

「片持ち梁」理論を用いたスギ林木の風害モデル

Modeling Wind Damage for Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) Trees Using Cantilever Beam Theory

嘉戸 昭夫

Kato, Akio

キーワード: スギ, 風害, モデル, 片持ち梁

要約: 富山県西部の森林にはカワイダニスギと呼ばれるスギ品種が多く植えられており, これらは 2004 年の台風 23 号で甚大な被害を受けた. このスギ林木の風害の発生機構を検討するために「片持ち梁」理論に基づく林木の力学的モデルを構築した. モデルの構築に必要な樹幹形や樹幹ヤング率などの資料を富山県西部のカワイダニスギ林から収集した. 根返りモーメントは県内の 3 箇所のスギ林で測定した. このモデルに林木のサイズをインプットして, その木が根返りまたは幹折れのどちらの被害タイプを示すのかを推定した. このモデルの適合性を検討するため, カワイダニスギのサイズや被害タイプを調べた. 推定結果と観察結果とを比較したところ, 幹折れの正解率は高かったが, 根返りのそれは低かった. 幹折れの高さは推定値と観察値がほぼ一致した. 胸高直径が同じであれば樹高の高い林木は幹折れを, 低い林木は根返りを生じる傾向が認められた.

Abstract: Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) clones, called kawaidanisugi, planted in western forests of the Toyama prefecture suffered severe wind damage from typhoon No. 23 in 2004. A dynamic model of kawaidanisugi, based on “cantilever” theory, was built to examine the mechanics of wind damage for this cedar tree. The stem form, elasticity data and necessary for construction of the model was collected from the forests in Toyama. Overturning

Received August 4, 2009; Accepted November 30, 2009

moments at the tree stem was investigated in three different forests throughout the prefecture. Given tree size, the model can estimate the failure type (uprooting or stem breakage). To verify the model's accuracy, actual tree size and failure type in kawaidanisugi forests were compared to predicted values. This comparison revealed that stem breakage could be predicted with a relatively high level of success, while the ability to predict uprooting was poor. As for the height of stem breakage, observed values corresponded well with estimated values. Assuming equal diameter at breast height, taller trees were more likely to suffer stem breakage, while shorter trees were more likely to uproot.

Keywords: Cantilever beam theory, Japanese cedar, modeling, wind damage

1. はじめに

富山県の森林では台風による林木の折損被害は発生頻度が低く、これまでのところ特段の風害対策が取られてこなかった。ところが、2004年10月の台風23号によって県西部のスギ林を中心に甚大な風害を受けた。この地域の主なスギはボカスギやカワイダニスギなどの挿し木品種であり、成長は早いですが材の強度が弱く冠雪害に弱い特徴を有する。風害を軽減するためには、まず被害を受けやすい林木や地形の特徴を明らかにする必要がある。そこで、2004年10月20日の台風23号によって被災した富山県氷見市八代地区のスギ林で被害タイプや本数被害率を調べた(嘉戸・図子, 2007)。その結果、本数被害率と相関が最も高かった要因は斜面方位であり、つぎに平均形状比(平均樹高/平均胸高直径)であった。なお、間伐直後には風害の危険度が高まるとの指摘があるが、この地域でも列状間伐が広範囲で実施されていたものの、間伐による顕著な影響は観察されなかった。この原因として地形要因の影響が相対的に大きかったために、間伐などの施業の影響が明瞭でなかったことが考えられた。また、風害のタイプは根返りや傾幹といった根系の支持力に関する被害と、幹折れや幹曲がりといった樹幹の強度に関する被害に大別された(図1)。

林木の風害は風荷重に対して、根系支持力と樹幹強度のどちらか弱い方の被害タイプを呈すると考えられることから、根返りは根返りを生ずるときの風荷重の方が幹折れを生ずるときのそれよりも弱かった場合に、幹折



図 1. 被害タイプ

れは幹折れを生ずるときの風荷重の方が根返りを生ずるときのそれよりも弱かった場合に起きることが推測される。このような点について確かめるには、力学的なモデルを用いた検討が有効と考えられる。これまでに、横風を受けた林木が根返りや幹折れする現象を解明するため、「片持ち梁」モデルを用いた静力学的な解析がなされている(平田, 1951, 澤田, 1983, 小泉, 1987, 鳥田, 2009)。ただし、モデルの構築に必要なパラメータである林木の幹形、材質特性および根系の支持力などは樹種や立地条件によって異なるので、対象とする樹種や立地条件毎に求める必要がある。

