

# 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

## Estimating long-term critical wind speed for wind damage by using mechanistic wind risk model, GALES

上村 佳奈・Gardiner, B.A.・白石 則彦

Kamimura, K., Gardiner, B.A. & Shiraishi, N.

キーワード: GALES, 限界風速, 台風害, 風害予測, 力学モデル

要約: 本論文は、風害予測力学モデルGALESを使用し、スギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) とヒノキ (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) 林分についての長期間にわたる変化に対し風害発生を引き起こす限界風速の推定を目的とした。その結果、植栽本数が少ない場合の方が、多い場合よりも限界風速が高い、すなわち耐風性が高かった。樹高が高くなるほど、成立本数毎の耐風性に差が見られることから、その差が開き始める樹高を限界樹高とすると、スギは約12m、ヒノキは約14mだった。よって、この限界樹高に到達する以前に間伐を行うことは、耐風性の向上に関係すると考えられる。

Abstract: In this study, we estimated critical wind speed causing overturning and stem breakage with special focus on linking a mechanistic wind risk model, GALES, with growth and yield models for sugi (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) and hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.). We found that lower initial planting density tended to increase the stability to the wind. In addition, stands with lower top tree height were more likely to be overturned than broken. To reduce wind damage, thinning would be recommended before the critical top tree height of sugi reaches 12m and that of hinoki reaches 14m. After this height, thinning might increase risk of wind damage. Although there were some limitations in the models developed for

Japanese forests, the results indicated the most suitable timing to conduct thinnings, which could be utilized for long-term forest management in Japan.

Keywords: Critical wind speed, GALES, Mechanistic models, Typhoon wind damage, Wind damage estimation

## 1. はじめに

日本の森林における台風害が、これまでも定期的に報告されている。過去の森林風害データから、人工林の41年生以上の林分に被害が多く見られ(久保山ら 2003), また50年生を境に人工林の風害に対する抵抗性が低下する(藤森 1997) ことなどが指摘されている。このことは、戦後の拡大造林により発展してきた日本の人工林が成熟期を迎えるに当たり、台風害がより拡大する可能性を示唆している。よって台風害を考慮した森林管理のあり方が、今後より重要になると考えられる。

風害軽減のための研究は、日本のみならず各国で行われている。それらの手法は主に、観察・経験的手法 (Observational/Empirical methods), 統計的手法 (Statistical methods), 力学的的手法 (Mechanistic methods) に分類される。観察・経験的手法と統計的手法は、被害地域のデータを用いることから、データが豊富な地域においては被害状況を正確に帰納することができる。しかしGardiner and Quine (2000) が指摘しているように、これらの手法は一定地域に限られ、さらに森林の力学的特性を考慮していないため、施業などで林分条件が変化したときの被害予測をすることは難しい。そこで近年、立木と林分の力学的特性と、風況に関する力学的・統計的モデルを組み合わせた力学的手法が発展してきた。

代表的な力学的手法は、英国の力学モデルGeographical Analysis of the Losses and Effects of Storms (GALES) と風況システムDetailed Aspect Methods of Scoring (DAMS) を組み合わせたForestGALES (Gardiner *et al.* 2000), フィンランドの力学モデルHWIND (Peltola *et al.* 1999) と風況モデルWASP (Mortensen *et al.* 2004) を組み合わせたスウェーデンのWINDA (Blennow and Sallnäs 2004) 等がある。これらは、林分の力学モデルから計算された風害発生の限界風速と、風況モデル等から計算された特定地域の風速を比較すること

により、風害の発生を予測する。各力学モデルに使用されているパラメータには多少の違いがあるものの、基本パラメータは立木をワイヤーで物理的に引き倒す立木引っ張り試験で取得することができる。よって、パラメータがあれば多くの地域で力学モデルを適応することが理論的に可能であり、実際にForestGALESはカナダ (Ruel *et al.* 2000, Achim *et al.* 2005)、フランス (Cucchi *et al.* 2005)、ニュージーランド (Moore and Quine 2000) 等の国で使用されている。以上のように、力学的方法是、多地域で使用が可能であり、かつ林分構造の変化に対応出来ることが利点である。特に間伐による成立本数と台風害の関係を明らかにすることは、今後森林における台風害リスクが増大すると予想される中で、適切な森林管理方法を決定する重要な要素の一つになると考えられる。

