

## 第4章 冠雪荷重を受けた林木の耐力

林木の冠雪害は枝葉に雪が付着し、その荷重によって幹が折れたり曲がったりする被害である。この防止対策としては、着雪しにくくするか、着雪してもそれに耐える丈夫な林木に育てることである。そのためには、第3章で検討した降雪量と冠雪荷重の関係に加えて冠雪害が発生するときの冠雪荷重すなわち幹の耐力を明らかにする必要がある。これが明らかになれば個々の林木の冠雪害抵抗性を定量化することが可能となり、冠雪荷重に耐える林木を育成するための施業指針を得ることができると考えられる。このような考えに基づき冠雪荷重を受けた林木の耐力の評価法について解析した（中谷・嘉戸ら、1984）。

本章ではさらに調査林分を増やして、その耐力に関与する幹の強度的性質および根系支持力の品種および林分変動について検討した。

### 第1節 林木の耐力の評価法

冠雪荷重を受けた林木の耐力の評価法に関しては既に報告済みであるが、林木の耐力に関与する要因の品種および林分変動の検討に不可欠である。そこで、冠雪害の発生機構の力学的解析とこの解析の妥当性の検証結果についてのべる（中谷・嘉戸ら、1984）。

#### 1. 冠雪害発生機構の力学的解析

林木の冠雪害は、力学的観点にたてば、次のような場合に発生するものと考えられる。

- a) 冠雪荷重と風荷重が同時に作用する場合
- b) 冠雪荷重が樹冠軸から偏心して作用する場合
- c) 元湾曲のある幹に冠雪荷重が作用する場合
- d) これらが複合して作用する場合

沢田(1983)は、b)の条件下で発生する冠雪害を長柱の偏心圧縮による林木の破壊として、林木の根元を固定端条件とみなして解を与えた。しかし、林木の根元は根張りの程度によっては半固定端となって、根元に加わるモーメントの増大に伴って回転する場合が多く認

められた。

したがって、筆者ら（中谷・嘉戸ら，1984）は次のような仮定をおき，根元を半固定端条件として解析した（図-24）。

a) 冠雪荷重は樹冠重量と冠雪重量の和とし，幹軸より  $e$  だけ偏心した重心部位  $G$  に集中荷重  $P$  として加わる。

b) 幹は一定のテーパを持った円形断面の通直な柱（截頭円錐体）とし，強度特性は均一である。

c) 林木の根元はモーメントに比例した回転変位を生じ，この関係は次式で示される。

$$\theta = \mu \cdot M_0 = \mu \cdot \delta \cdot P \quad (4.1.1)$$

ここで， $M_0$  は根元のモーメント， $\theta$  は回転変位， $\mu$  は  $M_0$  と  $\theta$  の間の比例定数（以下根元の回転係数と呼ぶ）および  $\delta$  は荷重点の水平変位である。

d) 樹冠の偏心量により幹は横方向に曲げ応力を生じる。荷重の増大に伴い曲げ応力も増大し，幹の曲げ強さを越えたときに折損する。この時の外力（冠雪荷重）が幹の耐力に相当する。

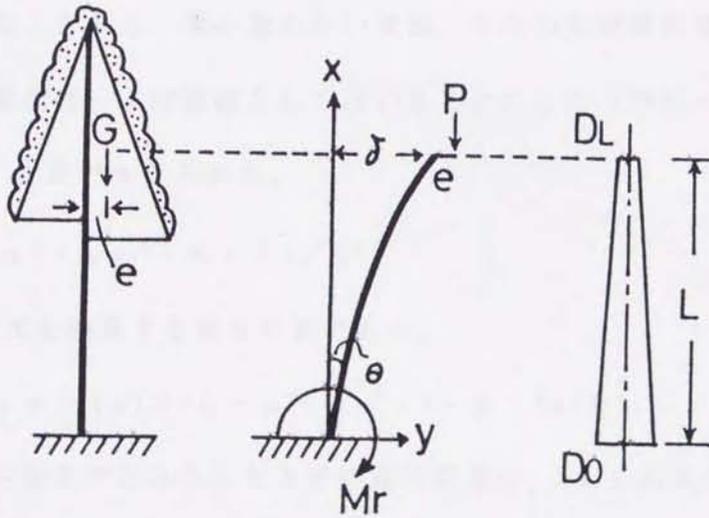


図-24 冠雪害の力学的モデル

- |                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| $G$ : 冠雪荷重の重心   | $e$ : 冠雪荷重の偏心量      |
| $P$ : 冠雪荷重      | $\theta$ : 根元の回転角度  |
| $L$ : 冠雪荷重の荷重点高 | $\delta$ : 荷重点の水平変位 |
| $D_0$ : 根元直径    | $D_L$ : 荷重点直径       |

この力学的モデルを解析した結果、荷重点における幹の水平変位  $\delta$ 、任意の高さにおける水平変位  $y$  と曲げ応力  $\sigma_x$  は次式で示された (中谷・嘉戸ら, 1984)。

$$\delta = \left[ \frac{\gamma}{\alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma} - 1 \right] e \quad (4.1.2)$$

$$y = \frac{\alpha \gamma - X_0 \{ \alpha \gamma \cos \gamma_0 + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma_0 \}}{\alpha \{ \alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma \}} e \quad (4.1.3)$$

$$\sigma_x = \frac{K_0 \alpha \gamma^2 \{ \alpha \gamma \cos \gamma_0 + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma_0 \}}{Z_0 L X_0^2 \{ \alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma \}} e \quad (4.1.4)$$

ここで、 $\gamma$  は  $(\beta/\alpha) \cdot \phi$ 、 $\beta$  は  $1 - \alpha$ 、 $\alpha$  は細り比 ( $D_L/D_0$ )、 $D_0$  は幹の根元直径、 $D_L$  は荷重点高における幹直径、 $\phi$  は  $(L/\beta)(\sqrt{P}/\sqrt{E I_0})$ 、 $L$  は荷重点高、 $E$  は幹の曲げヤング率、 $I_0$  は根元の断面二次モーメント ( $D_0^4 \cdot \pi/64$ )、 $K_0$  は  $E I_0/L$ 、 $X_0$  は  $1 - \beta \cdot x/L$ 、 $\gamma_0$  は  $(1 - X_0) \cdot \alpha \cdot \gamma / (X_0 \beta)$ 、 $Z_0$  は根元の断面係数である。

(4.1.4)式は幹の曲げ応力が偏心量に比例することを表していることから、偏心量の大きさは幹の耐力に影響を与えているといえる。しかし、現実には冠雪時の樹冠の偏心量を測定するのは困難なことから、偏心量のない状態、すなわち冠雪荷重が幹軸に鉛直に加わる場合の耐力 (座屈荷重) を指標値として用いることにした (中谷・嘉戸ら, 1984)。この座屈荷重  $P_{cr}$  は、次式で与えられる。

$$P_{cr} = \alpha^2 \cdot \gamma_s^2 \cdot E \cdot I_0 / L^2 \quad (4.1.5)$$

ここで、 $\gamma_s$  は次式を満足する場合の値である。

$$\tan \gamma / \gamma = -1 / (\beta / \alpha - \mu \cdot \alpha \cdot \gamma^2 \cdot E \cdot I_0 / L) \quad (4.1.6)$$

なお、根元を固定端条件とみなしたときの座屈荷重は、(4.1.6)式に  $\mu = 0$  を代入し  $\gamma_s$  を求め、(4.1.5)式により与えられる。特にこの場合の  $\gamma_s$  は、林木の細りを示す  $\alpha$ 、 $\beta$  のみから決定される (沢田, 1983)。

このように林木の座屈荷重は、直径、細り、冠雪荷重の重心の高さ、樹幹ヤング率および根元の回転係数によって決定される。また、冠雪害の発生機構としてより一般的な偏心

圧縮の場合には、これらの因子に加えて曲げ破壊応力とともに偏心量そのものが林木の耐力に重要な意味をもつといえる。

## 2. 試験方法

前節の力学的解析の妥当性を検討するため、林木の荷重試験、幹の強度試験および根系による幹支持力試験などを実施した。

### (1) 林木の荷重試験

林木の荷重試験を頼成のスギ14年生林分、吉峰の16年生林分および座主坊の28年生林分の3箇所で行った（表-15）。

これまで行われた林木の荷重試験は、林木に傾斜荷重を加えるものが大半であった（中嶋・松田, 1982）。この方法によると水平、鉛直の両荷重が同時に加わり、かつ荷重の増大に伴う水平変位の増大によって傾斜角度が変化する。この傾斜角度の変化は無視し得ないものであり、そのため妥当な耐力評価が困難になると考えられる。

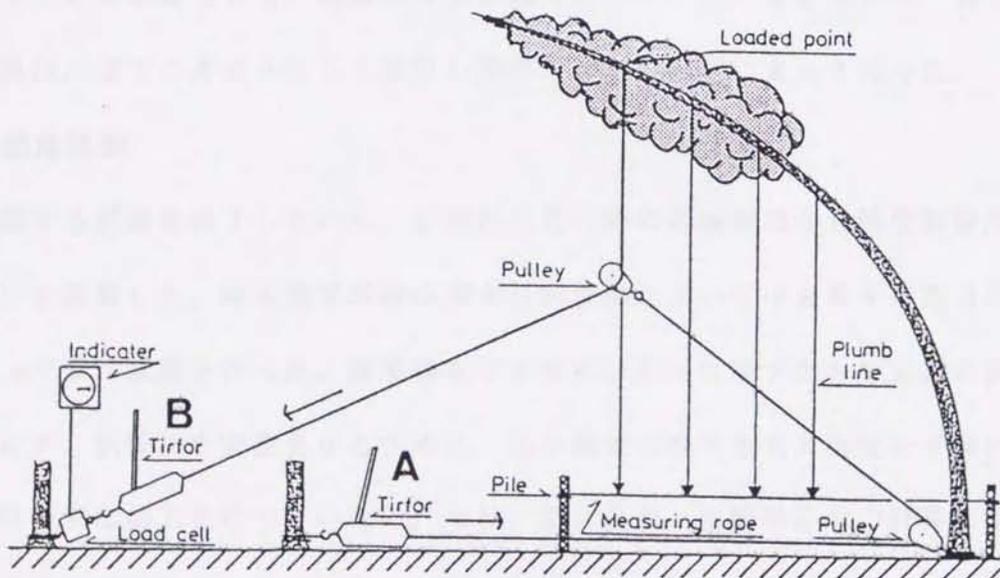


図-25 林木の鉛直荷重試験

そこで本研究では、林木に鉛直荷重のみを加えるために図-25のような荷重方法を採用した。所定の長さまで手動ウインチA（商品名：チルホール）のワイヤーを送りだしたのちに、林木の上部に連結されたワイヤーが鉛直に達するまで手動ウインチBで巻きとるものである。この試験はでき得る限り小さな水平変位の状態から測定を始め、所定の変位で荷重と幹各部の水平変位を測定し、最後に折損させた。なお、幹各部から錐下した鉛直線の移動量を、地上60cmに設置したスケール（1mm精度）により測定し、水平変位を求めた。また、幹が転倒しないように根系が支持する力（以下、根系支持力と呼ぶ）を測定する目的で、根元の回転変位を幹60cm高に打った釘の水平移動量で測定した。

