

抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能

北村 嘉一⁽¹⁾・難波 宣士⁽²⁾

Yoshikazu KITAMURA and Senshi NAMBA : The Function of
Tree Roots upon Landslide Provention Presumed
Through the Uprooting Test

要 旨：林木の山崩防止機能は主として根系による土壌緊縛作用、いかえれば土層の剪断抵抗力の増大にあると考えられている。しかし林地土壌の剪断抵抗力の測定は簡単ではない。そこで比較的測定の容易な抜根抵抗力が根系の土壌緊縛作用の指標になるものと仮定し、この抵抗力を立木と伐採根株について、地際で斜面下方に引張る方法で、かつ地況条件のできる限り類似した林地において、スギ、クロマツ、カラマツ、ブナ、その他広葉樹について測定した。そして抵抗力と根元直径、林齢、伐採後の経過年数、材積との関係を検討した。立木、伐採根株の抵抗力は根元直径、林齢とともに放物線的に大きくなること、しかし伐採根株では伐採後の経過年数とともに指数曲線的に急激に小さくなることわかった。樹種別にみた立木の抵抗力は林齢50年前後までは樹種による根の形態、あるいは材質的強度による影響は少なく、生長量すなわち根元直径の大ききで決まることが明らかであった。また伐採根株は樹種により伐採後の根株の腐朽状態に差異があって、抵抗力はクロマツが最も早く、ついで、一般広葉樹、スギ、ブナ（高齢天然木）、カラマツの順に早く低減することが推定された。また山地崩壊に対する抵抗力としての林分の土壌緊縛力を推定する場合は、根の大ききと強きに密接に関係する林分材積と抵抗力の関係から推定することが、実態に即した方法であることが明らかになった。

ま え が き

わが国は台風や不連続線などの集中豪雨により、洪水とともに山崩れが発生し、大災害の原因ともなっている。山崩れは降雨、地形など自然的要因の影響のほかには人為的な森林施業の影響も少なくない。またわが国は山地の大部分が森林で覆われていることから山地荒廃予防の研究にはこれらの影響を検討することが必要である。

森林はその根系によって土壌を緊縛して剪断強さを増加し崩壊を防止する機能を発揮するが、一度森林が伐採されると根系は枯死、腐朽してその機能を失うであろうことは、概念的に容易に想像できる。伐採された林木根系の枯死、腐朽は早い新植された造林木の生長は緩慢なため、更新後早い時期に崩壊に対する林地の抵抗力が低下するものと考えられる。既往における山地災害調査でも、林齢の若い林地で崩壊が多発している報告が多い。

筆者らは林木根系の土壌緊縛力は抜根抵抗力に比例するとの考えから数種の樹種について、抜根抵抗力を測定し、これから林木根系の崩壊防止機能について検討することとした。林木の抜根抵抗力に関する既往の研究には農地・林地の開発に関する抜根²⁾⁵⁾²⁶⁾、なだれあるいは積雪に対する林木の強度⁸⁾、風圧に対する立木の抵抗力²³⁾、集材機架空索用アンカーとしての根株の強度¹⁷⁾²⁵⁾に関するものがあり、また最近では林地保全の面からの報告^{3)6)11)~14)16)20)21)}も多くみられる。これらの報告は立木あるいは伐採根株について単木の強度を検討したものが多く、林分としての強さを検討した報告は少ない。

現地における抜根試験では測定機材の運搬、設置に少なからぬ労力と時間を要するため十分な測定資料を得ることは難しかったが、以下 2, 3 の結果についてとりまとめて報告する。

本研究の実施にあたり現地でのご指導とご便宜を賜った東京営林局天城営林署・浜松営林署、長野営林局岩村田営林署・上田営林署、前橋営林局六日町営林署の関係各位、また現地試験に際して直接ご協力をいただいた防災部治山第 1 研究室の各位に深く感謝する。

研究の目的

森林の崩壊防止機能は主として根系の土壌緊縛作用、いかえれば林地土層の剪断抵抗力の増大にあると考えられている。しかし林地土層の剪断抵抗力の測定は容易でない。この剪断抵抗力は抜根抵抗力に比例すると仮定すると、比較的測定の容易な後者によって森林の崩壊防止機能を具体的に検討することができ、しかも抜根抵抗力と林木の属性との関係を究明しておけばその結果から、崩壊危険地における森林施業に望ましい樹種、伐期齢、林分構成等について具体的指針を与えることができる。このような指針を検討する資料を得るためこの試験を行った。

I 試験樹種の選定

供試樹種はわが国で広い分布をもつ主要樹種で、根系が形態的に相違しているものから選定した。

林木の根系は形態、生理、生態など、目的によって類型化されているが、本試験のように治山の面から引抜に対する抵抗性を検討するには物理的な要素が考慮された形態により類型化されたものが好ましい。

苅住⁹⁾は多くの樹種の根系調査から根系の型態を 8 つの特徴を基準に類型化しているが、このなかから I, III, IV, V, VII型を高木の根系形態の基本的な型として、その特徴からそれぞれに含まれる樹種名を区分した。この根系の類型化は物理的な面も十分に加味されていて、本試験における樹種の選定に好適なものと考えられたので、それぞれの型に含まれる主要樹種のなかから選んだ。すなわち I 型からクロマツ、IV型からスギ、V型からカラマツ、VII型からブナを選んだ。その他一般広葉樹については薪炭林の構成樹種を対象としたので各種形態の樹種が含まれた。

II 試験地の概況

全国的に広く分布する樹種では地域別に試験地を選ぶのが好ましいが、同一樹種であれば、根系を含む林木の生長に関連する因子である気候、地質、土壌構造などはほぼ共通したものがあり、また根の形態や分布は種の遺伝的性質が左右するといわれていることもあるので、実施の都合から各樹種とも 1 試験地区で行った。

試験地は林齢および伐採後の経過年数別に試験地区のなかから求めたが、高度、地形（傾斜、方位等）、土壌条件などがちがいが、試験木については山腹の位置により土層の深さ、土壌水分などの差異が予想されたので、試験地のなかで標準的な条件をそなえた場所で、ほぼ平均的生長状態のものから選定した。また試験時期は梅雨や台風等の多雨期および土壌が凍結するような寒冷期を避けて実施した。以下樹種別に試験地区の概要を示す。

1. スギ

試験地区は東京営林局天城営林署狩野担当区管内で、海拔約 400~800 m、地形はやや急峻で 30 度以上の傾斜が多かった。地質は輝緑玢岩、あるいは凝灰岩を基岩とする変朽安山岩などからなり、新期火山噴

出物ならびに古期溶岩もみられる。土壤は一般に礫質壤土で腐植に富み適潤で深い。この地域は古くからスギ、ヒノキの適地として人工林の植栽が盛んで、更新も頻繁に行われており、林齢別に試験地を設定することが容易であった。

2. クロマツ

当初アカマツを試験木に予定したが、アカマツの適地の多くは松根油採取のため伐採根株が掘り取られて、適当な試験地が得られなかったので、アカマツと根の形態が同様なクロマツの試験適地が東京営林局浜松営林署三ヶ日、気賀担当区管内にあったのでここを試験地区とした。この地域は海拔 100~600 m の丘陵性低山地帯で、地形は傾斜が 30 度以下の緩斜面が多かった。地質は角岩、輝緑凝灰岩、粘板岩、硬砂岩等を基岩とする秩父古生層で、一部に御荷鉢系の変成岩が出現する。土壤は埴土、壤土で深度は中、結合度は軟であるが、A 層が極めて薄い。また結合度の堅い埴土あるいは赤土の部分もあるが、ともに地味は不良で瘠悪化している。

3. カラマツ

試験地区は浅間山南麓の長野営林局岩村田営林署小諸、御代田、追分、沓掛、軽井沢各担当区管内とした。この地域は古くから浅間山の爆発による多くの噴出物が累積し、上部は急峻であるが試験地を選んだ海拔 1,000~1,300 m 前後の山麓は傾斜も緩で、試験地では 30 度をこえる傾斜はほとんどなかった。地質は輝石安山岩、集塊岩を基岩とする洪積層で占められるが、浅間山の爆発ごとに降下堆積した各種の火山砕屑、軽石類、火山灰砂の互層で覆われている。土壤はこれらの風化物で、砂礫壤土を主とし A 層は比較的浅く地味も一般に良好でなく、結合力も乏しく乾燥しやすいが、カラマツ、アカマツの生長はよい。

4. ブナ

ブナはわが国の温帯林を構成する主要樹種であり、ブナを主林木とする林分も少なくないのでとくに広葉樹のなかから別に選定した。試験地区は前橋営林局六日町営林署三俣、二居担当区管内に求めた。この地域は清津川の源流地帯で試験地区の海拔は約 700~2,000 m と高度差は大きいですが、比較的傾斜は緩やかで、試験地の傾斜は 30 度を越えるものはなかった。地質はいわゆる奥利根帯とよばれる地質構造帯で、基盤は古生層であるが、花崗岩類が分布し玢岩、閃緑岩あるいは石英粗面岩、石英安山岩など第四紀の火山岩類もみられる。土壤はほとんどが褐色森林土で一部に黒色土もみられる。この地区の特色は典型的な裏日本型の気候による多雪である。この積雪の影響は大きく、スギ、カラマツなど人工林は幼齢時代には倒伏、根曲りなどの被害が多く、ブナを主とする天然広葉樹林は蓄積の少ない低位な疎林が多い。

5. 広葉樹

広葉樹は一般に一斉林的な林分が求め難く、本試験では主として萌芽更新による短伐期的施業が行われてきた古くからの薪炭林を対象に選定した。試験地区は長野営林局上田営林署和田担当区管内で試験区の海拔は約 1,100~1,800 m であるが、試験地は約 1,200~1,300 m の高度が多かった。地形は比較的緩傾斜であるが、30 度以上の傾斜も少なくない。地質は両輝安山岩を基岩とするが、石英閃緑岩、花崗閃緑岩、黒雲母安山岩、集塊岩なども混入する。土壤はこれら基岩の風化生成による埴土、砂礫壤土で疎鬆である。深さは中で地味は悪くない。人工林の大部分はカラマツであるが、薪炭林などの広葉樹の占める面積も少なくない。

III 試験の方法

試験はスギ、クロマツ、カラマツ、ブナと広葉樹の単木については立木と伐採根株、広葉樹のうち萌芽によって成立しているものについては萌芽木として試験を実施した。

1. 測定に使用した機器

通常抜根のための引張りにはチェンブロック、手動ウインチ類、小型動力集材機などが使用されている。また張力の測定にはリングのたわみをダイヤルゲージで読みとるもの、油圧計、ロットの伸縮を差動トランスにより電気的に検出するものなど各種の様式がある。これらの機器は能力、精度、使用場所などの条件によって選定される。本試験では伐採根株の経過年数や、林齢が異なる多くの林分が対象となり、林分内でも試験木を求めて移動が多いので、軽量で取扱いも簡便であるものが要求された。したがって能力や精度が若干低下してもやむを得ないものとし、とくに機動性を考慮して機種を選定した。

引張りにはチルホール (T-13、横引能力 2.5 ton) を使用し、張力は C 型動力計 (東京衡機製造所、秤量 3.0 ton、最小目盛 1/150) で計測した。

2. 測定方法

測定は Fig. 1 に示すとおり試験木に対して最大傾斜線方向の下方に 2 本のアンカーとして立木あるいは伐採根株を求めた。次にアンカー① (あるいは②) に動力計を取り付け、動力計に固定したワイヤロープを試験木に取り付けたスナッチブロックを通してアンカー② (あるいは①) のチルホールに導いた。試験木へのワイヤーの取付けは地際とした。セットを終わったらチルホールを緩やかに始動し、ロープが張られた状態で bb' ($ab=ab'$) のひらきを測定し、その後チルホールを平常に作動して測定に入る。測定はあらかじめ試験木に取り付けた傾斜計の読みに応じた動力計の指針を読みとり、引張り作動中に示された最大値を求めた。抜根抵抗力の最大値は根株の傾きが 5 度前後で出現することが多いといわれているが、本試験では動力計の指針が低下を始めても作動を続け、根株の傾斜が 30 度前後まで測定したが、土層の攪乱を少なくするため完全に引き抜くことはしなかった。原則として測定は上記の方法で実施したが、試験木の強度がアンカーより明らかに小さい場合は、アンカーを 1 本として、試験木との間に動力計とチルホールをセットして直接引張る方法もとった。

こうして読みとられた動力計の値 (P') は試験木の抵抗力 (P) の約 1/2 となる。しかし試験木とアンカー (①, ②) の位置の関係から bb' の広がりがあるので

$$P = 2P' \cos \alpha$$

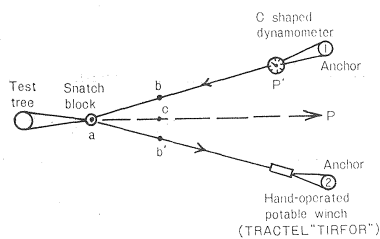


Fig. 1 抜根抵抗力の測定方法
The measuring method of resisting power of uprooting.

