

風によって林木に作用する回転モーメントの測定手法の開発

鈴木覚^{1*}・坂本知己¹・野口宏典¹・井道裕史¹

Development of method to measure the turning moment by wind for standing trees

Satoru Suzuki^{1*}, Tomoki Sakamoto¹, Hironori Noguchi¹, Hirofumi Ido¹

Abstract: We developed a method of measuring the turning moment for standing trees in natural wind. We used strain gauges attached to stems 1.3m in height to measure the strain to which they were exposed while swaying in the wind. The turning moment of the trees was obtained by multiplying the measured strain with coefficients determined by pulling tests of the trees. We considered an adequate sampling frequency to detect the strain fluctuation peaks and pulling heights of tree stems to obtain coefficients in the pulling tests of trees. In our case, more than 10Hz of sampling frequency was needed to detect the peaks of the turning moment fluctuation. Pulling heights at the gravity center of wind were required to measure the coefficient due to the height dependency. We measured the turning moment for four trees in a coastal pine forest (*Pinus thunbergii*) in Aichi prefecture. The recorded maximum turning moment were estimated in 100Nm-600Nm for sample trees under strong wind conditions in 8 to 10m/s. Developed method is expected to use in evaluation of wind damage risk and ecological researches to clarify the effects of wind force to trees and forests.

1 はじめに

海岸林における特徴的な生育環境は強風環境である。そして、強風環境が海岸林に及ぼす影響は、風力による力学的な影響と乾燥などの林木の生理面に及ぼす影響、および飛砂や飛来塩分など風に運ばれてきた物質による影響がある。

これらのうち力学的な影響として、風力は樹形の形成に関与する。たとえば、恒常的に外力を受けて生育した場合、樹高が低く樹幹の直径が太い形状となり (Telewski 1995), 風衝地では、風下側に樹冠が偏形する(大和田・吉野 1971; 吉野ら 1974)。また、特異的な強風は、時として根返りや幹折れなどの風害を発生させ (玉手 1955), そのメカニズムは風力と耐力との力学的なバランスで説明される。すなわち、林木が風力を受けると、樹幹に回転モーメントが働き、樹幹内部には応力が発生するが、回転モーメントが根系による最大抵抗モーメントを上回ったときに根返りが発生し、樹幹の応力が曲げ強度を上回ったときに幹折れが発生する(鈴木 2012)。

林木に作用する風力の実測事例はわずかにみられるが (Gardiner et al. 1997; James and Kane 2008; Wellpott 2008; Hale et al. 2012), 通常は樹冠の鉛直平面への投影面積を受風面積とし、風のエネルギーが林木へ作用する力に変換される効率である抗力係数、および定常風を仮定して、これらパラメータのかけ算で平均風力が見積もられる。さらに、動的な風力を推定する場合は、風力の時間変動をガスト係数として推定式に導入することによって、動的効果が表現される。ここで、受風面積や樹冠付近の風速分布を精度よく推定するのは困難であり、加えて抗力係数やガスト係数は風洞における模型実験や数値シミュレーションによる推定値が使われる。これらの、

必ずしも精度が高くない推定値同士をかけ算して求めた風力は、大きな誤差を伴う可能性がある。このように、風力の大きさは、様々な局面で林木に影響を及ぼしているにもかかわらず、実測が技術的に困難であったため、従来の推定精度は高くない。

そこで、風によって林木に作用する回転モーメントの測定手法を開発することを本研究の目的とする。また、クロマツ林における測定結果も併せて示す。

2 方法

2.1 観測地概要と測定機材

愛知県栽培漁業センター(田原市小中山町一膳松)におけるクロマツ (*Pinus thunbergii*) の海岸林(図1)で観測を行った。観測地付近はマツ材線虫病によってクロマツがほぼ全滅したあと天然更新した林である。海岸林内は更新時期や立地条件によって樹高が異なるが、観測地周辺の上層樹高はおよそ 6m であった。また、観測地周辺の立木密度は 20000 本/ha であった。林内には 5m 幅の作業道があり、汀線と平行 (N30E-S30W) に、汀線からおおよそ 280m の位置に敷設されていた。

