カラマツの風害に関する力学的評価

鳥田 宏行^{*、1}

本研究では、カラマツの風荷重による根返りおよび折損に関する力学的な評価を行うため、立木の引き倒し試験を北海道十勝管内で実施した。カラマツは、十勝における主要造林樹種であり、たびたび当地域は台風被害を受けてきた。回転モーメントと傾斜角の関係からは、最大回転モーメント時の根元の平均傾斜角は 9.7° で、比較的小さな傾斜角であった。最大抵抗モーメントと立木の諸因子（胸高直径 D 、樹高 H 、形状比 H/D 、材積 D^2H 、枝葉重 W_{cr} 、幹重 W_s 、全重 W_t ）との相関分析の結果、胸高直径 D は、根返りおよび幹折れのいずれの場合においても相関が高く、立木の耐風性を示すもっとも重要な指標となることが示された。今回の結果では、根返りに関しては、最大抵抗モーメントは、 D の約 2.6 乗に比例し、幹折れは D の約 3 乗に比例して増加した。被害形態に関しては、直径が細い立木では幹折れが発生し、太くなると根返りすることが示唆された。

キーワード：引き倒し、傾斜角、胸高直径、最大抵抗モーメント、被害形態

Hiroynki Torita^{*、1} (2009) Mechanical Evaluation of the Japanese Larch for Wind Damage. J. Jpn. For. Soc. 91: 120–124. To evaluate the mechanical stability of the Japanese larch (*Larix kaempferi* Carr) against wind loading, tree-pulling experiments were conducted in Tokachi, Hokkaido. The Japanese larch forests of this region are frequently subjected to strong winds from typhoons. These winds can cause root breakage and damage tree stems. Wind damage is a major source of economic loss in this region. The relationship between angle of inclination at the tree base and the turning moment showed that average angle of inclination was 9.7° at the maximum turning moment M_{max} . Correlation analysis revealed that the correlation coefficient between M_{max} and the diameter at breast height D was greater than that between M_{max} and other elements (tree height (H), slenderness ratio (H/D), stem volume (D^2H), weight of branches and leaves (W_{cr}), stem weight (W_s), total weight (W_t)). Significant relationships were observed. D was the best index of M_{max} . M_{max} increased in proportion to the 2.6 th power of D for uprooting and to the 3rd power of D for stem breakage. It was suggested that the mode of failure varied with the diameter; larger trees were uprooted, while smaller trees were broken.

Key words: tree pulling, angle of inclination, diameter at breast height, maximum resistive moment, mode of failure

I. は じ め に

2002 年北海道十勝地方は、台風 21 号によって、この地域の主要造林樹種であるカラマツ (*Larix kaempferi* Carr) 林で被害が発生した。この台風 21 号は、10 月 1 日夕方から風雨を強め、2 日 5 時 6 分には広尾町で最大瞬間風速 35.5 m/s を記録する暴風雨となった。総被害面積は約 8,400 ha に達し、十勝支庁管内の 10 町村（音更町、中札内村、更別村、忠類村、大樹町、幕別町、池田町、豊頃町、本別町、浦幌町）は、激甚災害地域に指定された（阿部ら、2003；鳥田、2006）。この地域は、過去にも台風の襲来時に森林被害が発生しており（水井・畠山、1984）、暴風による経済的な損失は深刻な問題となっている。これまでに暴風が引き起こす森林被害に関する研究は、統計的手法にもとづく要因解析（三浦ら、1984；Jalkanen and Mattila, 2000；Lanquaye-opoku and Mitchell, 2005；Scott and Mitchell, 2005；鳥田、2006）や間伐効果と耐風性に言及した野外調査（Cremer *et al.*, 1982；Slodicak and Novak, 2006）など、多くの研究がなされてきた。これらの研究は、林分レベルもしくは、広範な被害エリアを対象に調査研究が行われたものであり、森林を構成する個々の立木レベルでの研究は、力学モデルや立木の

引き倒し試験（Smith *et al.*, 1987；Fredericksen *et al.*, 1993；Peltola *et al.*, 2000；Nicoll *et al.*, 2005, 2006）によって実施されている。国内における引き倒し試験は、主に本州の主要造林樹種であるスギやヒノキを中心に実施されており（玉手ら、1965；森岡、1984；中谷、1991；陶山、1993；嘉戸、2001）、暴風に対する立木の風倒・折損に関する力学的な評価がなされている。これらの結果は、地上部情報（胸高直径、樹高等）から立木の耐風性を推測する重要な知見ではあるが、北海道の主要造林樹種であるカラマツに関しては、地上部情報と立木の耐風性との関係を示す知見が少なく（小泉、1987）、今後の研究調査が期待されるのである。