P : 抜根抵抗力, P' : 動力計の読み,

α : $\angle bac = \angle b'ac$

となり、これから各試験木の最大抵抗値を求めた。

測定に要するロープの移動長は立木と伐採根株あるいは直径の大小によって多少は異なるが大きな差はなく 50~100 cm 程度であった。また抵抗力と所要時間の関係は 1 ton で約 40 秒, 2 ton で 65 秒, 3 ton で 90 秒, 4 ton で 120 秒とほぼ直線的に増加し、人力ではロープの作動速度を一定にすることは困難であった。

抜根抵抗力は立木では根系の大きさ、形態が、伐採根株では伐採後の経過年数など基本的要因のほか、斜面傾斜、土壌構造、土壌湿度などの影響も少なくないものと予想されるので、努めて差のないように試験時期や試験木の箇所を選定には意を用いた。

IV 試験の結果

林木の抜根抵抗力に関係する因子のなかで最も相関が高いのは根株の直径とされているが、伐採された根株では更に経過年数が大きく影響する。その他の因子として根の形態は樹種によって代表されるが、地形、土壌などは試験木個々のきわめて小範囲の立地条件が影響し、本試験ではこれらの解析を満たす十分な資料が得られなかった。したがって本試験では立木については根元直径、伐採根株は根元直径と伐採後の経過年数を因子として、樹種ごとに抜根抵抗力との関係を検討した。また広葉樹のうち伐採根株から萌芽して数本の立木が成立した株は、伐採根株と立木に分離することは不可能なので、株の状態では抜根し、根元直径は成立している立木の合計値とした。試験木は立木では林齢5～50年、伐採根株については伐採直後～25年前後経過したものまでを目途としたが、チルホール能力、現地の状況から十分な資料を得ることは難しかった。

なお、林木の年齢については単木の場合は樹齢とするのが適当ではないかと考えられたが、本試験の資料はすべて林齢で示された林分のなかから得られたものであり、厳密に年輪から林木の年齢を確定しなかったため以下すべて林齢を用いた。

樹種別の立木、伐採根株および萌芽木の試験箇所、試験木の諸元と測定結果は Table 1 (スギ), Table 2 (クロマツ), Table 3 (カラマツ), Table 4 (ブナ), Table 5 (広葉樹), Table 6 (萌芽木) のとおりである。この表でみられるように立木は林齢が25～30年、根元直径が20～25 cm 以上になると、本試験の方法ではチルホール能力の限界を越えて測定が不可能になったものが生じた。

1. 立 木

1) 立木の根元直径と抜根抵抗力

樹種別に Table 1～Table 6 の個々の立木について根元直径に対する抜根抵抗力を両対数紙上にプロットして変化の傾向をみるとスギ (Fig. 2), クロマツ (Fig. 3), カラマツ (Fig. 4), ブナ (Fig. 5), 広葉樹 (Fig. 6) のとおりである。この結果どの樹種についても両対数紙上で直線関係が認められ根元直径と抜根抵抗力の関係は、

$$P = aD^b$$

P : 抜根抵抗力, D : 根元直径

$a \cdot b$: 常数

の放物線状に変化することが推定された。

本試験では植栽された林木の林齢に応じた抵抗力の変化を求めることが、主たる目的のため、林齢は一般に伐期とされている40～50年までの資料を得る必要があったが、

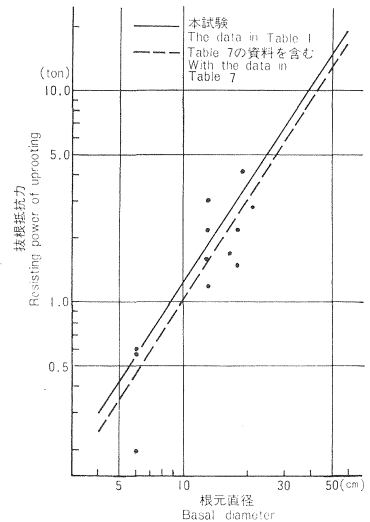


Fig. 2 根元直径と抜根抵抗力の関係 (スギ—立木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (*Cryptomeria japonica*, standing tree)

Table 1. 測定結果 (スギ)
The result measuring (*Cryptomeria japonica*)

区分 Classification	経過年数 Years elapsed after cutting and planting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木数 Number of test trees	根元直径 Basal diameter (cm)	抜根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)	備考 Note
伐採根株 Stump	25	31 (30~32)	5	40 (35~52)	1.37(0.8~2.2)	6 (3~15)	測定不可能 Measurement impossible
	23	16 (12~28)	5	42 (40~55)	1.29(0.4~3.0)	6 (3~8)	
	21	33 (32~37)	5	34 (25~50)	0.75(0.2~1.4)	7 (4~10)	
	20	33 (32~33)	4	46 (42~58)	1.35(0.5~2.8)	7 (5~10)	
	18	23	4	46 (42~54)	2.04(0.8~3.4)	4 (2~6)	
	15	14 (10~18)	4	42 (32~58)	2.03(1.0~4.4)	5 (2~10)	
	13	39 (38~40)	3	58 (55~60)	2.95(2.0~3.8)	6 (4~10)	
	11	28 (27~32)	4	43 (35~48)	2.99(1.0~4.5)	4 (2~5)	
	7	30	3	39 (38~40)	3.13(1.4~4.8)	4 (2~7)	
6	33 (30~35)	4	51 (34~73)				
2	38	1	30				
立木 Standing tree	22	7	1	19	4.16	5	
	21	9 (5~18)	4	18 (13~21)	2.38(1.5~2.8)	4 (1~6)	
	17	22 (16, 28)	2	13	1.91(1.6~2.2)	5 (3, 6)	
	14	24 (20, 27)	2	14 (10, 17)	1.45(1.2~1.7)	11 (6, 15)	
	10	31	1	6	0.60	30	
	7	19 (10, 28)	2	6	0.40(0.2~0.6)	10 (5, 15)	

注) Note) () は測定値の範囲 The range of measuring values, * 最大抜根抵抗力 Maximum resisting power, ** 最大抜根抵抗力出現時の傾斜角 Inclination angle of stump at the maximum resisting power.

Table 2. 測定結果 (クロマツ)
The result of measuring (*Pinus thunbergii*)

区分 Classification	経過年数 Years elapsed after cutting and planting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木数 Number of test trees	根元直径 Basal diameter (cm)	抜根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)
伐採根株 Stump	22	30	1	60	0.50	20
	18	33	3	41 (39~43)	0.40(0.1~1.0)	22 (15~30)
	17	24 (22~24)	5	34 (28~38)	0.37(0.1~0.7)	13 (6~20)
	16	22	1	43	0.60	24
	8	17 (3~30)	13	36 (25~48)	1.37(0.3~4.3)	14 (6~16)
	5	23	5	19 (13~24)	0.40(0.1~1.0)	5 (2~10)
立木 Standing tree	21	30	2	12 (9~15)	2.16(1.0~4.1)	20 (6~45)
	17	33	2	13 (10~16)	1.92(1.3~2.6)	26 (6, 45)
	16	13 (5~24)	5	11 (7~15)	1.34(0.8~2.1)	22 (8~60)
	15	22	3	13 (9~16)	1.48(1.0~2.1)	35 (30~45)
	14	24	3	7 (6~8)	0.47(0.4~0.6)	25 (15~30)
	13	17 (6~20)	4	12 (8~16)	1.75(0.7~2.9)	20 (8~30)
	7	8 (0~14)	7	7 (5~9)	0.69(0.26~1.5)	56 (30~80)

注) Note) (), *, ** Table 1 参照, See Table 1.

Table 3. 測定結果 (カラマツ)
The result of measuring (*Larix leptolepis*)

区分 Classification	経過年数 Years elapsed after cutting and planting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木本数 Number of test trees	根元直径 Basal diameter (cm)	抜根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)
伐採根株 Stump	26	0	2	40	0.20	15
	20	16 (0~23)	6	35 (28~43)	1.00(0.2~4.0)	11 (5~17)
	17	9 (0~20)	4	40 (27~48)	1.27(0.7~2.4)	9 (5~15)
	15	25 (20~30)	4	47 (40~55)	1.96(0.8~3.2)	10 (5~20)
	12	0	3	24 (23~25)	1.07(0.6~2.0)	9 (3~15)
	10	3 (0~13)	5	34 (28~43)	3.26(1.8~4.1)	8 (2~16)
立木 Standing tree	63	24	2	18 (16, 19)	2.75(2.5, 3.0)	10
	24	30	2	11 (9, 12)	0.84(0.3, 1.4)	23 (15, 30)
	8	0	3	8 (6~11)	0.67(0.4~1.0)	32 (20~45)

注) Note) (), *, ** Table 1 参照, See Table 1.

Table 4. 測定結果 (ブナ)
The result of measuring (*Fagus crenata*)

区分 Classification	経過年数 Years elapsed after cutting and planting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木本数 Number of test trees	根元直径 Basal diameter (cm)	抜根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)
伐採根株 Stump	23	7 (0, 13)	2	47 (43, 50)	0.59	2 (1, 3)
	16	7 (4, 10)	2	89 (88, 90)	1.05(0.8~1.3)	13 (6, 20)
	12	0	3	49 (29~65)	1.36(0.7~2.4)	6 (1~9)
	11	10	1	58	0.60	4
	7	14 (9~22)	10	28 (18~35)	1.40(0.1~3.2)	4 (1~10)
	6	12 (11~12)	6	22 (17~28)	2.70(1.0~5.2)	3 (2~4)
	5	4 (0~12)	3	23 (18~27)	2.96(0.6~4.5)	6 (5~7)
	4	6 (0~11)	4	21 (15~26)	2.56(0.5~4.8)	3 (2~4)
立木 Standing tree	3	17	3	11 (9~13)	0.69(0.3~1.0)	5 (4~5)
	0	6 (0~10)	9	16 (10~24)	2.96(1.0~5.2)	8 (2~15)
	150	16 (0~28)	3	18 (17~19)	4.25(4.0~4.8)	9 (8~11)

注) Note) (), *, ** Table 1 参照, See Table 1.

Table 5. 測定結果 (広葉樹) The result of measuring (Broad-leaved tree)

区分 Classification	経過年数 Years elapsed after cutting and planting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木本数 Number of test trees	根元直径 Basal diameter (cm)	拔根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)	樹種 Tree species
伐採根株 Stump	30	7	1	25	0.04	10	クリ <i>Castanea crenata</i>
	17	17	1	16	0.60	4	サクラ <i>Prunus jamasakura</i>
	6	14	1	29	4.91	12	カシワ <i>Quercus dentata</i>
	4	14 (10~24)	4	17 (11~25)	1.30(0.9~1.8)	7 (2~13)	シラカンバ <i>Betula platyphylla</i> , クリ
	1	31 (29~35)	10	13 (7~19)	1.74(0.5~2.8)	8 (1~15)	ミズナラ <i>Quercus mongolica</i> , カエデ <i>Acer</i> sp., サクラ, ズミ <i>Malus sieboldii</i> , クリ, シラカンバ
立木 Standing tree	26	32 (30~36)	4	15 (14~19)	2.49(2.0~2.9)	11 (4~20)	クリ, シラカンバ, サクラ, コナラ <i>Quercus serrata</i>
	18	5 (3~8)	6	11 (8~15)	1.54(0.8~2.2)	10 (7~14)	シラカンバ, サクラ, サワグルミ <i>Pterocarya rhoifolia</i> , サワシバ <i>Carpinus cordata</i>
	17	15	3	11 (10~12)	1.74(0.9~2.3)	9 (5~14)	シラカンバ, ミズキ <i>Cornus controversa</i> , ミズナラ
	14	31	2	12 (11, 12)	2.04(1.7, 2.4)	14 (10, 18)	シラカンバ, サワグルミ
	13	22	1	11	1.35	30	ミズキ
	10	34	1	11	1.88	30	コナラ
	6	24	1	5	0.49	30	シラカンバ

注) Note) (), *, ** Table 1 参照, See Table 1.

Table 6. 測定結果 (萌芽木) The result of measuring (Sprout-tree)

経過年数 Years elapsed after cutting (yrs)	地表傾斜角 Inclination angle (°)	試験木本数 Number of test trees	萌芽 Sprout		根元直径合計 Total of basal diameter (cm)	拔根抵抗力* Resisting power of uprooting (ton)	根株傾斜角** Inclination angle of stump (°)	樹種 Tree species
			平均本数 Average number	平均根元直径 Average basal diameter (cm)				
26	26	1	3.0	9.8	30	2.05	8	クリ <i>Castanea crenata</i>
18	8	2	3.5	7.6	27 (26, 27)	2.32	18 (15, 20)	サクラ <i>Prunus jamasakura</i> , キハダ <i>Phellodendron amurense</i>
17	16 (15, 17)	2	7.5	4.3	32 (40, 25)	2.30 (1.4, 3.2)	10 (5, 14)	サクラ, カエデ <i>Acer</i> sp.
10	36 (34~38)	8	8.9	3.1	28 (14~37)	1.82 (1.2~3.0)	19 (3~30)	サクラ, クリ, コナラ <i>Quercus serrata</i> , ハシバミ <i>Corylus heterophylla</i> , ミズナラ <i>Quercus mongolica</i> , シラカンバ <i>Betula platyphylla</i> , カエデ <i>Acer</i> sp., カシワ <i>Quercus dentata</i>
6	16 (10~24)	6	4.3	4.1	18 (10~34)	1.30 (1.1~1.5)	14 (3~35)	サクラ, クリ, ヤマナシ <i>Pyrus pyrifolia</i> , カシワ <i>Quercus dentata</i> , ハシバミ <i>Corylus heterophylla</i> , リョウブ <i>Clethra harbinensis</i>

注) Note) (), *, ** Table 1 参照, See Table 1.

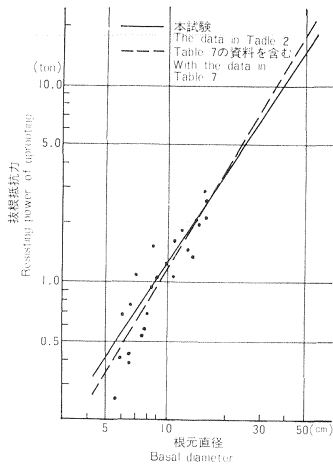


Fig. 3 根元直径と抜根抵抗力の関係
(クロマツ一立木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (*Pinus thunbergii*, standing tree).

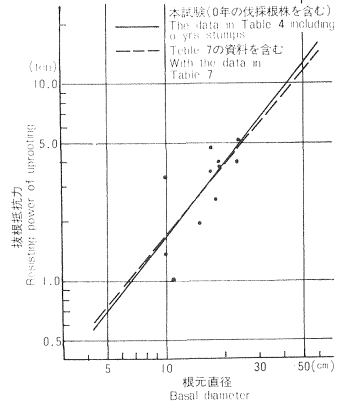


Fig. 5 根元直径と抜根抵抗力の関係
(ブナ一立木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (*Fagus crenata*, standing tree).

