



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	風倒木の切断処理における跳ね返り危険度の評価
Author(s)	佃, 猛司; 小泉, 章夫; 澤田, 圭 他
Citation	北海道大学演習林研究報告, 70(1), 1-8
Issue Date	2015-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58295
Type	departmental bulletin paper
File Information	RBHUF70-1_001.pdf



風倒木の切断処理における跳ね返り危険度の評価

佃 猛司¹, 小泉 章夫^{2*}, 澤田 圭², 佐々木 義久²,
佐々木 尚三³, 木幡 靖夫⁴

Evaluation of spring-back risk at cutting operations for wind-thrown trees
by

TSUKUDA Takeshi¹, KOIZUMI Akio^{2*}, SAWATA Kei², SASAKI Yoshihisa²,
SASAKI Shozo³, KOHATA Yasuo⁴

要 旨

本研究は風倒木の切断処理中における樹幹の跳ね返り危険度を弾性ひずみエネルギーで評価して、相対樹種間差をみることを目的に 6 樹種の丸太の曲げ破壊試験を行った。また、風倒被害発生後の応力緩和による危険度減少を応力緩和試験によって評価した。さらに、樹幹の跳ね返り危険度の樹種間差および応力緩和による危険度減少を無欠点小試験体によって推定可能か検討した。丸太の樹種特性値 MOR^2/E を用いた跳ね返り危険度評価では、アカエゾマツ、トドマツに比べ、ミズナラ、シラカンバ、スギ、カラマツの危険度が有意に大きかった。丸太の野外曲げ応力緩和試験では、直径差、樹種間差による影響は見られず、概ね全試験体に共通して試験開始 2 日目以降は緩和速度が減少し、7 日目以降の緩和速度はほぼ一定となった。無欠点小試験体によって樹幹の跳ね返り危険度および曲げ応力緩和の収束値を予測できることが示唆された。

キーワード：跳ね返り危険度、弾性ひずみエネルギー、応力緩和、風倒木、無欠点小試験体

2012 年 9 月 18 日受付, Received September 18, 2012

2014 年 11 月 4 日受理, Accepted November 4, 2014

1. 北海道大学大学院農学院木材工学研究室
Laboratory of Timber Engineering, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University
2. 北海道大学大学院農学研究院木材工学研究室
Laboratory of Timber Engineering, Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University
*akoizumi@for.agr.hokudai.ac.jp
3. 森林総合研究所北海道支所
Hokkaido Research Center of Forestry and Forest Products Research Institute
4. 北海道立総合研究機構林業試験場
Forest Research Institute, Hokkaido Research Organization

1. 緒言

台風などに伴う暴風によって森林では幹折れや根返りの被害が起きる。近年では、2004 年の台風 18 号により北海道で 37000ha の森林に被害が発生した¹⁻³⁾。特に針葉樹造林地の風害は大規模に生じやすい。これらの林地を放置しておくとも虫害の発生より二次的な被害を招くことになりかねず、風倒木を速やかに取り除くことが求められる^{1,4)}。風倒木の処理作業においては林業機械の使用が効率的で安全性も高いが、斜面傾斜や林道の不備等の制約のため、現状では手持ち式のチェーンソーで処理を行うことが一般的である。暴風によって生じた根返り木や幹折れ木の中には、自重や他の樹木と重なり合うことなどから弓なり状に変形して内部に曲げ応力が蓄えられている樹幹もあり、そのような状態の樹幹を鋸断しようとする跳ね返りが生じて重大な労働災害に繋がることがある⁵⁾。この危険を軽減するためには、曲げ応力の生じた倒木の跳ね返り危険度を評価する必要がある。

本研究では風倒木処理において、作業者に対する樹幹の跳ね返り危険度を弾性ひずみエネルギーで評価して、その樹種間差をみることを目的とし、6 樹種の丸太の曲げ破壊試験を行った。また、風倒被害発生後に樹木の応力緩和によって跳ね返り危険度がどの程度減少するか評価するため丸太の曲げ応力緩和試験を行った。さらに、跳ね返り危険度の樹種間差および丸太の曲げ応力緩和挙動について無欠点小試験体による推定が可能かどうか検討した。