手法開発にあたって、2013 年 1 月に引張り試験に



図1: 観測地の位置 (観測地: ●)

¹独立行政法人森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute, 1
Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan
*Corresponding author:satorusk@ffpri.affrc.go.jp

おける牽引高の検討, および測定周波数 (1 秒当たりの測定回数) の検討を P5 で行った (表 1). また, P5 からおよそ 20m 南西に P1, P2, P3, P4 をとり (表 1), 2013 年 3 月に回転モーメントの観測を行った. 風環境の異なる個体を試料とするため, 作業道に面した位置に P1 を設定し, P2 から P4 は約 2m の間隔で作業道と直交に内陸方向へ向かって一列に設定した (図 2). 作業道のために P1 の北西方向は空間が開けているが, P2 から P4 の周辺は空間的に不均一に立木が分布し, それらの樹高も不均一であった. 全体的な傾向として, 作業道から内陸に向かって上層樹高が大きくなる傾向が見られ, 調査個体は比較的樹高が大きく風を受けやすいと思われる個体であった.

風速計 (8368.03, Lufft Measurement & Control Technology Co., Ltd.) と風向計 (024A, Met One Instruments) を観測地から西北西におよそ 40m の位置に設置した. 測定高度は 6m であった. 風速計および風向計周辺の上層樹高はおよそ 2.5m であり, 植生の影響は比較的少ないと考えられることから, 観測地の代表風速として扱った. 観測期間中は典型的な冬季の気象条件であり, 平均風速は 6 m/s ~ 8 m/s の頻度が高く, 風向は作業道に面した林木と正対する北西風 ~ 北風が 7 割を占めていた.

林木は風力を主に樹冠で受けて動揺し, それによって樹幹に撓みを生じる. 本研究では樹幹の撓みをひずみセンサーで検出した. ひずみセンサーはひずみゲージ (KFG-1-120-D16-23, 共和電業) をアルミ製の治具に貼り付けて製作した (野口ら 2009). 金属製の治具にひずみゲージを貼り付けた同様のセンサーが, Moore らや James and Kane によって報告されている (Moore et al. 2005; James and Kane 2008). 本研

表 1: 調査個体の形状

	樹高 (m)	枝下高 (m)	胸高直径 (cm)	測定内容
P1	5.0	3.0	4.9	回転モーメント
P2	5.5	3.7	6.2	回転モーメント
P3	6.6	4.5	6.8	回転モーメント
P4	6.5	3.9	9.5	回転モーメント
P5	4.8	2.6	6.6	牽引高検討

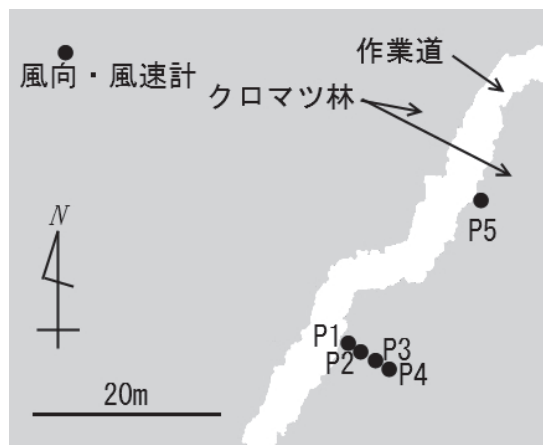


図 2: 測定個体および風向・風速計の配置

究で使用したひずみセンサーは Moore らのセンサーを参考に改良を加えたもので, Moore らのセンサーよりも水平力の検出精度が高く (野口ら 2009), James and Kane のセンサーよりも小型で簡便である.

ひずみセンサーは, 樹幹の 1.3m の高さに北面と西面に一つずつ取り付け, NS 方向および EW 方向のひずみを別個に記録した. 測定は 100Hz でロガー (EDS-400A, 共和電業) に記録した. また, 本研究では風心高を樹冠長の 1/2 の位置に仮定した.

