

論文

スギ試験林における引き倒し試験^{*1}茅島信行^{*2} ・ 佐々木重行^{*2}

茅島信行・佐々木重行：スギ試験林における引き倒し試験 九州森林研究 63：25-28, 2010 福岡県内のスギ試験林において立木の引き倒し試験を行い、胸高直径、樹高、地上部重量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を調査した。その結果、根元の最大回転モーメント即ち根系の最大抵抗モーメントは、胸高直径、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ることが分かった。地上部で測定可能かつ相関の高かった胸高直径、根元直径とは、それぞれ2.78乗、3.07乗に比例した。また、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ことが示唆された。

キーワード：引き倒し試験、根返り、最大回転モーメント、胸高直径、水平根

I. はじめに

台風災害に強い森林づくりを進めるにあたっては、根返りや幹折れといった風害に関する立木の力学的な評価を行う必要がある(3)。そのためには立木の引き倒し試験を実施し、胸高直径や樹高といった立木の地上部情報と、根返りや幹折れに対する抵抗力との関係を把握することが重要である。立木の引き倒し試験は主に本州のスギ・ヒノキを中心に実施されており(2, 4, 6, 7, 8)、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。そこで今回福岡県内においてスギの引き倒し試験を行い、胸高直径、樹高、地上部重量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を調査したので報告する。

II. 研究手法

引き倒し試験は、試験木のある高さにワイヤーを固定し、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-1)。引き倒す際の荷重点は、樹高のおよそ1/2の高さに設定した。今回の試験において、この高さは試験木の風心高さ(枝下高+樹冠長×1/3)とほぼ一致した(8)。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 最大測定荷重10kN)、データロガー(DATAMARK LS-3000PtV)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(9)、引張っているワイヤーの角度とともに適宜記録した。根元の回転モーメント M (kNm)は、引張り荷重 F (kN)と引張り荷重の作用線から根元中心に下ろした垂線の距離との積であり、以下の式から求めた。

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

L ：試験木からチルホール固定点までの水平距離(m)
 α ：チルホール固定点から見た試験木根元の傾斜角(°)
 β ：ワイヤーの引張り角度(°)

研究対象地は福岡県久留米市山本町にある福岡県森林林業技術センター内のスギ試験林である。当センターのスギ試験林には品種別試験林と傾斜別試験林があるが、傾斜の影響を避けるため、今回の試験は品種別試験林で行った。品種別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品種が植栽されており、14年生である。植栽時の植栽密度はおよそ4,400本/haであったが、現在はおよそ3,000本/haとなっている。土壌はH6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非常に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本とした。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は66.7(52.5~95.1)、平均樹冠長率は68.7%(51.4~82.3%)であり、全体的に形状比が低

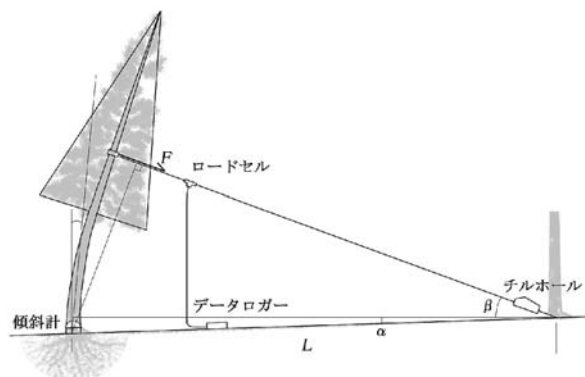


図-1. 引き倒し試験の概略図

^{*1} Kayashima, N. and Sasaki, S.: Tree-pulling experiments at Sugi (*Cryptomeria japonica*) examination forest.

^{*2} 福岡県森林林業技術センター Fukuoka Pref. For. Res. & Tech. Ctr., Kurume, Fukuoka 839-0827