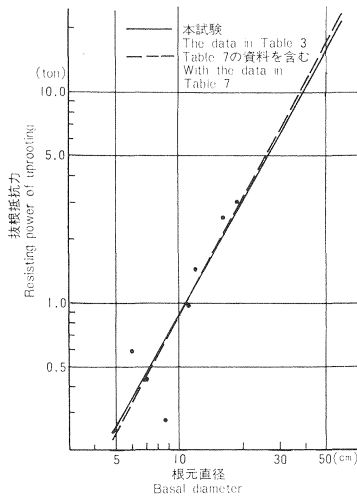


Fig. 4 根元直径と抜根抵抗力の関係
(カラマツ一立木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (*Larix leptolepis*, standing tree).

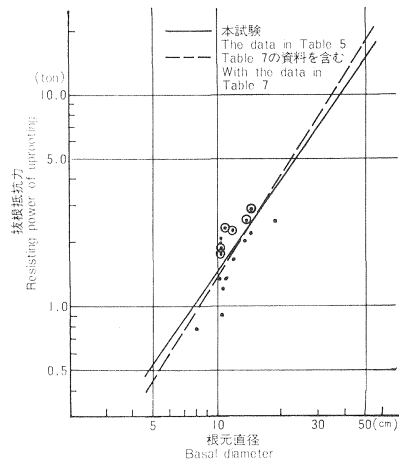


Fig. 6 根元直径と抜根抵抗力の関係
(広葉樹一立木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (Broad-leaved trees, standing tree).

チルホールの能力から根元直径は 20 cm 前後、林齢は 25 年位までの測定にとどまった。したがって本試験で得た資料より林齢が高く、直径の大きな立木の場合に根元直径と抜根抵抗力の関係が適合するかどうかを検討する必要があった。

たまたま架空索用アンカーとして根株の太さと強度の試験¹⁷⁾を実施した栃木、長野、兵庫、島根、高知、宮崎など各県の測定資料を中村英石氏（前林業試験場機械化部作業科長、現東京農業大学教授）より

Table 7. 架空索用根株アンカーの強度試験¹⁷⁾の資料
The summary of 'the strength test data of stumps for skyline anchor¹⁷⁾'

樹種 Tree species	本数 Number	根元直径の範囲 The range of basal diameter (cm)	抜根抵抗力の範囲 The range of resisting power of uprooting (ton)	実施県名 Field
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	70	17 ~ 48	2.1 ~ 14.7	栃木 Tochigi Pref. 兵庫 Hyōgo Pref. 島根 Shimane Pref. 高知 Kōchi Pref. 宮崎 Miyazaki Pref.
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	27	16 ~ 46	2.2 ~ 13.8	栃木 Tochigi Pref. 長野 Nagano Pref. 兵庫 Hyōgo Pref.
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	10	14 ~ 35	1.0 ~ 10.5	長野 Nagano Pref.
ブナ <i>Fagus crenata</i>	9	14 ~ 38	2.0 ~ 9.5	長野 Nagano Pref. 島根 Shimane Pref.
広葉樹 (13種) Broad-leaved tree (13 species)	43	12 ~ 49	1.2 ~ 14.3	長野 Nagano Pref. 兵庫 Hyōgo Pref. 島根 Shimane Pref. 宮崎 Miyazaki Pref.

Table 8. 立木の根元直径 (D) と抜根抵抗力 (P) の関係
The relation between basal diameter (D) and the resisting power of uprooting (P) of standing tree

樹種 Tree species	本数 Number	相関係数 Correlation coefficient	回帰式 Regression equation
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	82	0.9153	$\log P = 1.530 \log D - 1.451$
クロマツ <i>Pinus thunbergii</i>	53	0.8660	$\log P = 1.526 \log D - 1.432$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	17	0.9318	$\log P = 1.802 \log D - 1.857$
ブナ <i>Fagus crenata</i>	21	0.8442	$\log P = 1.266 \log D - 1.046$
広葉樹 Broad-leaved tree	61	0.9134	$\log P = 1.482 \log D - 1.327$
萌芽木 Sprout-tree	19	0.5989	$\log P = 0.453 \log D - 0.395$

提供を受けたので、これを本試験の資料に加えて直径と抜根抵抗力の関係を求めた。これに使用した資料の概要は Table 7 のとおりで、この結果を根元直径と抜根抵抗力の関係について示すと Table 8 のとおりであり、相関係数、回帰式ともに 1% の水準で有意であった。また樹種ごとの傾向は Fig. 2~6 に破線で示したとおりである。この図にみられるように両者の傾向は伐期までの生長量ではほとんど差がないことが明らかである。

本試験における立木の測定では施業林分であるため、試験木を自由に選択することを差し控えたこともあって、試験木として不適当な資料がないとはいえない。また地形、斜面上の位置、土壌の構造や湿度など差異の多少大きい箇所の資料も使用せざるを得なかったが、抜根抵抗力は根元直径を因子として一定の傾向を推定し得るものといえる。

ブナについては試験地内に成立している立木は林齢が高く直径の大きなものが大部分を占めて、チルホール能力を遥かに越えていたため、測定できた立木としては Table 4 のとおり 3 本に過ぎなかった。しかし同表の伐採根株のうち経過年数 0 年となっているものは、伐採後 6 か月前後までのもので、切口からは樹液が滲出し、枯死した状態ではなかったので立木として取り扱った。

また広葉樹は単木の立木と、萌芽による株であるものがあるが、本試験ではこれを広葉樹と萌芽木に区別した。測定した広葉樹は 8 樹種であったが、Fig. 6 にプロットされているもので◎印はクリ、ミズナラ、サワグルミ、コナラで、●印はサクラ、シラカンバ、ミズキ、サワシバである。この両者は図でもわかるように相対的に前者の抜根抵抗力が高いよううかがえる。資料の数が少なく樹種別に明らかではないが、根の形態型は前者が I 型、後者は VI, VII 型に属し、この資料からは 2 つのグループに分けられるようである。

2) 立木の林齢と抜根抵抗力

前項の根元直径と抜根抵抗力の関係における根元直径は林齢に対応したものと一応想定したが、同樹種、同齢木の林分であっても生長量の差が大きく、資料数も少ないので林齢に対応した根元直径とすることは必ずしも適当ではない。

本試験では林齢に応じた抜根抵抗力を推定するために、林齢と根元直径の関係を明らかにする必要があるが、通常林木の生長量のうち直径については胸高直径で示されていて、林齢と根元直径の関係を明らかにした資料はほとんど見当たらない。胸高直径と根元直径の関係は樹種、林齢、地形、風などによって異なることが推定されるが、樹種としての根の張り方の形態的特性が最も強く影響するものと考えて、樹種別に両者の関係を求めた。

スギは長野営林局管内での収穫表調査カードから両者の測定値があった資料 (胸高直径 11~49 cm, 調査本数 44 本) について変化の傾向を求めたのが Fig. 7 である。図の右側の縦軸は対応する林齢を示した。

クロマツは本試験を実施した東京営林局浜松営林署管

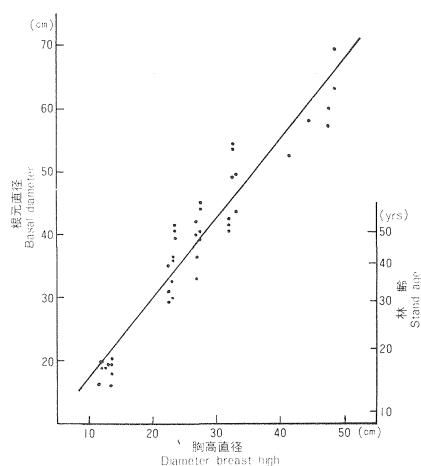


Fig. 7 胸高直径と根元直径の関係 (スギ)

Relation between diameter breast high and basal diameter (*Cryptomeria japonica*).

内で筆者らが測定した資料（調査本数 23 本）であるが、Fig. 8 でみられるように、胸高直径は 13 cm 前後、林齢で 25 年位に相当する資料が得られたに過ぎなかった。

カラマツは長野営林局岩村田営林署管内の本試験実施地区で測定した資料（調査本数 47 本）から両者の傾向を求めたのが Fig. 9 である。

ブナについては林齢と胸高直径に関する資料は少ないが、ここでは稲葉⁷⁾の報告からその傾向を求めた。林齢と胸高直径の関係は Fig. 10 のとおり両対数紙上でほぼ直線関係が認められた。この資料は林齢 40~130 年のもので、40 年以下のものについては明らかでないが、ブナは幼齢期の生長がとくに遅いことからこのような傾向が適合するものと考えられた。胸高直径と根元直径 (D. B.) の関係については資料が得られなかったので、上記 3 樹種 (スギ, クロマツ, カラマツ) を参考に回帰式 $D. B. = b D. B. H. + a$

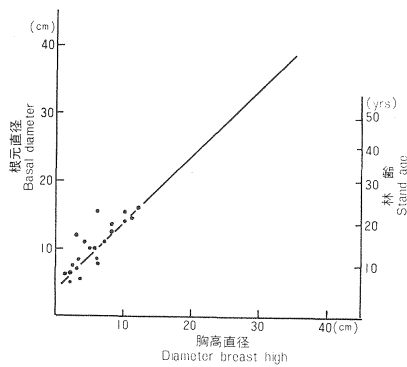


Fig. 8 胸高直径と根元直径の関係 (クロマツ)

Relation between diameter breast high and basal diameter (*Pinus thumbergii*).

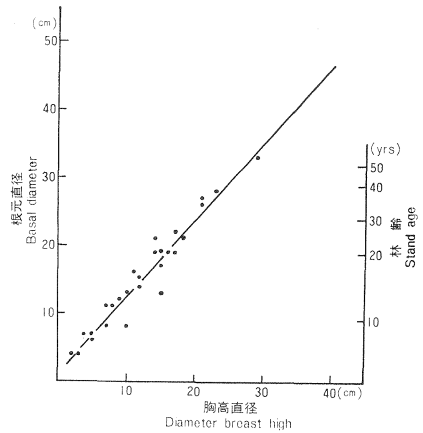


Fig. 9 胸高直径と根元直径の関係 (カラマツ)

Relation between diameter breast high and basal diameter (*Larix leptolepis*).

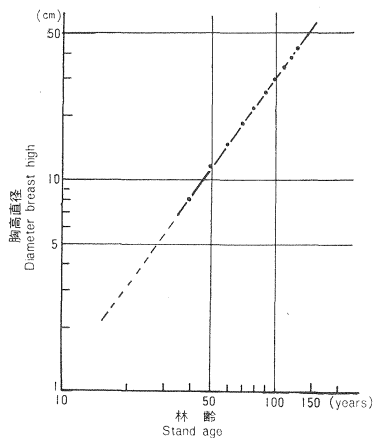


Fig. 10 林齢と胸高直径の関係 Relation between stand age and diameter breast high.

(ブナ: 稲葉の資料⁷⁾による) (*Fagus crenata*: data by INABA⁷⁾)

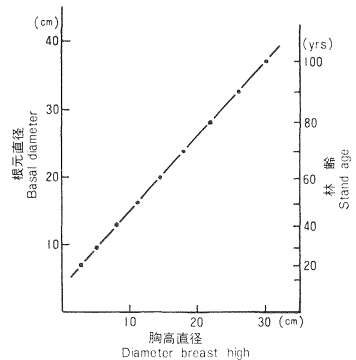


Fig. 11 胸高直径と根元直径の関係 (ブナ)

Relation between diameter breast high and basal diameter (*Fagus crenata*).

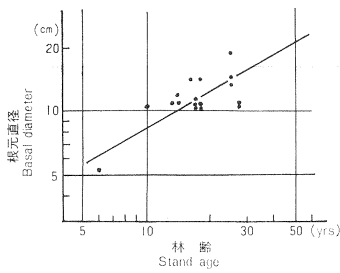


Fig. 12 林齢と根元直径の関係（広葉樹）
Relation between stand age and basal diameter (Broad-leaved tree).

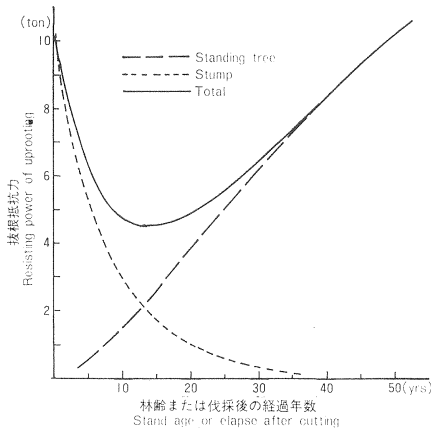


Fig. 13 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（スギ）
Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (*Cryptomeria japonica*).

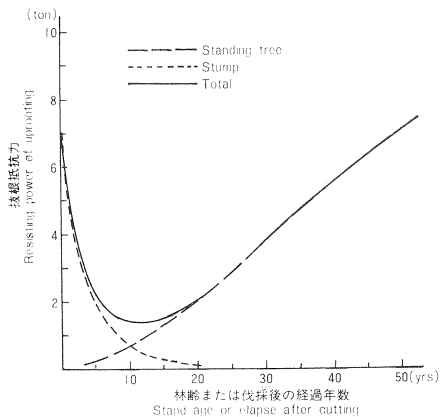


Fig. 14 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（クロマツ）
Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (*Pinus thunbergii*).

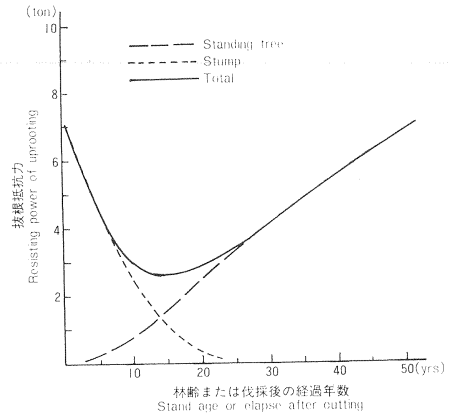


Fig. 15 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（カラマツ）
Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (*Larix leptolepis*).