そこで本研究では、風荷重を想定したカラマツの力学的な安定性および折損に関する評価に資するため、2002 年の台風 21 号の被害の中心地域である十勝地方で立木の引き倒し試験を実施した。

II. 方 法

試験は、傾斜による影響を避けるために、平坦地にある 12 年生のカラマツ林（北海道十勝管内の幕別町）で実施した。試験地は、広く火山灰土に覆われた十勝平野に位置し、

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: hirotori@hfri.pref.hokkaido.jp

¹ 北海道立林業試験場 〒079-0198 北海道美瑛市光珠内町東山（Hokkaido Forestry Research Institute, Higashiyama, Koushunai, Bibai 079-0198, Japan）

（2008 年 9 月 22 日受付；2008 年 11 月 10 日受理）

表層土壌は未熟くろぼく土壌に区分される。本数密度は約 2,600 本/ha, 平均樹高 13.6 m, 平均胸高直径 12.4 cm である。引き倒し試験の荷重点は、この原理を応用して根元に回転モーメントを生じさせるため、樹高の 1/2~1/3 の高さ (Fredericksen *et al.*, 1993; Peltola *et al.*, 2000; Nicoll *et al.*, 2005, 2006 など) に相当する地上高 5 m に設定した (図-1)。チルホルのけん引により発生した引張り荷重は、ロードセルから自動的に記録した。試験に用いた立木は、合計 66 本である。また、立木の傾きを測定するため、立木の高さ 0.1 m の位置に傾斜計 (オムロン D5-L02-60) を取り付けた。引張り荷重および傾斜角のデータは、1 秒間隔で記録した。

回転モーメント M は、以下の式から求めた。

$$M = F \cdot H \quad (\text{kNm}) \quad (F, \text{荷重 (kN)}; H, \text{荷重高 5 m}) \quad (1)$$

本研究では、試験木の重量も測定した。引き倒した試験木は、1 m ごとに玉切りして、幹部分と枝葉部分に分けて合計 47 本について測定し、残りの試験木についての重量 (kg) は、実測から得た胸高直径 D (cm) との関係式より推定した (枝葉重量 $W_{cr} = 0.125D^{2.05}$ ($r=0.84$), 幹重量 $W_s = 0.321D^{2.11}$ ($r=0.93$), 全重量 $W_t = 0.447D^{2.09}$ ($r=0.95$))。

III. 結 果

被害形態は、根返りと幹折れ (幹曲りを含み、以後幹折れと記載する) に分類した。被害形態とその本数は、根返り木が 29 本、幹折れ木が 37 本となった。

1. モーメントと幹傾斜角の関係

試験木に引張力を漸次加えていったときの、幹の傾斜角の変化の代表例を図-2, 3 に示す。根返りの場合、負荷開始当初において、回転モーメントは急激に増加するのに対して傾斜角の変化は小さく、回転モーメントが最大値を示したときの傾斜角は、5°~10°であった (図-2)。根の切れる音が聞こえるのは、回転モーメントが最大値を示すあたりで、この時に根系のせん断が生じると考えられる。胸高直径 D に注目すると、回転モーメントが最大値に到達したときの傾斜角は、太い立木ほど小さい傾向にあった (図-2)。根返りした全木に対しては、最大回転モーメント時の傾斜角と胸高直径との間には、負の相関が認められ (相関係数 -0.386 , 有意水準 5%), 根返りと判定したときの幹傾斜角は、太い立木ほど小さい傾向にあった。スギの引き倒し試験においても、胸高直径が大きくなるほど最大回転モーメント時の傾斜角は小さくなる傾向が示されており、本結果と定性的に一致する (森岡・北川, 1987)。

幹折れの場合、回転モーメントは、太い立木ほど荷重が加わり始めたときのモーメントの立ち上がりは急で、根返りと同様に幹折れしたときの傾斜角は、太い立木ほど小さい傾向にあった (図-3)。幹折れした全木に対しても、最大回転モーメント時の傾斜角と胸高直径との間には、負の相関が認められた (相関係数 -0.362 , 有意水準 5%)。

