

信州大学審査学位論文

森林伐採や植栽の影響を加味した
土砂生産予測に関する研究

2013年3月

黒岩知恵

目次

第1章 序論	1
第2章 表層崩壊予測に関する研究の現状	4
2.1 概説	4
2.2 表層崩壊予測に関する研究	4
2.3 森林と表層崩壊との関係に関する研究	6
第3章 研究対象流域	15
3.1 位置と自然環境	15
3.2 土砂生産状況	19
3.3 森林伐採と植栽の状況	22
第4章 森林伐採や植栽状況を指標とした土砂生産能力評価指標	24
4.1 概説	24
4.2 ダム堆砂量と森林伐採や植栽状況との関係	24
4.3 森林伐採や植栽を指標とした流域の土砂生産能力評価	27
4.4 まとめ	34
第5章 森林伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルの構築	36
5.1 概説	36
5.2 表層崩壊と森林伐採や植栽状況との関係	37
5.3 森林伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルの構築とその適用性	42
5.3.1 森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価	42
5.3.2 崩壊危険度評価指標 (A _{Phr} (t)) と崩壊面積率 (s/a) との関係	44
5.3.3 崩壊危険度評価指標 (A _{Phr} (t)) を指標とした崩壊予測	47
5.4 まとめ	49
第6章 崩壊予測精度の向上に向けた崩壊予測モデルの改良	52
6.1 概説	52
6.2 2004年台風21号による崩壊の発生要因	52
6.2.1 2004年台風21号による崩壊発生状況	53
6.2.2 2004年台風21号による表層崩壊とその発生要因	54
6.3 地形形状と森林伐採や植栽状況を考慮した崩壊予測改良モデルの構築	59
6.3.1 崩壊発生状況	59
6.3.2 森林伐採や植栽状況と表層崩壊との関係	64
6.3.3 崩壊予測改良モデルの構築とその適用性	71
6.4 まとめ	77
第7章 森林伐採や植栽状況の変化に伴う崩壊土砂量の長期予測	78
7.1 概説	78
7.2 森林の状態と崩壊深との関係	78
7.3 森林伐採や植栽状況の変化を考慮した崩壊土砂量予測	80
7.4 まとめ	84
第8章 総括	86
謝辞	89
要旨	91

第1章 序論

近年、我が国の林業は、木材価格の低迷や経営コストの増加、林業従事者の減少や高齢化等の諸事情により収益性が大幅に低下し、衰退傾向にあるのが現状である。森林の整備は、植栽や伐採をはじめとする林業生産活動を通じて図られることになるため、このような林業生産活動の衰退は、森林の荒廃化を意味すると言っても過言ではない。全国各地において、伐採後に植栽されずに放置された無植栽地で土砂生産が活発化している事実が多数報告されるようになり（例えば、小山ら，2009；黒岩・平松，2010；沼本ら，2002），森林管理の重要性が広く認識されるとともに、持続可能な森林施業の方法が再度検討されるようになってきた。

一方、砂防分野では、山地源流域から海域にわたる水系一貫の総合的な土砂管理が求められている。総合的な土砂管理を進めるためには、土砂生産域である山地の大半を占める“森林の状態”やこれに応じて変動する“森林の効果”を考慮して、土砂生産量を的確かつ効率的に予測することが求められる。

流域の主たる土砂生産源となる“表層崩壊”による土砂生産予測については、従来より数多くの研究がなされている。崩壊予測手法は、過去の崩壊実績から崩壊の要因を抽出して現象論的に崩壊危険度を推定する統計的手法と、物理モデルを用いて解析的に崩壊発生を予測する物理的手法に大別される。

森林の影響を考慮した崩壊予測としては、森林の有無や林齢、樹種などの因子に着目し、これらを単一もしくは降雨等と複合的に取り扱った統計的手法が提示されている（例えば、浅見，1997；作田ら，2007）。これに対し、阿部（1998）や塚本（1987）は、樹木根系の効果を土の粘着力の補強強度として斜面安定解析式に組み込み、斜面安定解析により物理的に崩壊危険度を評価している。しかしながら、これらの研究の多くは、その時点での森林状態や森林の効果と崩壊現象との対応関係に着目したものであり、時間の経過とともに崩壊に対する影響が変化することになる“森林伐採や植栽の状況”や“森林の成長”を考慮した研究はほとんど行われていないというのが現状である。

森林が崩壊の抑制に対して高い効果を有しており、その効果が十分に発揮されるためには、森林管理が適切に実施されるべきであるということは、周知の事実である。また、日本の全森林面積の約4割が森林管理を必要とする人工林であるのに加え、その大部分が1950年代から1960年代にかけての高度経済成長期に植林されたものであり、これらが全国各地で伐期を迎えているといった事実を勘案すると、森林の伐採や伐採後の森林管理については、十分な配慮が必要となる。

本研究は、林業衰退に伴う伐採跡地の放置や無植栽地の増加といった森林の現状を

踏まえ、森林の伐採や植栽が流域の土砂生産状況に及ぼす影響を定量的に把握するとともに、伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルを構築し、将来の望ましい流域管理のあり方を模索する上での一助とすることを目的として実施したものである。

本論文の構成と流れは、図 1.1 のとおりである。

第 2 章では、まず、豪雨を誘因とする崩壊予測手法に関する研究の経緯と現状について述べるとともに、現時点での崩壊予測における問題点を明らかにする。つぎに、森林と表層崩壊との関係について概観し、森林の影響を加味して崩壊予測を行ううえでの課題を抽出するとともに、本研究の位置づけを示す。

第 3 章では、本研究で対象とした三重県多気郡大台町に位置する“宮川ダム上流域”の地形・地質・降雨状況等の自然環境について述べる。そして、空中写真判読と現地調査等により、宮川ダム上流域の過去 40 年間にわたる土砂生産状況の推移を定量的に把握するとともに、森林の伐採や植栽状況の変遷についても概観する。

第 4 章では、流域の土砂生産状況としてダム堆砂量に着目し、森林伐採や植栽状態の変化とダム堆砂量との関係を把握する。そして、流域の土砂生産能力を評価するための指標として、森林伐採や植栽状況を使用することの可能性について考察を加える。

第 5 章では、流域の主たる土砂生産形態である表層崩壊に着目し、崩壊と森林伐採や植栽状況との関係について詳細に解析する。この結果と第 4 章で得られた知見をもとに、伐採や植栽の変化に伴う流域内の崩壊発生ポテンシャルを適正に評価することを目的とした「崩壊危険度評価指標」を提示する。さらに、森林伐採や植栽状況の影響を反映する崩壊危険度評価指標に加え、降雨の影響を加味することにより、流域内の崩壊面積の再現・予測を行うことを目的とした「崩壊予測モデル」を新たに提示するとともに、同モデルの妥当性を検討する。

第 6 章では、2004 年台風 21 号により発生した表層崩壊を対象として、斜面勾配や短時間降雨と崩壊との関係解析を行い、前章で構築した「崩壊予測モデル」の再現精度を向上させるための課題を抽出する。そして、「森林伐採や植栽状況」と「降雨量」に加え、「斜面勾配」を加味した「崩壊予測改良モデル」を新たに提示し、同モデルの再現性や適用性について検証する。

第 7 章では、現地調査により森林の状態と崩壊深との関係を把握し、この結果と前章で提示した「崩壊予測改良モデル」を用いて、流域内での崩壊土砂量の算出を試みる。さらに、同モデルを用いて、伐採跡地全面に対して植栽が行われる場合、伐採跡地の半面に対して植栽が行われる場合、伐採跡地全面が無植栽状態のまま放置される場合の 3 ケースを想定して崩壊土砂量の長期予測を行い、将来の望ましい流域管理のあり方について考察を加える。

第 8 章では、各章の考察結果を要約して記述するとともに、本論文全体の総括を行う。

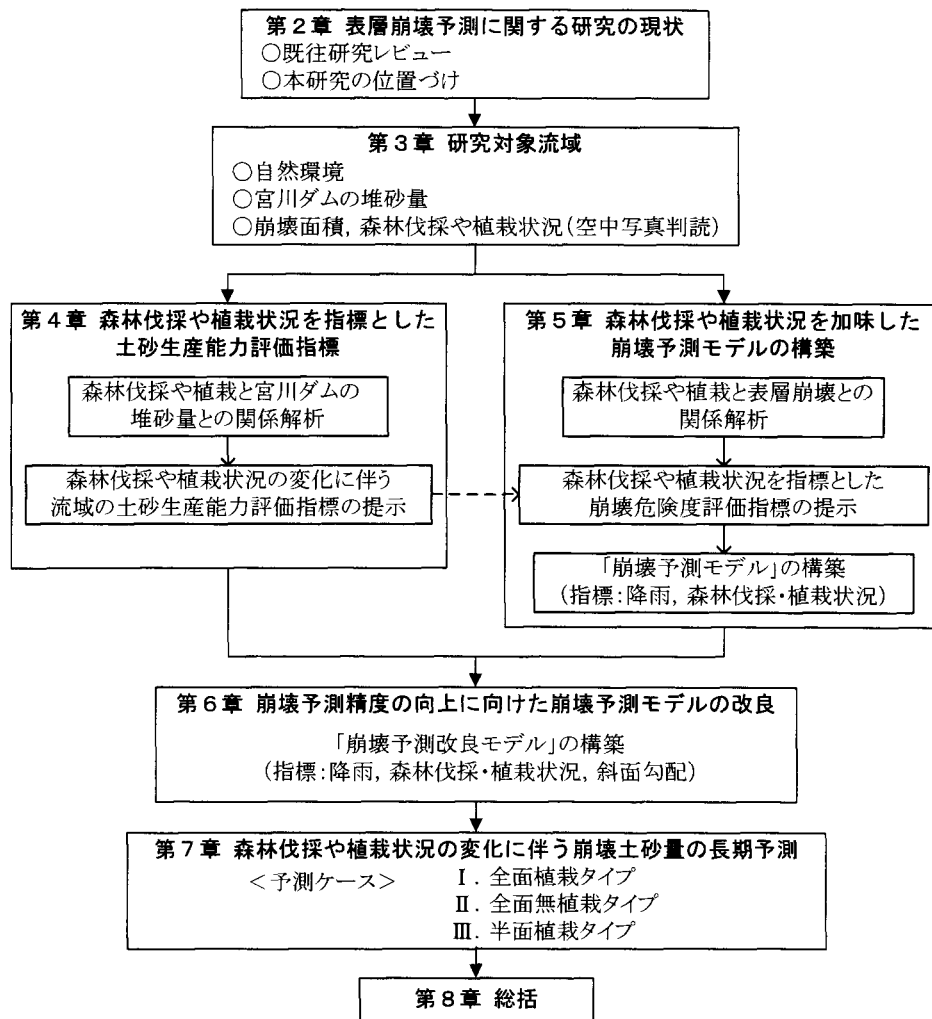


図 1.1 本研究の流れと内容

引用文献

- 阿部和時 (1998) : 樹木根系の斜面崩壊防止機能, 森林科学, No. 22, p. 23-29
- 浅見和弘 (1997) : 相模川沿い急傾斜地における植物群落から見た表層崩壊の判定, 砂防学会誌, Vol. 49, No. 5, p. 36-41
- 小山敢・藤田亮・前田雄一・多田泰之・落合博貴・三森利昭・大丸裕武・村上亘・河合隆行・岩村尚樹 (2009) : 2007年9月4日の集中豪雨により鳥取県琴浦町で生じた斜面崩壊の特徴, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 1, p. 52-59
- 黒岩知恵・平松晋也 (2010) : 三重県宮川ダム上流域における2004年台風21号による土砂生産に関する一考察, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 4, p. 16-21
- 沼本晋也・林拙郎・川邊洋・喜多村和義 (2002) : 十津川支流神納川上流部における山腹崩壊地の荒廃分析, 中森研, No. 50, p. 237-240
- 作田健・香月智・安田勇次・松村和樹・松木敬・尾崎順一 (2007) : 類似分析とニューラルネットワークを用いた山地源頭部斜面崩壊確立推定法, 砂防学会誌, Vol. 60, No. 4, p. 3-14
- 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, No.23, p.65-124

第2章 表層崩壊予測に関する研究の現状

2.1 概説

山腹斜面で発生する表層崩壊は、豪雨を主誘因として発生する現象であり、毎年台風や梅雨期に頻発し、流域内での主たる土砂生産源となっている（林，2008；塚本・小橋，1991）。表層崩壊の素因としては、地形・地質・森林等の自然環境要因や伐採・植栽といった森林の施業状態等の人為的要因が挙げられる（塚本，1998b）。

本章では、次章以降において、森林伐採や植栽状態と崩壊発生状況との関係をモデル化し、伐採や植栽の影響を加味した表層崩壊予測手法の構築を目指すうえで、崩壊予測に関する既往研究の経緯と現状を把握するとともに、現時点での崩壊予測における問題点を指摘する。

第2節では、豪雨を誘因とする表層崩壊予測手法に関する研究の経緯と現状について述べるとともに、現時点での崩壊予測における問題点を明らかにする。

第3節では、森林と表層崩壊との関係について概観し、森林の影響を加味して崩壊予測を行ううえでの課題を抽出するとともに、本研究の位置づけを示す。

2.2 表層崩壊予測に関する研究

豪雨を起因とする表層崩壊予測を対象とした研究は、

① 統計的手法

過去の崩壊実績から崩壊の要因を抽出して、崩壊危険度を現象論的に推定する手法

② 物理的手法

物理モデルを用いて解析的に崩壊発生を予測する手法

に大別される。ここでは、これらの手法ごとに、研究の現状と問題点について述べる。

統計的な手法にもとづく崩壊予測としては、従来から、誘因である降雨量や降雨強度を指標とした手法が数多く提案されてきた。打萩（1971）は、天竜川上流域、釜無川流域、木津川流域および有田川流域で発生した豪雨型表層崩壊を対象として、連続雨量と崩壊面積率との関係を解析し、両者の関係は(2.1)式で表される二次曲線により近似可能となることを示した。

$$s/a = K \cdot 10^{-6} \cdot (R_C - R_L)^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、s/a：崩壊面積率(%), K：係数, R_C ：連続雨量(mm), R_L ：崩壊限界雨量(mm)である。なお、(2.1)式中のKと R_L は、対象とする流域毎に異なった値を示すものとされている。

吉松 (1977) は、山腹斜面に対して熱力学的理論を適用して、崩壊発生メカニズムを解析し、崩壊限界雨量に加え、降雨量の経時変化 (降雨パターン) の影響も加味した崩壊面積率予測式を導出し、その再現精度が良好であることを示した。平野 (1988) は、六甲山地を対象とし、過去の降雨量および崩壊履歴を基に特定した崩壊限界雨量を指標とした土砂生産予測モデルを提示し、その再現精度が概ね良好であることを示した。

一方、表層崩壊の素因に着目した崩壊予測手法についても数多くの研究が行われている。水山ら (1990) は、集水性や斜面勾配の相違等の地形性危険度と、土層厚の発達と限界崩壊深との関係から得られる土層の危険度から、崩壊発生を相対的に判定しようとする手法を提示し、常願寺川流域に対する適用結果が良好であることを示した。また、浅見 (1997) は、相模川流域を対象として植物群落と地形・地質・土壌の現地調査結果を用いて、斜面安定性と植物群落との対応関係を検討し、植物群落の相違から崩壊危険場所の予測が可能となることを示した。近年では、リモートセンシングによる計測技術や GIS による解析技術を活用し、地形や植生などの要因を複合的に取り扱った崩壊予測モデルが提案されている (例えば、作田ら、2007)。

以上に示した統計的手法に基づく崩壊予測に関する研究の大部分は、実際に発生した表層崩壊を現象論的に説明するうえで有意な要因を求め、この要因を用いて崩壊現象を再現・予測しようとするものである。これらの手法は、崩壊に対するその時点での各要因の影響度を適正に評価することを前提としている。

一方、物理的な手法を用いた崩壊予測に着目すると、1980年代から、雨水流出に関するモデル (浸透流解析) と斜面安定解析を組み合わせ、崩壊の発生を解析し、崩壊の発生予測を行う手法が提案されてきた。この雨水の流出と斜面の安定性の双方から崩壊発生予測を行う試みは、沖村ら (1985) による数値シミュレーションを契機として急速に進展してきた。その後、平松 (1990) により、不飽和状態下における雨水の浸透・流下過程が簡易的にモデル化され、崩壊予測へと組み込まれたことにより、崩壊予測精度ならびに実用性が飛躍的に向上し、現在ではこの手法が物理的手法の主流となっている。近年は、コンピュータ能力の向上に伴い、メッシュサイズ、計算時間刻みの細かい計算が可能となり、地中で生じる様々な水文プロセスが物理モデルに組み込まれるようになってきた (例えば、執印ら、2009; Shuin et al, 2012)。また、内田ら (2009) は、実用性の高い崩壊予測手法として、物理モデルの入力条件のうち、現地において比較的測定が容易かつ実測可能な土層厚などをインプットとする表層崩壊危険度評価モデルを提示している。

以上に示した物理的手法に基づく崩壊予測では、手法の性質上、土層厚や土壌物理特性などの多くのパラメータが必要であり、電子計算機の処理能力が飛躍的に向上した今日においても、そのデータ取得には多大な労力を要する等、実用化に向けては困

難な点が多いというのが現状である。

以上のように、統計的手法と物理的手法に基づく崩壊予測手法のいずれにおいても、森林伐採・植栽状況や森林の成長などによって、時間とともに変動していくことになる“森林状態”や“森林の効果”に着目した崩壊予測はほとんど存在しないのが現状である。

2.3 森林と表層崩壊との関係に関する研究

森林は、「木材生産機能」をはじめ、「水源涵養（水保全）機能」、「土砂災害防止（土保全）機能」、「地球環境保全機能」等といった多種多様な公益的機能を有している（森林科学編集委員会，2002）。これらの機能の内、森林の土砂災害防止機能は、その効果が最も顕著かつ直接的に現れることになる（太田，1991）。土砂災害防止機能に位置づけられる「表層崩壊防止機能」は、

- ① 樹木根系の緊縛力により直接的に斜面の不安定化（表層崩壊）を抑制しようとする機能（土の強度補強効果）
- ② 高い透水性や保水性を有する森林土壌が形成されることにより地下水深が抑制され、その結果として間接的に表層崩壊の発生を抑制する機能

に大別され、一般に、①に示した樹木根系の緊縛力による土の強度補強効果として広く認識されている（例えば、阿部，1998；塚本，1998b）。

森林の成長と表層崩壊との関係を見ると、森林の樹冠部の成長とともに森林土壌が発達することになるものの、同時に土塊重量が増し土層の力学的強度は低下することになる。これに対し、樹木の根系は、土層の強度低下を防止し、斜面の不安定化すなわち表層崩壊の発生を抑制するという機能を果たしている。豪雨に伴う「雨水の浸透→飽和帯の形成→間隙水圧の増加」等の短期的影響により、上記のバランスが消失すると、表層崩壊が発生することになる。「森林の伐採→根系の腐朽」といった長期的影響もまた、このバランスを消失させる大きな原因となっている（太田，1993）。

一般に、表層崩壊の大部分は、土質的性質の異なる土壌層と基岩層との境界をすべり面として発生する。図 2.1 と図 2.2 に示すように、根系は土壌層内へと伸長し、この内、すべり面よりも深部まで発達した根系の緊縛力により、すべり面上の土塊のせん断抵抗力が補強され、表層崩壊が防止されることになる（阿部，1998）。なお、この効果は、根系の生長が及ばない基岩内部をすべり面として発生する深層崩壊に対しては期待できない。樹木根系の水平方向の抵抗力は、図 2.2 に示すように、土壌層の移動方向と反対方向に作用し、崩壊の発生を抑制することになる。垂直成分（引き抜き抵抗力）は、土壌層を基岩層に接着することにより、すべり面の摩擦力の増加に寄与している。これらの作用により、土のせん断抵抗力は補強されることになる。すべり

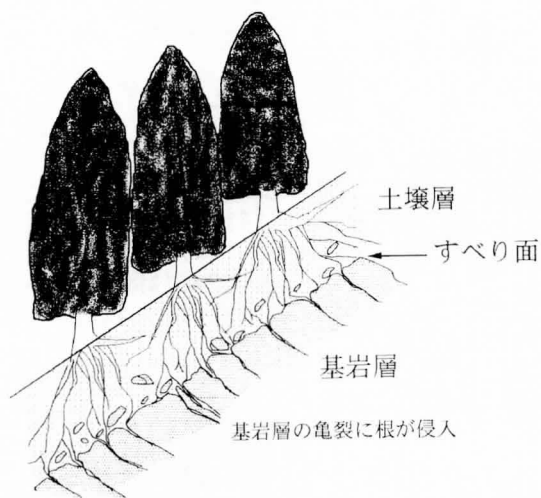


図 2.1 山腹斜面の土層構造と根系分布
(阿部, 1998)

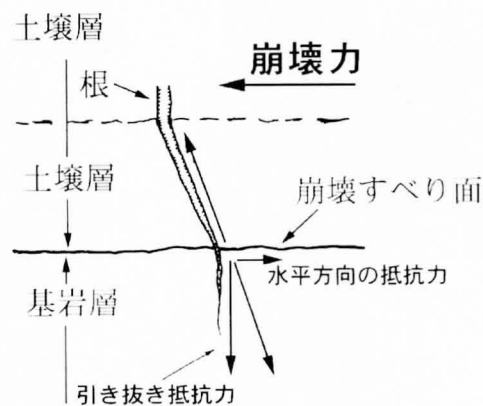


図 2.2 根による土のせん断抵抗力補強効果
(阿部, 1998)

面付近に存在する根系の直径は、樹種や立地条件等により異なるものの、10～20mm程度のもので多いようである(阿部, 1998)。また、近年では、樹木根系の緊縛力による斜面安定性への寄与効果として、通常規模の表層崩壊では鉛直根に加えて、水平根の影響も大きいことが指摘されている(木下, 2010; 北原, 2010)。

樹木根系の有する土のせん断抵抗力補強強度は、根の引き抜き抵抗力をもとに推定される。阿部(1998)は、過去の調査データより、樹種や土壌さらには試験方法により広範囲に変化することになるものの、樹木の根系は $100\sim 1,780\text{kgf/m}^2$ の補強強度を有することを示した。また、阿部(1998)は、苗畑にニセアカシア、カラマツ、ヤシヤブシ、ヒノキ、クロマツおよびヤマハンノキの計6種の樹木を生育させ、これらに対する原位置せん断試験結果を基に、根系の直径と引き抜き抵抗力との関係を把握し、すべり面付近に存在する直径:20mm以下の細根では、ニセアカシアとカラマツの根の引き抜き抵抗力が、他の樹種よりも大きくなる傾向を示した。一方、北原(2007)による試験結果では、根系の直径が10mmの場合、スギやヒノキ(針葉樹)とナラ類(落葉広葉樹)の根系の抵抗力はほぼ同等で100kgfを示すのに対して、マツ類が有する根系の抵抗力は低い傾向を示し、アカマツは50kgf、カラマツは40kgf程度の補強強度であることを示した。

塚本(1998a)は、薄い表層土の下に根がある程度伸長できる難透水性の下層土が存在する斜面断面を取り上げ、この斜面断面に無限長斜面安定式を適用することにより、表層崩壊の発生に及ぼす根の伸長や根による強度補強の影響を検討している。表層土

と下層土との境界に形成されるすべり面上の鉛直根の根量 (本/m²) と斜面安全率 : Fs との関係を求め、少数の樹根が存在するだけで斜面の安全率が上昇し、樹根のない場合 (Fs=1) と比較すると、1m²あたり直径 2cm の根が 2 本存在すると斜面安全率 : Fs は約 2 倍に、5 本存在すると約 3 倍に増加することを示した (塚本, 1998a)。また、塚本 (1998b) は、鉛直根分布域内の崩壊土塊の滑動力と土のせん断強度との関係を求め、根系の存在により土層の強度が大きくなることを示した。また、表層部において顕著に認められた根系による補強度効果は深度の増加とともに小さくなり、やがては消失することになる (塚本, 1998b)。このことより、土層の深層部で発生する深層崩壊に対しては、根系による強度補強効果はほとんど期待することができないことがわかる。

駒村 (1978) は、斜面勾配と土の内部摩擦角を種々変化させ、斜面上に樹木が存在した場合の斜面安定係数 : $\gamma \cdot H / C$ (γ : 土の単位体積重量, H : 土層厚, C : 土の粘着力) を求め、樹木の有無にかかわらず、斜面勾配の増加とともに斜面の安定係数は減少していくことを示した。また、樹木が存在する場合は、存在しない場合と比較して安定係数は大きくなり、この両者の差異は斜面勾配が緩いほど大きくなる。土の内部摩擦角の大きさによっても樹木の存在が斜面の安定性に及ぼす影響度合いは異なり、土の内部摩擦角の増加とともに樹木の安定化効果は大きくなる。また、急勾配斜面や土の内部摩擦角の小さい土質の斜面では、単に樹木が存在するだけでは必ずしも力学的に安定であるとは言い難いことも指摘している。

つぎに、森林伐採・植栽後の経過年数や林齢と根系の抵抗力との関係について概観した。阿部 (1998) は、伐採後の経過年数が異なる複数のヒノキ林内で、伐採木の根の引き抜き試験を実施し、根の直径と引き抜き抵抗力との関係を把握し、すべり面付近に存在する比較的細い 20mm 以下の根に着目すると、伐採後 6~9 年以上経過すると伐採木の根の引き抜き抵抗力はほとんど 0kgf となり、根系の腐朽に伴って土の補強効果が消滅することを示した。

北原 (2012) は、林齢の増加による斜面安定性の推移に着目して、引き抜き試験と斜面安定解析を実施し、ヒノキ林を対象とした場合、新植造林木では植栽後 20 年までは根系の粘着力増強分は増加することを示した。これに対し、伐採木では、伐採後より徐々に根系の効果が減少し、伐採後 7 年で最低値となることを示した。

阿部 (1998) は、スギ林を対象とした斜面安定解析を実施し、斜面安全率の増加傾向は、林齢 10 年から 30 年にかけて最も顕著に認められ、この 20 年間に 3 倍以上にまで増加することを示した。また、60 年生林の斜面安全率は、森林がない場合の 5 倍以上にも及ぶことを指摘している。

佐藤ら（2009）は、北海道に位置する冷温帯落葉広葉樹林を対象として根系の引き抜き抵抗試験と斜面安定解析を実施し、イタヤカエデ、ミズナラ、シナノキ等により構成される60～70年生の樹林では、樹木根系の存在により、斜面の安全率が0.2～0.5程度増加することを示した。

北村・難波（1981）は、森林伐採後の根株を対象とした根系の引き抜き試験結果を基に、伐採（植栽）後の経過年数に伴う抜根抵抗力の推移を図2.3のようにとりまとめている。図中の合力は、伐採木と植栽木の根系の引き抜き抵抗力を合計して得られた値である。伐採木の根系の有する抵抗力は伐採直後より著しい減少傾向を示し、伐採後30年以上経過するとほとんど0tonfにまで低下する（図中の点線；伐採木）。伐採後直ちに植栽が行われた場合においても、伐採直後より抵抗力は低下し、伐採後15年程度で4.5tonfと最低値を示すが、植栽後20年以上経過すると、経過年数の増加とともに抵抗力は増加するようになり、植栽木の根系の発達に伴って斜面が安定化することがわかる（図中の実線；合力）。

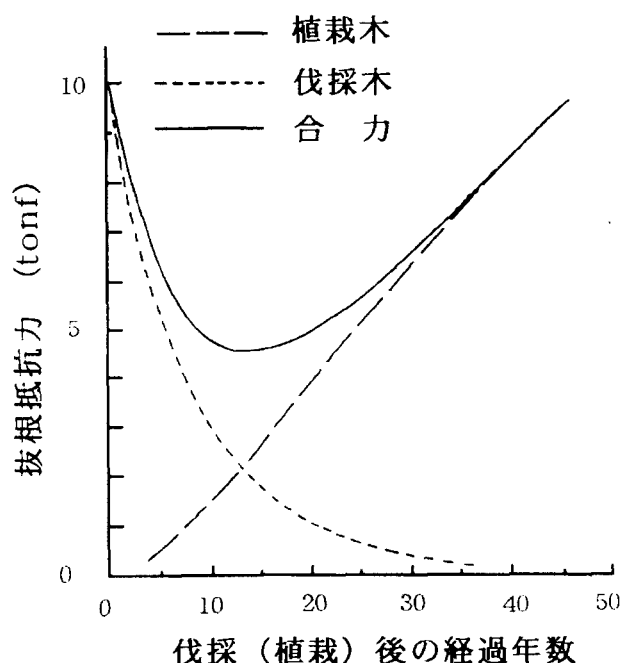
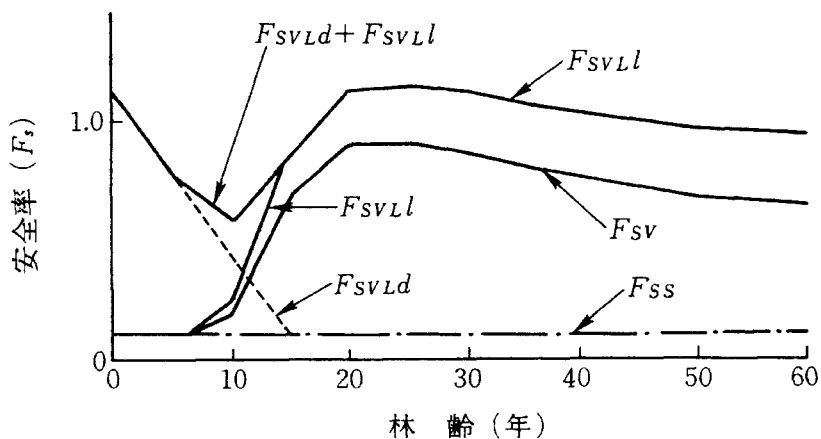


図 2.3 伐採（植栽）後の経過年数と抜根抵抗力との関係（スギ）
（北村・難波，1981）

塚本（1987）は、樹木根系による土の力学的強度補強効果は粘着力の増加として評価できるとし、水平根と垂直根による根系の崩壊防止機能をネットと杭でモデル化し、力学的解析を行うことにより図2.4に示す結果を得ている。



F_{ss} : 土のみの強度
 F_{sv} : 鉛直根の入った土の強度
 F_{svLl} : 鉛直根と水平根の両方が入った土の強度
 (生きた根の場合)
 F_{svLd} : 同上(伐採後の腐朽根の場合)
 ただし,
 F_{ss} , F_{svLl} および F_{svLd} : 上界定理による計算
 F_{sv} : 無限長斜面安定式による計算

図 2.4 伐採と植栽があった場合の斜面の安全率の経年変化 (塚本, 1987)

図 2.4 より,

- ① 斜面の安全率は樹木の生長とともに増加し、その増加傾向は林齢 10 年から 20 年までは特に顕著に認められるが、20 年を経過すると漸減するようになる
- ② 伐採根の場合、経過年数とともに安全率は低下し、約 15 年後には根系による強度補強効果はほとんど見られなくなる
- ③ 森林の伐採と植栽が同時に行われた場合、伐採による根系の腐朽と植栽された樹木の根系の強度補強効果とのバランスで、伐採後約 10 年で安全率は最低となり（最低の場合でも、安全率は樹木のない場合の 4 倍以上を示す）、20~30 年後には最大となる

ということがわかる。

つぎに、既往調査や研究事例をもとに、森林の状態と崩壊発生状況との関係について概観した。森林斜面では、樹木根系による表層崩壊防止機能により、崩壊の発生が抑制され、裸地や草地などの森林の生育していない環境に比べて、崩壊発生頻度が低いことが知られている。しかし、森林伐採や森林の荒廃等によって、樹木根系が腐朽すると、根系を含む表土全体の土の力学的強度が低下し、表層崩壊が発生しやすくなる (塚本, 1998b)。

塚本（1998b）は、全国各地で発生した既往崩壊発生実績をもとに、森林伐採と崩壊発生の関係について整理し、森林伐採後 10 年程度経過した時点で、崩壊が頻発することを示した。鈴木（2006）は、航空写真判読により 1953 年に京都府南部等で発生した南山城災害の実態調査を行い、森林伐採後 10 年程度以下の範囲で崩壊が多発した事実を報告している。また、小山ら（2009）は、2007 年 9 月に鳥取県で発生した表層崩壊の発生状況として、伐採跡地やヒノキ幼齢林で崩壊が多発した事実を報告している。松村ら（2005）は、2004 年台風 23 号により岡山県と香川県で発生した崩壊の実態を把握し、崩壊が林齢 15 年生のスギ人工林内で多発したことを報告している。一方、小藤・鈴木（2006）は、林齢と崩壊発生との関係に着目し、2004 年 7 月の福井豪雨を対象として崩壊発生要因を解析し、スギの人工林内では、林齢が上がるほど、表層崩壊の発生頻度が減少していることを指摘した。

以上に示した崩壊発生と森林状態との関係を整理すると、表層崩壊は、伐採跡地（特に、伐採後 10 年程度経過した時点）や 10～15 年生程度の幼齢林で多発するのに対し、森林の成長とともに森林の効果が増加し、壮齢林では、崩壊発生頻度が低くなっていることがわかる。

以上のように、崩壊発生には森林の状態が深く関与しており、森林は、表層崩壊の主要な説明因子として位置づけられる。しかし、前節で示したように、これまでに提案されている崩壊予測手法は、誘因である降雨量や地形・地質に着目したものが大部分を占めており、森林の効果を加味した崩壊予測手法はほとんど存在しないのが現状である。一方、表層崩壊に対する森林の効果を評価することを目的とした研究は、従来から数多く行われている。

片山ら（1999）は造林面積率、皆伐面積率および林道延長等の林業状況を示す統計データを用いた崩壊危険度評価を行い、良好な精度を得ている。小山内ら（2011）は、過去の災害を対象として、崩壊面積率と植生との関係を数量化手法により解析し、植生区分や樹高、樹木密度と崩壊面積率との関係を定量的に把握した。また、流域の樹種構成の相違による崩壊発生状況の違いに着目した崩壊危険度評価手法も提示されている（例えば、浅見，1997；田野口ら，2004）。以上に示した統計的手法は、その時点における林齢・樹種等の森林状態や森林の効果と表層崩壊との関係を説明することを前提としたものあり、これらの従来の手法では、時間とともに変化する森林の効果をリアルタイムで評価することは不可能である。

一方、森林の効果に着目した物理的手法に基づく崩壊危険度評価としては、樹木根系の効果を土の粘着力の補強強度として斜面安定解析式に組み込み、斜面安定解析により崩壊危険度の評価が行われている（例えば、阿部，1998；塚本，1987）。塚本（2001）は、人工林・天然林・皆伐地といった森林状態の相違による斜面安定性の推移をモデル化し、森林状態の違いによる潜在崩壊斜面数の相違を明らかにした。このほかに、

林齢によって異なる土のせん断補強効果を考慮した斜面安定解析に基づく崩壊危険度評価手法も提示されている（例えば、黒川ら，2007）。また，水平根に着目した森林の崩壊防止機能の評価手法も提案されている（例えば，木下，2010）。表層崩壊防止に対する森林の効果には，森林の成長に伴う樹冠部の形成・成長や根系部の成長，森林伐採や森林の荒廃化に伴う樹木根系の腐朽や衰退など，森林を構成する多くの要因が関係する（例えば，太田，1993）ことになるが，以上に示した物理的手法は，樹木根系の抵抗力にのみ着目したモデルとなっており，根系以外の要因を取り扱うことは不可能である。

森林の表層崩壊防止機能により発揮される効果を適正に評価するためには，伐採や植栽などの森林の施業状態，森林の成長や根系の発達・腐朽等の多くの要因を複合的に取り扱う必要がある。さらに，森林の影響を加味して崩壊予測を行う際には，森林の状態により時々刻々と変化していく森林の効果を適正に評価し，崩壊予測へと反映させていくことが課題となる。以上の点を踏まえ，本研究では，森林伐採・植栽後の経過年数や森林の成長・衰退によって，時間とともに変化する表層崩壊に対する森林の効果を適正に評価するとともに，さらに，この結果をもとに，伐採や植栽といった森林の施業状態を加味した崩壊予測モデルを提示することを目的として実施する。

引用文献

- 阿部和時（1998）：樹木根系の斜面崩壊防止機能，森林科学，No.22，p.23-29
- 浅見和弘（1997）：相模川沿い急傾斜地における植物群落から見た表層崩壊の判定，砂防学会誌，Vol.49，No.5，p.36-41
- 片山哲雄・松村和樹・安田勇次（1999）：林業データを使用した山地荒廃予測の検討，平成11年度砂防学会研究発表会概要集，社団法人砂防学会，p.178-179
- 木下篤彦（2010）：水平根に着目した森林の土砂崩壊防止機能の評価について—治山事業は水平根を育て，水平根は土砂崩壊防止機能を強化する—，治山，Vol.55，No.5，p.112-119
- 北原曜（2007）：平成18年7月豪雨災害の教訓 土砂災害に強い森林づくりに向けて—信州大学農学部治山学研究室の森林根系研究成果より—，長野県林業総合センター技術情報，No.126，p.2-7
- 北原曜（2010）：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，Vol.53，No.311，p.11-37
- 北原曜（2012）：森林根系の斜面安定性効果，山地災害シンポジウム 森林の取り扱いと土砂災害～防災から減災，避災へ～ 講演概要集
- 北村嘉一・難波宣士（1981）：抜根試験を通して推定した材木根系の崩壊防止機能，林業試験場研究報告，No.313，p.175-208
- 小藤隆一・鈴木昌一（2006）：平成16年7月福井豪雨における山腹崩壊とその対策の方向について，砂防学会誌，Vol.59，No.1，P.49-55
- 駒村富士弥（1978）：植生による斜面侵食及び崩壊防止効果，緑化工技術，Vol.5，No.2，p.10-13

- 小山敢・藤田亮・前田雄一・多田泰之・落合博貴・三森利昭・大丸裕武・村上亘・河合隆行・岩村尚樹 (2009) : 2007年9月4日の集中豪雨により鳥取県琴浦町で生じた斜面崩壊の特徴, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, p.52-59
- 黒川潮・阿部和時・大丸裕武・松浦純正 (2007) : 物理則モデルによる表層崩壊危険度評価, 地すべり学会誌, Vol. 43, No. 6, p. 351-355
- 林拙郎 (2008) : 土砂災害と水文・斜面特性, 自然環境保全のための保全砂防学入門—土砂災害の予知と防災—, 株式会社電気書院, p. 198-234
- 平松晋也・水山高久・石川芳治・福本晃久 (1990) : 降雨による一次元鉛直不飽和浸透に関する実験的研究, 新砂防, Vol.42, No.2, p.3-10
- 平野昌繁 (1988) : 六甲山地における崩壊の年次変化と崩壊無効雨量にもとづく土砂生産量の推定, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-1, p.127-138
- 松村和樹・海堀正博・水原邦夫・末峯章・戎信宏・野呂智之・山越隆雄 (2005) : 2004年台風23号における岡山県玉野市, 香川県さぬき市周辺の土砂災害(速報), 砂防学会誌, Vol.57, No.6, p.40-46
- 水山高久・阿部宗平・矢島重美・清水宏・小菅尉多 (1990) : 土砂生産の予測に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.42, No.6, p.29-34
- 沖村孝・市川龍平・藤井郁也 (1985) : 表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法, 新砂防, Vol.37, No.5, p.4-13
- 小山内信智・桂真也・富田陽子・小川紀一郎・中田慎 (2011) : 森林の崩壊抑制効果を反映した生産土砂量推定に向けた一考察—豪雨災害時の崩壊面積率の解析—, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 5, p. 22-32
- 太田猛彦 (1991) : 土保全のための森林管理モデル, 森林科学, No.3, p.36-40
- 太田猛彦 (1993) : 森林と侵食, 砂防学講座第2巻「土砂の生成・水の流出と森林の影響」, (社)砂防学会監修, p.254-282, 山海堂
- 作田健・香月智・安田勇次・松村和樹・松木敬・尾崎順一 (2007) : 類似分析とニューラルネットワークを用いた山地源頭部斜面崩壊確立推定法, 砂防学会誌, Vol. 60, No. 4, p. 3-14
- 佐藤創・大谷健一・神原孝義・島田宏行 (2009) : 冷温帯落葉広葉樹林の根系が斜面安定性に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol.62, No.4, p.29-37
- 森林科学編集委員会 (2002) : 森林の多面的機能の評価に関する学術会議答申, 森林科学, No.34, p.62-76
- 執印康裕・鈴木雅一・堀田紀文・田坂聡明・小川紀一郎 (2009) : 降雨特性及び土質強度特性が表層崩壊発生場に与える影響について—三重県宮川上流域を事例対象として—, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, p.39-46
- SHUIN, Y., HOTTA, N., MATSUE, K., ARUGA, K. and TASAKA, T. : Estimating the Influence of Rainstorms on Shallow Landslides: Comparison of the Intensity-duration Method and a Distributed-landslide Conceptual Model, International Journal of Japan Erosion Control Engineering, Vol.5, No.1, 2012, p.37-45
- 鈴木雅一 (2006) : 1953年8月「南山城災害」斜面崩壊地の航空写真についての研究, 砂防学会誌, Vol.59, No.4, p.43-47