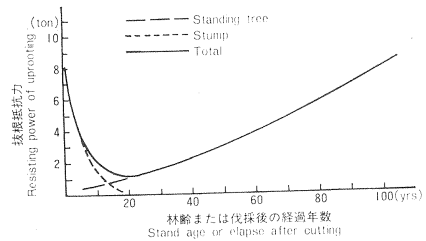


Fig. 16 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（ブナ）
Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (*Fagus crenata*).

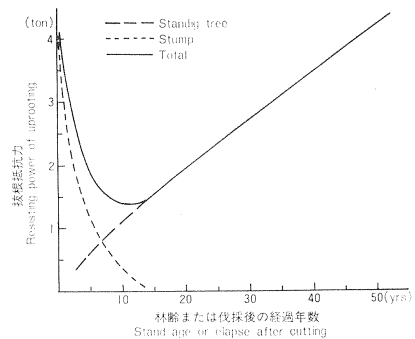


Fig. 17 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（広葉樹）
Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (Broad-leaved tree).

の定数 $a \cdot b$ をそれぞれ $3.30 \cdot 1.13$ と仮定してこの関係を Fig. 10 の胸高直径から根元直径を求めると Fig. 11 のとおりである。図の右側の縦軸は根元直径に対応する林齢を示した。

広葉樹の立木については、樹種別に林齢と胸高直径の資料が得られなかったので、本試験の供試木について林齢と根元直径の関係を示したのが Fig. 12 である。

このようにして林齢ごとに根元直径を推定し、これに対応した抜根抵抗力を Table 8 の回帰式から樹種別、林齢ごとに求めて変化の傾向を示すと Fig. 13~17 の破線のとおりである。

ここで得られた立木の林齢と抜根抵抗力の変化の傾向は、根元直径との関係のように明らかな放物線状の変化ではなく、やや林木の生長曲線に近い傾向がうかがえた。

2. 伐採根株

1) 伐採根株の直径と抜根抵抗力

伐採根株は伐採後の経過に伴って辺材部の腐朽が進み、経過年数が多くなると根株は心材部だけを残した状態になるが、樹皮の大部分は残存しているので、これを確認して根株の直径とした。

伐採根株の抜根抵抗力は根株の直径と伐採後の経過年数を変量として重回帰分析で求められれば理想的であるが、本試験では経過年数ごとの資料が十分得られなかったため経過年数の少ないグループと多いグループに分け、その中から資料が比較的多く得られた経過年数について根株の直径と抜根抵抗力の関係を求め、全体の傾向を推定した。

測定した資料を樹種別に両対数紙上にプロットすると Fig. 18~22 のとおりで総体的にはほぼ直線関係が認められた。この結果について相関係数と回帰式を求めると Table 9 のとおりで、伐採根株では個々の腐朽状態の差異により、抜根抵抗力のバラツキが大きい上に資料数も少なかったため満足な結果は得られなかった。しかしおおよその傾向は得られたので、この結果から今後の検討を進めることとした。

Table 9. 伐採根株の根元直径 (D) と抜根抵抗力 (P) の関係
The relation between basal diameter (D) and the resisting power of uprooting (P) of stump

樹種 Tree species	経過年数 Years elapsed after cutting (yrs)	本数 Number	相関係数 Correlation coefficient	回帰式 Regression equation
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	11	5	0.8687	$\log P = 2.935 \log D - 4.297$
	21	5	0.8587	$\log P = 2.356 \log D - 3.808$
クロマツ <i>Pinus thunbergii</i>	8	10	0.7759**	$\log P = 3.037 \log D - 4.604^{**}$
	18	4	0.9719*	$\log P = 2.457 \log D - 4.234^*$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	10	4	0.8190	$\log P = 2.075 \log D - 2.728$
	18	5	0.6766	$\log P = 1.530 \log D - 2.614$
ブナ <i>Fagus crenata</i>	7	7	0.8870**	$\log P = 2.086 \log D - 2.852^{**}$
	12	3	0.8543	$\log P = 1.279 \log D - 2.062$
広葉樹 Broad-leaved tree	1	10	0.7281*	$\log P = 1.283 \log D - 1.206^*$
	4	4	0.9578*	$\log P = 0.778 \log D - 0.831^*$

* Significant at 5% level.

** Significant at 1% level.

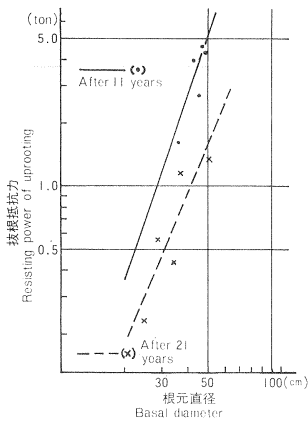


Fig. 18 伐採後の経過年数別，伐採根株の根元直径と抜根抵抗力の関係（スギ）
Relation between basal diameter and resisting power of uprooting at classification of years elapsed after cutting (*Cryptomeria japonica*).

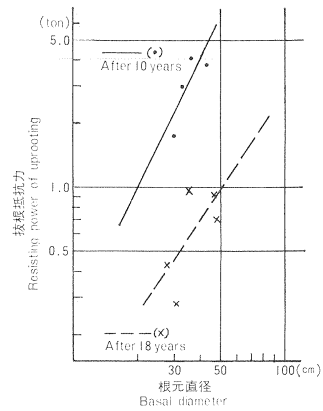


Fig. 20 伐採後の経過年数別，伐採根株の根元直径と抜根抵抗力の関係（カラマツ）
Relation between basal diameter and resisting power of uprooting at classification of years elapsed after cutting (*Larix leptolepis*).

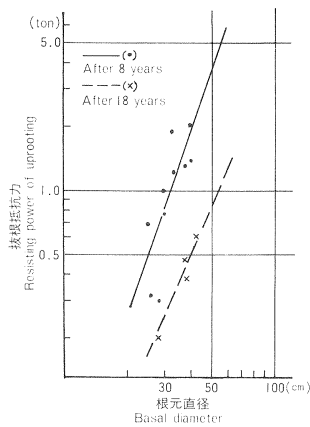


Fig. 19 伐採後の経過年数別，伐採根株の根元直径と抜根抵抗力の関係（クロマツ）
Relation between basal diameter and resisting power of uprooting at classification of years elapsed after cutting (*Pinus thunbergii*).

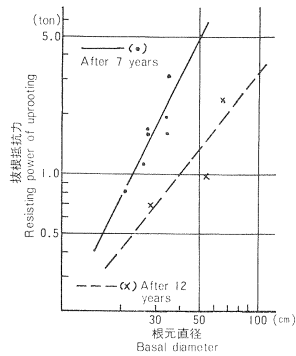


Fig. 21 伐採後の経過年数別，伐採根株の根元直径と抜根抵抗力の関係（ブナ）
Relation between basal diameter and resisting power of uprooting at classification of years elapsed after cutting (*Fagus crenata*).

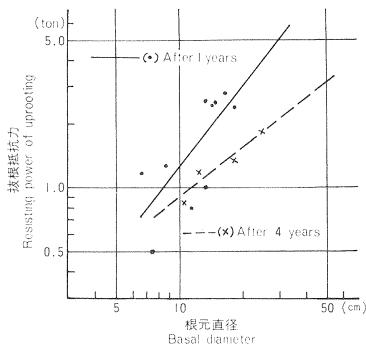


Fig. 22 伐採後の経過年数別，伐採根株の根元直径と抜根抵抗力の関係（広葉樹）
Relation between basal diameter and resisting power of uprooting at classification of years elapsed after cutting (Broad-leaved tree).

測定した樹種のうちクロマツはスギおよびその他の樹種に比べて、とくに辺材部の腐朽が早く、伐採根株では経過年数が多くなると心材部のみを引張る状態になるが、樹皮は腐朽が遅く原形をとどめていたため根株の直径の測定に支障はなかった。

カラマツは林齢が 30~40 年位になると腐朽菌が侵入して根株と樹幹の心材部が腐朽され、病状が進むと空洞化するものも少なくない。本試験の供試木にも被害を受けた根株が散見されたが、被害程度が軽微であったので資料として使用した。

ブナを含む広葉樹では材質的に針葉樹より腐朽の早いことが予想されたが、ブナの場合は伐採齢級が高く樹皮も厚く硬度も高いため伐採時の根株の直径は確認できた。その他の広葉樹は伐採後の経過年数が少ないため、腐朽の程度は少なく伐採根株の直径は容易に確認できた。

2) 伐採根株の経過年数と抜根抵抗力

伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係は根元直径を一定とし、伐採後の年数の経過に伴って根系が腐朽し抜根抵抗力が通減する傾向を推定することになる。ここでは一定の根元直径を各樹種とも伐期を 50 年(ブナのみ 100 年)とし、この根元直径を Fig. 7, 8, 9, 11, 12 から求めた。伐期の根元直径はスギ: 40.4 cm, クロマツ: 29.2 cm, カラマツ: 31.9 cm, ブナ: 36.9 cm, 広葉樹: 20.7 cm である。

経過年数と抜根抵抗力の関係の推定には伐期の直径に相当する立木の抜根抵抗力を Table 8 から樹種別に求めるとともに、Table 9 から経過年数に応じた伐期の直径に相当する抜根抵抗力を求めた。各樹種とも経過年数に応じた抜根抵抗力が 2 点と、これに伐期の立木の抜根抵抗力を加えた 3 点から、経過年数の変化に従って通減する抜根抵抗力の傾向を推定した。この傾向はほぼ指数曲線式が適合するが、定数 c を加えることにより更によく適合した。

$$P = ae^{bY} + c$$

P : 抜根抵抗力, $a \cdot b \cdot c$: 定数

e : 自然対数の底, Y : 伐採後の経過年数

ただしこの場合漸近線は $y=c$ となるので c が大きい場合は適当でない。

各樹種の伐期を 50 年(ブナは 100 年)とした場合の経過年数に応じた抜根抵抗力の関係は Table 10 のとおりで、その傾向は Fig. 13~17 の点線で示した。

Table 10. 伐採根株の経過年数 (Y) と抜根抵抗力 (P) の関係
The relation between years elapsed after cutting (Y) and the resisting power of uprooting (P) of stump

樹種 Tree species	相関係数 Correlation coefficient	回帰式 Regression equation
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	-0.9983*	$\log(P+0.029) = \log 0.990 - 0.049 Y$
クロマツ <i>Pinus thunbergii</i>	-0.9981*	$\log(P-0.176) = \log 0.753 - 0.120 Y^*$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	-0.9907	$\log(P+0.429) = \log 0.898 - 0.05 Y$
ブナ <i>Fagus crenata</i>	-0.9998*	$\log(P+0.213) = \log 0.940 - 0.076 Y^*$
広葉樹 Broad-leaved tree	-0.9944	$\log(P+0.151) = \log 0.623 - 0.099 Y$

* Significant at 5% level.

3. 萌 芽 木

薪炭林の施肥地区では単木の立木，または萌芽木だけで成立した林分は少なく，両者が混在しているのが通常の形態である。両者の混交状態は地域，樹種，経営形態などによって様々であるが，単木については広葉樹として立木，抜根の項で検討してきたので，ここでは萌芽木のみを対象として検討する。

萌芽林は一般に薪炭の生産を目的とし小径木の需要が多かったので，伐期は10数年から30年前後で更新されるものが多い。したがって本試験でも萌芽木については，伐期を林齢30年として考えることとした。

萌芽木は伐採されると当初多数の萌芽が発生し，人為的に本数を整理して保育することもあるが，放置しても淘汰されて経年的に本数が減少する。この関係を本試験の供試木についてプロットすると Fig. 23 のとおりである。しかし伐採直後の萌芽本数はここで推定される本数よりはるかに多いことが予想される。また林齢が25～30年になると成立本数は2～3本程度になるものようである。

1) 根元直径の合計値と抜根抵抗力

萌芽木の根元直径は成立している幹の根元直径の合計値とした。根元直径の合計値に対する抜根抵抗力の関係を両対数紙上にプロットして変化の傾向をみると Fig. 24 のとおりである。萌芽は上記の各樹種の立木に比べて根元直径の増加に対する抜根抵抗力の増加の割合は低いよううかがえる。しかし伐採後5～15年を経過するまでの抜根抵抗力の減衰は少ないので，伐採後次の伐期までの1更新期間の抜根抵抗力の変化は少ない。萌芽性の樹種は伐採された場合根系は非萌芽性の樹種と同様に次第に枯死するが，萌芽に対して新たな根系が発生するとともに，前生樹の根系の枯死，腐朽が遅いため更新後の抜根抵抗力の減衰が急激に進行しないものと予想される。しかし新たに萌芽した直径の合計値が大きくなっても，抜根抵抗力の増加の割合が一般立木よりはるかに少ない結果が得られたことについては，根系の量的調査を実施できなかったため本試験の結果からはこうした傾向の原因を明らかにすることはできなかった。

2) 林齢と抜根抵抗力

萌芽木の場合は他の樹種のように立木と伐採根株に分けて検討することができず，両者が混在した形の抜根抵抗力を測定したことになる。

萌芽木における林齢と根元直径に関する資料はほとんど

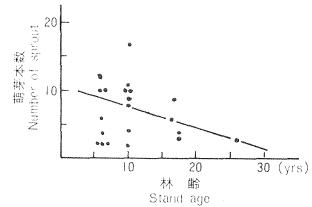


Fig. 23 林齢と萌芽本数
Number of sprout and stand age.

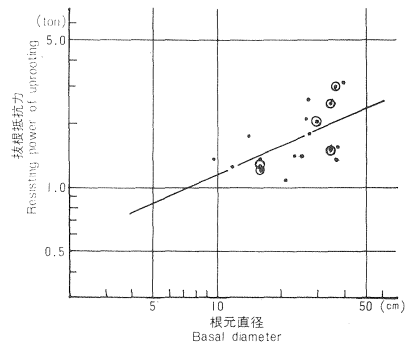


Fig. 24 根元直径と抜根抵抗力の関係
(萌芽木)

Relation between basal diameter and resisting power of uprooting (Sprout-tree).

