

多摩川最上流域における斜面崩壊の発生機構

2001年

林 誠

(財)経済調査会

多摩川最上流域における斜面崩壊の発生機構

2000年度 とうきゅう環境浄化財団研究助成 成果報告書

研究の概要

本書は、とうきゅう環境浄化財団より研究助成を受けて実施した課題「多摩川最上流域における斜面崩壊の発生機構」（課題番号2000-11）の報告書である。研究助成を受けたのは2000年度（平成12年度）単年で、本研究は研究代表者の 林 誠 が2001年1月に東京都立大学大学院理学研究科へ提出した修士学位論文の一部として実施した。

本研究で実施した作業と結果の概略は次の通りである。本研究では地形と森林の関係に着目して斜面崩壊の発生機構について検討した。対象地域は、多摩川最上流域に位置し、花崗岩から構成される柳沢川および高橋川の流域とした。1959年から1996年までに対象地域内では571件の表層崩壊が発生しており、その分布は、森林の条件による偏りが明瞭であった。とくに20年生以下の人工林地で崩壊が多発しており、林齢が増すほど崩壊件数が減少する傾向がみとめられた。本地域における斜面崩壊の発生は、森林による影響が極めて大きいと考えられる。

(1) 研究組織

研究代表者：林 誠 東京都立大学大学院理学研究科 地理科学専攻 修士課程
財団法人 経済調査会（2001年4月1日～現在）

(2) 研究発表（いずれも学会発表）

林 誠（2000）：多摩川最上流域における斜面崩壊の特性。東北地理学会2000年度秋季大会。新潟大学。季刊地理学53, 53-54.

林 誠（2001）：多摩川最上流域の水源林における表層崩壊の分布特性。日本地理学会2001年度春季大会。敬愛大学。日本地理学会発表要旨集59, 89.

林 誠・山田周二・堀 信行（2001）：多摩川最上流域における表層崩壊の発生頻度と森林の関係。日本地形学連合2001年度春季大会。京都大学。地形22, 410.

要 旨

本研究の目的は、多摩川最上流域の東京都水道水源林地において、森林のタイプ（様々な林齢のカラマツ一斉林からなる人工林と天然林の違い）が表層崩壊の発生に与える影響を検討し、森林管理の側面から表層崩壊の発生機構を議論することにある。

1959年から1996年までに8回撮影された空中写真の判読と縮尺1/5,000地形図、東京都水道局作成の森林現況表を通して、森林タイプごとの空間的な崩壊発生頻度と表層崩壊が発生した場所の地形条件を特定した。表層崩壊が発生した場所の地形条件は、地形的滑動力示数と斜面分類により評価した。

本調査地域では1959年から1996年までの間に571件の表層崩壊が発生しており、その分布には森林のタイプによって偏在性がみとめられた。表層崩壊の空間的な発生頻度は20年生以下の人工林地で著しく高く、天然林地における崩壊発生頻度の約5倍である。一方、51年生以上の人工林地における頻度は天然林地の頻度を下回る。人工林地においては、林齢を増すほど崩壊発生頻度が低下するが、森林の生長とともに根系の土層緊縛力が増加するためである。すなわち、表層崩壊の空間的な発生頻度は森林根系の土層緊縛力によって変化するものと考えられ、多摩川最上流域における表層崩壊の発生は、林地の種類および林齢が重要な要因である。

1956年から1971年まで実施された拡大造林政策を反映し、本調査地域の人工林地では皆伐と新植施業が盛んにおこなわれた。その結果、1960年代前半から1980年代半ばまで20年生以下の林地が広い面積を占め、多くの表層崩壊が発生した。本調査地域では1984年に人工林の皆伐施業が終了し、1980年代後半以降、幼齢林が減少している。それに伴って、崩壊発生件数も減少している。2000年代中頃には、本調査地域におけるすべての人工林地が21年生以上になることから、今後、表層崩壊の発生件数は減少するものと考えられる。

目 次

I. はじめに	1
II. 地域の概要	3
III. 方 法	5
1. 調査方法	5
2. データと記載項目	5
3. 表層崩壊が発生した場所の地形評価方法	6
IV. 結 果	8
1. 崩壊地の概要	8
2. 崩壊発生件数と林地別の面積	8
3. 空間的な崩壊発生頻度	9
4. 表層崩壊が発生した場所の地形	10
V. 考 察	13
1. 表層崩壊の発生頻度と森林の関係	13
2. 地形的安定度と森林の関係	13
3. 表層崩壊の発生に対する森林の影響	15
4. 森林管理からみた表層崩壊の発生要因	16
VI. 結 論	18
謝 辞	20
文 献	21
参考資料	22
英文要旨	23
図 表	25

I. はじめに

国土の約7割が山地で占められる日本では、山間部において、斜面表層が崩落する表層崩壊が日常的に発生している。これらの現象は災害に直結することも多いため、土木工事をはじめとした様々な対策が全国各地で講じられている。その一方で、表層崩壊の発生を促進させる森林の伐採が盛んにおこなわれてきた。森林の維持管理様式は林業をとりまく社会構造の変容によって大きく変化する。たとえば、国産材の需要が高かった1960年から1970年頃にかけて、皆伐を中心とした伐採施業がおこなわれ、需要が低下した現在は間伐や択伐による伐採施業が増加している。森林をめぐる環境が変化する中で、表層崩壊の発生機構を論じる際に森林の影響を検討することは、防災的な側面において極めて重要である。本研究の目的は、表層崩壊の発生に対する森林の影響を検証し、森林管理の側面から表層崩壊の発生機構について議論することである。

表層崩壊の発生に対する森林の影響について検討した研究は、砂防工学や地形学、林学など様々な分野から取り組まれてきた。その研究方法は、崩壊の発生と森林の力学的な関係に着目し、実験を通して両者の関係を検討する演繹的な方法と、実際に発生した崩壊に着目し、崩壊地の森林や地形的位置などを検討する帰納的な方法に大別できる。研究の大半は前者の手法により取り組まれ、森林根系による表層崩壊の抑止効果は0~20年生の人工林地において非常に小さいことが明らかとなっている。実験を通して、無林地より有林地の方が斜面の安定度が高く (Crozier and Vaughan, 1990)、立木根系の土層緊縛力は、林齢とともに増加し、伐採根系の土層緊縛力は、伐採後急激に減少することが報告されている (北村・難波, 1981)。さらに、根系の抜根実験をもとにスギ根系を例とした根系の崩壊抑止モデルが提示され、基岩層に亀裂が多い斜面と風化層が厚い斜面では、根系が崩壊の抑止に対して重要な役割を果たしていることが示された (阿部, 1997)。しかしこれらの研究は実験によるモデルの構築を主眼としているため、複数の崩壊を研究の対象とすることが少ない。したがって、森林の差異によって、崩壊の発生頻度がどのように変化するか、検討する余地が残されている。

後者の手法により取り組まれた研究は、実際に発生した多くの崩壊を対象としており、0~20年生の人工林地で崩壊が多発することが示されている。研究の多くは崩壊発生要因を検討する際に森林を要因の一つとして位置づけ、その影響についての議論を研究の主たる目的としている。たとえば、北九州市門司小倉地区では、広葉樹林地よりも針葉樹林地に崩壊が多く、とくに幼齢林と草本地帯に崩壊が多発している (竹下, 1971)。神奈川県

西丹沢においては、表層崩壊の分布は斜面における崩壊抵抗力の差に由来し、とくに小起伏の地域では、24年生以下の人工林地に崩壊が多い(柴原, 1992)。これらの研究は、崩壊地の分布と森林の対応関係について着目しており、地形条件と森林の対応や、森林の差異によって生じる崩壊発生頻度の変化を検討するには至っていない。このように、表層崩壊に対する森林の影響について、実際に発生した崩壊に基づき、定量的に評価した研究は少ない。実験を通して得られた表層崩壊の発生に対する森林の影響を実証するためには、実際に発生した崩壊を対象とし、多数の崩壊を比較する必要がある。

本研究では、関東山地の中部に位置する多摩川最上流域の柳沢川および高橋川の流域(第1図)で、花崗岩から構成される東京都水道水源林地(約19km²)を調査地域とし、1959年から1996年までに発生した表層崩壊を研究の対象とする。表層崩壊の発生に対して森林のタイプ(天然林と人工林の差、人工林については林齢による違い)が与える影響について考察する。具体的には、林野庁撮影、縮尺約1/20,000および1/16,000空中写真の判読によって1959年から1996年までに発生した表層崩壊の分布を示し、さらに、東京都水道局作成の森林現況表を用いて、人工林地と天然林地の分布、人工林地については林齢の分布を示す。表層崩壊と森林の関係を検討し、表層崩壊の発生機構を考察する。そのうえで、水道水源林地の林分構成を規定する水源林管理計画と崩壊発生との関係を議論する。

調査地域として多摩川最上流域の柳沢川と高橋川の流域を選定したのは、主に次の4つの理由に基づく。①調査地域内では表層崩壊が多発している。本研究の目的は表層崩壊の発生に対する森林の影響を検討することである。そのためには多数の崩壊を比較し、崩壊地の地形条件や森林の特性を把握する必要がある。②調査地域の全域が花崗岩から構成され、地質条件が均一である。表層崩壊の発生は地質の影響を大きく受けるが、表層崩壊の発生に関わる地質条件の影響を一定にみなすことができる。③表層崩壊と森林の関係を検討するためには、森林のデータを活用することで森林の現況と履歴を復元できる地域を選定する必要がある。調査地域は東京都の水道水源林に指定されており、東京都水道局作成の資料を通して調査地域内における森林の復元と現況を把握することが可能である。④調査地域の下流に位置する小河内貯水池は東京都独自の貯水池で、近年渇水が頻発するなかでその位置づけはますます重要となっている。東京都の水源管理事業により、貯水池が完成した1959年以降1999年までの堆砂率は2.57%と低い値を保っている。小河内貯水池より上流域では崩壊地が多く分布することから、本研究で森林と表層崩壊の関係を考察することにより、堆砂率のさらなる低下が期待される。

II. 調査地域の概要

調査地域の標高は1,122m～1,776mで、50mメッシュ(250m²)あたりの起伏量は平均28.6mである。全域が花崗岩から構成され(小出ほか, 1953)、流域内9地点での弾性波探査により、最も厚いところで、100m近い厚さの風化層も確認されている(日本物理探査株式会社, 1954; 島, 1961)。風化層の上部約1mはマサ土から構成される。本地域には崩壊深1～3mの表層崩壊が多く見られるが、これらの表層崩壊は弾性波速度0.4～1.2km/sの上部風化帯より発生している。なお、崩壊深が3mを超えるような大規模崩壊および地すべり性崩壊、継続して滑動する地すべり地は見られない。調査地域に分布する斜面崩壊は、Machida(1966)の定義するdebris avalancheに該当し、表層崩壊と位置づけられる。本研究で対象としている1959年から1996年の間に、崩壊が多発する誘因となりうるような大規模な地震は発生していない。本研究で対象としている崩壊の多くは、豪雨をはじめとする地震以外の誘因によって発生したものと考えられる。

調査地域の最下流部に位置する東京都水源管理事務所落合出張所(標高1,122m)の気象観測データによると、1915年から1996年までの累年平均年降水量は1714.3mmである。1959年から1996年の間での最多年降水量は2394.2mm(1959年)、最少年降水量は1144.8mm(1984年)で、約1000mmの変動が見られる(第2図)。累年の月平均降水量が最も多いのは9月の265.1mmで、1暦月あたりの最大降水量は1982年8月の754.2mmである。1961年から1991年まで30年間の平均気温は8.5℃である。最暖月は8月で20.3℃、最寒月は1月の-3.1℃である。

本研究の調査地域一帯は萩原山と呼ばれ、調査地域は東京都水道水源林萩原山分区13～29および34～36林班が該当する(第3図)。本調査地域は1912年に東京市の水道水源林に指定され、それ以降東京都水道局の経営計画に則って管理されている。経営計画は水道水源林の状況と社会情勢を踏まえて作成され、約10年ごとに更新される(第1表)。

山林の管理は林班単位でおこなわれている。1つの林班の面積は100ha前後だが、林班をさらに1～10ha程度の小林班に分割し、伐採や植栽などの管理施業を実施する。調査地域における人工林と天然林の面積比は約7:3であり、天然林地から人工林地への林地転換は全体の2%と極めて少ない。人工林地から天然林地への林地転換は存在しない。天然林地は調査地域の南端と北端に偏って分布するが、林道からの距離や森林利用の履歴による制約を受けた結果であり、地形条件の制約を受けたものではない。50mメッシュを用いて人工林地と天然林地の起伏量の頻度分布を比較したが、人工林地の平均が28.7m、天然林

地の平均が26.6mと、類似した傾向を示した(第4)。t検定により両者の有意差を求めると、有意水準0.05を下回り、有意な差はみとめられなかった。人工林は主にカラマツの植林から構成され、一部にはヒノキやマツ類が見られる。1haあたりの植栽本数は700~1000本で、林班に関わらず一定である。一部の複層林を除き、人工林は一斉林であるため林齢が明らかである。天然林はミズナラやブナから構成され、谷沿いではシオジ、標高1,500m以上ではダケカンバが見られる。植生区分では夏緑広葉樹林帯に属す。天然林の林齢は不明だが、東京都水道局の天然林調査によると、1998年現在で林齢100年~250年生の立木が多い。

本調査地域の人工林は1910~1920年代と1960~1970年代に植林された森林が多く、林齢の構成に偏りが見られる。本地域は1912年に水道水源林に指定されたが、それまでの間に焼畑を含む開墾目的の乱伐が日常的におこなわれ、無立木地が広い面積を占めていた(東京都水道局水源林事務所, 1981)。本地域が水道水源林に指定された1912年以降、無立木地への植栽が急速に進められたため、1910~1920年代に植栽された林分が多い。これらの林分は1960~1970年代に伐期に達する。このとき、木材需要の社会的な要請を反映させた拡大造林政策によって、皆伐施業と伐採跡地への植栽が盛んにおこなわれた。調査地域の約1/4が1960年代に伐採および植栽されている(第5図)。1971年に拡大造林政策が終了し、1972年以降の伐採面積は減少している。その後、1976年には森林保全による水源涵養の強化が水源林経営計画に加味され、皆伐施業は漸減傾向を示す。1984年には本調査地域内での皆伐施業が中止となった。皆伐に代わる森林更新の施業として、1986年以降は60~70年生の壮齢林を中心に択伐や除伐による混交林化が進められ、管理条件の悪い人工林地については複層林化が進められている。天然林地は1912年当時、森林に覆われていた地域である。人工林地に転換された約40haを除き、天然林地は伐採がおこなわれていない。

Ⅲ. 方法

1. 調査方法

表層崩壊の発生に対する森林の影響を検討するため、森林のタイプ（人工林、天然林の違いと、人工林は林齢による違い）ごとの空間的な崩壊発生頻度と、森林の違いによって生ずる崩壊が発生する場所の地形条件の差異を調査した。そのうえで水源管理計画と森林の関係、さらには崩壊発生との関係について考察した。

まず、撮影年次の異なる林野庁撮影縮尺約 1/20,000 および 1/16,000 空中写真の判読から、崩壊地の分布図を作成した。分布図の例として、第 6 図に 28 林班の崩壊地分布図、第 2 表に 28 林班の崩壊地一覧表を示す。つぎに、東京都水道局作成の森林現況表より、各空中写真撮影年次における人工林地と天然林地の面積、人工林地については各林齢の占める面積を求め、各林地で発生した崩壊件数で割ることによって、1haあたりの崩壊発生件数を求め、これを空間的な崩壊発生頻度とした。

つぎに、地形的滑動力示数（羽田野，1973）と斜面分類の 2 通りの方法により、森林タイプごとに表層崩壊が発生した場所の地形条件を求めた。まず、個々の崩壊地について地形的滑動力示数を算出し、表層崩壊が発生した場所の地形的な安定度を数値化して表現した。つぎに、本調査地域の全域について、傾斜変換線による斜面分類を実施した。個々の崩壊が発生した斜面部位を特定し、表層崩壊が発生した場所の地形的な安定度を斜面の位置関係に着目して表現した。そして、森林のタイプごとに地形的滑動力示数の頻度分布と斜面部位ごとの崩壊分布を求め、森林の違いによって、崩壊が発生した場所の地形条件に差異が生じるかを検討した。

2. データと記載項目

崩壊地のデータは現地調査および空中写真の判読、地形図作業により収集する。森林のデータは東京都水道局作成の森林現況表に基づく。

本地域に分布する崩壊の規模を把握するため、9ヶ所の崩壊地について、縦断面測量を実施し、崩壊深を計測した。9ヶ所の選定に当たっては、空中写真判読から予測した崩壊深の深浅、崩壊地の規模および斜面上の位置、方位などに多様性を持たせるように考慮した。また、調査地域に分布する崩壊地のうち、145ヶ所は崩壊地からの土砂流出の抑止を目的とした治山工事が実施されている。治山工事は、丸太柵もしくはコンクリートの堰堤設置と、崩壊地の原面に対して、草本の種が付着したネットの貼付を指す。治山工事が施

されている崩壊地は、林道や砂防堰堤に隣接した崩壊地、あるいは、面積が大きい崩壊地に多い。現地調査では、治山工事済みの崩壊地と、工事されていない崩壊地についてそれぞれ調査した。なお、現地調査を実施した9ヶ所のうち、5ヶ所は1959年より前に崩壊し、現在まで植被に覆われることなく残存している崩壊地を選定している。

森林のタイプごとに空間的な崩壊発生頻度を求めるため、林野庁により1959年以降1996年までに合計8回撮影された空中写真（1959.1967.1972.1977年撮影、縮尺約1/20,000 および1982.1987.1992.1996年撮影、縮尺約1/16,000）の判読より、調査地域において1959年以降1996年までに発生した崩壊地の位置と発生時期を特定し、東京都水道局作成の縮尺1/5,000地形図に移写した。確認した崩壊地は、地形図上で傾斜と集水面積を計測した。空中写真は4～8年間隔で撮影されているため、空中写真の判読から崩壊年の特定は困難である。崩壊発生時における林齢を特定するために、空中写真で確認した崩壊は、空中写真の撮影された年に発生したものとみなした。