- 田野口康彦・中野泰雄・一澤麻子 (2004) : 花崗岩山地斜面の崩壊現象に及ぼす植生の影響, 砂防学会誌, Vol.57, No.4, p.3-14
- 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, No.23, p.65-124
- 塚本良則・小橋澄治 (1991) : 新砂防工学, 朝倉書店, p.97-123
- 塚本良則 (1998a) : 森林は山地の侵食防止にどのように機能しているか, 森林科学, No.22, p.2-9
- 塚本良則 (1998b) : 森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—, 朝倉書店, p.89-102
- 塚本良則・小坂泉・滝沢英紀・石垣逸朗・大越真澄・福田喬 (2001) : 表層崩壊の発生と崩壊地裸地の消滅過程 —ハゲ山モデルのハゲ山フロント予備域における解析例—, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.63-72
- 内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二 (2009) : 場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, p.23-31
- 打狹珠男 (1971) : ひと雨による山腹崩壊について, 新砂防, Vol.23, No.4, p.21-34
- 吉松弘行 (1977) : 山腹崩壊の予測式について, 新砂防, Vol.29, No.3, p.1-9

第3章 研究対象流域

3.1 位置と自然環境

本研究では、三重県多気郡大台町に位置する「宮川ダム上流域」を対象流域として抽出した。同流域は、三重県と奈良県の県境に位置する大台ヶ原山系（日出ヶ岳：標高 1,695m）に水源を発し、三重県中央部を伊勢湾へと流下する“宮川”の最上流部に位置しており、流域面積は 125.6km²（この内、ダム湛水面積：2.0km²）である。対象流域の位置と流域図を図 3.1 に示す。なお、同図中には、宮川ダム上流域内の 4 次谷以上の河川からなる単元流域区分（流域①～⑧）を併記した。

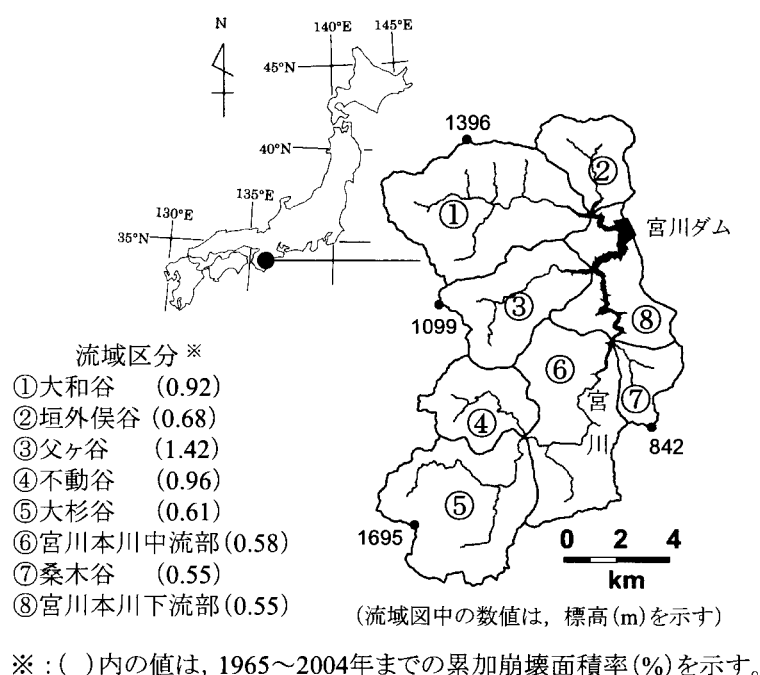


図 3.1 対象流域の位置

宮川ダム上流域の標高は 200～1,700m 程度、主流路長は約 26km、平均河床勾配は 1/18 である。宮川本川は、最上流部において平均河床勾配がそれぞれ 1/10、1/9 をなす不動谷（流域④）と大杉谷（流域⑤）に分かれている。宮川本川は、これら 2 流域の合流点から北に約 15km 流下した後、ダム直上流部において、平均勾配がそれぞれ 1/9、1/5 をなす大和谷（流域①）と垣外俣谷（流域②）からなる支川と合流する。

宮川ダム上流域内の 8 つの単元流域の地形諸元を示す表 3.1 より、垣外俣谷（流域②）は平均斜面勾配が 32.4°と 8 流域の中で最も急峻で、次いで、大和谷（流域①）、父ヶ谷（流域③）、宮川本川中流部（流域⑥）の順となっており、これら 3 流域の平均斜面勾配は 28°以上を示している。

表 3.1 対象流域の地形諸元

流域区分	流域面積 (km ²)	ダム湛水域 面積(km ²)	主流路長 (m)	標高(m)		平均河床 勾配	平均斜面 勾配(°) ※1	累加崩壊 面積率(%) ※2
				最低	最高			
① 大和谷	26.8	0.11	9,580	350	1,400	1/9	28.3	0.92
② 垣外俣谷	8.6	0.09	4,685	300	1,270	1/5	32.4	0.68
③ 父ヶ谷	14.9	0.13	7,251	650	1,233	1/7	28.2	1.42
④ 不動谷	10.5	—	5,512	830	1,355	1/10	26.1	0.96
⑤ 大杉谷	23.8	—	9,631	790	1,695	1/9	24.9	0.61
⑥ 宮川本川中流部	22.8	0.20	10,442	280	1,380	1/11	28.1	0.58
⑦ 桑木谷	5.3	0.02	3,128	290	1,100	1/9	25.6	0.55
⑧ 宮川本川下流部	12.9	1.45	5,880	200	1,042	1/11	27.9	0.55
宮川ダム上流域全域	125.6	2.00	25,953	200	1,695	1/18	27.7	0.81

※1: 国土地理院の50mメッシュの標高データを用いて、ダム湛水域と3次谷以上の河川部を除いて算出した。

※2: 1965～2004年までの累加崩壊面積率(%)を示す。

対象流域の地質は、流域の中～下流域にかけては中央構造線の南側に位置する秩父古生層の砂岩・泥岩・礫岩によってその大部分が占められており、垣外俣谷（流域②）から宮川ダム湛水域末端（流域⑧）にかけての左岸側に斑れい岩・輝緑岩が若干見られる（図 3.2）。流域中流部の右岸から流域上流に位置する大杉谷（流域⑤）は、主に中生代の砂岩・頁岩・礫岩によって占められる。

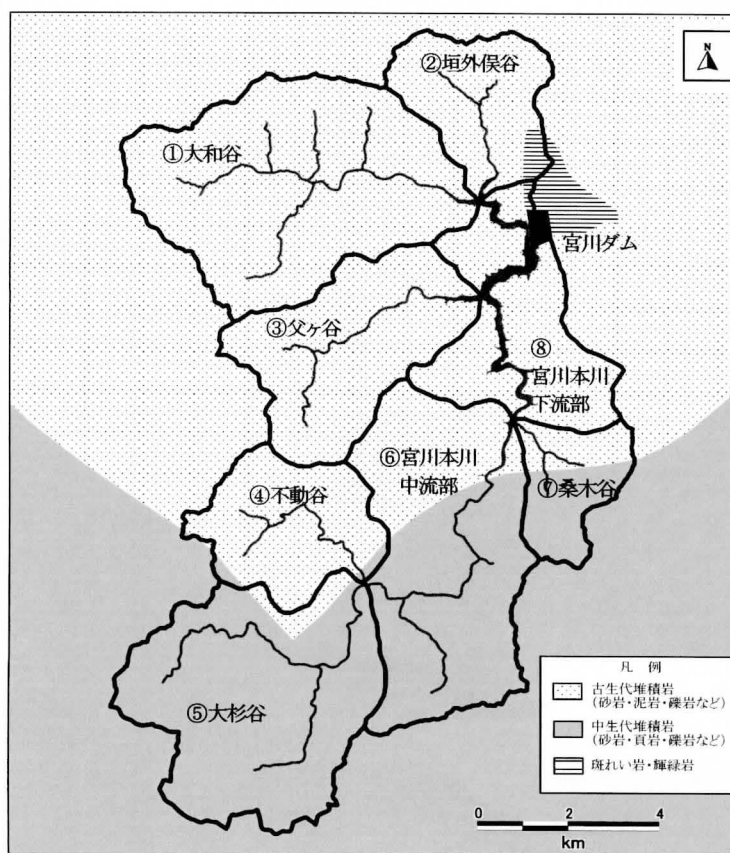


図 3.2 宮川ダム上流域の地質

(土地分類図 表層地質図Ⅳ 1/500,000 (国土交通省 国土政策局 国土情報課 公表 GIS データ) をもとに作成)

図 3.3 に示す宮川ダム上流域の植生図より、流域の植生は、主にスギ・ヒノキ人工林とシイ・カシからなる常緑広葉樹林により構成され、流域面積に対するスギ・ヒノキ人工林の占有率は41%、シイ・カシ林の占有率は30%となっている。スギ・ヒノキ人工林は、宮川本川の右岸側と宮川本川の左支川である大和谷（流域①）、父ヶ谷（流域③）および不動谷（流域④）に多く分布しており、シイ・カシ林は流域中～下流部や大和谷（流域①）と垣外俣谷（流域②）に集中している。また、大和谷（流域①）や大杉谷（流域⑤）の高標高地にはブナなどの落葉広葉樹林が多く分布している。

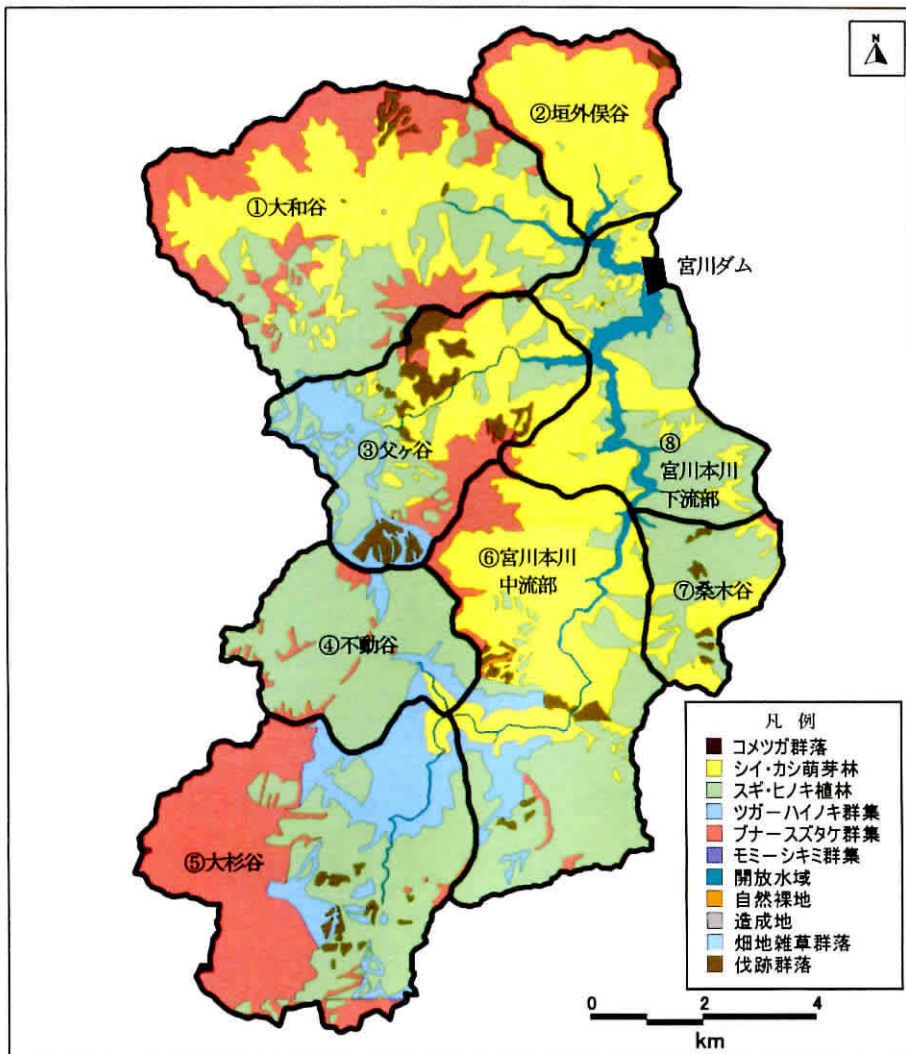


図 3.3 宮川ダム上流域の植生

(1981年 環境庁発行 現存植生図 1/50,000 (環境省自然環境局 生物多様センター 情報システム科 公表GISデータ) をもとに作成)

三重県松阪建設事務所ダム管理室ダム管理課により観測されている宮川ダム地点の降雨データをもとに、1958年から2007年までの50年間にわたる宮川ダム地点の年間総雨量と年最大日雨量の経年変化をとりまとめたものを図 3.4 と表 3.2 に示す。

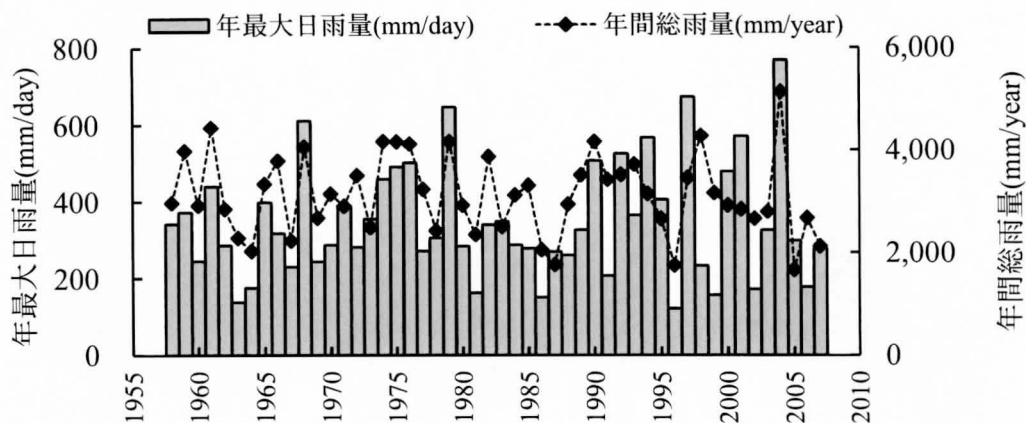


図 3.4 宮川ダム地点の年最大日雨量と年間総雨量の経年変化

表 3.2 宮川ダム地点の降雨状況

年	年間総雨量 (mm/year)	年最大日雨量		年	年間総雨量 (mm/year)	年最大日雨量	
		(mm/day)	発生日			(mm/day)	発生日
1958 (S33)	2,972	342	8/26	1984 (S59)	3,123	287	6/8
1959 (S34)	3,995	372	8/13	1985 (S60)	3,310	278	6/30
1960 (S35)	2,923	245	10/7	1986 (S61)	2,053	151	5/14
1961 (S36)	4,447	440	6/26	1987 (S62)	1,767	269	10/16
1962 (S37)	2,855	286	7/27	1988 (S63)	2,948	260	8/10
1963 (S38)	2,290	138	10/25	1989 (H1)	3,515	326	8/26
1964 (S39)	2,032	175	9/24	1990 (H2)	4,169	506	9/19
1965 (S40)	3,346	398	9/14	1991 (H3)	3,430	206	9/18
1966 (S41)	3,797	318	8/15	1992 (H4)	3,520	525	8/19
1967 (S42)	2,235	230	8/22	1993 (H5)	3,721	364	9/3
1968 (S43)	4,066	611	9/25	1994 (H6)	3,143	567	9/29
1969 (S44)	2,680	243	8/4	1995 (H7)	2,665	405	5/11
1970 (S45)	3,150	287	7/5	1996 (H8)	1,747	121	8/14
1971 (S46)	2,914	387	8/30	1997 (H9)	3,459	672	7/26
1972 (S47)	3,511	281	9/14	1998 (H10)	4,283	233	9/22
1973 (S48)	2,499	355	8/15	1999 (H11)	3,160	156	9/24
1974 (S49)	4,177	459	7/6	2000 (H12)	2,916	478	9/11
1975 (S50)	4,168	491	8/22	2001 (H13)	2,842	570	8/21
1976 (S51)	4,125	501	9/11	2002 (H14)	2,663	171	9/26
1977 (S52)	3,238	271	9/8	2003 (H15)	2,796	325	8/8
1978 (S53)	2,430	305	9/15	2004 (H16)	5,135	767	9/29
1979 (S54)	4,172	646	9/1	2005 (H17)	1,660	298	9/6
1980 (S55)	2,926	284	9/10	2006 (H18)	2,675	177	4/11
1981 (S56)	2,351	162	10/21	2007 (H19)	2,119	277	7/14
1982 (S57)	3,878	340	8/1	平均	3,130	346	—
1983 (S58)	2,508	348	10/8				

ダム地点の年間総雨量は 2,000~6,000mm/year 程度 (平均値 : 3,130mm/year), 年最大日雨量は 200~800mm/day 程度 (平均値 : 346mm/day) にもおよび、対象流域は日本有数の多雨地域であることがわかる。また、台風 21 号により旧宮川村 (現大台町) で甚大な土砂災害が発生した 2004 年には、年間総雨量は 5,135mm/year, 年最大日雨量は 767mm/day (発生日 : 台風 21 号時 (9 月 29 日)) と観測史上最大の降雨が発生

した。この2004年の年最大日雨量（767mm/day）は、対象流域に対して既往研究（黒岩・平松，2004）により示されている崩壊限界雨量：325mm/dayの2倍以上であり、崩壊限界雨量を上回った過去の年最大日雨量と比較しても、当該年の降雨量が突出していることがわかる。

3.2 土砂生産状況

三重県松阪建設事務所ダム管理室ダム管理課より入手した1957年から2007年までの51年間にわたる宮川ダムの堆砂状況の変遷を表3.3と図3.5に示す。1957～1989年までの年間堆砂量の平均値は44,000m³/year程度であったのに対し、1990年以降は175,000m³/year程度と4倍の値を示し、堆砂量は1990年代以降急激に増加していることがわかる。特に、1990、1993、1994、1997および2004年の年間堆砂量は245,000m³/year以上と極端に多くなっている。台風21号がもたらした豪雨によって観測史上最大の降雨量を記録した2004年には、年間堆砂量も596,000m³/yearと観測期間内で最大値を示し、2004年を除く1957～2007年までの平均値：79,000 m³/yearの7倍以上となっている。

表 3.3 宮川ダムの堆砂状況

年	年間堆砂量 (m ³ /year)	累加堆砂量 (m ³)	年	年間堆砂量 (m ³ /year)	累加堆砂量 (m ³)
1957 (S32)	107,000	107,000	1984 (S59)	12,000	1,280,000
1958 (S33)	16,000	123,000	1985 (S60)	5,000	1,285,000
1959 (S34)	21,000	144,000	1986 (S61)	45,000	1,330,000
1960 (S35)	35,000	179,000	1987 (S62)	5,000	1,335,000
1961 (S36)	63,000	242,000	1988 (S63)	48,000	1,383,000
1962 (S37)	20,000	262,000	1989 (H1)	77,000	1,460,000
1963 (S38)	18,000	280,000	1990 (H2)	264,000	1,724,000
1964 (S39)	28,000	308,000	1991 (H3)	179,000	1,903,000
1965 (S40)	103,000	411,000	1992 (H4)	130,000	2,033,000
1966 (S41)	52,000	463,000	1993 (H5)	245,000	2,278,000
1967 (S42)	31,000	494,000	1994 (H6)	269,000	2,547,000
1968 (S43)	41,000	535,000	1995 (H7)	28,000	2,575,000
1969 (S44)	15,000	550,000	1996 (H8)	31,000	2,606,000
1970 (S45)	40,000	590,000	1997 (H9)	424,000	3,030,000
1971 (S46)	47,000	637,000	1998 (H10)	115,000	3,145,000
1972 (S47)	6,000	643,000	1999 (H11)	170,000	3,315,000
1973 (S48)	45,000	688,000	2000 (H12)	105,000	3,420,000
1974 (S49)	129,000	817,000	2001 (H13)	32,000	3,452,000
1975 (S50)	30,000	847,000	2002 (H14)	196,000	3,648,000
1976 (S51)	10,000	857,000	2003 (H15)	112,000	3,760,000
1977 (S52)	8,000	865,000	2004 (H16)	596,000	4,356,000
1978 (S53)	4,000	869,000	2005 (H17)	111,000	4,467,000
1979 (S54)	151,000	1,020,000	2006 (H18)	60,000	4,527,000
1980 (S55)	156,000	1,176,000	2007 (H19)	89,000	4,616,000
1981 (S56)	25,000	1,201,000	1957～1989年の平均	44,242	—
1982 (S57)	14,000	1,215,000	1990～2007年の平均	175,333	—
1983 (S58)	53,000	1,268,000	全期間の平均	90,510	—

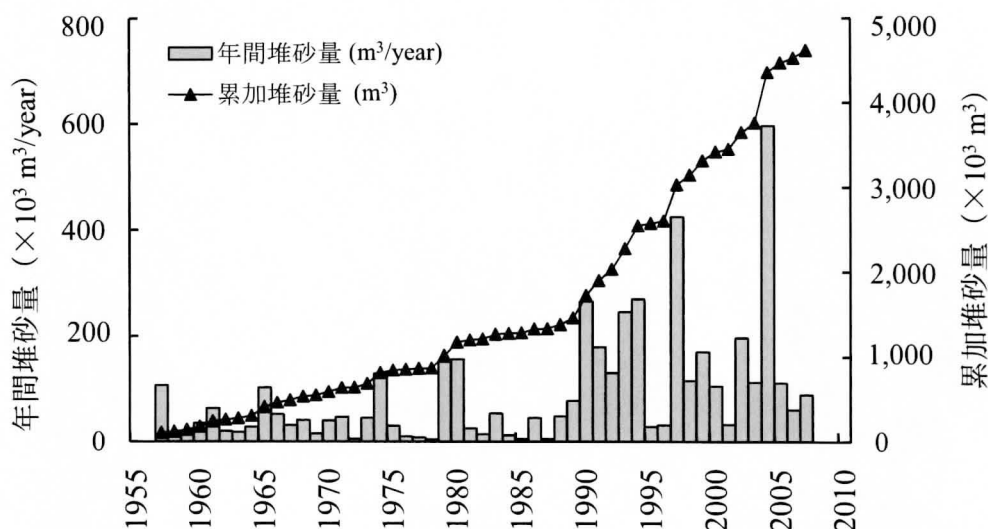


図 3.5 宮川ダムの堆砂量の経年変化

一方、堆砂量の少なかった1957年から1989年までの期間内においても、ダム竣工年である1957年を除くと、1965、1974、1979および1980年の4箇年に、年間堆砂量は103,000~156,000m³/yearと突発的に大きな値を示していることがわかる。なお、ダム竣工時である1957年の年間堆砂量が107,000 m³/yearと多かったのは、ダム建設時の掘削土砂が貯水池内へ流入するといった人為的影響によるものと考えられる（平松ら、2002）。

表 3.4 に示す1965年から2004年までの計9時期の空中写真を用いて判読した宮川ダム上流域内の崩壊発生状況の推移を図 3.6 と表 3.5 に示す。ここで、崩壊地の判

表 3.4 使用した空中写真

No.	撮影年月日	撮影縮尺	撮影計画機関
A	1965年(昭和40年) 4月 28日 9月 19,20日	1:20,000	林野庁
B	1970年(昭和45年) 5月 14,15,18,27日	1:20,000	林野庁
C	1976年(昭和51年) 自 9月 24日 至10月 22日	1:15,000	建設省国土地理院
D	1982年(昭和57年) 5月 8,23日	1:16,000	三重県
E	1986年(昭和61年) 5月 9日 1987年(昭和62年) 5月 10日	1:16,000	三重県
F	1992年(平成4年) 4月 27,29日	1:16,000	三重県
G	1996年(平成8年) 5月 6,10日 1997年(平成9年) 6月 8日	1:16,000	三重県
H	2001年(平成13年) 自 4月 27日 至 7月 5日	1:40,000 ※1	国土交通省国土地理院
I	2004年(平成16年) 10月 14日	1:10,000	三重県

※1:判読には、2倍に引き伸ばした空中写真(縮尺1:20,000)を使用した。

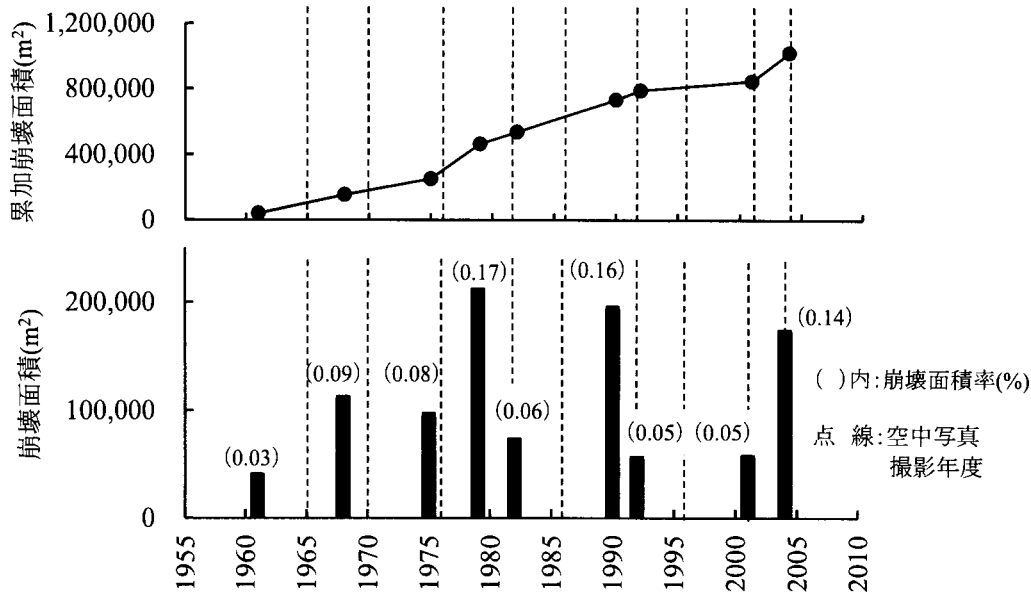


図 3.6 宮川ダム上流域の崩壊面積の推移

表 3.5 宮川ダムの崩壊面積の推移

空中写真 撮影年度	崩壊推定年	崩壊面積		累加崩壊面積		
		(m ²)	面積率 (%)	(m ²)	面積率 (%)	
A	1965	1961	40,920	0.03	40,920	0.03
B	1970	1968	112,811	0.09	153,731	0.12
C	1976	1975	97,311	0.08	251,042	0.20
D	1982	1979	212,225	0.17	463,267	0.37
E	1986~1987	1982	73,741	0.06	537,008	0.43
F	1992	1990	196,103	0.16	733,111	0.58
G	1996~1997	1992	57,164	0.05	790,275	0.63
H	2001	2001	58,120	0.05	848,395	0.68
I	2004	2004	174,090	0.14	1,022,485	0.81
合計			1,022,485	0.81	—	—

定は、2 時期の空中写真を比較することにより行い、1 時期前の空中写真で裸地ではなかった場所が崩壊して新たに裸地になった“新規崩壊”のみを抽出した。崩壊の発生域は、崩壊地の源頭部から崩壊幅が最大となる範囲を原則として抽出し、空中写真上で明らかに流下痕跡が確認された範囲については除外した。崩壊面積は各崩壊の発生域の面積とし、1mm 方眼のトレーシングペーパーを用いて空中写真より直接測定した。表 3.5 に示す崩壊推定年は、2 時期の空中写真の撮影間隔内に年最大日雨量が最大値を示す年を原則として設定した。

宮川ダム上流域では、1976~1982 年（崩壊推定年 1979 年）、1986~1992 年（崩壊推定年 1990 年）、台風 21 号による大規模降雨がもたらされた 2004 年に、崩壊が多発しており、これら 3 時期の崩壊面積はそれぞれ 212,225、196,103、174,090m² と、他期間の崩壊面積の平均値：73,344m² の 2.3 倍以上にも及んでいる。2004 年現在までの累

加崩壊面積は1,022,485m²であり、流域面積に対する累加崩壊面積の比率は0.81%である。また、崩壊地は、図 3.1 中のダム直上流に位置する大和谷（流域①）と父ヶ谷（流域③）、流域中流部に位置する不動谷（流域④）に多く分布している。

3.3 森林伐採と植栽の状況

崩壊地判読に用いた 1965～2004 年までの計 9 時期の空中写真（表 3.4）を用いて、流域内の森林伐採と植栽の状況を以下の 3 形態に区分した。

- ① 伐採地（伐採面積）：森林（立木）が伐採された範囲
- ② 植栽地（植栽面積）：伐採地のうち、植栽された範囲
- ③ 無植栽地（無植栽面積）：伐採地のうち、植栽されずに放置された範囲

伐採地の判読は、異なる 2 時期の空中写真を比較することにより行った。さらに、撮影時期の異なる複数の空中写真を用いて伐採跡地の推移を比較することにより、植栽の有無を判断し、伐採面積を植栽面積と無植栽面積に区別した。2004 年に撮影された空中写真上で新規確認された伐採地（伐採期間：2001～2004 年）については、当該年以降の空中写真を入手することができなかつたため、伐採面積を植栽面積と無植栽面積に区分することができなかつた。伐採面積・植栽面積・無植栽面積は、プランメータ（エリアラインメータ PLANIX5000；タマヤ計測システム株式会社）を用いて空中写真より直接計測した。

宮川ダム上流域における植栽面積、無植栽面積、伐採面積に対する植栽面積率と無植栽面積率の推移を表 3.6 と図 3.7 に示す。1976 年までは、5～6 年間で 500ha 以上（流域の 4%）と多量の森林が伐採されながらも、その大部分に植栽が行われており、伐採面積に対する植栽面積率は 84%以上を示していることがわかる。しかしながら、

表 3.6 伐採面積・植栽面積・無植栽面積の経年変化

空中写真 撮影年度	伐採や植栽が行 われた期間	宮川ダム上流域(流域面積:125.6km ²)								
		伐採面積		植栽面積		無植栽面積		伐採面積 に対する 植栽 面積率 (%)	伐採面積 に対する 無植栽 面積率 (%)	
		伐採 面積 (ha)	累加 伐採 面積 (ha)	植栽 面積 (ha)	累加 植栽 面積 (ha)	無植栽 面積 (ha)	累加 無植栽 面積 (ha)			
A	1965	1965年以前	578.3	578.3	568.3	568.3	10.0	10.0	98	2
B	1970	1965～1970年	753.2	1,331.5	739.3	1,307.6	13.9	23.9	98	2
C	1976	1970～1976年	643.8	1,975.3	538.7	1,846.3	105.1	128.9	84	16
D	1982	1976～1982年	366.6	2,341.8	251.0	2,097.3	115.6	244.5	68	32
E	1986～1987	1982～1986年	265.1	2,607.0	103.4	2,200.7	161.8	406.3	39	61
F	1992	1986～1992年	188.5	2,795.5	70.7	2,271.4	117.8	524.1	38	62
G	1996～1997	1992～1996年	142.0	2,937.5	3.8	2,275.2	138.2	662.3	3	97
H	2001	1996～2001年	35.3	2,972.8	0.0	2,275.2	35.3	697.5	0	100
I	2004	2001～2004年	22.9	2,995.7	—	—	—	—	—	—

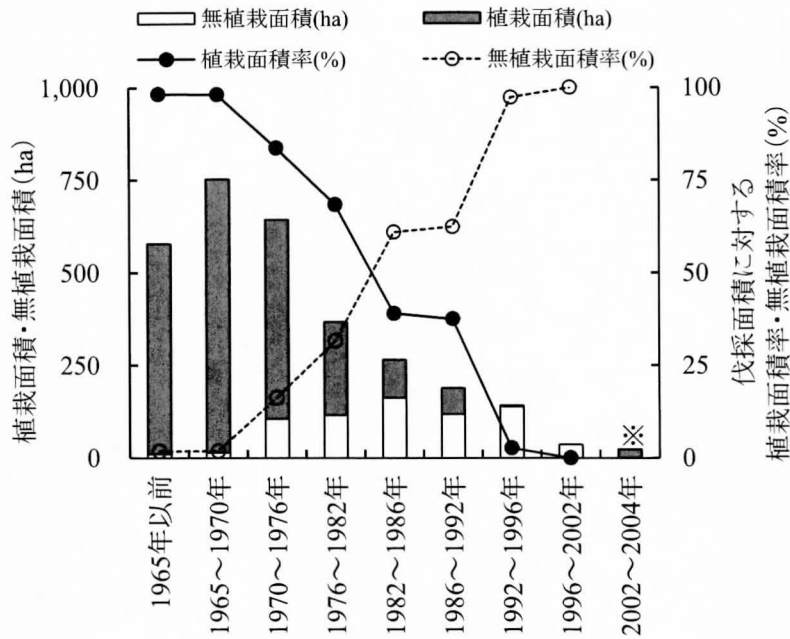


図 3.7 宮川ダム上流域における森林施業状態の推移

1976年以降は、伐採面積が急減するようになり、1980年代以降になると、伐採面積が年々減少するばかりか、伐採面積に対する植栽面積率は50%を下回り、1980年代を境に無植栽面積が急増している状況がうかがえる。2004年現在の森林の総伐採面積は2,996ha（流域の23%）であり、この23%を占める698ha（流域の約6%）が無植栽地となっている。無植栽地は、図3.1に示す流域中流部に位置する父ヶ谷（流域③）と流域上流部に位置する大杉谷（流域⑤）に多く分布している。人工林の樹種は、主にスギとヒノキである（彭ら、1998；三重県農林水産部、1996）。

引用文献

- 平松晋也・黒岩知恵・荒砂隆文（2002）森林伐採や植栽面積の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol. 55，No.4，p. 3-11
- 彭道黎・田中和博（1998）：地理情報システムによる三重県宮川源流域の森林景観分析，日林論，Vol. 109，p.115-118
- 環境庁（1981）：第2回自然環境保全基礎調査（植生調査）現存植生図 大台ヶ原山，尾鷲（S=1/50,000）
- 経済企画庁（1967）：土地分類図（表層地質図Ⅳ）中部・近畿地方（S=1/500,000）
- 黒岩知恵・平松晋也（2004）：森林伐採や植栽を指標とした崩壊面積予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol. 57，No. 2，p. 16-26
- 三重県農林水産部（1996）：宮川ダム上流の森林の状況，p.1-4

第4章 森林伐採や植栽状況を指標とした土砂生産能力評価指標

4.1 概説

森林は、地形や地質と並んで、表層崩壊の主要な説明因子として挙げられる(太田, 1993; 塚本・小橋, 1991)。これまでに提案されている崩壊予測手法は、誘因である降雨量や地形・地質に着目したものが大部分を占めており、森林の効果を加味した崩壊予測手法はほとんど存在しない。一方、表層崩壊に対する森林の効果を評価することを目的とした研究は、従来から数多く行われており、これまでに林齢や樹種等によって森林の効果が異なり、崩壊の発生状況も変化することが明らかにされている(例えば、塚本, 1998; 小山内ら, 2011)。しかしながら、これらの評価手法の大半は、ある時点での森林の状態に着目したものであり、崩壊に対する人為的要因すなわち“森林伐採や植栽状況”の推移を視野に入れた評価手法はほとんど存在しない。近年の林業衰退に伴う伐採跡地の放置等の森林をとりまく現状を勘案すると、表層崩壊による土砂生産予測を適正に行うためには、社会情勢の影響を受けて時々刻々と変化する“森林伐採や植栽の状況”が流域の土砂生産能力に与える影響を定量的に評価するとともに、これによって得られた成果を崩壊予測へと反映させていくことが必要となる。

そこで、本章では、流域の土砂生産状況として「ダム堆砂量:宮川ダム」に着目し、流域の土砂生産能力を評価するための指標として、“森林の伐採や植栽状況”を採用することの可能性について考察する。

第2節では、森林の伐採や植栽状況の変化とダム堆砂量との関係を定量的に把握する。

第3節では、前節で得られた結果を踏まえて、森林伐採や植栽状況の変化に伴う「流域の土砂生産能力評価指標」を提示するとともに、ダム堆砂量に対する同指標の適用性を考察する。

4.2 ダム堆砂量と森林伐採や植栽状況との関係

一般に、森林施業は、造林・保育・収穫等の一連の林業活動を意味するが、ここでは、林業活動の基本的な作業であり、また森林斜面からの土砂生産に大きな影響を及ぼす「森林の伐採と植栽状況」に着目し、これらとダム堆砂量との関係について考察する。

森林伐採や植栽状況とダム堆砂量との因果関係を明らかにするため、森林伐採や植栽状況の判読に使用した空中写真(表3.4)の撮影年度間ごとに年間堆砂量を集計し(以下、「期間内堆砂量」と呼ぶ)、これらの値と各期間の伐採面積・植栽面積・無植栽面積との関係について考察した。

伐採面積・植栽面積・無植栽面積と期間内堆砂量との関係を図 4.1 と表 4.1 に示す。2004 年の空中写真上で確認された伐採面積(2001～2004 年の期間に伐採された伐採面積)については, 2004 年以降に撮影された空中写真を入手することができなかったため, 伐採面積を植栽面積と無植栽面積に区分することができなかった。表 4.1 中には, 空中写真の撮影年度間ごとに集計した年間総雨量の合計値(以下, 「期間内総雨量」と呼ぶ)を併記した。

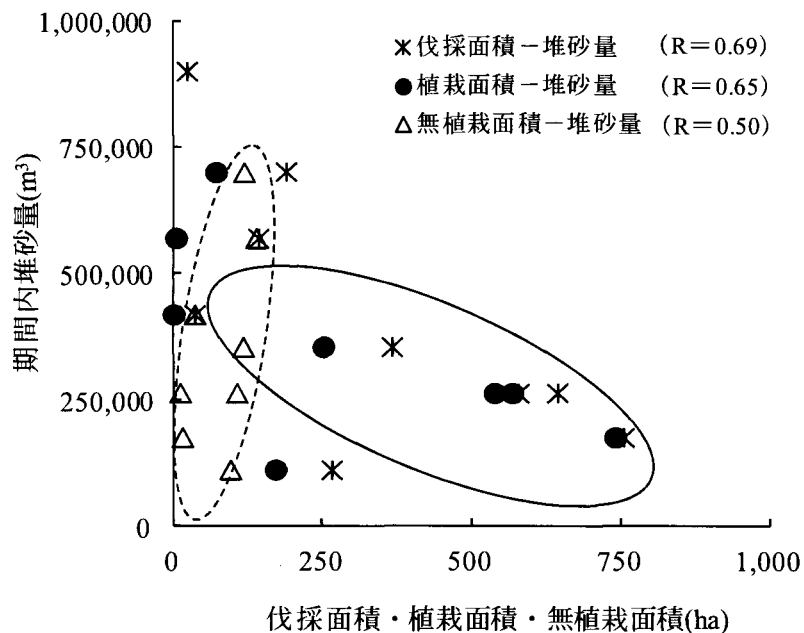


図 4.1 期間内堆砂量と伐採面積・植栽面積・無植栽面積との関係

表 4.1 期間内堆砂量と森林伐採や植栽状況

空中写真 撮影年度	伐採や植栽が 行われた期間	森林伐採や植栽状況					期間内 堆砂量 (m ³)	期間内 総雨量 (mm)
		伐採 面積 (ha)	植栽面積		無植栽面積			
			(ha)	伐採面積に 対する比率 (%)	(ha)	伐採面積に 対する比率 (%)		
1965	1965年以前	578.3	568.3	98.3	10.0	1.7	267,000 ^{※1}	17,893 ^{※1}
1970	1965～1970年	753.2	739.3	98.2	13.9	1.8	179,000	15,928
1976	1970～1976年	643.8	538.7	83.7	105.1	16.3	267,000	21,394
1982	1976～1982年	366.6	251.0	68.5	115.6	31.5	358,000	18,995
1986～1987	1982～1986年	265.1	170.6	64.3	94.6	35.7	115,000	10,994
1992	1986～1992年	188.5	70.7	37.5	117.8	62.5	703,000	19,349
1996～1997	1992～1996年	142.0	3.8	2.7	138.2	97.3	573,000	11,276
2001	1996～2001年	35.3	0.0	0.0	35.3	100.0	422,000	16,660
2004	2001～2004年	22.9 ^{※2}	—	—	—	—	904,000	10,594

