

---

# 自然回帰型修復緑化による露天採掘 跡地の再生と環境保全機能の回復

---

(課題番号：18560779)

平成 18 年度～平成 19 年度  
科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）

研究 成 果 報 告 書

平成 20 年 6 月

研究代表者 大塚尚寛  
岩手大学工学部教授

# 目 次

はしがき	1
研究成果	4
1. はじめに	4
2. 森林地帯における植生基盤のナチュラルアナログ	7
2. 1 緒言	7
2. 2 調査地の概要	8
2. 3 調査方法	9
2. 4 調査結果と考察	11
2. 4. 1 調査結果	11
2. 4. 2 樹木の大きさと植生基盤の厚さとの関係	13
2. 4. 3 地形勾配と植生基盤の厚さとの関係	14
2. 4. 4 植生基盤の土質試験結果	13
2. 5 森林表土の土質工学的特性	18
2. 6 結 言	19
3. 森林表土を利用する植生基盤の安定解析	20
3. 1 緒言	20
3. 2 植生基盤の崩壊形態と従来の安定解析	21
3. 3 安定解析式の誘導	23
3. 3. 1 植生基盤のすべり破壊	23
3. 3. 2 土塊に働く力の釣り合い	25
3. 3. 3 植生基盤土塊の安全率	25
3. 4 植生基盤の造成	26
3. 4. 1 残壁の傾斜と植生基盤の安定性	26
3. 4. 2 植生基盤造成の可能性	27
3. 5 結言	29

4. 残壁の修復緑化における自然回帰度評価	31
4. 1 緒言	31
4. 2 自然回帰度評価	32
4. 3 従来型修復緑化における自然回帰度評価	36
4. 3. 1 緑化シミュレーション画像	36
4. 3. 2 評価実験	40
4. 3. 3 自然回帰度	41
4. 4 自然回帰型修復緑化における自然回帰度評価	42
4. 4. 1 緑化シミュレーション画像	42
4. 4. 2 評価実験	45
4. 4. 3 自然回帰度	46
4. 5 残壁の修復緑化における自然回帰度	48
4. 5. 1 従来型修復緑化	48
4. 5. 2 自然回帰型修復緑化	50
4. 6 VRS 画像を用いた自然回帰度評価	54
4. 6. 1 自然回帰度評価	54
4. 6. 2 自然回帰度評価における VRS の有効性	64
4. 7 結言	64
5. 残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と自然回帰度評価システムの構築	66
5. 1 緒言	66
5. 2 現状の残壁修復緑化法とその問題点	66
5. 2. 1 現状の修復緑化法	66
5. 2. 2 残壁の修復緑化における問題点と改善策	67
5. 3 自然回帰型修復緑化法の開発	68
5. 3. 1 自然回帰型修復緑化システム	68
5. 3. 2 森林表土の利用	71
5. 3. 3 残壁形状の決定	73
5. 3. 4 植生基盤の造成	78
5. 4 自然回帰度評価システムの構築	79
5. 4. 1 自然回帰度評価システム	79
5. 4. 2 自然回帰度評価	83
5. 5 自然回帰度評価システムの構築	85

6. 森林の有する二酸化炭素吸収源機能と洪水調節機能の推定	87
6. 1 二酸化炭素吸収源機能の推定	87
6. 1. 1 概要	87
6. 1. 2 推定方法	87
6. 1. 3 植生区分と単位土地面積当たりの年間生産量	88
6. 1. 4 算出モデル式	89
6. 1. 5 露天採掘場開発以前の森林が有していた二酸化炭素吸収量	89
6. 1. 6 修復緑化による二酸化炭素吸収量の回復	90
6. 2 洪水調節機能の推定	91
6. 2. 1 概要	91
6. 2. 2 推定方法	92
6. 2. 3 降雨流出量の算出	92
6. 2. 4 任意の継続時間内の平均降雨強度の算出	95
6. 2. 5 露天採掘場開発以前の森林の降雨流出量	97
6. 2. 6 修復緑化による降雨流出量の回復	97
6. 3 まとめ	109
7. まとめ	108

## は し が き

本報告書は、平成18年度～平成19年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）の交付を受けて実施した研究課題「自然回帰型修復緑化による露天採掘跡地の再生と環境保全機能の回復」の研究成果をまとめたものである。

### 【研究組織】

研究代表者： 大塚尚寛（岩手大学工学部教授）

### 【配分額】

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	2,300	0	2,300
平成19年度	1,200	360	1,560
総計	3,500	360	3,860

### 【研究発表】

#### （1）学会誌等

- 1) 大竹照光、大塚尚寛、志田 寛、阿部洋祐  
残壁の自然回帰型修復緑化への森林表土の利用  
砕石の研究、Vol.22、No.1、pp.14—20、2007
- 2) 大竹照光、大塚尚寛、志田 寛、阿部洋祐  
残壁斜面部の樹木生長を想定した修復緑化に対する自然回帰度評価  
砕石の研究、Vol.22、No.1、pp.26—30、2007
- 3) 阿部洋祐、大塚尚寛、大竹照光、岩渕多恵、齊藤 貢、鳴海貴之  
樹木の生長を想定したVRSによる残壁の自然回帰シミュレーション  
砕石の研究、Vol.22、No.1、pp.31—35、2007
- 4) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、阿部洋祐  
森林表土を利用した露天採掘跡残壁の植生基盤造成に関する基礎的研究、  
Journal of MMIJ、Vol.123、No.6,7、pp.329-335、2007
- 5) Terumitsu Otake, Naohiro Otsuka and Mitsugu Saito  
Plane Slide Stability Analyses of Planting Ground Created on The  
Rock Slope of Mined-out Quarry Using Forest Topsoil,

Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety 2007,  
Busan, Korea, 2007

- 6) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、鳴海貴之  
露天採掘跡残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と評価システムの構築、  
骨材資源、Vol.39、No.155、pp.149-159、2007
- 7) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、阿部洋祐  
露天採掘跡残壁の自然回帰型修復緑化における緑化シミュレーションを  
用いた自然回帰度評価、  
Journal of MMIJ、Vol.124、No.3、pp.166-172、2008
- 8) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、鳴海貴之  
採石跡残壁の自然回帰型修復緑化計画の策定、  
砕石の研究、Vol.23、No.1、pp.31-35、2008
- 9) 鳴海貴之、大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、鶴飼文人、中村亜矢子  
自然回帰型修復緑化と従来型修復緑化による露天採場の自然回帰の比較、  
砕石の研究、Vol.23、No.1、pp.46-50、2008
- 10) 齊藤 貢、阿部洋祐、大塚尚寛、鳴海貴之  
露天採掘場の緑化による自然環境保全機能の回復度の推定、  
砕石の研究、Vol.23、No.1、pp.51-55、2008

(2) 口頭発表

- 1) 大竹照光、大塚尚寛、志田 寛、阿部洋祐  
残壁の自然回帰型修復緑化への森林表土の利用  
平成 18 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2006.9
- 2) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、阿部洋祐  
残壁の自然回帰型修復緑化へのマザーソイル工法の導入  
資源・素材学会東北支部平成 18 年度秋季大会、2006.12
- 3) 阿部洋祐、大塚尚寛、大竹照光、岩渕多恵、齊藤 貢、鳴海貴之  
砕石用原石山から採取したマザーソイルの発芽実験  
資源・素材学会東北支部平成 18 年度秋季大会、2006.12
- 4) 大竹照光、大塚尚寛、志田 寛、阿部洋祐  
残壁斜面部の樹木生長を想定した修復緑化に対する自然回帰度評価

資源・素材学会平成 19 年度春季大会、2007.3

- 5) 阿部洋祐、大塚尚寛、大竹照光、岩渕多恵、齊藤 貢、鳴海貴之  
樹木の生長を想定した VRS による残壁の自然回帰シミュレーション  
資源・素材学会平成 19 年度春季大会、2007.3
- 6) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、鳴海貴之  
採石跡残壁の自然回帰型修復緑化計画の策定  
平成 19 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2007.9
- 7) 鳴海貴之、大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢  
露天採掘跡地の従来型修復緑化と自然回帰型修復緑化による景観印象の比較  
平成 19 年度資源・素材学会東北支部秋季大会、2007.11
- 8) 阿部洋祐、大塚尚寛、齊藤 貢、鳴海貴之  
露天採掘場地域が開発以前に有していた CO<sub>2</sub> 吸収機能の推定と修復緑化による回復度の予測、  
平成 19 年度資源・素材学会東北支部秋季大会、2007.11
- 9) 鳴海貴之、大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、鶴飼文人、中村亜矢子  
自然回帰型修復緑化と従来型修復緑化による露天採場の自然回帰の比較、  
資源・素材学会平成 20 年度春季大会、2008.3
- 10) 齊藤 貢、阿部洋祐、大塚尚寛、鳴海貴之  
露天採掘場の緑化による自然環境保全機能の回復度の推定、  
資源・素材学会平成 20 年度春季大会、2008.3

# 研究成果

## 1. はじめに

わが国においては、1997年に京都で開催された地球温暖化防止に関する国際会議における京都議定書の締結を契機として地球環境問題への関心は一層高まり、その後の官民各機関における二酸化炭素削減に関する具体的な数値目標の設定<sup>1)-2)</sup>はその象徴ともいえる。そして、地球サミット世界会議を通して国際的な生物多様性に関する条約が締結され、国内における「自然再生推進法」や「特定外来生物による生態系等に係わる被害の防止に関する法律（外来生物法）」の施行など、生態系や自然環境への配慮はすでに人々の身近な関心事となっている。

一方、美しい国土づくりを目指す国の施策とも相まって、平成16年には「景観法」が施行されるなど、環境や景観保全関連の法整備は広く国民に自然環境への関心を促し、生物多様性保全、美しい里山の保全などは時代のキーワードともなっている<sup>3)</sup>。

このような、自然環境問題に関する意識の高揚は、石灰石や砕石などの資源採掘分野においても例外ではなく、露天採掘跡残壁の修復緑化には、残壁の保護を行いながら周辺環境と調和のとれた植物群落の造成を目指す自然回帰型の修復緑化が強く求められるようになってきている<sup>4)</sup>。

わが国では、国土の面積の約2/3に相当する2,500万haが森林地域であり、現在約2,500箇所を数える露天採掘場はその殆どがこの森林地域に存在する。そのため、採掘終了後は修復緑化を十分に行わなければそれは明らかに自然破壊行為となり、採掘跡地は採掘を終了した部分から順次緑化を行って行くことが原則である<sup>5)</sup>。また、岩盤が露出し裸地化した採掘跡地は、浸食、崩壊、落石などが発生し易く、土砂災害に結びつく危険性がある。このため、従来、修復緑化の目的は土砂の流出防止や残壁の安定などが第一義的であり、その上で、周辺景観との調和を図る観点から、樹林化の難しい斜面部は草本やツタ植物類で緑化し、樹木は小段だけに導入する手法を採ってきた<sup>5)</sup>。このことは、斜面部が裸地化した急傾斜岩盤斜面で樹木の導入が容易ではないことから、事業の成立と修復緑化が経済的に見合うことを考慮した施策であったともいえる。

しかし、斜面部に草本類だけを導入する緑化法は、樹木の場合に比べて斜面の安定維持機能が低いことや景観面での違和感が残るなどの問題点が以前から指摘されていた<sup>5)</sup>。また、近年では人々の環境問題意識の高揚と相まって、周辺景観との調和あるいは植物群落の回復を目指したより質の高い修復緑化が求められている。この観点からすると、緑化目標は草本群落よりも遷移した木本群落とすることが望ましく、積極的な木本類の導入による自然回帰型修復緑化を図る方向へと移行してきている<sup>5)</sup>。

このような社会的趨勢を背景として、本研究では、まず、残壁の斜面部に樹木を導入するための植生基盤を造成することと、植生基盤として地域の森林表土を利用することの2つの



観点から、森林表土の工学的特性を調査・解明し、植生基盤として造成することの可能性を理論的に解明した。森林表土は、地域の遺伝子を有する埋土種子を賦存することから、生態系の保全を意図する植生基盤の材料としては理想的であり、その効果的な利用法の開発が望まれているところである。つぎに、修復緑化の過程を事前評価する観点から、修復緑化過程の緑化シミュレーション画像を作成し、これらを景観評価実験に供することによって、自然回帰型修復緑化の評価システムを構築した。

本研究における自然回帰型修復緑化とは、残壁の修復緑化を行いつつ周辺の自然環境と調和のとれた植物群落の形成を図るものであり、残壁面の保護による安定確保、自然生態系の回復、周辺の既存植生や生物多様性の保全ならびに景観的調和を目指すものである。

採掘跡残壁は、裸地化した岩盤斜面であることから斜面部に樹木を導入することは容易なことではなく、この種の研究事例はほとんどみられないのが現状である。このような状況の中で、本研究は、地域の生態系を維持し地域の景観を保全・創出する視点が求められる社会的要請に応えるものとして、残壁に対する今後の修復緑化の方向性を示すものである。

露天採掘跡の残壁は、採掘終了後速やかに修復緑化することが原則である。しかし、残壁は植生土壌のない裸地化した岩盤斜面であることから、植物の生育にとっては極めて劣悪な状態にある。このため、従来の修復緑化は、植生基盤を造成できる小段だけに樹木を導入し、植生基盤の造成が容易でない斜面部にはツタなどの草本類だけを導入する方法が多用されてきた<sup>5)</sup>。これに対して、生物多様性を保全し周囲の景観とも違和感のない植物群落を復元・創出するためには、斜面部にも樹木を導入することが不可欠である。

このように、そこに元々あった自然をそのまま残壁全体に戻すことを目指す修復緑化を、本研究では「自然回帰型修復緑化」と呼ぶことにするが、本研究の目的の主軸は、この自然回帰型修復緑化の手法の開発およびその評価手法の検討にある。

そのために、つぎの2つの課題への取り組みを研究目的として設定した。これらの研究成果を総合して、自然回帰型修復緑化法の開発と評価システムを構築した。

まず、第1の課題と研究目的は、「森林表土を用いた植生基盤の造成」の可能性を解明することにある。森林表土は、地域固有の遺伝子を保有した埋土種子集団（シードバンク）を含むことから、これを緑化材として用いることは生物多様性保全の面からも理想的であるといえる<sup>6)</sup>。そこで、本研究では、森林表土を植生基盤として利用する方法を検討する観点から、実際の地山における森林表土の土壌を調査し、安定解析によって植生基盤として造成できることを明らかにした。この過程で、従来一般に多用されている安定解析式とは異なる平面すべり安定解析式を誘導し、安定造成できる植生基盤の厚さなどを明瞭に把握した。

第2の課題と目的は、森林表土を用いて導入した樹木の生長と自然回帰の状態を景観評価実験によって検討し、視覚的に自然回帰状態とみなせる植生の状態を把握することにある。すなわち、ここでは、修復緑化過程の緑化シミュレーション画像を作成し、これを評価実験に供することによって「自然回帰度の評価」を行った。狭義の景観ともいえる見た目の上で

自然回帰の状態とみなせることは、すなわち周辺と違和感のない植生状態が復元されることであり、動物の生息にも適した生態系が回復することになるものと考えられる。したがって、景観面での自然回帰状態は、単に見た目の状態だけではなく、生態系の復元と連動するものと考察する。

一方、森林は自然が残された地域であり、国土保全の役割を担っている。森林の持つ自然環境保全機能には、次のようなものがある<sup>3)</sup>。

- ①野生生物を保護する働き（生態系保全機能）
- ②炭酸ガスを吸収して酸素を排出する働き（二酸化炭素吸収源機能）
- ③水資源を涵養する働き（洪水調節機能、地下水涵養機能）
- ④国土を保全する働き（土砂流出防止機能、山腹崩壊防止機能）
- ⑤大気や水を浄化する働き（大気保全・浄化機能、水質保全・浄化機能）
- ⑥気象を緩和する働き（気温変化の緩和機能、防風機能）
- ⑦騒音を防止する働き（遮音・防音機能）
- ⑧自然景観を保全する働き（景観保全機能）
- ⑨保健・休養の場を与える働き（人間性回復機能）

以上のような森林の気圏、水圏、地圏に対する機能は、いずれも自然生態系の存立基盤であり、森林の持つ自然環境保全機能は、人類の生存基盤存立に深く関わっていると見える。したがって、露天採掘跡地を修復緑化することによって、その地域が開発以前に有していた自然環境保全機能を回復することが必要である。そこで本研究では、露天採掘場地域が開発以前に有していた自然環境保全機能を推定する方法を考案して、修復緑化による機能の回復度を判定するシステムを構築を行った。

## 参 考 文 献

- 1) 経済団体連合会：経団連環境自主行動計画、1997
- 2) 環境省：京都議定書目標達成計画、2005
- 3) 亀山章監修：生物多様性緑化ハンドブック、地人書館、pp.323、2006
- 4) 大竹照光・大塚尚寛・志田寛：資源素材学会秋季大会企画発表・一般発表(A)(B)講演資料、p.269-270、2005
- 5) 採石技術指導基準編集委員会：詳解採石技術指導基準、ぎょうせい、2004
- 6) 亀山章監修：生物多様性緑化ハンドブック、地人書館、pp.187-199、2006
- 7) 榎国分・塚田陶管(株)：「宝篋山ふるさとの山づくり事業」に係る事前総合調査・報告書、p.187、2006

## 2. 森林地帯における植生基盤のナチュラルアナログ

### 2.1 緒言

自然回帰型修復緑化の目的は、残壁の修復緑化を行いつつ周辺の自然環境と調和のとれた植物群落を形成することであり、残壁面の保護による安定確保、自然生態系の回復、周辺の既存植生や生物多様性の保全ならびに景観的調和を目指すものである。このためには、残壁全体を樹林化することが望ましく<sup>1)</sup>、これまでのように小段だけでなく斜面部にも樹木を導入するための植生基盤を造成する必要がある。

一般に、樹木が生長するために必要な植生基盤の厚さは、樹木の大きさや地形の勾配あるいは基盤の物性値によっても異なると考えられるが、これらに関する調査研究事例は現状ではほとんど見当たらない。例えば、**表2.1**は植物の生長に必要な基盤の厚さの目安とされているものである<sup>2)</sup>が、表中の値は平坦部に対するものであり、傾斜地における植生基盤の厚さをまとめたものではない。したがって、残壁のように傾斜した岩盤地山における植生基盤の厚さに関しては依然として不明である。

また、厚さばかりでなく、岩盤斜面上に安定して存在し、樹木の生育を支えている植生基盤の工学的な土質特性を解明した研究事例は殆どみられず、岩盤斜面の植生基盤については未解明な点が多く残されている。それにも拘わらず、岩盤斜面の緑化に関しては多種多様の工法<sup>3)</sup>が提案され、実用化されている工法も少なくない。しかし、このような工法の多くは、明瞭な理論に裏打ちされているとは言い難く、むしろアイデアが先行しているといっても過言ではない。

例えば、岩盤斜面の緑化工法として多用されている厚層基材吹付工などをみても、基盤材の力学特性や厚さに関する技術基準はみられず<sup>4)</sup>、殆どが経験にもとづいて実施されているのが実態である。

このような現状から、残壁に安定した植生基盤を造成するためには、植生基盤材の工学的な特性を明らかにするとともに、造成の可能性を理論的に解明し、理論に裏付けられた設計・施工を行う手法の確立が強く求められている。

このような観点から、本章では、樹林化した地山の森林地帯で植生基盤の事例調査を行い、工学的な特性を解明するとともに、その結果にもとづいて残壁に植生基盤を造成するための基礎資料をとりまとめた。

表2. 1 植物に必要な土層の最小厚さ<sup>2)</sup>

Classification	Minimum thickness for live	Minimum thickness for thrive
Grasses、Herbs	15 cm	30 cm
Small low trees	30	45
Large low trees	45	60
Shallow roots high trees	60	90
Deep roots high trees	90	150

## 2. 2 調査地の概要

一般に、植生基盤の厚さを知るためには、樹林化している実際の地山で植生基盤の厚さを直接調査するナチュラウアナログが最も有効な手段といえる。しかし、実際の地山で根系が生育する植生基盤の厚さを正確に把握するのは容易なことではない。すなわち、実際の地山では根の生育する植生基盤と根の入り込まない基盤岩との間に明瞭な境界面が存在するわけではなく、基盤岩の上面付近は風化の進行や亀裂の発達状況も様々で植生基盤となる未固結土層の厚さや締まり具合も多様である。また、未固結の植生基盤が薄い場合でも、根系は基盤岩の亀裂に入り込んで生育することから、樹木の生育に必要な植生基盤だけの厚さを厳密に把握するのは容易でない。

そこで本研究では、基盤岩に樹木の根系が入り込むような亀裂がほとんど認められない岩盤斜面地山を選定して植生基盤の調査を行い、その厚さや土木地質的特性を明らかにした。

**表2. 2**に調査の概要を示す。調査地は、宮城県仙台市太白区秋保地内の自然地山内にあり、基盤岩は新生代・新第三紀・中新世の秋保層の軽石凝灰岩である。この軽石凝灰岩は、亀裂の少ない塊状軟岩で、かつては「秋保石」の名称で石材として利用されていた。調査地はこの秋保石の採掘跡地に連続する自然地山であり、斜面の至る所に基盤岩が露頭する状況である。植生は落葉広葉樹を主とする自然林で、植生基盤である森林表土の下位には斜面の全域に亘って基盤岩が分布する状態である。

**図2. 1**に調査地山の状況を示す。

表2. 2 植生基盤調査地山の概要

Research site L	Akyu-area、Taihaku-ward、Sendai、Miyagi Prefecture、Ja
Research date	April、2006
Site base rock	Pumice Tuff of Akyu Formation、Miocene、Neogene、Tert
Research item	Kind of trees、Diameter of trees、Height of trees、Width
Soil test item	Density of soil particles、Water content、Particle size dis
Slope trend	N50W-EW;(30-60)(S-W)
Research site ar	900m <sup>2</sup> (15m width、60m length)
Forest outline	Broad-leaved forest of 7-15m height trees mainly
Research site ou	・ Natural forest slope、



図2. 1 調査地山の状況(平成 18 年 4 月)

### 2. 3 調査方法

図2. 2は、植生基盤を掘削し下位の基盤岩を確認した状況を示したものである。図より、未固結土である植生基盤の下位に基盤岩を明瞭に認めることができ、基盤岩には樹木の根系が一切入り込んでいないことがわかる。因みに、基盤岩の土壤硬度（中山式）は 33～36 m

m である。

図2.3は、森林地帯における土壌断面の層位を模式的に示したものである。この土壌層位は、ロシアの土壌学者ドクチャエフが創始したもので、基本的には土壌の母材をC層、動植物の影響がそれに加わり有機物によって黒褐色となったA層、A層とC層の中間部分をB層と区分命名している<sup>5)</sup>。また、A<sub>0</sub>層は落葉落枝層であり、土壌部はA層とB層である。

図2.3をもとに、本調査地の土壌構成を検討すると、調査地ではB層とC層とが極めて明瞭に区分できC層には植物根系が一切侵入していない。これに対して、A<sub>0</sub>-H層は厚さ2~3cmと薄くA層とは不明瞭に漸移する。

このような状況から、本研究で計測する植生基盤の厚さは、A<sub>0</sub>H層を含むそれより下位に分布する基盤岩までの未固結土の厚さとし、表層の落葉堆積層(A<sub>0</sub>L、A<sub>0</sub>F)を除き地表からピンポールを圧入して基盤岩に達するまでの実厚として測定した。厚さの測定は、斜面における樹木の上下左右それぞれ1m離れた位置の4点とし、4点の平均値をもってその位置の厚さとした。

地形勾配は、斜面上下方向の傾斜とし傾斜計(スラントルール)で計測した。また、土壌硬度は山中式土壌硬度計を用い樹木の右側約1m離れた位置において表層土を5cm程度除去した下位で3点実測しその平均値を記録した。樹木については、胸高直径4cm以上の樹木を対象とし、直径は実測値を四捨五入して1cm単位で記録した。樹高と樹幅については、2mの赤白ポールを目安として目視で計測した。

なお、調査結果は、次節(2.4)の表2.3に示す。



図2.2 調査地山の植生基盤の状況

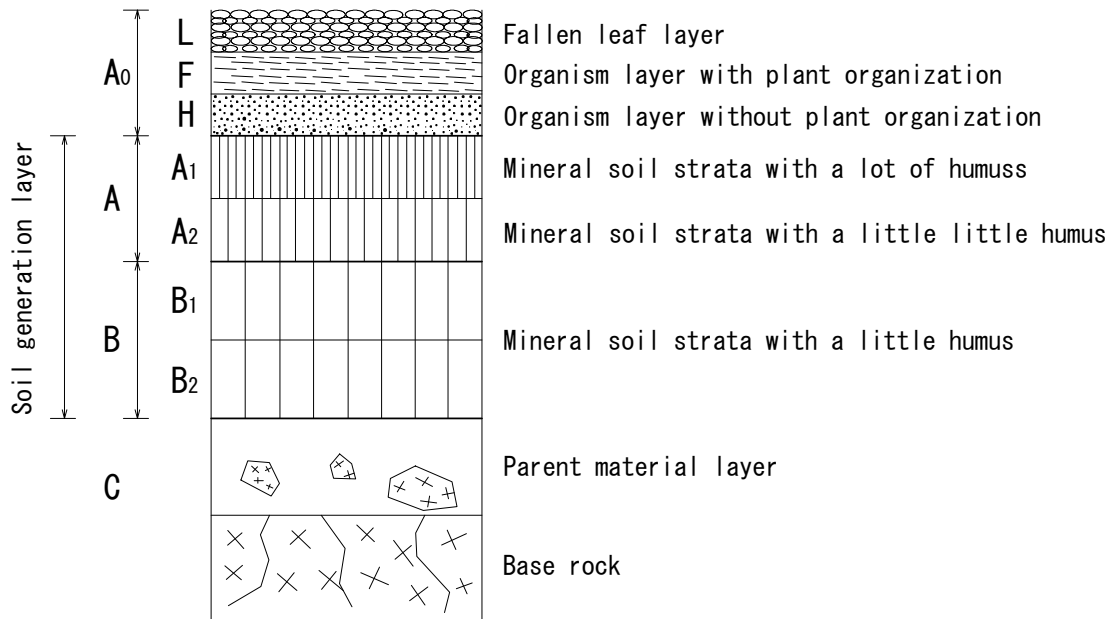


図2.3 森林土壌断面層位の模式図<sup>5)</sup>

## 2.4 調査結果と考察

### 2.4.1 調査結果

表2.3に、調査結果の集計表を示す。

表2.3 植生と植生基盤の調査結果

調査場所: 宮城県太白区秋保地内 (南西向斜面) 調査日: 2006年 04月 01日(土) 天候: はれ													
No.	広	針	樹種	樹木の諸元			地形勾配 $\beta(^{\circ})$	基盤の厚さ dt(cm)				基盤の 平均厚さ dtave(cm)	土壌硬度
				胸高径 Dt(cm)	樹高 Ht(m)	樹冠径 Hw(m)		a 上	b 右	c 下	d 左		
1	レ		クマシデ	12	8	4	46	27	12	8	20	16.8	12
2	レ		クマシデ	17	15	7	45	40	13	13	36	25.5	14
3	レ		ナラ	10	7	5	38	53	67	50	60	57.5	12
4	レ		クマシデ	11	10	7	48	38	48	17	33	34.0	13
5	レ		ホウノキ	21	15	7	39	28	32	45	38	35.8	11
6	レ		モミ	27	20	8	47	20	29	32	22	25.8	9
7	レ		モミ	32	23	8	35	43	43	55	35	44.0	10
8	レ		ナラ	19	18	10	55	55	43	37	53	47.0	11
9	レ		ヤマザクラ	17	15	5	42	32	31	50	52	41.3	9
10	レ		ナラ	18	8	5	48	33	27	23	23	26.5	9
11	レ		ホウノキ	21	15	6	53	12	7	11	18	12.0	8
12	レ		ヤマザクラ	12	12	4	48	15	12	8	18	13.3	12
13	レ		ナラ	17	16	5	42	19	14	19	23	18.8	11
14	レ		ナラ	24	15	7	48	32	22	9	14	19.3	16
15	レ		ナラ	14	14	7	53	27	23	8	22	20.0	16
16	レ		ナラ	22	15	6	43	32	25	38	22	29.3	15
17	レ		モミ	29	14	10	35	41	43	42	43	42.3	15
18	レ		ナラ	17	15	6	40	26	23	20	32	25.3	13
19	レ		ナラ	8	9	3	40	27	21	21	12	20.3	16
20	レ		アカシデ	12	7	5	41	15	15	14	10	13.5	12
21	レ		ホウノキ	12	7	5	40	20	18	17	20	18.8	12
22	レ		ホウノキ	6	6	2	50	37	11	8	22	19.5	9
23	レ		クヌギ	8	7	3	44	21	25	12	22	20.0	13
24	レ		ナラ	13	9	4	40	18	25	38	26	26.8	14
25	レ		ナラ	11	8	3	48	38	37	31	38	36.0	15
26	レ		ナラ	18	11	5	39	21	18	28	30	24.3	10
27	レ		ヤマザクラ	12	9	5	40	21	24	22	11	19.5	12
28	レ		ヤマザクラ	13	10	6	47	16	30	22	21	22.3	12
29	レ		イタヤカエデ	11	13	5	41	30	17	18	25	22.5	13
30	レ		ナラ	13	15	6	42	21	23	34	19	24.3	14
31	レ		イタヤカエデ	12	15	6	43	48	10	24	23	26.3	13
32	レ		ナラ	15	14	5	49	36	19	17	24	24.0	13
33	レ		ナラ	23	16	7	44	25	25	26	9	21.3	13
34	レ		コブシ	10	7	3	50	15	31	10	37	23.3	12
35	レ		アカシデ	13	10	7	40	17	21	60	3	25.3	13
36	レ		ナラ	11	13	4	47	2	9	61	11	20.8	13
37	レ		ナラ	10	8	2	26	11	9	9	9	9.5	15
38	レ		ナラ	18	14	6	14	16	9	4	7	9.0	13
39	レ		ナラ	13	14	4	34	7	11	1	4	5.8	17
40	レ		ナラ	19	15	6	38	13	12	17	16	14.5	15
41	レ		ヤマザクラ	9	7	2	43	26	8	17	9	15.0	13
42	レ		ナラ	12	12	4	45	30	21	20	32	25.8	11
43	レ		ナラ	9	10	3	43	21	23	19	29	23.0	12
44	レ		ナラ	12	13	4	41	30	20	21	31	25.5	13
45	レ		アカシデ	21	12	7	41	31	24	23	27	26.3	11
46	レ		アカシデ	12	12	4	40	18	19	21	12	17.5	14
47	レ		アカシデ	9	8	3	40	12	19	19	7	14.3	13
48	レ		ナラ	19	14	6	41	16	21	20	22	19.8	13
49	レ		ナラ	18	16	7	39	33	17	20	16	21.5	10
50	レ		ナラ	17	15	5	38	34	28	32	24	29.5	13



(前頁からのつづき)

No.	広 針	樹 種	樹木の諸元			地形勾配 $\beta(^{\circ})$	基盤の厚さ dt(cm)				基盤の 平均厚さ dtave(cm)	土壌硬度
			胸高径 Dt(cm)	樹 高 Ht(m)	樹冠径 Hw(m)		a 上	b 右	c 下	d 左		
51	レ	ホウノキ	25	17	6	45	40	31	25	50	36.5	17
52	レ	ホウノキ	26	17	7	56	60	35	20	23	34.5	14
53	レ	ホウノキ	18	17	7	43	16	9	17	20	15.5	17
54	レ	ホウノキ	25	16	7	45	60	50	47	28	46.3	17
55	レ	ホウノキ	20	16	7	30	45	65	60	38	52.0	14
56	レ	ホウノキ	23	17	8	33	85	75	70	41	67.8	16
57	レ	アカシデ	23	17	6	41	32	28	15	14	22.3	10
58	レ	アカシデ	22	8	6	50	0	13	3	16	8.0	13
59	レ	イタヤカエデ	13	14	6	44	18	21	11	13	15.8	9
60	レ	ナラ	22	18	7	50	18	24	15	28	21.3	10
61	レ	ナラ	22	14	5	37	23	30	12	23	22.0	14
62	レ	ミズナラ	19	14	5	41	24	17	26	24	22.8	11
63	レ	ケヤキ	18	16	6	47	9	10	14	24	14.3	10
64	レ	ケヤキ	22	16	6	48	2	16	14	23	13.8	11
65	レ	アカシデ	16	13	6	56	18	22	23	21	21.0	11
66	レ	ケヤキ	14	15	5	60	22	23	18	23	21.5	11
67	レ	モミ	20	11	5	49	15	14	8	26	15.8	17
68	レ	ヤマザクラ	15	8	5	46	9	11	21	9	12.5	15
69	レ	ナラ	13	10	4	45	16	21	22	26	21.3	14
70	レ	ナラ	24	14	6	43	29	11	12	27	19.8	13
71	レ	ケヤキ	19	13	6	42	0	14	14	7	8.8	13
72	レ	ケヤキ	18	13	5	53	8	7	11	1	6.8	11
73	レ	クマシデ	17	13	6	45	14	10	11	12	11.8	10
74	レ	クマシデ	16	13	5	44	4	21	11	8	11.0	11
75	レ	アカシデ	19	13	5	59	12	9	4	11	9.0	11
76	レ	ケヤキ	13	14	5	48	4	14	7	1	6.5	14
77	レ	ケヤキ	11	12	3	48	14	24	16	17	17.8	10
78	レ	アカシデ	12	9	4	50	19	9	16	11	13.8	11
79	レ	ヤマザクラ	14	11	4	46	3	20	24	25	18.0	10
80	レ	ヤマザクラ	12	9	3	49	9	3	24	27	15.8	10
81	レ	ナラ	23	15	7	47	12	7	12	20	12.8	13
82	レ	クマシデ	21	18	5	43	8	9	13	11	10.3	14
83	レ	アカシデ	22	13	6	52	5	17	15	13	12.5	10
84	レ	クマシデ	15	12	5	50	23	10	17	16	16.5	13
85	レ	モミジ	14	10	4	47	14	12	8	10	11.0	13
86	レ	ヤマザクラ	16	12	5	50	12	31	18	14	18.8	12
87	レ	アカシデ	13	10	4	48	30	38	34	19	30.3	12
88	レ	クマシデ	16	8	5	46	7	0	4	6	4.3	12
89	レ	ナラ	23	15	6	45	34	24	17	14	22.3	12
90	レ	クマシデ	1	10	4	51	18	15	2	22	14.3	14
91	レ	クマシデ	20	15	7	48	19	22	28	14	20.8	14
92	レ	ナラ	11	14	4	49	20	34	42	44	35.0	12
93	レ	ヤマザクラ	20	12	6	53	23	13	26	0	15.5	16
94	レ	アカシデ	12	14	5	46	21	15	14	10	15.0	10
95	レ	アカシデ	15	15	6	45	14	5	15	13	11.8	12
96	レ	ナラ	16	14	5	45	4	8	11	17	10.0	10
97	レ	ナラ	18	16	6	45	3	4	16	9	8.0	12
98	レ	アカシデ	18	13	5	45	3	4	16	9	8.0	12
99	レ	クマシデ	13	13	4	32	2	9	15	6	8.0	14
100	レ	ヤマザクラ	16	10	5	47	7	11	6	7	7.8	12
101	レ	ナラ	20	15	5	40	10	1	6	13	7.5	11
102	レ	アカシデ	21	16	7	49	7	15	2	1	6.3	11
103	レ	カエデ	17	9	4	46	15	11	20	23	17.3	12

