

荒廃地における土壌と植物の初期発達特性に関する研究

楊 喜 田*

信州大学農学部治山学研究室

目 次

第一章 緒 言	47	4.2 荒廃跡地における木本群落の初期発達特性	61
1.1 はじめに	47	4.3 山腹工事施工跡地における土壌の発達過程	67
1.2 本研究の目的	48	4.4 山腹工事施工跡地における導入植物の発達過程	72
第二章 対象地の概要と調査地の設置	48	4.5 総 括	75
2.1 地震荒廃跡地	48	第五章 結 語	76
2.2 山腹工事施工跡地	51	謝 辞	77
第三章 調査および解析方法	55	本論文に使用した植物の学名	77
3.1 地震荒廃地	55	引用文献	78
3.2 山腹工事施工跡地	56	要 旨	80
第四章 結果および考察	57	Summary	81
4.1 荒廃跡地における植生の初期自然遷移特性	57		

第一章 緒 言

1.1 はじめに

森林荒廃は、集中豪雨、雪崩、土壌の凍結・融解、強風、地震などの自然災害によって起こる。地震荒廃地は、豪雨、台風、火事などの災害によって起こる荒廃地と較べて、大規模で、土壌攪乱深度が大きいなどの特徴があげられる。このため、地震により生じた荒廃地は、植物群落の復旧、回復が容易でなく、特に防災機能や生産力の高い群落を形成させることは容易ではない。降雨により発生した森林荒廃は、降雨の頻度や強度、地形・地質特性、森林の種類や被覆度、林床の状況などに関連している。地形、地質的に不利な条件を有し、さらに峻烈な気象（豪雨）の状況下にあるので、広い範囲、特に深く風化した花崗岩地域にある森林は豪雨による被害を毎年生じる⁵⁶⁾。花崗岩の風化が著しい山地は、豪雨はもちろん特に風化土が深いと通常の降雨でも、表層崩壊が多発する。

これらの災害によって、植生、特に高木等の森林植生がなくなり、森林立地が荒廃される。このよう

な荒廃地をそのまま放置して、自然の持つ回復力のみを期待しても、回復速度が遅く、自然環境が厳しい場合は、再荒廃の発生と拡大の恐れがある。さらに、住民の近くにある里山は環境林として重要視されてきており、休暇観光地として利用されている。その意味でも、荒廃地における植生の早期復元が要求されている。

荒廃跡地も一つの生態系として受け止め、土壌の発達、植生の侵入、安定、遷移過程等はその生態系の自然的条件の中で、治山事業の内容を考えなければならない。緑化工技術は、(1)荒廃地に植生を導入するにはどうすればよいか、(2)どんな種類の植物を導入すればよいか、の2点について研究、発展してきた。日本における緑化工技術をみると、これまで数多くの緑化工法が開発されてきた。しかし、植生導入について、現実にはあまりにも不成績地や生育不良の例が多すぎる。従って、荒廃地における植生復元について導入方法の検討が重要な課題になっている。そのため、荒廃地に侵入・導入した植物の観察、とくに、その成立過程の観察は、ここでの植生復元を考えるにあたっての基本的な作業となる。

*河南農業大学

地震荒廃地について、その崩壊発生の規模、メカニズムなどに関する研究は多く、多分野にまたがってなされている^{47,48,57)}。これらの研究に比べ、地震跡地における植物の導入方法に関する研究は見られない。特に、植物導入方法を確立する際に基本的課題である植物の遷移および植物群落の成立過程に関する研究はなされていない。多くの研究より、山腹工事の影響で土壌及び植物の発達過程が加速されたことが証明されている^{例えば：29,38,42)}。しかし、これらの研究は、山腹工事の長時間（数十年以上）の影響を検討したもので、また、土壌の発達特性に着目したものが多し。今まで、山腹工事が土壌の初期変化過程に及ぼす影響についての研究は少なく、森林群落の発達特性を明らかにする研究はなされていない。

1.2 本研究の目的

地震荒廃地においては、攪乱規模が大きく、立地条件が厳しい。このような荒廃地で防災的に強い群落、自然環境と調和する群落を造成するには、森林群落の成立過程およびその成立要因を一層明確に把握することが重要である。本研究は、荒廃地に出現する植物の種類、密度、侵入速度を調べ、その土地における遷移過程とその特徴を明らかにし、これにより地表面条件と植物の侵入、遷移状況を前もって予測し把握しておくことを目的としている。

植生を積極的に導入することは、植生を発達させて侵食を防ぎ、できれば森林の成立を図り、長期的に土地を保全することを目指している。具体的に荒廃地の特性によって、植生の導入方法や施工の難易度は変化する。従って、施工地が「どのような状態を呈しているか」という施工跡地の土壌および導入植生の発達状態を時間軸にした評価が非常に重要である。この時間軸にした生態系の変化過程を解明することは、山腹工事の設計、施工及び施工跡地の管理に不可欠であると考えられる。このような観点から、本研究は、山腹工事施工跡地における土壌および導入植物の発達過程を調査し、時間の経過に伴う施工跡地の回復過程を明らかにすることが目的である。これによって、治山事業として植生導入を具体的に計画する場合、さらに施工跡地における安定した森林群落まで植物群落を維持管理するために、重要な基礎資料を得ることができる。

つまり、本研究は、(1)地震荒廃地における森林群落の成立メカニズムを明らかにし、植物の自然侵入過程および木本群落の成立過程を究明する。(2)導入植物の発達過程およびその導入植物が土壌発達過程に及ぼす影響を明らかにする。(3)荒廃地における植物の早期回復を図るための植物導入方法を検討することを目的とする。

第二章 対象地の概要と調査地の設置

2.1 地震荒廃跡地

2.1.1 対象地の概要

地震荒廃跡地の対象地域は、1984年9月14日長野県王滝村に発生した長野県西部地震の土石流災害によって生じた荒廃地である。この地域は、長野県の南西部にあり、太平洋気候の影響を受けている。近くの気象観測点(35°49'N, 137°24'E)によると、年間平均降水量は3,453mmで、そのうちの51%は6月から9月の間に降る。年平均気温は7.2°Cで、最低月平均気温は2月の-5.6°C、最高月平均気温は9月の20.2°Cである。

御岳山南側の山体には、放射状に河川の深い下刻が及んでいる。濁川の支流である伝上川や王滝川最上流部の本谷などでは、山体中腹で深さ200~300mをこえるけわしい峡谷が形成され、河床は基盤岩にまで達していることが多い。御岳山南側の基盤岩類は、火山噴火の影響で、溶岩類が広く分布している(図2.1)²⁶⁾。

この地域の植生は、1,600m以下にヒノキ・サワラ群落が大部分を占め、その中に植林されたスギ、ヒノキ、サワラ植林がモザイク状に分布している。王滝村の中心を流れる木曾川の支流の河床には、立地に適応し種々なヤナギ群落が見られる。また、亜高山帯上部の沢やなだれ斜面の不安定な立地には、亜高山性の針葉高木林の成立はみられず、ミヤマハンノキやダケカンバなどの夏緑低木林が生育している。その群落の分布は標高1,500~2,700mの広い範囲にみられる³⁵⁾。

2.1.2 1984年地震災害

1984年9月14日8時48分頃、長野県木曾郡王滝村御岳山南東方地域を震源としてマグチュード6.8の強い地震が発生した。この地震は、震源の深さが極めて浅い直下型の地震であり、斜面崩壊と土石流が発生し、広大な荒廃地が形成された。御岳山(標高3,036m)の南西斜面に、御岳崩れと呼ばれる大崩

落の源頭部（標高1,900~2,550m）は幅700m、深さ150m、長さ1,300m、面積約44ha、崩壊土砂量は3,600万m³と推定される（写真1）。土砂となって山肌を削り、小尾根を乗り越え、伝上川から濁沢、濁川を経て王滝川本流まで11km流下した。伝上川や濁沢では、溪岸が削られ、荒廃溪岸を出現させたほか、

表2.1 1984年長野西部地震による被害状況
Table 2.1 Disasters of Nagano-saibu earthquake in 1984

王滝村		国有林（億円）	
死者・行方不明者	29名	治山	102
家屋全壊	14戸	林道	28
家屋半壊	73戸	立木	21
家屋一部破損	517戸	その他	3
被害額	231億円	計	154

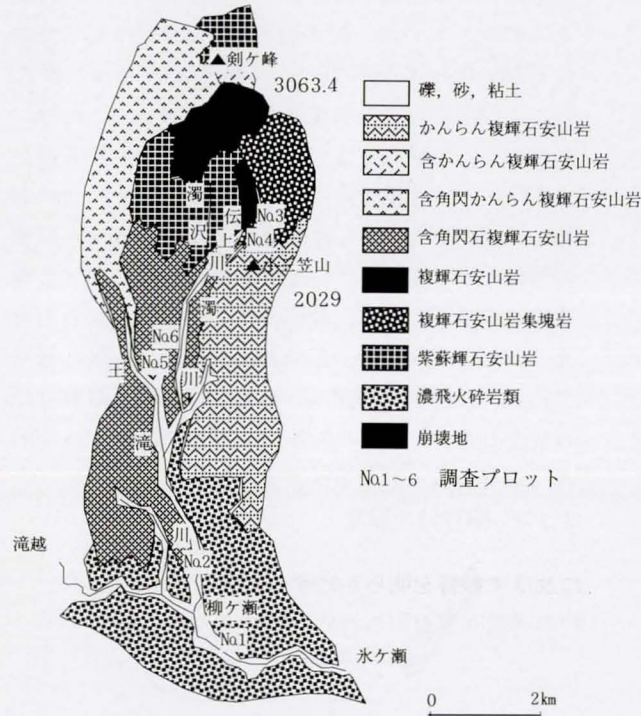


図2.1 御岳崩壊地の地質図

Fig.2.1 The distribution of geology in the disaster area in Mt. Ontake



図2.2 御岳崩壊の土砂堆積状況

Fig.2.2 Soil filling in the disaster area in Mt. Ontake



写真1 御岳くずれの状況

Photo.1 The view of Ontake landslide

各所に膨大な崩壊土砂を堆積させた⁴⁸⁾。この地震による土砂災害は非常に大きく、斜面崩壊と土石流が発生し、29名の生命を奪い、河川・道路・橋梁・山林・住宅などに多大の被害を及ぼした(表2.1)⁴⁹⁾。

図2.2に示したのは、1988年10月撮影の空中写真から北澤(1989)が図化したものである²³⁾。この崖下の斜面24.5haを3分割してみると、砂礫ゾーン(熔岩を主体とした岩塊状の礫を伴う)：砂礫を下方に移動させていて、激しく土砂生産をしている。生産土砂量は約22,500m³/年と推定される。パミスゾーンI(黄色のパミスが厚く覆う)：すべり面となった地層で厚さ1~4m、浅い多くの雨裂が形成されている。生産土砂量約1,260m³である。パミスゾーンII(パミスに熔岩及びビスコリヤ等と砂や礫を含む層)：現在著しい雨裂が生じていて、深さ2m前後、幅1~3mである。生産土砂量約7,500m³/年である。さらにその下手の斜面50.5haは、土砂ゾーンで2筋の尾根に相当し、生産土砂量約1,414m³/年である。したがって、この崩壊地からの生産土砂量は約32,674m³/年と推定される。C及びE地点では、崩壊直後植生はみられなかったが現在はササ類に覆われている。D地点では長さ数10mにも及

ぶクラックが生じて、そこから下の斜面がすべり出している。ガリーI及びIIは著しく深い浸食が起こっている。これらガリーと伝上川の落差はますます増大して、滝の形成に進むものと考えている。

地震災害の最も大きい玉滝村は、“木曾の五木”として全国に名高い林業村であり、また、登山、スキー、休養など観光村として、多くの人々が訪れるようになっていた。村の総面積312.7km²の92%にあたる288.1km²が山林原野で、林地荒廃は655haに及んだ。1箇所当たりの崩壊面積は0.58haで、これは、豪雨によって発生する一般の表層崩壊が1箇所当たり平均0.2~0.3haであることと比較すると、崩壊面積、崩壊深とも大きく、地震による地すべり性崩壊の特徴を示している¹⁶⁾。荒廃地に形成した森林の構造はこの地震による広範囲の攪乱に影響されると考えられる。災害直後の緊急対策事業、その後の通常の治山、砂防事業が進み、災害後の必要な対策はほぼ完了した。これらは短期的な対策であり、長期的には森林造成への対策が必要となる²⁴⁾。

2.1.3 調査地の設置

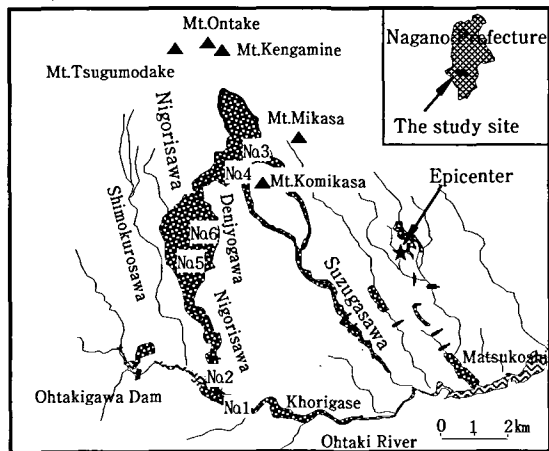


図2.3 調査地の位置およびプロットの配置

Fig.2.3 Location of the study site, and laid out the study plots

表2.2 調査プロットの概要

Table 2.2 General characteristics of the studied plots

Study plot	Elevation (m)	Angle (degrees)	Direction	Distance to forest land(m)
Na 1	1,030	0	—	600
Na 2	1,060	2	N	150
Na 3	2,030	2	E	300
Na 4	1,953	5	E	800
Na 5	1,560	10	E	500
Na 6	1,560	8	W	1,000

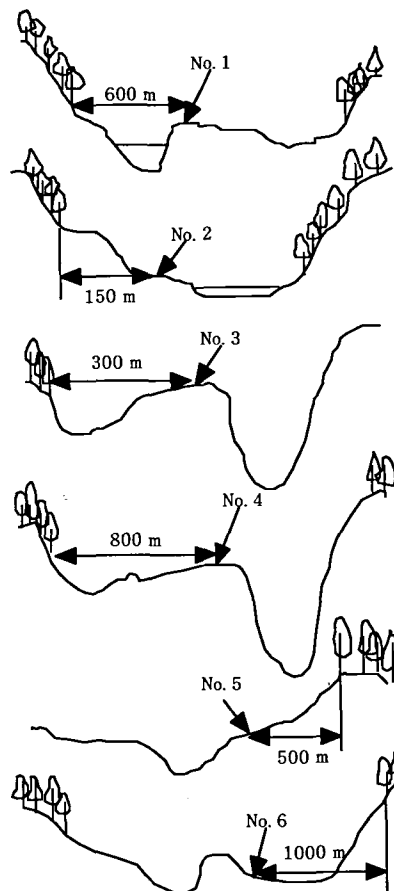


図2.4 調査プロットの斜面位置および周辺林地までの距離

Fig.2.4 The location of study sites and distance to forest land

1986年8月、次の6箇所に調査プロットを設置した。御岳崩壊による土石流が流下した王滝川に1箇所 (No.1), 濁川に1箇所 (No.2), 伝上川から濁川にかけて尾根を土石流が乗り越えた部分に2箇所 (No.3, No.4), 御岳崩壊による崩壊土砂で吹き飛ばされた森林跡地に2箇所 (No.5, No.6) の計6箇所である (図2.3, 表2.2)。各調査プロットの模式横断面を図2.4に示す。No.1は土石流の堆積物が厚さ40m, 礫の混入率30~40%である。No.2は土石流が一旦停止した場所である。No.3は大転石で占められている。No.4は表土が僅かに残存している。No.5はNo.3ほどの大転石ではないが, 礫の多い所である。No.6は凹地で湿地である。

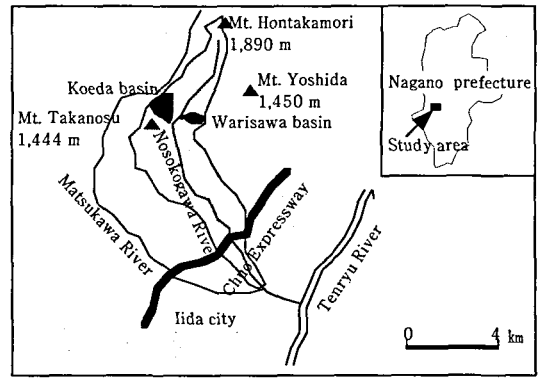


図2.5 調査地の位置およびプロットの配置
Fig.2.5 Location of the study site, and laid out the study plots

2.2 山腹工事施工跡地

2.2.1 対象地の概要

山腹工事施工跡地の対象流域は, 1961年6月27日の梅雨前線集中豪雨で大災害をもたらした, いわゆる伊那谷の36災害 (以後36災と呼ぶ) に関係の深い松川支流の野底川上流渓流を設定した (図2.5)。この渓流の出口には, 長野県が1983年築設した池の平砂防ダムがある。また, 支渓流には, 36災以後床固工及び山腹工が施工されてきた。1980年代より以前

の施工地の手直しを含め, 長野県によって治山事業が継続されてきた。1983年から水位や降雨観測を継続してきている。

天竜川上流域の領家花崗岩類は, 図2.6の分布図のように面積1,070km², 天竜川上流域の28.7%を占めている。これらの花崗岩類は22岩体に分類できる。これらの花崗岩類の地質学的な特徴については, 北澤 (1993) によって明らかにされている²⁵⁾。それによると, 領家変成作用に直接関与したグループとそうでないグループに分けられ, 前者 (古期岩類) と

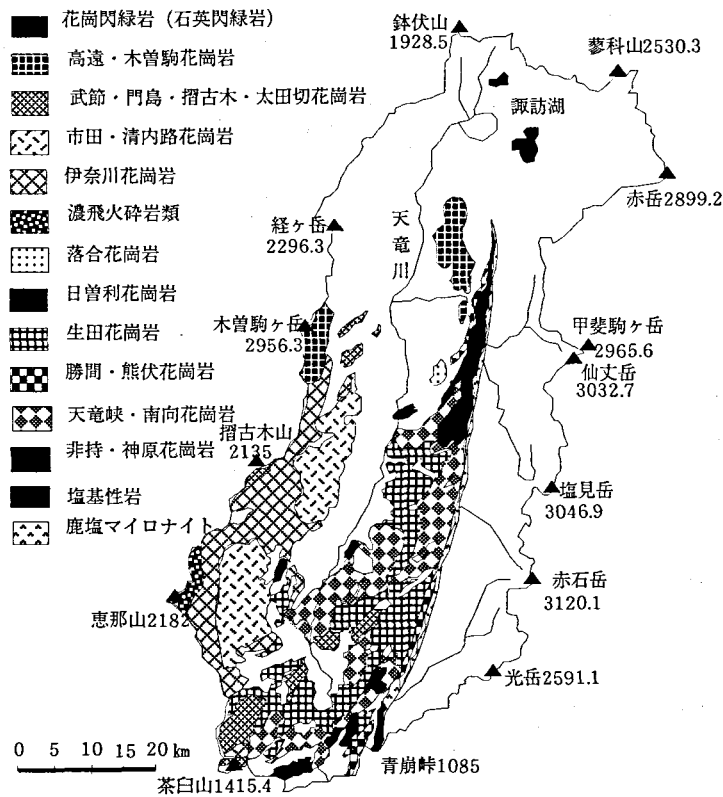


図2.6 天竜川上流域の花崗岩類の分布

Fig.2.6 The distribution of granite in the upper basin of Tenryugawa

後者 (新期岩類) の間に濃飛火砕岩類がある。崩壊は脆弱な部分が侵食されることによって発生する。そこで, 天竜川上流域に発生している崩壊について調べた結果, 地質別発生頻度, 崩壊面積率, 単位面積当たりの崩壊数及び規模 (一箇所当たりの崩壊面積) は図2.7の通りであった²⁸⁾。これをみると, 発生頻度では内帯すなわち領家変成帯の花崗岩類に多く, 崩壊面積率では後濃飛花崗岩類及び赤石及び白根層群が高率を示している。単位面積当たりの崩壊数では, 花崗岩類地帯を含む内帯に高く, 次いで赤石及び白根層群となっている。規模では, 秩父帯や赤石及び白根層群の外帯が平均0.2haで, 花崗岩類地帯の内帯では, 0.1ha程度である。

地形というと, 地表の起伏のことを指している。地表の起伏は, 基盤の地質的性質と気象現象に大きく影響される。崩壊が, どのような地形に現れるかをみるために, 天竜川上流域の崩壊