日本では、立木の風に対する力学的特徴の解明は進んでいるが (例えば小泉 1987, Chiba 2000, Zhu *et al.* 2000)、広域に適用でき、かつ比較的簡単に利用できる力学的手法は発展していない。これは、立木引っ張り試験の実施が容易では無いこと (小泉 1987) や、台風害などの気象災害が不可抗力であると一般的に考えられ、加えてこれまでの地域性や頻度の低さから、継続的な研究が行われにくい (松崎 1994) ことが考えられる。そこで本論文は、力学モデルを使用して限界風速の長期変化を示すことを目的とした。実際には、スギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) とヒノキ (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) の立木引っ張り試験データから得られたパラメータを組み込んだGALESと林分密度管理図を使用した。

## 2. 方法

### 2.1. GALESモデル

英国の針葉樹人工林の風害限界風速を計算するために開発され、単層林で、無間伐または軽度の間伐が行われた森林内部を対象としている (Gardiner *et al.* 2000)。GALESは根返りと幹折れ二種類の限界風速を示し、根返り発生限界風速は、立木引っ張り試験や風洞実験等による対数法則式により、幹折れは立木の力学的特性 (破壊係数等) から計算される。詳細な計算式はGardiner *et al.* (2000) により示されているが、抜粋して以下に記す。

### 2.1.1.1. 根返り発生限界風速

ある任意の高さ  $z$  (m) における風速は、以下の対数法則式

$$[1] \quad u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

に近似している。  $u(z)$  は高さ  $z$  における風速、  $u_*$  (m/s) は摩擦係数 (friction velocity)、  $k$  はカルマン定数 ( $\approx 0.4$ )、  $d$  (m) は地面修正量 (zero plane displacement; 樹高の約 8 割)、  $z_0$  (m) は粗度長 (aerodynamic roughness) である。粗度長は

$$[2] \quad \tau = -\rho u_*^2$$

と定義され、  $\tau$  (N/m<sup>2</sup>) は表面摩擦抵抗、  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) は空気密度を表している。ここで  $l$  (m) を立木間の平均距離とすると、  $\tau l^2 = -\rho u_*^2 l^2$  は個々の立木が受ける平均圧力  $F_{tree}$  を表す。よって  $F_{tree}$  は [1] 式より

$$[3] \quad F_{tree} = \rho \frac{u(h)^2 k^2 l^2}{\left( \ln \left( \frac{h-d}{z_0} \right) \right)^2}$$

で表される。ここで高さ  $z$  樹高  $h$  とし、すべての圧力は  $d$  に集中して作用すると仮定した上で、平均圧力を平均回転モーメント  $TM_{mean}$  に置き換える。ここで、一般に風害には平均風圧よりも最大風圧が大きく関係することから、Gardiner *et al.* (1997) の風洞実験と林内での風速測定により導き出された突風率  $G$  から、最大回転モーメント  $TM_{max}$  は、

$$[4] \quad TM_{max} = G \times TM_{mean}$$

となり、[3] 式、[4] 式から

$$[5] \quad TM_{max} = G d \rho \frac{u(h)^2 k^2 l^2}{\left( \ln \left( \frac{h-d}{z_0} \right) \right)^2}$$

となる。ところで根返りには、2 つの力が関係している。まず始めに風が樹冠部にあたり、立木がたわむ。そして樹冠重と樹幹重を合わせた地上部全体の重量により根返りが起こる (Coultts 1986)。よって樹重 ( $SW$ ) は根返りの最大回転モーメント ( $TM_{over}$ ) と強い相関関係を持っている (例えば Fraser and Gardiner 1967, Achim *et al.* 2005)。そこで傾きを  $c$  とすると直線  $TM_{over} = c \times SW$  で表され

る。なお、樹重が 0 ならばモーメントも 0 になるため、この直線は原点を通る。ここで  $TM_{max}$  と  $TM_{over}$  が等しいと仮定すると

$$[6] \quad c \times SW = Gd\rho \frac{u(h)^2 k^2 l^2}{\left( \ln \left( \frac{h-d}{z_0} \right) \right)^2}$$