林木の荷重試験の荷重点高は樹高の50～80%に設定した。これは、冠雪荷重の重心高の推定が困難なことおよび条件範囲をひろげて前述した力学的解析の適用範囲を検討するためである。荷重をかけて供試木が折損ないしは倒伏したのちに伐倒し、幹各部の直径（根元から1m間隔）、折損高などを測定した。なお、幹は解析で仮定したような一定のテーパ-を必ずしも持った円形断面の柱（截頭円錐体）とはなっていない。そのため、根張りの影響の大きい根元直径を除外し、根元上部から荷重点高までの測定直径に対し、高さと同直径間に最小二乗法を適用して、実際の幹形に最も近いテーパ-柱を求めた。以後の林木に関する計算は、全てこのようにして測定し求めたテーパ-柱によって行った。

## (2) 幹の強度試験

林木に関する試験を終了したのち、折損部に近い幹の非破壊部から強度試験用試料（長さ2.5m）を採取した。幹の強度試験は実大材試験機を用いて中央集中荷重方式により、スパン2mで曲げ試験を行った。冠雪害をできるだけ忠実に現すため生丸太の状態を試験をすすめたが、試験体を安定させるために、支点綱板に接する丸太部位を平滑に仕上げ、それ以外は特別な加工を行っていない。なお、最大応力、比例限度力の計算にはスパン中央の断面寸法を使用した。また、ヤング率の計算には、丸太を円形断面のテーパ-梁とみなした。

### 3. 結果と考察

#### (1) 林木の耐力の推定

各供試木の幹形状、樹幹ヤング率および根元の回転係数を(4.1.5)式に代入し、それぞれの座屈荷重を計算した。この結果から得られた値と林木の荷重試験における最大値の関係を示した(図-26)。この図から、林木の荷重試験における最大荷重は150~1,000kgまで広く分布しているが、最大荷重と座屈荷重の値はほぼ一致し、両者の間に高い相関が認められた。同様の傾向は、継田ら(1984)や谷ら(1985)によっても確認されている。そして各調査地の回帰直線間にも有意な差異が認められなかった。これらのことから、林木耐力は林分が違っていようとも、幹形状、幹の強度特性、根系の支持力の3要因によって推

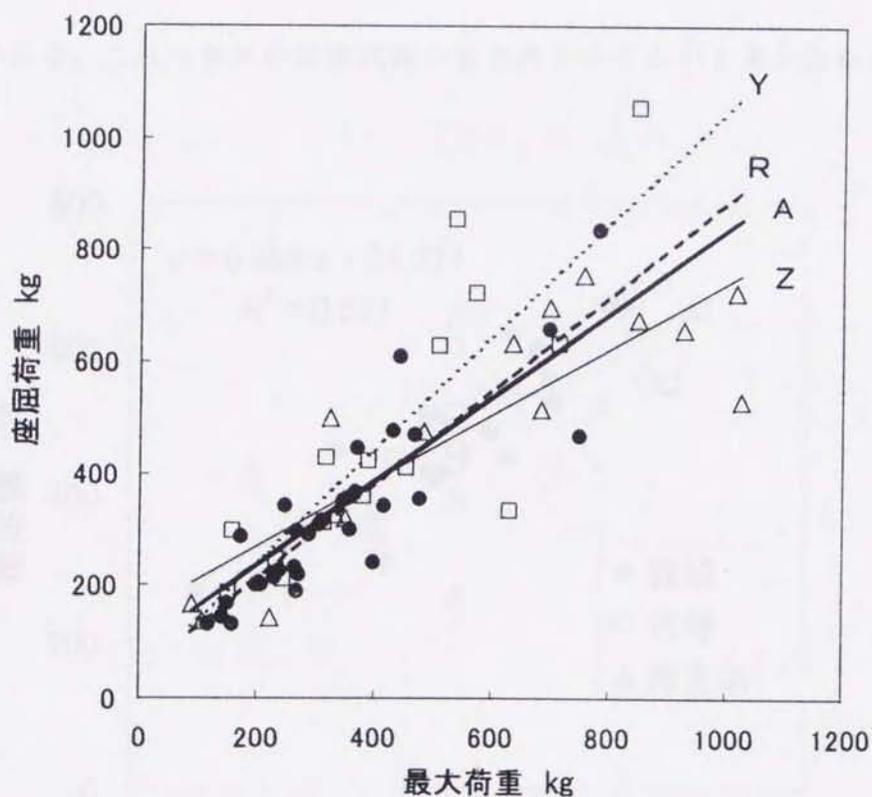


図-26 林木の鉛直荷重試験における最大荷重( $P_m$ )と座屈荷重( $P_{cr}$ )の関係

- --- : 頰成 (R)  $P_{cr} = 40 + 0.844 P_m$ ,  $r = 0.879$
- - - - : 吉峰 (Y)  $P_{cr} = 32 + 1.018 P_m$ ,  $r = 0.825$
- △ ——— : 座主坊 (Z)  $P_{cr} = 150 + 0.589 P_m$ ,  $r = 0.866$
- — — : 全体 (A)  $P_{cr} = 87 + 0.750 P_m$ ,  $r = 0.841$

定が可能と考えられた。しかし、全供試木を込みにした場合における耐力の変動に対する寄与率 ( $r^2$ ) は約70%にすぎなかった。この原因として、一般的な測定誤差に加えて、幹を截頭円錐体に修正する際に生じた誤差、幹や樹冠の自重、偏心量、幹の強度特性を一定と仮定したことにより生じることが考えられた。

## (2) 林木の形状と折損高

林木の荷重試験による折損高と座屈理論から求めた折損高の関係について検討した。林木の荷重試験によって折損した供試木を対象に、座屈時の応力分布を(4.1.4)式から求め、その最大応力部位を折損部位の推定値とした。荷重試験による折損部位の測定値とその推定値との間には1%水準で有意な相関が認められ(図-27)、測定値と推定値とがほぼ一致しているといえる。これは林木の荷重試験の妥当性を示すものと考えられた。なお、測定

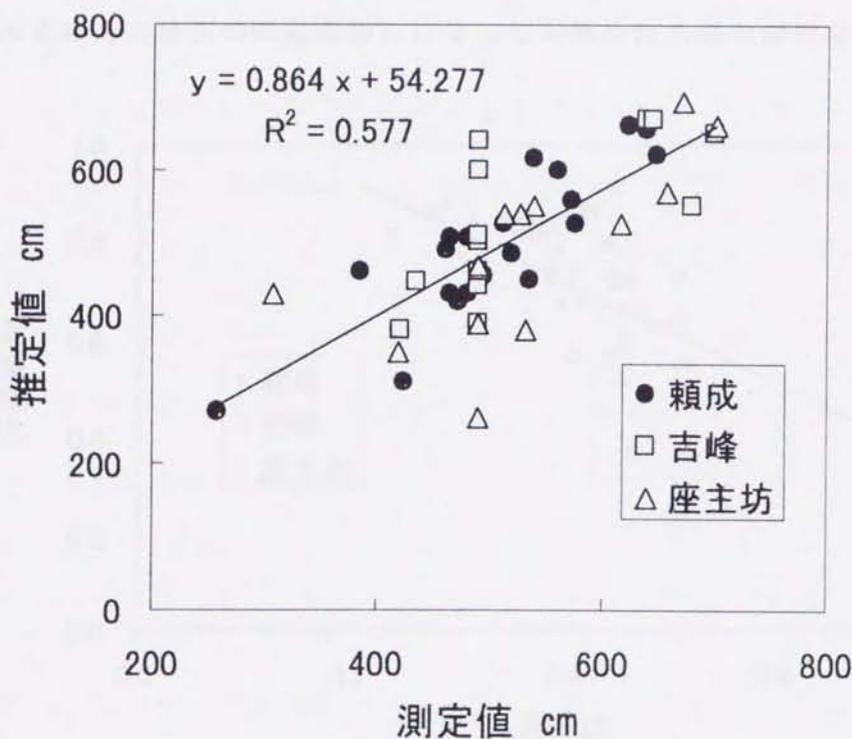


図-27 折損高の測定値(x)と推定値(y)の関係

値と推定値とが完全に一致しなかった原因として、本来曲線である幹形を直線で近似したこと、他に実際の幹では高さにより強度特性が変化するのに対し幹のヤング率や曲げ強度を一定と仮定したことなどが考えられる。

つぎに林木の形状と折損高の関係について検討した。幹の細り比 $\alpha$ （荷重点高直径／根元直径）と折損高比（折損高／荷重点高）の回帰直線は座屈理論から求めた折損高の推定曲線とほぼ一致していることがわかった（図-28）。なお根元直径は先に示したテーパ支柱から求めた。この図から、折損位置は幹の細り比が小さいほど高くなる傾向がみられ、細りが折損高に影響していることが明らかになった。すなわち、幹のうらごけが強いほどあるいは荷重点高が高いほど折損位置は高くなるといえる。