2.2 測定原理および方法

樹木に回転モーメントをもたらす外力は, 風力, 自重, および運動による慣性力である. これらの外力によって樹幹に撓みが生じ, 樹幹のある高さ (h) における撓み (δ_h) とひずみ (ε_h) は比例係数 B を用いて,

$$\delta_h = B\varepsilon_h \quad (1)$$

で示される. 一方, 樹幹を等断面の片持ち梁にみなすと, δ_h は次式で示される (土木学会 1986)

$$\delta_h = \frac{PL^3}{6EI} \left(2 - 3\frac{x}{L} + \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right) \quad (2)$$

ここで, $x=L-h$, P は荷重, E はヤング率, I は断面二次モーメント, L は風心高である. さらに, $h=aL$ ($0 \leq a \leq 1$) と置き, (1) 式を代入すれば,

$$PL = \frac{EIB}{C} \varepsilon_h \quad (3)$$

ただし, $C=(-a^3+3a^2)L^2/6$ である. 本研究では引張り試験で PL と ε_h を測定し, EIB/C を決定した. (3) 式により, 風による樹木の揺れで生じた ε_h から, 根元の回転モーメントを算出した. また, 回転モーメントは NS 方向および EW 方向を別個に求め, それらをベクトル合成した. なお, EIB/C は調査個体ごとに一定値をとり, 以下では係数 D と表記する.

引張り試験は樹幹を人工的に牽引して撓ませるので, 牽引力をロードセル (LUX-A-2KN, 共和電業) で計測した. 引張り試験で D を求める際に, 牽引によって樹幹が傾斜した場合自重による回転モーメントが付加されるが, それはロードセルの測定値に反映されないため, 根元回りの回転モーメントが過小評価される可能性がある. そこで, 樹幹の傾斜の影響を検討した.

また, 引張り試験における牽引は, 風力の作用を集中荷重に置き換えたものなので, 風心高で牽引して求めた値を対象木の D 値とすべきである. しかし, 林木の形状比が容易に 100 を超えていることが示唆するように (表 1), 樹高の割に幹の直径が小さく, 幹が容易に湾曲してしまうため, P1~P4 は風心に牽引ロープを取り付けられなかった. そこで, 風心より低い 3 高度で順次引張り試験を行い, 牽引高ごとに得られた D 値と, 樹高に対する相対的な牽引高との関係から, 風心における値を推定することとした. このような方法の妥当性を P5 で検討した.

3 結果と考察

3.1 測定周波数の検討

強風の影響を検討するには、林木にかかる回転モーメントの最大値が重要であり、その場合はひずみのピーク値が精確に検出できる測定周波数が必要である。これまでの研究事例では、測定周波数に関する検討が加えられていない。そこで、本研究では高い測定周波数で測定したデータを間引いて低い測定周波数のデータセットを作り、任意に選んだ10点のピーク値を各データセットから取り出して比較することにより、測定周波数の影響を検討した(図3)。測定周波数が不適切に小さい場合は、ピークが検出できないため過小評価になるはずである。図3で明らかのように10Hz以上の測定周波数の場合は値にほとんど差はみられず、10Hzのときの100Hzの測定値に対する過小評価は0.4%であった。一方、5Hzのときは100Hzの測定値よりも2.7%過小で、それよりも小さい測定周波数では急激に差が大きくなった。したがって、P5は10Hz以上の測定周波数であれば十分な精度を確保できると考えられた。

ここで、測定周波数は林木の動揺における往復運動の速さに依存すると考えられる。したがって、樹高の低いものほど卓越した動揺周波数が大きくなる一般的な傾向を考慮すれば(鈴木ら2010)、樹高の低いものほど測定周波数を大きくする必要があると考えられた。なお、P1からP5の樹高に大きな差がないことから、本研究ではすべての調査個体においてデータを10Hzに間引いてから計算を行った。