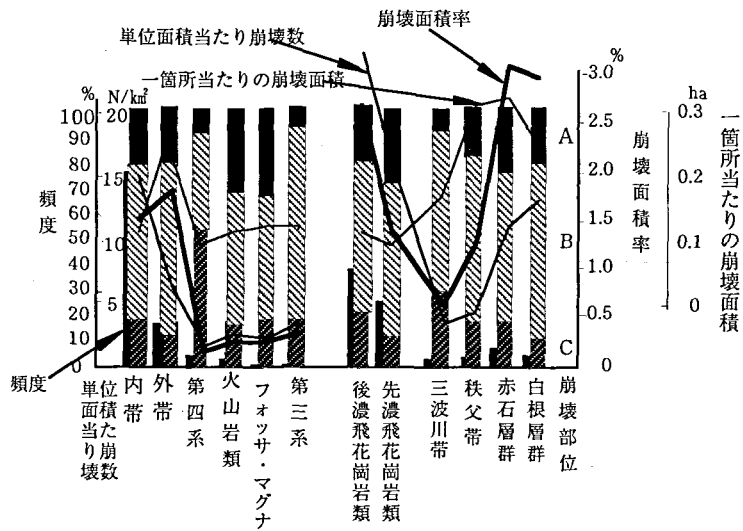


図2.7 地質区と崩壊頻度崩壊面積の関係

Fig.2.7 Relationship between occurrence frequency and area of landslide and granite type

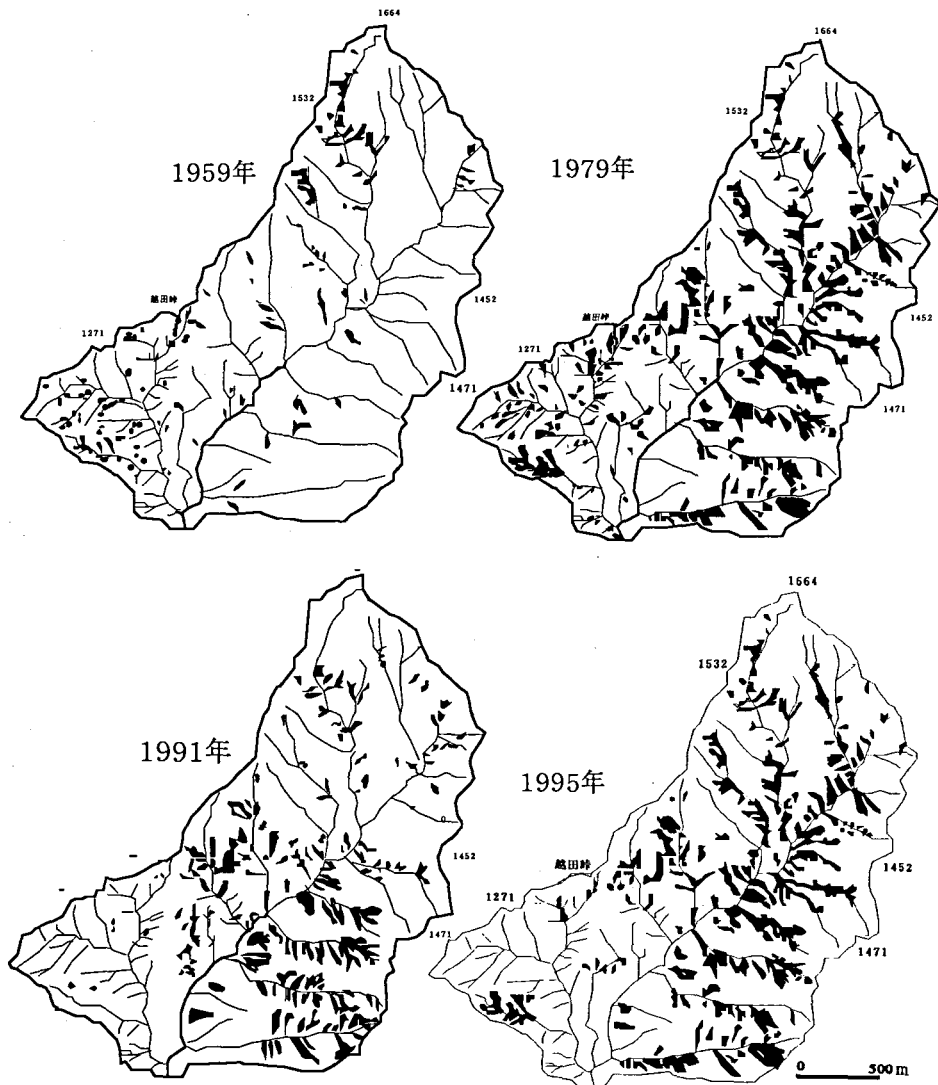


図2.8 野底川流域の荒廃地分布

Fig.2.8 The distribution of degraded lands in Nosokogawa Basin

表2.3 野底川流域の樹種別面積

Table 2.3 The area of forest types in Nosokogawa Basin

区分	スギ	ヒノキ	アカマツ	カラマツ	その他針	その他広	崩壊地等	計
面積 (ha)	67	338	269	549	47	158	81	1509
比率 (%)	4.4	22.4	17.8	36.4	3.1	5.4	5.4	100.0

地33,389箇所を調べたところ²⁵⁾、傾斜が38.7°をピークとする正規分布となっていた。これをみると、緩傾斜にも急傾斜にも崩壊が少ない。緩傾斜に少ない傾向は当然であるが、急傾斜に少ない傾向は、常識とは違っている。この解釈は、急傾斜部では常に表土が崩落していて、大きく落ちる物質が少ないと考えている。

野底川流域では、基盤の地質は市田花崗岩と伊奈川花崗岩であり、斜面の傾斜は30度以上40度未満の地域が広く分布している。そのため、地形の急峻な箇所が多く、そのうえ花崗岩の風化が進む脆弱な地質条件となっている。古くからも災害を受け、荒廃地が数多く発生してきた。特に1961年に梅雨前線集中豪雨、いわゆる昭和36年伊那谷大災害により、荒廃化が著しく進行した。過去の崩壊地の経年変化について、1959年、1976年、1991年および1995年の空中写真（林野庁）によって図化すると、図2.8となる²⁵⁾。これを見ると、1959年の空中写真から1976年まで17年間で崩壊地は2.5倍増になった。これは伊勢湾台風被害、36災によって起こられたものと考えられる。1976年より1991年の15年間で6割減少し、その後今日までに徐々に増加傾向を示す。

野底川流域の保安林は、大正3年から前後16回にわたり指定されている。流域全面積1,649haの88%にあたる1,486haが保安林で、流域の上部56%が水源かん養保安林で、残りは土砂防備保安林となっており、入口付近から115.28haは保健保安林との重複指定がなされている。森林の所有形態では、全体の87.7%が町有林で圧倒的に多い。林種をみると、人工林が73%も占めており、樹種別ではカラマツが最も多く36%、次いでヒノキの22%、アカマツの18%となっていて、カラマツ、ヒノキ、アカマツの3種で全体の76%を占めている（表2.3）。

割沢流域は土砂生産が活発であるので、土砂流失防備保安林となっており、面積は28.6haである。この流域には、荒廃跡地は6.63haがあった。1971年から復旧治山事業が始まり、1990年まで溪間工を7箇所（0.76ha）、山復工を16箇所（5.27ha）を施工した。現在、荒廃のまま放置している荒廃跡地は1.36haもあり、全面積の4.76%を占めている（写真2）。水源かん養機能が非常に低下している流域といえるだろう。

2.2.2 36伊那谷災害

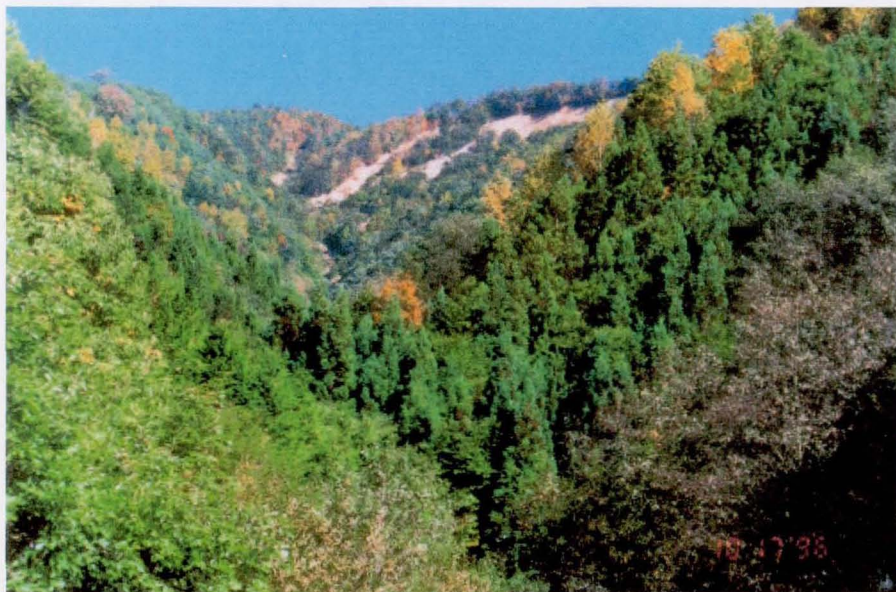


写真2 割沢支流の概観

Photo.2 The view of Warisawa Sub-basin

野底川流域の過去における災害といえば、1961年の「梅雨前線豪雨災害」があげられる。これは伊那谷にとって有史以来最大というべき大災害であった。梅雨前線の停滞に伴って、23日から振り出した雨が毎日続いていたが、6号台風の接近とともに27日から次第に強さを増し、時間雨量5～35mmの強雨が28日未明まで約30時間にわたって続いた。その後幾分弱まったが時間雨量5～10mm程度で、30日までの連続雨量は500mmを越え、飯田測候所開所以来の豪雨となった。(表2.4)。図2.9には、6月27日南部での日雨量図、災害救助法適用範囲及び死者数とその位置を示した。これをみると、雨域は恵那山から甲斐駒ヶ岳に至る北東-南西方向に帯状分布となっている。この日恵那山では、429mm、飯田で325mm(飯田測候所創設以来の大雨)の雨量で、この雨域に最も大きな被害が出ている。この災害で注目されることは、おびただしい土砂が流出したことである。こ

表2.4 1961年出水概要

Table 2.4 Characteristics of heavy rain in 1961 in Iida

最大日降水量 (27日) (飯田)	総雨量 (23-30日) (飯田)	最高水位 (天竜峡)	ピーク流量 (泰阜)
325mm/日	565mm	20.26m*	3600m ³ /s

*は推定値

のおもな河川は、天龍川の東部域(龍東)では、伊那山脈からの河川の全てに土石流がみられ、龍西では南から、阿知川、茂都計川、野底川などであった。これらの地域は、ほとんど花崗岩地帯であり、その崩れ方は、30～60cmの表土が基岩の上であり、植物の根系が密に入り基岩との間に薄い(3～5mm)粘土膜ができてすべる。その際、対岸に乗り上げそこも破壊してそのまま自然のダムとなる。これがダムアップして、突然決壊(トッピング)し土石流となる。このような現象は、山地の小溪流のいたる所に

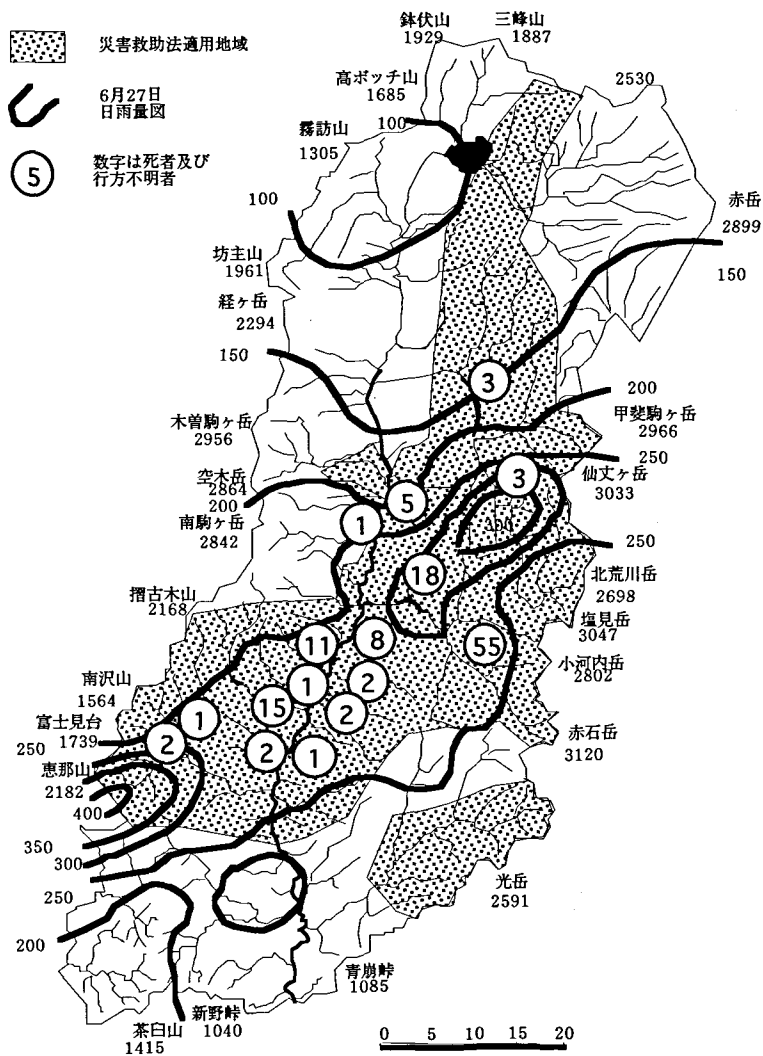


図2.9 36災の日降水量, 死者地点及び災害救助法適用地域

Fig.2.9 The daily precipitation, the place where people died and the disaster area

表2.5 1961年伊那谷災害における上郷村の被害状況
Table 2.5 Disasters of 1961 Heavy-rain in Jyougo Village

人の被害	死亡	3人	道路の被害	流失	3010m	
	ケガ	5人		欠壊	1870m	
家屋の被害	流失	31世代	136人	橋梁の被害	流失	16
	半壊	17世代	64人		埋没	700m
	床上浸水	80世代	351人			
	床下浸水	150世代	601人		欠壊	3

表2.6 割沢支流域における調査地の概要
Table 2.6 General characteristics of study sites sampled in the Warisawa Basin

Site number	Slope age (year)	Treatment	Density of tree plantation (ha ⁻¹)	Aspect	Slope	Elevation (m)
1	7	GS		N	38	1,250
2	9	TP, GS	1,640	N	34	1,170
3	10	TP, GS	1,720	S	24	1,210
4	12	TP, GS	1,680	S	28	1,180
5	14	TP, GS	1,600	N	22	1,270
6	15	TP, GS	1,570	N	25	1,220
7	16	TP	1,700	N	33	1,080
8	17	TP	1,750	N	39	1,060

GS=grass seeding; TP=tree plantation

できているので、土石流もいたる所で発生することになる。これによって伊那谷の大小河川は氾濫し、土砂や立木など沢を埋めて各地に大災害を発生させた(表2.5)。飯田市上郷での主なる災害箇所は野底川、松川、天竜川であるが、わけても野底川氾濫による被害は甚大であった³¹⁾。

2.2.3 調査地の設置

今度の調査地は野底川流域の割沢支流域における山腹工の施工した跡地を8箇所選択した。治山工事の経過年数は7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17年であった(表2.6)。この流域は土砂生産が活発化しているため、土砂流出防備保安林と指定されている。非荒廃地において、カラマツ、ヒノキおよびアカマツは優占種となっている。荒廃地には、ヤマハンノキは広く栽培され、ケンタッキー31フェスクは植生

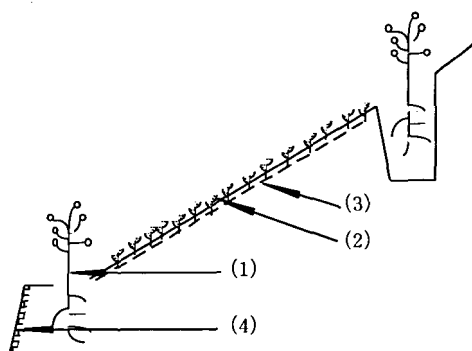


図2.10 山腹工の概要図：(1)植栽木；(2)植生袋；(3)植生付けネット；(4)土留工

Fig.2.10 The representation of hillside works. (1): tree plantation; (2): grass sowing; (3): vinyl net and (4): reinforced concrete

袋工によって導入されている。割沢支流域の山腹工の概要は図2.10の通りである。

第三章 調査および解析方法

3.1 地震荒廃地

3.1.1 調査方法

各調査プロットは、10m×10mの方形とし、その中を1m×1mの網目になるようにステンレス線を張り区分した。植物調査は、1986年から1990年までは年2回、1992年までは年1回とし、各プロットに

出現した植物の種類、株数、位置を記載し、次の調査時に植物の定着、消失、新侵入に分けて記載した。調査は、1986年から1992年までの8年間にわたり続け、特に、地震荒廃地における植物の自然侵入の初期特性に着目して行なった。

10m×10mの方形プロット内は1m×1mのグ

リッドに分割して、出現した樹高1.5m以上の個体を標識してグリッド位置、樹種、胸高直径、樹高について記録した。樹冠の4方向の枝張り長をもとに投影図を作成した。また、1.5m以下の個体について樹種、グリッド位置、樹高を記録した。

3.1.2 解析方法

調査に基づいて、各種類の定着率及び相対出現率を次式で計算した。

$$\text{定着率 (\%)} = (1 - \text{消失数} / \text{前回の総個体数}) \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{相対出現率 (\%)} = (\text{種の出現プロット数} / \text{調査プロット数}) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

また、樹高によって、林分の階層は上層と下層に区分した。下層：2.0m以下の木本個体により構成している。上層：2.0m以上の木本個体により構成している。上層に出現した種類の状況は、現在群落の発達状況を評価することができる。樹高2.0m以上の個体について、種類ごと (I) の相対優占度 (Yi) を次式で計算した⁴⁰⁾。

$$Y_i = 1/2 (BA_i / BA_t + S_i / S_t) \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

ただし、BA_iは樹種Iの胸高断面積、BA_tは総胸高断面積、S_iは樹種Iの個体数、S_tは総個体数である。

また樹冠については、樹冠投影面を4方向の枝張り長をもとに楕円に近似し、0.1mメッシュを単位に与えられた枠に投影図を作成し、各樹種の樹冠投影面積および各プロットのうっ閉度を求めた。重複樹冠率を下式で計算した。

$$\text{重複樹冠率} = (\text{上層個体の総樹冠面積} / \text{プロット面積}) - \text{樹冠率} \dots\dots\dots(4)$$

3.2 山腹工事施工跡地

3.2.1 調査方法

今度の調査地は、野底川流域の割沢支流域における山腹工の施工跡地について8箇所を選択した。治山工事の経過年数は7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17年である。調査は貫入試験とトレンチカット調査に基づいて、土層層位区分を行なって、上層土層の特性および形成過程により土層発達過程をパターンに分けて類型化した。さらに、土層の理化学性について、含水量、間隙率、飽和透水係数、全炭素および全窒素、土壌pHを調査分析し、その結果を山腹工事の経過年数と関係づけて検討した。

(1)土層調査：土層調査は簡易貫入試験とトレンチカット調査に基づいて、土層層位区分を行った。

①トレンチカットによる土層発達調査：トレンチカット調査は沖村、田中(1980)の基準により実施した⁴²⁾。肉眼観察によってカット面に現われる土層の色調、キメなどを記録するとともに、A層、B層の厚さおよび草本植物根系分布の最大深度(根系分布深)を測定した。

②貫入試験による層位分布調査：従来、貫入試験による土層の層位区分の調査および研究が数多くなされていた^{12,42)}。長谷川土壌貫入計は山中式硬度計と土壌ごとに強い相関関係があり、山で運搬、測定に便利のように設計しているため、造園緑化の場面でよく使われている¹²⁾。長谷川土壌貫入計は、重さ2kgの落錘を50cm落下させ、そのエネルギーで先端の円錐コーンを土壌に貫入させ、その時の貫入抵抗(貫入深)から土壌の相対的な硬さを知るものである。測定結果の表示方法は、1打撃による貫入量を土壌の軟らか度とする。この値が大きいほど土壌は軟らかいわけである。本研究では、土層深100cmないし貫入値0.5cmまで行った。なお、土層区分は過去の研究と現地土層の断面観察を参考として、地表面から貫入値1.5cm以上の土層を表層土層、貫入値1.5cmから0.5cm以上の土層を下層土層に層位区分した。貫入値0.5cm以下の土層は風化層とみなされるが今回の研究に含まれていない。