※ dtave= (a+b+c+d) /4

## 2. 4. 2 樹木の大きさと植生基盤の厚さとの関係

図2. 4は、調査地山における樹木の高さ（樹高）と樹木の位置の植生基盤の厚さとの関係

を示したものである。図によると、樹高が増加するほど植生基盤が厚くなる傾向をわずかに認めるものの明瞭ではなく、両者の間に相関性を求めるのは困難であるといえる。図をみる限り、調査地における樹高は大部分が 5~17m 程度で植生基盤の厚さは 10~30cm 程度であることがわかる。このことから、調査地のように勾配が 40~50° の傾斜地であっても、植生基盤の厚さが 10~30cm 程度あれば相応の樹木は生育可能であることが明らかとなった。このことは、植生基盤の厚さを検討する上での基礎資料になるといえる。

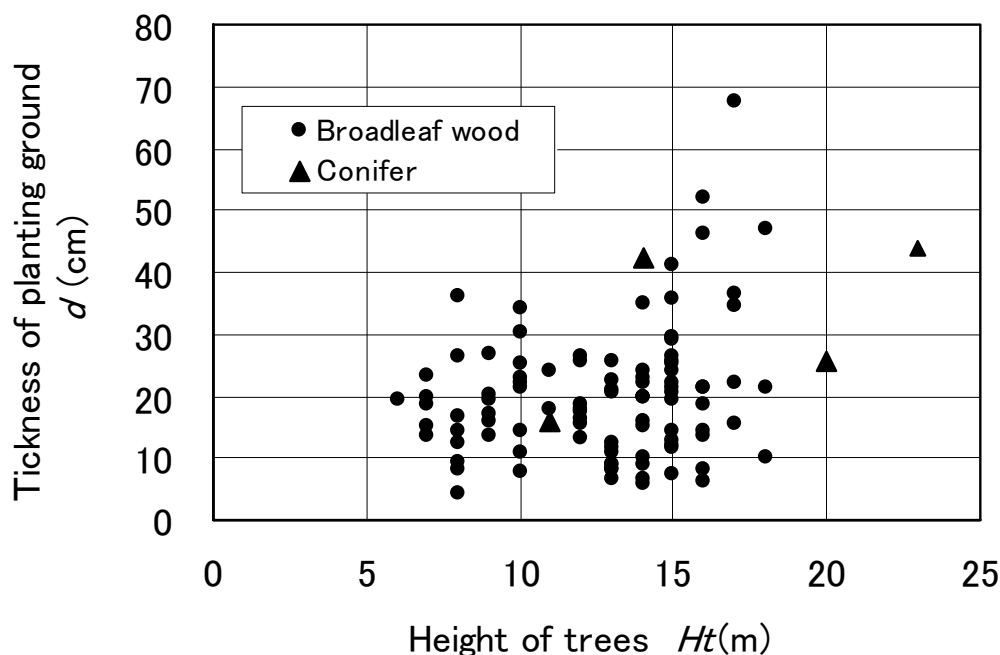


図2.4 調査地における樹高と植生基盤の厚さとの関係

### 2.4.3 地形勾配と植生基盤の厚さとの関係

図2.5は、地形勾配と植生基盤の厚さとの関係を示したものである。図から、地形勾配が大きくなるにしたがって植生基盤は薄くなる傾向がわずかに認められるが、地形勾配と植生基盤の厚さには明瞭な関係は認められない。調査地における地形勾配は、25~60° の範囲内ではばらつき、その中でも 40~50° を示す場合が大半である。また、植生基盤の厚さは、10cm 以下の場合から 70cm の範囲ではばらついてはいるが、大半が 10~25cm であることがわかる。

図2.6および図2.7に、地形勾配および植生基盤の厚さの出現頻度グラフをそれぞれ示す。図2.6によると、地形勾配は 40~50° の場合が全体の 70%近くを占め、平均勾配はほぼ 1 : 1.0 (1割勾配) である。図2.7では植生基盤の厚さを 5cm ごとに区分して集計したが、これによると、出現頻度が最も高いのは 15~20cm の場合で、全体の 20%を占める。また、10~25cm の範囲内に 60%が入り、10cm 以下の場合をも加えると実に 70%強が 25cm 以下となる。

斜面上の植生基盤の安全率を厳密に知ることは決して容易ではないが、安定を維持する限り少なくとも 1.0 以上の安全率を有するものと理解できる。図2.5~2.6から、地形勾配  $\beta$

と植生基盤  $d$  については、大半が分布する両者の組み合わせの上限が、 $\beta=50^\circ$ 、 $d=30\text{cm}$  と解釈できる。そこで、このときの植生基盤の斜面上での安全率を 1.20 とみなすこととした。また、それより下限側では 1.20 以上、上限側では 1.00~1.20 の安全率をそれぞれ有するものと解釈した。

この結果、少なくとも調査地のように傾斜  $40\sim 50^\circ$  の岩盤斜面においては、植生基盤の厚さが  $10\sim 25\text{cm}$  あれば、主に広葉樹からなる樹高 10m 前後の樹林化は十分に可能であるといえる。この事実は、今後残壁の植生基盤を設計・検討する上で有効な基礎資料になるものと考えられる。

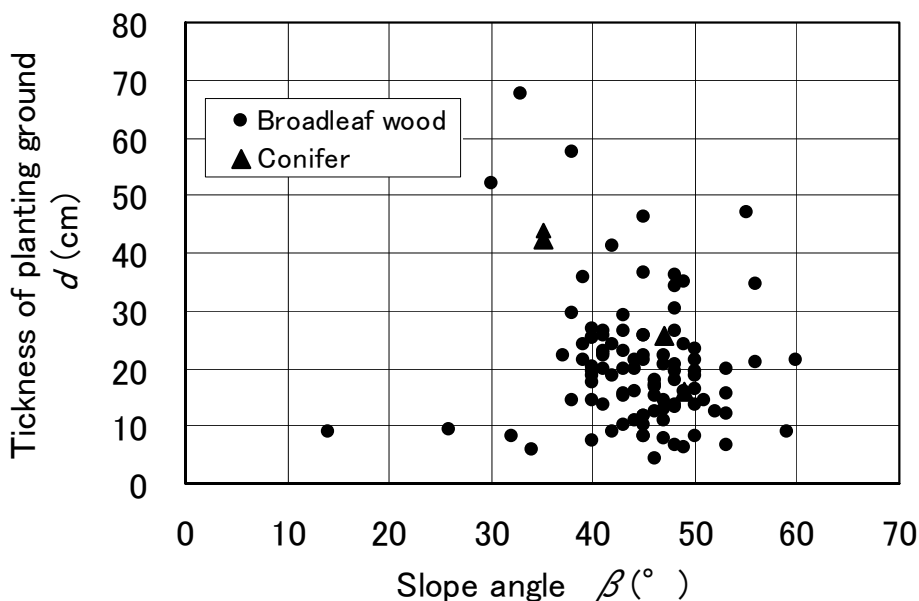


図2.5 調査地における地形勾配と植生基盤の厚さとの関係

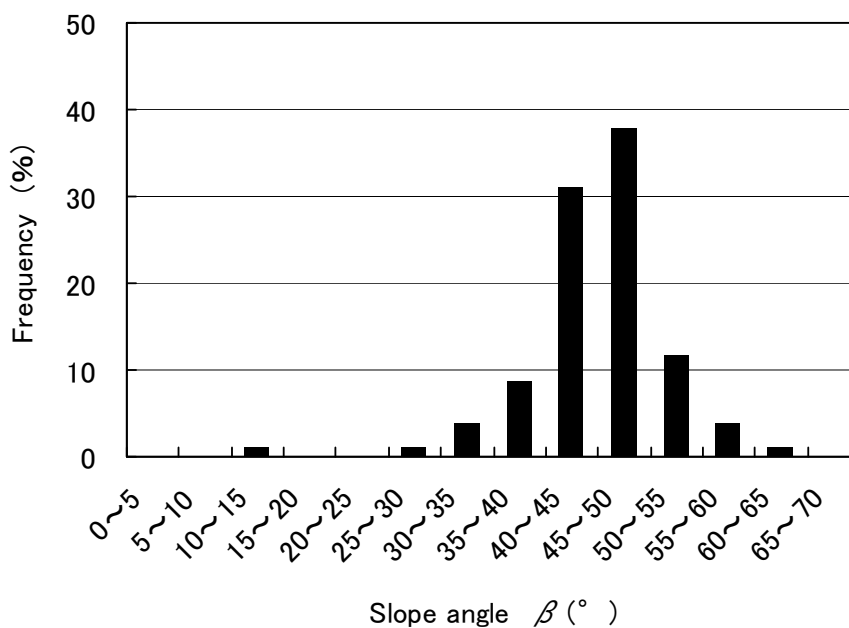


図2.6 調査地の地形勾配の頻度グラフ

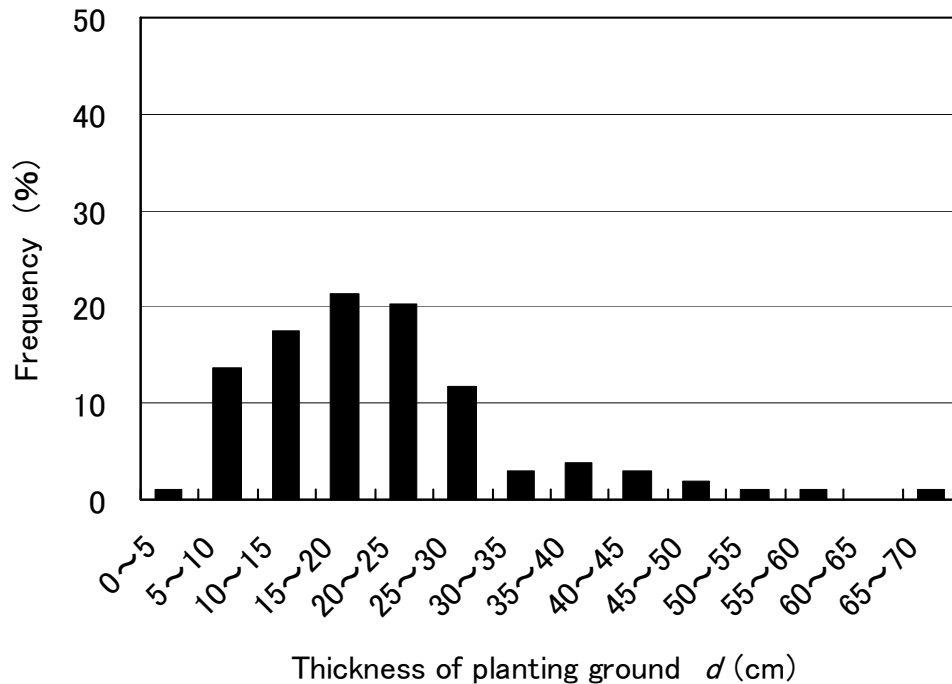


図2. 7 調査地の植生基盤の厚さの頻度グラフ

#### 2. 4. 4 植生基盤の土質試験結果

植生基盤である森林表土の土壌について、工学的な特性を知る観点から室内土質試験を実施した。土質試料は、図2. 3に示す土壌部の A 層と B 層を対象に一定の断面積で深さ方向に C 層上面まで採取し、全体を混ぜ合わせて試験に供した。試験項目と試験方法は表2. 4に示すとおりである。

表2. 5は、調査地の植生基盤の土質試験結果である。また、図2. 8は粒径加積曲線である。植生基盤の土壌は、周辺の基盤をなす軽石凝灰岩起源の強風化生成物と考えられることから、土壌も基盤岩を反映した特性を示しているといえる。すなわち、土粒子の密度は、通常の平野の未固結土で 2.6~2.7 程度であるのに対して、2.350 と小さな値を示しているが、これは構成土粒子が基盤岩起源の軽石を主とすることの現れと考えられる。また、自然含水比も 79.9%と高い値を示すが、これも、基盤岩起源の火山質土壌が有機物を多く含むためと理解できる。有機物の含有量を強熱減量で評価すると、概ね関東ローム ㉞に近い値を示している。pH はやや酸性の「5」を示すが、これも酸性に傾く軽石凝灰岩起源の土壌であることを反映した結果とみられる。粒度特性をみると、当該土壌は砂と細粒分（シルト+粘土）を主な構成とし、日本統一土質分類（SF）に分類される「細粒分質砂」である。細粒分を多く含むものの、やはり砂分が多いこともあって液性限界や塑性限界の測定は不可能である。

表2. 4 土質試験方法

Soil test item	Test method
Density of soil particles	JIS A 1202
Water content	JIS A 1203
Particle size distribution	JIS A 1204.
Liquid limit	JIS A 1205
Plastic limit	
pH of suspended soils	JGS 0211
Ignition loss	JIS A 1226

表2. 5 植生基盤土壌の土質特性

Soil properties		Measured values
Density of soil particles $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )		2.350
Water content $W_n$ (%)		79.9
Maximum grain size (mm)		4.75
Particle size distribution	Gravel (%)	4.4
	Sand (%)	62.9
	Silt (%)	25.5
	Clay (%)	7.2
Liquid limit (%)		NP
Plastic limit (%)		NP
pH(H <sub>2</sub> O)		5.0
Ignition loss $Li$ (%)		9.3
Japan unified soil classification		(SF)
Classification of geomaterials		Sand with fine particles
Soil hardness index $H_s$ (mm)		12.4

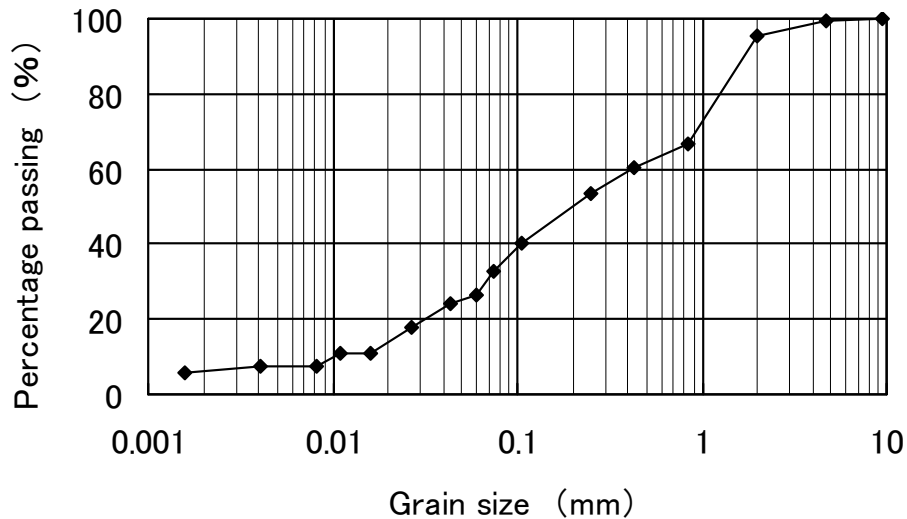


図2.8 植生基盤土壌の粒径加積曲線

### 2.5 森林表土の土質工学的特性

自然地山に樹木が生育する場合、森林表土は樹木にとって植生基盤となる。本項では森林表土を樹木の生育基盤盤として取り扱う観点から、事例調査を行った森林表土の土質工学的な特性を解明し植生基盤に関する基礎資料を得た。

地盤材料は、設計上、粒度構成をもとに粘土か砂のどちらかに区分して取り扱われることが多いが、当該森林表土は相応の細粒分と砂で構成されるため一方に区分するのは好ましくなく、その扱いは「中間土」<sup>8)</sup>となる。すなわち、工学的には粘着力 ( $C$ ) と内部摩擦角 ( $\phi$ ) の双方を考慮すべき土であるといえる。

表2.4は、前述の土質工学的観点から調査地山の植生基盤である森林表土の物性値を地山設計定数としてまとめたものである。事例調査の地山において、植生基盤を形成している森林表土は、基盤岩をなす軽石凝灰岩の風化生成物であることから、その土性は同じく火山灰の降下堆積物である関東ロームに近似しているといえる。このことから、植生基盤の内部摩擦角は、盛土として造成した関東ロームの値<sup>9)</sup>などを参考に  $20^\circ$  とした。また、粘着力は後述の平面すべり安定解析式を適用し、図2.4における  $\beta$  と  $d$  の組み合わせのほぼ上限、すなわち、 $\beta=50^\circ$ 、 $d=30\text{cm}$  のときの安全率を 1.20 と仮定し、逆算によって求めた。

表2.4 調査地山の植生基盤土壌の設計定数

Soil properties	Design constants
Bulk unit weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.0
Cohesion $C'$ (kN/m <sup>2</sup> )	8.0
Internal friction angle $\phi'$ (°)	20 (slip plane : 13)

## 2.6 結 言

本章では、残壁の自然回帰型修復緑化を進める観点から、裸地化した斜面部に木本類を導入することを目的とした植生基盤の造成に関する基礎的検討を行った。

まず、事例研究として、実際に樹林化している岩盤斜面の地山において地形勾配や植生基盤の厚さと物性値に関する基礎調査を行った。つぎに、得られた調査資料をもとに残壁に植生基盤を造成することの可能性を検討した。

本章で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 樹高と植生基盤の厚さとの間に明瞭な相関関係は認められないが、調査地のように勾配が  $40\sim 50^\circ$  の傾斜地において、植生基盤の厚さが  $10\sim 30\text{cm}$  程度あれば相応の樹木は生育可能であると考えられる。

(2) 植生基盤の厚さを明瞭に計測できる地山における事例調査の結果、傾斜  $40\sim 50^\circ$  の岩盤斜面に対して、植生基盤の厚さが  $10\sim 25\text{cm}$  程度あれば樹林の形成が十分に可能であることを明らかにした。

(3) 本研究で調査した植生基盤としての森林表土は、単位体積重量  $\gamma_t=14.0\text{ (kN/m}^3\text{)}$ 、粘着力  $C'=8.0\text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、内部摩擦角  $\phi'=20^\circ$  )であった。この値は、他地域の森林表土のすべてに遍く当てはまるものではないが、従来、森林表土の物性値がほとんど解明されていなかった中で重要な知見であるといえる。

近年、自然再生推進法の施行を背景として生物多様性保全の気運が高まる中、地域の森林表土を利用する法面修復緑化工が注目されている<sup>10)</sup>。本研究で得られた成果は、森林表土を植生基盤材として利用する残壁修復緑化工の確立に寄与するものといえる。

## 参考文献

- 1) 採石技術指導基準編集委員会：詳解採石技術指導基準、ぎょうせい、p.234、2004
- 2) 新田新三：植栽の理論と技術、鹿島出版会、p.59、1994
- 3) 日本法面緑化技術協会：のり面緑化技術、山海堂、p.146-167、2005
- 4) 前出 3) p.46
- 5) 国土調査研究会編：土地・水情報の基礎と応用、古今書院、p.143、1992
- 6) 森林土壌研究会：森林土壌の調べ方とその性質(改訂版)、林野弘済会、p.33、1993
- 7) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、地盤工学会、p.190、2000
- 8) 地盤工学会： $N$ 値と  $C\cdot\phi$  の活用法、地盤工学会、p.140、1998
- 9) 東/西/西高速道路株式会社：設計要領第一集、p.1-44、2006
- 10) 亀山章監修：生物多様性緑化ハンドブック、地人書館、pp.187-199、2006

### 3. 森林表土を利用する植生基盤の安定解析

#### 3.1 緒言

露天採掘は、一般にベンチカット工法で行われることから、採掘跡地の残壁には小段と小段間の斜面部が形成される。生態系保全や景観の面からは、小段・斜面の区別なく双方ともに周辺の地山に同化した樹林化を目指すことが望ましい。しかし、斜面部は裸地化した急傾斜の岩盤斜面であるために、そのままの状態での樹木の導入を図ることは容易ではない。このため、これまでは、斜面部には樹木の導入は行わず草本やツタ植物類で緑化することとし、樹林化は小段だけを対象としてきた経緯がある<sup>1)</sup>。

一方、小段に樹木を導入する場合でも、樹木がベンチの存在を隠すほどに大きく成長するためには10年単位の長期間を要することから、この間は小段の形状が明瞭に残るなど景観面からも周辺と調和しにくい環境が長く続くこととなる<sup>2)</sup>。また、草本類では根系の緊縛力を期待できず、表層崩落など防災面での問題点も指摘されている<sup>1)</sup>。さらに、斜面部に木本類を導入せずに草本類だけとしておくことは、結果として樹木の侵入を妨げ、むしろ人為的に自然の回復を阻止する行為となってしまう。

これらのことから、自然回帰型修復緑化を行うためには、小段だけではなく斜面部にも木本類を導入することによって樹林化した植物群落を形成することが強く望まれている。このことを実現するためには、裸地化した残壁斜面部に樹木を永続的に生育させるための植生基盤を人為的に造成する必要がある<sup>4)</sup>。

一般に、道路切土の分野では、切土の勾配が1:0.8より急勾配となる場合には植生工による緑化は困難とされおり<sup>5)</sup>、周辺と違和感の少ない植物群落の形成を目指す場合には、先駆植物となる植物種子を植生基盤とともに吹付け施工し、先駆植物後に侵入する周辺在来植物による自然回復を意図する緑化が現在でも広く行われている。また、本研究で対象としている露天採掘跡残壁の修復緑化においてもこのような修復緑化が実態として行われてきた<sup>1)</sup>。

しかし、先駆植物は、期待する先駆的役割をなす反面、旺盛な繁殖力を持つがために容易に衰退しないばかりでなく、計画区域外に越脱することによって周辺在来の生態系を攪乱するなど、看過できない問題点も指摘されている<sup>5)</sup>。このことは、地域の生物多様性保全の観点からは決して好ましいことではなく、ひいては周辺景観と馴染まない地域環境を形成することにもなり兼ねない。

このような、不具合を少しでも回避し、在来の生態系の保全を目指す自然回帰型修復緑化を行うための有効な手段として、近年、森林表土を利用する緑化手法が注目されている<sup>6)</sup>。森林表土は、地域固有の遺伝子を保有した埋土種子を含むことから、これを緑化材として用いることは生物多様性保全の面からも好ましい。

森林表土の土壌断面については、前章の図2.3に示すとおりであり、埋土種子は、表層の深さ5cmの部分にすべての種が含まれ、ここに個体数の80%が含まれる<sup>7)</sup>ことが知られている。このことから、埋土種子を活用する場合には、図2.3に示す土壌学のA<sub>0</sub>-H層とA<sub>1</sub>層が



用いられることが多い<sup>8)</sup>。

このように、森林表土はそこに含まれる埋土種子を利用する手法が注目され、この種の研究<sup>9)-12)</sup>が旺盛であるが、本章では、このことを前提とした上で、森林表土の土壌部を植生基盤材として造成することを主な研究目的としている。

すなわち、本章では、森林表土に含まれる埋土種子だけの利用を直接の目的とするものではなく、地域固有の遺伝子を含む在来の「土壌」を植生基盤として利用することの可能性を検討することを目的としている。しかし、この種の研究は皆無であり、本研究での成果が果たす役割は決して小さくないと考える。

この観点から、本章では、森林表土の明確な土壌部である A 層と B 層とを植生基盤として造成することを考える。結果として、そこに埋土種子が含まれることは望ましいことではある。しかし、本研究では、地域の森林表土の土壌部に埋土種子が含まれていることを前提条件としているものではないことから、埋土種子を利用した修復緑化を意図する際には、植生基盤に埋土種子を混入すること、あるいは別途播き出すことを別工程として加える必要がある。

この考えから、本章では、前章で解明した森林表土の土壌部の工学的な特性をもとに、自然回帰型修復緑化法を開発することを目的として、森林表土の土壌部を用いた植生基盤を造成するための理論的検討を行った。

### 3.2 植生基盤の崩壊形態と従来安定解析

一般に、地山全体が均質な土質からなる斜面の崩壊は円弧すべりの形態を示すことが知られており、対策工も円弧すべりを適用した設計が実態として行われている<sup>13)</sup>。しかし、残壁面に造成される植生基盤の場合は、その厚さが残壁面の長さ比べて著しく薄いことから、崩壊の形態は事実上無限長斜面における平面すべりと考えることができる<sup>14)</sup>。

平面すべりの安全率は、すべり面上の土塊がすべり落ちる力とそれに抵抗する力との比で計算できるが、従来、計算式におけるすべり土塊の厚さは、土塊のすべりが重力によって引き起こされることのわかり易さから、鉛直方向の厚さで表現されるのが一般的である。すなわち、従来用いられている無限長斜面の平面すべり安全率は、**図3.1**に示す斜面上の土塊 A BCD の釣り合い状態から、(3.1) 式のように求められる<sup>15)</sup>。

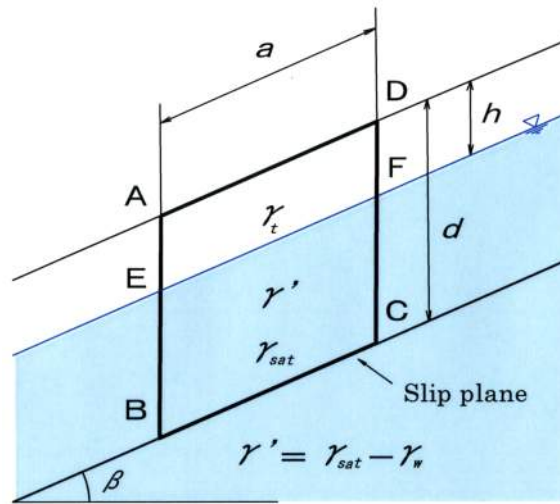


図3.1 従来の平面すべり安定解析式による土塊の釣り合い説明図<sup>15)</sup>

$$F_s = \frac{C' + \{ \gamma_t \cdot h + \gamma' (d - h) \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma_t \cdot h + \gamma_{sat} (d - h) \} \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots\dots\dots (3.1)$$

- ここに、
- $F_s$  : 安全率
  - $C'$  : 有効応力状態における土の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
  - $\phi'$  : 有効応力状態における土の内部摩擦角 (°)
  - $\gamma_t$  : 土の湿潤重量 (kN/m<sup>3</sup>)
  - $\gamma_{sat}$  : 土の飽和重量 (kN/m<sup>3</sup>)
  - $\gamma'$  : 土の水中重量 (kN/m<sup>3</sup>)
  - $h$  : 地下水位の深さ (m)
  - $d$  : 土の鉛直厚さ (m)
  - $\beta$  : 斜面の傾斜角 (°)

植生基盤は、厚さが 20cm 程度と薄いことから、関連分野の設計に際して、その厚さは実際の厚さで表現し規定されている<sup>16)</sup>。これに対して、従来の安定解析式は、実厚ではなく鉛直厚さで表現されている<sup>15)</sup>のが実情である。土塊の厚さを鉛直厚さで表現すると、斜面上で安定する土塊の厚さは傾斜が 45~50° 付近で最小となり、これより急勾配の斜面では土塊の鉛直厚さが増加に転ずる不具合を生じてしまう。

このことを示したのが図3.2である。図には、後述の本研究で新たに誘導した安定解析式を用いた計算結果をも示しているが、図から、傾斜 50° を超すような急斜面に対して従来の平面すべり安定解析式を適用するのは適当でないことがわかる。この不具合を是正する観点から、本研究ではすべり土塊の厚さを実際の厚さで表現できる平面すべり安定解析式を新

たに誘導し、これによって植生基盤の安定性を検討した。

なお、図3. 2における計算条件は、2つの式ともに同一で、 $\gamma_t=18$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $\gamma_{sat}=19$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $C'=5$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $\phi'=10$  (°) および  $h=0$  (m) とした。また、従来の式では上載荷重 ( $q$ ) を考慮していないことから、ここでは  $q=0$  とした。

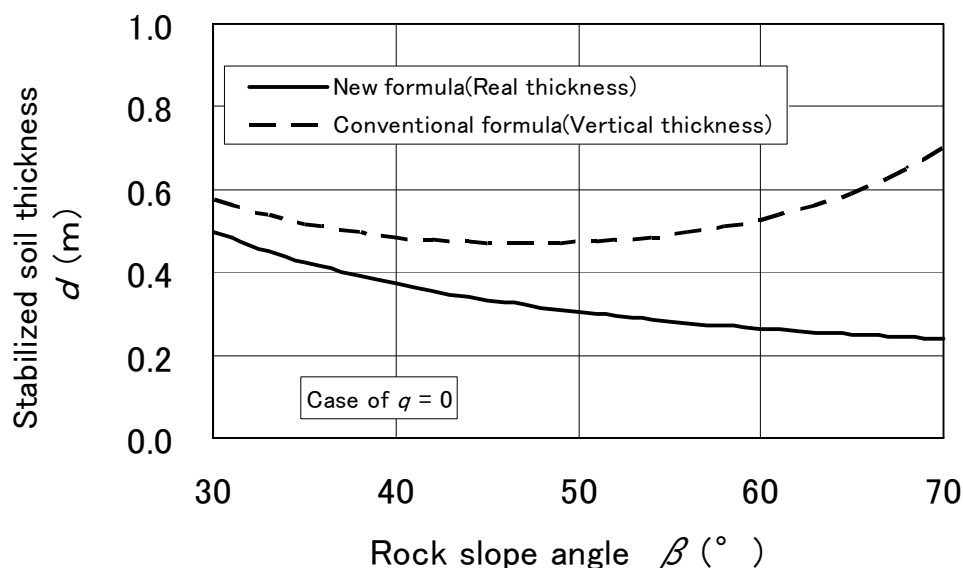


図3. 2 従来式と本研究で誘導した式による植生基盤の厚さの比較

### 3. 3 安定解析式の誘導

#### 3. 3. 1 植生基盤のすべり破壊

図3. 3は、残壁面上に造成された植生基盤の土塊が浸透水流のある残壁面上で釣り合っている状態を示したものである。土塊 ABCD に働く力をそれぞれ単位奥行き当たりで示すと、地表面の上載荷重  $W_0$  (kN/m)、地下水位面より上の土塊 AEFD の重量  $W_1$  (kN/m)、地下水位面より下の土塊 EBCF の重量  $W_2$  (kN/m)、すべり面に働くせん断抵抗力  $T$  (kN/m) と反力として働く有効垂直力  $N'$  (kN/m) および同じく反力として作用する水圧  $U$  (kN/m) である。

これらは、すべり面において土塊がすべり落ちようとする力  $\tau$  (kN/m<sup>2</sup>) とそれに抵抗して発現する土のせん断力  $\tau_r$  (kN/m<sup>2</sup>) に分けられ、安全率は両者の比 ( $\tau_r/\tau$ ) として定義される。

図3. 3(a)において、BE は流線に直交する等ポテンシャル線となるため、B 点を基準に考えると、B 点の全水頭は E 点のそれに等しく、E 点の全水頭の値は BH の長さに等しくなる。すなわち、B 点の全水頭 ( $h_p$ ) は (3.2) 式のようになる。

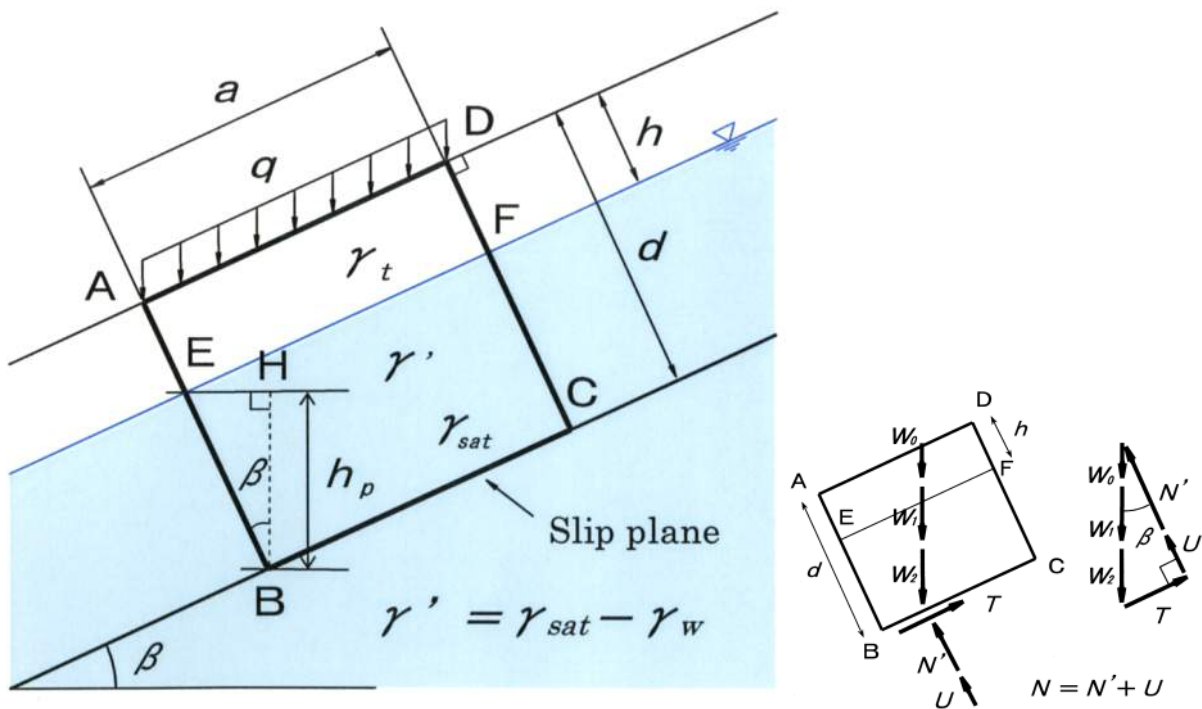
$$h_p = BH = EB \cdot \cos \beta = (d - h) \cdot \cos \beta \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

ここに、  $h_p$  : B 点の全水頭 (m)  
 $\beta$  : 残壁の傾斜角 (°)  
 $d$  : 斜面に直角方向の植生基盤の厚さ (m)  
 $h$  : 斜面に直角方向の地下水位の深さ (m)

また、EB 面と FC 面とに働く水圧の大きさは互いに同じ大きさで逆向きに働くから両者は釣り合っており、結局土塊に働く水圧は、BC 面に直角方向に働く水圧だけとなる。その大きさは (3.3) 式で表現できる。

$$U = \gamma_w \cdot a \cdot h_p = \gamma_w \cdot a \cdot (d - h) \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、  $U$  : BC 面に働く水圧 (単位奥行) (kN/m)  
 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $a$  : 植生基盤の長さ (m)