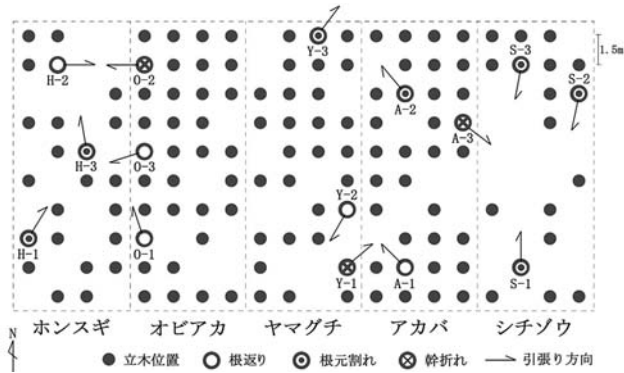


図-2. 引き倒し試験木の位置と被害形態

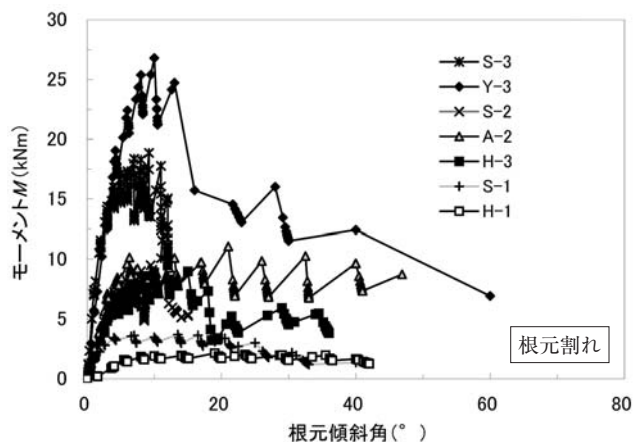
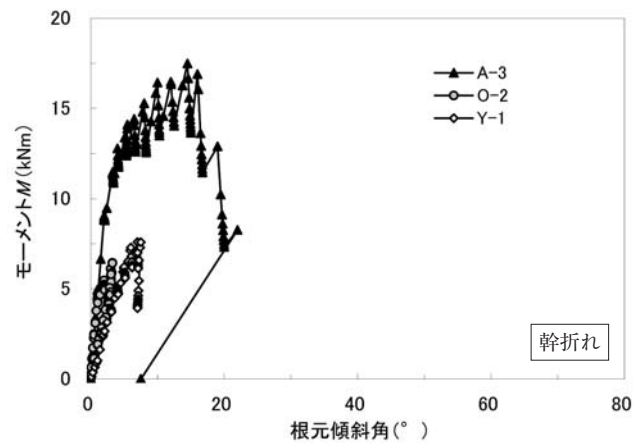
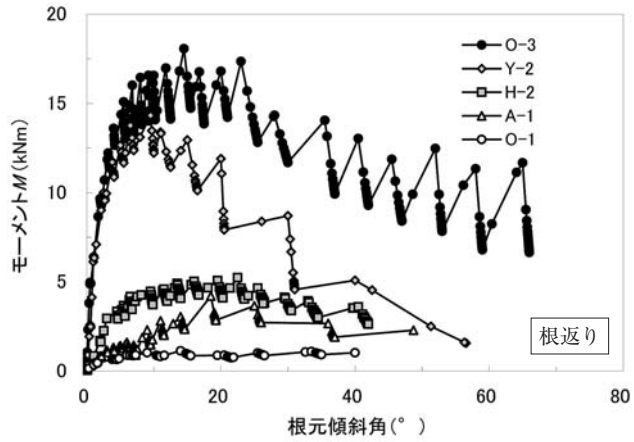


図-3. 根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係 (上:根返り 中:幹折れ 下:根元割れ)

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、根元直径（地上高20cm）、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、引き倒し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、引き倒し試験は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日～25日にかけて行い、根系の調査は9月1日～2日にかけて行った。

Ⅲ. 結果と考察

1) 引き倒し試験の被害形態

引き倒し試験の被害形態は、①根返り、②根元割れ、③幹折れの3種類に分類され、被害本数はそれぞれ5本、7本、3本であった。根返り被害は試験林の南西側に、根元割れ被害は北東側に、幹折れ被害はその中間付近に主に分布していた（図-2）。

①の根返りとは、根が根鉢ごと回転して転倒したものや、根が土壌から引き抜けるようにして転倒したもの、また完全に根鉢が回転したり根が土壌から引き抜け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。

②の根元割れとは、根元が裂けるように割れて転倒したものとした。根元割れは根系の支持力が強く根返りを起こさず、かつ樹幹の曲げ強度も大きい場合に生じると考えられる。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が、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、その結果根元付近の幹が引き裂かれることによって発生するものと推測される。従って、根返りや幹折れを起こしにくい風害に強い樹形であっても、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思われる。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が、これは土壌が一般的な森林土壌と比較してかなり硬く、根系の支持力が強かったためだと考えられる。

③の幹折れとは、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。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。幹折れ被害木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。

2) 根元傾斜角と根元の回転モーメントの関係

試験木を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被害形態別に図-3に示す。根返りでは引き倒し始めは、根元傾斜角の変化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 M_{max} のおよそ7割のモーメントがかか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（図-3上）。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と定性的に一致する（4）。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な傾向にあった。

