

# 福岡県森林林業技術センター 研究報告

第14号

2013年3月

- ・ **少花粉ヒノキ品種の挿し木増殖技術の確立**  
大川雅史・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1～8
- ・ **福岡県産スギ心持ち平角材の曲げ強度性能について**  
占部達也・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9～16
- ・ **スギにおける引き倒し試験および力学モデルを用いた風害に強い樹形の解明**  
茅島信行・佐々木重行・檜崎康二・・・・・・・・ 17～45



## 少花粉ヒノキ品種の挿し木増殖技術の確立<sup>1)</sup>

大川 雅史

### Establishment of cutting propagation technique of less pollen *Chamaecyparis obtusa* varieties

Masafumi OKAWA

大川雅史：少花粉ヒノキ品種の挿し木増殖技術の確立 福岡県森林研報 14：1～8，2013 「花粉が少ない」という特性を確実にもった苗木を安価に生産するために、少花粉ヒノキ3品種を用いて最適な挿し木環境および発根促進方法について検討を行った。その結果、挿し木の用土は鹿沼土小粒よりもパーミキュライト小粒が適していること、挿し木時期は2月から8月の間であれば時期を選ばないこと、ミスト挿しよりも密閉挿しが優れていることが明らかとなった。発根促進方法については、ブラシノライド処理後にオキシベロンを処理することが有効であること、その際のブラシノライドの処理濃度は1ppbが適していること、密閉挿しよりもミスト挿しでその効果が大きいことが明らかとなった。以上の結果から生産コストを試算したところ、オキシベロンとブラシノライドを併用した密閉挿しが最も安価であることが明らかとなった。

キーワード：ヒノキ、発根率、オーキシシン、ブラシノステロイド、密閉挿し、ミスト挿し

#### 1. はじめに

福岡県のヒノキ森林面積は61,213haで、スギの72,193haに次ぐ第2位の面積を占めている(福岡県農林水産部, 2012)。ヒノキはスギやマツと同じ風媒花であるため、毎年花粉を飛ばしており、福岡県における花粉飛散数はスギ花粉を超える年も報告されている(福岡県医師会, 2012)。県内のヒノキの齢級配置は、雄花生産量がピークを迎える10齢級(全国林業改良普及協会, 2012)を頂点として、10齢級以下のヒノキ森林面積が70%を占めていることから、ヒノキ花粉飛散数は今後も増加することが予想される。

ヒノキ花粉はスギ花粉と共通の抗原を持っているため(斎藤, 1997)、国民の25%以上といわれるスギ花粉症患者(馬場・中江, 2008)の約8割がヒノキ花粉症を発症する(佐橋・花粉情報協会, 2002)。したがってヒノキに対しても、スギと同様に林業サイドからも花粉症対策を実施する必要がある。

そこで当センターでは、独立行政法人森林総合研究所林木育種センター九州育種場や九州各県と協力して、成長や材質が特に優れた精英樹の中から、2007年度に花粉の少ないヒノキ(以下、少花粉ヒノキ)

を開発した(独立行政法人森林総合研究所林木育種センター, 2009)。これら少花粉ヒノキ苗の生産方法は、少花粉ヒノキを交配する実生方式と、挿し木方式の2つが考えられる。一般に実生方式では、種子から苗木を育てるため一度に多くの苗木を生産できるメリットがある。少花粉ヒノキについても、ジベレリンペースト等を用いたミニチュア採種園方式による実生苗生産が試みられている(矢ノ倉・武石, 2012)。しかし、実生方式では交配により形質の異なった苗ができるため、「花粉が少ない」という特性を確実にもつ苗木が生産できるとは限らない。一方、挿し木方式では母樹と同一の形質を持つ個体が得られるため、「花粉が少ない」という特性を確実にもつ苗木を生産できる。しかしながら、ヒノキは、挿し木の容易なスギとは異なり、一部の品種を除いて発根性が劣るといわれている(佐藤, 1971)。したがって、挿し木方式による苗木生産を実現するためには、少花粉ヒノキの発根性を向上させる増殖技術の確立を図る必要がある。

そこで本研究では、少花粉ヒノキに適した用土、挿し木時期、挿し木場所の環境や発根促進方法について検討を行った。

1) 本研究は県単研究課題「少花粉ヒノキ品種の挿し木増殖技術の確立」の中で実施した。

## II. 挿し木試験

### 1. 供試母樹および挿し木条件

供試母樹および挿し木条件は、各試験項目において特に記載しない限り、以下のとおりとした。

#### ①供試母樹

福岡県筑前町にある 1967 年に設定されたヒノキ採種園内の少花粉ヒノキから、県遠賀 1 号、県浮羽 1 号、県藤津 4 号の 3 品種各 1 個体を使用した。

#### ②挿し穂の調整

採取した挿し穂は、一晚流水にさらした後、穂の長さが 15cm になるようにナイフで挿し穂基部を斜め切りし、さらに切断面を返し切りした。また、過度の蒸散を防ぐために挿し穂基部から 2～3 枚の針葉を除去した (図 - 1)。

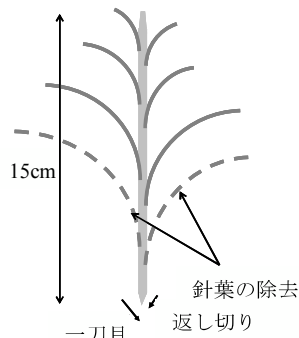


図 - 1. 挿し穂の調整

#### ③挿しつけ本数

1 品種 10 本の 3 反復とした。

#### ④挿しつけ用土

バーミキュライト小粒 (以下、バーミキュライト) を敷きつめた育苗箱 (51×36×10cm) を使用した。

#### ⑤発根促進処理

挿しつけ直前に挿し穂基部をオキシベロン液剤原液 (バイエルクロップサイエンス株式会社製、インドール酪酸 IBA : 19.7mM, 0.4%, 以下、オキシベロン) に 10 秒間浸漬した。

#### ⑥挿し木環境

3 分間の灌水を 1 日 4 回行う自動ミスト装置を設置したガラス温室内とした。

#### ⑦発根調査

挿しつけから 5 ヶ月後に、根系を傷つけないよう挿し穂を掘り取り、発根の有無を調べた。

### 2. 挿し木用土の検討

#### ①目的

挿し木用土の適否は、樹種によって異なることが知られている (森下・大山, 1972)。そこで、用土

の違いが少花粉ヒノキの発根に及ぼす効果について検討した。

#### ②用土

用土は、バーミキュライトのみ (以下、バーミ区)、バーミキュライトと鹿沼土小粒を容積比 1 : 3 で混合した土 (以下、混合区) および鹿沼土小粒のみ (以下、鹿沼区) を使用した。挿し穂は 2009 年 9 月に各品種から 90 本ずつ採取した。

#### ③結果と考察

結果を図 - 2 に示す。最も高い発根率を示したのはバーミ区の 45.6% で、次いで混合区の 41.1% であった。鹿沼区は 23.3% であった。3 つの用土間で発根率に有意差はみられなかったが (Tukey HSD 検定,  $p > 0.05$ )、バーミ区が高い傾向を示した。

この結果から今回用いた少花粉ヒノキ品種の挿し木用土にはバーミキュライトが適していると考えられた。

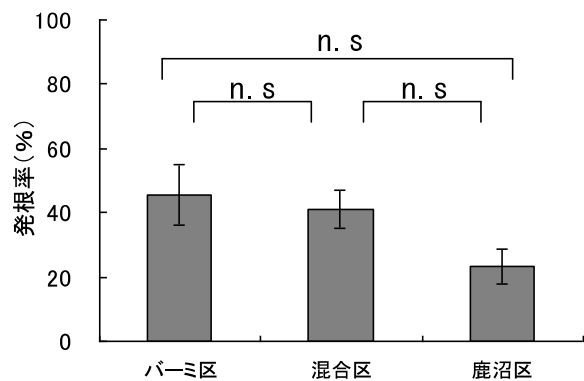


図 - 2. 用土別発根率

垂線は標準誤差を、n.s は有意差がないことを表す。

### 3. 挿し木時期の検討

#### ①目的

一般に、多くの樹種の挿し木では、挿し木時期に適切な時期が存在する。ヒノキについてはこれまでに検討が行われているものの (宮島, 1962; 永吉, 1966)、少花粉ヒノキにもこれを適用してよいか確認する必要がある。そこで、挿し木時期の違いが少花粉ヒノキの発根に及ぼす効果について調査した。

#### ②挿し木期間

挿し穂は、2010 年 10 月から 2011 年 8 月まで 2 ヶ月ごとに各品種から 30 本ずつ採取した。

#### ③結果と考察

結果を図 - 3 に示す。発根率は、10 月が 15.6%、12 月が 16.7%、2 月が 35.6%、4 月が 34.4%、6 月が 33.3%、8 月が 25.6% であった。2 月が最も高い

発根率を示したものの、2月から8月までは挿し木時期による発根率に有意差はみられなかった (Tukey HSD 検定,  $p > 0.05$ )。一方、10月と2月から6月、12月と2月から6月までは発根率に有意差がみられた (Tukey HSD 検定,  $p < 0.01$ )。

ヒノキの挿し木時期について宮島 (1962) は、4月末から6月末以外では挿し木時期はさほどこだわる必要はないと報告している。本試験では、2月から8月までの発根率は良好な成績を示したものの、10月と12月の発根率は低くなった。一方、宮島 (1962) は、4月末から6月末の発根率が低下した原因の1つとして、露地挿しでの挿し床の過度な温度上昇と挿し穂の蒸散を述べている。本試験においては、当該時期の発根率が良好な成績であったことから、ミスト灌水等により温度や挿し穂の蒸散を制御できる環境であれば、少なくとも今回用いた少花粉ヒノキ品種については、2月から8月までは挿し木時期を考慮しなくてよいと考えられた。

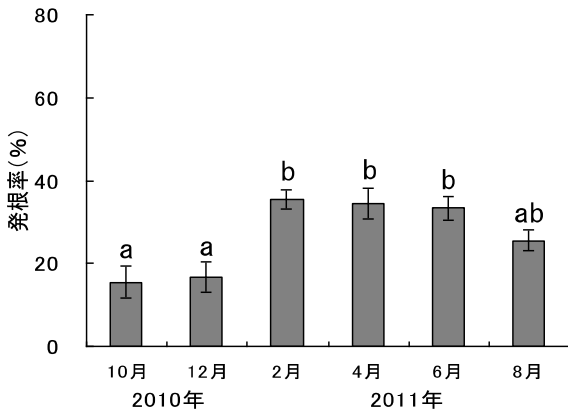


図 - 3. 挿し木時期別発根率

垂線は標準誤差を表す。異なるアルファベットは1%水準で有意差があることを表す。

#### 4. 挿し木環境の検討

##### ①目的

ミスト挿しは挿し穂の蒸散を抑えることができるため、挿し木に適した環境であるが、ミスト装置などの設備費が必要になる欠点がある (町田, 1974)。そのため、低コストで苗木生産を行うためには、設備の簡素化を図る必要がある。戸田・藤本 (1987) は、ヒノキの挿し木環境として、ポリフィルムで密閉したトンネル内に挿す密閉挿しの有効性を指摘している。密閉挿しは、ミスト挿しに比べ設備の簡素化が図れることから、少花粉ヒノキに対する密閉挿しの有効性について検討した。

##### ②環境

環境は、屋外において農業用ポリフィルムで密閉した幅 120cm, 高さ 75cm, 長さ 3m の半円状のトンネルを作り、その上部を遮光率 50% の寒冷紗で覆った密閉区と前項 1 の⑥で記述したガラス温室内 (以下、ミスト区) とした。また、挿し床の温度変化を測定するため、挿し床上部に自動記録温度計 (エスペックミック株式会社製, RT-30S) を設置し、1時間間隔で温度を測定した。挿し穂は 2010 年 3 月に各品種 60 本ずつ採取した。なお、密閉区は 1 週間に 1 回、育苗箱の底から水が出てくるまで灌水を行った。

##### ③結果と考察

結果を図-4に示す。密閉区は 64.4% とミスト区の 40.0% に比べて有意に高い発根率を示した (対応のある  $t$  検定,  $p < 0.05$ )。一方、挿し木開始から調査終了までの地際平均気温は、密閉区、ミスト区ともに 22.6°C であった。しかし、ヒノキの挿し木から発根までに必要な日数が、20~25 日であるとの報告 (町田, 1974) から、挿し木から 4 週間後まで (28 日間) の平均気温を比較したところ、密閉区が 16.3°C, ミスト区が 14.1°C で、密閉区が 2.2°C 高い値を示した。

本試験において、密閉挿しがミスト挿しに比べ高い発根率を示し、戸田ら (1987) の結果と一致していた。ヒノキ挿し床の発根適温に関して、宮島 (1962) は 20°C と報告している。本試験では発根が起きるであろう 4 週目までの日平均地際温度は、発根率が高かった密閉区で 16.3°C とより適温に近かったため、発根が促されたのではないかと考えられた。

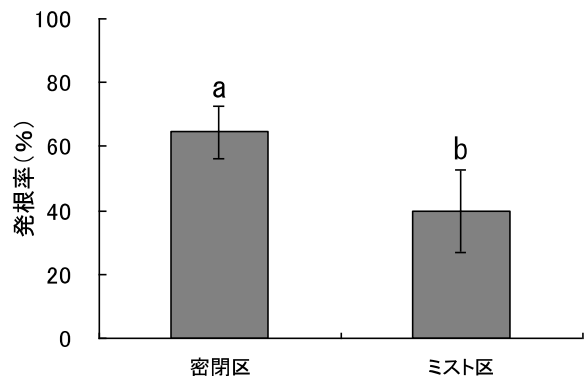


図 - 4. 挿し木環境別発根率

垂線は標準誤差を表す。異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを表す。

## 5. 植物ホルモン（ブラシノステロイド）処理による発根促進効果の検討

### 1) ブラシノライド処理濃度の検討

#### ①目的

竹松ら（1985）は、ブラシノステロイドの一種であるブラシノライドとオーキシンの一種であるナフトアレノ酢酸 1 ppm を併用したタバコのカルス増殖試験において、ブラシノライド濃度 10ppb の場合に増殖したカルス重量が最大を示し、それ以外の濃度ではカルス重量が減少したことを報告している。そこで、併用するブラシノライドの濃度と発根率の関係について調査した。なお、ブラシノステロイドとして、BL10 液（有限会社ブラシノ製、ブラシノライド：0.02mM, 10ppm）を使用し、オーキシンとして、オキシベロンを使用した。

#### ②処理条件

処理は、挿し穂の切り口から 5 cm 程度を①BL10 液 100 万倍希釈液に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、0.01ppb）、②BL10 液 1 万倍希釈液に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、1 ppb）、③BL10 液 100 倍希釈液に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、100ppb）、④蒸留水に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、IBA のみ）とした。挿し穂は 2010 年 3 月に各品種から 120 本ずつ採取し、処理後直ちに挿しつけた。

#### ③結果と考察

結果を図-5 に示す。最も高い発根率を示したのは、ブラシノライド濃度 1 ppb の 68.9%、次いで 100ppb の 56.7%、IBA のみの 40.0%であった。一方、

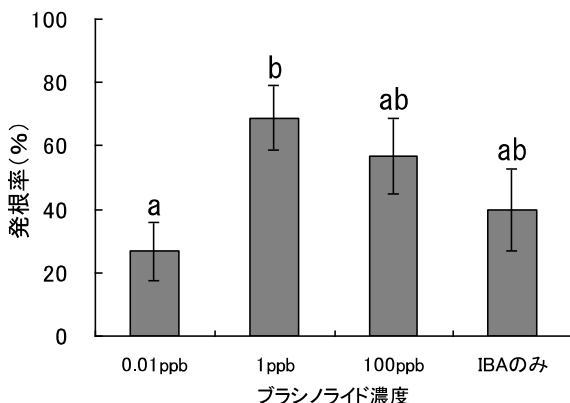


図-5. オキシベロンとの併用処理におけるブラシノライド濃度と発根率

垂線は標準誤差を示す。異なるアルファベットは 5%水準で有意差があることを表す。IBA のみは蒸留水に一晩浸漬後オキシベロンに 10 秒間浸漬した。

0.01ppb では、最も低い 26.7%を示した。ブラシノライド濃度 1 ppb、100ppb は IBA のみよりも発根率が高い傾向を示し、1 ppb は 0.01ppb よりも有意に高い値を示した（Tukey HSD 検定,  $p < 0.05$ ）。

本試験において、ブラシノライド 1 ppb 濃度条件下で発根率が最大を示し、それ以外の濃度では発根率が低下した。このようにブラシノライドはオキシベロンと併用することでヒノキの発根を促進させる可能性があること、さらに植物ホルモンが植物の生理に及ぼす効果については組み合わせるそれぞれのホルモンに最適濃度が存在することが示唆された。

### 2) 処理順番の検討

#### ①目的

前項 1) よりオキシベロンとブラシノライドの併用が少花粉ヒノキの発根促進に有効であることが示唆されたため、本試験ではオキシベロンとブラシノライドの処理順番が発根へ及ぼす効果を調査した。

#### ②処理条件

処理は、挿し穂の切り口から 5 cm 程度を①BL10 液 1 万倍希釈液（1 ppb）に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、BL→IBA）、②オキシベロンに 10 秒間浸漬後、BL10 液 1 万倍希釈液（1 ppb）に一晩浸漬（以下、IBA→BL）、③蒸留水に一晩浸漬後、オキシベロンに 10 秒間浸漬（以下、IBA のみ）とした。挿し穂は 2012 年 3 月に各品種から 90 本ずつ採取し、処理後直ちに挿しつけた。

#### ③結果と考察

結果を図-6 に示す。最も高い発根率を示したのは、BL→IBA の 65.6%で、次いで IBA のみの 41.1%であった。これは、前項 1) で行った結果を極めてよく再現する結果であった。一方、IBA→BL は、最も低い 36.7%を示した。IBA→BL と IBA のみには有意差はみられなかったが（Tukey HSD 検定,  $p > 0.05$ ）、BL→IBA は他の処理に比べて有意に高い値を示した（Tukey HSD 検定,  $p < 0.05$ ）。

Bao *et al.* (2004) は、ブラシノステロイドを添加した培地上で植物体を生育させると、分裂のさかんな根の先端に蓄積するオーキシン量が増加することから、側根形成時にブラシノステロイドがオーキシンの輸送調節をしている可能性を報告している。本試験では、BL→IBA が最大の発根率を示し、逆に IBA→BL では発根率が低かったことから、ブラシノライドによる前処理が挿し穂内のオーキシン量を増加させ、さらに挿し木直前のオキシベロン処理によ

るオーキシシン添加によって発根性が高まったのではないかと推察された。また予備試験において、ブラシノライド単独では全く発根がみられなかったことから、ブラシノライドは単独で発根を促進するのではなく、オキシベロンによる不定根形成促進を補助する役割を担っている可能性が示唆された。

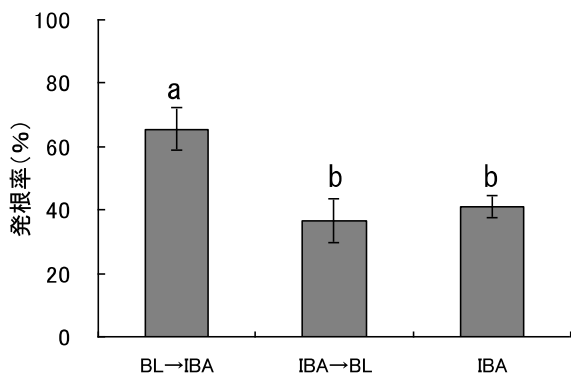


図 - 6. オキシベロンとブラシノライドの処理順による発根率

垂線は標準誤差を示す。異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを表す。BLはブラシノライド、IBAはオキシベロンを表す。

## 6. 挿し木環境と植物ホルモン処理の最適な組み合わせの検討

### ①目的

前項4, 5の結果から、今回用いた少花粉ヒノキ品種の挿し木には密閉挿しが有効であること、発根促進処理はオキシベロンとブラシノライドの併用が有効であることが明らかとなった。したがって、密閉挿しでオキシベロンとブラシノライドを併用すれば、発根率がさらに向上するのではないかと考えられた。そこで、密閉処理と発根処理の組み合わせが発根に及ぼす効果を調査した。

### ②環境および処理条件

環境は、前項4と同じ半円状のトンネルを作り農業用ポリフィルムで密閉した密閉環境と、ガラス温室内に自動ミスト灌水装置を設置したミスト環境とした。処理は、挿し穂の切り口から5cm程度を①BL10液1万倍希釈液(1ppb)に一晩浸漬後、オキシベロンに10秒間浸漬し、密閉環境下に設置(以下、密閉BL→IBA)、②蒸留水に一晩浸漬後、オキシベロンに10秒間浸漬し、密閉環境下に設置(以下、密閉IBA)、③BL10液1万倍希釈液(1ppb)に一晩浸漬後、オキシベロンに10秒間浸漬し、ミスト環境下に設置(以下、ミストBL→IBA)、④蒸留水に一

晩浸漬後、オキシベロンに10秒間浸漬し、ミスト環境下に設置(以下、ミストIBA)とした。挿し穂は2012年3月に各品種から120本ずつ採取し、処理後直ちに挿しつけた。なお、母集団の等分散性が棄却されたため、多重比較はノンパラメトリック検定(Steel-Dwass検定)で行った。

### ③結果と考察

結果を図-7に示す。発根率は、密閉BL→IBAが66.7%、密閉IBAが60.0%、ミストBL→IBAが65.6%、ミストIBAが41.1%となった。最も高い発根率を示した密閉BL→IBAは、ミストIBAと有意差がみられたが( $p < 0.05$ )、その他の処理とは有意差はみられなかった( $p > 0.05$ )。

本試験において、密閉挿しではオキシベロンとブラシノライドの併用処理による発根促進効果は小さかったが、ミスト挿しでは同処理は、発根率を向上させる有効な手段であると考えられた。

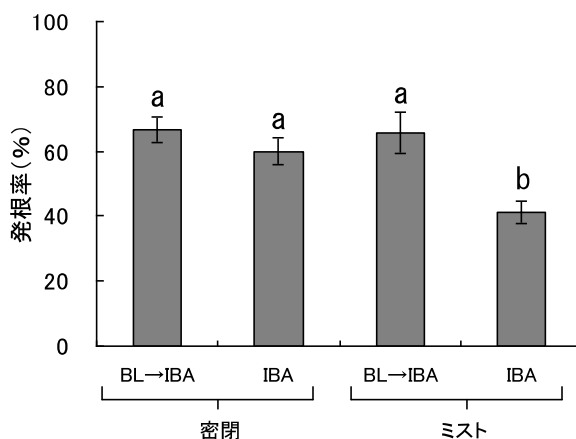


図 - 7. 異なる環境下でのオキシベロンとブラシノライドの併用処理による発根率

垂線は標準誤差を示す。異なるアルファベットは5%水準で有意差があることを表す。BLはブラシノライド、IBAはオキシベロンを表す。

## 7. 生産コストの評価

### ①目的

育苗コストは苗木単価に影響してくることから、各試験における生産コストを試算し、低コストで苗木生産が可能な方法を検討した。

### ②生産方法

試算に用いた生産方法は、これまでの試験で発根率が良かった①ミスト環境でオキシベロンを使用し、バーミキュライトに挿し木(以下、条件1)、②ミスト環境でオキシベロンとBL10液1万倍希釈

液（1 ppb）を併用処理して、バーミキュライトに挿し木（以下、条件2）、③密閉環境で、オキシベロンを使用して、バーミキュライトに挿し木（以下、条件3）、④密閉環境でオキシベロンと BL10 液 1 万倍希釈液（1 ppb）を併用処理して、バーミキュラ

イトに挿し木（以下、条件4）とした。発根率は、これまでの試験で得られた値の平均値を用いた（表-1）。単価は、ガラス温室およびミスト装置は大平ら（2009）の値を、その他は実際の購入価格を使用した。なお、人件費、光熱費等は含めていない。

表 - 1. コスト試算における挿し木条件および発根率

条件	用土	挿し木環境	発根促進処理 <sup>1)</sup>	発根率 (%) <sup>2)</sup>
1	バーミキュライト小粒	ミスト	オキシベロン（以下、IBA）のみ	42.2
2	バーミキュライト小粒	ミスト	BL10液（以下、BL）と IBA	67.2
3	バーミキュライト小粒	密閉	IBAのみ	62.2
4	バーミキュライト小粒	密閉	BLと IBA	66.7

1) 発根促進処理は、オキシベロン液剤原液（IBA：0.4%）および BL10 液 1 万倍希釈液（ブラシノライド：1ppb）を使用。

2) 発根率は各試験（2010～2012 年）における発根率の平均値。

表 - 2. 発根した少花粉ヒノキ 1 万本を生産するのに必要なコストの試算

条件	1	2	3	4
発根した苗木 1 万本生産するのに必要な挿し穂数（本） <sup>1)</sup>	24324.0	15254.0	16667.0	15000.0
用土コスト（円） <sup>2)</sup>				
育苗箱	16856.8	10571.2	11550.0	10395.0
バーミキュライト小粒	101189.5	63457.6	69333.3	62400.0
小計	118046.3	74028.8	80883.3	72795.0
環境コスト（円） <sup>3)</sup>				
温室	36728.8	23421.2	-	-
ミスト装置	149377.0	149377.0	-	-
ポリフィルム	-	-	13065.0	11700.0
支柱	-	-	103.5	95.0
小計	186105.8	172798.2	13168.5	11795.0
発根促進処理コスト（円） <sup>4)</sup>				
オキシベロン	24470.3	24470.3	16766.7	15090.0
ブラシノライド（1 ppb）	-	70.2	-	69.0
小計	24470.3	24540.5	16766.7	15159.0
合計（円） <sup>5)</sup>	328622.4	271367.5	110818.5	99749.0
1 本当たりの生産コスト（円）	32.9	27.1	11.1	10.0

1) 挿し穂数は表 - 1 の発根率より算出。

2) 育苗箱 1 箱にバーミキュライト小粒を 16L 使用して 50 本挿しつくと仮定。

3) 温室およびミスト装置単価は大平ら（2009）の値を使用。

4) 発根促進処理は、オキシベロン液剤原液（IBA：0.4%）および BL10 液 1 万倍希釈液（ブラシノライド：1ppb）を使用。

5) 温室、ミスト装置以外の資材費は実際の購入単価を使用し、人件費、光熱費および育苗費は含めていない。



### ③結果と考察

発根した少花粉ヒノキ1万本を生産するのに必要な生産コストの試算結果を表-2に示す。ミスト環境下で挿し木した条件1の総額は約33万円、条件2では、約27万円となった。一方、密閉環境下で挿し木した条件3の総額は約11万円、条件4では約10万円となった。条件4は、条件1よりも約23万円の大幅なコストダウンとなった。

### Ⅲ. まとめ

本研究では、少花粉ヒノキの最適な挿し木環境および発根促進方法の検討を行った。少花粉ヒノキの生産コストも試算した。その結果、挿し床の用土は鹿沼土よりもパーミキュライトが適していること、挿し木時期は2月から8月の間であれば時期を選ばないこと、ミスト挿しよりも密閉挿しが優れていることが明らかとなった。発根促進方法については、ブラシノライド処理後にオキシベロンを処理することが有効であること、その際のブラシノライドの処理濃度は1ppbが適していること、密閉挿しよりもミスト挿しでその効果が大きいことが明らかとなった。生産コストについては、オキシベロンとブラシノライドを併用した密閉挿しが最も安価であることが明らかとなった。

以上のことから、少花粉ヒノキの挿し木苗生産にあたっては、ミスト挿しよりもオキシベロンとブラシノライドを併用した密閉挿しが有効であると考えられた。しかし、密閉挿しは高温期に挿し床の温度が高くなりやすく、活着率が落ちることが報告されている(町田, 1974)。したがって、低温期には密閉挿しを行い、高温期にはミスト挿しを行うなど、季節にあわせた挿し木方法を選択する必要があると考えられた。

苗の生産コストは発根率に大きく影響しているため、今後、発根率の年変動や少花粉ヒノキ品種による発根率の違いを明らかにする必要がある。また、発根促進効果が高かったオキシベロンとブラシノライドの併用処理については、ブラシノライドの濃度を細かく設定し、最も高い発根促進効果のある濃度を明らかにする必要がある。

### 謝 辞

本研究を実施するにあたり、福岡県朝倉農林事務所の方々には、試料採取にご協力いただいた。当センター山下正宏、堤 昭広、矢ヶ部久美子、国武佳代子の各氏には試料の調整、実験補助にご協力いただいた。ここに厚くお礼を申し上げます。

### 引用文献

- 馬場廣太郎・中江公裕 (2008) 鼻アレルギーの全国疫学調査 2008 (1998年との比較) -耳鼻咽喉科医およびその家族を対象として-。Progress in Medicine 28 : 2001-2012.
- Bao, F.F., Shen, J.J., Brady, S.R., Muday, G.K., Asami, T.T., and Yang, Z.Z. (2004) Brassinosteroids interact with auxin to promote lateral root development in *Arabidopsis*. Plant Physiol. 134 : 1624-1631.
- 独立行政法人森林総合研究所林木育種センター (2009) 花粉症対策品種の開発 -林木育種からのアプローチ-. 6pp.
- 福岡県医師会 (2012) 九州花粉情報 20年のあゆみ. 118pp.
- 福岡県農林水産部 (2012) 平成23年度福岡県林業統計要覧. 150pp, 福岡県.
- 町田英夫 (1974) さし木のすべて. 261pp, 誠文堂新光社, 東京.
- 宮島 寛 (1962) ヒノキ栄養系の育成に関する基礎研究. 九大演報 34 : 104-111.
- 森下義郎・大山浪雄 (1972) 造園木の手引き -挿し木の理論と実際-. 367pp, 地球出版, 東京.
- 永吉清光 (1966) ヒノキ挿木事業化試験について. 日林九支講 20 : 75-77.
- 大平峰子・倉本哲嗣・藤澤義武・白石 進 (2009) マツ材線虫病抵抗性クロマツのさし木苗生産における密閉さしの有効性. 日林誌 91 : 266-276.
- 佐橋紀男・花粉情報協会 (2002) ここまで進んだ花粉症治療法. 190pp, 岩波書店, 東京.
- 斎藤洋三 (1997) これだけは知っておきたい花粉症. 143pp, NHK 出版, 東京.
- 佐藤敬二 (1971) 日本のヒノキ <下巻>. 361pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 竹松哲夫・竹内安智・古口正巳 (1985) 新しい植物

調節物質 ブラシノライド類の生理作用と農業  
および生物生産への利用. 植物調節 18 (12) :  
2-15.