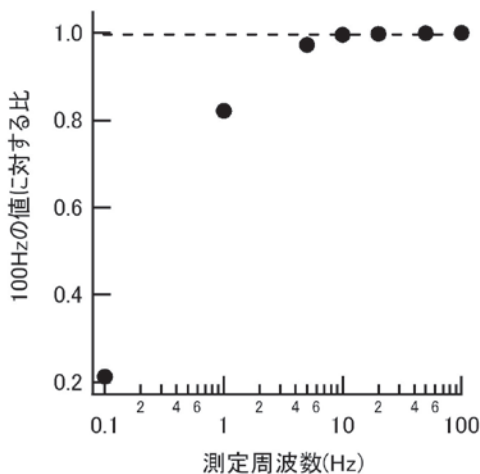


図3：各測定周波数における測定値の100Hzの測定値に対する比(P5)

3.2 自重および牽引高度の検討

引張り試験で樹幹が傾斜した場合における、自重による回転モーメントの過小評価について検討する。ひずみに対するロードセルで測定した回転モーメントの関係を図4に示す。いずれの回帰線も緩やかな曲線になっていることがわかる。その原因は、牽引力を大きくして樹幹の傾斜が大きくなるほど自重による回転モーメントが増加するが、その分はロードセルで検出できないため、回転モーメントの増加が見かけ上抑制されて測定されたためと考えられる。

したがって、本研究では、回帰線を2次曲線で回帰し、 $x=0$ における傾きをD値とすることにより、自重による回転モーメントによる過小評価が回避できるものと考えた。

次に、風心におけるD値の推定方法について検討する。0.4H(2.0m), 0.5H(2.5m), 0.6H(3.0m)(H:樹高)の風心より低い3高度で測定した3つのD値について、NS方向、EW方向のいずれも牽引高ごとに異なり、牽引高が高いほどD値は小さかった(図4)。また、樹高に対する牽引高の相対値を横軸にD値をプロットしたのが図5である。3高度のD値を漸近指数関数で回帰し、回帰曲線を外挿して風心である0.77H(3.7m)の値を推定すると、NS、EW方向

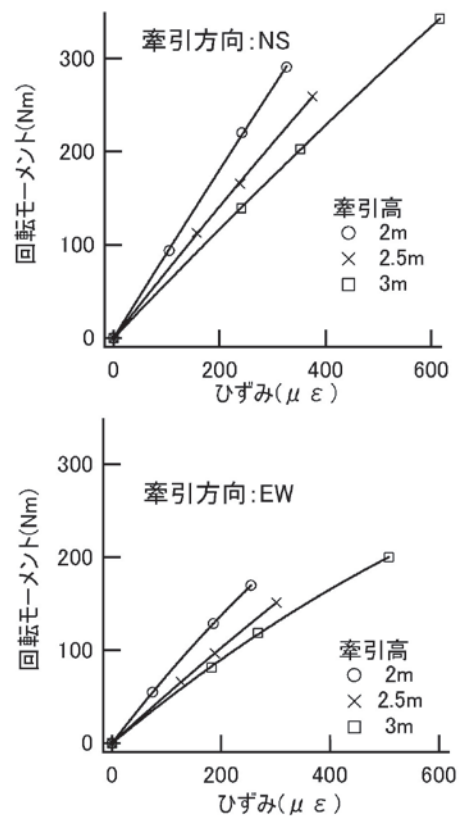


図4：ひずみに対する回転モーメントの例(P5)

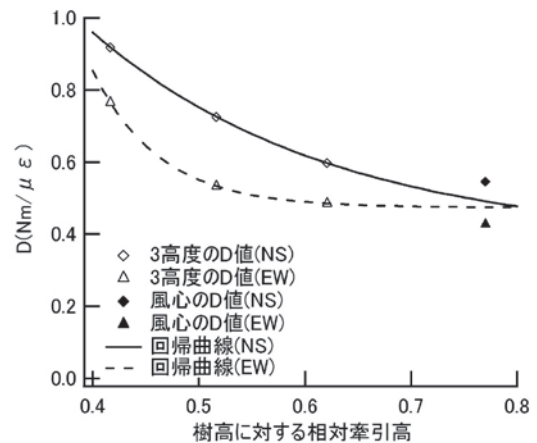


図5：P5における3高度のD値から求めた回帰曲線と風心におけるD値

それぞれ 0.49, 0.48 であった。一方, 0.77 H (3.7m) の高さで測定した D 値は NS, EW 方向それぞれ 0.55, 0.43 であり, 実測値と推定値の差はどちらの牽引方向においても, およそ 10% であった (図 5)。以上の結果から, 若干精度が低下する可能性はあるが, 風心で牽引できない場合における D 値の推定方法は概ね妥当と考えられた。既往の事例では, 引張り試験において 0.5H 付近の一高度で牽引して D 値を求めているが (James and Kane 2008; Hale et al. 2012), 本研究の結果からは, 風心による牽引あるいは風心の D 値を推定することが必要と考えられた。