表-1. 根元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

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

** $p < 0.01$ * $p < 0.05$

幹折れは最大回転モーメント M_{max} を記録した時の根元傾斜角が平均 8.3° ($3.3^\circ \sim 14.5^\circ$) と根返りと比較して個体サイズの割りに小さく、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(図-3中)。今回幹折れを起こした3個体ともに、最大回転モーメント記録後、根元の回転モーメントの低下に伴って根元の傾斜角も下がる現象が見られた。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。

根元割れは、地上の目に見えている箇所破壊、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を見てみると、幹折れよりも根返りと類似した傾向が見られた(図-3下)。最大回転モーメント M_{max} を記録した時の根元傾斜角は平均 13.2° ($8.0^\circ \sim 21.0^\circ$) であり、根返りよりも若干小さかったが有意な差は見られなかった。そこで、幹折れを除く試験木12本の最大回転モーメント計測時の根元傾斜角と、胸高直径、根元直径の関係を見てみたところ、胸高直径・根元直径双方に対して、個体サイズが大きくなるほど最大回転モーメント計測時の根元傾斜角が小さくなる負の相関が見られた(図-4)。このことは過去に行われたスギの引き倒し試験結果と類似するものであり、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ことを示唆しているものと考えられる(5)。

3) 根元の最大回転モーメント M_{max} と立木の諸因子との相関

全被害木および、今回データ数が少なくあまり有意な相関が見られなかった幹折れを除く、根返りと根元割れ被害木における、根元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根元直径で最も高く、胸高直径や地上部重量、根株重量とも高い相関が得られた(表-1)。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もないものの負の相関が得られた。このことから、同程度の個体サイズの立木であれば、形状比が高いほど最大回転モーメントが小さい、即ち根系の最大抵抗モーメントが小さく根返りが生じやすいことが示唆された。

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

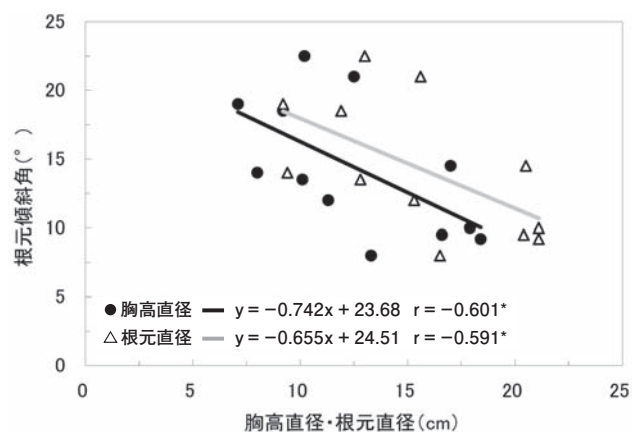


図-4. 最大回転モーメント M_{max} 計測時の根元傾斜角 (幹折れ除く $n = 12$)

に比例する(3)。そこで風心高さや樹冠投影面積、またその積と最大回転モーメント M_{max} との相関を見てみると、風心高さや樹冠投影面積の積との相関係数は、それぞれ単独の相関係数よりも高くなった。しかしながらその相関は胸高直径・根元直径との相関ほど高くなく、風圧として作用する力とそれに抵抗する力との間に生じる多少のギャップが、風害発生の有無に関わってくるものと考えられる。

以上より、根元の最大回転モーメント M_{max} 即ち根系の最大抵抗モーメントは、地上部の測定可能な因子としては胸高直径や根元直径との相関が高かったため、胸高直径もしくは根元直径が根系の抵抗モーメント推定因子として最適であると考えられる(9)。幹折れを除く根返りと根元割れ被害木の最大回転モーメントと、根元直径、胸高直径との関係を指数関数で近似すると(4, 8)、最大回転モーメント即ち根系の最大抵抗モーメントは、胸高直径の2.78乗、根元直径の3.07乗に比例した(図-5)。過去のスギにおける引き倒し試験の結果でも、最大回転モーメントは胸高直径の2~3乗に比例することが示されており(4, 7, 8)、今回の試験でも同様の傾向が得られた。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。