つぎに、東京都水道局作成の森林現況表から、個々の崩壊が、どのような森林の下で発生したのかを復元した。その際、人工林地と天然林地の区分と、人工林地については崩壊時における林齢を記載した。また、1967年以降1996年までの間で空中写真が撮影された年度における人工林地と天然林地、人工林地については林齢別の面積を求めた。なお、本研究では1998年度および1976年度の森林現況表を用いた。現存する森林現況表は1976年度以降であることから、1976年以前に伐採された森林は、森林現況表を通した復元ができない。それらの森林については、東京都水道局水源管理事務所職員への聞き取りおよび空中写真の判読から復元した。

本調査地域において、研究の対象である1959年以降1996年までの間には表層崩壊が多発する誘因となりうるような大規模な地震は発生していない。したがって、表層崩壊が発生するときの誘因として降雨が考えられる。空中写真の撮影期間が4～8年間隔で、崩壊の発生と誘因となる降雨を対応させることが困難であるため、表層崩壊が多発した時期に着目して降水量との関係を考察した。降水量データは、東京都水道局落合出張所で観測された日雨量データを使用した。

3. 表層崩壊が発生した場所の地形評価方法

地形的滑動力示数と斜面分類の2通りの方法を用いて、表層崩壊が発生した場所の地形条件を評価した。地形的滑動力示数 F は、斜面崩壊を力学的に解釈するとき用いる安定解析式（たとえばSelby, 1993, pp.268-275）をもとに斜面の安定度を数値化した示数で、

次式により求める（羽田野，1973）。

$$F = \tan \theta \times a^{1/3}$$

ただし、 θ は崩壊源の傾斜、 a は崩壊源下端部の単位幅あたりの集水域平均奥行きで、 a は A/W である。 A は集水面積、 W は崩壊源下端部の幅である。空中写真の判読から崩壊地の下端部を特定するのは困難であるため、本研究では崩壊地中心部の幅を W として用いた。斜面が不安定なほど地形的滑動力示数の値は大きくなり、斜面が安定しているほど地形的滑動力示数の値は小さくなる。個々の崩壊地について地形的滑動力示数を算出し、個々の崩壊が、どのような森林の条件下で発生したのかを特定し、森林のタイプごとに地形的滑動力示数の頻度分布を求めた。

斜面分類は斜面の位置関係に着目し、斜面の安定度を定性的に評価する。本地域の山地斜面には1～2本の凸型の傾斜変換線がみとめられる。植被が少なく、容易に地形判読が可能である林野庁1992年撮影、縮尺約1/16,000空中写真の判読より傾斜変換線を認定し、調査地域内の斜面全域を分類した。本調査地域に分布する2本の傾斜変換線を、低位傾斜変換線および高位傾斜変換線とし、低位傾斜変換線以下の斜面、低位傾斜変換線より上で高位傾斜変換線以下の斜面、高位傾斜変換線より上の斜面の3つに分類した。これらの斜面部位を谷壁斜面、山腹斜面、山頂斜面とする。低位の傾斜変換線は連続性が良いが、高位の傾斜変換線は連続性に欠く。傾斜変換線が1本みとめられる斜面は、谷壁斜面と山頂斜面に分類した。谷壁斜面の下部には土石流堆積面や谷底、水路などが続くが、これらの地形面では表層崩壊が発生していないため、本研究では分類の対象としない。本地域に分布するすべての表層崩壊について、崩壊源が3つの斜面部位のうちどこに発生しているかを特定した。崩壊発生時における森林タイプに分類し、各斜面部位における崩壊発生件数を求めた。

IV. 結果

1. 崩壊地の概要

本調査地域に分布する崩壊の特性を把握するため、9ヶ所の崩壊地で縦断面測量による崩壊深の計測を実施した（第7-1, 7-2, 7-3図）。9ヶ所の崩壊深は平面的な規模（9ヶ所での最小125㎡、最大2392㎡）に関係なく崩壊深が1～3mである。いずれの崩壊地も、滑落崖の比高は約1m、側壁の比高は1～2mで、地表から50cm～1m以深に位置する弾性波速度0.4～1.2km/sの上部風化帯において発生していることから、本地域に分布する崩壊は表層崩壊と位置づけられる。表層崩壊によってマサ土および上部風化岩が崩落するため、滑落崖の直下には風化した花崗岩が露出し、崩壊地の下部にはマサ土が堆積する。崩壊跡地へは、崩壊地の下部からササやミズナラなどの植生が侵入し、概ね崩壊発生から10～25年で原面は植生に覆われる。植生に覆われた後、再び崩壊した崩壊地は合計17ヶ所である。また、空中写真上で全崩壊地の面積を計測したが、571ヶ所の平均面積は511㎡である。面積が最も小さい崩壊は24㎡、最も大きい崩壊は6144㎡で、崩壊地の約75%にあたる434ヶ所は600㎡未満である。

2. 崩壊発生件数と林地別の面積

1959年から1996年の間に発生した崩壊件数は571件であり、崩壊発生件数は時期によって変化する（第8図）。571件の内訳は、人工林地で発生した崩壊が501件、天然林地で発生した崩壊が70件で、大半が人工林地で発生している。また、全体の約7割にあたる395件が0～10年生および11～20年生の人工林地で発生している。崩壊発生件数を時期別にみると、1959年～1967年に171件、1977年～1982年に275件と多発している。1982年以降、崩壊発生件数は急減し、1982年から1996年までの間に発生した表層崩壊はわずか23件である。

本調査地域における森林の構成は、人工林地が全体の73%、天然林地が全体の27%である。人工林地は時期によって林齢の分布に偏りが見られる。たとえば皆伐施業が始められた直後に当たる1967年は、0～10年生の林地が人工林地の約3割を占めるが、1910年代から1920年代にかけて植栽された41年生以上の林地が65%以上を占める。また、1930年頃から1950年代後半にかけて植栽された林分は存在しないため、11～30年生の人工林地は非常に少ない。皆伐施業が進むにつれ、1960年代から1980年代前半にかけて、0～20年生の林地の占める割合が高くなる。1977年には、0～20年生の林地が人工林地の55%を占め、

1910年代から1920年代にかけて植栽された51年生以上の林地が占める割合（42%）を上回る。1970年代後半から皆伐施業が漸減するのに伴い、1980年代後半以降、20年生以下の林地の占める割合が低下する。1996年には、0～20年生の林地は全人工林地の14%である。時期によって人工林の林齢構成が異なるため、森林タイプごとの崩壊件数を比較するには、林齢構成の偏りを補正する必要がある。そこで、1967年～1996年の空中写真の撮影年次における林地面積を林齢ごとに集計して累年の平均を求めた（第9図）。林齢を10年刻みで分類すると、各林齢が占める面積は概ね全体の10～15%だが、31～40年生と41～50年生の林地が占める割合が3%および6%と低い値を示す。

3. 空間的な崩壊発生頻度

森林タイプごとの空間的な崩壊発生頻度は、天然林地より人工林地の方が高い頻度を示す。人工林地について林齢別に見ると、0～20年生の幼齢林で著しく高く、林齢が増加するにしたがって頻度が低下する。51年生以上の壮齢林だと、天然林の頻度を下回る。

1haあたりの崩壊発生件数は、1959年から1996年までに発生した全崩壊の累年平均で0.042件である。森林のタイプごとに比較すると、人工林地で0.051件、天然林地で0.019件、人工林地の崩壊発生件数は天然林地の約2.5倍である。人工林地では、林齢が低いほど頻度が高く、林齢が増すほど頻度が低い。0～10年生で0.115件、11～20年生で0.101件と高く、51～60年生で0.019件、61年生以上で0.007件と頻度が低い（第10図）。21～30年生が0.01件、31～40年生が0.003件と頻度が著しく低い。21～40年生および51年生以上では天然林地（0.019件）より頻度が低くなる。

時期ごとに人工林地と天然林地の崩壊発生頻度を比べると、人工林地は各時期とも天然林地の頻度を上回る林齢、下回る林齢、時期によって天然林の頻度を上回ったり下回ったりする林齢がある（第11図）。すなわち人工林は、常に天然林より頻度が高い0～20年生、時期によって変動する21～50年生、常に頻度が低い51年生以上の3タイプに分けることができる。これらのタイプごとに崩壊発生頻度を求めた（第12図）。人工林は林齢が低いほど時期による頻度の変動が大きく、林齢を増すほど時期による変動が小さくなる。20年生以下の幼齢林では、崩壊多発期の1959～1967年と1977～1982年に著しく高い頻度を示す。一方、51年生以上の壮齢林では、崩壊多発期においても頻度の急増はみとめられない。天然林は51年生以上の頻度をわずかに上回っている。1959年から1996年までの累年平均でみると、0～20年生は0.108件、21～50年生は0.023件、51年生以上は0.012

件、天然林は0.019件であった。0～20年生の頻度は51年生以上の約9倍、天然林の約6倍となる。

4. 表層崩壊が発生した場所の地形

地形的滑動力示数と斜面分類により、表層崩壊が発生した地形を評価する。まず、地形的滑動力示数を用いて、表層崩壊が発生した地形を数値化して表現する。地形的滑動力示数を算出するため、全571ヶ所の崩壊地について傾斜と集水面積、崩壊地の幅を計測した(第13-1, 13-2, 13-3図)。77%にあたる440ヶ所の崩壊地は傾斜 $25\sim 45^\circ$ 、集水面積は442ヶ所が0.1ha未満、崩壊地の幅は440ヶ所が $5\sim 20$ mである。571ヶ所の平均は傾斜が 35.1° 、集水面積が0.12ha、崩壊地の幅が16.2mである。人工林地での崩壊501ヶ所の平均は、傾斜が 35.1° 、集水面積が0.12ha、崩壊地の幅が16.1mである(第14-1, 14-2, 14-3図)、天然林地での崩壊70ヶ所の平均は傾斜が 35.1° 、集水面積が0.19ha、崩壊地の幅が16.9mである(第17-1, 17-2, 17-3図)。傾斜と崩壊地幅の平均値は人工林と天然林ともほぼ同じ値で、集水面積の平均値は天然林が人工林を0.07ha上回る。崩壊地571ヶ所の地形的滑動力示数の最小値は0.03、最大値は0.44で、平均は0.12である(第16図)。571件の88%にあたる500ヶ所の崩壊地が0.04以上0.18未満で、0.02刻みで頻度分布を求めると、最頻値は0.08以上0.10未満になる。

森林のタイプごとに地形的滑動力示数の頻度分布を求めた(第17-1, 17-2図)。人工林地と天然林地で、表層崩壊が発生した場所の地形条件には差異がみとめられる。人工林地で発生した崩壊の最頻値は0.08以上0.10未満となり、天然林地で発生した崩壊地の最頻値は0.10以上0.12未満となった。天然林地で発生した崩壊の最頻値は、人工林地に比べて1階級高くなる。すなわち、人工林地では相対的に安定した斜面で崩壊が頻発し、天然林地では相対的に不安定な斜面で崩壊が頻発している。

人工林地で発生した崩壊について、林齢ごとに地形的滑動力示数の頻度分布を求めた(第18図)。0～10年生および11～20年生、41～50年生の人工林地では地形的滑動力示数の最頻値が0.08以上0.10未満となり、人工林の最頻値と同じである。21～30年生では最頻値が0.06以上0.08未満、0.08以上0.10未満、0.10以上0.12未満の3階級となる。31～40年生では2件しか崩壊が発生しておらず、他の林齢と比較するのが困難だが、0.06以上0.08未満と0.08以上0.10未満の階級で1件ずつ発生している。51～60年生では最頻値が0.10以上0.12未満となり、天然林の最頻値と同じである。61年生以上では最

頻値が0.12以上0.14未満となり、天然林の最頻値より1階級高くなる。

天然林地に比べて、空間的な崩壊発生頻度が常に高い20年生以下、時期によって変動がみられる21～50年生、常に低い51年生以上に分けて地形的滑動力示数の頻度分布を求めた(第19図)。0～20年生および21～50年生では最頻値が0.08以上0.10未満となり、51年生以上の最頻値は、天然林地と同じ0.10以上0.12未満となる。この結果は、人工林は林齢を増すほど、崩壊が頻発する斜面は安定した斜面から不安定な斜面へと推移し、51年生以上の人工林と天然林では、同程度の安定度を持つ斜面で崩壊が頻発していることを示す。人工林地での崩壊と天然林地での崩壊を比較して、地形的滑動力示数の最頻値が0.02変化したが、この差は、集水面積と崩壊地の幅が同一な場合において傾斜が約5°変化するときを生じる。集水面積が0.03haで崩壊地の幅が16mの場合、傾斜が33°で地形的滑動力示数が0.08になり、傾斜が39°で地形的滑動力示数が0.10、傾斜が44°で地形的滑動力示数が0.12になる。

つぎに、斜面分類を実施する。空中写真の判読により斜面分類をおこない、各斜面部位で発生した崩壊件数を集計した。谷壁斜面では335件、山腹斜面で163件、山頂斜面73件の崩壊が発生している。谷壁斜面の崩壊は、低位の傾斜変換線を起点に発生する溪岸崩壊と谷頭部において発生する崩壊が多い。溪岸崩壊の形状は、斜面の脚部が削られ三角形を示すものと、崩壊の上部から下部まで同じ幅の樋状を示すものが多い。谷頭部での崩壊は、崩壊源が丸みを帯びた杓子の形状を示すことが多い。山腹斜面で発生する崩壊の多くは低位の傾斜変換線の直上を起点に発生し、山頂斜面で発生する崩壊は高位の傾斜変換線の直上を起点とするものが多い。山腹斜面および山頂斜面で発生する表層崩壊の多くは、樋状を示す。第20図に崩壊地の形状を模式的に示す。

各斜面部位で発生した崩壊の傾斜の平均は、谷壁斜面が35.7°、山腹斜面で34.7°、山頂斜面で33.4°で、集水面積の平均は谷壁斜面で0.16ha、山腹斜面で0.09ha、山頂斜面で0.05haである。傾斜、集水面積ともに斜面の上部ほど値が小さくなる。

森林のタイプごとに、各斜面部位で発生している崩壊件数を比較した(第21図)。人工林地での崩壊501件は、谷壁斜面で301件、山腹斜面で142件、山頂斜面で58件ずつそれぞれ発生している。天然林地での崩壊70件は、谷壁斜面で34件、山腹斜面で21件、山頂斜面で15件ずつそれぞれ発生している。両者を比較すると、谷壁斜面：山腹斜面：山頂斜面で発生した崩壊件数は、人工林地で発生した崩壊では60：28：12、天然林地で発生した崩壊では49：30：21である。天然林地で発生した崩壊は、人工林地で発生した崩壊

に比べて斜面上部で頻発している。

人工林地で発生した崩壊について、林齢別に各斜面部位で発生した件数を集計した（第22図）。林齢ごとに大きな差異はみとめられない。31～40年生の人工林地では2件しか崩壊が発生しておらず、いずれも山腹で発生しているため、他の林齢と比較することはできない。各斜面部位で発生した崩壊件数を比率で示すと、0～30年生および41～60年生の林齢は、谷壁斜面で55～63%、山腹斜面で21～31%、山頂斜面で9～21%である。61年生以上では、谷壁斜面で77%、山腹斜面で15%、山頂斜面で8%となる。いずれの林齢も谷壁斜面において崩壊が多発し、斜面上方ほど減少する。

V. 考察

1. 表層崩壊の発生頻度と森林の関係

崩壊発生件数は時期によって大きく異なった。1959～1967年に171件、1977～1982年に275件と多発している。これは1961年6月28日に308.0mm、1982年8月1日および2日にそれぞれ342.5mm、122.0mmの降雨があったためと考えられる。表層崩壊が多発する誘因として、総雨量300mmが一つの目安である（難波ほか、1961）。本調査地域においても日雨量300mm以上の降雨が崩壊多発の誘因として考えられる。両時期に発生した崩壊は、その大半が0～20年生の人工林地で発生している。前者は171件のうち100件、後者は275件のうち242件を占めている。一方、天然林地で1959年から1967年の間に発生した崩壊は18件、1977年から1982年の間に発生したのは14件である。両時期とも他の時期に比べて多発しているが、0～20年生の人工林地のように、崩壊発生件数の顕著な増加はみとめられない。同様に51年生以上の人工林についても、時期によって崩壊発生件数が顕著に変化することはみとめられない。林齢が若いほど、崩壊発生件数は誘因の強度に比例するものと考えられる。

森林の違いによって生ずる崩壊件数の違いを比較するため、空間的な崩壊発生頻度を求めた。崩壊発生頻度の累年平均値を比べると、天然林地より人工林地の方が高く、人工林は林齢を増すほどに頻度が低下する傾向にある。21～40年生の頻度は著しく低いが、これらの林齢が多く分布した時期に崩壊が多発するような誘因がみられなかったためと考えられる。各時期における人工林地の崩壊発生頻度を林齢ごとにみると、天然林地に比べて高い頻度を示す林齢と低い頻度を示す林齢、時期により頻度が変動する林齢の3タイプ存在する。0～20年生の人工林地は、林地が少なかった場合を除いて天然林地の頻度を上回る。21～50年生の人工林地は、時期によって天然林の頻度を上回ったり下回ったりする。51年生以上の人工林地は天然林地の頻度を下回る。

これらの結果から、表層崩壊の発生は、森林の条件によって規定されることが考えられる。人工林は林齢が低いほど崩壊発生頻度が高く、強い誘因がみとめられたときには崩壊が多発する。逆に、林齢が高いほど崩壊発生頻度が低く、強い誘因がみとめられても崩壊は多発しない。天然林は51年生以上の人工林地における崩壊発生頻度と同程度である。