3.3 回転モーメント変動の時刻歴

ある 60 秒間の NS 方向の回転モーメントの時刻歴を図 6 に示す。林木の動揺は 8 秒から 15 秒にかけてのようにゼロを中心にプラスマイナス対称の振動が続く部分 (図中 A) と, 7 秒, や 53 秒のようにパルス状のマイナスの大きな振幅 (図中 B), さらに 24 秒から 28 秒, 34 秒から 38 秒, あるいは 54 秒から 57 秒のように数秒間ゼロをまたがずにマイナス側のみで動揺している部分 (図中 C) が観測された。図 6 におけるマイナスは風下への樹幹の変位に伴う回転モーメントに相当し, しばしば観察されるパルス状の大きな振幅は瞬間的な強風によるもので, 数秒間続くマイナス側の動揺は数秒間継続する強風によるものと考えられた。また, ゼロを中心にした動揺は, 風力を受けた後に風が弱まって外力が小さくなった状態, すなわち自由振動に近い状態にあると考えられた。7 秒~15 秒のように, パルス状の大きな振幅の直後に自由振動へ移行する場合, 53 秒~57 秒のようにパルス状の大きな振幅の後にも数秒間強風が持続する場合とが見られた。

この期間を含む 10 分間における 10Hz で計算した NS 及び EW 方向の回転モーメントを図化したリサージュを図 7 に示す。この時刻における平均風向は 318° であり, リサージュは風向に伸びた楕円形をしていた。また, 原点より風上側には小さな振幅の軌跡のみが観測されているのに対し, 風下側には大きな振幅の軌跡がみられ, それはパルス状の強風に対応していると考えられた。

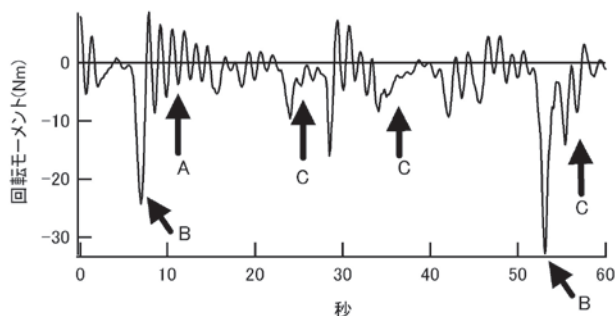


図 6: ある 60 秒間の回転モーメント時刻歴の例(P1)

(A: 自由振動に似た波形, B: パルス状波形, C: 数秒間風下のみで続く波形)

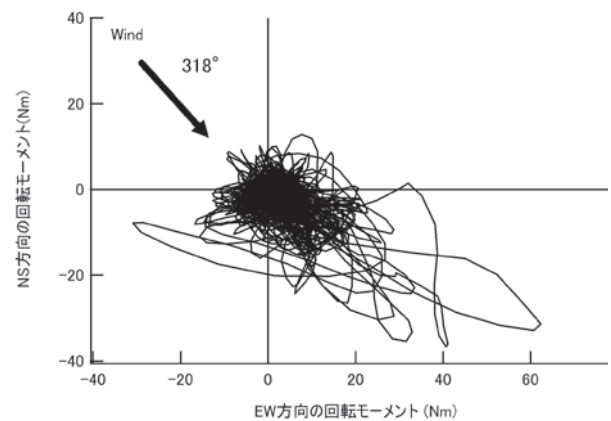


図 7 ある 10 分間のリサージュの例(P1)