戸田忠雄・藤本吉幸 (1987) ヒノキのさし木に関する研究 (Ⅲ) -さし木代数効果-. 日林九支研  
論 40 : 69-70.

矢ノ倉政広・武石洋一 (2012) 花粉の少ないヒノキ  
のミニチュア採種園管理技術の開発. 茨城県林  
業技術センター業務報告 49 : 7-8.

全国林業改良普及協会 (2012) 平成 23 年度森林環境  
保全総合対策事業 スギ・ヒノキ花粉発生源  
地域推定事業報告書. 152.

## 福岡県産スギ心持ち平角材の曲げ強度性能について<sup>1)</sup>

占部 達也

### Bending properties of Sugi boxed-heart flat square timber in Fukuoka Prefecture

Tatsuya URABE

占部 達也：福岡県産スギ心持ち平角材の曲げ強度性能について 福岡県森林研報 13：9～16, 2013  
資源が増加する県産スギ大径材の横架材としての需要拡大を図るため、県内各地から集めたスギ心持ち平角材を対象に JAS に基づく等級別の出現割合調査や曲げ強度試験を行い、品質や強度性能について調べた。目視等級区分では全体の 87.5%が甲種 2 級以上で、機械等級区分では E70 以上が 77.5%であった。強度試験の結果、曲げヤング係数、曲げ強さともに平均値は全国値とほぼ同等で、値のばらつきは小さかった。また、横架材の設計に供する曲げ強度性能値として評価した結果、E90 の曲げヤング係数が法令等で定める値をやや下回ったものの、それ以外の等級では法令等の値を上回る、もしくは同等ということを確認した。これらの結果を踏まえ設定した、材料区分毎の設計用強度性能値は、福岡県産材利用推進協議会発行の「福岡県産スギ横架材スパン表」に活用された。

キーワード：福岡県産スギ、心持ち平角材、曲げヤング係数、曲げ強さ、目視等級区分、機械等級区分

#### 1. 背景と目的

福岡県内民有林におけるスギ人工林は、戦後の復興、経済成長期の 1950 年代から 1960 年代を中心に植林されたもので、その蓄積量は約 2,800 万  $m^3$  に及ぶ。このうち、10 級以上が約 2,000 万  $m^3$  と全体の 7 割を占め、その多くが利用期を迎えている（平成 23 年福岡県林業統計要覧）。しかしながら、長引く材価低迷等により、県内におけるスギの素材生産量は、1998 年以降 10 万  $m^3$  前後で推移しており、今後素材生産量が一定レベルで増加すると仮定しても、スギ人工林の高齢化傾向は続くと予想される。これらのスギ人工林から生産される大径材は、これまでの柱材を主体とした利用では製材の歩留まりが低いこと等により、中目材に比べ 1  $m^3$  当たりの素材価格は 1 割程低く取引されている（福岡県森連浮羽事業所出来値表）。材価向上のためにも、スギ大径材の新たな用途開発等による需要拡大が課題となっている。

スギ大径材の用途の一つとして、木造住宅等に使用される梁や桁等の横架材が挙げられる。現在、木造軸組構法住宅に使用される横架材は輸入材が大半を占め、国産材は集成材を含めても 7% に留まり（日本木造住宅産業協会、2010）、横架材への国産材利

用が期待できる（林野庁、2011）。

横架材は、構造材の中でも強度、特に曲げ強度性能に対する要求が高い部材である。また、横架材に生じるたわみの制限値が法令（建設省、2000）で規定されており、住宅性能表示制度における構造の安定に関するチェック項目の一つとなっている。これまであまり使われていないスギ横架材を普及するためには、県産スギ材の横架材としての性能を明らかにするとともに、構造計算に供する強度データを整備し、消費者が安心して使える環境をつくることが重要である。

特に、スギは、曲げヤング係数が広い範囲でばらつきがあること（飯島、1983；小松、1988）、また、曲げヤング係数と曲げ強さとの相関に地域間で差があること（木構造振興、2011）が報告されている。県産スギ材の横架材としての強度性能を明らかにし、法令等（日本建築学会、2006；国土交通省、2007）で示す値を満足するかを確認することが必要である。

福岡県では、これまで柱適寸丸太の心持ち柱材利用を主眼に県産スギ材の材質調査を実施してきた（例えば、占部ら、1995）。しかしながら、横架材に関する材質データは少なく、県内スギ人工林から供給される大径材の品質やその割合等資源の質的な

1) 本報告は、県単研究課題「スギ大径材の材質特性の把握と大径材を活かした製品開発」（平成 21～23 年度）、林野庁補助事業「地域における木のまち・木のいえ環境整備事業」（平成 22 年度）を活用し実施したものである。

実態が把握されていない。

県産スギ材の横架材としての利用を促進するため、本研究では、スギ心持ち平角材を対象に日本農林規格協会(2007)の構造用製材の規格(以下、JAS)に基づいて等級別の出現割合を把握するとともに、実大材による曲げ試験を実施した。得られた県産スギ横架材の曲げ強度性能をもとに、横架材の構造計算に用いる設計用強度性能評価を行った。

## II. 試験体と試験方法

### 1. 供試材

原木には、図-1に示す福岡県内4つの地域(飯塚、朝倉、筑後、行橋農林事務所管内)で生育したスギ大径材(末口径32~36cm,直材)を各地域50本(行橋49本)用いた。

これらの丸太を福岡県うきは市内の製材所で製材し、高周波併用蒸気式乾燥機で7日間乾燥後、モルダー加工を行ったスギ心持ち平角材(120mm×240mm×4m)計199本を試験体に用いた(表-1)。

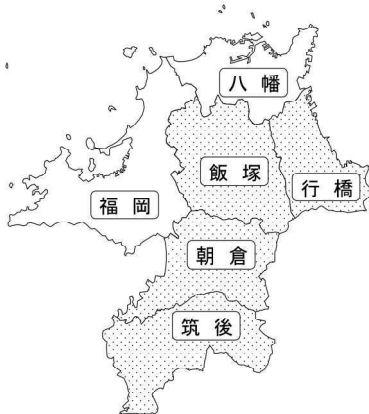


図-1. 原木の採取地域

福岡県を農林事務所管轄区域ごとに6つに区分し、網掛けの区域から採取した。

表-1. 試験体の概要

樹種	材種	産地*	N
スギ	心持ち平角 (120mm×240mm×4m)	朝倉	50
		飯塚	50
		筑後	50
		行橋	49
		合計	199

\*福岡県の農林事務所管内名

### 2. JASに基づく等級区分

これらのスギ平角材をJASの目視等級区分および

機械等級区分構造用製材の規格に準じ、節径比や曲がり、平均年輪幅等の材面の品質調査を実施した。さらにFFTアナライザー(リオン社,SA-78)を用いて縦振動法により動的ヤング係数を計測した。

これらの測定結果をもとに、JASの各等級区分における格付を行い、等級別の出現割合や等級の決定因子について調べた。

### 3. 曲げ試験方法

曲げ試験は、「構造用木材の強度試験法」(日本住宅・木材技術センター,2000)に準拠し、実大材強度試験機(前川試験機,IP-100B-B2)を用いて、支点間距離3640mm,荷重点間距離1214mmの3等分4点荷重方式により実施した(図-2)。クロスヘッドの降下速度は15mm/minに設定し、たわみはスパン中央の中立軸上で電気抵抗式変位計(東京測器,DP-500C)を用いて計測した。計測した荷重およびたわみをもとに、曲げヤング係数および曲げ強さを算出した。

含水率は、曲げ試験実施直後に、試験体の両木口から80cm前後の健全部にて、厚さ約2cmの試験片を採取し全乾法により計測した。

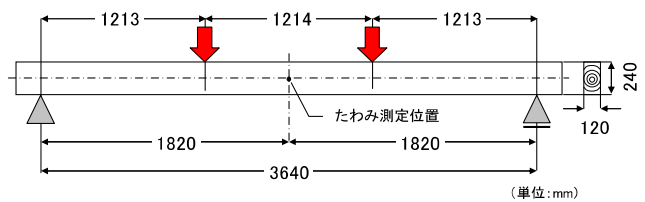


図-2. 曲げ試験方法

### 4. 強度性能値の標準試験条件への調整方法

試験で得られた各強度性能値は、上記試験法(日本住宅・木材技術センター,2000)において標準とする断面寸法(梁せい:150mm)および荷重条件(支点間距離:梁せいの18倍)に調整した。

また、同試験法では試験時の標準含水率を15%とし、標準含水率への調整方法をいくつか例示している。このうちのひとつで、強度性能研究会(2005)で規定するASTM(1985)のD2915に準じて調整を行った。

なお、横架材は断面寸法が大きいので、柱材等に比べ乾燥に非常に手間がかかる。今回用いた試験材は人工乾燥であるが、含水率20%以下は全体の6割にとどまる。このため、現状では含水率20%以上の材も流通するものと想定し、強度性能値の調整を行った。具体的には、上記方法を基本とし、標準に比べ低い材(含水率15%以下)は含水率15%時までで低

減させ、高い材 (同 22%以上) は 22%とみなし安全側の調整を行った。実測含水率が 15~22%であれば実測値とした。

**5. 曲げ強度性能値の評価方法**

標準試験条件に調整した試験データをもとに、JAS の各等級区分に対応させて、横架材の設計に供するスギの曲げ強度性能値の算出を行った、評価に当たっては、建設省建築指導課 (1996) の「木材の材料強度に関する評価基準」および日本建築学会 (2006) の基準弾性特性値の考え方に準じた。具体的には、曲げヤング係数は、正規分布と仮定した場合の信頼水準 75%の 50%下側許容限界値 (以下、50%下限値) を求めた。曲げ強さは、分布形の推定と検定を行い、最も適合度の高い分布パラメータをもとに信頼水準 75%の 5%下側許容限界値 (以下、5%下限値) を算出した。なお、統計処理には、木質構造研究所が開発した「強度データの解析シート mini」 (堀江, 1997) を活用した。

**Ⅲ. 結果と考察**

**1. 目視等級区分による格付**

**1) 目視等級区分材の等級別出現割合**

目視等級区分 (甲種構造用Ⅱ) の品質基準に基づく等級別の出現割合を図-3に示す。2級が 50.8%で最も多く、1級の 36.7%と合わせて2級以上が 87.5%を占めた。3級は 5.5%、等級外が 7.0%となった。

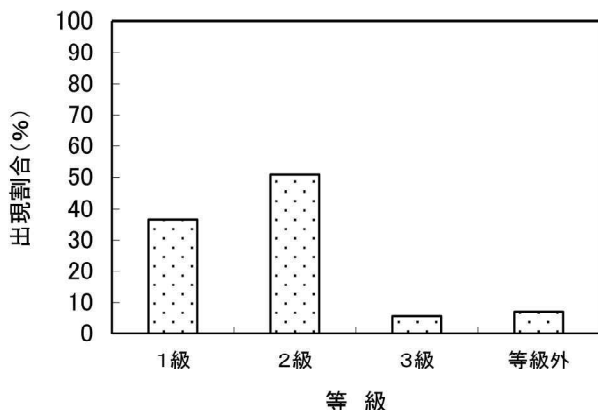


図-3. 目視等級区分材の等級別出現割合 (甲種構造用Ⅱ)

**2) 目視等級区分における等級決定因子**

目視等級区分における各等級を決定した因子を見るため、材面の品質項目別に見た各等級の出現割合

を図-4に示す。節径比で等級が下がるものが最も多く、次いで曲がり、平均年輪幅となっている。また、平均年輪幅では3級および等級外は無く、腐朽や貫通割れの欠点はほとんど見られなかった。その他としては外傷等による入皮や変色等である。

JAS の等級区分では、全品質項目のうち最も下位のランクで決定される。特に横架材は、柱材に比べ節径比の品質基準が厳しく、今回の結果もそれを反映した結果となった。

等級外 (14本) の等級決定因子としては、曲がりの基準値を超えたものが 11本と大半を占めた。曲がりについては、モルダー工程の見直しや品質管理の徹底により品質改善が可能と考えられる。一方、等級外のうち、節径比の基準を超えたことで等級外になったものは 1.5% (3本) と極めて少なく、枝打ち等の施業が徹底していたものと考えられた。今後もこのような手入れにより、生産される材の品質が維持、継続されることを期待したい。

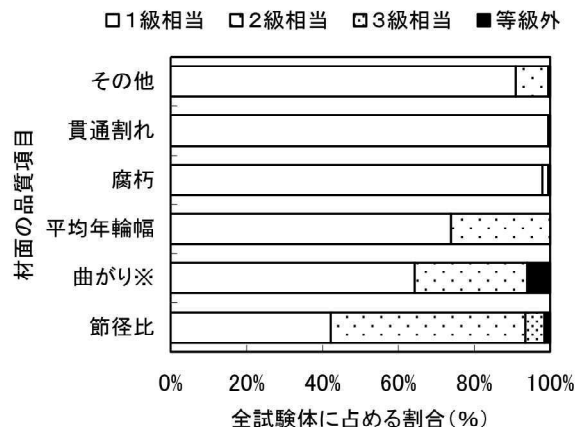


図-4. 材面の品質項目別の各等級出現割合 ※「曲がり」は2級、3級の基準が同じ。「その他」は、入皮や変色など。

**2. 機械等級区分による格付**

**1) 機械等級区分材の材面の品質調査**

機械等級区分に基づき材面の品質調査を実施した結果、節径比、曲がり、腐朽、貫通割れ等の品質基準において全本数が合格した。これは、機械等級区分では、曲げヤング係数の計測により一定の性能が担保されていることから、材面の品質基準が目視等級区分の乙種3級レベル相当となり、節径比や曲がりの基準が緩和されていることによる。

**2) 機械等級区分材の等級別出現割合**

機械等級区分による等級別出現割合を図-5に示す。E70が 62.8%と最も多く、次いでE90が 19.1%、

E50が16.1%, E110が1.5%となった。等級外は0.5% (199本中1本)であった。

この結果から、例えば「スギE70以上」の注文に対し県産材で供給する場合、仕入れた材のうち83.4%が供給可能ということになる。なお、全国から集めたスギのデータ(強度性能研究会, 2005)ではE70以上は77.5%であり、全国レベル以上の割合であった。

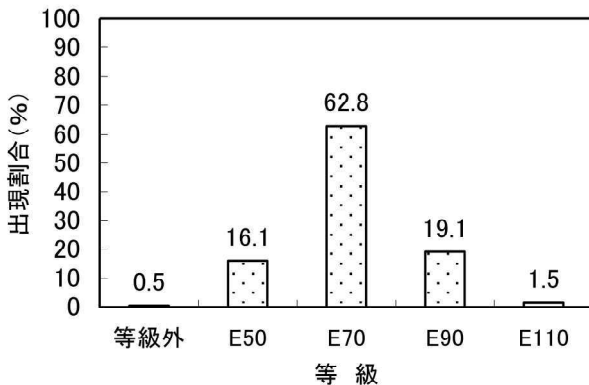


図-5. 機械等級区分材の等級別出現割合

### 3) 曲げ試験結果

曲げ試験の結果を表-2に示す。各強度性能値は、前述の標準試験条件に補正したものである。気乾密度は平均0.404g/cm<sup>3</sup>、平均年輪幅が5.4mmである。試験時の平均含水率は21.8%で、試験時の標準とする含水率(15%)と比べて高いものが多く含まれていた。

曲げヤング係数は、平均6.98kN/mm<sup>2</sup>(変動係数16.2%)、曲げ強さが同39.8N/mm<sup>2</sup>(同16.8%)であった。これらを全国データ(強度性能研究会, 2005)と比較すると、平均値では曲げヤング係数および曲げ強さともに全国値の98%となった。含水率による調整を安全側で行ったことも考慮すると、全国レベルとはほぼ同等の性能を有すると考えられる。

値のばらつきを表す変動係数は、曲げヤング係数、曲げ強さの全国値がそれぞれ23.9%、21.2%に対し、福岡県産は16.2%、16.8%であった。サンプル数等が異なり単純には比較できないが、産地を県内に限定したことで材質のばらつきが抑えられたものと考えられる。なお、図-6, 7に示すように曲げヤング係数、曲げ強さともに相応のばらつきがあり、機械等級区分の実施等による合理的な利用が望まれる。

表-2. 曲げ試験結果(全試験体)

	気乾密度※ (g/cm <sup>3</sup> )	平均 年輪幅 (mm)	試験時 含水率 (%)	曲げヤング 係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )
平均値	0.404	5.4	21.8	6.98	39.8
最大値	0.504	8.0	78.9	10.61	60.6
最小値	0.339	2.4	6.8	3.74	23.5
標準偏差	0.035	1.0	15.1	1.13	6.7
変動係数 (%)	8.8	19.5	69.1	16.2	16.8

※含水率15%時に補正した密度

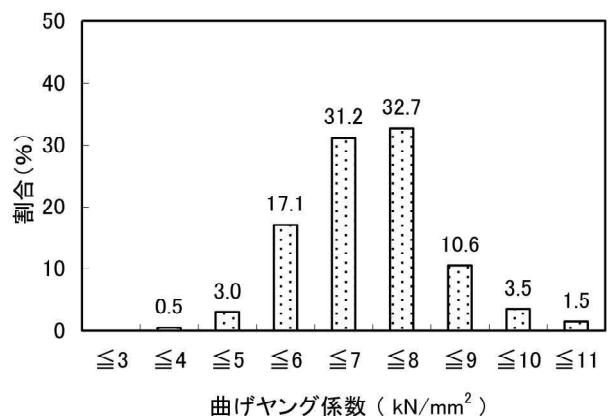


図-6. 曲げヤング係数の分布

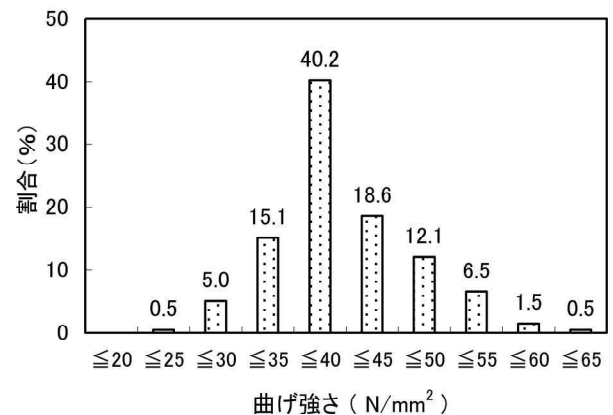


図-7. 曲げ強さの分布

## 4. 各強度性能値間の関係

### 1) 動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係

縦振動法による機械等級区分を実施する方法は比較的簡易な方法であるが、動的ヤング係数と曲げヤング係数との関係が明確であることを前提としている(全国木材検査・研究協会, 2010)。

本結果では、両者との間に高い相関( $p < 0.01$ )が

認められた (図-8)。心持ち平角材においても、正角材 (例えば占部ら, 1999; 村上ら, 1999) と同様に、縦振動法により高い精度で曲げヤング係数を推測できることを確認した。

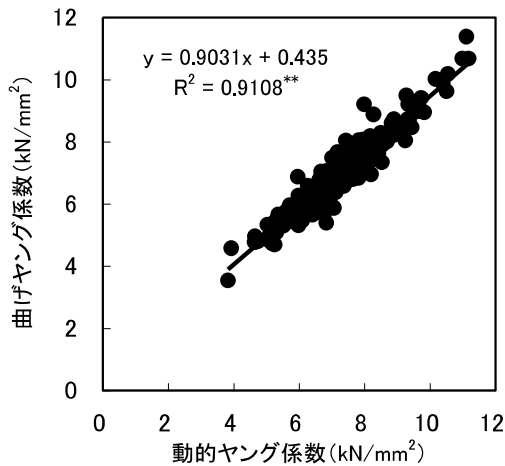


図-8. 動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係

## 2) 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

曲げ試験で実測した曲げヤング係数と曲げ強さとの関係を図-9に示す。全体としては、曲げヤング係数が高いほど曲げ強さが大きくなり、両者の間に高い相関が見られた ( $p < 0.01$ )。一方、含水率20%を境に含水率の高いグループと低いグループとに分けると、両グループ間で曲げヤング係数と曲げ強さの相関の強さが異なった。含水率が高いグループが、低いグループに比べ、両強度性能値が低い方にシフトしている。その要因は明らかにしていないが、含水率が高い試験体で、加力面側に圧縮破壊を先行して生じるものも多く見られた。この場合、荷重は伸びずに変形のみが増大し、圧縮破壊が進行し破壊に至るケースが多く、圧縮側で含水率の影響が大きく現れたものと推察された。

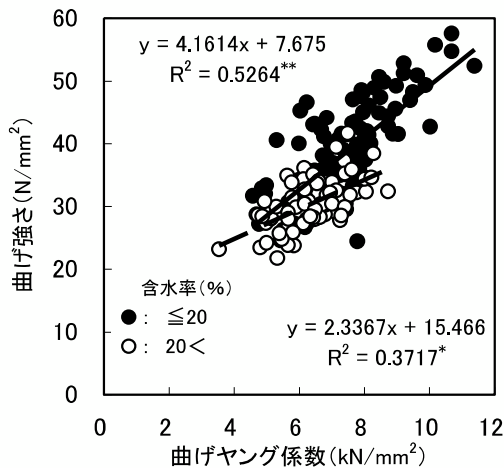


図-9. 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

●: 含水率20%以下、○: 含水率20%より大きい

## 5. 各等級区分における曲げ強度性能

各等級区分における曲げ強度性能を比較するため、等級別の曲げヤング係数および曲げ強さについてそれぞれ図-10, 11に示す。

目視等級区分では、等級が上がるにつれ曲げヤング係数の平均値はわずかに高くなるものの、等級間での差は明確でなく、等級内での値のばらつきも無等級材とあまり変わらなかった。また、曲げ強さについても、同様に等級間における差は小さく、いずれの等級も無等級材とほぼ同様な値であった

一方、機械等級区分では、曲げヤング係数で格付するため、等級間で曲げヤング係数の平均値の差が明確 ( $p < 0.05$ ) となり、各等級内でのばらつきも小さかった。また、曲げ強さも同様に等級間で平均値に差が見られた ( $p < 0.05$ )。

横架材は構造の安定に関わる重要な部材であることを考えると、性能が明確な機械等級区分材として横架材を供給していくことが、消費者の安心につながると言える。

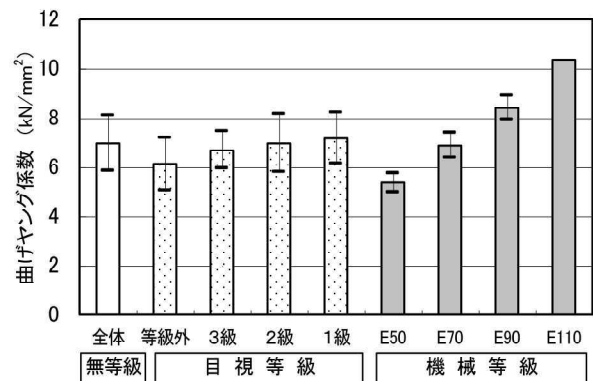


図-10. JAS 等級別の曲げヤング係数  
平均値±標準偏差を表す。

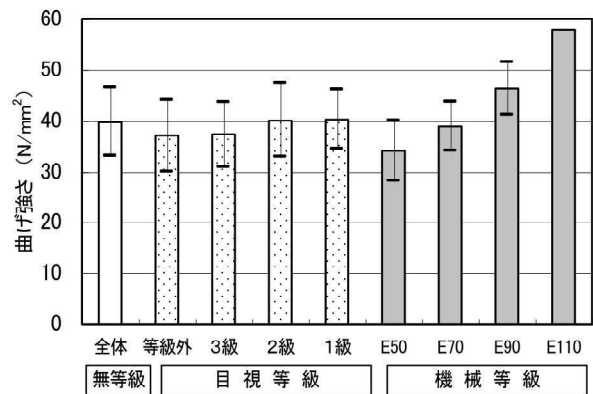


図-11. JAS 等級別の曲げ強さ  
平均値±標準偏差を表す。

### 6. 設計用強度性能値の算出

設計に用いるスギの曲げ強度性能値は法令等で定められ、具体的には、曲げヤング係数は日本建築学会（2006）が「基準弾性係数」として、目視等級区分材は50%下限値および5%下限値、機械等級区分材では各等級の中間値および等級下限値としている。一方、曲げ強さについては、国土交通省（2007）で「曲げの基準強度」としてそれぞれJASの等級区分毎に示されている。これらと同様な評価方法で目視等級区分および機械等級区分ごとに算出した結果をそれぞれ表-3、4に示す。