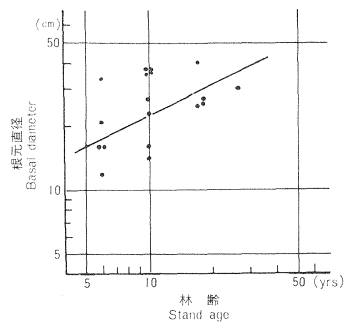


Fig. 25 林齢と根元直径の関係 (萌芽木)
Relation between stand age and basal diameter (Sprout-tree).

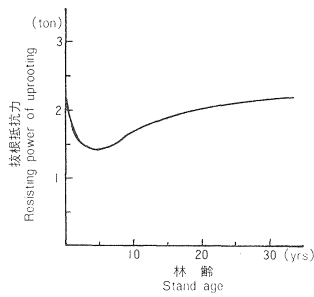


Fig. 26 林齢と抜根抵抗力の関係 (萌芽木)
Relation between stand age and resisting power of uprooting (Sprout-tree).

これまで樹種別に単木の立木、伐採根株および萌芽木について抜根抵抗力を測定して根系の土壌緊縛力の強さを推定してきた。すなわち本試験では林木根系が土壌を保持するとともに、剪断強さを増大する働きを仮に土壌緊縛力とし、土壌緊縛力が強力なほど山地の崩壊を防止する機能が大きいものと仮定し、また土壌緊縛力は林木根株を引張り抜根する抵抗力に比例するという前提のもとで実施した。なお本試験では林木根系の土壌緊縛力の強さを生長量あるいは林齢ごとに明らかにし、災害防止を目的とした森林施業の一指針となる資料を得るため一般化した傾向を求める方向で検討した。しかし少ない資料からの推定と多少の仮定も含んで、絶対値としての精度は低く、測定できた資料の状態からここで得られた結果は必ずしも各樹種を正確に代表するものとはいえないが、それぞれの変化の傾向はほぼ推定できたものと思う。

見当らないので、本試験の測定資料について両対数紙上にプロットすると Fig. 25 のとおりである。萌芽の根元直径は株状に発生したすべての幹の合計値としたが、林齢に対応した根元直径の値は他の樹種に比較するとかなり大きな値となった。ここで得られた林齢に対応した根元直径の関係と前項の根元直径と抜根抵抗力の関係から林齢に対応した抜根抵抗力を推定してみると Fig. 26 が得られた。

萌芽根株の抜根抵抗力は伐採後 5 年前後が最低となるが、変化の幅は少なく、抜根抵抗力は林齢が高くなっても他の樹種のような増加の傾向は認められなかった。

V 結果の検討

1. 立木根系の抜根抵抗力の強さ

山地の崩壊防止に根系の効果を期待するとすれば太い根系が土壌深部まで発達する必要がある。更新後植栽された立木は地上部の生長とともに根系も発達するが、幼齡林、若齡林の根系は長さ比べて肥大生長は劣り崩壊防止に対する期待は低い。

Fig. 27 は全樹種の立木について根元直径と抜根抵抗力の関係を両対数方眼紙上に示したものである。萌芽木を別にするると樹種間の変化の傾向には大きな差異は認められない。上田²⁵⁾ は根株の強さの力学的考察から各樹種とも抜根抵抗力 ($\log P$) と根元直径 ($\log D$) は係数を 2 とする直線関係を仮定し、樹種あるいは人工林、天然林などの差異は主として立木の許容曲げ強さが影響するものとして、根株の抜根に対する強さを推定している。

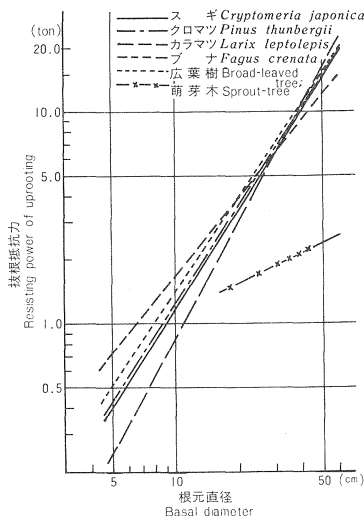


Fig. 27 樹種別の根元直径と抜根抵抗力の関係 (立木)
Relation between basal diameter and resisting power by species (Standing tree).

しかし本試験では根元直径が 30 cm 前後では全樹種とも抜根抵抗力はほぼ 6~7 ton に集中し、林齢 50 年前後、根元直径 40 cm 前後までの抜根抵抗力は、樹種の形質的な影響

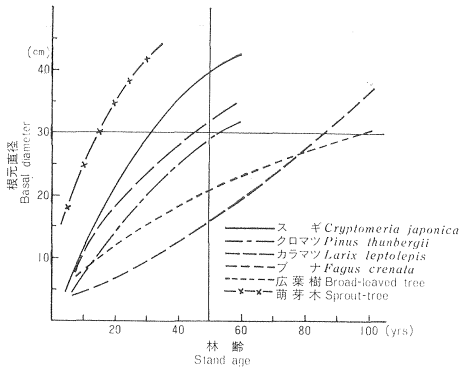


Fig. 28 樹種別の林齢と根元直径の関係
Relation between stand age and basal diameter by species.

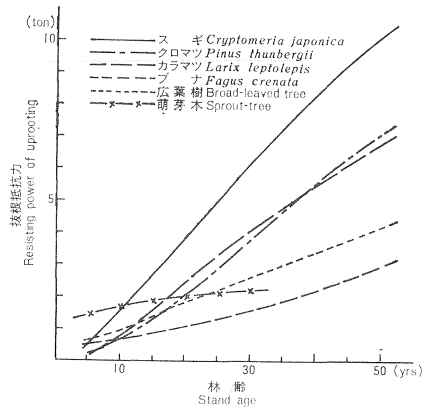


Fig. 29 樹種別の林齢と抜根抵抗力の関係
(立木および萌芽木)
Relation between stand age and resisting power of uprooting by species (Standing tree and sprout-tree).

より生長量である根元直径の差に影響されることが推定される。Fig. 28 は各樹種の林齢と根元直径の関係を示したものであるが、林齢 50 年を例にとるとスギが約 40 cm、クロマツ・カラマツが 30 cm 前後、広葉樹・ブナでは 15~20 cm 前後と大きな隔りがある。また Fig. 29 は立木と萌芽木の林齢と抜根抵抗力の関係を樹種別に示したものであるが、各樹種間の変化の傾向は Fig. 28 の傾向とよく類似している。このようなことから抜根抵抗力は根元直径の大小が強く影響していることが明らかである。

高橋²⁰⁾は根系の土壌緊縛力の強さを予測する要因について根株の引抜強度は斜面傾斜、土の凝集力、土の内部摩擦角、土の含水量など土壌の因子を除くと、根の質的な強さ、広がり、断面積などが影響し、引抜強度は根元直径と直線的に比例することを明らかにした。

また上田²⁵⁾は集材架線用アンカーの強度試験で根株の引抜きに対する強さについて力学的解析を試みたなかで、立木は過去における風圧に耐えぬいてきたという前提と抜根に際しての固定端を地下にとることが実際と合致しているとし、木材の曲げ強さとの関連で樹幹が折損しない条件で関係式を求めた。ここで抜根抵抗力： P と根元直径： D は両対数方眼紙上で直線関係を示し、引抜きに対する強さと直径の関係を明らかにした。

玉手²²⁾は林木が風圧により根返りする条件について検討の結果、立木の樹冠長： l 、風心高： Z_0 (樹冠に風圧が作用する場合の風圧の中心点で樹冠長に対して下から約 1/3 とされている)、と直径： D の関係を lZ_0/D として、この値の大小が根返り被害に対する耐風力の目安となり、林分、樹種が同一でほぼ同じ立地条件ならばこの値が小さいほど根返りと同時に幹折れの被害も少なくなることを報告している。この値は樹木の形状比に似通った性質と考えられ、形状比は一般に林齢が高くなるとその値は小さくなることから、林齢の高い林分の立木は樹高に対して直径の割合が大きく、根返りあるいは抜根に対する抵抗力が強いものと推定される。

以上数例の研究はいずれも、根系の抜根抵抗力は林木の生長量のうち直径との関連が大きいことを明らかに示している。

本試験では根株を地表と平行に引張ってその最大抵抗力を根系の土壌緊縛力の強さとして推定したが、

この方法では樹種によって異なる根の形態と林齢によって差異のある根の材質の強度が、最大抵抗力の出現する時点での根株の傾斜角と関連して根元直径と抜根抵抗力の関係が異なった傾向になることを予想した。また林木の根系は根株を中心に放射状に発達するが、傾斜地では樹冠の枝葉量が斜面下方に偏り、したがって重心が谷側にかかる結果これを支持するため根株を中心に斜面下方の根系が発達する。しかしこの傾向は幼齢木、若齢木では少なく、壮齢以上の林分で著しいことが考えられる。本試験ではこのような根の形態を予想したなかで、抜根は斜面の最大傾斜線方向の下方へ引張りその最大抵抗力を測定した。この場合壮齢以上の立木では十分木質化した太い根系も発達し、引張り方向の手前の根に支点を生じて、転倒するような状態で抜根される。この際根株より上方の根が切断あるいは引き抜ける直前に最大抵抗力が出現するものと予想した。しかし幼齢木、若齢木の根系は木質化の進まない細い根系が多いので、引張りに対して根は根株の近くで湾曲し、転倒の支点が定まらない。前者は根株を中心に手前に支点を生じ、反対側の主要な根系が抜根抵抗力の最大値に影響してその時点での根株の傾斜角は小さいが後者は広い範囲の根系が作用し最大抵抗力が出現する時点の根株の傾斜角は前者よりはるかに大きい。このように最大抵抗力が出現する時点で作用する根系の機構には差異のあることが推定された。試験実施中の観察では小径木の抜根は抵抗力の最大値が出現する根株の傾斜角は全般に大きく、そのため引張りに関与する根系の数が多くなり根元直径に対する抜根抵抗力は大径木に比べると相対的に大きな値を示したように見受けられた。

試験は根系の土壌緊縛力の強さに最も影響が大きいと予想される直径を唯一の因子として抜根抵抗力を求めて、林木根系の土壌緊縛力の強さを林齢ごとに推定した。したがってその他の因子については、試験地、試験木の選定に際して努めて変動が小さくなるように心掛けたが、必ずしも理想の試験地、試験木を選定できたとはいえない。しかし立木の抜根による根系の強さは直径を因子としてほぼ推定できるものと考えられる。

2. 伐採後の根株の抜根抵抗力の強さ

伐採根株は立木よりも個々の試験木の立地条件が影響して、根系の腐朽状態に大きな差異が生ずる。また経過年数ごとの資料も少なかったため測定結果は変動が大きく、Table 9 に示したとおり 5% 水準で

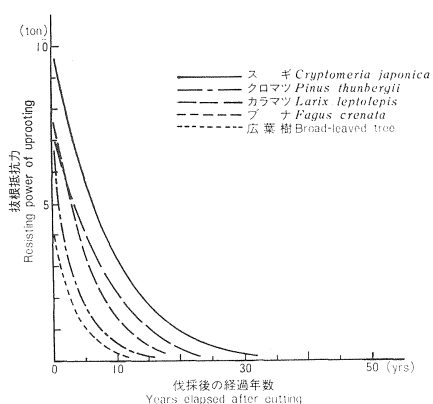


Fig. 30 樹種別の伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係 (伐採根株)

Relation between years elapsed after cutting and resisting power of uprooting by species (Stump).

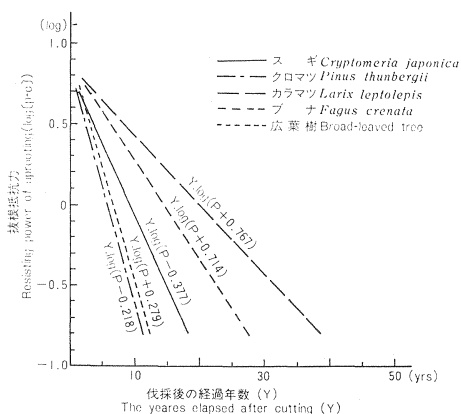


Fig. 31 樹種別の抜根抵抗力の減衰傾向
The tendency of decrease of resisting power at stumps of each tree species.