(a) Planting ground soil on rock slope

(b) Force balance of soil element on rock slope

図3.3 残壁面における植生基盤土塊の力の釣り合い状態

### 3. 3. 2 土塊に働く力の釣り合い

図3. 3(b)は土塊 ABCD に働く力の釣り合いを示したものである。土塊に働く重量は、上載荷重  $W_0$ 、地下水位面より上の土塊重量  $W_1$ 、地下水位面より下の土塊重量  $W_2$  の3つである。これらの合計の重量を底面に反力として働く垂直力  $N$  とせん断抵抗力  $T$  とで支えている。この場合、 $N$ は底面に反力として働く水圧  $U$  と同じく反力として働く有効垂直力  $N'$  の和である。また、土塊すべり面に働く垂直応力を  $\sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>)、せん断応力を  $\tau$  (kN/m<sup>2</sup>) とすると、これらは、それぞれ (3.4) ~ (3.10) 式のようになる。

$$W_0 = q \cdot a \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$W_1 = \gamma_t \cdot a \cdot h \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$W_2 = \gamma_{sat} \cdot a \cdot (d-h) = (\gamma' + \gamma_w) \cdot a \cdot (d-h) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$N = N' + U = (W_0 + W_1 + W_2) \cos \beta \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$T = (W_0 + W_1 + W_2) \sin \beta \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\sigma' = (N' / a) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\tau = (T / a) \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

ここに、 $q$  : 植生基盤に作用する上載荷重 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_t$  : 植生基盤の湿潤重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{sat}$  : 植生基盤の飽和重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma'$  : 植生基盤の水中重量 (kN/m<sup>3</sup>)

### 3. 3. 3 植生基盤土塊の安全率

図3. 3に示す力の釣り合い状態において、土塊がすべり落ちようとする力  $\tau$  は (3.10) 式に示す  $\tau = T / a$  であり、それに抵抗してすべり面で発現する土のせん断力  $\tau_f$  は、モールクーロンの式から (3.11) 式で表現できる。

$$\tau_f = C' + \sigma' \tan \phi' \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

ここに、 $\tau_f$  : すべり面で発現するせん断力 (kN/m<sup>2</sup>)

$C'$  : 有効応力状態での粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'$  : すべり面に働く有効垂直応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi'$  : 有効応力状態での内部摩擦角 (°)

これらの力の釣り合いから、安全率  $F_s$  を  $(\tau_f / \tau)$  として求めると (3.12) 式のようになる。

$$F_s = \frac{C' + \{q + \gamma_t \cdot h + \gamma' (d-h)\} \cos \beta \cdot \tan \phi'}{\{q + \gamma_t \cdot h + \gamma_{sat} (d-h)\} \sin \beta} \quad \dots (3.12)$$

### 3.4 植生基盤の造成

#### 3.4.1 残壁の傾斜と植生基盤の安定性

表3.1は、(3.12)式で計算した植生基盤の厚さと安全率との関係をまとめたものである。また、図3.4はその関係を図で示したものである。ここでの入力値は、表2.4に示す植生基盤の地山設計定数である。特に、すべり面の内部摩擦角については、残壁の地質や表面の状態などを勘案して、通常は $\phi \sim (2/3)\phi$ を採用することになるが、ここでは、ごく普通に平滑に仕上げた硬質岩盤を考え、事例調査した植生基盤の $2/3^{17}$ の値を適用した。なお、植生基盤に作用する樹木の重量あるいは風圧や雪などの荷重は上載荷重として一括し、 $5.0 \text{ kN/m}^2$ を作用させた。

図3.5によると、同一の植生基盤厚さに対して、残壁の傾斜角が大きくなるほど、また、各傾斜の残壁とも植生基盤の厚さが増加するほどそれぞれ安全率が低下する傾向を示している。このことは、経験的にも知られるように残壁の傾斜角が大きくなるほど造成できる植生基盤の厚さが薄くなることを裏付けるものである。

図3.5は、残壁に安定した植生基盤を造成できる安全率を1.20とし、残壁の傾斜角と植生基盤の厚さとの関係をみたものである。図より、残壁の傾斜角が大きくなるほど造成できる植生基盤の厚さが薄くなる傾向が明瞭となり、例えば、傾斜角 $\beta=45^\circ$ と $60^\circ$ の残壁に対して、造成できる植生基盤の厚さはそれぞれ約40cmおよび20cm程度となる。すなわち、本研究で調査した森林表土を植生基盤として利用する場合、傾斜が $60^\circ$ の残壁に対して厚さ20cm程度の植生基盤を造成することは可能であると判断できる。

表3.1 残壁の傾斜角に応じた植生基盤の厚さと安全率との関係

Thickness of planting ground $d$ (m)	Bulk unit weight $\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Cohesion $C'$ ( $\text{kN/m}^2$ )	Internal friction angle $\phi'$ ( $^\circ$ )	Surface load $q$ ( $\text{kN/m}^2$ )	Ground water level $h$ (m)	Safety factor $F_s$				
						Rock slope angle $\beta$ ( $^\circ$ )				
						45	50	55	60	65
0.05						2.1	1.9	1.8	1.7	1.6
0.10						1.9	1.7	1.6	1.5	1.4
0.15						1.7	1.5	1.4	1.3	1.3
0.20						1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
0.25						1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
0.30						1.3	1.2	1.1	1.0	1.0
0.35						1.2	1.1	1.0	0.9	0.9
0.40						1.1	1.0	0.9	0.9	0.8
0.45						1.1	1.0	0.9	0.8	0.8
0.50						1.0	0.9	0.8	0.8	0.7

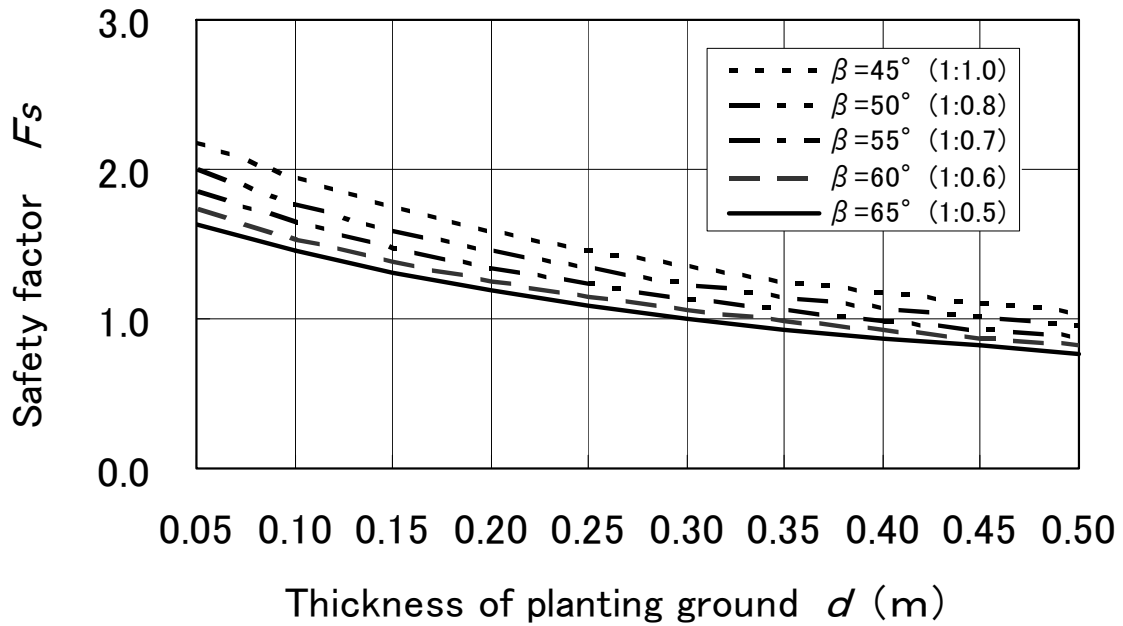


図3.4 植生基盤の厚さと安全率との関係

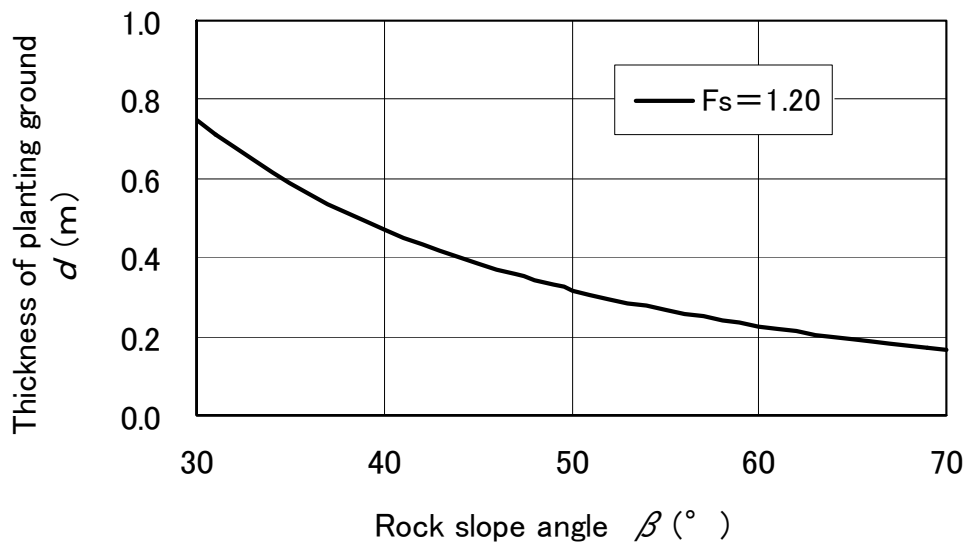


図3.5 残壁の傾斜角と植生基盤の厚さとの関係(安全率  $F_s=1.20$  の場合)

### 3.4.2 植生基盤造成の可能性

図3.6は、傾斜角が  $50^\circ$  (1:0.8)の残壁に対して、植生基盤の物性値が異なる場合の厚さと安全率との関係を見たものである。図では、本研究で事例調査した植生基盤の他に、「乾燥した砂のように粘着力を期待できない土」( $C=0$ 、 $\phi=13$ )と、「純粋な粘土のように内部摩擦角を期待できない土」( $C=8.0$ 、 $\phi=0$ )の双方についても検討した。後者の場合は事例調査の植生基盤と余り変化のない安全率を示すのに対して、前者の場合は安全率がほぼ「ゼロ」に近くなる。すなわち、乾燥した砂のように粘着力を持たない土を植生基盤として造成

することは不可能であることがわかる。このことから、残壁に植生基盤を造成するためには、基盤材は粘着力を有することが必要であることが明らかとなった。

また、本研究で事例調査したような森林表土を基盤材として用いる場合、傾斜  $60^\circ$  の残壁に対して厚さ 20 cm 程度の植生基盤を造成できることをすでに示したが、これは森林表土の土壌が原位置で保有している粘着力をそのまま発現した場合であることを条件としている。この粘着力には植物の根系による緊縛力も含まれていることから、掘削して乱した森林表土にこのような粘着力を期待することには無理がある。したがって、残壁の修復緑化の基盤材として周辺の森林表土を利用する場合には、掘削によって乱され低下した分の粘着力を付与する必要がある。また、他の土を造成する場合でも、残壁の傾斜や植生基盤の厚さに応じた粘着力を付与することが必要となる。例えば、本研究で事例調査した森林表土を適用した植生基盤を事前に設計するためには、実際の地山で想定される粘着力、すなわち、表 4 に示すように  $C=8.0$  ( $\text{kN/m}^2$ ) 程度の粘着力を期待できる何らかの対策を考える必要がある。このための手法としては、雨水による局所的な侵食防止などを兼ねたネット工の施工あるいは基盤材に粘着材を添付・混合することなども一案である。

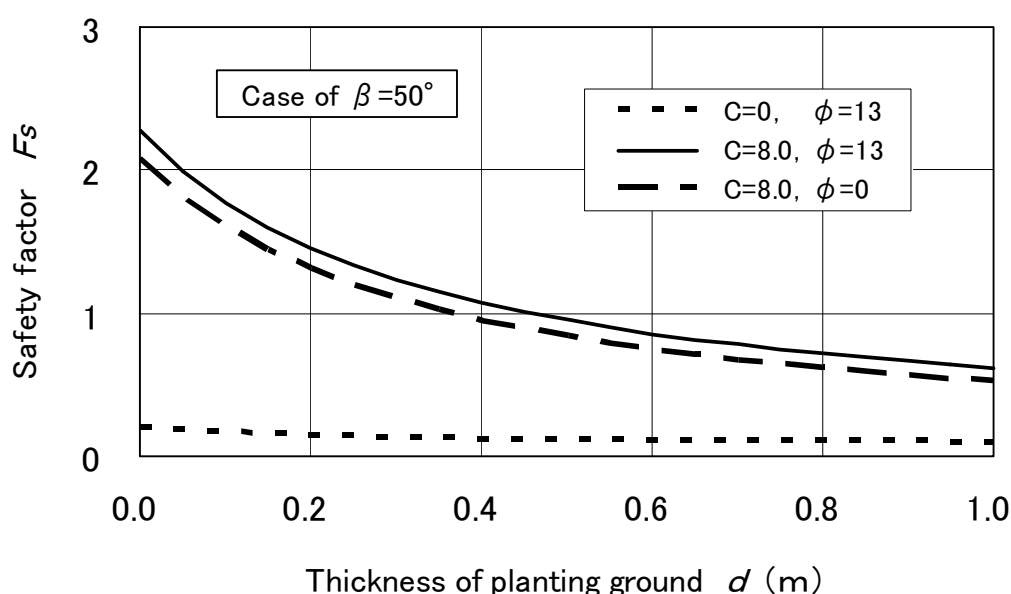


図3.6 植生基盤の物性値の違いによる安全率の変化 ( $\beta=50^\circ$  の場合)



### 3.5 結言

本章では、裸地化した斜面部に木本類(樹木)を導入する観点から、植生基盤の造成に関する基礎的検討を行った。

まず、事例研究として、第2章で実施した岩盤斜面上の植生基盤に関する調査資料をもとに残壁に植生基盤を造成することの可能性を検討した。また、この過程で新たな安定解析式を誘導した。

本章で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 平面すべり安定解析式について、従来、鉛直厚さで表現されてきた土塊の厚さを実際の厚さで表現する方法に改良した。このことによって、従来の式では安定する土塊の厚さが増加に転じてしまう傾斜  $50^\circ$  を超すような急斜面に対しても、土塊の厚さを傾斜で補正することなく直ちに表現できるようになった。
- (2) 粘着力を全く期待できない土 ( $C=0$ ) では、それを植生基盤として傾斜する残壁に造成することは不可能である。これに対して、内部摩擦角を期待できない土 ( $\phi=0$ ) では、何らかの粘着力を見込める限り植生基盤として造成できることを理論的に解明した。例えば、本研究で事例調査した森林表土を植生基盤材としてそのまま用いる場合、粘着力として  $8.0 \text{ kN/m}^2$  程度を期待でき、傾斜  $60^\circ$  の残壁に対して厚さ  $20 \text{ cm}$  程度の植生基盤を造成できることがわかった。
- (3) 傾斜した残壁に安定した植生基盤を造成するためには、植生基盤材に粘着力を付与しなければならない。そのための手法としては、例えば金網の設置や粘着材の添付など、粘着力を期待できる何らかの方策を考える必要がある。

以上、自然回帰型修復緑化を推進する観点から、残壁の斜面部に安定した植生基盤を造成するための理論的考察を行った。次章では、本研究の成果を前提として、斜面部に樹木を導入した場合の自然回帰の状態を景観評価実験によって解明するシステムの構築を行った。

### 参考文献

- 1) 採石技術指導基準編集委員会：詳解採石技術指導基準、ぎょうせい、2004
- 2) 大竹照光・大塚尚寛・志田寛・阿部洋祐：残壁の修復緑化における植物の生長過程を指標とした自然回帰度評価、資源・素材学会春季大会講演概要集、Vol. I、p.139-140、2006
- 3) 地盤工学会：自然環境の保全と緑化、地盤工学会、p.109、2004
- 4) (社)日本道路協会：道路土工—のり面工・斜面安定工指針、p.206、丸善、1999
- 5) 鷲谷いづみ・草刈秀紀：自然再生事業—生物多様性の回復を目指して、築地書館、

- 6) マザーソイル協会：マザーソイル工法・設計・施工の手引き（案）、マザーソイル協会、pp75、2005
- 7) 中越信和：再度山の森林群落における埋土種子集団の研究、再度山永久植生保存地調査報告書第2回、p.69-94、19851
- 8) 地盤工学会：自然環境の保全と緑化、地盤工学会、p.19-24、2004
- 9) 細木大輔・吉永知恵美・中村勝衛・亀山章：森林表土を用いたのり面緑化で成立する植物群落の特性、日本緑化工学会誌、Vol.27、No.1、p.114-119、2001
- 10) 細木大輔・米村惣太郎・亀山章：森林表土を用いて緑化したのり面における初期の木本の生育として、日本緑化工学会誌、Vol.28、No.1、p.73-78、2002
- 11) 坂本なつ子・内田泰三：積雪寒冷地にみる崩壊表土の播き出し材料としての利用可能性、日本緑化工学会誌、Vol.30、No.4、p.649-656、2004
- 12) 中村圭吾：湿地・湖沼の自然再生技術、土木技術、Vol.61、No.3、p.71-76、2006
- 13) 日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針、丸善、p.345-353、1999
- 14) 松井保監訳：植生技術による斜面安定工法、森北出版、p.46、2004
- 15) 地盤工学ハンドブック編集委員会：地盤工学ハンドブック、地盤工学会、p.168、1999
- 16) 日本法面緑化技術協会：のり面緑化技術、山海堂、2005
- 17) 日本道路協会：道路土工—擁壁工指針、丸善、p.67、1999

## 4. 残壁の修復緑化における自然回帰度評価

### 4.1 緒言

自然環境の破壊が全世界的な問題となり生物多様性の保全が強く叫ばれている今日、生態系は単に保全の対象であるばかりでなく、積極的に復元あるいは修復すべき対象となっている<sup>1)</sup>。生態系の保全や復元・修復の施策を効果的に推進するためには、生態系を何らかの形で評価することが重要である<sup>2)</sup>。例えば、生態系の保全の観点からは、植生の自然度、希少性、多様性あるいは動物の生息環境などに注目した定量的な評価が考えられる。これに対し、復元・修復の観点からは、目標とする生態系復元に対する到達の度合いを知ることで事業の効果を評価することなどが考えられる。

資源開発における露天採掘は、人類の持続可能な発展のために必要不可欠な事業ではあるが、規模の大小を問わず必ず自然の改変を伴うこととなる。そのため、事後の生態系の復元・修復が十分に行われなければ、それは明らかな自然破壊行為として社会的にも受け入れられず<sup>3)</sup>、事業そのものの存在意義を問われることとなる。

このような状況の中で、本研究の主題である自然回帰型修復緑化計画を策定する際には、残壁の安定確保、導入する植物の選定、植生基盤の整備を必要とするが、修復緑化過程における自然回帰の度合いを知ることはさらに重要な課題である。自然回帰の度合い、すなわち自然回帰度は、事前に掲げた修復緑化目標に対する到達の度合いであり、自然回帰型修復緑化計画を効果的に策定する上で不可欠であることから、評価手法の確立が急がれている<sup>4)</sup>。

しかし、この種の研究事例は少なく、生態学的な側面から土壌動物相の変化やシダ植物の種数などを指標とした幾つかの研究<sup>5)7)</sup>を認める程度に過ぎない。また、これらの研究はいずれも修復緑化の過程における自然回帰の度合いを結果として検証しようとするものであり、それを事前の修復緑化の策定に生かそうとするものではない。修復緑化の過程でその達成度を知ることは重要であるが、残壁の自然回帰型修復緑化計画を策定する際に必要となるのは、結果としての検証だけではなく、むしろ自然回帰の状態を事前にシミュレーションしてそれを緑化計画の策定に取り込むといった工学的評価システムの手法である。

そこで、本章では自然回帰度の評価システムを確立するための基礎資料を得る観点から、指標として樹高の変化に着目し緑化シミュレーションを用いた評価実験によって自然回帰度を検討した。すなわち、生態系を包含する自然回帰度を景観面からアプローチし評価するものである。

本章では、従来型の修復緑化のように残壁の小段だけに樹木を植栽した場合と、本研究で取り上げた、小段と斜面部の双方に樹木を導入する自然回帰型修復緑化の場合の2通りについて、それぞれの自然回帰状態を検討した。

なお、第2章で述べたように、岩盤斜面において、植生基盤の厚さが20cm程度あれば高木樹が生育することは、実際の岩盤斜面地山のナチュラルアナログから明らかとなっている<sup>8)</sup>。また、第3章では、平面すべり安定解析によって、傾斜60°の残壁面に厚さ20cm程度

の植生基盤を造成できることを明らかにしている<sup>8)</sup>。本章は、このように第 2、3 章に示す調査・研究成果に基づくもので、その前提として、森林表土を用いた植生基盤の造成による修復緑化を考えており、対象は傾斜 60° 以下の露天採掘跡残壁で、緑化目標を 10m 程度以下(主に 6~8m)の植物群落の形成とするものである。

## 4.2 自然回帰度評価

本研究の緑化シミュレーション画像を用いる実験は、広義の景観評価に類する実験である。この種の実験は実際の現場で行うことを理想とするが、所定の原位置に樹木の生長段階に応じた状況を設定することはまず不可能である。このため、一般には、写真や画像を用いた景観評価が行われているのが実態であり、本章でも画像を用いた評価実験を実施することとした。本研究は、その目的から、実際のサイトを持たない架空の画像を用いることも可能である。しかし、実際の現場に基づかない画像を創造するのはむしろ容易なことではなく、実際の地山状態とは乖離した現実味のない画像となる可能性も危惧される。そこで、本研究では、景観上なるべく実際の状態に近い緑化シミュレーション画像を作成する観点から、実在の残壁をその対象とした。

### (1) 研究対象の残壁

研究対象とした残壁は、岩手県八幡平市西根町地内の採石場の岩盤斜面で、ベンチ高さ 10 m、勾配 1:0.6 (59°)、最大高さ約 140m である。

残壁は現時点でまだ修復緑化が行われていないことから、ここでは、この状態の残壁に対して、樹木を小段だけに導入する従来型修復緑化ならびに小段と斜面部の双方に導入する自然回帰型修復緑化の 2 通りの場合について、樹高が変化する状況をフォトモンタージュ画像で作成し、これを評価実験に供した。

図4.1に残壁の所在位置図を、また、図4.2には残壁の現況をそれぞれ示す。

### (2) 評価方法

図4.3に、フォトモンタージュによる緑化シミュレーションと評価実験による自然回帰度評価の手順を示す。ここでは、まず、所定の位置から対象残壁のカラー写真撮影を行い、この写真をベースとして、フォトモンタージュによる緑化シミュレーション画像を作成する。つぎに、作成した画像を評価実験に供することによって、景観の面から自然回帰度を評価し判定する。



図4.1 残壁の位置図(所在地:岩手県八幡平市西根町地内)  
〔国土地理院2万5千分の1地形図「平館」・「沼宮内」利用:縮尺任意〕



図4.2 残壁の現況写真(平成18年)

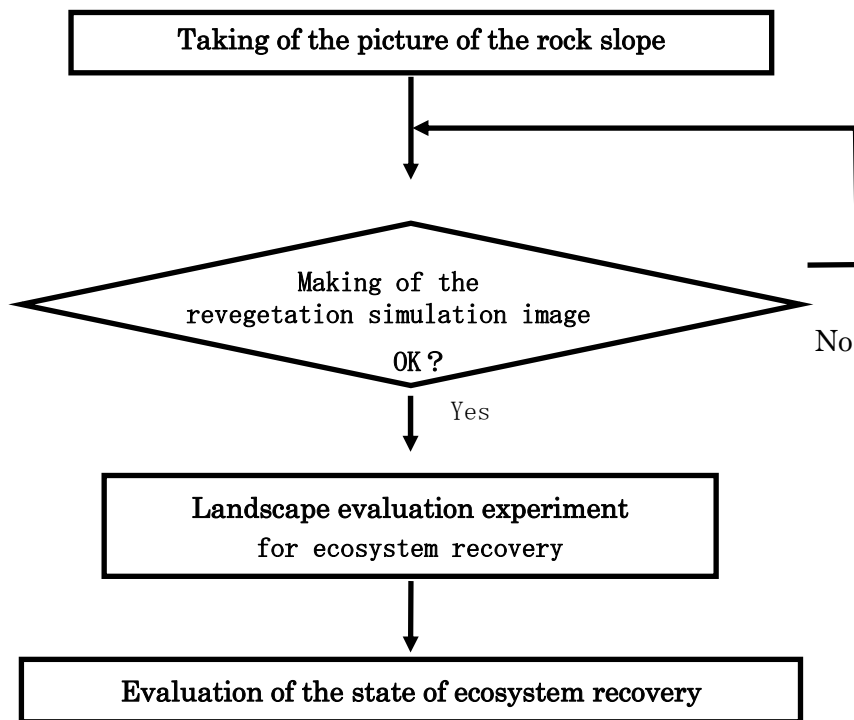


図4.3 自然回帰度評価の流れ

### (3) 緑化シミュレーション

#### ① 写真撮影

緑化シミュレーションは、残壁の修復緑化の状況をシミュレーションするもので、シミュレーション画像のベースは現地で撮影する写真である。

ここでは、図4.1に示すように、地域で残壁が目立つ位置として残壁のほぼ真南を東西に走る生活幹線道路を選定し、この位置から35mmフィルム換算38mm焦点距離のレンズを用いたデジタルカメラによってカラー写真を撮影した。視点距離は約1.6kmの中距離景<sup>9)</sup>である。この距離は、個々の樹木のアウトラインが問題となり、樹木のつくりだす「あや」が視覚的な興味の対象となる領域である<sup>9)</sup>。撮影の時期は、残壁の修復緑化を検討する観点から、周辺の緑が濃い状態である夏期とした。緑の濃い植生状態は、緑化復元の目標として比較検討する観点からは、条件が最も厳しい状態といえる。

#### ② フォトモンタージュ

緑化シミュレーション画像は、撮影した現況の写真をベースにしたフォトモンタージュ法によって作成した。すなわち、PC画面上に取り込んだ現況写真を用い、所定の大きさの樹木を画像上でコピーあるいは創作することによって作成した。フォトモンタージュ画像の作成には市販のソフト「Photoshop」(Adobe Systems社製)を用いた。

実際の修復緑化においては、生育する樹種や生長速度あるいは樹木の密度などは実態としてまちまちであると考えられる。このため、本研究では、設定した樹木密度に対して、樹高

の変化には一定の規則性を与えずに視覚を優先させてばらつかせ、複数人による見た目の自然さを考慮して画像上に表現した。特に、樹木の配置に際しては、見た目に規則性のある幾何学模様とならないよう特に注意した。また、樹種については画像の不確定要素を少しでも少なくする配慮から針葉樹を割愛し広葉樹だけを用いた。

### ③ 高さ比

樹木は連続的に生長することから、樹木の高さ（樹高）の変化状態をすべてシミュレーションすることは不可能である。そこで、本研究では、樹高をベンチ高さに対する比率で示し、これを「高さ比 ( $r$ )」と定義することによって、樹高の変化を高さ比の大小で表現した。この場合、所定の高さ比の画像は、規定の樹高の樹木数を6～7割配置し、他の3～4割はその前後の樹高をランダムに配置することで作成した。樹冠幅は樹高の1/2～1/3程度を目安に適宜変化させた。

図4.4に、ここで定義した高さ比の説明図を示す。

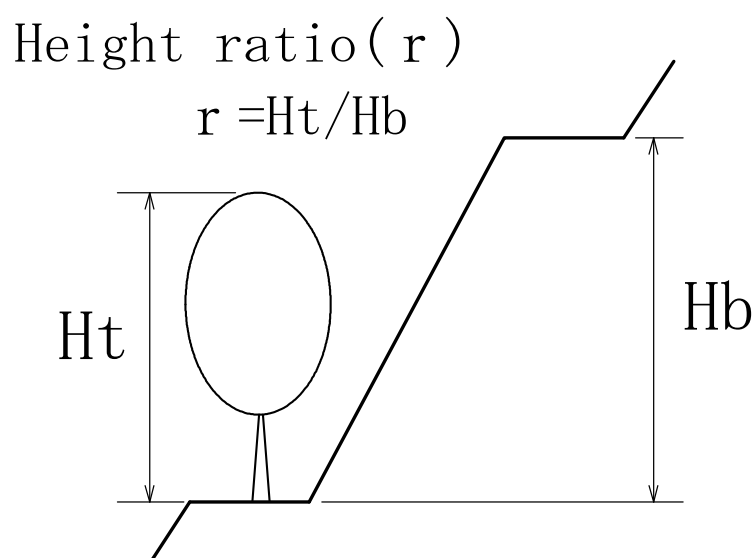


図4.4 高さ比( $r$ )の説明図

## (4) 実験方法

### ① 評価手法

自然回帰に関する評価実験には、その結果をもとに自然回帰の度合いを簡便に把握する観点から、感性を序数尺度で評価する評定尺度法を適用した。実験は、被験者に呈示した所定の高さ比の画像ごとに、次に示す5つの評価項目それぞれに対して、「全く思わない」から「非常に思う」までの7段階の評定尺度で評価してもらう方法を採用した。

### ② 評価項目

本研究では、自然回帰状態を把握するための評価項目として、「周辺の風景と同化している(Harmonious)」、「自然な感じがする(Natural)」、「緑化部分に違和感がない(Suitable)

e)」、「緑が豊かである(Luxuriant)」、「自然景観として許容できる(Acceptable)」の5項目を設定した。

### ③ 画像の呈示

実験に際しては、高解像度液晶プロジェクターを用い、被験者に対して、高さ比の異なる緑化シミュレーション画像を、現位置で見た場合とほぼ等しい大きさにスクリーン映写し呈示した。画像を呈示した順番はランダムとし、同じ画像を2回呈示した。ランダムに2回呈示すると安定した評価結果が得られることは、既往の研究<sup>10)</sup>によってすでに確認されている。

### ④ 被験者

被験者は、地域の景観に先入観や利害関係を持たない岩手大学工学部の4年次学生53名である。

## 4.3 従来型修復緑化における自然回帰度評価

### 4.3.1 緑化シミュレーション画像

図4.5は、残壁の従来型の修復緑化方法を示したものである。従来の修復緑化は、残壁の斜面部が裸地化した急傾斜岩盤斜面であるための植生基盤造成の難しさから、小段だけに樹木を植栽し斜面部には草本類を適用する方法が多用されてきた。これに対して、本研究で取り上げた自然回帰型修復緑化は、在来生態系保全の観点から、小段だけではなく斜面部にも木本類(樹木)を導入するものである<sup>11)</sup>。

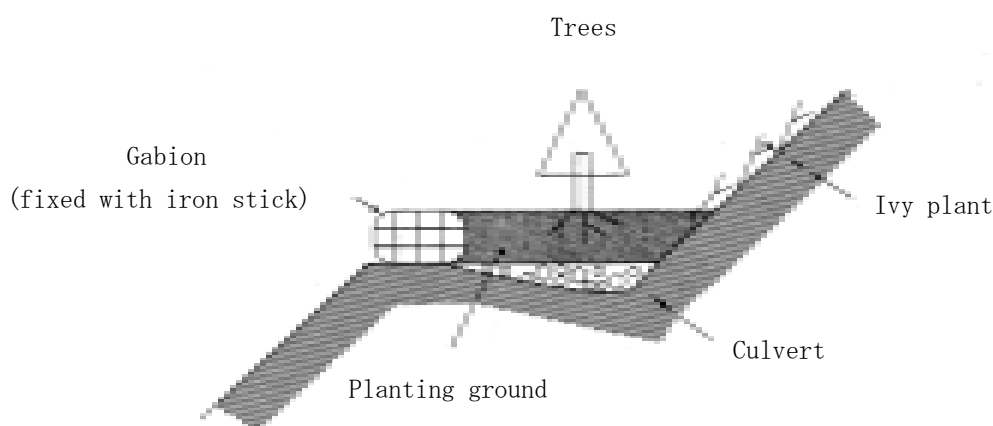


図4.5 従来型の修復緑化方法

本節ではこのことを前提として、従来型の修復緑化を行った場合の自然回帰状態を把握し、自然回帰型修復緑化策定のための基礎資料を得ることを目的として、樹木を小段だけに導入した場合の自然回帰度の検討を行った。

図4.7～図4.12は、従来型の修復緑化法において、小段に樹木が生長する場合の高さ比( $r$ )が、 $r=0$ (下草だけ)、0.6、0.8、1、1.2および1.4の6段階に変化したときの緑化シ



ミュレーション画像を示したものである。

この場合、小段への樹木の植栽は 2.5m 間隔の千鳥配置を想定している。実際の修復緑化においては、種々の草本類のほか低木類などの繁茂が想定されるが、これらは中距離景観面からは識別が不可能であることから、シミュレーション画像としては所定の樹木の背景として固定し、樹高と樹冠だけを変化させた。樹高と樹冠の変化については、4.2節(3)に記載したとおりである。



図4.7 緑化シミュレーション画像(従来型  $r=0$ :下草だけ)



図4.8 緑化シミュレーション画像(従来型  $r=0.6$ )



図4. 9 緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 0.8$ )



図4. 10 緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1$ )



図4. 11 緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1.2$ )



図4. 12 緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1.4$ )

### 4. 3. 2 評価実験

実験では、前 4.3.1 項で示した高さ比 ( $r$ ) の異なる 6 枚のシミュレーション画像に現況の緑化前の写真画像を加えた合計 7 枚の画像を呈示した。画像を呈示した順番は、緑化前→ $r=0.8$ → $1.2$ → $0.6$ → $1$ → $1.4$ → $0$ →緑化前→ $0.6$ → $0$ → $1.2$ → $1$ → $0.8$ → $1.4$  とし、同じ画像をランダムに 2 回呈示した。

図4. 13は、7段階の評定尺度に 1~7 の数値を与え、被験者の評価結果の平均値をプロットしたものである。図をみると、5つの評価項目とも、高さ比の増加と共に平均値が右側にプロットされ、樹木が大きくなるほど自然回帰度が高くなる結果を示している。ただし、5つの評価項目には多少の差が見られ、特に「緑が豊かである(Luxuriant)」については、高さ比が 0.8 以上になると7段階中の4段階目(どちらともいえない)を超えており、周辺の地山が緑であることによる厳しい条件の中でも、色調の回復は早い段階でよい印象を受けるものと考えられる。また、この項目と「自然景観として許容できる(Acceptable)」の2つは他の3項目よりも右側に位置している。この2項目に比べて相対的に評価の低い他の3項目は、いずれも周辺景観との比較を評価の視点とする項目であることから、自然回帰状態の評価には、周辺との差異が目立つ小段の”横筋模様”の影響が無視できないものと推察する。