## 第2節 樹幹の強度特性の品種間および林分間比較

前節において、冠雪荷重下の幹の耐力が幹形状、幹の強度特性（とくに樹幹ヤング率）および根系の支持力（根元の回転係数）によって計算される幹の座屈荷重で近似できるこ

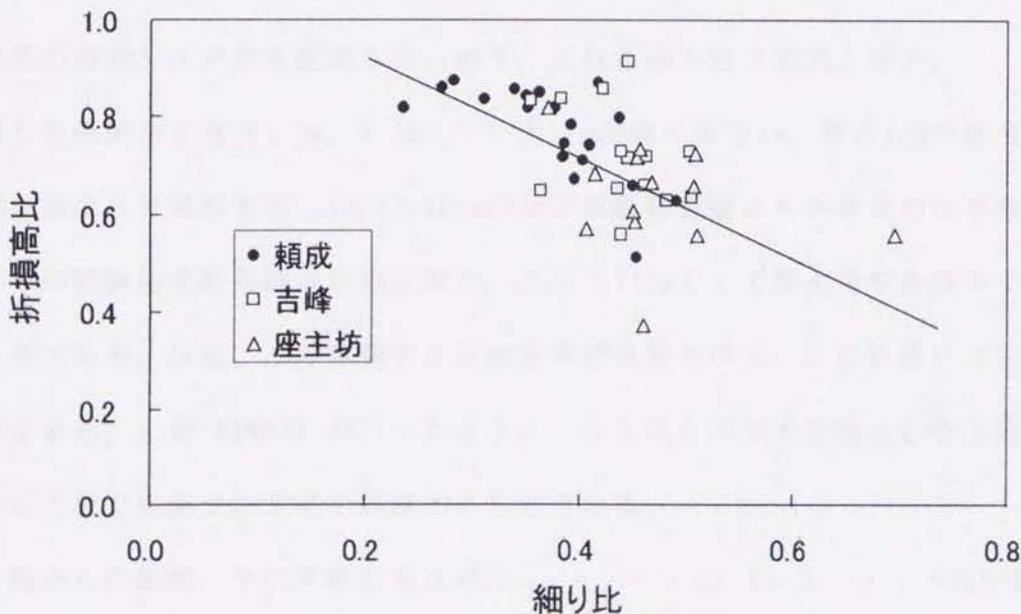


図-28 樹幹の細り比（荷重点直径／根元直径： $\alpha$ ）と折損高比（折損高／荷重点高： $y$ ）の関係

とを示した。このことは、幹の強度特性が林木の冠雪害抵抗性を評価するうえで重要な要因であることを示唆するものである。そこで、スギ樹幹の強度要因について品種間および林分間によって比較検討した。

## 1. 調査方法

幹の強度試験は延べ10箇所の林分において（表-15）、3つの試験方法 a）、b）、c）を用いて行った。

a）この方法は第4章1節に示した通りであり、幹を2.5mの長さに玉切りし、実験室に持ち帰り、万能試験機を用いてスパン2mとして中央集中荷重方式により生材条件で曲げ試験を行うものである。この試験では丸太の曲げヤング率のほか最大応力、比例限度力、テトマイヤー係数などを調べた。以下では、この調査法を実大材試験と呼ぶ。

b）これは加力梃子に人がぶら下がることにより林木に曲げモーメントを負荷させて樹幹ヤング率を測定するものである（小泉・上田，1986）。この方法は林木を伐採することなく測定できる利点がある反面、樹幹ヤング率の測定が高い部位や枝が密生する部位でできないこと、風がある場合には不向きなことなどの欠点もある。今回の調査ではいずれも地上1.3m付近の樹幹ヤング率を測定した。以下、これを加力梃子試験と呼ぶ。

c）伐倒した供試木を高さ1.3m、4.3m・・・と3m間隔で長さ1m、厚さ1cmの柾目板を採取し、無欠点部より2試料まで、1×1×16cmの曲げ試験体を髄より半径方向に連続的に作成し、これらの試験体を以後飽水状態を保ち、スパン14cmとして中央集中条件下で曲げ試験を行うものである。以後、この試験を小試験体曲げ試験と呼ぶ。この試験により各年輪のヤング率を求め、小泉（1987）が行ったように、幹を同心円状の年輪からなる層構造と見なし、次の手順で樹幹ヤング率を計算するものである。

各年輪の髄からの距離、ヤング率をそれぞれ  $r_1, r_2 \dots r_n, E_1, E_2 \dots E_n$  とおくと  $i$  年輪層の断面二次モーメントは次式で表される。

$$I_i = \pi (r_i^4 - r_{(i-1)}^4) / 4 \quad (4.2.1)$$

さらに、幹の全体剛性は次式で示される。

$$EI = E_1 I_1 + E_2 I_2 + \dots + E_n I_n$$

ここで、EIは幹の全体剛性である。

$$\text{また、} I = \pi r_0^4 / 4 \text{より} \quad (4.2.2)$$

樹幹ヤング率Eは次式によって得られる。

$$E = \sum E_i I_i / I \quad (4.2.3)$$

## 2. 結果と考察

### (1) 品種による比較

一般に幹内における強度特性は、いわゆる未成熟材部において小さく、加齢にともなっ

表-15 林木の耐力に関する調査地の概要と供試木本数

調査地	頼成	吉峰			北屋敷		荒館	座主坊	岩崎	下屋敷
林齢 (年生)	14	6	16	21	18	22	25	28	31	25
供試木本数 (本)										
1. 林木荷重試験	32		16					15		
2. 幹強度試験										
a. 実大材試験	32	22	16		10	11	18	15		
b. 加力梃子試験				86		45	27		48	32
c. 小試験体試験						7	8			
3. 根系支持力試験	32	54	16		10	11	18	15		
ボカスギ	○	○	○	○	○	○	○		○	
タテヤマスギ	○	○	○	○				○		
マスヤマスギ	○		○	○						
リョウワスギ		○		○						
カワイダニスギ		○								○
標高 (m)	100	230			100		50	350	100	150
傾斜度 (度)	5	5			30		35	23	30	5
樹高 (m)	9.0	2.8	10.7	12.7	10.2	13.4	19.7	10.8	17.3	10.9
胸高直径 (cm)	16.7	6.4	16.6	19.9	15.0	17.6	26.6	15.9	28.0	16.2
形状比 (m/m)	54	44	64	63	68	76	74	69	62	67
土壌の深さ (cm)	40	26			44	44	68	31		
土壌の堅さ (mm)	24	17			16	16	12	7		

て大きくなり、成熟材部に至って安定する傾向がある。また、後ほど詳しく検討するが、幹部位によっても強度特性が変動する傾向が認められている。したがって、樹幹ヤング率の品種間比較に際しては林齢や測定部位をそろえる必要がある。

吉峰の6年生林分においてタテヤマスギ実生、ボカスギ、リョウワスギおよびタテヤマスギサシキ（上市2号）の生丸太（長さ80cm）を対象に樹幹ヤング率を測定した結果について述べる（平・嘉戸ら、1990）。測定した各品種の樹高、根元直径および樹幹ヤング率の平均値を表-16に示した。この調査地では、リョウワスギの樹幹ヤング率は最も大きく、ボカスギはそれは最も小さかった。タテヤマスギの樹幹ヤング率はこれらの中間の値であり、実生とサシキの間には顕著な差異が見られなかった。そこで、樹幹ヤング率について分散分析をした結果、品種間に1%水準で統計的に有意な差異（ $F=7.23$ , d. f. =3, 18）が認められた。なお、根元直径および樹高には品種による差異が見られなかった。

次に、頼成の14年生林分における樹幹の強度特性について比較検討した。長さ2mの生丸太のヤング率、比例限度力、最大応力およびテトマイヤー係数の品種別平均値を表-17に示した。これらの丸太の採取部位は地上2~5mの高さであった。この結果、樹幹ヤング率には品種間差異が認められ、マサヤマスギは3品種の中で最も大きな値を示し、最も小さなボカスギの約1.5倍の値であった。タテヤマスギはこれら2品種の中間の値であった。

表-16 吉峰調査地(6年生)における根元直径、樹高および樹幹ヤング率の3品種別平均値

スギ品種	林齢	調査 本数	根元直径		樹高		樹幹ヤング率	
			平均値 (cm)	標準偏差	平均値 (m)	標準偏差	平均値 (tonf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差
タテヤマスギ <sup>*</sup> (実生)	6	6	7.0	1.52	2.82	0.56	13.1	4.29
ボカスギ <sup>*</sup>	6	6	5.8	0.86	2.94	0.37	9.1	0.86
リョウワスギ <sup>*</sup>	6	5	6.1	0.35	2.66	0.08	18.8	5.22
タテヤマスギ <sup>*</sup> (上市2号)	6	5	6.7	1.57	2.85	0.37	14.7	1.83

これらの品種間差を検定するための分散分析の結果を表-18に示した。この結果から、品種間に1%水準で統計的に有意な差異が認められたので、さらに各品種間で最小有意差を求めたところ、マシヤマスギはボカスギと1%水準で、タテヤマスギとは5%水準でそれぞれ有意性が認められた。比例限度力および最大応力についてもマシヤマスギが最大で、ついでタテヤマスギ、ボカスギの順であった。これらについて分散分析したところ、いずれも、品種間に5%水準で有意性が認められた。また、テトマイヤー係数は0.5から1の範囲で変動し、破壊までの荷重とたわみとの関係が直線的で塑性域が無い場合には0.5、塑性域が明瞭に表れるほど1に近くなる。この係数を比較するとタテヤマスギとボカスギはほぼ同値であるが、マシヤマスギはこれらよりも低かった。分散分析の結果、品種間に1%水準で有意性が認められた。以上のことから、ボカスギは小さな荷重でも変形しやすく、復元力も小さくてかつ塑性域が明瞭な品種といえる。同様の傾向は佐々木ら(1983)

表-17 頼成調査地(14年生)における生丸太の材質特性の3品種別平均値

品 種	ヤング率 ( $10^3\text{kgf/cm}^2$ )	比例限度力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	最大応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	テトマイヤー係数
ボカスギ	26.4	104	266	0.72
タテヤマスギ	31.2	138	305	0.69
マシヤマスギ	40.3	143	312	0.60

表-18 頼成調査地における3品種の生丸太の材質特性についての分散分析結果

要 因		自由度	平方和	平均平方	F
ヤング率	品種	2	1035.64	517.83	6.07**
	誤差	29	2474.41	85.32	
比例限度力	品種	2	9844.4	4922.2	3.79**
	誤差	29	37647.3	1298.2	
最大応力	品種	2	13663.2	6831.6	3.95**
	誤差	29	47230.8	1749.3	
テトマイヤー係数	品種	2	0.061	0.031	6.49**
	誤差	29	0.139	0.0048	

も認めている。一方、マサヤマスギは曲げたり、破壊したりするのに大きな荷重が必要で、かつ塑性域がはっきりしない品種といえる。タテヤマスギはこれら2品種の中間的な強度特性を有するようである。

以上のように6年生および14年生林分では材質特性に顕著な品種間差違が認められたが、同様の傾向が林齢の異なる場合においても認められるものか否かを検討するため、吉峰の22年生の調査地でぶら下がり法を用いて樹幹ヤング率を調べた。各品種の供試木の概要と樹幹ヤング率の平均値を表-19に示した。なおこの表には比較のために、近年、富山県においてボカスギの代わりに造林が進められているカワイダニスギの下屋敷25年生調査地における値も併せて示してある。この結果によると、樹幹ヤング率の平均値が最も大きいのはマサヤマスギで、つづいてタテヤマスギ、リョウワスギの順であったが、これらの値は50~60ton/cm<sup>2</sup>で大きな差異がなかった。しかし、これらの品種の樹幹ヤング率はボカスギのその1.4~1.6倍であり、品種間差異が大きいことがわかった。そこで、分散分析を行ったところ1%水準で品種間に有意な差異(F=25.37, d. f. =3, 83)が認められた。このように、樹幹ヤング率はマサヤマスギ大きく、ボカスギで小さい傾向がこれまでも報告されており(片岡ら, 1983; 矢野, 1984)、全国的にみても樹幹ヤング率はボカスギで小さく、マサヤマスギで大きいスギ品種と判断される。また、カワイダニスギの樹幹ヤング率の平均値はボカスギのそれよりも大きいものの、マサヤマスギ、タテヤマスギ、リョ