(2)土壌理化学的性質測定

調査地ごとに、100ccの採土円筒で表層から0~10cm, 10~20cm, 20~30cmの3層で、各層三つの土壌サンプルを採取した。採取した土壌は直ちに実験室に持ち帰り、図3.1に示した順で、土壌の採取時の水分含有率、飽和含有率、飽和透水率およびpF1.8の水分含有率を測定した。また、同じ層位から取ってきた攪乱した土壌サンプルを室内で風乾し、植物根などの粗大有機物と礫を除き、高速遠心機(Kokusan H-200 series)を用いて、34.8kPa, 139.4kPa, 313.5kPaおよび871kPaの土壌のpF-水分関係を測定した^{8,34)}。土壌化学的性質のうち、全炭素はチューリン法により、全窒素はケルグール法によって測定した。pH値は風乾細土1に水2.5を加え

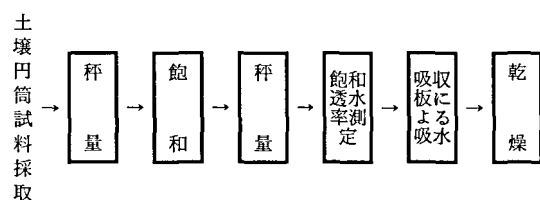


図3.1 土壌物理的性質の測定手順

Fig.3.1 Process of the measurements of soil physical characteristics

往復振とう機にかけたのちガラス電極pHメーター (Model HM-5A, Toa Electronics) により測定した⁹⁾。

(3)植物調査：各調査地に、10m×10mあるいは5m×20mのプロットを2個設定し、木本植物調査を行った。毎木調査を行い、樹種、樹高、胸高直径及び樹冠幅を記録した。また、各プロットに2個の50cm×50cm設定し、出現した草本植物の種類、被度を記録した。草本植物の地上部分を取り、導入された種類と侵入した種類を分け、70°Cで24時間乾燥して、地上生物現存量の調査を行った。

3.2.2 解析方法

圃場空気率は次式で計算した。

$$\text{圃場空気率} = \text{飽和含水率} - \text{圃場容水量} \dots\dots(5)$$

土壌の圃場容水量の水分は、細孔隙 (粒径30 μm 以下) に保持されることがよく知られている³³⁾。また、

飽和状態では、すべての孔隙が水で充填されていると考えられるから、粗孔隙率 (粒径30 μm 以上) は下式で計算できる。

$$\text{粗孔隙率 (Large porosity)} =$$

$$(\text{飽和含水率} - \text{圃場容水量}) / \text{飽和含水率} \dots\dots(6)$$

土壌の理化学的特性を二層 (地表から0~30cm深および30~60cm深) に分けて検討した。地表から0~30cm深の土壌の理化学的特性は地表から0~10cmと10~30cmの平均値とした。

樹高により木本植物の階層区分を行なった。階層の区分は、幼樹層 (2m以下)、低木層 (2-6m) および高木層 (6m以上) とした。幼樹層に出現した植物の状況は、更新樹種としての潜在力を示しているといえる。低木層及び高木層に出現した種類の状況は、現在群落の発達状況を評価することができる。種類ごとの相対重要度を3.2.2の所の(3)式と同じように計算した。

第四章 結果および考察

4.1 地震荒廃跡地における植生の初期自然遷移特性

4.1.1 出現した植物の種類数の変化

出現した植物の種類数の経年変化を図4.1に示す。

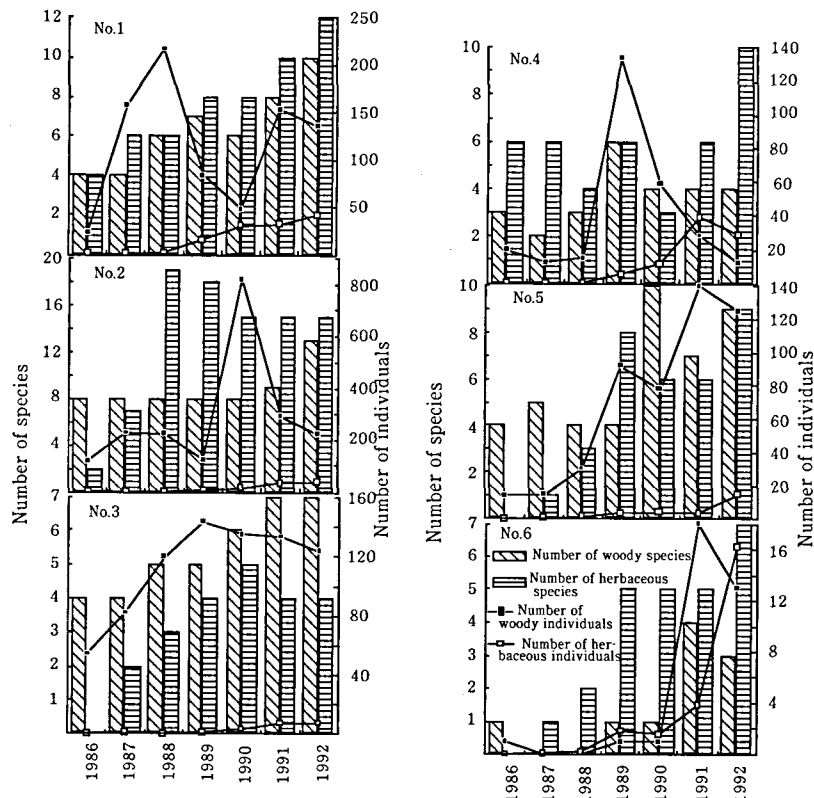


図4.1 経過年数による植物の種類数/100m²および個体数 (木本植物, 本/100m²; 草本植物, 100株/100m²) の変化
 Fig.4.1 Changes in numbers of species/100 m² and the marks represent the numbers of individuals (woody plant, stem/100 m²; herbaceous plant, 100stem/100 m²), respectively

木本植物の種類は各プロットとも経過年数に従って増加したが、調査プロットの間、大きなばらつきが認められた。1992年において出現した木本植物の種類は、6箇所の平均で7.7種類/100m²で、最低値(3種類/100m²)は湿地であったNo.6区に出現し、最大値(13種類/100m²)は土石流が一旦停止したNo.2区に出現した。

木本植物は主に4属(ヤナギ属, ハンノキ属, カバノキ属とヒノキ属)が出現した。ヤナギ属は、バッコヤナギ, オノエヤナギ, イヌコリヤナギ, カワヤナギの4種類で、最も多かった。ハンノキ属ではヤマハンノキ, ヤシャブシの2種類, ヒノキ属ではヒノキ, サワラの2種類が出現したが、カバノキ属ではダケカンバの1種類のみ出現した。また、周辺林地には針葉樹が優勢しているにもかかわらず、先駆樹種であるバッコヤナギとダケカンバが各プロットに共通にみられ、ヤマハンノキも83%の相対出現率を示した(表4.1)。

草本植物の種類は各プロットとも経過年数に従って増加している。1992年において、各プロットに出現した草本植物の種類数は、4~15種/100m²と変動が大きく、6箇所の平均は9.5種類であった。最大値は木本植物と同じNo.2区に出現したが、No.3区の表

層は大転石に占められていたため、草本植物の侵入種類数が非常に少なく、この区が最低値になった。なお、各プロットにはヨモギのみが共通にみられた。

地震荒廃地において、植物はほとんど飛来種子により侵入すると考えられる³⁹⁾ことから、種類数のばらつきは、周辺林地までの距離の違いが影響したと考えられる。1992年のデータにおいて、木本植物の出現種類数と周辺林地までの距離との間には、明らかな負の相関が認められた($r^2=0.69, P<0.05$)。また、草本植物については、No.3区を除くと、出現

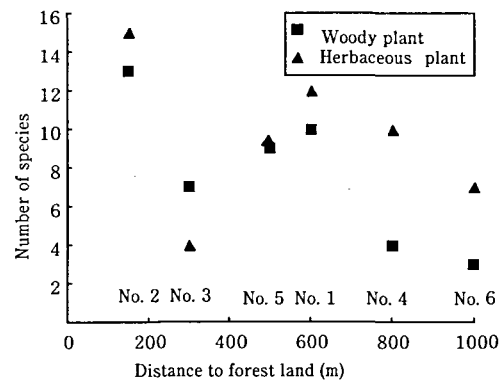


図4.2 種数と周辺林地までの距離の関係

Fig.4.2 The relationship between the number of species and the distance to the forest land

表4.1 1992年現在における植物の種組成, 相対頻度および個体数

Table 4.1 Species composition, relative occurrence frequency, and the number of individuals of the plants as of 1992

Species	Japanese name	Percent occurrence (%)	Number of individuals						Mean
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
woody species									
Salix bakko	Bakkoyanagi	100	5	13	24	2	37	13	15.7
Salix sachalinensis	Onoeyanagi	67	11	45	14	—	8	—	13
Salix integra	Inukoriyanagi	67	16	3	3	—	4	—	4.3
Salix gilgiana	Kawayanagi	33	42	—	11	—	—	—	8.8
Alnus hirsuta var. sibirica	Yamahannoki	83	17	28	—	5	2	2	9.2
Alnus firma var. hirtella	Miyamayashabushi	50	6	12	—	—	13	—	5.2
Betula ermanii	Dakekanba	100	16	15	71	3	50	1	26
Chamaecyparis obtusa	Hinoki	50	4	73	—	—	3	—	13.3
Hydrangea paniculata	Noriutugi	33	—	1	—	—	11	—	2
Rubus crataegifolius	Kumaichigo	67	16	14	1	—	2	—	5.33
Others/Unidentified			2	19	—	1	—	—	3.7
Herbaceous species									
Artemisia indica	Yomogi	100	279	540	128	201	5	280	238.8
Carex kiotensis	Tekirisuge	67	310	208	—	168	63	—	124.8
Erigeron annuus	Himejyoon	50	6	59	—	—	1	—	11
Polygonum cuspidatum	Itadori	67	619	79	439	2,206	—	—	557.2
Polygonum nepalense	Tanisoba	33	—	104	—	1	—	—	17.5
Anaphalis margaritacea	Yamahahako	67	808	139	—	—	85	7	173.2
Plantago asiatica	Oobako	33	—	285	—	—	—	83	61.3
Oenothera stricta	Matuyoigusa	33	—	24	—	—	1	—	4.2
Oenothera biennis	Arechimatuyoigusa	33	—	2	—	—	222	—	37.3
Others/Unidentified			2,084	2,508	99	287	1,222	16	1,036

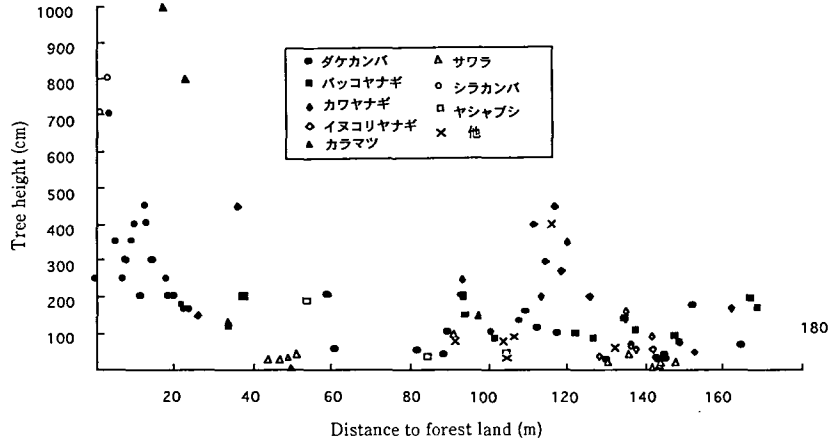


図4.3 周辺林地林縁から木本植物の自然侵入状況

Fig.4.3 The incursion of woody plants in relation to the distance to forest land

種類数と周辺林地までの距離との間に相関関係が認められた ($r^2=0.75$, $P<0.05$) (図4.2)。

また、1997年No.6区でベルトトランセクト調査を行なった。その結果を図4.3に示す。今回の調査プロットはほとんど平坦地であったのに対して、ベルトトランセクト調査の結果は、斜面の傾斜および斜面位置に強く影響されることが認められた。斜面位置によって樹種の変化が著しかったが、出現種数と周辺林地までの距離との間に明らかな相関関係は認められなかった。林縁から120mまで、ダケカンバが優占していた。しかし、その間の40mから80mまでは、斜面が急であった(35度~45度)ため、出現木本植物が非常に少なかった。サワラの幼樹の出現がみられたが、地表が不安定であるためか、大きく生長しなかった。林縁120m地点から斜面が緩やかになり、堆積土が発生した。また、林縁から150mの所に沢があって、それを中心にヤナギの群落が形成されていた。

4.1.2 出現した植物個体数の変化

出現した植物の全個体数の経年変化を図4.1に示す。6年間(1986年~1992年)の草本植物の全個体数は、経過年数に従って漸次増加した。これに対し、木本植物の全個体数は、経過年数に従って増加傾向がみられるが、全個体数がピーク値に達した後に、再び減少した。そのピーク値が出現する時期は、プロットによって異なっている。例えば、No.1区では1988年、No.2区では1990年、No.3区とNo.4区では1989年、No.5区とNo.6区では1991年に、それぞれピーク値が出現した。これに影響する要因として、周辺林地の種子生産状況が考えられる。個体数のピーク値の出現時期が同じ年になっているNo.3区と

No.4区、No.5区とNo.6区では、それぞれ同じ林地から更新種子が飛んできたと考えられる。

1992年現在の木本植物の全個体数を表4.1に示す。6箇所の平均値は106.5本/100m²であった。プロット間に11本/100m²~223本/100m²と大きな違いがみられる。木本植物の出現全個体数と周辺林地までの距離との間には、高い負の相関が認められる(図4.4a)。各プロットの出現全個体数間にばらつきが生じたのは、周辺林地までの距離の違いに基因したものと考えられる。

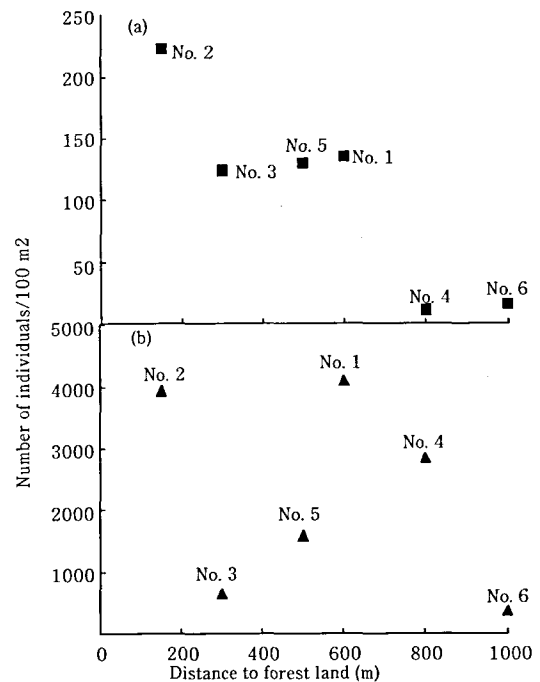


図4.4 100m²における植物の個体数と周辺林地までの距離の関係。a：木本植物；b：草本植物

Fig.4.4 The relationship between the number of individuals in 100 m² and the distance to the forest land, where a denotes the woody plant, and b the herbaceous plant

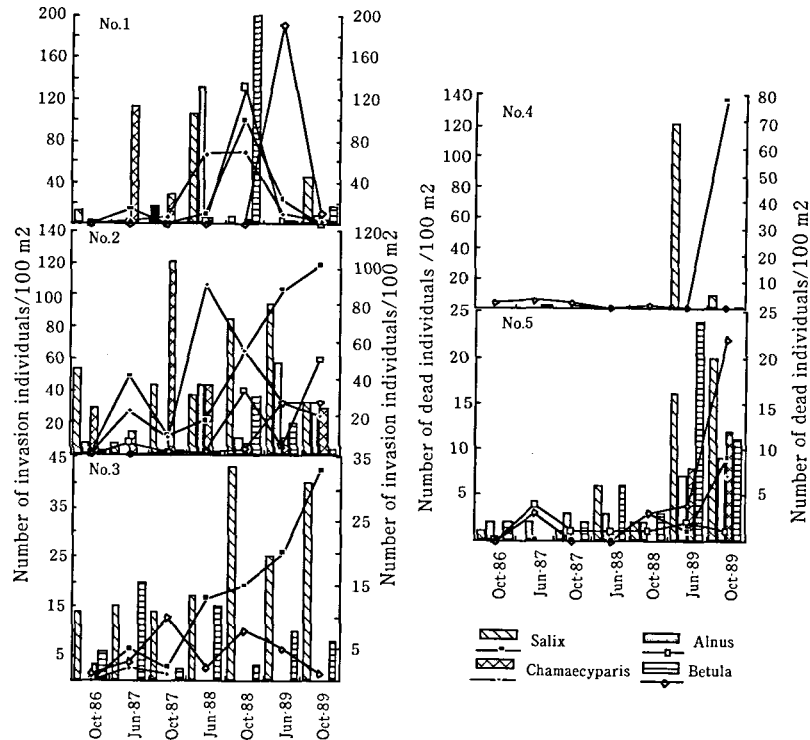


図4.5 経過年数による100m²における出現個体数と消失個体数の変化（棒線：出現個体数；折線：消失個体数）

Fig.4.5 Changes in the numbers of emerged and dead individuals with a lapse of years observed in five plots (100 m²). The bars represent the numbers of emerged individuals and the marks represent the number of dead individuals

草本植物の個体数をみると、6箇所の平均値は2,261株/100m²で、最低値は386株/100m²、最大値は4,106株/100m²で、プロットによりばらつきが大きかった。No.3区とNo.6区に少ない個体数が出現したのは、No.3区は大転石が多く、表層土壌がほとんどないために乾燥したこと、No.6区は湿地であるために表層の通気性が低いことが原因だと考えられる。草本植物の出現個体数と周辺林地までの距離との間には、明らかな相関関係は認められなかった（図4.4b）。これは、侵入した草本植物が容易に結実し、その落下種子が発芽、成立した結果によるためと考えられる。

4.1.3 木本植物の侵入および消失過程

木本群落の成立過程をさらに詳しく検討するため、主要な木本植物の侵入および消失過程を分析した。1986年から1989年の4属の侵入個体数と消失個体数の変化過程を図4.5に示す。木本植物の侵入個体数の変動は激しく、ある時期にピーク値に達することが認められる。侵入した個体数のピーク値の現われた時期は、出現した個体数のピーク値の現われた時期と一致している。この結果と同じように、市河、小見（1990）は、御岳の亜高山帯林における稚樹発生

について調査した結果、個体群密度は稚樹の発生年をピークに大きく変動したことを認めている¹⁹⁾。

しかしながら、侵入個体数のピーク直後に消失個体数のピークが現れ（図4.5）、結局、定着できる個体数は少なくなった。市河、小見（1988）および北原ほか（1988）は、発芽当年と発芽2年目の稚樹の消失率が高いと指摘した^{19,21)}。発芽当年の枯死原因は乾燥で、根系発達した発芽2年目の枯死原因は、凍上融解によって表土が持ち上げられルーズになり、根系が露出したこと²¹⁾に基因すると考えられる。

1987年から1989年の6プロットの平均定着率の変化を図4.6に示す。カバノキ属、ハンノキ属およびヤナギ属の定着率は、ヒノキ属より高いことが明らかである。また、木本植物の定着率は時期によって大きく変動している。特に、1987年6月と1988年10月において、カバノキ属、ハンノキ属、ヤナギ属およびヒノキ属とも低い定着率を示した。

定着率に影響する環境要因として、水分条件、温度変化、動物などがあげられる¹⁰⁾。今回の調査結果には、厳しい環境条件（高い表面温度、水分不足、凍上など）の影響が大きいと考えられる。1986年には冬期の凍上融解の影響を受け、また、1987年4月には月総降水量が少なく（110mm）、平年の20%しか

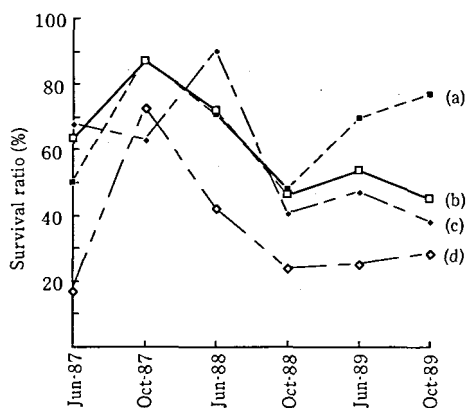


図4.6 経過年数による大本植物の6プロットの平均定着率の変化。a：ハンノキ属；b：ヤナギ属；c：カバノキ属；d：ヒノキ属

Fig.4.6 Change in mean survival ratios of three woody plant groups in 6 plots with a lapse of years, where a denotes *Alnus* group, b denotes *Salix* group, c denotes *Betula* group and d denotes *Chamaecyparis* group