※1: 1965年以前の期間内堆砂量と期間内総雨量は, 1960～1965年の値を集計したものである。

※2: 2004年の空中写真上で確認された伐採面積は, それ以降の空中写真を入手することができなかったため, 伐採面積を植栽面積と無植栽面積に区分することができなかった。

図 4.1 と表 4.1 をもとに、伐採面積と期間内堆砂量との関係を見ると、伐採面積の増加とともに堆砂量が減少するといった傾向がわずかながら認められる（相関係数： $R=0.69$ ）。この原因としては、森林の伐採が盛んに行われていた 1976 年以前では、伐採面積に対する植栽面積率は 80%以上を示し（表 4.1）、大部分の伐採跡地に対して植栽が行われていたという事実が挙げられる。このように、森林を伐採しても、そのまま放置した場合と直ちに植栽した場合とでは、流域内の土砂生産能力に及ぼす伐採の影響度が異なるため、単に森林伐採のみを指標として、流域内の土砂生産状況を説明することができないことがわかる。

上記事項を勘案し、森林伐採後の“植栽の有無”に着目し、植栽面積や無植栽面積と期間内堆砂量との関係を見ると、これらの相関係数はそれぞれ $R=0.65$, 0.50 と統計的な有意性は若干低くなったものの、植栽面積と堆砂量との間には負の相関性（図 4.1 中の実線で示した傾向）が、無植栽面積と堆砂量との間には正の相関性（図 4.1 中の点線で示した傾向）が確認された。

期間内堆砂量と伐採面積・植栽面積・無植栽面積の推移を図 4.2 に示す。同図中には、期間内総雨量の変遷も併記した。

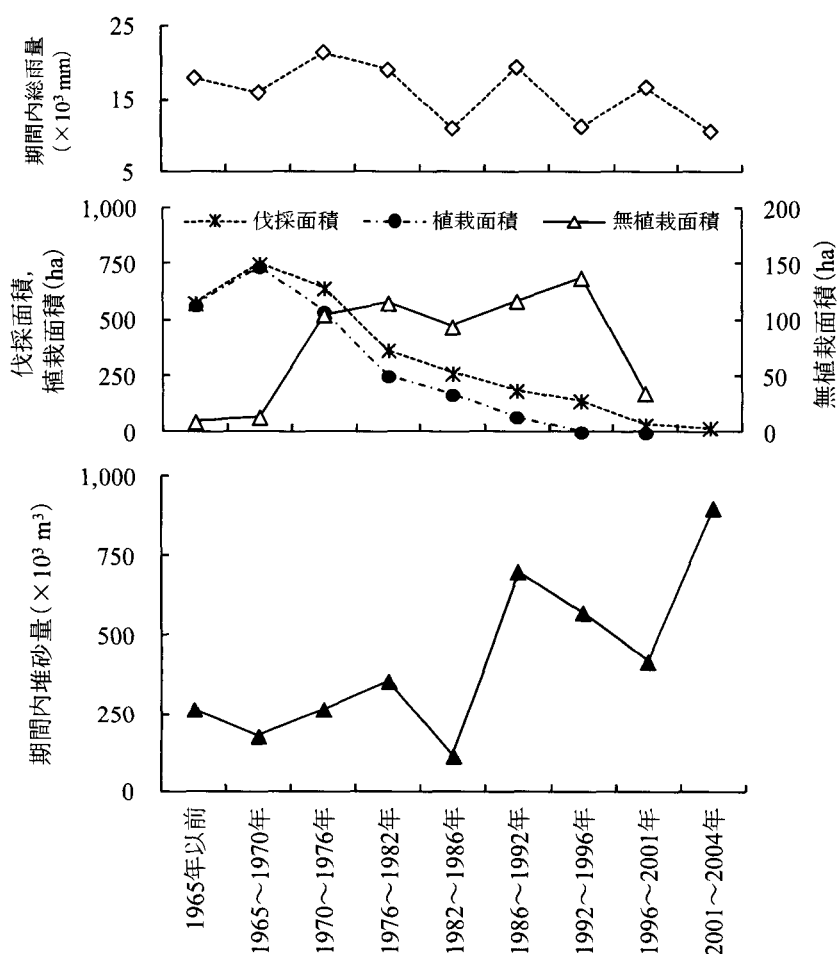


図 4.2 期間内総雨量，森林伐採や植栽状況および期間内堆砂量の推移

期間内堆砂量の推移を見ると、期間内総雨量に顕著な変化が認められないにもかかわらず、1986年以降堆砂量は急激に増加するようになり、1986年以前の期間と比較して、堆砂量は2~4倍程度大きな値を示していることがわかる。期間内堆砂量と森林伐採や植栽状況を比較すると、堆砂量と無植栽面積との間に明瞭な対応関係が認められ、堆砂量の急増した1986年以降に着目すると、期間内堆砂量が500,000m³以上と高い値を示した1986~1992年と1992~1996年2時期には、無植栽面積もそれぞれ118,138haと他期間と比較して大きな値を示している。さらに、空中写真判読と現地調査により、宮川ダム上流域では、1980年代後半より、30ha以上の大面積伐採跡地が無植栽のまま放置されるようになり、近年はこれらの無植栽地で表層崩壊が多発している事実が確認された(黒岩・平松, 2010)。このように、降雨量に顕著な変化が見られないにもかかわらず、近年堆砂量が急増した原因としては、無植栽地の増加により森林の効果を期待することができなくなったという事実が挙げられる。

以上の結果より、森林伐採後の植栽の有無によってダム堆砂量が大きく変化する事実が明らかとなり、伐採後に無植栽状態のまま放置すると流域からの土砂生産は活発化するのに対し、伐採後直ちに植栽が行われると土砂生産が抑制されることがわかる。

4.3 森林伐採や植栽を指標とした流域の土砂生産能力評価

流域内での土砂生産源を考えた場合、1次的な発生源としては斜面崩壊や土壌侵食などの斜面からの侵食が、2次的な発生源としては溪岸崩壊や土石流といった溪流での侵食が挙げられる。この内、最も典型的かつ活発な土砂生産源となるのは斜面崩壊であり、これを抑制しているのが樹木の根系群である(北原, 2010; 竹下, 1993)。

塚本(1987)は、この樹木根系群の崩壊防止機能をモデル化し、森林の伐採や植栽が斜面安定性に及ぼす影響について検討を加え、斜面安定性は伐採後5年頃より低下し始め、約15年でほぼ消滅するものの、植栽が行われた場合、斜面安定性は植栽後5~20年に顕著な増加傾向を示し、20~30年で最大となることを指摘している。

宮川ダム上流域内の伐採地で発生した表層崩壊を抽出し、森林伐採や植栽後の経過年数と伐採地内の崩壊面積や崩壊個数との関係をとりとまとめたものを図4.3に示す。図4.3より、森林の伐採後5年程度で、崩壊面積は78,045m²、崩壊個数は260個と崩壊が多発しており、斜面の不安定化が最も顕著に認められる。植栽後20年以上経過すると、崩壊面積は2,500~10,000m²、崩壊個数は10~30個と、伐採後5年頃と比較して1/8~1/30程度にまで減少しており、植栽により斜面が安定化していることがわかる。

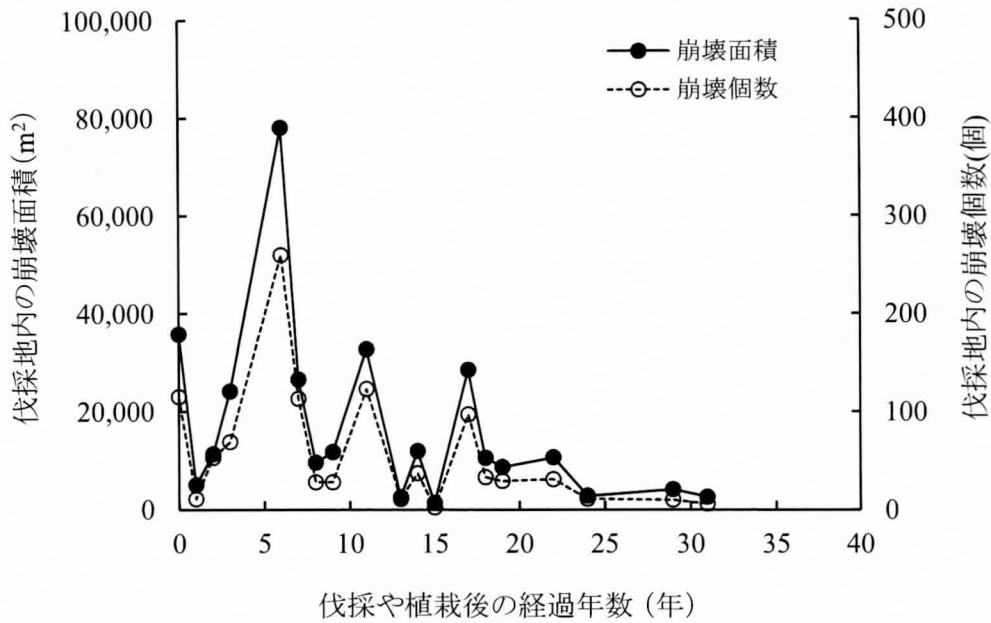


図 4.3 森林伐採や植栽後の経過年数と伐採地内での崩壊発生状況との関係

本研究では、図 4.3に示す宮川ダム上流域内における森林伐採後の経過年数と崩壊との関係、前節で得られた伐採や植栽状態とダム堆砂量との関係、さらに既往研究における指摘事項（塚本，1987）を勘案し、森林伐採や植栽状況の影響を加味した流域の土砂生産能力評価指標を提示した。本指標を算出するための概念を図 4.4に示す。

図 4.4に示したように、本研究では、森林伐採に伴う「斜面安定性の低下」と伐採後に植栽された場合の「斜面安定性の向上」の双方を加味して、流域の土砂生産能力

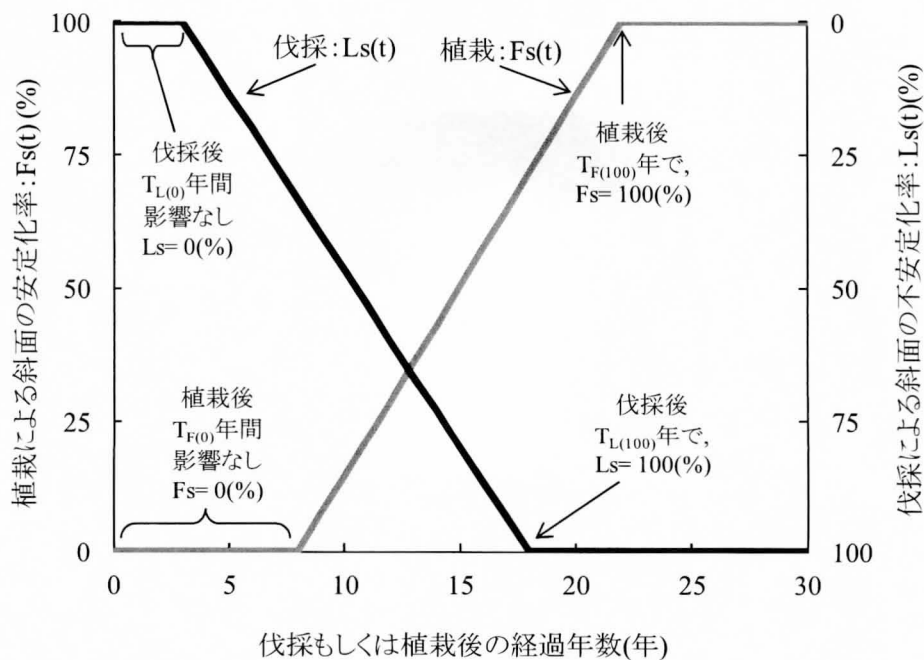


図 4.4 森林伐採や植栽状況の変化を指標とした土砂生産能力評価の概念

を評価する。伐採による斜面安定性の低下は、“伐採による斜面の不安定化率の増加”として表わし、伐採後の経過年数すなわち根系の腐朽とともに、斜面の不安定化率が増加するものとした。これに対して、伐採後に植栽が行われた場合の斜面安定性の向上は、“植栽による斜面の安定化率の増加”として表わし、植栽後の経過年数すなわち森林の成長とともに、斜面の安定化率が増加するものとした。これらの森林の伐採や植栽後の斜面安定性の変化傾向は、便宜上、直線的であると仮定した。

図 4.4に示すように、伐採による斜面の不安定化率： $Ls(t)$ は、伐採後 $T_{L(0)}$ 年より増加し始め（伐採による影響開始年数）、 $T_{L(100)}$ 年で100%になる（伐採による植生の影響消滅年数）。これに対して、植栽による斜面の安定化率： $Fs(t)$ は、植栽後 $T_{F(0)}$ 年より増加し始め（植栽による影響開始年数）、 $T_{F(100)}$ 年で100%になる（植栽による回復年数）。これらの4つの境界年数（ $T_{L(0)}$ 、 $T_{L(100)}$ 、 $T_{F(0)}$ 、 $T_{F(100)}$ ）は、対象とする流域内の土砂生産形態、気象条件および樹種等の立地条件によって変化するものと考え、流域固有の境界年数を設定した。

宮川ダムの堆砂量を対象とする際の境界年数は、図 4.3に示す森林伐採と崩壊発生状況との関係と前述の塚本（1987）による指摘事項を考慮したうえで、試行錯誤により、伐採による影響開始年数： $T_{L(0)}=5$ 年、伐採による植生の影響消滅年数： $T_{L(100)}=20$ 年、植栽による影響開始年数： $T_{F(0)}=5$ 年、植栽による回復年数： $T_{F(100)}=20$ 年とそれぞれ設定した（図 4.5）。

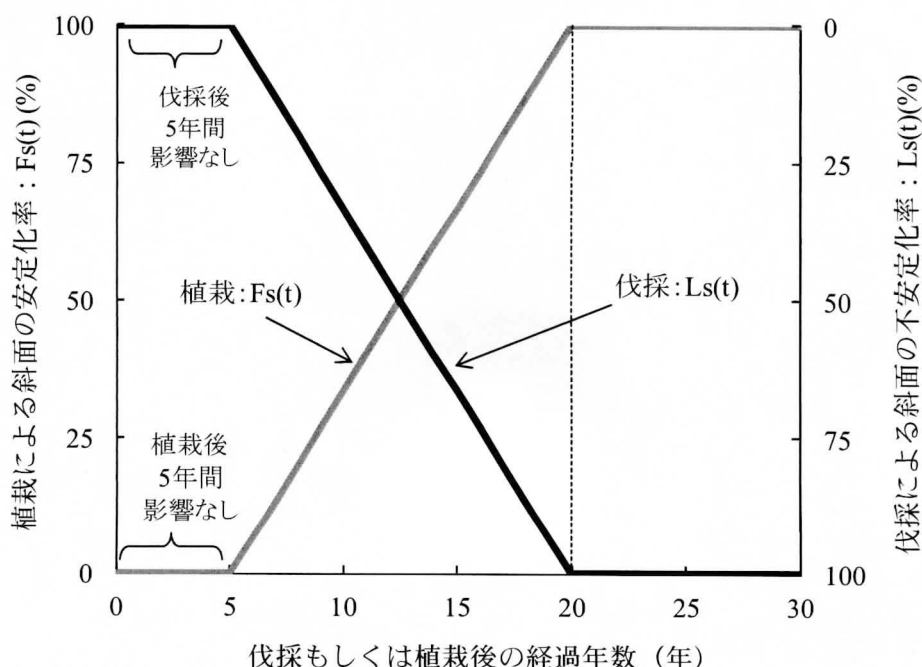


図 4.5 宮川ダムの堆砂量の評価を目的とした場合の境界年数設定結果

図 4.5に示した伐採もしくは植栽後の経過年数に対応した斜面の不安定化率と安定化率の経年変化は、それぞれ(4.1), (4.2)式を用いて表すことができる。

$$\left. \begin{array}{l} t \leq 5; L_s(t) = 0.0 \\ 5 < t < 20; L_s(t) = \frac{20}{3} \cdot t - \frac{100}{3} \\ t \geq 20; L_s(t) = 100.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} t \leq 5; F_s(t) = 0.0 \\ 5 < t < 20; F_s(t) = \frac{20}{3} \cdot t - \frac{100}{3} \\ t \geq 20; F_s(t) = 100.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに、 t ：伐採もしくは植栽後の経過年数（年）， $L_s(t)$ ：伐採後 t 年経過した時点での斜面の不安定化率（%）， $F_s(t)$ ：植栽後 t 年経過した時点での斜面の安定化率（%）である。

つぎに、(4.1)式で求められる伐採後 t 年に対応した不安定化率： $L_s(t)$ に、対象とする伐採地のうち伐採後 t 年経過した伐採面積を乗じた値を「伐採による不安定化面積指標： $AL_s(t)$ 」と定義し、(4.3)式で求めた。同様に、(4.2)式で得られる植栽後 t 年に対応した安定化率： $F_s(t)$ に、対象とする植栽地のうち植栽後 t 年経過した植栽面積を乗じた値を「植栽による安定化面積指標： $AF_s(t)$ 」と定義し、(4.4)式で求めた。

$$AL_s(t) = AL(t) \cdot L_s(t) \dots\dots\dots (4.3)$$

$$AF_s(t) = AF(t) \cdot F_s(t) \dots\dots\dots (4.4)$$

ここに、 $AL_s(t)$ ：伐採後 t 年時点の伐採による不安定化面積指標(ha)， $AL(t)$ ：対象とする伐採面積のうち伐採後 t 年の伐採面積(ha)， $L_s(t)$ ：伐採後 t 年経過した時点での斜面の不安定化率（%）， $AF_s(t)$ ：植栽後 t 年時点の植栽による安定化面積指標(ha)， $AF(t)$ ：対象とする植栽面積のうち植栽後 t 年の植栽面積(ha)， $F_s(t)$ ：植栽後 t 年経過した時点での斜面の安定化率（%）である。

さらに、(4.5)式に示すように、「伐採による不安定化面積指標： $AL_s(t)$ 」から「植栽による安定化面積指標： $AF_s(t)$ 」を差し引いた値を「土砂生産可能面積指標： $AP(t)$ 」と定義した。

$$AP(t) = ALs(t) - AFs(t) \dots\dots\dots (4.5)$$

ここに、 $AP(t)$ ：伐採もしくは植栽後 t 年時点の土砂生産可能面積指標(ha)， $ALs(t)$ ：伐採後 t 年時点の伐採による不安定化面積指標(ha)， $AFs(t)$ ：植栽後 t 年時点の植栽による安定化面積指標(ha)である。

そして、流域内に存在する伐採や植栽後の経過年数が異なる伐採地・植栽地に対して、(4.1)～(4.5)式を用いてそれぞれの経過年数に対応した「土砂生産可能面積指標： $AP(t)$ 」を算出し、これらを合計した値を対象流域内での森林伐採や植栽状況の変化に伴う「土砂生産能力評価指標： $\Sigma AP(t)$ 」と定義した。

$$\Sigma AP(t) = AP(t_1) + AP(t_2) + \dots\dots\dots + AP(t_n) \dots\dots\dots (4.6)$$

ここに、 $\Sigma AP(t)$ ：対象とする時期の土砂生産能力評価指標(ha)， t_n ：対象とする時期に流域内に存在する伐採地・植栽地の伐採（植栽）後の経過年数（年）， $AP(t_n)$ ：伐採（植栽）後 t_n 年に対応した土砂生産可能面積指標(ha)である。

現地調査により、無植栽地では、伐採後 20 年以上経過した時点でも斜面勾配が 30° 以上の急勾配区域では、植生の自然回復が見られない事例が数多く確認された。このため、本研究では、伐採後に植栽されずに放置された伐採面積すなわち無植栽面積は、伐採後の経過年数とは無関係に裸地として取り扱う（無植栽地内での植生の自然回復は考慮しない）ものとした。

宮川ダムの堆砂量を対象とした場合の図 4.5 と(4.1)～(4.6)式を宮川ダム上流域に適用することにより得られた土砂生産能力評価指標（ $\Sigma AP(t)$ ）と年間堆砂量の経年変化を図 4.6 と表 4.2 に示す。ここで、(4.1)～(4.6)式への入力条件となる伐採や植栽

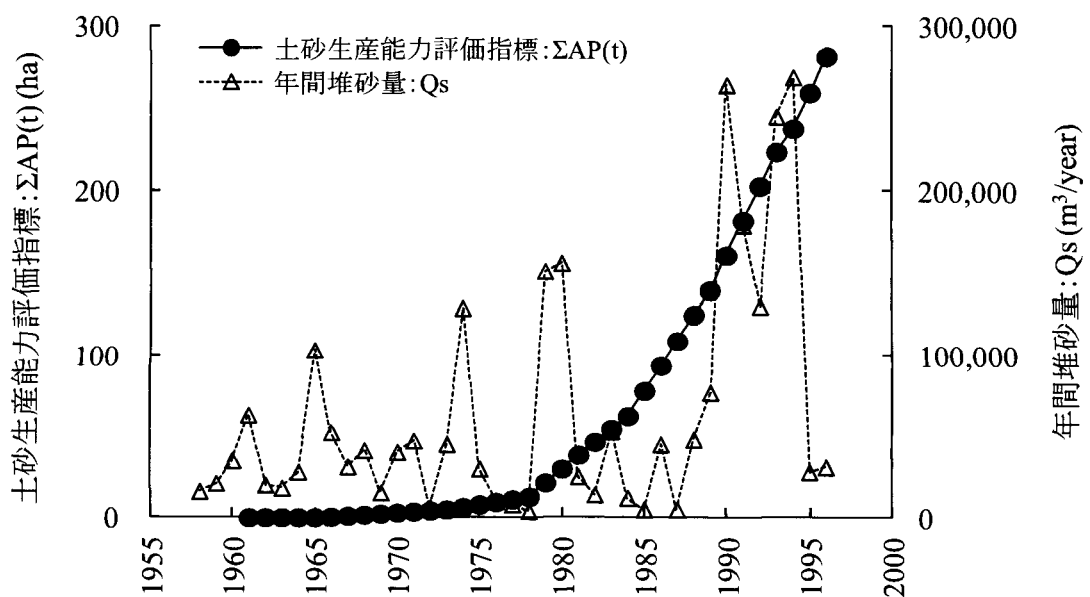


図 4.6 土砂生産能力評価指標（ $\Sigma AP(t)$ ）と年間堆砂量（ Qs ）の経年変化

表 4.2 土砂生産能力評価指標 (ΣAP(t)) と年間堆砂量 (Qs) の経年変化

年度	A(1986年)				B(1988年)				C(1973年)				D(1979年)				E(1984年)				F(1989年)				年間堆砂量 Qs (m ³ /year)
	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	経過年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	AP(t)(ha)	
1981	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48,400*	
1982	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20,000	
1983	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18,000	
1984	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28,000	
1985	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	103,000	
1986	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52,000	
1987	6	37.89	38.55	0.67	75.77	77.11	1.33	0	49.29	50.21	0.93	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31,000	
1988	7	113.66	115.66	2.00	1	0.00	0.00	0.00	98.57	100.42	1.85	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41,000	
1989	8	151.55	154.21	2.66	2	0.00	0.00	0.00	147.86	150.64	2.78	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15,000	
1990	9	189.43	192.76	3.33	3	0.00	0.00	0.00	197.14	200.85	3.71	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40,000	
1991	10	227.32	231.32	4.00	4	0.00	0.00	0.00	246.43	251.06	4.63	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47,000	
1992	11	265.21	269.87	4.66	5	0.00	0.00	0.00	295.71	301.27	5.56	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6,000	
1993	12	303.09	308.42	5.33	6	0.00	0.00	0.00	345.00	351.48	6.49	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46,000	
1994	13	340.98	346.97	5.99	7	0.00	0.00	0.00	394.28	401.70	7.41	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45,000	
1995	14	378.87	385.53	6.66	8	0.00	0.00	0.00	443.57	451.91	8.34	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8,000	
1996	15	416.75	424.08	7.33	9	0.00	0.00	0.00	492.85	502.12	9.27	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	129,000	
1997	16	454.64	462.63	7.99	10	0.00	0.00	0.00	542.14	552.33	10.19	11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30,000	
1998	17	492.53	501.18	8.66	11	0.00	0.00	0.00	591.42	602.54	11.12	12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10,000	
1999	18	530.41	539.74	9.32	12	0.00	0.00	0.00	640.71	652.76	12.05	13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8,000	
2000	19	568.30	578.29	9.99	13	0.00	0.00	0.00	689.99	702.97	12.97	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4,000	
2001	20	568.30	578.29	9.99	14	0.00	0.00	0.00	739.28	753.18	13.90	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	156,000	
2002	21	568.30	578.29	9.99	15	0.00	0.00	0.00	788.56	802.12	14.83	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25,000	
2003	22	568.30	578.29	9.99	16	0.00	0.00	0.00	837.84	851.91	15.76	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14,000	
2004	23	568.30	578.29	9.99	17	0.00	0.00	0.00	887.12	901.27	16.69	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53,000	
2005	24	568.30	578.29	9.99	18	0.00	0.00	0.00	936.40	950.44	17.62	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12,000	
2006	25	568.30	578.29	9.99	19	0.00	0.00	0.00	985.68	1000.00	18.55	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5,000	
2007	26	568.30	578.29	9.99	20	0.00	0.00	0.00	1034.96	1049.27	19.48	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45,000	
2008	27	568.30	578.29	9.99	21	0.00	0.00	0.00	1084.24	1100.00	20.41	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48,000	
2009	28	568.30	578.29	9.99	22	0.00	0.00	0.00	1133.52	1149.27	21.34	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	77,000	
2010	29	568.30	578.29	9.99	23	0.00	0.00	0.00	1182.80	1200.00	22.27	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	264,000	
2011	30	568.30	578.29	9.99	24	0.00	0.00	0.00	1232.08	1250.00	23.20	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7,000	
2012	31	568.30	578.29	9.99	25	0.00	0.00	0.00	1281.36	1300.00	24.13	26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	179,000	
2013	32	568.30	578.29	9.99	26	0.00	0.00	0.00	1330.64	1350.00	25.06	27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	130,000	
2014	33	568.30	578.29	9.99	27	0.00	0.00	0.00	1379.92	1400.00	26.00	28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	245,000	
2015	34	568.30	578.29	9.99	28	0.00	0.00	0.00	1429.20	1450.00	26.93	29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	269,000	
2016	35	568.30	578.29	9.99	29	0.00	0.00	0.00	1478.48	1500.00	27.86	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28,000	
2017	36	568.30	578.29	9.99	30	0.00	0.00	0.00	1527.76	1550.00	28.79	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31,000	

※計算開始年である1981年の年間堆砂量としては、1987～1981年の年間堆砂量を平均した値を使用した。
t: 採掘もしくは堆積後の経過年数(年)
AF(t): 対象とする堆積面積(ha)
AL(t): 対象とする採掘面積(ha)
AP(t): 対象とする堆積面積(ha)

ΣAP(t): 堆積による安定化面積指標(ha)
ΣAL(t): 採掘による不安定化面積指標(ha)
ΣAP(t): 土砂生産能力評価指標(ha)

後の経過年数：t を求めるために必要となる流域内で森林伐採や植栽が行われた時期は、空中写真撮影年度間の中間年と仮定し、1968, 1973, 1979, 1984, 1989, 1994 年とそれぞれ設定した。なお、1965 年の空中写真で確認された伐採地や植栽地は、空中写真判読により、伐採や植栽後 3~4 年程度経過しているものと判断されたため、伐採・植栽年を 1961 年と仮定した。

宮川ダムの年間堆砂量と $\Sigma AP(t)$ を比較すると、年間堆砂量は 1990 年より急増しているのに対し、 $\Sigma AP(t)$ は 1980 年頃より緩やかに上昇し始めるといった時期的なずれが若干認められるものの、両者は概ね同様の傾向を示し、近年の急激な堆砂量の増加とともに $\Sigma AP(t)$ も急増していることがわかる。

しかしながら、年平均堆砂量が $44,000\text{m}^3/\text{year}$ と少なかった 1980 年代以前では、1965, 1974, 1979 および 1980 年に堆砂量の突発的な増加が見られるのに対し、 $\Sigma AP(t)$ にはほとんど変化は見られない。また、 $\Sigma AP(t)$ は 1980 年頃を境に無植栽面積の増加とともに年々増加する傾向にあるものの、年間堆砂量は毎年増減を繰り返しており、両者の間には少なからず相違が認められる。このように、 $\Sigma AP(t)$ と堆砂量の傾向に差異が認められた理由としては、ダム堆砂量が、毎年変化する降雨量によって増減する流域内の土砂生産や土砂流出の影響を受けることが挙げられる。

さらに、本研究で提示した土砂生産能力評価指標： $\Sigma AP(t)$ と年間堆砂量： Q_s との関係性を求めたところ (図 4.7)、統計的な有意性は高いとはいえないものの (相関係数： $R=0.49$)、 $\Sigma AP(t)$ の増加とともに堆砂量も増加傾向を示すといった対応関係が確認された。

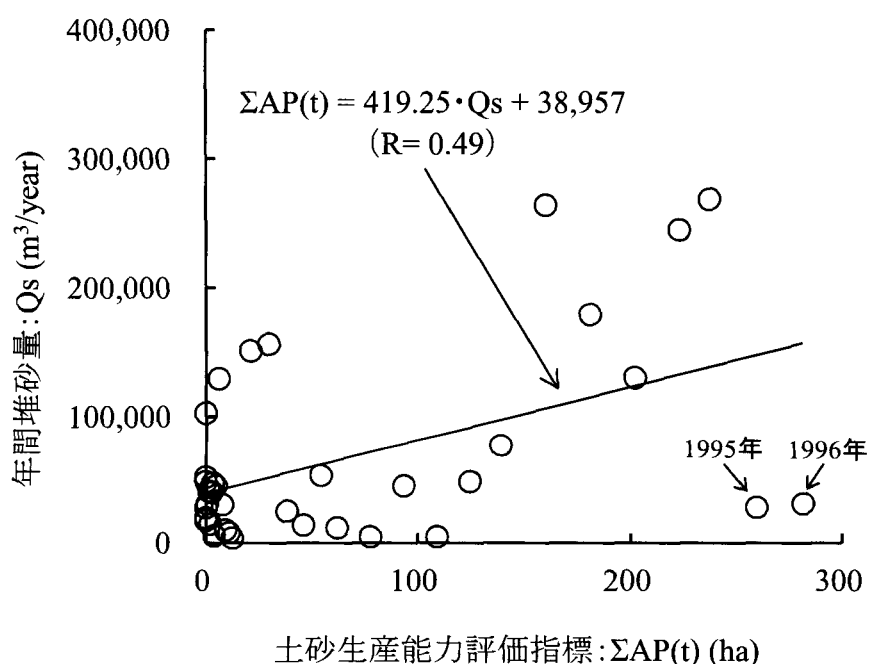


図 4.7 土砂生産能力評価指標 ($\Sigma AP(t)$) と年間堆砂量 (Q_s) との関係

以上の結果より、年間堆砂量と $\Sigma AP(t)$ の間には少なからず正の相関性が認められるため、「土砂生産能力評価指標： $\Sigma AP(t)$ 」は、流域の土砂生産状況を反映しているものと考えられるダム堆砂量を再現・予測するための説明変数として利用可能であると判断される。

図 4.7 を詳細に見ると、 $\Sigma AP(t)$ が 250ha 以上と極めて大きくなっているにもかかわらず、年間堆砂量は 30,000m³/year 程度と極端に小さな値を示す場合（1995, 1996 年）も見られる。このように、流域内の土砂生産能力が高くなっていたにもかかわらず、実際の堆砂量が少なかった原因としては、これらの 2 箇年の年間総雨量がそれぞれ 1995 年には 2,665mm/year, 1996 年には 1,747mm/year と年平均総雨量（3,130mm/year）を大きく下回っていたため、大規模な土砂生産・流出には至らなかったという事実が挙げられる。

4.4 まとめ

森林地を構成する A₀ 層や下層植生は「表面侵食防止機能」を、樹木の根系は「表層崩壊防止機能」を有しており、森林が後者の「表層崩壊防止機能」を中心として、土砂災害防止に多大な貢献をなしていることは周知の事実である（佐藤，2006；塚本，1998）。しかしながら、近年の林業活動における収益性の低迷にともなう森林施業の粗放化により、森林の土砂災害防止機能は著しく低下し、管理・保育が十分になされていない森林地内においては、斜面からの土砂生産が活発化するようになる。

本章では、流域の土砂生産状況としてダム堆砂量に着目し、森林伐採や植栽状態の変化とダム堆砂量との関係を把握するとともに、流域の土砂生産能力を評価するための指標として、森林の伐採や植栽状況を使用することの可能性について検討を加えた。

森林伐採後の植栽の有無とダム堆砂量との因果関係を検討したところ、植栽面積と堆砂量との間には負の相関性が、無植栽面積と堆砂量との間には正の相関性が確認され、植栽の有無によって堆砂量すなわち土砂生産状況が大きく変化することが明らかとなった。

以上の結果を踏まえ、森林伐採や植栽状況の変化に伴う流域の土砂生産能力評価指標として、 $\Sigma AP(t)$ を新たに提示した。宮川ダム上流域を対象として $\Sigma AP(t)$ を算出し、流域の土砂生産状況を反映するダム堆砂量と $\Sigma AP(t)$ の対応関係を比較したところ、 $\Sigma AP(t)$ は、1980 年代半ば以降の無植栽地の増加に伴うダム堆砂量の増加傾向を的確に再現している事実が確認された。

以上より、本章で提示した「土砂生産能力評価指標： $\Sigma AP(t)$ 」は、森林伐採や植栽を指標とした流域の土砂生産能力の説明変数として利用可能であると言える。

引用文献

- 北原曜 (2010) : 森林根系の崩壊防止機能, 水利科学, Vol.53, No.311, p.2-10
- 小山内信智・桂真也・富田陽子・小川紀一郎・中田慎 (2011) : 森林の崩壊抑制効果を反映した生産土砂量推定に向けた一考察—豪雨災害時の崩壊面積率の解析—, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 5, p. 22-32
- 黒岩知恵・平松晋也 (2010) : 三重県宮川ダム上流域における 2004 年台風 21 号による土砂生産に関する一考察, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 4, p. 16-21
- 太田猛彦 (1993) : 森林と侵食, 砂防学講座第 2 巻「土砂の生成・水の流出と森林の影響」, (社)砂防学会監修, p.254-282, 山海堂
- 佐藤創 (2006) : 特集 土砂災害と森林 IV章 表層崩壊と森林, 森林科学, Vol.47, p.22-27
- 竹下敬司 (1993) : わが国における現実の土砂生産, 砂防学講座第 2 巻「土砂の生成・水の流出と森林の影響」, (社)砂防学会監修, p.66-70, 山海堂
- 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, No.23, p.65-124
- 塚本良則 (1998) : 森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—, 朝倉書店, p.89-102
- 塚本良則・小橋澄治 (1991) : 新砂防工学, 朝倉書店, p.97-123

第5章 森林伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルの構築

5.1 概説

表層崩壊に影響を及ぼす誘因としては降雨・地震が、素因としては地形・地質・森林、森林伐採や植栽状況等が挙げられる。これらの諸要因のうち、人為的に制御可能となるのが伐採や植栽などの森林施業状態である。豊かな森林土壌を形成している良好な森林が表層崩壊防止機能を有することは周知の事実である（例えば、太田，1993；塚本，1998b）。しかしながら、伐採や森林施業の粗放化等により樹木の根系が腐朽・枯死すると、根系の有する土の力学的強度補強効果が消滅し、表層崩壊に対する斜面の抵抗力が大幅に低下する。このため、特に、皆伐跡地では、壮齢森林地と比較して崩壊が多発することになる（例えば、阿部，1998；塚本，1998a；塚本ら，2001）。また、近年、林業の衰退とともに急増しつつある無植栽地では、森林の効果が低下し、崩壊が多発している事実が多数報告されている（例えば、小山ら，2009；黒岩・平松；2010，沼本ら，2002）。上記事項を勘案すると、合理的で精度の高い崩壊予測を行うためには、土砂生産域となる山地の大半を占める森林の伐採や植栽状況に応じて変化する森林の効果を加味することにより、流域内の崩壊発生ポテンシャルを適正に評価し得る崩壊予測手法の確立が求められる。

本研究で対象とした宮川ダムの堆砂量と宮川ダム上流域の崩壊面積の推移を図 5.1 に示す。

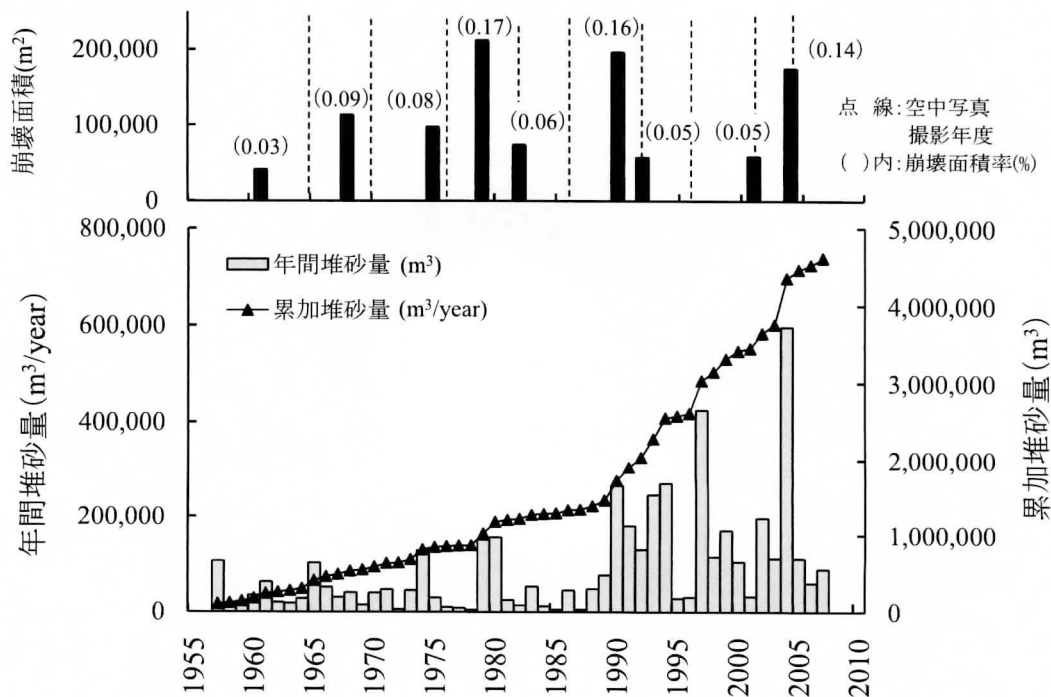


図 5.1 宮川ダムの堆砂量と宮川ダム上流域の崩壊面積の推移

図 5.1 より、ダム堆砂量と崩壊面積との間には正の相関関係が認められるものの、両者の傾向を詳細に見ると、崩壊土砂がダム地点へと到達するまでの時間的な遅れに起因するタイムラグが少なからず見受けられ、崩壊推定年の1~2年後に、堆砂量が急激に増加する傾向が認められる。また、宮川ダムの堆砂量には、表層崩壊による土砂生産に加え、表面侵食の影響も含まれることになる(平松ら、2002)。以上のように、ダム堆砂量と崩壊では土砂生産の形態や挙動が異なることから、流域内の土砂生産の再現・予測を行う際には、これらを個々に取り扱うことにより、土砂生産の再現精度が向上することが示唆される。