有意でないものが半数を占めた。しかしこの傾向は伐採根株の腐朽の差異から予想されたものであって、今後この種の試験が実施された場合の資料を追加して精度を上げる必要を痛感したが、本試験ではこの傾向を現時点での精度と判断して推定の根拠とした。

Fig. 30 は Table 9 の回帰式から推定された経過年数に対する抜根抵抗力の変化を樹種ごとに示したものである。図の経過年数 0 年は林齢 50 年（ブナは 100 年）の立木の抜根抵抗力に等しい。樹種により根元直径に差異があるので伐採時の抜根抵抗力の差は大きいですが、伐採後の抵抗力の変化はクロマツ、広葉樹がスギ、カラマツに比べて急激に減衰する傾向がうかがえる。Fig. 31 は全樹種の根元直径を一定（30 cm）として同時に伐採したと仮定した場合の経過年数（ Y ）に対する抜根抵抗力（ $\log P-c$ ）を求めたものである。この図でもわかるように抜根抵抗力の減衰傾向はカラマツが最も緩慢でブナ、スギと続き広葉樹、クロマツが急激に減衰することが明らかである。

カラマツは経験的にも抜根の腐朽が遅く、伐採後他の樹種に比べて抜根が困難だとされている。山崎ら²⁶⁾はカラマツの抜根試験で伐採後 1～10 年の根株の抜根抵抗力を測定して、伐採後の経過年数に対応した抵抗力の低下が少ないことを報告しているが、本試験の結果からもこのような傾向がうかがえた。

広葉樹の伐採根株は薪炭林施業の林分のなかで萌芽せずに伐採後枯死した単木の根株から選んだ。鳥飼ら²⁴⁾は荒廃危険地帯対策調査で伐採木の支持根腐朽調査を実施し、萌芽しない根株ではシデが 0～1 年、ナラ、クリは 2～7 年で枯死するものが多いと報告している。一般に広葉樹は材質的に腐朽が早いので抵抗力の減衰も早いことが予想できる。

アカマツ・クロマツは試験実施中の観察によると、心材部の腐朽はきわめて遅いが、これに反して辺材部は虫害が多く腐朽菌の侵入も容易なためか、伐採後は急激に腐朽されて抜根抵抗力の減衰がとくに早いように見受けられた。

以上のような事例から Fig. 30, 31 の樹種別にみた抜根抵抗力の減衰傾向はほぼ順当なものと考えられる。

高橋²¹⁾は伐採による林木根系の地盤支持力の減退傾向を知るためアカマツの抜根の腐朽状態と抜根抵抗力を測定しその傾向を求めた。それによると伐採後 1～11 年の抜根について根元直径別の経過年数に対する引抜き力をプロットすると、直径ごとに直線回帰を示して、いずれも 12 年で引抜き力は 0 になることを明らかにした。本試験では経過年数に対する抜根抵抗力の減衰は指数曲線で推定されて、多少異なった傾向で示された。

勝見¹²⁾はトドマツの伐採直後から 6 年経過までの抜根について、根元直径と経過年数を因子として、抜根抵抗力との関係を重回帰式で求めその有意性を明らかにした。本試験でも同様の方法で検討したが、スギを除く他の樹種では十分な資料が得られなかったこともあって、分散が大きく有意性も低く明確な結果は得られなかった。

立木では樹種として根の形態や材質的な差異よりは、根元直径の大小が抜根抵抗力の強弱に最も影響することが推定された。伐採根株の場合も樹種と経過年数が同じで、立地環境に大きな差異がなければ抜根抵抗力の強弱は立木と同様に根元直径の大小に比例する。しかし樹種が異なれば、その材質的特性や樹種としての立地条件などが、根系の腐朽の遅速に影響して、抜根抵抗力の減衰傾向は樹種による差異も少なくないことが推定された。

3. 萌芽木の抜根抵抗力の強さ

薪炭林を構成する樹種は萌芽性が強く、しかも割合に更新林齢が低いため立木が伐採されると多数の萌芽をみるが、これに伴って新根も発生する。しかし前生樹の根系は吸収根などの小径根は勿論のこと支持根である大径根も次第に枯死腐朽するものようである。したがって萌芽木の抜根は単木における立木と抜根が一体に合成された抜根抵抗力を測定することになり、両者の抵抗力を分けて検討することは困難であった。

萌芽木の前生樹根系の枯死、腐朽に関する調査資料は少ないが、林野庁が実施した荒廃危険地帯対策調査における鳥飼ら²⁴⁾の報告によると、小径の根は伐採後3年位までにはほぼ枯死腐朽するが支持根である大径の根は、萌芽の状況によって枯死する時期に差が認められた。すなわち萌芽が旺盛な株の支持根は枯死することが遅く、萌芽しないかまたは貧弱な株の支持根は早く枯死することが報告されている。このような傾向は樹種の特性とも関連があるようで、クリ、ナラなどは萌芽の本数が多く生長も旺盛で伐採後7年を経過しても枯死しない支持根が測定されている。また枯死が遅い根は同じ株のなかでも萌芽をしている下側で観察されている。この調査でシデはクリ、ナラに比べて萌芽も少なく支持根の枯死もはるかに早いことが明らかである。このような事例は根系の枯死が遅いために萌芽が旺盛なのか、萌芽の発生が根系の枯死を遅らせているのかは明らかでないが、薪炭林の更新あるいは樹種更改に際して林地保全に関して根系の影響を検討する有力な資料となる。

薪炭林を対象とした広葉樹の萌芽林では、一般に前生樹の根系の枯死腐朽は遅いとされているが、樹種によって根系の枯死に遅延があるので、抜根抵抗力の変化に差異が生ずるものと予想された。本試験では樹種別の資料が少なかったので十分な検討はできなかったが、Fig. 24 の◎印でプロットしたクリ・コナラ・ミズナラのグループについてみると、他の樹種に比べて根元直径に対する抜根抵抗力はやや強いようにみられたが、それほど明らかではなかった。しかし Fig. 6 の立木では◎印でプロットしたクリ・コナラ・ミズナラのグループは他の樹種より強いことが明瞭で、これらの樹種はその他の樹種に比べて根系の発達がよくて相対的に抜根抵抗力が強いものと推定され、樹種としての特性の一端がうかがえる。

4. 林分の土壌緊縛力の強さの推定

これまでは単木の立木と伐採根株および萌芽木の強さについて樹種別に根元直径あるいは林齢と抜根抵抗力の関係を求め、それぞれの変化の傾向を推定した。しかし林木の根系が林地の崩壊に及ぼす影響を検討するためには、林分としての土壌緊縛力の強さを知る必要がある。

林分の強さは単純にはある時点での立木と伐採根株の強さを合計すればよいが、立木の場合は植栽後生長に伴って除伐、間伐などの保育作業や各種被害による枯損で立木密度は著しく変化する。しかし伐採根株は伐採時の立木密度で変化することはない。

人工一斉林では樹種が同じで、地形・土壌などに大きな差異がなく法正に植栽・保育されている場合は個々の立木の抜根抵抗力が強ければ、その林分は崩壊に対して抵抗力が強いものと予想される。このような林分を対象にして、伐採根株は伐採後の経過年数に応じた抜根抵抗力に伐採時の立木密度を乗じ、立木は伐採後直ちに植栽されたものとして、林齢に応じた抜根抵抗力にその林齢の立木密度を乗じて、それぞれ林分の抵抗力とし、両者の合計値を林分全体の抜根抵抗力として樹種別に示すと Fig. 32~34 のとおりである。

伐採根株 (Fig. 33) は本数に変化がないので経過年数による抜根抵抗力の通減の傾向は単木の場合と

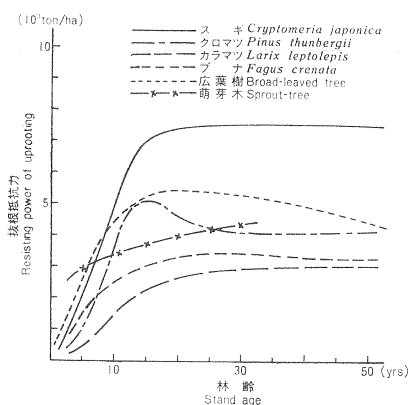


Fig. 32 樹種別の林齢と林分の抜根抵抗力の関係（立木）

Relation between stand age and resisting power of uprooting of stand by species (Standing tree).

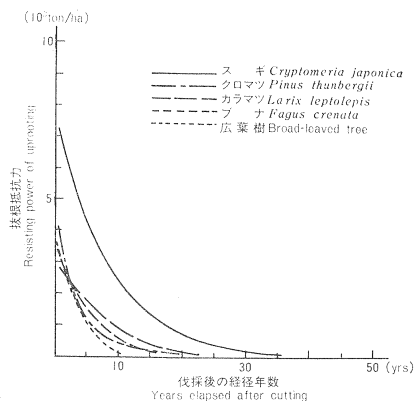


Fig. 33 樹種別の伐採後の経過年数と林分の抜根抵抗力の関係（伐採根株）

Relation between years elapsed after cutting and resisting power of uprooting of stand by species (Stump).

同様であるが、単木と異なることは樹種により伐期の立木密度に差があるため林分の合計値に開きがでた。これに反して立木 (Fig. 32) の抜根抵抗力は大部分の樹種が5~10年から急激に増大し、15~25年前後をピークとしてその後はほぼ平衡状態を示す樹種（スギ、カラマツ）もあるが、クロマツ、ブナ、広葉樹（薪炭林）などは僅かながら低下の傾向さえみえた。これを Fig. 29 の単木の場合と比較すると全く異なった傾向を示した。このような結果の一因は、林齢10~20年前後の立木（単木）では抜根抵抗力の増加に対して、まだ立木密度が高いことが考えられる。また V-1 (p. 194) でふれたように木試験のような抜根方法によると、林齢が低く根系が軟弱な場合は、

壮齢以上の大径木が明らかに支点を生じてこれを中心に転倒する形態で抜根されるのとは異なり、根株の近くで支持根が湾曲して支点が定まらず、根系全体を引き抜く形となる。したがって大径根の場合より根元直径に対する抜根抵抗力は相対的に大きな測定値となることが推定された。

Fig. 34 は立木と伐採根株を合計した林分全体の抵抗力を示したものであるが、大部分の樹種は林齢（伐採後の経過年数）が5年前後に抜根抵抗力は最低を示すが、その後は急激に上昇して15~25年の間が最高となり、伐期（50年）には僅かながら低下する結果が得られた。この結果単木の抜根抵抗力に立木あるいは伐採根株の本数を乗じて林分の抜根抵抗力とすると、崩壊の危険性が最も高いのは林齢5年前後になり、危険性が最も低いのは林齢15~25年前後となる。既往の災害調査から一般に崩壊率が高く危険

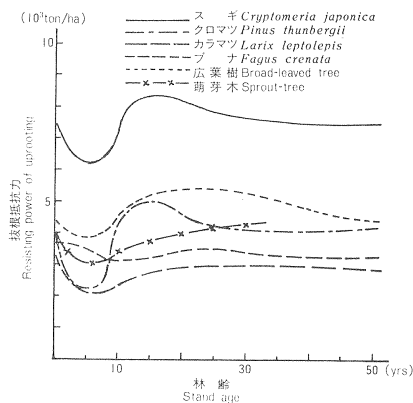


Fig. 34 樹種別の林齢と林分の抜根抵抗力の関係（立木と伐採根株の合計）

Relation between stand age and resisting power of uprooting of stand by species (Total of standing tree and stump).

性が高いとされている 林齢は 10~15 年であるといわれているが、本試験の結果からの推定では危険性の高い時期に若干の差異が生じた。したがって林分の強さを推定する場合は立木密度が関連するので、崩壊に対する森林の影響力の指標と予想した抜根抵抗力と根元直径の関係を直接結びつけることは適当でないと考えられる。

このような結果について 2・3 の考察を加えてみる。林木根系の崩壊防止機能は根系の土壤緊縛力によるものといわれている。本試験ではこの土壤緊縛力は抜根抵抗力に比例するものとし、抜根抵抗力が強い林分は崩壊防止機能も高いものとして測定された抜根抵抗力を林分の土壤緊縛力の強さとした。本試験の抜根方法では地表面と平行に引張るため土壤表層に発達した側根が大きく影響することが予想される。しかし山地の崩壊は通常すべり面を形成し、崩壊を防止するためにはこのすべり面を貫く直根・垂下根・斜出根が十分に発達していることが必要である。一般に根系の発達とくに大径根以上の根系は樹高・材積生長に伴って増大することが明らかで、林齢 20 年（スギ）位から顕著になるとされている。

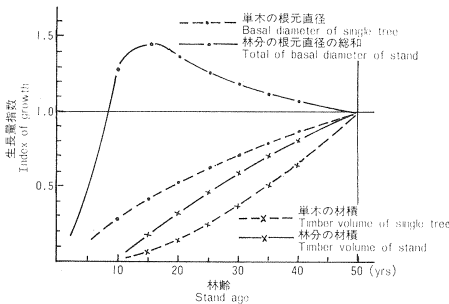


Fig. 35 林齢に対応した生長量の変化
—スギの林齢 50 年に対する指数—
Growth change corresponds to stand age.
(index of growth 1.0 :
Cryptomeria japonica 50 years)

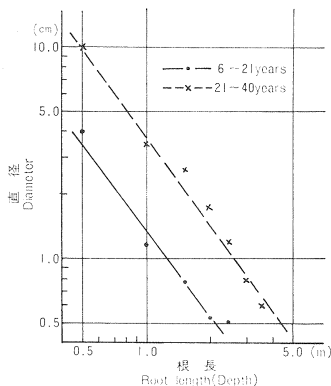


Fig. 36 林齢階別の根長（垂直方向）と直径の関係（スギ）
Relation between root length (depth) and diameter, according to stand age grade (*Cryptomeria japonica*).

さきに求めた林分の抵抗力のうち立木については単木の抵抗力に立木本数を乗じたものであるが、林齢と抵抗力の関係は林分の林齢と根元直径の関性に類似した変化の傾向がみられるようである。Fig. 35 はスギの伐期を 50 年とした場合の林分について林齢に応じた根元直径の総和と材積を林齢 50 年に対する割合で示したものである。この図でみると根元直径の総和のピークは林齢 15 年でその後林齢が高くなると低下している。また Fig. 32 では林齢に対する抜根抵抗力はピークあるいはそれに近い値が林齢が 15~25 年位にあって、林齢が高くなると低下する樹種もあり林齢に応じた変化の傾向は直径の総和とやや共通したものが予想された。このような根元直径の総和に対して、林分の材積の変化は、Fig. 35 でみられるように立木密度の変化に関係なく林齢が高くなると緩い放物線状で増加して、林齢に対応した変化の傾向は根元直径の総和の場合とは全く異質の変化を示した。

ここで林木根系の伸長と太さおよび質的な強さとその分布について考えてみる。筆者らは昭和 47 年 7 月の集中豪雨で多くの被害を生じた関東以西の 12 の県による「森林の崩壊防止機能に関する共同調査報告」に基づいて「林木の根系分布と山地崩壊」¹⁸⁾ および「崩壊地における林木の根系分布」¹⁵⁾ にまとめた。このなかで根系の崩壊防止機

能として重要な意味をもつ垂直方向の根系について、根株の地際からの距離（根長）とそれに対応した根の直径の関係について1例を示すと Fig. 36（スギ）のとおりである。この図の林齢階別にみた変化は両者とも両対数方眼紙上でほぼ同じような傾向の直線が得られた。しかし林齢階別では根株の地際から同距離（根長）における直径の差は大きい。根株の地際から 50 cm の根長では林齢 20 年までの平均直径は 3.5 cm であるが、20~40 年までの平均では 10.0 cm，以下地際から 1.0 m の位置の直径は 1.4 cm : 4.0 cm，2.0 m の位置では 0.55 cm : 2.0 cm となった。また直径 3.0 cm に相当する根株からの距離は 20 年までは約 55 cm，20~40 年までは 120 cm，直径 5.0 cm でみると 20~40 年までの林齢階の平均は約 82 cm にあたるが，20 年以下では 40 cm にも達していないことになる。林木根系が垂直方向へ伸長する場合は土壌層が深くなると硬度が高くなるとともに岩石を含み根系は必ずしも垂直方向へは伸長せず，土層と平行になる傾向がみられる。したがって根株地際からの距離は正確に垂直方向の土壌の深さではないことが推定される。このような不明確な点はあるが，林齢階別にみた根系の太さと伸長量は山地の崩壊防止に差異を生ずることは明らかである。