表-19 吉峰調査地(22年生)と下屋敷調査地(25年生)における胸高直径、樹高および胸高部位における樹幹ヤング率の品種間比較

スギ品種	林齢	調査 本数	胸高直径		樹高		樹幹ヤング率	
			平均値 (cm)	標準偏差	平均値 (m)	標準偏差	平均値 (tonf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差
ホカスギ*	22	18	25.6	2.96	13.9	1.70	35.6	7.98
マサヤマスギ*	22	20	18.9	3.90	12.2	1.72	57.6	5.74
リョウワスギ*	22	23	15.9	2.46	10.9	1.18	51.2	7.26
タテヤマスギ*	22	25	20.4	0.97	14.0	0.97	55.9	11.30
カワイダニスギ*	25	32	16.4	2.08	10.6	1.19	42.0	9.44

ウワスギのそれよりも小さかった。また、角材での強度試験の結果（平，1980）によると、ヤング率はマシヤマスギで大きく、ボカスギで小さく、その中間にタテヤマスギ、リョウワスギ、カワイダニスギが位置していたことが報告されている。

以上の結果を総合すると、樹幹ヤング率が最も大きい品種はマシヤマスギであった。つぎにリョウワスギまたはタテヤマスギの樹幹ヤング率が大きかった。ただし、これらの品種のヤング率は林分に<sup>より</sup>順位が変動したため、どの品種の値が多きかは明にならなかった。その次に樹幹ヤング率が大きかった品種はカワイダニスギで、ボカスギが最も小さい品種と考えられた。冠雪荷重を受けた林木の耐力は(3.1.5)式から根系の支持力が大きい場合 ( $\mu = 0$ ) にはヤング率に比例することから、ヤング率以外の条件が一樣ならばボカスギの耐力は他の品種の60~70%程度と推定される。このように、ボカスギの樹幹ヤング率が他の品種に比べて小さいことが冠雪害抵抗性が小さい一因であると考えられた。

#### (2) 部位および林齢による比較

ボカスギの樹幹ヤング率の平均値を林齢別に示した（図-29）。この図の実大材試験の結果に注目すると、生丸太の樹幹ヤング率は加齢に伴って大きくなる傾向がみられるが、

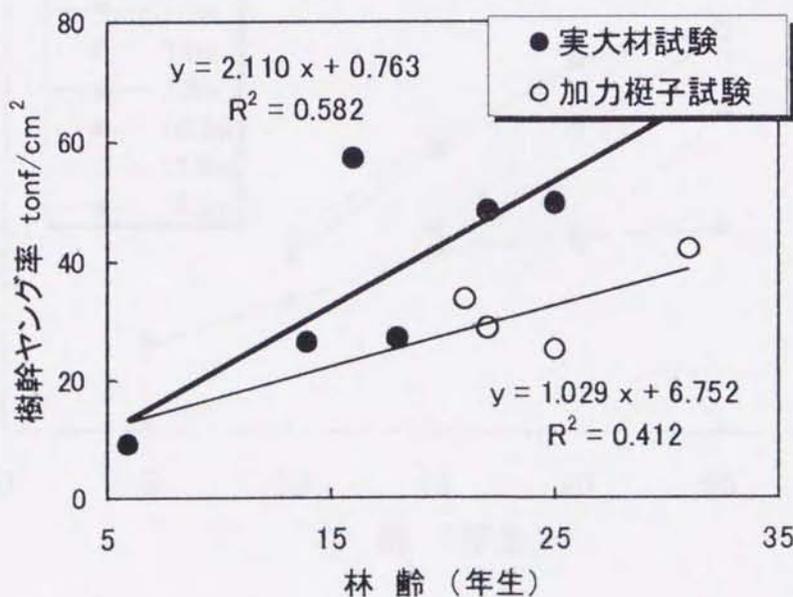


図-29 ボカスギの樹幹ヤング率(y)と林齢(x)の関係

同じ林齢でも林分によって変動も大きいことがわかる。ボカスギは単一クローンであり遺伝的性質が等しいとされていることから、樹幹ヤング率の変動原因は遺伝的性質よりはむしろ立地環境や施業歴の差異に起因するものと考えられた。また、樹幹ヤング率は実大材試験の結果の方が加力梃子試験の結果よりも大きくなる傾向があった。この主な原因は、前者では幹の中央部あるいは上部の材を対象にヤング率を測定したのに対し、後者では1.3m付近のヤング率を測定したことからの、測定部位の違いによる影響が考えられた。

そこで、樹幹ヤング率が林齢や部位の違いによってどの程度変動するのか検討するため、荒館において小試験体による曲げ試験を行い、各年輪毎のヤング率を調べた。この結果から高さの異なる部位における樹幹ヤング率を計算し、その経年変化の一例を図-30に示した。まず各高さ毎にみると樹幹ヤング率は林齢の増加に伴って大きくなる傾向がみられる。しかし、その増大の程度は部位によって異なるようである。例えば、1.3mの高さの樹幹ヤング率は15年生以後に頭打ち傾向がみられ約25tonf/cm<sup>2</sup>であったのに対し、4.3mや7.3mの部位における樹幹ヤング率は林齢とともに増大し、20年生時には約55tonf/cm<sup>2</sup>に達し、