このことを念頭に全体を大局視した場合、高さ比  $r$  が概ね 1~1.2 を超えると、”残壁自体は周辺とやや違和感を感じず、植生はほぼ自然に回帰した状態に見なせる”との解釈が可能と考えられ、特に、高さ比が 1.2 以上になると、5項目のうちの4項目がほぼ[4]を超える状態となる。

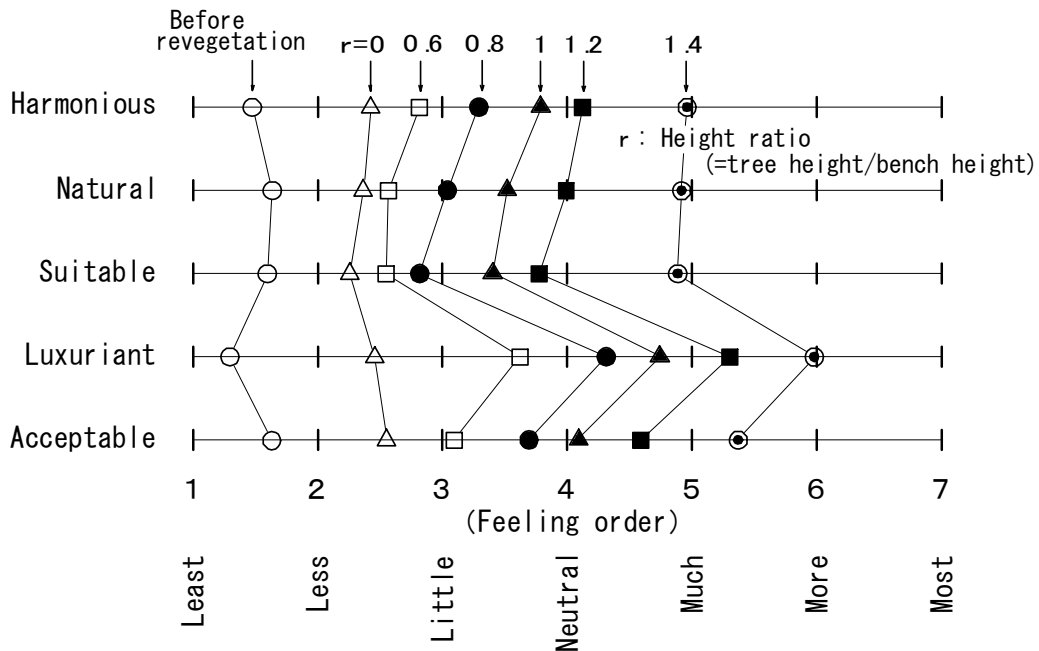


図4. 13 景観評価実験結果(従来型)

残壁の修復緑化において、緑化が全くなされていない状態から、「どちらともいえない(Neutral)」[4]の状態まで復元することは、ひとつの目安としてほぼ自然回帰の状態になったものと評価できる。この観点から、[4]を概ね超えた状態を「ほぼ自然回帰の状態」と解釈すると、そのときの高さ比は、1.2 程度になると判断される。

### 4.3.3 自然回帰度

図4.14は、高さ比と7段階で評価した自然回帰度との関係を示したものである。5つの評価項目それぞれについて、両者の間には、ほぼ正の相関関係が認められ、樹木が大きくなるほど自然回帰度が高くなることがわかる。本研究の評価実験にはいくつかの条件を前提として含むが、いま、前 4.3.2 項の考察から、5つの評価項目に対して、7段階中の4段階目である「どちらともいえない(Neutral)」[4]を超えた状態をほぼ自然回帰の状態と仮定すると、このときの高さ比は概ね 1.2 となる。この植生状態は、小段に生育する樹木の幹が、下の小段に生育する樹木の樹冠によって覆われ目立たなくなる状態とも想定される。このことも含めて、自然回帰といえる植生の状態となるためには、樹木の高さがベンチ高さよりも十分に高くなることがひとつの条件になる可能性を示唆している。

図4.15に、ほぼ自然回帰の状態とみなせる高さ比 1.2 のシミュレーション画像を示す。

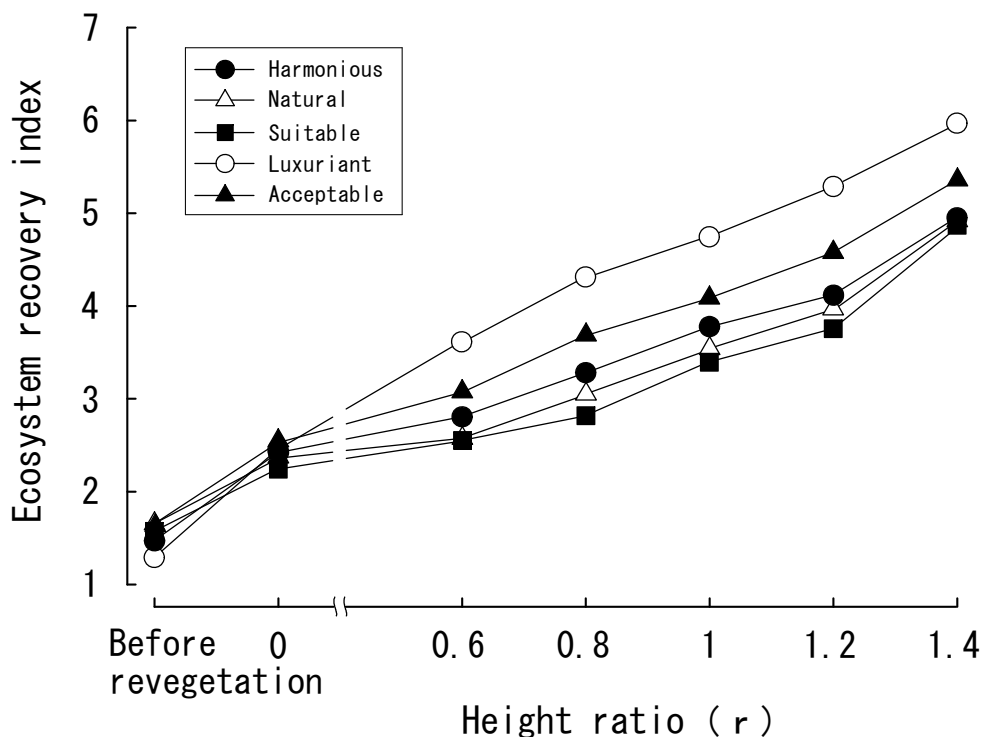


図4.14 高さ比と自然回帰度との関係(従来型)



図4. 15 ほぼ自然回帰状態とみなせる高さ比  $r = 1.2$  の画像(従来型)  
(図 4.11 に同じ)

#### 4. 4 自然回帰型修復緑化における自然回帰度評価

自然回帰型修復緑化の目的は、残壁の修復緑化を行いつつ周辺の生態系や生物多様性の保全をはじめとして自然環境と調和のとれた植物群落を形成することにある。このためには、従来のような小段だけではなく斜面部を含む残壁全体を樹林化することが不可欠であり、この場合の自然回帰度を把握することが重要である。この点に関して筆者らは、残壁斜面部に安定した植生基盤を造成することを目的に、無限長平面すべり安定解析式を適用した理論的考察を行い、傾斜  $60^\circ$  の残壁に厚さ  $20\text{ cm}$  程度の植生基盤を造成できることを既に報告している<sup>8)</sup>。

この観点から、本節では小段と斜面部の双方に樹木を導入した場合、すなわち本研究の自然回帰型修復緑化の場合における自然回帰度の評価・検討を行った。

##### 4. 4. 1 緑化シミュレーション画像

図4. 16～図4. 20は、小段と斜面部の双方に樹木を導入する自然回帰型修復緑化において、樹木の高さ比 ( $r$ ) を、 $r = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  および  $1$  の5段階に変化させたときの緑化シミュレーション画像を示したものである。

樹木の植え付け密度は、残壁に連続する自然地山森林の調査結果をもとに原則として  $5\text{ m}$  四方 ( $25\text{ m}^2$ ) の面積に1本としこれをランダムに配した。この場合も前節と同じように、樹

木と樹冠の大きさ以外のパラメータは変化させずに固定したシミュレーションを行った。その他の条件は前4. 3節に同じである。



図4. 16 緑化シミュレーション画像(自然回帰型  $r = 0.2$ )



図4. 17 緑化シミュレーション画像(自然回帰型  $r = 0.4$ )



図4. 18 緑化シミュレーション画像(自然回帰型  $r = 0.6$ )



図4. 19 緑化シミュレーション画像(自然回帰型  $r = 0.8$ )





図4. 20 緑化シミュレーション画像(自然回帰型  $r = 1$ )

#### 4. 4. 2 評価実験

実験では、被験者に対して緑化前と高さ比  $r = 0$  (両者とも前節の場合と同じ) および前 4. 4. 1 項で作成した高さ比の異なる 5 つの緑化シミュレーション画像を呈示した。画像を呈示した順番は、緑化前→ $r=0.8$ → $0.4$ → $0.2$ → $0.6$ → $1$ → $0$ →緑化前→ $0.4$ → $0$ → $0.6$ → $1$ → $0.2$ → $0.8$  とし、同じ画像をランダムに 2 回呈示した。実験の条件は、前 4. 3 節の場合と同じである。

図4. 21は、前節の場合と同様に 7 段階の評定尺度に 1～7 の数値を与え、被験者の評価結果の平均値をプロットしたものである。図より、5 つの評価項目のほとんどについて、高さ比の増加に対応して平均値が右側にプロットされる傾向がみられ、樹高が大きくなるほど自然回帰度が高くなることを示している。ただし、5 つの評価項目には多少を認め、特に「緑が豊かである(Luxuriant)」については、前節の従来型の場合(図 4. 13)と同じように、他の 4 つの項目に比べてより右側にプロットされる傾向がみられる。この原因としては、緑化前の残壁が緑の全くない裸地状態であることから、緑の復元による自然回帰の印象は他の項目よりも相対的に強くなることなどが考えられる。また、この項目と「自然景観として許容できる(Acceptable)」の 2 つは他の 3 項目よりも右側に位置しているが、他の 3 項目は、いずれも周辺景観との比較を評価の視点とする項目であることから、自然回帰状態の評価には、周辺との差異を印象付ける樹木の間に見える残壁の割合が影響しているものと推察する。また、図4. 21によると、「緑が豊かである(Luxuriant)」以外の 4 項目では、いずれも高さ比 0. 4 の場合の評価が 0. 2 の場合よりも僅かではあるが低くなっている。これは、樹木が高

高さ比 0.4 程度にまで生長すると、樹木の存在が 0.2 の場合よりもむしろ目立つ状態となり、樹木の点在するイメージを強調してしまうことによるものと考えられる。

このように、自然回帰の度合いは評価項目によって多少の差を認めるが、全体を大局視した場合、高さ比  $r$  が 0.6 以上になると、各評価項目は概ね[4]程度またはそれを超える状態となる。残壁の修復緑化において、緑化が全くなされていない状態から、「どちらともいえない(Neutral)」[4]の状態までに復元することは、前 4.3 節に示す従来型の場合と同様に、ひとつの目安として自然回帰の状態になったとの解釈ができる。この観点から、[4]を概ね超えた状態を「ほぼ自然回帰の状態」と解釈すると、そのときの高さ比は、0.6 程度になると判断される。

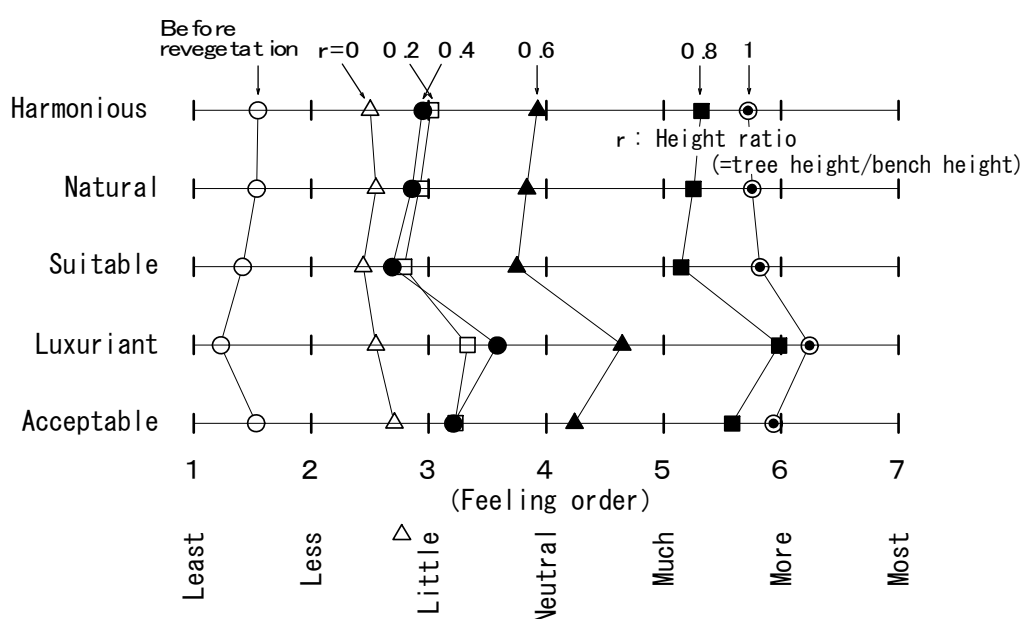


図4. 21 景観評価実験結果(自然回帰型)

#### 4. 4. 3 自然回帰度

図4. 22は高さ比と7段階で評価した自然回帰度との関係を示したものである。図より、高さ比と自然回帰度との間にはほぼ正の相関関係が認められ、樹高が大きくなるほど自然回帰度が高くなるのがわかる。しかし、「緑が豊かである(Luxuriant)」を除く4項目では、高さ比 0.2 の場合に比べて 0.4 の評価が低下しているのがわかる、これは、前 4.4.2 項でも触れたように、0.4 の場合は樹木の大きさが 0.2 の場合よりも、その点在する状態を強調してしまうことによるものと推察する。

いま、図 4.22 において、前節と同様に、5つの評価項目に対して7段階中の4段階である「どちらともいえない(Neutral)」を超えた状態をほぼ自然回帰の状態と仮定すると、このときの高さ比は概ね 0.6 となる。すなわち、残壁の小段と斜面部の双方に樹木の生育を想定した自然回帰型修復緑化の場合、自然回帰といえる植生の状態には、樹木の高さがベンチ高さの

約6割程度となるのがひとつの条件になると考えられる。

図4. 23には、ほぼ自然回帰状態とみなせる高さ比 0.6 のときのフォトモンタージュ画像を示した。

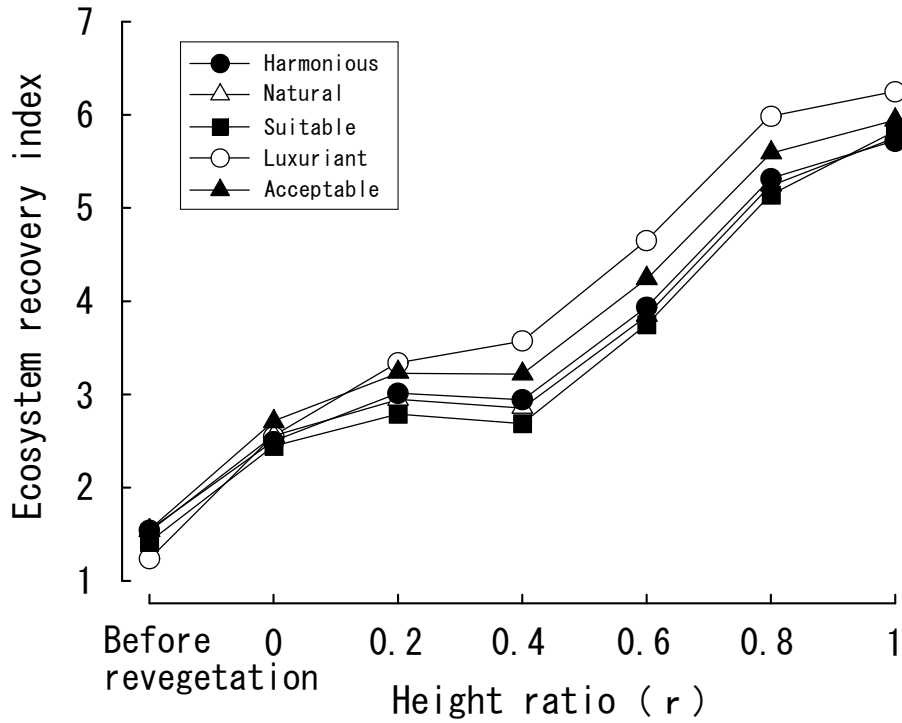


図4. 22 高さ比と自然回帰度との関係(自然回帰型)



図4. 23 ほぼ自然回帰状態とみなせる高さ比  $r = 0.6$  の画像(自然回帰型)  
(図 4.18 に同じ)

#### 4.5 残壁の修復緑化における自然回帰度

本研究では、残壁の自然回帰型修復緑化を進める観点から、従来型（樹木を小段だけに導入）と自然回帰型（小段と斜面部の双方に導入）双方の修復緑化についてそれぞれの自然回帰度を検討した。両者の検討結果については、既に 4.3、4.4 節で述べたとおりである。

本節では、4.3、4.4 節の結果をさらに検討する観点から、さらに多くの被験者を対象とした実験を別途行い、4.3、4.4 節に示す結果の正当性を確認するとともに、両者それぞれの自然回帰度を確定した。

##### 4.5.1 従来型修復緑化

ここでは、既に示した 4.3 節の場合とは異なる被験者について、4.3 節と全く同じ条件の実験を別途行った。被験者は、岩手大学工学部の 3 年次学生 56 名と大学院学生 16 名の合計 72 名である。

図 4.24 は、4.3 節に示す被験者 53 名の場合と、本節における被験者 72 名の場合とを集計し、被験者合計 125 名に対する実験結果をまとめたものである。本図を、被験者 53 名の図 4.14 と比較すると、評価項目によっては互いに僅かな差異を見るが、両者はほとんど同一と言えるほどに近似している。すなわち、被験者 53 名の場合の結論は、被験者 125 名の場合でもほぼそのまま当てはまるといえ、その結論はほぼ確定的な事実と推察できる。また、図 4.24 によると、自然回帰度は高さ比にほぼ正比例して増加するのがわかり、評価項目によっては、高さ比 1 のときに、「どちらともいえない(Neutral)」[4]を超えることもあるが、全項目がほぼ[4]あるいはそれを超える状態となる時の高さ比は 1.2 と解釈できる。

修復緑化を全く施さない裸地の状態が「全く思わない」であることを考慮した場合、「どちらともいえない」状態にまで回復することは、景観上ほぼ自然回帰の状態になったと解釈して差し支えないと考えられる。よって、ここではこの状態の高さ比 1.2 の場合を自然回帰と判断する。

図 4.25 は、自然回帰状態と判定される植生状態を模式的に示したものである。図の(a)は、まだ自然回帰状態には至らない高さ比 1 の状態を、また、(b)は自然回帰状態と評価される高さ比 1.2 の植生状態をそれぞれ示している。(a)の場合は、肉眼的には残壁が樹木で十分に覆われているにも拘らず（緑被率 50~60%）、自然回帰状態と評価されない状態である。このことには、すでに述べたように、小段の存在を示す残壁の横方向の連なり（横縞模様）が強調され、これが大きく影響しているものと推察される。

これに対して、(b)の植生状態は、緑被率の向上の他に、むしろそれよりも、小段に生育する樹木の幹が下の小段に生育する樹木の樹冠によって覆われ、小段の存在が目立たなくなる状態であると考えられる。

このように、自然回帰状態の評価には、小段の存在とその目立つ度合いが大きく影響しているものと考察される。

以上、従来型修復緑化の自然回帰度について述べたが、自然回帰といえる植生状態となる

ためには、樹木の高さがベンチ高さよりも十分に高くなり、景観上、小段の存在を緩和することがひとつの条件になるものと推察できる。本節での実験結果によって、このことはほぼ確定的であると結論する。

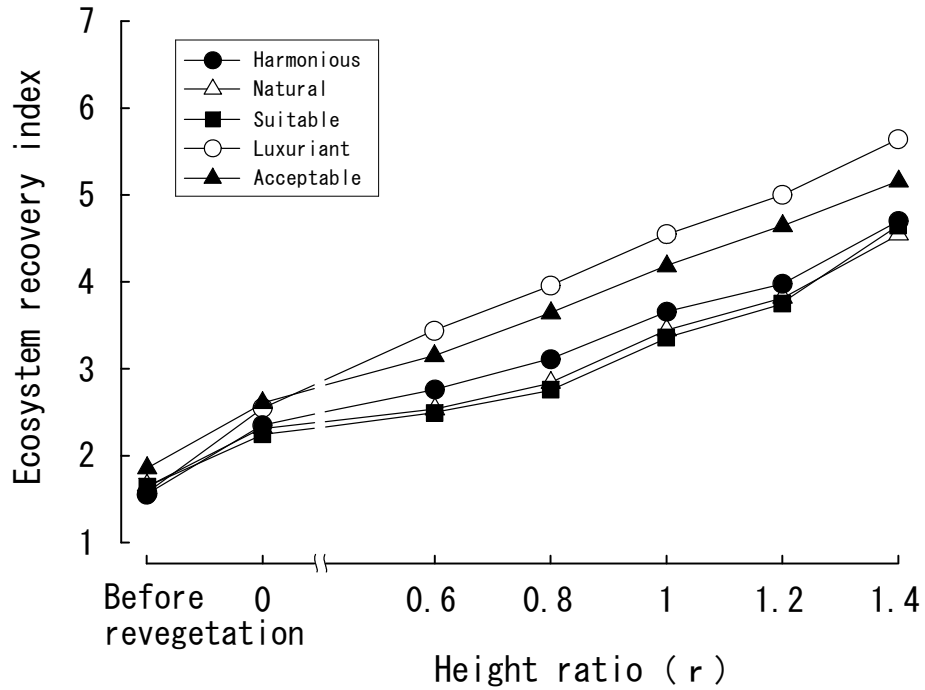
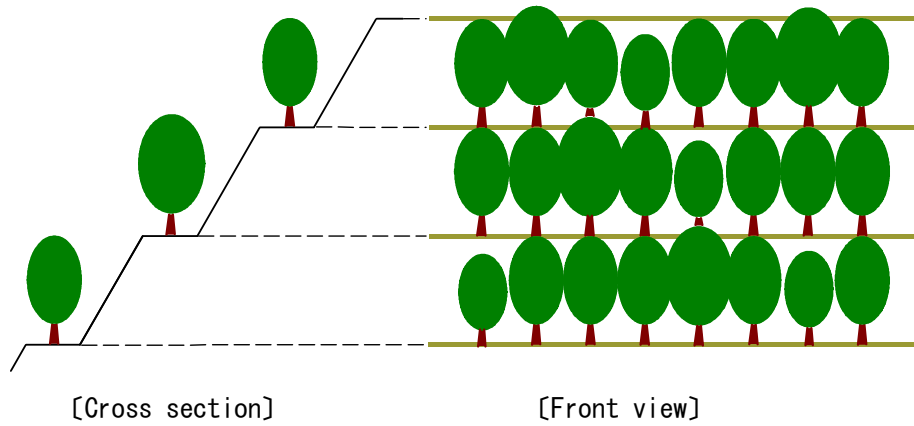
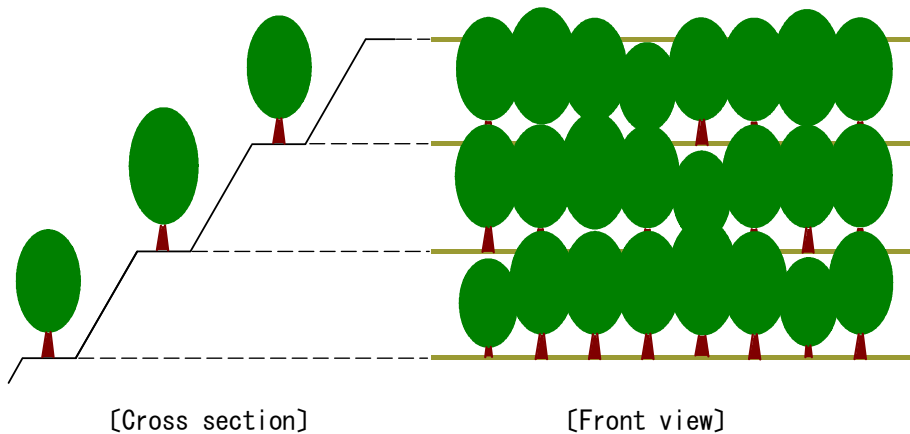


図4. 24 高さ比と自然回復度との関係(従来型:被験者 125 名)



(a) 高さ比  $r = 1$  の植生状態 (自然回帰状態と評価されない)



(b) 高さ比  $r = 1.2$  の植生状態 (自然回帰状態と評価される)

図4. 25 従来型修復緑化における自然回帰状態の植生模式図

#### 4. 5. 2 自然回帰型修復緑化

ここでは、既に表示した 4.4 節の場合とは異なる被験者について、4.4 節と全く同じ条件の実験を別途行った。被験者は、岩手大学工学部の、4.4 節の 53 名とは異なる 4 年次学生 42 名である。

図4. 26は、4.4 節の被験者 53 名の場合と、ここでの被験者 42 名の場合とを集計し、被験者合計 95 名に対する実験結果をまとめたものである。この図を、被験者 53 名の場合の図 4.22 と比較すると、4.5.1 項の従来型の場合と同様に評価項目によっては互いに僅かな差異を見るが、両者はほとんど識別不可能なほどに近似している。すなわち、被験者 53 名の場合

の結論はほぼそのまま被験者 95 名の場合にも当てはまり、その結論はほぼ確定的な事実と推察できる。

図 4.26 によると、一部の評価項目では、高さ比が 0.2 と 0.4 の場合で逆転する現象を認めるが、大局的には自然回帰度は高さ比に比例して高くなり、高さ比が 0.8 を超えると明らかに自然回帰の状態になっていると判定できる。このことを念頭において、いま、修復緑化前の残壁が自然回帰とは「全く思わない」ことを考慮して、4.5.1 項の場合と同様に「どちらともいえない」状態を景観上ほぼ自然回帰の状態と評価すると、高さ比 0.6 の場合がそれに相当する。

図 4.27 は、自然回帰型修復緑化において自然回帰状態と判断される植生状態を模式的に示したものである。図における(a)は、まだ自然回帰状態と評価される前の高さ比 0.4 の状態を、また、(b)は、自然回帰状態と評価される高さ比 0.6 の植生状態をそれぞれ示している。

自然回帰型修復緑化では、樹木が残壁全体に生育することもあって、小段の存在を強調する横縞模様は強調されず、むしろ樹木の点在する状態の目立ち具合や残壁面での緑被率などが評価に影響していると考えられる。この観点から、(a)、(b)双方の場合について、それぞれ緑被率を概算すると、前者が 10~20%、後者が 40~50%となる。

一般に、緑被率が 30%以下の場合、人は緑が少ないと感じるといわれている<sup>12)</sup>が、高さ比 0.6 の場合には、緑被率が少なくとも 40%程度を超えており、評価項目の「緑が豊かである (Luxuriant)」に注目した場合にもその評価結果と矛盾はない。このことから、自然回帰状態となるためには、緑被率と同じように、樹高に対応する樹木の断面積が残壁面で一定以上の割合を占めることがひとつの条件になるものと考察する。

以上、自然回帰型と従来型双方の場合の自然回帰度を評価検討したが、両者の場合ともに残壁の自然回帰度は樹高が大きくなるにつれて高くなる傾向は間違いなく認められる。また、自然回帰度は、評価実験結果の解釈として導かれた自然回帰の度合いであることから、これを両者について比較してみると、従来型の修復緑化の場合は、樹高がベンチの高さを超えないと自然回帰の状態とはいえないのに対して、自然回帰型修復緑化の場合は、樹高がベンチ高さの 6 割程度まで達すると自然回帰状態とみなせることが明らかとなった。

換言すれば、樹木を斜面部にも導入した場合、小段だけの場合に比べて樹高が相対的に小さい時点で自然回帰の状態とみなせる可能性が高いことになる。このことは、自然回帰状態となるまでの復元時間がかかり短縮されることであり、自然回帰型修復緑化計画を策定する上で重要な知見であるといえる。

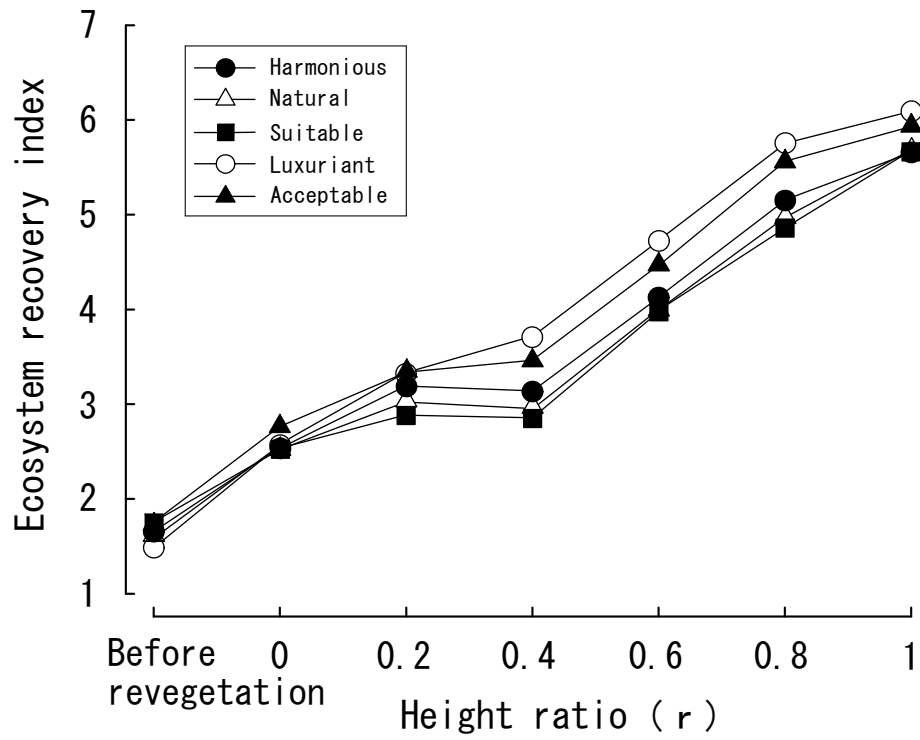
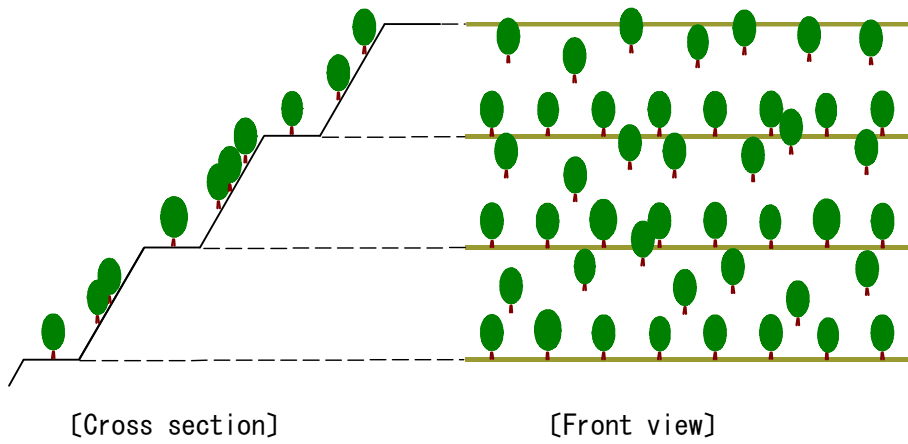
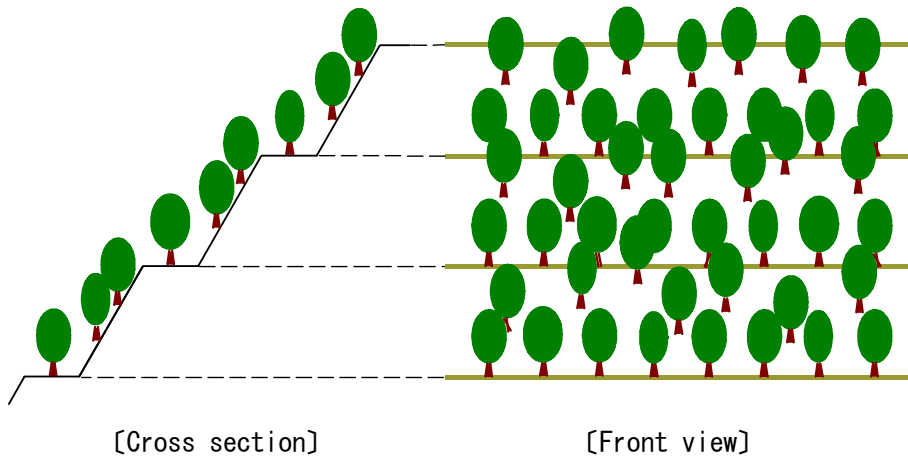


図4. 26 高さ比と自然回帰度との関係(自然回帰型:被験者 95 名)





(a) 高さ比  $r = 0.4$  の植生状態 (自然回帰状態と評価されない)



(b) 高さ比  $r = 0.6$  の植生状態 (自然回帰状態と評価される)

図4.27 自然回帰型修復緑化における自然回帰状態の植生模式図

## 4. 6 VRS 画像を用いた自然回帰度評価

本章では、緑化シミュレーション画像の作成に際して、フォトモンタージュ法を採用した。これは、周辺の景観を含めたリアリティのある画像を作成する点で本法は有効な手法と判断したことによる。しかし、また一方では、一連のシミュレーション手法を必ずしもフォトモンタージュ法に固執することなく、別の手法を適用することの可能性を知ること、今後、関連の研究を展開させる面から重要なことである。

そこで、本節では、緑化シミュレーション画像の作成に際して、最近の高度なコンピュータ技術を駆使した VRS(Virtual Reality System)を取り上げ、VRS を適用することの有効性を検討した。ここでは、すでに在来型の修復緑化が進行している実在の残壁を選定し、VRS による緑化シミュレーション画像を作成するとともに、景観評価実験によって自然回帰度の評価判定を行った。このことによって、自然回帰度評価における VRS の適用性を確認した。

### 4. 6. 1 自然回帰度評価

#### (1) 対象の残壁

研究対象とした残壁は、岩手県稗貫郡大迫町にある早池峰ダムの採石跡地に形成された岩盤斜面で、ベンチ高さ 8m、勾配 1:0.6(59°)、高さ約 150m である。全面に金網張工を併用した法面保護工が施工され、現在では上方周辺から木本類(樹木)の侵入が確認できる。