本報では、2004年の台風で被災した富山県西部のカワイダニスギ林を対象に、「片持ち梁」理論に基づいて林木の風害モデルを構築し、このモデルの適合性を風害タイプや幹折れ高などの点から検討したものである。

2. 方法

2.1. 林木の風害モデル

2.1.1. 被害タイプの判別

「根返り」と「幹折れ」の被害タイプのうち、前者は風荷重によって発生した力のモーメントが根系支持力(根返りモーメント)を超えた場合に、後者は風荷重によって生じた曲げ応力が樹幹の破壊応力を超えた場合に、それぞれ起こると考えられる。

したがって、樹幹の根元に生ずる曲げモーメント M_0 が根返りモーメント M_U を超える場合の風荷重 W_U と樹幹に生じた曲げ応力 σ_x の最大値

が破壊応力 σ_B を超える場合の風荷重 W_B を比べ、前者の荷重が後者のそれよりも小さい場合には「根返り」を、後者の荷重の方が小さい場合には「幹折れ」を生ずることが推測される。

2.1.2. 風荷重を受けた林木の応力と曲げモーメント

澤田 (1983) は、風荷重 (片持ち梁モデル) と冠雪荷重 (偏心圧縮モデル) を同時に受けた樹幹の変形と応力に関する理論式を誘導している。本報では基本的にはこの澤田のモデルを用いることとし、風荷重のみを受ける場合について被害タイプの判別を試みた。解析に当たり次のような仮定をおいた (図 2)。

- ① スギの樹幹には、風による水平荷重 W (N) が地上高 L (cm) にある樹冠の重心 G に集中して負荷される。
- ② 樹幹の材質を一様と見なし、その曲げヤング率 E (Gpa) や曲げ強さ σ_B (pa) を一定とした。

地上高 x (cm) における直径を D_x (cm) とすると、断面積 A_x (cm²)、断面係数 Z_x (cm³) および断面 2 次モーメント I_x (cm⁴) は、それぞれ次式で表すことができる。

$$[1] \quad A_x = \pi D_x^2/4, \quad Z_x = \pi D_x^3/32, \quad I_x = \pi D_x^4/64$$

また、地上高 x における樹幹の水平撓みを y (cm)、荷重点高 L における水平撓みを δ (cm) とすると、地上高 x における曲げモーメント M_x (kN·m) は次式で示される。

$$[2] \quad M_x = -(L - x)W$$

したがって、樹幹基部における曲げモーメント M_0 (k·Nm) は次式で示される。

$$[3] \quad M_0 = -LW$$

ここで、 M_0 が根返りモーメント M_U に達した場合を考えると、根返り時

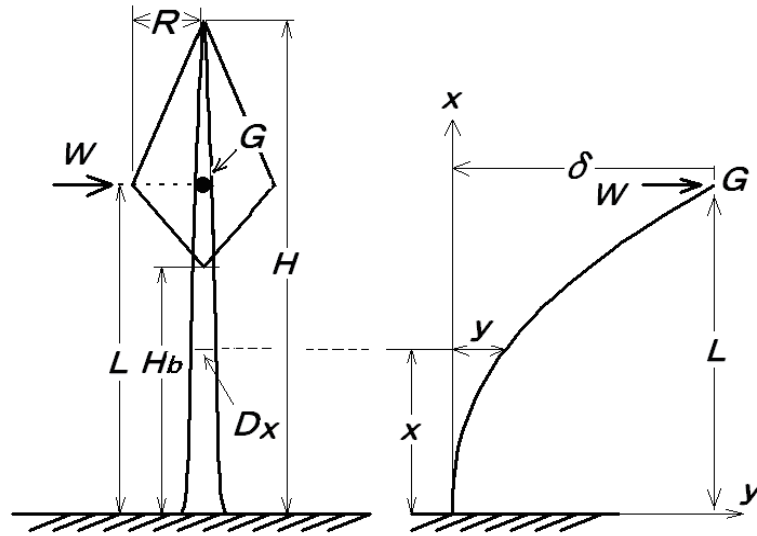


図 2. 林木の風害モデル

の風荷重 W_U (N) は次式で表される.