目視等級区分材の曲げヤング係数は、50%下限値では1級および2級で基準弾性係数とほぼ同等となったが、3級についてはやや下回った。5%下限値はいずれの等級も上回った。また、曲げ強さの5%下限値は、いずれの等級も基準強度を上回った。等級区分しなかった場合、つまり199本全体（以下、無等級材）では、曲げヤング係数の50%下限値は基準弾性係数とほぼ同等で、5%下限値は基準強度を3割ほど上回る結果となった。

表-3. 目視等級区分材の曲げ強度性能値

区分	N (本)	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )					曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
		試験結果		建築学会の基準弾性係数 <sup>※3</sup>			試験結果		告示 <sup>※4</sup> 曲げの基準強度
		平均値	50% 下限値 <sup>※1</sup>	5% 下限値 <sup>※2</sup>	50% 中間値 <sup>※1</sup>	5% 下限値 <sup>※2</sup>	平均値	5% 下限値 <sup>※2</sup>	
1級	73	7.2	7.1	5.5	7.0	4.5	40.3	31.1	27.0
2級	101	7.0	6.9	4.9	7.0	4.5	40.1	28.7	25.8
3級	11	6.7	6.5	5.3	7.0	4.5	37.3	26.0	22.2
等級外	14	6.1	5.9	4.3	-	-	37.0	25.0	-
全体 (無等級)	199	7.0	6.9	5.0	-	-	39.8	29.4	22.2

※1 正規分布と見なした信頼水準75%の下側50%許容限界値  
 ※2 信頼水準75%の下側5%許容限界値  
 ※3 木質構造設計基準・同解説、日本建築学会、2006  
 ※4 平成19年国土交通省告示第1524号(スギ甲種)

機械等級区分材については、E50 および E70 では、曲げヤング係数（50%下限値、5%下限値）が基準弾性係数（等級中間値）と同等か、やや上回った。しかしながら、E90 については両下限値が基準弾性係数をやや下回る結果となった。これは、曲げヤング係数の分布が図-6に示したように、等級内の中間値より低いものの割合が多かったためと考える。一方、曲げ強さについては、いずれの等級も5%下限値が法例で示す基準強度の値を上回った。今回、曲げ強さの5%下限値において、無等級材や目視3級、E50 の下位等級で法令の値を大きく上回った。これは、産地が県内に限定されたことによるものと

推察され、地域内で強度データを整備することで、より信頼性の高い構造材としての利用が可能になることを示唆する結果であった。

表-4. 機械等級区分材の曲げ強度性能値

区分	N	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )					曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
		試験結果		建築学会の基準弾性係数 <sup>※3</sup>			試験結果		告示 <sup>※4</sup> 曲げの基準強度
		平均値	50% 下限値 <sup>※1</sup>	5% 下限値 <sup>※2</sup>	等級 中間値	等級 下限値	平均値	5% 下限値 <sup>※2</sup>	
E50	32	5.4	5.3	4.7	4.9	3.9	34.1	24.5	24.0
E70	125	6.9	6.9	6.0	6.9	5.9	38.9	31.1	29.4
E90	38	8.4	8.4	7.6	8.8	7.8	46.3	37.6	34.8
E110	3	10.4	-	-	9.8	9.8	57.8	-	-
等級外	1	-	-	-	-	-	-	-	-
全体	199	7.0	6.9	5.0	-	-	39.8	29.4	22.2

※1 正規分布と見なした信頼水準75%の下側50%許容限界値  
 ※2 信頼水準75%の下側5%許容限界値  
 ※3 木質構造設計基準・同解説、日本建築学会、2006  
 ※4 平成19年国土交通省告示第1524号(スギ甲種)

### 7. スパン表における材料区分および曲げ強度性能値の設定について

「福岡県産スギ横架材スパン表」（福岡県産材利用推進協議会、2011）において、本試験結果をもとに県産スギ材の曲げヤング係数および曲げの基準強度が決定された。材料区分や曲げ強度性能値の設定にあたり協議会で検討した内容、考え方を以下に示す。

#### 1) 材料区分の設定

機械等級区分材は、本調査で出現頻度が高かった等級を対象とし、含水率20%以下のものをそれぞれ「E50 (D20)」「E70 (D20)」「E90 (D20)」と設定した。

目視等級区分材は、曲げヤング係数と各等級との間に明確な関係が認められず、50%下限値では基準弾性係数を下回る等級もあり、曲げヤング係数が未知であることは横架材としての信頼性が低いと判断した。このため、曲げヤング係数は実験値の5%下限値を基準として考え、値がE50 中間値相当であること、曲げ強さは告示（国土交通省、2007）の値を十分上回ることから、含水率20%以下の目視等級区分材を一括して機械等級区分の「E50 (D20)」と設定した。一方、含水率20%を上回る目視等級区分材は、未乾燥時においても曲げヤング係数の5%下限値がE50 中間値相当であること、また、曲げ強さは含水率20%以下のものに比べ低くなるため、「E50 (G)」とした。無等級材は、曲げヤング係数の5%



下限値では E50 中間値相当であったが、目視等級に比べ信頼性が低いと判断し、含水率に関わらず「E50 (G)」とした。

これらの検討結果をもとに、JAS の品質等級を整理し、表-5 に示す材料区分を設定した。

表-5. 福岡県産スギ横架材スパン表における材料区分

区分名	各区分における品質		
	JAS区分	等級	含水率
E50 (G)	無等級		
	目視等級	甲種1~3級	20% <
E50 (D20)	目視等級	甲種1~3級	≦20%
	機械等級	E50	
E70 (D20)	機械等級	E70	
E90 (D20)	機械等級	E90	

## 2) 各材料区分における曲げ強度性能値の設定

スパン表で設定した各材料区分における曲げヤング係数および曲げの基準強度を表-6 に示す。前述の材料区分の検討結果を踏まえ、曲げヤング係数は、E50 および E70 表示の区分については日本建築学会が示す各等級中間値とした。なお、50%下限値が等級中間値に満たなかった E90 (D20) は、試験データをもとにした 50%下限値を採用した。

曲げの基準強度については、各区分に対応する告示 (国土交通省, 2007) の基準強度を上回ることを確認したので、告示の値を採用した。

表-6. 各材料区分の曲げヤング係数および曲げの基準強度

区分名	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		曲げの基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	設定値	根拠	設定値	根拠
E50 (G)	4.9	E50の中間値 (≒試験5%下限値 <sup>※1</sup> )	22.2	
E50 (D20)	4.9	E50の中間値 (≒試験5%下限値 <sup>※1</sup> )	24.0	告示1524号 <sup>※3</sup> (<試験下限値)
E70 (D20)	6.9	E70の中間値 (≒試験平均値)	29.4	
E90 (D20)	8.4	(≒試験50%下限値 <sup>※2</sup> )	34.8	

※1 信頼水準75%の下側5%許容限界値

※2 正規分布と見なした信頼水準75%の下側50%許容限界値

※3 平成19年国土交通省告示第1524号(スギ甲種)

## IV. 今後の課題

横架材は、断面積が大きく乾燥に手間がかかり、県内では生産量が限られているのが現状である。今回用いた試験体も含水率が高いものが見られた。また、前述した横架材の含水率が曲げ性能に与える影響が予想以上に大きい可能性があり得る。こうした状況を考慮し、本報告では強度性能値の標準試験条件への調整には厳しい方法を採用した。

現在、スギ横架材の生産拡大を図るため、効率的な生産技術に関する研究やクリープ性能に関するデータ整備を進めている。こうした生産技術の進歩や供給の状況を見ながら、実状にあったデータの集積に取り組んでいく予定である。

今後、スギ横架材の生産技術の進展や機械等級区分材が普及することにより、品質の確かな製品の供給が拡大し、スギが横架材として当たり前のように使われる時期が早く訪れることを切望する。

## 謝辞

本研究を進めるのにあたり、福岡県産材利用推進協議会事務局の小林司氏、九州大学の村瀬安英名誉教授、川崎建築構造設計事務所の川崎薫代表には、適切なお指導をいただいた。また、福岡県森林組合連合会浮羽事業所、八女木材共販所、県内森林組合、(株)堀木材の方には、原木の調達や加工にご尽力いただいた。当センターの島晃主任技能員、山口祐士郎主任技能員、西尾美智代補助員、池田眞由美補助員をはじめスタッフの方には、試験にご協力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げます。

## 引用文献

ASTM (American Society for Testing Materials) (1985) Standard methods for evaluating allowable properties of structural lumber. ASTM D2915-84. ASTM, Philadelphia.

福岡県産材利用推進協議会 (2011) 福岡県産スギ横架材スパン表~ver.1~, pp38.

堀江和美 (1997) 木材強度データの確率・統計手法. 木質構造研究所.

飯島泰男 (1983) 構造用木材-強度データの収集と分析-. 日本木材学会木材強度・木質構造研究

会：1-41.

建設省（2000）建築物の使用上の支障が起こらないことを確かめる必要がある場合及びその確認方法を定める件．建設省告示第1459号．

建設省建築指導課（1996）木材の材料強度の評価について．建設省建築指導課長通達．住指発第132号．

国土交通省（2007）木材の基準強度 $F_c$ ,  $F_t$ ,  $F_b$  及び  $F_s$  を定める件．国土交通省告示第1524号．

小松幸平（1988）スギ材の構造的利用の方向と問題．

日本木材学会木材強度・木質構造研究会：9-20.

強度性能研究会（2005）「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 7. 56pp.

木構造振興（株）（2011）木材の強度等データおよび解説：70-79, 文唱堂印刷, 東京.

村上英人・占部達也・片桐幸彦（1999）スギ正角材の曲げ強度－同一品種で林齢が違う原木から製材された正角材の比較－．日林九支研論 52：141-142.

日本住宅・木材技術センター（2000）住宅資材性能規定化対策事業・報告書「構造用木材の強度試験法」．102pp.

日本建築学会（2006）木質構造設計基準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－．416pp, 丸善, 東京.

日本木造住宅産業協会（2010）木造軸組住宅における国産材利用の実態調査報告書.

日本農林規格協会（2007）構造用製材の規格．製材の日本農林規格．91pp.

林野庁（2011）木材の需要拡大－新たな木の文化を目指して－．平成 23 年版年森林林業白書：10-39.

占部達也・片桐幸彦・廣田篤彦（1995）福岡県におけるスギ挿し木品種の材質．日林九支研論 48：189-190.

占部達也・片桐幸彦・村上英人（1999）福岡県産スギ品種の強度性能－ヤマグチ心持ち正角材の曲げ強度性能－．日本木材学会大会研究発表要旨集 49：105.

全国木材検査・研究協会（2010）規格木材生産工場における品質管理．1186pp.

スギにおける引き倒し試験および力学モデルを用いた風害に強い樹形の解明<sup>1)</sup>茅島信行<sup>2)</sup>・佐々木重行・檜崎康二**Estimation of the wind-resistant Sugi (*Cryptomeria japonica*) tree shape by mechanical model based on tree-pulling experiments.**

Nobuyuki KAYASHIMA, Shigeyuki SASAKI, Koji NARAZAKI

茅島信行・佐々木重行・檜崎康二：スギにおける引き倒し試験および力学モデルを用いた風害に強い樹形の解明 福岡県森林研報 14：17～45, 2013 本研究は風害の軽減を目的とし、スギの引き倒し試験を行うことにより根系の抵抗力を調査するとともに、単木としての力学モデルを用いて根返りが発生する時の風速（限界風速）を推定し、風害に強い樹形や林分について検討した。平坦な試験林における引き倒し試験の結果、根系の抵抗力は胸高直径や地上部の重量などと相関が高く、胸高直径のおよそ3乗に比例すること、根系が浅いほど根返りを起こしやすいことがわかった。また、樹幹が円錐形であれば樹高のおよそ1/3より下側の幹にはほぼ一定の曲げ応力が作用し、完満な樹形ほど応力のピークが根元へ移動するため根返りが発生しやすくなることなども明らかとなった。傾斜の異なる試験林の引き倒し試験では、斜面における根系分布の偏りから、斜面上方に引き倒すよりも、下方や側方に引き倒す方が根系の抵抗力が大きく、傾斜地では引き倒す方向により根系の抵抗力が異なることが明らかとなった。次に、これら引き倒し試験により得られた根系の抵抗力の推定式を、単木としての力学モデルに組み込み、様々な樹形の立木の限界風速を推定した。その結果、本モデルは実際に発生した風害と適合しており、限界風速は形状比や樹冠長率と高い相関があることがわかった。形状比が低いほど、また樹冠長率が低いほど限界風速は高くなるが、樹冠長率が低い個体は形状比が高いことや樹木の健全性なども考慮すると、現実的に風害に強い樹形は形状比 75 以下、樹冠長率 30～60%程度が望ましいと結論付けられた。施業による限界風速の変化を検討し、風害のリスクを低く抑えながら限界風速を高めるためには、従来どおりこまめに適度な間伐を繰り返すことが有効であることを明らかにした。

キーワード：風害、引き倒し試験、根返り限界風速、形状比、樹冠長率、樹形、力学モデル、森林施業、スギ

**I. はじめに**

近年、従来から頻繁に台風の襲来がある九州や四国地方などの西南日本だけでなく、北日本でも台風起因した風害が発生している（秋田県林務部，1994；阿部ら，2006；嘉戸・凶子，2008；鳥田，2006，2009bなど）。台風の活動が長期的に見てどのように変化し、その変化が地球温暖化とどのような関係にあるのか正確に答えることは、現在の科学的知見では非常に難しい（下川ら，2009）とされている。しかし、不確定性

は高いものの、温暖化を想定した各実験結果から、温暖化により一般に台風の強度は増大する（下川ら，2009）と考えられている。近年の日本周辺における台風の動向としては、発生件数は減少しているものの、日本に接近する進路をとる台風が増加しており、接近数・上陸数は増加傾向にある（村山，2006）。また、台風が日本に接近した時の中心気圧は低下傾向にあり、強い勢力を保ったまま日本に影響を与える台風が増えてきている（村山，2006）との指摘もある。さらに、久保山ら（2003）は全国民有人工林における過去 39 年

1) 本研究は、県単研究課題「風害地形の特徴と風害に強い樹形の解明」（平成 20～23 年度）で実施したものである。なお、本研究の一部は茅島・佐々木（2010a, b, c），茅島・佐々木（2011a, b），茅島ら（2012a, b）として公表した。

2) 現福岡県環境部自然環境課

分の気象被害データを分析することにより、雪害被害率の減少と風害被害率の増加傾向を明らかにし、今後気象災害は雪害に代わって風害が主となっていくと予想している。図-1に福岡県の森林気象災害における年代毎の平均被害面積を示したが、福岡県においても雪害が減少し、特に1990年代以降、主に台風によるものとみられる風水害の被害が急増している。

一方、近年木材価格の低迷などから伐期が延長される長伐期林分や、手入れの遅れた過密林分が増えている。長伐期林分の増加からは、伐期までに台風災害に遭遇するリスクの高まり(野田ら, 1992; 齊藤・小南, 2004; 野々田, 2010)が、手入れの遅れた過密林分の増加からは、形状比の増加・樹冠長率の低下により、台風災害を受けやすい林分の増加(檜山ら, 1974; 諫本・高宮, 1992; 米丸, 1998; 野々田ら, 2008; 藤森, 2010など)が危惧される。また、過密林分においては高い間伐率での間伐が増加しているが、これは集団としても個樹としても林木の耐風性を低下させる(檜山ら, 1974)。これらのことから、近年各地で風害発生リスクの高まりが危惧されており、全国的に台風災害に強い森林づくりが求められている。

台風災害に強い森林づくりを進めるためには、風害を受けやすい地域や地形を明らかにすること(福永ら, 1993; 阿部ら, 2006; 谷川ら, 2009, 2010など)に加え、樹木の耐風性を評価し、風害を受けにくい樹形、林分を明らかにすること(野々田ら, 1996; 上村ら, 2007; 佐藤ら, 2009)により、風害のリスクに応じた森林施業を提案しなければならない。

そこで本研究では、風害の軽減に向け、風害のリスクに応じた森林施業を提案することを目的とし、施業によりコントロールが可能な樹形(Kamimura and Shiraiishi, 2007)に着目し、風害に強い樹形、林分について検討した。対象としたのは、福岡県における人工林の主林木であるスギであり、風害の多くを占める根返り(野田ら, 1992)について主に検討することとした。そして単木としての力学モデルを用いて、スギにおいて根返りが発生する時の風速(以下、限界風速)を推定することにより、樹木の耐風性を評価することとした。まず、この力学モデルにおいて限界風速の推定に必要な根系の抵抗力を把握するために、スギにおける立木の引き倒し試験を行った。引き倒し試験は平坦地、傾斜地双方で行い、根系の抵抗力の把握に加え、傾斜や根系の深さ・分布が根系の抵抗力や被害形態に与える影響についても検討した。また、異なる形状の樹幹における曲げ応力分布について検討した。さらに、引き倒し試験で得られた根系の抵抗力の推定式を力学

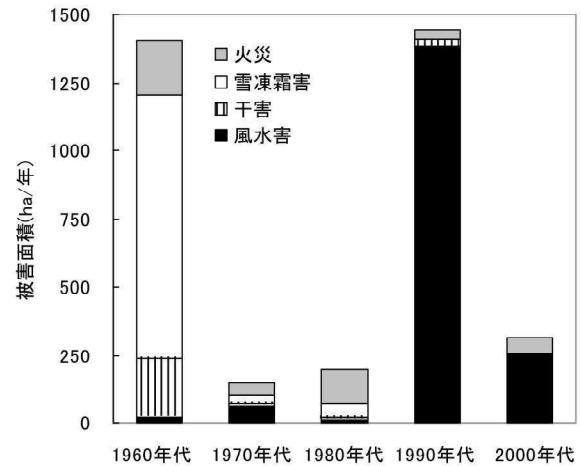


図-1. 福岡県の森林気象災害における年代毎の平均被害面積

福岡県林業統計要覧昭和42年度～平成19年度より。

モデルに組み込むことで、様々な樹形のスギ立木の限界風速を推定し、耐風性を評価するとともに、森林施業の観点から、風害に強い樹形や林分について検討した。

## II. 平坦地におけるスギの引き倒し試験

### 1. 目的

本研究では、風害の多くを占める根返り(野田ら, 1992)について主に検討することとし、単木的な力学モデルを用いて、スギにおいて根返り限界風速を推定することとした。この力学モデルを用いて限界風速を推定するためには、立木の引き倒し試験を行い、根系の抵抗力を把握する必要がある。しかしながら、立木の引き倒し試験は主に本州のスギ・ヒノキ(玉手ら, 1965; 森岡, 1984; 中谷, 1991; 陶山, 1993; 嘉戸, 2001)や北海道や本州におけるカラマツや広葉樹(深見ら, 2009, 2011; 佐藤ら, 2009; 鳥田, 2009a, b; 鳥田ら, 2010など)で実施されており、九州におけるスギ・ヒノキの引き倒し試験に関する知見は少ない。

そこで、スギにおける限界風速を推定する力学モデル構築のために必要となる、根系の抵抗力を把握することを目的として、福岡県内の平坦地にある試験林においてスギの引き倒し試験を行った。そして、胸高直径、樹高、地上部重量、形状比、樹冠長率などの地上部情報に加え、根株重量、根系形状などの地下部情報と、根元の最大回転モーメントや被害形態との関係について検討した。

## 2. 研究方法

研究対象地は、福岡県久留米市山本町にある当センター内のスギ試験林である。傾斜の影響を避けるため、今回の試験は平坦な品種別試験林で行った。本試験林にはホンスギ、オビアカ、ヤマグチ、アカバ、シチゾウの5品種が植栽されている。植栽時の植栽密度はおおよそ4,400本/haであったが、引き倒し試験時(14年生)にはおおよそ3,000本/haであった。土壌は1994年に近辺の地山を切り崩した土砂による造成地土壌であり、一般的な森林土壌と比較して硬く締め固められている。

試験木は品種毎に大・中・小となるようサイズを考慮して、それぞれ3本ずつ計15本供試した。試験木のサイズは、平均樹高8.34m(5.2~11.1m)、平均胸高直径12.9cm(7.1~18.4cm)であった。また、試験木の平均形状比(樹高/胸高直径)は66.7(52.5~95.1)、平均樹冠長率(樹冠長/樹高×100)は68.7%(51.4~82.3%)であり、全体的に形状比が低く、樹冠長率が高い傾向にあった。

引き倒す前に、試験木の胸高直径、地上高0.2mの直径(以下、根元直径)、樹高、枝下高、樹冠幅を測定し、引き倒した後に、地上部生重量を樹幹と枝葉に分けて測定した。また、試験を行った試験木の根系を調査するため、パワーショベルを用いて根株を掘り起こし、高圧洗浄機等を用いて付着した土を洗い流した後、根株の重量、根系の深さや形状の調査を行った。なお、試験は1週間以上まとまった降雨(日雨量10mm以上)がなかった2009年8月23~25日にかけて行い、根系の調査は同年9月1~2日にかけて行った。

引き倒し試験は、試験木の樹冠を残したまま、樹高のおおよそ1/2の高さにワイヤーを固定して荷重点とし、他の立木の根元に固定したチルホールを用いて引張り荷重を加えることによって行った(図-2、写真-1)。

引張り荷重は、試験木とチルホールの間に取り付けたロードセル(TEAC TT-RF, ティアック電子計測株式会社製, 最大測定荷重10kN)、データロガー(DATAMARK LS-3000PtV, 白山工業株式会社製)によって10秒間隔で自動的に記録した。また、立木の地際の傾きを測定するために立木の高さ0.1mの位置に傾斜計を設置し(鳥田, 2009b)、引張っているワイヤーの角度とともに適宜記録した。従来の引き倒し試験によって得られる根元の回転モーメントは、主に引張り荷重と荷重点の高さとの積として求められてきた(野々田ら, 1996, 2006; 佐藤ら, 2009; 鳥田, 2009bなど)。しかし、試験時に樹幹のたわみが大きかったことから、従来の手法では根元の回転モーメントを過大

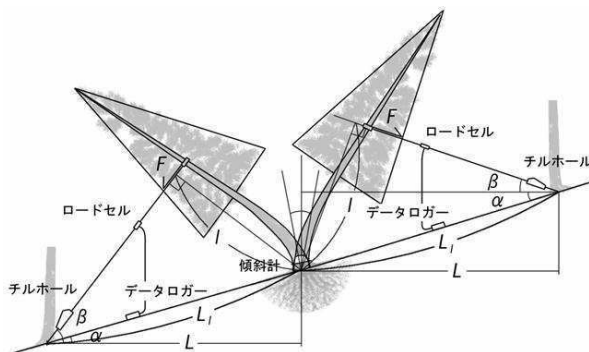


図-2. 引き倒し試験の概要

図中右半分が斜面上方に引き倒している場合、左半分が斜面下方に引き倒している場合を示す。斜面上方に倒すとき $\alpha < 0$ 、斜面下方に倒すとき $\alpha > 0$ (平坦地では、 $\alpha = 0$ )

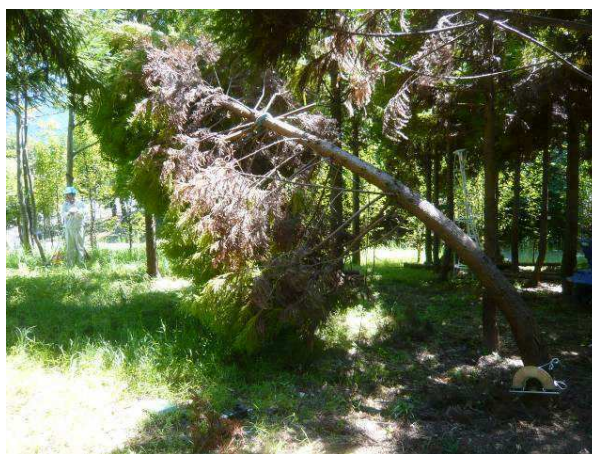


写真-1. 引き倒し試験実施状況

評価する危険性が考えられた。そこで、根元の回転モーメント $M$ (kNm)は、引張り荷重 $F$ (kN)と根元中心から引張り荷重の作用線に下ろした垂線の長さ $l$ (m)との積として、式(4)から求めた。

$$M = F \times l \tag{1}$$

$$l = L_l \times \sin(\beta - \alpha) \tag{2}$$

$$L_l = L / \cos \alpha \tag{3}$$

式(1)~(3)より

$$M = F \times L \times \sin(\beta - \alpha) / \cos \alpha \tag{4}$$

$L$ : 試験木根元からチルホール固定点までの水平距離(m)

$L_l$ : 試験木根元からチルホール固定点までの斜距離(m)

$\alpha$ : チルホール固定点から見た試験木根元の傾斜角(°)  
斜面上方に倒すとき $\alpha < 0$ 、斜面下方に倒すとき $\alpha > 0$ (平坦地では $\alpha = 0$ )

$\beta$ : チルホール固定点から見たワイヤーの角度(°)

ワイヤーが水平線より上方のとき  $\beta > 0$  , 水平線より下方のとき  $\beta < 0$

根元の最大回転モーメントは、胸高直径と非常に相関が高いことが知られているが（玉手ら, 1965 ; 檜山ら, 1974 ; 森岡・北川, 1987 ; 深見ら, 2009 ; 鳥田, 2009b など）、今回は地上部だけでなく、根系などの地下部も含めた様々な立木の諸因子と根元の最大回転モーメントとの相関を把握するため、胸高直径だけでなく表-1 に示す様々な立木の因子との相関を検討した。また、胸高直径・根元直径と根元の最大回転モーメント計測時の根元傾斜角との関係や、形状比と幹折れ高さの関係、被害形態別の根系重量と根系深さとの関係についても検討した。

引き倒し試験の最終的な被害形態は、「根返り」、「幹折れ」、「根元割れ」の3種類に分類した。

「根返り」とは、根が根鉢ごと回転して転倒したもので、根が土壌から引き抜けるようにして転倒したもので、たとえ完全に根鉢が回転したり根が土壌から引き抜けていたりしていなくても、転倒した際に根系が盛り上がったものとした（写真-2）。

「幹折れ」とは、根返りや根元割れを起こさずに幹の途中で折れたものとした（写真-3）。幹折れの際には圧縮破壊と引っ張り破壊が同時に起こるが、幹折れ高さは、位置が明瞭な圧縮破壊部までの高さとした。なお、「根返り」や次の「根元割れ」に分類した中でも、幹の破損が発生したのが見られたが、最終的な被害形態で根返りか幹折れかを判別した。

