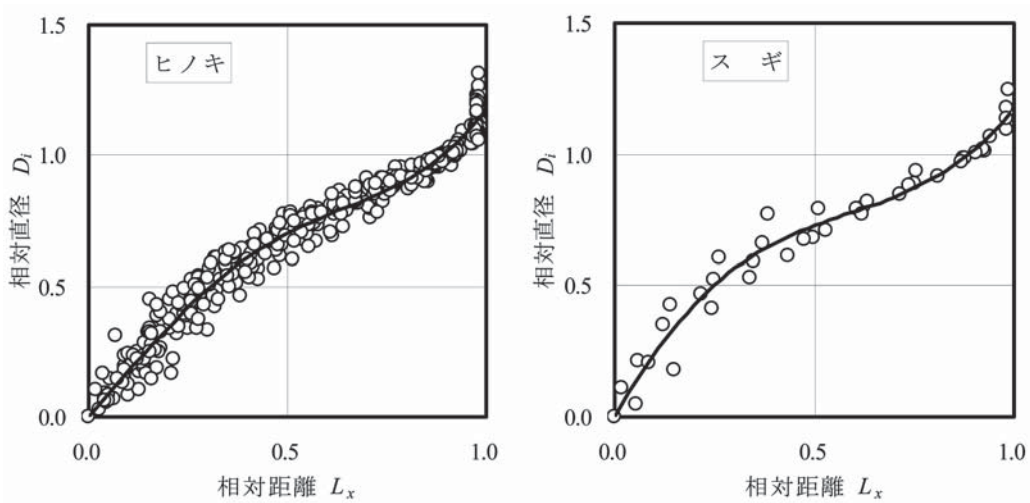


図-13. 試験木に共通する幹曲線

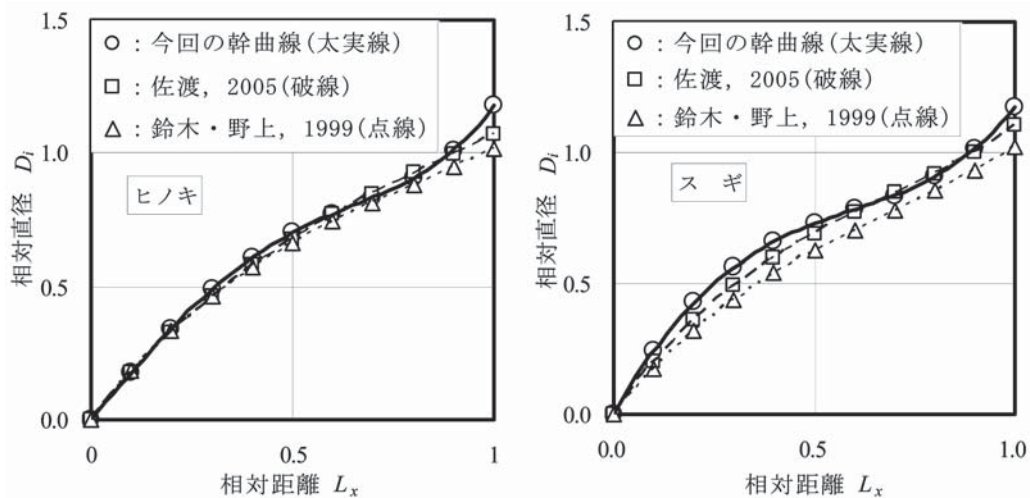


図-14. 他の相対幹曲線との比較

おわりに

前述の(12)~(15)式に示した相対幹曲線を用いれば、胸高直径と樹高を与えることで過密人工林における細り表の作成が可能である。樹高 H 、胸高直径 d_b のヒノキの場合以下となる。

- ① 胸高直径の相対距離 L_x は $1 - (1.2/H)$ である。
- ② (12)式または(13)式に $1 - (1.2/H)$ を代入し、相対直径 D_i を求める。
- ③ 基準直径を $d_s = d_b \cdot H = d_b / D_i$ より求める。
- ④ 相対距離 L_x は H 倍し、(12)式または(13)式により求まる L_x に対応する D_i を d_s 倍することによって細り表が作成できる。