$$[4] \quad W_U = -M_U/L$$

曲げによる基礎微分方程式は次式で示される.

$$[5] \quad EI_x d^2y/dx^2 = -M_x$$

地上高 x における変形した樹幹には曲げ応力 σ_x (MPa) が発生する.

$$[6] \quad \sigma_x = M_x/Z_x$$

ここで, σ_x が樹幹の曲げ強さ σ_B に達した場合を考えると, 幹折れ時の風荷重 W_B (N) は次式で表される.

$$[7] \quad W_B = -Z_x \cdot \sigma_x / (L - x)$$

澤田 (1983) は, 林木の樹幹形を截頭円錐体とみなして樹幹に負荷される応力 σ_x を誘導している. しかし, 現実の樹幹形は円錐体と見なせるのは

梢端部分であり、中央部分は放物線体そして幹足部分はナイロイドに近いことが知られている。これまでの研究(梶原, 1993)によると、梢端部から幹足部までのスギの樹幹形を一つの式で表現するには相対幹曲線式が適している。そこで、本報告では現実の樹幹形に近づけるために後ほど述べる相対幹曲線式を用いて近似することにした。この幹曲線式を用いた場合には澤田の解析手法が適用できないので、風荷重 W を逐次増大させるアルゴリズムを作成して樹幹基部から荷重点までの樹幹に負荷される応力 σ_x を計算し、この値が σ_B を超えるときの W 値を求めて幹折れ時の風荷重 W_B とした。

2.1.3. 風荷重と樹冠モデル

一般に構造物に負荷される風荷重 W (N) は次式から算出されている。

$$[8] \quad W = 1/2 C_d \rho U^2 S$$

ここで、 C_d は抗力係数、 ρ は空気密度 ($0.125 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^3$)、 U は風速 (m/sec)、 S は風を受けた樹冠の樹冠縦断投影面積 (m^2) である。

本報では樹冠の形状を図2に示すような菱形と仮定し、樹冠縦断投影面積 S (m^2) を次式から算出した。

$$[9] \quad S = (H - H_b)R$$

ここで、 H は樹高 (m)、 H_b は枝下高 (m)、 R は樹冠の最大半径 (m) である。

2.2. 調査方法

2.2.1. 被害調査

筆者ら(嘉戸・図子, 2008)は2004年台風23号により富山県氷見市八代地区のスギ林で発生した風害状況や気象状況について調査し、その概要を報告した。この地域の被害は岐阜県や長野県など本県の南側を台風が横断したことにともなって生じたもので、最寄りの氷見アメダス観測所や伏木測候所の資料などから最大風速 21 m/sec 、瞬間最大風速 40 m/sec と推測された(図3)。

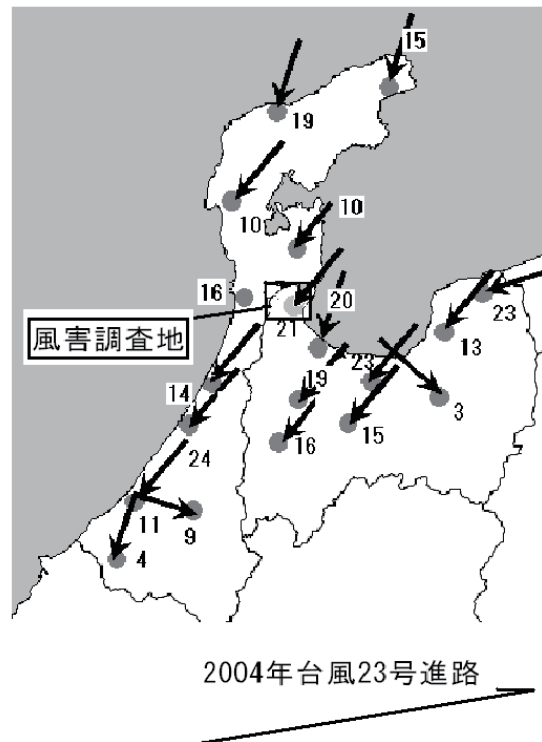


図3. 台風の進路と最大風速

「根返り」または「幹折れ」の判別に用いたカワイダニスギ供試木は14林分の229本である。これらは先の風害調査で得られたもので、被害タイプと胸高直径については毎木調査し、サンプル木の樹高を測定し、これと胸高直径の関係にヘンリクセン式を当てはめて、各個体の樹高を求めた。