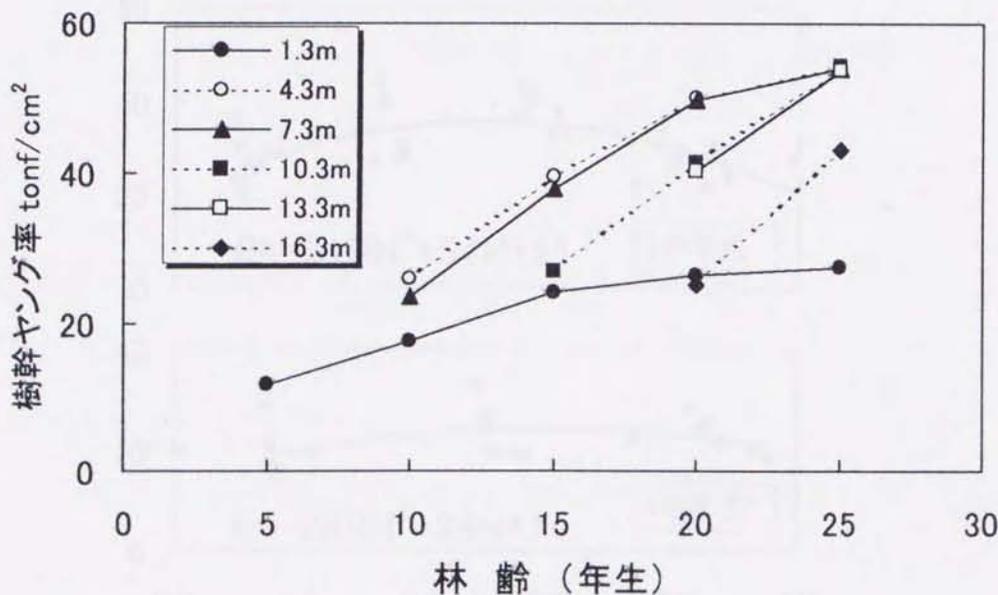


図-30 樹幹ヤング率の地上高別の経年変化

同林齢における1.8mの部位のその約2倍になった。これらの結果から、高い部位に位置するほど樹幹ヤング率の増加率が大きいといえる。

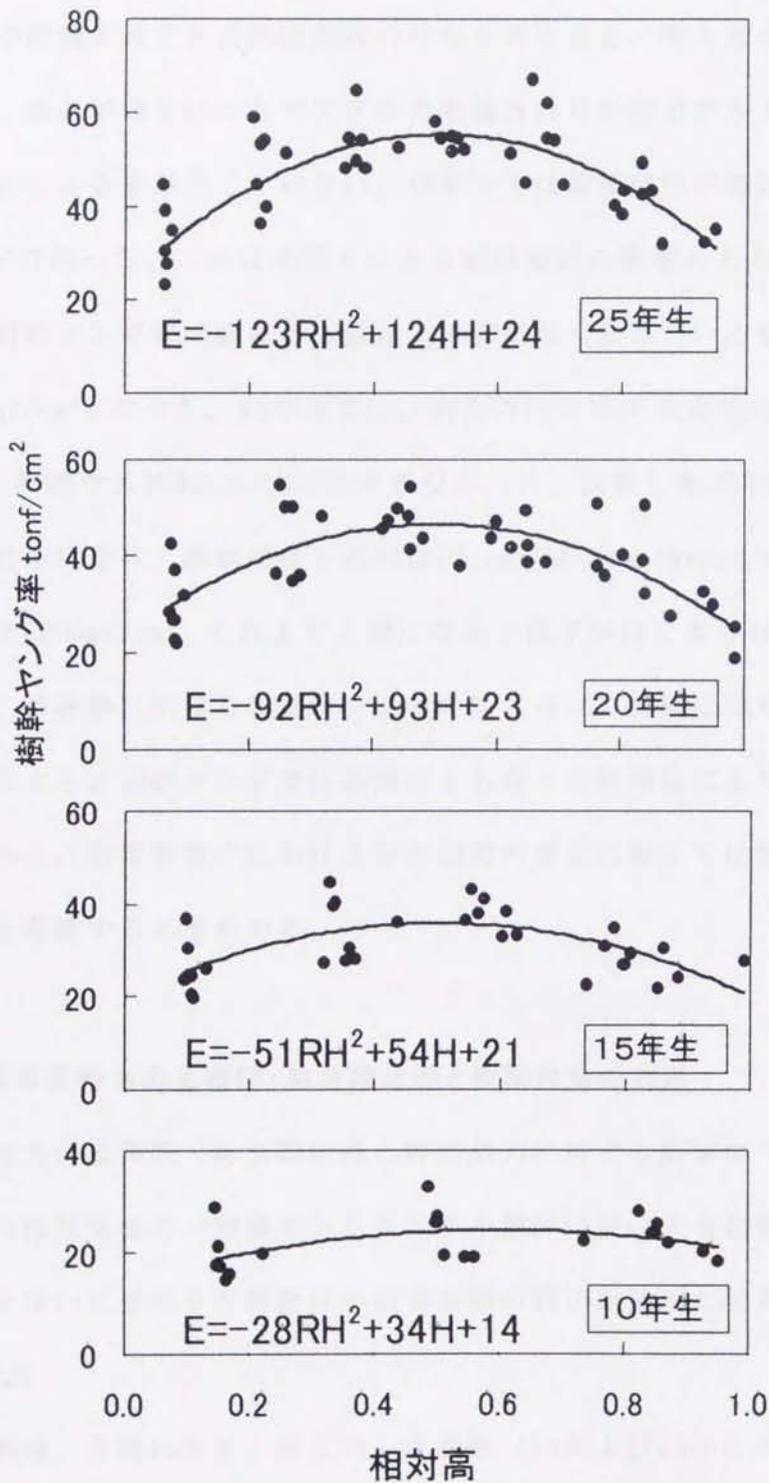


図-31 氷見市荒館の樹幹ヤング率(E)と相対高(RH)および林齢の関係

荒館の8本の供試木における樹幹ヤング率と幹の高さとの関係を林齢10年生より5年間隔で示した(図-31)。なお高さは各林齢における樹高に対する比(相対高)である。林齢10年生では樹幹ヤング率に高による差はほとんど認められず、ほぼ $20\text{tonf}/\text{cm}^2$ であった。これまで指摘されてきた未成熟材の分布を考えると、幹上部のヤング率は低下するはずであるが、高さが増すにつれヤング率の年輪当たりの増分が大きくなり、初期値も高いため幹の高さによる差が生じていない。15年生では胸高部位の樹幹ヤング率の上昇は小さく $26\text{tonf}/\text{cm}^2$ であった。これは根張りによる繊維傾斜の影響のためと考えられる。胸高部位より上の樹幹ヤング率は樹高の9割以上で若干低くなっているものの、ほぼ同レベルで推移し $32\text{tonf}/\text{cm}^2$ となった。20年生では、高さ方向の差が目立ちはじめ中央部では $44\text{tonf}/\text{cm}^2$ に対し、両端では約 $30\text{tonf}/\text{cm}^2$ にすぎなかった。伐採した25年生では樹幹ヤング率は上下の差が顕著になり、胸高部位で約 $30\text{tonf}/\text{cm}^2$ 、4.3mで $48\text{tonf}/\text{cm}^2$ 、7.3から13.3mまでがほぼ一定で $52\text{tonf}/\text{cm}^2$ 、それより上部になると低下がはじまり16.3mで $30\text{tonf}/\text{cm}^2$ となった。そして、各林齢における樹幹ヤング率の高さ方向の変動は相対樹高の2次曲線で近似された。このように樹幹ヤング率は加齢にともなって幹部位により約1.7倍の違いが認められたことから、冠雪荷重下における幹の耐力の推定に際しては幹の高さによる樹幹ヤング率の変動を考慮する必要がある。

### 第3節 根系の支持力の品種間・林分間比較と被害形態の判別

根系の支持力の品種間・林分間比較と幹の耐力に対する影響について検討した。また、根系の支持力は冠雪害の一形態である根返りや傾幹に関与すると考えられることから、力学的な手法を用いて根返りと幹折れの被害形態の判別を試みた結果について述べる。

#### 1. 調査方法

調査地は頼成、吉峰16年生、座主坊、北屋敷(18および23年生時)および荒館の延べ6箇所のスギ林分である(表-15)。齢級はⅢからⅥ齢級で、いずれの林分も冠雪害の発生しやすい齢級であった(高橋, 1977)。表中の土壌の深さはA層とB層の合計値で示した。

また、土壌の堅密度を山中式土壌硬度計で測定した。

根系の支持力を根元の回転係数 ( $\mu$ ) で表した。これは、林木が冠雪荷重を受けると根元部はそこに加わる曲げモーメント  $M_0$  に比例して回転角  $\theta$  を生じるという仮定条件から、(4.1.1)式では次のように定義されている。

$$\theta = \mu \cdot M_0$$

なお、 $\mu$  は単位モーメント当りの幹の回転角度を表すので、この値が小さいほど根系の支持力が大きいことを表す。

根元の回転係数に関する資料のうち頼成、吉峰、座主坊については第4章1節に示した林木の荷重試験の資料を用いた。試験方法は第4章1節に述べたとおりで、樹高の5~8割の部位にワイヤーを取り付け、手動ウインチ (チルホール) で徐々に鉛直荷重  $P$  を加え、随時、これと荷重点の水平変位  $\delta$  および根元の回転角  $\theta$  を測定した (図-32左)。このときの  $M_0$  は次式で示される。

$$M_0 = P \cdot \delta \quad (4.3.1)$$

また、北屋敷 (18, 22年生とも) と荒館では、地上2~2.5mの部位に徐々に傾斜荷重を加え、随時、その荷重と根元の回転角  $\theta$  を測定して根系の支持力を簡易的に求めた (図-32右)。この方法では、林木の変形に伴ってワイヤーの傾斜角度も変化するため、ワイヤーの傾斜角度と荷重点の水平変位もあわせて測定した。この場合の根元に加わるモーメントは次式で示される。

$$M_0 = P_1 (L \cos a + \delta \sin a) \quad (4.3.2)$$

ここで、 $P_1$  は傾斜荷重、 $L$  は荷重点の高さ、 $a$  はワイヤーの傾斜角度である。

なお、実験による根元のモーメント  $M_0$  と回転角  $\theta$  の関係は、 $M_0$  が小さい時には、 $\theta$  は  $M_0$  の増加に伴って直線的に大きくなる傾向がある (中谷・嘉戸ら, 1984)。そこで  $\theta$  と  $M_0$  との間に最小二乗法を適用して直線回帰式を求め、その式の傾きを  $\mu$  とした。

冠雪害の被害形態は幹折れや幹曲がりのような幹の損傷による被害と根返りや傾幹のよ

うな根系の損傷によって生じる被害に大別される。IV章1節に示したように頼成、吉峰、座主坊の3箇所において林木の鉛直荷重試験を行なって、各供試木の被害形態を調べた。そして、根返りした林木の根返りモーメント $M_r$ を(4.3.1)式を用いて算出した。また、座主坊では幹折れ木を対象に傾斜荷重(図-32左)を加えて根返りさせ、根返りモーメント $M_r$ を(4.3.2)式から算出した。

(1)品種間・林分間による比較

樹冠に冠雪荷重が加わった場合における根系の支持力を表す根元の回転係数について主なスギ品種間で比較した。吉峰の6年生林分においてタテヤマスギ実生、タテヤマスギサシキ、ボカスギおよびリョウワスギの根元の回転係数( $\mu$ )と根元直径の関係を調べた結果を図-33に示した(平・嘉戸ら、1990)。 $\mu$ 値は根元直径が大きくなるに従って直線的に減少する傾向が認められることから、根系支持力は根元直径が大きくなるのに従って大

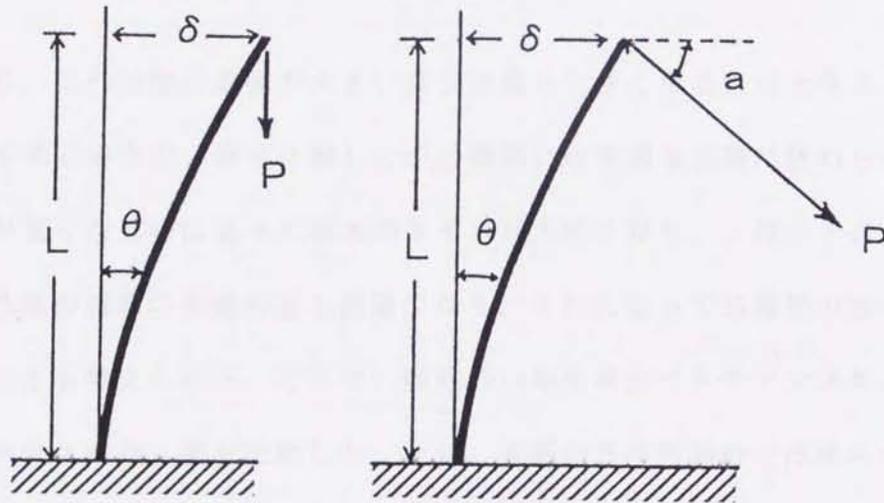


図-32 根系支持力の測定法

- (左) 垂直荷重試験, (右) 傾斜荷重試験  
 $P$ : ワイヤの荷重,  $\theta$ : 根元の回転角度  
 $L$ : 荷重点高,  $\delta$ : 荷重点の水平変位  
 $a$ : ワイヤの傾斜角度

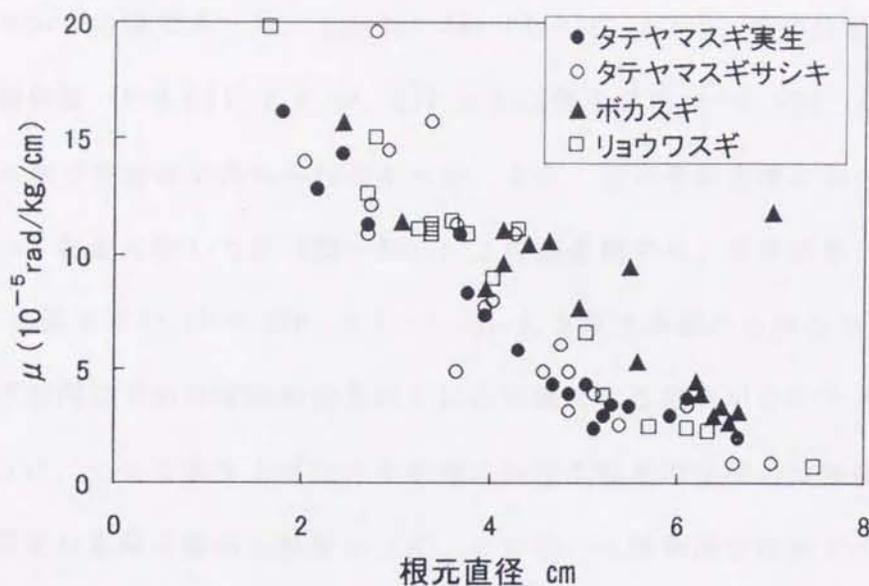


図-33 吉峰6年生林分における3品種の  
根元の回転係数の比較

きくなるといえる。これは根元直径が大きいほど根量も大きくなるためと考えられた。そこで、根元直径が同じ場合の $\mu$ 値を比較したが品種間には有意な差異は認められなかった。