「根元割れ」とは、地上部の破壊という点では幹折れと似ているが、根元が裂けるように割れて転倒したものとした（写真-4）。

### 3. 結果

#### 1) 引き倒し試験の被害形態

根返り、幹折れ、根元割れの被害形態別本数は、それぞれ5本、3本、7本であり、根元割れが最も多かった。根返りのうち1本、根元割れのうち3本は樹幹に破損が見られた。また、幹折れの平均幹折れ高さは61.7cm (23~97cm) であり、比較的根元に近い位置で幹折れを起こしていた。試験木の位置、引張り方向を図-3 に示した。試験木周囲の立木状況と被害形態の間には特に傾向は認められなかった。

#### 2) 根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係

根返りにおける、引き倒し始めてから倒れるまでの根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係を図-4 に示す。根返りでは引き倒し始めは、根元傾斜角の変化



写真-2. 根返り被害木



写真-3. 幹折れ被害木



写真-4. 根元割れ被害木

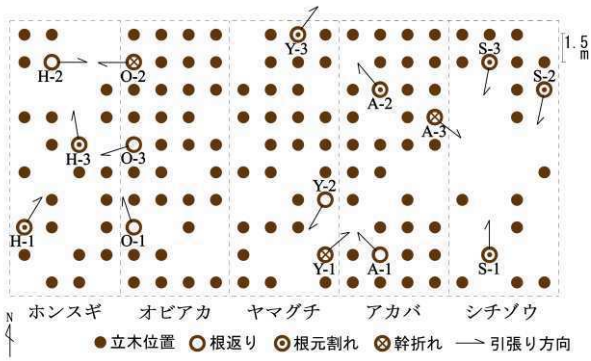


図-3. 試験木の位置と被害形態

樹木の植栽間隔は1.5m。品種ごとに東西4列，南北10列植栽。図中の矢印は引き倒した方向を示す。各試験木に付したアルファベットは品種（H：ホンスギ，O：オビアカ，Y：ヤマグチ，A：アカバ，S：シチゾウ）を，枝番は個体番号を表す。H-2は根返り，S-1，S-2，S-3は根元割れと分類したが，樹幹の破損も見られた。

に比例して回転モーメントが急増するが，最大回転モーメントのおよそ7割のモーメントが加わった時点から根元傾斜角の変化に対するモーメントの増加は緩くなった。根元傾斜角と根元の回転モーメントが比例して増加するのは，個体サイズを問わず，根元傾斜角約4°までであり，この傾向は過去の事例（森岡，1984）と一致した。最大回転モーメントを記録したのは根元傾斜角が平均15.8°（9.5～22.5°）の時点であり，胸高直径が大きい個体ほど根元傾斜角が小さい段階で最大回転モーメントを記録し，またそのピークが明瞭であった。

幹折れにおける，根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係を図-5に示す。幹折れは最大回転モーメントを記録した時の根元傾斜角が平均8.3°（3.3～14.5°）と根返りと比較して個体サイズの割に小さく，また最大回転モーメント記録後に根元の回転モーメントが急激に低下する傾向が見られた。さらに，3個体とも，この低下に伴って根元の傾斜角も下がる現象が見られた。試験木O-2のように根元傾斜角が小さく比例限度以下で幹折れが生じた場合は，荷重を除くと根元の傾斜は元に戻ったが，A-3やY-1のように比例限度を超えて幹折れが生じた場合は，荷重が除かれても根元の傾斜は完全に元には戻らなかった。

根元割れにおける，根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係を図-6に示す。根元割れは，地上部の破壊という点では幹折れと似ているが，根元の回転モーメントと根元傾斜角との関係は，幹折れよりも根返りと類似した傾向が見られた。最大回転モーメントを記録した時の根元傾斜角は平均13.2°（8.0～21.0°）であり，根返りよりも若干小さかったが，有意な差は見ら

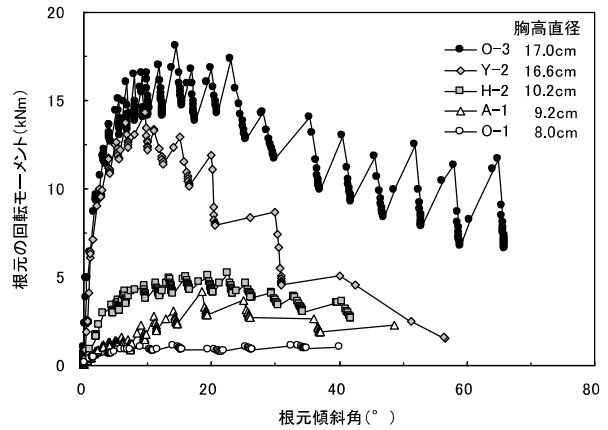


図-4. 根返り被害木における根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係

O-3（オビアカ）以下5本の試験木における関係を表す。

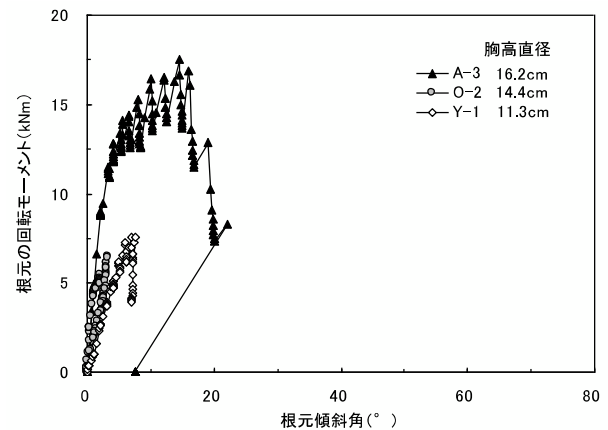


図-5. 幹折れ被害木における根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係

A-3（アカバ）以下3本の試験木における関係を表す。

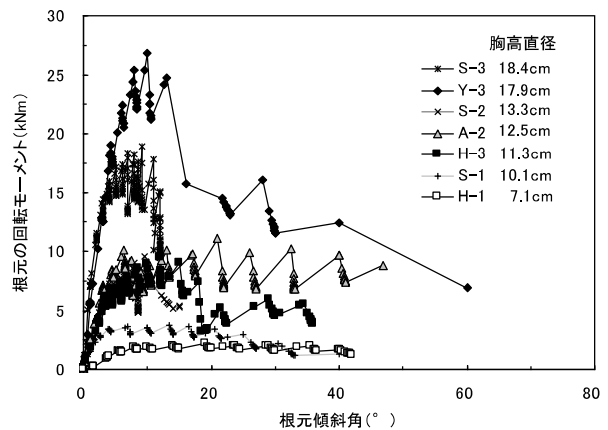


図-6. 根元割れ被害木における根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係

S-3（シチゾウ）以下7本の試験木における関係を表す。

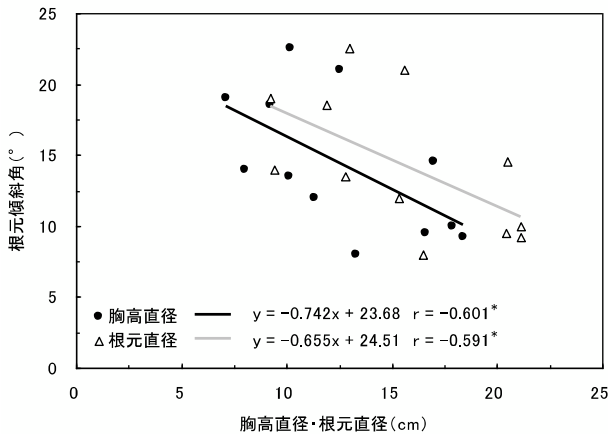


図-7. 胸高直径・根元直径と最大回転モーメント計測時の根元傾斜角の関係

n=12 (幹折れ被害木を除く)。アスタリスクは回帰式の危険率を示す(\*: 危険率5%で有意)。

れなかった。そこで、幹折れを除く試験木12本の胸高直径・根元直径と根元の最大回転モーメント計測時の根元傾斜角との関係を図-7に示した。胸高直径・根元直径ともに大きくなるほど根元傾斜角が小さくなる負の相関が見られ、森岡・北川(1987)や鳥田(2009b)と同様の傾向を示した。

3) 根元の最大回転モーメントと立木の諸因子との相関

根返り、幹折れ、根元割れの区分に加えて、根返りと根元割れを合わせたもの、そして試験木全体にお

る、根元の最大回転モーメントと立木の諸因子との相関係数を表-1に示す。試験木全体および、根返りと根元割れを合わせたものにおいて、根元の最大回転モーメントは根元直径との間の相関が最も高く、胸高直径や地上部重量、根株重量とも相関が高かった。樹高との相関は直径や重量の因子と比較するとやや低く、枝下高や樹冠幅との相関は更に低かった。また、形状比との間にはそれほど高くないものの負の相関が見られた。風圧として根元に作用する力は、風心高さや樹冠投影面積の積に比例する(茅島・佐々木, 2008; 佐藤ら, 2009)ため、風心高さや樹冠投影面積、またその積と根元の最大回転モーメントとの相関を検討した。風心高さや樹冠投影面積の積との相関係数は、それぞれ単独の場合よりも高くなったが、直径因子との相関ほど高くはなかった。根元直径・胸高直径と根元の最大回転モーメントとの関係を図-8に示す。根元の最大回転モーメントは胸高直径の2.78乗、根元直径の3.07乗に比例した。また、有意な相関は見られなかったものの、幹折れにおける根元の最大回転モーメントは、根返り・根元割れに比べて同じ直径でもやや低い傾向が見られた。

4) 形状比と幹折れ高さの関係

最終的な被害形態の分類に関係なく、樹幹の破損が発生した7本の試験木について、形状比と相対幹折れ高さ(幹折れ高さ/樹高)との関係を図-9に示す。樹幹の破損を含む幹折れは、形状比が低いほど相対的に高い位置で発生する傾向が見られた。また、樹幹の破損を含む幹折れの発生は、形状比60前後の比較的形

表-1. 被害形態別の根元の最大回転モーメントと立木の諸因子との相関係数

項目	根返り (n=5)	幹折れ (n=3)	根元割れ (n=7)	根返り+根元割れ (n=12)	全被害 (n=15)
胸高直径	0.946 *	0.641	0.959 **	0.943 **	0.926 **
根元直径	0.975 **	0.801	0.972 **	0.969 **	0.958 **
樹高	0.690	-0.897	0.815 *	0.748 **	0.717 **
枝下高	0.422	-0.855	0.579	0.514	0.431
樹冠幅	0.977 **	0.862	0.151	0.494	0.512
形状比	-0.537	-0.699	-0.599	-0.540	-0.556 *
樹幹長率	0.812	0.849	-0.334	-0.127	0.066
風心高さ	0.631	-0.873	0.743	0.697 *	0.616 *
樹冠投影面積	0.962 **	0.925	0.434	0.646 *	0.627 *
風心高さ×樹冠投影面積	0.903 *	0.473	0.837 *	0.824 **	0.773 **
樹幹重量	0.939 *	0.898	0.939 **	0.932 **	0.927 **
枝葉重量	0.981 **	0.999 *	0.718	0.869 **	0.870 **
地上部重量	0.960 **	0.971	0.941 **	0.952 **	0.953 **
根株重量	0.970 **	0.996	0.944 **	0.958 **	0.952 **

アスタリスクは回帰式の危険率を示す(\*\*: 危険率1%で有意, \*: 危険率5%で有意)。風心高さ、樹冠投影面積は第V項の式(14)、(15)参照。



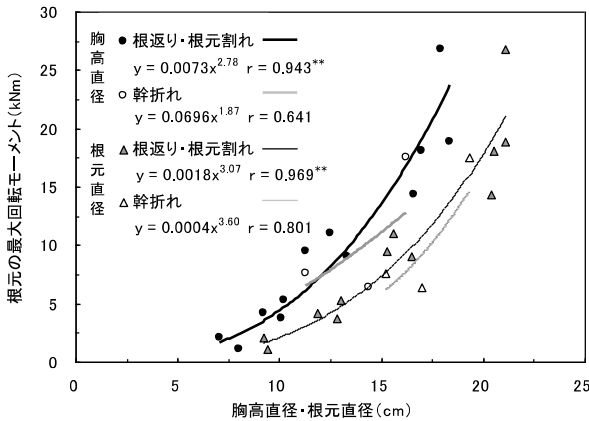


図-8. 胸高直径・根元直径と根元の最大回転モーメントの関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す(\*\*: 危険率1%で有意)。

表-2. 試験木の位置別の根系深さ

ホンスギ		オビアカ		ヤマグチ		アカバ		シチゾウ	
No.	cm	No.	cm	No.	cm	No.	cm	No.	cm
H-2	55	O-2	85	Y-3	65	A-2	65	S-3	85
H-3	50	O-3	60	Y-2	70	A-3	80	S-2	70
H-1	45	O-1	30	Y-1	45	A-1	45	S-1	50

試験木の位置は図-3を参照。

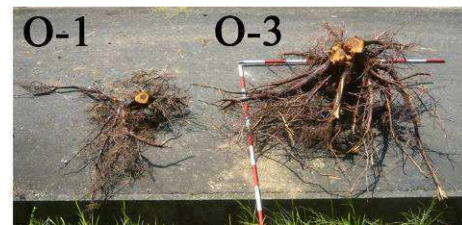


写真-6. 全試験木の根系

根系の位置は、試験木の位置(図-3, 表-2)と対応。下の写真は隣接するが根系形状の異なる2個体の比較。  
O-1: 水平根型, O-3: 斜出根型。

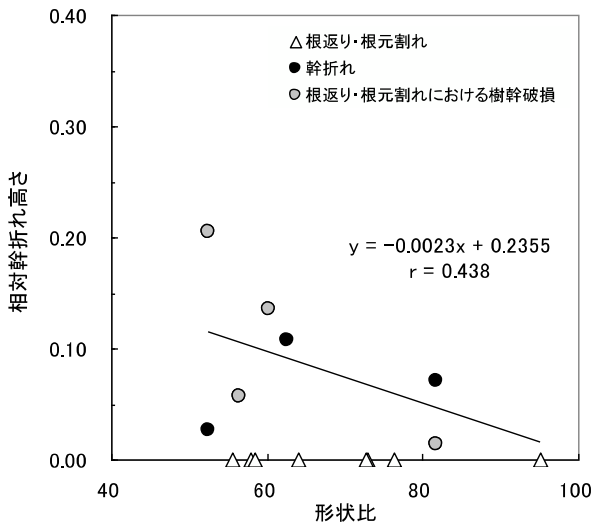


図-9. 形状比と相対幹折れ高さの関係

相対幹折れ高さは、幹折れ高さ/樹高。根返りおよび根元割れ被害木は相対幹折れ高さ0.00上にプロット。回帰式は幹折れ+根返り・根元割れにおける樹幹破損 (n=7)。

比の低い個体に多かった。

5) 根系と被害形態の関係

試験木の位置(図-3)別の根系深さを表-2に、それぞれの根系の形状を写真-6に示す。試験林の南西側で根系が浅く水平根型の根系が多かったのに対し、北東側では根系が深く斜出根型の根系が多い傾向が見られた。距離の違いはわずかであるが、根系の形態が大きく異なっていた。被害形態別の根株重量と根系の深さの関係を図-10に示す。全体的に根株重量の増加に伴い根系が深くなる傾向が見られたが、根返りを生じた個体は、根元割れや幹折れを生じた個体に比べて、根株重量の割に根系が浅かった。

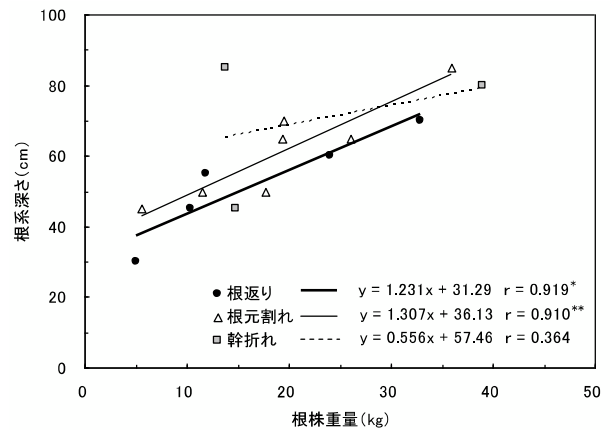


図-10. 被害形態別の根株重量と根系深さの関係  
アスタリスクは回帰式の危険率を示す(\*\*: 危険率1%で有意, \*: 危険率5%で有意)。

4. 考察

今回の引き倒し試験では被害形態として根元割れが最も多かった。これは、本試験林の土壌が一般的な森林土壌と比較して硬く(佐々木, 2002), 根系の支持力

が強かった上に、樹幹の曲げ強度も大きかったためと考えられた。このような条件下では、回転モーメントが最大となる根際において、見かけ上、地上部と根系の双方から引っ張られる状態となり、その結果、根元付近で幹が引き裂かれるようにして根本割れが発生したものと推測された。したがって、根返りや幹折れを起こしにくい樹形であっても、強い力が加われば最終的には根元割れによる被害を受けるものと考えられた。

根元の傾斜角と根元の回転モーメントの関係を検討したところ、根返りや根元割れにおいて、根元傾斜角の変化に比例して回転モーメントが増加するのは、個体サイズを問わず、根元傾斜角約 $4^{\circ}$ までであり、その時加わったモーメントは根元の最大回転モーメントのおよそ7割であることがわかった(図-4, 6)。この傾向は過去の事例(森岡, 1984)と一致している。森岡(1983)は、引き倒し試験により根元の傾斜角が $5^{\circ}$ を超えた立木には回復不可能な傾きが残留し、 $1^{\circ}$ を超えて傾きが残留した立木は数ヶ月経過後も傾きが戻らないことを確認している。したがって、根元の最大回転モーメントのおよそ7割以上の力が加わった立木については、根返りにまでは至らないが、樹幹の傾きなどの被害が残るものと考えられた。

幹折れを除く試験木12本の胸高直径・根元直径と根元の最大回転モーメント計測時の根元傾斜角との関係を検討したところ、個体サイズが大きくなるほど根元傾斜角が小さくなることがわかった(図-7)。この傾向は過去の事例(森岡・北川, 1987; 鳥田, 2009b)と同様であり、個体サイズが大きくなるほど剛直であるが、その反面脆くなる(森岡・北川, 1987)、すなわちたわみが少なくなると考えられた。このことは、高齢になり個体サイズが大きくなるほどたわみが少なく、樹幹がより直立した状態で根元の最大回転モーメントが最大となるため、風害を受けやすくなるということを示唆している。これは、一般的に風害に対して若齢林では被害率が低く、高齢になるほど被害率が高くなる(諫本・高宮, 1992; 中尾ら, 1993など)ことと一致する結果だと考えられた。

根元の最大回転モーメントと立木の諸因子との関係を検討したところ、胸高直径や根元直径などの直径因子や地上部重量、根株重量などの重量因子と高い相関があった(表-1)。特に、胸高直径、根元直径とは、それぞれ2.78乗、3.07乗に比例した(図-8)。過去のスギにおける引き倒し試験の結果においても、根元の最大回転モーメントは胸高直径のおよそ2~3乗に比例することが示されている(玉手ら, 1965; 森岡, 1984; 陶山, 1993)。よって、根返りに関する力学的モ

デル構築に用いる根元の最大回転モーメント、すなわち根系の最大抵抗力の推定には、胸高直径もしくは根元直径を因子として用いることが適当であると考えられた(深見ら, 2009, 2011; 鳥田, 2009bなど)。直径因子以外にも多くの因子と根元の最大回転モーメントとは正の相関があったが、形状比との間には負の相関があった(表-1)。このことから、同程度の個体サイズの立木であれば、形状比が高いほど根元の最大回転モーメントが小さい、すなわち根系の抵抗力が小さく根返りが生じやすいことが示唆された。

また、幹折れ被害木の根元の最大回転モーメントは同じ直径でも根返り・根元割れに比べてやや低い傾向が見られた(図-8)。これは、幹折れでは根返りが発生する根元の最大回転モーメントに達する前に樹幹が破壊されていたためだと考えられた。しかし、その差はわずかであり、幹折れや根返りといった被害形態の差異は、わずかな力の均衡に左右されていることが示唆された。

被害分類に関わらず、樹幹が破損した試験木の形状比と、相対幹折れ高さについて検討したところ、形状比が低いほど高い位置で幹折れが発生する傾向があり、幹折れ自体の発生も多かった(図-9)。このことは、形状比が低い、すなわち樹高に対して樹幹が太い個体ほど幹折れが発生しやすく、より樹幹の高い位置で幹折れが発生するというを示しており、一般的なイメージ(形状比が高い、すなわち樹高に対して樹幹が細い個体ほど幹折れが発生しやすい)とは異なると考えられた。

引き倒し試験による被害形態は、根返りは試験林の南西側に、根元割れは北東側に、幹折れはその中間付近に主に分布しており(図-3)、被害形態と立地との関係が示唆された。試験木の根系を調査した結果、同じ胸高直径、根株重量の個体であっても、根系が浅い水平根型では根系が深い斜出根型と比較して根返りを生じやすいと考えられた(図-10, 写真-6)。

今回引き倒し試験を行ったことにより、根元の最大回転モーメントが把握できただけでなく、風害に関する様々な知見を得ることができた。特に、根元の最大回転モーメントの推定には、胸高直径など直径因子を用いることの妥当性を示した。しかし、このモーメントは地上部重量とは正の相関が、形状比とは負の相関があるため、胸高直径が同じであっても樹冠の衰退した個体や形状比の高い個体では値が小さくなる可能性がある。このように、直径因子だけでなく樹冠や樹形によっても根元の最大回転モーメントが変わると考えられた。また、本試験は平坦な造成地土壌にて比較的

サイズの小さい(胸高直径 7.1~18.4 cm) 立木を用いた限定的な条件下で行われたものである。したがって今回得られた様々な知見が、実際の森林にも当てはまるものなのか、今後様々な条件下で引き倒し試験を行い検討する必要があると考えられた。

### Ⅲ. 傾斜地におけるスギの引き倒し試験

#### 1. 目的

前項Ⅱで平坦地における引き倒し試験の結果について考慮してきたが、森林の多くは斜面上に分布しており、中尾ら(1993)は、急傾斜地と緩傾斜地の風害発生率が異なることの原因として、傾斜地における樹木根系の伸長の形態が関与しているのではないかと推測しており、傾斜地では根返りに対する根系の抵抗力が異なることが考えられる。

一方、斜面上における根系の分布については、斜面傾斜から何らかの影響を受けることが確認されている(荏住, 1979; 福永, 2006)。また、野々田ら(1996)は、樹木の引き倒しに抵抗する根系部の抵抗力には、引き倒し方向と反対側に伸びる根系の引張力の合力が大きな役割を果たしているとして、引き倒し方向とは反対方向に伸びる根系を因子とした根返り発生モーメントを推測するモデルを作成しており、比較的良好な適合性を得ている。

以上のように、根系分布の偏りから、斜面上での引き倒し試験は、傾斜や引き倒す方向によって平坦地とは結果が異なることが考えられる。したがって、より現実的な樹木の耐風性を評価するため、引き倒し試験に与える斜面傾斜の影響を把握する必要がある。

そこで本項では、斜面傾斜および引き倒す方向の違いが根元の最大回転モーメントに与える影響を明らかにするため、傾斜の異なるスギ林において、斜面上方と下方に向けて引き倒し試験を行った。また、最も急傾斜のスギ林では斜面の側方に向けて引き倒し試験も行った。そして、根系分布の指標として、根張り範囲や根系中心から斜面方向 10 cm ごとの根系の乾燥重量および断面積合計を測定し、傾斜地での引き倒し試験結果との関係について検討した。

#### 2. 研究方法

研究対象地は当センター内のスギ傾斜別試験林である。本試験林は南向き斜面で、東から斜面傾斜 5°, 15°, 25°, 35° (a, b) の4段階の斜面が設置されている(図-11)。傾斜 35° (b) については、植栽本数 80 本(東

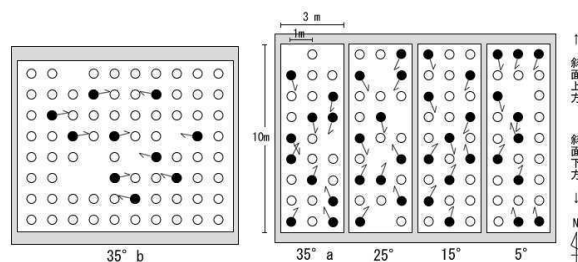


図-11. 傾斜別試験林における試験木の植栽位置と引き倒し方向

○は残存木を、●は試験木を示す。矢印は引き倒した方向を示す。

西 10 列×南北 8 列)、樹齢 15 年生であり、それ以外の斜面では 27 本(東西 3 列×南北 9 列)と 14 年生であった。それ以外の条件は共通しており、品種はホンズギ、植栽間隔は 1.0m で、植栽密度は 10,000 本/ha とかなり密植されている。土壌はマサ土であり、土壌深さはおよそ 1.4m である。35° (b) 以外の斜面において、斜面上部と下部の 2 箇所ずつ合計 8 箇所で行ったが、全地点での土壌深さ 1.4m までの Nc 値(土壌硬さを示す指標)の平均は 4.75 で、深さ方向に硬さがほぼ一様な土壌であった。

引き倒し試験は、傾斜 5°, 15°, 25°, 35° (a) については、各傾斜ともに 10 本ずつ、合計 40 本行った。各傾斜とも 5 本は斜面の上方に、残り 5 本は下方に向かって引き倒した。傾斜 35° (b) については、斜面に対して側方(等高線方向)つまり、5 本は東方に、残り 5 本は西方に引き倒した。試験木は、斜面方向に対して格子状に植栽されているため、斜面や等高線に対してまっすぐ引き倒すことは困難であった。そこで各方向とも±30°以内になるように引き倒した。

引き倒し試験木の概要を表-3に示す。全試験木の平均胸高直径は 6.83cm、平均樹高は 490.2cm で、各傾斜ともに比較的小径木であった。しかし平均形状比は 74.9、平均樹幹長率は 61.6%であり、植栽密度のわりに形状比は高くなく、樹冠長率も低くはなかった。

引き倒し方法は前項Ⅱのとおりである。傾斜 5°, 15°, 25°, 35° (a) については 2010 年 1~3 月に、傾斜 35° (b) については 2011 年 2~3 月に、1 週間以上まとまった降雨(日雨量 10mm 以上)がなかった日を選んで引き倒し試験を行った。

前項Ⅱと同様に、根元の回転モーメントを求め、そのうち最大のもをその試験木における根元の最大回転モーメントとした。また、胸高直径と根元の最大回転モーメントとの関係を、傾斜ごとおよび引き倒した