2.2.2. 風害モデルのパラメータ調査

風害モデルと解析するに当たり、幹の細り(樹幹形)、枝下高、樹冠の重心高、樹冠縦断面積および根返りモーメントなどのパラメータが必要になる。しかし、これらについてはいずれも現地では調査ができなかった。そこで、これまでに富山県森林研究所で収集したカワイダニスギの樹幹解析資料か

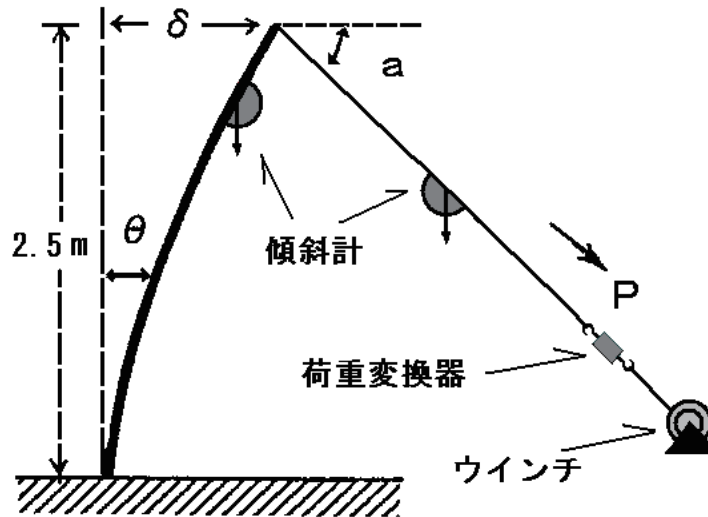


図 4. 根回りモーメントの測定法

ら樹幹形を、層別刈取資料から枝下高および樹冠の重心高を、毎木調査資料から平均胸高断面積と樹高および立木密度の間に成り立つ競争密度効果の逆数式を求め、この関係式から樹冠縦断面積を推測した。樹幹解析用の円板は厚さ 10cm で地上 0.3, 1.3, 2.3, ... という具合に 1m 間隔で採取した。樹幹解析資料および層別刈取資料は氷見市、高岡市などの 20 ~ 28 年生の 10 林分から得られた合計 78 本である。供試木の胸高直径は 14 ~ 36cm, 樹高は 10 ~ 23m であった。

スギ品種の違いによって根回りモーメントに差異があるか否かは明らかにされていない。しかし、砺波市頼成の 14 年生林分で根系支持力の一指標である根元の回転係数 (曲げモーメント当たりの樹幹基部の回転角) を測定した結果、林木サイズが同じであればタテヤマスギ、ボカスギおよびマサヤマスギの各品種間に有意な差異が認められなかった (嘉戸, 2001)。そこで、根回りモーメントの品種間差異は小さいものと仮定して、砺波市頼成の 14 年生林分 (タテヤマスギ, ボカスギおよびマサヤマスギ), 立山町吉峰の 20 年生林分 (ボカスギ) および立山町座主坊の 28 年生林分 (タテヤマス

ギ) で測定された根返りモーメントを用いた。

このうちの砺波市頼成と立山町座主坊における林況、測定方法および根返りモーメントと個体サイズの関係などについては既に報告済みである(嘉戸ら, 1988)。未報告である立山町吉峰は砺波市頼成と同様に斜面傾斜が5度と緩く、土壌のAおよびB層の合計の深さも40cmで等しかった。なお、立山町座主坊は斜面傾斜が23度、土壌の深さがAとB層合計で31cmであった。立山町吉峰の供試木は7本で、胸高直径は12~26cm、樹高は7~14mであった。これに砺波市頼成と立山町座主坊の合計22本を加えて、解析に用いた。砺波市頼成における根返りモーメントの測定は樹高の5~7割の部位に取り付けたワイヤーを鉛直方向に手動ウインチで巻き取るものであった(嘉戸ら, 1988)。一方、立山町吉峰と立山町座主坊では地上2~2.5mの高さの樹幹にワイヤーの取り付け、これを斜面下部方向にウインチで巻き取って、根返りさせるものである(図4)。ここで、ワイヤーの取り付け高を地上2~2.5mとしたのは、その取り付け作業が容易なこと、その取り付け位置を高くするほど樹幹の撓みが大きくなり、荷重点高が正確に測定できなくなること、荷重点が高くなるほど幹折れを生じ易くなること(森岡ら, 1991)などによる。つぎに、供試木やワイヤーの傾きを傾斜計で測定するとともに、ワイヤーに加わる張力 P (N)を荷重変換器で測定した。樹幹基部に負荷されたモーメント M_0 (N·m)を次式により算出した。