本試験における最大回転モーメント時の平均傾斜角は、全体が 9.7° (標準偏差 3.9°), 根返りが 11.3° (標準偏差 3.6°),

図-1. 引き倒し試験の概略

図-2. 傾斜角と根返り木の回転モーメントの経時変化

図-3. 傾斜角と幹折れ木の回転モーメントの経時変化

幹折れが 8.5° (標準偏差 3.6°) であり、比較的小さい傾斜角で破壊が生じた。

2. 最大回転モーメント M_{max} と立木の諸要素との関係

最大回転モーメント M_{max} と立木の諸因子 (胸高直径 D , 樹高 H , 形状比 H/D , 材積 D^2H , 枝葉重 W_{cr} , 幹重 W_s , 全重 W_t) との相関係数は、すべての諸因子に関して有意水準 1% で有意であった (表-1)。試験木全体では、立木全体の最大回転モーメント M_{max} と立木の諸因子との相関係数は、胸高直径が 0.832 でもっとも大きく、樹高 H の相関係数が 0.578 でもっとも小さくなった。重量因子 (W_{cr} , W_s , W_t) の相関係数 (0.719~0.762) は、胸高直径 D との相関係数に比べて小さめである。形状比 H/D は、最大回転モーメント M_{max} と負の相関 (-0.606) を示した。

根返り木については胸高直径との相関係数 (0.710) がもっとも大きく、樹高 H の相関係数 (0.466) は、もっとも小さくなった。重量要素 (W_{cr} , W_s , W_t) の相関係数 (0.485~0.581) は、胸高直径の相関係数に比べて小さめであった。

表-1. 最大抵抗モーメントと立木の諸因子との相関係数

	D	H	D^2H	H/D	W_{cr}	W_s	W_l
Uprooted and Broken trees	0.832	0.578	0.812	-0.739	0.719	0.734	0.762
Uprooted trees	0.710	0.466	0.696	-0.606	0.545	0.485	0.581
Broken trees	0.873	0.605	0.849	-0.786	0.826	0.799	0.823

有意水準 1 % ですべての相関係数が有意。

形状比 H/D は、最大回転モーメント M_{max} と負の相関を示した (-0.786)。

幹折れ木については、胸高直径との相関係数 (0.873) がもっとも大きく、樹高 H の相関係数 (0.605) は、もっとも小さくなった。重量要素 (W_{cr} , W_s , W_l) の相関係数 (0.799~0.826) は、胸高直径の相関係数に近似した。形状比 H/D は、最大回転モーメント M_{max} と負の相関を示した。

3. 立木の根返り抵抗力和幹折れ抵抗力の推定

最大回転モーメント M_{max} は、根返り木に関しては根系による最大抵抗モーメントを、幹折れ木に関しては幹折れ発生点での幹折れ抵抗モーメントを意味する。これらのモーメントは、上述したように胸高直径との相関が高く、最大抵抗モーメントおよび幹折れ抵抗モーメントの予測因子として適していると考ええる。そこで本節では、最大回転モーメント (kNm) と胸高直径 D (cm) の関係を指数関数で近似し (玉手ら, 1965; 森岡, 1984), 以下に示した。

$$M_{max} = 0.0117D^{2.58} \quad (\text{根返り}, r=0.73) \quad (2)$$

$$M_{max} = 0.0027D^{3.12} \quad (\text{幹折れ}, r=0.88) \quad (3)$$

IV. 考 察

1. 最大回転モーメント M_{max} と胸高直径 D との関係

根返り木において、最大回転モーメント M_{max} と相関がもっとも高かった因子は胸高直径である。これは、根重の 2 乗と胸高直径の間には相対生長関係が成り立つ (依田, 1971) ことが大きな要因であると推察する。試験結果では M_{max} と胸高直径 D との関係は、(2) 式に示されたように、約 2.6 乗に比例しており、胸高直径 D が大きくなるにつれて、急速に抵抗力も増大することが示されている。この意味においては、相対成長関係を考慮すると、幹が太い個体ほど根返りの抵抗性も高くなるように考えられる。しかし、実際の被害状況を検討すると、胸高直径が大きな個体に被害が多い場合 (諫本・高宮, 1992) や中間的な直径の個体に被害が多い場合 (Putz and Sharitz, 1991; Veblen *et al.*, 2001) など、被害状況を胸高直径のみで説明するのは困難である。立木の根返りに関する議論には、立木サイズ (胸高直径や樹高) の増大による根返り抵抗力の増加とともに自重の増加や樹冠の対風面積の増加、枝下高の上昇など、回転モーメントの増加に寄与する要因も考慮する必要がある。そこで、樹高の増大による回転モーメントの増加と胸高直径の増加による根返り抵抗モーメントの増加が立木の安定性に及ぼす影響を議論するため、図-4 のような三角形の樹冠面積 (樹冠幅は $H/6$, 枝下高は $0.6H$) をもつ形状比 80 の樹高 10~30 m の相似形立木を想定し、(2) 式で与えられる根