2. 地形的安定度と森林の関係

森林の違いによって崩壊発生頻度に差が生じたが、その要因を検討するため、地形的滑

動力示数と斜面分類を用いて表層崩壊が発生した場所の地形条件を評価した。571件の表層崩壊のうち、約80%の崩壊が傾斜 25° 以上 45° 未満、集水面積0.1ha未満になる。

まず、地形的滑動力示数を用いて崩壊が発生した場所の地形を評価した。571件の88%にあたる500件が地形的滑動力示数0.04以上0.18未満となる。いずれの森林においても、77~100%の表層崩壊は地形的滑動力示数0.04以上0.18未満の範囲で発生しているが、

その最頻値は森林によって差異がみとめられる。人工林地では林齢を増すほど最頻値が不安定な斜面に推移する。0~50年生の人工林地では0.08以上0.10未満、51年生以上の人工林地と天然林地では0.10以上0.12未満である。天然林地や51年生以上の人工林地では、地形的滑動力示数の最頻値は大きい値をとる。すなわち、地形的な安定度が同一の斜面であっても、森林の条件によって斜面の安定度が変化することを示している。50年生以下の人工林では、地形的に安定した斜面でも崩壊が多発し、逆に51年生以上の人工林と天然林は、安定した斜面での崩壊が減り、不安定な斜面で頻度が高くなる。つまり、林齢が低いほど森林による崩壊抑止効果が弱く、林齢が増すほど森林による崩壊抑止効果が発揮されると考えられる。森林によって生ずる地形的な安定度の差は、50年生以下の人工林と、天然林および51年生以上の人工林の間でみとめられる。崩壊地の幅と集水面積が同じと仮定した場合、前者は後者に比べて傾斜が約 5° 緩い斜面で崩壊が頻発する。このように、森林の条件によって地形的安定度に差異が生じた。20年生以下の人工林地では、安定した斜面でも崩壊が多発するため、崩壊発生頻度は高くなると考えられる。逆に、51年生以上の人工林と天然林では安定した斜面で崩壊件数が減ることから、崩壊発生頻度が低くなると考えられる。

つぎに、斜面分類により崩壊が発生した場所の地形を評価した。表層崩壊が発生した位置に着目し、全571件の崩壊発生件数を斜面部位ごとに比べると、約6割が谷壁斜面、約3が山腹斜面、約1割が山頂斜面で発生している。崩壊は斜面下部ほど多発しているが、田村(1999)は、崩壊による斜面の発達過程を統一的に論じており、斜面下部ほど崩壊による地表の物質移動が大きいことを指摘している。本地域においても、斜面下部ほど崩壊が多発しており、斜面の発達過程と調和的な結果を示す。この傾向は、森林の条件に関わらず同じであった。天然林地で発生した崩壊と人工林地で発生した崩壊で、斜面部位ごとの崩壊件数の比率を比べると、天然林地での崩壊は人工林地での崩壊に比べて、谷壁斜面での比率が低く、山頂斜面での比率が高い。天然林地では安定した斜面で崩壊が頻発しているといえよう。人工林について、崩壊が発生した斜面部位を林齢別に頻度分布を求めた

が、林齢によって大きく変化することはない。森林によって、崩壊が発生する斜面部位が変化する傾向はみとめられなかった。

森林が地形的安定度に与える影響は、地形的滑動力示数で評価したときに変化した。20年生以下のような幼齢林では、安定した斜面でも崩壊が頻発して空間的な崩壊発生頻度が高くなると考えられる。斜面分類で評価したときは大きく変化しなかった。斜面上部ほど安定して崩壊件数が少なく、斜面下部ほど不安定で崩壊が多発する傾向は、森林の影響を受けるものではないと考えられる。各斜面部位が持つ地形的安定度が森林によって受ける影響は薄いといえよう。

3. 表層崩壊の発生に対する森林の影響

森林の違いによって、空間的な崩壊発生頻度と斜面の地形的な安定度が大きく変化した。したがって、表層崩壊の発生には森林が極めて重要な役割を果たしている。とりわけ人工林地では林齢によって崩壊発生頻度と崩壊が発生する場所の地形的な安定度に差異が生じたことから、根系による土層緊縛作用の強弱が大きな影響を及ぼすものと考えられる。

森林のタイプによって崩壊発生頻度が異なったのは、人工林と天然林で根系の伸張方向が異なり、林齢によって根系の生育状況が異なるためと考えられる。本地域の人工林を構成するカラマツは主に水平根が卓越し、天然林を構成するミズナラは斜出根が卓越する(苧住, 1987)。また、本地域の斜面は、表土が薄く、表土と基盤の間に遷移層が介在する。この場合、鉛直根の分布が遷移層の強度を規定する。水平根による崩壊抑止効果は、鉛直根の1/4~1/3程度である(塚本, 1987; 塚本・窪田, 1991)。すなわち、森林による崩壊抑止効果は、根系の状態によって規定されるといえよう。

人工林地において、林齢ごとに崩壊発生頻度が大きく異なったのは、カラマツ根系の生育特性によるものと考えられる。20年生以下の人工林地における崩壊発生頻度は、林地が少なかった場合を除いて天然林地の頻度を上回った。また、地形的に安定した斜面でも崩壊が多発するうえ、強い誘因を受けたときに崩壊が多発した。樹木根系の観察記録をまとめた苧住(1987)は、カラマツの場合、20年生頃までは、水平根の伸張が未熟で支持力も低い、40~50年生頃から水平根の基部から垂下根が分岐し、支持力が増加することを指摘した。20年生以下の人工林地で崩壊発生頻度が高くなったのは、根系による崩壊抑止力が発揮されず、安定した斜面でも崩壊が頻発するためである。さらに、強い誘因がみとめられたときに崩壊発生件数が急増するためと考えられる。一方、51年生以上の人

工林地における崩壊発生頻度は天然林地の頻度を下回った。崩壊は不安定な斜面で頻発し、安定した斜面での崩壊発生件数が減少する。また、誘因の強弱に関わらず、崩壊発生件数に大きな変化はない。これは、垂下根の分岐により崩壊抑止力が発揮されたためと考えられる。北村・難波（1981）は、樹木根系による土層緊縛力は樹木を引き抜くときの抵抗力に比例するものと仮定し、抜根実験によりカラマツの土層緊縛力を推定した。立木の抜根抵抗力は林齢とともに増加し、伐採後の抜根抵抗力は急激に減少することを示した（第23図）。この結果は、本研究の結果に沿うものである。

天然林は主にミズナラから構成される。ミズナラは斜出根と垂下根が卓越し、深根性で垂下根が深部にまで達するため根系の支持力が大きい（菊住，1987）。天然林地における崩壊発生頻度は低く、51年生以上の人工林地における頻度をわずかに上回った。また、誘因の強弱に関わらず崩壊件数に大きな変化はなかった。これは、ミズナラ根系の特性によるものと考えられる。

崩壊発生頻度と崩壊が発生した場所の地形条件の変化は、森林根系による土層緊縛力の推移と調和的であった。崩壊の発生頻度は森林根系の土層緊縛力によって変化するものと考えられる。

4. 森林管理からみた表層崩壊の発生要因

表層崩壊の発生は森林根系による土層緊縛力の大小に規定されるものと考えられる。本地域の水道水源林地は東京都水道局の経営計画に則って管理されている。すなわち、崩壊発生頻度は、水源林経営計画の内容によって大きく変化するものといえよう。

高度経済成長期に木材需要が増加し、政府は1956年から1971年まで拡大造林政策を実施した。水道水源林地においても、1956年から1965年までの第五次経営計画と1966年から1971年までの第六次経営計画の前半5年間は広範囲にわたり皆伐が実施され、15年間で本地域の人工林地1403haの約1/2にあたる673haが皆伐および新植された。その結果、1960年代後半から1980年代後半まで0～20年生の人工林地が拡大し、1977年には人工林地の1/2強にあたる771haが0～20年生で占められた。1977年から1982年にかけて、275件の崩壊が発生したが、そのうち242件は20年生以下の人工林地で発生している。これらの林地で崩壊が多発した原因として、0～20年生の占める面積が広く、さらに1982年8月1日に342.5mm、2日に122.0mmの降雨があったためと考えられる。このとき、0～20年生の幼齢林では森林根系の崩壊抑止効果が発揮せず、地形的に安定した斜面でも崩壊が多発

したことが挙げられる。

1976年から1985年まで施行された第七次経営計画では、林産資源は副次的事項と明文化し、1984年には皆伐施業が中止された。現在、択伐および除伐による森林更新が実施されており、択伐および除伐跡地にはカラマツ以外の樹種を植栽してカラマツ一斉林からなる人工林地の複層林化を進めている。1982年以降の崩壊件数は急減しているが、皆伐施業の中止により崩壊が多発する0～20年生以下の人工林が縮小しているためと考えられる。カラマツ一斉林では、林齢0～20年生の間は根系の発達が未熟で、崩壊抑止効果は発揮されない。現在、本地域では崩壊の発生件数が減少傾向にあるが、人工林の壮齢化が進んでいるためと考えられる。また、2000年代中頃には20年生以下の人工林が消滅する。今後、人工林地の高齢化と複層林化が進行するに伴い、表層崩壊の発生は漸次減少するものと考えられる。人工林の皆伐施業は、崩壊多発の素因を形成する重要な要因である。

VI. 結論

多摩川最上流域において、表層崩壊の発生は斜面上の森林が規定すると考えられる。空間的な崩壊発生頻度は森林のタイプにより大きく変動した。とくに、0～20年生の人工林地は天然林地の約5倍の発生頻度を示し、51年生以上の人工林地は天然林地の発生頻度より低くなる。この結果は、森林根系による土層緊縛力の変化と対応している。根系の土層緊縛力が小さいとき、崩壊発生頻度は誘因の強弱によって変動する。日雨量300mmを超えるような降雨があった場合、0～20年生の人工林地で崩壊が多発している。これは、根系の崩壊抑止効果が弱く、誘因による影響が大きいためと考えられる。一方、根系の土層緊縛力が大きいと、崩壊発生頻度は誘因の強弱によらない。51年生以上の人工林地と天然林地では、日雨量300mmを超えるような降雨があった場合でも崩壊発生件数の急増はみとめられない。地形的滑動力示数から表層崩壊が発生した場所の地形条件を評価すると、森林のタイプによって変化が生じた。0～50年生の人工林地では、相対的に安定した斜面で崩壊が発生しているのに対し、51年生以上の人工林地と天然林地では、相対的に不安定な斜面で崩壊が発生している。幼齢の人工林では、森林根系による土層緊縛力が小さいため、比較的安定した斜面で崩壊が多発していることを示す。斜面分類から表層崩壊が発生した場所の地形条件を評価すると、いずれの森林タイプとも、斜面下部ほど崩壊が多発し、斜面上部ほど崩壊の発生件数が少ない。表層崩壊が発生する斜面部位と森林タイプの関係は薄いといえる。

0～20年生の人工林地のように、根系の土層緊縛力が弱い林地で崩壊発生頻度が高いのは、地形的に安定した斜面で崩壊が多発し、かつ崩壊発生件数は誘因強度に比例するためである。一方、51年生以上の人工林地や天然林地のように、根系の土層緊縛力が強い林地で崩壊発生頻度が低いのは、地形的に安定した斜面での崩壊発生件数が減少し、かつ誘因の強弱に関わらず崩壊発生件数が少ないためである。

1970年代から1980年代にかけて、多摩川最上流域では20年生以下の林地が広範な面積を占め、多くの崩壊が発生した。1970年代から1980年代にかけて20年生以下の林地が広範な面積を占めたのは、1956年から1971年まで実施された拡大造林政策を反映させた水源林経営計画により、伐期に達した林木の多くが皆伐施業により伐採され、その翌年に植栽されたことによる。多摩川最上流域の水道水源林地において、表層崩壊の発生には、森林の管理が極めて大きな影響を及ぼしていると考えられる（第24図）。

本研究では、1959年から1996年までの37年間に発生した571件の表層崩壊を対象とし、

多数の表層崩壊と多様な森林のタイプに基づき、表層崩壊の発生に対する森林の影響を定量的に実証した。これまで、表層崩壊の発生と森林の関係を検討した研究は、木の一本一本に着目して、多様な実験を重ねる力学的な方法により進められることが多かった。これらの研究は、崩壊発生機構の力学的な解明を目的としているため、様々なタイプの森林が混在する斜面において、森林の差異によって生じる崩壊発生頻度の違いについて論じられることが少なかった。そのなかで、本研究では森林の状態によって表層崩壊の発生頻度が大きく変化し、崩壊が発生する場所の地形条件も変化することを示した。この結論は、斜面の地形変化現象に対する森林の役割を示すことで基礎地形学の知見を拡充できたと同時に、斜面防災対策といった応用地形学の課題にも成果を提供できたと考えている。

今後、崩壊斜面と非崩壊斜面の分類、評価方法を開発し、空間的な側面から表層崩壊の発生条件について検討したい。それと同時に、表層崩壊の再現性や免疫性など時間的な崩壊発生頻度と森林の関係について考察を深めることで、表層崩壊の空間的・時間的な発生頻度からみた表層崩壊による斜面の発達過程を検討することができよう。また、自然科学的な側面に着目すると同時に、森林利用など人文的、社会的な現象にも目を向け、多摩川最上流域における人間と自然環境の関係の中に、表層崩壊を位置づけてみたい。本研究では、水道水源林の経営および管理計画を森林管理の指標として用いたため、これらの計画に加味されていない森林管理の経緯については考慮していない。すなわち、具体的な森林管理の方法や森林の利用について検討を重ねる必要がある。多摩川最上流域が水道水源林地として指定される1912年より前から現在にいたるまで、森林利用の背景を様々な角度から検討し、森林利用と表層崩壊との関係をめぐる包括的な議論の展開を課題としたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方に御協力いただきました。東京都水道局水源管理事務所技術課企画調整担当係長の柳内洋一氏には森林現況表や大縮尺地形図をはじめとする水源管理事務所所蔵資料の数々を提供していただきました。また、現地調査の際には、調査地域の水道水源林を管轄する水源管理事務所落合出張所長の小峰尋巳氏をはじめ、落合出張所の皆様に便宜を図っていただきました。

東京都立大学大学院の堀 信行先生には終始御指導いただきました。山田周二先生には地形の調査をはじめ、多方面にわたり御指導いただきました。岡 秀一先生、大山修一先生には環境地理学研究室セミナー等を通して御指導いただきました。現地調査の実施にあたっては、東京都立大学大学院の大塚 弘氏、永迫俊郎氏、永保敏伸氏、山口叔史氏、法政大学大学院の土方智紀氏、北陽建設株式会社の石井正樹氏に御協力いただき、東京都立大学大学院の Aung Kyaw 氏には英文を校閲していただきました。東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻の皆様には示唆に富む御意見、御指摘をいただきました。とうきゅう環境浄化財団から多大なるご支援を賜りました。ここにお名前を挙げた皆様をはじめ、本研究を進める過程では多くの方のお世話になりました。記してお礼申し上げます。

文 献

- 阿部和時 (1997) : 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法の研究. 森林総合研究所 研究報告, 373 : 105-181.
- 小出 博・牛来正史・大森昌衛・黒田吉益 (1954) : 多摩川上流地域地質図.
- 苅住 昇 (1987) : 『新装版 樹木根系概説』. 誠文堂新光社.
- 北村嘉一・難波宣士 (1981) : 抜根実験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能. 林業試験場研究報告, 313 : 175-208.
- 柴原俊昭 (1992) : 丹沢山地西部大滝川流域における山地崩壊特性とその要因について. 季刊地理学, 44 : 145-160.
- 島 宏 (1961) : 花崗岩の風化と地形. 『辻村太郎先生古稀記念論文集』 201-214.
- 竹下敬司 (1971) : 北九州市門司・小倉地区における山地崩壊の予知とその立地解析. 福岡県林業試験場.
- 田村俊和 (1999) : 崩壊発生位置と崩壊履歴からみた斜面発達過程の研究. 田村俊和編 『崩壊発生位置と崩壊履歴からみた斜面発達過程の研究』 平成9年-10年度科学研究費補助金基盤研究(B) 研究成果報告書. 7-86.
- 塚本良則 (1987) : 樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究. 東京農工大学農学部演習林報告, 23 : 65-124.
- 塚本良則・窪田順平 (1991) : 斜面プロセスにおける森林の役割. 地形, 12 : 243-257.
- 東京都水道局水源林事務所 (1981) 『水源林80年のあゆみ』.
- 難波宣士・滝口喜代志・河野良治・岸岡 孝 (1961) : 昭和34年7号台風による山梨水害の山地荒廃とその治山対策. 林業試験場研究報告, 132 : 69-104.
- 日本物理探鉱株式会社 (1954) : 奥多摩水系弾性波式地質調査報告書 (未見).
- 地質断面図の再録; 畦地稔生 (1976) : 多摩川最上流域の押し出し地形. 埼玉県立蓮田高校研究紀要, 1 : 9-33
- 羽田野誠一 (1973) : 地すべり性崩壊と地形条件. 第10回自然災害科学シンポジウム論文集. 再録; 羽田野誠一地形学論集刊行会(1998) 『羽田野誠一地形学論集』 40-41. 古今書院.
- 堀越弘司 (1996) : 『東京の水源林』. けやきブックレット21, けやき出版.
- Crozier, M, J. and Vaughan, E, E (1990) : Relative instability of colluvium-filled bedrock depressions. *Earth surface processes and landforms*, 15 : 329-339.

Machida, H (1966) : Rapid Erosional Development of Mountain Slopes and Valleys Caused by Large Landslides in Japan. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 1 : 55~78.

Selby, M, J (1993) : *Hillslope Materials and Processes, Second edition*. Oxford University Press.