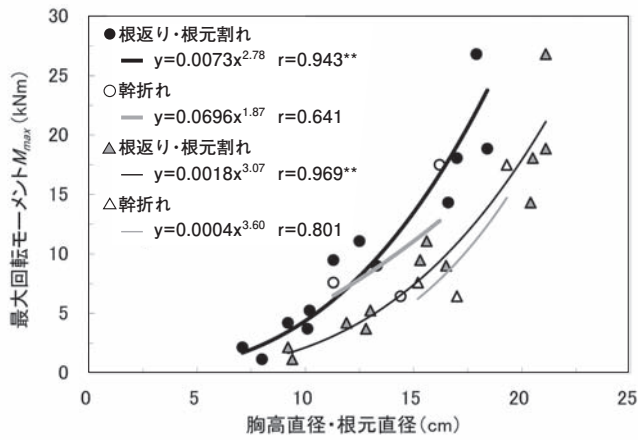


図-5. 胸高直径・根元直径と根元の最大回転モーメント M_{max} の関係

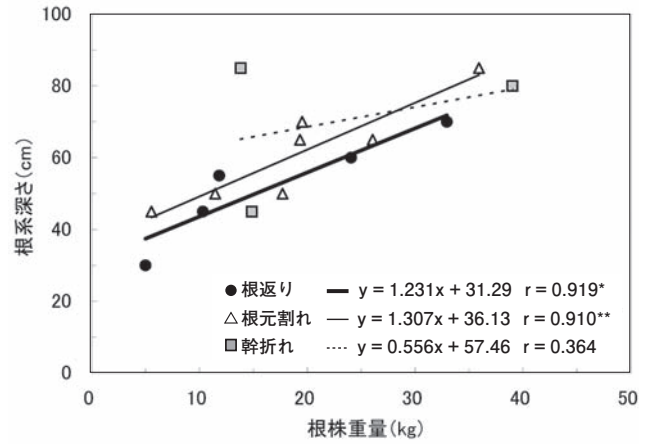


図-6. 被害形態別の根株重量と根系深さの関係

表-2. 植栽位置別の根系深さ

	ホンスギ	オビアカ	ヤマグチ	アカバ	シチゾウ
H-2	55	85	65	65	85
H-3	50	60	70	80	70
H-1	45	30	45	45	50

左: 個体 No. 右: 根系深さ (cm)



写真-1. 全試験木の根系 (根系の位置は表-2と対応)

4) 被害形態と根系の関係

引き倒した試験木の根株を掘り起こし、形状等を調査した結果、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(表-2, 写真-1)。前述した通り引き倒し試験による被害形態は、根返り被害は試験林の南西側に、根元割れ被害は北東側に、幹折れ被害はその中間付近に主に分布しており(図-2)、被害形態と根系の深さや形状との関係が示唆された。

根株重量と根系の深さを被害形態別に見てみると、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、根返り被害を生じた個体は、根元割れや幹折れ被害を生じた個体と比べて、根株重量の割に根系が浅いことが分かった(図-6)。根株重量と胸高直径の間には高い相関があるため、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いうことが示唆された。

IV. おわりに

本研究では、福岡県内のスギ試験林において立木の引き倒し試験を行い、胸高直径、樹高、地上部重量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 M_{max} や被害形態との関係を調査した。その結果、根元の最大回転モーメント即ち根系の最大抵抗モーメントは、胸高直径、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り、形状比とは負の相関があることが分かった。

地上部で測定可能かつ相関の高かった胸高直径、根元直径とは、それぞれ2.78乗、3.07乗に比例した。ま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いうことが示唆された。

今回行った引き倒し試験は、比較的サイズの小さい立木における試験であり、また平坦な造成地土壌という限定的な条件下で行われたものである。従って今後は森林土壌や斜面上において、よりサイズの大きい立木の引き倒し試験を行うなど、様々な条件下で試験を行い、更なるデータの蓄積を図っていきたい。

引用文献

- (1) 苅住昇 (1979) 樹木根系図説, 1121pp, 誠文堂新光社, 東京.
- (2) 嘉戸昭夫 (2001) 富山県林試研報 14 : 1-78.
- (3) 茅島信行・佐々木重行 (2008) 九州森林研究 61 : 189-192.
- (4) 森岡昇 (1984) 日林試 66 : 160-163.
- (5) 森岡昇・北川勝弘 (1987) 名大演報 9 : 1-5.
- (6) 中谷浩 (1984) 富山県林試研報 4 : 1-54.
- (7) 陶山正憲 (1993) 水利科学 210 : 25-53.
- (8) 玉手三稜寿ほか (1965) 日林試 47 : 210-213.
- (9) 鳥田宏行 (2009) 日林試 91 : 120-124.

(2009年10月24日受付; 2010年1月24日受理)