第4章では、宮川ダムの堆砂量に着目し、森林伐採や植栽状況の変化とダム堆砂量との因果関係をもとに、伐採や植栽を指標とした流域の土砂生産能力評価指標を提示し、同指標はダム堆砂量の再現や予測の説明変数として利用可能であることを示した。そこで、本章では、流域の主たる土砂生産形態である「表層崩壊」に着目し、第4章で得られた知見をもとに、森林伐採や植栽状況の変化を指標とした流域の崩壊危険度評価と崩壊予測を試みる。

第2節では、宮川ダム上流域内の表層崩壊と森林伐採や植栽状況との関係について詳細に解析する。

第3節では、前節で得られた結果と第4章で得られた結果をもとに、森林伐採や植栽状況の変化に伴う流域内の崩壊発生ポテンシャルの変動を適正に評価するための「崩壊危険度評価指標」を提示する。さらに、森林伐採や植栽状況の影響を反映する同指標に加え、降雨量の影響を加味した「崩壊予測モデル」を新たに構築し、その再現性を検証する。

5.2 表層崩壊と森林伐採や植栽状況との関係

宮川ダム上流域内の伐採地で発生した表層崩壊を対象として、森林伐採後の経過年数と崩壊面積や崩壊個数との関係をとりとまとめた図 4.3 を見ると、伐採後5年程度経過すると崩壊が多発し、その後の時間経過とともに崩壊は減少傾向を示し、20年以上経過すると崩壊地は急減する事実が確認された。しかし、伐採後の植栽の有無による崩壊発生状況の相違を確認するまでには至っていない。ここでは、空中写真判読により把握した流域内の伐採地・植栽地・無植栽地と崩壊地の推移をもとに、森林伐採や植栽状況と崩壊発生状況との関係を詳細に解析した。

宮川ダム上流域内に分布する崩壊地を自然斜面で発生したものと、伐採地内で発生したものとに区分して、各区域における崩壊面積の推移をとりとまとめたものを図 5.2 と表 5.1 に示す。伐採地内で確認された崩壊地は、伐採後の植栽の有無により、植栽地内で発生したものと無植栽地内で発生したものとに区分した。宮川ダム上流域内で

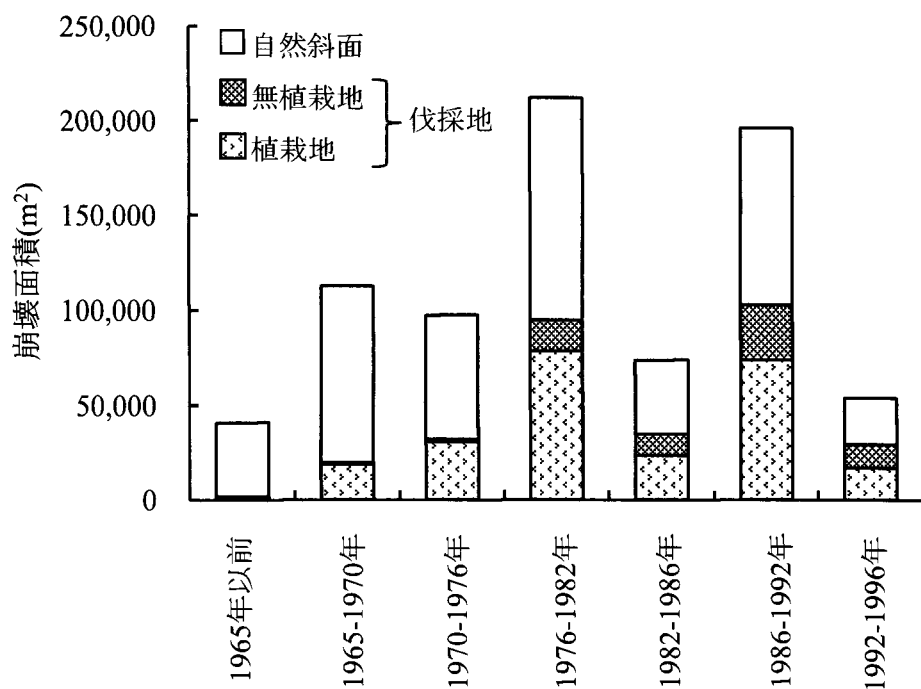


図 5.2 宮川ダム上流域における伐採地（植栽地・無植栽地）と自然斜面での崩壊発生状況

表 5.1 宮川ダム上流域の崩壊発生状況

空中写真撮影年	崩壊が発生した期間	崩壊推定年度	全崩壊		伐採地内で発生した崩壊			植栽地内で発生した崩壊			無植栽地内で発生した崩壊			自然斜面内で発生した崩壊		
			崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m²)	全崩壊面積に対する割合 (%)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m²)	全崩壊面積に対する割合 (%)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m²)	全崩壊面積に対する割合 (%)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m²)	全崩壊面積に対する割合 (%)
1965	1965年以前	1961	141	40,920	3	1,800	4.4	3	1,800	4.4	0	0	0.0	138	39,120	95.6
1970	1965～1970年	1968	388	112,811	82	19,624	17.4	78	18,744	16.6	4	880	0.8	306	93,187	82.6
1976	1970～1976年	1975	366	97,311	136	32,083	33.0	131	30,728	31.6	5	1,355	1.4	230	65,228	67.0
1982	1976～1982年	1979	697	212,225	326	94,762	44.7	274	78,608	37.0	52	16,155	7.6	371	117,463	55.3
1986～1987	1982～1986年	1982	173	73,741	92	34,870	47.3	66	23,528	31.9	26	11,342	15.4	81	38,871	52.7
1992	1986～1992年	1990	588	196,103	313	102,714	52.4	229	73,940	37.7	84	28,773	14.7	275	93,389	47.6
1996～1997	1992～1996年	1992	205	57,164	115	32,742	57.3	60	16,846	29.5	55	15,896	27.8	90	24,422	42.7
合計			2,558	790,275	1,080	321,922	40.7	841	244,193	30.9	226	74,401	9.4	1,491	471,680	59.7

は、空中写真上で確認された崩壊面積の 40.7%が伐採地内に位置していることが確認された。特に、崩壊面積が他期間の 2 倍以上を示した 1976～1982 年と 1986～1992 年には、これらの期間内に確認された崩壊面積の内、伐採地内で発生したものはそれぞれ 44.7%、52.4%をも占めている。

また、台風 21 号により崩壊が多発した 2004 年には、宮川ダム上流域内で発生した全崩壊面積 $174,090\text{m}^2$ の 75%に相当する $130,520\text{m}^2$ が伐採地内に位置し、さらに、無植栽地内での崩壊面積は $99,380\text{m}^2$ と、全崩壊面積の 57%を占めており、無植栽地内で崩壊が多発している事実が確認された（黒岩・平松，2010）。

以上より、宮川ダム上流域の表層崩壊の発生には、森林伐採や植栽状況の影響が強く関与していることがわかる。

つぎに、伐採面積・植栽面積・無植栽面積と崩壊面積との関係をとりとまとめたものを図 5.3 と表 5.2 に示す。伐採面積と崩壊面積との間には明瞭な関係は認められず（相関係数： $R=0.18$ ），伐採面積の増加とともに崩壊面積は減少する傾向が若干ながら見ら

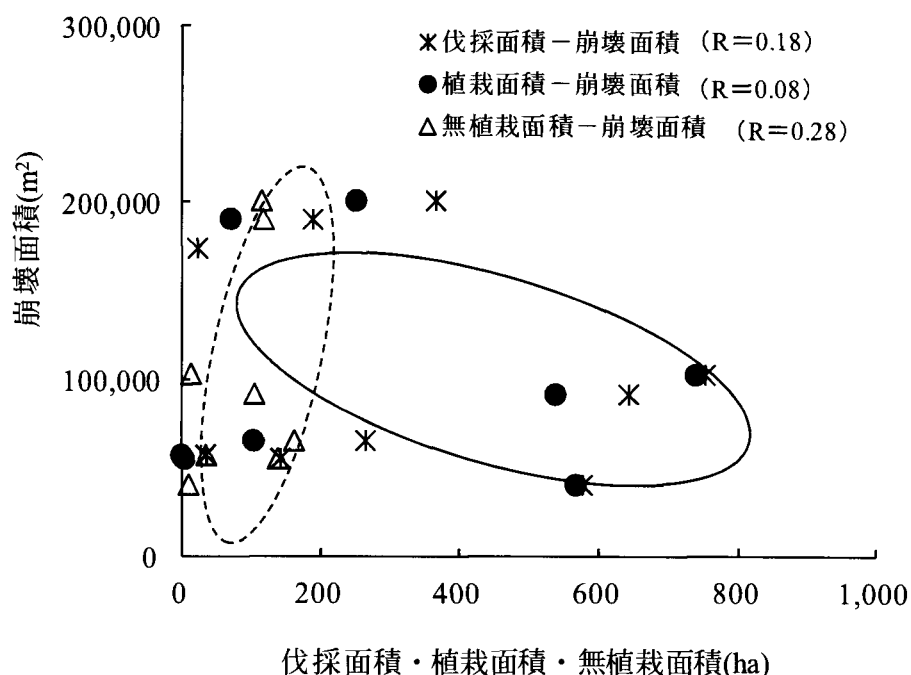


図 5.3 崩壊面積と伐採面積・植栽面積・無植栽面積との関係

表 5.2 宮川ダム上流域における崩壊発生状況と森林伐採や植栽状況

空中写真 撮影年度	伐採や植栽が行われた期間 崩壊が発生した期間	崩壊発生状況		森林伐採や植栽状況			
		崩壊 推定年	崩壊面積 (m^2)	伐採 (植栽)年	伐採面積 (ha)	植栽面積 (ha)	無植栽面積 (ha)
1965	1965年以前	1961	40,920	1961	578.29	568.30	9.99
1970	1965～1970年	1968	112,811	1968	753.18	739.28	13.90
1976	1970～1976年	1975	97,311	1973	643.80	538.74	105.06
1982	1976～1982年	1979	212,225	1979	366.57	250.99	115.58
1986～1987	1982～1986年	1982	73,741	1984	265.12	170.55	94.57
1992	1986～1992年	1990	196,103	1989	188.49	70.73	117.76
1996～1997	1992～1996年	1992	57,164	1994	142.03	3.81	138.22

れる。これは、他期間よりも伐採面積の大きかった1970年頃までは、大部分の伐採跡地に対して植栽が行われていたことにより、伐採面積に植栽面積が多く含まれることによるものである。そこで、伐採面積を植栽面積と無植栽面積とに区分して、これらと崩壊面積との関係をそれぞれ見ると、これらの相関係数は $R=0.08, 0.28$ と統計的な有意性が高いとは言い難いものの、植栽面積と崩壊面積との間には負の相関性が（図中の実線で示した傾向）、無植栽面積と崩壊面積との間には正の相関性（図中の点線で示した傾向）が確認された。

これらの事実より、森林伐採後の植栽の有無によって流域の有する崩壊発生ポテンシャルが変化し、伐採後に無植栽状態のまま放置すると崩壊発生頻度が極端に高くなるものの、植栽を行うと崩壊の発生が抑制されることが示唆される。

伐採地・植栽地・無植栽地内で発生した崩壊地を抽出し、伐採や植栽後の経過年数と伐採面積・植栽面積・無植栽面積に対する崩壊面積の比率（以下、「伐採地内での崩壊面積率」、「植栽地内での崩壊面積率」および「無植栽地内での崩壊面積率」と呼ぶ）との関係をとりとまとめたものを図5.4と表5.3に示す。宮川ダム上流域では、植栽の有無にかかわらず伐採直後より崩壊斜面が出現し、伐採後6年経過した時の伐採地内・植栽地内・無植栽地内での崩壊面積率はそれぞれ0.86, 0.82, 0.98%と最大値を示し、斜面の不安定化が最も顕著に認められる。植栽地内では、植栽後6年以降、経過年数の増加とともに崩壊面積率は減少し、植栽後10年以上経過すると、植栽地内での崩壊面積率は無植栽地内での値の1/2~1/45倍程度にまで低下し、さらに植栽後25年以上経過すると、崩壊がほとんど発生していないことがわかる。

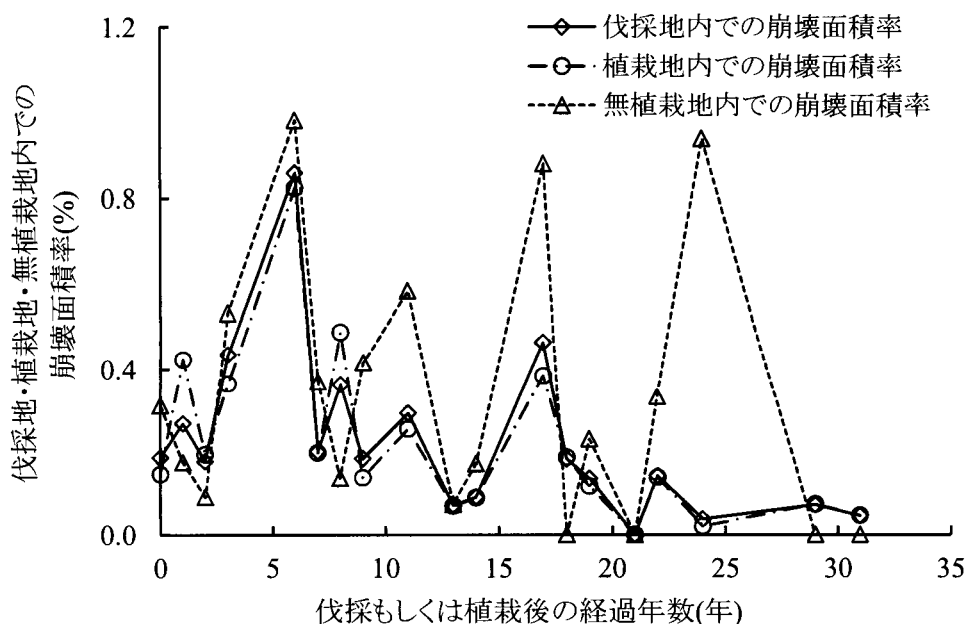


図 5.4 森林伐採や植栽後の経過年数に伴う崩壊発生状況の変化

表 5.3 森林伐採や植栽後の経過年数に伴う

伐採地・植栽地・無植栽地内での崩壊発生状況

伐採や 植栽後 の経過 年数	森林伐採や植栽状況			崩壊発生状況								
				伐採地内の崩壊			植栽地内の崩壊			無植栽地内の崩壊		
	伐採 面積 (ha)	植栽 面積 (ha)	無植栽 面積 (ha)	崩壊 個数 (個)	崩壊 面積 (m ²)	伐採地 内での 崩壊面 積率(%)	崩壊 個数 (個)	崩壊 面積 (m ²)	植栽地 内での 崩壊面 積率(%)	崩壊 個数 (個)	崩壊 面積 (m ²)	無植栽地 内での 崩壊面 積率(%)
0	2,105.19	1,732.93	372.26	115	39,091	0.201	86	25,141	0.145	29	10,623	0.285
1	188.49	70.73	117.76	11	5,043	0.268	4	2,995	0.423	7	2,048	0.174
2	643.80	538.74	105.05	53	11,328	0.176	49	10,378	0.193	4	950	0.090
3	555.06	321.72	233.34	69	24,166	0.435	32	11,725	0.364	37	12,442	0.533
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	908.92	709.29	199.62	260	78,045	0.859	206	58,435	0.824	54	19,610	0.982
7	1,331.47	1,307.58	23.89	113	26,551	0.199	109	25,671	0.196	4	880	0.368
8	265.12	170.55	94.57	28	9,600	0.362	21	8,320	0.488	7	1,280	0.135
9	643.80	538.74	105.05	28	11,725	0.182	21	7,373	0.137	7	4,352	0.414
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	1,119.75	990.27	129.48	123	32,687	0.292	89	25,135	0.254	34	7,552	0.583
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	366.57	250.99	115.58	11	2,560	0.070	6	1,715	0.068	5	845	0.073
14	1,331.47	1,307.58	23.89	37	11,942	0.090	36	11,537	0.088	1	405	0.170
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	643.80	538.74	105.05	99	29,824	0.463	75	20,582	0.382	24	9,242	0.880
18	578.29	568.30	9.99	33	10,522	0.182	33	10,522	0.185	0	0	0
19	643.80	538.74	105.05	29	8,653	0.134	22	6,246	0.116	7	2,406	0.229
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	578.29	568.30	9.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	753.18	739.28	13.90	31	10,624	0.141	29	10,163	0.137	2	461	0.332
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	753.18	739.28	13.90	11	2,816	0.037	7	1,510	0.020	4	1,306	0.939
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	578.29	568.30	9.99	10	4,134	0.071	10	4,134	0.073	0	0	0
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	578.29	568.30	9.99	6	2,611	0.045	6	2,611	0.046	0	0	0
合計	-	-	-	1,067	321,922	-	841	244,193	-	226	74,401	-

これに対し、無植栽地内では、伐採後24年経過した時点でも、崩壊の発生が顕著に認められ、崩壊面積率は0.94%と伐採後6年時点に次いで高い値を示している。これらの事実は、「伐採後直ちに植栽されると、斜面安定性は植栽後5~20年の間に顕著な増加傾向を示し、20~30年で最大となる」とする塚本(1987)の指摘を裏付けるものである。

以上のように、森林伐採や植栽後の経過年数すなわち森林の成長や樹木根系の腐朽に伴って、崩壊の発生状況が変化する事実が確認された。

5.3 森林伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルの構築とその適用性

第4章では、宮川ダムの堆砂量と森林伐採や植栽状況との関係を用いて、伐採や植栽を指標とした土砂生産能力評価指標を提示し、同指標が流域の土砂生産能力を反映するダム堆砂量を再現・予測するための説明変数として利用可能となる事実を示した。

本節では、この「森林伐採や植栽を指標とした土砂生産能力評価指標」の表層崩壊に対する適用の可能性について考察を加えた。そして、表層崩壊に影響を及ぼす誘因として降雨量を、素因として森林伐採や植栽状況の影響を示す評価指標を抽出し、これらの影響を加味した「崩壊予測モデル」を新たに提示し、崩壊面積率の再現を行うとともに、同モデルの妥当性の検討を行った。

5.3.1 森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価

森林伐採や植栽状況を指標とした土砂生産能力評価指標は、図4.4に示したように、伐採や植栽後の経過年数とともに変動する“伐採による斜面の不安定化率”と“植栽による斜面の安定化率”の双方を考慮して求められる。これらの斜面安定性の変動傾向を決定するための4つの境界年数である「伐採による影響開始年数： $T_{L(0)}$ 」, 「伐採による植生の影響消滅年数： $T_{L(100)}$ 」, 「植栽による影響開始年数： $T_{F(0)}$ 」, 「植栽による回復年数： $T_{F(100)}$ 」は、対象とする土砂生産形態や流域の気象条件・樹種等に応じて設定する必要がある。

前述のように、宮川ダムの堆砂量には、表面侵食と表層崩壊による土砂生産の影響が混在するため、第4章に示すダム堆砂量を対象とした境界年数(図4.5)を崩壊現象に対してそのまま適用するには無理がある。そこで、宮川ダム上流域の表層崩壊(崩壊面積率)を目的変数とする場合の境界年数は、前節で把握した森林伐採や植栽後の経過年数と崩壊発生状況との関係(図5.4)を考慮し、図5.5と表5.4に示すように、 $T_{L(0)}=0$ 年、 $T_{L(100)}=6$ 年、 $T_{F(0)}=5$ 年、 $T_{F(100)}=25$ 年とそれぞれ設定した。表5.4中には、宮川ダムの堆砂量を対象とした境界年数： $T_{L(0)}=5$ 年、 $T_{L(100)}=20$ 年、 $T_{F(0)}=5$ 年、 $T_{F(100)}=20$ 年をも併記した。伐採による影響は、ダム堆砂量を対象とした場合5年後より見られるようになり($T_{L(0)}=5$ 年)、20年経過すると不安定化率： $Ls(t)$ は100%になるのに対し($T_{L(100)}=20$ 年)、表層崩壊を対象とした場合にはそれぞれ $T_{L(0)}=0$ 、 $T_{L(100)}=6$ 年となり、崩壊に対する伐採の影響の方が短期間で現れることになる。これは、表層崩壊が伐採に伴う樹木根系の腐朽の影響を直接的に受けることによるものと理解される(北原, 2010; 塚本, 1998b)。これに対し、ダム堆砂量の場合、流域内で発生した表層崩壊や表面侵食による生産土砂量がダム地点へと到達するまでに時間を要し、崩壊を個別に取り扱った場合よりも伐採の影響が現れるまでに時間的な遅れが生じたものと理解される。一方、ダム堆砂量や表層崩壊に対する植栽の影響は、ともに5年後

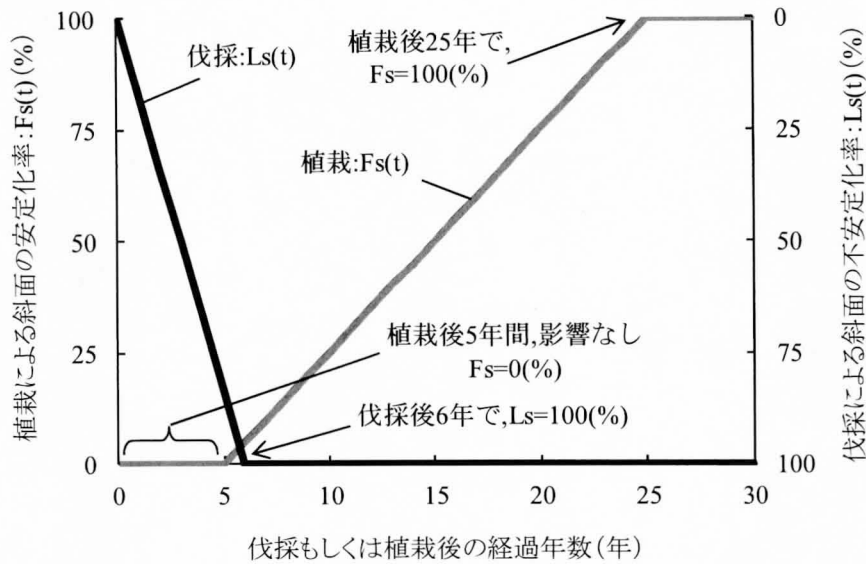


図 5.5 表層崩壊を対象とした場合の境界年数設定結果

表 5.4 境界年数の設定結果

境界年数		対象とする土砂生産形態	
		宮川ダム上流域の表層崩壊	宮川ダムの堆砂量
伐採による影響	伐採による影響開始年数: $T_{L(0)}$ (年)	0	5
	伐採による植生の影響消滅年数: $T_{L(100)}$ (年)	6	20
植栽による影響	植栽による影響開始年数: $T_{F(0)}$ (年)	5	5
	植栽による回復年数: $T_{F(100)}$ (年)	25	20

より現れ始め、植栽による回復年数 ($T_{F(100)}$) は、それぞれ 20 年、25 年と土砂生産形態の相違に関わらずほぼ同様となった。

図 5.5 に示した伐採もしくは植栽後の経過年数: t (年) に対応した斜面の不安定化率: $Ls(t)$ と安定化率: $Fs(t)$ の経年変化は、それぞれ(5.1), (5.2)式を用いて表すことができる。

$$\left. \begin{array}{l} t \leq 6; Ls(t) = \frac{50}{3} \cdot t \\ t > 6; Ls(t) = 100.0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} t \leq 5; Fs(t) = 0.0 \\ 5 < t < 25; Fs(t) = 5 \cdot t - 25 \\ t \geq 25; Fs(t) = 100.0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5.2)$$

ここに、 t ：伐採もしくは植栽後の経過年数（年）， $Ls(t)$ ：伐採後 t 年経過した時点での斜面の不安定化率（%）， $Fs(t)$ ：植栽後 t 年経過した時点での斜面の安定化率（%）である。

伐採後 t 年経過した時点の不安定化率： $Ls(t)$ に伐採面積： $AL(t)$ を乗じた値が「伐採による不安定化面積指標： $ALs(t)$ ；(4.3)式」，植栽後 t 年経過した時の安定化率： $Fs(t)$ に植栽面積： $AF(t)$ を乗じた値が「植栽による安定化面積指標： $AFs(t)$ ；(4.4)式」となる。さらに、ここでは流域内で発生する“表層崩壊”を対象とするため、不安定化面積指標から安定化面積指標を差し引いた値を、新たに「崩壊可能面積指標： $APh(t)$ 」と定義し、(5.3)式で求めた。

$$APh(t) = ALs(t) - AFs(t) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここに、 $APh(t)$ ：崩壊可能面積指標(ha)， $ALs(t)$ ：伐採後 t 年時点の伐採による不安定化面積指標(ha)， $AFs(t)$ ：植栽後 t 年時点の植栽による安定化面積指標(ha)である。

流域内に存在する伐採や植栽後の経過年数が異なる伐採地と植栽地に対して、(5.1)～(5.3)式より得られるそれぞれの経過年数に対応した「崩壊可能面積指標： $APh(t)$ 」を合計し、他流域への適用や比較等の汎用性を考慮して、この合計値の流域面積に対する比率を森林伐採や植栽状況の変化に伴う「崩壊危険度評価指標： $APhr(t)$ 」と定義し、(5.4)式で算出した。

$$APhr(t) = \{ (APh(t_1) + APh(t_2) + \dots\dots\dots + APh(t_n)) / a \} \cdot 100 \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ここに、 $APhr(t)$ ：対象とする時期の崩壊危険度評価指標(%)， t_n ：対象とする時期に流域内に存在する伐採地や植栽地の伐採（植栽）後の経過年数（年）， $APh(t_n)$ ：伐採や植栽後 t_n 年に対応した崩壊可能面積指標(ha)， a ：流域面積(ha)である。

5.3.2 崩壊危険度評価指標（ $APhr(t)$ ）と崩壊面積率（ s/a ）との関係

表層崩壊を対象とした場合の境界年数（図 5.5と表 5.4）より得られる(5.1)～(5.4)式を宮川ダム上流域に適用して得られた流域の崩壊危険度評価指標： $APhr(t)$ と実績崩壊面積率： s/a の経年変化をとりまとめたものを表 5.5と図 5.6に示す。図 5.6中には、宮川ダム地点の年最大日雨量の経年変化も併記した。

宮川ダム上流域では、 $APhr(t)$ と崩壊面積率との間には若干のばらつきや時期的なずれが認められるものの、概ね同様の傾向を示し、1979年頃までは崩壊面積率の増加とともに、 $APhr(t)$ も増加傾向を示す。1980年以降、 $APhr(t)$ は漸減するようになる。同様に、崩壊面積率も1980年以降減少傾向を示すものの、1990年には極端に大きな値（ $s/a=0.16(\%)$ ）を示している。これは、当該年の年最大日雨量は506mm/day、年間

表 5.5 崩壊危険度評価指標 (APhr(t)) と実績崩壊面積率 (s(a)) の経年変化

年度	A(1961年)		B(1968年)		C(1972年)		D(1979年)		E(1984年)		F(1989年)		崩壊危険度 評価指標 APhr(t)(%)	崩壊面積率 (実績値) s(a)(%)
	経過 年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	経過 年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	経過 年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)	経過 年数 t(年)	安定 AF(t)(ha)	不安定 AL(t)(ha)		
1961	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1962	1	0.00	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	96.38	0.77
1963	2	0.00	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	192.76	1.53
1964	3	0.00	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	289.15	2.30
1965	4	0.00	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	385.53	3.07
1966	5	0.00	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	481.91	3.84
1967	6	28.42	578.29	549.88	578.29	549.88	578.29	549.88	578.29	549.88	578.29	549.88	578.29	4.38
1968	7	56.83	578.29	521.46	0	0.00	502.12	502.12	502.12	502.12	502.12	502.12	502.12	4.15
1969	8	85.25	578.29	493.05	1	0.00	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65	4.92
1970	9	113.66	578.29	464.63	2	0.00	353.18	353.18	353.18	353.18	353.18	353.18	353.18	5.70
1971	10	142.08	578.29	436.22	3	0.00	278.71	278.71	278.71	278.71	278.71	278.71	278.71	6.47
1972	11	170.49	578.29	407.80	4	0.00	204.24	204.24	204.24	204.24	204.24	204.24	204.24	7.24
1973	12	198.91	578.29	379.39	5	0.00	129.77	129.77	129.77	129.77	129.77	129.77	129.77	8.02
1974	13	227.32	578.29	350.97	6	36.96	55.30	55.30	55.30	55.30	55.30	55.30	55.30	9.35
1975	14	255.74	578.29	322.56	7	73.93	0	0	0	0	0	0	0	9.88
1976	15	284.15	578.29	294.14	8	110.89	753.18	753.18	753.18	753.18	753.18	753.18	753.18	10.02
1977	16	312.57	578.29	265.73	9	147.86	753.18	605.32	4	0.00	429.20	429.20	429.20	10.35
1978	17	340.98	578.29	237.31	10	184.82	753.18	566.36	5	0.00	354.73	354.73	354.73	10.69
1979	18	369.40	578.29	208.90	11	221.78	753.18	531.40	6	26.94	280.26	280.26	280.26	10.81
1980	19	397.81	578.29	180.48	12	258.75	753.18	494.43	7	53.87	205.79	205.79	205.79	10.56
1981	20	426.23	578.29	152.07	13	295.71	753.18	457.47	8	80.81	130.32	130.32	130.32	10.31
1982	21	454.64	578.29	123.65	14	332.68	753.18	420.50	9	107.75	54.85	54.85	54.85	10.06
1983	22	483.06	578.29	95.24	15	369.64	753.18	383.54	10	134.69	0	0	0	9.56
1984	23	511.47	578.29	66.82	16	406.60	753.18	346.58	11	161.62	643.80	643.80	643.80	9.57
1985	24	539.89	578.29	38.41	17	443.57	753.18	309.61	12	188.56	643.80	455.24	455.24	9.08
1986	25	568.30	578.29	9.99	18	480.53	753.18	272.65	13	215.50	643.80	429.30	429.30	8.83
1987	26	568.30	578.29	9.99	19	517.50	753.18	235.68	14	242.43	643.80	403.37	403.37	8.57
1988	27	568.30	578.29	9.99	20	554.46	753.18	198.72	15	269.37	643.80	374.43	374.43	8.31
1989	28	568.30	578.29	9.99	21	591.42	753.18	161.76	16	296.31	643.80	347.49	347.49	8.57
1990	29	568.30	578.29	9.99	22	628.38	753.18	124.79	17	323.24	643.80	320.56	320.56	8.24
1991	30	568.30	578.29	9.99	23	665.35	753.18	87.83	18	350.18	643.80	293.62	293.62	8.24
1992	31	568.30	578.29	9.99	24	702.32	753.18	50.86	19	377.12	643.80	266.68	266.68	7.81
1993	32	568.30	578.29	9.99	25	739.28	753.18	13.90	20	404.06	643.80	239.75	239.75	7.38
1994	33	568.30	578.29	9.99	26	739.28	753.18	13.90	21	430.99	643.80	212.81	212.81	6.96
1995	34	568.30	578.29	9.99	27	739.28	753.18	13.90	22	457.93	643.80	185.87	185.87	6.83
1996	35	568.30	578.29	9.99	28	739.28	753.18	13.90	23	484.87	643.80	158.93	158.93	6.67
1997	35	568.30	578.29	9.99	27	739.28	753.18	13.90	23	484.87	643.80	158.93	158.93	6.26

t: 当該(建設)年度
 APhr(t): 崩壊危険度評価指標 (ha)
 AF(t): 対象とする崩壊面積 (ha)
 AL(t): 対象とする伏壊面積 (ha)
 APhr(t): 崩壊危険度評価指標 (%)
 APhr(t): 崩壊危険度評価指標 (ha)
 AF(t): 崩壊危険度評価指標 (ha)
 AL(t): 崩壊危険度評価指標 (ha)
 APhr(t): 崩壊危険度評価指標 (%)

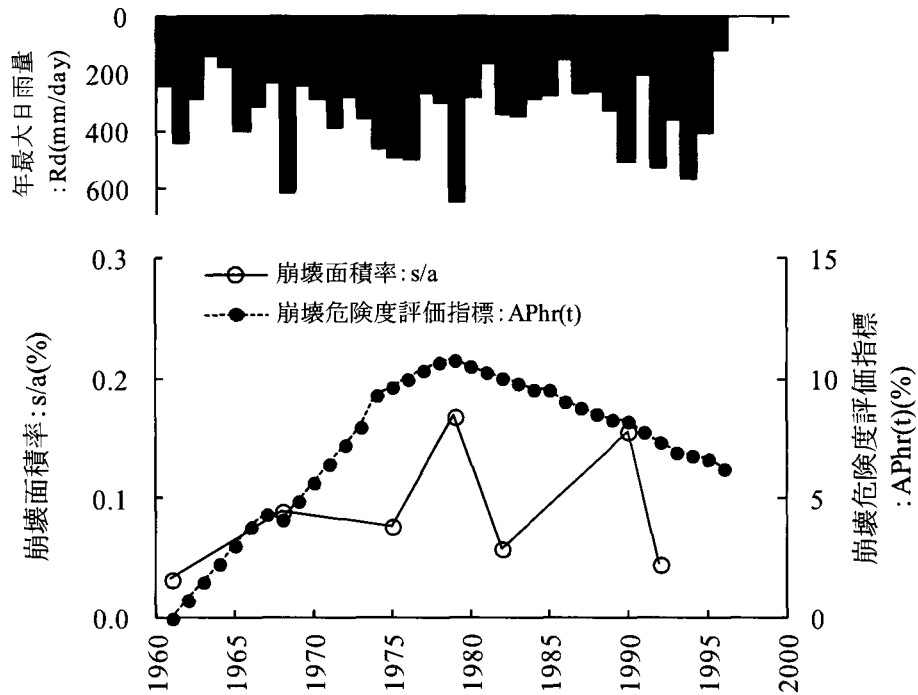


図 5.6 崩壊危険度評価指標 (APhr(t)) と崩壊面積率 (s/a) : 実績値の経年変化

総雨量は 4,169mm/year と、例年の 1.3 倍以上にも及ぶ大規模降雨によるものである。

これに対し、1968年には年最大日雨量は611mm/day、年間総雨量は4,066mm/year と崩壊の多発した1979年や1990年と同等規模の降雨が記録されたにもかかわらず、崩壊面積率は0.09%と低くなった。これは、1968年の APhr (t)が4.2%と、1979年や1990年の値 (10.8, 8.3%) の1/2以下の値を示し、流域内の崩壊危険度が低かったことによるものと理解される。その他、降雨分布の相違等もその原因の一つとして挙げられる (黒岩・平松, 2004)。

崩壊危険度評価指標 : APhr(t)と実績崩壊面積率 : s/a との関係をとまとめたものを図 5.7 に示す。図 5.7 より、APhr(t)の増加とともに崩壊面積率も増加する傾向が認められ、宮川ダム上流域の崩壊危険度評価指標 : APhr(t)(%)と崩壊面積率 : s/a(%)の関係は、(5.5)式で指数近似可能となる (決定係数 : $R^2=0.36$)。

$$s/a = 0.039 \cdot e^{0.09 \cdot APhr(t)} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここに、s/a : 崩壊面積率(%), APhr(t) : 崩壊危険度評価指標(%)である。

以上、APhr(t)と崩壊面積率との間には明瞭な類似性が認められ、「森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価指標 : APhr(t)」は、崩壊面積率を再現・予測する上での説明変数として利用可能であると判断される。

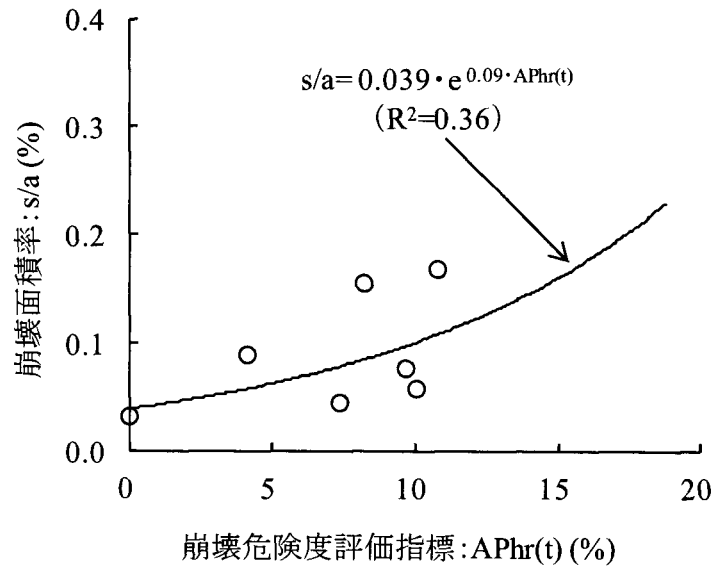


図 5.7 崩壊危険度評価指標 (APhr(t)) と崩壊面積率 (s/a) : 実績値との関係

5.3.3 崩壊危険度評価指標 (APhr(t)) を指標とした崩壊予測

前項までに得られた結果をもとに、表層崩壊に影響を及ぼす誘因として降雨量を、素因として森林伐採や植栽状況の変化に伴う崩壊危険度評価指標：APhr(t)を抽出し、これらを指標とした「崩壊予測モデル」を構築した。そして、同モデルを宮川ダム上流域に適用し、モデルの妥当性について考察を加えた。

降雨指標として年最大日雨量を抽出し、打萩 (1971) により提示された崩壊面積率と連続雨量との関係式に準拠して、崩壊面積率と年最大日雨量との関係をとりとまとめたものを図 5.8 に示す。流域の代表雨量観測所としては、欠測が無く、また長期にわ

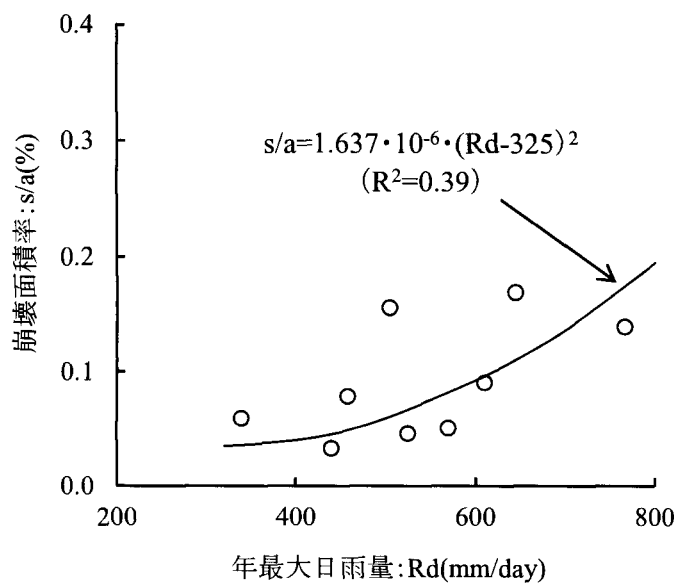


図 5.8 年最大日雨量 (Rd) と崩壊面積率 (s/a) : 実績値との関係

たつて観測が行われている宮川ダム地点を抽出した。宮川ダム上流域の崩壊面積率： $s/a(\%)$ は、年最大日雨量： $Rd(\text{mm/day})$ を用いて(5.6)式で表すことができる。式中の係数：1.637 と崩壊限界雨量：325mm/day は、流域に対して最適となる値を最小自乗法により求めた（決定係数： $R^2=0.39$ ）。

$$s/a = 1.637 \cdot 10^{-6} \cdot (Rd - 325)^2 \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

ここに、 s/a ：崩壊面積率(%), Rd ：宮川ダム地点の年最大日雨量(mm/day)である。

崩壊面積率の説明変数として宮川ダム地点の年最大日雨量： $Rd(\text{mm/day})$ に加え、崩壊危険度評価指標： $A\text{Phr}(t)$ を抽出し、これらの値と崩壊面積率との関係(図 5.7～図 5.8, (5.5)～(5.6)式)を加味したうえで重回帰分析を行うことにより、森林伐採や植栽状況と降雨量とを指標とした「崩壊予測モデル」を新たに構築した。宮川ダム上流域の崩壊面積率： $s/a(\%)$ は、(5.7)式で近似可能となる（重相関係数： $R=0.77$ ）。

$$s/a = 8.48 \cdot 10^{-3} \times (e^{0.09 \cdot A\text{Phr}(t)})^{1.12} \times (Rd - 325)^{2 \times 0.15} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