なり、風速  $u(h)$  を根返りの限界風速  $u_{over}$  に置き換えると

$$[7] \quad u_{over} = \frac{1}{kl} \left( \frac{cSW}{\rho Gd} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left( \frac{h-d}{z_0} \right)$$

で表される。以上から、根返りの限界風速を求めるためには、立木引っ張り試験により最大回転モーメントと樹重の相関関係を求める必要がある。

### 2.1.2. 幹折れ発生限界風速

GALESの幹折れ限界風速の計算は、樹幹にかかる外圧が樹冠下から根元まで一定であるという仮定に基づいている (Morgan and Cannell 1994)。そこで幹折れを起こす最大回転モーメントは

$$[8] \quad TM_{break} = \frac{\pi}{32} MOR \times D^3$$

表される。 $MOR$ は破壊係数 (modulus of rupture, Pa)、 $D$ は胸高直径 (m) を表す。このとき、樹冠上の風速が[5]式の風速 $u(h)$ と等しいと仮定すると、幹折れを発生させる限界風速  $u_{break}$  は、

$$[9] \quad u_{break} = \frac{1}{kl} \left( \frac{\pi MOR \times D^3}{32 \rho G (d - 1.3)} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left( \frac{h-d}{z_0} \right)$$

で表すことができる。

### 2.1.3. 限界風速計算及び密度管理図

GALESの基本パラメータである最大回転モーメントと樹重の相関関係、及び破壊係数は2005年6月から7月に、東京大学秩父演習林にて行われた立木引っ張り試験の結果を使用した (表1)。対象木はスギとヒノキで、試験方法は英国で行われている引っ張り試験 (例えばAchim *et al.* 2005) に準じた。

林分の成長予測には、日本林業技術協会発行のスギ林分密度管理図 (北関東・中部地方) と、ヒノキ林分密度管理図 (関東・中部地方) を使用した。これらの地域には、立木引っ張り試験を行った秩父が含まれる。限界風速計算に当

表1. 立木引っ張り試験におけるスギ・ヒノキ試供木の特徴と根元の最大回転モーメントと樹重(SW)の回帰式の係数

樹種	n	樹齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	平均根系半径 (m)	平均根系深 (m)	幹重量 (kg)	最大回転モーメント (Nm)	MOR (MPa)	回帰直線 係数
スギ	10 (4)	27.9 12-46	20.2 11.7-34.8	16 10.6-23.1	0.9 0.4-1.4	0.9 0.5-1.2	266.7 51.2-660.1	48534.4 6757-179444.4	42.5	229.0
ヒノキ	9 (1)	31 16-47	18 13-27.8	13 7.5-17.6	0.8 0.4-1.3	0.8 0.5-1.4	164.9 51.2-418.2	41671.4 9261.8-138175.2	71.6	244.2

注1: スギは10本中4本, ヒノキは9本中1本が幹折れ. 平均根系半径および平均根系深はスギ6本, ヒノキ8本から計測. 破壊係数はスギ4本, ヒノキ1本から計算.

注2: MOR: 破壊係数 (modulus of rupture)

たつては、ヘクタールあたりの植栽本数が3,000, 2,000, 1,000本の自然枯死線から、上層樹高、胸高直径、立木本数を求め、GALESに入力した。

### 3. 結果と考察

本研究では、力学モデルGALESと林分密度管理図を用いて、林分の成長に伴った風害発生限界風速の長期変化を成立本数毎に示した(図1)。両樹種に共通する特徴として、立木本数が少ない方が、限界風速が高い傾向、すなわち風に対する抵抗性が高いことが認められた。また、立木のサイズが小さいときは幹折れよりも根返りのほうが発生しやすい(限界風速が低い)。原因の一つとして、若い林分は根の成長が十分でなく、根系と土壌のつながりが比較的に弱い。そのため、根返りの方が起こりやすいためと考えられる。