図4. 28に造成後約 10 年を経過した平成 17 年時点の状況を示す。



図4. 28 研究対象残壁の現況写真(平成 17 年)

#### (2) 植生調査

残壁を目視観察すると、上方から 1~5 の小段には樹木をかなり密に認めるのに対して、6~10 段では樹木密度が 1~5 段の 3 割程度と判定でき、11 段目より下方では樹木をほとんど認めない。また、斜面部に樹木は全くみられず、施工当時の先駆植物である草本類が密に繁

茂している状態である。

植生調査は、このような目視による観察結果を考慮しながらも、上から4段までの小段に対して、樹木の種類、樹高、胸高直径および樹幅を調査項目として実施した。植生する樹木はナラやクヌギなどの落葉広葉樹とマツを主とする常緑針葉樹であり、樹高はまちまちであるがベンチ高さの8mに達するものはみられない。

表4.1は、調査結果を落葉広葉樹と常緑針葉樹とに大別してまとめたものである。すなわち、対象残壁における上方から数えた小段の位置1～4における広葉樹と針葉樹の本数を高さ2mごとに分類して集計したものである。

図4.29は、調査結果をもとに広葉樹と針葉樹それぞれの樹木密度（単位面積あたりの樹木数）を示したものである。図から、樹木密度は樹高によって異なるものの小段の位置による差は余り大きくないことがわかる。このことから、樹木密度は樹高別に1～4段の小段全体を平均して算出しても問題ないと考えられる。

表4.1 残壁の小段に生育している樹木の数

Situation of berm		1		2		3		4	
Berm area $A(m^2)$		56.0		90.0		285.0		146.0	
Kind of trees		Br	Co	Br	Co	Br	Co	Br	Co
Tree height	0～ 2 under	0	0	0	0	0	0	0	0
	2～ 4 under	6	0	16	0	15	1	37	3
$H(m)$	4～ 6 under	14	0	20	14	44	27	27	18
	6～ 8 under	0	0	0	0	17	0	7	0

(Br : Broadleaf wood、Co : Conifer)

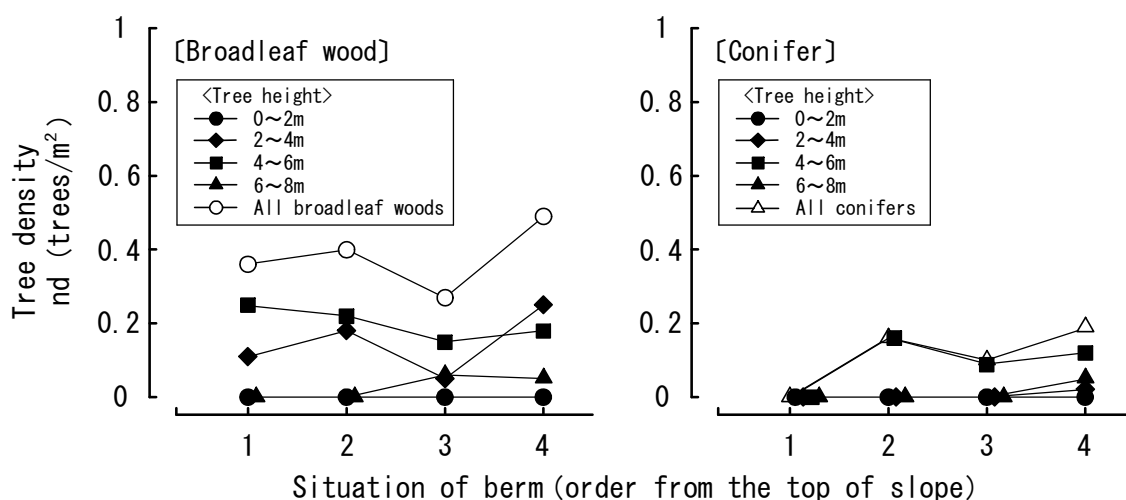


図4. 29 残壁の小段に生育する樹木の密度

(3) 緑化シミュレーション

① シミュレーション手法

緑化シミュレーションは、残壁における今後の樹木の大きさを予想し、景観評価実験に供する画像作成のために実施した。画像の作成には VRS ソフトを用いて PC 画面上で樹木を植え付ける方法を採用した。使用ソフトは市販の「UC-Win/Road」(フォーラムエイト社製)である。

図4. 30に VRS ソフトを用いたシミュレーション画像作成の手順を示す。本システムでは、まず、対象残壁付近の 3 次元地形モデルの更新を行う。本システムは国土地理院発行の 50m メッシュ数値地図を基本地形情報としているが、当該残壁の地形表現には情報が不足していることから、別途詳細な地形図をもとに現場地形モデルを更新した。つぎに、地表画像であるカラー空中写真を 3 次元地形モデルに貼り付け、ベンチカットの形状など必要な情報を世界測地系座標で入力した。その後、実際の写真を参考にしながら、PC 画面上で残壁周辺の森林、道路、構造物などを配置した。また、残壁に植え付ける樹木は、ソフトに用意されている 3D 樹木モデルを所定の樹高となるよう調整し、これを小段に配することで樹高の変化に応じたシミュレーション画像を作成した。

なお、植物の生長には気象環境条件が影響することから、そのシミュレーションには関連する幾つかのパラメータを取り込むことが必要となるが、ここでは、樹高および樹冠以外のパラメータは変化させずに背景として固定した。

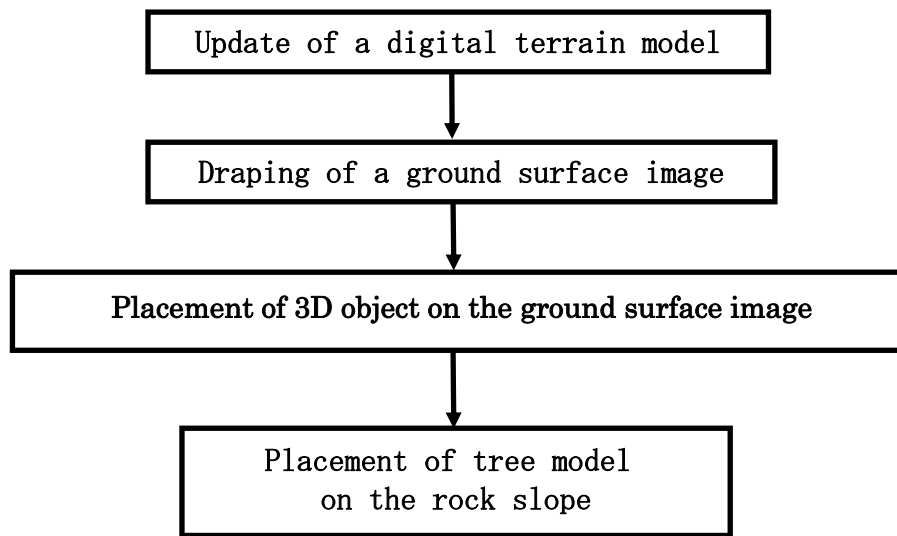


図4. 30 緑化シミュレーション画像作成の流れ

## ② 樹木の本数

緑化シミュレーションでは、樹木を小段だけに植え付けたが、その本数は植生調査結果と目視による観察結果を考慮してつぎのように設定した。すなわち、1～5 段に対しては、広葉樹と針葉樹とに大別した樹高ごとに図 4.27 に示す 1～4 段の樹木密度の平均値を用い、これに各小段の面積を乗ずることによって算定した。

表4. 2は、このようにして求めた 1～5 段までの植え付け本数を示したものである。6～10 段に対しては、目視観察結果をもとに、1～5 段までの約 30%の本数を植え付けた。また、1 1 段から下方に対しては草本類による下草だけを考慮し、原則として樹木は植え付けないこととした。なお、樹木を植え付ける位置については、各小段に所定の本数をほぼ平均して配置したが、規則性を持たせず実際の写真を参考にしながらランダムとした。

## ③ 樹木の高さ

樹木の高さ（樹高）は、4.3 節および 4.4 節の場合と同様に「高さ比」で規定した。本節では、ベンチ高さ 8m に対する樹木の高さ比を  $r = 0, 0.6, 0.8, 1, 1.2$  および  $1.4$  の 6 段階に変化させ、これを小段に植え付けることで樹高の変化をシミュレーションした。因みに、平成 17 年時点の樹高は概ね 5m であることから、これを高さ比で表現すると、 $r = 5/8 \approx 0.6$  となる。なお、シミュレーションの樹高は、2m ごとに区分した高さの中央値で代表させた。例えば、樹高 4～6m の範囲の樹木はそれらの中央値 5m を代表の樹高とした。また、高さ比の変化に対応する樹高は、2m ごとに区分した樹高に対して乱数表を適用し、2m の範囲内でその高さをランダムに変化させる方法で設定した。目安として、ほぼ規定の樹高の樹木数が 6～7 割を占め、残りの 3～4 割が前後各 1m 樹高の樹木となるように調整した。

表4. 2 緑化シミュレーション画像で植え付ける樹木の数

		Average tree density		Simulation trees ( <i>ns</i> )									
				Situation of berm and its area									
		<i>nd</i>		1		2		3		4		5	
Kind of trees		Br	Co	Br	Co	Br	Co	Br	Co	Br	Co	Br	Co
Tree height <i>Ht</i> (m)	0~2 under	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2~4 under	0.086	0.002	5	1	8	1	25	1	13	1	15	1
	4~6 under	0.181	0.095	11	6	17	9	52	28	27	14	32	17
	6~8 under	0.039	0.000	3	0	4	0	12	0	6	0	7	0

(Br : Broadleaf wood、Co : Conifer)

(4) 緑化シミュレーション画像

図4. 3 1~4. 3 6に、VRSによって作成した高さ比の異なる緑化シミュレーション画像を示す。このうち、特に、図4.32は現時点の植生状態をシミュレーションした高さ比0.6の状態を示したものである。図4.28に示す現況の写真と比較した場合、両者は互いに類似しており違和感の少ない画像として、景観上の有効性を概ね認めることができる。



図4. 31 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 0$ )



図4. 32 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 0.6$ )



図4. 33 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 0.8$ )



図4. 34 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1$ )





図4. 35 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1.2$ )



図4. 36 VRS による緑化シミュレーション画像(従来型  $r = 1.4$ )

### (5) 評価実験

評価実験には、評定尺度法を用い、被験者に対して、高さ比の異なる6つの植生シミュレーション画像を17インチPC画面上で呈示し、自然や緑化状態の感じ方を表現する評価項目として「自然な感じがする(Natural)」、「人工的な感じがしない(Not artificial)」および「周辺と同化している(Harmonious)」の3項目を設定し、それぞれについて、「全く思わない(Least)」から「非常に思う(Most)」までの7段階の評定尺度で評価してもらう方法を採用した。被験者は岩手大学の学生62名で、画像を呈示した順番は、高さ比が増加する順番のとおりとし、いずれも1回だけの呈示とした。

図4.37は、7段階の評定尺度に1~7の数値を与え、被験者の評価結果の平均値をプロットしたものである。図をみると、3つの評価項目とも高さ比が大きくなる程平均値が右側にプロットされる傾向を認め、樹木が大きくなるほど自然回帰度が高くなる結果を示している。また、3つの評価項目による傾向の差はほとんどみられず、互いにほぼ類似の結果を示している。

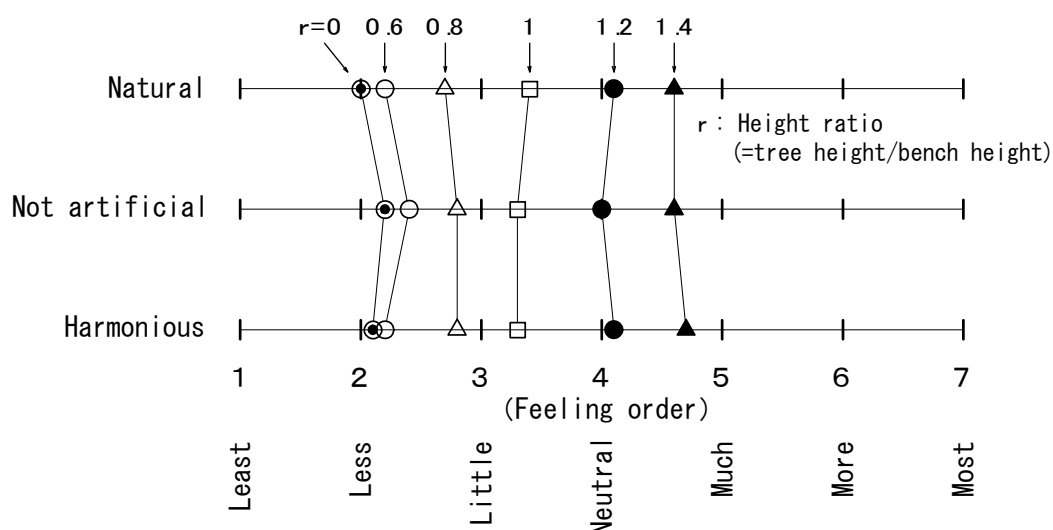


図4.37 評定尺度法による評価実験結果(従来型修復緑化)

### (6) 自然回帰度

図4.38は、高さ比と7段階で評価した自然回帰度との関係を示したものである。両者の間には、特に、高さ比が0.6以上になるとほぼ正比例の関係が認められ、樹木が大きくなるほど自然回帰度が高くなることがわかる。ここでの評価実験にはいくつかの条件を前提として含むが、いま、3つの評価項目に対して、7段階中の4段階目である「どちらともいえない(Neutral)」を超えた状態をほぼ自然回帰の状態と仮定すると、このときの高さ比は概ね1.2

となる。すなわち、自然回帰といえる植生の状態には、樹木の高さがベンチ高さよりも高くなるのがひとつの条件になる可能性を示唆しているといえる。

図4. 39に、ほぼ自然回帰の状態とみなせる高さ比 1.2 のシミュレーション画像示す。

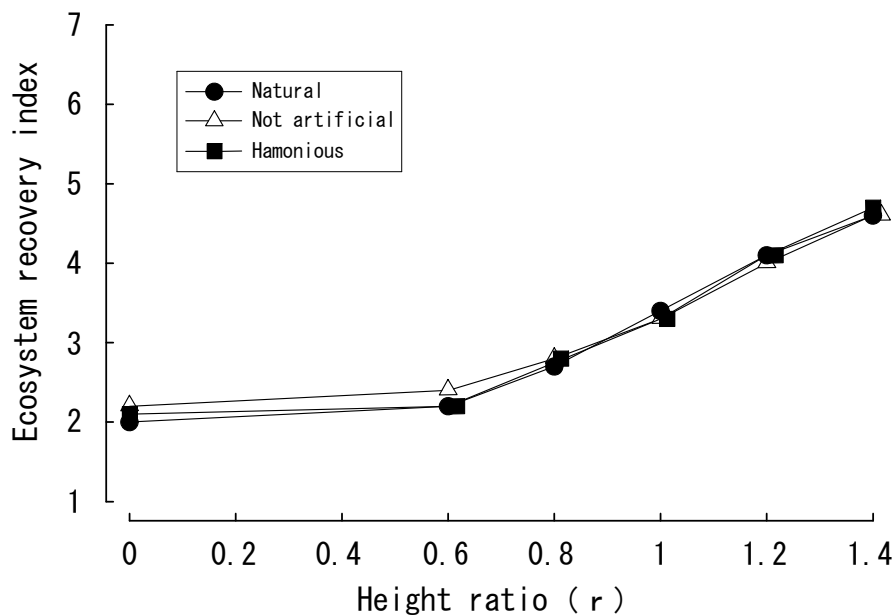


図4. 38 高さ比と自然回帰度との関係(従来型修復緑化)



図4. 39 ほぼ自然回帰状態とみなせる高さ比  $r = 1.2$  の画像  
(図 4.35 に同じ)

#### 4.6.2 自然回帰度評価における VRS の有効性

本節では、すでに従来型の修復緑化が行われている実在の残壁について、VRS による緑化シミュレーション画像を作成し、4.3 節と同様の評価実験を行った。この結果、VRS による画像は、見た目に実際の植生状態に近似しており、シミュレーション画像として有効性を確認できた。また、自然回帰度については、フォトモンタージュ画像を使用した場合とほぼ同様の実験結果が得られた。すなわち、ここで比較した従来型の修復緑化における自然回帰度を評価する場合、得られる結果（自然回帰度）に、VRS とフォトモンタージュの手法の差異は認められなかったことになる。

したがって、残壁の修復緑化シミュレーション画像の作成に際して、VRS の適用性は高く、今後の発展が期待できると考えられる。特に、VRS は個々の樹種や輪郭を識別できるシミュレーションが可能であることから、近距離景における植生状態のシミュレーションに対して有効な手法になり得るものと考察する。今後、関連の研究実績の実績の積み重ねが期待されるところである。

#### 4.7 結言

本章では、残壁の自然回帰型修復緑化における自然回帰度評価システムを確立するための基礎資料を得る観点から、樹木を小段だけに導入する従来型の修復緑化と小段と斜面部の双方に導入する自然回帰型修復緑化の2通りの場合について、景観評価実験による自然回帰度を検討した。実験に際しては、両者の場合ともに樹木の生長過程を評価の指標とし、フォトモンタージュによる画像をそれぞれ作成した。これらを評定尺度法による評価実験に供することによってそれぞれの自然回帰状態を判定した。

本章で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 従来型の修復緑化（樹木を小段だけに導入）の場合、自然回帰度は、高さ比に比例して増加し、ほぼ自然回帰の状態と判定できる高さ比は 1.2 となる。換言すれば、自然回帰と判断できるためには、樹木がベンチの高さよりも大きくなる必要があるといえる。

(2) 自然回帰型修復緑化（樹木を小段と斜面部の双方に導入）の場合、自然回帰度は高さ比に正比例して増加し、ほぼ自然回帰の状態と判定できる高さ比は 0.6 となる。すなわち、自然回帰と判断できるための植生状態は、樹木がベンチ高さのほぼ 6 割程度にまで生長したときであるといえる。

(3) 残壁の自然回帰度は、樹木を小段だけに導入した場合と小段と斜面部の双方に導入した場合の違いに拘わらず、樹高が大きくなるにつれて高くなる傾向がみられる。前者の場合は、樹高がベンチの高さを超えないと自然回帰の状態とはいえないのに対して、後者の場合は 6 割程度まで生長すると自然回帰状態とみなせることが明らかとなった。

(4) 樹木を斜面部にも導入した場合には、小段だけの場合に比べて、樹高が相対的に小さい時点で自然回帰の状態に達する可能性が高い。換言すれば、斜面部にも樹木を導入する自

然回帰型修復緑化の場合には、自然回帰状態への復元時間はかなり短縮できるものと推察する。

(5) 緑化シミュレーションに際して、VRS を適用することの可能性を把握した。今後、VRS を適用した自然回帰度評価システムの構築は十分に可能であると考察する。

本章では、自然回帰型修復緑化計画を効果的に策定する観点から、修復緑化過程を事前にシミュレーションすることによって自然回帰の状態を評価する手法の構築を行った。緑化シミュレーションはそれ自体が研究課題でもあるが、今後は自然界の規則性や法則を取り入れた緑化シミュレーションが可能となるような研究・技術開発をはじめ、三次元の緑化シミュレーションによる景観評価についても対応すべき課題と考える。このことによって、修復緑化に対するより精度の高い事前評価が可能になるものと考え。また、本研究の成果をもとに、実用化に向けた修復緑化の事前評価システムの確立に向けた展開が期待される。

### 参 考 文 献

- 1) 日本緑化工学会：環境緑化の事典、朝倉書店、p.388、2005
- 2) 森本幸裕・小林達明：最新環境緑化学、朝倉書店、p.76、2007
- 3) 採石技術指導基準編集委員会：詳解採石技術指導基準、ぎょうせい、p.234、
- 4) 大竹照光・大塚尚寛・志田寛・阿部洋祐：残壁の修復緑化における植物の生長過程を指標とした自然回帰度評価、資源・素材学会春季大会講演概要集、Vol. I、p.139-140、2006
- 5) ソン ゼェタク・篩孝夫：造成樹林の生態系回復の指標としての林床植生および土壌動物相の有効性、日本緑化工学会誌、Vol.30、No.1、p.21-26、2004
- 6) 橘隆一・西村香奈子・宮本沙織・福永健司：アリ類とトビムシ類の群構成による緑化法面の環境指標、日本緑化工学会誌、Vol.29、No.1、p.56-61、2003
- 7) 松井理恵・村上健太郎・森本幸裕：都市近郊における大規模造成樹林地の自然回復度評価—シダ植物を指標として—、日本緑化工学会誌、Vol.29、No.1、p.119-124、2003
- 8) 大竹照光・大塚尚寛・齋藤貢・阿部洋祐：Journal of MMIJ、Vol.123、p.329-335、2007
- 9) 樋口忠彦：景観の構造、技報堂出版、p.19-24、1975
- 10) 外菌貴彦・大塚尚寛・志田寛・齋藤貢：骨材資源、No.151、2006
- 11) 残壁ハンドブック編集委員会：残壁ハンドブック、丸善、p.215、2005
- 12) 熊沢伝三：景観デザインと色彩、技報堂、p.215、2002

## 5.1 残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と自然回帰度評価システムの構築

### 5.1 緒言

従来の露天採掘跡残壁の修復緑化では、土砂の流出防止や残壁の安定を第一条件とした上で、周辺景観との調和を図る観点から、斜面部には樹木を導入せずに草本やツタ植物類で緑化し、樹林化は小段だけを対象としてきた<sup>1)</sup>。これは、斜面部が裸地化した急傾斜岩盤斜面であり樹木の導入が容易でないために、修復緑化と採掘事業とが経済的に成立するための方策であったとも言える。しかし、斜面部に草本類だけを導入する方法は、樹木の場合に比べて斜面の安定維持機能が低いことや景観面での違和感が長期間残るなどの問題点が指摘されていた<sup>1)</sup>。また、近年では人々の環境問題意識の高揚と相まって、残壁の修復緑化は、周辺景観や地域の生態系と調和した植物群落の回復を意図する、より質の高い修復緑化が求められている<sup>2)</sup>。

これらの状況を鑑み、本研究では、小段だけに樹木を導入する方法を一步進め、斜面部にも樹木を生育させることによって、残壁全体に周辺と同等の在来植物群落の形成を目指す緑化法の開発を行った。この緑化法を本研究では「自然回帰型修復緑化」と呼ぶこととする<sup>3)</sup>。自然回帰型修復緑化を実現するためには、残壁全体に樹木を生育させるための植生基盤の造成が不可欠となる。しかし、発生源が不明な土壌や地域外の土壌を持ち込み造成することは、在来の生態系保全の面から好ましくなく避けるべきである。そこで本研究では、原石山本来の森林表土に着目し、これを植生基盤材として利活用することを考えた。森林表土は地域の遺伝子を保有する埋土種子集団（シードバンク）を含むことから、生態系保全のための緑化材料としては理想的と考えられる<sup>4)</sup>。

本研究では、まず、自然回帰型修復緑化を進める観点から、実際の森林地山で植生基盤を形成している森林表土の工学的特性の調査解明と、それを残壁に安定造成するための理論的検討手法を開発した。つぎに、修復緑化過程を評価する観点から、緑化シミュレーションを適用した景観評価実験を実施することにより、自然回帰度を把握するための評価システムを構築した。

本研究は、残壁の修復緑化に求められる社会的ニーズに応え、美しい国土の復元と生物多様性の保全に寄与するものとして、今後の残壁に対する修復緑化施策の方向性を示すものとする。

## 5.2 現状の残壁修復緑化法とその問題点

### 5.2.1 現状の修復緑化法

露天採掘跡残壁のような岩盤斜面の修復緑化に関する研究分野としては、露天採掘の場合と規模は異なるが、土木分野における道路の切土岩盤斜面がある。道路の場合は、交通の安全確保が第一であることから、従来、緑化は斜面安定のための植生工による法面保護工のひとつとして位置付けられてきた。しかし、近年では植生工を支えるための緑化基礎工とも

に法面緑化工として捉えられ、草本類による早期緑化の手法から在来種を用いた播種工による法面緑化の方向へと移行しつつある。このような中で、岩盤斜面に対しては、安定上急勾配で問題ない場合でも、切土勾配を植生による緑化が可能となる程度に緩くする設計法が一般に是認されており、植生基盤を維持するための緑化基礎工が広く受け入れられている<sup>5)</sup>。

一方、露天採掘跡の残壁は、土砂や岩石が露出した裸地状態となることから、従来、防災上の安全確保を第一として緑化が行われてきた。環境問題意識の高まりへの対応は道路の場合と同じであるが、露天採掘跡残壁の場合は、相対的に大規模な岩盤斜面の緑化という特殊性とその経済的な施策から、現状では、小段だけに木本類を導入し、斜面部はツタ類などの草本類を適用した緑化法を用いているのが実態である<sup>1)</sup>。

図5.1は、上述の観点から、現状多用されている修復緑化の典型的な方法を示したものである。すなわち、樹木の導入が容易ではない斜面部はつる植物で緑化し、小段には客土工を施工することで樹木を植栽し、樹木の成長による景観保全機能の回復を期待するものである。

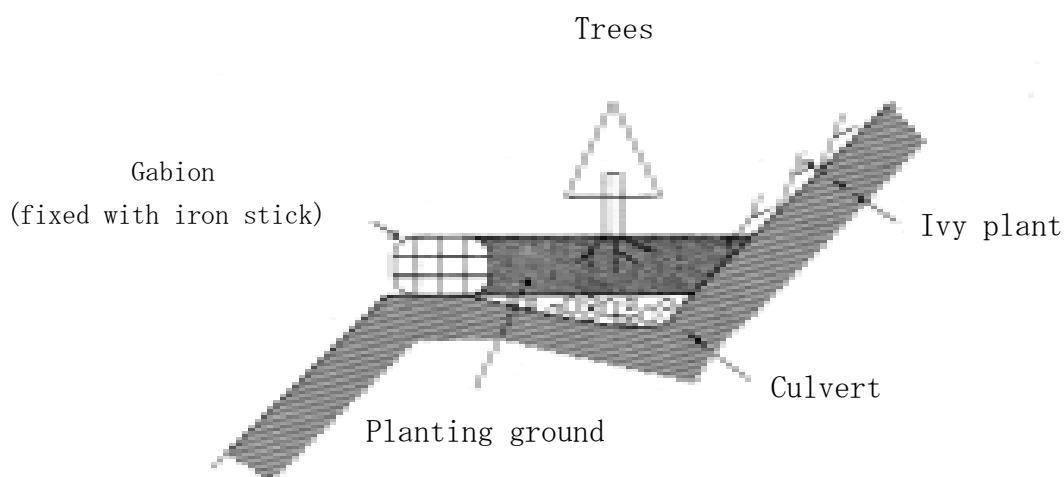


図5.1 残壁における従来の修復緑化法の例<sup>1)</sup>

### 5.2.2 残壁の修復緑化における問題点と改善策

露天採掘跡の残壁は、裸地化した急傾斜の岩盤斜面であることから植物の生育には不向きである上に植生基盤の造成も容易ではない。道路の場合は、相対的に規模が小さく事業計画の当初から予算を計上し易いこともあって、ほとんどの場合に緑化基礎工が用いられている。しかし、大規模岩盤斜面となる残壁の場合は、緑化基礎工の施工には消極的とならざるを得ない側面がある。このため、斜面部への木本類の導入は行わず、小段だけに植生基盤を造成して木本類を導入する工法が現在でも広く行われているのが実態である。このことについては、前節でも述べたとおりである。

しかし、このように斜面部を草本類だけで緑化する方法は、自然環境や景観保全の面から幾つかの問題点が指摘されている<sup>1)</sup>。すなわち、斜面部を草本類だけで緑化することは、草

本類の根系が浅いことから崩壊の発生など土砂災害の危険性が高くなること、また、草本類が斜面部に長期間繁茂すると、残壁周辺から入ってくる木本類の侵入を妨げ、結果として自然回復を遅らせてしまうことなどである。さらに、樹木を小段だけに導入する場合、樹木がベンチの高さ以上にならないと、景観上も自然回帰の状態とは評価し難く、樹木が十分に生長するまでの長期に亘って周辺の自然景観と調和しにくい環境が継続することなども無視できない問題点である。

このような問題点を解消し、地域の自然生態系に適した修復緑化を推進するためには、残壁の斜面部にも木本類を導入し、生物多様性保全や景観保全の観点から、周辺の植物群落に少しでも近い植生状態を復元または創出する施策が必要となる。また、その前提条件として、根系が十分に絡み合い斜面安定維持効果の高い植物群落を形成することが必要となる。

本研究で進める自然回帰型修復緑化とは、このような修復緑化を目指すものであり、このために具体的な施策として次の4つを取り入れることとする。すなわち、①緑化目標は、隣接する周辺地山の植物群落相当とする。②残壁の斜面部を樹林化する。③植生基盤材として近隣周辺の森林表土を用いる。④植生基盤上に周辺森林表土の埋土種子を播き出すことの4つである。このことによって、地域の生物多様性を保全し安定面での効果も期待でき、かつ結果として景観面でも周辺と違和感の少ない植物群落を形成できるものと考えられる。ただし、自然回帰型修復緑化の手法では、早急な修復緑化の実現には不向きなこと、創出する植生の状態を事前に予測することが困難であることなど、今後に残された課題も指摘できる。これについては、今後の実績の積み重ねとデータの取得ならびに関連の研究と技術開発による展開が望まれる。

### 5.3 自然回帰型修復緑化法の開発

#### 5.3.1 自然回帰型修復緑化システム

残壁の自然回帰型修復緑化の手法は、残壁全体に近隣周辺の森林表土を植生基盤として造成し、埋土種子を播き出すことによって、地域の生態系を維持した修復緑化を行うものである。本緑化法は、急速な回復緑化には適さないが、自然に働きかける人為的行為を極力排除し、自然の回帰力と自然の法則を利活用する修復緑化法である。したがって、本工法は、人為的に早期の回復緑化を目指す従来の「急速緑化」に対して、「常速緑化」として位置付けることができる。

図5.2に本研究で開発した自然回帰型修復緑化法のシステムを示す。



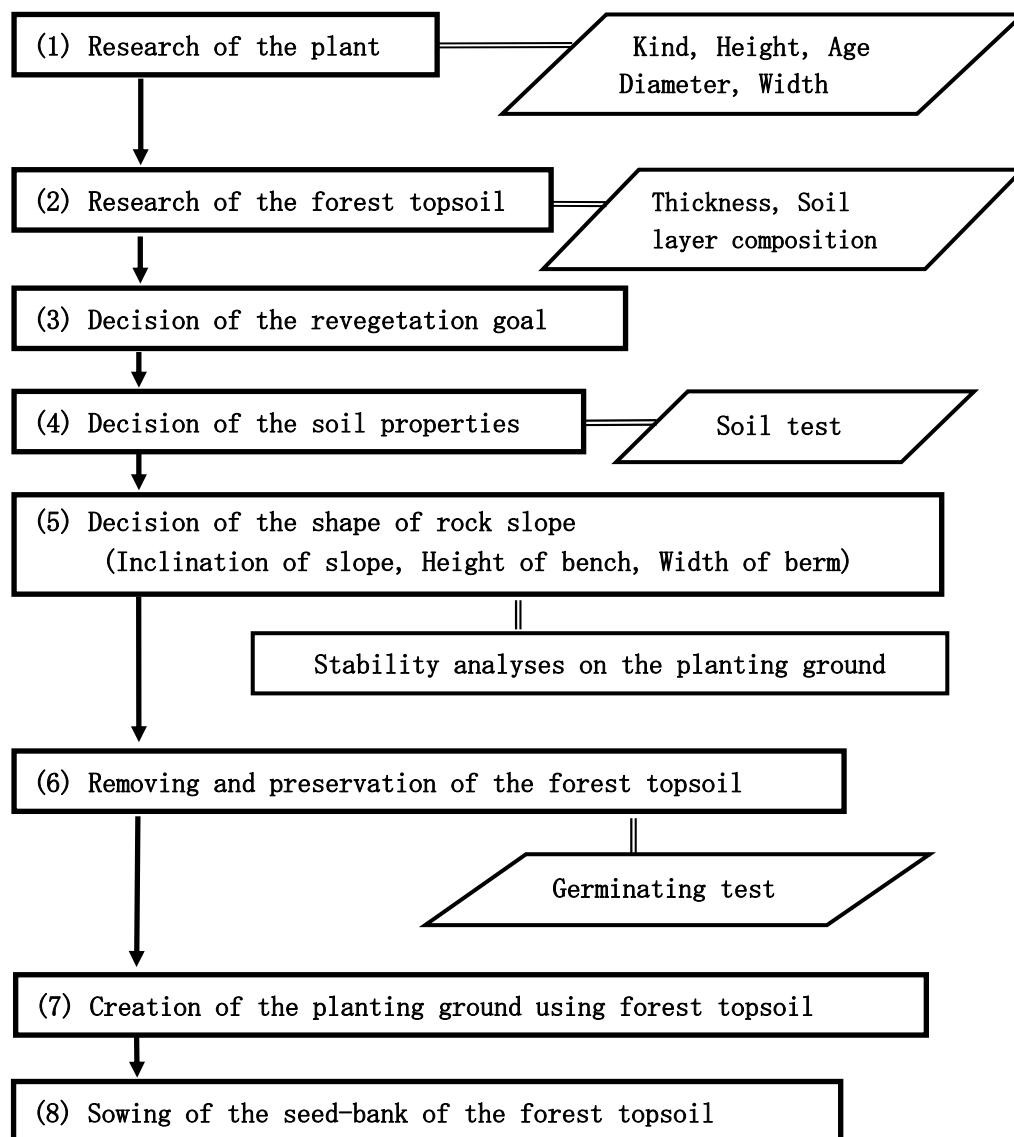


図5.2 自然回帰型修復緑化システム

図に示すように、本システムは、大きく8つのプロセスで構成される。

(1) 植生調査 (Research of the plant)

地域における在来の生態系、特に植物群落を把握する観点から周辺の植生調査を実施する。調査結果は、緑化目標を設定する際の重要な基礎資料となる。主な調査項目は、樹種・樹高・樹齢・胸高直径・樹冠幅などである。この他、地山斜面の向きや気候に関する情報も収集する。

(2) 森林表土の調査 (Research of the forest topsoil)

植生基盤である森林表土の厚さや土質工学的な特性を把握するための調査である。対象区域内の代表的な位置で土壌層位<sup>⑥</sup>の概要を調査する。本調査は、自然地山の植生基盤である森林表土の厚さの確認、土壌層位の把握、目視による土壌の判別分類および室内試験に供す