表-3. 傾斜地における引き倒し試験木の概要

斜面傾斜	引き倒し方向	本数 (本)	胸高直径 (cm)	樹高 (cm)	形状比	樹冠長率 (%)
5°	上方	5	7.30 ± 1.65	489.8 ± 64.7	69.1 ± 13.4	59.5 ± 24.9
	下方	5	8.50 ± 1.69	571.2 ± 48.5	68.8 ± 11.0	61.8 ± 25.7
15°	上方	5	6.96 ± 1.03	505.4 ± 77.0	72.8 ± 7.1	53.6 ± 18.8
	下方	5	6.02 ± 1.21	500.2 ± 41.0	85.1 ± 12.7	50.3 ± 22.5
25°	上方	5	6.28 ± 2.92	455.2 ± 131.2	77.8 ± 14.6	66.4 ± 14.2
	下方	5	6.10 ± 0.78	483.0 ± 43.5	79.7 ± 7.2	52.0 ± 22.7
35° a	上方	5	7.14 ± 1.57	480.2 ± 60.4	68.7 ± 9.5	75.6 ± 12.7
	下方	5	6.38 ± 2.74	456.2 ± 109.7	78.9 ± 22.1	74.5 ± 11.9
35° b	東方	5	5.72 ± 1.93	453.2 ± 96.0	82.7 ± 14.7	76.6 ± 21.0
	西方	5	5.92 ± 1.88	451.8 ± 100.9	78.3 ± 8.4	65.6 ± 8.9
合計		50	6.63 ± 1.86	484.6 ± 82.5	76.2 ± 12.9	63.6 ± 19.8

表中の値は平均値±標準偏差を示す。

方向ごとに示した。

試験木の根系については、試験後に 35° (b) を除く全試験木の根系を掘り取り、高圧洗浄機等を用いて付着した土を洗い流した後、根株の重量および、斜面方向に対する上下左右の根張り長さを測定した。また、比較的根系の破損の少なかった個体を各傾斜ともに 3 本ずつ選び、室内にて現地の状態を再現するように吊し、斜面方向の根系分布を調査した。根系分布の指標として、根株中心から斜面方向に水平距離 10cm ほどの根系の乾燥重量と、直径 1 mm 以上の根系の断面積合計を測定した。根系の乾燥重量からは、斜面上方・下方の根系重量の割合を求めた。根系の断面積合計からは、根株中心から等距離における、斜面下方に対する上方の根系断面積合計の比（以下、根系断面積比）を求めた。

さらに、傾斜地における根系分布の差異が、引き倒し試験の結果の差異に寄与するのではないかと考え、根系断面積比（斜面上方/下方）と、根元の最大回転モーメントの関係について検討することとした。すなわち、本試験の実測値と前項Ⅱの平坦地で得られた回帰式による最大回転モーメント推定値との較差  $\Delta M$ （前者-後者）を求め、 $\Delta M$  と根系断面積比（斜面上方/下方）との関係について検討した。

### 3. 結果

#### 1) 引き倒し方向別の根元の最大回転モーメント

本試験の被害形態はすべて根返りであった。ただし、根鉢ごと転倒した個体はなく、全て土壌から引き抜け

るようにして転倒した。

斜面上方に引き倒した場合の胸高直径と根元の最大回転モーメントの関係を図-12 に、斜面下方に引き倒した場合の関係を図-13 に示す。胸高直径に対する根元の最大回転モーメントの値は、斜面上方に引き倒す場合は傾斜角が増加してもあまり変わらないか、やや低下した。一方、斜面下方に引き倒す場合は、傾斜角の増加に伴って根元の最大回転モーメントの値も増加する傾向がみられた。傾斜 5°、15°では引き倒す方向の間に差は見られなかったが、25°、35° (a) では、斜面上方に引き倒すよりも下方に引き倒す方が根元の最大回転モーメントが大きい傾向がみられた。共分散分析の結果、最も傾斜の急な 35° (a) の斜面では、引き倒す方向（上方・下方）の間に危険率 1% で有意な差が見られた。最も傾斜の急な斜面傾斜 35° (a, b) における、上下方向および側方へ引き倒した場合の胸高直径と根元の最大回転モーメントの関係を図-14 に示す。斜面側方へ引き倒した場合の根元の最大回転モーメントは、斜面下方に引き倒した場合と変わらないか、やや大きくなった。傾斜 35° において胸高直径 8 cm の試験木の根元の最大回転モーメントを引き倒し方向別に比較した。その結果、平坦地で得られた回帰式による最大回転モーメント推定値は 2.34kNm であったのに対し、上方 2.05kNm (-12.5%)、下方 3.06kNm (+30.8%)、側方 3.30kNm (+41.0%) であり、斜面上方に引き倒した場合と下方に引き倒した場合の間にはおよそ 1.5 倍の差が見られた。

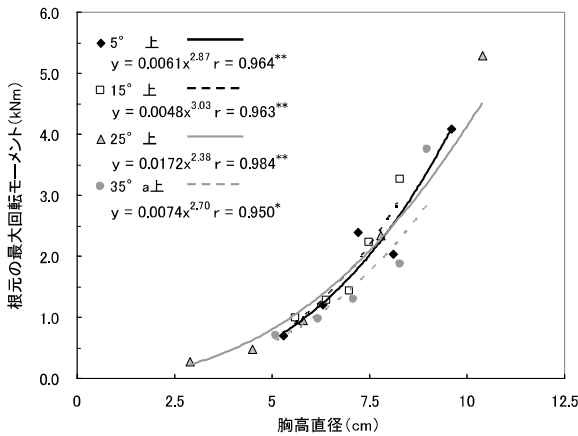


図-12. 斜面上方に引き倒した場合の胸高直径と根元の最大回転モーメントの関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す (\*\*: 危険率 1% で有意, \*: 危険率 5% で有意)。

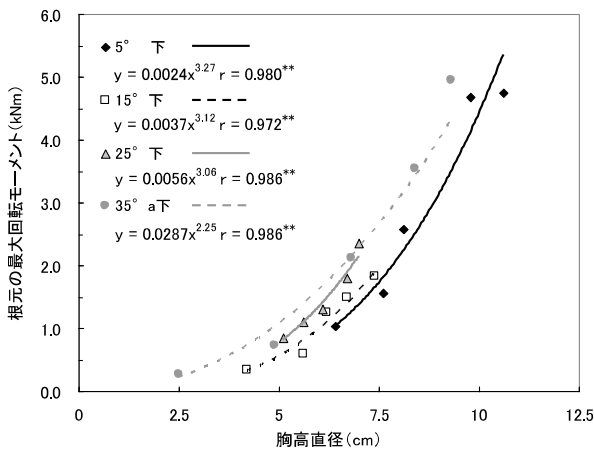


図-13. 斜面下方に引き倒した場合の胸高直径と根元の最大回転モーメントの関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す (\*\*: 危険率 1% で有意)。

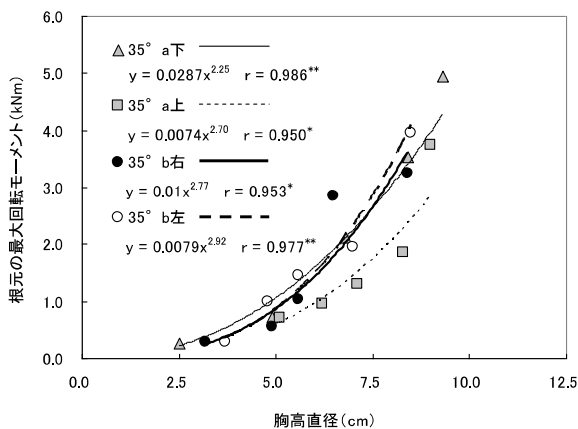


図-14. 35° (a, b) における引き倒し方向別の胸高直径と根元の最大回転モーメントの関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す (\*\*: 危険率 1% で有意)。

## 2) 根系重量

試験木の地上部重量と根株重量の関係を図-15に示す。斜面傾斜 5°, 15°, 25°の間には差がみられなかったが、斜面傾斜 35° (a) では、地上部重量に対する根株重量の割合が高い傾向がみられた。根系の詳細調査を行った各傾斜 3 本における、斜面上下方向の根系重量の割合を図-16に示す。傾斜 5°では、斜面上方の根系重量割合は 47.5%であり、上方と下方の根系重量に差がみられなかった。一方、傾斜 15°, 25°, 35° (a) ではそれぞれ 71.6%, 80.5%, 68.7%であり、いずれも下方に比べて上方の根系重量の割合が高かった。

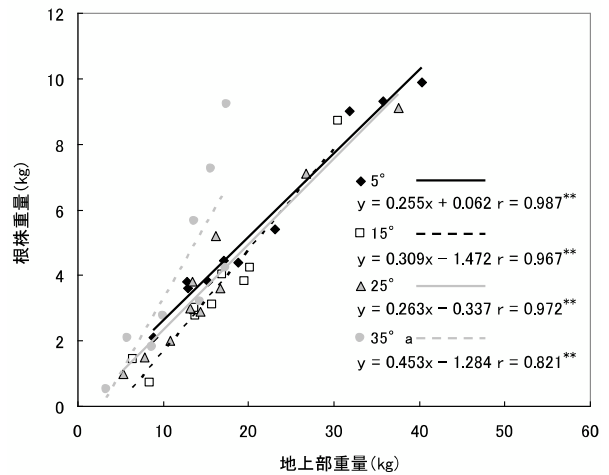


図-15. 地上部重量と根株重量の関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す (\*\*: 危険率 1% で有意)。

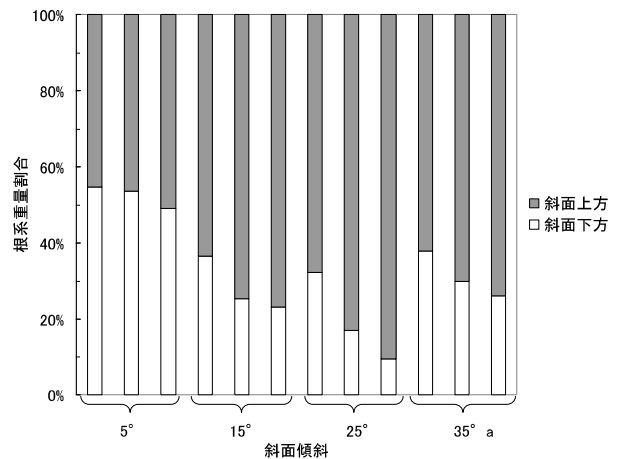


図-16. 斜面方向別の根系重量割合

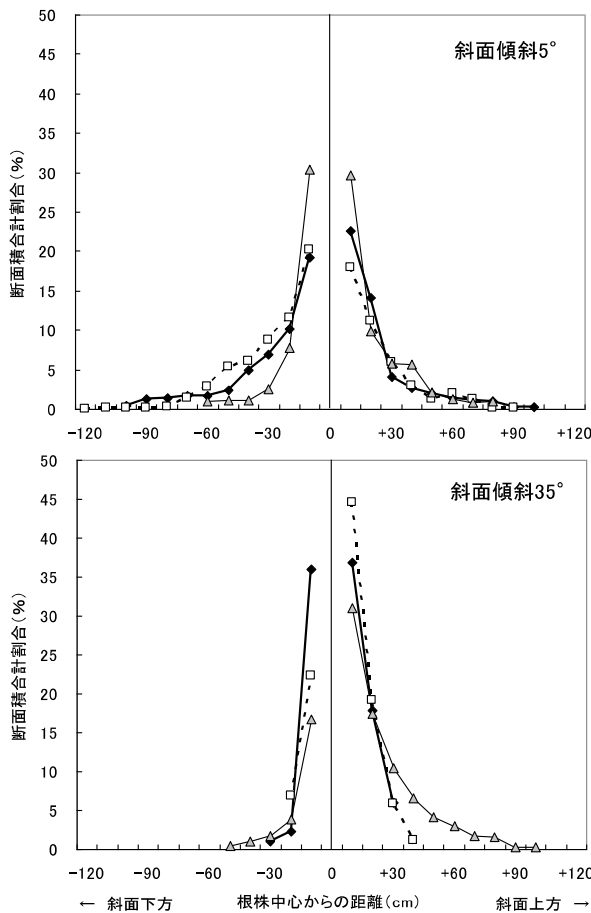
## 3) 根系伸長量

傾斜別の根系深さと、根張りの範囲および斜面下方における根張り長さを 1.0 とした場合の上方、側方の根張り長さの比を表-4に示す。全試験木ともに斜出

表一 4. 根系深さおよび根張り範囲

斜面傾斜	本数 (本)	根系深さ (cm)	根張り		
			斜面下方 (cm)	斜面上方 (cm)	斜面側方 (cm)
5°	10	98.0 ±14.6	92.0 ±21.6	71.0 ±23.2 (0.82 ±0.36)	69.0 ±24.2 (0.78 ±0.30)
15°	10	86.0 ±25.8	77.0 ±35.5	80.5 ±18.5 (1.30 ±0.66)	82.3 ±24.0 (1.32 ±0.73)
25°	10	73.5 ±19.7	72.0 ±17.4	81.0 ±23.9 (1.21 ±0.53)	83.0 ±22.5 (1.22 ±0.45)
35° a	10	78.3 ±19.8	60.0 ±41.6	75.9 ±28.4 (1.49 ±0.55)	73.3 ±26.8 (1.46 ±0.56)
合計	40	84.1 ±21.7	75.5 ±32.2	77.3 ±23.6 (1.20 ±0.57)	76.9 ±24.7 (1.20 ±0.58)

平均値±標準偏差を示す。括弧内の数値は斜面下方の根張り長さを1.0とした場合の比を示す。斜面側方は、斜面方向に直交する2方向の平均値を示す。



図一 17. 根株中心からの距離と断面積合計の割合  
上：斜面傾斜 5°，下：斜面傾斜 35° (a)。図中左が斜面下方を、右が斜面上方を示す。それぞれ3個体について表し、両図間で同じシンボル・線種は同一個体を表す。

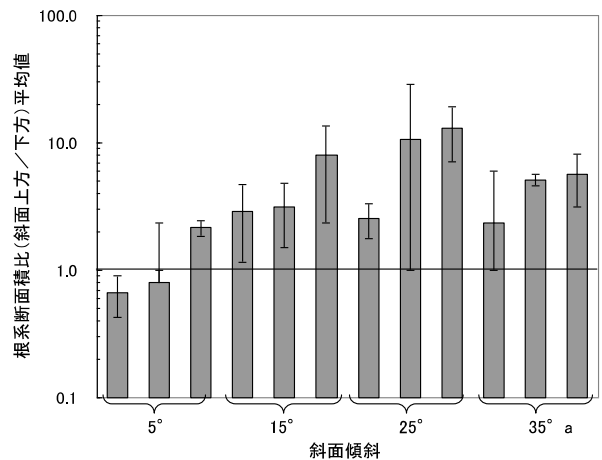
根が発達した深根性の根系であった。根系深さは平均84.1cmで、傾斜が急になるほど浅くなる傾向がみられた。根張り長さの斜面下方に対する上方の比は、傾斜5°では0.82で、上方の根張りは下方よりやや短い傾向

にあった。一方、傾斜 15°, 25°, 35° (a) ではそれぞれ 1.30, 1.21, 1.49 で、傾斜が急になるほど上方の根張りは下方より長くなる傾向がみられた。また、斜面側方の根張りは上方とほぼ同じ長さであった。

傾斜5°と35° (a) における、斜面方向に対する根株中心から10cmごとの根系断面積合計の割合を図一17に示す。根系断面積合計の割合は、両傾斜ともに根株中心付近で最も高く、中心から離れるに従って指数関数的に減少する傾向がみられた。この傾向は、5°では斜面上方と下方の間にほとんど差がみられず、均等であった。一方、35° (a) では斜面上方では減少が緩やかであったのに対し、下方では急激に減少した。

4) 根系断面積比

根系断面積比を図一18に示す。傾斜5°では1.0前後で、斜面上方と下方の根系断面積合計にあまり差がみられなかった。一方、15°, 25°, 35° (a) では全ての個体で2.0以上であり、斜面下方に比べて斜面上方で大きい傾向がみられた。根系断面積比は、根張り長さの斜面下方に対する上方の比(表一4)との間に正の相関がみられ( $r=0.561$ )、斜面上方の根張りが長いほど、上方の断面積の割合も大きい傾向がみられた。



図一 18. 傾斜別試験における各個体の根系断面積比  
各個体の平均値±標準偏差を示す。根系断面積比は、根株中心から等距離における、斜面下方に対する上方の根系断面積合計の比を示す。縦軸は対数目盛とした。

5) 根元の最大回転モーメントとΔMの関係

傾斜地での本試験の実測値と平坦地で得られた回帰式による最大回転モーメント推定値との較差ΔMと、根系断面積比との関係を図一19に示す。相関はそれほど高くないものの、斜面上方に引き倒す場合は、根系断面積比が高いほどΔMが小さくなる傾向がみられた( $r=0.225$ )。一方で斜面下方に引き倒す場合は、根系

断面積比が高いほど  $\Delta M$  も大きくなる傾向がみられた ( $r=0.590$ )。

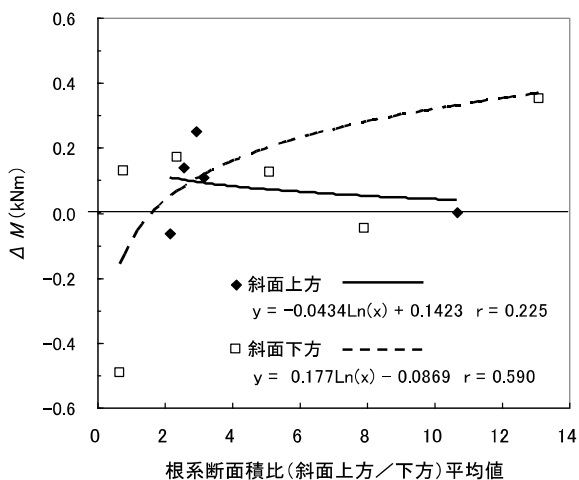


図-19. 根系断面積比と  $\Delta M$  の関係

$\Delta M$ は、傾斜地での実測値と平坦地で得られた回帰式 (最大回転モーメント=0.0073×胸高直径<sup>2.78</sup>) による最大回転モーメント推定値との較差 (前者-後者) を示す。根系断面積比平均値は、根株中心から等距離における、斜面下方に対する上方の根系断面積合計の比を示す。

#### 4. 考察

斜面での引き倒し試験では、上方に引き倒す場合、根元の最大回転モーメントは、傾斜角が増加してもほぼ変わらないか、やや低下したのに対し、下方に引き倒す場合は、傾斜角の増加に伴って増加する傾向がみられた (図-12, 13)。また、斜面側方に引き倒す場合が最も根元の最大回転モーメントが大きかった (図-14)。このことは、傾斜が急になるほど、下方や側方に引き倒す方が上方に引き倒すのに比べて、根返りに対する抵抗力が増加することを示している。つまり、斜面に対して吹き下ろす風や横から吹く風よりも、吹き上げる風に対して根返りに対する抵抗力が弱いことを示唆している。このことは主風方向に開けた斜面で風害が多い (三浦ら, 1984; 諫本・高宮, 1992; 福永ら, 1993; 中尾ら, 1993; 秋田県林務部, 1994; 嘉戸・図子, 2008 など) ことを、風当たりの面からだけでなく、耐風性の面からも説明できる結果であった。

次に、根系を調査したところ、傾斜が 35°になると地上部重量に対する根株重量の割合が高くなる傾向が示された (図-15)。この結果は、関東ロームの切土斜面に侵入した樹木の根系を調査した前田ら (2000) の結果と一致する。しかし、前項IIでは、根株重量も根返りに対する抵抗力と相関が非常に高かった (表-1)

ため、単に根系重量の割合が高くなるだけであるならば、斜面下方だけでなく、上方に引き倒した場合の抵抗力も強くなると考えられる。そこで斜面上下方向の根系重量の割合を見てみると、傾斜が急になると斜面上方の根系重量割合が高くなることがわかった (図-16)。また傾斜地では、根系断面積合計の割合が斜面下方に比べて上方で大きいことが示された (図-18)。北原 (2010) は、林地に掘削したトレンチに現れた単位面積当たりの根系本数は、立木からの距離によって大きく変わらないことを明らかにしている。よって、根系断面積が大きいということは、細い根系が多数伸びているのではなく、太い根系が伸びていることを意味していると考えられる。したがって、傾斜地では斜面上方により太い根系が多く分布していると考えられた。さらに、全試験木において、根張り長さは傾斜が急になるほど斜面下方より上方が長くなる傾向が示されるとともに (表-4)、根系断面積比との間にも正の相関があった。したがって、この傾向は根系の詳細調査を実施した 12 本だけでなく、試験木全体の傾向であると考えられた。

上述の根系分布の差異が、傾斜地における引き倒し試験結果の差異に寄与しているのではないかと考え、 $\Delta M$ と根系断面積比との関係を検討した。その結果、斜面上方に引き倒す場合は、根系断面積比が高いほど  $\Delta M$  が小さくなる傾向が、下方に引き倒す場合は、根系断面積比が高いほど  $\Delta M$  も大きくなる傾向がみられた (図-19)。このことは、斜面下方に対して上方の根系断面積が大きいほど、根元の最大回転モーメントが斜面上方に引き倒す場合は低下し、下方に引き倒す場合は増加することを示している。したがって、傾斜が急になるほど太い根系が斜面上方に分布する傾向にあり、このような根系分布の差異が、斜面傾斜地における引き倒し試験結果の差異に寄与していることが示唆された。

今回斜面側方の根系量については詳細な調査を行っていないが、根張り長さは側方と上方とであまり変わりが無いことから、傾斜が急になるほど側方の根張りも相対的に長くなり、上方と同程度太い根系が多く分布していると考えられた。

福永 (2006) は、山地自然斜面におけるスギ植栽木の根系分布を調査し、根系の水平分布は等高線側および山側は長く分布範囲が広いのに対し、谷側は短く分布範囲が狭い傾向が認められるとしている。そして等高線方向に並んだ個体間には比較的多くの根系が絡み合いながら連続的に存在しているのに対し、斜面方向 (山側-谷側) に並んだ個体間は根系が不連続であることを確認している。したがって、隣接する個体間の

根系の絡み合いも考慮に入れると、等高線方向に引き倒し試験を行った場合の根元の最大回転モーメントが最も大きかったことは合理的であると考えられた。

今回の結果は、深さ方向に土壤硬度の様なマサ土に栽植された14~15年生のスギによるものであるが、樹木の根系分布は立地や樹種によっても異なることが知られている(荏住, 1979; 福永 2006)。したがって、今後立地や樹種を変えて傾斜地において引き倒し試験を行い、様々な条件に対する本研究結果の適応性について検討を行うことが重要であると考えられる。

#### IV. スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布

##### 1. 目的

本研究では風害の中で比較的割合の多い根返りに着目して力学的な検討を行っているが、根返りに次いで幹折れの被害も多く発生している(諫本・高宮, 1992; 野田ら, 1992)。また、台風によって根返りや幹折れが発生しなかった立木であっても、樹幹には大きな力が加わったことに変わりない。この場合、材が圧縮破壊した跡である「モメ」や年輪に沿って割れが生じる「目廻り」といった影響が材の内部に残る場合もある(野田ら, 1992; 藤本ら, 1994 など)。したがって、強風時に樹幹にどのような力が加わっているかも把握する必要がある。

幹折れについて、風圧に対する樹幹の曲げ応力の分布は樹幹形状によって異なる(森岡ら, 1991; 千葉, 1993; 野々田ら, 2004)とされている。樹幹のたわみを考慮しないモデルでは、樹幹形状を円錐と仮定すると、枝下高付近に明瞭なピークを持つ応力分布を示す(森岡ら, 1991; 野々田ら, 2004)と考えられている(図-20)。しかし、中尾ら(1993)は、計算値と実測値の間で幹折れ高さが異なることから、樹幹のたわみを考慮しないモデルでは、曲げ応力を過大評価する恐れがあることを指摘している。

そこで、樹幹のたわみを考慮した場合の曲げ応力分布を把握することを目的とし、引き倒し試験を実施した立木の曲げ応力分布を算定した。そして樹幹の任意の高さにおける最大曲げ応力の分布について検討した。

##### 2. 研究方法

試験木は、前項IIで引き倒し試験を行った14年生のS-3(品種:シチゾウ)1本とした(図-3)。引き倒し試験では根元割れに分類したが、樹幹の破損(幹折れ)も生じていた。樹高は11.10m、胸高直径は18.4cm、

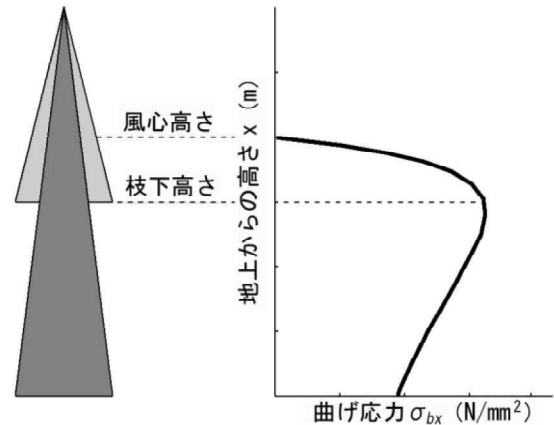


図-20. 樹幹のたわみを考慮しない円錐形樹幹モデルにおける樹幹の曲げ応力分布

形状比は60.3、樹冠長率は82.3%で、形状比が低く、樹冠長率が高い個体であった。

引き倒し試験時に樹幹の任意の高さ  $x$  において外力によって生じる曲げモーメント  $M_{bx}$  (kNm) は、引張り荷重  $F$  (kN) と樹幹上の任意の地点から引張り荷重の作用線へ下ろした垂線の長さ  $l$  (m) との積として式(5)で表される(図-21)。

$$M_{bx} = Fl \quad (5)$$

ここで  $l$  は、チルホールの固定点を原点  $O(0,0)$  とし、樹幹上の任意の地点  $X(a,b)$ 、および立木における荷重の作用点  $Y(A,B)$  の2点の座標を与えることにより、式(9)から求めた。

$$l = L \sin\theta \quad (6)$$

$$L = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1}(B/A) - \tan^{-1}(b/a) \quad (8)$$

式(6)~(8)より

$$l = \sqrt{a^2 + b^2} \sin\{\tan^{-1}(B/A) - \tan^{-1}(b/a)\} \quad (9)$$

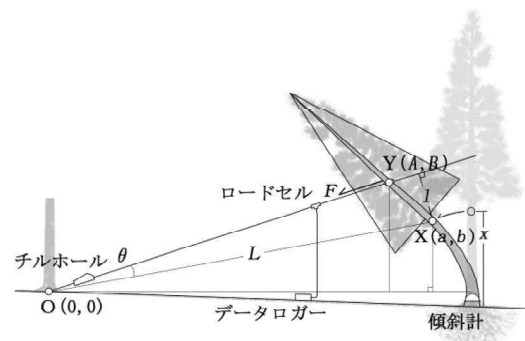


図-21. 樹幹の曲げ応力分布推定の推定模式図



なお、計算を簡略化するため自重の影響は考慮せず、座標を与える樹幹上の任意の地点は根元から 0.5m 毎に設定した。また、引き倒し試験中における各点の座標は、チルホルの固定点から立木の根元までの距離や傾斜角、引き倒し中のワイヤーの角度や立木根元の傾斜角がわかっているため、その時々撮影した写真より詳細な座標を決定した (図-22)。