ここに、 s/a ：崩壊面積率(%), $A\text{Phr}(t)$ ：崩壊危険度評価指標(%), Rd ：年最大日雨量(mm/day)である。

崩壊予測モデル ((5.7)式) による崩壊面積率の再現計算結果を図 5.9～図 5.10 と表 5.6 に示す。再現計算開始時である 1961 から 1982 年までの再現性は高く、計算値と実績値は概ね同様の傾向を示していることがわかる。特に、崩壊面積率が最大値 ($s/a=0.17(\%)$) を示した 1979 年の崩壊多発現象やそれ以降崩壊面積率が急減する傾向は精度よく再現されている。これに対し、1990 年以降の再現性は若干劣り、1990 年には計算値は実績値の 1/2 程度と過少評価されている。一方、1992 年には逆に計算値が実績値の 2 倍程度の値を示す結果となった。この理由としては、降雨指標として

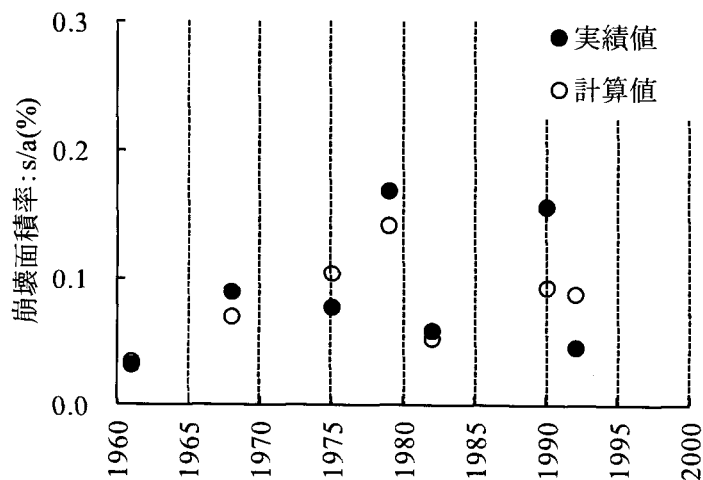


図 5.9 計算崩壊面積率と実績崩壊面積率の経年変化

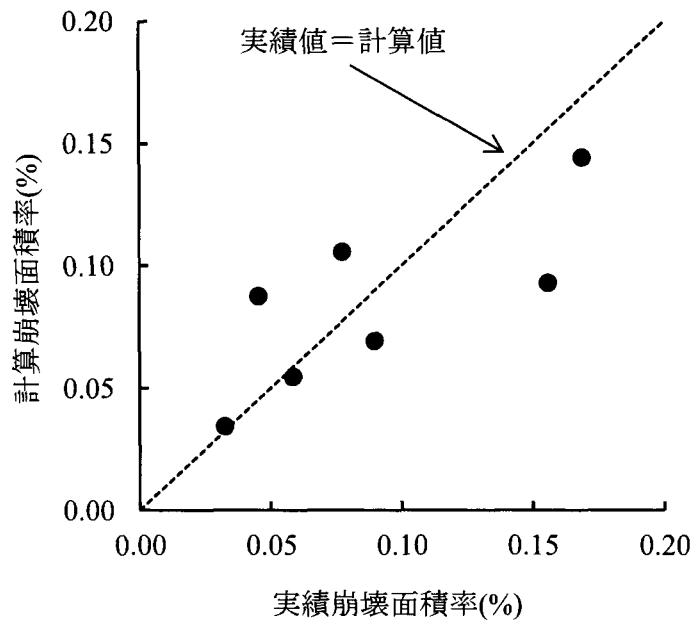


図 5.10 崩壊面積率の再現計算結果

表 5.6 実績崩壊面積率と計算崩壊面積率の比較

崩壊 推定 年度	誘因：降雨量	素因：森林伐採や植栽状況	崩壊面積率：s/a(%) (宮川ダム上流域)	
	宮川ダム地点の年最大日雨量 Rd(mm/day)	崩壊危険度評価指標 APhr(t)(%)	実績値	計算値
	1961	440	0.00	0.033
1968	611	4.15	0.090	0.069
1975	491	9.68	0.077	0.106
1979	646	10.81	0.169	0.144
1982	340	10.06	0.059	0.054
1990	506	8.26	0.156	0.093
1992	525	7.46	0.046	0.088

抽出した宮川ダム地点の年最大日雨量だけでは、流域面積が125.6km²と広大な宮川ダム上流域の降雨分布特性を考慮していないことや、年最大日雨量や森林伐採や植栽状況以外の崩壊要因：短時間降雨量、地形・地質等による影響が挙げられる。

5.4 まとめ

本章では、宮川ダム上流域を対象として、表層崩壊と森林伐採や植栽との関係を定量的に把握した。そして、この結果をもとに、森林伐採や植栽状況の変化に伴う流域内の崩壊発生ポテンシャルの変動を適正に評価するための「崩壊危険度評価指標」を提示するとともに、森林伐採や植栽状況の影響を反映する同指標に加え、降雨量の影

響を加味した「崩壊予測モデル」を新たに構築し、同モデルの妥当性を検討した。

空中写真を用いた森林伐採後の植栽の有無と表層崩壊との関係解析により、

- 1) 森林伐採後の植栽の有無によって流域内の崩壊発生状況が異なり、植栽面積と崩壊面積との間には負の、無植栽面積と崩壊面積の間には正の相関関係が成立する
- 2) 植栽の有無にかかわらず伐採直後より崩壊斜面が出現し、伐採後 6 年経過すると斜面の不安定化が最も顕著に認められ、崩壊が多発する
- 3) 植栽地では植栽後 20 年以上経過すると崩壊の発生が沈静化するが、無植栽地では伐採後 24 年経過した時点でも崩壊の発生が顕著に認められる

といった事実が明らかとなった。

以上の結果を踏まえ、「森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を提示し、同指標と崩壊面積率との関係を概観すると、両者の間には顕著な対応関係が認められ、「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」は表層崩壊の説明変数として利用可能であることが確認された。

さらに、森林伐採や植栽状況の変化を反映することになる A_{Phr}(t)と年最大日雨量とを表層崩壊の説明変数とした「崩壊予測モデル；(5.7)式」を提示し、崩壊面積率の再現計算を実施した結果、良好な再現性が認められ、崩壊面積率の再現・予測を行ううえで同モデルの有用性が確認された。

引用文献

阿部和時（1998）：樹木根系の斜面崩壊防止機能，森林科学，No.22，p.23-29

平松晋也・黒岩知恵・荒砂隆文（2002）：森林伐採や植栽面積の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.55，No.4，p.3-11

北原曜（2010）：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，Vol.53，No.311，p.11-37

小山敢・藤田亮・前田雄一・多田泰之・落合博貴・三森利昭・大丸裕武・村上亘・河合隆行・岩村尚樹（2009）：2007年9月4日の集中豪雨により鳥取県琴浦町で生じた斜面崩壊の特徴，砂防学会誌，Vol.62，No.1，p.52-59

黒岩知恵・平松晋也（2004）：森林伐採や植栽を指標とした崩壊面積予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.57，No.2，p.16-26

黒岩知恵・平松晋也（2010）：三重県宮川ダム上流域における2004年台風21号による土砂生産に関する一考察，砂防学会誌，Vol.63，No.4，p.16-21

沼本晋也・林拙郎・川邊洋・喜多村和義（2002）：十津川支流神納川上流部における山腹崩壊地の荒廃分析，中森研，No.50，p.237-240

太田猛彦（1993）：森林と侵食，砂防学講座第2巻「土砂の生成・水の流出と森林の影響」，(社)砂防学会監修，p.254-282，山海堂

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, No.23, p.65-124

塚本良則 (1998a) : 森林は山地の侵食防止にどのように機能しているか, 森林科学, No.22, p.2-9

塚本良則 (1998b) : 森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—, 朝倉書店, p.89-102

塚本良則・小坂泉・滝沢英紀・石垣逸朗・大越真澄・福田喬 (2001) : 表層崩壊の発生と崩壊地裸地の消滅過程 —ハゲ山モデルのハゲ山フロント予備域における解析例—, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.63-72

打荻珠男 (1971) : ひと雨による山腹崩壊について, 新砂防, Vol.23, No.4, p.21-34

第6章 崩壊予測精度の向上に向けた崩壊予測モデルの改良

6.1 概説

森林が崩壊をはじめとする土砂生産の抑制に対して高い効果を有し、その効果が十分に発揮されるためには、森林の施業や管理が適切に実施される必要があるということは周知の事実である（例えば、太田，1991；塚本，1998）。我が国では、土砂生産域となる山地の大半が森林によって占められており、さらに、森林面積の約4割が森林施業を必要とする人工林となっている。人工林の大部分は、1950年代から1960年代にかけての高度経済成長期に植林されたものであり、近年は、全国各地で伐期を迎えている。これらの事実を踏まえると、合理的な森林管理や土砂管理を進めるためには、森林伐採や植栽などの森林施業状態と土砂生産との因果関係を定量化し、さらにこの結果を反映させた精度や実用性の高い崩壊予測手法の確立が求められる。

第5章では、宮川ダム上流域を対象に、過去の崩壊実績をもとに表層崩壊と森林伐採や植栽状況との関係を明らかにし、伐採や植栽状況と年最大日雨量を指標とした「崩壊予測モデル」を提示した。その再現性は概ね良好であったものの、同モデルでは流域面積が125.6km²にも及ぶ広大な流域を一括して取り扱っており、伐採地・植栽地・無植栽地の分布状況や面積、伐採や植栽の時期といった同流域内に位置する単元流域の立地環境の違いを考慮するまでには至らなかった。さらに、同モデルでは、表層崩壊の発生を決定づける斜面勾配や短時間降雨といった崩壊の主要な要因が加味されていない。

本章では、合理的で実用性の高い崩壊予測モデルを確立することを目的とし、宮川ダム上流域を構成する8単元流域を対象として、過去40年間に発生した崩壊現象の再現性に着目し、第5章で提示した「崩壊予測モデル」の改良を試みる。

第2節では、2004年台風21号により発生した表層崩壊を対象として、斜面勾配、短時間降雨および森林伐採や植栽状況の相違などの要因と崩壊との関係について考察を加える。この結果をもとに、「崩壊予測モデル」の再現精度を向上させるための課題を抽出する。

第3節では、前節で得られた結果と第5章で得られた知見をもとに、「森林伐採や植栽状況」と「降雨量」に加え、「斜面勾配」を加味した「崩壊予測改良モデル」を新たに構築する。そして、同モデルの現地流域への適用性を検討する。

6.2 2004年台風21号による崩壊の発生要因

2004年9月28日から29日にかけて、三重県では台風21号による短時間の集中豪雨がもたらされ、特に、宮川ダム上流域の位置する多気郡大台町（旧宮川村）では、

甚大な土砂災害が発生した（林ら，2004；林・近藤，2006；三重県松坂地方県民局建設部，2005）。この時の宮川ダム地点での降雨量は，連続雨量が930mm（9月28日4時～29日21時），最大時間雨量が114mm（9月29日9～10時）に達し，観測史上最大値を示した（黒岩・平松，2010）。

本節では，2004年台風21号により発生した表層崩壊の因子として「斜面勾配」，「短時間降雨」および「森林伐採や植栽状況の相違」に着目し，図3.1に示す宮川ダム上流域内の4次谷以上の河川からなる8単元流域（流域①～⑧）を対象として，崩壊とこれらの因子との因果関係を解析した。そして，崩壊面積率の再現・予測を行ううえでの各因子の有用性について考察し，この結果をもとに，第5章で提示した「崩壊予測モデル」の再現精度を向上させるための課題を明らかにした。

6.2.1 2004年台風21号による崩壊発生状況

2004年台風21号発生直後である10月14日に撮影された空中写真（表3.4）を用いて判読した流域①～⑧の崩壊面積を図6.1に示す。

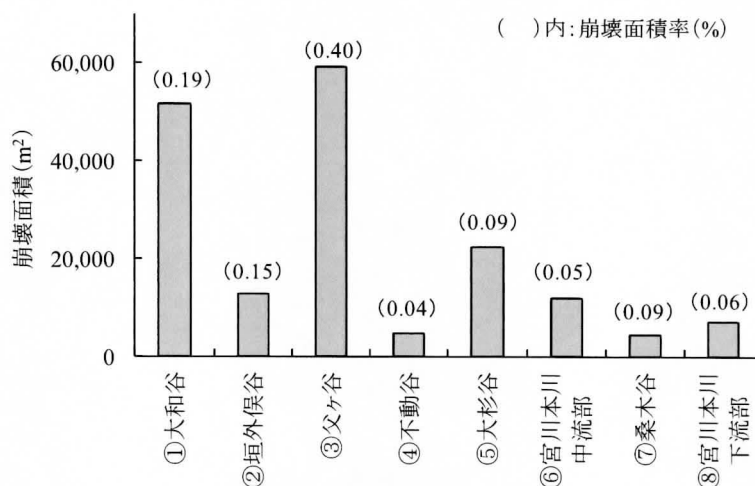


図 6.1 2004年台風21号による8単元流域の崩壊面積

崩壊面積は，図3.1に示す宮川本川の左支川である大和谷（流域①）と父ヶ谷（流域③）で50,000m²を超える大きな値を示しており，これら2流域の崩壊面積の合計値：110,740m²は，全崩壊面積：174,090m²の55%以上を占めることから，宮川ダム上流域の荒廃状況は，これら2流域に強く支配されていることがわかる。これら2流域に次いで，大杉谷（流域⑤）でも崩壊が多発しており，崩壊面積は22,340m²を示している。また，各流域の崩壊面積率を比較すると，父ヶ谷（流域③）の崩壊面積率は0.40%と最も高く，これに次いで大和谷（流域①）の0.19%となっている。

6.2.2 2004 年台風 21 号による表層崩壊とその発生要因

宮川ダム上流域を構成する単元流域①～⑧の崩壊発生状況を示す崩壊面積率と短時間降雨, 斜面勾配および森林伐採や植栽状況の相違との関係について考察を加えた。

宮川ダム上流域内の降雨量は, 三重県松阪建設事務所ダム管理室ダム管理課により, 図 6.2 に示す宮川ダム, 大和谷雨量・水位観測所, 父ヶ谷雨量観測所および大台ヶ原雨量観測所の 4 地点で観測されている。同事務所より入手したこれら 4 観測所における 2004 年台風 21 号発生時の降雨状況を表 6.1 に示す。表中には, ティーセン法による流域区分 (図 6.2 中の I～IV) も併記した。表 6.1 より, 流域内の降雨量は, 宮川ダム地点 (I) で連続雨量: 930mm, 最大時間雨量: 114mm/hr と最も多く, 次いで父ヶ谷雨量観測所 (III) の連続雨量: 879mm, 最大時間雨量: 99mm/hr であり, 流域の中～下流部で降雨量が多かったことがわかる。宮川本川の左支川である大和谷雨量

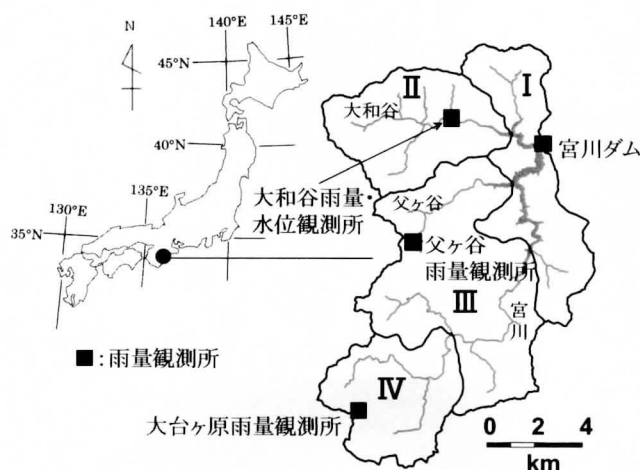


図 6.2 雨量観測所の位置と流域区分

表 6.1 2004 年台風 21 号時の降雨状況

雨量観測所	降雨状況			流域区分	
	最大時間雨量 Rh(mm/hr)	連続雨量 R(mm)	最大日雨量;9/29 Rd(mm/day)	流域	流域面積 (km ²)
I 宮川ダム	114 (9/29 9:00~10:00)	930	767	②垣外俣谷	8.6
				⑦桑木谷	5.3
				⑧宮川本川下流部	12.9
II 大和谷雨量・水位観測所	86 (9/29 9:00~10:00)	740	633	①大和谷	26.8
III 父ヶ谷雨量観測所	99 (9/29 9:00~10:00)	879	728	③父ヶ谷	14.9
				④不動谷	10.5
				⑥宮川本川中流部	22.8
IV 大台ヶ原雨量観測所	89 (9/29 8:00~9:00)	721	576	⑤大杉谷	23.8

観測所（Ⅱ）と流域最上流部に位置する大台ヶ原雨量観測所（Ⅳ）での連続雨量はそれぞれ740, 721mm, 最大時間雨量は86, 89mm/hrであり、宮川ダム地点と比較してこれら2地点の連続雨量は200mm程度、最大時間雨量は30mm/hr程度小さくなっている。

短時間降雨の指標として「時間雨量」に着目し、表6.1に示すティーセン法により区分した雨量観測所の降雨量を用いて、流域①～⑧の崩壊面積率と最大時間雨量との関係をとりとまとめたものを表6.2と図6.3に示す。図6.3中には、最大日雨量や連続雨量と崩壊面積率との関係も併記した。また、表6.2中には、各流域の斜面勾配と2004年時点での森林伐採や植栽状況を記載した。

表 6.2 2004 年台風 21 号時の崩壊発生状況と降雨状況、
斜面勾配および森林伐採や植栽状況

流域区分	流域面積 (km ²)	ダム湛水域面積 (km ²)	崩壊発生状況		降雨状況			地形 平均斜面勾配 (°)	森林伐採や植栽状況 (2004年時点)				崩壊危険度評価指標 APhr(t) (%)
			崩壊面積 (m ²)	崩壊面積率 (%) ※1	時間雨量 Rh (mm/hr)	最大日雨量 Rd (mm/day)	連続雨量 R (mm)		累加伐採面積 (ha)	累加伐採面積率 (%) ※2	累加無植栽面積 (ha)	累加無植栽面積率 (%) ※2	
① 大和谷	26.80	0.11	51,660	0.19	86	633	740	28.3	400.2	15.0	114.4	4.3	15.0
② 垣外俣谷	8.56	0.09	12,880	0.15	114	767	930	32.4	47.3	5.6	32.6	3.8	3.8
③ 父ヶ谷	14.94	0.13	59,080	0.40	99	728	879	28.2	659.8	44.7	239.2	16.2	16.9
④ 不動谷	10.53	-	4,670	0.04	99	728	879	26.1	242.8	23.1	9.3	0.9	1.5
⑤ 大杉谷	23.82	-	22,340	0.09	89	576	721	24.9	669.0	28.1	227.8	9.6	8.6
⑥ 宮川本川中流部	22.77	0.20	11,830	0.05	99	728	879	28.1	780.7	34.5	47.3	2.1	2.5
⑦ 桑木谷	5.32	0.02	4,550	0.09	114	767	930	25.6	211.8	40.1	22.6	4.3	4.7
⑧ 宮川本川下流部	12.89	1.45	7,080	0.06	114	767	930	27.9	283.3	24.7	24.1	2.1	2.8

※1: 崩壊面積率は、ダム湛水域を除く流域面積に対する崩壊面積の割合を示す。

※2: 累加伐採面積率と累加無植栽面積率は、ダム湛水域を除く流域面積に対する累加伐採面積、累加無植栽面積の割合を示す。

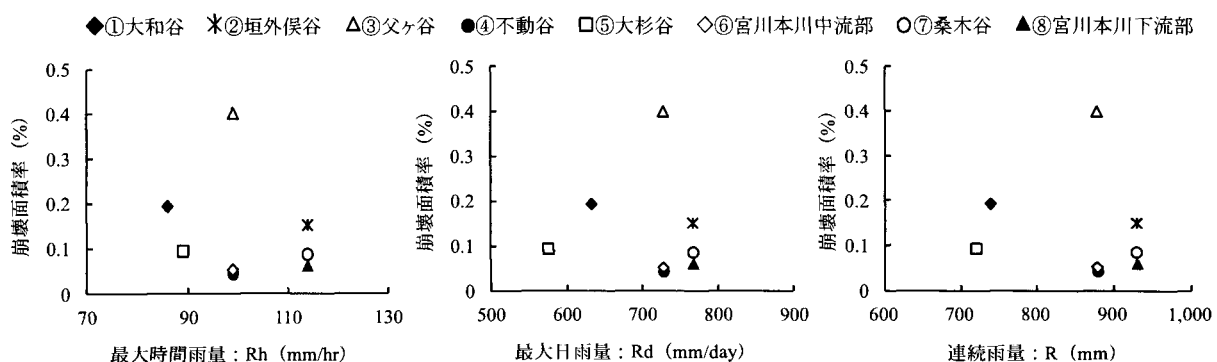


図 6.3 2004 年台風 21 号時の降雨特性と崩壊面積率との関係

最大時間雨量と崩壊面積率との間には、最大日雨量や連続雨量と同様に、若干ながら正の相関性が認められる。しかしながら、大和谷（流域①）、父ヶ谷（流域③）および大杉谷（流域⑤）では、降雨量に対して崩壊面積率が極端に大きな値を示す結果と

なった。この事実より、これら3流域の崩壊発生には、降雨以外の要因が深く関与していることが示唆される。空中写真をもとに、これら3流域の状況を確認したところ、他流域に比べて、流域内に伐採後に植栽されずに放置された無植栽地が多く存在する事実が確認されたことより、崩壊の発生には、斜面の不安定化を助長する無植栽地の影響が大きく関与しているものと推察される。そこで、上記の立地環境の違いを考慮し、無植栽地の多かった大和谷（流域①）、父ヶ谷（流域③）および大杉谷（流域⑤）とこれら以外の5流域とにわけて降雨量と崩壊面積率との関係をとりとまとめたものを図6.4に示す。流域内に無植栽地が多く存在する3流域（流域①、③、⑤）の最大時間雨量と崩壊面積率の間には、相関係数： $R=0.85$ と高い正の相関性が確認され、時間雨量は、日雨量や連続雨量と同様に、崩壊面積率との間に明瞭な正の相関性を有することが確認された。また、垣外俣谷（流域②）、不動谷（流域④）、宮川本川中流部（流域⑥）、桑木谷（流域⑦）および宮川本川下流部（流域⑧）の時間雨量と崩壊面積率の間にも正の相関性が確認され、相関係数は、日雨量や連続雨量の場合と同様に $R=0.65$ を示した。

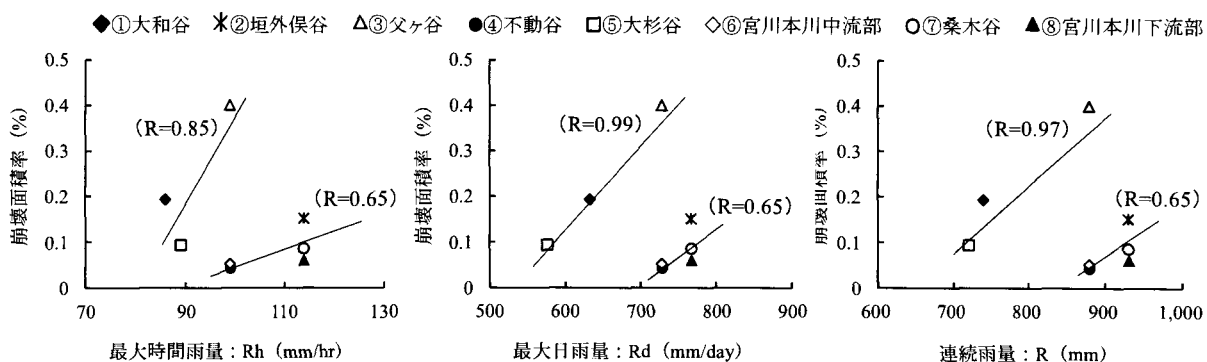


図 6.4 2004 年台風 21 号時の降雨特性と崩壊面積率との関係
（流域①、③、⑤と流域②、④、⑥、⑦、⑧に区分した場合）

以上の結果、宮川ダム上流域の崩壊発生状況には、日雨量や連続雨量と同等に、時間雨量といった短時間降雨も大きく関与している事実が確認された。

つぎに、流域①～⑧の8単元流域ごとに、2004年台風21号による崩壊面積率と流域の平均斜面勾配との関係をとりとまとめたものを図6.5に示す。流域の平均斜面勾配は、国土地理院の50mメッシュの標高データ（DEM）を10mメッシュに補完したデータを用いて、ダム湛水域と3次谷以上の河川部を除いて、メッシュごとの斜面勾配を算出し、これらの値を平均することにより算出した。図6.5より、平均斜面勾配の増加とともに崩壊面積率も増加傾向を示し、両者の間には明瞭な正の相関性が確認される（相関係数： $R=0.30$ ）。さらに、父ヶ谷（流域③）では、同様の平均斜面勾配（28°程度）を示す大和谷（流域①）、宮川本川中流部（流域⑥）および宮川本川下流部（流

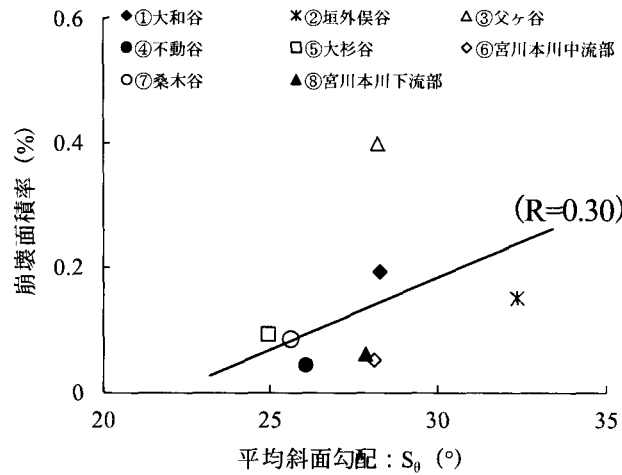


図 6.5 流域の平均斜面勾配と2004年台風21号による崩壊面積率

域⑧)の3流域と比較し、崩壊面積率が0.40%と極端に大きな値を示していることがわかる。この原因としては、父ヶ谷(流域③)の2004年時点での累加無植栽地面積率が16.2%(表6.2)と他流域よりも極端に大きな値を示した事実が挙げられる。

表3.4に示す空中写真を用いて判読した流域①~⑧の森林伐採や植栽状況をもとに、流域面積に対する伐採面積率と累加伐採面積率の経年変化をとりまとめたものを図6.6, a)に、流域面積に対する無植栽面積率と累加無植栽面積率の経年変化をとりまとめたものを図6.6, b)に示す。なお、2004年に撮影された空中写真上で新規確認され

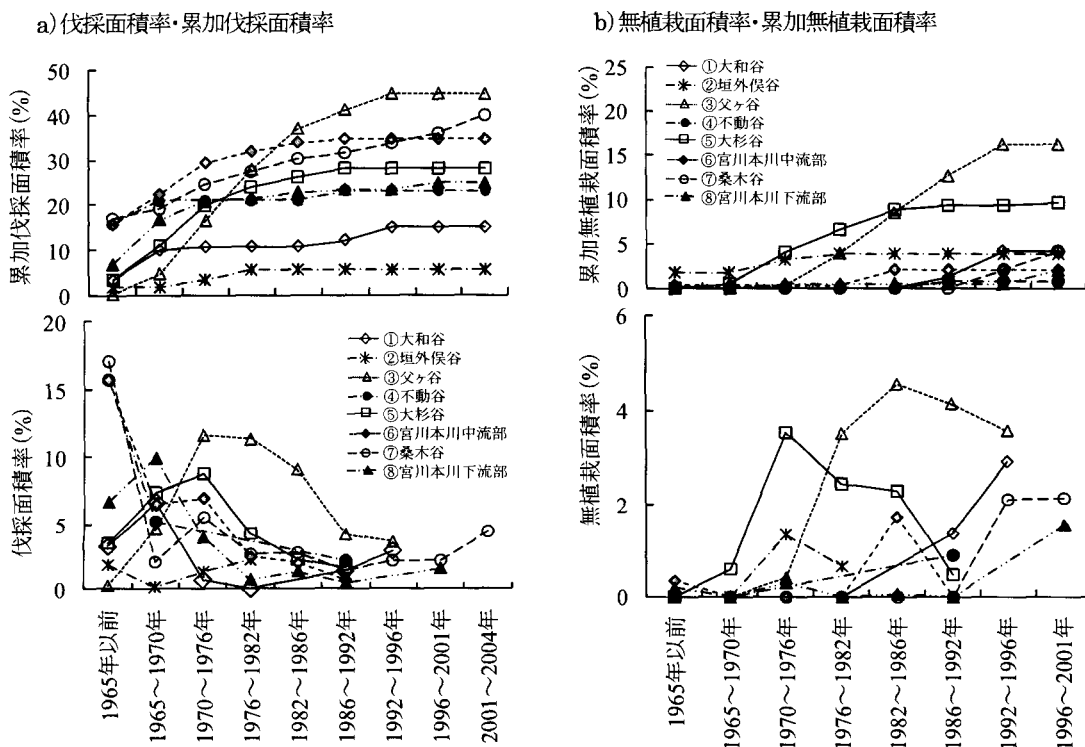


図 6.6 伐採面積率と無植栽面積率の推移

た伐採地（伐採期間：2001～2004年）については、当該年以降の空中写真を入手することができなかつたため、伐採面積を植栽面積と無植栽面積に区分することができなかつた。

8 単元流域の中で最も伐採が盛んに行われたのは父ヶ谷（流域③）であり、2004 年までの累加伐採面積は 660ha と、流域の 45% を占める。また、無植栽地は、父ヶ谷（流域③）と大杉谷（流域⑤）に多く分布しており、2004 年時点の累加無植栽面積率はそれぞれ 16.2, 9.6% となっている。これら 2 流域に次いで、大和谷（流域①）でも無植栽地が多く、累加無植栽面積率は 4.3% を示す。なお、8 単元流域の森林伐採や植栽状況の詳細については、次節で詳述する。

つぎに、第 5 章で提示した「森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を用いて、2004 年台風 21 号時の“森林伐採や植栽の影響”と崩壊との関係を把握した。表層崩壊を対象とする場合の (5.1)～(5.4) 式を流域①～⑧にそれぞれ適用して得られた崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t) と実績崩壊面積率との関係を図 6.7 に示す。各流域の A_{Phr}(t) の算出結果は表 6.2 に示したとおりである。A_{Phr}(t) を算出するために必要となる各流域の伐採面積や植栽面積と伐採・植栽時期などの詳細については、次節の表 6.5 に示す。

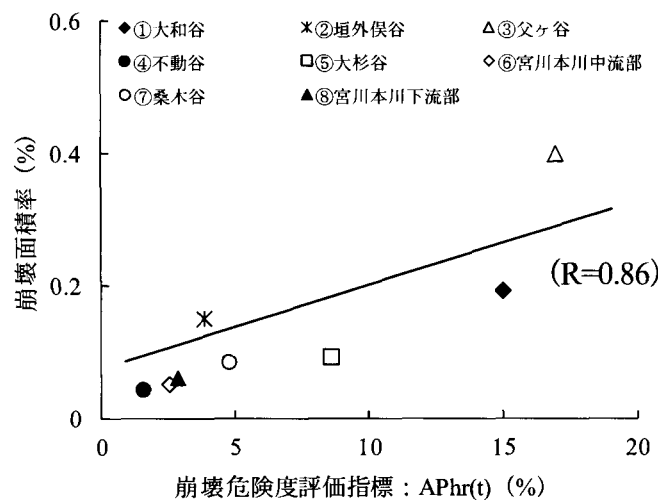


図 6.7 2004 年台風 21 号による崩壊面積率：実績値と A_{Phr}(t) との関係

図 6.7 と表 6.2 より、A_{Phr}(t) と崩壊面積率の間には明瞭な正の相関性が認められる（相関係数：R=0.86）。他の流域と比較して崩壊面積率の高い大和谷（流域①）と父ヶ谷（流域③）では、A_{Phr}(t) が 15% を上回り、同流域内に広く分布する無植栽地の影響により 2004 年時点で流域の崩壊危険度が高まっていたことがわかる。また、垣外俣谷（流域②）では、A_{Phr}(t) が 3.8% と低い値を示しているにもかかわらず、崩壊面積率が 0.15% と高い値を示した。これは、垣外俣谷（流域②）の平均斜面勾配が 32.4°

と8単元流域中最大値を示すことから(表6.2), 森林伐採や植栽の影響に加えて, 不安定な急勾配斜面の存在により同流域内の崩壊発生危険度が高まっていたことによるものと推察される。

以上, 2004年台風21号により発生した表層崩壊と時間雨量, 斜面勾配および森林伐採や植栽状況の相違を反映する崩壊危険度評価指標: APhr(t)の間には, 正の相関関係が確認され, これらの3指標は崩壊に対する主要な説明要因であると判断される。このため, 第5章で構築した「崩壊予測モデル」の説明変数として, 流域ごとに異なる森林伐採や植栽の影響を示す「崩壊危険度評価指標: APhr(t)」に加え, 新たに「斜面勾配」と「時間雨量」を追加することにより, 崩壊現象の再現精度が飛躍的に向上するものと推察される。

6.3 地形形状と森林伐採や植栽状況を考慮した崩壊予測改良モデルの構築

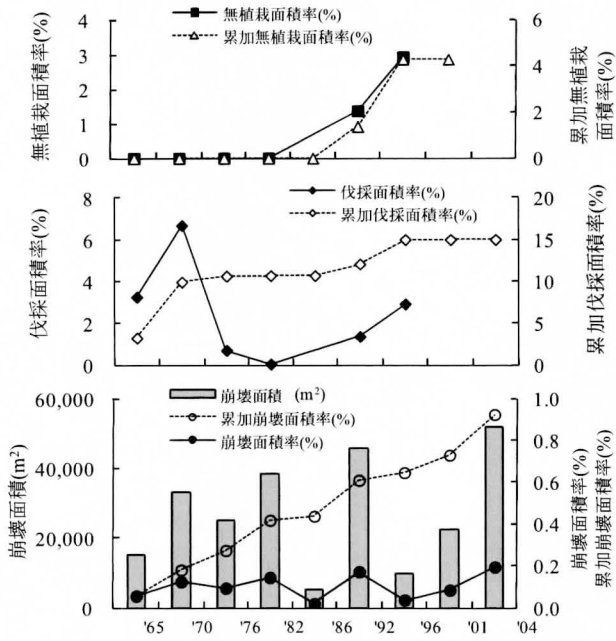
本節では, 宮川ダム上流域を構成する8単元流域(流域①~⑧)を対象として, 1965~2004年までに発生した崩壊現象の再現性に着目し, 前節と第5章で得られた知見をもとに, 森林伐採や植栽状況の相違を反映した崩壊危険度評価指標: APhr(t)と年最大日雨量の2指標に加え, 「斜面勾配」と「時間雨量」を加味した「崩壊予測改良モデル」を構築した。そして, 同モデルの現地流域への適用性や妥当性について考察を加えた。

6.3.1 崩壊発生状況

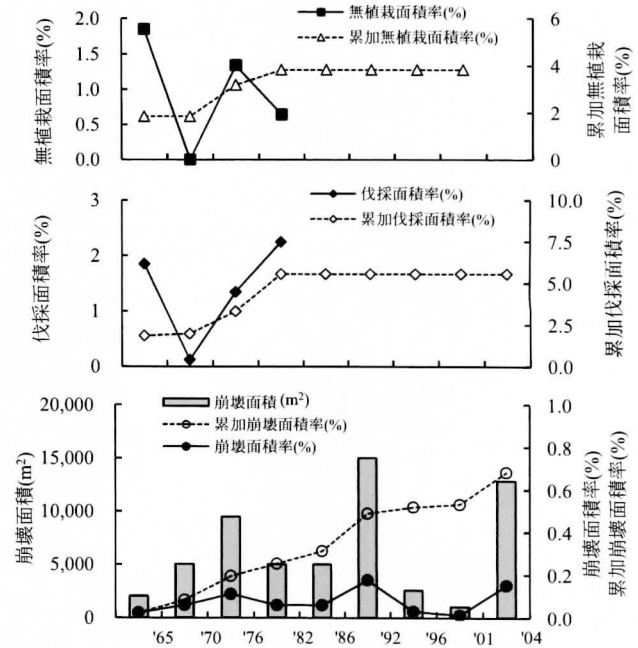
1965~2004年の期間に撮影された空中写真(表3.4)を用いて, 宮川ダム上流域を構成する8単元流域(流域①~⑧; 図3.1)内での崩壊発生状況の推移を概観するとともに, 崩壊と斜面勾配との関係を把握した。流域①~⑧の崩壊面積, 崩壊面積率および累加崩壊面積率の推移を図6.8と表6.3に示す。図6.8の中段には, 流域面積に対する伐採面積の比率(以下, 「伐採面積率」と呼ぶ)と伐採面積率を累加した累加伐採面積率の経年変化を, 同図の上段には, 流域面積に対する無植栽面積の比率(以下, 「無植栽面積率」と呼ぶ)と無植栽面積率を累加した累加無植栽面積率の経年変化を併記した。また, 表6.3中には, 空中写真の撮影間隔内に年最大日雨量が最大値を示す年を原則として設定した崩壊推定年を記載した。

大和谷(流域①), 垣外俣谷(流域②), 父ヶ谷(流域③)の3流域では, 1986~1992年(崩壊推定年: 1990年), 2001~2004年(崩壊推定年: 2004年)の2時期に崩壊面積の増加が認められ, 近年土砂生産が活発化していることがわかる。これら2時期の崩壊面積率は, 大和谷(流域①)と垣外俣谷(流域②)では0.15~0.19%, 父ヶ谷(流域③)では0.4~0.41%となっている。