2. 解析モデル

本研究では、風倒木の応力状態を中央集中荷重で負荷された単純支持丸太梁によってモデル化した。Fig. 1 に示す荷重-たわみ曲線において、破壊直前の点 C で除荷した際の回復過程が弾性領域である直線 AB に平行と仮定すると、完全に除荷するまでに丸太に吸収されるエネルギーは ABCE で囲まれた面積に相当する。したがって、負荷に要したエネルギー ABCD から吸収されたエネルギー ABCE を差し引いた三角形 CDE の面積分が、跳ね返りの際に運動エネルギーとして解放されるエネルギー量に相当する。この三角形 CDE の面積を最大弾性ひずみエネルギー (U_E) と定義すると、 U_E は

実際の風倒木の跳ね返りで解放されうるエネルギーの最大値であると考えられる。本研究では U_E を指標として、跳ね返り危険度の樹種間評価を行った。

Fig. 1 で U_E に相当する三角形の面積は、底辺 ED に仮想たわみ (δ_0)、高さ CD に最大荷重 ($P_{\max}$) を当てることで算出できる。ここで δ_0 は、直線 AB と $P_{\max}$ の交点の x 座標で表される。

中央集中荷重を受ける円断面単純梁の $P_{\max}(N)$ 、 $\delta_0(mm)$ は以下のように表すことができる。

$$P_{\max} = \frac{\text{MOR}\pi r^3}{L} \quad (1)$$

$$\delta_0 = \frac{P_{\max} L^3}{12 E_b \pi r^4} \quad (2)$$

ここで、MOR：曲げ破壊係数(N/mm²), r ：円断面梁の半径(mm), L ：支点間距離(mm), E_b ：曲げヤング率(N/mm²)

式(1), (2)から $U_E(\text{N} \cdot \text{mm})$ は以下のように表される。

$$U_E = \frac{1}{2} P_{\max} \delta_0 = \frac{\text{MOR}^2 \pi^2 L}{24 E_b} \quad (3)$$

式(3)において MOR^2/E_0 を跳ね返り危険度の樹種特性値とみなすことができ、 MOR^2/E_0 が大きい程、跳ね返り危険度は高くなると考えられる。

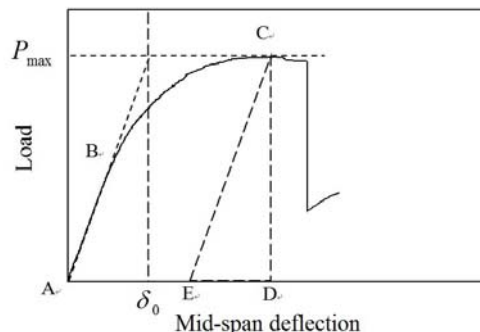


Fig.1. Method of determining maximum elastic strain energy (U_E)

Legend: $P_{\max}$, maximum load, δ_0 , maximum virtual deflection.

3. 材料と試験方法

3.1 材料と試験方法

材料にはアカエゾマツ(*Picea glehnii*), トドマツ(*Abies sachalinensis*), スギ(*Cryptomeria japonica*), カラマツ(*Larix kaempferi*)の針葉樹4樹種, シラカンバ(*Betula platyphylla*), ミズナラ(*Quercus crispula*)の広葉樹2樹種, 計32本の丸太(長さ: 約2m)を用いた(Table 1)。

ポータブルFFTアナライザー(エー・アンド・デイ製, AD-3527)を用いた縦振動法によって丸太の動的ヤング率を測定後, 油圧式材料強度試験機(アムスラー製, 能力: 1500kN)を用いて中央集中荷重方式で曲げ破壊試験を行った。スパンは1.6mとした。中央たわみは, 丸太中央部両側面における変位の平均から求めた。試験後, 丸太の両木口から等間隔に7個の円板を採材し, それらの辺材部と心材部の含水率及び密度を測定した。

3.2 丸太の曲げ応力緩和試験

供試丸太のうち, Table 2に示すアカエゾマツ, シラカンバ, ミズナラの各3本, 計9本の丸太について, 曲げ破壊試験に先立って野外で曲げ応力緩和試験を行った。試験地は北海道大学構内の林地とし, 温湿度環境は成り行きに任せた。試験期間は丸太1本あたり2週間とした。試験方法は,