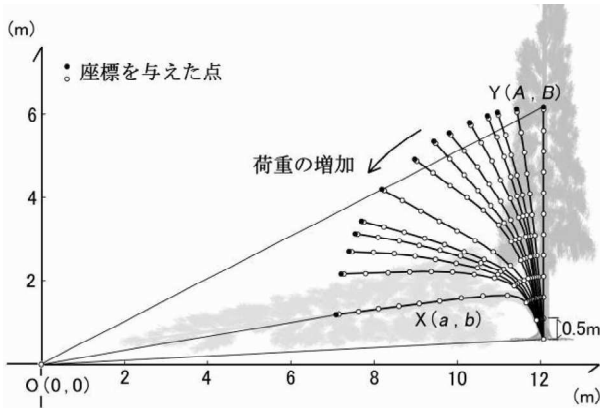


図-22. 荷重の増加に伴う樹幹上の任意の点の座標変化

次に、樹幹の曲げ応力  $\sigma_{bx}$  は、任意の高さ  $x$  における樹幹の直径を  $dx$  (cm) とすると、任意の高さにおける樹幹の曲げモーメント  $M_{bx}$  を円形の断面係数である  $\pi dx^3 / 32$  で除すことによって、式 (10) により求めた。

$$\sigma_{bx} = 32M_{bx} / \pi dx^3 \quad (10)$$

ここで、 $dx$  は、KUNZE の幹曲線を応用し、式 (11) によって求めた。

$$dx = D \left( \frac{T-x}{T-1.2} \right)^n \quad (11)$$

$D$ : 胸高直径 (cm)       $T$ : 樹高 (m)

式中の  $n$  は樹幹形状を決めるパラメータであり、 $n = 1.0$  の時は円錐形の樹幹を示し、 $n$  が 1.0 より小さくなる場合は完満な樹幹を、 $n$  が 1.0 より大きくなる場合はうらごけの樹幹を示す (図-23)。今回は地上高 0.5 m 以上において式 (11) を適用し、地上高さ 0 m においては高さ 20cm の地点で測定した根元直径の値を用いた。なお、樹幹形状が異なると引き倒し試験時の  $X(a, b)$  や  $Y(A, B)$  の座標も変化すると想定されるが、今回はその影響を無視している。今回の解析では  $n$  の値を 1.00, 0.75, 0.50 と変化させた場合の樹幹の曲げ応力分布について検討した。

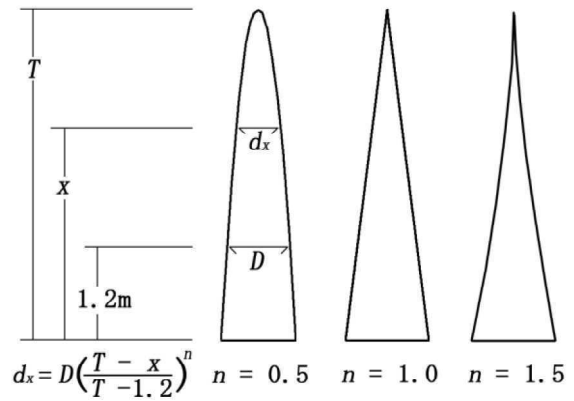


図-23. KUNZE の幹曲線

$n$  は KUNZE の幹曲線における樹幹形状を決定するパラメータ。

### 3. 結果

#### 1) 樹幹形状を円錐とした場合の曲げ応力分布

KUNZE の幹曲線に  $n=1.0$  を与え、樹幹形状を円錐と仮定した場合の、荷重に応じた樹幹の曲げ応力分布の変化を図-24 に示す。まず、荷重が小さい段階から明確なピークを持たない応力分布を示し、樹高のおよそ 1/3 (3.70m) 以下にはほぼ一様に曲げ応力が分布していた。次に、荷重が幹折れ発生時のおよそ 75% である 3.00kN を超えると、荷重が増加しても曲げ応力は増加しなくなり、樹幹上における応力分布はほとんど変化しなくなった。そして、荷重を 3.96kN 加えた時点で高さ 1.50m において幹折れが発生したが、幹折れが生じた高さは応力分布が一様に高い範囲と一致し、幹折れ時の外力による曲げ応力は  $24.4\text{N/mm}^2$  であった。幹折れ発生後、曲げ応力のピークが根元付近へと下がった後、荷重の増加に伴い樹幹上部の応力は低下し、最終的には根元付近で最大値をとるような応力分布へと変化した。

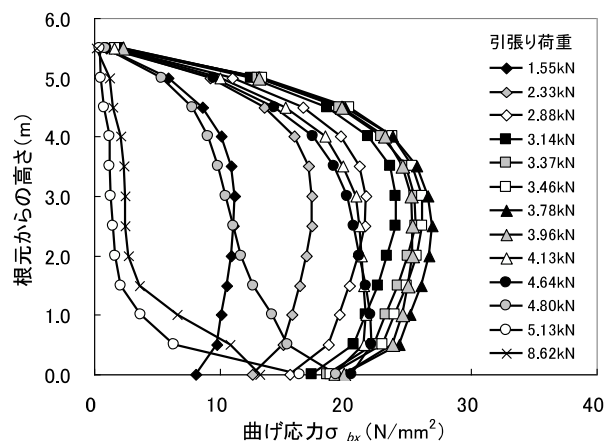


図-24. 荷重ごとの曲げ応力分布 ( $n=1.0$ )

2) 樹幹形状を完満とした場合の曲げ応力分布

次に、KUNZE の幹曲線に  $n=0.75$  を与え、樹幹形状をやや完満と仮定した場合の、荷重に応じた樹幹の曲げ応力分布の変化を図-25 に示す。まず、荷重が小さい段階から根元付近で最大値をとるような曲げ応力分布を示した。次に、荷重がある程度大きくなると、荷重が増加しても曲げ応力は増加しなくなり、樹幹上における応力分布はほとんど変化しなくなった。その後幹折れが発生したが、幹折れは曲げ応力の最大値を示した高さよりも高い位置で発生していた。幹折れ後、根元付近の応力が最大となる傾向は明確となり、根元付近で最大値をとったまま荷重の増加に伴い樹幹上部の曲げ応力は低下していった。

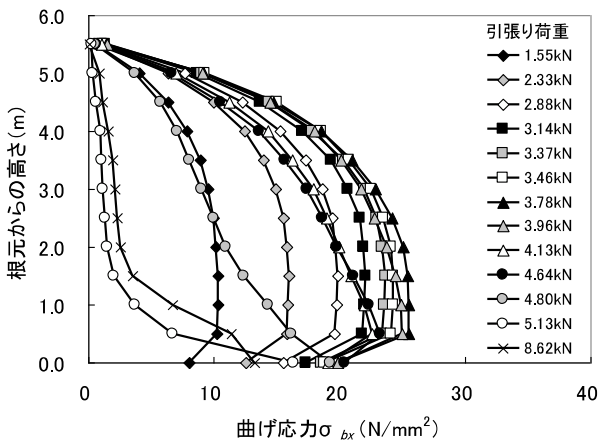


図-25. 荷重ごとの曲げ応力分布 ( $n=0.75$ )

3) 樹幹形状による曲げ応力分布の変化

図-26 に KUNZE の幹曲線において  $n=1.00, 0.75, 0.50$  と樹幹形状を円錐から完満へ変化させた場合における、根元からの高さ(高さ)と樹幹の最大曲げ応力の関係を示す。樹幹形状が円錐の場合には樹高の 1/3 以下の最大曲げ応力がほぼ一様な分布を示したが、樹幹形状が完満になるにつれて樹幹の高い位置での応力が減少し、根元付近で最大値をとるような分布へと変化した。また、最大曲げ応力の絶対値は樹幹形状が円錐の場合 ( $n=1.0$  の時,  $26.9\text{N/mm}^2$ ) と完満な場合 ( $n=0.75$  の時,  $25.5\text{N/mm}^2$ ;  $n=0.50$  の時,  $26.9\text{N/mm}^2$ ) との間に明確な差はみられなかった。

4. 考察

樹幹のたわみを考慮しなければ、荷重が大きくなっても曲げ応力の絶対値が変化しただけで応力分布の形状は変化せず、樹幹形状が円錐の場合には、枝下高付近に明確なピークを持つ応力分布を示すと考えられて

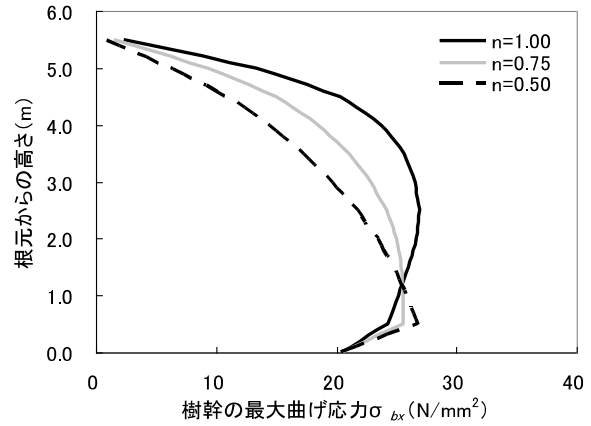


図-26. 根元からの高さ(高さ)と樹幹の最大曲げ応力の関係

いる(図-20)(森岡ら, 1991; 野々田ら, 2004)。しかしながら、実際の引き倒し試験においては、荷重によって応力分布の形状が変化する傾向が見られた(図-24)。また、幹折れが発生するまでは、比較的似通った応力分布の形状を示したが、枝下高(1.96m)付近に特に明確なピークを持たない、樹高のおよそ 1/3 付近から下方の曲げ応力がほぼ一様とみなせる応力分布を示した。このように実際の引き倒し試験において荷重によって応力分布が変化したのは、樹幹が荷重によって大きくなったためと考えられた(図-22)。そして樹幹が円錐形の場合には、樹幹がたわむことにより、枝下高付近に明確なピークを持たない、樹高の 1/3 以下の曲げ応力がほぼ一様となる分布を示すと考えられた。今回の結果は、実際の風害では幹折れやモメが生じやすい高さが樹高の 1/3 付近を中心に多く見られること(檜山ら, 1974; 千葉, 1993; 中尾ら, 1993; 野田, 1993; 米丸, 1998)と一致した。なお、幹折れが発生した高さ、幹折れ発生時の曲げ応力分布が高くなった範囲とが一致したことから、試験木の樹幹形状は円錐形に近いと考えられた。

樹幹形状を完満と仮定した場合においても、円錐と仮定した場合と同様に、荷重によって応力分布の形状が変化する傾向が見られた(図-25)。しかし、荷重が小さい段階から一貫して根元付近で最大値をとるような応力分布を示し、円錐の場合と異なり常に根元付近の応力が最大となる傾向が見られた(図-26)。根元付近における最大曲げ応力が樹幹を通して最大となることから、幹折れ高さが著しく低くなるか、根返りが発生しやすくなるものと考えられた。また、樹幹形状が円錐の場合と比較して、樹幹上部における最大曲げ応力は低下し、全体的に曲げ応力の高い範囲は狭くなる

ことから、モメなどの被害を受ける範囲は、樹幹形状が円錐から完満になるにつれて低く狭くなると考えられた。一方で樹幹形状が円錐の場合には、完満な場合と比較して、幹折れやモメなどの被害範囲が高く広くなると想定されたが、最大曲げ応力の絶対値は完満な場合と同程度の値を示すことから、必ずしも幹折れが生じやすいとは言えなかった。樹幹形状を説明する樹幹のパイプモデル(藤森, 2010; Shinozaki et al, 1977a, b)の観点から考えると、樹冠長が長く、形状比の低い立木ほど円錐形の樹幹形状を示しやすく、一方で樹冠長が短く、形状比の高い立木ほど完満な樹幹形状を示しやすい(野々田ら, 2008)と考えられる。そのため、樹幹形状による樹幹の曲げ応力分布の変化は、単に樹幹形状だけでなく、樹冠長や形状比と連動して説明されるのではないかと推測された。

前項Ⅱにおいて、幹折れが発生した試験木の形状比と、相対幹折れ高さについて検討したところ、形状比が低いほど高い位置で幹折れが発生する傾向があり、形状比が低いほど幹折れ自体の発生も多かった(図-9)。このことは、前述のとおり、一般的なイメージ(形状比が高い、すなわち樹高に対して樹幹が細い個体ほど幹折れが発生しやすい)とは異なった。しかし、今回の結果と上述の樹幹のパイプモデルなどを総合して樹幹形状と形状比の観点から検討すると、樹冠長が長く形状比の低い立木ほど円錐形の樹幹形状を示しやすいため、幹折れが発生しやすく、その発生位置も高くなり、一方で樹冠長が短く形状比の高い立木ほど完満な樹幹形状を示しやすいため、根返りが発生しやすくなる、と説明できた。

今回は幹折れを生じた1個体の調査結果であるため、今後は解析個体数を増やすとともに、幹折れが発生しなかった個体についても解析を行うことにより、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力の傾向を明らかにする必要がある。また、実際の風害では自重による影響も無視できないため(森岡・北川; 1987, 中尾ら; 1993)、これについても解析する必要があると考えられた。

## V. 力学モデルを用いたスギにおける根返り限界風速の推定

### 1. 目的

台風災害に強い森林づくりを進めるためには、風害を受けやすい地域や地形を明らかにすること(福永ら, 1993; 阿部ら, 2006; 谷川ら, 2009, 2010など)に加え、風害を受けにくい樹形、林分を明らかにすること(野々田ら, 1996; 上村ら, 2007; 佐藤ら, 2009)に

より、風害のリスクに応じた森林施業を提案しなければならない。そこで著者らは樹冠形状や樹幹の曲げ強度、根系の強さを考慮した上で、単木としての力学モデルを用い、根返り・幹折れといった風害の相対的な危険度を評価した(茅島・佐々木, 2008)。その結果、風害の危険度は形状比と高い相関があり、形状比によって風害の危険度を定量的に評価できる可能性が示された(茅島・佐々木, 2008)。しかしながら、根系の強さなど、樹木の強度のパラメータが不足していたことにより、実際にどの程度の風速に耐えられるのか、といった絶対的な風害の危険度評価には至らなかった。

そこで根系の強さのパラメータを得るために前項Ⅱで立木の引き倒し試験を実施したところ、根系の最大抵抗モーメントは胸高直径と非常に相関が高く、胸高直径を指標とした近似式により高い精度で推定することが可能であることが明らかとなった。したがって、単木としての力学モデルに根系抵抗力の推定式を組み込むことによって、絶対的な風害の危険度である限界風速の推定が可能となった。

そこで、風害を受けにくい樹形、林分を明らかにすることを目的として、様々な林分・樹形のスギにおいて力学モデルを用いて限界風速を推定し、根返りに強い樹形や林分の条件について検討した。

## 2. 研究方法

### 1) 根返り限界風速の推定

本項で限界風速を推定するために用いた力学モデルの模式図を図-27に示す。このモデルにおいて限界風速の推定に必要な項目は樹高  $H$ (m)、胸高直径  $D$ (cm)、枝下高  $H_b$ (m)、樹冠幅  $W_c$ (m)の4項目である。モデルは樹木を単木として扱っており、風を受ける面積である樹冠投影面積  $A$ ( $m^2$ )は樹冠を二等辺三角形と近似し、この樹冠に一樣に風速  $V$ (m/s)の風が吹きつ

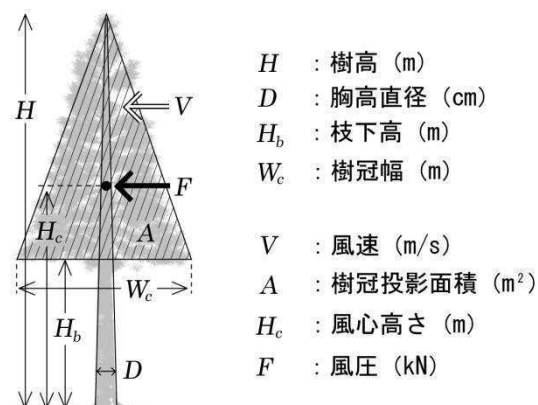


図-27. 根返り限界風速推定モデル模式図

けるとしている(茅島・佐々木, 2008)。また, 風心はこの二等辺三角形の重心にあるとしている(茅島・佐々木, 2008)。このモデルにおいて, 根返りを起こす力である根返りモーメント  $M_r$  (kNm) は風圧を  $F$  (kN), 根元から風心までの高さを  $H_c$  (m) とすると式 (12) で表される。ここで風圧  $F$  は式 (13) で, 根元から風心までの高さ  $H_c$  は式 (14) で表される。式 (13) 中の樹冠投影面積  $A$  は式 (15) で表され,  $C_d$  (抵抗係数) は 0.7 (檜山ら, 1974),  $\rho_s$  (空気密度) は  $1.225\text{kg/m}^3$  とした。一方, 根返りに抵抗する力である根返り抵抗モーメント  $M_{max}$  (kNm) は, 前項Ⅱの試験結果より式 (16) で与えた。

$$M_r = FH_c \quad (12)$$

$$F = 1/2 C_d \rho_s V^2 A / 1000 \quad (13)$$

$$H_c = 1/3 (H - H_b) + H_b \quad (14)$$

$$A = 1/2 (H - H_b) W_c \quad (15)$$

$$M_{max} = 0.0073D^{2.78} \quad (16)$$

ここで, 根返りが発生する条件は, 根返りモーメント  $M_r$  が根返り抵抗モーメント  $M_{max}$  以上になった場合 ( $M_r \geq M_{max}$ ) であり, 根返り発生時の風速を限界風速  $V_r$  (m/s) とした。  $V_r$  は, 式 (12) に式 (13) (14) (15) を代入し, 式 (16) との不等式により, 式 (17) で表される。

$$V_r = \sqrt{\frac{87.6 D^{2.78}}{C_d \rho_s (H - H_b)(H + 2H_b) C_w}} \quad (17)$$

限界風速の推定に用いたデータは, 上述の4項目を測定しているスギ林の毎木調査データである。場内試験林 (2007~2011年), 添田複層林上木 (1990~2007年), 過去の当センター研究課題「機械化作業システムに適合した森林施業法の開発」の調査林分 (以下, 機械化作業林: 1997~2000年), 篠栗スギ林 (1985年), 間伐調査林 (1990年) の5つの試験で測定した44林分2112本のデータを使用した。場内試験林, 添田複層林上木, 機械化作業では同一林分において異なる年度に毎木調査を行っているが, このように同一林分においても測定時期が異なるものは異なる林分, 異なる個体として取り扱った。

使用林分データにおける本数密度, 樹高, 胸高直径, 形状比, 樹冠長率の頻度分布を図-28に示す。場内試験林は本数密度が高く, 若齢林 (3齢級) であるため樹高, 胸高直径ともに小さく, 下枝の枯れ上がりも進んでいないため, 樹冠長率が高い傾向にあった。一方, 添田複層林上木は本数密度が低く, 樹高, 胸高直径ともに大きく, 形状比はやや低め, 樹冠長率はやや高い傾向にあった。残りの3つの試験における林分は場内

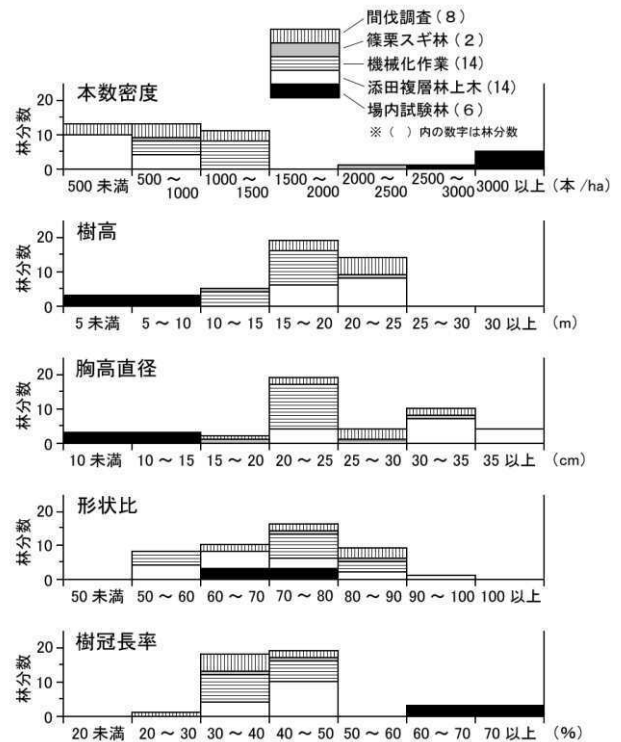


図-28. 使用林分データの頻度分布

試験林と添田複層林上木との中間的な分布を示す傾向にあった。

これらのデータを用いて, 式 (17) により各個体の限界風速を推定した。そして限界風速と樹形の諸因子との関係から, 根返りに強い樹形について検討した。また, 各林分の平均限界風速を求め, 林分レベルにおける耐風性について検討した。

## 2) 根返り限界風速推定モデルの検証

限界風速を推定する力学モデルの適合性を検証するために, T9119により風害を受けた林分のデータ(野田ら, 1992)を用いて, 林分の平均限界風速推定値と根返り発生率の関係について検討した。検証に用いた林分は, 田川郡添田町の南西部, 東峰村に接する林分で, 九州地区林業試験研究機関連絡協議会が行った「九州産すぎ優良品種現地適応試験」として設定されたものの1つであった。この林分では, T9119により根返りや幹折れ, 傾きといった被害が発生した。風害発生時の現地の風速について詳細はわからないが, 周辺の風速から推測すると, 最大風速は25~30m/s, 最大瞬間風速は50~60m/s程度だったと推測される。

この林分において風害後に調査が行われ, スギ品種による被害形態の違いについて検討されている(野田ら, 1992)。この試験林には100×100mの1haにアヤスギ, ヤブクグリ, ウラセバル, オビアカ, メアサの5

品種がそれぞれ2林分ずつ斜面の上下に分けて無作為に配置されており(図-29)、調査時(1992年)の林齢は37年であった。調査区の林況を表-5に、被害の概要を表-6に示す。本来は1本1本個別に限界風速を推定してその適合性を検証すべきであるが、林分の平均的なデータしか残っていなかったため、胸高直径、樹高、枝下高についてはそれぞれの林分の平均値を用いた。また樹冠幅は測定されていなかったが、限界風速の推定に用いた2112本の樹冠長と樹冠幅の関係から、樹冠の先端の角度を約26°とし、式(18)により推定した値を用いた。

$$W_c = 2 \tan 26^\circ (H - H_b) \quad (18)$$

これらのデータを用いて林分の平均限界風速を推定し、根返り発生率との関係について検討し、本モデルの適合性を検証した。なお、検証林分は東向き斜面であり、強風の推定主風向である南(野田ら, 1992)に対して直交するように緩い谷が見られた(図-29)ため、谷部と尾根部に分けて解析した。また、検証林分では品種別に根返り以外の被害形態についても集計さ

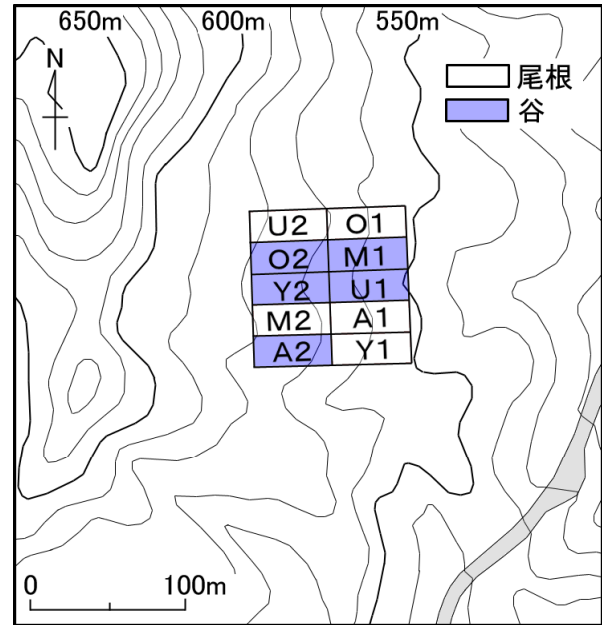


図-29. 九州産すぎ優良品種現地適応試験林の位置と各品種の植栽位置

A~Yは植栽品種を示す。A:アカバ, M:メアサ, O:オビアカ, U:ウラセバル, Y:ヤマグチ。

表-5. 力学モデル検証林分における林況

品種	番号	被害前	胸高直径	樹高	枝下高	樹冠幅	形状比	樹冠長率
		本数密度						
		本/ha	cm	m	m	m		%
アヤスギ	1	1170	23 (21~28)	15 (14~16)	8 (6~10)	3.4	65.0 (65.2)	48.0 (46.7)
	2	1500	19 (17~20)	14 (13~16)	8 (7~9)	2.9	73.0 (73.7)	43.0 (42.9)
ヤブクグリ	1	1140	22 (21~24)	16 (15~18)	9 (8~12)	3.4	73.0 (72.7)	44.0 (43.8)
	2	1130	21 (15~25)	17 (15~19)	9 (7~11)	3.9	80.0 (81.0)	45.0 (47.1)
ウラセバル	1	890	28 (22~37)	21 (18~24)	12 (11~14)	4.4	76.0 (75.0)	42.0 (42.9)
	2	890	29 (23~34)	19 (16~22)	11 (8~13)	3.9	67.0 (65.5)	46.0 (42.1)
オビアカ	1	880	31 (27~36)	19 (17~21)	9 (8~11)	4.9	62.0 (61.3)	51.0 (52.6)
	2	1320	23 (21~27)	19 (18~22)	11 (9~14)	3.9	82.0 (82.6)	41.0 (42.1)
メアサ	1	890	24 (22~26)	16 (15~17)	8 (8~9)	3.9	68.0 (66.7)	48.0 (50.0)
	2	1010	23 (16~33)	14 (12~17)	8 (8~9)	2.9	63.0 (60.9)	47.0 (42.9)

胸高直径、樹高、枝下高の値は平均値(最小値~最大値)を示す。形状比、樹冠長率の括弧書きの値は平均胸高直径と平均樹高、平均樹高と平均枝下高より求めた値。樹冠幅は樹冠先端の角度を26°とし、樹冠長より林分平均値を推定。

表-6. 力学モデル検証林分における被害形態別本数(割合)

品種	番号	被害形態別本数(割合)										被害木合計		被害状況
		無被害		幹折れ		傾き		根返り		裂け		本	%	
		本	%	本	%	本	%	本	%	本	%			
アヤスギ	1	48	41.0	0	0.0	19	16.2	47	40.2	3	2.6	69	59.0	集団状
	2	115	76.7	0	0.0	34	22.7	1	0.7	0	0.0	35	23.3	点状
ヤブクグリ	1	30	26.3	0	0.0	44	38.6	40	35.1	0	0.0	84	73.7	集団状
	2	93	82.3	0	0.0	8	7.1	12	10.6	0	0.0	20	17.7	点状
ウラセバル	1	41	46.1	41	46.1	4	4.5	3	3.4	0	0.0	48	53.9	集団状
	2	34	38.2	47	52.8	1	1.1	7	7.9	0	0.0	55	61.8	集団状
オビアカ	1	58	65.9	0	0.0	7	8.0	21	23.9	2	2.3	30	34.1	点状
	2	101	76.5	1	0.8	13	9.8	14	10.6	3	2.3	31	23.5	点状
メアサ	1	87	97.8	0	0.0	1	1.1	1	1.1	0	0.0	2	2.2	点状
	2	94	93.1	0	0.0	6	5.9	1	1.0	0	0.0	7	6.9	点状