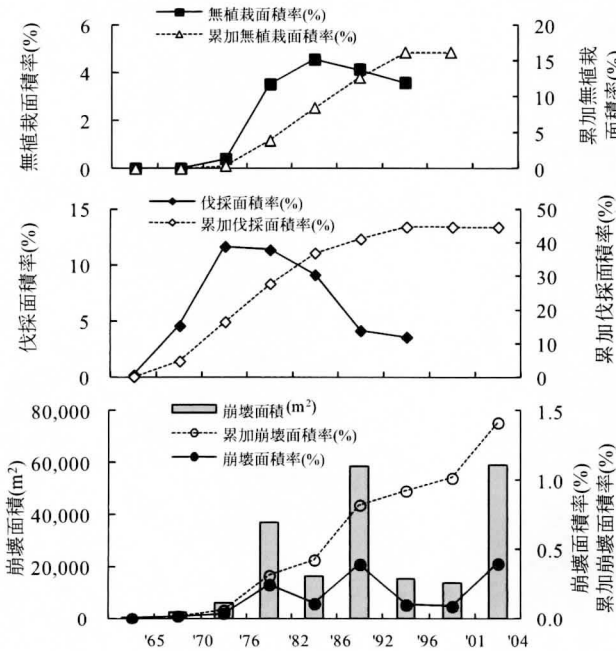
①大和谷



②垣外俣谷



③父ヶ谷



④不動谷

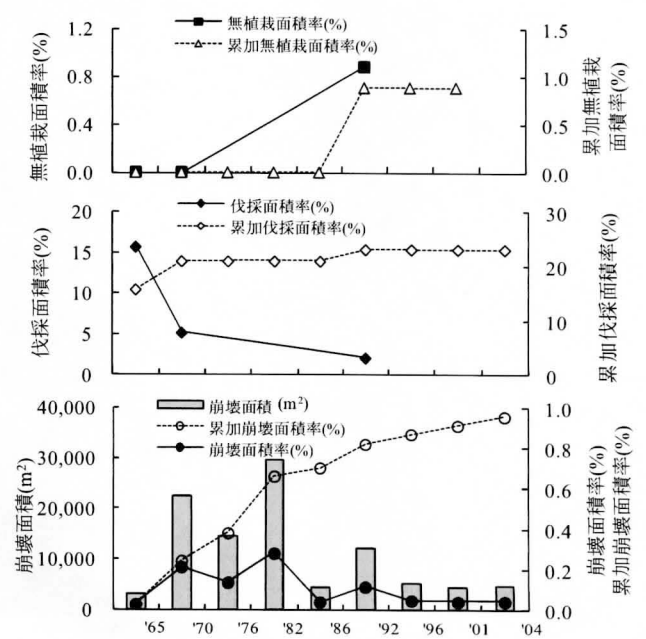
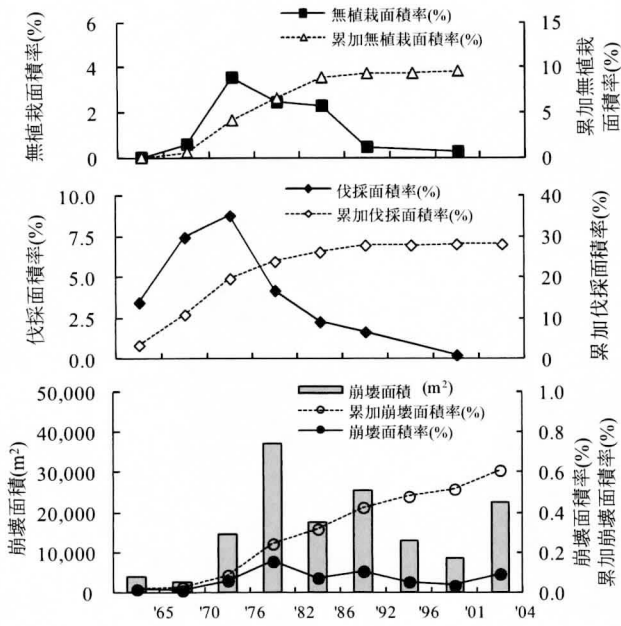
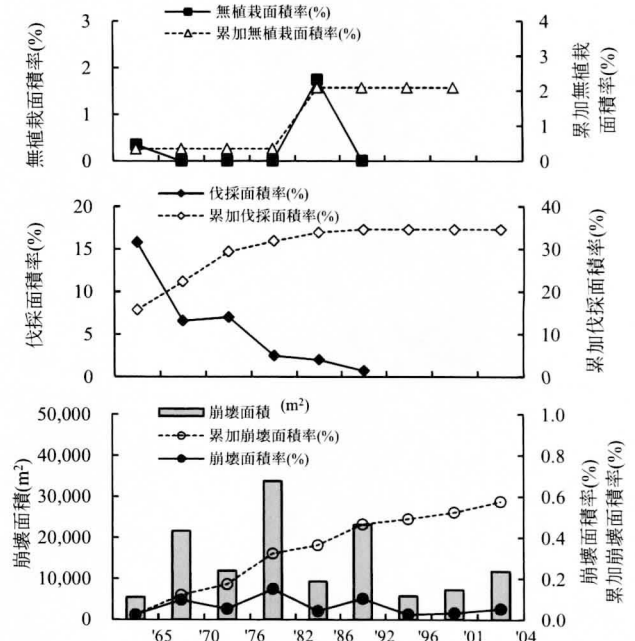


図 6.8 (1) 流域①～④内での崩壊発生状況と伐採面積率・無植栽面積率の推移

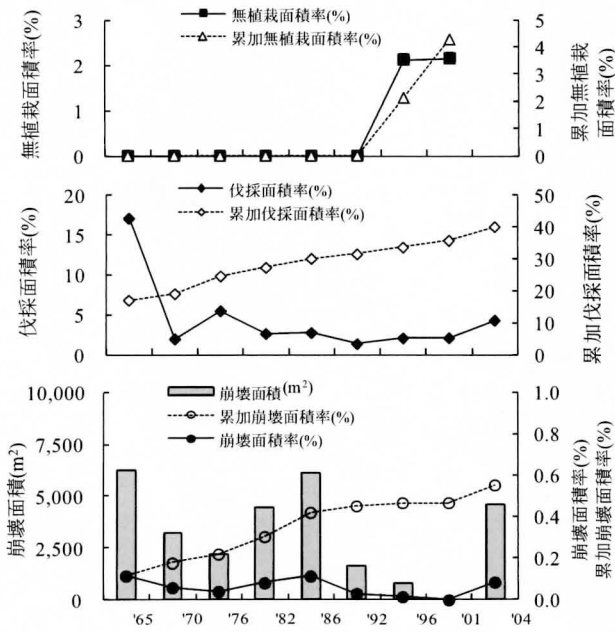
⑤大杉谷



⑥宮川本川中流部



⑦桑木谷



⑧宮川本川下流部

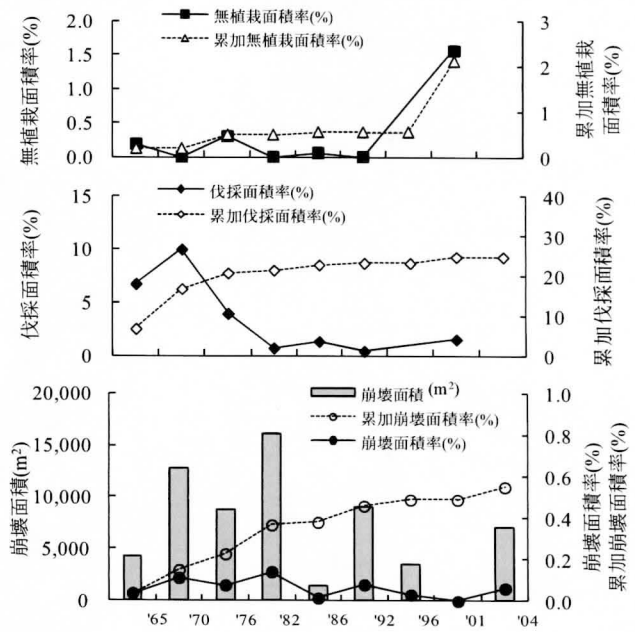


図 6.8 (2) 流域⑤～⑧内での崩壊発生状況と伐採面積率・無植栽面積率の推移

表 6.3 単元流域①～⑧の崩壊面積と累加崩壊面積の推移

空中写真 撮影年度	崩壊 推定 年	①大和谷				②垣外俣谷				③父ヶ谷				
		流域面積: 26.69 (km ²)		流域面積: 8.51 (km ²)		流域面積: 14.77 (km ²)		流域面積: 14.77 (km ²)		流域面積: 14.77 (km ²)		流域面積: 14.77 (km ²)		
		崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	
A	1965	1961	15,000	0.06	15,000	0.06	2,040	0.02	2,040	0.02	720	0.00	720	0.00
B	1970	1968	38,976	0.15	53,976	0.20	5,040	0.06	7,080	0.08	2,680	0.02	3,400	0.02
C	1976	1975	27,594	0.10	81,570	0.31	9,973	0.12	17,053	0.20	6,022	0.04	9,422	0.06
D	1982	1979	39,983	0.15	121,553	0.46	7,301	0.09	24,354	0.29	37,717	0.26	47,139	0.32
E	1986~1987	1982	5,509	0.02	127,062	0.48	5,874	0.07	30,228	0.36	17,741	0.12	64,880	0.44
F	1992	1990	48,320	0.18	175,382	0.66	15,027	0.18	45,255	0.53	60,513	0.41	125,393	0.85
G	1996~1997	1992	9,830	0.04	185,212	0.69	2,586	0.03	47,841	0.56	15,616	0.11	141,009	0.95
H	2001	2001	22,520	0.08	207,732	0.78	1,040	0.01	48,881	0.57	13,720	0.09	154,729	1.05
I	2004	2004	51,660	0.19	259,392	0.97	12,880	0.15	61,761	0.73	59,080	0.40	213,809	1.45
空中写真 撮影年度	崩壊 推定 年	④不動谷				⑤大杉谷				⑥宮川本川中流部				
		流域面積: 10.50 (km ²)		流域面積: 23.80 (km ²)		流域面積: 22.60 (km ²)		流域面積: 22.60 (km ²)		流域面積: 22.60 (km ²)		流域面積: 22.60 (km ²)		
		崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	
A	1965	1961	3,200	0.03	3,200	0.03	3,960	0.02	3,960	0.02	5,440	0.02	5,440	0.02
B	1970	1968	22,400	0.21	25,600	0.24	2,520	0.01	6,480	0.03	22,915	0.10	28,355	0.13
C	1976	1975	15,747	0.15	41,347	0.39	15,124	0.06	21,604	0.09	11,902	0.05	40,257	0.18
D	1982	1979	31,768	0.30	73,115	0.70	37,653	0.16	59,257	0.25	36,993	0.16	77,250	0.34
E	1986~1987	1982	8,956	0.09	82,071	0.78	17,613	0.07	76,870	0.32	10,394	0.05	87,644	0.39
F	1992	1990	12,262	0.12	94,333	0.90	25,626	0.11	102,496	0.43	23,168	0.10	110,812	0.49
G	1996~1997	1992	5,171	0.05	99,504	0.95	13,542	0.06	116,038	0.49	6,195	0.03	117,007	0.52
H	2001	2001	4,920	0.05	104,424	0.99	8,640	0.04	124,678	0.52	7,280	0.03	124,287	0.55
I	2004	2004	4,670	0.04	109,094	1.04	22,340	0.09	147,018	0.62	11,830	0.05	136,117	0.60
空中写真 撮影年度	崩壊 推定 年	⑦桑木谷				⑧宮川本川下流部				宮川ダム上流域全域				
		流域面積: 5.28 (km ²)		流域面積: 11.45 (km ²)		流域面積: 123.6 (km ²)		流域面積: 123.6 (km ²)		流域面積: 123.6 (km ²)		流域面積: 123.6 (km ²)		
		崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	累加崩壊面積 (m ²)	面積率(%)	
A	1965	1961	6,240	0.12	6,240	0.12	4,320	0.04	4,320	0.04	40,920	0.03	40,920	0.03
B	1970	1968	4,360	0.08	10,600	0.20	13,920	0.12	18,240	0.16	112,811	0.09	153,731	0.12
C	1976	1975	2,234	0.04	12,834	0.24	8,715	0.08	26,955	0.24	97,311	0.08	251,042	0.20
D	1982	1979	4,429	0.08	17,263	0.33	16,381	0.14	43,336	0.38	212,225	0.17	463,267	0.37
E	1986~1987	1982	6,144	0.12	23,407	0.44	1,510	0.01	44,846	0.39	73,741	0.06	537,008	0.43
F	1992	1990	1,638	0.03	25,045	0.47	9,549	0.08	54,395	0.48	196,103	0.16	733,111	0.59
G	1996~1997	1992	768	0.01	25,813	0.49	3,456	0.03	57,851	0.51	57,164	0.05	790,275	0.64
H	2001	2001	0	0.00	25,813	0.49	0	0.00	57,851	0.51	58,120	0.05	848,395	0.69
I	2004	2004	4,550	0.09	30,363	0.58	7,080	0.06	64,931	0.57	174,090	0.14	1,022,485	0.83

※流域面積は、ダム湛水域を除く面積を記載した。

※崩壊面積率と累加崩壊面積率は、それぞれダム湛水域を除く流域面積に対する崩壊面積と累加崩壊面積の比率を示す。

一方、不動谷（流域④）、桑木谷（流域⑦）および宮川本川下流部（流域⑧）では、1980年代以前に崩壊が多発している。不動谷（流域④）と宮川本川下流部（流域⑧）では1965～1970年（崩壊推定年：1968年）、1976～1982年（崩壊推定年：1979年）に崩壊が多発しており、崩壊面積率は、不動谷（流域④）では0.2～0.3%、宮川本川下流部（流域⑧）では0.12～0.14%を示している。桑木谷（流域⑦）では1965年以前（崩壊推定年1961年）と1982～1986年（崩壊推定年：1982年）に崩壊面積が突発的に多くなっており、これらの時期の崩壊面積率は0.12%であった。また、大杉谷（流域⑤）と宮川本川中流部（流域⑥）では、1976～1992年にかけて崩壊が多発しており、崩壊面積率は0.05～0.16%を示す。流域④～⑧における近年の崩壊発生状況を見ると、不動谷（流域④）を除く4流域では、観測史上最大規模の降雨がもたらされた2004年を含む2001～2004年（崩壊推定年：2004年）において、突発的な崩壊面積の増加が認められる。不動谷（流域④）では、このような傾向は認められず、近年土砂生産が沈静化している。崩壊地は、父ヶ谷（流域③）、不動谷（流域④）および大和谷（流域①）に多く分布しており、2004年現在での累加崩壊面積率はそれぞれ1.45、1.04、

0.97%となっている。

宮川ダム上流域では、図 6.5 に示したように、2004 年の台風 21 号時には、急勾配斜面の占有率が高い単元流域で、崩壊面積率が高くなる傾向が確認されている。ここでは、この事実を踏まえ、流域①～⑧の各単元流域を対象として、斜面勾配と崩壊発生状況との関係を詳細に把握した。国土地理院の 50m メッシュの標高データを 10m メッシュに補間したデータを用いて算出した各崩壊の発生域の斜面勾配を 5° 間隔で把握し、当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率をとりまとめたものを図 6.9 と表 6.4 に示す。

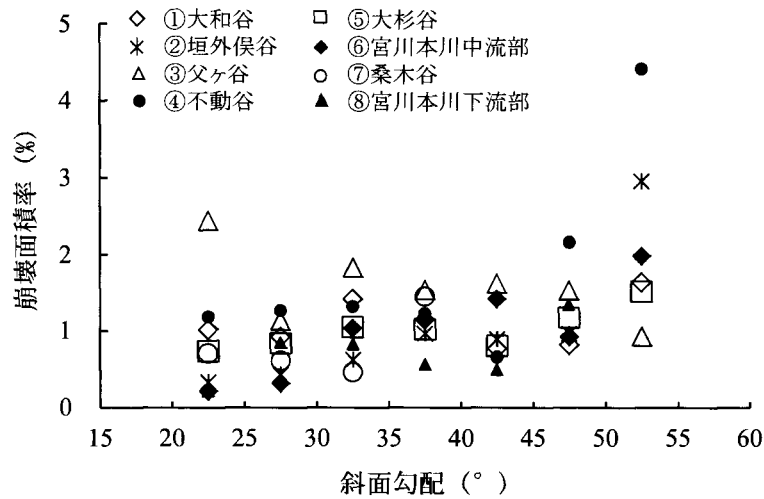


図 6.9 斜面勾配と各勾配区分における崩壊面積率との関係

表 6.4 斜面勾配と各勾配区分における崩壊面積率

斜面勾配	①大和谷				②垣外俣谷				③父ヶ谷				④不動谷			
	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)
0~5°未満	0.04	-	-	-	0.03	-	-	-	0.03	-	-	-	0.03	-	-	-
5~10°未満	0.46	-	-	-	0.03	-	-	-	0.24	-	-	-	0.25	-	-	-
10~15°未満	1.24	-	-	-	0.18	-	-	-	0.66	-	-	-	0.66	-	-	-
15~20°未満	2.40	-	-	-	0.33	-	-	-	1.35	-	-	-	1.25	-	-	-
20~25°未満	4.33	152	43,941	1.01	0.76	6	2,518	0.33	2.57	228	62,474	2.44	2.18	110	25,839	1.19
25~30°未満	6.63	196	61,059	0.92	1.70	22	7,271	0.43	3.90	197	44,259	1.13	2.72	132	34,473	1.27
30~35°未満	6.16	257	87,331	1.42	2.55	47	15,862	0.62	3.32	195	60,688	1.83	2.01	93	26,517	1.32
35~40°未満	3.26	107	37,469	1.15	1.90	57	18,292	0.96	1.68	114	25,851	1.54	0.85	32	10,420	1.23
40~45°未満	1.23	28	9,416	0.77	0.88	18	7,829	0.89	0.68	51	11,074	1.62	0.23	3	1,539	0.66
45~50°未満	0.36	7	2,956	0.82	0.30	11	2,909	0.96	0.25	21	3,899	1.53	0.06	4	1,274	2.16
50°以上	0.11	6	1,852	1.64	0.08	6	2,418	2.96	0.07	2	691	0.92	0.01	1	384	4.41
斜面勾配	⑤大杉谷				⑥宮川本川中流部				⑦桑木谷				⑧宮川本川下流部			
	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)	当該勾配の占有面積 (km ²)	崩壊個数 (個)	崩壊面積 (m ²)	当該勾配の占有面積に対する崩壊面積率 (%)
0~5°未満	0.13	-	-	-	0.09	-	-	-	0.01	-	-	-	0.16	-	-	-
5~10°未満	0.78	-	-	-	0.40	-	-	-	0.09	-	-	-	0.29	-	-	-
10~15°未満	1.86	-	-	-	0.91	-	-	-	0.28	-	-	-	0.53	-	-	-
15~20°未満	3.34	-	-	-	1.72	-	-	-	0.67	-	-	-	0.92	-	-	-
20~25°未満	5.23	144	38,402	0.73	3.61	30	7,761	0.21	1.28	43	9,056	0.71	1.74	17	3,762	0.22
25~30°未満	5.82	193	48,743	0.84	6.29	90	20,021	0.32	1.82	41	11,059	0.61	2.91	70	24,614	0.85
30~35°未満	3.57	124	37,367	1.05	5.56	165	57,499	1.03	1.08	22	4,957	0.46	2.78	90	22,960	0.83
35~40°未満	1.48	44	15,026	1.02	2.65	84	30,577	1.15	0.26	10	3,712	1.45	1.42	34	8,032	0.56
40~45°未満	0.49	13	3,881	0.80	0.78	24	11,013	1.42	0.05	-	-	0.00	0.46	10	2,248	0.49
45~50°未満	0.17	4	1,952	1.17	0.19	8	1,779	0.92	0.00	-	-	0.00	0.10	4	1,365	1.34
50°以上	0.02	1	360	1.51	0.05	4	910	1.98	0.00	-	-	0.00	0.03	-	-	0.00

斜面勾配の増加とともに崩壊面積率も増加傾向を示しており、その増加度合いは、父ヶ谷（流域③）と大杉谷（流域⑤）を除いて、45°を境に急激に大きくなっていることがわかる。特に、この傾向は、不動谷（流域④）で最も顕著に認められ、斜面勾配が45～50°の区域の崩壊面積率は2.2%と、45°以下の区域の崩壊面積率(0.6～1.3%)の2～3倍を示している。さらに、斜面勾配が50°以上になると、崩壊面積率は4.4%と、45～50°の区域の値(2.2%)の2倍にまで上昇している。また、垣外俣谷（流域②）と宮川本川中流部（流域⑥）では、斜面勾配50°以上の区域で崩壊面積率が急増しており、その値は45～50°の区域に比べて、垣外俣谷（流域②）では3倍以上、宮川本川中流部（流域⑥）では2倍以上となっている。

しかしながら、父ヶ谷（流域③）では、斜面勾配が20～25°の緩勾配区域で崩壊面積率が2.4%と最大値を示す結果となった。空中写真をもとに崩壊が発生した緩勾配区域の状況を確認したところ、その大部分が伐採後に植栽されずに放置された無植栽地であることが確認された。このような森林伐採に伴う地表状態の不安定化により、当該流域では、緩勾配区域においても崩壊が多発したと言える。

6.3.2 森林伐採や植栽状況と表層崩壊との関係

前章までの検討により、宮川ダム上流域内の表層崩壊の発生には、森林伐採や植栽状況の相違の影響が強く関与していることが明らかとなった。ここでは、空中写真をもとに、8単元流域相互間での森林伐採や植栽状況の時系列的・空間的な相違やこれらと崩壊との関係を詳細に把握した。さらに、第5章で提示した「森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を用いて、単元流域ごとに、表層崩壊に対する森林伐採や植栽の影響度を把握した。

伐採面積率と累加伐採面積率の推移を示す図6.8（各流域の中段の図）と森林伐採や植栽状況の推移を示す表6.5より、1970年代までは森林伐採が盛んに行われており、垣外俣谷（流域②）を除き、伐採面積率は流域の相違にかかわらず、1976年までの特定の期間に最大値を示し、それ以降は減少していることがわかる。伐採面積率が最大値を示す期間は、不動谷（流域④）、宮川本川中流部（流域⑥）および桑木谷（流域⑦）で1965年以前、大和谷（流域①）と宮川本川下流部（流域⑧）で1965～1970年、父ヶ谷（流域③）と大杉谷（流域⑤）で1970～1976年である。一方、垣外俣谷（流域②）では、1982年までは伐採が行われていたが、それ以降は伐採されておらず、2004年時点の累加伐採面積率は5.6%と、流域の大部分の森林が手を加えられることなく、自然状態で存在していることがわかる。また、不動谷（流域④）では、伐採が行われた時期は、1965年以前、1965～1970年、1986～1992年の3時期のみである。

表 6.5 単元流域①～⑧の森林伐採や植栽状況の推移

空中写真 撮影年度	伐採や植栽が 行われた期間	伐採 や 植栽 年	①大和谷												②垣外俣谷												
			流域面積: 26.69 (km ²)						流域面積: 8.51 (km ²)																		
			伐採地		植栽地		無植栽地		伐採地		植栽地		無植栽地														
			伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	
A	1965	1965年以前	1961	87.1	3.3	87.1	3.3	87.1	3.3	87.1	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	15.7	1.8	15.7	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	15.7	1.8	15.7	1.8
B	1970	1965～1970年	1968	178.4	6.7	265.5	9.9	178.4	6.7	265.5	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	16.8	2.0	1.0	0.1	1.0	0.1	0.0	0.0	15.7	1.8
C	1976	1970～1976年	1973	18.8	0.7	284.2	10.6	18.8	0.7	284.2	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	1.3	28.2	3.3	0.0	0.0	1.0	0.1	11.4	1.3	27.1	3.2
D	1982	1976～1982年	1979	1.5	0.1	285.7	10.7	1.5	0.1	285.7	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	2.2	47.3	5.6	13.7	1.6	14.7	1.7	5.5	0.6	32.6	3.8
E	1986～1987	1982～1986年	1984	-	-	285.7	10.7	-	-	285.7	10.7	-	-	-	-	-	-	47.3	5.6	-	-	14.7	1.7	-	-	32.6	3.8
F	1992	1986～1992年	1989	36.4	1.4	322.2	12.1	0.0	0.0	285.7	10.7	36.4	1.4	36.4	1.4	-	-	47.3	5.6	-	-	14.7	1.7	-	-	32.6	3.8
G	1996～1997	1992～1996年	1994	78.0	2.9	400.2	15.0	0.0	0.0	285.7	10.7	78.0	2.9	114.4	4.3	-	-	47.3	5.6	-	-	14.7	1.7	-	-	32.6	3.8
H	2001	1996～2001年	1999	-	-	400.2	15.0	-	-	285.7	10.7	-	-	114.4	4.3	-	-	47.3	5.6	-	-	14.7	1.7	-	-	32.6	3.8
I	2004	2001～2004年	2003	-	-	400.2	15.0	-	-	285.7	10.7	-	-	114.4	4.3	-	-	47.3	5.6	-	-	14.7	1.7	-	-	32.6	3.8
空中写真 撮影年度	伐採や植栽が 行われた期間	伐採 や 植栽 年	③父ヶ谷												④不動谷												
			流域面積: 14.77 (km ²)						流域面積: 10.50 (km ²)																		
			伐採地		植栽地		無植栽地		伐採地		植栽地		無植栽地														
			伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	
A	1965	1965年以前	1961	3.0	0.2	3.0	0.2	3.0	0.2	3.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	165.2	15.7	165.2	15.7	165.2	15.7	165.2	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0
B	1970	1965～1970年	1968	67.7	4.6	70.8	4.8	67.7	4.6	70.8	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	54.9	5.2	220.1	21.0	54.9	5.2	220.1	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C	1976	1970～1976年	1973	172.3	11.7	243.0	16.5	166.3	11.3	237.0	16.0	6.0	0.4	6.0	0.4	-	-	220.1	21.0	-	-	220.1	21.0	-	-	0.0	0.0
D	1982	1976～1982年	1979	167.7	11.4	410.7	27.8	115.8	7.8	352.8	23.9	51.9	3.5	57.9	3.9	-	-	220.1	21.0	-	-	220.1	21.0	-	-	0.0	0.0
E	1986～1987	1982～1986年	1984	135.0	9.1	545.7	36.9	67.8	4.6	420.6	28.5	67.2	4.5	125.1	8.5	-	-	220.1	21.0	-	-	220.1	21.0	-	-	0.0	0.0
F	1992	1986～1992年	1989	61.2	4.1	606.9	41.1	0.0	0.0	420.6	28.5	61.2	4.1	186.3	12.6	22.7	2.2	242.8	23.1	13.4	1.3	233.5	22.2	9.3	0.9	9.3	0.9
G	1996～1997	1992～1996年	1994	52.9	3.6	659.8	44.7	0.0	0.0	420.6	28.5	52.9	3.6	239.2	16.2	-	-	242.8	23.1	-	-	233.5	22.2	-	-	9.3	0.9
H	2001	1996～2001年	1999	-	-	659.8	44.7	-	-	420.6	28.5	-	-	239.2	16.2	-	-	242.8	23.1	-	-	233.5	22.2	-	-	9.3	0.9
I	2004	2001～2004年	2003	-	-	659.8	44.7	-	-	420.6	28.5	-	-	239.2	16.2	-	-	242.8	23.1	-	-	233.5	22.2	-	-	9.3	0.9
空中写真 撮影年度	伐採や植栽が 行われた期間	伐採 や 植栽 年	⑤大杉谷												⑥宮川本川中流部												
			流域面積: 23.80 (km ²)						流域面積: 22.60 (km ²)																		
			伐採地		植栽地		無植栽地		伐採地		植栽地		無植栽地														
			伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	
A	1965	1965年以前	1961	82.8	3.5	82.8	3.5	82.8	3.5	82.8	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	356.2	15.8	356.2	15.8	348.3	15.4	348.3	15.4	7.9	0.3	7.9	0.3
B	1970	1965～1970年	1968	177.3	7.4	260.0	10.9	163.4	6.9	246.1	10.3	13.9	0.6	13.9	0.6	149.0	6.6	505.1	22.4	149.0	6.6	497.3	22.0	0.0	0.0	7.9	0.3
C	1976	1970～1976年	1973	208.7	8.8	468.7	19.7	124.5	5.2	370.6	15.6	84.2	3.5	98.1	4.1	158.3	7.0	663.4	29.4	158.3	7.0	655.6	29.0	0.0	0.0	7.9	0.3
D	1982	1976～1982年	1979	100.0	4.2	568.7	23.9	41.8	1.8	412.4	17.3	58.2	2.4	156.3	6.6	55.9	2.5	719.3	31.8	55.9	2.5	711.5	31.5	0.0	0.0	7.9	0.3
E	1986～1987	1982～1986年	1984	54.5	2.3	623.2	26.2	0.0	0.0	412.4	17.3	54.5	2.3	210.8	8.9	45.4	2.0	764.7	33.8	5.9	0.3	717.4	31.7	39.4	1.7	47.3	2.1
F	1992	1986～1992年	1989	39.7	1.7	662.9	27.9	28.8	1.2	441.2	18.5	10.9	0.5	221.7	9.3	16.0	0.7	780.7	34.5	16.0	0.7	733.4	32.5	0.0	0.0	47.3	2.1
G	1996～1997	1992～1996年	1994	-	-	662.9	27.9	-	-	441.2	18.5	-	-	221.7	9.3	-	-	780.7	34.5	-	-	733.4	32.5	-	-	47.3	2.1
H	2001	1996～2001年	1999	6.1	0.3	669.0	28.1	0.0	0.0	441.2	18.5	6.1	0.3	227.8	9.6	-	-	780.7	34.5	-	-	733.4	32.5	-	-	47.3	2.1
I	2004	2001～2004年	2003	-	-	669.0	28.1	-	-	441.2	18.5	-	-	227.8	9.6	-	-	780.7	34.5	-	-	733.4	32.5	-	-	47.3	2.1
空中写真 撮影年度	伐採や植栽が 行われた期間	伐採 や 植栽 年	⑦桑木谷												⑧宮川本川下流部												
			流域面積: 5.28 (km ²)						流域面積: 11.45 (km ²)																		
			伐採地		植栽地		無植栽地		伐採地		植栽地		無植栽地														
			伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	伐採面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	無植栽面積 (ha)	面積 率(%)	累加面積 (ha)	面積 率(%)	
A	1965	1965年以前	1961	90.4	17.1	90.4	17.1	90.4	17.1	90.4	17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	77.1	6.7	77.1	6.7	75.0	6.6	75.0	6.6	2.1	0.2	2.1	0.2
B	1970	1965～1970年	1968	10.6	2.0	101.0	19.1	10.6	2.0	101.0	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	114.3	10.0	191.4	16.7	114.3	10.0	189.3	16.5	0.0	0.0	2.1	0.2
C	1976	1970～1976年	1973	29.1	5.5	130.1	24.6	29.1	5.5	130.1	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0	45.2	4.0	236.7	20.7	41.8	3.6	231.1	20.2	3.5	0.3	5.6	0.5
D	1982	1976～1982年	1979	14.1	2.7	144.2	27.3	14.1	2.7	144.2	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	0.7	245.0	21.4	8.3	0.7	239.4	20.9	0.0	0.0	5.6	0.5
E	1986～1987	1982～1986年	1984	14.8	2.8	159.0	30.1	14.8	2.8	159.0	30.1	0.0	0.0	0.0	0.0	15.5	1.4	260.5	22.7	14.8	1.3	254.2	22.2	0.7	0.1	6.3	0.5
F	1992	1986～1992年	1989	7.4	1.4	166.4	31.5	7.4	1.4	166.4	31.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	0.4	265.5	23.2	5.1	0.4	259.2	22.6	0.0	0.0	6.3	0.5
G	1996～1997	1992～1996年	1994	11.2	2.1	177.6	33.6	0.0	0.0	166.4	31.5	11.2	2.1	11.2	2.1	-	-	265.5	23.2	-	-	259.2	22.6	-	-	6.3	0.5
H	2001	1996～2001年	1999	11.4	2.1	188.9	35.8	0.0	0.0	166.4	31.5	11.4	2.1	22.6	4.3	17.8	1.6	283.3	24.7	0.0	0.0	259.2	22.6	17.8	1.6	24.1	2.1
I	2004	2001～2004年	2003	22.9	4.3	211.8	40.1	-	-	166.4	31.5	-	-	22.6	4.3	-	-	283.3	24.7	-	-	259.2	22.6	-	-	24.1	2.1

※流域面積は、ダム湛水域を除く面積を記載した。

1992年以降の近年12年に着目すると、伐採が確認できるのは大和谷（流域①）、父ヶ谷（流域③）、大杉谷（流域⑤）、桑木谷（流域⑦）および宮川本川下流部（流域⑧）の5流域である。さらに、1996年以降では、伐採が行われた流域は、大杉谷（流域⑤）、桑木谷（流域⑦）および宮川本川下流部（流域⑧）の3流域に減少し、伐採範囲は、各流域内の比較的アクセスのよい範囲に限られる。8単元流域の中で最も伐採が盛んに行われたのは父ヶ谷（流域③）であり、2004年までの累加伐採面積は660haと、流域の45%を占める。

無植栽面積率と累加無植栽面積率の推移を示す図 6.8（各流域の上段の図）と表 6.5より、1970年以降、植栽が徐々に行われなくなり、近年は無植栽面積率が増加してい

ることがわかる。父ヶ谷（流域③）では1976～1996年、大杉谷（流域⑤）では1970～1986年にかけて、無植栽面積率が高い値を示している。大和谷（流域①）、桑木谷（流域⑦）および宮川本川下流部（流域⑧）では、1992年以降、無植栽面積率が急激に増加している。前述のように、近年では、森林の伐採範囲が桑木谷（流域⑦）や宮川本川下流部（流域⑧）といった比較的アクセスのよい範囲にシフトしているにもかかわらず、伐採後に植栽が行われることなく放置されたままとなっている事実は注目に値する。無植栽地は、父ヶ谷（流域③）と大杉谷（流域⑤）に多く分布しており、2004年時点の累加無植栽面積率はそれぞれ16.2%、9.6%となっている。

宮川ダム上流域内の無伐採地（空中写真上で森林の伐採が確認されなかった範囲）・植栽地・無植栽地における崩壊面積率と斜面勾配との関係を図 6.10 に示す。

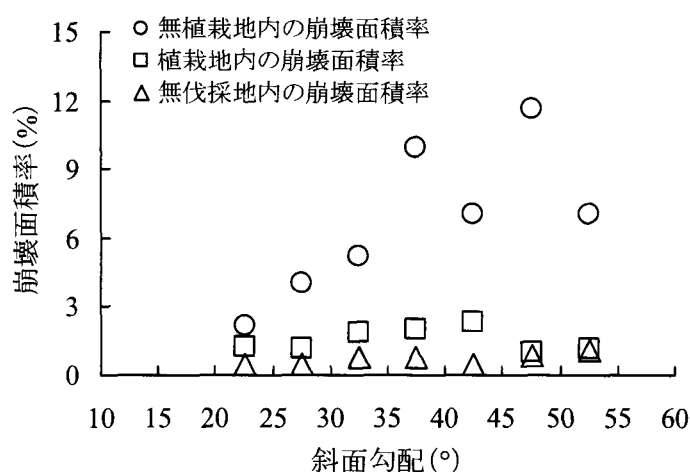


図 6.10 無伐採地・植栽地・無植栽地における斜面勾配と崩壊面積率との関係（宮川ダム上流域全域）

図 6.10 より、無伐採地・植栽地・無植栽地のいずれにおいても、斜面勾配と崩壊面積率の間には正の相関性が認められ、特に、無植栽地内において斜面勾配に対する崩壊面積率の増加度合いが大きく、斜面勾配に対して崩壊面積率が鋭敏に増加していることがわかる。さらに、森林伐採が行われた植栽地や無植栽地では、無伐採地に比べて崩壊面積率が高い傾向が認められる。特に、無植栽地内では、斜面勾配 35°以上の区域での崩壊面積率は6～12%にまで達し、無伐採地の値の6～15倍となっている。これに対し、植栽地内での崩壊面積率は、無伐採地の値に比べて3倍程度大きいものの、無植栽地で確認されたような斜面勾配の増加に伴う崩壊面積率の急増傾向は認められない。なお、8 単元流域それぞれを対象としてこれらの関係を求めた場合でも、同様の結果が得られた（黒岩・平松，2012）。

また、8 単元流域における崩壊面積と無植栽面積の経年変化（図 6.8）を比較すると、無植栽地が多く分布している父ヶ谷（流域③）と大杉谷（流域⑤）では、無植栽面積

率と崩壊面積との間には少なからず対応関係が認められ、無植栽面積率の高かった1970～1980年代には、崩壊面積も比較的大きな値を示していることがわかる。

つぎに、流域①～⑧の8単元流域ごとに、伐採地・植栽地・無植栽地内で発生した崩壊地を抽出し、伐採や植栽後の経過年数と崩壊面積との関係をとりとまとめたものを図6.11に示す。父ヶ谷（流域③）、大杉谷（流域⑤）および宮川本川中流部（流域⑥）では、宮川ダム上流域全域の場合（図4.3）と同様に、伐採後6年時点で崩壊面積が最大値を示し、父ヶ谷（流域③）で $30,000\text{m}^2$ 以上、大杉谷（流域⑤）と宮川本川中流部（流域⑥）で $18,000\text{m}^2$ 以上にも及んでいる。また、これらの3流域では、植栽後25年以上経過した区域においてはほとんど崩壊が発生していない。

大和谷（流域①）と宮川本川下流部（流域⑧）では、これら3流域に比べて崩壊面積が最大値を示す年が若干遅く、大和谷（流域①）では、伐採後10年に崩壊面積が $33,800\text{m}^2$ と最大値を示している。また、宮川本川下流部（流域⑧）では、伐採後6～7年目に崩壊が多発し、伐採後7年で崩壊面積が最大値（ $7,420\text{m}^2$ ）を示す。これら2流域の植栽地内の崩壊面積の推移を見ると、大和谷（流域①）では植栽後の経過年数にかかわらず、崩壊面積は $400\sim 6,000\text{m}^2$ の範囲で推移し、植栽後43年目の崩壊面積は $3,150\text{m}^2$ と、植栽後36年時点の値： $1,000\text{m}^2$ よりも3倍程度上昇している。これに対し、宮川本川下流部（流域⑧）では、植栽後10年以降より崩壊面積が減少し始め、植栽後40年以上経過すると崩壊の発生が沈静化している。

一方、桑木谷（流域⑦）では、伐採後3～6年で崩壊が多発している。植栽地では、植栽後5年程度経過すると崩壊面積が減少し始め、植栽後15年で若干崩壊面積が上昇傾向を示すものの、植栽後20年以上経過すると、崩壊の発生は認められない。

不動谷（流域④）では、植栽直後は崩壊が多発しているものの、植栽後5年以上経過すると、崩壊面積は植栽後の経過年数とともに減少傾向を示すようになる。しかしながら、植栽後14年目の崩壊面積は、 $2,000\text{m}^2$ 程度と植栽直後と同程度の値を示していることがわかる。この崩壊が発生したのは2004年の大規模降雨時である事実を考慮すると、崩壊が多発したのは、根系の緊縛力が十分発達していない環境下に、未曾有の豪雨がもたらされたことによるものと推測される。また、同流域では、無植栽地内での崩壊は確認されなかった。

垣外俣谷（流域②）では、伐採後17年目に崩壊面積が $3,250\text{m}^2$ と最大値を示している。植栽地では、植栽後5年程度経過すると、崩壊面積が減少している。

以上の事実より、森林伐採や植栽の有無やその相違は、崩壊の発生に大きな影響を及ぼしており、森林伐採や植栽状態は、崩壊現象の説明変数として極めて重要な役割を担うことが確認された。