丸太両端の支点をベルトスリングで支点となる立木に連結し, チェーンブロックを用いてスパン中央部に水平方向に引張負荷し, チェーンブロックと丸太の間に連結したロードセルで荷重を計測した(Fig. 2)。なお, 支点となるスリングの伸びが微小であることを確認するために両支点と荷重点に変位計(共和電業製, DTP-05MDS)を設置した。曲げスパンは丸太の長さに合わせて1.6~2.0mとした。

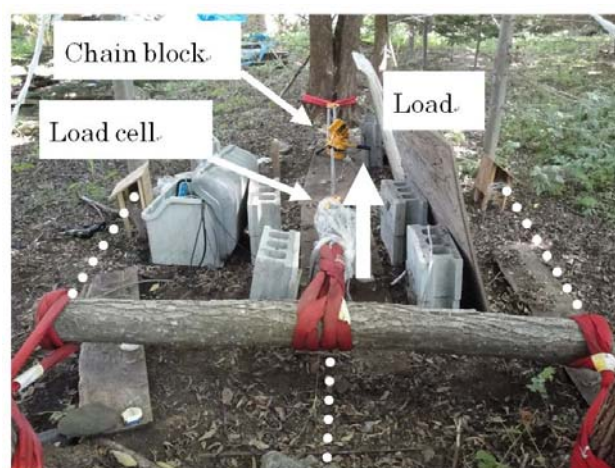


Fig. 2. The bending-stress relaxation test of a log in field.

Note: Dot-lines indicate the wires of displacement transducers.

Table 1. Dimensions and mechanical properties of logs.

Species	Number of logs	Diameter at midlength (mm)	Air-dry density ^{g)} (kg/m ³)	E_H (kN/mm ²)	E_b (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	E_H / E_b
		Mean (CV. %)	Mean (CV. %)	Mean (CV. %)	Mean (CV. %)	Mean (CV. %)	Mean (CV. %)
Todomatsu ^{a)}	5	185 (20.1)	403 (10.7)	9.98 (11.7)	5.23 (29.7)	37.3 (26.7)	2.10 (39.1)
Sugi ^{b)}	5	98 (9.2)	332 (14.8)	5.11 (30.7)	3.44 (27.6)	40.3 (14.9)	1.42 (9.3)
Karamatsu ^{c)}	4	136 (10.4)	475 (12.3)	8.54 (22.5)	4.78 (25.1)	45.4 (14.5)	1.82 (18.8)
Akaezomatsu ^{d)}	8	155 (27.8)	400 (6.7)	7.81 (10.6)	5.80 (41.5)	38.6 (22.9)	1.63 (53.2)
Shirakamba ^{e)}	7	128 (9.7)	581 (6.6)	11.3 (12.8)	7.14 (24.6)	55.3 (12.8)	1.67 (28.9)
Mizunara ^{f)}	3	162 (6.5)	705 (6.1)	10.5 (16.3)	7.26 (7.20)	59.9 (10.5)	1.45 (11.3)

Note :^{a)}*Abies sachalinensis*; ^{b)}*Cryptomeria japonica*; ^{c)}*Larix kaempferi*; ^{d)}*Picea glehnii*; ^{e)}*Betula platyphylla*; ^{f)}*Quercus crispula*, ^{g)}Air-dry density was obtained from small clear specimens which were cut off from logs after bending fracture tests. E_H : dynamic modulus of elasticity; E_b : modulus of elasticity determined by static bending test, MOR: modulus of rupture, Mean: average, CV: coefficient of variation.

Table 2. Results of the bending-stress relaxation test for logs.

Species	No.	Diameter of logs (mm)	Air-dry density (kg/m ³)	Load level (%)	Parameters of Eq. (4)		
					a^e	b	c
Akaezomatsu ^{d)}	1	77	372	16	0.76	-0.17	0.02
	2	130	288	28	0.81	-0.11	0.02
	3	153	305	23	0.66	-0.21	0.02
Shirakamba ^{e)}	4	124	502	29	0.72	-0.15	0.01
	5	132	534	29	0.91	-0.05	0.06
	6	148	442	36	0.67	-0.20	0.02
Mizunara ^{f)}	7	153	549	32	0.75	-0.18	0.03
	8	158	523	48	0.72	-0.17	0.02
	9	173	535	26	0.80	-0.12	0.02

Note :^{d-f)} See Table.1. ^{e)} Parameter “ a ” means convergence load ratio.