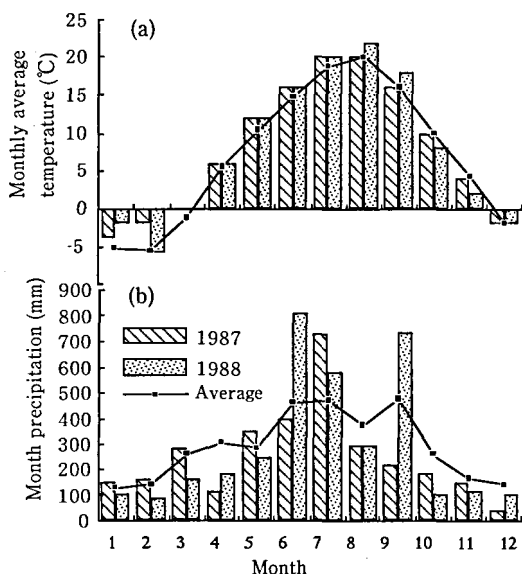


図4.7 1987年と1988年における(a)月平均気温、(b)月総降雨量の変化および平年値との比較

Fig.4.7 Monthly changes in (a) temperature and (b) precipitation in 1987 and 1988 as compared with averages

なかった。1988年8月には、月平均気温は22.0°C、平年より2°C高かった。また、月間降水量は290mmで、平年より84mmも少なかった(図4.7)。これらの要件により、1987年6月と1988年10月において、低い定着率を生じたと考えられる。

以上の結果から、地震荒廃地の遷移初期過程における木本植物の成立は、極めて不安定なものであるといえる。木本植物の侵入、定着ができるか否かは、種の遺伝的な性質(明るさなど林床の環境に対する

適応性)によって決まるばかりではなく、周辺環境条件によって大きく左右されるといえる。ヒノキ、サワラのような遷移後期樹種は、侵入しても厳しい環境(乾燥、高温等の極端な変動等)への適応性が低いため、極めて成立しにくいと考えられる。なお、先駆樹種はこの厳しい環境条件を改善し、極端な環境条件を緩和する能力を有している^{2,10,30,55}。このことから、森林群落の形成を図るためには、先駆樹種を積極的に導入して、厳しい環境の緩和を図り、遷移後期樹種の生育に好ましい環境条件を作り出すことが重要である。

4.1.4 まとめ

本研究は、地震荒廃地における森林の成立過程を知るため、植物の自然侵入状況を調べた。8年間は、植生遷移過程においては、ほんの短い期間であるが、以下の点が明らかになった。

1)経過年数に従って、植物の種類数と個体数の増加がみられる。植物の侵入過程は周辺林地までの距離に強く影響され、周辺林地に近い調査プロットほど種類数及び個体数が多く現われる。

2)各調査プロットに数多くの木本植物の稚樹が出現したが、木本植物は樹種ごとの環境への適応性に大きな差異があることが認められる。ヤナギ属、カバノキ属およびハンノキ属のような先駆樹種は出現箇所が多く、個体数は経過年数に従って増加し、定着している。一方、ヒノキ属は、出現箇所も個体数も少なく、出現しても枯損が多く、ほとんど成立しない。

3)地震荒廃地の遷移初期過程においては、植物の侵入、消失が激しく繰り返されている。遷移後期樹種は厳しい環境(乾燥、高温、凍上等の極端な変動)への対応性が低いため、侵入しても成立しない。このため、環境条件の厳しい地震荒廃地の復旧にあたっては、先駆樹種をまず導入し、森林の形成に好ましい生育環境条件を作り出すことが重要である。

4.2 地震荒廃跡地における木本群落の初期発達特性

4.2.1 樹高生長の特性

地震荒廃地における木本植物の発達状態を評価するため、1996年現在、各調査プロットに出現した木本植物の状況を表4.2と表4.3に示す。表4.2に示した4ヶ所には、樹高2.0m以上の木本植物個体の出現は見られなかった。No.1区は、土石流が流下した王滝川に設置した個所であるが、地表は礫や粗砂で

表4.2 1996年現在No.1, 3, 4, 6区における大本植物の個体数および最大樹高

Table 4.2 Number of individuals and maximum height of woody plants in No. 1, 3, 4 and 6 in 1996

Species (group)	Number of individuals				Maximum height (cm)			
	No.1	No.3	No.4	No.6	No.1	No.3	No.4	No.6
<i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i>	14		7		95		160	
<i>Alnus firma</i> var. <i>hirtella</i>	9			10	55			21
Salix group	39	71		6	170	90	80	
<i>Betula ermanii</i>		64	3			45	20	
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	7			11	10			10
<i>Larix kaempferi</i>		2		3		15		10

藓苔類, 地衣類によって密におおわれている。木本植物には, ヤナギ類の個体数が39株と最も多く, 最大樹高が1.7mであった。No.3区およびNo.4区は伝上川から濁川にかけて尾根を土石流が乗り越えた個所であるが, 地表は岩塊に被われており, また, 積雪・凍上・風衝などの影響を強く受けていると考えられる。他のプロットと比較すると,

標高は最も高く, 出現した木本植物の種類数は少ないが亜高山帯のダケカンバの出現が見られた。最大樹高はNo.3区において, カワヤナギの0.9mで, No.4区において, ヤマハンノキの1.6mであった。No.6区はバッコヤナギは一本のみ定着し, 樹高が0.8mまで伸びたが, ほかの木本植物の個体は全部一年生稚苗であった。これはNo.6区が凹地であるため, 吹き込んだ雪が厚く堆積し, 植物が定着しにくいことが影響したと考えられる

一方, 1996年現在のNo.2区およびNo.5区の2ヶ所には, 樹高が2.0m以上生長した木本植物個体が出現した(表4.3)。No.5区は, No.6区と同じように, 御岳崩壊による崩壊土砂で吹き飛ばされた森林跡地である, 表層が削りとられた深さはNo.6区より浅く, そこに出現した樹高2.0m以上の木本植物は27株であり, 最高樹高はミヤマヤシャブシの7.0mであった。また, 根元から萌芽幹をいくつも持つ個体が多く, 1株あたりの幹数は2本から11本であった。これは強風などの環境要因の影響で主幹が損傷をうけ, 冬期に頂部が枯損するためであると考えられる。

No.2区は土石流が一時止まってダムアップしたので, 堆積物が厚く残存し, 下層は孔隙の多い岩塊層となっているが, 地表は厚さ20cm程度の砂礫まじりの土壌層をもち, 適潤である。そこには, 侵入樹種は順調に森林への遷移がみられた。樹高2.0m以上の木本植物は45株であり, 最高樹高はヤマハンノキの12.0mであった。

No.2区とNo.5区における各樹種の平均木の樹高の

表4.3 1996年現在No.2区およびNo.5区における大本植物の状況

Table 4.3 Crown coverage, stem densities, basal areas, average heights of all trees in study sites of No.2 and No.5

Study site	Crown coverage (%)	≥2.0 m in height			<2.0 m in height	
		Stem density	BA(m ²)	Average height(m)	Stem density	Average height(m)
No.2	88	45	0.1314	4.65	48	0.55
No.5	43	27	0.0197	2.7	41	0.545

推移を図4.8に示す。ミヤマヤシャブシ, ヤマハンノキ, ヤナギ類の樹高の年間平均生長量は, No.2区において, それぞれ0.83m, 1.17m, 1.10mで, No.5区において, それぞれ0.70m, 0.30m, 0.70mであった。No.2区の土壌層はNo.5区より厚いため, No.2区における各樹種の樹高生長量はNo.5区における各樹種の樹高生長量と比較して大きかった。樹冠うっ閉度の増加によって, ヤナギ類の樹高の年間生

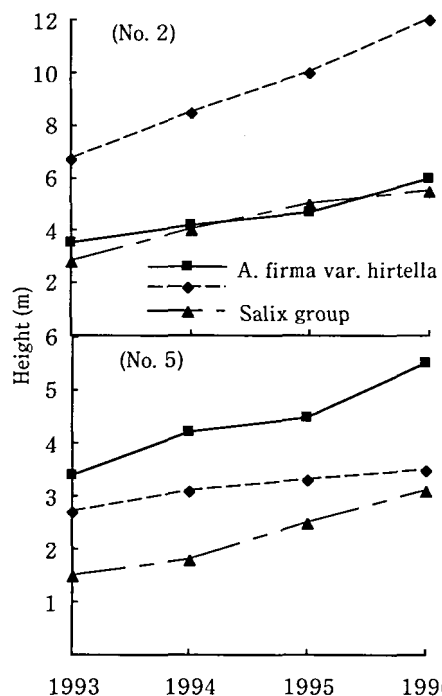


図4.8 No.2及びNo.5における平均木の樹高生長量
Fig.4.8 Height growth of mean tree in the study sites of No.2 and No.5

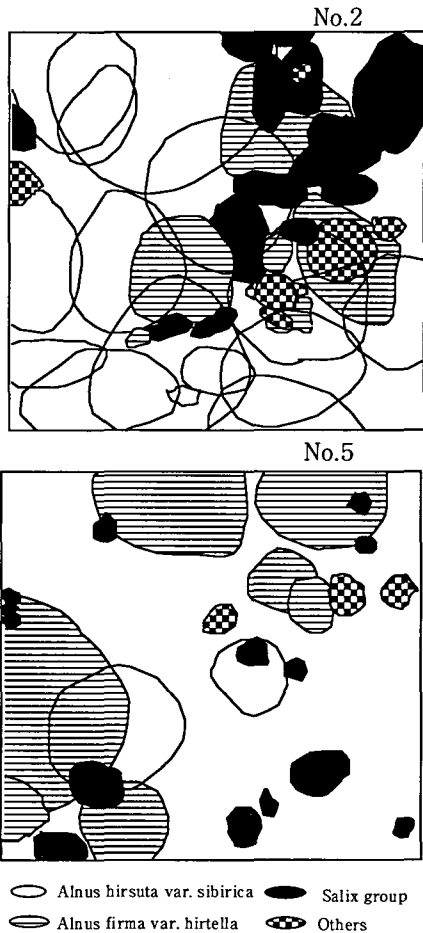


図4.9 No.2 及びNo.5 における樹高2.0m以上の樹冠投影
Fig.4.9 Crown projection diagram (H≥2.0 m) in the study sites of No.2 and No.5

長が1995年頃から鈍化し始める傾向が見られた。

今回認められた地震荒廃地における樹高の初期生長速度の差は、立地条件の違いによるものと考えられる。この立地条件には、気象状況（積雪・風）の影響があると考えられるが、ほとんど地表状況（堆積・侵食およびそれらの程度）によって決まっているようにみられる。すなわち、地表が厚く削りとられた地点で、地表が岩塊におおわれている場合は、生存率が低くかつ樹高生長が遅いため、地震発生後

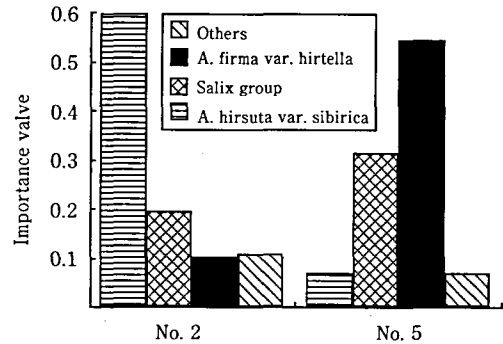


図4.10 樹高2.0m以上の木本植物の相対優占度
Fig.4.10 The importance values of trees (H≥2.0 m) in the study sites of No.2 and No.5

12年経過時点でも、地表はまだ樹冠でうっ閉されていなかった。一方、堆積地点および地表が浅く削りとられた尾根部では、地表は樹冠でうっ閉された。

4.2.2 樹冠発達特性

No.2 区とNo.5 区における樹冠投影図を図4.9に示す。No.2 区はNo.5 区に比べると各樹種が入り混ざった林相を呈している。No.2 区では、重複樹冠率が51.7%で、No.5 区では、重複樹冠率が13.1%であった。各樹種の相対優占度を図4.10に示す。No.2 区ではヤマハンノキが優占し、No.5 区ではミヤマヤシャブシが優占しており、相対優占度はそれぞれ0.6と0.57であった。つづいて2区に共通して、ヤナギ属の総相対優占度は大きかった。

樹高2.0m以上の木本植物の樹冠発達特性を検討するため、No.2 区及びNo.5 区における各樹種の樹冠投影面積を表4.4に示す。No.2 区では、樹冠うっ閉度が88%で、優占樹種ヤマハンノキの総樹冠投影面積が89.6m²で、単木の平均樹冠投影面積は5.9m²であった。No.5 区では、樹冠うっ閉度が43%で、優占樹種ミヤマヤシャブシの総樹冠投影面積が37.2m²で、単木の平均樹冠投影面積は5.3m²であった。ヤマハンノキとミヤマヤシャブシの単木の平均樹冠投影面積について、No.5 区の方が大きかった。これは、前

表4.4 1996年現在No.2 区およびNo.6 区における樹高2.0m以上の木本植物の個体数および樹冠投影面積
Table 4.4 Numbers of individuals and crown areas (≥2.0 m in height) in study sites of No.2 and No.5 in 1996

Species (group)	Number of individuals		Total crown area (m ²)		Crown area per individual (m ²)	
	No.2	No.5	No.2	No.5	No.2	No.5
<i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i>	15	2	89.6	12.1	5.9	6.1
<i>Alnus firma</i> var. <i>hirtella</i>	6	7	20.9	37.2	3.5	5.3
Salix group	17	15	20	5.3	1.2	0.4
Others	7	3	9.2	1.5	1.3	0.5
Total	45	27	139.7	56.1		

にも述べたように、厳しい環境条件下で、木本植物の主幹が損傷を受け、樹高生長が遅くなり、幹の数を増やすことで分布地を確保するためと考えられる。

樹冠部は同化量を生産する重要な器官であり、水平的に樹冠を広げる性質の強い広葉樹の場合、樹冠投影面積（特に太陽光が直接当たる部分の樹冠投影面積）が生長の指標となることが知られている（例えば、15, 43）。本研究では、樹冠投影面積と相対優占度（ $r^2=0.64$, $P<0.05$ ）（図4.11）。

また、樹冠投影面積が樹木の生長とどのような関係にあるかを考察するため、No.2区及びNo.5区にお

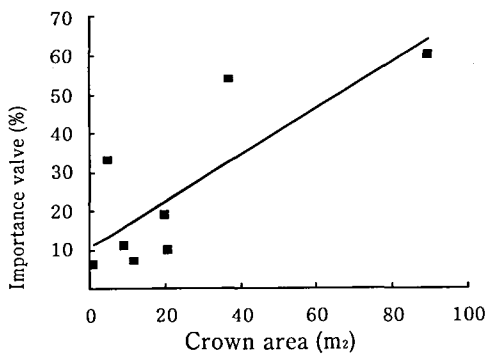


図4.11 相対優占度と樹冠投影面積の関係
Fig.4.11 Relationship between importance value and crown area

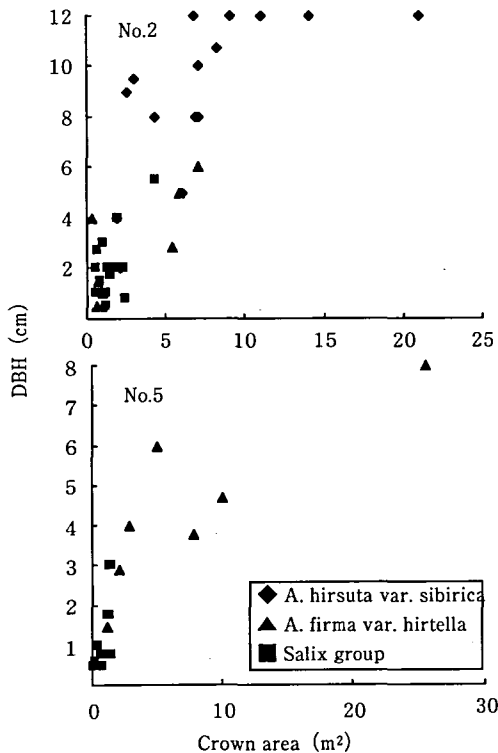


図4.12 樹冠投影面積と胸高直径の関係
Fig.4.12 The Relationship between crown area and diameter at breast height

けるヤマハンノキ、ミヤマヤシャブシ、ヤナギ類の樹冠投影面積—胸高直径関係を検討してみた（図4.12）。これらの3種の樹冠投影面積（S）—胸高直径（D）関係は次式で表された。

ヤマハンノキ： $D=0.41S+5.94(r^2=0.43, P<0.01)$

ミヤマヤシャブシ：

No.2区に、 $D=0.58S+1.10(r^2=0.59, P<0.05)$

No.5区に、 $D=0.21S+2.79(r^2=0.70, P<0.05)$

ヤナギ類：

No.2区に、 $D=0.82S+0.79(r^2=0.38, P<0.01)$

No.5区に、 $D=1.19S+0.11(r^2=0.53, P<0.01)$

回帰式によると、同じ1m²の樹冠投影面積の増加に対して、No.2区にヤマハンノキ、ミヤマヤシャブシ、ヤナギ類は、それぞれ0.41, 0.58, 0.82cmの胸高直径が増加し、No.5区にミヤマヤシャブシ、ヤナギ類は、それぞれ0.21, 1.19cmの胸高直径が増加する。

樹高2.0m以上の木本植物胸高直径別個体数の分布を図4.13に示す。No.2区では、最大胸高直径がヤマハンノキの12.0cmであるのに対して、No.5区では、最大胸高直径がヤシャブシの8.0cmである。2区とも、小直径階（2.0cm以下）の個体数が多く、総個体数の54.0%と55.2%を示している。No.5区では、2.0~4.0cmの直径階の木本植物の個体数が34.5%も

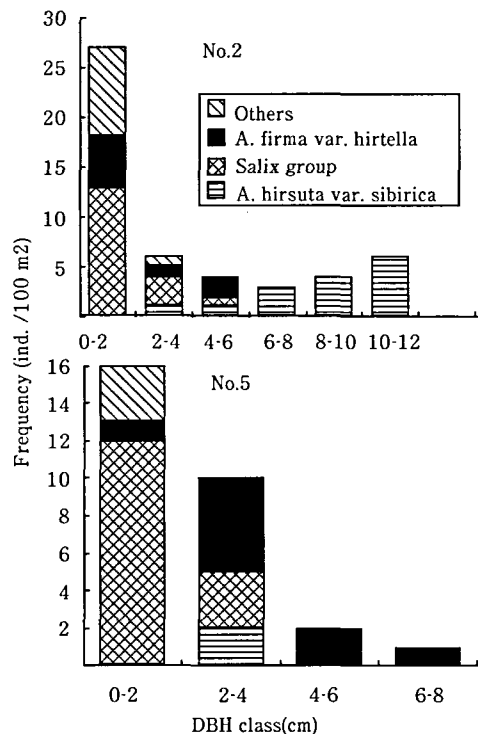


図4.13 No.2およびNo.5区における樹高2.0m以上の木本植物の胸高直径階別本数

Fig.4.13 DBH-class frequency distribution for trees ($H \geq 2.0$ m) in plots of No.2 and No.5

示しているが、No.2区では、その階の個体数の占める率が12%でかなり低い。それはNo.2区において、この直径階での競争は上層木との競争も加わり激しかったためと考えられる。

以上の解析結果から、樹冠の占有空間の大きさや樹冠頂点の位置に個体差があるとき、これらの違いが胸高直径の生長速度に個体差をもたらすことを示している。すなわち、樹冠投影面積が同じであっても、樹冠頂点の位置に偏りがあり、この原因により胸高直径の生長量に差が生じるものと考えられる。

4.2.3 階層構造特性

No.2区とNo.5区における樹高2.0m以上の木本植物の樹高別個体数の分布を図4.14に示す。No.5区では、低い樹高階ほど個体数が多かったが、No.2区では、4~6mの樹高階の個体数が割合少なかった。これは、この樹高階の個体は上の階層へ進行していくが、樹冠うっ閉によるこの樹高階へ移行してくる個体数が少なくなるためと考えられる。

No.2区とNo.5区の樹冠層は、それぞれヤマハンノキとミヤマシャブシによって構成されていた。ヤマギ類は両区とも下層に優占していた。No.2区では高木層が発達しているため、先駆樹種以外の陽性樹

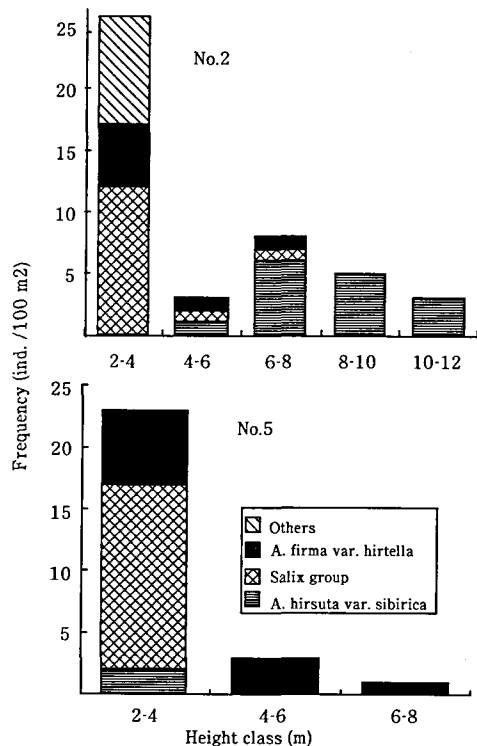


図4.14 No.2およびNo.5区における樹高2.0m以上の木本植物の樹高階別本数
Fig.4.14 Height-class frequency distribution for trees (H ≥ 2.0 m) in plots of No.2 and No.5