参考資料

東京都水道局水源林事務所作成，縮尺1/5,000地形図（1961年測図）

図幅名『石保戸山』『倉掛山』『柳沢峠』

東京都水道局水源管理事務所作成，林班図

2000年度用 萩原山分区 13林班～29林班，34林班～36林班.

東京都水道局水源林事務所作成，森林現況表.

1976年度用 萩原山分区 13林班～29林班，34林班～36林班. pp. 14-54, 64-71.

東京都水道局水源管理事務所作成，森林現況表.

1998年度用 萩原山分区 13林班～29林班，34林班～36林班. pp. 17-74, 88-98.

東京都水道局作成，小河内貯水池管理年報.

『落合地点降水量』1959年から1996年までの間，毎年度使用.

The mechanism of shallow landslide in the headwater basin of the Tama River

Makoto Hayashi

Abstract

The purpose of this study is to examine the influence of forest type (ordinary artificial forests of *Larix leptolepis* Gord consists of various age and natural forests) and age of the tree on shallow landslide from the case of distribution of shallow landslides at the water resources forest in the upper stream of Tama river. Forest policy was also considered, because it is determinant factor of forest type.

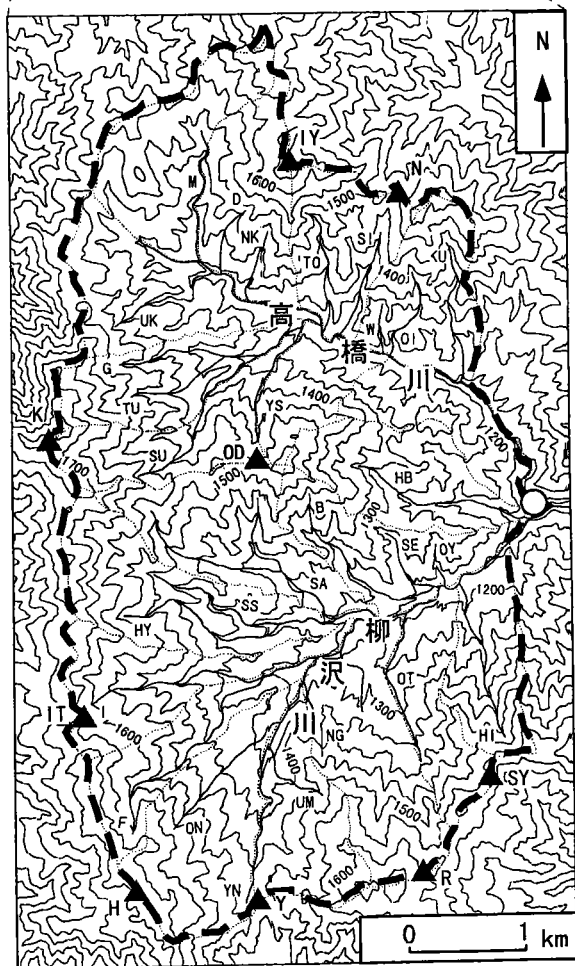
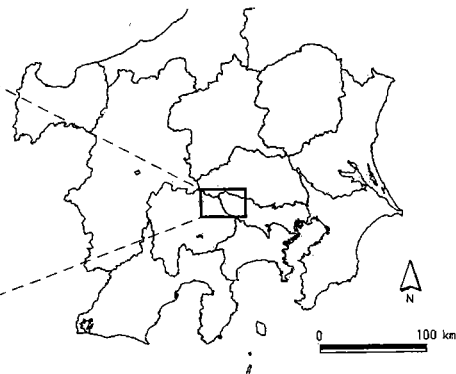
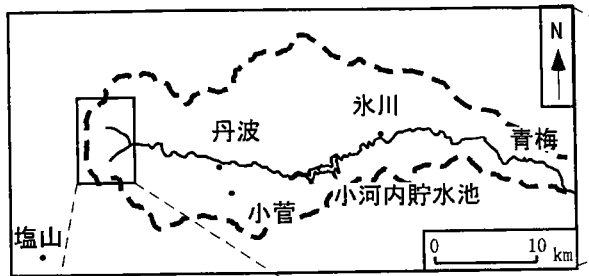
The spatial frequency of shallow landslide, geomorphological conditions, and characteristics of forest cover are examined from aerial photographs taken 8 times between 1959 and 1996, and 1/5,000 topographic map, and the inventory of the water resources forest. Geomorphological conditions were evaluated from topographic index (F) of susceptibility to shallow land sliding, and from landforms classification of each shallow landslides

There were 571 shallow landslide occurred the period from during 1959 to 1996 in the study area. There was only little difference in the geomorphological conditions of shallow landslides between artificial forests area and natural forests area. Consequently, forest type and age are important factors in the occurrence of shallow landslides in the study area.

Spatial frequency of shallow landslides in artificial forests area in which tree age is younger than 20 years old was 5 times higher than natural forests area. However, spatial frequency of shallow landslide in artificial forests area in which tree age is older than 51 years old was less than natural forests area. Therefore, it is seems that the frequency of shallow landslide decreases with forest development. Since soil binding power of tree roots increase with forest development. It is likely that change in frequency of shallow landslide corresponds to that in soil binding power of tree roots.

Japanese government proposed a reforestation plan in 1956 and both wood

extraction and reforestation were taking place in this area. Frequency of shallow landslide will decrease in the future, because wood extraction and reforestation finished in 1984. Artificial forest area in which tree age is younger than 20 years old was dominated from early 1960s to the mid-1980s, and severe shallow landslide occurred. From late 1980s, younger forest area decreased with correspondence to the end of wood extraction. In mid-2000s, all artificial forests are older than 21 years old in the area, and thus occurrence of shallow landslide will further decrease in the future.



凡例

- | | |
|-------------|-------------|
| B・・・馬場沢 | OT・・・大トクサ沢 |
| D・・・ドロクボ | OY・・・御屋敷沢 |
| F・・・藤ノ木沢 | SA・・・サンショウ沢 |
| G・・・ギザエモンクボ | SE・・・雪陰沢 |
| HB・・・ハビロ沢 | S1・・・サス入沢 |
| HI・・・ヒノキオ沢 | SS・・・水晶沢 |
| HY・・・ハヤブサ沢 | SU・・・壘川 |
| I・・・板橋沢 | TO・・・トウハチ沢 |
| M・・・ミズキ沢 | TU・・・ツクリノ沢 |
| NG・・・長尾沢 | UK・・・牛首沢 |
| NK・・・長クボ | UM・・・梅ノ木沢 |
| O1・・・大岩沢 | W・・・ワル沢 |
| ON・・・大ナベ沢 | YN・・・柳沢 |
| | YS・・・ヤスバ沢 |

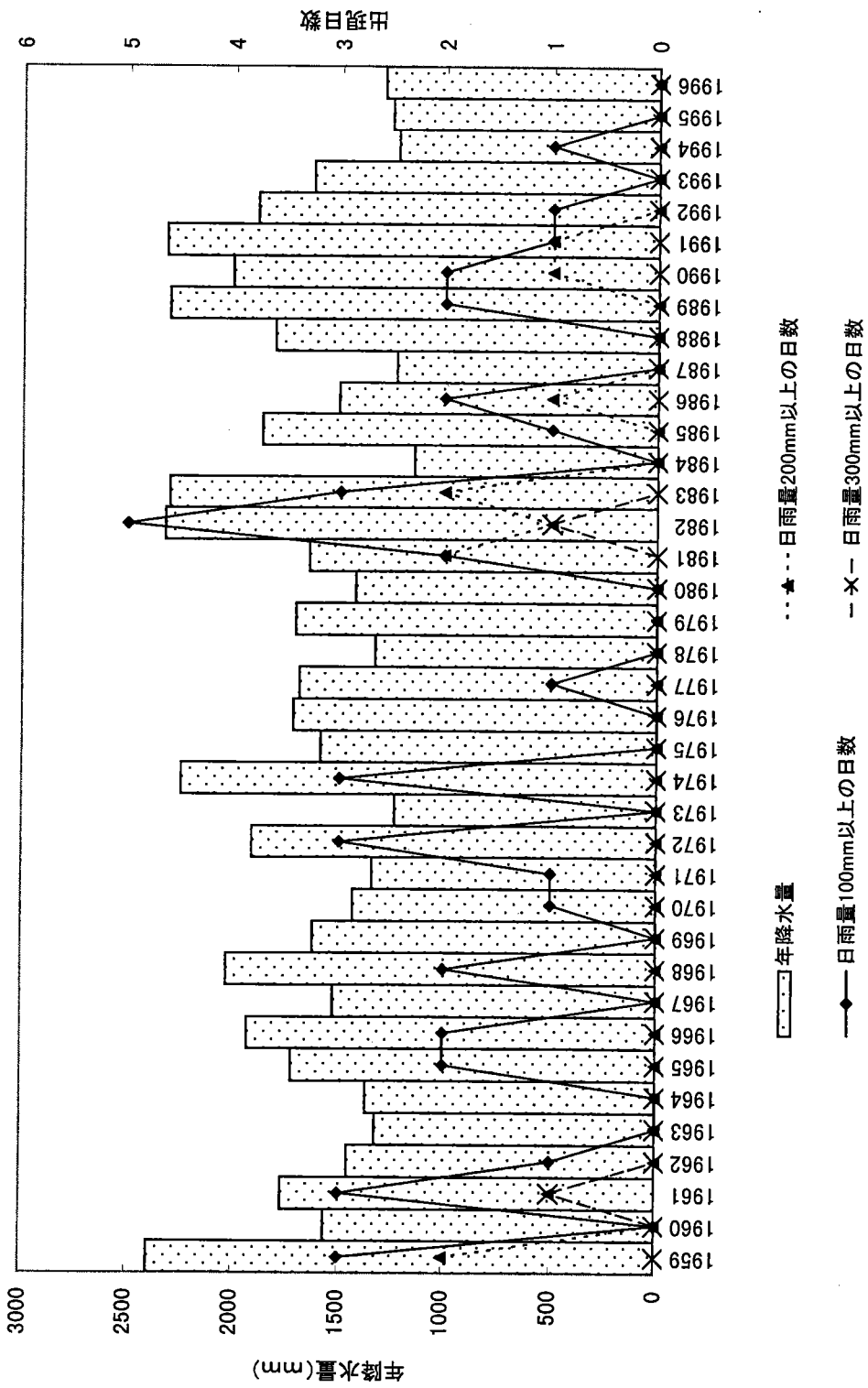
- ▲IT・・・石保戸山 (標高1672m)
- ▲K・・・倉掛山 (標高1776m)

- ▲H・・・ハンセイの頭 (標高1692m)
- ▲IT・・・板橋峠 (標高1596m)
- ▲N・・・ノロカワの頭 (標高1477m)
- ▲OD・・・下の大ダル (標高1507m)
- ▲R・・・六本木峠 (標高1612m)
- ▲SY・・・新横手山峠 (標高1557m)
- ▲Y・・・柳沢峠 (標高1472m)

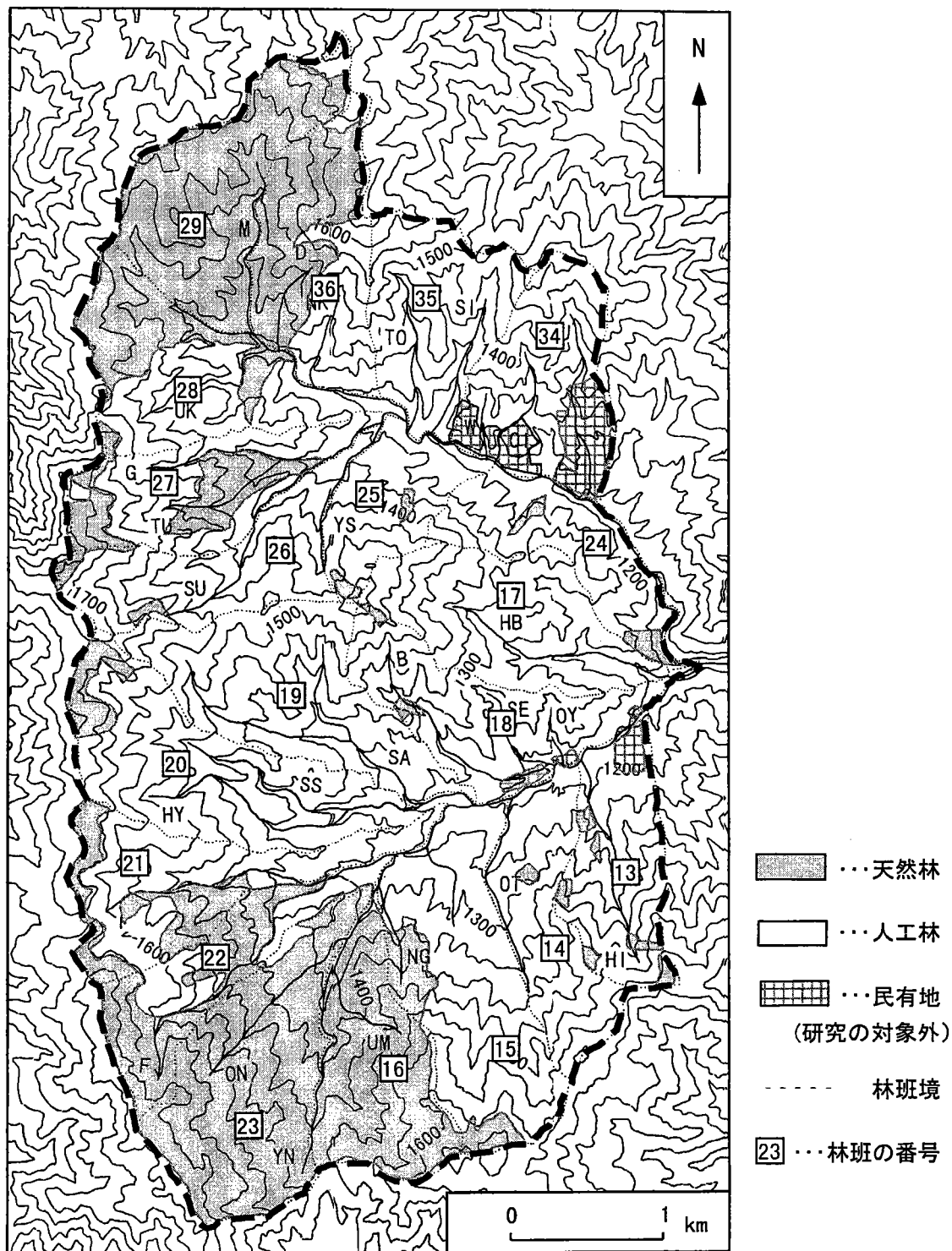
- ・・・東京都水道局水源管理事務所
落合出張所 (標高1122m)

--- 調査地域の境界 - - - - 林班界
調査地域の概観図 (私有地を含む)

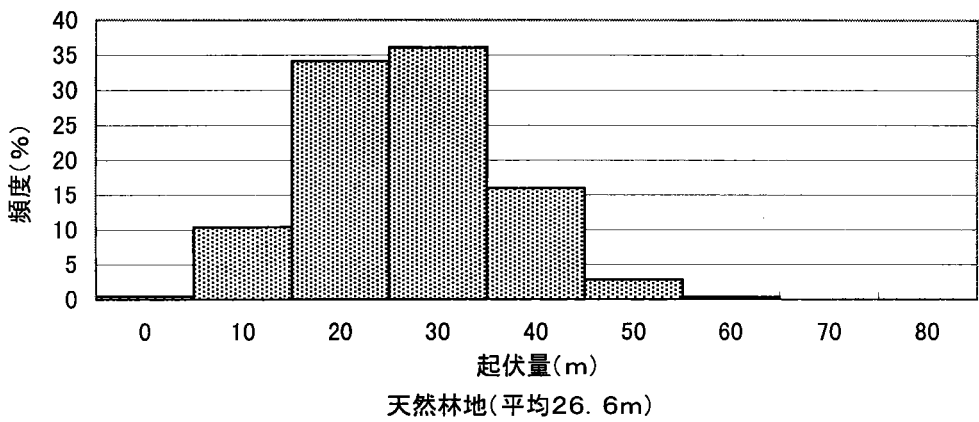
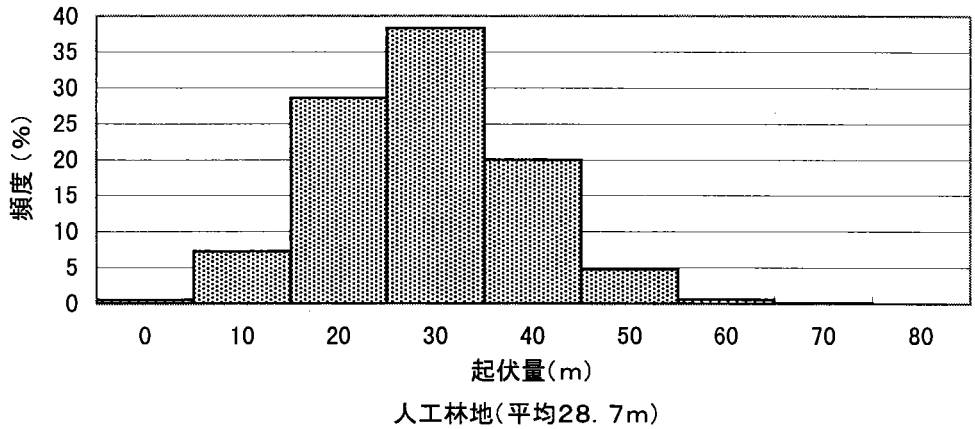
第1図 調査地域の概観図