樹種別では、スギの場合、樹高が高くなるにつれ根返りよりも幹折れの方が発生しやすくなる傾向を示した(図1左)。これは、主たる要因としてスギ樹幹の強度(本研究の場合は破壊係数)が低いことと、一般的に土壤条件が良ければ立木が成長するにつれ根系が発達する結果、次第に幹の強度が風に対する抵抗性の限定条件となるためと考えられる。被害形態別では、根返りの抵抗性は上層樹高約18mまでは成立本数にかかわらず、大きな差は見られなかったが、幹折れの場合は早い段階で成立本数毎の差が現れている。これはGardiner *et al.* (1997) による風洞実験及び林内調査において確認された、幹折れの抵抗性は樹幹距離が大きいほど高くなるが、根返りの抵抗性は幹折れほど樹幹距離に著しく反応しないことに対応している。この傾向はヒノキでも若干確認されたが(図1右)、ヒノキの場合は幹の強度が高いこともあり強度が限定条件には必ずしもならず、そのため上層樹高が高くなっても根返りと幹折れの限界風速は成立本数毎にほぼ同じ値を示したと考察された。

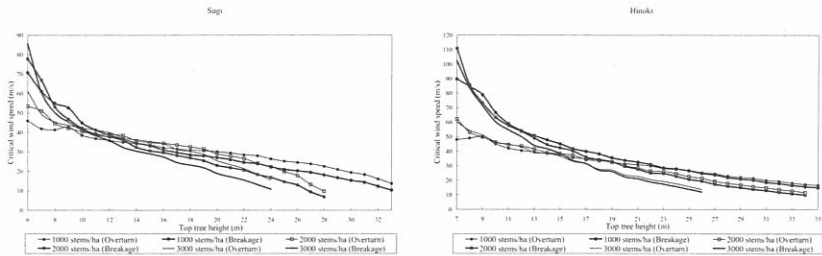


図1. スギ (左) およびヒノキ (右) 林分における成立本数毎の根返り・幹折れ発生限界風速の変化

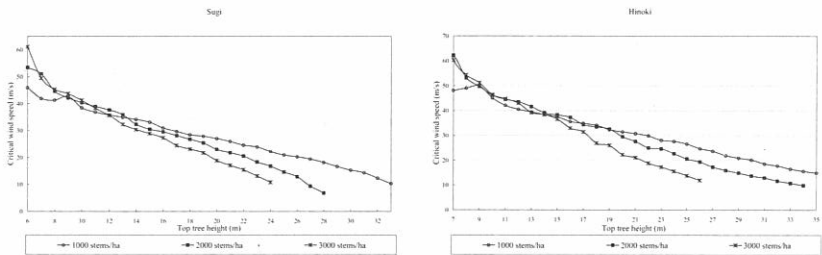


図2. スギ (左) およびヒノキ (右) 林分における成立本数毎の最小限界風速の変化

森林管理として限界風速を考えると、何らかの被害が起こる可能性を示すものとして、限界風速の低い値に着目する必要がある。図2は、スギとヒノキの幹折れと根返りを発生させる限界風速の低い値を抽出してプロットしたものである。この図から成立本数毎の線が交わる地点を考えると、3,000本植えを行う場合スギは樹高が約12m、ヒノキは約14mになる以前に、成立本数を少なくすることで限界風速を上げることが可能と予想された。ここでこの樹高を限界樹高とすると、限界樹高に達した後の間伐では耐風性の効果は上がりにくく、かえって風害のリスクを高める可能性がある。よって限界樹高に達する前に間伐、または除伐を行って十分に本数を減らしておくことが望ましい。しかし、間伐直後2-3年の耐風性が著しく低下することは過去の文献で報告されており(例えばSavill 1983)、また耐風性の低下はギャップのサイズに著しく関係している(Gardiner *et al.* 1997)ことから、強度の間伐には特に注意が必要である。

GALESと林分密度管理図を使用した本方法は、林分の特徴を生かした長期間の風害発生限界風速の変化を簡潔に示すことが出来た。しかし図1と図2の樹高9 m以下の若齢林分については、本方法による限界風速の推定は難しいと予想される。これは、林分密度管理図による若齢林の成長予測の精度と、GALESの計算式および最大回転モーメントと樹重の相関関係が、風害発生の可能性がある一定サイズ以上の立木について対象としているためと考えられる。このような若齢林は限界風速が高いため、風害推定には特に問題にはならないが、限界風速そのものに着目する場合は注意が必要である。