$$[10] \quad M_0 = P(L \cos a + \delta \sin a)$$

2.3. 被害タイプの判別

図5は被害タイプを判別するシミュレーションの手順を示したものである。

- ①まず、供試木の樹高 H (m)と胸高直径 D (cm)を入力する。
- ②樹幹の曲げヤング率 E は本調査での平均値3730MPaとした。また、中谷(1999)が富山県内のスギを調査して得た E と σ_B の関係式を参考にして、樹幹の曲げ強度 σ_B を28.5MPaとした。また、被

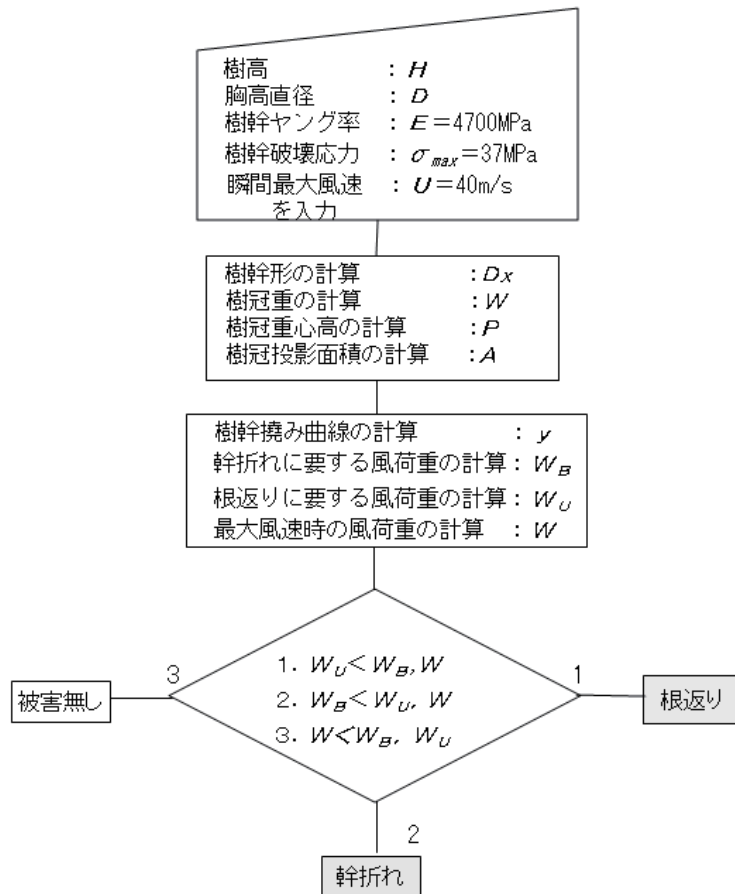


図 5. 被害形態を判別するシミュレーションの手順

災時の最大風速 U は伏木測候所の値を参考に 40m/sec とした。

- ③ 樹高と胸高直径から、樹幹形、樹冠の重心高 (m)、樹冠投影面積、根返りモーメント、最大風速のときの風荷重 W などを推定した。
- ④ 樹幹の根元に加わる曲げモーメント M_0 が根返りモーメント M_U を超えるときの風荷重 W_U と樹幹の曲げ応力の最大値 σ_x が破壊応力 σ_B を超えるときの風荷重 W_B を算出した。

⑤被害タイプは、 $W_U < W_B$, W の場合に根返り, $W_B < W_U$, W の場合に幹折れ, $W_U, W_B > W$ の場合に無被害と判別した。

樹幹ヤング率は挺子法 (小泉, 1987) を用いて氷見市, 小矢部市, 立山町などの 12 ~ 50 年生のカワイダニスギ 11 林分で合計 132 本測定した。