荷重レベルは予備試験によって得られた生材丸太曲げ破壊係数の 1/3 とした。本試験後に実施した曲げ破壊試験の結果から求めた曲げ破壊係数に対する荷重レベルは生材丸太曲げ破壊係数の 16～48%であった(Table 2)。初期荷重は、データロガーの表示で荷重値が 3 秒間一定を保った値を初期値とし、経時変化する荷重値を初期値で除した値を残存荷重比とした。なお、木材の曲げ応力緩和試験に関しては圧縮と引張の緩和挙動の差によってひずみ一定条件が満たされないため、厳密な意味で応力緩和挙動の計測が困難であることが知られている⁶⁾。従って、ここでは計測値の相対比較による跳ね返り危険度評価に主眼を置いた。

3.3 無欠点小試験体の曲げ破壊試験と曲げ応力緩和試験

曲げ応力緩和試験を行った丸太について、曲げ破壊試験後、支点から 30cm 程度離れた非破壊部の辺材から無欠点小試験体を切り出し、中央荷重方式で曲げ破壊試験と曲げ応力緩和試験を行った。試験体数は各丸太から 7～8 体、計 23 体とした。断面寸法は幅 20mm(半径方向)、梁せい 16mm(接線方向)とし、スパンは JIS Z 2101⁷⁾に準じて梁せいの 14 倍である 224mm(繊維方向)とした。曲げ応力緩和試験は Fig.3 に示す自作の装置を用い、手締めで負荷した。荷重は曲げ破壊係数の 20～89%の間で 3 段階の荷重レベルを設定し、ロードセル

で検出した荷重を 1Hz でデータロガーに保存した。応力緩和試験の開始は荷重の表示値が設定初期荷重と同等になる時点とした。残存荷重比は、丸太の場合と同様に初期値に対する比として求めた。試験期間は試験体 1 体あたり 2 週間とし、試験中はラップによる乾燥防止処置を施して生材状態を維持した。

曲げ応力緩和試験を行った試験体のうち、丸太と比較するため荷重レベルが 50%以下のものに対して万能材料試験機（東京衡機製、RUEⅡ型：能力 100kN）を用いて曲げ破壊試験を行った。その際、試験直前に乾燥防止用のラップは外した。

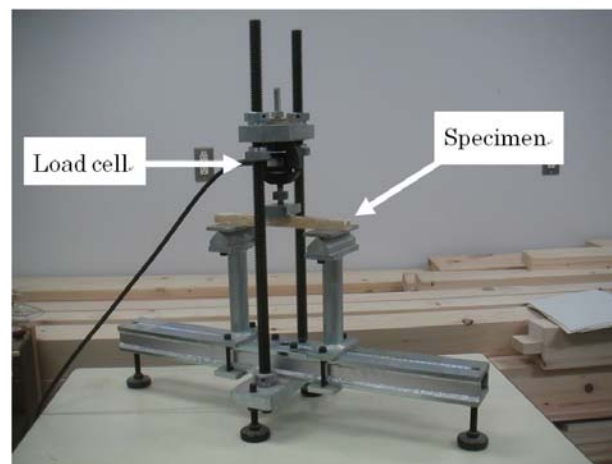


Fig.3. The device for stress-relaxation test for small clear specimens.

4. 結果と考察

4.1 最大弾性ひずみエネルギー

曲げ破壊試験直後の丸太中央部の含水率は心材部で 32～101%，辺材部 58～130%の範囲であり，全試験体において生材状態であることが確認できた。丸太の曲げ破壊試験の結果(Table 1)から MOR^2/E_b を求めた。なお，本研究は丸太の曲げ変形におけるたわみエネルギーを想定した解析であるため，これ以降は丸太の曲げヤング率を表す E_b を用いた MOR^2/E_b を基に検証を行った。その結果，ミズナラ，シラカンバ，スギ，カラマツの MOR^2/E_b は，アカエゾマツ，トドマツに対して有意に大きかった(t 検定，有意水準 5%)(Fig. 4)。ここから，スギのようにヤング率が低い樹種でも跳ね返り危険度は高い場合があることが示された。