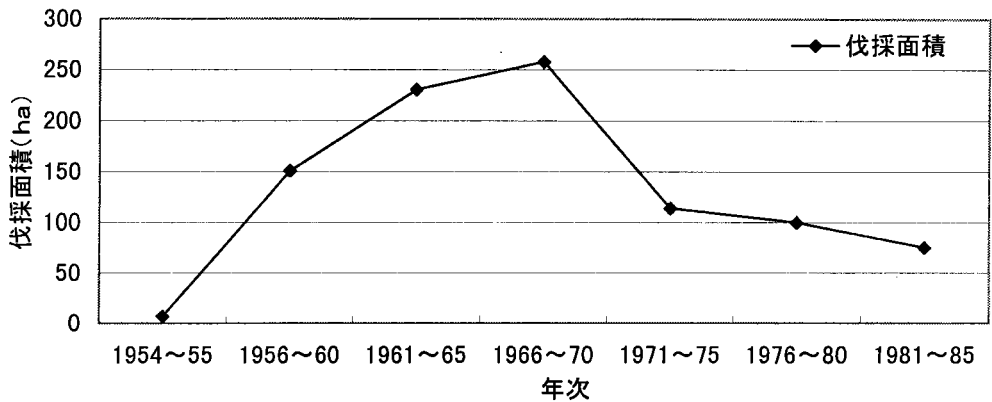
第2図 年降水量の経年変化



第3図 林班と人工林、天然林の分布図



第4図 人工林地と天然林地における起伏量の頻度分布

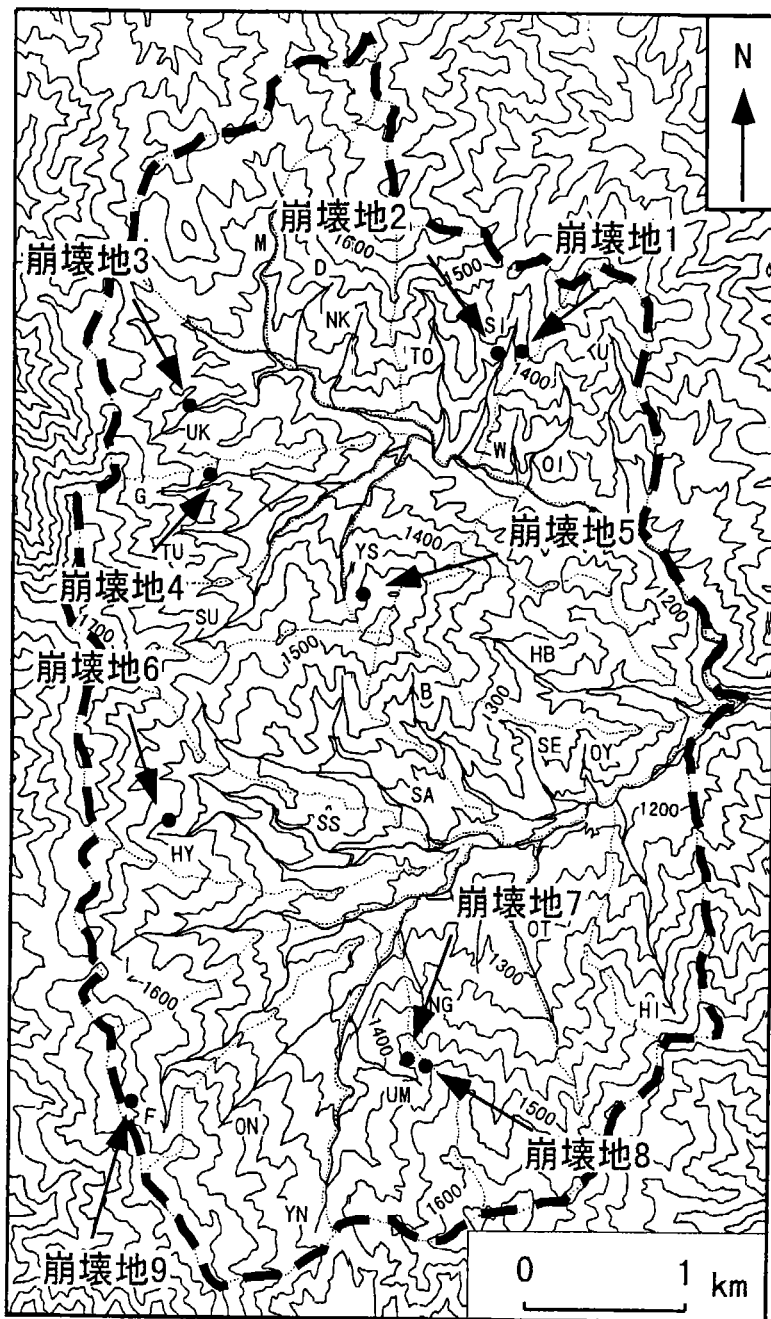


第5図 調査地域における伐採面積の推移
(出典：東京都水道局森林現況表)



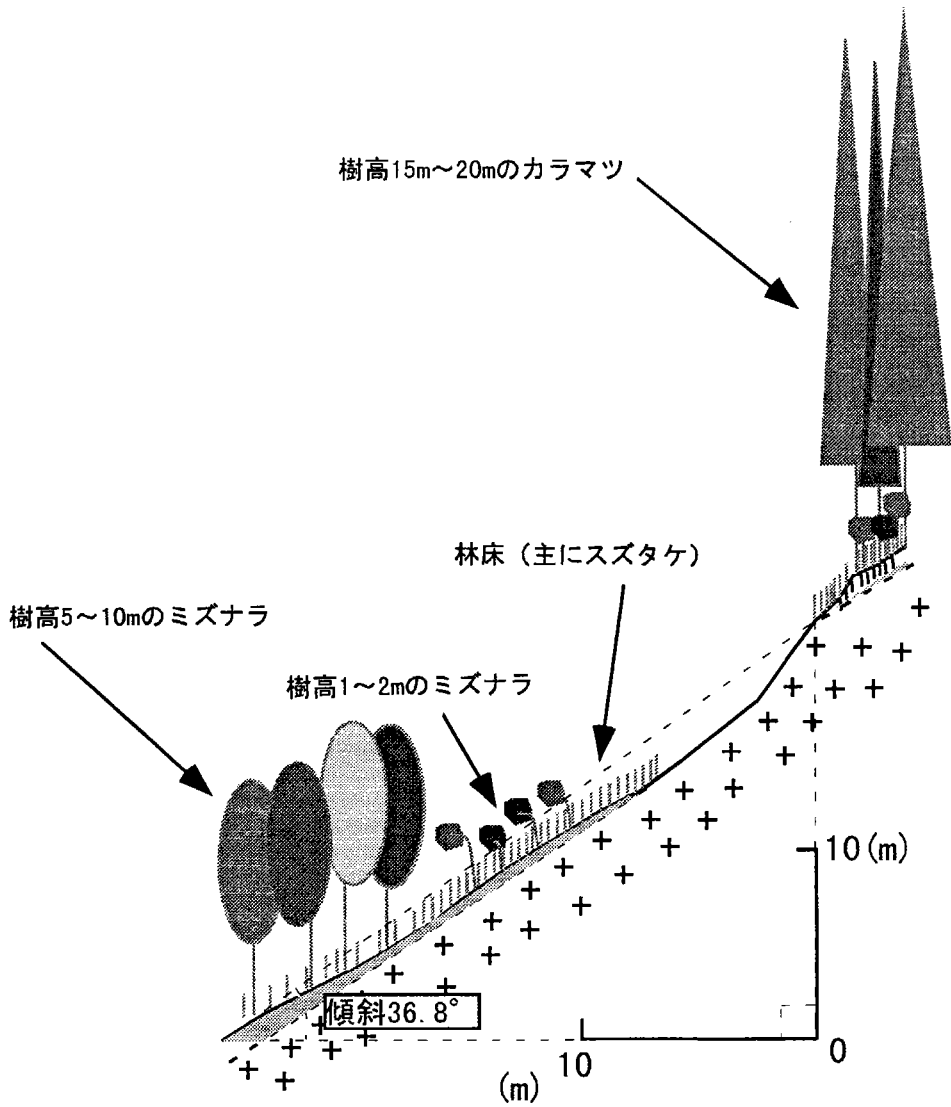
第6図 28林班の崩壊地分布図

(崩壊地の番号は第2表と対応)

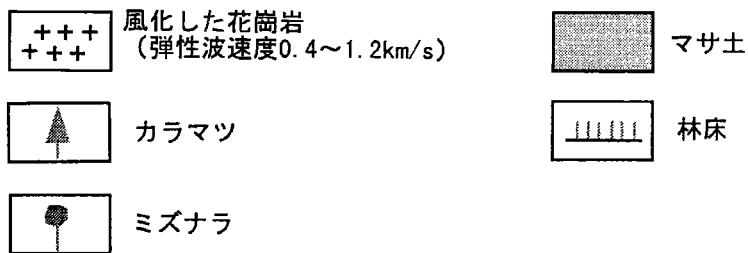


第7-1図 崩壊地の縦断面計測位置図

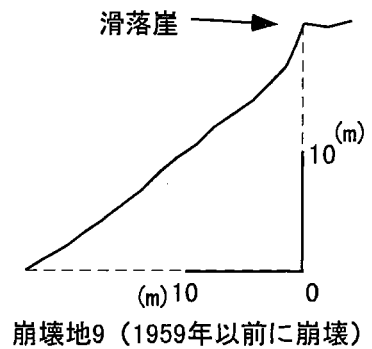
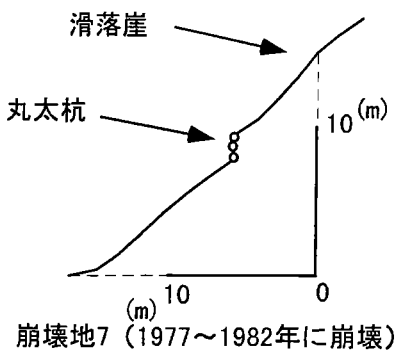
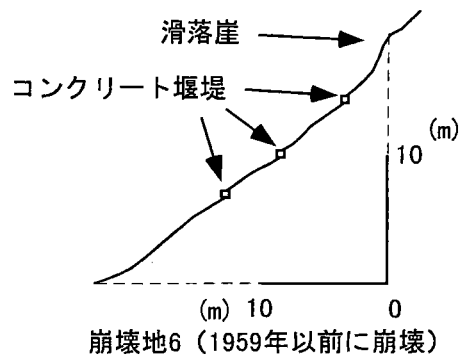
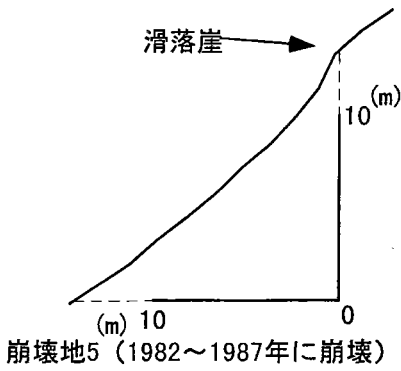
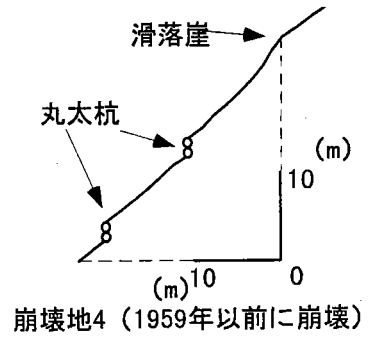
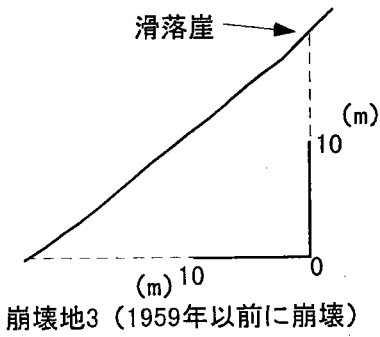
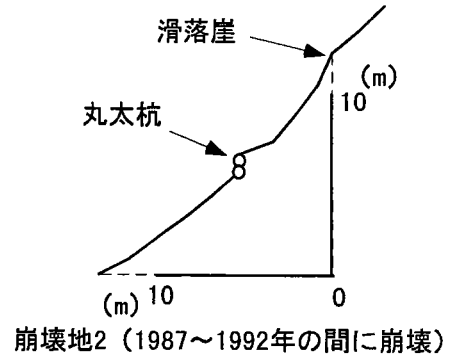
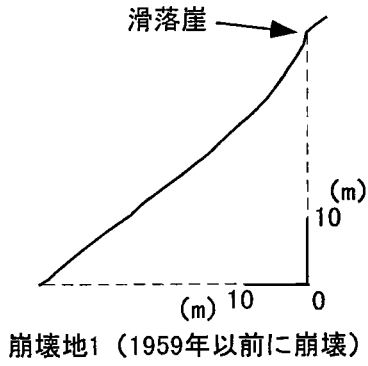
崩壊地1~9は第7-2, 7-3図の縦断面測量地点



崩壊地8 (1977~1982年の間に崩壊) の断面図

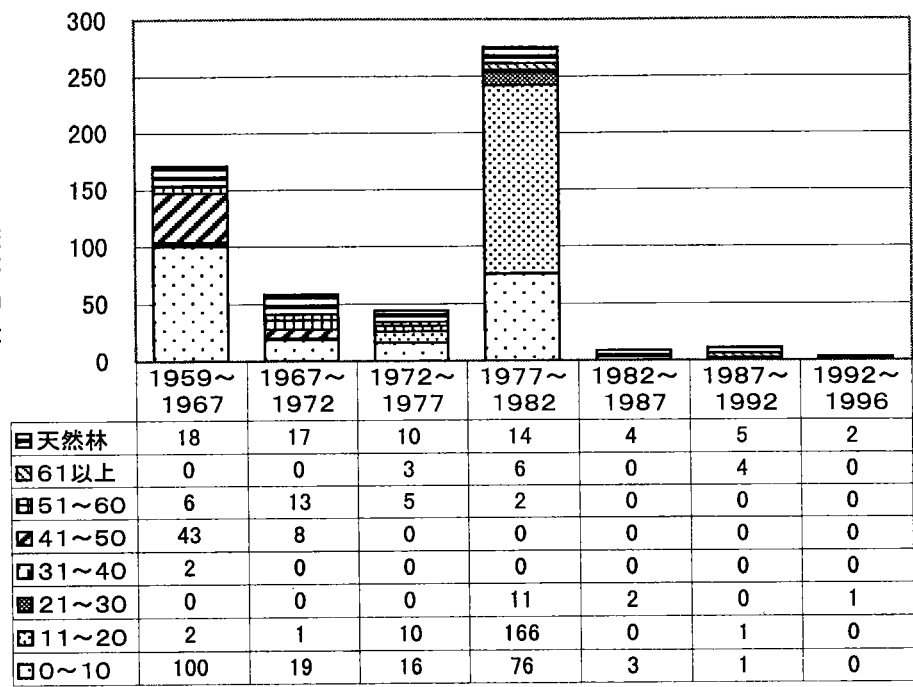


第7-2図 崩壊地の縦断面図



第7-3図 崩壊地の縦断面図

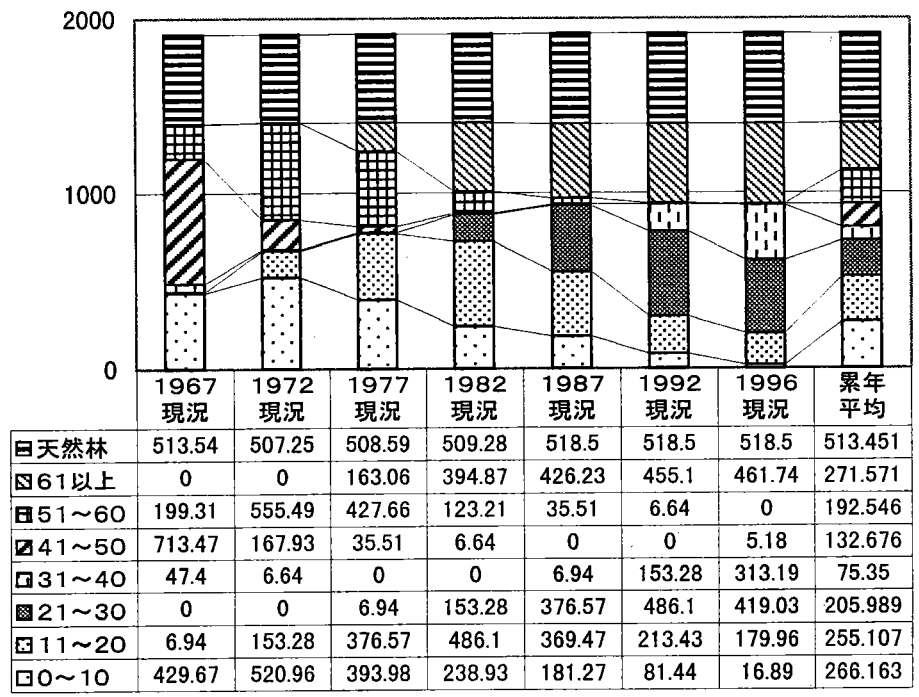
林地・林齢ごとの崩壊件数



人工林の林齢

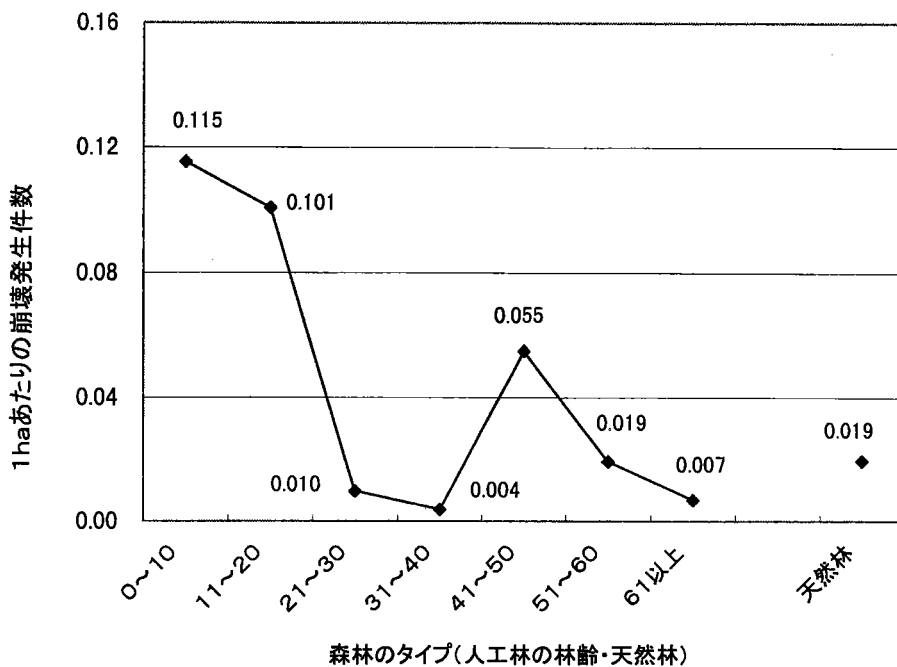
第8図 時期別の崩壊発生件数（森林のタイプごと）

林地の面積(ha)