種のカツラは9本が出現し、樹高が3.7mまで生長していた。No.5区では、樹冠層木の高さが低いため、2.0m以上生長した先駆樹種以外の陽性樹種の出現はみられなかった。Ishizuka (1984)は、北海道のさまざまな天然林を解析した結果、上・中層の枝下高で中・下層の高さが規定されていると考えた¹⁸⁾。本報では、上層木の樹高が主要樹種の高さに重要な影響を及ぼしていることを示した。No.2区では高木層が十分発達しているため、主要樹種は樹高6.0mまで生長していたが、No.5区では、樹冠層木の高さが低いため、2.0m以上生長した主要樹種の個体がみられなかった。

低木層に出現した木本植物の出現パターンは、林床における光環境によって決められると考えられる。低木層に出現した樹種別個体数の分布を図4.15に示す。No.2区の樹冠率は88%で、林床がかなり暗く

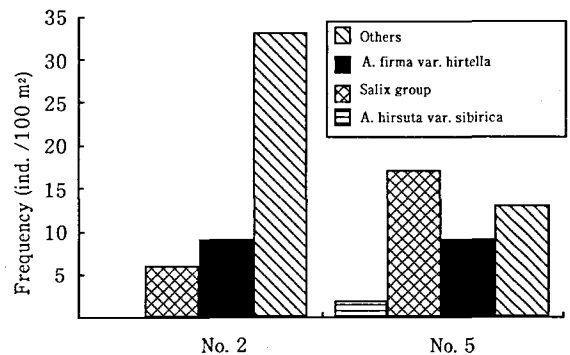


図4.15 下層における木本植物の樹種別分布
Fig.4.15 Tree species frequency distributions in subordinate layer

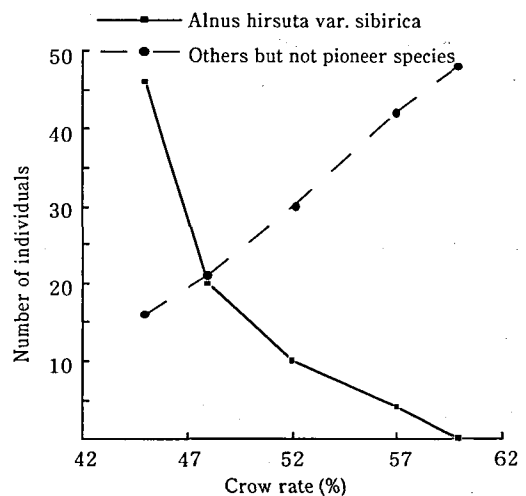


図4.16 No.2における樹冠うっ閉度と下層に出現したヤマハンノキおよび先駆樹種以外の陽種の幼苗の数の関係
Fig.4.16 The relationship of crown rate and individual number of A. hirsuta var. sibirica and others but not pioneer species less than 2.0 m in height in study of No.2

なった。そこにおいて、カツラ・ミツデカエデ・ヒノキ・サワラなどの出現個体数が最も多く、総個体数の57%を占めていたが、樹冠層を構成する優占樹種であるヤマハンノキの出現はみられなかった。一方、No.5区においては、樹冠率はより低い(43%)から、先駆樹種であるヤナギ類とミヤマシャブシの出現個体数が多かった。最も多く出現したのはヤナギ類で、総個体数の41.5%を占めており、優占樹種であるミヤマシャブシの出現個体数も総個体数の22.0%を占めていた。ダケカンパ・カラマツの出現がみられるが、出現した個体数が少なかった。

No.2区におけるうっ閉度と下層にあるヤマハンノキ稚樹の数との関係を図4.16に示す。うっ閉度の増加に従って、先駆樹種以外の陽性樹種(カツラ、ミツデカエデ、ヒノキなど)の侵入は漸次増加した。一方、ヤマハンノキ稚樹の数が著しく減少し、樹冠うっ閉度が60%付近で、ヤマハンノキ稚樹の出現が見えなくなることが認められた。これは、うっ閉度の増加によって、先駆樹種の下層への侵入が抑制されることを示した。

樹種の耐陰性の順に、初期の樹高生長速度が違って、その結果階層化が起こることはよく知られている(例えば、45)。以上述べたことから、地震荒廃地において、初期に樹高生長が速い先駆樹種は、鉛直的より高い樹冠位置を獲得している。しかしながら、樹冠うっ閉度の増加によって、先駆樹種の下層への侵入が抑制され、耐陰樹種の侵入が優勢になると考えられる。

4.2.4 木本群落の発達段階

木本期の遷移系列は先駆木本期一陽樹期一陰樹期と概括されている^{41,55)}。今回の調査地について、現在の状態は先駆木本期であると考えられるが、樹高および樹冠率の発達状況により、地震荒廃地における木本群落の発達段階を三つに分けることを提案する。(I)階層構造未発達段階：樹高2.0m以上の個体は出現せず、木本植物の侵入・消失が激しく繰り返す段階。(II)階層構造をもつ段階：樹高2.0m以上の個体は出現したが、樹冠率は60%以下と低い段階。(III)先駆樹種の侵入が抑制される段階：樹高生長は発達し、樹冠率は60%以上である段階。

各段階の特徴が以下のようにあげられる。I段階において、厳しい環境条件に対応性の高い木本植物種は定着・生長し始める。II段階において、耐陰樹種の侵入が多く、階層構造が生じ、生長の速い先駆樹種は樹冠層を占める。III段階において、先駆樹種

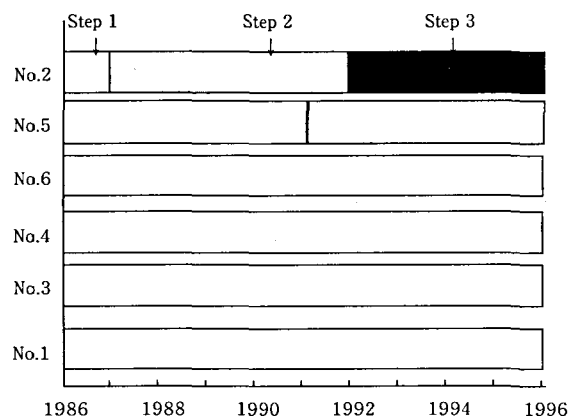


図4.17 木本群落の発達段階

Fig.4.17 The development steps of woody community

の下層への侵入が抑制され、耐陰樹種の侵入が優勢になる。樹冠層においては、各単木が競争することで枯死木が発生し、隙間が生じる。ここで次の遷移系列陽樹期への移行が期待できる。

今回の調査プロットにおける木本群落の発達段階の経年変化を図4.17に示す。これをみると、No.1区、3区、4区および6区における木本群落は、1996年現在、またI段階に停滞していた。No.5区はにおいて、地震後7年が経過した時点から、木本群落はII段階へ進んできた。No.2区における木本群落は、地震後4年を経過した時点でII段階に進み、8年を経過した時点からIII段階へ進んできた。

本研究では、土壤の発達過程に踏まえていなかったが、森貞・大角(1992)の研究によると、5年後の地震荒廃地には、地衣類が繁茂しており、林縁部での土壤発達はかなりはやいと見られ、しかしながら泥流本体部では外観的には植生が回復し始めているが、有機物が蓄積されるほど進んでおらず、土壤生成は始まったばかりの段階であると論じられた³⁷⁾。森林群落の初期発達の速さは立地条件によって違っている。また、木本植物の生育状態からその立地条件を判断できる。今回、木本植物にとっての生育環境の厳しさの順は、No.2区<No.5区<No.1区<No.3、4区<No.6区であると考えられる。

木本群落がどちらの段階まで成立するかは、地表の状態によって決まるように見える。地震により形成された荒廃地の性質およびこの荒廃地における植物の発達過程は侵食・堆積の状態に強く影響されるが、気象条件の影響も大きいと考えられる。現在また階層構造未発達段階にある地点では、環境条件が厳しいため、木本群落は次の段階へ進んでいくには、まだ長い時間がかかりそうである。このような地点

で積極的に先駆樹種を導入し、厳しい環境条件を緩和することが、森林の自然成立に非常に重要であると考えられる。

4.2.5 まとめ

地震荒廃地は、他の誘因により発生された荒廃地に比較して、攪乱された程度がひどく、面積が広いと考えられる。その結果、森林群落の形成過程もそれぞれ異なる。地震発生後12年現在、木本群落は遷移系列上では、先駆木本期であると考えられるが、今回、地震荒廃地における木本群落が三つの発達段階を経て発達することが明らかになった。

(1)階層構造未発達段階：木本植物の侵入・消失の繰り返し激しく、樹高生長が著しく遅い。地震荒廃地における樹高の初期生長速度は、立地条件によって違っている。この段階まで発達してきた地点は、岩塊におおわれているところがほとんどで、地表が乾燥しやすいと考えられる。その結果、木本植物の生存率が低くかつ樹高生長が遅い。

(2)階層構造をもつ段階：堆積地点および地表が浅く削りとられた尾根部のような立地条件下では、先駆樹種の樹高生長が著しく速く、階層構造が生じた。上層ではやせ地に耐え育つ先駆樹種のヤマハンノキおよびミヤマシャブシに占められ、下層では、耐陰樹種の侵入が多くなったが、ヤナギ類が優勢樹種であった。樹冠うっ閉度の増加によって、耐陰樹種の下層への侵入数が増加し、先駆樹種の侵入が減少する。

(3)先駆樹種の侵入が抑制される段階：樹冠うっ閉度が60%付近で先駆樹種の下層への侵入が抑制され、先駆樹種以外の陽性樹種（カツラ、ミツデカエデ、ヒノキなど）が優勢となった。また、胸高直径の生長が樹冠投影面積に影響されることが認められ、低木層木ほど樹冠投影面積の影響が強い。

4.3 山腹工事施工跡地における土壌の発達過程

4.3.1 土壌厚さの発達過程

4.3.1.1 土壌A、B層の発達

経過年数によってA、B層の厚さの変化を図4.18に示す。A層は経過年数によって増加し、経過年数が17年であった調査地では最大値（16.0cm）が現われた。一方、経過年数が7、9年であった調査地ではB層が出現しなかった。10年以後、B層の厚さが速く増加し、経過年数が17年であった調査地点で20.0cmに達した。

Hillel (1982) は、土壌層位の発達過程は色々な

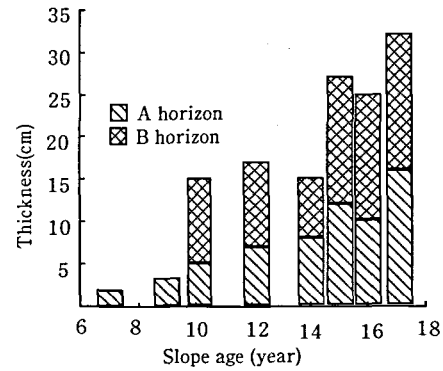


図4.18 土壌A、B層の経年変化

Fig.4.18 Variation in A, B horizon thicknesses with slope age

自然要因（例えば、気候、基質、植生、地形および時間）に影響されていることを指摘した¹³⁾。逢坂ほか（1992）は、土層の厚さが斜面タイプに影響され、さらに斜面に発生した土壌風化、流出および堆積の状態に決められることを証明した⁴⁴⁾。本研究では、各調査地点の気候、基質および地形はほぼ同じであり、経過時間はかなり短いこと、また、山腹工事の影響で、斜面は安定した状態にあるといえることから、植物の影響が大きいと考えられる。

経過年数によって土壌A層の深さは増加することが数多くの研究に証明された。しかしその形成速度がそれぞれ違っている。例えば、約0.15cm year⁻¹^{38,51)}および約0.5cm year⁻¹⁴²⁾などの事例研究があった。本研究における結果では、平均形成速度が0.59cm year⁻¹で、これまでの事例に比較して大きかった。研究対象地においては、安定した斜面で土壌A層の形成速度が速く、また、不安定な斜面では、表層侵食の発生により著しく減少することがわかった。

また、各事例研究はトレンチカットにより実施されたため、人為的な要因（例えば、層位区分の基準）も、違った結果が生じた一つの原因と考えられる。従って、土壌形成過程を明らかにするため、もっと客観的な調査方法が必要と考える。

4.3.1.2 土層柔らかさの分布パターン

施工跡地における貫入試験の結果を図4.19に示す。土層深による土層柔らかさの変化パターンは3種類に分けることができる。Aパターン：経過年数が9、10、14、16年の斜面のように、土層柔らかさの変化が連続であり、深度の増加と共に、土壌が硬くなる。Bパターン：経過年数が7、12、15年の斜面のように、土壌は柔らかさの変化の不連続性がみえる。最初深度の増加と共に、土壌が硬くなるが、ある深度

付近に土壌が柔らかくなり、その後、再び固くなる。Cパターン：Bパターンと同じような変化がみえるが、貫入値1.5cm以上の土層が深度1m以下も続いている（経過年数が17年の斜面）。荒廃地周辺の非荒廃斜面における貫入試験の結果、Cと同じようなパターンを表した（図4.20）。

施工跡地における土壌の発達には、施工後の経過年数と関係があると共に、施工方法、主に施工に際して表土層の攪乱された程度に強く影響されるいると考えてよいだろう。平松ほか（1993）は森林土壌特性調査の結果、表層部より50cm地点付近に土壌特性上の不連続面の存在を確認した¹⁴。土壌貫入試験による貫入抵抗値と土層の物理性とは相関関係が認められるから⁵⁸、本研究で認められたB、Cパターンは、平松ほか（1993）の研究結果と同様な傾向を示した。治山工事の経過年数が7年の調査地には表層部から20cm付近に不連続面が出現したが、ほかの三箇所には50cmから70cmの付近に出現した。

4.3.1.3 表層土層の発達過程

経過年数による表層土層厚の変化を図4.21に示す。A層厚は経過年数に従って漸次に増加したのに対して、表層土層の厚さが経過年数の増加によって増加する傾向は認められたが、地点によってばらつきが大きかった。土壌柔らかさの変化がAパターンを呈している地点がB、Cパターンを呈している地点より、表層土層厚が小さかった。

一般に、森林山腹斜面において、有機物を多量に含む上位土層と、その下位に位置する風化土層とでは、土壌特性が異なっている。長谷川（1981）は関東ロームなど火山灰土の場合、貫入値1.5cm以下では、根系発達に障害樹種があり、貫入値1.5cmから4.0cmまでは、根系発達に障害なし、貫入値4.0cm以上の土層が膨軟過ぎとみなした¹²。今度の調査では、表層土層厚と草本根系分布深および木本平均樹高とは、高い相関関係が認められた（図4.22）。

4.3.1.4 治山工事の土壌再形成に与える影響

非荒廃斜面において、一般に侵食、堆積が同時に発生したり、あるいは時間を異にして侵食と堆積が繰り返し出現している。施工跡地には、自然地形が人為的な改変を受けたり、自然の土壌層位が攪乱されることが多い。施工後の斜面における土壌の発

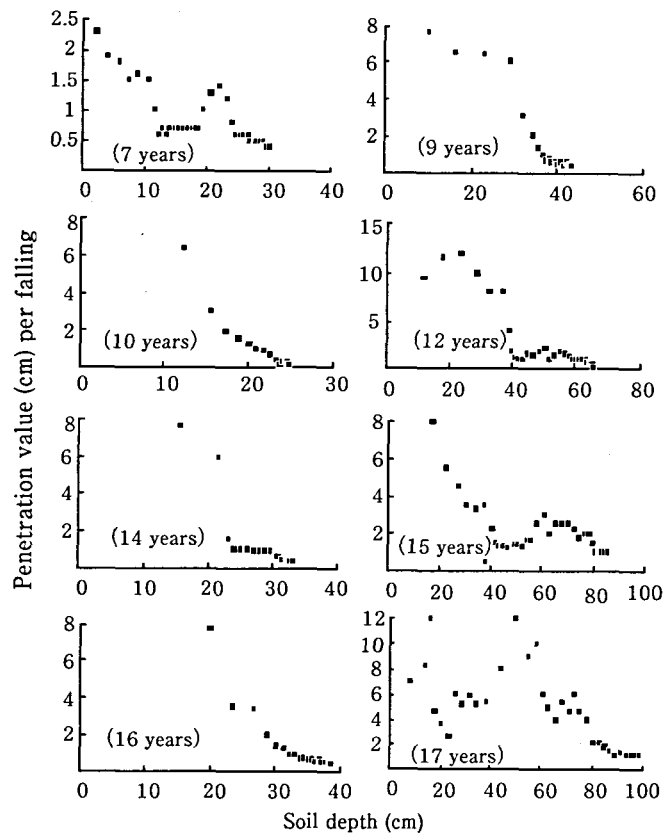


図4.19 調査地における土壌柔らかさの変化

Fig.4.19 Change in soil hardness in the study sites

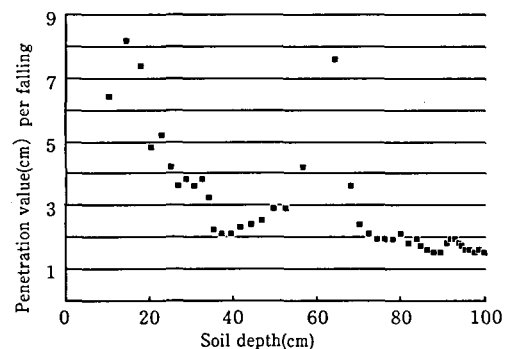


図4.20 周辺林地における土壌柔らかさの変化

Fig.4.20 Change in soil hardness in forest land

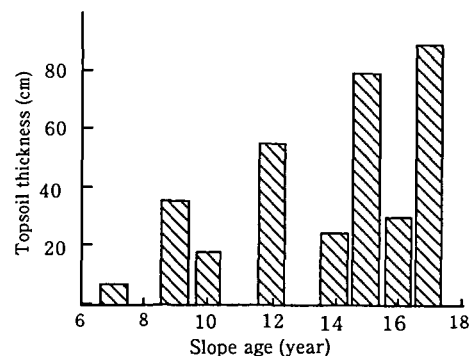


図4.21 表層土層深さの経年変化

Fig.4.21 Variation in topsoil thicknesses with slope age

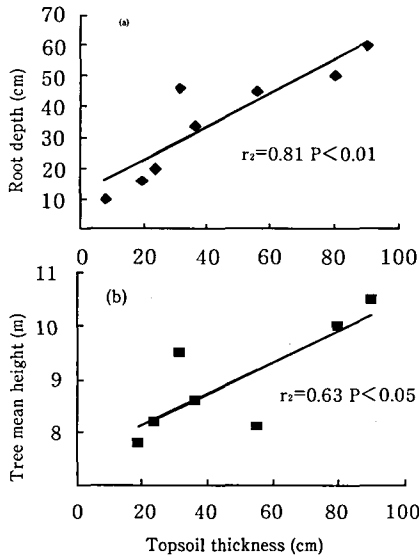


図4.22 表層土層深と草本植物根系の最大分布深および木本植物平均樹高の関係

Fig.4.22 Relationships between topsoil thickness and (a): herb root depth ; (b): tree mean height

達過程は、施工時に行った切土と盛土の状況によって決められると考える。今回は貫入試験の結果に基づいて類型した土層発達パターンを参考し、切土と盛土の状況によって、治山工事施工後の斜面における土壌再形成の初期条件が、以下の3種類に分けることができる。(1)切土型：施工時に切土がなされて、地表面には未熟な土層（B層、C層あるいは基盤）が露出することになる。その後、表層土層がある程度発達した。(2)平衡型：切土と盛土をなされていない。あるいは切土と盛土をなされても、量的には等しく、表土層の厚さの発達に影響が殆どない。土層構造は基本的に切土型と同じである。(3)盛土型：表層土層が厚く、基盤性質と堆積時期によって、土層性質が異なっている。例えば、以下の事例が挙げられる：①崩壊跡地の上に盛土がなされて、その後表層土層の発達が始まった。②ある程度発達した土層の上に堆積が発生して、堆積層から表層土層が発達した。③斜面下部にある非崩壊地の上に堆積が発生した。

切土型と平衡型を初期条件として土層形成が再開された場合は、土層発達パターンがAパターンを呈し、盛土型を初期条件とした場合は、B、Cパターンを呈していることが推定できる。