図-4. 仮想立木の樹形

図-5. 樹高が立木の安定性に与える影響

○, 最大根返り抵抗モーメント; ●, 限界風速。図中の数字は、胸高直径 (cm) を表す。

返り最大抵抗モーメント M_{max} とその時の風速 (限界風速) を求めた (図-5)。風速の算定には以下の式を用いた。

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot U^2 \cdot A \quad (4)$$

$$T = F \cdot L \quad (5)$$

ここで、 F , 風荷重 (kN); T , 回転モーメント (kNm); ρ , 空気密度 (1.225 kg/m^3); A , 対風面積 (m^2); L , 風心高 (m); U , 風心高での風速 (m/s); C_d , 抗力係数 (0.29)。

抗力係数には、Mayhead (1973) による値を用いた。根返りが発生するとき、(2) 式の M_{max} と (5) 式の回転モーメント T は等しく、(2), (4), (5) 式より限界風速が求まる。図-5 の結果からは、直径サイズの増大による根返り最大抵抗モーメント M_{max} の急速な増加に関わらず、樹高サイズの増加に伴って限界風速が低下することが示されており、樹高サイズの増加によって、立木の安定性は低下することが示唆される。より定量的な理解を得るには、立木の撓みによる自重の影響や強風による対風面積の減少効果 (Rudnicki *et al.*, 2004) などを考慮して、回転モーメントを求める必要があるだろう。

幹折れについては、最大抵抗モーメント M_{max} は胸高直径 D と相関が高く、(3) 式に示したように M_{max} は胸高直径 D の約 3 乗に比例する。胸高直径 D の 3 乗に比例することについては、力学的な推察が可能である。樹幹円柱と仮定し風心高 L に風荷重 F が作用したとすると、樹幹内には曲げ応力が生じる。その応力は地際部で最大となり、地際が折損しない応力 σ_{max} は、断面係数 Z を用いれば以下のように表現できる。

図-6. 胸高直径 (D) と最大抵抗モーメントの関係

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{Z} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$ 、最大応力 (N/m^2)； $M_{\max}$ 、最大回転モーメント (kNm)； Z 、断面係数 (m^3)。

Z は断面形状に依存し、円形の場合には $Z = \pi D^3/32$ である。したがって、(6)式は(7)式のように、胸高直径 D の3乗に比例してモーメントは増加する。

$$M_{\max} = \sigma_{\max} \cdot Z = \frac{\pi \sigma_{\max}}{32} \cdot D^3 \quad (7)$$

2. 被害形態の違いと直径の関係

野々田ら (1993) は、根返りと幹折れの被害形態の差異が生じる条件を、根系による根返り抵抗モーメント M_R と風荷重による回転モーメント M_{FR} 、幹折れ発生点での幹折れ抵抗モーメント M_T と幹折れモーメント M_{FT} の4要素を用いて、根返る条件は $M_R/M_{FR} < 1$ かつ $M_T/M_{FT} > 1$ 、幹折れする条件は $M_R/M_{FR} > 1$ かつ $M_T/M_{FT} < 1$ であることを示した。今回の試験では、幹折れ発生点の多くが地際もしくは地際から数十センチ程度であることを考慮し、 M_{FR} と M_{FT} は等しいと仮定すると、根返る条件は $M_R < M_T$ 、幹折れする条件は $M_R > M_T$ になる。ここで(2)式と(3)式を用いて、胸高直径 D と M_R および M_T との関係を図に示すと、 D が0~15 cmまでは常に $M_R > M_T$ であり、胸高直径 D が15 cmを超えると $M_R < M_T$ である(図-6)。つまり、幹が細いうちは幹折れが発生しやすく、胸高直径が15 cmを超えると、根返りしやすくなることが示唆される。径級によって被害形態の分布が異なる可能性は十分にあると考えられる。

V. お わ り に

本研究では、北海道の主要造林樹種であるカラマツの風荷重に対する力学的な安定性および折損に関する評価に資するため、立木の引き倒し試験を実施した。回転モーメントと傾斜角の関係からは、最大回転モーメント時の平均傾斜角は、全体が 9.7° (標準偏差 3.9°)、根返りが 11.3° (標準偏差 3.6°)、幹折れが 8.5° (標準偏差 3.6°)であり、比較的小さな傾斜角で破壊が生じた。最大抵抗モーメントと立木の諸因子(胸高直径 D 、樹高 H 、形状比 H/D 、 D^2H 、枝葉重 W_{cr} 、幹重 W_s 、全重 W_l)との相関分析の結果、胸高直径 D は、根返りおよび幹折れのいずれの場合においても相関が高く、立木の耐風性を示すもっとも重要な地上部情報となることが示された。今回の結果では、根返りに関しては、