3. 結果と考察

3.1. 風害モデルのパラメータ

3.1.1. 樹幹形

梶原 (1993) は, 相対幹曲線式は 3 次式に 20 次の項を加えることにより, 地際寄りのナイロイド状の部分も良く表現できる幹曲線式となり, 適合度が高かったと述べている. これに従ってカワイダニスギの樹幹解析資料を用いて相対幹曲線式を算出した. 地上高 x における相対直径 RD_x は [11] 式で近似された. この式を用いて樹幹形を推定した.

$$[11] \quad RD_x = a_1(1 - x/H) + a_2(1 - x/H)^2 + a_3(1 - x/H)^3 + a_4(1 - x/H)^{20}$$

ここで,

$$[12] \quad a_1 = 1.311 + 0.106H - 0.0607D$$

$$[13] \quad a_2 = 0.244 - 0.274H + 0.158D$$

$$[14] \quad a_3 = -0.549 + 0.179H - 0.106D$$

$$[15] \quad a_4 = 0.199 - 0.0253H + 0.0206D$$

3.1.2. 樹幹の重心高

カワイダニスギの層別刈取り資料から, 樹冠の重心高 L (m) と枝下高 H_b (m) を樹高と胸高直径の経験式から算出した.

$$[16] \quad L = -2.58 + 1.01H - 0.126D \quad (r^2 = 0.959, n = 78)$$

$$[17] \quad H_b = -0.695 + 0.513H - 0.0633D \quad (r^2 = 0.539, n = 78)$$

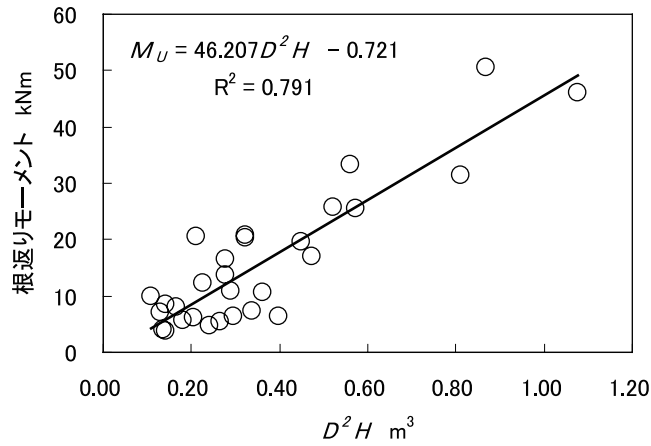


図 6. 供試木の D^2H と根返りモーメントの関係

3.1.3. 樹冠縦断投影面積

カワイダニスギの平均断面積を g (m^2), 立木密度を ρ (本/ha) で表すと, 競争密度効果の逆数式は次式で示された.

$$[18] \quad 1/g = A\rho + B$$

ここで, $A = 0.0453H^{-0.652}$, $B = 4867H^{-2.161}$ である. この式の平均断面積 g を平均胸高直径で表して, 立木密度と平均胸高直径および平均樹高の関係式に変形して, 任意の胸高直径と樹高を有するカワイダニスギの ρ を算出した. 次に, [9] 式の R は林木のサイズによって変化する. 林木のサイズは立木密度によって変化すると考え, R を [18] 式から推定し, 個々の林木の風荷重を推定するための樹冠縦断投影面積 S (m^2) を次式で定義した.

$$[19] \quad S = 50(H - H_b)\rho^{-1/2}$$

3.1.4. 根返りモーメント

図 6 は根返りモーメントと胸高直径の 2 乗 × 樹高 (D^2H) の関係を示したものである. 根返りモーメント M_U ($\text{kN}\cdot\text{m}$) と D^2H (m^3) の間に高い

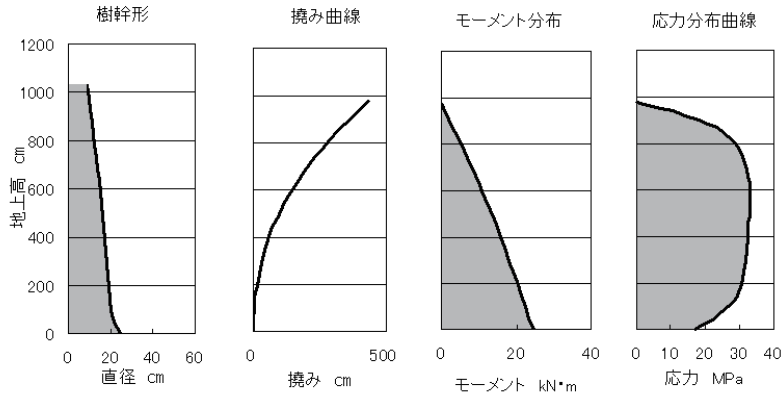


図 7. 平均木の樹幹形, 樹幹の撓み曲線, 曲げモーメントおよび曲げ応力の一例

正の相関が認められたことから, この関係式を用いて個々の林木の根返りモーメントを推定することにした.