る土壌試料の採取を目的とする。

### (3) 緑化目標の設定 (Decision of the revegetation goal)

緑化目標は、周辺の植生状態、残壁の勾配あるいは維持管理の内容によって異なるが、自然回帰型修復緑化は在来の植生復元を条件とすることから、周辺在来の植物群落相当の植生状態の形成を緑化目標とする。実態として資源開発が原生林内で行われることはなく、露天採掘は森林地帯の中でも二次林<sup>7)</sup>地域が対象となる。したがって、緑化目標は隣接する二次林相当の植物群落の形成となる。

### (4) 土質特性の決定 (Decision of the soil properties)

土質試験によって森林表土の土質特性を解明し、設計に用いる土質定数を決定する資料とする。設計上、必要とする土質定数は、単位体積重量、粘着力および内部摩擦角である。これらの値を用いて土質特性を決定する。

### (5) 残壁形状の決定 (Decision of the shape of rock slope)

自然回帰型残修復緑化を施工する残壁は、稼働中の暫定的な岩盤斜面ではなく、露天採掘終了後の最終残壁である。残壁の形状は、斜面部の勾配、ベンチ高さおよび小段幅で決まる。形状を検討する際の第一の条件は、残壁の安定であり、これは斜面の勾配と小段の幅を決定することで確保できる。これらについては、通常、「採石技術指導基準」<sup>1)</sup>（以下、「指導基準」という）に準ずることによって問題ない。ただし、所定の植生基盤を安定造成できる斜面勾配は、平面すべり安定解析式<sup>3)</sup>で検討する。

ベンチの高さについては、緑化シミュレーション評価実験の結果をもとに、自然回帰状態と判定できる樹木の高さとその高さに生長するまでに許容し設定できる時間(年月)を考慮して決定する。

### (6) 森林表土の剥取りと保管 (Removing and preservation of the forest topsoil)

露天採掘において、開発開始から修復緑化までには一般に長い年月を要するため、開発時に埋土種子を別途保存し事後に利用することは原則として考えない。ただし、この場合でも埋土種子の利活用を検討する観点から、発芽実験による植生状態を事前に確認することが望ましい。森林表土の土壌部については、植生基盤としての利用を前提とすることから、混入する埋土種子や地下茎からの発芽の有無に拘わらず、長期間の保存は可能である。この場合、他地域での汚染あるいは風散布種子の混入を回避する観点から、敷地外へは持ち出さず、当該敷地内にシートなどで被覆し保管<sup>8)</sup>することを原則とする。

### (7) 森林表土を用いた植生基盤の造成 (Creation of the planting ground using forest topsoil)

自然回帰型修復緑化で造成する植生基盤の厚さは20cm程度<sup>3)</sup>であり、30cm以上にもなることは想定していない。このため、植生基盤の造成は道路盛土などとは異なり、薄い単一層の巻き出しとなる。道路の盛土構築の際に行われるような密度管理<sup>9)</sup>などは必要としない。造成に際しては、必要に応じて散水しながら重機の排土板の類で圧着することで施工する。

### (8) 埋土種子の播き出し (Sowing of the seed-bank of the forest topsoil)

埋土種子は、修復緑化を行う時点で残壁周辺の森林表土から採取することを原則とする。埋土種子は土壌部にも含まれるが、そのほとんどは地表から深さ 5cm までの表層部に存在するといわれている<sup>10)</sup>。したがって、修復緑化を行う時点で近接する森林表土の埋土種子を採取し、造成した植生基盤上に播き出すこととする。このときネット工などを施工し、降雨による土粒子や種子の流失を防止するなどの方策を施すことが望ましい。

### 5.3.2 森林表土の利用

森林表土は、すでに述べたように、地域固有の遺伝子を有する土であることから、これを当該残壁の植生基盤として造成し利用することは生態系保全の観点から極めて有効である。

図5.3は、森林表土を植生基盤として利用する際の調査ならびに評価の手順を示したものである。

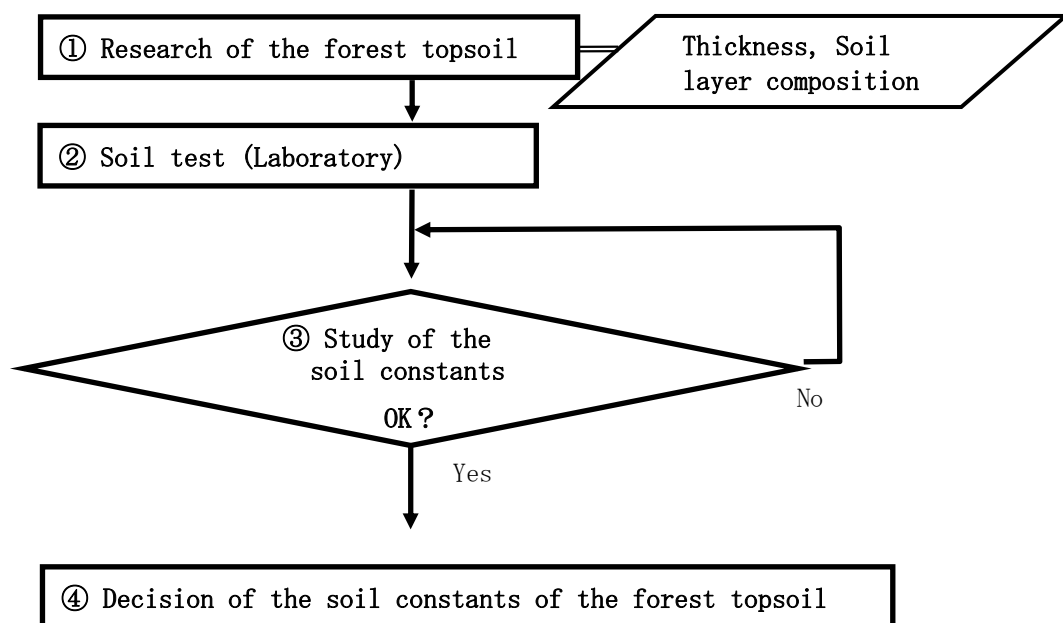


図5.3 森林表土の調査と評価の手順

図5.3による森林表土の調査・評価手順は、以下の通りである。

#### ①森林表土の調査 (Research of the forest topsoil)

隣接する周辺地山において、在来の植物群落を形成している森林表土の調査を行う。調査は、森林表土の厚さの確認、土壌層位の把握、目視による土壌の判別分類および室内試験に供する土質試料の採取を目的とする。

この観点から、所定の位置において森林表土を掘削し土壌層位を確認するとともに、室内土質試験に供する土壌を採取する。

図5. 4に、森林表土を掘削し土壌層位を確認した事例を示す。



図5. 4 森林表土の土壌層位の調査事例  
(岩手県八幡平市西根町地内)

### ②土質試験 (Soil test—Laboratory—)

森林表土の土壌部について、採取した土壌を室内土質試験に供し、設計定数を検討する際の基礎資料を得る。

表5. 1に、植生基盤の造成検討に必要な土質試験の項目と方法を示す。

表5. 1 室内土質試験の項目と方法

Soil test item	Test method
Density of soil particles	JIS A 1202
Water content	JIS A 1203
Particle size distribution	JIS A 1204.
Liquid limit	JIS A 1205
Plastic limit	
pH of suspended soils	JGS 0211
Ignition loss	JIS A 1226

### ③土質定数の検討 (Study of the soil constants)

土質試験結果をもとに、森林表土を植生基盤として造成するための設計定数を決定する。

設計定数は土質試験結果によって一義的に決定できるものではないが、一般には、粒度分布特性から対象土を工学的に分類し、土質工学的手法<sup>11)</sup>を適用することによって設計定数を検討する。例えば、当該森林表土の土質特性を勘案した上で、土木の分野における道路盛土の土質定数<sup>9)</sup>などを参考とすることも1つの方法である。表5. 2に、その一例を示す。

表5. 2 盛土の土質定数の例<sup>9)</sup>

Kind of soil	State of soil	Bulk unit weight $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion $C'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle $\phi'$ (°)	
Gravel and Sand mixing gravel	Tightened	20	0	40	
Sand	Tightened	Well graded	20	0	35
		Uniform graded	19	0	30
Sandy soil	Tightened	19	30<	25	
Cohesive soil	Tightened	18	50<	15	
Kanto loam	Tightened	14	10<	20	

#### ④土質定数の決定 (Decision of the soil constants of the forest topsoil)

設計に必要な土質定数は、土の単位体積重量、粘着力および内部摩擦角である。この他、設計に必要な条件は安全側であることに配慮し、極力実態を反映した条件となるよう設定する。例えば、地下水位は飽和状態を想定して地表面とする、積雪や樹木に作用する風圧その他の外力を上載荷重として一括し5 kN/m<sup>2</sup>程度を作用させことも一案である。

### 5. 3. 3 残壁形状の決定

残壁の形状を決める3つの条件（斜面勾配、ベンチ高、小段幅）のうち、まず、植生基盤を安定造成できる斜面勾配を検討し、つぎにこの結果をもとに自然回帰型修復緑化を遂行できるベンチ高さおよび小段幅を決定する。

#### (1) 植生基盤を安定造成できる斜面勾配

残壁の勾配は、防災上の安定確保を条件に、採掘量が最大となる勾配とすることが望ましい。従来、残壁の安定勾配は、限界平衡解析<sup>2)</sup>などによって行われる場合もあるが、残壁には多数の不規則な亀裂が発達するなど不確定要素が多くモデル化が容易ではない。このため、安

定性を解析的手法で検討することは特殊な事例に限られ、一般には指導基準に準じた勾配とする方法が採られている。

しかし、指導基準に準ずる勾配は、自然回帰型修復緑化の前提となる植生基盤を造成する観点からは急な勾配となることが多く、植生基盤の造成は困難となる。他方、自然回帰型修復緑化における緑化目標を達成する観点から、景観を含む環境条件（Environment and landscape）を最優先として、安全性（Safety）や経済性（Economy）を無視することは、事業自体の成立が困難となり兼ねない。これらは互いにトレードオフの関係となるが、自然回帰型修復緑化を推進するためには、事業者自身が環境保全の意識に立って、3つの優先順位を図5.5のように固定することが必要となる。すなわち、残壁の安定性が確保されて初めて環境条件や経済性が成り立つことを明確に固定する必要がある。

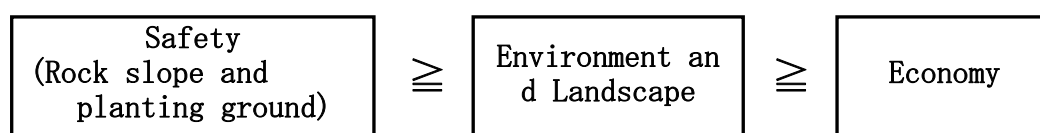


図5.5 残壁の形状決定における3つの条件の優先順位

露天採掘終了後の残壁の災害防止のためには、岩質や岩盤の状況に応じた残壁斜面を造る必要がある。指導基準によると、例えば、碎石用原石採取場においては、小段間の斜面部の勾配を75°以下とし、平均勾配を60°以下とすることを規定している<sup>2)</sup>。かつ、浮石などに起因する崩落や落石の危険を低減する観点から、プレスプリッティング（破断面を予め作っておく発破方式）の採用を勧めている<sup>2)</sup>。

本研究における自然回帰型修復緑化法は、終掘後の残壁の形状や整形については上述の技術基準に準拠するものであるが、後述するように、小段間の斜面部の傾斜をより緩勾配の60°以下としている。つま先部と頂部を結ぶ平均勾配はさらに緩勾配となることから、防災面での安定性は従来よりも向上することとなる。

自然回帰型修復緑化では、植生基盤として森林表土の利用を前提としているが、森林表土の土壌は未固結の「土」であることから、土が安定する斜面の勾配は岩盤斜面の残壁よりも通常緩くなる。換言すれば、自然回帰型修復緑化における残壁斜面の勾配は、岩盤の力学的特性で決まるのではなく、造成される植生基盤の安定性に支配されることになる。造成する植生基盤は、厚さが20cm程度と薄いことから、厚さに比べてすべり面の長さは事実上無限長と解釈できる。このことから、そのすべりは無限長平面すべり<sup>12)</sup>形態として考察できる。

図5.6は、植生基盤土塊が無限長の斜面上で釣り合っている状態を示したものである。また、式(5.1)は、土塊の釣り合い状態から導き出した無限長平面すべり安定解析式<sup>3)</sup>である。自然回帰型修復緑化における植生基盤の安定性は、式(5.1)によって検討する。

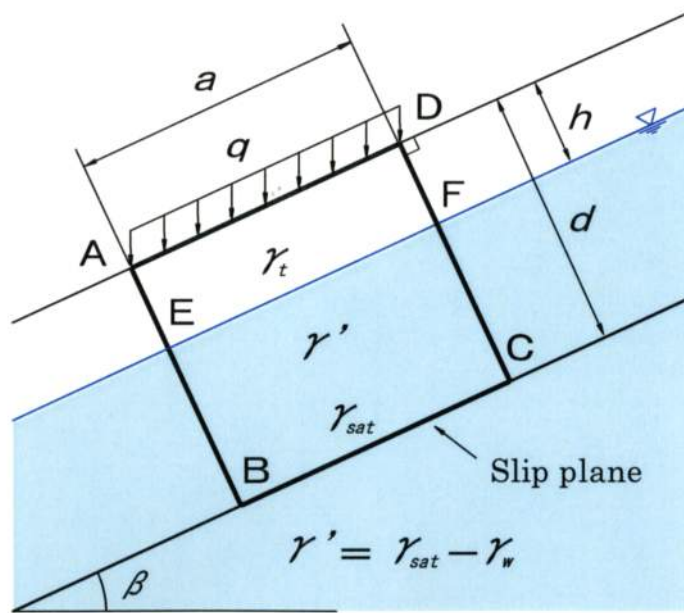


図5.6 残壁面における植生基盤土塊の力の釣り合い

$$Fs = \frac{C' + \{q + \gamma_t \cdot h + \gamma' (d-h)\} \cos \beta \cdot \tan \phi'}{\{q + \gamma_t \cdot h + \gamma_{sat} (d-h)\} \sin \beta} \quad (5.1)$$

ここに、 $Fs$  : 安全率

$C'$  : 有効応力状態での粘着力 ( $\text{kN/m}^2$ )

$\phi'$  : 有効応力状態での内部摩擦角 ( $^\circ$ )

$q$  : 植生基盤に作用する上載荷重 ( $\text{kN/m}^2$ )

$\gamma_t$  : 植生基盤の湿潤重量 ( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma_{sat}$  : 植生基盤の飽和重量 ( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma'$  : 植生基盤の水中重量 ( $\text{kN/m}^3$ )

$d$  : 斜面に直角方向の植生基盤の厚さ (m)

$h$  : 斜面に直角方向の地下水位の深さ (m)

$\beta$  : 残壁の傾斜角 ( $^\circ$ )

図5.7は、式(5.1)を用いて残壁の勾配と安定造成できる植生基盤の厚さとの関係を計算したものである。式(5.1)の検討から、粘着力の違いが安定性に及ぼす影響は大きい、単位体積重量や内部摩擦角の違いによる影響は余り大きくないことがわかる。このことから、図5.7では、植生基盤を安定造成できる安全率を  $Fs = 1.20$  とし、砂や粘土が混合した普通の土<sup>9)</sup>

を植生基盤とした場合を想定して、単位体積重量  $\gamma_t=15 \text{ kN/m}^3$ 、内部摩擦角  $\phi=20^\circ$ （残壁との境界すべり面では $(2/3)\phi=13^\circ$ とする<sup>13)</sup>）、上載荷重  $5 \text{ kN/m}^2$ 、地下水位を地表面としたときに、粘着力  $C$  を 6、7、8、9 および  $10 \text{ kN/m}^2$  の5段階に変化させた場合の残壁の勾配と植生基盤の厚さとの関係を示した。図から、粘着力が  $1.0 \text{ kN/m}^2$  異なると、造成できる植生基盤の厚さが  $10\text{cm}$  程度変化することが分かる。

自然地山の乱さない場合の森林表土についての調査結果では、粘着力  $C=8.0 \text{ kN/m}^2$  程度であることをすでに把握している<sup>3)</sup>。また、樹林化に必要な植生基盤の厚さは  $20\text{cm}$  程度である<sup>3)</sup>が、その造成が可能となる残壁の傾斜角は、厳密には植生基盤の粘着力に左右されるものの、図5.7から概ね  $60^\circ$  程度以下になるものと考察する。

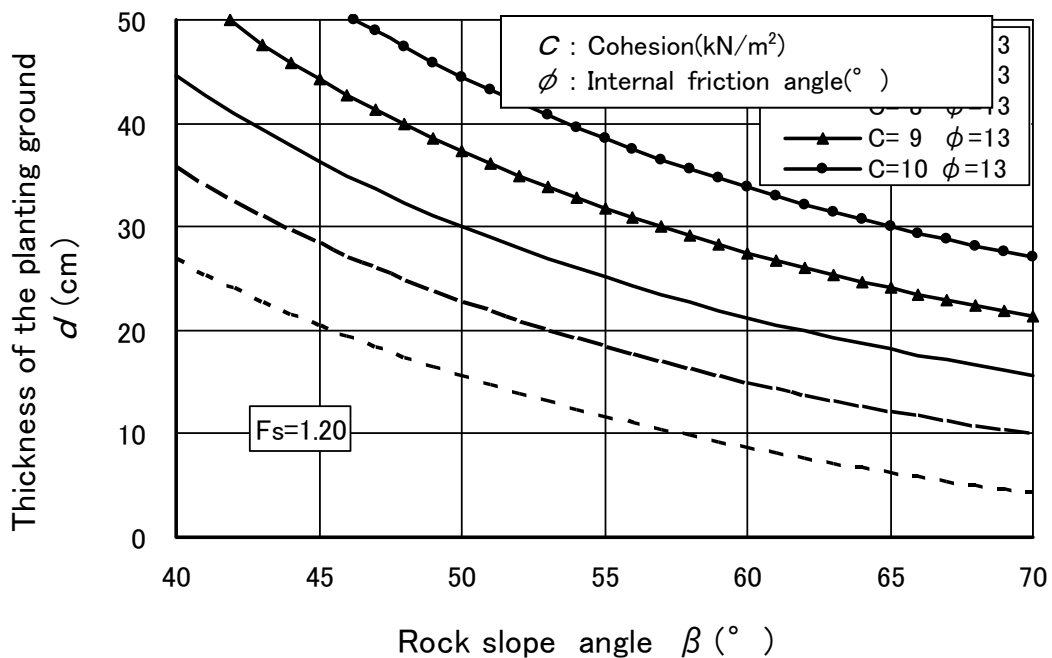


図5.7 残壁の勾配と植生基盤の厚さとの関係

(2) 自然回帰型修復緑化における残壁形状

(A) 斜面勾配

残壁の自然回帰型修復緑化を行う場合、斜面部の樹林化に必要な植生基盤の厚さは概ね  $20 \text{ cm}$  程度であり、森林表土を用いてそのような植生基盤を造成し得る残壁の勾配は、前項の考察から  $60^\circ$  以下とするのが望ましい。

したがって、自然回帰型修復緑化における残壁の勾配は最大  $60^\circ$  と設定する。残壁地山が  $60^\circ$  より急勾配で安定する場合でも、自然回帰型修復緑化のためには  $60^\circ$  より緩い勾配に切り直すこととする。

(B) ベンチ高さ



ベンチ高さについては、指導基準に示される形状を基本とするが、自然回帰型修復緑化では指導基準の条件を満足した上で以下の通り設定する。

自然回帰状態とみなせる樹木の高さはベンチ高の6割程度であることが分かっている<sup>14)</sup>。このことから、ベンチの高さは、緑化目標とする植生樹林の高さがベンチ高さの6割程度となるまでに許容できる時間(年月)と採掘量を勘案して決定する。

樹木の生長速度や極相状態の高さは、地形や気候あるいは土壌の養分などによって異なると考えられるが、例えば、札幌市内の道路盛土における落葉広葉樹の調査事例によると、播種後10～15年後には樹高が6～10m程度に達していることが報告されている<sup>15)</sup>。また、岩手県二戸市の折爪地区の例では、林道の切土法面において、厚さわずかに3cmの植生基盤への播種工で、約5年後に樹高2mに達する落葉広葉樹の生長を確認している<sup>16)</sup>。さらに、関西電力(株)のN発電所における落葉広葉樹からなる環境林の例では、苗木の植栽後8～10年で樹高6～7mに達し、その後樹高の増加は緩慢となる調査データが得られている<sup>17)</sup>。このようなデータを含め、経験的にも、国内の落葉広葉樹から成る二次林は、実生から生長する場合、10～15年後には樹高6～7mに達するものと想定できる。

樹高6～7mの樹林は、広葉樹ではほぼ極相の状態であることから、この樹高に達したときに残壁が自然回帰状態となる必要がある。この条件を満足するベンチ高さを上述の自然回帰状態の樹高との比率(6割程度)で求めると約10mとなる。本研究では、これをベンチ高さの最大値とする。この最大ベンチ高さを採用する場合には、自然回帰状態となるまでにおよそ10～15年程度を見込む必要があり、これは景観面での許容期間を検討する際の目安になると考える。

以上の考察から、自然回帰型修復緑化におけるベンチ高さは最大10mとし、具体的には、周辺景観面から許容できる樹木の生長速度や事業が経済的に成立する採掘量などを総合的に判断して決定する。

### (C) 小段幅

小段の幅については、指導基準に示される形状を基本とする。指導基準では、小段の幅は緑化に用いる樹木の種類によっても異なることを前提に、植生工に必要な最小幅として2mを設定している<sup>1)</sup>。

本研究での自然回帰型修復緑化においても、実際の小段幅は、それぞれの残壁の安定性の確保を条件とした上で、緑化目標とする樹林の樹幅などを勘案して決定することとする。ただし、斜面部に植生基盤を造成する場合の作業性などを考慮し、小段はできるだけ広くとるなどの配慮が必要である。

図5.8は、以上の検討結果をまとめ、本研究で開発した自然回帰型修復緑化法で提案する残壁の形状を示したものである。

斜面勾配( $\alpha$ )は $60^\circ$ 以下、ベンチ高( $h_1 \sim h_n$ )は10m以下、小段幅( $d_1 \sim d_n$ )は2m以上とそれぞれ設定する。なお、残壁高さ(H)が100mを越えるような場合には、上半部

の底部小段幅 ( $d_{n0}$ ) を 10m 以上とする。このことは指導基準に同じである。

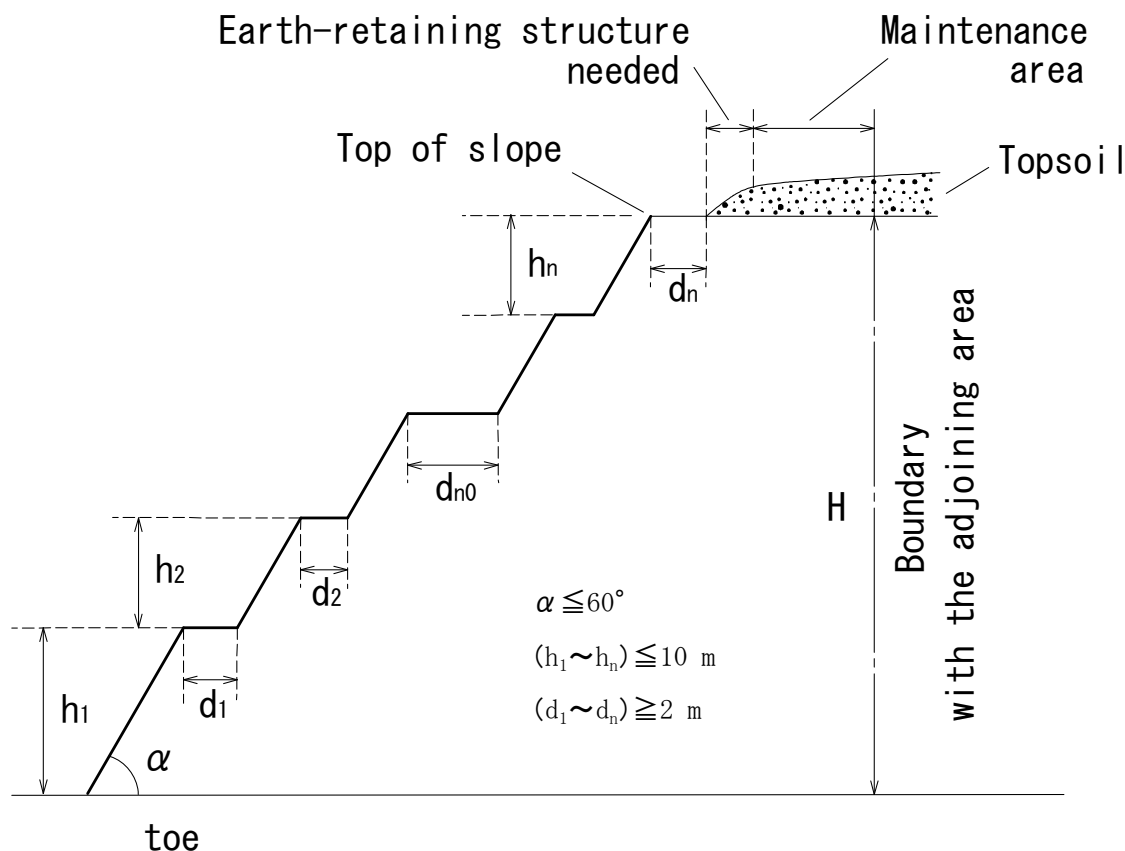


図5.8 自然回帰型修復緑化法で提案する残壁の形状

### 5.3.4 植生基盤の造成

自然回帰型修復緑化では、最大傾斜  $60^\circ$  の残壁斜面に厚さ 20cm 前後の植生基盤を造成する。例えば、道路の盛土を造成する際には、予め土の締固め特性を把握した上で綿密な密度管理による施工を必要とするが、残壁に造成する植生基盤は、厚さ 20cm 前後の薄い単一層であることから、このような密度管理は必要としない。

植生基盤の造成に際しては、残壁面に残る浮石や土砂などを入念に除去し、安定した岩盤面として整形することが必要となる。その後、適量の散水を行いながら森林表土を巻き出し、重機の排土板の類で圧着する。一般に、造成する植生基盤は、時間の経過とともに安定性を徐々に向上させ、さらに植物根系の発達によって長期的な安定を維持することになるが、造成初期の段階では降雨などによる土砂の侵食～流失が懸念される。このような事態を防ぐためには、森林表土に相応の粘着材（少量のセメントなど）を混入させることやネット工などを併用することも一案である。このことは、埋土種子を表層に播き出す際にも有効な対策になるといえる。

なお、造成基盤に対する侵食防止や土粒子の流失防止のための考え方や方策は、土木工事における道路盛土の造成などの場合と基本的に同じであり、造成直後の降雨に対してはシー

ト工を適用するなど、状況に応じた流動的な対応を計画することが肝要である。

## 5. 4 自然回帰度評価システムの構築

### 5. 4. 1 自然回帰度評価システム

自然回帰度<sup>18)</sup>は、事前に掲げた緑化目標に対する到達の度合いであり、それを評価することは、修復緑化計画を効果的に策定する上で不可欠である。しかし、特に定量的な評価手法が確立されていない<sup>19)</sup>現状においては、その対応が急務である。修復緑化における自然回帰度を評価する研究としては、生態学的側面から土壌動物相の変化やシダ植物の種数などを指標とする事例を幾つか認める<sup>20)-22)</sup>。しかし、自然回帰度を景観面から評価しようとする既存研究はみられず、その手法の確立が求められている<sup>18)</sup>。

景観面からの評価は、単に景観上の問題に止まらず、生態系を包含する自然回帰度に対して景観の側面からアプローチし評価するものである。この観点から、本研究では、残壁に生育する樹木の生長過程に着目し、これを指標とした自然回帰度評価システムを構築した。景観上、修復緑化の進行状況を大きく左右する要素は、樹木の大きさの変化であり、それ以外の要素は余り大きく影響しないと考えられる<sup>23)</sup>。そこで、本システムでは樹木の大きさを指標とする緑化シミュレーション画像を作成し、評価実験に供することによって自然回帰度を景観面から判定した。

図5. 9に、本研究で構築した自然回帰度評価システムを示す。

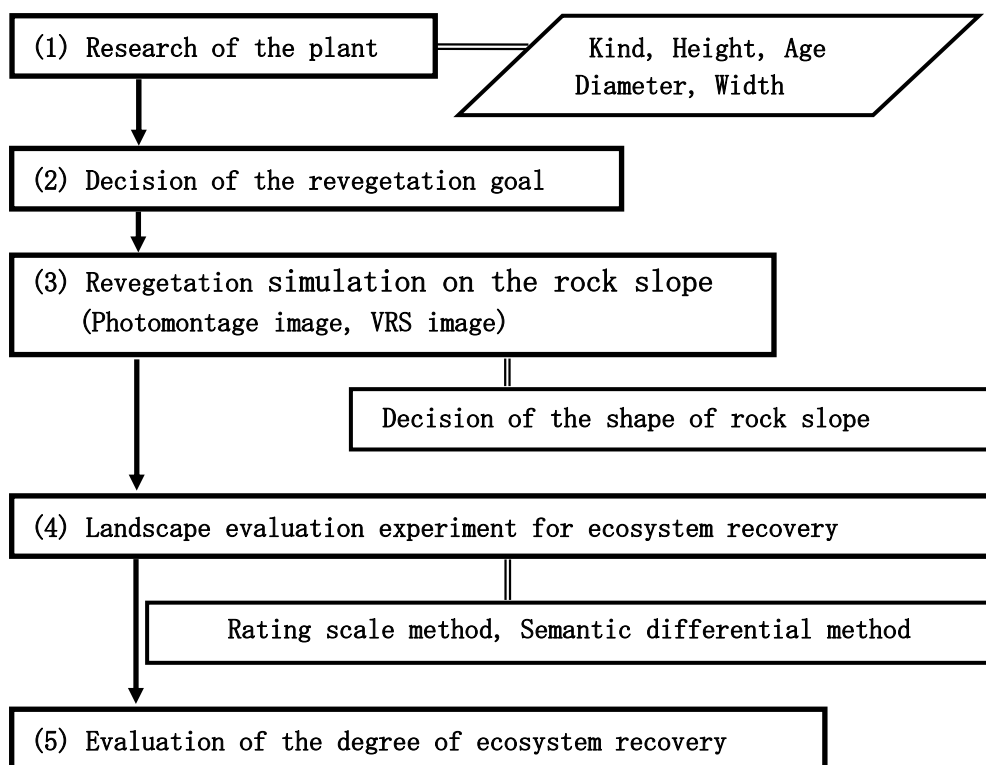


図5. 9 自然回帰度評価システム

本システムは、大きく5つのプロセスで構成される。

(1) 植生調査 (Research of the plant)

植生調査は、前 5.3 節の「自然回帰型修復緑化法の開発」に同じである。特に、樹木密度などをはじめ植生に関する調査データは、緑化シミュレーション画像を作成する際の基礎資料となる。

(2) 緑化目標の設定 (Decision of the revegetation goal)

植生調査結果にもとづいて緑化目標を設定する。これについても前 5.3 節に同じである。自然回帰型修復緑化における緑化目標は、周辺在来の植物群落相当の植生状態の形成とすることを原則とする。

(3) 緑化シミュレーション (Revegetation simulation on the rock slope)

自然回帰型修復緑化を策定する際には、修復緑化の過程を事前に把握し評価する必要がある。ここでは、フォトモンタージュによる修復緑化過程の緑化シミュレーションを行う。ただし、シミュレーションに際しては、市販の VRS (Virtual reality system) ソフトなどを用いることも可能である。作成した緑化シミュレーション画像は、別途景観評価実験に供する。

(4) 景観評価実験 (Landscape evaluation experiment for ecosystem recovery)

適切な被験者を選定し<sup>24)</sup>、所定の緑化シミュレーション画像を用いて景観評価実験を行う。自然回帰度判定のための評価実験には評定尺度法 (Rating scale method) を適用する。

(5) 自然回帰度評価 (Evaluation of the degree of ecosystem recovery)

評価実験結果をもとに、自然回帰状態とみなせる植生状態を把握し、実際の修復緑化を策定する際の資料とする。すなわち、残壁に樹木が生育・生長し自然回帰状態となるまでの時間 (年数) あるいは創出される植生状態を予め把握し、その植生状態を形成するための緑化法を立案検討する際の基礎資料とする。

#### 5.4.2 緑化シミュレーション

自然回帰型修復緑化計画を策定する際には、自然回帰度を事前に把握し、より効果的な緑化法を検討する必要がある。自然回帰度は、緑化シミュレーションを用いた景観評価実験によって検討する。

**図5.10**に、フォトモンタージュによる緑化シミュレーションと評価実験の手順を示す。

①対象残壁の写真撮影 (Taking of the picture of the rock slope)

フォトモンタージュに適用する写真は、所定の位置からカラー撮影する。写真は評価実験に使用するフォトモンタージュ画像の基礎となることから、実際にその現場で体感する景観と近似した状態であることが望ましい。具体的には、景観アセスメント<sup>25)</sup>の際に多用されている 35mm フィルム換算で 28~35mm 程度の焦点距離レンズを用いた写真撮影を行うこととする。

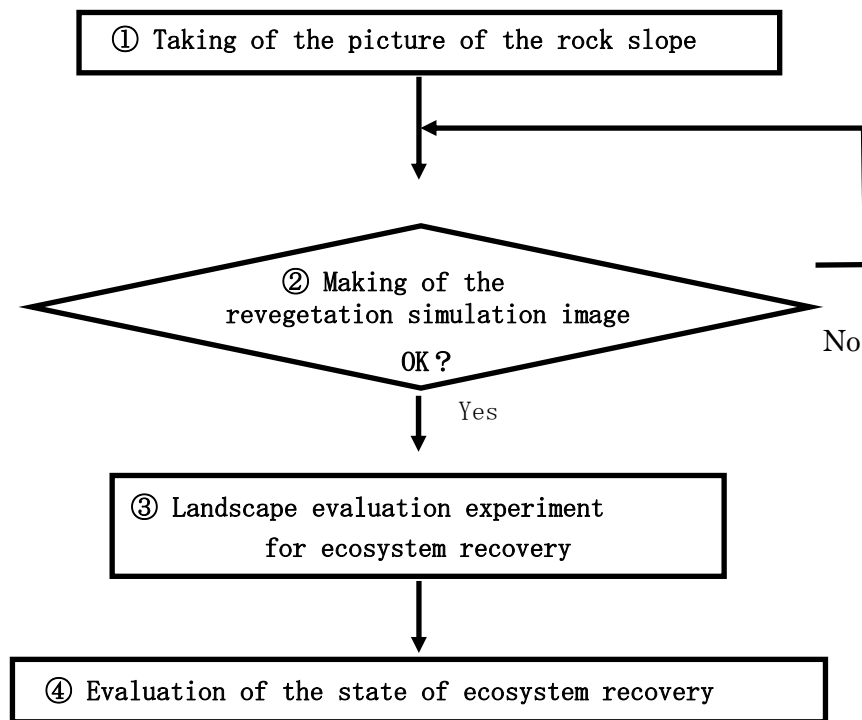


図5. 10 緑化シミュレーションと評価実験の手順

#### ②緑化シミュレーション画像の作成 (Making of the revegetation simulation image)

緑化シミュレーション画像は、撮影した現況の写真を用い、フォトモンタージュによって作成する。シミュレーション画像は、連続性を有する植物（樹木）の生長過程を予測することになるが、実態として連続性を表現することは困難であることから、ここでは樹高を指標として、それを複数段階（例えば、5～6段階）に変化させた画像を作成する。