4.3.2 土壌水分特性

土壌水分特性は、他の土壌特性に影響を与えていると考えられる³³⁾。高い飽和含水率の土壌は豪雨期に多量の水分を貯留することができ、貯留された水

分は長時間にわたって中下層に浸透し、表面流の発生が抑制される。経過年数によって、地表から0～30cmおよび30～60cmの土壌の飽和含水率は線性に増加している（図4.23a）。一方、現場含水率は経過年数によって増加する傾向がうかがえるが、相関関係が5%水準で有意ではなかった（図4.23b）。現場含水率は前期降雨に強く影響され、この調査地のような湿潤気候下で山腹工事の影響が著しく現われな

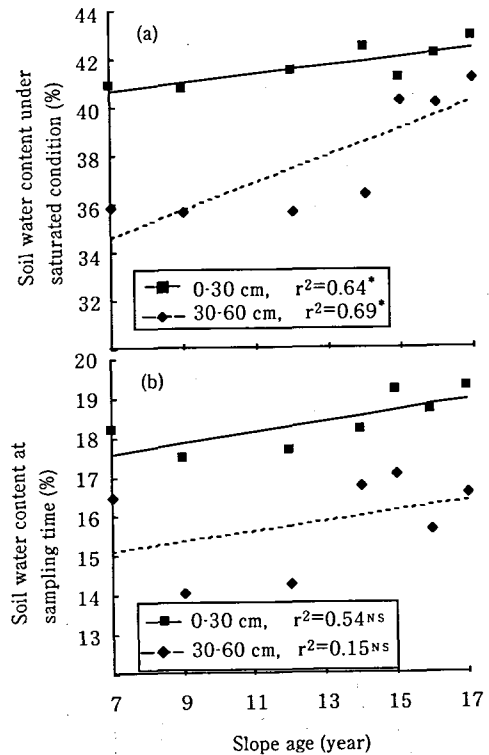


図4.23 土壌の飽和含水率および現場含有率と経過年数の関係

Fig.4.23 Relationship between soil water content and slope age. a: under saturated condition ; b: at sampling time (*: P<0.05; NS: Not significant)

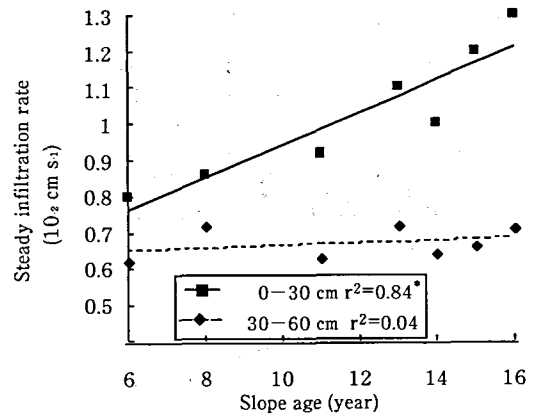


図4.24 飽和透水性と経過年数の関係

Fig.4.24 Relationship between steady infiltration rate and slope age

いといえる。

0~30cmの土層では、飽和透水率が経過年数の増加によって著しく増加しているが、30~60cmの土層では、飽和透水率が一定なレベルに維持している(図4.24)。植物の根の生育によって形成した孔隙は飽和透水係数を増加させる。今度の結果は、表層ほどその影響が強いことを示した。

0~30cmおよび30~60cmの土壌のpH-水分含有量の関係を図4.25に示している。一定な水分張力では、水分含有量が経過年数によって増加している。これは、経過年数によって土壌の構造が改善されていることを示した。異なったpH-水分特性は異なった総孔隙率および粒度組成を反映している。低い水分張力で吸着された水分(圃場容水量)の増加は、有機物含有量の増加に基因し、高い水分張力で吸着された水分(永久しおれ点)の増加は、土粒の高い表面積に基因すると考えられる。

pH-水分曲線を利用して、圃場容水量、圃場空気率および有効水含有量を求めた。0~30cmおよび30~60cmの土壌の圃場容水量と圃場空気率とも、経過年数によって増加している(図4.26a, b)。0~30cmの土壌の有効水含有量が経過年数によって緩やかに増加する傾向が認められるが、30~60cmの土

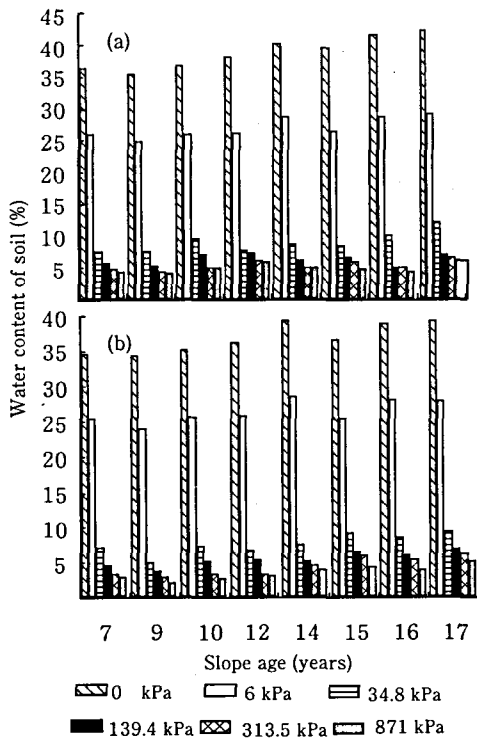


図4.25 土壌のpF値と水分含有量の関係

Fig.4.25 Soil water retention characteristics for (a): 0-30cm and (b): 30-60cm depth. The bars represent the section levels

壌の有効水含有量と経過年数との関係が5%の水準で有意ではない(図4.26c)。これは、永久しおれ点が圃場合水量と同じように増加しているからである。

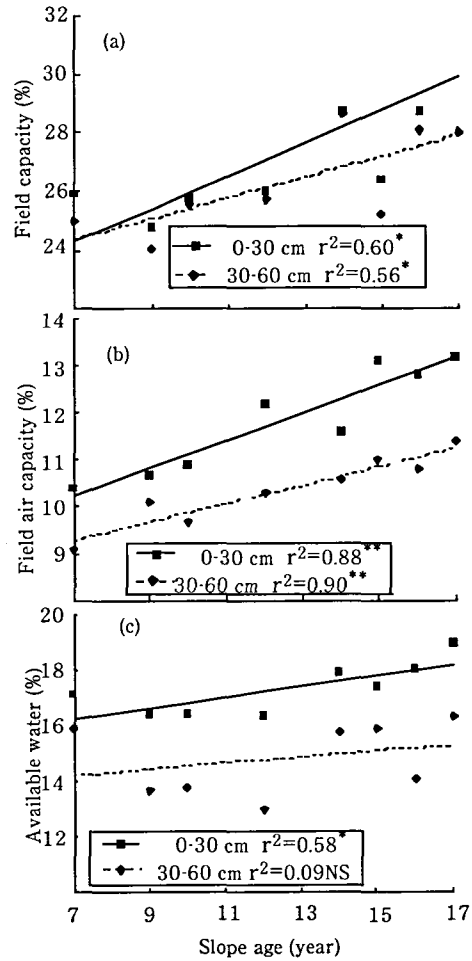


図4.26 圃場空気率、圃場容水量および有効水含有量と経過年数の関係

Fig.4.26 Linear regressions for the field air capacity, field capacity and available water in 0-30cm and 30-60cm depth as a function of slope age (*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: Not significant)

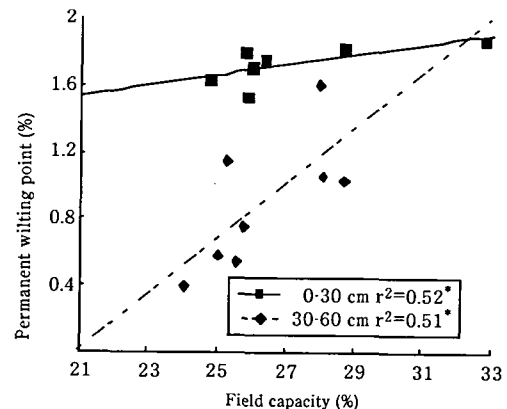


図4.27 永久しおれ点と圃場合水量との関係

Fig.4.27 Relationship between permanent wilting point and field capacity in 0-30cm and 30-60cm soil (*: $P < 0.05$)

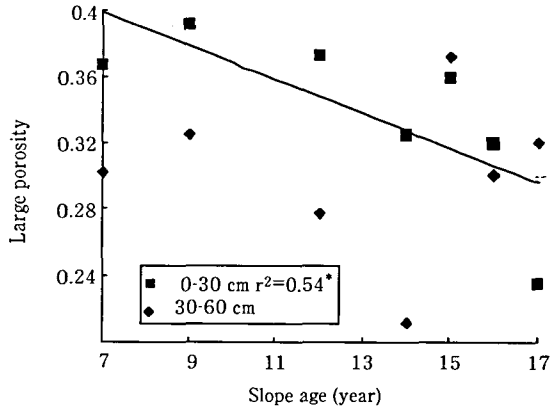


図4.28 経過年数により粗孔隙率の変化

Fig.4.28 Relationship between large porosity in topsoil and subsoil and slope age (*:P<0.05)

永久しおれ点と圃場含水量との線性相関関係を図4.27に示す。0～30cmおよび30～60cmの土層について回帰直線の傾斜はそれぞれ0.0310と0.1688であるため、0～30cmの土層の有効水含有量の増加は、30～60cmの土層のそれより大きい。

一般的には、攪乱された土壌に大きな粗孔隙率が存在している。経過年数によって粗孔隙率の変化を図4.28に示す。初期過程において、攪乱の影響で表層土壌の粗孔隙率は下層より大きい。植物の落葉および根の生育によって団粒状構造を形成し、表層土壌の粗孔隙率は漸次に減少していく。一方、30～60cmの土層において、明らかな土壌粗孔隙率と経過年数の関係は認められなかった。

4.3.3 有機物含有量

経過年数によって、全炭素および全窒素の含有量の変化を図4.29に示す。30～60cmの土壌の全炭素含有量は経過年数によって増加している ($r^2=0.62$, $P<0.05$)。一方、0～30cmの土壌の全炭素含有量は経過年数との関係は認められなかった。0～30cmの土壌の全炭素含有量について、南向きの経過年数が10年と12年であった調査地点では、より高い値を示した。これは、初期の炭素含有量の変化、時間より微気候の影響が大きいといえるだろう。

花崗岩地域における森林土壌の全炭素含有量について、熊田ほか(1976)はA層では6～11%、B層では3～6%の間に変動すると論じた²⁸⁾。経過年数が24～55年であった山腹工事施工跡地において、表層土壌の全炭素含有量はほぼ1.4～3.3%で、下層のは0.3～2.8%であった²⁹⁾。本研究では、0～30cmの土壌の最大全炭素含有量は3.92%で、30～60cmの土壌の最大全炭素含有量は1.91%であった。これを他

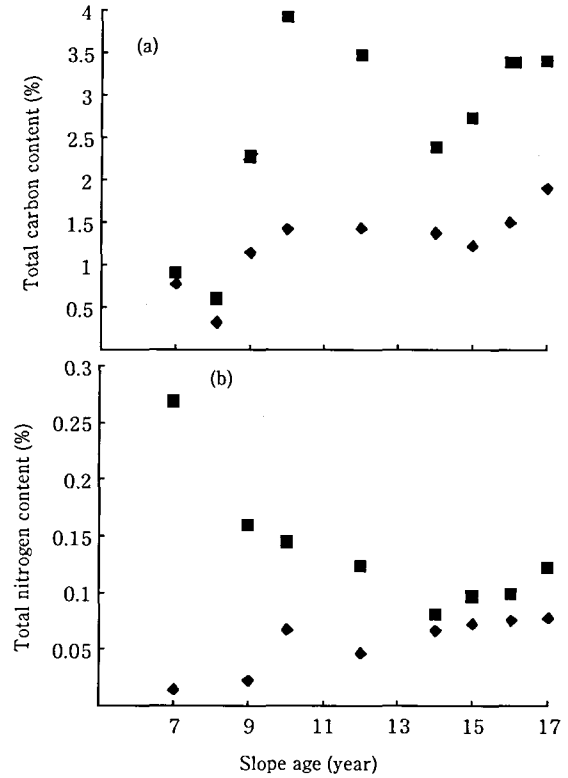


図4.29 経過年数による土壌(a)全炭素(b)全窒素の含有量の変化

Fig.4.29 Variations in (a) total carbon content and (b) total nitrogen content with slope age (■: soil 0-30cm; ◆: soil 30-60cm)

の研究結果と比べて、初期過程における炭素の蓄積速度は速かった。これは地表の安定により現われたものと考えられる。

0～30cmの土層において、全窒素含有量と経過年数との間に非線性相関が認められた ($r^2=0.76$, $P<0.05$) (図4.29b)。0～30cmの土層において、全窒素含有量は経過年数によって減少した。最初に全窒素含有量が最も高く、これは山腹工事施工時の施肥の影響であろうと考えられる。13年まで漸次に減少して、その後、再び増加する傾向が見える。これは淋融の発生したものと考えられる。そのため、30～60cmの土層において、全窒素含有量は経過年数によって著しく増加している (図4.29b)。

森林生態系における窒素の供給は、施肥、窒素固定(共生と非共生)、湿性と乾性沈澱などを含むが、その損失は淋融、流失および気化の方式で行う⁶⁾。土壌窒素含有量の減少は針葉樹林への遷移と関係があると証明された^{4,52)}。また、窒素が降雨により淋融され、しかも高い土壌窒素含有量の所から多量の窒素が淋融されることが証明された¹⁷⁾。本研究では、0～30cmの土壌窒素含有量の減少は、植物組成の変化と強く関係すると考える。山腹工事施工時の施肥

の影響で、最初に全窒素含有量が最も高かった。導入された草本植物の生長により、多量な土壌窒素が利用され、土壌窒素含有量が経過年数によって漸次に減少した。一方、導入された先駆樹種ヤマハンノキの生長によって、地表に有機物が集積され、表層土壌に窒素が貯積されるため、窒素含有量が増加する。草本植物の根系の分布深が浅いため、30~60cmの土壌窒素の利用が少なく、土壌窒素含有量が経過年数によって増加した ($r^2=0.75$, $P<0.01$)。

4.3.4 土壌pH値

経過年数によって土壌pH値の変化を図4.30に示す。0~30cmの土壌pH値は5.4~5.9、30~60cmの土壌pH値は5.4~6.2の範囲で変動しているが、経過年数との関係が認められなかった。即ち、立地条件の影響は経過年数の影響を上回っている。地点間のの差異は腐植の状況(数量と性質)によって生じたものと考えられる。土壌のC/N比率は腐植の状況を説明

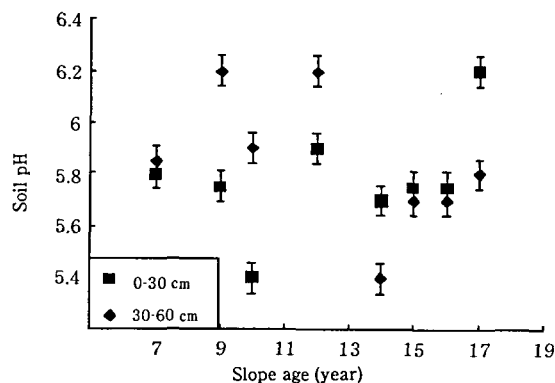


図4.30 土壌pH値の経年変化

Fig.4.30 Change in soil pH values with slope ages. The standard error bar represents the variation in soil pH (n=9 per site)

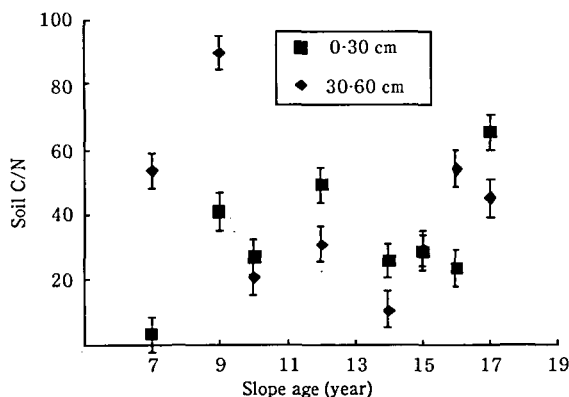


図4.31 土壌C/N比率の経年変化

Fig.4.31 Change in soil C/N ratio with slope age. The standard error bar represents the variation in soil C/N ratio (n=9 per site)

できる。本研究では、土壌のC/N比率の経年変化は土壌pH値と同じ傾向を示した(図4.31)。

4.3.5 まとめ

(1)土壌の発達過程は、施工時に人工的な切土、盛土の状況に強く影響されている。今度の調査では、貫入試験による土壌硬度の変化は複雑で、土層深との関係は明確ではなかった。表層土層厚、A層厚および根系分布深は、経過年数の増加によって増加する傾向が認められるが、表層土層厚と根系分布深は、地点によってばらつきが大きかった。表層土層は根系の密度が高く根の伸長が良好な層であると考えられるが、今度の調査で、表層土層厚と根系分布深との間に、高い相関関係が認められた。

(2)地表から0~30cmおよび30~60cmの土層において、飽和含水率と圃場含水量、0~30cmのみの土壌飽和透水係数と有効水含有量が経過年数によって増加した。30~60cmの土壌飽和透水係数と有効水含有量は、経年変化により明らかな増加傾向は認められなかった。

(3)0~30cmおよび30~60cmの土層において、速い炭素の集積がみられた。0~30cmの土層において、全窒素含有量が経過年数とともに減少している。30~60cmの土層において、全窒素含有量は0~30cm層に比較して値が小さいものの経過年数とともに増加傾向がみられた。

(4)通常の自然森林土壌は、多量な有機物と良好な状態の土壌構造を含んでいる。一旦土壌侵食が発生されると、土壌とともに有機物も急に減少する。この結果、土壌構造の悪化に伴って、森林土壌の機能を失ってしまう。積極的に機能を向上させるためには、何らの手段を講じなければならない。本研究では、山腹工事は荒廃された立地条件に対し改善作用があることを明らかにし、この改善作用のほかに、植物の根系の改善機能が重要であろうと考えられる。

4.4 山腹工事施工跡地における導入植物の発達過程

4.4.1 草本植物群落構造の発達

調査地に出現した草本植物の種数、地上部生物現存量および被度を図4.32に示す。草本植物の種数は経過年数によって増加した ($r^2=0.87$, $P<0.01$)。調査地には合計10種類の草本種が出現したが、プロットによりばらつきが多かった。経過年数が7年であったNo 1には出現した種類は最も少なく、3種であったに対して、経過年数が17年であったNo 8に

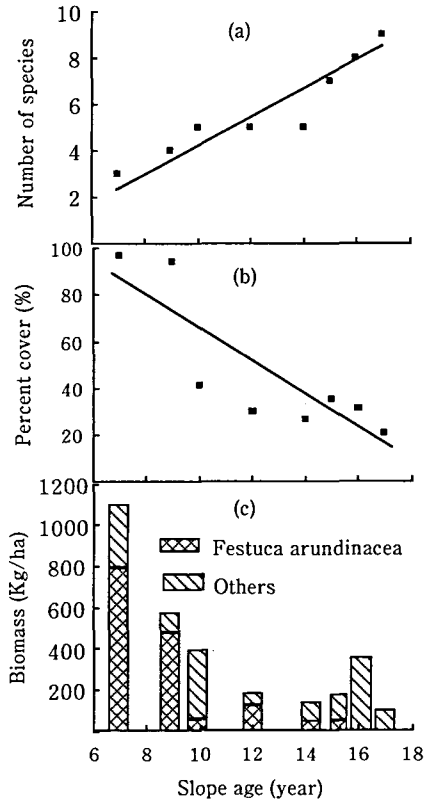


図4.32 草本植物の種数、地上部生物現存量および被度の経年変化

Fig.4.32 Changes in species number, percent cover and above-ground biomass of herbaceous plant with slope age

は出現した種類は8種であった。各プロットに共通して出現したケンタキーなど、導入された草本種を除いて、出現頻度の最も高い種はヨモギであった。経過年数が17年のプロットに9種の出現がみられた。経過年数の増加に伴い草本植物の被度が減少した ($r^2=0.71, P<0.01$)。植物現存量は経過年数が7年のNo.1区に最も大きく、 1100Kg/ha^{-1} であった。樹冠層の形成によって、木本植物との競争が激しくなりつつあり、また、肥料ぎれの影響も考えられるが、その後、植物現存量は経過年数によって減少してきた。最少植物現存量は経過年数が17年のNo.8に出現した (100Kg/ha^{-1})。初期には、地表植生は主に導入された草本植物に優勢されていたが、遷移による樹冠層の形成および低木種類の侵入によって、10年後にその優勢度が低くなった (図4.32c)。

4.4.2 木本植物群落構造の発達

経過年数による樹高2.0m以上の木本植物の密度、胸高直径及び樹高の変化を図4.33に示す。樹高2.0m以上の木本植物の個体数は経過年数12年のプロットに44株/100m²で、最も多く、それから経過年数に伴い減少し、経過年数17年のプロットは23株/100m²