今回は力学モデルを使用し林分の限界風速のみを算出したが、地形が複雑な立地にある林分については、風況の影響が大きいと予想されるため、力学モデルだけでなく精度の高い風況モデル等を組み合わせた力学的手法を用いることが有効であろう。また、以上のような改善すべき点はあるものの、力学モデルは林分の変化に対応しながら風害を予測するため、長期にわたる森林管理には適している。なお力学モデルを様々な環境に適応させるには、土壌条件毎の立木引っ張り試験が不可欠であるが、労力や資金面から困難な場合が多い。しかし過去に試験が行われた事例は多くはないが存在するので、例えばこれらの結果をデータベース化し利用できれば、日本における力学的手法の発展だけでなく、台風害そのものを広く理解することに繋がると考えられる。

#### 4. おわりに

日本のように急峻な地形が多いところでは地形条件も重要であるが、小泉(1987)が指摘しているように、樹種間の耐風性に差異がみられること、同じ樹種であっても限界風速および被害形態の差が林分条件により異なっていることにも注目すべきである。そこで、今回は力学モデルGALESを用いて、林分構造による耐風性の違いを明らかにした。本研究では立木密度管理図を用いたことから、概念的な限界風速の変化のみの結果であった。しかし、スギ、ヒノキ両樹種とも成立本数が少ないほど限界風速が高いという結果が得られ、適切な時期に間伐をすることの重要性を示すことができた。一方、時期を逸した間伐では耐風性を向上させる効果は期待できず、また間伐直後の数年は抵抗性が著しく低下することもあり、風害のリスクを高める可能性が考察された。日



本における力学的手法は、力学モデルの整合性や、立木引っ張り試験によるデータ入手の困難性などの問題はあがるが、限界風速の長期変化を林分構造毎に計算できることから、台風害軽減を考慮した森林の管理には有効であると考えられる。

## 引用文献

- Achim, A., Ruel, J.-C., Gardiner, B., Laflamme, G. and Meunier, S. 2005. Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management* 204: 35-50
- Blennow, K. and Sallnäs, O. 2004. WINDA – a system of models for assessing the probability of wind damage of forest stands within a landscape. *Ecological Modelling* 175: 87-99
- Chiba, Y. 2000. Modelling stem breakage caused by typhoons in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *Forest Ecology and Management* 135: 123-131
- Cucchi, V., Meredieu, C. and Stokes, A. 2005. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 213: 184-196
- Fraser, A.I. and Gardiner, J.B.H. 1967. Rooting and stability in Sitka spruce. *Forestry Commission Bulletin* No. 40. HMSO. London. 28p.
- 藤森隆郎. 1997. 日本のあるべき森林像からみた「1千万ヘクタールの人工林」. *森林科学* 19: 2-8
- Gardiner, B.A., Stacey, G.R., Belcher, R.E. and Wood, C.J. 1997. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70(3): 233-252
- Gardiner, B., Peltola, H. and Kelleomäki, S. 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129: 1-23

- Gardiner, B. and Quine, C. 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage – a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management* 135: 261-277
- 小泉章夫. 1987. 生立木の非破壊実験による材質評価に関する研究. *北大農演報* 44(4): 1329-1415
- 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. *日林誌* 85(3): 191-198
- 松崎 健. 1994. 佐渡の森林における強風倒木被害の研究. 平成4・5年度文部省科学研究費補助金 (一般研究B) 研究成果報告. 66p.
- Moore, J. and Quine, C.P. 2000. A comparison of the relative risk of wind damage to planted forests in Border Forest Park, Great Britain, and the Central North Island, New Zealand. *Forest Ecology and Management* 135: 345-353
- Morgan, J. and Cannell, M.G.R. 1987. Structural analysis of tree trunks and branches: tapered cantilever beams subject to large deflections under complex loading. *Tree Physiology* 3: 365-374
- Mortensen, N.G., Heathfield, D.N., Myllerup, L., Landberg, L. and Rathmann, O. 2004. Getting started with WASP8. Risø National Laboratory. Roskilde. 87p.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H. and Ikonen, V.-P. 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian J. of Forest Research* 29: 647-661
- Ruel, J.-C., Quine, C.P., Meunier, S. and Suarez, J. 2000. Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGALES model. *The Forestry Chronicle* 76(2): 329-337
- Savill, P.S. 1983. Silviculture in windy climate. *Forestry Abstract* 44: 473-488
- Zue, J., Matsuzaki, T. and Sakioka, K. 2000. Wind speeds within a single crown of Japanese black pine (*Pinus thunbergii* Parl.). *Forest Ecology and Management* 135: 19-31