フォトモンタージュ画像の作成に際しては、関連の市販ソフト「Photoshop」（Adobe Systems 社製）を用いる。

図5. 11は、採石場残壁の現況写真であり、図5. 12はそれをもとに Photoshop によって作成した緑化シミュレーション画像の一例である。

#### ③景観評価実験 (Landscape evaluation experiment for ecosystem recovery)

所定の緑化シミュレーション画像を用いて景観評価実験を行う。自然回帰度判定のための評価実験には序数尺度の評定尺度法 (Rating scale method) を適用する。

実験は、被験者に対して所定の画像を 17 インチ程度の PC 画面または高解像度液晶プロジェクターによるスクリーン映写で呈示し、その画像についての印象を被験者の主観に基づいて判断してもらう方法とする。この場合、被験者は対象の残壁に利害関係を持たない第三者とし、少なくとも 30 名以上<sup>23)</sup>について実験することが望ましい。



図5. 11 残壁の現況写真の例



図5. 12 フォトモンタージュ画像の例  
(残壁のベンチ高さ 10m に対して樹高が 6m まで生長した場合)

図5.13は、評定尺度法を用いた評価実験で使用するデータシートの例である。この例では、呈示された所定の画像に対して、左側に示す5つの形容詞それぞれについて、被験者の主観を下側の評定尺度1~7の該当箇所に○印を付けて示してもらうものである。

なお、画像の呈示方法は、被験者に規則性を感じないようにランダムとし、2回呈示することが望ましい<sup>26)</sup>。

### 評価実験シート

平成 年 月 日 ( )      所属 : \_\_\_\_\_      氏名 : \_\_\_\_\_

(スライド番号 1 )

周辺の風景と同化している (Harmonious)									
			○						
自然な感じがする (Natural)									
				○					
緑化部分に違和感がない (Suitable)									
				○					
緑が豊かである (Luxuriant)									
			○						
自然景観として許容できる (Acceptable)									
				○					
	1	2	3	4	5	6	7		
	全く 思わない (Least)	思わ ない (Less)	あま り思 わな い (Little)	い えな い ど ち ら と も (Neutral)	や や 思 う (Much)	思 う (More)	非 常 に 思 う (Most)		

図5.13 評定尺度法によるデータシートの例

#### ④自然回帰状態の評価 (Evaluation of the state of ecosystem recovery)

実験結果から、各形容詞それぞれについて、各被験者の評価結果の平均値を求める。

図5.14は、各形容詞について、評価結果の平均値をプロットした例である。図では、樹木の生長過程を変化指標としているが、それをベンチ高に対する樹木の高さ比 ( $r$ ) で示している。図から、樹木が生長、すなわち高さ比  $r$  が増加すると、被験者の判定はより良好な方向 (数値が大きくなる右側) へ移動しているのがわかる。

#### 5.4.3 自然回帰度評価

評定尺度法は、序数尺度であることから、図5.14における1~7の数値による定量的な評価は好ましくない。しかし、数値による位置関係を把握することは可能であり、この観点から、図5.14の「全く思わない」から「非常に思う」までの7段階の評価にそれぞれ1~7の数値を与え、被験者全員の平均値を求める。これによって自然回帰の状態を評価する。

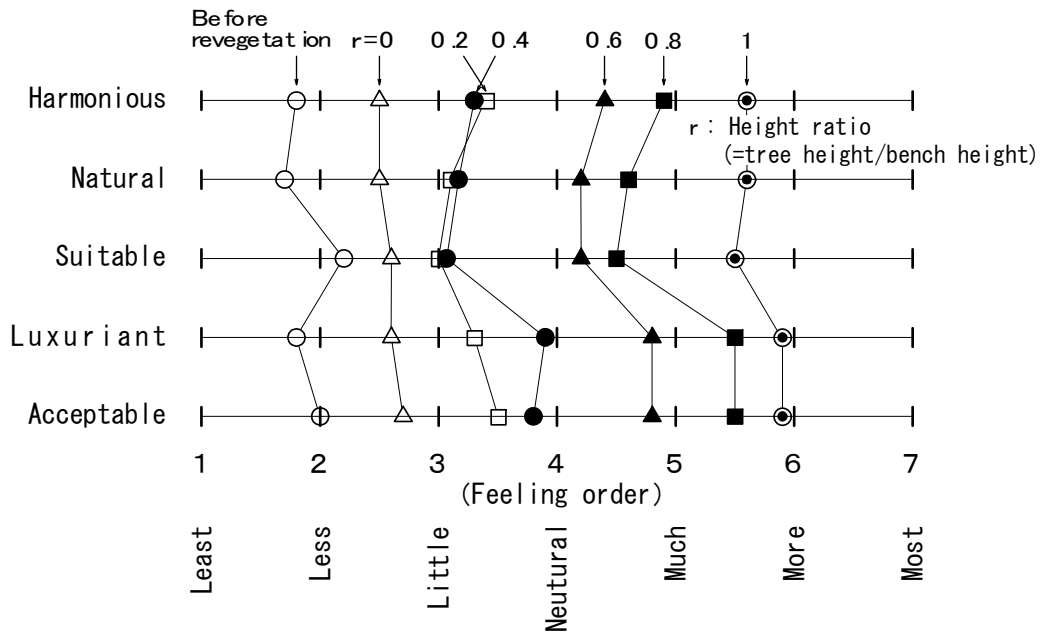


図5. 14 評定尺度法による評価実験結果の例

図5. 15は、残壁に生長する樹木の高さとの関係を示した例である。この例では、樹木の高さをベンチ高に対する高さ比で示し、自然回帰度を 1～7 の数値で与えた評定尺度の平均値で示している。また、この例では両者の関係にほぼ正比例の直線関係を確認することができ、例えば、自然回帰度[4]のときを概ね自然回帰に達した状態とするならば、その時の高さ比は  $r = 0.6$  として評価できる。

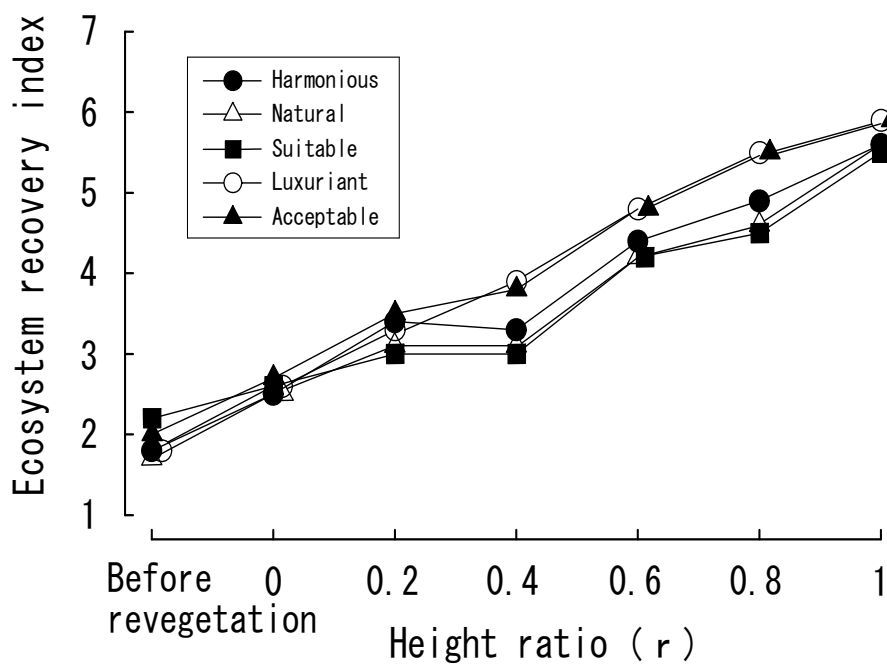


図5. 15 樹木の高さ比と自然回帰度との関係の例



## 5.5 結 言

本章では、残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と自然回帰度評価システムの構築を行った。まず、自然回帰型修復緑化の手法を特徴づける森林表土の利用について、その調査方法、工学的な評価手法および安定造成のための検討手法をとりまとめ、一連の成果を自然回帰型修復緑化法の開発へと結び付けた。つぎに、自然回帰型修復緑化計画を策定する際に、その過程を事前に評価し、より効果的な修復緑化法を立案する観点から、残壁に生育する樹木の生長過程を指標とする自然回帰度の評価システムを構築した。

本章で得られた結果をまとめると、つぎのとおりである。

(1) 植生基盤材として森林表土の土壌部の利用方法を検討した。これによって、地域固有の遺伝子をもつ植生基盤の造成が可能となり、この知見をもとに地域の生物多様性保全に寄与し得る自然回帰型修復緑化法を開発した。

(2) 自然回帰型修復緑化を遂行するための残壁の形状を設定した。すなわち、残壁の最大勾配を  $60^\circ$ 、ベンチ高さを 10m 以下とし、小段幅を 2m 以上と設定する。

(3) 残壁に植生する樹木の生長過程を指標とする緑化シミュレーション画像を適用した評価実験により、自然回帰度の評価システムを構築した。

本研究で開発した自然回帰型修復緑化法と自然回帰度評価システムは、まだ基礎研究の段階であり、実用化に際しては、今後解決しなければならない問題点が残されている。例えば、森林表土を用いた植生基盤の具体的な造成工法の技術開発、造成後の雨水による侵食防止を含む維持管理方法の開発、緑化目標に対する埋土種子の事前評価手法の開発などである。

また、簡易なCGなどを適用した景観予測シミュレーションあるいは三次元の緑化シミュレーション手法の開発なども取り組むべき課題と考える。

今後は、本研究での基礎的成果をもとに実用化へ向けた研究と技術開発が必要となる。関連の研究をさらに押し進め、地域の生物多様性保全に寄与し得る修復緑化工法として発展させる必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 採石技術指導基準編集委員会：詳解採石技術指導基準、ぎょうせい、2004
- 2) (社)資源・素材学会：残壁ハンドブック、丸善、2005
- 3) 大竹照光・大塚尚寛・齋藤貢・阿部洋祐：Journal of MMIJ、Vol.123、p.329-335、2007
- 4) 亀山章監修：生物多様性緑化ハンドブック、地人書館、pp.187-199、2006
- 5) (社)日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針、丸善、1999
- 6) 森林土壌研究会：森林土壌の調べ方とその性質(改訂版)、林野弘済会、p.33、1993
- 7) 日本緑化工学会誌、Vol.29、No.4、p.509、2003

- 8) 地盤工学会：自然環境の保全と緑化、地盤工学会、p.21、2004
- 9) 東／中／西日本高速道路株式会社：設計要領第一集・土工編、NEXC 中央研究所、2006
- 10) 中越信和：再度山の森林群落における埋土種子集団の研究、再度山永久植生保存地調査報告書第2回、p.69-94、1985
- 11) 地盤工学会： $N$ 値と  $C \cdot \phi$  の活用法、地盤工学会、p.140、1998
- 12) 松井保監訳：植生技術による斜面安定工法、森北出版、p.46、2004
- 13) 日本道路協会：道路土工－擁壁工指針、丸善、p.67、1999
- 14) 大竹照光・大塚尚寛・志田寛・阿部洋祐：資源・素材学会春季大会講演概要集、Vol. I、p.89-90、2007
- 15) 孫田敏・渡辺修他：「野生生物と交通」研究発表会講演論文集、(社)北海道開発技術センター、2、1-8、2003
- 16) 古田智昭・吉田寛：日本緑化工学会誌、Vol.30、No.2、p.377-382、2004
- 17) 日本緑化工学会：環境緑化の事典、朝倉書店、p.201、2005
- 18) 大竹照光・大塚尚寛・志田寛・阿部洋祐：資源・素材学会春季大会講演概要集、Vol. I、p.139-140、2006
- 19) 増田俊二：第20回道路緑化技術発表会要旨論文集、社団法人道路緑化保全協会、p.16-17、2000
- 20) ソン ゼェタク・篩孝夫：日本緑化工学会誌、Vol.30、No.1、p.21-26、2004
- 21) 橘隆一・西村香奈子・宮本沙織・福永健司：日本緑化工学会誌、Vol.29、No.1、p.56-61、2003
- 22) 松井理恵・村上健太郎・森本幸裕：日本緑化工学会誌、Vol.29、No.1、p.119-124、2003
- 23) 大竹照光・大塚尚寛・齋藤貢・鳴海貴之：資源・素材 2007(名古屋)企画発表・一般発表(A)(B)講演資料、B6-5、2007
- 24) 外菌貴彦・大塚尚寛・志田寛・齋藤貢：Journal of MMIJ、Vol.122、p.589-595、2006
- 25) 自然環境アセスメント研究会：自然環境アセスメント技術、自然環境研究センター、pp.638、1995
- 26) 外菌貴彦・大塚尚寛・志田寛・齋藤貢：骨材資源、No.151、2006

## 6. 森林の有する二酸化炭素吸収源機能と洪水調節機能の推定

### 6.1 二酸化炭素吸収源機能の推定

#### 6.1.1 概要

森林の二酸化炭素吸収源機能は、地球温暖化防止対策における二酸化炭素吸収源として大きな注目を集めている。気候変動に関する国際連合枠組条約第3回締約国会議（COP3）で採択された「京都議定書」において、露天採掘跡地の修復緑化によって1990年以降に行われた新規の植林は、森林吸収源としてカウント可能とされている。平成19年に内閣府によって行われた調査によると、森林に期待する働きとして「二酸化炭素を吸収する働きにより、地球温暖化防止に貢献する働き」という意見が54.2%と過半数を超え、また2008年から京都議定書の第一約束期間に入るため、関心がさらに高まると予想される。

本研究では、露天採掘場が開発される以前の森林、ベンチ小段だけに緑化を行う従来型修復緑化と残壁全体に緑化を行う自然回帰型修復緑化、各々の森林の有する二酸化炭素吸収量を推定し、比較することでその回復度を判定した。（図5.1）

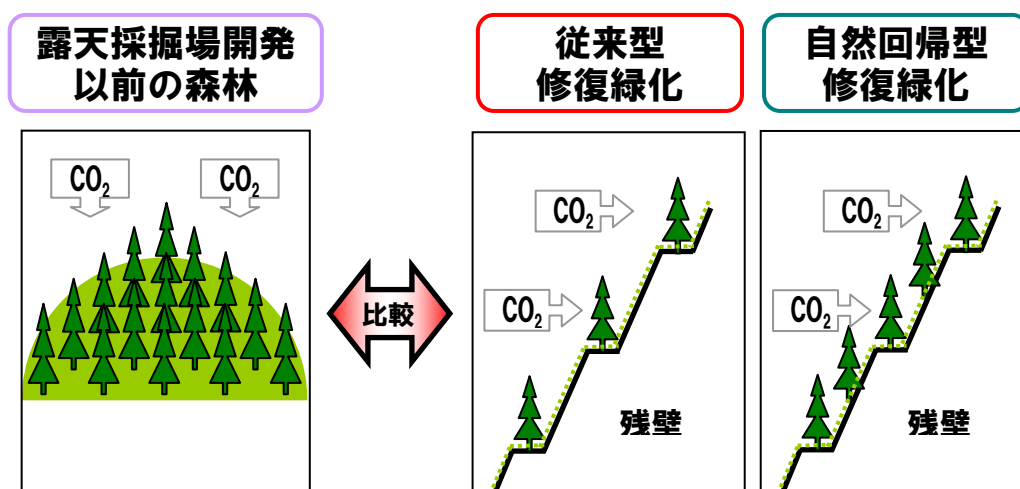


図6.1 二酸化炭素吸収源機能の概要

#### 6.1.2 推定方法

二酸化炭素吸収量に関する研究は近年盛んに行われている。本研究では、独立行政法人環境再生保全機構による「植生図に基づく定量的評価法」<sup>1)</sup>を適用し推定を行った。これは、既存の植生図を利用して、対象地域の植生区分を行い、その分布面積を測定するとともに、その植生区分ごとに既存の知見を集約して設定した単位面積当たりの年間の純生産量を乗じることによって1年間に吸収する汚染ガスの量を概算・推定する方法である。

この算出方法は、植物の光合成による二酸化炭素の吸収量をもとに植物による汚染ガスの吸収量を間接的に推定する方法で、その大要は国立環境研究所（1987）に従っている<sup>1)</sup>。こ

の推定で不可欠なのは、植生区分ごとの総生産量のデータである。これには森林や草地における我が国の一次生産量に関する豊富なデータが利用されている。以下にその手順を示す。

- ① 植生図をもとに、植生タイプの区分を行い、対象地域内における分布状況を把握する。
- ② ①で区分した植生区分について、それぞれの区分面積を測定する。
- ③ 植生区分別の単位純生産量、分布面積などを用いて植生区分別の二酸化炭素吸収量を算出モデルにより推定し、これを合計して地域全体の吸収量を試算する。

### 6. 1. 3 植生区分と単位土地面積当たりの年間生産量

この算出法を用いて緑地の有する二酸化炭素吸収能力を評価するためには、植生区分ごとの生産量のデータが不可欠である。

表6. 1に植生区分と単位面積当たりの年間生産量を既存の知見の集約から設定した値を示す。

森林や草地などのような植物群落としての年間二酸化炭素吸収量については、世界の生物生産力の研究を主題とした IBP(International Biological Program、国際生物学事業計画、1965～1974)の発足以来爆発的な進歩を遂げ、いまや生態学、林学の一大研究テーマとなった生物の一次生産量に関する研究の成果により、かなりのデータが蓄積されている。その知見によれば、森林では落葉樹林の純生産量は常緑樹林よりも低い。これは落葉樹では着葉期間が短く冬には落葉してしまうので、常緑樹のように生育期間を十分に利用できないためであると考えられている。一方、呼吸消費量の推定が技術的に困難なため、総生産量の推定例は純生産量に比べてずっと少ないが、森林の純生産量／総生産量の比は、落葉樹林（0.5～0.6）では常緑樹林（0.3～0.4）に比べてやや大きい傾向がある。これについても着葉期間が関係していて、普通、群落呼吸量の半分以上を占める葉の呼吸量が、落葉樹林では生育期間が短いため、相対的に小さくなるためであるといわれている<sup>1)</sup>。

表6. 1 植生区分と単位土地面積当たりの年間生産量

植生区分	Pn (t / ha·yr) <sup>*1</sup>	Pn / Pg	Pg (t / ha·yr) <sup>*2</sup>
常緑広葉樹林	18	0.35	51
落葉広葉樹林	12	0.55	22
常緑針葉樹林	18	0.35	51
落葉針葉樹林	10	0.55	18
草地 <sup>*3</sup>	12	0.55	22
農耕地 <sup>*4</sup>	10	0.55	18
その他の緑地 <sup>*5</sup>	6	0.45	13

注) \*1) Pn : 純生産量      \*2) Pg : 総生産量

- \*3) 竹林、牧草地などは草地に含める。
- \*4) 果樹園、苗圃、桑園などは農耕地に含める。
- \*5) 緑の多い住宅地、公園などを含む。

#### 6.1.4 算出モデル式

植物体の乾物重の大部分を占める多糖類 ( $C_6H_{12}O_5$  で代表) と多糖類を合成する際に取り込まれる二酸化炭素の重量比は(6.1)式となる。

$$[6CO_2]/[C_6H_{12}O_5] = 264/162 = 1.63 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

であるから、総光合成速度 (二酸化炭素の吸収速度) を  $U_{CO_2}$ 、植物群落の総生産量を  $P_g$  とすると、(6.2)式が成り立つ。

$$U_{CO_2} = 1.63 \times P_g \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

純生産量を  $P_n(t/ha \cdot yr)$ 、分布面積を  $S(ha)$  とすると、二酸化炭素の吸収量  $W_{CO_2}(t/yr)$  は、(6.3)式で求めることができる。

$$W_{CO_2} = 1.63 \times P_n \times S \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

#### 6.1.5 露天採掘場開発以前の森林が有していた二酸化炭素吸収量

本研究では対象地の詳細な植生分布図を入手することができなかつたため、植生調査の結果から植生区分別の分布面積を推定した。その結果、露天採掘場の開発によって失われた森林面積は 37.9(ha)であり、その内訳は落葉広葉樹林が 33.7(ha)、常緑針葉樹林が 4.2(ha)であると分かった。

露天採掘場の開発によって失われた二酸化炭素吸収量を(6.3)式、純生産量 (表6.1)、分布面積を用いて算出すると以下ようになる。 ((6.4)、(6.5)式)

① 落葉広葉樹林

$$W_{CO_2} = 1.63 \times P_n \times S \cong 660 \quad (t / yr) \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

② 常緑針葉樹林

$$W_{CO_2} = 1.63 \times P_n \times S \cong 123 \quad (t / yr) \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

これを合計すると、開発によって失われた二酸化炭素吸収量は年間約 780(t)と推定され、この値を日本人一人当たりの年間二酸化炭素排出量 10(t)で換算すると、約 78 人分に相当す

る。 ((6.6)式)

$$660 + 123 = 783 \quad (t / yr) \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

### 6. 1. 6 修復緑化による二酸化炭素吸収量の回復

ベンチ小段だけに緑化を行う従来型修復緑化 (A) と残壁全体に緑化を行う自然回帰型修復緑化 (B)、従来型修復緑化には生長が早く適応力が大きい針葉樹による急速緑化方式を、自然回帰型修復緑化にはマザーソイル工法による緑化を想定し、その二酸化炭素吸収量の推定を行った。

#### (A) 従来型修復緑化の場合

小段の面積は 4.2(ha)、小段+斜面部の面積は 12.3(ha)であった。従来型修復緑化の場合、小段のみに針葉樹林が生成されると考えられるため、(6.3)式による二酸化炭素吸収量は(6.7)式のように推定される。

$$W_{co_2} = 1.63 \times P_n \times S \quad \doteq 123.2 \quad (t / yr) \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

#### (B) 自然回帰型修復緑化の場合

自然回帰型修復緑化の場合、小段+斜面部に周辺地山の同じ構成種の森林が生成されると考えられるため、(6.3)式による二酸化炭素吸収量は以下のように推定される。 ((6.8)、(6.9)式)

##### ① 落葉広葉樹林

$$W_{co_2} = 1.63 \times P_n \times S \\ \doteq 213.2 \quad (t / yr) \quad \dots\dots (6.8)$$

##### ② 常緑針葉樹林

$$W_{co_2} = 1.63 \times P_n \times S \\ \doteq 41.1 \quad (t / yr) \quad \dots\dots (6.9)$$

これを合計すると、自然回帰型修復緑化による年間二酸化炭素吸収量は 254.3(t)であると推定される。 ((6.10)式)

$$213.2 + 41.2 = 254.3 \dots (t / yr) \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

露天採掘場開発以前の年間二酸化炭素吸収量 780(t/yr)と比較すると、従来型修復緑化を想定した場合の回復度は 16%、自然回帰型修復緑化を想定した場合の回復度は 33%となった。自然回帰型修復緑化は従来型修復緑化と比較し約 2 倍の回復度を有していると推定される。

((6.11)、(6.12)式)

#### (A) 従来型修復緑化の場合

$$123.2 / 780 \times 100 = 15.79 (\%) \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

#### (B) 自然回帰型修復緑化の場合

$$254.3 / 780 \times 100 = 32.60 (\%) \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

従来型修復緑化の中でも、急速緑化方式ではなくハギ、ヤシャブシ、ハンノキなど落葉広葉樹を植栽することで景観面に考慮した緑化工法（C）も多く見られる。この場合の二酸化炭素吸収量を(6.3)式により推定すると(6.13)式のようになる。

(C) 従来型修復緑化（落葉広葉樹）の場合

$$W_{co2} = 1.63 \times P_n \times S \doteq 82.2 \quad (\text{t / yr}) \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

二酸化炭素吸収量は年間 82.2(t/yr)と算出され、その回復度は約 11%と推定される。

土地の有効活用の観点から考えると、良質な景観と生態系、二酸化炭素吸収量の効率性、どのポイントを優先させるかを立地条件や周辺環境などから判断し、その土地に適切な手法を導入して緑化を行うことが重要であるといえる。

## 6.2 洪水調節機能の推定

### 6.2.1 概要

森林の持つ洪水調節機能には以下のようなものがある<sup>2)</sup>。

- 出水時の流量増加が時間的に穏やかになる。
- 洪水流の流量が減少する。
- ピーク流量が低くなり遅くなる。
- 減水が穏やかになり安定する。

また間接的な機能として以下の2つが挙げられる。

- 森林の崩壊防止機能による突発的な崩壊・土石流の発生を軽減する。
- 地表流による表面侵食がほとんどないため、侵食土砂の河道への流出が減り天井川の発生を防止する。

開発により伐採された森林の減少に伴いその機能は低下しているものと推察され、自然防災の観点からも森林の回復が望まれる。本研究では、露天採掘場開発以前の露天採掘場地域から降雨時に流出していた水量を推定し、修復緑化後の水量と比較してその回復度を判定した。（図6.2）

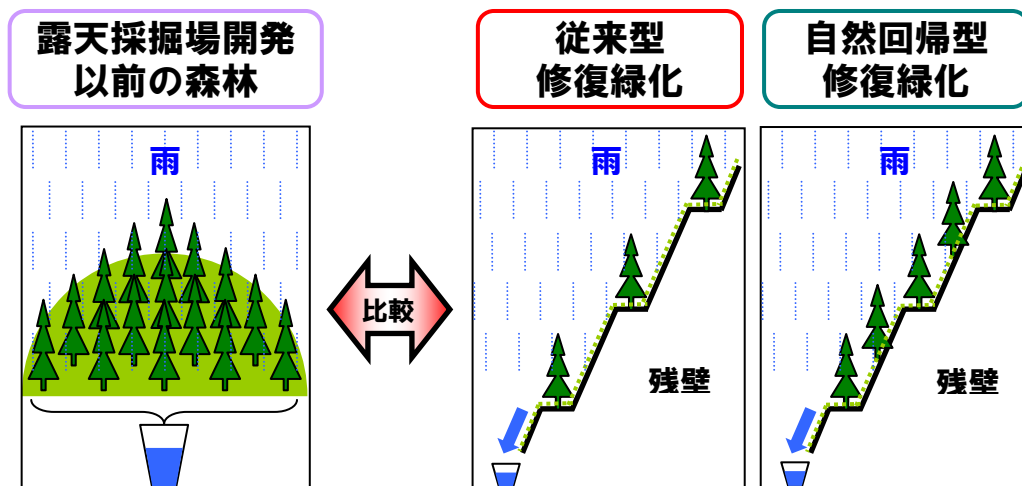


図6.2 洪水調節機能の推定の概要

### 6.2.2 推定方法

露天採掘場の場内から場外への排水については、水質汚濁防止法（昭和45年法律138号）及び関係条例に基づく基準が適用される場合にはそれに適合するよう処理し、また適用がない場合においても下流において災害を起こさないように沈殿池等の処理施設で処理して排出すること<sup>29)</sup>、となっている。そこで本研究では、この採石技術指導基準による降雨の流出量の算出方法を基に推定を行った。

### 6.2.3 降雨流出量の算出

#### ① 降雨による流出量

降雨の流出量は、(6.14)式によって計算される。

$$Q = \frac{1}{360} \times f \times I \times A \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

Q：流出量（m<sup>3</sup>/s）

f：流出係数

I：流達時間内の平均降雨強度（mm/h）

A：集水面積（ha）

降雨量は流下するにしたがって土砂を伴って汚濁水になる。それゆえ、流出する汚濁水の量は、Qより土砂の含有量だけ増加する。採石場に設置する導入路、沈殿池などの諸施設の容量は、増加した汚濁水としての量を対象に考えなければならない。

#### ② 集水面積

集水面積（流域面積）は、ある地点（採石場）に雨水が流下してくる周囲の地域の広さ(面



積)である。その地点を基点とした稜線で囲まれた範囲による。

### ③ 流出係数

流出係数は、降雨量に対して地表を流下する雨水の割合を表す数値である。降った雨水は地中への浸透、樹木への付着、蒸散等により地表を流れる量は降雨量より少なくなる。その値は地形、地質、樹木の繁茂の状態などによって相違がある。採用に当たっては、**表6.2**に示す数値を基本とする。

**表6.2** 流出係数値

地 表 状 態	流出係数
急峻な山地	0.75～0.90
三紀層山岳	0.70～0.80
起伏のある土地及び樹林	0.50～0.75
平坦な耕地	0.45～0.60
植芝地	0.60～0.80
灌漑中の水田	0.70～0.80
山地河川	0.75～0.85
平地小河川	0.45～0.75
流域の大半が平地である大河川	0.50～0.75
グラウンド、コート等	0.90～1.00
宅地	0.80～0.90

### ④ 流達時間

流達時間は、集水地点（流出量を求めようとする地点、この場合は採石場）から最も遠距離にある集水地域内の地点に降った雨水が、集水地点まで流達するのに要する時間をいう。具体的には、森林法に基づく開発行為の許可基準の運用細則を準用して、**表6.3**により設定する。

**表6.3** 流達時間表

集水面積 (ha)	流達時間 (mm)
50 以下	10
100 以下	20
500 以下	30

⑤ 降雨強度

降雨強度は、任意の継続時間に降った雨量を 1 時間当たりの強さに換算したもので、mm/h で表現される流達時間内の平均降雨強度は、時間確率降水量を基に、流達時間及び集水区域の特性を勘案して定めるものとする。

排水施設、沈殿池等は十分な能力を確保する必要がある、原則として 50 年に 1 回あると考えられる降雨量を採用する。

露天採掘場近傍の降水観測所年間最大 60 分間降雨量は 10 分間降雨量との 2 系統の降雨記録を、できるだけ長時間にわたり収集する。収集する資料数は、それぞれ 30 個（1 年で 1 個であるから 30 年分）以上が望ましい。収集した資料を生起年月日に関係なく、降雨量の大きさの順序に並べ、順位番号をつける。この資料によって、60 分間降雨量と 10 分間降雨量との確率年降雨量をそれぞれ算出する。（（注）確率年降雨量の算出だけであれば、目的とする一系統の降雨記録でよいが、流達時間内の平均降雨強度の算定のために、二系統の資料が必要なためである。）確率年降雨量は(6.15)式により求めることができる。

$$\log(x+B) = \log(x_0+B) + (1/A)\xi \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

$x$  : 降雨量 (確率変数)

$\xi$  : 正規変数であるが確率年  $N$  によって変わる。 (表 5-4)

$A, B, x_0$  : 定数

**表 6.4** 確率年  $N$  に対する正規変量 ( $\xi$ )

N (年)	正規変量 ( $\xi$ )	N (年)	正規変量 ( $\xi$ )
2	0.0000	50	1.4520
5	0.5951	100	1.6450
10	0.9062	200	1.8215
20	1.1630	500	2.0350
30	1.2967	1000	2.1850

(6.15)式の各定数は次の式により計算する。

$$x_0 : \quad \log x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i \quad \dots\dots\dots (6.16)$$

$$B : \quad B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad m \doteq n/10 \text{ (整数)} \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

$$B_i = \frac{x_i \cdot x_s - x_0^2}{2x_0 - (x_i + x_s)}$$

$$A : \frac{1}{A} = \sqrt{\frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \log \frac{x_i + B}{x_0 + B} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ \log(x_i + B) \}^2 - \{ \log(x_0 + B) \}^2}$$

$$= \sqrt{\frac{2n}{n-1}} \cdot \sqrt{X^2 - X_0^2} \quad \dots\dots\dots (6.18)$$

ただし、

$$\overline{X^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ \log(x_i + B) \}^2 \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

$$X_0 = \log(x_0 + B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log(x_i + B) \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

$x_i$  : 観測値で大きいほうから  $i$  番目の値

$x_s$  : 観測値で小さいほうから  $s$  番目、すなわち大きいほうから  $(n-s+1)$  番目の値

$n$  : 資料数 (観測値の数)

(注) 定数  $B$  の値が極めて小さいときは  $B \div 0$  として計算してよい。

流達時間内の平均降雨強度を算出するためには、降雨強度の数値が必要である。降雨強度の単位は mm/h であるため、60 分間降雨量は、そのまま降雨強度も表わすことになり、10 分間降雨量はその降雨強度に換算する必要がある。

短時間降雨量を降雨強度に換算するには、(6.21)式が用いられる。

$$\gamma = R \times \frac{60}{t} \quad \dots\dots\dots (6.22)$$

$\gamma$  : 降雨強度 (mm/h)

$t$  : 降雨継続時間 (min)

$R$  : 継続時間中の降雨量 (mm)

#### 6.2.4 任意の継続時間内の平均降雨強度の算出

厳密算定法により降雨強度式を導く。一般に用いられている降雨強度式には3つの型があ

る。

タルボット型 
$$I = \frac{a}{t+b} \quad \dots\dots\dots(6.22)$$

シャーマン型 
$$I = \frac{a}{t^n} \quad \dots\dots\dots(6.23)$$

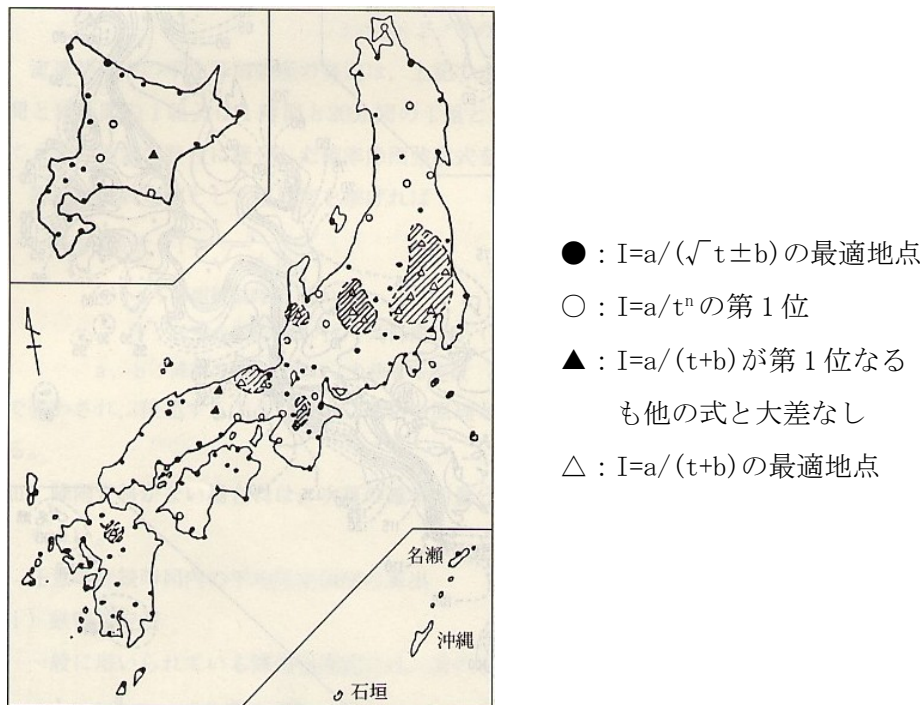
石黒型 
$$I = \frac{a}{\sqrt{t \pm b}} \quad \dots\dots\dots(6.24)$$