れているため、限界風速とそれら被害形態との関係についても検討した。

**3) 施業による根返り限界風速の変化**

施業による限界風速の変化を検討するため、同じ林分において異なる時期に毎木調査を行っている場内試験林2林分、機械化作業林6林分、添田複層林上木3林分のデータを用いて、限界風速の経年変化を調査した。

場内試験林は 2007～2011 年の間に3回毎木調査を行っており、追跡期間は4年間である。1つは前項Ⅱで2009年に引き倒し試験を行っているものの、本数間伐率にすると10%程度の、ほぼ無間伐の林分である。もう1林分は前項Ⅲで2010～2011年に引き倒し試験を行った林分である。本数間伐率は平均37%であるが、最終測定時は引き倒し試験の直後であったため、引き倒し試験による伐採の影響は無視して、無間伐の林分として扱った。

機械化作業林分は、間伐による樹冠の回復状況等を調査した林分であり、間伐は1997～1998年にかけて、本数間伐率16.1～31.5%で実施された。毎木調査は間伐前後の2回、1997～2000年に行っており、追跡期間は2～3年である。

添田複層林上木は、1983年に本数間伐率40.0～47.8%の強度間伐が行われ、複層林化された林分の上木である。毎木調査は1990～2007年に4～5回行われており、追跡期間は15～17年である。

施業により林分全体の耐風性がどのように変化するのか、これらの林分において平均限界風速を求め、その経年変化を調査することにより、施業による影響を検討した。なお、間伐木は間伐前後の比較ができないため、解析から外し、最終的に残存している個体のみの平均限界風速を比較した。

**3. 結果**

**1) 根返り限界風速の推定**

風害の危険度と相関の高い形状比(茅島・佐々木, 2008)と限界風速の関係を試験区分別にまとめて図-30に示す。限界風速は7.96～55.17m/sまで幅広く分布しており、風速20m/s以下のほとんどは高密度に植栽された場内試験林内の個体であった。全体的にみると、限界風速は形状比と相関が高く、形状比の負の指数乗に比例した。近似式における形状比の指数は-1.0に近く、形状比と限界風速とはおよそ反比例の関係にあった。限界風速は、形状比が75付近より小さくなると急激に高くなるのに対し、75付近より大きくなると緩やかに低下する傾向が見られた。しかし、形状比が同じ

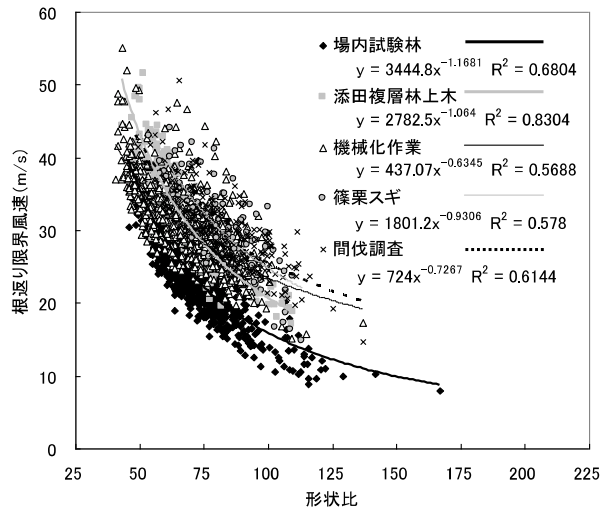


図-30. 林分別の形状比と根返り限界風速の関係

でも限界風速の分布幅は広く、形状比だけでは限界風速を説明するには不十分であった。

樹冠投影面積や風心高さに関係する要素である樹冠長率と限界風速の関係を試験区分別にまとめて図-31に示す。樹冠長率との相関はあまり見られなかったが、場内試験林のように樹冠長率が高い林分でも限界風速はあまり高くなかった。全体的には、樹冠長率が低くなるほど限界風速は高くなる傾向が見られた。

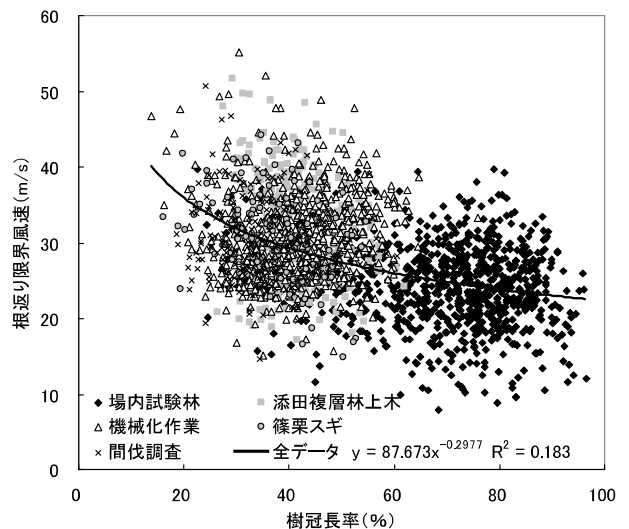


図-31. 林分別の樹冠長率と根返り限界風速の関係

形状比と樹冠長率の関係を試験区分別にまとめて図-32に示す。若齢林である場内試験林では、両者に明確な関係は見られなかったが、場内試験林以外の林分では、負の相関が見られた。すなわち、樹冠長率が低い個体は形状比が高く、樹冠長率が高い個体は形状比が低い傾向が見られた。

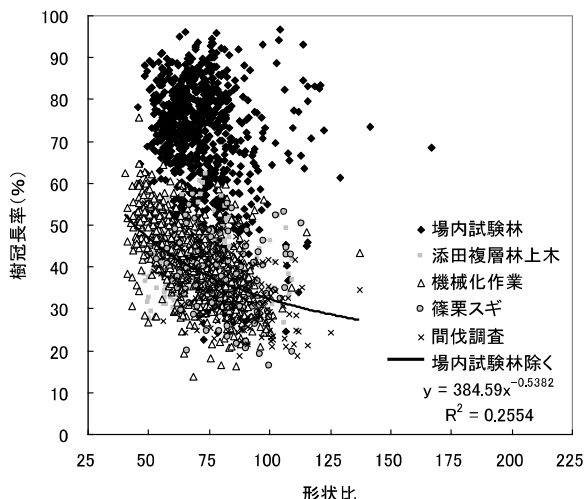


図-32. 林別の形状比と樹冠長率の関係

全ての試験木の樹冠長率別の形状比と限界風速の関係を図-33に示す。同一形状比であれば樹冠長率が低いほど限界風速が高い傾向にあり、図-30で見られた同一形状比における限界風速のばらつきは、樹冠長率である程度説明されることがわかった。

各林分の形状比と限界風速の関係を図-34に示す。各林分内の個々の樹木の根返り限界風速は正規分布に従っていた(全ての林分において危険率5%で有意)。場内試験林は形状比が高く、限界風速は低い傾向がみられた。逆に、添田複層林上木では形状比が低く、限界風速は高い傾向がみられた。また残りの3つの試験における林分は場内試験林と添田複層林上木との中間的な分布を示していた。

林分別の本数密度と限界風速の関係を図-35に示す。限界風速は、本数密度とも相関が高く、本数密度が低くなるにつれて高くなる傾向が見られた。

**2) 根返り限界風速推定モデルの検証**

力学モデル検証林における限界風速と根返り発生率の関係を図-36に示す。谷部と尾根部の双方において限界風速と根返り発生率の間には高い相関が見られ、限界風速が小さい林分ほど根返り発生率が指数関数的に高くなる傾向が見られた。また、限界風速が同じ場合でも、谷部に比べて尾根部における根返り発生率が高かった。根返り発生率が等しくなる限界風速を比較すると、谷部と尾根部との差はおよそ8m/sであった。根返り発生率50%の時の風速(その林分の平均限界風速に相当)を比較すると尾根部ではおよそ26m/s、谷部では19m/sであった。実際に風害が発生した時の風速は、最大風速25~30m/s、最大瞬間風速50~60m/s程度だったと推測され、限界風速は最大瞬間風速ではなく、

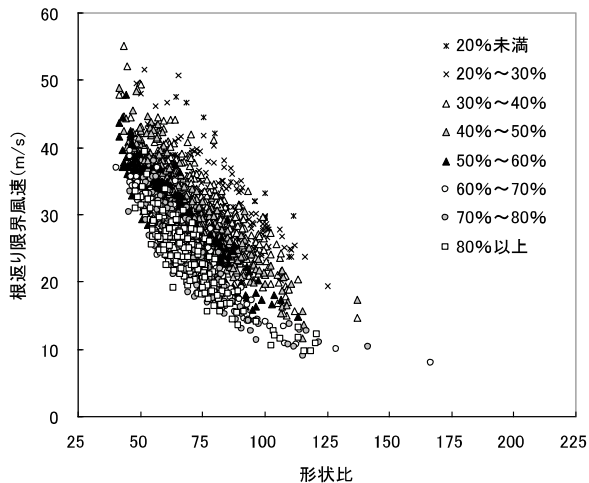


図-33. 樹冠長率別の形状比と根返り限界風速の関係

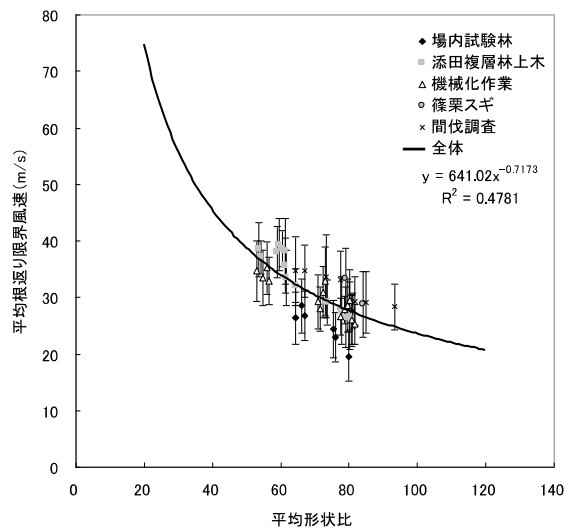


図-34. 林別の形状比と根返り限界風速の関係

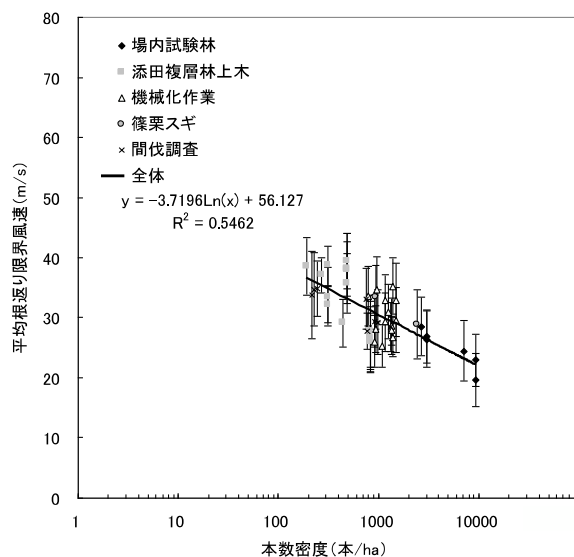


図-35. 林分別の本数密度と根返り限界風速の関係

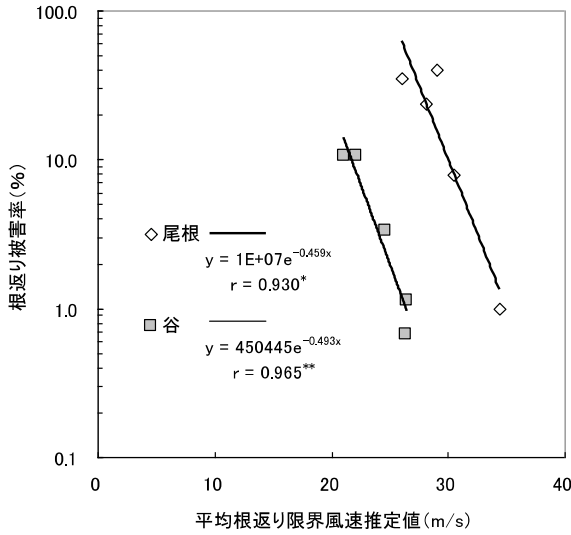


図-36. 力学モデル検証林分における根返り限界風速と根返り被害率の関係

アスタリスクは回帰式の危険率を示す (\*\*: 危険率 1% で有意, \*: 危険率 5% で有意)。

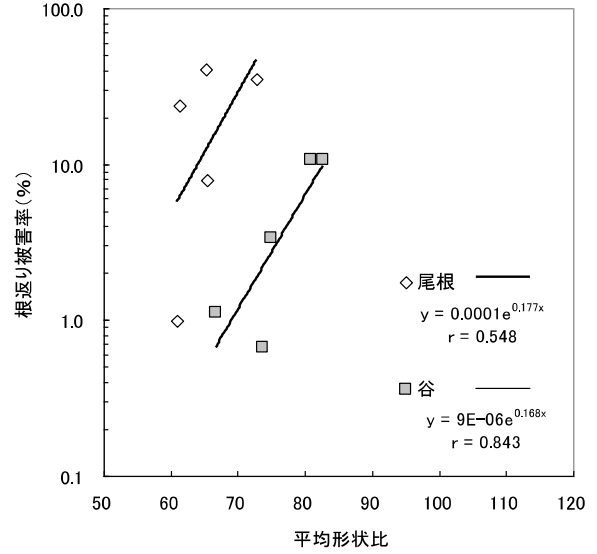


図-37. 力学モデル検証林分における形状比と根返り被害率の関係

最大風速と類似した値であった。

同検証林における形状比と根返り発生率の関係を図-37に示す。谷部と尾根部の双方において、形状比と根返り発生率の間には正の相関が見られ、形状比が高くなるほど、根返り発生率も高くなる傾向が見られたが、形状比との相関は限界風速との相関ほど高くなかった。

同検証林における限界風速と根返り・幹折れ・傾きの各被害率との関係を品種別に図-38に示す。根返りだけでなく、傾き被害についても谷部と尾根部の双方で限界風速との相関が見られた。一方、幹折れについては、ウラセバルにおいて谷部・尾根部ともに顕著に発生率が高かったが、その他の品種ではほとんど発生しておらず、限界風速との関係性は見られなかった。

3) 施業による根返り限界風速の変化

ほぼ無間伐の場内試験林における形状比、樹冠長率、樹冠幅、限界風速の経年変化を図-39に示す。場内試験林では一貫して樹冠長率が低くなる一方、限界風速が高くなる傾向が見られた。形状比と樹冠幅は、平坦な品種別試験林では変化が小さいのに対し、傾斜別試験林ではともに漸減する傾向が見られた。

間伐直後の変化を調査した機械化作業林における同指標の経年変化を図-40に示す。間伐後に全林分で一貫して樹冠幅が増加する一方で、限界風速は低下する傾向が見られた。また、形状比や樹冠長率の変化は小さかった。

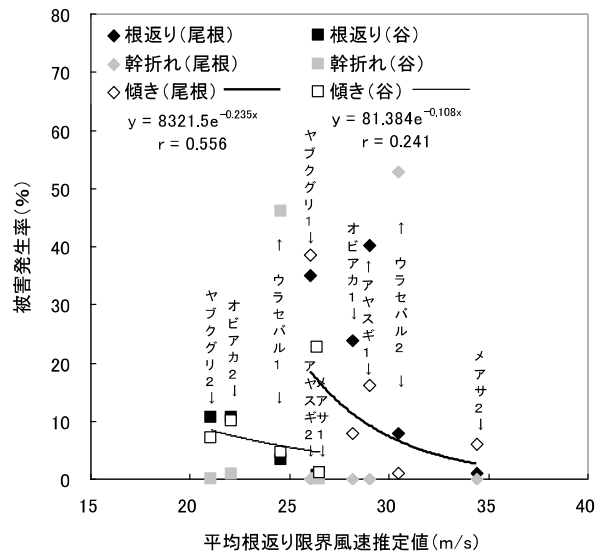


図-38. 力学モデル検証林分における根返り限界風速と品種別の根返り・幹折れ・根返り被害率の関係

強度間伐後の変化を調査した添田複層林上木における同指標の経年変化を図-41に示す。全体的な傾向として、間伐直後は樹冠長率や樹冠幅が大きくなる一方で限界風速が下がる傾向が見られたが、形状比の低下とともに、次第に限界風速が高くなる傾向が見られた。



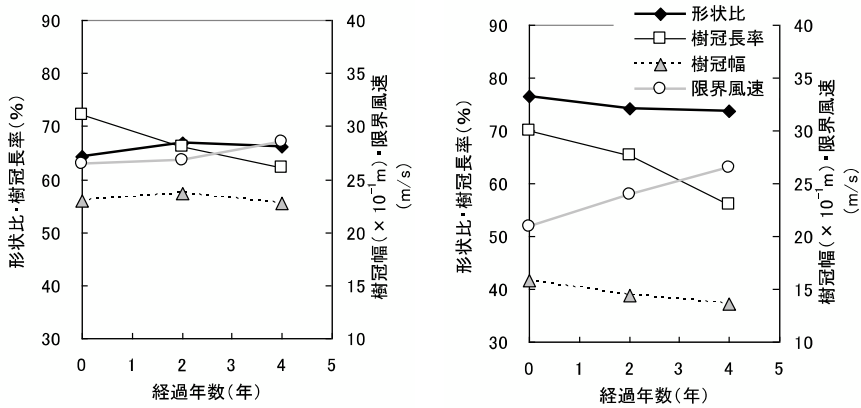


図-39. 場内試験林2林分における形状比・樹冠長率・樹冠幅・根返り限界風速の変化

各プロットはすべて平均値を表す。左：品種別試験林，右：傾斜別試験林。引き倒し試験に供した個体は解析から除外。

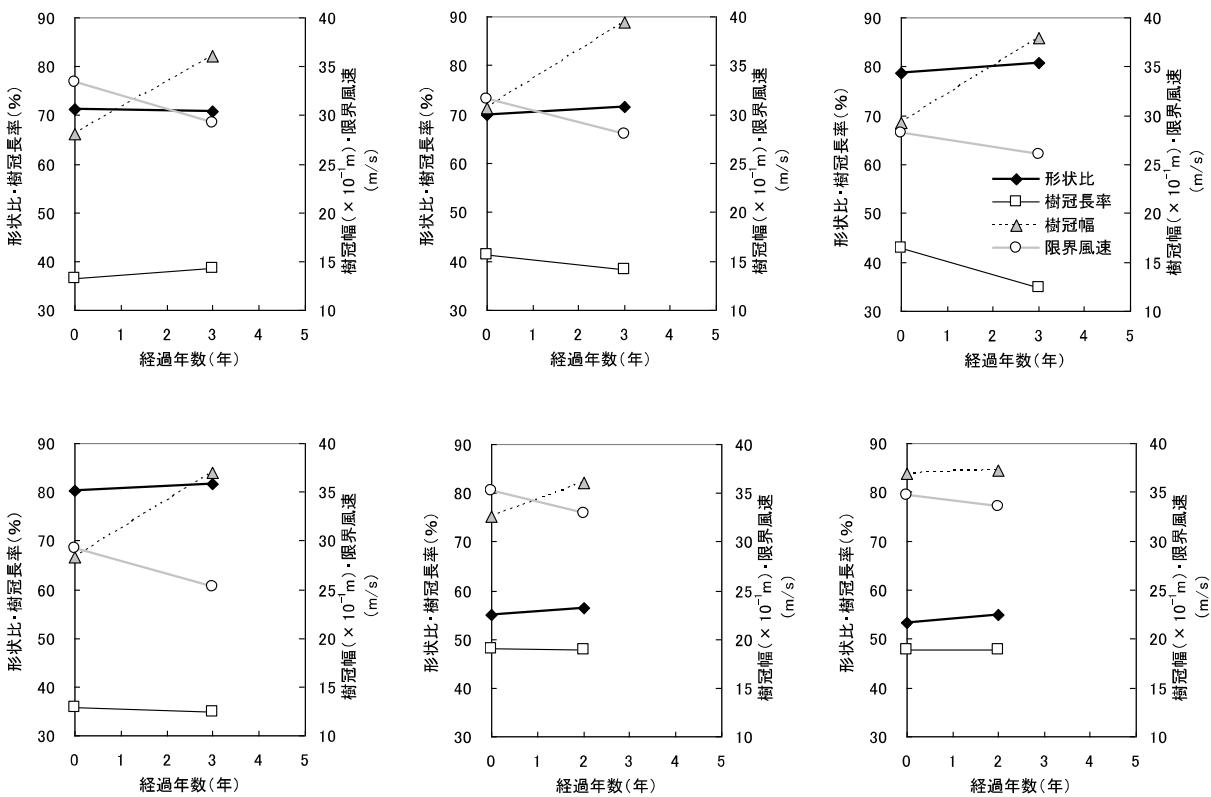


図-40. 機械化作業林6林分における形状比・樹冠長率・樹冠幅・根返り限界風速の変化

各プロットはすべて平均値を表す。間伐により伐採した個体は解析から除外。

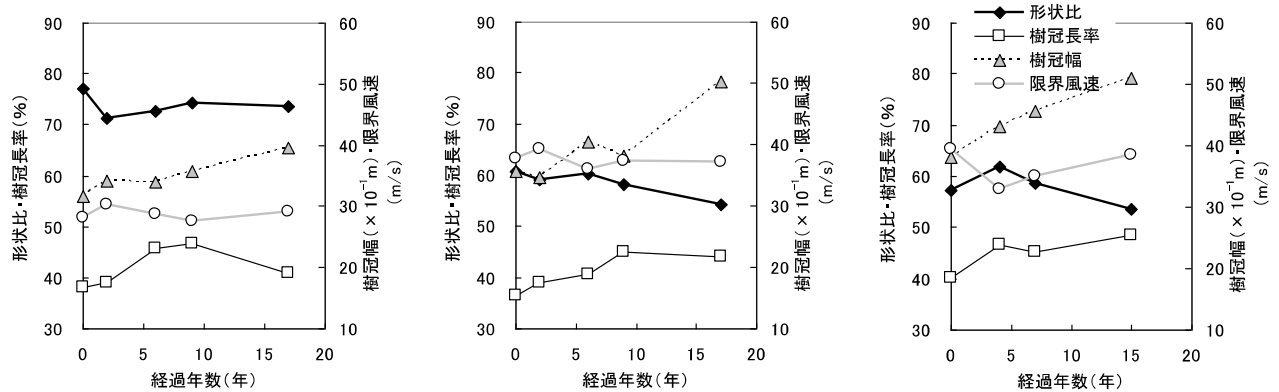


図-41. 添田複層林上木3林分における形状比・樹冠長率・樹冠幅・根返り限界風速の変化

各プロットはすべて平均値を表す。間伐により伐採した個体は解析から除外。

#### 4. 考察

##### 1) 根返り限界風速の推定

限界風速を推定した結果、形状比が低く、かつ樹冠長率も低い個体で高くなることがわかった(図-30, 31, 33)。しかし、形状比と樹冠長率との間には負の相関があるため(図-32)、両者ともに低いという根返りににくい樹形は一般的にはとり難いと考えられた。

同じ形状比であれば樹冠長率が低いほど限界風速は高くなるが、樹冠長率が20~30%以下の個体は木の成長力を維持できず(藤森, 2010; 桑野ら, 2009; 社団法人全国林業改良普及協会, 2006)、樹木の健全性が低いと考えられている。したがって、樹冠長率30%以上を維持しながら限界風速を高めるためには、形状比を低くしなければならない(図-33)。絶対的な数値で示すことは難しいが、樹木の健全性なども考慮すると、風害に強い林分を目指すには、樹冠長率は30~60%、形状比は少なくとも限界風速が急激に高くなる75以下が望ましいと考えられた。これらの値はこれまで経験的に用いられてきた風害に強い樹形の指標(桜井, 2002; 社団法人全国林業改良普及協会, 2006; 内田, 2007; 藤森, 2010など)と範囲が一致しており、本研究の結果はそれらを力学的に支持するものと考えられた。

今回用いた力学モデルは単木としてのモデルであるが、各林分内の個々の樹木の限界風速はおよそ正規分布に従うことがわかった。林分レベルでは単木と風の挙動が異なることを考慮する必要があるが、林内に一様な風が吹いたとすると、林分全体の平均限界風速が高ければ、林分としても根返りに対する耐風性が高いと考えられた。そして、林分ごとの平均限界風速は平均形状比と高い負の相関をもつ(図-34)ことから、林分レベルの根返りに対する耐風性も林分の平均形状比がある程度指標となる(嘉戸・図子, 2008)ことが示唆された。また、林分の平均限界風速は本数密度とも負の相関がある(図-35)ことから、間伐により本数密度が低くなるにつれて根返りに対する耐風性が高まることが示唆された。したがって、林分レベルにおいても耐風性を高めるためには、樹冠長率が低くなり過ぎないように適度に間伐を行い、本数密度を少なくして林分の平均形状比を低く誘導することが望ましい(諫本・高宮, 1992; 上村ら, 2007; 鳥田, 2006, 2009bなど)と考えられた。

##### 2) 根返り限界風速推定モデルの検証

限界風速を推定する本モデルの適合性を検証したところ、林分の平均限界風速と根返り発生率との間には高い負の相関が見られた(図-36)。このことは、本モ

デルにおいて林分内の個々の樹木の限界風速がおよそ正規分布に従うということとも一致している。これらのことから、本モデルにおける限界風速が、根返りに対する耐風性の指標として高い精度を有していることが確認された。

本モデル検証林においてT9119時に林内に一様な風が吹いたとすると、根返り被害率50%の時の風速(平均限界風速)は、尾根部で約26m/s、谷部で約19m/sであった。一方、根返りがほとんど発生しなかった(発生率1%)時の風速は、尾根部で約35m/s、谷部で約26m/sと、平均限界風速より7~9m/s程度高かった。したがって、T9119規模の強風にも耐えられる林分にするためには、風当たりの強い尾根部などでは、平均限界風速を35m/s以上、比較的風当たりが弱く、少なくとも強風の主風向に面していない谷部などにおいても25m/s以上が望ましいと考えられた。特に尾根部で風害に遭わないためには、平均60以下の形状比が必要ではないかと考えられ(図-33)、本研究の添田複層林上木のような樹形の林分(図-28)が風害に強いと考えられた。