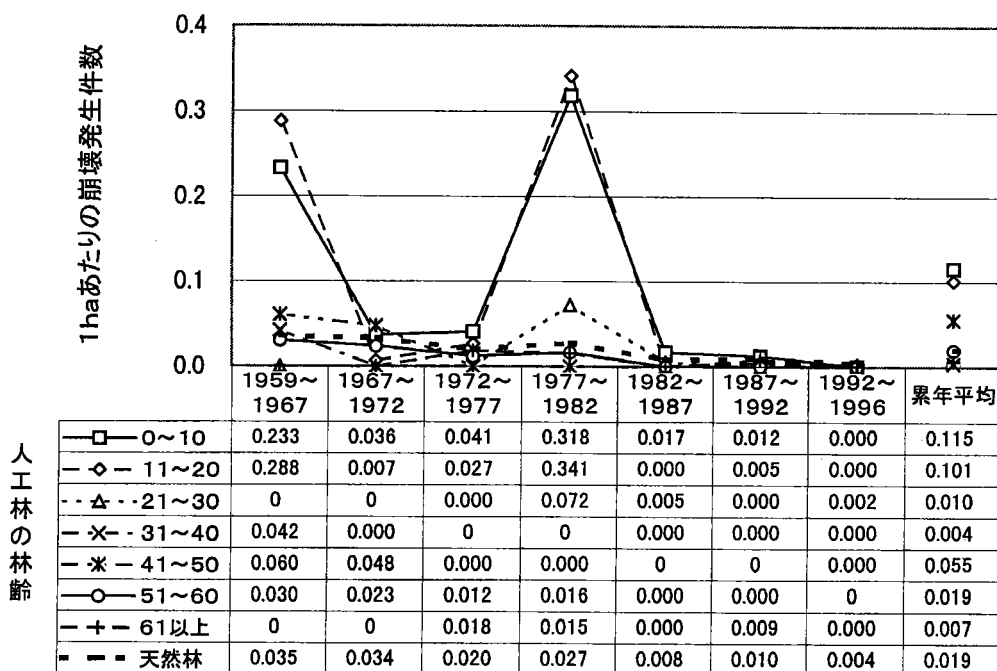


人工林の林齢

第9図 時期別の林地面積一覧

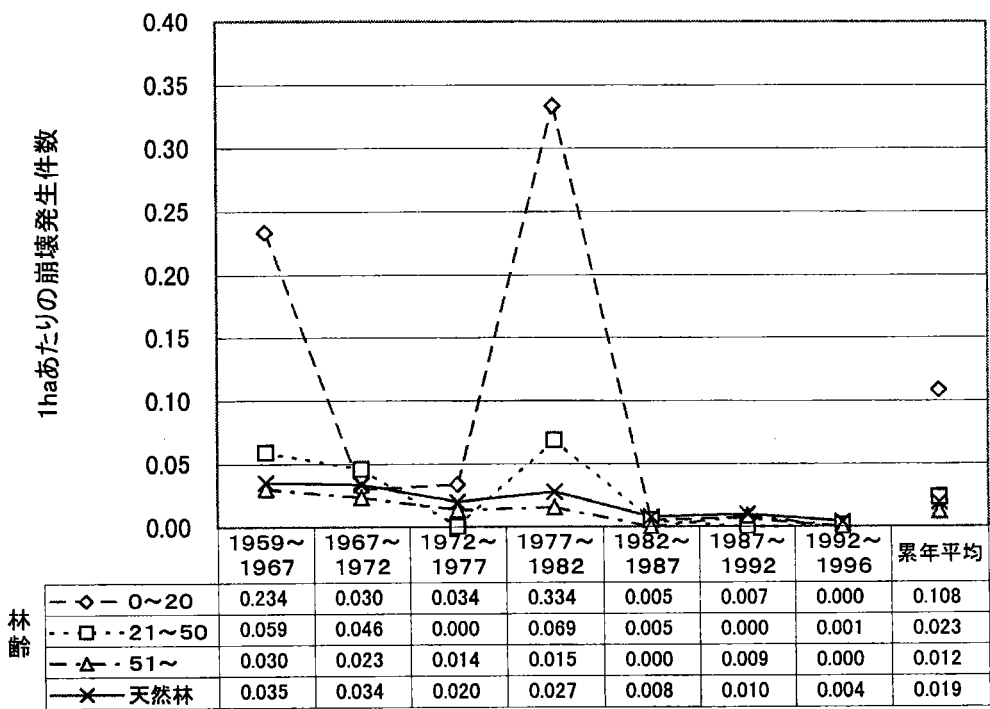


第10図 森林タイプごとの1haあたり崩壊発生件数 (累年平均)

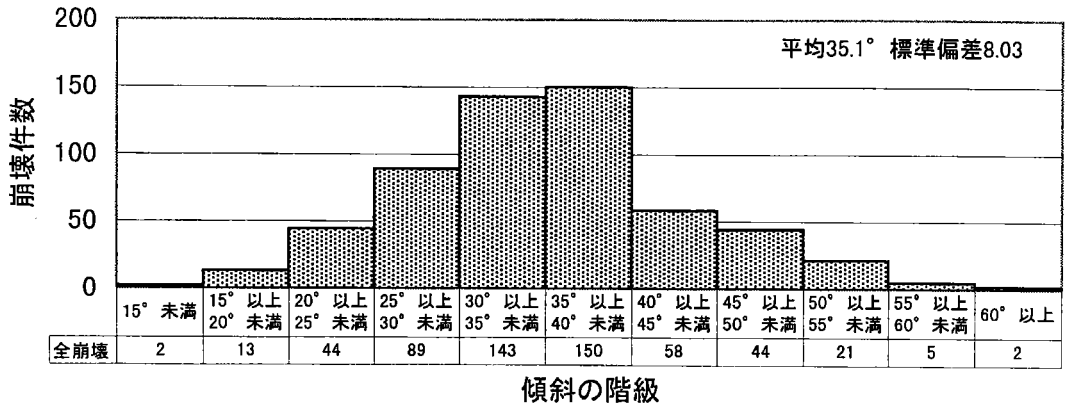


第11図 森林タイプごとの1haあたり崩壊発生件数 (時期別)