I : 任意の継続時間内の平均降雨強度 (mm/h)

t : 降雨継続時間 (min)

a, b, n : 降雨の地域性による定数

宮崎大学の石黒教授が降水観測所の記録を用いて、全国 147 地点で確率降雨強度式の 3 つの型の適合性を調査し、**図6. 3**のような分布図を報告している<sup>1)</sup>。我が国では(6.25)式が最も適合性があり、(6.26)式は特定地域でよく適合することがわかる。



**図6. 3** 本邦・降雨強度式型・適合度検定分布図

(6.22)～(6.24)式の降雨強度式中の各定数の値は、最小 2 乗法の原理と手順とによって算出した次の各式で計算することができる。

タルボット型

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{[I t][I^2] - [I^2 t][I]}{m[I^2] - [I][I]} \\ b &= \frac{[I][I t] - m[I^2 t]}{m[I^2] - [I][I]} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.25)$$

シャーマン型

$$\left. \begin{aligned} \log a &= \frac{[\log I][(\log t)^2] - [\log t \cdot \log I][\log t]}{m[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \\ n &= \frac{[\log I][\log t] - m[\log t \cdot \log I]}{m[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.26)$$

石黒型

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{[I\sqrt{t}][I^2] - [I^2\sqrt{t}][I]}{m[I^2] - [I][I]} \\ b &= \frac{[I][I\sqrt{t}] - m[I^2\sqrt{t}]}{m[I^2] - [I][I]} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.27)$$

ここで、m : 資料数

[ ]はΣと同じく総計を表す。

採用する地域に適合した降雨強度式の型を選定し、収集した降雨資料から求めた 60 分間と 10 分間の 2 系統の N 年確率降雨強度を使い、(6.25)～(6.27)式によって定数 a, b, n を算定して採用する N 年確率降雨式が定まれば、任意の継続時間 t の降雨強度が計算できる。

### 6. 2. 5 露天採掘場開発以前の森林の降雨流出量

前述した厳密算定法により、露天採掘場開発以前の森林の降雨流出量の推定を行った。

#### ① 確率年降雨量の計算

本研究の対象地は岩手県八幡平市に位置しているため、対象地に近く観測数の多い盛岡地方気象台の降雨資料（1962 年～2006 年）を利用した。盛岡地方気象台の 45 年間にわたる年間最大 1 時間降雨量記録と年間最大 10 分間降雨量記録とを収集した観測記録を表 6. 5 に示す。収集した資料を生起年月日に関係なく降雨量の大きさの順序に並べ、順位番号をつける（表 6. 6 の第 1 欄）。

#### (a) 1 時間確率降雨量の計算

確率降雨量は(2)式によって求めることができる。(6.15)式の各項の数値を求めるために、(6.15)式～(6.20)式の関係を使って計算し、その数値を用いて N 年確率降雨量を算定する。  
((6.27)式)

$$\log(x+B) = \log(x_0+B) + (1/A)\xi = X_0 + (1/A)\xi \quad \dots\dots\dots (6.27)$$

1 時間確立降雨量計算表を**表6. 6**に示す。

**表6. 5 盛岡地方気象台降雨観測記録 (1962 年～2006 年)**

1 時間降雨極値記録		10 分間降雨極値記録		
生起年月日	観測値(mm)	生起年月日	観測値(mm)	降雨強度(mm/h)
1962/8/26	47.0	1962/8/26	15.1	90.6
1963/7/14	17.1	1963/9/6	9.3	55.8
1964/8/25	27.4	1964/8/12	8.7	52.2
1965/7/28	31.5	1965/9/4	11.0	66.0
1966/10/28	24.3	1966/10/28	11.3	67.8
1967/8/13	21.4	1967/9/12	8.1	48.6
1968/8/3	17.5	1968/8/31	9.0	54.0
1969/7/28	14.5	1969/7/20	7.5	45.0
1970/8/1	48.5	1970/8/1	11.5	69.0
1971/7/18	25.0	1971/7/18	12.0	72.0
1972/8/3	31.5	1972/8/10	19.0	114.0
1973/8/24	34.0	1973/8/24	12.0	72.0
1974/7/31	19.0	1974/7/28	8.0	48.0
1975/7/25	38.0	1975/7/25	15.0	90.0
1976/8/20	31.5	1976/10/21	8.0	48.0
1977/8/17	38.5	1977/9/7	12.5	75.0
1978/8/15	20.5	1978/8/15	10.5	63.0
1979/7/28	25.5	1979/8/5	12.0	72.0
1980/6/17	17.5	1980/6/17	9.0	54.0
1981/7/22	18.5	1981/7/22	12.0	72.0
1982/8/30	45.5	1982/8/30	17.5	105.0
1983/7/28	27.5	1983/7/27	8.5	51.0

1984/8/1	24.5	1984/8/1	12.0	72.0
1985/9/7	20.0	1985/9/7	7.5	45.0
1986/8/5	17.5	1986/7/18	6.0	36.0
1987/8/22	28.0	1987/9/26	12.0	72.0
1988/8/30	35.5	1988/8/30	12.0	72.0
1989/8/22	37.5	1989/8/10	17.5	105.0
1990/9/12	35.0	1990/7/25	15.0	90.0
1991/8/31	20.5	1991/8/31	9.0	54.0
1992/9/5	19.0	1992/9/5	8.0	48.0
1993/9/14	14.0	1993/7/26	8.5	51.0
1994/9/30	14.0	1994/9/30	17.0	102.0
1995/8/26	50.5	1995/8/25	20.0	120.0
1996/7/15	15.5	1996/9/10	11.0	66.0
1997/5/17	20.5	1997/5/17	10.5	63.0
1998/9/22	22.5	1998/9/22	10.5	63.0
1999/7/13	17.5	1999/7/13	9.5	57.0
2000/5/3	24.5	2000/7/12	15.0	90.0
2001/7/31	19.5	2001/7/17	10.5	63.0
2002/7/11	30.5	2002/8/4	10.5	63.0
2003/8/25	34.0	2003/8/25	19.0	114.0
2004/7/10	37.5	2004/7/10	18.0	108.0
2005/8/15	38.0	2005/7/1	11.0	66.0
2006/8/13	24.5	2006/9/10	15.5	93.0

表6.6 1時間確率降雨量計算表(1)

順位	観測値 $\chi_i$	$\log \chi_i$	$\chi_i+B$	$\log(\chi_i+B)$	$\{\log(\chi_i+B)\}^2$
1	50.5	1.7033	47.24	1.6743	2.8033
2	48.5	1.6857	45.24	1.6555	2.7408
3	47.0	1.6721	43.74	1.6409	2.6925
4	45.5	1.6580	42.24	1.6257	2.6430
5	38.5	1.5855	35.24	1.5470	2.3933
6	38.0	1.5798	34.74	1.5408	2.3742
7	38.0	1.5798	34.74	1.5408	2.3742

8	37.5	1.5740	34.24	1.5345	2.3548
9	37.5	1.5740	34.24	1.5345	2.3548
10	35.5	1.5502	32.24	1.5084	2.2753
11	35.0	1.5441	31.74	1.5016	2.2548
12	34.0	1.5315	30.74	1.4877	2.2133
13	34.0	1.5315	30.74	1.4877	2.2133
14	31.5	1.4983	28.24	1.4509	2.1050
15	31.5	1.4983	28.24	1.4509	2.1050
16	30.5	1.4983	28.24	1.4509	2.1050
17	28.0	1.4843	27.24	1.4352	2.0598
18	27.5	1.4472	24.74	1.3934	1.9416
19	27.4	1.4393	24.24	1.3845	1.9169
20	25.5	1.4378	24.14	1.3827	1.9120
21	25.5	1.4065	22.24	1.3471	1.8148
22	25.0	1.3979	21.74	1.3373	1.7883
23	24.5	1.3892	21.24	1.3272	1.7614
24	24.5	1.3892	21.24	1.3272	1.7614
25	24.5	1.3892	21.24	1.3272	1.7614
26	24.3	1.3856	21.04	1.3231	1.7505
27	22.5	1.3522	19.24	1.2842	1.6492
28	21.4	1.3304	18.14	1.2586	1.5842
29	20.5	1.3118	17.24	1.2365	1.5290
30	20.5	1.3118	17.24	1.2365	1.5290
31	20.5	1.3118	17.24	1.2365	1.5290
32	20.0	1.3010	16.74	1.2238	1.4976
33	19.5	1.2900	16.24	1.2106	1.4655
34	19.0	1.2788	15.74	1.1970	1.4328
35	19.0	1.2788	15.74	1.1970	1.4328
36	18.5	1.2672	15.24	1.1830	1.3995
37	17.5	1.2430	14.24	1.1535	1.3306
38	17.5	1.2430	14.24	1.1535	1.3306
39	17.5	1.2430	14.24	1.1535	1.3306
40	17.5	1.2430	14.24	1.1535	1.3306
41	17.1	1.2330	13.84	1.1411	1.3022



42	15.5	1.1903	12.24	1.0878	1.1833
43	14.5	1.1614	11.24	1.0508	1.1041
44	14.0	1.1461	10.74	1.0310	1.0630
45	14.0	1.1461	10.74	1.0310	1.0630
計		63.3133		60.4367	82.5572
1/m		log $\chi_0=1.407$ 0		$X_0=1.3430$	$\overline{x^2}=1.8346$

観測数 n は、45 年分であるため n=45 として log  $\chi_i$  の値を求め (表6. 6の第3欄)、 $\chi_0$ 、 $2\chi_0$ 、 $\chi_0^2$  を算出する。(6.17)式より、

$$\log x_0 = \frac{1}{45} \sum_{i=1}^{45} \log x_i = \frac{63.3133}{45} = 1.4070 \quad \dots\dots\dots (6.28)$$

よって、 $\chi_0=25.52$ 、 $2\chi_0=51.05$ 、 $\chi_0^2=651.51$  となる。

(6.18)式から  $B_i$  を求め、B を算出する。観測数 n=45 であるため(6.17)式より m を求める。

$$m = \frac{n}{10} = \frac{45}{10} = 4.5 \quad \doteq 5 \quad \dots\dots\dots (6.29)$$

(6.29)式より m=5 になるから、 $B_i$  の計算には  $\chi_i$  は大きいほうから 5 番目まで、 $\chi_s$  は小さいほうから 5 番目までの降雨量の数値を使えばよい。(表6. 7)

**表6. 7** 1時間確率降雨量計算表(2) (B の計算)

i・s	$\chi_i$	$\chi_s$	$\chi_i \cdot \chi_s$	$\chi_i + \chi_s$	$\chi_i \cdot \chi_s - \chi_0^2$	$2\chi_0 - (\chi_i + \chi_s)$	$B_i$
1.45	50.5	14.0	707.00	64.5	55.4883	-13.4505	-4.13
2.44	48.5	14.0	679.00	62.5	27.4883	-11.4505	-2.40
3.43	47.0	14.5	681.50	61.5	29.9883	-10.4505	-2.87
4.42	45.5	15.5	705.25	61.0	53.7383	-9.9505	-5.40
5.41	38.5	17.1	658.35	55.6	6.8383	-4.5505	-1.50
計							-16.30

表6. 7の第8欄より Bは(6.30)式のように計算される。

$$B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 B_i = \frac{-16.30}{5} = -3.26 \quad \dots\dots\dots (6.31)$$

(6.20)式から  $\overline{X^2}$  を、(6.21)式から  $X_0$  を求め (表6.6の第6欄及び第5欄) (6.19)式によって  $1/A$  を計算すると(6.32)式のようになる。

$$\frac{1}{A} = \sqrt{\frac{2n}{n-1}} \cdot \sqrt{\overline{X^2} - X_0^2} = \sqrt{\frac{2 \times 45}{45-1}} \cdot \sqrt{1.8346 - 1.3430^2} = 0.25 \quad \dots\dots\dots (6.32)$$

任意の確率年  $N$  に対する 1 時間降雨量  $\chi$  は、表6.4と(6.29)式によって以下のように算出される。(表6.8の第6欄)

**表6.8** 1時間確率降雨量計算表(3) (確率降雨量  $\chi$  の計算)

確率年 $N$	$\xi$	$(1/A) \xi$	$X_0 + (1/A) \xi$	$\chi + B$	$\chi$
10	0.9062	0.2276	1.5707	37.21	33.95
20	1.1630	0.2922	1.6352	43.17	39.91
50	1.4520	0.3648	1.7078	51.03	47.77
100	1.6450	0.4132	1.7563	57.05	53.79
200	1.8215	0.4576	1.8006	63.19	59.93

以上の計算結果より 50 年確率 1 時間降雨量は 47.8mm/h となる。

(b) 10 分間確率降雨強度の計算

収集した年間最大 10 分間降雨量の記録を、(6.22)式で 10 分間降雨強度に換算した数値 (表6.5の第5欄) を用いて  $N$  年確率降雨強度を算定する。計算手順は、1 時間確率降雨量の計算の場合と全く同様である。(表6.9、表6.10、表6.11参照)

**表6.9** 10分間確率降雨強度計算表(1)

順位	観測値 $\chi_i$	$\log \chi_i$	$\chi_i + B$	$\log(\chi_i + B)$	$\{\log(\chi_i + B)\}^2$
1	120.0	2.0792	104.29	2.0182	4.0733
2	114.0	2.0569	98.29	1.9925	3.9701
3	114.0	2.0569	98.29	1.9925	3.9701

4	108.0	2.0334	92.29	1.9651	3.8618
5	105.0	2.0212	89.29	1.9508	3.8056
6	105.0	2.0212	89.29	1.9508	3.8056
7	102.0	2.0086	86.29	1.9359	3.7479
8	93.0	1.9685	77.29	1.8881	3.5650
9	90.6	1.9571	74.29	1.8744	3.5134
10	90.0	1.9542	74.29	1.8709	3.5003
11	90.0	1.9642	74.29	1.8709	3.5003
12	90.0	1.9542	74.29	1.8709	3.5003
13	75.0	1.8751	59.29	1.7730	3.1434
14	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
15	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
16	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
17	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
18	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
19	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
20	72.0	1.8573	56.29	1.7504	3.0639
21	69.0	1.8388	53.09	1.7266	2.9812
22	67.8	1.8312	52.29	1.7167	2.9472
23	66.0	1.8195	50.29	1.7015	2.8950
24	66.0	1.8195	50.29	1.7015	2.8950
25	66.0	1.8195	50.29	1.7015	2.8950
26	63.0	1.7993	47.29	1.6747	2.8048
27	63.0	1.7993	47.29	1.6747	2.8048
28	63.0	1.7993	47.29	1.6747	2.8048
29	63.0	1.7993	47.29	1.6747	2.8048
30	63.0	1.7993	47.29	1.6747	2.8048
31	57.0	1.7559	41.29	1.6158	2.6109
32	55.8	1.7466	40.29	1.6030	2.5696
33	54.0	1.7324	38.29	1.5831	2.5061
34	54.0	1.7324	38.29	1.5831	2.5061
35	54.0	1.7324	38.29	1.5831	2.5061
36	52.2	1.7177	36.49	1.5621	2,4403
37	51.0	1.7076	35.29	1.5476	2.3951

38	51.0	1.7076	35.29	1.5476	2,3951
39	48.6	1.6866	32.29	1.5170	2.3014
40	48.0	1.6812	32.29	1.5090	2.2772
41	48.0	1.6812	32.29	1.5090	2.2772
42	48.0	1.6812	32.29	1.5090	2.2772
43	45.0	1.6532	29.29	1.4667	2.1512
44	45.0	1.6532	29.29	1.4667	2.1512
45	36.0	1.5563	20.29	1.3072	1.7089
計		82.4931		77.0386	133.1152
1/m		log $\chi_0=1.8332$		X <sub>0</sub> =1.7120	$\overline{X^2}=2.9581$

観測値  $\chi_i$  は観測降雨量を降雨強度に換算した数値

観測数 n は、45 年分であるため n=45 として log  $\chi_i$  の値を求め (表6. 9の第3欄)、 $\chi_0$ 、 $2\chi_0$ 、 $\chi_0^2$  を算出する。(6.17)式より

$$\log \chi_0 = \frac{1}{45} \sum_{i=1}^{45} \log \chi_i = \frac{82.4931}{45} = 1.8332 \quad \dots\dots\dots (6.33)$$

よって、 $\chi_0=68.11$ 、 $2\chi_0=136.21$ 、 $\chi_0^2=4638.32$  となる。

(6.18)式から  $B_i$  を求め、B を算出する。1 時間確率降雨量と同様に m=5 として計算すると以下ようになる。(表6. 10)

**表6. 10** 10 分間確率降雨強度計算表(2) (B の計算)

i・s	$\chi_i$	$\chi_s$	$\chi_i \cdot \chi_s$	$\chi_i + \chi_s$	$\chi_i \cdot \chi_s - \chi_0^2$	$2\chi_0 - (\chi_i + \chi_s)$	$B_i$
1.45	120.0	36.0	4320.00	156.0	-318.3233	-19.7895	16.09
2.44	114.0	45.0	5130.00	159.0	491.6767	-22.7895	-21.57
3.43	114.0	45.0	5130.00	159.0	491.6767	-22.7895	-21.57
4.42	108.0	48.0	5184.00	156.0	545.6767	-19.7895	-27.57
5.41	105.0	48.0	5040.00	153.0	401.6767	-16.7895	-23.92
計							-78.56

表5. 10の第8欄より B は(6.34)式のように計算される。

$$B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 B_i = \frac{-78.56}{5} = -15.71 \quad \dots\dots\dots (6.34)$$

(6.20)式から  $\overline{X^2}$  を、(6.21)式から  $X_0$  を求め (表6. 6の第6欄及び第5欄) (6.20)式によって  $1/A$  を計算すると(6.35)式のようになる。

$$\frac{1}{A} = \sqrt{\frac{2n}{n-1}} \cdot \sqrt{\overline{X^2} - X_0^2} = \sqrt{\frac{2 \times 45}{45-1}} \cdot \sqrt{2.9581 - 1.7120^2} = 0.2362 \quad \dots\dots\dots (6.35)$$

任意の確率年  $N$  に対する 10 分間降雨量  $\chi$  は、表6. 4と(6.29)式によって以下のように算出される。(表6. 11の第6欄)

**表6. 11** 10分間確率降雨強度計算表(3) (確率降雨量  $\chi$  の計算)

確率年 $N$	$\xi$	$(1/A) \xi$	$X_0 + (1/A) \xi$	$\chi + B$	$\chi$
10	0.9062	0.2140	1.9260	84.34	68.62
20	1.1630	0.2747	1.9867	96.98	81.27
50	1.4520	0.3430	2.0549	113.48	97.77
100	1.6450	0.3886	2.1005	126.04	110.33
200	1.8215	0.4302	2.1422	138.74	123.03

以上の計算結果より 50 年確率 10 分間降雨強度は 97.8mm/h となる。

② 降雨強度式の決定

収集した 2 系統の降雨量の資料から算出した下記の確率年降雨強度により、流達時間内の平均降雨強度を求めるための降雨強度式を厳密算定法により決定する。

50 年確率 1 時間降雨強度 =  $I_{50}^{60} = 47.8$  mm/h

50 年確率 10 分間降雨強度 =  $I_{50}^{10} = 97.8$  mm/h

降雨強度式は図6. 3よりシャーマン型  $I = \frac{a}{t^n}$  を採用する。

資料数  $m$  は 50 年確率 1 時間降雨強度と 50 年 10 分間降雨強度の 2 つであるから、 $m=2$  である。

シャーマン型の定数  $a$ ,  $n$  は(13)式で計算する (表6. 12、(6.36)、(6.37)式)。

表6.12 常数計算準備表

t	I	log t	(log t) <sup>2</sup>	log I	log t · log I
60	47.8	1.78	3.16	1.68	2.99
10	97.8	1.00	1.00	1.99	1.99
[ ]	145.6	2.78	4.16	3.67	4.98

$$\begin{aligned} \log a &= \frac{[\log I][(\log t)^2] - [\log t \cdot \log I][\log t]}{m[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \\ &= \frac{3.67 \times 4.16 - 4.98 \times 2.78}{2 \times 4.16 - 2.78 \times 2.78} \\ &= \frac{1.4228}{0.5916} \\ &= 2.3898 \\ a &\doteq 245 \quad \dots\dots\dots (6.37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{[\log I][\log t] - m[\log t \cdot \log I]}{m[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \\ &= \frac{3.67 \times 2.78 - 2 \times 4.98}{2 \times 4.16 - 2.78 \times 2.78} \\ &= \frac{0.2426}{0.5916} \\ &= 0.3995 \\ n &\doteq 0.4 \quad \dots\dots\dots (6.38) \end{aligned}$$

以上の計算より求める 50 年確率降雨強度式は(25)式となる。

$$I_{50}^t = \frac{245}{t^{0.4}} \quad \dots\dots\dots (6.39)$$

求めた降雨強度式 ((6.38)式) によって降雨強度を求めると(6.40)式のようになる。

$$I_{50}^{10} = \frac{245}{10^{0.4}} = 97.5 \text{ (mm/h)} \quad \dots\dots\dots (6.40)$$

本研究の対象地の開発以前の降雨流出量を算出するにあたり、集水面積 [A] は事業区域面積である 42.2(ha)を採用し、流失係数 [f] は採石技術基準による「起伏のある土地及び樹林」のおおよその中央値であり、森林の一般的な値とされる 0.6 を採用した。流達時間 [t] は森林法に基づく開発行為の許可基準の運用細則に沿って 10 分間、降雨強度は(6.39)式より 97.5(m<sup>3</sup>/s)として、(6.15)式より降雨流出量を求める。

$$Q = \frac{1}{360} \times f \times I \times A \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

$$= \frac{1}{360} \times 0.6 \times 97.5 \times 42.2$$

$$\doteq 6.86 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (6.41)$$

以上の計算により、開発以前に有していた森林の降雨流出量は 6.86 (m<sup>3</sup>/s) と推定された。

### 6.2.6 修復緑化による降雨流出量の回復

対象地を修復緑化せずに岩盤が露出したまま放置した場合と、残壁全体に緑化を行う自然回帰型修復緑化を想定した場合の降雨流出量を推定し、比較を行った。

修復緑化せずに岩盤が露出したまま放置した場合は、集水面積 [A] 37.9(ha)、流出係数 [f] 0.9、降雨強度 [I] 97.5(mm/h)として算出を行った。その結果、降雨流出量は 9.24 (m<sup>3</sup>/s) と算定され、開発以前に有していた森林の降雨流出量と比較すると約 1.3 倍と推定された。(6.42)式)

$$Q = \frac{1}{360} \times f \times I \times A$$

$$= \frac{1}{360} \times 0.9 \times 97.5 \times 37.9$$

$$\doteq 9.24 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (6.42)$$

自然回帰型修復緑化を想定した場合は、緑化部分と非緑化部分に分類し、緑化部分は集水面積 (A) 12.3(ha)、流出係数 (f) 0.6、非緑化部分は集水面積 (A) 25.6(ha)、流出係数 (f) 0.9、降雨強度 (I) は両者 97.5(mm/h)として算出を行った。その結果、緑化部分の降雨流出量は 2.00(m<sup>3</sup>/s)、非緑化部分の降雨流出量は 6.24(m<sup>3</sup>/s)と算出された。これを合計すると、自然回帰型修復緑化を行った場合の降雨流出量は 8.24(mm/h)と算定され、開発以前に有していた森林の降雨流出量と比較すると約 1.2 倍と推定された。また、修復緑化せずに岩盤が露出したままの場合の降雨流出量と比較すると、約 11%の抑制が見込めると推定された。(6.43)、(6.44)、(6.45)式)

$$Q = \frac{1}{360} \times f \times I \times A$$

$$= \frac{1}{360} \times 0.6 \times 97.5 \times 12.3$$

$$\doteq 2.00 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (6.43)$$

$$Q = \frac{1}{360} \times f \times I \times A$$

$$= \frac{1}{360} \times 0.9 \times 97.5 \times 25.6$$

$$\doteq 6.24 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (6.44)$$

$$2.00 + 6.24 = 8.24 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (6.45)$$

### 6.3 まとめ

第6章では、露天採掘場の修復緑化による二酸化炭素吸収源機能及び洪水調節機能の定量的評価を行い、開発以前に有していた自然環境保全機能の回復度について検討した。

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 本研究の対象地において、二酸化炭素吸収源機能では植生図・モデル式を洪水調節機能ではラショナル式を用いた算定を行うことで、露天採掘場地域が開発以前に有していたそれぞれの機能を推定することが可能となった。
- (2) 修復緑化による回復度を判定することが可能となった。
- (3) 本研究の対象地においては、自然回帰型修復緑化法が従来型修復緑化法と比較して二酸化炭素吸収量の回復度が約2倍となること、そして修復緑化を行わず岩盤が露出した状態よりも降雨流出量を約11%低減することが明らかとなった。

現在、二酸化炭素吸収源機能に関しては、専門的な機関を中心として盛んに研究が進められている。しかし多く見られるのは既存森林の吸収量に関する研究であり、新規森林の吸収量に関する研究は未だ少なく、また概算的なものが主であるため、今後は材積による推定など農学、森林学を含めた視点で研究を進めていくことで、本研究がより有意義なものになると考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) 大気浄化植樹マニュアルーきれいな大気をとるもどすためにー：独立行政法人環境再生保全機構、I 総論編、第3章2節、pp32-43
- 2) 北原曜：森林の公益的機能ー災害を防止し環境を保全する森林ー、南信法面協会（2001）、<http://kadomatsu.shinshu-u.ac.jp/~chisan/13/g/10/i/>



## 7. まとめ

本研究では、国内の森林地帯に数多く存在する露天採掘跡残壁の修復緑化において、地域の生態系保全を意図する修復緑化法の開発と自然回帰度評価システムを構築するための基礎研究を行い、その成果を「残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と評価システムの構築」としてとりまとめた。

本研究で得られた結論をまとめると以下のようなになる。

(1) 残壁に森林表土を用いた植生基盤を造成する観点から、ナチュラルアナログとして、自然森林地帯における森林表土の調査を行った。自然回帰型修復緑化法では、残壁の斜面部に樹木の導入を考えるが、そのためには植生基盤の造成が必要不可欠となる。この植生基盤材として地域の森林表土を用いる手法は、自然回帰型修復緑化を特徴づけるものである。

森林表土の調査地としては、基盤岩に樹木の根系が進入する亀裂をほとんど認めない岩盤斜面地山として、宮城県仙台市太白区秋保地内の自然地山を選定した。ここでは、樹木の生育状態、地形勾配、森林表土の厚さおよび土壌の土質工学的な特性を解明した。

その結果、傾斜  $40\sim 50^\circ$  の岩盤斜面において、植生基盤の厚さが  $10\sim 25$  cm 程度あれば、樹高  $7\sim 8$  m の樹林帯は十分に形成できるとことを解明した。また、土質試験の結果、当該森林表土は日本統一土質分類による細粒分質砂で、自然含水比  $W_n=79.9\%$  であることがわかった。植生基盤として造成する際的设计定数は、単位体積重量  $\gamma_t=14.0\text{kN/m}^3$ 、粘着力  $C'=8.0\text{kN/m}^2$  および内部摩擦角  $\phi'=20^\circ$  とそれぞれ設定した。

土質特性には、地域の森林表土によって多少の差異をみることから、実際の利用に際してはその都度土質試験による物性の確認を要する。このことを前提としながらも本研究で解明した森林表土の厚さと土質工学的な特性は、今後森林表土を利用する際の重要な基礎資料となる。

(2) 植生基盤を造成する際の安定解析法を理論的に確立した。本研究で考える植生基盤の厚さは  $20\text{cm}$  程度と薄く、また、残壁の斜面長は、植生基盤の厚さに比して事実上無限長となることから、植生基盤のすべりは無限長平面すべり形態となる。従来、このような無限長平面すべりの安定解析に際して、土塊の厚さは鉛直方向の厚さで表現されていた。しかし、この表現ではすべり面の傾斜角が  $50^\circ$  付近を越えると、安定する土塊の厚さは逆に増加に転ずるという問題点がある。この不具合を是正する観点から、本研究では土塊の厚さを実際の厚さ、すなわちすべり面に直角方向の厚さで表現できる解析式を新たに導いた。これによって、傾斜が  $50^\circ$  を超えるような急斜面に対しても、土塊の厚さを補正することなく直ちに表現できるようになった。

この解析式を適用し、森林表土を植生基盤として安定造成するための可能性を検討した。その結果、つぎのような知見を得た。すなわち、粘着力を全く期待できない土 ( $C=0$ ) では、それを残壁の植生基盤として造成することは不可能であること、これに対して、内部摩擦角を期待できない土 ( $\phi=0$ ) では、何らかの粘着力を見込める限り造成できることな

どを理論的に解明した。

(3) 残壁の自然回帰型修復緑化における自然回帰状態の評価システムを確立する観点から、樹木を小段だけに導入する従来の修復緑化法と小段と斜面部の双方に導入する自然回帰型修復緑化法の2通りの場合について、景観評価実験により自然回帰度を検討した。実験に際しては、両者の場合ともに樹木の生長過程を評価の指標とし、フォトモンタージュ法による画像をそれぞれ作成した。これらを評定尺度法による評価実験に供し、それぞれの自然回帰状態を判定した。

その結果、樹木を小段だけに導入した場合、自然回帰度は、樹木のベンチ高さに対する高さ比に比例して増加し、ほぼ自然回帰の状態と判定できる高さ比は 1.2 となる。換言すれば、自然回帰と判断できるためには、樹木がベンチの高さよりも十分に大きくなる必要があるといえる。これに対して、樹木を小段と斜面部の双方に導入した場合には、自然回帰度は高さ比に比例して増加し、ほぼ自然回帰の状態と判定できる高さ比は 0.6 となる。すなわち、自然回帰の状態と判断できる植生状態は、樹木がベンチの高さのほぼ6割程度にまで生長した時点であることがわかった。

残壁の自然回帰度は、樹木を小段だけに導入した場合と小段と斜面部の双方に導入した場合ともに樹木が生長するにつれて高くなる傾向がみられ、前者の場合は、樹木がベンチの高さを超えないと自然回帰の状態とはいえないのに対して、後者の場合は6割程度まで生長すると自然回帰状態とみなせることが明らかとなった。このように、樹木を小段と斜面部の双方に導入する自然回帰型修復緑化法を適用する場合、自然回帰とみなせる状態は、従来のように小段だけに導入する場合に比べて樹高が約半分となり、自然回帰状態への還元時間が大幅に短縮できることがわかった。また、本章の後半では、VRS法を適用した緑化シミュレーション画像を作成し、自然回帰度に関する評価実験を行った。その結果、VRS法の有効性が確認でき、今後の展開への期待が示唆された。

(4) 残壁の自然回帰型修復緑化の手法を開発し併せて自然回帰状態を評価するシステムを構築した。

前半では、従来の修復緑化の手法をまとめ、問題点と課題を整理するとともに、自然回帰型修復緑化法を特徴つける森林表土の利用と安定造成の手法をとりまとめた。自然回帰型修復緑化では、残壁の小段だけでなく斜面部にも樹木を導入するが、そのためには植生基盤の造成が不可欠である。ただし、地域の生態系保全のためには、植生基盤土壌を他の地域から持ち込むべきではなく、その理想的な材料として地域の遺伝子を有する森林表土に着目した。本章では、森林表土の利用を前提として、森林表土の調査法から、緑化目標の設定、土質工学的な評価法、事後利用までの保存・保管の方法、造成のための安定計算の手法および残壁への造成の方法に至る一連の流れを系統的にとりまとめた。また、本研究での開発は基礎的事項の開発が主となることから、実用化のためには、造成後の維持管理手法の開発をはじめとして、今後のさらなる研究の進展と技術開発が必要であることを

述べた。

後半では、自然回帰度評価システムの構築について取りまとめ、斜面部を含む残壁全体に植生する樹木の生長過程を指標として自然回帰度を評価するシステムを構築した。このシステムは、自然回帰修復緑化計画を策定する際に修復緑化過程を事前に予測し評価するもので、樹木の生長を予測する手段としてフォトモンタージュによる緑化状態のシミュレーションを行うものである。ここでは、周辺地山の植生調査から、緑化目標の設定、フォトモンタージュを用いた緑化シミュレーションと景観評価実験の手法ならびに評価実験を通じた自然回帰度評価の手法までを系統的にまとめた。

最後に、自然回帰型修復緑化を効果的に策定するために、完成型となる残壁の形状を提案した。提案する形状は、斜面勾配 60°以下、ベンチ高さ 5~10m、小段幅 2m 以上である。ただし、残壁全体の直高が 100m 以上となる場合には、上半部下方の小段幅を 10m 以上とする。

- (5) 自然環境保全機能の中から CO<sub>2</sub> 吸収機能と洪水調節機能に着目し、露天採掘場地域が開発以前に有していた CO<sub>2</sub> 吸収量と降雨流出量を推定し、修復緑化による回復度を推定するシステムを構築した。

以上、本研究では、露天採掘跡残壁の修復緑化に際して、在来の生態系や景観の保全を図る観点から、地域の森林表土を利活用する自然回帰型修復緑化法の開発を行い、修復緑化過程における自然回帰度評価システムを構築した。

残壁の修復緑化に際しては、従来、環境保全や防災面からも樹木の導入による樹林化の必要性が叫ばれてきた。しかし、課題の難しさもあって、研究への取組みが後回しとなっているのが現状である。このような中で、本研究は、地域の遺伝子を有する森林表土に着目し、これを植生基盤として造成することによって、樹木を導入することの可能性を示した。森林表土を植生基盤として造成する研究は、他に類を見ない画期的な取組みであり、岩盤緑化における今後の方向性を示すものと考えられる。

また、本研究で構築した自然回帰度評価システムは、従来から行われている事後の検証とは異なり、修復緑化の効果を事前に評価し検討し得るものである。したがって、今後、特に環境や景観に配慮した修復緑化計画を策定する上で大きな効果を発揮するものと期待できる。

本研究の成果は、今日、露天採掘跡残壁の環境に適した修復緑化手法が議論される中であって、今後の方向性を示す指針となり得るものであると確信する。