次に，無欠点小試験体と丸太の MOR^2/E_b を比較した。なお，無欠点小試験体の含水率は 38～140%の範囲であり，生材状態であることが確認できた。無欠点小試験体と丸太の MOR^2/E_b はほぼ同じ値，または無欠点小試験体の方が丸太より高い値を示した(Fig. 5)。ここから，無欠点小試験体を用いた場合，丸太跳ね返り危険度を安全側で予測できる可能性が示唆された。

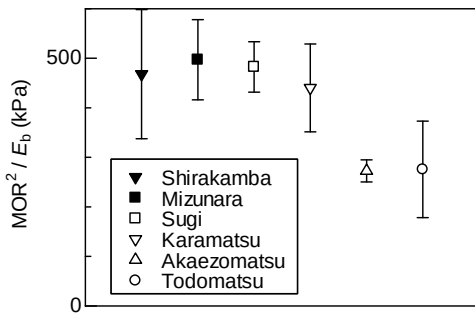


Fig.4. Average values of MOR^2/E_b for tested species.

Note: Error bars denote standard deviations. MOR, modulus of rupture, E_b , modulus of elasticity determined by bending test.

4.2 応力緩和挙動

各丸太の曲げ応力緩和の挙動を Fig. 6 に示す。全体を通して樹種や温湿度環境条件の影響は見られなかった。残存荷重比が終始高かった 1 本(Table 2, No.5)を除き，ほぼ全ての丸太において試験開始 2 日目以降は緩和速度が大きく減少し，7 日目以降

は残存荷重比はほぼ一定となった。残存荷重比の減少が小さかった No.5 の荷重点付近には比較的大きな節が確認された。これは節周辺の繊維の乱れが応力緩和挙動に何らかの影響を及ぼしたものと考えられた。なお，既往の研究ではマイクロフィブリル傾角やヘミセルロースが粘弾性に大きく影響することが報告されている⁸⁻¹¹⁾。

各丸太の直径および荷重レベルと残存荷重比の収束値を比較するため，式(4)に示すロジスティック関数を用いて，残存荷重比と経過時間の関係を表す近似曲線を非線形最小二乗法により求めた。

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-cx)} \quad (4)$$

ここで， x ：経過時間， y ：残存荷重比， $a \sim c$ はパラメータを表す。

Fig.7 より，式(4)は 2 日目までの残存荷重比に差が見られたが，2 日目以降は概ね一致し，安全側の予測を行うには十分妥当であると考えられた。

丸太の残存荷重比の収束値を表す式(4)の a は節の確認された丸太 No.5 を除き，0.66～0.81 の間に収まった。また，直径，荷重レベル間で残存荷重比の収束値に有意な差はなかった(Table2)。

同様に無欠点小試験体の試験結果についても式(4)で曲線近似し，荷重レベルと残存荷重比の収束値を比較した(Table 3)。

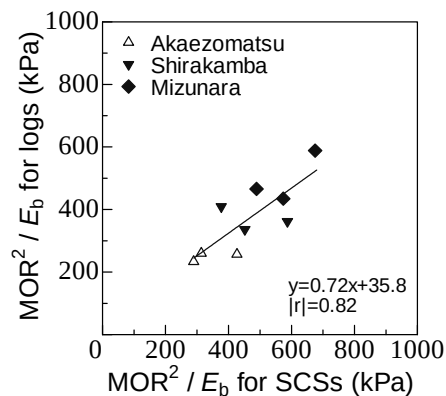


Fig.5. Comparison of MOR^2/E_b between logs and small clear specimens (SCSs).

Note: E_b , modulus of elasticity determined by bending test, MOR, modulus of rupture.

無欠点小試験体の残存荷重比の収束値と荷重レベルの関係を、小試験体を採取した丸太別に Fig. 8 に示す。荷重レベル 70~90%の残存荷重比の収束値は荷重レベル 20~30%の残存荷重比の収束値と比べて最大 13%小さい値を示した。なお、ミズナラの荷重レベル 26%の試験体が他と比べて明らかに大きな緩和を示したが、その原因は特定できなかった。

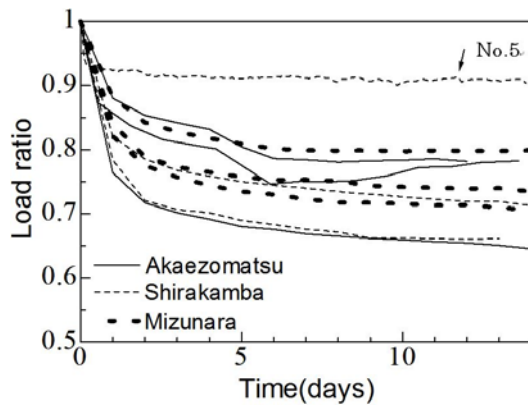


Fig. 6. Stress relaxation curves of log specimens
Note: each plot was averaged for each day.