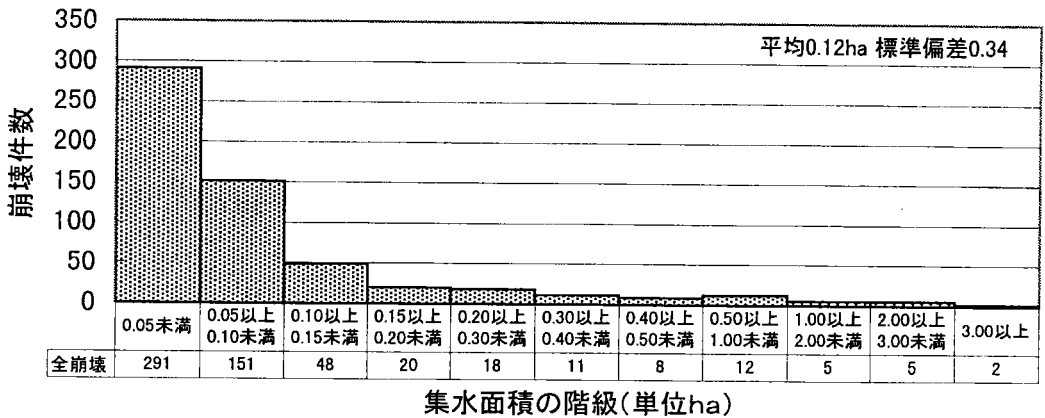
0は該当する林地が存在しない場合を示す



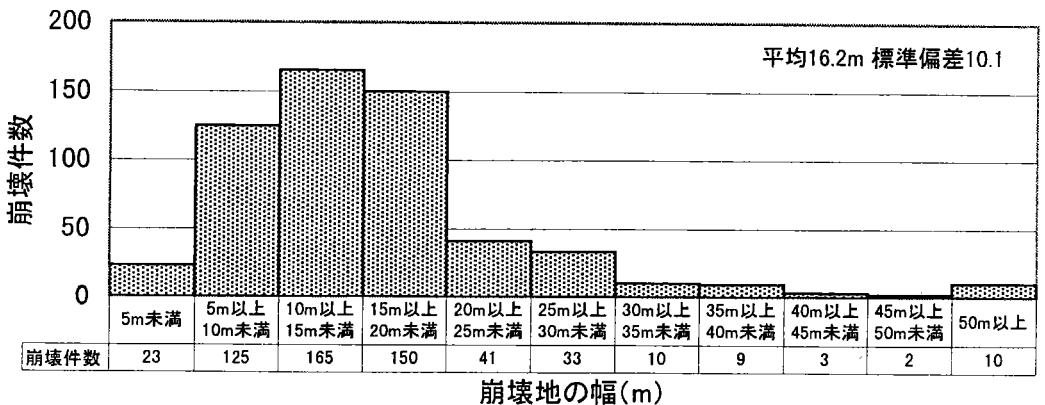
第12図 森林タイプごとの1haあたり崩壊発生件数（時期別）



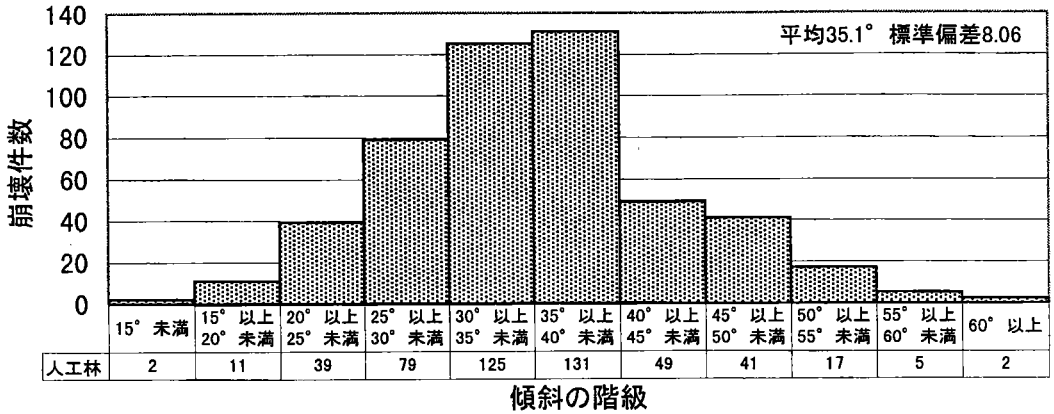
第13-1図 全崩壊（571ヶ所）傾斜の頻度分布



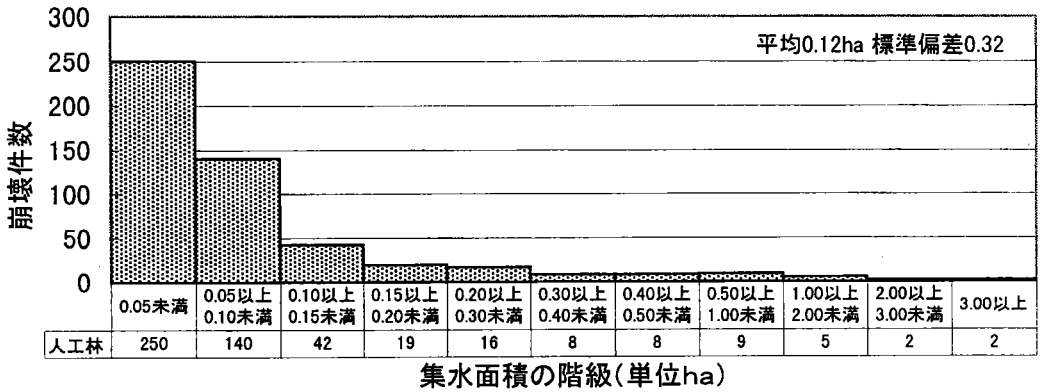
第13-2図 全崩壊（571ヶ所）集水面積の頻度分布



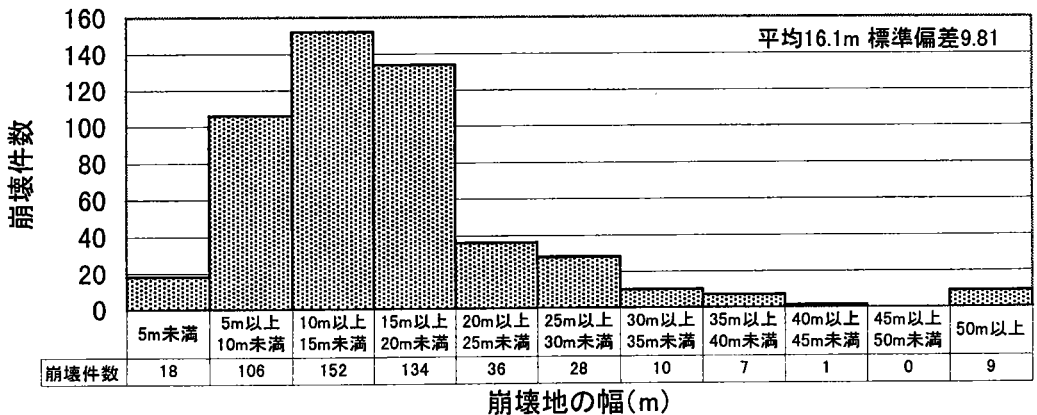
第13-3図 全崩壊（571ヶ所）崩壊地幅の頻度分布



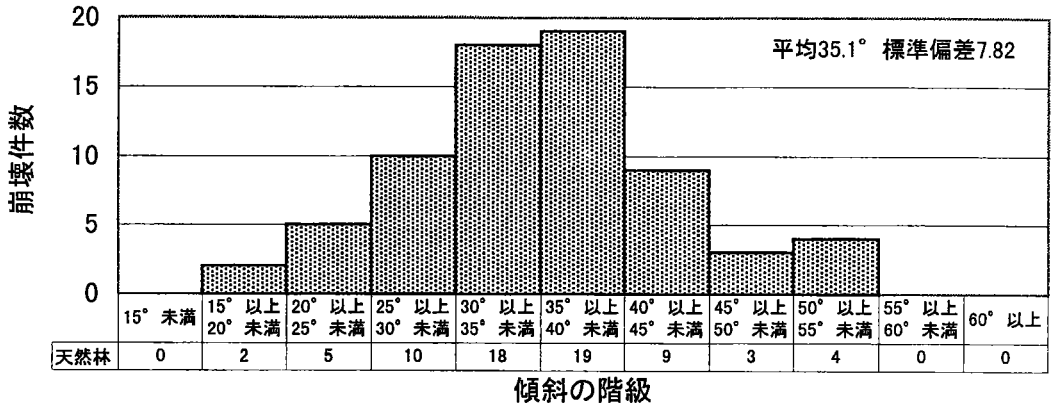
第14-1図 人工林地での崩壊（501ヶ所）傾斜の頻度分布



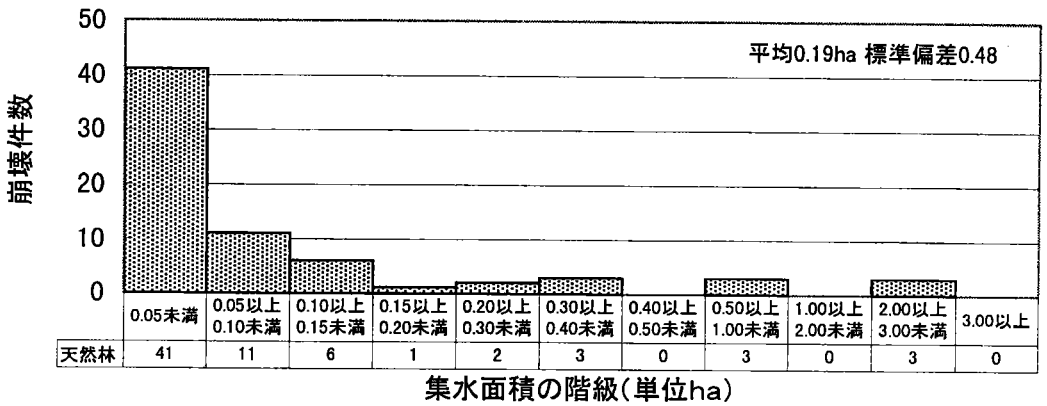
第14-2図 人工林地での崩壊（501ヶ所）集水面積の頻度分布



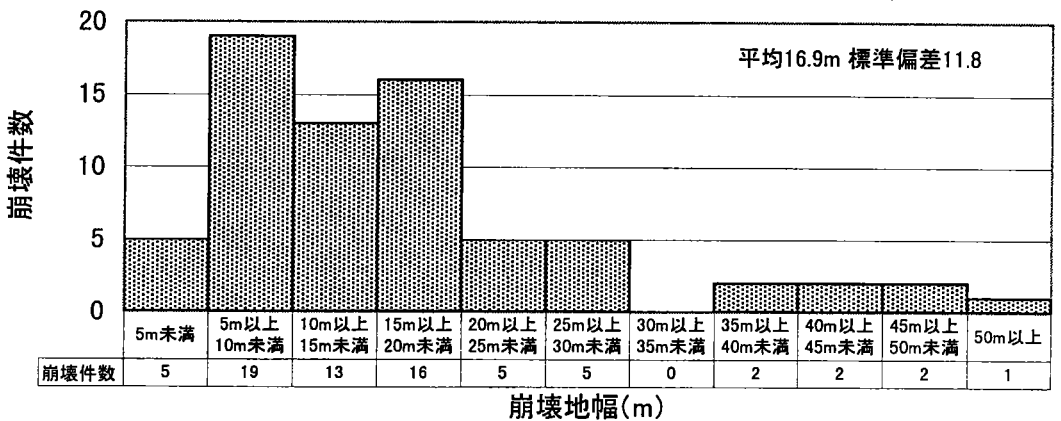
第14-3図 人工林地での崩壊（501ヶ所）崩壊地幅の頻度分布



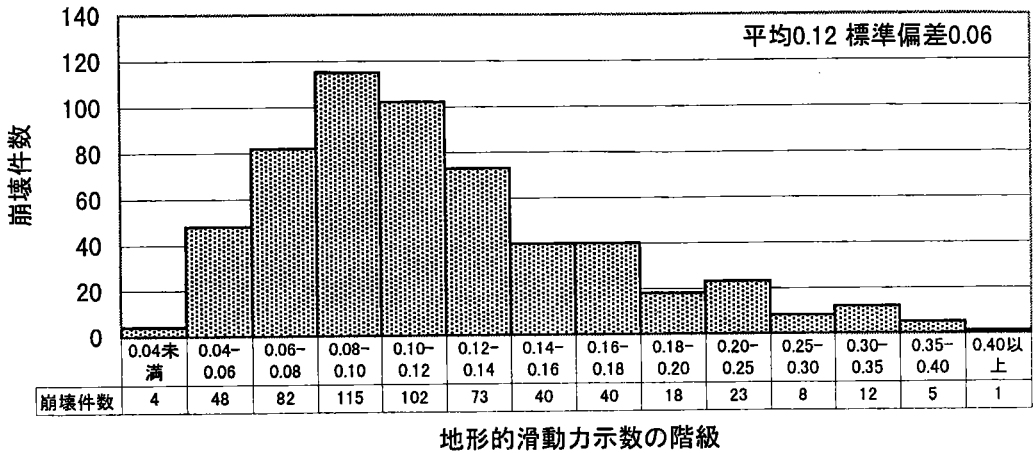
第15-1図 天然林地での崩壊（70ヶ所）傾斜の頻度分布



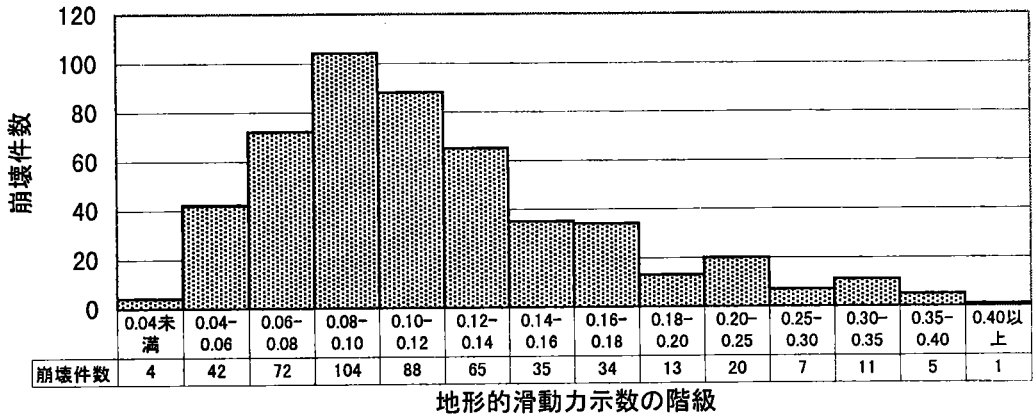
第15-2図 天然林地での崩壊（70ヶ所）集水面積の頻度分布



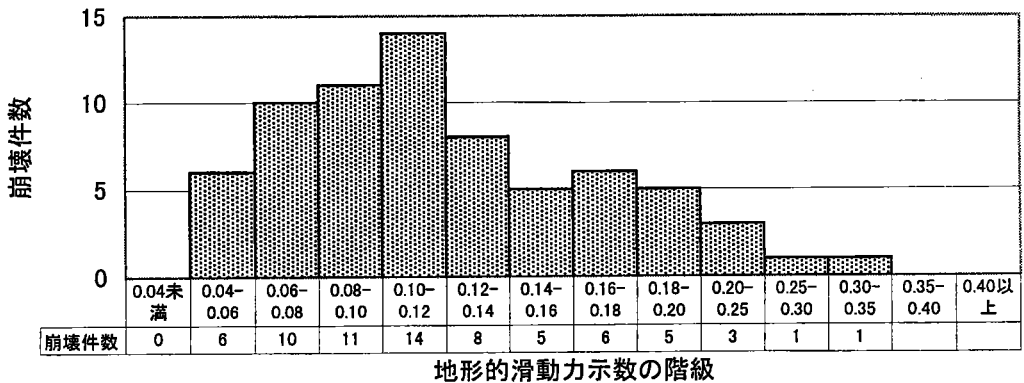
第15-3図 天然林地での崩壊（70ヶ所）崩壊地幅の頻度分布



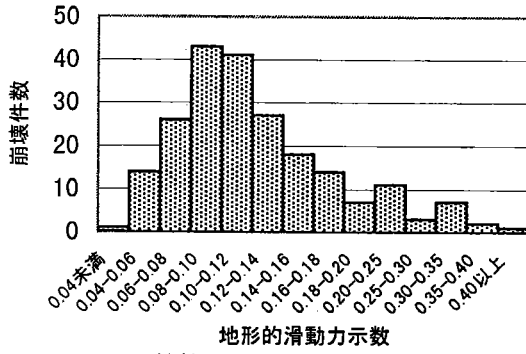
第16図 全崩壊（571ヶ所）地形的滑動力示数の頻度分布



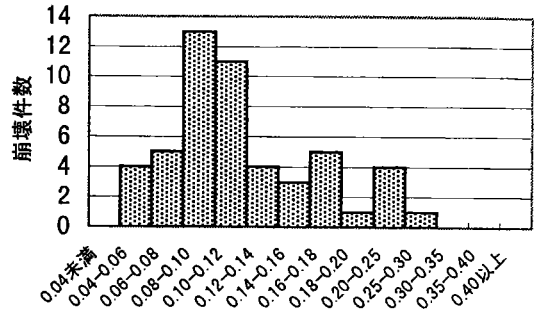
第17-1図 人工林地で発生した崩壊（501ヶ所）地形的滑動力示数の頻度分布



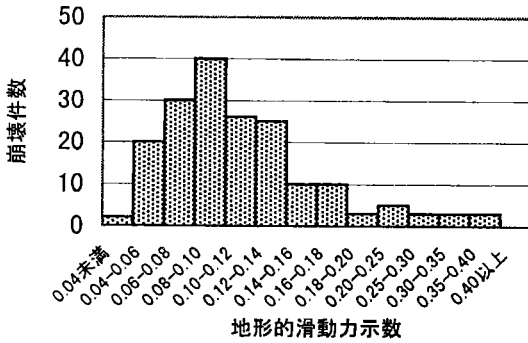
第17-2図 天然林地で発生した崩壊（70ヶ所）地形的滑動力示数の頻度分布



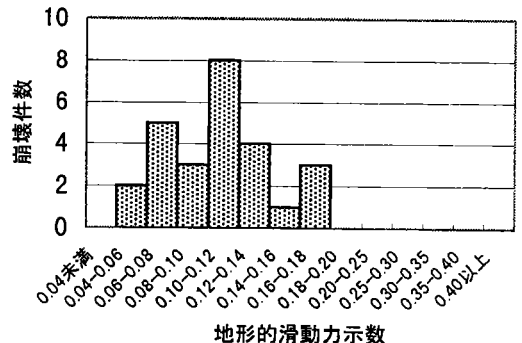
林齢0～10での崩壊(215ヶ所)



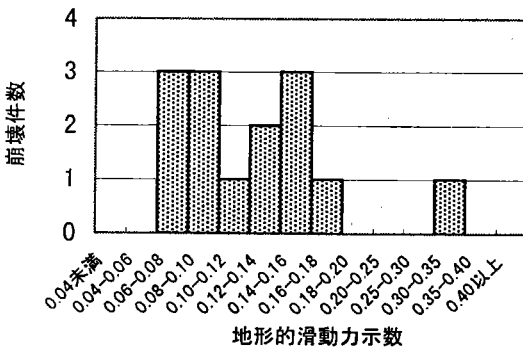
林齢41～50での崩壊(51ヶ所)



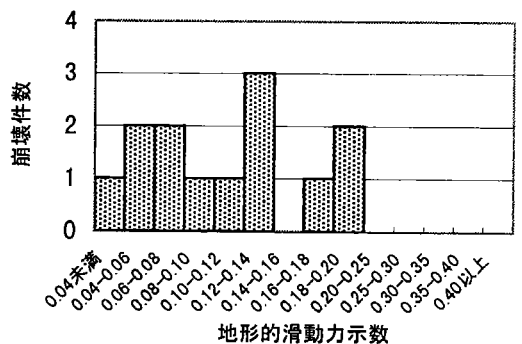
林齢11～20での崩壊(180ヶ所)



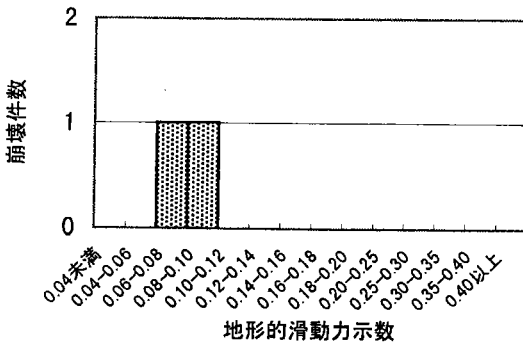
林齢51～60での崩壊(26ヶ所)



林齢21～30での崩壊(14ヶ所)

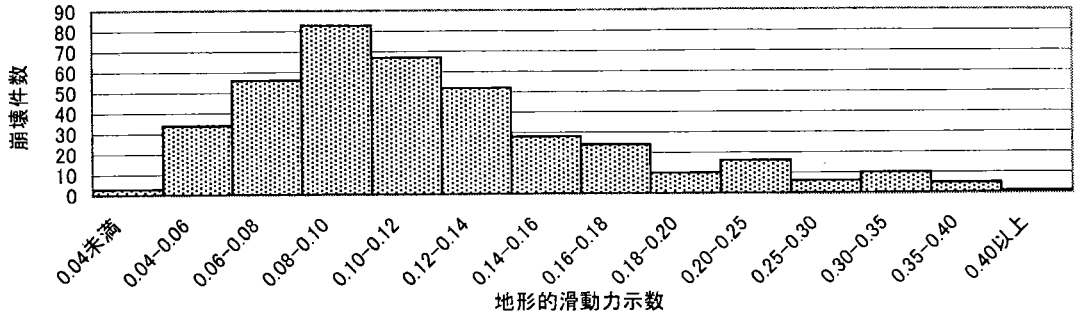


林齢61以上での崩壊(13ヶ所)

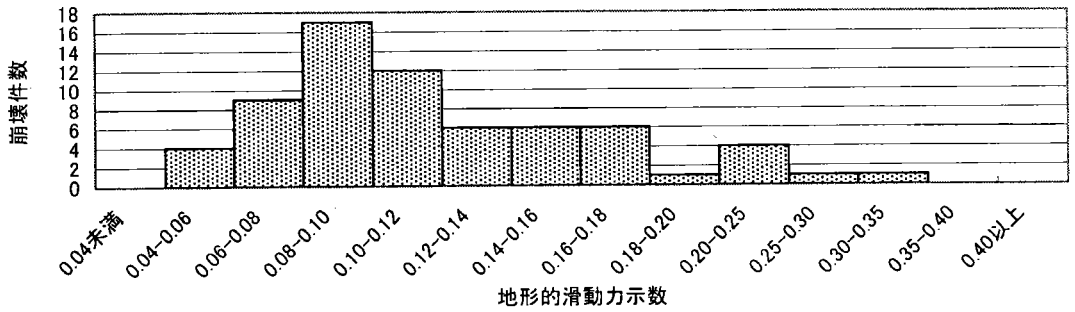


林齢31～40での崩壊(2ヶ所)

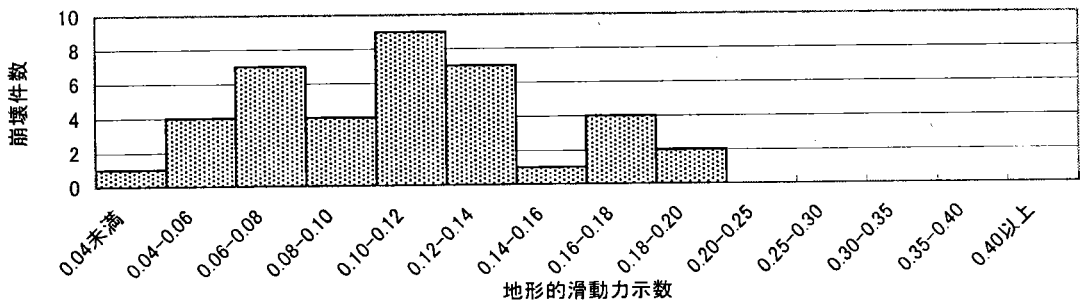
第18図 林齢別地形的滑動力示数の頻度分布



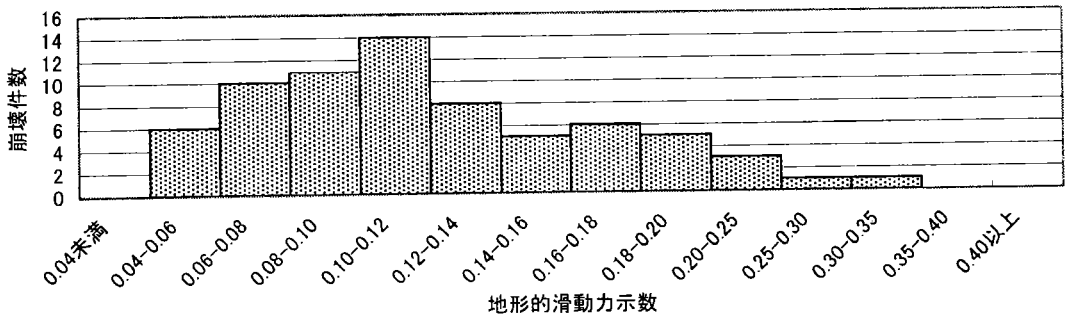
0～20年生の人工林地で発生した崩壊(395ヶ所)



21～50年生の人工林地で発生した崩壊(67ヶ所)

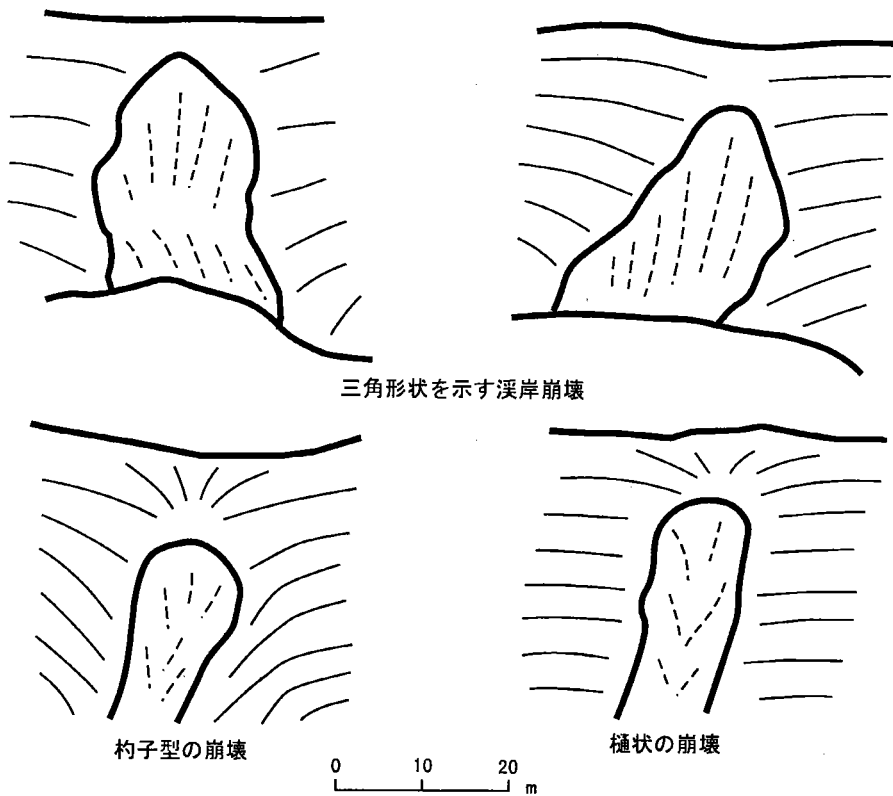


51年生以上の人工林地で発生した崩壊(39ヶ所)