3.4 強風時の回転モーメント

観測期間で最も風速が大きかった 1 時間における, 調査個体ごとの回転モーメントの大きさを作用方向ごとに図 8 に示した。このときの平均風向は 298 度から 303 度, 平均風速は 8.1 m/s から 10.0 m/s であった。試料ごとの卓越した回転モーメントの方向は P1 から P4 の順に, およそ 310 度, 250 度, 290 度, 260 度であり, P1 と P3 は概ね風向と一致していたが, P2 と P4 に風向とのずれがみられた。P2 や P4 において, 卓越した作用方向が風向と異なった理由として, 周囲の個体との位置関係や樹高の高低関係による風向の不均一性を反映している可能性, あるいは, 樹冠形状が偏りを持っていたため, 風の受け方が個体ごとに異なった可能性が考えられる。また, P2 と P4 には卓越した作用方向とは別に小さなピークがみられ, 卓越した作用方向との差は 180 度から 200 度であった。したがって, 小さなピークは, 卓越した作用方向へ変位した後の反動による逆方向への回転モーメントによるものと考えられた。

回転モーメントの最大値は P1 から P4 の順に, 136 Nm, 109 Nm, 183 Nm, 586 Nm であった。P4 は他の試料よりも遙かに大きな回転モーメントを記録しており, ほぼ同じ樹高である P3 の 3 倍以上であった。その原因の一つは, P4 の樹冠長が P3 よりも大きいことから (表 1), 風を受ける面積が大きかったためと考えられた。しかし, 仮に P3 と P4 の樹幹形状が相似であったとすると, 樹冠長の差から推定される P4 の鉛直平面への投影面積は P3 の 1.5 倍に過ぎず, 観測された大きな差は説明しきれない。したがって, P4 が樹冠で受けた風速が P3 よりも大きかった可能性が高いと考えられる。観測地は実生更新のため, 立木の配置や樹高は不均一で, 調査個体ごとに周囲との関係が大きく異なると考えられる。その結果, 周囲の個体数や位置関係ならびに樹高の高低関係により, 受ける風速が異なると推察された。

今後, 林木の最大抵抗モーメントと比較することによって, 回転モーメントの最大値から根返りリスクの推定が可能になる。加えて, 樹幹直径の軸方向の分布を測定すれば, 最大応力度とその発生部位が