また根系の質的な強度については，引張り，曲げ，剪断など根そのものの強度の測定は実施できなかったが，根系の太さに対する年輪本数を測定して強度の指標とした。Fig. 37 は樹種別に林齢階と年輪本数を直径階 5 cm（4.1~6.0 cm）の根系についての測定結果である。この図でみられるように林齢 20 年までの平均はすべての樹種で年輪数は 10~11 本，林齢が 21~40 年では 16~17 本，41 年以上の林齢になると 19~25 本と林齢が高くなると同一直径での年輪は明らかに増加の傾向を示し，それだけ根系強度は高くなっていることが推定された。このように崩壊防止に効果が期待できる根系は，長さに対応した太さと，年輪数からみた質的な強度も林齢が高くなると増加する傾向が顕著である。

林齢が高くなり地上部の生長量の増大に伴って根系も長さ，太さ，量が増加することは当然であるが，葉や枝とともに中径根以下の根系は林齢が 20 年前後に達するとほとんど増加しないが，大径根以上の根系は地上部の幹と同様に林齢とほぼ直線的に増加することが知られている。このようなことから根系の崩壊防止機能を検討するに当たって，林分を単位として考慮する場合の抜根抵抗力との関係は，立木密度の影響が大きい根元直径の総和と関連したこれまでの方法に比べて，林分材積との関係で検討することがより適切であるように推定された。Fig. 38 はスギの林分収穫表から地位中の全国平均について，主林木の ha 当りの幹材積と本数から 1 本当りの材積を求め，これと根元直径の関係を林齢（10~50

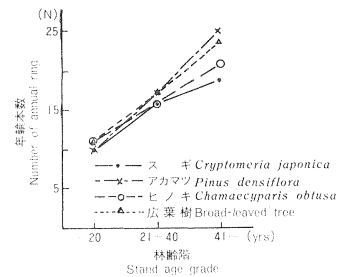


Fig. 37 樹種別の林齢と年輪本数の関係
(直径 4.1~6.0 cm の根系)
Relation between stand age and number of annual ring by species.
(diameter : 4.1~6.0 cm)

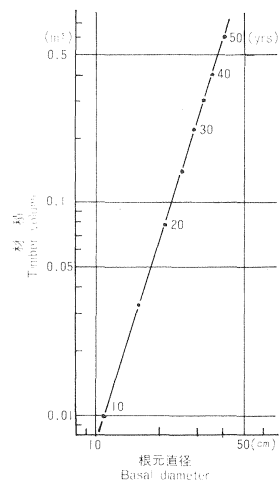


Fig. 38 根元直径と材積の関係（スギ）
Relation between basal diameter and timber volume (Cryptomeria japonica).

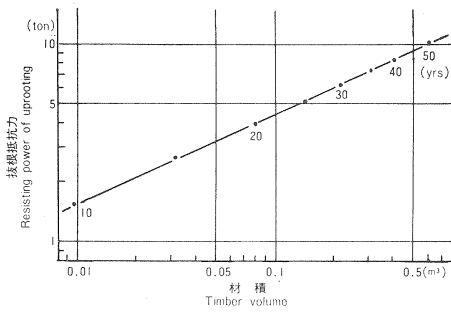


Fig. 39 材積と抜根抵抗力の関係 (スギ)
Relation between timber volume and
resisting power of uprooting (*Cryptomeria japonica*).

これまでの結果は単木の根元直径あるいは材積と抵抗力の関係であるが、林分の総量としての根元直径の総和あるいは林分材積も同様な傾向で関係するものと仮定して、林齢に応じた抜根抵抗力の変化を推定してみた。

スギの伐期を 50 年と仮定し根元直径の総和および材積に対する抜根抵抗力を その時点における林分の土壤緊縛力の強さとし、それぞれ林齢ごとに林分の強さを指数で示すと Fig. 40, Fig. 41 のとおりである。両図でみられるように根元直径の総和と材積の両者では林齢に対応した林分の強さは、変化の傾向に著しい差異がみられた。ここで伐採根株の減衰傾向は全く同一であるので、この差異は立木の差によって生じていることが明らかである。

根元直径の総和から推定した 林分の土壤緊縛力の強さの変化は Fig. 34 のスギの変化によく似た傾向であることがわかる。両者とも 5 年前後が最低値となり 50 年生林分の 80% 前後であるが、ともに 15 年をピークにその後が高くなり、10 年後の強さは 50 年生林分を上回る値となった。また Fig. 35 の林分に

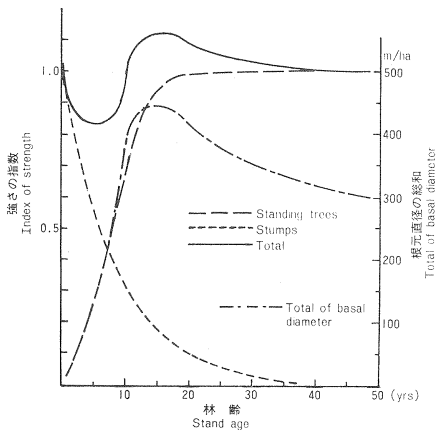


Fig. 40 根元直径で推定した林分の強さの変化
—スギの林齢50年に対する指数—

Strength variation estimated from basal diameter.

(index of growth 1.0 :

Cryptomeria japonica 50 years)

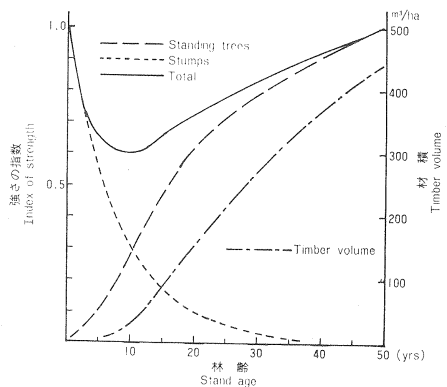


Fig. 41 材積で推定した林分の強さの変化
—スギの林齢50年に対する指数—

Strength variation estimated from timber volume.

(index of growth 1.0 :

Cryptomeria japonica 50 years)

年) ごとに両対数紙上にプロットしたもので、両者の間には明らかに直線関係が認められた。以上の結果、林齢ごとの根元直径と材積について一定の傾向が得られたので、材積と抜根抵抗力の関係を求めるため林齢ごとの根元直径に対応した材積とその抜根抵抗力を両対数紙上にプロットすると Fig. 39 のとおりである。ここでも明らかに直線関係が認められた。

勝見¹¹⁾はトドマツとシラカンバについて単木材積と抜根抵抗力の関係を求め両対数紙上で直線関係が得られたことを報告している。

おける生長量としての根元直径の総和の変化にもよく似た傾向とみられた。これに反して林分材積から推定した強さは、10年前後が最低値を示して50年生林分の60%に相当する値となり、それ以後の値は漸増し50年生林分を越えることはなかった。

以上のように林分の土壤緊縛力の強さを根元直径と抜根抵抗力の関係から推定すると林齢別にみた抜根抵抗力の変化の傾向は、災害時に崩壊発生が多いとされている10～15年前後の林分に抜根抵抗力としてはピークがあって崩壊発生の実態と一致しない。しかし林分材積から推定すると林齢5～15年の値が低く、崩壊発生がこの林齢の時期に多くなっていることから災害の実態に即した傾向になることが推定できた。林分の土壤緊縛力の強さの推定に根元直径の総和と材積のいずれを用いるかでは全く異なった傾向が得られたが、この差異の原因について2・3の検討を加えてみたい。Fig. 35の単木の根元直径と材積の生長曲線でもわかるように、幼齢・若齢時代には根元直径の生長に比べると材積生長は極めて少ない。材積生長は直径生長、樹高生長できまり、材積が増大することは樹高が高くなり、林木は風の影響を強く受けることを意味する。したがって風に対する抵抗力を増すために地下部の支持根である長大な根系の生長を促す結果となることが考えられる。

林木は幼齢・若齢期には土壤表層に近い側根の発達に比べて、崩壊のすべり面を貫く主根あるいは垂下根の発達が十分でないことが知られている。一方本試験の抜根方法によると最大抵抗力は側根が強く影響して、幼齢・若齢林では崩壊防止機能が未だ低いにもかかわらず抜根抵抗力は強く測定された結果となり、立木密度とも関連して根元直径から推定すると強さのピークが林齢15年前後に出現したものと考えられた。

豪雨に際して多発する表層剥離や滑落型の崩壊に対してとくに有効であるすべり面を貫く太い主根や垂下根は、地上部の材積に比例して増大する傾向があることから、林分としての強さは林齢に対応した材積の変化で推定することが適切であるものと考えられる。

VI 山地崩壊に及ぼす林木根系の影響

台風や前線に伴う豪雨で頻発する林地崩壊は地形、地質、土壤など自然的要因が強く影響するが、常に変化する林相の影響も少なくない。崩壊の発生と林相の関係について、林齢からみると、幼齢林、若齢林での崩壊率が、壮齢以上の林分より高いことが統計的に立証されている。この林齢による差異は土壤層を緊縛し、土壤の剪断強さを増加している根系の量、質、分布によるものと予想される。これら林木の根系については長さ、深さ、密度、強度など崩壊防止機能の面からの調査も実施されることが多くなり、崩壊に対する根系の影響も徐々に解明されつつある¹¹⁹⁾。また剪断強さに関しても苗畑での実験⁴⁾や現地試験¹⁾も実施されて、資料も逐次増加され、根系を含む土壤の剪断強さの解明への期待も少なくない。

本試験では根系の土壤緊縛力が抜根抵抗力に比例し、抜根抵抗力が強いことは土壤緊縛力も強く、したがって崩壊防止機能がすぐれているものと仮定して試験を実施してきた。この抜根抵抗力は本試験のような抜根方法によると林木全体の根量が大きく影響し、根系の太さや深さなどの分布による影響が十分把握されないよううかがえた。しかし林地では崩壊のすべり面となる深さを貫く強い根系が存在することにより、崩壊防止機能はより強力となることから根系の太さや深さの分布も重要な意義がある。

ここで林木の根の生長、構造、はたらきなどに関して、1・2の文献と本試験の結果から、山地崩壊と林木根系の関係について検討を加えてみる。

林木は“生長の初期には主根の生長が著しいが、しだいに主根よりも側根の生長が盛んになる”¹⁰⁾。主根は林齢が進むと土壤層に深く伸長するが、10年以降になるとその生長速度は目立って低下し、ほとんど停止するものもある。また“根の重量の生長経過は根株、特大根、大径根などは地上部の幹と同様にほぼ直線的に増加するが、中径根、小径根、細根などは枝や葉と同様に20年以降はほとんど増加しない。大径根以上の重量は胸高直径が12~15cm位の頃から急に増加する傾向がみられて、根の肥大生長は地上部の重量を支えるはたらきと関係しているものとみられている”¹⁰⁾。すなわち林木の根系は稚苗時代は主根が先ず垂直方向に伸長し、幼齡木から若齡木の時代は側根の生長が盛んで、とくに中径根以下の養分吸収に関連した部分の根量増加が目立つといわれている。その後林齢が高くなると生長した地上部を支持するために、主根、側根とも肥大生長が進むが、この林齢がスギでは20年生前後の林分に相当するものと推定される。土壤緊縛力は養分吸収など生育に直接関連した中径根以下の多数の根系と、本数は少ないが地上部を支持する大径根以上の根系の両者が土壤と結合した状態の総合された力であることが推定できる。この根系のうち地上部を支持する力は水平根の引張り強さも大きく働くと考えられているが、林木の倒伏には土壤深部に太い根系の発達する樹種が強いといわれている。

本試験の抜根方法は山腹斜面の最大傾斜線方向の谷側に引張り、その最大抵抗力を測定した。このような抜根方法によると引張りの強さは、主として根株の山側の水平根の影響が強く垂直方向に伸長する主根の力が十分に測定できないことが考えられた。また最大抵抗力が出現する根株の傾斜角は大径木ほど少なく、山側水平根の影響は大径木ほど著しいことが予想できる。根系は林齢が高くなると土壤表層には大径根から細根まで数多くの側根がネットワークを形成して、山腹斜面の亀裂を防止し降水が急激に土壤中に侵入することを阻止し、間接的に崩壊の発生と拡大を防止する効果があり、主根(垂下根)は10年生位で伸長速度は衰えるが、大径根以上の根系は林齢が高くなり、樹高、材積が増加するのと比例してほぼ直線的に重量も増加することから、土壤深部の主根は斜出根、垂下根とともに肥大して崩壊のすべり面の剪断強さを増加して、崩壊の発生を直接防止する効果が大きい。このような根系の崩壊防止機能を本試験の抜根抵抗力の測定から推定する場合には垂下根を含む土壤の剪断強さと、幼齡木、若齡木など木質化が十分進まない林木では地際の根系の湾曲から、引張りの機作が異なることが推定され、壮齡木、高齡木より根元直径に対する抜根抵抗力が相対的に大きく測定される点などを考慮する必要がある。また本試験では当初林齢に対応した林分の土壤緊縛力の強さを、その林分の直径総和に比例した考え方で推定したが、崩壊防止に有効な大径の根は地上部の材積との関連が大きいことから、材積と抜根抵抗力の関係で推定した林分土壤緊縛力の強さを、根系による森林の崩壊防止機能の変化の傾向とみた方が適切であるものと判断した。さらに林木は生長が停止するか、枯損の徴候がなければ、高齡木といえども中径根以下の根量は維持され、大径根以上の根系は土壤深部にもよく発達し、適正な立木密度を保持すれば高齡林分の崩壊防止機能は高いものと推定される。