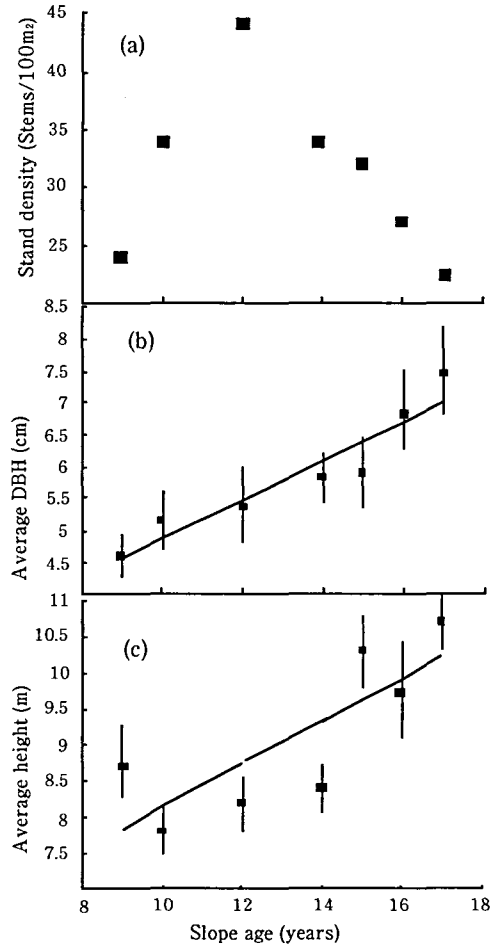


図4.33 樹高2.0m以上の木本植物の(a)密度、(b)平均胸高直径及び(c)平均樹高の経年変化

Fig.4.33 Changes in (a) stand density, (b) average DBH and (c) average height of all trees more than 2.0m in height with slope age. Vertical lines represent standard deviations

であった (図4.33a)。しかし、木本植物の人工植栽を行なわなかった経過年数7年のプロットには、樹高2.0m以上の木本植物の出現は認められなかった。平均胸高直径および平均樹高は経過年数と共に増加しており、経過年数との間に正の相関が認められた (それぞれ $r^2=0.89, P<0.01$; $r^2=0.62, P<0.05$) (図4.33b, c)。

各プロットに出現した樹高2.0m以上の木本植物の種類数は少ない。ハンノキ類とヤナギ類が出現したが、ハンノキ類は導入されたヤマハンノキのみ、ヤナギ類はカワヤナギ、イヌコリヤナギ、オノエヤナギが出現した。ヤマハンノキとヤナギ類の優占度の変化を図4.34に示す。各プロットに、ヤマハンノキは優勢種となっている。経過年数14年のプロットに優占度がピーク値になった (0.68)。その後は低くなり、経過年数17年のプロットに0.42まで減少した。ヤナギ類は、経過年数9年のプロットを除いて、

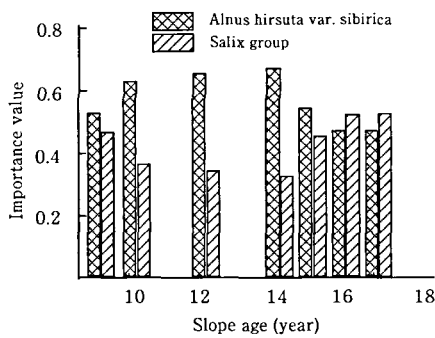


図4.34 ヤマハンノキとヤナギ類の優占度の経年変化

Fig.4.34 Change in importance values of tree species with slope age

優占度が経過年数と共に増加している。

六甲山におけるヤマハンノキの優勢だった所に、20年後ヤシャブシが侵入し上層木になったことが報じられている⁵⁰⁾。本研究では、経過年数16年時点からヤナギ類の優占度がヤマハンノキを超えたが、これは侵入数の多量発生のためであった。ヤナギ類は低木性であり、被圧される状況にある。ここで、上層木になる傾向をもつ樹種はまだ見えない。

ここで、樹高による階層は3層に分けることができる。上層：樹高が8 m以上の個体に構成される；下層：樹高が2 m以上8 m以下の個体に構成される；幼樹層：樹高が2 m以下の個体に構成される。

経過年数が9年以上の調査プロットについて、樹高階層分布図を図4.35に示す。上層において導入されたヤマハンノキは優勢となり、株数の変動は小さい。ヤナギ類は下層に優勢となっており、株数は経過年数により減少する傾向がみられる。幼樹層において、種類及び個体数とも少なく、ヤナギ類以外の種類の木本植物の侵入は認められなかった。出現した個体数が経過年数に伴って増加し、12年を経過した時点でピーク値が現われた。その後、出現した個体数が減少し、枯死木が増加している(図4.36)。これは樹冠層の形成によって林床がうっ閉され、先駆樹種の侵入が抑制され、しかも耐陰性樹種が侵入してこなかったためと考えられる。

草原には、木本植物の侵入が抑制され、そこに成立できる種類が選択されることがよく知られている¹⁾。種子の発芽あるいは稚樹の定着が抑制される原因は、厚いリター層^{3,7)}、高い密度の草本植物の被覆^{11,32)}があげられる。草本植物の人工導入が行なわ

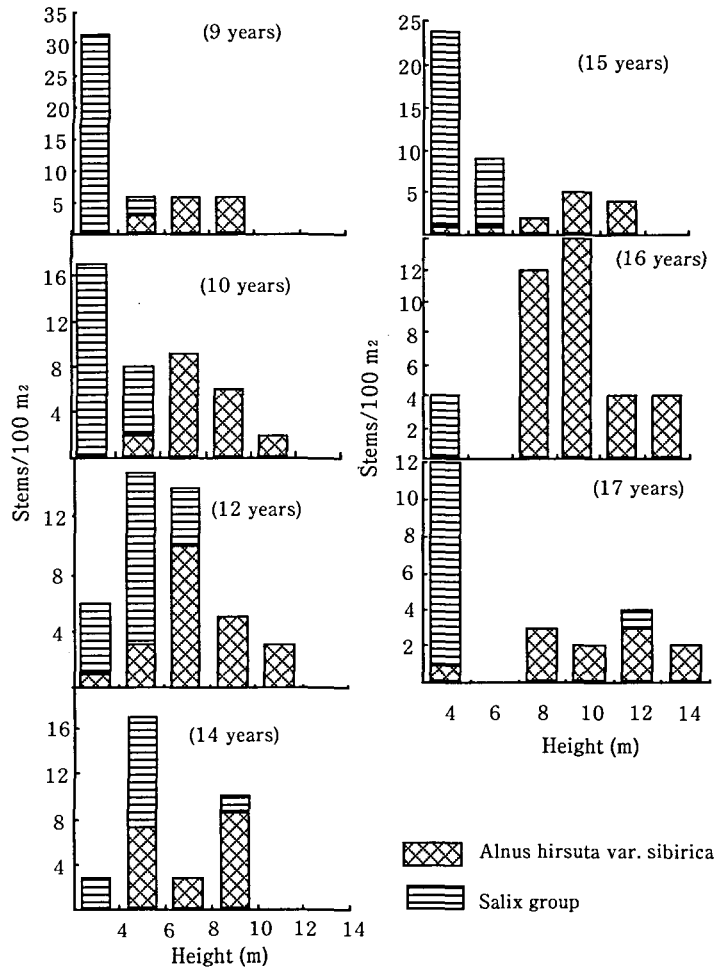


図4.35 樹高2.0m以上の樹高階層分布図

Fig.4.35 Height-class distributions of trees more than 2.0m in height in study sites (100 m²)

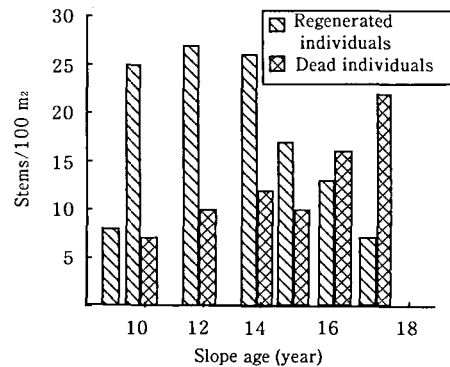


図4.36 幼樹層における木本植物の出現した個体数および枯死木の数の経年変化

Fig.4.36 Number of regenerated individuals and dead individuals in the juvenile layer in the study sites

れたところでの高い密度の草本植物の被覆、草本植物の人工導入が行なわれなかったところでの表層土壌の侵食の発生は、本調査地点での木本植物の侵入が抑制される原因だろうと考えられる。

4.4.3 まとめ

(1)経過年数に伴って侵入した草本植物の種類数は増加している。樹冠層の形成によって、木本植物との競争が激しくなりつつあり、また、肥料ぎれの影響も考えられるが、植被度および植物現存量が減少している。

(2)上層の優勢樹種は、植栽された木本植物ヤマハノキに占められているのに対して、下層および更新層は侵入したヤナギ類に占められている。

(3)侵入木本植物の種類数は極めて少なく、ヤナギ類以外の種類の木本植物の侵入が認められなかった。草本植物の人工導入が行なわれたところでの高い密度の草本植物の被覆及び草本植物の人工導入が行なわれなかったところでの表層土壌の侵食の発生は、木本植物の侵入が抑制される原因だろうと考えられる。

4.5 植生導入に関する総合考察

荒廃地に侵入した植物の観察、とくに、その成立過程の観察は、ここでの植生復元を考えるにあたっての基本的な作業となる。本章第1, 2節では、地震荒廃地における植物の自然侵入特性および木本群落の成立過程を検討した。第3, 4節では、山腹工事施工跡地における土壌と植物の発達特性について検討した。本節では、以上の結果を通して、荒廃地における植物導入方法について考察する。

4.5.1 荒廃地における植物の自然侵入について

大きな攪乱の生じた後、長い期間にわたって大きな攪乱がない場合、植生群落が発達する。地震発生後12年の植生群落の発達段階は第2節に示したように、最初、厳しい環境条件下で、様々な種が生存を主張して競争する。つづいて先駆樹種の侵入と定着によって、階層構造はないが、先駆樹種が優占する森林群落が形成される。先駆樹種の林冠が強度に閉鎖され、下層に先駆樹種以外の陽性樹種の侵入が優占となる。この段階は先駆樹種、他の陽性樹種、耐陰性樹種、枯死木、倒木を含み、階層構造が多様であり生物多様性に富んでいる。

人為的な攪乱（森林伐採）をした後の植生更新に比べて、自然攪乱（崩壊）をした後の植生の発達はずいぶん遅い。その原因は荒廃した土壌、更新源の不足、種間の激しい競争等が挙げられる。荒廃された生態系のなか、厳しい立地条件、草本植物との競争などの影響で、森林群落を回復させ、防災能力および生産能力を向上させることは容易ではない。地

震荒廃地には、地表が岩塊に覆われる地点が多い。そこでは、裸地から(Ⅳ)の段階への移行は長い期間がかかりそうである。このような地点で森林群落の形成を図るためには、まず表土のない生育基盤を改善し、その上に先駆樹種を積極的に導入して、厳しい環境の緩和を図り、遷移後期樹種の生育に好ましい環境条件を作り出すことが重要である。

4.5.2 荒廃地における植物の導入について

草本植物は短期間に裸地面を被覆でき、また施工が簡単で、施工経費が安いことから、これまで多く導入された。しかし、草本植物の単純な群落は、土壌保全力が小さく、導入植物としては望ましくないことが指摘された⁵⁴⁾。本研究では、草本植物の繁茂で、木本植物の侵入が抑制され、結局、生態系の回復が遅くなっていることが明らかになった。

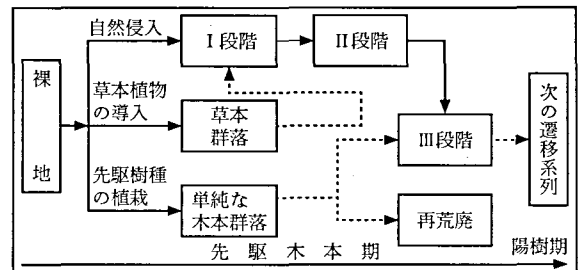


図4.37 荒廃地における木本群落の初期遷移過程及び予測

Fig.4.37 The initial process and forecast of the woody community succession in degraded land

植生の復元、特に、森林群落の成立を目標とする場合、積極的な樹木導入が一つの有効な手法である。そのなかで最も注目される方法は、先駆植物や成長の速い種類の植物を用いて、厳しい立地条件の改善を図る手法である^{2,10,20,30)}。最近では、植林が自然林の形成過程に森林植生の保護機能を持っていることが注目された^{20,46)}。しかしながら、この植林が厳しい立地条件に適応するまでは、管理手法が必要になる。また、導入された植物は、防災上では欠点があることが指摘された⁵³⁾。本研究では、先駆樹種の植栽によって植物を導入する場合、林冠が植栽木で閉鎖され、単純で林床植生の乏しい群落が形成されてしまうことが明らかになった。

4.5.3 植生導入の在り方について

これまで、土木技術のスピード化、大規模化に対応し、“急速緑化工法”を発展させてきた。しかし、荒廃裸地から目標とする植生型までの誘導は、その土地の条件や植生の導入方法で異なるべきである²⁷⁾。

早期に森林復元を目標とするなら、より多様な工法の確立が必要となる。人為的に植生復元をしようとする場合には、復元の手法や使用植物の種類、その取り扱いを決め、荒廃地の特性に合った樹種の選択や導入方法の確立が必要である。

植生の導入については、裸地に植物群落を作り、さらにそれをより物質循環系の優れた群落へと発達させることを願うのである。今までの植物の導入方法は、気象災害への弱さ、水土保持的な問題点、および生物多様性の乏しさなどの欠点があり、改善し

なければならない。これらの問題から考えると、草本植物を導入する時に、導入密度、配置方式などを改善し、木本植物の侵入に対する抑制作用を減少する必要がある。木本植物の導入について、その多くは将来多様な機能の高い森林群落に移行させていくべきである。このため、植物の導入方法およびその後の保育について検討する必要がある。先に述べた欠点を改善し、早く様々な大きさの個体を持ち、様々な機能の高い複層林を形成させることが望ましい。

第五章 結 論

本研究は、荒廃地における植物の回復過程を明らかにすることを目的し、地震荒廃地および山腹工事施工跡地における土壌および植物の初期発達過程を究明し、その結果に基づいて、荒廃地における植物の導入方法の改善について検討するものである。

5.1 地震荒廃地における植物の自然侵入と木本群落の成立過程

地震荒廃地の遷移初期過程における木本植物の成立は、極めて不安定なものであるといえる。ヤナギ属、カバノキ属およびハンノキ属のような先駆樹種は出現箇所が多く、個体数は経過年数に従って増加し、定着している。一方、ヒノキ属は、厳しい環境（乾燥、高温等の極端な変動等）への適応性が低いため、出現箇所も個体数も少なく、出現しても枯損が多く、ほとんど成立しない。また、木本植物の侵入、定着ができるか否かは、種の遺伝的な性質（明るさなど林床の環境に対する適応性）によって決まるばかりではなく、周辺環境条件によって大きく左右されるといえる。地震発生後12年現在、木本群落は遷移系列上では、先駆木本期であると考えられるが、木本群落は三つの発達段階を経て発達してきたことが明らかになった。

(I)階層構造未発達段階：木本植物の侵入・消失の繰り返しが激しく、樹高生長が遅い。

(II)階層構造をもつ段階：堆積地点および地表が浅く削りとられた立地条件下では、先駆樹種の樹高生長が著しく速く、階層構造が生じる。上層ではやせ地に耐え育つ先駆樹種のヤマハンノキおよびミヤマヤシバシに占められ、下層では、耐陰樹種の侵入が多くなったが、ヤナギ類が優勢樹種である。樹冠うっ閉度の増加によって、耐陰性樹種の下層への侵入数が増加し、先駆樹種の侵入が減少する。

(III)先駆樹種の侵入が抑制される段階：樹冠うっ閉度が60%付近で先駆樹種の下層への侵入が抑制され、先駆樹種以外の陽樹樹種（カツラ、ミツデカエデ、ヒノキなど）が優勢となる。

地震荒廃地における森林群落がどの段階まで成立するかは、土地の状態によって決まっているようにみえる。階層構造未発達段階まで発達してきた地点は、岩塊におおわれているところがほとんどで、地表が乾燥しやすいと考えられる。その結果、木本植物の生存率が低くかつ樹高生長が遅い。先駆樹種はこの厳しい環境条件を改善し、極端な環境条件を緩和する能力を有しているから、森林群落の形成を図るためには、先駆樹種を積極的に導入して、厳しい環境の緩和を図り、遷移後期樹種の生育に好ましい環境条件を作り出すことが重要であると考えられる。

5.2 山腹工事施工跡地における土壌と植物の発達特性

(1)土壌の発達過程は、施工時に人工的な切土、盛土の状況に強く影響されている。今回の調査では、貫入試験による土壌硬度的変化は複雑で、土層深との関係は明確ではなかった。表層土層厚、A層厚および根系分布深は、経過年数の増加によって増加する傾向が認められるが、表層土層厚と根系分布深は、地点によってばらつきが大きかった。表層土層は根系の密度が高く根の伸長が良好な層であると考えられ、表層土層厚と根系分布深とは、高い相関関係が認められた。

(2)地表から0—30cmおよび30—60cmの土層において、飽和含水率と圃場容水量、0—30cmのみの土壌飽和透水係数と有効水含有量が経過年数に伴って増加した。30—60cmの土壌飽和透水係数と有効水含有量の経年変化に伴う増加は著しくなかった。

(3) 0—30cmおよび30—60cmの土層において、速い炭素の集積がみられた。0—30cmの土層において、全窒素含有量が経過年数とともに減少している。30—60cmの土層において、全窒素含有量は0—30cm層に比較して値が小さいものの経過年数とともに増加する傾向がみられた。

(4) 経過年数に伴って侵入した草本植物の種類数は増加している。樹冠層の形成によって、木本植物との競争が激しくなりつつあり、また、肥料ぎれの影響も考えられるが、植被度および植物現存量が減少している。

(5) 上層の優勢樹種は、植栽された木本植物ヤマハンノキに占められており、下層および更新層は侵入したヤナギ類に占められている。

(6) 侵入木本植物の種類数は極めて少なく、ヤナギ類以外の種類の木本植物の侵入が認められなかった。草本植物の人工導入が行なわれたところでの高い密度の草本植物の被覆及び草本植物の人工導入が行なわれなかったところでの表層土壌の侵食の発生は、木本植物の侵入が抑制される原因になると考えられる。

本研究では、山腹工事は荒廃された立地条件を改善する作用があることを明らかにし、この改善作用のなかで、植物の根系の機能が重要であろうと考え

られる。しかし今までの植物の導入方法は、気象災害への弱さ、水土保全的な問題点、および生物多様性の乏しさなどの欠点があり、改善しなければならない。例えば、1) 草本植物を導入する時に、導入密度、配置方式などを改善し、木本植物の侵入への抑制作用を減少する。2) 木本植物の導入について、その導入方法およびその後の保育について検討する。これによって、様々な機能の高い複層林を形成させることが望ましい。

謝 辞

本研究を行うにあたっては、信州大学農学部教授北澤秋司先生、同農学部教授山寺喜成先生、岐阜大学農学部助教授木村正信助先生にご指導を頂きました。本稿の作成について、静岡大学農学部教授土屋智先生、信州大学農学部教授新田隆三先生にご助言を頂きました。植物の鑑定について、信州大学農学部助教授馬場多久男先生にご指導を頂きました。土壌分析に関して、同農学部助教授川崎圭造先生にご助言とご指導を頂きました。現地調査にご協力いただいた同農学部治山学研究室の学生、貴重な資料をいただいた下伊那地方事務所林務課の皆様、長野営林局治山課、長野営林局王滝営林署の皆様にご感謝の意を表します。

本論文に使用した植物の学名

宮脇・奥田³⁶⁾により、本論文に使用した植物の学名は以下の通りである。

- イヌコリヤナギ： *Salix integra* Thunb.
- オノエヤナギ： *Salix sachalinensis* Fr. Schm.
- カワヤナギ： *Salix gilgiana* Seemen
- バッコヤナギ： *Salix bakko* Kimura
- ヤマハンノキ： *Alnus hirsuta* Turcz. var. *sibirica* C. K. Schn.
- ヤシャブシ： *Alnus firma* Sieb. et Zucc.
- ミヤマヤシャブシ： *Alnus firma* Sieb. et Zucc. var. *hirtella* Fr. etav.
- ヒノキ： *Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.
- サワラ： *Chamaecyparis pisifera* Sieb. et Zucc.
- ダケカンバ： *Betula ermanii* cham.
- カツラ： *Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc.
- ミツデカエデ： *Acer cissifolium* K. Koch
- カラマツ： *Larix kaempferi* Carr.
- アカマツ： *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.
- ノリウツギ： *Hydrangea paniculata* Siebold
- クマイチゴ： *Rubus crataegifolius* Bunge

- アレチマツヨイグサ： *Oenothera biennis* Linn
- ヒメジョウオン： *Erigeron annuus* Pers.