$$[20] \quad M_U = 46.207D^2H - 0.721 \quad (r^2 = 0.791, n = 29)$$

3.1.5. 被害タイプの判別

一例として, 立木密度 2,004 本/ha, 平均樹高 14.8m, 平均胸高直径 20.4cm の調査地における平均木の樹幹形, 樹幹の撓み曲線, 曲げモーメントおよび曲げ応力を算出して, 図 7 に示した. この林木が幹折れを生ずるのは樹幹に作用する最大応力が 28.5MPa を超える場合であって, その時の風荷重は 17.2kN と推定された. 一方, 根返りを生ずるのは [20] 式から根元に負荷される曲げモーメントが 27.7kN・m を超える場合であって, その時の風荷重は 22.7kN と推定された. 被害タイプは風荷重がより小さい方の破壊形態を示すと考えられるので, この場合は幹折れを生ずる確率が高いと推測された. この調査地内の 21 本の調査木の折損高を測定したところ, 1.1 ~ 7.8m で平均 5.1m であった. 曲げ応力の最大値が 5 ~ 6m にあって折損高とほぼ一致したことから, この解析が概ね妥当であったと考

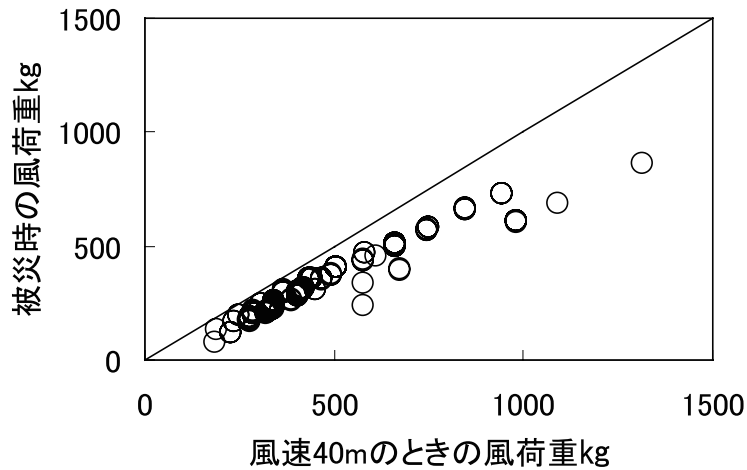


図 8. 風荷重の推定値

えられた。

被災時の瞬間最大風速は最寄りのアメダス観測所の資料から最大で 40m/sec 程度と推定された。Johnson *et al.* (1982) は、風洞実験から [8] 式のスギの抗力係数 C_d と風速との関係式を求めている。この式から、風速 40m/sec のときの C_d 値は 0.35 と推定された。そこで、被害タイプの判別に用いた 227 本の供試木を対象に、風速 40m/sec のときに受ける風荷重を [8] から、また根返り木は [4] 式、幹折れ木は [7] 式からそれぞれ風荷重を求めて図 8 に示した。その結果、被災時の風荷重は風速 40m/sec のときの値を超えることはなかった。したがって、風害は風速 40m/sec 以下で起こったものと推測された。

つぎに、観察された根返り木 168 本と幹折れ木 61 本、それぞれ根返り木または幹折れ木と推定された確率が統計的に有意か否かについて、四分表を用いて独立性の検定を行った。その結果は表 1 に示すとおり 1% 水準で統計的に有意となった。また、正答率は幹折れが 98% と高かったが、根返りは 41% と低かった。この原因としては、根系の支持力が土壌条件により大きく変化するのに (嘉戸ら, 1988)、本報では調査地による土壌条件を考