引用文献

- 1) 秋谷孝一ほか：シラス地帯の森林と崩壊に関する研究(シラス地帯の集中豪雨災害防止に関する総合研究報告書), 科学技術庁, 303~380, (1977)
- 2) 青野英也ほか：茶樹根の土壤保持力に関する二~三の考察, 日作東海支部研究概要 78, 19~22, (1977)
- 3) 遠藤治郎ほか：スギその他の根株の引抜試験, 日林東北支講27, 63~64, (1975)

- 4) 遠藤泰造ほか：樹木の根が土のせん断強さにあたえる作用（1），林試北支年報 1968, 167～182, (1969)
- 5) 藤林 誠ほか：ヒノキの抜根に関する試験，林業技術シリーズ（8），(1950)
- 6) 東 三郎ほか：低木類の浸食抵抗について，日林北支講 12, 4～7, (1963)
- 7) 稲葉広通：ブナ林の成立，林学会雑誌, 10, 11, 583～597, (1928)
- 8) 鎌田正之：なだれに対する林木と杭の強度について，雪氷, 21, (6), 12～16, (1959)
- 9) 苅住 昇：樹木の根の形態と分布，林試研報, 94, (1957)
- 10) 苅住 昇：林木の根の働きと生長，林業研究解説シリーズ 3, 林業科学技術振興所, (1963)
- 11) 勝見精一：抜根抵抗力の測定，北方林業, 263, 24～26, (1971)
- 12) 勝見精一：トドマツの抜根抵抗力の経年変化，林試北支年報 1970, 161～167, (1971)
- 13) 北村嘉一ほか：樹根の抵抗力に関する現地試験（I），日林講, 77, 568～570, (1966)
- 14) 北村嘉一ほか：樹根の抵抗力に関する現地試験（II），日林講, 79, 360～361, (1968)
- 15) 北村嘉一ほか：崩壊地における林木の根系分布，日林講, 85, 284～285, (1974)
- 16) 村井 宏ほか：林地の水および土壌保全機能に関する研究（1），林試研報, 274, 68～71, (1975)
- 17) 中村英碩：林業機械の効果的作業技術，林試研報, 225, 1～29, (1969)
- 18) 難波宣士ほか：林木の根系分布と山地崩壊（森林の崩壊防止機能に関する共同調査報告），林野庁研修教材, (1974)
- 19) 難波宣士ほか：森林特性に関する研究（昭和47年7月豪雨災害に関する特別研究報告書），科学技術庁, 71～212, (1975)
- 20) 高橋宏治：保全的見地にたった森林取扱いに関する研究（1）青森林友, 225, 75～77, (1967)
- 21) 高橋宏治：保全的見地にたった森林取扱いに関する研究（2），青森林友, 226, 63～71, (1967)
- 22) 玉手三稟寿ほか：キティ台風による森林の風害，林試集報, 59, 61～88, (1950)
- 23) 玉手三稟寿ほか：立木引き倒し試験，日林試, 47, 5, 210～213, (1965)
- 24) 鳥飼俊治ほか：荒廃危険地帯対策調査，鳥取県林試研報, 10, 37～41, (1967)
- 25) 上田 実ほか：集材架線用アンカー（根株・立木）の強さ試験，日林講, 80, 364～366, (1969)
- 26) 山崎不二夫ほか：抜根に関する研究，農業土木研究, 21, 2, 79～93, (1953)

The Function of Tree Roots upon Landslide Prevention Presumed Through the Uprooting Test

Yoshikazu KITAMURA⁽¹⁾ and Senshi NAMBA⁽²⁾

Summary

Landslides caused by torrential rainfall due to typhoons or fronts are influenced not only by natural factors such as rainfall, topography and so on but also by the variations in forest treatment.

The authors assume that a forest has the function of preventing the occurrence of landslides because the existence of forest roots increases the shearing resistance of the soil. But the forest loses this function when the forest roots are dead or decay after being felled. Thus it is expected that there is a decrease in the above mentioned forest function in newly planted forests or in regenerating forests. Actually, most of the former investigations of landslide occurrence show there are more landslides in young forests.

Consequently it is supposed that forest roots change both in quality and in quantity according to forest treatment, and the forest function against landslides changes from time to time with the change of the state of the forest.

As it is considered that the soil binding power of tree roots is one of the important factors in the relationship between landslide and forest, the authors tried to compare the uprooting resistance among the main species concerned with their landslide prevention ability, based on the assumption that the soil binding power of a tree is proportional to the resistance of the tree against the uprooting resistance. The outline of the method, results and discussions of experiment are as follows.

(1) Species selection for the experiment

According to the report by Dr. N. KARIZUMI, tree roots are classified basically into the following five types in this country.

Type I : Few long and large pendent roots

Type II : Large oblique roots and short pendent roots

Type III : Fine rope-like long pendent roots

Type IV : Exceptionally developed level roots

Type V : Oblique roots with many forking roots

The authors selected the main species which are distributed widely in Japan and have different morphological root systems as mentioned above. The following species, as representatives of each types except type III were selected.

For type I : *Pinus Thunbergii*, *Castanea crenata* and *Quercus serrata* which are broad-leaved trees,

Type II : *Cryptomeria japonica*,

Type IV : *Larix leptolepis*

Type V : *Fagus crenata* and *Betula platyphylla*

Received October 3, 1980

(1) (2) Forest Influences

(2) Method of the experiment

This experiment mainly consists of measuring the uprooting resistance of trees and stumps. We used portable instruments so that we could move easily on many hillsides and gather many data from the test trees. We used a hand-operated portable winch with a maximum capacity of 2.5 tons for lateral tension and measured tensile stress with a C shaped dynamometer with a maximum capacity of 3.0 tons and minimum scale of 20 kg.

As for the method, a test tree or a test stump on the hillside slope was selected first, next two other trees or stumps as anchor trees were selected on the slope along the maximum gradient line. We installed the dynamometer on an anchor tree and the hand-operated portable winch on the other anchor tree. The dynamometer and the hand-operated portable winch were connected with a wire cable through the snatch block on the test tree. Then the test tree was pulled and uprooted by the wire cable.

In the pulling process, the maximum resisting power against pulling was measured by the dynamometer.

The results were shown in Fig. 1.

The value (P') indicated by the dynamometer is about one half of the resistance power of the test tree. Moreover, as an angle (α) between the slope direction along the maximum gradient line and the cable direction varies according to the position of the test tree and the anchor, we calculated the maximum real resistance power (P) of each test tree by using the following formula; $P = 2 P' \cos \alpha$

(3) Results and discussion

When we discussed the data, we considered the basal diameter in the case of trees, and the basal diameter and the years elapsed after cutting in the case of stumps as the main factors. In the case of stumps regenerated by sprouting we regarded the sum of each basal diameter as the basal diameter of the test stump.

The results were shown in Table 1~6. From these results we were able to find some tendencies as follows.

1) Uprooting resistance power of growing trees.

Uprooting resistance powers varied with the size of the basal diameter in different species and were plotted in Fig. 27 or were represented in Table 8. The relation between the resisting power and the basal diameter has been represented in the following formula;

$$P = aD^b$$

where P : uprooting resisting power

D : basal diameter

a and b : constant

There seems to be not so much difference in the trend of uprooting resistance power among the species which do not regenerate by sprouting until the fiftieth year after planting. And uprooting resistance power is affected more by the diameter which is considered as a degree of growth of trees than by the shape of the roots.

The difference, however, in uprooting resistance among the species tends to become larger when trees grow more than fifty years old and their diameter becomes large (Fig. 28 and 29).

2) Uprooting resistance power of stumps after cutting.

The uprooting resistance power of a stump can be assumed by multiple regression analysis using the data of tree diameter and years elapsed after cutting as parameters. But in this experiment, as sufficient data on variously aged stumps were not obtained, we used the relation

between basal diameter and uprooting resisting power as a part of stump age (Table 9 and Fig. 18~22). From this and from the relation between basal diameter and uprooting resistance power of growing trees (Table 8 and Fig. 27), we calculated the uprooting power which corresponds to the basal diameter of a growing tree at cutting age. Then we assumed the tendency of decreasing resisting power with the lapse of years after cutting. This tendency was applied to the following equation.

$$P = ae^{bY} + c$$

where P ; uprooting resisting power

e ; the base of natural logarithm

Y ; the years elapsed after cutting

a, b ; constants

When trees are cut at the age of 50 years (in the case of *Fagus crenata* BLUME, it is for 100 years), the relation between uprooting resistance power and the number of years elapsed after cutting is represented in Table 10 and Fig. 30.

3) Uprooting resistance power of stumps regenerated by sprouting.

When we measured the uprooting resistance power of stumps regenerated by sprouting, we pulled the stump with both the original root system and newly penetrated one. Basal diameter was determined from the total diameter of the stumps of the sprouted tree. The results are shown in Fig. 24 and Fig. 27.

Though the uprooting resistance power of a sprouting tree is extremely smaller than that of a growing tree, the resistance power of a sprouting tree does not change so much during a regeneration period because the stump of a sprouting tree does not decay easily.

The relation between tree age and resisting power of stumps was presumed from the relation between the basal diameter corresponding to each tree age and the resisting power of the stump (Fig. 25).

The resisting power is estimated to be at a minimum at around the fifth year after cutting, but there is not so much change in the resisting power because the total resisting power is the sum of the resisting power of the tree before cutting and that of the sprouting tree.

4) Soil binding power of a forest stand assumed by resisting power of the tree against uprooting.

On the assumption that the soil binding power of a tree root system is proportional to the resisting power of a tree against uprooting, the soil binding power of a forest stand at a certain year is represented by the sum of the uprooting powers of growing trees and stumps.

Though the density of cut stumps is the same as that of trees at the cutting time, the density of growing trees changes according to their age by silvicultural treatment.

Accordingly, it is not so simple to assume the soil binding power of a stand at a certain age of the forest stand. As the number of cut stumps is that of growing trees at the cutting time (Fig. 33), the tendency of the decreased uprooting power of cut stumps is the same as that in the case of the uprooting resisting power of trees. But in the case of growing trees, as there is a difference in the number of trees at the various treatment stages, the tendency of the decreased uprooting resistance power of a forest stand is different from that shown by a tree (Fig. 30). Considering the change of forest density (Fig. 32), the maximum resisting power against uprooting of standing trees is represented by that of a tree aged around 20 years in any species.

The total resisting power of a stand is represented by the sum value of the resisting

power of stumps multiplied by the number of stumps and that of trees multiplied by the number of growing trees. Among most species, the minimum resisting power of a stand is shown before or after the 5th year and the resisting power has been estimated to be at a maximum between the 15th~25th year after cutting and followed immediate planting.

Judging from the actual frequency of landslides which occurred in the past, we can recognize that the soil binding power is estimated to be at a minimum at a comparatively early period for a stand planted immediately after cutting, but it can not be believed that the soil binding power is estimated to be at a maximum at between the 15th and 25th year and that it then gradually decreases.

Large and long pendent roots, oblique roots and so on, which are useful for preventing landslides, increase linearly after a certain age of more than about 20 years as the timber volume increases. Considering this fact, we shall assume that tree roots for preventing landslide have much to do with timber volume. Though a large and long root system has not developed yet, under the effective influence of small roots in the experiment, there is a tendency that the uprooting resistance power of young stand is over estimated (Fig. 34).

From this point of view, we think it is proper that a stand's resisting power is estimated by the timber volume in the case of a stand and by the years elapsed after cutting in the case of a stump.

Regarding a tree, we pursued the relation between basal diameter and timber volume and then assumed the relation between the timber volume of a stand at a certain year and the uprooting resistance power. On the assumption that the relation derived from a tree is adaptable to a forest stand, the resisting power ratios of each forest aged up to a 50-year old forest stand are shown in Fig. 40 and 41.

Judging from the relation between resisting power and basal diameter, the resisting power in a 5-year old stand has been estimated to be 80 percent of that in a 50-year old stand, which is to say, it is at a minimum and the resisting power will increase rapidly toward that of the a 15-year old stand after cutting and followed immediate planting. But on the assumption from the relation between resisting power and timber volume, the resisting power has been estimated to be at a minimum in a stand around 10 years of age, and this value is 60 percent of that in the 50-year old stand.

As the stand ages, the resisting power tends to increase gradually.

This tendency is similar to that of the actual occurrence of landslides. Consequently, we believe it is adequate that the resisting of a forest stand for landslides is estimated by the change in timber volume in a forest stand.

(4) Influence of the tree root system on the occurrence of landslides in mountainous areas.

The occurrence of landslides in mountainous areas is caused not only by natural factors such as topography, geology, soil and so on, but also by the forest condition owing to forest treatment.

On the relation between the occurrence of landslide and forest type, it has been statistically proved that the ratio of landslide area is higher in the young stands than in the middle aged forests.

Making networks of many big and small roots in the surface soil with the addition of timber volume, the tree root system prevents the occurrence of cracks on the mountain slope and the rapid infiltration of rainfall into the soil layer. As a result, the tree root system has the effect of indirectly preventing the occurrence of the enlargement of landslides. At the

same time, since the main root of a tree grows to about two or three meters in depth and reinforces the shearing strength at the landslide section, the tree root system has the good effect of preventing the occurrence of landslides.

In this investigation, we assumed at first that soil binding power was proportional to the total diameter of trees in a stand. However, as to the landslide triggered at the point deeper than a few ten centimeters, the tree roots necessary to prevent landslides must be large and long. It is evident that tree root size has a great relation to timber volume. Accordingly it will be proper that we assume soil binding power of a stand by the sum value of uprooting power of stumps decreased rapidly after cutting and the power of growing trees increased after planting which is estimated by timber volume.

Judging from the uprooting resistance power of a tree, we can understand that the forest function for the prevention of landslides will not a little be affected by the change of the tree root system with regeneration. We cannot help cutting many trees in the forestry. But we need to treat forests considering the change of soil binding power in a stand as shown in Fig. 41. We must especially treat forest stands carefully in such areas which may indicate a high danger of landslides by reason of geology, topography and so on.

Therefore, we had better avoid wide clearcutting as the soil binding power becomes a minimum at a certain period. Moreover, we must maintain the stand with a rich timber volume if we are able to assume that the area is subject to landslides.