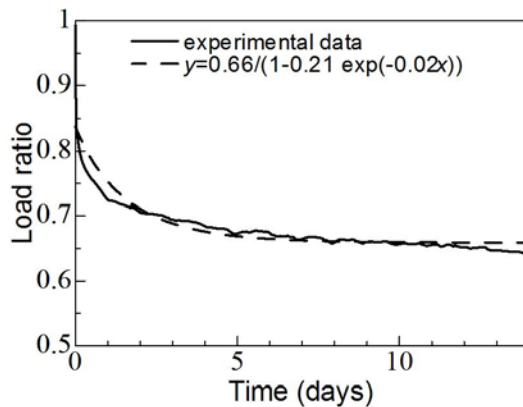


Fig. 7. An example of curve-fit models of the experimental curve of No. 3

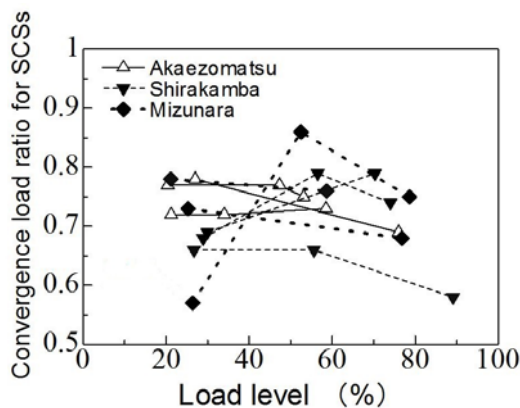


Fig. 8. Effects of load level on convergence load ratio for small clear specimens (SCSs).

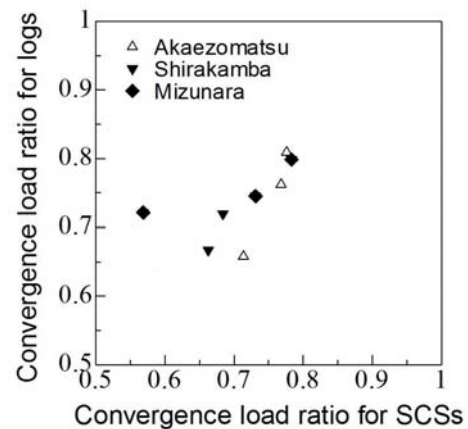


Fig. 9. Comparison of convergence load ratio between logs and small clear specimens (SCSs)

Table 3. Results of the stress relaxation test for small clear specimens.

Species	No	Diameter of logs (mm)	Air-dry density (kg/m ³)	Load level (%)	Parameters of equation (4)		
					<i>a</i> ^{g)}	<i>b</i>	<i>c</i>
Akaezomatsu ^{d)}	1	77	413	20	0.77	-0.11	0.01
	2		404	47	0.77	-0.13	0.01
	3		431	53	0.75	-0.15	0.01
	4	130	350	27	0.78	-0.14	0.02
	5		350	76	0.69	-0.23	0.03
	6	153	388	21	0.72	-0.17	0.01
	7		413	34	0.72	-0.17	0.01
	8		419	59	0.73	-0.16	0.03
Shirakamba ^{e)}	9	124	581	29	0.68	-0.18	0.01
	10		577	56	0.79	-0.16	0.06
	11		572	74	0.74	-0.30	0.13
	12	132	572	30	0.69	-0.26	0.08
	13		628	70	0.79	-0.33	0.46
	14	148	585	27	0.66	-0.28	0.05
	15		629	56	0.66	-0.23	0.02
	16		507	89	0.58	-0.28	0.00
Mizunara ^{f)}	17	153	671	25	0.73	-0.19	0.01
	18		664	77	0.68	-0.20	0.02
	19	158	647	26	0.57	-0.28	0.01
	20		738	53	0.59	-0.35	0.00
	21		749	79	0.75	-0.15	0.02
	22	173	743	21	0.78	-0.16	0.01
	23		722	59	0.76	-0.17	0.01

Note :^{d-f)}; See Table.1. ^{g)}; Parameter “*a*” means convergence load ratio.