本モデル検証林は、主風向に直交する谷部と尾根部の双方で平均限界風速と根返り発生率の間に相関が見られたが、限界風速が同じでも谷と尾根とで被害率が異なった(図-36)。同じ根返り発生率で限界風速を比較すると、谷部では尾根部より限界風速が7m/s程度低かった。これは、風当たりの強い尾根部において耐風性が高くなる、という解釈よりも、立地による成長量の差が耐風性の差を生む要因になっていると解釈された。すなわち、比較的肥沃で水分量の多い谷部では樹高伸長量が大きく、形状比が高くなりやすいことが反映された結果ではないかと考えられた。したがって、根返りに対して耐風性の高い林分に誘導するためには、尾根部よりも谷部でより積極的に間伐などの手入れを行う必要があると考えられた。また、微地形が風害に及ぼす影響も非常に大きいことが確認された。たとえば、ほんの1haの試験林内においても、限界風速が低い林分の方が同じ強風イベントにおいて被害率が低いといったことが起こっていた。本モデル検証林分に、もし今回被害が発生した時と同じ風速の強風が、斜面と同じ東側から吹いたとすると、限界風速の低い谷部ではほぼ全域において激害となる(3林分で根返り発生率100%、残りの2林分でも50%以上)と考えられた(図-36)。一方で、主風向に直行する斜面においては、本モデル検証林のようにわずかな谷と尾根であっても、谷部では相対的に風速が弱くなるため、主風向に面した斜面よりも風害を受けにくいと考えられた。

これまで、主風向に面した斜面で風害リスクが高い(三浦ら, 1984; 諫本・高宮, 1992; 福永ら, 1993; 中尾ら, 1993; 秋田県林務部, 1994; 嘉戸・凶子, 2008 など)とされているが、これは立地における樹形の差異と、風速の差異との両方において説明されると考えられた。

限界風速は、最大瞬間風速よりも最大風速(推定値)と類似したことから、本モデルで推定される限界風速とは、最大風速に対する耐風性であることが示唆された。一方、前項Ⅱの引き倒し試験から、風害が発生するには、樹幹が十分なわんだ状態から、さらに一定以上の力が持続して加わる必要があると推測された。したがって、中尾ら(1993)も指摘するように、実際の風害が発生する風速は、瞬間的な風速よりも、より持続的な風速によって判断されるべきであると考えられた。

本研究の限界風速は根返りに対するものであるが、幹折れや傾きの被害率と限界風速との関係についても検討した。その結果、傾きについては根返りと同様に相関が見られた(図-38)。前項Ⅱにおいて、根元の最大回転モーメントのおよそ7割以上の力が加わると、根系や樹幹に破壊など不可逆的な影響が生じ、樹幹の傾きなどの被害が生じるものと考えられた。このように、傾きの力学的なメカニズムは根返りと同様と考えられるため、限界風速との間に相関が見られたことは妥当だと考えられた。一方、幹折れについては特別な傾向は見られず、ウラセバルという早生系の品種だけが主に被害を受けていた(野田ら, 1992)。幹折れについては樹幹の曲げ強度等の特性が品種により異なることが知られており(諫本・高宮, 1992; 諫本, 1993; 宮原, 1993; 岡野・伊藤, 1993 など)、品種の影響が強く表れると考えられた。このような幹折れに対しては、晩生系の品種を植栽することにより対処することなどが望ましいのではないかと考えられた。これに対して根返りは、品種を問わず同一の限界風速推定式との適合性が高かった。このように、根系の抵抗力については、樹幹の曲げ強度などと比較して品種間差が見られにくいと考えられた。前項Ⅱの引き倒し試験でも、データ数が十分ではないものの、根元の最大回転モーメント等は品種間差が見なかった。根系の深さや形状は、品種よりもむしろ土壌条件に強く影響されていることが確認されており(荻住, 1979)、根返りについては、本モデルのような1つの式により耐風性を幅広く評価できるのではないかと考えられた。

今回、本モデルが実際の根返り発生率とよく適合しており、根返りの耐風性の指標として利用できる可能

性が示された。しかし、検証に用いたのは1試験地のみであり、また林分を構成する1本1本の風害発生の有無を本モデルで検証できたわけではない。さらに厳密に検証するためにも、より優れたモデルの構築のためにも、樹高、胸高直径、枝下高、樹冠幅の毎木調査を行っている林分で風害が発生した場合は、風害発生時の風速も含め詳細なデータを収集する必要がある。

### 3) 施業による根返り限界風速の変化

風害の要因を解析した過去の報告の多くが、林齢と風害の密接な関係を指摘している。しかし、本研究の力学的モデルからは、林齢とは無関係に形状比や樹冠長率といった樹形が耐風性に重要であることが示された。茅島(2012)は、1991年台風19号(T9119)と2004年台風18号(T0418)の二度の風害被害を受けた福岡県筑後農林事務所管内において、風害被害林齢の解析を行った。その結果、T9119時には林齢が大きくなるほど風害が発生しやすかったのに対し、T9119で風害に対する抵抗力の弱い樹木が淘汰されたT0418時にはこのような林齢による風害の発生しやすさに明瞭な傾向が見られなかった。このことから、一般的に風害は若齢林で発生しにくく、主伐期を迎えた壮齢林で発生しやすいと言われているが、林齢に伴う樹形の変化が風害の発生しやすさに寄与しているためだと結論付けている。このことは、たとえ林齢が高くなっても施業により風害に強い樹形へと誘導できれば、風害に強い林分をつくることを示唆している。

そこで、施業により林分の限界風速がどのように経年変化しているのかを調査した。その結果、ほぼ無間伐の場内試験林では、主に樹冠長率が低下する一方で平均限界風速は高くなる傾向が見られた(図-39)。無間伐で放置した林分では、下枝が枯れ上がることで樹冠長率が小さくなり、風を受ける樹冠投影面積が小さくなる。その結果、限界風速が大きくなると考えられた。樹冠長率が低くなると、風心の位置が高くなるため、根元の回転モーメントが大きくなり、根返りが発生しやすくなるとも考えられる。しかし、本モデルからは樹冠長率の低下による樹冠投影面積の減少の方が、風心高さの増加よりも限界風速の変化により大きく寄与することにより、限界風速が高くなったと考えられた。本林分では、ほぼ無間伐であったにもかかわらず、形状比はほとんど変化がない、もしくは低下する傾向が見られた。このことから、樹幹の形状の変化は樹冠の変化と連動して即座に生じるものではなく、樹冠の変化が先に起こり、それに応じて徐々に変化していくものだと考えられた。

間伐直後の機械化作業林では、間伐後に主に樹冠幅

が大きくなる一方で、限界風速は低くなる傾向が見られた(図-40)。間伐直後の林分では樹冠の回復により樹冠長率や樹冠投影面積が増加することで、前述の場内試験林と同様の理由により、限界風速が小さくなると考えられた。本林分のように樹冠幅のみが大きくなる場合、風心高さは変化せず、樹冠投影面積だけが増加するため、限界風速の低下に拍車をかけると考えられた。加えて、本林分では間伐したにも関わらず、形状比はほとんど変化がない、もしくは増加する傾向が見られた。しかし、本試験林は間伐後あまり年数が経過していないため、今後の樹冠および樹幹の形状の変化を追跡しながら限界風速との関係を考察する必要があると考えられた。

これに対して、強度間伐後、長期間の経年変化を把握できた添田複層林上木においては、間伐直後は樹冠長率の増加などにより限界風速が低下したものの、その後の形状比の低下にともない、限界風速が高くなっていく傾向が見られた(図-41)。このように間伐直後に限界風速が低下する傾向は、前述の機械化作業林のケースと同様であった。短期的には、間伐を行うと樹冠の回復にともなう樹冠投影面積の増加などによって、根返りに対する耐風性が低下するものと考えられた。一方で、長期的に見ると形状比が低下することで耐風性が高まるものと考えられた。ただし、このような複層林においては、間伐により個々の樹木の形状比を改善させるだけでなく、形状比の高い樹木を中心とした下層間伐を行うことで、林分全体の形状比を下げっていくことも重要であると考えられた。間伐直後は耐風性が一時的に低下し、その後耐風性が高まっていく傾向は諫本・高宮(1992)、上村ら(2007)なども指摘している。これらの指摘の多くは、間伐により樹冠に隙間が生じ、風が林内に入りやすくなることに着目しているようだが、内田(2007)が示唆したように、樹形の変化から見ても間伐後は樹冠の回復により耐風性が一時的に低下し、その後の形状比の回復により徐々に耐風性が高まっていくと考えられた。

今回の三つの林分のケースでは、無間伐の林分では限界風速が高く、間伐直後の林分では限界風速が低くなる、といった結果が得られた。これは、風害に対する一般的な認識、つまり「放置すると耐風性は低下し、間伐を行うと耐風性は高まる」と逆の結果に感じられる。しかし、これは施業に応じてまず樹冠が変化し、樹冠の変化に応じて樹幹、すなわち形状比が変化するためだと考えられた。したがって無間伐の林分では短期的には限界風速が高まるものの、長期的に見ると限界風速は低下するものと考えられた。逆に、間伐を行

った林分では、短期的には限界風速が低下するが、長期的に見ると限界風速は高くなるものと考えられた。つまり、長期的に耐風性を高めるためには、間伐を行い、形状比を下げる必要があると考えられた。特に、樹冠が衰退した手入れ不足の林分において根本的に耐風性を高めるためには、間伐を行って形状比を下げるしかなく、通常よりも強度の間伐を行う必要があるのではないかと考えられた。ただし、強度間伐を行うと、間伐後の樹冠の回復が通常の間伐よりも大きくなること、林内に風が吹き込みやすくなることなどから、間伐直後の耐風性の低下がより大きくなるため、注意が必要である。このように、一度樹冠が衰退してしまうと、耐風性を高める間伐そのものが短期的には風害のリスクを高めることから、風害に強い林分に誘導するためには、初期の段階から樹冠が衰退しないように適度に間伐を行う必要があると考えられた。また、従来どおり適度な間伐をこまめに繰り返すことが最も有効であると考えられた(諫本・高宮, 1992; 秋田県林務部, 1994; 上村ら, 2007; 藤森, 2010 など)。以上のことを、間伐などの手入れ量(樹木の健全性)と根返りに対する耐風性の関係として図-42にまとめた。

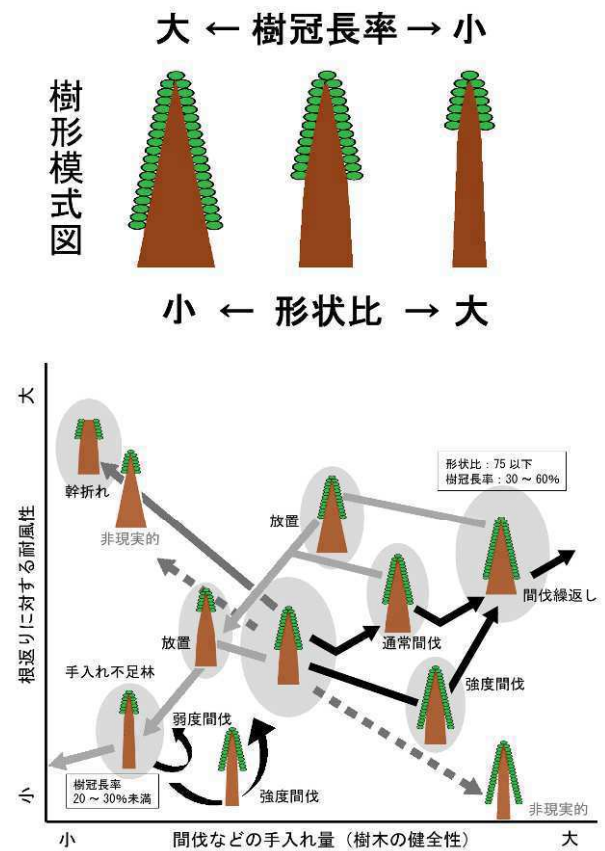


図-42. 施業と根返りに対する耐風性の関係

黒色の矢印は間伐を行った場合、灰色の矢印は放置した場合の変化を示す。樹形は、形状比と樹冠長率の関係をわかりやすくするために極端に表現した。

## VI. おわりに

本研究では森林の気象災害の中で近年増加してきている風害の軽減に向け、風害のリスクに応じた森林施業を提案することを目的とした。施業によりコントロールが可能な樹形 (Kamimura and Shiraishi, 2007) に着目し、風害に強い樹形や林分について検討した。対象としたのは、福岡県における人工林の主林木であるスギであり、風害の多くを占める根返り (野田ら, 1992) について主に検討した。

「II. 平坦地におけるスギの引き倒し試験」では、単木的な力学モデルにおいて限界風速の推定に必要な根系の抵抗力を把握するために、平坦地にある試験林においてスギの引き倒し試験を実施した。その結果、根系の抵抗力はこれと比例する胸高直径により推定するのが適当であることがわかった。また、形状比が低い個体ほど高い位置で幹折れが発生しやすくなること、根系が浅いほど根返りが発生しやすくなることなど、幹折れや被害形態と根系の関係などの知見も得られた。

「III. 傾斜地におけるスギの引き倒し試験」では、傾斜の異なる試験林において、斜面傾斜や引き倒し方向が根系の抵抗力に与える影響を把握した。傾斜地においては、根系分布の偏りから、上方に引き倒すよりも、下方や側方に引き倒す方が根系の抵抗力が大きいことを明らかにした。これまで根系の抵抗力と斜面傾斜の関係を詳細に論じた例はなく、根系の抵抗力が引き倒す方向によって異なり、その原因が根系分布の偏りにあることを初めて明らかにした。

「IV. スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布」では、引き倒し試験において樹幹のたわみを考慮した場合の樹幹の曲げ応力分布を把握した。樹幹が円錐形であれば、樹高のおよそ  $1/3$  より下側の幹にほぼ一定の曲げ応力が作用する一方、完満な樹形ほど応力のピークが根元へ移動するため根返りが発生しやすくなることを明らかにした。

「V. 力学モデルを用いたスギにおける根返り限界風速の推定」では、引き倒し試験により得られた根系の抵抗力を単木的な力学モデルに組み込み、推定された限界風速から、根返りに強い樹形や林分ならびに施業との関係についても検討した。本モデルは実際に発生した風害と適合しており、形状比および樹冠長率が低いほど限界風速は高くなることがわかった。現実的には、風害に強い樹形として形状比 75 以下、樹冠長率 30~60%程度が望ましいと結論付けた。さらに施業による限界風速の変化を検討した結果、間伐を行うと、短期的には樹冠の回復により限界風速が低下するが、

長期的には形状比の低下により限界風速が高まり、耐風性が高くなることを明らかにした。そして、風害のリスクを低く抑えながら限界風速を高めるためには、従来どおりこまめに適度な間伐を繰り返すことが有効であることを示した。

以上のように、本研究では樹形が耐風性に大きく寄与しており、施業により樹形をコントロールすることで、風害のリスクを低減できることを示した。本来、植栽前から風害のリスクに応じた施業を一貫して行うことが望ましいが、既存林分においても、風害に強い樹形へと誘導することで、風害のリスクを軽減できる可能性を示せることができた。また本研究では主にスギの根返りをみてきたが、得られた知見は、他の針葉樹についても活用できるものである。他地域でスギの根返りに対する耐風性を評価したい場合にも、引き倒し試験を行えば、得られた樹高・胸高直径・枝下高・樹幹幅から本モデルにて限界風速を推定することで、容易に評価することができる。

本研究成果が各地の現場で活かされ、台風災害時に、少しでも風害が軽減されれば幸いである。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、当センターの甲斐田哲雄氏、平田雅治氏、井上忠司氏には、引き倒し試験の実施に多大なるご協力を頂きました。また辛島利行氏には研究の方向性に関する有益な助言を頂きました。当センターの傾斜別試験林や 1991 年台風 19 号時に収集された被害林分の調査データの存在により、より詳細な解析ができました。旧福岡県林業試験場の職員の努力にも敬意を表し、ここに厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

- 阿部友幸・菅野正人・対馬俊之 (2006) 2004 年台風 18 号による森林風倒被害に関する調査研究—風倒被害の要因解析について—。(第 39 回林業技術シンポジウム 災害に強い森林づくりをめざして, 78pp, 全国林業試験研究機関協議会, 北海道). 20-29.
- 秋田県林務部 (1994) 1991 年台風 19 号による大規模森林被害の実態解析と耐風性森林育成技術の検討. 73pp, 秋田県林務部, 秋田.
- 千葉幸弘 (1993) 1991 年台風 19 号によるスギ林木の折損被害発生機構の解析. 日本林学会誌 75 :

372-374.

- 藤森隆郎(2010)間伐と目標林型を考える. 191pp, (社) 全国林業改良普及協会, 東京.
- 藤本登留・久富浩人・又木義博(1994)台風被害木の被害形態別モメ発生分布. 九州大学農学部演習林報告 70 : 75-88.
- 深見悠矢・北原 曜・小野 裕・宮崎隆幸・山内仁人・片倉正行・松澤義明(2009)立木の引き倒し抵抗力の樹種間比較. 日本森林学会大会学術講演集 120 : 208.
- 深見悠矢・北原 曜・小野 裕・藤堂千影・山瀬敬太郎(2011)土壌水分等の条件が異なる場合の立木の引き倒し試験. 日本森林学会誌 93 : 8-13.
- 福永寛之・増谷利博・今田盛生・加賀英昭(1993)風倒木被害発生と立地及び林分構造との関係解析. 九州大学農学部演習林報告 69 : 13-30.
- 福永健司(2006)斜面における樹木の根系分布. 日本緑化工学会誌 31 : 338-345.
- 諫本信義・高宮立身(1992) 1991年9月台風19号に発生した大分県における森林被害の要因解析. 大分県林業試験場研究時報 18 : 1-43.
- Kamimura, K., and Shiraishi, N. (2007) A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12 : 162-176.
- 上村佳奈・Gardiner, B. A.・白石則彦(2007)風害予測力学モデル GALES による長期間の風害発生限界風速の推定. (森林資源管理と数理モデル Vol.6 -FORMATH KYUSHU 2006-, 164pp, 森林計画学会出版局, 宇都宮). 19-28.
- 苅住 昇(1979)樹木根系図説. 1121pp. , 誠文堂新光社, 東京.
- 櫻山徳治・高橋啓二・土井恭次・坂上幸雄(1974)林木の気象被害. 114pp, 日本林業技術協会, 東京.
- 嘉戸昭夫(2001)スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究. 富山県林業技術センター研究報告 14 : 1-78.
- 嘉戸昭夫・関子光太郎(2008) 2004年台風23号により富山県西部のスギ林で発生した風害の要因解析. 富山県林業技術センター研究報告 21 : 1-8.
- 茅島信行(2012)森林の気象災害に関する研究-T9119 および T0418 風害被害林齢の比較-. 平成 23 年度福岡県森林林業技術センター年報 : 38-39.
- 茅島信行・佐々木重行(2008)スギ試験林における風倒害の危険度評価. 九州森林研究 61 : 189-192.
- 茅島信行・佐々木重行(2010a)スギ傾斜別試験林における引き倒し試験. 日本森林学会学術講演集 121 : E21.
- 茅島信行・佐々木重行(2010b)スギ試験林における引き倒し試験. 九州森林研究 63 : 25-28.
- 茅島信行・佐々木重行(2010c)斜面傾斜地における根系分布の偏りがスギの引き倒し試験に与える影響. 森林立地 52 (2) : 49-55.
- 茅島信行・佐々木重行(2011a)引き倒し試験結果に及ぼす根系分布の影響. 日本森林学会学術講演集 122 : H22.
- 茅島信行・佐々木重行(2011b)スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布. 九州森林研究 64 : 98-101.
- 茅島信行・檜崎康二・佐々木重行(2012a)力学モデルを用いたスギにおける根返り限界風速の推定. 九州森林研究 65 : 49-52.
- 茅島信行・檜崎康二・佐々木重行(2012b)施業がスギの根返り限界風速に与える影響. 日本森林学会学術講演集 123 : I10.
- 北原 曜(2010)森林根系の崩壊防止機能. 水利科学 311 : 11-37.
- 久保山裕史・鄭 躍軍・岡 裕泰(2003)主要な森林気象災害の林齢別被害率の推定と考察. 日本林学会誌 85 : 191-198.
- 桑野泰光・檜崎康二・橋川ひろみ・佐々木重行(2009)福岡県における手入れ不足人工林の実態について福岡県森林林業技術センター研究報告 10 : 11-16.
- 前田浩之助・杉山太宏・赤石 勝(2000)関東ロームの切土斜面に侵入, 成長した傾斜樹木の引抜き抵抗力. 日本緑化工学会誌 25 : 311-316.
- 三浦 覚・松本陽介・真下育久(1984)台風15号(昭和56年)により東京大学北海道演習林に発生した風害の要因解析. 東京大学農学部演習林報告 73 : 139-160.
- 宮原文彦(1993)1991年17・19号台風によるスギ被害の精英樹・在来品種間差異-福岡県の例-. 林木の育種 167 : 8-11.
- 森岡 昇(1983)集運材用ワイヤロープの支柱としての立木の強さ(I)-単一横荷重による幹の変位の解析-. 日本林学会誌 65 : 67-71.
- 森岡 昇(1984)集運材用ワイヤロープの支柱としての立木の強さ(III)-横荷重による力のモーメントと幹の傾きの関係-スギ小径木の場合. 日本林学会誌 66 : 160-163.
- 森岡 昇・北川勝弘(1987)スギ小径木の引き倒し試験の結果. 名古屋大学農学部演習林報告 9 : 1-5.
- 森岡 昇・オンウォナ アジマン シアウ・近藤稔・北川勝弘(1991)日本林学会誌 73 : 380-383.

- 村山貢司 (2006) 台風学入門. 134pp, 山と溪谷社, 東京.
- 中尾博美・金 錫権・又木義博・藤本登留 (1993) 台風 9117, 9119 号による森林被害の要因解析. 九州大学農学部演習林報告 68 : 11-48.
- 中谷 浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究. 富山県林業技術センター研究報告 4 : 1-54.
- 野田 亮 (1993) 1991 年台風第 17・19 号による福岡県の森林被害. 森林立地 35 (1) : 50-59.
- 野田 亮・小河誠司・佐々木重行・野中重之・廣田篤彦・福島敏彦・宮原文彦 (1992) 1991 年 9 月に発生した台風 17 号・19 号による森林被害調査報告書. 福岡県林業試験場研究資料 18 : 1-89.
- 野口貴士・小林正秀 (2011) 人工林における冠雪害の発生要因に関する一考察—京都府南丹市美山町で発生した被害から—. 森林防疫 60 (5) : 16-27.
- 野々田稔郎・林 拙郎・川邊 洋・本多 潔・小藪一志 (1996) 樹幹引き倒しによる根返りの発生機構. 日本林学会誌 78 : 390-397.
- 野々田稔郎・林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也 (2004) 針葉樹の樹冠サイズか耐風性に及ぼす影響—枝打ちによる樹冠サイズの変化と樹幹曲げ応力の関係. 日本森林学会学術講演集 115 : 824.
- 野々田稔郎・島田博匡・近藤観慈・林 拙郎・沼本晋也・吉岡小百合 (2006) 樹木引き倒し試験から推定した根返り発生モデル. 日本森林学会大会学術講演集 117 : 215.
- 野々田稔郎・林 拙郎・近藤観慈・島田博匡 (2008) 過密人工林における樹幹細り形状と耐風性の関係. 日本森林学会大会学術講演集 119 : 774.
- 野々田稔郎 (2010) 三重県内で発生した森林風害—台風コースと被害発生斜面方位の関係—. 日本森林学会大会学術講演集 121 : 189.
- 岡野哲郎・伊藤 哲 (1993) スギ品種の台風被害抵抗性と感受性 六演習林スギ品種試験地第 I 試験地における被害の分析. 九州大学農学部演習林報告 68 : 1-10.
- 桜井尚武 (2002) 長伐期林の実際—その効果と取り扱い技術—. 173pp, 財団法人林業科学技術振興所, 東京.
- 齊藤 哲・小南陽亮 (2004) 西南日本における強風の再現周期の広域的特徴. 日本林学会誌 86 : 105-111.
- 佐々木重行 (2002) 造成地土壌の物理・化学性. 九州森林研究 55 : 184-187.
- 佐藤 創・鳥田宏行・真坂一彦・今 博計・澁谷正人 (2009) 防風林の風倒要因の解析—2004 年台風 18 号による北海道美唄市の例—. 日本森林学会誌 91 : 307-312.
- 澁谷正人・浦田 格・鳥田宏行・飯島勇人 (2011) 北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形. 森林立地 53 (2) : 53-59.
- 下川信也・飯塚 聡・栢原孝浩・鈴木真一 (2009) 防災科学技術研究所における台風とその災害に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告 75 : 33-40.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., and Kira, T. (1964a) A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory I. Jpn. J. Ecol. 14 : 97-105.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., and Kira, T. (1964b) A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory II. Jpn. J. Ecol. 14 : 133-139.
- 社団法人全国林業改良普及協会 (2006) 長伐期林を解き明かす, 189pp, (社) 全国林業改良普及協会, 東京.
- 陶山正憲 (1993) 台風による樹木の風倒・折損機構. 水利科学 210 : 25-53.
- 玉手三葉寿・樫山徳治・笹沼たつ・高橋亀久松 (1965) 立木引き倒し試験. 日本林学会誌 47 : 210-213.
- 谷川直太・加治佐 剛・太田徹志・溝上展也・内田孝紀・荒屋 亮・吉田茂二郎 (2009) 風況シミュレータ RIAM-COMPACT を用いた風害の予測—台風 9119 号の場合—. 日本森林学会大会学術講演集 120 : 534.
- 谷川直太・太田徹志・内田孝紀・加治佐 剛・溝上展也・吉田茂二郎 (2010) 風況シミュレーションソフトを用いた風害発生の予測. 日本森林学会大会学術講演集 121 : 287.
- 鳥田宏行 (2006) 2002 年台風 21 号により北海道十勝の防風保安林に発生した風害の要因解析. 日本森林学会誌 88 : 489-495.
- 鳥田宏行 (2009a) 防風林の防風防雪機能と気象害に関する研究. 北海道林業試験場研究報告 46 : 1-51.
- 鳥田宏行 (2009b) カラマツの風害に関する力学的評価. 日本森林学会誌 91 : 120-124.
- 鳥田宏行・澁谷正人・小泉章夫 (2010) カラマツ林の力学的解析による風害予測. 日本森林学会誌 92 : 127-133.
- 内田健一 (2007) 森を育てる技術. 421pp, 川辺書林, 長野.
- 米丸伸一 (1998) スギ, ヒノキ単層林の台風被害. 鹿児島県林業試験場研究報告 4 : 1-23

---

福岡県森林林業技術センター研究報告 第14号

平成25年3月29日発行

発行 福岡県森林林業技術センター  
〒839-0827 福岡県久留米市山本町豊田1438-2  
TEL 0942-45-7870  
FAX 0942-45-7901

印刷 多田印刷株式会社  
〒830-0037 福岡県久留米市諏訪野町4丁目2432  
TEL 0942-35-3459  
FAX 0942-36-1472

---



- Establishment of cutting propagation technique of less pollen  
*Chamaecyparis obtusa* varieties** 1～ 8  
Masafumi OKAWA
- Bending properties of Sugi boxed-heart flat square timber  
in Fukuoka Prefecture** 9～16  
Tatsuya URABE
- Estimation of the wind-resistant Sugi (*Cryptomeria japonica*) tree shape  
by mechanical model based on tree-pulling experiments** 17～45  
Nobuyuki KAYASHIMA, Shigeyuki SASAKI, Koji NARAZAKI

福岡県行政資料	
分類番号 PF	所属コード 4706205
登録年度 24	登録番号 0002