表 1. 被害判別の観察値と推定値の独立性の検定

		観察値		計
		根返り	幹折れ	
推定値	根返り	69	1	70
	幹折れ	99	60	159
計		168	61	229
正答率		41%	98%	56%

$$\chi^2 = 30.95 \quad (p < 0.01)$$

慮せず、根返りモーメントを一定とみなしたことがあげられる。また、一般に横荷重を立木に負荷したとき、荷重点が高い場合には幹折れを生じ、低いときには根返りを生ずる傾向があることから(森岡ら, 1991), 実際の風の荷重点が樹冠(枝葉)の重心高よりさらに低かったことも考えられる。この点については今後の検討である。

図9は林木の形状と被害タイプの関係シミュレーションによって検討したものである。この図から、胸高直径が同じ場合には樹高が高い林木は幹折れ、小さい木は根返りの傾向があるといえる。

以上のことから、被害タイプは林木の形状(樹高と胸高直径)と密接に関係していると考えられた。

4. おわりに

台風で被災したカワイダニスギ林木に「片持ち梁」モデルを適用し、林木の形状と典型的な被害タイプである根返りと幹折れの判別の可否を検討した。その結果、モデルによる被害タイプの正答率は幹折れが98%と高かったものの、根返りが41%と低かった。今後、根返りの正答率を高めるには各調査地における根系の支持力を定量化する必要があると考えられた。胸高直径が同じであれば樹高が大きい林木は幹折れを、小さい林木は根返りを生じる傾向があった。

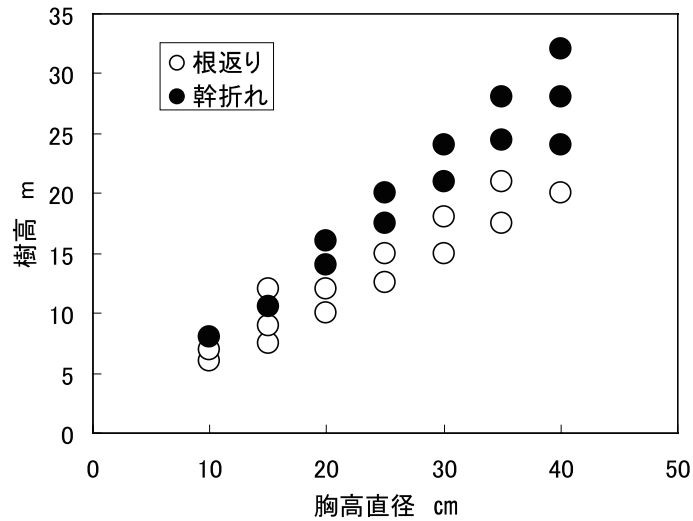


図 9. 樹幹形状と被害形態

謝辞

カワイダニスギの樹幹解析および層別刈取の資料を提供くださった富山県農林水産総合技術センター森林研究所の相浦英春氏に御礼を申し上げます。

引用文献

- 平田 種男 (1951) 伐採列区構成に関する基礎的研究 (第 1 報) 林木の暴風被害防除に就いて, 東大演報 39: 1-12.
- Johnson, R. C., Ramey, G. E. and O'Hagan, D. S. (1982) Wind induced forces on trees. *J. Fluids Eng.* 104: 25-30.
- 梶原 幹弘 (1993) 相対幹形—その実態と利用—, 森林計画学会, 138p.
- 嘉戸 昭夫・中谷 浩・平 英彰 (1988) 根系の支持力が冠雪荷重下の立木の耐力に及ぼす影響と被害形態の判別, 日林誌 70: 301-308.
- 嘉戸 昭夫・関子 光太郎 (2008) 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, 富山林技セ研報 21: 1-8.

小泉 章夫 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究, 北大演報 44: 1329-1413.

森岡 昇・オンウォナ アジマン シアウ・近藤 稔・北川 勝弘 (1991) 立木の樹幹と根株の力学的バランスを表す指標 LT 比, 日林誌 73: 380-383.

中谷 浩 (1999) 富山県産スギの材質と強度, 富山県林業技術センター, 60p.

沢田 稔 (1983) 風および冠雪による針葉樹幹の変形, 林業試験場北海道支場研究資料 No. 128, 18p.

鳥田 宏行 (2009) 防風林の防風防雪機能と気象害に関する研究, 北海道林試研報 46: 1-51.