5. 結論

1. 樹種特性値 MOR^2/E_0 を指標とした樹木の切断処理時の跳ね返り危険度評価では、アカエゾマツ、トドマツに比べて、ミズナラ、シラカンバ、スギ、カラマツの危険度が有意に大きかった。
2. 丸太の野外曲げ応力緩和挙動では、直径差、樹種間差による影響は見られず、概ね全試験体に共通して試験開始 2 日目以降は緩和速度が大きく減少し、7 日目以降の残存荷重比はほぼ

一定となった。このことから風倒木の切断処理は被害発生後、最低 1 週間程度待つことが望ましい。

3. 無欠点小試験体によって樹幹の跳ね返り危険度および曲げ応力緩和による残存荷重の収束値を予測できることが示唆された。

謝 辞

本研究は、平成20年～22年度、新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「高性能林業機械を活用した風倒被害木処理システムの開発」プロジェクトの補助金によって行った。

参考文献

- 1) 対馬俊之, 菅野正人, 寺澤和彦, 木幡靖夫, 阿部友幸, 佐藤 創, 三岡 修, 原 秀穂, 浅井達弘 (2004) : 光珠内季報 No.137, 1-2.
- 2) 阿部友幸, 菅野正人, 対馬俊之 (2006) : 日本森林学会北海道支部論文集 54, 151-155.
- 3) 三岡 修, 佐藤孝夫, 清水 一, 石井弘之, 清水口 進, 金田秀行, 中山康博 (2005) : 台風18号による緑化樹の被害調査報告書, 北海道立林業試験場緑化樹センター, p.5.
- 4) 原 秀穂, 三好秀樹, 徳田佐和子 (2008) : 北海道林業試験場研究報告 45, 21-27.
- 5) 林業労働災害 (死亡災害) 速報一覧, 林業・木材製造業労働災害防止協会 (Accessed October 25 2011) : http://www.rinsaibou.or.jp/cont03/03_frm.html
- 6) 大熊幹章, 森田直樹 (1970) : 木材学会誌 17 (2), 74-78.
- 7) JIS Z 2101 (1994) : “木材の試験方法”, 日本規格協会.
- 8) Kirbach, E., Wellwood, R.W., Wilson, J.W. (1976) : *Wood and Fiber* 8, 74-78.
- 9) Lofty, M. El-osta, M., Wellwood, R.W. (1972) : *Wood and Fiber* 4, 26-32.
- 10) Eder, M., Burgert, I., Tschegg, S. (2006) : Proceedings of the Third International Conference of the European Society for Wood Mechanics, FCT, Vila Real, Portugal. 141-147.
- 11) 森泉 周, 伏谷賢美, 蕪木自輔 (1971) : 木材学会誌 17 (10), 431-436.

Summary

Spring-back risk at manual cutting operations was evaluated to discuss the differences among 6 wood species by using elastic strain energy as a predictor, which was obtained from bending rupture test of logs. Furthermore, decrease of the risk considering stress relaxation in wind-thrown tree stems was evaluated by bending-stress relaxation test. We also discussed the validity of evaluating the differences in spring-back risks among species by using small clear specimens. Considering characteristic value of MOR^2/E_b for logs, the risks of mizunara (*Quercus crispula*), shirakamba (*Betula platyphylla*), sugi (*Cryptomeria japonica*) and karamatsu (*Larix kaempferi*) were significantly greater than those of akaezomatsu (*Picea glehnii*) and todomatsu (*Abies sachalinensis*). In the stress relaxation test for logs, the relaxation speed decreased within 2 days after the test started and kept it nearly constant after the seventh day. No effect of diameters and species on the stress relaxation curves was found for almost all the specimens. It was suggested that spring-back risks could be estimated using mechanical properties obtained by small clear specimen tests.

Keywords: spring-back risk, elastic strain energy, stress relaxation, wind-thrown tree, small clear specimen.