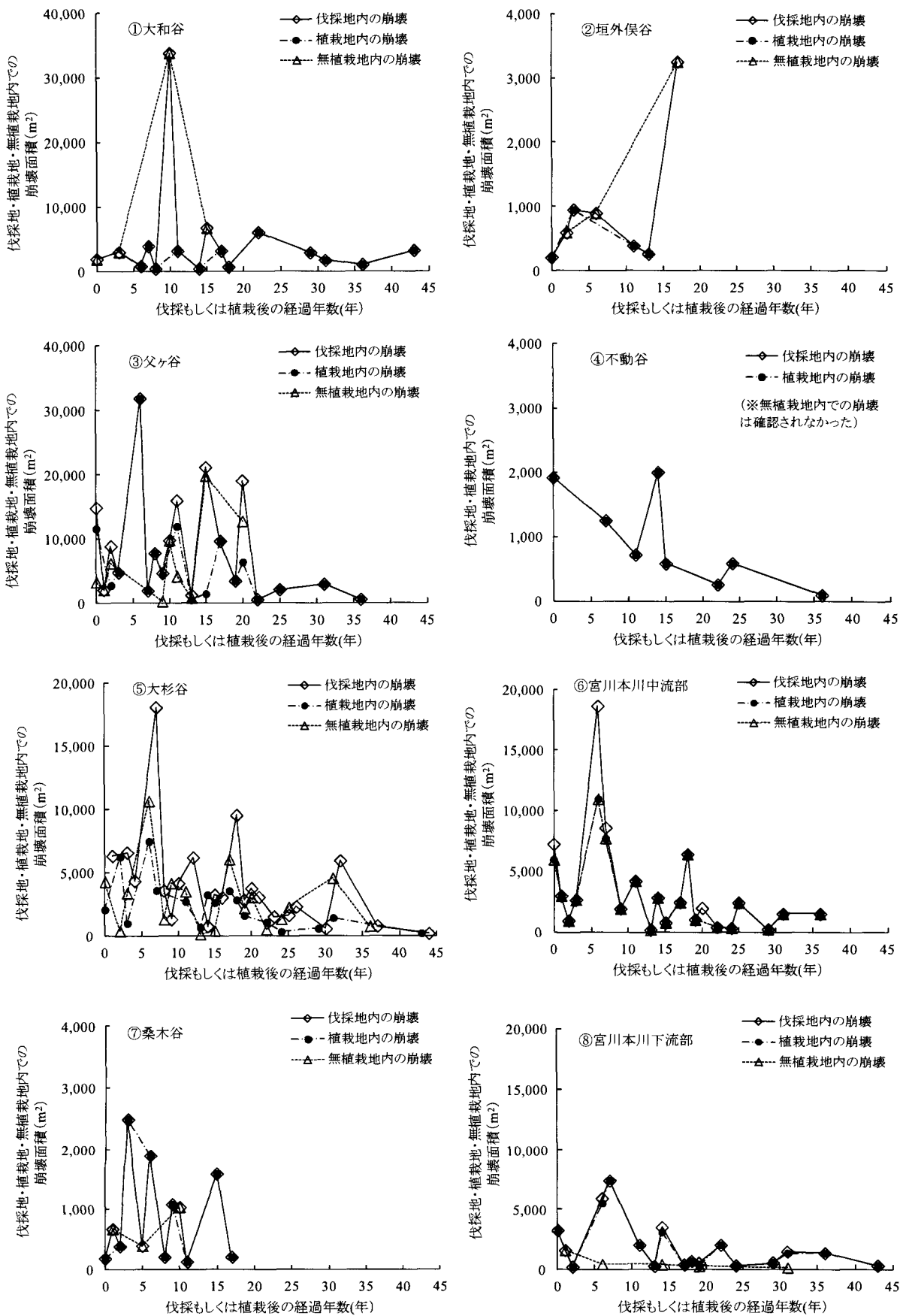


図 6.11 森林伐採や植栽後の経過年数に伴う崩壊発生状況の変化

宮川ダム上流域の表層崩壊を対象とした場合の森林伐採や植栽状況の影響を反映する崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)は、図 5.5 と表 5.4 に示す 4 つの境界年数より導出された(5.1)～(5.4)式を用いて算出される。ここでは、流域①～⑧の 8 単元流域内で発生した表層崩壊を対象として、流域ごとに境界年数を設定して「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を求め、この値を指標として、各単元流域の崩壊発生状況と森林伐採や植栽状況の相違との関係について考察を加えた。流域①～⑧の 8 単元流域内で発生した表層崩壊を対象とした境界年数：T_{L(0)}、T_{L(100)}、T_{F(0)}、T_{F(100)}は、森林伐採や植栽後の経過年数と崩壊面積との関係（図 6.11）をもとに、表 6.6 に示すように、伐採による影響開始年数：T_{L(0)}=0 年、伐採による植生の影響消滅年数：T_{L(100)}=3～17 年、植栽による影響開始年数：T_{F(0)}=5～10 年、植栽による回復年数：T_{F(100)}=15～40 年の範囲内で、単元流域ごとに設定した。大和谷（流域①）では、植栽地内において、植栽後の経過年数に伴う崩壊面積の減少傾向が確認されなかったため、植栽の影響による斜面の安定化については評価しないものとした（表 6.6 中の※1）。また、不動谷（流域④）では、伐採地内で確認された崩壊は、全て植栽地で発生したものであり（図 6.11）、無植栽地内での崩壊に対する考察ができなかったため、伐採による影響を示す境界年数は、宮川ダム上流域全域を対象とした場合と同様の T_{L(0)}=0 年、T_{L(100)}=6 年を採用した。表 6.6 に示すように、単元流域間で境界年数に差異が認められたのは、表層崩壊の発生に関与する“伐採後の樹木根系の腐朽”や“植栽後の植生の成長”に影響を及ぼす地形や土壌条件等の相違によるものと理解される。

表 6.6 単元流域①～⑧の表層崩壊を対象とした場合の境界年数

流域区分	伐採による影響		植栽による影響	
	伐採による影響開始年数	伐採による植生の影響消滅年数	植栽による影響開始年数	植栽による回復年数
	T _{L(0)} (年)	T _{L(100)} (年)	T _{F(0)} (年)	T _{F(100)} (年)
① 大和谷	0	10	— ※1	— ※1
② 垣外俣谷	0	17	5	15
③ 父ヶ谷	0	6	5	25
④ 不動谷	0	6	5	25
⑤ 大杉谷	0	6	5	25
⑥ 宮川本川中流部	0	6	5	25
⑦ 桑木谷	0	3	5	20
⑧ 宮川本川下流部	0	7	10	40

※1：大和谷（流域①）では、植栽地内での崩壊実績を踏まえ、植栽の影響による斜面の安定化は評価しないものとした。

崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)を求めるために必要となる伐採による斜面の不安定化率：L_s(t)と植栽による斜面の安定化率：F_s(t)は、表 6.6 に示す各単元流域の境界年数を用いて、それぞれ(6.1)～(6.3)式と(6.4)～(6.6)式で求められる。

【伐採による斜面の不安定化率：Ls(t)】

$$t \leq T_{L(0)} ; Ls(t) = 0.0 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$T_{L(0)} < t < T_{L(100)} ; Ls(t) = a \cdot t - b \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

$$t \geq T_{L(100)} ; Ls(t) = 100.0 \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

【植栽による斜面の安定化率：Fs(t)】

$$t \leq T_{F(0)} ; Fs(t) = 0.0 \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

$$T_{F(0)} < t < T_{F(100)} ; Fs(t) = c \cdot t - d \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

$$t \geq T_{F(100)} ; Fs(t) = 100.0 \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

ここに、t：伐採もしくは植栽後の経過年数（年）、 $T_{L(0)}$ ：伐採による影響開始年数（年）、 $T_{L(100)}$ ：伐採による植生の影響消滅年数（年）、Ls(t)：伐採による斜面の不安定化率(%), a, b：伐採による斜面の不安定化率の変化傾向を示す係数、 $T_{F(0)}$ ：植栽による影響開始年数（年）、 $T_{F(100)}$ ：植栽による回復年数（年）、Fs(t)：植栽による斜面の安定化率(%), c, d：植栽による斜面の安定化率の変化傾向を示す係数である。

(6.2)式中の a, b と(6.5)式中の c, d は、伐採による斜面の不安定化率と植栽による斜面の安定化率の変化傾向をそれぞれ反映する係数であり、単元流域①～⑧の表層崩壊を対象とする場合の係数 a, b, c, d は、表 6.6 に示す境界年数をもとに、表 6.7 に示す値で与えられる。

表 6.7 単元流域①～⑧の表層崩壊を対象とした場合の斜面安定性の変化傾向を反映する係数

流域区分	伐採による斜面の不安定化率:Ls(t)(%)		植栽による斜面の安定化率:F _s (t)(%)	
	係数a	係数b	係数c	係数d
①大和谷	10	0	—	—
②垣外俣谷	100/17	0	10	50
③父ヶ谷	50/3	0	5	25
④不動谷	50/3	0	5	25
⑤大杉谷	50/3	0	5	25
⑥宮川本川中流部	50/3	0	5	25
⑦桑木谷	100/3	0	20/3	33
⑧宮川本川下流部	100/7	0	10/3	33

※大和谷（流域①）では、植栽地内での崩壊発生実績を踏まえ、植栽の影響による斜面の安定化は評価しないものとした。

(6.1)～(6.6)式と表 6.7 を用いて求めた伐採による斜面の不安定化率：Ls(t)と植栽による斜面の安定化率：Fs(t)を、(5.3)～(5.4)式に代入することより得られた単元流域①～⑧の崩壊危険度評価指標：APhr(t)と崩壊面積率との関係を図 6.12 に示す。図 6.12 よ

り、各流域ともに、A_{Phr}(t)の増加とともに崩壊面積率も増加傾向を示しており、両者の対応関係は流域によって異なることがわかる。特に、父ヶ谷（流域③）では、A_{Phr}(t)に対する崩壊面積率の増加傾向が顕著であり、また、8 単元流域のなかで唯一 A_{Phr}(t)が20%以上を示していることから、当該流域の崩壊は、他の7 流域に比べて森林伐採による斜面の不安定化の影響を強く受けていることがうかがえる。

さらに、図 6.12 を詳細に見ると、父ヶ谷（流域③）において A_{Phr}(t)が20%以上を示す2 時期では、1992～1996 年の崩壊面積率：0.10%は、1986～1992 年の値：0.40%のわずか 1/4 となっていることがわかる。この事実より、1986～1992 年に流域内の不安定箇所的大部分が崩壊し、その直後にあたる 1992～1996 年には、崩壊発生の可能性が高い不安定な箇所がほとんど無かったため、流域内の崩壊危険度が著しく低下していたためと推察される。

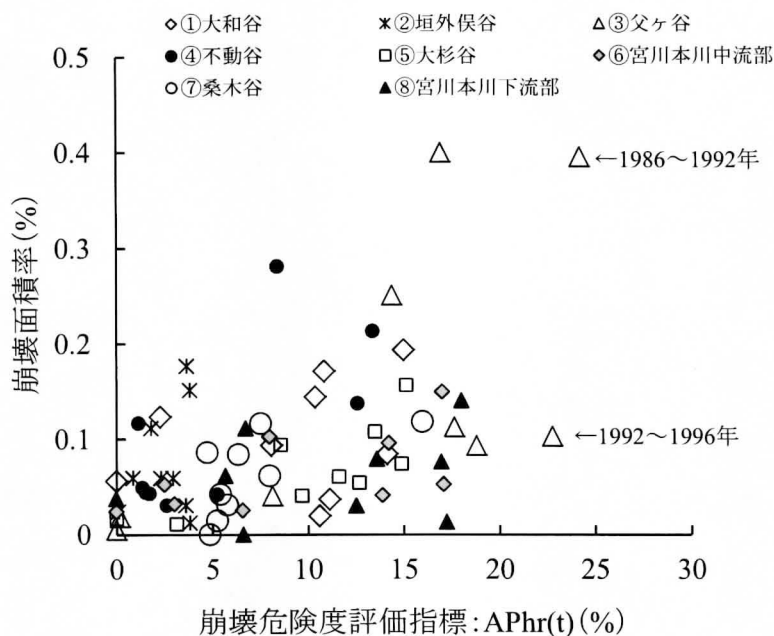


図 6.12 崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)と崩壊面積率：実績値との関係

以上のように、前節の図 6.7 で示した 2004 年台風 21 号により各単元流域内で発生した表層崩壊を対象とした場合と同様に、1965～2004 年までの長期間を対象とした場合においても、単元流域①～⑧の崩壊面積率と森林伐採や植栽の影響を反映した崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)の間には、高い正の相関関係が確認された。

6.3.3 崩壊予測改良モデルの構築とその適用性

前項までの検討により、宮川ダム上流域を構成する 8 単元流域内での崩壊発生状況には、森林伐採や植栽状況、斜面勾配、時間雨量や日雨量の影響が強く関与しており、

これらの指標は、崩壊現象の主要な説明要因となることが確認された。この事実を踏まえ、本項では、第5章で提示した「崩壊予測モデル」の説明変数である年最大日雨量と森林伐採や植栽の影響を示す「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」に加え、新たに「斜面勾配」と「時間雨量」を追加することにより、「崩壊予測改良モデル」を構築し、同モデルの再現精度について考察を加えた。

崩壊の発生には、日雨量だけではなく、短時間降雨である時間雨量も大きな影響を及ぼすという事実を考慮して、降雨指標として、前述の「崩壊予測モデル」で採用した「年最大日雨量：R_d (mm/day)」に加え、「年最大日雨量記録日の最大時間雨量：R_h (mm/hr) (以下、「最大時間雨量」と呼ぶ)」の2指標を抽出した。これらの降雨指標の算出にあたっては、宮川ダム上流域の降雨状況を考慮して、崩壊の発生時期を1961, 1968, 1975, 1979, 1982, 1990, 1992, 2001 および2004年と推定し、これらの崩壊推定年を対象としてティーセン法で求めた年最大日雨量と最大時間雨量の流域平均値をそれぞれ採用した。流域①～⑧の崩壊面積率と最大時間雨量との関係を示す図6.13 a)より、若干のばらつきが認められるものの、両者の間には正の相関関係が確認され、最大時間雨量は8単元流域内での崩壊現象の説明変数として利用可能であると判断される。また、先に示した崩壊予測モデルでも採用している年最大日雨量と8単元流域の崩壊面積率との間にも、図6.13 b)に示すように正の相関関係が認められ、崩壊現象に対する年最大日雨量の説明変数としての重要性が確認された。

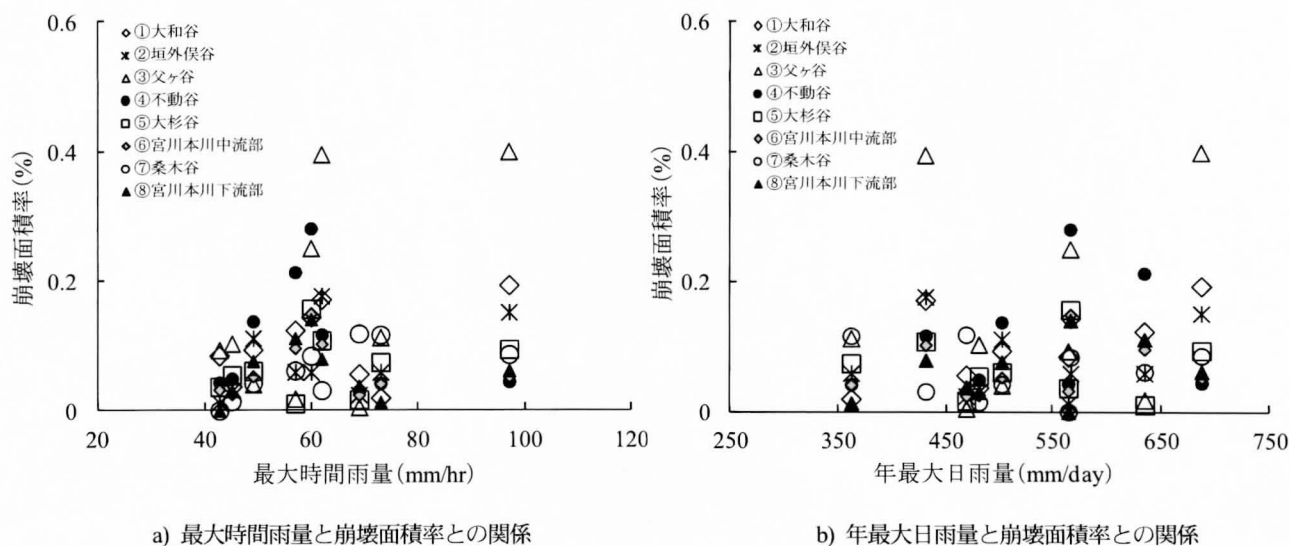


図 6.13 最大時間雨量・年最大日雨量と崩壊面積率：実績値との関係

以上の結果を踏まえ、表層崩壊の誘因として「年最大日雨量」と「最大時間雨量」を、素因として「流域の平均斜面勾配」と森林伐採や植栽状況の影響を反映する「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を抽出し、これら4指標と実績崩壊面積率を用いて重

回帰分析を行うことにより、新たに「崩壊予測改良モデル」を構築した。各単元流域の崩壊面積率：s/a (%) は、(6.7)式で近似可能となる（重相関係数：r=0.62）。

$$s/a = 2.10 \cdot 10^{-6} \times (Rd - r)^{0.39} \times Rh^{0.77} \times e^{0.08 \cdot APhr(t)} \times S_{\theta}^{1.36} \dots\dots\dots (6.7)$$

ここに、s/a:崩壊面積率(%), Rd:年最大日雨量(mm/day), r:崩壊限界雨量(mm/day), Rh:年最大日雨量記録日の最大時間雨量(mm/hr), APhr(t):崩壊危険度評価指標(%), S_θ:流域の平均斜面勾配(°)である。

(6.7)式中の崩壊限界雨量：rは、打萩(1971)により提示された崩壊面積率と累加雨量との関係式に準拠し、前章で示した宮川ダム上流域を対象とした場合(図5.8)と同様に、r=325mm/dayを採用した。この崩壊限界雨量r=325mm/dayは、崩壊の発生限界となる日雨量を意味しており、年最大日雨量：Rdが崩壊限界雨量：325mm/day以下の値の場合は、崩壊は発生しないことになる(崩壊面積率：s/a=0%)。また、崩壊危険度評価指標：APhr(t)の式形としては、図5.7に示す宮川ダム上流域全体に対して得られたAPhr(t)と崩壊面積率と同様の指数形式を採用した。なお、(6.7)式の説明変数に用いたS_θ、APhr(t)および降雨量(Rd, Rh)相互間の単相関係数はr=4.0×10⁻⁸~0.20と、各因子間は独立している。

崩壊予測改良モデル((6.7)式)による崩壊面積率の再現計算結果を図6.14と表6.8に示す。図6.14より、本章で提示した崩壊予測改良モデル((6.7)式)による再現計算では、若干過少評価される傾向が見受けられるものの、概ね良好な再現精度を示していることがわかる。しかしながら、図6.14を詳細に見ると、父ヶ谷(流域③)では、

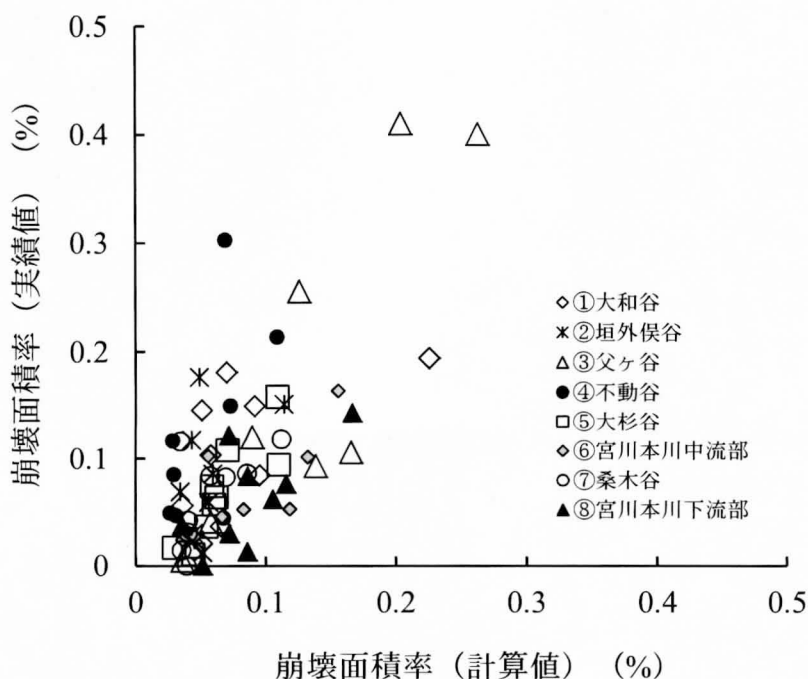


図 6.14 崩壊予測改良モデルによる崩壊面積率の再現計算結果

表 6.8 崩壊予測改良モデルによる計算崩壊面積率と実績崩壊面積率

流域	流域面積 (km ²) (ダム湛水域 を除く)	崩壊 推定 年	降雨量		地形条件 平均斜面 勾配 Sa(°)	森林伐採や植栽状況 崩壊危険度 評価指標 APhr(t)(%)	崩壊面積率: s/a(%)	
			年最大日雨量 (流域平均値) Rd (mm/day)	年最大時間雨量 (流域平均値) Rh (mm/hr)			実績値 (%)	計算値 (%)
①大和谷	26.69	1961	469	69	27.44	0.00	0.06	0.04
		1968	635	57	27.44	2.28	0.15	0.05
		1975	503	49	27.44	8.08	0.10	0.06
		1979	567	60	27.44	10.37	0.15	0.09
		1982	362	73	27.44	10.60	0.02	0.05
		1990	431	62	27.44	10.84	0.18	0.07
		1992	481	45	27.44	11.12	0.04	0.07
		2001	565	43	27.44	14.12	0.08	0.10
		2004	687	97	27.44	14.99	0.19	0.23
②垣外俣谷	8.51	1961	469	69	32.07	0.11	0.02	0.05
		1968	635	57	32.07	0.87	0.06	0.06
		1975	503	49	32.07	1.81	0.12	0.04
		1979	567	60	32.07	2.33	0.09	0.06
		1982	362	73	32.07	2.95	0.07	0.03
		1990	431	62	32.07	3.68	0.18	0.05
		1992	481	45	32.07	3.62	0.03	0.04
		2001	565	43	32.07	3.83	0.01	0.05
		2004	687	97	32.07	3.83	0.15	0.11
③父ヶ谷	14.77	1961	469	69	27.39	0.00	0.005	0.04
		1968	635	57	27.39	0.18	0.02	0.04
		1975	503	49	27.39	8.13	0.04	0.06
		1979	567	60	27.39	14.38	0.26	0.13
		1982	362	73	27.39	17.65	0.12	0.09
		1990	431	62	27.39	24.20	0.41	0.20
		1992	481	45	27.39	22.75	0.11	0.17
		2001	565	43	27.39	18.80	0.09	0.14
		2004	687	97	27.39	16.93	0.40	0.26
④不動谷	10.50	1961	469	69	24.99	2.62	0.03	0.04
		1968	635	57	24.99	13.37	0.21	0.11
		1975	503	49	24.99	12.57	0.15	0.07
		1979	567	60	24.99	8.38	0.30	0.07
		1982	362	73	24.99	5.24	0.09	0.03
		1990	431	62	24.99	1.14	0.12	0.03
		1992	481	45	24.99	1.34	0.05	0.03
		2001	565	43	24.99	1.71	0.05	0.03
		2004	687	97	24.99	1.52	0.04	0.07
⑤大杉谷	23.80	1961	469	69	23.61	0.00	0.02	0.03
		1968	635	57	23.61	3.13	0.01	0.04
		1975	503	49	23.61	11.60	0.06	0.06
		1979	567	60	23.61	15.11	0.16	0.11
		1982	362	73	23.61	14.88	0.07	0.06
		1990	431	62	23.61	13.49	0.11	0.07
		1992	481	45	23.61	12.66	0.06	0.06
		2001	565	43	23.61	9.67	0.04	0.05
		2004	687	97	23.61	8.56	0.09	0.11
⑥宮川本川 中流部	22.60	1961	469	69	27.43	0.00	0.02	0.04
		1968	635	57	27.43	14.22	0.10	0.13
		1975	503	49	27.43	17.09	0.05	0.12
		1979	567	60	27.43	17.01	0.16	0.16
		1982	362	73	27.43	13.90	0.05	0.07
		1990	431	62	27.43	7.98	0.10	0.06
		1992	481	45	27.43	6.58	0.03	0.05
		2001	565	43	27.43	3.03	0.03	0.04
		2004	687	97	27.43	2.51	0.05	0.08
⑦桑木谷	5.28	1961	469	69	24.60	15.98	0.12	0.11
		1968	635	57	24.60	7.99	0.08	0.07
		1975	503	49	24.60	5.41	0.04	0.04
		1979	567	60	24.60	6.35	0.08	0.06
		1982	362	73	24.60	7.51	0.12	0.03
		1990	431	62	24.60	5.78	0.03	0.04
		1992	481	45	24.60	5.25	0.01	0.04
		2001	565	43	24.60	4.86	0.00	0.04
		2004	687	97	24.60	4.74	0.09	0.09
⑧宮川本川 下流部	11.45	1961	469	69	27.14	0.00	0.04	0.04
		1968	635	57	27.14	6.74	0.12	0.07
		1975	503	49	27.14	16.97	0.08	0.12
		1979	567	60	27.14	18.03	0.14	0.17
		1982	362	73	27.14	17.25	0.01	0.09
		1990	431	62	27.14	13.60	0.08	0.09
		1992	481	45	27.14	12.53	0.03	0.07
		2001	565	43	27.14	6.62	0.00	0.05
		2004	687	97	27.14	5.68	0.06	0.11

1992年と2001年の崩壊面積率の実績値はそれぞれ0.11%、0.09%であるのに対し、計算崩壊面積率は0.17%、0.14%と若干過大評価となっている場合が見られる。また、不動谷（流域④）では、他流域と比べて過小評価の傾向が若干多く見られる。このように予測精度が低下した原因としては、崩壊の発生に関与する斜面勾配、森林伐採や植栽状況、降雨量以外の要因の関与が挙げられる。

1961年から2004年までの期間を対象として、崩壊予測改良モデル((6.7)式)により算出した①～⑧の8単元流域の崩壊面積を合計して得られた宮川ダム上流域の崩壊面積の経年変化を図6.15と表6.9に示す。同図表中には、崩壊予測モデル((5.7)式)による計算値も併記した。崩壊が多発した1979年、1990年および2004年の3時期に着目すると、崩壊予測改良モデル((6.7)式)では、崩壊予測モデルに比べて、突発的な崩壊の上昇傾向を精度よく再現していることがわかる。特に、2004年には、崩壊予測モデルを用いた場合には計算結果は102,289m²と、実績値：174,090m²よりも過少評価されていたのに対し、崩壊予測改良モデルを用いた場合の計算値は189,116m²と実績値とわずか15,000m²程度の差となっており、崩壊予測精度が向上していることが確認された。さらに、崩壊の少なかった1975年、1982年、1992年および2001年においても、崩壊予測改良モデルでは、崩壊面積の減少傾向に対する再現精度が向上していることがわかる。

以上のように、今回新たに提示した「崩壊予測改良モデル：(6.7)式」は、流域全体としてみると飛躍的な再現精度の向上にまでは至らなかったものの、過去40年以上もの長期間にわたる崩壊現象の時間的な変動を精度よく再現していることが明らかとなった。

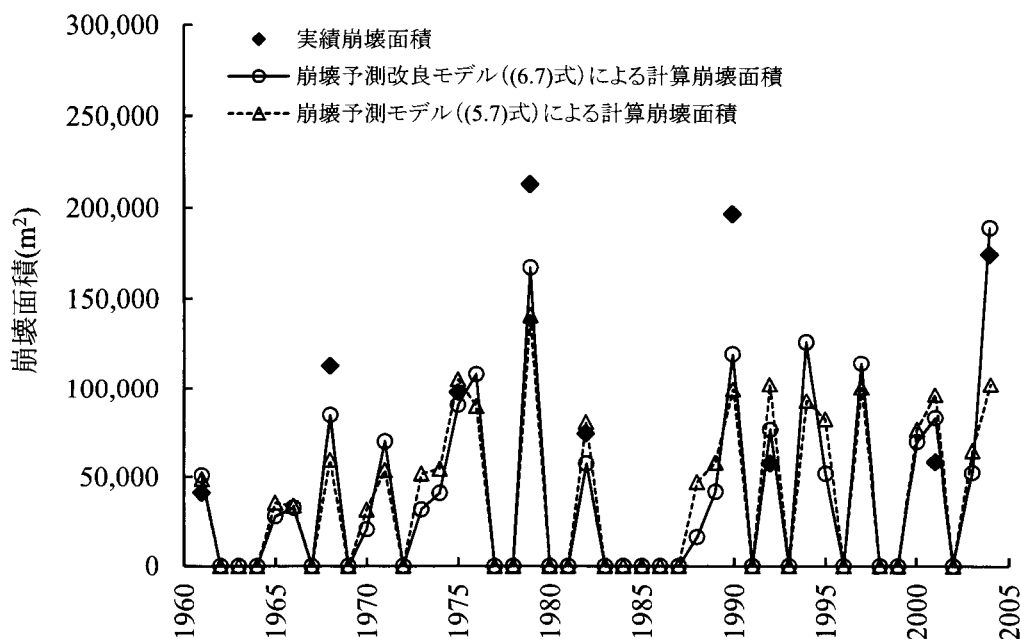


図 6.15 宮川ダム上流域における崩壊面積の再現計算結果

表 6.9 崩壊予測改良モデルによる崩壊面積の再現計算結果

年	再現計算結果														
	実績値	崩壊予測改良モデル((6.7)式)											崩壊予測モデル((5.7)式)		
	崩壊面積 (m ²) ;宮川ダム 上流域 全域	年最大 日雨量 (流域 平均) Rd (mm/day)	年最大 時間 雨量 (流域 平均) Rh (mm/hr)	① 大和谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	② 垣外俣谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	③ 父ヶ谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	④ 不動谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	⑤ 大杉谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	⑥ 宮川本川 中流部 計算 崩壊 面積 (m ²)	⑦ 桑木谷 計算 崩壊 面積 (m ²)	⑧ 宮川本川 下流部 計算 崩壊 面積 (m ²)	宮川ダム 上流域 全域 計算 崩壊 面積 (m ²)	崩壊 危険度 評価 指標 APhr(t) (%)	年最大 日雨量 (ダム 地点) Rd (mm/day)	計算 崩壊 面積 (m ²) ;宮川ダム 上流域 全域
1961	40,920	469	79	10,182	4,048	5,619	4,351	7,400	8,617	6,233	4,303	50,751	0.69	440	48,628
1962	-	319	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.66	286	-
1963	-	191	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.62	138	-
1964	-	221	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.59	175	-
1965	-	377	40	4,487	1,664	2,255	3,997	3,536	7,929	1,717	2,324	27,910	0.55	398	35,457
1966	-	369	47	4,913	1,790	2,412	4,938	3,951	10,436	1,672	2,678	32,790	0.51	318	33,773
1967	-	254	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.48	230	-
1968	112,811	635	58	12,996	4,574	6,064	10,931	10,107	28,578	3,497	7,843	84,590	0.44	611	59,281
1969	-	241	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.42	243	-
1970	-	343	35	3,381	1,034	1,518	2,458	2,660	6,681	719	2,186	20,637	2.40	287	31,463
1971	-	402	76	11,770	3,355	5,183	7,959	9,315	22,055	2,227	7,878	69,742	3.38	387	53,574
1972	-	303	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.36	281	-
1973	-	359	37	5,458	1,424	2,436	3,362	4,604	9,684	773	3,982	31,722	5.33	355	51,710
1974	-	348	55	6,752	1,685	3,462	3,866	6,395	12,397	943	5,350	40,850	6.88	459	54,311
1975	97,311	503	51	15,057	3,594	8,340	7,472	14,497	26,200	2,074	12,960	90,194	7.41	491	104,897
1976	-	410	89	18,409	4,203	11,015	7,919	18,019	30,356	2,739	15,355	108,014	7.95	501	89,423
1977	-	258	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.48	271	-
1978	-	228	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.01	305	-
1979	212,225	567	82	29,381	6,086	22,351	8,683	31,214	42,299	3,632	22,910	166,555	9.33	646	140,382
1980	-	251	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.27	284	-
1981	-	168	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.24	162	-
1982	73,741	362	55	10,630	2,273	10,315	2,399	10,882	11,714	1,416	7,648	57,277	9.22	340	80,363
1983	-	288	96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.20	348	-
1984	-	263	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.18	287	-
1985	-	268	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.41	278	-
1986	-	132	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.15	151	-
1987	-	288	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.89	269	-
1988	-	332	25	3,102	692	4,602	507	2,896	2,258	381	1,780	16,217	8.63	260	46,909
1989	-	342	57	8,017	1,794	12,214	1,283	7,297	5,618	941	4,424	41,586	8.37	326	57,803
1990	196,103	431	86	22,959	5,101	36,886	3,662	20,615	15,457	2,611	12,097	119,388	8.32	506	99,146
1991	-	217	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.91	206	-
1992	57,164	481	43	15,997	3,462	22,398	2,536	13,151	9,423	1,706	7,568	76,240	7.50	525	101,927
1993	-	320	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.10	364	-
1994	-	460	95	28,476	6,002	35,390	4,581	22,032	15,067	2,722	11,909	126,179	6.99	567	92,617
1995	-	413	37	12,074	2,485	14,619	1,922	8,932	5,977	1,138	4,622	51,768	7.05	405	82,219
1996	-	107	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.85	121	-
1997	-	524	72	29,663	5,761	30,525	4,364	19,189	12,611	2,716	9,467	114,295	6.65	672	100,124
1998	-	249	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.45	233	-
1999	-	236	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.25	156	-
2000	-	421	57	20,444	3,622	17,653	2,702	10,971	7,397	1,643	5,066	69,497	6.10	478	76,330
2001	58,120	565	46	25,332	4,384	20,331	3,254	12,895	8,831	2,060	5,877	82,963	5.76	570	96,228
2002	-	278	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.44	171	-
2003	-	396	48	17,101	2,825	11,859	2,075	7,834	5,535	1,344	3,600	52,173	5.32	325	64,377
2004	174,090	687	114	64,197	10,358	41,380	7,570	27,899	20,019	4,818	12,875	189,116	5.19	767	102,289

6.4 まとめ

本章では、森林伐採や植栽の影響を加味した合理的で実用性の高い崩壊面積率予測手法を確立することを目的とし、宮川ダム上流域を構成する8単元流域を対象として、過去40年間に発生した崩壊現象の再現性に着目し、第5章で提示した「崩壊予測モデル」の改良を試みた。

2004年台風21号により発生した表層崩壊の発生要因解析を実施した結果、時間雨量、斜面勾配および森林伐採や植栽状況の相違を反映する崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)と崩壊面積率との間には、正の相関関係が確認され、これらの3指標を説明変数とすることにより、「崩壊予測モデル」の再現精度が向上することが確認された。この事実を勘案し、第5章で提示した「崩壊予測モデル」で抽出した「年最大日雨量」と森林伐採や植栽の影響を示す「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」に加え、新たに「斜面勾配」と「時間雨量」を説明変数として抽出した「崩壊予測改良モデル」を構築した。同モデルを宮川ダム上流域に対して適用した結果、崩壊面積率に対して高い再現精度が確認され、今後降雨データ等を蓄積することによりその精度を向上させていく必要があるもの、本章で新たに提示した「崩壊予測改良モデル」は、崩壊面積率予測を行ううえで十分な精度を有していると判断される。

以上より、今回新たに斜面勾配や時間雨量を説明変数として組み込んだ「崩壊予測改良モデル：(6.7)式」に、降雨量、斜面勾配、森林の伐採や植栽状況といった流域の基礎的なデータを与えることにより、流域内で生じる崩壊面積の再現や予測精度が飛躍的に向上する事実が確認された。

引用文献

- 林拙郎・土屋智・近藤観慈・芝野博文・沼本晋也・小杉賢一朗・山越隆雄・池田暁彦（2004）：2004年9月29日、台風21号に伴って発生した三重県宮川村の土砂災害（速報），砂防学会誌，Vol.57，No.4，p.48-55
- 林拙郎・近藤観慈（2006）：森林域における崩壊の発生状況と防災のあり方—三重県宮川村災害を例として—，中森研 No.54，p.199-202
- 黒岩知恵・平松晋也（2010）：三重県宮川ダム上流域における2004年台風21号による土砂生産に関する一考察，砂防学会誌，Vol. 63，No. 4，p. 16-21
- 黒岩知恵・平松晋也（2012）：地形形状と森林伐採や植栽状況を考慮した崩壊予測に関する研究，砂防学会誌，Vol. 65，No. 3，p. 12-20
- 三重県松阪地方県民局建設部（2005）：平成16年9月29日発生 台風21号による三重県宮川村の土砂災害箇所と対応
- 太田猛彦（1991）：土保全のための森林管理モデル，森林科学，No.3，p.36-40
- 塚本良則（1998）：森林・水・土の保全—湿润変動帯の水文地形学—，朝倉書店，p.89-102
- 打萩珠男（1971）：ひと雨による山腹崩壊について，新砂防，Vol. 23，No. 4，p. 21-34

第7章 森林伐採や植栽状況の変化に伴う崩壊土砂量の長期予測

7.1 概説

近年、木材価格の低迷や経営コストの増加等により、林業従事者の不足や高齢化が進み、全国各地で伐採後に植栽されずに放置される無植栽地が急増している。このような無植栽地では、表層崩壊が多発するなど、土砂生産が活発化している事実が多数報告されるようになり（例えば、小山ら，2009；黒岩・平松，2010），森林施業や森林管理の重要性が広く認識されるとともに、持続可能な森林施業の方法が検討されるようになってきた。

本章では、第6章において崩壊面積率の再現や予測を行ううえで有用性が確認された「崩壊予測改良モデル」を用いて、伐採や植栽状況の異なる複数ケースを想定して崩壊土砂量の長期予測を行い、伐採や植栽といった森林施業状態の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響について考察する。

第2節では、空中写真判読と現地調査を行うことにより、崩壊土砂量を求める際に必要となる崩壊深と森林の状態との関係を定量的に把握する。

第3節では、これらの結果と第6章で新たに提示した「崩壊予測改良モデル」を用いて、流域内の森林施業状態を種々変化させた場合の崩壊土砂量の算出を試みる。具体的には、伐採跡地全面に対して植栽が行われる場合、伐採跡地全面が無植栽状態のまま放置される場合、伐採跡地の半面に対してのみ植栽が行われる場合の3ケースに対して崩壊土砂量の長期予測を行い、伐採や植栽状況の相違と土砂生産状況との関係について考察を加えるとともに、将来の望ましい流域管理のあり方について言及する。

7.2 森林の状態と崩壊深との関係

流域からの崩壊土砂量を算出するためには、流域内で生じる崩壊面積に加え、崩壊深を把握する必要がある。表層崩壊と森林との関係については数多くの研究が行われており、崩壊深と森林との関係に着目した調査事例も少なからず見受けられる。人工林内では、森林の成長とともに、崩壊深が深くなる傾向が指摘されており、壮齢林では、幼齢林に比べて崩壊発生頻度は低いものの、幼齢林よりも崩壊深の深い崩壊が発生している事実が報告されている（例えば、太田，2006；多田ら，2010）。また、このような崩壊深の深い崩壊により、大量の土砂が生産・流出した事実も数多く報告されている（例えば、平松ら，2006；小藤・鈴木，2006）。

本節では、宮川ダム上流域内に位置する人工林を対象として、森林の状態を示す指標として「植栽後の経過年数」に着目し、崩壊深と植栽後の経過年数との関係を定量的に把握した。

宮川ダム上流域内の人工林の主な構成樹種であるスギ林とヒノキ林を対象として、植栽後の経過年数が異なる崩壊地を複数地点抽出し、これらの崩壊地に対して現地サンプリング調査を実施し、各崩壊地の崩壊深を計測した。崩壊深の計測結果を表 7.1 に示す。表中には、それぞれの崩壊が発生した時点での森林の状態と斜面勾配を併記した。

表 7.1 崩壊深の計測結果

崩壊地No.	調査年	斜面勾配(°)	崩壊地諸元		森林の状態		
			崩壊深(m)	崩壊推定年※1	樹種	植栽推定年※2	崩壊発生時点での植栽後の経過年数(年)
1	2000	30.0	0.70	1997	スギ	1984	13
2	2010	30.2	1.61	2008	スギ	1973	35
3	2010	30.2	2.01	2008	スギ	1973	35
4	2010	30.0	1.60	2004	スギ	1973	31
5	2000	35.7	0.76	1997	ヒノキ	1973	24
6	2000	33.6	1.37	1997	ヒノキ	1973	24
7	2010	30.9	1.63	2008	ヒノキ	1973	35
8	2010	33.8	1.01	2008	ヒノキ	1973	35
9	2010	32.6	1.08	2008	ヒノキ	1973	35
10	2010	32.4	0.55	2008	ヒノキ	1973	35
11	2010	34.5	1.40	2008	ヒノキ	1968	40
12	2010	31.1	1.26	2008	ヒノキ	1984	24
13	2010	38.6	0.64	2008	ヒノキ	1989	19

※1: 空中写真判読結果, 宮川ダム地点の降雨資料, 崩壊地の現地確認結果を勘案して, 崩壊年を推定した。

※2: 1965~2004年までの空中写真判読結果, 植栽地の現地確認結果をもとに, 植栽年を推定した。

現地調査は、2000年7月21~22日と9月10~11日、2010年6月3~6日の計3回にわたって実施した。崩壊深の計測には、ノンプリズムレーザー距離計（レーザーテクノロジー社、型式：インパルスLR）を用いた。一般に、水分要求量の違いから、スギは斜面下方に、ヒノキは斜面中~上方に植栽されるため、スギとヒノキは土層厚や斜面勾配が異なる条件下に生育することになる。このため、本調査では、崩壊深に対する植栽後の経過年数や樹種といった植生の影響のみを抽出するため、斜面勾配等の植生以外の条件が類似した箇所から、崩壊地を抽出した。調査対象とした崩壊地は、斜面勾配30~40°で、斜面中~下方に位置しており、崩壊地の全景が林道より視認でき、崩壊深の計測が可能な表 7.1 に示す計13地点（スギ林内：4地点、ヒノキ林内：9地点）である。

スギ林とヒノキ林で発生した各崩壊地の崩壊深と崩壊発生時点における植栽後の経過年数との関係を図 7.1 に示す。図 7.1 より、スギ林・ヒノキ林ともに、植栽後の経過年数と崩壊深の間には正の相関関係が認められ、森林の成長すなわち根系の伸長とともに、崩壊深の深い崩壊が発生する傾向がうかがえる。この傾向は、ヒノキ林よりもスギ林でより顕著に認められ、スギ林では、植栽後35年経過した植栽地で発生