しかし、林齢が高くなるのに従って林木のサイズが大きくなり、 $\mu$ 値が小さくなってゆくと同時に、各品種の根系の形態の差も顕著になり、それによって品種間の根系の支持力に差異が生じることも考えられる。そこで、頼成の14年生林分でタテヤマスギ（実生）、ポカスギ、マサヤマスギの $\mu$ 値を比較した。なお、吉峰の6年生林分では林木のサイズが小さかつ変動も小さかったので個体のサイズを根元直径で表したが、個々の林木の根量と胸高直径の二乗×樹高（ $D^2H$ ）間に相対成長関係が認められていることから（依田，1971），以下の解析では、林木サイズを $D^2H$ で表すこととし、これと根元の回転係数 $\mu$ の関係を用いて、根系の支持力の品種および林分による差違について検討した。

頼成におけるスギ3品種の両対数グラフ上の $\mu$ 値は $D^2H$ が大きいほど小さくなる傾向が認められ（図-34），大きな林木ほど根系の支持力も大きくなることが示唆された。ま

た、林木サイズが同じ場合の $\mu$ 値を比較するとボカスギが最も大きく、ついでマシヤマスギ、タテヤマスギの順であった。しかし、 $\log(D^2H)$ と $\log\mu$ の共分散分析をおこなった結果、回帰係数 ( $F=0.043$ , d. f. =2, 27) および修正平均 ( $F=2.922$ , d. f. =2, 29) についても5%水準で有意性が認められなかった。また、16年生の吉峰におけるボカスギとマシヤマスギの $\mu$ 値を比較したが(図-35)、この調査地でも、回帰係数 ( $F=0.555$ , d. f. =1, 7) および修正平均 ( $F=0.280$ , d. f. =1, 8) に有意性が認められなかったことから、林木のサイズが同じであれば根系の支持力には品種による差異がないと考えられた。

以上のように、ここで取り上げたスギ品種における根系の支持力は個体変動も大きいこともあって顕著な差異が認められなかったことから、立地条件や林木サイズが同じであれば、スギ品種のいかにかわらず根系の支持力が等しいと見なしても実用上は大きな問題がないと考えられた。

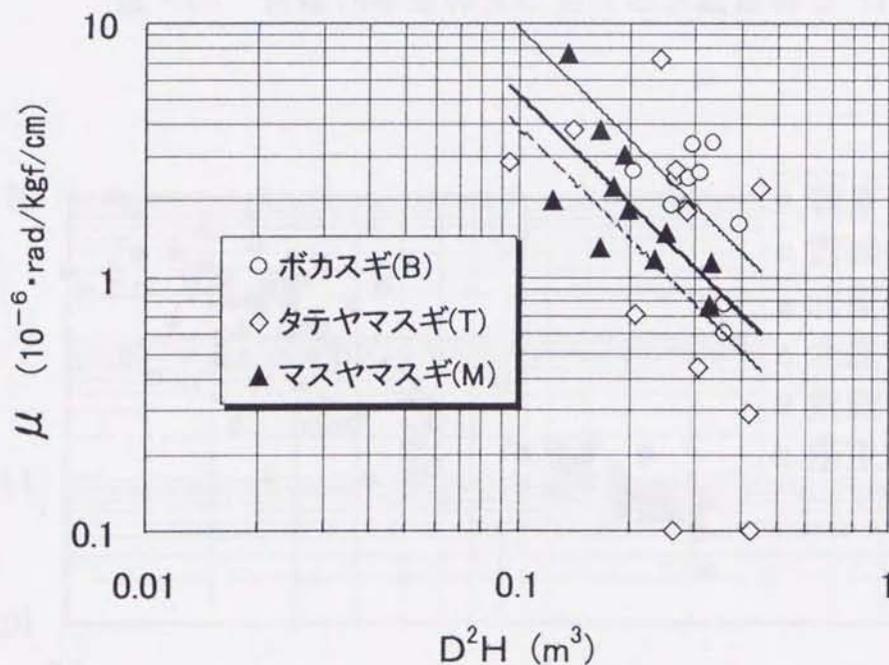


図-34 頼成における3品種の $D^2H$ と根元の回転係数( $\mu$ )の関係

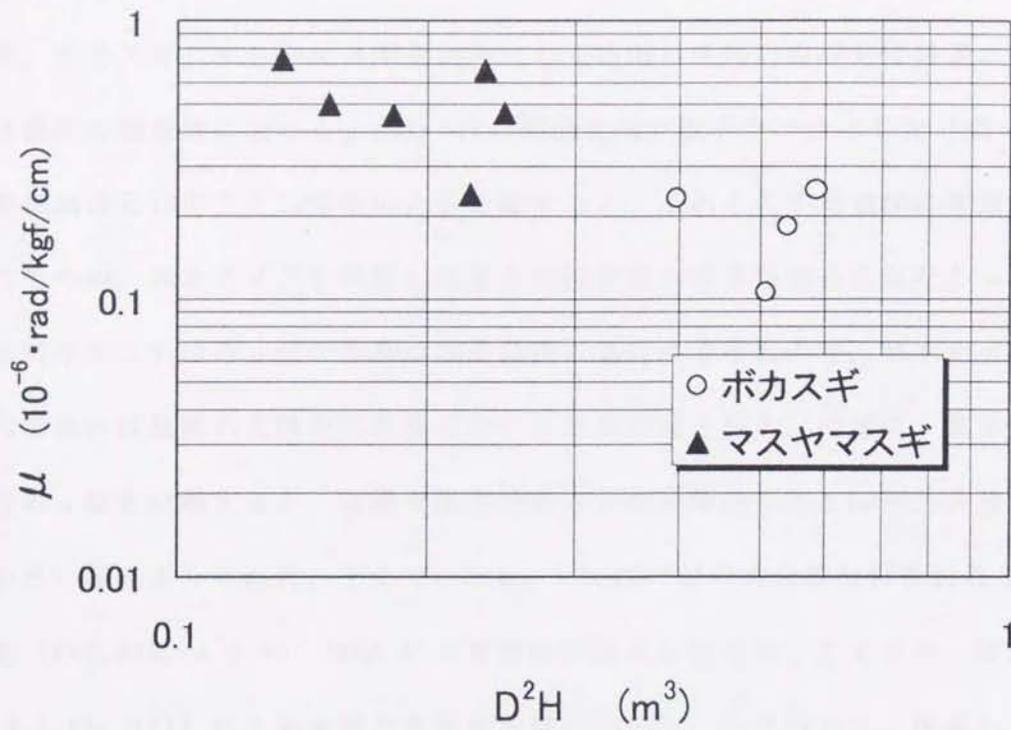


図-35 吉峰16年生林分における3品種の $D^2H$

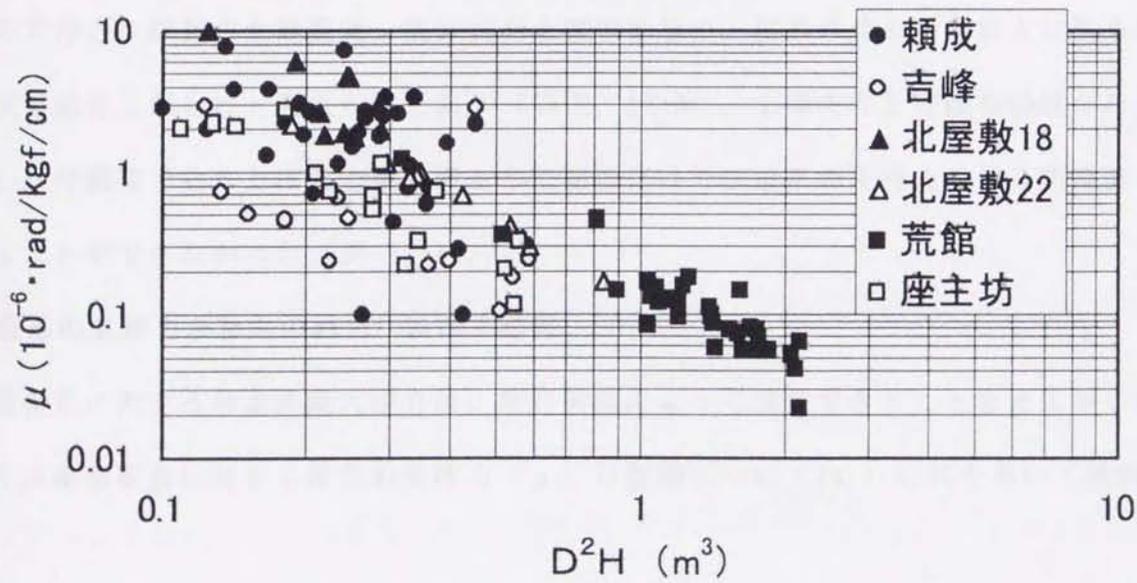


図-36 根元の回転係数 ( $\mu$ ) の林分間比較

以上のように、根系の支持力には明瞭な品種間差異が認められなかったことから、タテヤマスギ、ボカスギ、マシヤマスギを込みにして根系の支持力の林分間差異について検討した。6箇所の調査地における $\mu$ と $D^2H$ の関係を両対数グラフに示した(図-36)。まず北屋敷における18年生と22年生の $\mu$ を比較すると、これらの平均値間に有意な差異が認められたものの、林木サイズを考慮した場合には有意な差異が認められなかったことから、18年生と22年生における $\mu$ 値の差異は成長段階の違いによるもので、林木サイズと立地環境が同じであれば根系の支持力に差異がないことが示唆された。つぎに、林木サイズが等しい場合の $\mu$ 値を比較すると、吉峰や座主坊の方が北屋敷18年生と22年生林分および頼成よりも小さい傾向がみられた。そこで、 $\log \mu$ と $\log D^2H$ の共分散分析をおこなった結果、回帰係数( $F=0.835$ , d. f. =5, 106)には有意性が認められなかったものの、修正平均( $F=9.754$ , d. f. =5, 111)に1%水準で有意性が認められた。したがって、根系の支持力は林分によって異なり、吉峰、座主坊で大きく、北屋敷18年生と22年生林分、頼成で小さかったといえる。

以上のことから、根系の支持力は林分によって大きく変動することが明らかになった。根系の支持力は根鉢の土壌重量、根鉢表面土壌の粘着力、根系のせん断力および根系の摩擦抵抗を総合したものと考えられており(荻住, 1979)、土壌条件と密接な関連がある。しかし、今調査で取り上げた土壌の深さや堅密度だけでは根系の支持力の林分間差違を説明することができなかった(表-15)。