最大抵抗モーメントは、胸高直径 D の約2.6乗に比例し、幹折れは胸高直径 D の約3乗に比例して増加した。スギの引き倒し試験の結果では、最大抵抗モーメントは、胸高直径 D の2~3乗に比例して増加することが示されており(玉手ら, 1965; 森岡, 1984)、樹種が異なっても直径の増大が立木の根返り・幹折れの抵抗性の増大に寄与することが示唆された。被害形態の判別に関しては、直径が細い立木では幹折れが、太くなると根返りが発生することが示唆された。以上は、カラマツの1林分(平坦地、12年生、本数密度は2,600本/ha、平均樹高13.6m、平均胸高直径12.4cm)で実施された調査結果であり、定量的な知見を得るには、更に林況の異なる多くの林分での調査、研究が必要である。

引用文献

- 阿部友幸・菅野正人・対馬俊之 (2003) 十勝地方の風倒木被害について～地形とどのような関係がみられたか。114 回日林講：170。
- Cremer, K.W., Borough, C.J., McKinnel, F.H., and Carter, P.R. (1982) Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. N. Z. J. For. Sci. 12 : 244-268.
- Fredericksen, T.S., Hedden, R.L., and Williams, S.A. (1993) Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. Can. J. For. Res. 23 : 1760-1765.
- 諫本信義・高宮立身 (1992) 1991年9月、台風19号により発生した大分県における森林被害の要因解析。森林立地 34 : 98-105。
- Jalkanen, A. and Mattila, U. (2000) Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the national Forest Inventory data. For. Ecol. Manage. 135 : 315-330.
- 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。
- 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。北大演研報 44 : 1329-1415。
- Langquay-opoku, N. and Mitchell, S.J. (2005) Portability of stand-level empirical windthrow risk models. For. Ecol. Manage. 216 : 134-148.
- Mayhead, G.J. (1973) Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. Agric. Meteorol. 12 : 123-130.
- 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。東大演報 73 : 139-160。
- 水井憲雄・畠山末吉 (1984) カラマツ人工林の台風被害と耐風性。北海道林業試験場研究報告 22 : 1-9。
- 森岡 昇 (1984) 集運材用ワイヤー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—。日林誌 66 : 160-163。
- 森岡 昇・北側勝弘 (1987) スギ小径木の引き倒し試験結果。名大演報 9 : 1-5。
- 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。
- Nicoll, B.C., Achim, A., Mochan, S., and Gardiner, B.A. (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. Can. J. For. Res. 35 : 2360-2367.
- Nicoll, B.C., Gardiner, B.A., Rayner, B., and Peace, A.J. (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. Can. J. For. Res. 36 : 1871-1883.
- 野々田稔郎・林 拙郎・川辺 洋 (1993) 平成2年台風19号による三重県南部の森林被害について (II) 一 根返りの発生機構—。104 回日林論 : 735-738。
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., and Granander, M. (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. For. Ecol. Manage. 135 : 143-153.
- Putz, F.E. and Sharitz, R.R. (1991) Hurricane damage to old-growth forest in Congaree National Monument, South Carolina, U.S.A. Can.

- J. For. 21 : 1765–1770.
- Rudnicki, M., Mitchell, S.J., and Novak, M.D. (2004) Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species. *Can. J. For. Res.* 34 : 666–676.
- Scott, R.E. and Mitchell, S.J. (2005) Empirical modeling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighborhood, and stand attributes. *For. Ecol. Manage.* 218 : 193–209.
- Slodicak, M. and Novak, J. (2006) Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. *For. Ecol. Manage.* 224 : 252–257.
- Smith, V.G., Watts, M., and James, D.F. (1987) Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 17 : 1080–1091.
- 玉手三葉寿・樫山徳治・笹沼たつ・高橋亀久松 (1965) 立木の引き倒し試験. *日林誌* 47 : 210–213.
- 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. *日林誌* 88 : 489–495.
- 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.
- Veblen, T.T., Kulakowski, D., Eisenhart, K.S., and Baker, W.L. (2001) Subalpine forest damage from a severe windstorm in northern Colorado. *Can. J. For. Res.* 31 : 2089–2097.
- 依田恭二 (1971) 森林生態学. 331pp, 築地書館, 東京.