上の手順に従って、計算により求めたヒノキ（樹高15m）の細り表の例を表-3に示す。なお、(12)~(15)式は相対直径を求める式として定義している。これを1/2にして半径を求め、幹軸の周りに回転したときの立体、すなわち回転体として $0 \leq L_x \leq 1$ の範囲で定積分を行えば幹材積を求められる。また、(12)~(15)式の代わりに(11)式を用いれば皮付き丸太の材積を求めることが可能である。

これら細り表、幹材積は、今回測定した過密人工林における相対幹曲線に基づいて計算されるものである。その面で限定的な林分条件を対象としているが、過密人工林におけるこれらの情報は、管理不足となった人工林の間伐推進と有効利用が重要な課題となっている現状において有用であろう。今後、林齢等を考慮してより広範囲の林分条件のデータを加え、相対幹曲線式を検討することで、より正確性、汎用性が増すものと考えられるので、既存データ、収集データを加え、相対幹曲線式の係数等を修正していく必要があるだろう。

表-3. ヒノキ（樹高 15m）の細り表の例

胸高直径 (cm)	地上高さ (m)								
	0.3	1.2	3.2	5.2	7.2	9.2	11.2	13.2	15
	地上高さ別直径 (cm)								
10	11.0	10.0	8.6	7.8	6.9	5.7	4.1	2.0	0.0
12	13.2	12.0	10.3	9.3	8.3	6.9	4.9	2.4	0.0
14	15.3	14.0	12.1	10.9	9.7	8.0	5.7	2.8	0.0
16	17.5	16.0	13.8	12.4	11.0	9.2	6.5	3.3	0.0
18	19.7	18.0	15.5	14.0	12.4	10.3	7.4	3.7	0.0
20	21.9	20.0	17.2	15.5	13.8	11.4	8.2	4.1	0.0
22	24.1	22.0	19.0	17.1	15.2	12.6	9.0	4.5	0.0
24	26.3	24.0	20.7	18.6	16.5	13.7	9.8	4.9	0.0
26	28.5	26.0	22.4	20.2	17.9	14.9	10.6	5.3	0.0
28	30.7	28.0	24.1	21.7	19.3	16.0	11.4	5.7	0.0

引用文献

- 福島敏彦(1982)福岡県におけるヒノキ林分についてⅡーヒノキ幹曲線ー.福岡県林試研報 6:1-27.
- 後藤 亮(1967)ヒノキ細り表.広島県林試研報 2:2-8.
- 梶原幹弘(1972)スギ同齢林における相対幹曲線の変動について.日林誌 54:340-345.
- 梶原幹弘(1973a)スギの相対幹曲線について.日林誌 55:63-70.
- 梶原幹弘(1973b)相対幹曲線と関連しての樹皮厚率について.日林誌 55:132-139.
- 梶原幹弘(1987)幹形.(森林計測学講義.大隈眞一編著,養賢堂,東京).11-28.
- 梶原幹弘(2006)幹材積推定における幹曲線と係数の利用.森林技術 776:30-32.
- 三重県(2007)三重県総合計画「県民しあわせプラン」第二次戦略計画.
- 三重県ホームページ : <http://www.pref.mie.jp/SHIAWASE/HP/keikaku/1/1-2/422-2.htm#1>.
- 大友栄松(1987)樹幹の形状.(林業実務必携第三版.東京農工大学農学部林学科編,朝倉書店,東京) .35-36.
- 佐渡靖紀(2005)長伐期施業に対応する森林管理技術の開発ー山口県スギ・ヒノキ人工林樹幹細り表の作成ー.山口林指セ試験報告 18:1-26.
- 鈴木善郎・野上啓一郎(1999)長伐期に対応するスギ及びヒノキ細り表,静岡県林技セ研報 27:9-21.
- 豊田信行(2006)愛媛県高齢級針葉樹人工林のシステム収穫表と細り表, 現実林分収穫表(暫定版)の作成.愛媛県林技研報 24:7-26.
- 山根正伸(1989)神奈川県における人工林の生産力(Ⅲ)ースギ, ヒノキ林の立木の形状と丸太利用材積の予測資料の作成ー.神奈川県林試研報 16:49-73.