## (2)根系の支持力が林木の耐力に及ぼす影響

鉛直荷重に対する林木の最大耐力は、座屈荷重によって推定できることを先に示した。ここでは座屈荷重に対する根系の支持力( $\mu$ )の影響について(4.1.5)式を用いて検討した。

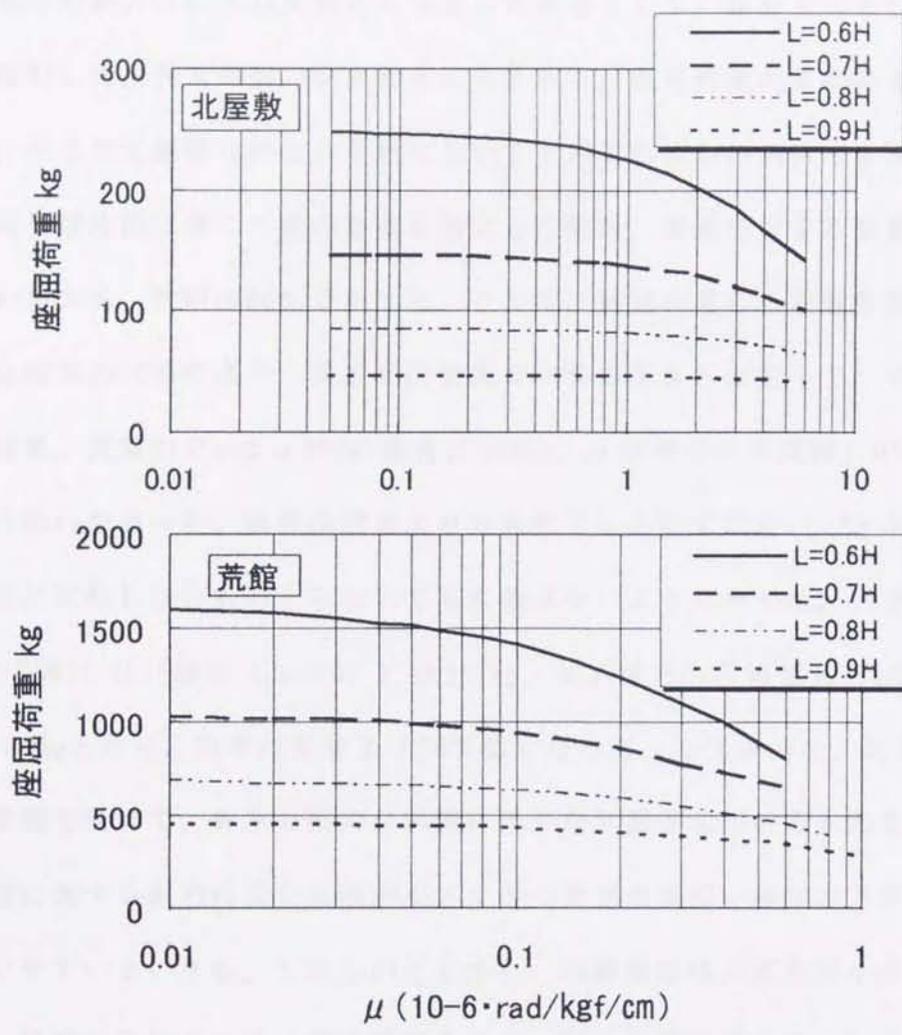


図-37 北屋敷と荒館における林木の座屈荷重に及ぼす根元の回転係数 ( $\mu$ ) の影響

一例として生育段階の異なる北屋敷18年生と荒館における林木の最大耐力  $P_{cr}$  と根元の回転係数  $\mu$  との関係を示した (図-37)。両調査地の  $P_{cr}$  は表-20に示した調査地の平均値をもとに (4.1.5) 式を用いて算出した。この結果によると、林木の耐力は、根系の支持力の低下 ( $\mu$  の増加) にともなって急激に低下することがわかる。このような傾向は荷重点が低いほど顕著である。したがって、冠雪荷重が梢端に集中する場合には林木の耐力に及ぼす  $\mu$  の影響を考慮にいれなくてもよいが、冠雪荷重が幹の下部に作用する場合にはその影響を無視することはできないと考えられる。

つぎに、林木の耐力は根系の支持力を考慮した場合としない場合とでどの程度異なるのかについて検討した。林木の耐力を求めるにあたって、冠雪荷重の重心高を明らかにする必要がある。そこで北屋敷18年生と荒館においてそれぞれ8本の供試木を選び、層厚1mとして層別刈り取り法に準じて葉の重量を測定した結果、樹高に対する葉量の重心高は北屋敷が根元から60%、荒館が80%であった。そこで、樹冠の重心を冠雪荷重の重心すなわち北屋敷では樹高の60%の高さ、荒館では樹高の80%の高さと仮定して、それぞれの $P_{cr}$ を計算した結果、荒館の $P_{cr}$ は $\mu$ が0の場合に589kg、 $\mu$ が林分の平均値 $1.01 \cdot 10^{-7}$ rad/kgf/cmの場合に553kgであった。後者は前者より6%低下したにすぎないことから、この林分の耐力は根元が回転しないものとみなしても大差はないようであった。一方、北屋敷の $P_{cr}$ は、根元が回転しない場合( $\mu=0$ )には257kg、 $\mu$ が林分の平均値 $31 \cdot 10^{-7}$ rad/kgf/cmの場合には184kgとなり、後者は前者より28%低くなった。したがって、北屋敷では根系の支持力の影響を受けて、林木の耐力が実際にはかなり低下しているものと考えられた。以上から冠雪に対する耐力は根元直径が小さくかつ荷重点が低い林木の方が根系の支持力の影響を受けやすいといえる。これらのことから、幼齢期は根元直径が小さくかつ荷重点が低いので、根系の支持力の強い木に育てること、即ち植栽密度を低くして肥大成長を促進する施業が望ましいと考えられた。

### (3)根返りモーメント

冠雪害には、幹折れや曲がりなどのほかに根返りや傾幹など根系の支持力に起因する被害形態がある。これは林木が冠雪荷重を受け幹が変形していく過程において、幹に加わる曲げ応力が破壊応力に達する前に、根元に根返りを起こすモーメントを越える力が加わったときに発生する現象と考えられる。

座主坊および頼成の荷重試験で得られた根返りモーメント( $M_r$ )と $D^2H$ の関係を対数で示し、各調査地毎にみると、 $\log(M_r)$ と $\log(D^2H)$ の間に正の相関が認められたことから(図-38)、大きな林木ほど根返りしにくい傾向があるといえる。しかし、 $D^2H$ と根返りモーメントとの関係は林分によってそれぞれ異なっており、この図の場合は

座主坊の根系の支持力の方が頼成のそれよりも大きいといえる。一般に個体の根量は $D^2 H$ と密接な関係があることが知られていることから（依田，1971），両調査地の根系の支持力の差異は根量以外の差異，たとえば立地条件の差異などに起因することが考えられた。

つぎに，両林分の根返りモーメントと根元の回転係数との関係を示したのが（図-39）である。この図において，根元の回転係数が大きいほど根返りモーメントが小さくなる傾向が認められたことから，冠雪荷重を受けても根元が回転しにくい林木は根返りも発生しにくいといえる。また，座主坊の方が頼成より根元の回転係数の値が小さくかつ根返りモーメントが大きい林木が多かったことから，前者の方が後者よりも根系の支持力が大きな木が多かったといえる。しかし，この図から，根元の回転係数が同じであれば根返りモーメントには林分による差異がないようであった。これを明らかにするために，座主坊と頼成について $\log Mr$ と $\log \mu$ の共分散分析を行ったところ，回帰係数（ $F=2.525$ , d. f. =1, 19）および修正平均（ $F=2.301$ , d. f. =1, 18）についても5%水準で有意性が認められなかった。

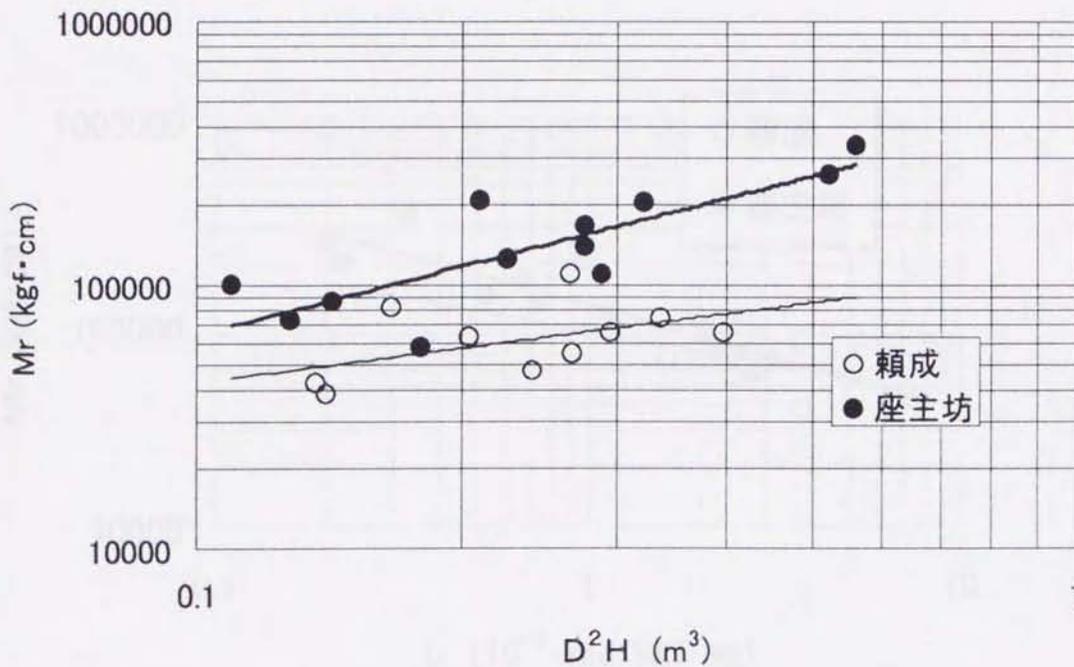


図-38 根返りモーメント( $Mr$ )と $D^2H$ の関係

以上の結果から、両調査地の資料を一括して取り扱っても大きな問題はないようであり、両林分の根返りモーメントと根元の回転係数の関係は1本の回帰線で示すことができ、根返りモーメントを根元の回転係数から推定できると考えられた。両林分から求めた根返りモーメントの根元の回転係数の回帰式は次式で示される。

$$Mr = 31.842 \mu^{-.610} \quad r^2 = 0.828 \quad d. f. = 21 \quad (4.3.3)$$

#### (4)被害形態の判別

冠雪荷重  $P$  を受けた林木は、 $P$  の増大につれて大きく変形し、かつ幹に生じる曲げ応力  $\sigma_x$  も増大し、これが木材の破壊応力を越えた時に幹が折損する。しかし、変形の増大は根元のモーメント

$$M_0 = (\delta + e) P \quad (4.3.4)$$

も同時に増大させる。ここで、 $e$  は偏心量である。したがって、 $\sigma_x = \sigma_{max}$  となる前に、 $M_0$  が先に述べた根返りモーメントに達するならば、幹は根返りするであろう。このことは、事前に曲げ破壊応力や根返りモーメントが与えられるならば、幹折れに要する冠雪荷重