イタドリ：Polygonum cuspidatum Sieb. et Zucc.
 ケンタッキー31フェスク：Festuca arundinacea Schreb K31F
 マツヨイグサ：Oenothera stricta Ledeb.
 オオバコ：Plantago asiatica Linn.
 タニソバ：Polygonum nepalense Meisn.
 テキリスゲ：Carex kiotensis Fr. et Sav.
 ヤマハハコ：Anaphalis margaritacea Benth. et Hook. fil. var. angustior Nakai
 ヨモギ：Artemisia princeps Pampan

引用文献

- 1) Aide, T.M., Zimmerman, J.K., Herrera, L., Rosario, M. and Serrano, M. (1995): Forest recovery in abandoned tropical pastures in Puerto Rico, For. Ecol. Manage., 77: 77~86
- 2) Anderson, M. (1987): The effects of forest plantations on some lowsoils. I.A second sampling of nutrient stock, Forestry, 60: 69~86
- 3) Brais, S., Camire, C., Bergeron, Y., and Pare, D. (1995): Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of north western Quebec, For. Ecol. Manage., 76: 181~189
- 4) Bartlett, R.M., Reader, R.J. & Larson D.W. (1991): Multiple controls of cliffedge distribution patterns of *Tbujia occidentalis* and *Acer saccharum* at the stage of seedling recruitment, Journal of Ecology, 79: 183~197
- 5) Bormann, B.T., Spaltenstein, H., McClellan, M.H., Ugolini, F.C., Cromack, K. & Nay, S.M. (1995): Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests, Journal of Ecology, 83: 747~757
- 6) Carlyle, J.C. (1986): Nitrogen cycling in forested ecosystems, For. Abstr., 47: 308~336
- 7) Collins, S.L. (1990): Habitat relationship and survivorship of tree seedlings in hemlock-hardwood forest, Canadian Journal of Botany, 68: 790~797
- 8) 土壤物理性測定法委員会編集 (1972): 土壤物理性測定法, 503pp, 養賢堂, 東京
- 9) 土壤養分測定法委員会編 (1970): 土壤養分分析法, 430pp, 養賢堂, 東京
- 10) Finegan B. (1984): Forest succession, Nature, 312: 109~114
- 11) Guariaguata, M.R. (1990): Landslide disturbance and forest regeneration in the upper Luquillo Mountains of Puerto Rico, Journal of Ecology, 78: 814~832
- 12) 長谷川秀三・川久邦雄・今川映三郎 (1981): 長谷川式土壤貫入計による緑化地の土壤調査—「柔らか度」の測定による土壤診断—, 日本造園学会春季大会研究発表要旨, 43~44
- 13) Hillel, D. (1982): Introduction to Soil Physics, Academic Press, New York, 364pp
- 14) 平松晋也・右川芳治・原 義文 (1993): 森林土壤の鉛直分布特性を考慮した表層崩壊発生モデルの適応性に関する研究, 新砂防, 46(3): 3~10
- 15) Hix, D. M. & Lorimer, C. G. (1990): Growth-competition relationships in young hardwood stands on two contrasting sites in southwestern Wisconsin, Forest Science, 36: 1032~1049
- 16) 堀内照夫 (1985): 長野県西部地震による農林災害, 自然災害特別研究突発災害研究成果 1984年長野県西部地震の地震および災害の総合調査 (研究代表者 飯田波事), 131~133
- 17) 生田和義・藤山英保・長井武雄 (1995): 森林小流域からの降雨時窒素流出の解析, 日本土壤肥料学雑誌, 66: 396~403
- 18) Ishizuka, M. (1984): Spatial pattern of trees and their crowns in natural mixed forests, Jpn. J. Ecol., 34: 421~430
- 19) 市河三英・小見山章 (1988): 御岳山亜高山帯常緑針葉樹林における稚樹個体群密度の年次変動, 日林誌, 70(8): 337~343
- 20) Jordan, C.F. and Farnworth, E.G. (1982): Natural vs. plantation forest: a case study of land reclamation strategies for the humid tropics, Environ. Manage., 6: 485~492
- 21) 北原 曜・真島征夫・清水 晃 (1988): 林道切取法面における木本侵入の初期過程 (II) 法面造成後2~4年目の結果, 日林誌70(6): 273~277
- 22) 北澤秋司 (1988): 長野県西部地震災害の荒廃地のその後 (I) 植生調査, 99回日林論, 593~594
- 23) 北澤秋司 (1989): 牧尾ダムの流域の状況ならびに流入土砂に関する基礎調査報告書, 105pp

- 24) 北澤秋司 (1991): 長野県西部地震災害の荒地のその後 (II) 今後の対策, 102回日林論, 569~572
- 25) 北澤秋司 (1993): 野底川流域の保安林整備—自然的特性と森林の実態—, 42pp
- 26) 北澤秋司, 宮崎敏孝, 堀内照夫 (1985): 長野県西部地震における御岳崩壊の災害地質学的問題点について, 新砂防, 38(3): 12~19
- 27) 小橋澄治・村井 宏・亀山 章 (1992): 環境緑化学, 188pp, 朝倉書店, 東京
- 28) 熊田恭一・大角泰夫・太田誠一 (1976): 名古屋大学演習林および尾鷲実験林の土壌について, 名古屋大学演習林報, 6: 227~262
- 29) Kumlung, A and Takeda, Y. (1991): Changes of soil properties in relation to lapsed years of hillside works on a Granite area., J. Jpn. For. Soc., 73: 327~338
- 30) 倉田益二郎 (1963): 緑化工概論, 295pp, 養賢堂, 東京
- 31) 九津見生哲・中村俊六・久保田稔 (1995): 昭和36年6月出水と58年9月出水時における天竜川上流の土砂氾濫, 自然災害科学, 13(3): 235~248
- 32) Maguire, D.A. & Forman R.T.T. (1983): Herb cover effects on tree seedling patterns in a mature hemlock-hardwood forest, Ecology, 64: 1367~1380
- 33) Mapa, R.B. (1995): Effect of reforestation using *Tectona grandis* on infiltration and soil waterretention, For. Ecol. Manage., 77: 119~125
- 34) 真下育久 (1961): 土壌の理学的性—吸水板による簡単なpF値の測定とこれによる土壌水および孔隙の区分—, 森林立地, 3(1): 32~34
- 35) 宮脇 昭: 長野県の潜在自然植生図 (第一集) (1977), 134pp, 長野県
- 36) 宮脇 昭・奥田重俊 (1978): 日本植生便覧, 850pp, 至文堂, 東京
- 37) 森貞和仁・大角泰夫 (1992): 1984年御岳泥流堆積地における土壌生成, 日林誌, 74(2): 83~86
- 38) 中島 武・伏見知道 (1969): 瀬戸内はげ山復旧後の土壌 (I) 化学的性質の変化, 日林誌, 51(7): 175~182
- 39) 中静 透・谷本文夫・鈴木和次郎 (1986): 御岳山泥流上の植生回復, 35回生態講要, 128
- 40) Neave, I.A., Davey, S.M., Russell-Smith, J.J. and Florence, R.G. (1995): The relationship between vegetation patterns and environment on the south coast of New South Wales, For. Ecol. Manage., 72: 71~80
- 41) 新島俊哉・相場芳憲・生原喜久雄 (1986): 直径階別本数分布曲線のあてはめによる天然性広葉樹林の林分構造の推移, 日林誌, 68: 361~367
- 42) 沖村 孝・田中 茂 (1980): 一試験地における風化花崗岩斜面の土層構造と崩壊深さに関する研究, 新砂防, 33(1): 7~16
- 43) 梶原幹弘 (1985): 陽樹冠表面積と幹表面積による幹材積生産量の推定, 日林誌, 67: 501~505
- 44) 逢坂興宏・田村 毅・窪田順平・塚本良則 (1992): 花崗岩斜面における土層構造の発達過程に関する研究, 新砂防, 45(3): 3~12
- 45) Palik, B.J., & Pregitzer, K.S. (1993): The vertical development of early successional forests in northern Michigan, USA. Journal of Ecology, 81: 271~285
- 46) Parrotta, J.A. (1992): The role of plantation forests in rehabilitating degraded tropical ecosystems, Agric. Ecosys. Environ., 41: 115~133
- 47) 齋藤正美・新谷 融・中村太士 (1995): 北海道南西沖地震にともなう奥尻島の斜面崩壊の特徴と土砂滞留, 新砂防47(6): 28~33
- 48) 酒井潤一 (1985): 昭和59年長野県西部地震による斜面崩壊, 自然災害特別研究突発災害研究成果 1984年長野県西部地震の地震および災害の総合調査 (研究代表者 飯田波事), 165~178
- 49) 佐々木克芳 (1996): 昭和59年長野県西部地震災害—よみかえる御岳—, 49(5): 57~59
- 50) 戸松 修 (1993): 第30回森林保全懇話会シンポジウム—治山施工地の保育管理—, 日林誌, 75(3): 252~257
- 51) 堤 利夫 (1963): 森林の成立および皆伐が土壌の2, 3の性質に及ぼす影響について (I), 京大演習林, 34: 53~54
- 52) Van Cleve, K., Oliver, L.K., Schlentner, R., Viereck, L.A., and Dyrness, C.T. (1983): Productivity and nutrient cycling in taiga forest ecosystems, Can. J. For. Res., 13: 747~766
- 53) 山寺喜成 (1986): 播種工による早期樹林化方式の提案, 緑化工技術, 12(3): 25~35
- 54) 山寺喜成 (1989): 急勾配斜面における緑化工技術の改善に関する実験的研究, 169pp, (株)全国特定法面保護協会, 東京
- 55) 山寺喜成・安保 昭・吉田 寛 (1993): 自然環境を再生する緑の設計, 169pp, (財)農業土木事業協会, 東京

- 56) Yamaguchi, I. (1987): The functions of the forest for soil and water conservation and mountain land management in Japan, In: Yamaguchi, I., The disaster and the mountain land management, pp182-200, Chikyusha Press, Tokyo
- 57) 山口伊佐夫・川辺 洋 (1982): 地震による山地災害の特性, 新砂防 35(2): 3~15
- 58) 吉永秀一郎・大貫靖浩 (1995) 簡易貫入試験による土層の物理性の推定, 新砂防, 48(3): 22~28

要 旨

自然災害による各種の攪乱は森林に広く影響している。これによって、植生、特に高い森林植生がなくなり、森林立地が荒廃される。その荒廃された生態系のなか、厳しい立地条件、草本植物との競争などの影響で、森林群落を回復させ、防災および生産能力を向上させることは容易ではない。荒廃跡地も一つの生態系として受け止め、土壌の発達、植生の侵入、安定、遷移過程等はその生態系の自然的条件の中で、治山事業の内容を考えなければならない。森林を形成しようと初期の植生を導入する場合は、その荒廃地の自然的特性を尊重し、植生の遷移過程を前もって把握し、廃地地の特性に合った樹種の選択や導入方法の確立が必要である。本研究は、荒廃地における植物の回復過程を明らかにするため、地震荒廃地および山腹工事施工跡地を対象にし、土壌と植物の初期発達特性を検討した。

1984年9月14日8時48分頃、長野県木曾郡王滝村御岳山南東方地域を震源としてマダチュード6.8の強い地震により発生した荒廃地を対象地とし、植物の自然回復過程を検討した。地震荒廃地における草本植物、木本植物の侵入種類数は、両者とも経過年数に伴って増加し、その侵入は、周辺林地までの距離との間に、明らかな負の相関が認められた。草本植物、木本植物の侵入個体数は経過年数に従って増加したが、木本植物の侵入個体数には、年度による差が大きく、また、当年生稚樹の枯損が多くみられた。ヤナギ属、カバノキ属のような先駆樹種は出現箇所が多く、経過年数に伴って個体数は増加したが、先駆樹種以外のヒノキ、サワラなどは、出現箇所も個体数も少なく、また、出現しても、何らかの原因で枯れてしまい、ほとんど成立しないことを認めた。地震荒廃地における立地条件は複雑で、森林の成立の速さもかなり違う。地震発生後12年の荒廃地における木本植物の発達特性を検討した結果、地震発生後12年を経過した現在、木本群落が三つの発達段階を経て発達したことが明らかであった。(i)階層構造未発達段階：木本植物の侵入・消失の繰り返しが多く、樹高生長が著しい。この段階まで発達してきた地点は、岩塊におおわれているところがほとんどで、地表が乾燥しやすいと考えられる。(ii)階層構造をもつ段階：堆積地点および地表が浅く削りとられた地点では、先駆樹種の樹高生長が著しく速く、階層構造が生じる。上層ではやせ地や乾燥地に耐え育つ先駆樹種のヤマハンノキおよびミヤマシャブシに占められ、下層では、耐陰樹種の侵入が多くなったが、ヤナギ類が優勢樹種であった。(iii)先駆樹種の侵入が抑制される段階：樹冠うっ閉度が60%付近で先駆樹種の下層への侵入が抑制され、先駆樹種以外の樹種(カッラ、ミツデカエデ、ヒノキなど)の侵入が優勢となったことがみられる。地震荒廃地は、他の誘因により発生された荒廃地に比較して、攪乱された程度がひどく、面積が広いと考えられる。このため、環境条件の厳しい地震荒廃地の復旧にあたっては、先駆樹種をまず導入し、森林の形成に好ましい生育環境条件を作り出すことが重要である。

長野県飯田市の野底川流域の割沢支流を対象地とし、山腹工事施工跡地における土壌と植物の発達過程を検討した。土壌の発達過程は、施工時に人工的な切土、盛土の状況に強く影響されている。今度の調査では、貫入試験による土壌硬度の変化は複雑で、土層深との関係は明確ではなかった。表層土層厚、A層厚および根系分布深は、経過年数の増加によって増加する傾向が認められるが、表層土層厚と根系分布深は、地点によってばらつきが大きかった。表層土層は根系の密度が高く根の伸長が良好な層であると考えられるが、今回の調査で、表層土層厚と根系分布深とは、高い相関関係が認められた。地表から0-30cmおよび30-60cmの土層において、飽和含水率と圃場含水量、0-30cmのみの土壌飽和透水係数と有効水含有量が経過年数に伴って増加した。30-60cmの土壌飽和透水係数と有効水含有量は経過年数との関係は明らかではなかった。0-30cmおよび30-60cmの土層において、速い炭素の集積がみられた。0-30cmの土層において、全窒素含有量は経過年数とともに減少している。30-60cmの土層において、全窒素含有量は0-30cmの土層に比較して値が小さいものの経過年数とともに増加する傾向がみられた。土壌のC/N比率は治山工事の経過年数との間に明らかな関係がみられず、調査地の間にはばらつきが大きかった。これは土壌のC/N比率は斜面の気候

環境と植生条件に強く影響されると考えられる。経過年数によって侵入した草本植物の種類数は増加しているが、植被度および生物現存量が減少している。草本植物の導入を行わなかった地点には、地表植被度は低く、地表は不安定である。上層の優勢樹種は、植栽された木本植物ヤマハンノキに占められているのに対して、下層および更新層は侵入したヤナギ類に占められている。侵入木本植物の種類数は極めて少なく、ヤナギ類以外の種類の木本植物の侵入が認められなかった。

今回のような植物の導入方法は、気象災害への弱さ、水土保持的な問題点、および生物多様性の乏しさなどの欠点があり、導入方法、導入密度、配置方式などを改善する必要がある。これによって、様々な機能の高い複層林を形成させることが望ましい。

Study on the characteristics of initial developments of soil and vegetation in degraded land

Yang Xitian

Laboratory of Soil and Water Conservation, Fac. Agric., Shinshu Univ.

(Henan Agric. Univ.)

Summary

Forest can be disturbed by many types of natural disasters. As a result of the occurrence of a disturbance, vegetation cover is lost and the forest slope becomes degraded. Protecting and restoring vegetation cover, especially forest, is a complementary approach to control soil erosion and to restore the natural ecosystem. The rate of vegetation recovery in degraded land is much slower in comparison to regeneration following thinning or cutting, and the development of natural succession vegetation in the degraded land is so difficult that the help of artificial managements is necessary. Thus, hillside works are widely used in highly eroded areas to protect soil from erosion and to introduce vegetation rapidly.

An understanding of the natural development process of forest vegetation in degraded land and the effect of hillside works on soil and vegetation development is very important in the construction of hillside works and the management of the ecosystem. Precise information about the effect of hillside works and the early evaluation of hillside works is important in the management of the ecosystem. The objective of this study was to obtain precise information about the natural development process of forest vegetation, and to find out whether, and to what extent, soil and vegetation development is affected by hillside works in the initial phase (less than 17 years) in order to help build models for designing future hillside works.

In 1984, an earthquake, named the Nagano-ken Seibu earthquake, hit the western part of Nagano Prefecture located in Central Japan, bringing about a large scale landslide on Mt. Ontake. In 1986, we laid out six inspection plots over an area of 0.1 ha, and have investigated the process of the natural incursion of vegetation into the devastated bare land over 8 years. As a result, it has become clear that the incursion species of both the herbaceous and woody plants increased in numbers with a lapse of years, and that there is an apparently significant negative correlation between the distance to peripheral forest land and the numbers of incursion species of both the herbaceous plants and the woody plants. That is, the intruding individuals of both the herbaceous plants and the woody plants increased in numbers with a lapse of years, while the number of intruding individuals of the woody plants is considerably different for each year. Pioneer tree species such as the *Salix* group, the *Alnus* group and the *Betula* group occurred more often than forest tree groups such as the *Chamaecyparis* group. It was noted that the number of individuals of the former species increased over the years, whereas that of the latter was less. It was also proved that forest tree species such as Japanese Hinoki cypress and Sawara cypress are more likely to die due to some reason and even if they had intruded into the devastated land, they established little foothold there. Accordingly, in order to establish solid forestation in land severely devastated by earth-

quake, we suggest that the introduction of pioneer tree species is more appropriate for protecting the woody regenerations because they alleviate the harsh environmental condition.

we can divide the development process of forest vegetation into three stages.

(1). The stage of no-layer structure stage: The intruding and dying of woody plants frequently occurs, and the growth of tree height is not significant. Stands on which woody vegetation developed to this stage tend to have a cover of large blocks of rock, and drain easily.

(2). The stage of the formation of layer structure: On the stands as where soil was filled or cut thinly, the growth of height of pioneer tree species is significant, and the layer structure forms. In superior layer, pioneer tree species such as *Alnus hirsuta* var. *sibirica* and *A. firma* var. *hirtella* are abundant, which are tolerant to drought and poor nutrition condition. In the subordinate layer, *Salix* group is abundant even though the emergence of forest tree species increased.

(3). The stage of no-regeneration of pioneer tree species: Shading appears at about 60% of crown ratio, the regeneration of pioneer tree species can not be seen in the subordinate layer, and the regeneration of the tree species but not pioneer tree species such as *Cercidiphyllum japonicum*, *Acer cissifolium* and *Chamaecyparis obtusa* become abundant instead.

Eight slopes were chosen to study the initial changes in soil properties after hillside works, and the lapse of years of the hillside works ranged from 7 to 17 years. plant root depth, soil thickness of A, B hirozon, physical and chemical properties of the soils in 0~30 cm and 30~60 cm depth were investigated. This study shows that in the initial phase, hillside works had a measurable impact on soil thickness and organic matter content. With the increasing slope ages, A and B horizons gradually developed, and the thicknesses were positively correlated with increasing slope age. The thickness of topsoil ($PV \geq 1.5$ cm) had a trend to increase with increasing slope age, but showed great differences among study sites. In 0~30 cm soil, water content under saturated conditions, steady infiltration rate, field capacity, available water increased with the increase of slope ages, but in 30~60 cm soil, steady infiltration rate and available water were not significantly correlated with slope ages. The soil pH, C/N ratio were not significantly correlated with slope ages in both topsoil and subsoil. A rapid rate of soil total carbon accumulation was found in the initial phase. The total nitrogen content appeared to be affected by fertilizers which were made when the hillside works were constructed.

Introduced herbaceous species became less important in the herbaceous community as other herbaceous species invaded. With increasing slope age and canopy cover, species diversity increased but vegetation cover was much reduced. The early planted trees dominated the woody community and forest tree species were generally absent. Regeneration (less than 2.0 m in height) of tree species were almost absent in all sites. Only the juveniles of pioneer tree (*Salix* group) were found at the study sites. A dense herb cover can protect surface soil from frequent occurrence of erosion, but also probably prevent the establishment or further growth of juveniles of forest species. Hillside works, which aim at soil erosion control and successful natural regeneration, should primarily protect surface soil from erosion by introducing grasses, but it is also important to protect the seedling stock from competition by grasses or other ground layer plants. Further studies are necessary to develop the method of vegetation introduction.