計算でき、幹折れリスクと折損位置の推定が可能と考えられる。このように、森林気象害あるいは生態学的方面での本手法の活用を図る予定である。

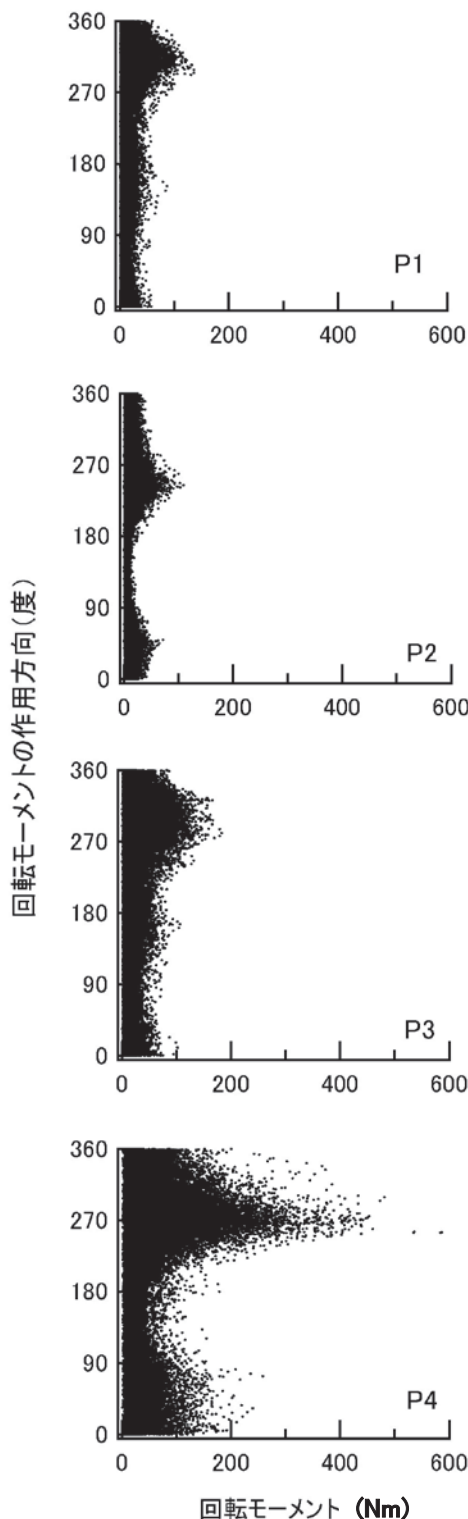


図 8 : 強風時の回転モーメントの大きさと作用方向の分布

4 まとめ

- (1) 自然の風が立木にもたらす回転モーメントを、ひずみゲージを使って測定する手法を開発した。
- (2) 回転モーメント変動の瞬間値をとらえるため、適切な測定周波数の選択が必要と考えられ、本研究の場合は 10Hz 以上の測定周波数であれば、十分な精度が確保できると考えられた。
- (3) ひずみから回転モーメントへの変換係数である D は牽引高によって異なるため、風心による牽引あるいは風心の D 値を推定する必要があると考えられた。
- (4) クロマツ海岸林で観測された 4 個体における強風時の回転モーメントの最大値は、100Nm から 600Nm であった。
- (5) 本手法は、風害リスクの推定や生態学的な研究に活用できると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたって、愛知県東三河農林水産事務所、愛知県栽培漁業センター、田原市の皆様にご協力いただいた。森林総合研究所九州支所の萩野裕章氏には有益なコメントをいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- [1] Dean, T. J. and Long, J. N. (1986): Validity of Constant-stress and Elastic-instability Principles of Stem Formation in *Pinus contorta* and *Trifolium pratense*. *Annals of botany*, 58(6), 833-840.
- [2] 土木学会 (1986) 構造力学公式集 (構造工学委員会・構造力学公式集改訂委員会編) 573pp.
- [3] Gardiner, B. A. Stacey, G. R. Belcher, R. E. & Wood, C. J. (1997): Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability, *Forestry*, 70(3), 233-252.
- [4] Hale, S. Gardiner, B. Wellpott, A. Nicoll, B. & Achim, A. (2012): Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*, 131(1), 203-217.
- [5] James, K. R. and Kane, B. (2008): Precision digital instruments to measure dynamic wind loads on trees during storms. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6-7), 1055-1061.
- [6] Moore, J. R. Gardiner, B. A. Blackburn, G. R. A. Brickman, A. & Maguire, D. A. (2005): An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(1-2), 78-83.
- [7] 野口宏典・鈴木 覚・坂本知己(2009): 任意の水平方向からの負荷に対する樹幹ひずみの測定方法, 海岸林学会誌, 8(2), 80-85.
- [8] 大和田道雄・吉野正敏(1971): 石狩平野の卓越風の分布について, 地理学評論, 44(9), 638-652.
- [9] 玉手三葉寿(1955): 森林風害調査について, 林業技術, 158, 1-8.
- [10] 鈴木 覚・野口宏典・後藤義明・吉武 孝・坂本知己 (2010) クロマツ海岸林における樹木の動揺の特徴, 日本海岸林学会誌, 9, 97-102.
- [11] 鈴木 覚. (2012): 樹木と環境, 樹木医学研究, 16(1), 15-22.
- [12] Telewski, F. W. (1995): Wind-induced physiological and developmental responses in trees. In *Wind and Trees* Eds

M. P. Coutts & J. Grace), p. 485. Cambridge: Cambridge University Press.

[13] Wellpott, A. (2008): The stability of continuous cover forests. University of Edinburgh.

[14] 吉野正敏. 三井嘉都夫・吉野みどり・吉村 稔・漆

原和子・上田茂春・大和田道雄・中村恵三(1974): ユーゴスラヴィアのアドリア海岸における偏形樹のよるボラ地域の調査, 地理学評論,47(3), 155-164.

[受付 平成25年8月26日, 受理 平成26年4月4日]