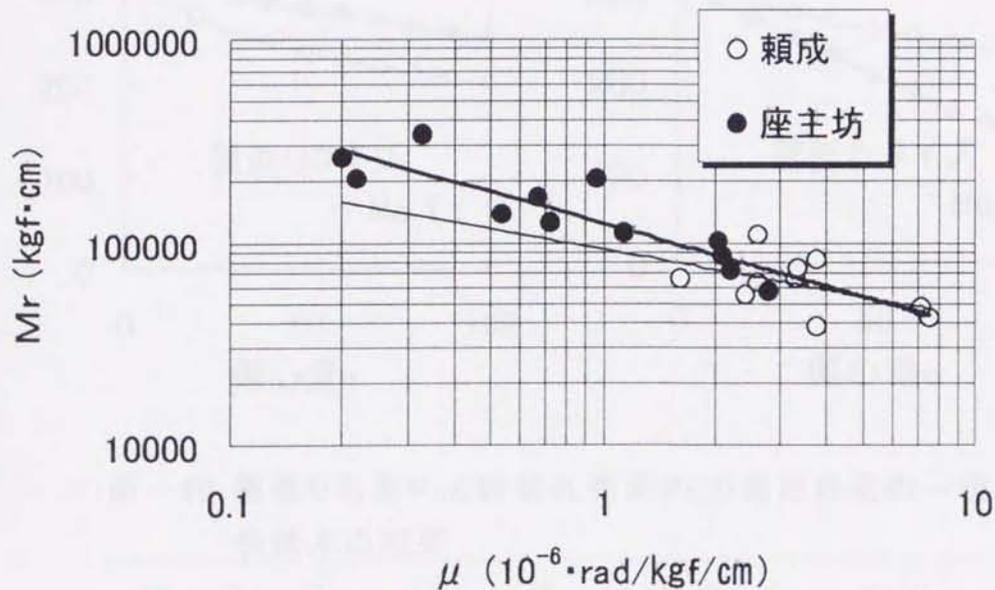


図-39 根返りモーメント( $M_r$ )と根元の回転係数( $\mu$ )の関係

( $P_b$ )、根返りに要する冠雪荷重 ( $P_u$ ) が推定しうることを示唆している。そして、幹折れ荷重か根返り荷重のいずれか小さいほうで幹折れか根返りかが決定されることが考えられる。

$P_b$ は(4.1.4)式に  $\sigma_x = \sigma_{max}$  を代入し、この式を満足する場合の  $P$  の値からえられる。

また、 $M_r$ は(4.1.2)、(4.3.4)式より

$$M_r = (\delta + e) P$$

$$= \gamma e P / (\alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma) \quad (4.3.5)$$

$P_u$ は(4.2.3)式を満足する場合の  $P$  の値から得られる。

そこで、鉛直荷重試験に供した林木を対象に、個々の林木の形状、幹の強度特性、根系の支持力などから  $P_b$  と  $P_u$  を求め、この結果から被害形態の判別を試みた。解析に用いたものは、根返りや幹折れが生ずる前に試験を中止した7本を除く56本である。各供試木の

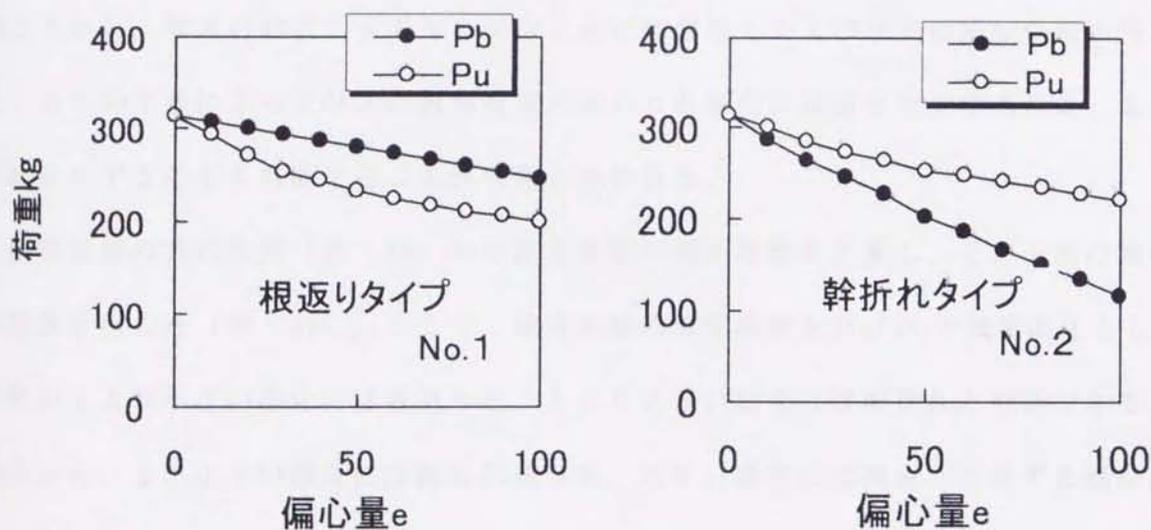


図-40 根返り荷重  $P_u$  と幹折れ荷重  $P_b$  の推定結果の一例  
供試木の概要

No.	$D_o$ (cm)	$D_L$ (cm)	$L$ (m)	$E$ (tonf/cm <sup>2</sup> )	$\mu$ (10 <sup>-6</sup> rad/kgf/cm)	$\sigma_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	15.5	9.4	3.7	79.3	7.64	373
2	14.9	7.2	4.3	28.9	2.02	278

$M_r$ は(4.3.3)式に個々の $\mu$ 値に代入して求めた。また荷重点の偏心量 $e$ はこの実験において実測できなかったが、その値は比較的小さいと考えられたので、0~100cmの範囲で10cm毎に変化させて $P_u$ と $P_b$ を求めた。

二つの供試木(No. 1, No. 2)について $e$ を変化させた場合の $P_u$ と $P_b$ の計算結果を示した(図-40)。 $P_u$ および $P_b$ は $e$ が大きくなるほど小さくなる傾向を示すが、左図は $e$ の大きさにかかわらず $P_u$ が $P_b$ より小さいことので、幹折れタイプと判断された。なお $P_u$ と $P_b$ の値が $e$ の変化にともなって入れ替わったのは、供試木56本中4本であったことから、被害形態に及ぼす偏心の影響は小さいと考えられた。

$e$ を10cmとした場合の被害形態の判別結果と実験結果との集計表を示した(表-20)。この判別法による適中率は88%、誤りが5%、 $P_u$ と $P_b$ が等しく判別できなかったものが7%であった。また判別ができなかったものを誤りに含め、判別結果と実験結果との独立性の検定をおこなったところ $\chi^2$ 値が16.43となり、1%水準で有意性が認められた。以上のことから、林木の形状、材のヤング率と曲げ破壊応力および根元の回転係数が得られると、力学的手法によって林木に冠雪荷重が加わった場合に根返りを生ずるのか、または幹折れを生ずるのかを判断することが可能と思われる。

被害形態の判別結果(表-20)から被害形態の判別指数を計算し、それと幹の細り比 $\alpha$ の関係を示した(図-41)。ここで、被害形態の判別指数を $P_u/P_b$ で表すこととし、この値が1より小さい場合には根返りを、1より大きい場合には幹折れと判断できる。この結果から、 $\alpha$ が小さい場合には幹折れ被害を、大きい場合には根返りを生ずる傾向があることがわかる。 $\alpha$ は根元直径に対する荷重点の直径比であるから、荷重点が同じであれば幹が梢殺形のものは幹折れを、また完満なものは根返りを、また完満度が同じであれば荷重点が高い場合には幹折れを、荷重点が低い場合には根返りを助長する傾向があると考えられる。

一般に若齢林では根返り、幹折れとも発生するが、壮齢林では根返りが少なく、被害の大半が幹折れで占められることが多い(高橋, 1977)。この一因として、林齢が高いほど径

級が大きくなるので根元の回転係数が小さくなり、その結果、根返りしにくくなることがあげられる（図-38, 39）。加えて、林齢が高くなるほど枝の枯れ上がりが進み、冠雪の荷重点が高くなるためと考えられる。

表-20 林木の荷重試験による被害形態別本数と力学的な計算による被害形態別本数の関係

		計算による判別本数			計
		幹折れ木	根返り木	判別不可	
観察本数	幹折れ木	42	2	3	47
	根返り木	1	7	1	9
	計	43	9	4	56

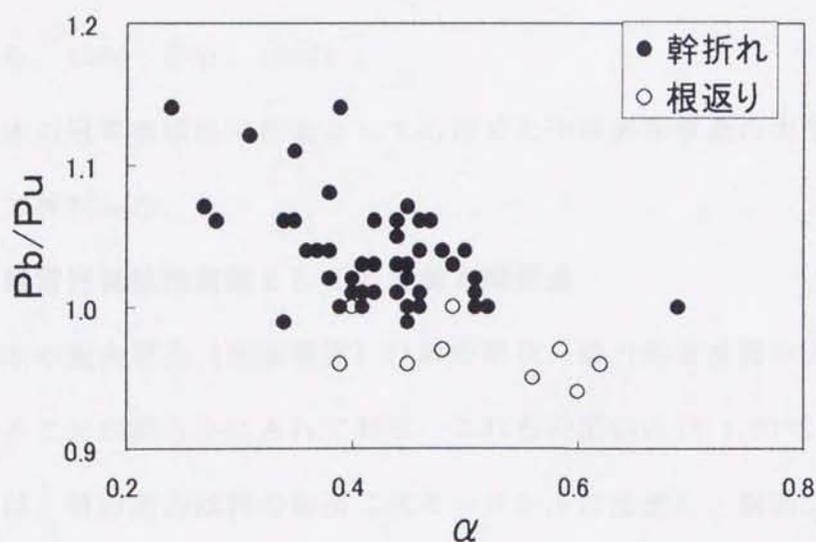


図-41 被害形態の判別係数 ( $P_b/P_u$ ) と幹の細り比 ( $\alpha$ ) の関係