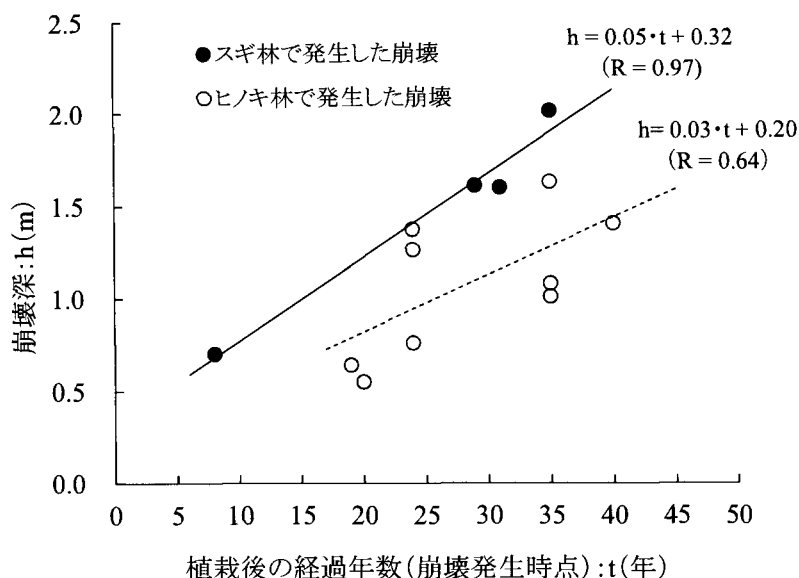


図 7.1 植栽後の経過年数と崩壊深との関係

した崩壊地の崩壊深は2.0mと、ヒノキ林の1.3～2.0倍程度となっている。このように、スギ林の崩壊深が深い傾向を示す結果となった原因としては、樹木の主根の形態がスギは深根型であるのに対し、ヒノキは浅根型（苅住，1987）であるといった根の伸長特性の相違に加え、ヒノキ林に比べてスギ林の崩壊地が若干緩勾配斜面に位置しているという事実が挙げられる（黒岩ら，2012）。

スギ林とヒノキ林地での崩壊深： h (m)は、植栽後の経過年数： t (年)を用いて、それぞれ(7.1)～(7.2)式で表すことが可能となる。

$$\text{【スギ林】 } h=0.05 \cdot t+0.32 \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

$$\text{【ヒノキ林】 } h=0.03 \cdot t+0.20 \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

ここに、 h ：崩壊深 (m)、 t ：植栽後の経過年数 (年)である。

以上のように、植栽後の経過年数すなわち森林の成長とともに、植栽地内で発生する崩壊地の崩壊深が増加することになるため、流域内の崩壊土砂量を算出する際には、(7.1)～(7.2)式を用いて対象とする森林の状態に対応した崩壊深を与えることにより、再現精度の高い崩壊土砂量の算出が可能となると言える。

7.3 森林伐採や植栽状況の変化を考慮した崩壊土砂量予測

本節では、人工林（植栽地）内での植栽後の経過年数と崩壊深との関係を示す(7.1)～(7.2)式と第6章で提示した「崩壊予測改良モデル」を用いて、宮川ダム上流域内の崩壊土砂量の再現計算を実施した。さらに、森林伐採や植栽状況を種々変化させた場合の崩壊土砂量の長期予測を行い、その結果について考察した。

1961～2004年の期間を対象として、植栽後の経過年数と崩壊深との関係を示す(7.1)～(7.2)式と「崩壊予測改良モデル：(6.7)式」を用いて、宮川ダム上流域内の崩壊土砂量の再現計算を実施した。崩壊土砂量の算出にあたっては、崩壊予測改良モデル((6.7)式)を用いて、宮川ダム上流域を構成する単元流域①～⑧ごとに崩壊面積率を算出し、この崩壊面積率に無伐採地・植栽地・無植栽地のそれぞれの面積を乗じて、これらの森林の状態別に崩壊面積を求めた。そして、植栽地内で発生した崩壊に対しては、植栽地内の樹種構成がスギとヒノキで1/2ずつと仮定し、植栽後の経過年数に対応した崩壊深は、(7.1)～(7.2)式でそれぞれ得られる崩壊深の平均値とし、この値を崩壊面積に乘じることにより、崩壊土砂量を求めた。無伐採地と無植栽地内で発生した崩壊に対しては、現地調査により把握した宮川ダム上流域の平均崩壊深：0.8mに崩壊面積を乘じることにより、崩壊土砂量を算出した。以上に示す手順により算出した単元流域①～⑧の崩壊土砂量を合計して得られた1961～2004年までの44年間にわたる宮川ダム上流域の崩壊土砂量の再現計算結果を図7.2に示す。同図中には、宮川ダムの堆砂量の経年変化を併記した。

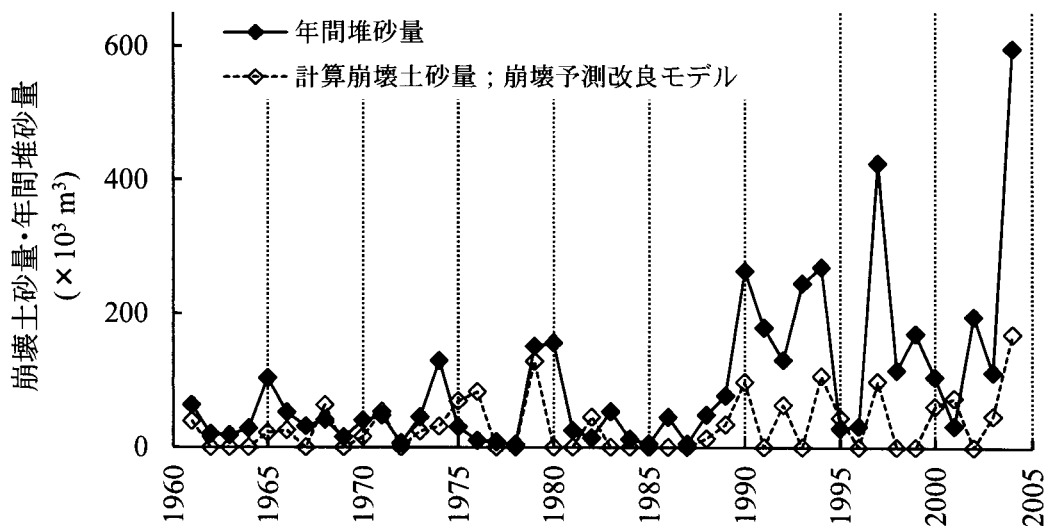


図 7.2 宮川ダム上流域の崩壊土砂量の再現計算結果

図7.2より、崩壊土砂量の計算値と宮川ダムの実績年間堆砂量の変化傾向は概ね類似しており、時期的なズレが若干認められるものの、堆砂量が急激に増加した1979、1990、1994、1997、2004年には崩壊土砂量も大きな値を示していることがわかる。1979年には崩壊土砂量の計算値は $128,056\text{m}^3/\text{year}$ と突発的に大きな値を示すのに対し、年間堆砂量は1979～1980年の2年間に $151,000$ 、 $156,000\text{m}^3/\text{year}$ と例年の2倍以上の値を示している。このように両者の挙動に若干のずれが認められたのは、崩壊等により流域内で生産された土砂がダム地点へと到達するまでに時間的な遅れを伴うことによるものである。

つぎに、崩壊予測改良モデル ((6.7)式) を用いて、2005 年から 2048 年までの 44 年間にわたる崩壊土砂量の長期予測を試みた。降雨条件としては、1961～2004 年までの 44 年間の降雨が繰り返し発生するものと仮定した。また、2005 年以降の森林伐採や植栽状況としては、過去の事例（三重県農林水産部、1996）を参考に、伐期を林齢 40 年と設定し、2004 年現在で林齢 40 年以下の人工林を対象に、これらが伐期を迎えた時点で順次伐採されるものと仮定した。伐採後の状態としては、表 7.2 に示すように、伐採跡地全面に植栽が行われる場合（Ⅰ：全面植栽タイプ）、伐採跡地に植栽は行われず無植栽状態のまま放置される場合（Ⅱ：全面無植栽タイプ）、伐採跡地の半面に対してのみ植栽が行われる場合（Ⅲ：半面植栽タイプ）の 3 ケースを想定した。

表 7.2 崩壊土砂量の予測ケース

計算ケース	森林の状態	伐期
Ⅰ 全面植栽タイプ	伐採跡地全面に植栽が行われる場合	林齢40年
Ⅱ 全面無植栽タイプ	伐採跡地に植栽は行われず、無植栽状態のまま放置される場合	林齢40年
Ⅲ 半面植栽タイプ	伐採跡地の半面に対してのみ植栽が行われる場合	林齢40年

表 7.2 に示す各ケースに対して、前述の 1961～2004 年の崩壊土砂量の算出の場合と同様の手順により、植栽後の経過年数と崩壊深との関係を示す(7.1)～(7.2)式と「崩壊予測改良モデル：(6.7)式」を用いて求められる単元流域ごとの崩壊土砂量を合計し、宮川ダム上流域の崩壊土砂量の予測値を算出した結果を図 7.3 と表 7.3 に示す。

崩壊土砂量の経年変化を見ると、2010 年までは、いずれのケースでも 53,000～93,000m³/year の範囲内で推移しているものの、計算開始 8 年後である 2012 年頃よりケース間で崩壊土砂量の差が見られ始め、その差は経過年数とともに大きくなる。崩壊土砂量は、全面無植栽タイプ（Ⅱ）で最大値を示し、次いで半面植栽タイプ（Ⅲ）、全面植栽タイプ（Ⅰ）の順となっている。2019 年以降、これらの崩壊土砂量の差は、より顕著に認められるようになり、全面無植栽タイプ（Ⅱ）では崩壊土砂量は 88,000～1,487,000m³/year にも達しているのに対し、半面植栽タイプ（Ⅲ）では 55,000～888,000m³/year と全面無植栽タイプ（Ⅱ）の 1/2 程度、全面植栽タイプ（Ⅰ）では 40,000～668,000m³/year と全面無植栽タイプ（Ⅱ）の 2/5 程度となっている。特に、計算開始 30 年後である 2034 年以降、全面無植栽タイプ（Ⅱ）の崩壊土砂量は降雨に対して鋭敏に反応して増加するようになり、流域内で多量の土砂が生産されることとなる。さらに、その 14 年後である 2048 年には、全面無植栽タイプ（Ⅱ）の崩壊土砂量は 1,487,605m³/year と、全面植栽タイプ（Ⅰ）の値：668,353m³/year の 2.2 倍以上、半面植栽タイプ（Ⅲ）の値：88,402m³/year の 1.6 倍以上の値を示すようになり、伐採跡地が無植栽状態のまま放置されたことにより崩壊が多発し、流域内で土砂生産が極端に活発化するようになる。

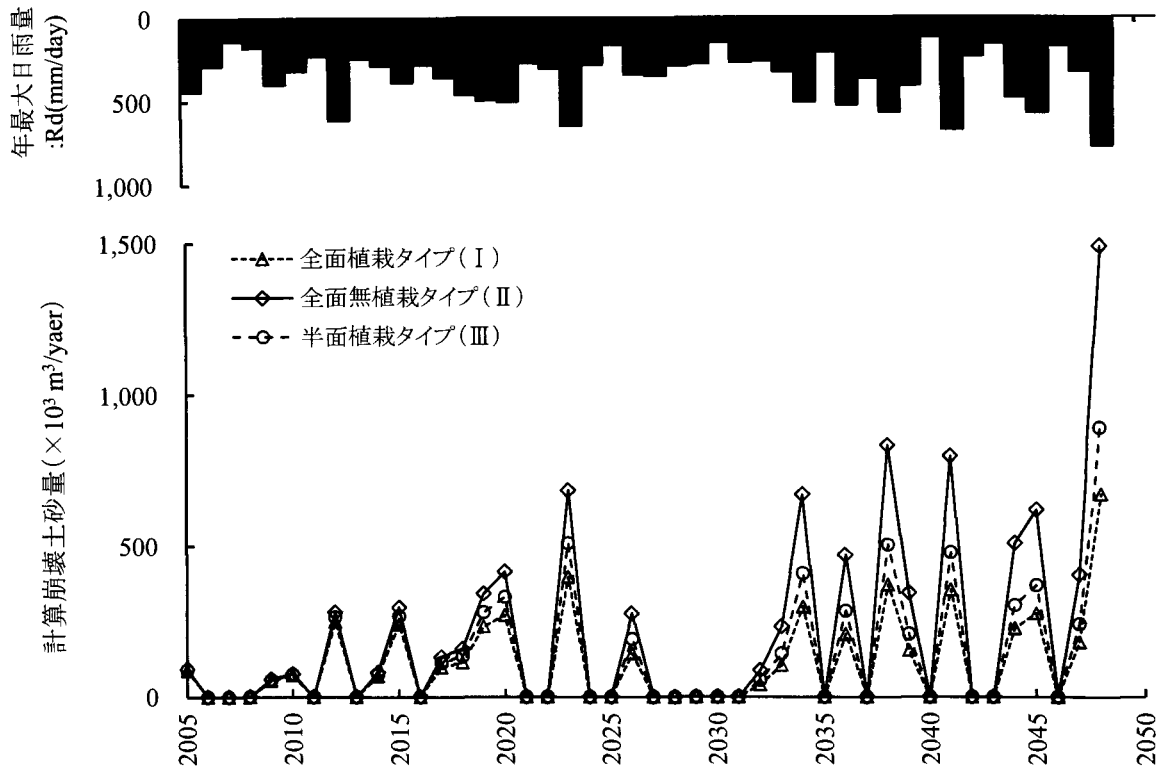


図 7.3 宮川ダム上流域の崩壊土砂量の長期予測結果

表 7.3 森林施業状態を変化させた場合の崩壊土砂量の長期予測結果

年度	年最大日雨量 Rd(mm/day) ※	最大時間雨量 Rh(mm/hr)	崩壊土砂量の予測結果			年度	年最大日雨量 Rd(mm/day) ※	最大時間雨量 Rh(mm/hr)	崩壊土砂量の予測結果		
			崩壊土砂量(m ³ /year)						崩壊土砂量(m ³ /year)		
			I 全面植栽 タイプ	II 全面無植栽 タイプ	III 半面植栽 タイプ				I 全面植栽 タイプ	II 全面無植栽 タイプ	III 半面植栽 タイプ
2005	469	79	88,271	92,812	90,541	2027	288	96	-	-	-
2006	319	41	-	-	-	2028	263	33	-	-	-
2007	191	24	-	-	-	2029	268	56	-	-	-
2008	221	22	-	-	-	2030	132	20	-	-	-
2009	377	40	53,821	58,199	56,010	2031	288	43	-	-	-
2010	369	47	71,944	77,224	74,584	2032	332	25	40,220	88,199	55,033
2011	254	30	-	-	-	2033	342	57	104,427	232,105	143,097
2012	635	58	249,058	280,405	264,359	2034	431	86	297,432	669,842	408,054
2013	241	45	-	-	-	2035	217	22	-	-	-
2014	343	35	68,457	80,873	74,385	2036	481	43	207,852	469,797	284,354
2015	402	76	240,095	296,926	266,695	2037	320	43	-	-	-
2016	303	51	-	-	-	2038	460	95	369,769	831,529	502,292
2017	359	37	97,785	131,824	113,056	2039	413	37	153,123	343,427	207,252
2018	348	55	113,049	158,133	132,808	2040	107	28	-	-	-
2019	503	51	231,655	342,242	279,009	2041	524	72	354,558	796,663	478,128
2020	410	89	269,552	414,331	330,066	2042	249	66	-	-	-
2021	258	30	-	-	-	2043	236	21	-	-	-
2022	228	48	-	-	-	2044	421	57	226,027	509,189	303,048
2023	567	82	396,740	684,906	509,583	2045	565	46	275,843	619,724	369,045
2024	251	28	-	-	-	2046	278	27	-	-	-
2025	168	14	-	-	-	2047	396	48	180,744	403,550	240,774
2026	362	55	142,799	275,697	191,011	2048	687	114	668,353	1,487,605	888,402

※年最大日雨量が崩壊限界雨量(325mm/day)以下の場合は、崩壊は発生しないことになる。

また、半面植栽タイプ（Ⅲ）では、崩壊土砂量は全面植栽タイプ（Ⅰ）の値の 1.4 倍程度を示しているものの、植栽されなかった全面無植栽タイプ（Ⅱ）で見られたような年数の経過に伴う崩壊土砂量の急増傾向は認められなかった。

以上の結果、森林伐採後の植栽の有無や伐採跡地に対する植栽比率の相違によって、流域内で生じる崩壊やその土砂量の変動傾向が大きく異なることになり、崩壊を抑制することにより流域内での土砂生産を沈静化させるためには、森林伐採後の植栽の実施が重要となることが確認された。

7.4 まとめ

本章では、第 6 章で新たに提示した「崩壊予測改良モデル」を用いて、森林伐採や植栽状況の異なる種々の場合を想定して崩壊土砂量の長期予測を行い、伐採や植栽といった森林施業状態の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響について考察した。

流域からの崩壊土砂量予測を行うにあたり、現地調査と空中写真判読により、森林の状態と崩壊深との関係を定量的に把握したところ、植栽後の経過年数の増加すなわち森林の成長とともに崩壊深は増加し、この崩壊深の増加傾向は、ヒノキ林よりもスギ林においてより顕著となる事実が明らかとなった。

つぎに、この結果と崩壊予測改良モデルを用いて、全面植栽タイプ（Ⅰ）、全面無植栽タイプ（Ⅱ）、半面植栽タイプ（Ⅲ）の 3 ケースを想定して崩壊土砂量の予測を行い、植栽の有無や伐採跡地に対する植栽比率が崩壊土砂量の長期的変動に及ぼす影響について考察を加えた。全面無植栽タイプ（Ⅱ）では、最も崩壊土砂量が大きく、伐採後の経過年数とともに崩壊土砂量が増加するといった顕著な傾向が確認されたのに対し、伐採後に直ちに植栽を行う全面植栽タイプ（Ⅰ）や半面植栽タイプ（Ⅲ）では、経過年数に伴う崩壊土砂量の極端な増加傾向は認められず、伐採面積に対して少なくとも 50% 程度植栽することにより崩壊の発生が抑制され、流域内の土砂生産環境に大きな変化が生じないことが明らかになった。

以上、本章で示した植栽後の経過年数と崩壊深との関係を示す(7.1)～(7.2)式と「崩壊予測改良モデル：(6.7)式」を使用することにより、伐採や植栽といった森林施業状態の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響について考察することが可能となり、本手法は、森林施業状態に対応した崩壊土砂量予測だけではなく、土砂管理という観点から流域管理を行う上での有効な支援ツールとして活用可能となることが確認された。

今後は、本研究で構築したこれらのモデルを用いて、森林の施業状態を種々変化させた場合の崩壊土砂量予測を実施し、これらの結果を比較するとともに、有効に活用することにより、森林施業状態と流域の土砂生産との関係について検討を重ね、土砂管理の観点から、望ましい森林施業のあり方を模索することが必要となる。

引用文献

- 平松晋也・水野秀明・池田暁彦・加藤誠章 (2006) : 2006 年 7 月豪雨による土砂災害—長野県岡谷市で発生した土石流災害—, 砂防学会誌, Vol.59, No.3, p.51-56
- 苅住昇 (1987) : 新装版樹木根系図説, 誠文堂, p.592-596, 611-614
- 小藤隆一・鈴木昌一 (2006) : 平成 16 年 7 月福井豪雨における山腹崩壊とその対策の方向について, 砂防学会誌, Vol.59, No.1, p.49-55
- 小山敢・藤田亮・前田雄一・多田泰之・落合博貴・三森利昭・大丸裕武・村上亘・河合隆行・岩村尚樹 (2009) : 2007 年 9 月 4 日の集中豪雨により鳥取県琴浦町で生じた斜面崩壊の特徴, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 1, p. 52-59
- 黒岩知恵・平松晋也 (2010) : 三重県宮川ダム上流域における 2004 年台風 21 号による土砂生産に関する一考察, 砂防学会誌 Vol.63, No.4, p.16-21
- 黒岩知恵・平松晋也・福山泰治郎 (2012) : 森林の成長と崩壊深との関係—三重県宮川ダム上流域を事例として—, 砂防学会誌 Vol.65, No.2, p.12-15
- 三重県農林水産部 (1996) : 宮川ダム上流の森林の状況, p.1-4
- 太田猛彦 (2006) : 土砂災害と森林 第Ⅵ章 土砂災害と今後の森林管理のあり方, 森林科学, No.47, p.33-38
- 多田泰之・三森利昭・大丸裕武・小山敢・河合隆行 (2010) : 過去 100 年間の森林と土砂災害の変化, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, p.32-33

第8章 総括

近年、木材価格の低迷や経営コストの増加等により、林業従事者の減少や高齢化が進み、伐採後に植栽されることなく放置される無植栽地が急増し、無植栽地では表層崩壊が多発し、土砂生産が活発化している事実が数多く報告されるようになった。本研究は、このような森林をとりまく環境変化に着目し、森林の伐採や植栽が表層崩壊に及ぼす影響を定量的に把握するとともに、これらの結果を用いて伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルを構築し、将来の望ましい流域管理のあり方を模索する上での一助とすることを目的として実施したものである。

第1章では、林業や森林をとりまく現状や森林と表層崩壊との因果関係等を勘案し、伐採や植栽といった森林の施業状態を指標とした崩壊予測モデルの構築を目指す本研究の必要性を指摘した。

第2章では、豪雨を誘因とする表層崩壊予測手法に関する研究の経緯と現状を述べた。また、現時点での崩壊予測における問題点として、崩壊に対する森林の効果は、森林の成長や施業状態の変化等によって時系列的に推移していくものであり、その定量化や指標化が困難であるため、森林の効果を加味した崩壊予測手法はほとんど存在しないことを指摘した。そして、森林の影響を指標とした崩壊予測を試みるにあたって、森林と表層崩壊との関係について概観し、森林の影響を加味して崩壊予測を行ううえでの課題を抽出するとともに、本研究の位置づけを明らかにした。

第3章では、研究対象流域として抽出した「宮川ダム上流域（三重県中央部；125.6km²）」の自然環境について概観するとともに、流域内の土砂生産状況や森林伐採・植栽状況の推移をとりまとめた。流域の土砂生産状況としては、1989年以前までは宮川ダムの堆砂速度は概ね一定であったのに対し、1990年以降は4倍程度にまで上昇し、近年土砂生産が活発化している事実が明らかになった。宮川ダム上流域内の森林伐採や植栽状況を把握したところ、1976年までは、多量の森林が伐採されながらも、その大部分に植栽が行われていたことが確認された。しかしながら、1976年以降は、伐採面積が急減するようになり、1980年代以降になると、伐採面積が年々減少するばかりか、伐採後に植栽が行われなくなり、1980年代を境に無植栽面積が急増している事実が確認された。

第4章では、流域の土砂生産状況を反映しているものと考えられる「ダム堆砂量」に着目し、流域の土砂生産能力を評価するための指標として、森林の伐採や植栽状況を使用することの可能性について検討を加えた。森林伐採や植栽状況とダム堆砂量との因果関係を検討したところ、堆砂量は伐採後の植栽の有無に大きな影響を受けることが明らかとなり、植栽面積と堆砂量との間には負の相関性が、無植栽面積と堆砂量

との間には正の相関性が確認された。この結果を踏まえ、森林伐採や植栽状況の変化に伴う流域の土砂生産能力評価指標として $\Sigma AP(t)$ を提示した。宮川ダム上流域を対象として $\Sigma AP(t)$ を算出した結果、 $\Sigma AP(t)$ は、1980年代半ば以降の無植栽地の増加に伴うダム堆砂量の増加傾向を的確に再現しており、「土砂生産能力評価指標： $\Sigma AP(t)$ 」は、伐採や植栽を指標とした流域の土砂生産能力の説明変数として利用可能であることが明らかとなった。

第5章では、流域の主たる土砂生産形態である「表層崩壊」に着目し、第4章で得られた知見をもとに、森林伐採や植栽状況の変化を指標とした流域の崩壊危険度評価と崩壊予測を試みた。過去40年間程度の空中写真を用いた森林伐採後の植栽の有無と表層崩壊との関係解析により、伐採後の植栽の有無によって流域内の崩壊発生状況が異なり、植栽面積と崩壊面積の間には負の、無植栽面積と崩壊面積の間には正の相関関係が成立する事実が確認された。また、植栽の有無にかかわらず伐採直後より崩壊斜面が出現し、伐採後6年経過すると斜面の不安定化が最も顕著に認められ、崩壊が多発し、植栽後20年以上経過すると崩壊の発生が沈静化するが、無植栽地では伐採後24年経過した時点でも崩壊の発生が顕著に認められるといった事実が明らかとなった。以上の結果を踏まえ、「森林伐採や植栽状況を指標とした崩壊危険度評価指標： $A_{Phr}(t)$ 」を提示し、同指標と崩壊面積率との関係を概観すると、両者の間には顕著な対応関係が認められ、「崩壊危険度評価指標： $A_{Phr}(t)$ 」は表層崩壊の説明変数として利用可能であることが確認された。さらに、森林伐採や植栽状況の変化を反映することになる $A_{Phr}(t)$ と年最大日雨量とを表層崩壊の説明変数とした「崩壊予測モデル」を提示し、崩壊面積率の再現計算を実施した結果、良好な再現性が認められ、崩壊面積率の再現・予測を行ううえでの同モデルの有用性が確認された。

第6章では、合理的で実用性の高い崩壊予測モデルを確立することを目的とし、宮川ダム上流域を構成する8単元流域を対象として、過去40年間に発生した崩壊現象の再現性に着目し、第5章で提示した「崩壊予測モデル」の改良を試みた。2004年台風21号により発生した崩壊の発生要因解析を実施した結果、時間雨量、斜面勾配および森林伐採や植栽状況の相違を反映する崩壊危険度評価指標： $A_{Phr}(t)$ と崩壊面積率との間には、正の相関関係が確認され、これらの3指標を説明変数とすることにより、「崩壊予測モデル」の再現精度が向上することが確認された。この事実を勘案し、第5章で提示した「崩壊予測モデル」で抽出した「年最大日雨量」と森林伐採や植栽の影響を示す「崩壊危険度評価指標： $A_{Phr}(t)$ 」に加え、新たに「斜面勾配」と「時間雨量」を説明変数として抽出した「崩壊予測改良モデル」を構築した。同モデルを宮川ダム上流域に対して適用した結果、崩壊面積率に対して高い再現精度が確認され、今後降雨データ等を蓄積することによりその精度を向上させていく必要があるもの、本章で

新たに提示した「崩壊予測改良モデル」は、崩壊面積率予測を行ううえで十分な精度を有していることが確認された。

第7章では、第6章で新たに提示した「崩壊予測改良モデル」を用いて、森林伐採や植栽状況の異なる種々の場合を想定して崩壊土砂量の長期予測を行い、伐採や植栽といった森林施業状態の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響について考察した。まず、崩壊土砂量を算出する際に必要となる崩壊深と森林との関係を定量的に把握したところ、植栽後の経過年数の増加とともに崩壊深は増加し、この崩壊深の増加傾向は、ヒノキ林よりもスギ林においてより顕著となる事実が明らかとなった。つぎに、この結果と崩壊予測改良モデルを用いて、全面植栽タイプ(I)、全面無植栽タイプ(II)、半面植栽タイプ(III)の3ケースを想定して崩壊土砂量の予測を行い、植栽の有無や伐採跡地に対する植栽比率が崩壊土砂量の長期的変動に及ぼす影響について考察を加えた。全面無植栽タイプ(II)では、最も崩壊土砂量が大きく、伐採後の経過年数とともに崩壊土砂量が増加するといった顕著な傾向が確認されたのに対し、伐採後に直ちに植栽を行う全面植栽タイプ(I)や半面植栽タイプ(III)では、経過年数に伴う崩壊土砂量の極端な増加傾向は認められず、伐採面積に対して少なくとも50%程度植栽することにより崩壊の発生が抑制され、流域内の土砂生産環境に大きな変化が生じないことが明らかになった。

本研究で提示した「崩壊予測改良モデル」に、降雨量、斜面勾配、森林の伐採・植栽状況といった流域の基礎的なデータを与えることにより、流域内で生じる崩壊面積の再現や予測精度が飛躍的に向上する事実が確認された。さらに、本モデルと植栽後の経過年数と崩壊深との関係式を用いることにより、伐採や植栽といった森林施業状態の変化が流域の土砂生産状況に及ぼす影響について考察することが可能となり、本手法は、森林の施業状態に対応した崩壊土砂量予測だけでなく、土砂管理という観点から流域管理を行う上での有効な支援ツールとして活用可能となることが確認された。今後は、本研究で構築したこれらのモデルを用いて、森林の施業状態を種々変化させた場合の崩壊土砂量予測を実施し、これらの結果を比較するとともに、有効に活用することにより、森林の施業状態と崩壊による土砂生産との関係について検討を重ね、土砂管理の観点から、望ましい森林施業のあり方を模索することが必要となる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、長い期間にわたって、多くの方々より、暖かいご指導とご支援、励ましをいただきました。

信州大学農学部 教授 平松晋也先生には、大学 4 年の頃から、修士課程、社会人入学した博士課程と、10 年以上もの間、終始適切で暖かいご指導をいただきました。また、建設コンサルタントで働く筆者に、信州大での研究の機会を与えてくださったのも先生でした。平松先生には、研究に対する姿勢、文章の書き方から専門的な知識や技術まで、本当に多くのことを丁寧に教えていただきました。また、右も左もわからず、ただ砂防に興味があった学部生の時に、現在でも研究の必要性や社会ニーズの高い森林と崩壊予測というテーマを与えていただいたことに感謝します。振り返ると、このテーマのもと、研究や調査を通して汗を流し、学んだ知識や技術の多くが、現在の仕事へつながり、進むべき方向を示してくれています。博士課程になってからは、自らの学位論文であるにも関わらず、研究の方向性を度々見失って行き詰まり、研究者として成長できないまま指導を仰ぐばかりとなり、また提出期日を守れないことが多く、ご多忙な先生に大変ご迷惑をおかけしました。お忙しいなかで、休日・深夜・早朝に、大学・ご自宅やご出張先の電車内などで、時間や場所を問わず、論文の添削等をしていただいたことに、心から感謝申し上げます。

信州大学農学部 教授 星川和俊先生には、幅広い観点から有益なご助言をいただくとともに、ご多忙のなか原稿をご校閲いただき、学位論文としての文章の書き方・まとめ方等の細部までご指導いただきました。同教授 北原曜先生には、森林と斜面安定、流域内での土砂生産・流出の考え方など、専門的な観点から大変多くの有益なご助言をいただきました。同教授 佐々木邦博先生には、お忙しい中、原稿をご校閲いただくとともに、適時のご助言をいただきました。静岡大学農学部 教授 土屋智先生には、お忙しい中、論文全般にわたる有益なご助言をいただきました。お忙しい先生方に、学位論文についてご教示いただき、また学位論文の発表会や審査等で何度もお時間を割いていただき、ご指導していただいたことに、深く感謝いたします。

信州大学農学部 助教 福山泰治郎先生には、論文執筆や現地調査等で多大なご指導とご支援をいただきました。現地調査では、三重県大台町まで調査にご同行いただき、崩壊地の調査方法等をご指導いただきました。また、筆者の苦手な英文論文の執筆において丁寧なご指導をいただきました。深夜・明け方まで、つたない英文を添削していただいたことに、深く感謝いたします。

解析を実施するにあたっては、三重県松阪建設事務所宮川ダム管理室の水谷様をはじめ、職員の皆様に、堆砂量や降雨量データ等、貴重な資料をご提供いただきました。また、静岡大学農学部 准教授 今泉文寿先生より、空中写真を長期間にわたってお貸しいいただきました。貴重な資料を快くご提供くださったことに、感謝申し上げます。

信州大学農学部 流域保全学研究室の学生の皆様、卒業生の皆様には、学位論文発表会の

準備などで大変お世話になりました。在籍中、学科棟の工事に伴う研究室の引っ越しが何度ありましたが、嫌な顔ひとつせず、崩壊地判読結果などの重い紙資料を運んでくれたり、研究室の掃除・ゴミ捨てなど細かなお気遣いをいただきました。みなさんのお気遣い・ご配慮のおかげで、研究室で論文執筆や作業に集中することができました。本当にありがとうございました。本来は、最年長の筆者が、みなさんを励ましたり、研究を支援すべき立場でしたが、研究室へ顔を出す機会が少なく、お返しができず大変申し訳ありません。

信州大学学務主査の竹松様、前任の奥原様には、社会人である筆者に多くのご配慮をいただくとともに、学位論文の申請手続き等で大変お世話になりました。いつも親切にご対応いただきましたことに、感謝申し上げます。

アジア航測株式会社中部コンサルタント部 梅村裕也部長、総合防災課 坂口宏課長には、通常業務等において特段の便宜を図っていただくとともに、多大なご支援と励ましをいただきました。また、同課 湯川典子係長、大橋一智技師、山口かずえさんには、通常業務等において、多くのご配慮とご協力をいただきました。湯川さんには、仕事や研究生活について相談にのっていただき、多くのアドバイスをいただきました。山口さんには、多くの励ましと夜遅く作業する筆者に暖かい差し入れをいただきました。2年前には、当時の中部コンサルタント部 前田禎 部長（現 東北支社長）、同部の皆様のご便宜とご理解により、半年もの長期間の休職を受け入れていただき、本研究の核となる崩壊予測改良モデルに関する研究・論文執筆に集中する時間をいただきました。また、小川紀一朗 社長には、多くのお気遣いをいただきました。皆様に深く感謝します。

また、本研究の基礎となる崩壊地判読、伐採や植栽を指標とした崩壊危険度評価は、高知大学砂防学研究室に所属した学生時代に取り組んだものです。平松先生のもと共に学び、現地調査・解析・論文作成に明け暮れた仲間や先輩の存在、手助け無しには、膨大な判読作業や地道なトライアル計算に耐えきれなかったと思います。当時の研究室メンバー皆様に感謝します。

研究と仕事の両立は大変難しく、うまく両立することができず、学位論文完成までには、平松先生をはじめ大学関係の皆様や会社の皆様に、多大なご迷惑とご心配をおかけしました。皆様から多大な温情あるご便宜をいただいたにもかかわらず、最後までご迷惑をおかけし、大変申し訳ございませんでした。今後は、研究生活で得た経験を活かし、反省や感謝の気持ちを忘れずに、少しでも人や社会の役に立てるよう努めていく所存です。

最後に、筆者を暖かく見守り、いつも励ましてくれた家族や友人に心から感謝します。苦しい時に励ましのメールをくれた亡き父に感謝します。家族や友人の大きな支えがあったおかげで、時間的に大変難しく精神的に追い込まれる日々が続くなかで、何とか研究に取り組み、継続することができたと思います。

以上に挙げました皆様をはじめ、多くの方々のご指導やご支援、ご協力、そして暖かい励まし無しには、学位論文を完成させることができませんでした。ここに記して、皆様に、心から深く感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

要 旨

【目的】近年、我が国の林業は衰退し、伐採後に放棄された区域での土砂生産の活発化が多数報告されるようになり、森林管理の重要性が広く認識されるようになってきた。一方、水系一貫の総合的な土砂管理を合理的に進めるためには、土砂生産域となる山地の大半を占める森林の状態を考慮して、土砂生産予測を効率的に行うことが求められる。流域の主たる土砂生産源となる表層崩壊の予測に関しては、これまでに数多くの研究が行われてきたものの、“森林伐採や植栽の状況”や“森林の成長”を考慮した研究はほとんど行われていない。本研究は、森林の伐採や植栽が流域の土砂生産状況に及ぼす影響を定量的に把握するとともに、伐採や植栽状況を加味した崩壊予測モデルを構築し、将来の望ましい流域管理のあり方を模索する上での一助とすることを目的として実施した。

【研究対象流域と研究方法】対象流域として、三重県中西部に位置する「宮川ダム上流域（流域面積：125.6km²）」を抽出した。流域内の土砂生産状況を示す指標としてダム堆砂量と崩壊面積に着目し、空中写真判読と現地調査等により、過去40年間にわたる土砂生産状況の推移を概観するとともに、森林の伐採や植栽状況と土砂生産状況との因果関係について検討を加えた。これらの結果をもとに、森林伐採や植栽状況の変化に伴う斜面安定性の推移をモデル化し、伐採や植栽を指標とした崩壊危険度評価指標を新たに提示した。さらに、同指標を用いて、伐採や植栽を指標とした崩壊予測モデルを新たに構築し、その再現性や現地流域への適用性について考察した。

【結果および考察】対象流域では、1980年代後半から急激に無植栽地が増加していることが明らかとなった。宮川ダムの年間堆砂量を指標として流域の土砂生産状況を見ると、1989年以前までは堆砂速度は概ね一定であったのに対し、1990年以降は4倍程度にまで上昇し、近年土砂生産が活発化している事実が確認された。この堆砂量の急増傾向には、無植栽地の増加に伴う森林効果の衰退が大きく関与していることが明らかになった。流域の主たる土砂生産形態である表層崩壊に着目し、崩壊と森林伐採や植栽との関係を解析した結果より、崩壊の発生には「森林伐採後の植栽の有無」と「伐採や植栽後の経過年数」が大きく関与しており、1) 近年の無植栽面積の増加とともに、崩壊面積も増加すること、2) 無植栽地では、植栽地に比べて崩壊発生頻度が高く、特に伐採後10年程度経過した無植栽地や大面積の無植栽地に崩壊が集中していること、3) 植栽地では経過年数とともに斜面が安定化し、崩壊が減少することが明らかになった。

以上の結果に基づき、森林伐採による斜面の不安定化と植栽による斜面の安定化をそれぞれ評価したうえで、流域の崩壊危険度を適正に評価することを目的として「崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)」を新たに提示した。このA_{Phr}(t)は、森林伐採や植栽状況の変化に伴う流域の崩壊危険度を表わしている。対象流域に対して崩壊危険度評価指標：A_{Phr}(t)を求めたところ、A_{Phr}(t)を用いることにより、近年の無植栽地の急増に伴う崩壊の多発

傾向を的確に評価することが可能となった。さらに、APhr(t)に加え、表層崩壊の誘因となる降雨量を加味し、年最大日雨量と APhr(t)を指標とした「崩壊予測モデル」を構築した。同モデルによる崩壊面積の再現精度は良好であり、流域の崩壊面積予測において有効であることが確認されたものの、崩壊予測精度をより向上させるためには、崩壊の主要要因である地形条件や短時間降雨を加味することの必要性も同時に指摘された。そこで、表層崩壊の説明変数として、年最大日雨量と伐採・植栽状況の影響を反映する崩壊危険度評価指標：APhr(t)に加え、斜面勾配や時間雨量を加味した「崩壊予測改良モデル」を新たに構築した。同モデルでは、前述の降雨量と APhr(t)のみを指標とした崩壊予測モデルと比較して、崩壊面積の再現性は顕著に向上し、長期間にわたる崩壊現象の増減傾向を精度よく再現可能となる事実が確認された。つぎに、伐採跡地全面に対して植栽が行われる場合、伐採跡地の半面に対して植栽が行われる場合、伐採跡地全面が無植栽状態のまま放置される場合の3ケースを想定し、「崩壊予測改良モデル」を用いた崩壊土砂量の将来予測を行った。崩壊土砂量の推移を見ると、全面植栽や半面植栽の場合と比較して、全面無植栽の場合には、年々崩壊が多発するようになり、森林伐採や植栽の相違が流域の土砂生産環境に及ぼす影響の大きさや土砂管理を模索するうえでの森林管理の重要性が強く指摘された。

以上より、本研究で新たに構築した「崩壊予測改良モデル」に、「森林伐採や植栽状況」、「降雨量」、「斜面勾配」といった流域の基礎的なデータを入力条件として与えることにより、流域内で生じる崩壊面積率の再現や予測精度が飛躍的に向上する事実が確認された。今後は、空間情報計測技術を活用し、時々刻々と変化する森林の成長や施業状態を面的に把握し、これらの結果をモデルへと入力することにより、さらなる崩壊予測精度の向上が期待される。さらに、本モデルを用いることにより、流域の土砂管理や森林管理などの多方面において、森林の成長や衰退に伴う“森林の効果”や“流域の土砂生産ポテンシャル”の推移をリアルタイムで評価することが可能となる。

以上