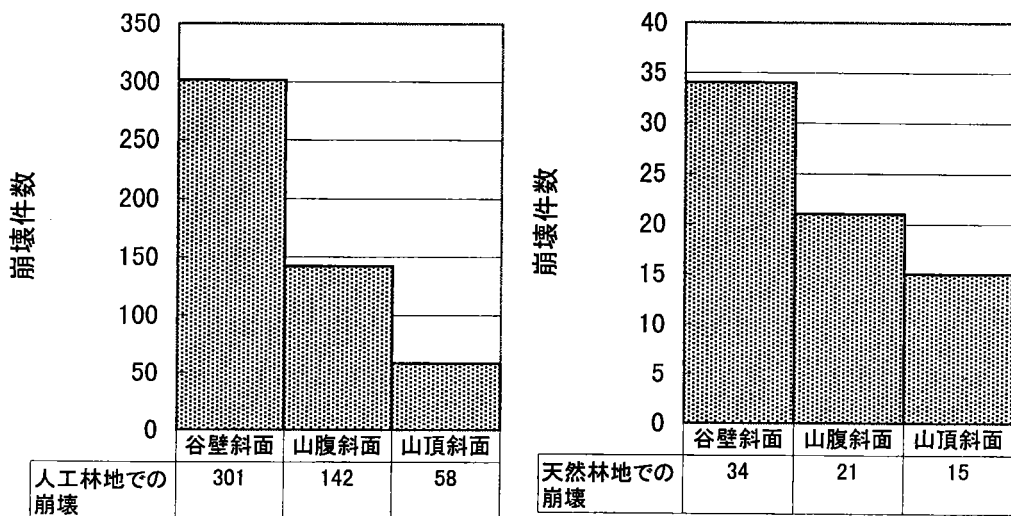


天然林地で発生した崩壊(70ヶ所)

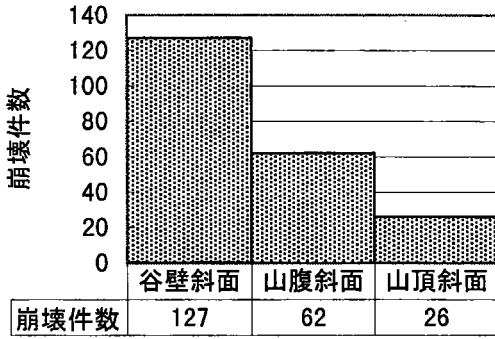
第19図 林齢別地形的滑動力示数の頻度分布



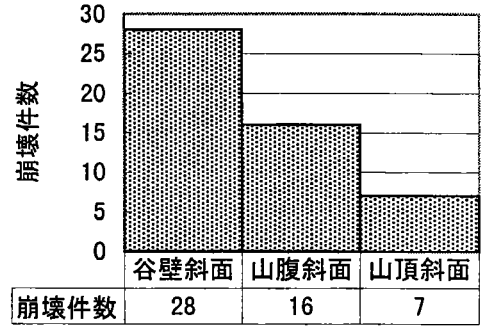
第20図 崩壊地の形状模式図



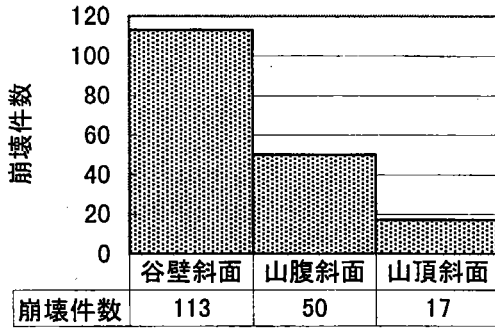
第21図 斜面部位ごとの崩壊発生件数（林地別）



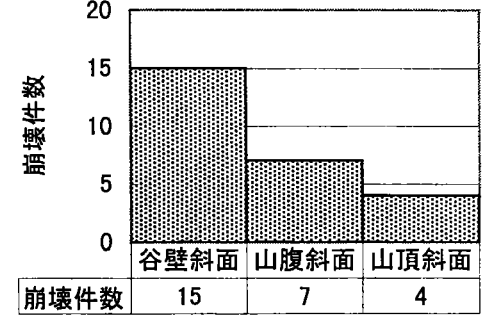
林齢0～10での崩壊(215ヶ所)



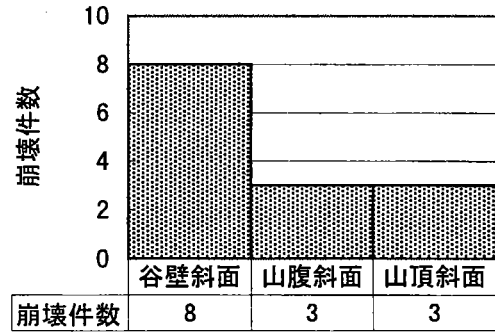
林齢41～50での崩壊(51ヶ所)



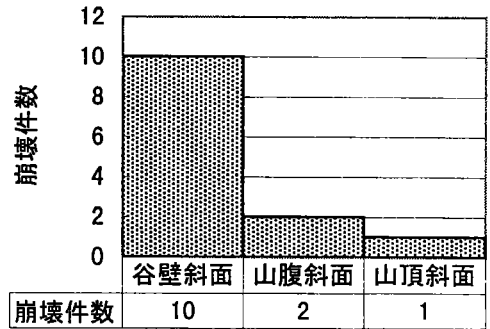
林齢11～20での崩壊(180ヶ所)



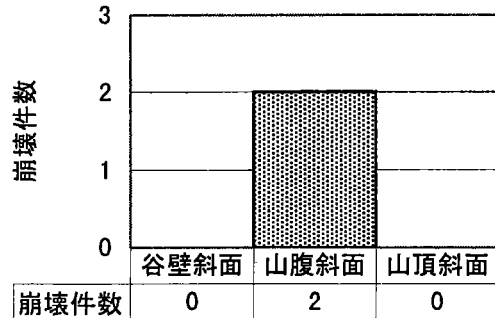
林齢51～60での崩壊(26ヶ所)



林齢21～30での崩壊(14ヶ所)

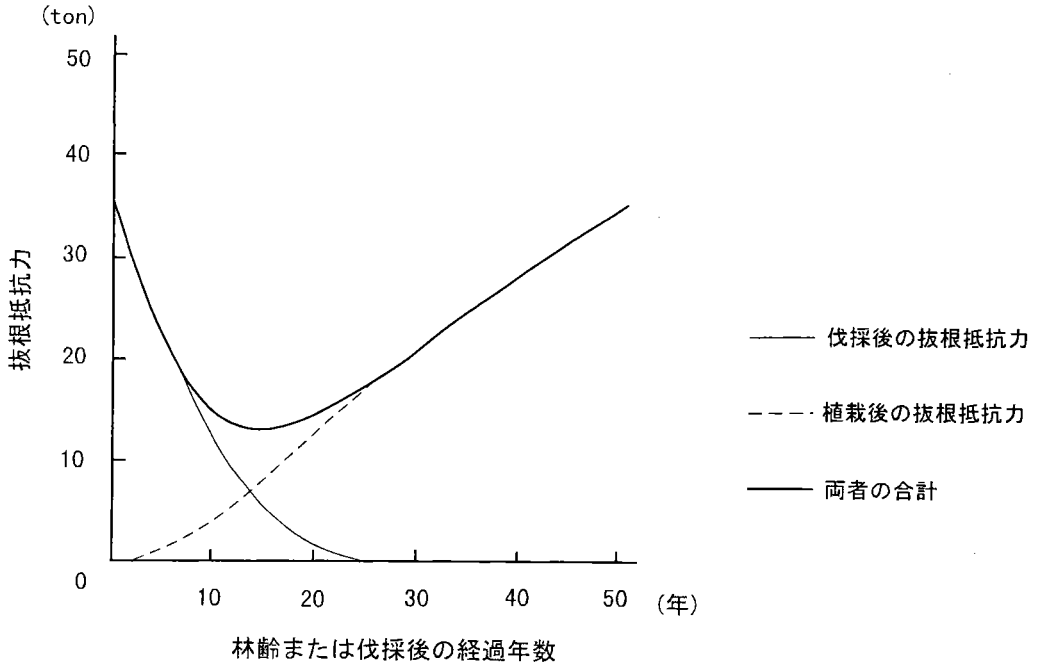


林齢61以上での崩壊(13ヶ所)

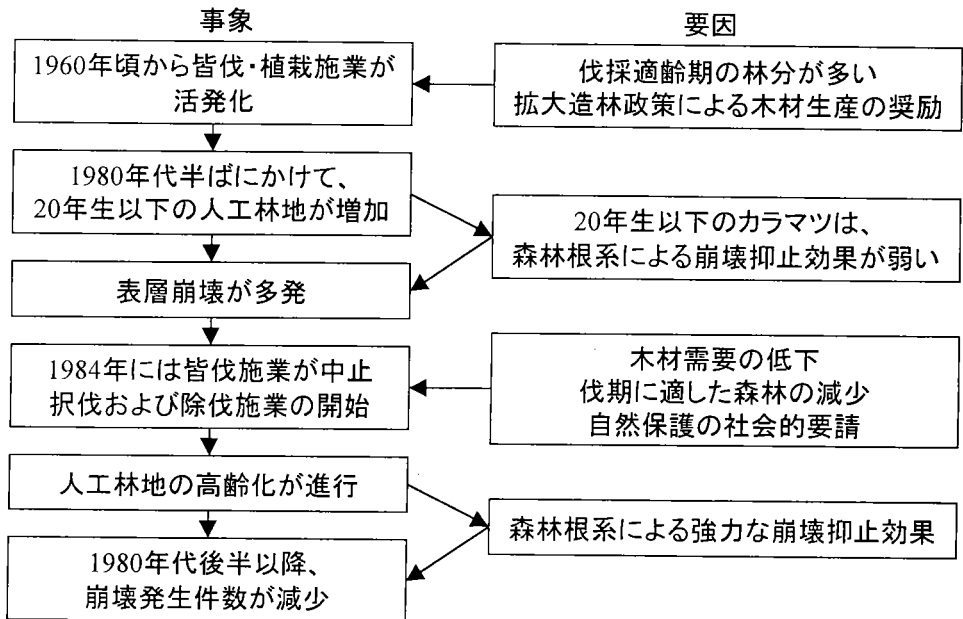


林齢31～40での崩壊(2ヶ所)

第22図 斜面部位ごとの崩壊発生件数(林齢別)



第23図 カラマツ根系による抜根抵抗力の推移
(北村・難波, 1981を一部改変)



第24図 時系列から見た表層崩壊の発生と森林管理の対応

第1表 東京都水道局水源管理事務所(旧称:水源林事務所)、
管理計画(旧称:経営計画)の概要

実施時期	内 容	調査地域における水道水源林の歴史
第一次経営計画 1910(明治43)年～ 1922(大正11)年	最初の10年間で無立木地の5000町歩に造林, 30年間で15000町歩に造林することを基本方針として定めた。	1901年:東京府は水川, 小菅, 丹波の御料林約8400haを譲り受け, 水道水源林の経営を開始する。
第二次経営計画 1923(大正12)年～ 1937(昭和12)年	1926年までに4219haの無立木地への植栽を完了した。直営の製炭事業を実施した。	1912年:東京市と山梨県の契約が締結し, 萩原山5610haが水道水源林に編入される。
第三次経営計画 1938(昭和13)年～ 1948(昭和23)年	天然林は混交多層林に誘導することを基本方針とした。第一次経営計画で定めた造林面積のうち, 水道水源林全体で4933haの植栽を完了した。	1913年:落合出張所開設。萩原山の無立木地へカラマツ, スギ, ヒノキの植栽がはじまる。 1940年:それまで続けられていた植栽が完了。萩原山の全域が森林に覆われた。
第四次経営計画 1949(昭和24)年～ 1955(昭和30)年	戦時中放置された人工林の保育作業に重点を置き, 造林を実施した。また, 伐期に達した森林の主伐を開始した。	1953年:伐採適齢期に達した人工林について, 小林班単位での皆伐と皆伐地への植栽が開始される。
第五次経営計画 1956(昭和31)年～ 1965(昭和40)年	経済性の乏しい天然林を人工林に切り替える拡大造林政策により, 水道水源林全体で, 人工林887ha, 天然林1161haを伐採した。	1957年:小河内貯水池の完成。
第六次経営計画 1966(昭和41)年～ 1975(昭和50)年	1971年まで拡大造林政策を踏襲した。それ以降, 自然保護の時代的要請を受けて天然林皆伐を中止し, 人工林の伐採も漸減させることとした。	この間, 人工林の皆伐が盛んに実施される。
第七次経営計画 1976(昭和51)年～ 1985(昭和60)年	林木の収穫は副次事項と明文化し, 水源涵養機能を発揮させるための森林施業, 土砂流出防止事業の推進, 地域の自然保護を基本方針とした。	1984年:人工林の皆伐施業が中止される。
第八次経営計画 1986(昭和61)年～ 1995(平成7)年	管理条件の悪い人工林について, 複層林化による天然林化を基本理念とした。	1985年:除伐, 間伐施業による人工林の更新が開始される。管理・経営条件の悪い人工林について, 複層林化が開始される。
第九次管理計画 1996(平成8)年～	経営計画を管理計画と改め, 木材生産は副次的事項とする理念の浸透を図った。地域と水源林の共存共栄を目指す内容を盛り込んだ。	1990年:多摩川上流域における水源関連施設の統一的管理を図るための組織改編により, 水源林事務所を水源管理事務所と改め, 管轄範囲が小河内貯水池や羽村堰など水源林以外の施設にも広がった。 2001年:水道水源林100周年

出典

東京都水道局水源林事務所(1981):水源林80年のあゆみ。313p.

堀越弘司(1996):東京の水源林。けやきブックレット21, けやき出版, 63p.

第2表 28林班の崩壊地一覧表

崩壊地 番号	崩壊 発生年	崩壊地消 失年	長さ (m)	比高 (m)	傾斜	崩壊地の 幅(m)	集水面積 (ha)	F	崩壊源の 位置	崩壊時の 林齢
1	1967	1977	64	38	30.7	20.0	0.13	0.111	谷壁	49
2	1982	現況	36	16	24.0	12.8	0.11	0.091	山腹	15
4	1982	1996	170	62	20.0	11.2	0.12	0.080	谷壁	15
5	1977	1996	16	15	43.2	6.0	0.03	0.160	谷壁	10
6	1982	1996	80	41	27.1	76.8	0.05	0.044	山頂	15
7	1982	現況	74	38	27.2	35.2	0.17	0.087	山頂	15
8	1982	現況	38	27	35.4	12.8	0.05	0.112	谷壁	15
9	1982	現況	76	45	30.6	25.6	0.09	0.090	山腹	15
10	1959	1967	24	27	48.4	8.0	0.02	0.153	山腹	41
11	1982	現況	30	21	35.0	9.6	0.02	0.089	谷壁	15
13	1982	現況	70	33	25.2	19.2	0.09	0.079	谷壁	15
14	1982	現況	38	30	38.3	25.6	0.05	0.099	谷壁	15
15	1967	1972	20	10	26.6	32.0	0.06	0.062	谷壁	52
16	1982	1996	20.8	15	35.8	6.4	0.03	0.121	谷壁	20
17	1959	1996	24	15	32.0	52.0	0.11	0.080	谷壁	44
18	1959	1987	10	7	35.0	18.0	0.02	0.073	谷壁	44
19	1967	1987	20	18	42.0	18.0	0.06	0.134	谷壁	5
20	1959	1987	52	37	35.4	30.0	0.15	0.122	谷壁	44
21	1959	1967	92	40	23.5	50.0	0.07	0.049	山腹	44
22	1959	現況	80	53	33.5	20.0	0.02	0.066	山頂	44
23	1959	現況	42	25	30.8	30.0	0.03	0.059	山腹	44
24	1959	現況	32	20	32.0	14.0	0.03	0.081	谷壁	44
25	1959	現況	54	43	38.5	18.0	0.04	0.104	山頂	44
26	1959	現況	80	50	32.0	22.0	0.04	0.076	山頂	44
27	1959	現況	64	37	30.0	14.0	1.38	0.267	谷壁	44
28	1959	1987	66	43	33.1	34.0	0.05	0.074	山腹	32
29	1959	1987	14	7	26.6	24.0	0.19	0.099	谷壁	44
30	1959	1982	38	14	20.2	32.0	0.04	0.039	谷壁	32
31	1959	1996	46	28	31.3	52.0	0.24	0.101	山腹	32
32	1959	1996	28	15	28.2	26.0	0.46	0.139	谷壁	32
33	1959	1982	32	27	40.2	16.0	0.05	0.123	谷壁	32
34	1959	1977	80	52	33.0	18.0	0.02	0.067	山腹	34
35	1977	1982	90	54	31.0	14.0	0.05	0.092	谷壁	52
36	1959	1977	36	22	31.4	28.0	0.11	0.096	谷壁	34
37	1959	1967	26	17	33.2	12.0	0.03	0.089	谷壁	34
38	1959	1977	22	15	34.3	16.0	0.1	0.126	谷壁	34
39	1959	1967	46	30	33.1	14.0	0.03	0.084	山腹	34
40	1959	1977	36	26	35.8	16.0	0.02	0.078	谷壁	34
41	1987	現況	19.2	18	43.2	17.6	0.08	0.155	谷壁	天然
42	1987	1996	28.8	19	33.4	25.6	0.12	0.110	山頂	天然
43	1982	1996	12.8	18	54.6	8.0	0.12	0.303	谷壁	天然
44	1982	現況	32	20	32.0	22.4	0.08	0.109	谷壁	天然

崩壊地番号は第7図と対応

崩壊地消失年…崩壊地の原面が植被に覆われて消失した時期を示す。

現況…1996年当時、原面が残存しているもの。

■…1959年以前に発生した崩壊(本研究の対象外)

た ま がわ さい じょうりゅういき しゃめんほうかい はっせい き こう
「多摩川最上流域における斜面崩壊の発生機構」

(研究助成・一般研究 VOL. 23-No.128)

著 者 はやし まこと
 林 誠
発行日 2002年3月31日
発 行 財団法人 とうきゅう環境浄化財団
 〒150-0002
 渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)
 TEL (03)3400-9142
 FAX (03)3400-9141
